



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo di un protocollo contenente le
procedure per le verifiche su motori
elettrici fino a 15kW così come previste dal
Regolamento della Commissione 640/2009

E. Fiorucci, G. Bucci, A. Ometto,
F. Parasiliti Collazzo, M. Tursini, M. Villani

SVILUPPO DI UN PROTOCOLLO CONTENENTE LE PROCEDURE PER LE VERIFICHE SU MOTORI ELETTRICI
FINO A 15KW COSÌ COME PREVISTE DAL REGOLAMENTO DELLA COMMISSIONE 640/2009

E. Fiorucci, G. Bucci, A. Ometto, F. Parasiliti Collazzo, M. Tursini, M. Villani (Università dell'Aquila)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

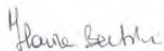
Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Risparmio di energia elettrica nei settori: civile, industria e servizi

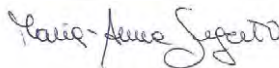
Obiettivo:

Responsabile del Progetto: Ilaria Bertini, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sviluppo di un protocollo contenente le procedure per le verifiche su motori elettrici fino a 15kW così come previste dal Regolamento della Commissione 640/2009"

Responsabile scientifico ENEA: ing. Maria Anna Segreto



Responsabile scientifico UniL'Aquila: prof. Edoardo Fiorucci



Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE	6
1.1 IL QUADRO LEGISLATIVO VIGENTE	6
1.2 IL QUADRO NORMATIVO VIGENTE	7
2 IDENTIFICAZIONE DELLE SPECIFICHE DI PROGETTO PER I LABORATORI DI VERIFICA.....	8
2.1 STRUMENTAZIONE DI PROVA: TIPOLOGIA E SPECIFICHE	11
2.2 INDIVIDUAZIONE DELLA STRUMENTAZIONE PER LA MISURAZIONE DELLA TENSIONE	13
2.2.1 <i>Misurazione del valore efficace della tensione</i>	14
2.2.2 <i>Inserzione dei voltmetri</i>	16
2.2.3 <i>Misurazione della componenti inverse e della distorsione armonica della tensione</i>	17
2.2.4 <i>Specifiche tecniche per i gli strumenti voltmetrici da utilizzare</i>	17
2.2.5 <i>Trasformatori e trasduttori di tensione</i>	17
2.3 INDIVIDUAZIONE DELLA STRUMENTAZIONE PER LA MISURAZIONE DELLA CORRENTE	18
2.3.1 <i>Misurazione del valore efficace della corrente</i>	19
2.3.2 <i>Inserzione degli amperometri</i>	19
2.3.3 <i>Misurazione della componenti inverse e della distorsione armonica della corrente</i>	20
2.3.4 <i>Specifiche tecniche per i gli strumenti amperometrici da utilizzare</i>	20
2.3.5 <i>Trasformatori e trasduttori di corrente</i>	21
2.4 INDIVIDUAZIONE DELLA STRUMENTAZIONE PER LA MISURAZIONE DELLA FREQUENZA	25
2.4.1 <i>Specifiche tecniche per i gli strumenti frequenzimetrici da utilizzare</i>	28
2.5 INDIVIDUAZIONE DELLA STRUMENTAZIONE PER LA MISURAZIONE DELLA POTENZA ELETTRICA.....	28
2.5.1 <i>Potenza elettrica in sistemi polifase, in regime simmetrico ed equilibrato</i>	28
2.5.2 <i>Wattmetri basati su moltiplicatori analogici</i>	30
2.5.3 <i>Trasduttori di potenza con moltiplicatori ad effetto Hall</i>	31
2.5.4 <i>Wattmetri basati su moltiplicatori digitali</i>	33
2.5.5 <i>Inserzione dei wattmetri</i>	34
2.5.6 <i>Specifiche tecniche per i wattmetri da utilizzare</i>	37
2.6 INDIVIDUAZIONE DELLA STRUMENTAZIONE PER LA MISURAZIONE DELLA DI RESISTENZA ELETTRICA DEGLI AVVOLGIMENTI.....	38
2.6.1 <i>Specifiche tecniche per i gli strumenti ohmmetrici da utilizzare</i>	39
2.7 INDIVIDUAZIONE DELLA STRUMENTAZIONE PER LA MISURAZIONE DELLA TEMPERATURA.....	39
2.7.1 <i>Specifiche tecniche per i gli strumenti termometrici da utilizzare</i>	40
2.8 INDIVIDUAZIONE DELLA STRUMENTAZIONE PER LA MISURAZIONE DELLA VELOCITÀ ANGOLARE	40
2.8.1 <i>Specifiche tecniche per i gli strumenti tachimetrici da utilizzare</i>	41
2.9 INDIVIDUAZIONE DELLA STRUMENTAZIONE PER LA MISURAZIONE DELLA COPPIA.....	41
2.9.1 <i>Specifiche tecniche per gli strumenti torsiometrici da utilizzare</i>	42
2.10 INDIVIDUAZIONE DEI SISTEMI DI ALIMENTAZIONE	50
2.10.1 <i>Autotrasformatori a rapporto variabile (Variac)</i>	51
2.10.2 <i>Regolatori di tensione ad induzione</i>	51
2.10.3 <i>Alimentatori elettronici</i>	52
2.11 INDIVIDUAZIONE DEI SISTEMI PER LA REALIZZAZIONE DEL CARICO MECCANICO	52
3 CERTIFICAZIONE E ACCREDITAMENTO	54
3.1 INTRODUZIONE	54
3.2 REQUISITI GENERALI PER LA COMPETENZA DEI LABORATORI DI PROVA:	56
NORMA UNI CEI EN ISO /IEC 17025	56
3.3 ORGANIZZAZIONE DEL LABORATORIO.....	57
3.4 REQUISITI TECNICI	59
3.5 METODI DI PROVA E DI TARATURA E VALIDAZIONE DEI METODI	60
3.6 STIMA DELL'INCERTEZZA DI MISURA	61
3.7 APPARECCHIATURE	61

3.8	RIFERIBILITÀ DELLE MISURE.....	61
3.9	CAMPIONI DI RIFERIMENTO E MATERIALI DI RIFERIMENTO	62
3.10	CAMPIONAMENTO.....	62
3.11	MANIPOLAZIONE DEGLI OGGETTI DA SOTTOPORRE A PROVA E A TARATURA	62
3.12	ASSICURAZIONE DELLA QUALITÀ DEI RISULTATI DI PROVA E DI TARATURA.....	63
3.13	PRESENTAZIONE DEI RISULTATI E RAPPORTI DI PROVA.....	63
3.14	STRUTTURA DEL MANUALE DELLA QUALITÀ	64
4	DEFINIZIONE DEL PROTOCOLLO PER LE PROCEDURE DI VERIFICA.....	71
4.1	OSSERVAZIONI SUL COLLAUDO DEL MOTORE ASINCRONO TRIFASE.....	71
4.2	LA VERIFICA DI CONFORMITÀ SECONDO LA NORMA IEC 60034-2-1	72
4.2.1	<i>Termini e definizioni</i>	72
4.2.2	<i>Simboli</i>	73
4.2.3	<i>Prescrizioni fondamentali</i>	74
4.2.4	<i>Resistenza di prova</i>	75
4.2.5	<i>Correzione alla temperatura di riferimento</i>	75
4.2.6	<i>Metodi di prova</i>	76
4.2.7	<i>Prove a vuoto</i>	76
4.2.8	<i>Prove a carico</i>	76
4.2.9	<i>Determinazione del rendimento</i>	77
4.2.10	<i>Perdite costanti</i>	77
4.2.11	<i>Perdite a carico</i>	78
4.2.12	<i>Perdite addizionali a carico</i>	79
4.3	OSSERVAZIONI SULLA DETERMINAZIONE DELLE INCERTEZZE DI MISURA	80
4.4	PROCEDURE DI VERIFICA DELL'EFFICIENZA.....	83
5	CONCLUSIONI.....	86
6	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	87
8	CURRICULA.....	89

Sommario

La capillare diffusione dei motori a livello industriale, nell'ordine di oltre 19 milioni di unità installate ad oggi in Italia, fa sì che i tre quarti dell'energia elettrica consumata nel settore industriale nel nostro Paese sia attribuibile al funzionamento dei motori elettrici, valore che corrisponde a circa il 40% del consumo elettrico nazionale. Le potenzialità complessive di miglioramento dell'efficienza energetica di questi sistemi in modo economicamente efficace sono state quantificate nel 20-30% circa. Da un punto di vista legislativo, la Comunità Europea ha affrontato il problema con il Regolamento della Commissione 640/2009 [1] il quale specifica i requisiti in materia di progettazione ecocompatibile per i motori elettrici, definendo le specifiche per l'appartenenza alle classi di efficienza minima (IE2, IE3) e i tempi di introduzione delle suddette classi di efficienza. Nell'ambito del Regolamento 2009/640/CE [1], il Ministero dello Sviluppo Economico ha riconosciuto in ENEA il suo braccio operativo per tutto ciò che riguarda l'ERP (Energy Related Products) ed ha affidato a ENEA il compito di svolgere i controlli di conformità delle diagnosi energetiche fatte nelle aziende energivore, dove spesso vengono impiegati motori elettrici e, più in generale, di stimolare le PMI all'uso di tecnologie efficienti.

Obiettivo dell'attività di ricerca svolta, e presentata in questo documento, è inerente lo sviluppo di un protocollo, contenente le procedure per le verifiche su motori elettrici fino a 15kW così come previste dal Regolamento della Commissione 640/2009 [1].

La parte iniziale dell'attività è stata mirata ad identificare tutte le specifiche necessarie per la progettazione del laboratorio di verifica definendo tutti gli elementi che caratterizzeranno la facility sia in termini di strumentazione che di gestione.

La seconda parte delle attività previste è stata focalizzata a realizzare un protocollo contenente le procedure per le verifiche sui motori elettrici previste dal Regolamento della Commissione 640/2009 [1] per una facility fino a 15 kW.

Sono stati analizzati il quadro legislativo e normativo inerente l'efficienza dei motori, nonché lo svolgimento delle prove e misurazioni da eseguire nelle verifiche dei motori di taglia considerata; sono stati investigate le caratteristiche delle grandezze da misurare, nonché lo stato dell'arte della strumentazione. Particolare attenzione è stata data alla identificazione delle procedure da seguire, per la corretta valutazione dell'efficienza dei motori in accordo con la normativa internazionale.

1 Introduzione

La parte iniziale della collaborazione mira ad identificare tutte le specifiche necessarie per la progettazione del laboratorio di verifica, definendo tutti gli elementi che caratterizzeranno la facility sia in termini di strumentazione che di gestione.

Onde inquadrare correttamente le tematiche che saranno sviluppate nel presente documento, non si può prescindere dall'analisi del quadri legislativo e normativo vigenti, visti i risvolti di natura metrologica legale, oltre che tecnica, che concernono la determinazione sperimentale delle prestazioni dei motori elettrici, in accordo con quanto disposto dal Regolamento 640/2009 [1] che, nell'Allegato III recita: *“Al fine di verificare la conformità al presente regolamento gli Stati membri applicano la procedura descritta nell'allegato II e metodi di misura affidabili, accurati e riproducibili, che tengano conto dello stato dell'arte generalmente riconosciuto, compresi i metodi definiti nelle norme i cui numeri di riferimento sono stati pubblicati a tal fine nella Gazzetta ufficiale dell'Unione europea.”*

Si considera quindi necessario introdurre i seguenti paragrafi, che riassumeranno aspetti legislativi, normativi e considerazioni sullo stato dell'arte nelle misurazioni che sono necessarie per la determinazione dell'efficienza dei motori oggetto di verifica.

1.1 Il quadro legislativo vigente

Si richiamano di seguito i principali atti legislativi ad oggi operanti:

- la Direttiva 2005/32/CE del Parlamento europeo e del Consiglio “relativa all'istituzione di un quadro per l'elaborazione di specifiche per la progettazione ecocompatibile dei prodotti che consumano energia” [2];
- le legislazioni locali di certi Paesi Europei, come l'Italia (L'articolo 1 della legge 27 dicembre 2006 N° 296 [3]), ed extra-europei che incentivano se non addirittura obbligano (per esempio Israele e Nuova Zelanda) l'acquisto di motori ad alto rendimento;
- il Regolamento (CE) N. 640/2009 della Commissione del 22 luglio 2009 pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale il 23 luglio 2009 “recante modalità di applicazione della direttiva 2005/32/CE del Parlamento europeo e del Consiglio in merito alle specifiche per la progettazione ecocompatibile dei motori elettrici”»[1];
- Decreto legislativo 16 febbraio 2011, n.15: attuazione della direttiva 2009/125/CE relativa all'istituzione di un quadro per l'elaborazione di specifiche per progettazione ecocompatibile dei prodotti connessi all'energia”. (GU n.55 del 8/3/20011)[4];
- Direttiva 2012/27/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 25 ottobre 2012 “sull'efficienza energetica, che modifica le direttive del 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE [5];
- Regolamento Commissione 4/2014/UE del 6 gennaio 2014 e vigente dal 22/02/2014: “modifiche al regolamento 640/2009/CE sulle specifiche per la progettazione ecocompatibile dei motori elettrici”[6];
- Decreto legislativo 4 luglio 2014, n.102: “attuazione della direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, che modifica le direttive del 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE [7]”.

Inoltre va ricordato che il Regolamento (CE) N. 640/2009 [1] stabilisce che:

- a partire dal 1° gennaio 2015 i motori con una potenza nominale compresa tra 7,5 e 375 kW devono avere come minimo il livello di efficienza IE3, oppure il livello di efficienza IE2 se muniti di variatore di velocità;
- a partire dal 1° gennaio 2017 tutti i motori con una potenza nominale compresa tra 0,75 e 375 kW devono avere come minimo il livello di efficienza IE3 oppure il livello di efficienza IE2 se muniti di variatore di velocità.

1.2 Il quadro normativo vigente

I motori elettrici ad alta efficienza possono portare ad una significativa riduzione del consumo energetico con conseguente beneficio per l'ambiente. Una importante ragione per la loro più ampia diffusione sul mercato è l'armonizzazione delle norme relativamente alle prove di funzionamento, alla definizione delle classi di rendimento e evidenza dei dati di targa.

Ad oggi, come risultato di un decennale e significativo sforzo di far progredire in modo globale l'armonizzazione delle norme, si può contare su un insieme operante di norme internazionali IEC (International Electrotechnical Commission) per caratterizzare in modo univoco il funzionamento dei motori elettrici industriali.

Le norme IEC costituiscono la base per migliorare l'armonizzazione internazionale del quadro normativo per i motori elettrici, definendo:

- uguali metodi di prova per ottenere risultati accurati e ripetibili per la valutazione delle perdite energetiche e del rendimento;
- un sistema di classificazione dei motori basato sul loro rendimento, come riferimento per i piani nazionali di efficienza energetica nello stabilire i MEPS (Minimum Energy Performance Standards).

Le principali normative IEC sono riportate di seguito:

- IEC 60034-1, Publ. 2010, "Rating and performance.": Environmental conditions and on/off cycles for use, content of rating plate, tolerances [8].
- IEC 60034-2-1, Publ. 2011, "Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles).": Preferred testing methods, standard procedures and sequences, accuracy of instruments. This standard is applicable until August 2017 [9].
- IEC 60034-2-3, Technical Specification Publ. 2013, "Specific test methods determining losses and efficiency of converter-fed AC motors.": Extra losses from harmonics when induction motors are operated with frequency converters [10].
- IEC 60034-30-1, Publ. 2014, "Efficiency classes of single-speed, three phase, cage induction motors (IE-code).": Definition of efficiency classes IE1, IE2, IE3 and IE4 for 0,12 kW to 1.000 kW, 50 and 60 Hz, 2-, 4-, 6-, and 8-poles [11].
- IEC 60034-3,1 Technical Specification Publ. 2010, "Selection of energy-efficient motors including variable speed applications – application guide.": Systems integration, operating hours, economic analysis [12].
- IEC EN 60051-1/9 Publ. 1997-1999, "Direct acting indicating analogue electrical measuring instruments and their accessories". Parts 1-9 [13].
- IEC 61869-1/5 Publ. 2007-2015, "Instrument transformers". Parts 1-5. [14]
- IEC 60034-30-2*, New work item 2014, planned Publ. in 2016 "Efficiency classification for motors operated with variable speed." [15].
- IEC 61800-9*, New work item 2014, planned Publ. in 2016 "Energy efficiency of adjustable speed electric power drive systems." [16].
- ISO/IEC 17025 Publ. 2005 "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories": general requirements for the competence to carry out tests and/or calibrations, including sampling. It covers testing and calibration performed using standard methods, non-standard methods, and laboratory-developed methods. It is applicable to all organizations performing tests and/or calibrations. These include, for example, first-, second- and third-party laboratories, and laboratories where testing and/or calibration forms part of inspection and product certification [17].
- ISO ENV 13005:2000 "Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)" (BIPM JCGM 100:2008) [18].
- International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM 3rd edition) JCGM 200:2012 (JCGM 200:2008 with minor corrections) [19].
- EN 50160: July 2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks [20].

- Kyei, J. (2001). Analysis and Design of Power Acceptability Curves for Industrial Loads. New York: Power Systems Engineering Research Center [21]
- IEC 61000-4-30:2015 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods [22].
- IEC 61000-4-7:2002+AMD1:2008 CSV Consolidated version Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto [23].
- IEC 61000-4-15:2010 RLV Redline version Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-15: Testing and measurement techniques – Flickermeter – Functional and design specifications [24].
- IEC 61558-2-14:2012, Safety of transformers, reactors, power supply units and combinations thereof - Part 2-14: Particular requirements and tests for variable transformers and power supply units incorporating variable transformers [25].
- ISO/IEC 17065:2012 Conformity assessment -- Requirements for bodies certifying products, processes and services [26].
- IEEE 112:2004: Test Procedure for Poliphase Induction Motors and Generators [27].
- IEEE 114:2011 Test Procedure for Single-Phase Induction Motors [28].
- EA-1/17A S1: Supplement 1 to EA-1/17 Criteria for Membership (Published on 17 June 2014) [29].
- ISO 9001:2008 Quality management systems – Requirements [30].
- ISO/IEC 17000:2004 Conformity assessment -- Vocabulary and general principles [31].
- BIPM, The International System of Units (SI), 2006 [32].

* Si tratta di norme inerenti motori alimentati tramite convertitori, in condizioni di funzionamento a carico variabile; sono in corso di definizione apparati di riferimento.

2 Identificazione delle specifiche di progetto per i laboratori di verifica

Per lo svolgimento di verifiche su motori elettrici asincroni fino a 15kW, in accordo con il Regolamento della Commissione 640/2009 [1], l'identificazione delle grandezze da misurare, della strumentazione più idonea e delle tecniche di misura richiedono la valutazione dell'ordine di grandezza dei parametri dei motori oggetto di verifica.

Per determinare le taglie di motori da verificare e le rispettive grandezze elettriche e meccaniche, è possibile partire dalle tabelle di rendimento minime prescritte nella norma IEC 60034-30-1, e recepite dal Regolamento 640/2009 [1] che considera come classe di rendimento più bassa la E2, limitandoci a taglie fino a 15 kW nel presente documento.

Tabella 1 – rendimenti minimi per motori di taglia fino a 15 kW

Pn [kW]	2 poli eff. IE1	4 poli eff. IE1	6 poli eff. IE1	2 poli eff. IE2	4 poli eff. IE2	6 poli eff. IE2	2 poli eff. IE3	4 poli eff. IE3	6 poli eff. IE3
0,75	72,1	72,1	70,0	77,4	79,6	75,9	80,7	82,5	78,9
1,1	75,0	75,0	72,9	79,6	81,4	78,1	82,7	84,1	81,0
1,5	77,2	77,2	75,2	81,3	82,8	79,8	84,2	85,3	82,5
2,2	79,7	79,7	77,7	83,2	84,3	81,8	85,9	86,7	84,3
3	81,5	81,5	79,7	84,6	85,5	83,3	87,1	87,7	85,6
4	83,1	83,1	81,4	85,8	86,6	84,6	88,1	88,6	86,8
5,5	84,7	84,7	83,1	87,0	87,7	86,0	89,2	89,6	88,0
7,5	86,0	86,0	84,7	88,1	88,7	87,2	90,1	90,4	89,1
11	87,6	87,6	86,4	89,4	89,8	88,7	91,2	91,4	90,3
15	88,7	88,7	87,7	90,0	90,6	89,7	91,9	92,1	91,2

Tuttavia, il Regolamento della Commissione 640/2009 [1] introduce una correzione al ribasso di tali valori di rendimento, come specificato nell'Allegato III, punto 2 in cui, a proposito del motore in prova si legge:

“Il modello è considerato conforme al presente regolamento se nell’efficienza nominale del motore (η) le perdite $(1-\eta)$ non si discostano dai valori fissati nell’allegato I di oltre il 15 % dell’intervallo di potenza 0,75-150 kW e di oltre il 10 % nell’intervallo $> 150-375$ kW.”

Si considerano quindi come valori di rendimento minimi effettivi, i seguenti in tabella:

Tabella 2 – rendimenti minimi per motori di taglia fino a 15 kW, con perdite maggiorare del 15%

Pn [kW]	2 poli eff. IE2	4 poli eff. IE2	6 poli eff. IE2	2 poli eff. IE3	4 poli eff. IE3	6 poli eff. IE3
0,75	74,01	76,54	72,29	77,81	79,88	75,74
1,10	76,54	78,61	74,82	80,11	81,72	78,15
1,50	78,50	80,22	76,77	81,83	83,10	79,88
2,20	80,68	81,95	79,07	83,79	84,71	81,95
3,00	82,29	83,33	80,80	85,17	85,86	83,44
4,00	83,67	84,59	82,29	86,32	86,89	84,82
5,50	85,05	85,86	83,90	87,58	88,04	86,20
7,50	86,32	87,01	85,28	88,62	88,96	87,47
11,00	87,81	88,27	87,01	89,88	90,11	88,85
15,00	88,50	89,19	88,16	90,69	90,92	89,88

Poiché non è improbabile che tra i motori da verificare vi siano modelli che non soddisfano le specifiche di rendimento, è necessario prevedere un’ulteriore riduzione di rendimento, ai fini di dimensionare correttamente la strumentazione di misura per prove anche su motori a basso rendimento.

Si può osservare che i valori di rendimento per la classe IE2 con perdite maggiorate del 15% (Tabella 2) sono solo leggermente superiori ai valori di riferimento per la classe IE1, (Tabella 1), tranne nel caso di motori a 2 poli da 15 kW, per i quali il valore di rendimento IE2 con perdite maggiorate risulta minore del rendimento IE1. (Tabella 3).

Di seguito si riportano le tabelle con i valori che verranno in seguito considerati per la scelta degli strumenti di misura, in termini di portata. A commento delle seguenti tabelle si osserva che:

- 1) I valori rendimento in classe IE1 sono i più bassi tra quelli previsti nella norma IEC 60034-30-1 [11], e non sono previsti dal Regolamento; tuttavia considerare motori di classe IE1 consente di introdurre un margine cautelativo nella scelta della strumentazione, contemplando la possibilità che i motori in prova non siano conformi e siano caratterizzati da valori di assorbimento di potenza conseguentemente maggiori.
- 2) Il fattore di potenza considerato a carico nominale è di 0,6; tale valore si considera cautelativo, visto che, di norma, motori ad alta efficienza sono caratterizzati da ridotti assorbimenti di potenza reattiva; tuttavia la scelta di tale valore è in accordo con quanto osservato al punto 1.
- 3) La tensione concatenata di alimentazione è stata assunta pari a 400 V; è noto che oggi i motori sono disponibili con possibilità di alimentazione concatenata di 690 V. Considerare una tensione più bassa è cautelativo per il dimensionamento della portata degli strumenti amperometrici; come si osserverà in seguito, la misurazione della tensione risulta meno critica della misurazione della corrente, per la scelta della strumentazione.
- 4) Lo scorrimento considerato a carico nominale è 0,10, anch’esso come valore cautelativo per il dimensionamento dei trasduttori di coppia.
- 5) La frequenza della tensione di alimentazione considerata è 50 Hz, valore della frequenza delle rete elettrica europea.

Tabella 3 – Confronto tra rendimenti IE1 e IE2 con perdite maggiorate del 15%, per motori di taglia fino a 15 kW

Pn [kW]	2 poli eff. IE1	2 poli eff. IE2 – perdite maggiorate del 15%	4 poli eff. IE1	4 poli eff. – perdite maggiorate del 15%	6 poli eff. IE1	6 poli eff. IE2– perdite maggiorate del 15%
0,75	72,10	74,01	72,10	76,54	70,00	72,29
1,10	75,00	76,54	75,00	78,61	72,90	74,82
1,50	77,20	78,50	77,20	80,22	75,20	76,77
2,20	79,70	80,68	79,70	81,95	77,70	79,07
3,00	81,50	82,29	81,50	83,33	79,70	80,80
4,00	83,10	83,67	83,10	84,59	81,40	82,29
5,50	84,70	85,05	84,70	85,86	83,10	83,90
7,50	86,00	86,32	86,00	87,01	84,70	85,28
11,00	87,60	87,81	87,60	88,27	86,40	87,01
15,00	88,70	88,50	88,70	89,19	87,70	88,16

Definiti i valori di riferimento nominali nelle tabelle precedenti, per la scelta della strumentazione è necessario considerare aspetti teorici inerenti le misure sulle macchine elettriche, le prescrizioni delle norme inerenti le procedure di misura e valutazioni di natura economica.

Tabella 4 – Parametri per motori a 2 poli

Potenza nominale [kW]	Rendimento IE1 [%]	Pf minimo	Tensione [V]	Corrente [A]	Potenza apparente [kVA]	Potenza attiva [kW]	Scorrimento massimo	Coppia Nominale [Nm]
0,75	72,10	0,60	400,00	2,50	1,73	1,04	0,10	2,65
1,10	75,00	0,60	400,00	3,53	2,44	1,47	0,10	3,89
1,50	77,20	0,60	400,00	4,67	3,24	1,94	0,10	5,31
2,20	79,70	0,60	400,00	6,64	4,60	2,76	0,10	7,78
3,00	81,50	0,60	400,00	8,86	6,13	3,68	0,10	10,61
4,00	83,10	0,60	400,00	11,58	8,02	4,81	0,10	14,15
5,50	84,70	0,60	400,00	15,62	10,82	6,49	0,10	19,45
7,50	86,00	0,60	400,00	20,98	14,53	8,72	0,10	26,53
11,00	87,60	0,60	400,00	30,21	20,93	12,56	0,10	38,90
15,00	88,50*	0,60	400,00	41,15	28,25	16,95	0,10	53,05

Tabella 5 – Parametri per motori a 4 poli

Potenza nominale [kW]	Rendimento IE1 [%]	Pf minimo	Tensione [V]	Corrente [A]	Potenza apparente [kVA]	Potenza attiva [kW]	Scorrimento massimo	Coppia Nominale [Nm]
0,75	72,10	0,60	400,00	2,50	1,73	1,04	0,10	5,31
1,10	75,00	0,60	400,00	3,53	2,44	1,47	0,10	7,78
1,50	77,20	0,60	400,00	4,67	3,24	1,94	0,10	10,61
2,20	79,70	0,60	400,00	6,64	4,60	2,76	0,10	15,56
3,00	81,50	0,60	400,00	8,86	6,13	3,68	0,10	21,22
4,00	83,10	0,60	400,00	11,58	8,02	4,81	0,10	28,29
5,50	84,70	0,60	400,00	15,62	10,82	6,49	0,10	38,90
7,50	86,00	0,60	400,00	20,98	14,53	8,72	0,10	53,05
11,00	87,60	0,60	400,00	30,21	20,93	12,56	0,10	77,81
15,00	88,70	0,60	400,00	40,68	28,18	16,91	0,10	106,10

Tabella 6 – Parametri per motori a 6 poli

Potenza nominale [kW]	Rendimento IE1 [%]	Pf minimo	Tensione [V]	Corrente [A]	Potenza apparente [kVA]	Potenza attiva [kW]	Scorrimento massimo	Coppia Nominale [Nm]
0,75	70,00	0,60	400,00	2,58	1,79	1,07	0,10	7,96
1,10	72,90	0,60	400,00	3,63	2,51	1,51	0,10	11,67
1,50	75,20	0,60	400,00	4,80	3,32	1,99	0,10	15,92
2,20	77,70	0,60	400,00	6,81	4,72	2,83	0,10	23,34
3,00	79,70	0,60	400,00	9,06	6,27	3,76	0,10	31,83
4,00	81,40	0,60	400,00	11,82	8,19	4,91	0,10	42,44
5,50	83,10	0,60	400,00	15,92	11,03	6,62	0,10	58,36
7,50	84,70	0,60	400,00	21,30	14,76	8,85	0,10	79,58
11,00	86,40	0,60	400,00	30,63	21,22	12,73	0,10	116,71
15,00	87,70	0,60	400,00	41,15	28,51	17,10	0,10	159,15

2.1 Strumentazione di prova: tipologia e specifiche

Il Regolamento 640/2009 [1], nell'Allegato, III recita:

“Al fine di verificare la conformità al presente regolamento gli Stati membri applicano la procedura descritta nell'allegato II e metodi di misura affidabili, accurati e riproducibili, che tengano conto dello stato dell'arte generalmente riconosciuto, compresi i metodi definiti nelle norme i cui numeri di riferimento sono stati pubblicati a tal fine nella Gazzetta ufficiale dell'Unione europea.

L'efficienza energetica è il rapporto tra potenza meccanica in uscita ed energia elettrica fornita.

Il livello di efficienza del motore, indicato all'allegato I, deve essere determinato alla potenza nominale (P_N), alla tensione nominale (U_N) e alla frequenza nominale (f_N).

La differenza tra potenza meccanica in uscita ed energia elettrica fornita è data dalle perdite che avvengono nel motore.

Le perdite totali devono essere determinate secondo uno dei seguenti metodi:

- *misura delle perdite totali, oppure*
- *determinazione delle singole perdite e relativa somma.”*

Si possono quindi delineare le seguenti considerazioni:

- 1) il Regolamento impone una ricognizione sullo stato dell'arte nel settore delle misure sulle macchine elettriche, nel caso specifico motori asincroni;
- 2) è necessario indagare i metodi di misura e le procedure prescritte dalle norme;
- 3) si fornisce la definizione di efficienza come rendimento, rapporto tra potenza meccanica resa in uscita e potenza elettrica fornita al motore, da valutarsi nelle condizioni nominali di potenza, tensione e frequenza;
- 4) si introducono le perdite totali, come differenza tra potenza meccanica resa in uscita e potenza elettrica fornita al motore;
- 5) si fa obbligo di valutare le perdite totali, con metodo della determinazione delle perdite totali o delle singole perdite, da sommare successivamente;

Il regolamento quindi, se in modo generico prescrive di considerare lo stato dell'arte nel settore delle misure sulle macchine elettriche, tuttavia in modo palese prescrive la determinazione dell'efficienza in modo indiretto, mediante determinazione delle perdite.

Si osserva che non vi sono prescrizioni sulle incertezze di misura massime accettabile o altre indicazioni in tal senso.

Come norma di riferimento per l'esecuzione delle prove atte alla valutazione dell'efficienza, nel presente documento si considera primariamente la IEC 60034-2-1 [9], nell'edizione del 2011 che resterà applicabile fino al 01/08/2017.

Rispetto alla precedente edizione della stessa norma, in IEC 60034-2-1 [9] è stata introdotta una sezione dedicata alla definizione della precisione degli strumenti da utilizzare nelle prove. Si tratta del capitolo 5.5, nel quale si afferma che gli strumenti di misura devono avere una classe di precisione pari a 0,2 conformemente IEC EN 60051-1/9 [13], mentre per prove di routine come descritto in 9.1 IEC 60034-1 [8] è sufficiente una classe di precisione pari a 0,5.

I trasformatori di misura devono avere una precisione conforme alla IEC 61869-1/5 [14] così che il loro errore di misura non sia superiore a $\pm 0,5$ % per le prove in generale o non superiore a $\pm 0,3$ % per le macchine a induzione, metodo della somma delle perdite con determinazione delle perdite addizionali a carico in accordo a IEC 60034-2-1 [9], articolo 8.2.2.5.1.

La strumentazione utilizzata per misurare la coppia deve avere una precisione pari a $\pm 0,2$ % del fondo scala. Quando la coppia all'albero è misurata per mezzo di un dinamometro, si deve effettuare una prova per la correzione della coppia. Questo si applica anche se tra il dispositivo di misura della coppia e l'albero del motore è interposto un cuscinetto o un giunto.

La strumentazione utilizzata per misurare la frequenza deve avere una precisione pari al $\pm 0,1$ % del fondo scala. La misura della velocità dovrebbe essere precisa allo 0,1 % o a 1 giro al minuto, adottando quella che fornisce l'errore minore.

La strumentazione usata per misurare la temperatura degli avvolgimenti deve avere una precisione di ± 1 °C.

I valori di precisione richiesti sono indicati in Tabella 7.

Tabella 7 – Specifiche della strumentazione

Strumenti	Precisione secondo CEI EN 60034-2-1
Voltmetri	+/- 0.2 % del fondo scala
Amperometri	+/- 0.2 % del fondo scala
Trasformatori di misura	+/- 0.3 %
Misuratori di coppia	+/- 0.2 % del fondo scala
Wattmetri	+/- 0.2 % del fondo scala
Tachimetri	+/- 1 rpm
Frequenzimetri	+/- 0.1 % del fondo scala
Ohmmetri	+/- 0.2 % del fondo scala
Termometri	+/- 1 °C

Si osserva che, per quanto concerne la scelta della strumentazione, le specifiche sopra riportate sono introdotte nella norma IEC 60034-2-1 [9] dalle seguenti considerazioni, articolo 5.5.1:

“Dal momento che la precisione dello strumento è generalmente espressa in percentuale del fondo scala, il campo di misura da utilizzare per gli strumenti scelti deve essere piccolo per quanto possibile.

NOTA Per gli strumenti analogici i valori da leggere dovrebbero trovarsi nel terzo superiore del campo di misura dello strumento.”

Pur in modo qualitativo, la norma evidenzia la necessità di effettuare misure mediante scelta di strumentazione di portata prossima ai valori di misura presunti; nel presente documento si accoglierà il suggerimento della nota, che, per quanto introdotta per strumentazione analogica, tuttavia risulta valido anche per strumentazione elettronica qualora le specifiche di precisione siano espresse in percentuale del fondo scala.

Tuttavia, per completare il quadro inerente la scelta della portata della strumentazione, non è sufficiente limitarsi ai valori nominali riportati nelle Tabelle 4-6, perché i metodi di determinazione delle perdite richiedono l'esecuzione di prove a tensione variabile, nonché a carico variabile, che risultano necessari anche qualora sia richiesta la determinazione dell'efficienza nelle sole condizioni di carico nominale, come nel Regolamento.

Le prove a tensione variabile sono da effettuarsi per la determinazione delle perdite nel ferro, e per attrito e ventilazione; le prove a carico variabile sono necessarie alla determinazione delle perdite addizionali.

Se le misurazioni di grandezze elettriche sono usualmente effettuabili con apparecchiature dotate di più portate, ciò non è valido per le misure meccaniche quali quelle di coppia; si osserva cioè che, durante prove a carico variabile, ad esempio, sarà possibile cambiare la portata di un amperometro digitale, ma non quella del trasduttore di coppia, senza interrompere la prova, il quale dovrà garantire una precisione adeguata da bassi valori di coppia fino al massimo valore previsto, che può essere del 50% maggiore del valore nominale.

Nel seguito, per ciascuna grandezza da misurare verranno presentati lo stato dell'arte, in sintesi, e le specifiche per la scelta della strumentazione ottimale.

2.2 Individuazione della strumentazione per la misurazione della tensione

Per poter delineare le specifiche della strumentazione necessaria alla misurazione della tensione, è opportuno individuare le diverse grandezze che ne devono essere quantificate.

Le tensioni di alimentazione di un sistema trifase vengono in prima analisi considerate come un sistema trifase simmetrico di sequenza diretta di fasori, corrispondenti ad una terna di forme d'onda sinusoidali sfasate di 120° elettrici, di ampiezza costante a frequenza costante (Fig.1).

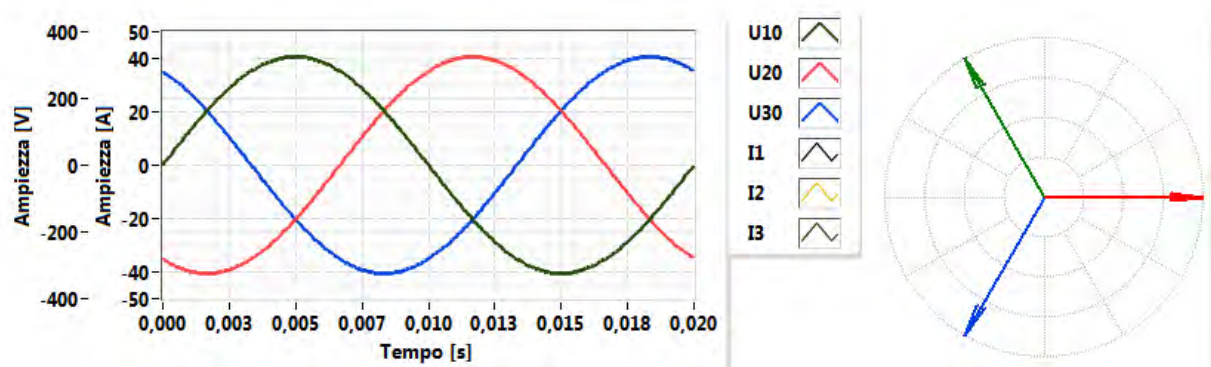


Fig.1 – Sistema trifase simmetrico di sequenza diretta di tensioni sinusoidali

La grandezza fondamentale che deve essere misurata è quindi il valore efficace delle tensioni, che può variare nel nostro campo di applicazione, da 230 V fino 1000 V, in accordo con il Regolamento; la precisione con cui il valore della tensione viene misurato influenza in modo rilevante la determinazione delle perdite a vuoto.

Pur se non espressamente contemplate nel Regolamento, è necessario effettuare due ulteriori misurazioni sulla terna di tensioni di alimentazione:

- 1) la misura delle componenti di sequenza inversa ed omopolare,
- 2) la misurazione dell'ampiezza di eventuali componenti armoniche.

Ciò è infatti in accordo con la IEC 60034-2-1[9], che all'articolo 5.4 inerente le tensioni di alimentazione, prescrive che la tensione deve essere conforme agli articoli 7.2 (e 8.3.1 per le prove termiche) della IEC 60034-1 [8].

In tale norma si esprime come limite per la componente di sequenza inversa l'1% della componente di sequenza diretta durante un lungo periodo di tempo, o 1,5% per un breve periodo non superiore a pochi minuti, ed un limite per la componente di sequenza omopolare pari all'1% della componente di sequenza diretta. Tali valori sono ridotti allo 0,5% per la componente di sequenza inversa e azzerato per la componente di sequenza omopolare durante le prove termiche.

Infatti, per quanto concerne la presenza di componenti di sequenza inversa, è noto che esse producano un effetto di frenatura del motore, che risulta particolarmente critico durante le prove a vuoto in quanto può incrementare le perdite misurate. Le componenti omopolari possono indurre circolazione di corrente omopolare qualora il motore sia alimentato con conduttore di neutro, in configurazione con avvolgimenti concatenati a Y.

E' quindi necessario predisporre un sistema di misura delle componenti di sequenza, che risulta di fatto indispensabile qualora le prove vengano effettuate con tensione prelevata direttamente dalla rete elettrica. La stessa norma prescrive, inoltre, come indice per la valutazione della distorsione della tensione l' HVF, definito come:

$$HVF = \sqrt{\sum_{n=2}^k \frac{u_n^2}{n}} \quad (1)$$

dove u_n è il valore in p.u. (per unità) dell'armonica di tensione di ampiezza u_n in riferimento alla tensione nominale U_N , n è l'ordine dell'armonica, non multipla di 3 per motori trifase; k è pari a 13.

Sono fissati per l'HVF valori massimi di 0,02 in condizioni normali, e 0,015 durante le prove termiche.

Anche la presenza di armoniche di tensione può indurre problemi simili alla dissimmetria di tensione, per quanto concerne l'insorgenza di coppie frenanti, se sono presenti armoniche di ordine 5, 11 ecc. che sono dette inverse; la presenza di armoniche induce comunque la presenza di correnti armoniche che contribuiscono all'innalzamento fittizio delle perdite. L'adozione di un sistema di monitoraggio della armoniche di tensione è quindi necessario [33, 34, 35].

2.2.1 Misurazione del valore efficace della tensione

Per quanto concerne la misurazione del valore efficace della tensione, è opportuno introdurre alcune considerazioni sulla migliore modalità per la sua misurazione.

A differenza delle tensioni continue, che sono costanti (o al limite lentamente variabili) nel tempo e quindi pienamente identificate con il valore dell'ampiezza, le tensioni alternate hanno un valore istantaneo continuamente variabile. Per una completa individuazione di queste tensioni si usa spesso la loro rappresentazione al variare del tempo, mediante una rappresentazione tensione-tempo, ottenibile con un oscilloscopio.

Volendone rappresentare l'ampiezza con un singolo valore, come quello fornito da un voltmetro, è necessario precisare bene a quale dei valori assunti dalla tensione ci si riferisce. I valori di una tensione alternata presi normalmente come indicativi della forma d'onda sono i valori efficace, medio e di cresta, a seconda dell'applicazione:

- il valore efficace: è il parametro più frequentemente misurato quando si vogliono conoscere gli effetti energetici della tensione (o corrente), soprattutto se essa non è perfettamente sinusoidale;
- il valore medio: è raramente importante per le grandezze alternative, ma la sua misura, come vedremo, può consentire la determinazione di altri parametri, come ad esempio il valore efficace o il fattore di forma.
- il valore di picco (cresta): è importante in diverse applicazioni, ad esempio per verificare che le tensioni non superino valori limite pericolosi.

Come è noto, il valore efficace è stato introdotto per consentire il confronto degli effetti di grandezze elettriche variabili con legge periodica con quelli di grandezze costanti. L'espressione analitica del valore efficace traduce in termini rigorosi un'equivalenza energetica e venne storicamente adottata quando, nella distribuzione dell'energia elettrica, si passò dal regime continuo a quello alternato.

Il valore efficace di una tensione sinusoidale rappresenta la tensione continua che, applicata ad un resistore, nello stesso tempo, produce gli stessi effetti termici (dissipa la stessa quantità di energia).

Tra i parametri descritti esiste un legame diretto, nel senso che è possibile passare da un valore all'altro, purché sia nota la forma d'onda in esame (Fig.2). In ogni caso, poiché il parametro più utilizzato è il valore efficace, per le varie forme d'onda sono stati calcolati i fattori di conversione che sono: il fattore di cresta ed il fattore di forma.

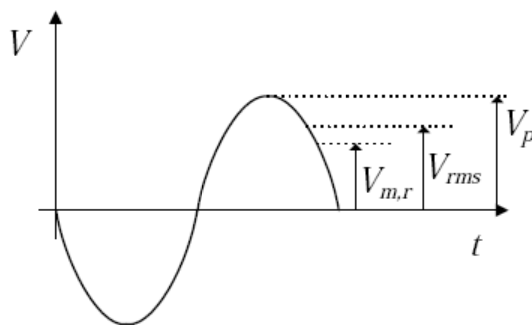


Fig.2 - Principali parametri di una tensione sinusoidale

Analiticamente, si definiscono:

- valore efficace, o RMS (Root Mean Square): $V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} v^2(t) dt}$ (2)

- valore medio: $V_m = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} v(t) dt$ (3)

- valore medio raddrizzato: $V_{mr} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} |v(t)| dt$ (4)

- valore di picco: $V_p = V_{max}$ (5)

- fattore di cresta: $\frac{V_p}{V_{rms}}$ (in regime sinusoidale è pari $\sqrt{2} \cong 1,41$) (6)

- fattore di forma: $\frac{V_{rms}}{V_{mr}}$ (in regime sinusoidale è pari $\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cong 1,11$) (7)

La misurazione diretta del valore efficace presenta diverse difficoltà, per questo motivo sono stati studiati diversi metodi di misura sia diretti, sia indiretti tramite la misura di altri parametri del segnale.

Dalla conoscenza del valore di picco si potrebbe quindi agevolmente ricavare il valore efficace $v_2 \approx 1,41$ semplicemente dividendo il valore numerico ottenuto per il fattore di cresta: sfortunatamente il valore del fattore di cresta varia con la forma d'onda del segnale. In presenza di distorsioni, quando cioè la forma d'onda del segnale non è rigorosamente sinusoidale, dividere il valore di picco del segnale per al fine di ricavare il valore efficace comporta errori, che possono essere anche molto rilevanti. Sono pertanto disponibili sul mercato due tipologie di strumenti per la misurazione del valore efficace della tensione, convenzionalmente identificati dalle sigle:

Per distinguere gli strumenti del primo tipo (utilizzabili correttamente solo se il segnale da misurare ha forma d'onda sinusoidale) da quelli del secondo tipo (utilizzabili correttamente anche con segnali distorti) sono utilizzate rispettivamente le sigle:

- RMS (root mean square) per gli strumenti che misurano (in qualche modo) il valore efficace, utilizzabili correttamente solo se il segnale da misurare ha forma d'onda sinusoidale;
- TRMS, (true root mean square) per gli strumenti che misurano effettivamente il vero valore efficace, utilizzabili correttamente anche con segnali distorti.

Per la verifica dell'efficienza dei motori asincroni apparentemente sarebbe sufficiente ricorrere a strumentazione del primo tipo, poiché si ipotizzano tensioni sinusoidali; in realtà, sono sempre preferibili strumenti TRMS, che consentono una misurazione più accurata della tensione anche in presenza di armoniche. L'utilizzo congiunto di un voltmetro a valor medio raddrizzato e di un voltmetro TRMS consente di effettuare una prima stima della sinusoidalità della tensione, mediante calcolo del fattore di forma che, in condizioni ideali, deve essere pari a circa 1,11. La presenza di armoniche comporta una deviazione da tale valore che può suggerire l'esecuzione dell'analisi del contenuto armonico della tensione.

2.2.2 Inserzione dei voltmetri

Per quanto riguarda l'inserzione (collegamento al circuito) di questi strumenti è utile ricordare che il voltmetro è inserito in parallelo alla sorgente del segnale mentre l'amperometro è inserito in serie.

Affinché lo strumento non perturbi il regime nel circuito in cui è inserito, ne deriva che il voltmetro dovrebbe avere una impedenza d'ingresso infinita. Quanto affermato, seppur auspicabile, è una pura astrazione; uno dei parametri qualitativi dello strumento è relativo a quanto si avvicina alle condizioni ideali.

Volendo dare una rappresentazione schematica del comportamento del voltmetro, lo possiamo schematizzare un voltmetro reale come un voltmetro ideale (avente impedenza interna infinita) in parallelo ad una impedenza Z_{in} ; La presenza delle impedenze d'ingresso provoca un errore di inserzione, cioè quando lo strumento reale viene connesso al circuito, così come indicato in Fig.3.

L'impedenza interna della sorgente e dello strumento provocano un errore di inserzione come mostrato in figura. Il valori misurato di tensione è:

$$V_m = V \frac{Z_{in}}{Z_g + Z_{in}} \quad (8)$$

con errore pari a:

$$e = \frac{V_m - V}{V} = \frac{Z_{in}}{Z_g + Z_{in}} - 1 = -\frac{Z_g}{Z_g + Z_{in}} \quad (9)$$

che tende a zero al crescere di Z_{in} .

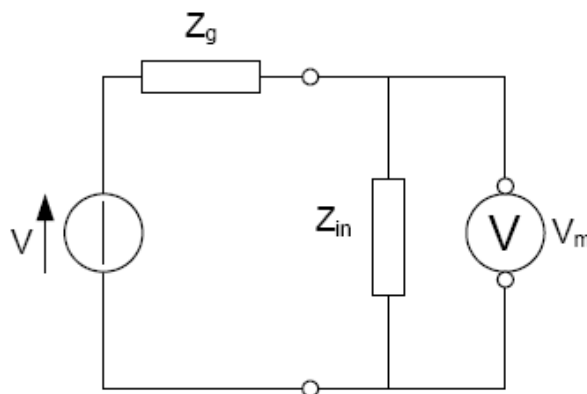


Fig.3 Schematizzazione degli effetti legati all'inserzione di un voltmetro reale

Per l'esecuzione delle misure di tensione applicata ai motori asincroni, nell'ipotesi di sistema simmetrico è possibile effettuare la misurazione di una sola tensione concatenata, inserendo un solo voltmetro. Tuttavia è preferibile l'adozione di tre voltmetri distinti, per poter effettuare simultaneamente la misurazione delle tensioni concatenate, per poi determinarne il valore medio che verrà utilizzato nelle procedura di calcolo dell'efficienza.

2.2.3 Misurazione della componenti inverse e della distorsione armonica della tensione

Le misurazioni delle componenti di sequenza e della distorsione armonica delle tensioni di alimentazione, pur non producendo valori che sono utilizzati direttamente nelle espressioni analitiche che determinano l'efficienza, sono necessarie per il monitoraggio delle condizioni di prova. La strumentazione che può essere adottata per tali misura rientra nella tipologia degli analizzatori di rete elettrica, che possono essere utilizzati per il monitoraggio di ulteriori parametri della tensione, che vengono considerati nell'ambito della Power Quality, nonché le caratteristiche della corrente elettrica ed i parametri di potenza ed energia.

Senza entrare in dettagli sulle caratteristiche costruttive, si considerano come Sistemi di Acquisizione Dati multicanale ad acquisizione simultanea, equipaggiati con trasduttori di tensione e corrente, e sui quali sono implementati algoritmi per la determinazione delle componenti di sequenza, basati sull'implementazione di algoritmi per le trasformazioni con matrici di Fortescue, ed algoritmi di trasformazione di Fourier e calcolo degli indici di deformazione, per concerne le misure di interesse nel presente paragrafo.

Sono strumenti che debbono soddisfare diverse norme IEC e standard di altre istituzioni, tra le quali si evidenziano la EN 50160 [20], le tabelle inerenti i disturbi transitori redatte da CBEMA e ITIC [21], le norme IEC 61000-4-30 [22], IEC 61000-4-7 [23] e EN 61000-4-15 [24].

2.2.4 Specifiche tecniche per i gli strumenti voltmetrici da utilizzare

Nel caso si consideri l'inserzione diretta di strumenti voltmetrici, in assenza di trasduttori come i TV che verranno analizzati in seguito, è possibile effettuare le misurazioni di tensione efficace mediante multimetri digitali o sfruttando la misurazione della tensione effettuata da wattmetri digitali; la prima soluzione consente di raggiungere elevate precisioni di misura, quale ad esempio $\pm(0,08\%$ del valore di misura $+0,02\%$ del fondo scala) per fondo scala di 1000 V in multimetri digitali ad $8\frac{1}{2}$ digit per tensioni sinusoidali a 50 Hz. (Modello di riferimento: $8\frac{1}{2}$ digit Keysight 3458A DMM).

Se si considera la possibilità di utilizzare la sezione voltmetrica di wattmetri monofase, o di un solo wattmetro trifase, i valori di precisione che si possono raggiungere sono: $\pm(0,01\%$ del valore di misura $+0,03\%$ del fondo scala), con possibilità di selezionare 3 fondo scala utili per le nostre applicazioni, 300 V, 600 V e 1000 V in regime sinusoidale, a frequenza di 50 Hz.

I wattmetri digitali trifase oggi disponibili sul mercato possono essere dotati di funzionalità per l'analisi delle caratteristiche della tensione, in termini di componenti di sequenza e distorsione armonica, in accordo con quanto riportato nel paragrafo precedente, e prendono il nome di Power Analyzer. (Modello di riferimento: Precision Power Analyzer Yokogawa WT3000).

Entrambe le soluzioni considerate soddisfano ampiamente la specifica di precisione del $\pm 0.2\%$ del fondo scala in Tabella 1; per quanto concerne il fondo scala, deve essere adeguato allo svolgimento della prova a vuoto con tensione variabile, come indicato dalla IEC 60034-2-1 [9] all'articolo 8.2.2.3.3 relativo alla determinazione delle perdite nel ferro. Il valore massimo previsto è del 125% della tensione nominale. Nel Regolamento 640/2009 [1] si specifica come tensione massima 1000V, tuttavia, le tensioni nominali dei motori asincroni di taglia 15 kW sono usualmente 400/690 a seconda della concatenamento se a triangolo o a stella, per cui, considerando il 125% di 690 V si ottiene 862,5 V, valore che risulta ampiamente al di sotto dei 1000 V di fondo scala della strumentazione considerata nel presente paragrafo.

2.2.5 Trasformatori e trasduttori di tensione

In questo paragrafo sono considerati trasformatori, ed in generale, trasduttori da impiegare nelle misurazioni di tensione. Usualmente l'impiego di trasformatori di tensione è legato alle seguenti necessità: i) adeguamento del livello di tensione da misurare al fondo scala degli strumenti dotati di morsetti voltmetrici (voltmetri, wattmetri, varmetri, cosfimetri, frequenzimetri, e relè di protezione); ii) isolamento galvanico tra il circuito di potenza ed il circuito di misura; iii) possibilità di inserire un collegamento a terra nel circuito di misura [36, 37, 38].

Dal punto di vista dell'adeguamento del livello di tensione, l'adozione di strumentazione quale i DMM e wattmetri digitali consente di effettuare connessioni dirette ai circuiti con tensioni fino ai 1000 V rms, per cui non vi è necessità di impiego di trasduttori di tensione.

Qualora si preferisse comunque inserire trasduttori di tensione, è necessario svolgere alcune considerazioni sulle caratteristiche dei principali tipi di trasduttore disponibili sul mercato.

I trasformatori di tensione induttivi, o TVI, sono trasformatori costituiti da un avvolgimento primario, da un nucleo magnetico e da uno o più avvolgimenti secondari, con isolamento solido o liquido, a seconda del livello di tensione; i TVI possono essere di due tipi, in base al tipo di collegamento: 1) fase - fase: avvolgimento primario collegato tra due fasi, 2) fase - terra: avvolgimento primario collegato tra fase e terra. Le caratteristiche sono definite dalla norma IEC 61869-1/5 [14]. Tali norme prescrivono le caratteristiche per TVI con tensione nominale di almeno 7,2 kV, con classe di precisione massima pari a 0,2% del fondo scala; è evidente che tali tipologie di trasduttori non siano adatti alle applicazioni considerate nel presente documento.

Si osserva inoltre che i trasformatori di tensione hanno banda passante limitata a poche centinaia di Hz, poiché le prestazioni ne sono garantite solo al valore di frequenza nominale; risultano quindi non adatti alla misurazione di tensioni mirate al monitoraggio della qualità dell'alimentazione.

Per motivi analoghi non si considerano trasformatori di tensione di tipo capacitivo TVC.

Trasduttori di tensione che possono essere considerati sono i divisori di tensione di tipo resistivo, che non garantiscono isolamento galvanico tra il circuito di potenza ed il circuito di misura.

I trasduttori con caratteristiche migliori sono del tipo attivo del tipo "Type-C" a ciclo chiuso che impiegano due toroidi e due circuiti secondari, con un circuito di compensazione della corrente mediante un generatore interno; sono impiegabili per la misura della tensione mediante una resistenza voltmetrica. Si possono raggiungere precisioni di $\pm 0,2\%$ per valori nominali di 1000 V rms, con rapporto di conversione 1500 V / 10 V, e banda passante da DC-800 kHz (Modello di riferimento: LEM CV 3-1500). L'adozione di tale tipologia di trasduttori consente la corretta l'esecuzione di misure di qualità dell'alimentazione elettrica [37].

2.3 Individuazione della strumentazione per la misurazione della corrente

Per l'esecuzione delle misurazioni di corrente, si possono svolgere considerazioni analoghe a quanto discusso nei paragrafi precedenti, inerenti le misurazioni di tensione. Le correnti assorbite da un motore asincrono trifase vengono in prima analisi considerate come un sistema trifase equilibrato di sequenza diretta di fasori, corrispondenti ad una terna di forme d'onda sinusoidali sfasate di 120° elettrici, a frequenza costante, con ampiezza variabile in base alla taglia del motore, e, a parità di taglia, al variare del carico. Nel funzionamento da motore, le correnti hanno sfasamenti in ritardo, relativi al funzionamento come carico ohmico-induttivo, con fattori di potenza che possono essere molto ridotti, nelle prove a vuoto o a rotore bloccato [39].

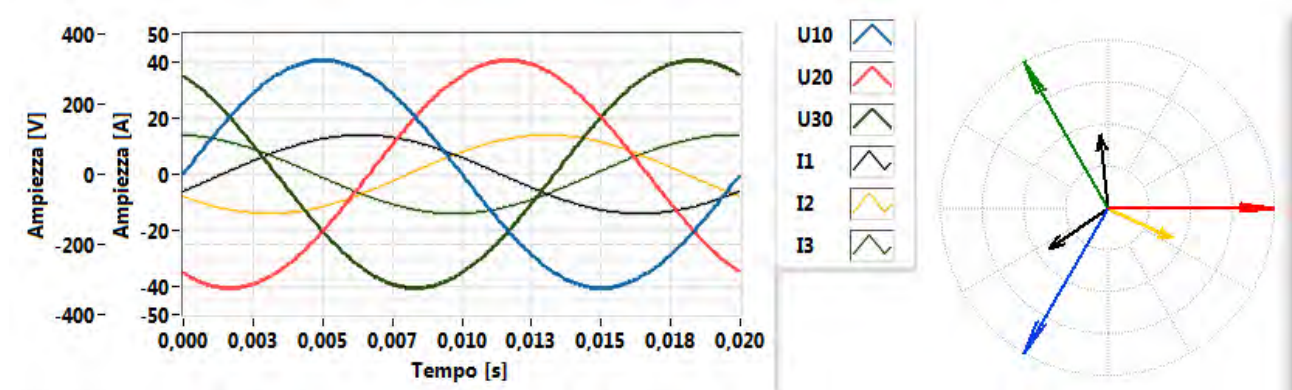


Fig.4 – Sistema trifase simmetrico ed equilibrato di sequenza diretta di tensioni e correnti sinusoidali

La grandezza fondamentale che deve essere misurata è quindi il valore efficace delle correnti, che può variare nel nostro campo di applicazione, da circa 1 A fino a 65 A, considerando il funzionamento a vuoto ed a carico variabile dei motori, con valori di carico fino al 150% del valore nominale; la precisione con cui il valore della tensione viene misurato influenza in modo rilevante la determinazione delle perdite sia a vuoto

che a carico. Sotto l'ipotesi che i motori in prova siano assimilabili a carichi lineari equilibrati, si può osservare che la presenza di componenti di sequenza inversa ed omopolare sia dovuta essenzialmente alle caratteristiche delle tensioni di alimentazione; analoghe osservazioni si possono svolgere per la presenza di componenti armoniche, considerando trascurabili le eventuali deformazioni delle correnti nelle prove a vuoto. Tuttavia la misura di tali caratteristiche delle correnti è opportuna, in quanto utile alla determinazione di eventuali anomalie di funzionamento, o difetti della macchina. Inoltre, all'articolo 8.3.1 della IEC 60034-1 [8] si prescrive la misurazione della componenti inversa del sistema di correnti, qualora non sia possibile effettuare la determinazione delle componenti di sequenza del sistema di tensione, e si fissa un limite del 2,5%. E' quindi opportuno predisporre un sistema di misura delle componenti di sequenza e delle armoniche anche delle correnti, il quale risulta di fatto indispensabile qualora le prove vengano effettuate con tensione prelevata direttamente dalla rete elettrica.

2.3.1 Misurazione del valore efficace della corrente

Per quanto concerne la misurazione del valore efficace della corrente, valgono le medesime osservazioni svolte per la misura del valore efficace della tensione, cui si rimanda per le osservazioni teoriche.

Anche per le misurazione delle correnti, sono sempre preferibili strumenti TRMS, che consentono una misurazione più accurata anche in presenza di armoniche. L'utilizzo congiunto di un amperometro a valor medio raddrizzato e di un amperometro TRMS consente di effettuare una prima stima della sinusoidalità della corrente, mediante calcolo del fattore di forma che, in condizioni ideali, deve essere pari a circa 1,11. La presenza di armoniche comporta una deviazione da tale valore che può suggerire l'esecuzione dell'analisi del contenuto armonico della corrente [33, 34, 35].

2.3.2 Inserzione degli amperometri

Per quanto riguarda l'inserzione (collegamento al circuito) di questi strumenti è utile ricordare che l'amperometro è inserito in serie alla sorgente del segnale da misurare.

Affinché lo strumento non perturbi il regime nel circuito in cui è inserito, ne deriva che l'amperometro dovrebbe avere una impedenza d'ingresso nulla. Quanto affermato, seppur auspicabile, è una pura astrazione; uno dei parametri qualitativi dello strumento è relativo a quanto si avvicina alle condizioni ideali.

Volendo dare una rappresentazione schematica del comportamento dell'amperometro, lo possiamo schematizzare un amperometro reale come un amperometro ideale (avente impedenza interna nulla) in serie ad una impedenza Z_{in} ; La presenza delle impedenze d'ingresso provoca un errore di inserzione, cioè quando lo strumento reale viene connesso al circuito, così come indicato in Fig.5.

L'impedenza interna della sorgente e dello strumento provocano un errore di inserzione come mostrato in figura. Il valori misurato di tensione è:

$$I_m = I \frac{Z_g}{Z_g + Z_{in}} \quad (10)$$

con errore pari a:

$$e = \frac{I_m - I}{I} = \frac{Z_g}{Z_g + Z_{in}} - 1 = -\frac{Z_{in}}{Z_g + Z_{in}} \quad (11)$$

che tende a zero al decrescere di Z_{in} .

Per l'esecuzione delle misure di corrente applicata ai motori asincroni, nell'ipotesi di sistema simmetrico è possibile effettuare la misurazione di una sola corrente di linea, inserendo un solo amperometro. Tuttavia è preferibile l'adozione di tre amperometri distinti, per poter effettuare simultaneamente la misurazione delle correnti di linea, per poi determinarne il valore medio che verrà utilizzato nelle procedura di calcolo dell'efficienza.

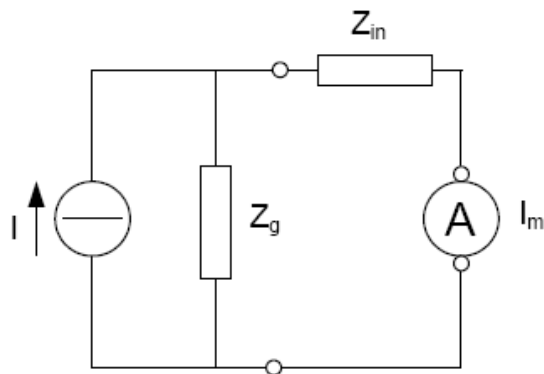


Fig.5 - Schematizzazione degli effetti legati all'inserzione di amperometro reale

2.3.3 Misurazione della componenti inverse e della distorsione armonica della corrente

Le misurazioni delle componenti di sequenza e della distorsione armonica delle correnti, pur non producendo valori che sono utilizzati direttamente nelle espressioni analitiche che determinano l'efficienza, sono necessarie per il monitoraggio delle condizioni di prova. La strumentazione che può essere adottata per tali misura rientra nella tipologia degli analizzatori di rete elettrica, che possono essere utilizzati per il monitoraggio di ulteriori parametri della tensione, che vengono considerati nell'ambito della Power Quality, nonché le caratteristiche della corrente elettrica ed i parametri di potenza ed energia.

Senza entrare in dettagli sulle caratteristiche costruttive, si considerano come Sistemi di Acquisizione Dati multicanale ad acquisizione simultanea, equipaggiati con trasduttori di tensione e corrente, e sui quali sono implementati algoritmi per la determinazione delle componenti di sequenza, basati sull'implementazione di algoritmi per le trasformazioni con matrici di Fortescue, ed algoritmi di trasformazione di Fourier e calcolo degli indici di deformazione, per concerne le misure di interesse nel presente paragrafo.

Sono strumenti che debbono soddisfare diverse norme IEC e standard di altre istituzioni, tra le quali si evidenziano la EN 50160 [20], le tabelle inerenti i disturbi transitori redatte da CBEMA e ITIC [21], le norme IEC 61000-4-30 [22], IEC 61000-4-7 [23] e EN 61000-4-15 [24].

2.3.4 Specifiche tecniche per i gli strumenti amperometrici da utilizzare

Nel caso si consideri l'inserzione diretta di strumenti amperometrici, in assenza di trasduttori come i TA che verranno analizzati in seguito, è possibile effettuare le misurazioni di corrente efficace mediante multimetri digitali o sfruttando la misurazione della tensione effettuata da wattmetri digitali; la prima soluzione consente di raggiungere elevate precisioni di misura, quale ad esempio $\pm(0,10\%$ del valore di misura $+0,04\%$ del fondo scala) per fondo scala di 10 A in multimetri digitali a $7\frac{1}{2}$ digit per correnti sinusoidali a 50 Hz. (Modello di riferimento: $7\frac{1}{2}$ digit Keysight 34470A DMM).

Se si considera la possibilità di utilizzare la sezione amperometrica di wattmetri monofase, o di un solo wattmetro trifase, i valori di precisione che si possono raggiungere sono: $\pm(0,01\%$ del valore di misura $+0,03\%$ del fondo scala), con possibilità di selezionare 6 fondo scala utili per le applicazioni considerate, 500 mA, 1 A, 2 A, 5 A, 10 A, 20 A, e 30 A, in regime sinusoidale, a frequenza di 50 Hz.

I wattmetri digitali trifase oggi disponibili sul mercato possono essere dotati di funzionalità per l'analisi delle caratteristiche della corrente, in termini di componenti di sequenza e distorsione armonica, in accordo con quanto riportato nel paragrafo precedente, e prendono il nome di Power Analyzer. (Modello di riferimento: Precision Power Analyzer Yokogawa WT3000).

Limitatamente alle portate considerate, entrambe le soluzioni considerate soddisfano ampiamente la specifica dei precisione del $\pm 0.2\%$ del fondo scala in Tabella 1; per quanto concerne la misurazione di correnti maggiori di 30 A, si impone la necessità di utilizzare trasduttori di corrente che possono essere realizzati di differenti tipologie.

2.3.5 Trasformatori e trasduttori di corrente

Per l'esecuzione delle prove oggetto del presente documento, poiché i valori di corrente da misurare possono raggiungere 75 A rms a 50 Hz, non è possibile eseguire tutte le misurazioni di corrente richieste impiegando solo strumenti amperometrici ad inserzione in serie di quali multimetri del tipo non a pinza, o wattmetri senza adozione di trasduttori esterni.

In questo paragrafo sono considerati trasformatori, ed in generale, trasduttori da impiegare nelle misurazioni di corrente [40, 41]. Analogamente all'uso dei trasformatori di tensione, l'impiego di trasformatori di corrente è legato alle seguenti necessità: i) adeguamento del livello di corrente da misurare al fondo scala degli strumenti dotati di morsetti voltmetrici (voltmetri, wattmetri, varmetri, cosfimetri, frequenzimetri, e relè di protezione); ii) isolamento galvanico tra il circuito di potenza ed il circuito di misura; iii) possibilità di inserire un collegamento a terra nel circuito di misura.

E' possibile considerare diverse tipologie di trasduttori di corrente, oltre ai trasformatori di corrente le cui caratteristiche sono nella norma IEC 60034-2-1 [9] prescritte come specificato nella IEC 61869-2 [14]; si specifica che: *"il loro errore di misura non sia superiore a $\pm 0,5$ % per le prove in generale o non superiore a $\pm 0,3$ % per le macchine a induzione, metodo della somma delle perdite con determinazione delle perdite addizionali a carico in accordo a 8.2.2.5.1."*

I trasformatori di corrente, o TA, sono trasformatori costituiti da un avvolgimento primario, da un nucleo magnetico e da uno o più avvolgimenti secondari, con isolamento solido o liquido, a seconda del livello di tensione; i TA possono essere di più tipi: 1) avvolto: l'avvolgimento primario è all'interno del TA e costituito da una o più spire; 2) passante: l'avvolgimento primario è costituito da un conduttore non isolato (ad esempio barre); 3) toroidale: avvolgimento costituito da un conduttore isolato (ad esempio cavo isolato). Secondo IEC 60044-1, i valori normalizzati di corrente primaria nominale per TA ad un solo rapporto sono: 10 - 12,5 - 15 - 20 - 25 - 30 - 40 - 50 - 60 - 75 A, e i loro multipli decimali o frazioni. I valori preferenziali sono quelli sottolineati. Per TA a rapporti multipli tali valori si riferiscono ai valori più bassi della corrente primaria nominale, con valori normalizzati di corrente secondaria nominale 1, 2 o 5 A, con valore preferenziale 5 A. Le classi di precisione normali per i TA di misura sono 0,1 - 0,2 - 0,5 - 1 - 3 - 5. In accordo con le prescrizioni della IEC 60034-2-1 [9] in merito alle prove sui motori asincroni, si devono considerare TA con errori massimi del $\pm 0,3$ %, per cui la nostra attenzione si focalizzerà su TA in classe 0,1 e 0,2.

Per quanto concerne gli errori di misura, dalla norma IEC 61869-1/5 [14] si possono evincere le seguenti specifiche in Tabella 8, limitatamente alle classi 0,1 e 0,2 considerate:

Tabella 8 – Specifiche per trasformatori di corrente

Classe di precisione	Errore di corrente (rapporto) % alla percentuale della corrente nominale indicata				Errore d'angolo in minuti alla percentuale della corrente nominale indicata				Errore d'angolo in centiradiani alla percentuale della corrente nominale indicata			
	5	20	100	120	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1	$\pm 0,4$	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	± 15	± 8	± 5	± 5	$\pm 0,45$	$\pm 0,24$	$\pm 0,15$	$\pm 0,15$
0,2	$\pm 0,75$	$\pm 0,35$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	± 30	± 15	± 10	± 10	$\pm 0,9$	$\pm 0,45$	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$

Si evince quindi che i TA in classe 0,1 possono essere usati a partire dal 20% della corrente primaria nominale, fino al 120% della stessa, mentre TA in classe 0,2 possono essere usati dal valore nominale. La scelta di TA in classe 0,1 può essere considerata per le misure di corrente da effettuare durante le prove sui motori. Per determinare quali siano i TA ottimali per l'esecuzione delle prove sui differenti motori, si può individuare il possibile intervallo di variabilità delle correnti per le prove a carico, secondo quanto prescritto da IEC 60034-2-1, all'articolo 6.4.4.2 *Prova a carichi variabili* (curva di carico), nelle ipotesi che la corrente di statore sia tra il 40% ed il 150% della corrente nominale del motore. Nelle Tabelle 9-11 sono indicati gli abbinamenti ottimali tra motori da provare e trasformatori di misura, per le prove a carico variabile.

Tabella 9 - Abbinamenti ottimali tra motori a 2 poli e TA, per prove a carico variabile

Motori a 2 poli			Prove a carico variabile Portata del TA ottimale in classe 0,1 % [A], con intervallo di impegno con errore <0,3% (20%-120% della corrente nominale)				
Potenza nominale [kW]	Corrente nominale [A]	Intervallo di corrente 40-150% della corrente nominale [A]	10 (2-12 A)	15 (3-15 A)	20 (4-24 A)	30 (6-36 A)	50 (10-60 A)
0,75	2,50	1,00-3,75					
1,10	3,53	1,41-5,29					
1,50	4,67	1,86-7,00					
2,20	6,64	2,65-9,96					
3,00	8,86	3,54-13,29					
4,00	11,58	4,63-17,37					
5,50	15,62	6,24-23,43					
7,50	20,98	8,39-31,47					
11,00	30,21	12,08-45,31					
15,00	41,15	16,46-61,72					*

Tabella 10 - Abbinamenti ottimali tra motori a 4 poli e TA, per prove a carico variabile

Motori a 4 poli			Prove a carico variabile Portata del TA ottimale in classe 0,1 % [A], con intervallo di impegno con errore <0,3% (20%-120% della corrente nominale)				
Potenza nominale [kW]	Corrente nominale [A]	Intervallo di corrente 40-150% della corrente nominale [A]	10 (2-12 A)	15 (3-15 A)	20 (4-24 A)	30 (6-36 A)	50 (10-60 A)
0,75	2,50	1,00-3,75					
1,10	3,53	1,41-5,29					
1,50	4,67	1,86-7,00					
2,20	6,64	2,65-9,96					
3,00	8,86	3,54-13,29					
4,00	11,58	4,63-17,37					
5,50	15,62	6,24-23,43					
7,50	20,98	8,39-31,47					
11,00	30,21	12,08-45,31					
15,00	40,68	16,27-61,02					*

Per quanto concerne l'esecuzione delle prove a vuoto con tensione variabile, si suppone che le correnti misurate durante tali prove siano tra il 10% e l'80% del valore di corrente nominale del motore. Nelle Tabelle 12-14 sono indicati gli abbinamenti ottimali tra motori da provare e trasformatori di misura, per le prove a vuoto a tensione variabile.

Tabella 11 - Abbinamenti ottimali tra motori a 6 poli e TA, per prove a carico variabile.

Motori a 6 poli			Prove a carico variabile Portata del TA ottimale in classe 0,1 % [A], con intervallo di impegno con errore <0,3% (20%-120% della corrente nominale)				
Potenza nominale [kW]	Corrente nominale [A]	Intervallo di corrente 40-150% della corrente nominale [A]	10 (2-12 A)	15 (3-15 A)	20 (4-24 A)	30 (6-36 A)	50 (10-60 A)
0,75	2,58	1,03-3,87					
1,10	3,63	1,45-5,44					
1,50	4,80	1,92-7,20					
2,20	6,81	2,72-10,21					
3,00	9,06	3,62-13,59					
4,00	11,82	4,73-17,73					
5,50	15,92	6,36-23,88					
7,50	21,30	8,52-31,95					
11,00	30,63	12,25-45,95					
15,00	41,15	16,46-61,72					*

legenda	
Preferibile inserzione diretta senza TA	
Soddisfa le condizioni di misura dal 40% al 150% della corrente nominale	
Sovradimensionato	
Sottodimensionato	

Nota *: Per il caso dei motori di taglia 15 kW, il TA da 50 A nominali consente di effettuare misure fino a valori di poco inferiori al 149% della corrente nominale dei motori considerati, per cui non si giustifica l'impegno di TA di portata superiore.

Tabella 12- Abbinamenti ottimali tra motori a 2 poli e TA, per prove a tensione variabile

Motori a 2 poli			Prove a vuoto a tensione variabile Portata del TA ottimale in classe 0,1 % [A], con intervallo di impegno con errore <0,3% (20%-120% della corrente nominale)				
Potenza nominale [kW]	Corrente nominale [A]	Intervallo di corrente 10-80% della corrente nominale [A]	10 (2-12 A)	15 (3-15 A)	20 (4-24 A)	30 (6-36 A)	50 (10-60 A)
0,75	2,50	0,25-2,00					
1,10	3,53	0,35-2,82					
1,50	4,67	0,47-3,74					
2,20	6,64	0,66-5,31					
3,00	8,86	0,89-7,09					
4,00	11,58	1,16-9,26					
5,50	15,62	1,56-12,50	#S	#			
7,50	20,98	2,10-16,78		#S	#		
11,00	30,21	3,02-24,17			#S	#	
15,00	41,15	4,12-32,92				#	

Tabella 13- Abbinamenti ottimali tra motori a 4 poli e TA, per prove a tensione variabile

Motori a 4 poli				Prove a vuoto a tensione variabile Portata del TA ottimale in classe 0,1 % [A], con intervallo di impegno con errore <0,3% (20%-120% della corrente nominale)			
Potenza nominale [kW]	Corrente nominale [A]	Intervallo di corrente 10-80% della corrente nominale [A]	10 (2-12 A)	15 (3-15 A)	20 (4-24 A)	30 (6-36 A)	50 (10-60 A)
0,75	2,50	0,25-2,00					
1,10	3,53	0,35-2,82					
1,50	4,67	0,47-3,74					
2,20	6,64	0,66-5,31					
3,00	8,86	0,89-7,09					
4,00	11,58	1,16-9,26					
5,50	15,62	1,56-12,50	#§	#			
7,50	20,98	2,10-16,78		#§	#		
11,00	30,21	3,02-24,17			#§	#	
15,00	40,68	4,07-32,54				#	

Tabella 14- Abbinamenti ottimali tra motori a 6 poli e TA, per prove a tensione variabile

Motori a 6 poli				Prove a vuoto a tensione variabile Portata del TA ottimale in classe 0,1 % [A], con intervallo di impegno con errore <0,3% (20%-120% della corrente nominale)			
Potenza nominale [kW]	Corrente nominale [A]	Intervallo di corrente 10-80% della corrente nominale [A]	10 (2-12 A)	15 (3-15 A)	20 (4-24 A)	30 (6-36 A)	50 (10-60 A)
0,75	2,58	0,26-2,06					
1,10	3,63	0,36-2,90					
1,50	4,80	0,48-3,84					
2,20	6,81	0,68-5,44					
3,00	9,06	0,91-7,24					
4,00	11,82	1,18-9,45					
5,50	15,92	1,59-12,73	#§	#			
7,50	21,30	2,13-17,04		#§	#		
11,00	30,63	3,06-24,50			#§	#	
15,00	41,15	4,16-32,92				#	

legenda	
Preferibile inserzione diretta senza TA	
Adatto (con possibili note)	
Sovradimensionato	
Sottodimensionato	

Nota §: Il TA selezionato non consente di effettuare misurazioni fin con la precisione del 0,2% misure con correnti crescenti fino al 80%.

Nota #: Il TA selezionato non consente di effettuare con la precisione del 0,2% misure con correnti decrescenti fino al 10% del valore nominale del motore.

Analogamente ai TVI, si osserva che anche i TA hanno banda passante limitata a poche centinaia di Hz, poiché le prestazioni ne sono garantite solo al valore di frequenza nominale; risultano quindi non adatti alla misurazione di correnti mirate al monitoraggio della qualità dell'alimentazione.

Per incrementare la precisione della misura delle correnti, si può ricorrere ad altre tipologie di trasduttori, quali i derivatori o shunt, i trasduttori a bobina di Rogowski [40] ed i trasduttori ad effetto Hall o a tecnologia IT.

Gli shunt triassiali consentono di ottenere elevate bande passanti, fino a 500 kHz con incertezze pari a 0,03% con fondo scala 30 A, con resistenza di inserzione pari a 0,010 Ω . (Modello di riferimento: Fluke serie Norma). Gli shunt non garantiscono isolamento galvanico tra circuito di alimentazione del motore e circuito di misura.

I trasduttori del tipo a bobina di Rogowski sono costituiti da un conduttore isolato avvolto in modo elicoidale su un supporto non metallico; una delle estremità del conduttore viene riportata all'origine passando assialmente attraverso la bobina. Il principio di funzionamento è basato alla legge di Ampere. Tale tipologia di trasduttore non consente di effettuare misure di correnti costanti, ma presenta vantaggi legati all'assenza di nucleo magnetico, che permette di avere banda passante elevata e semplicità di installazione data la flessibilità e la deformabilità della bobina. E' impiegabile per misure di correnti molto elevate, superiori al kA. Per le prove sui motori asincroni considerati, si possono ottenere precisioni dello 0,2%, con fondo scala 20 A e 200 A, dal 10% al 100% del fondo scala, con banda passante 10 Hz a 20 kHz (Modello di riferimento: Fluke i2000 CA Flex).

I trasduttori ad effetto Hall a ciclo chiuso consentono di ottenere buone prestazioni, con precisioni dello 0,25%, con portata di 50 A rms, intervallo di misura da 0 a +/- 90 A, banda passante DC-200 kHz ed isolamento galvanico tra circuito di alimentazione del motore e circuito di misura (Modello di riferimento: Lem LAH50 -P/SP1).

I trasduttori che consentono di ottenere le prestazioni migliori sono i trasduttori basati sulla tecnologia IT, che non usa generatori ad effetto Hall; il flusso magnetico creato dalla corrente primaria è compensato da una corrente secondaria. Sono presenti due ulteriori nuclei per la misura della compensazione del flusso. Tali trasduttori consentono di ottenere precisioni migliori dello 0,03%, con portate di 60 A di picco o superiori, banda passante 500 kHz, linearità < 1 ppm, ed isolamento galvanico tra circuito di alimentazione del motore e circuito di misura (Modello di riferimento: LEM IT 60-S ultrastab) [37].

2.4 Individuazione della strumentazione per la misurazione della frequenza

La frequenza f_x di un segnale, ad esempio di una forma d'onda sinusoidale di tensione o corrente, è definita come il numero di eventi, o oscillazioni, che il segnale, presupposto periodico, presenta nell'unità di tempo (un secondo). Le tecniche più utilizzate per misurare la frequenza si basano sul conteggio delle oscillazioni presentate dal segnale in una finestra temporale, la cui durata è determinata da un segnale di temporizzazione. In Fig.5 si considera un segnale sinusoidale che sia stato già squadrato.



Fig.5 – Frequenza di un segnale squadrato, intesa come ripetizioni per secondo.

Se il segnale di riferimento ha una generica frequenza f_r , il numero di oscillazioni contate sarà pari a:

$$N_x = \frac{f_x}{f_r} \quad (12)$$

Da cui si ricava la frequenza incognita:

$$f_x = N_x \cdot f_r \quad (13)$$

Dal punto di vista circuitale, le oscillazioni del segnale d'ingresso sono contate mediante un dispositivo elettronico denominato *contatore di eventi*. Per limitare il conteggio degli impulsi all'interno della desiderata finestra temporale, viene utilizzato un circuito d'abilitazione che attiva la trasmissione del segnale d'ingresso al contatore nell'intervallo di tempo determinato da un segnale d'abilitazione. Lo schema di principio per la misurazione della frequenza è riportato in Fig. 6.

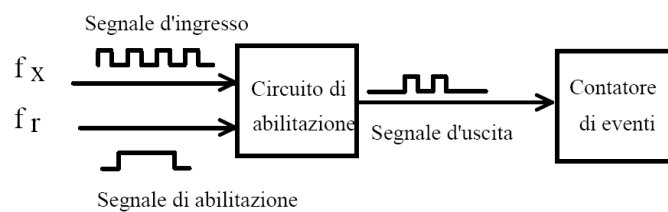


Fig.6 - Circuito di abilitazione per conteggio in una finestra temporale.

La tecnica utilizzata per misurare un generico *intervallo di tempo* t_x si basa sul confronto con un segnale campione di periodo T_r , che rappresenta l'unità di misura di riferimento. In Fig.7 si riporta lo schema di principio per la misurazione dell'intervallo di tempo.

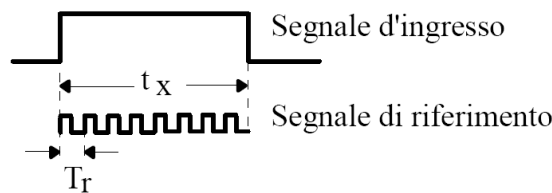


Fig. 7 - Schema di principio per la misurazione dell'intervallo di tempo

Contando il numero di oscillazioni N_x presentate dal segnale di riferimento per tutta la durata dell'intervallo di tempo da misurare è possibile determinare t_x come:

$$t_x = N_x \cdot T_r \quad (14)$$

Questa misurazione viene effettuata inviando al contatore di eventi il segnale prodotto da un temporizzatore interno, mediante il circuito d'abilitazione, che viene abilitato per il desiderato intervallo di tempo mediante il segnale d'ingresso in esame.

La misurazione della frequenza dei segnali di tensione e corrente di interesse può essere correttamente svolta ricorrendo ad una misura di periodo, di cui la frequenza è l'inverso; ciò perché la frequenza dei segnali di riferimento impiegati nei contatori è sensibilmente maggiore delle decine di Hz, che costituiscono i valori delle frequenze industriali.

In Fig.8 è riportata la configurazione per l'esecuzione della misurazione di periodo. Il segnale da misurare, dopo aver attraversato la sezione di condizionamento viene squadrato ed inviato al circuito di controllo della porta logica, determinandone quindi il tempo di abilitazione [41].

Sull'altro ingresso della porta viene inviato il segnale proveniente dalla base dei tempi. Il numero di impulsi contati rappresenta il numero di impulsi prodotti dalla base dei tempi nell'intervallo di tempo in cui la porta

è abilitata, cioè in un periodo del segnale d'ingresso. Essendo nota la frequenza di questi impulsi, dal loro numero si risale alla durata dell'intervallo di tempo.

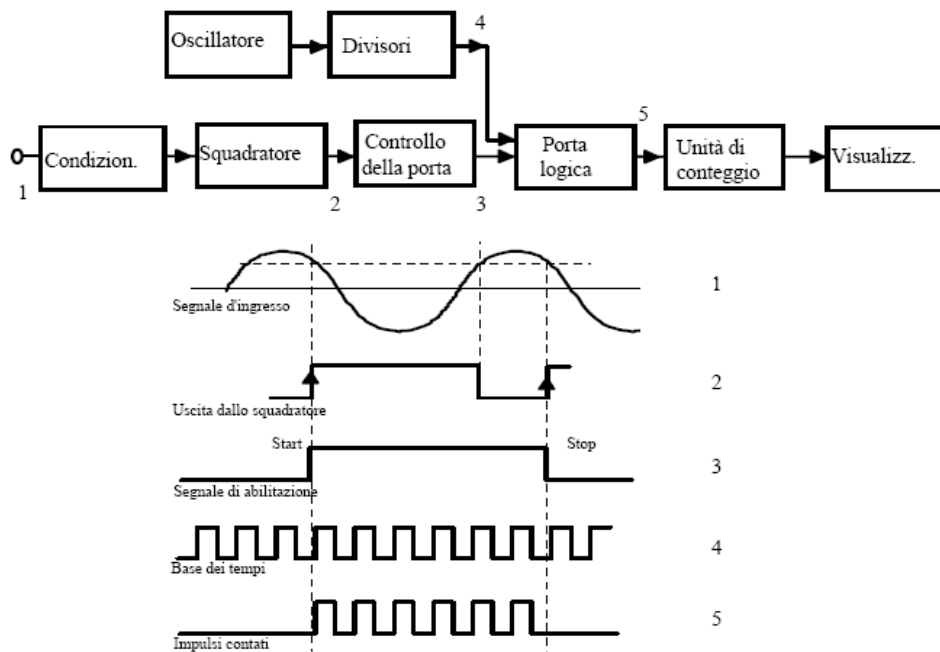


Fig. 8 - Schema a blocchi per l'esecuzione della misurazione di periodo

Detti T_x il periodo incognito e T_{CK} il periodo del segnale fornito dalla base dei tempi, si ha:

$$T_x = N_x \cdot T_{CK} \quad (15)$$

la quale mostra che, noto T_{CK} , per determinare T_x è sufficiente contare il numero di impulsi N_x che transitano attraverso

la porta logica durante l'intervallo di abilitazione.

A causa dell'incertezza di ± 1 per il numero di impulsi contati, si avrà

$$T_x = N_x \cdot T_{CK} \pm T_{CK} \quad (16)$$

Poiché T_{CK} non può essere ridotto oltre un certo valore minimo dipendente dalla base dei tempi utilizzata, per esprimere il risultato con un adeguato numero di cifre, è necessario che il periodo T_x incognito sia sufficientemente maggiore del valore minimo di T_{CK} .

L'incertezza (*risoluzione*) risulta pari a:

$$\Delta T_x = \pm T_{CK} \quad (17)$$

l'incertezza relativa è:

$$\frac{\Delta T_x}{T_x} = \frac{\pm T_{CK}}{T_{CK} \cdot N_x} = \frac{\pm 1}{N_x} \quad (18)$$

è invece inversamente proporzionale al numero N_x di periodi del segnale d'ingresso considerati. Se si effettua una misura su più periodi, si ottiene la misura del periodo medio, che consente di ridurre l'incertezza di misura.

2.4.1 Specifiche tecniche per i gli strumenti frequenzimetrici da utilizzare

La misurazione della frequenza deve essere eseguita con precisione di $\pm 0.1\%$ del fondo scala o superiore, secondo quanto prescritto da IEC 60034-2-1 [9]; considerato che il valore di frequenza da misurare è 50 Hz, con variazioni molto contenute anche per tensioni di alimentazione prelevate dalla rete senza adozione di alimentatori, è possibile utilizzare multimetri digitali per effettuarne la misurazione.

2.5 Individuazione della strumentazione per la misurazione della potenza elettrica

2.5.1 Potenza elettrica in sistemi polifase, in regime simmetrico ed equilibrato

Per poter delineare le specifiche necessarie per la progettazione del laboratorio di verifica, e definire tutti gli elementi che caratterizzeranno il laboratorio sia in termini di strumentazione e procedure di misura, è opportuno richiamare le problematiche inerenti le misure di potenza elettrica, limitando l'analisi ai sistemi mono fase e polifase in regime sinusoidale e con carichi equilibrati, ohmico induttivi con fattore di potenza variabile [42, 43, 44, 45, 46].

L'unità di misura della potenza elettrica è il watt (W), definito come J/s, che dal punto di vista dimensionale risulta pari a:

$$[\text{joule/s}] = [\text{joule/coulomb}] \cdot [\text{coulomb/s}] = [\text{V}] \cdot [\text{A}] = [\text{W}]. \quad (19)$$

In un circuito in corrente continua, dove tensione e corrente sono costanti, la potenza elettrica P dissipata in un carico alimentato da una tensione V_L e che assorbe corrente I_L è pari a:

$$P = V_L \cdot I_L \quad (20)$$

In un circuito in corrente alternata, la potenza elettrica varia continuamente a causa delle variazioni cicliche di tensione e corrente, come illustrato in Fig.9 nel caso di segnali sinusoidali. La potenza istantanea, è comunque definita come il prodotto della caduta tensione istantanea $v(t)$ ai capi del carico e della corrente istantanea $i(t)$ che lo attraversa:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (21)$$

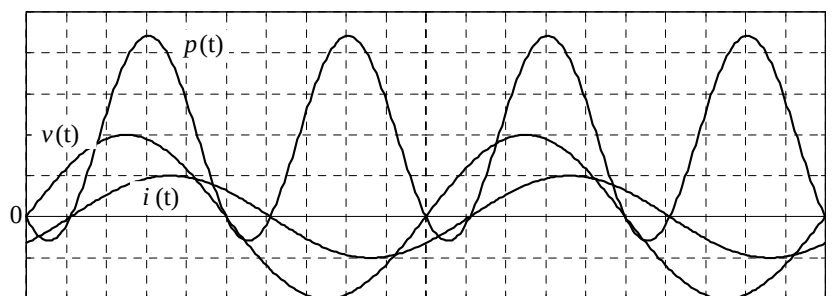


Fig.9 – Il prodotto dei segnali di tensione (v) e di corrente (i) produce la potenza istantanea (p), che varia durante il ciclo sinusoidale.

In un generico intervallo di tempo infinitesimo dt , il lavoro compiuto è pari a:

$$dW_e = v(t) i(t) dt \quad (22)$$

L'energia elettrica relativa ad un intero periodo T è pari all'integrale esteso al periodo:

$$W_e = \int_0^T p(t) dt \quad (23)$$

Non essendo la potenza istantanea una grandezza costante, per convenzione si fa riferimento all'energia W_e considerando una potenza media P costante nel tempo

$$W_e = PT \quad (24)$$

La potenza media (o potenza reale o potenza attiva), è pari al valor medio di potenza dissipato in un periodo T del segnale sinusoidale:

$$P = \frac{\int_0^T p(t) dt}{T} \quad (25)$$

rappresenta quindi la media aritmetica di tutte le potenze istantanee relative ad un periodo.

L'impedenza del carico può essere rappresentata da un circuito equivalente, formato da una resistenza pura R_{EQ} ed una reattanza pura X_{EQ} in serie (Fig.10a).

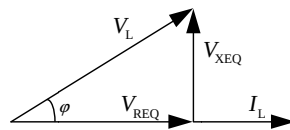
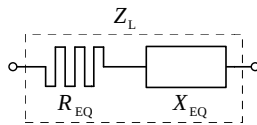


Fig.10a – Impedenza del carico Fig.10b – Diagramma di fasori

In questo caso la potenza elettrica associata al carico Z_L può essere espressa dalla somma di due componenti; una componente associata alla resistenza R_{EQ} e l'altra alla reattanza X_{EQ} del circuito stesso. Poiché la potenza attiva non si dissipa sulla reattanza X_{EQ} , segue che la potenza attiva è data da:

$$P = V_{REQ} I_L = V_L I_L \cos(\varphi) \quad (26)$$

Il termine $\cos(\varphi)$ rappresenta il *fattore di potenza*, un coefficiente che tiene conto della flessione del termine $V_L I_L$. Infatti, solo una parte della tensione V_L contribuisce alla potenza attiva mentre la componente V_{XEQ} (caduta sulla reattanza) non produce potenza attiva poiché essa è in quadratura alla corrente I_L circolante nel circuito (Fig.10b). Il termine complementare alla potenza attiva sarà:

$$Q = V_{XEQ} I_L = V_L I_L \sin(\varphi) \quad (27)$$

Questo termine è detto *potenza reattiva* introdotto come conseguenza della caduta di tensione su di una reattanza pura. Esso ha valore medio nullo, rappresenta una energia oscillante in entrambe le direzioni e quindi non dà contributo alla potenza attiva. Il prodotto tra il valore efficace della tensione e della corrente, definisce la *potenza apparente*:

$$P_A = V_L I_L \quad (28)$$

questa grandezza non riveste in generale alcun significato energetico, ma rappresenta, quale potrebbe essere la potenza attiva se la corrente fosse in fase con la tensione..

Sia la potenza apparente che quella reattiva sono grandezze dimensionalmente omogenee alla potenza (e quindi espresse in watt) ma hanno una differente natura. Mentre la relazione esistente tra la potenza istantanea e la potenza reale soddisfa il principio di conservazione dell'energia, la potenza apparente e quella reattiva non soddisfano alcun principio di conservazione. Per evidenziare la significativa differenza fisica tra P_A e Q le unità di misura sono chiamate rispettivamente *volt-amper* (VA) e *volt-amper-reattivi* (var). Dalla Fig.10b, la relazione esistente tra la potenza apparente, potenza attiva e potenza reattiva è data da:

$$P_A = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (29)$$

Lo strumento utilizzato per la misura della potenza elettrica è il *wattmetro*. Va precisato che esistono anche *trasduttori di potenza* che convertono la potenza elettrica in una tensione continua ad essa proporzionale. Ai fini di una corretta misura, questi strumenti devono avere una banda passante sufficientemente ampia. Va precisato, ad esempio, che i moderni alimentatori in corrente continua basati sulla tecnica a commutazione (alimentatori switching) hanno frequenze di commutazione che possono superare anche i 100 kHz, per cui una corretta misura della potenza elettrica necessiterebbe di una banda passante sufficientemente elevata. Per le esigenze delle attività di misura considerate nel presente documento, le tensioni e le correnti vengono considerate sinusoidali; tuttavia, le forme d'onda della tensioni di alimentazione e delle correnti dovranno essere monitorate con strumenti di opportuna banda passante, per garantire il rispetto di tale condizione durante le misurazioni. Da un punto di vista costruttivo esistono tipologie di wattmetri molto diverse tra loro. Per le misure in corrente continua ed in bassa frequenza, in passato venivano impiegati quasi esclusivamente strumenti di tipo elettrodinamico; gli strumenti impiegati oggi sono essenzialmente di tipo elettronico. I processi di moltiplicazione e media inclusi nei calcoli relativi alla misura di potenza possono essere svolti tramite l'utilizzo di circuiti elettronici. Questi tipi di wattmetri si dividono in due categorie, a seconda che le operazioni di moltiplicazione e di media siano effettuate in maniera analogica o digitale.

2.5.2 Wattmetri basati su moltiplicatori analogici

Prima che le tecniche numeriche avessero lo sviluppo attuale, la misura della potenza avveniva utilizzando esclusivamente moltiplicatori di tipo analogico. Anche oggi, quando piuttosto che il valore medio della potenza si desidera conoscere il valore efficace e non risulta semplice realizzare il campionamento con una frequenza sufficientemente elevata, si ricorre a moltiplicatori di questo tipo. In questi strumenti le moltiplicazioni vengono principalmente effettuate da circuiti analogici, che fanno il prodotto della tensione $v(t)$ e della corrente $i(t)$, mentre le operazioni di media sono effettuate tramite l'utilizzo di filtri passa-basso (LPF, low pass filter), o circuiti integratori, oppure utilizzando direttamente strumenti che misurano il valore medio (Fig.11).

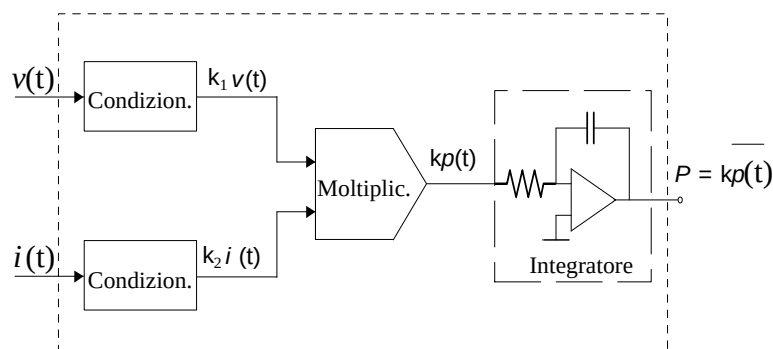


Fig.11 - Schema a blocchi di un wattmetro monofase con moltiplicatore analogico

In generale, se i valori della tensione $v(t)$ o della corrente $i(t)$ sono troppo elevati per l'applicazione diretta allo strumento, si impiegano opportuni trasduttori che riducono il valore della tensione e della corrente: CT

= Current Transducer e VT = Voltage transducer. Le uscite di questi sono applicate agli ingressi del wattmetro (Fig.12).

I moltiplicatori analogici sono elementi che presentano due porte di ingresso ed una porta di uscita. A seconda che le grandezze di ingresso possano essere solo di un segno o anche di segno opposto, i moltiplicatori si diranno a :

- quattro quadranti: ingressi ed uscita possono essere sia positivi che negativi;
- due quadranti: uno degli ingressi ha una sola polarità;
- un quadrante: ingressi ed uscita possono avere una sola polarità, in genere positiva.

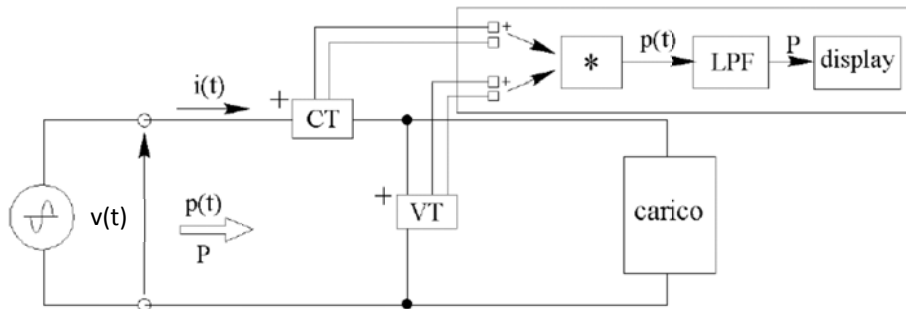


Fig.12- Inserzione di un wattmetro monofase con trasduttori di corrente e tensione.

I principali moltiplicatori analogici sono basati su circuiti a transistor, con un moltiplicatore a quattro quadranti che processa segnali di tensione e corrente, fornendo la potenza istantanea.

Molto spesso è richiesta la misura di potenza su sistemi trifase; in questo caso si usano wattmetri con 3 circuiti che misurano la potenza assorbita dalle singole fasi, che sono sommate per fornire la potenza complessiva (Fig.13).

Questi strumenti possono utilizzare diversi tipi di *trasduttori* di tensione e corrente, che consentono di ottenere diversi valori di banda:

- trasformatori di tensione e corrente: banda da 50 Hz a qualche kilohertz;
- shunt coassiale con amplificatori d'isolamento: banda dalla continua a qualche centinaio di kilohertz;
- trasduttori ad effetto Hall: banda dalla continua a qualche centinaio di kilohertz.

Soluzioni più efficaci sono basate su moltiplicatori a divisione di tempo o moltiplicatori ad effetto Hall.

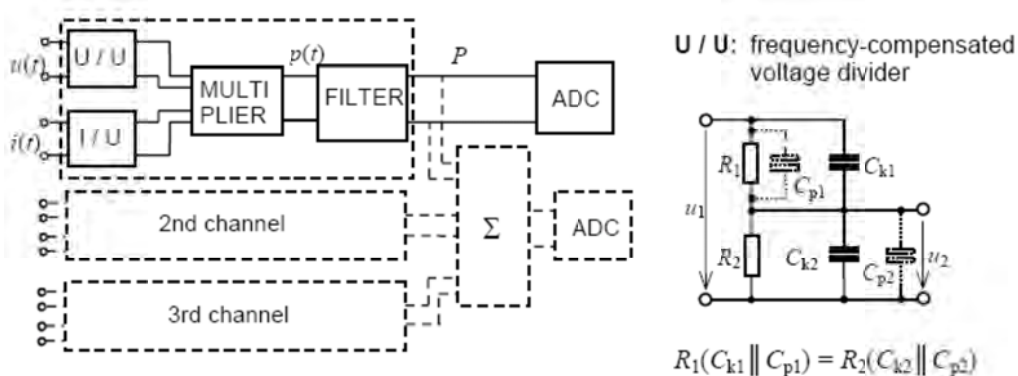


Fig.13 - Wattmetro trifase con moltiplicatore analogico e partitore di tensione

2.5.3 Trasduttori di potenza con moltiplicatori ad effetto Hall

Come noto, in un sensore ad effetto Hall la tensione in uscita $v_H(t)$ è proporzionale al prodotto di due grandezze tempo varianti, la corrente $i(t)$ circolante nel sensore e l'induzione magnetica $B(t)$:

$$v_H(t) = R_H i(t) B(t) \quad (30)$$

dove R_H è la costante di Hall.

Da questa relazione si vede come l'andamento nel tempo della tensione in uscita sia proporzionale al prodotto di sue grandezze variabili nel tempo: la corrente $i(t)$ e l'induzione $B(t)$. Il sensore ad effetto Hall può essere visto quindi come un moltiplicatore analogico con due ingressi $i(t)$ e $B(t)$ ed una uscita $v_H(t)$.

In uscita è possibile avere una f.e.m. proporzionale al valore della potenza istantanea se si rende la corrente $i(t)$ proporzionale alla corrente di un carico e l'induzione $B(t)$ proporzionale alla tensione applicata. Per ottenere la potenza istantanea

$$p_L(t) = v_L(t) \cdot i_L(t) \quad (31)$$

in effetti è possibile rendere la $i(t)$ proporzionale alla caduta di tensione ai capi del carico $v_L(t)$, e la $B(t)$ proporzionale all'intensità di corrente assorbita dal carico $i_L(t)$ oppure, in alternativa, la $B(t)$ proporzionale alla caduta di tensione ai capi del carico $v_L(t)$ e la $i(t)$ proporzionale all'intensità di corrente assorbita dal carico $i_L(t)$.

Nel circuito di Fig.14-a, la potenza P è determinata misurando $v_H(t)$ attraverso un voltmetro a valore medio con elevata impedenza d'ingresso e considerando che $B(t) = k_V i_L(t)$, l'induzione magnetica è proporzionale alla corrente sul carico, $i(t) = k_I v_L(t)$, la corrente di polarizzazione, è proporzionale alla v_L (secondo la resistenza R_V), dove k_V e k_I sono fattori di proporzionalità.

Il valor medio della tensione di Hall è:

$$V_H = \frac{1}{T} \int_0^T v_H(t) dt = R_H \frac{1}{T} \int_0^T i(t) B(t) dt = R_H k_V k_I \frac{1}{T} \int_0^T v_L(t) i_L(t) dt = K P \quad (32)$$

dove T è il periodo del misurando e V_H il valore medio di $v_H(t)$, è proporzionale alla potenza media.

Nella configurazione usuale il sensore a moltiplicatore di Hall presenta un'incertezza dello 0.1% fino a pochi MHz.

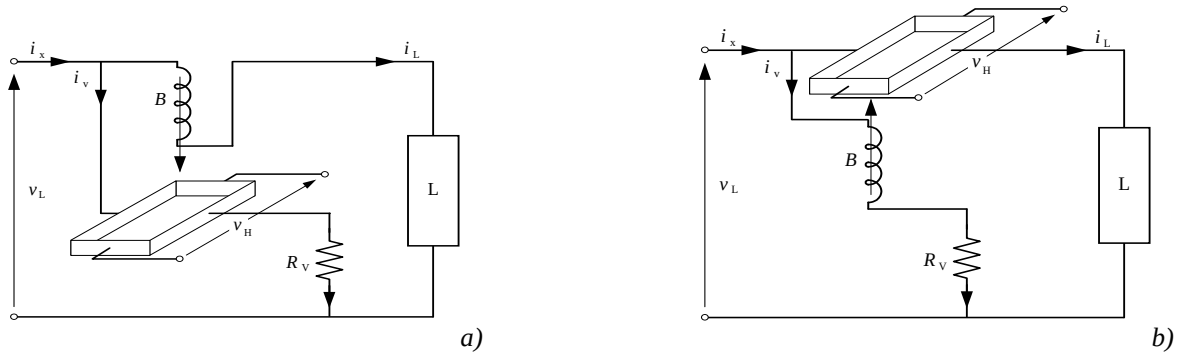


Fig.14 – Schemi di principio di un wattmetro ad effetto Hall, per applicazioni a bassa (a) e alta (b) frequenza.

Per frequenze superiori ai megahertz una soluzione alternativa è mostrata in Fig.14-b in cui la corrente del carico scorre direttamente nella piastrina di Hall, fungendo da corrente di polarizzazione, ed il campo magnetico, generato dalla tensione v_L è inferiore al caso precedente¹. Si ha $i(t) = k_V i_L(t)$, quindi la corrente di polarizzazione i è proporzionale alla corrente sul carico e $B(t) = k_I v_L(t)$, con l'induzione magnetica è proporzionale alla v_L .

Analogamente al caso del wattmetro elettrodinamico, anche in questo caso bisogna considerare le resistenze della voltmetrica e dell'amperometrica e gli errori di fase dell'amperometrica e_{ω} e della

voltmetrica e_{av} e la relativa incertezza della misura di potenza (nel caso di condizione sinusoidale di $(e_{av} - e_{av}) \tan \phi$).

Questi errori crescono per le applicazioni ad alta frequenza, mentre sono più contenuti a frequenza industriale. I sensori per le alte frequenze, usano in genere sonde in guide d'onda con raddrizzatori.

2.5.4 Wattmetri basati su moltiplicatori digitali

In questi strumenti (Fig.15) i campioni delle forme d'onda di tensione e corrente vengono prelevati e digitalizzati simultaneamente in modo da poter effettuare le operazioni desiderate utilizzando le tecniche digitali (wattmetri a campionamento).

Questi strumenti implementano in forma discreta la formula della potenza, elaborando i campioni di tensione v_k e di corrente i_k .

La tensione d'ingresso è applicata ad un operazionale che ne adatta l'ampiezza e quindi inviata al convertitore A/D. La corrente, applicata ad una resistenza di shunt, è convertita in tensione, amplificata ed applicata ad un secondo convertitore A/D. I convertitori A/D sono dotati di circuiti di S/H a campionamento simultaneo. Le uscite degli A/D sono isolate con optoisolatori ed inviate ad un DSP che esegue le elaborazioni. In alternativa è possibile prevedere in ingresso trasduttori di tensione e di corrente (es TV e TA o trasduttori ad effetto Hall), le cui uscite sono applicate all'ingresso del wattmetro. In questo caso lo strumento potrebbe non avere gli optoisolatori interni, in quanto l'isolamento dal circuito di misura è garantito dai trasduttori. Più in particolare, la sezione di campionamento può essere schematizzata come in Fig. 16.

Essa è essenzialmente composta da due canali di ingresso, ciascuno costituito da: una sezione di condizionamento (C), un circuito di sample and hold (S/H) ed un convertitore analogico digitale (ADC). Sono inclusi anche un moltiplicatore digitale (MUL), un sommatore (SUM), un divisore (DIV), ed una unità di visualizzazione (DISP). Tutto questo viene gestito da un opportuno processore, non raffigurato in figura.

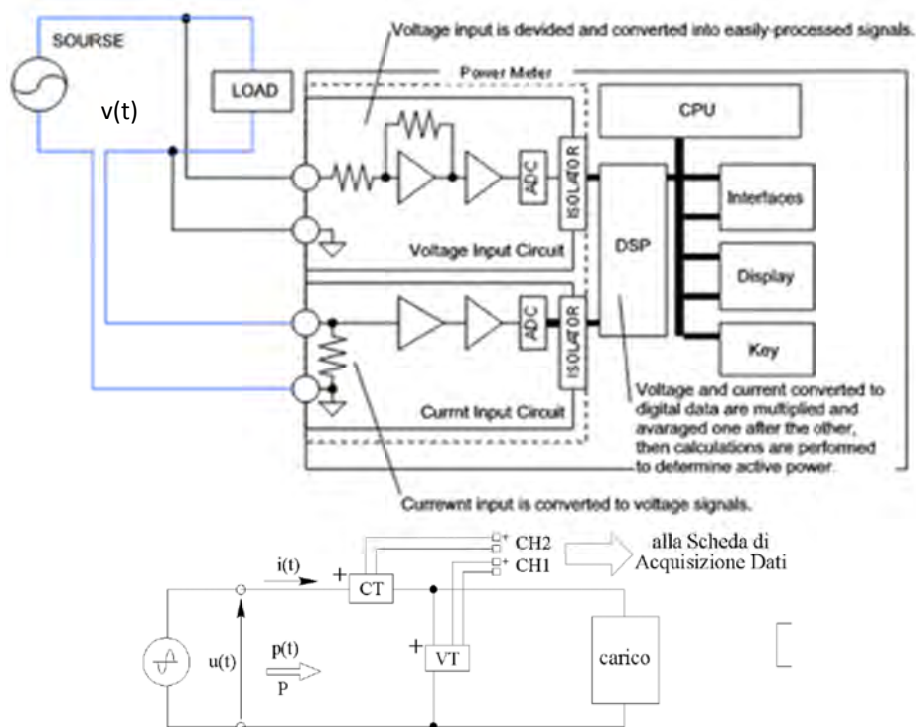


Fig.15- Architettura di un wattmetro digitale

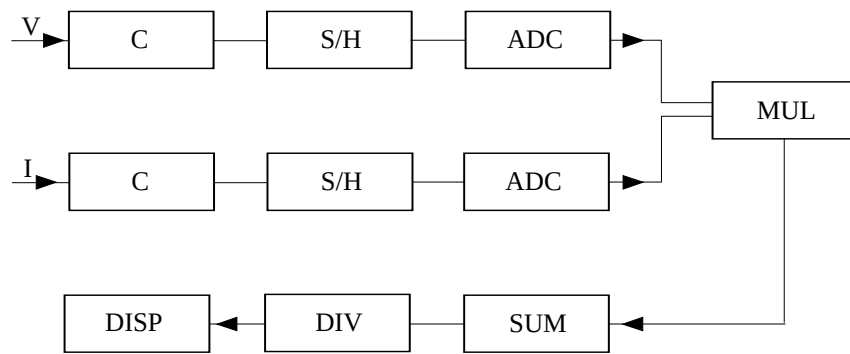


Fig.16 - Sezione di campionamento in un wattmetro digitale

I campioni uniformi del segnale d'ingresso permettono di valutare la potenza attiva come media delle sequenze di campioni di potenza istantanea p_k .

La relazione $P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$ viene approssimata in forma numerica, discretizzando la variabile (t) con $(k T_c)$, T con $N T_c$, dt con T_c e l'integrale con la sommatoria:

$$P = \frac{1}{N T_c} \sum_{k=1}^N p_k T_c = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N p_k = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N v_k i_k \quad (33)$$

Un problema è costituito dall'esatta determinazione del periodo del segnale d'ingresso e quindi del numero di campioni N da considerare ($T = N T_c$). Una stima preventiva del periodo della fondamentale viene effettuata per migliorare l'intervallo della sommatoria dell'equazione (33) e/o il periodo di campionamento al fine di ottenere un campionamento sincro.

Il periodo di campionamento può essere migliorato utilizzando un moltiplicatore di frequenza, con circuiti PLL, pilotato dal segnale di ingresso. Alternativamente, il contributo dell'errore di campionamento può essere ridotto effettuando la media su un elevato numero di periodi del segnale di ingresso.

Una strada alternativa per ottenere la potenza media consiste nel considerare le armoniche di tensione e corrente nel dominio della frequenza utilizzando la trasformata discreta di Fourier. In particolare, per migliorare l'efficienza si fa uso della FFT (Fast Fourier Transform).

2.5.5 Inserzione dei wattmetri

A prescindere dal principio di funzionamento utilizzato, il collegamento di un wattmetro su una linea monofase può essere realizzato secondo gli schemi riportati nella Fig.17.

Nella stessa Fig.17 sono disegnati anche i diagrammi fasoriali per un funzionamento in regime sinusoidale.

Negli schemi si nota che il wattmetro W presenta due coppie di morsetti:

- $(v_1$ e $v_2)$ facenti capo al circuito voltmetrico, derivato fra i conduttori di linea,
- $(i_1$ e $i_2)$ facenti capo al circuito amperometrico, attraversato dalla corrente di linea.

Siano U ed I i fasori rappresentativi della tensione e della corrente effettive sul carico.

Con riferimento alla connessione A): il circuito voltmetrico $(v_1$ e $v_2)$, che ha una resistenza propria R_v di valore elevato, è sottoposto alla tensione effettiva sul carico U e deriva dalla linea la piccola corrente $I_v = U/R_v$.

Pertanto si introduce un'approssimazione nel misurare la potenza attiva P consegnata al carico, dovuta al fatto che la corrente effettiva I sul carico non coincide esattamente con la corrente I_a sentita dal circuito amperometrico dello strumento.

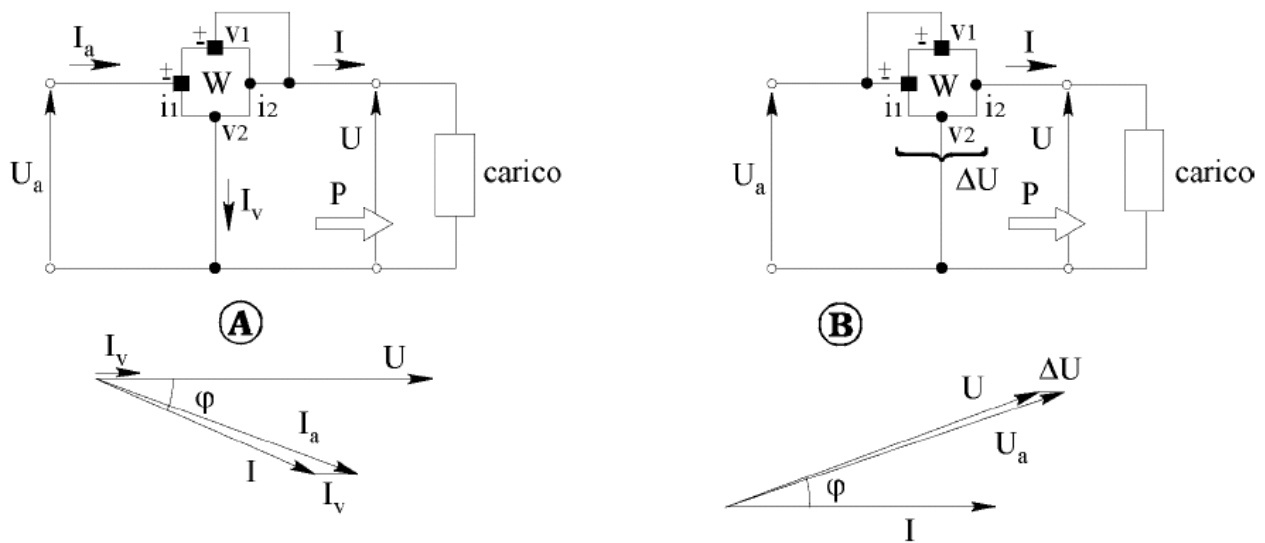


Fig.17 - Possibili connessioni per un wattmetro.

Si potrebbe rimediare a questo fatto, spostando la connessione voltmetrica a monte, come nello schema di Fig.17B. In tal caso la corrente che attraversa il circuito amperometrico coincide con la corrente I che fluisce sul carico, ma la tensione U_a misurata dallo strumento differisce da quella sul carico U della caduta di tensione ΔU ai capi del circuito amperometrico.

Questo circuito ha solitamente una resistenza propria R_a bassa e pertanto la caduta $\Delta U = R_a I$ risulta normalmente piccola.

In entrambi i casi esaminati, si commettono delle approssimazioni nella misura della potenza attiva P . La prima connessione è tuttavia preferibile quando si hanno carichi con bassa tensione ed elevata corrente (la corrente I_v risulta trascurabile rispetto alla corrente I). La seconda connessione risulta invece preferibile quando si hanno carichi con bassa corrente ed elevata tensione (la tensione ΔU risulta trascurabile rispetto alla tensione U).

I termini "alto" e "basso" hanno solo un significato qualitativo: l'obiettivo deve essere quello di minimizzare (in senso relativo) l'inevitabile perturbazione introdotta dallo strumento sul circuito sotto misura. Nella pratica i wattmetri elettronici rendono particolarmente piccoli tali effetti di carico strumentale.

In sistemi polifase, possono essere considerate diverse possibili connessioni per la misura della potenza attiva. Per quanto concerne le misure di potenza su motori asincroni, si può premettere che, per macchine ad elevata efficienza, le correnti misurabili nelle prove a vuoto possono essere una percentuale considerevole della corrente nominale, con valori fino al 50% della stessa; tale considerazione comporta una scelta preferenziale per l'inserzione dei wattmetri con voltmetrica la connessione voltmetrica a valle, ed a tale connessione si farà riferimento nel seguito. Si considera un sistema privo del conduttore di neutro.

La prima possibile connessione è quella che prevede un solo wattmetro, connesso con un centro stella artificiale, secondo al Fig. 18. Tenuto conto della necessità di non introdurre squilibri di carico, nella connessione con un solo wattmetro è necessario realizzare un centro stella artificiale mediante due resistenze R_v di valore pari alla resistenza del circuito voltmetrico del wattmetro.

Nel caso considerato, la potenza attiva totale si ottiene dalla misura dal wattmetro W_A mediante la seguente relazione, nelle succitate ipotesi di sistema sinusoidale simmetrico ed equilibrato, che esprime il prodotto scalare tra fasori di tensione e corrente:

$$P = 3W_A = 3\dot{U}_{10} \cdot \dot{I}_1 = 3U_{10} I_1 \cos \varphi \quad (34)$$

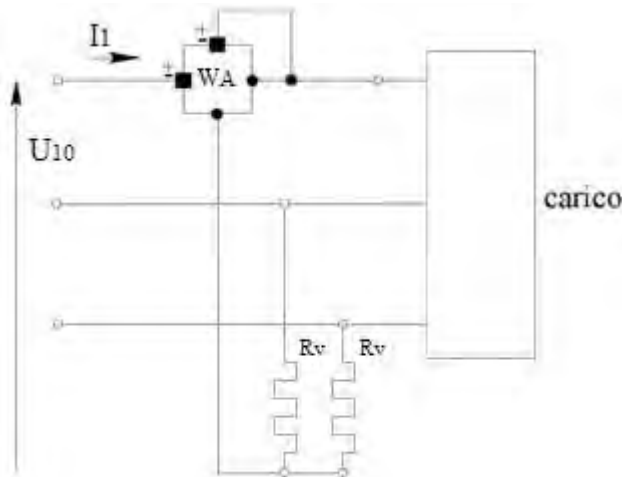


Fig.18 – Misura di potenza attiva con l’inserzione di un solo wattmetro

Nella pratica si preferisce ricorrere ad inserzioni con 2 wattmetri, secondo lo schema Aron, di seguito riportato in Fig.19

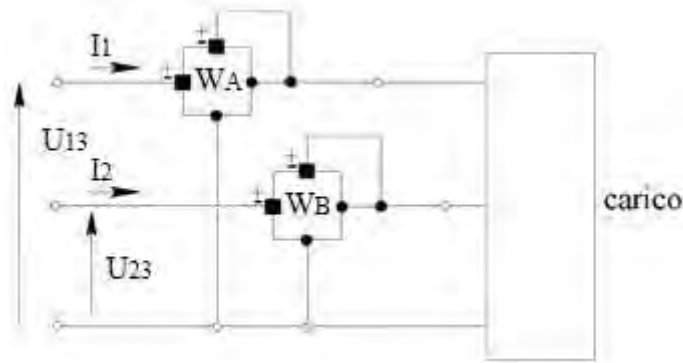


Fig.19 – Wattmetri in inserzione Aron.

La determinazione della potenza attiva totale si ottiene dalle misure ottenute dai due wattmetri, mediante la seguente relazione dei prodotti scalari tra fasori:

$$\begin{aligned} P &= W_A + W_B = \dot{U}_{13} \cdot \dot{I}_1 + \dot{U}_{23} \cdot \dot{I}_2 = (\dot{U}_{10} - \dot{U}_{30}) \cdot \dot{I}_1 + (\dot{U}_{20} - \dot{U}_{30}) \cdot \dot{I}_2 = \\ &= \dot{U}_{10} \cdot \dot{I}_1 + \dot{U}_{20} \cdot \dot{I}_2 - \dot{U}_{30} \cdot (\dot{I}_1 + \dot{I}_2) = \dot{U}_{10} \cdot \dot{I}_1 + \dot{U}_{20} \cdot \dot{I}_2 + \dot{U}_{30} \cdot \dot{I}_3 = P_1 + P_2 + P_3 \end{aligned} \quad (35)$$

A fronte di un evidente risparmio economico derivante dalla necessità di acquistare due soli wattmetri, l’inserzione Aron comporta incertezze di misura che possono essere rilevanti nelle misurazioni di carichi a bassi fattori di potenza; tali condizioni si verificano durante le misurazioni di potenza nelle prove a vuoto dei motori asincroni. Nell’inserzione Aron vengono infatti effettuati prodotti scalari tra tensioni concatenate e correnti di linea, che portano ad incrementare e ridurre rispettivamente di 30° gli angoli di sfasamento tra tensioni e correnti. Ad esempio, qualora le correnti avessero uno sfasamento prossimo a 60° rispetto alle tensioni di fase, uno dei due wattmetri misurerebbe una potenza prossima a 0, con incremento dell’incertezza di misura.

Quindi, la misura di potenza può presentare errori sensibili, con bassi valori del fattore di potenza sul carico. Infatti, se indichiamo con ϕ l’angolo di fase sul carico e con ε l’errore con cui tale angolo viene percepito dallo strumento, la potenza misurata non sarà $P=UI\cos\phi$ e l’errore assoluto commesso nella sua determinazione risulterà:

$$\delta P = UI \cos(\phi - \varepsilon) - UI \cos(\phi) = UI [\cos \phi \cdot \cos \varepsilon + \sin \phi \cdot \sin \varepsilon - \cos \phi] =$$

$$= UI [\cos \varphi \cdot (\cos \varepsilon - 1) + \sin \varphi \cdot \sin \varepsilon] \cong UI \varepsilon \sin \varphi \quad (36)$$

se $\varepsilon \ll \pi/2$

L'errore relativo risulta invece:

$$\frac{\delta P}{P} \cong \varepsilon \frac{UI \sin \varphi}{UI \cos \varphi} = \varepsilon \tan \varphi \quad (37)$$

Si osserva che, anche per piccoli errori ε sulla fase ϕ , l'errore relativo sulla potenza P può risultare consistente, quando il fattore di potenza del carico risulta troppo basso.

Si consiglia quindi di adottare sempre, durante l'esecuzione delle prove a vuoto ed a carico, l'inserzione con tre wattmetri con centro stella artificiale, in Fig.20

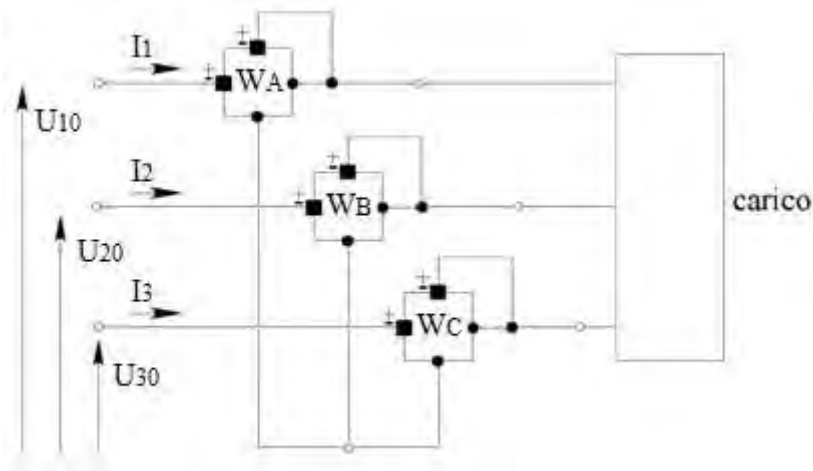


Fig.20 – Wattmetri in inserzione con centro stella artificiale

2.5.6 Specifiche tecniche per i wattmetri da utilizzare

Lo stato dell'arte nelle misure di potenza per le applicazioni considerate è oggi rappresentato da strumentazione basata su campionamento e moltiplicazione digitale di tensione e corrente. I wattmetri digitali di tale tipologia consentono di effettuare misurazioni di varie grandezze, integrando le funzioni di voltmetri ed amperometri.

Si possono ottenere precisioni di misura, in termini % del valore misurato fattore di potenza unitario, da $\pm 0,10\%$ fino a $\pm 0,02\%$ per gli strumenti più performanti. A queste quantità devono aggiungersi una quota inerente il fondo scala selezionato, e l'effetto del fattore di potenza, qualora diverso da 1. Per intervalli di frequenza compresi tra DC e 1 MHz, l'incertezza può raggiungere valori espressi come $\pm (0,02\%$ del valore di misura $+0,04\%$ del fondo scala); l'effetto del basso fattore di potenza può essere limitato ad un $0,03\%$ del valore di potenza apparente. La presenza di più fondo scala di corrente e tensione consente di ottenere misurazioni con il fondo scala più adatto; il fondo scala per le misure di potenza si considera il prodotto dei fondo scala di corrente e di tensione selezionati. Come fondo scala di corrente, si possono avere valori quali 0.5, 1, 2, 5, 10, 20 e 30 A nel caso di inserzione diretta senza trasduttori esterni, e sono disponibili livelli di fondo scala per trasduttori esterni con uscite in tensione di 50mV, 100mV, 200mV, 500mV, 1, 2, 5 e 10 V; come fondo scala per le misure di tensione si possono avere valori pari a 15, 30, 60, 100, 150, 300, 600 e 1000 V. I wattmetri digitali usualmente consentono di avere già elaborati i seguenti parametri, sia per ogni fase che totali: tensioni efficaci, correnti efficaci, potenze attive, potenze reattive, potenze apparenti, fattori di potenza, angoli di sfasamento, tensioni di picco, correnti di picco, fattori di cresta. (Modello di riferimento: Precision Power Analyzer Yokogawa WT3000).

Per incrementare la portata per le misurazioni di potenza per correnti superiori a 30 A, come nel caso degli scopi del presente documento, è possibile impiegare trasduttori di corrente esterni, che possono essere

scelti tra diverse tipologie. Utilizzando i trasduttori precedentemente descritti, di tipologia IT, è possibile effettuare misurazioni di corrente con portate di 60, 200 e 1000 A di picco, con bande passanti DC-300 kHz, e precisioni di misura dell'ordine del $\pm(0.05\%$ del valore di misura + 30 μA).

2.6 Individuazione della strumentazione per la misurazione della di resistenza elettrica degli avvolgimenti

Per la determinazione delle prestazioni dei motori asincroni, la misura della resistenza elettrica degli avvolgimenti di statore, e di rotore per macchine a rotore avvolto, è necessaria per la quantificazione delle perdite nel rame per effetto Joule, durante le prove a vuoto ed a carico. L'ordine di grandezza tipico delle resistenze degli avvolgimenti è di solito inferiore ad alcuni Ω , e presentano valori di induttanza dell'ordine delle decine di mH. Per l'esecuzione delle misurazioni, si adottano usualmente i metodi del confronto, con inserzioni a 4 morsetti, il metodo voltamperometrico ed il metodo a doppio ponte (metodo di zero) per misurazioni di elevata precisione.

Nel caso di misure di resistenza su circuiti fortemente induttivi, quali ad esempio gli avvolgimenti di motori di taglia elevata, il collegamento voltmetrico si effettua solitamente con puntali, per poter inserire lo strumento dopo che eventuali fenomeni transitori si siano conclusi; ciò riduce il rischio di misure voltmetriche durante sovratensioni transitorie. Si effettua solitamente la misura con corrente continua costante, ad esempio con il circuito in Fig. 21, eseguendo la prova in tempi molto rapidi per evitare il riscaldamento dell'avvolgimento, e contestualmente misurando la temperatura della carcassa del motore, per successivi riporti delle resistenze misurate ai valori di riferimento. Per compensare errori di misura dovuti a forze elettromotrici termoelettriche, è opportuno effettuare le misurazioni invertendo il verso della corrente applicata, mantenendone costante l'intensità; i due valori ottenuti di resistenza verranno successivamente mediati, in quanto le forze elettromotrici termoelettriche non cambiano segno al variare del verso della corrente.

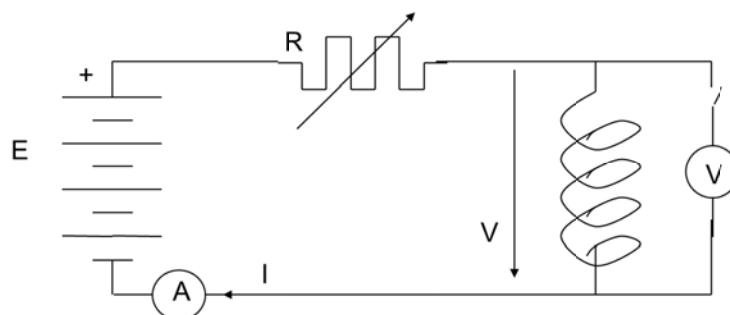


Fig.21 – Misurazione della resistenza con metodo voltamperometrico.

In circuiti trifase simmetrici in cui non sia accessibile il centro stella, quali possono essere considerati i motori asincroni trifase, si misura il valore della resistenza R_m fra due terminali di linea. Qualunque sia lo schema di collegamento, è possibile comunque riportare i dati misurati al valore della stella o del triangolo equivalente con le relazioni, in accordo con Fig.22:

$$R_Y = \frac{1}{2} R_m ; \quad (38)$$

$$R_\Delta = \frac{3}{2} R_m ; \quad (39)$$

La potenza dissipata, data una terna simmetrica di correnti di linea di valore I, è:

$$P = 3R_Y I^2 = 3R_\Delta \left(\frac{I}{\sqrt{3}} \right)^2 = \frac{3}{2} R_m I^2 \quad (40)$$

Se le resistenze misurate tra le differenti coppie di morsetti risultano poco diverse, conviene assumere per R_m la media delle tre misurazioni.

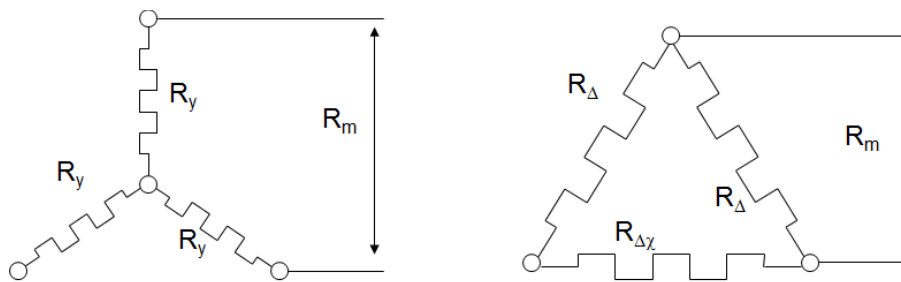


Fig.22 – Valore della resistenza di misura in base alla connessione degli avvolgimenti

Data la dipendenza della resistenza di un conduttore dalla sua temperatura, il riporto a valori di riferimento diversi da quello al momento della misurazione si può effettuare con la relazione seguente:

$$R_f = R_m \frac{\frac{1}{a} + t_f}{\frac{1}{a} + t_m} = R_m \left(1 + \frac{t_f - t_m}{\frac{1}{a} + t_m} \right) \quad (41)$$

dove R_m è il valore di resistenza misurato alla temperatura t_m , t_f è la temperatura di riferimento ad a è il coefficiente di variazione della resistività del materiale in funzione della temperatura.

2.6.1 Specifiche tecniche per i gli strumenti ohmmetrici da utilizzare

La misurazione delle resistenze degli avvolgimenti dei motori considerati richiede una stima dell'ordine di grandezza delle stesse; si può considerare un intervallo dai 200 mΩ per i motori di taglia maggiore, fino a valori di 8 Ω per motori di taglia minore. La norma IEC 60034-2-1 [9] prescrive per la misurazione della resistenza degli avvolgimenti l'impiego di strumentazione di classe 0,2% del fondo scala o migliore. Per la misurazione delle resistenze degli avvolgimenti di macchine elettriche sono disponibili sul mercato microhmometri di elevate prestazioni, che permettono di effettuare misurazioni di resistenze fino a portate dell'ordine di 5 mΩ, con risoluzione 0,1 μΩ con precisione +/- (0.05% del valore di misura + 1 μΩ). Si tratta di strumenti in grado di effettuare la misura della resistenza in modalità voltamperometrica, con inserzione a 4 morsetti, e compatibili con circuiti ad elevata reattanza induttiva, in serie alla resistenza da misurare. Le misurazioni possono essere eseguite con valori di corrente continua fino alla decina di ampere, con la possibilità di impostare valori di temperatura di riferimento per diversi materiali conduttori in accordo con la (19).

Per le misurazioni di resistenza considerate, si può optare per microhmometri con i seguenti fondo scala: 1) 250.00 mΩ, risoluzione 10 μΩ, precisione +/- (0.05% del valore di misura + 30 μΩ); 2) 2500.0 mΩ, risoluzione 0,1 mΩ, precisione +/- (0.05% del valore di misura + 0,3 mΩ); 3) 25.000 Ω, risoluzione 1 mΩ, precisione +/- (0.05% del valore di misura + 3 mΩ) (Modello di riferimento: Chauvin Arnoux CA microhmmetro CA 6250).

2.7 Individuazione della strumentazione per la misurazione della temperatura.

La misurazione della temperatura ha un ruolo fondamentale nella procedura di determinazione del rendimento dei motori asincroni [41]. Le misurazioni di temperatura vengono effettuate per determinare la temperatura del motore a freddo, prima cioè dell'esecuzione di qualsiasi prova, in modo da poter correlare a tale temperatura i valori di resistenza degli avvolgimenti; viene usualmente misurata la temperatura di inizio e fine prova, sulla carcassa, durante le prove a vuoto ed a carico variabile, per verificare che durante le stesse non vi siano apprezzabili effetti di variazione di temperatura che potrebbero rendere non significativo il valore delle resistenze misurate a fine prova. Tali valori di resistenza sono utilizzati per l'elaborazione del rendimento. Inoltre è necessario misurare la temperatura del fluido di raffreddamento del motore, per effettuare il riporto delle resistenze e dello scorrimento rispetto ad un valore convenzionale di temperatura, di solito 25°C.

La misurazione della temperatura del motore a freddo può essere effettuata con sonde termometriche a contatto, quali termocoppie o termoresistenze; sistemi radiometrici possono essere utilizzati, ma

richiedono accortezza nella determinazione dell'emissività della superficie della carcassa, valore dipendente dal tipo di trattamento superficiale e/o verniciatura. La misurazione della temperatura della carcassa del motore durante le prove richiede l'individuazione di un unico punto di misura, che potrebbe essere individuato sullo scudo opposto alla ventola di raffreddamento nei motori autoventilati; poiché la temperatura superficiale della carcassa di un motore presenta variazioni significative, la misurazione della temperatura sulla superficie deve essere effettuata sullo stesso punto. La misura della temperatura del fluido di raffreddamento può essere effettuata con strumenti quali termoigrometri, da collocare in prossimità dell'aspirazione dell'aria per motori raffreddati in aria, o la realizzazione di pozzetti per sonde termometriche nel circuito di raffreddamento, sempre in prossimità dell'aspirazione della pompa di circolazione del fluido. Anche se non espressamente richiesto dalle norme, il monitoraggio dell'umidità relativa dell'aria di raffreddamento è consigliabile.

2.7.1 Specifiche tecniche per i gli strumenti termometrici da utilizzare

La norma IEC 60034-2-1 [9] prescrive per la misurazione della temperatura l'impiego di strumentazione con precisione di $\pm 1^\circ\text{C}$ o migliore.

Per l'esecuzione di misurazioni contemporanee su più punti della carcassa di un motore possono essere impiegati data logger, equipaggiati con sonde a termocoppia o a termoresistenza; tali apparati possono essere collegati ad un numero elevato di trasduttori di temperatura, tipicamente alcune decine, (da 20 a 60 canali). La scansione dei canali è funzione della risoluzione che si vuole ottenere, è varia tipicamente da 0,03 s per canale per misure a bassa risoluzione (visualizzazione a 4½ digit), fino 0,5 s per canale per misure ad elevata risoluzione (visualizzazione a 6½ digit).

Le misurazioni più precise si possono ottenere utilizzando sensori termoresistivi a 4 fili, quali i Pt 100, con modalità ad elevata risoluzione. Per il campo di applicazione di interesse, l'espressione della precisione di misura va da $0,038^\circ\text{C}$ a 0°C fino a $0,078^\circ\text{C}$ a 300°C , con risoluzione $0,001^\circ\text{C}$ e valori intermedi ottenibili con interpolazione lineare.

Con l'adozione di termocoppie le incertezze aumentano, poiché è necessario tenere conto anche della compensazione del giunto freddo la cui temperatura di riferimento deve essere misurata. Per il campo di applicazione di interesse, con termocoppie di tipo T, l'espressione della precisione di misura va da $0,10^\circ\text{C}$ a 0°C fino a $0,08^\circ\text{C}$ a 200°C , con risoluzione $0,01^\circ\text{C}$ e valori intermedi ottenibili con interpolazione lineare, se si impiega un riferimento esterno per temperatura di riferimento per il quale si deve considerare un'ulteriore contributo di incertezza. Se si utilizza il riferimento interno agli strumenti, la precisione diminuisce, andando da $0,65^\circ\text{C}$ a 0°C fino a $0,47^\circ\text{C}$ a 200°C , con risoluzione $0,01^\circ\text{C}$ e valori intermedi ottenibili con interpolazione lineare. (Modello di riferimento: Fluke 2638A Hydra Series III Data Acquisition System).

2.8 Individuazione della strumentazione per la misurazione della velocità angolare

Le misurazioni della velocità angolare sono necessarie durante l'esecuzione delle prove a vuoto ed a carico variabile, per determinare il valore di scorrimento del motore e come fattore per la determinazione della potenza meccanica erogata; tale potenza è da determinare con precisione anche nelle metodologie di determinazione del rendimento per via indiretta, mediante valutazione delle perdite totali.

La misurazione della velocità angolare nella prova a vuoto è da eseguirsi preferibilmente senza il calettamento di trasduttori sull'albero del motore, per evitare di incrementare le perdite per attrito e ventilazione; sono da preferire metodi senza contatto, mediante stroboscopi o tachimetri senza contatto. Assolutamente da evitare è l'effettuazione della misurazione della velocità angolare utilizzando un banco dinamometrico a carico nullo, in quanto lo scorrimento misurato risulterebbe maggiorato a seguito di erogazione di una maggiore coppia di attrito e ventilazione dovuta al trascinarsi di elementi del banco collegati all'albero.

La misurazione della velocità durante le prove a carico può essere effettuata mediante trasduttori usualmente integrati nel banco dinamometrico, tipicamente encoder, dinamo tachimetriche o sensori ottici con profili scanalati ricavati sul trasduttore di coppia [37, 47, 48, 49, 50].

2.8.1 Specifiche tecniche per i gli strumenti tachimetrici da utilizzare

Per la misurazione della velocità rotazionale a vuoto, si possono utilizzare tachimetri laser ad uso manuale, che possono garantire misure di velocità tipicamente nell'intervallo 5-20000 rpm con precisioni dell'ordine di $\pm 0,01\%$, con risoluzioni da 0,001 a 1 rpm. La IEC 60034-2-1 [9] prescrive una precisione di ± 1 rpm; considerando che il valore massimo di velocità rotazionale è 3000 rpm, con la scelta di trasduttori di tali prestazioni si può avere una precisione di $\pm 0,3$ rpm, in modo da soddisfare le specifiche normative. (Modello di riferimento: tachimetro laser manuale PCE-155).

La misurazione della velocità durante le prove a carico può essere effettuata mediante trasduttori usualmente integrati nel banco dinamometrico. Anche per questi trasduttori è possibile ottenere misure di velocità tipicamente nell'intervallo 5-20000 rpm con precisioni dell'ordine di $\pm 0,01\%$, con risoluzioni da 0,001 a 1 rpm. (Modello di riferimento: Magtrol 3411 Torque display in abbinamento a trasduttori di coppia Magtrol serie TM 300).

2.9 Individuazione della strumentazione per la misurazione della coppia.

Particolare attenzione richiedono le misurazioni di coppia, durante le prove a carico variabile. Possono essere utilizzati torsimetri rotanti del tipo a trasformatore differenziale, da collegarsi tra motore e carico; il trasduttore è costituito da due cilindri concentrici, calettati su l'albero da ogni lato della zona di deformazione, e da due avvolgimenti concentrici fissati all'alloggiamento del trasduttore. L'avvolgimento primario è alimentato a corrente alternata, a frequenza dell'ordine dei kHz; se una coppia viene applicata, la deformazione dei due cilindri induce nel secondo avvolgimento una f.e.m. proporzionale alla coppia stessa, che può essere convertita in un segnale di tensione continua, con polarità dipendente dal verso della coppia, dell'ordine di alcuni volt. Usualmente sono integrati in tale tipologia di trasduttori anche dei sensori di velocità di tipo induttivo, mediante la realizzazione di un profilo scanalato direttamente sul cilindro esterno e l'adozione di un sensore di prossimità. Questa tipologia di trasduttori di coppia e velocità è attualmente la più performante tra quelle disponibili sul mercato, in quanto non presenta fenomeni apprezzabili di offset dovuti alla temperatura, perché usualmente sono presenti circuiti di compensazione; hanno inoltre elevata banda passante, che li rende adatti anche a misure in transitorio.

Altra tipologia di trasduttori sono quelli basati su elementi estensimetrici, utilizzati per la realizzazione di celle di carico, ed i sensori magnetoelastici [37, 47, 48,].

La scelta dei trasduttori di coppia, per l'esecuzione delle prove con la precisione ottimale, richiede considerazioni che si basano sull'elaborazione dei seguenti parametri:

- valore nominale di coppia del motore, determinabile a partire dai valori di frequenza, potenza e velocità di rotazione nominali e dal numero di poli;
- valore massimo di coppia da applicare, come richiesto dalla norma IEC 60034-2-1 [9] al paragrafo 6.4.4.2 durante la prova a carico variabile;
- classe di precisione richiesta dalla norma IEC 60034-2-1 [9] per i trasduttori di coppia;
- caratteristiche dei trasduttori di coppia disponibili sul mercato.

Si ricorda che, la norma IEC 60034-2-1 [9] recita all'articolo 5.5.1:

“Dal momento che la precisione dello strumento è generalmente espressa in percentuale del fondo scala, il campo di misura da utilizzare per gli strumenti scelti deve essere piccolo per quanto possibile.

NOTA Per gli strumenti analogici i valori da leggere dovrebbero trovarsi nel terzo superiore del campo di misura dello strumento.”

Preliminarmente si osserva che la velocità massima di rotazione dei motori sotto prova è di circa 3000 rpm; tale valore è compatibile con tutti i trasduttori di coppia che verranno considerati nel presente paragrafo.

Per la scelta dei trasduttori ottimali per l'esecuzione delle misure di coppia, si può quindi seguire la seguente procedura, recependo il suggerimento della nota sul funzionamento dei trasduttore nel terzo superiore, cioè almeno a $2/3$ del fondo scala:

- 1) determinazione della coppia nominale del motore da provare;
- 2) determinazione della coppia massima di prova, considerando un incremento del 50%; si determina così un fondo scala ideale per il trasduttore di coppia, specifico per il motore da provare, e tale che la coppia nominale si collochi a $2/3$ del fondo scala;

- 3) individuazione del trasduttori di coppia, con classe di precisione 0.2% del fondo scala o migliore, con fondo scala il più prossimo al valore individuato al punto 2 del presente elenco;
- 4) calcolo del punto di lavoro in % del fondo al scala del trasduttore individuato, per valore di coppia nominale;
- 5) verifica che tale valore sia almeno 2/3 del fondo scala; in caso di esito positivo la scelta del trasduttore è conclusa.

se tale condizione non è verificata, è possibile effettuare una riduzione del valore massimo di coppia al punto 2 del presente elenco per individuare un trasduttore di fondo scala minore, in accordo comunque con quanto prescritto dalla norma IEC 60034-2-1 [9], all'articolo 6.4.4.2 Prova a carichi variabili (curva di carico), che recita:

“Applicare il carico variabile alla macchina in modo da ottenere sei differenti punti di funzionamento. Quattro punti di carico dovrebbero essere scelti in modo da essere egualmente distribuiti tra non meno del 25 % e fino al 100 % incluso del carico nominale. Gli ultimi due punti di carico, approssimativamente distribuiti equamente, dovrebbero essere scelti al di sopra del 100 % e non oltre il 150 % del carico nominale.”

Una volta individuato il trasduttore più adatto per ciascuna taglia di motore da provare, si verificherà la possibile compatibilità dei trasduttori per più taglie, in modo da definire il set completo di trasduttori da acquistare.

2.9.1 Specifiche tecniche per gli strumenti torsionometrici da utilizzare

In riferimento alla scelta di trasduttori di coppia che siano allo stato dell'arte, è consigliabile considerare famiglie di trasduttori di precisione migliore di 0.2% del fondo scala; attualmente, i trasduttori migliori attualmente reperibili sul mercato, per i valori di coppia considerati nel presente documento, sono in classe 0,1% per coppie fino a 100 Nm (modelli di riferimenti: Magtrol serie TM 300, HBM serie T5) ed in classe 0,03% per coppie superiori (modelli di riferimenti: HBM serie T12).

La scelta di un trasduttore in classe superiore consente di ottenere evidenti vantaggi in termini di scelta del fondo scala. Infatti l'errore a 2/3 del fondo scala di un trasduttore in classe 0.2 è pari all'errore ad 1/3 del fondo scala di un trasduttore in classe 0.1; la scelta di trasduttori con classe di precisione migliore consente di effettuare misure più precise per valori elevati di coppia, e di acquistare un numero minore di trasduttori, per le diverse taglie di motore da provare.

Si riportano di seguito le tabelle per la scelta ottimale dei trasduttori di coppia; analizzando le caratteristiche dei trasduttori di coppia presenti sul mercato, si osserva che, per il campo di applicazione considerato nel presente documento, si possono reperire trasduttori caratterizzate da sequenze di fondo scala nelle sequenze 5, 10, 20, 50, 100, 200 Nm.

In Tabella 15 sono riportati i valori di coppia da misurare per motori a 2 poli, e sono indicati i valori % del fondo scala al quale i trasduttori funzionerebbero, a seconda della scelta di trasduttori dimensionati considerando il valore nominale di coppia e coppia maggiorata del 50%, per lo svolgimento di prove a carico variabile; si considerano in prima analisi trasduttori in classe 0,2%.

Si osserva che per solo i motori di taglia 1,1 , 2,2, 4, 5,5 e 11 kW possono essere verificati con funzionamento dei trasduttori oltre i 2/3 del fondo scala; inoltre, i valori massimi misurabili sono compatibili per lo svolgimento di prove a carico variabile con coppie fino al 150% solo per il motori di taglia 0,75, 1,5, 3, 7,5 e 15. Sono quindi in contrasto le condizioni di funzionamento ad almeno 2/3 di fondo scala e la possibilità di arrivare al 150% della coppia nominale.

In Tabella 16 si considerano trasduttori adatti a prove fino al 150% della coppia nominale; si osservano gli incrementi di errore % nel funzionamento a coppia nominale.

Se si effettua la scelta di trasduttori di precisione migliore, ad esempio 0,1% del fondo scala, si osserva che si possono ottenere gli stessi errori % con valori di coppia minori; in Fig. 23 sono riportati gli andamenti degli errori % in funzione del rapporto tra coppia misurata e coppia di fondo scala.

Tabella 15 – Portate ed errori per trasduttori di coppia in classe 0.2% per motori a due poli, portata dimensionata sul valore nominale di coppia del motore

Potenza nominale [kW]	Coppia Nominale 2 poli [Nm]	Portata del trasduttore [Nm]	Coppia nominale % del fondo scala	Errore % a coppia nominale (classe 0.2%)	Coppia massima misurabile % del valore nominale
0,75	2,65	5,00	53,05	0,38	188,50
1,10	3,89	5,00	77,81	0,26	128,52
1,50	5,31	10,00	53,05	0,38	188,50
2,20	7,78	10,00	77,81	0,26	128,52
3,00	10,61	20,00	53,05	0,38	188,50
4,00	14,15	20,00	70,74	0,28	141,37
5,50	19,45	20,00	97,26	0,21	102,82
7,50	26,53	50,00	53,05	0,38	188,50
11,00	38,90	50,00	77,81	0,26	128,52
15,00	53,05	100,00	53,05	0,38	188,50

Il miglioramento di classe di precisione consente di considerare le misure di coppia maggiori di 1/3 del fondo scala in classe 0,1 come eseguite al di sopra di 2/3 del fondo scala in classe 0,2.

Nella Tabella 17 seguente si considerano trasduttori adatti a prove fino al 150% della coppia nominale, in classe 0,1; l'unico motore per il quale la scelta del trasduttore non è soddisfacente è il 4 kW. E' però possibile optare per il trasduttore da 20 Nm di fondo scala, limitando la coppia massima di prova al 141% della coppia nominale durante le prove a carico variabile.

Per i motori a due poli, sono individuati il seguente insieme di trasduttori di coppia , in classe 0,1% del fondo scala, corrispondenti a valori di fondo scala 5, 10, 20, 50 e 100 Nm.

Tabella 16 – Portate ed errori per trasduttori di coppia in classe 0.2% per motori a due poli, portata dimensionata sul 150% del valore di coppia nominale del motore

Potenza nominale [kW]	Coppia Nominale 2 poli	Coppia maggiorata del 50%	Portata del trasduttore per prove fino al 150% [Nm]	Coppia nominale % del fondo scala	Errore % a coppia nominale (classe 0.2%)
0,75	2,65	3,98	5,00	53,05	0,38
1,10	3,89	5,84	10,00	38,90	0,51
1,50	5,31	7,96	10,00	53,05	0,38
2,20	7,78	11,67	20,00	38,90	0,51
3,00	10,61	15,92	20,00	53,05	0,38
4,00	14,15	21,22	50,00	28,29	0,71
5,50	19,45	29,18	50,00	38,90	0,51
7,50	26,53	39,79	50,00	53,05	0,38
11,00	38,90	58,36	100,00	38,90	0,51
15,00	53,05	79,58	100,00	53,05	0,38

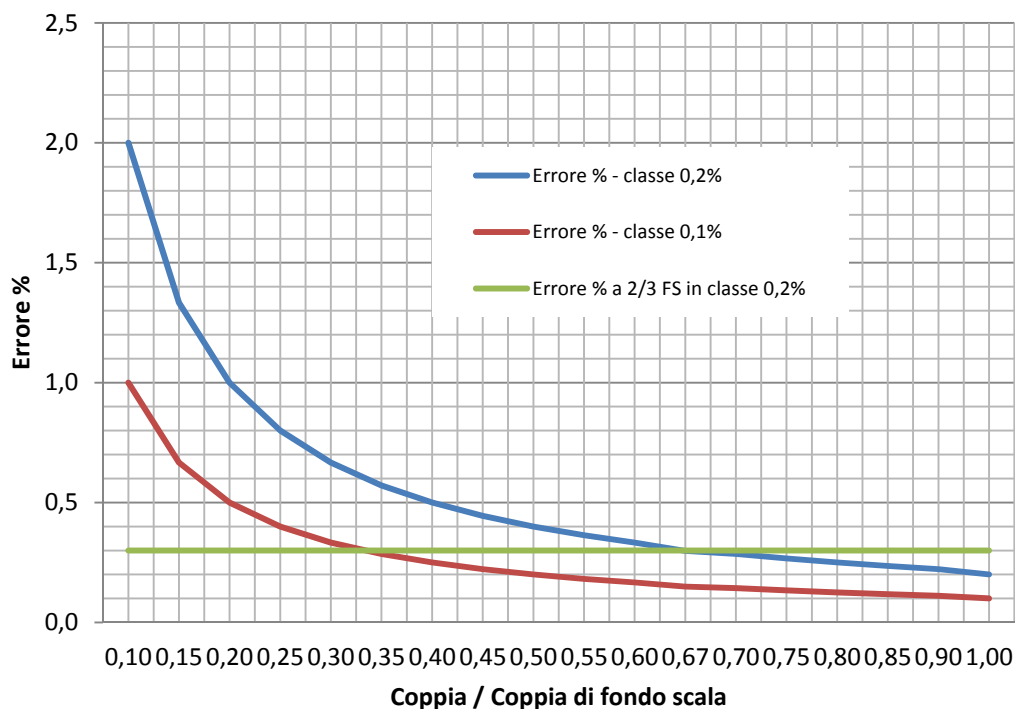


Fig.23 –Confronto tra errori % per trasduttori di coppia in classe 0,1% e 0,2% del fondo scala.

Per i motori da 4 poli e da 6 poli si posso svolgere le medesime considerazioni; riportiamo di seguito le Tabelle 18-23 con i dati, analogamente al caso dei motori a 2 poli.

L'unico motore a quattro poli per il quale la scelta del trasduttore non è soddisfacente è il 2,2 kW. La scelta di utilizzare un trasduttore da 20 Nm di fondo scala risulta però limitare la coppia massima di prova al 128%.

Per i motori a quattro poli, sono individuati il seguente insieme di trasduttori di coppia , in classe 0,1% del fondo scala, corrispondenti a valori di fondo scala 10, 20, 50, 100 e 200 Nm.

Tabella 17 – Portate ed errori per trasduttori di coppia in classe 0.1% per motori a due poli, portata dimensionata sul 150% del valore di coppia nominale del motore

Potenza nominale [kW]	Coppia Nominale 2 poli [Nm]	Coppia maggiorata del 50% [Nm]	Portata del trasduttore per prove fino al 150% [Nm]	Coppia nominale % del fondo scala	Errore % a coppia nominale (classe 0.1%)	Coppia % del fondo scala a pari errore in classe 0.2%
0,75	2,65	3,98	5,00	53,05	0,19	106,10
1,10	3,89	5,84	10,00	38,90	0,26	77,81
1,50	5,31	7,96	10,00	53,05	0,19	106,10
2,20	7,78	11,67	20,00	38,90	0,26	77,81
3,00	10,61	15,92	20,00	53,05	0,19	106,10
4,00	14,15	21,22	50,00	28,29	0,35	56,59
5,50	19,45	29,18	50,00	38,90	0,26	77,81
7,50	26,53	39,79	50,00	53,05	0,19	106,10
11,00	38,90	58,36	100,00	38,90	0,26	77,81
15,00	53,05	79,58	100,00	53,05	0,19	106,10

Tabella 18 – Portate ed errori per trasduttori di coppia in classe 0.2% per motori a quattro poli, portata dimensionata sul valore nominale di coppia del motore

Potenza nominale [kW]	Coppia Nominale 4 poli [Nm]	Portata del trasduttore [Nm]	Coppia nominale % del fondo scala	Errore % a coppia nominale (classe 0.2%)	Coppia massima misurabile % del valore nominale
0,75	5,31	10,00	53,05	0,38	188,50
1,10	7,78	10,00	77,81	0,26	128,52
1,50	10,61	20,00	53,05	0,38	188,50
2,20	15,56	20,00	77,81	0,26	128,52
3,00	21,22	50,00	42,44	0,47	235,62
4,00	28,29	50,00	56,59	0,35	176,71
5,50	38,90	50,00	77,81	0,26	128,52
7,50	53,05	100,00	53,05	0,38	188,50
11,00	77,81	100,00	77,81	0,26	128,52
15,00	106,10	200,00	53,05	0,38	188,50

I motori a quattro poli per il quale la scelta del trasduttore non è soddisfacente sono l'1,5 ed il 15 kW. La scelta di utilizzare trasduttori da 20 e 200 Nm di fondo scala risulta però limitare la coppia massima di prova al 125%.

Per i motori a quattro poli, sono individuati il seguente insieme di trasduttori di coppia, in classe 0,1% del fondo scala, corrispondenti a valori di fondo scala 20, 50, 100, 200 e 500 Nm.

Vengono di seguito riportate le Tabelle 24-26, riassuntive per l'identificazione dei trasduttori ottimali per ciascuna taglia di motore da verificare; i trasduttori sono classificati come sottodimensionati, sovradimensionati, le soddisfacenti condizioni di funzionamento a 2/3 del fondo scala e/o misura fino al 150% della coppia nominale.

Tabella 19 – Portate ed errori per trasduttori di coppia in classe 0.2% per motori a quattro poli, portata dimensionata sul 150% del valore di coppia nominale del motore

Potenza nominale [kW]	Coppia Nominale 4 poli [Nm]	Coppia maggiorata del 50% [Nm]	Portata del trasduttore per prove fino al 150% [Nm]	Coppia nominale % del fondo scala	Errore % a coppia nominale (classe 0.2%)
0,75	5,31	7,96	10,00	53,05	0,38
1,10	7,78	11,67	20,00	38,90	0,51
1,50	10,61	15,92	20,00	53,05	0,38
2,20	15,56	23,34	50,00	31,12	0,64
3,00	21,22	31,83	50,00	42,44	0,47
4,00	28,29	42,44	50,00	56,59	0,35
5,50	38,90	58,36	100,00	38,90	0,51
7,50	53,05	79,58	100,00	53,05	0,38
11,00	77,81	116,71	200,00	38,90	0,51
15,00	106,10	159,15	200,00	53,05	0,38

Tabella 20 – Portate ed errori per trasduttori di coppia in classe 0.1% per motori a quattro poli, portata dimensionata sul 150% del valore di coppia nominale del motore

Potenza nominale [kW]	Coppia Nominale 4 poli [Nm]	Coppia maggiorata del 50% [Nm]	Portata del trasduttore per prove fino al 150% [Nm]	Coppia nominale % del fondo scala	Errore % a coppia nominale (classe 0.1%)	Coppia % del fondo scala a pari errore in classe 0.2%
0,75	5,31	7,96	10,00	53,05	0,19	106,10
1,10	7,78	11,67	20,00	38,90	0,26	77,81
1,50	10,61	15,92	20,00	53,05	0,19	106,10
2,20	15,56	23,34	50,00	31,12	0,32	62,25
3,00	21,22	31,83	50,00	42,44	0,24	84,88
4,00	28,29	42,44	50,00	56,59	0,18	113,18
5,50	38,90	58,36	100,00	38,90	0,26	77,81
7,50	53,05	79,58	100,00	53,05	0,19	106,10
11,00	77,81	116,71	200,00	38,90	0,26	77,81
15,00	106,10	159,15	200,00	53,05	0,19	106,10

Tabella 21 – Portate ed errori per trasduttori di coppia in classe 0.2% per motori a sei poli, portata dimensionata sul valore nominale di coppia del motore

Potenza nominale [kW]	Coppia Nominale 6 poli [Nm]	Portata del trasduttore [Nm]	Coppia nominale % del fondo scala	Errore % a coppia nominale (classe 0.2%)	Coppia massima misurabile % del valore nominale
0,75	7,96	10,00	79,60	0,25	125,63
1,10	11,67	20,00	58,35	0,34	171,38
1,50	15,92	20,00	79,60	0,25	125,63
2,20	23,34	50,00	46,68	0,43	214,22
3,00	31,83	50,00	63,66	0,31	157,08
4,00	42,44	50,00	84,88	0,24	117,81
5,50	58,36	100,00	58,36	0,34	171,35
7,50	79,58	100,00	79,58	0,25	125,66
11,00	116,71	200,00	58,36	0,34	171,36
15,00	159,15	200,00	79,58	0,25	125,67

Usualmente, i trasduttori di coppia ad elevate prestazioni presentano limiti di funzionamento superiori al valore nominale, tipicamente con sovraccarico al 200% del valore nominale, e fino al 400% come limite di coppia sopportabile senza danneggiamento; il valore di precisione è garantito fino al valore nominale. Vista la possibilità di sovraccaricare i trasduttori, è possibile utilizzare simultaneamente due trasduttori di portate differenti, in modo da poter garantire una migliore precisione nella misurazione della coppia durante l'esecuzione di prove con carico variabile. Tale approccio consente di migliorare la precisione.

Ad esempio, per le prove sui motori da 2,2 kW a quattro poli, è possibile utilizzare simultaneamente il trasduttore da 20 Nm e da 50 Nm, utilizzando il trasduttore di coppia da 20 Nm per prove fino al 128% del valore nominale, e quello da 50 Nm per coppie superiori. In Fig. 24 è riportato il confronto tra le curve di errore del trasduttore da 50 Nm e la curva ottenuta utilizzando il trasduttore da 20 Nm fino al suo fondo scala, e per valori superiori il trasduttore da 50 Nm.

Tabella 22 – Portate ed errori per trasduttori di coppia in classe 0.2% per motori a sei poli, portata dimensionata sul 150% del valore di coppia nominale del motore

Potenza nominale [kW]	Coppia Nominale 6 poli [Nm]	Coppia maggiorata del 50% [Nm]	Portata del trasduttore per prove fino al 150% [Nm]	Coppia nominale % del fondo scala	Errore % a coppia nominale (classe 0.2%)
0,75	7,96	11,94	20,00	39,80	0,50
1,10	11,67	17,51	20,00	58,35	0,34
1,50	15,92	23,88	50,00	31,84	0,63
2,20	23,34	35,01	50,00	46,68	0,43
3,00	31,83	47,75	50,00	63,66	0,31
4,00	42,44	63,66	100,00	42,44	0,47
5,50	58,36	87,54	100,00	58,36	0,34
7,50	79,58	119,37	200,00	39,79	0,50
11,00	116,71	175,07	200,00	58,36	0,34
15,00	159,15	238,73	500,00	31,83	0,63

Tabella 23 – Portate ed errori per trasduttori di coppia in classe 0.1% per motori a sei poli, portata dimensionata sul 150% del valore di coppia nominale del motore

Potenza nominale [kW]	Coppia Nominale 6 poli [Nm]	Coppia maggiorata del 50% [Nm]	Portata del trasduttore per prove fino al 150% [Nm]	Coppia nominale % del fondo scala	Errore % a coppia nominale (classe 0.1%)	Coppia % del fondo scala a pari errore in classe 0.2%
0,75	7,96	11,94	20,00	39,80	0,25	79,60
1,10	11,67	17,51	20,00	58,35	0,17	116,70
1,50	15,92	23,88	50,00	31,84	0,31	63,68
2,20	23,34	35,01	50,00	46,68	0,21	93,36
3,00	31,83	47,75	50,00	63,66	0,16	127,32
4,00	42,44	63,66	100,00	42,44	0,24	84,88
5,50	58,36	87,54	100,00	58,36	0,17	116,72
7,50	79,58	119,37	200,00	39,79	0,25	79,58
11,00	116,71	175,07	200,00	58,36	0,17	116,71
15,00	159,15	238,73	500,00	31,83	0,31	63,66

Tabella 24 - Abbinamenti ottimali tra motori a 2 poli e trasduttori di coppia.

Motori a 2 poli Potenza nominale [kW]	Portata del trasduttore classe di coppia ottimale in classe 0,1 % [Nm]						
	5	10	20	50	100	200	500
0,75							
1,10							
1,50							
2,20							
3,00							
4,00							
5,50							
7,50							
11,00							
15,00							

In Fig.25 sono riportati gli andamenti degli errori ottenibili con i trasduttori da 5 a 500 Nm, e l'andamento della curva di errore minima, ottenibile impiegando trasduttori di portata adiacente, nel rispetto del limite di sovraccaricabilità dei singoli trasduttori.

Tabella 25 - Abbinamenti ottimali tra motori a 4 poli e trasduttori di coppia.

Motori a 4 poli Potenza nominale [kW]	Portata del trasduttore classe di coppia ottimale in classe 0,1 % [Nm]						
	5	10	20	50	100	200	500
0,75							
1,10							
1,50							
2,20							
3,00							
4,00							
5,50							
7,50							
11,00							
15,00							

Tabella 26 - Abbinamenti ottimali tra motori a 6 poli e trasduttori di coppia.

Motori a 6 poli Potenza nominale [kW]	Portata del trasduttore classe di coppia ottimale in classe 0,1 % [Nm]						
	5	10	20	50	100	200	500
0,75							
1,10							
1,50							
2,20							
3,00							
4,00							
5,50							
7,50							
11,00							
15,00							

legenda	
Soddisfa le condizioni di funzionamento a 2/3 del fondo scala e misura fino al 150% della coppia nominale	
Soddisfa solo la condizione di misura fino al 150% della coppia nominale	
Soddisfa solo la condizioni di funzionamento a 2/3 del fondo scala	
Sovradimensionato	
Sottodimensionato	

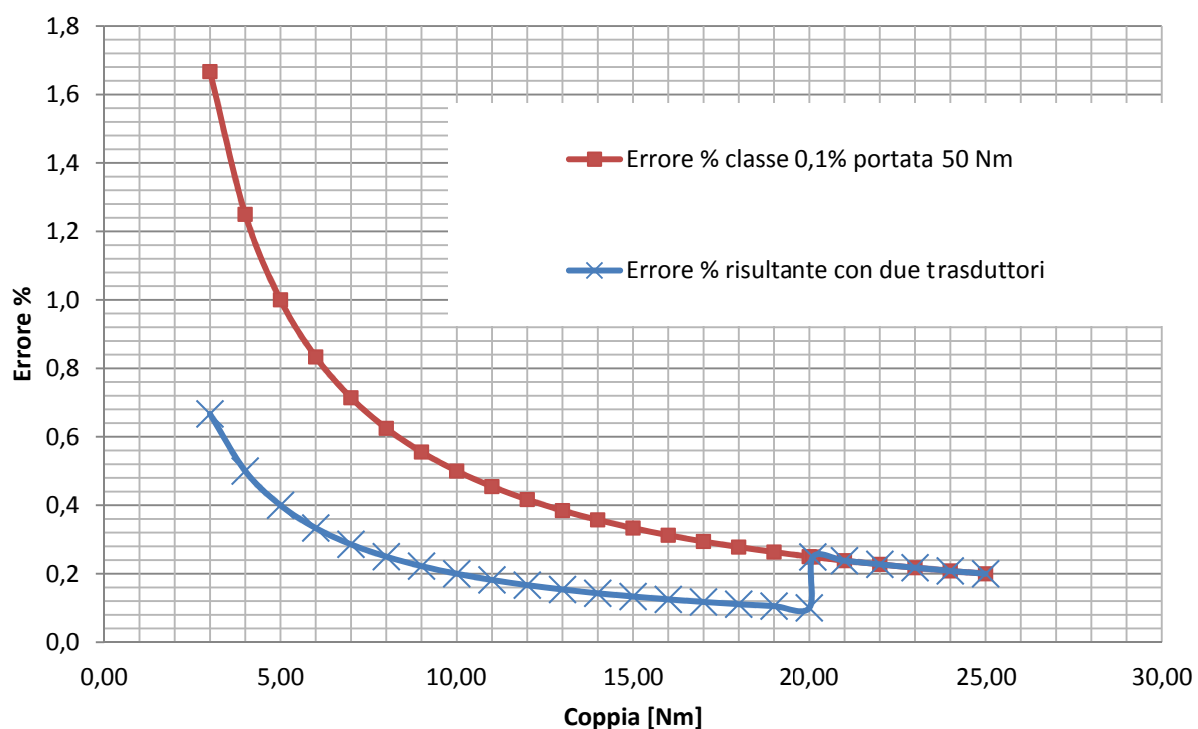


Fig. 24 confronto tra le curve di errore del trasduttore da 50 Nm e la curva ottenuta utilizzando il trasduttore da 20 Nm

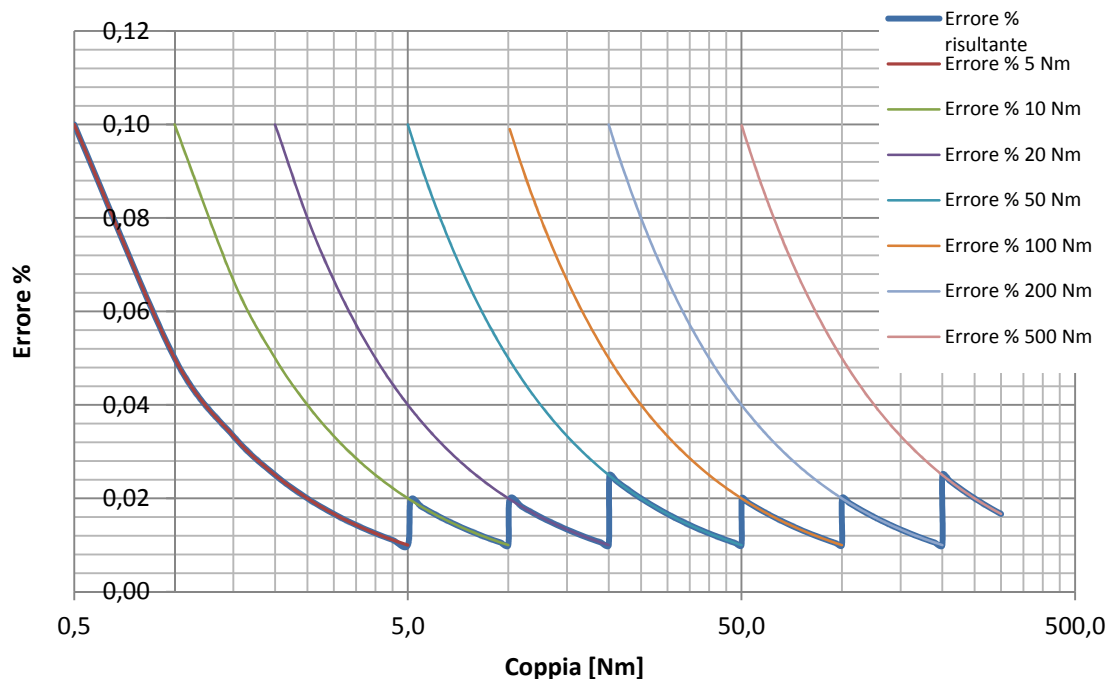


Fig.25 –Andamenti degli errori ottenibili con i trasduttori da 5 a 500 Nm

2.10 Individuazione dei sistemi di alimentazione

Per lo svolgimento delle prove a tensione variabile in accordo con IEC 61034-2-1 [9], e per consentire anche l'avviamento a tensione ridotta dei motori di taglia maggiore, è necessario adottare sistemi di alimentazione a tensione variabile. Nel Regolamento 640/2009 [1] si specifica come tensione massima 1000V, tuttavia, le tensioni nominali dei motori asincroni di taglia 15 kW sono usualmente 400/690 V, a seconda del concatenamento se a triangolo o a stella; considerando il 125% come limite, 500 V e 862,5 V rispettivamente. Per quanto concerne la corrente da erogare, considerando la necessità di effettuare prove con carichi fino al 150% del valore nominale, dalle Tabelle 4-6 si evince la necessità di prevedere un valore di corrente di linea di almeno 65 A, per il concatenamento del motore a triangolo, e 38 A per il concatenamento a stella. Le tensioni devono essere di forma sinusoidale, a frequenza di 50 Hz.

La IEC 60034-2-1 [9], all'articolo 5.4 inerente le tensioni di alimentazione, prescrive che la tensione deve essere conforme agli articoli 7.2 (e 8.3.1 per le prove termiche) della IEC 60034-1 [8].

In tale norma si esprime come limite per la componente di sequenza inversa l'1% della componente di sequenza diretta durante un lungo periodo di tempo, o 1,5% per un breve periodo non superiore a pochi minuti, ed un limite per la componente di sequenza omopolare pari all'1% della componente di sequenza diretta. Tali valori sono ridotti allo 0.5% per la componente di sequenza inversa e azzerato per la componente di sequenza omopolare durante le prove termiche.

Come già precedentemente osservato, è opportuno predisporre un sistema di misura delle componenti di sequenza, che risulta di fatto indispensabile qualora le prove vengano effettuate con tensione prelevata direttamente dalla rete elettrica, mediante apparati quali trasformatori o variatori ad induzione.

La stessa norma prescrive, inoltre, come indice per la valutazione della distorsione della tensione l' *HVF*, già precedentemente introdotto, per il quale sono fissati valori massimi di 0,02 in condizioni normali, e 0,015 durante le prove termiche.

Come già precedentemente osservato, è opportuno predisporre un sistema di misura delle componenti di sequenza e del contenuto armonico, il quale risulta di fatto indispensabile qualora le prove vengano effettuate con tensione prelevata direttamente dalla rete elettrica, mediante apparati quali trasformatori o variatori ad induzione.

2.10.1 Autotrasformatori a rapporto variabile (Variac)

La prima tipologia di apparato considerata è quella dell'autotrasformatore a rapporto variabile, comunemente denominato Variac (General Radio); nella configurazione monofase, si tratta di un apparato costituito da un nucleo ferromagnetico, spesso di tipo toroidale, sul quale è realizzato un unico avvolgimento con due morsetti terminali, più un terzo che permette una presa intermedia. La tensione primaria è applicata tra due terminali, la tensione secondaria è prelevata dalla presa intermedia su una spazzola strisciante, e può essere minore o uguale alla tensione primaria, o raggiungere valori maggiori se la tensione primaria è applicata ad un numero di spire minore del totale, mentre la presa intermedia varia fino al numero totale delle spire. Questa seconda tipologia di costruzione è quella di interesse per le applicazioni considerate, in cui è necessario raggiungere almeno tensioni dell'ordine dei 500 V. Per la realizzazione di un Variac trifase è necessario collegare tre Variac monofase a stella, prevedendo una variazione contemporanea della posizione delle spazzole sui tre avvolgimenti, onde evitare dissimmetrie della tensione di alimentazione.

Per quanto concerne la movimentazione delle spazzole, sono disponibili sul mercato Variac a regolazione manuale o motorizzata, e sono realizzati a costruzione aperta o chiusa. La norma di riferimento per la costruzione è IEC 61558-2-14 [25]. Tra i vantaggi che l'uso dei Variac comporta si evidenziano la robustezza costruttiva, la possibilità di effettuare una variazione continua della tensione erogata, assenza di limitazione su fattore di potenza, assenza di introduzione di deformazioni sulla forma d'onda, possibilità di regolazione automatica della tensione con l'adozione di servomotori.

Tra gli svantaggi si annovera l'assenza di isolamento galvanico tra circuito primario e secondario, per cui può essere consigliabile inserire un trasformatore di isolamento a monte del Variac, e l'impossibilità di filtrare la tensione prelevata dalla rete, per cui la presenza di squilibri o deformazione armonica non può essere corretta mediante l'impiego di un Variac. Per quanto concerne le caratteristiche tecniche dei Variac da impiegare nelle prove, si richiede che debbano erogare una corrente di linea di 65 A a 400 V, con tensione massima erogabile almeno 500 V con 35 A di corrente; come potenza apparente nominale si identifica il valore di 45 kVA. Considerate tali specifiche ed analizzati i cataloghi di alcuni costruttori (Belotti, CEA ItalOhm, Staco Energy ecc.), si può concludere che non siano disponibili sul mercato a catalogo Variac di tali caratteristiche e che sia necessario richiedere una costruzione ad hoc.

2.10.2 Regolatori di tensione ad induzione

La seconda tipologia di apparato che può essere considerata è quella dei regolatori di tensione ad induzione; si tratta di macchine asincrone con rotore avvolto, solitamente con 4 poli, che sono a rotore bloccato, con servomotori che regolano la posizione del rotore. Gli avvolgimenti delle fasi dello statore sono collegati in serie con gli avvolgimenti del rotore; le tensioni di alimentazione sono applicate allo statore, mentre le tensioni di uscita sono prelevate ai capi della serie tra avvolgimenti di statore e di rotore. In base al rapporto di trasformazione della macchina, alimentando lo statore con una terna di tensioni simmetriche a valore efficace costante, si ottengono delle tensioni di rotore che sono di valore efficace costante, ma di fase variabile in base alla posizione angolare delle fasi rotoriche rispetto alle statoriche. Mediante la rotazione controllata del rotore, è possibile effettuare la somma dei fasori di tensione statorica e rotorica, secondo il diagramma in Fig. 25; per avere una ampia variazione di tensione in uscita, il variatore è realizzato in modo che le tensioni del rotore siano prossime a quelle di alimentazione, quindi con un rapporto di trasformazione prossimo all'unità. Si possono ottenere tensioni variabili con continuità da un valore comunque non nullo, pari a $V_{f1}-E_2$, fino ad un massimo di tensione pari a $V_{f1}+E_2$, con correnti sempre pari al valore nominale. Trattandosi di una macchina asincrona, si hanno effetti di saturazione del nucleo trascurabili, con forme d'onda potenzialmente meno deformate rispetto ad un autotrasformatore che non è usualmente dotato di traferro; le forme d'onda generate non risentono di eventuali dissimmetrie introdotte dal regolatore, in quanto non sono presenti contatti striscianti che richiedono registrazioni come per i Variac. Il regolatore di tensione offre inoltre la robustezza tipica delle macchine asincrone, che sono in grado di sopportare sovraccarichi di corrente purché raffreddate correttamente. Per quanto concerne le caratteristiche tecniche dei regolatori di tensione da impiegare nelle prove, si richiede che debbano erogare una corrente di linea di 65 A a 400 V, con tensione massima erogabile almeno 500 V con 35 A di corrente;

vista la possibilità di ottenere tensioni di valore quali doppio rispetto alla tensione di alimentazione, è possibile effettuare prove a tensioni maggiori, rispetto ai Variac di caratteristiche standard. Come potenza apparente nominale si identifica il valore di 45 kVA. Usualmente i regolatori di tensione ad induzione sono realizzati ad hoc su specifiche del cliente.

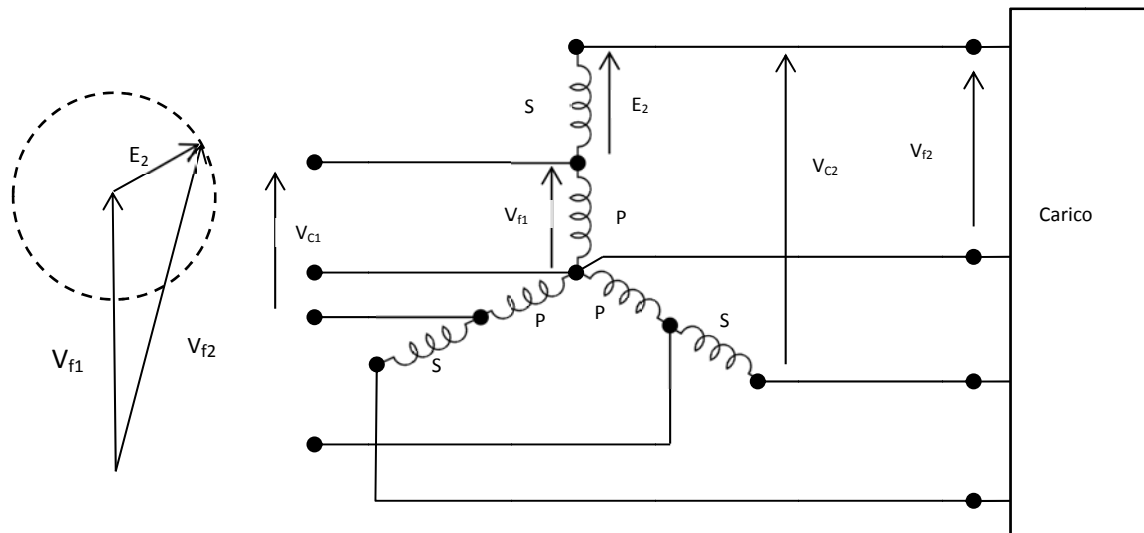


Fig 25 – Diagramma di fasori e schema del regolatore di tensione ad induzione

2.10.3 Alimentatori elettronici

Per garantire un controllo accurato delle forme d'onda di tensione, in termini di simmetria e di contenuto armonico, si possono utilizzare convertitori elettronici AC/AC (Power supply). Tali dispositivi sono in grado di erogare forme d'onda sinusoidali, con distorsione armonica tipicamente minore dell'1% con frequenza nell'intervallo 10-800 Hz; sono dotati di strumentazione integrata per la misurazione dei parametri elettrici e consentono di regolare in modo remoto le condizioni di funzionamento, mediante interfacciamento con host PC. Per quanto concerne le caratteristiche tecniche degli alimentatori da impiegare nelle prove, si deve valutare le caratteristiche degli apparati disponibili sul mercato. E' possibile individuare alimentatori in grado di fornire tensioni sinusoidali (VTHD% minore di 0,5% a 50 Hz), con tensioni concatenate fino a 519 V; i valori di corrente nominali possono essere di 50 A a tensione massima, e maggiori per valori di tensione inferiori; la taglia di potenza nominale è 45 kVA. Alcuni modelli permettono di erogare correnti fino al 125% del valore nominale, per tensioni comprese tra 50% e 80% della tensione massima, nella modalità a potenza costante; per le applicazioni considerate nel presente documento, è possibile avere fino a 62,5 A a 400 V, che rappresentano il 77% della tensione massima. Quindi, optando per un alimentatore di potenza 45 kVA è possibile soddisfare di fatto tutte le specifiche in termini di tensioni, correnti, e caratteristiche della forma d'onda. (Modello di riferimento: Amtek California Instruments BPS45-3).

2.11 Individuazione dei sistemi per la realizzazione del carico meccanico

La realizzazione del carico meccanico può essere effettuata con diverse tipologie di sistemi frenanti. Si possono identificare due possibili approcci: il primo prevede l'adozione di sistemi dissipativi, che possono essere considerati per motori di piccola taglia e a bassa coppia, mentre sistemi attivi a recupero di energia sono preferibili per motori di taglia maggiore, e per coppie più elevate.

Tra i sistemi di frenatura dissipativa si possono elencare i banchi dinamometrici a polveri magnetiche; una corrente elettrica che fluisce attraverso un avvolgimento produce un campo magnetico, che modifica le proprietà della polvere, producendo una coppia di attrito frenante a corrente di eccitazione nulla è presente una coppia residua nell'ordine tra il 2% ed il 5% della coppia nominale. Sono utilizzabili per velocità di rotazione medio basse, con coppie medio alte. Possono essere impiegati per generare la coppia massima anche a velocità nulla; richiedono una sistema di raffreddamento che usualmente è ad acqua. Le taglie presenti sono usualmente fino a 50 kW. (Modelli di riferimento: Magtrol serie PB) [48].

I banchi dinamometrici a correnti parassite sono impiegabili per applicazioni ad elevata velocità, e per valori

di potenza medio-alti. I banchi a correnti parassite forniscono una coppia resistente crescente con la velocità, con valore di coppia massimo alla velocità nominale; sono inoltre caratterizzati di bassa inerzia dovuta a dimensioni contenute del rotore. Sono usualmente raffreddati ad acqua, e possono essere impiegati con potenze fino ai 140 kW. (Modelli di riferimento: Magtrol serie WB).

Sovente le due tipologie di apparato sono montate assieme, in tandem, in modo da permettere una compensazione della coppia resistente, visto il diverso legame tra velocità di rotazione e coppia erogata.

Ulteriore tipologia di sistemi di frenatura sono i banchi ad isteresi, che trovano impiego per motori ad elevata velocità, con potenze ridotte. I sistemi ad isteresi producono coppia frenante senza contatto, mediante una struttura polare reticolata ed un particolare assemblaggio del sistema rotore-albero, senza contatto. Finché la struttura polare non è energizzata, il rotore può girare con coppia resistente nulla; quando è applicata corrente all'avvolgimento, un campo magnetico investe il rotore, generando un'azione frenante tra rotore e statore. Il valore tipico di potenza che si può ottenere con singole unità ad isteresi è dell'ordine dei 14 kW, con sistemi di raffreddamento ad aria forzata (Modelli di riferimento: Magtrol serie HB). La necessità di poter implementare metodi attivi di frenatura emerge dalla necessità di permettere un controllo ottimale della coppia frenante, e di ridurre l'assorbimento di potenza dalla rete elettrica, limitando anche i costi di svolgimento di ogni singola prova, ed evitando l'installazione di sistemi di dissipazione del calore. Non si deve trascurare la necessità di svolgere prove a carico nominale per tempi dell'ordine di alcune ore, per portare a regime termico i motori di taglia più grande dotati di maggiore inerzia termica. I sistemi di frenatura attiva a recupero prevedono l'impiego di motori, asincroni o brushless, alimentati da inverter e dotati di sistemi di controllo in retroazione di giri o di corrente. La scelta della retroazione di giri consente di mantenere costante il numero di giri del motore, +/- 1 giro tipicamente, indipendentemente dal regime di coppia; con tale approccio è possibile usualmente provare motori di piccola taglia anche con banchi di frenatura di elevata potenza nominale. Il funzionamento in retroazione di corrente consente di mantenere costante la coppia assorbita indipendentemente dal numero di giri, in un certo intervallo di velocità di rotazione. Questo approccio usualmente è impiegato per motori di taglia maggiore, e prossima al valore nominale del banco di frenatura. Usualmente tali tipi di sistemi di frenatura non sono disponibili a catalogo, ma sono progettati su specifiche del cliente.

Per individuare le specifiche in termini di coppia e velocità necessari per lo svolgimento delle prove, si può far riferimento alla Tabella 27, che sintetizza i valori di coppia minima e massima necessarie all'esecuzione delle prove per ciascuna tipologia di motore di interesse. Ipotizzando uno scorrimento variabile da circa 0 a coppia minima a 0,1 a coppia massima, si possono riassumere i valori di coppia in un grafico, in Figura 26.

Tabella 27 – Specifiche di coppia per sistemi di frenatura.

Potenza nominale [kW]	Intervallo di potenza 25% -150% [kW]	Motori a 2 poli (3000 rpm max)		Motori a 4 poli (1500 rpm max)		Motori a 6 poli (1000 rpm max)	
		Coppia Nominale [Nm]	Intervallo di coppia 25%-150% [Nm]	Coppia Nominale [Nm]	Intervallo di coppia 25%-150% [Nm]	Coppia Nominale [Nm]	Intervallo di coppia 25%-150% [Nm]
0,75	0,19 - 1,13	2,65	0,66 - 3,98	5,31	1,32 - 7,96	7,96	1,99 - 11,94
1,10	0,28 - 1,64	3,89	0,97 - 5,84	7,78	1,94 - 11,67	11,67	2,92 - 17,51
1,50	0,38 - 2,25	5,31	1,33 - 7,96	10,61	2,65 - 15,92	15,92	3,98 - 23,88
2,20	0,55 - 3,30	7,78	1,95 - 11,67	15,56	3,89 - 23,34	23,34	5,84 - 35,01
3,00	0,75 - 4,50	10,61	2,65 - 15,92	21,22	5,31 - 31,83	31,83	7,96 - 47,75
4,00	1,00 - 6,00	14,15	3,53 - 21,22	28,29	7,07 - 42,44	42,44	10,61 - 63,66
5,50	1,37 - 8,25	19,45	4,86 - 29,18	38,90	9,73 - 58,36	58,36	14,59 - 87,54
7,50	1,88 - 11,25	26,53	6,63 - 39,79	53,05	14,89 - 79,58	79,58	19,89 - 119,37
11,00	2,75 - 16,50	38,90	9,73 - 58,36	77,81	19,45 - 116,71	116,71	29,18 - 175,07
15,00	3,75 - 22,50	53,05	12,51 - 79,58	106,10	26,53 - 159,15	159,15	39,79 - 238,73

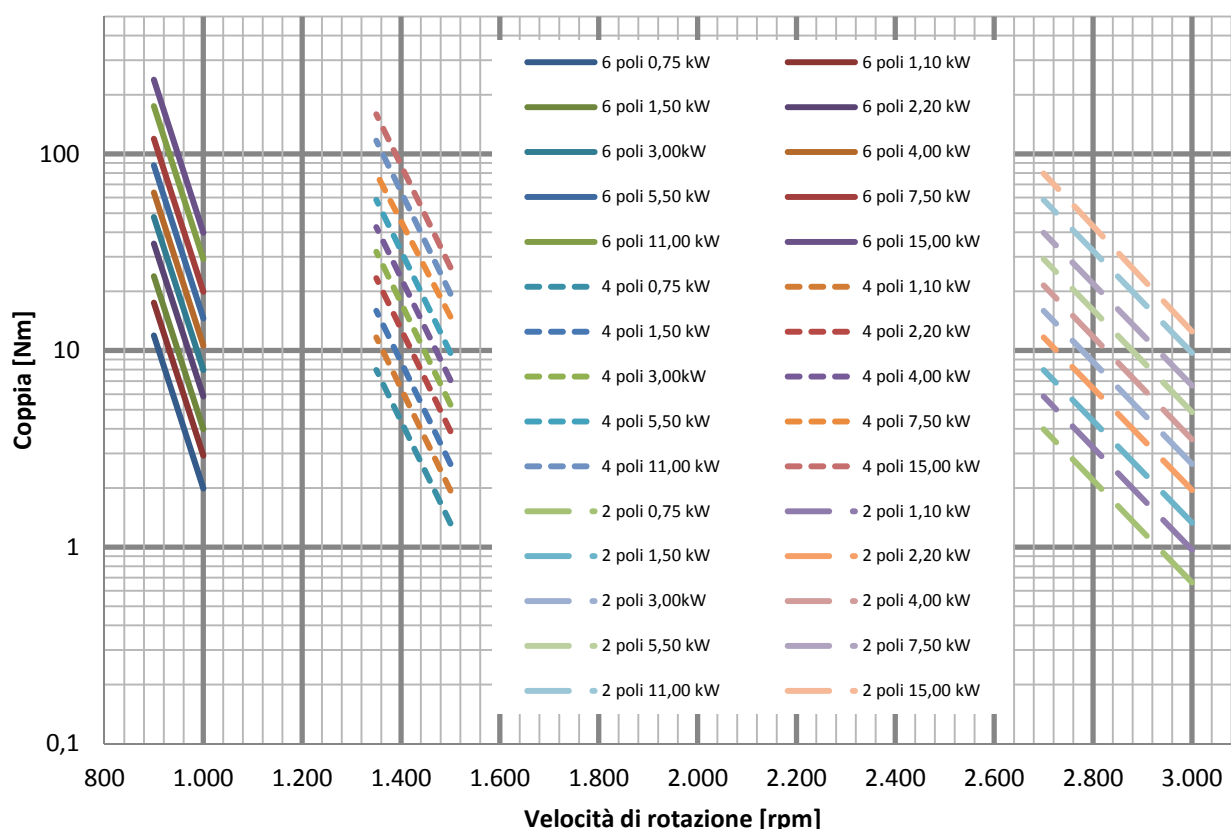


Fig 26 – Specifiche di coppia e velocità per sistemi di frenatura.

3 Certificazione e accreditamento

3.1 Introduzione

La certificazione di un prodotto usata come dichiarazione di conformità dal fornitore del prodotto o sta ad indicare che un prodotto è stato dichiarato corrispondente alle sue specifiche da una parte terza. La certificazione generalmente fa parte del monitoraggio, della verifica e delle applicazioni di procedure associate a programmi nazionali di efficienza energetica.

Il processo di certificazione richiede chiarezza attraverso leggi, regolamenti o regole amministrative che specifichino:

- i requisiti di funzionamento del prodotto,
- il metodo più appropriato per testare i prodotti e dove le prove possono essere effettuate,
- chi può rilasciare il certificato e indicare le procedure per farlo,
- il modello e la struttura del certificato, e dove esso deve essere esibito,
- le sanzioni per il non adempimento,
- ogni altro requisito aggiuntivo, come la distribuzione di informazioni, la conservazione della documentazione, ecc.

Si deve notare che la certificazione generalmente non è intesa come un mezzo per fornire informazione all'utilizzatore finale, ed è perciò diversa dall'etichetta energetica¹.

¹ L'etichettatura energetica è l'uso di una etichetta materiale, apposta sul prodotto stesso, per indicare la prestazione energetica di quel prodotto (generalmente in termini del suo rendimento). Ad es. il marchio CE è una conformità obbligatoria per i prodotti posti sul mercato europeo (Consiglio direttivo 93/68/EEC e Consiglio deliberativo 93/465/EEC). Nel contesto della progettazione ecocompatibile dei prodotti legati all'energia che comprendono anche i motori elettrici, con il porre il marchio CE sul prodotto, il costruttore dichiara di fatto che il prodotto è conforme con l'applicazione delle direttive della UE.

A livello globale è importante ricordare l'istituzione IECEE (International Electrotechnical Commission for Electrical Equipment). L'IECEE è parte dell'IEC, segue il sistema degli Organismi di Certificazione e controlla la certificazione internazionale dei prodotti elettrici ed elettronici in modo tale che una singola certificazione consenta l'accesso al mercato globale.

Nel 2012, l'IECEE e NEMA (US National Electrical Manufacturers Association) lanciarono un'iniziativa intesa a stabilire un modello internazionale per la valutazione di conformità agli standard di rendimento energetico per i motori elettrici, con riferimento alle norme di test IEC e ad un sistema internazionale di etichettatura per il motore GLMP (Global Motor Labelling Programme) basato sulle classi di efficienza definite dall'IEC. Viene inoltre proposto che i laboratori di prova e gli organismi di certificazione siano registrati sotto lo stretto controllo dell'IECEE Peer Assessment Programme, ensuring compliance with ISO/IEC 17025 [17]: General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories, e ISO/IEC 17065 [26]: Conformity Assessment – Requirements for Bodies Certifying Products, Processes and Services, così come con tutte le norme IEC che riguardano il funzionamento e l'efficienza energetica e gli aspetti di sicurezza.

Molti paesi richiedono ai fornitori di prodotti dichiarati a norma di registrare tutti i modelli (o a volte famiglie di modelli) con un'agenzia governativa come condizione per immettere tali modelli sul mercato. Ad esempio il Dipartimento Americano per l'Energia ha disposto che dal 19/12/2010 il requisito NEMA (National Electrical Manufacturers Association) Premium diventi lo standard minimo di prestazioni energetiche per i motori negli Stati Uniti. Per ottenere la certificazione i produttori dovranno far testare i prodotti presso laboratori accreditati.

Nei paesi della UE la situazione invece è differente, in quanto spetta al produttore la responsabilità di conformarsi agli standard previsti. La certificazione da parte di un ente terzo non è obbligatoria; tuttavia le agenzie governative eseguiranno audit di mercato sporadici. Qualora un dispositivo non sia conforme ai livelli di efficienza previsti e dichiarati, il produttore sarà obbligato a ritirarlo dal mercato a proprie spese.

La certificazione di prodotto potrebbe fare la differenza tra chi dice e chi dimostra, assicurando il compratore. Normalmente, infatti, la conformità ad un requisito normativo può essere fatta certificare da un ente accreditato che, nel caso di motori elettrici, sia dotato di banchi prova idonei, per capacità, a certificare motori delle potenze tipiche secondo le classi di rendimento IEC.

A livello globale molti sono gli organismi di accreditamento, si riportano i principali:

- AFRAC: African Accreditation Cooperation,
- APLAC: Asia Pacific Laboratory Accreditation Cooperation,
- ARAC: Arab Accreditation,
- EA: European co-operation for Accreditation,
- IACC: Inter American Accreditation Cooperation,
- ILAC: International Laboratory Accreditation Cooperation,
- SADCA: Southern African Community Cooperation in Accreditation.

In particolare si segnala che l'ILAC è l'ente internazionale di vigilanza per gli organismi di accreditamento dei laboratori di prova. Esso utilizza una struttura regionale per amministrare gli organismi di accreditamento.

Negli USA è noto il *National Voluntary Laboratory Accreditation Program (NVLAP)*, che dal 1992 è stato abilitato all'accREDITAMENTO dei laboratori di prova per la misura del rendimento dei motori elettrici. Attualmente i laboratori sono accreditati in conformità alla IEEE 112: *Test Procedure for Poliphase Induction Motors and Generators* [27] e dal 2013 alla IEEE 114: *Test Procedure for Single-Phase Induction Motors* (CSA C747) [28]. Attualmente NVLAP accredita 13 laboratori in cinque nazioni.

In Europa l'European co-operation for Accreditation (EA) è un ente avente lo scopo di promuovere l'armonizzazione delle regole e delle procedure dei sistemi di accreditamento volontario e di gestire accordi di mutuo riconoscimento tra gli enti di accreditamento, riconosciuti dai loro Governi nazionali. Le organizzazioni che controllano l'osservanza delle normative, devono avere competenze tecniche e l'onestà per svolgere i servizi di accertamento (come la certificazione, verifica, ispezione, testing e calibrazione). Se un fornitore è accreditato da uno dei membri appartenenti alla rete EA, i suoi clienti possano avere fiducia nella competenza, indipendenza e imparzialità del suo lavoro di accertamento di conformità.

I Soci dell'EA sono divisi in membri di diritto e associati; i membri di diritto sono 35 e quelli associati sono 13. In accordo agli articoli dell'associazione, i membri di diritto sono organismi di accreditamento localizzati in uno Stato Membro della EU/EFTA o in un paese candidato. I criteri per ottenere la condizione di socio sono riportati in EA-1/17 Supplement 1 [29].

In Italia il socio di diritto è ACCREDIA.

ACCREDIA (L'Ente Italiano di Accreditamento) ACCREDIA è un'associazione senza scopo di lucro che ha come finalità l'accREDITamento di laboratori di prova, per garantire l'affidabilità e la riproducibilità delle verifiche di rispondenza dei prodotti alle Norme Internazionali e Nazionali. Per mezzo di visite ispettive annuali, ACCREDIA accredita un laboratorio, per ogni singola prova, solo dopo aver accertato l'esistenza di precisi requisiti tecnici ed organizzativi, in modo che siano garantiti i riferimenti metrologici, l'affidabilità e la ripetibilità delle procedure impiegate, l'uso di strumentazioni adeguate, la competenza del personale, l'imparzialità del personale addetto alle prove e del giudizio tecnico emesso dal Laboratorio, secondo quanto previsto dalla norma UNI CEI EN ISO/IEC 17025 [17] e dalle sue prescrizioni. E' membro dell'EA (European co-operation for Accreditation) e dell'ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation). Per consultare l'elenco delle prove accreditate visitare il sito www.accredia.it

3.2 Requisiti generali per la competenza dei laboratori di prova: norma UNI CEI EN ISO /IEC 17025

La norma UNI CEI EN ISO/IEC 17025 [17] indica i requisiti generali per la competenza dei laboratori ad effettuare prove e/o tarature, compreso il campionamento.

Essa si applica alle prove e tarature eseguite utilizzando metodi normalizzati, non-normalizzati e metodi sviluppati da laboratori.

Per come è stata strutturata, i laboratori di prova e di taratura che operano in conformità alla presente norma internazionale operano anche in conformità alla ISO 9001 [30]; non è da considerarsi però vero il viceversa, in quanto la conformità del sistema di gestione per la qualità, all'interno del quale opera il laboratorio, ai requisiti della ISO 9001 [30], non costituisce da sé prova della competenza del laboratorio a produrre dati e risultati tecnicamente validi. La conformità dimostrata alla presente norma internazionale non implica la conformità del sistema di gestione per la qualità attuato dal laboratorio a tutti i requisiti della ISO 9001 [30].

L'appendice A della UNI CEI EN ISO/IEC 17025 [17] fornisce una matrice di riferimenti di corrispondenza nominale con la ISO 9001 [30]; essa inoltre riporta requisiti di competenza tecnica che non sono coperti dalla ISO 9001 [30].

La norma UNI CEI EN ISO/IEC 17025 [17] si applica a tutte le organizzazioni che eseguono prove e/o tarature. Tali organizzazioni sono, per esempio, laboratori di prima, seconda e terza parte e laboratori dove le prove e/o le tarature fanno parte delle attività d'ispezione e certificazione di prodotto.

La presente norma internazionale è applicabile a tutti i laboratori indipendentemente dal numero di persone o dall'estensione del campo di applicazione delle loro attività di prova e di taratura. E' inoltre utilizzata dai laboratori nello sviluppo dei propri sistemi di gestione per la qualità, amministrativi e tecnici che governano le relative attività.

I clienti del laboratorio, le autorità in ambito legislativo e gli organismi di accreditamento possono pure utilizzarla per confermare o riconoscere la competenza dei laboratori. La presente norma internazionale non è destinata ad essere utilizzata come base per la certificazione dei laboratori.

Sono indispensabili per l'applicazione della norma i documenti: ISO/IEC 17000 "Conformity assessment - Vocabulary and general principles" [31] e VIM, International vocabulary of basic and general terms in metrology [19], issued by BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP and OIML.

Nel seguito vengono riportati, in sintesi, i contenuti della norma UNI CEI EN ISO/IEC 17025 inerenti i requisiti principali che il laboratorio deve soddisfare, in termini di organizzazione, documentazione e procedure.

3.3 Organizzazione del laboratorio

La norma UNI CEI EN ISO/IEC 17025 [17] definisce il laboratorio o l'organizzazione di cui esso è parte come un'entità che possa essere considerata giuridicamente responsabile.

È responsabilità del laboratorio eseguire le attività di prova e di taratura in modo da rispettare i requisiti della norma e di soddisfare le esigenze del cliente, delle autorità in ambito legislativo o delle organizzazioni che forniscono riconoscimenti.

Il sistema di gestione del laboratorio deve coprire le attività svolte in installazioni permanenti del laboratorio o in siti, sia provvisori che mobili, al di fuori delle sue installazioni permanenti.

Al fine di identificare ed evitare conflitti di interesse, se il laboratorio è parte di un'organizzazione che esegue attività diverse da prove e/o da tarature, le responsabilità delle persone aventi un ruolo chiave nell'organizzazione, che partecipano o influenzano le attività di prova e/o di taratura del laboratorio, devono essere definite.

Qualora un laboratorio faccia parte di un'organizzazione più grande, le disposizioni organizzative dovrebbero essere tali che le funzioni che hanno conflitti di interesse, come quelle relative alla produzione, alla ricerca di mercato o alla finanza, non compromettano la conformità ai requisiti della norma.

Se il laboratorio desidera essere riconosciuto come laboratorio di terza parte, dovrebbe essere in grado di dimostrare che esso stesso ed il suo personale sono liberi da indebite pressioni commerciali, finanziarie o di altra natura, suscettibili di avere una influenza negativa sui giudizi tecnici.

Il laboratorio di prova o di taratura di terza parte non dovrebbe intraprendere attività che possano compromettere la fiducia nella sua indipendenza di giudizio e nella sua integrità in relazione alle sue attività di prova o di taratura.

Per quanto concerne l'organizzazione, si richiede che il laboratorio debba:

- a) avere un personale direttivo e tecnico il quale, indipendentemente da tutte le altre attività, possieda l'autorità e le risorse necessarie per svolgere i suoi compiti, ivi compresi l'attuazione, il mantenimento ed il miglioramento del sistema di gestione per la qualità, per identificare eventuali scostamenti dal sistema di gestione o dalle procedure per l'esecuzione delle prove e/o delle tarature e per intraprendere delle azioni al fine di prevenire o minimizzare tali scostamenti.
- b) avere delle disposizioni per assicurare che la sua direzione ed il suo personale non siano soggetti ad alcune indebite pressioni o influenze commerciali, finanziarie o di altra natura, interne o esterne, che possano influenzare la qualità del loro lavoro;
- c) adottare politiche e procedure che permettano di garantire la protezione delle informazioni riservate e dei diritti di proprietà dei clienti, comprese le procedure per proteggere la conservazione e la trasmissione elettronica dei risultati;
- d) adottare politiche e procedure per evitare il coinvolgimento in attività che possano diminuire la fiducia nella sua competenza, nella sua imparzialità, nel suo giudizio o nella sua integrità professionale;
- e) definire la struttura dell'organizzazione e della direzione del laboratorio, il suo posizionamento nell'ambito dell'organizzazione di appartenenza ed i rapporti fra la funzione qualità, le attività tecniche ed i servizi di supporto;
- f) specificare la responsabilità, l'autorità e le interdipendenze di tutto il personale che gestisce, esegue o verifica il lavoro che ha influenza sulla qualità delle prove e/o delle tarature;
- g) fornire adeguata supervisione del personale che esegue le prove e le tarature, compreso il personale in formazione ed addestramento, a mezzo di personale avente familiarità con i metodi e le procedure, lo scopo di ciascuna prova e/o taratura e la valutazione dei risultati di prova e/o di taratura;
- h) avere una direzione tecnica che detiene la responsabilità complessiva per le attività tecniche e per provvedere alle risorse necessarie in modo da assicurare la qualità richiesta nelle operazioni di laboratorio;
- i) incaricare un membro del personale come responsabile della qualità (quale che sia la funzione) il quale, indipendentemente da altri compiti e responsabilità, abbia definite responsabilità ed

autorità per assicurare che il sistema di gestione sia attuato e seguito in ogni momento; il responsabile della qualità deve avere accesso diretto ai livelli più alti della direzione, ove sono prese le decisioni in materia di politica e di risorse;

- j) nominare dei sostituti per il personale avente un ruolo chiave nell'ambito della direzione (vedere nota); assicurare che il suo personale sia consapevole della pertinenza e dell'importanza delle sue attività e del modo in cui contribuisce al raggiungimento degli obiettivi del sistema di gestione.

E' possibile che le più funzioni siano attribuite ad una stessa persona.

Particolare attenzione è data alla comunicazione interna al laboratorio; l'alta direzione deve assicurare che siano stabiliti appropriati processi di comunicazione in seno al laboratorio e che abbia luogo la comunicazione riguardante l'efficacia del sistema di gestione.

Per quanto concerne il **sistema di gestione**, si richiede che il laboratorio debba stabilire, attuare e mantenere attivo un sistema di gestione adatto al campo delle sue attività. Il laboratorio deve documentare le politiche, i sistemi, i programmi, le procedure e le istruzioni nella misura necessaria ad assicurare la qualità dei risultati delle prove e/o delle tarature. La documentazione di sistema deve essere comunicata e resa disponibile per essere compresa ed applicata dal personale competente. E' espressamente richiesta la redazione di un **manuale della qualità**, nel quale riportare le politiche del sistema di gestione del laboratorio relative alla qualità, che comprendono una dichiarazione della politica per la qualità. Gli obiettivi generali devono essere stabiliti e successivamente riesaminati durante il riesame da parte della direzione. La dichiarazione della politica per la qualità deve essere definita sotto l'autorità dell'alta direzione. Essa deve comprendere almeno quanto segue:

- a) l'impegno della direzione del laboratorio per una buona pratica professionale e per la qualità delle prove e delle tarature offerte ai clienti;
- b) la dichiarazione della direzione del laboratorio relativamente al livello del servizio offerto;
- c) l'obiettivo del sistema di gestione per la qualità;
- d) un requisito che tutto il personale coinvolto nelle attività di prova e di taratura all'interno del laboratorio, abbia familiarità con la documentazione per la qualità ed attui le politiche e le procedure nel proprio lavoro;
- e) l'impegno della direzione del laboratorio a conformarsi alla presente norma internazionale e a migliorare in modo continuo l'efficacia del sistema di gestione.

Il manuale della qualità deve comprendere o fare riferimento a procedure di supporto comprese le procedure tecniche. Esso deve evidenziare la struttura della documentazione utilizzata nel sistema di gestione.

Il laboratorio deve stabilire e mantenere attive procedure per controllare tutti i documenti che costituiscono il sistema di gestione (elaborati all'interno o provenienti da fonti esterne), come regolamenti, norme o altri documenti normativi, metodi di prova e/o di taratura, così come disegni, software, specifiche, istruzioni e manuali.

Tutti i documenti emessi per il personale del laboratorio, come parte del sistema di gestione, devono essere riesaminati ed approvati, per l'utilizzazione, da parte del personale autorizzato prima della loro emissione. Una lista generale di controllo, o una equivalente procedura di tenuta sotto controllo della documentazione, che identifica lo stato di revisione in vigore e la distribuzione dei documenti del sistema di gestione, deve essere stabilita e resa facilmente disponibile al fine di evitare l'utilizzazione di documenti non validi e/o obsoleti.

Il laboratorio deve stabilire e mantenere attive procedure per il riesame delle richieste, delle offerte e dei contratti. Le politiche e le procedure, relative alla stesura di un contratto per l'esecuzione delle prove e/o delle tarature, devono assicurare che:

- a) i requisiti, compresi i metodi da utilizzare, siano adeguatamente definiti, documentati e comprensibili;
- b) il laboratorio abbia la capacità e le risorse per soddisfare i requisiti;

- c) siano selezionati i metodi di prova e/o di taratura appropriati ed in grado di soddisfare i requisiti dei clienti.

Ogni differenza fra la richiesta o l'offerta ed il contratto deve essere risolta prima dell'inizio di qualsiasi lavoro. Ogni contratto deve essere accettabile sia da parte del laboratorio, sia da parte del cliente. Il cliente deve essere informato circa ogni scostamento dal contratto.

Il laboratorio deve essere disposto a cooperare con i propri clienti o loro rappresentanti per chiarire le richieste dei clienti e per tenere sotto controllo le prestazioni del laboratorio in relazione al lavoro eseguito, a condizione che il laboratorio assicuri la riservatezza nei riguardi degli altri clienti.

I laboratori devono fare in modo di ottenere informazioni di ritorno, sia positive che negative, dai propri clienti. Tali informazioni di ritorno dovrebbero essere utilizzate per migliorare il sistema di gestione, le attività di prova e di taratura ed il servizio offerto al cliente.

Il laboratorio deve possedere una politica ed una procedura per la risoluzione dei reclami ricevuti dai clienti o da altre parti. Esso deve conservare le registrazioni di tutti i reclami, così come delle indagini e delle azioni correttive effettuate.

Il laboratorio deve possedere una politica e delle procedure che devono essere attuate quando qualunque aspetto delle attività di prova e/o di taratura, o i risultati di queste attività, non siano conformi alle proprie procedure o ai requisiti concordati con il cliente.

Il laboratorio deve migliorare in modo continuo l'efficacia del proprio sistema di gestione attraverso l'utilizzo della politica per la qualità, gli obiettivi per la qualità, i risultati degli audit, l'analisi dei dati, le azioni correttive e preventive ed il riesame da parte della direzione.

Devono essere identificati i miglioramenti necessari e le possibili fonti di non conformità, sia di natura tecnica, sia riguardanti il sistema di gestione. Quando sono identificate opportunità di miglioramento o quando è necessaria un'azione preventiva, devono essere sviluppati, attuati e monitorati dei piani di azione al fine di ridurre la probabilità del verificarsi di tale non conformità e trarre vantaggio dalle opportunità di miglioramento.

Il laboratorio deve eseguire periodicamente, secondo un piano e procedura prefissati, audit sulle sue attività per accertare che le operazioni continuino a soddisfare i requisiti del sistema di gestione e della presente norma internazionale. Il programma di audit interni deve trattare tutti gli elementi del sistema di gestione, comprese le attività di prova e/o di taratura. Il responsabile della qualità ha la responsabilità di pianificare ed organizzare gli audit come richiesto dal piano prefissato e dalle richieste della direzione.

Tali audit devono essere eseguiti da personale formato, addestrato e qualificato che è, quando le risorse lo consentono, indipendente dalle attività sottoposte ad audit.

L'alta direzione del laboratorio deve condurre periodicamente, in conformità ad un piano e ad una procedura prefissati, un riesame del sistema di gestione del laboratorio e delle attività di prova e/o di taratura per assicurare il mantenimento, in modo continuo, della loro idoneità ed efficacia e per introdurre i necessari cambiamenti o miglioramenti.

3.4 *Requisiti tecnici*

Particolare attenzione deve essere attribuita agli aspetti tecnici, data la finalità della norma che è specificamente destinata all'implementazione di processi di misura, in termini di prove e tarature. Molti fattori determinano la correttezza e l'affidabilità delle prove e/o delle tarature eseguite da un laboratorio. Questi fattori comprendono contributi da:

- fattori umani;
- postazione di lavoro e condizioni ambientali;
- metodi di prova e di taratura e validazione dei metodi;
- apparecchiature;
- riferibilità delle misure;
- campionamento;
- manipolazione dei dispositivi da sottoporre a prova o taratura.

Il grado di contributo di tali fattori sull'incertezza totale, differisce notevolmente da prova a prova e da taratura e taratura. Il laboratorio deve prendere in considerazione questi fattori nello sviluppare i metodi e le procedure di prova e di taratura, nella formazione ed addestramento e nella qualifica del personale, nella scelta e nella taratura delle apparecchiature da utilizzare.

Per quanto concerne il personale, la norma prescrive che la direzione del laboratorio deve assicurare la competenza di tutti coloro che utilizzano apparecchiature specifiche, eseguono prove e/o tarature, valutano i risultati e firmano i rapporti di prova e di taratura. Quando si fa ricorso a collaboratori che sono in corso di formazione ed addestramento, deve essere prevista un'appropriata supervisione. Il personale che esegue compiti particolari deve essere qualificato sulla base di appropriata istruzione, formazione ed addestramento, esperienza e/o comprovata abilità, come richiesto. Viene considerata l'opportunità di impiegare personale certificato, per lo svolgimento di prove, ad esempio non distruttive. Viene inoltre evidenziata la necessità che il personale deputato alla formulazione di opinioni ed interpretazione dei risultati delle prove possieda anche conoscenza approfondita delle tecnologie utilizzate per la costruzione dei dispositivi, materiali, prodotti, ecc., sottoposti a prova, o del modo con cui vengono utilizzati o s'intende utilizzarli, e dei difetti o del degrado cui possono essere soggetti durante il funzionamento; conoscenza dei requisiti generali espressi nella legislazione e nelle norme; comprensione del significato degli scostamenti rilevati rispetto all'uso consueto dei dispositivi, materiali, prodotti, ecc., in questione. L'istruzione, la formazione, l'addestramento e l'abilità del personale del laboratorio sono tra gli obiettivi che la direzione del laboratorio deve prefissarsi. Il laboratorio deve utilizzare personale dipendente dal laboratorio o ad esso legato da un contratto. Il laboratorio deve mantenere aggiornati i mansionari del personale coinvolto nelle attività di prova e/o di taratura, a livello direzionale, tecnico e di supporto con ruolo chiave.

3.5 Metodi di prova e di taratura e validazione dei metodi

Il laboratorio deve adottare metodi e procedure appropriati per tutte le prove e/o le tarature che rientrano nel suo campo di attività. Questi comprendono il campionamento, la manipolazione, il trasporto, l'immagazzinamento e la preparazione degli oggetti da sottoporre a prova e/o a taratura e, quando appropriato, una stima dell'incertezza di misura così come le tecniche statistiche per l'analisi dei dati di prova e/o di taratura.

Il laboratorio deve disporre di istruzioni circa l'utilizzo ed il funzionamento di tutte le apparecchiature necessarie e circa la manipolazione e la preparazione degli oggetti da sottoporre a prova e/o a taratura, o di entrambi, quando l'assenza di tali istruzioni possa compromettere i risultati delle prove e/o delle tarature. Tutte le istruzioni, le norme, i manuali e i dati di riferimento relativi all'attività del laboratorio devono essere mantenuti aggiornati e devono essere facilmente disponibili al personale.

Il laboratorio deve utilizzare metodi di prova e/o di taratura, compresi i metodi di campionamento, che soddisfino le esigenze del cliente e che siano appropriati per le prove e/o le tarature da eseguire. Si devono utilizzare preferibilmente i metodi pubblicati nelle norme internazionali, regionali o nazionali. Il laboratorio deve assicurare che sia utilizzata l'ultima edizione valida, salvo che ciò non sia appropriato o possibile. Quando necessario la norma deve essere integrata con dettagli supplementari per assicurarne una corretta applicazione.

Metodi sviluppati dal laboratorio o adottati dal laboratorio possono essere utilizzati se sono appropriati per l'uso previsto e se sono validati. Il cliente deve essere informato circa il metodo scelto.

La validazione è la conferma attraverso esame e l'apporto di evidenza oggettiva che i requisiti particolari per l'utilizzazione prevista sono soddisfatti.

Il laboratorio deve validare i metodi non normalizzati, i metodi sviluppati/progettati dal laboratorio, i metodi normalizzati utilizzati al di fuori del proprio scopo e campo di applicazione prefissato, così come estensioni e modifiche di metodi normalizzati, per confermare che i metodi siano adatti all'utilizzazione prevista. La validazione deve essere estesa in modo da soddisfare le esigenze di una data applicazione o campo di applicazione. Il laboratorio deve registrare i risultati ottenuti, le procedure utilizzate per la validazione, così come una dichiarazione circa l'idoneità del metodo per l'utilizzo previsto.

3.6 *Stima dell'incertezza di misura*

Un laboratorio di taratura, o un laboratorio di prova che esegue le proprie tarature, deve avere e deve applicare una procedura per stimare l'incertezza di misura per tutte le tarature e tipi di taratura.

I laboratori di prova devono avere e devono applicare delle procedure per stimare l'incertezza di misura. In certi casi la natura dei metodi di prova può escludere il calcolo rigoroso dell'incertezza di misura, valido dal punto di vista metrologico e statistico. In questi casi il laboratorio deve almeno tentare di identificare tutte le componenti dell'incertezza e fornire una stima ragionevole, e deve assicurare che l'espressione del risultato non fornisca un'impressione errata dell'incertezza. Una stima ragionevole deve essere basata sulla conoscenza del metodo e sullo scopo della misurazione e deve far uso, per esempio, delle esperienze precedenti e della validazione dei dati.

In quei casi in cui un metodo di prova ben conosciuto specifichi i limiti delle maggiori sorgenti di incertezza e la forma di presentazione dei risultati calcolati, si ritiene che il laboratorio abbia soddisfatto questo punto seguendo i metodi di prova e le istruzioni per la presentazione dei risultati. Quando si stima l'incertezza di misura, devono essere prese in considerazione, utilizzando appropriati metodi di analisi, tutte le componenti dell'incertezza che sono di rilievo in una data situazione.

I calcoli ed il trasferimento dei dati devono essere soggetti a controlli appropriati condotti in modo sistematico.

Quando vengono utilizzati elaboratori elettronici o apparecchiature automatiche per l'acquisizione, l'elaborazione, la registrazione, la presentazione, la conservazione o la ricerca di dati di prova o di taratura, il laboratorio deve assicurare che:

- a) il software dell'elaboratore elettronico sviluppato dall'utilizzatore sia documentato con sufficiente dettaglio e sia opportunamente validato per l'adeguatezza all'uso;
- b) siano predisposte ed applicate delle procedure per proteggere i dati; tali procedure devono comprendere, non limitandosi ad essi, gli aspetti di integrità e di riservatezza dei dati di ingresso o della raccolta dati, della conservazione, della trasmissione e della elaborazione degli stessi;
- c) gli elaboratori elettronici e le apparecchiature automatiche siano mantenute in modo da assicurare un opportuno funzionamento e dispongano di condizioni ambientali ed operative necessarie a mantenere l'integrità dei dati di prova e di taratura.

3.7 *Apparecchiature*

Il laboratorio deve essere dotato di tutte le apparecchiature per il campionamento, per le misurazioni e le prove, richieste per una corretta esecuzione delle prove e/o delle tarature (compresi il campionamento, la preparazione degli oggetti da sottoporre a prova e/o a taratura, l'elaborazione e l'analisi dei dati di prova e/o di taratura). In quei casi in cui il laboratorio necessita di utilizzare apparecchiature al di fuori del suo controllo permanente, deve assicurare che i requisiti della presente norma internazionale siano soddisfatti. Le apparecchiature ed il relativo software, utilizzati per le prove, le tarature ed il campionamento, devono consentire il raggiungimento dell'accuratezza richiesta e devono essere conformi alle specifiche relative alle prove e/o alle tarature. Devono essere stabiliti programmi di taratura per le grandezze o valori essenziali degli strumenti quando questi hanno un effetto significativo sui risultati.

3.8 *Riferibilità delle misure*

Tutte le apparecchiature utilizzate per le prove e/o le tarature, comprese le apparecchiature per misurazioni ausiliarie (per esempio per le condizioni ambientali) che hanno un'influenza significativa sull'accuratezza o sulla validità del risultato della prova, taratura o campionamento, devono essere tarate prima di essere messe in servizio. Il laboratorio deve stabilire un programma ed una procedura per la taratura delle proprie apparecchiature.

Per i laboratori di taratura, il programma di taratura delle apparecchiature deve essere concepito ed attivato in modo da assicurare che le tarature e le misurazioni eseguite dal laboratorio siano riferibili al Sistema Internazionale delle Unità (SI) [32].

Un laboratorio di taratura stabilisce la riferibilità dei propri campioni di misura e degli strumenti per misurazione, relativi al sistema SI, a mezzo di una catena ininterrotta di tarature e confronti che li collegano

ai relativi campioni primari delle unità di misura SI. Il collegamento alle unità SI può essere ottenuto facendo riferimento ai campioni nazionali di misura. I campioni nazionali di misura possono essere campioni primari, che sono la realizzazione primaria delle unità SI o rappresentazioni riconosciute delle unità SI fondate su costanti fisiche fondamentali, o possono essere campioni secondari tarati da un altro istituto nazionale di metrologia. Quando si utilizzano servizi di taratura esterna, la riferibilità delle misure deve essere assicurata dall'impiego di servizi di laboratori di taratura che possano dimostrare competenza e capacità nell'eseguire misurazioni ed assicurare la riferibilità.

Per i laboratori di prova, i requisiti enunciati sopra si applicano alle apparecchiature per misurazioni e di prova utilizzate con funzione di misurazione, a meno che sia stato stabilito che il contributo derivante dalla taratura contribuisca scarsamente all'incertezza totale del risultato di prova. Quando si presenta questa situazione, il laboratorio deve assicurare che l'apparecchiatura utilizzata sia in grado di fornire l'incertezza di misura richiesta.

3.9 Campioni di riferimento e materiali di riferimento

Il laboratorio deve disporre di un programma e di una procedura per la taratura dei propri campioni di riferimento. I campioni di riferimento devono essere tarati da un organismo che sia in grado di fornire la riferibilità. Tali campioni di misura di riferimento conservati dal laboratorio devono essere utilizzati soltanto per la taratura e non per altri scopi, salvo sia possibile dimostrare che non siano invalidate le proprietà come campioni di riferimento. I campioni di riferimento devono essere tarati prima e dopo ogni messa a punto. Ogni qual volta possibile, i materiali di riferimento devono essere riferibili alle unità SI, o a materiali di riferimento certificati. I materiali di riferimento interni devono essere controllati nella misura in cui sia tecnicamente ed economicamente fattibile.

3.10 Campionamento

Il laboratorio deve disporre di un piano e di procedure di campionamento quando esegue il campionamento di sostanze, di materiali o prodotti destinati alle prove o alle tarature. Il piano di campionamento, così come la procedura di campionamento, deve essere disponibile nei luoghi dove sono effettuati i campionamenti. I piani di campionamento devono, quando ciò sia ragionevole, essere basati su appropriati metodi statistici. Il processo di campionamento deve tenere conto di fattori che devono essere controllati per assicurare la validità dei risultati di prova e di taratura.

Il campionamento è una procedura definita secondo cui una parte di una sostanza, materiale o prodotto, è prelevata per fornire, per le prove o le tarature, un campione rappresentativo della totalità. Un campionamento può essere ugualmente richiesto da specifiche appropriate secondo cui una sostanza, materiale o prodotto sono sottoposti a prove o a tarature. In certi casi (per esempio nelle analisi medico-legali), il campione può non essere rappresentativo, ma determinato dalla sua disponibilità.

Le procedure di campionamento dovrebbero descrivere i criteri di selezione, il piano di campionamento, di ritiro e di preparazione di uno o di più campioni a partire da una sostanza, da un materiale o da un prodotto per ottenere l'informazione richiesta.

Il laboratorio deve disporre di procedure per registrare i dati pertinenti e le operazioni riguardanti il campionamento che fanno parte delle prove o delle tarature da eseguire. Queste registrazioni devono comprendere le procedure di campionamento utilizzate, l'identificazione di chi effettua il campionamento, le condizioni ambientali (se pertinenti) e diagrammi o altri mezzi equivalenti per identificare il luogo di campionamento come necessario e, se appropriato, le statistiche su cui sono basate le procedure di campionamento.

3.11 Manipolazione degli oggetti da sottoporre a prova e a taratura

Il laboratorio deve disporre di procedure per il trasporto, la ricezione, la manipolazione, la protezione, l'immagazzinamento, la conservazione e/o l'eliminazione degli oggetti da sottoporre a prova e/o taratura,

comprese tutte le disposizioni necessarie per proteggere l'integrità degli oggetti da sottoporre a prova o taratura, così come gli interessi del laboratorio e del cliente.

Il laboratorio deve disporre di un sistema per identificare gli oggetti da sottoporre a prova e/o taratura. L'identificazione deve essere mantenuta durante tutta la vita dell'oggetto nel laboratorio. Il sistema deve essere concepito ed attuato in modo da assicurare l'impossibilità di confondere fisicamente gli oggetti o quando viene fatto riferimento ad essi nelle registrazioni o in altri documenti. Il sistema deve, se necessario, prevedere una suddivisione in gruppi di oggetti ed il trasferimento di oggetti all'interno o all'esterno del laboratorio. Il laboratorio deve disporre di procedure ed attrezzature appropriate per evitare il deterioramento, la perdita o il danneggiamento dell'oggetto da sottoporre a prova o a taratura durante le fasi di immagazzinamento, manipolazione e preparazione.

3.12 Assicurazione della qualità dei risultati di prova e di taratura

Il laboratorio deve disporre di procedure di tenuta sotto controllo della qualità per monitorare la validità delle prove e delle tarature effettuate. I dati risultanti devono essere registrati in modo che le tendenze siano rilevabili e, quando fattibile, devono essere applicate tecniche statistiche per riesaminare i risultati.

I dati di tenuta sotto controllo della qualità devono essere analizzati e, qualora si dimostrino al di fuori dei criteri predefiniti, devono essere adottate azioni pianificate per correggere il problema e per prevenire che siano riportati risultati non corretti.

3.13 Presentazione dei risultati e rapporti di prova

I risultati di ogni prova, taratura, o serie di prove o di tarature effettuate dal laboratorio, devono essere registrati in modo accurato, chiaro, non ambiguo ed oggettivo e in conformità alle istruzioni particolari date nei metodi di prova e di taratura.

I risultati devono essere generalmente registrati in un rapporto di prova o in un certificato di taratura, devono comprendere tutte le informazioni richieste dal cliente necessarie alla interpretazione dei risultati di prova o di taratura e tutte le informazioni richieste dal metodo utilizzato.

Salvo situazioni in cui il laboratorio abbia valide ragioni per non farlo, ciascun rapporto di prova o certificato di taratura deve comprendere almeno le seguenti informazioni:

- a) il titolo (per esempio "Rapporto di Prova" o "Certificato di Taratura");
- b) il nome e l'indirizzo del laboratorio ed il luogo dove le prove e/o le tarature sono state eseguite, se differente dall'indirizzo del laboratorio;
- c) una identificazione univoca del rapporto di prova o del certificato di taratura (come il numero di serie) e una identificazione su ogni pagina al fine di garantire che la pagina sia riconosciuta come parte del rapporto di prova o del certificato di taratura, ed una chiara identificazione della fine del rapporto di prova o del certificato di taratura;
- d) il nome e l'indirizzo del cliente;
- e) l'identificazione del metodo utilizzato;
- f) una descrizione, unitamente alla relativa condizione, e l'identificazione non ambigua dello/degli oggetto/i sottoposto/i a prova o a taratura;
- g) la data di ricevimento dello/degli oggetto/i sottoposto/i a prova o taratura quando questa è critica per la validità e l'applicazione dei risultati, e la/e data/e di esecuzione della prova o della taratura;
- h) il riferimento a piani e procedure di campionamento utilizzati dal laboratorio o da altri organismi quando questi influiscono sulla validità o sull'applicazione dei risultati;
- i) i risultati di prova o di taratura, con le unità di misura, quando appropriato;
- j) il/i nome/i, la/e funzione/i e la/e firma/e o identificazione equivalente della/e persona/e che autorizza/autorizzano l'emissione del rapporto di prova o del certificato di taratura;
- k) quando pertinente, una dichiarazione attestante che i risultati si riferiscono solo agli oggetti sottoposti a prova o a taratura.

Inoltre, i rapporti di prova devono comprendere, se necessario per l'interpretazione dei risultati di prova, quanto segue:

- a) scostamenti, aggiunte o esclusioni rispetto al metodo di prova e informazioni su specifiche condizioni di prova, come le condizioni ambientali;
- b) quando pertinente, una dichiarazione circa la conformità/non conformità ai requisiti e/o alle specifiche;
- c) quando applicabile, una dichiarazione circa l'incertezza di misura stimata; informazioni circa l'incertezza di misura sono necessarie nel rapporto di prova quando ciò influisce sulla validità o sull'applicazione dei risultati di prova, quando le istruzioni del cliente lo richiedono, o quando l'incertezza ha influenza sulla conformità ad un limite specificato;
- d) quando appropriato e necessario, pareri ed interpretazioni;
- e) informazioni aggiuntive che possono essere richieste da metodi specifici, da clienti o da gruppi di clienti.

In aggiunta ai requisiti elencati sopra, i rapporti di prova che contengono i risultati di campionamento, devono comprendere, se necessario per l'interpretazione dei risultati, quanto segue:

- a) la data del campionamento;
- b) l'identificazione non ambigua della sostanza, del materiale o del prodotto campionato (compresi il nome del costruttore, il modello o il tipo di designazione ed il numero di serie, se appropriato);
- c) il luogo del campionamento, compresi diagrammi, schizzi o fotografie;
- d) un riferimento al piano ed alle procedure di campionamento utilizzati;
- e) dettagli circa le condizioni ambientali durante il campionamento che possono avere effetto sull'interpretazione dei risultati;
- f) il riferimento ad ogni norma o altre specifiche concernenti il metodo o la procedura di campionamento, gli scostamenti, le aggiunte o le esclusioni rispetto alle relative specifiche.

Qualora siano incluse delle opinioni e delle interpretazioni, il laboratorio deve documentare la base su cui tali opinioni ed interpretazioni sono state formulate. I pareri e le interpretazioni devono essere chiaramente evidenziati, come tali, nel rapporto di prova.

3.14 *Struttura del manuale della qualità*

Si riporta di seguito la struttura di un possibile manuale della qualità, adottabile per il laboratorio oggetto del presente documento. Come possibili paragrafi, è ipotizzabile il seguente indice:

0	Indice e stato di revisione
1	Scopo e Campo di Applicazione
2	Normative di riferimento
3	Terminologia e Definizioni
4	Requisiti per la Gestione
4.1	Organizzazione
4.2	Sistema di Qualità
4.3	Controllo della Documentazione
4.4	Riesame delle Richieste, delle Offerte e dei Contratti
4.5	Subappalto di prove
4.6	Approvvigionamento di Servizi e Forniture
4.7	Servizi al Cliente
4.8	Reclami
4.9	Controllo delle attività di prova non conformi
4.10	Miglioramento

- 4.11 *Azioni Correttive*
- 4.12 *Azioni Preventive*
- 4.13 *Controllo delle RegISTRAZIONI*
- 4.14 *Verifiche Interne*
- 4.15 *Riesami del Sistema*

5 *Requisiti Tecnici*

- 5.1 *Generale*
- 5.2 *Personale*
- 5.3 *Luogo di lavoro e condizioni ambientali*
- 5.4 *Metodi di Prova e Taratura e Validazione dei Metodi*
- 5.5 *Apparecchiature*
- 5.6 *Riferibilità delle misure*
- 5.7 *Campionamento*
- 5.8 *Manipolazione degli oggetti da provare e tarare*
- 5.9 *Assicurazione della qualità dei risultati delle prove e tarature*
- 5.10 *Presentazione dei risultati*

In dettaglio, si riporta di seguito per grandi linee il contenuto di ciascun paragrafo, da sviluppare per ottenere il manuale della qualità del laboratorio. Ciascun paragrafo può indicare procedure, tecniche, metodologie, documenti e schede inserite come allegato allo stesso, in modo da renderne più snella la struttura ed agevolarne l'utilizzo.

0 *Indice e stato di revisione*

Contiene l'indice del manuale e l'indicazione sulle revisioni svolte.

1 *Scopo e Campo di Applicazione*

Contiene indicazioni sulla finalità del documento, in accordo con quanto richiesto da UNI CEI EN ISO/IEC 17025.

2 *Normative di riferimento*

Contiene l'elenco della normativa di riferimento impiegate per la predisposizione e l'attuazione del Sistema Qualità.

3 *Terminologia e Definizioni*

4 Contiene l'elenco della terminologia e delle definizioni impiegate nel Manuale; può essere sinteticamente riportato che la terminologia adottata è conforme a quanto prescritto da norme e documenti, quali UNI EN ISO 9000, ISO/IEC 2, VIM ecc. Ulteriori termini specifici nonché abbreviazioni sono da riportare in modo esaustivo.

4 *Requisiti per la Gestione*

4.1 *Organizzazione*

Contiene la descrizione del Sistema di Gestione per la Qualità, che può essere in sintesi costituito da:

- Manuale della Qualità
- Insieme delle procedure gestionali, che definiscono responsabilità ed attività di gestione della struttura
- Insieme delle procedure tecniche che definiscono responsabilità ed attività tecniche della struttura
- Modelli di registrazione che rappresentano l'evidenza dell'applicazione delle procedure e dei principi del Manuale.

In questo paragrafo sono inoltre da descrivere i documenti del Sistema di Gestione per la Qualità; tali documenti devono contenere descrizioni di:

- Processi dell'organizzazione, completi di interazioni, sequenze, monitoraggi e criteri adottati
- Risorse
- Attività per il raggiungimento degli obiettivi
- Attività per il miglioramento continuo
- Modalità di pianificazione
- Processi
- Attività ulteriori (outsourcing)

In questo paragrafo si riporta l'Organigramma funzionale della struttura, come diagramma a blocchi; non è necessario inserire in questo diagramma i nominativi delle persone incaricate.

Sono da inserire in questo paragrafo indicazioni specifiche su responsabilità ed autorità all'interno della struttura, sulle deleghe e sugli strumenti impiegati per l'attuazione e la diffusione dei principi del Sistema Qualità; possono essere indicati quali strumenti:

- La comunicazione in forma sistematica all'interno della struttura, a tutti i livelli ed organismi
- L'aggiornamento programmato della politica della qualità
- Le modalità e le tempistiche adottate per il riesame dell'organizzazione

Particolare attenzione deve essere data alle modalità individuate per il conseguimento di imparzialità, indipendenza ed integrità del personale, ed alle modalità in cui espletare i processi di comunicazione interna.

Sono da inserire inoltre le deleghe al Responsabile Tecnico, che usualmente possono consistere in:

- predisposizione del sistema Qualità
- diffusione a tutti i livelli dell'organizzazione dei principi del manuale e della politica della qualità
- la redazione di rapporti periodici sul Riesame del Sistema
- l'attuazione del sistema, delle verifiche di conformità delle verifiche ispettive interne con
- la diffusione dei risultati delle verifiche e degli scostamenti dagli standard fissati;
- il mantenimento e miglioramento del sistema
- la gestione dei rapporti con gli organismi di accreditamento e certificazione in merito al sistema di gestione della qualità
- il coordinamento di eventuali Unità Operative Distaccate.

4.2 *Sistema di Qualità*

Sono da inserire in questo paragrafo indicazioni sulle modalità impiegate per il perseguimento e continuo miglioramento degli standard qualitativi.

Possono essere indicate in questo paragrafo le caratteristiche, le procedure e gli obiettivi di eventuali uffici preposti alla qualità. Sono da riportare indicazioni sulle competenze del Responsabile della Qualità, nonché sulla Politica per la Qualità. Sono da inserire inoltre riferimenti agli obiettivi della qualità, alla pianificazione del sistema di gestione per la qualità ed al Manuale stesso, in tale contesto.

4.3 *Controllo della Documentazione*

Sono da inserire in questo paragrafo indicazioni sintetiche sulla tipologia dei documenti utilizzati e sulle modalità operative per il controllo e la gestione degli stessi.

I documenti possono essere organizzati in tre categorie:

- Documenti di gestione, che, ispirandosi alle politiche della qualità, diano i principi del sistema (manuale, norme ecc.)
- Documenti di registrazione, che diano evidenza dello svolgersi delle attività
- Documenti di commessa, che operativamente delineano le modalità in cui i servizi sono resi.

Sono da inserire in questo paragrafo indicazioni inerenti l'identificazione e la redazione dei documenti, la loro verifica e approvazione, la loro distribuzione, archiviazione e redazione (compresa la modifica).

4.4 *Riesame delle Richieste, delle Offerte e dei Contratti*

Sono da inserire in questo paragrafo indicazioni inerenti le procedure adottate nella gestione di contratti od ordini per le attività di prova.

Una prima fase può consistere nella determinazione dei requisiti inerenti le prove richieste, con il coinvolgimento del cliente e la possibilità di accogliere particolari richieste dello stesso; l'esito è la richiesta di offerta.

Una seconda fase può prevedere un'analisi dell'offerta, mediante anche interazioni con il cliente, dal punto di vista tecnico.

Eventuali modifiche al contratto od ordine possono essere discusse con il cliente, ed una revisione dell'offerta può essere emessa in questa fase.

A valle di ciascuna prova dovranno essere gestite le registrazioni del processo svolto; particolare attenzione dovrà essere attribuita alla comunicazione con il cliente.

4.5 *Subappalto di prove*

Se previste, devono essere riportate in questa sezione le indicazioni sulle procedure di subappalto di prove presso terzi.

4.6 *Approvvigionamento di Servizi e Forniture*

Si inseriscono in questa sezione le indicazioni sulle procedure adottate per l'acquisizione di prodotti e servizi, in conformità con i requisiti richiesti e la qualità attesa.

Si devono riportare le procedure per la qualifica dei fornitori, e la gestione dei rapporti con gli stessi; devono essere indicate le informazioni inerenti l'approvvigionamento, per la corretta identificazione dei beni e servizi da acquistare, con la corrispondente procedura di registrazione.

Deve essere inoltre riportata la procedura per la verifica dei prodotti acquisiti, dando possibilità al cliente di accedere alla documentazione e di approvare eventuali attività o beni di acquisizione da terzi.

4.7 *Servizi al Cliente*

Tra i servizi al cliente devono essere indicati gli impegni che si sottoscrivono con lo stesso, quali la riservatezza, l'assistenza e la politica in merito alla formulazione di interpretazione dei risultati, se richiesti dal cliente, comunicazione e valutazione della soddisfazione. Devono essere riportate in questo paragrafo indicazioni sulle procedure adottate.

4.8 *Reclami*

Si riportano in questo paragrafo le procedure per la gestione dei reclami.

4.9 *Controllo delle attività di prova non conformi*

Si definiscono in questo paragrafo le politiche e le procedure atte ad evitare lo svolgimento di attività o l'utilizzo di apparati o servizi in modo non conforme ai requisiti richiesti ed alla qualità stessa.

Devono essere riportate le procedure impiegate per analizzare e tenere sotto controllo le non conformità.

4.10 *Miglioramento*

Si riportano in questo paragrafo le politiche e le procedure volte al conseguimento del miglioramento continuo, per il progressivo incremento dell'efficacia della struttura.

4.11 *Azioni Correttive*

In accordo con le esigenze del sistema qualità, è necessario prevedere l'adozione di azioni correttive per l'eliminazione delle non conformità. In questo paragrafo devono essere descritte le azioni correttive previste per i differenti tipi di non conformità e reclamo riscontrati.

4.12 *Azioni Preventive*

In analogia con le azioni correttive, si richiede l'implementazione di azioni preventive atte a prevenire il manifestarsi di non conformità e/o ad evitare che esse si ripetano. In questo paragrafo devono essere riportate tali azioni.

4.13 *Controllo delle Registrazioni*

In questo paragrafo sono riportate le procedure adottate per il controllo delle registrazioni, in termini di identificazione, raccolta, catalogazione, accesso, archiviazione, conservazione, aggiornamento ed eliminazione.

Particolare attenzione deve essere data alla procedure inerenti le registrazioni di carattere tecnico.

4.14 *Verifiche Interne*

Le modalità con cui si svolgono le verifiche interne sono riportate in questo paragrafo; dette verifiche sono propedeutiche allo svolgimento delle verifiche svolte da organismi esterni, per il mantenimento o rinnovo delle convenzioni con organismi quali ACCREDIA.

4.15 *Riesami del Sistema*

In questo paragrafo sono riportate le procedure adottate per il riesame di tutto il sistema, che si effettua almeno con cadenza annuale. Devono essere definiti i documenti che sono da considerare in ingresso al processo di riesame, nonché i documenti in uscita dallo stesso. Deve essere inoltre descritta la procedura di svolgimento del riesame.

5

Requisiti Tecnici

5.1 *Generale*

In questo paragrafo si riportano in sintesi le risorse che sono parte del sistema, in termini di personale, metodi di prova e di validazione, apparecchiature, tecniche di campionamento e di manipolazione dei campioni, servizi generici.

5.2 *Personale*

In questo paragrafo sono indicate le prescrizioni per la qualificazione e l'addestramento del personale, con riferimento alle diverse funzioni indicate nell'organigramma della struttura; sono perseguiti gli obiettivi di competenza, consapevolezza ed addestramento, mediante l'istituzione di attività di formazione. Sono valutate le competenze del personale, mediante opportune procedure basate sull'analisi delle prove svolte, in termini di efficacia, nonché dall'esito delle attività di formazione ed addestramento.

E' data ampia importanza alla tutela della proprietà industriale e alla riservatezza delle informazioni, mediante la formazione specifica del personale in tal senso.

5.3 *Luogo di lavoro e condizioni ambientali*

Sono da inserire in questo paragrafo la descrizione delle strutture in cui materialmente sono svolte le attività, nonché le caratteristiche generali degli impianti e dei servizi predisposti; sono da specificare le modalità di gestione e di mantenimento della strumentazione, con particolare attenzione ai campioni ed alla strumentazione di precisione.

5.4 *Metodi di Prova e Validazione dei Metodi*

In questo paragrafo sono riportate le procedure adottate per lo svolgimento delle prove, secondo quanto prescritto dalla normativa, e sono riportate le metodologie seguite qualora la normativa non fosse sufficientemente esaustiva in termini operativi.

Le procedure di prova sono organizzate secondo diversi documenti, che riportano, ad esempio:

- scopo e campo di applicazione
- documenti di riferimento
- apparecchiature, macchinari, strumenti, campioni di riferimento necessari per l'esecuzione delle attività
- modelli di registrazione da utilizzare
- espressione e valutazione dei risultati di prova, inclusa l'incertezza di misura
- ove necessario, le modalità per la preparazione e manipolazione di materiali e campioni
- documentazione finale

Devono essere presentate le modalità con cui sono pianificate e gestite le prove, organizzabili secondo schede operative.

I metodi utilizzati devono essere validati, con diversi possibili approcci che devono essere presentati in questo paragrafo; particolare attenzione va attribuita alle procedure di approvazione.

L'incertezza di misura deve essere sempre tenuta in considerazione, preferibilmente mediante una procedura di valutazione ed espressione dedicata.

5.5 *Apparecchiature*

Per quanto concerne le apparecchiature, sono da riportare in questo paragrafo le procedure di identificazione, la gestione delle stesse, le modalità di intervento in presenza di sovraccarichi o errato utilizzo, la manutenzione, la manipolazione, custodia e conservazione.

5.6 *Riferibilità delle misure*

La riferibilità delle misure deve essere assicurata da un programma di interventi mirati, mediante definizione delle procedure di taratura per le apparecchiature, dei campioni e degli accessori. Si devono tenere in conto la frequenza d'utilizzo, il numero di utilizzatori, le condizioni di conservazione, la storia dello strumento, la criticità delle misure, le indicazioni fornite dal costruttore ed organizzazione di accreditamento e la normativa di riferimento. In questo paragrafo sono descritte le procedure predisposte per soddisfare i requisiti di mantenimento della riferibilità.

5.7 *Campionamento*

Qualora implementabile, il campionamento e le procedure inerenti sono da riportare in questo paragrafo. Nel caso di prove sui motori in accordo con il Regolamento della Commissione 640/2009 [1], le attività della struttura si considerano a valle di procedimento di campionamento dei motori, vista la finalità di monitoraggio del mercato che è al centro di detto regolamento, e che deve essere compiuta necessariamente da un ente terzo.

5.8 *Manipolazione degli oggetti da provare*

In questo paragrafo sono descritte le procedure predisposte per il ricevimento e l'immagazzinamento degli oggetti da provare, la loro identificazione, movimentazione e circolazione all'interno della struttura. Sono inoltre presentate le procedure per la protezione da possibili danni.

5.9 *Assicurazione della qualità dei risultati delle prove e tarature*

La qualità dei risultati richiede l'adozione di processi di monitoraggio, misurazione, analisi e miglioramento finalizzate alla verifica di conformità del servizio, conformità ed adeguatezza del sistema di gestione della qualità e dell'efficacia del sistema.

In questo paragrafo sono da specificare le procedure per il controllo della qualità, dei Ring Test e prove interlaboratorio.

Sono inoltre da inserire indicazioni sul controllo dei dati, implementabile mediante tecniche basate su carte di controllo, confronto tra serie di dati e stima e contenimento dell'incertezza.

5.10 *Presentazione dei risultati*

Sono riportati in questo paragrafo sono riportate le modalità per l'emissione dei documenti che presentano l'esito delle prove, in forma di rapporto. Sono descritti in dettaglio i dati che sono da inserire, e le modalità con cui sono gestiti eventuali risultati ottenuti da terzi, le modalità di comunicazione elettronica dei risultati, e la gestione dei rapporti già emessi.

In allegato al Manuale della Qualità si producono la modulistica, le schede e le procedure dettagliate eventualmente richiamate nei paragrafi sopra elencati.

4 Definizione del protocollo per le procedure di verifica

La seconda parte delle attività previste mira a realizzare un protocollo contenente le procedure per le verifiche sui motori elettrici previste dal Regolamento della Commissione 640/2009 [1] per una facility fino a 15 kW.

4.1 Osservazioni sul collaudo del motore asincrono trifase

Lo svolgimento delle verifiche delle prestazioni dei motori asincroni si configura come una procedura di collaudo, che può essere intesa come un controllo di efficienza operativa dei motori stessi, per accertarne l'idoneità all'uso o la conformità ai requisiti fissati da norme o contratti; nel presente documento si fa riferimento al Regolamento della Commissione 640/2009 [1], ed alle norme IEC in materia di prove sulle macchine elettriche rotanti.

Tuttavia, è opportuno introdurre alcune osservazioni e richiami sulle prove sulle macchine asincrone, in modo che risulti più agevole la lettura dei paragrafi successivi.

Le prove che si effettuano usualmente sui motori asincroni hanno l'obiettivo di determinarne i parametri circuitali, per la sintesi della rete equivalente a frequenza di rete, o l'implementazione di modelli dinamici da impiegare nello sviluppo di sistemi di azionamento. La valutazione del rendimento può essere ottenuta con diverse modalità, che sono dipendenti dal livello di precisione desiderato, nonché dalla disponibilità di strumentazione e sistemi di alimentazione e di carico.

La prima fase di un collaudo consiste nell'acquisizione della documentazione associata al motore da provare, con particolare riferimento ai dati di targa, che ne sintetizzano i parametri nominali garantiti dal costruttore; tali dati devono essere conformi alla normativa vigente.

Acquisiti i valori dei dati di targa, si possono effettuare delle stime sugli intervalli di variazione dei parametri che dovranno essere misurati durante le prove, a seconda del tipo di approccio seguito per determinare il rendimento, diretto o indiretto.

Qualora si effettui la misurazione del rendimento con approccio indiretto, le prime misurazioni da svolgere sono quelle inerenti le resistenze degli avvolgimenti statorici, e rotorici per macchine a rotore avvolto, con macchina in equilibrio termico con l'ambiente. Dovranno essere inoltre misurate le temperatura dell'ambiente e degli avvolgimenti stessi, per successivi riporti a temperature di riferimento. Nel caso di macchine a rotore avvolto di dovrà misurare anche il rapporto di trasformazione tra statore e rotore, necessario per il riporto al primario della resistenza degli avvolgimenti rotorici.

Una volta effettuate tali prove, si procede usualmente con l'esecuzione della prova a vuoto, con macchina scollegata da qualsiasi carico, e nelle condizioni nominali di alimentazione. La prova a vuoto a tensione variabile consente di ottenere informazioni sulle perdite nel ferro, nonché individuare per regressione le perdite per attrito e ventilazione.

Sarà opportuno verificare che la macchina abbia raggiunto l'equilibrio termico, scaldandosi per effetto delle sole perdite a vuoto, prima di effettuare le misurazioni di tensione, corrente, potenza elettrica, scorrimento e temperatura del fluido di raffreddamento. I valori di potenza elettrica misurati dovranno essere opportunamente diminuiti delle perdite nel rame di statore dovute alla corrente a vuoto, il cui effetto non è trascurabile.

E' opportuno effettuare la misura delle resistenze degli avvolgimenti, con macchina calda, in modo da poter determinare correttamente tale contributo.

La prova a carico variabile è necessaria per la determinazione delle perdite a carico, nonché delle perdite addizionali. La macchina dovrà essere portata all'equilibrio termico, lasciandola riscaldare con le proprie perdite prima di effettuare le misurazioni; si misureranno i valori di tensione, corrente, potenza elettrica, coppia, scorrimento (o velocità angolare) e temperatura del fluido di raffreddamento. E' opportuno effettuare la misura delle resistenze degli avvolgimenti, con macchina calda, in modo da poter determinare correttamente tale contributo. Si consideri che, per lo svolgimento di prove a vuoto ed a carico, per motori di taglia fino a 15 kW, possono essere necessarie diverse ore, nell'ordine della decina, a causa dell'inerzia termica delle macchine stesse; ciò si riflette sul costo di esecuzione delle verifiche, in termini di occupazione dei banchi prova.

Qualora si effettui la misurazione del rendimento con approccio diretto, il numero di misurazioni da svolgere si riduce drasticamente; è necessario svolgere la prova a carico nominale, dopo che la macchina abbia raggiunto l'equilibrio termico, e misurare la potenza elettrica in ingresso e quella meccanica in uscita, in termini di coppia e velocità angolare, monitorando i valori di tensione e corrente e la temperatura. La prova richiede inoltre un tempo minore per lo svolgimento, poiché non sono richieste misurazioni di resistenza e prove a vuoto.

4.2 La verifica di conformità secondo la norma IEC 60034-2-1

Il Regolamento 640/2009 [1] nell'Allegato III recita:

“Al fine di verificare la conformità al presente regolamento gli Stati membri applicano la procedura descritta nell'allegato II e metodi di misura affidabili, accurati e riproducibili, che tengano conto dello stato dell'arte generalmente riconosciuto, compresi i metodi definiti nelle norme i cui numeri di riferimento sono stati pubblicati a tal fine nella Gazzetta ufficiale dell'Unione europea.

L'efficienza energetica è il rapporto tra potenza meccanica in uscita ed energia elettrica fornita.

Il livello di efficienza del motore, indicato all'allegato I, deve essere determinato alla potenza nominale (P_N), alla tensione nominale (U_N) e alla frequenza nominale (f_N).

La differenza tra potenza meccanica in uscita ed energia elettrica fornita è data dalle perdite che avvengono nel motore.

Le perdite totali devono essere determinate secondo uno dei seguenti metodi:

- misura delle perdite totali, oppure
- determinazione delle singole perdite e relativa somma.”

Come norma internazionale di riferimento, si considera la IEC 60034-2-1 [9], che resterà in vigore fino al mese di Agosto 2017.

La norma IEC 60034-2-1 [9] è inerente le macchine elettriche rotanti, ed è incentrata sui metodi normalizzati per la determinazione, mediante prove, delle perdite e del rendimento (escluse le macchine per veicoli di trazione). Le prove sui motori asincroni ne costituiscono quindi una sezione.

4.2.1 Termini e definizioni

Per quanto concerne termini e definizioni, nella norma all'articolo 3 si introducono i seguenti, che sono riportati limitatamente alle prove su motori asincroni (macchine ad induzione), in accordo con le norme indicati nella IEC 60034-1 [8], e nella IEC 60051-1 [13]:

- rendimento:
rapporto tra potenza resa e potenza assorbita espresse nelle stesse unità di misura e generalmente indicato in percento
- prove per la determinazione indiretta del rendimento
metodo generale secondo il quale la determinazione indiretta del rendimento viene effettuata misurando la potenza assorbita o la potenza resa e determinando le perdite totali. Queste perdite vengono aggiunte alla potenza resa, ottenendo così la potenza assorbita, oppure sottratte dalla potenza assorbita, ottenendo così la potenza resa
- prova a vuoto
prova nella quale una macchina funziona come motore senza fornire potenza meccanica utile all'albero, oppure nella quale la macchina funziona da generatore con i terminali in circuito aperto.
- perdite totali P_T
differenza tra la potenza assorbita e la potenza resa, equivalente alla somma delle perdite costanti, delle perdite a carico, delle perdite addizionali a carico e delle perdite nel circuito di eccitazione

- perdite costanti P_k
somma delle perdite nel ferro e delle perdite di attrito e di ventilazione
- perdite nel ferro P_{fe}
perdite nel ferro attivo e perdite addizionali a vuoto nelle altre parti metalliche
- perdite di attrito e di ventilazione P_{fw}
perdite di attrito: perdite dovute ad attrito (cuscinetti e spazzole, se non sollevate alle condizioni nominali) escluse le eventuali perdite in un sistema di lubrificazione separato. Le perdite nei cuscinetti comuni dovrebbero essere indicate separatamente, sia che siano forniti o no con la macchina. Le perdite nei cuscinetti dipendono dalle temperature di funzionamento dei cuscinetti, dal tipo di olio e dalla temperatura dell'olio.
perdite di ventilazione: perdite totali dovute all'attrito aerodinamico in tutte le parti della macchina, compresa la potenza assorbita dai ventilatori montati sugli alberi e da eventuali macchine ausiliarie che fanno parte integrante della macchina perdite a carico PL somma delle perdite nell'avvolgimento (I^2R) e delle perdite elettriche nelle eventuali spazzole
- perdite nell'avvolgimento
le perdite nell'avvolgimento sono le perdite ohmiche I^2R negli avvolgimenti dello statore e del rotore delle macchine a induzione;
- perdite nelle spazzole P_b (circuiti interessati dal carico)
perdite elettriche nelle spazzole (perdite di contatto/attrito incluse) in macchine a induzione a rotore avvolto
- perdite addizionali a carico PLL (perdite parassite a carico)
perdite dovute alla corrente di carico nelle parti attive del ferro e nelle altre parti metalliche esclusi i conduttori
- tensione ai terminali
per le macchine polifase a c.a. la media aritmetica delle tensioni di linea
- corrente di linea
per le macchine polifase a c.a. la media aritmetica delle correnti di linea
- resistenza tra i terminali
per le macchine polifase a c.a. la media aritmetica della resistenza tra ciascuna coppia di terminali. Per le macchine trifase collegate a stella, la resistenza di fase è 0,5 volte la resistenza tra i terminali. Per le macchine collegate a triangolo, la resistenza di fase è 1,5 volte la resistenza tra i terminali.

4.2.2 Simboli

Per quanto concerne i simboli, nella norma all'articolo 4 si introducono i seguenti, che sono riportati limitatamente alle prove su motori asincroni (macchine ad induzione), con le relative unità di misura:

- $\cos \varphi$ è il fattore di potenza (sotto l'ipotesi di regime sinusoidale)
- f è la frequenza di alimentazione, [Hz]
- I è la corrente media di linea, [A]
- k_θ è il fattore di correzione della temperatura
- n è la velocità di funzionamento, [s^{-1}]

- p è il numero di coppie di poli
- P è la potenza, [W]
- P_0 è la potenza assorbita a vuoto, [W]
- P_1 è la potenza assorbita, [W]
- P_2 è la potenza resa, [W]
- P_b è la perdita nelle spazzole, [W]
- P_{fe} sono le perdite nel ferro, [W]
- P_{fw} sono le perdite di attrito e di ventilazione, [W]
- P_C sono le perdite costanti, [W]
- P_L sono le perdite a carico, [W]
- P_{Lr} sono le perdite residue, [W]
- P_{LL} sono le perdite addizionali a carico, [W]
- P_{mech} è la potenza meccanica, [W]
- P_k sono le perdite in cortocircuito, [W]
- P_T sono le perdite totali, [W]
- P_w sono le perdite nell'avvolgimento, [W] dove il pedice w è solitamente sostituito da a , f , e , s oppure r
- R è la resistenza dell'avvolgimento, Ω
- R_{ll} è la resistenza media tra i terminali, Ω
- R_{ph} è la resistenza media di fase, Ω
- s è lo scorrimento, in valore relativo della velocità sincrona
- T è la coppia della macchina, [N·m]
- T_d è la lettura del dispositivo di misura della coppia, [N·m]
- T_c è la correzione della coppia, [N·m]
- U è la tensione media ai terminali, [V]
- U_0 è la tensione a vuoto ai terminali, [V]
- U_N è la tensione nominale ai terminali, [V]
- η è il rendimento
- ϑ_0 è la temperatura iniziale dell'avvolgimento, [°C]
- ϑ_a è la temperatura ambiente, [°C]
- ϑ_c è la temperatura di ingresso del fluido refrigerante primario, [°C]
- ϑ_w è la temperatura dell'avvolgimento, [°C]
- τ è una costante di tempo, [s]

4.2.3 Prescrizioni fondamentali

All'articolo 5 di [9], sono introdotte le prescrizioni fondamentali, inerenti le metodologie di determinazione del rendimento, l'incertezza, i metodi preferibili per provare le diverse tipologie di macchine, la strumentazione, le unità di misura e la resistenza.

In sintesi, le prove per la determinazione del rendimento possono essere raggruppate in tre categorie:

- a) Misura della potenza assorbita e della potenza resa su una singola macchina.
Si tratta del metodo diretto, non previsto dal Regolamento 640/2009 [1].
- b) Misura della potenza assorbita e della potenza resa su due macchine identiche accoppiate meccanicamente in opposizione e connesse a due sistemi elettrici separati. Si tratta di un metodo non previsto dal Regolamento 640/2009 [1].
- c) Misura delle perdite effettive della macchina in una particolare condizione di prova. Solitamente queste non sono le perdite totali, ma ne comprendono alcune componenti. Il metodo consente tuttavia di essere utilizzato per calcolare le perdite totali o una componente delle perdite. La determinazione delle perdite totali deve essere effettuata mediante uno dei seguenti metodi:

- misura delle perdite totali;
- determinazione mediante sommatoria delle perdite separate;

Considerata la taglia dei motori asincroni oggetto di prova nel presente documento, nel seguito si farà riferimento al metodo di determinazione mediante sommatoria delle perdite separate.

Per quanto concerne l'incertezza di misura, è stata analizzata nel paragrafo 2.1 del presente documento. La norma IEC 60034-2-1 [9] non fa riferimento a valori numerici per la determinazione dei livelli di incertezza consigliati o richiesti, in quanto questi richiederebbero analisi approfondite ottenibili mediante determinazione di valori rappresentativi e confrontabili. La norma introduce una classificazione qualitativa, con tre livelli:

- "bassa" si applica a determinazioni del rendimento che si basano unicamente sui risultati di prova;
- "media" si applica a determinazioni del rendimento che si basano su approssimazioni limitate;
- "alta" si applica a determinazioni del rendimento che si basano su ipotesi/presunzioni.

In sintesi, si definiscono a bassa incertezza le determinazioni in cui non vi sono assunti teorici in sostituzione di prove sperimentali; a rigore questo approccio, sebbene indicata una prassi preferibile, non tiene conto della qualità con cui le misurazioni sono condotte, né la propagazione dell'incertezza e nelle misurazioni che coinvolgono più grandezze.

In Tabella 2 della norma IEC 60034-2-1 [9] si riportano i metodi, gli articoli di riferimento, i metodi preferiti, le attrezzature richieste ed il livello di incertezza per le prove sui motori asincroni. Si osserva che, in contrasto con il Regolamento 640/2009, il metodo preferito per la misurazione del rendimento per i motori asincroni monofase e trifase di taglia inferiore ed uguale a 1 kW è quello diretto, mentre il metodo preferito per la misurazione del rendimento per motori asincroni trifase di potenza maggiore di 1 kW è quello mediante determinazione della somma delle perdite separate, con e senza prova a carico.

Come già evidenziato precedentemente in questo documento, la norma osserva che *"A causa dell'imprecisione di misura la determinazione del PLL in base alle perdite residue è limitata a coefficienti di correlazione (vedi 8.2.2.5.1.2) superiori a 0,95 e può avere inaccurately nella determinazione del rendimento superiori a $\pm 0,5$ %."*

Per quanto concerne l'alimentazione dei motori in prova, la norma all'articolo 5.4 si riferisce a quanto indicato nella norma IEC 60034-1 [8] all'articolo 7.2 e 8.3.1, già citati in precedenza. La frequenza durante le misure deve essere mantenuta entro il $\pm 0,3\%$ del valore nominale.

La strumentazione di misura deve soddisfare le specifiche già illustrate al paragrafo 2.1 del presente documento, nella norma indicate agli articoli da 5.5.1 a 5.5.6.

4.2.4 Resistenza di prova

All'articolo 5.7 di [9] si definiscono le modalità per la misurazione delle resistenze di prova. Per macchine polifase a c.a., $R = R_{ll}$ è la resistenza tra coppie di terminali dell'avvolgimento statorico o di armatura. In caso di macchine a induzione con rotore avvolto, $R_{r, ll}$ è la resistenza tra coppie di terminali del rotore. La resistenza di prova al termine della prova termica deve essere determinata come previsto dalla procedura di estrapolazione descritta in 8.6.2.3.3 della IEC 60034-1 [8], utilizzando la lettura al tempo più breve possibile invece delle letture plurime agli intervalli di tempo specificati nella Tab. 5 della Norma, e la successiva estrapolazione al tempo zero. La temperatura di prova degli avvolgimenti deve essere determinata secondo l'articolo 5.7.2 [8] che prescrive che la temperatura di prova dell'avvolgimento deve essere determinata mediante diversi metodi; per le applicazioni considerate nel presente documento, la temperatura è da determinarsi in base alla resistenza R_N ottenuta dalla prova a carico nominale con la procedura di estrapolazione descritta in 5.7.1 [8].

4.2.5 Correzione alla temperatura di riferimento

All'articolo 5.7.3 [9] si definiscono le modalità per la correzione alla temperatura di riferimento del fluido di raffreddamento; i valori di resistenza dell'avvolgimento rilevati durante la prova devono essere riferiti alla

temperatura di riferimento normalizzata di 25 °C. Il fattore di correzione per riportare la resistenza dell'avvolgimento (e lo scorrimento nel caso di macchine ad induzione) alla temperatura di riferimento normalizzata del fluido di raffreddamento di 25 °C deve essere determinato in base a

$$k_{\theta} = \frac{235 + \theta_w + 25 - \theta_c}{235 + \theta_w} \quad (42)$$

dove k_{θ} è il fattore di correzione della temperatura per gli avvolgimenti, θ_c è la temperatura all'ingresso del fluido di raffreddamento durante la prova, θ_w è la temperatura dell'avvolgimento secondo l'articolo 5.7.2 [9]. La costante termica 235 è relativa al rame; deve essere sostituita da 225 nel caso di un avvolgimento in alluminio.

4.2.6 Metodi di prova

All'articolo 6 di [9] sono introdotti i metodi di prova per la determinazione del rendimento; per quanto concerne lo stato della macchina in prova, devono essere condotte su una macchina assemblata e provvista dei componenti essenziali per ottenere condizioni di prova uguali o molto simili alle condizioni normali di funzionamento.

Le prove che costituiscono una procedura di prova devono essere effettuate secondo la sequenza elencata. Non è necessario che le prove siano effettuate immediatamente una dopo l'altra. Tuttavia, se nella sequenza alcune prove sono effettuate con ritardo o singolarmente, allora le condizioni termiche specificate devono essere ristabilite prima di rilevare i dati di prova.

Sui motori a induzione con rotore avvolto con dispositivo di sollevamento delle spazzole, le spazzole devono essere sollevate durante le prove, con l'avvolgimento del rotore cortocircuitato.

4.2.7 Prove a vuoto

All'articolo 6.4.2 [9] sono riportate le condizioni per lo svolgimento della prova a vuoto, necessaria per la determinazione delle perdite addizionali.

Le perdite a vuoto devono essere stabilizzate con riferimento alla frequenza ed alla tensione nominali. Le perdite a vuoto sono considerate stabilizzate quando la potenza assorbita a vuoto varia di un valore uguale o inferiore al 3 %, quando misurata tra due intervalli successivi di 30 min. Le perdite a vuoto sono considerate stabilizzate anche quando la prova a vuoto viene effettuata immediatamente dopo la prova a carico.

Per la determinazione dei diversi contributi delle perdite, in termini di perdite per attrito e ventilazione, e nel ferro, nell'articolo 6.4.2.3 [9] si prescrive di eseguire un numero minimo di sette misure dei valori di tensione, inclusa quella a tensione nominale, in modo che: quattro o più valori siano rilevati a intervalli approssimativamente uguali compresi tra 125 % e 60 % della tensione nominale; tre o più valori siano rilevati a intervalli approssimativamente uguali compresi tra 50 % e circa 20 % della tensione nominale.

La prova deve essere effettuata il più velocemente possibile eseguendo le letture in ordine decrescente di tensione. Si devono misurare per ciascun valore di tensione: U_0 , I_0 , P_0 , R_0 con R_0 determinato misurando la resistenza dopo le letture al valore minimo di tensione.

4.2.8 Prove a carico

Secondo l'articolo 6.4.4.1 [9], la prova di riscaldamento a carico nominale deve essere eseguita ponendo la macchina sotto carico con mezzi opportuni (banchi di prova) alimentata con valori nominali, e fatta funzionare finché sia raggiunto l'equilibrio termico (gradiente di 2 K all'ora).

Al termine della prova a carico nominale, bisogna rilevare: P_N , I_N , U_N , s , f , θ_c , $R_N = R$ (la resistenza di prova al carico nominale conforme a 5.7.1 [9]) e θ_N (la temperatura dell'avvolgimento a carico nominale conforme a 5.7.2 [9]).

All'articolo 6.4.4.2 [9] si riportano le prescrizioni per lo svolgimento corretto della prova a carichi variabili; prima di iniziare a rilevare i dati per questa prova, la temperatura degli avvolgimenti deve essere entro 5 K rispetto alla temperatura ϑ_N , ottenuta dalla prova di riscaldamento a carico nominale (vedi 6.4.4.1 [9]).

La macchina deve essere messa sotto carico con mezzi adeguati. Si regola il carico in modo da ottenere sei differenti punti di funzionamento. Quattro punti di carico dovrebbero essere scelti in modo da essere egualmente distribuiti tra non meno del 25 % e fino al 100 % incluso del carico nominale. Gli ultimi due punti di carico, approssimativamente distribuiti equamente, dovrebbero essere scelti al di sopra del 100 % e non oltre il 150 % del carico nominale. Con la macchina a carico, iniziare le prove dal valore di carico più elevato e procedere in senso discendente verso il più basso. Queste prove devono essere effettuate il più velocemente possibile per ridurre al minimo le variazioni di temperatura nella macchina durante le prove.

Nelle macchine a c.a., la variazione della frequenza tra tutti i punti deve essere inferiore allo 0,1 %. Misurare R prima dei rilievi al carico massimo e dopo i rilievi al carico minimo. Il valore della resistenza R al carico 100 % e ai carichi superiori deve essere quello determinato prima della lettura al carico massimo. La resistenza R da considerare per i carichi inferiori al 100 % deve essere determinata supponendo una relazione di linearità di R in funzione del valore del carico, e utilizzando come estremi della relazione lineare i valori delle letture eseguite prima della prova al carico massimo e dopo la prova al carico minimo del 25 %. Rilevare per ciascun punto di carico devono essere misurati U , I , P_1 , R , n , f , T dove R è conforme a quanto indicato all'articolo 5.7.1 della norma [9].

La misurazione della coppia, con trasduttori in grado di soddisfare le prescrizioni di precisione pari $\pm 0,2\%$ del fondo scala, è prescritta dall'articolo 6.4.5.3 [9], per la prova a carico con misurazione della coppia; tale prova è necessaria per la determinazione delle perdite addizionali.

4.2.9 Determinazione del rendimento

L'articolo 8 della norma IEC 60034-2-1 [9] è interamente dedicato alla determinazione del rendimento per i motori asincroni. All'articolo 8.2.2. [9] e seguenti si riportano le modalità di svolgimento delle prove per la determinazione della somma delle perdite separate.

Il rendimento in questo caso si può correttamente esprimere come:

$$\eta = \frac{P_1 - P_T}{P_1} = 1 - \frac{P_T}{P_1} \quad (43)$$

dove P_1 è la potenza assorbita determinata dalla prova a carico nominale secondo 6.4.4.1, P_2 è la potenza resa e P_T è in accordo a 8.2.2.2; Le perdite totali devono essere calcolate come somma delle perdite costanti, perdite a carico e perdite addizionali a carico, secondo la relazione:

$$P_T = P_k + P_s + P_r + P_{LL} \quad (44)$$

dove P_k sono le perdite costanti, intese come somma dei contributi per attrito e ventilazione e nel ferro, P_s sono le perdite a carico nell'avvolgimento di statore, P_r sono le perdite a carico nell'avvolgimento di rotore, e P_{LL} sono le perdite addizionali a carico.

4.2.10 Perdite costanti

L'articolo 8.2.2.3.1 [9] riporta le generalità per la determinazione delle perdite costanti. Mediante sottrazione delle perdite a vuoto nell'avvolgimento (riferite alla temperatura durante la prova a vuoto) dalla potenza assorbita a vuoto si determinano le perdite costanti che sono la somma delle perdite di attrito, di ventilazione e nel ferro. Determinare le perdite costanti per ciascun valore di tensione rilevato durante le prove a vuoto a tensione all'articolo 6.4.2.3 [9].

$$P_k = P_{fe} + P_{fw} = P_0 - P_s = P_0 - 1.5 \cdot I_0^2 \cdot R_{110} = P_0 - 3 \cdot I_0^2 \cdot R_0 \quad (45)$$

$R = R_{ll}$ è la resistenza tra coppie di terminali dell'avvolgimento statorico o secondo l'articolo 3.6.3 [9]; per le macchine polifase a c.a. è la media aritmetica della resistenza tra ciascuna coppia di terminali. Per le macchine trifase collegate a stella, la resistenza di fase è 0,5 volte la resistenza tra i terminali. Per le macchine collegate a triangolo, la resistenza di fase è 1,5 volte la resistenza tra i terminali.

Tale approccio è necessario per tenere conto delle perdite nell'avvolgimento di statore dovute alla corrente a vuoto, che non sono trascurabili.

La valutazione del contributo di perdite per attrito e ventilazione è indicata all'articolo 8.2.2.3.2 [9]. Si individua il metodo di estrapolazione a tensione zero dei valori P_k specificati sopra. In particolare, fra i valori delle perdite a vuoto determinati, si utilizzano tutti quelli che non mostrano un significativo effetto di saturazione per tracciare una curva delle perdite costanti P_k in funzione del quadrato della tensione U_0^2 . Si estrapola una linea retta fino a tensione zero. L'intersezione con l'asse di tensione zero costituisce le perdite di attrito e ventilazione P_{fw} . Le perdite di attrito e ventilazione sono considerate indipendenti dal carico e lo stesso valore di perdite di attrito e ventilazione può essere usato per ciascuno dei punti di carico.

La valutazione delle perdite nel ferro è indicata all'articolo 8.2.2.3.3 [9]; si utilizzano le grandezze misurate in corrispondenza ai valori di tensione compresi tra il 60 % e il 125 % della tensione nominale, tracciare la curva di $P_{fe}=P_k-P_{fw}$ in funzione della tensione U_0 . Le perdite nel ferro nel punto di carico desiderato sono ricavate dalla curva alla tensione U_r che tiene conto della caduta di tensione resistiva dell'avvolgimento primario di statore, definita come:

$$U_r = \sqrt{\left(U - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}\right)^2 + \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I \cdot R \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I}\right)^2}\right]^2} \quad (46)$$

Dove P_1 , I , R ed U sono definiti nell'articolo 6.4.4.2 [9], in cui è descritta la prova a carico variabile.

4.2.11 Perdite a carico

L'articolo 8.2.2.4.1.2 [9] definisce le modalità di valutazione delle perdite nell'avvolgimento di statore, nonché la correzione di temperatura. Durante lo svolgimento della prova a carico variabile, definita negli articoli 6.4.4.1 e 6.4.4.2 [9], le perdite non corrette nell'avvolgimento di statore, per ogni punto di carico, sono:

$$P_s = 1.5 \cdot I^2 \cdot R \quad (47)$$

Con I ed R definiti in accordo con l'articolo 6.4.4.1 [9].

Le perdite corrette nell'avvolgimento di statore per ciascun punto di carico sono determinate utilizzando la resistenza dell'avvolgimento di statore R_N ottenuta dalla prova a carico nominale, corretta alla temperatura di riferimento del fluido di raffreddamento di 25 °C:

$$P_{s,\theta} = 1.5 \cdot I^2 \cdot R_N \cdot k_\theta \quad (48)$$

dove k_θ è secondo quanto definito all'articolo 5.7.3.

Il secondo contributo di perdite a carico sono le perdite nell'avvolgimento di rotore, che sono presentate nell'articolo 8.2.2.4.1.3 [9], assieme con la correzione di temperatura.

Per ciascun punto di carico, analogamente a quanto illustrato per le perdite nell'avvolgimento di statore, le perdite non corrette sono:

$$P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) \cdot s \quad (49)$$

con

$$s = 1 - \frac{p \cdot n}{f} \quad (50)$$

Dove p è il numero di poli del motore, P_1 è secondo l'articolo 6.4.4.1 [9]; P_s , n ed f sono secondo l'articolo 6.4.4.1 [9] e P_{fe} è secondo l'articolo 8.2.2.3.3 [9].

Se consideriamo i valori di velocità di rotazione espressi in giri/minuto, la (50) diviene:

$$s = 1 - \frac{p \cdot n}{60 \cdot f} \quad (51)$$

Le perdite corrette nell'avvolgimento di rotore per ciascun punto di carico sono determinate utilizzando il valore di scorrimento, rilevato per ciascuno dei punti e corretto, alla temperatura di riferimento del fluido di raffreddamento di 25 °C ed utilizzando il valore corretto delle perdite nell'avvolgimento di statore per ciascuno dei punti:

$$P_{r,\theta} = (P_1 - P_{s,\theta} - P_{s,\theta}) \cdot s_\theta \quad (52)$$

dove: $P_{s,\theta}$ è secondo l'articolo 8.2.2.4.1.2 [9], P_{fe} è secondo l'articolo 8.2.2.3.3 [9], $s_\theta = sk_\theta$ è lo scorrimento corretto alla temperatura di riferimento del fluido di raffreddamento di 25 °C (5.7.3) e k_θ è secondo l'articolo 5.7.3:

$$s_\theta = \left(1 - \frac{p \cdot n}{60 \cdot f}\right) \cdot k_\theta \quad (53)$$

Per quanto concerne le perdite nelle spazzole, nel caso di rotore avvolto, queste sono incluse in quanto sopra indicato. Qualora si volesse determinarle in maniera dettagliata, si dovranno assumere valori convenzionali di caduta di tensione in base alla tipologia di spazzola, secondo quanto indicato all'articolo 8.2.2.4.1.4 [9].

4.2.12 Perdite addizionali a carico

La determinazione delle perdite addizionali a carico è da effettuarsi per ogni punto di carico, con un metodo di sottrazione; dalla potenza elettrica assorbita dal motore devono essere sottratte: la potenza resa, le perdite nell'avvolgimento di statore al valore di resistenza di ciascuna prova, le perdite nel ferro, le perdite di attrito e ventilazione e le perdite nell'avvolgimento di rotore corrispondenti al valore di scorrimento determinato:

$$P_{Lr} = P_1 - P_2 - P_{s,\theta} - P_{r,\theta} - P_{fw} - P_{fe} \quad (54)$$

dove, $P_2 = 2\pi nT$, e P_1 , T ed n sono potenza attiva assorbita, coppia e numero di giri nella prova a carico variabile all'articolo 6.4.4.2 [9]; P_s sono le perdite nell'avvolgimento di statore all'articolo 8.2.2.4.1.2 [9]; P_{fe} sono le perdite nel ferro all'articolo 8.2.2.3.3 [9]; P_{fw} sono le perdite per attrito e ventilazione all'articolo 8.2.2.3.2 e P_r sono le perdite nell'avvolgimento di rotore all'articolo 8.2.2.4.1.3 [9].

La norma prevede all'articolo 8.2.2.5.1.2 [9] che i dati delle perdite residue vengano trattati mediante analisi di regressione lineare, basata sull'espressione delle perdite in funzione del quadrato della coppia di carico secondo la relazione:

$$P_{Lr} = A \cdot T^2 + B \quad (55)$$

T è definita all'articolo 8.2.2.5.1.1 [9] e le costanti A e B sono determinate secondo quanto riportato agli articoli 6.4.4.2 e 8.2.2.5.1.1 [9], considerando almeno sei punti di carico, ed utilizzando le seguenti equazioni:

$$A = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N (P_{Lri} \cdot T_i^2) - \sum_{i=1}^N P_{Lri} \cdot \sum_{i=1}^N T_i^2}{N \cdot \sum_{i=1}^N T_i^4 - (\sum_{i=1}^N T_i^2)^2} \quad (56)$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^N P_{Lri}}{N} - A \cdot \frac{\sum_{i=1}^N T_i^2}{N} \quad (57)$$

Le (57) e (58) sono significative solo se i valori di P_{Lri} e T_i sono correlati; per effettuare la verifica di tale condizione, la [9] richiede di effettuare il calcolo del coefficiente di correlazione così definito:

$$\gamma = \frac{N \cdot \sum_{i=1}^N (P_{Lri} \cdot T_i^2) - \sum_{i=1}^N P_{Lri} \cdot \sum_{i=1}^N T_i^2}{\sqrt{[N \cdot \sum_{i=1}^N (T_i^2)^2 - (\sum_{i=1}^N T_i^2)^2] \cdot [N \cdot \sum_{i=1}^N P_{Lri}^2 - (\sum_{i=1}^N P_{Lri})^2]}} \quad (58)$$

Qualora il coefficiente di correlazione γ sia inferiore a 0,95 si suggerisce di cancellare il punto peggiore e ripetere la regressione; qualora il nuovo valore di γ aumenti fino a essere $\geq 0,95$ si può utilizzare questa seconda regressione. Qualora γ resti inferiore a 0,95 l'esecuzione delle misurazioni deve considerarsi insoddisfacente. L'origine della scarsa accuratezza nell'esecuzione della misurazioni dovrebbe essere indagata e corretta e la prova all'articolo 6.4.4.2 [9] dovrebbe essere ripetuta.

Effettuata la determinazione della costante A è stabilita, con $\gamma \geq 0,95$, per il valore delle perdite addizionali a carico si determinerà il valore delle perdite addizionali P_{LL} per ciascun punto di carico, come:

$$P_{LL}(T) = A \cdot T^2 \quad (59)$$

dove A e T sono secondo l'articolo 8.2.2.5.1.2 [9].

4.3 Osservazioni sulla determinazione delle incertezze di misura

Nella determinazione del rendimento del motore asincrono polifase, il risultato ottenuto non può essere considerato a prescindere dall'incertezza ad esso associata, che risulta essere necessaria per collocare il motore testato nella classificazione di livelli di efficienza energetica definiti dalla normativa IEC 60034-30-1 [11]. L'incertezza della misura del rendimento inoltre è il dato che consente di confrontare i valori di rendimento misurati sullo stesso motore in laboratori differenti, o su diversi motori di stessa taglia nello stesso laboratorio; in questi casi senza l'espressione corretta dell'incertezza di misura del rendimento, non è possibile applicare il concetto basilare di equivalenza tra misura, in accordo con quanto prescritto da ISO ENV 13005:2000 (GUM) [18]. La norma IEC 61034-2-1 [9] che definisce metodi per la determinazione delle perdite nelle macchine elettriche rotanti e dei rendimenti a partire da dati sperimentali, introduce alcuni requisiti di precisione sulla strumentazione che deve essere utilizzata nella misurazione delle grandezze elettriche, meccaniche e termiche. Tuttavia, l'espressione dell'incertezza del rendimento non viene espressamente affrontata, lasciando all'operatore che effettua le misurazioni la valutazione della stessa.

La norma IEC 61034-2-1 infatti afferma che *"E' difficile stabilire regole precise per la determinazione del rendimento. La scelta del metodo di prova da utilizzare dipende dalle informazioni richieste, dalla precisione richiesta, dal tipo e dalle dimensioni della macchina interessata e dall'apparecchiatura di prova disponibile (alimentazione, carico o macchina di trascinamento). Il metodo di prova dovrebbe essere scelto tra le procedure con incertezza minore."*

Inoltre, la ISO/IEC 17025 [17] prescrive che un laboratorio di taratura, o un laboratorio di prova che esegue le proprie tarature, deve avere e deve applicare una procedura per stimare l'incertezza di misura per tutte le tarature e tipi di taratura.

I laboratori di prova devono avere e devono applicare delle procedure per stimare l'incertezza di misura. In certi casi la natura dei metodi di prova può escludere il calcolo rigoroso dell'incertezza di misura, valido dal punto di vista metrologico e statistico. In questi casi il laboratorio deve almeno tentare di identificare tutte le componenti dell'incertezza e fornire una stima ragionevole, e deve assicurare che l'espressione del risultato non fornisca un'impressione errata dell'incertezza. Una stima ragionevole deve essere basata sulla conoscenza del metodo e sullo scopo della misurazione e deve far uso, per esempio, delle esperienze precedenti e della validazione dei dati.

Se consideriamo quanto prescritto nella ISO ENV 13005:2000 (GUM) [18], l'incertezza nelle misurazioni è generalmente costituita da diverse componenti, raggruppabili in due categorie in funzione del modo in cui i loro valori sono determinati [51]:

- A per quelle incertezze ottenute applicando metodi statistici ad una serie di dati sperimentali ; L'incertezza di tipo A fa riferimento ad $\bar{x}$ come stima del valore sperato del misurando e $\sigma(x)$ come stima della dev. std. della media.
- B per quelle incertezze non ottenute mediante osservazioni ripetute, ma che vengono descritte, valutate e limitate con altri metodi, quali ad esempio:
 - o l'esperienza dell'operatore,
 - o i risultati di esperimenti collaterali,
 - o gli effetti noti delle grandezze di influenza,
 - o una scelta di strumenti di caratteristiche superiori,
 - o l'adozione di opportune condizioni ambientali,

Le incertezze di tipo B non possono essere ridotte con metodi statistici.

Le incertezze di tipo A sono dovute alla presenza di processi di rumore casuale. Di esse è possibile darne una descrizione statistica e quindi individuare un processo di stima per ridurne, o eliminarne, l'influenza. Si considerino n osservazioni indipendenti x_i della grandezza x ottenute nelle stesse condizioni sperimentali.

Introdotta una opportuna distribuzione di probabilità, solitamente ma non necessariamente gaussiana (è sufficiente sia simmetrica), si calcola il valore medio $\bar{x}$ ed è immediato ricavare la varianza sperimentale e lo scarto quadratico medio, chiamato *scarto tipo u*. La stima del valore sperato è la *media aritmetica* delle osservazioni x .

Per quanto concerne le incertezze di categoria B, queste vengono valutate non con l'analisi statistica, ma in qualsiasi altro modo. La stima delle incertezze di tipo B è effettuata a priori, ed è basata su informazioni non provenienti dall'esperimento in oggetto, ma precedenti ad esso.

Tali informazioni possono provenire da:

- misurazioni effettuate da se o da altri durante prove precedenti ed indipendenti..;
- certificati di taratura, relazioni di prova, registri di laboratorio..;
- documentazione tecnica di strumentazione o impianti..;
- manuali d'uso, relazioni di collaudo, .. ;
- letteratura tecnica: libri, manuali, elenchi di costanti, .. ;
- esperienza del personale del laboratorio.

Come già detto, l'incertezza di tipo sistematico è prodotto dall'interazione di molteplici sorgenti di scarti di tipo sistematico. Se questi sono quantità note la misura può essere corretta; se i vari scarti non sono noti (perché dovuti a molteplici fattori non quantificabili) la misura non può essere corretta.

In questo caso si deve ipotizzare un'opportuna distribuzione di probabilità, per ognuna delle singole fonti di incertezza, per poter trattare assieme le incertezze dovute a cause diverse.

Il passo successivo è quello di combinare in una sola cifra tutte le stime delle incertezze di categoria B.

Questa combinazione viene fatta solitamente, ma non sempre, adottando per ciascuna fonte di incertezza una distribuzione di probabilità di categoria rettangolare, con l'ipotesi, Fig. 27, che ragionevolmente il valore del misurando sia compreso entro una fascia di ampiezza $2a$. Si mira solitamente per la scelta di a ad una valutazione realistica e non semplicemente prudentiale.

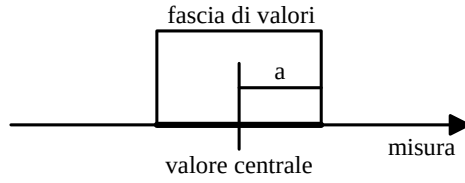


Fig 27 - Distribuzione di probabilità considerata.

La stima dell'incertezza tipo, per la grandezza in Fig.1, si ottiene come:

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (60)$$

Per come sono definite le procedure di misurazione descritte nel presente documento, in accordo con la normativa considerata, non sono prescritte misurazioni da effettuarsi con approccio statistico, in quanto si considerano misurazioni singole per ogni grandezza; quindi la determinazione dei contributi di incertezza di categoria A non risulta significativa, mentre sono da analizzare i contributi di categoria B, tra i quali sono rilevanti i contributi dovuti all'incertezza di misura dovuti alle specifiche della strumentazione, che sono state ampiamente descritte in precedenza nel presente documento.

Vista la necessità di effettuare misurazioni di grandezze derivate, è opportuno indicare quale procedimento si debba seguire, per grandezze non correlate e per grandezze correlate; esempio di quest'ultima categoria possono essere le grandezze di tensione a vuoto e perdite costanti, e le perdite addizionali a carico e la coppia.

Consideriamo che la grandezza y , non direttamente misurabile, sia esprimibile in funzione di N grandezze x_i , $y=f(x_1, \dots, x_N)$, e che siano note le incertezze $u(x_i)$ con cui le grandezze x_i sono state misurate; per via del tutto generale, in accordo con ISO ENV 13005:2000 (GUM) [18], l'incertezza della misura di y può essere definita come:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i)} \quad (61)$$

qualora le misurazione delle grandezze x_i siano non correlate. Per come è definito il metodo di misurazione delle perdite nella norma, l'ipotesi di non correlazione tra le grandezze non è applicabile per la determinazione di alcune delle incertezze richieste, quali quelle relative alle perdite nel ferro ed alle perdite addizionali che sono valutate mediante metodi di estrapolazione. È pertanto necessario ricorrere ad una diversa espressione per la propagazione dell'incertezza:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot u(x_i, x_j)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) \cdot u(x_i, x_j)} \quad (62)$$

Il parametro $u(x_i, x_j)$ è la covarianza di x_i e x_j , $Cov(x_i, x_j)$; se $x_i = x_j$ la covarianza coincide con la varianza. La covarianza esprime il grado di dipendenza statistica tra le stime delle due grandezze, e risulta nulla se le grandezze sono non correlate. La stima della covarianza richiede che siano effettuate N misurazioni congiunte delle grandezze x_i e x_j ; noti i valori medi X_i ed X_j si ha:

$$Cov(x_i, x_j) = E\{[x_i - E(x_i)] \cdot [x_j - E(x_j)]\} = E(x_i \cdot x_j) - E(x_i) \cdot E(x_j) \quad (63)$$

$Cov(x_i, x_j)$ è positiva se, mediamente, x_i e x_j variano in modo concorde (quando x_i supera il valor medio anche x_j supera il valor medio), negativa se variano in modo discorde (quando x_i supera il valor medio x_j non

lo supera, o viceversa), nulla se subiscono oscillazioni indipendenti (quando x_i supera il valor medio, x_j a volte lo supera a volte no).

Risulta quindi necessario determinare la covarianza delle grandezze in caso di grandezze correlate.

In accordo con ISO ENV 13005:2000 (GUM) [18], è possibile introdurre il coefficiente di correlazione, che deve essere determinato comunque per stimare la qualità del processo di misurazione di grandezze correlate:

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i \cdot x_j)}{u(x_i) \cdot u(x_j)} \quad (64)$$

Inserendo (65) in (63) si ottiene l'espressione che utilizzeremo nel seguito del documento:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot u(x_i, x_j)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial x_j} \right) \cdot u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j)} \quad (65)$$

Per ogni grandezza misurata in maniera indiretta, come grandezza derivata, la quantificazione dell'incertezza dovuta alla strumentazione è da valutarsi seguendo l'approccio definito.

4.4 Procedure di verifica dell'efficienza

Per procedere operativamente con lo svolgimento della verifica dell'efficienza di un motore asincrono, coerentemente con quanto presentato in questo documento, si propone la seguente procedura, corredata di tabelle, a titolo di esempio, da impiegare per la raccolta dei valori di misura.

1. Acquisizione della documentazione del motore da verificare; qualora si svolgano verifiche in modalità anonima, l'ente responsabile del campionamento dei motori da verificare dovrà comunicare al personale del laboratorio i dati di targa del motore, e quanto altro utile desumibile dalla documentazione del motore, senza che detto personale possa risalire al costruttore del motore stesso.
2. Elaborazione dei valori nominali del motore da verificare, quali modalità di concatenamento degli avvolgimenti di statore, tensione, corrente, frequenza, fattore di potenza, potenza, classe di isolamento, numero di giri, coppia.
3. Scelta della strumentazione più opportuna per lo svolgimento delle diverse prove, considerando le tipologie di prova e gli intervalli di variazione delle grandezze di misura, secondo quanto illustrato in dettaglio nel capitolo 2 del presente documento.
4. Misurazione delle temperature del motore in equilibrio termico con l'ambiente, e della temperatura del fluido di raffreddamento.

5. Misurazione della resistenza degli avvolgimenti del motore in equilibrio termico con l'ambiente.
6. Determinazione della modalità di svolgimento della prova a vuoto a tensione variabile, mediante definizione del numero di punti di tensione in corrispondenza dei quali effettuare le misurazioni.
7. Alimentazione del motore a tensione nominale, in modo che possa raggiungere una temperatura costante (gradiente 2 K/h) a seguito delle sole perdite a vuoto.
8. Monitoraggio continuo, durante la prova a vuoto, della simmetria della terna di tensione e della distorsione armonica, per verificare che non vi siano contributi significativi di coppie controrotanti che possano portare a sovrastima delle perdite.
9. A motore in condizione termiche stazionarie, esecuzione delle misurazioni nei diversi punti di tensione, registrando i seguenti valori, scelti in modo che la rappresentazione delle perdite in funzione della tensione al quadrato sia con passo uniforme sulle ascisse (il pedice m indica valore misurato):

Tensione [% di V_n]	22%	32%	45%	55%	63%	71%	77%	84%	89%	100%	105%	109,5%	114%
$V_{m,0}$ [V]													
$I_{m,0}$ [A]													
$P_{m,0}$ [W]													
$n_{m,0}$ [rpm]													
$R_{m,0}$ [Ω]													

Il valore $R_{m,0}$ si misura dopo le letture al valore minimo di tensione.

10. Determinazione del valore delle perdite P_k costanti sottraendo dalla potenza $P_{m,0}$ il contributo delle perdite nell'avvolgimento di statore per ogni valore di corrente misurato, secondo quando indicato da (45).
11. Determinazione delle perdite per attrito e ventilazione utilizzando i valori di perdite P_k , tracciando una retta in funzione della tensione al quadrato fino a tensione 0; l'intersezione con l'asse di tensione zero rappresenta il valore delle perdite per attrito e ventilazione.
12. Determinazione della modalità di svolgimento della prova a carico variabile, mediante definizione del numero di punti di carico in corrispondenza dei quali effettuare le misurazioni.
13. Alimentazione del motore a tensione, frequenza e carico nominali, in modo che possa raggiungere una temperatura costante (gradiente 2 K/h) a seguito delle sole perdite a carico

14. Monitoraggio continuo durante la prova a vuoto della simmetria della terna di tensione e della distorsione armonica, per verificare che non vi siano contributi significativi di coppie controrotanti che possano portare a sovrastima delle perdite, nonché maggiorazioni delle perdite negli avvolgimenti.
15. Al termine della prova a carico nominale, misurazione dei valori di P_n , I_n , U_n , s , f , ϑ_o , ϑ_n pari alla temperatura dell'avvolgimento a carico nominale, ed R_n pari alla resistenza di prova al carico nominale.
16. Esecuzione della prova a carico variabile quando la temperatura degli avvolgimenti è entro 5 K rispetto alla temperatura ϑ_n sopra indicata.
17. Applicazione del carico variabile alla macchina in modo da ottenere sei differenti punti di funzionamento. Quattro punti di carico dovrebbero essere scelti in modo da essere egualmente distribuiti tra non meno del 25 % e fino al 100 % incluso del carico nominale. Gli ultimi due punti di carico, approssimativamente distribuiti equamente, dovrebbero essere scelti al di sopra del 100 % e non oltre il 150 % del carico nominale. Con la macchina a carico, iniziare le prove dal valore di carico più elevato e procedere in senso discendente verso il più basso. Queste prove devono essere effettuate il più velocemente possibile per ridurre al minimo le variazioni di temperatura nella macchina durante le prove. Nelle macchine a c.a., la variazione della frequenza tra tutti i punti deve essere inferiore allo 0,1 %.
18. Misurazione di R prima dei rilievi al carico massimo e dopo i rilievi al carico minimo. Il valore della resistenza R al carico 100 % e ai carichi superiori deve essere quello determinato prima della lettura al carico massimo. La resistenza R da considerare per i carichi inferiori al 100 % deve essere determinata supponendo una relazione di linearità di R in funzione del valore del carico, e utilizzando come estremi della relazione lineare i valori delle letture eseguite prima della prova al carico massimo e dopo la prova al carico minimo del 25 %.
19. Misurazione dei seguenti valori, (il pedice m indica valore misurato):

Carico [% P_n]	25%	50%	75%	100%	125%	150%
$V_{m,c}$ [V]						
$I_{m,c}$ [A]						
$P_{1,m,c}$ [W]						
$C_{m,c}$ [Nm]						
$n_{m,c}$ [rpm]						
$f_{m,c}$ [Hz]						
$R_{m,c}$ [Ω]						

20. Determinare per ogni punti di carico il valore delle perdite nel ferro, utilizzando i valori misurati nella prova a carico variabile per determinare il valore di tensione U_r nella relazione (46) che tiene conto della caduta di tensione dell'avvolgimento di statore, entrando con tale valore sulla retta delle perdite nel ferro in funzione della tensione al quadrato.

21. Verificare se sia necessario introdurre la correzione alla temperatura di riferimento del fluido di raffreddamento a 25 °C; in caso affermativo, per ogni scostamento di temperatura del fluido di raffreddamento rilevato durante le prove, determinare il coefficiente di correzione k_{θ} definito da (42) da introdurre di seguito.
22. Determinare per ogni punto di carico le perdite nell'avvolgimento di statore, in accordo con le relazioni (47) e (48).
23. Determinare per ogni punto di carico le perdite nell'avvolgimento di rotore, in accordo con quanto indicato dalle relazioni da (49) a (53).
24. Determinare le perdite addizionali a carico per ogni punto di carico, mediante la relazione (54), ed effettuarne il trattamento mediante tecnica di regressione lineare secondo le relazioni da (55) a (59).
25. Esecuzione della somma di tutte le perdite ottenute, per ogni punto di carico, secondo la relazione (44).
26. Determinare per ciascun punto di carico il rendimento secondo la relazione (43).
27. In corrispondenza del valore di carico nominale, confronto tra il valore di rendimento ottenuto, ed i valori precisati in Tabella 1 del presente documento.
28. In accordo con quanto prescritto dal Regolamento 640/2009 *“Il modello è considerato conforme al presente regolamento se nell'efficienza nominale del motore (η) le perdite ($1-\eta$) non si discostano dai valori fissati nell'allegato I di oltre il 15 % dell'intervallo di potenza 0,75-150 kW e di oltre il 10 % nell'intervallo > 150-375 kW.”*

5 Conclusioni

Obiettivo dell'attività svolta, della quale il presente documento è il risultato, è inerente lo sviluppo di un protocollo contenente le procedure per le verifiche su motori elettrici fino a 15kW così come previste dal Regolamento della Commissione 640/2009 [1]. La parte iniziale dell'attività è stata mirata ad identificare tutte le specifiche necessarie per la progettazione del laboratorio di verifica definendo tutti gli elementi che caratterizzeranno la facility sia in termini di strumentazione che di gestione. La seconda parte delle attività previste è stata focalizzata a realizzare un protocollo contenente le procedure per le verifiche sui motori elettrici previste dal Regolamento della Commissione 640/2009 [1] per una facility fino a 15 kW. Sono stati analizzati il quadro legislativo e normativo inerente l'efficienza dei motori, nonché lo svolgimento delle prove e misurazioni da svolgere nelle verifiche dei motori di taglia considerata. Sono stati individuati apparati, strumenti e trasduttori idonei in termini di prestazioni, portata ed incertezza, in accordo con la normativa internazionale nel campo delle misure elettriche e dei sistemi elettrici di potenza. Sono state considerate le tematiche inerenti la certificazione e l'accreditamento della facility, in accordo con la normativa, e si è delineata la struttura di un possibile manuale della qualità.

È stata analizzata la normativa internazionale inerente la verifica di efficienza, in confronto con quanto richiesto dal Regolamento, e si è delineata una procedura operativa per lo svolgimento delle verifiche di efficienza, per i motori di taglia indicata. Si è investigato il problema, ancora aperto a livello normativo, dell'espressione quantitativa dell'incertezza di misura nella determinazione dell'efficienza.

Futuri sviluppi potranno concentrarsi sulla elaborazione di metodi per la determinazione dell'incertezza di misura, con l'obiettivo di poter quantificare per ogni contributo di perdita misurato, la corretta incertezza tenendo conto dei contributi così come definiti dagli organismi internazionali e sintetizzati nella guida GUM [18].

6 Riferimenti bibliografici

- [1] Regolamento (CE) N. 640/2009 “recante modalità di applicazione della direttiva 2005/32/CE del Parlamento europeo e del Consiglio in merito alle specifiche per la progettazione ecocompatibile dei motori elettrici”;
- [2] Direttiva 2005/32/CE del Parlamento europeo e del Consiglio “relativa all’istituzione di un quadro per l’elaborazione di specifiche per la progettazione ecocompatibile dei prodotti che consumano energia”.
- [3] Articolo 1 legge 27 dicembre 2006 N° 296.
- [4] Decreto legislativo 16 febbraio 2011, n.15: attuazione della direttiva 2009/125/CE relativa all’istituzione di un quadro per l’elaborazione di specifiche per progettazione ecocompatibile dei prodotti connessi all’energia”. (GU n.55 del 8/3/20011);
- [5] Direttiva 2012/27/UE del Parlamento europeo e del Consiglio del 25 ottobre 2012 “sull’efficienza energetica, che modifica le direttive del 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE;
- [6] Regolamento Commissione 4/2014/UE del 6 gennaio 2014 e vigente dal 22/02/2014: “modifiche al regolamento 640/2009/CE sulle specifiche per la progettazione ecocompatibile dei motori elettrici”;
- [7] Decreto legislativo 4 luglio 2014, n.102: “attuazione della direttiva 2012/27/UE sull’efficienza energetica, che modifica le direttive del 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE”.
- [8] IEC 60034-1, Publ. 2010, “Rating and performance.”: Environmental conditions and on/off cycles for use, content of rating plate, tolerances.
- [9] IEC 60034-2-1, Publ. 2011, “Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles).”: Preferred testing methods, standard procedures and sequences, accuracy of instruments. This standard is applicable until August 2017. (Incl. stray load losses; rev.2014 for 3-phase machines, rated output power <1.000 kW)
- [10] IEC 60034-2-3, Technical Specification Publ. 2013, “Specific test methods determining losses and efficiency of converter-fed AC motors.”: Extra losses from harmonics when induction motors are operated with frequency converters.
- [11] IEC 60034-30-1, Publ.2014, “Efficiency classes of single-speed, three phase, cage induction motors (IE-code).”: Definition of efficiency classes IE1, IE2, IE3 and IE4 for 0,12 kW to 1.000 kW, 50 and 60 Hz, 2-,4-6 and 8-poles.
- [12] IEC 60034-3,1 Technical Specification Publ. 2010, “Selection of energy-efficient motors including variable speed applications – application guide.”: Systems integration, operating hours, economic analysis.
- [13] IEC EN 60051-1/9 Publ. 1997-1999, “Direct acting indicating analogue electrical measuring instruments and their accessories”. Parts 1-9
- [14] IEC 61869-1/5 Publ. 2007-2015, “Instrument transformers”. Parts 1-5
- [15] IEC 60034-30-2*, New work item 2014, planned Publ. in 2016 “Efficiency classification for motors operated with variable speed.”
- [16] IEC 61800-9*, New work item 2014, planned Publ. in 2016 “Energy efficiency of adjustable speed electric power drive systems.”

- [17] ISO/IEC 17025 Publ. 2005 "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories": general requirements for the competence to carry out tests and/or calibrations, including sampling. It covers testing and calibration performed using standard methods, non-standard methods, and laboratory-developed methods. It is applicable to all organizations performing tests and/or calibrations. These include, for example, first-, second- and third-party laboratories, and laboratories where testing and/or calibration forms part of inspection and product certification.
- [18] ISO ENV 13005:2000 "Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)" (BIPM JCGM 100:2008).
- [19] International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM 3rd edition) JCGM 200:2012 (JCGM 200:2008 with minor corrections)
- [20] EN 50160: July 2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks.
- [21] Kyei, J. (2001). Analysis and Design of Power Acceptability Curves for Industrial Loads. New York: Power Systems Engineering Research Center
- [22] IEC 61000-4-30:2015 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods.
- [23] IEC 61000-4-7:2002+AMD1:2008 CSV Consolidated version Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto.
- [24] IEC 61000-4-15:2010 RLV Redline version Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-15: Testing and measurement techniques – Flickermeter – Functional and design specifications.
- [25] IEC 61558-2-14:2012, Safety of transformers, reactors, power supply units and combinations thereof - Part 2-14: Particular requirements and tests for variable transformers and power supply units incorporating variable transformers
- [26] ISO/IEC 17065:2012 Conformity assessment -- Requirements for bodies certifying products, processes and services.
- [27] IEEE 112:2004: Test Procedure for Poliphase Induction Motors and Generators
- [28] IEEE 114:2011 Test Procedure for Single-Phase Induction Motors.
- [29] EA-1/17A S1: Supplement 1 to EA-1/17 Criteria for Membership (Published on 17 June 2014)
- [30] ISO 9001:2008 Quality management systems – Requirements
- [31] ISO/IEC 17000:2004 Conformity assessment -- Vocabulary and general principles
- [32] BIPM, The International System of Units (SI), 2006
- [33] G. Bucci, E. Fiorucci, C. Landi, "Digital Measurement Station for Power Quality Analysis in Distributed Environments", IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement, Vol.52, N.1 february 2003, pp.75-84.
- [34] G. Bucci, E. Fiorucci, A. Ometto, N. Rotondale, "The Evaluation of the Effects of the Voltage Amplitude Modulations on Induction Motors", Proceedings of IEEE Powertech 2005, June 27-30, St. Petersburg, Russia (Presenter) ISBN: 978-5-93208-034-4.
- [35] D. Castaldo, D. Gallo, C. Landi, E. Fiorucci, "Measurement Network Infrastructure for Power Quality Monitoring", Shaker Verlag Transactions on Systems, Signals and Devices, volume 1, no. 4, pp. 387-404, 2005-2006. ISSN: 1861-5252.
- [36] D. Gallo, C. Landi, M. Luiso, E. Fiorucci, G. Bucci, F. Ciancetta, "A Method for Linearization of Optically Insulated Voltage Transducers". WSEAS Transactions on Circuit and Systems, Issue 3, Volume 12, March 2013, pag. 91-100 ISSN 1109-2734
- [37] G. Bucci, E. Fiorucci, F. Ciancetta, D. Gallo, C. Landi, M. Luiso "Variable Speed Drive Characterization: Review of Measurement Techniques and Future trends" Advances in Power Electronics, vol. 2013, Article ID 968671, 14 pages, 2013.
- [38] D. Gallo, C. Landi, M. Luiso, E. Fiorucci, G. Bucci, F. Ciancetta, "Realization and Characterization of an Electronic Instrument Transducer for MV Networks with Fiber Optic Insulation", WSEAS Transactions on POWER SYSTEMS, Issue 1, Volume 8, January 2013 pag. 45-56 E-ISSN: 2224-350X

- [39] Gentile, G.; Meo, S.; Ometto, A., "Induction motor current signature analysis to diagnostics, of stator short circuits," *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, 2003. SDEMPED 2003. 4th IEEE International Symposium on , vol., no., pp.47,51, 24-26 Aug. 2003
- [40] G. Bucci, F. Ciancetta, S. Dolce, F. D'Innocenzo, E. Fiorucci "A low-cost power transducer for transient currents Conference Record – (2015) IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp. 1267-1272. ISBN: 978-1-4799-6113-9
- [41] G. Bucci, E.Fiorucci, C. Landi, "Industrial measurement and Control", WILEY Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering Online, John Wiley & Sons, Inc., Sept. 14, 2007.
- [42] G. Bucci, C.De Capua, C. Landi, "Power Measurements", WILEY ENCYCLOPEDIA OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING Vol.16, J.G.Webster Editor, John Wiley & Sons Ltd., pp.716-733, Mar 1999.
- [43] Fiorucci, E. "The measurement of actual apparent power and actual reactive power from the instantaneous power signals in single-phase and three-phase systems" (2015) *Electric Power Systems Research*, 121, pp. 227-242.
- [44] G. Bucci, E Fiorucci, F. Ciancetta, D. Gallo, C. Landi, M. Luiso "Embedded Power and Energy Measurement System Based on an Analog Multiplier" *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, vol 62, issue 8 Aug. 2013, Page(s): 2248 - 2257. ISSN:0018-9456
- [45] D. Gallo, C. Landi, M. Luiso, G. Bucci, E. Fiorucci "Low Cost Smart Power Metering" *Proceedings of IEEE I2MTC 2013, Minneapolis USA May 6-9 2013*, pag. 763-767 ISBN 978-1-4673-4622-1.
- [46] E. Fiorucci, G. Bucci, A. Ometto, A. Ragonese, F.D'Innocenzo, A. Genovese "An automatic test system for the characterization of quick charging stations for electric vehicles" *Proceedings of 20th IMEKO TC4 International Symposium and 18th International Workshop on ADC Modelling and Testing Research on Electric and Electronic Measurement for the Economic Upturn Benevento, Italy, September 15-17, 2014*, pag. 455-460 ISBN-14: 978-92-990073-2-7.
- [47] G.Bucci, E.Fiorucci, C.Landi, "State of Art and Future Trends of Measurement Techniques for Asynchronous Motor Characterisation", *Proc. IEEE SDEMPED 2001, Gorizia, Italy Sept. 1-3, 2001*.
- [48] E. Fiorucci, G. Bucci, F. Ciancetta, N. Rotondale, "A Testing System for the Performance Evaluation of Electrical Machines Under Realistic Voltage Fluctuations", *Proceedings of IEEE IMTC 2010, Austin Texas May, 3-6 2010* ISSN: 1091-5281 ISBN: 978-1-4244-2833-5.
- [49] Petrella, R., Tursini, M., Peretti, L., Zigliotto, M. "Speed measurement algorithms for low-resolution incremental encoder equipped drives: A comparative analysis" (2007) *International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion ACEMP'07 and Electromotion'07 Joint Conference*, art. no. 4510607, pp. 780-787.
- [50] Faccio, M., Grande, P., Parasiliti, F., Petrella, R., Tursini, M. "An embedded system for position and speed measurement adopting incremental encoders" (2004) *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, 2, pp. 1192-1199.
- [51] Ferrero, A.; Salicone, S., "Measurement uncertainty," *Instrumentation & Measurement Magazine, IEEE* , vol.9, no.3, pp.44,51, June 2006

7 Curricula

Curriculum Scientifico di EDOARDO FIORUCCI

Edoardo Fiorucci è nato nel 1974 a Popoli, in provincia di Pescara. Nel 2000 ha conseguito la laurea in Ingegneria Elettrica, discutendo una tesi sperimentale dal titolo: "Stazione di misura numerica per la valutazione della qualità dell'alimentazione elettrica", presso l'Università degli Studi dell'Aquila, con la votazione di 110/110 e lode. Dal 01/04/2006 presta servizio come ricercatore nel settore scientifico disciplinare ING-INF/07, presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università dell'Aquila, afferendo al Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione fino al giugno 2012, e presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

e di Economia dell'Università dell'Aquila da tale data fino ad oggi. E' stato confermato in ruolo il 01/04/2009.

Dal 2006, in qualità di Professore Aggregato, è docente del corso di Collaudi di Macchine ed Impianti Elettrici nei corsi di laurea specialistica e di laurea magistrale in Ingegneria Elettrica ed Ingegneria Elettronica.

Nel settembre 2006 ha vinto il premio nazionale "Carlo Offelli" dell'Associazione Italiana Gruppo di Misure Elettriche ed Elettroniche GMEE per la sua tesi di dottorato dal titolo "Nuove tecniche e strumentazione numerica per il monitoraggio della qualità dell'alimentazione elettrica".

Nel 2010 ha conseguito la certificazione National Instruments C.L.A.D. (Certified LabVIEW Associate Developer), che mantiene tuttora.

Edoardo Fiorucci:

- è membro del Collegio del Dottorato di Ricerca "Sistemi e metodi per l'utilizzazione delle energie rinnovabili, l'efficienza energetica, la generazione, trasmissione, distribuzione dell'energia elettrica e per il costruire sostenibile", per i cicli XXVI, XXVII e XXVIII;
- dal 2010 è responsabile per la Facoltà di Ingegneria e del Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia, delle attività didattiche svolte nell'ambito della National Instruments LabVIEW Academy,
- dal 2000 è membro dell'Unità Operativa dell'Aquila del gruppo nazionale GMEE, Misure Elettriche ed Elettroniche;
- dal 2003 è Member della Instrumentation and Measurement Society, IMS, dell'Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE;
- nel 2008, 2009 e 2011 è stato menzionato dalla IEEE Instrumentation and Measurement Society tra gli "Outstanding Reviewers of 2008", come riconoscimento per la qualità della attività svolta come revisore per la rivista IEEE IMS Transactions on Instrumentation and Measurement;
- nel 2011 è stato elevato al grado di Senior Member dell'Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE;
- nel gennaio 2012 è stato nominato Associate Editor nel comitato editoriale della rivista IEEE IMS Transactions on Instrumentation and Measurement;
- nel 2014 ha conseguito l'Abilitazione Scientifica Nazionale per il ruolo di Professore Associate nel settore concorsuale Misure.

Curriculum Scientifico di GIOVANNI BUCCI

Giovanni Bucci è nato a Roma nel 1958. Nel 1985 ha conseguito la laurea in Ingegneria Elettrotecnica presso l'Università degli Studi dell'Aquila con la votazione di 110/110. Dal 1985 al 1989 ha lavorato presso la Selenia Spazio dell'Aquila nel settore di ricerca e sviluppo sui sistemi automatici di misura. Nel 1989 ha preso servizio presso l'Università degli Studi dell'Aquila come Ricercatore Universitario del settore scientifico-disciplinare Misure elettriche ed elettroniche ed è stato confermato nel ruolo di Ricercatore al termine del triennio successivo. Dal 1.9.2001 ha prestato servizio come professore associato presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi dell'Aquila, nel settore scientifico disciplinare ING-INF/07 – Misure Elettriche ed Elettroniche, con regime d'impegno a tempo pieno, afferendo al Dipartimento di Ingegneria Elettrica. Dal 1.10.2006 presta servizio come professore di prima fascia presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi dell'Aquila, nel SSD ING-INF/07 – Misure Elettriche ed Elettroniche, con regime d'impegno a tempo pieno, ed afferisce al Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione. Il prof. Giovanni Bucci, nell'ambito della Facoltà e del Dipartimento di sua afferenza, ha partecipato alle molteplici attività previste. In particolare:

- dal marzo 2010 il prof. G. Bucci è Presidente del Consiglio Didattico di Corso di Studi (C.D.C.S.) in Ingegneria Elettronica;

- dal 2004 al 2006 è stato membro del Comitato Ordinatore del master di II° livello in Microelettronica: Sistemi, tecnologie e processi per la caratterizzazione di dispositivi microelettronici complessi (memorie DRAM e Flash);
- dal 2005 al 2013 è stato rappresentante dell'Università dell'Aquila nel consiglio scientifico del Consorzio NITEL (Consorzio Nazionale Interuniversitario per i Trasporti e la Logistica).

Il prof. Giovanni Bucci:

_ è referee per le riviste IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, di Measurement Science and Technology e di IEEE Sensors Journal, IEEE Transactions on Industrial Informatics, IET Generation, Transmission & Distribution, SCIENCEDOMAIN International;

_ dall'agosto del 2002 è inserito nell'Albo degli Esperti (DL 27 luglio 1999, n. 297);

_ dall'aprile 2003 è inserito nell'Albo dei Revisori del MIUR per i progetti COFIN;

_ dal marzo 2004 è inserito nell'Elenco dei Valutatori delle proposte nell'ambito del Programma Regionale per la Ricerca Industriale, l'Innovazione e il Trasferimento Tecnologico (PRRIITT) della Regione Emilia-Romagna;

_ dal gennaio 2007 è inserito nell'Elenco dei Valutatori delle proposte nell'ambito del Bando per la Ricerca Industriale e lo Sviluppo Precompetitivo (PRRIITT) della Regione Piemonte;

_ dal gennaio 2009 è inserito nell'Elenco degli esperti in ricerca, sviluppo, innovazione e trasferimento tecnologico della Regione Marche;

_ dal 1 novembre 2002 è responsabile dell'Unità Operativa dell'Aquila dell'associazione italiana Gruppo di Misure Elettriche ed Elettroniche (GMEE);

_ è stato Responsabile dell'Unità di Ricerca dell'Aquila per il progetto PRIN (Bando 2007) dal titolo "Metodologie e strumentazione innovativa per la qualificazione metrologica di misuratori di energia elettrica operanti in regime non sinusoidale".

L'attività di ricerca scientifica sviluppata negli ultimi 3 anni ha riguardato principalmente le seguenti tematiche.

- A. Misura della qualità dell'alimentazione elettrica.
- B. Sistemi di misura distribuiti, sensori smart.
- C. Trasduttori di tensione e corrente per basse e medie tensioni.
- D. Anemometri ad ultrasuoni.
- E. Sistemi di misura per applicazioni biomedicali.
- F. Sistemi di test per impianti fotovoltaici.

Curriculum Scientifico di ANTONIO OMETTO

Ometto Antonio si è laureato in Ingegneria Elettrotecnica nell'a.a. 1985/86 presso l'Università degli Studi dell'Aquila. Nel 1986 è risultato vincitore della Borsa di Studio per il perfezionamento di ingegneri all'estero della Fondazione F. Filauri con conseguente permanenza a Sheffield (UK) nell'anno 1987, dove ha collaborato con il prof. M. McCormick dell'Università di Sheffield. Dal 1990 al 2002 è stato ricercatore del settore scientifico disciplinare ING-IND/32 presso l'Università dell'Aquila.

Nel 1993 è stato a Madison, Wisconsin (USA), dove ha collaborato con il Prof. T. Lipo dell'Università del Wisconsin. Dal 2002 è Professore Associato, prima presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione, attualmente presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia dell'Università dell'Aquila, S.S.D. ING-IND/32 ed ha tenuto corsi di macchine elettriche, elettronica di potenza, attuatori elettrici, modellistica dei sistemi elettromeccanici e sistemi elettrici per la mobilità.

L'attività scientifica, riportata in più di settanta pubblicazioni, riguarda le seguenti linee di ricerca:

- perdite nelle macchine elettriche;
- comportamento delle macchine elettriche in presenza di guasti;
- convertitori statici ad elevato fattore di potenza (PFC);

- convertitori statici per azionamenti elettrici;
- ripple di coppia dei motori asincroni in presenza di armoniche e di sub-armoniche della tensione di alimentazione;
- modellistica e controllo di motori lineari;
- applicazioni automotive delle celle a combustibile;
- motoriduttori a magneti permanenti.

Curriculum Scientifico di FRANCESCO PARASILITI COLLAZZO

Francesco Parasiliti Collazzo ha conseguito la laurea con lode in Ingegneria Elettrotecnica nel 1981 presso la Facoltà di Ingegneria di Roma La Sapienza. Dal 1983 al 1992 è Ricercatore Universitario presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università dell'Aquila. Dal 1992 al 2000 è Professore Associato presso la stessa Università. Dal 1995 al 1999 è Professore a Contratto presso la De Montfort University, Leicester (UK). Dal novembre del 2000 è Professore Ordinario presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università dell'Aquila nel Settore Scientifico Disciplinare "Convertitori, Macchine ed Azionamenti Elettrici" ING/IND32.

È stato General Chairman della Conferenza Internazionale "Energy Efficiency in Motor Driven Systems" (EEMODS'02), Treviso, settembre 2002.

È stato Editore del libro: Energy Efficiency in Motor Driven Systems, Springer, 2003, ISBN 3-540-00666-4.

È stato General Chairman della Conferenza Internazionale "International Conference on Electrical Machines" (ICEM 2010), Roma, 6-8 settembre 2010.

Dal 2004 è membro per l'Italia dello Steering Committee dell'International Conference on Electrical Machines (ICEM).

Dal 2004 al 2007 è stato Presidente del Consiglio Didattico di Corso di Studio in Ingegneria Elettronica dell'Università dell'Aquila.

Dall'aprile 2007 a luglio 2012 è stato Vice Direttore del Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione dell'Università dell'Aquila.

Dall'agosto 2008 al febbraio 2013 è stato membro del Comitato Tecnico Scientifico del Consorzio "Innovazione Automotive e Metalmeccanica".

Dal settembre 2009 al 2013 è stato membro del Consiglio Direttivo del Consorzio Universitario della Marsica.

Dal dicembre 2010 è membro del Comitato Tecnico Scientifico della Fondazione Istituto Tecnico Superiore "Efficienza Energetica", L'Aquila.

Dal novembre 2011 è membro del Comitato Scientifico della Fondazione dell'Università degli Studi dell'Aquila.

Dal 2012 è Vice-Chair dello Steering Committee dell'International Conference on Electrical Machines (ICEM)

Dal luglio 2012 è Direttore del Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia dell'Università degli Studi dell'Aquila.

Dal febbraio 2013 al settembre 2014 è stato Vice Presidente del Consiglio di Amministrazione del Consorzio "Innovazione Automotive e Metalmeccanica".

Dal luglio 2014 è membro del Comitato di Indirizzo della Fondazione "Istituto Tecnico Superiore Nuove Tecnologie per il Made in Italy, Sistema Meccanica".

Nel settembre 2014 ha ricevuto dallo Steering Committee dell'International Conference on Electrical Machines (ICEM) lo "ICEM John Tegopoulos Distinguished Service Award" quale riconoscimento del servizio svolto in favore della comunità scientifica mondiale operante nell'ambito delle Macchine Elettriche.

Da settembre 2014 è membro del Consiglio di Amministrazione del Consorzio "Innovazione Automotive e Metalmeccanica".

La sua attività di ricerca, testimoniata da oltre 125 pubblicazioni, riguarda prevalentemente l'ottimizzazione e il progetto di motori elettrici, la loro modellistica e simulazione, l'efficienza energetica dei motori elettrici, le tecniche di controllo, il progetto e la realizzazione di azionamenti a microprocessore, le tecniche di stima per il controllo di azionamenti elettrici.

Questa attività è stata svolta prevalentemente in collaborazione con numerosi enti, aziende ed università internazionali.

Con riferimento all'attività scientifica più recente, è stato responsabile di due contratti di ricerca Europei (analisi tecnico-economica di motori elettrici ad alta efficienza), per uno dei quali era project leader, di un Progetto di Rilevante Interesse Nazionale Cofinanziato MIUR (motori ad alta efficienza con avvolgimento rotorico in rame pressofuso), di contratti con il Centro Sviluppo Materiali (impiego di lamierini magnetici ad alte prestazioni per motori elettrici ad alta efficienza), con il Cesi Ricerca (prove su motori elettrici ad alta efficienza), con Tecnomatic Spa, con SCM Group, con il MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA TUTELA DEL TERRITORIO E DEL MARE, con la Regione Abruzzo nell'ambito dei POR FESR ABRUZZO 2007 – 2013.

È Revisore per numerose riviste e conferenze internazionali.

Curriculum Scientifico di MARCO TURSINI

Marco TURSINI è nato a S.Pio delle Camere (AQ) il 14 luglio 1960. Nel marzo 1987 si laurea in Ingegneria Elettrotecnica presso l'Università degli Studi dell'Aquila e inizia l'attività di collaborazione scientifica con l'allora Dipartimento di Ingegneria Elettrica (DIE) della Facoltà di Ingegneria;

- nel 1990 vince la borsa di studio di perfezionamento in Ingegneria della Fondazione “F. Filauri” e svolge attività di ricerca per un semestre presso il Laboratorio di Elettronica Industriale della Scuola Politecnica Federale di Losanna (Svizzera);

- nell'ottobre 1990 vince il concorso libero per il ruolo di Ricercatore Universitario presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università dell'Aquila, gruppo di discipline “Azionamenti Elettrici Industriali”, afferendo al DIE nel dicembre 1990;

- nel dicembre 1993 viene confermato ricercatore per il settore scientifico-disciplinare I18X (Convertitori, Macchine ed Azionamenti Elettrici), e inizia a svolgere attività di docenza istituzionale presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università dell'Aquila; – nel 1994 è ricercatore invitato presso il Department of Electrical and Electronic Engineering dell'Università di Nagasaki (Giappone);

- nell'a.a.1999/2000 riceve in affidamento per supplenza il corso di “Modellistica dei Sistemi Elettromeccanici” presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Roma “Tor Vergata”;

- nel giugno 2001 risulta idoneo al concorso per Professore Universitario di II Fascia del s.s.d. ING/IND-32 presso il Politecnico di Milano, Facoltà di Ingegneria Milano-Bovisa; a seguito della chiamata della Facoltà di Ingegneria dell'Aquila, dal 31 marzo 2002 presta servizio con tale ruolo;

- nel dicembre 2013 consegue l'Abilitazione Scientifica Nazionale al ruolo di professore di I Fascia (bando 2012 - DD n. 222/2012).

Attualmente afferisce al Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia dell'Università dell'Aquila (DIIIE) dove ricopre i seguenti incarichi:

- docente del corso di “Automazione Elettrica” nell'ambito dei Corsi di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica ed Informatica ed Automatica;

- docente del modulo di “Macchine Elettriche” (all'interno del corso di “Elettrotecnica”) nell'ambito del Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Industriale, indirizzo Meccanica;

- vice-presidente del Consiglio di Area Didattica in Ingegneria Elettrica magistrale;

- membro del Collegio dei Docenti del Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettrica e dell'Informazione;

- membro del Collegio dei Docenti del Dottorato di Ricerca in Ingegneria Industriale e dell'Informazione e di Economia.

- membro di Commissioni inerenti l'attività di ricerca del DIIIE (gruppi di ricerca, valutazione).

Nella sua attività didattica è stato relatore/correlatore di 57 tesi a carattere sperimentale e tutor di 5 tesi di dottorato.

Dal 1990 partecipa a Progetti di Ricerca d'Interesse Nazionale ammessi a finanziamento pubblico (COFIN e PRIN) e mantiene rapporti di collaborazione e trasferimento tecnologico con numerosi partners industriali nazionali ed esteri.

In questo ambito è stato:

- responsabile dell'Unità di Ricerca dell'Aquila nel progetto "COFIN 2000" (biennio 2000-02);
- responsabile dell'Unità di Ricerca dell'Aquila nel progetto "COFIN'2003" (biennio 2003-05);
- responsabile delle attività dell'Università dell'Aquila nell'ambito del progetto AMD "Advanced Motion Drives" della ELECTROLUX (biennio 1996-97);
- responsabile per il consorzio Parco Scientifico e Tecnologico d'Abruzzo delle attività di trasferimento tecnologico nel settore degli azionamenti elettrici (05/1999 - 12/2007);
- responsabile tecnico e/o scientifico di decine di attività di trasferimento tecnologico dell'Università dell'Aquila verso aziende.

La sua attività di ricerca riguarda il campo delle macchine e degli azionamenti elettrici, con particolare riferimento alle seguenti tematiche:

- Sensorless control of AC drives
- Flux-weakening strategies for PM synchronous motors
- Multiphase fault-tolerant motors and drives
- Digital motion & motor control
- Fault analysis and diagnostics
- Fuzzy, adaptive & sliding-mode control
- Prototyping tools for electrical drives
- Improved sensors and measurement in electrical drives

Inoltre è:

- membro della Editorial Board della rivista "Electric Power Components and Systems";
- revisore delle IEEE Transactions on "Industry Electronics", "Power Electronics", "Automatic Control" e "Industry applications", di "The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering" (COMPEL), "America Control Conference (ACC)", "IET Electric Power Applications", "Chinese Journal of Aeronautics" e della "Int. Conf. on Electrical Machines" (ICEM);
- membro del comitato organizzatore delle conferenze "Energy Efficiency in Motor Driven Systems" (EEMODS'2002) ed "Int. Conf. on Electrical Machines" (ICEM 2010);
- membro della "Industrial Electronics Society" dello IEEE.

Curriculum Scientifico di MARCO VILLANI

Marco Villani e' nato a Lecce l'11 novembre 1960. Nel 1985 ha conseguito la laurea in Ingegneria Elettrotecnica presso la Facolta' di Ingegneria dell'Universita' degli Studi di L'Aquila.

Nel 1987 ha conseguito la borsa di studio di perfezionamento all'estero "Ferdinando Filauri" che gli ha consentito di effettuare uno stage presso la Technische Universitaet - Sektion Elektrotechnik di Dresda. E' docente del corso di Costruzioni Elettromeccaniche, nell'ambito del Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica, presso l'Universita' degli Studi dell'Aquila. Coordinatore di numerosi progetti di ricerca, in collaborazione con Enti ed Industrie sia nazionali che europee. Referente, nell'ambito dei programmi Erasmus, degli accordi bilaterali con le Universita' di Amiens e di Kaunas. La sua attivita' di ricerca riguarda prevalentemente la modellistica e la progettazione di motori elettrici ed e' documentata da circa 100 pubblicazioni in conferenze e riviste nazionali ed internazionali.

Marco Villani ha una comprovata esperienza nel settore della progettazione delle macchine elettriche grazie anche alle collaborazioni con importanti aziende elettromeccaniche nazionali e internazionali ed alla partecipazione a numerosi progetti di ricerca finanziati dalla Comunita' Europea (progetti SAVE II), dal Ministero dell'Universita' e della Ricerca Scientifica (progetti PRIN) e dal CNR. Ha sviluppato delle procedure di dimensionamento basate su programmi agli elementi finiti e algoritmi di ottimizzazione, che sono state ampiamente utilizzate per la progettazione di motori asincroni, motori sincroni a magneti permanenti e motori sincroni a riluttanza, per impieghi nel settore industriale, aeronautico e nel settore "automotive".