



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Specifica tecnica della struttura funzionale e del controllo di un
dispositivo con accumulo elettrochimico per i servizi di rete

Stefano Barsali, Romano Giglioli



Università di Pisa - DESE

Report RdS/20122/249

SPECIFICA TECNICA DELLA STRUTTURA FUNZIONALE E DEL CONTROLLO DI UN DISPOSITIVO CON
ACCUMULO ELETTROCHIMICO PER I SERVIZI DI RETE

Stefano Barsali, Romano Giglioli (Università di Pisa; DESE)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Sistemi avanzati di accumulo di energia

Responsabile del Progetto: Mario Conte, ENEA

Indice

Sommario	4
INTRODUZIONE	5
<i>NORMATIVA DI RIFERIMENTO</i>	6
<i>SCHEMA DI SISTEMA</i>	6
Filtri	7
Elettronica di Potenza	7
Trasformatore	7
Protezioni	7
Collegamento	8
SISTEMA DI CONTROLLO	8
<i>Sistema di controllo con statismo</i>	8
Funzionamento normale.....	9
Comportamento a fronte di guasto	10
<i>Unità di controllo</i>	10
SISTEMA DI ACCUMULO	11
<i>Dimensionamento</i>	11
<i>Specifiche tecniche del pacco batteria</i>	11
<i>Specifiche sul singolo modulo accumulatore</i>	11
<i>Specifiche sul sistema di monitoraggio del pacco accumulatori</i>	11
<i>Alloggiamento del pacco accumulatori e sistemi di sezionamento</i>	12

Sommario

La presente specifica riguarda un compensatore statico di collegamento tra una rete in corrente alternata in bassa tensione e una rete in corrente continua a 600V, dotato di accumulo elettrochimico e con una potenza nominale dell'inverter di interfaccia pari a 20kW.

Il sistema dovrà essere in grado di scambiare con la rete in corrente alternata sia potenza attiva che reattiva e sul lato corrente continua potenza tra diversi dispositivi (ex. accumulatore, carica batterie, solare fotovoltaico, ecc.).

INTRODUZIONE

Nell'ambito della pianificazione e gestione di un sistema energetico con presenza di impianti di generazione da fonte rinnovabile e di utenze sia in corrente alternata che in corrente continua, la possibilità di disporre di una quota di accumulo elettrico riveste un ruolo fondamentale, non solo per migliorare i profili di carico e compensare i disturbi, ma anche per ottimizzare la gestione economica dell'intero insediamento consentendo una certa flessibilità di gestione.

Nell'ambito dell'impiego in un'ottica di utenza in bassa tensione, le funzioni da svolgere sono quelle di compensazione di potenza attiva e reattiva, in modo da ottimizzare la gestione delle sorgenti, oltre che di consentire il possibile funzionamento in isola nell'evenienza di una disalimentazione dalla rete di distribuzione e impiegando le risorse disponibili localmente.

Il sistema dovrà comportarsi da generatore di tensione ed essere controllato con una logica con "statismo", come descritto più oltre, in modo da consentirne il funzionamento sia in parallelo alla rete che in isola o in parallelo ad altri generatori.

Lo schema di principio è indicato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

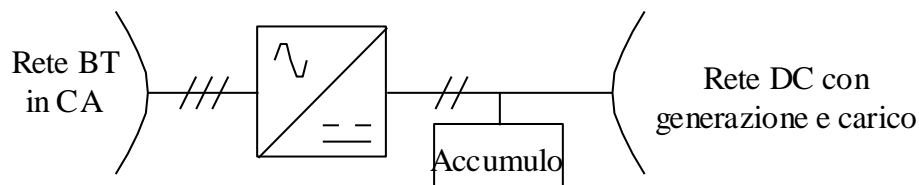


Figura 0.1 Schema di principio del sistema di interfacciamento con accumulo

NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- CEI 0-21 Regola tecnica di riferimento per la connessione di Utenti attivi e passivi alle reti BT delle imprese distributrici di energia elettrica
- CEI 11-1 Impianti di produzione, trasporto, distribuzione energia elettrica. Norme generali.
- CEI 11-17 Impianti di produzione, trasporto, distribuzione energia elettrica. Linee in cavo.
- CEI 11-20 Impianti di produzione dell'energia e gruppi di continuità collegati a reti di I e II categoria.
- CEI 14-8 Trasformatori di potenza a secco.
- CEI 17-11 Interruttori, sezionatori, unità combinate con fusibili, per corrente alternata fino a 1000V e corrente continua fino a 1500V.
- CEI 17-13/1 Apparecchiature assiemate di protezione e di manovra per b.t. (quadri b.t.).
- CEI 17-19 Apparecchiature industriali in bassa tensione, grandezze dei morsetti per conduttori in rame.
- CEI 20-19 Cavi isolati con gomma con tensione nominale non superiore a 450/750 V.
- CEI 20-22 Cavi non propaganti l'incendio.
- CEI 23-19 Canali portacavi in materiale plastico.
- CEI 70-1 Gradi di protezione degli involucri (codice IP).
- CEI EN 50091-2 Prescrizioni di compatibilità elettromagnetica per sistemi statici di continuità.
- CEI EN 62040-1 Prescrizioni generali e di sicurezza per sistemi statici di continuità.
- CEI EN 62040-3 Metodi di specifica delle prestazioni e prescrizioni di prova.
- CEI EN 60950-1 Apparecchiature per la tecnologia dell'informazione.

SCHEMA DI SISTEMA

Il sistema dovrà essere realizzato con uno schema elettrico e di controllo tali da consentire lo svolgimento delle funzioni menzionate.

In linea di principio e salvo diverso accordo tra le parti da redigere in fase di realizzazione, lo schema dovrà essere come indicato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

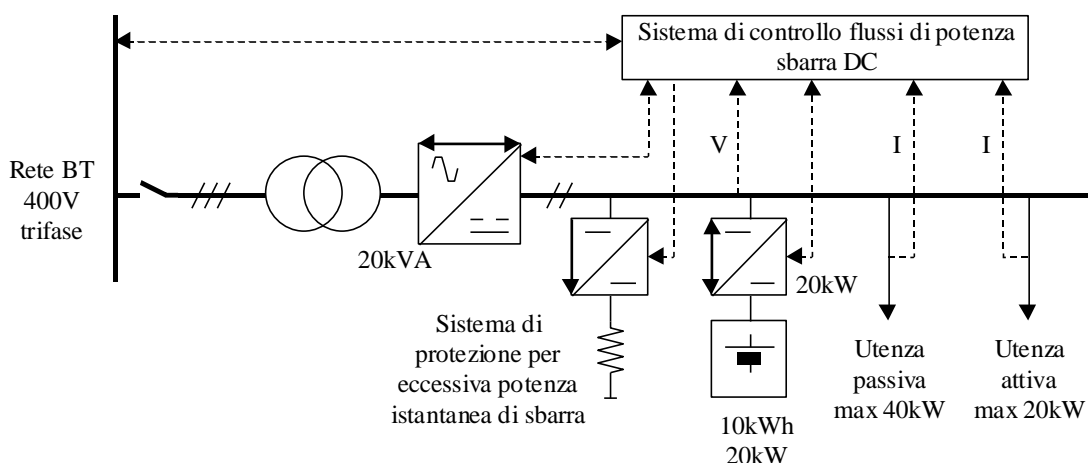


Figura 0.2 Schema elettrico di massima e collegamenti sistema di controllo

Il sistema indicato nello schema di principio di **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** deve avere un dispositivo di controllo per la gestione dei flussi di potenza sulla sbarra in corrente continua interfacciato con i convertitori DC-DC dell'accumulo e del sistema di sfioramento passivo, nonché con l'inverter. Il bilanciamento della potenza dovrà essere ottenuto mantenendo costante la tensione sulla sbarra in corrente continua a 600V. Il sistema di controllo fornirà i set-point di potenza ai dispositivi attuatori secondo una logica da definirsi con il committente. In prima battuta il convertitore DC-DC dell'accumulo controllerà la tensione in DC bilanciando la somma delle potenze scambiate dagli altri dispositivi connessi, i

cui punti di lavoro saranno invece definiti dalle proprie esigenze (utenza attiva e passiva) o dal sistema di controllo stesso per quanto riguarda l'inverter di interfacciamento con la rete. Il punto di lavoro dell'inverter sarà definito tenendo conto in particolare dello stato di carica delle batterie e degli eventuali servizi che si volessero erogare verso la rete esterna, in particolare quando si volesse realizzare un'isola sulla rete in alternata.

Le prestazioni in termini di potenza attiva erogabile saranno limitate temporalmente dalle caratteristiche degli accumulatori impiegati e dovranno essere previsti accumulatori con energia nominale alla scarica in un'ora non inferiore a 10kWh e capaci di erogare una potenza di 20kW per almeno 15 minuti. Il sistema di conversione deve essere in grado di scambiare continuamente una potenza di 20kVA, in modo da poter comunque svolgere le altre funzioni, come ad esempio di compensazione di potenza reattiva, senza alcuna limitazione delle prestazioni.

Filtri

I convertitori statici devono essere dotati di adeguati filtri di ingresso e di uscita per la soppressione dei disturbi indotti e condotti nonché di quelli emessi a radiofrequenza, secondo le direttive 89/336/CEE e 92/31/CEE.

Elettronica di Potenza

Il convertitore statico è del tipo a stato solido, le valvole di potenza devono essere del tipo IGBT aventi tensione di blocco opportuna per lavorare alla tensione di barra necessaria alle regolazioni.

Le sovratensioni di commutazione a piena potenza non devono superare i 200V (a questo scopo possono essere utilizzati appositi circuiti di limitazione).

Gli IGBT devono essere dotati di circuito di rilevamento della desaturazione (sia che avvenga per sovracorrente che per pilotaggio anomalo). Il rilevamento della situazione di desaturazione dovrà avvenire localmente con un circuito hardware collegato al potenziale anodico di ogni singola valvola e dovrà portare all'immediato arresto della conduzione della valvola stessa. Contemporaneamente dovrà essere inviato un segnale di blocco che, tramite la logica di controllo, determini l'arresto dell'intero convertitore.

Per proteggere il dispositivo dai riscaldamenti devono essere implementati uno o più sensori di temperatura, all'interno del modulo a semiconduttore e sul dissipatore.

Trasformatore

Nella Fornitura è inclusa un'unità di trasformazione con la funzione principale di realizzare la separazione galvanica tra le sezioni in corrente alternata ed in corrente continua: tale unità deve essere dimensionata per soddisfare contemporaneamente tutte le prestazioni dell'apparato richieste in questo documento.

Devono comunque essere garantite le seguenti caratteristiche:

- Trasformazione trifase o in alternativa mediante tre trasformatori monofasi opportunamente collegati;
- Classe di appartenenza degli avvolgimenti almeno di un livello superiore alla classe di appartenenza della sovratemperatura;
-

Protezioni

Solo a titolo di esempio il sistema dovrà provvedere di massima le seguenti indicazioni stato di servizio/protezioni:

- errore di CRC su dati Eprom
- alimentazioni schede fuori range
- errore di comunicazione con DSP
- tensione di barra bassa
- tensione di barra alta
- sovratemperatura inverter

- dispersione correnti a terra
- time out marcia
- sovracorrente inverter
- protezione moduli IGBT
- allarme protezione termica inverter
- allarme tensione di linea alta
- allarme tensione di linea bassa

Collegamento

Il sistema dovrà collegarsi ad una rete di distribuzione a 400V in corrente alternata e dovrà contenere tutte le protezioni necessarie a rispettare i requisiti imposti dalla norma CEI 0-21. Dovrà inoltre presentare una sbarra a 600V in corrente continua su cui dovranno essere predisposte due porte per collegare sia un utilizzatore di potenza massima pari a 40kW che un sistema di produzione con potenza massima di 20kW.

SISTEMA DI CONTROLLO

Sistema di controllo con statismo

La struttura di controllo dell'inverter deve permetterne l'utilizzo sia su rete passiva che attiva secondo varie modalità di funzionamento.

Il controllo che dovrà essere implementato nel convertitore dovrà prevedere un grado di **statismo**. Nella figura seguente è riportato uno schema a blocchi dell'architettura del sistema.

Funzionamento normale

Il controllo agisce definendo il modulo e fase della fondamentale della tensione che l'inverter deve produrre sulla base di quattro controllori: di frequenza, di tensione, in limitazione di potenza e in limitazione di corrente. Le uscite sono inviate al generatore degli impulsi di accensione delle valvole che può essere un PWM ma anche essere realizzato con una qualsivoglia altra metodologia.

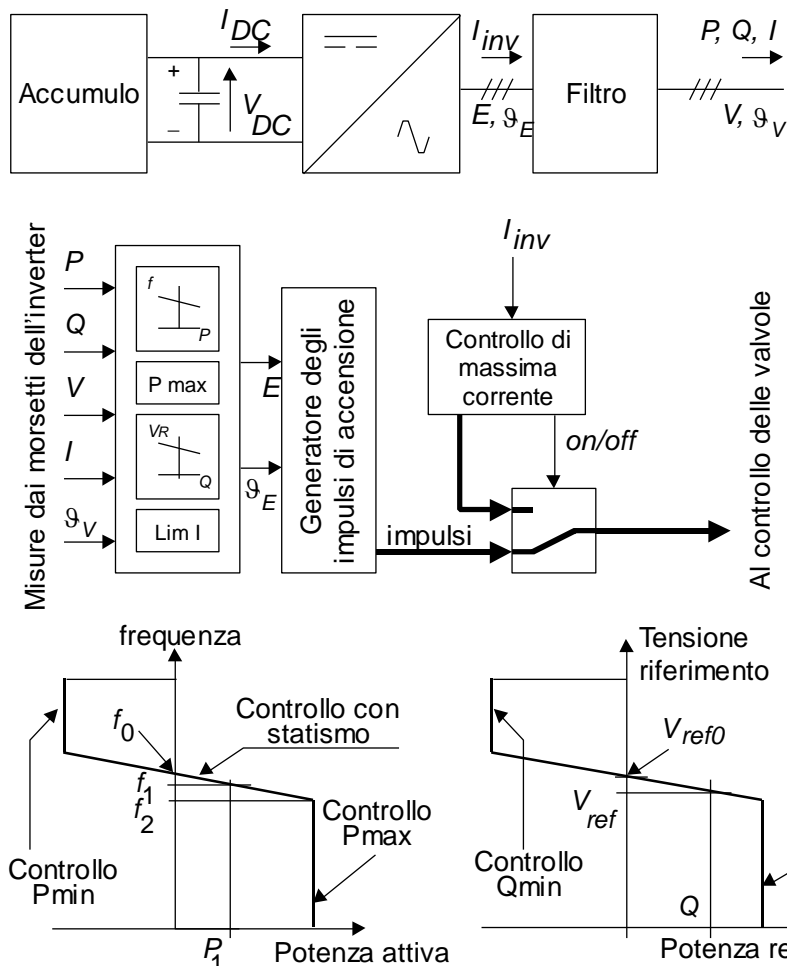


Figura 0.1. Schema di principio del sistema di regolazione con statismo.

La forza elettromotrice che l'inverter deve generare è:

$$E(t) = V_{dc} m(t) \sin \vartheta(t)$$

in cui l'angolo $\vartheta(t)$ altro non è che l'integrale della pulsazione $\omega(t)$ pari a $2\pi f(t)$. La frequenza f è legata alla potenza attiva erogata dall'inverter secondo la caratteristica riportata in basso a sinistra in figura. A sua volta l'ampiezza $V_{dc}m(t)$ è legata alla potenza reattiva erogata secondo la caratteristica riportata in basso a destra in figura ed il controllo avviene mediante l'indice di modulazione $m(t)$.

La velocità di risposta di un tale sistema di controllo può non essere sufficiente ad evitare che la corrente nell'inverter superi livelli pericolosi danneggiandone così i componenti. È necessario quindi un sistema più rapido indicato come "Controllo di massima corrente" che by-passa i segnali inviati dal PWM qualora la corrente superi un valore istantaneo predefinito.

Con tale sistema è possibile effettuare anche un controllo P,Q secondo una regolazione secondaria semplicemente agendo sui riferimenti delle curve f-P e V-Q riportate in basso nella figura.

Comportamento a fronte di guasto

I componenti di elettronica di potenza hanno una ridotta capacità di sovraccarico a causa della minima inerzia termica dei componenti a semiconduttore che costituiscono il ponte stesso.

Pertanto, il sistema di controllo dell'inverter deve anche provvedere ad effettuare la protezione dalle sovracorrenti. Nell'evento di un guasto o di ogni altro fenomeno che porti ad un aumento della corrente oltre ai limiti propri del sistema, il sistema di controllo provvede a limitare la corrente scambiata dall'inverter.

Gli inverter controllati in corrente non necessitano variazioni del controllo in presenza di guasto. L'effetto del corto è solo una riduzione della tensione. In particolare, se il controllo di corrente è realizzato tramite un sistema a isteresi, esso è di per sé già del tutto idoneo. Se invece il controllo di corrente si basa su altre logiche può essere necessario l'intervento di loop di controllo più rapidi.

Gli inverter a controllo di tensione devono invece ridurre la tensione per mantenere la corrente entro i limiti sostenibili dall'inverter. Questa azione avviene però con tempi di risposta del tutto inadeguati a salvaguardare i componenti di elettronica di potenza e sono necessarie altre azioni se non l'arresto dell'inverter stesso.

Unità di controllo

L'unità di controllo deve essere costituita da un sistema a microprocessore, di tipo DSP, che esegue le funzioni di supervisione e controllo del convertitore statico, il calcolo dei parametri derivati dalle grandezze misurate, la gestione delle anomalie, la gestione degli I/O e dell'interfaccia con l'utente.

Il microprocessore esegue le funzioni di calcolo e di modulazione degli impulsi per i componenti di potenza. La modulazione deve essere del tipo PWM. I segnali di I/O che pervengono alla scheda di controllo devono essere opportunamente condizionati e galvanicamente isolati.

L'unità di controllo deve poter permettere un interfacciamento con la piattaforma multiprocessore veloce: questa caratteristica ha per obiettivo la possibilità di poter pilotare il convertitore statico per seguire richieste di funzionamento ottenute a seguito delle elaborazioni delle misure e dei parametri di linea da parte di un sistema supervisore esterno.

Per lo scambio di informazioni con il sistema di controllo esterno che, sulla base delle informazioni sulla potenza scambiata e sullo stato di carica del sistema di accumulo, provvede a definire i riferimenti V_{ref0} e f_0 indicati in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, l'unità di controllo deve essere dotata di interfaccia Modbus RS485. Dovrà essere anche previsto, in assenza di segnale dal controllo esterno, di poter impostare in locale i valori dei due riferimenti.

Le grandezze da scambiare dovranno essere le seguenti:

in ingresso dal sistema di supervisione e controllo esterno:

- riferimento V_{ref0}
- riferimento f_0

in uscita verso il sistema di supervisione e controllo esterno:

- misura della potenza attiva scambiata P
- misura della potenza reattiva scambiata Q
- misura della tensione ai morsetti lato AC del compensatore V
- misura della frequenza ai morsetti del compensatore f
- stima dello stato di carica del pacco batterie (dal sistema di monitoraggio del pacco di accumulatori)
- segnali digitali di allarme

SISTEMA DI ACCUMULO

Il sistema di accumulo energetico deve essere di natura elettrochimica. La tecnologia di accumulatore è al Litio Polimeri. Il sistema di accumulo deve essere costituito da un pacco di moduli accumulatori collegati opportunamente tra di loro. Il rapporto tra la potenza massima erogabile dalle batterie e l'energia nominale alla scarica in un'ora deve essere compresa tra 4 e 8 h⁻¹. L'energia nominale (estraibile alla scarica in un'ora) deve essere non inferiore a 10kWh. Il sistema deve essere collegato ad una sbarra in corrente continua a 600V con una opportuna interfaccia DC-DC che possa regolare lo scambio di potenza tra il sistema di accumulo e la sbarra stessa. L'obiettivo del controllo del convertitore DC-DC sarà, in prima battuta, il mantenimento della tensione ad un livello costante realizzando, di fatto, il saldo tra le potenze scambiate dagli altri dispositivi connessi alla sbarra stessa. La gestione dello stato di carica delle batterie dovrà essere effettuato dal sistema di controllo di sbarra agendo sui set-point del controllore con statismo dell'inverter di connessione con la rete AC.

Dimensionamento

Il sistema deve essere in grado di erogare la potenza di 20kW per almeno 15 minuti e comunque deve essere in grado di erogare 10kW continuativamente per un'ora.

Specifiche tecniche del pacco batteria

La tecnologia ipotizzata per il sistema di accumulo è al Litio-Polimeri, per ragioni di ingombro, durata della vita utile e elevato rapporto potenza/energia.

- Tipologia preferibile: Litio-Polimeri
- Potenza scaricabile dal pacco per 15 minuti: 20kW
- Vita in termini di cicli all'80% di scarica: >2000
- Temperatura massima di esercizio: 45°C
- Range di umidità di esercizio: 40÷90%

Specifiche sul singolo modulo accumulatore

Il numero dei moduli deve essere tale da costituire un pacco capace di scaricare una potenza costante di 20kW per 15 minuti. Considerate le taglie commercialmente disponibili per gli accumulatori, la scelta del modulo deve essere tale per cui il pacco dovrà essere costituito da un'unica stringa di moduli in serie.

Specifiche sul sistema di monitoraggio del pacco accumulatori

Il sistema di monitoraggio del pacco accumulatori deve avere una sensibilità ottimale per individuare gli elementi difettosi prima che pongano dei rischi alla continuità dell'intero pacco batteria. Esso deve essere affidabile e preciso.

Il sistema deve essere dotato di interfacce di comunicazione che permettono alle apparecchiature installate sull'impianto d'accumulo, di comunicare tutti i dati remotamente ad un punto di supervisione. La comunicazione può avvenire via LAN, CAN, Wireless-LAN o bluetooth.

Le funzionalità generali richieste al sistema di monitoraggio sono:

- fornire una stima dello stato di carica di ciascun modulo e dell'intero pacco.
- memorizzare le misure di ogni singolo modulo e del pacco
- impostare gli intervalli di misura e le soglie di allarme associate

Le misure che devono essere eseguite (grandezze da monitorare) sono:

- tensione di ogni modulo (a circuito aperto, in carica e scarica)

- temperatura ambiente
- temperatura per alcuni moduli pilota da scegliere opportunamente all'interno del pacco.
- corrente del pacco durante la carica e scarica

Alloggiamento del pacco accumulatori e sistemi di sezionamento

La disposizione deve essere tale da garantire l'accesso manuale ai morsetti di tutti gli accumulatori da parte dell'operatore.

Il sistema di sezionamento deve essere opportunamente progettato in modo tale da garantire che l'intero pacco risulti sezionabile in più sezioni la cui differenza di potenziale non sia superiore a 60V.

La presente specifica riguarda un compensatore statico di collegamento tra una rete in corrente alternata in bassa tensione e una rete in corrente continua a 600V, dotato di accumulo elettrochimico e con una potenza nominale dell'inverter di interfaccia pari a 20kW.

Il sistema dovrà essere consegnato e installato presso i laboratori di ENEA.

Appendice

Curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Stefano Barsali

Stefano Barsali ha conseguito laurea e dottorato di ricerca in Ingegneria Elettrica presso l'Università di Pisa nel 1994 e 1998 rispettivamente.

Dal 2000 al 2006 è stato ricercatore del settore scientifico disciplinare Sistemi Elettrici per l'Energia e dall'ottobre 2006 è professore associato nello stesso settore prestando servizio presso la facoltà di Ingegneria dove è attualmente titolare dei moduli di "Sistemi di produzione dell'energia elettrica (6CFU)" e "Dinamica e controllo dei sistemi elettrici per l'energia (6CFU)" del corso di laurea magistrale in Ingegneria Elettrica.

Dal dicembre 2012 è presidente del Consiglio di Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica.

Svolge la propria attività di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia dei Sistemi del Territorio e delle Costruzioni (DESTEC) dell'Università di Pisa.

Dal 2004 al 2008 ha svolto la funzione di segretario dello Study Committee C6 CIGRÉ su "Distribution Systems and Dispersed Generation" ed è stato membro di due task force CIGRÉ.

I principali temi della ricerca svolta più di recente sono:

- Riaccensione del sistema elettrico a seguito di black-out
- Sistemi di accumulo elettrochimico ed applicazioni in veicoli a propulsione ibrida
- Generazione distribuita dell'energia elettrica e fonti rinnovabili
- Modellazione degli impianti di produzione e loro flessibilizzazione

Tale attività è stata condotta sia in collaborazione con altre Università (anche nell'ambito di progetti PRIN) e con enti esterni (ENEL, CESI, AEI, GRTN, CIGRÉ, ecc.).

Parte dell'attività sul tema della generazione distribuita è svolta all'interno del già citato comitato di studio C6 e di gruppi di lavoro CIGRÉ.

Su tali temi è autore di numerose pubblicazioni scientifiche.

Romano Giglioli

Nato a San Gimignano (SI) il 02/06/1951, laureato con lode in Ingegneria Elettrotecnica nel 1976, nello stesso anno ha ricevuto il premio di Economia e Tecnica dell'Energia "G. Levi Cases".

Dal 1994 è Professore Ordinario e ricopre la cattedra di "Sistemi Elettrici per l'Energia e tecnica ed Economia dell'energia".

Attività di ricerca.

Nell'arco di più di trenta anni di attività nel settore della ricerca, in collaborazione con strutture di ricerca pubbliche e private, sia nazionali che internazionali, ha contribuito, con studi teorici e sperimentali, all'innovazione e allo sviluppo di sistemi e dispositivi per la produzione, trasporto ed accumulo (in particolare elettrochimico) dell'energia elettrica e dei sistemi di conversione energetica, nonché dei sistemi di trasporto con propulsione elettrica ed ibrida. L'attività è testimoniata da oltre un centinaio di pubblicazioni, dalla titolarità di alcuni brevetti utilizzati nell'ambito dei sistemi elettrici per l'energia ed in quelli di conversione energetica e dalla realizzazione di numerosi sistemi e dispositivi prototipali.

Tale attività è stata ed è sviluppata anche come responsabile di numerosi contratti di ricerca e coordinatore di gruppi di lavoro nell'ambito dei Sistemi per l'Energia e di quelli per il Trasporto.

Incarichi direttivi nell'ambito dell'Amministrazione Universitaria.

Dal 1995 al 2002 ha assunto l'incarico di Direttore del Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione dell'Università di Pisa.

Dal 2005 al 2009 è stato Direttore del Master post laurea "Pianificazione e gestione di sistemi per l'energia da fonti rinnovabili", istituito dall'Università di Pisa con ENEL Produzione, CONFINDUSTRIA, Kyoto Club, Legambiente.

Dal 2006 è nel comitato direttivo del consorzio Interuniversitario CRIBE per la ricerca sulle biomasse ad uso energetico, che ha contribuito a costituire.

Dal 2007 è nel comitato direttivo del consorzio Nazionale Interuniversitario ENSIEI per la ricerca sui Sistemi per l'Energia, che ha contribuito a costituire.

Dal gennaio 2007 è membro del Consiglio di Amministrazione dell'Università di Pisa

Incarichi in strutture esterne all'Università.

Dal 2003 al 2009 è membro del Consiglio di Amministrazione della società ITALCERTIFER (del gruppo Ferrovie dello Stato), società per la ricerca nell'ambito dei sistemi di trasporto e per l'omologazione dei mezzi di trasporto ferroviario. Dal 2005 al 2008 è stato delegato italiano nel mirror europeo per le " smart grids". E' coordinatore scientifico nell'ambito del Consorzio Regionale per l'energia CET, di cui è stato promotore. Dal maggio del 2007 è membro del Consiglio del CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano per la normativa elettrica). Valutatore di progetti di sviluppo precompetitivo L.n. 46/82 per conto del Ministero delle Attività Produttive e, per lo stesso Ministero, nel 2008 ha fatto parte del gruppo di esperti, con il compito di sviluppare l'analisi fattuale in ambito energia ed ambiente, per l'indirizzamento dei fondi strutturali per le regioni del mezzogiorno. Esperto per la valutazione dei progetti di Ricerca di Sistema per il Settore Elettrico per la CCSE. Esperto per la valutazione per il MIUR dei progetti PRIN e dei progetti PON.