



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

“Installazione sperimentale pilota per l’applicazione
di batterie a sistema di trasporto a fune”

Romano Giglioli, Massimo Ceraolo



Dipartimento di Sistemi Elettrici ed Automazione

INSTALLAZIONE SPERIMENTALE PILOTA PER L'APPLICAZIONE DI BATTERIE A SISTEMA
DI TRASPORTO A FUNE

Romano Giglioli, Massimo Ceraolo (Università di Pisa – Dipartimento di Sistemi Elettrici
ed Automazione)

Settembre 2010

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Usi finali

Tema: Valutazione dell'impatto dell'utilizzo delle batterie al litio nelle applicazioni
stazionarie

Responsabile Tema: Ennio Ferrero, ENEA



Funicolare di Bergamo S. Vigilio.

<u>1.</u>	<u>INTRODUZIONE</u>	5
<u>2.</u>	<u>IMPIANTO PER LA SPERIMENTAZIONE (S. VIGILIO – BG)</u>	7
<u>2.1.</u>	<u>Dimensionamento del sistema</u>	7
<u>2.2.</u>	<u>Stima del fattore di potenza</u>	11
<u>2.3.</u>	<u>Stima del modello equivalente della rete</u>	14
<u>3.</u>	<u>SIMULATORE DELL’IMPIANTO</u>	15
<u>4.</u>	<u>ANALISI DEL CARICO SIMULATO E SINTESI DELL’IMPIANTO PROPOSTO</u> ..	18
<u>5.</u>	<u>SPECIFICHE PER IL DISPOSITIVO DA INSTALLARE</u>	21
<u>6.</u>	<u>RILIEVI SPERIMENTALI</u>	22
<u>6.1.</u>	<u>Analisi armonica</u>	23
<u>6.2.</u>	<u>Analisi dei cicli di carico</u>	32
<u>6.3.</u>	<u>Ricerca dei giorni “tipo”</u>	34
<u>7.</u>	<u>VALIDAZIONE SIMULATORE</u>	36
<u>8.</u>	<u>STIMA DEI BENEFICI ECONOMICI</u>	37
<u>9.</u>	<u>CONCLUSIONI</u>	40

1. INTRODUZIONE

La gestione dei sistemi elettrici per l'energia, in particolare per quelli di grandi dimensioni come quello europeo, è effettuata secondo un obiettivo che prevede gli utilizzatori liberi di richiedere la potenza necessaria per gli usi finali dell'energia in qualunque momento e nell'intensità voluta, purché nei limiti previsti dal contratto di fornitura. In altre parole la produzione produce istante per istante la potenza richiesta dagli utilizzatori mantenendo l'equilibrio delle potenze per mezzo di un sofisticato (e complesso) sistema di regolazione.

Questa logica di gestione presenta sicuramente un grande vantaggio per gli utilizzatori resi liberi di decidere quanta e quando utilizzare l'energia elettrica senza porsi nessun problema di come viene prodotta. Tutto ciò non è altrettanto vantaggioso per il sistema "a monte" di produzione, trasporto e distribuzione, il quale si trova a far fronte ad una richiesta fortemente variabile ed aleatoria con evidenti riduzioni dell'efficienza di trasformazione dell'energia primaria in energia elettrica e nel dover dimensionare tutti i dispositivi per la massima potenza richiesta, che, peraltro, ha una durata molto piccola rispetto al totale tempo di utilizzazione.

Sul piano economico la variabilità e l'aleatorietà della potenza richiesta si traduce in contratti più onerosi per i clienti finali (utilizzatori).

L'aver una richiesta di potenza più costante e prevedibile, per quanto detto in precedenza, porta sicuramente ad una migliore efficienza energetica ed ad un migliore utilizzo di tutto il sistema con una conseguente riduzione dei prezzi di fornitura dell'energia agli utenti finali. Per ottenere questo risultato sono sempre più studiati e realizzati sistemi di gestione e/o sistemi di compensazione del carico, secondo una visione strutturale e gestionale oggi definita "smart grids". Rientrano in questo contesto i sistemi di compensazione costituiti da accumulatori elettrochimici collegati con la rete mediante inverter bidirezionali.

Tali dispositivi sono in grado di controllare gli scambi di potenza attiva e reattiva con dinamiche molto veloci (di poche decine di millisecondi), permettendo di avere il profilo voluto della potenza richiesta alla rete e di effettuare servizi dinamici utili al miglioramento dell'esercizio del sistema. Questi dispositivi possono, inoltre, scambiare con la rete correnti di forma d'onda e di intensità, sulle tre fasi, tali da migliorare la qualità del vettore corrente con cui l'utenza risponde alla rete di alimentazione, che fornisce il vettore tensione, in modo da instaurare un equilibrio elettrico circuitale dell'intero sistema in cui il vettore tensione risulti di qualità migliore.

La funicolare di Bergamo (S. Vigilio) è un archetipo dell'utenza con un assorbimento estremamente variabile (c'è anche l'inversione del flusso di potenza richiesto in corrispondenza alla frenatura del veicolo) e con forte contenuto armonico della corrente scambiata con la rete : risulta, quindi, un eccellente caso studio e impianto per la sperimentazione dei dispositivi di compensazione richiamati in precedenza.

2. IMPIANTO PER LA SPERIMENTAZIONE (S. VIGILIO – BG)

La funicolare di Bergamo “San Vigilio” unisce Bergamo bassa a Bergamo alta. Presenta una corsa di circa 620 metri e un dislivello di circa 90 m fra le due stazioni di partenza e di arrivo, senza stazioni intermedie. Ogni corsa dura circa 2 minuti e mezzo, quindi in circa 6 minuti è possibile completare un intero ciclo di andata-ritorno.

Allo stato attuale l'alimentazione dell'impianto prevede una fornitura trifase in bassa tensione (400 V) con un picco di potenza richiesta di circa 220 kW. La tensione alternata trifase viene quindi trasformata in tensione continua tramite un doppio ponte raddrizzatore a tiristori, mediante il quale viene alimentato il circuito di armatura del motore elettrico di trazione. Tale motore si configura come un motore in corrente continua tradizionale ($P_n = 160$ kW, $V_n = 400$ V), il cui albero risulta accoppiato mediante un riduttore di giri all'albero lento della puleggia che movimentata la fune di trazione. Il carico meccanico è costituito prevalentemente dall'unica carrozza facente parte della funicolare, che presenta una massa a vuoto di 7 tonnellate, e una massa a pieno carico di circa 11 tonnellate. Il valore della massa a pieno carico risulta da considerazioni relative al numero massimo di persone che la carrozza è in grado di portare (55) e da un peso medio stimato per persona pari a 75 kg.

2.1. Dimensionamento del sistema

Per il dimensionamento dell'intero sistema sono determinanti le prestazioni dinamiche richieste alla funicolare stessa, in particolare il profilo di velocità. Tale profilo è riportato in Fig. 2-1, dove è stato scelto di rappresentare la velocità in valore assoluto, senza distinguere il verso fra tratto in salita e tratto in discesa. Come si può ricavare dal grafico il valore dell'accelerazione è pari a 0.4 m/s^2 .

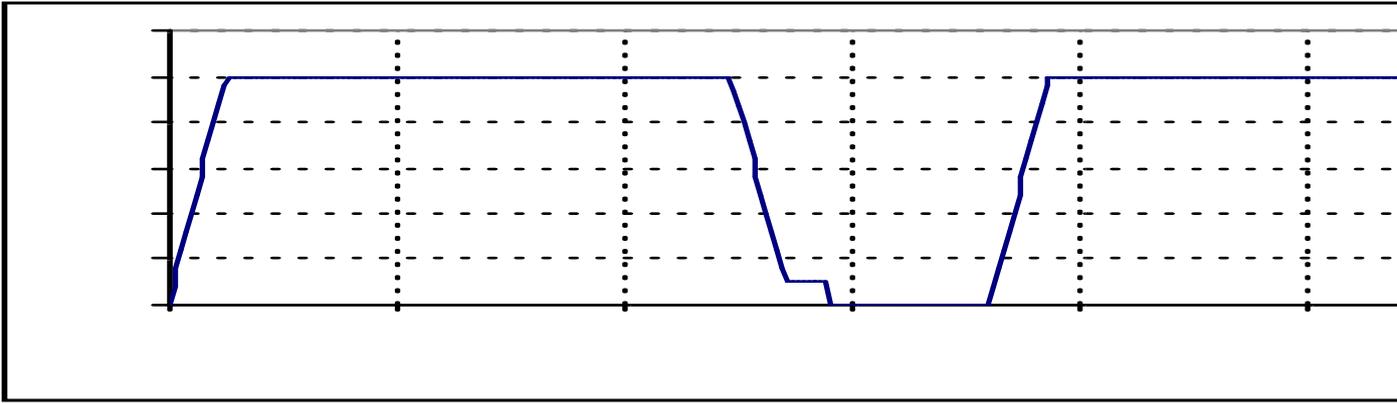


Fig. 2-1. Profilo di velocità funicolare S. Vigilio – BG

Dal profilo di velocità e dal profilo di progetto della potenza a pieno carico (Fig. 2-2) è stato possibile stimare la pendenza puntuale del percorso. Conoscere il profilo del percorso è determinante in quanto, una volta nota la pendenza dello stesso, è possibile costruire un semplice modello fisico del sistema (massa su piano inclinato a pendenza variabile), dal quale ricavare i profili di potenza a carico intermedio e a vuoto (vedi Fig. 2-3 e Fig. 2-4). Tali andamenti risultano importanti da conoscere, in quanto, nella stima finale delle prestazioni del sistema di accumulo, è necessario tenere conto del fatto che molte corse vengono effettuate con pochi passeggeri, ed alcune (per esempio le prime della mattina e le ultime della sera) praticamente a vuoto.

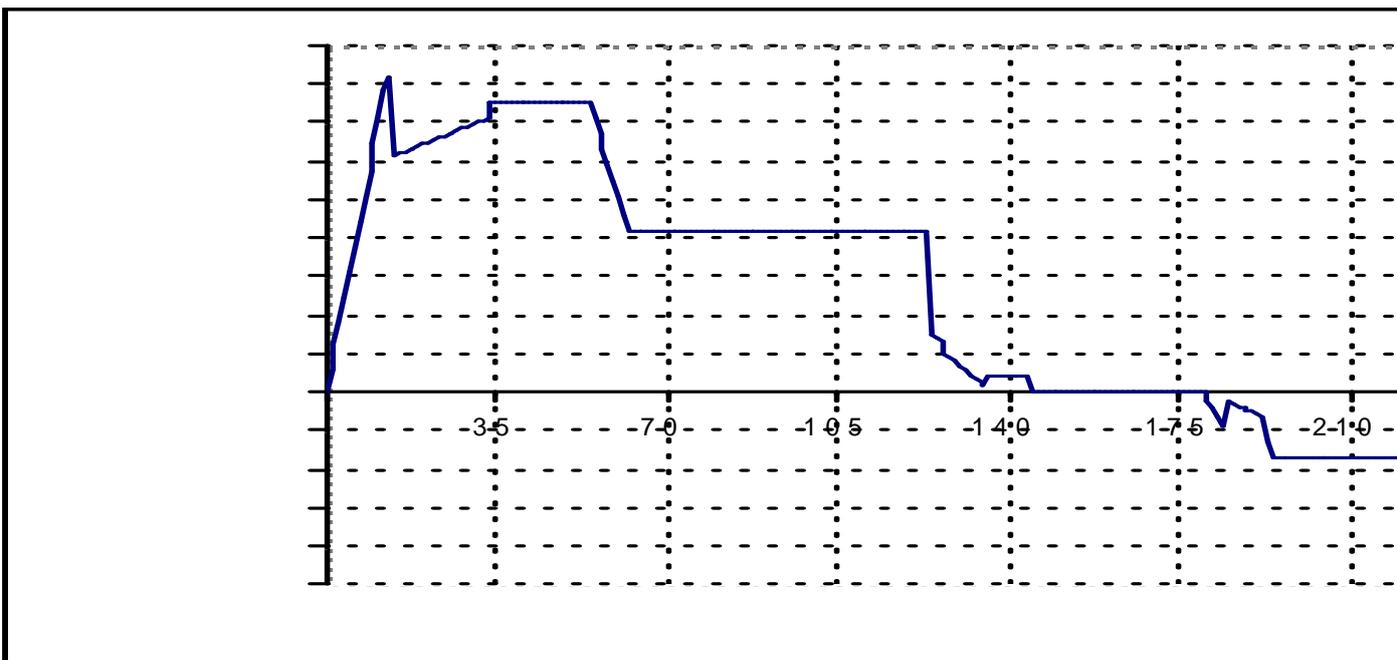


Fig. 2-2 Profilo della potenza meccanica alle ruote a pieno carico

Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.

Fig. 2-3. Modello in salita

Fig. 2-4. Modello in discesa

In Fig. 2-3 e Fig. 2-4 con α si intende l'angolo (variabile) la cui tangente fornisce la pendenza del percorso.

In Fig. 2-5 sono riportati i profili di potenza meccanica alle ruote della vettura a pieno carico (blu), a carico intermedio (rosso) e con vettura vuota (nero).

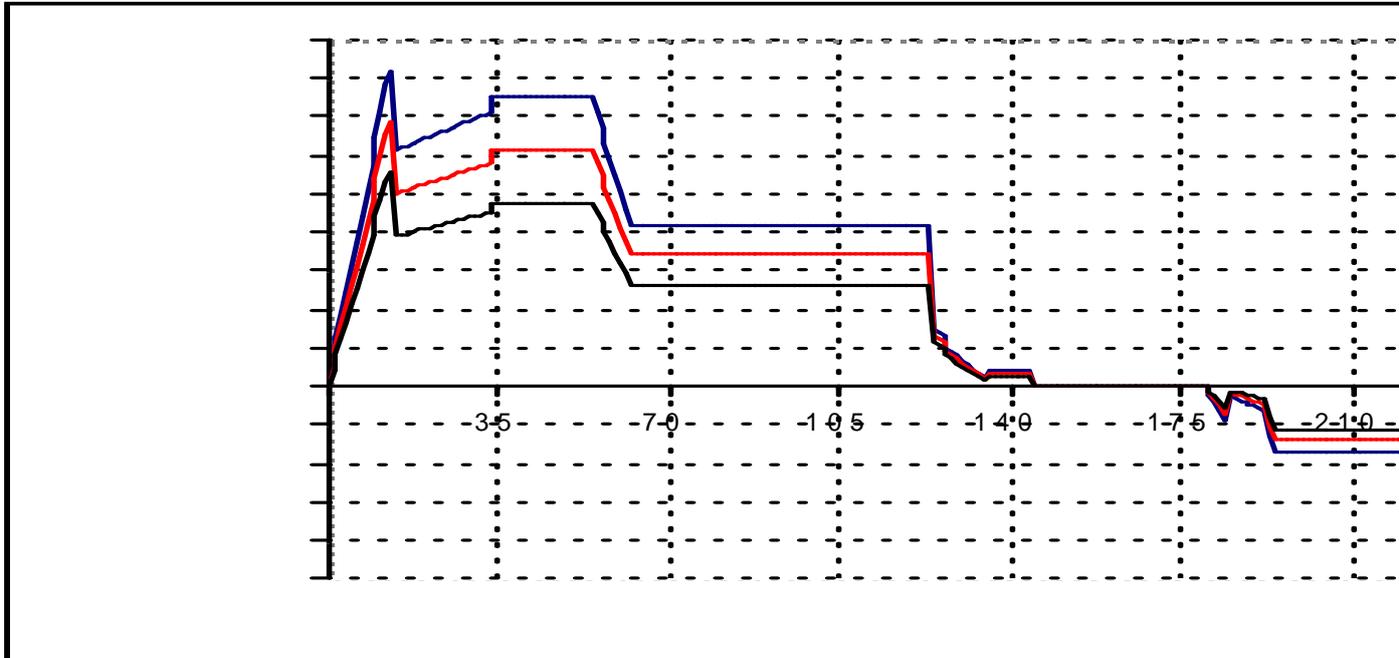


Fig. 2-5. Potenza meccanica alle ruote a pieno carico (blu), a carico medio (rosso) e a vuoto (nero).

Risulta doveroso a questo punto precisare che durante le fasi di accelerazione è necessario tenere conto anche delle inerzie delle masse rotanti. E' stato tenuto conto di questo fatto riportando una massa equivalente alle ruote, che si traduce con una forza di inerzia aggiuntiva di circa 760 N. Il valore della forza di attrito è stato supposto costante e pari a 5000 N. I grafici a carico medio e con vettura vuota sono stati ottenuti soltanto cambiando M (massa) nel modello fisico del sistema.

Una volta ottenuti gli andamenti temporali della potenza meccanica riportati in Fig. 2-5 è stato necessario stimare il rendimento totale di tutta la catena per arrivare alla potenza elettrica assorbita. Tale stima, partendo dalla vettura e procedendo a ritroso verso la rete di alimentazione elettrica, ha tenuto conto del rendimento del riduttore (92%), del motore in continua (80%) e del convertitore

elettronico di potenza a tiristori (96%). Nel complesso è stato valutato come ipotesi di lavoro un rendimento dell'intero sistema pari a circa il 70%. In tale modo si è risaliti alla potenza attiva assorbita dalla rete di alimentazione.

2.2. Stima del fattore di potenza

Il passo successivo è stato quello di stimare il fattore di potenza lato alternata. La procedura seguita è stata la seguente: il raddrizzatore a tiristori è in grado di regolare la tensione di armatura del motore in corrente continua a partire da un minimo (teorico) di 0 V fino ad un massimo di circa 566 V variando opportunamente l'angolo di accensione dei tiristori fra 90° e 0° . Si è supposto che quando l'uscita del raddrizzatore vale 400 V il motore in continua stia erogando la potenza massima. In questo modo si è calcolato l'angolo di accensione dei tiristori per ottenere la potenza massima del motore in base alla formula:

$$U_{lato_continua} = V_{max} \cdot \cos(\beta)$$

Il risultato è $\beta = 42.23^\circ$. Per stimare come può variare l'angolo β si suppone che il ponte a tiristori regoli la tensione di armatura V del motore in continua mediante una legge del tipo:

$$\frac{V^2}{P} = k$$

Dove k è una costante, che nel caso in questione vale circa 0.975 (con P in prima approssimazione pari alla potenza alle ruote della vettura).

Avendo quindi ottenuto l'andamento della tensione di armatura del motore in funzione della potenza richiesta (vedi Fig. 2-6), è stato possibile ricavare l'andamento dell'angolo di accensione dei tiristori (vedi Fig. 2-7).

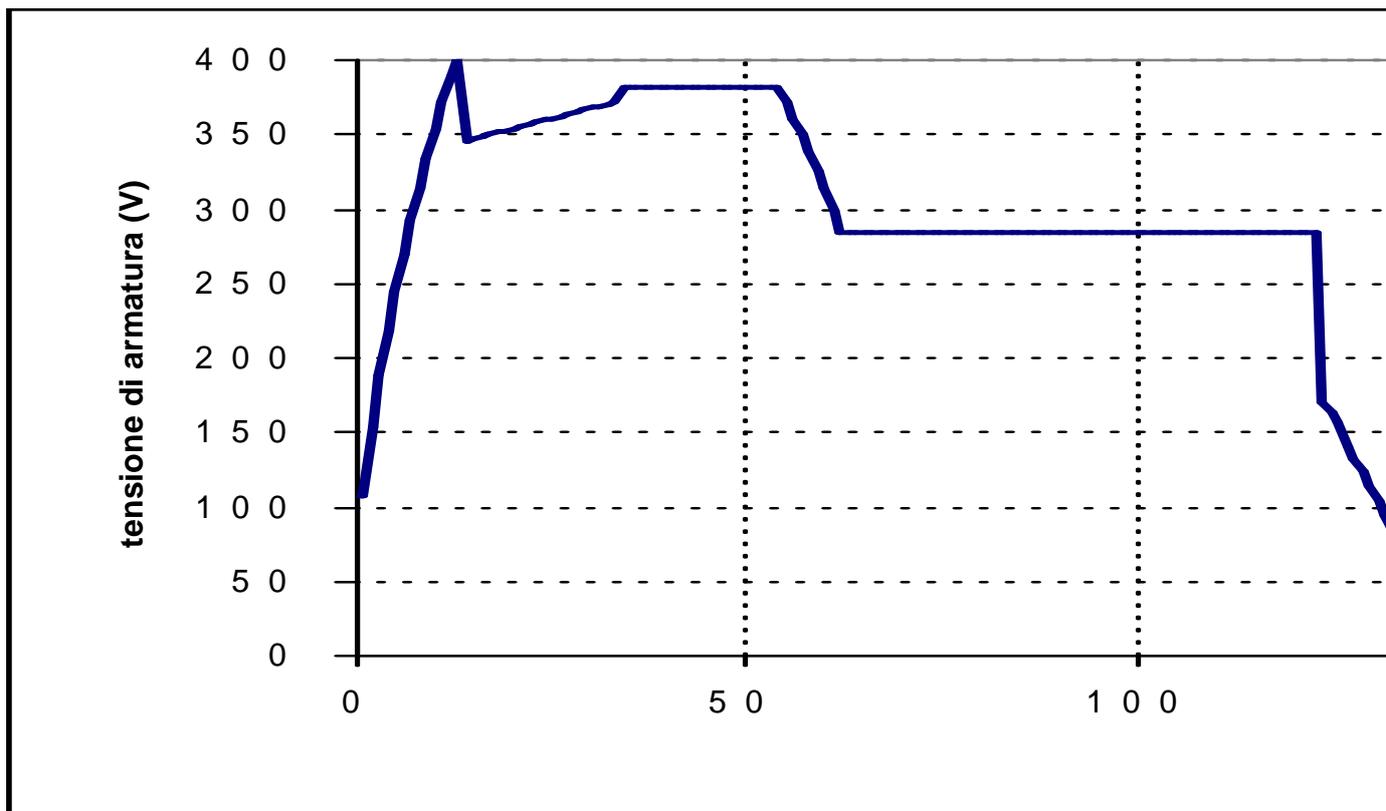


Fig. 2-6. Andamento della tensione di armatura del motore in continua.

Il fattore di potenza lato alternata è legato rigidamente al coseno dell'angolo di accensione dei tiristori mediante la relazione:

$$\cos \varphi = \frac{3}{\pi} \cos \beta$$

In questo modo, un volta ricavato il fattore di potenza, è possibile conoscere l'andamento della potenza reattiva assorbita (vedi Fig. 2-8).

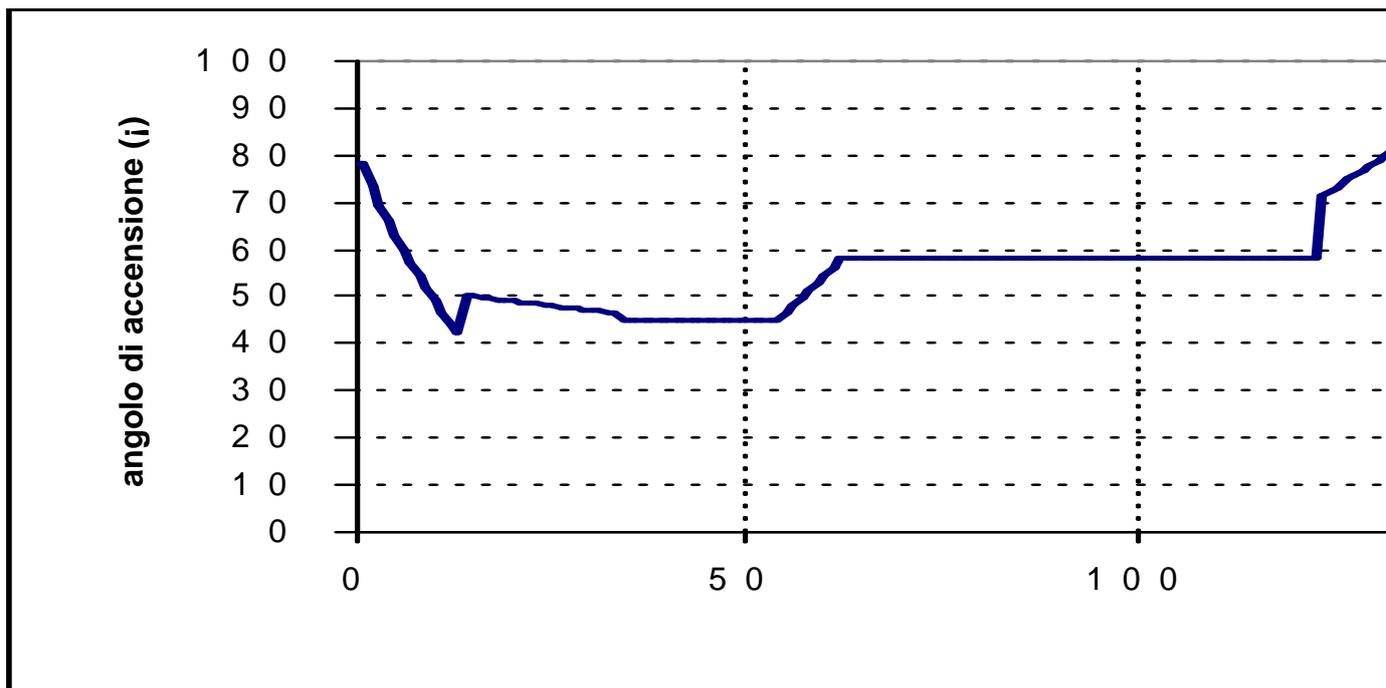


Fig. 2-7. Andamento dell'angolo di accensione dei tiristori.

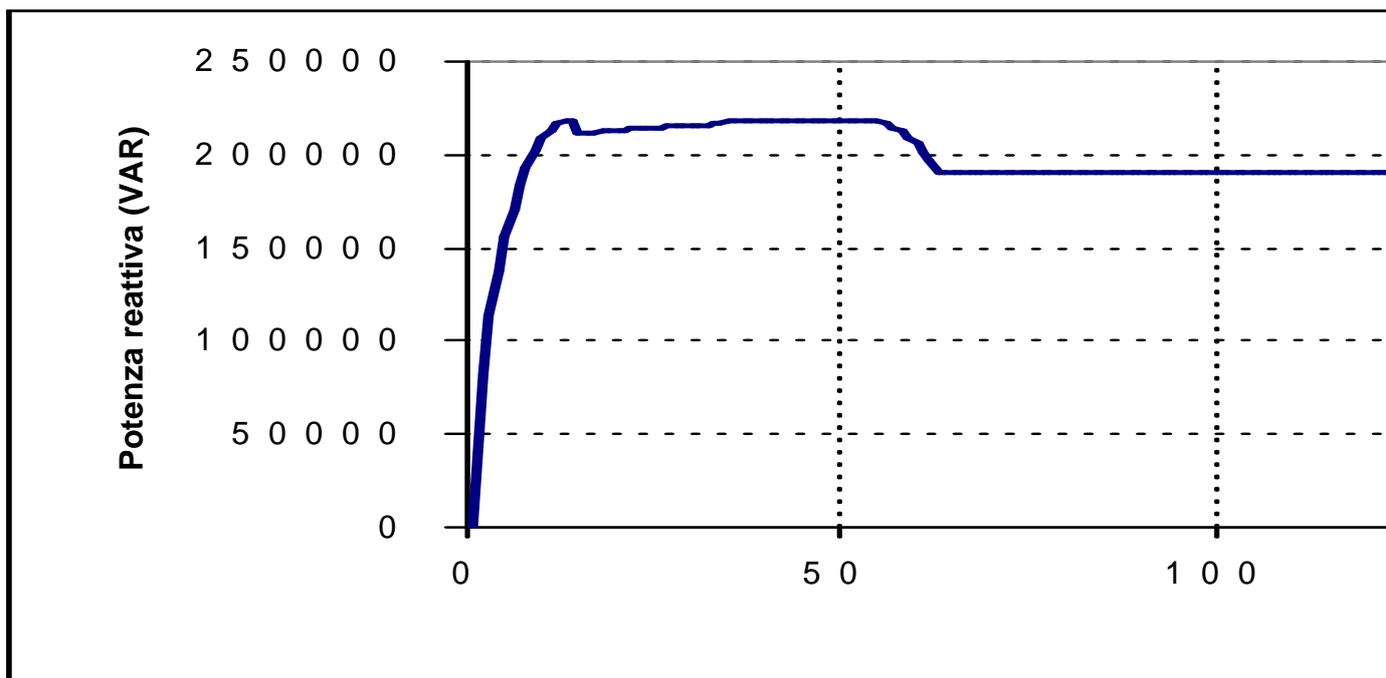


Fig. 2-8. Andamento della potenza reattiva a pieno carico.

La potenza reattiva relativa all'azionamento appena calcolata risulta una quantità importante per il corretto dimensionamento del sistema di accumulo e per le valutazioni economiche sviluppate nel seguito (vedi Cap. 5 e Cap. 8).

2.3. Stima del modello equivalente della rete

Il sistema di accumulo è stato supposto essere collegato alla rete in alternata subito a monte dell'azionamento mediante un convertitore elettronico bidirezionale (vedi Fig. 2-9).

La rete è stata modellata mediante il circuito equivalente di Thevenin lato bassa tensione, supponendo una potenza di corto-circuito nel punto di consegna pari a 10 MVA. Questo significa che, supponendo un trasformatore MT/bt da 400 kVA con una $V_{cc}\% = 5\%$ (e quindi anche $Z_{cc}\% = 5\%$) è possibile ottenere una impedenza di corto circuito secondaria Z_{2cc} pari a circa 20 mΩ. Di questa impedenza di corto circuito lato secondario è stato supposto che circa il 30% sia resistenza e il resto reattanza induttiva, ottenendo $Z_{rete} = Z_{2cc} = R_{2cc} + j\omega L_{2cc} = 0.007 + j0.02$.

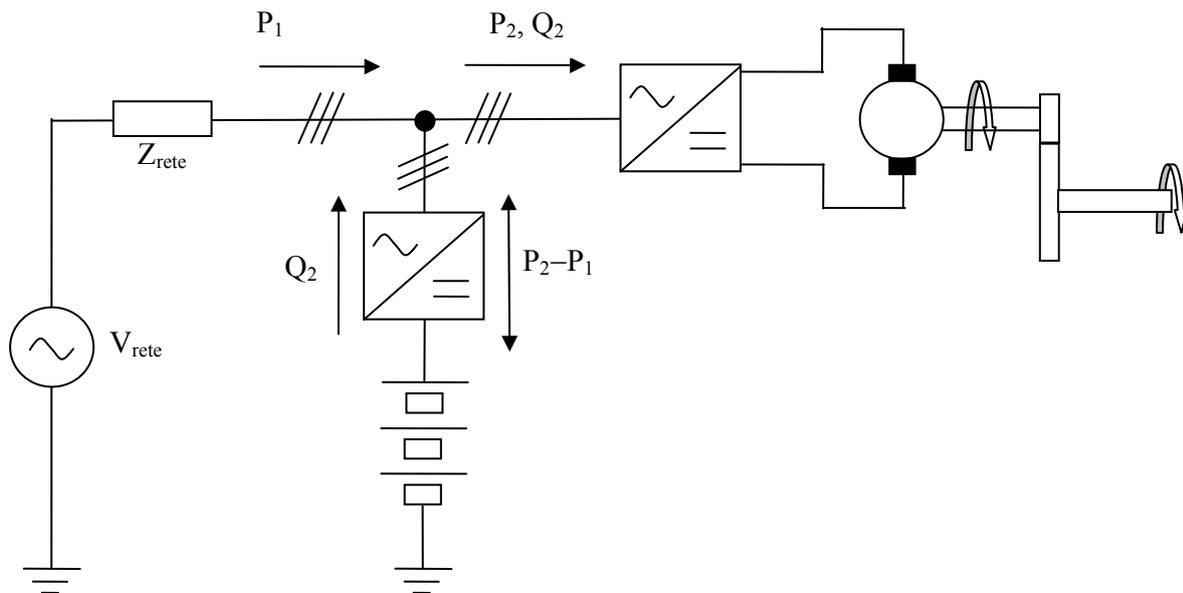


Fig. 2-9. Schema di principio della rete, dell'azionamento e del sistema di accumulo sotto studio.

In Fig. 2-9 è riportato uno schema di principio del sistema comprendente il sistema di compensazione con l'accumulo e gli scambi di potenza (attiva e reattiva) fra la rete, l'azionamento e il sistema di accumulo stesso.

3. SIMULATORE DELL'IMPIANTO

Per quanto riguarda la parte di simulazione del funzionamento dell'impianto in cui sia presente il sistema di accumulo, è stato sviluppato un modello del sistema mediante il programma SimulinkTM. In tale modello, oltre al profilo di carico descritto in precedenza e al modello della rete elettrica, è stata implementata anche una possibile logica di controllo sia per la compensazione totale della potenza reattiva, sia per la limitazione dei picchi di potenza attiva.

La strategia di controllo impiegata è stata la seguente: nei tratti di percorso in cui la potenza attiva richiesta alla rete è inferiore a 100 kW il sistema compensa completamente la potenza reattiva, funzionando da rifasatore totale del carico. Non appena la potenza richiesta alla rete supera il valore di 100 kW, il sistema di accumulo deve essere in grado di fornire il surplus di potenza attiva unitamente a tutta la potenza reattiva. Con questa logica di funzionamento si trova che il pacco batterie deve fornire un picco di potenza di circa 100 kW nel caso di pieno carico. Su questo valore viene quindi condotto il dimensionamento del pacco batterie.

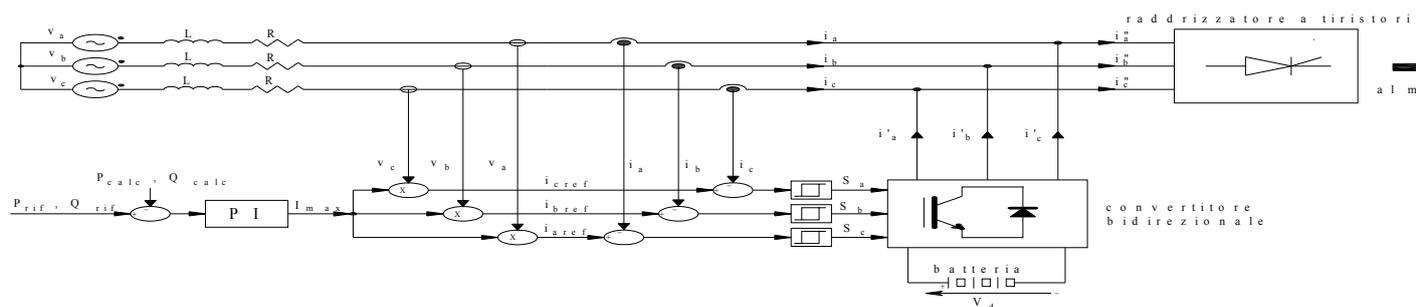


Fig. 3-1. Schema di principio del controllo realizzato sul sistema di accumulo.

La Fig. 3-1 mostra lo schema di principio del controllo implementato: un sistema di misura delle principali grandezze elettriche del sistema permette di ottenere in tempo reale P_{calc} e Q_{calc} ; tali grandezze vengono confrontate con i rispettivi valori di riferimento e l'errore è mandato ad un controllore PI. L'uscita del controllore PI è una grandezza proporzionale al valore massimo della

corrente che il sistema di accumulo deve erogare/assorbire. Tale valore viene moltiplicato per i valori istantanei delle tre tensioni di fase al fine di ottenere una terna di correnti di riferimento esattamente in fase con le tensioni stesse. Tale terna di correnti (indicate con i_{aref} , i_{bref} , i_{cref}) viene comparata con le correnti reali e i tre errori mandati poi a tre comparatori ad isteresi per la realizzazione di un semplice controllo di tipo Bang-Bang. Le uscite dei tre comparatori ad isteresi (uno per ogni fase) comandano direttamente (o tramite opportuna amplificazione) i tasti del convertitore elettronico di interfaccia bidirezionale, il quale invia verso il carico una terna di correnti opportuna in modo da ottenere quanto desiderato.

Quanto appena descritto è stato realizzato, come già detto, mediante un modello Simulink descritto in Fig. 3-2.

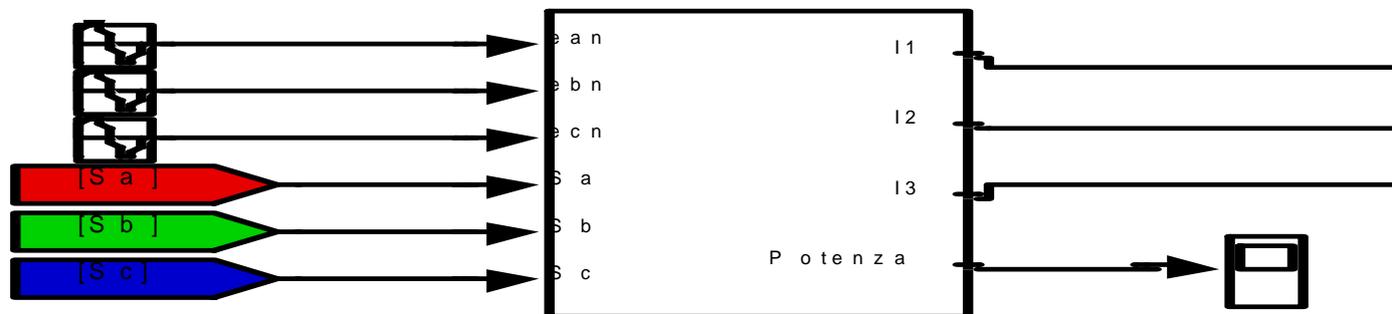


Fig. 3-2. Schema a blocchi del modello utilizzato per le simulazioni.

Nello schema sopra riportato sono riconoscibili i 4 blocchi principali: il convertitore bidirezionale, il controllo, il comparatore ad isteresi e il blocco che, a partire dal valore massimo e dalla fase delle correnti ricostruisce le tre sinusoidi relative alle correnti nel carico. In Fig. 3-3 è riportato il dettaglio dello schema del controllore. Da notare come gli ingressi siano gli andamenti della potenza attiva e reattiva assorbita stimati in precedenza. Nella realizzazione pratica del sistema tali valori verranno sostituiti con i valori misurati in tempo reale.

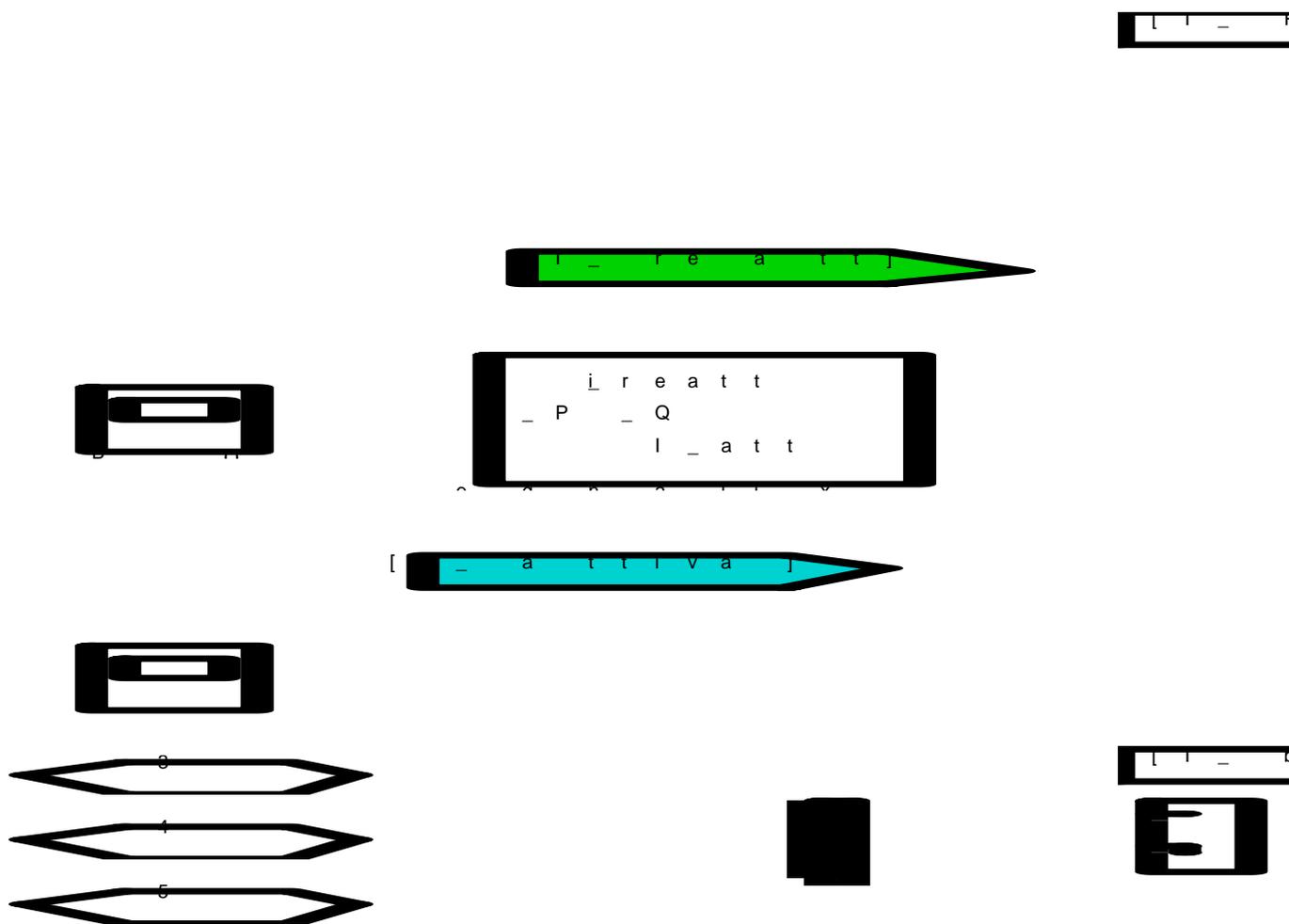


Fig. 3-3. Schema del controllore di Fig. 3-2.

4. ANALISI DEL CARICO SIMULATO E SINTESI DELL'IM-PIANTO PROPOSTO

La simulazione dei primi 9 secondi (Fig. 4-1) del ciclo di salita è sufficiente per dimostrare come l'azione del controllore agisca in maniera corretta sul sistema, limitando la corrente di fase ad un valore massimo di circa 208 A (valore efficace quindi pari a 147.1 A), cui corrisponde una potenza apparente pari a 100 kVA. Questo valore di potenza apparente in realtà risulta tutta potenza attiva, in quanto, come evidenziato dalla Fig. 4-2 l'effetto dell'azione rifasatrice del dispositivo di compensazione con accumulo è completo, tanto che corrente e tensione risultano perfettamente in fase fra loro. E' inoltre interessante vedere come la tensione disponibile scenda dal valore massimo iniziale di 325.3 V (valore efficace 230 V) fino ad un valore massimo finale pari a 321.2 V (valore efficace 227.1 V), con una caduta di tensione di 4.2 V, come evidenziato dal particolare riportato in Fig. 4-3, in cui sono rappresentati i massimi della tensione durante i primi 8 secondi di simulazione. Senza sistema di accumulo la caduta di tensione risulterebbe nell'ordine degli 8-9 V, quindi anche da questo punto di vista è possibile apprezzare il beneficio apportato dal sistema di accumulo relativamente alla power quality.

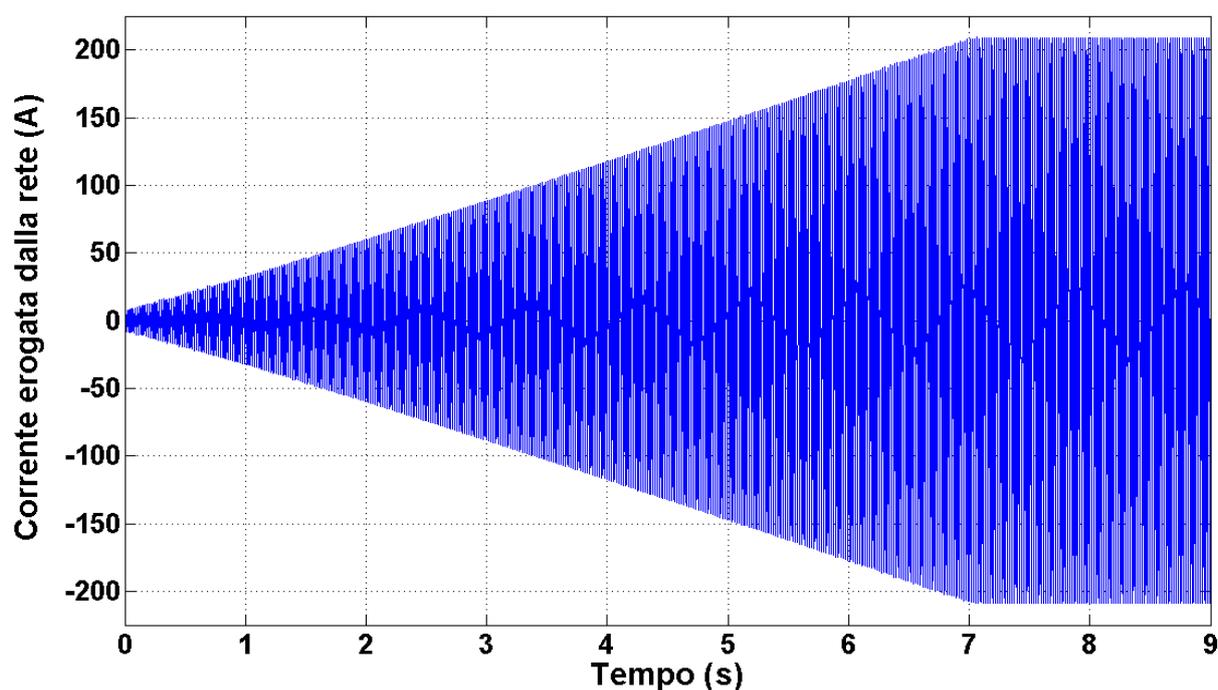


Fig. 4-1. Corrente di fase erogata dalla rete di alimentazione nei primi 9 secondi di simulazione. Notare il taglio a circa 208 A di valore massimo della corrente dovuto alla soglia di 100 kW sulla potenza attiva.

Le oscillazioni ad alta frequenza presenti sulla corrente sono dovute alla banda scelta per i comparatori ad isteresi. Limitando tale banda le oscillazioni diventano minori e quindi diminuisce anche il contenuto armonico della corrente stessa.

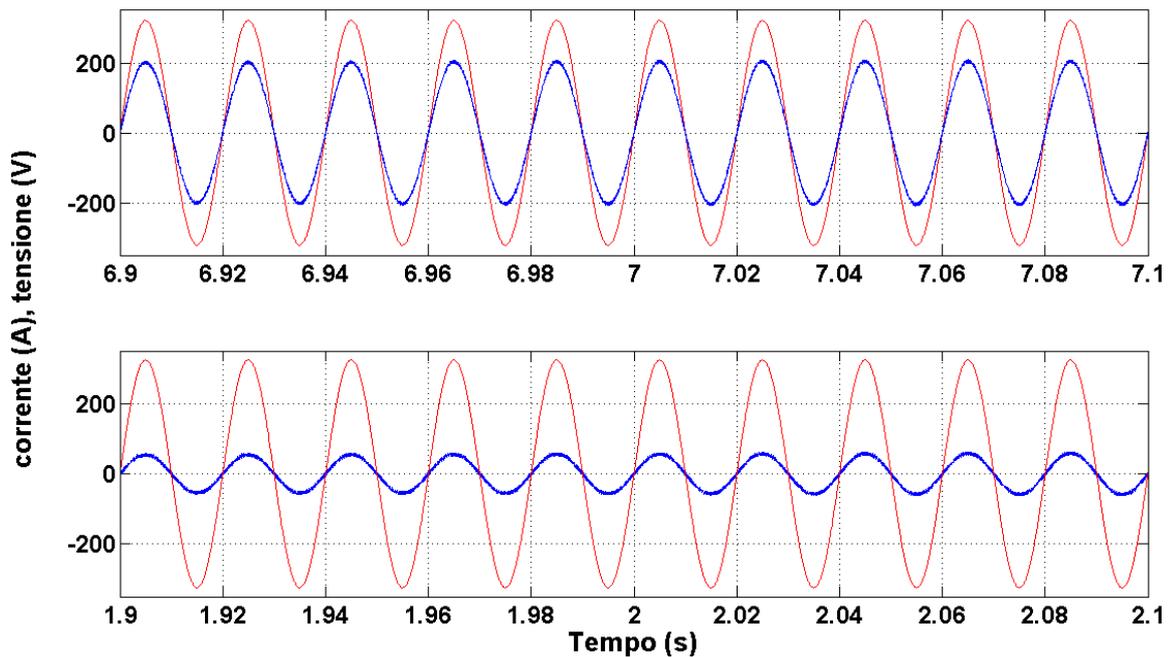


Fig. 4-2. Corrente (blu) e tensione (rossa) di fase relative alla rete di alimentazione in due momenti distinti: il primo grafico si riferisce alla situazione dopo 7 secondi dalla partenza, il secondo è relativo alla situazione dopo 2 secondi. Notare i valori differenti di corrente, che rimane sempre in fase con la tensione

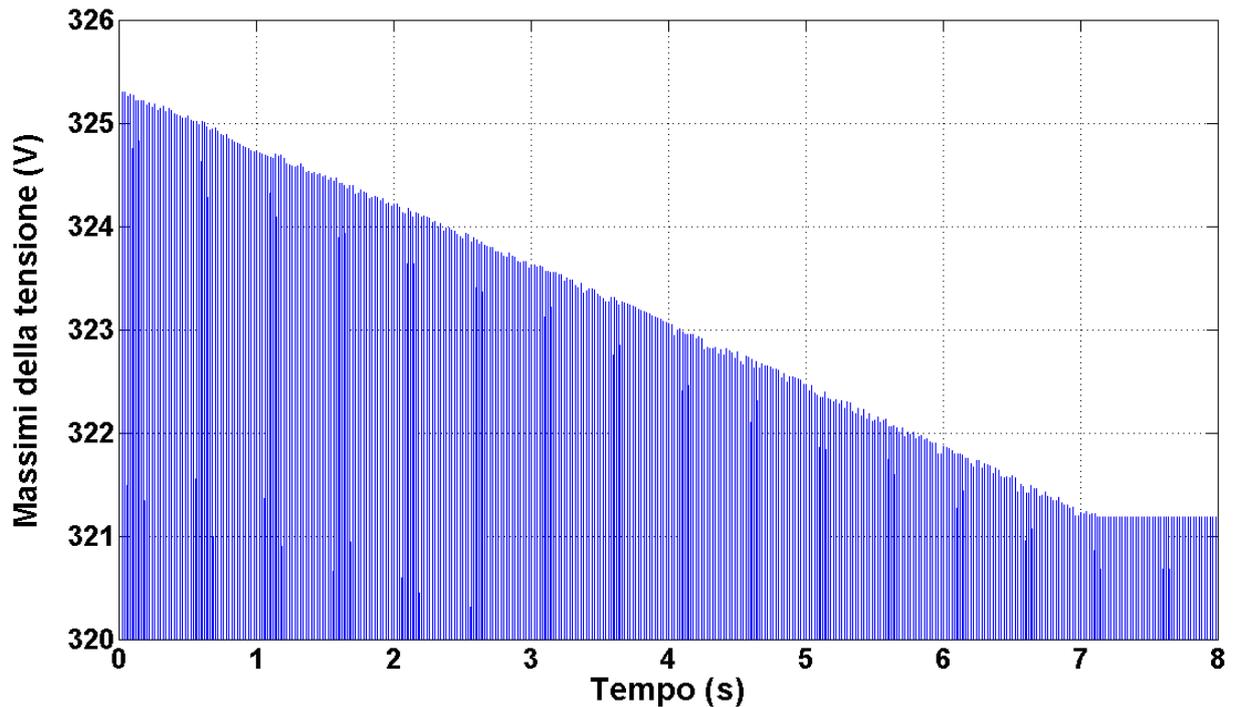


Fig. 4-3. Tensione di fase relativa alla rete di alimentazione durante i primi 8 secondi: si nota come l'aumento della corrente erogata crei una caduta di tensione legata all'impedenza equivalente con cui è stata modellata la rete stessa.

Dalle simulazioni numeriche descritte in precedenza è risultato che durante la fase di trazione il sistema assorbe circa 4.2 kWh di energia elettrica nel caso di pieno carico. Il sistema di accumulo equipaggiato con il sistema di controllo che implementa la logica descritta in precedenza è in grado di limitare questo assorbimento a 3.2 kWh. Se ne deduce che il sistema di accumulo deve essere in grado di fornire 1 kWh di energia per ogni salita a pieno carico.

5. SPECIFICHE PER IL DISPOSITIVO DA INSTALLARE

In relazione a quanto specificato nel capitolo precedente l'energia erogata dal sistema di accumulo durante la salita della funicolare è di circa 1 kWh.

Tale energia può essere in pratica completamente recuperata durante la fase di discesa. Sapendo l'energia che il sistema di accumulo deve fornire e la potenza massima di picco, si è dimensionato il pacco di batterie al Litio nel seguente modo: si è supposto una corrente di scarica massima di 5C1, il che comporta di avere una pacco batterie da 20 kWh. Con questo dimensionamento il DOD (Depth Of Discharge) risulta al massimo (cioè con il sistema funicolare a pieno carico) il 5%, quindi per batterie di accumulatori al Li-ioni oggi disponibili sul mercato, è possibile stimare una vita utile delle batterie di 80.000-100.000 cicli.

Questo numero risulta una stima probabile e non sicura in quanto il costruttore non fornisce il dato del numero di cicli con un DOD del 5%, ma solitamente fornisce il numero di cicli con DOD 100%, 80% e 20%, da cui è necessario estrapolare il numero di cicli per DOD più piccoli. Si fa presente che comunque il DOD al 5% si realizzerebbe soltanto nel caso di pieno carico, e che il DOD medio previsto per ciclo sarà nettamente più basso, in quanto, dati il numero di passeggeri annui (156000) e il numero delle corse annue (circa 16000), è evidente che le corse a pieno carico siano molto rare rispetto a corse con carico medio/vuoto (il numero medio di passeggeri per ogni corsa risulta pari a 10, quando il pieno carico si realizza con 55 persone a bordo). Se ne deduce che molti cicli presenteranno DOD di circa il 3%, con un probabile netto aumento del numero di cicli di vita del sistema di accumulo.

La potenza attiva e reattiva del dispositivo (inverter di interfaccia tra rete e batteria di accumulatori), secondo quanto indicato nel capitolo precedente devono essere rispettivamente 100 kW e 100 kWAr.

6. RILIEVI SPERIMENTALI

Nei mesi di Luglio e Agosto del 2010 è stata realizzata una campagna di misure sull'impianto esistente, volta a validare il modello ed anche a condurre una serie di valutazioni economiche relative ai tempi di ritorno dell'investimento legato al sistema di accumulo e alla modernizzazione dell'impianto stesso.

Le misure sono state realizzate in tre modi differenti, con lo scopo di analizzare fenomeni diversi.

- a) Nella giornata del 14 Luglio 2010 sono state misurate le forme d'onda delle tensioni e delle correnti lungo una finestra temporale di 200 ms, con lo strumento acquisitore regolato con un tempo di campionamento pari a 20 μ s. Questa prima serie di misure è volta all'analisi del contenuto armonico delle correnti assorbite.
- b) dal 14 al 18 luglio 2010 sono stati misurati gli assorbimenti reali di potenza attiva e reattiva della funicolare in oggetto, con l'acquisitore di segnale regolato in modo tale da poter acquisire tutte le principali grandezze elettriche (tensioni, correnti, potenze) ogni secondo. Questa seconda serie di misure è volta alla definizione precisa dei profili di carico durante i cicli giornalieri.
- c) Dal 23 Luglio al 13 Agosto l'acquisitore di dati è stato lasciato a misurare le principali grandezze elettriche con un intervallo temporale di 5 secondi fra un dato e il successivo. Quest'ultima campagna di misurazioni ha come scopo un'analisi più globale dell'assorbimento dell'impianto, potendo scegliere i giorni "tipo" sui quali condurre le valutazioni energetiche e/o economiche.

6.1. Analisi armonica

Nella Fig. 6-1 sono riportate le forme d'onda della tensione e della corrente misurate. E' evidente l'alto contenuto armonico soprattutto della corrente, che appare molto deformata e soprattutto non periodica. Tali andamenti sono stati misurati in fase di salita, dopo circa 30 secondi dalla partenza della funicolare stessa.

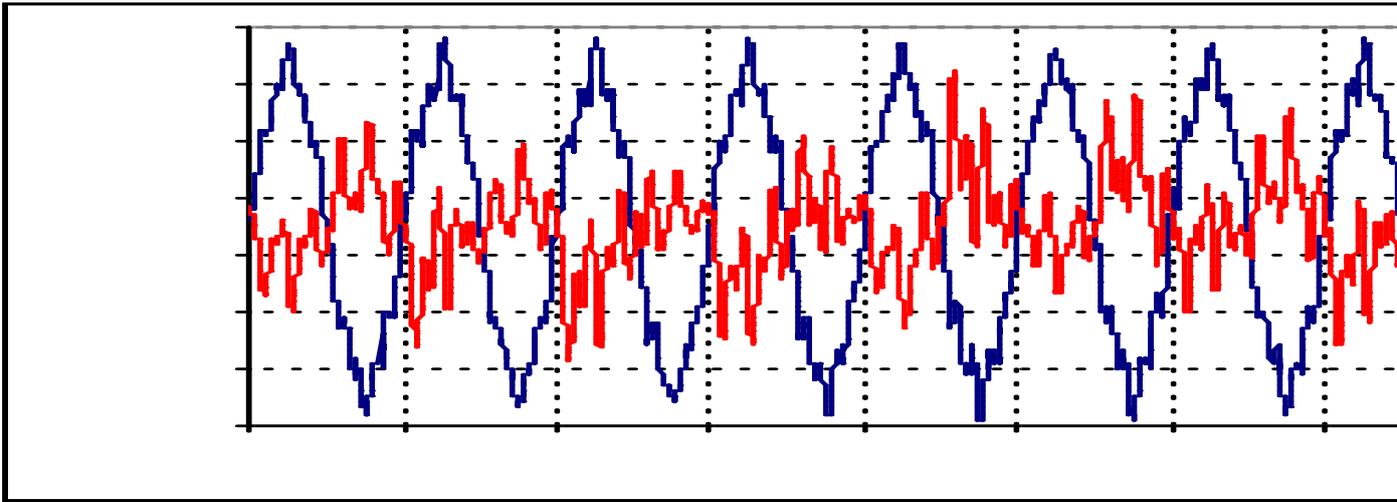


Fig. 6-1. Forma d'onda misurate della tensione concatenata e della corrente di linea.

L'analisi armonica risulta particolarmente complessa, per i motivi descritti nel seguito. La Fig. 6-2 riporta il particolare di una delle tre tensioni concatenate:

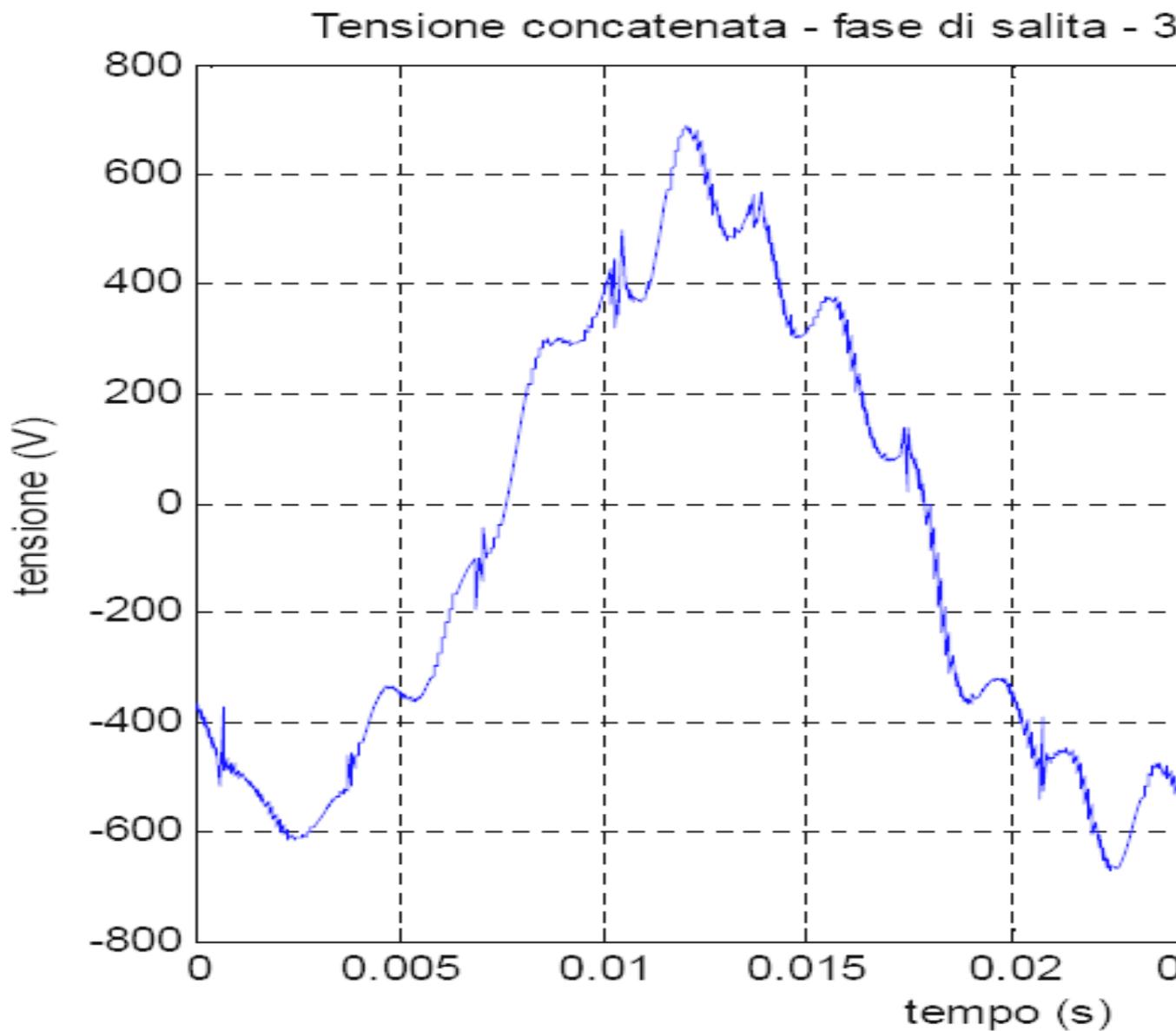


Fig. 6-2. Forma d'onda misurata di una tensione concatenata.

Il segnale rilevato, corrispondente teoricamente a due periodi della fondamentale, non risulta in realtà periodico, come evidenziato dalla Fig. 6-3, che riporta sovrapposti gli andamenti delle grandezze nei due “periodi” (primo “periodo” in blu, secondo “periodo” in nero).

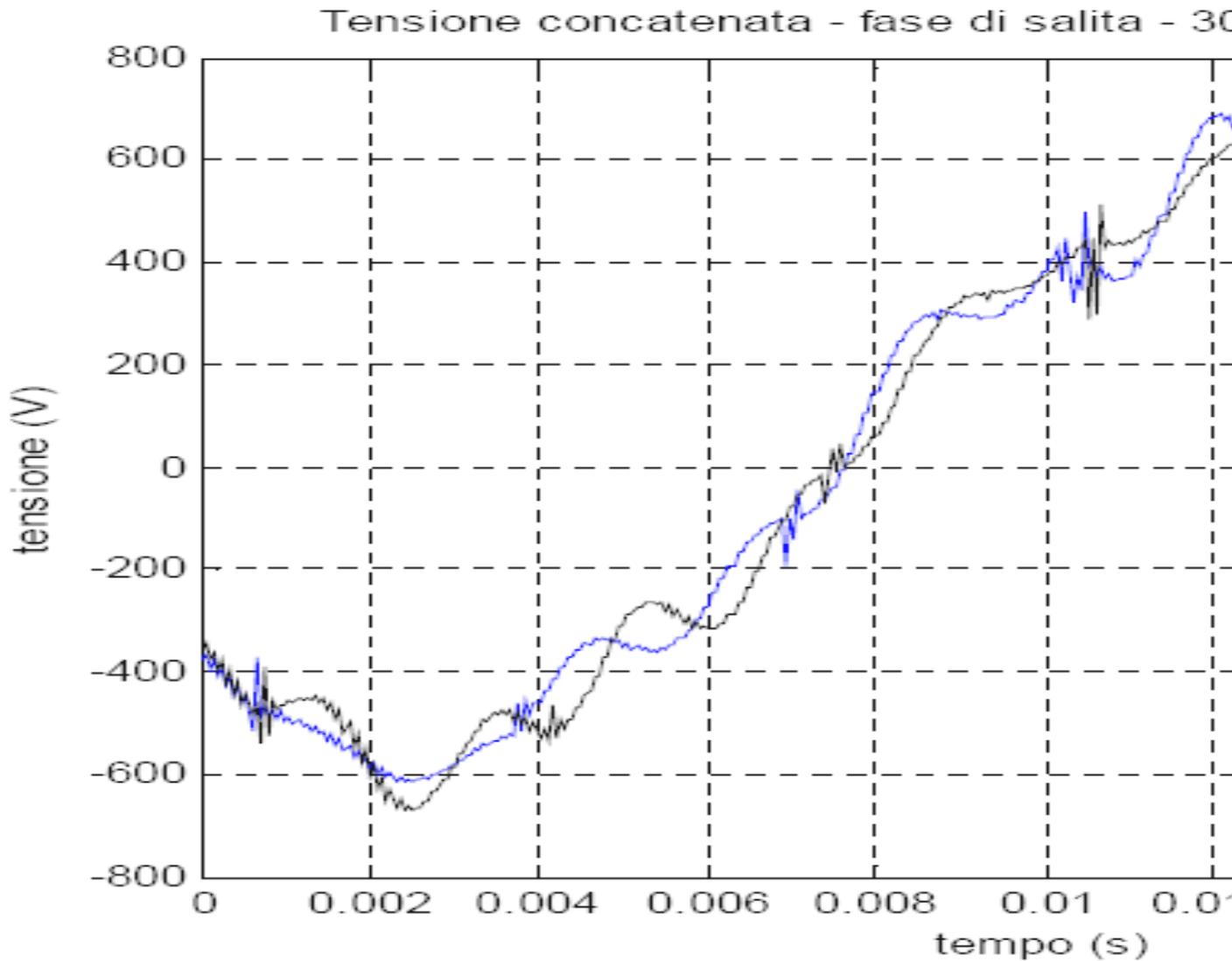


Fig. 6-3. Confronto fra il primo e il secondo periodo della tensione concatenata.

Anche le altre tensioni concatenate presentano andamenti analoghi.

L'algoritmo FFT (algoritmo per l'implementazione "veloce" della DFT) opera su una porzione del segnale di ingresso ed è **basato sull'assunto che tale porzione sia ripetuta nel tempo**, cioè non opera sul segnale originario, bensì su di un segnale periodico "fittizio" ricavato a partire dal segnale originario, considerato periodico.

Nel caso in esame è possibile il calcolo della FFT ad esempio sui primi 20 ms del segnale ma è importante sottolineare che l'algoritmo calcola lo spettro di un

segnale “fittizio” considerato periodicizzando il segnale. **Tale segnale NON CORRISPONDE al segnale reale di tensione rilevato (non periodico).**

Nella Fig. 6-4 è riportato lo spettro relativo ad una elaborazione FFT della forma d’onda che da una stima delle principali armoniche presenti nella grandezza rilevata.

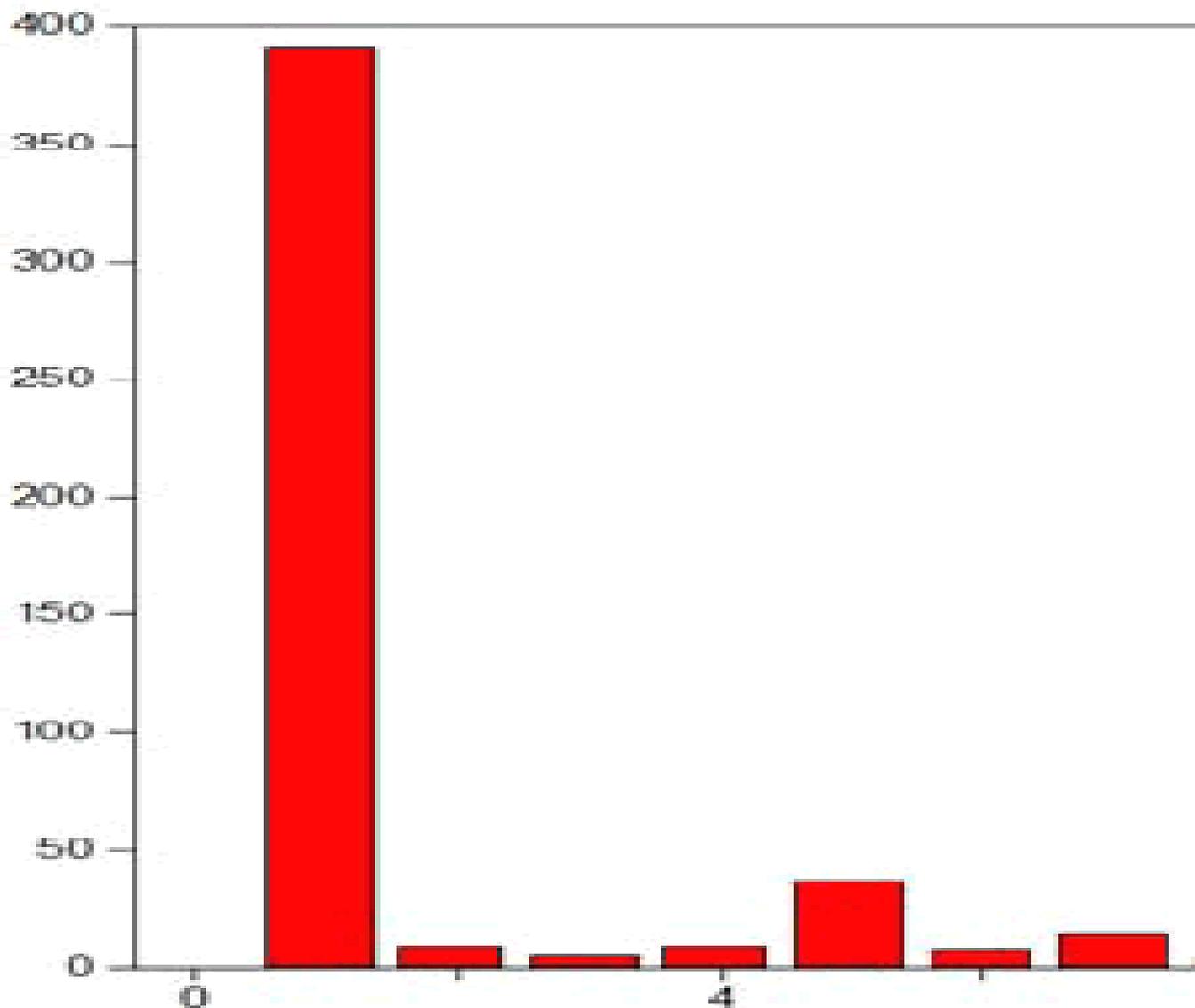


Fig. 6-4. Spettro in ampiezza relativo al primo periodo della tensione concatenata.

I valori numerici corrispondenti alle principali frequenze presenti (valori RMS) sono:

ordine	Valore
--------	--------

dell'armonica	dell'armonica
1	391,71
5	36,579
7	13,987
9	12,931
10	23,814
11	28,911

Il calcolo relativo al secondo “periodo” per quanto esposto in precedenza porta a risultati differenti, in quanto effettuato ipotizzando la ripetizione (periodicizzazione) del segnale relativo al secondo “periodo”.

I valori numerici corrispondenti alle principali frequenze presenti (valori RMS) sono:

ordine dell'armonica	Valore dell'armonica
1	394,41
5	34,37
7	4,5381
9	0,44845
10	20,086
11	26,246

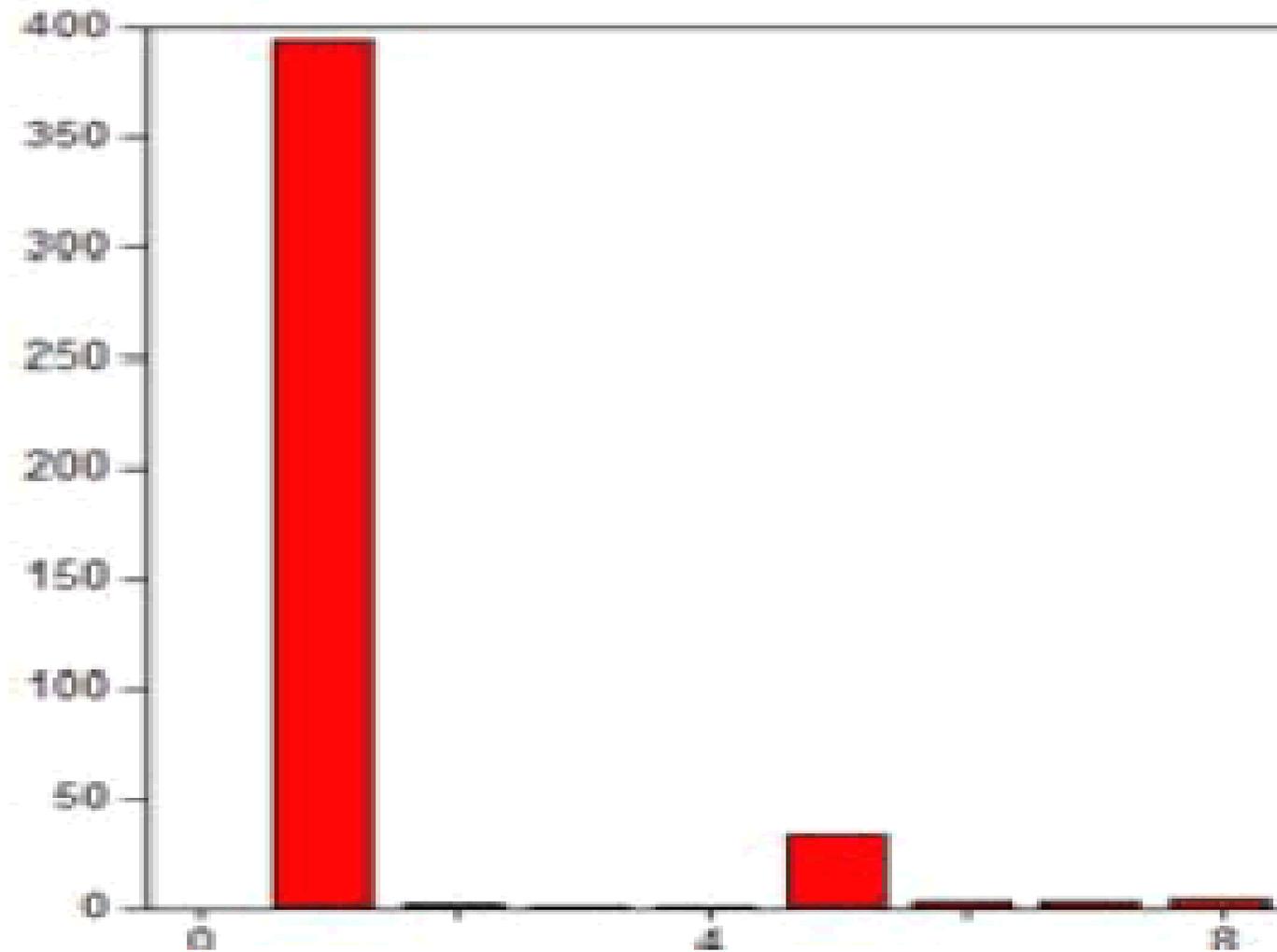


Fig. 6-5. Spettro in ampiezza relativo al secondo periodo della tensione concatenata.

La Fig. 6-6 riporta la corrente relativa alla fase 1 (I1) rilevata, corrispondente ad una acquisizione effettuata durante la fase di salita, dopo 30 secondi dalla partenza.

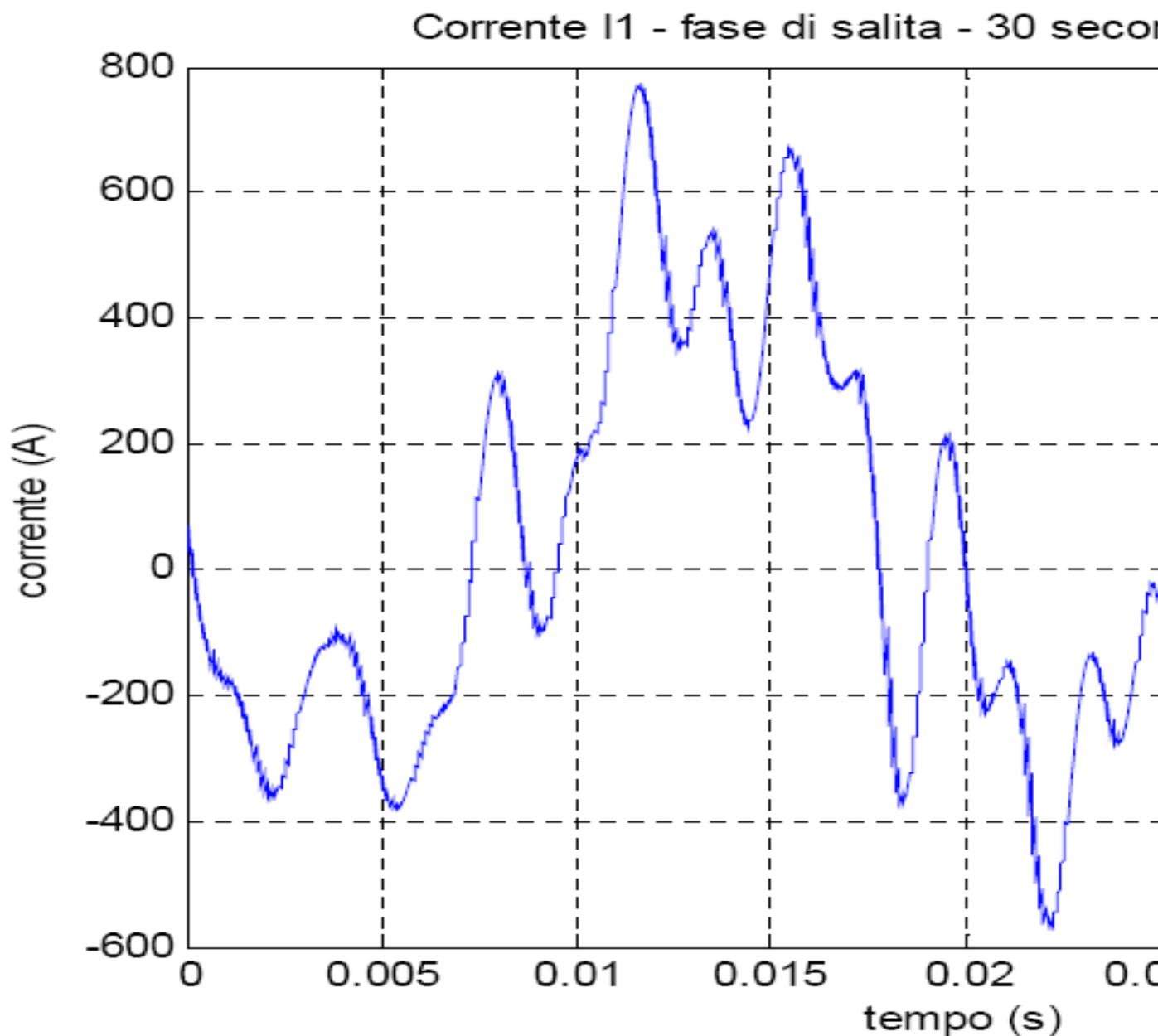


Fig. 6-6. Andamento della corrente nella fase 1 circa 30 secondi dopo la partenza.

Come avvenuto per le tensioni concatenate, il segnale rilevato, corrispondente teoricamente a due periodi della fondamentale, non risulta in realtà periodico, come evidenziato dalla Fig. 6-7, che riporta sovrapposti gli andamenti delle grandezze nei due “periodi” (primo “periodo” in blu, secondo “periodo” in nero).

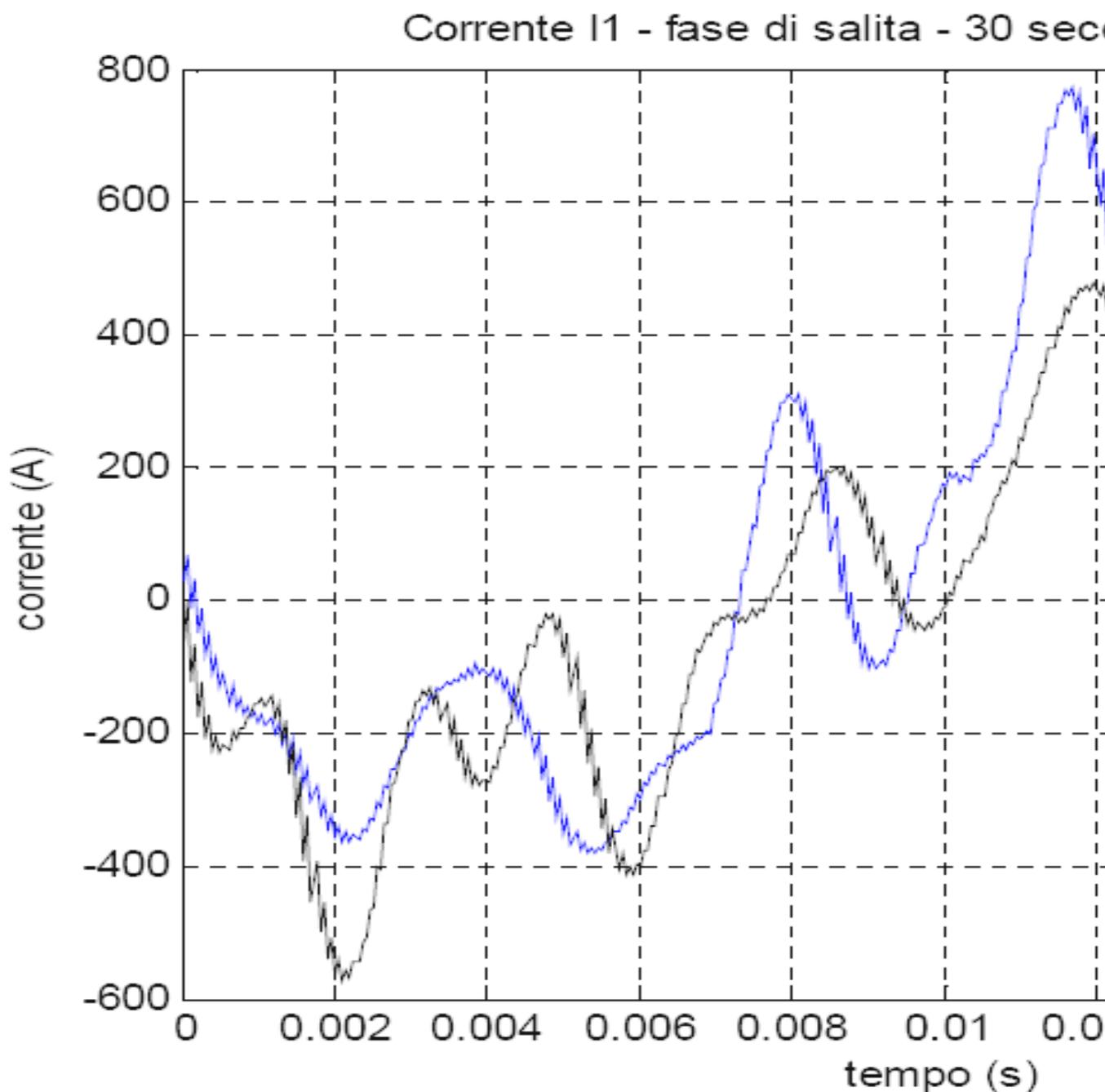


Fig. 6-7. Corrente nella fase 1: confronto fra il primo periodo e il secondo periodo.

Considerazioni analoghe valgono per le correnti nelle altre due fasi. I segnali presentano una chiara non periodicità. I valori agli istanti iniziali e finali risultano inoltre molto differenti (anche 200-300A); in tali condizioni l'eventuale "periodicizzazione" introduce discontinuità nel segnale fittizio. In

tali condizioni l'analisi del segnale di corrente richiede l'utilizzo di tecniche diverse dalla FFT. Si può comunque certamente dire che il contenuto armonico è notevole e il THD corrispondente (qualora si possa definire un indicatore equivalente al THD) risulterebbe certamente molto elevato.

6.2. Analisi dei cicli di carico

Nel seguito sono riportati i dati relativi ad una finestra temporale di 12 ore misurati dalle 12:00 alle 24:00 di sabato 17 luglio 2010. Nella Fig. 6-8 è riportato l'assorbimento di potenza attiva nell'intera finestra temporale di 12 ore. In tale figura è possibile rendersi conto della frequenza delle corse (circa 4 l'ora in media) e del valore dei picchi di potenza sia durante le accelerazioni che durante le frenate. Si nota un picco massimo in assorbimento verso le ore 20 pari 200 kW, e dei picchi negativi in discesa di circa 110 kW distribuiti più o meno uniformemente in tutta la finestra temporale presa in considerazione. E' inoltre evidente come con un tale diagramma di assorbimento il sistema di compensazione con accumulo sia una soluzione ottimale dal punto di vista sia economico sia tecnologico.

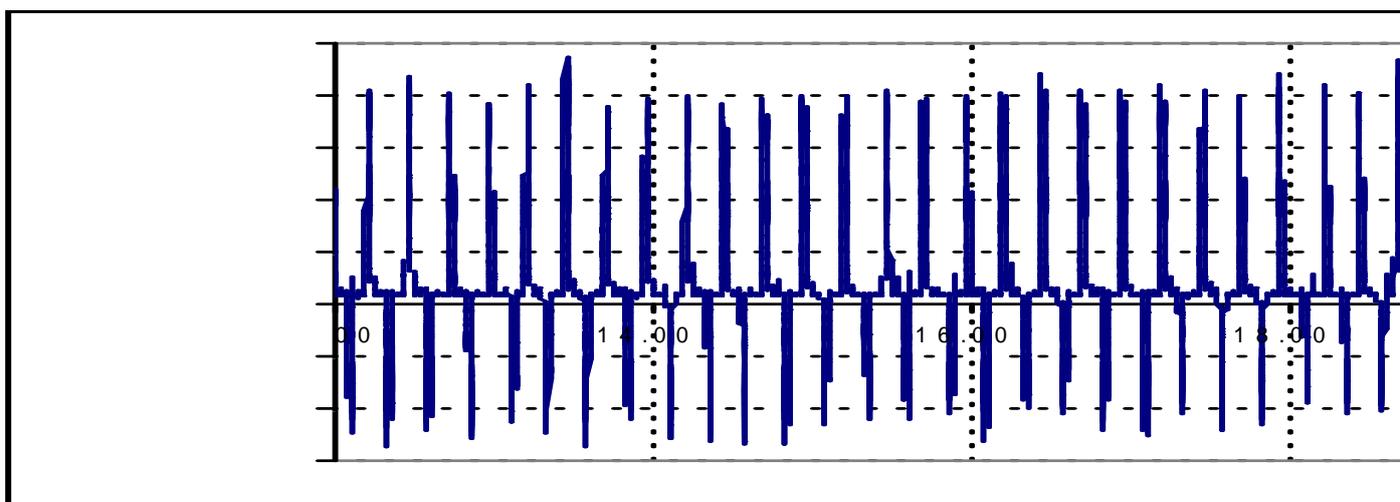


Fig. 6-8. Andamento della potenza attiva misurata su un arco di 12 ore.

In Fig. 6-9 è riportato l'andamento della potenza attiva nella finestra temporale compresa fra le 20 e le 21, dove cade il picco massimo in assorbimento. Come si può notare il diagramma di carico è, come previsto, piuttosto ripetitivo e il valore di picco tra una corsa e la successiva varia in base al carico trasportato.

In Fig. 6-10 è riportato l'andamento delle potenze relative al ciclo che presenta il picco massimo di assorbimento. Come è possibile notare il fattore di potenza risulta estremamente basso, con un massimo pari a circa 0.7, allorquando la potenza attiva e quella reattiva risultano dello stesso valore. In tutti gli altri istanti il fattore di potenza risulta minore di questo valore, così come previsto in fase di stima dei profili di assorbimento.

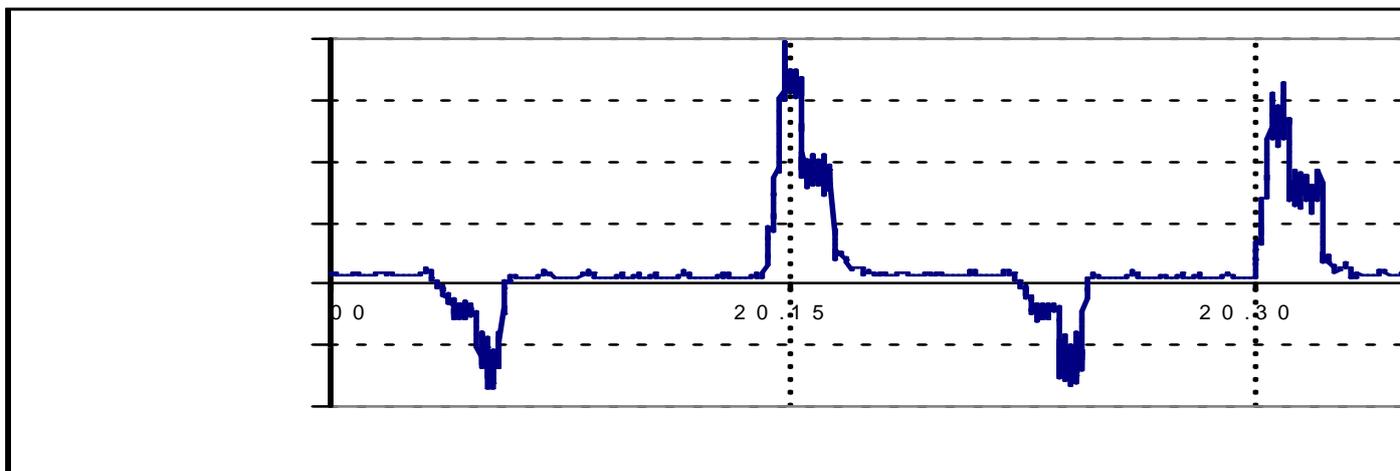


Fig. 6-9. Andamento della potenza attiva misurata sulla finestra oraria comprensiva del picco massimo in assorbimento.

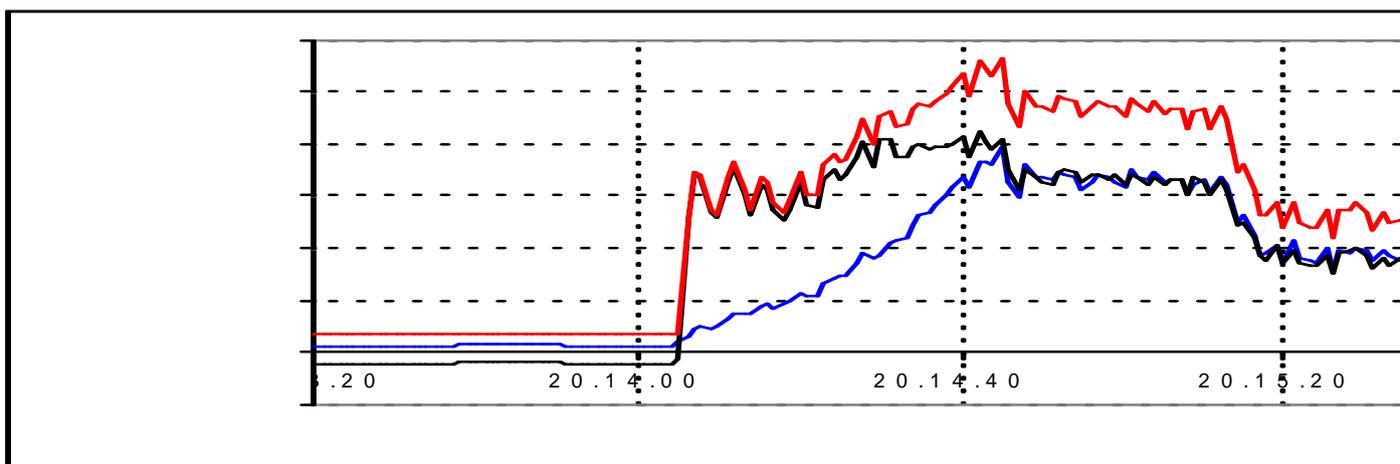


Fig. 6-10. Andamenti della potenza attiva, reattiva e apparente misurate sul ciclo a pieno carico.

6.3. Ricerca dei giorni “tipo”

In Fig. 6-11 è riportato l’andamento della potenza attiva nell’arco delle 24 ore nella giornata di domenica 8 agosto 2010. Da dati storici è noto come attorno alla metà di agosto vi sia il picco di passeggeri trasportati dalla funicolare, e tale dato emerge anche dalle simulazioni, in quanto il totale di corse giornaliere è decisamente superiore alla media (58 corse) e i picchi di potenza risultano anch’essi piuttosto consistenti (203 kW in salita, 120 kW in fase di discesa), in relazione al fatto che anche il numero di passeggeri in questo periodo è mediamente alto.

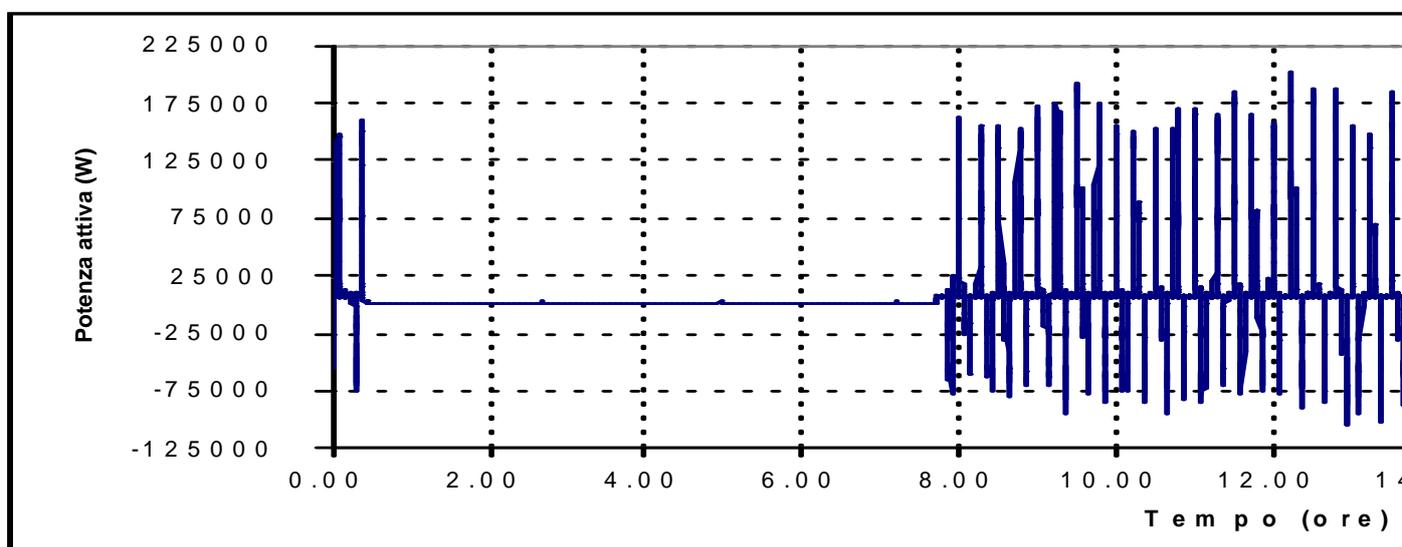


Fig. 6-11. Andamenti della potenza attiva misurata durante l’intera giornata di domenica 8 agosto 2010.

Grafici simili sono riscontrabili anche nelle giornate di domenica 1 agosto, di sabato 7 e di lunedì 9 agosto.

La tabella seguente riporta i principali dati ricavati dall’analisi degli andamenti in questi 5 giorni tipo, scelti in modo da prendere 2 domeniche, un intero week-end e un giorno in mezzo alla settimana.

Giorno	n. corse	En. erog in discesa (kWh)	En. ass. trazione (kWh)	Pot. di picco (kW)	Pot. di picco neg. (kW)	En. ass. dal ciclo max (kWh)	En. erog. dal ciclo max neg. (kWh)	Pot. ass. da fermo (kW)
--------	----------	---------------------------	-------------------------	--------------------	-------------------------	------------------------------	------------------------------------	-------------------------

01/08/2010	58	70.7	284.4	198	108	4.7	1.48	7
07/08/2010	59	73.4	294	192	126	4.44	1.48	7
08/08/2010	58	73	288	203	120	4.7	1.5	7
09/08/2010	59	68.3	268.4	185	119	4.44	1.48	7
11/08/2010	53	66.6	263.5	185	121	3.88	1.62	7

Si può notare come i giorni relativi al week-end siano decisamente più gravosi dal punto di vista sia dell'assorbimento di energia, sia dal punto di vista dei picchi di potenza.

7. VALIDAZIONE SIMULATORE

Come è possibile notare, dal confronto tra le stime e i rilievi sperimentali riportati nei capitoli precedenti, la rampa di potenza attiva è più dolce (arriva al picco in circa 40 secondi), mentre è decisamente più severa quella di potenza reattiva, che durante tutta la fase di accelerazione si mantiene comunque molto alta (come stimato preliminarmente) e addirittura nei primi 10 secondi risulta praticamente coincidere con tutta la potenza assorbita.

Il confronto fra i grafici di Fig. 6-10 e Fig. 2-8 quindi dimostra un buon accordo tra gli andamenti delle simulazione e i rilievi sperimentali.

Una volta installato l'impianto di compensazione con le batterie di accumulatori sarà quindi possibile verificare con precisione anche quest'ultima parte dell'intero sistema e validare completamente il simulatore.

Il simulatore validato sarà, quindi, uno strumento importante anche per il gestore della funicolare, poiché permetterà di definire di volta in volta la migliore politica di gestione: ad esempio quando cambiano i contratti di fornitura dell'energia elettrica, oppure quando cambiano gli orari.

8. STIMA DEI BENEFICI ECONOMICI

Il sistema di accumulo così come è stato ipotizzato ha la possibilità di realizzare molteplici benefici, sia tecnologici, sia economici. I benefici dal punto di vista tecnologico sono evidenti:

- a) minore impiego del trasformatore di cabina secondaria che alimenta l'impianto, in quanto mediante il sistema di accumulo viene annullata la quota di potenza reattiva che il trasformatore deve erogare, e viene anche circa dimezzata la quota di potenza attiva;
- b) Minore corrente in linea e quindi minori perdite e minore caduta di tensione lato rete;
- c) Con la funzione di filtro attivo (che in genere il sistema di interfaccia è in grado di eseguire) è possibile filtrare molte delle armoniche di ordine basso, aumentano anche da questo punto di vista la power quality.

Dal punto di vista dei benefici economici, essi si estrinsecano in:

- a) benefici legati alla possibilità di recuperare energia in fase di discesa (con cui ricaricare le batterie del sistema di accumulo), che prima andava persa o comunque non veniva remunerata dal distributore
- b) benefici legati all'aumento del fattore di potenza
- c) benefici legati alla minore potenza di picco impegnata

Nella tabella sottostante sono riportati gli ipotetici guadagni che si potrebbero ottenere allo stato attuale nel caso si potesse rivendere in rete l'energia in fase di discesa.

Giorno	Ricavo giornaliero (euro)
01/08/2010	6.50
07/08/2010	6.51
08/08/2010	6.05
09/08/2010	6.07
11/08/2010	5.80

Si può quindi stimare un introito per cessione alla rete di circa 200,00€/anno.

In termini di esposizione alle tariffe di acquisto dell'energia elettrica, gli immediati vantaggi economici riconducibili all'installazione di un dispositivo di accumulo, con contestuale modifica del sistema di alimentazione della funicolare ai fini di un più efficace rifasamento del carico, riguardano la riduzione delle punte di prelievo e l'annullamento delle penali per eccessivo assorbimento di energia reattiva.

Contenimento dei picchi di potenza

Il profilo elettrico di assorbimento dell'attuale impianto è caratterizzato da picchi istantanei di potenza di circa 200 kW. Tuttavia, dal punto di vista delle tariffe applicate dal distributore elettrico, non sono rilevanti i picchi istantanei di potenza, bensì i valori medi di potenza registrati ogni quarto d'ora (ricavabili dalla misura dell'energia assorbita in ogni intervallo di 15'). Attualmente, tali picchi al quarto d'ora (la cosiddetta "potenza impegnata") si attestano intorno a 20 kW, peraltro in maniera coerente con l'effettuazione di una corsa mediamente ogni 15 minuti e con l'entità dell'energia assorbita in ciascuna corsa (circa 5 kWh).

Secondo l'attuale quadro regolatorio stabilito dall'Autorità per l'energia elettrica e il gas, la quota di potenza impegnata incide solo su una componente minoritaria della tariffa di distribuzione. In particolare, per utenze allacciate in

Bassa Tensione con potenza disponibile superiore a 16,5 kW, la quota di potenza vale circa 2,4 €/kW/mese, da applicarsi alla potenza media assorbita nel quarto d'ora di maggior prelievo di quel mese. Nel caso in questione, si tratta dunque di circa 48 €/mese. Considerando l'energia media assorbita dall'impianto ogni mese (circa 8 MWh), tale quota di potenza incide dunque in tariffa per circa 6 €/MWh, pari al 3-4% del totale pagato in bolletta, IVA esclusa.

Nell'ipotesi che, grazie al sistema di accumulo, si riesca a dimezzare da 200 a 100 kW il picco istantaneo di prelievo e assumendo che quest'azione si traduca in una riduzione del 10% (2 kW) della potenza media a 15', il risparmio in bolletta equivarrebbe a circa 5 €/mese.

Annullamento delle penali per eccessivo prelievo di energia reattiva

L'attuale quadro regolatorio stabilito dall'Autorità per l'energia elettrica e il gas prevede che i distributori applichino penali mensili per eccessivo prelievo di energia reattiva, quando il $\tan\phi$ medio mensile supera 0,5¹. In particolare, per utenze allacciate in Bassa Tensione la penale vale:

- 32,3 €/Mvarh, per ogni Mvarh eccedente il $\tan\phi$ 0,5 e fino al $\tan\phi$ 0,75²
- 42,1 €/Mvarh, per ogni Mvarh eccedente il $\tan\phi$ 0,75

Tale verifica, che può dar luogo a penali tutt'altro che indifferenti, avviene mese per mese, separatamente per le fasce orarie F1 e F2. Non sono previste penali per prelievi eccessivi di energia reattiva in fascia F3 (orari notturni, sabato pomeriggio, domeniche e principali festività).

¹ Ciò significa che i kvarh mensili (energia reattiva) assorbiti dall'impianto hanno numericamente superato il 50% dei kWh (energia attiva) prelevati nello stesso periodo.

² Tale soglia corrisponde ad un prelievo mensile di kvarh numericamente pari al 75% dell'assorbimento in kWh.

Da una prima valutazione, si può stimare che nelle fasce F1 e F2 vengano assorbiti ogni mese almeno 5 Mvarh, a fronte di un consumo di energia attiva di circa 5 MWh (su 8 MWh di consumo mensile). 1,25 Mvarh risultano così esposti ogni mese al primo livello di penale e ulteriori 1,25 Mvarh al secondo livello, ancora più oneroso. Questo si traduce in un onere mensile di circa 95 €. E' realistico pensare che, agendo opportunamente sul sistema di alimentazione ai fini di un corretto rifasamento, si riesca a portare il prelievo di energia reattiva al di sotto della soglia di penale ($\tan\phi=0,5$ ovvero $\cos\phi=0,9$), evitando così interamente tale spesa.

Energia non acquistata

Dai rilievi si può notare come si possa accumulare l'energia restituita alla rete durante la frenatura e quindi erogarla all'impianto durante la salita con un conseguente minor acquisto di energia di circa 2,5 MWh/anno e con un risparmio economico di circa 400,00 €/anno.

In conclusione si può stimare che la presenza del sistema di compensazione con accumulo possa far diminuire la "bolletta" di circa 1.600,00 €/anno.

9. CONCLUSIONI

Le attività sviluppate sia a carattere teorico che di monitoraggio confermano essere il sito “funicolare di S.Vigilio” a Bergamo un eccellente caso studio e di sperimentazione di sistemi di compensazione con batterie di accumulatori.

La stima dei miglioramenti energetici porta ad una riduzione di circa 100kW di potenza di punta assorbita dalla rete e a circa 2,5 MWh/anno di minore energia richiesta, che sommate alle minori perdite su tutto il sistema elettrico a monte per la minore potenza assorbita e il miglioramento della qualità della forma d’onda della corrente, in relazione al mix produttivo nazionale, porterebbe ad una minore emissione di CO² di circa 1t/anno.

Oltre ai benefici energetici ambientali si possono stimare benefici economici di esercizio minimi (non tenendo conto della riduzione delle perdite) di circa 1.600,00€/anno.