

Accumulatori a superconduttori

Per colmare le mancanze transitorie d'energia dovute agli abbassamenti di tensione negli impianti che utilizzano potenze dell'ordine dei MVA, sono ora disponibili accumulatori a superconduttori. Un'applicazione industriale in Italia

L'installazione funzionante alla STMicroelectronics

Rupert Schöttler, Mario Maggi

I grandi impianti industriali, con carichi di alcuni megawatt, generalmente vengono alimentati in media tensione, spesso con più di una linea d'alimentazione dalla rete pubblica fino alla stazione con i trasformatori principali.

Questa configurazione migliora la continuità di servizio, ma non può dare alcun tipo di protezione all'impianto contro le microinterruzioni dell'alimentazione, causate da guasti o da eventi atmosferici su linee di trasmissione.

Questi eventi, che peraltro possono differenziarsi sensibilmente come entità e durata a seconda che i guasti siano più o meno vicini alla stazione, durano generalmente meno di un secondo e sono caratterizzati da un abbassamento della tensione fino al 50% (buchi di tensione) o al 100% (microinterruzioni) del valore nominale.

Fin dal 1990, l'American Superconductor ha concentrato la propria attenzione sullo sviluppo di sistemi

ad accumulazione magnetica d'energia con utilizzo di materiali superconduttori (Superconducting Magnetic Energy Storage - SMES), sia per il miglioramento della qualità dell'energia, sia per la protezione d'impianti o di sezioni di essi alimentanti carichi sensibili alla qualità dell'alimentazione.

Il sistema SMES alimenta istantaneamente l'impianto con la sua energia accumulata e stabilizza la tensione al verificarsi degli abbassamenti di tensione.

L'accumulatore a superconduttori immagazzina l'energia elettrica in una bobina avvolta su un nucleo magnetico, entrambi mantenuti a temperatura criogenica all'interno di un contenitore isolato termicamente.

Un raddrizzatore trasforma la tensione alternata della rete e carica la bobina che, trovandosi in stato superconduttivo, non offre alcuna resistenza ohmica al passaggio della corrente e, quindi, non crea perdite termiche.

Appena caricata con una corrente di alcune migliaia di ampere, la bobina viene cortocircuitata da un semi-conduttore, mantenuto anch'esso a temperatura criogenica, e la corrente

circola in continuazione, esercitando la funzione di volano elettrico.

Il nucleo a temperatura criogenica acquista una permeabilità molto elevata; come risultato si ottiene l'accumulo di un'elevata quantità d'energia, immediatamente disponibile e scaricabile in uno spazio ristretto. L'energia immagazzinata sotto forma di corrente continua viene ceduta, quando necessario, al sistema a corrente alternata tramite un inverter ed opportuni dispositivi di controllo a commutazione.

Esistono due metodi di connessione alla rete, in serie ed in parallelo, dalla scelta dei quali dipendono le prestazioni del sistema.

► Alimentazione in serie

L'alimentazione in serie (PQ VR) è un metodo consolidato per ricostruire un'onda di tensione che presenta un'insellatura dovuta ad un buco di tensione (figura 1). Applicando una terna di vettori tensione sull'avvolgimento secondario di un trasformatore d'alimentazione, si può sommare una tensione sul lato primario e riportare la tensione lato carico al valore corretto.

Il massimo aumento di tensione è

fissato dal rapporto d'avvolgimento tra primario e secondario ed il massimo carico alimentabile determina il dimensionamento del trasformatore.

Se la potenza disponibile è sufficiente, la possibilità di ricostruzione delle semionde di tensione raggiunge ben l'80%.

Gli accumulatori a superconduttori e l'elettronica di potenza possono essere parallelati per aumentare la capacità di recupero o la durata del periodo di soccorso.

Il sistema inverter usato è derivato da sistemi standard ben collaudati e richiede due uscite, controllate in angolo di fase, per ogni fase. Per un buon funzionamento, al sistema in serie è richiesto di fornire l'esatta potenza necessaria per compensare l'abbassamento di tensione. La potenza è determinata dall'effettiva richiesta del carico in quel momento, dalla profondità dell'abbassamento e dal numero di fasi interessate. Il sistema di accumulo magnetico è in grado di fornire esattamente la potenza mancante; di conseguenza la bobina superconduttrice si scaricherà parzialmente, secondo lo schema "Controlled Power", inviando una corrente modulata in larghezza d'impulso verso il DC link dell'inverter.

Alimentazione in parallelo

I sistemi d'alimentazione in parallelo (PQ IVR) (figura 3) attualmente disponibili, permettono di avere sistemi d'accumulo d'energia con capacità di soccorso istantanea fino a 20 MVAR, che si riducono a 18,4 MVAR tenendo conto delle perdite del trasformatore.

La capacità di un sistema di compensazione in parallelo di ricostruire l'onda di tensione è determinata in prima approssimazione dal rapporto fra la potenza iniettata nel punto di collegamento alla rete e la potenza di corto circuito della rete stessa nel punto d'allacciamento.

Con un singolo accumulatore a superconduttori da 20 MVAR si può così proteggere un impianto che presenta una potenza di corto circuito di 50 MVAR al punto di collegamento con la rete, offrendo una capacità di

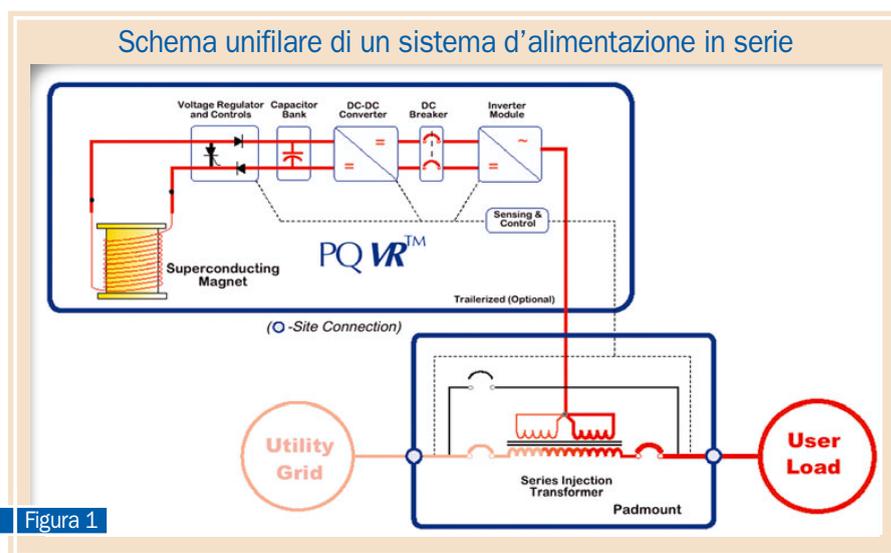


Figura 1

Risultato di un'operazione di carry-over in un sistema d'alimentazione in serie, relativa ad un'installazione in Sud Africa

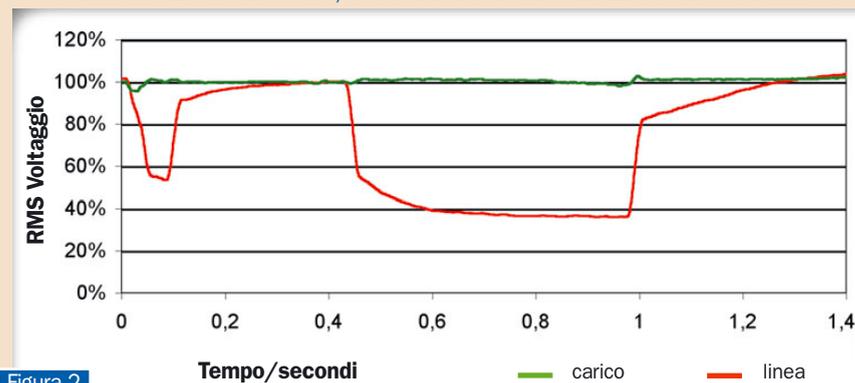


Figura 2

Schema unifilare di un sistema d'alimentazione parallelo

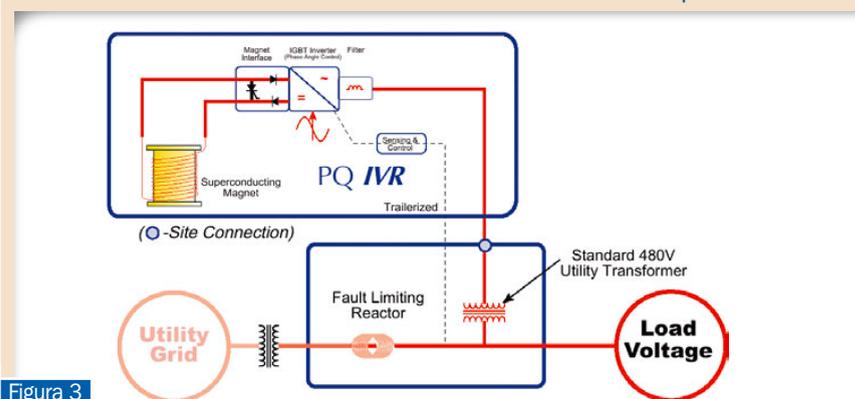


Figura 3

compensazione del 37% della tensione di linea.

Per aumentare il livello della compensazione di tensione, laddove la potenza di corto circuito è molto alta, è possibile aggiungere un limita-

tore della corrente di guasto nel lato verso il carico.

È importante rilevare che la tecnica parallela non risente dell'effettivo livello del carico; ci si deve aspettare sempre la stessa percen-

Risposta di un sistema parallelo a un abbassamento di tensione

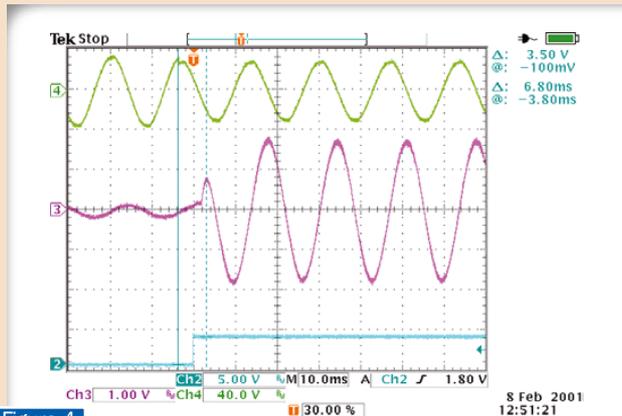


Figura 4

Criostato ad alta efficienza

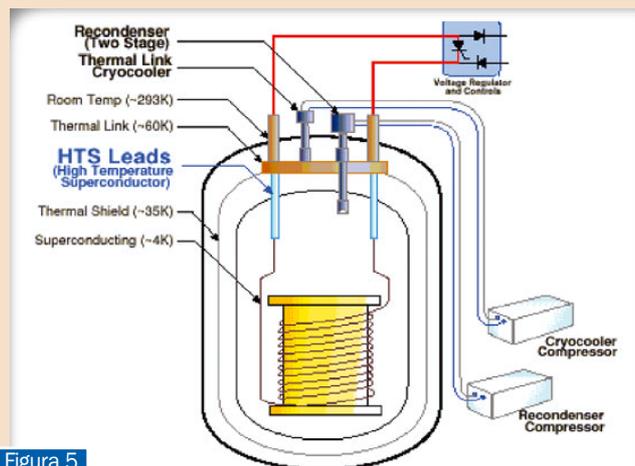


Figura 5

tuale di compensazione ad ogni carico. In pratica si considera che la potenza del carico non sia superiore ad un quarto della potenza di cortocircuito disponibile.

Il sistema d'alimentazione in parallelo richiede un inverter veloce a quattro quadranti (figura 4), che riceve dal microcontrollore comandi di corrente e di angolo di fase per ogni linea e fase ed opera in modalità a controllo di corrente, con controllo indipendente su ogni fase.

L'inverter utilizza moduli singoli da 250 kVA; l'uscita viene sommata e trasformata in media tensione al livello desiderato mediante un trasformatore trifase standard. Gli attuali sistemi d'inverter offrono una considerevole capacità di sovraccarico istantaneo e questa caratteristica permette di sfruttare completamente l'energia immagazzinata nella bobina da 2,7 MJ per eventi momentanei.

I sistemi SMES in parallelo raggiungono la loro massima efficacia quando la potenza reale impulsiva è al proprio valore massimo. Quindi lo schema di scarica per la bobina è del tipo "Constant Voltage".

La corrente della bobina viene inviata in continuazione al DC link dell'inverter ad alta tensione.

L'attuale sistema SMES prodotto da American Superconductor permette una disponibilità di oltre 3 MW di potenza attiva istantanea per l'iniezione in rete.

Alta velocità di risposta

Per tutte le applicazioni di controllo e miglioramento della qualità dell'a-

limentazione d'energia elettrica, è richiesta una velocità di risposta molto elevata, al di sotto del tempo di un ciclo (20 ms).

Nei sistemi ad alimentazione in serie (figure 1 e 2), che sono continuamente on-line, si controllano le tre fasi comparandole con le sinusoidi ideali.

Quando la deviazione supera i valori prefissati in una finestra con tolleranze variabili, s'inizia un ciclo di "carry over", cioè un'azione compensativa di trasferimento d'energia dalla bobina al carico, per riportare la tensione al valore nominale.

Il sistema PQ di tipo parallelo (figura 3) lavora, invece, con gli inverter in modalità stand-by, finché non viene richiesta l'azione di compensazione a fronte di un'improvvisa mancanza d'energia. Si tratta, quindi, di un sistema ad alto rendimento

per l'utilizzatore, molto superiore a qualsiasi altro sistema concorrente. Per attivare l'inverter in caso d'abbassamento della tensione nella linea d'ingresso, il sistema controlla le tensioni delle tre fasi e crea istantaneamente una "previsione RMS" basandosi su campionamenti precedenti ed attuali della forma dell'onda di tensione.

Si può vedere in figura 4 che l'attivazione del gruppo soccorritore avviene 3,8 ms dopo il rilevamento di un abbassamento di tensione, e dopo altri 3 ms la corrente d'uscita dell'inverter raggiunge il valore richiesto.

Volano a superconduttori

Si è già visto come il sistema SMES accumuli energia in un campo magnetico, creato dal flusso di corrente continua in una bobina di filo conduttore realizzato con Niobio e



Figura 6

Setup del server DAS all'American Superconductor

I vantaggi degli SMES

Un sistema ad accumulo d'energia magnetica a superconduttori offre importanti vantaggi rispetto ad altre tecniche di accumulo, quali:

- immagazzinare energia in un campo magnetico sotto forma di corrente elettrica permette un rapido ed efficiente accesso all'energia con un tempo di risposta decisamente più breve rispetto a qualsiasi altra tecnologia;
- un singolo sistema accumulatore può erogare più di 3 MW di potenza istantanea;
- i sistemi SMES sono intrinsecamente sicuri; essi si spengono da soli, entro pochi secondi, nel caso di problemi inattesi od imprevisti. I sistemi criogenici usati per mantenere le basse temperature sono ambientalmente sicuri e non vengono impiegati prodotti chimici pericolosi;
- non ci sono parti mobili associate all'accumulatore d'energia, eliminando quindi usura e necessità di manutenzione;
- la funzionalità del sistema e la vita utile non sono influenzate né dal numero di cicli di carica e scarica, né dalla profondità della scarica.

Titanio. Per mantenere l'elettromagnete in uno stato di superconduzione, questo viene immerso in un criostato di acciaio inossidabile isolato termicamente sotto vuoto, contenente elio liquido ad una temperatura prossima allo zero assoluto, intorno a 4,2 K (figura 5).

L'impiego delle più aggiornate tecniche d'ingegneria criogenica e l'utilizzo di terminali in materiale superconduttore, anche a temperature più alte (HTSC), riducono l'ingresso di calore nel criostato a circa 1 W, un valore così basso da permettere l'impiego di un refrigeratore convenzionale raffreddato ad aria, tipo Gifford-McMahon, per ricondensare la parte di elio diventata gassosa.

La bobina a superconduttori viene caricata da un opportuno alimentatore a corrente continua. Una volta caricata, lo stesso alimentatore provvede a fornire una limitata carica di mantenimento, necessaria per superare le minime perdite resistive che si generano nella parte del circuito che si trova a temperatura più alta. Con questo accorgimento, la corrente che circola nella bobina a superconduttori è sempre al suo valore massimo, quindi nella condizione di poter accumulare il massimo possibile di energia.

Nel caso si presenti un disturbo

in linea, il sistema utilizza immediatamente l'energia immagazzinata per riportare la tensione al valore iniziale.

► Sistema d'acquisizione dati

Ogni SMES di American Superconductor utilizza un sistema d'acquisizione dati computerizzato (DAS = Data Acquisition System), integrato nel controllore del sistema. L'utente può, quindi, accedere a molte informazioni usate dal controllore e memorizzarle, quali tensioni, correnti, pressioni, temperature, posizioni degli interruttori e altro, e può crearne di nuove, come informazioni di stato, avvisi e allarmi.

Normalmente vengono distinti tre tipi di dati, che vengono generati, salvati localmente e trasmessi, via modem e linee telefoniche, ad un server per una memorizzazione sicura e un'ulteriore elaborazione (figura 6).

I dati lentamente variabili quali, ad esempio, le temperature, il livello dell'elio liquido, le pressioni, vengono memorizzati mediamente ogni minuto ed inviati al server una volta al giorno; servono al personale tecnico principalmente per controllare la funzionalità del sistema e per attivare, se necessario, azioni correttive.

I dati digitali vengono creati da cambi di stato, come ad esempio il

passaggio da stato di attività a stato di disattività del sistema, le commutazioni, gli avvisi o gli allarmi per anomalia.

Le informazioni considerate urgenti vengono inviate immediatamente al server per allertare il servizio assistenza, tramite palmari wireless o telefoni cellulari.

I dati ad alta velocità sono generati dall'attività del sistema chiamata "carry-over".

Per ogni evento di soccorso con fornitura di corrente, che segue un abbassamento di tensione, vengono acquisiti numerosi segnali ad alta velocità. Un blocco di questi dati contiene tipicamente quattro secondi d'informazioni, con mezzo secondo di pre-trigger. Questi dati vengono sempre inviati al server per l'analisi delle prestazioni del sistema e per ricavare statistiche sulla qualità dell'energia elettrica.

Un'interfaccia grafica remota per l'utente (RGUI) permette un accesso al sistema in tempo reale. La connessione può essere effettuata da ogni PC con Windows, sia localmente, tramite una connessione seriale RS485, sia in remoto, via modem e linea telefonica. In funzione delle autorizzazioni concesse all'utilizzatore, è possibile conoscere in tempo reale lo stato del sistema, i parametri e i ▶

Integrazione degli SMES alla ST Microelectronics di Agrate Brianza

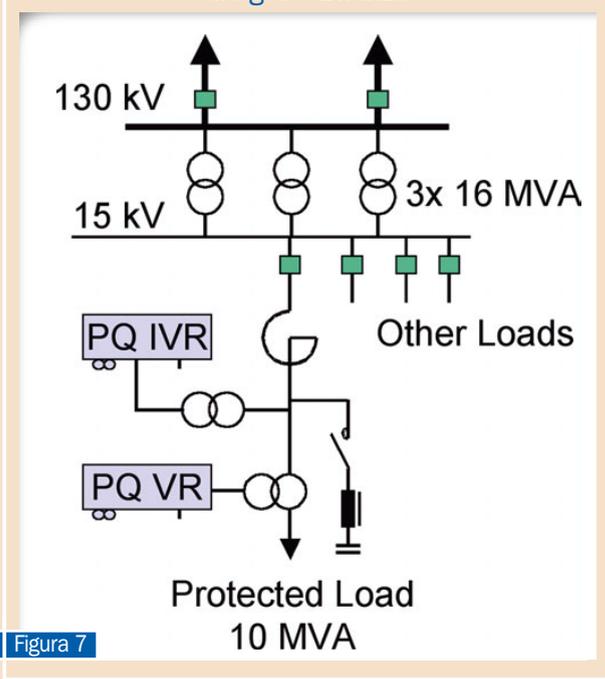
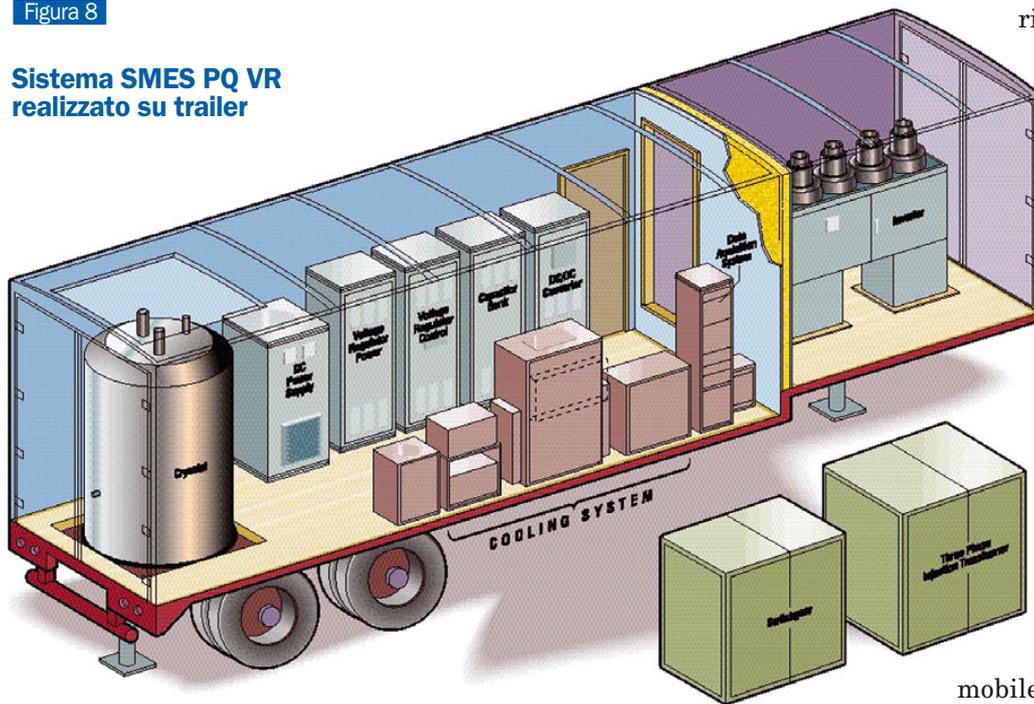


Figura 7

Figura 8

**Sistema SMES PQ VR
realizzato su trailer**



valori delle grandezze in gioco; è possibile, inoltre, comandare il sistema da una postazione remota, modificare qualche parametro ed aggiornare il software di controllo.

Un'applicazione in Italia

Oltre alle già citate configurazioni con alimentazione in serie ed in parallelo, esiste anche la soluzione "combinata" parallelo (PQ IVR) e serie (PQ VR): tale configurazione è stata applicata presso la fabbrica di semiconduttori STMicroelectronics di Agrate Brianza, in provincia di Milano.

Lo stabilimento, con un carico complessivo di circa 35 MW, è alimentato da due linee di trasmissione a 130 kV con una sottostazione 130 kV/15 kV, interamente dedicata alla fabbrica.

Come media, negli ultimi anni, lo stabilimento ha registrato circa 50 abbassamenti di tensione all'anno, ma mai una vera mancanza (micro-interruzione).

Grazie al doppio sistema d'alimentazione, la tensione minima durante gli abbassamenti non è mai scesa sotto il 45% della tensione nominale e gli abbassamenti hanno avuto durate sempre di molto inferiori al secondo.

Una deviazione della tensione entro +/- 10% dalla nominale della durata di 20 ms, non determina

alcun inconveniente al processo produttivo. Di conseguenza, un sistema di compensazione degli abbassamenti di tensione dimensionato per una capacità di soccorso del 45%, capace quindi di ricostruire la tensione fino ad almeno il 90% della nominale, risponde perfettamente alle esigenze produttive dell'impianto. La figura 7 mostra lo schema unifilare dello stabilimento STMicroelectronics interessato dall'installazione della soluzione combinata PQ IVR/PQ VR.

Un carico da 10 MVA, alimentato da un feeder, è protetto da un sistema SMES. Per aumentare l'effetto del sistema d'alimentazione in parallelo, è stata inserita una reattanza al fine di ridurre la potenza di corto circuito disponibile.

Il sistema di compensazione in parallelo PQ IVR offre una capacità di soccorso di non meno del 37% (i valori effettivi variano col carico e le caratteristiche dell'alimentazione, e possono essere maggiori), mentre il sistema di compensazione in serie PQ VR aggiunge un altro 13%, portando la capacità di soccorso totale ad oltre il 50% ed offrendo così un adeguato margine di sicurezza per fronteggiare la quasi totalità degli abbassamenti di tensione registrati sull'alimentazione.

L'esperienza sul campo

I sistemi SMES prodotti da Ame-

rican Superconductor sono in esercizio in impianti fin dal 1990.

I clienti sono costituiti da utilities in Europa, Sud Africa e Nord America, da utilizzatori industriali nei settori dei semiconduttori, della chimica, della metallurgia, della plastica e della carta, nonché da strutture governative legate alla ricerca ed alla difesa.

Tutti gli SMES forniti finora sono installati su semirimorchi mobili (figura 8), sebbene sia possibile anche l'installazione all'interno di strutture fisse.

I vantaggi della soluzione mobile consistono nella minimizzazione degli spazi e nel fatto che non sono necessarie complesse modifiche alla geometria dei locali, modifiche indispensabili nel caso di un'installazione fissa al chiuso.

La predisposizione in loco per l'installazione è molto semplice: sono richieste solo elementari opere civili per le fondazioni, una recinzione e i cavi per la connessione.

Tutti i componenti del sistema Power Quality sono completamente assemblati e collaudati nel container prima dell'arrivo sul luogo d'installazione. L'attivazione e l'adattamento del sistema normalmente richiedono meno di due settimane, tempo determinato principalmente dalla necessità d'effettuare un raffreddamento lento del contenitore criogenico contenente l'elettromagnete.

Inoltre, la soluzione mobile ha il grosso vantaggio di permettere un facile ed economico trasferimento in altra posizione, se le caratteristiche del sito vengono modificate e non richiedono più tale sistema di compensazione, ad esempio, perché l'impianto viene alimentato da una rete elettrica più affidabile.



AUTORI

ING. RUPERT SCHÖTTLER,
American Superconductor Europe
GmbH - Kaarst (Germania)

MARIO MAGGI
Consultronica - Milano