A.Di Gerlando, E.Tironi, I.Vistoli

Indagini preliminari di un sistema distribuito di conversione c.a.-c.c.

L'Energia Elettrica, n.4
1989

IN COPERTINA

Da ABB Elettroconduttore la Serie S2..

Con la Serie S2.. di interruttori automatici e di differenziali magnetotermici, ABB Elettroconduttore propone una soluzione di sicurezza all'altezza della sfida europea degli anni '90.
Nata da un'esperienza tecnologica di livello internazionale, la Serie S2.. deve il suo elevato livello di affidabilità all'utilizzo, nella costruzione, delle più avanzate tecnologie produttive. Gli interruttori automatici sono infatti costituiti da soli tre blocchi premontati e assemblati con procedimenti completamente automatizzati.
I risultati sono all'altezza dell'impegno progettuale e produttivo e fanno della Serie S2.. un prodotto assolutamente conforme alle più severe normative internazionali. Modularità globale con 68 mm di profondità unificata e modulo unico 17,5 mm per tutti i poteri d'interruzione (3-6-10-25 kA) e fino a 63 A di corrente nominale. BiMorsetto protetto a doppio serraggio e protezione IP 20. Attacco a doppia posizione su guida DIN. Gamma assolutamente completa, con ricco corredo di elementi ausiliari e di accessori.
ABB ELETTROCONDUTTURE S.p.A.
Via dei Valtorta, 43/45
20127 Milano

Fondatore: GIACINTO MOTTA
Direttore: GIORGIO CATENACCI
Redattori: C. AGUSTONI (*), P. BERTACCHI, D. BORGESE, A. BOSSI, A. BRANDOLINI, E. CALCATERRA (*), C. CAPUTO, V. CARRESCIA, V. CATALIOTTI, L. CENTURIONI, F. CIAMPOLINI, D. CITRINI (*), E. COMELLINI, A. CONSOLI, F. COPPADORO, G. CORBELLINI, R. CORTINA, M. CUNIETTI, V. DANIELE, G. DIANA, D. FABRIZI, M. FANELLI, M. FINZI, G. FURIOLI (*), F. GAGLIARDI, F. GASPARINI, P. GAZZANA PRIAROGGIA, F. ILICETO, L. LANZAVECCHIA, G. MAIER, U. MAIONE, R. MANIGRASSO (*), G. MANZONI, L. MARZIO, L. MAYER, G. MOLINARI, P. NICOLINI, L. PARIS, E. PEDROCCHI, G. PIAZZI, G. ROSTAGNI, A. SALMOIRAGHI (*), G. SANTAGOSTINO, M. SAVINO, T. SPEGIORIN, A. TASCHINI, F. TOMMAZZOLLI, S.B. TONIOLO, G. ZINGALES
Segretaria di Redazione: L. TINÈ
(*) Membri del Comitato di Redazione

Proprietaria ed Editrice: AEI - Associazione Elettrotecnica ed Elettronica Italiana - *Direzione, Redazione e Amministrazione:* «L'Energia Elettrica», Viale Monza 259, 20126 Milano, *Telefono:* 25 50 641, *Telefax:* 25 70 512, *Telegrammi:* Asselita, Milano, *Conto Corrente Postale:* 274209 Milano. *Abbonamento:* non Soci L. 80 000 (Italia), L. 100 000 (Estero). *Fascicoli dell'anno in corso:* ciascuno: in Italia L. 8 000, all'Estero L. 10 000. *Fascicoli degli anni precedenti:* ciascuno: in Italia L. 15 000, all'Estero L. 20 000. I Soci dell'AEI hanno diritto a ricevere gratuitamente «L'Elettrotecnica» col solo versamento della quota di associazione annua; per i Soci juniores (età inferiore ai 26 anni all'inizio dell'anno solare) la quota è di L. 27 000. I Soci individuali o juniores possono abbonarsi a prezzo ridotto alle riviste AEI «Alta Frequenza» International Journal, «Alta Frequenza - Rivista di Elettronica» e «L'Energia Elettrica», alle seguenti condizioni (valide per un solo abbonamento): «Alta Frequenza» International Journal in Telecommunications and Related Technologies (bimestrale, in inglese): L. 35 000 (*); «Alta Frequenza - Rivista di Elettronica» (trimestrale, in italiano): L. 18 000 (*); «L'Energia Elettrica» (mensile, prevalentemente in italiano, con qualche articolo in inglese o in francese): L. 40 000.
(*) Per il triennio 1989-1991 i Soci individuali e juniores possono sottoscrivere un abbonamento cumulativo alle due riviste «Alta Frequenza» International Journal e «Alta Frequenza - Rivista di Elettronica» alla quota promozionale di L. 15 000 (quota valida per un solo abbonamento).

Associato all'USPI
Unione Stampa Periodica Italiana

L'Energia Elettrica

Volume **LXVI**
Aprile **1989**
4

G. Superti Furga — Analisi semplificata di convertitori statici trifasi a ponte. Il convertitore ideale 145

A. Di Gerlando, E. Tironi, I. Vistoli — Indagini preliminari di un sistema distribuito di conversione c.a.-c.c. 155

A. Manara, G. Oberto — Efficienza schermante e impedenza caratteristica dei materiali. Messa a punto di metodi di misura 165

G. Becherini, E. Cardelli, A. Tellini — Modello monodimensionale dell'armatura di plasma in iniettori di idrogeno per reattori a fusione 175

M. D'Amore, M. Feliziani — Effetti indotti su cavi coassiali da sorgenti elettromagnetiche transitorie 183

F. Tavano, G. Pirovano — Sbarre flessibili di stazione in condizioni di corto circuito: fenomeno del «pinch effect» 193

Pubblicazione mensile - Spedizione in abbonamento postale: Gruppo III. È vietato riprodurre articoli dalla presente rivista senza citarne la fonte. Gli scritti dei singoli Autori non impegnano la Redazione; sia quelli degli Autori sia quelli della Redazione non impegnano l'AEI - I manoscritti non si restituiscono - *La pubblicità non supera il 70% della superficie totale della rivista.*

A. Di Gerlando, E. Tironi, I. Vistoli (*)

Indagini preliminari di un sistema distribuito di conversione c.a.-c.c. (**)

Sommario

La prospettiva di realizzare, in un prossimo futuro, resine semiconduttrici per uso industriale ha suggerito alla ATM (Azienda Trasporti Municipali di Milano) l'idea di studiare un sistema costituito da un cavo di conversione distribuita c.a.-c.c., per linee di contatto di metropolitana: tale cavo svolgerebbe la duplice funzione di trasporto e di conversione dell'energia, realizzando la conversione in linea.

In questo ambito si è avviata presso il Dipartimento di Elettrotecnica del Politecnico di Milano una ricerca per individuare le condizioni di fattibilità di tale sistema. Data la attuale indisponibilità di resine per tali applicazioni, si è scelto di anticipare i tempi, studiando, in via preliminare, una struttura costituita da una sequenza di unità di conversione connesse in cascata. Il passaggio dal continuo al discreto è motivato dal fatto che la rappresentazione discretizzata può portare a risultati comunque rappresentativi del continuo e, al tempo stesso, impiantisticamente significativi.

Nella presente memoria si espone la metodologia scelta per l'analisi del sistema. Dapprima si è svolto lo studio teorico del funzionamento in alcuni casi limite; quindi, data la complessità del sistema, si è realizzato un modello "fisico-analogico": tale scelta, oltre ai vantaggi propri dei modelli analogici, ha permesso la messa a punto di un modello matematico adeguato alla simulazione al calcolatore, da utilizzare per successive indagini.

1. Premessa.

La prospettiva ventilata di poter realizzare in un futuro più o meno prossimo delle resine semiconduttrici [1,2,3], ha suggerito alla A.T.M. (Azienda Trasporti Municipali di Milano) l'idea di avviare uno studio di prefattibilità di un sistema di conversione c.a.-c.c. continuo finalizzato alla alimentazione di una linea metropolitana: è nata così l'idea di far svolgere al cavo di alimentazione del sistema la duplice funzione di trasporto della energia in alternata e di conversione in continua, realizzando cioè la "conversione in linea".

Lo studio è stato impostato sondando in via preliminare il comportamento di una struttura costituita da una sequenza di unità di conversione connesse in cascata. Il passaggio dal continuo al discreto è giustificato dal fatto che la rappresentazione discretizzata può portare a dei risultati comunque rappresentativi del continuo e, al tempo stesso, impiantisticamente significativi; si tratta di una soluzione già oggi realizzabile con la sequenza di più unità convertitrici.

A tal proposito basterà qui ricordare come attualmente esistano già applicazioni di tali sistemi in armadi di conversione costituiti da più unità raddrizzatrici in parallelo.

Fare lavorare ponti raddrizzatori non controllati in parallelo presenta notoriamente difficoltà, in quanto bastano modeste differenze tra le caratteristiche delle valvole perchè si creino apprezzabili squilibri di corrente fra i ponti.

Gli armadi di grande potenza, costituiti da diversi elementi in parallelo, presentano, nonostante una accurata selezione dei componenti, differenze di carico che, nelle migliori delle ipotesi, sono dell'ordine delle decine di percento rispetto al valore medio.

Il pensare, dunque, di mettere in parallelo molti ponti ad una certa distanza l'uno dall'altro e con il carico in una sezione qualsiasi (ad esempio ad una estremità) comporta notevoli problemi, anche dal punto di vista circuitale di rappresentazione e simulazione.

Preliminarmente ad una simulazione numerica, con programmi di calcolo noti, si è ritenuto di basilare importanza effettuare uno studio teorico, per comprendere i meccanismi fondamentali di funzionamento del sistema; successivamente si è realizzato un modello "quasi-fisico", potremmo dire fisico-analogico, per valutare il grado di importanza dei vari elementi circuitali ed il loro effetto contemporaneo. I risultati sperimentali sono anche stati utilizzati a validazione dell'analisi numerica a calcolatore.

In sintesi, scopo del presente lavoro è quello di pervenire a modelli sufficientemente semplici, idonei allo studio di sistemi di conversione c.a.-c.c. distribuiti, che consentano di valutare l'influenza esercitata dai vari parametri sulla ripartizione della corrente tra le singole unità di

(*) Ing. Antonino Di Gerlando, Prof. Enrico Tironi, Prof. Ivo Vistoli, del Dipartimento di Elettrotecnica del Politecnico di Milano.

(**) Ricerca eseguita con contributo del CNR, nell'ambito del PFE.

conversione e che permettano successivamente di individuare i provvedimenti da assumere per migliorare la collaborazione fra le unità stesse. Ciò costituisce, infatti, la premessa indispensabile per una ipotetica realizzazione del sistema.

2. Possibili soluzioni impiantistiche.

Pur esulando dai limiti del presente lavoro, si ritiene opportuno illustrare brevemente, per una migliore comprensione di quanto segue, una possibile struttura del cavo per conversione continua dell'energia ed una soluzione alternativa nella versione discretizzata [4].

In fig.1 è rappresentata in modo schematico la sezione di un cavo convertitore continuo esafase. I sei settori interni di rame sono percorsi da un sistema esafase di correnti mentre sul mantello esterno, grazie alla azione del semiconduttore inserito tra il nucleo e quest'ultimo, si rende disponibile la tensione raddrizzata, di polarità positiva o negativa a seconda della resina impiegata.

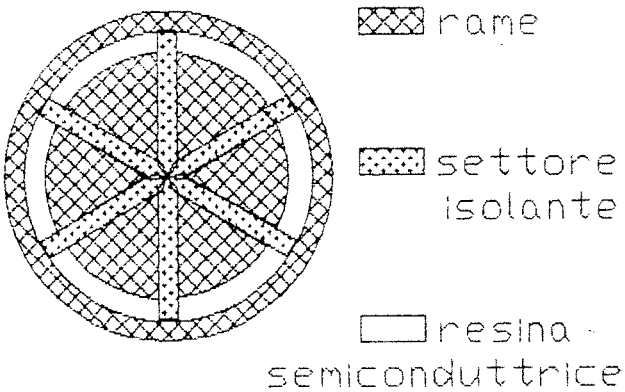


Fig.1 - Cavo esafase per la conversione distribuita di energia.

In fig.2 è schematicamente riportata una possibile applicazione impiantistica del cavo esafase di conversione continua dell'energia.

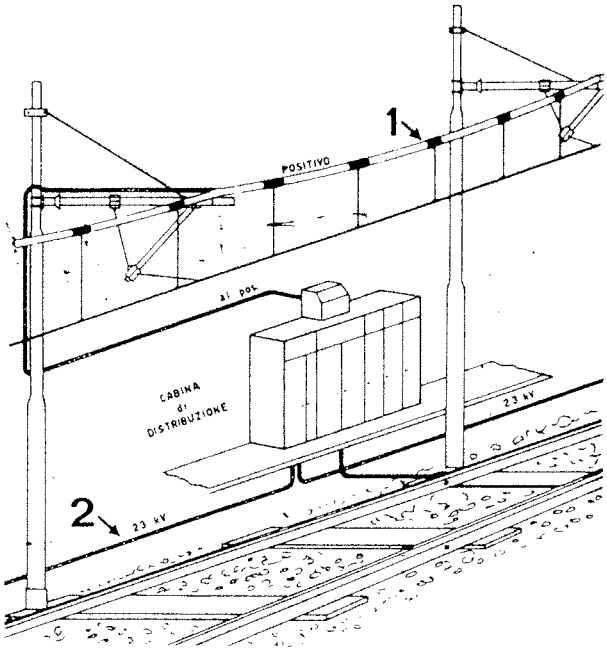


Fig.2 - Schema di possibile applicazione del cavo esafase di conversione dell'energia [4]:
1 = cavo convertitore esafase;
2 = cavo di alimentazione trifase.

L'attuale indisponibilità di adatte resine semiconduttrici non consente l'avvio di una sperimentazione con un cavo continuo, ma richiede il passaggio al discreto; a titolo puramente indicativo in fig.3 è rappresentata la sezione trasversale di un ipotetico profilato di conversione con gruppi esafase di diodi, sufficientemente ravvicinati. In pratica, come verrà evidenziato nel corso del lavoro, lo studio è stato condotto partendo da una differente impostazione.

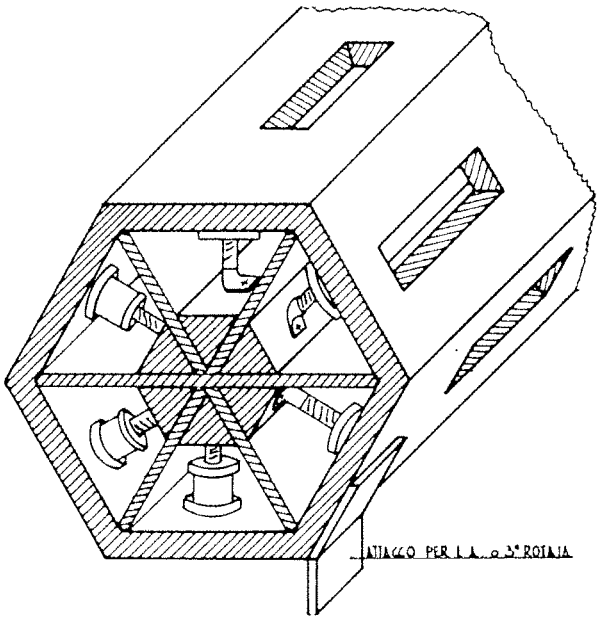


Fig.3 - Sezione di un ipotetico profilato di conversione a gruppi di diodi distribuiti [4]

Gli esempi finora riportati fanno esplicito riferimento alla soluzione con cavo esafase; considerazioni del tutto analoghe sono fattibili per cavi convertitori trifasi.

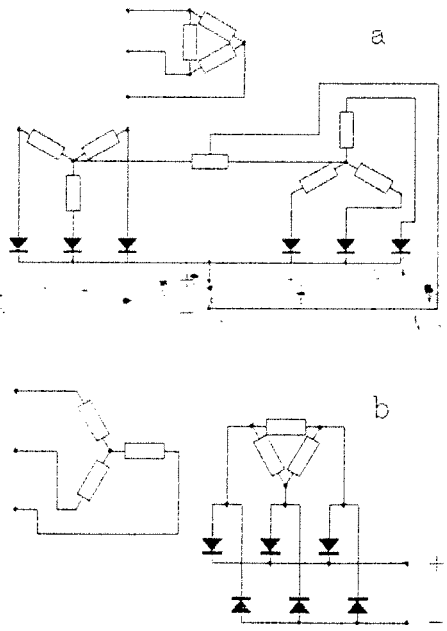


Fig.4 - Possibili schemi elettrici di sistemi di conversione per la alimentazione di linee di contatto per metropolitana.
4a: doppia stella con bobina interfasica;
4b: ponte di Graetz.

Nelle figure 4a e 4b sono infine rappresentati gli schemi elettrici di due sistemi di conversione tipici per l'alimentazione di linee di contatto per metropolitana, cui è naturale ricondursi anche nel caso di un sistema di conversione distribuito.

3. Studio teorico.

Nello studio del sistema di conversione c.a.-c.c. distribuito, costituito da diverse unità convertitrici in cascata, le configurazioni ipotizzabili sono alquanto diverse fra loro, sia come struttura sia come modalità di funzionamento. Tuttavia nell'ipotesi che le commutazioni siano regolari (cioè che la commutazione di una coppia di valvole non influenzi quella di altre del generico convertitore elementare) è lecito ricondursi allo studio di una cascata di stelle positive di diodi, rispettivamente trifasi od esafasi.
Le conclusioni così ottenute hanno validità generale, particolarmente per quanto riguarda la ripartizione del carico fra le diverse unità, il meccanismo della commutazione e l'influenza dei parametri.
Il sistema da analizzare si presenta, nella configurazione completa, piuttosto complesso: i parametri che intervengono, in misura più o meno rilevante, a determinare la ripartizione delle correnti tra le varie unità di conversione sono le resistenze e le induttanze longitudinali dei conduttori di linea in c.a. e c.c., le mutue induttanze tra i singoli conduttori, le resistenze le induttanze e le capacità trasversali ed infine le caratteristiche tensione-corrente dei diodi, sensibilmente influenzate dalla loro temperatura di lavoro e quindi, in pratica, dalla corrente che li attraversa.

In quanto segue si supporrà simmetrica la struttura del sistema e si prescinderà dalle induttanze e capacità trasversali, ritenendo i loro effetti secondari rispetto a quelli degli altri parametri, e ciò in relazione alle possibili soluzioni impiantistiche ipotizzabili.
In particolare il ruolo delle capacità, nella dinamica del funzionamento del sistema, è in sostanza analogo a quello svolto dai circuiti "snubber", inseriti usualmente negli impianti di conversione per la protezione delle valvole dalla sovratensioni delle oscillazioni ad alta frequenza, conseguenti alle commutazioni.

Nell'intento di comprendere il ruolo giocato dai vari parametri nella ripartizione della corrente tra le unità di conversione, si è ritenuto, in via preliminare, conveniente considerare separatamente l'effetto dei parametri induttivi da quello dei parametri resistivi, supponendo inizialmente nulle le resistenze trasversali ed ideali le valvole impiegate.
Quest'ultima ipotesi trova giustificazione dal fatto che il contributo dei diodi, pensati perfettamente identici, dovrebbe essere trascurabile sia in fase di conduzione che in commutazione. Ciò è legato alla circostanza che le c.d.t. dirette sulle valvole, all'interno di tutte le maglie del sistema, sono in contrapposizione tra loro. Ritenendo prevalente il valore delle tensioni di soglia rispetto ai contributi aggiuntivi di c.d.t. sulle resistenze differenziali (più precisamente rispetto alla differenza di tali contributi) si può concludere che tali cadute sui diodi si elidono vicendevolmente nelle equazioni alle maglie, condizione questa che corrisponde a supporre tali valvole ideali. Una verifica del grado di attendibilità di questa ipotesi di lavoro sarà discussa nel seguito.

Per fissare le idee facciamo riferimento allo schema elettrico di fig. 5, in cui si è preso in esame il caso elementare di sistema a due stelle, alimentante un carico schematizzabile tramite un generatore di corrente costante I; nella figura si sono indicate esclusivamente le coppie di valvole interessate alla commutazione tra le fasi 1 e 2.
La rete a monte della prima stella è rappresentabile mediante generatori ideali di tensione con in serie la resistenza R_t e la induttanza L_t; i collegamenti in continua ed in alternata tra le due stelle presentano rispettivamente resistenza ed induttanza R_c, L_c ed R_a, L_a.

Nel seguito sono esaminati i due casi limite di sistema puramente induttivo e sistema puramente ohmico.

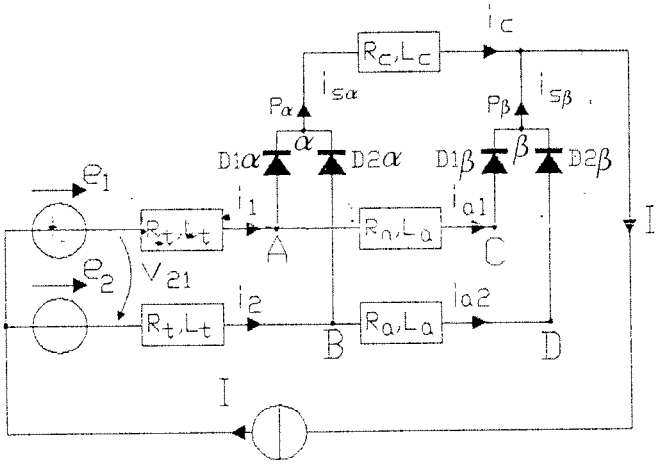


Fig.5 - Sistema di 2 stelle in cascata: coppie di valvole in commutazione fra le fasi 1 e 2.

3.1. Sistema puramente induttivo ($R_t=R_c=R_a=0$).

Supponiamo che immediatamente prima della commutazione, la corrente $i_1=I$ si ripartisca con valori i_c e i_{a1} tra le valvole D1α e D1β, con legge determinata dalla storia precedente del circuito.
Nell'istante in cui e_2 supera e_1, ha inizio la commutazione nella stella α; la corrente nella valvola D2α cresce, mentre in ugual misura diminuisce la corrente in D1α.
Durante la commutazione della stella α, non può avere inizio la commutazione tra le valvole della stella β e le correnti i_c ed i_{a1} restano costanti. Quando si ha $i_1=i_{a1}$ il diodo D1α passa in blocco ed ha inizio la commutazione della stella β.
Al crescere della corrente i_{a2} si ha contemporaneamente un incremento δi_c della corrente erogata dalla stella α ($\delta i_c=i_{a2}\cdot L_a/L_c$); la commutazione della stella β ha termine nell'istante in cui i_1 si annulla.

Quanto esposto porta a concludere che al ripetersi delle commutazioni fra le varie fasi si ha un progressivo incremento della corrente della stella α finchè, a regime, la stella β risulta completamente scarica.

A conclusioni sostanzialmente analoghe si perviene nel caso di più stelle in cascata: in definitiva, a regime, tutte le unità convertitrici si scaricano e l'unica ad addurre corrente è la stella posta in prossimità della alimentazione.

A questo risultato si può pervenire rapidamente anche per altra via, osservando che, durante la commutazione della stella α, il potenziale di Pα uguaglia quello di Pβ, mentre durante la commutazione della stella β il potenziale di Pβ risulta essere inferiore di quello di Pα di una tensione pari a $L_a\cdot di_{a2}/dt$ (la cosa è ovviamente estendibile al caso in cui si abbiano più stelle).
Qualunque sia la corrente portata inizialmente dalle singole unità di conversione, ne viene quin-

di una tensione media raddrizzata decrescente man mano ci si allontana dalla sezione di alimentazione; di conseguenza l'unica stella a portare corrente è la prima, essendo questo sistema di convertitori equivalenti al parallelo di più generatori di tensione unidirezionali, di valore medio decrescente verso il carico e di resistenza interna nulla.

3.2. Sistema puramente resistivo ($L_t=L_c=L_a=0$).

Riferiamoci anche in questo caso al circuito di fig.5.
Durante l'intervallo di conduzione della fase 1 le valvole in conduzione sono D1α e D1β e le relative correnti (i_c ed i_{a1}), di somma pari a $i_1=I$, sono ripartite in base al parallelo delle resistenze R_c ed R_a; contemporaneamente si ha: $i_2=i_{a2}=0$.
La prima valvola della fase 2 ad entrare in conduzione è D2β, con un angolo β di anticipo, rispetto al passaggio per lo zero della tensione $v_{21}=V_M\cdot\sin(w\cdot t)$, pari a:

$$\beta = \arcsin\{[R_t+R_c\cdot R_a/(R_c+R_a)]\cdot I/V_M\}$$

Con anticipo $\alpha=\arcsin\{[(R_a\cdot R_t)/(2\cdot R_c+R_a)]\cdot I/V_M\}$, rispetto al passaggio per lo zero di v_{21}, entra in conduzione la valvola D2α ed inizia la commutazione tra le fasi 1 e 2 della stella α.
Nell'intervallo compreso tra $-\beta$ e $-\alpha$ le correnti i_1 ed i_2 variano secondo le relazioni:

$$i_1(t) = \frac{(R_t+R_a)\cdot I - v_{21}(t)}{2\cdot R_t + R_a + R_p} ,$$

$$i_2(t) = \frac{(R_t+R_p)\cdot I + v_{21}(t)}{2\cdot R_t + R_a + R_p} , \quad \text{con } R_p = \frac{R_c\cdot R_a}{R_c+R_a} .$$

Corrispondentemente, la corrente erogata dalla stella α si riduce dal valore $I\cdot R_a/(R_a+R_c)$ al valore $I\cdot R_a/(2\cdot R_c+R_a)$, mentre aumenta in ugual misura quella erogata dalla stella β, dal valore $I\cdot R_c/(R_a+R_c)$ al valore $2\cdot R_c\cdot I/(2\cdot R_c+R_a)$.
Durante la commutazione della stella α le correnti i_1 ed i_2 variano secondo le relazioni:

$$i_1(t) = \frac{R_t\cdot I - v_{21}(t)}{2\cdot R_t} ,$$

$$i_2(t) = \frac{R_t\cdot I + v_{21}(t)}{2\cdot R_t} .$$

Le correnti nei rami a valle della stella α restano costanti e, conseguentemente, rimangono inalterate le correnti erogate dalle due stelle.
Cessata la commutazione di D1α con D2α ha inizio quella tra le valvole D1β e D2β.
In tale intervallo le correnti i_1 ed i_2 variano in funzione del tempo con legge data dalle:

$$i_1(t) = \frac{(R_t+R_p)\cdot I - v_{21}(t)}{2\cdot R_t + R_a + R_p} ,$$

$$i_2(t) = \frac{(R_t+R_a)\cdot I + v_{21}(t)}{2\cdot R_t + R_a + R_p} .$$

La commutazione della stella β, e con essa quella tra le fasi 1 e 2, ha termine dopo il passaggio per lo zero della tensione v_{21}, in corrispondenza di un angolo $\delta = \arcsin[(R_t+R_p)\cdot I/V_M]$.
Alla fine della commutazione tra le fasi 1 e 2 le correnti erogate dalle due stelle riassumono i valori che avevano inizialmente durante la conduzione della fase 1.
Rispetto ai livelli di corrente totale di stella che si hanno durante la conduzione di una sola fase, e che sono funzione esclusiva di R_a e di R_c, durante gli intervalli di commutazione si ha una variazione di tali valori, rispettivamente in diminuzione per la stella α ed in aumento per la stella β.

E' quindi evidente che sulla ripartizione dei valori medi di corrente, i fenomeni di commutazione hanno influenza anche nel caso resistivo. Tuttavia, con gli usuali valori assunti dai parametri resistivi, le commutazioni sono di breve durata e conseguentemente risultano modeste le variazioni delle aree corrente-tempo delle correnti: ciò implica che non si commette un errore significativo se si stima la ripartizione dei valori medi di corrente come dovuta al solo funzionamento in conduzione.

L'estensione dello studio al funzionamento di più stelle di diodi in cascata, in condizioni di sistema puramente resistivo, è più complessa che nel caso puramente induttivo.
L'analisi si complica ulteriormente se si tiene anche conto della resistenza R_b trasversale, percorsa dalla corrente totale di stella e connessa fra ciascun centro stella dei diodi ed il punto di collegamento alla linea in c.c..

Come esempio del meccanismo di funzionamento di più stelle in cascata, si considera un sistema di tre stelle α,β,Γ (fig.6); i generatori sinusoidali, aventi resistenza interna R_t, sono connessi alla prima stella (α), mentre il carico (schematizzato con un generatore di corrente I) è connesso all'ultima stella (Γ).

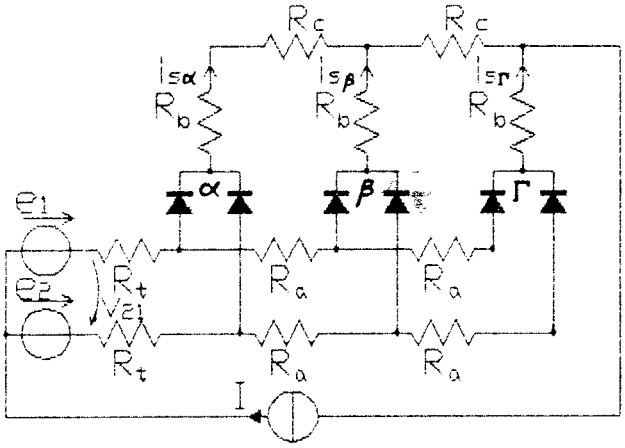


Fig.6 - Sistema puramente resistivo di 3 stelle in cascata: coppie di valvole in commutazione fra le fasi 1 e 2.

La trattazione analitica delle sequenze di commutazione, concettualmente semplice, porta a conclusioni sostanzialmente analoghe al caso costituito da due stelle in cascata.
In quanto segue si riporterà, in termini quantitativi, esclusivamente la legge di ripartizione delle correnti durante il funzionamento in conduzione di una generica fase del sistema.
Per quanto riguarda la ripartizione della corrente totale I fra le tre stelle durante il funzionamento in conduzione di una fase, valgono le seguenti relazioni:

$$i_{s\alpha} = \frac{[(R_a+R_b)^2+R_a\cdot(R_b+R_c)]\cdot I}{(R_a+R_b+R_c)\cdot(R_a+3\cdot R_b+R_c)}$$

$$i_{s\beta} = \frac{R_b\cdot I}{R_a+3\cdot R_b+R_c} \; ; \; i_{s\Gamma} = \frac{[(R_b+R_c)^2+R_c\cdot(R_b+R_a)]\cdot I}{(R_a+R_b+R_c)\cdot(R_a+3\cdot R_b+R_c)}$$

Tali espressioni, relative al caso particolare di un sistema a tre stelle, danno anche alcune indicazioni di carattere generale. Esse mettono in evidenza il ruolo fondamentale che il parametro resistenza trasversale R_b ha sul livello di collaborazione delle unità di conversione in cascata: quanto più R_b è piccolo rispetto alle resistenze R_a ed R_c, tanto più è trascurabile la corrente della stella intermedia (β), e le stelle estreme tendono a caricarsi con legge analoga al caso con due stelle prima considerato; viceversa, al crescere della resistenza trasversale R_b rispetto alle resistenze longitudinali, si ha un effetto di migliore collaborazione della stella intermedia con quelle estreme.

Il meccanismo generale di funzionamento in conduzione e commutazione, descritto nei casi precedentemenete affrontati, resta sostanzialmente valido anche per un numero superiore di unità in cascata.

Durante l'intervallo di conduzione, la ripartizione del carico fra le unità è legata alla posizione del punto di captazione del carico ed ai parametri longitudinali R_a ed R_c e trasversale R_b: all'analisi di questa modalità di funzionamento del sistema verrà dedicato un prossimo lavoro.

Quanto fin qui esposto evidenzia la difficoltà di uno studio puramente analitico del modello completo del sistema reale, in cui si consideri la presenza contemporanea di resistenze, auto e mutue induttanze e si tenga conto delle caratteristiche reali delle valvole. In particolare, per quanto riguarda il funzionamento durante la conduzione di una sola fase, la ripartizione fra le unità di conversione è diversa da quella valutata nelle medesime condizioni di sistema resistivo; tuttavia tende a quest' ultima, secondo un transitorio che evolve con le costanti di tempo proprie della rete di funzionamento in conduzione.

Nell'intento di approfondire l'indagine sul contributo dei vari elementi circuitali alla ripartizione del carico tra le diverse unità convertitrici in cascata, tenendo anche conto degli elementi fin qui trascurati, si è ritenuto opportuno effettuare una indagine di tipo analogico preliminarmente alla simulazione numerica del sistema.

La realizzazione di un modello "fisico-analogico", oltre che giustificata dai vantaggi propri dei modelli analogici, ha consentito di avere il conforto della evidenza sperimentale del comportamento del sistema ed ha permesso contemporaneamente la messa a punto di un modello matematico adeguato alla simulazione al calcolatore, da utilizzare per successive indagini.

4. Simulazione analogica.

4.1. Modello analogico.

L'approccio sperimentale è stato condotto facendo necessariamente riferimento ad una configurazione specifica che, al di là delle effettive opportunità di realizzazione impiantistica, desse delle risposte significative di carattere generale circa l'oggetto ultimo dello studio, cioè la valutazione del grado di collaborazione delle unità di conversione ed i provvedimenti da assumere per influenzarla convenientemente.

Come configurazione del sistema di conversione si è fatto riferimento ad una linea bifilare di contatto, connessa ad una linea in c.a. trifase tramite unità di conversione in cascata, costituite da ponti raddrizzatori trifasi di Graetz.

Il circuito equivalente che ne deriva è schematizzabile [5] secondo la disposizione di fig.7.

Il valore dei parametri resistivi e reattivi del circuito equivalente dipende dalla disposizione relativa dei conduttori in c.a. e in c.c. e dalla loro sezione.

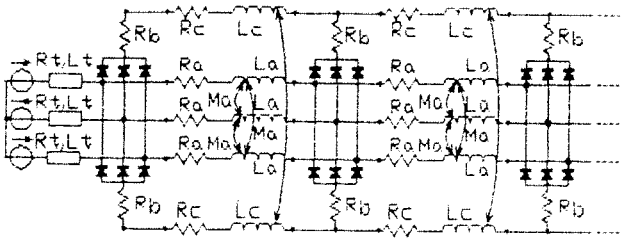


Fig.7 - Schema elettrico equivalente del modello analogico realizzato.

Un problema rilevante è rappresentato dal dimensionamento dei conduttori lato c.a. e lato c.c. e dei diodi dei raddrizzatori: tale dimensionamento non é facilmente definibile a priori, poiché non si conosce la ripartizione delle correnti nel sistema, legata a sua volta alla geometria del sistema stesso.

La disposizione ipotizzata per i conduttori è indicata in fig.8.

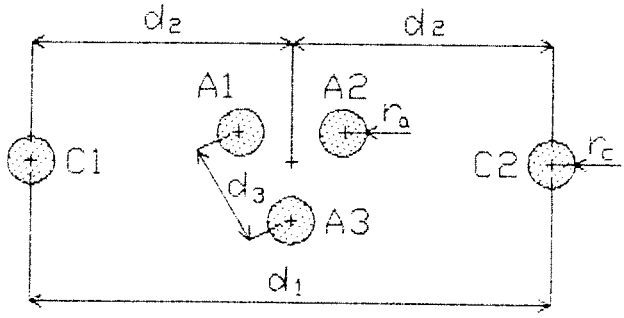


Fig.8 - Disposizione spaziale ipotizzata per i conduttori c.a. e c.c. .
C1, C2: conduttori equivalenti della linea in c.c.;
A1, A2, A3: conduttori equivalenti della linea in c.a. .

Si assumono le ipotesi descritte nel seguito.

- I conduttori in c.c. hanno uguale raggio equivalente ($r_{c1}=r_{c2}$), pari a $(A/\pi)^{1/2}$, essendo A la totale sezione di ciascuna polarità.
- I conduttori in c.a. hanno raggio equivalente $r_{a1}=r_{a2}=r_{a3}$.
- La posizione della terna di conduttori in c.a. è simmetrica rispetto a quella dei conduttori in c.c.: i conduttori in c.c. distano tra loro 1 m; i conduttori in c.a. sono disposti a distanza d_3 = 50 mm fra loro, in posizione media equidistante (d_2 = 0,5 m) dai due conduttori in c.c..
- La sezione di tutti i conduttori è di 500 mm².
- I ponti sono pensati a distanza di 15 m l'uno dall'altro.

Con la disposizione geometrica dei conduttori indicata in fig.8, il sistema si comporta come se la linea in c.c. e la linea in c.a. fossero disaccoppiate tra loro; inoltre i coefficienti di autoinduttanza, rispettivamente dei conduttori in c.c. ed in c.a., risultano uguali fra loro.

Tenendo poi conto che la somma delle cinque correnti, tutte misurate positive verso valle in ciascuna sezione di linea, è nulla, è allora possibile esprimere la generica c.d.t. induttiva v_k, lungo il conduttore k-esimo, in funzione delle sole correnti continue o alternate rispettivamente. Applicando gli usuali metodi di calcolo dell'induttanza di esercizio di fasci di conduttori, si perviene alle relazioni (1).

$$v_{c1} = L_c \cdot p i_{c1} - M_c \cdot p i_{c2}$$

$$v_{c2} = L_c \cdot p i_{c2} - M_c \cdot p i_{c1}$$

$$(1) \qquad v_{a1} = L_a \cdot p i_{a1} + M_a \cdot p(i_{a2}+i_{a3}) \ , \quad p = d/dt$$

$$v_{a2} = L_a \cdot p i_{a2} + M_a \cdot p(i_{a1}+i_{a3})$$

$$v_{a3} = L_a \cdot p i_{a3} + M_a \cdot p(i_{a1}+i_{a2}) \ .$$

I coefficienti di auto e mutua induttanza che vi compaiono possono essere valutati, per un tratto di linea di lunghezza z, secondo le seguenti espressioni:

$$L_a = L_c = L = (\mu_o/2\pi) \cdot \ln[d_2/(K \cdot r_{ca})] \cdot z$$

$$M_c = (\mu_o/2\pi) \cdot \ln[(d_1/d_2) \cdot (r_a/r_c)^{1/2}] \cdot z$$

$$M_a = (\mu_o/2\pi) \cdot \ln\{[d_2/(d_3-r_a)] \cdot (r_a/r_c)^{1/2}\} \cdot z$$

dove:

$r_{ca} = (r_c \cdot r_a)^{1/2}$ è il raggio medio geometrico;
$K = 0{,}779$ (corrisponde all'ipotesi di distribuzione uniforme della corrente nella sezione del conduttore).

Con riferimento alla simbologia di fig.7 e con le dimensioni geometriche prefissate, i parametri elettrici longitudinali di riferimento dell'impianto reale ipotizzato assumono i seguenti valori:

$R_t = 2{,}63$ mΩ $L_t = 132$ μH $R_c = R_a = 0{,}558$ mΩ
$L_a = L_c = 11{,}8$ μH $M_c = -2{,}09$ μH $M_a = 7{,}79$ μH .

Le relazioni (1) possono venire simulate con i modelli analogici descritti in Appendice e riportati, per completezza, da un precedente lavoro [5].

4.2. Rilievi sperimentali.

Il modello analogico realizzato è costituito da otto ponti raddrizzatori trifasi in cascata; tale scelta è stata motivata dalla opportunità di poter simulare in modo sufficientemente adeguato il comportamento del sistema di conversione in presenza di un convoglio di tipo metropolitano a più punti di captazione. I parametri sono inoltre variabili rispetto ai valori nominali (≈±50%) per consentire una analisi della influenza della loro variazione sul comportamento del sistema.

I rilievi sperimentali condotti sul modello analogico nella prima fase della ricerca fanno riferimento al caso di alimentazione monolaterale ad una estremità della linea, con carico lato c.c. alimentato a sbalzo all'altra estremità.
Il carico è stato simulato mediante un circuito passivo R,L serie: ciò equivale a considerare una delle condizioni di funzionamento più gravose, comportando elevato assorbimento di corrente, in un punto fisso di captazione.

La campagna di misure è stata condotta considerando rispettivamente la configurazione a tre ponti in cascata e quella ad otto ponti.

Le prove effettuate (con bassi valori di resistenza trasversale (R_b=32 mΩ), corrispondente a quella dei collegamenti) hanno fatto riferimento alle seguenti condizioni di funzionamento:

- a parametri del sistema costanti si è fatto variare il prelievo di corrente del carico;
- ad assorbimento costante del carico si è modificato il valore di induttanza a monte del primo convertitore;
- si sono ridotte al valore minimo compatibile col modello le resistenze dell'impianto;
- si sono eliminate le auto e mutue induttanze dei vari tronchi di linea;
- si è effettuata una prova con alimentazione in c.c. di due fasi della linea in c.a..

In fig.9, tra i numerosi rilievi fatti, si riportano, a titolo di esempio, gli oscillogrammi delle grandezze più significative rilevate sul modello analogico, per il caso di conversione con tre ponti; i parametri del circuito (modificati secondo il fattore di scala Km=200) sono quelli nominali, riportati nel Par.4.1.
Il complesso dei rilievi sperimentali consente di svolgere le seguenti considerazioni.

Variazioni anche ampie della corrente assorbita dal carico non implicano sensibili variazioni sul livello di collaborazione dei vari ponti, almeno fin tanto che la commutazione delle valvole resta regolare.

Una riduzione anche sensibile della sola induttanza a monte del primo ponte (≈50%) non altera in modo apprezzabile la legge di ripartizione della corrente tra i ponti.

Una riduzione della resistenza longitudinale dei tratti di linea compresi tra i ponti indica una tendenza del primo convertitore della catena a caricarsi maggiormente.

L'eliminazione dei reattori di auto e mutua induttanza tra i ponti implica un incremento della corrente erogata dall'ultima unità convertitrice della catena ed in generale una migliore collaborazione dei ponti intermedi.

L'alimentazione di due sole fasi della linea trifase con una sorgente in continua, pur non corrispondendo ad un funzionamento reale del sistema, consente di studiare il livello di collaborazione dei ponti in condizioni di pura conduzione senza i fenomeni di commutazione: in particolare pone in evidenza che la ripartizione della corrente tra i convertitori è influenzata, oltre che dalle resistenze dei collegamenti trasversali, dalla realtà della caratteristica dei diodi. Si ha dunque un contributo, anche se modesto, dei ponti intermedi, contributo che dovrebbe essere nullo nel caso di valvole ideali e resistenze trasversali nulle.

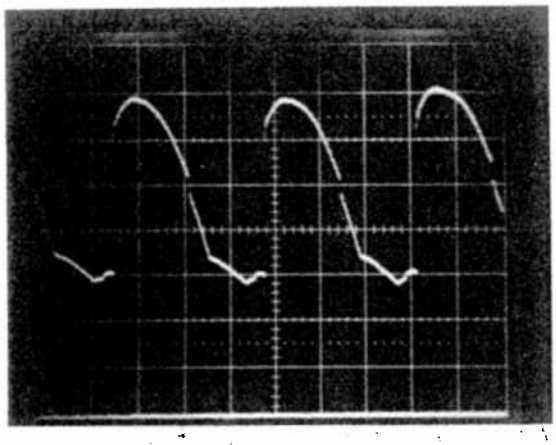
Un confronto tra funzionamento ad otto ponti in cascata con quello a tre ponti evidenzia come il contributo dei convertitori estremi sia sostanzialmente lo stesso nei due casi, ed in definitiva la collaborazione dei sei ponti intermedi equivalga complessivamente a quella del solo ponte intermedio nel caso costituito da tre unità di conversione.
Ciò è imputabile ai bassi valori assunti, nel modello realizzato, dalle resistenze trasversali rispetto alle longitudinali: con i parametri utilizzati nel modello, la collaborazione tra le unità di conversione è decisamente insoddisfacente, in quanto il contributo complessivo dei ponti di estremità è dell'ordine dell'80÷90% .
E' possibile migliorare la situazione, agendo prevalentemente sui parametri trasversali dell'impianto, come verrà mostrato in un prossimo lavoro.

I risultati sin qui descritti sono sostanzialmente concordanti con le considerazioni teoriche esposte nella prima parte di questa relazione.

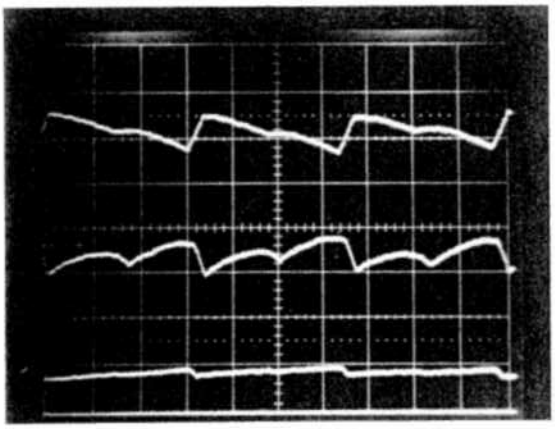
5. Simulazione numerica.

I rilievi sperimentali condotti sul modello analogico del circuito sono stati utilizzati per la messa a punto di un adeguato modello numerico del sistema, da utilizzarsi per successive indagini, in alternativa al modello analogico stesso, secondo la convenienza suggerita, di volta in volta, dai casi in esame.
Il programma di calcolo utilizzato è l'EMTP: le valvole sono state raprresentate con interruttori ideali, aventi in serie una resistenza di valore

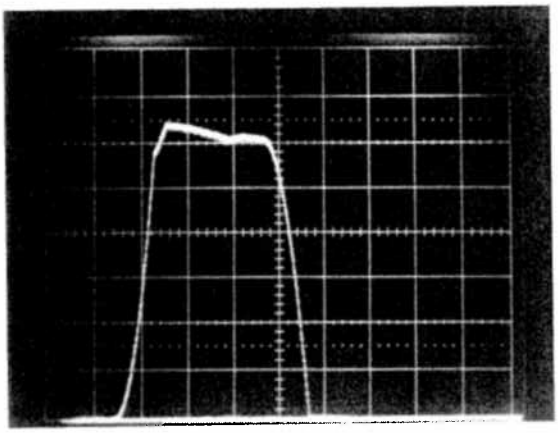
pari alla somma della resistenza differenziale di valvola con quella dei collegamenti.



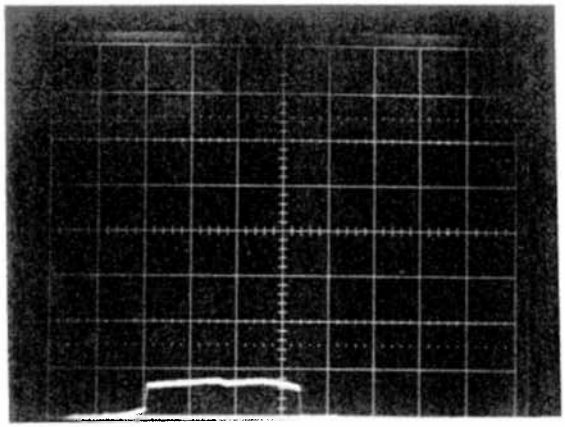
9a) Tensione della stella anodica di diodi del ponte adiacente alla alimentazione; σ_V=25 V/div; σ_t=2 ms/div.



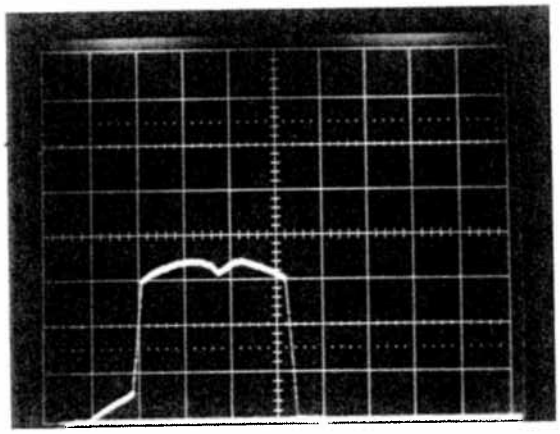
9b) Correnti anodiche di ponte: σ_I=0,5 A/div; σ_t=2 ms/div:
traccia superiore: ponte 1 (adiacente alla alimentazione);
traccia intermedia: ponte 3 (adiacente al carico);
traccia inferiore: ponte 2 (intermedio).



9c) corrente anodica di valvola del ponte 1: σ_I=0,5 A/div; σ_t=2 ms/div.



9d) Corrente anodica di valvola del ponte 2: σ_I=0,5 A/div; σ_t=2 ms/div.



9e) Corrente anodica di valvola del ponte 3: σ_I=0,5 A/div; σ_t=2 ms/div.

Fig.9 (a,b,c,d,e) - Oscillogrammi di tensioni e correnti rilevate sul modello analogico del sistema, costituito da tre ponti di Graetz in cascata.
V_{linea} = 220 V efficaci;
R_{carico} = 48,7 Ω; L_{carico} = 195 mH.

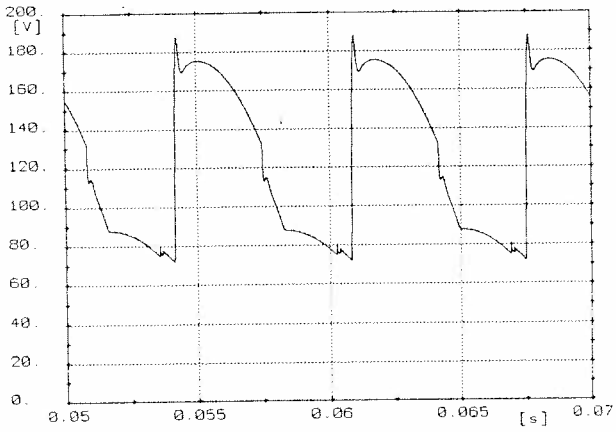
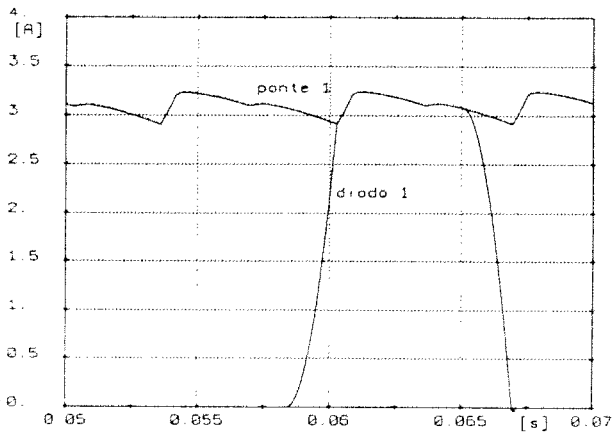
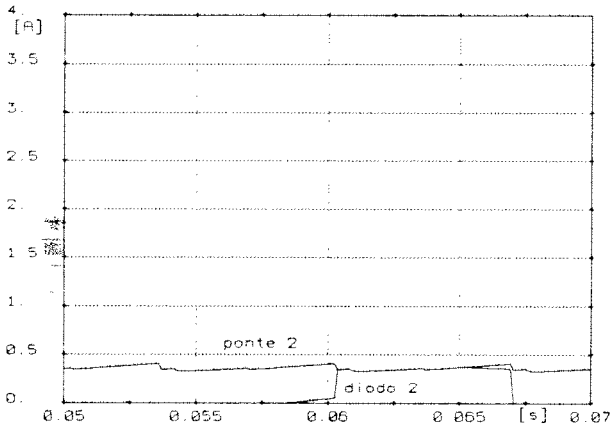


Fig.10 - Tensione della stella anodica di diodi del ponte adiacente alla alimentazione, ottenuta dalla simulazione con programma EMTP per le medesime condizioni di funzionamento di fig.9.

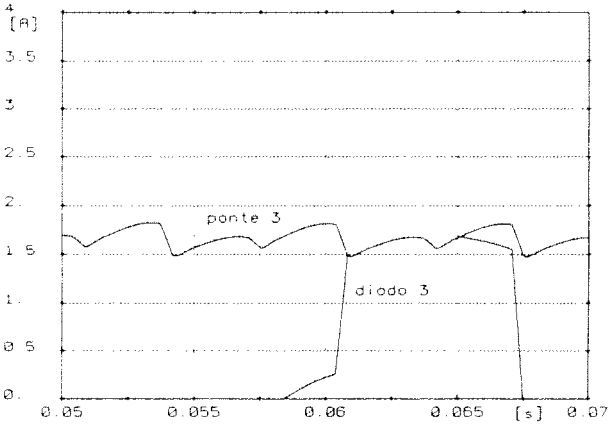
A titolo di esempio si riportano in fig.10 e fig.11 gli andamenti di correnti e tensioni, con riferimento agli stessi parametri utilizzati nei rilievi di fig.9.



a) Corrente anodica di ponte 1 (adiacente alla alimentazione).



b) Corrente anodica di ponte 2 (intermedio).



c) Corrente anodica di ponte 3 (adiacente al carico).

Fig.11 (a,b,c) - Correnti anodiche di ponte e di diodo, ottenute dalla simulazione con programma EMTP per le medesime condizioni di funzionamento di fig.9.

Il confronto tra rilievi sperimentali e risultati della simulazione numerica evidenziano una sostanziale coincidenza negli andamenti e nei valori delle grandezze analizzate e confermano l'ipotesi, inizialmente assunta, di rappresentare le valvole come elementi ideali.

6. Conclusioni.

L'Azienda Trasporti Municipalizzata del Comune di Milano ha inteso esaminare, nell'ambito del Progetto Finalizzato Energetica del CNR, la possibilità di realizzare un cavo di conversione continua che svolga la duplice funzione di trasporto dell'energia e di conversione in linea.

L'analisi preliminare di un siffatto sistema, svolta presso il Dipartimento di Elettrotecnica del Politecnico di Milano, ha ricondotto l'indagine al caso di un impianto costituito da più unità di conversione in cascata.

Per lo studio si è messo a punto un modello "quasi-fisico" di un sistema ad otto ponti di Graetz in cascata, che è stato successivamente simulato al calcolatore, con il programma EMTP.

Attraverso considerazioni teoriche e mediante rilievi sperimentali si è svolta un'accurata indagine degli elementi che possono influenzare la ripartizione della corrente tra le diverse unità di conversione.

La conclusione delle prime indagini condotte pone in evidenza come non sia possibile avere una soddisfacente collaborazione delle diverse unità di conversione quando i parametri trasversali siano di entità modesta rispetto a quelli longitudinali.

Il lavoro proseguirà indagando gli effetti funzionali ed energetici associati alla presenza di parametri derivati resistivi, al fine di individuare condizioni più soddisfacenti di collaborazione tra i ponti.

APPENDICE

Parametri della linea in c.c..

Le c.d.t. induttive v_{c1} e v_{c2} sul tratto di linea di lunghezza z, pari a quello compreso fra due successive unità di conversione, si ottengono realizzando 4 avvolgimenti, come indicato in fig.12, attorno a 2 nuclei magnetici distinti di uguale permeanza P.

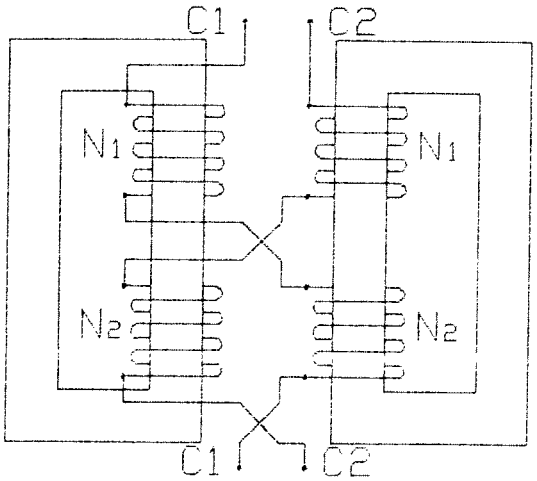


Fig.12 - Schema di principio di reattori idonei a simulare la c.d.t. induttiva lungo i conduttori in c.c..

I parametri di auto e mutua induttanza che si ottengono per le due linee (C1 e C2) sono dati dalle seguenti relazioni:

$$L_c = [(N_1)^2+(N_2)^2]\cdot P$$

$$M_c = 2\cdot N_1\cdot N_2\cdot P \quad .$$

Definito il valore della permeanza P e noti i valori di M_c ed L_c, i numeri di spire necessari per realizzare i parametri voluti di fig.11 si possono così determinare: posto $h = M_c/L_c$; $x = N_2/N_1$ si ha:

$$x = [1 - (1 - h^2)^{1/2}]/h$$

$$N_1 = (L_c/[(1+x^2)\cdot P])^{1/2}$$

$$N_2 = x \cdot N_1 \quad ,$$

con N_1 ed N_2 da approssimare agli interi.

Parametri della linea in c.a..

Le c.d.t. induttive v_{a1} , v_{a2} , v_{a3} nel tratto di lunghezza z si ottengono per mezzo degli avvolgimenti di fig.13, e ne risultano, per i parametri di auto e mutua, le seguenti espressioni:

$$L_a = [(N_1)^2+2\cdot(N_2)^2]\cdot P$$

$$M_a = [(N_2)^2+2\cdot N_1\cdot N_2]\cdot P \quad .$$

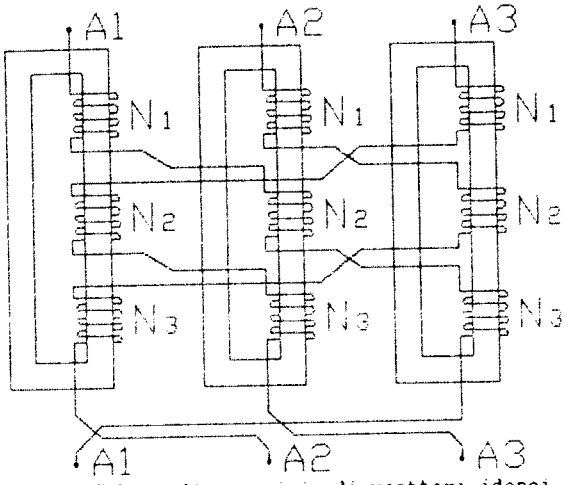


Fig.13 - Schema di principio di reattori idonei a simulare la c.d.t. induttiva lungo i conduttori in c.a..

Il calcolo dei numeri di spire, scelto l'opportuno valore di permeanza, può essere condotto secondo le seguenti formule:
posto $M_a/L_a = y$; $N_2/N_1 = x$, si ha:

$$x = (1-[1-y\cdot(2\cdot y-1)]^{1/2})/(2\cdot y-1)$$

$$N_1 = (M_a/[(x^2+2\cdot x)\cdot P])^{1/2}$$

$$N_2 = x\cdot N_1 \qquad N_3 = N_2 \quad .$$

Per quanto riguarda i parametri serie all'inizio della linea di conversione, rappresentativi del trasformatore di alimentazione, essi corrispondono agli usuali parametri di servizio, data la presenza in questa sezione di impianto dei soli 3 conduttori della linea in c.a. .
In questo caso il relativo modello analogico risulta di semplice realizzazione e corrisponde, per ciascuna fase, ad un unico avvolgimento disposto su un proprio nucleo magnetico.

La realizzazione dei parametri resistivi non presenta particolari difficoltà .

Il valore che i parametri assumono nella situazione di riferimento dell'impianto reale è estremamente basso; d'altro canto a tali parametri, nella situazione reale, fa riscontro un elevato valore delle grandezze elettriche tensioni e correnti.

L'insieme di questi elementi è poco adatto alla realizzazione di un conveniente modello analogico, sia per l'elevato livello di potenza necessario, che per le difficoltà di realizzazione dei parametri, soprattutto in relazione al peso relativo di questi ultimi rispetto agli effetti parassiti resistivi e reattivi dovuti ai collegamenti.

E' quindi necessario modificare il livello delle grandezze elettriche e dei parametri dalla situazione reale ipotizzata al modello analogico, pur garantendo una risposta corretta di quest'ultimo.

Le linee adottate per il progetto del modello analogico si basano sui seguenti criteri di similitudine.

Non si altera il funzionamento del sistema (agli effetti della collaborazione e delle forme d'onda di tutte le grandezze elettriche) se:

- si lascia inalterato, rispetto alla ipotetica situazione reale dell'impianto, il rapporto tra induttanze e resistenze, cioè si modifica secondo un medesimo fattore di scala il valore di tutti i parametri del circuito: questo corrisponde a conservare inalterate tutte le costanti di tempo;
- si lasciano inalterate le cadute di tensione induttive, dovute alle reattanze di commutazione dei vari rami dei ponti raddrizzatori, espresse in valore relativo rispetto alla tensione di alimentazione: poichè tali c.d.t. sono legate alle durate di commutazione, questo consente di conservare inalterati i tempi di commutazione.

Si tratta dunque di scegliere un opportuno fattore di scala Km , moltiplicativo dei parametri della situazione reale, tenendo conto dei suddetti criteri di similitudine. Il fattore moltiplicativo impiegato nella realizzazione del modello sperimentale è stato scelto pari a 200 e la tensione concatenata di alimentazione è stata ridotta rispetto alla situazione reale da 590 V a 220 V.

BIBLIOGRAFIA

[1] L. Esaki, R. Tsu: "Superlattice and Negative Differential Conductivity in Semiconductors". IBM Journal of Research and Development, January 1970.

[2] G. H. Döhler: "Super-reticoli allo stato solido". Le scienze, Gennanio 1984.

[3] L. Esaki: "In As-Ga Sb Superlattices - Synthesized semiconductors and semimetals". Journal of Crystal Growth, Aprile 1981.

[4] L. Mazzon, A. Giusti, E. Magni: "Tecniche di ottimizzazione della gestione dell'energia elettrica in una rete metropolitana mediante modellistica per impianti innovativi e supervisione automatizzata di impianti esistenti." Convegno Anipla: "L'automazione nei trasporti", Trieste, 28-30/10/86.

[5] E. Campanari, A. Di Gerlando, E. Tironi, I. Vistoli: "Modello analogico", da "Tecniche di ottimizzazione della gestione..." (vedi [4]), pagg. 571÷578. Convegno Anipla: "L'Automazione nei trasporti", Trieste, 28-30/10/86.

Manoscritto ricevuto il 12 dicembre 1988.