

672

E.CAMPANARI-A.DI GERLANDO-E.TIRONI-I.VISTOLI

Tecniche di ottimizzazione della gestione dell'energia
elettrica in una rete metropolitana mediante modelli
stica per impianti innovativi e supervisione automatiz-
zata di impianti esistenti

Atti del Convegno Nazionale ANIPLA
"L'automazione nei trasporti"

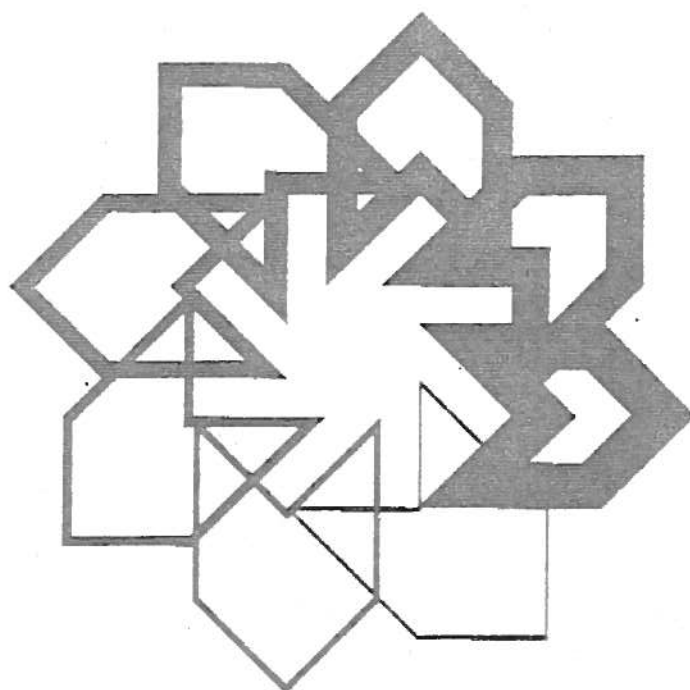
Trieste 28 - 30 ottobre 1986

515



ANIPLA
associazione nazionale italiana per l'automazione

L'AUTOMAZIONE NEI TRASPORTI



**VOL. 2 ATTI
DEL CONVEGNO
NAZIONALE**

Trieste, 28-30 ottobre 1986

TECNICHE DI OTTIMIZZAZIONE DELLA GESTIONE DELL'ENERGIA
ELETTRICA IN UNA RETE METROPOLITANA MEDIANTE MODELLI-
STICA PER IMPIANTI INNOVATIVI E SUPERVISIONE AUTOMATIZ-
ZATA DI IMPIANTI ESISTENTI.

Luciano Mazzon (*), Antonio Giusti (°), Eugenio Magni (°)

Sommario.

Vengono presentate le attività di ricerca - svolte nell'ambito del progetto Finalizzato Energetica del CNR -, relativamente alle seguenti linee di indagine:

- Cavo di conversione continua dell'energia
- Equalizzazione degli assorbimenti nelle Sottostazioni di conversione.

Per tali linee, che presentano aspetti e contenuti altamente innovativi per il sistema di alimentazione metroferroviaria, vengono descritte sia le metodologie studiate che quelle da sviluppare nel prosieguo della ricerca al fine di poter realizzare prototipi funzionanti degli impianti sotto analisi.

1. INTRODUZIONE

Nell'ambito del contratto n. 84.02843.59 "UT.G/1 Studi preliminari di gestione dell'energia elettrica nella Metropolitana Milanese", l'A.T.M. ha svolto nel corrente anno un'ampia attività di tipo conoscitivo e metodologico allo scopo di definire le possibili direttrici di intervento sul sistema di trasporto metropolitano.

(*) A.T.M. - Servizio Armamento e Fabbricati

(°) A.T.M. - Servizio Impianti Elettrici

Finalità degli interventi è la razionalizzazione delle risorse sia energetiche che economiche aventi l'obiettivo di raggiungere vantaggi relativi a:

- migliore utilizzazione delle risorse energetiche;
- costi di installazione degli impianti;
- costi di gestione degli stessi.

Ciò in quanto il trasporto urbano su ferrovia, per la criticità e l'importanza che riveste, necessita di notevoli risorse economico-gestionali che sono strettamente legate alla struttura organizzativa del servizio ed alla evoluzione tecnologica degli impianti; ogni intervento che consenta anche pur minime modifiche ad una delle due aree che caratterizzano i costi, permette di conseguire notevoli risparmi di carattere economico.

Partendo dai sopraccitati presupposti è stata focalizzata la attenzione su tre diverse linee di ricerca:

- sistema di conversione continua dell'energia;
- equalizzazione energetica degli assorbimenti nelle sotto-stazioni;
- ricerca di materiale antitraccia per mensole in vetroresina.

Tali linee, pur diversificate negli obiettivi immediati, rendono ipotizzabile una ristrutturazione impiantistico-gestionale che consenta di perseguire i risultati attesi.

La relazione si riferisce alle sole due prime linee di ricerca per le quali viene di seguito riportata una descrizione dello stato dell'arte.

Gli studi vengono svolti dall'A.T.M. di Milano con la collaborazione di:

- E. Campanari, A. Di Gerlando, E. Tironi, I. Vistoli del Politecnico di Milano
- S. D'Arminio Monforte della Marelli Trazione
- O. Ventura della Ansaldo Trasporti

2.2. Modello analogico.*

Scopo del lavoro, tuttora in corso, è quello di analizzare la possibilità di effettuare una conversione distribuita lungo la linea di alimentazione di una metropolitana attraverso il collegamento in cascata di più celle di conversione c.a. - c.c.

Riconosciuta la complessità del sistema, che rende arduo uno studio di tipo puramente analitico del suo funzionamento, si è ritenuto necessario instaurare un processo iterativo di risoluzione, alternato a successive modifiche nel dimensionamento: tale processo iterativo, che deve condurre, se possibile, ad un dimensionamento di massima collaborazione fra le celle di conversione, richiede necessariamente l'impiego di un programma di calcolo adeguato per la risoluzione delle reti in funzionamento transitorio.

Data la complessità del fenomeno ed il carattere di novità dello studio, si è tuttavia ritenuto pregiudiziale effettuare un'indagine di tipo analogico, che desse il conforto dell'evidenza sperimentale, consentendo una sicura verifica dei risultati ottenibili mediante la elaborazione numerica.

Come primo approccio si è considerata la configurazione base costituita da due raddrizzatori trifasi alimentanti un carico di elevata induttanza.

I rilievi sperimentali effettuati hanno evidenziato come il grado di collaborazione dei due convertitori risulti fortemente influenzato dalle induttanze e dalle resistenze dei vari rami (lato c.c. e lato c.a.) e che comunque, a patto di scegliere opportunamente i rapporti L/R, risulti possibile ottenere una buona collaborazione di entrambi i ponti.

Si è inoltre avuto modo di vedere come a fronte di una corrente costante assorbita dal carico, le correnti erogate dai ponti abbiano un andamento pulsante in funzione del tempo.

Sulla base di tali risultati si è proceduto allo studio e successivamente al progetto di un modello analogico della linea di conversione atto a simulare il comportamento di n ponti in cascata e della interazione tra conduttori c.c. e c.a.

Per la configurazione del sistema di conversione si è ipotizzato l'impiego di una linea bifilare di contatto, connessa, tramite celle di conversione in cascata costituita da ponti raddrizzatori trifasi di Graetz, ad una linea in c.a. trifase.

* Questa parte è opera dei ricercatori del Politecnico di Milano: E. Campanari, A. Di Gerlando, E. Tironi, I. Vistoli.

Tale scelta consente una semplificazione nello studio del comportamento del sistema; d'altro canto si ritiene che i risultati conseguiti siano di validità generale anche per disposizioni diverse da quella esaminata.

Il circuito che ne deriva è schematizzabile secondo la disposizione di fig. 2.2.1.

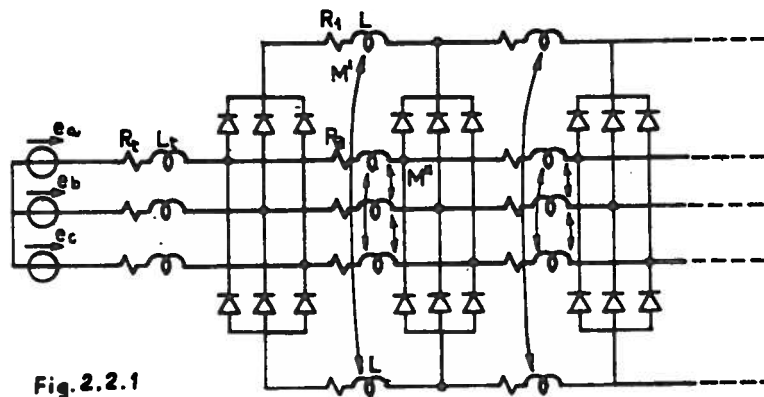


Fig. 2.2.1

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; un problema rilevante resta il dimensionamento dei conduttori lato c.a. e lato c.c. e dei diodi dei raddrizzatori.

Tale dimensionamento non è facilmente definibile a priori, poichè 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. 2.2.2.

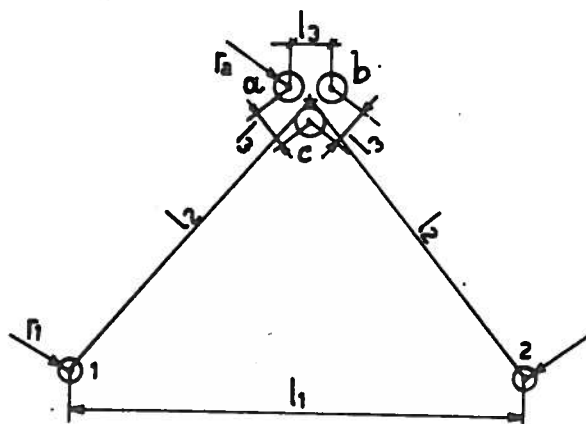


Fig. 2.2.2

1,2 conduttori equivalenti Linea c.c.
a,b,c conduttori equivalenti Linea c.a.

Si assumono le seguenti ipotesi:

- 1) I conduttori in c.c. hanno uguale raggio ($r_1 = r_2$), pari a $\sqrt{A/\pi}$, essendo A la totale sezione di ciascuna polarità.
- 2) Analogamente con $r_a = r_b = r_c$ si intende il raggio equivalente di ciascun conduttore della linea trifase.
- 3) La posizione della terna di conduttori in c.a. è simmetrica rispetto a quella dei conduttori in c.c.

Gli effetti di auto e mutua induzione nei cinque conduttori 1,2,a,b,c, possono essere espressi, in termini di cadute di tensione induttiva per una lunghezza l di linea, da relazioni del seguente tipo (assumendo come versi positivi per le correnti quelli indicati in fig. 2.2.3).

$$2.2.1 \quad v_i = \sum_{j=1}^5 L_{ij} \frac{di_j}{dt}$$

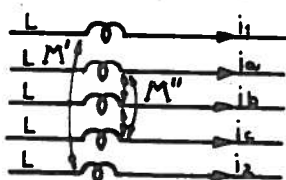


Fig. 2.2.3

Nell'ipotesi in cui si verificano particolari condizioni di simmetria tra i conduttori in c.c. e quelli in c.a. si perviene ad un disaccoppiamento elettromagnetico tra le relative linee: infatti in tal caso sussiste l'eguaglianza dei coefficienti di mutua induttanza tra ciascun conduttore in c.c. e i rimanenti in c.a., e viceversa; con l'ulteriore ipotesi di somma nulla delle cinque correnti, è allora possibile esprimere la c.d.t. v_i in funzione delle sole correnti continue, o alternate rispettivamente.

In tal caso la relazione generica precedentemente scritta si trasforma nelle seguenti:

$$v_1 = L p i_1 - M' p i_2$$

$$v_2 = L p i_2 - M' p i_1$$

$$(2.2.2) \quad v_a = L p i_a + M'' p (i_b + i_c) \quad p = d/dt$$

$$v_b = L p i_b + M'' p (i_a + i_c)$$

$$v_c = L p i_c + M'' p (i_a + i_b)$$

I coefficienti di auto e mutua induttanza che vi compaiono possono essere valutati secondo le seguenti espressioni:

$$L = (\mu_0 / 2\pi) \left\{ \ln \left[\frac{l_2}{(K \cdot r_{1a})} \right] \right\} \cdot l \quad [H]$$

$$(2.2.3) \quad M' = (\mu_0 / 2\pi) \left[\ln \left(\frac{l_1}{l_2} \sqrt{r_a / r_1} \right) \right] \cdot l \quad [H]$$

$$M'' = (\mu_0 / 2\pi) \left[\ln \left(\frac{l_2}{l_3 - r_a} \sqrt{r_a / r_1} \right) \right] \cdot l \quad [H]$$

dove $r_{1a} = \sqrt{r_1 \cdot r_a}$ è il raggio medio geometrico.

$$K = 0,779 \quad (\text{corrisponde all'ipotesi di distribuzione uniforme della corrente nella sezione del conduttore}).$$

Si può osservare l'identica espressione che il parametro di autoinduttanza presenta per i conduttori in c.a. e per quelli in c.c.

Si riconosce inoltre come dai parametri L, M', M'' si possono dedurre gli usuali parametri di servizio in c.a. ($L_{ca} = L - M''$) e in c.c. ($L_{cc} = L + M'$) nell'ipotesi (qui non verificata) che le 3 correnti della linea trifase e le 2 della linea in c.c. siano separatamente a somma nulla.

Le relazioni (2.2.2) possono essere simulate con i seguenti modelli analogici:

- Parametri della linea in c.c.:

Le c.d.t. induttive v_1 e v_2 sul tratto di linea di lunghezza l , pari a quello compreso fra due successive celle di conversione, si ottengono realizzando 4 avvolgimenti, come indicato in fig. 2.2.4, attorno a due nuclei magnetici distinti di uguale permeanza $\mathcal{A}$. I parametri di auto e mutua induttanza che si ottengono per le due linee (1 e 2) sono dalle seguenti relazioni:

$$(2.2.4) \quad L = (N_1^2 + N_2^2) \cdot \mathcal{A};$$

$$M' = 2 \cdot N_1 N_2 \cdot \mathcal{A}.$$

Definito il valore della permeanza $\mathcal{A}$ e noti i valori di M' ed L , i numeri di spire necessari per realizzare i parametri voluti di fig. 2.2.4 si possono così determinare: posto $h = M'/L$; $x = N_2/N_1$ si ha:

$$(2.2.5) \quad x = (1 - \sqrt{1 - h^2}) / h$$

$$N_1 = \sqrt{L / [(1 + x^2) \cdot \mathcal{A}]}$$

$$N_2 = x \cdot N_1,$$

con N_1 ed N_2 da approssimare agli interi.

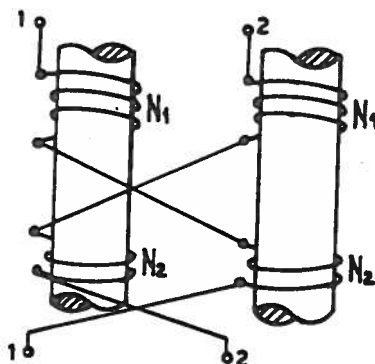


Fig. 2.2.4

- Parametri della linea in c.a. :

Le c.d.t. induttive v_a , v_b , v_c nel tratto di lunghezza l si ottengono per mezzo degli avvolgimenti di fig. 2.2.5 e ne risultano, per i parametri di auto e mutua, le seguenti espressioni:

$$(2.2.6) \quad L = (N_1^2 + 2 \cdot N_2^2) \cdot \mathcal{L}$$

$$M'' = (N_2^2 + 2 \cdot N_1 \cdot N_2) \cdot \mathcal{L}$$

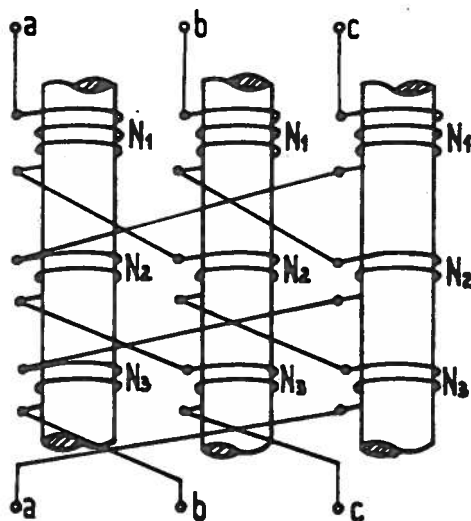


Fig. 2.2.5

Il calcolo dei numeri di spire, scelto l'opportuno valore di permeanza, può essere condotto secondo le seguenti formule:

posto $M'' / L = Y$; $N_2 / N_1 = x$, si ha:

$$(2.2.7) \quad x = [1 - \sqrt{1 - y \cdot (2 \cdot y - 1)}] / (2 \cdot y - 1)$$

$$N_1 = \sqrt{M'' / [(x^2 + 2x) \cdot \mu]}$$

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

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.

Se si calcola il valore che i parametri assumono nella situazione di riferimento dell'impianto reale, si può osservare come essi siano estremamente bassi; d'altro canto ad essi, 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 lo 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 della 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 K_m , moltiplicativo dei parametri della situazione reale, tenendo conto dei suddetti criteri di similitudine.

Attualmente è in corso di realizzazione un modello analogico del sistema di conversione, costituito da 8 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 quattro ponti di captazione.