

Fig. 13. - Diagramma fornito dalla prova con capacità limite.

Nella stessa figura 11 sono riportati anche i diagrammi calcolati e rilevati della corrente nell'avvolgimento rotorico i_1 in funzione del tempo.

L'oscillogramma di figura 12 si riferisce invece ad una prova eseguita con capacità pari al valore limite calcolato ($141 \mu\text{F}$ con collegamento a triangolo); di tale oscillogramma per ragioni pratiche sono stati riportati solamente tre tratti ma i dati da esso forniti sono stati riassunti nel diagramma di figura 13. È interessante notare come nei primi istanti si sia avuto un inizio di autoeccitazione che è successivamente cessato, probabilmente per la diminuita velocità della macchina, stabilizzandosi la tensione ai morsetti ad un valore di poco superiore alla f.e.m. dovuta al magnetismo residuo.

In seguito per qualche causa accidentale è aumentata, sia pure di poco, la velocità del gruppo e il fenomeno ha avuto inizio di nuovo, svolgendosi secondo l'andamento previsto.

L'instabilità riscontrata dimostra che la capacità con cui si è operato era effettivamente quella

limite per l'innescarsi del fenomeno, e coincideva con quella prevista con il calcolo.

La descrizione delle operazioni grafiche ed analitiche eseguite esorbita dai limiti imposti alla presente esposizione.

5. - Conclusione.

Lo studio compiuto ha permesso di individuare i parametri che determinano l'andamento nel tempo del fenomeno di autoeccitazione. Essi possono essere calcolati in sede di progetto oppure essere rilevati in sede di collaudo mediante prove assai semplici, che non richiedono di sottoporre la macchina a carico né attivo né reattivo. Conoscendo il valore di tali parametri è possibile stabilire con sufficiente esattezza, almeno per quanto riguarda il fenomeno dell'autoeccitazione, la minima velocità con cui devono intervenire i regolatori di tensione.

Mario Picchi, Alfredo Vallini

Pisa - Istituto di Elettrotecnica dell'Università.

BIBLIOGRAFIA

- C. PALESTRINO e C. CAMINITI, *Tecnica degli Impianti Elettrici*, UTET, Torino, 1934.
 P. WALDVOGEL, *Theorie der Spannungshaltung einer auf eine lange leerlaufende Leitung arbeitenden Drehstrommaschine*, Brown Boveri Miti., 1945, XXXII, pag. 251.
 R. KELLER, *Die Beherrschung der Selbsterregung bei Synchrongeneratoren*, Bulletin de l'Ass. Suisse des Electr., 1949, XL, pag. 173.
 C. LAVANCHY, *La stabilité des génératrices synchrones*, Revue Brown Boveri, 1949, XXXVI, pag. 264.
 J. HERLITZ, *Problèmes relatifs au fonctionnement des réseaux de transport d'énergie à haute tension et à grande distance*, C.I.G.R.E., Parigi 1949, Tomo III, Rapporto n. 406.

a Giancarlo Vallauri

Stato attuale degli studi sulla trasmissione d'energia a corrente continua ad alta tensione

Riassunti gli studi compiuti o in corso di esecuzione sulla trasmissione d'energia a corrente continua ad alta tensione, si accenna a quelli che verranno effettuati presso l'I.E.N.G.F. e si considera la convenienza che esperienze di esercizio vengano compiute in Italia.

1. - Indirizzo generale degli studi.

Le esperienze sulla trasmissione a corrente continua ad alta tensione con sottostazioni di conversione a vapore di mercurio ebbero inizio poco prima dell'ultima guerra. Abbandonato il vecchio concetto di Thury della produzione diretta dell'energia a corrente continua ad alta tensione, si delineò con esse la figura dell'impianto moderno di trasmissione a corrente continua, con produzione mediante generatori trifasi e doppia conversione, da corrente alternata in corrente continua in partenza, da corrente continua in corrente alternata all'arrivo. L'uso dei convertitori a vapore di mercurio per la doppia conversione fu conseguenza del progresso costruttivo dei commutatori corrispondenti, che, soprattutto con l'introduzione delle griglie di comando e di elettrodi ausiliari fra anodo

e catodo, consentivano nella maniera migliore la conversione nei due sensi a tensione elevata: altri commutatori, quelli di Marx, ad arco in aria compressa, pure studiati per le alte tensioni, non riuscivano altrettanto convenienti, così che furono scartati all'atto degli studi, di poco posteriori, per la progettazione e l'esecuzione della linea Elba-Berlino, di cui sarà fatta parola in seguito.

In questo tipo di impianti, il sistema di produzione e quello di trasmissione permettono di unire i vantaggi economici della produzione mediante generatori trifasi e quelli della trasmissione a corrente continua attraverso linee, aeree o in cavo, a due o addirittura a un solo conduttore, con ritorno per il terreno. Per contro la doppia conversione accresce il costo complessivo degli impianti, attenuando e annullando a volte, secondo i valori delle

potenze da trasmettere e delle distanze di trasmissione, e il percorso della linea, i vantaggi economici del sistema di trasmissione.

Mentre nei confronti della trasmissione a corrente continua con produzione diretta di energia di questa forma, la trasmissione a corrente continua con produzione a corrente trifase e doppia conversione ha ottenuto una facile prevalenza, nei confronti con la trasmissione trifase si è stabilita una competizione, che, risoltasi nel periodo immediatamente successivo alla guerra a favore della trasmissione trifase a tensione oltre 200 kV e fino a 400 kV, non può dirsi ancora chiusa.

2. - Schemi usati. Esperienze passate o in corso di esecuzione.

Due schemi di trasmissione a corrente raddrizzata furono sperimentati da principio, quello in serie, a corrente costante, seguendo in questo il concetto classico di Thury, quello in derivazione, a tensione costante, più corrispondente, come modalità d'esercizio, agli usuali impianti di trasmissione tritasi.

Negli Stati Uniti d'America, fra Schenectady e Mechanicville, nel 1936, la G.E.C. eseguì la trasmissione sperimentale di circa 180 A a 15 kV, col sistema a corrente costante, servendosi dello schema monociclico di Steinmetz per passare dal circuito a tensione costante del generatore a quello a corrente costante del trasformatore, del commutatore e della linea di trasmissione, o viceversa da questo a quello dell'utilizzatore (fig. 1) [1]. Tale schema non ha avuto diffusione in seguito, forse anche in conseguenza del fatto che al problema della trasmissione a corrente continua non sono state dedicate in America ulteriori speciali attenzioni, essendosi rivolte piuttosto le case costruttrici americane, specie dopo la guerra, verso lo studio dei problemi della trasmissione trifase a tensione superiore a 220 kV.

Tutti gli studi compiuti e in corso di esecuzione in Europa sono stati effettuati invece su linee di trasmissione a tensione costante. Lo schema dei convertitori prescelto il più delle volte è quello trifase di Graetz, che meglio si adatta alle alte tensioni d'esercizio, perchè comporta il minor valore della tensione inversa, eguale a quello della tensione raddrizzata, anzichè circa doppio di essa, come avviene negli schemi con conduzione a una sola via. Per le tensioni di esercizio maggiori sono stati usati o previsti più gruppi tritasi connessi in serie in ogni convertitore ed eventualmente più elementi di commutatori in serie nello stesso lato dello schema. Usando elementi dei tipi più recenti, che possono sostenere con piena sicurezza una tensione di esercizio di 50 kV, lo schema della fig. 2, con due gruppi in serie fra loro e due elementi di commutatore in serie in ogni lato dello schema, permette di effettuare una trasmissione a 200 kV: mettendo a terra il punto di connessione fra i due gruppi, i due conduttori di linea si trovano a potenziali di ± 100 kV; con una corrente continua di 250 A, che può facilmente ottenersi con gli elementi indicati, è possibile trasmettere una potenza di 50 MW.

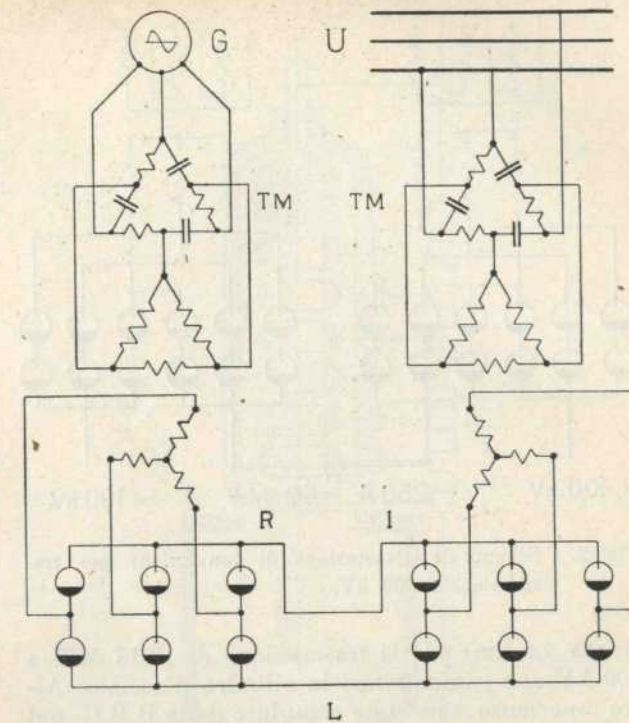


Fig. 1. - Trasmissione a corrente costante con schema monociclico di Steinmetz.

L'uso di elementi per tensioni più elevate o per correnti più intense, che non è impossibile costruire, consentirebbe la trasmissione di potenze proporzionalmente maggiori. Con elementi simili e schemi più semplici costituiti da un solo gruppo avente un elemento in ogni lato del commutatore (quindi comprendente 6 elementi di commutatore in tutto) è possibile effettuare la trasmissione di potenze dell'ordine di 12-15 MW, a 50-60 kV, con un estremo di un convertitore a terra o con ritorno per la terra.

Il primo impianto a tensione costante ad alta tensione, sperimentato in Europa, fu installato dalla B.B.C. di Baden nel 1939, fra Wettingen e Zurigo (30 km), in occasione dell'Esposizione nazionale svizzera tenuta quell'anno in quella città [2]. La potenza trasmessa era di 500 kW, la tensione di 50 kV. Lo schema dei convertitori era con conduzione a una sola via (fig. 3); i commutatori, polianodici, erano in cilindro di acciaio.

A parte le esperienze, di poco successive, sull'impianto da Lehrte a Misburg (Hannover-Braunschweig) per la trasmissione di 16 MW a 80 kV con convertitori equipaggiati con commutatori di Marx ad arco in aria compressa, che avevano per scopo la messa al punto di questi commutatori e non hanno avuto seguito, come già è stato accennato, numerose esperienze sono state eseguite in Europa a partire da quegli anni, con convertitori a vapore di mercurio, quasi sempre in cilindro di acciaio [3].

La Siemens aveva eseguito delle prove a Siemensstadt, fin dal 1937, con ampole monoanodiche in vetro, a 75 kV, 4 A raddrizzati, e altre ne compì anni dopo, fra Charlottenburg e Moabit (di-

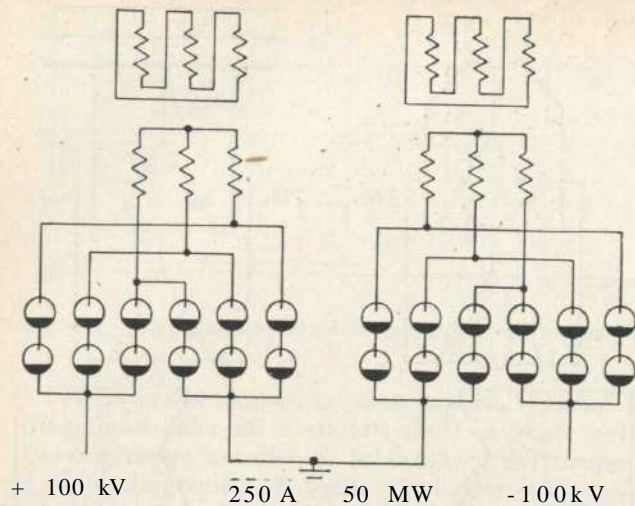
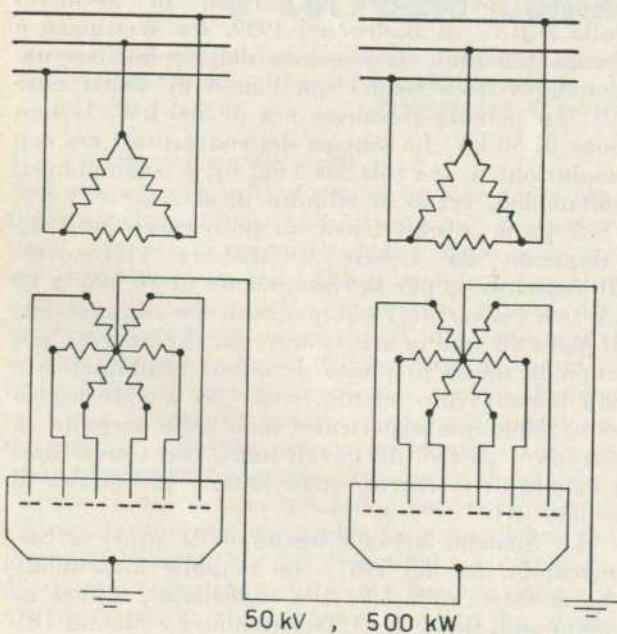


Fig. 2. - Schema di sottostazione di conversione per trasmissione a 200 kV.

stanza 4,6 km) per la trasmissione di 10-15 MW a 100 kV con commutatori in cilindro d'acciaio. Altre esperienze sono state compiute dalla B.B.C. nel 1946, a Bodio, per la trasmissione di 300-400 A, a 33 kV. Esperienze di esercizio della maggiore importanza avrebbero dovuto essere effettuate su impianti a carattere industriale studiati e costruiti dalla Siemens, per la trasmissione di 100 MW, a 440 kV, fra Fürstenberg e Berlino, e dalla A.E.G., per la trasmissione di 60 MW, a 440 kV, fra Vockeroode (Dessau) e Berlino-Marienburg. Portati a buon punto verso l'inizio del 1945, tali impianti vennero smantellati dopo l'occupazione della Germania, né esperienze conclusive d'esercizio poterono aver luogo. Restano soltanto i risultati dei numerosi studi

Fig. 3. - Schema della trasmissione a 50 kV Wettingen-Zurigo (1939).



teorici eseguiti in quell'occasione, raccolti da K. Baudisch in un libro di recente pubblicazione [4]. Si pensa anche che tali esperienze siano state continuate in Russia dopo la guerra, servendosi specialmente del materiale tedesco ricavato dagli impianti smantellati; ma di esse non si hanno notizie.

Esperienze sistematiche sono state iniziate nel 1946, in collaborazione fra la Casa svedese A.S.E.A. e il Swedish State Power Board, e sono in corso attualmente, a Trollhättan, nella Svezia centro-occidentale, e fra Trollhättan e Mellerud (distanza circa 50 km) [5]. Tanto a Trollhättan quanto a Mellerud sono installate due piccole sottostazioni sperimentali di conversione, ognuna equipaggiata con due convertitori predisposti per il funzionamento tanto da raddrizzatori quanto da invertitori. I convertitori, connessi secondo lo schema di Graetz, hanno il commutatore costituito da 6 elementi monoanodici; la tensione raddrizzata è di 45 kV, la corrente raddrizzata di 72 A. Vari strumenti di misura sono installati nelle due sottostazioni; particolarmente numerosi quelli di Trollhättan. Le due sottostazioni sono collegate da una linea a corrente trifase, a 55 kV, due conduttori della quale sono stati adibiti per queste esperienze.

La connessione in serie dei due gruppi di ognuna delle due sottostazioni, secondo uno schema simile a quello della fig. 2, salvo l'esistenza di un solo elemento monoanodico in serie in ogni lato di esso, consente di effettuare la trasmissione attraverso la linea considerata di circa 6 500 kW, a 90 kV raddrizzati. Esperienze di trasmissione del genere sono state ripetute più volte da Mellerud a Trollhättan, funzionando quest'ultima sottostazione da invertitrice, in quanto più completamente equipaggiata di strumenti di misura e di oscillografi, e quindi più adatta all'esame del funzionamento dei convertitori da invertitori, più delicato e meno completamente noto di quello da raddrizzatori.

Le esperienze più lunghe, che, salvo gli intervalli in cui sono state eseguite quelle precedenti, sono durate pressoché ininterrottamente dal 1946 a oggi, sono quelle eseguite a Trollhättan, predisponendo i due convertitori l'uno da raddrizzatore l'altro da invertitore e connettendoli sul posto attraverso una linea artificiale di trasmissione; questa trasmette una potenza circa metà della precedente, a tensione di 45 kV. Tali esperienze sono servite soprattutto a analizzare a fondo il comportamento degli elementi dei commutatori, e, insieme con altre eseguite tanto a Trollhättan quanto a Ludvika (a non grande distanza da Stoccolma), nella fabbrica dei convertitori a vapore di mercurio della A.S.E.A., hanno consentito di orientarsi sui tipi costruttivi più convenienti degli elementi a vapore di mercurio. Due gruppi di conversione equipaggiati con elementi di nuovo tipo, disegnati in base a tali risultati sperimentali, saranno pronti fra breve e verranno sottoposti a prove analoghe alle precedenti in un nuovo fabbricato della stessa sottostazione di Trollhättan.

Intanto, in base ai primi risultati di tali esperienze, fin dal termine del 1950, il Swedish State Power Board ha deciso la costruzione di una linea

di trasmissione della lunghezza di circa 100 km dalla penisola scandinava all'Isola di Gotland, nel Baltico. La trasmissione avrà luogo in cavo, con ritorno attraverso l'acqua, a 100 kV, con una corrente raddrizzata di 200 A, quindi con una potenza di 20 MW [6].

Lo schema delle sottostazioni di conversione sarà analogo a quello della fig. 2, salvo la minore complicazione dello schema di ogni gruppo, comprendente un solo elemento in serie in ciascun lato, e la diversa posizione del punto di messa a terra. È previsto che la trasmissione sia capace di funzionare anche in senso inverso, trasportando energia da Gotland verso la penisola. Attraverso i trasferimenti di energia verso Gotland, il Swedish State Power Board conta di ridurre di 15-20 % il costo dell'energia nell'isola, prodotta oggi con un impianto termoelettrico locale. Le ordinazioni sono state passate da oltre un anno dal Swedish State Power Board alla Casa A.S.E.A.; l'impianto è previsto che possa entrare in servizio entro la fine del 1954.

Altre esperienze di esercizio si ha notizia che dovranno essere intraprese in Inghilterra, su un impianto in cavo destinato alla trasmissione di potenze dell'ordine di 20 MW, a tensione intorno a 200 kV, con caratteristiche non molto dissimili da quelle dell'impianto svedese di Gotland.

3. - Problemi della trasmissione a corrente continua ad alta tensione.

Tre ordini di problemi devono studiarsi fondamentalmente:

- 1) problemi, principalmente di carattere costruttivo, riguardanti i commutatori;
- 2) problemi riguardanti l'interruzione delle correnti continue;
- 3) problemi relativi al comportamento degli impianti di trasmissione in condizioni normali o anormali.

4. - Problemi relativi ai commutatori.

Questi problemi riguardano principalmente la maniera di raggiungere, tanto nell'intervallo di funzionamento diretto, quanto in quello inverso, le condizioni interne di temperatura, pressione e ionizzazione e la ripartizione del potenziale fra anodo e catodo, più adatte per garantire non solo la minor caduta di tensione interna in senso diretto, ma soprattutto il maggior valore della tensione critica inversa e il regolare comportamento delle griglie e della scarica, in generale, così da evitare gli archi di ritorno nel funzionamento da raddrizzatore e i difetti di commutazione in quello da invertitore, pur alle più elevate tensioni di esercizio e con le maggiori correnti che possano mettersi in giuoco.

Sul raggiungimento di queste condizioni, oltre che il proporzionamento delle varie parti incidono soprattutto il sistema e i particolari della refrigerazione. L'orientamento più recente, per i cilindri d'acciaio per alte tensioni, è verso la ventilazione

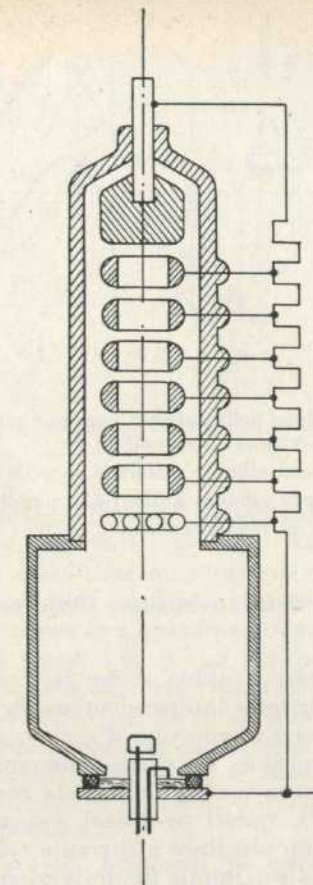


Fig. 4. - Elettrodi ausiliari interposti fra anodo e catodo, nell'interno dell'isolatore anodico cilindrico cavo.

ad aria soffiata, che, attraverso la regolazione della temperatura dell'aria, refrigerata o riscaldata secondo i casi, e l'uso di riscaldatori locali, consente di ottenere i risultati migliori.

Per regolare la ripartizione del potenziale fra anodo e catodo nell'intervallo di applicazione della tensione inversa, l'orientamento generale è verso l'uso degli elettrodi ausiliari interposti fra anodo e catodo, e portati a potenziali convenienti mediante divisori di tensione generalmente a resistenza e capacità, ai capi dei quali è applicata la stessa tensione inversa (fig. 4). I conduttori di alimentazione di tali elettrodi sono saldati entro fori passanti attraverso la parete degli isolatori anodici cilindrici cavi in porcellana. La forma e la posizione di questi elettrodi sono particolarmente studiate [7] [4].

Per padroneggiare nella maniera migliore i fenomeni di ionizzazione interna, l'indirizzo manifestatosi già nelle costruzioni sperimentali di anni fa [8], confermato nelle esperienze più recenti della A.S.E.A., è quello verso il frazionamento della corrente anodica complessiva tra più anodi da connettere in parallelo fra loro attraverso partitori di corrente ⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Cilindri di questo tipo verranno usati per la trasmissione dalla penisola scandinava all'Isola di Gotland. Cilindri simili, a cinque anodi, sono stati provati nella sottostazione di Trollhättan, con due anodi in parallelo fra loro sul circuito a 45 kV raddrizzati e gli altri tre anodi in parallelo fra loro su un circuito indipendente.

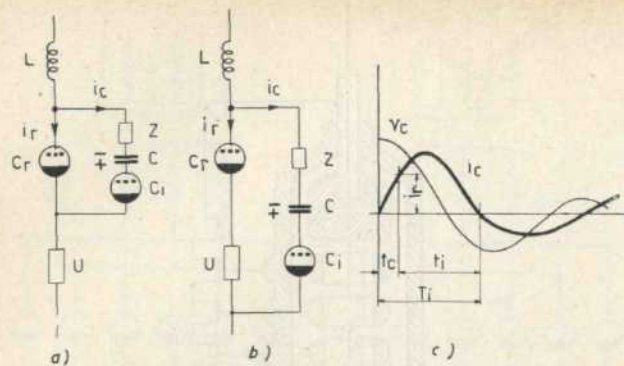


Fig. 5. - Interruzione delle correnti continue mediante apparecchi a vapore di mercurio:

- schema con cilindro ausiliario in serie col carico;
- schema con cilindro ausiliario in parallelo col carico;
- principio di funzionamento.

5. - Problemi dell'interruzione delle correnti continue.

Assenti finché si abbia a che fare con trasmissioni che connettono indipendentemente una sottostazione di partenza con una d'arrivo, oppure con altri schemi semplici, nei quali l'interruzione possa effettuarsi sul lato corrente alternata di ambedue i convertitori ⁽²⁾, questi problemi nascono inevitabilmente quando più linee a corrente continua presentino almeno un punto di derivazione. Essi offrono una notevole gravità appena siano in gioco tensioni elevate e correnti di qualche intensità, date le rilevanti quantità d'energia elettrostatica ed elettromagnetica che devono essere dissipate nelle aperture eseguite tanto in funzionamento normale quanto soprattutto all'atto dei corti circuiti ⁽³⁾. Non ha luogo infatti, a corrente continua, il fenomeno del passaggio per lo zero che facilita l'interruzione delle correnti alternate.

L'interruzione delle correnti continue può avvenire attraverso l'applicazione del principio studiato già dai primi tempi dell'introduzione delle griglie nei cilindri a vapore di mercurio: un apparecchio di questo genere (C_r della fig. 5a), attraversato dalla corrente i_r , che si vuole interrompere, è connesso in parallelo con un cilindro ausiliario C_i analogo, disposto in serie con un condensatore C e un elemento dissipatore Z . In servizio normale la griglia di C_r consente la scarica, quella di C_i l'interdice; il condensatore C è carico nel senso indicato dalla fig. 5. Quando si voglia interrompere la corrente i_r , basta consentire la scarica del condensatore C attraverso C_i , agendo sulla griglia di questo; la scarica ha luogo anche attraverso C_r , sotto forma di una corrente oscillatoria del tipo di

⁽²⁾ Ciò a parte la possibilità di agire sulle griglie di comando dei commutatori.

⁽³⁾ Per linee della lunghezza di qualche centinaio di chilometri, con capacità dell'ordine di una decina di microfarad, alla tensione di 200 kV, l'energia elettrostatica immagazzinata vale $\frac{1}{2} CV^2 = 200\ 000$ J; con induttanze dell'ordine di un centinaio di millihenry e correnti di corto circuito di circa 2 000 A, l'energia elettromagnetica risulta $\frac{1}{2} LI^2 = 200\ 000$ J.

i_c della fig. 5c. Quando essa raggiunge il valore di i_r , nell'istante t_c , la corrente si annulla in C_r ; se nel frattempo la griglia di questo è stata portata sotto il potenziale d'interdizione, l'arco si arresta definitivamente attraverso C_r . Portando subito dopo al di sotto del potenziale di interdizione la griglia di C_i , anche la corrente i_c in esso viene interdetta a partire dall'istante t_i del suo successivo passaggio per lo zero. L'interruzione attraverso l'utilizzatore U avviene così nel tempo $T = t_c + t_i$. Volendo ridurre questo tempo, si può derivare il circuito ausiliario in parallelo col complesso di C_r e U : per l'utilizzatore U , esso si riduce allora a t_c ; l'interruzione per la linea L avviene sempre nel tempo T_c .

A parte la permanenza dell'arco di C_r in serie nel circuito principale durante il funzionamento normale, inconvenienti principali degli schemi considerati sono le dimensioni e il costo dell'elemento dissipatore Z , del condensatore C , il quale deve immagazzinare quantità d'energia anch'esse molto rilevanti, e degli accessori per la sua carica: gli studi precedenti all'installazione degli impianti sperimentali tedeschi consideravano in qualche caso specifico l'uso di condensatori della capacità di 10 μ F, caricati a una tensione di 200 kV.

Più di recente, nel 1945, sono state eseguite esperienze di interruzione di correnti continue con interruttori a gas compresso con tensioni d'arco elevate per agevolare l'interruzione [9]. Sebbene fossero stati ottenuti risultati di qualche rilievo, essendo state interrotte, in tempi dell'ordine di 10 ms, correnti fino a 12 000 A a tensione d'esercizio di 2 000 V, in un circuito con un'induttanza di 7 mH ($\frac{1}{2} LI^2 \approx 500\ 000$ J), o correnti di 2 000 A in un circuito a 10 kV con $L = 40$ mH, con una tensione massima d'arco di 24 kV, tali esperienze sono state sospese successivamente, forse anche per il prevalere della trasmissione trifase a tensione oltre 220 kV.

Oggi lo studio di questi problemi è accantonato, prevedendosi per ora soltanto l'installazione di impianti con schemi semplici.

6. - Problemi degli impianti di trasmissione a corrente continua.

Lo studio di alcuni fra questi problemi era stato iniziato da tempo.

A parte i problemi della trasmissione in serie a corrente costante [10], per quella a tensione costante, ciò si è verificato anzitutto per i problemi relativi al fenomeno corona. Studiati fin dai primi decenni del secolo, contemporaneamente a quelli dell'analogo fenomeno delle linee a corrente alternata e, in generale, a tutti i fenomeni di scarica nei gas [11], essi venivano ripresi in esame sia teoricamente sia sperimentalmente a partire dal 1930 circa [12]. Si conseguivano allora vari risultati sui fenomeni di innesco per conduttori tanto positivi quanto negativi rispetto al suolo, sulle tensioni critiche corrispondenti, sulle perdite e sulle espressioni relative. Ulteriori studi potrebbero ancora effettuarsi specialmente con riferimento ai conduttori

cordati, alle maggiori sezioni, di uso pratico più frequente, alle tensioni più elevate, e potrebbero anche farsi confronti più estesi con le correnti alternate. Nel complesso, tuttavia, i fenomeni sono ormai completamente chiariti e i loro elementi fondamentali acquisiti.

Anche il problema del ritorno delle correnti attraverso il terreno è stato largamente studiato. Iniziati gli studi già fin quasi dal principio del secolo [10], essi sono stati proseguiti largamente nei decenni successivi principalmente in rapporto al ritorno delle correnti continue negli impianti di trazione, e poi ripresi di recente [13]. Sono stati esaminati così i fenomeni di corrosione degli elettrodi di messa a terra e delle canalizzazioni vicine, in specie delle guaine dei cavi di telecomunicazione, i disturbi arrecati negli impianti di segnalamento ferroviario con relè alimentati a corrente continua, i provvedimenti corrispondenti, atti in generale a contenere inconvenienti e disturbi entro limiti ragionevoli. Anche il ritorno delle correnti attraverso il mare è stato studiato e si è riscontrato che esso può migliorare la situazione in alcuni casi.

Senza soffermarsi sui problemi dell'isolamento delle linee e del relativo proporzionamento, non studiati in maniera particolarmente approfondita, anche in vista dell'analogia che essi presentano molte volte con quelli delle trasmissioni a corrente alternata, problemi di maggiore interesse, il cui esame è stato largamente affrontato nello studio delle trasmissioni a corrente raddrizzata, sono quelli del funzionamento di tali impianti a regime permanente e transitorio, della regolazione, della stabilità. Gli studi più ampi sono forse quelli che hanno preceduto la progettazione degli impianti sperimentali tedeschi a cui è stato accennato. La distruzione di tali impianti fa sì che manchi tutta la parte sperimentale relativa; resta comunque un vasto materiale derivante dagli studi teorici sulla regolazione eseguita agendo sull'invertitore all'arrivo della linea o sul raddrizzatore alla partenza di essa o su ambedue, sui vari regimi di regolazione che possono ottenersi, a potenza reale dell'invertitore costante, a corrente raddrizzata costante, ecc. [4]. Altri studi sugli stessi problemi sono stati compiuti o sono in corso di esecuzione in Svezia, da parte della A.S.E.A. [14].

Due ordini di fenomeni incidono sul regolare funzionamento dell'impianto di trasmissione e su quelli connessi, a monte e a valle di esso. Anzitutto i fenomeni inerenti alle macchine sincrone collegate con le due reti a corrente alternata, che definiscono gli ordinari campi di stabilità e i limiti corrispondenti del funzionamento di queste. Inoltre, il fenomeno di commutazione dell'invertitore, nelle note condizioni limiti di funzionamento stabile: il fatto che la commutazione debba completarsi per ogni coppia di anodi (o di elettrodi in generale) prima che diventino eguali i potenziali corrispondenti (istante t_0 , della fig. 6), fissa, in dipendenza del valore dell'angolo α di ritardo di polarizzazione di griglia, la durata massima ϵ della commutazione stessa e quindi il valore massimo

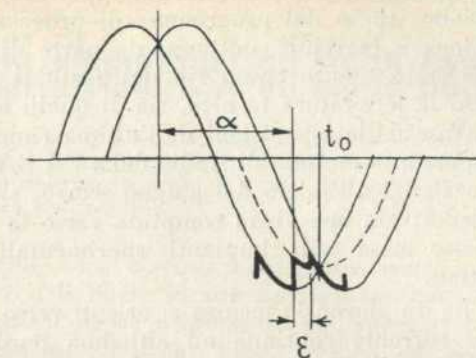


Fig. 6. - Commutazione in un invertitore.

della corrente raddrizzata ammissibile attraverso l'invertitore, da cui ϵ dipende. Ambedue gli ordini di fenomeni possono studiarsi, con riferimento al complesso degli impianti, in condizioni di regime tanto lentamente, quanto rapidamente variabile (« stabilità transitoria »). Lo studio per i sistemi di trasmissione a corrente continua è naturalmente più complesso che per quelli ordinari a corrente alternata, nelle equazioni corrispondenti intervenendo gli elementi della linea di trasmissione a corrente raddrizzata e soprattutto quelli dei convertitori corrispondenti.

Il campo dei fenomeni in questione è molto vasto e gli ampi studi compiuti potranno utilmente essere proseguiti e approfonditi, tanto teoricamente, quanto sperimentalmente.

7. - Possibili studi ed esperienze future.

Gli studi in corso di esecuzione in Svezia da parte della A.S.E.A. e specialmente l'esperienza di esercizio che potrà aversi dagli impianti di trasmissione dell'Isola di Gotland, a partire dalla fine del 1954, aggiungeranno senza dubbio un materiale di primo ordine a quello già disponibile per la conoscenza dei problemi della trasmissione a corrente continua. Altri elementi preziosi potranno ricavarsi dai futuri impianti sperimentali inglesi. Ma accanto a questi, eseguiti eventualmente su scala minore, altri studi ed esperienze potranno portare probabilmente contributi di qualche interesse.

Il Consiglio nazionale delle ricerche, accettando questo punto di vista, specialmente per l'interessamento del Prof. Vallauri, ha destinato in più riprese un contributo a un complesso di esperienze da eseguirsi presso l'I.E.N.G.F. sui convertitori a vapore di mercurio. Il Consiglio superiore dei Lavori pubblici, per analoghe ricerche, ha aggiunto un contributo supplementare.

Del programma, già imbastito presso l'Istituto, fanno parte anche delle esperienze sulla trasmissione a corrente continua: per gli elementi mono-anodici, sia a catodo caldo, sia a catodo liquido (ignitron), che si pensa di usare per le esperienze, è previsto un montaggio su pannelli singoli, che possano essere facilmente intercambiati e connessi fra loro, così da predisporre di volta in volta se-

condo schemi vari e da servire per esperienze diverse. Nello studio del programma di prove sulla trasmissione a corrente continua, da parte di chi scrive, è stato tenuto conto sia dei risultati noti attraverso la letteratura tecnica, sia di quelli avuti direttamente dalle esposizioni dell'ultima riunione del competente Comitato di studio della C.I.G.R.E. tenuto a Parigi all'inizio del giugno scorso, sia di quelli dedotti da una visita compiuta verso la fine dello stesso mese agli impianti sperimentali di Trollhättan.

Sia che un giorno la tecnica si orienti verso impianti a corrente continua ad altissima tensione per effettuare l'interconnessione a grandissima distanza, con reti « sovrapposte » a quelle attuali trifasi, come è opinione di qualche eminente tecnico svedese, sia che questo sistema resti circoscritto a casi speciali come quello dell'Isola di Gotland, in cui si richieda una trasmissione in cavo e il sistema si imponga per l'economia conseguente in questo, sulla utilità di tali esperienze non possono aversi dubbi. Tanto più che, anche se possa nutrirsi qualche perplessità circa l'avvenire della trasmissione a corrente continua, si deve riconoscere che la posizione di sfavore che questa ha oggi in confronto con la trasmissione trifase è dovuta in gran parte alla notevole competenza che noi abbiamo dei problemi di quest'ultima, dopo oltre mezzo secolo di esperienze, mentre ben poca conoscenza possediamo sui problemi dell'esercizio della prima.

Per le esperienze di esercizio, vivamente auspicabili accanto a quelle di laboratorio, non mancano in Italia sistemi di impianti su cui esse potrebbero essere effettuate, con schemi semplici che non comportino l'interruzione a corrente continua. Non può pensarsi, a questo riguardo, ad allacciamenti di importanza considerevole, anche se per qualcuno di essi le potenze relativamente non grandi da trasmettere e le lunghezze notevoli delle linee di trasmissione, o, comunque, i costi elevati di queste, potrebbero fare sperare vantaggi economici dall'uso della corrente continua; questa infatti non eviterebbe forse nemmeno oggi agli impianti un carattere « sperimentale » inammissibile e all'esercizio una eccessiva suscettibilità di fronte alle alee dell'esperienza stessa. Esistono invece anche da noi casi, non molto dissimili da quello dell'Isola di Gotland in Svezia, di isole a non grande distanza dalla terra ferma, che, non avendo risorse idrauliche, sono alimentate da centrali termoelettriche locali e potrebbero essere allacciate utilmente alle reti elettriche del continente attraverso linee di trasmissione in cavo: forse per qualcuno di essi, anche in conseguenza del modesto valore delle potenze da trasmettere, e quindi di quelle da installare nelle sottostazioni di conversione, il confronto economico potrebbe risolversi a favore della soluzione a corrente continua.

Antonino Asta

Bari - Istituto di Elettrotecnica della Facoltà d'Ingegneria.

Senza riportare una bibliografia completa, sono citati di seguito alcuni lavori che hanno più immediata attinenza con gli argomenti riassunti nel testo.

[1] B. D. BEDFORD, F. R. ELDER, C. H. WILLIS, *Power transmission by direct current*, G.E.R., 1936, pag. 220.

R. LOMBARDI, *La conversione statica dell'energia elettrica nei riguardi della trasmissione a grandi distanze*, Bollettino C.G.E., 1940, pag. 69.

[2] P. EGLOFF, *La première transmission d'énergie par courant continu, 50 000 V, à l'aide de mutateurs*, Revue B.B.C., 1939, pag. 92.

[3] Notizie sulle più considerevoli fra queste esperienze possono trovarsi principalmente in:

H. KELLER, *Grâce à de nouveaux progrès, il est maintenant possible de réaliser, à l'aide de mutateurs, une première installation de transmission d'énergie par courant continu à haute tension*, Revue B.B.C., 1945, pag. 310; oltre che in

[4] K. BAUDISCH, *Energieübertragung mit Gleichstrom hoher Spannung*, Springer, 1950.

[5] U. LAMM, *Progrès réalisés en Suède dans le transport de l'énergie en courant continu à haute tension*, C.I.G.R.E., 1948, rapp. n. 411.

[6] U. LAMM, *High voltage d. c. power transmission.. A pioneer project*, A.S.E.A. Journal, 1950, pag. 172.

A. RUSCK, B. G. RATHSMAN, U. GLIMSTEDT, *Transport d'énergie à haute tension en courant continu du continent suédois jusqu'à l'île de Gotland*, C.I.G.R.E., 1950, rapp. n. 406.

G. B. RATHSMAN, U. LAMM, *The Gotland H.V.D.C. link: present progress*, Direct Current, 1952, pag. 2.

[7] U. LAMM, *Postes de convertisseurs à vapeur de mercure pour la transmission de courant continu à haute tension*, C.I.G.R.E., 1946, rapp. n. 133.

[8] C. BRYNHILDSEN, *Etat actuel de la construction des mutateurs destinés à la transmission d'énergie par courant continu à haute tension*, Revue B.B.C., 1945, pag. 318.

[9] P. CHEVALLEY, E. EICHERBERGER, CH. EHRENSPERGER, *Disjoncteurs pour courant continu à haute tension*, Revue B.B.C., 1945, pag. 248.

[10] H. HIGHFIELD, *The transmission of electric energy by direct current on the series system*, J.I.E.E., 1907, pagina 471; 1912, pag. 848; 1913, pag. 640.

[11] S. P. FARWELL, *Corona produced by continuous potential*, A.I.E.E. Proc, 1914, pag. 1693.

[12] E. MARX, H. GÖSCHEL, *Koronaverluste bei hoher Gleichspannung*, E.T.Z., 1933, pag. 1112.

G. DE FASSI, *Effetto corona in tensione continua*, Elettrotecnica, 1935, pag. 163.

[13] F. HABERLI, *La terre utilisée comme conducteur de retour dans la transmission d'énergie à grande distance*, Revue B.B.C., 1941, pag. 303.

R. LUNDHOLM, *Esperiences suédoises de transmission de courant continu à travers le sol*, C.I.G.R.E., 1946, rapp. n. 134.

C. E. SÖDERBAUM, J. BECKIUS, M. BÖCKMAN, R. LUNDHOLM, *Transport en courant continu avec retour par la terre*, C.I.G.R.E., 1948, rapp. n. 401.

[14] U. LAMM, *Progrès réalisés en Suède dans le transport de l'énergie en courant continu à haute tension*, C.I.G.R.E., 1950, rapp. n. 408.