

Elettrodotti blindati: una alternativa per la trasmissione

L'articolo analizza gli elettrodotti blindati con approccio multiconduttore: se ne richiama la metodologia mostrando le cospicue potenze trasmissibili con basse perdite, il ridotto impatto ambientale e l'estrema riduzione dei campi elettromagnetici.

1 Introduzione

Il crescente consumo di energia elettrica può richiedere la costruzione di nuove linee ad alta e altissima tensione. Le linee aeree sono oggi la sola soluzione tecnica fattibile per i collegamenti su lunghe distanze, ma, come noto, esse appaiono sempre meno accettate a causa del loro impatto visivo e per il loro livello di campo elettromagnetico; l'impiego alternativo di linee in cavo comporta, per distanze maggiori di 20 km, notevoli difficoltà per la necessaria compensazione reattiva. Gli elettrodotti blindati trifase (EBLI) appaiono essere una risposta realistica (compatibilmente con il loro costo) per l'immediato futuro, soprattutto nelle situazioni più critiche di impatto ambientale: essi, infatti, uniscono i vantaggi di alte potenzialità di trasmissione con

basse perdite e campo magnetico quasi nullo in prossimità della linea. Le possibilità offerte dalla tecnologia odierna degli EBLI meritano apprezzamento e inducono a considerare attentamente l'opportunità di realizzazioni anche su ampia scala. Scopo della presente memoria è quello di illustrare sia le caratteristiche tecniche principali della nuova tecnologia sia i metodi di calcolo più idonei per determinarne le prestazioni, mentre gli autori si ripromettono di sviluppare in altre pubblicazioni aspetti tecnici particolari e una approfondita analisi dei costi.

2 Caratteristiche tecniche

Gli EBLI sono l'evoluzione diretta delle tecnologie sviluppate per le stazioni blindate in SF₆. La tecnica costruttiva [1] prevede la realizzazione di tre condotti unipolari o di un unico condotto tripolare, in cui le fasi sono disposte entro un solo involucro: questa seconda tipologia presenta maggiori problemi tecnici e non verrà qui considerata. Nella esecuzione unipolare [1, 2, 3] il conduttore di fase tubolare è mantenuto in posizione centrale da un isolatore in resina all'interno di un involucro (si vedano Figura 1 e Figura 2). Nelle realizzazioni giapponesi [2] il gas isolante è costituito da puro SF₆ alla pressione di circa 3÷5 bar. Costruttori europei [1,3] propongono l'uso di una miscela di SF₆/N₂ (nel rapporto di 10÷20%) a pressioni più alte (fino a 10 bar): essa è più compatibile con l'ambiente e meno costosa. In ogni caso l'isolamento soddisfa le prescrizioni IEC [4]. Senza addentrarci nella complessa problematica riguardante la tenuta dell'isolamento alle diverse tensioni di prova, ricorderemo che per ottimizzare il campo elettrico il rapporto tra il diametro interno D_e dell'involucro e quello esterno del conduttore D_c ha da essere 2,72. Nelle pratiche applicazioni qualsiasi rapporto tra 2,5 e 3 può essere adottato poiché in questo intervallo il campo elettrico, fissato D_e, aumenta meno di 0,5 % rispetto a quello ottimale.

Gli EBLI disponibili sul mercato sono composti da elementi (moduli) di dimensioni compatibili con le esigenze di trasporto (modulo rettilineo, modulo d'angolo, modulo per dilatazione termica) costruiti e provati in officina. Tali elementi sono poi uniti in sito innestando i conduttori e saldando gli involucri (grazie ad una speciale saldatrice automatica). Essi sono adattabili per installazione sia in galleria sia nel terreno [3]. Il costo stimato si colloca a circa 10÷15 volte quello di una equivalente linea aerea a seconda del tracciato; ma si consideri che il costo globale deve tenere conto di altri fattori quali le mino-

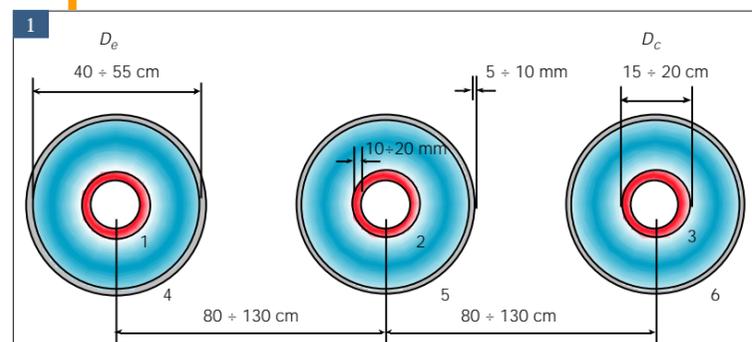


Figura 1 Dimensioni indicative per tipica disposizione a condotti affiancati e tensioni nominali 220 kV e 380 kV.

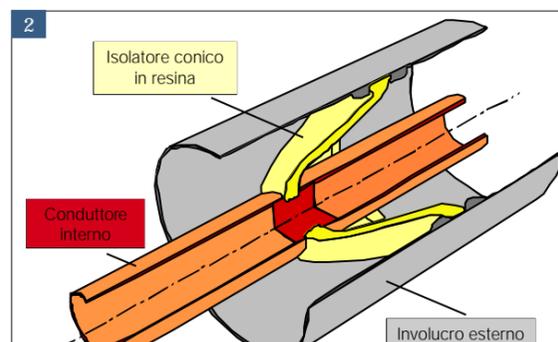


Figura 2 Struttura di un condotto unipolare.

ri perdite e la minore superficie del terreno da vincolare confrontandolo con le linee aeree [1,3] e l'assenza di compensazione reattiva nei riguardi delle linee in cavo.

3 Prestazioni

Una prima valutazione orientativa delle prestazioni di tali elettrodotti può essere facilmente condotta adottando l'ipotesi di linea ideale formata da tre strutture unipolari prive di resistenza e disposte a "trifoglio", così che (come risulta confermato dall'analisi del sistema multiconduttore) ci si può ricondurre nei casi di carico equilibrato allo studio classico di una linea simmetrica trifase avente, per lunghezza unitaria, la capacità di esercizio c e l'induttanza di esercizio λ

$$c = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D_e}{D_c}} \quad l = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_e}{D_c} \quad \text{Se si assume il rapporto ottimale } D_e/D_c = 2,72 \text{ si ottengono i valori (indipendenti dalle dimensioni assolute)}$$

$$c = 55,6 \frac{nF}{km} \quad l = 0,2 \frac{mH}{km} \quad Z_0 = \sqrt{\frac{l}{c}} = 60 \Omega \quad \text{in cui } Z_0 \text{ è l'impedenza caratteristica. Pertanto in corrispondenza delle tensioni nominali normali le potenze naturali di siffatte linee ideali risultano}$$

$$\begin{aligned} V = 66 \text{ [kV]} &\rightarrow S = 73 \text{ [MW]} & V = 132 \text{ [kV]} &\rightarrow S = 290 \text{ [MW]} \\ V = 220 \text{ [kV]} &\rightarrow S = 800 \text{ [MW]} & V = 380 \text{ [kV]} &\rightarrow S = 2400 \text{ [MW]} \end{aligned}$$

Tali elevati valori, che di fatto risultano compatibili anche termicamente nelle tipiche realizzazioni costruttive, indicano una via alternativa per aumentare le potenze trasmissibili senza elevare i livelli di tensione e possono suggerire in alcuni casi di rivalutare livelli di tensione come 66 kV, oggi pressoché abbandonati. La limitata capacità di esercizio (sia pure ≈ 4 volte superiore a quella di una linea aerea ma 4 ÷ 7 volte inferiore a quella di una linea in cavo, nei casi di 380 kV) non richiede compensazione reattiva anche con grandi lunghezze. Come si vedrà nelle tabella 2 e tabella 3 essa ha in genere un benefico effetto rifsante sulla estremità di partenza anche con carichi relativamente ridotti.

4 Correnti negli involucri: un primo approccio matriciale

I tre involucri di un EBLI devono essere (Figura 3) corto circuitati fra loro e ben connessi a terra alle estremità di ciascuna tratta (secondo l'analoga prassi adottata per gli schermi metallici delle linee in cavo): ciò dà luogo in genere a ridotte tensioni di contatto e consente inoltre negli involucri (trascurando l'effetto delle correnti parassite) la circolazione di correnti di reazione che tendono ad annullare i campi magnetici prodotti dalle sole correnti di fase. Avendo definito i vettori colonna (3 × 1) i_c, i_e, v_e, v_e^* con le

$$i_c \triangleq \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix}; \quad i_e \triangleq \begin{bmatrix} i_4 \\ i_5 \\ i_6 \end{bmatrix}; \quad v_e \triangleq \begin{bmatrix} v_{e4} \\ v_{e5} \\ v_{e6} \end{bmatrix}; \quad v_e^* \triangleq \begin{bmatrix} v_{e4}^* \\ v_{e5}^* \\ v_{e6}^* \end{bmatrix};$$

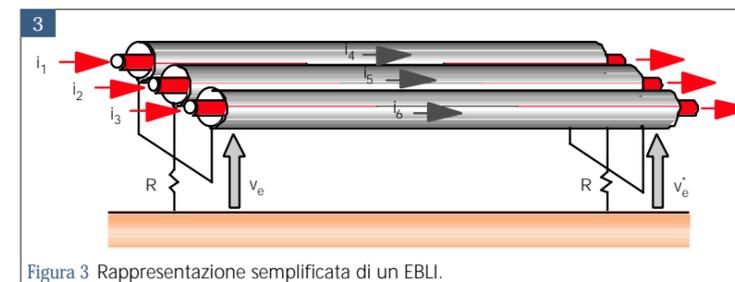


Figura 3 Rappresentazione semplificata di un EBLI.

di sequenza diretta imposta nei conduttori di fase.

È da notare che con configurazione simmetrica a "trifoglio" le correnti negli involucri risulterebbero rigorosamente equilibrate e comporterebbero $v_e = v_e^* = 0$, anche con $R \neq 0$. In ogni caso (vedi § 7) si riscontra una fortissima riduzione dei campi magnetici anche in punti molto prossimi all'elettrodotto, a fronte di modeste perdite aggiuntive suscitate negli involucri.

e assumendo per la messa a terra $R \equiv 0$ così che $v_e = 0$, se le resistenze r_e degli involucri fossero nulle risulterebbe:

$$i_e = i_c$$

con conseguente annullamento del campo magnetico in ogni punto esterno al sistema di conduttori. Per un EBLI 220 kV con tipiche resistenze di involucro, in terreni con differenti resistività ρ_r si ottengono le correnti di involucro, riportate in tabella 1, conseguenti ad una terna di correnti unitarie

	$\rho_r = 100 \Omega \cdot m$	$\rho_r = 1000 \Omega \cdot m$
i_c	i_e	i_e
$1 \angle 0^\circ$	$0,989 \angle -178,5^\circ$	$0,990 \angle -178,5^\circ$
$1 \angle -120^\circ$	$0,999 \angle 62,5^\circ$	$0,999 \angle 62,5^\circ$
$1 \angle 120^\circ$	$1,010 \angle -58,4^\circ$	$1,010 \angle -58,5^\circ$

5 Analisi multiconduttore: principi

Gli elettrodotti blindati, come del resto anche le linee aeree con funi di guardia e le linee in cavo con schermi metallici, costituiscono tipici sistemi multiconduttore a parametri distribuiti e, generalmente, a struttura non simmetrica: le procedure di analisi e di sintesi di tali elementi di rete, descritte per vari casi in [5, 6] e con particolare riferimento agli EBLI in [7], si fondano sulla modellizzazione di "celle elementari" (di lunghezza modesta, ad es. 250 m), con parametri desumibili dalla teoria di Carson, ampiamente trattata in [8] e ottimamente sintetizzata in [9]: la loro composizione in cascata (tramite snella procedura di calcolo) permette di ottenere la matrice risultante $Y(2n \times 2n)$ che sintetizza la linea in doppio n -polo, dove n è il numero dei conduttori, incluse le tre fasi. Una volta costruite le debite matrici alle ammettenze degli altri fondamentali elementi di rete (generatori, trasformatori, carichi) considerate anche le messe a terra, si può procedere (in base alla topologia delle interconnessioni) a formare la matrice alle ammettenze dell'intero sistema, che può essere utilizzata per uno studio circostanziato dei flussi di potenza in sistema multiconduttore a struttura non simmetrica.

6 Esempi di calcolo: regime a basse perdite e condizioni di guasto

Lo studio multiconduttore di due tipici EBLI (tensioni nominali di 380 kV e 220 kV), in differenti condizioni di carico applicato ma con tensione all'arrivo V_2 comunque pari alla nominale, fornisce i risultati di tabelle 2 e 3.

Dalle tabelle 2 e 3 si possono desumere le seguenti osservazioni:

Arrivo linea		Partenza linea			
S_2 [MW] + j [Mvar]	cos ϕ	S_1 [MW] + j [Mvar]	V_1 [kV]	ΔP [%]	ΔV [%]
2400 + j 0	1	2437 - j 143	384	1,5	1,0
2400 + j 487	0,98	2437 + j 319	397	1,5	4,6
2100 + j 690	0,95	2129 + j 424	401	1,4	5,5
1400 + j 460	0,95	1413 + j 15	390	0,9	2,7
700 + j 230	0,95	703 - j 313	381	0,5	0,1
500 + j 164	0,95	502 - j 392	378	0,4	-0,6
200 + j 66	0,95	201 - j 497	374	0,4	-1,6
0 + j 0	-	0,7 - j 560	372	-	-2,2

Arrivo linea		Partenza linea			
S_2 [MW] + j [Mvar]	cos ϕ	S_1 [MW] + j [Mvar]	V_1 [kV]	ΔP [%]	ΔV [%]
800 + j 0	1	816 - j 22	224	2,0	1,8
800 + j 150	0,98	816 + j 120	232	2,0	5,4
600 + j 197	0,95	609 + j 99	231	1,5	5,0
400 + j 131	0,95	404 + j 15	225	1,0	2,3
200 + j 66	0,95	201 - j 107	220	0,5	-0,04
100 + j 33	0,95	100 - j 145	218	0,4	-1,1
0 + j 0	-	0,3 - j 177	215	-	-2,2

Tecnica di messa a terra	Tensione totale V_t	Tensione di contatto
concentrata: ogni 1 km	20 kV	4 kV ÷ 20 kV
concentrata: ogni 250 m	15 kV	3 kV ÷ 15 kV
distribuita ($\rho_t = 1000 \Omega \cdot m$)	15 kV	0 dentro lo schermo 1,5 kV fuori schermo
distribuita ($\rho_t = 100 \Omega \cdot m$)	5 kV	0 dentro lo schermo 500 kV fuori schermo

- anche con elevate potenze trasmesse le cadute di tensione sono accettabili e le perdite attive sono molto basse (aspetto rilevante nelle valutazioni di costo globale);
- in un ampio campo di carico la capacità d'esercizio dà un vantaggioso effetto rifasante alla partenza;
- le potenze reattive capacitive "emergono" in modo rilevante solo con carichi molto bassi.

L'analisi accurata del sistema multiconduttore conferma il semplice esempio del § 4 riguardante il fenomeno di opposizione delle correnti. Gli EBLI hanno un'influenza positiva anche sulla qualità del servizio: infatti la dissimmetria in tensione dovuta ad un EBLI a condotti affiancati (Figura 1) è $< 0,01\%$, del tutto trascurabile se confrontata con quella di una linea aerea non trasposta ($\sim 1\% \div 3\%$). Un guasto possibile tipico per un EBLI è quello tra fase e involucro; in questa condizione le tensioni degli involucri dipendono fortemente dalla tecnica di messa a terra. Si sono confrontate due differenti configurazioni: la prima dove usuali messe a terra ($R = 10 \Omega$ sono concentrate ad intervalli regolari lungo la linea (Figura 4), e la seconda dove uno schermo addizionale metallico (ad es. l'armatura di galleria) realizza una messa a terra distribuita e racchiude l'intera linea come in figura 5. Una tale soluzione, che configura un sistema a sette conduttori, ancorché costosa, è degna di considerazione in primo approccio per valutarne i benefici sulle tensioni di contatto.

Nella configurazione di figura 5 le tensioni di contatto all'interno dello schermo addizionale sono annullate: ciò consente una completa sicurezza per gli operatori in caso di ispezione. La tabella 4 riporta i valori delle tensioni di contatto durante guasto monofase di 20 kA in un EBLI a 220 kV.

7 Elevata compatibilità ambientale

ambiente

Per quanto attiene l'impatto ambientale, gli EBLI hanno i seguenti vantaggi rispetto alle linee aeree:

- insensibilità a condizioni ambientali avverse e inquinanti;

- impatto visivo nullo (se sotterranei);
- annullamento del campo elettrico;
- ottimo effetto schermante per il campo magnetico.

Per quest'ultimo punto appaiono molto significativi i risultati di un'analisi approfondita di confronto tra EBLI e linea aerea: la figura 6 mostra i livelli di campo magnetico prodotti da un EBLI 220 kV con correnti di fase di 2200 A (840 MVA); la figura 7 e la figura 8 mostrano i livelli di campo magnetico prodotti da una tipica linea aerea a 380 kV che trasmette pressoché la stessa potenza con 1300 A.

Si noti come, nell'esempio riportato, il valore $0,2 \mu T$, limite assai restrittivo peraltro attualmente previsto dalla legislazione di alcune Regioni italiane, viene raggiunto per la linea aerea a circa 130 m dal suo asse (Figura 8), mentre per l'elettrodotto blindato tale distanza si riduce a meno di 8 m (Figura 6).

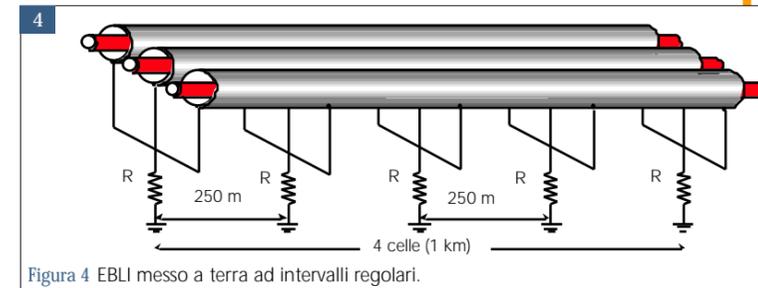


Figura 4 EBLI messo a terra ad intervalli regolari.

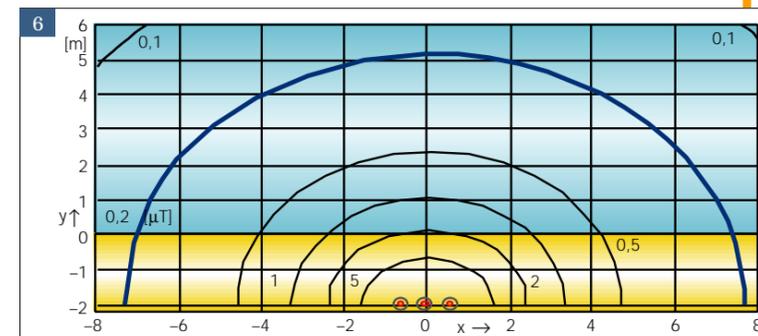


Figura 6 Campo magnetico per un EBLI (220kV, 840 MVA).

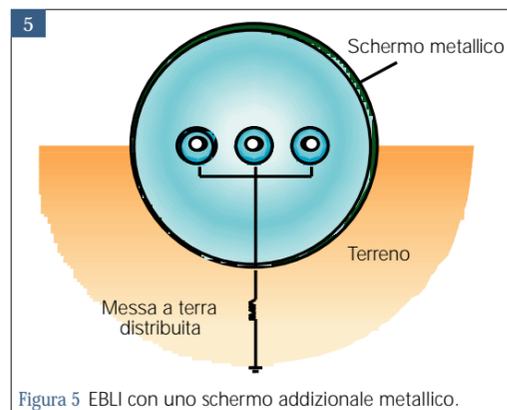


Figura 5 EBLI con uno schermo addizionale metallico.

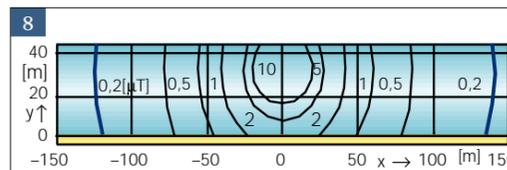


Figura 8 Campo magnetico di linea aerea (380 kV, 840 MVA).

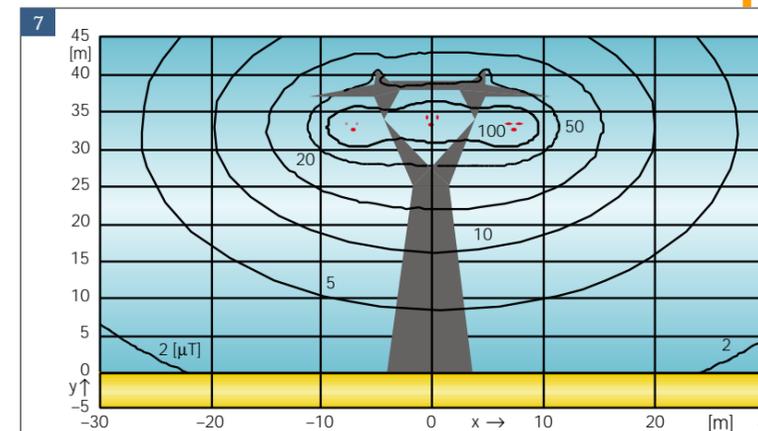


Figura 7 Campo magnetico di linea aerea (380 kV, 840 MVA).

8 Conclusioni

Le prime realizzazioni già attuate dall'industria sono molto suggestive e fanno prevedere una possibile diffusione degli elettrodotti blindati con conseguente riduzione dei loro costi di produzione, che comunque trovano una compensazione nel modesto impatto ambientale, nell'esiguo inquinamento magnetico e nelle ridotte perdite di energia, pur con elevate potenze trasmissibili. Le metodologie di calcolo presentate mettono bene in luce questi aspetti significativi.

Roberto Benato, Lorenzo Fellin, Antonio Paolucci
soci AEI - Dipartimento di Ingegneria Elettrica
- Università di Padova

bibliografia

- [1] Guillen M, Bertrand M: *Optimized gas-insulated transmission line*. Jicable, Versailles (France), 1999.
- [2] Nojima T, Shimizu M, Araki T, Hata H, Yamachi T: *Installation of 275 kV - 3,3 km Gas Insulated Transmission Line for underground large capacity transmission in Japan*. CIGRE SC21/23/33-01, 1998.
- [3] Hillers T, Koch H: *Gas Insulated Transmission Lines for High Power Transmission over Long Distances*. Proceedings of EMDP 98, 3.-5. March 1998, Singapore, p. 613-617.
- [4] IEC 61640: *HV gas-insulated transmission lines for rated voltages of 72.5 kV and above*. Geneva, 1998.
- [5] CCITT: *Directives concerning the protection of telecommunication lines against harmful effects from electric power and electrified railway lines*. Geneva, 1989.
- [6] Hochrainer A: *Symmetrische Komponenten in Drehstromsystemen*. (Kap. 15), Springer, Berlin, 1957.
- [7] Benato R, Caldori R, Paolucci A: *Procedura automatica per il calcolo delle interferenze elettromagnetiche fra sistemi elettrici di diversa natura*. Rendiconti 97^a Riunione Annuale AEI, Vol. 3, Baveno 1997, p. 19-26.
- [8] Benato R, Caldori R, Paolucci A: *Algoritmo matriciale per l'analisi di linea ferroviaria ad alta velocità e rispettiva rete di alimentazione*. L'Energia Elettrica, Vol. 75, n. 5, Settembre-Ottobre 1998, p. 304-311.
- [9] Benato R, Fellin L, Marzenta D, Paolucci A: *Gas-insulated transmission lines: excellent performance and low environmental impact*. International Symposium and Exhibition on Electric Power Engineering at the Beginning of the Third Millennium, Maggio 12-18 2000, Napoli-Capri, Vol. 1, p. 385-405.