

Brochure Cigré # 639: cavi versus elettrodotti blindati

Roberto Benato *Segretario del WG B1/B3-27*
Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Padova

*Fattori decisionali sugli investimenti
per la trasmissione dell'energia elettrica
in corrente alternata.*

Premessa

La brochure aveva il compito precipuo di fornire degli elementi per guidare la scelta tra un cavo e un elettrodotto blindato successivamente alla decisione di non costruire una linea aerea. I *terms of reference*, che sono le linee d'azione del WG che non si possono né eludere né valicare, asserivano che la finalità della ricerca non era quella di presentare i costi assoluti delle due tecnologie ma solo i costi relativi. In quest'ambito la brochure tecnica ha affrontato i seguenti argomenti:

- parametri economici nelle installazioni di cavi ed elettrodotti blindati e struttura dei costi relativi;
- confronto di tipiche installazioni interrato, in tunnel e in infrastrutture condivise;
- impatto ambientale in termini di sicurezza e campi magnetici esterni generati dagli elettrodotti in cavo e blindati;
- fattori di costo al fine di rendere le soluzioni comparabili e in modo particolare configurazioni del sistema, fasce di rispetto, aspetti di sicurezza, comportamento al fuoco, perdite elettriche nella trasmissione, necessità della compensazione reattiva derivata, invecchiamento delle apparecchiature, esperienza di esercizio, tenuta al gas in pressione (per GIL), riciclo dei materiali a fine vita, costi d'esercizio e manutenzione (O&M).

Inoltre, la brochure ha limitato il suo studio a:

- la trasmissione dell'energia elettrica in corrente alternata (la tematica HVDC era quindi esclusa);

- tensioni nominali comprese tra 52 kV e 800 kV;
- GIL e cavi ad isolamento estruso (i cavi superconduttori erano quindi esclusi).

La **tabella 1** mostra la composizione del gruppo di lavoro.

Descrizione di un GIL

Inizialmente, i GIL venivano chiamati *Compressed Gas Insulated Cables* con acronimo CGIC. Erano quindi considerati "cavi speciali" appartenenti alla famiglia dei cavi isolati. Il GIL è una linea di trasmissione dell'energia elettrica. Anche se si potrebbe pensare al loro utilizzo in media e bassa tensione il loro costo d'investimento ne giustifica e ne confina l'uso solo sull'alta e altissima tensione. È noto che i condotti sbarre a fasi blindate, solitamente usati nelle centrali per collegare in media tensione il generatore con il trasformatore elevatore, abbiano una struttura simile ai GIL ma essi sono isolati in aria a pressione atmosferica con diametri maggiori (l'aria, a parità di pressione, ha una tenuta dielettrica che è circa un terzo di quella dell'esafioruro di zolfo). Vi sono due differenti tipi di GIL: l'unipolare (**figura 1 A**) e il tripolare (**figura 1 B**). Si ricordi che nella realizzazione tripolare con le tre fasi contenute in un unico involucro non si evitano guasti di tipo bifase e trifase accompagnati da elevati sforzi elettrodinamici: per siffatte motivazioni essa è stata abbandonata. Il GIL quindi è composto di tre involucri tubolari in alluminio o lega di alluminio all'interno dei quali giacciono i conduttori di fase anch'essi in alluminio e mantenuti centralmente da isolatori in

Tabella 1 Composizione del Cigré WG B1/B3-27: "Factors for investment decision GIL vs. CABLE for ac transmission"

| | |
|--------------------------------|-------------|
| "CONVENOR" (PRESIDENTE) | |
| Hermann Koch | Germania |
| SEGRETARIO | |
| Roberto Benato | Italia |
| MEMBRI | |
| Arnaud Ficheux | Francia |
| Jonathan Flood | USA |
| Kok Kei Leung | Cina, HKSAR |
| Pierre Mirebeau | Francia |
| Dave Royle | Regno Unito |
| Ernesto Zaccone | Italia |
| MEMBRI "CORRESPONDING" | |
| Pierre Argaut | Francia |
| Claudio Di Mario | Italia |
| Thomas Diggelmann | Svizzera |
| François Renaud | Svizzera |
| Dieter Fuchsle | Svizzera |
| Josef Kindersberger | Germania |
| Manfred Köhler | Austria |
| Ruan Quanrong | Cina |
| Stefan Schedl | Germania |
| Markku Hyvärinen | Finlandia |

resina epossidica (figura 2). Per quanto attiene all'evoluzione degli elettrodotti blindati si faccia riferimento alla tabella 2.

Descrizione di un cavo isolato per la corrente alternata

I cavi in alta tensione trovano applicazione soprattutto in aree densamente urbanizzate, nelle connessioni sottomarine e, in generale, laddove la costruzione di una linea aerea risulta difficile o impossibile. Essi hanno un ridotto impatto sul territorio e un'occupazione di suolo molto limitata; i cavi sono installati (fuori dalla vista) interrati, in tunnel o sott'acqua. I terminali sono l'unica evidenza della loro presenza.

La figura 3 mostra i componenti di base di un cavo per la trasmissione dell'energia elettrica applicabili, in linea di principio, alle moderne tecnologie con isolamento estruso. Senza dare dettagli sui vari componenti, si ricorda che il conduttore di fase, atto a trasmettere le correnti nominali e quelle di guasto, può essere in rame o alluminio. Il progetto del conduttore di fase che può essere rotondo cordato, segmentale e la scelta della sezione sono fondamentali per la riduzione delle perdite Joule e per il mantenimento nello stesso della temperatura massima di esercizio che nel caso degli isolamenti estrusi vale 90 °C. Per sezioni uguali o maggiori di 1200 mm² per il rame e 1600 mm² per l'alluminio si usano conduttori di tipo Milliken: la massima sezione raggiunta oggi è 2500 mm². Per la corrente alternata vengono usati differenti tipi di cavi: quelli isolati in carta a olio fluido (usati sin dal 1924, per almeno 70 anni, per importanti colle-

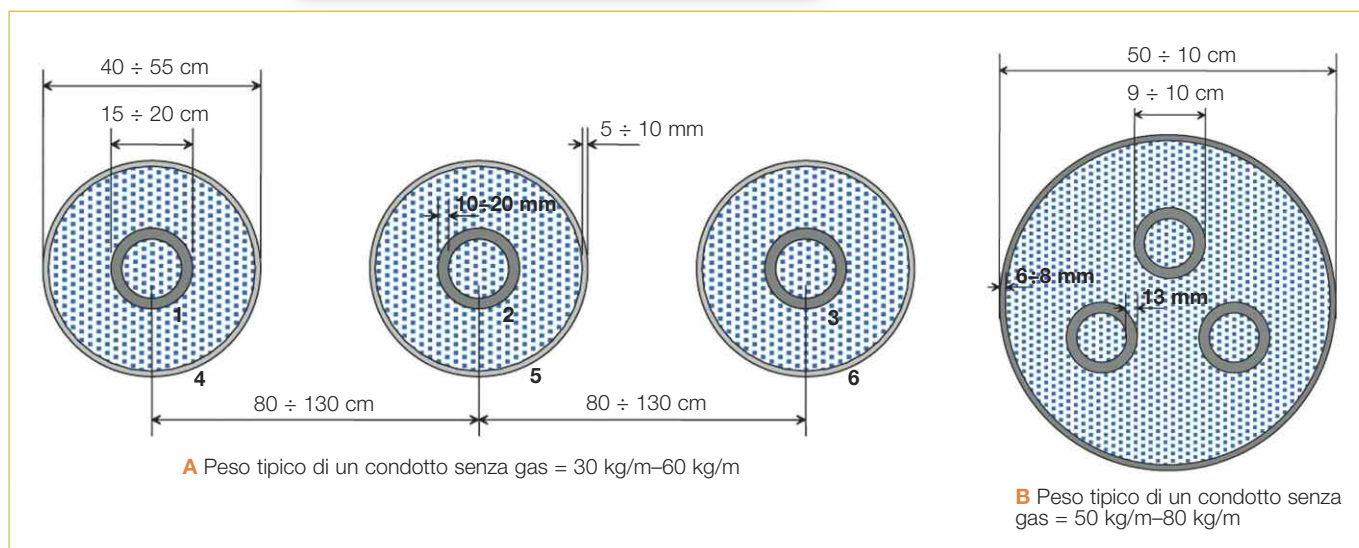


Figura 1 A GIL in configurazione unipolare; B GIL in configurazione tripolare.



Figura 2 Struttura interna di un condotto di un GIL.

Tabella 2 Storico delle installazioni di GIL

| ANNO | LUNGHEZZA DELLA LINEA [m] | TENSIONE NOMINALE [kV] | INSTALLAZIONE |
|------|---------------------------|------------------------|---|
| 1971 | 122 | 345 | Prima installazione AT di un GIL isolato con puro SF ₆ (di prima generazione ¹): Eastlike, Ohio |
| 1972 | 138 | 245 | Prima installazione AT di GIL direttamente interrato isolato con puro SF ₆ (di prima generazione): Stazione di Hudson nel New Jersey, 1600 A |
| 1975 | 192 | 550 | Prima installazione AAT di GIL isolato con puro SF ₆ (di prima generazione): Ellensburg, Washington, 3000 A |
| 1976 | 670 | 400 | Prima installazione europea AAT di GIL isolato con puro SF ₆ (di prima generazione) alla centrale di pompaggio in Schluchsee, Germania |
| 1981 | 57 | 800 | Prima installazione AAT di un GIL a 800 kV con puro SF ₆ (di prima generazione): Guri Dam, Venezuela, 1200 A, BIL = 1925 kV (Lunghezza totale dei condotti 855 m, 5 terne) |
| 1997 | 709 | 380 | Record di lunghezza dei condotti 17,010 km di un GIL isolato con puro SF ₆ (di prima generazione): PP9, Arabia Saudita con tensione 380 kV (8 terne) |
| 1998 | 3300 | 275 | Record di lunghezza del circuito 3,3 km di un GIL isolato con puro SF ₆ (di prima generazione): Shinmeika-Tokai, Giappone (2 terne) |
| 2001 | 420 | 220 | Prima installazione AT di un GIL isolato con una miscela di N ₂ e SF ₆ (di seconda generazione): Ginevra, Svizzera |
| 2004 | 540 | 400 | Prima installazione AAT di un GIL di seconda generazione: Hams Hall in Regno Unito |
| 2009 | 488 | 800 | Prima installazione GIL di prima generazione a 800 kV con portata 4 000 A e con record di BIL pari a 2 100 kV: Laxiwa Dam, Cina (Lunghezza totale di condotti 2 928 m, 2 terne) |
| 2012 | 880 | 400 | Prima installazione AAT mondiale di GIL di seconda generazione direttamente interrato: stazione di Kelsterbach vicino a Francoforte, Germania (2 terne) |
| 2013 | 1000 | 420 | Prima installazione AAT di un GIL di seconda generazione con raggio di curvatura pari a 400 m sotto una fabbrica di birra bavarese (4 terne con giunti tutti saldati, in tunnel) |

¹ Prima e seconda generazione di GIL si riferiscono alla composizione della miscela isolante: nella prima generazione i GIL avevano il 100% di esafluoruro di zolfo mentre nella seconda generazione la miscela isolante è costituita dal 20 % di esafluoruro di zolfo e il restante 80 % di azoto (N.d.A.).

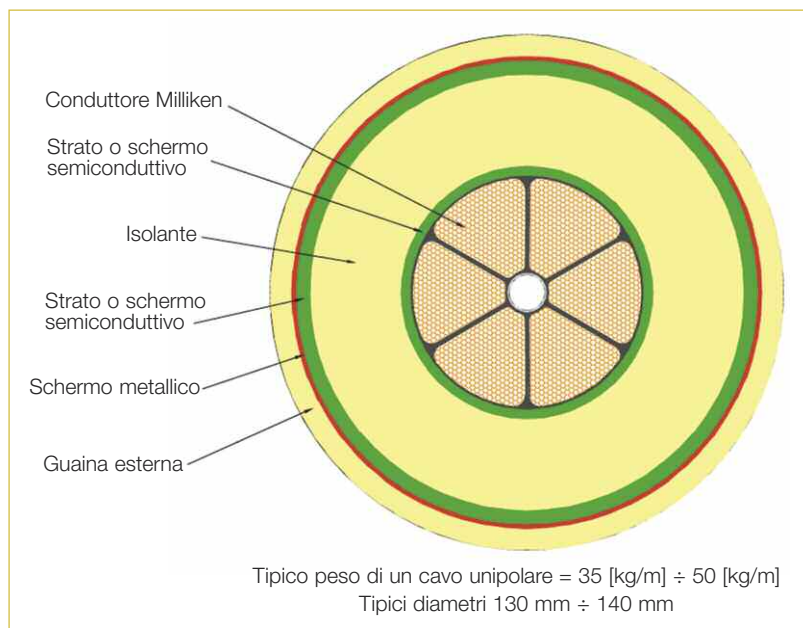


Figura 3 Cavo unipolare 420 kV ÷ 550 kV con isolamento estruso.



Figura 4 Sinistra: cavo Milliken a sei settori isolato in XLPE; Destra: cavo in carta impregnata con olio fluido.

gamenti sottomarini e in aree urbane) e quelli isolati con polietilene reticolato (XLPE) che sono e saranno quelli maggiormente usati nel futuro. La **figura 4** mostra due spezzoni dei suddetti cavi.

Per quanto attiene all'evoluzione degli elettrodotti in cavo si faccia riferimento alla **tabella 3**.

La brochure mostra gli accessori e le tipologie d'installazione (**figura 5** per un'installazione in tunnel e **figura 6** per un'installazione direttamente interrata).

Informazioni di base

Portata di corrente di cavi e elettrodotti blindati

Il calcolo della portata di un GIL deve essere fatto per ogni installazione: a differenza dei ca-

vi, non esiste uno standard IEC per il calcolo anche se la IEC 62271-204 [3] definisce le temperature massime ammissibili in esercizio: per le installazioni direttamente interrate la massima temperatura degli involucri non dovrebbe superare 50-60 °C oltre i quali potrebbe intervenire l'essiccazione del terreno; per le installazioni in tunnel, la massima temperatura degli involucri non dovrebbe superare 80 °C a differenza delle parti che vengono normalmente toccate durante l'esercizio che non dovrebbero superare i 70 °C. Il calcolo dell'ampacity di un GIL direttamente interrato è stato condotto coerentemente con [1, 3, 32, 33]. Il vincolo posto nel calcolo è che lo strato anticorrosivo (in intimo contatto con il terreno) non superi i 60 °C. Nella **figura 7** è mostrato un Gil di seconda generazione avente un'ampacity pari a 2390 A.

Per aumentarne l'ampacity lasciando inalterate caratteristiche termiche del terreno e temperatura è possibile:

- aumentare le sezioni di fasi e involucri (per esempio con $S_{\text{fase}} = 13270 \text{ mm}^2$ e $S_{\text{involucro}} = 20106 \text{ mm}^2$ si avrebbe $I_a = 3524 \text{ A}$);
- aumentare la spaziatura tra i condotti (per esempio con spaziatura pari a 2000 mm si avrebbe un'ampacity di 2737 A).

Entrambe queste opzioni implicano costi di investimento più elevati.

Per quanto riguarda i cavi, il calcolo è normato nella serie di standard IEC 60287 [34].

Un valore orientativo di portata di corrente per un cavo 2500 mm² in un'installazione di tipo interrato standard è 1800 A. I parametri per l'effetto pelle e prossimità assunti nel calcolo della suddetta portata sono $k_s = 0.435$; $k_p = 0.37$ che corrispondono a un cavo di tipo Milliken con fili di rame ossidati cordati unidirezionalmente.

Vale la pena ricordare che i due valori riportati sono indicati nella IEC 60287-1-1 che però afferma che essi valgono per conduttori a quattro segmenti e fino a 1600 mm². Una buona memoria pubblicata nella conferenza Jicable [35] ha presentato valori di misura che confermano che, in alcuni casi, i valori k_s e k_p presentati nella IEC sono ottimistici. I valori k_s e k_p proposti dalla memoria [35] sono stati confermati dalla Multiconductor Cell Analysis (MCA- Analisi multiconduttore a cella) nell'articolo [36] che consente anche di calcolare il rapporto r_{ac}/r_{dc} per $f = 50$ o 60 Hz, Milliken in rame o alluminio.

Al fine di incrementare la portata dei cavi, la brochure prende in esame le seguenti soluzioni:

1. aumentare la spaziatura fino a 0.7 m (ciò au-

Tabella 3 Storico delle installazioni di cavi isolati

| ANNO | TENSIONE CONCATENATA kV | TIPO DI CAVO |
|------|----------------------------|---|
| 1890 | 10 | Primo cavo in alternata con carta impregnata - Ferranti |
| 1913 | 33 | Cavo in carta impregnata |
| 1924 | 132 | Carta impregnata olio fluido |
| 1936 | 220 | Carta impregnata olio fluido |
| 1947 | 20 | Polietilene estruso termoplastico |
| 1952 | 400 | Carta impregnata olio fluido |
| 1960 | 20 | Polietilene reticolato - XLPE |
| 1966 | 138 | Polietilene reticolato - XLPE |
| 1974 | 500 | Carta impregnata olio fluido |
| 1979 | 275 | Polietilene reticolato - XLPE |
| 1980 | 1100 | Carta impregnata olio fluido (sperimentale) |
| 1986 | 420 | Polietilene reticolato - XLPE |
| 1988 | 550 | Polietilene reticolato - XLPE |
| 1993 | 800 | PPLP (sperimentale) |
| 2004 | 420 | Primo cavo in polietilene reticolato (XLPE) con sezione $S = 2500 \text{ mm}^2$ |
| 2006 | 420 | Primo cavo AAT senza piombo |



Figura 5 Cavi AAT installati in un tunnel profondo 20 m sotto Berlino.

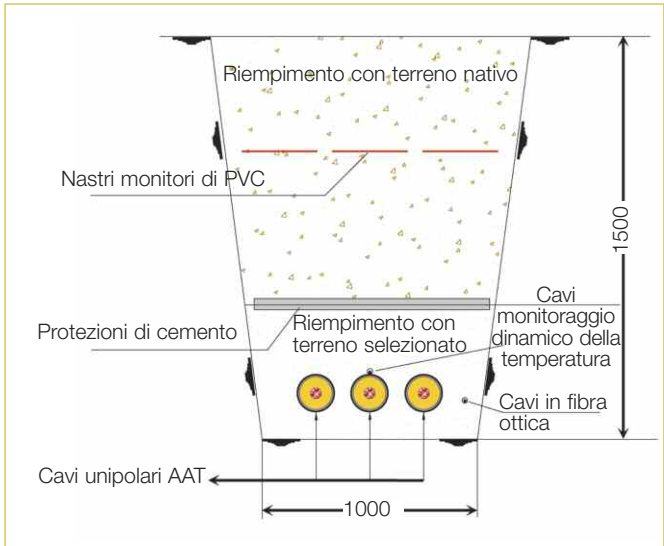


Figura 6 Tipica installazione AAT direttamente interrata.

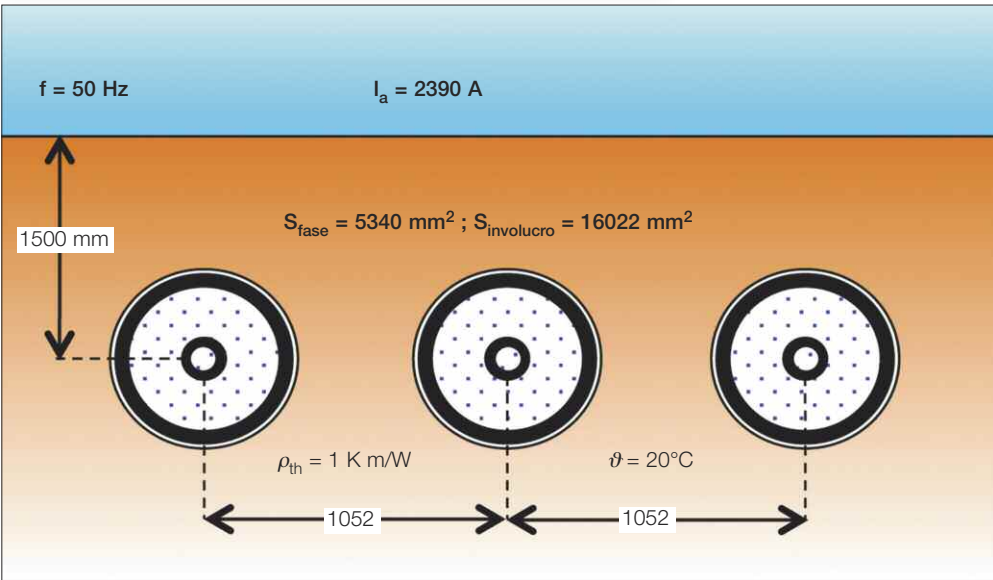


Figura 7 GIL in AAT direttamente interrato con uno strato anticorrosivo di polietilene.

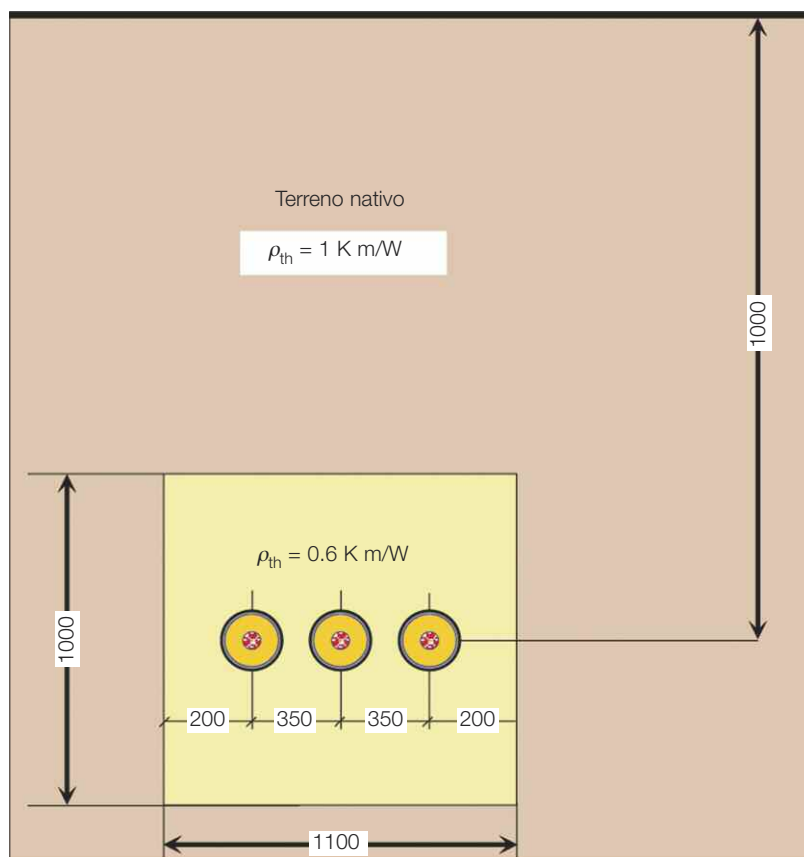


Figura 8 Terna di cavi unipolari in alta tensione installati in una parte di terreno con bassa resistività termica.

Tabella 4 Portate di corrente per cinque soluzioni speciali

| SOLUZIONE # | TIPO D'INSTALLAZIONE | AMPACITY [A] |
|-------------|---|--------------|
| 1 | S = 2500 mm ² ; k _s = 0.435; k _p = 0.37; spaziatura = 0.7 m | 2026 |
| 2 | S = 2500 mm ² ; k _s = 0.435; k _p = 0.37; spaziatura = 0.35 m come nella figura 8 | 1930 |
| 3 | S = 3250 mm ² ; k _s = 0.435; k _p = 0.37; spaziatura = 0.35 m | 1970 |
| 4 | S = 2500 mm ² ; k _s = 0.25; k _p = 0.15; spaziatura = 0.35 m | 1889 |
| 5 | S = 3250 mm ² ; k _s = 0.25; k _p = 0.15; spaziatura = 0.70 m; riempimento con ρ _{th} = 0.6 K · m/W | 2484 |

menta il costo d'investimento e i livelli di campo magnetico);

- utilizzare materiale di riempimento a bassa resistività termica come mostrato nella **figura 8** (ciò aumenta il costo d'investimento);

- utilizzare una sezione uguale a 3 250 mm² (ciò aumenta il costo d'investimento e comunque tale sezione non è mai stata installata);
- utilizzare cavi di tipo Milliken a fili isolati (ciò aumenta il costo d'investimento);
- utilizzare tutte le soluzioni menzionate i.e. cavo Milliken a fili isolati con sezione 3 250 mm² installato con interassi maggiorati in una parte di terreno con resistività bassa (i.e. 0.6 K · m/W).

Le portate conseguibili sono mostrate nella **tabella 4**.

Raccolta delle più importanti installazioni in cavo e in GIL

Questo paragrafo offre un'ampia visuale sulle più importanti installazioni in cavo e in blindato che per la necessaria brevità vengono qui presentate con riferimento a due sole installazioni tedesche.

Il GIL direttamente interrato di Kelsterbach

L'estensione dell'aeroporto di Francoforte richiedeva di interrare una linea elettrica aerea in doppia terna a 220 kV e di passare al livello di tensione di 420 kV. La **figura 9** mostra le suddette linee aeree e il corridoio in cui sono stati interrati gli elettrodotti blindati in doppia terna. Si scorge la tenda di assemblaggio (area mobile) che è posta al di sopra dello scavo. Le operazioni di assemblaggio e saldatura (**figura 10**) avvengono all'interno dell'area mobile (figura 10) e poi vengono movimentati all'interno della trincea. La **tabella 5** riporta i dati tecnici dell'installazione. La **figura 11** mostra infine il GIL in doppia terna prima dell'interramento.

Cavi tripolari e unipolari per il collegamento di centrali eoliche fuori costa: BorWin2 (Germania)

La necessità di trasmettere grossi quantitativi di potenza da grosse centrali eoliche ubicate molto lontano dalla costa collegandole alla rete di trasmissione ha portato a un grande sviluppo di progetti di cavi sottomarini. A seconda dell'estensione del parco eolico, vengono impiegati cavi sottomarini in media tensione tra i singoli generatori (detti *inter-array*), cavi HVAC per connettere i blocchi di generatori (detti *cluster*) e cavi HVDC marini/terrestri per connettere il sistema con la stazione elettrica ubicata



Figura 9 Vista delle linee aeree che interferivano con l'aeroporto di Francoforte e area mobile per l'assemblaggio del GIL (Germania 2010).



Figura 10 Area mobile e a dx operazioni di saldatura.

| Tabella 5 Dati del GIL direttamente interrato a Kelsterbach, Germania, 2010 | |
|--|-----------------------|
| Tensione nominale U_r | 420 kV |
| Corrente nominale I_r | 3000 A |
| Tensione nominale di tenuta alle sovratensioni di origine esterna U_{BIL} | 1425 kV |
| Corrente nominale di breve durata I_s | 63 kA |
| Lunghezza del circuito | 2 terne di 860 m |
| Gas isolante | 80% N_2 /20% SF_6 |



Figura 11 Primo GIL direttamente interrato al mondo di seconda generazione (prima di essere interrato).

in terraferma. Una tipica architettura distributiva/trasmittiva di un parco eolico è mostrato nella **figura 12**.

- La struttura tipica di cavi in media tensione è:
- ☐ tipo: cavi tripolari ad isolamento estruso;
 - ☐ tensioni nominali: 12 ÷ 72.5 kV;

- ☐ sezioni tipiche: 150 ÷ 800 mm²;
 - ☐ potenza trasmessa: fino a 50 MW.
- Per i cavi HVAC tra i gruppi di generatori (**figura 13**):
- ☐ tipo: cavi tripolari ad isolamento estruso;
 - ☐ tensioni nominali: 115 ÷ 245 kV;

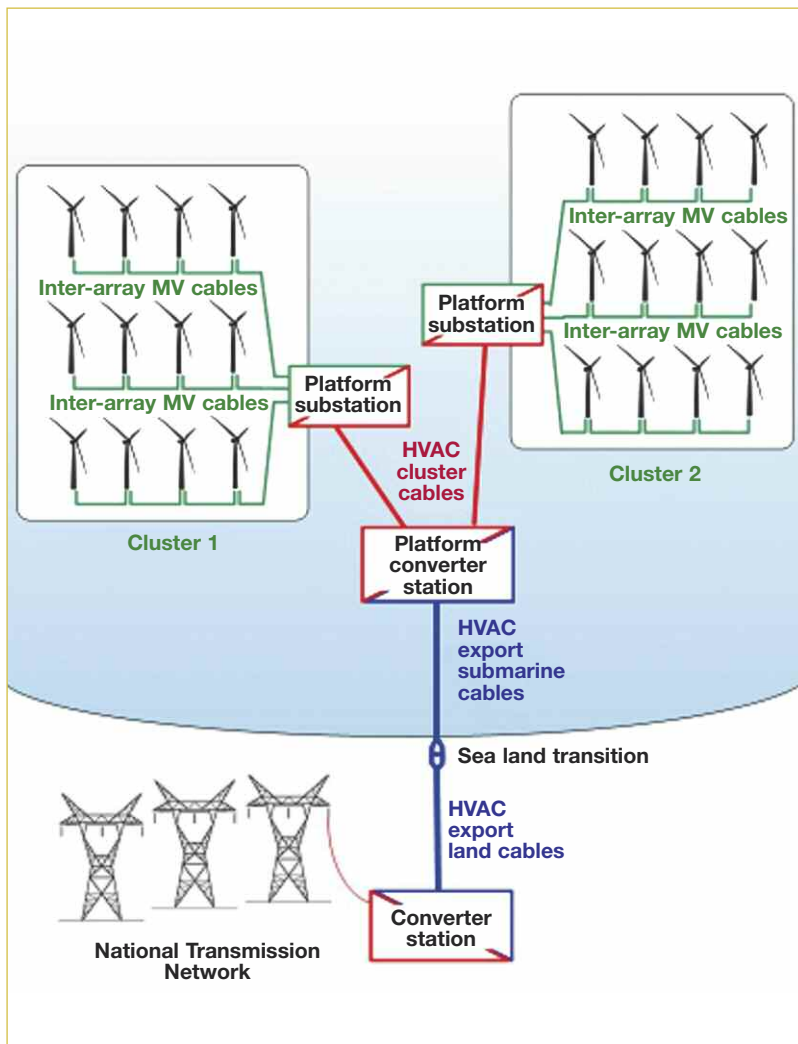


Figura 12 Schema distributivo/trasmissivo di un parco eolico.

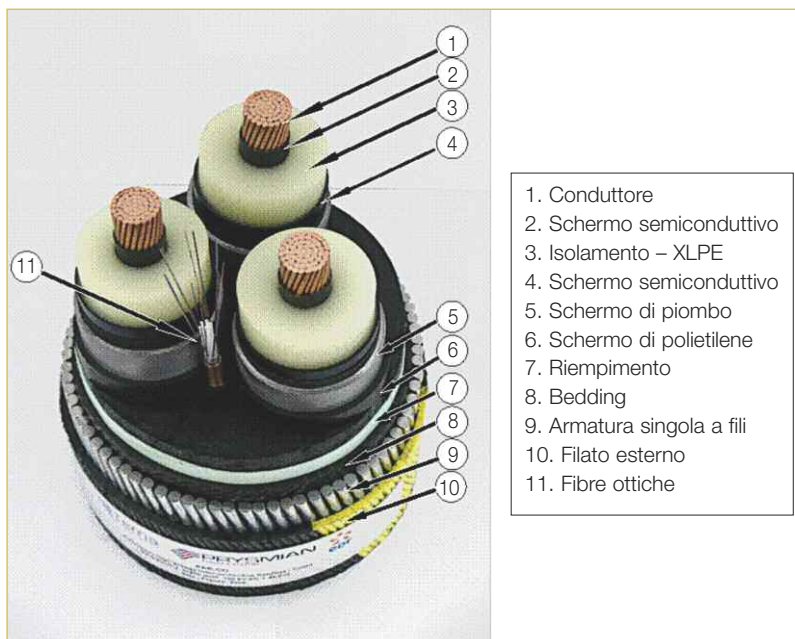


Figura 13 Tipico cavo tripolare a 170 kV c.a.



Figura 14 Tipico cavo a 320 kV c.c.

- sezioni tipiche: $630 \div 1600 \text{ mm}^2$;
- potenza trasmessa: fino a 250 MW.

Per i cavi HVDC (figura 14) di collegamento con la terraferma:

- tipo: HVDC unipolari con isolamento estruso;
- tensioni nominali: $\pm 150 \div \pm 320 \text{ kV DC}$;
- potenza trasmessa per bi-polo: fino a 1000 MW.

La figura 15 mostra l'installazione nel Mare del Nord chiamata BorWin2. La tabella 6 riporta i dati dei due cavi tripolari in c.a. che collegano con BorWin beta il gruppo di generatori eolici chiamati "Veja Mate" e "Global Tech1". Essi hanno una sezione di 800 mm^2 , schermo in piombo e un'unica armatura a fili d'acciaio zincato.

Fattori specifici di confronto

Una volta individuata la potenza che la nuova linea deve trasmettere, si possono seguire, nel confronto cavi vs GIL, le seguenti valutazioni finali. Un GIL direttamente interrato ha un *ampacity* di 2390 A. Aumentando i costi d'investimento, si possono aumentare le sezioni di fase e involucro (arrivando a 3524 A con $S_{\text{fase}} = 13270 \text{ mm}^2$ e $S_{\text{involucro}} = 20 \cdot 106 \text{ mm}^2$) o/e la spaziatura tra i condotti (arrivando a 2737 A con spaziatura pari a 2 m). Per i cavi, da un *ampacity* di 1800 A relativa a un'installazione standard si può arrivare, con soluzioni speciali aventi costi d'investimento superiori, fino a 2484 A (tabella 4). È fondamentale notare che il rapporto tra il costo d'investimento di un GIL e quello di un cavo varia tra 2,5 a 4 volte. I costruttori di cavi possono quindi considerare l'utilizzo di più terne in parallelo. Ciò

implica che ogni progetto abbisogna di un confronto specifico, caso per caso, da condurre mediante gli strumenti di confronto presentati in questa brochure.

Influenza del percorso della linea

Si noti che il minimo raggio di curvatura di un GIL è 400 m. Se il percorso prevede delle curve con raggio di curvatura più piccolo, è necessario usare unità d'angolo speciali che aumentano il costo d'investimento. Il cavo ha raggio di curvatura 15-20 volte il proprio diametro: per un cavo di 2500 mm² si può assumere 3 m. Il cavo segue, quindi, il percorso con grande facilità e senza costi aggiuntivi e ha un vantaggio sui GIL per percorsi con molte curve.

Opzioni d'installazione (posa interrata, in tunnel, su ponti)

Gli elettrodotti in cavo e in blindato possono avere diverse installazioni con costi differenti. La classica installazione di un cavo è direttamente interrata (vedi figura 6). Per i GIL esiste solo un'installazione importante direttamente interrata (come esposto in questa sintesi e nel § 6.2.1 della brochure) ma si può stimare che questo tipo d'installazione incida per circa il 30% del totale costo d'investimento.

Definizioni tecniche dei fattori di costo

Ai fini di ottenere un confronto ingegneristico tra diverse opzioni di trasmissione è necessario riferirsi ai costi globali e non ai meri costi d'investimento [7, 25, 27, 29]. Cosa confrontare?

Le due linee di trasmissione devono avere:

- la stessa lunghezza;
- la stessa potenza trasmissibile (di regime e di sovraccarico).

Con riferimento al secondo punto, per confermare una possibile equivalenza d'esercizio tra cavo e GIL, è necessario costruire le relative *capacity-charts* [7, 29].

Tali curve hanno bisogno che siano definite, in modo più o meno cautelativo, le *ampacity* delle due tecnologie. La necessità di confrontare le due opzioni a parità di potenza trasmessa può implicare l'utilizzo di una singola terna di GIL e una doppia terna in cavo. Analogamente, la necessità di un confronto a parità di lunghezza potrebbe implicare l'utilizzo della compensazione reattiva derivata per i cavi e non per i GIL. Tutte queste decisioni hanno un'influenza sui costi.



Figura 15 Parco eolico Borwin2 (Germania).

Tabella 6 Dati tecnici dei cavi marini tripolari, BorWin Beta, Germania, 2012

| | |
|---|--|
| Tensione nominale U_n | 170 kV |
| Corrente nominale I_n | 960 A |
| Tensione nominale di tenuta alle sovratensioni di origine esterna U_{BIL} | 750 kV |
| Corrente di breve durata I_s | 35 kA / 0,5 s |
| Lunghezza del circuito | 1 circuito di 30 km 1 circuito di 10 km |
| Tipo di isolamento | XLPE |

I costi d'investimento

I costi d'investimento per una nuova linea di trasmissione possono essere assegnati ad uno o più anni di costruzione prima dell'esercizio della linea. Usualmente si assume che tutti i costi d'investimento siano sostenuti nell'anno zero [29]. In caso di lunghezze d'installazione superiori a quelle mostrate nel § 8.2 della brochure, va conteggiato un costo aggiuntivo (Δ)_{sh} per la compensazione stessa.

La valorizzazione delle perdite nella trasmissione dell'energia elettrica

Il costo dell'energia perduta rappresenta la componente più importante dei costi d'esercizio. Il

diagramma di carico di una linea (e quindi le perdite) è strettamente correlato al suo utilizzo in seno alla rete: si menzionano, come esempio, in AAT, le interconnessioni transfrontaliere (potenza complessa nel primo e terzo quadrante), connessioni tra centrali e rete [19, 20, 21, 22] (potenza complessa nel primo quadrante) o linee nella rete magliata [7, 29]. Con riferimento a quest'ultime, i diagrammi dei flussi di potenza presenta-

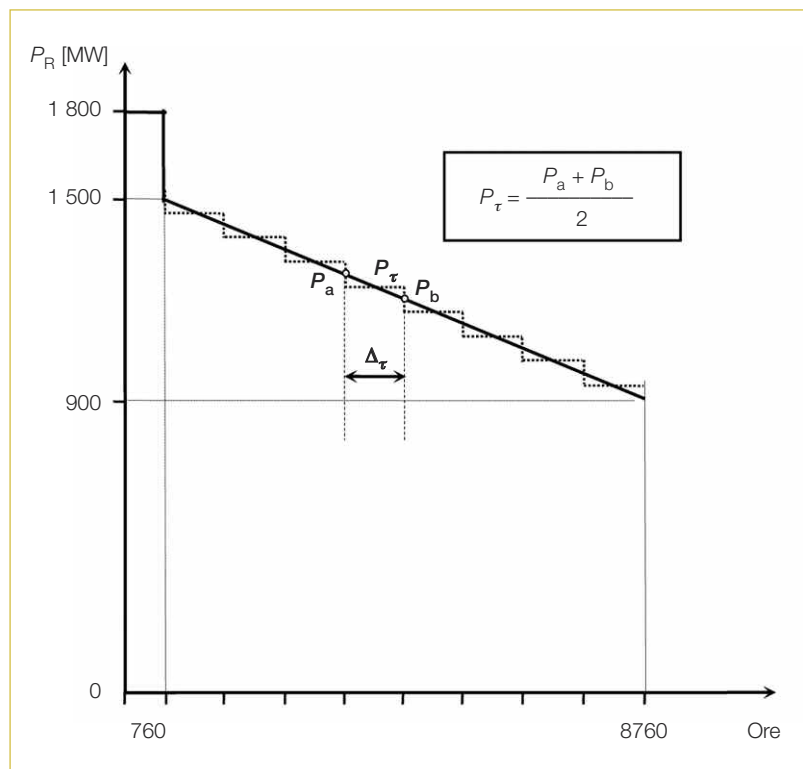


Figura 16 Curva di durata annuale linearizzata e a gradini per una linea di trasmissione in seno alla rete magliata.

no grosse fluttuazioni sia su base giornaliera sia su base mensile dovute alle variazioni di potenza assorbita dall'insieme dei carichi. La potenza trasmessa dalla linea può essere rappresentata per mezzo di una tipica curva di durata annuale, che riporta l'ampiezza della potenza attiva all'arrivo P_R in ciascuna ora dell'anno. È stato assunto un rapporto $Q_R/P_R = 0.2$ che equivale a $\cos\varphi_R = 0.98$. Ai fini di una semplificazione computazionale, la curva continua di durata P_R viene approssimata da una curva a gradini. Ciascun gradino corrisponde a un intervallo di tempo $\Delta\tau = 1000$ h (solo per l'ultimo gradino si ha $\Delta\tau = 760$ h) per il quale la potenza complessa $S_\tau = P_\tau (1 + j0.2)$ è stata considerata costante e uguale al suo valore medio sull'intervallo. Naturalmente deve essere utilizzata la stessa curva di durata annuale (figura 16) sia per i GIL sia per i cavi nell'ipotesi di disponibilità di 8760 h. Utilizzando il teorema di Ossanna [7], viene calcolato il regime della linea con carico all'arrivo pari alla potenza complessa S_τ e vengono quindi anche calcolate le perdite di energia per ciascun intervallo temporale.

La tabella 7 riporta per una data Potenza complessa all'arrivo le perdite per GIL e cavi. Si noti che nel caso dei cavi sono state anche computate le perdite dei reattori $P_{Reactor}$. Come spiegato nel § 8.2 della brochure, per tale lunghezza, i GIL non abbisognano di compensazione reattiva derivata.

In questo modo, possono essere quantificate, per le due tecnologie, le totali perdite di energia AEL. Dal momento che le perdite energetiche richiedono, di fatto, di consumare extra-combustibile nelle centrali, è stato assunto un costo marginale di generazione pari a $Lec = 40$ €/MWh.

Tabella 7 Perdite [kW/km] di un GIL in singola terna e di una doppia terna di cavi compensati alle estremità aventi lunghezza pari a 25 km con $U_n = 400$ kV (tensione stellata nominale pari a 230 kV)

| $S_\tau = 1800 \text{ MW} + j360 \text{ Mvar}$ | | | |
|--|------------------|--|------------------|
| GIL Singola terna $\xi_{sh} = 0,0$ | Perdite kW/km | UGC Doppia terna $\xi_{sh} = 0,53$ | Perdite kW/km |
| P_J Perdite Joule | 183,8 | P_J Perdite Joule | 140,2 |
| $P_{Reactor}$ Perdite nei reattori | 0 | $P_{Reactor}$ Perdite nei reattori | 12,3 |
| P_g Perdite dielettriche | 0 | P_g Perdite dielettriche | 16,3 |
| $P_J + P_g + P_{Reactor}$ | 183,8 | $P_J + P_g + P_{Reactor}$ | 168,8 |

Conseguentemente, il costo totale delle perdite ALC può essere così calcolato:

$$ALC \text{ [€]} = AEL \text{ [MWh]} \cdot Lec \text{ [€/MWh]}$$

Costi imputabili alle riparazioni dopo guasti casuali

Dopo un guasto permanente è prevista sia per cavi sia per GIL la riparazione. Mentre tutti gli altri costi possono essere valutati su basi deterministiche, la stima dei costi per riparare i componenti guastatisi aleatoriamente ha ovviamente natura probabilistica. Dunque, l'ammontare, (R) , di questi costi durante la vita della linea deve essere inteso come valore atteso. Nella memoria [29] vengono forniti valori di (R) per una doppia terna di cavi compensati. I bassi costi attesi per la riparazione imputabili al cavo riflettono l'alta affidabilità dei cavi isolati con XLPE e dei suoi accessori.

Valutazione dell'impatto sul territorio

L'onere finanziario sul territorio, sia sulla proprietà privata sia pubblica, imposto dalla presenza di una linea lungo tutto il suo percorso può essere non trascurabile. Ne conseguono degli oneri economici imputabili alle eventuali restrizioni sull'utilizzazione dei terreni limitrofi al corridoio di attraversamento. Essi devono essere introdotti nell'analisi economica come costi di compensazione. Molte autorità locali hanno imposto limitazioni all'uso residenziale di terreni esposti a campi elettromagnetici a frequenza di esercizio, che oltrepassino un prestabilito valore (RMS) dell'induzione magnetica, B [μT]. Per esempio,

in Italia, per esposizioni di lungo periodo, è stato stabilito, nel caso di linee esistenti, un valore di attenzione pari a 10 [μT]; mentre nel caso di costruzione di nuove linee è previsto un obiettivo di qualità pari a 3 [μT]. In Svizzera, il valore limite del campo magnetico per esposizione di lungo termine è stato fissato a 1 [μT] nel caso di nuove installazioni. In osservanza alla legge italiana, la fascia di larghezza F ai bordi della linea, entro cui $B \geq 3$ [μT], deve essere calcolata ed esclusa da qualunque procedimento di autorizzazione per edilizia residenziale. Al fine di quantificare tale perdita, viene presunto un "parametro di edificabilità medio ed " simile a quello delle zone adiacenti. Il parametro ed [m^3/m^2], il cui valore può presentare sensibili variazioni sul territorio, rappresenta il rapporto medio, in una zona specifica, tra il volume complessivo edificato e la superficie della zona. Valori caratteristici sono compresi nell'intervallo $3 \div 4$ in aree urbane, $0,5 \div 1$ in aree suburbane e possono scendere al di sotto di 0,1 in aree rurali. La **figura 17** offre visualizzazione immediata di due zone con il medesimo coefficiente ed . Perciò, ogni m^2 di terra compreso all'interno del corridoio di larghezza F potrebbe potenzialmente perdere, per effetto del divieto di edificare a uso residenziale, il valore:

$$w_x = k \cdot ed \text{ [€/m}^2\text{]}$$

in cui il valore di k [$€/m^3$] dipende strettamente dal mercato immobiliare locale. Pertanto, l'onere gravante su una superficie di dimensioni $F \cdot 1000$ [m^2] (cioè, pari alla larghezza della

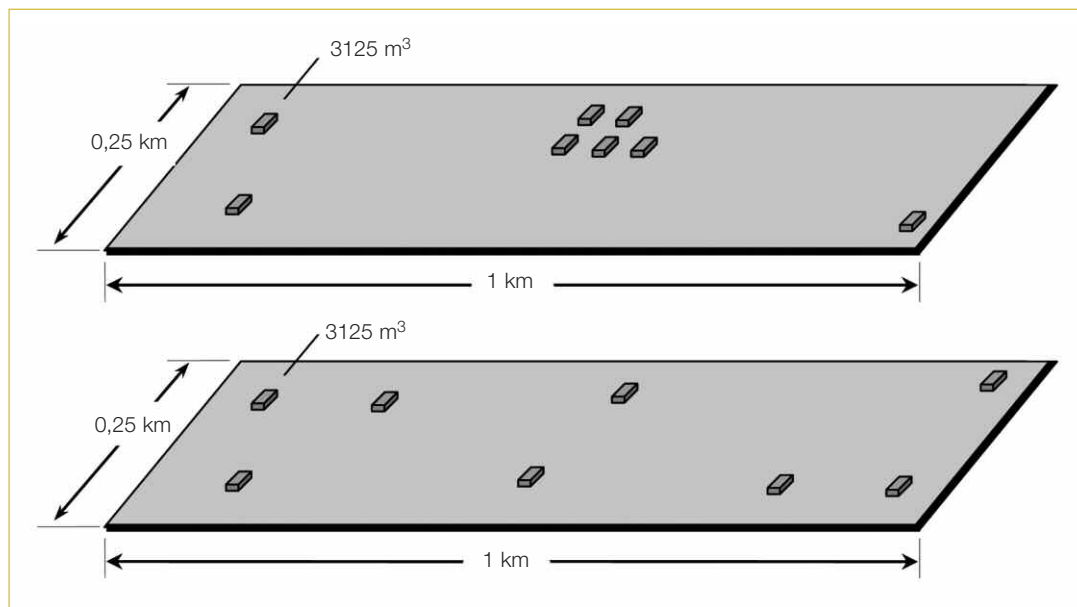


Figura 17 Impresione visiva di due aree aventi il medesimo parametro $ed = 0,1$ [m^3/m^2].

fascia inedificabile moltiplicata per la lunghezza di un km di "corridoio") può essere espresso come:

$$(T) = F \cdot 10^3 \cdot w_x \text{ [€/km]} \Rightarrow F \cdot 10^{-3} \cdot w_x \text{ [M€/km]}$$

Aspetti relativi alla sicurezza

Entrambe le tecnologie offrono ampie garanzie per la sicurezza dal rischio di shock elettrico. Nel caso d'installazione in tunnel, gli involucri dei GIL possono essere toccati senza pericolo: infatti, essi sono messi a terra alle estremità e la tensione di contatto è pressoché nulla durante il normale esercizio. Quindi non sono necessari extra costi. Nel caso di installazione in tunnel che abbia un'armatura continua, gli involucri possono essere ad essa collegati sistematicamente lungo il percorso a intervalli regolari e sufficientemente corti; ciò assicura equipotenzialità tra le pareti del tunnel e gli involucri del GIL e costituisce un'ottima messa a terra distribuita¹. Nel caso di corto circuito monofase le tensioni di contatto sono così annullate. Se l'armatura del tunnel non fosse continua, l'installazione di una maglia di terra potrebbe essere onerosa. Per quanto riguarda i cavi, gli schermi metallici non possono essere toccati per la presenza della guaina esterna in PE. Gli unici punti in cui gli schermi metallici potrebbero essere toccati è in corrispondenza delle cassette di *cross-bonding* che sono, però, sempre ben protette dai contatti. Questo risulta importante dal momento che le tensioni degli schermi durante il normale esercizio possono superare i 50 V [42]. Durante un guasto monofase, le ampiezze delle tensioni degli schermi diventano alte, ma ancora una volta, essi sono ben protetti dai contatti. Anche per i cavi non ci sono extra costi per la sicurezza dai contatti elettrici.

Comportamento al fuoco

I GIL non producono alcun rischio d'incendio. Il corto circuito fase-involucro non provoca effetti irreversibili. Dal momento che il sistema è totalmente composto da parti metalliche, non vi può essere innesco di combustione. La parte a tenuta delle flange è l'unica

non metallica (potenzialmente combustibile ma presente in minima parte) e non può né innescare né incendiarsi visto l'assenza di ossigeno (si ricorda che la miscela di gas isolante è N_2/SF_6). Non vi è inoltre possibilità alcuna di generazione di fumo. Per di più, gli sforzi elettrodinamici sono auto centranti all'interno e nulli all'esterno degli involucri. Nessun costo extra è previsto per la prevenzione incendio. Per cavi installati in tunnel, un incendio² può causare un rapido innalzamento di calore e fumo in uno spazio confinato. Il fumo generato dai materiali combustibili utilizzati nel cavo possono essere tossici. Al fine di proteggere il cavo e ritardare lo sviluppo di un possibile incendio nella struttura, può essere utilizzata una protezione fisica del cavo. In alternativa, il cavo può essere costruito con una guaina non propagante l'incendio oppure a cavo installato possono essere applicati dei materiali resistenti al fuoco. Un'altra possibilità è installare i cavi in compartimenti resistenti al fuoco o interrati nel tunnel. In ogni caso, la prevenzione al fuoco nel caso dei cavi in tunnel rappresenta un extra costo. La TB 403 [16] ha analizzato la prevenzione al fuoco nel caso di installazioni condivise in infrastrutture stradali e ferroviarie. In aggiunta, un nuovo gruppo Cigré B1.51 sta analizzando questo argomento.

Campi elettromagnetici

Il campo elettrico a frequenza d'esercizio esterno a cavi e GIL è nullo visto che gli involucri dei GIL e gli schermi dei cavi sono messi a terra alle estremità (sia per il *solid-bonding* dei GIL sia per il *cross-bonding* dei cavi). Per quanto riguarda il campo magnetico, senza tecniche di schermatura, i cavi hanno livelli d'induzione magnetica superiori a quelli dei GIL (ciò è ascrivibile all'elevato effetto schermante degli involucri che sono poco resistivi e messi a terra). Laddove, nel caso dei cavi, il livello di campo magnetico superasse i valori imposti, vi è la possibilità di utilizzare tecniche di mitigazione del campo magnetico in alcune parti del tracciato: ciò aumenta i costi d'investimento e implica una riduzione dell'*ampacity* [43, 44].

¹ Anche se tale dicitura non è riportata nella brochure si tratta di una terra di fatto (N.d.A.).

² Non viene qui specificata l'origine dell'incendio ovvero se endogeno (i.e. provocato dal cavo) o esogeno (i.e. subito dal cavo) (N.d.A.).

bibliografia

- [1] Cigré Technical Brochure # 218: *Gas Insulated Transmission Lines (GIL)*. Joint Working Group 23/21/33.15, February 2003.
- [2] Cigré Technical Brochure # 351: *Application of long high capacity gas-insulated lines in structures*. Working Group B3/B1.09, October 2008, ISBN: 978-2-85873-044-5.
- [3] International Standard IEC 62271-204: *High-voltage switchgear and control gear - Rigid gas-insulated transmission lines for rated voltage above 52 kV*. Edition 1, 2011.
- [4] IEEE: *Draft Guide for Application and User Guide for Gas-Insulated Transmission Lines (GIL), Rated 72.5 kV and Above*. IEEE PC38.122.4/DH, December 2012, May 17 2013, p. 1, 48.
- [5] Koch H.: *Gas-Insulated Transmission Lines*. John Wiley & Sons, 2012.
- [6] Benato R., Di Mario C., Koch H.: *High capability applications of Long Gas Insulated Lines in Structures*. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 22, Issue 1, January 2007, p. 619-626, doi: 10.1109/TDC.2006.1668566.
- [7] Benato R., Paolucci A.: *EHV AC Undergrounding Electrical Power*. Performance and Planning, SPRINGER, Series: Power Systems, ISBN: 978-1-84882-866-7, 2010.
- [8] IEC 60502-2: *Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV (Um = 1,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV) - Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV (Um = 7,2 kV) up to 30 kV (Um = 36 kV)*.
- [9] IEC 60840: *Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV (Um = 36 kV) up to 150 kV (Um = 170 kV) - Test methods and requirements*.
- [10] IEC 62067: *Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV (Um = 170 kV) up to 500 kV (Um = 550 kV) - Test methods and requirements*.
- [11] Argaut P., Bjorlow-Larsen K., Zaccone E., Gustafsson A., Schell F., Waschk V.: *Large projects of EHV underground cable systems*. Paper A.2.1, Jicable 2007 also in Revue de l'électricité et de l'électronique, n. 6/7, 2007, p. 65-75.
- [12] Cigré Technical Brochure # 338: *Statistics of ac underground cables in power networks*. December, 2008.
- [13] Cigré Technical Brochure # 379: *Update of service experience of HV underground and submarine cable systems*. 2009.
- [14] Cigré Technical Brochure # 194: *Construction, laying and installation techniques for extruded and self-contained fluid filled cable systems*. October, 2001.
- [15] Cigré Technical Brochure # 250: *General guidelines for the integration of a new underground cable system in the network*. August, 2004.
- [16] Cigré Technical Brochure # 403: *Cable systems in multi-purpose or shared structures*. February, 2010, ISBN: 978-2-85873-090-2.
- [17] Peschke E., von Olshausen E.: *Cable systems for high and extra-high voltage*. Publicis MDC Verlag, Germany, 1999.
- [18] Cigré Technical Brochure # 110: *Comparison of high voltage overhead lines and underground cables*. December, 1996.
- [19] Benato R., Fellin L., Lorenzoni A., Paolucci A.: *Elettrodotti blindati nel territorio: connessioni dei nuovi impianti di generazione alla RTN*. AEI Journal, Vol. 88, n. 3, March 2001, p. 28-37.
- [20] Benato R., Fellin L., Lorenzoni A., Paolucci A.: *Sistemi di trasmissione nel territorio*. AEI Journal, Vol. 88, n. 12, December 2001, p. 28-35.
- [21] Benato R., Del Brenna M., Di Mario C., Lorenzoni A., Zaccone E.: *Analisi economica comparata tra linee di trasmissione in cavo XLPE e aeree*. AEIT Journal, Vol. 92, n. 9, September 2005, p. 20-29.
- [22] Benato R., Fellin L., Lorenzoni A., Paolucci A.: *Impatto delle nuove tipologie di elettrodotti blindati sul territorio e sull'economia*. Proc. of "ELETTRODOTTI e TERRITORIO", 22 November 2000, Padova, p. 7.1-7.9 (in Italian).
- [23] JWG 21/22-01: *Comparison of overhead lines and underground cables for electricity transmission*. Proc. of Cigré 1996, Paper 21/22-01.
- [24] Fricke K.G., Paschen R., Steckel R.D.: *AC Overhead and Underground HV-Lines - Comparison and new aspects*. Proc. of Cigré 1996, Paper 21/22-07.
- [25] Benato R., Di Mario C., Lorenzoni A.: *Lines versus Cables: Consider All Factors*. Transmission & Distribution World, Vol. 59, Issue 11, (ISSN 1087-0849), November 2007, p. 26-32.
- [26] Benato R., Capra D., Conti R., Gatto M., Lorenzoni A., Marazzi M., Paris G., Sala F.: *Methodologies to assess the interaction of network, environment and territory in planning transmission lines*. Proc. of Cigré 2006, Paper C3-208.
- [27] Benato R., Del Brenna M., Di Mario C., Lorenzoni A., Zaccone E.: *A New procedure to compare the social costs of EHV-HV overhead lines and underground XLPE cables*. Proc. of Cigré 2006, Paper B1-301.
- [28] Armani G.V., Benato R., Di Mario C., Lorenzoni A., Rebolini M., Renaud F.: *Application Of Multi-Criteria Methodology For Planning An Electric Transmission Line*. Proc. of Cigré 2008, Paper C3-303.
- [29] Benato R., Napolitano D.: *Overall Cost Comparison Between Cable and Overhead Lines Including the Costs for Repair After Random Failures*. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 27, Issue 3, doi: 10.1109/TPWRD.2012.2191803, 2012, p. 1213-1222.
- [30] Cigré Working Group 21.12: *Calculation of the continuous rating of single core, rigid type, compressed gas insulated cables in still air with no solar radiation*. Electra 100, May 1985;
- [31] Cigré Working Group 21.12: *Calculation of the continuous rating of three-core, rigid type, compressed gas insulated cables in still air and buried*. Electra 125, May 1989;
- [32] IEC 60287: *Electric cables - Calculation of the current rating, in 8 parts (1.1, 1.2, 1.3, 2.1, 2.2, 3.1, 3.2, 3.3)*.
- [33] Dubois D., Mirebeau P.: *The use of insulated wires Milliken conductors in high voltage power transmission underground AC lines*. Proc. of Jicable 2007, Paper B8.1, Versailles, France.
- [34] Benato R., Paolucci A.: *Multiconductor cell analysis of skin effect in Milliken type cables*. Electric Power Systems Research, Vol. 90, 2012, p. 99-106, doi: 10.1016/j.epsr.2012.04.006.
- [35] Granadino R., Portillo M., Planas J., Schell F.: *Undergrounding the first 400 kV transmission line in Spain using 2 500 mm² XLPE cables in a ventilated tunnel: the Madrid "Barajas" airport project*. Jicable 2003, A.1.2.
- [36] Rendina, R., Posati A., Rebolini M., Bruno G., Bocchi F., Marelli M., Orini A.: *The New Turbigo-Rho 380 kV Transmission Line: An Example Of The Use Of Underground Xlpe Cables In A Meshed Transmission Grid*. Cigré 2006, paper B1.302.
- [37] Benato R., Paolucci A.: *Operating Capability of Long AC EHV Transmission Cables*. Electric Power Systems Research, Vol. 75/1, July 2005, p. 17-27, doi: 10.1016/j.epsr.2004.11.011.
- [38] Benato R., Paolucci A.: *Operating capability of ac EHV mixed lines with overhead and cables links*. Electric Power System Research, Vol. 78/4, April 2008, p. 584-594, doi: 10.1016/j.epsr.2007.05.002.
- [39] IEC 62271-100: *High voltage alternating-current circuit-breakers*. 2001.
- [40] IEEE Std 442-1981 (reaffirmed 1996): *IEEE GUIDE for Soil Thermal Resistivity Measurements*.
- [41] Anders G.J.: *Rating of electric power cables in unfavourable thermal environment*. IEEE Press, Wiley-Interscience, New Jersey 2005.
- [42] Benato R.: *Multiconductor Analysis of Underground Power Transmission Systems: EHV AC Cables*. Electric Power System Research, Vol. 79, Issue 1, January 2009, p. 27-38, doi: 10.1016/j.epsr.2008.05.016.
- [43] Cigré Technical Brochure # 373: *Mitigation techniques of power-frequency magnetic fields originated from electric power systems*. February 2009.
- [44] Cigré Technical Brochure # 559: *Impact of EMF on current ratings and cable systems*. December 2013.
- [45] Cigré Technical Brochure # 177: *Accessories for HV Cables with extruded insulation*. Working Group 21.06, February 2001.
- [46] Cigré Technical Brochure # 272: *Large Cross-Section and Composite Screens Design*. Working Group B1.03, June 2005.
- [47] Peters U., Laage U., Memmer H., Welein A.: *Worldwide Experiences and challenges with EHV XLPE Cable projects 330kV to 500 kV*. Jicable 2015, paper A1.1.
- [48] Shell F., Uhlenkücken H.: *The network connection of Niehl 3 CCCP- The first 380 kV long-distance cable project in Germany since the Bewag projects in 2000*. Jicable 2015, paper A1.2.
- [49] Biolley C., Mouchangou C.: *Production, Installation and Commissioning of two underground lines for the Pump-Storage plant project of Linth Limmern*. Jicable 2015, paper A.2.1.
- [50] Cigré SC B1 WG B1.35: *A Guide for rating calculations of Insulated cables*. Jicable 2015, paper E2.1.
- [51] Cigré SC B1 WG B1.34: *Mechanical Forces with Large conductor Cross Section XLPE cables*. Jicable 2015, paper D3.2.
- [52] Cigré SC B1 WG B1.42: *Recommendations for Mechanical tests on Submarine Cables*. Jicable 2015, paper B3.2.
- [53] Cigré Technical Brochure # 531: *Electrical Cable Characteristics*. Working Group B1.30, April 2013.
- [54] Cigré Technical Brochure # 560: *Guidelines for maintaining the integrity of XLPE Transmission Cable Accessories*. Working Group B1.29, December 2013.
- [55] Cigré Technical Brochure # 606: *Upgrading and uprating of existing HV Cable systems*. January 2015.
- [56] Cigré Technical Brochure #610: *Offshore Generation Cable Connection*. February 2015.
- [57] Cigré Technical Brochure #490: *Recommendations for testing of Long AC Submarine Cables for extruded insulation for system voltage above 30 (36) to 500 (550) kV*. February 2012.
- [58] Cigré Technical Brochure #623: *Recommendations for Mechanical Testing of Submarine Cables*. June 2015.
- [59] Lesur F., Mirebeau P., Mammeri M., Santana J.: *Innovative insertion of very long AC cable links into the transmission network*. Proc. of Cigré 2014, Paper B1-301.