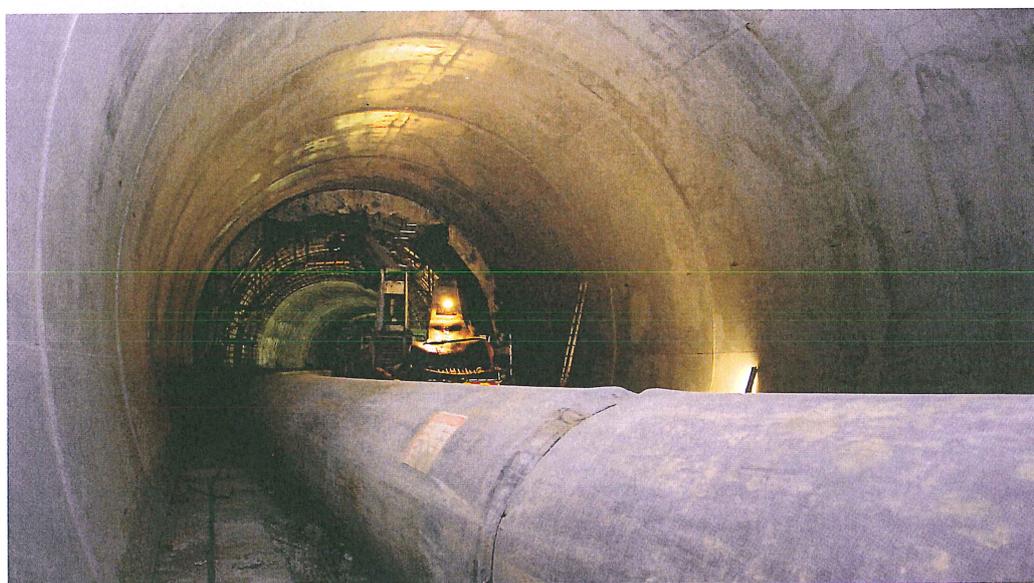


Elettrodotti blindati in galleria

L'installazione nel cunicolo pilota del Tunnel di base del Brennero garantirebbe un'ottima resa, l'abbattimento dei costi e la salvaguardia ambientale

ROBERTO BENATO* E LORENZO FELLIN*



Lavori di ultimazione di una galleria.

Dal 1484, anno in cui fu ultimato il "buco di Viso", primo traforo alpino, migliaia di chilometri di gallerie stradali e ferroviarie sono stati realizzati "intersecando" le Alpi e la dorsale appenninica. Sul finire del secondo millennio, Francia/Italia (Moncenisio), Germania/Austria/Italia (Brennero), Svizzera (Gottardo e Lötschberg) hanno progettato nuove gallerie ferroviarie di base lungo le quattro grandi vie di transito. A parte le gallerie di base del Lötschberg e del Gottardo, i cui lavori sono in corso e saranno completati entro il 2008 e 2013 rispettivamente, per le altre due direttrici si sta lavorando

agli studi di fattibilità. Tali progetti offrono una possibilità unica e irripetibile per conciliare nello stesso "corridoio" più servizi tecnologici basilari per l'attività umana. In questa memoria verrà focalizzata l'attenzione soprattutto sulla coesistenza galleria ferroviaria-trasmissione di energia elettrica tramite la nuova tecnologia degli elettrodotti blindati.

Queste "linee elettriche" del futuro, costante oggetto di studio nell'ambito del Dipartimento di ingegneria elettrica dell'Università di Padova, presentano ingombri molto contenuti, campo magnetico esterno trascurabile ed eccellenti prestazioni (ridotte perdite pur con elevate potenze trasmissibili); esse costituiscono una soluzione compatibile con le gallerie e consentirebbero una

* Dipartimento di ingegneria elettrica - Università di Padova.

forte interconnessione elettrica paneuropea auspicabile per l'operatività del mercato elettrico.

Premessa

L'idea di sfruttare sinergie che consentano di recuperare gli alti costi che queste grandi opere comportano, si inquadra nel tentativo di realizzare in maniera ben coordinata "corridoi comuni" allo scopo di soddisfare le molteplici e crescenti esigenze di scambi fra aree di grandi sistemi industrializzati. In questo contesto, merita grande attenzione soprattutto l'opportunità offerta dalle grandi infrastrutture ferroviarie e autostradali future ed esistenti. In particolare, tale concetto sta trovando applicazione anche in occasione dei vari progetti per la costruzione di gallerie ferroviarie (o stradali) paneuropee, che devono essere programmate e coordinate in maniera razionale, allo scopo di configurare, per quanto possibile, ciascuna galleria come "vettore multiservizio".

In questa sede si ritiene doveroso segnalare le possibilità offerte dai trafori alpini, con particolare riferimento al nuovo collegamento ferroviario Bolzano-Innsbruck, essendo essi compatibili con l'installazione di elettrodotti blindati che consentirebbero un notevole incremento degli scambi di energia elettrica Italia-Austria e conseguentemente anche Italia-Nord Europa. La Comunità europea ha prontamente recepito la bontà della proposta, co-finanziando uno studio di fattibilità, durato dal 2002 al 2005, che ha visto quali *partner* TERNA (in qualità di *project leader*), il Dipartimento di ingegneria elettrica dell'Università di Padova e l'austriaca TIWAG.

Il problema dell'interconnessione elettrica paneuropea

Per quanto riguarda le possibilità e le esigenze attuali di scambi di energia elettrica della rete italiana con quella europea, appare significativa la memoria¹

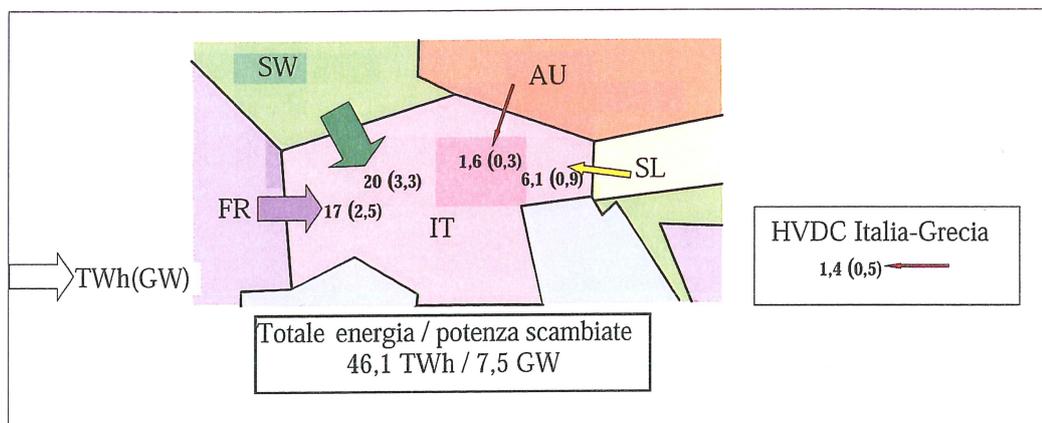
che sottolinea, fra l'altro, come "l'energia a buon mercato può venire praticamente solo dall'estero e, per contro, non sono facili le prospettive di ampliamento delle interconnessioni".

Sono ben note infatti le difficoltà di realizzare in Italia grandi elettrodotti transfrontalieri che dovrebbero attraversare zone ad alto impatto paesaggistico e culturale. La citata memoria mette conseguentemente in evidenza le modeste potenze di scambio oggi attuabili con la rete austriaca a fronte di quelle molto più consistenti con la rete francese e svizzera (Figura 1), tenuto conto anche dei vincoli introdotti da margini operativi riguardanti la sicurezza dell'esercizio. La figura si riferisce a dati di TERNA del 2004 e conferma le ridotte possibilità dell'unico collegamento significativo a 220 kV fra Italia e Austria (la linea Soverzene-Lienz) che consente un contributo insignificante rispetto alla totale potenza importabile (4% circa). Manca, infatti, un qualsiasi collegamento a 400 kV tra Italia e Austria che si renderebbe quanto mai necessario.

Queste "linee elettriche" del futuro garantiscono eccellenti prestazioni

¹ Borghi S. O...[et al.] - L'interconnessione elettrica con l'estero, "L'Energia Elettrica", V. 77, n. 4/5, ott. 2000, p.11-20.

Fig. 1 – Scambi di energia/potenza nel confine italiano nel 2004 (vicino alla freccia si è riportata l'energia in TWh e tra parentesi la potenza in GW)



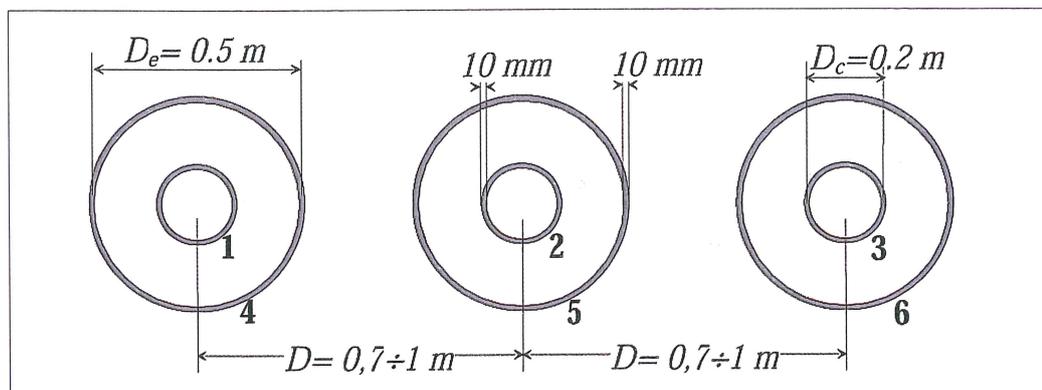
Gallerie e GIL

Una moderna tecnologia per la trasmissione dell'energia elettrica, che è perfettamente compatibile e integrabile in galleria, è rappresentata dagli elettrodotti trifase isolati in gas o con acronimo inglese GIL (*Gas insulated transmission lines*).

Si ritiene utile fornire qualche nota esplicativa di tale tecnologia. I GIL sono l'evoluzio-

ne diretta delle tecnologie sviluppate ormai da vari decenni per le stazioni elettriche in SF₆ (esafluoruro di zolfo), spesso definite anche come "blindate". La tecnica costruttiva più diffusa prevede la realizzazione di tre involucri cilindrici in alluminio o in lega d'alluminio, in ciascuno dei quali il conduttore di fase (tubolare, in alluminio) è mantenuto in posizione centrale tramite

Fig. 2 – Dimensioni indicative per tipica disposizione a condotti affiancati per GIL 400 kV



isolatori in resina. La Figura 2 mostra le dimensioni indicative di un GIL disposto su piano per la massima tensione adottata oggi in Europa di 400 kV; tale configurazione è tipica per l'installazione direttamente interrata (anche se non mancano installazioni in aria o in trincea di protezione in cemento armato). Per le installazioni in galleria sono stati adottati, in Giappone e in Europa, GIL disposti su piano verticale, come mostra la foto di Figura 3; realizzazioni di questo tipo appaiono senz'altro attuabili utilizzando la "galleria di prospezione" o "tunnel pilota" (Figura 4) in cui possono anche essere previsti cavi elettrici di media e bassa tensione (per i normali servizi ausiliari dei *tunnel* ferroviari), eventuali fibre ottiche, canali di drenaggio e condotte d'acqua, vista l'assenza di problemi di compatibilità tra i vari tipi di impianto. Gli elementi o moduli di ciascun elettrodotto blindato trifase (modulo rettilineo, modulo d'angolo, fino a 90°, modulo per dilatazione termica) costruiti e provati in officina possono avere lunghezze fino a 20 [m] (se il trasporto fino al sito d'installazione lo consente) e possono essere trasportati tramite carrello su binario di servizio sino al sito di assemblaggio.

L'installazione dei GIL viene in ogni caso completata con sistemi elettronici di monitoraggio e diagnostica. Tra i sistemi protettivi si possono citare: le trappole per catturare le particelle metalliche contaminanti, il sistema di monitoraggio della pressione della miscela di gas con sensori di densità in fibra ottica, il monitoraggio continuo delle scariche parziali al fine di prevenire l'insorgere di situazioni di guasto.

Fig. 3 – GIL in doppia terna a 300 kV (Palexpo nell'aeroporto di Ginevra) in galleria di diametro 3,2 [m] × 3 [m] (realizzazione Siemens AG in servizio dal 2000)



Fig. 4 – a) Il percorso delle gallerie

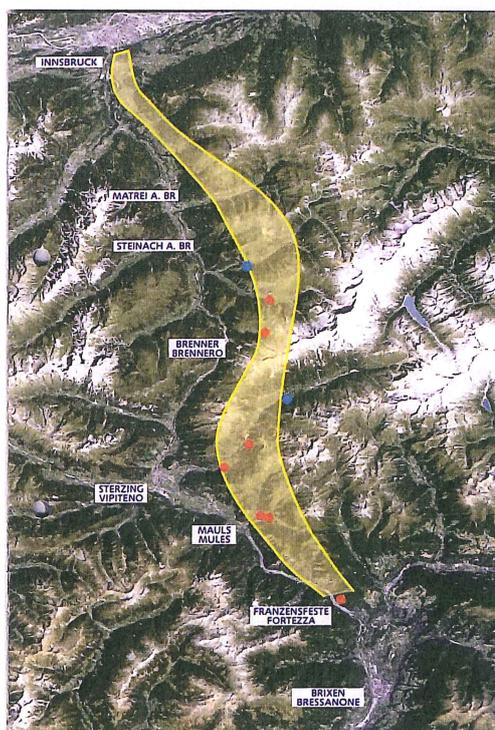


Fig. 4 – b) Gallerie ferroviarie e cunicolo pilota

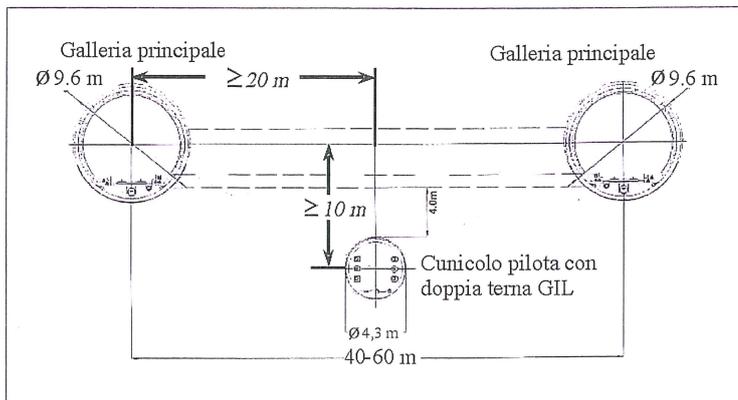
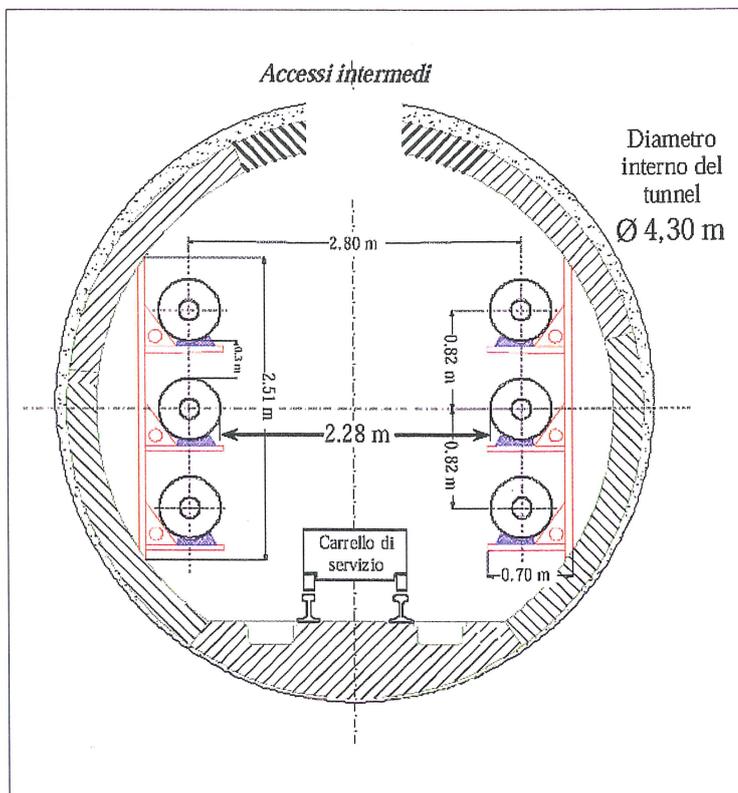


Fig. 4 – c) Cunicolo pilota con GIL in doppia terna



Un'idea orientativa dell'architettura del sistema di monitoraggio è offerta in Figura 5.

Infine viene inserito alle estremità del GIL un sistema localizzazione guasto (*Arc location system-ALS*) per individuare la posizione di un eventuale guasto interno. (Figura 6)

Alta compatibilità Galleria-GIL

L'impatto ambientale (visivo e "magnetico") di una linea aerea tradizionale, a semplice o doppia terna, è ormai praticamente ritenuto inaccettabile nelle regioni alpine e con particolare fermezza in quelle austriache². La soluzione GIL consegue un impatto visivo nullo (come peraltro anche la soluzione concorrente in cavi ad isolamento estruso) e un trascurabile impatto elettromagnetico. Oltre a questi vantaggi, si possono elencare altre motivazioni che identificano nei GIL la soluzione *ad hoc* per le installazioni in galleria.

1. Eccellenti capacità di trasmissione³

Le elevate correnti nominali dei GIL (che possono arrivare a 3.150 A) consentono la trasmissione di elevate potenze (fino a 2200 MVA a 400 kV) che risultano comparabili con quelle di una linea aerea di pari tensione sfruttata al limite termico, con ridotte perdite elettriche e ridotte cadute di tensione (Tabella 1).

2 Conferenza: *Zukunftsweisende Übertragung von elektrischer Energie in umweltsensiblen Gebieten*, Kristallwelten in Wattens/Tirol, 13/06/2001.

3 Benato R., Fellin L., Lorenzoni A., Paolucci A. – *Sistemi di trasmissione nel territorio*, "AET", Vol. 88, N. 11, Dic. 2001, p. 28-35.

Fig. 5 – Sistema di monitoraggio e diagnostica GIL (concessione Siemens AG)

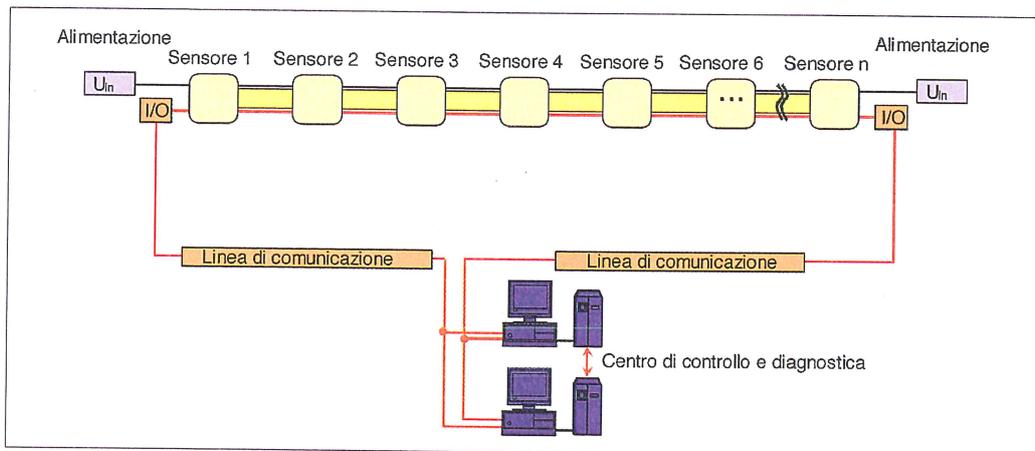
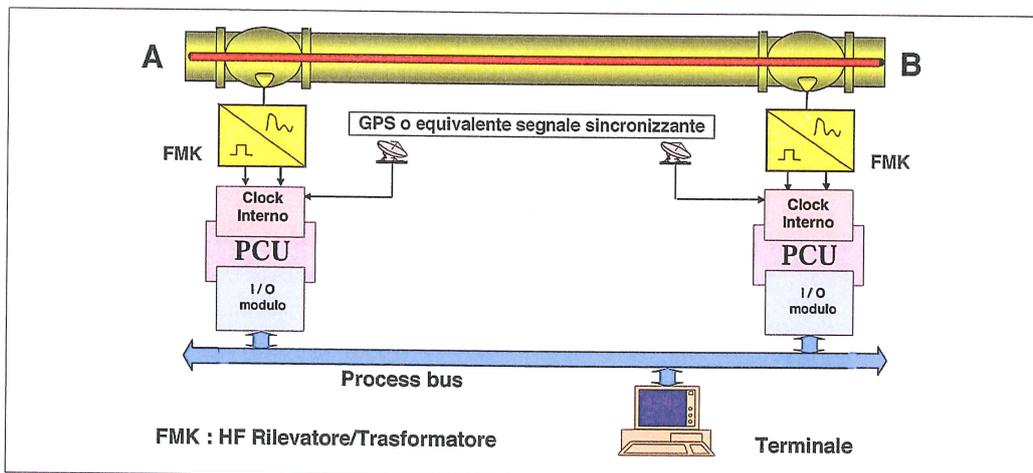


Fig. 6 – Sistema di localizzazione guasto (concessione Siemens AG)



Tab. 1 – Prestazioni per una doppia-terna GIL di 65 [km] a 400 [kV]

Potenza trasmessa con fattore di potenza 0,98	Tensione all'origine per tensione all'arrivo di 400 kV	Perdite medie per unità di lunghezza	Caduta di tensione massima
[MVA]	[kV]	[W/m]	[%]
0	399,1	1.1	-0,23
1000	400,8	26	0,20
2000	402,6	105	0,65
3000	404,5	238	1,13
4000	406,5	424	1,63

2. Perdite elettriche ridotte⁴

Come ben noto, le perdite elettriche sono principalmente dovute alla resistenza chilometrica dei conduttori interessati dalla trasmissione della potenza elettrica. Nel caso dei GIL bisogna considerare anche la resistenza chilometrica degli involucri che ancorché conduttori passivi (ai quali cioè non è applicata tensione) sono percorsi da correnti di ampiezza pressoché uguale ed in opposizione a quella di fase. Questa situazione configura i GIL come vettori energetici ad altissimo rendimento di trasmissione con importanti ricadute sul risparmio energetico.

3. Ottima sicurezza

In caso di cedimento dell'isolamento, l'arco dovuto al guasto rimane confinato entro l'involucro e non vi è conseguentemente trasferimento alcuno all'esterno. Per quanto riguarda la "reazione al fuoco" degli elettrodotti blindati, la valutazione è immediata ed univoca, trattandosi di un sistema chiuso

ed impermeabile ai gas che presenta superfici esterne esclusivamente metalliche (leghe di alluminio). Il fatto è rilevante, in quanto rappresenta le condizioni di sicurezza migliori riguardo all'ambiente circostante ed alle persone eventualmente presenti nell'ambiente stesso. Ciò assume maggior importanza nel caso d'installazione in un *tunnel*, dove l'eventuale presenza di materiali combustibili caratterizzati da classi di reazione al fuoco diverse può costituire serio pregiudizio per l'incolumità delle persone. L'unico guasto possibile nei GIL è quello tra fase e involucro (guasto monofase); in questa condizione le tensioni degli involucri dipendono fortemente dalla tecnica di messa a terra. Nel caso della galleria, il collegamento degli involucri all'armatura d'acciaio rappresenta uno schermo addizionale metallico e realizza una messa a terra distribuita. Una tale soluzione, che, per la doppia terna, dà luogo ad un sistema a tredici conduttori, implica notevoli benefici sulle tensioni di contatto. In particolare le tensioni di contatto all'interno della galleria sono annullate: ciò consente una completa sicurezza per gli operatori in caso di ispezione anche nell'eventualità (remota) di guasto.

⁴ Benato R., Fellin L., Paolucci A. – *Condutture a fasi blindate: calcolo degli effetti di prossimità e del campo magnetico esterno*, in: Rendiconti 97^a Riunione annuale AEI, Padova, ott. 2001.

4. Buona affidabilità

Le principali ragioni di un'elevata affidabilità sono da ascrivere al fatto che, come già detto, la tecnologia GIL risulta essere l'estensione della tecnica consolidata delle sottostazioni in esafluoruro di zolfo e beneficia così di tale esperienza pregressa. Infatti l'installazione di una doppia terna di GIL anche in gallerie di modesto diametro (Figura 3) è stata attuata in situazioni che richiedevano alti livelli di affidabilità come ad esempio nella connessione tra centrali nucleari e linee elettriche aeree. Una soluzione più economica ma con affidabilità praticamente equivalente a quella della doppia terna è quella con una condotta di riserva (GIL a quattro condotte)⁵.

5. Campo elettromagnetico esterno

Il 14 febbraio 2001 è stata approvata in via definitiva dalla Camera dei deputati la "Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici".

Per questo è molto importante evidenziare il trascurabile inquinamento elettromagnetico dei GIL, il cui utilizzo può essere ipotizzato, come logico prosieguo del tratto Innsbruck-Bolzano, nella Valle dell'Adige (in cui peraltro sono previste numerose gallerie). La Figura 7 mostra il campo magnetico interno al tunnel pilota.

6. Invecchiamento nullo

I dielettrici (isolanti ndr) solidi invecchiano sia per motivi elettrici che termici. Più alti

Fig. 7 – a) Tunnel pilota e GIL

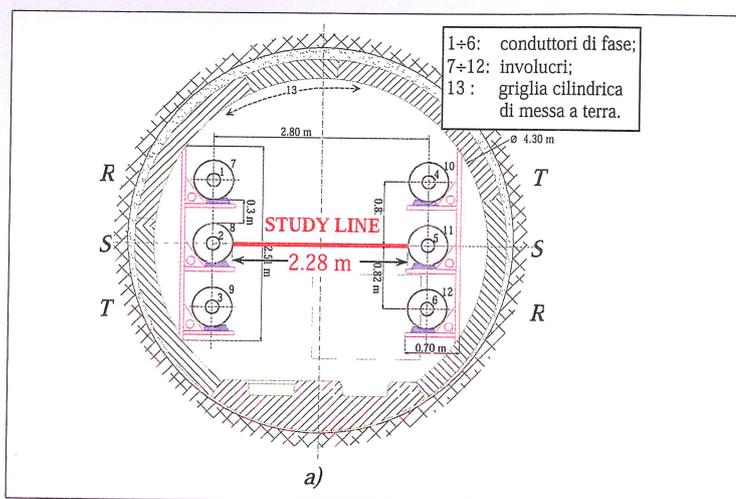
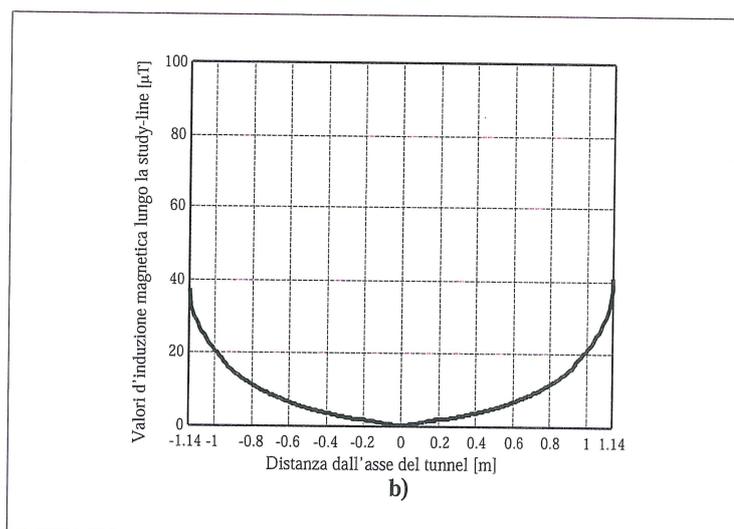


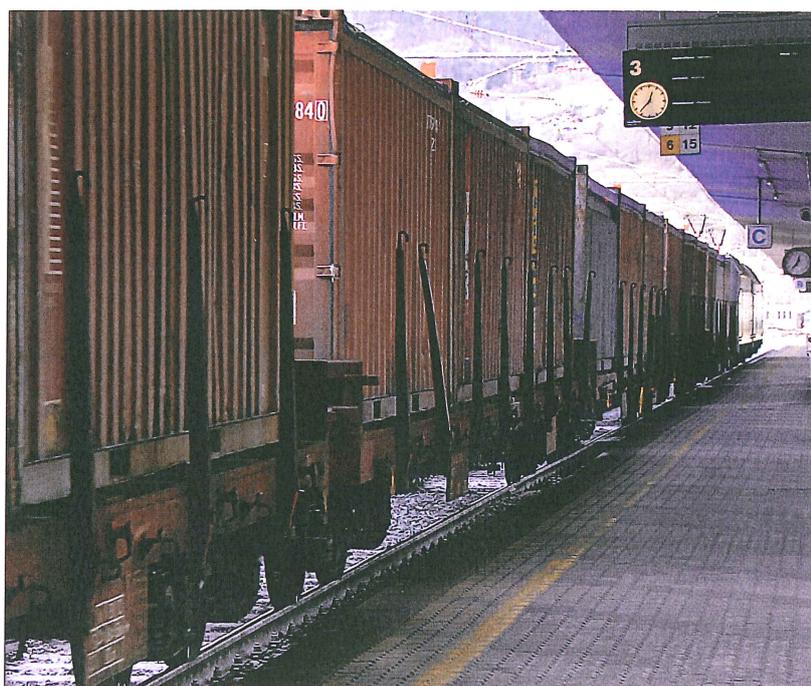
Fig. 7 – b) Campo induzione magnetica all'interno del tunnel pilota



⁵ Benato R., Napolitano D. – *Reliability assessment of EHV Gas insulated transmission lines: effect of redundancies*, "IEEE Trans. on Power delivery", Vol. 23, Issue 4, ott. 2008.

Treno merci in transito da Trento.

**L'installazione
è completata da sistemi
di monitoraggio
e diagnostica**



risultano il campo elettrico e la temperatura e più velocemente il dielettrico si deteriora. Mentre il cavo invecchia in funzione delle sollecitazioni elettriche, della temperatura e del tempo, il gas isolante nei GIL non è affetto da sensibili fenomeni di invecchiamento.

Interferenze elettromagnetiche tra sistema di trazione in corrente alternata e GIL⁶

Nel caso di installazione nel *tunnel* pilota, un'approfondita trattazione ha messo in luce problemi del tutto marginali. Inoltre, per un inserimento stabile nella rete di trasmissione elettrica europea, fortemente magliata e composta prevalentemente da linee aeree, è ovviamente necessario esaminare attentamente l'influenza di uno o più GIL per quanto riguarda i flussi di potenza, le correnti di corto circuito e la stabilità del parallelo. Infine l'inevitabile interfaccia con le linee aeree non pone particolari problemi nei riguardi dei cicli di richiusura così che non vi è bisogno alcuno di cambiamenti di esercizio o di schemi di protezione. L'isola-

mento dei GIL infatti è "autoripristinante", cioè recupera interamente le sue proprietà isolanti dopo una scarica "disruptiva" peraltro assai improbabile.

Prospettive di impiego

Le prospettive di impiego dei cavi a isolamento estruso e in gas nella trasmissione di energia elettrica sono oggetto da un decennio di studi e ricerche del gruppo di lavoro dell'Università di Padova, che ha prodotto significative pubblicazioni sia in sedi nazionali che internazionali. Per l'impiego di tali tecnologie su vasta scala e per lo studio del loro inserimento nei *tunnel* è però necessario l'approfondimento di alcuni aspetti che richiedono specifiche ricerche finanziate, il cui ritorno in termini economici e ambientali è assicurato (problemi di compatibilità elettromagnetica, analisi del rischio, problemi di interfaccia con altri sistemi, problemi di accessibilità e affidabilità per guasti, ecc.). In generale il gruppo di Sistemi elettrici per l'energia del Dipartimento di ingegneria elettrica dell'Università di Padova (di cui fanno parte i due autori) ha una lunga tradizione nell'ambito della trasmissione dell'energia elettrica e ha focalizzato la ricerca sulle tecnologie innovative alternative alle linee aeree, soprattutto GIL e cavi in

⁶ Benato R., Caldon 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, sett.e-ott. 1998, p. 304-311.

*Sequenza di tralicci.*

altissima tensione con isolamento estruso. Queste ricerche potrebbero giocare un ruolo chiave anche per l'imminente risanamento magnetico delle linee aeree (laddove si superino i valori di legge).

Conclusioni

La razionalizzazione nel territorio di servizi insostituibili per la società, come i trasporti e l'energia elettrica, rappresenta un accresciuto grado di consapevolezza nel conciliare tecnologia e ambiente. In tale auspicabile contesto, il progetto di nuove gallerie di base tra Italia e Paesi confinanti rappresenta una possibilità assolutamente irripetibile. Si aggiunga che la scarsa interconnessione elettrica tra Italia e Stati membri della UE pone vincoli invalicabili per addivenire ad un vero mercato elettrico paneuropeo. La coesistenza di linee di trasmissione dell'ener-

gia elettrica a ridotto ingombro e ad elevate prestazioni con gallerie ferroviarie risponde a tutte le esigenze sopracitate: razionalizza i corridoi di servizi e, a livello elettrico, interconnette saldamente l'Italia all'Europa. Alla Comunità europea e agli Stati membri, da sempre attenti all'abbattimento di barriere nazionali, si offre così un'occasione unica. Non ultima l'elevata compatibilità ambientale dei GIL, soprattutto per il ridotto campo magnetico esterno, appare in sintonia con le aspettative della "società civile" che manifesta grande avversione per la costruzione di nuovi elettrodotti aerei.

La memoria è stata sviluppata grazie ai fondi di Ateneo CPDA063345, "Sensori polarimetrici in fibra ottica per il monitoraggio di linee ad alta tensione".