

# Linee miste aereo-cavo in altissima tensione

Roberto Benato, Antonio Paolucci *Università degli Studi di Padova* - Leandro Cacioli, Claudio Di Mario *TERNA S.p.A*

Nell'attuare il rafforzamento e l'ampliamento della rete di trasmissione, che si rendono tuttora necessari per soddisfare la crescente domanda di energia elettrica, sempre più spesso i pianificatori e gli esercenti devono ricorrere all'impiego di linee in cavo e linee miste, che possono in alcuni casi ridurre sensibilmente, in virtù della loro flessibilità, i problemi di tracciato

**L**e linee in cavo e le linee miste, stanno assumendo un ruolo sempre crescente negli sviluppi delle reti elettriche in ragione della loro facile adattabilità a particolari vincoli del territorio ed alla possibilità di superare ostacoli sia di natura orografica (come grandi fiumi, montagne, laghi, collegamento di isole) sia ambientali (come aeroporti, aree urbane, zone industriali o aree estremamente sensibili all'impatto "paesaggistico"). È importante ricordare che alcune installazioni di linee miste sono già state realizzate da parecchi anni per consentire grossi flussi di potenza in grandi centri cittadini. Ancor più oggi, per gli aumentati problemi, gli operatori della rete devono affrontare l'analisi di questa tipologia di linea, per sfruttarne al massimo le prestazioni. In questa memoria si richiamano sinteticamente da [1] le procedure di carattere generale per linee composite a tre tronchi (aereo-cavo-aereo) che consentono di co-



struire capability chart in grado di mostrare con evidenza le massime prestazioni dell'intera linea nel rispetto dei vincoli di ampacity e dei livelli di tensione. Le capability chart sono integrate da altri parametri utili per circostanziare maggiormente le condizioni di esercizio e per limitare con adeguata compensazione reattiva derivata le sovratensioni dovute all'energizzazione della linea mista. Viene inoltre considerato anche un caso concreto realizzato recentemente nella rete italiana e si riportano i criteri per le protezioni della linea e dei reattori di compensazione.

## **Linee miste a tre tronchi: linea aerea - cavo - linea aerea**

Un rigoroso approccio alla linea mista richiederebbe di fissare per ciascuna sezione i vincoli specifici riguardanti la sicurezza e la durata di vita

di ogni singolo tronco e di ricercare, successivamente, le massime performance compatibili dell'intero collegamento. Un approccio più semplice ma estremamente significativo può essere adottato quando la situazione è quella rappresentata in figura 1 (① linea aerea - ②, cavo - ③ linea aerea, con lunghezze  $d_1$ ,  $d_2$ , e  $d_3$ ), dove il tronco intermedio è in cavo: in questo frequente caso i vincoli espressi da (1) e (2) appaiono sufficienti a soddisfare l'ampacity non solo del tronco in cavo ma anche delle linee aeree ① e ③. Infatti è sufficiente che la corrente limite  $I_C$ , scelta in  $H$  e  $K$  per l'esigenza di ②, sia un po' più bassa dell'ampacity della linea aerea ① e ③ per ottenere (come si è accertato sistematicamente) livelli di corrente adeguati su tutto il tratto aereo e quindi anche in  $S$  e  $R$ . Infine la relazione (3) fissa la tensione in  $S$ , similmente a quanto esposto in [1-3]. Nel prosieguo, posto il livello di tensione massima  $U_m = 420$  kV, si adotta un livello di tensione stellata  $U_{oc} = 230$  kV = 95%  $U_m/\sqrt{3}$ .

In questa memoria, è stata assunta una completa simmetria delle linee trifase: ciò implica trasposizione delle fasi per la linea aerea e per i cavi anche la trasposizione degli schermi (pratica del cross-bonding). Ciò consente l'utilizzo delle classiche equazioni di trasmissione basate sui parametri alla sequenza diretta (Tabella 1 per linea aerea e per singola terna di cavi) e delle corrispondenti matrici. Per tutto il formalismo matriciale, non privo di elegante sintesi, si rimanda a [1]. Per la linea aerea è stata scelta una tipica linea AAT 380 kV della RTN italiana (conduttori a fascio trinati) e per il tronco ②, una doppia terna 380 kV di cavi unipolari da 2000 mm<sup>2</sup> o da 2500 mm<sup>2</sup> (conduttori in rame e isolamento in XLPE). Ambedue le realizzazioni previste (due terne # a, due terne # b) com-

portano ampacity superiori a quelle dei tronchi aerei: con esse si ottengono coefficienti di riserva diversi a seconda della zona e della stagione nel caso di indisponibilità di una delle due terne in cavo. L'analisi del collegamento tra i nodi  $S$  e  $R$  costituisce una valutazione preliminare da utilizzare per i successivi approfondimenti tramite i debiti studi di rete (tra i quali simulazioni e flussi di potenza).

## Prima e seconda analisi

I regimi realizzabili nel rispetto dei vincoli di figura 1 possono essere desunti con opportune relazioni matriciali (si veda [1]) nelle quali intervengono le matrici di trasmissione  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  dei tre tronchi che formano la linea.

Nell'ambito di una prima analisi, una volta fissato nel nodo  $K$  il fasore corrente  $I_K = I_C \angle 0$  (sull'asse reale) nel rispetto del vincolo (2), e imposto, secondo il vincolo (3), nel nodo  $S$  il fasore

$$\underline{U}_{oS} = 230 \text{ kV} \angle \delta \quad (\delta = 0 \div 2\pi)$$

è possibile determinare univocamente un insieme di regimi dell'intera linea; quelli che rispettano il vincolo (1) nel nodo  $H$  si verificano quando  $\delta$  percorre l'intervallo  $\delta_1 \div \delta_2$  (analiticamente calcolabile). In modo analogo, una volta fissato nel nodo  $H$  il valore della corrente  $I_H = I_C \angle 0$  (sull'asse reale), e imposto nel nodo  $S$  il seguente fasore

$$\underline{U}_{oS} = 230 \text{ kV} \angle \vartheta \quad (\vartheta = 0 \div 2\pi),$$

viene individuato un altro insieme di regimi (seconda analisi); ancora una volta quelli che rispettano il limite  $I_C$  nel nodo  $K$  si hanno nell'intervallo  $\vartheta_1 \div \vartheta_2$ , determinabile anch'esso analiticamente.

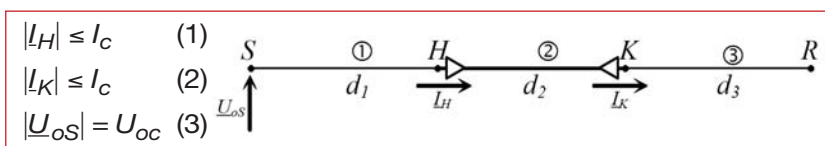


Figura 1

Vincoli di esercizio riguardanti lo schema di linea mista, con tronco intermedio in cavo

Tabella 1 - Parametri alla sequenza diretta (singola terna) per la linea aerea e per il cavo (tipiche installazioni)

LINEA AEREA		①, ③			CAVO #		#a	#b	
Livello di tensione		380 kV			Livello di tensione		380 kV	380 kV	
Sezione		3 sub-cond. AA 585 mm <sup>2</sup> , $\phi=31,5$ mm (spaz.=40 cm)			Sezione		mm <sup>2</sup>	2000 Cu	2500 Cu
Resistenza a 75°C (50 Hz)	$r$	mΩ/km	23,10		Resistenza chilometrica apparente a 90°C (50 Hz)	$r$	mΩ/km	15,2	13,3
Induttanza chilometrica	$\ell$	mH/km	0,858		Induttanza chilometrica	$\ell$	mH/km	0,598	0,576
Conduttanza chilometrica (50 Hz)	$g$	nS/km	10		Conduttanza chilometrica (50 Hz) con $\tan \delta=0,0007$	$g$	nS/km	47,9	51,5
Capacità chilometrica	$c$	nF/km	13,3		Capacità chilometrica $\epsilon_r=2,3$	$c$	nF/km	218	234
Ampacity	Periodo C	A	2220	2955	Zona A	Ampacity	A	1642	1788
	Periodo F		2040	2310	Zona B				

È da segnalare che la doppia terna di cavi nel tronco ② richiede, in ragione della sua elevata suscettanza capacitiva, quasi sempre un adeguato livello di compensazione derivata  $\xi_{sh}$  (da stabilire secondo le modalità esposte nel capitolo "Messa in tensione della linea a vuoto") che, intervenendo nella matrice  $\mathbf{M}_2$ , influisce su tutti i regimi della linea (sia di energizzazione a vuoto sia di power-flow). L'ipotesi di compensazione uniformemente distribuita adottata già in [1-3] rappresenta una potente semplificazione che comporta minime variazioni rispetto a compensazioni concentrate se impiantisticamente ben realizzate.

## Le capability chart

Le procedure di prima e seconda analisi presentate nel capitolo precedente consentono di individuare, per una data linea mista, tutti i regimi compatibili con i vincoli (1) (2) (3) e in particolare permettono di calcolare le potenze complesse  $\underline{S}_S$  e  $\underline{S}_R$  agli estremi S e R. Risultano inoltre agevoli e immediate le verifiche dell'ampacity non solo in S e R, ma anche sempre per mezzo di algoritmi matriciali, in qualsiasi sezione lungo le linee aeree e lungo il cavo. Conseguentemente (si vedano le capability chart presentate in figura 2) il contorno s, formato dalle potenze  $\underline{S}_S$ , delimita l'area delle potenze alla partenza, mentre il contorno r, formato dalle potenze  $\underline{S}_R$ , delimita l'area delle potenze all'arrivo, nel rispetto dei vincoli prefissati. Può essere dimostrato analiticamente che i contorni sono composti da archi di circonferenza e da archi d'ellisse a seconda dei casi.

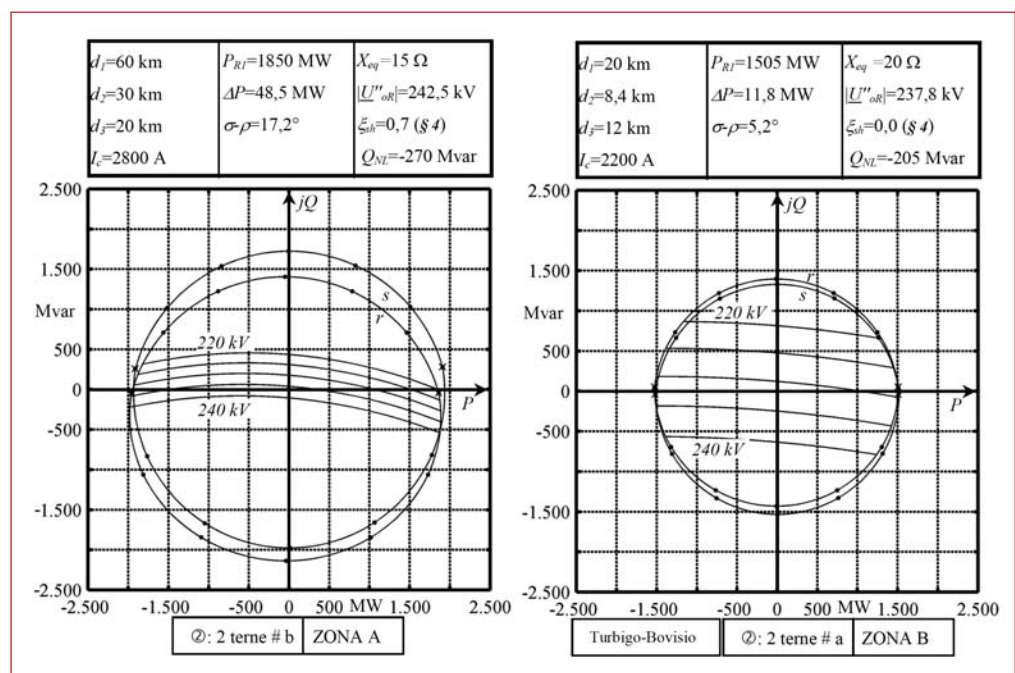
Ad intervalli regolari, è possibile poi marcare le potenze complesse  $\underline{S}_S$  e  $\underline{S}_R$  con coppie di punti sopra le curve s e r: la loro corrispondenza è facilmente individuabile dalla mutua prossimità (Figura 2). Le differenze  $\underline{S}_S - \underline{S}_R$  indicano nella parte reale le perdite attive di trasmissione e nella parte immaginaria la potenza reattiva richiesta dalla intera linea mista (inclusa la compensazione reattiva se presente). Le coppie di punti indicate con x rappresentano quei particolari regimi caratterizzati da  $|L_K| \equiv |L_H| \equiv I_c$ . Queste capability chart danno così informazioni visive immediate sulle performance dei flussi di potenza attuabili con il collegamento. In più, come mostrato in figura 2, ciascuna capability viene arricchita con i seguenti parametri di trasmissione (circostanziando ancor più la power quality):

- Massima potenza all'arrivo  $P_{R1}$  a  $\cos\varphi = 1$  con le corrispondenti perdite attive  $\Delta P$  e la differenza d'angolo  $\sigma-\rho$  tra  $\underline{U}_{oS}$  e  $\underline{U}_{oR}$ ;
- Livelli di tensione in R;
- Grado di compensazione derivata  $\xi_{sh}$  (per la sezione ②) necessario per limitare a  $U_m/\sqrt{3}$  le sovratensioni subtransitorie  $U''_{oR}$ , nel caso di inserzione a vuoto (vedi capitolo seguente) per una prescelta  $X_{eq}$ ;
- Potenza reattiva capacitiva  $Q_{NL}$  assorbita a regime permanente in S dalla linea a vuoto in R, con il prescelto  $\xi_{sh}$ .

**A. Massima potenza attiva all'arrivo  $P_{R1}$  con fattore di potenza unitario, perdite attive  $\Delta P$  e differenza d'angolo  $\sigma-\rho$**

La massima potenza attiva all'arrivo  $P_{R1}$  (a  $\cos\varphi = 1$ ) appare molto significativa al fine di valutare

**Figura 2** ▶  
Esempi di capability chart



le performance di maggiore interesse nei flussi di potenza della linea mista, congiuntamente alle perdite  $\Delta P$  e alla differenza d'angolo  $\sigma - \rho$ .

**B. Livelli di tensione in R**

Dato che i livelli di tensione nei diversi nodi giocano un ruolo chiave nell'esercizio della rete, risulta molto utile visualizzare direttamente, nell'area delle potenze all'arrivo delle capability chart, il livello di tensione nel nodo R per mezzo di curve parametrizzate implementando le classiche espressioni delle potenze in arrivo  $S_R$  con i dati desumibili dalla matrice  $M_{123}$ , che intercorre tra le estremità S e R. Una volta fissato il livello di tensione alla partenza  $U_{oS} = 230 \text{ kV} \angle \sigma$  e ponendo il livello di quella all'arrivo  $U_{oR} \angle \rho$  (con ampiezza 220, 225, 230, 235, 240 kV) è possibile attribuire adeguati valori  $\sigma - \rho$  in modo tale da determinare le potenze complesse  $S_R$ . In tal modo possono essere individuati i regimi che non sono accettabili a causa di livelli di tensione eccessivamente alti o bassi in R (anche se compatibili con il limite  $I_C$ ): per esempio, consistenti flussi di potenza reattiva o attiva su lunghe distanze.

Anche i soli due esempi riportati in figura 2 sono sufficienti a mostrare come le capability chart in-

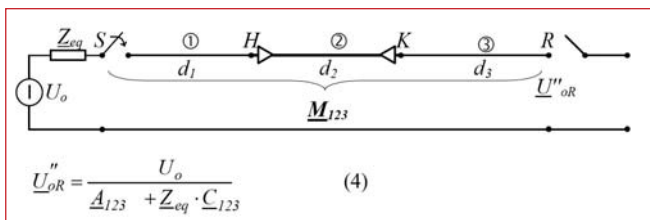


Figura 3 Linea mista a vuoto in R

quadrino con immediatezza le differenti prestazioni conseguenti alle due diverse realizzazioni e permettano agevoli confronti. Ci si limita in questa sede a rilevare brevemente come la linea Turbigo-Rho-Ospiate [4], caratterizzata a fronte del primo esempio da minori lunghezze  $d_1$ ,  $d_2$  e  $d_3$ , con tronco ②, meno consistente per sezione e lunghezza, chiamata a rispettare il limite  $I_C = 2200 \text{ A}$  (Zona B, periodo freddo) presenta aspetti interessanti principalmente per:

- nessuna necessità di compensazione derivata, data la limitatezza di  $d_2$ , anche nell'evenienza di  $X_{eq} = 20 \Omega$  ben superiore ai valori (8 ÷ 12  $\Omega$ ) previsti in  $S \equiv \text{Turbigo}$ : ciò comporta anche (v.  $Q_S - Q_R$  lungo i contorni s e r) che le potenze reattive impegnate dall'intera linea siano di natura capacitiva;
- rilevante potenza  $P_{R1} = 1505 \text{ MW}$  e modesta  $\Delta P = 11,8 \text{ MW}$ ;
- buoni livelli di tensione in R in ampio campo dei limiti di capability;
- limitata potenza capacitiva a vuoto  $Q_{NL} = -205 \text{ Mvar}$ .

Si segnala che le suddette procedure ammettono anche casi con lunghezze  $d_1$  e/o  $d_3$  nulle.

**Messa in tensione (energizzazione) della linea a vuoto**

La suscettanza capacitiva chilometrica del tronco ②, (ad esempio 2 terne #b) vale circa 35 volte quella della linea aerea e richiede (a seconda della lunghezza  $d_2$ ) cospicue potenze reattive capacitive: questa suscettanza capacitiva condiziona sensibilmente le capability chart e gioca un ruolo

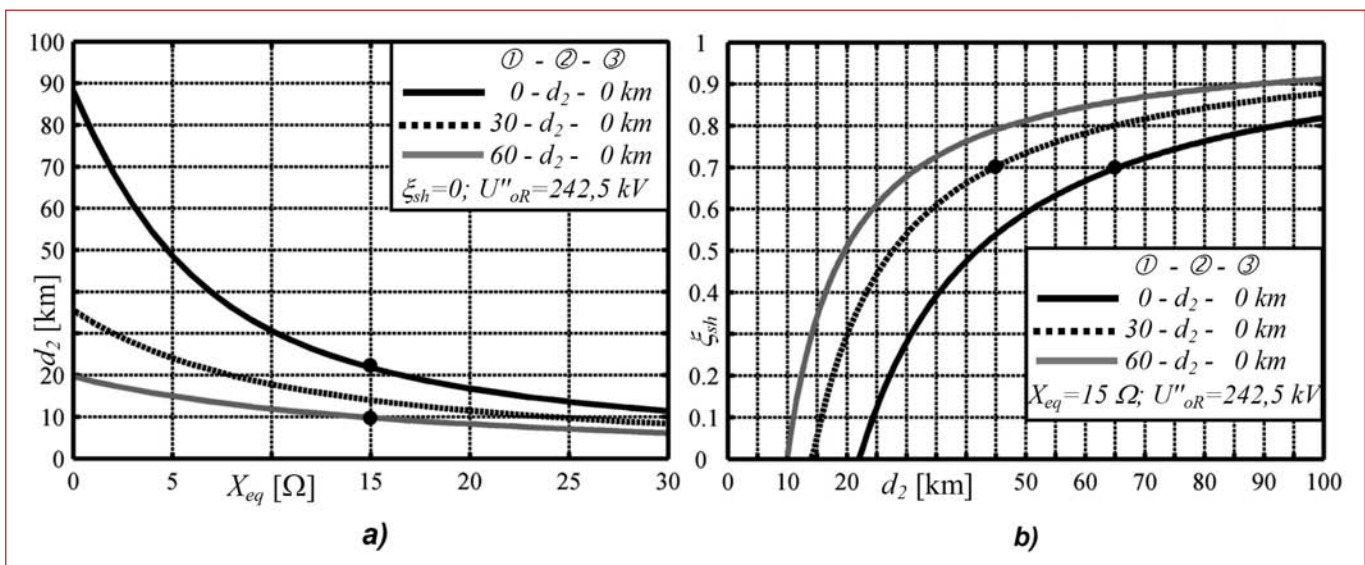


Figura 4 Esempi di lunghezza limite  $d_2$  del cavo ( $\xi_{sh} = 0$ ) in funzione della reattanza  $X_{eq}$  di corto circuito e del grado di compensazione  $\xi_{sh}$  in funzione della lunghezza  $d_2$

chiave sui regimi permanenti e transitori della linea mista a vuoto. Considerando la doppia terna #b, è possibile calcolare la consistente potenza capacitiva  $Q_C \approx 2 (3 U_o^2 \omega c) = 23 \text{ Mvar/km}$  a 50 Hz (28 Mvar/km a 60 Hz): diventa così prevedibile che la compensazione reattiva derivata sia quasi sempre necessaria per i benefici effetti sia sulle capability chart sia sulle sovratensioni di manovra nella linea a vuoto. Infatti, nell'esercizio della rete, un evento molto ricorrente è rappresentato dalla energizzazione di linea a vuoto: esso è molto più significativo di altri (ad esempio la perdita di carico) perché risulta ineludibile per preparare la struttura di esercizio di qualsiasi rete elettrica.

Il circuito di figura 3 mostra la chiusura dell'interruttore in S al fine di energizzare la linea mista e serve come primo approccio, approssimato ma significativo, per evidenziare la natura dei fenomeni. L'alimentazione in S può essere modellizzata come un generatore equivalente (visto dal nodo S appartenente ad una data rete) caratterizzato dalla sua forza elettromotrice  $U_o$  (supposta uguale a 230 kV) e dalla reattanza di corto circuito subtransitoria  $Z_{eq}$  (per semplicità puramente induttiva  $Z_{eq} = jX_{eq}$ ).

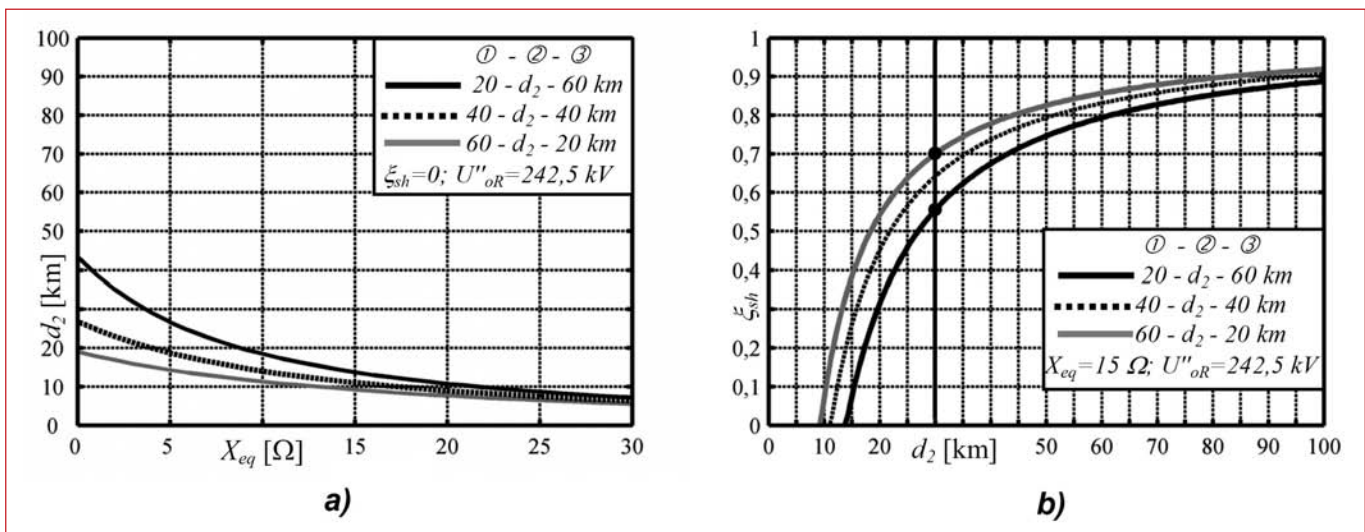
La tensione subtransitoria a vuoto  $\underline{U}_{oR}''$  in R, dovuta alla chiusura dell'interruttore in S, è definita in figura 3 dalla (4) essendo  $\underline{A}_{123}/\underline{C}_{123}$  l'impedenza (quasi completamente capacitiva) vista da S con R a vuoto (vedi [1]).

Per quanto riguarda una valutazione di  $Z_{eq} \approx jX_{eq}$  ci si può riferire agli studi eseguiti da Terna e riportati in [5]: dai dati elaborati si può risalire, per i nodi delle rete a 380 kV, a valori di  $X_{eq}$  (reattanza subtransitoria alla sequenza diretta) prevedibili nell'intervallo  $4 \div 23 \Omega$ .

Al fine di rispettare con un adeguato margine cautelativo i livelli d'isolamento standard agli impulsi di manovra (fissato a 1050 kV), sembra consigliabile che il modulo del fasore  $\underline{U}_{oR}''$  non abbia a superare l'ampiezza  $U_m/\sqrt{3} = 242,5 \text{ kV}$ . Il valore di  $x_{sh}$  necessario per avere  $|\underline{U}_{oR}''| = 242,5 \text{ kV}$  nella (4) può essere facilmente calcolato con iterazioni automatiche una volta fissati i parametri  $d_1, d_2, d_3, X_{eq}, U_o$ . Dal momento che l'obiettivo dipende dai numerosi parametri citati, le figure 4 a) e b) riportano solo alcuni esempi che aiutano a comprendere il fenomeno. Le curve di figura 4 a) mostrano ad esempio che con  $\xi_{sh} = 0$  e  $X_{eq} = 15 \Omega$  la lunghezza  $d_2$  del cavo non può superare 22 km se  $d_1 = 0$  e addirittura 10 km se  $d_1 = 60 \text{ km}$ . Le curve di figura 4 b) - con  $X_{eq} = 15 \Omega$  - mostrano per esempio come (posto  $d_3 = 0$ ) il tronco in cavo con  $\xi_{sh} = 0,7$  può raggiungere  $d_2 = 65 \text{ km}$  se  $d_1 = 0 \text{ km}$  o  $d_2 = 45 \text{ km}$  se  $d_1 = 30 \text{ km}$ . È opportuno notare che la linea aerea ① introduce principalmente (a 50 Hz) una reattanza longitudinale ( $\approx 0,27 \Omega/\text{km}$ ) che si aggiunge alla reattanza  $X_{eq}$  con tutte le ovvie conseguenze (ovvero riduzione della lunghezza del tronco in cavo, aumento del grado di compensazione). Una volta calcolato il valore di  $\xi_{sh}$  per mezzo della (4), risulta utile stimare tramite la (5) la potenza (quasi completamente capacitiva) assorbita dalla linea mista a vuoto alimentata nel nodo S con la tensione nominale a regime permanente  $U_o$  (per esempio 230 kV) nell'ipotesi che, dopo i transitori di manovra, essa venga ripristinata:

$$\underline{S}_{NL} = 3 \cdot U_o^2 \cdot \frac{\underline{C}_{123}^*}{\underline{A}_{123}^*} \approx j Q_{NL} \quad (5)$$

(\*: complesso coniugato)



▲ **Figura 5**

Esempi di lunghezza limite  $d_2$  del cavo ( $\xi_{sh} = 0$ ) in funzione della reattanza  $X_{eq}$  di corto circuito e del grado di compensazione  $\xi_{sh}$  in funzione della lunghezza  $d_2$

Nella progettazione della linea mista si deve accertare, con gli appropriati studi di flussi di potenza, che la  $Q_{NL}$  sia compatibile con il regime permanente della rete circostante anche con riguardo all'eventualità di autoeccitazione in generatori sincroni di taglia modesta [6] e che gli interruttori di linea previsti siano adeguati alla corrispondente manovra di apertura. Si ricorda che la norma CEI EN 62271-100 suggerisce, per l'altissima tensione, un valore preferenziale di corrente d'interruzione nominale di cavi a vuoto pari a 400 A.

Le figure 5 a) e b) considerano esempi in cui  $d_3 > 0$ . È evidente che l'energizzazione della linea mista dal nodo R deve essere valutata considerando le lunghezze delle tre sezioni nel giusto ordine: ad



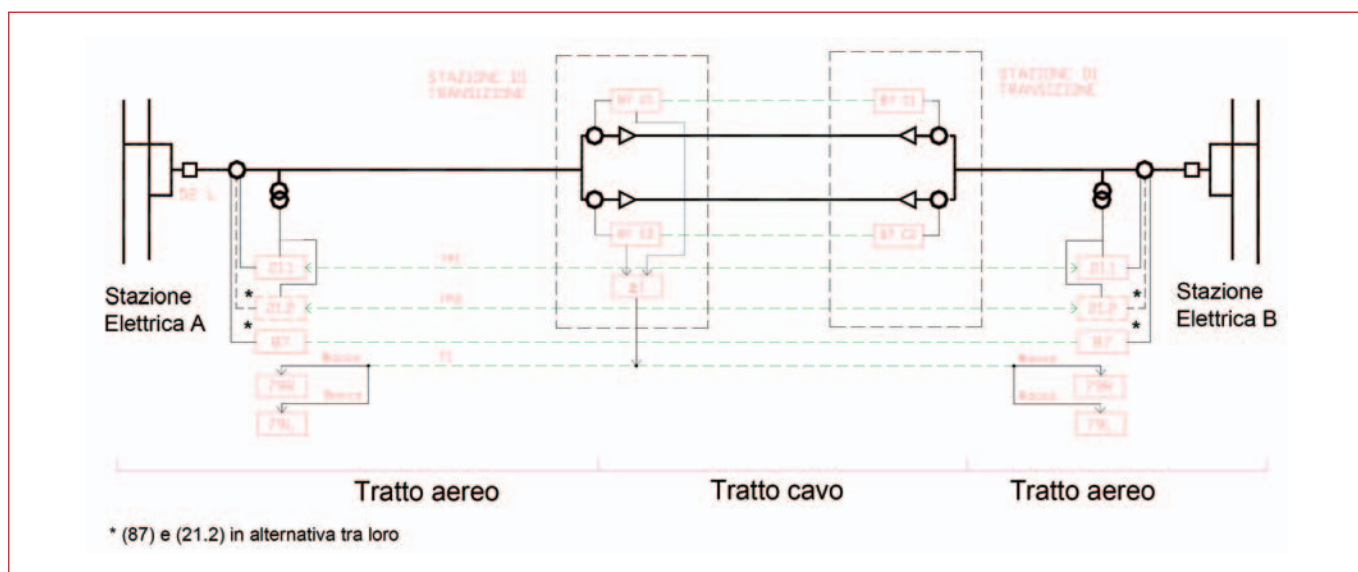
Foto: Archivio Terna

esempio, se l'ordine da S a R delle lunghezze  $d_1, d_2, d_3$  è 60, 30, 20 km, quando l'energizzazione avviene da S deve essere considerata la curva grigia di figura 5 b), mentre si farà ricorso alla curva nera se l'energizzazione è prevista dall'estremo R. Se i "generatori equivalenti" visti alle estremità fossero uguali (stessi valori per  $U_o = 230$  kV e  $X_{eq} = 15 \Omega$ ) sarebbe consigliabile energizzare da R, che richiede un più basso grado di compensazione. D'altro canto, è probabile che il nodo d'arrivo R sia debole ( $X_{eq}$  piuttosto alta) così da risultare meno idoneo di S all'energizzazione della linea a vuoto: la ricerca di "best-end switching" [7] viene ricordata dal CEGB come una pratica efficace nell'esercizio della rete. È banale ricordare la possibilità da parte del TSO (*Transmission System Operator*) di energizzare la linea con tensione temporaneamente ridotta. Queste prime significative considerazioni sui funzionamenti a vuoto devono essere integrate da un'analisi approfondita dei flussi di potenza e da simulazioni di rete al fine di fissare definitivamente il grado di compensazione derivata della linea in cavo.

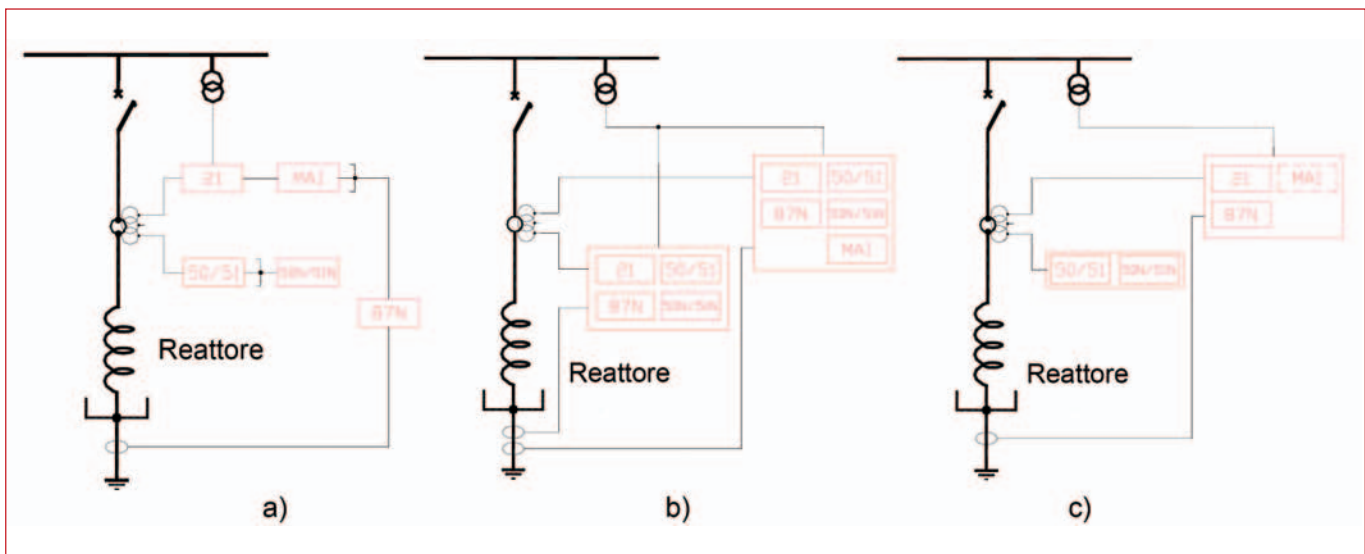
Come già precisato, per la determinazione di  $\xi_{sh}$ , si è assunta l'ipotesi di compensazione uniformemente distribuita ed è stato sempre verificato che sia le capability chart sia la tensione subtransitoria dovuta all'energizzazione della linea rimangono pressoché inalterate applicando (con lo stesso  $\xi_{sh}$ ) la compensazione concentrata su intervalli di lunghezza non maggiori di 15 ÷ 20 km.

### Sistema di protezione di linea mista e reattori di compensazione

Come già esposto in [8], il principio della doppia protezione [9] per l'intera linea (Figura 6) può es-



**Figura 6**  
Protezioni linea mista con cavo 380 kV in doppia terna



**Figura 7** Architettura del sistema di protezione

essere soddisfatto da una protezione distanziometrica (21) affiancata ad una protezione differenziale (87). Specialmente se il tratto in cavo è una parte significativa dell'intero sviluppo della linea, tale soluzione viene privilegiata rispetto a quella classica costituita da due protezioni distanziometriche. Va tuttavia considerato che spesso risulta difficoltoso disporre di vettori idonei (essenzialmente fibre ottiche) richiesti dalla protezione differenziale per la comunicazione tra le due estremità della linea, cosicché la soluzione con due protezioni distanziometriche (21.1 e 21.2) si impone per la maggiore facilità di applicazione. Ciascuna terna di cavi sarà inoltre dotata di un relè differenziale aggiuntivo avente lo scopo di individuare l'eventuale presenza di un guasto e facilitare una pronta ripresa del servizio tramite sezionamento della terna guasta e rimessa in esercizio del collegamento con la sola terna sana. Gli stessi relè 87C1 e 87C2 vengono utilizzati anche per bloccare l'intervento delle richiuse automatiche rapide e lente in caso di guasto nei cavi stessi. Nel caso invece di guasti nei tronchi aerei vengono consentite sia la richiusura rapida (79R) che quella lenta (79L).

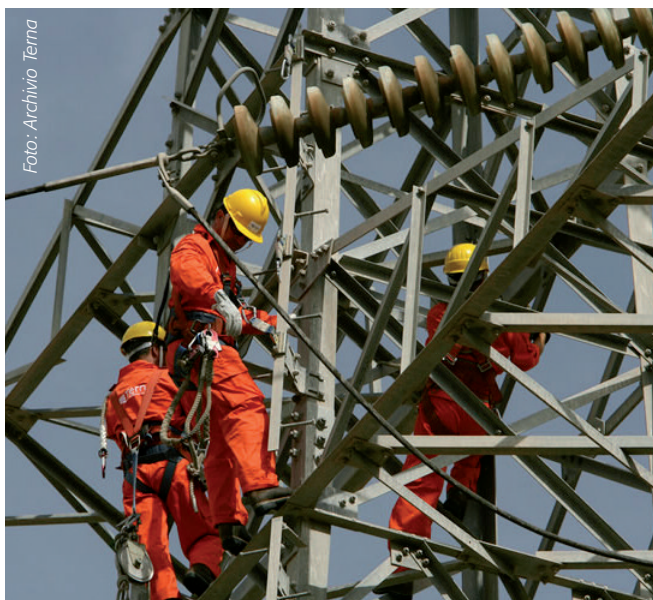
### Architettura del sistema di protezione del reattore

Le differenze d'esecuzione dei reattori possono influenzare le opzioni relative al sistema di protezione. Se, ad esempio, il reattore è formato da tre unità monofase, le sei estremità degli avvolgimenti sono disponibili all'esterno delle casse e ciò rende possibile l'impiego di una protezione differenziale a copertura di ciascun avvolgimento. La stessa protezione non può essere però applicata ai reattori trifase perché, per ragioni di eco-

nomia e di affidabilità, la connessione a stella è realizzata all'interno del cassone ed all'esterno sono portati solo i tre terminali di fase e quello di neutro. Per evitare di differenziare il sistema di protezione in funzione del tipo di macchina e cogliere tutti i vantaggi sia gestionali sia economici della uniformità, viene proposto un sistema di protezione unico applicabile, con pari grado di efficacia, a tutte le situazioni che possono presentarsi senza distinzione di livello di tensione, taglia e tipologia costruttiva delle macchine e utilizzabile sia per i reattori inseriti negli stalli linea che per quelli derivati dalle sbarre di stazione. L'unica differenza, come successivamente specificato, riguarda il requisito della ridondanza che, in funzione della posizione e dell'importanza dell'impianto nella rete, può richiedere o meno il raddoppio del sistema di protezione. I tipi di guasto ed i funzionamenti anomali considerati sono i seguenti: scariche sugli isolatori passanti, guasti a terra degli avvolgimenti, corto circuiti tra le fasi, guasti nel nucleo magnetico, interruzioni di fase, corto circuiti tra le spire e sovrariscaldamento degli avvolgimenti. Oltre alle protezioni usualmente montate dal costruttore a bordo della macchina:

- Buchholz (97);
  - Protezione di massima temperatura (26);
  - Protezione di sovrappressione (63),
- per l'equipaggiamento dello stallo reattore vengono indicate le seguenti protezioni elettriche:
- Protezione di terra ristretta (87N);
  - Protezione di minima impedenza (21);
  - Protezione di massima corrente omopolare (50N/51N);
  - Protezione di massima corrente di fase (50/51).

Le protezioni elettriche 21, 50/51, 87N, 50N/51N,



MAI (protezione contro la mancata apertura dell'interruttore) possono essere disposte nel montante reattore nel modo indicato in figura 7 a) che illustra il collegamento dei relè ai riduttori di corrente e di tensione. Nella organizzazione del complesso di tali protezioni occorre tenere conto delle soluzioni tecnologiche oggi offerte dal mercato ed in particolare della disponibilità di protezioni multifunzione che concentrano in uno stesso apparato più funzioni ed anche l'intero insieme protettivo sopra definito. Nelle stazioni dove, per le esigenze della sicurezza e della ridondanza è richiesto un sistema di protezione in doppio, ogni stallo reattore sarà dotato di due apparati uguali funzionanti in parallelo, ognuno dei quali comprenderà tutte le protezioni in precedenza individuate ad eccezione della protezione MAI che sarà presente in uno solo di essi. I due sistemi integrati di protezione saranno alimentati da correnti di fase prelevate da nuclei diversi della terna di TA dello stallo reattore e da correnti di neutro prelevate da due distinti TA toroidali montati sul collegamento di terra del centro stella del reattore. La figura 7 b) illustra la configurazione descritta.

Nelle situazioni di impianto ove, invece, è sufficiente un sistema di protezione singolo le funzioni protettive possono essere opportunamente ripartite su due apparati avendo cura di assegnare una funzione contro i guasti tra le fasi ed una contro i guasti a terra a ciascun apparato. La figura 9 c) illustra il criterio raccomandato.

## Conclusioni

Le linee in cavo e le linee miste che possono ridurre sensibilmente, in virtù della loro adattabilità, i problemi di percorso nel territorio sono argomento

di grande attualità nella letteratura tecnica [v. bibliografia]. In questa memoria si richiamano sinteticamente da [1] procedure di carattere generale per linee composite a tre tronchi (areo-cavo-aereo) che consentono di costruire capability chart (utili per il progetto e per l'esercizio sia di linea mista sia di linea in solo cavo) in grado di mostrare con evidenza le diverse prestazioni dell'intera linea attuabili nel rispetto dei vincoli di ampacity e dei livelli di tensione. Viene considerato anche un caso concreto (linea mista 380 kV Turbigio-Rho-Ospiate) realizzato recentemente nella rete italiana e si riportano i criteri per le protezioni della linea e dei reattori di compensazione. Il tempo di calcolo per una capability chart utilizzando un PC Pentium 2,8 GHz, RAM 1048 Mb, è di circa 4 secondi. Nell'ambito della memoria si fornisce anche un preciso criterio per determinare il grado di compensazione derivata nel tronco in cavo.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Benato, A. Paolucci: "Operating Capability of Long AC EHV Mixed Lines with Overhead and Cable Links", memoria accettata da *Electric Power Systems Research*.
- [2] R. Benato, A. Paolucci: "Operating Capability of Long AC EHV Transmission Cables", *Electric Power Systems Research*, Vol. 75/1, luglio 2005, pp. 17-27.
- [3] R. Benato, A. Mansoldo, A. Paolucci: "Prestazioni limite di cavi per AAT su lunghe distanze", *AEIT*, 2005, N° 9, pag. 8-18.
- [4] R. Rendina, A. Posati, M. Rebolini, G. Bruno, F. Bocchi, M. Marelli, A. Orini: "The new Turbigio-Rho 380 kV transmission line: an example of the use of underground XLPE cables in a meshed transmission grid", *CIGRÉ 2006*, B1-301.
- [5] Terna Rete Elettrica Nazionale: "Valori minimi e massimi convenzionali di potenza di cortocircuito della rete rilevante con tensione 380-220-150-132 kV", [www.terna.it](http://www.terna.it).
- [6] R. Benato, L. Fellin, A. Lorenzoni, A. Paolucci: "Sistemi di trasmissione nel territorio", *AEI*, Vol. 88, N° 12, dicembre 2001, pp. 28-35.
- [7] British Electricity International: *Modern Power Station Practice*, Vol. K, EHV Transmission, Chapter 9, Sect. 3.3 "Control of switching surges", *Pergamon Press (Third Edition, 1991, Oxford)*.
- [8] L. Caciolli, C. Di Mario: "Sistemi di protezione delle linee in cavo XLPE e dei reattori shunt associati", *AEIT*, 2005, N° 9, pag. 36-45.
- [9] GRTN, Criteri generali di protezione delle reti a tensione uguale o superiore a 120 kV, [www.terna.it](http://www.terna.it).
- [10] F.M. Gatta, S. Lauria: "Very long EHV cables and mixed overhead-cable lines. Steady-state operation.", *Proceedings of IEEE St. Petersburg Power Tech'05 Conference*, 27-30 giugno 2005, St. Petersburg, Russia.



Lo scorso 24 febbraio è stata inaugurata la linea elettrica a 380 kV "Turbigio - Rho", uno dei principali interventi del Piano di sviluppo della rete di trasmissione nazionale elaborato da Terna. L'elettrodotto "Turbigio-Rho" riveste un ruolo di primaria importanza per l'ammodernamento del sistema di trasmissione dell'energia elettrica nel nord-ovest dell'Italia, e per questo è stata inserita tra le opere di "preminente interesse nazionale". In particolare per l'area di Milano, l'elettrodotto risulta decisivo per aumentare la sicurezza della rete in una zona ad alta densità abitativa e industriale. In Lombardia, inoltre, Terna ha in programma tre ulteriori interventi prioritari di sviluppo e razionalizzazione per un totale di circa 180 km di linee, con un investimento di circa 200 milioni di euro. In particolare: la nuova linea a 380 kV Trino - Lacchiarella, e le razionalizzazioni dell'area di Lodi e di Milano. Questi, in sintesi, i benefici dell'elettrodotto "Turbigio - Rho":

- 1.000 MW di capacità in più per la copertura del fabbisogno nell'area interessata;
- eliminazione della congestione di rete nella zona, con conseguente "sblocco" della produzione delle due centrali del polo di Milano, quella termoelettrica di Turbigio (1.600 MW) e quella di pompaggio di Roncavalgrande (960 MW), prima limitate e che invece oggi possono destinare interamente l'energia prodotta al consumo nell'area di Milano. Questo favorisce un aumento della disponibilità di energia elettrica in condizioni di maggiore sicurezza;
- aumento della sicurezza, dell'affidabilità e dell'efficienza della rete ad alta e altissima tensione nell'area di Milano;
- riduzione delle perdite di rete per circa 150 milioni di kilowattora all'anno, con un risparmio pari a circa 10 milioni di euro/anno.

La nuova linea, lunga 28 km di cui 20 aerei e 8 interrati per ridurre al minimo l'impatto sul territorio, ha interessato 11 Comuni della Provincia di Milano (Robecchetto con Induco, Cuggiolo, Inveruno, Busto Garolfo, Casorezzo, Parabiago, Arluno, Nerviano, Vanzago, Pogliano Milanese e Rho) e alcuni parchi (tra i quali: Parco del Ticino, Parco del Roccolo, la Riserva Naturale WWF Bosco di Vanzago e il Parco agricolo Sud Milano). L'iter autorizzativo, comprensivo della fase di concertazione con le singole aree territoriali coinvolte, è stato articolato: dal 2001 al 2002 la concertazione; dal 2003 al 2004 l'autorizzazione; nel 2005 l'apertura cantiere e nel 2006 la chiusura. I lavori sono stati effettuati dai tecnici di Terna con un investimento totale di circa 40 milioni di euro. L'opera ha coinvolto 5 diverse imprese e 70 addetti altamente specializzati. La costruzione dei 48 tralicci di cui si compone la linea ha richiesto oltre 1.000 tonnellate di carpenteria metallica e 320 tonnellate di conduttori installati; sono state inoltre costruite due nuove stazioni elettriche di conversione aereo-cavo (Pogliano Milanese e

Rho). Contestualmente Terna ha smantellato 25 km di vecchie linee a 220 kV (tra Turbigio e Ospiate) come opera di compensazione ambientale gestendo, inoltre, anche la sistemazione del Bosco di Arbuno Brugliereza e dell'inserimento della vegetazione nel Parco Lombardo.

I criteri di progetto adottati nella scelta dei tracciati della nuova linea sono stati concordati con Regione, Provincia e singoli Comuni, nel rispetto dell'ambiente e della comunità. I tecnici di Terna hanno realizzato l'opera adottando soluzioni tecnologiche all'avanguardia (mix aereo-cavo interrato) che hanno richiesto forte capacità di innovazione nella ricerca del miglior tracciato possibile in un'area fortemente antropizzata e con vincoli ambientali e paesaggistici (parchi, riserve naturali, siti di interesse comunitario, zone di protezione speciale, zone boschive).

Nel corso del 2006 Terna ha concluso circa 60 interventi tra elettrodotti e stazioni. Oltre alla Turbigio-Rho, nel 2006 sono stati realizzati due nuovi elettrodotti: il cavo di interconnessione a 150 kV tra Sardegna e Corsica (SAR.CO) e la linea "Matera-Santa Sofia", completata a dicembre 2006, che con i suoi 220 km rappresenta il più lungo elettrodotto a 380 kV in Italia.

All'inaugurazione della nuova linea il Presidente di Terna Luigi Roth ha evidenziato come tra le principali linee guida dell'attività di Terna nella sua missione di gestore della Rete di Trasmissione vi sia garantire l'efficienza, lo sviluppo e la sicurezza del sistema elettrico nazionale. La linea Turbigio-Rho, in particolare, è anche un caso di successo nei rapporti con le istituzioni locali e con il territorio e rappresenta un paradigma dell'attività che Terna sta realizzando anche per le altre linee già in concertazione con Regioni ed Enti locali. Più un'opera è strategica, tanto più è necessario promuovere un giusto equilibrio tra esigenze energetiche e salvaguardia dell'ambiente circostante.

Nel piano strategico 2007-2011 Terna investirà, in sviluppo ed altri investimenti, 2,7 miliardi di euro in opere infrastrutturali di grande rilevanza per il Paese, con una crescita del 35% rispetto a quanto annunciato lo scorso anno (oltre 2 miliardi di Euro). L'incremento del piano di investimenti è sostanzialmente legato ai progetti di sviluppo, che rappresentano l'80% del totale, e che passano da 1,4 miliardi di euro, annunciati lo scorso anno, a 2,2 miliardi. Questo impegno di Terna è volto a rilanciare gli investimenti in un settore cardine per l'efficienza del mercato e per la sicurezza della fornitura di energia elettrica: la rete nazionale di trasmissione.

Per Terna la ricerca di un giusto equilibrio fra le esigenze di sviluppo delle infrastrutture elettriche e la salvaguardia dell'ambiente e del territorio è un elemento di fondamentale importanza. Sviluppare la rete non implica solo costruire nuove linee ma anche razionalizzare l'assetto attuale, ossia eliminare elettrodotti obsoleti con evidenti vantaggi ambientali. In tale ottica va sottolineato che nei prossimi dieci anni saranno abbattuti 1.000 km di vecchie linee su 1.700 km di lavori programmati.