

Linee aeree dette a “5 Fasi” per la riduzione dei campi elettrici e magnetici

Maria Rosaria Guarniere, Francesco Palone, Roberto Spezie Terna SpA • Luciano Zuccolo Specialista Linee Aeree AAT

Terna ha sviluppato una nuova generazione di sostegni in grado di minimizzare i campi elettrici e magnetici prodotti dalle linee aeree in AT perseguendo, al contempo, la massima sostenibilità e la migliore interazione visiva con l'ambiente

Introduzione

La correlazione tra campi elettrici e magnetici a bassissima frequenza ELF (*Extremely Low Frequency*) e la salute dell'uomo, rappresenta uno degli argomenti più critici nello sviluppo e nell'esercizio delle infrastrutture di trasporto dell'energia elettrica.

Nonostante vi siano infatti limitate evidenze scientifiche di un rapporto di causalità tra campi elettrici e magnetici ELF prodotti dagli elettrodotti ed effetti a lungo termine sulla salute, la legislazione italiana ha adottato limiti di esposizione molto restrittivi [1 e 2], se paragonati con quelli suggeriti dalle principali istituzioni europee e internazionali [3].

La presenza di tali limiti comporta conseguenze non indifferenti nella pianificazione, progettazione e nell'esercizio delle infrastrutture elettriche convenzionali, con potenziali riflessi anche sulla trasmissione di energia rinnovabile e l'efficienza della rete AT di trasmissione. Per far fronte alle problematiche sopra descritte Terna ha sviluppato una nuova generazione di sostegni, a “5 Fasi”, in grado di ridurre drasticamente i campi elettrici e magnetici prodotti dalle future linee elettriche aeree, così realizzate. Il tutto con una migliore interazione paesaggistica sui territori, grazie al contenimento delle dimensioni e alla ricerca della gradevolezza delle forme.

Gli elettrodotti aerei a “5 Fasi” potranno essere impiegati sia nelle reti regionali di sub-trasmissione, a 132 e 150 kV, sia nella rete di trasmissione ad altissima tensione (220 e 380 kV) e

potranno rappresentare quindi uno strumento di significativa efficacia per abilitare la transizione energetica del sistema elettrico nazionale.

Questo articolo descrive le prestazioni dei nuovi elettrodotti aerei a “5 Fasi” (figura 1), nei termini di interazioni antropiche e in particolare ne confronta il comportamento con linee di tipo convenzionale, in riferimento ai campi elet-



Figura 1
Sostegno a traliccio tipo “5 Fasi”

trici e magnetici, di livello di pressione sonora (rumore) e radio-interferenza per effetto corona. Ulteriori approfondimenti scientifici sono in fase di completamento per definire i benefici in termini di capacità di trasporto di potenza attiva su lunghe distanze.

Campi elettrici e magnetici, limiti di legge e impatti sulle linee elettriche aeree

La presenza di campi elettromagnetici nello spazio è una condizione necessaria al trasporto di potenza tramite linee elettriche. Infatti, adottando un approccio fisico/campistico e ricordando il teorema di Poynting è possibile esprimere la potenza attiva trasportata da una linea elettrica come:

$$P_{attiva} = \operatorname{Re} \left[\iint_{St} (E \times H^*) dS \right]$$

essendo E e H i vettori dei campi elettrico e magnetico e St il piano trasversale all'asse della linea elettrica.

L'equazione sopra riportata evidenzia come, solo con la contemporanea presenza di un campo elettrico e di un campo magnetico, sia possibile trasportare potenza attiva [4]. Da questa realtà fisica deriva l'impossibilità di eliminare i campi elettrici e magnetici generati dalle linee elettriche per il trasporto di energia e la necessità di trovare nuove e sempre migliori soluzioni tecnologiche per la mitigazione delle possibili problematiche a esse correlate. Gli effetti dei campi elettrici e magnetici a frequenza di rete ELF sulla salute umana sono dibattuti da anni ma non è stata tuttavia mai stabilita una relazione causale certa né è stato appurato alcun altro effetto a lungo termine. Sulla base di questi studi sono stati identificati i livelli di riferimento per l'esposizione del pubblico a campi elettrici e magnetici; per la frequenza di rete di 50 Hz utilizzata in Europa, i suddetti livelli sono pari a 5 kV/m per il campo elettrico e 200 μ T per l'induzione magnetica [3].

Tali limiti sono stati recepiti, in modo ulteriormente restrittivo, dalle normative di riferimento europee che prevedono, per il campo magnetico, un limite di esposizione al pubblico di 100 μ T [5].

Anche in mancanza, a oggi, di una relazione scientificamente provata di causalità tra campi elettrici e magnetici a 50 Hz e danni alla salute, la legislazione italiana ha adottato limiti ulteriormente più stringenti per il campo magnetico. Il

DPCM 08/07/2003 [2] prevede infatti:

- un valore di attenzione di 10 μ T;
- un obiettivo di qualità di 3 μ T;

da intendersi, entrambi, come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio. I suddetti limiti sono maggiormente restrittivi, se confrontati con la pratica europea e internazionale e rappresentano una peculiarità della legislazione italiana.

Nella **figura 2** si riporta un confronto tra i valori limite per l'esposizione al pubblico del campo magnetico previsti dalla normativa nazionale di alcuni tra i principali paesi dell'unione Europea ed extra-europei.

Focalizzandoci sui paesi del Gruppo 3, che prevedono limiti più stringenti rispetto a quelli della raccomandazione europea, è possibile riscontrare che:

- In Slovenia si prevede un limite di 10 μ T per le nuove realizzazioni mentre, per quelle esistenti il valore limite è allineato a quello indicato dalle raccomandazioni europee [4] (100 μ T).
- In Croazia si prevede un limite di 40 μ T per le case, scuole, case di riposo, ecc..
- In Bulgaria sono previste delle distanze minime, in caso di nuove costruzioni, tra linee elettriche aeree e recettori sensibili. Non sono indicati valori limite di esposizione all'induzione magnetica per linee elettriche aeree.
- In Belgio sono presenti limiti su base regionale, applicati alle nuove costruzioni, variabili tra 100 μ T e valori inferiori.
- In Polonia è presente un limite di 75 μ T.

Il confronto internazionale evidenzia quindi come la legislazione italiana sia sostanzialmente tra le più cautelative in assoluto. Essa è inoltre l'unica a stabilire limiti sensibilmente più bassi rispetto alle raccomandazioni EU per l'esposizione del pubblico all'induzione magnetica di linee elettriche esistenti. Peraltro, è anche opportuno evidenziare come i valori limite dell'induzione magnetica dell'ICNIRP e della legislazione europea (di 200 μ T e 100 μ T), non essendo mai raggiunti per le linee elettriche aeree di alta e altissima tensione, non costituiscano mai una limitazione alla progettazione o all'esercizio di queste ultime. Al contrario, l'applicazione dei vigenti limiti della legislazione italiana (10 μ T valore di attenzione e 3 μ T obiettivo di qualità), comporta delle restrizioni nell'esercizio delle linee elettriche aeree esistenti e delle sostanziali difficoltà nella progettazione e realizzazione di nuovi elettrodotti aerei.

In termini di esercizio si riscontra, in diversi casi, una limitazione ai flussi di potenza ammis-

sibili sugli elettrodotti, comportando, in generale, maggiori costi per il sistema elettrico e una minore fruibilità delle fonti rinnovabili potenzialmente disponibili.

A livello di progettazione e realizzazione di nuovi impianti, il rispetto delle suddette soglie determina:

- ❑ maggiori vincoli al tracciato degli elettrodotti aerei e franchi da terra sensibilmente incrementati, con aumento dei costi strutturali e degli impatti ambientali/paesaggistici;
- ❑ maggiori costi per il frequente ricorso a linee elettriche in cavo interrato, anche dove non tecnicamente necessario.

Il tutto tende a rendere il sistema elettrico italiano meno competitivo rispetto alla maggior parte di altri paesi europei ed extra-europei, che non adottano limiti così stringenti in termini di campi elettrici e magnetici e nei quali gli elettrodotti aerei possono essere utilizzati in modo più intensivo per il trasporto di energia.

Allo scopo di rendere maggiormente efficiente e competitivo il sistema elettrico nazionale, nel rispetto peraltro dei criteri di sostenibilità, Terna si è sempre posta l'obiettivo di studiare

delle soluzioni progettuali all'avanguardia atte a consentire il trasporto di energia elettrica nel rispetto dei valori limite della legislazione nazionale. Se in passato Terna ha sviluppato soluzioni per linee elettriche aeree a bassi campi magnetici (quali ad esempio i loop passivi [7]), i nuovi sostegni a "5 Fasi" si inseriscono nel solco di un rinnovato processo di studio e ricerca tecnologica, rappresentandone la più recente ed efficiente evoluzione [8].

Sostegni a "5 Fasi" per la riduzione dei campi magnetici

Viste le particolari sfide derivanti dal quadro normativo nazionale sull'esposizione ai campi elettrici e magnetici, uno dei quesiti che ha visto maggiormente impegnate le strutture di Terna, volte allo sviluppo tecnologico, è stato il seguente:

"È possibile pensare a elettrodotti aerei in corrente alternata ad alta e altissima tensione, realizzati con soluzioni innovative e in grado di produrre campi elettrici e magnetici sensibilmente ridotti, rispetto alle soluzioni tradizionali?"

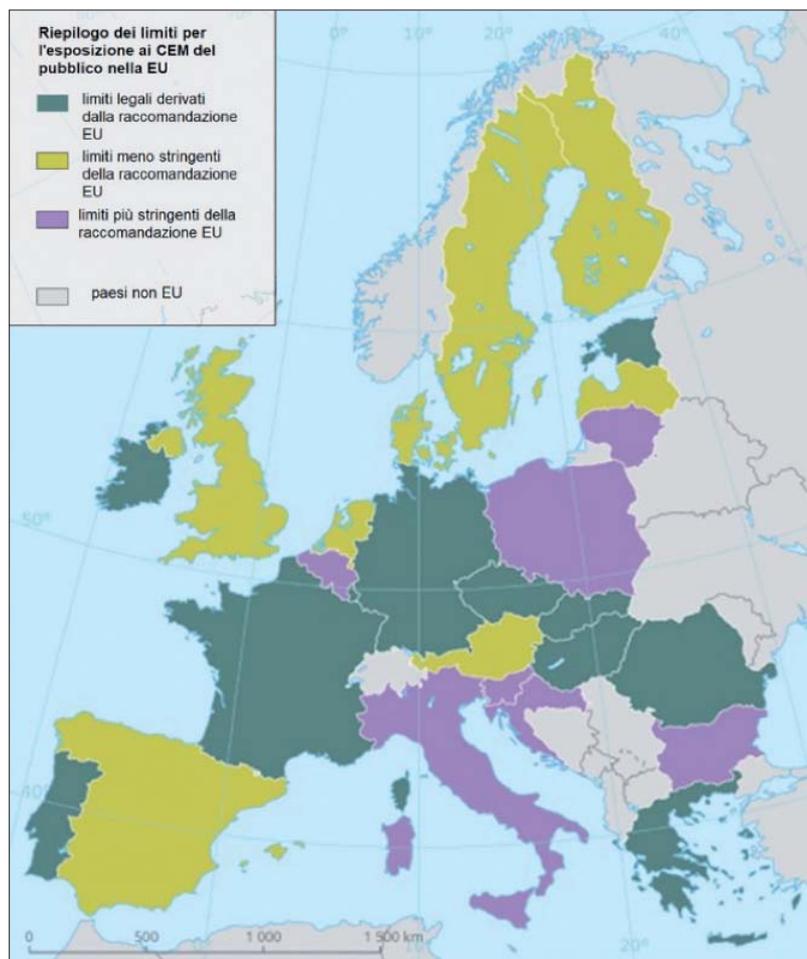


Figura 2

Limiti di esposizione della popolazione ai campi elettrici e magnetici, a frequenza di rete, nei vari paesi dell'Unione Europea [6]. Gli stati che hanno adottato una legislazione nazionale più restrittiva rispetto alle raccomandazioni europee sono rappresentati con il colore viola

Fino a oggi, la soluzione tecnologica più consolidata ed efficiente per la riduzione dell'induzione magnetica prodotta da una linea elettrica aerea è stata il passaggio da una palificazione in Singola Terna ST a una in Doppia Terna (singola terna sdoppiata e ottimizzata - STSO), rappresentata nella seguente **figura 3**.

La suddivisione della corrente elettrica totale di ogni singola fase (**figura 4**), secondo due conduttori contrapposti (o fasci di conduttori, per i livelli di tensione più elevati) e secondo

Figura 3
Geometrie tipiche dei sostegni ST e DT, a 220 kV

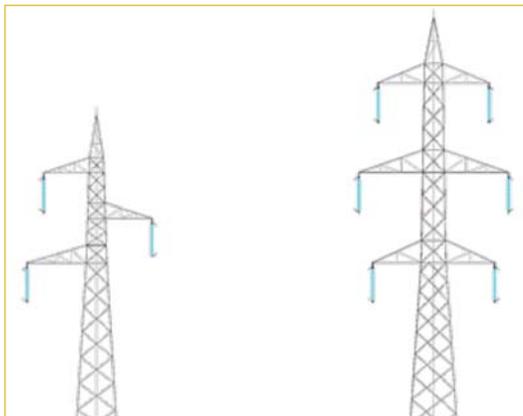


Figura 4
Disposizione anti-simmetrica delle fasi

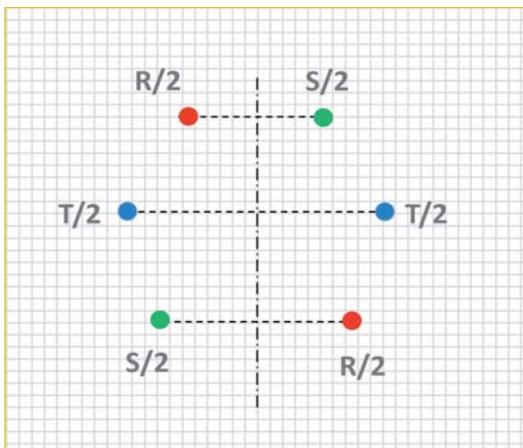
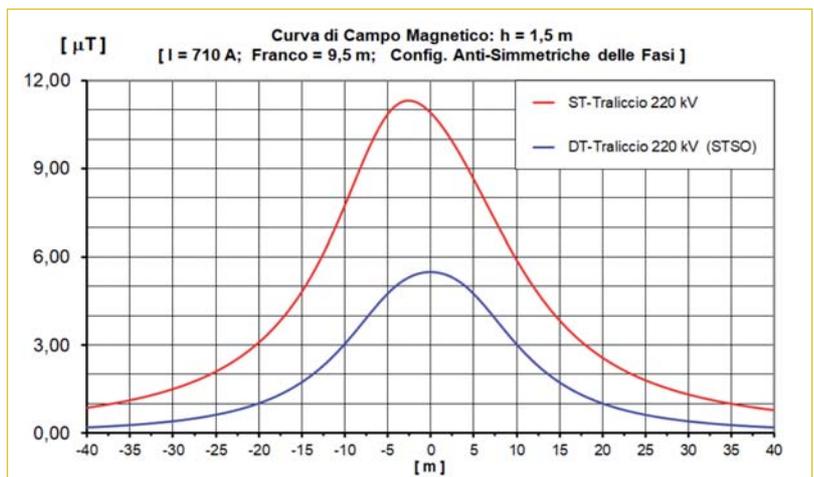


Figura 5
Distribuzione di campo magnetico di una ST e DT (STSO) a 220 kV, a parità di altezza utile



una disposizione anti-simmetrica delle fasi, consentono una buona riduzione del campo magnetico risultante prodotto dalla infrastruttura (**figura 5**) e che, in termini numerici, è possibile stimare attorno al 50% circa il massimo valore di induzione magnetica in corrispondenza dell'asse linea.

L'incremento della sezione conduttrice permette, inoltre, una riduzione delle perdite a parità di portata amperometrica.

Accanto a tale beneficio occorre tuttavia riscontrare anche lo svantaggio dell'incremento dell'altezza totale dei sostegni, con le conseguenti maggiori interazioni di tipo ambientale, paesaggistico e autorizzativo.

Il passo decisivo che ha portato a soddisfare il quesito sopra esposto è stato lo sviluppo degli innovativi sostegni a "5 Fasi", con l'ottimizzazione della disposizione dei conduttori nello spazio, nel rispetto delle distanze dielettriche sulla testa del sostegno e a centro campata. La disposizione ottimale per la minimizzazione della Distanza di prima Approssimazione (DpA), proiezione a terra della curva isocampo di 3 μT, è quella che vede la divisione della corrente elettrica di due fasi, in quattro distinti fasci di conduttori disposti ai vertici di un rettangolo e al cui centro rimane collocato il singolo fascio di conduttori della restante fase (**figura 6**).

L'implementazione di questa ideale disposizione delle fasi sulla testa-palo di un traliccio che potesse risultare di facile realizzazione, scalabilità con metodi tradizionali e, nel contempo, in grado di mantenere un'economia di costruzione in termini di quantità di materiali e costo unitario, ha impegnato gli autori per diversi anni, fino a giungere alla soluzione rappresentata in **figura 7**.

Si noti che lo sfasamento reciproco tra le fa-

si [9] di un elettrodotto a "5 Fasi" è pari a 0° o 120° elettrici, come accade negli elettrodotti convenzionali in semplice o doppia terna. Ciò rende possibile l'impiego dei sostegni "5 Fasi", sia per la completa realizzazione di linee tra due sottostazioni, sia per il rinnovo di tratti parziali della dorsale originaria, grazie all'impiego di opportuni "sostegni di passaggio", costruttivamente analoghi ai sostegni di amarro rappresentati in **figura 7**.

I risultati ottenibili, come rappresentato in **fi-**

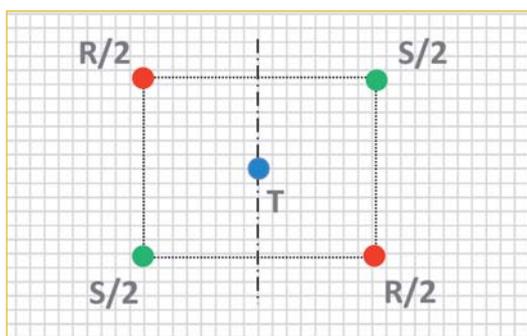


Figura 6
Disposizione ottimale delle fasi nel sostegno "5 Fasi"

gura 8, in termini di riduzione di induzione magnetica, sono notevolissimi.

Il valore massimo di induzione, riscontrabile sotto la linea aerea decresce di oltre l'80% rispetto a una linea tradizionale in Singola Terna e di oltre il 60% rispetto a una DT (Singola Terna Sdoppiata e Ottimizzata). Ancora più significativo è il valore massimo riscontrato sotto la linea, inferiore rispetto all'obiettivo di qualità di $3 \mu\text{T}$ e paragonabile con quello generato da una linea elettrica AT in cavo interrato.

Ma anche dal punto di vista dell'interazione con l'ambiente il nuovo sostegno a "5 Fasi" consente di perseguire ottimi risultati. L'ottimizzazione studiata per la geometria e le distanze relative tra le fasi sulla testa del palo consente una riduzione tangibile dell'altezza totale del sostegno, a parità di altezza utile (**figura 9**), se paragonata a una linea aerea convenzionale in Singola Terna e soprattutto a una Doppia Terna (STSO). Il tutto a vantaggio della sostenibilità ambientale e sociale dell'intervento.

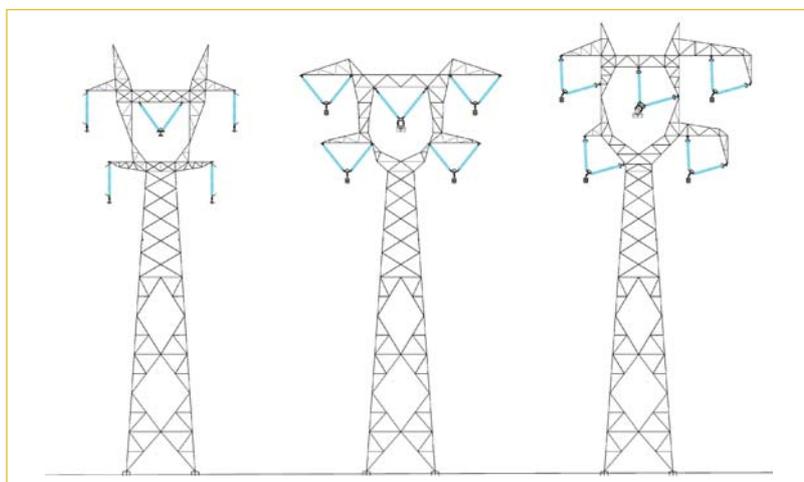


Figura 7
Geometrie tipiche dei sostegni "5 Fasi" con riferimento a una linea elettrica a 220 kV. A sinistra: sostegno di amarro; al centro: sostegno di sospensione con catene a "V", per rettifici; a destra: sostegno di sospensione con catene a "L", per sostegni con angoli di deviazione rilevanti

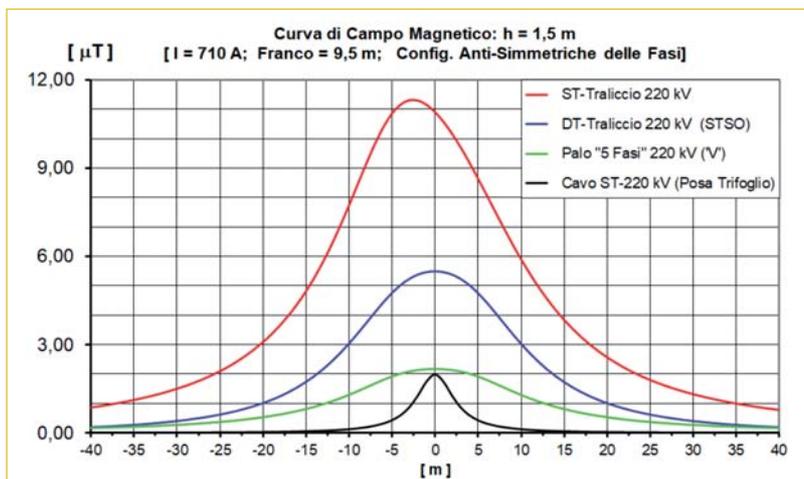


Figura 8
Confronto delle distribuzioni di induzione magnetica tra diverse soluzioni tecnologiche per linee a 220 kV: linee aeree convenzionali in Singola Terna, Doppia Terna (STSO), linee a "5 Fasi" (a parità di altezza utile) e cavo interrato

Se si considera, in particolare, l'utilizzo di una nuova linea a "5 Fasi", palificata in modo tale da rimanere nei limiti di occupazione visiva dell'orizzonte, delineato dalla fune di guardia della dorsale AT originaria (opzione Skyline), come da **figura 9**, si possono perseguire riduzioni estremamente significative di campo magnetico. Nella **figura 10**, infatti, si osserva un effetto di "spianamento" della distribuzione di campo magnetico con valori perfino inferiori rispetto a una linea elettrica AT in cavo interrato.

Sostegni a "5 Fasi" per l'incremento delle portate, a parità d'impronta magnetica sul territorio

Ancora più interessante è il confronto delle curve isocampo, a 3 e 10 T, derivanti dall'esercizio di elettrodotti aerei, a 220 kV, convenzionali in Singola Terna e a "5 Fasi", considerando il medesimo transito di corrente elettrica.

Nella **figura 11** si fa riferimento al valore di 710 A, corrispondente alla portata in corrente in servizio normale (periodo invernale per la zona B, secondo la norma CEI 11-60 [10], per conduttori alluminio-acciaio unificati da 31.5 mm di

diametro) e il confronto tra le soluzioni è effettuato a parità di altezza totale dei sostegni e di freccia dei conduttori, a centro campata (condizioni di franco minimo).

I grafici evidenziano il sostanziale vantaggio della nuova soluzione a "5 Fasi":

- DpA significativamente più ridotta;
- Curva isocampo a 3 μT che non interseca il piano del terreno, a differenza delle linee convenzionali ST, arrivando a circa 6 metri di altezza da terra al di sotto della linea.

Il tutto col grande vantaggio di poter risolvere eventuali problemi di superamento del valore di attenzione o dell'obiettivo di qualità, anche in presenza di costruzioni sottostanti alla linea aerea.

La forma delle curve isocampo della soluzione a "5 Fasi", particolarmente "piatta" nella parte inferiore, deriva dalla geometria delle fasi, a "trapezio rovesciato" (**figura 12**), disegnata per la testa-palo ed è frutto di una accurata ottimizzazione progettuale, volta a distanziare la curva isocampo stessa dal suolo e, quindi, dai potenziali recettori presenti.

Alla luce dell'eccellente prestazione, in termini di riduzione del campo magnetico, delle linee con sostegni a "5 Fasi", la successiva do-

Figura 9
Confronto schematico delle diverse geometrie dei sostegni per la mitigazione del campo magnetico per linee a 220 kV. Si osservi il sostegno a "5 Fasi" a parità di altezza utile e di altezza totale della linea originaria (opzione Skyline)

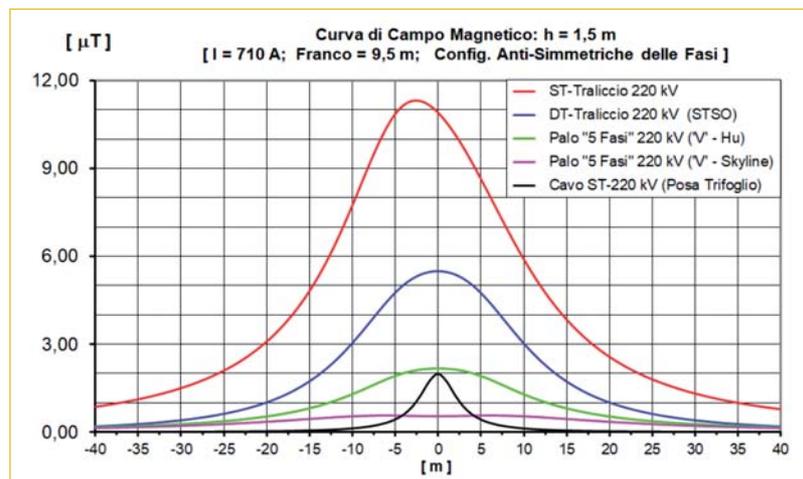
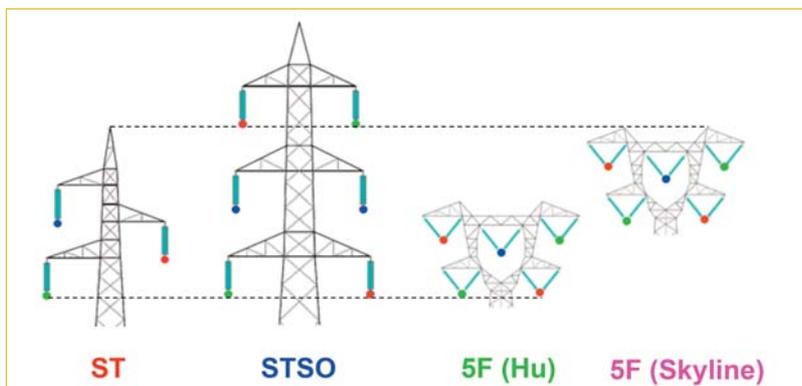


Figura 10
Confronto delle distribuzioni di induzione magnetica tra diverse soluzioni tecnologiche per linee a 220 kV: linee convenzionali in Singola Terna, Doppia Terna (STSO), linee a "5 Fasi" - a parità di altezza utile e altezza totale della linea originaria (opzione Skyline) - e cavo interrato

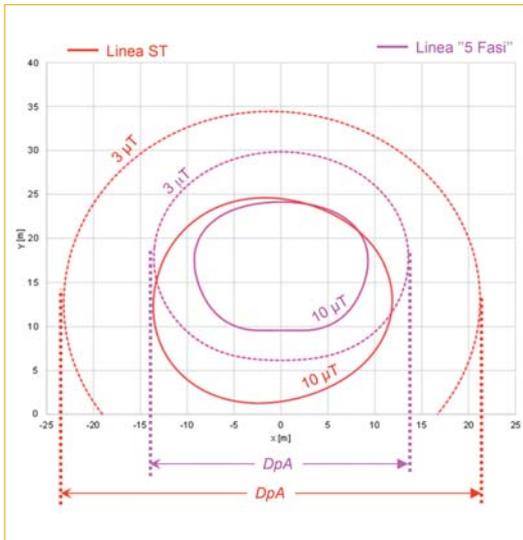


Figura 11
Curve isocampo a 3 μT (tratteggiate) e 10 μT (continue) per linee convenzionali ST a traliccio tronco-piramidale (tratto rosso) e per linee a "5 Fasi" (tratto fucsia), a parità di altezza totale dei sostegni e di freccia dei conduttori. Corrente elettrica pari a 710 A

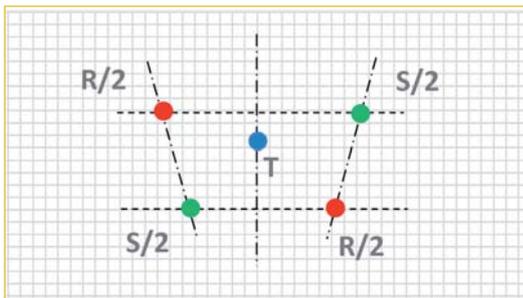


Figura 12
Particolare geometria delle fasi a "trapezio rovesciato"

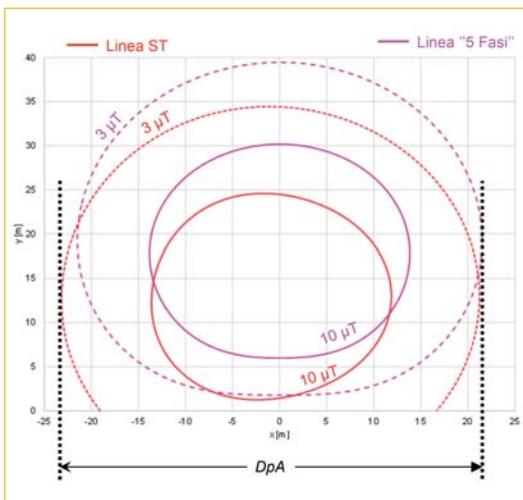


Figura 13
Curve isocampo a 3 μT (tratteggiate) e 10 μT (continue) per linee convenzionali ST a traliccio tronco-piramidale (tratto rosso) e per linee a "5 Fasi" (tratto fucsia), a parità di altezza totale dei tralicci e di freccia dei conduttori. Corrente elettrica pari a 710 A (linea convenzionale ST) e 2510 A (linea a "5 Fasi")

manda, che gli autori si sono posti, è stata:

"Ma a parità d'occupazione di territorio (ovvero di DpA), che maggiori correnti elettriche potremmo trasmettere con i nuovi sostegni a '5 Fasi'?"

Lo studio effettuato, affrontando il tema a parità di occupazione del territorio e quindi di DpA, ha mostrato come i sostegni a "5 Fasi" consentano un notevolissimo incremento della potenza elettrica trasmissibile e rappresentino quindi uno strumento fondamentale per il potenziamento del sistema elettrico a vantaggio della transizione energetica e dello sviluppo delle energie rinnovabili.

La successiva **figura 13** confronta infatti le curve isocampo a 3 e 10 μT ottenute considerando:

- una linea elettrica convenzionale ST 220 kV, con corrente pari a 710 A;
- una linea elettrica con sostegni a "5 Fasi", esercita al limite termico dei conduttori, pari a 2510 A (1255 A per ciascuno dei due conduttori ACSR da 40.5 mm utilizzati per ciascuna fase).

Si evidenzia come, nonostante il notevolissimo aumento della corrente elettrica trasmessa (da 710 a 2510 A), la DpA risulti uguale, se non inferiore, rispetto a quella di una linea convenzionale ST.

Inoltre, grazie alla disposizione ottimizzata dei conduttori a "trapezio rovesciato", la curva isocampo a 3 μT della linea a "5 Fasi" non interseca mai il terreno e si mantiene a un'altezza di 1.5 m dallo stesso, con un ulteriore miglioramento rispetto alle linee aeree AT di tipo convenzionale.

Campo elettrico dei sostegni a "5 Fasi"

Si può notare, dalla successiva **figura 14**, come una linea con sostegni "5 Fasi" (tratto di colore verde) presenti, rispetto alle soluzioni tradizionali (tratto di colore rosso per sostegni in Singola Terna e blu per sostegni in Doppia Terna), una buona riduzione del valore massimo di campo elettrico.

Risultati ancora più interessanti si ottengono nell'ipotesi di utilizzo di linee a "5 Fasi", aventi sostegni con una palificata pari all'altezza totale della linea originaria (opzione Skyline). In tale caso (tratto di colore fucsia) si osserva un limite massimo di campo elettrico significativamente ribassato. In altri termini è possibile anche concludere come l'impiego dei sostegni della nuova generazione "5 Fasi" consenta, implicitamente, un recupero di extra-franco, in termini di rispetto di un limite di campo elettrico.

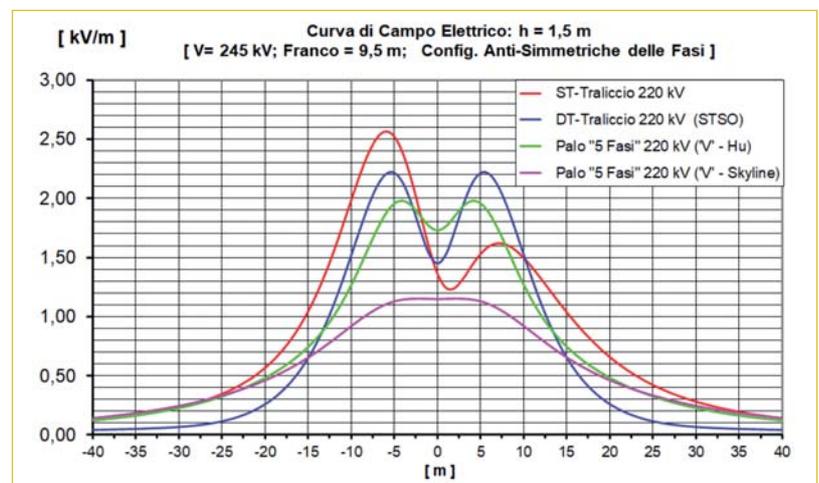


Figura 14
Confronto delle distribuzioni di campo elettrico tra diverse soluzioni tecnologiche per linee a 220 kV: linee convenzionali in Singola Terna, Doppia Terna (STSO), linee a "5 Fasi" - a parità di altezza utile e altezza totale della linea originaria (opzione Skyline)

Effetto corona: rumore e radio interferenza

La grande compattezza della geometria delle fasi, sulla testa dei sostegni a "5 Fasi", risulta basilare, unitamente alla disposizione nello spazio dei conduttori, per il risultato ottenuto di riduzione del campo magnetico. Tutto ciò comporta, tuttavia, l'incremento dei gradienti di potenziale elettrico presenti sui conduttori, a parità di diametro degli stessi, se paragonati con gli attuali progetti delle linee elettriche aeree convenzionali.

È noto che l'effetto corona è causato dalla ionizzazione dell'aria in corrispondenza della zona a elevato gradiente di potenziale elettrico sulla superficie dei conduttori: l'aumentare del campo elettrico sulla superficie del conduttore accelera le particelle cariche, fino a portare a un processo di scarica a valanga e generando, infine, delle scariche localizzate. Il fenomeno, tutt'altro che lineare, ha conseguenze direttamente e indirettamente osservabili:

- ❑ rumore acustico, con componenti tonali (nel caso di linee aeree in c.a.) o con uno spettro relativamente piatto in alta frequenza (nel caso di linee in c.c.);
- ❑ radio interferenza, con spettro di emissione concentrato su frequenze da poche centinaia di kHz ad alcuni MHz;
- ❑ perdite di potenza attiva, che possono peraltro diventare rilevanti per linee ad altissima tensione in condizioni di tempo perturbato;
- ❑ produzione di ozono (O₃);
- ❑ produzione di ioni, nel caso di linee aeree in c.c..

A oltre un secolo dalle prime osservazioni sperimentali di Peek sull'effetto corona, il fenomeno è documentato nella letteratura tecnica in modo esaustivo. In tale senso, diversi modelli empirici sono stati sviluppati e tarati nel corso di progetti di ricerca da parte delle principali aziende elettriche (incluse ENEL, EDF, BPA) e degli enti di ricerca (CESI, EPRI). Tuttavia, la natura aleatoria del fenomeno e la sua forte dipendenza dalle condizioni ambientali e di invecchiamento del conduttore rendono inevitabile una certa incertezza nelle valutazioni numeriche. Trattandosi di modelli empirici o semi-empirici, l'incertezza va crescendo a mano a mano che ci si allontana dalle condizioni di applicazione nelle quali il modello è stato tarato sul campo.

La produzione di ozono o di ioni, stante il valore contenuto di campo superficiale sui conduttori di fase (pari a circa 12.5 kV/cm nelle

condizioni di normale servizio), non costituisce invece un elemento rilevante per la progettazione delle linee elettriche a "5 Fasi", mentre le perdite di potenza attiva possono essere inserite in un contesto più ampio di ottimizzazione economica delle linee aeree.

Il rumore acustico e la radio interferenza rappresentano, al contrario, un vincolo non elastico nella progettazione delle linee aeree a "5 Fasi". Questo è tangibile, in particolar modo per le applicazioni italiane, per via di un quadro legislativo molto stringente in tema di acustica ambientale, nonché per la forte urbanizzazione che spesso caratterizza i territori interessati dalle infrastrutture elettriche.

Dal punto di vista acustico, l'effetto corona in una linea ad alta o altissima tensione, genera:

- ❑ nelle linee aeree in c.a. e c.c. uno spettro a banda larga, causato dalle brusche variazioni di pressione nell'aria conseguenti alle micro scariche casualmente distribuite nel tempo e nello spazio;
- ❑ nelle linee aeree in c.a., componenti tonali alla frequenza di rete, causate dall'addensamento dei fenomeni di scarica in corrispondenza dei picchi positivo e negativo della tensione di rete e dal movimento di emissione e assorbimento delle cariche di spazio attorno al conduttore [11-13].

La legge quadro n.447/1995 sull'inquinamento acustico [14] e il successivo DPCM attuativo del 14/11/1997 [15] definiscono e identificano i seguenti Valori Limite di Emissione per le differenti classi di utilizzo nelle quali, la zonizzazione acustica, suddivide il territorio di ciascun Comune (**tabella 1**). Considerato che è usuale che le linee elettriche aeree di alta e altissima tensione ricadano nelle zone classificate come "Aree prevalentemente residenziali", il corrispondente limite di emissione da considerare in periodo notturno è pari a 40 dB(A), al netto di eventuali penalizzazioni per componenti tonali in bassa frequenza.

Possono quindi presentarsi due scenari:

- ❑ La fascia di asservimento della linea risulta libera da recettori; in questo caso è sufficiente garantire il rispetto del limite di 40 dB(A) al limite della fascia di asservimento della linea elettrica, come peraltro normalmente adottato nella buona pratica internazionale.
- ❑ Nella fascia di asservimento della linea sono insediati, per motivi storici o di superficiale gestione del territorio, dei recettori. In quest'ultimo caso è necessario garantire il rispetto del limite di legge anche nelle situazioni più critiche di potenziali recettori situati pro-

prio al di sotto dei conduttori della linea.

Ad esempio, con riferimento ai nuovi elettrodotti a "5 Fasi" a 220 kV, la scelta di conduttori ACSR da 40.5 mm di diametro garantisce un gradiente di tensione sulla superficie degli stessi pari a circa 12.5 kV/cm alla normale tensione di esercizio della linea (230 kV). Tali valori del gradiente di tensione determinano una bassa emissione di rumore, anche in condizioni di elevata umidità e con conduttore bagnato che, notoriamente, per le linee aeree in corrente alternata, rappresentano le situazioni di maggiore emissione acustica.

Il valore stimato del livello di pressione acustica per un elettrodotto aereo a 220 kV, in configurazione "5 Fasi" è confrontato, nella successiva **figura 15**, con quello di linee aeree tradizionali di pari livello di tensione.

La figura mostra che, a parità di altezza utile e franco da terra dei conduttori, il rumore generato da una linea a "5 Fasi" (tratto di colore verde) è inferiore od uguale rispetto a quello di una linea tradizionale in Singola Terna con sostegni tronco-piramidali (tratto di colore rosso) e notevolmente inferiore rispetto a

quello di una linea tradizionale in Doppia Terna (tratto di colore blu), entrambe con conduttori ACSR da 31.5 mm di diametro.

L'aumento del gradiente di potenziale elettrico sui conduttori, causato dalla maggiore compattezza della linea a "5 Fasi", è dunque stato positivamente controbilanciato dal maggior diametro dei suoi conduttori.

Immaginando invece di effettuare il rinnovo di una tradizionale dorsale AT in Singola Terna, con sostegni a "5 Fasi" e con una palificazione avente pari altezza totale della soluzione originaria (opzione Skyline), il vantaggio in termini di rumore emesso da questa nuova innovativa soluzione è ancora più rilevante. Si osserva infatti come il profilo laterale del livello di pressione acustica (tratto di colore fucsia) risulta nettamente inferiore, di circa 3 dB(A), rispetto a quello originario (tratto in colore rosso).

In riferimento al fenomeno della radio interferenza, le emissioni causate dall'effetto corona sono principalmente limitate a frequenze inferiori a 5 MHz, con impatti modesti sulle attuali trasmissioni radiotelevisive e telefoniche.

Tabella 1 Valori limite di Emissione: valore massimo di rumore che può essere emesso da una sorgente, misurato in prossimità della sorgente stessa; o comunque in corrispondenza di spazi utilizzati da persone e comunità

CLASSI DI DESTINAZIONE D'USO DEL TERRITORIO	TEMPI DI RIFERIMENTO:	
	GIURNO (06.00 - 22.00) dB(A)	NOTTURNO (22.00 - 06.00) dB(A)
I - Aree particolarmente protette	45	35
II - Aree prevalentemente residenziali	50	40
III - Aree di tipo misto	55	45
IV - Aree di intensa attività umana	60	50
V - Aree prevalentemente industriali.	65	55
VI - Aree esclusivamente industriali	65	65

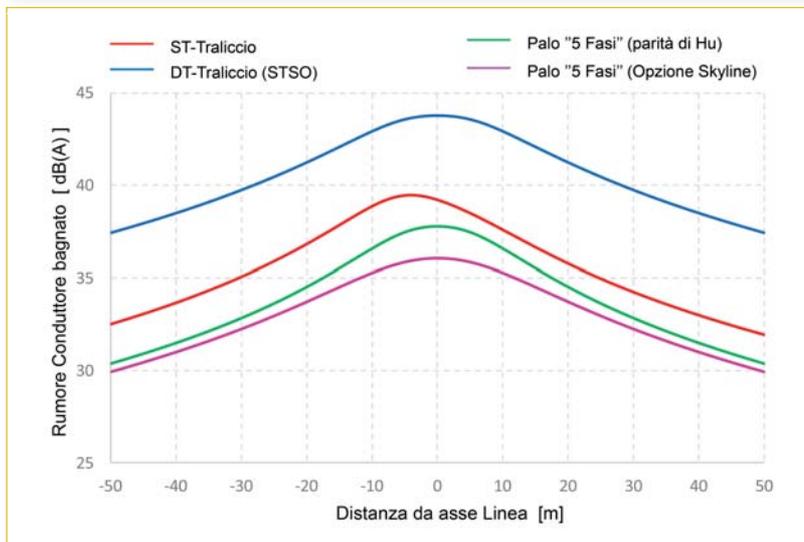


Figura 15

Profilo trasversale del rumore acustico generato da elettrodotti a 220 kV in condizioni di conduttore bagnato, in accordo alla metodologia EPRI [16]; tratto rosso: linea tradizionale in Singola Terna; tratto blu: linea tradizionale in Doppia Terna (STSO); tratto verde: linea a "5 Fasi" (a parità di altezza utile rispetto alla ST); tratto fucsia: linea a "5 Fasi" (a parità di altezza totale rispetto alla ST)

Lo spettro di emissione tipico di linee elettriche aeree in corrente alternata è riportato nella successiva **figura 16**.

La principale sovrapposizione con i servizi di radiotrasmissione si colloca nel campo delle onde medie, il cui utilizzo è in declino da decenni; questa banda di frequenze è oggi in fase di abbandono da parte della RAI, ultimo grande operatore a trasmettere in Italia in onde medie, che cesserà le trasmissioni nell'anno in corso. terminate queste trasmissioni rimarranno solamente alcune radio locali, con carattere poco più che amatoriale, a trasmettere in Italia.

Anche i sistemi di radionavigazione in onde lunghe (es. LORAN) risultano a oggi non più utilizzati nell'area del Mediterraneo. Gli unici impatti relativi al problema della radio interferenza per gli elettrodotti di alta tensione, nel panorama italiano, saranno quindi circoscritti a casi particolari, quali:

- ❑ ricezione di stazioni radio estere in onde medie e lunghe;
- ❑ trasmissioni radioamatoriali in onde lunghe (135 kHz in particolare);

- ❑ segnali di clock per radiosveglie, dispositivi me-
teo e apparecchi simili (DCF77 a 77,5 kHz);
- ❑ eventuali trasmissioni militari in onde medie e
lunghe.

Nonostante lo scarso impiego delle bande di frequenza interessate dal fenomeno della radio interferenza per effetto corona e l'assenza di un limite legislativo e normativo, il progetto delle nuove linee aeree con sostegni a "5 Fasi" garantirà, comunque, valori di radio-interferenza in linea con lo stato dell'arte per elettrodotti di alta e altissima tensione.

Come infatti rappresentato in **figura 17**, la soluzione a "5 Fasi" presenta un valore massimo inferiore a 72 dB rif. 1 $\mu\text{V}/\text{m}$ (equivalenti a 0.5 MHz) anche al di sotto dei conduttori, nel punto di minimo franco in campata, confrontabile con la soluzione tradizionale in Singola e Doppia Terna.

Valori di radio-frequenza ulteriormente inferiori, rispetto alle soluzioni tradizionali, potranno essere perseguite con soluzioni di rinnovo basate sull'impiego di sostegni a "5 Fasi" in opzione Skyline.

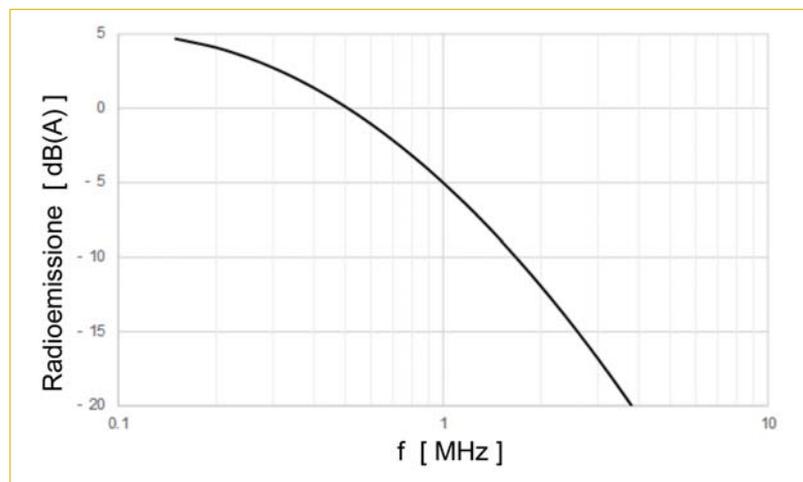
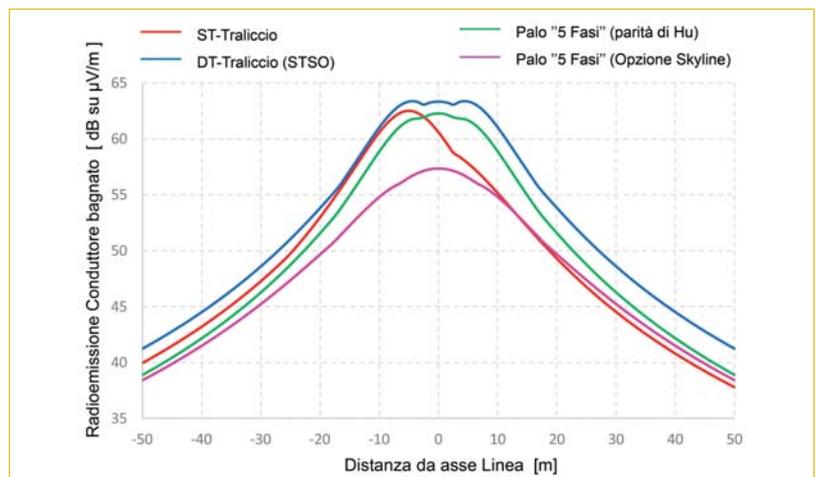


Figura 16
Spettro standard CISPR [17] per radio-interferenza di linee elettriche di alta tensione in corrente alternata, normalizzato a 0.5 MHz

Figura 17
Profilo trasversale della radio interferenza generato da elettrodotti a 220 kV in condizioni di conduttore bagnato, in accordo alla metodologia EPRI [16]; tratto rosso: linea tradizionale in Singola Terna; tratto blu: linea tradizionale in Doppia Terna (STSO); tratto verde: linea a "5 Fasi" (a parità di altezza utile rispetto alla ST); tratto fucsia: linea a "5 Fasi" (a parità di altezza totale rispetto alla ST)



Conclusioni

Alla luce della sempre maggiore attenzione alla sostenibilità ambientale e sociale delle infrastrutture elettriche nonché della constatazione che la legislazione italiana sia sostanzialmente tra le più cautelative in assoluto, Terna ha sviluppato un'innovativa tipologia di sostegni, a "5 Fasi", in grado di ridurre notevolmente i campi magnetici ed elettrici prodotti, anche a livello del suolo. Con riferimento, ad esempio, a elettrodotti a 220 kV, questa nuova soluzione consente di non superare mai il valore dell'obiettivo di qualità, di 3 μ T, perseguendo valori di induzione magnetica, a 1,5 m da terra, anche inferiori rispetto a elettrodotti in cavo interrato di pari portata.

Ragionando, invece, a parità di DpA, e dunque a parità di "impronta magnetica" sul territorio della linea aerea originaria, il rinnovo della dorsale elettrica, realizzabile con sostegni in soluzione a "5 Fasi", consentirà di attuare portate in corrente nettamente maggiori rispetto a quelle delle linee aeree convenzionali, costituendo così uno strumento concreto per l'abilitazione della transizione energetica, senza ulteriore consumo di suolo, ottimizzando così l'utilizzazione degli esistenti corridoi

elettrici infrastrutturali.

Grazie all'adozione di conduttori di maggiore diametro rispetto a quelli delle attuali linee convenzionali, il rumore acustico e la radio-interferenza, per effetto corona, generati dai sostegni a "5 Fasi" saranno inferiori od uguali rispetto a quelli di linee convenzionali, garantendo così il rispetto dei limiti di legge e dello stato dell'arte per linee aeree di alta e altissima tensione.

Pur rappresentando un forte contributo innovativo, soprattutto nell'eccellenza dei risultati, i componenti e le tecnologie da impiegarsi nelle linee a "5 Fasi" saranno sostanzialmente le stesse di quelle normalmente sinora adottate. Pertanto, la totalità dei materiali necessari e le tecniche di realizzazione potranno essere fornite dalle industrie elettriche e dalle imprese italiane, limitando anche i rischi e gli svantaggi derivanti dal ricorso a materiali e tecnologie non disponibili sul panorama nazionale.

I nuovi futuri elettrodotti a "5 Fasi" rappresentano quindi un'utile soluzione per lo sviluppo e il rinnovo della Rete di Trasmissione Nazionale, sia alla luce di un sempre maggiore sviluppo delle energie rinnovabili, sia nella prospettiva di una maggiore efficienza tecnico-economica e di una rinnovata sostenibilità delle infrastrutture di rete.

bibliografia

[1] Legge 22 febbraio 2001, n. 36: Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici.

[2] Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 8 luglio 2003: Fissazione dei limiti di esposizione, dei valori di attenzione e degli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete (50 Hz) generati dagli elettrodotti.

[3] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz), *Health Phys.* 99(6):818-36, Dec. 2010.

[4] M Robert G. Olsen: High Voltage Overhead Transmission Line Electromagnetics. 1 volume, 2° Edizione, 2018.

[5] Raccomandazione del Consiglio Ue 1999/519/Ce: Limitazione della esposizione della popolazione ai campi elettromagnetici da 0 Hz a 300 GHz.

[6] European Environment Agency - rapporto 21/2019: Healthy environment, healthy lives: how the environment influences health and well-being in Europe, *Publications Office of the European Union*, 2020.

[7] P. Berardi, L. Buono, G. Gemelli, F. Palone, L. Papi, A. Piccinin, R. Spezie, M. Valente: Design and protection criteria for passive loops on a 400 kV double circuit line, *Cigre 2022 General Session*, paper n°10775.

[8] A. M. Lopez Diaz, M. R. Guarniere, F. Palone, R. Spezie: Soluzioni progettuali per la miglior interazione visiva dei nuovi elet-

trodotti aerei. *L'Energia Elettrica*, n. 5 settembre/ottobre, 2022.

[9] Vocabolario Elettrotecnico Internazionale, IEC 60050 5 466-01-04.

[10] Norma CEI 11-60: Portata al limite termico delle linee elettriche esterne con tensione maggiore di 100 kV, 2° Edizione, 2002.

[11] A. Donini, R. Spezie, R. Cortina, E. Piana, R. Turri: Accurate prediction of the corona noise produced by overhead transmission lines, *AEIT International Annual Conference* - Capri 2016.

[12] F. Bignucolo, R. Turri, A. Donini, R. Spezie, R. Cortina, E. A. Piana: Valutazione dell'emissione sonora e in radiofrequenza dovuta all'effetto corona in linee aeree AT e AAT, *L'Energia Elettrica*, vol. 95 - n. 1 gennaio/febbraio, 2018.

[13] E. Stracqualursi; R. Araneo; S. Celozzi: The Corona Phenomenon in Overhead Lines: Critical Overview of Most Common and Reliable Available Models. *Energies*, 14, 6612, 2021.

[14] Legge 26 ottobre 1995, n. 447. Legge quadro sull'inquinamento acustico.

[15] Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 14 novembre 1997 - Determinazione dei valori limite delle sorgenti sonore.

[16] EPRI Red book: AC Transmission Line Reference Book - 200 kV and Above, 3° Edizione, 2008.

[17] CISPR 18-1: Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment - Description of phenomena, Part 1 - 3° Edizione, 2017.