

# Valutazione dei Campi Elettrici e Magnetici nelle Stazioni AT

## Sviluppo di un modello per la sicurezza e la conformità normativa

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

Candidato: Giuseppe Pito' (s330982@studenti.polito.it), Relatore: Prof. Aldo Canova (aldo.canova@polito.it)

15 Luglio 2025, Anno Accademico 2024/2025

**Riassunto**— Questa tesi analizza i campi elettrici e magnetici a bassa frequenza (ELF) generati dalle stazioni di Altissima e Alta Tensione (AAT/AT), con particolare attenzione agli aspetti di sicurezza e conformità normativa. A tal fine sono stati sviluppati modelli di calcolo basati su un approccio integrale, che consente di descrivere i componenti della stazione senza discretizzare l'ambiente circostante (aria e suolo), riducendo sensibilmente il carico computazionale. Oltre al modello completo, è stato introdotto un modello semplificato - fondato sull'approssimazione di campo lontano - utile per una stima rapida delle distanze minime di sicurezza richieste dalla normativa. Entrambi i modelli sono stati integrati in un codice numerico sviluppato in ambiente MATLAB, dotato di interfaccia grafica e progettato per una parametrizzazione flessibile. Il tool consente di modellare con semplicità e rapidità diverse configurazioni di stazione, risultando utile sia in fase progettuale sia per la valutazione di impianti esistenti. Il codice è stato validato attraverso un caso studio di stazione AIS (Air Insulated Substation) 380/150 kV, per il quale sono stati calcolati i valori di campo elettrico e induzione magnetica, con riferimento ai limiti stabiliti dal DPCM 8/7/2003. Il confronto tra i due modelli ha permesso di valutarne coerenza e limiti applicativi, evidenziando una buona corrispondenza per le soglie normative inferiori e una maggiore cautela richiesta per livelli più elevati. Il tool sviluppato si propone come uno strumento efficace, rapido e conforme alle normative, a supporto della progettazione orientata alla sicurezza elettromagnetica. Il modello semplificato, rappresenta una risorsa immediata per analisi preliminari.

**Keywords** — *Campo elettrico, Campo magnetico, Alta tensione, Stazione elettrica, Distanza di rispetto, Campi elettromagnetici ELF, Esposizione umana ai CEM*

### I. INTRODUZIONE

L'aumento della domanda energetica e la progressiva elettrificazione dei consumi richiedono un potenziamento delle reti di trasmissione e un'espansione delle infrastrutture elettriche sul territorio. In questo contesto, le stazioni di Alta e Altissima Tensione (AT/AAT) svolgono un ruolo chiave, garantendo la trasformazione e la distribuzione dell'energia tra reti a diverse tensioni. Tuttavia, queste infrastrutture rappresentano anche sorgenti significative di campi elettrici e magnetici a bassa frequenza (50 Hz), con potenziali criticità legate all'esposizione umana, sia per le popolazioni limitrofe che per gli operatori.

L'esposizione ai campi elettromagnetici (CEM) è un tema di crescente rilevanza scientifica e normativa, data la sua possibile correlazione con effetti sanitari e ambientali. Sebbene gli studi disponibili non siano conclusivi, ricerche epidemiologiche e sperimentali hanno suggerito un possibile legame tra esposizione prolungata e l'insorgenza di patologie neurologiche o tumorali. A seguito di ciò, l'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) ha classificato i campi magnetici a 50 Hz come "possibilmente cancerogeni per l'uomo" (Gruppo 2B), basandosi su evidenze limitate relative alla leucemia infantile.

Per mitigare tali rischi, organismi come l'ICNIRP e l'Unione Europea hanno stabilito limiti di esposizione differenziati per la popolazione generale e i lavoratori, focalizzandosi sugli effetti acuti derivanti dall'induzione di correnti nei tessuti biologici. In Italia, il DPCM 8 luglio 2003 ha adottato un approccio ancora più cautelativo, introducendo non solo limiti di esposizione, ma anche valori di attenzione e obiettivi di qualità per l'esposizione a lungo termine, con particolare riferimento all'induzione magnetica.

Tuttavia, mentre per le linee elettriche aeree esistono metodologie di calcolo consolidate (es. DM 29/05/2008 – Approvazione della metodologia di calcolo per la determinazione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti), per le stazioni elettriche AT gli strumenti disponibili sono ancora limitati. Questa tesi affronta proprio tale lacuna, proponendo un metodo innovativo per la modellazione rapida e corretta dei campi elettromagnetici generati da stazioni AAT/AT.

Lo strumento proposto si pone come supporto concreto per la verifica della conformità normativa, la progettazione di nuove infrastrutture e l'analisi di impianti esistenti, contribuendo a colmare una lacuna presente nell'attuale panorama tecnico-normativo.

### II. MODELLO TEORICO

La modellazione numerica dei campi elettromagnetici (CEM) costituisce lo strumento fondamentale per la valutazione dell'esposizione umana. I metodi più diffusi si basano su tecniche agli elementi finiti (FEM) che richiedono una discretizzazione spaziale dettagliata dell'intera struttura e del dominio circostante (aria e terreno). Sebbene estremamente accurati, questi approcci presentano uno svantaggio significativo: un elevato costo computazionale, con tempi di simulazione spesso incompatibili con le esigenze progettuali pratiche.

Una valida alternativa è offerta dai metodi integrali, che permettono di limitare la discretizzazione ai soli conduttori attivi, trattando l'ambiente circostante come uno spazio omogeneo. Questa semplificazione riduce drasticamente la complessità computazionale, consentendo simulazioni rapide anche per geometrie complesse, senza compromettere l'accuratezza dei risultati.

#### A. Modello del Campo Elettrico

Il campo elettrico generato dai conduttori in tensione è stato calcolato utilizzando il metodo delle immagini, che tiene conto dell'effetto del suolo, modellato come omogeneo e perfettamente conduttore. I conduttori, di lunghezza finita e con densità di carica uniforme, sono immersi in un mezzo dielettrico omogeneo (aria).

L'approccio si basa sulla costruzione della matrice dei coefficienti di potenziale  $P$ , dove l'elemento  $P_{ij}$  rappresenta il potenziale sul conduttore  $i$  prodotto da una carica unitaria posta sul conduttore  $j$ . Questa matrice dipende esclusivamente dalla geometria del sistema e permette di esprimere il potenziale come

$$V_i = \sum_{j=1}^n P_{ij} q_j \quad (1)$$

Una volta determinata la matrice  $P$  e noti i fasori di tensione  $\underline{V}$ , è possibile calcolare le cariche  $\underline{q}_j$  e, da queste, derivare il campo elettrico risultante.

#### B. Applicazione del modello del Campo Elettrico

Il modello proposto è stato applicato alle stazioni AIS (Air Insulated Substation), dove i conduttori sono esposti all'aria e quindi immersi in un mezzo omogeneo. In questo caso, la distribuzione di carica e il campo elettrico risultante sono determinati dalla geometria dei conduttori, dalla loro quota rispetto al suolo, dalla distanza rispetto al punto di osservazione e dal livello di tensione.

Invece, per le stazioni GIS (Gasi Insulated Substation) i conduttori sono completamente racchiusi in un involucro metallico collegato a terra, che funge da schermo elettrostatico efficace. In questo caso il campo elettrico all'esterno dell'involucro risulta trascurabile, rendendo superfluo il calcolo del campo elettrico nello spazio circostante.



### C. Modello del Campo di Induzione Magnetica

Il campo magnetico generato da conduttori di lunghezza finita percorsi da corrente è calcolato mediante la legge di Biot-Savart in forma integrale. Per un conduttore filiforme, l'integrale ammette una soluzione analitica chiusa, semplificando il processo di calcolo.

Il campo magnetico totale in un punto Q è determinato applicando il principio di sovrapposizione degli effetti.

### D. Applicazione del modello del Campo di Induzione Magnetica

Il modello proposto è applicabile alle stazioni AIS.

Nelle stazioni GIS trifase, le tre fasi sono racchiuse in un unico involucro metallico schermante e poste a distanza ravvicinata. Grazie alla compensazione reciproca dei campi magnetici generati dalle correnti trifase bilanciate, il campo magnetico risultante all'esterno dell'involucro è trascurabile.

Per le configurazioni GIS monofase, il modello fornisce una descrizione accurata del campo magnetico generato in caso di messa a terra a punto singolo. Se è presente il multi-point grounding, il modello rimane valido purché siano note le correnti indotte negli involucri metallici. In tal caso, gli involucri possono essere modellati come conduttori filiformi rettilinei coassiali.

Per un approccio conservativo, l'effetto delle correnti indotte può essere trascurato. Questa semplificazione porta a una sovrastima dei livelli di campo magnetico, garantendo così una valutazione più cautelativa ai fini della sicurezza.

### E. Modello semplificato (Campo Lontano)

Il modello semplificato si basa sull'approssimazione di conduttori infinitamente lunghi ed è valido per punti sufficientemente distanti dal sistema di conduttori. Per un sistema equilibrato ( $\sum I_k = 0$ ) con le fasi disposte in configurazione planare con interasse  $d$ , il campo di induzione magnetica a distanza  $R$  è approssimabile come:

$$B(R) \approx \frac{\mu_0 \sqrt{3} I d}{2\pi R^2} \quad (2)$$

### F. Applicazione del modello semplificato

Il modello è utilizzabile esclusivamente nella regione di campo lontano, risultando particolarmente adatto per valutare la conformità ai limiti di esposizione per bassi livelli di campo di induzione magnetica, come i valori soglia di  $3 \mu T$  e  $10 \mu T$ . Le distanze corrispondenti a tali soglie sono:

$$R_{3\mu T} \approx 0.34\sqrt{Id} \quad R_{10\mu T} \approx 0.19\sqrt{Id} \quad (3)$$

La Distanza di Prima Approssimazione (DPA), rappresentata in fig. 1, assume una forma rettangolare di lunghezza pari allo sviluppo lineare dei conduttori e chiuso alle estremità da semicerchi di raggio  $R$  calcolato con (3). L'ipotesi di conduttori infinitamente lunghi porta a una sovrastima sistematica del campo, rendendo i risultati conservativi dal punto di vista della sicurezza in prossimità delle estremità.



Fig. 1. Distanza di Prima Approssimazione col modello semplificato.

### III. CODICE MATLAB E CASO STUDIO

Il modello teorico è stato implementato in un codice numerico sviluppato in ambiente MATLAB, dotato di un'interfaccia grafica (GUI) progettata per facilitare la configurazione geometrica ed elettrica della stazione. L'utente può definire in modo intuitivo tutti gli elementi principali (sbarre, trasformatori, linee e sezioni) specificandone i parametri geometrici ed elettrici, tra cui le coordinate spaziali, i livelli di tensione e i valori di corrente. Un algoritmo dedicato verifica automaticamente la consistenza

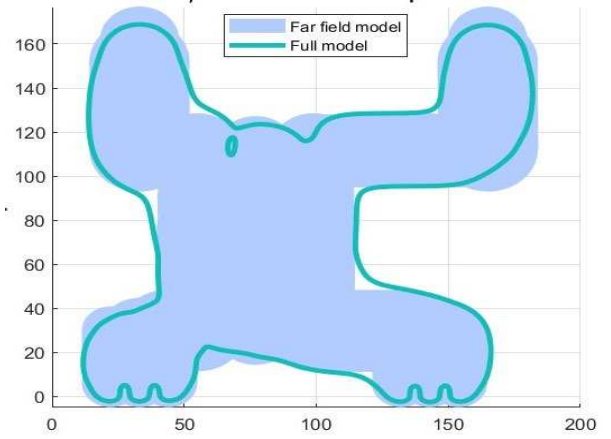


Fig. 2. Isolinea  $B = 3 \mu T$  sul piano  $z = 1,5$  m. Assi in metri. Confronto tra modello completo e semplificato.

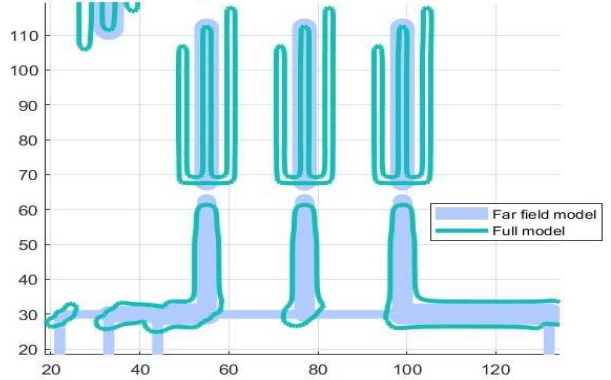


Fig. 3. Isolinea  $B = 100 \mu T$  sul piano  $z = 6$  m. Assi in metri. Confronto tra modello completo e semplificato.

topologica dell'impianto attraverso il controllo della legge di Kirchhoff delle correnti.

Per validare l'approccio proposto, è stato analizzato un caso studio di stazione AIS 380/150 kV con configurazione a doppia sbarra. L'impianto comprende tre trasformatori di potenza e diverse linee in ingresso e uscita. Le analisi condotte hanno consentito di valutare la distribuzione spaziale dei campi elettromagnetici e di verificare il rispetto dei limiti previsti. Dall'analisi comparata tra i due modelli è emersa un'elevata concordanza per i livelli di campo più bassi ( $\leq 10 \mu T$ ) ma scostamenti significativi per valori più elevati ( $100 \mu T$ ), come mostrato in fig. 2 e 3. Il modello semplificato tende a sovrastimare il campo nelle zone prossime ai terminali dei conduttori, risultando quindi un'approssimazione a favore della sicurezza. I dati ottenuti confermano che il modello semplificato costituisce uno strumento valido per analisi preliminari, mentre il modello completo risulta indispensabile per valutazioni più accurate, specialmente in prossimità delle sorgenti e per valori di campo elevati.

### IV. CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha sviluppato un approccio innovativo per la valutazione dei campi elettromagnetici generati da stazioni AAT/AT. Il tool sviluppato consente una modellazione parametrica efficiente, combinando precisione e rapidità di esecuzione.

L'introduzione di un modello semplificato, basato sull'approssimazione di campo lontano, ha dimostrato particolare efficacia grazie alla sua semplicità d'uso, rapidità di applicazione - anche solamente con "carta e penna" - e coerenza con il modello completo per soglie di induzione magnetica cautelative ( $3-10 \mu T$ ).

Per queste caratteristiche, se ne raccomanda l'adozione come strumento standard per analisi preliminari, verifiche di conformità e supporto alle decisioni progettuali.

Complessivamente, il lavoro propone una soluzione concreta e accessibile per la valutazione dell'impatto elettromagnetico delle stazioni elettriche, colmando una lacuna metodologica presente nella pratica professionale.