

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN FISICA

ANALISI, MODELLI PREVISIONALI E VALUTAZIONE DI IMPATTO AMBIENTALE DI CAMPI DI INDUZIONE MAGNETICA GENERATI DA LINEE ELETTRICHE AD ALTISSIMA TENSIONE

LAUREANDO: RELATORE: CORRELATORI: MORENO COMELLI PROF. LUCIANO BERTOCCHI DOTT. RENATO VILLALTA DOTT. MASSIMILIANO BENES

ANNO ACCADEMICO 2003-2004

Il càlibro non si sa bene a cosa serva. "Serve a misurare con grande precisione la forma o le dimensioni di certi pezzi delle macchine" ha detto tuo babbo. Alóra? Quando li hai ben misurati? Ó non è meglio col metro, o a occhio? Il càlibro è come una pinza di quelle che giri un tondino e le ganassce si aprono e si chiudono. Ma è d'acciaio lucido, con tanti segni millimetrati, e per scorrere meglio ha ancora un po' dell'antico olio da ingrasso...

F.

Sommario

Premessa	1
I - Campi elettromagnetici ELF	3
1.1 - Definizione di ELF	
1.2 - Campo vicino reattivo	
1.3 - Modalità d'interazione	
1.4 - Bibliografia	4
II - Effetti biologici e sanitari dei campi ELF	5
2.1 - Introduzione	
2.2 - L'interazione tra campi elettromagnetici e sistemi biologici Meccanismi di accoppiamento diretto Meccanismi di accoppiamento indiretto Limite critico e limite cronico	5
 2.3 - Studi epidemiologici Tumori infantili Tumori negli adulti: studi residenziali Tumori negli adulti: studi occupazionali 	
 2.4 - Studi in vivo	
2.5 - Studi in vitro: l'interazione biofisica con i campi ELF Interazione a livello di membrana cellulare Alterazione della secrezione di melatonina Effetti antiproliferativi	
2.6 - Bibliografia	
III - Cenni di elettrotecnica	21
3.1 - La distribuzione di energia elettrica	
3.2 - Classificazione delle linee elettriche	
3.3 - Grandezze caratteristiche	
3.4 - Schematizzazione di una linea	
3.5 - Potenza in un sistema monofase	
3.6 - Potenza in un sistema trifase	
3.7 - Il rifasamento	

3.8 - Definizioni	
3.9 - Bibliografia	
IV - Calcolo del campo generato da linee AAT	
4.1 - Definizione del problema Determinazione del minimo della campata Coordinate degli estremi dei segmenti Orientamento degli sbracci	31 31 32 33
4.2 - Effetto della temperatura	
4.3 - Campo generato da un segmento percorso da corrente Visualizzazione grafica di un caso particolare Condizioni al contorno	
4.4 - Implementazione delle matrici di Eulero	
4.5 - Campo efficace prodotto da linee trifase	
4.6 - Rigidità dielettrica ed effetto corona	
4.7 - Armoniche successive alla fondamentale	
4.8 - Bibliografia	
V - Strumenti di misura	47
5.1 - Gli strumenti di misura dell'induzione magnetica a 50 Hz	
5.2 - Taratura degli strumenti	
5.3 - EMDEX Il funzionamento dell'EMDEX II Risoluzione dello strumento Risposta in frequenza La modalità LINDA	
5.4 - PMM 8053 Opzioni di visualizzazione Specifiche tecniche Sonda EHP-50A	
5.5 - <i>PMM 8055S</i> Sonda HP-050	
5.6 - Interconfronto strumentale	
5.7 - Bibliografia	
VI - I software di calcolo	63
6.1 - I software esistenti	
6.2 - CMagnetico Metodo di calcolo Sistema di riferimento Regione di campionamento Dati elettrici in ingresso Dati geometrici in ingresso Presentazione dei dati in output	
r resentazione dei dati in output	

Requisiti software e hardware	
Osservazioni e commenti	
6.3 - CAMPI	
Sistema di riforimente	
Begione di campionamento	
Dati elettrici in ingresso	
Dati geometrici in ingresso	67
Onzioni	67
Presentazione dei dati in output	
Linguaggio di programmazione	
Requisiti software e hardware	
Osservazioni e commenti	
6.4 - SteMa 1.2	
Metodo di calcolo	
Sistema di riferimento	
Regione di campionamento	
Dati elettrici in ingresso	
Dati geometrici in ingresso	
Opzioni	
Presentazione dei dati in output	
Requisiti software e hardware	
Osservazioni e commenti	
6.5 - LINATCTN	
Sistema di riferimento	71
Regione di campionamento	71
Dati elettrici in ingresso	
Dati geometrici in ingresso	
Presentazione dei dati in output	
Requisiti software e hardware	
6.6 - EFC 400	
Metodo di calcolo	71
Sistema di riferimento	
Regione di campionamento	
Dati elettrici in ingresso	
Dati geometrici in ingresso	
Opzioni	
Presentazione dei dati in output	
Oggorugioni o commonti	
6.7 - Interconfronto	
6.8 - Carenze dei software: sfasamenti e configurazioni compless	e
6.9 - Bibliografia	
VII - Il nuovo programma: Phidel 1.0	79
7.1 - Premessa	
7.2 - I dati geometrici: integrazione dal catasto degli elettrodotti.	

7.3 - I dati elettrici	83
7.4 - Requisiti richiesti	
7.5 - Il nuovo programma	
L'immissione dei dati	
L'elaborazione dei dati	
La visualizzazione dei dati	87 87
Funzioni avanzate	
7.6 - Test di validazione e controllo delle approssimazioni	
Campo di un segmento	
Risultato al variare della lunghezza del segmento	89 00
Variazione dello sfasamento relativo	
7.7 - Incertezza sul valore calcolato	
Variazione media di quota	92
Errore sull'altezza	
Errore sulla distanza dalla protezione al suolo	94 04
Errore sul campo calcolato	
7.8 - Bibliografia	
APPENDICE 7.1 - SCHEMATIZZAZIONE DELLE LINEE AT ED AAT SUUL 'ATLANTE	96
8.1 - Misura effettuata presso terna singola	
Errore sulla corrente	
Verifica della linearità	
8.2 - Misura lungo un percorso	
Normalizzazione rispetto ad una misura di riferimento	
8.3 - Misura presso una doppia linea a 380 kV	
9.4. Dia etta di in atazi a sum lifa atina	
8.4 - Rigetto di ipotesi semplificative	
8.4 - Rigetto di ipotesi semplificative	104 106 106 108
8.4 - Rigetto di ipotesi semplificative 8.5 - Procedure di misura	
8.4 - Rigetto di ipotesi semplificative 8.5 - Procedure di misura 8.6 - Conclusioni 8.7 - Bibliografia	104 106 106 108 108 108
8.4 - Rigetto di ipotesi semplificative 8.5 - Procedure di misura 8.6 - Conclusioni 8.7 - Bibliografia 7 - Tecniche di abbattimento del campo di induzione magnetica	104 106 106 108 108 108
8.4 - Rigetto di ipotesi semplificative 8.5 - Procedure di misura 8.6 - Conclusioni 8.7 - Bibliografia 7 - Tecniche di abbattimento del campo di induzione magnetica 9.1 - Introduzione	104 106 106 108 108 108 109
 8.4 - Rigetto di ipotesi semplificative	104 106 106 108 108 108 109 109 109
 8.4 - Rigetto di ipotesi semplificative	104 106 106 108 108 108 109 109 109 109 110
 8.4 - Rigetto di ipotesi semplificative	
 8.4 - Rigetto di ipotesi semplificative	

9.5 - Introduzione della doppia terna Doppia terna ottimizzata	<i>113</i> 113
Sostituzione di una configurazione a Δ	114
9.0 - Fattibilita aelle soluzioni	113
9.7 - Altre tecniche di abbattimento del campo	115
Interramento L inee split-phase	116
Circuiti di compensazione passiva	118
9.8 - Bibliografia	118
X - Mitigazione dell'impatto ambientale	121
10.1 - La Valutazione di Impatto Ambientale	121
10.2 - Un problema con 3 linee	121
10.3 - I dati a disposizione	122
10.4 - Le soluzioni proponibili	124
10.5 - Bibliografia	125
XI - La normativa italiana vigente	127
11.1 - Normativa sull'esposizione a campi a frequenza industriale	127
Legge 22 febbraio 2001, n. 36	127
Il DPCM 8 luglio 2003	128
11.2 - Normativa sulla Valutazione di Impatto Ambientale	128
Direttiva 85/337/CEE del 27 giugno 1985, integrata dalla 97/11/CE del 3 marzo 1997	128
Legge Regionale / settembre 1990, n. 43	129
Legge Regionale 19 novembre 2002, n. 50	129
11.3 - Normativa sulla distribuzione di energia elettrica	130
Denderazione den Autorita per renergia elettrica e il gas 18 ottobre 2001, il. 228	150
11.4 - Bibliografia	130
XII - Conclusioni	131
XIII - Ringraziamenti	133

Premessa

Questa Tesi espone il lavoro compiuto in collaborazione con l'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Friuli Venezia Giulia, nell'ambito degli studi sui campi generati da linee elettriche a frequenza industriale ad altissima tensione. La ricerca ha trovato naturale applicazione nel caso di particolari configurazioni "complesse" di linee, per le quali gli strumenti informatici esistenti si sono rivelati inadeguati, ed è stata quindi valutata la possibilità di realizzare un nuovo software adatto allo scopo, in grado di soddisfare tutte le esigenze del caso.

Dopo una premessa tecnica, viene evidenziata la necessità di approfondire le conoscenze in questo settore, analizzando la correlazione esistente tra l'esposizione prolungata a tali campi e gli effetti sulla salute umana.

Sono presi quindi in considerazione gli aspetti tecnici e le nozioni di elettrotecnica necessarie a descrivere una linea elettrica e le grandezze caratteristiche ad essa associate, e viene esposta la procedura utilizzata per calcolare il campo prodotto da un sistema di elettrodotti.

Successivamente sono descritti gli strumenti che sono stati utilizzati per effettuare le misure, ed alcuni software sviluppati per calcolare l'induzione magnetica prodotta da sistemi del tipo studiato.

Nei capitoli seguenti viene descritto il processo di realizzazione del nuovo programma, le caratteristiche implementate ed il confronto con i casi in cui sono state effettuate le misure, al fine di verificare l'attendibilità dei risultati forniti. Il software, chiamato Phidel, viene inoltre utilizzato per studiare la possibilità di mitigare le situazioni ambientali esistenti e per definire una procedura di misura relativamente a siti complessi.

Dopo queste valutazioni, per i casi concreti più esemplari viene proposta una serie di metodi per affrontare il problema, in modo da ridurre l'impatto ambientale tenendo conto della tutela della popolazione e della realizzabilità del progetto.

Vengono riportati infine i principali riferimenti normativi di interesse, relativi all'esposizione ai campi a frequenza industriale, alla Valutazione di Impatto Ambientale e ad alcuni aspetti concernenti la distribuzione di energia elettrica in Italia.

Campi elettromagnetici ELF

1.1 - Definizione di ELF

A seconda della loro frequenza, le onde elettromagnetiche possono essere classificate come "radiazioni ionizzanti" o "radiazioni non ionizzanti" (NIR): quest'ultimo termine indica la parte dello spettro elettromagnetico in cui l'energia fotonica è troppo bassa per rompere i legami atomici. Convenzionalmente il limite si fissa a 12 eV, corrispondenti ad una frequenza di circa $2 \cdot 10^6$ GHz; i campi ELF (Extremely Low Frequency) sono definiti come quelli di frequenza fino a 300 Hz. A frequenze così basse corrispondono lunghezze d'onda molto grandi (circa 6000 km a 50 Hz, la frequenza delle sorgenti legate alla trasmissione e all'uso di energia elettrica in Italia) e, in situazioni pratiche, il campo elettrico e quello magnetico agiscono in modo indipendente l'uno dall'altro.

Va inoltre ricordata la presenza di un campo magnetico terrestre: ha intensità media di circa 40 μ T ed è prodotto principalmente dalle correnti circolanti nello strato più esterno del nucleo terrestre. Sulla superficie terrestre esiste anche un campo elettrico naturale, creato dalle cariche presenti nella ionosfera, che assume valori dell'ordine di 0.1 kV/m in condizioni di bel tempo, per raggiungere intensità di 10÷20 kV/m durante forti perturbazioni atmosferiche. I campi terrestri naturali si possono considerare statici o comunque lentamente variabili.

1.2 - Campo vicino reattivo

Si può suddividere lo spazio intorno ad una sorgente di onde elettromagnetiche in tre zone:

- **campo lontano**: in questa regione il campo elettromagnetico ha le caratteristiche di un'onda piana; generalmente si ha per una distanza dalla sorgente superiore a max $\{3\lambda; 2D^2/\lambda\}$, ove *D* rappresenta la dimensione massima della sorgente e λ la lunghezza d'onda;
- campo vicino radiativo: compresa tra le regioni di campo lontano e campo vicino reattivo, è caratterizzata da campo elettrico e magnetico che non sono rappresentabili come onda piana, ma variano notevolmente da punto a punto;
- campo vicino reattivo: regione vicina alla sorgente nella quale i campi elettrico e magnetico sono considerabili disaccoppiati e non sono presenti fenomeni di trasporto di energia. Si estende dalla superficie della sorgente fino ad una distanza dell'ordine di grandezza di λ .

Per il caso d'interesse le misure sono sempre effettuate in condizione di campo vicino reattivo, quindi campo elettrico e magnetico sono indipendenti e misurati separatamente.

1.3 - Modalità d'interazione

Alla frequenza considerata un corpo umano si può trattare come un perfetto conduttore omogeneo, ed il campo elettrico non penetra i tessuti in modo significativo. Sulla superficie corporea è indotta una distribuzione di carica la cui variazione nel tempo crea delle correnti che attraversano il corpo e si scaricano a terra. Tali correnti sono la principale conseguenza dell'esposizione e la loro intensità è definita come:

$$J = A_E f E$$
 1.1

ove A_E è un fattore di proporzionalità che dipende dal tipo di tessuto interessato, f è la frequenza ed E è il valore di campo elettrico.

Il campo magnetico non interagisce direttamente con il corpo, ma induce in esso delle correnti che a loro volta generano un campo magnetico secondario interno, perturbando il campo originario.

L'interazione tra campo magnetico ed organismo sarà oggetto di discussione nel prossimo capitolo.

1.4 - Bibliografia

- [1.1]. Vincenzo Cataliotti, "Impianti elettrici" Vol. I e Vol. II, S. F. Flaccovio Editore, Palermo 1988
- [1.2]. Isabella Concina, Manuel Dall'Osto, Alberto Gasparotto, Paolo Pangrazzi, Matteo Borella Venturini, Andrea Trevisan, "Campi elettromagnetici: stato dell'arte", Dipartimento di Medicina Ambientale e Sanità Pubblica, Università di Padova, 2001

Effetti biologici e sanitari dei campi ELF

2.1 - Introduzione

Le interazioni dei campi elettromagnetici a frequenza industriale con gli organismi biologici e gli effetti sanitari derivanti sono oggetto di studio sin dagli anni '60. I metodi di indagine si possono schematicamente suddividere in:

- studi epidemiologici;
- studi di laboratorio in vivo;
- studi di laboratorio in vitro.

Tali studi sono a loro volta classificabili a seconda che vengano condotti su esseri umani o animali, su campioni residenziali o di addetti ai lavori, in base alle fasce d'età, su campioni reali o tramite simulazioni al computer.

2.2 - L'interazione tra campi elettromagnetici e sistemi biologici

Le onde elettromagnetiche possono produrre effetti biologici arrecanti un danno alla salute. Un effetto biologico si verifica quando l'esposizione alle onde elettromagnetiche provoca qualche variazione fisiologica notevole o rilevabile in un sistema biologico. Un danno alla salute avviene quando l'effetto biologico è al di fuori dell'intervallo in cui l'organismo può normalmente compensarlo.

L'interazione tra sistemi biologici e campi elettromagnetici può essere diretta (se è il campo esterno a provocare direttamente l'effetto biologico) o indiretta (quando l'interazione tra campo e corpo si verifica tramite un terzo elemento, generalmente un oggetto conduttore posto ad un potenziale elettrico diverso da quello del sistema biologico con cui viene a contatto).

Meccanismi di accoppiamento diretto

Il meccanismo di interazione tra campi elettromagnetici e corpo dell'individuo dipende dalla frequenza del campo. Le grandezze dosimetriche utilizzate nell'intervallo di frequenza in cui ricadono le radiazioni ELF sono la densità di corrente e la corrente elettrica.

Alle basse frequenze il campo elettrico e quello magnetico interagiscono con il corpo umano in modo indipendente l'uno dall'altro. L'esposizione a campi elettrici e magnetici a bassa frequenza comporta un assorbimento trascurabile di energia elettromagnetica, e conseguentemente un aumento non apprezzabile della temperatura corporea.

Il campo elettrico induce la formazione di correnti elettriche interne, la polarizzazione di cariche legate (formazione di dipoli elettrici) e la riorientazione di dipoli già esistenti nei tessuti. L'importanza di questi diversi tipi di effetti dipende dalle proprietà elettriche del corpo, ad esempio la conducibilità elettrica, da cui dipende il flusso di corrente, e la permittività magnetica, che influisce sull'ampiezza dei fenomeni di polarizzazione. Tali grandezze variano a seconda del tipo di tessuto biologico e inoltre dipendono dalla frequenza del campo applicato. L'interazione tra corpo umano e campo magnetico variabile nel tempo a bassa frequenza provoca la formazione di campi elettrici indotti e di correnti circolari, le cui intensità sono proporzionali alle dimensione del corpo investito, alla conducibilità elettrica dei tessuti e al tasso di variazione temporale dell'intensità del flusso magnetico $(d\Phi_B/dt)$. Il percorso e l'intensità delle correnti indotte dipendono dalla conducibilità elettrica del tipo di tessuto all'interno del corpo.

La grandezza dosimetrica che descrive l'interazione alle basse frequenze è la densità di correnti indotte. Il campo elettrico indotto all'interno del corpo e le correnti indotte sono legati fra loro dalla legge di Ohm:

$$J = \sigma E_{int}$$
 1.1

dove σ è la conducibilità del mezzo, E_{int} è il campo elettrico interno e J è la densità di corrente interna.

Meccanismi di accoppiamento indiretto

Vi sono due tipi di meccanismi di interazione indiretta:

- le correnti di contatto causate appunto dal contatto tra il corpo umano e un oggetto caratterizzato da un potenziale elettrico differente;
- interazione tra campo elettromagnetico e dispositivi medici indossati o impiantati.

I campi elettromagnetici possono generare una distribuzione di cariche superficiali su un oggetto conduttore; se un uomo si trova nelle immediate vicinanze o viene a contatto diretto con tale oggetto può avvenire una scarica elettrica. L'intensità e la distribuzione spaziale di tali correnti dipendono dalla frequenza del campo e dalle dimensioni dell'oggetto, della persona e dell'area di contatto.

Limite critico e limite cronico

Quando si analizzano gli effetti di un agente inquinante sull'organismo, i due valori da tenere in considerazione sono il limite critico, che causa danni nel breve periodo di tempo, e quello cronico, i cui effetti si fanno sentire dopo un'esposizione prolungata.

Nel caso di esposizione a campi ELF questi due concetti vanno visti in seno alla diversa concezione di dosimetria, in quanto non esiste accumulo nell'organismo. Si definisce allora un limite critico a 100 μ T, per il quale i danni sono conseguenti alle correnti indotte nell'organismo. Il limite cronico fissato dall'Organizzazione Mondiale della Sanità a 0.2 μ T fa riferimento agli esperimenti in laboratorio (che analizzano le interazioni a livello cellulare) e soprattutto agli studi epidemiologici, gli unici nei quali vengono analizzati dati per periodi di tempo sufficientemente lunghi.

2.3 - Studi epidemiologici

Gli studi epidemiologici vengono condotti per investigare l'associazione tra un effetto sulla salute di una popolazione e l'esposizione ad un potenziale agente nocivo. Uno studio epidemiologico progettato ed eseguito in modo appropriato consiste di diverse fasi, che comprendono l'identificazione della popolazione oggetto dello studio, la definizione dell'esposizione da esaminare, la scelta del tipo di studio da condurre (ad esempio uno studio di coorte o uno studio casocontrollo), e la determinazione del periodo durante il quale l'esposizione è rilevante per l'insorgenza della malattia in esame. Tutti questi fattori influenzano in modo sostanziale la qualità dello studio e, conseguentemente, l'interpretazione che si deve attribuire ai risultati dello stesso.

Gli studi epidemiologici di tipo caso-controllo sono i più appropriati per studiare l'insorgenza di malattie rare, come la leucemia, all'interno di una popolazione che presenta un vasto ventaglio di caratteristiche e di condizioni espositive, come le popolazioni a livello nazionale. Gli studi di coorte, invece, sono indicati nelle indagini condotte all'interno di campioni con caratteristiche espositive più specifiche (ad esempio i lavoratori impiegati in particolari attività o industrie) o su patologie caratterizzate da alti tassi di incidenza.

Nelle ricerche cliniche o di laboratorio, eseguite con gli appropriati controlli, gli oggetti dello studio vengono sottoposti a trattamenti o a condizioni espositive noti e controllati.

Nelle indagini epidemiologiche, invece, non è possibile attribuire l'esposizione in modo casuale a ciascun soggetto all'interno del campione. Questo implica che i ricercatori devono progettare lo studio in modo che le persone che sviluppano la malattia (casi) rispecchino in tutti gli aspetti, tranne che per l'esposizione, gli individui che non presentano la stessa patologia (controlli); in tal modo si tenta di limitare gli effetti di eventuali distorsioni (bias).

Una distorsione dovuta ad un'inappropriata selezione dei casi e dei controlli viene introdotta quando l'esposizione è legata a delle caratteristiche che rendono più, o meno, probabile la selezione degli uni rispetto agli altri, o, una volta selezionati, la loro partecipazione. È inoltre possibile introdurre dei bias da selezione dei casi, ad esempio, in uno studio di mortalità in cui il tasso di sopravvivenza differisca tra gli esposti ed i non esposti, e, contemporaneamente, l'esposizione risulti legata allo status socioeconomico. Tale differenza può, infatti, essere dovuta alla diversa distribuzione della mortalità nei vari gruppi socioeconomici legata alla possibilità di aver avuto le appropriate cure mediche. Inoltre, per patologie facilmente curabili o che concedono lunghi periodi di sopravvivenza, i malati adeguatamente curati possono decedere per altri motivi e quindi non venire inclusi nelle liste dei casi.

Negli studi caso-controllo è quindi fondamentale avere a disposizione degli strumenti che consentano di associare ad ogni caso uno o più controlli caratterizzati da aspetti del tutto simili (età, status socioeconomico, regione di residenza, attività lavorativa ecc.) tranne che per l'esposizione. Nelle nazioni nordiche e in quelle europee in genere, vengono abitualmente utilizzati come base per la selezione dei controlli i registri nazionali sulla popolazione, che forniscono molte indicazioni sulle caratteristiche socioeconomiche, sulla salute e sull'attività lavorativa degli individui selezionati. Se la partecipazione allo studio è alta è molto improbabile che si verifichino bias da selezione, anche se la partecipazione dei controlli può essere influenzata dal fatto che questi ultimi siano o meno esposti all'agente in esame. Nelle nazioni, come ad esempio gli Stati Uniti, dove tali registri non esistono è necessario adottare altri metodi per identificare, contattare e reclutare i controlli. Spesso la selezione viene effettuata tramite l'estrazione casuale dei numeri di telefono (random digit dialing) che però presenta l'inconveniente di introdurre distorsioni, dato che le persone appartenenti agli stati socioeconomici più bassi possono non avere il telefono. Ciò può determinare bias negli studi sulle leucemie infantili.

L'impossibilità di assegnare le diverse condizioni espositive in modo casuale può introdurre possibili effetti di confondimento. Il confondimento si verifica quando l'esposizione in esame è associata ad un altro fattore che influenza quantitativamente il rischio di contrarre la malattia in oggetto. I fattori di confondimento possono produrre distorsioni in eccesso o in difetto, a seconda dei legami esistenti tra esposizione, malattia, confondente. I confondenti possono essere corretti, o almeno controllati, tramite metodi statistici. Nel caso delle leucemie infantili o della leucemia linfatica cronica, tuttavia, la conoscenza dei fattori di confondimento non è sufficiente a garantirne l'identificazione ed il controllo all'interno degli studi epidemiologici.

Un'altra limitazione degli studi epidemiologici, sempre dovuta all'impossibilità di assegnare e controllare l'esposizione, è rappresentata dalla errata classificazione espositiva, vale a dire da un'errata determinazione dei livelli di esposizione. Tale errore può distorcere notevolmente le misure di associazione riportate da uno studio. Per esempio, negli studi epidemiologici condotti sulle esposizioni nei luoghi di lavoro (studi occupazionali), la valutazione dell'esposizione viene spesso basata indirettamente sul tipo di lavoro eseguito dalle persone. Tuttavia una stessa mansione può comportare diversi gradi di esposizione per individui distinti. Le informazioni sulle condizioni espositive possono essere prospettive (prima dell'insorgenza della malattia) o retrospettive (dopo l'insorgenza della malattia). In quest'ultimo caso, soprattutto quando le informazioni vengono richieste direttamente al lavoratore tramite un questionario, il ricordo dell'esposizione può essere influenzato dal fatto che il paziente è affetto dalla malattia e che sia a conoscenza dei possibili legami tra la patologia e l'agente a cui è stato esposto; questo tipo di distorsioni causa una disparità di valutazione dell'esposizione tra il gruppo delle persone esposte e il gruppo dei non esposti.

Gli studi epidemiologici hanno utilizzato vari metodi per stimare l'esposizione ai campi elettromagnetici ELF, al fine di indagare possibili correlazioni tra questi ultimi e l'insorgenza di neoplasie. L'esposizione residenziale è stata valutata sostanzialmente in cinque modi diversi: le configurazioni elettriche (wire codes), basate essenzialmente sulla distanza tra l'abitazione e i dispositivi di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica (linee elettrica ad alta, media, bassa tensione, trasformatori, ecc.); le stime del campo magnetico, effettuate medianti calcoli teorici del campo emesso da alcune tipologie di linee elettriche utilizzando i dati storici del carico delle stesse; misure puntuali (spot) di campo magnetico, che forniscono un valore singolo ed istantaneo del campo magnetico in uno o più punti all'interno della casa; misure medie di campo magnetico, che sono sostanzialmente delle misure spot di pochi secondi ripetute per almeno 24 ore e mediate su tutta la durata del campionamento; infine, misure dosimetriche mediate, durante le quali il soggetto indossa un misuratore che campiona e registra per 48 ore l'andamento del campo magnetico, successivamente mediato nel tempo.

Dall'esame della validità dei diversi metodi di valutazione dell'esposizione si è concluso che ciascuno di essi presenta delle limitazioni. I wire codes e le stime di campo magnetico presentano il vantaggio di offrire un quadro più stabile nel tempo e quindi di fornire delle indicazioni probabilmente più corrette dell'esposizione durante il periodo di insorgenza dei tumori. Tali metodi, tuttavia, hanno lo svantaggio, rispetto a quelli basati sulle misure, di non considerare affatto il campo magnetico prodotto dagli elettrodomestici e dai dispositivi elettrici di comune utilizzo all'interno delle abitazioni. Il contributo degli apparecchi elettrici, infatti, presenta dei livelli di intensità di campo magnetico molto simili a quelli emessi dalle linee elettriche, e quindi non dovrebbe essere trascurato a priori. L'esame della correlazione tra wire codes e misure dirette di campo magnetico ha portato a concludere che l'accordo tra i due metodi è variabile.

Tumori infantili

Vi è una notevole controversia sulla possibilità di un legame tra l'esposizione a campi magnetici ELF e rischio tumorale. A riguardo sono stati pubblicati molti studi da quando, nel 1979, Leeper e Wertheimer riportarono un'associazione tra mortalità per tumori infantili e vicinanza delle abitazioni alle linee di distribuzione dell'energia elettrica; tali case vennero classificate come abitazioni ad "alta configurazione di corrente". Emerse l'ipotesi di un aumento nel rischio di tumori infantili dovuto alla presenza di sorgenti di campo magnetico esterne.

Ad oggi, sono stati pubblicati diversi studi su tumori infantili ed esposizione ai campi magnetici a frequenza di rete generati dalle linee elettriche di distribuzione. I metodi di valutazione dell'esposizione in queste ricerche vanno dalle misure a breve termine alla stima della distanza relativa tra la linea e l'abitazione, e, nella maggior parte degli studi, alla configurazione della linea elettrica (wire codes); in alcuni studi si è anche tenuto conto del carico storico di corrente.

La coerenza dei risultati sulle associazioni tra leucemia e vicinanza delle abitazioni alle linee elettriche ha portato la U.S. National Academy of Sciences Committee a concludere che i bambini residenti in prossimità delle linee elettriche siano soggetti ad un maggior rischio di contrarre leucemie. Poiché gli studi singoli si basano su piccoli campioni statistici, gli intervalli di confidenza che ne risultano sono estremamente grandi. Tuttavia, considerando questi studi assieme, i risultati sono coerenti con un rischio relativo di 1.5.

L'ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) pone particolare attenzione allo studio americano di Linet et al. nel 1997; si tratta di un caso-controllo di vaste dimensioni (638 casi e 620 controlli) nel quale sono state effettuate sia misure mediate sulle 24 ore nella camera da letto e sia misure brevi di 30 secondi in tutte le altre stanze dell'abitazione in cui il bambino ha vissuto per più del 70% nei 5 anni precedenti la diagnosi, o il tempo corrispondente per i relativi controlli. Alle 416 coppie caso-controllo che non hanno cambiato casa negli anni precedenti la diagnosi, sono state assegnate le relative configurazioni di corrente (wire codes) delle abitazioni. Mentre non ci sono indicazioni di associazione tra la categoria dei wire codes e la leucemia, i risultati delle misure suggeriscono una correlazione con un rischio relativo di $1.2 \div 1.5$ per $B > 0.2 \mu$ T e di 1.7 per $B > 0.3 \mu$ T.

Secondo l'ICNIRP, lo studio di Linet et al. costituisce il maggior contributo alla ricerca nel settore per le sue dimensioni, il numero di soggetti nelle categorie ad elevata esposizione, la tempestività delle misure dopo la data della diagnosi (generalmente entro i 24 mesi), gli altri strumenti utilizzati per la stima dell'esposizione e la qualità delle analisi.

Tumori negli adulti: studi residenziali

Diversi recenti studi hanno esaminato il rischio di leucemie (sia di tutte le leucemie prese assieme che di tipi specifici) in relazione all'esposizione residenziale. Le indagini basate sulle valutazioni numeriche dei campi magnetici hanno fornito esiti sia positivi che negativi dipendentemente dal tipo di leucemia in oggetto e dalla definizione delle categorie espositive.

Tumori negli adulti: studi occupazionali

Le indagini epidemiologiche sulle malattie associate all'esposizione professionale ai campi ELF sono precedenti a quelle relative all'esposizione residenziale.

Tutti questi studi presentano delle limitazioni che vanno dal progetto dell'indagine epidemiologica alla determinazione dei criteri di valutazione dell'esposizione; analizzati assieme evidenziano un'associazione tra esposizione professionale ai campi magnetici e leucemia linfatica cronica in seguito all'esposizione ad un campo magnetico al di sopra dei 0.2μ T.

2.4 - Studi in vivo

Negli studi in vivo, condotti sull'uomo (volontari) o su animali, viene esaminato l'effetto dell'agente nocivo sull'intero organismo biologico.

Gli studi compiuti su volontari hanno il vantaggio di osservare gli effetti dei campi elettromagnetici sulla specie animale "giusta"; tuttavia, è chiaro che, per motivi etici, l'intensità dell'esposizione deve sempre essere mantenuta a livelli bassi, e non può mai superare delle determinate soglie. Per questo motivo, molti argomenti della ricerca biologica vengono analizzati più appropriatamente con i modelli animali che non con gli esseri umani, in quanto l'esposizione all'agente ambientale può essere invasiva, e non limitata a bassi dosaggi, e può essere studiata in condizioni rigorosamente controllate. L'uso di modelli animali nello studio degli effetti dei campi elettromagnetici è limitato da due problemi fondamentali: l'estrapolazione dei risultati conseguiti a specie diverse e l'estrapolazione delle condizioni espositive di laboratorio a quelle ambientali. Rispetto alle caratteristiche di un'esposizione ambientale legata ai campi elettromagnetici, gli studi sugli animali sono stati condotti a livelli di intensità generalmente molto più elevati e con un maggiore grado di uniformità, sia in frequenza che in intensità di campo. Queste condizioni sperimentali sono state scelte per massimizzare la possibilità di rilevare gli eventuali effetti di una determinata situazione espositiva.

Studi clinici su volontari

Gli studi clinici sull'esposizione umana ai campi ELF sono stati sostanzialmente condotti attraverso tre principali filoni di ricerca che comprendono un vasto numero di indagini sui lavoratori impiegati nelle compagnie per l'elettricità eseguite in Unione Sovietica a partire dagli anni '60, la ricerca di laboratorio condotta in Germania negli anni '70 e, infine, il programma di ricerca clinica sull'uomo iniziato nel 1982 al Midwest Research Institute negli Stati Uniti. Campi magnetici sufficientemente intensi sono in grado di stimolare direttamente i tessuti muscolari ed i nervi periferici; tali campi, infatti, somministrati mediante brevi impulsi, vengono già utilizzati per scopi clinici per verificare la buona funzionalità dei percorsi nervosi. Campi magnetici variabili nel tempo che inducono densità di corrente interne maggiori di 1 A/m² possono eccitare i neuroni e sono in grado di ingenerare effetti biologici irreversibili, quali la fibrillazione cardiaca.

L'eccitabilità dei tessuti dipende molto dalla durata dell'esposizione al campo magnetico.



Alterazione del battito cardiaco

Figura 2.1 - Esempio di variazione dello spettro di intensità delle serie temporali cardiache.

Lo studio delle variazioni del battito cardiaco conseguente all'esposizione ai campi ELF ha seguito due filoni di ricerca: le variazioni del numero di battiti per minuto (ritmo cardiaco) e le modificazioni dei segnali elettrochimici inviati al cuore (attività cardiaca). Per quanto riguarda il primo filone, gli studi clinici condotti in laboratorio hanno osservato una riduzione del battito in almeno una delle categorie di esposti. In particolare, si sono osservate modeste variazioni nelle funzioni cardiache dei volontari contemporaneamente esposti a campi elettrici e magnetici, di intensità rispettivamente 9 kV/m e 20 µT. Il battito cardiaco a riposo è risultato essere leggermente ridotto di 3÷5 battiti al minuto, nel periodo immediatamente successivo all'esposizione

La variazione della frequenza cardiaca deriva dall'azione dei riflessi neuronali e cardiovascolari, compresi quelli coinvolti nel controllo della temperatura, della pressione sanguigna e del respiro. È stato dimostrato che una diminuzione di tale valore assume un significato clinico nella predizione della morbosità cardiovascolare e della mortalità.

In Figura 2.1 è riportato un esempio estratto da uno studio effettuato su 77 volontari sottoposti nelle ore di sonno ad un campo intermittente circolarmente polarizzato di 200 mG a 60 Hz. Nei grafici viene visualizzato lo spettro di intensità delle serie temporali cardiache, per ognuno degli intervalli di 20 minuti in cui sono state suddivise le 3 ore dell'esperimento.

Si nota, durante il periodo di attivazione del campo magnetico, un incremento del picco nella banda dell'aritmia respiratoria $(0.15 \div 0.40 \text{ Hz})$ e un'attenuazione nella banda di controllo della regolazione termica e della pressione sanguigna.

Esperimenti sugli animali: studi sul cancro

Le indagini epidemiologiche hanno suggerito una possibile associazione tra esposizione a campi magnetici e tumore alla mammella nell'uomo e nella donna; dagli studi eseguiti sui ratti è emersa l'ipotesi che l'incremento dell'incidenza di tumori alla mammella osservato sia da addebitare ad un effetto di soppressione della produzione di melatonina pineale ed al conseguente aumento dei livelli dell'ormone steroide. Dopo una prima ricerca positiva che segnalava la possibile azione dei campi magnetici ELF come promotori tumorali nei confronti del cancro alla mammella, è stata condotta una serie di studi per indagare il possibile ruolo dei campi ELF come iniziatori e promotori tumorali nei roditori. In queste indagini, che utilizzavano come cavie femmine di ratto, il tumore veniva iniziato per via intragastrica mediante la somministrazione di un agente cancerogeno chimico; a questo seguiva l'esposizione continua e giornaliera, per tredici settimane, a campi magnetici a 50 Hz. Il primo studio di questa serie, i cui risultati vennero poi analizzati istologicamente nello studio, mostrò che campi magnetici di intensità dell'ordine delle centinaia di µT agivano come promotori sulla crescita e lo sviluppo del tumore alla mammella, ma non alteravano il tasso di incidenza. Lo stesso laboratorio ripeté l'esperimento utilizzando diverse intensità di campo magnetico allo scopo di evidenziare una relazione dose-risposta; il risultato fu un eccesso, statisticamente non significativo, di tumori totali nel gruppo degli animali esposti.

Esperimenti sugli animali: studi su effetti non cancerogeni

A dispetto del grande numero di studi condotti allo scopo di individuare gli effetti biologici dei campi elettrici e magnetici ELF, pochi studi sistematici hanno definito le soglie del campo al di sopra delle quali si hanno perturbazioni significative delle funzioni biologiche. È stato ben accertato che le correnti elettriche indotte possono stimolare direttamente i nervi e la muscolatura non appena vengono superati i valori di soglia. Ma anche le correnti che non sono i grado di eccitare direttamente i tessuti possono tuttavia influenzare l'attività elettrica e l'eccitabilità neurale: le funzioni del sistema nervoso centrale sono sensibili ai campi elettrici endogeni generati dalle cellule nervose a-diacenti, caratterizzati da livelli di intensità inferiori a quelli necessari per la stimolazione diretta.

Correnti e campi elettrici indotti di intensità superiori a quelle dei segnali bioelettrici endogeni, normalmente presenti nei tessuti, sono la causa di una quantità di effetti fisiologici, la cui gravità aumenta al crescere della densità di corrente elettrica indotta. Effetti sui tessuti e modificazioni delle funzioni cognitive del cervello sono state riportate per densità di corrente comprese tra 10 e 100 mA/m^2 . Per frequenze nell'intervallo tra 10 Hz e 1 kHz, le soglie della stimolazione neurale e neuromuscolare vengono superate quando la densità di corrente supera valori compresi tra 100 e diverse migliaia di mA/m^2 .

Quando la densità di corrente supera 1 mA/m^2 possono aver luogo effetti gravi o addirittura fatali, quali extrasistole, fibrillazione ventricolare, tetano muscolare e blocco respiratorio. La gravità delle conseguenze e la probabilità che si verifichino danni irreversibili ai tessuti aumentano se l'esposizione a densità di correnti indotte superiori a $10\div100 \text{ mA/m}^2$ è cronica. L'ICNIRP conclude quindi che è appropriato limitare l'esposizione umana a campi che inducono correnti interne maggiori a 10 mA/m^2 nella testa, nel tronco e nel collo, nell'intervallo di frequenza tra 10 Hz e 1 kHz.

Una grande varietà di animali, comprendente primati non umani, piccioni e roditori, sono stati esposti a campi elettrici e magnetici di elevata intensità allo scopo di verificare eventuali modificazioni comportamentali e fisiologiche a carico del sistema nervoso. La capacità degli animali di percepire i campi elettrici è un fenomeno ormai ben conosciuto, e le soglie di sensibilità per gli animali sembrano simili.

Alcuni studi condotti sui babbuini e sui roditori allo scopo di verificare se i campi elettrici e magnetici hanno un influenza su alcune reazioni neurocomportamentali, quali la fuga, l'avversione, l'apprendimento e la capacità di agire, hanno riportato esiti positivi, anche se non vi è alcuna evidenza che i campi elettromagnetici provochino gli stessi effetti ai tipici livelli di intensità ambienta-le.

2.5 - Studi in vitro: l'interazione biofisica con i campi ELF

Storicamente, la sperimentazione su sostanze potenzialmente tossiche si è basata sull'impiego di sistemi cellulari in vitro strettamente controllati; per identificare gli effetti potenzialmente cancerogeni o tossici di un agente, le cellule vengono generalmente esposte a dosaggi anche molto superiori a quelli che ne caratterizzano l'esposizione ambientale. Successivamente vengono misurati una serie di parametri per rilevare le alterazioni avvenute nei processi cellulari, quali la differenziazione, la proliferazione, l'espressione dei geni e la trasduzione dei segnali.

Vi è un gran numero di componenti, processi e sistemi cellulari che possono essere influenzati dai campi ELF. Dato che non si conosce nulla sul potenziale meccanismo di interazione biologica, è necessario considerare accuratamente gli effetti osservati associandoli all'intervallo di intensità di dosaggio applicata, in quanto la loro estrapolazione a livelli di esposizione inferiore potrebbe risultare inappropriata, perché potrebbero esistere differenti meccanismi di interazione in funzione dell'intervallo di intensità di campo applicata.

Interazione a livello di membrana cellulare

Un campo magnetico oscillante può determinare una variazione nel flusso attraverso la membrana cellulare di ioni (soprattutto Ca^{2+}). Infatti il passaggio di proteine ed elettroliti attraverso tale membrana è regolato tramite dei canali di membrana (le cosiddette "pompe cellulari") attraverso i quali vengono attivamente assunte od espulse sostanze chimiche. Queste entrano nel campo statico di tali "pompe", e a causa della forza di Lorentz entrano o escono seguendo un'orbita circolare.

Alterazione della secrezione di melatonina

Uno dei pochi effetti accertati riguardante l'esposizione di animali a campi ELF riguarda l'attenuazione della produzione notturna di melatonina da parte dell'epifisi, e il ritardo di tale secrezione di circa due ore.

Tale diminuzione causa disturbi nel ritmo sonno-veglia e nelle funzioni neuro-vegetative, oltre ad un aumento dell'incidenza di neoplasie, una parziale soppressione del sistema immunitario e del sistema riproduttivo, alterazioni nella fisiologia delle funzioni endocrine e perturbazioni psicologiche che possono condurre a disturbi depressivi.

La soppressione del normale ciclo circadiano della melatonina è indicata come uno dei possibili meccanismi attraverso il quale l'esposizione ai campi ELF incrementa il rischio di tumore alla mammella. Gli studi in vitro sulle cellule umane di tumore alla mammella hanno mostrato che trattando le colture con livelli fisiologici di melatonina si ottiene un decremento della proliferazione cellulare e che tale effetto viene annullato dall'esposizione a campi magnetici ELF sinusoidali di $1.2 \mu T$.

Effetti antiproliferativi

Numerose indagini si sono interessate dei potenziali effetti dei campi ELF sui processi caratteristici della differenziazione cellulare, quali, ad esempio, le caratteristiche della superficie cellulare, la morfologia, la dimensione e l'orientazione della cellula. Molti di questi studi hanno osservato che il campo elettrico influenza il comportamento cellulare.

Indagini sulle alterazioni della produzione delle matrix protein hanno trovato una correlazione positiva tra la dose di campo elettrico applicato e lo stato di differenziazione della cellula. Le ricerche sulle alterazioni a carico della superficie cellulare hanno utilizzato una grande varietà di tipologie di cellule. In alcuni di questi lavori gli effetti osservati sono stati ricondotti all'esposizione ai campi elettrici.

Un'ulteriore indagine ha inoltre evidenziato che l'esposizione a un campo elettrico a 60 Hz agisce sopprimendo la formazione di cellule di tipo osteoclastico nelle colture di midollo.

2.6 - Bibliografia

- [2.1]. Juris Galvanovskis, John Sandblom, Bjorn Bergqvist, Sheila Galt, Yngve Hamnerius, "The influence of 50-Hz magnetic fields on cytoplasmic Ca²⁺ oscillations in human leukemia Tcells", The Science of the Total Environment 180 (1996) 19-33
- [2.2]. J. Gartzke, K. Lange, U. Brandt, J. Bergmann, "A new concept for risk assessment of the hazards of non-genotoxic chemicals-electronmicroscopic studies of the cell surface. Evidence for the action of lipophilic chemicals on the Ca²⁺ signaling system", The Science of the Total Environment 199 (1997) 213-226
- [2.3]. Committee on the Possible Effects of Electromagnetic Fields on Biologic Systems Board on Radiation Effects Research – Commission on Life Sciences – National Research Council, "Possible Health Effects of Exposure to Residential Electric and Magnetic Fields", National Academy Press, Washington, D. C., 1997
- [2.4]. Arnt Inge Vistnes, Gro B. Ramberg, Lars Rune Bjørnevik, Tore Tynes, Tor Haldorsen, "Exposure of Children to Residential Magnetic Fields in Norway: Is Proximity to Power Lines an Adequate Predictor of Exposure?", Bioelectromagnetics 18:47–57 (1997)
- [2.5]. Leeka I. Kheifets, Robert Kavet, Stanley S. Sussman, "Wire Codes, Magnetic Fields, and Childhood Cancer", Bioelectromagnetics 18:99–110 (1997)
- [2.6]. Jun Zhang, Indira Nair, M. Granger Morgan, "Effects Function Simulation of Residential Appliance Field Exposures", Bioelectromagnetics 18:116–124 (1997)
- [2.7]. Stefan Engström, "What Is the Time Scale of Magnetic Field Interaction in Biological Systems?", Bioelectromagnetics 18:244–249 (1997)
- [2.8]. P.K.C. Wang, "ELF Magnetic Field Exposure System with Feedback-Controlled Disturbance Rejection", Bioelectromagnetics 18:299–306 (1997)
- [2.9]. Domenico Lanera, John E. Zapotosky, James A. Colby, "Study of Magnetic Fields From Power-Frequency Current on Water Lines", Bioelectromagnetics 18:307–316 (1997)
- [2.10]. J. Alan Beech, "Bioelectric Potential Gradients May Initiate Cell Cycling: ELF and Zeta Potential Gradients May Mimic This Effect", Bioelectromagnetics 18:341–348 (1997)
- [2.11]. Jun Zhang, Indira Nair, Jack Sahl, "Effects Function Analysis of ELF Magnetic Field Exposure in the Electric Utility Work Environment", Bioelectromagnetics 18:365–375 (1997)
- [2.12]. T.A. Litovitz, M. Penafiel, D. Krause, D. Zhang, J.M. Mullins, "The Role of Temporal Sensing in Bioelectromagnetic Effects", Bioelectromagnetics 18:388–395 (1997)
- [2.13]. Ferdinando Bersani, Fiorenzo Marinelli, Andrea Ognibene, Alessandro Matteucci, Stefania Cecchi, Spartaco Santi, Stefano Squarzoni, Nadir Mario Maraldi, "Intramembrane Protein Distribution in Cell Cultures Is Affected by 50 Hz Pulsed Magnetic Fields", Bioelectromagnetics 18:463–469 (1997)
- [2.14]. Jørgen H. Skotte, Henrik I. Hjøllund, "Exposure of Welders and Other Metal Workers to ELF Magnetic Fields", Bioelectromagnetics 18:470–477 (1997)
- [2.15]. Trevor W. Dawson, Kris Caputa, Maria A. Stuchly, "Influence of Human Model Resolution on Computed Currents Induced in Organs by 60-Hz Magnetic Fields", Bioelectromagnetics 18:478–490 (1997)
- [2.16]. L. Beale, N. E. Pearce, D. M. Conroy, M. A. Henning, K. A. Murrell, "Psychological Effects of Chronic Exposure to 50 Hz Magnetic Fields in Humans Living Near Extra-High-Voltage Transmission Lines", Bioelectromagnetics 18:584–594 (1997)
- [2.17]. Paolo Bevitori, "Inquinamento elettromagnetico Campi elettrici e magnetici a frequenza industriale (50-60 Hz) generati da elettrodotti ed apparecchi elettrici - Aspetti tecnici, sanitari e normativi", Maggioli Editore, Rimini 1998
- [2.18]. M. Simko, R. Kriehuber, D. G. Weiss, R.A. Luben, "Effects of 50 Hz EMF Exposure on Micronucleus Formation and Apoptosis in Transformed and Nontransformed Human Cell Lines", Bioelectromagnetics 19:85–91 (1998)

- [2.19]. Antonio Sastre, Mary R. Cook, Charles Graham, "Nocturnal Exposure to Intermittent 60 Hz Magnetic Fields Alters Human Cardiac Rhythm", Bioelectromagnetics 19:98–106 (1998)
- [2.20]. Paul J. Villeneuve, David A. Agnew, Paul N. Corey, Anthony B. Miller, "Alternate Indices of Electric and Magnetic Field Exposures Among Ontario Electrical Utility Workers", Bioelectromagnetics 19:140–151 (1998)
- [2.21]. K. Heermeier, M. Spanner, J. Träger, R. Gradinger, P. G. Strauss, W. Kraus, J. Schmidt, "Effects of Extremely Low Frequency Electromagnetic Field (EMF) on Collagen Type I mRNA Expression and Extracellular Matrix Synthesis of Human Osteoblastic Cells", Bioelectromagnetics 19:222–231 (1998)
- [2.22]. C. M. Furse, O. P. Gandhi, "Calculation of Electric Fields and Currents Induced in a Millimeter-Resolution Human Model at 60 Hz Using the FDTD Method", Bioelectromagnetics 19:293–299 (1998)
- [2.23]. Nikolaos Kazantzis, John Podd, Craig Whittington, "Acute Effects of 50 Hz, 100 mT Magnetic Field Exposure on Visual Duration Discrimination at Two Different Times of the Day", Bioelectromagnetics 19:310–317 (1998)
- [2.24]. W. T. Kaune, M. Feychting, A. Ahlbom, R. M. Ulrich, D. A. Savitz, "Temporal Characteristics of Transmission-Line Loadings in the Swedish Childhood Cancer Study", Bioelectromagnetics 19:354–365 (1998)
- [2.25]. L. DiCarlo, J. M. Farrell, T. A. Litovitz, "A Simple Experiment to Study Electromagnetic Field Effects: Protection Induced by Short-term Exposures to 60 Hz Magnetic Fields", Bioelectromagnetics 19:498–500 (1998)
- [2.26]. Organizzazione Mondiale della Sanità, "Promemoria n. 181 Campi elettromagnetici e salute pubblica - Il progetto internazionale CEM", maggio 1998
- [2.27]. Organizzazione Mondiale della Sanità, "Promemoria n. 182 Campi elettromagnetici e salute pubblica - Proprietà fisiche ed effetti sui sistemi biologici", maggio 1998
- [2.28]. Organizzazione Mondiale della Sanità, "Promemoria n. 184 Campi elettromagnetici e salute pubblica - Percezione dei rischi dei campi elettromagnetici nel pubblico", maggio 1998
- [2.29]. M. H. Repacholi, "WHO's International EMF Project", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 83, Nos 1-2, pp. 1-4 (1999)
- [2.30]. Organizzazione Mondiale della Sanità, "Promemoria n. 205 Campi elettromagnetici e salute pubblica – Campi a frequenza estremamente bassa (ELF)", novembre 1998
- [2.31]. J. H. Bernhardt, "ICNIRP initiatives", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 83, Nos 1-2, pp. 5-7 (1999)
- [2.32]. J. Swanson, "Residential power-frequency and magnetic fields: sources and exposures", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 83, Nos 1-2, pp. 9-14 (1999)
- [2.33]. P. Vecchia, "Sources of exposure to ELF fields at workplaces", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 83, Nos 1-2, pp. 15-19 (1999)
- [2.34]. R. Kavet, "ELF magnetic fields, transients and TWA metrics", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 83, Nos 1-2, pp. 29-40 (1999)
- [2.35]. J. M. Silva, "Personal exposure logging for ELF fields", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 83, Nos 1-2, pp. 41-45 (1999)
- [2.36]. P. Chadwick, "Assessment of industrial exposure to magnetic fields", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 83, Nos 1-2, pp. 47-52 (1999)
- [2.37]. D. Baris, M. Linet, A. Auvinen, W. T. Kaune, S. Wacholder, R. Kleinerman, E. Hatch, L. Robison, S. Niwa, C. Haines, R. E. Tarone, "Temporal and other exposure aspects of residential magnetic fields measurement in relation to acute lymphoblastic leukaemia in children: the National Cancer Institute/Children's Cancer Group study", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 83, Nos 1-2, pp. 53-60 (1999)
- [2.38]. L. Kheifets, "Occupational exposure assessment in epidemiological studies of EMF", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 83, Nos 1-2, pp. 61-69 (1999)

- [2.39]. Albom, M. Feychting, "Magnetic field exposure estimates based on power lines near homes", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 83, Nos 1-2, pp. 79-82 (1999)
- [2.40]. R. Matthes, "Rapporteur report: sources and exposure metrics for ELF epidemiology (part I)", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 83, Nos 1-2, pp. 83-86 (1999)
- [2.41]. Floderus, "Combined occupational and residential ezposures", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 83, Nos 1-2, pp. 93-97 (1999)
- [2.42]. M. Yost, "Alternative magnetic field exposure metrics: occupational measurements in trolley workers", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 83, Nos 1-2, pp. 99-106 (1999)
- [2.43]. M. L. McBride, "Rapporteur report: sources and exposure metrics for ELF epidemiology (part II)", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 83, Nos 1-2, pp. 107-112 (1999)
- [2.44]. G. d'Amore, L. Anglesio, M. Tasso, A. Benedetto, S. Roletti, "Outdoor background ELF magnetic fields in an urban environment", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 83, Nos 1-2, pp. 113-117 (1999)
- [2.45]. Michael H. Repacholi, B. Greenebaum, "Interaction of Static and Extremely Low Frequency Electric and Magnetic Fields With Living Systems: Health Effects and Research Needs", Bioelectromagnetics 20:133–160 (1999)
- [2.46]. Christopher C. Davis, Ian Barber, Mays L. Swicord, "Food and Drug Administration Low-Level Extremely-Low-Frequency Magnetic Field Exposure Facility", Bioelectromagnetics 20:203–215 (1999)
- [2.47]. Trevor W. Dawson, Kryz Caputa, Maria A. Stuchly, "Magnetic Induction at 60 Hz in the Human Heart: A Comparison Between the In Situ and Isolated Scenarios", Bioelectromagnetics 20:233–243 (1999)
- [2.48]. John Swanson, W.T. Kaune, "Comparison of Residential Power-Frequency Magnetic Fields Away From Appliances in Different Countries", Bioelectromagnetics 20:244–254 (1999)
- [2.49]. Juris Galvanovskis, John Sandblom, Björn Bergqvist, Sheila Galt, Yngve Hamnerius, "Cytoplasmic Ca²⁺ Oscillations in Human Leukemia T-Cells Are Reduced by 50 Hz Magnetic Fields", Bioelectromagnetics 20:269–276 (1999)
- [2.50]. Charles Graham, Mary R. Cook, "Human Sleep in 60 Hz Magnetic Fields", Bioelectromagnetics 20:277–283 (1999)
- [2.51]. Henry Lai, Monserrat Carino, "60 Hz Magnetic Fields and Central Cholinergic Activity: Effects of Exposure Intensity and Duration", Bioelectromagnetics 20:284–289 (1999)
- [2.52]. C.M. Li, H. Chiang, Y.D. Fu, B.J. Shao, J.R. Shi, G.D. Yao, "Effects of 50 Hz Magnetic Fields on Gap Junctional Intercellular Communication", Bioelectromagnetics 20:290–294 (1999)
- [2.53]. R. Kavet, R.M. Ulrich, W.T. Kaune, G.B. Johnson, T. Powers, "Determinants of Power-Frequency Magnetic Fields in Residences Located Away From Overhead Power Lines", Bioelectromagnetics 20:306–318 (1999)
- [2.54]. François Clinard, Chantal Milan, Mohamed Harb, Paule-Marie Carli, Claire Bonithon-Kopp, Jean-Paul Moutet, Jean Faivre, Patrick Hillon, "Residential Magnetic Field Measurements in France: Comparison of Indoor and Outdoor Measurements", Bioelectromagnetics 20:319– 326 (1999)
- [2.55]. Patrick Levallois, Denis Gauvin, Suzanne Gingras, José St-Laurent, "Comparison Between Personal Exposure to 60 Hz Magnetic Fields and Stationary Home Measurements for People Living Near and Away From a 735 kV Power Line", Bioelectromagnetics 20:331–337 (1999)
- [2.56]. Joseph D. Bowman, Duncan C.Thomas, Liangzhong Jiang, Feng Jiang, John M. Peters, "Residential Magnetic Fields Predicted From Wiring Configurations: I.Exposure Model", Bioelectromagnetics 20:399-413 (1999)
- [2.57]. Duncan C.Thomas, Joseph D. Bowman, Liangzhong Jiang, Feng Jiang, John M. Peters, "Residential Magnetic Fields Predicted From Wiring Configurations: II. Relationships to Childhood Leukemia", Bioelectromagnetics 20:414-422 (1999)

- [2.58]. Stefan Engström, Robert Fitzsimmons, "Five Hypotheses to Examine the Nature of Magnetic Field Transduction in Biological Systems", Bioelectromagnetics 20:423-430 (1999)
- [2.59]. N.A.Cridland, R.G.E.Haylock, R.D.Saunders, "50 Hz Magnetic Field Exposure Alters Onset of S-Phase in Normal Human Fibroblasts", Bioelectromagnetics 20:446-452 (1999)
- [2.60]. Elinor R. Schoenfeld, Kevin Henderson, Erin O'Leary, Roger Grimson, William Kaune, M. Cristina Leske, "Magnetic Field Exposure Assessment: A Comparison of Various Methods", Bioelectromagnetics 20:487-496 (1999)
- [2.61]. KurtisW. Andrews, David A. Savitz, "Accuracy of Industry and Occupation on Death Certificates of Electric UtilityWorkers: Implications for Epidemiologic Studies of Magnetic Fields and Cancer", Bioelectromagnetics 20:512-518 (1999)
- [2.62]. M. Stievano, M. Erna, "Rassegna degli effetti derivanti dall'esposizione ai campi elettromagnetici", ANPA - Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, RTI CTN_AGF 2/2000
- [2.63]. Organizzazione Mondiale della Sanità, "Promemoria Marzo 2000 Campi elettromagnetici e salute pubblica Politiche cautelative", marzo 2000
- [2.64]. L. Anglesio, G. D'Amore, S. Maggiolo, L. Menini, S. Rebeschini, R. Sogni, S. Adda, C. Barbieri, A. Cogorno, B. Dalzocchio, W. Piromalli, F. Rigolon, F. Trotti, M. Valle, "Rassegna di indicatori e indici per il rumore, le radiazioni non ionizzanti e la radioattività ambientale", Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, RTI CTN_AGF 4/2000
- [2.65]. Andrei L. Kindzelskii, Howard R. Petty, "Extremely low frequency pulsed DC electric fields promote neutrophil extension, metabolic resonance and DNA damage when phase-matched with metabolic oscillators", Biochimica et Biophysica Acta 1495 (2000) 90-111
- [2.66]. Lisi, D. Pozzi, E. Pasquali, S. Rieti, M. Girasole, A. Cricenti, R. Generosi, A.L. Serafino, A. Congiu-Castellano, G. Ravagnan, L. Giuliani, and S. Grimaldi, "Three Dimensional (3D) Analysis of the Morphological Changes Induced by 50 Hz Magnetic Field Exposure on Human Lymphoblastoid Cells (Raji)", Bioelectromagnetics 21:46-51 (2000)
- [2.67]. Norman H. Hansen, Eugene Sobel, Zoreh Davanipour, Lynne M. Gillette, Juha Niiranen, Bary W.Wilson, "EMF Exposure Assessment in the Finnish Garment Industry: Evaluation of Proposed EMF Exposure Metrics", Bioelectromagnetics 21:57-67 (2000)
- [2.68]. Jukka Juutilainen, Sakari Lang, Tapio Rytömaa, "Possible Cocarcinogenic Effects of ELF Electromagnetic Fields May Require Repeated Long-term Interaction With Known Carcinogenic Factors", Bioelectromagnetics 21:122-128 (2000)
- [2.69]. B.Bianco, A.Chiabrera, S.Giordano, "DC-ELF Characterization of Random Mixtures of Piecewise Nonlinear Media", Bioelectromagnetics 21:145-149 (2000)
- [2.70]. M.A. Stuchly, O.P. Gandhi, "Inter-Laboratory Comparison of Numerical Dosimetry for Human Exposure to 60 Hz Electric and Magnetic Fields", Bioelectromagnetics 21:167-174 (2000)
- [2.71]. Frank S. Prato, M. Kavaliers, A.W.Thomas, "Extremely Low Frequency Magnetic Fields Can Either Increase or Decrease Analgaesia in the Land Snail Depending on Field and Light Conditions", Bioelectromagnetics 21:287-301 (2000)
- [2.72]. Kristie L. Ebi, Leeka I. Kheifets, Robert L. Pearson, Howard Wachtel, "Description of a New Computer Wire Coding Method and Its Application to Evaluate Potential Control Selection Bias in the Savitz et al. Childhood Cancer Study", Bioelectromagnetics 21:346-353 (2000)
- [2.73]. James E. Trosko, "Human Health Consequences of Environmentally-Modulated Gene Expression: Potential Roles of ELF-EMF Induced Epigenetic Versus Mutagenic Mechanisms of Disease", Bioelectromagnetics 21:402-406 (2000)
- [2.74]. Bruno Saia, Anna Volpin, "Elettrodotti: Rischi per la salute", Associazione Elettrotecnica ed Elettronica Italiana, Giornata di Studio "Elettrodotti e territorio – Nuove tecnologie per ridurre l'inquinamento elettomagnetico", Padova, 22 novembre 2000

- [2.75]. Charles Graham, Antonio Sastre, Mary R. Cook, Robert Kavet, Mary M. Gerkovich, Donald W. Riffle, "Exposure to Strong ELF Magnetic Fields Does Not Alter Cardiac Autonomic Control Mechanisms", Bioelectromagnetics 21:413-421 (2000)
- [2.76]. John H. Graham, David Fletcher, JamesTigue, Malcolm McDonald, "Growth and Developmental Stability of Drosophila melanogaster in Low Frequency Magnetic Fields", Bioelectromagnetics 21:465-472 (2000)
- [2.77]. Charles Graham, Antonio Sastre, Mary R. Cook, Robert Kavet, "Heart Rate Variability and Physiological Arousal in Men Exposed to 60 Hz Magnetic Fields", Bioelectromagnetics 21:480-482 (2000)
- [2.78]. Alfonsina Ramundo-Orlando, Umberto Morbiducci, Giuseppe Mossa, Guglielmo D'Inzeo, "Effect of Low Frequency, Low Amplitude Magnetic Fields on the Permeability of Cationic Liposomes Entrapping Carbonic Anhydrase - I. Evidence for charged lipid involvement", Bioelectromagnetics 21:491-498 (2000)
- [2.79]. Alfonsina Ramundo-Orlando, Francesca Mattia, Alessandro Palombo, Guglielmo D'Inzeo, "Effect of Low Frequency, Low Amplitude Magnetic Fields on the Permeability of Cationic Liposomes Entrapping Carbonic Anhydrase - II. No evidence for surface enzyme involvement", Bioelectromagnetics 21:499-507 (2000)
- [2.80]. R. Kavet, L. E. Zaffanella, J. P. Daigle, K. L. Ebi, "The Possible Role of Contact Current in Cancer Risk Associated With Residential Magnetic Fields", Bioelectromagnetics 21:538-553 (2000)
- [2.81]. Maes, M. Collier, S.Vandoninck, P. Scarpa, L.Verschaeve, "Cytogenetic Effects of 50 Hz Magnetic Fields of Different Magnetic Flux Densities", Bioelectromagnetics 21:589-596 (2000)
- [2.82]. Paolo Galloni, Carmela Marino, "Effects of 50 Hz Magnetic Field Exposure on Tumor Experimental Models", Bioelectromagnetics 21:608-614 (2000)
- [2.83]. Mikhail N. Zhadin, "Review of Russian Literature on Biological Action of DC and Low-Frequency AC Magnetic Fields", Bioelectromagnetics 22:27-45 (2001)
- [2.84]. Martin Lindgren, Maria Gustavsson, Yngve Hamnerius, Sheila Galt, "ELF Magnetic Fields in a City Environment", Bioelectromagnetics 22:87-90 (2001)
- [2.85]. Seung Cheol Hong, Yoshika Kurokawa, Michinori Kabuto, Ryutaro Ohtsuka, "Chronic Exposure to ELF Magnetic Fields During Night Sleep With Electric Sheet: Effects on Diurnal Melatonin Rhythms in Men", Bioelectromagnetics 22:138-143 (2001)
- [2.86]. J. Antonio Heredia-Rojas, Abraham O. Rodríguez-De la Fuente, M. del Roble Velazco-Campos, Carlos H. Leal-Garza, Laura E. Rodríguez-Flores, Beatriz de la Fuente-Cortez, "Cytological Effects of 60 Hz Magnetic Fields on Human Lymphocytes In Vitro: Sister-Chromatid Exchanges, Cell Kinetics and Mitotic Rate", Bioelectromagnetics 22:145-149 (2001)
- [2.87]. Ben G. Armstrong, Jan Deadman, Mary L. McBride, "The Determinants of Canadian Children's Personal Exposures to Magnetic Fields", Bioelectromagnetics 22:161-169 (2001)
- [2.88]. Steven H. Hefeneider, Sharon L.McCoy, Frances A. Hausman, Heidi L. Christensen, Diana Takahashi, Nancy Perrin, T. Dan Bracken, K.Y. Shin, Arthur S. Hall, "Long-Term Effects of 60-Hz Electric vs. Magnetic Fields on IL-1and IL-2 Activity in Sheep", Bioelectromagnetics 22:170-177 (2001)
- [2.89]. L.E. Anderson, J.E.Morris D.L. Miller, C.N. Rafferty, K.L. Ebi, L.B. Sasser, "Large Granular Lymphocytic (LGL) Leukemia in Rats Exposed to Intermittent 60 Hz Magnetic Fields", Bioelectromagnetics 22:185-193 (2001)
- [2.90]. W.T. Kaune, S.Davis, R.G. Stevens, D.K. Mirick, L. Kheifets, "Measuring Temporal Variability in Residential Magnetic Field Exposures", Bioelectromagnetics 22:232-245 (2001)
- [2.91]. Shin-ichi Harada, Sotoshi Yamada, Osamu Kuramata, Yoshirou Gunji, Masatoshi Kawasaki, Tomokazu Miyakawa, HidetoYonekura, Shigeru Sakurai, Kazuo Bessho, Ryuji Hosono, Hi-

roshi Yamamoto, "Effects of High ELFMagnetic Fields on Enzyme-Catalyzed DNA and RNA Synthesis InVitro and on a Cell-Free DNAMismatch Repair", Bioelectromagnetics 22:260-266 (2001)

- [2.92]. W. T. Kaune, R. S.Banks, M. S. Linet, E. E. Hatch, R. A. Kleinerman, S.Wacholder, R. E.Tarone, C. Haines, "Static Magnetic Field Measurements in Residences in Relation to Resonance Hypotheses of Interactions Between Power-Frequency Magnetic Fields and Humans", Bioelectromagnetics 22:294-305 (2001)
- [2.93]. J. Brix, H.Wettemann, O. Scheel, F. Feiner, R. Matthes, "Measurement of the Individual Exposure to 50 and 16 2/3 Hz Magnetic Fields Within the Bavarian Population", Bioelectromagnetics 22:323-332 (2001)
- [2.94]. A.W. Thomas, D.J. Drost, F.S. Prato, "Magnetic Field Exposure and Behavioral Monitoring System", Bioelectromagnetics 22:401-407 (2001)
- [2.95]. Santi Tofani, Domenico Barone, Marcella Cintorino, Maria Margherita de Santi, Adriana Ferrara, Renzo Orlassino, Piero Ossola, Flavio Peroglio, Katia Rolfo, Flavio Ronchetto, "Static and ELF Magnetic Fields Induce Tumor Growth Inhibition and Apoptosis", Bioelectromagnetics 22:419-428 (2001)
- [2.96]. Eugene Lyskov, Monica Sandtröm, Kjell Hansson Mild, "Provocation Study of Persons With Perceived Electrical Hypersensitivity and Controls Using Magnetic Field Exposure and Recording of Electrophysiological Characteristics", Bioelectromagnetics 22:457-462 (2001)
- [2.97]. Aleksander Sieroń, Ryszard Brus, Ryszard Szkilnik, Andrzej Plech, Norbert Kubański, Grzegorz Cieślar, "Influence of Alternating Low Frequency Magnetic Fields on Reactivity of Central Dopamine Receptors in Neonatal 6-Hydroxydopamine Treated Rats", Bioelectromagnetics 22:479-486 (2001)
- [2.98]. Andrew A. Marino, R. Michael Wolcott, Robert Chervenak, Frances Jourd'heuil, Erik Nilsen, Clifton Frilot II, "Nonlinear Dynamical Law Governs Magnetic Field Induced Changes in Lymphoid Phenotype", Bioelectromagnetics 22:529-546 (2001)
- [2.99]. G.L. Hu, H. Chiang, Q.L. Zeng, Y.D. Fu, "ELF Magnetic Field Inhibits Gap Junctional Intercellular Communication and Induces Hyperphosphorylation of Connexin43 in NIH3T3 Cells", Bioelectromagnetics 22:568-573 (2001)
- [2.100]. Donna E. Foliart, Richard N. Iriye, Kathleen J. Tarr, J. Michael Silva, Rob Kavet, Kristie L. Ebi, "Alternative Magnetic Field Exposure Metrics: Relationship to TWA, Appliance Use, and Demographic Characteristics of Children in a Leukemia Survival Study", Bioelectro-magnetics 22:574-580 (2001)
- [2.101]. W. Löscher, "Do Cocarcinogenic Effects of ELF Electromagnetic Fields Require Repeated Long-Term Interaction With Carcinogens? Characteristics of Positive Studies Using the DMBA Breast Cancer Model in Rats", Bioelectromagnetics 22:603-614 (2001)
- [2.102]. Raymond Richard Neutra, Vincent Del Pizzo, "California Department of Health Services Workshop on EMF Epidemiology", Bioelectromagnetics Supplement 5:S1-S3 (2001)
- [2.103]. Gary M. Shaw, "Adverse Human Reproductive Outcomesand Electromagnetic Fields: A Brief Summary of the Epidemiologic Literature", Bioelectromagnetics Supplement 5:S5-S18 (2001)
- [2.104]. Bryan Langholz, "Factors That Explain the Power Line Configuration Wiring Code-Childhood Leukemia Association: What Would They Look Like?", Bioelectromagnetics Supplement 5:S19-S31 (2001)
- [2.105]. Daniel Wartenberg, "The Potential Impact of Bias in Studies of Residential Exposure toMagnetic Fields and Childhood Leukemia", Bioelectromagnetics Supplement 5:S32-S47 (2001)
- [2.106]. Raymond Richard Neutra and Vincent Del Pizzo, "A Richer Conceptualization of 'Exposure' for Epidemiological Studies of the 'EMF Mixture'", Bioelectromagnetics Supplement 5:S48-S57 (2001)

- [2.107]. Peggy Reynolds, Eric Elkin, Russell Scalf, Julie Von Behren, Raymond Richard Neutra, "A Case-Control Pilot Study of Traffic Exposures and Early Childhood Leukemia Using a Geographic Information System", Bioelectromagnetics Supplement 5:S58-S68 (2001)
- [2.108]. David A. Savitz, Charles Poole, "Do Studies of Wire Code and Childhood Leukemia Point Towards or Away From Magnetic Fields as the Causal Agent?", Bioelectromagnetics Supplement 5:S69-S85 (2001)
- [2.109]. Daniel Wartenberg, "Residential EMF Exposure and Childhood Leukemia: Meta-Analysis and Population Attributable Risk", Bioelectromagnetics Supplement 5:S86-S104 (2001)
- [2.110]. T.C. Erren, "A Meta-Analysis of Epidemiologic Studies of Electric and Magnetic Fields and Breast Cancer in Women and Men", Bioelectromagnetics Supplement 5:S105-S119 (2001)
- [2.111]. Anders Ahlbom, "Neurodegenerative Diseases, Suicide and Depressive Symptoms in Relation to EMF", Bioelectromagnetics Supplement 5:S132-S143 (2001)
- [2.112]. Raymond R. Neutra, "Panel Exploring Pro and Con Arguments as to Whether EMFs Cause Childhood Brain Cancer", Bioelectromagnetics Supplement 5:S144-S149 (2001)
- [2.113]. Organizzazione Mondiale della Sanità, "Promemoria n. 263 Campi elettromagnetici e salute pubblica – Campi a frequenza estremamente bassa e cancro", ottobre 2001
- [2.114]. Christopher H. Mueller, Helmut Krueger, Christoph Schierz, "Project NEMESIS: Perception of a 50 Hz Electric and Magnetic Field at Low Intensities (Laboratory Experiment)", Bioelectromagnetics 23:26-36 (2002)
- [2.115]. Anna Laitl-Kobierska, Grzegorz Cieślar, Aleksander Sieroń, Henryk Grzybek, "Influence of Alternating Extremely Low Frequency ELF Magnetic Field on Structure and Function of Pancreas in Rats", Bioelectromagnetics 23:49-58 (2002)
- [2.116]. C.M. Cook, A.W. Thomas, F.S. Prato, "Human Electrophysiological and Cognitive Effects of Exposure to ELF Magnetic and ELF Modulated RF and Microwave Fields: A Review of Recent Studies", Bioelectromagnetics 23:144-157 (2002)
- [2.117]. Ahmed Elbetieha, Moh'd-Ali AL-Akhras, Homa Darmani, "Long-Term Exposure of Male and Female Mice to 50 Hz Magnetic Field: Effects on Fertility", Bioelectromagnetics 23:168-172 (2002)
- [2.118]. Yuomo Eskelinen, Jari Keinänen, Heidi Salonen, Jukka Juutilainen, "Use of Spot Measurements for Assessing Residential ELF Magnetic Field Exposure: A Validity Study", Bioelectromagnetics 23:173-176 (2002)
- [2.119]. W. T. Kaune, T. Dovan, R. I. Kavet, D. A. Savitz, R. R. Neutra, "Study of High- and Low-Current-Configuration Homes From the 1988 Denver Childhood Cancer Study", Bioelectromagnetics 23:177-188 (2002)
- [2.120]. John Podd, Jeana Abbott, Nikolaos Kazantzis, Al Rowland, "Brief Exposure to a 50 Hz, 100 μT Magnetic Field: Effects on Reaction Time, Accuracy, and recognition memory", Bioelectromagnetics 23:189-195 (2002)
- [2.121]. Robert S. Banks, William Thomas, Jack S. Mandel, William T. Kaune, Sholom Wacholder, Robert E. Tarone, Martha S. Linet, "Temporal Trends and Misclassification in Residential 60 Hz Magnetic Field Measurements", Bioelectromagnetics 23:196-205 (2002)
- [2.122]. Yoshihisa Otaka, Tetsuo Chida, Yasuhiko Yamagishi, Satoshi Kitamura, "Carcinogenicity Test in B6C3F1 Mice After Parental and Prenatal Exposure to 50 Hz Magnetic Fields", Bioelectromagnetics 23:206-213 (2002)
- [2.123]. Ulla M. Forssén, Anders Ahlbom, Maria Feychting, "Relative Contribution of Residential and Occupational Magnetic Field Exposure Over Twenty-Four Hours Among People Living Close to and Far From a Power Line", Bioelectromagnetics 23:239-244 (2002)
- [2.124]. József Bakos, Noémi Nagy, György Thuróczy, László D. Szabó, "One Week of Exposure to 50 Hz, Vertical Magnetic Field Does Not Reduce Urinary 6-Sulphatoxymelatonin Excretion of Male Wistar Rats", Bioelectromagnetics 23:245-248 (2002)

- [2.125]. Karl Gerhard Blaasaas, Tore Tynes, "Comparison of Three Different Ways of Measuring Distances Between Residences and High Voltage Power Lines", Bioelectromagnetics 23:288-291 (2002)
- [2.126]. Vanessa Manni, Antonella Lisi, Deleana Pozzi, Sabrina Rieti, Annalucia Serafino, Livio Giuliani, Settimio Grimaldi, "Effects of Extremely Low Frequency (50 Hz) Magnetic Field on Morphological and Biochemical Properties of Human Keratinocytes", Bioelectromagnetics 23:298-305 (2002)
- [2.127]. Mayumi Obo, Shiro Konishi, Yoshihisa Otaka, Satoshi Kitamura, "Effect of Magnetic Field Exposure on Calcium Channel Currents Using Patch Clamp Technique", Bioelectromagnetics 23:306-314 (2002)
- [2.128]. Juraj Gmitrov, Chiyoji Ohkubo, "Artificial Static and Geomagnetic Field Interrelated Impact on Cardiovascular Regulation", Bioelectromagnetics 23:329-338 (2002)
- [2.129]. Jiliang Zhou, Changlin Li, Gengdong Yao, Huai Chiang, Zongliang Chang, "Gene Expression of Cytokine Receptors in HL60 Cells Exposed to a 50 Hz Magnetic Field", Bioelectromagnetics 23:339-346 (2002)
- [2.130]. Lawrence N. Dworsky, "Project NEMESIS: Perception of a 50 Hz Electric and Magnetic Field at Low Intensities", Bioelectromagnetics 23:553-554 (2002)
- [2.131]. Gui-Rong Ding, Takehisa Nakahara, Junji Miyakoshi, "Exposure to Power Frequency Magnetic Fields and X-Rays Induces GAP-43 Gene Expression in Human Glioma MO54 Cells", Bioelectromagnetics 23:586-591 (2002)
- [2.132]. W.T. Kaune, "Thermal Noise Limit on the Sensitivity of Cellular Membranes to Power Frequency Electric and Magnetic Fields", Bioelectromagnetics 23:622-628 (2002)
- [2.133]. Thomas S. Tenforde, "The Wonders of Magnetism", Bioelectromagnetics 24:3-11 (2003)
- [2.134]. Q. L. Zeng, H. Chiang, G. L. Hu, G. G. Mao, Y. T. Fu, D. Q. Lu, "ELF Magnetic Fields Induce Internalization of Gap Junction Protein Connexin 43 in Chinese Hamster Lung Cells", Bioelectromagnetics 24:134-138 (2003)
- [2.135]. G. R.Verheyen, G. Pauwels, L.Verschaeve, G. Schoeters, "Effect of Coexposure to 50 Hz Magnetic Fields and an Aneugen on Human Lymphocytes, Determined by the Cytokinesis Block Micronucleus Assay", Bioelectromagnetics 24:160-164 (2003)
- [2.136]. Chung-Yi Li, Ruey S. Lin, Fung-Chang Sung, "Brief Communication Elevated Residential Exposure to Power Frequency Magnetic Field Associated With Greater Average Age at Diagnosis for Patients With Brain Tumors", Bioelectromagnetics 24:218-221 (2003)
- [2.137]. Moon-Koo Chung, Jong-Choon Kim, Sung-Ho Myung, Dong-Il Lee, "Developmental Toxicity Evaluation of ELF Magnetic Fields in Sprague–Dawley Rats", Bioelectromagnetics 24:231-240 (2003)
- [2.138]. T. Beruto, R. Botter, F. Perfumo, S. Scaglione, "Interfacial Effect of Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields (EM-ELF) on the Vaporization Step of Carbon Dioxide From Aqueous Solutions of Body Simulated Fluid (SBF)", Bioelectromagnetics 24:251-261 (2003)
- [2.139]. Michael A. Kelsh, T. Dan Braken, Jack D, Sahl, Mona Shum, Kristie L. Ebi, "Occupational Magnetic Field Exposures of Garment Workers: Results of Personal and Survey Measurements", Bioelectromagnetics 24:316-326 (2003)
- [2.140]. Maria Teresa Santini, Gabriella Rainaldi, Antonella Ferrante, Pietro Luigi Indovina, Paolo Vecchia, Gianfranco Donelli, "Effects of a 50 Hz Sinusoidal Magnetic Field on Cell Adhesion Molecule Expression in Two Human Osteosarcoma Cell Lines (MG-63 and Saos-2)", Bioelectromagnetics 24:327-338 (2003)

Cenni di elettrotecnica

3.1 - La distribuzione di energia elettrica

L'energia elettrica è prodotta in appositi impianti di trasformazione, le centrali elettriche, a partire da altre fonti di energia, attraversando un passaggio intermedio in cui si ha una conversione in energia cinetica di rotazione. Si genera in questa maniera corrente alternata (in Italia alla frequenza di 50 Hz) trifase (sistema preferito al monofase per ragioni pratiche ed economiche), in modo da poter variare simultaneamente tensione e corrente tramite l'utilizzo dei trasformatori.

Per ridurre la dissipazione di energia per effetto Joule durante il trasporto, si diminuisce il valore della corrente circolante (fino ad alcune migliaia di Ampere, a seconda del fabbisogno dell'utenza) utilizzando linee ad altissima tensione (220 e 380 kV), mantenendo così la potenza richiesta.

Queste reti di trasporto ad altissima tensione (AAT) collegano le centrali di produzione alle stazioni di trasformazione (o le stazioni tra di loro), dove avviene la prima trasformazione, ossia una riduzione della tensione, e l'energia viene ripartita in più linee di distribuzione ad alta tensione (AT, tra 40 e 150 kV). Queste giungono alle cabine primarie che trasformano l'energia alla media tensione di distribuzione (MT, da 10 a 30 kV). Quindi le linee di distribuzione a media tensione alimentano le cabine secondarie e le medie utenze industriali. Le cabine secondarie trasformano l'energia alla tensione di utilizzo (BT, 220 e 380 V). Infine la rete di distribuzione a bassa tensione collega le cabine secondarie agli utenti di una certa zona.

All'interno di una stazione elettrica le connessioni dei diversi componenti a un "nodo" vengono realizzate con il collegamento ad un sistema di conduttori, chiamati "sbarre", tramite l'interposizione di apparecchiature di manovra, protezione e misura.

3.2 - Classificazione delle linee elettriche

Le linee si possono suddividere in aeree, con conduttori nudi in corda di rame o corda bimetallica alluminio-acciaio, e interrate, per le quali i cavi sono posati a terra, a circa 80 cm di profondità nel sottosuolo. In tal caso, per la ridotta distanza tra i conduttori, sono necessari particolari accorgimenti tecnici nella realizzazione dei rivestimenti.

Le linee elettriche aeree ad alta ed altissima tensione possono esistere in più configurazioni. Le definizioni qui riportate descrivono le varie tipologie di linea che si possono incontrare:

- singola terna: i tralicci sostengono un solo conduttore per ciascuna delle tre fasi (o ciascuna fase è suddivisa al più in un gruppo di conduttori che corrono ravvicinati: si parla di conduttori binati, trinati, ecc.). I cavi in una singola terna sono tipicamente disposti a triangolo o a Δ (si veda Figura 3.1);
- **doppia terna**: si tratta di una singola linea in cui ciascuna delle tre fasi viene sdoppiata, ed è quindi costituita da sei conduttori. In questa maniera ciascuno di essi è destinato a sopporta-

re un carico minore, e le sue specifiche tecniche possono essere modificate di conseguenza (può essere più sottile);

- **doppia terna ottimizzata**: è un caso particolare di doppia terna, in cui le fasi vengono disposte in maniera antisimmetrica ed il campo prodotto viene minimizzato;
- doppia linea: si tratta di un sistema costituito da due distinte linee alla medesima tensione nominale, che percorrono una parte del loro tragitto sugli stessi tralicci e con i conduttori omologhi (cioè alla stessa fase R, S, o T) afferenti in cabina di trasformazione alla stessa sbarra: lo sfasamento tra le tensioni dei conduttori omologhi è nullo;
- **doppia linea ottimizzata**: è il caso particolare di una doppia linea, caratterizzata da una disposizione delle fasi tale da minimizzare il campo prodotto.

Esiste infine la possibilità che due linee distinte percorrano un certo tratto del loro percorso parallelamente (anche sugli stessi tralicci), ma senza che i rispettivi conduttori provengano dalla stessa cabina di trasformazione. In tal caso non è possibile formulare alcuna ipotesi relativamente ad una relazione tra le fasi dei conduttori.

In generale però, nelle trasformazioni da 380 kV a 220 kV e da 220 kV a 132 kV, in cabina di trasformazione si utilizzano particolari autotrasformatori¹ (di tipo YNA0) che mantengono nullo lo sfasamento tra le diverse tensioni (cosa non più verificata nel passaggio da alta a media tensione), anche se l'informazione va comunque accertata caso per caso.



Figura 3.1 - Da sinistra, le disposizioni dei conduttori a triangolo e a ∆ in una linea singola, e una doppia linea. In quest'ultima, si notino i conduttori trinati.

3.3 - Grandezze caratteristiche

In un generico circuito elettrico alimentato da un generatore di f.e.m. alternata sinusoidale, la relazione tra tensione e corrente è data da:

$$V = (R + iX)I = ZI$$
3.1

Z è detta impedenza del circuito: è un vettore la cui parte reale è formata dagli elementi resistivi del circuito, mentre per quella immaginaria, detta reattanza, può essere:

• X>0, ed in tal caso è di tipo induttivo;

- X < 0, ed in tal caso è di tipo capacitivo.

L'impedenza è caratterizzata da un modulo:

¹ Si tratta di particolari trasformatori che anziché avere gli avvolgimenti primario e secondario costituiti da due complessi di spire distinti ed isolati tra di loro, presentano un unico avvolgimento, sul quale il secondario è costituito da una porzione dell'intero complesso di spire, che costituisce l'avvolgimento primario.

$$\left|Z\right| = \sqrt{R^2 + X^2} \tag{3.2}$$

e da un argomento:

$$\arg Z = \arctan \frac{X}{R} = \varphi$$
 3.3

 φ , chiamato angolo di fase o sfasamento, è positivo per circuiti di tipo induttivo (corrente in ritardo rispetto alla tensione), negativo per circuiti capacitivi (corrente in anticipo rispetto alla tensione).

Si definiscono inoltre le quantità:

- ammettenza: $Y = \frac{1}{Z}$;

- conduttanza:
$$G = \frac{R}{R^2 + X^2}$$

- suscettanza:
$$B = -\frac{A}{R^2 + X^2}$$

3.4 - Schematizzazione di una linea

I fenomeni elettromagnetici a mezzo dei quali avviene il trasporto di energia elettrica su una linea di trasmissione possono essere descritti attribuendo a ciascun conduttore di linea quattro parametri elettrici, uniformemente distribuiti, riferiti all'unità di lunghezza: la resistenza longitudinale r, l'induttanza di servizio l (il coefficiente che mette in relazione la corrente che lo percorre con la f.e.m. in esso indotta per la variazione nel tempo delle correnti che percorrono tutti i conduttori di linea), la conduttanza trasversale di servizio g (rapporto tra potenza perduta per dispersione trasversale e quadrato del valore efficace della tensione) e la capacità di servizio c (il coefficiente che lega la corrente di spostamento che lo interessa con la tensione riferita al centro astratto del sistema: si veda più avanti il paragrafo 3.6).

Un elemento di lunghezza infinitesima di linea può essere schematizzato con il quadrupolo elementare avente come parametri longitudinali una resistenza rdx e una reattanza ωldx e come parametri trasversali una suscettanza ωcdx e una conduttanza gdx.



L'impedenza complessiva (e quindi lo sfasamento tra corrente e tensione) dipende quindi sia dalle caratteristiche costruttive della linea che dal tipo carico presente, ma non dal tipo di generato-re.

3.5 - Potenza in un sistema monofase



Si consideri una rete monofase, ai capi della quale viene applicata una tensione alternata V(t); se è chiusa su un carico, nel suo interno circola una corrente alternata I(t).

L'evoluzione temporale in notazione esponenziale è rappresentabile, per le due quantità, come:

$$V(t) = V_M e^{i\omega t} \qquad 3.4$$

$$I(t) = I_M e^{i(\omega t + \varphi)} \qquad 3.5$$

ove V_M e I_M sono i valori massimi, rispettivamente, di tensione e corrente, e φ è lo sfasamento (come rappresentato in Figura 3.3).

La legge oraria per tensione e corrente è data dalle:

$$V(t) = V_M \cos \omega t \qquad 3.6$$

$$I(t) = I_M \cos(\omega t + \varphi)$$
 3.7

Si può scomporre il vettore rappresentante la corrente nel piano complesso in due componenti, una parallela alla tensione ed una ad essa ortogonale, che prendono rispettivamente il nome di corrente attiva e corrente reattiva:

$$I = I_A + iI_R = I\cos\varphi + iI\sin\varphi \qquad 3.8$$

Nel caso di grandezze variabili cosinusoidalmente nel tempo i valori efficaci sono dati da:

$$I^{eff} = \sqrt{\frac{1}{T}} \int_{0}^{T} I_{M}^{2} \cos^{2}(\omega t + \varphi) dt =$$

= $I_{M} \sqrt{\frac{1}{\omega T}} \int_{0}^{\omega T} \cos^{2}(\omega t) d(\omega t) = \frac{I_{M}}{\sqrt{2}}$
 $I_{M} = I^{eff} \sqrt{2}$ 3.9

e analogamente:

$$V_{\rm M} = V^{\rm eff} \sqrt{2} \tag{3.10}$$

Si definisce allora la potenza apparente:

$$P_{a} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} VIdt = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} VI_{A}dt + \frac{i}{T} \int_{0}^{T} VI_{R}dt =$$

$$= \frac{V_{M}I_{M}}{T} \cos \varphi \int_{0}^{T} \cos^{2} \omega tdt + i \frac{V_{M}I_{M}}{T} \sin \varphi \int_{0}^{T} \cos^{2} \omega tdt =$$

$$= \frac{V_{M}I_{M}}{2} \cos \varphi + i \frac{V_{M}I_{M}}{2} \sin \varphi =$$

$$= V^{eff} I^{eff} \cos \varphi + i V^{eff} I^{eff} \sin \varphi =$$

$$= P + iQ \qquad 3.11$$

che si misura in VA (voltampere) ed il cui modulo ed argomento valgono rispettivamente:

$$\left|P_{a}\right| = \sqrt{P^{2} + Q^{2}} = \sqrt{\left(VI\cos\varphi\right)^{2} + \left(VI\sin\varphi\right)^{2}} = VI$$

$$3.12$$

$$\arg P_a = \arctan \frac{VI \sin \varphi}{VI \cos \varphi} = \varphi$$
 3.13

Restano definite la potenza attiva e la potenza reattiva medie. Il termine:

$$P=VI\cos\varphi \qquad \qquad 3.14$$

rappresenta la potenza attiva e si misura in Watt. Possono sussistere due condizioni:

- per -π/2<φ<π/2, si ha cosφ>0 e P>0: l'energia associata alla potenza istantanea attiva è fornita al circuito senza mai rifluire dal circuito stesso verso l'esterno (è la potenza assorbita dal circuito, che viene trasformata in calore per effetto Joule o in lavoro utile nelle macchine elettriche);
- per $\pi/2 < \varphi < 3\pi/2$, si ha cos $\varphi < 0$ e *P*<0: l'energia associata alla potenza attiva esce definitivamente dal circuito.

Quindi la potenza attiva rappresenta un flusso unidirezionale di energia, che entra nel circuito quando $\cos\varphi > 0$ o che esce quando $\cos\varphi < 0$. Il termine $\cos\varphi$ è detto fattore di potenza. Per $\varphi=0$ e $\varphi=\pi$, si ha $|\cos\varphi|=1$: la potenza attiva è massima in modulo e il circuito è puramente resistivo; per $\varphi=\pm\pi/2$ e $\cos\varphi=0$ (corrente sfasata di $\pi/2$ rispetto alla tensione) la potenza attiva è nulla e il circuito è puramente reattivo.

Il termine

$$Q=VI \operatorname{sen} \varphi$$
 3.15

è sfasato di $\pi/2$ rispetto al termine precedente e si chiama potenza reattiva (o swattata). Tale termine si annulla nei circuiti puramente resistivi (φ =0, tensione in fase con la corrente), ed è massimo nei circuiti puramente reattivi. La potenza reattiva, misurata in VAR (voltampere reattivi), rappresenta una potenza scambiata tra generatore e campo magnetico (circuiti induttivi) o campo elettrico (circuiti capacitivi) del circuito utilizzatore. Questo avviene ad esempio in un condensatore (reattanza) che caricandosi immagazzina un'energia $W_C = \frac{1}{2}CV^2$ che restituisce quando cala la tensione, o in un'induttanza (reattanza) percorsa da corrente *I*, che genera un campo magnetico che immagazzina un'energia $W_L = \frac{1}{2}LI^2$ che restituisce quando cala la corrente.

3.6 - Potenza in un sistema trifase

Un sistema trifase è un circuito in cui circolano tre correnti indipendenti sotto tre distinte differenze di potenziale. Tale tipo di configurazione viene utilizzata, a causa della particolare distribuzione di tensioni e correnti, soprattutto nelle applicazioni industriali per il trasporto su linee e nel campo dei motori di grande potenza.





Per ottenere un sistema con tensioni sfasate di 120° si possono utilizzare particolari generatori, detti alternatori, costituiti da tre sistemi di spire immersi in un campo magnetico rotante, aventi un accesso verso l'esterno, e ruotati l'uno rispetto all'altro di 120°. In tal modo si ottiene ai terminali di ciascun sistema di spire una f.e.m. di ampiezza e frequenza uguali a quelle degli altri due, ma che differisce di una fase di 120°.

Per collegare tale sistema ad un circuito utilizzatore, questo dovrà essere formato da tre impedenze, ciascuna connessa a uno dei tre circuiti del generatore. La somma vettoriale delle tre tensioni così prodotte è sempre nulla:

$$\sum_{i} \overline{E}_{i} = 0$$
 3.16

ed è quindi possibile evitare di utilizzare tre coppie di cavi, come si farebbe connettendo con due conduttori ciascun elemento del generatore. Infatti ogni conduttore si può considerare come ritorno degli altri due presi assieme: si possono così usare i tipi di collegamento a stella e a triangolo.

Nel collegamento a stella i tre avvolgimenti del generatore sono congiunti in modo da iniziare tutti e tre nello stesso punto (centro di stella), e i tre utilizzatori sono connessi in modo analogo. Sono uniti tra loro i terminali liberi del generatore e dell'utilizzatore, e i centri di stella tramite un filo detto neutro: questo tipo di connessione riduce a 4 il numero di conduttori. In tale configurazione si definiscono tensioni di fase le d.d.p. esistenti tra ciascun conduttore di connessione ed il centro di stella (in Figura 3.6 sono indicate con \overline{E}_i), tensioni concatenate o di linea le d.d.p. esistenti tra i conduttori che collegano il generatore al carico (indicate con \overline{V}_i).



Nel collegamento a triangolo i tre avvolgimenti del generatore sono congiunti in modo che siano in serie uno con l'altro, e si preleva quindi la f.e.m. dai vertici del triangolo che ne risulta. In questa configurazione compaiono solo tre fili di collegamento e non esiste il neutro. Si distingue tra correnti di linea, che percorrono i conduttori di linea (indicate con \overline{I}_i), e correnti di fase (solitamente indicate con \overline{J}_i), che scorrono tra i conduttori di linea attraverso le impedenze.

I sistemi trifase nei quali sia le tensioni concatenate (e quindi anche quelle stellate) che le correnti di linea costituiscono una terna simmetrica di grandezze alternate sinusoidali si dicono simmetrici ed equilibrati, ed è in tali semplici casi che valgono le considerazioni qui effettuate. Perché le correnti di linea costituiscano una terna simmetrica è necessario che le tre impedenze di carico siano tra di loro uguali. Si parla di sistemi simmetrici nelle tensioni ed equilibrati nelle correnti (o nel carico).

Per quanto nella descrizione appena esposta siano considerati collegamenti tra generatori e carichi di tipo omogeneo, nelle normali utilizzazioni di rete si collegano normalmente generatori e carichi di entrambi i tipi.

Dalla Figura 3.6 si nota che, nell'ipotesi di sistemi simmetrici ed equilibrati, il collegamento a stella è caratterizzato da tensioni di fase E e tensioni di linea V legate dalla relazione:

$$V = \sqrt{3E} \qquad \qquad 3.17$$
mentre le correnti di fase coincidono con quelle di linea:

Nel collegamento a triangolo, invece, le tensioni di fase sono uguali alle concatenate:

$$V=E$$
 3.19

e le correnti di fase J e quelle di linea I sono legate da:

$$V = \sqrt{3}J \tag{3.20}$$

Di conseguenza, per entrambi i tipi di collegamento potenza attiva, reattiva ed apparente sono definibili rispettivamente come:

$$P = \sqrt{3}VI\cos\varphi \qquad \qquad 3.21$$

$$Q = \sqrt{3}VI\sin\varphi \qquad 3.22$$

$$P_a = \sqrt{3}VI \qquad \qquad 3.23$$

ove V è la tensione concatenata, I la corrente di linea e φ l'angolo di fase.

Dai valori di *P*, *Q* e *V*, che vengono normalmente misurati e forniti dall'ente gestore per tensioni nominali superiori a 132 kV, si ricavano φ ed *I*:

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P}$$
 3.24

$$\varphi = \arctan \frac{Q}{P}$$
 3.25

$$P^{2} + Q^{2} = 3V^{2}I^{2}$$

$$\sqrt{P^{2} + Q^{2}}$$

$$I = \sqrt{\frac{P + Q}{3V^2}} \qquad 3.26$$

Inoltre dalle formule trigonometriche:

$$\sin\varphi = \frac{\tan\varphi}{\sqrt{1 + \tan^2\varphi}}$$
 3.27

$$\cos\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2\varphi}}$$
 3.28

si ricavano le relazioni:

$$\sin\varphi = \frac{Q}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$
3.29

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$
3.30

che saranno utilizzate in seguito nell'analisi dei dati relativi alle linee.

3.7 - Il rifasamento

Nei circuiti puramente resistivi la potenza apparente assorbita è tutta potenza attiva. Nei circuiti con utilizzatori che hanno al loro interno carichi induttivi (come motori, saldatrici, trasformatori, elettromagneti) una parte della potenza apparente assorbita viene impegnata per eccitare i circuiti magnetici e non è quindi impiegata come potenza attiva ma come potenza reattiva. Il fattore di potenza è il rapporto tra potenza attiva e potenza apparente: è uguale a 1 nel caso di circuiti puramente resistivi, è inferiore a 1 negli altri casi.

Un apparecchio utilizzatore con basso fattore di potenza richiede alla rete più potenza apparente (e quindi più corrente) di quella che richiederebbe qualora avesse un fattore di potenza più elevato. Una diretta conseguenza è una maggiore dissipazione per effetto Joule ($W_J=RI^2$), ma bisogna tener conto anche della diminuzione della potenza disponibile sugli impianti di alimentazione (che causa un sovradimensionamento degli impianti a parità di potenza attiva), dell'aumento delle cadute di tensione, con conseguenze negative sul funzionamento degli apparecchi utilizzatori, e del maggior costo dell'energia a causa delle maggiorazioni tariffarie previste in relazione all'energia reattiva fornita. Infatti l'ente erogatore, per fornire l'utenza di una potenza attiva P, è costretto a generare, trasportare e distribuire insieme anche una potenza reattiva $Q=P\tan\varphi$, che circola in linea tra generatori ed utenza e viceversa, senza produrre lavoro utile.

Per questi motivi le normative vigenti e considerazioni di ordine tecnico impongono di utilizzare l'energia elettrica con un fattore di potenza medio mensile non inferiore a 0.9. Per migliorarlo si può agire con una serie di accorgimenti tecnici (usare motori e trasformatori correttamente dimensionati, in modo che non debbano funzionare troppo a lungo a carico ridotto; non lasciare motori e trasformatori in funzione senza carico; non mantenere in esercizio motori difettosi), ma se ciò non fosse sufficiente si rende necessario ricorrere a batterie di condensatori (detti rifasatori) che compensano la potenza reattiva.

La presenza di utilizzatori di tipo elettromagnetico come motori, elettromagneti, induttanze e di componenti elettronici a comportamento non lineare implica la circolazione di correnti armoniche nella rete elettrica. Tali correnti, attraverso l'impedenza di linea, si traducono in tensioni aventi una frequenza multipla della fondamentale, e le si sovrappongono determinando una distorsione della forma d'onda finale che, risultando non più sinusoidale, crea disturbi alla rete elettrica.

3.8 - Definizioni

Vengono di seguito riportate alcune definizioni, con l'ausilio della Figura 3.7, che saranno utili più avanti.



Elettrodotto: l'insieme costituito da una o più linee elettriche aventi in comune gli stessi sostegni. Linea: una tratta di elettrodotto senza diramazioni, delimitata ad entrambi gli estremi da una stazione, da una sottostazione, da una cabina oppure da un punto di diramazione da cui si dipartono altre linee. Una linea è caratterizzata da un unico valore di tensione e di corrente nominali, ed è formata in tutto il suo percorso dallo stesso numero di conduttori attivi.

Conduttori omologhi: in una doppia terna o in un sistema di più linee, i conduttori caratterizzati dalla stessa fase.

Campata: una tratta di linea comprese tra due sostegni successivi.

Sostegni: le strutture a cui sono appesi i conduttori. Rientrano tra i sostegni non solo i piloni ed i tralicci lungo la linea, ma anche le strutture (chiamate porte o sostegni terminali) a cui sono appesi i conduttori all'inizio ad al termine della linea stessa. I conduttori vengono ancorati ai sostegni tramite gli isolatori in appositi punti di attacco posti alle estremità di bracci denominati mensole.

Punto di sospensione: il punto estremo della catenaria formata dal conduttore lungo la campata.

Centro elettrico del sostegno *O*': il punto giacente nell'intersezione tra l'asse di simmetria verticale del sostegno e la linea orizzontale passante per il punto di attacco della mensola più basso.

Normale al sostegno: il versore ortogonale al piano individuato dai punti di attacco degli isolatori alle mensole, (ovvero al piano su cui giacciono i punti di attacco degli isolatori alle mensole ed il centro del basamento del sostegno) e avente come verso positivo quello convenzionalmente associato alla vista frontale del tipo di sostegno. Rispetto a questa vista vanno anche individuati e numerati in modo univoco i punti di attacco.

Orientamento del sostegno: l'angolo formato dalla normale al sostegno con il Nord geografico.

Sistema di riferimento del sostegno: il sistema di riferimento cartesiano levogiro O'X'Y'Z', con origine giacente sul centro elettrico O' del sostegno, l'asse Z' orientato lungo la verticale del sostegno e asse Y' lungo la normale allo stesso.

3.9 - Bibliografia

- [3.1]. Aldo Polettini, "Impianti elettrici Impianti di trasmissione di distribuzione e di utilizzazione", Tredicesima edizione, Volume secondo, Editrice Vannini, Brescia 1978
- [3.2]. V. Bressi, A. Corticelli, R. Cremonini, M. P. Zerbetto, "Elettrotecnica applicata", Zanichelli, Bologna 1978
- [3.3]. Vittorio Re-Alberto Bandini Buti, "L'energia elettrica. Principi fondamentali ed applicazioni", seconda edizione, Editoriale Delfino, Milano 1982
- [3.4]. Vincenzo Cataliotti, "Impianti elettrici" Vol. I e Vol. II, S. F. Flaccovio Editore, Palermo 1988
- [3.5]. R. Giacometti, F. Frasari, "Elettrotecnica elettronica telecomunicazioni Volume primo -Fondamenti teorici e pratici", Quarta Edizione, Edizioni Calderoni, Bologna 1993
- [3.6]. Daniele Andreuccetti, Laura Anglesio, Luca Cristoforetti, Salvatore Curcuruto, Giovanni D'Amore, Paolo D'Atanasio, Tina Fabozzi, Fabio Francia, Gaetano Licitra, Giorgio Alfonso Lovisolo, Angelo Lozito, Alberto Moro, Carla Malacarne, Alessandro Polichetti, Rolando Pontalti, Maila Strappini, Renzo Tommasi, Alessandro Zambotti, "Specifiche tecniche per la realizzazione del Catasto Elettromagnetico Nazionale e dei Catasti Elettromagnetici Regionali", Gruppo di Lavoro cEr/CeN, Rev. 3.1/ENEA, 2 agosto 2001

Calcolo del campo generato da linee AAT

4.1 - Definizione del problema

Per determinare il campo di induzione magnetica efficace generato da un insieme di linee elettriche ad altissima tensione, si procede ad una discretizzazione del problema, per una successiva implementazione software: ogni campata viene suddivisa in un numero finito di segmenti di lunghezza fissata, e si calcola quindi la somma dei vettori induzione magnetica prodotti da ciascun segmento.

Determinazione del minimo della campata

La curva che descrive una fune sospesa a due estremi, detta catenaria, è rappresentata analiticamente dalla funzione coseno iperbolico. La sua forma dipende da un parametro (di seguito indicato con *a*) detto costante di tesatura e definito come rapporto tra tensione e peso del cavo per unità di lunghezza (solitamente alla temperatura di 40°C):

$$z(x) = b + a \cosh\left(\frac{x - x_0}{a}\right)$$

$$4.1$$

mentre il parametro b ne determina il posizionamento in quota.

Nel caso in cui le coordinate dei punti di sospensione, $(0, z_1) \in (L, z_2)$, e la costante di tesatura *a* siano note (come avviene nella pratica), si determinano le quantità *b* e x_0 . Sostituendo si ottiene il sistema a due incognite:

$$\begin{cases} z_1 = b + a \cosh\left(\frac{-x_0}{a}\right) \\ z_2 = b + a \cosh\left(\frac{L - x_0}{a}\right) \end{cases}$$

$$4.2$$

Sottraendo termine a termine:

$$z_2 - z_1 = a \left[\cosh\left(\frac{L - x_0}{a}\right) - \cosh\left(-\frac{x_0}{a}\right) \right]$$

$$4.3$$

$$\frac{z_2 - z_1}{a} = \cosh\left(\frac{L - x_0}{a}\right) - \cosh\left(-\frac{x_0}{a}\right)$$
 4.4

Espandendo il coseno iperbolico:

$$\frac{z_1 - z_2}{a} = \frac{1}{2} \left(e^{\frac{L - x_0}{a}} + e^{-\frac{L - x_0}{a}} - e^{-\frac{x_0}{a}} - e^{\frac{x_0}{a}} \right)$$
4.5

$$2\frac{z_1 - z_2}{a} = e^{\frac{L - x_0}{a}} + e^{-\frac{L - x_0}{a}} - e^{-\frac{x_0}{a}} - e^{\frac{x_0}{a}}$$

$$4.6$$

Si definiscono le quantità:

$$C = 2\frac{z_2 - z_1}{a}$$
 4.7

$$Y = e^{-\frac{x_0}{a}}$$

$$4.8$$

$$A = e^{\frac{L}{a}}$$
 4.9

e si può riscrivere la 4.6:

$$C = AY + \frac{1}{AY} - Y - \frac{1}{Y}$$

$$4.10$$

$$C = Y(A-1) + \frac{1}{Y}\left(\frac{1}{A} - 1\right)$$
 4.11

$$Y^{2}(A-1) - CY + \left(\frac{1}{A} - 1\right) = 0$$
4.12

e l'unica soluzione accettabile (quella con Y>0) è data da:

$$Y = \frac{C + \sqrt{C^2 - 4(A - 1)\left(\frac{1}{A} - 1\right)}}{2(A - 1)}$$
4.13

Esplicitando x_0 dalla 4.8:

$$x_0 = -a \ln Y \tag{4.14}$$

si ottiene infine:

$$x_{0} = -a \ln \frac{\frac{z_{2} - z_{1}}{a} + \sqrt{\left(\frac{z_{2} - z_{1}}{a}\right)^{2} + e^{-\frac{L}{a}} \left(e^{\frac{L}{a}} - 1\right)^{2}}}{e^{\frac{L}{a}} - 1}$$

$$4.15$$

mentre *b* si ricava dalla 4.2.

Coordinate degli estremi dei segmenti

Una volta noti i parametri che caratterizzano la curva, si determinano le coordinate degli estremi del *k*-esimo segmento in una campata di lunghezza *L* suddivisa in segmenti la cui proiezione al suolo abbia lunghezza *l*, ove X_0 , Y_0 e Z_0 sono le coordinate del punto di sospensione precedente (v. Figura 4.1):



Si ricavano immediatamente le relazioni:

$$x_k = X_0 + kl\cos\phi \qquad 4.16$$

$$y_k = Y_0 + kl\sin\phi \qquad 4.17$$

$$z_k = b + a \cosh\left(\frac{x_k - x_0}{a}\right)$$

$$4.18$$

Orientamento degli sbracci



Gli sbracci di un traliccio sono solitamente orientati secondo la bisettrice dell'angolo formato dai tratti di linea precedente e successivo.

Con riferimento alla Figura 4.2, deve essere:

$$\gamma = \frac{\beta + \phi}{2} \tag{4.19}$$

e indicando con (X_k, Y_k) le coordinate relative al *k*-esimo traliccio, gli angoli si ricavano da:

$$\beta = \arctan \frac{Y_k - Y_{k-1}}{X_k - X_{k-1}}$$
 4.20

$$\phi = \arctan \frac{Y_{k+1} - Y_k}{X_{k+1} - X_k} \qquad 4.21$$

e da questi si ottiene γ .

Indicando con S la lunghezza dello sbraccio, le coordinate dei punti di sospensione sono quindi date da:

$$\begin{pmatrix} X_{s} \\ Y_{s} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma \\ \sin\gamma & \cos\gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{k} \\ Y_{k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{k} + S\cos\gamma \\ Y_{k} + S\sin\gamma \end{pmatrix}$$

$$4.22$$

4.2 - Effetto della temperatura

Si deve valutare la variazione della costante di tesatura per effetto della variazione di temperatura del conduttore. Questa può raggiungere in genere valori fino ad 80°C, ammettendo una sovratemperatura massima di 40°C rispetto ad una temperatura massima ambientale di 40°C.

La lunghezza di una curva di equazione f(x) nell'intervallo [a; b] è data da:

$$l = \int_{a}^{b} d\zeta \sqrt{[f'(\zeta)]^{2} + 1}$$
 4.23

Nel caso della catenaria, considerando per comodità il caso simmetrico con i tralicci di uguale altezza e di ascissa -L/2 e L/2 rispettivamente, l'equazione diventa:

$$l = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{\pi}{2}} dx \sqrt{\left[\sinh\left(\frac{x}{a}\right)\right]^2 + 1} = 2\int_{0}^{\frac{\pi}{2}} dx \cosh\frac{x}{a} = 4.24$$

$$=2a\sinh\frac{x}{a}\Big|_{0}^{\frac{L}{2}}=2a\sinh\frac{L}{2a}$$
4.25

Utilizzando i valori caratteristici L=400m e a=1600m si ricava un valore della lunghezza l~401m.

Per tener conto dell'effetto della dilatazione termica, dato il coefficiente di dilatazione lineare definito nella relazione:

$$\alpha = \frac{1}{l} \frac{\partial l}{\partial \tau}$$
 4.26

in cui *l* è la lunghezza del cavo e $\frac{\partial l}{\partial \tau}$ la variazione della lunghezza rapportata a quella della temperatura, al primo ordine si ricava:

$$\frac{\Delta l}{\Delta \tau} \cong \frac{\partial l}{\partial \tau} = \alpha l \tag{4.27}$$

$$\Delta l \cong \alpha l \Delta \tau \approx 4 \cdot 10^{-3} m K^{-1} \cdot \Delta \tau \tag{4.28}$$

Materiale	Acciaio	Rame - filo	Rame - corda	Corda Al	Corda Al - acciaio
Modulo di elasticità <i>E</i> [kg/mm²]	20000	13000	10000	6000	7800
Coefficiente di dilatazione termica lineare α [K ⁻¹]	12.10^{-6}	$16.8 \cdot 10^{-6}$	$16.8 \cdot 10^{-6}$	$23 \cdot 10^{-6}$	$19.2 \cdot 10^{-6}$
Tabella 4.1 – Moduli di elasticità e coefficienti di dilatazione termica lineare per alcuni tipi di materiale.					

Per i conduttori bimetallici (ad esempio alluminio con anima di acciaio) si ricava un coefficiente di dilatazione termica virtuale, tenendo conto del fatto che i due materiali costituenti i conduttori hanno caratteristiche diverse e che comunque per essi non è ammissibile alcuno scorrimento tra anima e mantello. Indicando con *S* la sezione, con l'indice *a* i parametri relativi all'anima e con *m* quelli relativi al mantello, se i conduttori fossero liberi di dilatarsi si allungherebbero rispettivamente di $\alpha_a \Delta \tau$ e $\alpha_m \Delta \tau$. Essendo fra loro vincolati, si allungano di una quantità $\alpha \Delta \tau$ intermedia tra le due. Lo sforzo totale di trazione che l'anima riceve dal mantello vale $(\alpha - \alpha_a)\Delta \tau E_a S_a$, ed analogamente lo sforzo totale di compressione che il mantello riceve dall'anima vale $(\alpha - \alpha_m)\Delta \tau E_m S_m$. Poiché tali sforzi devono essere uguali e di segno opposto si avrà:

$$(\alpha - \alpha_a) \Delta \tau E_a S_a = -(\alpha - \alpha_m) \Delta \tau E_m S_m$$

$$4.29$$

da cui si ricava il coefficiente di dilatazione termica virtuale:

$$\alpha = \frac{\alpha_a S_a E_a + \alpha_m S_m E_m}{E_a S_a + E_m S_m}$$

$$4.30$$

A questo punto sono disponibili tutti i dati per determinare la dipendenza del parametro di tesatura dalla temperatura. La variazione di lunghezza del conduttore è data da:

$$\Delta L = L_1 - L_0 = \alpha L_0(\tau_1 - \tau_0) = \alpha L_0 \Delta \tau$$

$$L_1 = L_0(1 + \alpha \Delta \tau)$$

$$2a_1 \sinh \frac{L}{2a_1} = 2a_0 \sinh \frac{L}{2a_0} (\alpha \Delta \tau + 1)$$

$$\Delta \tau = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{a_1}{a_0} \frac{\sinh \frac{L}{2a_1}}{\sinh \frac{L}{2a_0}} - 1 \right)$$

$$4.31$$

ove 0 è l'indice alla temperatura di riferimento e 1 a quella per cui calcolare il parametro.

La funzione che lega tesatura a temperatura è monotòna, e quindi invertibile nell'intervallo di interesse: si può calcolare numericamente la funzione inversa. Come valori di riferimento si assumano $\tau_0=40^{\circ}$ C (per il quale $\Delta \tau=0^{\circ}$ C), *L*=400m, *a*₀=1600m, *a*=19.2·10⁻⁶ K⁻¹.

Si ricava la dipendenza funzionale tramite fit vincolato con una funzione cubica:

$$a(\tau) = -10^{-4} (\Delta \tau)^3 + 3.6 \cdot 10^{-2} (\Delta \tau)^2 - 6.2 \Delta \tau + 1600$$

$$4.33$$

La curva è visualizzata in Figura 4.3, e sarà utilizzata nel seguito per stimare la variazione di tesatura di una campata.



4.3 - Campo generato da un segmento percorso da corrente

Per calcolare il campo di induzione magnetica generato dalla corrente che passa in un conduttore rettilineo si applica la legge di Biot-Savart:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_C \frac{I(\vec{r}\,')d\vec{l} \times \vec{R}}{R^3}$$

$$4.34$$

ove $\vec{R} = \vec{r} - \vec{r'}$ è il vettore spostamento che va dal punto $\vec{r'}$ in cui si trova l'elemento $d\vec{l}$ al punto \vec{r} in cui si calcola il campo.

Considerando il caso di un filo rettilineo di lunghezza finita orientato lungo l'asse x, il campo prodotto dall'elemento di corrente $Id\vec{l} = Idx'i$ nel piano yz è dato da:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I dx'}{4\pi R^3} \mathbf{i} \times \left(-x'\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}\right) = \frac{\mu_0 I dx'}{4\pi R^3} \left(y\mathbf{k} - z\mathbf{j}\right)$$

$$4.35$$

ove **i**, **j** e **k** sono i versori relativi agli assi cartesiani. Il raggio vettore, che va dall'origine delle coordinate al punto in cui si calcola il campo, è dato da $\vec{\rho} = y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$, e quindi $\vec{\rho} \cdot \vec{B} = 0$: ne consegue che le linee di campo sono perpendicolari al raggio vettore e descrivono delle circonferenze attorno all'asse che contiene il tratto di filo (v. Figura 4.4).

Definendo il versore:

$$\hat{\varepsilon} = \frac{(y\mathbf{k} - z\mathbf{j})}{\rho}$$
 4.36

ove ρ è la distanza dal punto in cui si calcola il campo dall'asse del filo, si può scrivere:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I \rho dx'}{4\pi R^3} \hat{\varepsilon}$$
 4.37



Dalla Figura 4.4 si ricavano le relazioni:

$$\cos\theta = \frac{\rho}{R} \Longrightarrow R = \frac{\rho}{\cos\theta}$$
 4.38

$$\tan \theta = \frac{x'}{\rho} \Longrightarrow x' = \rho \tan \theta \tag{4.39}$$

$$dx' = \rho d \tan \theta = \frac{\rho}{\cos^2 \theta} d\theta$$
 4.40

Sostituendo e integrando lungo il tratto di filo si ricava:

$$\vec{B} = \int_{C} d\vec{B} = \int_{\theta_{1}}^{\theta_{2}} \frac{\mu_{0} I \rho}{4\pi \rho^{3}} \cos^{3} \theta \frac{\rho}{\cos^{2} \theta} d\theta \hat{\varepsilon} =$$
$$= \frac{\mu_{0} I}{4\pi \rho} \int_{\theta_{1}}^{\theta_{2}} \cos \theta d\theta \hat{\varepsilon} = \frac{\mu_{0} I}{4\pi \rho} (\sin \theta_{2} - \sin \theta_{1}) \hat{\varepsilon}$$
$$4.41$$

relazione che non dipende dal sistema di coordinate e vale anche fuori dal piano yz.





Si utilizzano gli angoli $\alpha \in \beta$ (visualizzati in Figura 4.5) in modo da non dover tener conto dell'orientamento di $\theta_1 \in \theta_2$:

$$\cos\beta = -\frac{b^2 - a^2 - l^2}{2al}$$
 4.42

$$\cos \alpha = -\frac{a^2 - b^2 - l^2}{2bl}$$
 4.43

Risulta così:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi\rho} (\cos\alpha + \cos\beta)\hat{\varepsilon} \qquad 4.44$$

Si ricava ρ :

$$\rho = a \sin \beta \qquad 4.45$$

e si definisce la quantità η :

$$\eta = \frac{\cos \alpha + \cos \beta}{\rho} \qquad 4.46$$

da cui:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \eta \hat{\varepsilon}$$
 4.47

Visualizzazione grafica di un caso particolare

Si consideri, per una visualizzazione grafica, il caso in cui gli estremi del segmento di lunghezza L abbiano coordinate -L/2 ed L/2, lungo l'asse x.

Dalla Figura 4.6 si ricavano le dipendenze:

$$\tan \alpha = -\frac{\rho}{\frac{L}{2} + x}$$
4.48

$$\tan\beta = \frac{\rho}{\frac{L}{2} - x}$$
 4.49



e dalla relazione:

$$\cos\xi = \sqrt{\frac{1}{\tan^2\xi + 1}}$$
 4.50

si arriva, considerando la 4.44, ad una formula per il calcolo del modulo del campo ad una distanza ρ dall'asse *x*:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi\rho} \left[\frac{\frac{L}{2} - x}{\sqrt{\rho^2 + \left(\frac{L}{2} - x\right)^2}} + \frac{\frac{L}{2} + x}{\sqrt{\rho^2 + \left(\frac{L}{2} + x\right)^2}} \right]$$
(4.51)

L'andamento di tale quantità, nel caso di un segmento lungo 40 m percorso da una corrente di 1600 A, è visualizzato in Figura 4.7:



Condizioni al contorno

Nell'implementazione software della 4.47 occorre tener conto del caso $\rho=0$, che condurrebbe al problema di una divisione per zero anche per $\lim_{\rho \to 0} \eta$ finito. Bisogna infatti distinguere tra due casi

concernenti tale limite: quello per cui avvicinandosi all'asse del segmento si raggiunge il conduttore (ed allora la soluzione deve divergere), e quello per cui si raggiunge l'asse del segmento, ma esternamente ad esso.



In tale situazione, facendo riferimento alla Figura 4.8, dalle quantità:

$$\tan \beta = -\frac{y}{x_2} \tag{4.52}$$

$$\tan(\pi - \alpha) = \frac{y}{x_1} \tag{4.53}$$

ed utilizzando la 4.50 si arriva a:

$$\eta = \frac{\sqrt{\left(\frac{y}{x_2}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{y}{x_1}\right)^2 + 1}}{y}$$
 4.54

Passando al limite:

$$\lim_{y \to 0} \eta = \lim_{y \to 0} \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{y}{x_2} \right)^2 + 1 \right]^{-\frac{3}{2}} \frac{2y}{x_2^2} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{y}{x_1} \right)^2 + 1 \right]^{-\frac{3}{2}} \frac{2y}{x_1^2} \right\} = 0$$

$$4.55$$

Quindi nel software, per ovviare agli inconvenienti derivanti da una divisione per 0, si potrà importe direttamente $\eta|_{q=0} = 0$ senza alterare il risultato del calcolo.

Per una visualizzazione grafica dell'andamento asintotico di η nei due casi si rimanda direttamente alla Figura 7.12, che riporta i risultati ottenuti per verificare la correttezza del calcolo eseguito dal software.

Il problema di una divisione per 0 si presenta anche nelle definizioni di $\cos \alpha e \cos \beta$, qualora b=0 e a=0, rispettivamente (come si evince immediatamente dalle 4.42 e 4.43). In tali casi si calcolerebbe però il campo sulla sorgente (per la precisione sugli estremi del segmento), il che porta ad una naturale divergenza come soluzione delle equazioni di Maxwell¹, e non è possibile ovviare al problema con un controllo come nel caso precedente. In generale, ci si trova ad eseguire il calcolo sul filo (estremi esclusi) quando sono verificate entrambe le condizioni $\rho=0$ e $\cos\alpha\cos\beta=1$. In tali situazioni si dovrà optare per una procedura che blocchi l'esecuzione dell'intero programma, e che avverta l'utente del problema.²

4.4 - Implementazione delle matrici di Eulero

Si introducono le matrici di Eulero per tener conto, nella fase successiva di costruzione del software, del generico orientamento spaziale del segmento percorso da corrente e quindi della direzione di **B**. Il procedimento che segue illustra come vengono determinate le caratteristiche del versore $\hat{\varepsilon}$, del quale è noto il punto di applicazione (è quello in cui si calcola il campo), e tenendo presente che le caratteristiche non dipendono dalla lunghezza del segmento (di cui tiene conto il fattore η).

² In realtà nel programma le condizioni di controllo sono:

¹ Il campo diverge perché si considerano conduttori rettilinei unidimensionali. Una trattazione più completa, implementabile in futuro ma non ritenuta necessaria al momento, può considerare conduttori di sezione finita: si dovrebbe allora analizzare l'effetto pelle, per il quale la corrente attraversa una sezione superficiale del conduttore, che è funzione del materiale e della frequenza. In tal caso la densità di corrente assume un valore finito e non si ha più divergenza. (Nel rame, a frequenza industriale, lo spessore interessato è ~9.5 mm).

⁻ a≤0 || b≤0

⁻ $\rho \leq 0$ && $\cos \alpha > 0$ && $\cos \beta > 0$

⁻ $\rho \leq 0$ && cosacos $\beta < 0$

per ovviare ai problemi che insorgono nel linguaggio C quando si confrontano tipi diversi.

Poiché si conosce esattamente l'orientamento del versore relativo ad un cavo orientato parallelamente all'asse delle ascisse, si opera dapprima una traslazione del segmento di riferimento in modo che un suo estremo vada a coincidere con l'origine degli assi; quindi si applicano due rotazioni attorno agli assi z prima ed y poi affinché la retta da esso individuata vada a coincidere con l'asse x. A questo punto una terza rotazione, attorno all'asse x, porta il punto in cui si effettua il calcolo sul piano xz. In questa configurazione si sa che $\hat{\varepsilon}$ coincide con il versore **j**, e per determinarne il secondo estremo è sufficiente sommarvi tale vettore. A questo punto si eseguono le operazioni precedenti in ordine inverso: dapprima le tre rotazioni e quindi la traslazione spaziale, in modo da riportare il punto di applicazione di $\hat{\varepsilon}$ al punto di partenza.



Figura 4.9 - Angoli definiti dalle rotazioni attorno agli

Dalla Figura 4.9 si ricavano gli angoli di Eulero: quello relativo alla prima rotazione, attorno all'asse y, è dato da:

$$\sin \psi = \frac{\Delta z}{l} \Rightarrow \psi = \arcsin\left(\frac{\Delta z}{l}\right)$$
 4.56

ove Δz e *l* sono riferiti al segmento. Per quanto riguarda la seconda rotazione, attorno all'asse *z*:

$$\tan \phi = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \Longrightarrow \phi = \arctan\left(\frac{\Delta Y}{\Delta X}\right) \qquad 4.57$$

ove $\Delta Y e \Delta X$ sono riferiti alla campata.

Si ricavano le prime due matrici di Eulero relative alle rotazioni attorno agli assi e le loro inverse:

$$\hat{M}_{z} = \begin{pmatrix} \cos\phi & -\sin\phi & 0\\ \sin\phi & \cos\phi & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad \hat{M}_{z}^{-1} = \begin{pmatrix} \cos\phi & \sin\phi & 0\\ -\sin\phi & \cos\phi & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad 4.58$$

$$\hat{M}_{y} = \begin{pmatrix} \cos\psi & 0 & -\sin\psi\\ 0 & 1 & 0\\ \sin\psi & 0 & \cos\psi \end{pmatrix} \qquad \hat{M}_{y}^{-1} = \begin{pmatrix} \cos\psi & 0 & \sin\psi\\ 0 & 1 & 0\\ -\sin\psi & 0 & \cos\psi \end{pmatrix} \qquad 4.59$$

Per ricavare l'angolo θ , che definisce la rotazione attorno all'asse *x*, si ricordi che questa avviene quando tale asse è individuato dal segmento di interesse, dopo le precedenti trasformazioni (traslazione e rotazioni attorno a *x* e *z*). Ci si trova cioè nella situazione visualizzata in Figura 4.10.

Indicando con 0 le coordinate relative al punto di misura e con *s* quelle relative al primo estremo del segmento di riferimento, si definisce:

$$D_{y} = \begin{bmatrix} \hat{M}_{y}^{-1} \hat{M}_{z}^{-1} \begin{pmatrix} x_{0} - x_{s} \\ y_{0} - y_{s} \\ z_{0} - z_{s} \end{pmatrix} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{j} =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\phi \cos\psi & \sin\phi \cos\psi & \sin\psi \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ -\cos\phi \sin\psi & -\sin\phi \sin\psi & \cos\psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{0} - x_{s} \\ y_{0} - y_{s} \\ z_{0} - z_{s} \end{pmatrix} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{j} =$$

$$= \begin{pmatrix} (x_{0} - x_{s})\cos\phi \cos\psi + (y_{0} - y_{s})\sin\phi \cos\psi + (z_{0} - z_{s})\sin\psi \\ - (x_{0} - x_{s})\sin\phi + (y_{0} - y_{s})\cos\phi \\ - (x_{0} - x_{s})\cos\phi \sin\psi - (y_{0} - y_{s})\sin\phi \sin\psi + (z_{0} - z_{s})\cos\psi \end{pmatrix} \cdot \mathbf{j} =$$

$$= -(x_{0} - x_{s})\sin\phi + (y_{0} - y_{s})\cos\phi$$

$$4.61$$

assi y e z.



L'angolo relativo alla rotazione attorno l'asse x si ricava da:

$$\sin\theta = \frac{D_y}{\rho} \Longrightarrow \theta = \arcsin\left(\frac{D_y}{\rho}\right) \qquad 4.62$$

e da questo si ottiene:

$$\hat{M}_{x} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$$

$$\hat{M}_{x}^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$$

$$4.63$$

e le matrici che descrivono le rotazioni combinate $\hat{\Omega} = \hat{M}_z \hat{M}_y \hat{M}_x$ e $\hat{\Omega}^{-1} = \hat{M}_x^{-1} \hat{M}_y^{-1} \hat{M}_z^{-1}$:

$$\hat{\Omega} = \begin{pmatrix} \cos\phi\cos\psi & \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\theta & -\cos\phi\cos\theta\sin\psi - \sin\phi\sin\theta\\ \sin\phi\cos\psi & \cos\phi\cos\theta + \sin\phi\sin\theta\sin\psi & \cos\phi\sin\theta - \sin\phi\cos\theta\sin\psi\\ \sin\psi & -\sin\theta\cos\psi & \cos\theta\cos\theta\sin\psi \\ & \cos\phi\cos\psi & \sin\phi\cos\psi & \sin\psi\\ & \cos\phi\cos\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\theta & \cos\phi\cos\theta + \sin\phi\sin\theta\sin\psi & -\sin\theta\cos\psi\\ & -\sin\phi\sin\theta - \cos\phi\cos\theta\sin\psi & \cos\phi\sin\theta - \sin\phi\cos\theta\sin\psi & \cos\phi\cos\theta \end{pmatrix}$$

$$4.64$$

Indicando con l'indice *s* le coordinate relative all'estremo del segmento, con 0 quelle relative al punto di misura e con *A* quelle relative al vertice di $\hat{\varepsilon}$, per quanto sopra detto deve essere:

$$\begin{pmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{pmatrix} + \hat{\Omega} \begin{bmatrix} \hat{\Omega}^{-1} \begin{pmatrix} x_0 - x_s \\ y_0 - y_s \\ z_0 - z_s \end{pmatrix} - \mathbf{j} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_0 - x_s \\ y_0 - y_s \\ z_0 - z_s \end{pmatrix} - \hat{\Omega} \mathbf{j} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} - \hat{\Omega} \mathbf{j}$$

$$4.66$$

Per come è stato definito $\hat{\varepsilon}$ si trova³:

$$\hat{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_A - x_0 \\ y_A - y_0 \\ z_A - z_0 \end{pmatrix} = -\hat{\Omega}\mathbf{j} = -\begin{pmatrix} \cos\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\theta \\ \cos\phi\cos\theta + \sin\phi\sin\psi \\ -\sin\theta\cos\psi \end{pmatrix}$$

$$4.67$$

e si ricava il campo generato dall'i-esimo segmento:

$$\vec{B}_i(t) = \frac{\mu_0}{4\pi} I_i \sin(\omega t + \varphi_i) \eta_i \hat{\varepsilon}_i$$

$$4.68$$

In Figura 4.11 sono rappresentati gli effetti dell'applicazione delle tre matrici di rotazione:

³ Il segno naturalmente è inessenziale, e può essere cambiato ridefinendo opportunamente la fase della corrente, che è arbitraria.



4.5 - Campo efficace prodotto da linee trifase

In regime alternato sinusoidale l'ampiezza del campo magnetico varia ciclicamente alla stessa frequenza della corrente che lo genera. Nel caso di un insieme di linee elettriche trifase, data la presenza di più sorgenti, le tre componenti spaziali del campo non sono necessariamente in fase tra loro, e di conseguenza il vettore risultante ha intensità e direzione variabili nel tempo.

La quantità a cui si fa riferimento nelle normative, e che viene fornita dagli strumenti di misura, è il valore efficace del campo di induzione magnetica:

$$B^{eff} \equiv \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} B^2(t) dt}$$

$$4.69$$

che viene qui ricavato a partire dalla relazione 4.68.

Nella formula dovrà essere utilizzato il valore efficace della corrente, che è il dato fornito dall'ente gestore:

$$I_M = I^{eff} \sqrt{2} \tag{4.70}$$

Si ricava allora il campo di induzione magnetica efficace:

$$B^{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} (B_{x}^{2} + B_{y}^{2} + B_{z}^{2}) dt} = 4.71$$

$$= I_{0} \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} \left[\left(\sum_{i} B_{x,i} \right)^{2} + \left(\sum_{i} B_{y,i} \right)^{2} + \left(\sum_{i} B_{z,i} \right)^{2} \right] dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} \sum_{i,j} (B_{x,i} B_{x,j} + B_{y,i} B_{y,j} + B_{z,i} B_{z,j}) dt} =$$

$$=\frac{\mu_0}{4\pi}\sqrt{\frac{\sqrt{2}\sqrt{2}}{T}}\sum_{i,j}I_i^{eff}I_j^{eff}\eta_i\eta_j\hat{\varepsilon}_i\cdot\hat{\varepsilon}_j\int_0^T\sin(\omega t+\varphi_i)\sin(\omega t+\varphi_j)dt$$
4.72

Gli indici *i*, *j* nella sommatoria sono indici di segmento. La discretizzazione comporta nel calcolo la mancanza di riferimenti al singolo conduttore, tenendo presente che tutti i segmenti riferiti ad esso sono percorsi dalla stessa corrente $I_i^{eff} \sin(\omega t + \varphi_i)$.

Si definisce:

$$A_{ij} = \prod_{k=i,j} I_k^{eff} \eta_k \hat{\varepsilon}_k$$

$$4.73$$

Si cambia variabile d'integrazione: $t \rightarrow \omega t = \xi$ per una sola armonica⁴.

$$B^{eff} = \frac{\mu_0}{4\pi} \sqrt{\frac{2}{2\pi} \sum_{i,j} A_{ij} \int_0^{2\pi} \sin(\xi + \varphi_i) \sin(\xi + \varphi_j)} d\xi \qquad 4.74$$

Si cambia ancora variabile d'integrazione: $\xi \rightarrow (\xi + \varphi_i) = \alpha$.

$$\int_{0}^{2\pi} \sin(\xi + \varphi_{i})\sin(\xi + \varphi_{j})d\xi = \int_{\varphi_{i}}^{2\pi+\varphi_{i}} \sin\alpha\sin(\alpha + \varphi_{j} - \varphi_{i})d\alpha =$$

$$= \int_{0}^{2\pi} \sin\alpha\left[\sin\alpha\cos(\varphi_{j} - \varphi_{i}) + \cos\alpha\sin(\varphi_{j} - \varphi_{i})\right]d\alpha =$$

$$= \cos(\varphi_{j} - \varphi_{i})\int_{0}^{2\pi} \sin^{2}\alpha d\alpha + \sin(\varphi_{j} - \varphi_{i})\int_{0}^{2\pi} \sin\alpha\cos\alpha d\alpha =$$

$$= \cos(\varphi_{j} - \varphi_{i})\left[\frac{1}{2}\alpha - \frac{1}{4}\sin2\alpha\right]_{0}^{2\pi} = \pi\cos(\varphi_{j} - \varphi_{i})$$
4.75

Si ricava così:

$$B^{eff} = \frac{\mu_0}{4\pi} \sqrt{\sum_{i,j} A_{ij} \cos(\varphi_j - \varphi_i)}$$

$$4.76$$

Si noti la dipendenza del valore efficace dell'induzione magnetica da un termine dipendente dalle fasi relative dei conduttori - $\cos(\varphi_j - \varphi_i)$ - e da un termine - A_{ij} - dipendente, oltre che dalle correnti, dalla geometria della linea. È su questi parametri (opportuna disposizione delle fasi, diminuzione della distanza tra i conduttori, aumento della quota dei punti di sospensione, ...) che sarà possibile intervenire per ridurre l'impatto ambientale della linea, come si vedrà nel Capitolo IX.

4.6 - Rigidità dielettrica ed effetto corona

La rigidità dielettrica è il valore di campo elettrico oltre il quale si produce una scarica attraverso l'isolante. In queste condizioni il dielettrico perde le proprietà isolanti, dal momento che entro di esso si instaurano fenomeni di conduzione analoghi a quelli dei materiali conduttori. Per l'aria vale ~30 kV/cm in condizioni normali di temperatura e pressione; oltre a questi fattori è influenzata dall'umidità, e quindi varia a seconda delle condizioni atmosferiche.

Quando il campo elettrico sulla superficie di un conduttore raggiunge un valore superiore alla rigidità dielettrica dell'aria circostante aumentano in questa i processi di ionizzazione già presenti (per radiazioni luminose, raggi cosmici, ecc.), il che dà luogo a un flusso trasversale di corrente tra i conduttori, con dissipazione di potenza.

⁴ Il contributo delle armoniche successive è trascurabile, come evidenziato nel paragrafo 4.7.

A ciò si accompagna l'emissione di radiazioni elettromagnetiche, in particolare luminose (in relazione a scambi di energia tra particelle ionizzanti e atomi), con la formazione di una guaina luminosa intorno al conduttore, che fa definire effetto corona questo fenomeno.

4.7 - Armoniche successive alla fondamentale

Il vero valore efficace del campo di induzione magnetica è dato da:

$$B^{eff} = B_f \sqrt{1 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + \dots}$$
 4.77

ove B_f è il valore efficace della componente fondamentale del campo, e α_i è la frazione della *i*-esima armonica.

Le armoniche successive alla fondamentale (di 50 Hz), che portano effetti sensibili nel caso di apparecchi elettrici, contribuiscono in maniera del tutto trascurabile al campo prodotto da elettrodotti.



Figura 4.12 - Esempio di spettro del campo di induzione magnetica.

In un rivelatore di tipo PMM 8053 si può visualizzare sul display lo spettro dell'induzione magnetica, notare l'assenza di armoniche pari e lo scarso peso di quelle dispari successive alla fondamentale, come visualizzato in Figura 4.12 (la scala è semi-logaritmica).

Frequenza [Hz]	50	250
Intensità [µT]	2.06	0.015

Tabella 4.2 – Intensità di ciascuna armonica per un'induzione magnetica totale *B*=2.07 μ T.

La presenza di tali componenti è dovuta a particolari condizioni di funzionamento a carattere transitorio: all'effetto corona, alle manovre di inserzione e disinserzione di elementi di impianto, all'intervento degli interruttori per l'eliminazione di guasti e alla struttura della rete di distribuzione, nella quale le tensioni sono ridotte, avvicinandosi all'utenza finale, attraverso una serie di cabine di trasformazione. Ad ogni passaggio si ha una deformazione della corrente, la cui forma non è più una sinusoide pura ma contiene armoniche di ordine dispari (quelle di ordine pari non compaiono per le condizioni al contorno) per la saturazione del nucleo del trasformatore.

L'uso di apparecchiature elettroniche con caratteristiche intrinsecamente non lineari provoca l'immissione in rete di correnti e tensioni armoniche, producendo una distorsione permanente della forma d'onda della tensione di rete.

4.8 - Bibliografia

- [4.1]. Vittorio Re-Alberto Bandini Buti, "L'energia elettrica. Principi fondamentali ed applicazioni", seconda edizione, Editoriale Delfino, Milano 1982
- [4.2]. Duane E. Roller, Ronald Blum, "Fisica Volume secondo: Elettricità, magnetismo, ottica", Zanichelli, Bologna 1985
- [4.3]. Francesco Iliceto, "Lezioni di elettrotecnica" Vol. III Elementi di impianti elettrici, Patron editore, Bologna 1989

- [4.4]. M. Bini, D. Andreuccetti, R. Olmi, N. Zoppetti, "Influenza del terreno nel calcolo del campo elettrico e magnetico prodotto da linee elettriche", CNR-IFAC, Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara", Firenze
- [4.5]. Norma Italiana CEI 211-4, luglio 1996, Prima Edizione, Fascicolo 2840, "Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche"
- [4.6]. Norma Italiana CEI 211-6, gennaio 2001, Prima Edizione, Fascicolo 5908, "Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettrici e magnetici nell'intervallo di frequenza 0Hz – 10kHz, con riferimento all'esposizione umana"

Strumenti di misura

5.1 - Gli strumenti di misura dell'induzione magnetica a 50 Hz

Le sonde di campo magnetico, costituite da una bobina di filo elettricamente schermato, sono usate in combinazione con un voltmetro che rileva la f.e.m. indotta dalla componente di campo ortogonale alla sonda. Per risalire al valore efficace di campo servono tre misure lungo tre orientamenti ortogonali.

I misuratori di campo magnetico triassiali forniscono direttamente il valore efficace del campo, e possono essere commutati o sintonizzati in modo da indicare i valori efficaci della componente a frequenza industriale e di una o più componenti armoniche del campo.

Per caratterizzare le componenti armoniche del segnale nel circuito del rivelatore viene inserito uno stadio integratore (attivo o passivo) in modo da conservare la forma d'onda del campo magnetico.

Per misure a lungo termine è più adatto uno strumento che registri le letture in un sistema di immagazzinamento dati a intervalli di tempo prefissati.

Esistono anche misuratori di campi magnetici con sonde a effetto Hall che possono essere usati per misurare le induzioni magnetiche con frequenze da 0 a diverse centinaia di Hz. Non risultano tuttavia adatti per gli ambienti con campi alternati a basso livello, per via della bassa sensibilità e dei problemi di saturazione dovuti al campo terrestre.

È necessario considerare la risposta in frequenza della sonda. A causa dell'induttanza della bobina L, della capacità parassita C, della resistenza intrinseca r e dell'impedenza d'ingresso R, il rapporto tra la tensione V indotta nella bobina e la tensione che entra nel rivelatore v_p deve essere considerato in funzione della frequenza.



Dal circuito schematizzato in Figura 5.1 si può risalire al rapporto tra tensione della sonda e tensione indotta:

$$\left|\frac{v_p}{V}\right| = \left\{ \left(\frac{R+r}{R} - \omega^2 LC\right)^2 + \left[\omega \left(\frac{L}{R} + Cr\right)^2\right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$
 5.1

Tale valore dovrebbe restare prossimo all'unità e non avere picchi prima di diminuire rapidamente all'aumentare della frequenza. Valori elevati di R possono causare dei picchi vicino alla frequenza di risonanza della sonda, mentre valori troppo bassi causano un'attenuazione più rapida e una riduzione non voluta nella risposta in frequenza.

Nel caso di sonde contenenti nuclei ferromagnetici la teoria si complica, a causa della dipendenza della permeabilità del materiale del nucleo da frequenza ed ampiezza del campo.

5.2 - Taratura degli strumenti

L'equivalenza e l'affidabilità delle misure del campo magnetico sono assicurate dalla riferibilità della strumentazione utilizzata, intesa come la proprietà che uno strumento acquisisce quando viene sottoposto a taratura, applicando grandezze le cui misure sono state assegnate con riferimento a campioni riconosciuti a livello nazionale e internazionale.

La taratura del rivelatore di campo magnetico, effettuata una volta dal costruttore, va ripetuta a intervalli di tempo durante la vita dello strumento e in caso di modifiche o riparazioni.

Esistono vari metodi di taratura, uno dei quali consiste nell'introduzione della sonda in un campo magnetico calcolabile, generato da un sistema di bobine con geometria circolare o rettangolare.



Il fattore di taratura C è ottenuto dal rapporto tra il valore del campo di riferimento applicato al sensore e l'indicazione fornita dallo strumento:

$$C = \frac{H_r}{H_m}$$
 5.2

La tecnica a iniezione di tensione, utile per tarare le gamme molto elevate (ad esempio superiori a 10 mT) è applicabile solo durante la fase di progettazione o di costruzione dello strumento. La tensione in funzione dell'induzione magnetica misurata in uscita da una sonda a bobina può essere riferita ad ogni frequenza di interesse tramite l'utilizzo di un voltmetro collegato all'ingresso del rivelatore e un campo magnetico il cui ordine di grandezza sia almeno il doppio di quello del campo parassita. Quindi le tensioni più piccole sono iniettate nel circuito del rivelatore (con la sonda scollegata) per tarare le scale più sensibili del misuratore del campo magnetico. Per iniettare le tensioni conosciute per la gamma di frequenza interessata, è possibile usare un divisore di tensione con un rapporto conosciuto quando questo è collegato al rivelatore, una sorgente di tensione in c.a. (per es. un generatore di funzioni), un voltmetro preciso e una schermatura adeguata di campo elettrico.



Con riferimento alla Figura 5.3, la tensione *V* proveniente da un generatore di funzioni è ridotta ai fini dell'iniezione usando un divisore resistivo. La tensione iniettata *v* è data da $V_r/(R+r)$ se la frequenza non ha effetti sul rapporto del divisore (tipicamente R>>r). L'impedenza di ingresso del rivelatore è approssimata a una resistenza R_D . La relazione $r<<R_D$ deve essere soddisfatta per evitare di influenzare significativamente il valore del rapporto del divisore.

Tale tecnica potrebbe non essere applicabile alle sonde con nucleo ferromagnetico, poiché la permeabilità del nucleo può variare con l'induzione magnetica e influenzare la sensibilità della sonda.

Si può infine confrontare il rivelatore con un sistema di misura di riferimento, precedentemente tarato.

5.3 - EMDEX



EMDEX (Electric and Magnetic Field Digital Exposure System) è un sistema hardware e software per la misura, la memorizzazione e l'analisi di campi elettrici e magnetici a frequenza industriale prodotto dalla Enertech Consultants. È costituito da un misuratore di campo (EMDEX II), dal sistema LINDA (LINear Data Acquisition System) per la misura di campi in funzione dello spostamento, e dal sistema di software EMCALC.

Il funzionamento dell'EMDEX II

L'EMDEX II è un misuratore programmabile per l'acquisizione dati che può rilevare le componenti del campo magnetico con delle sonde interne, posizionate lungo assi ortogonali, e l'ampiezza del campo elettrico tramite un sensore esterno.

Consiste di un computer a 8 bit con sistema operativo interno su EPROM, una scheda per l'elaborazione del segnale, tre sensori per la misura del campo magnetico, e di una memoria interna

CMOS (fino a 512 kB) per l'immagazzinamento temporaneo dei dati. Tre pulsanti consentono la regolazione delle impostazioni, visualizzate su uno schermo LCD.

Tramite i pulsanti di controllo (e in alcuni casi avvalendosi della comunicazione con un computer su cui sia installato il software EMCALC) l'operatore può stabilire:

- se registrare i dati o semplicemente visualizzare le misure sul display;
- la frequenza di campionamento (impostando qualunque valore tra 1.5 e 327 s);
- l'ampiezza di banda di frequenza potendo scegliere tra "broadband only" e "broadband and harmonic". La risposta broadband misura i segnali da 40 a 800 Hz, la harmonic da 100 a 800 Hz. La frequenza fondamentale del campo non è misurata direttamente, ma calcolata usando le quantità harmonic e broadband;
- se memorizzare solo l'ampiezza di campo o anche le componenti.

Alla fine della misura i dati vengono trasferiti, tramite comunicazione su porta seriale, su di un computer dotato dell'apposito software per la memorizzazione a lungo termine. I dati vengono salvati in un file con estensione MDX, dal quale è possibile ricavare una prima visualizzazione grafica ed un'analisi statistica. Una conversione in formato ASCII li rende disponibili su qualunque piatta-forma per analisi successive.



L'intensità del campo magnetico alternato è determinata misurando le correnti indotte in tre sensori a spirale disposti ortogonalmente. I tre segnali del campo magnetico, il segnale proveniente dal connettore ausiliario e una serie di segnali auto-diagnostici sono diretti ad un interruttore multiplo 8 a 1. Questo dispositivo, sotto il controllo del computer interno, seleziona uno degli otto segnali e lo manda al preamplificatore. Il segnale selezionato è quindi introdotto in un amplificatore a guadagno variabile che ha tre differenti intervalli. Il computer legge il livello del segnale e regola l'intervallo del guadagno per mantenere il segnale prodotto al livello dell'accuratezza ottimale.

L'amplificatore regolabile alimenta due canali separati, definiti broadband e harmonic.



Il canale broadband si connette direttamente all'amplificatore finale. Il canale harmonic contiene un filtro passa alto che attenua fortemente il segnale sotto i 100 Hz. L'uscita del filtro si connette, attraverso un interruttore, agli amplificatori finali dello strumento.

L'amplificatore finale aumenta il livello del segnale e attenua i segnali sotto i 40 e sopra gli 800 Hz. Il segnale in uscita è quindi introdotto in un convertitore TRMS (true root-mean-square) che trasforma i segnali alternati in tensioni continue. La tensione continua risultante è proporzionale all'energia totale del segnale alternato. Queste caratteristiche fanno sì che il tempo minimo di campionamento del segnale sia 1.5 s: 0.4 s richiesti dal convertitore TRMS per rispondere ad un cambiamento di livello nel segnale in ingresso (per ognuno dei tre assi), più 0.3 s richiesti dal software.

Va notato che, dato l'intervallo di frequenze, il campo magnetico terrestre, quasi statico, viene filtrato e non è misurato anche nel caso di bruschi movimenti dello strumento.

L'uscita dall'amplificatore finale è introdotta in tre resistori regolabili separati e canali di input ADC sul computer interno. I canali di ingresso all'ADC sono contrassegnati in Figura 5.6 con A_0 , A_1 e A_2 : A_0 è usato per i segnali del campo elettrico e della componente sull'asse *x* del campo magnetico, A_1 e A_2 per i segnali delle componenti *y* e *z* del campo magnetico.

Al momento dell'accensione del rivelatore parte un contatore interno; questo si incrementa fino al momento della connessione al PC per una comunicazione o trasmissione dati: in quel momento vengono comunicate data e ora attraverso il collegamento seriale, in modo da rendere possibile l'elaborazione del campo in funzione del tempo.

Nel corso di una misura è possibile segnare un particolare punto con l'immissione di un MARKER, ossia di un marcatore di evento: questi, progressivamente numerati, vengono riportati con una breve descrizione nei file salvati su PC, per essere eventualmente utilizzati in una successiva analisi dati.

Alla fine di una misura, l'invio di uno STOP manda lo strumento in stand-by con risparmio di batteria. In questo modo è possibile effettuare più misure distinte in successione, senza dover scaricare ogni volta i dati su PC.

Risoluzione dello strumento

L'intervallo di misura è compreso tra 0.01 e 300 μ T, con un'accuratezza tipica di ±3%, nel caso peggiore di ±10%.

Induzione magnetica [µT]	Risoluzione [µT]		
0.01 ÷ 1.1	0.01		
0.8 ÷ 17.8	0.02		
$12.8 \div 300$	0.32		
Tabella 5.1 - Risoluzione dello strumento al variare dell'induzione.			

Risposta in frequenza

Le specifiche tecniche dello strumento riportano, per una misura in modalità broadband, una variazione di $\pm 30\%$ su tutto l'intervallo di frequenze (da 40 a 800 Hz), mentre per la modalità harmonic si ha una dipendenza dalla frequenza, come riportato nella Tabella 5.2:

Frequenza [Hz]	Variazione della risposta in frequenza	
100	da +10% a - 45%	
120	da +25% a – 30%	
150	da +25% a - 0%	
$180 \div 800$	da +25% a - 25%	
Tabella 5.2 – Variazione della risposta in funzione della frequenza.		

Nelle Figure 5.7 e 5.8 è visualizzata la risposta in frequenza nelle due modalità.



La modalità LINDA



Figura 5.9 - Il sistema LINDA.

Nella configurazione LINDA (LINear Data Acquisition System) l'EMDEX II viene fissato su di un supporto mobile munito di odometro, bussola e speciali sensori che rendono possibile registrare anche la distanza e la direzione in una misura di induzione magnetica. Affinché questo sia possibile è necessario installare nella memoria del rivelatore un apposito programma.

Tutti i dati memorizzati vengono quindi trasferiti su di un computer; qui il software EMCALC permette di visualizzare il percorso effettuato (Figura 5.10), il profilo dell'induzione (Figura 5.11), e tramite un procedimento di interpolazione l'andamento del campo su una superficie, in un grafico tridimensionale (Figura 5.12).

Le variazioni di direzione devono essere multipli di 45°, visualizzabili tramite la bussola ed impostabili tramite pulsantiera.

Oltre alla conversione dei dati in file ASCII, esiste la possibilità di esportare i grafici così ottenuti in file di tipo IMG o ART: è quindi possibile visualizzarli tramite opportuni programmi presenti su computer su cui non sia stato installato il software EMCALC. Per il grafico in Figura 5.12, ad esempio, è stato utilizzato ImageMagick, reperibile sul sito http://www.imagemagick.com.









Il programma installato imposta la frequenza di campionamento, in modalità broadband. La ruota dello strumento fa scattare un interruttore ogni qualvolta viene percorsa la distanza di un piede, riducendo la resistenza del jack Remote sotto i 50 k Ω . Quando l'interruttore si riapre, la resistenza risale sopra i 1000 k Ω , e la transizione da basso ad alto è contata dal computer interno.



Le misure si fermano se non giungono segnali per tre secondi, per ripartire al successivo segnale. La risoluzione (numero di misurazioni per unità di distanza) dipende dalla velocità di avanzamento dello strumento.

In questa maniera è possibile memorizzare simultaneamente nella RAM dello strumento i valori di campo, le distanze percorse e i cambiamenti di direzione.

5.4 - PMM 8053



Il PMM 8053 è un'unità di controllo per misurare campi elettrici e magnetici. È utilizzato con una sonda esterna, connessa tramite fibra ottica. In questo modo si evitano effetti di accoppiamento con l'operatore che risultano importanti soprattutto nel caso di misure di campo elettrico.

Opzioni di visualizzazione

Tramite la pulsantiera ed il display l'operatore può selezionare diverse modalità di visualizzazione dei dati. In modalità "ABS/%" vengono mostrate le componenti vettoriali del campo misurato in valore assoluto o in percentuale. In modalità "MIN-MAX/AVG" (o "MIN-MAX/RMS") vengono visualizzati i valori massimo e minimo oltre al valore medio espresso come media aritmetica (o quadratica) trascinata della lettura:

$$AVG = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} |B(t)| dt$$
 5.3

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} \left| B(t) \right|^{2} dt}$$
 5.4

In modalità "PLOT" i dati sono acquisiti e visualizzati sul display in funzione del tempo. In modalità "DATA logger" i dati vengono immagazzinati in un file, che potrà poi essere trasportato su PC.

Specifiche tecniche

L'unità è progettata per lavorare nell'intervallo di frequenze tra 5 Hz e 40 GHz, con un range di misura di campo magnetico tra 10 nT e 10 mT ed un'accuratezza dell'1%. Nella memoria interna è possibile immagazzinare sino a 8100 misure.

Al momento di effettuare una misura si fissa lo SPAN, valore che indica la frequenza massima dello spettro entro cui lo strumento effettua la misura, tra i valori riportati in Tabella 5.3:

SPAN	Tempo di acquisizione	Risoluzione [Hz]
100 Hz	4.1 s	0.24
200 Hz	2.0 s	0.49
500 Hz	0.8 s	1.22
1 kHz	0.4 s	2.44
2 kHz	0.2 s	4.88
10 kHz	40.96 ms	24.41
100 kHz	4.096 ms	244.14

Tabella 5.3 – Valori selezionabili dello SPAN, e corrispondenti tempi di acquisizione e risoluzioni.

La frequenza minima misurabile corrisponde a circa l'1.2% dello SPAN (in ogni caso non è mai inferiore a 5 Hz): per misure a 50 Hz si sceglie lo SPAN a 1 kHz, che garantisce una maggiore sensibilità tra quelli possibili (<0.2 μ T). In questa maniera resta fissato un filtro passa-alto a 20 Hz, che ripulisce le misure dal rumore di fondo, ed il tempo di acquisizione, secondo la Tabella 5.4:

Frequenza filtro [Hz]	Tempo di acquisizione [ms]		
10	900		
20	450		
40	250		
80	150		
abella 5.4 Tempo di campionamento e filtro passa-alto.			

La misura può essere effettuata in due modalità: WIDEBAND, in cui vengono misurate le componenti relative a tutto lo spettro (Span) selezionato, o HIGHEST, in cui viene misurata solo la componente con intensità di campo maggiore all'interno dello Span. L'intervallo di campionamento può essere fissato in 1, 2, 3, 6, 10, 15, o 30 minuti, oppure la media (trascinata) viene effettuata sugli ultimi 32 campionamenti.

È possibile un utilizzo, solo con la sonda EHP-50A per misure di campi a 50 Hz, in modalità Low Power (LP): in tale configurazione le rilevazioni avvengono ogni 60 secondi, e lo strumento rimane in stand-by tra una misura e la successiva. In modalità Low Power la sonda ha un'autonomia di 50 ore, maggiore di quella del PMM 8053 che deve essere alimentato esternamente per poterlo utilizzare per intervalli di tempo così lunghi. Il collegamento tramite fibra ottica allontana l'alimentazione dalla sonda, in modo da non alterarne il funzionamento.

Il PMM 8053 può essere utilizzato con più sonde. I parametri di taratura sono memorizzati in un chip contenuto nella testa della sonda. Il riconoscimento della sonda e la lettura della curva di taratura avvengono al momento dell'accensione dello strumento o al momento dell'innesto della sonda.

Sonda EHP-50A

Il PMM 8053, per le misure di campi a frequenza industriale, ha bisogno di una sonda di tipo EHP-50A: è un sensore-analizzatore isotropico di campi elettrici e magnetici a bassa frequenza, di cui sono riportate nella Tabella 5.5 le specifiche tecniche.

5 Hz ÷ 100 kHz
10 nT ÷ 10 mT
1 nT
10 nT
±0.8 dB (=9.6%)
±0.5 dB (=5.9%)
±1 dB (=12.2%)
16.6%



Permette l'analisi di spettro dei segnali per mezzo di un DSP (Digital Signal Processor), che viene effettuata sui sette SPAN possibili e visualizzata sul display del misuratore; la misura precisa delle frequenza e del livello è ottenuta per mezzo di un marker (v. Figura 5.16).

Si riporta una nota su come si determina l'errore totale dello strumento. L'errore espresso in decibel è correlabile ad un rapporto tra tensioni tramite la relazione:

$$dB = 10\log\frac{P_m}{P_0} = 20\log\frac{V_m}{V_0}$$
 5.4

$$\frac{V_m}{V_0} = 10^{\frac{dB}{20}}$$
 5.5

ove $m \in 0$ sono indici riferiti a quantità misurata e di riferimento, rispettivamente. L'errore totale si ottiene tramite somma in quadratura.

Nelle Figura 5.17 è visualizzata la risposta in frequenza per le misure di campo magnetico:



5.5 - PMM 8055S

Il sistema PMM 8055S è utilizzato per il monitoraggio continuo e remoto dei campi elettromagnetici. La centralina, alimentata da batterie interne, è collegata a due celle fotovoltaiche che consentono un'autonomia praticamente illimitata, in normali condizioni di luce solare.

Tramite un cellulare GSM incorporato nella centralina e dotato di scheda telefonica SIM-DATI, comunica attraverso la rete GSM con un Modem montato su PC in remoto per l'immediata archiviazione a lungo termine delle misure effettuate.

La centralina ha un'autonomia di una settimana in assenza di luce; all'esaurimento della carica i dati raccolti rimangono in memoria.



Ci sono vari tipi di allarmi e controlli visualizzabili in remoto:

- case open;
- low-battery;
- diagramma di irraggiamento solare.

Ogni 2 ore la stazione radiobase interroga il cellulare (come avviene per tutti i cellulari), e tali eventi sono opportunamente segnati nel file in cui vengono acquisite le misure: è possibile utilizzare l'informazione per rigettare eventualmente il dato raccolto in concomitanza con la comunicazione remota. Il tempo massimo di acquisizione può arrivare a 18 mesi, dipendentemente dal campionamento e dai dati acquisiti.

Campo di frequenza	5 Hz ÷ 40 GHz		
Campo di lavoro	(10±0.1)nT ÷ (10±0.1)mT		
Campo misurato	Componenti, totale, massimo e medio (trascinato su 1 e 6 minuti)		
Campionamento	1 misura/s		
Intervallo di memorizzazione	5, 10, 15, 30s, 1, 2, 6 minuti		
Memoria	256 kB		
rabella 5.6 - Specifiche tecniche della centralina PMM 8055S.			

Sonda HP-050

La centralina è utilizzata con una sonda (visibile nel riquadro in basso a sinistra di Figura 5.18) di tipo HP-050, di cui vengono qui riportate le specifiche tecniche:

Campo di frequenza	10 Hz ÷ 5 kHz		
Portata	$10 \text{ nT} \div 40 \mu\text{T}$		
Risoluzione	1 nT		
Sensibilità	10 nT		
Errore assoluto @ 50 Hz 200 nT 25 °C	±0.4 dB (=4.7%)		
Piattezza (40 Hz – 1 kHz)	±1 dB (=12.2%)		
Isotropicità @ 50 Hz 200 nT	±0.3 dB (=3.5%)		
Errore totale (massimo)	13.5%		
Fabella 5.7 - Specifiche tecniche della sonda HP-050.			

Viene riportato infine il grafico che visualizza la risposta in frequenza della sonda:



5.6 - Interconfronto strumentale

Nessuno tra quelli appena descritti è lo strumento ideale per qualunque tipo di misura: la scelta deve essere effettuata a cura dell'operatore a seconda delle condizioni e delle necessità che si presentano di volta in volta.

L'EMDEX II è sicuramente da preferirsi per misure con bassi valori di campo per la migliore sensibilità, e nei casi in cui si renda necessario operare in modalità LINDA per acquisire i valori di campo lungo un percorso o su una superficie estesa. Inoltre, essendo più maneggevole, è utile per uno screening preliminare della zona e per l'individuazione veloce dei punti di posizionamento di una centralina o per l'esecuzione di una misura a lungo termine. Diventa molto meno affidabile per quanto riguarda le misure di campo elettrico, nel qual caso richiede, oltre all'installazione dell'apposito software, una sonda esterna non isotropa (un condensatore piano).

I rivelatori di tipo PMM sfruttano invece appieno le loro caratteristiche nel caso di misure prolungate nel tempo. Questo è dovuto alla possibilità di comunicare i dati in remoto, alla maggiore quantità di informazioni memorizzabili, ad un'autonomia di gran lunga superiore (praticamente illimitata in particolari condizioni ambientali nel caso della centralina) ed infine alla caratteristica non trascurabile di mantenere i dati in memoria anche nel caso di un'interruzione dell'alimentazione, condizione che nel caso dell'EMDEX II comporta la perdita totale dei dati acquisiti.

5.7 - Bibliografia

- [5.1]. M. Borsero, G. Crotti, L. Anglesio, G. d'Amore, "Calibration and evaluation of uncertainty in the measurement of environmental electromagnetic fields", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 97, No 4, pp. 363-368 (2001)
- [5.2]. PMM Costruzioni Elettroniche Centro Misure Radioelettriche s.r.l., "Manuale Operativo PMM 8053 Misuratore portatile di campi elettromagnetici", 1999
- [5.3]. Enertech consultants, "EMDEX II Linear Data Acquisition System LINDA User Manual Version 2.2", Palo Alto (California), Ottobre 1994
- [5.4]. Enertech consultants, "EPRI EMDEX Electric and Magnetic Field Digital Exposure System - EMDEX Technical Reference Manual - Version 2.2", Palo Alto (California), Ottobre 1994
- [5.5]. Enertech consultants, "EPRI Electric and Magnetic Field Digital Exposure System EM-DEX II User Manual Version 2.2", Palo Alto (California), Novembre 1994
- [5.6]. Enertech consultants, "EPRI Electric and Magnetic Field Digital Exposure System EM-CALCTM95 User Manual", Palo Alto (California), Dicembre 1994
- [5.7]. Norma Italiana CEI 211-6, gennaio 2001, Prima Edizione, Fascicolo 5908, "Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettrici e magnetici nell'intervallo di frequenza 0Hz – 10kHz, con riferimento all'esposizione umana"
- [5.8]. PMM Costruzioni Elettroniche Centro Misure Radioelettriche s.r.l., "Manuale Operativo PMM 8055S – Sistema di monitoraggio distribuito di campi elettromagnetici ambientali", 2002
I software di calcolo

6.1 - I software esistenti

In questo capitolo vengono analizzati i più diffusi software per il calcolo del campo di induzione magnetica adoperati dalle varie Agenzie per la Protezione dell'Ambiente in Italia. Ciascuno di essi è stato analizzato in base ad un elenco di caratteristiche, ove disponibili, riportate qui di seguito, che permettono di schematizzarne il funzionamento, l'ambiente di lavoro, i dati richiesti e i risultati in output:

- Metodo di calcolo
- Sistema di riferimento
- Regione di campionamento
- Dati elettrici in ingresso
- Dati geometrici in ingresso
- Opzioni
- Presentazione dei dati in output
- Linguaggio di programmazione
- Requisiti software e hardware
- Osservazioni e commenti

In tal modo è stato possibile valutare come procedere per analizzare in maniera completa i dati a disposizione, in base alle problematiche che si sono presentate in seguito allo studio del problema e alle misurazioni effettuate sul campo.

6.2 - CMagnetico

CMagnetico è un software sviluppato dall'ITC – irst (Istituto Trentino di Cultura – Istituto di Ricerca Scientifica del Trentino) per il calcolo dell'induzione magnetica generata da una linea elettrica. Riferimenti al sito http://www.itc.it.

Metodo di calcolo

Si basa sull'integrazione numerica della legge di Biot-Savart sulla catenaria della campata, utilizzando l'approssimazione agli elementi finiti: suddivide cioè la regione di campionamento in celle a forma di parallelepipedo all'interno delle quali viene calcolato il campo.

Sistema di riferimento

Viene definito un sistema di riferimento *OXYZ* rispetto al quale si precisano i dati geometrici relativi alla linea:

- l'asse X traversale alla linea rispetto al quale misurare gli scostamenti dei fili;
- l'asse *Y* lungo la direzione di sviluppo della linea rispetto al quale misurare l'angolo di inclinazione delle campate;

- l'asse Z verticale rispetto al quale fissare l'altezza dal suolo identificato con il piano OXY.

Regione di campionamento

La regione entro cui si vuole calcolare il campo è un parallelepipedo che può essere posizionato arbitrariamente rispetto alla linea elettrica; i punti in esso contenuti forniscono i valori di campo magnetico, nella regione di spazio prescelta, fittamente quanto si vuole. È necessario specificare:

- il numero di punti di campionamento lungo i tre assi X, Y, Z;
- il passo di campionamento lungo gli assi;
- l'origine del campionamento.

						4)	Dati	Elette	ici della	. Linea	CA	Centralo
-11	NG I	Punti del	Campi	onamento			Corrente ett. (ano) Fe	de: R.S.T	"Orner" (g	nadi) Asc	issa X (m)
L	x ogn	Lungo	Y	Lungo Z		F 1						
						F 2						
						F3						
23	Pass	a del	Cample	namente	1000	F.4						
lue		Lunat V	(m)	Lunan T (m		F 5						
tun	90 X (4)	Lungo s	(40	Lungo z (m		F6						
						17						
255	. Changes	1979	the second second			10						
3)	Origi	io del	Campi	enamento		E 40						
Lun	po X (m)	Lungo V	(m)	Lungo I (m	0	F 11						
						F 12						
		and a second state of a						Committi Carbon				
5)		D	a (t. i	G e	o m e	t r i e i		d e 1.1	a	Line	a	
	C1:L(m)	U_0 (m)	H_0 (m)	H_1 (m)	H_2 (m)	INCL. (gradi)	C2 : L (m)	U_0 (m)	H_0 (m)	H_1 (m)	H_2 (m)	NCL (grad
P1												
F2												
F3												
F.4												+
F5												-
P5 F6 F7									-			-
F5 F6 F7 F8												
F5 F6 F7 F8 F9				1				A COMPANY AND A REAL PROPERTY.				
F5 F6 F7 F8 F9 F10												-
F5 F6 F7 F8 F9 F10 F11												
F5 F6 F7 F8 F9 F10 F11 F12												

Dati elettrici in ingresso

I dati elettrici della linea devono essere specificati solo per la campata centrale che interseca la zona di spazio in cui si vuole calcolare il campo magnetico; in particolare per ogni conduttore si deve inserire:

- la corrente effettiva;
- la fase (R, S, T);
- l'offset di ogni fase (in gradi) che misura di quanto una singola fase si discosta dal suo valore standard di riferimento;
- l'ascissa del conduttore (cioè il suo scostamento dall'asse della linea).

Dati geometrici in ingresso

È possibile considerare fino a 5 campate comunque orientate rispetto ad una direzione presa come riferimento (l'asse *Y*); una volta immessi i dati per più campate, il programma determina la campata centrale automaticamente come l'intermedia fra quelle che la precedono e la seguono e a questa assegna il valore di coordinata Y=0.

Per ogni campata e per ogni conduttore devono essere specificati:

- la lunghezza della campata;

- la distanza dal traliccio di sinistra del punto minimo della catenaria lungo cui si dispone il conduttore;
- l'altezza dal suolo del punto minimo;
- l'altezza dal suolo del punto di attacco del conduttore sul sostegno di sinistra;
- l'altezza dal suolo del punto di attacco del conduttore sul sostegno di destra;
- l'inclinazione in gradi della campata rispetto ad una direzione presa come riferimento.

Presentazione dei dati in output

È possibile visualizzare piani (lungo X, Y, Z) del profilo trasversale del campo (in modulo e per ciascuna componente) e mappe bidimensionali, e salvare i dati in una tabella Excel.



Requisiti software e hardware

È richiesto il sistema operativo Windows 98 o NT.

Osservazioni e commenti

Il calcolo non tiene conto delle funi di guardia perché non essendo percorsi da corrente non contribuiscono al campo magnetico generato dai conduttori attivi.

Nell'inserimento dati non vengono accettate quote negative o nulle.

Nell'apertura di file salvati in precedenza si sono presentati problemi riguardanti la perdita delle cifre decimali.

Non è possibile il calcolo nel caso di più linee indipendenti (ossia aventi i conduttori sospesi a tralicci distinti).

A causa dell'approssimazione utilizzata nell'implementazione del programma (elementi finiti) il campo non viene calcolato in un punto, ma in un volume, e a tutti i punti entro quel volume viene assegnato lo stesso valore di campo.

6.3 - CAMPI

CAMPI è un programma per il calcolo del campo elettrico e dell'induzione magnetica generati da linee elettriche, sviluppato dal Prof. Daniele Andreuccetti per l'Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara" del Consiglio Nazionale delle Ricerche di Firenze. La versione qui analizzata, risalente al maggio 2002, è la 4.1. Riferimenti al sito http://www.iroe.fi.cnr.it/pcenmi/prog1.htm.

Metodo di calcolo

L'algoritmo di calcolo impiegato fa uso del seguente modello semplificato:

- tutti i conduttori costituenti la linea (sia quelli attivi che le funi di guardia) sono considerati rettilinei, orizzontali, di lunghezza infinita e paralleli tra di loro;
- i conduttori sono considerati di forma cilindrica con diametro costante; nel caso di conduttori a fascio, si suppone che la distanza tra i singoli subconduttori a uguale potenziale sia piccola rispetto alla distanza tra i conduttori a diverso potenziale; si suppone inoltre che tutti i subconduttori siano uguali tra di loro e che, in una sezione normale del fascio, i loro centri giacciano su una circonferenza; in base a queste ipotesi, si sostituisce al fascio di subconduttori un conduttore unico di opportuno diametro equivalente;
- la tensione e la corrente su ciascun conduttore attivo sono considerati in fase tra di loro;
- la distribuzione della carica elettrica sulla superficie dei conduttori è considerata uniforme;
- il suolo è considerato piano e privo di irregolarità, conduttore dal punto di vista elettrico e trasparente dal punto di vista magnetico;
- viene trascurata la presenza dei tralicci o piloni di sostegno, e di qualunque oggetto si trovi nell'area interessata.

Tali condizioni permettono di ridurre il calcolo ad un problema piano, poiché la situazione è sostanzialmente la stessa su qualunque sezione normale alla linea.

L'induzione magnetica B generata da n conduttori filiformi, numerati da 0 a (*n*-1), può essere calcolata con l'espressione:

$$\vec{B} = -\frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{k=0}^{n-1} \int_{C_k} \frac{I}{r^3} \vec{r} \times \vec{dl}$$
6.1

Le ipotesi adottate consentono di eseguire l'integrazione ed ottenere l'espressione usata per il calcolo dell'induzione magnetica (si è preso l'asse Z nella direzione dei conduttori):

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{i_k \vec{z} \times (Q - P_k)}{|Q - P_k|^2}$$
6.2

dove i_k è la corrente sul conduttore C_k .

Sistema di riferimento

Si fa riferimento ad un sistema di coordinate *XY* sul piano della sezione normale alla linea (cioè la sezione generata da un piano verticale ortogonale all'asse longitudinale della linea passante per i punti dove si vuole effettuare il calcolo) avente asse *X* orizzontale passante per il conduttore più basso della linea ed asse *Y* coincidente con l'asse di simmetria verticale della linea, se esistente, o altrimenti con l'asse di simmetria verticale dei piloni di sostegno.

Regione di campionamento

Per la regione entro cui si può calcolare il campo possono essere effettuate diverse scelte e per ognuna di esse cambiano i dati di ingresso. Le possibili scelte e gli input sono:

- lungo un segmento parallelo al suolo (distanza iniziale e finale dall'asse della linea, altezza costante dal suolo, numero di intervalli di campionamento);

- lungo un segmento verticale (altezza iniziale e finale dal suolo, distanza dall'asse della linea, numero di intervalli di campionamento);
- un punto singolo (distanza dall'asse della linea, altezza dal suolo);
- un punto singolo riferito al livello del mare (quota s.l.m. del conduttore più basso della linea, quota s.l.m. del terreno in corrispondenza dell'asse della linea, quota s.l.m. del terreno in corrispondenza del punto, distanza lungo un piano orizzontale tra la retta verticale passante per il punto e l'asse della linea).

Dati elettrici in ingresso

Possono essere gestiti fino a 60 conduttori; deve essere specificato il numero complessivo di conduttori (attivi o di guardia) e per ogni conduttore deve essere inserita:

- tensione efficace tra conduttore e terra;
- corrente efficace;
- fase della tensione (supposta uguale a quella della corrente: 0°, +120°, -120°).

Dati geometrici in ingresso

È possibile considerare una sola campata alla volta. Occorre specificare:

- raggio del conduttore (o raggio equivalente, nel caso di conduttori a fascio);
- ascissa e ordinata del punto in cui il conduttore interseca la sezione normale alla linea;
- altezza da terra del centro del conduttore più basso;
- pendenza del terreno;
- quota della struttura della linea.

<u>Opzioni</u>

Può essere applicato anche al calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da elettrodotti interrati, come pure da sistemi di alimentazione di filovie, tramvie e ferrovie funzionanti in corrente continua o in corrente alternata.

La modalità BATCH è utile per semplificare e velocizzare i calcoli nei casi in cui si è interessati ai valori di induzione magnetica generati da un sistema di elettrodotti in un unico punto prefissato, ma per numerose diverse combinazioni di corrente sui conduttori delle linee interessate.

Presentazione dei dati in output

Esistono diverse opzioni con cui è possibile salvare ed esportare i risultati:

- solo testo;
- solo grafico (profilo di campo con la distanza dall'asse della linea o con la quota);
- solo file (di testo);
- testo e file;
- grafico e file.

Nei punti di interesse vengono calcolati il valore efficace dell'intensità di campo elettrico in V/m e il valore efficace dell'intensità dell'induzione magnetica in μ T. I campi possono essere calcolati nei modi definiti nella <u>Regione di campionamento</u>.

Linguaggio di programmazione

Il programma è stato sviluppato in Borland Turbo C++, nella versione 3.0, ed utilizza un pacchetto di procedure per il calcolo vettoriale diretto sviluppate dall'autore. Per la realizzazione dell'interfaccia utente si è fatto uso del pacchetto di pubblico dominio TCU versione 3.2, scritto da Karl Keyte dell'ESOC.

Requisiti software e hardware

CAMPI lavora in ambiente MSDOS o DRDOS e nella finestra DOS di Windows, e richiede una scheda grafica EGA o VGA. Un coprocessore matematico accelera di un fattore 7 l'esecuzione dei calcoli.

Osservazioni e commenti

Per quanto riguarda la corrispondenza tra i valori calcolati con le misure, occorre tenere presente che il programma fornisce valori tanto più vicini alla "realtà" quanto più la situazione è vicina al modello semplificato adottato per il calcolo; in altri casi la divergenza può anche essere considerevole. Una situazione abbastanza tipica è che fornisca una stima superiore di un $10\div20\%$ rispetto ai valori misurati.

6.4 - SteMa 1.2

Stema è un programma di studio e mappatura dei valori di campo elettromagnetico prodotto da elettrodotti sviluppato da Euronia e giunto alla release 1.86 (al 05/02/03). Riferimenti al sito http://www.euronia.it.

Metodo di calcolo

Basa le proprie routine di calcolo su algoritmi simili a quelli proposti nella Norma CEI 211-4 "Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche" per determinare i valori efficaci delle grandezze: il campo elettrico è calcolato con il metodo delle immagini, l'induzione magnetica risolvendo la legge di Biot-Savart, rappresentando i vari elementi percorsi da corrente come segmenti rettilinei.



Sistema di riferimento

L'origine degli assi coincide con la base del primo traliccio, e vengono posti:

- l'asse *X* ortogonale alla linea e al primo traliccio;
- l'asse *Y* coincidente con l'asse di un traliccio;
- l'asse Z lungo la linea.

Regione di campionamento

I calcoli vengono effettuati in piani perpendicolari all'asse della linea.

Dati elettrici in ingresso

Vanno specificate la tensione (i valori normalizzati possono essere 132, 220 o 380 kV), la corrente circolante e le fasi. Queste sono espresse in gradi, e nel caso di correnti simmetriche i valori sono 0°, 120° e 240°. Nel caso di correnti squilibrate si deve introdurre lo sfasamento reciproco a partire dai dati dell'ente gestore (che fornisce potenza attiva e reattiva).

Si possono introdurre fino a 20 conduttori e 10 funi di guardia.

Dati geometrici in ingresso

L'utente deve specificare:

- il passo di calcolo;
- la distanza tra due tralicci;
- le altezze da terra al punto di sospensione dei singoli conduttori e delle funi e la loro distanza reciproca;
- i parametri di tesatura;
- il dislivello tra i tralicci;
- lo spanning (la circonferenza che interessa tutti i sub-conduttori costituenti un unico conduttore equivalente). È quindi definito dal diametro della circonferenza che interessa tutti i sub-conduttori e dal numero di sub-conduttori costituenti un unico conduttore equivalente. Questi dati si usano nel caso di conduttori trinati (o conduttori multipli), o a fascio.

<u>Opzioni</u>

_





È uno dei software dotati di più caratteristiche opzionali:

- possibilità di spostare gli elementi della linea tramite mouse;
- analisi applicabili anche nel caso di linee sotterranee;
- valutazione delle soluzioni da proporre per un eventuale risanamento, tramite la possibilità di introdurre ingombri architettonici;
- esportazione ed importazione di database di tipo PARADOX (interfacciabile con altri strumenti tramite ODBC);
- possibilità di collegamento dei client ad un fileserver contenente un database unico.

Presentazione dei dati in output



È possibile salvare i risultati come fogli di calcolo Excel ed immagini WMF di sezioni di campi ortogonali agli assi della linea, visualizzazione 3D del campo ad una certa altezza, del profilo della linea e di superficie limite di campo (si vedano le figure adiacenti).



Requisiti software e hardware

È richiesto il sistema operativo Windows.

Osservazioni e commenti

Non esegue il calcolo con strutture complesse con incroci.

6.5 - LINATCTN

Questo software è stato sviluppato dalla sezione di Ivrea dell'ARPA Piemonte.

Sistema di riferimento

Si fa riferimento ad un sistema di coordinate *XYZ*, in cui l'asse *X* è lungo l'asse longitudinale della linea, l'asse *Y* è diretto lungo l'asse di simmetria verticale della linea e l'asse *Z* è orizzontale sul piano trasversale ortogonale alla linea.

Regione di campionamento

Possono essere effettuate 2 scelte, con input leggermente diversi:

- lungo un piano trasversale alla linea ortogonale al suolo (quota iniziale e finale dal suolo, numero di intervalli di campionamento, distanza dall'asse della linea);
- lungo un segmento verticale (altezza iniziale e finale dal suolo, numero di intervalli di campionamento, distanza dall'asse della linea).

Dati elettrici in ingresso

Possono essere gestite, alternativamente, linee a singola o a doppia terna. Occorre specificare per ogni linea la corrente efficace e la fase dei conduttori $(0^\circ, +120^\circ, -120^\circ)$.

Dati geometrici in ingresso

È possibile considerare una sola campata alla volta. Occorre specificare:

- larghezza della campata;
- dislivello tra il palo sinistro e il destro;
- quota del cavo più basso del palo sinistro;
- quota del cavo più basso del palo destro;
- quota del minimo dalla base del palo più basso;
- configurazione reciproca dei cavi;
- distanze (Z, Y) reciproche dei cavi.

Presentazione dei dati in output

Per ognuno dei passaggi viene creato un file ASCII, direttamente modificabile senza dover rieseguire tutte le procedure dall'inizio per modificare solo alcuni dati.

Requisiti software e hardware

È richiesto un sistema operativo DOS oppure Windows.

6.6 - EFC 400

EFC-400 è un software per il calcolo dei campi elettrico e magnetico generati da linee ad alta tensione giunto alla versione 5.03 (build 2162) nel 2003, sviluppato dalla Narda Safety Test Solutions per la Wandel & Goltermann. Riferimenti al sito http://www.narda-sts.de.

Metodo di calcolo

Esegue il calcolo tridimensionale di intensità, valori di picco e componenti del campo magnetico usando il metodo di Biot-Savart per sorgenti di campo da 0 a 500 Hz. Il campo elettrico è calcolato usando il metodo della carica equivalente considerando gli effetti dei tralicci, del terreno e delle costruzioni.

Entrambi sono calcolati lungo linee rette o per ogni superficie nello spazio.

Sistema di riferimento

Si definisce un sistema di riferimento ortogonale *XYZ*, in cui l'asse *Z* ha la direzione degli assi dei tralicci.

Regione di campionamento

Esegue il calcolo del campo su linee o superfici ortogonali agli assi del sistema.

Dati elettrici in ingresso

Vanno definite correnti, tensioni e relative frequenze, e le fasi dei conduttori (in gradi).

Dati geometrici in ingresso

Per i conduttori i parametri da specificare sono:

- coordinate del punto di patenza del conduttore;
- coordinate del punto d'arrivo;
- altezza a metà campata.
- Per i tralicci:
- coordinate;
- altezza;
- dimensioni della base;
- angolo con l'asse *X*;
- numero di sbracci.

I tralicci vengono creati scegliendo un modello dalla libreria standard ed inserendo le coordinate. Si possono specificare:

- fino a 500 tralicci e 50 conduttori per traliccio;
- funzioni per modificare, spostare e ruotare la geometria dei conduttori per cammini completi;
- simulazione di costruzioni (fino a 500);
- input di profili del terreno (dati di altezze assoluti o relativi), importazione di mappe in formati DXF, PCX e JPEG.



Si inseriscono infine i parametri relativi ai conduttori:

- numero di conduttori;
- distanza tra i conduttori;
- angolo di rotazione del cavo;
- sezione del conduttore;
- spessore dell'isolante.

<u>Opzioni</u>

Può calcolare la distribuzione di campo da:

- cavi ad alta tensione sospesi ed interrati;
- stazioni di commutazione interne ed esterne;
- stazioni di trasformazione ed installazioni elettriche;
- linee ferroviarie e tranviarie di superficie;
- percorsi sotterranei;
- reti elettriche su navi ed aerei.

Sono presenti librerie di elementi predefiniti, che possono essere combinate ed ampliate dall'utente per ottenere configurazioni più complesse.

Supporta l'integrazione di profili di terreno in formati vettoriale o raster e fornisce funzioni per ulteriori analisi di dati cartografici. Le intensità di campo sono calcolate e visualizzate in base all'attuale topografia.

Può lavorare come applicazione di rete.

Esiste infine la possibilità di eseguire operazioni in modalità batch, compressione dei dati, configurazione definibile dall'utente.



Presentazione dei dati in output

Esporta i risultati in formati DXF, ASCII, bitmap, WMF e file di Excel relativamente a:

- diagrammi lungo gli assi X, Y e Z;
- presentazione in linee equipotenziali 2D;
- diagrammi in superficie 3D;
- esportazione come superficie vettoriale colorata tridimensionale.



Figura 6.10 - Visualizzazione del campo di induzione magnetica in sezione verticale (a sinistra) e proiettato sulla carta tecnica (a destra).

Requisiti software e hardware

Richiede un processore 486 DX, 8 MB di RAM, 50 MB di spazio libero su disco e un sistema operativo Windows.

Osservazioni e commenti

La versione non commerciale fornisce risultati volutamente errati e consente solo il calcolo di configurazioni particolarmente semplici.

6.7 - Interconfronto

Si rende a questo punto necessario un lavoro di confronto tra i vari software dal punto di vista operativo per valutarne la facilità d'uso, e una comparazione con misure ottenute sul campo per verificarne l'attendibilità come strumenti predittivi.

È stato quindi svolto un lavoro in due passi: dapprima sono stati confrontati i risultati forniti dai vari software relativamente casi di cui esistono i riferimenti sperimentali, quindi il confronto con tali dati.

Non sono stati utilizzati Stema ed EFC-400, programmi commerciali di cui non sono liberamente a disposizione versioni integralmente funzionanti.



Dalla prima analisi emerge la coerenza dei risultati ottenuti dai software previsionali, come si evince dalla Figura 6.11: le discrepanze tra i valori di induzione magnetica non superano il 10%, come peraltro già evidenziato precedentemente in studi condotti dalle Agenzie Regionali. Le differenze percentuali più rilevanti si ottengono per i valori più bassi, dove diventano significativi gli arrotondamenti effettuati dall'algoritmo di calcolo. Va tenuto presente che nel caso di software (quali CAMPI e LINATCTN) nei quali non si tiene conto dell'andamento della catenaria, prima di effettuare il calcolo si rende necessario determinare l'altezza dei conduttori al di sopra del punto di misura, altrimenti si ottengono risultati che si discostano dai valori sperimentali anche del 100%.

Quindi, per verificare la validità dei dati calcolati, sono stati confrontati con risultati ricavati in misure eseguite nei pressi di linee singole, ove il valore dell'induzione magnetica risulta proporzionale all'intensità di corrente circolante e non vi sono problematiche legate a sfasamenti tra correnti di più linee: in tali casi si può valutare immediatamente il grado di coerenza tra i valori misurati e le previsioni dei software, ottenute a partire dai dati forniti dall'ente gestore.



Con l'ausilio del database degli elettrodotti è stato possibile individuare sulla CTRN due linee singole campione a 380 kV. In Figura 6.12 viene mostrata la linea 21347 Planais-Salgareda presso il sostegno 142, mentre in Figura 6.13 è rappresentata la linea 21356 Planais-Redipuglia in prossimità del sostegno 160: i percorsi di misura sono indicati dalle linee rosse, gli elettrodotti da quelle nere. Sono state eseguite due misure di profilo dell'induzione trasversalmente alle linee utilizzando il sistema di misura EMDEX II nella versione LINDA, in cui lo strumento palmare viene fissato su un supporto mobile munito di odometro. Nelle Figure 6.14 e 6.15 viene mostrato il confronto per il profilo dell'induzione magnetica tra le misure ed il calcolo.

Sui dati è stato condotto uno studio del $\tilde{\chi}^2$ assumendo un errore sperimentale del 3%, come riportato nel manuale d'uso dello strumento, al quale viene sommata in quadratura la fluttuazione percentuale di corrente, ricavabile dai dati forniti dall'ente gestore. Nel caso della linea 21347, per un valore di corrente di 130 ± 50 A, è stato ottenuto il valore $\tilde{\chi}_{84}^2 = 1.0$; nel caso della linea 21356, per un valore della corrente di 1110 ± 90 A, $\tilde{\chi}_{200}^2 = 0.6$. In nessun caso il valore del $\tilde{\chi}^2$ ottenuto comporta il rigetto dell'ipotesi di consistenza fra le misure ed il calcolo, fissata la soglia al 5%.





6.8 - Carenze dei software: sfasamenti e configurazioni complesse

Per quanto i software analizzati forniscano, nella loro configurazione prevista o con opportuni accorgimenti, predizioni in accordo con le misure, quasi tutti presentano dei limiti non superabili: non consentono di valutare campi prodotti in configurazioni particolari (tipicamente da linee distinte intersecantesi), non è possibile né tener conto efficacemente della variazione di fase in una doppia linea, né integrare i calcoli con dati propri di ciascun caso, quali le variazioni di fase tra le correnti in presenza di più linee, né operare in modalità batch, effettuando ciclicamente il calcolo su set di dati riguardanti la storia della linea. Inoltre non sono disponibili i codici sorgente di tali software, onde intervenire opportunamente apportando le modifiche necessarie.

Per questi motivi si rende necessario sviluppare un software in proprio, prendendo spunto da quelli studiati per quanto riguarda l'algoritmo di calcolo e la tipologia di dati in output. Si farà riferimento al database degli elettrodotti sviluppato dall'ARPA Friuli Venezia Giulia (sinora solo per la provincia di Udine) per quanto concerne l'inserimento dei dati elettrici e geometrici disponibili, e si terrà conto della possibilità di migliorare il codice sorgente di volta in volta per risolvere ogni specifico problema.

6.9 - Bibliografia

- [6.1]. Norma Italiana CEI 211-4, luglio 1996, Prima Edizione, Fascicolo 2840, "Guida ai metodi di calcolo dei campi elettrici e magnetici generati da linee elettriche"
- [6.2]. Roberto Turri, Maurizio Albano, "Calcolo previsionale dei campi elettromagnetici generati da elettrodotti", Associazione Elettrotecnica ed Elettronica Italiana, Padova 2000
- [6.3]. Elena Gambato, Maria Rosa, "Studio dei modelli per il calcolo dei campi elettromagnetici generati da elettrodotti", Direzione Tecnico Scientifica ARPAV, Venezia 2000
- [6.4]. D. Manco, L. Bruzzi, A. Soloni, D. Valbonetti, S. Fabbri, S. Violanti, "Electric and magnetic fields generated by AC power lines: an application of advanced modelling tools in order to predict exposure levels", Radiation Protection Dosimetry, 97(4), pp 359-362 (2001)
- [6.5]. G. Licitra, M. Magnoni, G. D'Amore, A. Poggi, S. Adda, M.C. Losana, A. Jacoponi, T. Gabrieli, "Rassegna dei modelli per il rumore, i campi elettromagnetici e la radioattività ambientale", ANPA, RTI CTN_AGF 1/2001

- [6.6]. G. D'Amore, L. Anglesio, S. Adda, A. Bonino, G. Licitra, F. Francia, "Standard per la realizzazione delle banche dati delle sorgenti di inquinamento elettromagnetico (alte e basse frequenze)", ANPA - Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, Dipartimento Stato dell'Ambiente, Controlli e Sistemi Informativi, RTI CTN AGF 4/2001
- [6.7]. G. Licitra, N. Colonna, C. Chiari, "Evaluation of long-term exposure to the magnetic field produced from power lines", Radiation Protection Dosimetry, Vol. 97, No 4, pp. 401-404 (2001)
- [6.8]. Daniele Andreuccetti, "CAMPI Un programma per il calcolo del campo elettrico e dell'induzione magnetica generati da linee elettriche – Manuale programma CAMPI versione 4.1", Istituto di Fisica Applicata "Nello Carrara", Consiglio Nazionale delle Ricerche, Firenze, maggio 2002
- [6.9]. "SteMa, Studio e mappatura dei campi elettromagnetici generati da elettrodotti Versione 1.2. Guida all'uso"
- [6.10]. Silvia Violanti, "Cem nelle aree urbane, a Bologna uno studio per valutare i campi a basse frequenze", ARPA Rivista N. 1, ARPA Emilia-Romagna, Gennaio-Febbraio 2003
- [6.11]. Benes M., Comelli M., Drigo A., Giovani C., Montanari F., Villalta R., "Strumenti per una mappatura degli elettrodotti: database, software di simulazione e monitoraggio", ARPA Friuli Venezia Giulia, 2003

Il nuovo programma¹: Phidel 1.0

7.1 - Premessa

Come si è visto nel precedente capitolo, per un'analisi approfondita del problema è necessario sviluppare uno strumento informatico adeguato. Nel seguito verranno analizzati dapprima i dati geometrici a disposizione e quelli elettrici forniti di volta in volta dall'ente gestore, per poi passare ad una descrizione delle funzionalità operative del software.

7.2 - I dati geometrici: integrazione dal catasto degli elettrodotti

La "Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici" (Legge 22 febbraio 2001, n. 36) istituisce il "*catasto nazionale delle sorgenti fisse e mobili dei campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici e delle zone territoriali interessate, al fine di rilevare i livelli di campo presenti nell'ambiente*" (art. 4, comma 1, lettera *c* ed art. 7), definendo inoltre le competenze delle regioni, delle province e dei comuni (art. 8).

Si tratta di definire le specifiche tecniche per la realizzazione concreta e la successiva gestione dei catasti elettromagnetici regionali (cEr) e del catasto elettromagnetico nazionale (CeN), nonché delle modalità di consultazione, aggiornamento e interscambio dei dati.

Il catasto elettromagnetico è costituito da una base di dati informatizzata, contenente le informazioni relative alla localizzazione geografica ed alla caratterizzazione fisica delle sorgenti di campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici sul territorio nazionale.

La scelta dei dati da inserire in un programma di nuova realizzazione non è univoca. Si presentano diverse alternative sia per quanto riguarda il sistema di riferimento (coordinate Gauss-Boaga o sistema di riferimento relativo ad un elemento della linea in questione) che i parametri dei cavi (parametro di tesatura o distanza del franco minimo dal terreno). La scelta è sicuramente vincolata al tipo di dati forniti dall'ente gestore, ma tiene conto anche delle linee guida fornite a livello nazionale dall'APAT, a partire dalle quali è iniziata la realizzazione di un database regionale (che per ora copre il territorio della Provincia di Udine) e delle caratteristiche proprie dei software analizzati nella sezione precedente.

Nella catalogazione degli elettrodotti ad alta ed altissima tensione della Provincia di Udine, i tracciati di tutte le linee sono stati georeferenziati sulla Carta Tecnica Regionale Numerica² (CTRN, v. Figura 7.1) e quindi organizzati in due database, uno per i sostegni ed uno per le campate, i cui campi sono riportati nelle Tabelle 7.1 e 7.2.

¹ Il nome deriva dall'implementazione nel software della differenza di fase ($\Delta \varphi$, DELta PHI), con un anagramma per non ricadere nel già abusato Delphi.

² Le disposizioni in materia di cartografia regionale e di sistema informativo territoriale cartografico (SITC) sono stabilite dalla Legge Regionale n. 63 del 27/12/1991 del Friuli Venezia Giulia.



Figura 7.1 - Georeferenziazione delle linee su CTRN.

Campo	Descrizione					
Gestore	Gestore della linea cui appartiene il traliccio					
Codlinea	Codice della Linea cui appartiene il traliccio					
Linea	Nome della Linea cui appartiene il traliccio					
Terna_ass	Codice della terna associata (sostenuta dal medesimo traliccio)					
Tratto	Indicazione del tratto di appartenenza del sostegno					
Provincia	Provincia nel cui territorio insiste il sostegno					
Comune	Comune nel cui territorio insiste il sostegno					
Ctrn	Carta Tecnica Regionale Numerica in cui si georeferenzia il sostegno					
Tensione	Tensione nominale della linea					
Numpic	Identificativo del sostegno lungo la linea, attribuito dal Gestore					
X_coord	Coordinata Nord del sostegno (sistema Gauss - Boaga)					
Y_coord	Coordinata Est del sostegno (sistema Gauss - Boaga)					
Quota_s.l.m.	Quota sul livello del mare della base del sostegno [m], desunta dai profili altimetrici della linea forniti dal Gestore					
Tipo_palo	Tipo sostegno, riconosciuto dal Gestore					
Armamento	Tipo di armamento					
Min	Quota s.l.m. d'attacco fune minima [m]					

Med	Quota s.l.m. d'attacco fune media [m]				
Max	Quota s.l.m. d'attacco fune massima [m]				
Fm_h	Quota s.l.m. del punto di minimo della catenaria [m]				
Note	Note				
Fm_dist	Distanza dal sostegno del punto di minimo della campata precedente [m]				
Corr_media	Corrente media annua [A]				
Percentile	95° percentile del valore di corrente [A]				
Cod_cond	Codice caratterizzante il conduttore				
T_c	Parametro di tesatura (T/P o C) [m]				
Terna_ass	Terna associata nei tratti in doppia terna				
Elevation	Quota s.l.m. del sostegno desunta dalla CTRN [m]				
S_min	Sbraccio dell'attacco del conduttore più basso [m]				
S_med	Sbraccio dell'attacco del conduttore medio [m]				
S_max	Sbraccio dell'attacco del conduttore più alto [m]				
Catena	Lunghezza dell'isolatore (nulla se in <i>ammarro</i>) [m]				
Dy_maxmin	Differenza di quota fra l'attacco della fune minima e la massima [m]				
H_min	Altezza della mensola minima [m]				
H_med	Altezza della mensola media [m]				
H_max	Altezza della mensola massima [m]				
H_fdg	Altezza della fune di guardia [m]				
Angle	Angolo di orientazione del traliccio [°] desunto dalla CTRN				
Mensole	Tipo di mensolatura				
Tabella 7.1 - Cai	mpi presenti nel database relativo ai tralicci.				

Campo	Descrizione
IdCamp	Identificativo univoco della campata nel database
Pic_prec	Identificativo, riconosciuto dal Gestore, del sostegno precedente la campata
Pic_succ	Identificativo riconosciuto dal Gestore, del sostegno seguente la campata
Lunghezza	Lunghezza della campata [m]
Tabella 7.2 – Car	npi presenti nel database relativo alle campate.

I dati relativi a tralicci e campate sono forniti in parte su supporto informatico, sotto forma di file DWG (v. Figura 7.2), in parte ancora in formato cartaceo.

Tra i diversi gestori di linee si è scelto di aderire, per quanto possibile, alle convenzioni adottate da GRTN, l'unico che gestisca linee ad altissima tensione in regione.





7.3 - I dati elettrici



Figura 7.3 - File DWG con i dati della linea (in questo caso la Planais-Salgareda a 380 kV) fornito dall'ente gestore (E-NEL).

Tutte le linee a 220 kV (per un'estensione totale di 249.6 km) e a 380 kV (165.6 km) presenti sul territorio della Regione Friuli Venezia Giulia sono patrimonio della società TERNA S.p.A. e sono gestite da GRTN (Gestore Rete Trasmissione Nazionale). Per le linee a queste tensioni nominali i dati elettrici vengono forniti su file di foglio di calcolo (o, talvolta, su supporto cartaceo) come nell'esempio in Tabella 7.3: sono riportati i valori di tensione (concatenata), potenza attiva e reattiva rilevati istantaneamente ogni 15 minuti con un'incertezza del 3%.

Il valore efficace della corrente di linea è ricavato dagli altri, secondo la relazione 3.26.

L'ENEL fornisce inoltre una documentazione, in formato DWG (v. Figura 7.3) o cartaceo, dalla quale è possibile risalire disposizione delle fasi dei conduttori, un dato essenziale nella determinazione del campo prodotto da una doppia linea. La notazione adottata in questo caso per definire le fasi è (4, 8, 12) equivalente alle (R, S, T) e (0, 120, 240) richieste dai software di calcolo.

In Appendice 7.1 viene riportata la schematizzazione delle linee AT ed AAT come raffigurate sull'Atlante delle linee.

		Tens. di Sbarra	Linea a 380 kV	′ n° 3443 Redipugli	a - Monfalcone
		kV	P (MW)	Q (MVAR)	I (A)
28/08/2001	0.00	394,0	-300	-32,4	443
28/08/2001	0.15	394,6	-300	-25,2	441
28/08/2001	0.30	392,9	-300	-38,4	445
28/08/2001	0.45	394,0	-300	-31,2	442
28/08/2001	1.00	393,5	-300	-37,2	444
28/08/2001	1.15	393,5	-300	-36,0	444
28/08/2001	1.30	394,6	-298	-28,8	439
Tabella 7.3 – I	dati elettr	ici forniti da GRTN	ι.		

7.4 - Requisiti richiesti

Dopo aver analizzato - come esposto nel Capitolo VI - i programmi proposti da vari enti, e tenendo conto delle esigenze dovute ai dati ed agli strumenti a disposizione, le caratteristiche che si richiedono ad un software "ideale" sono diverse, riassumibili in vari punti:

- salvataggio di dati su file di testo, facilmente visualizzabili ed eventualmente modificabili;
- modularità del software: possibilità di operare a passi intermedi, in modo da poter intervenire sui dati senza dover iniziare da capo l'intero procedimento;
- compatibilità con i dati a disposizione (soprattutto il catasto degli elettrodotti e i file relativi ai dati elettrici);
- rapidità di esecuzione, anche a scapito di aspetti inessenziali presenti in altri software (visualizzazioni tridimensionali, salvataggio in formati proprietari o tabelle Excel, calcolo di dati non richiesti dalla normativa, interfaccia grafica), tenendo conto delle risorse a disposizione (software GIS);
- minore dipendenza possibile da specifici requisiti di sistema;
- calcolo del campo efficace in punti (non volumi), per il confronto con misure sperimentali;
- per minimizzare le approssimazioni geometriche si deve tener conto di tutto ciò che caratterizza la forma della catenaria (dipendenza da parametro di tesatura, coefficienti di elasticità dei materiali costituenti e temperatura), evitando il ricorso ad approssimazioni;
- esecuzione senza installazione in locale;
- possibilità di elaborare vettori di dati esterni relativi a fasi e correnti (o, in maniera del tutto equivalente, tensioni e potenze) per determinare l'evoluzione storica del campo senza ricorrere a successive numerose esecuzioni, il che renderebbe di fatto improponibili i tempi di lavoro;
- calcolo del campo in un punto, un percorso rettilineo o un piano di interesse, con origine, dimensioni, direzioni e passo di campionamento specificabili.

Queste analisi preliminari hanno portato all'elaborazione del progetto descritto nel paragrafo successivo. Attualmente l'unico requisito non soddisfatto è il calcolo della dipendenza dalla temperatura (per quanto il software sia stato predisposto allo scopo), trattandosi di un dato non rilevato sperimentalmente al momento delle misure, ma implementabile qualora se ne presenti la necessità.

7.5 - Il nuovo programma

Il software realizzato è diviso in tre distinte parti, inerenti:

- immissione dei dati;
- elaborazione;
- visualizzazione in ambiente GIS.

Ciascuna di queste, oltre ad assolvere un compito diverso, è stata sviluppata in un diverso linguaggio di programmazione, per motivi di praticità, velocità di esecuzione del codice, o semplicemente per necessità.

Uno schema riassuntivo con tutti i passaggi effettuati dal software è riportato in Appendice 7.2.

L'immissione dei dati

La parte preposta all'inserimento dei dati elettrici e geometrici è stata sviluppata in PHP, un linguaggio di scripting open source mirato alla programmazione web; è server-side, cioè gli script vengono eseguiti su lato server, dove l'output viene inviato al browser del client – generalmente in forma di file HTML. L'unico requisito software consiste (per l'utilizzo di PHP come scripting server-side) nell'installazione di un server web (nel caso in questione è stato utilizzato Apache), del modulo PHP e, ovviamente, di un browser.

Grazie alle potenzialità offerte dal linguaggio PHP, le pagine relative all'inserimento dei dati con i relativi campi vengono create dinamicamente di volta in volta, a seconda di quanto immesso dall'utente. La convenzione utilizzata per i dati da inserire prende spunto dallo studio effettuato sui vari software in circolazione, ma tiene conto soprattutto dello schema del catasto degli elettrodotti realizzato presso l'ARPA Friuli Venezia Giulia, e quindi dei dati direttamente a disposizione dell'Ente.

All'inizio l'utente inserisce il numero di linee del caso in esame. Quindi viene creata una pagina in cui, per ogni linea, ne va specificato il nome, il numero di cavi, la costante di tesatura ed il numero di tralicci. Nella pagina successiva, creata in base ai dati inseriti nella precedente, vanno specificate per ogni traliccio quota s.l.m. e coordinate Gauss-Boaga, oltre alle coordinate dei tralicci precedente e successivo a quelli presi in considerazione per il calcolo (servono a definire univocamente l'orientamento degli sbracci dei tralicci in esame). Per ogni cavo è necessario specificare:

- fase $(R, S \circ T)$;
- altezza del punto di sospensione;
- sbraccio (la distanza dall'asse del traliccio del punto di sospensione);
- catena (l'altezza del sostegno che regge il cavo, nel punto di sospensione, allo sbraccio del traliccio);



Infine, i dati da inserire una sola volta per l'intero progetto, che vanno immessi nell'ultima schermata:

- nome del progetto (utilizzato, assieme a data e ora d creazione, per generare un file di backup);
- temperatura;
- quota s.l.m. alla quale eseguire il calcolo;
- coordinate Gauss-Boaga relative al punto di origine del calcolo;
- numero di passi lungo ciascuna delle direzioni $x, y \in z$ (in modo da definire una griglia di punti);

- angolo relativo all'asse delle ascisse;
- angolo della pendenza del piano di calcolo rispetto al piano orizzontale xy;
- lunghezza del passo.

Al momento della conferma dei valori inseriti, per ogni campo viene effettuato un controllo che non consente di proseguire in presenza di valori mancanti o incompatibilità tra quanto atteso dal codice e quanto inserito dall'utente, che dovrà pertanto completare o correggere i dati.

Il PHP, essendo un linguaggio interpretato, è lento e quindi poco adatto all'esecuzione di grosse quantità di calcoli: dopo un periodo di tempo prefissato, tipicamente 30 secondi, si raggiunge il timeout per l'esecuzione di un singolo script e il server lo interrompe.

Di conseguenza viene utilizzato esclusivamente per inserire i dati e salvarli su un file di testo (chiamato "dati.txt"): questo può essere scaricato dall'utente (assieme al software di elaborazione vero e proprio) ed eventualmente modificato solo in alcuni parametri, per effettuare il calcolo di una configurazione simile (ad esempio con altri valori di corrente o con diversa disposizione delle fasi) senza dover ripetere la procedura di inserimento. Viene creata inoltre una copia di back-up personalizzata dei dati sul server, con nome del progetto, data e ora, in modo da poterli recuperare in qualunque momento.

L'elaborazione dei dati

La seconda parte del progetto, quella che consiste nell'elaborazione vera e propria (è l'implementazione di quanto esposto nel Capitolo IV), richiede maggiori risorse, ed è stata pertanto sviluppata in C, un linguaggio di programmazione che richiede la compilazione: ne consegue quindi una maggior efficienza e velocità di calcolo.

Al fine di ottimizzare il codice, sono risultate utili alcune considerazioni:

- l'utilizzo di puntatori consente di allocare tutta la memoria necessaria senza dover sovradimensionare quella relativa a ciascuna variabile. Con questa ottimizzazione, entro certi limiti il programma dispone di tutte le risorse;
- la complessità del codice e la memoria richiesta sono quadratiche nel numero di segmenti: aumentando la lunghezza del singolo segmento di un fattore 10, in prima approssimazione il tempo di calcolo e la quantità di memoria occupata diminuiscono di un fattore 100. Ciò può essere rilevante nel caso di calcoli relativi a configurazioni particolarmente complesse, ma va verificato che tale perdita di precisione non influisca eccessivamente sul risultato finale.

Il programma così ottenuto, chiamato Phidel 1.0, ricerca nella sua stessa directory il file "dati.txt", lo legge, ne elabora i dati e crea in output un altro file di testo ("risultato.txt"), il quale è costituito da una matrice di valori di coordinate Gauss-Boaga e di intensità efficace di campo di induzione magnetica sul piano definito dall'utente al momento dell'inserimento dati. Il calcolo del campo lungo un percorso desiderato avviene senza dover intervenire manualmente sulle coordinate dei punti di misura o sulla matrice in output, semplicemente specificando il punto di origine e l'angolo formato dallo spostamento con l'asse delle ascisse.

Qualora si riscontrassero problemi dovuti ad un'eventuale incompatibilità con un particolare sistema operativo (ad esempio una successiva versione di Windows che non mantenga la "compatibilità verso il basso"), questi sarebbero risolti con una semplice ricompilazione nel nuovo ambiente.

Controlli del software

Il programma esegue tre verifiche, che possono causare l'immediato termine dell'esecuzione, onde evitare errori nel procedimento; ad ognuna di queste corrisponde un messaggio d'errore specifico (v. Figura 7.6):

- all'apertura di "dati.txt", in modalità lettura;
- all'apertura di "risultato.txt", in modalità scrittura;
- per ogni punto in cui si effettua il calcolo, che non cada sul cavo.





La visualizzazione dei dati

I dati devono essere visualizzati tramite un software GIS (Sistema Informativo Geografico), in modo da potere sovrapporre graficamente i valori di campo alla Carta Tecnica. Un'opportuna rap-

presentazione grafica deve rendere evidente l'intensità di campo su una superficie piana definita in corrispondenza ai punti e alla quota di interesse.

Il file in output deve essere pertanto una matrice di dati compatibile con il programma GIS ArcView, che elabora il file "risultato.txt" e visualizza a monitor quanto richiesto (Figura 7.7, a sinistra, riferita alla linea 21356 a 380 kV).

Per poter eventualmente utilizzare il risultato in un programma di foglio di calcolo (quando $\varphi=0$: non ci sono rotazioni), per ottenere una visualizzazione tridimensionale, è possibile trasformare tale file attraverso un'utility appositamente creata, chiamata "GIS2x1s" (Figura 7.7, a destra).

Funzioni avanzate

Al programma sono state aggiunte funzionalità allo scopo di snellire alcune procedure di calcolo da parte dell'utente.



La prima consiste nella possibilità di specificare due angoli (v. Figura 7.8), uno rispetto all'asse delle z e l'altro rispetto a quello delle x, qualora si renda necessario calcolare valori di campo su piani inclinati, o più comunemente profili lungo percorsi in pendenza (v. Figura 7.9).

Attraverso tali dati, ricavabili facendo riferimento a quanto riportato su carta tecnica, è possibile tra l'altro ottenere i valori di induzione magnetica relativamente a piani verticali ortogonali alla direzione dei tralicci, in modo di ricavare le fasce di rispetto per i valori limite previsti dalla normativa.



È inoltre possibile riprodurre la storia di una doppia linea costituita da due linee distinte utilizzando un file di testo esterno contenente i valori di correnti e sfasamento relativo al variare del tempo (si veda la Figura 8.8, nel Capitolo successivo).

7.6 - Test di validazione e controllo delle approssimazioni

Campo di un segmento

Una prima verifica della validità dei risultati forniti dal software è data dalla riproduzione del campo relativo al conduttore rettilineo di lunghezza finita, di cui si è discusso nel Capitolo IV. I dati ottenuti dal programma sono visualizzati nella figura sottostante (a sinistra), e vanno confrontati con quelli di Figura 4.7.



A tal proposito è stato calcolato lo scarto relativo tra i due casi (a destra, in figura): tale differenza è sempre inferiore allo 0.03%, e lo scarto percentuale maggiore si ha per i valori di campo più bassi (in questo caso 0.07μ T), quando diventano più importanti le approssimazioni dovute alle perdite di cifre significative per la precisione limitata delle variabili nel software. Si tratta di differenze non rivelabili da nessuno strumento di misura, in quanto anche la sensibilità migliore è inferiore di almeno tre ordini di grandezza a tali valori.



Risultato al variare della lunghezza del segmento

Per lunghezze del segmento vicine allo zero il calcolo tende al caso non approssimato. Ci si aspetta quindi un andamento asintotico, come quello effettivamente ottenuto visualizzato in scala semilogaritmica in Figura 7.11.

Per lunghezze inferiori al metro i tempi di calcolo si allungano sensibilmente, anche in caso di configurazioni semplici. Si può scegliere allora, in base al grafico, una lunghezza di 10 m, ove si nota iniziare un andamento costante. In tal caso il campo è sottovalutato, rispetto alla scelta di una lunghezza di 1 m, dello 0.03%.

L'andamento irregolare nel grafico, che presenta un minimo relativo a 80 m, è dovuto alla particolare configurazione scelta, in cui il punto di misura può trovarsi più o meno vicino ai segmenti che approssimano la campata al variare della lunghezza di questi.

Comportamento a piccole distanze dal cavo

Secondo quanto detto nel Capitolo IV, la quantità $\eta = \frac{\cos \alpha + \cos \beta}{\rho}$ per piccoli valori di ρ si comporta in maniera diversa a seconda che ci si avvicini al segmento $(\lim_{\rho \to 0} \eta = \infty)$, o ad un suo prolungamento esterno $(\lim_{\rho \to 0} \eta = 0)$. I risultati ottenuti dal software sono concordi con quanto previsto dalla teoria, come visualizzato nelle figure seguenti, che si riferiscono ai due casi.



Variazione dello sfasamento relativo

Considerando il caso di una doppia terna costituita da due linee distinte, il campo efficace in un punto deve essere una funzione periodica dello sfasamento relativo tra le correnti delle due linee.

Si consideri a tal proposito una linea costituita da tralicci il cui schema è riportato in Figura 7.13 (a sinistra), ove sono indicate le fasi dei conduttori e i due punti (in rosso) in cui è effettuato il calcolo. Nell'esempio le costanti di tesatura dei cavi riferiti alle due linee sono di 1600 m e 1700 m, e le correnti di 960 A e 1300 A, rispettivamente. Per semplicità è stata considerata una sola campata lunga 300 m.



Il risultato atteso è una funzione periodica dello sfasamento, che presenti un minimo a 360° a distanza infinita: infatti a piccole distanze il punto di misura risente della geometria dei conduttori (ossia della distanza da ciascuno di essi), mentre allontanandosi dalla sorgente la distanza relativa tra i cavi diventa trascurabile rispetto alle dimensioni del problema. Conformemente alle aspettative, tale andamento è riportato in Figura 7.13 (a destra).

La figura 7.14 visualizza il campo sia in funzione dello sfasamento che della distanza:



7.7 - Incertezza sul valore calcolato

Verrà ora ricavato l'ordine di grandezza dell'errore relativo da associare al campo calcolato.

L'induzione magnetica dipende dalla corrente e dalla geometria del sistema. Supponendo indipendenti³ tali quantità, si può fattorizzare:

$$B^{eff} = \frac{\mu_0}{4\pi} If(\vec{r})$$
 7.1

In prima approssimazione la parte relativa alla geometria del sistema tiene conto della distanza dai conduttori. L'errore sul campo calcolato si ricava allora da:

$$\sigma_B^2 = \left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right)^2 \left\{ \left[\frac{\partial}{\partial I} If(r)\right]^2 \sigma_I^2 + \left[\frac{\partial}{\partial r} If(r)\right]^2 \sigma_r^2 \right\} = \\ = \left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right)^2 \left\{ f^2(r)\sigma_I^2 + I^2 \left[\frac{\partial}{\partial r} f(r)\right]^2 \sigma_r^2 \right\}$$
7.2

$$\frac{\sigma_B^2}{B^2} = \frac{\sigma_I^2}{I^2} + \frac{\sigma_r^2}{f^2(r)} \left[\frac{\partial}{\partial r} f(r)\right]^2$$
7.3

Approssimando il caso a quello di un conduttore rettilineo infinito, si impone:

$$f(r) = \frac{1}{r} \tag{7.4}$$

$$\frac{\partial}{\partial r}f(r) = -\frac{1}{r^2} = -\frac{1}{r}f(r)$$
7.5

da cui:

$$\frac{\sigma_B^2}{B^2} = \frac{\sigma_I^2}{I^2} + \frac{\sigma_r^2}{r^2}$$
7.6

³ Si trascura l'effetto di dilatazione termica dovuto al carico, che causa un allungamento ed un conseguente abbassamento del conduttore.

$$\frac{\sigma_B}{B} = \sqrt{\frac{\sigma_I^2}{I^2} + \frac{\sigma_r^2}{r^2}}$$
7.7

L'errore su *r* dipende dalle incertezze su:

- coordinate dei tralicci;
- altezza dei tralicci;
- sbraccio;
- catena;
- tesatura;
- coordinate del punto di calcolo;
- quota del punto di calcolo;

che sono quantità tra loro indipendenti.

I dati geometrici sono conosciuti con un'approssimazione $\sigma_{GB} = 50$ cm per quanto riguarda le coordinate, gli altri con $\sigma_{geom} = 10$ cm (valori ottenuti dai dati forniti dal gestore). Per ricavare il termine relativo alla tesatura si fa riferimento a quanto detto nel paragrafo 4.2, e supponendo fluttuazioni termiche di ±20°C, si ha $\sigma_{tesatura} = 100$ m, che si traduce in un errore $\sigma_{fmin} = 45$ cm sulla quota del franco minimo, come si evince dai dati riportati in Tabella 7.4:

Costante di tesatura [m]	Altezza franco minimo [m]
1500	22.5
1600	23.0
1700	23.4

Variazione media di quota



Si trova $\Delta(x)$:

Va ora calcolata la variazione media di quota lungo tutta la campata, definita:

$$\overline{\Delta} = \frac{1}{L} \int_{0}^{L} \Delta(x) dx \qquad 7.8$$

come visualizzato in Figura 7.15, ove *L* è la lunghezza della campata e $\Delta(x)$ la variazione di quota alla generica coordinata *x*. Le curve utilizzate nel calcolo hanno rispettivamente equazione:

$$f_1(x) = b_1 + a_1 \cosh \frac{(x - x_0)}{a_1}$$
 7.9

$$f_2(x) = b_2 + a_2 \cosh \frac{(x - x_0)}{a_2}$$
 7.10

$$\Delta(x) = (b_1 - b_2) + a_1 \cosh \frac{(x - x_0)}{a_1} - a_2 \cosh \frac{(x - x_0)}{a_2}$$
7.11

⁴ I risultati sono stati ottenuti supponendo una campata simmetrica lunga 300 m, con una costante di tesatura di 1600 m definita a 40°C.

E si ricavano i coefficienti dalle condizioni al contorno, noti i punti di sospensione:

$$f_1(x_1 = 0) = z_1 = b_1 + a_1 \cosh\left(-\frac{x_0}{a_1}\right)$$
7.12

$$b_1 = z_1 - a_1 \cosh\left(-\frac{x_0}{a_1}\right)$$
 7.13

e analogamente:

$$b_2 = z_1 - a_2 \cosh\left(-\frac{x_0}{a_2}\right)$$
 7.14

da cui:

$$\Delta(x) = -a_1 \cosh\left(-\frac{x_0}{a_1}\right) + a_2 \cosh\left(-\frac{x_0}{a_2}\right) + a_1 \cosh\frac{(x-x_0)}{a_1} - a_2 \cosh\frac{(x-x_0)}{a_2}$$
7.15

e per il valor medio:

$$\overline{\Delta} = \frac{1}{L} \int_{0}^{L} \left[-a_{1} \cosh\left(-\frac{x_{0}}{a_{1}}\right) + a_{2} \cosh\left(-\frac{x_{0}}{a_{2}}\right) + a_{1} \cosh\left(\frac{x-x_{0}}{a_{1}}\right) - a_{2} \cosh\left(\frac{x-x_{0}}{a_{2}}\right) \right] dx =$$

$$= \frac{1}{L} \left\{ \left[-a_{1} \cosh\left(-\frac{x_{0}}{a_{1}}\right) + a_{2} \cosh\left(-\frac{x_{0}}{a_{2}}\right) \right] x - a_{1}^{2} \sinh\left(\frac{x-x_{0}}{a_{1}}\right) + a_{2}^{2} \sinh\left(\frac{x-x_{0}}{a_{2}}\right) \right\}_{0}^{L} =$$

$$= -a_{1} \cosh\left(-\frac{x_{0}}{a_{1}}\right) + a_{2} \cosh\left(-\frac{x_{0}}{a_{2}}\right) - \frac{2a_{1}^{2}}{L} \sinh\left(-\frac{x_{0}}{a_{1}}\right) + \frac{2a_{2}^{2}}{L} \sinh\left(-\frac{x_{0}}{a_{2}}\right)$$
7.16

ove si è utilizzato il fatto che il seno iperbolico è una funzione dispari.

Utilizzando i valori tipici:

- $a_1 = 1700 \text{ m}$
- $a_2 = 1600 \text{ m}$
- $x_0 = 150 \text{ m}$

-
$$L = 300 \text{ m}$$

si ottiene $\overline{\Delta} = 28$ cm.



A questo punto si può ricavare l'errore relativo alla parte geometrica, facendo riferimento alla Figura 7.16:

$$r = \sqrt{h^2 + d^2} \tag{7.17}$$

ove h è l'altezza del cavo dal suolo e d la distanza della sua proiezione al suolo dal punto di calcolo. Dalla propagazione degli errori:

$$\sigma_r^2 = \left(\frac{\partial r}{\partial d}\right)^2 \sigma_d^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial h}\right)^2 \sigma_h^2 = \frac{d^2}{r^2} \sigma_d^2 + \frac{h^2}{r^2} \sigma_h^2$$
7.18

essendo d ed h quantità indipendenti.

Errore sull'altezza

La quantità *h* dipende in maniera lineare da tre quantità tra loro indipendenti:

- altezza del tralicci;
- catena;
- franco verso terra, dipendente dalla tesatura. Si ricava immediatamente:

$$\sigma_h = \sqrt{\sigma_{altezza}^2 + \sigma_{catena}^2 + \sigma_{lesatura}^2 + \sigma_{quota \ relativa}^2} = 33 \,\mathrm{cm}$$
 7.19

utilizzando i valori:

- $\sigma_{altezza} = 10 \text{ cm}$
- $\sigma_{catena} = 10 \text{ cm}$
- $\sigma_{tesatura} = 28 \text{ cm}$
- $\sigma_{quota\ relativa} = 10\ \mathrm{cm}$

Errore sulla distanza dalla proiezione al suolo

d è funzione degli sbracci e delle coordinate dei tralicci e del punto di calcolo. Essendo:

- $\sigma_{sbraccio} = 10 \text{ cm}$
- $\sigma_{GB} = 50 \text{ cm}$

si determinano le incertezze massime sulle coordinate dei tralicci:

$$\sigma_{tral} = \sqrt{\sigma_{GB}^2 + \sigma_{sbraccio}^2} = 51 \,\mathrm{cm}$$
 7.20

e quindi l'errore su d:

$$\sigma_d = \sqrt{\sigma_{GB}^2 + \sigma_{tral}^2} = 71 \,\mathrm{cm}$$
 7.21

Errore sulla distanza dal cavo

Dai dati appena ottenuti si giunge, considerando per comodità il caso d=h (interessa solo l'ordine di grandezza dell'errore), a:

$$\sigma_r^2 = 2\left(\sigma_d^2 + \sigma_h^2\right)$$
 7.22

$$\sigma_r \approx \sqrt{2} \left(\sigma_d^2 + \sigma_h^2 \right) \approx 1 \,\mathrm{m}$$
 7.23

Errore sul campo calcolato

Partendo dalla 7.7 e utilizzando i dati appena ricavati, ipotizzando di effettuare una misura a 20 m dal cavo ed utilizzando l'errore sulla corrente ricavato da un caso concreto analizzato nel seguito (v. Capitolo VIII), si ottiene:

$$\frac{\sigma_B}{B} = \sqrt{\frac{\sigma_I^2}{I^2} + \frac{\sigma_r^2}{r^2}} \approx 8\%$$
7.24

7.8 - Bibliografia

- [7.1]. Herbert Schildt, "La guida completa C++ Quarta edizione", McGraw-Hill, Milano 2003
- [7.2]. Tim Converse, Joyce Park, "Guida a PHP4", McGraw-Hill, Milano 2000
- [7.3]. Environmental Systems Research Institute, "Using Avenue Customization and Application Development for ArcView GIS", USA 1996
- [7.4]. ENEL, Direzione produzione e trasmissione, "Atlante della rete elettrica 380-220-132 kV Trentino-Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia", Touring Club Italiano, Milano 1995
- [7.5]. Pierluigi Mozzo, "Attività di controllo e monitoraggio dell'inquinamento elettromagnetico da elettrodotti", Associazione Elettrotecnica ed Elettronica Italiana, Padova 2000
- [7.6]. "Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici", Legge n. 36 del 22 febbraio 2001, G.U. n. 55 del 7 marzo 2001
- [7.7]. G. D'Amore, L. Anglesio, S. Adda, A. Bonino, G. Licitra, F. Francia, "Standard per la realizzazione delle banche dati delle sorgenti di inquinamento elettromagnetico (alte e basse frequenze)", ANPA - Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, Dipartimento Stato dell'Ambiente, Controlli e Sistemi Informativi, RTI CTN_AGF 4/2001
- [7.8]. Daniele Andreuccetti, Laura Anglesio, Luca Cristoforetti, Salvatore Curcuruto, Giovanni D'Amore, Paolo D'Atanasio, Tina Fabozzi, Fabio Francia, Gaetano Licitra, Giorgio Alfonso Lovisolo, Angelo Lozito, Alberto Moro, Carla Malacarne, Alessandro Polichetti, Rolando Pontalti, Maila Strappini, Renzo Tommasi, Alessandro Zambotti, "Specifiche tecniche per la realizzazione del Catasto Elettromagnetico Nazionale e dei Catasti Elettromagnetici Regionali", Gruppo di Lavoro cEr/CeN, Rev. 3.1/ENEA, 2 agosto 2001
- [7.9]. Francesco Montanari, Annalisa Drigo, Renato Villalta, "Elettrodotti sul territorio della Provincia di Udine. Valutazione dell'impatto sulla popolazione – Allegato alla prima fase del progetto: Conoscenza approfondita del tracciato e delle caratteristiche degli elettrodotti in provincia di Udine", ARPA Friuli Venezia Giulia, 2003
- [7.10]. Renato Villalta, Anna Bampo, Francesco Montanari, Massimiliano Benes, Moreno Comelli, Alessandra Petrini, Luca Piani, Francesca Tassan Mazzocco, "Elettrodotti sul territorio della Provincia di Udine. Valutazione dell'impatto sulla popolazione – Relazione finale", ARPA Friuli Venezia Giulia, 2004



Appendice 7.1 - Schematizzazione delle linee AT ed AAT sull'Atlante



APPENDICE 7.2 - VISUALIZZAZIONE SCHEMATICA DEI PROCEDIMENTI DEL SOFTWARE
VIII

Applicazione del software a diverse situazioni sperimentali

8.1 - Misura effettuata presso terna singola

In presenza di una linea costituita da una terna singola, l'induzione magnetica in un punto è proporzionale alla corrente passante, per la legge di Biot-Savart:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_C \frac{I(\vec{r}')dl \times R}{R^3}$$
8.1

Per verificare sperimentalmente questo fatto è stata effettuata una misura avvalendosi di una centralina di tipo PMM 8055S, adatta per le misure in continuo, e i dati raccolti nell'arco di quattro giornate sono stati confrontati con i valori di corrente forniti dall'ente gestore.



Errore sulla corrente

Nel procedimento che porta alla verifica dell'ipotesi di linearità tra gli andamenti di corrente e di campo, è necessario sapere quale errore assegnare alle grandezze in questione. A tal proposito sono stati utilizzati i valori storici relativi alla linea in esame (la 21356 a 380 kV) di tensione, potenza attiva e reattiva, che sono conosciuti con un errore del 3%. Poiché la corrente è calcolata secondo la relazione 3.26:

$$I = \sqrt{\frac{P^2 + Q^2}{3V^2}}$$

supposta l'indipendenza di $V, P \in Q$, si ricava l'errore sulla corrente dalla formula di propagazione degli errori:

$$\sigma_{I} = \sqrt{\sum_{i} \left(\frac{\partial I}{\partial x_{i}}\right)_{x=\bar{x}}^{2}} \sigma_{i}^{2}$$
8.2

e si ottiene:

$$\sigma_{I}^{2} = \left(\frac{\partial I}{\partial V}\right)^{2} \sigma_{V}^{2} + \left(\frac{\partial I}{\partial P}\right)^{2} \sigma_{P}^{2} + \left(\frac{\partial I}{\partial Q}\right)^{2} \sigma_{Q}^{2} =
= \frac{P^{2} + Q^{2}}{3V^{4}} \alpha^{2} V^{2} + \frac{4P^{2}}{3V^{2} (P^{2} + Q^{2})} \alpha^{2} P^{2} + \frac{4Q^{2}}{3V^{2} (P^{2} + Q^{2})} \alpha^{2} Q^{2} =
= \frac{P^{2} + Q^{2}}{3V^{2}} \alpha^{2} + \frac{4\alpha^{2}}{3V^{2} (P^{2} + Q^{2})} (P^{4} + Q^{4}) =
= \frac{\alpha^{2} (5P^{4} + 5Q^{4} + 2P^{2}Q^{2})}{3V (P^{2} + Q^{2})}
\sigma_{I} = \frac{\alpha}{V} \sqrt{\frac{5P^{4} + 5Q^{4} + 2P^{2}Q^{2}}{3(P^{2} + Q^{2})}}$$
8.3

ove con α si è indicato l'errore relativo del 3%, lo stesso per *V*, *P* e *Q*. Si può così ricavare una relazione tra corrente ed errore ad essa associato, nell'ipotesi di linearità $\sigma_I = kI$:



Si ottiene un errore relativo del 6.64% (quantità valida su tutto l'intervallo su cui restano definiti i valori di corrente).

L'errore associabile alla misura di induzione magnetica è dell'8.4%, ricavabile dalle specifiche tecniche dello strumento qualora non si tenga conto della dipendenza dalla frequenza della risposta, trattandosi di misure alla sola armonica fondamentale, come visto al paragrafo 4.7.

Verifica della linearità



Supposta una relazione del tipo B=mI tra campo e corrente, il valore che quantifica la bontà dell'ipotesi lineare è il chi quadro ridotto:

$$\widetilde{\chi}_{n}^{2} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} \frac{(B_{i} - mI_{i})^{2}}{(m^{2} \sigma_{I_{i}}^{2} + \sigma_{B_{i}}^{2})}$$
8.4

Si suppone che il valore vero di *m* si trovi in corrispondenza di un minimo locale per $\tilde{\chi}_n^2$. Per ricavarlo si risolve allora l'equazione:

$$\frac{\partial \tilde{\chi}_n^2}{\partial m} = 0$$
 8.5

Si ricorre ad una procedura ricorsiva, utilizzando come valore di partenza per *m* quello ricavato senza tener conto degli errori ($m_0=3.2 \text{ nT/A}$), risolvendo quindi:

$$\frac{\partial}{\partial m} \left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} \frac{(B_{i} - mI_{i})^{2}}{(m_{0}^{2} \sigma_{I_{i}}^{2} + \sigma_{B_{i}}^{2})} \right) = 0$$

$$S_{i=1}^{n} \frac{2I_{i}(B_{i} - mI_{i})}{(m_{0}^{2} \sigma_{I_{i}}^{2} + \sigma_{B_{i}}^{2})} = 0$$

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{I_{i}B_{i}}{(m_{0}^{2} \sigma_{I_{i}}^{2} + \sigma_{B_{i}}^{2})} - m \sum_{i=1}^{n} \frac{I_{i}^{2}}{(m_{0}^{2} \sigma_{I_{i}}^{2} + \sigma_{B_{i}}^{2})} = 0$$

$$m = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{I_{i}B_{i}}{(m_{0}^{2} \sigma_{I_{i}}^{2} + \sigma_{B_{i}}^{2})}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{I_{i}^{2}B_{i}}{(m_{0}^{2} \sigma_{I_{i}}^{2} + \sigma_{B_{i}}^{2})}}$$
8.7

Si ricava un valore m_1 che, introdotto al posto di m_0 , consente di calcolare m_2 , e così via. In questa maniera si ottiene una convergenza al valore m.

Dopo tre iterazioni la variazione relativa è inferiore a 10^{-7} , ed il valore ricavato è $m=3.2\pm0.1$ nT/A. Utilizzando tale parametro, si ottiene:

$$\widetilde{\chi}_{272}^2 = 0.08 \qquad \qquad 8.8$$

e l'ipotesi di linearità è pienamente verificata.

Naturalmente un valore così basso del $\tilde{\chi}^2$ implica una sovrastima degli errori, e trattandosi di dati forniti direttamente dal gestore si riscontra la necessità di approfondire la conoscenza sulle apparecchiature utilizzate nelle misure delle quantità elettriche.

Utilizzando il software il risultato calcolato è m_c =3.2±0.3: i due valori possono ritenersi consistenti, essendo lo scarto inferiore all'incertezza relativa ad entrambi.

8.2 - Misura lungo un percorso

I risultati ottenuti dal software sono inoltre confrontabili con i profili ottenuti dalle misure con il sistema LINDA e dalla previsione con CMagnetico relativamente alle linee 21356 Planais-Redipuglia e 21347 Planais-Salgareda (si veda il paragrafo 6.7). L'utilizzo del nuovo programma consente un notevole risparmio di tempo, poiché fornisce i dati richiesti senza ulteriori elaborazioni che tengano conto dell'angolo formato dalla traiettoria del percorso con gli assi cartesiani (un dato ricavato direttamente dalle coordinate specificate in fase di input) nel punto desiderato, e non deve essere ricavato a partire da dati che descrivono il campo in un volume.

È necessario, dapprima, ricavare l'incertezza da associare alla corrente della linea 21347, con lo stesso procedimento visto nel paragrafo precedente. Si ottiene un errore relativo del 6.46%.

Il calcolo del $\tilde{\chi}^2$ nei due casi, limitato alle misure sopra la sensibilità dello strumento, evidenzia come l'ipotesi di validità del software non vada rigettata:

	CMagnetico	Phidel 1.0
Linea 21356	$\widetilde{\chi}_{260}^2 = 0.6$	$\widetilde{\chi}_{260}^2 = 0.6$
Linea 21347	$\widetilde{\chi}_{75}^2 = 1.0$	$\widetilde{\chi}^2_{75} = 0.7$

Tabella 8.1 - Valori di chi quadro ridotto ottenuti confrontando i due software alle misure effettuate.

I valori ottenuti da LINDA, CMagnetico e Phidel, relativamente alla linea 21356 e 21347, sono visualizzati nelle Figure 8.4 e 8.5, rispettivamente: il risultato del nuovo programma è indistinguibile da quello di CMagnetico e segue l'andamento della curva sperimentale per quanto riguarda la prima linea, mentre Phidel 1.0 nel secondo caso fornisce valori più aderenti alle misure in prossimità dell'asse della linea.





Normalizzazione rispetto ad una misura di riferimento



Quando si effettua una misura per un periodo di tempo esteso in più punti nei pressi di una linea singola, come avviene utilizzando il sistema LINDA per profili sotto le campate o su superfici estese, il campo viene rilevato ad intervalli con frequenza superiore a quella con cui vengono forniti i dati dal gestore della linea (al massimo ogni quarto d'ora).

Di conseguenza non è possibile considerare le fluttuazioni istantanee dell'intensità di corrente, per operare quindi un corretto confronto tra i due set di dati.

Tenendo però conto della proporzionalità diretta tra campo e corrente in prossimità della linea, si può procedere ad una normalizzazione del campo rispetto ad un secondo rivelatore, ad esempio un PMM 8053, sincronizzato con il primo e possibilmente situato in posizione ottimale, ossia dove è atteso il valore più alto di campo, ad esempio in corrispondenza del franco minimo di una campata.

In questa maniera si prende come riferimento un valore di campo ed uno di corrente, misurati allo stesso istante, B_0^{PMM} ed I_0 . Siano B_i^L i valori di campo misurati successivamente con il sistema LINDA: il confronto avverrà allora tra la corrente $I_i' = I_0 \cdot \frac{B_i^{PMM}}{B_0^{PMM}}$ e i dati normalizzati

$$B_i^{L'} = B_i^L \cdot \frac{B_i^{PMM}}{B_0^{PMM}}$$

8.3 - Misura presso una doppia linea a 380 kV



La configurazione costituita da due linee distinte, afferenti alla stessa sbarra in cabina di trasformazione, è stata definita "doppia linea". La determinazione del valore di induzione magnetica in un punto non dipende dai soli valori delle correnti di linea, ma anche dallo sfasamento tra di esse. Un calcolo del campo è pertanto possibile solo nel caso in cui sia possibile determinare tale sfasamento.

Un esempio concreto in cui tutti i dati necessari sono risultati disponibili è costituito dalla doppia linea costituita dalle 21347 e 21356 a 380 kV. I cavi di entrambe le linee terminano sulla stessa sbarra nella cabina primaria, quindi le tensioni sono sempre in fase. Lo sfasamento tra corrente e tensione in una linea si ricava attraverso i valori di tensione, potenza attiva e reattiva dalla relazione 3.25:

$$\varphi = \arctan \frac{Q}{P}$$

Dai dati relativi alle linee 21347 e 21356 si può ricavare, utilizzando il nuovo software, l'evoluzione nel tempo del campo di induzione magnetica nel punto in cui è stata posta la centralina.





mentre in Figura 8.9 i due set di dati sono confrontati:



Si notano, evidenziati dal cerchio rosso, alcuni punti completamente al di fuori della previsione teorica, registrati in un ristretto intervallo temporale: tali valori sono sensibilmente inferiori a quelli attesi teoricamente. Questo comportamento può essere attribuito ad un malfunzionamento del rivelatore, la cui batteria è caricata da una cella fotovoltaica, in seguito ad alcune giornate caratterizzate da scarso irraggiamento solare. Tale ipotesi trova piena conferma grazie ai dati forniti da due centraline meteorologiche dell'OSMER¹ situate in zone prossime a quella di interesse (Talmassons e Strassoldo, in provincia di Udine). Queste hanno evidenziato una diminuzione dell'irraggiamento solare (v. Figura 8.10) nel periodo precedente a quello in cui si sono raccolti i dati affetti dal problema, che sono stati pertanto eliminati.



¹ OSservatorio MEteorologico Regionale.

La nuova versione del software a corredo delle centraline PMM 8055S memorizza anche i dati relativi alla carica della batteria, quindi sarà possibile in futuro operare una pulitura selettiva dei dati raccolti in condizioni di carica non ottimale, senza ricorrere ad un procedimento qualitativo e non automatizzabile come quello appena esposto.

I dati rimanenti, linearmente correlati con una regressione pari a 0.95, vengono sottoposti ad un test del $\tilde{\chi}^2$, che non permette di rigettare l'ipotesi di validità del software ($\tilde{\chi}_{5182}^2 = 0.6$).

Scelta del punto di misura

Prima di effettuare la misura appena descritta, è stato scelto un particolare punto in cui posizionare la centralina, ossia quello che risente maggiormente della variazione di fase relativa tra le correnti. Per trovarlo è stato calcolato il campo all'altezza della sonda su tutta la zona d'interesse utilizzando i valori medi di corrente e gli sfasamenti di 0° e 180°, ossia quelli che in prima approssimazione forniscono i valori più alto e più basso di campo. Il punto in questione è quello posto in corrispondenza del massimo della differenza tra i due casi.

8.4 - Rigetto di ipotesi semplificative

Nelle pubblicazioni (in particolare Licitra, Colonna e Chiari, "Valutazione dell'esposizione a lungo termine al campo magnetico prodotto da più linee ad alta tensione") che si propongono di trovare una soluzione per determinare il campo prodotto da un sistema di più linee, generalmente si ipotizza una dipendenza lineare tra l'induzione e la corrente della linea più vicina al punto di misura, e il campo prodotto dalle altre linee viene trattato come un fondo costante.

Prendendo però spunto dalle misure appena descritte, si nota come l'andamento del campo in funzione della corrente di ciascuna delle due linee presenti caratteristiche che si discostano dalla linearità. In particolare, con riferimento alla Figura 8.11, non si può stabilire una relazione del tipo: $B=B_0+kI$ 8.9



$$\cos B_0 > 0$$
:

e lo stesso si può dire per la linea 347:

106



Tale andamento si può meglio comprendere analizzando il grafico seguente, nel quale vengono confrontate le correnti delle due linee. Si nota che non raggiungono mai un valore minimo nello stesso momento, poiché entrambe servono almeno in parte la stessa utenza, e ciascuna sopperisce ai periodi di scarso carico dell'altra.



Di conseguenza, per determinare il valore del campo in prossimità di più linee, è necessario tener conto anche dello sfasamento relativo tra le correnti, e tentativi di ricondursi ad approssimazioni più semplici possono trovare apparente giustificazione solo a causa della scarsa statistica raccolta (nel controesempio considerato solamente 24 ore) o della particolare geometria della misura, per cui l'effetto di una linea risulta predominante.

8.5 - Procedure di misura

Si rende necessario a questo punto definire una procedura di misura per i casi analizzati, che si possono classificare in tre categorie:

- 1. linea singola (compresa quindi la doppia terna);
- 2. linea doppia (o più linee con le tensioni in fase);
- 3. linee indipendenti.

Nel primo caso la soluzione è completamente determinata una volta noti i valori di tensione, potenza attiva e reattiva (o di corrente per le linee a tensione fino a 132 kV): è sufficiente eseguire una sola misura in un punto, per poi ricostruirvi l'andamento temporale del campo attraverso una semplice proporzionalità tra i valori di corrente. In particolare, la mediana del valore efficace dell'induzione magnetica si ricava direttamente dalla mediana del valore di corrente.

Il secondo caso si riferisce a linee AAT aventi i conduttori omologhi afferenti alla medesima sbarra in cabina primaria, o a sistemi di linee, anche di diversa tensione nominale, le cui tensioni risultino in fase a causa dell'utilizzo degli autotrasformatori di tipo NAY0 in sede di trasformazione. Bisogna determinare gli sfasamenti tra correnti e tensioni, per risalire agli sfasamenti relativi tra le correnti: è allora necessario conoscere tensioni, potenze attive e reattive di ciascuna linea, dati disponibili solo per linee con tensione nominale di 220 e 380 kV. In questi casi l'unica alternativa all'impiego di un programma di calcolo è l'utilizzo di una centralina per le misure in continuo.

In tutti gli altri casi (linee completamente indipendenti, sistemi di linee sia AAT/AT che MT o in cui non siano disponibili tutti i dati) si rende necessario un monitoraggio continuo, non potendo ricavare il campo dai pochi dati a disposizione. È però possibile utilizzare i dati di corrente forniti dall'ente gestore per effettuare un calcolo del campo, inserendo i valori di fase corrispondenti al caso peggiore possibile, in modo da ottenere un risultato che sia cautelativo per la popolazione.

8.6 - Conclusioni

In definitiva, Phidel 1.0 si dimostra uno strumento attendibile sia per quanto riguarda il calcolo del campo in un punto, e per estensione nello spazio, che nel determinare l'evoluzione temporale dell'induzione, nota la storia dei parametri elettrici delle linee in questione.

Va notato però che un valore così basso della quantità $\tilde{\chi}^2$ implica anche una sovrastima degli errori attribuiti alle grandezze considerate. È un problema di non facile soluzione, poiché è il gestore delle linee ad avere il controllo diretto sugli strumenti di misura.

Nei capitoli successivi il programma verrà utilizzato per lo studio di un caso più complesso, al fine di prevedere l'effetto di una modifica della struttura di alcune linee per ridurne l'impatto elettromagnetico sul territorio.

8.7 - Bibliografia

- [8.1]. Licitra G., Colonna N., Chiari C., "Valutazione dell'esposizione a lungo termine al campo magnetico prodotto da più linee ad alta tensione", APAT Dipartimento Provinciale di Livorno
- [8.2]. Roberto Turri, Maurizio Albano, "Calcolo previsionale dei campi elettromagnetici generati da elettrodotti", Associazione Elettrotecnica ed Elettronica Italiana, Padova 2000
- [8.3]. Renato Villalta, Anna Bampo, Massimiliano Benes, Francesco Montanari, Moreno Comelli, Mauro Moretuzzo, Giancarlo Menotti, "Elettrodotti sul territorio della Provincia di Udine. Fase misure", ARPA Friuli Venezia Giulia, 2004

Tecniche di abbattimento del campo di induzione magnetica

9.1 - Introduzione

Quasi tutte le linee elettriche esistenti hanno caratteristiche geometriche e strutturali di vecchia concezione, il cui criterio generale di costruzione consiste nella minimizzazione del costo complessivo. L'utilizzo di materiali ad alta conducibilità o ad elevata permeabilità trova applicazione pratica solo per schermatura di piccoli volumi (tipicamente riguardanti apparati elettronici), e non rappresenta una soluzione pensabile per intervenire sull'effetto prodotto dalle linee su ampie zone di territorio.

Una volta verificata la validità previsionale di Phidel 1.0, il programma può essere utilizzato per determinare la variazione di impatto ambientale dovuta ad una modifica della struttura di una linea. I parametri di cui tener conto sono esaminabili separatamente:

- altezza dei punti di sospensione;
- ampiezza e quota relativa degli sbracci;
- disposizione delle fasi,

tenendo presente che per i primi due punti la valutazione viene effettuata sia nel caso di singola (nelle diverse possibili configurazioni geometriche) che di doppia terna.

Viene quindi analizzato l'effetto della sostituzione di una linea a singola terna con una doppia terna ottimizzata, una configurazione ottimale (se si escute il caso della linea interrata) non presente al momento in Friuli Venezia Giulia.

Infine vengono descritte alcune tecniche innovative di abbattimento del campo, che però non hanno trovato ancora applicazione su vasta scala o esistono solo a livello sperimentale.

Tutte le considerazioni di questo capitolo troveranno naturale applicazione nel successivo, nel quale verrà esaminato un caso particolarmente complesso e saranno proposte alcune soluzioni per migliorare la condizione preesistente.

9.2 - Aumento dell'altezza del traliccio

Un modo evidente per diminuire il campo consiste nell'aumentare la distanza dalla sorgente. Si nota che una maggiore altezza del traliccio riduce il campo nella zona sottostante, ma l'effetto diviene trascurabile a partire da alcune decine di metri di distanza della linea: l'andamento della diminuzione percentuale è riportato in Figura 9.2. Questo rimedio non ha quindi sostanziale influenza sulla diminuzione dell'ampiezza delle fasce di rispetto.



Il caso riportato in figura si riferisce alla situazione riscontrata a Strassoldo (linea 347 a 380 kV, singola terna, configurazione a Δ), supponendo di alzare i punti di sospensione. Nel caso di linee di altro tipo (configurazione a triangolo o doppia linea) si ottengono risultati analoghi.



9.3 - Modifica del posizionamento degli sbracci

Avvicinando i conduttori, il campo nella regione esterna a quella interessata dagli stessi diminuisce. In particolare, se *d* è la distanza relativa tra i cavi, $\lim_{d\to 0} \vec{B} = 0$, in quanto i contributi dovuti a correnti sfasate si sommano vettorialmente, annullandosi. È allora possibile intervenire sulla geometria degli sbracci, in maniera dipendente dal particolare tipo di linea.

Singola terna



In una configurazione a Δ i tre conduttori sono sospesi all'incirca alla stessa quota (le differenze sono dell'ordine del metro), e si può considerare per semplicità una variazione della sola ampiezza degli sbracci.

Per quanto la variazione in valore assoluto più sensibile si noti in prossimità del franco minimo, il campo viene ridotto di una frazione consistente anche a centinaia di metri dall'asse della linea, a differenza di quanto avviene aumentando l'altezza del traliccio (si veda la Figura 9.4).



Nel caso di una disposizione a triangolo le considerazioni sono analoghe, ma per ottenere una diminuzione significativa del campo è necessario intervenire anche sulla differenza di quota dei punti di sospensione (si veda a tal proposito la discussione del paragrafo successivo, relativa al caso della doppia linea).

Doppia linea

In una doppia linea (ma le considerazione sono analoghe nel caso di una doppia terna) la sola diminuzione dell'ampiezza degli sbracci comporta una riduzione del campo meno significativa, qualunque sia la configurazione delle fasi.



Questo è dovuto al fatto che i cavi sono sospesi a quote la cui differenza può essere dell'ordine della decina di metri, quindi riducendo gli sbracci non si ottiene lo stesso effetto visto nel caso precedente, e le correnti al limite non si sommano dando un contributo nullo.

Affinché l'intervento abbia un effetto più consistente, oltre all'ampiezza va diminuita anche la differenza di quota tra gli sbracci. L'effetto è visualizzato in Figura 9.5: la linea arancio descrive il campo generato da una doppia terna con gli sbracci di 6, 7 e 6 m, posti a 4 m di dislivello relativo. La linea punteggiata color arancio rappresenta il caso riferito alla sola diminuzione di ampiezza degli sbracci, la linea verde quella in cui è stata diminuita anche la differenza di quota.

In quest'ultimo caso è stata mantenuta costante la distanza dal suolo dei conduttori più bassi, per non inficiare il risultato introducendo un allontanamento della sorgente dal punto di misura.

9.4 - Modifica delle fasi: ottimizzazione di una doppia linea

In Figura 9.6 vengono schematizzate le 6 possibili configurazioni in cui sono disponibili le fasi in una doppia linea, il campo calcolato in un punto (supposto nullo lo sfasamento tra le correnti) e la diminuzione percentuale rispetto al caso peggiore. Il caso evidenziato è quello della doppia linea 21347 e 21356, nel comune di Torviscosa (UD), con il punto di calcolo riferito a dove è stata utilizzata la centralina per le misure in continuo. Emerge subito come sia immediatamente possibile operare un miglioramento nel punto in questione con una semplice modifica in sede di cabina primaria. Il risultato è stato ottenuto senza considerare gli sfasamenti delle correnti, quindi i casi particolari andrebbero valutati tenendo conto della storia della linea.

¹ Si faccia riferimento alla Figura 9.6.



9.5 - Introduzione della doppia terna

Dalle considerazioni sin qui effettuate risulta evidente come il meccanismo più efficace per ridurre il campo sia quello di disporre in maniera appropriata le fasi. A tal proposito si analizza il caso della cosiddetta doppia terna, ossia una linea in cui ciascuna fase è sdoppiata su due conduttori: si può dimostrare che il campo prodotto dipende fortemente dalla loro disposizione relativa.

Doppia terna ottimizzata

Facendo riferimento ai diagrammi di Figura 9.6, si calcola di campo di induzione magnetica lungo un percorso trasversale all'asse di una doppia terna per ciascuna delle sei configurazioni di fasi.



La migliore disposizione possibile consente di abbattere notevolmente i valori di campo non solo in prossimità della linea, ma anche a grandi distanze dall'asse (si veda a tal proposito la Figura

9.8, in cui viene evidenziata la diminuzione percentuale di campo): una conseguenza immediata è la diminuzione delle fasce di rispetto della linea.



Si valuterà ora l'effetto della sostituzione di una linea a singola terna con questa particolare configurazione.

Sostituzione di una configurazione a Δ

Solitamente, le linee a 380 kV (per le quali si rende più sovente necessario un intervento di mitigazione ambientale), se presenti come singola terna, sono caratterizzate da una configurazione a Δ .



Nella Figura 9.9 sono visualizzati, sempre in funzione della distanza dall'asse, gli andamenti dell'induzione per una singola e per una doppia terna, e la diminuzione percentuale prevista.

Nell'effettuare i calcoli è stata mantenuta costante l'altezza dal suolo dei punti di sospensione relativi ai conduttori più bassi, per non ridurre il campo allontanandoli dal punto di misura.

Si nota che, al di là della consistente diminuzione del campo in prossimità della linea, l'effetto si sente pure a grandi distanze: questo significa che una sostituzione con una doppia terna ottimizzata riduce anche le dimensioni della fascia di rispetto.



9.6 - Fattibilità delle soluzioni

Le modifiche appena proposte per tentare di mitigare il campo non presentano alcuna difficoltà concettuale, ma lasciano aperto un problema di tipo strettamente tecnico, legato alla possibilità di avvicinare i conduttori alla distanza richiesta senza che insorgano problemi strutturali o legati alla formazione di scariche tra di essi.

Utilizzando tralicci sottili, tipicamente a struttura bidimensionale (sostegni tubolari monostelo), si ottiene l'avvicinamento delle fasi (oltre ad un miglioramento paesaggistico), e quindi una riduzione della fascia di rispetto. La sostituzione delle mensole metalliche con mensole isolanti comporta la possibilità di ridurre la distanza tra conduttore e traliccio. Dalla riduzione delle distanze di isolamento consegue un aumento del campo elettrico sulla superficie dei conduttori, con abbassamento della soglia di innesco dell'effetto corona.

Le distanze tra le fasi rimangono comunque dell'ordine di alcuni metri, e a questo va aggiunto che le distanze di sicurezza dipendono dalle condizioni atmosferiche (che possono abbassare la rigidità dielettrica dell'aria - si riveda il paragrafo 4.6).

9.7 - Altre tecniche di abbattimento del campo

Oltre a quelli appena esposti, esistono altri tipi di interventi che consentono di ridurre il campo in prossimità di una linea elettrica: se ne parla qui per motivi di completezza senza approfondire il discorso, in quanto si tratta o di soluzioni esistenti ma relativamente alle quali non sono state effettuate misure sul campo (linee interrate), o di alternative che non hanno ancora trovato applicazioni concrete sul territorio regionale (linee split-phase e circuiti di compensazione).

Interramento

Le tecnologie di interramento presenti sono due: posa in cavo e isolamento a mezzo gas², che però è utilizzata solamente in applicazioni di tipo sperimentale.

Per quanto non sia possibile confrontare il campo prodotto da una linea interrata con quello di una aerea, in quanto l'interramento comporta necessariamente una diminuzione della corrente circolante a causa delle ridotte distanze tra i conduttori, è interessante notare come l'andamento del campo scenda velocemente già a piccole distanze dalla linea. I grafici riportati in Figura 9.11 sono riferiti ad una linea con un carico di 1500 A ed i cui conduttori siano distanziati di 28 cm. Si consideri che una tipica profondità di interramento può essere ~1 m, quindi la linea azzurra rappresenta il campo al suolo. Un'ulteriore riduzione si può ottenere introducendo una struttura a doppia terna.



L'andamento riprodotto evidenzia come sia problematico introdurre un sistema del genere in ambito residenziale, in quanto i valori di campo in prossimità della linea sono molto maggiori che nelle peggiori situazioni relative a linee aeree; in compenso, viene schermato completamente il campo elettrico.

Esistono inoltre delle problematiche legate alla manutenzione di linee di questo tipo ed ai costi di posa, che vanno dalle 3 alle 8 volte quelli di una linea elettrica, a seconda della conformazione del terreno.

Linee split-phase

Una linea split-phase è una linea trifase in cui una o più fasi sono divise in più conduttori. In Figura 9.12 vengono descritte alcune delle configurazioni possibili, mentre nelle due figure successive è visualizzato il calcolo della variazione di campo, assoluta e in percentuale, in funzione della distanza dall'asse della linea, in caso di sostituzione di una singola terna con una split-phase.

 $^{^2}$ Per superare i problemi relativi alla bassa rigidità dielettrica, sono stati sviluppati sistemi che prevedono come isolanti gas diversi dall'aria (GIS, Gas Insulated Systems or Substations, e LIS, Line Insulated Systems). Questi devono necessariamente essere contenuti in appositi involucri, e quindi possono essere fatti lavorare a pressione maggiore di quella atmosferica, aumentandone le capacità isolanti. Queste linee sono normalmente realizzate con tre condotte cilindriche coassiali con gli involucri esterni posti a terra e il conduttore cilindrico interno tenuto centrato da distanziatori in resina. Il gas utilizzato solitamente è l'esafluoruro di zolfo (SF₆), che è inerte, non tossico, ed ha una rigidità dielettrica tripla rispetto a quella dell'aria.









Circuiti di compensazione passiva

Se si crea un circuito (loop) passivo attorno ai conduttori, le correnti in esso indotte dal campo magnetico generano un campo che tende a compensare quello inducente. Per aumentare la corrente indotta, e di conseguenza l'effetto schermante, va inserito in serie alla spira stessa un condensatore che compensi in parte le induttanze presenti, e la resistenza della spira deve essere quanto più bassa possibile.



Una soluzione di questo tipo fa diminuire il campo di circa il 40% in prossimità della linea. Comporta però un costo maggiore di circa 1.5 volte per il tratto interessato, e permette di risanare solo situazioni locali.

Si possono ottenere risultati migliori con la tecnica di "schermo attivo", in cui la corrente di schermo è forzata da generatori controllati in ampiezza e fase, anche se il sistema comporta costi maggiori.



Esiste infine il sistema della doppia spira, sviluppato per ottenere con uno schermo passivo l'efficacia di uno attivo.

Sul tratto di linea da schermare è previsto, al di sotto dei conduttori di fase, un conduttore aggiuntivo che con la fune di guardia costituisce la spira di schermo. In una campata contigua, il conduttore addizionale e due di fase sono trasposti: in quel tratto la spira genera la f.e.m. necessaria alla circolazione della corrente di schermo.

9.8 - Bibliografia

[9.1]. Renato Vismara, "Ecologia applicata - Inquinamento e salute umana, Criteri di protezione dell'aria, delle acque, del suolo, Valutazione di impatto ambientale, Esempi di calcolo", Hoepli, 1992

- [9.2]. Paolo Bevitori, "Inquinamento elettromagnetico Campi elettrici e magnetici a frequenza industriale (50-60 Hz) generati da elettrodotti ed apparecchi elettrici - Aspetti tecnici, sanitari e normativi", Maggioli Editore, Rimini 1998
- [9.3]. Luigi Bruzzi, "Valutazione di impatto ambientale", Maggioli Editore, Ravenna 1999
- [9.4]. Renato Conti, "Riduzione del campo magnetico", AEI volume 88, Speciale "Linee innovative", dicembre 2001
- [9.5]. Arnaldo Bertazzi, Antonio Cerri, "Il contenimento del campo magnetico generato da elettrodotti ad alta tensione", Associazione Elettrotecnica ed Elettronica Italiana, Giornata di Studio "Elettrodotti e territorio - Nuove tecnologie per ridurre l'inquinamento elettromagnetico", Padova, 22 novembre 2000
- [9.6]. B. Mazzoleni, "Gas Insulated Lines", Associazione Elettrotecnica ed Elettronica Italiana, Giornata di Studio "Elettrodotti e territorio - Nuove tecnologie per ridurre l'inquinamento elettromagnetico", Padova, 22 novembre 2000
- [9.7]. G. Baldo, G. Pesavento, "Problemi di isolamento nelle diverse tipologie di elettrodotti", Associazione Elettrotecnica ed Elettronica Italiana, Giornata di Studio "Elettrodotti e territorio - Nuove tecnologie per ridurre l'inquinamento elettromagnetico", Padova, 22 novembre 2000
- [9.8]. P. Paternò, R, Redina, R. Ruggeri, "Quadro normativo e possibili scenari per le reti di trasmissione", Associazione Elettrotecnica ed Elettronica Italiana, Giornata di Studio "Elettrodotti e territorio - Nuove tecnologie per ridurre l'inquinamento elettromagnetico", Padova, 22 novembre 2000
- [9.9]. M. D'Amore, F. Maradei, E. Menghi, M. S. Sarto, "Tecniche di schermatura di campi magnetici a frequenza industriale", Progetto MIUR/CNR-ENEA "Salvaguardia dell'uomo e dell'ambiente dalle emissioni elettromagnetiche", Roma, aprile 2002
- [9.10]. Renato Conti, Davide Capra, "Sorgenti ELF: nuove tecnologie e risanamenti", dal Seminario "Valutazione e misura dell'esposizione ai campi elettromagnetici", Università di Palermo, febbraio 2002

Mitigazione dell'impatto ambientale

10.1 - La Valutazione di Impatto Ambientale

La Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) è un insieme di procedure tecniche ed amministrative volte a formulare un giudizio di ammissibilità sugli effetti che una determinata opera avrà sull'ambiente, inteso come l'insieme delle attività umane e delle risorse naturali. Queste si collocano in un momento consultivo antecedente alla decisione definitiva, che si basa anche su altre valutazioni (economiche, sociali, politiche, ecc.).

La VIA è costituita da due distinte componenti:

- una Procedura di Impatto Ambientale, costituita dal complesso degli atti amministrativi che permettono di arrivare (o non) ad una decisione di accettabilità ambientale dell'opera in esame;
- uno Studio di Impatto Ambientale, realizzato dal proponente l'opera il cui scopo è l'utilizzo di tecniche il più possibile oggettive per valutarne i futuri effetti.

L'obiettivo primario di uno Studio di Impatto Ambientale è quello di valutare gli effetti della realizzazione di un'infrastruttura sulla popolazione.

Nel caso di un elettrodotto, l'indicatore (ossia il parametro fisico di cui tener conto) da analizzare è il campo efficace di induzione magnetica, tenendo presente quanto specificato dal DPCM 8 luglio 2003^1 . Questo prevede i limiti di immissione di 5 kV/m per il campo elettrico, e per l'induzione magnetica:

- 100 µT come limite di esposizione;
- 10 μT come valore di attenzione;
- $3 \mu T$ come obiettivo di qualità (in corrispondenza di luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore),

da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio.

Lo Studio di Impatto Ambientale deve contenere una descrizione delle misure attuabili per evitare, ridurre e se possibile compensare eventuali effetti negativi del progetto sull'ambiente. In questo capitolo viene esposta una serie di interventi mirati ad abbattere il campo di induzione magnetica in prossimità di una linea elettrica, compatibilmente con le limitazioni tecniche del caso.

10.2 - Un problema con 3 linee

Una situazione particolarmente complicata da analizzare si è presentata nel comune di Doberdò del Lago (in provincia di Gorizia), sul territorio del quale transitano diverse linee elettriche ad altissima tensione. In particolare, sopra due abitazioni situate nella stessa zona, corrono tre linee: la 343 a 380 kV e, in configurazione di doppia linea, le 277 e 283 a 220 kV.

Come prima cosa è stato effettuato uno screening nella sona di interesse avvalendosi dell'EMDEX II, in modo da individuare i punti più esposti all'interno delle abitazioni, ossia nei

¹ Si veda a tal proposito il Capitolo XI.

luoghi a più prolungata permanenza. Sono quindi state effettuate delle misure in continuo, della durata di 2 giorni, sempre con l'ausilio dello stesso strumento.



Successivamente, in base ai dati ricevuti da TERNA S.p.A. ed alle considerazioni esposte nel capitolo precedente relativamente all'importanza della disposizione relativa delle fasi, è stato elaborato un progetto (tuttora in corso d'opera) per ridurre il campo nei casi in questione.

È possibile avvalersi anche in questa situazione di Phidel per determinare il campo nei punti di interesse a partire dai dati forniti dal gestore della linea, essendo possibile ricavare gli sfasamenti relativi tra le correnti delle tre linee. Infatti, se per la doppia linea a 220 kV si ricade in un caso già visto, anche la tensione della linea a 380 kV è in fase con le altre due, a causa del particolare tipo di autotrasformatori utilizzati in centrale di trasformazione.

10.3 - I dati a disposizione

I dati raccolti con l'EMDEX II nelle due abitazioni vengono filtrati in modo da ottenere un valore di campo ogni quarto d'ora, che sia sincronizzato con i dati di corrente forniti da GRTN. Di questi due set di valori viene riportato in Figura 10.2 l'andamento temporale:

² Il tempo impiegato dal software per eseguire il calcolo (e, analogamente, la memoria richiesta) è proporzionale al numero di punti in cui si determina il campo. Nel caso in questione non è necessario trovare il valore dell'induzione in un rettangolo che comprenda le due abitazioni di interesse, ma si può lavorare separatamente per ciascuna, come si può vedere in figura 10.1. Poiché i risultati vengono salvati in file ASCII, si possono semplicemente aggiungere i dati da uno alla fine dell'altro, ottenendo così il risultato mostrato ed ottimizzando i tempi di calcolo.

In questa maniera è anche possibile impostare i due calcoli inserendo la quota di misura alla stessa altezza relativa rispetto alla quota piede dell'edificio, per determinare il campo nelle due abitazioni alla stessa altezza dal suolo.

In una possibile implementazione futura si può tener conto dell'orografia del terreno, per calcolare il campo non ad una quota ma ad un'altezza dal suolo definita. Questo è possibile utilizzando i dati orografici già presenti nella Carta Tecnica.



L'improvviso incremento della corrente ha fatto sorgere il dubbio che la linea funzionasse a minimo carico all'inizio della misura. Tale ipotesi è stata confermata analizzandone l'andamento temporale su un periodo più lungo:



Si nota un andamento caratteristico, di tipo periodico quando la linea è utilizzata, a carico costante molto basso (circa 10 A) negli altri giorni.

Di seguito vengono invece mostrati gli andamenti temporali del campo misurato sotto la doppia linea a 220 kV (linea azzurra) e delle due correnti:



Dai dati raccolti, in particolare quelli di corrente riportati in Figura 10.3, emerge la necessità di una misura in continuo a più lungo termine, possibilmente con l'ausilio di una centralina (strumento non disponibile all'epoca delle prime rilevazioni). In questa maniera sarebbe possibile raccogliere abbastanza dati per un'analisi completa e, possibilmente, dimostrare il superamento dei limiti di legge: solo in questo modo il gestore sarebbe costretto infatti ad un intervento di mitigazione.

10.4 - Le soluzioni proponibili

In questa situazione è possibile intervenire immediatamente, e con bassi costi, per ridurre il campo, almeno in prossimità della doppia linea a 220 kV. Si possono infatti riconfigurare le fasi, poiché la disposizione attuale è la peggiore possibile³, ed ottenere così una doppia linea ottimizzata. A questo andrebbe accompagnato un frequente rifasamento, in modo da essere vicini ad una condizione ottimale (si veda a tal proposito la Figura 7.13). In tal maniera si ottiene una riduzione del campo di circa il 28% nel caso peggiore (quando cioè l'altra linea è in funzione), corrispondenti a circa 2 μ T, all'interno dell'abitazione sottostante.

Nel caso della linea a 380 kV la situazione è invece più complicata: un'ottimizzazione delle fasi, tenendo conto della disposizione della doppia linea adiacente, comporterebbe un miglioramento poco significativo, vista la distanza dai conduttori delle altre linee. Si rende necessario in tal caso un intervento strutturale, che può consistere in:

- innalzamento dei punti di sospensione;
- avvicinamento dei conduttori;
- sostituzione con una doppia terna;
- interramento.

Se ultime due soluzioni sono difficilmente proponibili dal punto di vista economico, la più realizzabile sembra la seconda, in quanto implicherebbe un intervento senza grosse modifiche sulla struttura esistente.

³ Analogamente al caso "1" di Figura 9.6.

10.5 - Bibliografia

- [10.1]. Licitra G., Colonna N., Chiari C., "Valutazione dell'esposizione a lungo termine al campo magnetico prodotto da più linee ad alta tensione", APAT Dipartimento Provinciale di Livorno
- [10.2]. Roberto Turri, Maurizio Albano, "Calcolo previsionale dei campi elettromagnetici generati da elettrodotti", Associazione Elettrotecnica ed Elettronica Italiana, Padova 2000

La normativa italiana vigente

11.1 - Normativa sull'esposizione a campi a frequenza industriale

Legge 22 febbraio 2001, n. 36

Si tratta della legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici. Detta i princîpi fondamentali diretti a:

- assicurare la tutela della salute della popolazione dagli effetti dell'esposizione ai campi elettromagnetici;
- promuovere la ricerca scientifica per valutare gli effetti a lungo termine;
- assicurare la tutela dell'ambiente e promuovere l'innovazione tecnologica e le azioni di risanamento per minimizzare l'intensità e gli effetti dei campi.

L'ambito di applicazione riguarda gli impianti, i sistemi e le apparecchiature per usi civili e militari che possano comportare esposizione a frequenze comprese tra 0 Hz e 300 GHz.

Vengono date, tra l'altro, le definizioni di:

- esposizione: la condizione di una persona soggetta a campi elettrici, magnetici, elettromagnetici, o a correnti di contatto, di origine artificiale;
- limite di esposizione: il valore di campo considerato come valore di immissione, definito ai fini della tutela della salute da effetti acuti, che non deve essere superato in alcuna condizione di esposizione;
- valore di attenzione: il valore di campo, considerato come valore di immissione, che non deve essere superato nei luoghi adibiti a permanenze prolungate. Costituisce misura di cautela ai fini della protezione da possibili effetti a lungo termine;
- obiettivi di qualità: i valori di campo ai fini della progressiva miticizzazione dell'esposizione;
- elettrodotto: insieme delle linee elettriche, delle sottostazioni e delle cabine di trasformazione.
- Spetta allo Stato:
- determinare limiti di esposizione, valori di attenzione e obiettivi di qualità, considerando di interesse nazionale la definizione di criteri unitari e di normative omogenee, viste le finalità della legge;
- promuovere attività di ricerca e di sperimentazione scientifica, programmi di ricerca epidemiologica e di cancerogenesi sperimentale, per approfondire i rischi connessi all'esposizione;
- istituire un catasto nazionale delle sorgenti, per rilevare i livelli di campo presenti nell'ambiente;
- determinare i criteri di elaborazione dei piani di risanamento;
- individuare le tecniche di misurazione;
- realizzare accordi con i gestori di elettrodotti per promuovere tecniche di costruzione di impianti che minimizzino le emissioni nell'ambiente e tutelino il paesaggio;
- definire i tracciati degli elettrodotti con tensione superiore a 150 kV;

 determinare i parametri per la previsione delle fasce di rispetto per gli elettrodotti, all'interno delle quali non è consentita destinazione di edifici che comporti permanenza superiore alle quattro ore;

Le regioni devono adeguare la propria legislazione ai limiti di esposizione, ai valori di attenzione ed agli obiettivi di qualità specificati nel successivo decreto attuativo.

Lo Stato esercita le funzioni previste tramite un "Comitato interministeriale per la prevenzione e la riduzione dell'inquinamento elettromagnetico" appositamente costituito.

Alle regioni spetta la definizione dei tracciati degli elettrodotti con tensione non superiore a 150 kV, e la definizione delle opportune fasce di rispetto, nonché la realizzazione e la gestione di un catasto elettromagnetico delle sorgenti al fine di rilevare i livelli di esposizione della popolazione.

Il DPCM 8 luglio 2003

Questo decreto, attuativo della Legge 36/2001, fissa i limiti di esposizione, i valori di esposizione e gli obiettivi di qualità per la protezione della popolazione dalle esposizioni ai campi elettrici e magnetici alla frequenza di rete generati dagli elettrodotti.

Il limite di esposizione è fissato a 100 μ T per l'induzione magnetica e 5 kV/m per il campo elettrico, intesi come valori efficaci.

A titolo di misura di cautela per la protezione da possibile effetti a lungo termine, nelle aree gioco per l'infanzia, in ambienti abitativi, in ambienti scolastici e nei luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore giornaliere, si assume per l'induzione magnetica il valore di attenzione di 10 μ T, da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio.

Nella progettazione di nuovi elettrodotti in corrispondenza di aree gioco per l'infanzia, di ambienti abitativi, di ambienti scolastici e di luoghi adibiti a permanenze non inferiori a quattro ore e nella progettazione dei nuovi insediamenti e delle nuove aree di cui sopra in prossimità di linee ed installazioni elettriche già presenti nel territorio, ai fini della progressiva minimizzazione dell'esposizione ai campi, è fissato l'obiettivo di qualità di 3μ T per il valore dell'induzione magnetica, da intendersi come mediana dei valori nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio.

Vengono abrogati i precedenti DPCM 23 aprile 1992 e 28 settembre 1995, che fissavano le fasce di rispetto a partire dall'asse dell'elettrodotto in base alla tensione d'esercizio (rispettivamente 10 m per 132 kV, 18 m per 220 kV e 28 m per 380 kV).

Per la determinazione delle fasce di rispetto si fa riferimento all'obiettivo di qualità ed alla portata di corrente in servizio normale dell'elettrodotto. Gli enti locali non possono quindi mantenere più le normative in materia (v. LR 27/93 del Veneto, che fissava i limiti di 0.5 kV/m per il campo elettrico e 0.2 μ T per il campo di induzione magnetica, e determinava di conseguenza le fasce di rispetto).

11.2 - Normativa sulla Valutazione di Impatto Ambientale

Direttiva 85/337/CEE del 27 giugno 1985, integrata dalla 97/11/CE del 3 marzo 1997

È il primo riferimento normativo in materia, e si applica alla valutazione dell'impatto ambientale dei progetti pubblici e privati che possono comportare rilevanti conseguenze sull'ambiente. In particolare:

- delega gli Stati membri ad adottare le disposizioni necessarie affinché, prima del rilascio dell'autorizzazione, per i progetti per i quali si prevede un notevole impatto ambientale, in particolare per la loro natura, le loro dimensioni o la loro ubicazione, sia prevista un'autorizzazione e una valutazione del loro impatto;

- stabilisce le categorie su cui ricadrebbero gli eventuali effetti dell'opera per la quale è richiesta la procedura di VIA;
- favorisce lo scambio di informazioni relative all'esperienza acquisita nell'applicazione della normativa tra gli Stati membri;
- stabilisce un elenco di progetti sottoposti a valutazione, tra i quali figura la costruzione di elettrodotti aerei con un voltaggio di 220 kV o superiore e di lunghezza superiore a 15 km.

Legge Regionale 7 settembre 1990, n. 43

Con questa legge la Regione Friuli Venezia Giulia, avvalendosi delle proprie competenze statutarie:

- disciplina la Valutazione di Impatto Ambientale in attuazione della direttiva del Consiglio delle Comunità europee del 27 giugno 1985 e della normativa statale conseguente;
- definisce i concetti di impatto ambientale e di VIA;
- stabilisce che la regione partecipa alle pronunce di compatibilità ambientale sui progetti di opere individuate ai sensi dell'articolo 6 della legge 8 luglio 1986, n. 349, e che l'Amministrazione regionale è tenuta ad acquisire il parere, altresì, del Comune sul cui territorio è prevista la collocazione dell'opera e degli altri Comuni eventualmente interessati;
- sottolinea l'importanza della partecipazione dei cittadini alle procedure di VIA;
- definisce l'ambito di applicazione, oltre che per le opere elencate nel già citato articolo 6 della legge n. 349/1986, a progetti, opere e loro modifiche sostanziali localizzate nelle aree sensibili (individuate dal regolamento di esecuzione), ossia le parti di territorio dove sia riscontrata la presenza di valori ambientali, particolare fragilità dell'equilibrio ecologico, ovvero una rilevante concentrazione di attività e insediamenti che comportino già notevoli effetti sull'ambiente;
- stabilisce le categorie di opere escluse dalla procedura di VIA;
- dispone che il proponente il progetto presenti uno Studio di Impatto Ambientale, e lo renda pubblico;
- descrive le caratteristiche tipiche di uno Studio di Impatto Ambientale;
- specifica come individuare le autorità ed il pubblico interessato,
- indica il termine per l'emissione di un parere motivato da parte di un'apposita Commissione tecnico-consultiva, e ne stabilisce gli effetti;
- prevede misure di mitigazione per le opere già realizzate.

Legge Regionale 19 novembre 2002, n. 30

Con questa legge, la regione Friuli Venezia Giulia disciplina le funzioni e l'organizzazione delle attività a essa attribuite in materia di energia dal Decreto Legislativo 23 aprile 2002, n. 110 (Norme di attuazione dello statuto speciale della regione Friuli Venezia Giulia concernenti il trasferimento di funzioni in materia di energia, miniere, risorse geotermiche e incentivi alle imprese), il conferimento di funzioni e compiti amministrativi alle Autonomie locali e la programmazione del sistema energetico regionale nelle sue diverse articolazioni settoriali.

In particolar modo, l'Art. 13 tratta la "Realizzazione di elettrodotti di interesse sovraregionale e regionale", evidenziando secondo quali modalità vadano rilasciati i provvedimenti di Valutazione di Impatto Ambientale per gli elettrodotti sovraregionali con tensione uguale o inferiore a 150 kV e per gli elettrodotti regionali con tensione da 30 a 150 kV.

11.3 - Normativa sulla distribuzione di energia elettrica

La legislazione in questo campo fa riferimento alla Legge 14 novembre 1995, n. 481 (Norme per la concorrenza e la regolazione dei servizi di pubblica utilità. Istituzione delle Autorità di regolazione dei servizi di pubblica utilità), ed è piuttosto corposa a causa delle frequenti modifiche ed integrazioni apportate ai testi precedentemente emanati.

Deliberazione dell'Autorità per l'energia elettrica e il gas 18 ottobre 2001, n. 228

Si tratta del Testo integrato delle disposizioni dell'Autorità per l'energia elettrica e il gas per l'erogazione dei servizi di trasporto, di misura e di vendita dell'energia elettrica. In esso viene definito fattore di potenza "un parametro funzione del rapporto tra l'energia reattiva e l'energia attiva immesse o prelevate in un punto di immissione o di prelievo".

In particolare si specifica che, per quanto concerne le opzioni tariffarie per il servizio di trasporto, l'esercente può applicare componenti tariffarie in relazione a differenze positive tra il valore 0.9 e il valore medio mensile del fattore di potenza del cliente finale.

11.4 - Bibliografia

- [11.1]. B.U.R. del Friuli Venezia Giulia 11 settembre 1996, n. 37
- [11.2]. Gazzetta Ufficiale Italiana n. 55 del 7 marzo 2001
- [11.3]. Gazzetta Ufficiale Italiana n. 297 del 22 dicembre 2001
- [11.4]. B.U.R. del Friuli Venezia Giulia 20 novembre 2002, n. 47
- [11.5]. Gazzetta Ufficiale Italiana n. 200 del 29 agosto 2003

XII

Conclusioni



Figura 12.1 - Statua di Nikola Tesla, a Belgrado.

La messa a punto del nuovo strumento informatico Phidel ha permesso di calcolare il campo di induzione magnetica in situazioni non proponibili con gli altri prodotti attualmente presenti sul mercato.

La sua validazione ha richiesto una campagna di misure presso linee ad altissima tensione. Sono stati valutati il campo generato da una linea singola in un punto e lungo dei tracciati, nonché l'evoluzione temporale del campo generato da una doppia linea.

Questi confronti con i dati sperimentali, oltre a servire da banco di prova per il software ed a fornire un sostegno sperimentale per la presente Tesi, hanno permesso di definire delle procedure di misura da adottare nelle diverse situazioni.

È emerso che nei casi complessi completamente determinati (quando le tensioni sono in fase) la scelta migliore è di ricorrere al calcolo tramite Phidel, oppure optare per un monitoraggio continuo. Quest'ultima scelta è d'obbligo nel caso di linee indipendenti.

Inoltre si è proceduto, mediante l'impiego del software e delle conoscenze acquisite sulla tipologia delle linee, ad una proposta di mitigazione di una situazione ambientale esistente, suggerendo il passaggio da una doppia linea alla soluzione tecnica qui definita doppia linea ottimizzata.

La doppia linea ottimizzata può essere una valida alternativa alle soluzioni tecniche già esistenti per la mitigazione del campo, dato che presenta il vantaggio di avere un basso rapporto costi/benefici.

Questo modo di operare può essere infine inserito nelle procedure di VIA, in cui vanno presentate valide alternative ad un progetto, per minimizzare l'impatto delle opere sulla popolazione. Al momento della chiusura della Tesi, nella sezione di Fisica Ambientale dell'ARPA del Friuli Venezia Giulia si sta prendendo in considerazione la possibilità di avvalersi di Phidel come software per il calcolo dei campi generati da elettrodotti, non solo per studi interni ma anche per le elaborazioni che precedono la documentazione ufficiale. Il fatto di averlo sviluppato in base alle specifiche esigenze di chi si trova a lavorare direttamente sul campo costituisce certamente un notevole punto a suo favore, che si somma alla possibilità di poter decidere la strada da intraprendere per le nuove modifiche ed opzioni implementabili.

XIII

Ringraziamenti

Naturalmente questo lavoro è stato realizzato anche grazie al contributo di chi si mi ha seguito durante tutta la sua evoluzione: innanzitutto il prof. Luciano Bertocchi, Renato Villalta e Massimiliano Benes, che hanno curato le correzioni e sono stati prodighi di preziosi consigli, e il prof. Franco Calligaris, per la revisione finale.

Ma non voglio dimenticare tutti coloro che mi hanno fornito, seppur temporaneamente, il loro prezioso e valido sostegno: Annalisa Drigo, che mi ha seguito nel primo periodo, Francesco Montanari, che si è occupato della parte relativa al catasto degli elettrodotti ed ha partecipato ad alcune misure, i tecnici dell'OSMER, che mi hanno prontamente inviato i dati delle centraline meteo, Daniele Scochet per l'aiuto nel linguaggio PHP, Anna Bampo per alcuni consigli che sono stati prontamente implementati nel software, ed infine tutti gli amici della sezione di Fisica Ambientale dell'ARPA di Udine che non hanno mai negato un aiuto quando ho avuto bisogno di loro.