

# POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Elettrica

**Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Elettrica**

Tesi di Laurea Magistrale

## **Modellizzazione del sistema cavo-motore elettrico in bassa ed alta frequenza**



**Relatore**

Prof. Paolo Guglielmi

**Corelatore**

Riccardo Ruffo

**Candidato**

Gabriele Castagnaro

Dicembre 2017

## **Indice**

<b>1. Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>2. Capitolo 1 – Descrizione teorica</b>	<b>4</b>
<b>3. Capitolo 2 – Ottimizzazione deterministica ed euristica</b>	<b>14</b>
<b>4. Capitolo 3 – Utilizzo Matlab per disegno cavo trifase</b>	<b>26</b>
<b>5. Capitolo 4 - FEMM</b>	<b>38</b>
<b>6. Capitolo 5 – Verifica sperimentale filtro</b>	<b>56</b>
<b>7. Citazioni</b>	<b>58</b>
<b>8. Riferimenti formule</b>	<b>59</b>
<b>9. Bibliografia</b>	<b>63</b>

## **Introduzione**

La seguente tesi verterà sulla modellizzazione di un sistema cavo-motore elettrico, analizzato sia in bassa sia in alta frequenza.

Nei capitoli seguenti verranno descritte, in modo esaustivo, le varie operazioni sia pratiche che teoriche che sono state attuate nello svolgimento della tesi.

A tale scopo verranno descritti i programmi di calcolo utilizzati e le modalità di svolgimento di alcune misure sperimentali che si sono rese necessarie, per motivi che verranno meglio spiegati successivamente.

Occorre precisare che la parte teorica della tesi è stata basata principalmente sullo studio di alcune pubblicazioni IEEE.

## Capitolo 1 – Descrizione teorica

Occorre fare un excursus teorico per poter spiegare in modo esaustivo le soluzioni al problema dell'interferenza elettromagnetica.

Per fare questo, si è usufruito di alcuni articoli pubblicati sullo IEEE. Dopo un'attenta analisi, si è deciso di prendere in considerazione soltanto alcuni dei numerosi articoli redatti sulla materia in questione.

In primis si descrive la teoria espressa dall'articolo [1] in cui si identificano i parametri di un motore AC studiandoli, però, in alta frequenza. Infatti, come viene precisato all'inizio dell'articolo stesso, si è deciso di studiare il fenomeno solo alle alte frequenze perché a tali frequenze si verificano i problemi di interferenza elettromagnetica.

Infatti, come viene sostenuto nello stesso articolo, le frequenze di modulazione PWM nei motori AC sono nell'ordine delle decine di kHz; questo produce in uscita al convertitore, che è un inverter, una sovratensione e delle correnti parassite che confluiscono nelle capacità parassite dei cavi e del motore.

Gli autori di questo articolo si prefissano di ricavare i parametri del motore attraverso due impedenze: una fase-terra, denominata  $Z_{wg}(f)$ , e una fase-neutro, chiamata  $Z_{wn}(f)$ .

Gli autori, non potendo chiaramente studiare range infiniti di frequenza, hanno ristretto il campo di frequenza tra 1kHz e 1 MHz, poiché le componenti che commutano a frequenze superiori a 1 MHz, non sono in grado di penetrare a fondo negli avvolgimenti del motore, che è di natura induttiva. Inoltre, in questo range di frequenza, viene usato il modello a parametri concentrati del motore; potendo così studiare il fenomeno in modo accurato attraverso l'uso di software.

Nel modello a parametri concentrati vi sono:

- $L_d$  è l'induttanza di dispersione di fase
- $C_g$  è la capacità che rappresenta i fenomeni capacitivi passitici tra fase-terra
- $R_e$  è la resistenza che rappresenta i fenomeni di corrente parassita nel materiale magnetico e nel telaio del motore
- $R_{se}$  e  $L_{se}$  rappresentano il fenomeno dell'effetto pelle.

In seguito sono stati fatti anche degli studi su motori ad induzione e Synchrel di taglie diverse, la cui potenza era in un range compreso tra 1.5 kW e 7.5 kW.

Per la determinazione sperimentale dei valori di  $Z_{wg}(f)$  e  $Z_{wn}(f)$  si fanno svariate misurazioni, con il rotore del motore in una diversa posizione angolare ciascuna volta, poiché si pensava che la posizione del rotore influisse sul valore delle impedenze citate precedentemente.

Dai dati sperimentalmente ricavati, si è giunti alla conclusione che i valori di tali impedenze sono indipendenti dalla posizione angolare del rotore.

Successivamente, si considera che per i motori che vengono studiati dagli autori dell'articolo, non è possibile avere accesso al neutro; quindi, di conseguenza, l'unica impedenza che potrà essere ricavata sarà quella fase-terra, ovvero  $Z_{wg}$ .

A valori di frequenza nell'ordine del MHz, vi è un secondo picco di risonanza che, proprio per i valori di frequenza a cui si verifica, può essere considerato trascurabile.

Quindi il modello circuitale, considerato dagli autori medesimi, si può ritenere valido per descrivere il fenomeno dell'interferenza elettromagnetica per valori di frequenza tra 1 kHz e 1 MHz.

Quindi, gli autori dell'articolo, procedono alla formalizzazione matematica delle espressioni delle due impedenze, nel dominio di Laplace:

$$Z_{wg}(s) = \frac{1}{3} \frac{\frac{s^2}{Cg} + \frac{s}{Cg^2 Re} + \frac{s}{Cg^2 Ld}}{s^3 + 2\frac{s^2}{Cg Re} + 2\frac{s}{Cg Ld}} \quad (1)$$

$$Z_{wn}(s) = \frac{1}{3} \frac{\frac{2s^2}{Cg} + 2\frac{sRse}{CgLse}}{s^3 + s^2\left(\frac{Rse}{Lse} + \frac{2}{CgRe}\right) + 2s\left(\frac{1}{CgLd} + \frac{Rse}{CgLseRe} + \frac{1}{CgLse}\right) + \frac{2Rse}{CgLdLse}} \quad (2)$$

Da queste espressioni si ricavano i vari parametri del motore.

Si può notare che, l'impedenza fase-terra è particolarmente influenzata dal valore dal fenomeno di interferenza elettromagnetica, poiché nell'espressione della stessa compare, sia a numeratore sia a denominatore, l'induttanza  $Ld$ .

Mentre, per quanto riguarda l'altra impedenza,  $Ld$  compare ma in modo meno influente rispetto all'impedenza fase-terra.

Viene poi verificato \*\*che il valore di induttanza di dispersione di fase risulta essere alto sia nei motori ad induzione sia in quelli Synchronrel.

Invece, nell'articolo [2] si studia il fenomeno con un'ottica leggermente differente.

Analogamente all'articolo precedente, anche qui viene usato il modello a parametri concentrati del motore, considerando le capacità fase-fase e fase-terra.

Il modello, pur essendo, come detto pocanzi, a parametri concentrati, presenta alcune differenze con quello dell'articolo [1], caratterizzato dai seguenti parametri:

- R è la resistenza di statore e rotore
- Ld è l'induttanza di dispersione
- Ct è la capacità fase-fase
- Cg è la capacità fase-terra
- Re è la resistenza delle correnti parassite nel telaio e nelle parti magnetiche del motore

Anche qui, come nell'articolo [1] viene ristretto il range di frequenza tra 1 kHz e 1 MHz. Inoltre, vengono considerate le stesse impedenze, ovvero quella fase-terra e fase-neutro.

Viene fatta un'ipotesi semplificativa, ovvero che nel range di valori di frequenza considerati, la resistenza R risulta essere trascurabile rispetto all'induttanza di dispersione Ld.

Quindi, vengono ricavate le seguenti espressioni semplificate delle due impedenze, nel dominio di Laplace:

$$Z_{wn}(s) = \frac{sLd}{3[s^2Ld\left(Ct + \frac{Cg}{2}\right) + s\frac{Ld}{Re} + 1]} \quad (3)$$

$$Z_{wg}(s) = \frac{s^2Ld(Ct + Cg) + s\frac{Ld}{Re} + 1}{6sCg[s^2Ld\left(Ct + \frac{Cg}{2}\right) + s\frac{Ld}{Re} + 1]} \quad (4)$$

Se si fa lo studio delle espressioni precedenti nel dominio della frequenza, si ricavano le formule della frequenza dei poli e degli zeri.

Infatti la frequenza del polo di  $Z_{wn}$  è:

$$fp(w_n) = \frac{1}{2\pi\sqrt{Ld(Ct + \frac{Cg}{2})}} \quad (5)$$

Mentre quella dello zero di  $Z_{wg}$  è:

$$fz(w_g) = \frac{1}{2\pi\sqrt{Ld(Ct + Cg)}} \quad (6)$$

D'altronde, si ha anche la seguente uguaglianza tra i altri due poli di  $Z_{wg}$  e  $Z_{wn}$ :

$$fp(w_g) = fp(w_n) \quad (7)$$

Si possono fare delle semplificazioni delle espressioni dello zero e del polo, in quanto se consideriamo le basse frequenze, cioè valori prossimi al kHz, otteniamo che:

$$Cg = \frac{1}{6(2\pi f Z_{wg})} \quad (8)$$

Se, invece, consideriamo le alte frequenze, e quindi valori nell'intorno del MHz, si ottiene che l'espressione di  $Ct$  può essere ricavata dalla seguente equivalenza:

$$6Cg \frac{Ct + \frac{Cg}{2}}{Ct + Cg} = \frac{1}{2\pi f Z_{wg}} \quad (9)$$

Ora, è possibile fare un'ulteriore semplificazione, considerando il fatto che  $C_t$  è trascurabile rispetto a  $C_g$ , si ottiene che le nuove espressioni delle impedenze  $Z_{wg}$  e  $Z_{wn}$  sono:

$$Z_{wn}(s) = \frac{sLd}{3[s^2Ld\frac{Cg}{2} + s\frac{Ld}{Re} + 1]} \quad (10)$$

$$Z_{wg}(s) = \frac{s^2LdCg + s\frac{Ld}{Re} + 1}{6sCg[s^2Ld\frac{Cg}{2} + s\frac{Ld}{Re} + 1]} \quad (11)$$

Di conseguenza, anche le espressioni delle frequenze del polo e dello zero diventano:

$$fp(w_n) = fp(w_g) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2}{LdCg}} \quad (12)$$

$$fz(w_g) = \frac{1}{2\pi\sqrt{LdCg}} \quad (13)$$

La formula di  $C_g$  resta, invece, immutata rispetto a quella precedentemente descritta.

Quindi, il valore dell'induttanza di dispersione risulta essere pari a:

$$Ld = \frac{1}{(2\pi fz(w_g))^2 Cg} \quad (14)$$

Tale equazione è valida sia alle basse frequenze, nell'ordine dei kHz, sia alle alte frequenze, nell'ordine dei MHz.

Gli autori dell'articolo [2] hanno fatto un'analisi sperimentale su una serie di macchine a 4 poli alla frequenza di 50 Hz.

I risultati hanno confermato che la differenza tra i valori teorici e quelli sperimentali è pressoché trascurabile.

Se si considerano anche gli effetti di non linearità magnetica, entra in gioco il concetto di saturazione magnetica, che influisce sul valore di induttanza.

Per limitare il fenomeno della saturazione viene considerato come riferimento un motore con i seguenti parametri:

- Potenza nominale = 7.5 kW
- $C_g = 1 \text{ nF}$
- $L_d = 12.97 \text{ mH}$
- $R_e = 7.32 \text{ k}\Omega$

Per testare il motore vengono usate un'onda quadra e una triangolare e il software di simulazione PSpice.

Quindi, i parametri induttivi e capacitivi del motore vengono identificati attraverso una risposta ad alta frequenza; la capacità  $C_g$  avrà la seguente espressione logaritmica:

$$C_g = 0.009 + 0.53 \ln(\text{Pr}) \quad (15)$$

dove:

- Pr: potenza nominale del motore espressa in kW
- $C_g$  capacità espressa in nF

Mentre, l'induttanza di dispersione avrà la seguente espressione esponenziale:

$$L_d = e^{2.36 - 0.1 \text{Pr}} \quad (16)$$

dove:

- Pr: potenza nominale del motore espressa in kW
- $L_d$  induttanza di dispersione espressa in mH

Da notare che l'induttanza presenta una formula esponenziale rispetto alla capacità che ne ha una di forma logaritmica.

Il problema dell'interferenza elettromagnetica è stato anche affrontato nell'articolo [3].

Essi affrontano, come si può evincere dal titolo dello stesso articolo, il problema nell'ottica in cui vi è la presenza di lunghi cavi.

Si fa notare che, la presenza delle già citate sovratensioni sul motore che danneggiano i cavi e l'isolamento del motore stesso, ne abbreviano la vita.

Le possibili soluzioni per limitare gli effetti della sovratensione sono: l'utilizzo di motori più efficienti, aumentare l'isolamento dei cavi e del motore o aumentare l'impedenza lato motore od inverter; l'effetto di quest'ultima soluzione sarà più evidente successivamente.

A tale scopo si deve considerare una linea elettrica di lunghezza definita, in genere è di alcuni km, lungo la quale si verificano dei fenomeni transitori di riflessione della tensione e della corrente.

Verranno considerate linee senza perdite, ovvero con l'assenza dei parametri puramente dissipativi.

In PWM il periodo di oscillazione in alta frequenza è definito come il tempo che un'onda di corrente o tensione per percorrere un tragitto completo, cioè composto da un'andata ed un ritorno dell'onda stessa.

Suddetto periodo è definito come:

$$T_o = 4\tau \quad (17)$$

Naturalmente, il periodo è legato alla frequenza dalla seguente espressione:

$$f_o = \frac{1}{T_o} = \frac{1}{4\tau} = \frac{1}{4l\sqrt{LoCo}} \quad (18)$$

dove:

- $\frac{1}{\sqrt{LoCo}}$  è definita come velocità di propagazione della linea,

indicata con la lettera  $v$ ; si misura in m/s

secondo questa teoria, si possono definire dei fattori di riflessione, chiamati  $\Gamma$ ; esso è una grandezza adimensionale.

Tali fattori possono essere definiti per ciascun punto della linea; quindi, ad inizio linea si avrà un fattore di riflessione  $\Gamma_1$  definito come:

$$\Gamma_1 = \frac{Z_s - Z_c}{Z_s + Z_c} \quad (19)$$

dove:

- $Z_s$  è l'impedenza ad inizio linea; si misura in  $\Omega$
- $Z_c$  è l'impedenza caratteristica della linea; si misura in  $\Omega$

L'importanza dell'impedenza caratteristica della linea, sarà sviluppata in maniera approfondita nel corso della tesi.

Siccome l'impedenza  $Z_s$  è trascurabile rispetto a  $Z_c$ , si ha che il fattore di riflessione  $\Gamma_1$  è circa pari a -1.

Mentre, a lato del carico, cioè a fine linea, il fattore di riflessione, che si chiamerà  $\Gamma_2$ , è definito come:

$$\Gamma_2 = \frac{Z_l - Z_c}{Z_l + Z_c} \quad (20)$$

dove:

- $Z_l$  è l'impedenza di carico; si misura in  $\Omega$
- $Z_c$  è l'impedenza caratteristica della linea; si misura in  $\Omega$

La tensione sarà influenzata dai fattori di riflessione; quindi la tensione avrà due contributi, uno dell'onda di andata ( $v_1$ ) e uno di quella di ritorno ( $v_2$ ).

$$V = v_1 + v_2 \quad (21)$$

Tale espressione può essere scritta, tenendo conto dei fattori di riflessione:

$$V = v * (1 + \Gamma) \quad (22)$$

Tenendo conto che la corrente è legata alla tensione per mezzo dell'impedenza caratteristica, come si può notare dalla seguente espressione:

$$I = \frac{v}{Z_c} (1 + \Gamma) \quad (23)$$

La tensione è strettamente correlata ad alcuni fattori, tra i quali la lunghezza del cavo, la frequenza di commutazione.

Gli autori hanno formalizzato la correlazione tra tensione di picco e la tensione in ingresso nel modo seguente:

$$V_{picco} = (1 + \Gamma^2)V \quad (24)$$

Questa relazione si può ritenere valida fino a quando la costante di tempo di trasmissione dell'onda di tensione o di corrente, che è pari a  $2\tau$ , è maggiore del tempo di salita dell'onda ( $t_{rise}$ ).

Invece se  $2\tau < t_{rise}$ , si ha che la tensione al lato motore ( $V_{back}$ ) sarà pari a:

$$V_{back} = V \left( \frac{2\tau}{t_{rise}} \right) \quad (25)$$

La sovratensione nelle due diverse condizioni di costanti di tempo, risulta essere minore se  $2\tau < t_{rise}$ .

Come detto precedentemente, la sovratensione è legata a molteplici fattori, tra i quali la lunghezza critica del cavo che si può formulare nel modo seguente:

$$l_c = \frac{t_{rise}}{2} v \quad (26)$$

Gli autori dell'articolo [3] propongono alcune soluzioni per alleviare il problema della sovratensione, tra le quali quella di inserire un filtro RC del primo o secondo ordine; un'altra è quella di usare un filtro RL o RLC ai terminali dell'inverter.

A proposito dell'inverter, si può fare una breve descrizione del problema principale che si riscontra di sovratensione, cioè quello del funzionamento non controllato da generatore del motore.

Esso è un fenomeno che si verifica al lato del sistema convertitore formato da raddrizzatore ed inverter. Il problema principale è che quando si verifica tale fenomeno, le sovratensioni che ci possono essere al lato motore, si trasferiscano, proprio a causa di questo fenomeno, al lato generatore e quindi provocare malfunzionamenti o danni.

L'impedenza di filtro è la seguente:

$$Z_{filtro} = \frac{j2\pi fLdRd}{Rd + j2\pi fLd} \quad (27)$$

Gli autori concludono che:

- $Rd$  deve essere trascurabile rispetto all'impedenza caratteristica del cavo
- $Ld$  è proporzionale alla lunghezza del cavo

## Capitolo 2 – Ottimizzazione deterministica ed euristica

Sulla base dei concetti introdotti precedentemente, si passa ora a descrivere come si è affrontato il problema della stima dei parametri dell'impedenza di filtro.

Si è deciso di procedere a step successivi nell'affrontare il suddetto problema. Come punto in comune le varie analisi hanno il fatto che viene confrontata una curva d'impedenza di riferimento con delle curve ricavate da parametri resistivi, capacitivi ed induttivi generati in vario modo.

Inoltre, verranno usati due diversi metodi di risoluzione dei problemi, ovvero quello deterministico ed euristico.

Questi due metodi hanno due differenti modi di approccio al problema: il primo confronta tutte le curve con quella di riferimento, secondo una variabile di discretizzazione (epsilon), che determina quando viene raggiunto l'optimum e, quindi, la curva in questione è classificata come quella ottimale.

Il secondo invece ricerca la curva ottimale tra tutte quelle che ci sono, senza però confrontarle tutte, ma solo una parte. Occorre precisare che esistono svariati approcci che appartengono a questa famiglia; infatti, nel corso degli anni sono stati sviluppati, in maniera sempre più frequente, numerosi metodi, alcuni anche con nomi particolari: ad esempio esistono metodi basati sul comportamento delle api, un altro basato sul peso che uno zaino può sostenere, e via discorrendo.

Nel nostro caso, si è deciso di utilizzare il metodo di ottimizzazione basato sul volo di uno stormo di rondini.

Questo stormo, con il suo movimento, all'inizio casuale, ma, poi, sempre più accurato, andrà a concentrarsi sulla caratteristica che sarà classificata essere quella migliore. Naturalmente anche in questo caso ci sarà un valore di soglia di uscita del risultato ottimale.

In prima analisi si è deciso di scrivere un programma Matlab in cui i parametri resistenza, capacità sono generati all'interno del codice stesso tramite l'uso di intervalli di valori: per la resistenza verranno assegnati un valore  $r\_min$  e un altro  $r\_max$ , come descritto in seguito:

$$\begin{aligned}r\_min &= 0.001 \\ r\_max &= 1700\end{aligned}$$

invece, per la capacità si sono scelti i valori seguenti:

$$\begin{aligned}c\_min &= 10^{-10} \\ c\_max &= 10^{-6}\end{aligned}$$

Analogamente, è stato fatto per la frequenza:

```
f_min=600;  
f_max=450000;
```

Inoltre, sono state assegnate anche le dimensioni dei vettori di resistenza, capacità e frequenza che il programma genererà ogni qualvolta verrà avviato; esse sono uguali per tutti e tre i vettori e pari a 200.

I valori di resistenza si intendono espressi in Ohm; quelli di capacità in Farad e quelli di frequenza in Hz.

Nel processo di ottimizzazione di tipo deterministico si sono definiti degli errori sia sul modulo sia sulla fase dell'impedenza classificata come quella ottimale; inoltre è definito anche uno scarto massimo, che ha un valore elevato nell'ordine del  $10^6$ , proprio per far in modo che alla prima interazione esso sia sostituito dall'errore che risulterà essere sicuramente minore di esso; quindi alle interazioni successive questo errore sarà confrontato di ciclo in ciclo con gli errori di modulo e fase dell'impedenza e, se esso risulterà essere maggiore degli altri, sarà a sua volta sostituito da quello di valore minore, e così per tutte le iterazioni.

All'interno del programma si vogliono anche ottenere i grafici del modulo e della fase dell'impedenza ricavata dai valori di resistenza, capacità che sono stati definiti precedentemente; inoltre si vogliono raffigurare anche il modulo e la fase dell'impedenza che risulta essere quella ottimale, alla fine di tutte le iterazioni necessarie.

Occorre precisare che il grafico del modulo è in scala logaritmica, perciò nel codice verrà scritto come:

$$20*\log_{10}(\text{modulo\_impedenza})$$

Di seguito, verranno inseriti i grafici, ottenuti dal codice Matlab, del modulo e della fase dell'impedenza ricavata da valori generati casualmente da un file Excel. Occorre fare una precisazione riguardo al file Excel; infatti in esso sono contenute diverse colonne contenenti diversi parametri: modulo, fase, frequenza.

Tali valori vengono esportati direttamente da Excel a Matlab tramite una funzione chiamata xlsread. Tale funzione di Matlab richiede il nome del file, il foglio e la colonna da importare; di seguito è dato un esempio dal codice:

Importazione del modulo dell'impedenza:

```
filename='Dati_da_importare.xlsx';  
sheet=1;  
colonna_modulo_impedenza='C2:C201';  
modulo_importato=xlsread(filename,sheet,colonna_modulo_impedenza);
```

Importazione della fase dell'impedenza:

```
filename='Dati_da_importare.xlsx';  
sheet=1;  
colonna_fase_impedenza='D2:D201';  
fase_importata=xlsread(filename,sheet,colonna_fase_impedenza);
```

Importazione della frequenza:

```
filename='Dati_da_importare.xlsx';  
sheet=1;  
colonna_frequenza='B2:B201';  
% Funzione di importazione della colonna frequenza  
frequenza_importata=xlsread(filename,sheet,colonna_frequenza);
```

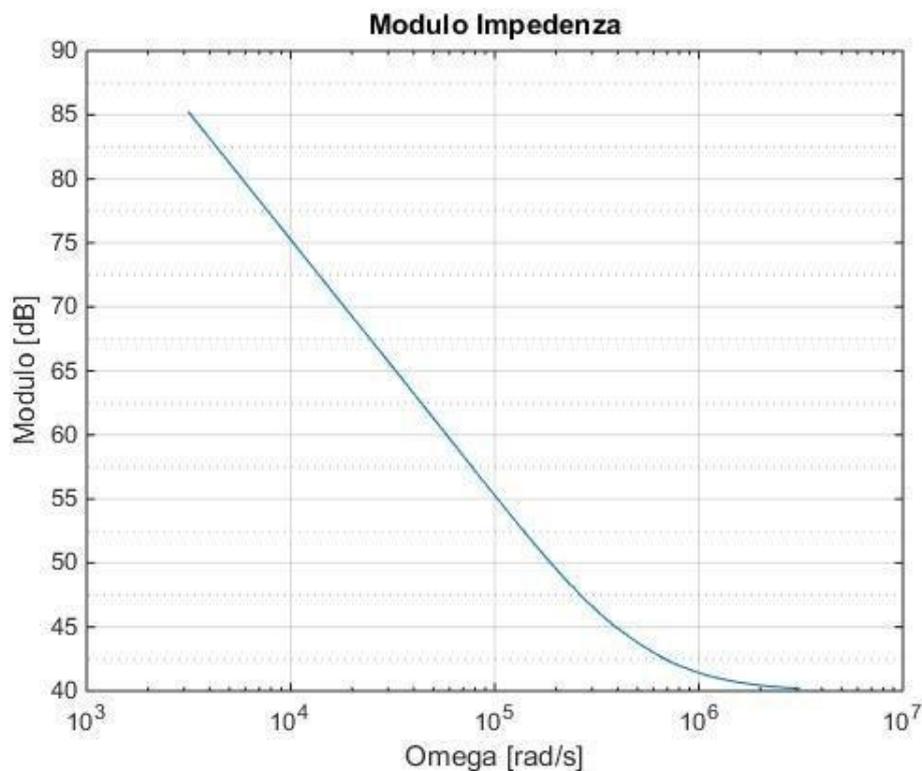
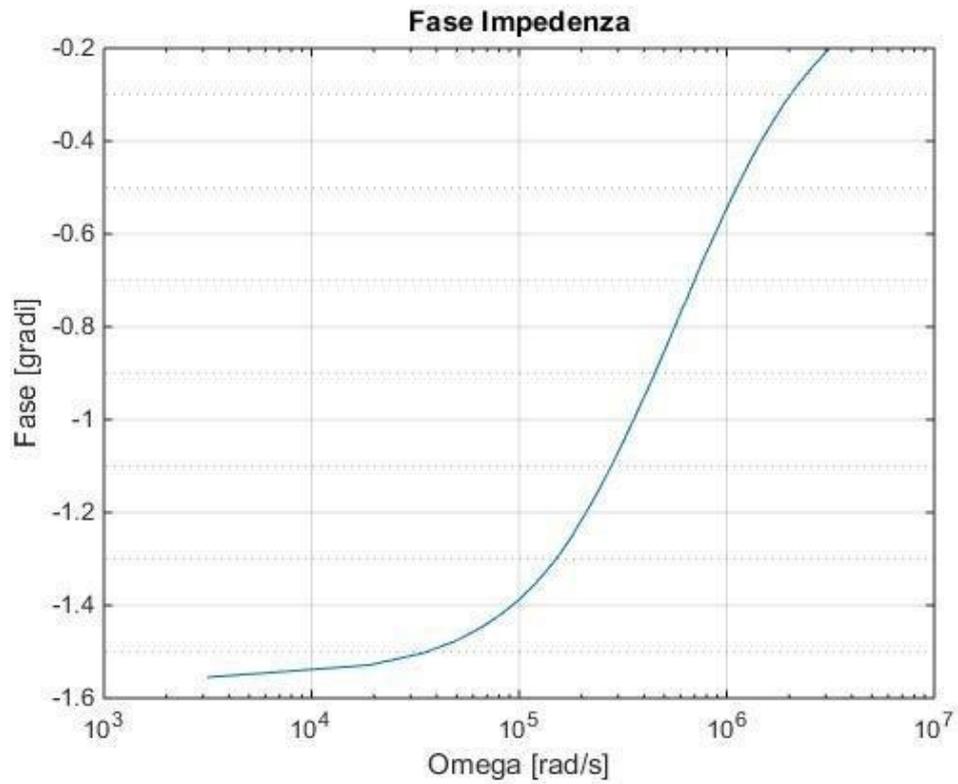
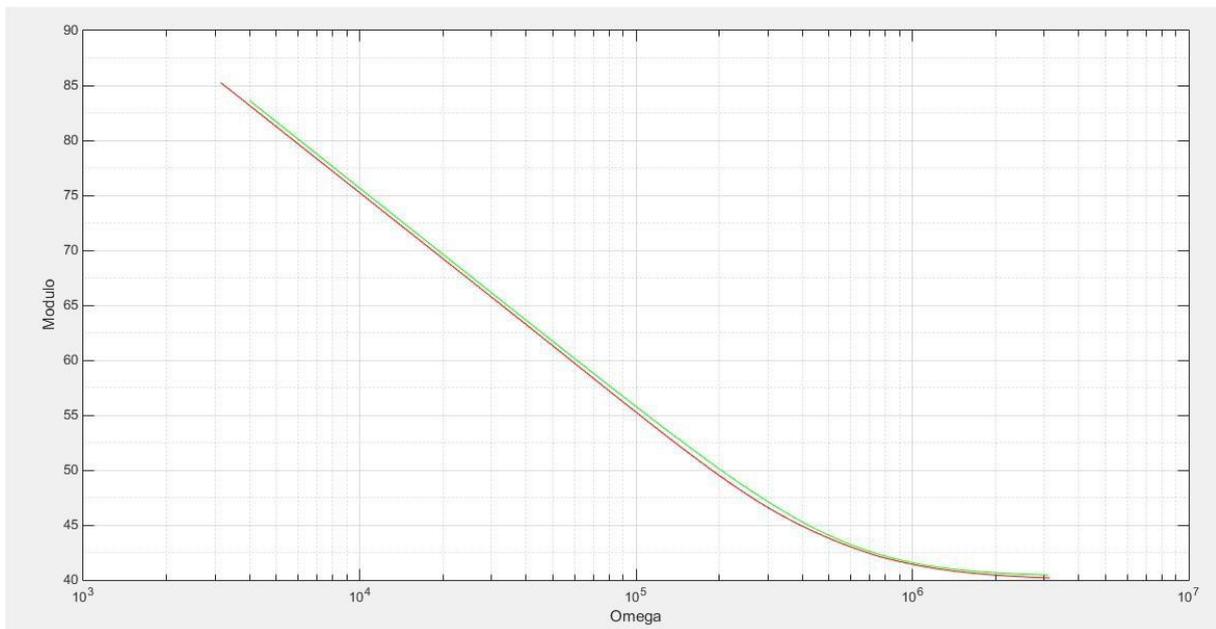


Fig.1: Modulo impedenza misurata



*Fig.2: Fase dell'impedenza misurata*

Con l'implementazione del codice Matlab sono stati ottenuti i seguenti risultati:



*Fig.3: Moduli impedenze confrontati - metodo deterministico*

L'errore calcolato risulta essere inferiore al 3%, quindi del tutto tollerabile e accettabile; tenendo sempre in considerazione il fatto che il risultato perfetto non potrà mai essere raggiunto per via del fatto che la realtà fisica, per quanto si cerchi di rappresentarla con modelli matematici sempre più complessi, non sarà mai perfettamente e completamente identica al modello matematico usato.

Dopo aver fatto queste considerazioni, si passa ora all'analisi del problema applicando, però, la metodologia di soluzione basata sull'ottimizzazione di tipo euristico.

Come accennato in precedenza, si è deciso di applicare un solo tipo di metodo, cioè quello basato sul movimento dello stormo di rondini, tra i tanti sviluppati e disponibili.

Questa, in verità, non potrà essere considerata una scelta limitata perché è inverosimile pensare di studiare il fenomeno utilizzando tutte le metodologie di ottimizzazione euristica, in quanto esse risultano essere un numero elevatissimo e sempre in evoluzione; d'altronde bisogna anche considerare la possibilità concreta che i vari metodi di ottimizzazione, seppure con approcci diversi, ma sempre con lo stesso tipo di metodo di soluzione – ovvero quello euristico – portino a risultati simili, se non identici, con un errore minimo trascurabile.

Verrà descritto, brevemente, il metodo euristico utilizzato nel corso della tesi, ovvero quello dello stormo di rondini.

Questo metodo di ottimizzazione è stato sviluppato da Kennedy, Eberhart e Shi in seguito allo studio del moto degli stormi di uccelli o dei banchi di pesci; essi lo concepirono per lo studio dei comportamenti umani nella società, poi quando si compresero l'importanza e il potenziale di questo metodo si decise di semplificarlo per gli scopi dell'ottimizzazione.

Occorre definire quindi un'area di ricerca dell'optimum, in cui le rondini si muoveranno nel corso del processo di ottimizzazione. L'optimum viene definito in base ad un parametro di misura della qualità, chiamato in inglese fitness. Si devono definire, inoltre, anche il numero di rondini e di iterazioni che l'algoritmo di ottimizzazione andrà a eseguire; in quanto, più questo parametro ha un valore elevato, più tempo il processo di ottimizzazione ci impiegherà per giungere al termine e quindi trovare l'optimum.

Occorre, a questo punto, fare un'importante considerazione su questo metodo di ottimizzazione: infatti a causa della sua stessa struttura, non può essere garantito che quella trovata, al termine del processo di ottimizzazione sia la soluzione ottimale che si andava cercando, ma può essere che essa sia una delle soluzioni ottimali; quindi, è consigliato fare più cicli di questo processo, accrescendo così la possibilità che quella trovata sia effettivamente la soluzione ottima cercata.

Fatta questa doverosa ed importante considerazione, è necessario aggiungere altri particolari riguardo all'algoritmo stesso.

Ad ogni iterazione, viene identificato un possibile optimum, che viene denominato "candidato all'ottimo"; esso potrà risultare alla fine del processo l'optimum oppure potrà venire sostituito da un altro "candidato all'ottimo".

Si devono anche definire, per ogni rondine, una velocità, inteso come vettore, quindi con un modulo, direzione e verso; infatti essa risulterà essere importante per il movimento della relativa rondine.

Quando una rondine trova un "candidato all'ottimo", le restanti sono attratte verso quella che ha trovato il possibile optimum, però muovendosi verso di essa, perseverano nella ricerca dell'ottimo; così, quando si verifica che una di queste trova a sua volta un ottimo possibile, attrae verso di sé le altre, e via dicendo.

Quindi, tenendo presente la velocità di spostamento aggiornata, la migliore soluzione locale e globale trovate, questo metodo di ottimizzazione ricerca l'ottimo globale; ma come detto in precedenza, può risultare un falso ottimo globale ed essere soltanto un ottimo locale. I tre fattori descritti pocanzi sono anche classificati come componente inerzia, cognitiva e sociale.

Per cercare di evitare o, quantomeno, cercare di ridurre, il problema legato alla possibilità che quello ottenuto sia un falso ottimo globale, si utilizzano dei fattori casuali, detti anche jittering.

All'inizio del codice viene fatta una pulizia dei dati contenuti nel Workspace e nella finestra dei comandi:

```
clear all  
close all  
clc
```

Definizione dei parametri iniziali:

```
omega=4000:100:3100000;  
num_rondini=10;
```

Inserisco una soglia oltre la quale non senso processare ulteriormente:

```
tolleranza=10^-1;
```

Fisso un numero massimo di iterazioni:

```
num_max_iter=400;
```

Definizione range resistenza e capacità:

```
r_min=0.001;  
r_max=1000;  
c_min=10^-15;  
c_max=10^-6;  
iter=1;
```

Definisco la posizione di partenza delle rondini, aggiungendo un fattore aleatorio per avere maggiore contributo di casualità:

```
pos_iniziale_r = r_min + (r_max - r_min) * rand(num_rondini, 1);  
pos_iniziale_c = c_min + (c_max - c_min) * rand(num_rondini, 1);
```

Creo un vettore con le posizioni iniziali create:

```
pos = [pos_iniziale_r, pos_iniziale_c];
```

Impedenza da confrontare con quella misurata sperimentalmente, rappresentata nella forma A+jB:

```
impedenza = pos_iniziale_r * ones(1, size(omega, 2))  
+ (1 ./ (i * pos_iniziale_c * omega));
```

Calcolo il modulo e la fase dell'impedenza:

```
modulo_impedenza = abs(impedenza);  
angolo_impedenza = angle(impedenza);
```

Definisco il vettore velocità come somma di due componenti: una resistiva (asse x) e una capacitiva (asse y), poi inserisco le due componenti in un vettore velocità:

```
velocita_r = zeros(num_rondini, 1);  
velocita_c = zeros(num_rondini, 1);  
velocita = [velocita_r, velocita_c];
```

Di seguito verranno definiti dei fattori che serviranno ad aggiungere ulteriore casualità al tutto.

Fattore di correzione della velocità:

$$k1 = 0.7;$$

Fattori correttivi della posizione:

$$k2 = 0.9;$$

$$k3 = 0.10;$$

Importo modulo, fase e frequenza dell'impedenza misurata sperimentalmente e definisco i parametri utili alla funzione che importa da Excel a Matlab.

Modulo impedenza:

```
filename='Dati_da_importare_metodo_euristico.xlsx';
sheet=1;
colonna_modulo_impedenza='C2:C201';
modulo_impedenza_misurata=xlsread(filename,sheet,colonna_modulo_impedenza);
```

Angolo impedenza in gradi:

```
filename='Dati_da_importare_metodo_euristico.xlsx';
sheet=1;
colonna_angolo_impedenza='D2:D201';
angolo=xlsread(filename,sheet,colonna_angolo_impedenza);
```

Trasformo deg in radianti:

$$angolo\_rad=(angolo*pi)/180;$$

Frequenza:

```
filename='Dati_da_importare_metodo_euristico.xlsx';
sheet=1;
colonna_frequenza='B2:B201';
frequenza=xlsread(filename,sheet,colonna_frequenza);
```

Definisco un vettore delle pulsazioni angolari:

```
omega_misurata=frequenza*2*pi;
```

Grafico del modulo dell'impedenza:

```
figure  
semilogx(omega_misurata,20*log10(modulo_impedenza_misurata))  
grid on  
xlabel('Omega')  
ylabel('Modulo')  
grid minor
```

Linearizzo impedenza da confrontare, in modo tale che le pulsazioni angolari siano considerate nello stesso intervallo:

```
modulo_impedenza_misurata_corretta=interp1(omega_misurata,modulo_impedenza_misurata,omega);
```

Definisco una soglia minima per cui il valore minimo trovato sia memorizzato come quello candidato ad essere il migliore:

```
soglia_max=10^60;
```

Ora c'è la parte di codice per determinare il risultato migliore

```
while iter<num_max_iter
```

Calcolo della funzione obiettivo per il numero di rondini:

```
for(m=1:num_rondini)  
funzione_obiettivo_totale_modulo(m)=sum(abs((modulo_impedenza(m,:)-  
modulo_impedenza_misurata_corretta)));
```

Prendo la funzione obiettivo più bassa che corrisponde all'errore tra la curva dell'impedenza di confronto con quella dell'impedenza misurata.

Il risultato migliore all'iterazione i-esima sarà pari a:

```
[ris_migliore_modulo_parziale,indice_modulo]=min(funzione_obiettivo_totale_modulo);
```

Quindi, ora voglio ottenere il risultato migliore in assoluto:

```
if (ris_migliore_modulo_parziale < soglia_max)
    soglia_max=ris_migliore_modulo_parziale;
    leader_r= pos(indice_modulo,1)
    leader_c= pos(indice_modulo,2)
```

Inserisco un flag per avere coscienza di come variano i valori che vengono ricavati ad ogni iterazione:

```
flag=ris_migliore_modulo_parziale
end
```

Calcolo la nuova velocità:

```
for m=1:num_rondini
    velocita(m,1)= velocita(m,1)+k1*(pos(indice_modulo,1)-pos(m,1))+(leader_r-
        pos(m,1))*k2*rand()+(r_min+(r_max-r_min))*k3*(rand()-rand());
    velocita(m,2)= velocita(m,2)+k1*(pos(indice_modulo,2)-pos(m,2))+(leader_c-
        pos(m,2))*k2*rand()+(c_min+(c_max-c_min))*k3*(rand()-rand());
```

Calcolo le posizioni:

```
pos(m,1)=velocita(m,1)+pos(m,1);
pos(m,2)=velocita(m,2)+pos(m,2);
```

Limitiamo le posizioni

```
if(pos(m,1)>=r_max)
    pos(m,1)=r_max;
    velocita(m,1)=0;
end
if(pos(m,1)<=r_min)
    pos(m,1)=r_min;
    velocita(m,1)=0;
end
if(pos(m,2)>=c_max)
    pos(m,2)=c_max;
    velocita(m,2)=0;
end
if(pos(m,2)<=c_min)
    pos(m,2)=c_min;
```

```

    velocita(m,2)=0;
    end
    end

```

Impedenza nella forma A+jB:

```

    impedenza=pos(:,1)*ones(1,size(omega,2)) +(1./(i*pos(:,2)*omega));

```

Modulo impedenza:

```

    modulo_impedenza=abs(impedenza);

```

Incremento il numero di iterazioni:

```

    iter=iter+1;

```

Grafico del movimento delle posizioni migliori trovate per ogni iterazione:

```

    scatter(pos(:,1),pos(:,2),'filled')
    xlim([r_min r_max])
    ylim([c_min c_max])
    pause(0.1)
    end

```

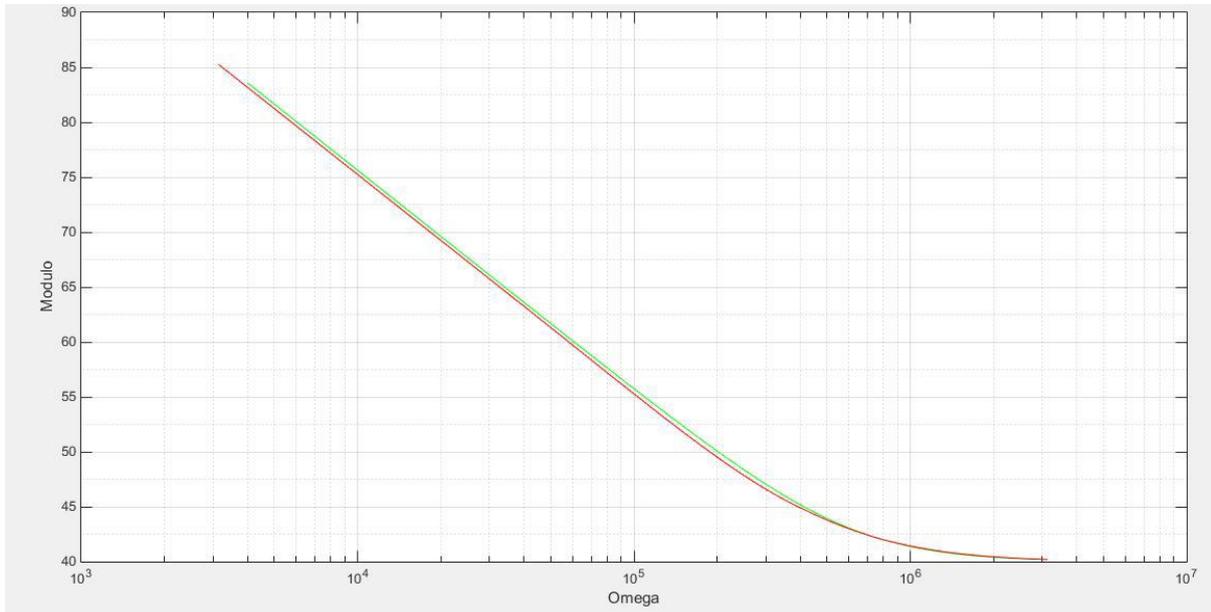
Grafico modulo ottimizzato:

```

    impedenza=leader_r*ones(1,size(omega,2)) +(1./(i*leader_c*omega));%A+jB
    modulo_impedenza=abs(impedenza);%Abbiamo il modulo
    semilogx(omega,20*log10(modulo_impedenza),'g')
    hold on
    grid on
    grid minor
    xlabel('Omega')
    ylabel('Modulo')
    semilogx(omega_misurata,20*log10(modulo_impedenza_misurata),'r')

```

Di seguito si riportano i grafici ottenuti dall'ottimizzazione euristica:



*Fig.4: Moduli impedenze confrontati - metodo deterministica*

Anche qui, come nel caso deterministico, l'errore è inferiore al 3%; per cui è del tutto accettabile per le stesse motivazioni espresse nel caso deterministico.

### Capitolo 3 – Utilizzo Matlab per disegno cavo trifase

Si utilizzerà un codice Matlab per disegnare un cavo trifase, ove i conduttori di fase sono formati da uno strato conduttivo, una guaina ed uno schermo. Mentre i conduttori di terra, anch'essi in numero pari a tre, sono formati da uno strato conduttivo ed una guaina. Vi sono poi una guaina ed uno schermo che racchiudono il tutto.

I vari conduttori elencati precedentemente sono composti da materiali diversi: i conduttori di fase e di terra sono in rame, mentre le guaine sono in PVC e gli schermi in Alluminio.

Nel codice Matlab verranno dati i vari raggi dei conduttori e le loro posizioni, secondo la logica delle coordinate polari.

- Per un conduttore di fase:

```
r_c1=10;  
r_c2=10;  
r_c3=10;  
teta_c1=pi/2;  
teta_c2=pi/2+((2*pi)/3);  
teta_c3=pi/2+((4*pi)/3);
```

Inserisco i valori in due vettori:

```
vettore_r=[r_c1,r_c2,r_c3];  
vettore_teta=[teta_c1,teta_c2,teta_c3];
```

Matrice delle coordinate polari:

```
Pc=[vettore_r;vettore_teta];
```

Considero guaina:

```
r_guaina_c1=15;  
r_guaina_c2=15;  
r_guaina_c3=15;  
teta_guaina_c1=pi/2;  
teta_guaina_c2=pi/2+((2*pi)/3);  
teta_guaina_c3=pi/2+((4*pi)/3);
```

Inserisco i valori in due vettori:

```
vettore_r_guaina=[r_guaina_c1,r_guaina_c2,r_guaina_c3];  
vettore_teta_guaina=[teta_guaina_c1,teta_guaina_c2,teta_guaina_c3];
```

Matrice delle coordinate polari:

```
P_guaina=[vettore_r_guaina;vettore_teta_guaina];
```

Considero schermatura:

```
r_schermo_c1=20;  
r_schermo_c2=20;  
r_schermo_c3=20;  
teta_schermo_c1=pi/2;  
teta_schermo_c2=pi/2+((2*pi)/3);  
teta_schermo_c3=pi/2+((4*pi)/3);
```

Inserisco i valori in due vettori:

```
vettore_r_schermo=[r_schermo_c1,r_schermo_c2,r_schermo_c3];  
vettore_teta_schermo=[teta_schermo_c1,teta_schermo_c2,teta_schermo_c3];
```

Matrice delle coordinate polari:

```
P_schermo=[vettore_r_schermo;vettore_teta_schermo];
```

Trasformo le coordinate polari dei conduttori in cartesiane:

```
for(i=1:3)  
x_c=Pc(1,:).*cos(Pc(2,:));  
y_c=Pc(1,:).*sin(Pc(2,:));  
end
```

Trasformo le coordinate polari delle guaine in cartesiane:

```
for(k=1:size(P_guaina,2))  
x_guaina=P_guaina(1,:).*cos(P_guaina(2,:));  
y_guaina=P_guaina(1,:).*sin(P_guaina(2,:));  
end
```

Trasformo le coordinate polari degli schermi in cartesiane:

```
for(g=1:size(P_schermo,2))
    x_schermo=P_schermo(1,:).*cos(P_schermo(2,:));
    y_schermo=P_schermo(1,:).*sin(P_schermo(2,:));
end
```

- Per un conduttore di terra:

```
r_t1=10;
r_t2=10;
r_t3=10;
teta_t1=pi/2;
teta_t2=pi/2+((2*pi)/3);
teta_t3=pi/2+((4*pi)/3);
```

Inserisco i valori in due vettori:

```
vettore_r_terra=[r_t1,r_t2,r_t3];
vettore_teta_terra=[teta_t1,teta_t2,teta_t3];
%Matrice delle coordinate polari
Pt=[vettore_r_terra;vettore_teta_terra];
```

Considero guaina:

```
r_guaina_t1=15;
r_guaina_t2=15;
r_guaina_t3=15;
teta_guaina_t1=pi/2;
teta_guaina_t2=pi/2+((2*pi)/3);
teta_guaina_t3=pi/2+((4*pi)/3);
```

Inserisco i valori in due vettori:

```
vettore_r_guaina_terra=[r_guaina_t1,r_guaina_t2,r_guaina_t3];
vettore_teta_guaina_terra=[teta_guaina_t1,teta_guaina_t2,teta_guaina_t3];
```

Matrice delle coordinate polari:

```
P_guaina_terra=[vettore_r_guaina_terra;vettore_teta_guaina_terra];
```

Trasformo le coordinate polari dei conduttori in cartesiane:

```
for(a=1:size(P_guaina_terra,2))
    x_t=Pt(1,:).*cos(Pt(2,:));
    y_t=Pt(1,:).*sin(Pt(2,:));
end
```

Trasformo le coordinate polari delle guaine in cartesiane:

```
for(b=1:size(P_guaina,2))
    x_guaina=P_guaina(1,:).*cos(P_guaina(2,:));
    y_guaina=P_guaina(1,:).*sin(P_guaina(2,:));
end
```

- Per la guaina e lo schermo esterni:

```
r_schermo_ext=100;
r_guaina_ext=90;
rif_guaina=0;
rif_schermo=0;
teta_schermo_ext=rif_schermo;
teta_guaina_ext=rif_guaina;
```

Matrice delle coordinate polari:

```
P_schermo_ext=[r_schermo_ext,teta_schermo_ext];
P_guaina_ext=[r_guaina_ext,teta_guaina_ext];
```

Trasformo le coordinate polari dei conduttori in cartesiane:

```
x_schermo_ext=P_schermo_ext(:,1).*cos(P_schermo_ext(:,2));
y_schermo_ext=P_schermo_ext(:,1).*sin(P_schermo_ext(:,2));
```

Trasformo le coordinate polari delle guaine in cartesiane:

```
x_guaina_ext=P_guaina_ext(:,1).*cos(P_guaina_ext(:,2));
y_guaina_ext=P_guaina_ext(:,1).*sin(P_guaina_ext(:,2));
```

- Per l'anima del cavo:

```

r_anima=5;
teta_anima=0;
P_anima=[r_anima,teta_anima];

```

Coordinate polari:

```

x_anima=P_anima(:,1)*cos(teta_anima);
y_anima=P_anima(:,1)*sin(teta_anima);

```

Poi questi dati, per i vari conduttori vengono utilizzati per plottare il cavo trifase.

Per ciascun conduttore si definiscono i seguenti parametri.

- Definisco i vari parametri per i conduttori di fase:

```

X0_conduttore=x_c+rif_guaina;
Y0_conduttore=y_c+rif_guaina;
punti=50;
semiA_conduttore=vettore_r;
semiB_conduttore=vettore_r;
ang_ell_conduttore=2*pi;
x_conduttore=x_c;
y_conduttore=y_c;
ang_ini_conduttore=vettore_teta;

```

- Definisco i vari parametri per le guaine dei conduttori di fase:

```

X0_guaina_conduttore=x_c+rif_guaina;
Y0_guaina_conduttore=y_c+rif_guaina;
semiA_guaina_conduttore=vettore_r_guaina;
semiB_guaina_conduttore=vettore_r_guaina;
ang_ell_guaina_conduttore=2*pi;
x_guaina_conduttore=x_c;
y_guaina_conduttore=y_c;
ang_ini_guaina_conduttore=vettore_teta_guaina;

```

- Definisco i vari parametri per gli schermi dei conduttori di fase:

```

X0_schermo_conduttore=x_c+rif_guaina;
Y0_schermo_conduttore=y_c+rif_guaina;
semiA_schermo_conduttore=vettore_r_schermo;
semiB_schermo_conduttore=vettore_r_schermo;
ang_ell_schermo_conduttore=2*pi;
x_schermo_conduttore=[1 1 1];
y_schermo_conduttore=[1 1 1];
ang_ini_schermo_conduttore=vettore_teta_schermo;

```

- Definisco i vari parametri per i conduttori di terra:

```

X0_conduttore_terra=x_t+rif_guaina;
Y0_conduttore_terra=y_t+rif_guaina;
punti=50;
semiA_conduttore_terra=vettore_r_terra;
semiB_conduttore_terra=vettore_r_terra;
ang_ell_conduttore_terra=2*pi;
x_conduttore_terra=[1 1 1];
y_conduttore_terra=[1 1 1];
ang_ini_conduttore_terra=vettore_teta_terra;

```

- Definisco i vari parametri per le guaine dei conduttori di terra:

```

X0_guaina_conduttore_terra=x_t+rif_guaina;
Y0_guaina_conduttore_terra=y_t+rif_guaina;
semiA_guaina_conduttore_terra=vettore_r_guaina_terra;
semiB_guaina_conduttore_terra=vettore_r_guaina_terra;
ang_ell_guaina_conduttore_terra=2*pi;
x_guaina_conduttore_terra=[1 1 1];
y_guaina_conduttore_terra=[1 1 1];
ang_ini_guaina_conduttore_terra=vettore_teta_guaina_terra;

```

- Definisco i vari parametri per le guaine dei conduttori esterni:

```

X0_guaina_conduttore_ext=rif_guaina;
Y0_guaina_conduttore_ext=rif_guaina;
semiA_guaina_conduttore_ext=r_guaina_ext;
semiB_guaina_conduttore_ext=r_guaina_ext;
ang_ell_guaina_conduttore_ext=2*pi;

```

```

x_guaina_conduttore_ext=1;
y_guaina_conduttore_ext=1;
ang_ini_guaina_conduttore_ext=teta_guaina_ext;

```

- Definisco i vari parametri per lo schermo dei conduttori esterni:

```

X0_schermo_conduttore_ext=0;
Y0_schermo_conduttore_ext=0;
semiA_schermo_conduttore_ext=r_schermo_ext;
semiB_schermo_conduttore_ext=r_schermo_ext;
ang_ell_schermo_conduttore_ext=2*pi;
x_schermo_conduttore_ext=1;
y_schermo_conduttore_ext=2;
ang_ini_schermo_conduttore_ext=teta_schermo_ext;

```

- Definisco i vari parametri per l'anima:

```

X0_anima_conduttore=x_anima;
Y0_anima_conduttore=y_anima;
semiA_anima_conduttore=r_anima;
semiB_anima_conduttore=r_anima;
ang_ell_anima_conduttore=2*pi;
x_anima_conduttore=1;
y_anima_conduttore=2;
ang_ini_anima_conduttore=teta_anima;

```

Per il disegno dei conduttori si utilizzano i seguenti codici:

```

for (i=1:size(x_conduttore,2))
elliX_conduttore=x_conduttore(i)^2/semiA_conduttore(i);
elliY_conduttore=y_conduttore(i)^2/semiB_conduttore(i);
ango_conduttore=ang_ini_conduttore(i)+linspace(0,ang_ell_conduttore,punti);
ragione_conduttore=semiA_conduttore(i)*semiB_conduttore(i)./sqrt((semiB_conduttore(i).*cos(ang_conduttore)).^2+(semiA_conduttore(i).*sin(ang_conduttore)).^2);
[elliX_conduttore,elliY_conduttore]=pol2cart(ang_conduttore,ragione_conduttore);

```

```

plot(elliX_conduttore+X0_conduttore(i)*k_corr*vettore_distanza_centri_conduttori(k),elliY_conduttore+Y0_conduttore(i)*k_corr*vettore_distanza_centri_conduttori(k),'g')
scatter(X0_conduttore(i)*k_corr*vettore_distanza_centri_conduttori(i),Y0_conduttore(i)*k_corr*vettore_distanza_centri_conduttori(i),'x','b')
grid minor
grid on
hold on
for(k=1:size(x_guaina_conduttore,2))
elliX_guaina_conduttore=x_guaina_conduttore(k)^2/semiA_guaina_conduttore(k);
elliY_guaina_conduttore=y_guaina_conduttore(k)^2/semiB_guaina_conduttore(k);
ango_guaina_conduttore=ang_ini_guaina_conduttore(k)+linspace(0,ang_ell_guaina_conduttore,punti);
ragione_guaina_conduttore=semiA_guaina_conduttore(k)*semiB_guaina_conduttore(k)./sqrt((semiB_guaina_conduttore(k).*cos(ang_guaina_conduttore)).^2+(semiA_guaina_conduttore(k).*sin(ang_guaina_conduttore)).^2);
[elliX_guaina_conduttore,elliY_guaina_conduttore]=pol2cart(ang_guaina_conduttore,ragione_guaina_conduttore);
plot(elliX_guaina_conduttore+X0_guaina_conduttore(k)*k_corr*vettore_distanza_centri_conduttori(k),elliY_guaina_conduttore+Y0_guaina_conduttore(k)*k_corr*vettore_distanza_centri_conduttori(k),'g')
scatter(X0_guaina_conduttore(k)*k_corr*vettore_distanza_centri_conduttori(k),(Y0_guaina_conduttore(k)*k_corr*vettore_distanza_centri_conduttori(k)+(vettore_r_guaina(k)-vettore_r(k)*k_corr),'x','y')
hold on
for(j=1:size(x_schermo_conduttore,2))
elliX_schermo_conduttore=x_schermo_conduttore(j)^2/semiA_schermo_conduttore(j);
elliY_schermo_conduttore=y_schermo_conduttore(j)^2/semiB_schermo_conduttore(j);
ango_schermo_conduttore=ang_ini_schermo_conduttore(j)+linspace(0,ang_ell_schermo_conduttore,punti);
ragione_schermo_conduttore=semiA_schermo_conduttore(j)*semiB_schermo_conduttore(j)./sqrt((semiB_schermo_conduttore(j).*cos(ang_schermo_conduttore)).^2+(semiA_schermo_conduttore(j).*sin(ang_schermo_conduttore)).^2);
[elliX_schermo_conduttore,elliY_schermo_conduttore]=pol2cart(ang_schermo_conduttore,ragione_schermo_conduttore);
plot(elliX_schermo_conduttore+X0_schermo_conduttore(j)*k_corr*vettore_distanza_centri_conduttori(j),elliY_schermo_conduttore+Y0_schermo_conduttore(j)*k_corr*vettore_distanza_centri_conduttori(j),'g')
scatter(X0_schermo_conduttore(j)*k_corr*vettore_distanza_centri_conduttori(j),(Y0_schermo_conduttore(j)*k_corr*vettore_distanza_centri_conduttori(j)+(vettore_r_schermo(j)-vettore_r(j)*k_corr),'x','g')

```

```

hold on
for (m=1:size(x_conduttore_terra,2))
elliX_conduttore_terra=x_conduttore_terra(m)^2/semiA_conduttore_terra(m);
elliY_conduttore_terra=y_conduttore_terra(m)^2/semiB_conduttore_terra(m);
ango_conduttore_terra=ang_ini_conduttore_terra(m)+linspace(0,ang_ell_conduttore_terra,punti);
ragione_conduttore_terra=semiA_conduttore_terra(m)*semiB_conduttore_terra(m)./sqrt((semiB_conduttore_terra(m).*cos(ang_conduttore_terra)).^2+(semiA_conduttore_terra(m).*sin(ang_conduttore_terra)).^2);
[elliX_conduttore_terra,elliY_conduttore_terra]=pol2cart(ang_conduttore_terra,ragione_conduttore_terra);
plot(elliX_conduttore_terra+X0_conduttore_terra(m)*fatt_correttivo_terra*k_corr_terra*vettore_distanza centri_conduttori_terra(m),elliY_conduttore_terra+Y0_conduttore_terra(m)*fatt_correttivo_terra*k_corr_terra*vettore_distanza centri_conduttori_terra(m),'r')
scatter(X0_conduttore_terra(m)*k_corr_terra*vettore_distanza centri_conduttori_terra(m),(Y0_conduttore_terra(m)*k_corr_terra*vettore_distanza centri_conduttori_terra(m)),'x','b')
hold on
for(n=1:size(x_guaina_conduttore_terra,2))
elliX_guaina_conduttore_terra=x_guaina_conduttore_terra(n)^2/semiA_guaina_conduttore_terra(n);
elliY_guaina_conduttore_terra=y_guaina_conduttore_terra(n)^2/semiB_guaina_conduttore_terra(n);
ango_guaina_conduttore_terra=ang_ini_guaina_conduttore_terra(n)+linspace(0,ang_ell_guaina_conduttore_terra,punti);
ragione_guaina_conduttore_terra=semiA_guaina_conduttore_terra(n)*semiB_guaina_conduttore_terra(n)./sqrt((semiB_guaina_conduttore_terra(n).*cos(ang_guaina_conduttore_terra)).^2+(semiA_guaina_conduttore_terra(n).*sin(ang_guaina_conduttore_terra)).^2);
[elliX_guaina_conduttore_terra,elliY_guaina_conduttore_terra]=pol2cart(ang_guaina_conduttore_terra,ragione_guaina_conduttore_terra);
plot(elliX_guaina_conduttore_terra+X0_guaina_conduttore_terra(n)*fatt_corr_terra*k_corr_terra*vettore_distanza centri_conduttori_terra(n),elliY_guaina_conduttore_terra+Y0_guaina_conduttore_terra(n)*fatt_corr_terra*k_corr_terra*vettore_distanza centri_conduttori_terra(n),'r')
coeff_correzione=7;
scatter(X0_guaina_conduttore_terra(n)*k_corr_terra*vettore_distanza centri_conduttori_terra(n),((Y0_guaina_conduttore_terra(n)*k_corr_terra*vettore_distanza centri_conduttori_terra(n))+(vettore_r_guaina_terra(n)-vettore_r_terra(n)+coeff_correzione)),'x','r')
hold on

```

```

elliX_guaina_conduttore_ext=x_guaina_conduttore_ext^2/semiA_guaina_conduttore_ext;
elliY_guaina_conduttore_ext=y_guaina_conduttore_ext^2/semiB_guaina_conduttore_ext;
ango_guaina_conduttore_ext=ang_ini_guaina_conduttore_ext+linspace(0,ang_ell_guaina_conduttore_ext,punti);
ragione_guaina_conduttore_ext=semiA_guaina_conduttore_ext*semiB_guaina_conduttore_ext./sqrt((semiB_guaina_conduttore_ext.*cos(angog_uaina_conduttore_ext)).^2+(semiA_guaina_conduttore_ext.*sin(angog_uaina_conduttore_ext)).^2);
[elliX_guaina_conduttore_ext,elliY_guaina_conduttore_ext]=pol2cart(angog_uaina_conduttore_ext,ragione_guaina_conduttore_ext);
plot(elliX_guaina_conduttore_ext+X0_guaina_conduttore_ext,elliY_guaina_conduttore_ext+Y0_guaina_conduttore_ext,'b')
scatter(X0_guaina_conduttore_ext,Y0_guaina_conduttore_ext+fatt_correttivo,'x','g')
hold on
elliX_schermo_conduttore_ext=x_schermo_conduttore_ext^2/semiA_schermo_conduttore_ext;
elliY_schermo_conduttore_ext=y_schermo_conduttore_ext^2/semiB_schermo_conduttore_ext;
ango_schermo_conduttore_ext=ang_ini_schermo_conduttore_ext+linspace(0,ang_ell_schermo_conduttore_ext,punti);
ragione_schermo_conduttore_ext=semiA_schermo_conduttore_ext*semiB_schermo_conduttore_ext./sqrt((semiB_schermo_conduttore_ext.*cos(angog_schermo_conduttore_ext)).^2+(semiA_schermo_conduttore_ext.*sin(angog_schermo_conduttore_ext)).^2);
[elliX_schermo_conduttore_ext,elliY_schermo_conduttore_ext]=pol2cart(angog_schermo_conduttore_ext,ragione_schermo_conduttore_ext);
plot(elliX_schermo_conduttore_ext+X0_schermo_conduttore_ext,elliY_schermo_conduttore_ext+Y0_schermo_conduttore_ext,'b')
scatter(X0_schermo_conduttore_ext,(Y0_schermo_conduttore_ext+r_guaina_ext+10*k_corr),'x','r')
hold on
end
end
end
end
end

```

Disegno l'anima:

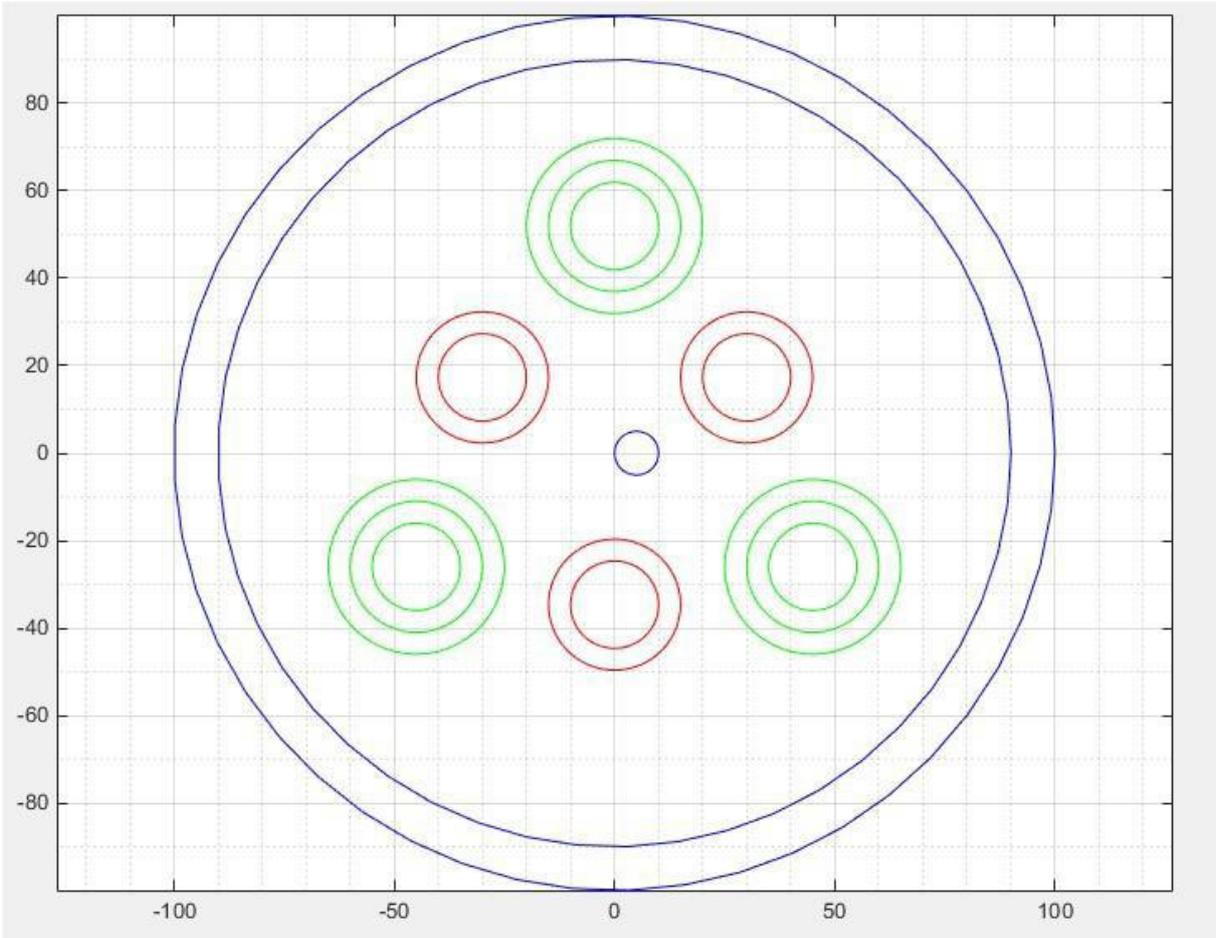
```
elliX_anima_conduttore=x_anima_conduttore^2/semiA_anima_conduttore;  
elliY_anima_conduttore=y_anima_conduttore^2/semiB_anima_conduttore;  
ango_anima_conduttore=ang_ini_anima_conduttore+linspace(0,ang_ell_anima  
a_conduttore,punti);  
ragione_anima_conduttore=semiA_anima_conduttore*semiB_anima_conduttore.  
/sqrt((semiB_anima_conduttore.*cos(ang_anima_conduttore)).^2+(semiA_a  
nima_conduttore.*sin(ang_anima_conduttore)).^2);  
[elliX_anima_conduttore,elliY_anima_conduttore]=pol2cart(ang_anima_cond  
uttore,ragione_anima_conduttore);  
plot(elliX_anima_conduttore+X0_anima_conduttore,elliY_anima_conduttore+Y  
0_anima_conduttore,'b')  
scatter(X0_anima_conduttore,Y0_anima_conduttore,'x')  
hold off
```

*axis equal*

La funzione scatter è utilizzata per le corrispondenze delle diverse tipologie di materiali utilizzati all'interno dei vari conduttori.

La funzione axis equal è usata per avere una rappresentazione uniforme del cavo all'interno della finestra di plottaggio di Matlab.

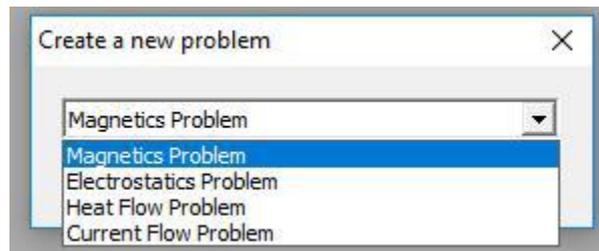
Si riporta di seguito una raffigurazione del cavo:



*Fig.5:Disegno Matlab cavo trifase*

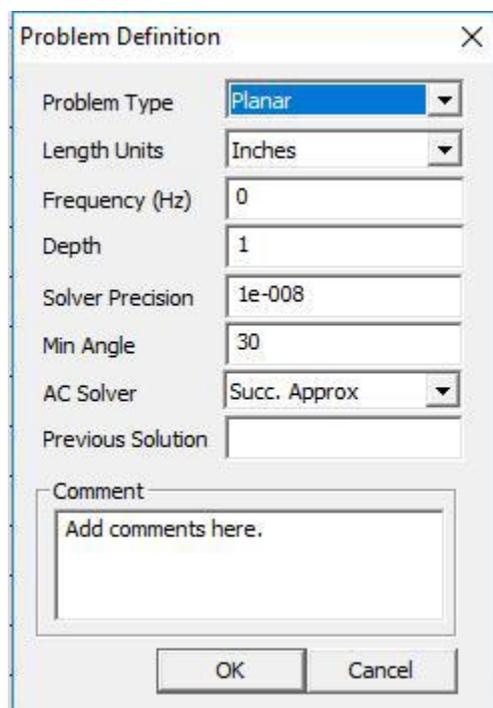
## Capitolo 4 – FEMM

FEMM (Finite Element Method Magnetic) è un programma gratuito che dà la possibilità a chi ne usufruisce di determinare, innanzitutto, la tipologia di problema che si vuole affrontare: magnetico, elettrostatico, flusso di corrente, flusso di calore:



*Fig.6: Definizione tipologia problema FEMM*

Dopodiché si fissa l'unità di misura (ad esempio millimetri, centimetri, metri ed altri) che verrà utilizzata nel corso del problema; poi possono anche essere definite la frequenza e il grado di approssimazione del problema, a seconda della tipologia di problema scelta.



*Fig.7: Definizione parametri problema FEMM*

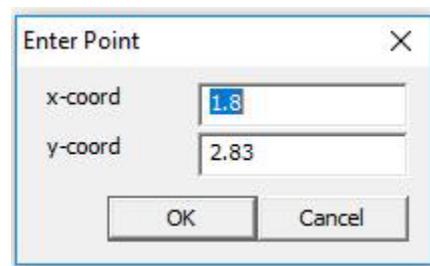
Successivamente, si procede al disegno della struttura che si vuole studiare con gli elementi finiti.

Nel nostro caso disegneremo un cavo trifase. Si sceglie quindi la funzione punto:



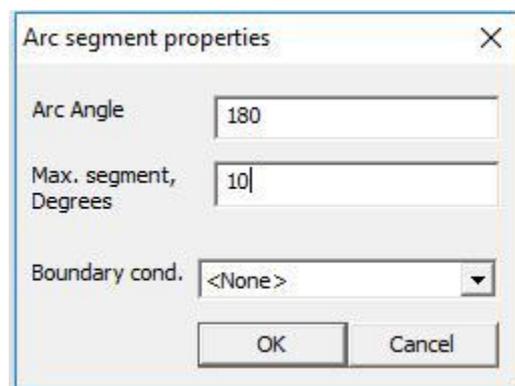
*Fig.8: Menù funzioni principali FEMM*

E si danno le coordinate dei vari punti che andranno a definire la geometria:



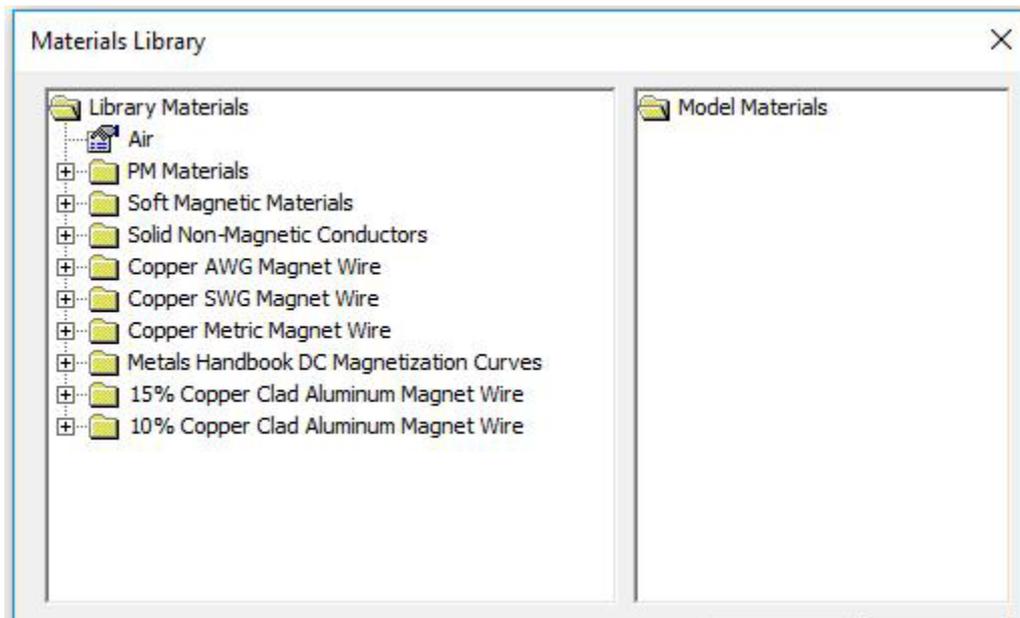
*Fig.9: Coordinate punto*

Poi per disegnare i cerchi si utilizzerà la funzione arco:



*Fig.10: Disegno arco*

Una volta disegnato ciò si potranno definire i vari materiali delle parti della struttura; infatti in FEMM esiste una libreria dei materiali, in cui sono contenuti i più comuni e anche, talvolta, meno comuni materiali.



*Fig.11: Libreria dei materiali di FEMM – caso magnetico*

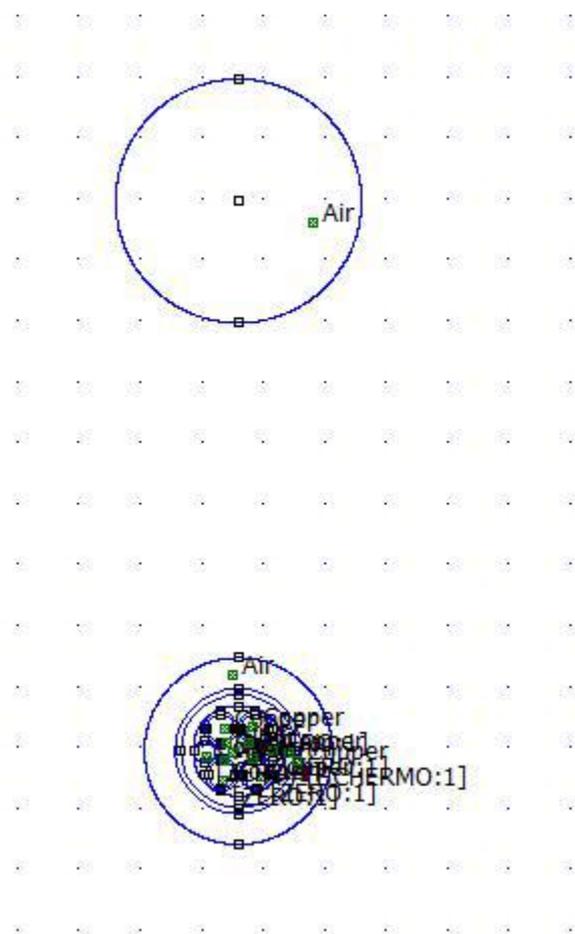
I materiali presenti nella libreria cambiano a seconda della tipologia di problema scelta.

Ove qualora non dovesse essere presente il materiale che si desidera, è possibile crearlo, definendo le relative proprietà, come ad esempio la costante magnetica del mezzo – se si tratta di un problema magnetico – oppure la costante dielettrica del mezzo – se si tratta, invece, di un problema elettrostatico – in base, quindi, al tipo di problema che si vuole affrontare.

*Fig.12: Definizione parametri per la creazione di un materiale – caso magnetico*

Inoltre, dopo aver definito i vari materiali che compongono la struttura disegnata, si possono assegnare anche delle condizioni ad alcune parti della stessa, come ad esempio i punti, i contorni; ma anche altre di tipo circuitale.

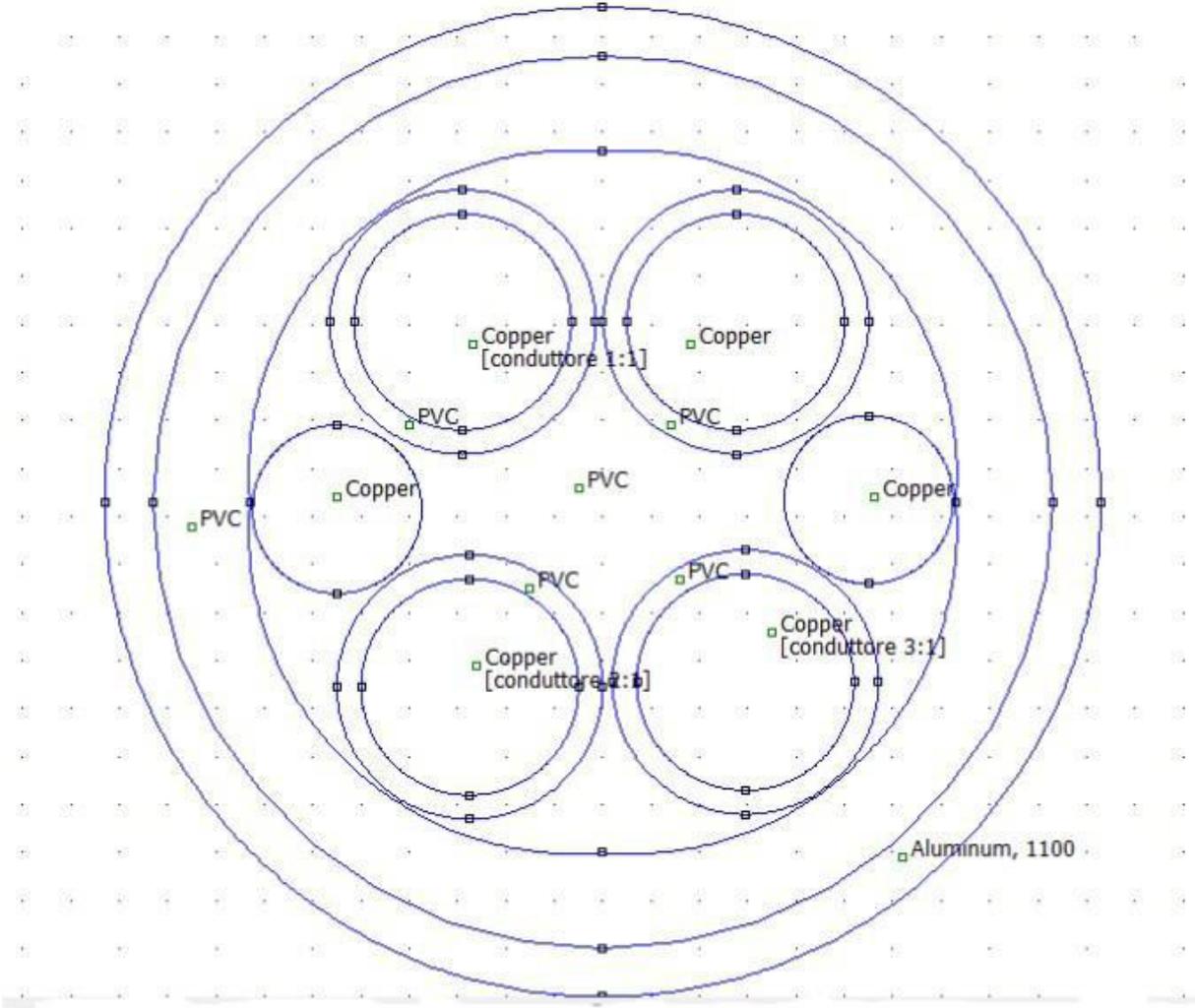
Per il caso magnetico si sono disegnati due cerchi uno di dimensioni più grandi che racchiude quelli dello schermo e della guaina esterni; ed un altro più piccolo che è lontano da tutti questi. Questi due cerchi saranno composti di aria e saranno quelli dove andremo ad imporre le condizioni al contorno e puntuali.



*Fig.13: Visuale globale del cavo trifase*

Il cavo che si andrà a disegnare è formato da tre conduttori di fase e tre di terra, più una guaina (in PVC) ed uno schermo (in Alluminio).

Di seguito, è data una rappresentazione 1grafica del cavo in questione:



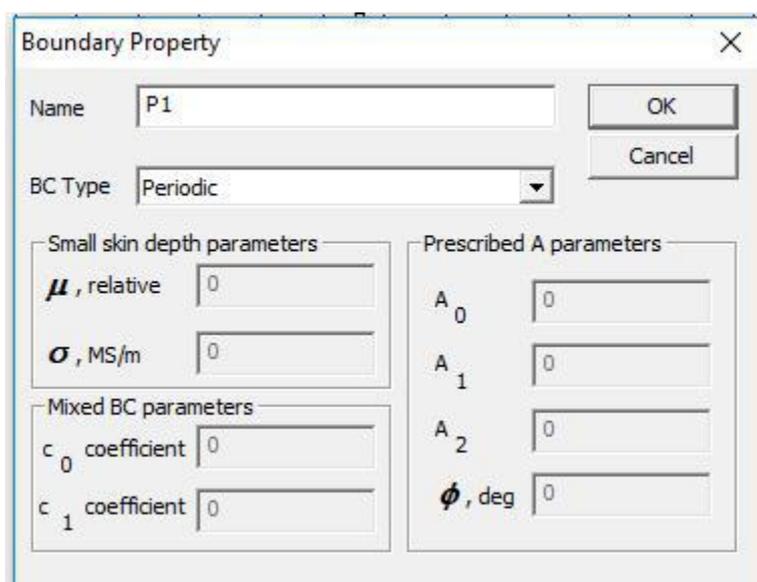
*Fig.14: Cavo trifase con tre conduttori di fase e tre di terra*

Per i singoli conduttori, affrontando un problema magnetico, si deve definire una condizione circuitale, in cui si fissa un valore di corrente, che sarà quella circolante nel conduttore stesso; per determinare il verso della corrente medesima, si può procedere in due strade diverse: si può attribuire un valore positivo o negativo di corrente, con l'assunzione che la corrente positiva è quella entrante, mentre quella negativa è uscente dal conduttore; in questo caso si assegneranno ai singoli conduttori delle condizioni circuitali, cioè si andrà a definire il numero di spire del conduttore, le quali saranno positive.

Il secondo metodo è quello di definire correnti positive per tutti i conduttori, quindi implicitamente la corrente avrà lo stesso verso, ma si andrà a definire valori positivi e negativi alle condizioni circuitali.

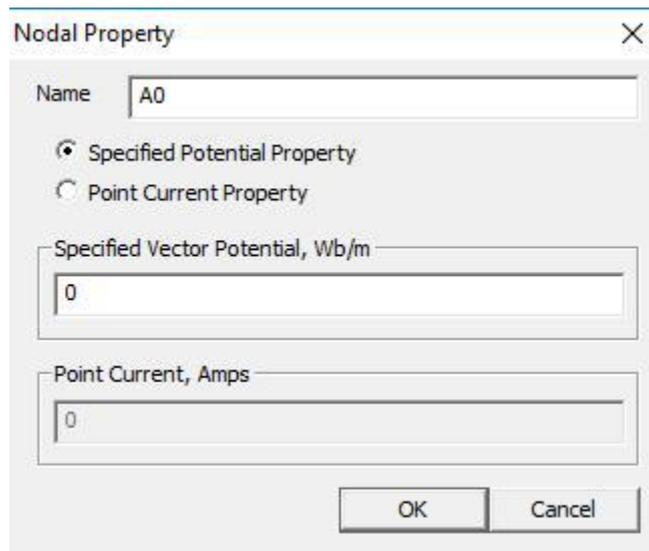
Si utilizzerà il primo metodo nel proseguimento della trattazione.

Come condizioni al contorno si sono definite due diverse condizioni periodiche, denominate P0 e P1, che andranno poi applicate ai due semicerchi corrispondenti dei cerchi che sono stati definiti di aria.



*Fig.15: Definizione condizione al contorno*

Come proprietà puntuale, si è definita una sola condizione che è stata applicata al punto corrispondente al cerchio esterno a tutti gli altri, composto di aria. È stato definito un potenziale nullo per questo punto.



*Fig.16: Definizione condizione nodale*

Una volta disegnata la geometria del cavo trifase ed assegnati i materiali, si crea il Mesh della geometria.

Questo numero può essere anche definito dall'utente, a seconda delle proprie esigenze di calcolo.

Dopodiché si procede all'effettiva simulazione degli elementi finiti, in cui si possono fare una vasta serie di calcoli e ottenere vari tipi di grafici.

Si ottiene innanzitutto il disegno delle linee di flusso, poi si possono anche osservare le linee di campo magnetico od elettrico, a seconda del problema che si sta analizzando.

Siccome il caso considerato non risulta essere simmetrico, si è calcolato il fattore di dissimmetria delle correnti:

$$\frac{i_2}{i_3} = \frac{(L-M_{31}-M_{13}+M_{12})}{(L-M_{12}-M_{32}+M_{31})} = k \quad (28)$$

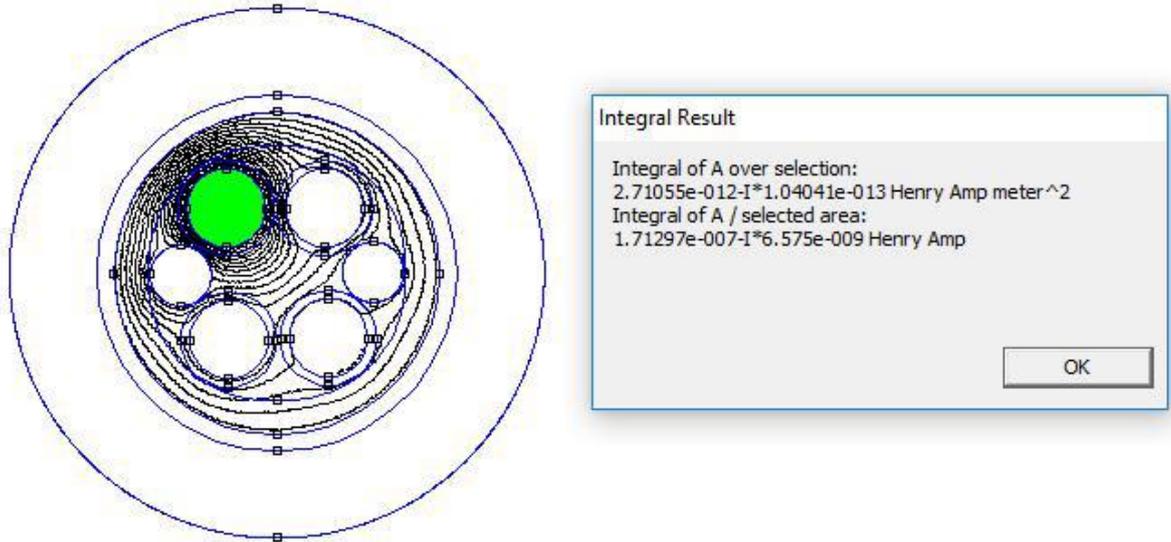
Mentre per le altre correnti risulta essere:

$$\frac{i_1}{i_3} = -1 - k \quad (29)$$

Le prime simulazioni sono state fatte per calcolare l'autoinduttanza; questo è stato fatto alimentando un conduttore di fase diverso ad ogni simulazione; si seleziona il conduttore dove circola corrente e si fa il calcolo dell'integrale A. Il valore dell'autoinduttanza sarà pari alla parte reale dell'integrale.

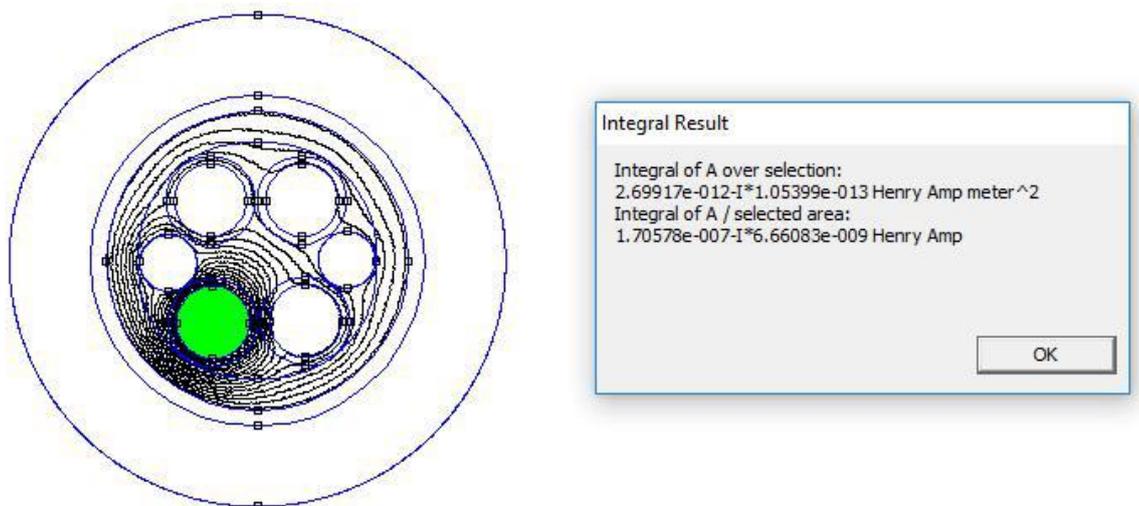
Le tre diverse simulazioni sono state fatte alla frequenza di 1 MHz.

- Prima simulazione



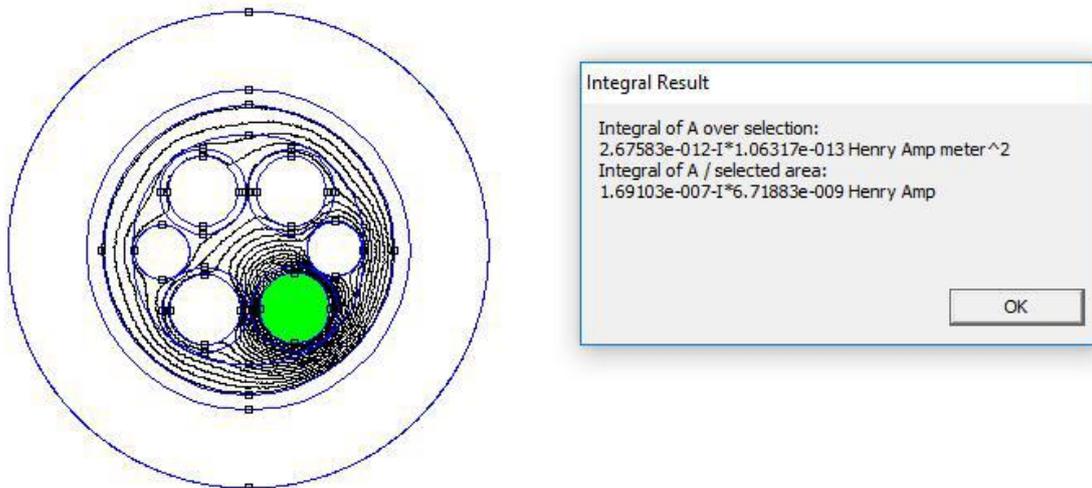
*Fig.17: Simulazione FEMM – calcolo autoinduttanza*

- Seconda simulazione



*Fig.18: Simulazione FEMM – calcolo autoinduttanza*

- Terza simulazione



*Fig.19: Simulazione FEMM – calcolo autoinduttanza*

Si può notare che i risultati ottenuti nelle tre simulazioni, non si discostano in modo significativo l'uno dagli altri.

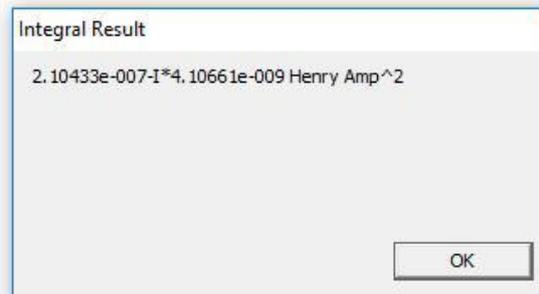
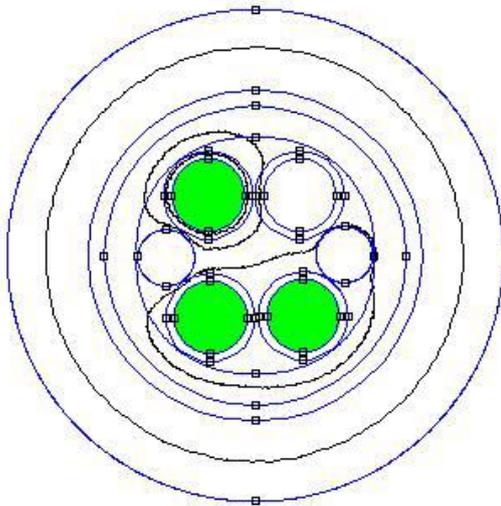
Dopodiché, si è proceduto al calcolo dell'induttanza differenziale; per fare questo si alimentano i tre conduttori di fase in modo tale che la somma delle tre correnti sia nulla: quindi si inietta 1A in un conduttore e -0.5A in ciascuno degli altri due restanti conduttori.

Dopo aver lanciato la simulazione, si evidenzieranno i tre conduttori e si farà l'integrale AJ.

Si ripete anche qui la simulazione per tre volte in modo tale che siano fatti tutti i casi possibili di distribuzione delle correnti.

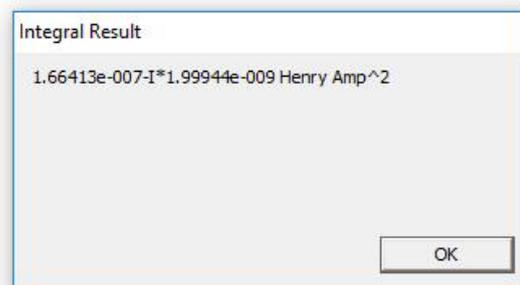
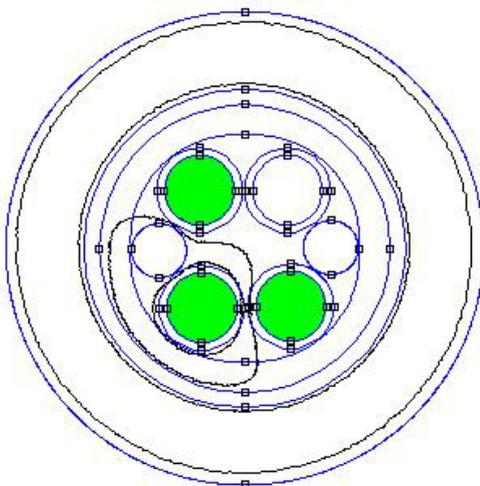
L'importanza cruciale dell'induttanza differenziale risiede nel calcolo dell'impedenza caratteristica; la quale sarà calcolata come rapporto tra induttanza differenziale – appunto – e capacità differenziale.

- Prima simulazione



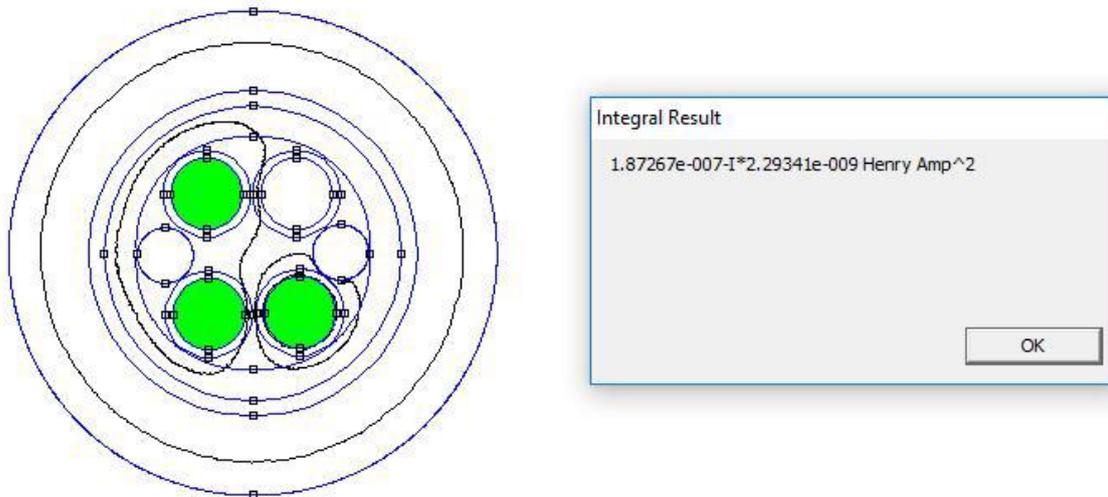
*Fig.20: Simulazione FEMM – calcolo induttanza differenziale*

- Seconda simulazione



*Fig.21: Simulazione FEMM – calcolo induttanza differenziale*

- Terza simulazione



*Fig.22: Simulazione FEMM – calcolo induttanza differenziale*

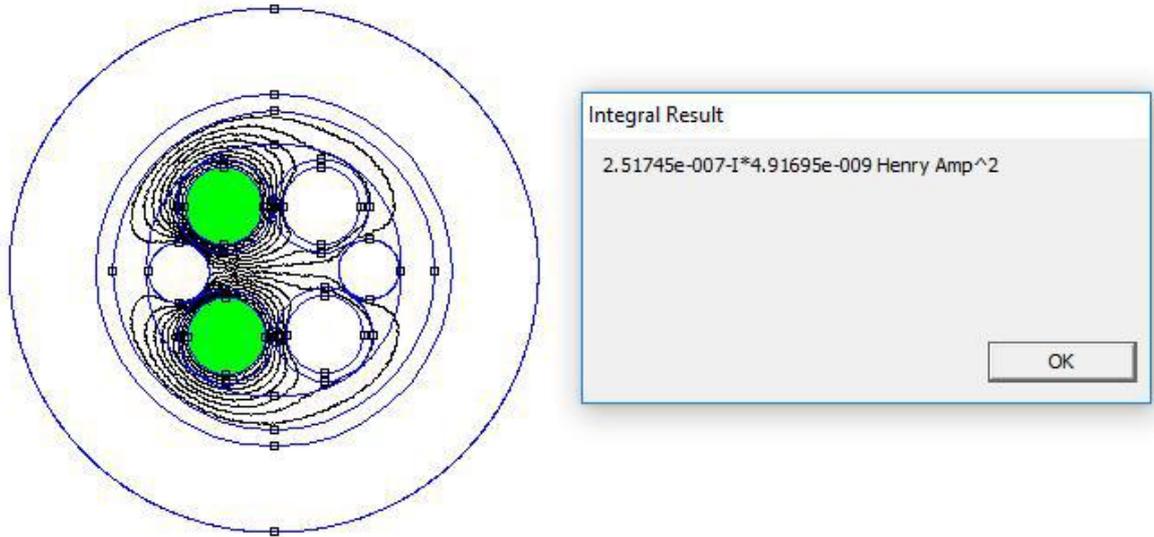
In seguito si è proceduto a ricavare l'induttanza di servizio; per fare questo si alimentano due conduttori di fase ad ogni simulazione e si distribuisce la corrente tra di essi in modo tale che la loro somma sia nulla. Poi, si ricava l'induttanza facendo l'integrale AJ sui rispettivi conduttori di fase.

Occorre però moltiplicare per 2/3 il valore di induttanza di FEMM, per poter avere il vero valore di induttanza di servizio.

Tale induttanza è stata calcolata per poter, eventualmente, ricavare la mutua induttanza; infatti si può ricavare dalla formula seguente:

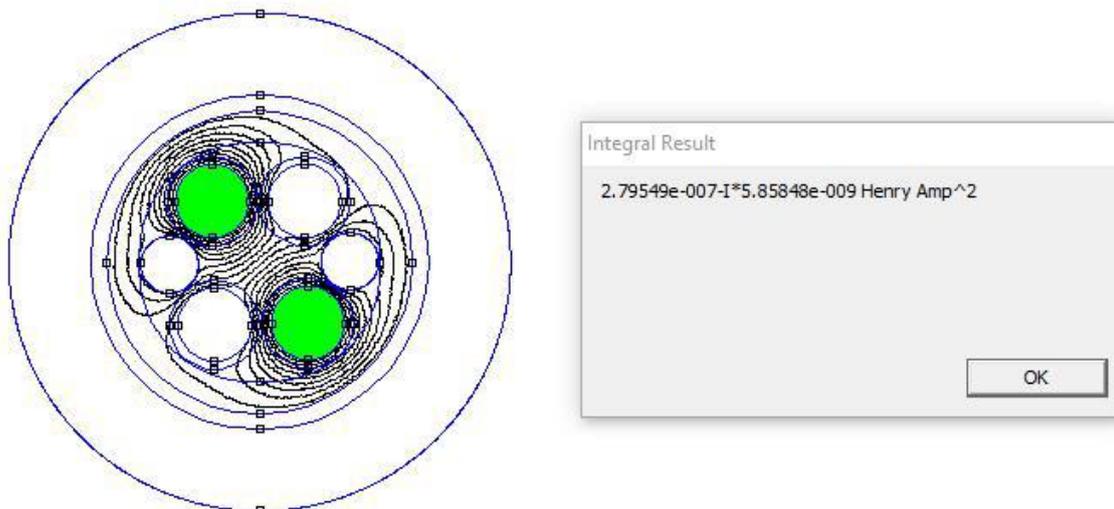
$$L_{servizio} = 2(L - M) \quad (30)$$

- Prima simulazione



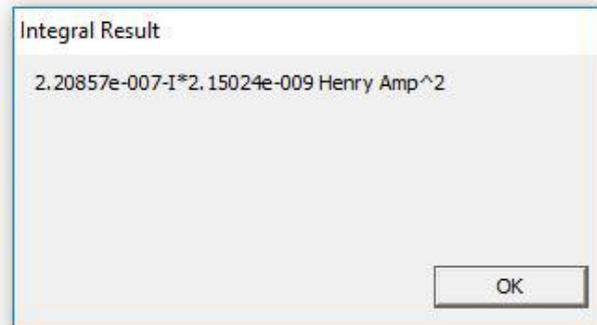
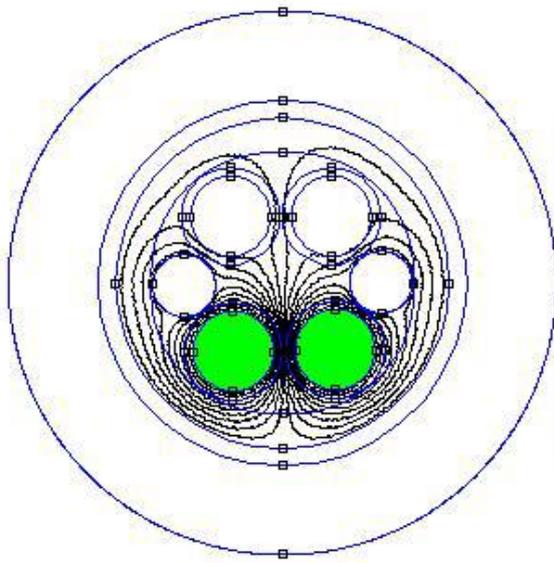
*Fig.23: Simulazione FEMM – calcolo induttanza di servizio*

- Seconda simulazione



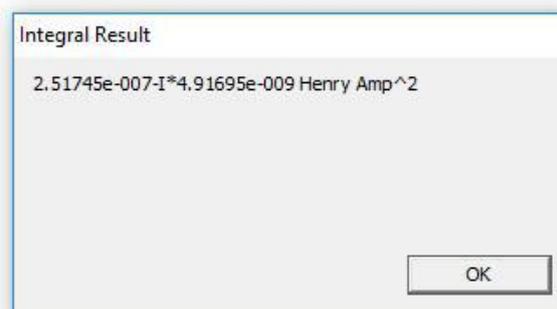
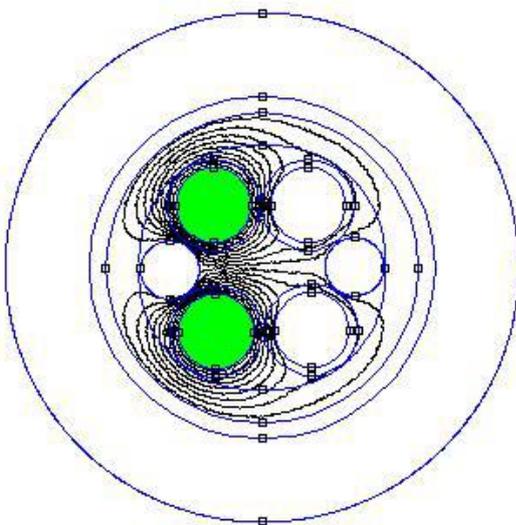
*Fig.24: Simulazione FEMM – calcolo induttanza di servizio*

- Terza simulazione



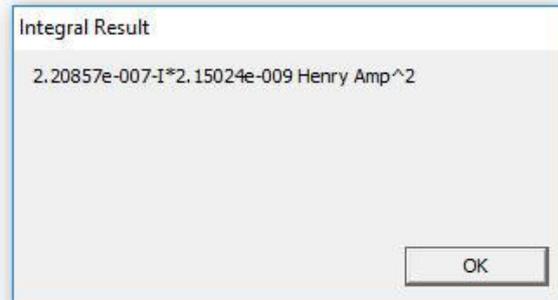
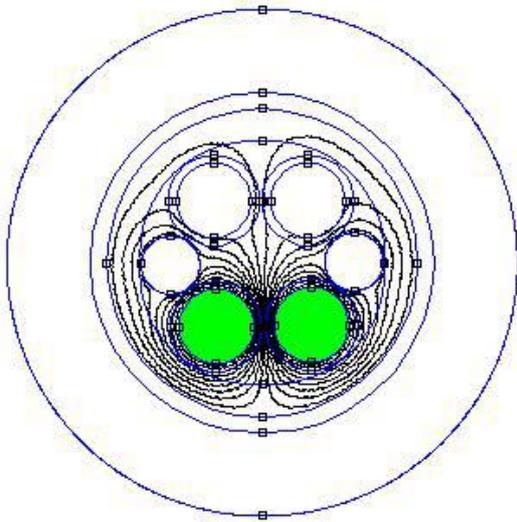
*Fig.25: Simulazione FEMM – calcolo induttanza di servizio*

- Quarta simulazione



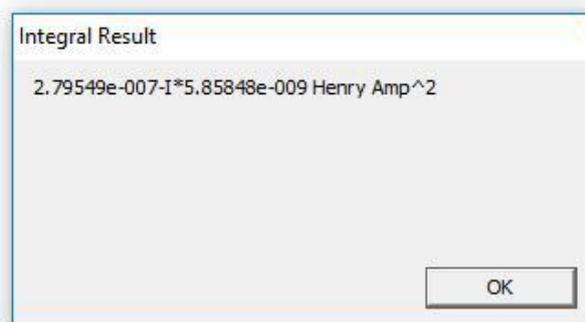
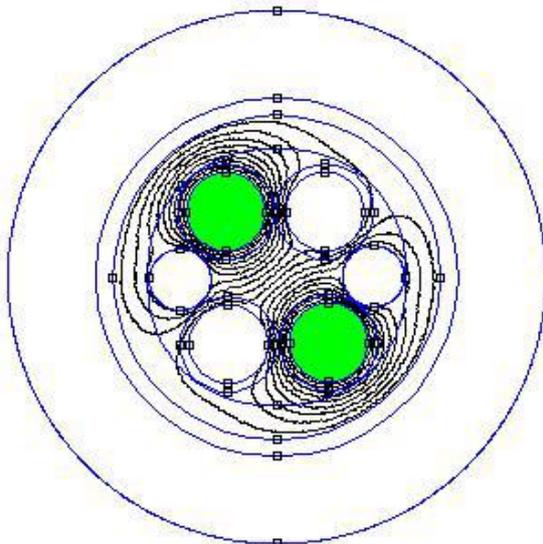
*Fig.26: Simulazione FEMM – calcolo induttanza di servizio*

- Quinta simulazione



*Fig.27: Simulazione FEMM – calcolo induttanza di servizio*

- Sesta simulazione



*Fig.28: Simulazione FEMM – calcolo induttanza di servizio*

Per il caso elettrostatico sono stati definiti i materiali seguenti:

Poliuretano (PUR): costante dielettrica pari a 6.5

Elastomero termoplastico (TPE): costante dielettrica pari a 2.4

Rame: costante dielettrica pari ad 1

Questa volta si imporranno condizioni circuitali sulla tensione; imponendola positiva e pari a 1V per un conduttore e -1V per gli altri due.

Il valore della capacità sarà ottenuto dalla seguente formula:

$$Cd = \frac{Q1 - \frac{1}{2}Q2 - \frac{1}{2}Q3}{\Delta V} \quad (31)$$

Nei vari casi considerati  $\Delta V$  sarà pari a 2V.

La carica presente nei conduttori si può vedere selezionando il comando:



*Fig.29: Funzione utilizzata per visualizzare le cariche dei conduttori*

Da cui si potranno selezionare i vari conduttori e vedere la relativa carica presente.

Per la prima simulazione si sono ottenuti i seguenti risultati:

$$Q1 = 2.3721e-010 \text{ C}$$

$$Q2 = -1.78114e-010 \text{ C}$$

$$Q3 = -1.7622e-010 \text{ C}$$

La capacità differenziale risulta quindi essere pari a:

$$C = 2.0719e-10 \text{ F}$$

Per la seconda simulazione si sono ottenuti i seguenti risultati:

$$Q1 = 2.9841e-010 \text{ C}$$

$$Q2 = -2.30111e-010 \text{ C}$$

$$Q_3 = -2.89417e-010 \text{ C}$$

La capacità differenziale risulta quindi essere pari a:

$$C = 2.7909e-10 \text{ F}$$

Per la terza simulazione si sono ottenuti i seguenti risultati:

$$Q_1 = 2.96516e-010 \text{ C}$$

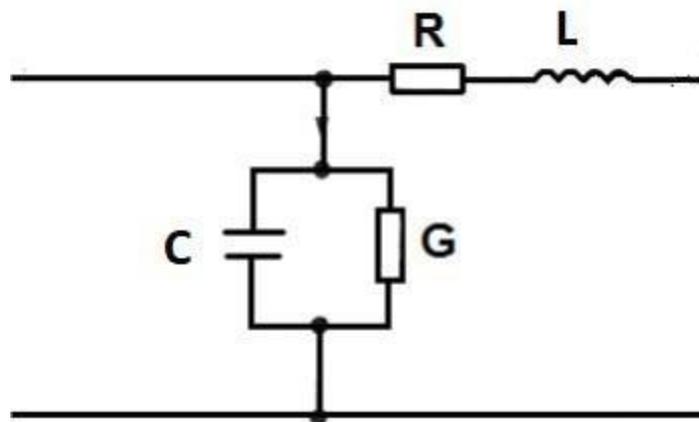
$$Q_2 = -2.18106e-010 \text{ C}$$

$$Q_3 = -2.79306e-010 \text{ C}$$

La capacità differenziale risulta quindi essere pari a:

$$C = 2.7261e-10 \text{ F}$$

Per maggiore completezza si riporta una descrizione del modello di una linea elettrica a parametri concentrati, ovvero dove le dimensioni sono trascurabili rispetto alla lunghezza d'onda delle grandezze fisiche. Una linea elettrica può essere rappresentata nel modo seguente:



*Fig.30: Modello linea elettrica*

Considerando la figura soprastante, si può ricavare l'impedenza caratteristica della linea nella forma seguente:

$$Z_c = \sqrt{\frac{r + j\omega * l}{g + j\omega * c}} \quad (30)$$

dove:

- $r$  è la resistenza per unità di lunghezza della linea [ $\Omega/\text{km}$ ]
- $g$  è la conduttanza per unità di lunghezza della linea [ $\text{S}/\text{km}$ ]; tiene conto dell'effetto Corona.
- $l$  è l'induttanza per unità di lunghezza della linea [ $\text{H}/\text{km}$ ]; tiene conto della forza elettromotrice della linea
- $c$  è la capacità per unità di lunghezza della linea [ $\text{F}/\text{km}$ ]; essa tiene conto della capacità conduttore verso gli altri conduttori della linea e verso terra.
- $\omega$  è la pulsazione angolare [ $\text{rad}/\text{s}$ ] che è strettamente legata alla frequenza dall'espressione seguente:

$$\omega = 2 * \pi_{greco} * f \quad (31)$$

- $Z_c$  si misura in  $\Omega$

Si può fare un'ipotesi semplificativa dell'espressione dell'impedenza caratteristica della linea, considerando una linea senza perdite, dove i parametri  $r$  e  $g$  risultano essere pressoché nulli, ottenendo l'espressione seguente dell'impedenza caratteristica:

$$Z_c = \sqrt{\frac{l}{c}} \quad (32)$$

Per le simulazioni fatte sono stati ricavati i seguenti valori:

Per la prima simulazione:

$$Z_c = 27.30 \Omega$$

Per la seconda simulazione:

$$Z_c = 20.92 \Omega$$

Per la terza simulazione:

$$Z_c = 22.37 \Omega$$

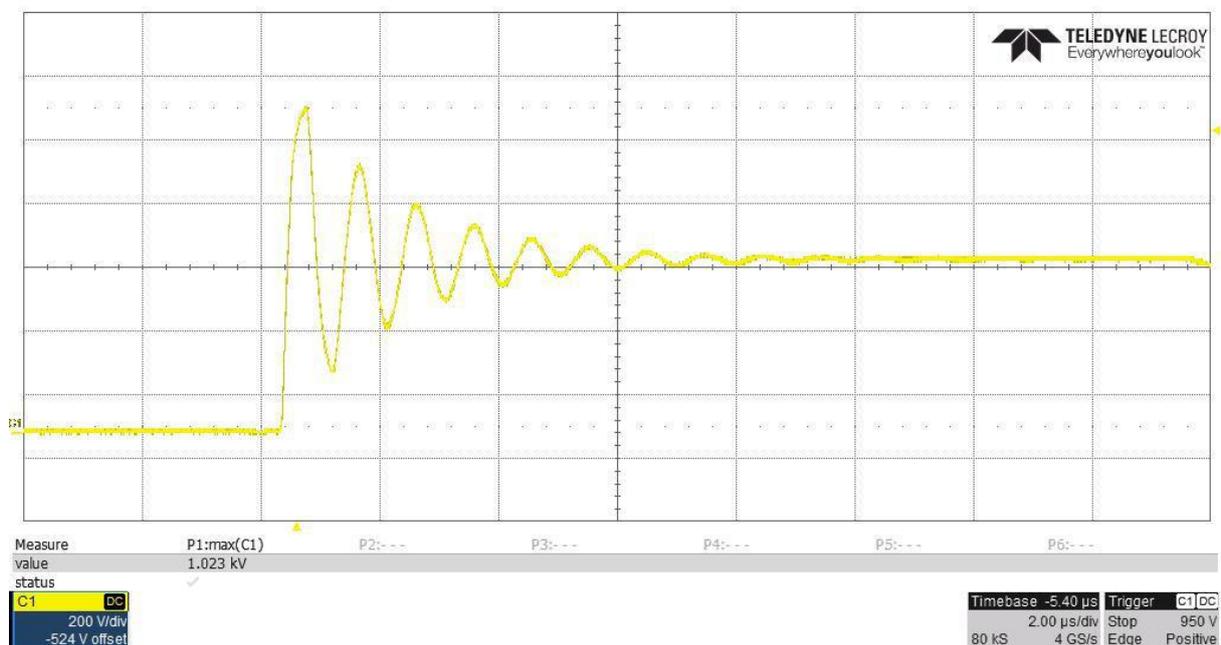
## Capitolo 5 – Verifica sperimentale filtro

Si è proceduto alla verifica sperimentale del filtro RC dimensionato; si è usato un filtro resistivo – capacitivo per via del fatto che un filtro RL deve essere dimensionato sul valore di corrente di picco, che varierà in funzione dell’azionamento considerato; invece un filtro RC occorre che sia dimensionato sul valore di tensione di picco che non deve superare il doppio della tensione del BUS, che nel caso considerato sarà pari circa a 600 V, portando una sovratensione di circa 1200 V.

Quindi, con i valori di capacità e di impedenza caratteristica, che risulterà essere pari alla resistenza del filtro, si è proceduto alla verifica del corretto funzionamento del filtro.

Per fare questo si sono usati due motori connessi in parallelo ad un terminale (Putty) che permettesse di variare alcuni parametri, come ad esempio la velocità di rotazione.

La prima prova è stata fatta in assenza di filtro, per poter verificare il valore di sovratensione, che dovrebbe essere circa il doppio della tensione del BUS.



*Fig.31: Sovratensione vista dall’oscilloscopio – senza filtro*

Come si può verificare il valore di sovratensione è quello atteso.

Per cui, si è proceduto all'inserimento del filtro e la verifica del suo corretto funzionamento; lo smorzamento atteso è all'incirca del 80-90%.



*Fig.32: Sovratensione vista dall'oscilloscopio – con filtro*

Come si evince dalla figura sopra, il filtro ha prodotto un considerevole smorzamento della sovratensione.

Quindi, si può concludere che il filtro è stato dimensionato nel modo corretto.

## Citazioni

- [1] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, “Experimental High Frequency Parameter Identification of AC Electrical Motors”, IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005, San Antonio, TX, USA, pp. 5-10.
- [2] A. Boglietti, E. Carpaneto, “Induction Motor High Frequency Model”, Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record IEEE, 1999, Phoenix, AZ, USA, pp. 1551-1558.
- [3] Yue Liu, Ligu Wang, Han Gao, Haicong Zhang, Dianguo Xu, “Overvoltage Mitigation of Submersible Motors with Long Cables of Different Lengths”, Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014 17th International Conference, 2014, Hangzhou, China, pp. 638-644

## Riferimenti formule

- (1) A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, “Experimental High Frequency Parameter Identification of AC Electrical Motors”, IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005, San Antonio, TX, USA, pag. 7
- (2) A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, “Experimental High Frequency Parameter Identification of AC Electrical Motors”, IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005, San Antonio, TX, USA, pag. 7
- (3) A. Boglietti, E. Carpaneto, “Induction Motor High Frequency Model”, Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record IEEE, 1999, Phoenix, AZ, USA, pag. 1552
- (4) A. Boglietti, E. Carpaneto, “Induction Motor High Frequency Model”, Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record IEEE, 1999, Phoenix, AZ, USA, pag. 1552
- (5) A. Boglietti, E. Carpaneto, “Induction Motor High Frequency Model”, Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record IEEE, 1999, Phoenix, AZ, USA, pag. 1552
- (6) A. Boglietti, E. Carpaneto, “Induction Motor High Frequency Model”, Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record IEEE, 1999, Phoenix, AZ, USA, pag. 1552
- (7) A. Boglietti, E. Carpaneto, “Induction Motor High Frequency Model”, Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record IEEE, 1999, Phoenix, AZ, USA, pag. 1552
- (8) A. Boglietti, E. Carpaneto, “Induction Motor High Frequency Model”, Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record IEEE, 1999, Phoenix, AZ, USA, pag. 1553
- (9) A. Boglietti, E. Carpaneto, “Induction Motor High Frequency Model”, Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record IEEE, 1999, Phoenix, AZ, USA, pag. 1553

- (10) A. Boglietti, E. Carpaneto, "Induction Motor High Frequency Model", Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record IEEE, 1999, Phoenix, AZ, USA, pag. 1553
- (11) A. Boglietti, E. Carpaneto, "Induction Motor High Frequency Model", Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record IEEE, 1999, Phoenix, AZ, USA, pag. 1553
- (12) A. Boglietti, E. Carpaneto, "Induction Motor High Frequency Model", Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record IEEE, 1999, Phoenix, AZ, USA, pag. 1553
- (13) A. Boglietti, E. Carpaneto, "Induction Motor High Frequency Model", Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record IEEE, 1999, Phoenix, AZ, USA, pag. 1553
- (14) A. Boglietti, E. Carpaneto, "Induction Motor High Frequency Model", Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record IEEE, 1999, Phoenix, AZ, USA, pag. 1553
- (15) A. Boglietti, E. Carpaneto, "Induction Motor High Frequency Model", Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record IEEE, 1999, Phoenix, AZ, USA, pag. 1557
- (16) A. Boglietti, E. Carpaneto, "Induction Motor High Frequency Model", Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record IEEE, 1999, Phoenix, AZ, USA, pag. 1557
- (17) Yue Liu, Ligu Wang, Han Gao, Haicong Zhang, Dianguo Xu, "Overvoltage Mitigation of Submersible Motors with Long Cables of Different Lengths", Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014 17th International Conference, 2014, Hangzhou, China, pag. 638
- (18) Yue Liu, Ligu Wang, Han Gao, Haicong Zhang, Dianguo Xu, "Overvoltage Mitigation of Submersible Motors with Long Cables of Different Lengths", Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014 17th International Conference, 2014, Hangzhou, China, pag. 638

- (19) Yue Liu, Ligu Wang, Han Gao, Haicong Zhang, Dianguo Xu, “Overvoltage Mitigation of Submersible Motors with Long Cables of Different Lengths”, Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014 17th International Conference, 2014, Hangzhou, China, pag. 639
- (20) Yue Liu, Ligu Wang, Han Gao, Haicong Zhang, Dianguo Xu, “Overvoltage Mitigation of Submersible Motors with Long Cables of Different Lengths”, Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014 17th International Conference, 2014, Hangzhou, China, pag. 639
- (24) Yue Liu, Ligu Wang, Han Gao, Haicong Zhang, Dianguo Xu, “Overvoltage Mitigation of Submersible Motors with Long Cables of Different Lengths”, Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014 17th International Conference, 2014, Hangzhou, China, pag. 640
- (25) Yue Liu, Ligu Wang, Han Gao, Haicong Zhang, Dianguo Xu, “Overvoltage Mitigation of Submersible Motors with Long Cables of Different Lengths”, Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014 17th International Conference, 2014, Hangzhou, China, pag. 640
- (26) Yue Liu, Ligu Wang, Han Gao, Haicong Zhang, Dianguo Xu, “Overvoltage Mitigation of Submersible Motors with Long Cables of Different Lengths”, Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014 17th International Conference, 2014, Hangzhou, China, pag. 641
- (27) Yue Liu, Ligu Wang, Han Gao, Haicong Zhang, Dianguo Xu, “Overvoltage Mitigation of Submersible Motors with Long Cables of Different Lengths”, Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014 17th International Conference, 2014, Hangzhou, China, pag. 643

## Bibliografia

1. A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Lazzari, “Experimental High Frequency Parameter Identification of AC Electrical Motors”, IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005, San Antonio, TX, USA, pp. 5-10.
2. A. Boglietti, E. Carpaneto, “Induction Motor High Frequency Model”, Industry Applications Conference, 1999. Thirty-Fourth IAS Annual Meeting. Conference Record IEEE, 1999, Phoenix, AZ, USA, pp. 1551-1558.
3. Yue Liu, Ligu Wang, Han Gao, Haicong Zhang, Dianguo Xu, “Overvoltage Mitigation of Submersible Motors with Long Cables of Different Lengths”, Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014 17th International Conference, 2014, Hangzhou, China, pp. 638-644
4. A. Fratta, G.M. Pellegrino, F. Scapino, F. Villata, “A three-phase PWM VSI line termination net for load overvoltage cancellation”, Industrial Electronics, 1999. ISIE '99. Proceedings of the IEEE International Symposium on, 1999, Bled, Slovenia, Slovenia, pp.762-767
5. G.L. Skibinski, R.J. Kerkman, D. Schlegel, “EMI emissions of modern PWM AC drives”, IEEE Industry Applications Magazine, vol.5, n.6, Nov/Dec 1999. Pp. 47 – 80
6. G. Skibinski “Design Methodology of a Cable Terminator to Reduce Reflected Voltage on AC motors”, Industry Applications Conference, 1996. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96., Conference Record of the 1996 IEEE, vol. 1, 6-10 Ottobre 1996. Pp.153 - 161