

COSTRUZIONI ELETTROMECCANICHE

Progettare una macchina elettrica significa definire un disegno quotato della macchina elettrica. La macchina elettrica deve soddisfare le specifiche del cliente.

In macchine elt. si sono studiati dei modelli edotti allo studio delle macchine elt. Si è visto, ad esempio, che un motore con un numero di fase ha un circuito equivalente

In questo caso dalle specifiche del committente devo ricavare un circuito equivalente della macchina. Dobbiamo quindi legare i parametri del circuito equivalente alle dimensioni della macchina.

Esistono delle funzioni matematiche che legano i parametri del circuito equivalente alle dimensioni.

esempio:
$$y = 4 \sin \sqrt{x} + \frac{5}{8} e^{-\frac{x}{10}} \quad \bullet \quad y = f(x)$$

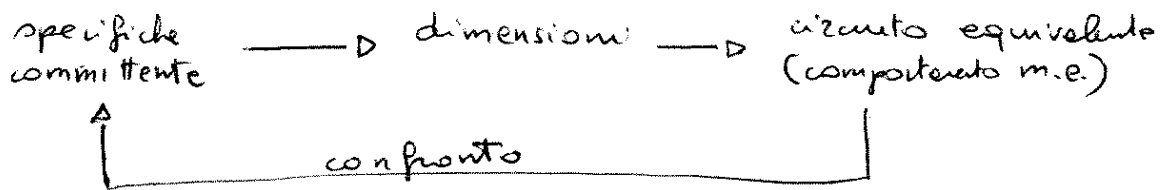
di questa funzione esiste l'inversa $x = f^{-1}(y)$. Assapato x è facile trovare y . Il viceversa è "difficile".

Ma conosciamo come ricavare dalle dimensioni i parametri, è più difficile il viceversa. Per risolvere le equazioni inverse usiamo ^{un} il metodo numerico. Bisogna cercare di limitare il numero di tentativi.

Le dimensioni devono soddisfare le specifiche del cliente così abbiamo un circuito equivalente con opportuni parametri. Bisogna tenere presenti le sollecitazioni a cui è sottoposta la macchina durante il funzionamento.

- sollecitazioni meccaniche σ, ϵ
- sollecitazioni elettromagnetiche S, B δ (densità di corrente)
- sollecitazioni termiche $\theta, P_{dissipata}$

Il processo di progettazione



Quando passiamo da specifiche a dimensioni si possono avere aiuti dalle:

- normative per la sicurezza
- normative dimensionali
- materiali
- costi

Inoltre dobbiamo basarci sulle teorie delle macchine elettriche, sulle equazioni di dimensionamento, sulle regole di similitudine e sull'"esperienza".

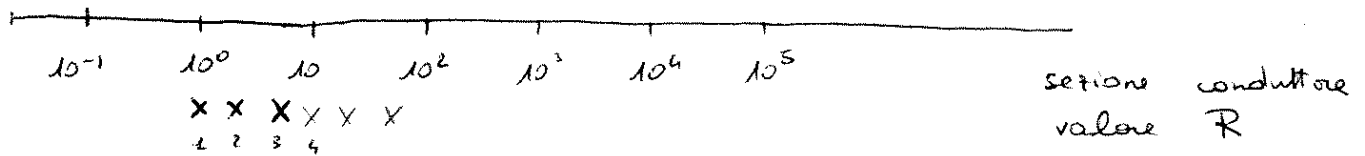
L'"esperienza" è la conoscenza del c. equivalente di macchine costruite in precedente, cioè la conoscenza dei parametri del c. equiv, ovvero la conoscenza del comportamento di macchine costruite in precedente.

NORMATIVA DIMENSIONALE

I componenti delle macchine elt sono particolari costruiti da sub-fornitori per numerosi costruttori di macchine elettriche.

Vengono resi disponibili dei componenti standardizzati. Questi vengono scelti in modo tale da rendere minimo l'errore ^{relativo} ~~assoluto~~ tra valore desiderato e valore disponibile.

Questo viene realizzato mediante le Serie di Rénard.



Si scelgono 3 valori equidistanti nella scala logaritmica di cui il primo è 10^0 .

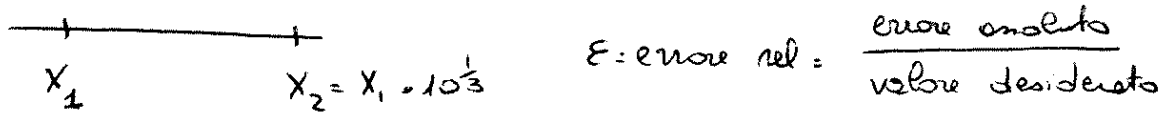
1. $10^{\frac{0}{3}} = 1$

2. $10^{\frac{1}{3}} = 2,15$

3. $10^{\frac{2}{3}} = 4,64$

4. $10^{\frac{3}{3}} = 10$

} Sono scelti in modo da avere una progressione geometrica di ragione $10^{\frac{1}{3}}$



$x_1 \leq$ valore desiderato $\leq x_2$

$$E = \frac{\frac{x_1 + x_2}{2} - x_1}{\frac{x_1 + x_2}{2}} = \frac{x_1 + x_2 - 2x_1}{x_1 + x_2} = \frac{x_2 - x_1}{x_1 + x_2}$$

$$E_{x_1} + E_{x_2} = x_2 - x_1 \Rightarrow (1 + E)x_1 = (1 - E)x_2$$

$$x_2 = \left(\frac{1 + E}{1 - E} \right) x_1$$

Il massimo errore rel. va \bar{E} .

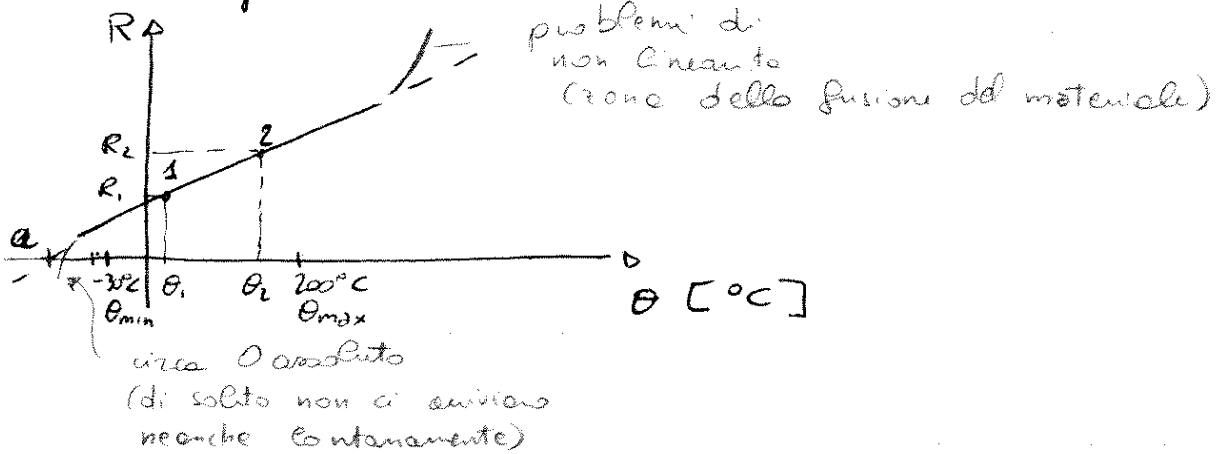
$$\frac{x_2}{x_1} = \frac{1 + E}{1 - E} = 10^{\frac{1}{3}} \quad 1 + E = 10^{\frac{1}{3}} = E \cdot 10^{\frac{1}{3}}$$

$$E = \frac{10^{\frac{1}{3}} - 1}{10^{\frac{1}{3}} + 1} = 0,37$$

con la serie R_3 lo errore max 37%

MATERIALI

I Conduttori che ci interessano sono il rame e l'alluminio.
 A noi dei conduttori interessa la variazione di resistenza con la temperatura.



Dove interessa a noi la resistenza è lineare.

a val -235°C per il rame e -275°C per l'alluminio

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{235 + \theta_2}{235 + \theta_1} = \frac{235 + \theta_2 - \theta_1 + \theta_1}{235 + \theta_1} = 1 + \frac{1}{235 + \theta_1} (\theta_2 - \theta_1) = 1 + \alpha (\theta_2 - \theta_1) \approx 0,4\%$$

$$\frac{1}{235 + 20} = 0,0033$$

$\alpha \approx 0,4\%$ se si parte da temperature prossime alle temperature ambiente.

$\frac{R_2}{R_1} = 1 + \alpha (\theta_2 - \theta_1)$ non viene più considerata delle nome ma è utile per fornire un'idea generale. Le ^{resistenza} temperature variano di $0,4\%$ per ogni salto di 1°C .

Esempio : $R = 100 \Omega$ e 20°C
 $R = 100,4 \Omega$ e 21°C
 $R = 140 \Omega$ e 120°C

Bisogna tenere conto dei salti di temperatura pochi!

- se varia la resistenza cambia il comportamento della macchina
- la temperatura del rame coincide con quella dell'isolante che è molto sensibile alle temperature.

Metodi di misura della temperatura:

- variazione di resistenza (alimenta la macchina con tensione continua e uso metodo volt-ampereometrico).
- metodo termometrico (sonde appoggiate sui conduttori usati su macchine) (più costante)
- metodo con termorivelatori incorporati (sonde termometriche inserite nel costruttore in un posto ritenuto opportuno).

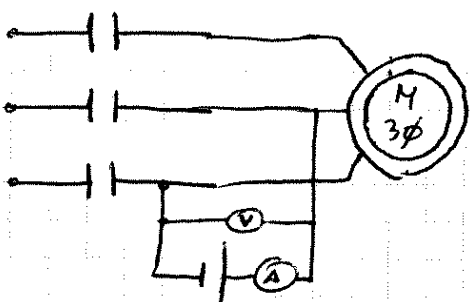
Differenza tra le due tipologie di misura: il metodo termometrico danno la misura dove sono posizionati i rivelatori (forniscono temperature puntuali).

Il metodo volt-ampereometrico fornisce una temperatura media del conduttore.

Le norme dice che in funzione del tipo di macchina se si ha una temperatura media di 100°C si può avere una temperatura massima di $5 \pm 20^{\circ}\text{C}$

Se invece si usa il metodo termometrico bisogna prendere la temperatura in alcuni punti specifici.

Esiste anche il metodo per sovrapposizione (non contemplato dalle norme) che è usato sui motori ad induzione.



Ⓟ e Ⓜ per la continua

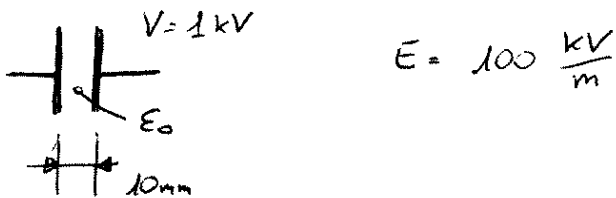
Vantaggio: eseguo una misura di θ per variazione di resistenza mentre il motore sta funzionando. Svantaggio: esiste componente in continua su motori ad induzione.

Se la componente in continua è bassa come valore non do fastidio alle macchine, ma meglio C_0 misura.

Se ho componente continua alto do fastidio alle macchine.

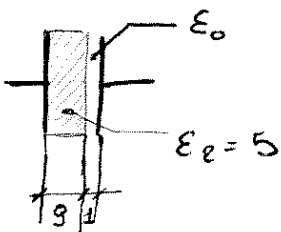
Altre frequenze. i condensatori devono assorbire tutta la corrente erogata dalle macchine.

Materiali isolanti



$$E = 100 \frac{\text{kV}}{\text{m}}$$

Aggiungiamo un isolante

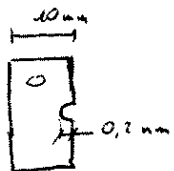


ho 2 camp. elt.

$$E_1 = 71 \frac{\text{kV}}{\text{m}} \text{ nell'isolante}$$

$$E_2 = 358 \frac{\text{kV}}{\text{m}} \text{ nell'aria}$$

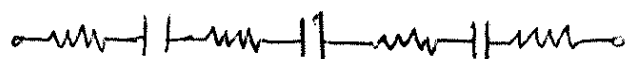
Se non si riempie completamente lo spazio tra i conduttori peggiora la situazione invece di migliorarla.

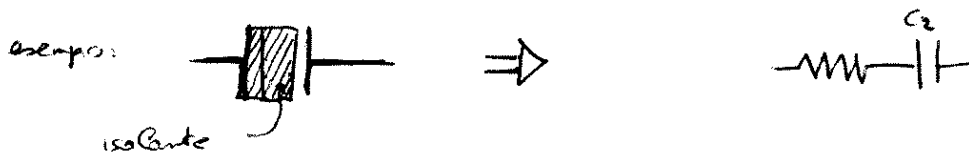


Nelle cose posso avere delle scariche.

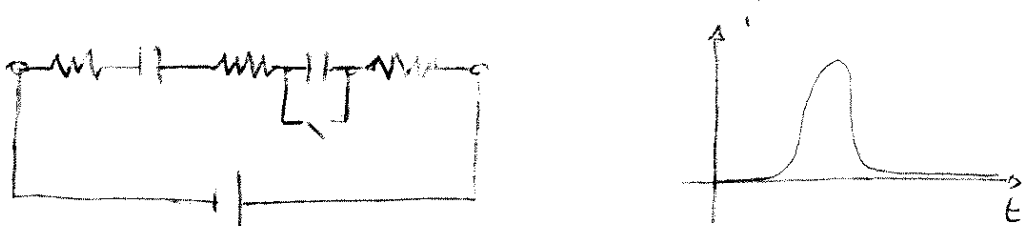
È importante che l'isolante non abbia abrasioni superficiali o bolle all'interno

Misure di scariche parziali: è un metodo per capire se l'isolante ha dei problemi (bolle o coriandoli, impurità). Possiamo vedere il risultato in questo modo





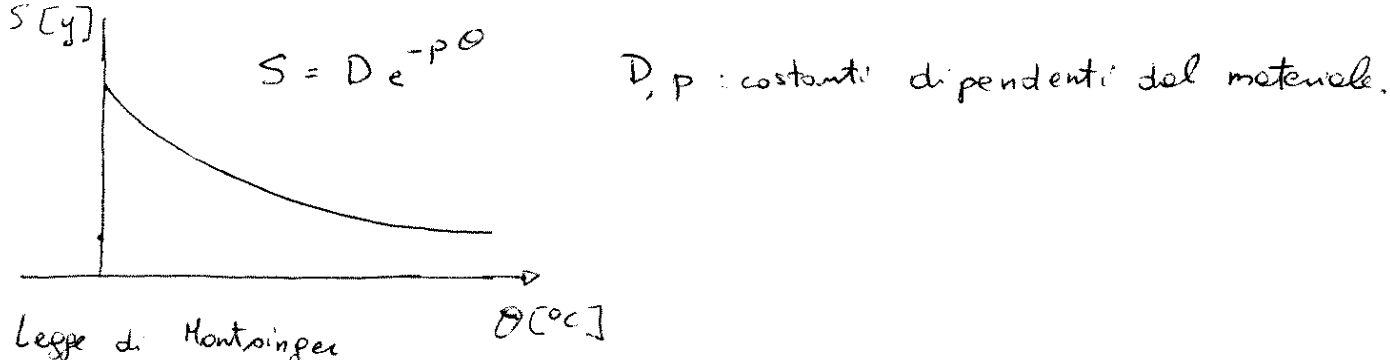
Applichiamo una tensione Dc allo schema precedente. Si ha che la corrente è uguale a 0 finché siamo in Dc. Aumento della tensione. Se lo delle occlusioni di cui si ha una scarica



All'inizio avrà una scarica ogni qualche giorno. Poi queste scariche aumenteranno e ci si rende conto che c'è qualcosa che non va. Ha senso fare delle prove del genere per macchine di alta tensione (100 kV)

Stabilità delle caratteristiche di un materiale isolante con la temper.

Le caratteristiche degli isolanti dipendono dall'aumentare di θ . Cioè all'aumentare di θ si accorcia la vita utile del materiale isolante. Esiste una legge che fornisce la vita in funzione di θ .



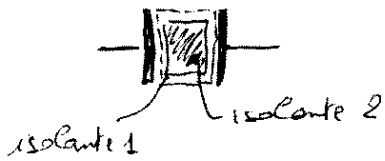
A noi interessa che la durata dell'isolante sia pari a quella della macchina elt.

Regola pratica: un incremento $\Delta\theta \approx 6 \div 10^{\circ}C$ produce una riduzione di S (Service life) del 50%.

Le norme forniscono degli esempi per il calcolo della temperatura e

della vita utile.

Le norme prevedono che tra 2 conduttori si possano mettere diversi tipi di isolante. La norma chiama il conduttore + materiali isolante



EIS (Electrical isolation system).

Chi si occupa di materiali isolanti fornisce al costruttore della macchina elettrica gli EIS.

Insieme agli EIS viene fornita anche la "classe di isolamento" (oggi è definita "classe termica").

Le classi termiche variano da 90°C a 270°C . A noi interessano le classi termiche B (130°C), F (155°C) e H (180°C).

La classe B è riservata ai trasformatori. Le classi F e H sono sia motori che trasformatori.

Il numero di anni di funzionamento non è riportato né nella versione vecchia, né in quella nuova.

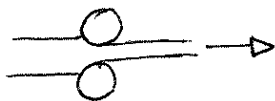
Materiali magnetici

I materiali che ci interessano sono:

Laminati

- Laminati Fe Si (Si al 4%, aggiungo il Silicio perché aumenta la resistività)

Le lamine sono prodotte per laminazione



In genere lo spessore delle lamine finite è 0,5 o 0,35 mm.

La laminazione di solito è fatta su metallo caldo (meno fatica) o su metallo freddo (più difficile la laminazione). C'è differenza tra laminazione a caldo, e a freddo.

Laminazione a caldo: materiali a grani non orientati e sono isotropi.

Laminazione a freddo: materiali a grani orientati e sono anisotropi.

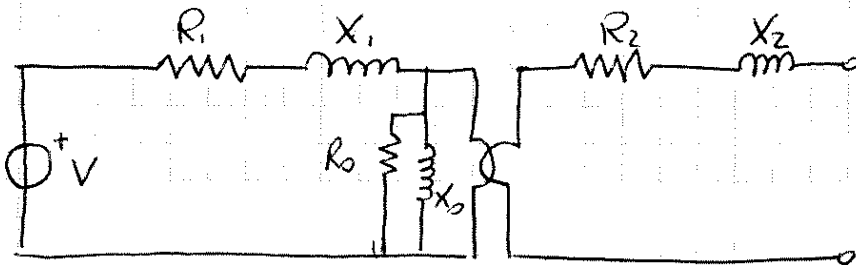
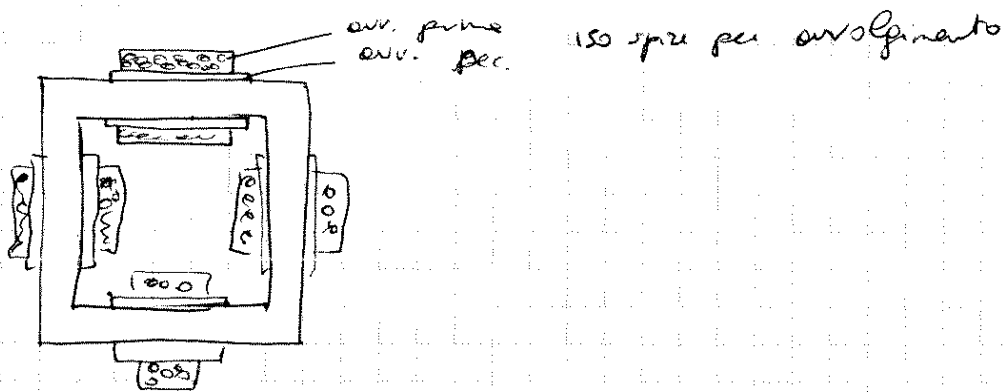
La lamina isotropa ha le stesse caratteristiche e le stesse caratteristiche

per ogni direzione del passaggio del flusso. Nell'emistotipo NO.

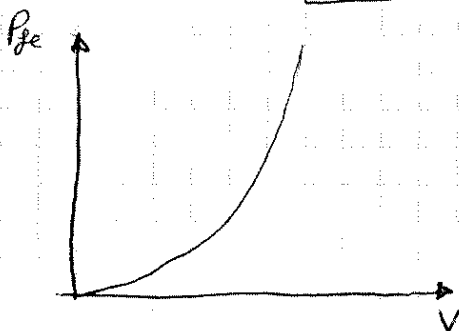
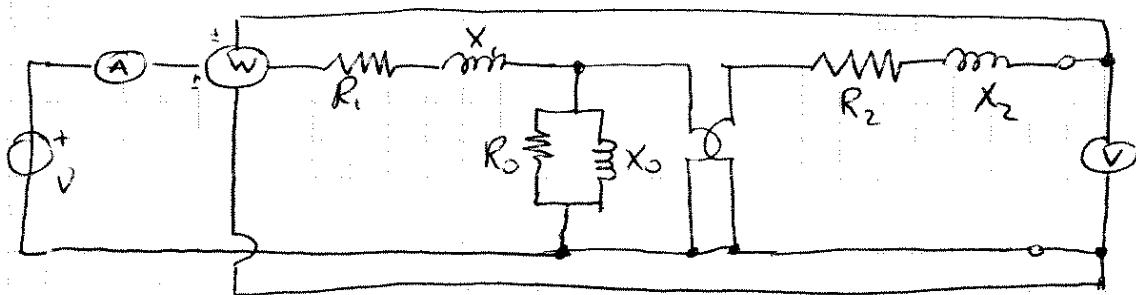
Se in una lamiera laminata a freddo fucuo. prova il flusso nella direzione dei grani ha caratteristiche del materiale molto migliori del laminato a caldo. Se posto oltre i grani ha caratteristiche peggiori.

Misurazione perdite materiale magnetico è un problema!!

In un trasformatore questa misura viene effettuata con la prova a vuoto. Per generalizzare la misura viene effettuata con il giogo di Epstein: un trasformatore monofase con dimensioni unificate.

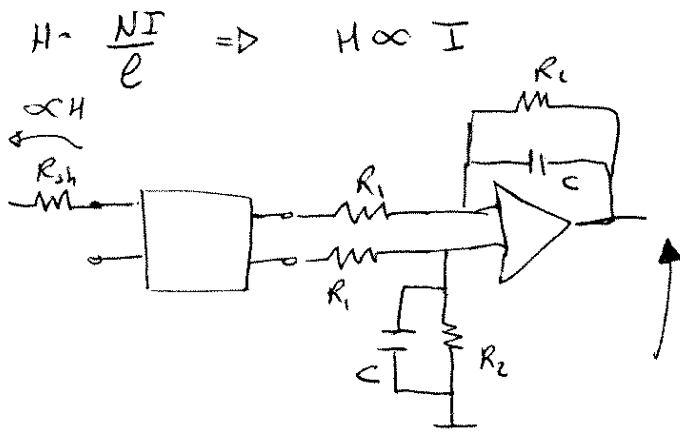


Gli strumenti vanno inseriti così:



$$B = \phi / S \quad \phi = \frac{\lambda}{N} \quad \lambda = \int v dt$$

S, N sono definite per il giogo di Epstein. Quindi $B \propto \int v dt$



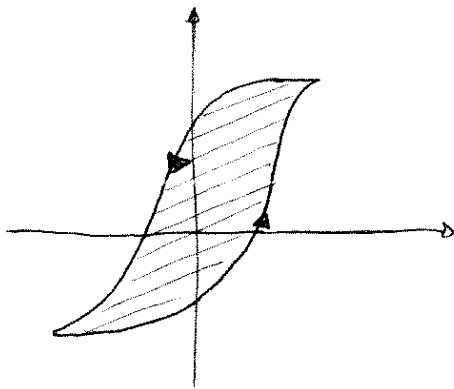
Integrali come basso!!

Deve funzionare in condizione dove $\omega C = \frac{1}{R_2 C} \ll 2\pi f$

con f la frequenza di alimentazione e primario.

Mi sono creato due segnali: l'uno $\propto B$ e l'altro $\propto H$ e così posso disegnare la caratteristica H-B.

L'area racchiusa dal ciclo di isteresi è l'energia specifica per U.V.

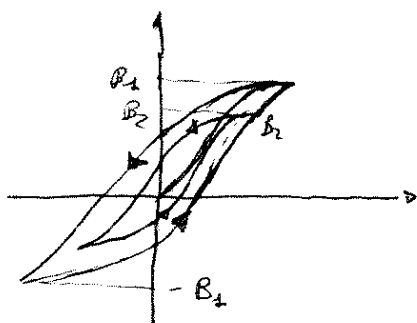


passo del materiale quando viene percorso il ciclo di isteresi.

I motivi delle perdite sono:

- 'isteresi'
- correnti parassite.

Prendo un materiale nuovo mai soggetto a campo magnetico e lo magnetizzo per la 1^a volta - lo magnetizzo e ottengo un ciclo di isteresi, ora tendo che voglio muovermi

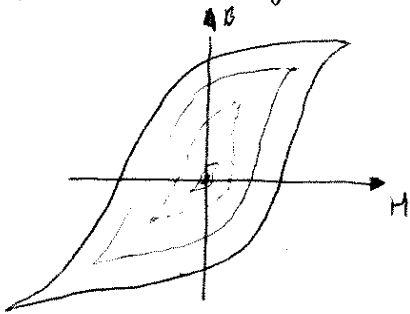


con $B_{max} = B_2$. Il ciclo di isteresi sarà quello più interno.

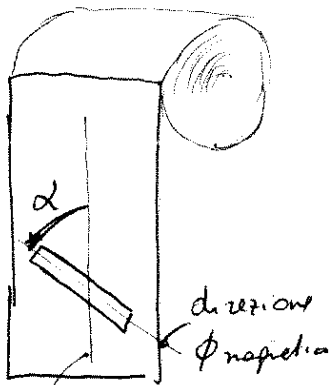
La curva di magnetizzazione (o curva normale di magnetizzazione) è il luogo geometrico dei cicli di isteresi simmetrici.

Ciclo di isteresi simmetrico è il ciclo di isteresi del materiale tra valori di B_1 opposti (es: $+B_1, -B_1$) per $N \rightarrow \infty$ con N il numero di volte in cui un ciclo viene eseguito.

Voglio smagnetizzare un pezzo di materiale ferromagnetico. Il materiale viene messo in uno smagnetizzatore che gli fa fare una serie di circuiti sinusoidali tra valori alti B . Poi inizia a diminuirli gli estremi fino a quando il materiale è in un punto passato allo zero e $B=0$ e $H=0$.



Lavorazione di un rotolo



Prendiamo un lamierino tagliato in diagonale - l'angolo α è compreso tra 0 e 90° .

In genere si fanno più prove con diversi valori di α .

direzioni di laminazione

Il ferro orientato viene usato nei trasformatori, nei motori e nei generatori, il ferro non orientato

Le macchine elettriche dove impiego il materiale magnetico sottoposto a misura nel gruppo di Epstein possono essere:

- trasformatori
- macchine elett. rotante.

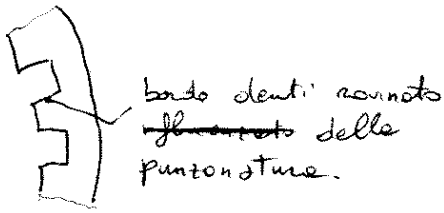
Dobbiamo verificare l'affidabilità della misura effettuata col gruppo di Epstein.

Se costruisco un trasformatore la misura è affidabile (ho perdite differenziale più alte).

Con le macchine elett. rotante si hanno due problemi quali:

- puzzone di ferro diverso dal taglio con cesoie. Si ha l'area di metallo

con la fine della lastra che si vuole ottenere. Si ha un puntone di taglio
 la lastra. Il materiale magnetico dove è stato puntonato è più rovinato
 rispetto alle pinze. Se la macchina è piccola l'effetto si fa ancora



peggiori.

Di conseguenza quando costruiamo
 una macchina elett. stiamo mi-
 nistrando con perdite maggiori

rispetto a quelle col prog di Epstein.

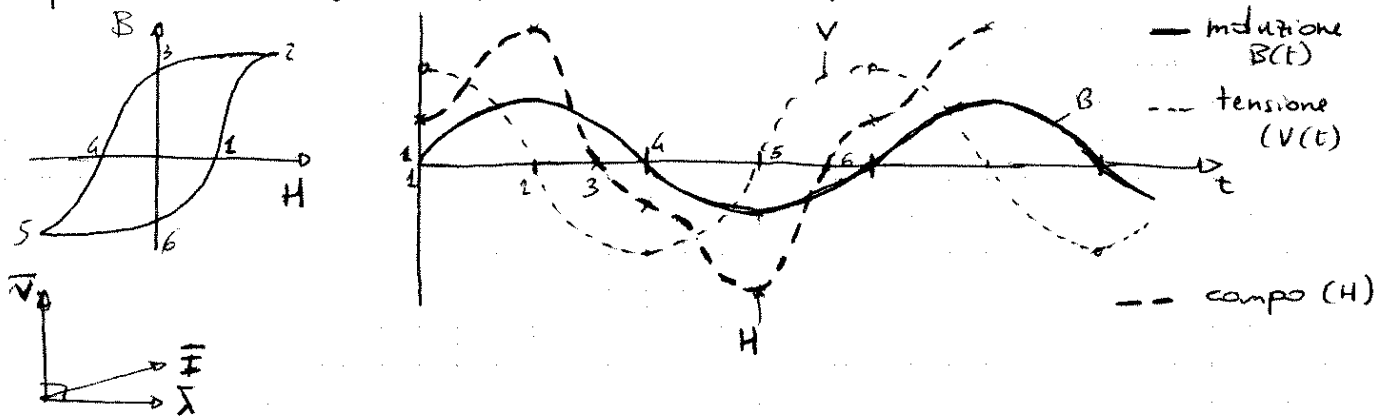
$$\frac{P_{m.e. est.}}{P_{g. Epstein}} = k_b \text{ (building factor)} \quad , 1 \leq k_b \leq 1,35$$

Il valore k_b è noto al costruttore sulle basi dell'esperienza.

Si ha anche il problema di un'alimentazione non sinusoidale

(6 step - PWM).

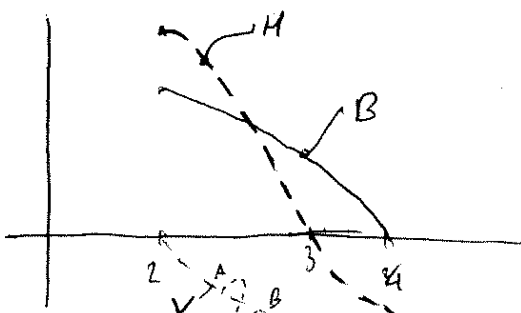
Le prove sul prog di Epstein si hanno V, f costanti e sinusoidali.



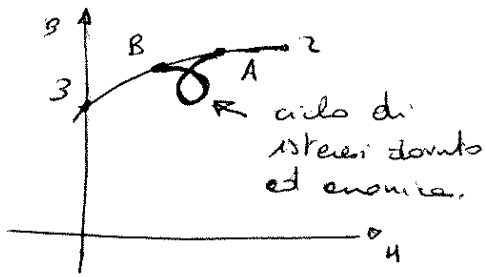
Se lavoro in sinusoidale ho sempre questa situazione.

Quando elemento con tensione 6-step o PWM, fornisce una sinusoidale
 fondamentale + delle armoniche.

Per determinare le P_{fe} con 6-step e PWM devo determinare
 l'effetto delle armoniche.

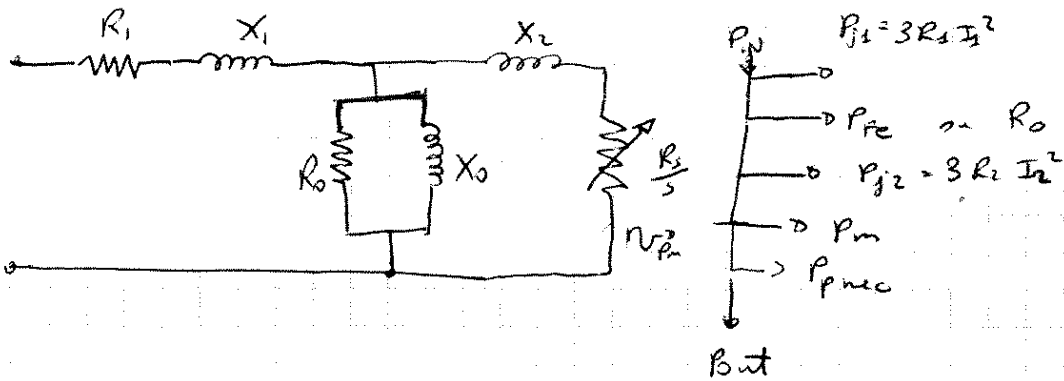


Tra il punto 2 ed il 3 sommano
 un periodo di un'armonica ad alta
 frequenza



La presenza del ciclo di isteresi dovuto all'armonica fa aumentare l'area di perdite.

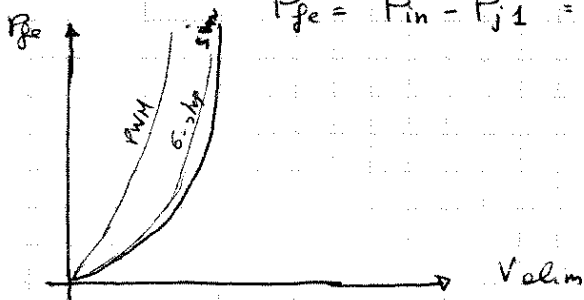
Quindi 6-step e PWM sono uguali ed una sinusoide fondamentale più armoniche che provocano degli aumenti delle perdite nel ferro. Il PWM aumenta parecchio le perdite, mentre il 6-step no.



a vuoto: $P_{out} = 0$. Voglio trovare la P_{fe} . Devo fare fuori P_{j1} , P_{j2} e P_{mec} . Costruisco una macchina così: mot. a vuoto $3\phi \rightarrow$ tolgo gabbia di rotore e trascuro in rotazione con un anello alle freq. di sincronismo. (elimino perdite meccaniche e P_{j2} (non c'è più la gabbia)). Restano solo più le P_{j1} e la P_{fe} . Le P_{j1} si possono calcolare facilmente perché si può misurare R_s .

Quindi P_{in} viene misurata, P_{j1} sono misurate quindi:

$$P_{fe} = P_{in} - P_{j1} = P_m - 3 R_s I_s^2$$



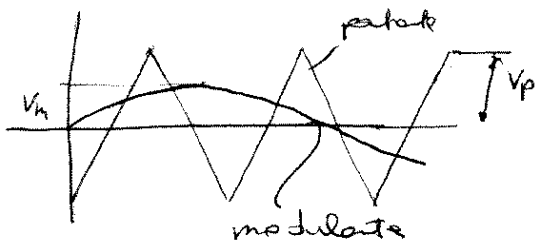
Confronto 6-step, PWM e sinus. e parte di valore efficace di fondamentale

A 210 V ho un aumento di più del 30% delle perdite a elemento PWM

Valutiamo i parametri della tensione modulata che influenzano sulle P_{fe}. Generiamo le fondamentali di alimentazione delle macchine con diverse velocità di V_{dc}.

Decido di alimentare il motore a 150 V e 50 Hz. Freq di switching 2160 Hz. Se ho tensione DC alta devo avere indice di modulazione m=0,6. Se il bus DC è basso una m indice di modulazione m=0,9.

Se m=0,6 allora $\frac{V_m}{V_p} = 0,6$ $V_m = 150 \cdot \sqrt{2}$



$\frac{V_m}{V_p} = 0,6$ $V_p = \frac{150\sqrt{2}}{0,6} = 353,55 \text{ V}$

Se m=0,9 $V_p = \frac{150\sqrt{2}}{0,9} = 235,7 \text{ V}$

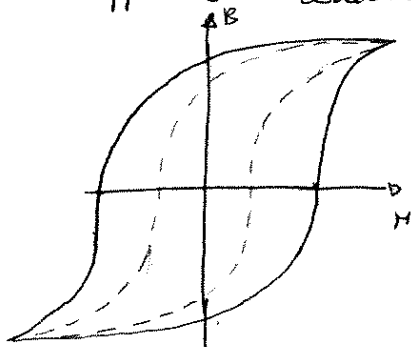
Si nota che le perdite nel ferro sono maggiori per m bassi

Se variano la frequenza della portante con m=0,9. Tensione 220 V, 50 Hz. Vario la frequenza da 1 kHz a 20 kHz.

Si nota che le P_{fe} diminuiscono all'aumentare della frequenza di switching. All'inizio scendono velocemente poi si stabilizza.

Se si è a base frequenza di modulazione si hanno grandi variazioni di campo $\frac{dB}{dt}$ e cause del ripple di corrente. Se aumento la freq. di switching il campo viene meno perché diminuisce il

ripple di corrente.

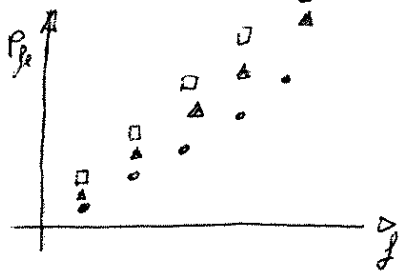


- ciclo isteresi: base freq. di switching
- ciclo isteresi: alta freq di switching.

Ricordiamo che l'area dei nuclei di istessi aumenta con la frequenza.

Nota: l'area dei nuclei di istessi aumenta con l'armatura delle frequenze di fondamentale e non di quelle di switching

Alimentiamo un motore a $\phi = \frac{B}{f} = \text{costante}$ e sinusoidale! ^{PWM a costante} Vario f e V . Metodi di eliminazione PWM. 1) Vario l'indice di modulazione e tempo V_{dc} costante. 2) Vario V_{dc} e m a tempo costante m .



- dim. sinusoidale
- ◻ PWM V_{dc} costante
- ◼ PWM m costante.

Se ho un catalogo con delle perdite specifiche ottenute con il gruppo di Epstein. Posso usare il materiale del catalogo per costruire:

- trasformatore (funzione in sinusoidale a 50 Hz). Il flusso lavora in una condizione molto simile a quella in cui ~~è~~ è stato testato. Le P_{fe} sono simili a quelle misurate col gruppo. In general l'aumento delle perdite è del 5-15%.
- macchine elettriche rotanti: in questo caso le perdite nel ferro aumentano 15-30% per il building factor più un altro termine ~~de~~ 15-20% dovuto all'eliminazione non sinusoidale.

I materiali a grani orientati buoni li uso sulle parti macchine rotanti. Quelli un po' meno buoni sulle macchine rotanti. Scedendo di qualità si passa ai nuclei per uso generale e per reattori.

I laminari vengono isolati per ridurre le correnti parassite.



l'area meccanica è $a \cdot b$ mentre l'area "magnetica" è $m \cdot a \cdot b$. Vale

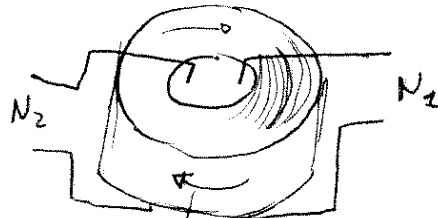
$$K_s a \cdot b, \quad K_s < 1 \text{ fattore di stipamento}$$

Per conoscere k_s bisogna sapere lo spessore dei laminari.

A catalogo vengono date le caratteristiche garantite (il nome delle laminari e quelle tipiche) e quelle tipiche.

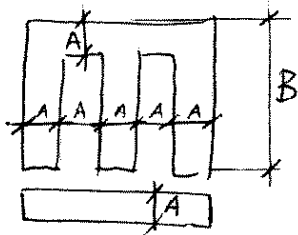
Trasformatori possono essere a lamelle o a nucleo avvolto.

A nucleo avvolto:

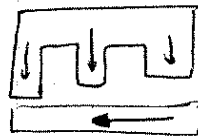


direzione di laminazione se materiale a grani orientati.

Nucleo tracciato tipo EI



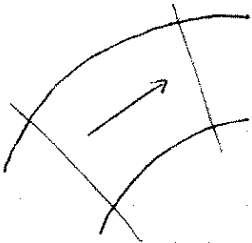
B può essere = 3A oppure = 5A



Direzione laminazione verso il basso nelle E ed in Inglese nelle I

Lo sono stato in piedi perché i laminari a cristalli orientati hanno caratteristiche non così brutte a 90° , e ottime a 0° . Quindi non ad usare cristalli orientati per l'EI. I materiali sono "PR".

Si possono usare grani orientati per grandi generatori sismici. Questo



perché se lo statore è enorme sono obbligato a costruirlo a settori e posso così scegliere una direzione di laminazione.