

La simulazione di elementi magnetici, mediante software disponibili gratuitamente ed utilizzabili su un comune personal computer, aiuta ad ottimizzare il progetto ed a prevederne l'esatto comportamento in ogni situazione circuitale

SIMULAZIONE DI ELEMENTI MAGNETICI

di Fabio Milanesi

2

All'inserzione di trasformatori e variatori di tensione si verifica un'elevata corrente che può rendere problematico il coordinamento delle protezioni.

In questo articolo si indica come determinare, con metodi numerici, la corrente allo spunto attraverso le seguenti fasi:

- costruzione di un modello matematico del trasformatore a partire dai dati costruttivi e dalla curva di magnetizzazione del lamierino;
- simulazione del circuito equivalente con il programma SPICE.

Si considerano, quindi, i provvedimenti per limitare le correnti allo spunto ed il coordinamento con le protezioni contro le sovracorrenti.

Si è scelto di utilizzare programmi di calcolo funzionanti su un comune personal computer e disponibili gratuitamente in rete.

■ MODELLO DEL TRASFORMATORE

Volendo studiare il comportamento a vuoto di un trasformatore (figura 1) si può trascurare completamente l'avvolgimento secondario e schematizzare il circuito primario come una resistenza R , pari alla resistenza ohmica del primario, ed una induttanza L , pari all'induttanza di magnetizzazione.

■ TRANSITORIO D'INSERZIONE

Nell'ipotesi di linearità del nucleo e facendo riferimento alla figura 2, l'equazione che regola il funzionamento del trasformatore è:

$$e(t) = L \frac{di}{dt} + R \cdot i(t) \quad [1]$$

dove R è la resistenza ohmica dell'avvolgimento primario ed L è l'induttanza di magnetizzazione del circuito primario.

In caso di alimentazione con una tensione sinusoidale $e(t) = E_M \sin(\omega t + \alpha)$, esiste una soluzione analitica del transitorio espressa dall'equazione:

$$i(t) = \left[\frac{E_M}{Z} \sin(\varphi - \alpha) \right] e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{E_M}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \quad [2]$$

dove:

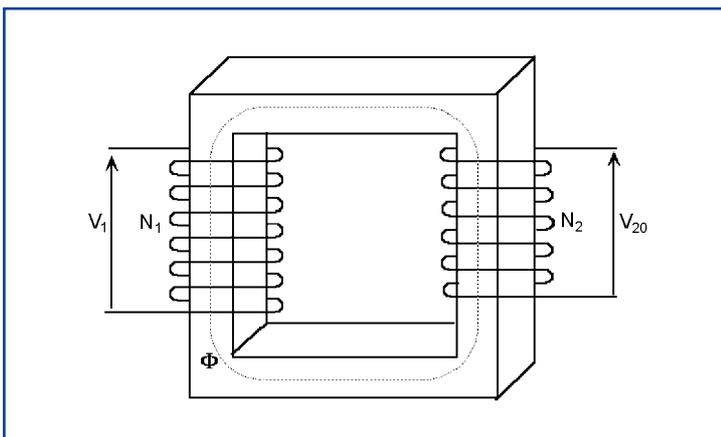
$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ è il modulo dell'impedenza del circuito;

$\tau = L/R$ è la costante di tempo del circuito;

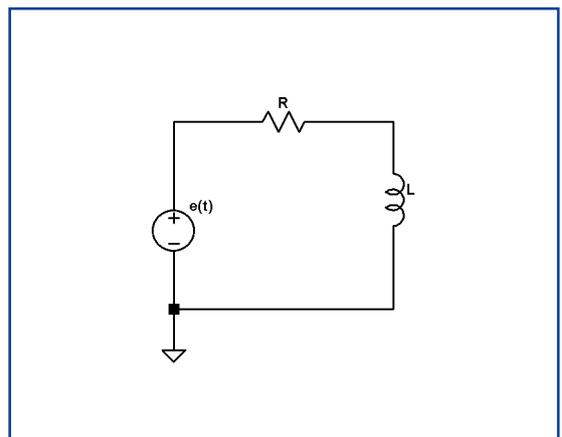
φ è l'angolo di fase del circuito dato dalla relazione $\tan \varphi = \omega L/R$.

Si nota che la corrente è la somma di due termini:

▼ **Figura 1:** Rappresentazione schematica di un trasformatore monofase



▼ **Figura 2:** Circuito equivalente



- il primo è spesso chiamato corrente transitoria ed indicato con i_t ;
- il secondo è la corrente periodica che si ha a regime ed è indicato con i_p .

La corrente transitoria i_t è un esponenziale smorzato, che tende a zero con costante di tempo $\tau = L/R$. In pratica, dopo un tempo pari a 4 volte la costante di tempo i_t è trascurabile e si è raggiunta la condizione di regime.

Se il circuito è chiuso all'istante t , per cui $\varphi = \alpha$, si ha $\sin(\varphi - \alpha) = 0$ e $i_t = 0$ ed il transitorio non ha luogo.

La condizione opposta si ha quando la chiusura avviene all'istante per cui $(\varphi - \alpha) = 90^\circ$. In questo caso, $\sin \varphi = 1$ ed il termine esponenziale è massimo e vale esattamente il modulo della corrente a regime. Il transitorio è significativo, tuttavia la corrente non può mai superare il doppio della corrente di regime.

Per un circuito puramente induttivo si ottiene:

$$\tau = \frac{L}{R} = \infty \quad i_t = \frac{E_M}{\omega L}$$

$$i_p = \frac{E_M}{\omega L} \sin(\omega t + \alpha - 90)$$

In pratica, alla corrente sinusoidale periodica sfasata di 90° in ritardo rispetto alla tensione si deve aggiungere una componente costante della stessa ampiezza. La corrente non è simmetrica rispet-

to allo zero, ma presenta una componente continua pari alla metà del suo valore massimo.

Anche in questo caso il valore massimo della corrente non supera il doppio della corrente di regime.

La figura 3 mostra il transitorio in un circuito ohmico induttivo con $R = 0,28 \Omega$, $L = 0,6 \text{ H}$, $V = 230 \text{ V}$ efficaci (325 V di picco) e $f = 50 \text{ Hz}$.

Si noti la forte componente continua smorzata con andamento esponenziale.

Circuito non lineare

I componenti magnetici avvolti presentano una spiccata non linearità, dovuta alla saturazione del nucleo. In questo caso non è possibile definire un'induttanza e l'equazione [1] che governa il circuito dovrebbe essere scritta nella forma:

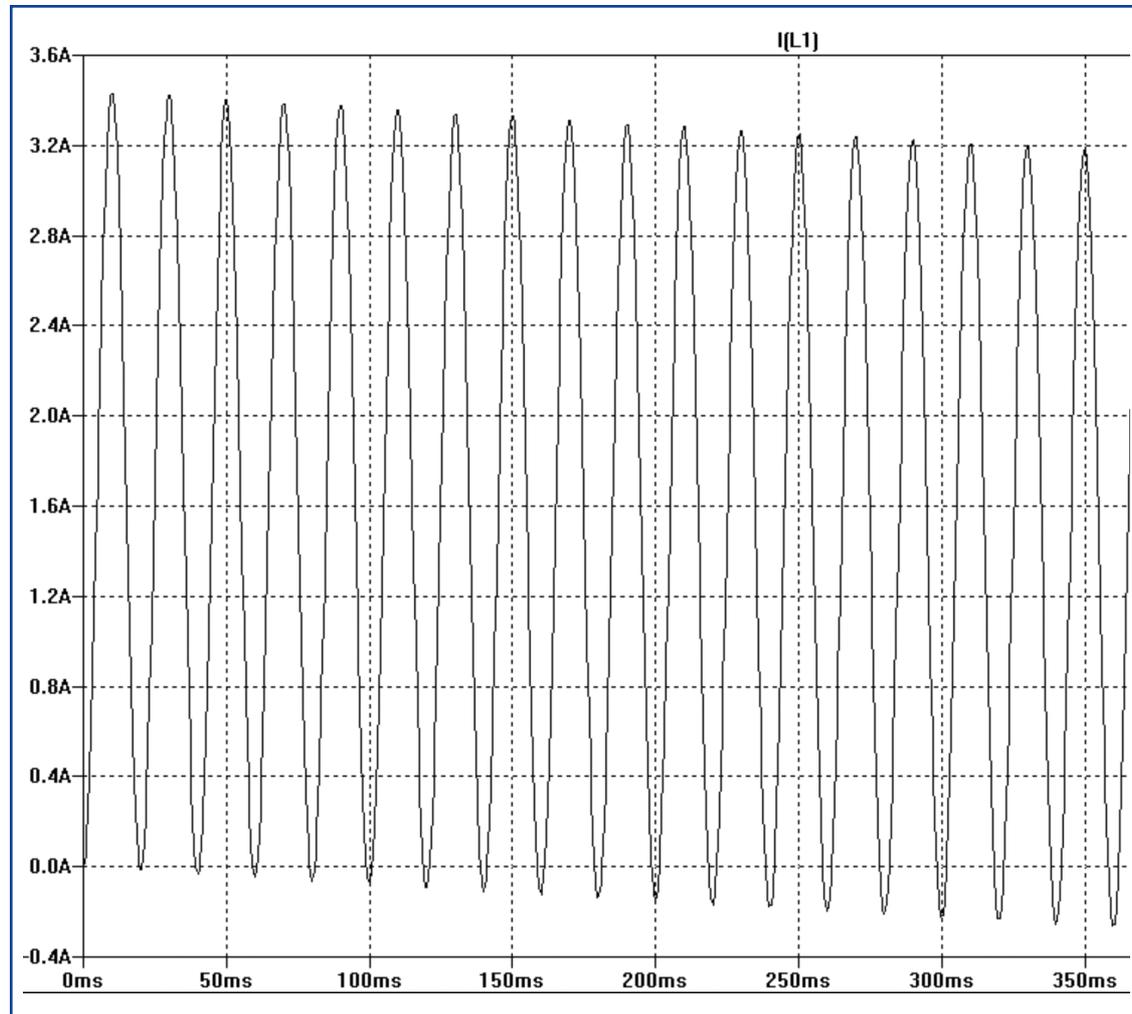
$$e(t) = E_M \sin(\omega t + \alpha) = \frac{d\Phi}{dt} + R \cdot i(t)$$

di cui esiste una soluzione analitica analoga a quella vista in precedenza.

In particolare, trascurando il termine resistivo e supponendo che l'inserzione avvenga nell'istante $t = 0$, si ottiene una soluzione del tipo:

$$\Phi = k - \frac{E_M}{\omega} \cos(\omega t + \alpha) = k - \Phi_M \cos(\omega t + \alpha)$$

La costante k può essere determinata dalle condizioni iniziali, imponendo $\Phi = 0$ all'istante $t =$



◀ **Figura 3:** Transitorio di inserzione di un circuito LR lineare

0, ossia trascurando la magnetizzazione residua. Sostituendo, si ottiene: $k = \Phi_M \cos \alpha$. Anche in questo caso l'espressione del flusso in funzione del tempo è la somma di due componenti:

$$\Phi(t) = \Phi_M [\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha)]$$

In generale, il flusso non è simmetrico rispetto allo zero, ma presenta una componente continua che è massima per $\alpha = 0$, ossia quando l'inserzione del trasformatore avviene al passaggio per lo zero della tensione. In questo particolare caso, il flusso oscillerà tra 0 e $2 \Phi_M$.

Si osservi che, a causa della saturazione magnetica, per ottenere un flusso pari al doppio di quello del funzionamento ordinario del trasformatore, occorre una corrente primaria enormemente più grande; ad esempio, se l'induzione di lavoro del trasformatore a cui corrisponde il flusso Φ_M è 1,4 T, per ottenere un flusso doppio occorre un'induzione di 2,8 T, praticamente impossibile da raggiungere in ogni materiale magnetico.

Modello circuitale di componenti non lineari

Per costruire un modello circuitale che tenga conto della saturazione partiamo dall'equazione:

$$e(t) = E_M \sin(\omega t + \alpha) = \frac{d\Phi}{dt} + R \cdot i(t)$$

che riscriviamo nella forma:

$$e(t) = \frac{d\Phi}{di} \frac{di}{dt} + R \cdot i(t) \Rightarrow \frac{d\Phi}{dt} + R \cdot i(t)$$

Il termine $d\Phi/di$ ha le dimensioni di un'induttanza, che definiamo induttanza incrementale, non più costante, ma funzione della corrente. Questa induttanza incrementale $L(i) = d\Phi/di$, detta anche induttanza per piccoli segnali, è variabile con la corrente e risente fortemente della variabilità della permeabilità magnetica del nucleo in funzione della corrente.

L'equazione può, quindi, essere riscritta nella forma:

$$e(t) = L(i) \frac{di}{dt} + R \cdot i(t) \quad [3]$$

Non esiste una soluzione analitica dell'equazione [3], ma è possibile ottenere una soluzione numerica approssimando la funzione $L(i)$ con una caratteristica lineare a tratti.

La relazione tra L ed i risente del comportamento non lineare del materiale magnetico; in particolare, vicino alla saturazione, a forti incrementi della corrente i corrispondono piccoli incrementi del flusso e, quindi, $L(i)$ diventa molto piccola.

Per determinare la curva $L(i)$ si calcola il flusso in funzione della corrente.

Se è richiesta una soluzione sufficientemente precisa, occorre partire dai dati costruttivi geometrici e dalla caratteristica di magnetizzazione del materiale ed utilizzare un software di simulazione magnetica agli elementi finiti.

Il metodo degli elementi finiti è basato sulle equazioni di Maxwell applicate al campo magnetico e consiste nel creare un modello bidimensionale o tridimensionale del componente e nel calcolarne l'andamento del campo magnetico in ogni punto. Il modello riguarda sia la geometria costruttiva, sia i materiali utilizzati, tenendo conto della non linearità dei materiali ferromagnetici. Se il modello è sufficientemente dettagliato la simulazione fornisce risultati molto accurati.

■ SIMULAZIONE DEL TRASFORMATORE

Trasformatore simulato

A titolo di esempio, s'ipotizzi un trasformatore monofase a mantello, realizzato con nucleo in lamierino a cristalli orientati avente le seguenti caratteristiche:

- potenza nominale 6.000 VA;
- tensione primaria 400 V;
- tensione secondaria 230 V;
- corrente nominale primaria = $6.000/400 = 15$ A;
- dimensioni del lamierino: 200 x 240 mm, colonna centrale 80 mm, spessore pacco 90 mm.

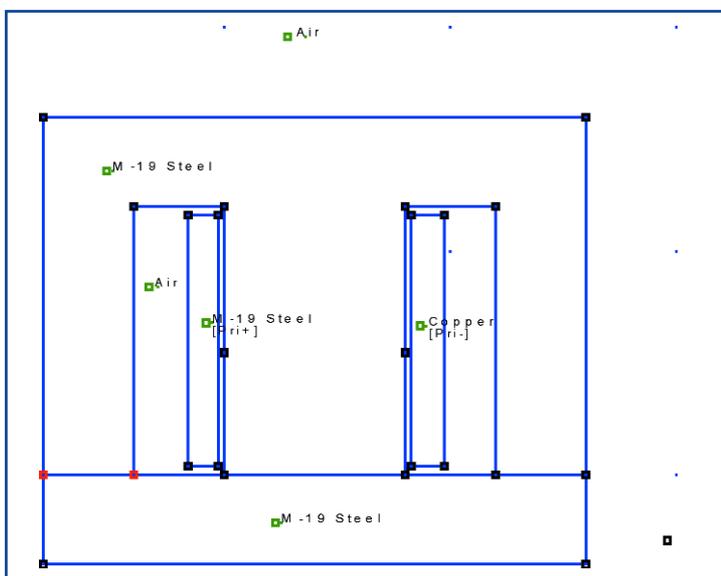
La bassa cifra di perdita del materiale magnetico consente di utilizzare un'induzione di lavoro relativamente alta, dell'ordine di 1,35÷1,5 T, a vantaggio della riduzione d'ingombro e di costo. L'avvolgimento primario (interno, ossia vicino al nucleo) è composto da 180 spire di diametro 2,8 mm.

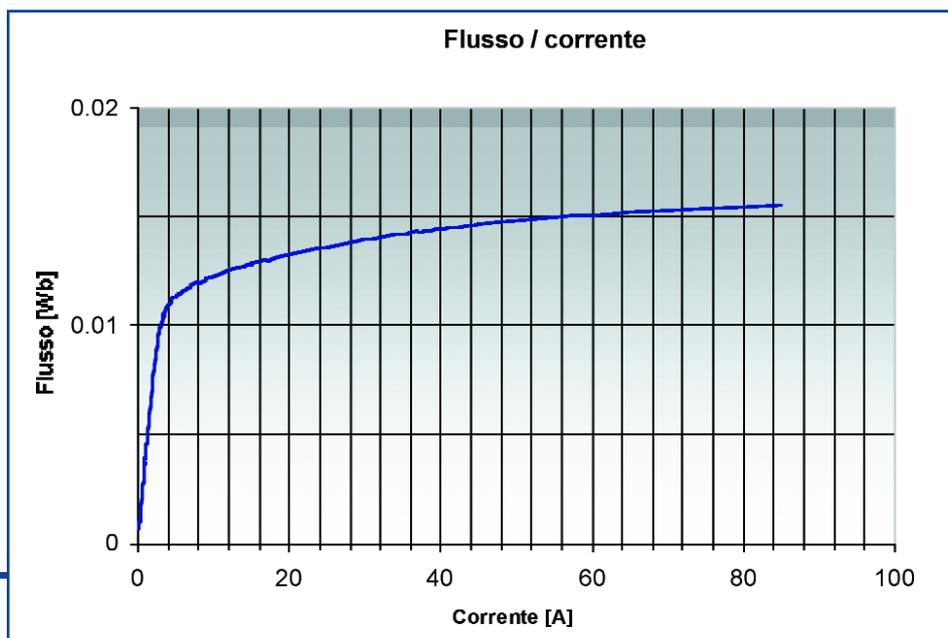
L'avvolgimento secondario (sovrapposto al primario e ad esso concentrico) comprende 106 spire del diametro di 3,55 mm.

Le dimensioni e la disposizione dei due avvolgimenti sono illustrati in figura 4.

Determiniamo il punto di lavoro del trasformatore a vuoto in regime sinusoidale, trascurando per ora la saturazione. La relazione fra tensione indotta e flusso è:

▼ **Figura 4:** Simulazione con programma agli elementi finiti





◀ Figura 5:
Relazione
non lineare
tra flusso
e corrente

$$\Phi_{OM} = \frac{V_{RMS}}{4,44 \cdot f \cdot N_1} \text{ (Wb)}$$

Sostituendo $V = 400 \text{ V}$, $f = 50 \text{ Hz}$, $N_1 = 180$ spire, si ricava $\Phi_{OM} = 0,01 \text{ Wb}$.

Dividendo il flusso per la sezione della colonna A_c ($80 \times 90 \text{ mm}$) e considerando un fattore di laminazione di 0,98, si ottiene l'induzione di lavoro:

$$B_M = \Phi_{OM} / A_c = 1,418 \text{ T}$$

valore che risulta discretamente lontano dalla saturazione.

Ricaviamo ora un modello del circuito magnetico partendo dalle caratteristiche dimensionali e dalla curva di magnetizzazione del lamierino ed utilizzando il programma FEMM, che sfrutta il metodo agli elementi finiti per risolvere problemi di magnetostatica (il programma è liberamente scaricabile dal sito <http://femm.foster-miller.net/index.html>).

Questo programma è un simulatore bidimensionale di circuiti magnetici. È possibile utilizzarlo per ottenere la distribuzione dell'induzione, il flusso magnetico e da questo l'induttanza del circuito primario del trasformatore al variare della corrente.

Si noti che, in generale, la caratteristica di un nucleo non ricalca fedelmente la curva di magnetizzazione; la presenza dei traferri e la non perfetta uniformità del campo magnetico richiedono uno studio accurato del modello.

Le parti in ferro sono indicate come *M-19 Steel*, l'avvolgimento è contrassegnato come *Copper* ed associato al circuito *Pri+* e *Pri-*; le altre parti del modello e lo spazio circostante il circuito magnetico sono indicate come *Air*.

È stato inserito un piccolo traferro di 0,2 mm (non visibile in figura), equivalente a quello che si crea con nuclei a lamierini interfacciati.

Dalla simulazione magnetica si può ricavare il valore dell'induzione B in un punto al variare

della corrente; è possibile anche ricavare il flusso magnetico totale Φ in funzione della corrente.

Il grafico di figura 5, ottenuto facendo variare la corrente primaria, illustra appunto la relazione $\Phi = f(i)$. È evidente la saturazione.

Il metodo agli elementi finiti evidenzia anche una distribuzione del flusso non uniforme (figura 6): l'induzione aumenta passando dalle zone bianche a quelle azzurre, blu, rosa, rosse.

Il campo magnetico all'esterno del nucleo è praticamente nullo.

La zona evidenziata in verde è la bobina primaria. Il programma comprende anche un linguaggio di script con cui è possibile automatizzare le operazioni d'analisi del circuito magnetico al variare della corrente e salvare i risultati su un file.

Alla fine dell'elaborazione si avrà una tabella che riporta l'induttanza incrementale in funzione della corrente (tabella 1).

Il passo successivo può essere la risoluzione dell'equazione [3] utilizzando metodi numerici ed inserendo la tabella di $L(i)$ oppure utilizzando un

▼ Figura 6: Campo magnetico all'interno del trasformatore

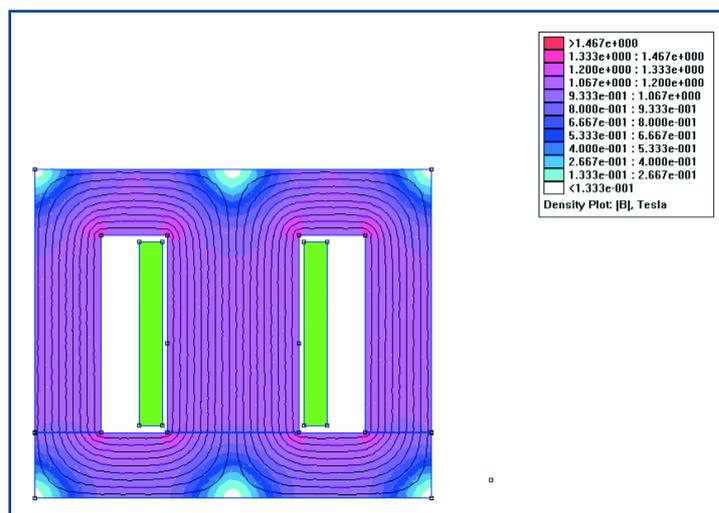


Tabella 1

Andamento dell'induttanza incrementale in funzione della corrente		
Corrente (A)	Flusso (Wb)	Induttanza incrementale (H)
0,2	0,001190497	1,071447699
1,2	0,007373548	1,106032234
1,4	0,008240658	1,059513137
1,6	0,008899192	1,001159095
1,8	0,009332364	0,933236437
2	0,009644107	0,867969617
3	0,010468218	0,628093067
4	0,010878487	0,489531898
5	0,011131273	0,400725843
6	0,011317790	0,339533688
7	0,011474158	0,295049765
8	0,011613624	0,261306543
9	0,011742083	0,234841664
10	0,011862023	0,213516412
15	0,012360836	0,148330027
20	0,012744080	0,114696718
30	0,013359663	0,080157979
40	0,013877487	0,062448691
50	0,014233753	0,051241510
100	0,015049052	0,027088294

simulatore circuitale per analizzare il circuito equivalente, in particolare durante il transitorio d'inserzione.

Risoluzione dell'equazione differenziale [3] con metodi numerici

La risoluzione diretta dell'equazione differenziale può essere eseguita con il programma freeware "Octave" (disponibile all'indirizzo <http://www.octave.org>).

Questo programma ha gran parte delle funzioni del Matlab, incluso il calcolo matriciale, la risoluzione di equazioni non lineari, la risoluzione di equazioni e sistemi di equazioni differenziali.

Nel nostro caso occorre solo scrivere una funzione che interpoli $L(i)$ estraendo i dati dalla tabella e definire un intervallo $t = (0 \div 2 \text{ s})$. Il tempo di 2 s è ovviamente arbitrario e va scelto in funzione della costante di tempo. Nel box 1 è illustrato il codice di definizione dell'equazione differenziale da integrare e nel box 2 quello della funzione interpolante per ottenere il valore di induttanza in funzione della corrente.

La soluzione si ottiene poi con il comando:

```
I = lode("f",0,t)
```

Octave fornisce non una funzione, ma una matrice contenente un'insieme di coppie (i,t) . L'andamento di $i(t)$ può essere visualizzato con il programma "gnuplot", fornito con Octave.

Codice di definizione dell'equazione differenziale da integrare

#equazione di un transitorio in un circuito RL non lineare con L funzione di I
#L(i) è una funzione lineare a tratti descritta dalla matrice a

```
function idot = RL_nlin ( i , t )
R = 0,3;
V = 537;
f = 50;
global a;
a1 = a;
#definizione di L = f(i) lineare a tratti
ia = abs( i );
L = interpola(ia,a1) ;
idot = (V * sin( 2 * pi * f * t ) - i * R)/L ;
endfunction
```

Purtroppo il metodo dell'equazione differenziale non si presta ad inserire altri elementi circuitali, se non a prezzo di forti complicazioni.

Risoluzione dell'equazione con un simulatore circuitale

Esistono numerosi programmi di analisi circuitale, derivati per la maggior parte dal codice di SPICE, il primo simulatore circuitale sviluppato presso l'università di Berkeley negli anni '70. Alcuni sono programmi commerciali, con una versione limitata di prova, altri sono di utilizzo libero.

Tra i migliori si può senz'altro annoverare "LTSPICE" (liberamente scaricabile dal sito della Linear Technology: <http://www.linear.com>). Il programma è dotato di un modulo per il disegno del cir-

Codice di definizione della funzione interpolante per ottenere il valore di induttanza in funzione della corrente

```
function x_medio = interpola( xi )
#interpola tra i dati di una tabella
#la matrice a è di 2 colonne e un numero di righe a piacere
# x1 y1
# x2 y2
# .....
# xn yn
global a;
L = 0;
ia = abs( xi );
for i = 1 : rows(a)-1
    if (ia >= a(i,1) & ia <= a(i+1,1) )
        y1 = a(i,2) ;
        y2 = a(i+1,2) ;
        x1 = a(i,1) ;
        x2 = a(i+1,1);
        L = y1+(y2-y1) * (ia-x1) / (x2-x1);
        break;
    else
        L =0.0;
    endif
endfor
x_medio = L;
endfunction
```

cuito, del risolutore e di un "postprocessor" per tracciare grafici delle grandezze simulate.

La principale difficoltà incontrata è che SPICE ed i programmi derivati non supportano direttamente l'induttanza variabile in funzione della corrente con una caratteristica arbitraria. È pertanto necessario costruirsi un modello di induttanza non lineare a partire da elementi circuitali, come generatori di tensione e di corrente dipendenti, in cui è possibile inserire una tabella di coppie di valori I ed L tra cui il programma eseguirà un'interpolazione lineare.

Nella costruzione del modello si è partiti dall'ottimo lavoro pubblicato su <http://www.beyond-designs.com> e si è adattato il modello a LTSPICE. La complicazione del modello sembra eccessiva rispetto alla soluzione diretta dell'equazione differenziale, l'utilità dell'approccio con LTSPICE sarà, però, evidente quando si aggiungeranno altri elementi circuitali per limitare le sovracorrenti.

Nella figura 7 è riportato il risultato della simulazione del trasformatore preso ad esempio.

È evidente il picco di quasi 400 A, corrispondente ad oltre 26 volte la corrente nominale del trasformatore. In pratica, il picco sarà inferiore, essendo limitato anche dall'impedenza della linea di alimentazione e dalla resistenza dell'eventuale dispositivo di protezione.

■ PROGETTAZIONE PER RIDURRE LA CORRENTE ALL'INSERZIONE

Vista l'entità delle sovracorrenti d'inserzione, viene spontaneo chiedersi se sia possibile ridurle modificando i parametri costruttivi del trasformatore.

Purtroppo le soluzioni progettuali per contenere le sovracorrenti allo spunto sono in contrasto con l'ottimizzazione del trasformatore sotto altri aspetti.

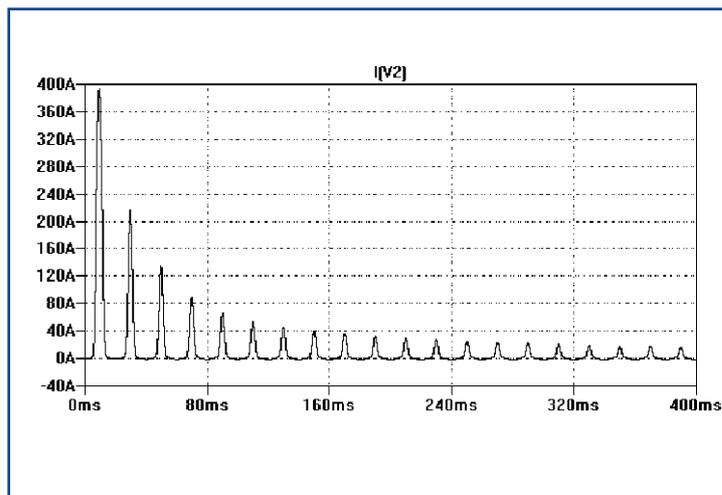
Il parametro che maggiormente influenza il transitorio d'inserzione è l'induzione di lavoro: utilizzare induzioni basse fa sì che la saturazione del ferro sia solo sfiorata durante il transitorio e, quindi, l'induttanza incrementale non crolli a valori infinitesimi.

D'altra parte, tenere un'induzione bassa significa non sfruttare a fondo il materiale magnetico, aumentare le dimensioni del nucleo, utilizzare più rame per gli avvolgimenti; insomma un trasformatore più grosso e costoso.

Spesso trasformatori economici, costruiti con lamierino avente cifra di perdita di 2,3 W/kg, presentano sovracorrenti d'inserzione minori di trasformatori aventi nucleo in lamierino a cristalli orientati di ottima qualità. Questo fatto si spiega facilmente: con lamierino da 2,3 W/kg il progettista è obbligato a tenere bassa l'induzione di lavoro per contenere le perdite nel ferro ed il riscaldamento.

A parità di altre condizioni, per trasformatori con avvolgimenti concentrici, le sovracorrenti allo spunto possono essere ridotte con una disposizione degli avvolgimenti che massimizzi l'induttanza di dispersione primaria. Ciò si ottiene avvolgendo prima il secondario e poi il primario: la maggior lunghezza dell'avvolgimento prima-

▼ **Figura 7:** Grafico del transitorio ottenuto con un simulatore circuitale in funzione dei valori: $V = 400 V_{RMS}$ e $\varphi = 0$



rio ne aumenta sia la resistenza, sia l'induttanza. È da notare come un circuito magnetico privo di traferro, come quello dei trasformatori toroidali e dei variac, non sia vantaggioso sotto il profilo delle correnti allo spunto.

Provedimenti per limitare le sovracorrenti d'inserzione

Correnti d'inserzione superiori a $10 I_n$ rendono difficile la protezione del trasformatore contro il cortocircuito. Infatti, gli interruttori magnetotermici in curva "C" hanno una soglia d'intervento istantaneo compresa tra 5 e 10 volte I_n e possono intervenire intempestivamente all'atto dell'inserzione del trasformatore. Si possono utilizzare interruttori in curva "D", con soglia d'intervento istantaneo compresa tra 10 e 20 volte I_n , ma in questo caso la protezione potrebbe rivelarsi insufficiente in caso di cortocircuito.

Se la sovracorrente di inserzione raggiunge $20 I_n$ il coordinamento della protezione diventa praticamente impossibile. L'ordine di grandezza di queste sovracorrenti è lo stesso di un cortocircuito ai morsetti secondari del trasformatore.

Al fine di limitare le sovracorrenti d'inserzione del trasformatore, si possono adottare i seguenti provvedimenti:

- inserzione di un resistore NTC;
- utilizzo di avviatori statici a SCR o TRIAC;
- inserzione del trasformatore attraverso una resistenza di limitazione.

È appena il caso di osservare che i tre provvedimenti sopra citati comportano sicuramente una diminuzione dell'affidabilità dell'insieme (il trasformatore è uno dei componenti elettromeccanici più affidabili), con elevata probabilità di danneggiamento in caso di cortocircuito.

Utilizzo di NTC

Questi componenti, noti anche col nome di termistori, sono caratterizzati dall'aver una resistenza fortemente variabile con la temperatura. Il coefficiente di temperatura è fortemente negativo; la loro resistenza a temperatura ambiente è

di qualche ohm ed appena vengono percorsi da corrente si riscaldano diminuendo fortemente la resistenza fino a qualche milliohm. Essi vengono collegati in serie al trasformatore, limitandone fortemente la corrente allo spunto con la loro resistenza a freddo. Appena la temperatura aumenta, la resistenza crolla ad un valore trascurabile, tale da non alterare sensibilmente il funzionamento del circuito a regime.

La figura 8 illustra la simulazione dello stesso trasformatore di figura 7, ma con in serie due termistori EPCOS modello S364S01, aventi una resistenza a temperatura ambiente di 1 Ω . Il picco di corrente si riduce a 160 A, per cui il trasformatore è proteggibile con un interruttore magnetotermico in curva "C" avente corrente nominale di 16 A.

I termistori sono economici, di ridotte dimensioni e facilmente reperibili. Non sono però adatti a frequenti inserzioni del circuito: la temperatura resterebbe elevata e di conseguenza la loro resistenza non sarebbe sufficiente a ridurre il transitorio.

In caso di cortocircuito del trasformatore, probabilmente, si danneggerebbero.

Avviatori statici

Come si è visto in precedenza, se il trasformatore viene inserito quando la tensione è massima,

la corrente di picco è notevolmente ridotta ed il transitorio non ha effetti apprezzabili. Su questo principio si basano i relè statici per inserzione dei trasformatori.

Un circuito elettronico provvede a pilotare la chiusura di un TRIAC nel momento in cui la sinusoide della tensione applicata raggiunge il valore massimo.

I relè statici sono adatti per avviamenti frequenti. Essi non sono idonei come interruttori di sicurezza o per il sezionamento e, pertanto, devono essere abbinati ad un interruttore elettromeccanico. L'atro svantaggio è il costo relativamente elevato.

Resistenze di limitazione

Il trasformatore risulta inserito con una resistenza in serie, che viene cortocircuitata quando è trascorso il transitorio. Il resistore può essere dimensionato in modo da renderlo adatto ad avviamenti frequenti, in ogni caso il costo e l'ingombro sono elevati;

In figura 9 il trasformatore è stato inserito con una resistenza di limitazione pari a 5 Ω , cortocircuitata senza effetti apprezzabili dopo 100 ms.

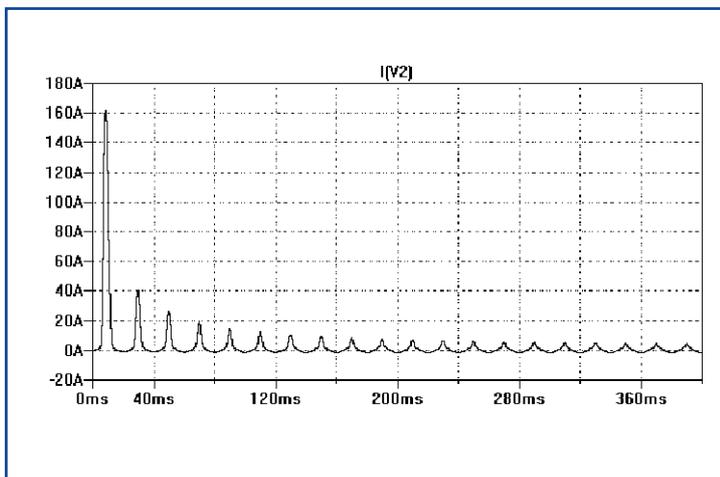
Il programma di simulazione è in grado di calcolare la corrente efficace durante il tempo d'inserzione del resistore, pertanto è semplice ricavare l'energia E dissipata nel resistore di limitazione, che risulta:

$$E = P \cdot t = R \cdot i^2 \cdot t = 5 \cdot 11,111^2 \cdot 0,1 = 61 \text{ joule}$$

CONCLUSIONI

La simulazione di elementi magnetici aiuta ad ottimizzare il progetto ed a prevederne l'esatto comportamento in ogni situazione circuitale. In questo articolo si è voluto sfatare l'opinione che l'utilizzo di software di simulazione sia eccessivamente complesso o costoso, facendo il punto degli strumenti informatici disponibili gratuitamente ed utilizzabili su un comune personal computer.

▼ **Figura 8:** Transitorio con corrente limitata da due NTC modello S364S01



▼ **Figura 9:** Transitorio con resistenza di limitazione

