



# Il transitorio di inserzione dei trasformatori in rete

Lucia FROSINI

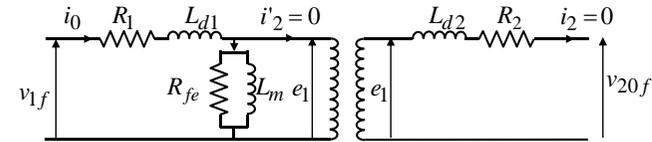
Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione  
Università di Pavia  
E-mail: lucia@unipv.it

1

L. Frosini

## Funzionamento a vuoto di un trasformatore

Il funzionamento a vuoto di un trasformatore si può schematizzare come segue:



$$v_{1f}(t) = R_1 i_0(t) + L_{d1} \frac{di_0(t)}{dt} + e_1(t) = R_1 i_0(t) + L_{d1} \frac{di_0(t)}{dt} + \frac{dN_1 \Phi(t)}{dt}$$

Sappiamo che la  $i_0$  è al massimo qualche per cento della corrente nominale, pertanto, durante il funzionamento a vuoto, si possono trascurare le cadute di tensione dovute alla resistenza  $R_1$  e alla reattanza di dispersione  $L_{d1}$  dell'avvolgimento primario (che sono al massimo dell'ordine di pochi per mille della tensione nominale, dato che le stesse cadute di tensione in condizioni nominali sono pari a poche unità percentuali delle rispettive tensioni  $V_1$  e  $V_2$ ).

2

L. Frosini

## Inserzione a vuoto di un trasformatore in rete

La tensione di una fase ai capi dell'avvolgimento primario risulta quindi circa pari a:

$$v_{1f}(t) \cong e_1(t) = \frac{dN_1 \Phi(t)}{dt} = N_1 \frac{d\Phi(t)}{dt}$$

A sua volta la tensione di fase di alimentazione del primario può essere espressa come:

$$v_{1f}(t) = V_M \cos(\omega t + \alpha) \quad \text{con:} \quad \alpha = \omega t_0$$

In cui  $t_0$  è l'istante (casuale) di chiusura dell'interruttore per l'inserzione a vuoto del trasformatore in rete.

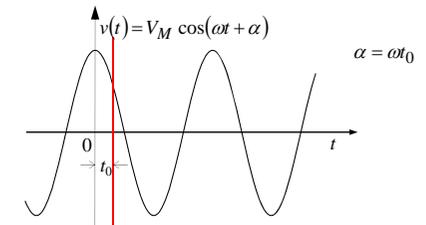
L'equazione da risolvere è quindi:  $N_1 \frac{d\Phi}{dt} = V_M \cos(\omega t + \alpha)$

3

L. Frosini

## Inserzione a vuoto di un trasformatore in rete

La soluzione di questa equazione differenziale è data dalla somma della soluzione dell'omogenea associata e dell'integrale particolare.



a) Soluzione dell'omogenea associata:

$$N_1 \frac{d\Phi_a}{dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad \Phi_a = C \quad \text{da determinare}$$

b) Soluzione dell'integrale particolare:

$$\Phi_b = A \cos(\omega t + \alpha) + B \sin(\omega t + \alpha) \quad \Rightarrow \quad \frac{d\Phi_b}{dt} = -A \omega \sin(\omega t + \alpha) + B \omega \cos(\omega t + \alpha)$$

$$-N_1 A \omega \sin(\omega t + \alpha) + N_1 B \omega \cos(\omega t + \alpha) = V_M \cos(\omega t + \alpha)$$

$$\Rightarrow \quad A = 0 \quad B = \frac{V_M}{\omega N_1} \quad \Rightarrow \quad \Phi_b = \frac{V_M}{\omega N_1} \sin(\omega t + \alpha)$$

4

## Inserzione a vuoto di un trasformatore in rete

$$\Rightarrow \Phi(t) = \frac{V_M}{\omega N_1} \sin(\omega t + \alpha) + C$$

Ipotizzando che non vi sia flusso residuo, all'istante  $t=0$  possiamo porre  $\Phi(0)=0$ :

$$\frac{V_M}{\omega N_1} \sin(\alpha) + C = 0 \Rightarrow C = -\frac{V_M}{\omega N_1} \sin(\alpha)$$

$$\Rightarrow \Phi(t) = \frac{V_M}{\omega N_1} [\sin(\omega t + \alpha) - \sin(\alpha)]$$

Il massimo di questa espressione può assumere diversi valori a seconda dell'istante di tempo di chiusura dell'interruttore ( $\alpha = \omega t_0$ ).

Il valore massimo si verifica quando l'argomento entro parentesi è pari a 2, ossia quando  $\alpha = -\pi/2$  e dopo mezzo periodo ( $t = 0,01$  s, per  $f = 50$  Hz, ossia  $\omega t = \pi$ ).

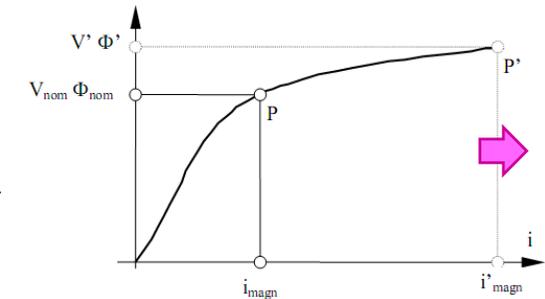
5

## Inserzione a vuoto di un trasformatore in rete

$$\Rightarrow \Phi(0,01) = \frac{V_M}{\omega N_1} \left[ \sin\left(\pi - \frac{\pi}{2}\right) - \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) \right] = 2 \frac{V_M}{\omega N_1} = 2\Phi_M$$

**Il valore ottenuto è il doppio del flusso a regime!**

Quindi, se il flusso a regime si trova in prossimità del ginocchio della curva di magnetizzazione, possiamo immaginare che, per ottenere un valore doppio di questo, sarà necessaria una corrente magnetizzante MOLTO elevata (inrush current), che può addirittura superare il valore della corrente nominale.



Nota: questo accade su una delle tre fasi. Se questa è la fase più "sfortunata", le altre lo saranno meno, ossia le correnti magnetizzanti saranno inferiori.

6

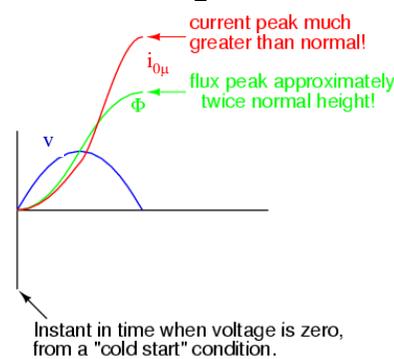
## Inserzione a vuoto di un trasformatore in rete

Questa è la condizione più "sfortunata" e si verifica quando:  $\omega t + \alpha = \frac{\pi}{2}$

$$\text{ossia quando: } v_{1f}(t) = V_M \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0$$

Si osserva che fino ad ora abbiamo considerato il circuito puramente induttivo (induttanza magnetizzante), trascurando la resistenza e l'induttanza di dispersione dell'avvolgimento primario: poiché queste non sono nulle, in realtà l'andamento e il valore massimo trovati per il flusso si riferiscono a una condizione transitoria e non di regime.

Infatti, il termine che deriva dall'omogenea associata andrebbe moltiplicato per un esponenziale del tipo  $e^{-(R/L)t}$  analogamente a quanto visto per il transitorio di corto circuito.



7

## Inserzione a vuoto di un trasformatore in rete

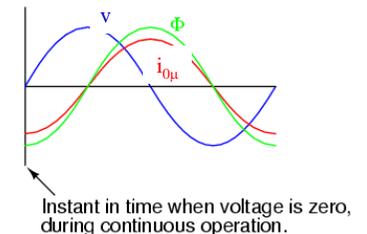
Per capire graficamente questo fenomeno, si può osservare che, durante il funzionamento a regime del trasformatore, la tensione, il flusso e la corrente magnetizzante hanno il seguente andamento:

Ossia, nel funzionamento a regime, a partire dall'istante in cui la tensione passa per lo zero, in mezzo periodo il flusso aumenta di  $2\Phi_M$ .

Quindi, quando il trasformatore è spento e viene collegato alla rete proprio nell'istante in cui la tensione passa per lo zero, il flusso in mezzo periodo aumenterà di  $2\Phi_M$ .

Supponendo che non vi sia alcun flusso residuo, il flusso passerà da 0 a  $2\Phi_M$  (ricordiamo che il flusso è l'integrale della tensione).

Se esiste anche un flusso residuo, il flusso può aumentare ulteriormente.

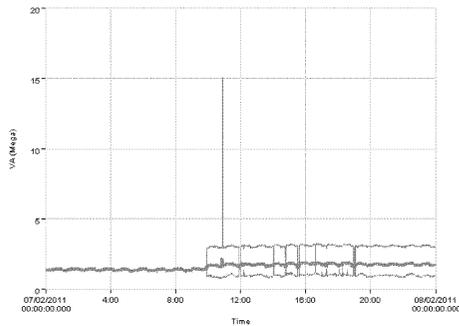


8

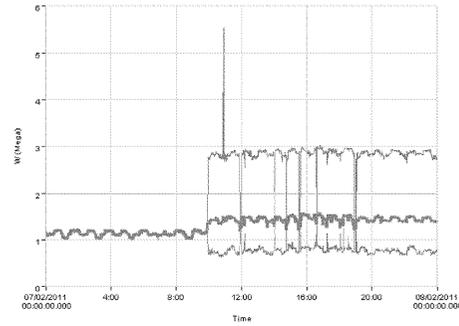
## Inserzione a vuoto di un trasformatore in rete

Ecco quel che succede realmente quando un trasformatore da 20 MVA viene messo in tensione (o energizzato, come si suol dire):

Potenza apparente



Potenza attiva



— Apparent Power Total Maximum — Apparent Power Total Minimum — Apparent Power Total Average — Active Power Total Maximum — Active Power Total Minimum — Active Power Total Average

Nota: le potenze apparente e attiva riportate nei grafici sono relative al punto di consegna dell'impianto, che comprende un altro trasformatore, il quale era già in servizio, sebbene a basso carico (circa 1 MVA).

9

## Osservazioni sull'inserzione a vuoto

✚ Il caso in cui il flusso di inserzione è doppio rispetto a quello a regime si verifica nella situazione più "sfortunata" di inserzione del trasformatore al passaggio per lo zero della tensione: in altri casi, si potranno avere valori di flusso inferiori e quindi correnti magnetizzanti inferiori al caso considerato;

✚ Il relè di protezione dalle sovracorrenti dovrebbe essere tarato in modo da tollerare sovracorrenti transitorie superiori alla nominale senza aprire l'interruttore.

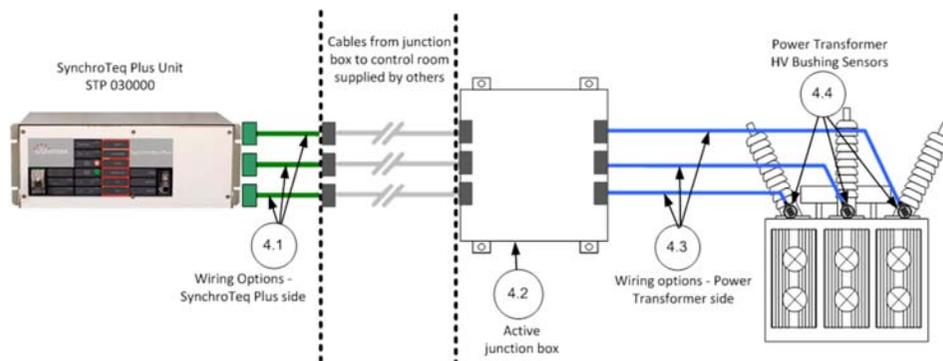
✚ All'aumentare delle dimensioni dei trasformatori, sappiamo che diminuisce la resistenza degli avvolgimenti, aumenta l'induttanza di dispersione e diminuisce la corrente a vuoto percentuale: di conseguenza ( $\tau = L/R$ ), nei trasformatori più grandi si avranno correnti di inserzione più piccole, ma una maggiore durata del transitorio (dell'ordine di 1 s, mentre per i trasformatori piccoli dell'ordine di 0,1 s).

✚ Per trasformatori speciali, è possibile inserire delle resistenze in serie all'avvolgimento primario, per ridurre l'ampiezza della corrente di inserzione e velocizzare il transitorio di smorzamento.

10

## Osservazioni sull'inserzione a vuoto

Recentemente sono stati realizzati e sono commercialmente disponibili strumenti che consentono di controllare la chiusura degli interruttori in modo da ridurre drasticamente l'ampiezza delle correnti di inserzione dei trasformatori in rete (*inrush current*).



11

## Osservazioni sull'inserzione a vuoto

I vantaggi di questo strumento sono:

- ✓ Riduce le correnti di inserzione del trasformatore;
- ✓ Preserva trasformatori, autotrasformatori, interruttori, ecc. da stress elettrici e meccanici dovuti alla *inrush current*;
- ✓ Riduce i guasti dei componenti e, di conseguenza, i costi e gli investimenti per la manutenzione;
- ✓ Evita perturbazioni in rete, migliorandone la qualità e l'affidabilità del servizio;
- ✓ Permette il monitoraggio e la registrazione di eventi e oscillogrammi e, di conseguenza, tiene sotto controllo le prestazioni e l'eventuale degrado degli impianti.

12