

## La misura della resistenza degli avvolgimenti nei trasformatori di elevata potenza

Finalmente dopo molti anni di immobilismo nel settore degli strumenti di misura di resistenze di bassissimo valore qualcosa si muove.

Elio Pedranti \*

\* Elio Pedranti – consulente e progettista elettronico per conto terzi e titolare dell'omonima società.

Sebbene tecnologia elettronica e tecniche di misura, quindi strumenti di misura, progrediscono continuamente grazie a continui miglioramenti nei componenti discreti e negli integrati, vi è un settore della strumentazione che è fermo nelle prestazioni da almeno una decina di anni: quello della misura di resistenze di basso valore. E per basso valore si intende nel range compreso fra 1 ohm e 0,000000001ohm (un miliardesimo di ohm) o meno.

A parte insieme di strumenti o strumenti appositamente costruiti per misure sub-nanoohm, strumenti commerciali in grado di misurare sino a  $10E-9$  ohm esistono da oltre 20 anni, ma ingombri e prestazioni si sono “fossilizzati” almeno ad una decade fa, nonostante che in cellulari sempre più piccoli vi sia la potenza di un supercomputer di nemmeno 20 anni orsono in dimensioni e consumi 100 mila volte inferiori. Prestazioni, ingombri e consumi di milliohmometri, microohmmetri e nanoohmmetri sono rimasti invece invariati, anche perché non ne sono stati presentati di nuovi sul mercato, fino ad ora....

....ma ora qualcosa si è mosso.

Il principio di misura non è cambiato: è sempre valida la vecchia classica legge di ohm dove, iniettando una corrente, si risale al valore della resistenza incognita misurando la caduta di tensione. Ciò che cambia in una nuova famiglia di strumenti appena presentata è che prestazioni analoghe sono state ottenute in dimensioni, pesi e costi decisamente minori di prima, migliorando drasticamente la portabilità e l'accessibilità (economica) a questo tipo di strumenti.

Un esempio. Consideriamo il top della gamma di questa nuova famiglia di strumenti e confrontiamolo con il top di quanto già presente sul mercato. Entrambi raggiungono la ragguardevole risoluzione di 1 miliardesimo di ohm.

	concorrenza	nuovo	miglioramento
Potenza assorbita	260VA	15VA	17,33
Volume strumento	63648 cm <sup>3</sup>	6164 cm <sup>3</sup>	10,32
Peso	28 Kg	4,77 Kg	5,87
Costo	12000€ circa	3000€ circa	4

Il miglioramento è evidente.

Di questa nuova famiglia di strumenti fa parte uno strumento espressamente progettato per la misura della resistenza di avvolgimento di grossi trasformatori.

### La misura su trasformatori

La misura di resistenze di bassissimo valore non è una cosa semplice poiché, nonostante correnti di misura dell'ordine della decina o al massimo del centinaio di ampere, raggiungono risoluzioni in tensione comprese fra 0,01 microvolt e 10 microvolt tipici. Inoltre sono pressoché sempre segnali in continua e questo, pur non facilitando certo il compito, permette di trattare anche elementi induttivi. La presenza di una componente alternata nella corrente iniettata potrebbe alterare o disturbare notevolmente la misura, sovrapponendo ad un segnale utile in continua di modesta entità uno in alternata proporzionale al prodotto fra induttanza, componente in frequenza del residuo in alternata della corrente e dell'ampiezza di questa.

Un esempio può chiarire meglio di che ordini di grandezza si parla.

Consideriamo di dover misurare il primario di un trasformatore che presenta una resistenza di avvolgimento di circa 25 milliohm e un'induttanza di circa 3 henry con uno strumento in grado di avere 32000 punti di misura e la portata di 32 milliohm che utilizza una corrente di 1A.

Ammettendo una componente alternata di 1mA a 50Hz si hanno:

Risoluzione strumento	1 microohm / 1 microvolt
Componente segnale in continua	1A x 0,025ohm = 25mV circa
Componente segnale in alternata	1mA x 6,28 x 50 (hertz) x 3 (henry) = 942mV <sub>eff</sub> circa
Rapporto segnale alternata / continua	37,68

Come si può constatare una componente alternata pari ad un millesimo della corrente continua di misura genera un disturbo quasi 38 volte maggiore dell'intero segnale in continua e ben 942000 volte quello della risoluzione.

Ecco evidente perché non si usano, salvo casi particolari, correnti alternate per determinare la componente resistiva dell'avvolgimento di un trasformatore o un motore.

Ciò non significa che non sia possibile eseguire misure su elementi prevalentemente induttivi. Anzi, mentre un piccolo trasformatore viene collaudato semplicemente misurandone la/le tensione/i di uscita ed eventualmente l'assorbimento sul primario, i trasformatori di potenza vengono testati molto approfonditamente, verificando, tra l'altro, la resistenza di ogni singolo avvolgimento. ...E quando si parla di trasformatori di potenza si parla anche di trasformatori di 10, 50 100MVA (megavoltampere) o più, con induttanze che vanno da alcune decine di henry a oltre un migliaio di henry.

E' assolutamente da scartare la possibilità di utilizzare strumenti che eseguono la misura ad impulsi poiché nel breve lasso di tempo di questo (generalmente inferiore a 10 secondi) difficilmente l'induttanza riesce ad essere caricata consentendo anche di avanzare tempo per la misura.

E dunque come fare? Ci sono strumenti appositamente concepiti per questo tipo di applicazione che presentano peculiarità assai diverse rispetto a quelli per misure su elementi prevalentemente resistivi o poco induttivi, in grado di alimentare, caricare e scaricare induttanze di elevato valore. In particolar modo la possibilità di poter adeguatamente dissipare l'energia accumulata nell'induttanza è una caratteristica tipica di questi strumenti, non presente in quelli concepiti prevalentemente per elementi resistivi. Le energie in gioco infatti non sono per nulla trascurabili perché un trasformatore con avvolgimento da 1000 henry, misurato con una corrente di 10A, accumula un'energia di ben 50000 juole. In altri termini equivale all'energia che possiede una massa di 10kg che si va a schiantare alla velocità di 360Km/ora.

Questa energia va ovviamente dissipata prima di poter eventualmente riaprire il circuito di corrente. In caso contrario si potrebbero avere extratensioni estremamente elevate e condizioni potenzialmente distruttive per lo strumento medesimo. Per queste ed altre particolarità le modalità operative di questi strumenti dedicati a trasformatori di potenza si discostano notevolmente da quelli ad uso resistivo e spesso l'intero ciclo di misura è gestito dal microcontrollore interno.

La misura su trasformatori di potenza è tutt'ora molto frequentemente realizzata con banchi di batterie, quasi sempre d'automobile, con resistenze di potenza per limitare la corrente e voltmetri ed amperometri. Lette tensione e corrente si calcola la resistenza. Va da sé che tale metodo risulta scomodo (spesso tutto il sistema pesa anche oltre un centinaio di chili ed è trasportato su di un carrello), instabile (le resistenze di limitazione si scaldano variando la corrente di misura), difficilmente trasportabile fuori sede, impreciso (la precisione è affidata alla precisione di due strumenti, voltmetro ed amperometro, e alla simultaneità della lettura) e inoltre le batterie vanno mantenute e necessitano, quando scariche, di essere messe in carica richiedendo ulteriori attrezzature.

Esistono strumenti ad hoc, ma anch'essi, finora, si sono rivelati scomodi da trasportare poiché comunque assai ingombranti e soprattutto pesanti. Anche in questo caso l'utilizzo di tecnologie e componenti più recenti ha consentito di ridurre costi, ingombri e peso pur mantenendo elevate prestazioni, riducendo lo strumento ad una valigetta di facile trasportabilità di circa 10kg.

Per questo tipo di strumenti la modalità di misura inizia applicando una tensione costante all'avvolgimento di cui si desidera misurare la resistenza. La parte induttiva a questo punto determina

un incremento lineare nel tempo della corrente sino a che viene raggiunto il valore di corrente di misura per quella specifica portata. Da quell'istante in poi lo strumento funziona come generatore di corrente continua consentendo la classica misura di resistenza della parte resistiva dell'avvolgimento.

Procedura di carica dell'induttanza, misura e scarica dell'induttanza sono completamente gestite da microprocessore per garantire la massima incolumità e sicurezza all'operatore, in considerazione delle elevate energie e tensioni potenzialmente in gioco, come precedentemente annotato.

Va da sé che i tempi di carica e scarica dell'induttanza possono essere anche di alcuni minuti. Considerando un trasformatore con avvolgimento da 200 henry a cui viene applicata, dallo strumento di misura, una tensione di 40V, il tempo  $t$  necessario a far salire la corrente da 0A a 10A è dato dalla semplice formula:

$$1) \quad t = \text{Henry} * I / V = 200 * 10 / 40 = 50 \text{ secondi}$$

In questo caso non si tiene conto della parte resistiva dell'avvolgimento per il semplice motivo che la caduta di tensione su di esso è del tutto trascurabile e l'influenza sul calcolo del tempo di carica porta a variazioni non significative.

Il tempo per scaricare l'energia immagazzinata nel nucleo del trasformatore non è generalmente da meno, ma è inversamente proporzionale al valore della resistenza su cui viene dissipata l'energia. Ammettendo una resistenza di scarica di 25 ohm si ottiene, con la formula della costante di tempo:

$$2) \quad t = \text{Henri} / \text{Ohm} = 200 / 25 = 8 \text{ secondi}$$

Come si può facilmente dedurre minore è la resistenza, maggiore è la costante di tempo e viceversa. Ma minor resistenza equivale anche a minor dissipazione di energia.

In altri termini minore resistenza significa minor energia dissipata e quindi un maggior tempo necessario per scaricare l'energia immagazzinata nel nucleo.

Anche se non appare immediatamente evidente, ma già con una resistenza di scarica da 25 ohm ed una corrente di misura di 10A la potenza istantanea dissipata all'inizio della scarica dell'induttore è di ben 2500W, che però scende a 205W dopo 10 secondi con una corrente di circa 2,9A, immaginando sempre un'induttanza di 200 henry.

Prima però che potenza e corrente residue scendano a valori non più pericolosi occorre attendere tempi ben superiori alla costante di tempo precedentemente calcolata e comunque dipendente dalla corrente di misura. Se la costante di tempo dipende solo dall'induttanza e dalla resistenza di scarica (trascurando la resistenza degli avvolgimenti e dei cavi di collegamento), l'energia accumulata nel nucleo dipende anche dalla corrente di misura: ciò che importa è infatti il valore della corrente residua che per scendere sotto valori non pericolosi richiede un tempo diverso a seconda che si inizi da una corrente di misura di 10A o di 0,1A.

Riformulando il calcolo del tempo di scarica tenendo presente anche la corrente di misura si ha la formula empirica:

$$3) \quad t_{\text{scarica}} = 3 * (L_{\text{trafo}} / R_{\text{scarica}}) * \sqrt{I_{\text{misura}}}$$

Dalle formule 1) e 3) risulta evidente la dipendenza dei tempi di carica e scarica dalla corrente di misura. La conseguenza è che questi tempi possono notevolmente aumentare se vengono usati strumenti con elevate corrente di test: 100 o più ampere. Mentre nel primo caso una parziale contromisura è di utilizzare tensioni di carica alte (ma generalmente queste non superano i 60V) che però non modifica significativamente i termini del problema, nel secondo caso la conseguenza è l'elevatissima dissipazione sulla resistenza di scarica che può portare a picchi iniziali anche di alcune decine di KW.

Ecco dunque che, salvo necessità inderogabili o basse induttanze degli avvolgimenti, questo tipo di misure vengono eseguite con correnti massime di poche decine di ampere.

Oltre che dal valore dell'induttanza da caricare, il tempo di carica di questa dipende dalla magnetizzazione residua del nucleo. Se questa è preesistente ed è concorde con il verso della corrente di misura il tempo di attesa può essere più breve di quello calcolato con la formula 1), viceversa il tempo si allunga. Generalmente l'isteresi magnetica è modesta, ma è comunque ben rilevabile.

### **Scopo delle misure**

Tralasciando che sono le norme a chiedere certe misure, è nell'interesse del costruttore che queste vengano eseguite poiché da esse è possibile controllare se la resistenza degli avvolgimenti è prossima a quella di progetto o se vi sono anomalie, oppure se gli avvolgimenti sono resistivamente bilanciati.

Le anomalie riscontrabili possono essere dovute a scarsa superficie di contatto fra la piattina dell'avvolgimento e le piastre di terminazione dovute a bombature o altri difetti superficiali quali rigature o ossidazione, nonché al mancato corretto serraggio di viti. Queste cause possono portare ad un locale innalzamento della resistenza con conseguenti localizzate dissipazioni di potenza anche di qualche kilowatt con una possibile esaltazione del fenomeno. Immaginando che la causa sia un insufficiente serraggio delle viti, un riscaldamento porta ad un allungamento del viti medesime, che di conseguenza tende a fare allentare ulteriormente la stretta e la resistenza di contatto.

Una attenta misura ed analisi di questa può evidenziare queste anomalie consentendo di intervenire prima, con costi ridotti.

### **Conclusioni**

La misura della componente resistiva degli avvolgimenti di grossi trasformatori è stata fatta sempre in modo tradizionale con batterie, voltmetro ed amperometro poiché è la soluzione più economica, ma un nuovo strumento recentemente posto sul mercato offre costi estremamente abbordabili con prestazioni di tutto rispetto disponendo di 32000 punti di misura e fondi scala che vanno da 3200microhm a 32 ohm, con correnti di misura sino a 10A, ma soprattutto è trasportabile pesando solo circa 10Kg e funzionando a batteria. Pensato espressamente per trasformatori di grandi dimensioni è stato testato su trasformatori sino a 100MVA e a breve verrà provato anche su un trasformatore da 240MVA.