

PROBLEMATICHE NELLA MISURA DI RESISTENZE DI BASSO VALORE

La misura di elementi resistivi è apparentemente una delle operazioni più semplici, ma anche questo componente -spesso sottovalutato dal punto di vista tecnico- può riservare qualche sorpresa.

La misura di una resistenza è apparentemente semplice: si prende un tester, si connettono i puntali nei punti desiderati e, se la scala selezionata è corretta, si leggono gli ohm. Ma vi siete mai chiesti quante decadi copre la 'resistenza'? I migliori strumenti commerciali, sia singolarmente che unitamente ad altri, permettono di misurare, considerando i valori estremi tanto in un verso che nell'altro, qualcosa come 30 decadi circa.

Si ha, ad un estremo, la misura della resistenza di isolanti grazie a tensioni di 1000V e elettrometri da 10^{-17} A di sensibilità arrivando a 10^{20} ohm, per raggiungere, all'estremo opposto, i 10^{-10} ohm con l'ausilio di nanovoltmetri e correnti di 10A. Senza tema di smentita la resistenza elettrica è la grandezza fisica che presenta la maggior estensione pur mantenendo una ragionevole facilità di misura. ...Di misura, non di calcolo. Nemmeno le misure di tempo, con risoluzioni di 10^{-12} secondi attualmente direttamente misurabili, arrivano a tanto, se non altro perchè nessuno è disposto ad aspettare un milione di anni per dire di aver contato $2,5 \cdot 10^{25}$ picosecondi, che a ben guardare è ancora piuttosto lontano da quanto visto prima.

Da quanto detto ci si accorge subito che anche senza voler arrivare per forza agli estremi, uno strumento o un metodo di misura che permetta di spaziare da valori molto grandi a molto piccoli non esiste. Essendo inoltre la resistenza la grandezza elettrica che, dopo la tensione, è quella misurabile con maggiore precisione e ripetibilità e che con maggior facilità può essere realizzata, è naturale che su di essa si basino precisione e stabilità di molti strumenti di misura.

Volendo una precisione dello 0,01% anche con un ottimo multimetro non è possibile misurare resistenze inferiori a 1000 ohm, a meno che si adotti la compensazione dei cavi di misura: in tal modo si può guadagnare quasi un'altra decade, arrivando a risoluzioni e precisioni attorno a 0,01 ohm. Avendo la necessità di scendere ulteriormente come risoluzione, mantenendo ovviamente una adeguata precisione, diventa indispensabile utilizzare una tecnica di misura a quattro fili, chiamata anche Kelvin.

Di seguito si parlerà esclusivamente di microohmmetri (inglobando in questo termine tanto i milliohmmetro che i nanoohmmetri), ossia di quegli strumenti un po' particolari, specializzati e misconosciuti che servono proprio per la misura di resistenze comprese approssimativamente fra 10^3 ohm e 10^{-9} ohm.

Il principio di funzionamento su cui si basano è identico per tutti: viene generata una corrente che circola tanto nella resistenza incognita che in una campione. Essendo la medesima corrente, il rapporto fra le tensioni V_x e V_c è identico al rapporto fra le resistenze R_x e R_c . Misurando le tensioni e conoscendo la resistenza campione R_c si ricava facilmente R_x .

Anche se lo schema di principio è uguale per tutti, dove i vari strumenti si differenziano è nel generatore di corrente, che può fornire correnti sinusoidali, continue, impulsive unipolari o bipolari, a seconda dei settori specifici di utilizzo, delle prestazioni e dei costi.

Ovviamente l'amplificatore di tensione d'ingresso che amplifica i segnali generalmente deboli ai capi della resistenza incognita sarà realizzato in modo diverso in funzione del tipo di corrente di misura adottata, ponendo limitazioni e vantaggi diversi da caso a caso.

Anche se non comunissime le resistenze a quattro terminali sono presenti, o come shunt o come resistenze vere e proprie, nei diffusi tester per la misura di correnti dal centinaio di milliampere in su, in ambito industriale per la derivazione di correnti anche di migliaia di ampere, nei microohmmetri dove fungono da resistenze campioni, e in tante altre applicazioni.

Non solo però si ha la necessità di realizzare resistenze di basso valore, anche di pochi microohm, e di precisione spesso superiore all'1%, ma capita anche sempre più frequentemente di aver bisogno di misurare la resistenza di parti meccaniche o elettriche che per loro natura, e spesso per necessità, presentano valori resistivi decisamente modesti. Basti pensare agli avvolgimenti di motori anche di solo qualche centinaio di watt dove si hanno resistenze dell'ordine della decina di milliohm, o di trasformatori di linee primarie di rete dove si possono raggiungere valori della decina di microohm e richiedere precisioni, nell'equilibratura degli avvolgimenti, migliori dell'1%.

ELEMENTI INDUTTIVI

Se elementi scarsamente induttivi non pongono problemi, questi iniziano a sorgere proprio quando si deve misurare la componente resistiva di un qualcosa che è prevalentemente induttivo. Altre problematiche ed accorgimenti necessari al fine dell'ottenimento di una buona misura saranno analizzati più avanti.

Unendo l'alta induttanza dei grossi trasformatori alla elevata precisione richiesta alla misura si ha che i tempi necessari all'assestamento della tensione entro i limiti di precisione richiesti va dalla decina di secondi a qualche minuto. Può capitare che tali tempi di attesa siano in certi casi intollerabili, ragione per cui è necessario ricorrere ad alcuni accorgimenti, quale cortocircuitare l'avvolgimento non sottoposto a misura, così da ridurre l'induttanza vista dal microohmmetro a quella di dispersione, nettamente inferiore a quella totale. Proporzionalmente si riducono i tempi.

Alte induttanze possono portare il generatore di corrente, anche ad uscita continua, dello strumento di misura ad autooscillare. Se mettendo in parallelo all'elemento sotto prova una capacità di valore tale da neutralizzare l'effetto dell'induttanza, non si ottiene quanto desiderato permanendo l'autooscillazione del sistema, il problema è da ricercarsi nel generatore di corrente che non è in grado di sopportare valori induttivi elevati. L'unica alternativa è cambiare strumento.

Un fenomeno di tipo oscillatorio lo si ha pure nel caso che si alimenti un trasformatore o un motore, e comunque un elemento prevalentemente induttivo, con degli impulsi di corrente (unipolari o bipolari non ha importanza) che non consentono, dato la loro breve durata, un assestamento della tensione di misura. Strumenti di questo tipo, o perchè non prevedono la misura con correnti continue o perchè non sono in grado di fornire alte correnti per tempi sufficientemente lunghi, non sono adatti alla misura su macchine a forte componente induttiva.

GLI EFFETTI DI DISSIMMETRIA

Un altro inconveniente, forse più grave, riguardante la precisione della misura è imputabile a dove e come viene iniettata la corrente di misura e prelevata la tensione, indice del valore ohmico. Su resistenze, provini o quant'altro le cui dimensioni trasversali comincino a diventare paragonabili a quelle longitudinali (per focalizzare l'idea si immagini una barra di rame piuttosto corta), diventa essenziale, per una buona precisione e ripetibilità della misura, sfruttare le simmetrie geometriche, dimensionali del pezzo sotto esame. La corrente tenta naturalmente di passare dove la resistenza è minore, e dato che generalmente il pezzo è di materiale omogeneo, per la via più breve. Questa è anche l'insieme dei punti baricentrali delle sezioni infinitesime in cui si può immaginare 'affettato' il pezzo che si sta misurando. Questo è il percorso preferenziale preso dalla corrente, ossia dove si ha il massimo nel flusso di corrente. Iniettare o misurare la caduta di tensione lungo una linea diversa da questa significa far percorrere alla corrente un percorso maggiore, con la conseguenza di misurare qualcosa maggiore di quello che è. Conseguenza immediata di tale ragionamento è che la misura che da il risultato inferiore è quella che più individua la linea baricentrale.

Apparentemente può sembrare un discorso puramente teorico, ma chi realizza shunt sa benissimo che se i punti in cui viene prelevato il segnale risulta anche di poco disassato o i due capicorda che portano la corrente non sono fissati nell'identico modo (o perchè non hanno la medesima superficie di contatto o/e perchè sono orientati non simmetricamente), la misura risulta certamente falsata. E tali asimmetrie risultano via via più importanti quanto più è richiesta un'alta precisione.

L'EFFETTO JOULE

Anche il valore della corrente risulta determinante per la misura stessa: non è vero che raddoppiando la corrente di misura, pur lasciando perfettamente inalterata la configurazione del sistema, si ha un raddoppio della tensione misurata. La tensione è sempre leggermente superiore.

La spiegazione è semplicemente da ricercarsi nell'effetto Joule. Si è visto precedentemente che la corrente passa prevalentemente lungo la linea baricentrale, che generalmente è anche quella più interna e quindi con maggior difficoltà di dissipazione termica. Dalla classica legge $P = I^2 \cdot R$ si ricava subito che un semplice raddoppio della corrente di misura determina un quadruplicamento della potenza dissipata, ma non solo: il riscaldamento determina a sua volta un innalzamento della resistenza e quindi un ulteriore incremento della dissipazione. Questo effetto del second'ordine è però spesso trascurabile.

A chi è capitato di vedere un report dei certificati di taratura SIT di resistenza campione avrà probabilmente notato che vengono fornite più misure con correnti diverse, proprio per il motivo sopra esposto. E leggendo attentamente si può notare che maggiore è la corrente e maggiore è il valore della resistenza misurata.

Volendo trarre una lezione bisogna considerare, per quanto possibile, di eseguire la misura alla corrente di lavoro dello shunt, del motore o del trasformatore, o alla temperatura di esercizio, per non

incorrere in grossolani errori, perché se fenomeni di deriva si riescono a rilevare in resistenze campioni, c'è da immaginarsi cosa potrebbe accadere con il rame dove il coefficiente termico è notevolmente superiore alla manganina o alla costantana.

Esistono dei microohmmetri che sono in grado di eseguire misure con correnti diverse per cui sono sicuramente da preferire, anche se va considerato che gli effetti termici di tipo Joule cominciano a farsi sentire quando le correnti sono dall'ampere in su. Una misura a 1, 10 o 100 mA non dà apprezzabili differenze, a meno che si misuri, ad esempio, un NTC, ma questo difficilmente rientra nella gamma di valori coperti da microohmmetri.

POTENZIALI DI CONTATTO

Un altro inconveniente alquanto insidioso è dovuto ai potenziali di contatto, o effetto Volta. In altre parole la classica pila, dove due metalli differenti, elettricamente in serie, generano una differenza di potenziale, dipendente a sua volta dalla temperatura. Sia la d.d.p. che l'entità della variazione sono, in valore assoluto, estremamente modesti essendo dell'ordine dei microvolt e dei decimi di microvolt rispettivamente, ma in talune misure non sono per nulla trascurabili.

Finché lo strumento usa sensibilità, in tensione, sino a 10 microvolt difficilmente sussistono problemi, ma quando questa scende a 1 microvolt o meno diventa indispensabile tenere ben presente il fenomeno.

Tipicamente la risoluzione di 1 microohm si ottiene con 1A, per cui si ha già una risoluzione di 1 microvolt. Risoluzioni di 10 nanoohm si ottengono con correnti di 10A, ossia 100 nanovolt. In laboratorio, con varie apparecchiature connesse in sistema, si utilizzano correnti di 30, 50 o 100A, determinando però maggiori dissipazioni i cui effetti possono essere mitigati mettendo la resistenza sotto misura, se di modeste dimensioni e quindi con resistenza termica elevata, a bagno d'olio.

Quale esempio si consideri un avvolgimento da 380V di un trasformatore da 1MVA il quale presenta una resistenza tipica di 300÷350 microohm e sul quale si desidera una risoluzione di 100 nanoohm. Data la notevole massa non si ha praticamente riscaldamento per effetto Joule anche con correnti di misura di 10A, ma anche così la risoluzione in tensione si ferma a 1 microvolt. Questo significa che posizionando i terminali di tensione di un microohmmetro in punti diversi della barra ove termina l'avvolgimento si hanno spesso misure diverse per il semplice motivo che diversi sono i gradi di ossidazione del rame. La presenza di olii o del grasso acido lasciato dalle mani degli operatori contribuisce ulteriormente ad alterare la misura. Se poi si considera che i puntali possono essere tenuti in mano e quindi riscaldati a circa 30 °C prima di andare a toccare una barra a circa 20°C, si capisce come la deriva termica, soprattutto se avviene principalmente su uno dei puntali, unitamente a sensibilità che possono anche scendere a 0,1 microvolt, comporti, a livello di rappresentazione della misura, variazioni e derive anche di qualche decina di digit.

Anche qui l'insegnamento consiste nel pulire bene le superfici di contatto, in prevalenza dei terminali di tensione, attendere un tempo sufficiente affinché si abbia l'assestamento termico, non modificare i punti di misura fra una misura e l'altra e fare attenzione ad indurre riscaldamenti localizzati nei punti di contatto delle sonde di tensione.

Se questi accorgimenti sembrano esagerati ci si può consolare pensando che si è molto prossimi al limite inferiore di misura delle resistenze. Se misure sino a 10 nanoohm possono ancora essere svolte in officina, sul campo, per scendere di una decade, a 1 nanoohm, già occorre stare in laboratorio ed adottare notevoli precauzioni. Per raggiungere i 100 picoohm non vi è altra soluzione che le camere schermate e strumenti e accorgimenti del costo complessivo di alcune centinaia di milioni di lire.

DISTURBI ESTERNI E INTERNI

Fra le cause di errore o instabilità nella misura o nell'azzeramento di origine esterna sono da considerare la presenza di campi magnetici che, inducendo del rumore elettrico possono spostare il livello in continua del segnale. Il modo migliore per attenuare questa influenza è di tenere i cavi di misura, sia di corrente che di tensione, i più corti possibile e fra loro paralleli e vicini, collegando alla massa dello strumento l'eventuale schermo dei fili di tensione.

Assicurarsi inoltre che i cavi di misura non ondeggino o vibrino anche in vicinanza di campi magnetici statici: ciò causerebbe l'insorgere di tensioni indotte di ampiezza e frequenza dipendenti dal movimento.

Fra le cause di origine interna agli strumenti prevale sicuramente la deriva dell'amplificatore d'ingresso, senza dubbio la parte più critica di un microohmmetro, che generalmente ha delle derive non superiori a 5 microvolt fra l'accensione e la stabilizzazione termica dell'apparecchio, per ridursi a 0,5÷1

microvolt nell'arco dell'ora a stabilizzazione termica avvenuta. Per la massima stabilità e ripetibilità delle misure è buona norma che queste vengano eseguite non meno di mezz'ora dopo l'accensione.

Raggiungendo la massima sensibilità dello strumento si raggiunge anche il limite del rumore dell'amplificatore, il quale determina sostanzialmente l'incertezza della misura nel brevissimo termine, cioè entro i 10 secondi. Se le fluttuazioni sono più lente, potendo eseguire delle operazioni di azzeramento, il rumore può venire assogettato a una deriva. Se ben progettato l'amplificatore non deve presentare un rumore picco-picco superiore a 5÷10 digit in un tempo non inferiore a un minuto, così da permettere l'azzeramento dello strumento.

AZZERAMENTO DELLO STRUMENTO

Tutti gli strumenti di una certa classe hanno la possibilità di un azzeramento automatico o quanto meno di una misura relativa che, se adeguatamente utilizzata, consente di raggiungere gli stessi risultati.

Considerato quanto detto per i potenziali di contatto, è assolutamente da escludere di cortocircuitare i terminali di tensione, perché così verrebbero compensati i potenziali di contatto di quella particolare configurazione e non quelli della configurazione di misura. Rimane la possibilità di cortocircuitare, più intelligentemente, i terminali di corrente. In questo modo tutto ciò che viene misurato (potenziali di contatto, effetti termoelettrici e offset dell'amplificatore d'ingresso) costituisce l'offset ed è sottratto alle misure successive.

Pur alcuni strumenti la funzione di azzeramento necessita di un intervento esterno che cortocircuiti un terminale di corrente sull'altro, mentre altri eseguono questa operazione internamente in modo automatico. In ogni caso il risultato è il medesimo: come sopra detto quanto misurato viene sottratto alle successive misure. Minore è il tempo impiegato per tale operazione e maggiore è quello dedicato alla misura, soprattutto se questo scarseggia come quando si è in presenza di rumore a bassa frequenza.