

CAP. V

LA MISURA DELLE GRANDEZZE ELETTRICHE

§V.1 Gli strumenti di misura

§V.1.1 Introduzione

La misura di una grandezza elettrica, come per qualsiasi grandezza di interesse ingegneristico, comporta opportune valutazioni sia sul metodo adoperato per effettuare la misura stessa, sia sullo strumento adoperato. Alcuni metodi prevedono la **misura diretta** della grandezza, in altri casi la misura verrà effettuata mediante confronto con grandezze campioni o di precisione nota (vedi i **metodi di zero**), in altri casi si procede a **misure indirette** e si valutano i riporti alla grandezze di interesse (costanti strumentali o curve di riporto) anche attraverso idonee tarature del sistema di misura. Laddove si preveda anche od esclusivamente la lettura digitale corrispondente alla misura, si parlerà di **strumenti digitali** (negli altri casi si parla di **strumenti analogici**). La strumentazione digitale può essere collegata ad un calcolatore ordinario o dedicato, che può eventualmente controllare anche sistemi di controllo e di allarme. Gli strumenti possono anche classificarsi in indicatori (se danno l'indicazione della grandezza da misurare), registratori (se registrano la misura), integratori (se integrano la grandezza da misurare).

Le strumentazioni digitali risultano di più facile lettura ed utilizzo ed inoltre sono più indicate per la registrazione e la successiva elaborazione a scopi di controllo e regolazione e per scopi statistici.

Occorre tuttavia considerare che gli strumenti digitale sono affetti, oltre che dagli errori ed incertezze tipiche degli strumenti analogici, anche da errori numerici (discretizzazione, troncamento, ecc.); di converso, possono essere ridotte le incertezze di lettura.

Laddove la misura avvenga essenzialmente in una zona limitata alquanto lontana dallo strumento stesso, vengono impiegate dispositivi addizionali dedicati denominati genericamente sonde, eventualmente dotato di un **sensore** (elemento di piccole dimensioni che fornisce una valutazione diretta della grandezza da misurare, ad es. sonda di campo elettrico o magnetico) o di un **trasduttore** (elemento in grado di convertire la grandezza da misurare in un'altra di più facile lettura, ad es. un trasduttore di pressione può fornire un segnale elettrico corrispondente ad una certa pressione, un trasduttore elettroottico può fornire una grandezza elettrica corrispondente ad una certa intensità luminosa, e così via).

In regime stazionario, le intensità di corrente possono essere misurate, nella maggior parte dei casi da strumenti che utilizzano il riscaldamento e quindi la dilatazione di metalli (amperometri termici), ovvero l'interazione tra un campo stazionario derivante da un magnete permanente ed il conduttore interessato dalla corrente da misurare (strumenti analogici magnetoelettrici), ovvero nell'interazione tra un campo magnetico proporzionale

alla corrente da misurare ed ed il conduttore interessato dalla corrente da misurare (strumenti analogici elettrodinamici, a scala quadratica). La tensione stazionaria tra due punti A e B può essere misurata da strumenti magnetoelettrici o elettrodinamici, in cui la intensità della corrente misurata sia proporzionale alla tensione da misurare; il circuito voltmetrico contiene in genere un resistore di resistenza elevata in modo che l'intensità della corrente "voltmetrica" sia comunque molto piccola rispetto alle correnti a monte ed a valle dei punti A-B. Le tensioni possono essere misurate anche con i voltmetri elettrostatici. La potenza può essere misurata con uno strumento elettrodinamico in cui l'intensità di una delle correnti sia proporzionale alla tensione.

In regime sinusoidale, per misurare i valori efficaci delle grandezze possono essere misurate da strumenti elettrodinamici, tenendo conto che il termine fluttuante può essere facilmente soppresso. In tal modo si possono anche misurare potenze medie.

§V.1.2 Teoria degli errori

Una misura non è mai esatta, se non per caso, ma sempre affetta da errori. Con particolare riferimento alle misure elettriche, oltre agli errori grossolani dovuti a disattenzione, di ampiezza tale da essere immediatamente riconoscibili, che ovviamente portano a risultati che vanno subito scartati, si possono avere due tipi di errori:

a) errori sistematici, che influenzano il risultato della misura sempre nello stesso senso e non possono pertanto venire compensati facendo la media di più misurazioni. Sono tali gli errori strumentali dipendenti dalle caratteristiche costruttive degli strumenti di misura e gli errori dipendenti dall'autoconsumo degli strumenti impiegati e cioè conseguenti alle intensità di correnti non nulle degli strumenti collegati in derivazione ed alle tensioni sia pur di modico valore risultanti strumenti collegati in serie. Gli errori sistematici possono essere sempre determinati (eseguendo un'accurata indagine critica del metodo impiegato e delle apparecchiature usate) e risulta così possibile apportare le opportune correzioni al risultato della misura od almeno individuare l'incertezza che accompagna il risultato della misura.

b) errori accidentali, dovuti a cause che si possono immaginare in linea di principio ma di cui non si possono prevedere gli effetti. In genere sono conseguenza dell'incertezza con cui sono poste determinate condizioni di misura che vengono invece considerate come se fossero attuate esattamente: per esempio piccole oscillazioni della temperatura ambiente, piccole variazioni della resistenza di contatto di morsetti o commutatori possono influenzare i risultati di una misura introducendo errori rispetto al valore vero della grandezza misurata. Gli errori accidentali hanno la proprietà di essere variabili sia in valore che in segno e si individuano ripetendo una misura diverse volte con gli stessi strumenti e in condizioni che, per quanto sta nelle facoltà dell'operatore, possono essere ritenute costanti. L'eventuale discordanza dei risultati, supposto nullo ogni errore sistematico, sarà dovuta alla presenza di errori accidentali. La teoria degli errori

accidentali viene svolta mediante la matematica probabilistica e tale argomento esula dalla nostra trattazione.

Ricordiamo solo che, ripetendo n volte la misura della stessa grandezza, se x_i è il risultato della prova i -esima, il valore più probabile della grandezza in misura è la media aritmetica dei risultati:

$$X_m = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Si definisce scarto della misura i -esima rispetto al valore medio la differenza

$$z_i = x_i - X_m \text{ con } \sum_{i=1}^n z_i = 0$$

Il valore dell'errore assoluto da associare al valore medio è lo scarto quadratico medio (eventualmente *corretto* con la stima della media su $n-1$ campioni):

$$|\Delta X| = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n z_i^2}{n-1}}$$

Nella pratica normale delle misure elettriche accade che gli errori sistematici che non si riescono a correggere, chiamati errori sistematici residui, prevalgano nettamente sugli errori accidentali così che prove ripetute sulla medesima grandezza danno tutte gli stessi risultati. Si assume pertanto come misura della grandezza il valore ottenuto da un'unica prova e come errore l'errore massimo (somma di tutti gli errori sistematici residui).

Si definisce errore assoluto la differenza tra il valore misurato (medio) ed il valore vero x_v di una grandezza: $\Delta X = X_m - x_v$. Se l'errore assoluto ΔX è noto nel valore e nel segno si può calcolare il valore vero, noto che sia quello misurato.

Si definisce errore relativo (e quello percentuale) il rapporto fra l'errore assoluto ed il valore vero, considerando però che ΔX è di solito piccolo, al valore vero si può sostituire il valore misurato:

$$e_x = \frac{\Delta X}{x_v} \cong \frac{\Delta X}{X_m}; \quad e_{x\%} = 100 \frac{\Delta X}{x_v} \cong 100 \frac{\Delta X}{X_m}$$

Più spesso si hanno errori noti in ampiezza ma non nel segno, quindi si potrà solo determinare l'intervallo di valori entro il quale certamente è contenuto il valore vero:

$$x_v = X_m \pm \Delta X$$

Risulta così definita l'incertezza (imprecisione) con la quale si conosce il risultato della misurazione, esprimibile in valore assoluto od in valore relativo percentuale.

§IV.1.3 Propagazione degli errori

Spesso è necessario ricavare il valore di una grandezza sviluppando operazioni di calcolo sui valori misurati di altre grandezze. Chiamiamo con A_m , ΔA , e_A , B_m , ΔB , e_B i valori misurati e gli errori assoluto e relativo di due grandezze, di tali errori si immagina di non conoscerne il segno e quindi di assumerli nei calcoli ponendosi sempre nelle condizioni più sfavorevoli. Ciò premesso è possibile calcolare il massimo possibile valore dell'errore della grandezza calcolata, valore che ha il 100% di possibilità di non essere superato.

a) somma aritmetica delle grandezze:

$$S_m = A_m + B_m, \Delta S = \pm (\Delta A + \Delta B), e_s = \frac{\pm \Delta S}{S_m}$$

Si può osservare che nel caso di somma di più termini, se uno di essi è molto piccolo rispetto agli altri, l'importanza dell'errore che ad esso compete è piccola anche se tale errore è relativamente elevato. Inoltre l'errore relativo della somma è sempre più piccolo dell'errore relativo massimo commesso nelle misure delle singole grandezze.

b) differenza aritmetica delle grandezze:

$$D_m = A_m - B_m, \Delta D = \pm (\Delta A + \Delta B), e_D = \frac{\pm \Delta D}{D_m}$$

Il risultato della differenza è affetto da un errore relativo sempre maggiore degli errori relativi delle singole grandezze sulle quali si è operato. Tale errore relativo è tanto più grande quanto più le grandezze misurate sono tra di loro vicine, addirittura tende ad infinito se B_m tende ad A_m . Quindi bisogna evitare metodi di misura che prevedano calcoli di differenza tra due grandezze.

c) prodotto delle grandezze:

$$P_m = A_m \cdot B_m, \Delta P = \pm (\Delta A \cdot B_m + \Delta B \cdot A_m + \Delta A \cdot \Delta B) \cong \pm (\Delta A \cdot B_m + \Delta B \cdot A_m)$$

$$e_P = \frac{\pm \Delta P}{P_m} = \pm (e_A + e_B)$$

Essendo l'errore relativo del prodotto pari alla somma degli errori relativi delle singole grandezze misurate, queste devono essere tutte misurate con la stessa cura.

d) potenza e radice (sottocasi del prodotto):

$$W_m = A_m^n, e_W \cong \pm n \cdot e_A$$

$$R_m = \sqrt[n]{A_m}; \quad e_R = \pm \frac{e_A}{n}$$

e) quoziente delle grandezze:

$$Q_m = \frac{A_m}{B_m}, \quad \Delta Q = \pm \frac{\Delta A \cdot B_m + \Delta B \cdot A_m}{B_m^2 \cdot (1 + e_B)} \cong \pm \frac{\Delta A \cdot B_m + \Delta B \cdot A_m}{B_m^2}$$

$$e_Q = \frac{\Delta Q}{Q_m} \cong \pm (e_A + e_B)$$

Valgono le stesse considerazioni fatte sul prodotto.

f) coseno:

$$C = \cos \varphi_m, \quad e_C \cong \pm \Delta \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi_m, \quad \Delta C \cong \pm e_C \cdot C$$

dove φ_m è il valore misurato dell'angolo e $\Delta \varphi$ il corrispondente errore assoluto.

§V.1.4 Cifre significative ed arrotondamenti

Nell'esprimere il risultato di una misura per mezzo del corrispondente valore numerico occorre tenere presente che, a causa della imprecisione della misura, tale valore numerico potrebbe contenere una o più cifre prive di significato.

Ad esempio supponiamo di leggere sulla scala di un voltmetro l'indicazione $V_m = 156,4$ [V]. Se l'incertezza della misura, espressa in valore assoluto, vale $\Delta V = 5$ [V] risulta evidente che non ha nessun senso trascrivere anche l'ultima cifra del valore misurato (i 4 decimi).

In linea generale i risultati di una misura devono essere rappresentati in modo da limitare il numero di cifre significative a quelle che sono prive di incertezza, fatta eccezione per l'ultima che deve essere arrotondata in relazione alle cifre seguenti. Una regola pratica che può essere adottata è la seguente: nel riportare il risultato di una misura possono essere trascurate tutte quelle cifre che comportano una variazione minore di un decimo dell'errore assoluto della misura stessa.

Osservazione: le cifre significative sono quelle che si incontrano nel numero a partire dalla prima cifra di sinistra diversa dallo zero. Ad esempio il valore **0,00201** ha tre cifre significative, il valore **0,002010** ha quattro cifre significative.

Osservazione: gli esempi seguenti mostrano come arrotondare a due cifre significative alcuni valori:

$$0,1245 \cong 0,12, \quad 0,12501 \cong 0,13, \quad 0,1205 \cong 0,12, \quad 0,125 \cong 0,12, \quad 0,135 \cong 0,14$$

In definitiva, la cifra da approssimare si lascia inalterata (arrotondamento per difetto) se quella che segue è minore di 5, si aggiunge una unità (arrotondamento per eccesso) se quella che segue è maggiore di 5 (oppure 5 seguito da altre cifre non tutte nulle), è indifferente come si approssima se quella che segue è 5 seguito eventualmente da tutti zeri anche se è in uso lasciare la cifra inalterata se è pari e aggiungere una unità se è dispari.

§V.2 Strumenti di misura

Possono essere classificati a seconda del modo con cui è misurata la grandezza elettrica, si hanno: a) strumenti indicatori che visualizzano istantaneamente il valore della quantità misurata senza memorizzarla; b) strumenti registratori che forniscono l'andamento temporale della grandezza da misurare; c) strumenti integratori che forniscono in uscita l'integrale nel tempo della grandezza in oggetto, sono anche detti contatori.

Noi tratteremo soltanto gli strumenti indicatori. Si possono avere strumenti indicatori analogici e strumenti indicatori digitali. Vediamone le specifiche più importanti.

§V.2.1 Strumenti indicatori analogici

In tali strumenti il risultato della misura è fornito dalla lettura della deviazione di un indice materiale o luminoso che si muove su una scala graduata, la deviazione dell'indice è una funzione continua della grandezza misurata.

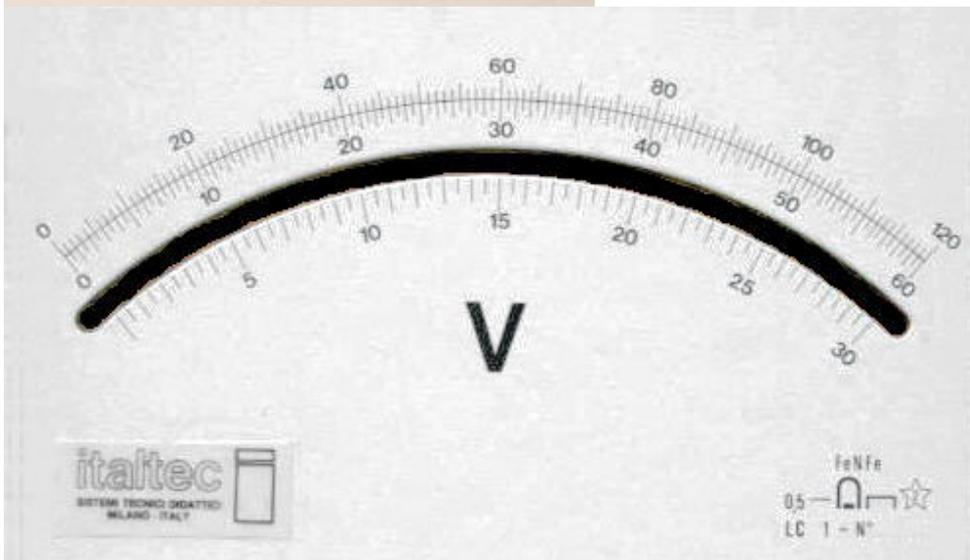
Si hanno strumenti analogici elettromeccanici e strumenti analogici elettronici.

Gli strumenti analogici elettromeccanici sfruttano fenomeni per i quali l'interazione di grandezze elettriche o magnetiche dà luogo ad una forza o ad una coppia meccanica. Sono costituiti da un equipaggio mobile, avente una posizione iniziale di riposo, sul quale agisce una coppia motrice C_{MX} funzione continua della grandezza elettrica G_x che si intende misurare. Alla coppia motrice viene opposta una coppia antagonista, normalmente di tipo elastico e realizzata tramite una molla, che tende a ricondurre l'equipaggio mobile nella posizione iniziale al cessare dell'azione prodotta dalla coppia motrice stessa. Dall'equilibrio delle due coppie, trascurando gli attriti, si ottiene una deviazione angolare δ_{AX} proporzionale alla grandezza elettrica misurata. All'equipaggio mobile viene fissato un indice che ruota in corrispondenza di una scala graduata in divisioni che permette la lettura dello strumento sotto forma di numero di divisioni δ_x . Lo schema a blocchi di un tale strumento può essere il seguente:



A seconda del principio di funzionamento alla base del convertitore elettromeccanico si possono avere diversi tipi di strumenti. I più importanti sono:

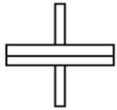
a) strumenti magnetoelettrici (detti a bobina mobile), usati in corrente continua e che possono essere impiegati come amperometro, voltmetro, Ohmetro. Portano il simbolo disegnato sotto impresso sul quadrante.



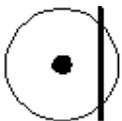
b) strumenti elettromagnetici (detti a ferro mobile), usati sia in corrente continua che alternata e che possono essere impiegati come amperometro, voltmetro, frequenzimetro. Portano il simbolo disegnato sotto impresso sul quadrante.



c) strumenti elettrodinamici, usati sia in corrente continua che alternata e che possono essere impiegati come amperometro, voltmetro, frequenzimetro, wattmetro, contatore. Portano il simbolo disegnato sotto impresso sul quadrante.

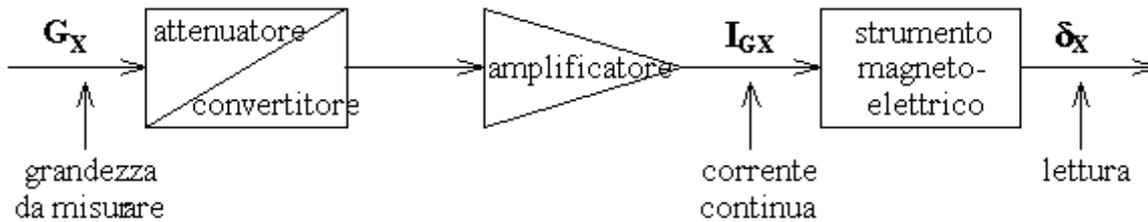


d) strumenti ad induzione, usati in corrente alternata e che possono essere impiegati come wattmetro, contatore. Portano il simbolo disegnato sotto impresso sul quadrante.



Gli strumenti analogici elettronici sono impiegati per misure sia in continua che in alternata e contengono apparati elettronici (quali filtri, oscillatori, raddrizzatori, amplificatori, ...) che manipolano la grandezza elettrica da misurarsi G_x trasformandola in corrente continua I_{Gx} ad essa proporzionale misurata infine da uno strumento magnetoelettrico. La presenza di un amplificatore permette di realizzare strumenti ad alta sensibilità. Ulteriore caratteristica di questi strumenti è quella di avere una altissima impedenza d'ingresso con conseguente bassissimo consumo. Quale aspetto negativo si ha la necessità di alimentarli (solitamente alla tensione alternata di 220 [V], 50 [Hz]) perché possano funzionare gli apparati elettronici che li compongono, mentre gli apparecchi elettromeccanici non esigono alimentazione. L'impiego più comune è come voltmetro o

frequenzimetro, anche se attualmente tendono ad essere sostituiti dagli strumenti digitali. Lo schema a blocchi di uno strumento analogico elettronico può essere il seguente:



Le specifiche più importanti che caratterizzano uno strumento analogico sono:

a) sensibilità: rappresenta il rapporto tra una variazione ΔG_x della grandezza misurata e la corrispondente variazione $\Delta \delta_x$ della deviazione dello strumento. L'unità di misura della sensibilità è il rapporto tra l'unità di misura della grandezza oggetto della misurazione e l'unità di misura della deviazione (ad esempio per un voltmetro si ha $[V/\delta]$).

b) risoluzione: esprime la minima variazione della grandezza misurata rilevabile con sicurezza attraverso uno spostamento dell'indice.

c) portata: indica il valore massimo della grandezza incognita misurabile con lo strumento. La portata corrisponde al limite superiore assoluto del campo di misura.

d) sovraccarico: indica la possibilità di effettuare misure di grandezze superiori alla portata, il sovraccarico è spesso espresso in percento della portata.

e) prontezza: è il tempo impiegato dallo strumento per indicare il valore della grandezza misurata entro i suoi limiti di accuratezza.

f) gamma di frequenza: è l'intervallo di frequenza entro il quale lo strumento assicura l'accuratezza nominale.

g) impedenza d'ingresso: è l'impedenza [Ω] offerta al segnale da misurare, per gli strumenti elettromeccanici ha una natura prevalentemente Ohmica.

h) indice della classe di precisione: definisce l'accuratezza dello strumento ed è il limite superiore dell'errore assoluto $|\Delta G| = |G_m - G_v|$ rapportato alla portata P_G e moltiplicato per 100, ovvero:

$$CI = \frac{|\Delta G|}{P_G} \cdot 100$$

arrotondato al valore normalizzato immediatamente superiore. Gli indici che definiscono le classi di precisione per gli strumenti elettrici industriali sono i seguenti:

0,05 - 0,1 - 0,2 - 0,3 - 0,5 - 1 - 1,5 - 2 - 2,5 - 3 - 5

Ovviamente gli indici più piccoli sono riferiti agli strumenti destinati ai laboratori, i più alti agli strumenti da quadro.

i) divisioni di fondo scala: è il numero δ_{FS} delle divisioni che compongono la scala dello strumento.

l) costante della scala: è il rapporto tra la portata e le divisioni di fondo scala $C = P_G / \delta_{FS}$. L'unità di misura della costante della scala è il rapporto tra l'unità di misura della portata e l'unità di misura della deviazione (ad esempio per un voltmetro si ha $[V/\delta]$).

Vediamo mediante un esempio come si impiegano alcune delle specifiche sopra elencate. Immaginiamo di effettuare la misura di una corrente continua con un amperometro magnetoelettrico avente portata $P_A = 5 [A]$, numero di divisioni di fondo scala $\delta_{FS} = 100$, classe di precisione $CI = 0,2$, impedenza d'ingresso (resistenza interna, che si può ritenere nota senza errore) $R_A = 0,15 [\Omega]$. Supponiamo che l'indice dello strumento si sia fermato, nella misurazione, sulla sessantacinquesima divisione della scala, si potrà calcolare:

a) il valore misurato:

$$C_A = \frac{P_A}{\delta_{FS}} = \frac{5}{100} = 0,05 [A / \delta] \left. \vphantom{C_A} \right\} \Rightarrow I_m = C_A \cdot \delta_m = 0,05 \cdot 65 = 3,35 [A]$$

b) l'errore assoluto strumentale e l'errore relativo percentuale:

$$\Delta I = \frac{CI \cdot P_A}{100} = \frac{0,2 \cdot 5}{100} = 0,01 [A] , e_I \% = \frac{\Delta I}{I_m} \cdot 100 = \frac{0,01}{3,35} \cdot 100 = 0,30$$

E' importante osservare che l'errore assoluto strumentale dipende dalla classe di precisione ed è costante per tutto il campo di misura, quindi l'errore relativo si fa tanto più grande quanto più piccolo è il valore misurato rispetto alla portata. Per questo motivo è opportuno utilizzare strumenti aventi una portata tale da collocare il valore misurato oltre i due terzi della portata stessa.

c) il valore vero:

$$I = I_m \pm \Delta I = 3,35 \pm 0,01 [A]$$

Abbiamo ritenuto che l'incertezza della misura sia determinata unicamente dall'errore proprio dello strumento, il cui segno è per sua natura ignoto. Questo modo di procedere è accettabile solo se si può escludere la presenza di altri errori (sistematici o accidentali) oppure se gli altri eventuali errori sono di entità trascurabile.

Per quanto riguarda il numero di cifre significative con le quali trascrivere il valore misurato, ricordando che devono essere trascurate quelle che comportano una variazione

inferiore ad un decimo dell'errore assoluto e quindi inferiore a **0,001 [A]**, sarà $I_m = 3,350$ [A]. In tale valore, le prime tre cifre significative sono da considerarsi esatte mentre la quarta è stata aggiunta al fine di informare sul grado di accuratezza che caratterizza la misura (se il risultato della misura fosse stato composto da più di quattro cifre significative, si sarebbe dovuto limitare il valore alle prime quattro approssimando la quarta cifra secondo i criteri già esposti).

d) l'autoconsumo dello strumento:

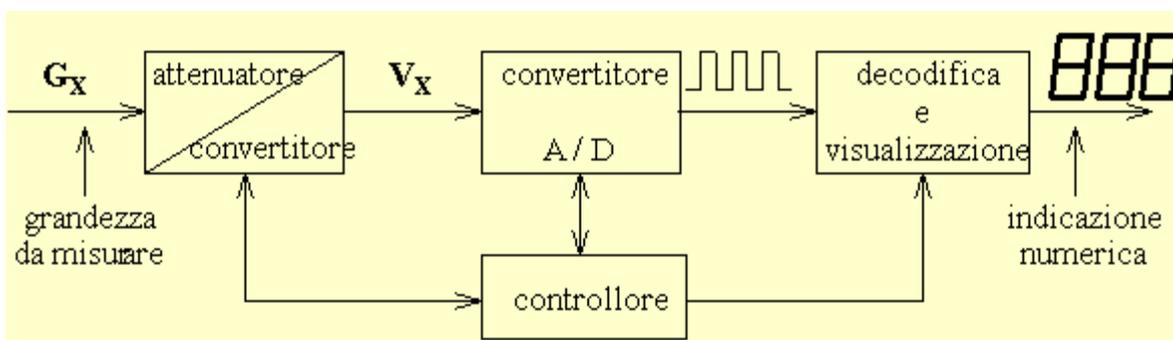
si può calcolare come potenza dissipata internamente all'amperometro oppure come tensione interna all'amperometro, quindi:

$$P_{AI} = R_A \cdot I_m^2 = 0,15 \cdot 3,350^2 = 1,683 \text{ [W]}, \quad V_{AI} = R_A \cdot I_m = 0,15 \cdot 3,350 = 0,5025 \text{ [V]}$$

L'autoconsumo in potenza è noto con un errore relativo percentuale pari a $\pm 0,6$ (essendo calcolato attraverso il quadrato della intensità di corrente, affetta da un errore relativo percentuale pari a $\pm 0,3$, moltiplicato per la resistenza interna nota senza errore), mentre l'autoconsumo in tensione è noto con un errore relativo percentuale pari a $\pm 0,3$ (di facile giustificazione).

§V.2.2 Strumenti indicatori digitali

Gli strumenti con presentazione in forma digitale o numerica diretta offrono molteplici vantaggi rispetto ai corrispondenti tipi analogici, ed in particolare: facilità di lettura essendo abolita l'operazione di interpolazione tra due divisioni contigue e il calcolo della costante della scala, maggiore accuratezza e risoluzione, basso livello di rumore, elevata velocità di misura, possibilità di inserimento in un complesso di misura automatico controllato da un elaboratore elettronico. Quale aspetto negativo si ha la necessità di alimentarli (solitamente alla tensione alternata di **220 [V]**, **50 [Hz]**) perché possano funzionare gli apparati elettronici che li compongono. La figura seguente mostra lo schema a blocchi di uno strumento digitale:



Si osserva che la grandezza da misurare G_x viene convertita in un segnale continuo di tensione V_x che, a sua volta, viene convertito in un segnale digitale binario (successione di bit) inviato infine alla sezione di decodifica e visualizzazione che avviene sotto forma numerica. Il tutto è gestito da un controllore, di solito costituito da un microprocessore. Il

numero di cifre col quale viene fornita l'indicazione numerica dipende dall'accuratezza dello strumento, essendo inutile rappresentare cifre non significative (delle quali, cioè, non può essere assicurata la fondatezza). Tuttavia, molto spesso il numero visualizzato comprende una cifra in più rispetto all'accuratezza dello strumento, questo per rendere massima la risoluzione. Ad esempio, uno strumento col visualizzatore a cinque cifre e quindi con 100000 punti di misura (da 00000 a 99999) ha una risoluzione del visualizzatore pari a $1/100000 = 10^{-5}$ mentre la sua accuratezza potrebbe essere pari a 10^{-4} .

Gli strumenti digitali offrono inoltre la possibilità di effettuare la memorizzazione ed il successivo richiamo dei valori misurati, nonché la loro elaborazione e controllo remoti potendo tali strumenti essere interfacciati con sistemi a microprocessore fino ad ottenere strutture automatiche di misura (SAM).

Le specifiche più importanti che caratterizzano uno strumento digitale sono:

a) accuratezza (precisione): definisce l'errore strumentale e può essere espressa come:

1) errore relativo percentuale sul fondo scala, del tutto analogo alla classe di precisione degli strumenti analogici:

$$e_{FS}\% = \frac{|G_m - G_v|}{P_G} \cdot 100$$

dove P_G è il fondo scala (portata) dello strumento, G_m e G_v il valore misurato e quello vero.

2) errore relativo percentuale sul valore misurato:

$$e_{VM}\% = \frac{|G_m - G_v|}{G_v} \cdot 100$$

3) numero di digit, ovvero numero di unità della cifra meno significativa del visualizzatore.

In generale il costruttore per indicare la precisione dello strumento fornisce almeno due dei tre valori sopra definiti, nella forma:

accuracy = $\pm(e_{FS}\% + e_{VM}\%)$;

accuracy = $\pm(e_{FS}\% + N_{digit})$;

accuracy = $\pm(e_{VM}\% + N_{digit})$;

b) tempo di misura: è il tempo impiegato dallo strumento per effettuare un ciclo di misura. Anziché il tempo, può essere indicata la frequenza, ovvero il numero di cicli di misura effettuabili in un secondo.

c) risoluzione: è il peso dell'ultima cifra del visualizzatore nella portata più bassa. Ad esempio per un voltmetro di portata minima **0,1 [V]** con display a **4** cifre, l'ultima cifra a destra indica i centesimi di [millivolt], quindi la risoluzione di tale strumento è di **0,01 [mV]**. A volte la risoluzione è indicata in parti per milione, nell'esempio fatto si hanno **100 p.p.m.**.

d) sovraportata: lo strumento digitale è in grado di misurare grandezze superiori al fondo scala (portata). Si definisce sovraportata la percentuale rispetto al fondo scala del campo di misura ricoperto dallo strumento oltre la portata. Ad esempio, un voltmetro di portata **100 [V]**, con display a **3** cifre e con una sovraportata del **20%** può misurare fino a **120 [V]**. Per permettere misure in sovraportata lo strumento dispone di una quarta indicazione sul display (ad esempio una barra verticale) che si illumina quando lo strumento va in sovraportata. Tale indicazione viene chiamata mezza cifra e si dice che lo strumento dell'esempio è a **3½** cifre.

e) punti di misura: è il numero di indicazioni distinte che lo strumento può dare, compresa l'eventuale sovraportata. Ad esempio uno strumento a **3** cifre dispone di **1000** punti di misura (da **000** a **999**), uno strumento a **3½** cifre con sovraportata del **20%** dispone di **1200** punti (da **0000** a **1199**).

Osservazione: attualmente l'uso della ½ cifra è più spesso fatto col seguente criterio. Uno strumento a **3** cifre, ad esempio, permette di visualizzare valori tra **000** e **999**, quindi rende possibili **1000** diverse letture. La risoluzione del visualizzatore sarà quindi **1/1000** ovvero lo **0,1%**. Per ampliare il margine di misura e la risoluzione si ricorre alla ½ **cifra**. Si tratta di dotare il visualizzatore di una cifra aggiuntiva (la prima a sinistra) che può indicare solamente i valori **0** ed **1**. Ad esempio nel caso di **3½** cifre il campo di misura va da **0000** a **1999** con una risoluzione del visualizzatore pari a **1/2000** ovvero **0,05%**.

f) impedenza d'ingresso: è l'impedenza all'ingresso dello strumento.

g) rumore: rappresenta la fluttuazione casuale, dovuta a cause fisiche intrinseche allo strumento, che si sovrappone al segnale utile da misurare. Si manifesta con fluttuazioni della cifra meno significativa.

h) reiezione di modo normale (NMR): indica l'attitudine dello strumento di distinguere il segnale da misurare dai rumori nell'ingresso di misura, si esprime in decibel.

i) reiezione di modo comune (CMR): indica l'attitudine dello strumento di distinguere il segnale da misurare dai rumori presenti fra ingresso di misura e massa, si esprime in decibel.

Vediamo mediante un esempio come si impiegano alcune delle specifiche sopra elencate. Effettuiamo la misura di una corrente continua con un amperometro digitale di portata **P_A = 100 [mA]**, display di **3 ½** cifre ed **accuracy ± (0,1% della lettura + 1 digit)**.

Se la misura è stata di 90 [mA], l'accuratezza risulterà pari a:

$$\Delta I = \pm \left(\frac{0,1}{100} \cdot 90 + 0,1 \right) = \pm 0,19 \text{ [mA]} , \quad e_I \% = \pm \frac{\Delta I}{I_m} \cdot 100 = \frac{0,19}{90} \cdot 100 = \pm 0,21$$

dove lo 0,1 [mA] che compare come secondo termine per il calcolo dell'errore assoluto è il contributo di 1 digit per errore di risoluzione, ovvero avendo 3 cifre piene e quindi 1000 punti di misura in assenza di sovrapposizione, un errore pari a:

$$\frac{P_A}{1000} = \frac{100}{1000} = 0,1 \text{ [mA]}$$

Il valore vero della corrente misurata sarà $I_v = (90 \pm 0,19) \text{ [mA]}$.

§V.3 Misura dell'intensità di corrente

- 1 Tipi di amperometri
 - 1.1 Amperometro ideale
 - 1.2 Amperometro magnetoelettrico
 - 1.3 Amperometro elettromagnetico
 - 1.4 Amperometro elettrodinamico
 - 1.5 Amperometri termici
 - 1.5.1 Strumenti di misura a termocoppia o termoelettrici
 - 1.6 Amperometri elettrostatici
 - 1.7 Amperometri ad induzione
 - 1.8 Amperometri digitali

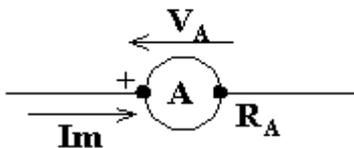


-
- 1.9 Pinza amperometrica

Caratteristica generale di questa categoria di strumenti (con l'esclusione delle pinze amperometri che) è l'inserzione in serie nel circuito da misurare, da ciò consegue che la loro resistenza (impedenza) interna deve essere piccola e quindi trascurabile rispetto a quella del circuito sul quale sono inseriti (in tal modo si ha un autoconsumo molto ridotto e non si alterano le condizioni di funzionamento del circuito).

§V.3.1 Misura nei circuiti in corrente continua

Si possono impiegare amperometri magnetoelettrici a bobina mobile, amperometri elettromagnetici a ferro mobile, amperometri elettrodinamici con bobine in parallelo, amperometri termici a coppia termoelettrica, multimetri analogici o numerici commutati sulla misura di corrente continua. E' fondamentale inserirli considerando l'ordinamento (polarità) dello strumento.

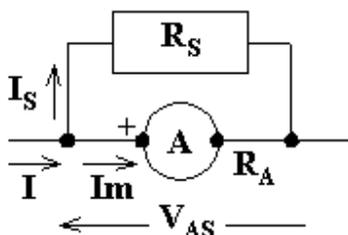


Nel caso in cui la portata dello strumento superi l'intensità della corrente da misurarsi si effettua l'inserzione diretta. Se I_P [A] è la portata, δ_{FS} sono le divisioni di fondo scala, Cl la classe di precisione, R_A [Ω] la resistenza interna (supposta nota con precisione assoluta), δ le divisioni lette, l'intensità di corrente I_m [A] misurata e gli errori ad essa associati valgono:

$$C_A = \frac{I_P}{\delta_{FS}} \text{ [A / div]} \Rightarrow I_m = C_A \cdot \delta \text{ [A]}, \Delta I_m = \frac{Cl \cdot I_P}{100} \text{ [A]}, e_{I_m} \% = \frac{\Delta I_m}{I_m} \cdot 100$$

La tensione interna e l'autoconsumo nello strumento valgono:

$$V_A = R_A \cdot I_m \text{ [V]}, P_A = R_A \cdot I_m^2 \text{ [W]}$$



Nel caso in cui l'intensità della corrente nel circuito superi la portata dello strumento si deve ricorrere all'inserzione di una resistenza R_S di bassissimo valore (shunt o derivatore di corrente). Lo shunt, inserito in parallelo all'amperometro, sarà interessato dalla intensità I_s , mentre il valore I_m che interesserà l'amperometro dovrà essere inferiore alla portata dello stesso. Si avrà $I = K_S \cdot I_m$ [A] con:

$$K_S = \frac{R_A + R_S}{R_S}$$

Nell'ipotesi di conoscere le resistenze con precisione assoluta, si hanno gli stessi errori visti nel caso precedente.

La tensione interna e l'autoconsumo valgono:

$$V_{AS} = R_A \cdot I_m = R_S \cdot I_S = (R_A/R_S) \cdot I \text{ [V]}, P_{AS} = R_A \cdot I_m^2 + R_S \cdot I_S^2 = (R_A/R_S) \cdot I^2 \text{ [W]}$$

Se si ha un amperometro di resistenza interna R_A e si desidera aumentare la sua portata di un fattore K_S , si dovrà porre in parallelo uno shunt di resistenza:

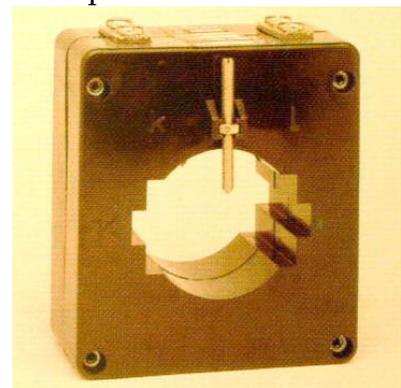
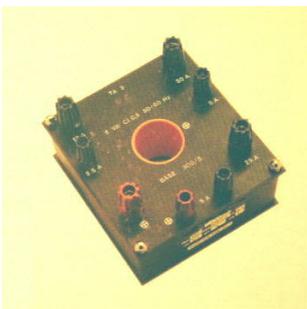
$$R_S = \frac{R_A}{K_S - 1} \text{ [\Omega]}$$

§V.3.3 Misura di intensità di corrente nei circuiti in regime sinusoidale

Si possono impiegare amperometri elettromagnetici a ferro mobile, amperometri elettrodinamici con bobine in parallelo, amperometri termici a coppia termoelettrica, multimetri analogici o numerici commutati sulla misura di corrente alternata.

Nel caso in cui la portata dello strumento sia inferiore alla intensità di corrente nel circuito, si dovrà inserire l'amperometro tramite un trasformatore di misura amperometrico (TA), oppure pinze amperometriche.

In corrente alternata non è opportuno usare derivatori di corrente in quanto se così si facesse si produrrebbero delle modificazioni nella forma d'onda sinusoidale delle grandezze elettriche non potendosi ritenere il circuito puramente resistivo.



TRASFORMATORI AMPEROMETRICI (TA)



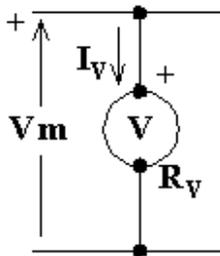
PINZA AMPEROMETRICA

§V.4 Misura di tensione

Vengono impiegati i voltmetri. Caratteristica generale di questa categoria di strumenti è l'inserzione in parallelo (derivazione) nel circuito da misurare, da ciò consegue che la loro resistenza interna deve essere grande rispetto a quella del circuito sul quale sono inseriti (in tal modo si ha un autoconsumo molto ridotto e non si alterano le condizioni di funzionamento del circuito).

§V.4.1 Misura nei circuiti in corrente continua

Si possono impiegare voltmetri amperometrici (si ottengono dagli amperometri già visti collegando in serie un resistore addizionale), voltmetri elettrostatici, spinterometri (solo per tensioni elevatissime), multimetri analogici o numerici commutati sulla misura di tensione continua. E' fondamentale inserirli considerando le polarità dello strumento.

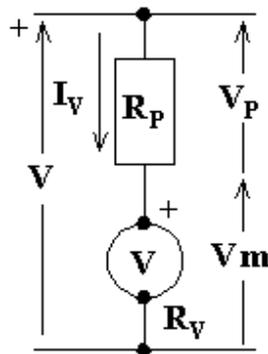


Nel caso in cui la portata dello strumento superi la tensione da misurarsi si effettua l'inserzione diretta. Se V_P [V] è la portata, δ_{FS} sono le divisioni di fondo scala, Cl la classe di precisione, R_V [Ω] la resistenza interna (supposta nota con precisione assoluta), δ le divisioni lette, la tensione V_m [V] misurata e gli errori ad essa associati valgono:

$$C_V = \frac{V_P}{\delta_{FS}} \text{ [V / div]} \Rightarrow V_m = C_V \cdot \delta \text{ [V]}, \Delta V_m = \frac{Cl \cdot V_P}{100} \text{ [V]}, e_{V_m} \% = \frac{\Delta V_m}{V_m} \cdot 100$$

La intensità della corrente assorbita e l'autoconsumo nello strumento valgono:

$$I_V = \frac{V_m}{R_V} \text{ [A]}, P_V = \frac{V_m^2}{R_V} \text{ [W]}$$



Nel caso in cui la tensione nel circuito superi la portata dello strumento si deve ricorrere all'inserzione tramite un partitore di tensione. Si tratta di una resistenza R_P che, inserita in serie al voltmetro. Si è dimostrato che $V = K_P \cdot V_m$ [V] con:

$$K_P = \frac{R_V + R_P}{R_V}$$

Nell'ipotesi di conoscere le resistenze con precisione assoluta, si hanno gli stessi errori visti nel caso precedente.

L'intensità della corrente assorbita e l'autoconsumo valgono:

$$I_V = \frac{V}{R_V + R_P} \text{ [A]} , \quad P_V = \frac{V_P^2}{R_P} + \frac{V_m^2}{R_V} = \frac{V^2}{R_P + R_V} \text{ [W]}$$

Se si ha un voltmetro di resistenza interna R_V e si desidera aumentare la sua portata di un fattore K_P , si dovrà porre in serie un resistore con resistenza $R_P = R_V \cdot (K_P - 1)$ [Ω]. Naturalmente la portata in corrente del partitore dovrà essere adeguata alla intensità di corrente che lo attraverserà (di solito piccolissima).

§V.4.2 Misura nei circuiti in corrente alternata

Si possono impiegare gli stessi strumenti visti per le correnti continue (con l'eccezione dei voltmetri derivati dagli amperometri magnetoelettrici). Nel caso in cui la portata dello strumento sia inferiore alla tensione nel circuito, si dovrà inserire il voltmetro tramite un trasformatore di misura voltmetrico (TV). In corrente alternata non è lecito usare partitori di tensione in quanto se così si facesse si produrrebbero delle deformazioni nella forma d'onda sinusoidale delle grandezze elettriche a causa delle induttanze e capacità parassite.

Nei circuiti in corrente alternata può inoltre interessare la misura del valore medio in un semiperiodo della tensione oppure la misura del valore massimo della tensione. Per questo scopo si devono usare voltmetri appositi che possono essere di tipo elettronico (sia analogico che numerico) oppure di tipo elettromeccanico (in tal caso si tratta di strumenti magnetoelettrici alimentati attraverso dei circuiti raddrizzatori statici).

§V.5 Misura di potenza reale, wattmetro

Nel caso di circuiti in corrente continua, la misura della potenza assorbita da un utilizzatore è riconducibile ad una misura di tensione e di corrente essendo per la legge di Joule $P = V \cdot I$ [W]. Quindi basta approntare una normale inserzione voltamperometrica e tenere conto dell'autoconsumo dello strumento inserito a valle:

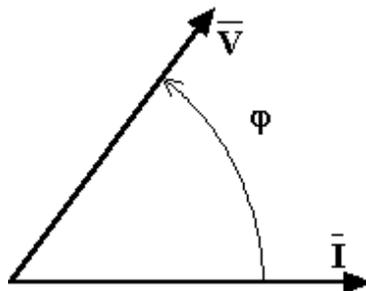
voltmetro a valle:

$$P = V_m \cdot I_m - \frac{V_m^2}{R_V} \text{ [W]}$$

amperometro a valle:

$$P = V_m \cdot I_m - I_m^2 \cdot R_A \text{ [W]}$$

dove V_m [V], I_m [A] sono i valori misurati di tensione e corrente, mentre R_V [Ω], R_A [Ω] sono le resistenze interne del voltmetro e dell'amperometro.



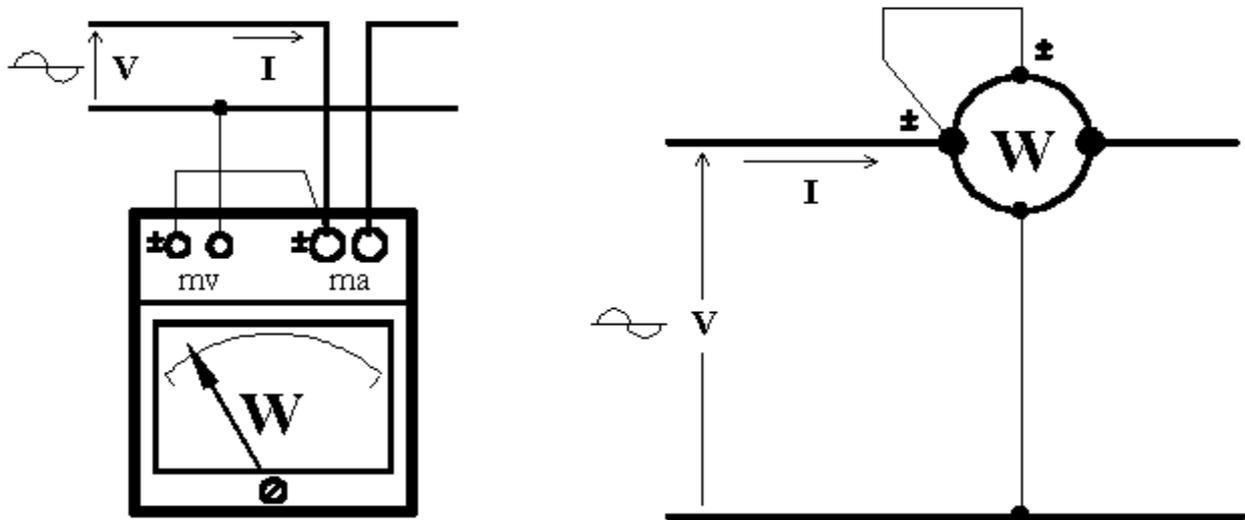
Nel caso di circuiti in corrente alternata il prodotto dei valori efficaci V , I della tensione e della corrente non è sufficiente a definire la potenza reale (potenza attiva) in watt, ma definisce solamente la potenza apparente in voltampere. Per ottenere la potenza reale bisogna moltiplicare ancora per il fattore di potenza $\cos \varphi$ (dove φ è l'angolo di sfasamento tra la tensione e l'intensità della corrente). La stessa espressione si può interpretare come il prodotto scalare tra i vettori \bar{V} ed \bar{I} :

$$P = \bar{V} \times \bar{I} = V \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ [W]}$$

Per quanto riguarda il prodotto scalare tra due vettori è bene ricordare che esso gode di tutte le proprietà dei prodotti algebrici ed in particolare delle tre proprietà associativa, distributiva e commutativa.

Quindi, per misurare la potenza reale in corrente alternata sarebbero necessari un voltmetro, un amperometro ed un fasometro (misura il f.d.p.) ed è poi necessario eseguire il prodotto delle tre grandezze misurate. Si verrebbe così a propagare un errore di misura pari alla somma degli errori relativi delle tre singole determinazioni.

Per questo motivo la potenza reale nei circuiti in corrente alternata non viene mai determinata attraverso la misura dei singoli fattori, ma viene sempre misurata nel suo complesso mediante un unico strumento a lettura diretta denominato wattmetro (che, se di tipo tradizionale elettromeccanico, è nelle forme più pregiate uno strumento elettrodinamico):



La figura in alto a sinistra mostra l'inserzione di un wattmetro in un sistema monofase. Si osserva la presenza di quattro morsetti, due amperometrici (indicati con ma) e due voltmetrici (indicati con mv). Ai morsetti amperometrici fa capo l'equipaggio amperometrico fisso, ai morsetti voltmetrici fa capo l'equipaggio voltmetrico mobile, inoltre per ciascuna delle due coppie il morsetto d'ingresso è opportunamente contrassegnato. Si osserva che nell'esempio l'equipaggio amperometrico è inserito a valle rispetto quello voltmetrico (che, quindi, si dice inserito a monte).

I dati caratteristici più significativi dello strumento sono:

1) classe di precisione CI che determina nella misura della potenza un errore strumentale pari a:

$$|\Delta P| = \frac{CI \cdot P_W}{100} \text{ [W]}$$

dove P_W [W] è la portata di fondo scala del wattmetro.

2) errore d'angolo ε [rad] che determina nella misura della potenza un errore di fase pari a $\varepsilon_F \% \cong 100 \cdot \varepsilon \cdot \text{tg}(\varphi)$, dove φ espresso in gradi sessagesimali ($^\circ$) è l'angolo di sfasamento tra la tensione applicata all'equipaggio voltmetrico e la corrente che interessa l'equipaggio amperometrico (tale errore è significativo solo nelle misure di potenza in circuiti fortemente reattivi).

3) massima frequenza di impiego.

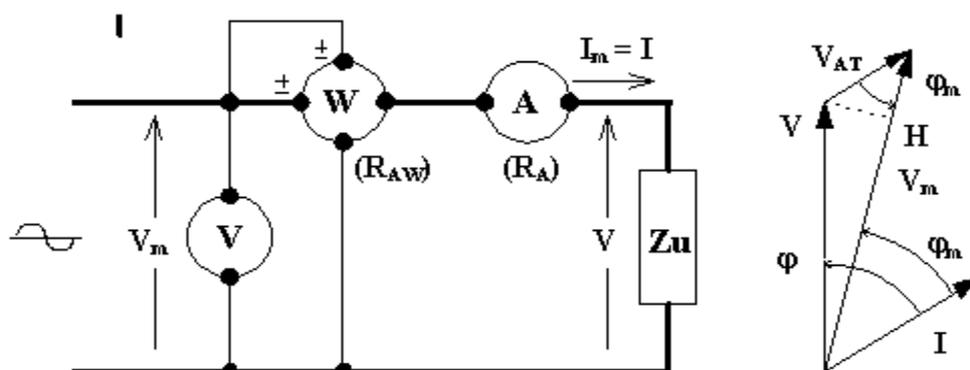
- 4) portata in corrente dell'equipaggio amperometrico P_A [A].
- 5) resistenza interna amperometrica R_{AW} [Ω] (qualche decimo di ohm). La componente reattiva di tale circuito è trascurabile.
- 6) portata in tensione dell'equipaggio voltmetrico P_V [V].
- 7) resistenza interna voltmetrica R_{vW} [Ω] (qualche decina di migliaia di ohm). La componente reattiva di tale circuito è trascurabile.
- 8) $\cos\phi_w$ del wattmetro per basso $\cos\phi$. Normalmente $\cos\phi_w = 1$, ma per i wattmetri a molla antagonista indebolita necessari per la misura di potenza in circuiti fortemente reattivi tale parametro può assumere valori molto piccoli (tipicamente **0,1** o **0,2**).
- 9) portata in potenza del wattmetro, $P_W = P_A \cdot P_V \cdot \cos\phi_w$ [W].
- 10) divisioni di fondo scala δ_{FS} .
- 11) costante strumentale $C_W = P_W / \delta_{FS}$ [W / δ].

Il wattmetro deve sempre essere inserito accompagnandolo con un voltmetro ed un amperometro, questo per assicurarsi di rispettare le portate dell'equipaggio voltmetrico e dell'equipaggio amperometrico.

Con l'esclusione dei wattmetri per basso $\cos\phi$, quasi sempre l'equipaggio voltmetrico sopporta sovraccarichi del **50%** mentre l'equipaggio amperometrico del **100%**, in ogni caso è bene verificare controllando le caratteristiche dello strumento che si sta impiegando.

Insieme all'errore strumentale ed all'errore di fase, dipendenti dalla classe di precisione e dall'errore d'angolo, un'altra importante causa di errore nelle misure di potenza è costituita dall'autoconsumo delle bobine del wattmetro e degli altri strumenti inseriti. Per valutare tale errore occorre distinguere tra i due possibili schemi di inserzione noti come inserzione con le voltmetriche a monte ed inserzione con le voltmetriche a valle.

§V.5.1 Inserzione con le voltmetriche a monte



L'inserzione è così chiamata perché il voltmetro e l'equipaggio voltmetrico del wattmetro sono derivati a monte rispetto alla posizione del carico sia della bobina amperometrica del wattmetro che dell'amperometro. Con questa inserzione l'intensità della corrente nel wattmetro è la stessa del carico, mentre la tensione V_m che è applicata ai circuiti voltmetrici è diversa dalla tensione V applicata al carico.

La potenza attiva assorbita dal carico vale :

$$P = VI \cos \varphi \quad [\text{W}]$$

La potenza misurata dal wattmetro vale :

$$P_m = V_m I \cos \varphi_m = \Re e \left[(\bar{V} + R_{AT} \bar{I}) \tilde{I} \right] = P + R_{AT} I^2 \quad [\text{W}]$$

Dove $R_{AT} = R_A + R_{AW} \quad [\Omega]$ è la resistenza serie totale degli equipaggi amperometrici. La potenza $P_{AA} = R_{AT} \cdot I^2 \quad [\text{W}]$ rappresenta l'autoconsumo del sistema amperometrico di misura e deve essere detratta dalla potenza misurata per avere la potenza al carico :

$$P = P_m - P_{AA} \quad [\text{W}]$$

Conseguentemente, se si assumesse P_m come potenza al carico, si commetterebbe un errore sistematico pari a :

$$e_{AA} \% = 100 \cdot \frac{P_m - P}{P} = 100 \cdot \frac{R_{AT} \cdot I^2}{V \cdot I \cdot \cos \varphi} = 100 \cdot \frac{R_{AT} \cdot I}{V \cdot \cos \varphi} = 100 \cdot \frac{V_{AT}}{V \cdot \cos \varphi}$$

Si osserva che tale errore è tanto minore quanto più piccolo è il valore della tensione V_{AT} rispetto alla tensione V del circuito, quindi questo schema è particolarmente indicato per circuiti con correnti piccole e tensioni elevate. In ogni caso l'errore si fa tanto più grande quanto più piccolo è il f.d.p. del carico.

Il voltmetro indica una tensione V_m diversa dalla tensione V applicata al carico. Posto:

$$\cos \varphi_m = \frac{P_m}{V_m \cdot I}$$

si dimostra che è :

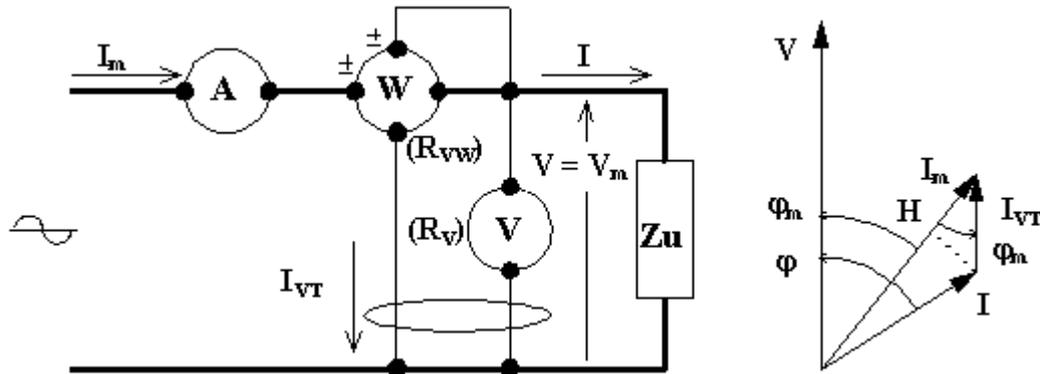
$$V = \sqrt{(V_m - R_{AT} \cdot I \cdot \cos \varphi_m)^2 + (R_{AT} \cdot I \cdot \sin \varphi_m)^2} \cong V_m - R_{AT} \cdot I \cdot \cos \varphi_m \quad [\text{V}]$$

§V.5.2 Inserzione con le voltmetriche a valle

L'inserzione è così chiamata perché il voltmetro e l'equipaggio voltmetrico del wattmetro sono derivati a valle (con riferimento alla posizione del carico) sia della bobina

amperometrica del wattmetro che dell'amperometro. Tale inserzione è preferita essendo la resistenza interna degli equipaggi voltmetrici nota con maggior precisione di quella degli equipaggi amperometrici.

Con questa inserzione la tensione applicata ai circuiti voltmetrici è la stessa applicata al carico, mentre la corrente nei circuiti amperometrici \bar{I}_m differisce da quella \bar{I} del carico.



Applicando il primo principio di Kirchhoff risulta infatti essere :

$$\bar{I} = \bar{I}_m - \bar{I}_{VT} \quad \text{con} \quad \bar{I}_{VT} = \frac{\bar{V}}{R_{VW}} + \frac{\bar{V}}{R_V} = \frac{\bar{V}}{R_{VT}} \quad \text{dove} \quad R_{VT} = \frac{R_{VW} \cdot R_V}{R_{VW} + R_V} \quad [\Omega]$$

La potenza attiva assorbita dal carico vale :

$$P = \bar{V} \times \bar{I} = V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad [\text{W}]$$

La potenza misurata dal wattmetro vale :

$$P_m = V \cdot I_m \cdot \cos \varphi_m = \bar{V} \times \bar{I}_m = \bar{V} \times \left(\bar{I} + \frac{\bar{V}}{R_{VT}} \right) = \bar{V} \times \bar{I} + \frac{V^2}{R_{VT}} = P + P_{AV} \quad [\text{W}]$$

Dove $R_{VT} = R_A // R_{AV} \quad [\Omega]$ è la resistenza parallelo degli equipaggi voltmetrici. La potenza $P_{AV} = V^2 / R_{VT} \quad [\text{W}]$ rappresenta l'autoconsumo del sistema voltmetrico di misura e deve essere detratta dalla potenza misurata per avere la potenza al carico :

$$P = P_m - P_{AV} \quad [\text{W}]$$

Conseguentemente, se si assumesse P_m come potenza al carico, si commetterebbe un errore sistematico pari a :

$$e_{AV} \% = 100 \cdot \frac{P_m - P}{P} = 100 \cdot \frac{V^2}{R_{VT} \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi} = 100 \cdot \frac{V}{R_{VT} \cdot I \cdot \cos \varphi}$$

Si osserva che tale errore è tanto minore quanto più grande è il prodotto ($R_{VT} \cdot I$) rispetto alla tensione V del circuito, quindi questo schema è particolarmente indicato per circuiti con correnti elevate e tensioni piccole. In ogni caso l'errore si fa tanto più grande quanto più piccolo è il f.d.p. del carico.

L'amperometro indica una intensità di corrente I_m diversa da quella (I) assorbita dal carico. Posto:

$$\cos \varphi_m = \frac{P_m}{V \cdot I_m}$$

si dimostra che è :

$$I = \sqrt{(I_m - I_{VT} \cdot \cos \varphi_m)^2 + (I_{VT} \cdot \sin \varphi_m)^2} \cong I_m - I_{VT} \cdot \cos \varphi_m \text{ [A]}$$

§V.5.3 Misura di potenza reattiva, apparente e del fattore di potenza

Le condizioni di funzionamento di un impianto o di una macchina in corrente alternata vengono precisate indicandone, oltre la potenza attiva P [W], anche la potenza reattiva Q [VAR] e la potenza apparente S [VA] :

Nella pratica tecnica la potenza reattiva può essere misurata con misure dirette impiegando un varmetro, oppure con misure indirette impiegando un wattmetro, un voltmetro ed un amperometro. Criteri analoghi valgono per la misura del fattore di potenza, nel caso di misura diretta si dovrà impiegare un fasometro.

I metodi di misura diretti mediante varmetri e fasometri vengono riservati alle installazioni fisse da quadro, l'inserzione di questi strumenti è del tutto analoga a quella dei wattmetri.

Se la misura è del tipo indiretto si dovranno inserire un wattmetro, un voltmetro ed un amperometro. Di solito si adotta l'inserzione con le voltmetriche a valle, i calcoli da effettuarsi dopo le letture V_m [V], I_m [A], P_m [W] degli strumenti sono i seguenti :

$$S_m = V_m \cdot I_m \text{ [VA]}, \quad Q = Q_m = \sqrt{S_m^2 - P_m^2} \text{ [VAR]}$$

Il valore di potenza reattiva non richiede alcuna correzione in quanto la potenza reattiva impegnata dai circuiti voltmetrici è sempre trascurabile (data la loro natura prevalentemente ohmica).

Per quanto riguarda la potenza attiva sarà invece bene tenere conto dell'errore di autoconsumo, così che si avrà $P = P_m - P_{AV}$ [W].

La potenza apparente corretta ed il fattore di potenza si potranno così calcolare :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \text{ [VA]} , \quad \cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{tg}^2\varphi}} \quad \text{dove} \quad \text{tg}\varphi = \frac{Q}{P}$$

Il metodo di misura indiretto non permette in nessun caso di determinare il segno della potenza reattiva, deve perciò essere nota a priori la natura induttiva o capacitiva del carico. L'errore relativo risultante può raggiungere valori elevati essendo pari alla somma degli errori relativi commessi dai tre strumenti inseriti, se poi l'angolo di sfasamento è molto piccolo si può addirittura, a causa dell'errore, incorrere nell'assurdo fisico di una potenza apparente minore di quella reale o di un f.d.p. maggiore dell'unità.

La misura di tutte le grandezze indicate, nonché la registrazione dei valori istantanei può essere ordinariamente effettuata attraverso strumenti digitali portatili e da banco (*digitalizzatori*).



- Line Trigger
- ALT Triggering
- C.T. Facility

DIGITALIZZATORE PORTATILE E DA BANCO