

Appunti di Misure Elettriche

Appendice 1 - Generalità sui metodi di misura

Introduzione: misure relative ed assolute	1
Classificazione dei metodi di misura	1
Metodi a deviazione	2
Metodi di zero	3
Simboli per gli apparecchi di misura	6
Schema operativo di lavoro	7
Misure dirette ed indirette	9
Introduzione	9
Misure dirette	9
Strumenti di misurazione e controllo per grandezze elettriche.....	10
Introduzione	10
Classe di precisione di uno strumento indicatore	14
<i>Esempio</i>	15
<i>Incertezza relativa ed assoluta di indicazione</i>	16
Verifica di uno strumento indicatore.....	16
<i>Verifica per confronto di amperometri e voltmetri</i>	17
Altre cause di incertezza.....	18

INTRODUZIONE: MISURE RELATIVE ED ASSOLUTE

In generale, possiamo distinguere due tipi di misure:

- **misure relative:** la grandezza incognita X viene determinata tramite un confronto con una grandezza della stessa natura e di valore noto, detta **campione**;
- **misure assolute:** la grandezza incognita X viene dedotta dalla misura di altre grandezze fisiche fondamentali (come ad esempio avviene nella taratura dei campioni primari metrologici).

Noi ci occupiamo solo di misure relative, per cui determiniamo X tramite un confronto; tale confronto può essere di tipo **diretto** (quando utilizziamo direttamente un *campione*) oppure **indiretto** (quando utilizziamo strumenti di misura preventivamente *tarati* mediante un *campione*).

CLASSIFICAZIONE DEI METODI DI MISURA

E' possibile classificare i metodi di misura in vari modi:

- una prima possibilità è quella di classificarli in base alla grandezza da misurare: avremo perciò metodi di misura di tensione, di corrente, di sfasamento, di frequenza e così via;

- una seconda possibilità riguarda la precisione raggiungibile: avremo perciò metodi più precisi, come ad esempio quelli tipicamente usati in laboratorio, e quelli meno precisi, ad esempio quelli usati a livello industriale;

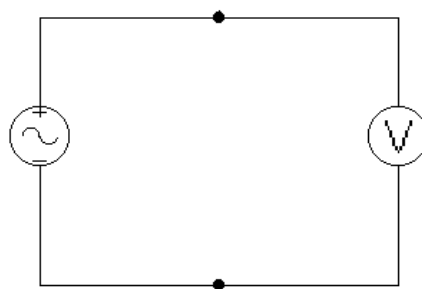
Una classificazione più importante può invece essere la seguente:

- **metodi di deviazione**: la grandezza incognita si determina osservando ciò che succede sul *display a lettura analogica* degli strumenti usati; si pensi tipicamente ad una *scala graduata* sulla quale si muove una *lancetta*: la misura viene effettuata leggendo la **deviazione** della lancetta rispetto alla *posizione iniziale di riposo*;
- **metodi di zero**: in questo caso, si deve realizzare una *condizione operativa di equilibrio*, per la quale cioè lo strumento di misura, inserito nel circuito in esame, presenti una **indicazione di zero** sul proprio display; questo consente di ricavare una *relazione tra la grandezza incognita X ed altre grandezze note*, da cui ricavare appunto X. Da notare che è sufficiente avere la condizione di zero anche in una sola parte del sistema (ad esempio una corrente nulla in un lato di un circuito).

Si intuisce come i metodi di deviazione siano abbastanza sbrigativi, al contrario dei metodi di zero, che invece sono più laboriosi e quindi richiedono più tempo. A fronte di questo, la precisione ottenibile dai metodi di deviazione è fortemente limitata da quella degli strumenti indicatori utilizzati (e quindi anche dalla loro taratura), mentre i metodi di zero consentono di ottenere misure molto accurate: infatti, al **rivelatore di zero** si richiede solo una sensibilità adeguata e la stabilità dello zero (per cui le misure non sono affette da errori di taratura dello strumento).

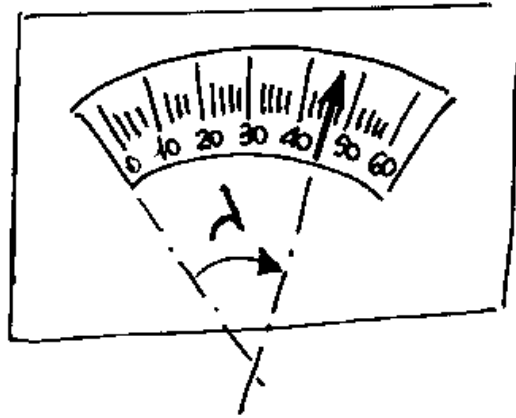
METODI A DEVIAZIONE

Supponiamo di voler misurare la tensione tra due punti di un circuito, usando un apposito **voltmetro**. Possiamo schematizzare la situazione della misura nel modo seguente:



La tensione (alternata) da misurare è rappresentata da un generatore di tensione alternata. I morsetti del generatore (corrispondenti ai due punti tra i quali si vuol fare la misura) vengono connessi ai morsetti dello strumento di misura, che in questo caso è un **voltmetro in corrente alternata**. Quest'ultimo è tipicamente un resistore con resistenza molto alta. La presenza di questa resistenza, sia pure molto alta, fa sì che nel circuito scorra una certa corrente, la quale fa sì che il display dello strumento indichi il valore della misura.

Supponiamo dunque che questo display sia **a lettura analogica**, composto da una **scala graduata** sulla quale si muove una **lancetta**:



Tale lancetta, che inizialmente si trova in **posizione di riposo** (in corrispondenza dello 0), si sposta di una certa quantità λ , che prende il nome di **deviazione**. Questa deviazione andrebbe teoricamente misurata in angoli, dato che la scala non è lineare ma curva, mentre invece si misurano gli archi. In particolare, prendendo come unità di misura la singola **divisione** (abbreviato **div.**), la deviazione viene espressa in divisioni. Ad esempio, nell'esempio riportato in figura, risulta

$$\lambda = 47 \text{ div.}$$

Ovviamente, per risalire, da questa lettura, al valore numerico della tensione, è necessario conoscere la cosiddetta **costante strumentale**, che consente sostanzialmente di associare un numero alla singola divisione. La *costante strumentale* è così definita:

$$k = \frac{V_{FS}}{\lambda_{max}} \left[\frac{V}{\text{div.}} \right]$$

La quantità V_{FS} è la massima quantità (in questo caso la massima tensione) che lo strumento può misurare e si chiama **portata** dello strumento (o anche **tensione di fondo scala**). La quantità λ_{max} è invece la deviazione corrispondente alla portata, ossia il numero massimo di divisioni misurabili; essa prende il nome di **deviazione massima**.

Allora, una volta letto il numero λ di divisioni, la misura si ottiene moltiplicando per la costante strumentale:

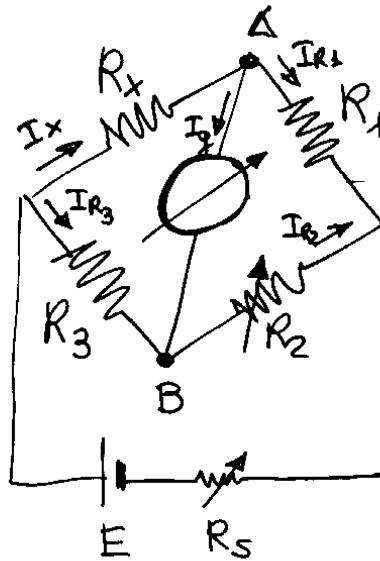
$$V = k \cdot \lambda = \frac{V_{FS}}{\lambda_{max}} \cdot \lambda \quad [V]$$

Nel nostro caso ad esempio, supponendo che la portata dello strumento sia $V_{FS}=60V$ e che il numero massimo di divisioni sia $\lambda_{max}=60\text{div.}$, si ottiene una costante strumentale di $1(V/\text{div.})$, il che significa che ogni divisione corrisponde ad $1V$, per cui, supponendo di aver letto $\lambda=47 \text{ div.}$ concludiamo che la misura di tensione è $V=k\lambda=47V$.

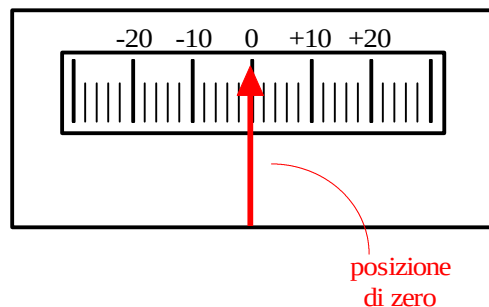
METODI DI ZERO

Per spiegare i concetti generali sui metodi di zero, facciamo un esempio spesso ricorrente in letteratura e cioè la **misura di resistenza tramite il ponte di Wheatstone**.

Il problema è dunque quello di misurare una resistenza incognita, che indichiamo con R_X . Per fare questo, si utilizza il seguente circuito:



In primo luogo, si costruisce un circuito resistivo disponendo 4 resistenze sui lati di un rombo. Una di queste resistenze è quella incognita R_X ; sono poi presenti due resistenze R_1 ed R_3 di valore ben noto (sono **resistenze di precisione**, fornite di *certificato di taratura*) ed una resistenza variabile R_2 (reostato). Il circuito viene alimentato disponendo sulla diagonale secondaria (riportata, per comodità, all'esterno del rombo e detta **diagonale di alimentazione**) tramite un generatore di tensione E (nota) in serie ad un'altra resistenza variabile. Sull'altra diagonale del rombo (quindi tra i nodi contrassegnati con A e B), detta **diagonale di rivelazione**, viene invece inserito un **galvanometro**, ossia uno strumento per la misura della corrente. questo galvanometro, come vedremo tra poco, dovrà fare da rivelatore di zero, ossia dovrà aiutarci ad individuare quella condizione operativa per cui i punti A e B sono alla stessa tensione (per cui nel galvanometro non scorre corrente); per questo motivo, è opportuno (anche se non strettamente necessario) che esso sia **a zero centrale**, ossia che il suo display (sempre a lettura analogica) presenti una scala del tipo seguente, con la posizione di riposo al centro:



Una volta avviata la tensione di alimentazione E sulla diagonale di alimentazione, bisogna regolare il valore di R_2 in modo tale che il galvanometro segni un passaggio di corrente nullo ($I_g=0$), il che corrisponde a dire che i nodi A e B sono alla stessa tensione. In questa situazione, la corrente I_X che scorre nella resistenza incognita coincide con la corrente I_{R1} che scorre in R_1 , così come la corrente I_{R3} che scorre nella resistenza R_3 coincide con la corrente I_{R2} che scorre in R_2 .

Quindi, abbiamo che:

$$I_g = 0 \longrightarrow V_A = V_B$$

$$I_X = I_{R1}$$

$$I_{R3} = I_{R2}$$

Applicando la LKT, otteniamo che

$$0 = V_{AB} = R_1 I_{R1} - R_2 I_{R2} = -R_X I_X + R_3 I_{R3}$$

da cui ricaviamo, considerando le uguaglianze tra le varie correnti, che

$$R_1 I_X - R_2 I_{R3} = -R_X I_X + R_3 I_{R3}$$

Sempre dalla relazione di prima, ricaviamo anche che

$$I_{R3} = \frac{R_X}{R_3} I_X$$

Dalle ultime due espressioni riusciamo ad esplicitare l'espressione di R_X in funzione delle altre resistenze:

$$R_X = \frac{R_1 R_3}{R_2}$$

Questa relazione analitica, nella quale ovviamente il valore di R_2 è quello che forniva la condizione $I_g=0$, ci consente dunque di ricavare R_X .

Facciamo osservare che la resistenza variabile R_S serve solamente ad impedire che nel circuito scorra una corrente eccessiva, nel caso in cui non si possa agire sulla tensione di alimentazione E .

SIMBOLI PER GLI APPARECCHI DI MISURA

Nella tabella seguente sono riportati alcuni simboli tipici che compaiono sugli apparecchi di misura e le corrispondenti descrizioni:

	corrente continua		meccanismo a bobina mobile
	corrente alternata monofase		con raddrizzatore
	corrente continua e alternata		con termocoppia non isolata
	corrente alternata trifase		con termocoppia isolata
	indice di classe		logometro a bobina mobile
	verticale		meccanismo a magnete mobile
	orizzontale		logometro a magnete mobile
	inclinata		meccanismo a ferro mobile
	tensione di prova 500 V		logometro a ferro mobile
	tensione di prova in kV		meccanismo elettrodinamico (senza ferro)
	derivatore esterno		logometro elettrodinamico (senza ferro)
	resistore esterno in serie		meccanismo elettrodinamico (con ferro)
	schermo magnetico		logometro elettrodinamico (con ferro)
	schermo elettrostatico		strumento ad induzione
	strumento astatico		logometro ad induzione
	attenzione! vedere istruzioni allegate		strumento a filo caldo
	regolazione dello zero		strumento bimetallico
	terminale di terra		meccanismo elettrostatico
	tensione di prova non standard		meccanismo a lamelle vibranti

Esempio						
---------	--	--	--	--	--	--

Strumento elettrodinamico - per corrente alternata monofase - fornito di schermo magnetico - classe 0,5 nel campo di temperatura da 10 a 30 °C e nel campo di frequenza da 40 a 100 Hz - funzionamento in posizione orizzontale - tensione di prova 2 kV

SCHEMA OPERATIVO DI LAVORO

E' opportuno dare dei cenni ai passi fondamentali da seguire quando si deve compiere una misura. Possiamo distinguere sostanzialmente due fasi della procedura:

- una **fase preliminare**, in cui progettiamo e successivamente montiamo il circuito di misura;
- una **fase di misura**, in cui eseguiamo la misura vera e propria.

A monte delle due fasi c'è ovviamente la scelta del metodo di misura da adottare, da cui poi consegue tutto il resto. Tale scelta va effettuata in base alla **grandezza da misurare** (quindi alla sua natura, alla localizzazione del punto in cui essa è presente, all'eventuale valore che si prevede essa assumerà durante la misura e così via), in base alla **precisione richiesta** (ad esempio si sceglierà un metodo di zero in caso di elevata precisione oppure un metodo di deviazione in caso di scarsa precisione) e, ovviamente, in base alla **disponibilità del laboratorio** (in termini sia di componenti sia di strumenti).

Altre considerazioni da fare, circa la scelta del metodo di misura, sono le seguenti:

- * in primo luogo, è bene scegliere un metodo di misura che garantisca una precisione abbastanza più grande di quella effettivamente richiesta;
- * in secondo luogo, bisogna valutare se e come il metodo adottato altera la grandezza da misurare: non dimentichiamo, infatti, che la sola inserzione di uno strumento di misura in un circuito può alterare, in modo più o meno rilevante, il funzionamento del circuito stesso;
- * ancora, è bene anche valutare le cause esterne che possono perturbare la misura: ci riferiamo, ad esempio, a correnti e flussi dispersi, a campi elettromagnetici esterni e così via;
- * non sono da trascurare nemmeno le norme di sicurezza, cui si deve necessariamente ottemperare: ad esempio, se sono in gioco delle tensioni molto elevate ($> 500V$), è necessario l'uso di *trasformatori di misura*, i quali isolano l'operatore dalla sorgente di alimentazione e adeguano le grandezze da misurare alle portate degli apparecchi di misura.

Fatte tutte queste considerazioni, si può passare alla fase preliminare:

- una volta scelto il metodo di misura, bisogna progettare il corrispondente **circuito di misura**; spesso, è opportuno che tale circuito contenga degli **interruttori**, in posizione facilmente manovrabile, che possano interrompere il circuito quando si dovessero presentare condizioni anomale di funzionamento; è ovviamente importante, in fase di progetto, il **dimensionamento** degli elementi del circuito ed è inoltre importante notare che la scelta del circuito dipende anche dagli strumenti di misura disponibili;
- successivamente, bisogna montare il circuito di misura; questo presuppone una serie di passi preventivi:
 - * predisporre dispositivi ed apparecchiature sul **banco di misura** e verificarne il corretto funzionamento;
 - * disporre gli strumenti nell'ottica della facile lettura;
 - * disporre vicini gli eventuali organi di regolazione e controllo, da manovrare possibilmente per mezzo di un unico operatore;
 - * scegliere i **cavi di collegamento** in base alle grandezze in gioco ed al tipo di misura;
 - * proteggere gli strumenti con opportuni **tasti di cortocircuito**, da usare in fase transitoria;

- * predisporre organi di regolazione dell'alimentazione (ad esempio resistenze variabili o autotrasformatori a rapporto variabile sotto carico;
- * infine, per sicurezza è bene montare per ultimo l'interruttore collegato alla sorgente di alimentazione;
- terminato e verificato il montaggio, si può procedere all'avvio dell'alimentazione: in questa fase, è bene disporre le portate degli strumenti ai valori massimi e, contemporaneamente, portare i **reostati di regolazione** sulla posizione "*tutto inserito*", in modo da limitare al massimo le tensioni e le correnti; successivamente, si potrà portare i reostati nella posizione necessaria ad ottenere le desiderate condizioni di funzionamento.

Si passa così alla fase di misura:

- una prima verifica da fare riguarda le letture fornite dagli strumenti di misura: in caso ci siano *letture anomale*, è bene interrompere l'alimentazione e ripetere le verifiche fatte in precedenza, in modo da eliminare le cause dell'anomalia;
- se tutte le letture sono regolari, si può eseguire la misura, raccogliendo i dati necessari dai vari strumenti utilizzati; è necessario evidentemente aver ben chiaro quali manovre dovranno essere eseguite e quali letture vanno effettuate. Inoltre, è bene annotare le *costanti strumentali* dei vari strumenti, in modo da concentrarsi solo sulle letture degli strumenti (in termini cioè di *deviazioni* rispetto alle posizioni di riposo), dalle quali ricavare solo successivamente le varie grandezze;
- tramite i dati ottenuti si può anche calcolare l'incertezza ad essi associata;
- infine, prima di spegnere l'alimentazione, è opportuno verificare i dati ottenuti siano più o meno in accordo alle previsioni; in caso affermativo, si può concludere la procedura, mentre, in caso negativo, bisogna ripetere in sequenza inversa le operazioni precedenti e poi ripetere nuovamente il procedimento.

Misure dirette ed indirette

INTRODUZIONE

Ci sono due possibilità di effettuare una misura:

- il **metodo diretto** di misura permette di ottenere il risultato della misura direttamente dalla lettura dello strumento utilizzato, senza la necessità di conoscere esplicitamente valori di altri parametri, eccetto ovviamente quelli delle grandezze che influenzano la misura stessa¹; una misura ottenuta con il metodo diretto è ovviamente detta *misura diretta*:
- si parla invece di **metodo indiretto** di misura quando il risultato della misura è ottenuto dalla combinazione di risultati di misure dirette su parametri funzionalmente legati al misurando. Parliamo perciò in questo caso di una *misura indiretta*. Ad esempio, una misura di resistenza si può ottenere misurando la tensione ai suoi capi e la corrente attraverso di essa e facendo poi il rapporto.

La maggior parte delle misure è ottenuta per via indiretta, quasi sempre per motivi di costo. Ad esempio, una misura di densità di una data sostanza potrebbe essere ottenuta direttamente tramite un apparecchio che si chiama *densimetro*, ma è decisamente più comodo misurare direttamente la massa ed il volume della sostanza e farne poi il rapporto.

MISURE DIRETTE

La figura seguente mostra le entità coinvolte in una misura diretta:



Il confronto del misurando con il campione può avvenire in vari modi:

- per **opposizione** (tipico esempio è quello di una bilancia a due piatti): il misurando X ed il campione C sono presenti entrambi ed entrambi sollecitano il sistema di misura; è necessario che il campione sia variabile con molta precisione: lo si fa variare fin quando lo strumento di misura indica equivalenza tra C ed X. L'incertezza legata a questo tipo di misura è legata essenzialmente alle variazioni delle condizioni ambientali (tipicamente la temperatura, ma

¹ Si tratta delle cosiddette grandezze di influenza, che saranno esaminate in seguito.

anche, per esempio, una variazione della forza di gravità nel caso di una misura effettuata con una bilancia);

- per **sostituzione**: in questo caso, si deve disporre, oltre che del campione C, di un'altra grandezza S di riferimento (della stessa natura del misurando X e del campione); si effettuano due confronti: il primo confronto avviene tra X ed S e bisogna variare S finché si manifesta l'equivalenza con X; il secondo confronto avviene invece tra C ed S e, in questo caso, bisogna far variare C fino ad ottenere equivalenza con S (che assume il valore ottenuto dal confronto precedente). Anche in questo caso, contano molto le condizioni ambientali, ma conta anche il tempo che intercorre tra i due successivi confronti;
- con **memoria della funzione di taratura** dello strumento: per prima cosa, si applica il campione C e si varia una **quantità di riferimento interno** S fino ad avere equivalenza con C; quando l'equivalenza è verificata, si memorizzano i risultati ottenuti in una apposita **memoria di taratura**; questa viene dunque a contenere una **funzione di taratura**, la quale consente, una volta applicato il misurando X e una volta fatto variare S per ottenere equivalenza con X, di fornire il valore di X. Anche in questo caso è molto importante il tempo intercorso tra la misura e la preventiva operazione di taratura.

Strumenti di misurazione e controllo per grandezze elettriche

INTRODUZIONE

In generale, gli strumenti di misurazione e controllo di grandezze elettriche, siano essi ad indicazione analogica o digitale, possono essere classificati in base ai seguenti criteri:

A SECONDA DELLA GRANDEZZA DA MISURARE

- **Amperometri**

Per misurazione di corrente continua e alternata. Fornisce la misura in Ampere (A), multipli o sottomultipli.

- **Voltmetri**

Per misurazione di tensioni continue e alternate, prevalentemente impiegati in Elettronica ed Elettrotecnica. Fornisce la misura in Volt (V), multipli o sottomultipli.

- **Ohmetri**

Per misurazione di resistenze elettriche. Fornisce la misura in Ohm (Ω), multipli o sottomultipli.

- **Wattmetri**

Per misurazione di potenza. Nel caso di misura di potenza attiva, fornisce il risultato in Watt (W), multipli o sottomultipli.

- Cosfimetri

Per misure del fattore di potenza (angolo di sfasamento tra tensione e corrente); prevalentemente impiegati in campo elettrotecnico o industriale

- Impedenzimetri

Per misure di impedenza. Possono essere:

- **Induttanzimetri**: per misure di induttanza
- **L-R-C meter**: per misure di induttanza, resistenza e capacità
- **Impedenzimetri vettoriali**: misurano modulo e fase di un'impedenza

- Multimetri e tester

Strumenti multifunzionali per misure di resistenze (DC e AC), tensione (DC e AC). A carattere analogico (*tester*) e digitale (*DMM, Digital MultiMeter*).

- Frequenzimetri

Per misure di frequenza, prevalentemente a carattere digitale.

- Modulometri

Per la misura dei parametri di un'onda modulata in ampiezza o frequenza.

- Distorsimetri (%-dB)

Effettuano la misura della distorsione lineare totale presente in un segnale (in origine sinusoidale) dovuta all'azione di circuiti elettrici ed elettronici non lineari

- Flussmetro magnetico (Wb)

Per misure di flusso magnetico

- Banco di Epstein

Per misurare le perdite nel ferro (nei lamierini ferromagnetici). Impiegato nel campo dell'elettromagnetismo.

- Registratori di curva di isteresi

Registrono l'andamento del vettore induzione magnetica in funzione del campo magnetico per materiali ferromagnetici.

- Analizzatori d'onda

Misurano l'ampiezza dei vari termini sinusoidali componenti un segnale complesso. L'analizzatore d'onda può essere considerato un voltmetro a sensibilità e selettività elevate, operante in una certa gamma di frequenza. Impiegato prevalentemente nello studio dei segnali.

- Analizzatori di spettro (Analizzatori di Fourier)

Impiegati per l'analisi di un segnale nel dominio della frequenza. Visualizza ed esegue misure dello spettro di ampiezza di un segnale. Differisce dall'analizzatore d'onda nella presentazione del risultato, che non appare più dall'indicazione di un voltmetro ma sullo schermo di un CRT. Gli analizzatori di Fourier agiscono in tempo reale e coprono solo il campo delle basse frequenze.

- Analizzatori di stati logici (Logic Analyzers)

Prevalentemente impiegati in campo digitale, servono per rilevare lo stato logico di un circuito digitale. Possibilità di visualizzare su un CRT svariati canali.

- Misuratore di resistenza di terra

Impiegati in campo elettrotecnico ed impiantistico per le misure di resistività del terreno o di resistenza del circuito di messa a terra di un impianto

- Misure di resistenza di isolamento

Sono prevalentemente megaohmetri impiegati per prove di isolamento su materiali isolanti (plastiche, fibre, resine vernici) o componenti elettrici (condensatori, interruttori, cavi, motori). Impiegati in campo industriale ed in fase di collaudo per prove di isolamento su impianti elettrici industriali.

- Strumenti automatici di misura

Sempre più adottati in campo non solo industriale, lavorano in connessione a PC, workstation, mainframe.

A SECONDA DEL MODO CON CUI È MISURATA LA GRANDEZZA

Indicato con X il valore della grandezza da misurare e con X' il valore di un suo parametro (per esempio, nel caso di una grandezza alternata, il valore efficace, di cresta, picco-picco, il valore medio) si hanno:

STRUMENTI INDICATORI

(CEI 85-3: GIUGNO 1991 STRUMENTI DI MISURA ELETTRICI, INDICATORI ANALOGICI E RELATIVI ACCESSORI):

Strumenti in DC e AC che misurano le grandezze elettriche per misura diretta (a deviazione) della grandezza incognita. Strumenti che in ogni momento presentano il valore della grandezza misurata senza registrarla. Si dividono in:

- STRUMENTI INDICATORI ANALOGICI

- La grandezza di uscita è funzione continua della grandezza di ingresso $Y=f(X)$.
- Il risultato della misura è fornito dalla lettura di uno strumento a deviazione e viene rilevato in concomitanza di una particolare condizione (misura di zero, di massimo, di risonanza).
- Nella gran parte dei casi (esempio per strumenti magnetoelettrici) la grandezza di uscita è direttamente proporzionale alla corrente, funzione della grandezza da misurare.

Gli strumenti indicatori analogici si suddividono a loro volta in:

1) INDICATORI ANALOGICI ELETTROMECCANICI

- Sfruttano fenomeni quali l'interazione tra grandezze elettriche e magnetiche che generano una forza o coppia meccanica.

- Essi constano di un organo, o equipaggio mobile, avente una posizione iniziale ben determinata di riposo, sollecitato a muoversi da una forza (**AZIONE**) funzione della grandezza da misurare, che si contrappone ad una forza resistente (**REAZIONE**), funzione dello spostamento la quale tende a ricondurlo nella posizione iniziale.
- Usati in DC e AC.

2) INDICATORI ANALOGICI ELETTRONICI

- Contengono apparati elettronici per il condizionamento del segnale di ingresso (attenuatori, filtri, raddrizzatori e amplificatori).
- Il segnale in continua così ottenuto costituisce l'ingresso di uno strumento elettromeccanico, anche a bobina mobile, che in questo caso è ancora il vero e proprio strumento di misura.
- Usati in DC e AC.

- STRUMENTI INDICATORI DIGITALI O NUMERICI

- La grandezza Y di uscita non è continua ma discreta, cioè varia per gradini finiti. Presentano il risultato in forma numerica.
- Per l'impiego di dispositivi digitali, è necessaria la conversione A/D del segnale.
- Una qualsiasi **grandezza elettrica** (tensione AC, corrente DC e AC, resistenza) e **non elettrica** (temperatura, pressione, accelerazione, spostamento, ...) è sempre ricondotta, mediante l'impiego di opportuni circuiti elettronici, al conteggio di un certo numero di eventi e alla misura di una tensione continua.
- Tali strumenti sono composti essenzialmente da due parti:
 - sistema attenuatore-convertitore A/D.
 - contatore di impulsi in un certo intervallo di tempo (*gating*).

REGISTRATORI

- Misurano la grandezza elettrica in oggetto, registrandola mediante un indice con punta scrivente su carta.
- In pratica essi forniscono l'andamento temporale di X o di un altro parametro.
- Sono anche detti strumenti a scrittura diretta.

INTEGRATORI

- Forniscono in uscita l'integrale nel tempo della grandezza X.
- Un esempio è il contatore di energia che effettua l'integrale della potenza nel tempo.

A SECONDA DEL MODO DI IMPIEGO

- Gli strumenti indicatori di misura a carattere industriale possono essere classificati in base alla qualità della misura e alla destinazione.
- Le norme CEI (85.3) hanno classificato gli strumenti elettrici industriali in 11 classi di precisione a ciascuna delle quali è assegnato un numero detto **indice di classe c**.

CLASSE DI PRECISIONE DI UNO STRUMENTO INDICATORE

Gli **strumenti indicatori** vengono suddivisi in *classi di precisione*; la **classe di precisione** di uno strumento è ciò che ne caratterizza l'incertezza: infatti, appartengono ad una determinata classe tutti gli strumenti rispondenti a determinate prescrizioni metrologiche che mantengono gli errori entro i limiti specificati. Vediamo di spiegarci meglio.

Sia dato un generico strumento indicatore. Il costruttore, nei certificati di taratura dello strumento, fornisce il valore della **classe di precisione** dello strumento stesso, definita dalla seguente relazione:

$$c = \frac{|dx_m|}{X_{FS}} \cdot 100$$

In questa formula, X_{FS} è l'**indicazione di fondo scala** dello strumento, mentre $|dx_m|$ è l'errore massimo assoluto di indicazione compiuto dallo strumento. Esplicitando proprio tale errore, scriviamo che

$$|dx_m| = \frac{c}{100} \cdot X_{FS}$$

Questa relazione ci dice che, una volta nota la classe di precisione, è possibile calcolare l'errore massimo assoluto di indicazione $|dx_m|$. Questo errore è importante in quanto il costruttore ci garantisce che, eseguita una qualsiasi misura tramite lo strumento, il corrispondente **errore assoluto di indicazione $|dx|$** risulta inferiore, per tutto il campo di misura, al valore **$|dx_m|$** :

$$|dx| = |X_m - X_v| \leq \frac{c}{100} X_{FS} = |dx_m|$$

dove, ovviamente, abbiamo indicato con X_m il *valore misurato* e con X_v il *valore vero* del misurando (o, tutt'al più, il valore misurato con uno strumento particolarmente accurato).

In base a questa relazione, dato che **$|dx_m|$** risulta essere un maggiorante dell'errore assoluto di indicazione, è più corretto parlare di **incertezza assoluta di indicazione**.

In pratica, quindi, *uno strumento rientra nei limiti della propria classe di precisione quando l'errore assoluto di indicazione $|dx|$ risulta inferiore, per tutto il campo di misura, all'errore assoluto $|dx_m|$ corrispondente alla classe dello strumento.*

Le norme CEI fissano i seguenti indici di classe normalizzati:

$$c = \quad 0.05 \quad 0.1 \quad 0.2 \quad 0.3 \quad 0.5 \quad 1 \quad 1.5 \quad 2 \quad 2.5 \quad 3 \quad 5 \quad (11 \text{ classi})$$

La determinazione dell'indice di classe avviene mediante **taratura** con strumento campione (o strumento preso come riferimento), come sarà descritto più avanti.

Ciò premesso, si hanno:

- **strumenti da laboratorio** (impiegati per misure di grande precisione):
 - campioni da laboratorio $c=0.05 - 0.01$
 - strumenti con buona precisione $c=0.2, 0.3$
 - strumenti con discreta precisione $c= 0.5$
- **strumenti di controllo** (Impiegati per controlli saltuari negli impianti e per tarare gli strumenti da quadro);
- **strumenti da quadro** (normalmente impiegati in installazioni fisse, servono per misure continuative sugli impianti e sono caratterizzati da precisione piuttosto modesta).

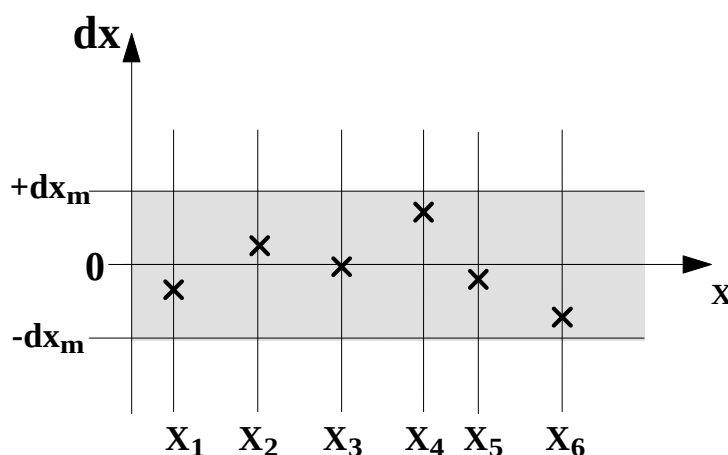
Volendo dare una interpretazione quantitativa di c , possiamo proprio basarsi sulla relazione $|dx_m| = \frac{c}{100} \cdot X_{FS}$: essa dice sostanzialmente che la classe di precisione rappresenta l'errore percentuale di indicazione che si commette per una lettura effettuata a fondo scala, ossia, in altri termini, l'errore assoluto che si commette, in ogni punto della scala, espresso in termini di percentuale del fondo scala.

Esempio

Facciamo adesso un esempio concreto per comprendere a pieno quanto detto. Supponiamo di avere 6 distinte misure della stessa quantità: $\{X_1, X_2, \dots, X_6\}$. Ad esse corrisponderanno altrettanti errori assoluti di indicazione $\{|dx_1|, |dx_2|, \dots, |dx_6|\}$. Allora, la classe dello strumento ci garantisce che sia verificata la seguente condizione:

$$|dx_i| \leq \frac{c}{100} X_{FS} = |dx_m| \quad \text{per } \forall i=1,2,\dots,6$$

La figura seguente chiarisce ulteriormente il concetto:



In ascisse sono riportati i valori X_i ottenuti nelle singole misure, mentre in ordinate sono riportati i corrispondenti errori assoluti di indicazione (che ovviamente non possiamo conoscere). La classe di precisione ci garantisce che tali errori siano maggiorati, in modulo, dalla quantità $|dx_m|$ e cioè che siano confinati all'interno della fascia indicata in figura. Questo spiega appunto perché $|dx_m|$ è rigorosamente una incertezza.

Incertezza relativa ed assoluta di indicazione

Naturalmente, dall'incertezza assoluta di indicazione possiamo anche passare alla **incertezza relativa di indicazione**:

$$\frac{|dx_m|}{X} = \frac{c \cdot X_{FS}}{100 \cdot X}$$

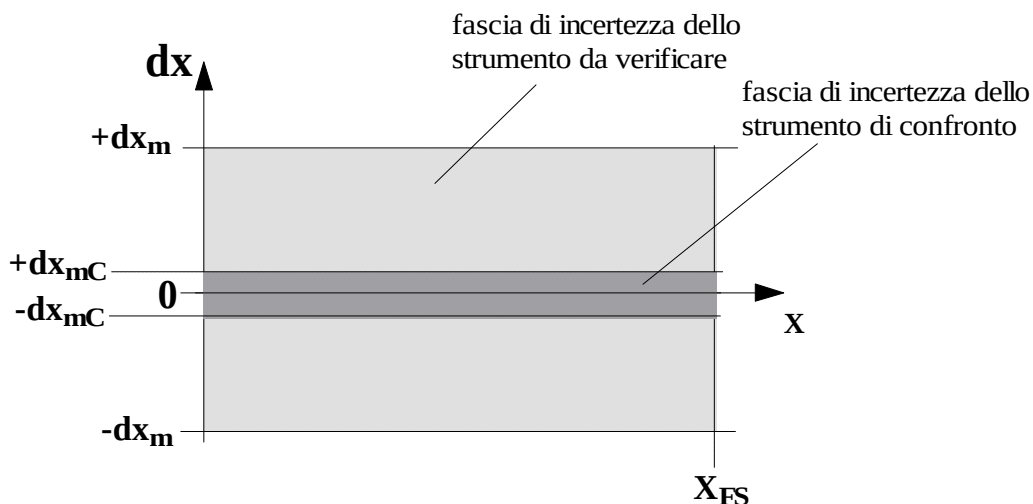
Questa quantità rappresenta una maggiorazione dell'errore relativo di indicazione: $\frac{|dx|}{X} \leq \frac{|dx_m|}{X}$

E' evidente che l'incertezza relativa di indicazione diminuisce all'aumentare del valore misurato X, il che significa che è bene effettuare, quando possibile, tutte le misure in condizioni di fondo scala.

VERIFICA DI UNO STRUMENTO INDICATORE

Verificare uno strumento di misura significa controllare che le indicazioni da esso fornite siano affette da errori che rientrano comunque nella classe di precisione dello strumento stesso. Ovviamente, tutti i parametri ambientali e certe caratteristiche della grandezza da misurare devono essere compresi entro limiti fissati dalle Norme o almeno dal costruttore.

Per determinare gli **errori di indicazione** di uno strumento, è necessario misurare contemporaneamente la stessa grandezza sia con lo strumento da verificare sia con un altro strumento (detto quindi **strumento di confronto**) di gran lunga migliore. In termini quantitativi, ciò significa che la fascia di incertezza dello strumento di confronto deve essere di gran lunga inferiore rispetto a quella dello strumento da verificare:



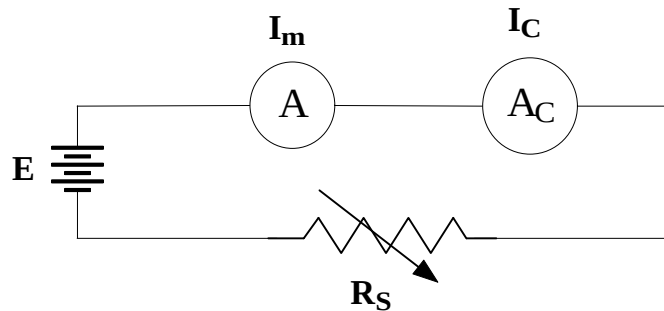
Dato che

$$|dx_m| = \frac{c}{100} X_{FS} \qquad |dx_{mC}| = \frac{c_C}{100} X_{FS,C}$$

è evidente che, a parità di fondo scala, dovremo usare uno strumento di confronto con classe di precisione sufficientemente inferiore a quella dello strumento da verificare. La Norma stabilisce che si debba prendere **$c_C \leq c/5$** .

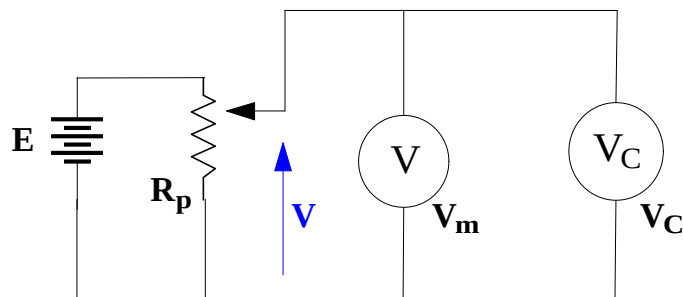
Verifica per confronto di amperometri e voltmetri

Supponiamo di dover verificare l'accuratezza di un amperometro A , tramite confronto con un amperometro campione A_C . Il circuito da usare è il seguente:



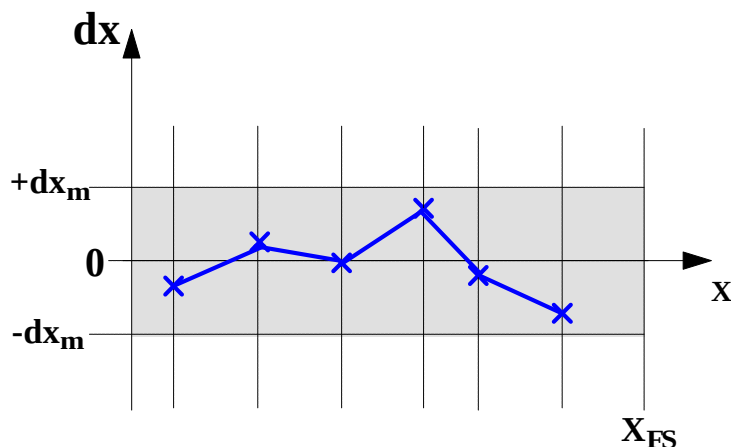
Abbiamo dunque posto in serie i due amperometri, nei quali fluisce quindi la stessa corrente, prodotta da un generatore di tensione E in serie ad un resistore variabile R_S . Da notare che è opportuno fare in modo che la portata dell'amperometro di confronto sia maggiore di quella dell'amperometro sotto verifica.

Discorso perfettamente duale dovremo fare per verificare l'accuratezza di un voltmetro V :



In questo caso, la tensione da far misurare ai due voltmetri, posti in paralleli, è quella ottenuta tramite un potenziometro R_p collegato ad una batteria E .

Sia nel caso del voltmetro sia nel caso dell'amperometro, dovremo dunque procedere ad una serie di misure, avendo cura di variare ogni volta la quantità da misurare, da un valore minimo generico ad un valore massimo leggermente inferiore alla portata. Successivamente, dovremo controllare che tutte le misure ottenute rientrino nella fascia di incertezza dello strumento da verificare:



Qui entra in gioco lo strumento di confronto: infatti, non potendo mai conoscere con precisione l'errore assoluto dx commesso in ciascuna misura x_m , potremo solo farne una stima, adottando, come stima del valore vero x_v del misurando, la misura x_c fornita dallo strumento di confronto:

$$dx = x_m - x_v \cong x_m - x_c$$

Stimati, quindi, gli errori assoluti corrispondenti a ciascuna misura, dovremo verificare che essi risultino sempre inferiori, in modulo, a $|dx_m| = \frac{c}{100} X_{FS}$. Se così non fosse, se cioè quella linea spezzata dovessero andare al di fuori della fascia di incertezza, dovremmo aumentare la classe di precisione, ossia **declassare lo strumento**.

ALTRE CAUSE DI INCERTEZZA

Come si dirà anche in seguito, l'**errore di indicazione** commesso da uno strumento analogico di misura (cioè il fatto che tale strumento, per ragioni varie, non possa mai fornire il valore esatto del misurando) non è l'unica causa di incertezza di misura. Possiamo infatti citare almeno altri due errori tipici:

- in primo luogo, è sempre presente l'**errore di parallasse**, determinato dal fatto che l'indice dello strumento non si muove mai sullo stesso piano della scala graduata, per cui l'operatore vede comunque una posizione sbagliata dell'indice sulla scala;
- in secondo luogo, anche nell'ipotesi che l'errore di parallasse sia nullo, non è comunque possibile, a causa dei limiti dell'apparato visivo dell'uomo e dello spessore non infinitesimo dell'indice, determinare esattamente la posizione dell'indice stesso sulla scala. Si parla in questo caso di **errore di lettura**.

Mentre l'errore di parallasse è difficile da quantificare, per quello di lettura esistono dei valori convenzionali. Indichiamo con λ l'indicazione fornita dallo strumento (in termini di numero di divisioni) e con $d\lambda$ l'errore assoluto di lettura (sempre in termini di divisione). L'errore relativo di misura è allora

$$e_\lambda = \frac{d\lambda}{\lambda}$$

Non essendo possibile, come al solito, conoscere con precisione $d\lambda$, si fa una maggiorazione di questo errore, ossia si introduce una **incertezza relativa di lettura**:

$$u_\lambda = \frac{d\lambda}{\lambda}$$

In questa formula, solo apparentemente uguale alla precedente, il valore di $d\lambda$ è assunto convenzionalmente pari a **0.5** oppure a **0.2** in base alle specifiche fornite dal costruttore. In particolare, se le tacchette della scala graduata sono molto vicine tra loro, prenderemo il valore 0.2, mentre invece in caso contrario prenderemo 0.5.

Appare evidente, a questo punto, che *solo una lettura accurata di quanto indicato dal display dello strumento possa garantire che l'unica incertezza di misura sia quella di indicazione*. In altre parole, se effettuiamo la nostra lettura in modo da minimizzare sia l'errore di parallasse sia quello di lettura, potremo affermare che l'unica incertezza è quella legata alla classe di precisione dello strumento, vale a dire

$$|dx_m| = \frac{c}{100} X_{FS} \text{ (incertezza assoluta di indicazione).}$$

Autore: **SANDRO PETRIZZELLI**
e-mail: sandry@iol.it
sito personale: <http://users.iol.it/sandry>
succursale: <http://digilander.iol.it/sandry1>