

TA & TV di misura

a cura di Zeno Martini

E' presente [1 commento](#) a questo documento.



Scopo e funzioni

I trasformatori di misura e di protezione riproducono, per via elettromagnetica, una corrente od una tensione alternate, secondo un determinato fattore di scala e con un trascurabile errore di fase. Si impiegano quando le correnti in gioco superano qualche decina di ampere e le tensioni qualche centinaio di volt. L'obiettivo è ridurre i problemi di smaltimento di calore ed i forti campi magnetici che possono disturbare gli strumenti, ed isolare gli strumenti dal resto dell'impianto, garantendo l'incolumità di chi ne viene in contatto. All'avvolgimento primario è applicata la grandezza da misurare. Al secondario gli strumenti di misura o le apparecchiature di protezione.

Diciamo subito che i trasformatori di misura hanno esigenze diverse dai trasformatori di protezione. Essi devono garantire una corretta misura della grandezza controllata (TA, la corrente; TV, la tensione) per un intervallo di valori che supera di poco il valore nominale. Inoltre devono anche impedire che gli strumenti alimentati possano essere danneggiati da valori eccessivi di corrente e di tensione. Ad esempio un TA fornisce un valore al secondario direttamente proporzionale alla corrente primaria nel campo di correnti che va dal 10% al 120% della corrente nominale. Per valori superiori satura rapidamente. In tal modo eventuali correnti primarie dovute ad un cortocircuito, non danneggiano gli strumenti collegati al secondario. I TV ed i TA di protezione devono invece fornire una indicazione corretta della grandezza controllata anche per valori di questa molto più elevati di quello nominale. E' proprio per sovratensioni e sovracorrenti che devono garantire un'accettabile precisione affinché l'intervento delle protezioni sia corretto. Se si alimentasse un relè di protezione con un TA di misura, la corrente secondaria in occasione di un cortocircuito, per effetto della saturazione del nucleo, fornirebbe un valore molto inferiore a quello che si ricaverebbe dalla diretta proporzionalità e la protezione di massima corrente non interverrebbe. Ci sono in commercio trasformatori che svolgono entrambe le funzioni, di misura e di protezione: essi hanno però nuclei ed avvolgimenti separati.

Da ricordare che, come impone l'art. 5.2.4 della CEI 11-1, se non esiste uno schermo da collegare a terra che separa primario e secondario, il secondario di TA e TV deve essere collegato a terra con un conduttore di sezione 4 mm^2 ($2,5 \text{ mm}^2$ se meccanicamente protetto). La messa a terra si rende necessaria per evitare che gli strumenti alimentati dal

secondario assumano un potenziale rispetto a terra per accoppiamento capacitivo, dovuto alla ripartizione della tensione totale verso terra dell'impianto tra la capacità esistente tra gli avvolgimenti e la capacità verso terra. Le norme di riferimento sono le seguenti

Per i TA

- CEI EN 60044-1 - Class. CEI 38-1 - Fascicolo 5706 - Anno 2000
- CEI EN 60044-1/A1 - Class. CEI 38-1;V1 - Fascicolo 6089 - Anno 2001
- CEI EN 60044-1/A2 - Class. CEI 38-1;V2 - CT 38 - Fascicolo 6978 - Anno 2003
- CEI EN 60044-6 - Class. CEI 38-6 - CT 38 - Fascicolo 5660 E - Anno 2000 - Prescrizioni per i trasformatori di corrente per protezione in regime transitorio

Per i TV

- CEI EN 60044-2 - Class. CEI 38-2 - Fascicolo 6090 - Anno 2001
- CEI EN 60044-2/A2 - Class. CEI 38-2;V1 - Fascicolo 6979 - Anno 2003

Per i Trasformatori combinati

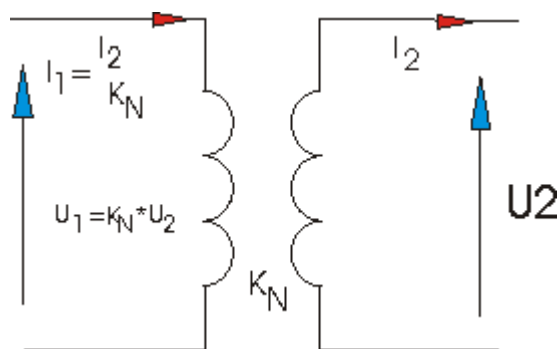
- CEI EN 60044-3 - Class. CEI 38-4 -
- CT 38 - Fascicolo 7055 - Anno 2003

Per i TV elettronici

CEI EN 60044-7 - Class. CEI 38-7 - CT 38 - Fascicolo 6277 - Anno 2001

Richiami sulla teoria del trasformatore

Se i trasformatori fossero ideali sarebbe superfluo distinguere tra TA e TV. Il trasformatore ideale si comporta in maniera perfetta sia rispetto alle correnti che alle tensioni, indipendentemente dai valori che esse possono assumere, quindi dai carichi alimentati.



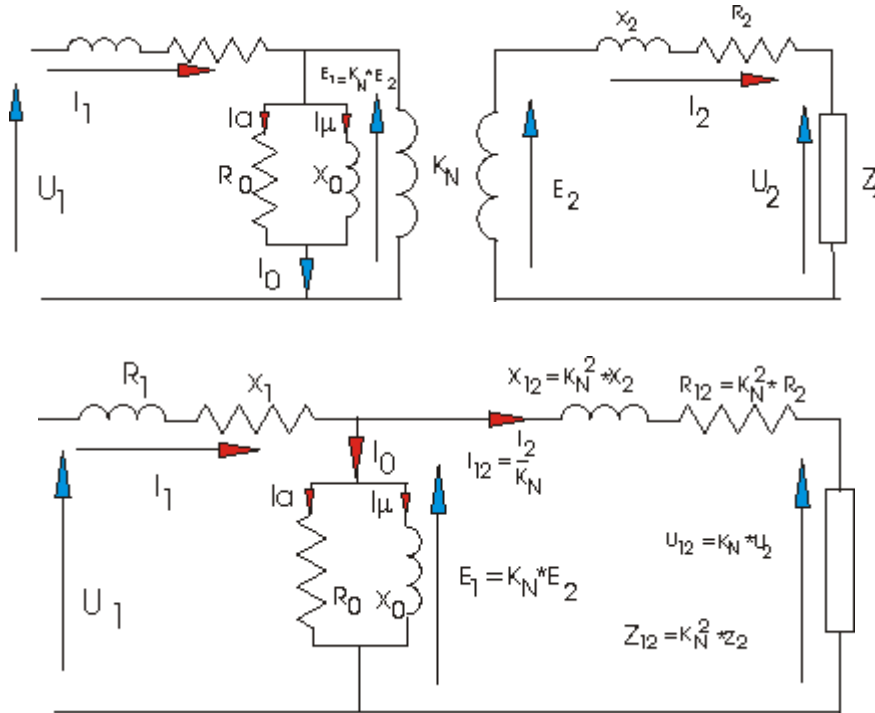
Il trasformatore ideale è illustrato in figura. Esso è caratterizzato da un rapporto di trasformazione nominale K_N tra la tensione nominale primaria U_{1n} e la tensione nominale secondaria U_{2n} , che coincide con il rapporto spire dei due avvolgimenti, che definisce in modo univoco il legame tra correnti e tensioni primarie e secondarie.

$$K_N = U_{1n} / U_{2n} = N_1 / N_2$$

$$U_1 = K_N * U_2$$

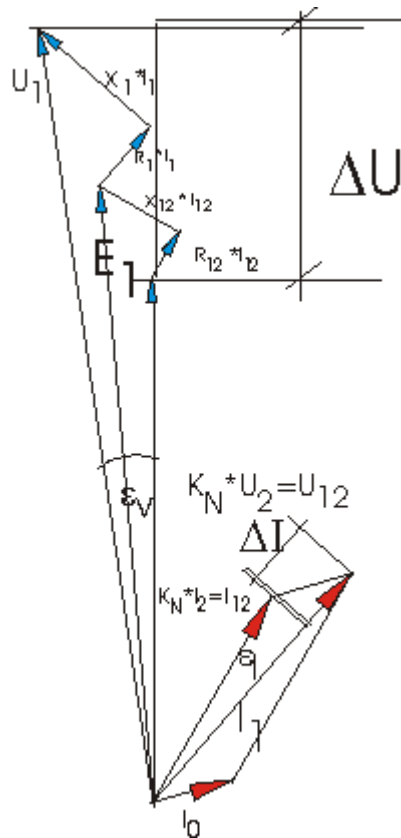
$$I_1 = I_2 / K_N$$

La realtà però è diversa ed il trasformatore deve essere in schematizzato come nelle figure seguenti



Si passa dal primo al secondo schema eliminando il trasformatore ideale, che nel primo evidenzia la separazione galvanica tra primario e secondario, tenendo conto delle relazioni che esso impone alle grandezze elettriche. Nel riporto al primario la corrente secondaria è divisa per il rapporto di trasformazione; le tensioni secondarie ne sono moltiplicate; le impedenze moltiplicate per il quadrato del rapporto. Le impedenze rappresentano: le resistenze degli avvolgimenti, R_1 , R_2 ; le loro reattanze di dispersione, X_1 ed X_2 ; la reattanza di magnetizzazione, X_0 , responsabile del flusso nel nucleo; la resistenza di simulazione delle perdite nel ferro R_0 . Z_2 è l'impedenza del carico che, possiamo anticiparlo, nel caso dei trasformatori di misura, è chiamato *prestazione*.

Nel trasformatore reale, come mostra il diagramma vettoriale, le tensioni e le correnti primarie e secondarie non sono esattamente legate al rapporto di trasformazione. Le relazioni del trasformatore ideale sono approssimazioni di quelle reali. Le differenze tra le indicazioni che fornirebbe un trasformatore ideale e quelle effettive del trasformatore reale sono dette errori. Sia per le correnti che per le tensioni, esistono errori di modulo e di fase. Cioè se K_N è il rapporto nominale, applicando le relazioni del trasformatore ideale in una qualsiasi condizione di carico, ai moduli di tensione e corrente, si commettono, rispettivamente, gli errori ΔU e ΔI . Non solo: tensioni e correnti primarie non sono esattamente in fase con le rispettive grandezze secondarie. Sono, rispettivamente, gli errori di rapporto e di fase. Esistono differenze di fase indicate con ϵ_v ed ϵ_i . Il grafico vettoriale della figura che segue illustra il significato delle grandezze descritte. Gli errori di fase sono convenzionalmente considerati positivi se la grandezza secondaria nel diagramma è in anticipo su quella primaria. Nel caso della figura ϵ_i è positivo, ϵ_v è negativo.



La realizzazione dei trasformatori di misura e protezione è effettuata in modo da ridurre al minimo gli errori che interessano: quelli relativi alla tensione per i TV, alle correnti per i TA. E' stabilito anche il campo di valori entro cui gli errori non superano quelli massimi dichiarati, che definisce la classe di precisione dei trasformatori.

L'**errore di rapporto** $\eta\%$ è definito in modo formalmente identico sia per i TA che per i TV.

$$\eta\% = \Delta U \cdot 100 = 100 \cdot \frac{K_N \cdot U_2 - U_1}{U_1}$$

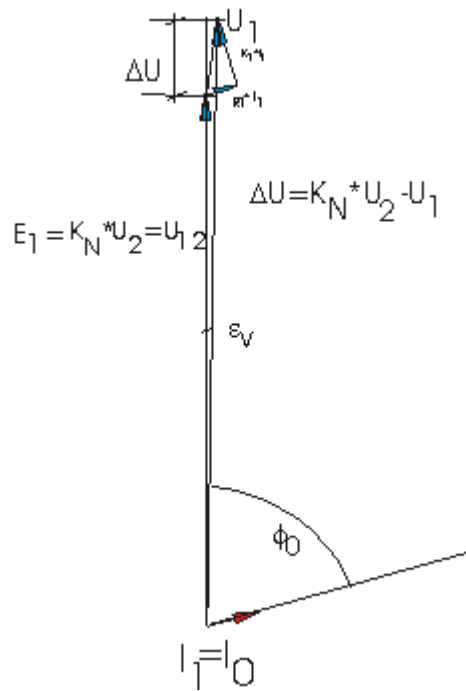
$$K_N = \frac{U_{1r}}{U_{2r}}$$

$$\eta\% = \Delta I \cdot 100 = 100 \cdot \frac{K_N \cdot I_2 - I_1}{I_1}$$

$$K_N = \frac{I_{1r}}{I_{2r}}$$

TV

Per i TV interessa che sia precisa la tensione. La condizione in cui è minimo l'errore tra le tensioni U_1 e $K_N \cdot U_2$ si ha quando il trasformatore lavora a vuoto: $I_2=0$, come si può vedere nel diagramma, essendo molto piccola la corrente a vuoto $I_0=I_1$.



Collegando strumenti al secondario il TV si discosta dalla condizione a vuoto.

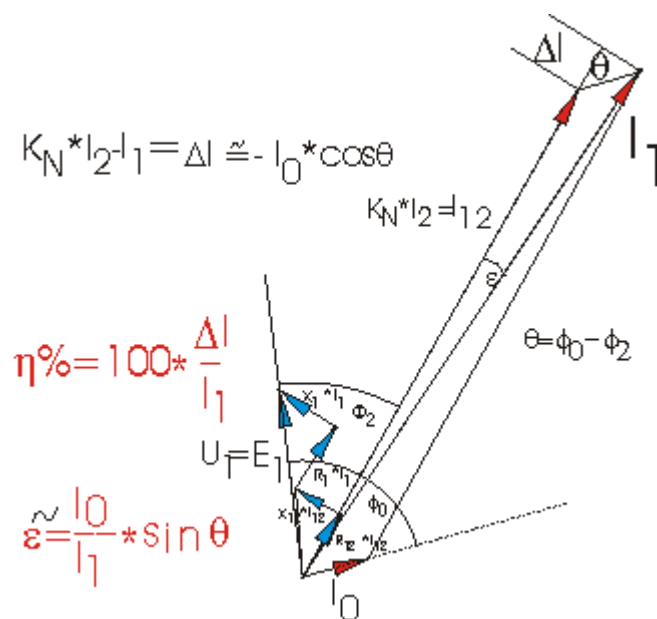
Sia l'errore di tensione che di angolo dipendono dunque dalla corrente a vuoto che introduce una caduta sempre presente, e dal carico alimentato dal secondario che introduce cadute variabili. Entrambe le cadute dipendono, oltre che dalle correnti, dal valore dell'impedenza longitudinale degli avvolgimenti ($R_1 + jX_1$, $R_2 + jX_2$). Quindi è necessario che questa sia il più piccola possibile. Anche la corrente a vuoto deve essere bassa, cioè l'impedenza a vuoto il più alta possibile. A parità di induzione di lavoro massima B_M , quindi di campo magnetico H_M , e a parità di lunghezza, l , del circuito magnetico la corrente a vuoto I_m è tanto più bassa quanto maggiore è il numero di spire N ($H_M \cdot l = 1,41 \cdot N \cdot I_m$)

Non è superfluo osservare che il rapporto nominale K_N non coincide necessariamente con il rapporto spire. Anzi generalmente si ha $N_1 / N_2 < K_N$ in quanto in questo modo si introduce un errore opposto a quello di rapporto, quindi una compensazione dello stesso.

E' importante ricordare che il TV lavorando praticamente a vuoto dà luogo ad elevate correnti in caso di cortocircuito ai morsetti secondari per cui deve essere protetto, ad esempio con fusibili.

TA

Per i TA interessa che sia precisa la corrente. La condizione in cui è minimo l'errore tra le correnti I_1 e $K_N \cdot I_2$ (qui occorre ricordare che per i TA il rapporto di trasformazione è dato dal rapporto tra corrente nominale primaria e nominale secondaria, l'inverso di quello per le tensioni) si ha quando il trasformatore lavora in cortocircuito: $U_2 = 0$, come si può vedere nel diagramma, essendo molto piccola la corrente I_0 rispetto alla corrente I_1 .



Anche per i TA, e per le stesse ragioni dei TV, il rapporto nominale K_N non coincide necessariamente con il rapporto spire. Generalmente si ha $N_2 / N_1 < K_N$ per una compensazione dell'errore di rapporto. Stabilire l'entità degli errori è un problema costruttivo. Gli errori di rapporto e di fase definiscono la classe dei trasformatori. I limiti fissati dalle norme IEC sono riassunti nella successiva tabella. In essa sono anche riportate le caratteristiche dei trasformatori di protezione che, come si è già detto, devono rispondere ad esigenze diverse dai trasformatori di misura.

Come detto la prestazione è il carico che può essere applicato ai secondari senza che siano superati gli errori di rapporto e di fase. Per i TA si hanno in genere $S_r = (2,5; 5; 10; 15; 30)$ VA. Per i TV: $S_r = (10; 25; 50)$ VA. Per i TA gli errori sono dati anche in funzione della effettiva corrente primaria rapportata al valore nominale I_r . I valori delle correnti nominali dei TA sono $I_r = (10; 20; 100; 500; 1.000; 5.000; 10.000)$ A. I valori normalizzati al secondario sono (5; 2; 1) A. Il rapporto di trasformazione è il rapporto tra la primaria nominale e la secondaria nominale.

Poiché i TA lavorano in pratica in condizioni di cortocircuito occorre assolutamente evitare che i morsetti secondari rimangano aperti; a primario alimentato la tensione secondaria raggiunge valori elevati, che, oltre a danneggiare l'isolamento del secondario, possono costituire un notevole pericolo per gli operatori. Devono pertanto essere protetti da dispositivi che, in caso di sovratensione, chiudano i morsetti secondari in cortocircuito.

Il primario dei trasformatori di corrente può essere costituito dallo stesso conduttore di linea da una sbarra passante entro il nucleo magnetico di tipo toroidale. In alcuni modelli, [come questo](#), si può avvolgere il conduttore primario intorno al nucleo toroidale, una o due volte variando in tal modo il rapporto di trasformazione.

TA di MISURA								
	$(I/I_r) \cdot 100; S = (25..100)\% S_r, \cos \phi = 0,8 R$							
	5%	20%	100%	120%	5%	20%	100%	120%
Classe	h%				ε_r (centiradiani)			
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	0,45	0,24	0,15	0,15
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	0,9	0,45	0,3	0,3
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	2,7	1,35	0,9	0,9

1,0	3,0	1,5	1,0	1,0	5,4	2,7	1,8	1,8
0,2S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,9	0,45	0,3	0,3
0,5S	1,5	0,75	0,5	0,5	2,7	1,35	0,9	0,9
TA di Protezione								
Classe	h%(+/-)		e ₁ (centiradianti) (+/-)		Errore composto %			
5P	1		1,8		5			
10P	3				10			
TV di MISURA $S=(25..100)\%S_r$, $\cos\phi=0,8R$								
Classe	h% (+/-)			e _v (centiradianti) (+/-)				
0,1	0,1			0,15				
0,2	0,2			0,3				
0,5	0,5			0,6				
1	1			1,2				
3	3			Nessuna prescrizione				
TV di Protezione								
	h%			e _v (centiradianti)				
3P	3			3,5				
6P	6			7				

In caso di cortocircuiti in rete i TA devono essere in grado di sopportare correnti elevate per tempi brevi. I parametri che consentono di valutarlo sono la corrente termica di breve durata e la corrente dinamica. La durata convenzionale è di 1 secondo. La corrente dinamica, generalmete è 2,5 volte quella termica e può essere anche 100 volte la corrente nominale.

Per i TV le tensioni nominali primarie sono i valori nominali delle reti U, oppure $U/1,73$ se devono essere inseriti tra fase e terra. Le tensioni secondarie normalizzate sono: 100; $100 / 1,73$; $100 / 3$. Anche i TV devono resistere a condizioni anomale, ad esempio guasto a terra di una fase, secondo un fattore di tensione definito dalla seguente tabella.

Fattore di tensione (U_{max}/U_r)	Durata	1. Collegamento primario 2. condizioni di messa a terra della rete
1,2	continua	1. Tra le fasi o tra il centro stella del trasformatore e la terra 2. qualsiasi rete
1,2	continua	1. Fase-terra 2. neutro efficacemente a terra

1,5	30 s	
1,2	continua	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fase-terra 2. neutro non efficacemente a terra con eliminazione automatica del guasto a terra.
1,9	30 s	
1,2	continua	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fase-terra 2. neutroisolato o collegate a terra con bobina di estinzione senza eliminazione automatica
1,9	8 h	

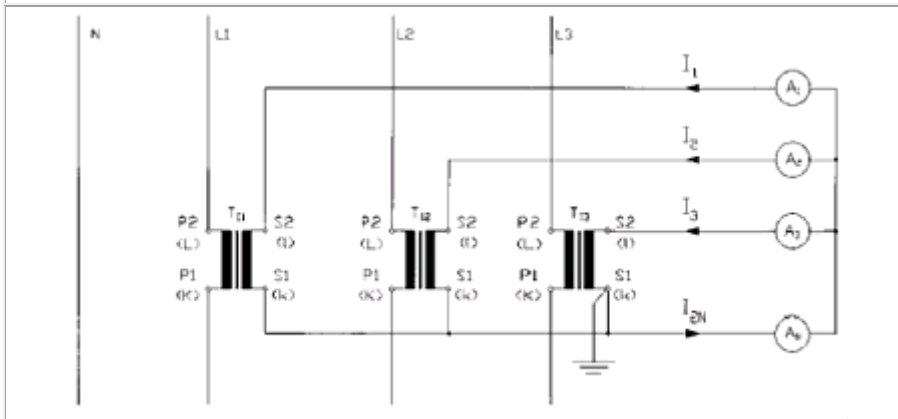
I dati principali sono, come al solito, riportati su una targa con l'indicazione della norma in base a cui sono stati progettati. I morsetti primari e secondari devono essere contrassegnati. Nella seguente tabella è riportato un esempio di targa di designazione di un TA della ABB con doppio rapporto di trasformazione, predisposto sia per la misura che per la protezione.

<p>ABB 1234567890</p> <p style="text-align: center;">TPU 40.13</p> <p style="text-align: right;">50 Hz</p> <p>200-400/1/1 A</p> <p>1S1-1S2 5VA cl. 0.5 FS 5 1S1-1S3 10VA cl. 0.5 FS 5 2S1-2S2 5VA cl. 5P15 2S1-2S3 10VA cl. 5P15</p> <p>12/28/75 kV 50(1s)/125 kA</p> <p>2002 IEC 60044-1 E TCM 212/95-2150</p>	
1234567890	serial number
TPU 40.13	transformer type code
50Hz	rated frequency
200-400/1/1 A	rated transformer ratio
1S1-1S2	terminal marking for core number 1, first tap
1S1-1S3	terminal marking for core number 1, second tap
5VA	rated output (burden)
0.5, 5P	accuracy classes
FS5	instrument security factor
12/28/75 kV	highest voltage for equipment / power-frequency withstand voltage / rated lightning-impulse voltage
IEC 60044-1	referred standard(s)
50(1s)/125kA	rated short time thermal current (thermal time) / rated dynamic current
2002	year of production
E	temperature class
<ul style="list-style-type: none"> • Il TA ha dunque due nuclei, uno per gli avvolgimenti di misura ed uno per la protezione. 	

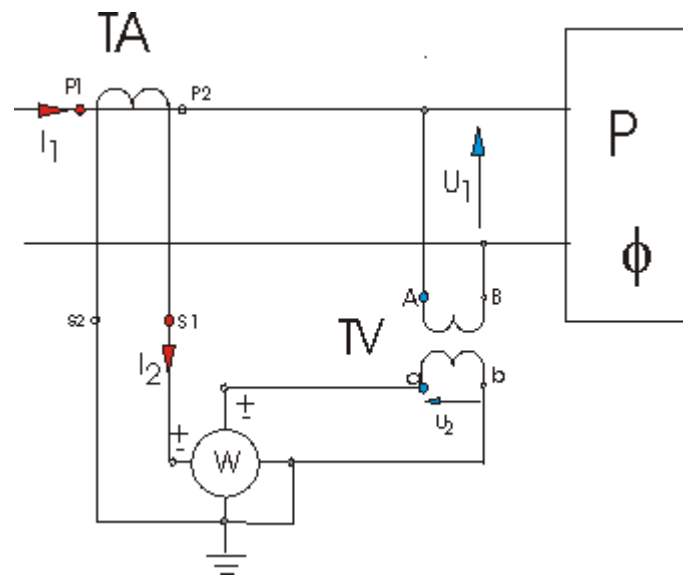
- Il fattore di sicurezza FS indica fino quante volte la corrente nominale può superare il valore nominale senza che gli strumenti collegati subiscano danneggiamenti.
- I terminali secondari per la misura sono, per i due rapporti, nS1-nS2 ed nS1-nS3 con n=1 ed n=2 rispettivamente per indicare il nucleo di misura e quello di protezione.
- La classe di precisione è 0,5 per la misura e 5P per la protezione.
- Le prestazioni per le due portate di 5 VA e 10 VA
- Il livello di isolamento è definito dalle tensioni: massima d'esercizio=12 kV; tensione di tenuta a frequenza di 50 Hz per 60 secondi: 28 kV; tensione di tenuta ad impulso (1,2/50 ms): 75 kV
- La corrente termica di breve durata che il l'avvolgimento primario del TA può sopportare per 1 secondo quando il secondario è in cortocircuito è di 50 kA, mentre la corrente dinamica, che è il valore di cresta massimo che può assumere la corrente primaria è di 125 kA

Esempio di inserzione per la misura di correnti in un sistema trifase con neutro.

NB: le immagini sono tratte dal catalogo ABB riportato nel link.



Misura di potenza su carico monofase



La figura rappresenta lo schema di inserzione di un wattmetro tramite TA e TV. La corretta inserzione richiede il rispetto dei morsetti contrassegnati del wattmetro con quelli contrassegnati dei trasformatori. In pratica i puntini di TA e TV sono collegati al \pm del wattmetro.

Il carico di potenza P e fattore di potenza $\cos\phi$ è sottoposto alla tensione U_1 ed assorbe la corrente I_1 . Quindi si ha $P = U_1 I_1 \cos\phi$. Al wattmetro arriva la potenza $P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos\phi_2$ ed il valore misurato è $P_{mis} = P_2 \cdot (1 \pm \eta_W)$ avendo indicato con η_W l'errore di classe del wattmetro.

P_2 è affetta dall'errore introdotto dai trasformatori di misura che coinvolge sia l'errore di modulo sia quello di fase.

• Zoom +/-
• Espandi/Contrai
• Nuova finestra

$$P_2 = U_1 \cdot (1 \pm \eta_U) \cdot I_1 \cdot (1 \pm \eta_I) \cdot \cos(\phi \pm \varepsilon_U \pm \varepsilon_I) =$$

$$= U_1 \cdot I_1 \cdot (1 \pm \eta_U \pm \eta_I \pm \eta_I \cdot \eta_U) \cdot (\cos\phi \cdot \cos(\pm \varepsilon_U \pm \varepsilon_I) - \sin\phi \cdot \sin(\pm \varepsilon_U \pm \varepsilon_I))$$

• Zoom +/-
• Espandi/Contrai
• Nuova finestra

$$\eta_P = \frac{P_2 - P_1}{P_1} = (1 \pm \eta_U \pm \eta_I \pm \eta_I \cdot \eta_U) \cdot (\cos(\pm \varepsilon_U \pm \varepsilon_I) - \tan\phi \cdot \sin(\pm \varepsilon_U \pm \varepsilon_I)) - 1 \cong$$

$$\cong (1 \pm \eta_U \pm \eta_I) \cdot (1 - \tan\phi \cdot (\pm \varepsilon_U \pm \varepsilon_I)) - 1 \cong$$

$$\cong \pm \eta_U \pm \eta_I - \tan\phi \cdot (\pm \varepsilon_U \pm \varepsilon_I)$$

Considerando la situazione più sfavorevole il definitivo errore che si aggiunge a quello di classe propri del wattmetro è dato da

$$\eta_P = \eta_U - \varepsilon_U \cdot \tan \phi + \eta_I - \varepsilon_I \cdot \tan \phi$$

L'errore è tanto maggiore quanto più basso è il fattore di potenza del carico. E' per questo considerato un errore limite di potenza. Ad esempio per un TV di classe 0,2 deve essere

$$e_{\max,P} = |\eta_U - \varepsilon_U \cdot \tan \phi| \leq 0,2$$

Bibliografia

- **Misure elettriche** di Giuseppe Zingales ed Cleup
- **Metodi e Strumenti**, Giuseppe Zingales, ed UTET
- **Dispense di Misure Elettriche**, A. Bossi, P. Malcovati
- **Dispense di Misure sui sistemi di potenza** di Nicola Locci