

Le misure di energia elettrica

Ing. Marco Laracca

Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione
Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale

Misure di energia elettrica

La misura dell'energia elettrica ha una importanza pratica fondamentale, in quanto costituisce la base dei rapporti commerciali tra il produttore e l'utente

Misure di energia elettrica

La misura dell'energia elettrica ha una importanza pratica fondamentale, in quanto costituisce la base dei rapporti commerciali tra il produttore e l'utente

L'energia elettrica è il lavoro che un sistema elettrico è in grado di compiere

Misure di energia elettrica

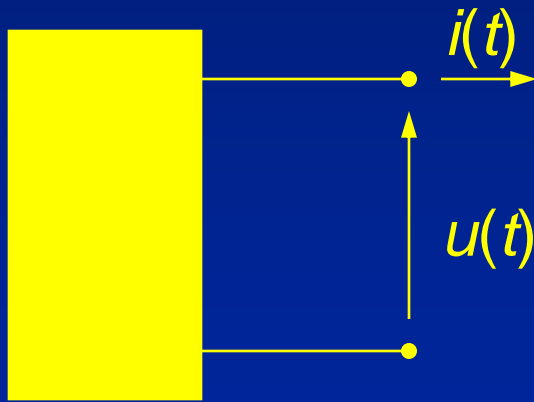
La misura dell'energia elettrica ha una importanza pratica fondamentale, in quanto costituisce la base dei rapporti commerciali tra il produttore e l'utente

L'energia elettrica è il lavoro che un sistema elettrico è in grado di compiere

Cosa si intende per lavoro elettrico?

Il lavoro elettrico

Un sistema elettrico ai cui morsetti è localizzata una tensione $u(t)$ e da cui fluisce una corrente $i(t)$ è in grado di compiere, nel tempo infinitesimo dt , il lavoro elettrico:

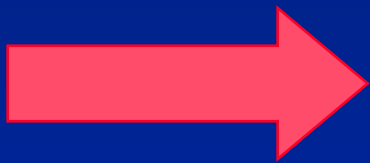


$$dE = u(t) \cdot i(t) \cdot dt$$

Il lavoro elettrico

Il lavoro elettrico compiuto al tempo t , a partire da un istante generico t_0 si ottiene integrando l'equazione:

$$dE = u(t) \cdot i(t) \cdot dt$$



$$E(t) = \int_{t_0}^t u(\tau) \cdot i(\tau) \cdot d\tau$$

L'energia elettrica nei sistemi alternati sinusoidali

La quasi totalità della distribuzione dell'energia elettrica avviene oggi in regime alternato sinusoidale

L'energia elettrica nei sistemi alternati sinusoidali

La quasi totalità della distribuzione dell'energia elettrica avviene oggi in regime alternato sinusoidale.

Tensione e corrente sono rappresentate da funzioni sinusoidali nel tempo:

$$u(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(2\pi ft)$$

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(2\pi ft + \varphi)$$

L'energia elettrica nei sistemi alternati sinusoidali

Il prodotto di tensione e corrente fornisce la potenza istantanea (lavoro nell'unità di tempo):

$$p(t) = u(t) \cdot i(t)$$
$$= U \cdot I \cdot \cos \varphi - U \cdot I \cdot \cos(4\pi f t + \varphi)$$



termine costante

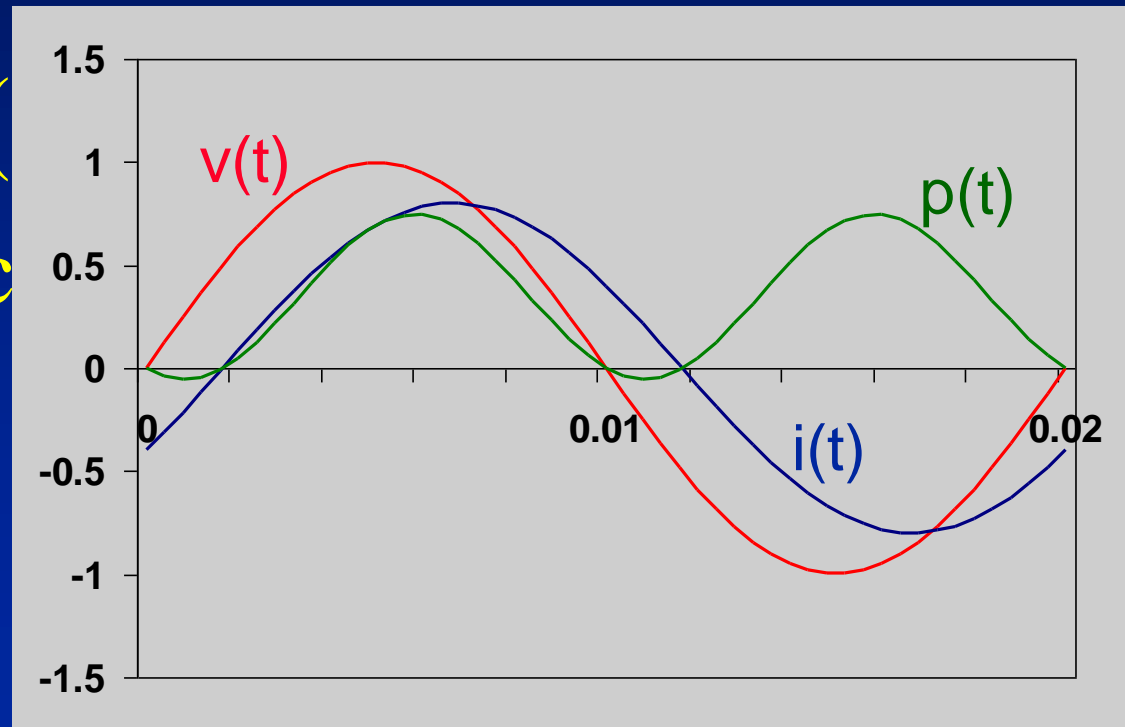


termine oscillante

L'energia elettrica nei sistemi alternati sinusoidali

Il prodotto di tensione e corrente fornisce la potenza istantanea (lavoro nell'unità di tempo):

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \\ = U \cdot I \cdot \cos(\phi)$$



L'energia elettrica nei sistemi alternati sinusoidali

Il prodotto di tensione e corrente fornisce la potenza istantanea (lavoro nell'unità di tempo):

$$\begin{aligned} p(t) &= u(t) \cdot i(t) \\ &= U \cdot I \cdot \cos \varphi - U \cdot I \cdot \cos(4\pi ft + \varphi) \end{aligned}$$

Una parte è costante e rappresenta il lavoro medio che il sistema è in grado di compiere nel periodo.

Questa parte viene detta **potenza attiva**, e l'energia associata **energia attiva**.

L'energia elettrica nei sistemi alternati sinusoidali

Il prodotto di tensione e corrente fornisce la potenza istantanea (lavoro nell'unità di tempo):

$$\begin{aligned} p(t) &= u(t) \cdot i(t) \\ &= U \cdot I \cdot \cos \varphi - U \cdot I \cdot \cos(4\pi ft + \varphi) \end{aligned}$$

Una parte è oscillante a valore medio nullo e rappresenta la potenza istantanea scambiata con i campi magnetico o dielettrico.

Il suo valore massimo viene detto **potenza reattiva**.

Il fattore di potenza

*Il **$\cos\varphi$** è il coseno dell'angolo φ di sfasamento tra la corrente e la tensione in un sistema elettrico in corrente alternata*

In un sistema puramente resistivo (detto anche ohmico) lo sfasamento è nullo, per cui si ha $\cos\varphi = 1$.

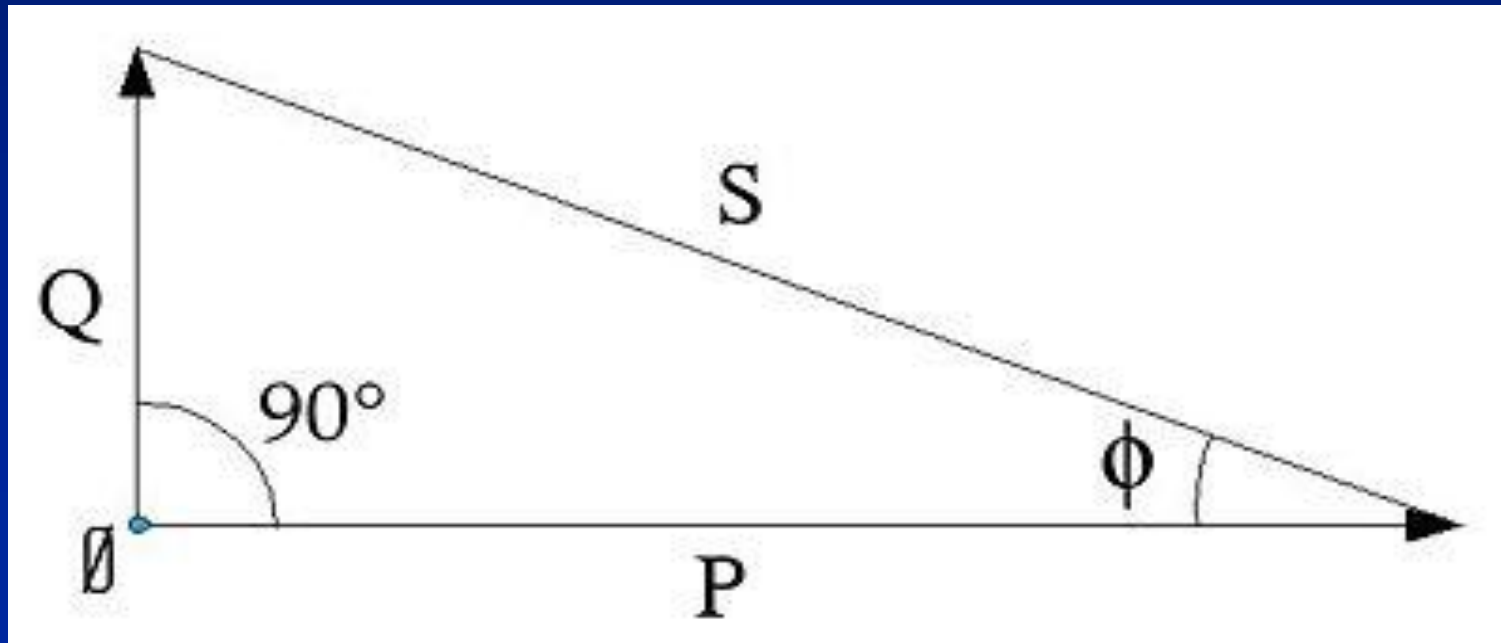
In un sistema di tipo induttivo reale, ovvero con componente resistiva non nulla (es. un motore elettrico, un alimentatore per lampada fluorescente), l'angolo di sfasamento è compreso tra 0 e $\pi/2$ (sfasamento in ritardo).

In un sistema con componente capacitiva lo sfasamento è compreso tra 0 e $-\pi/2$ (sfasamento in anticipo). In entrambi i casi il valore di $\cos\varphi$ si abbassa da uno fino a raggiungere teoricamente il valore zero.

Il fattore di potenza

Il $\cos\phi$ è anche definito **fattore di potenza** in quanto equivale al rapporto tra la **potenza attiva (P)** e la **potenza apparente (S)**.

Un $\cos\phi$ di valore unitario significa che la potenza apparente corrisponde alla potenza attiva e la potenza reattiva è nulla. Poiché la potenza reattiva è sempre indesiderata, un valore di $\cos\phi$ è tanto più indesiderato quanto più si abbassa da uno.



Misure di energia elettrica

$p(t)$ = termine costante + termine oscillante



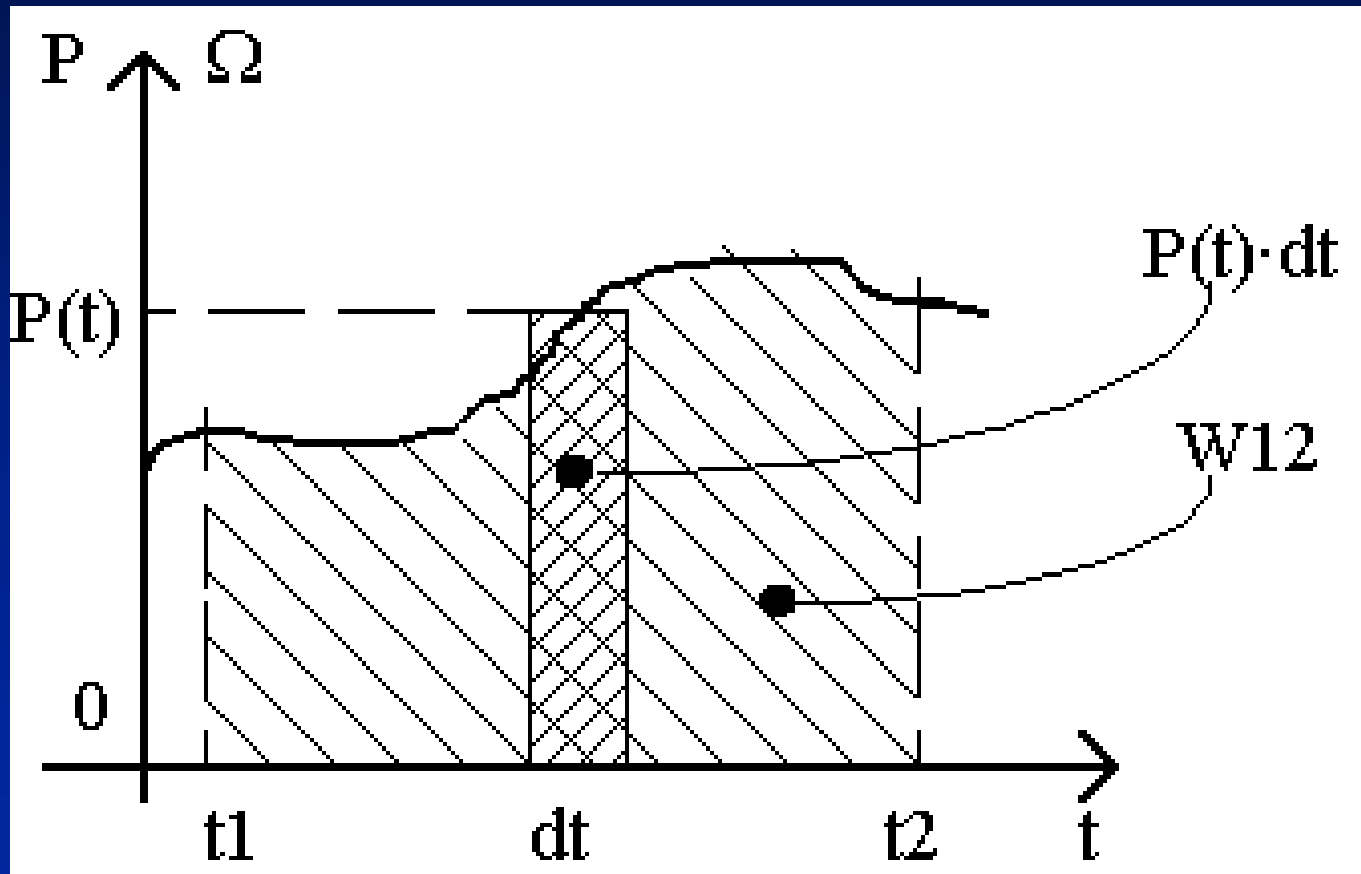
GENERATORE  CARICO GENERATORE  CARICO

La misura del lavoro elettrico effettivamente utilizzato (o generato) da un elemento di rete si riconduce quindi alla misura dell'**energia attiva**, cioè all'integrale nel tempo della **potenza attiva**:



$$E_A(t) = \int_0^t P(\tau) d\tau$$

Misure di energia elettrica



$$W_{12} = \int_{t_1}^{t_2} P(\tau) d\tau$$

MISURARE L'ENERGIA ELETTRICA

La misura dell'energia elettrica prevede la valutazione dei seguenti parametri:

- La tensione (o le tensioni in sistemi trifase)
- La corrente (o le correnti in sistemi trifase)
- Il fattore di potenza (solo in corrente alternata)
- Il tempo di integrazione o di misura.

Nei casi in cui i livelli di tensione e corrente siano rispettivamente maggiori di centinaia di Volt e decine di Ampere, si ricorre a trasduttori, per ridurre proporzionalmente tali valori. Si parla in questi casi di TRASFORMATORI DI MISURA.

Misure di energia elettrica

Lo strumento che viene utilizzato per la misura dell'energia prende il nome di ***contatore di energia elettrica*** (contatore).

Misure di energia elettrica

Lo strumento che viene utilizzato per la misura dell'energia prende il nome di **contatore di energia elettrica** (contatore).

L'unità di misura universalmente adottata è il kilowattora (kWh):

$$1 \text{ kWh} = 3600 \text{ kJ}$$



Il kJ è una unità molto piccola.

Contatore di Energia

Esistono due tipologie fondamentali di CONTATORI DI ENERGIA



Dinamico

Statico



Contatore di Energia

Esistono due tipologie fondamentali di CONTATORI DI ENERGIA



Dinamico



Statico



Contatore di Energia

Esistono due tipologie fondamentali di

CONTATORI DI ENERGIA



Dinamico

Statico

Generalmente il contatore è inserito indirettamente a mezzo RIDUTTORI



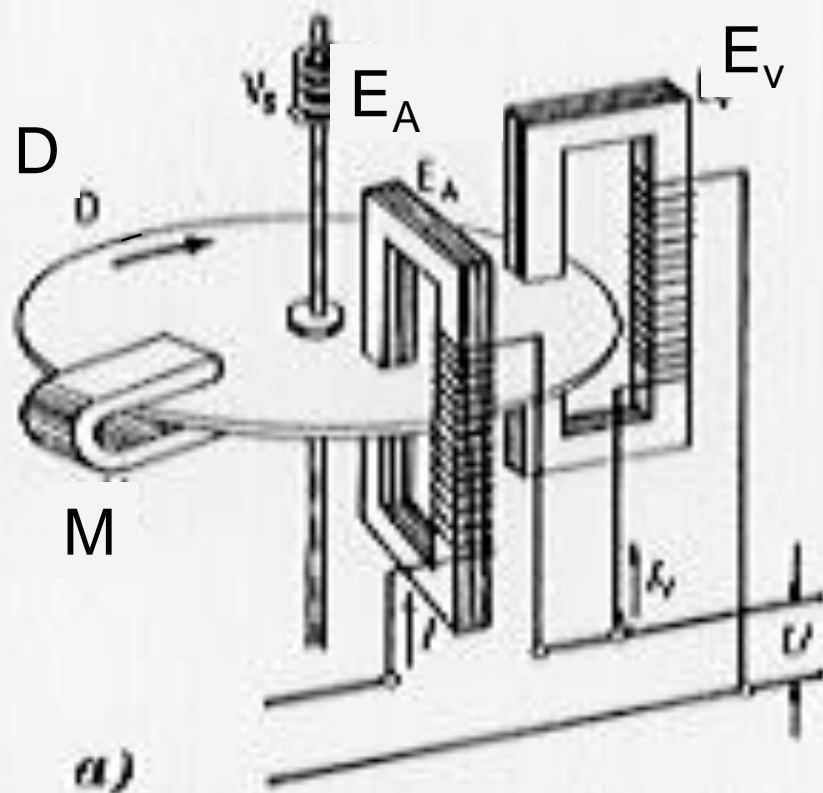
TA

TV

TA+TV+ CONTATORE = COMPLESSO DI MISURA

Misure di energia elettrica

contatore monofase a induzione



D: disco di alluminio

E_V : elettromagnete
voltmetrico

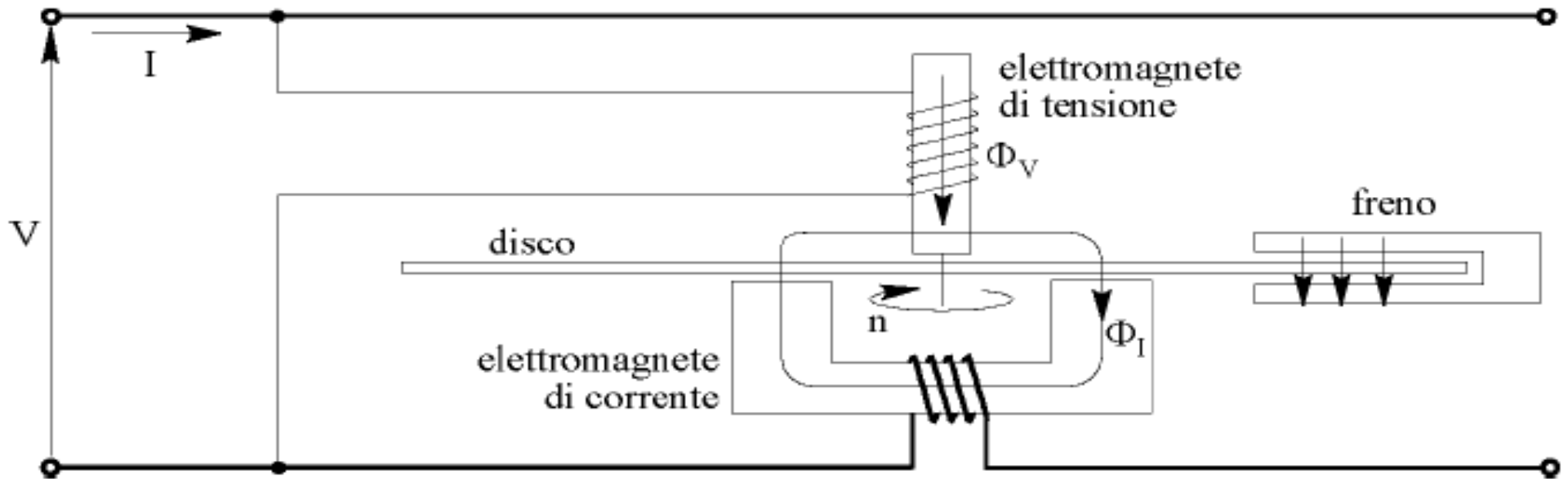
E_A : elettromagnete
amperometrico

M: magnete permanente

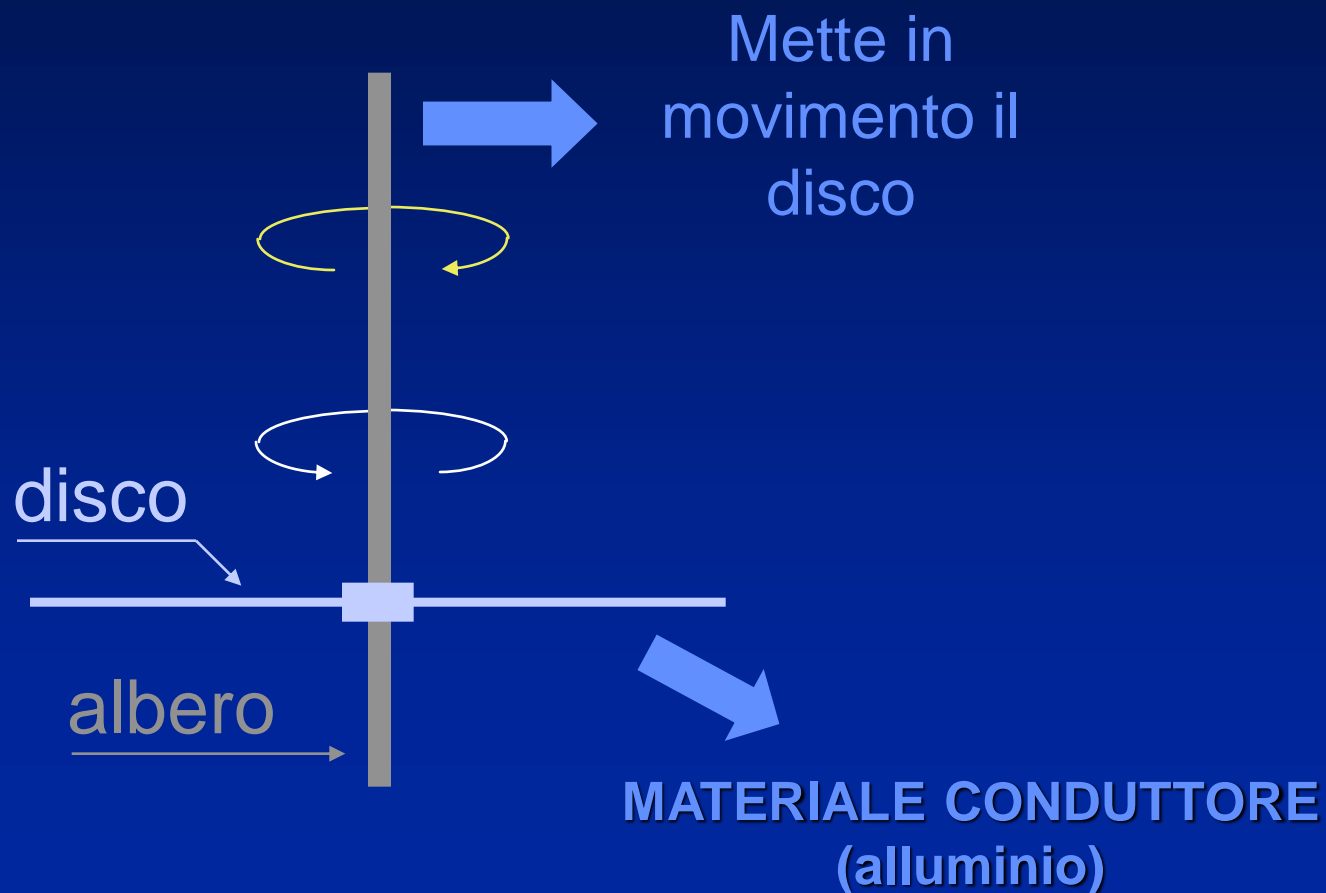
Misure di energia elettrica

contatore monofase a induzione

D: disco di alluminio

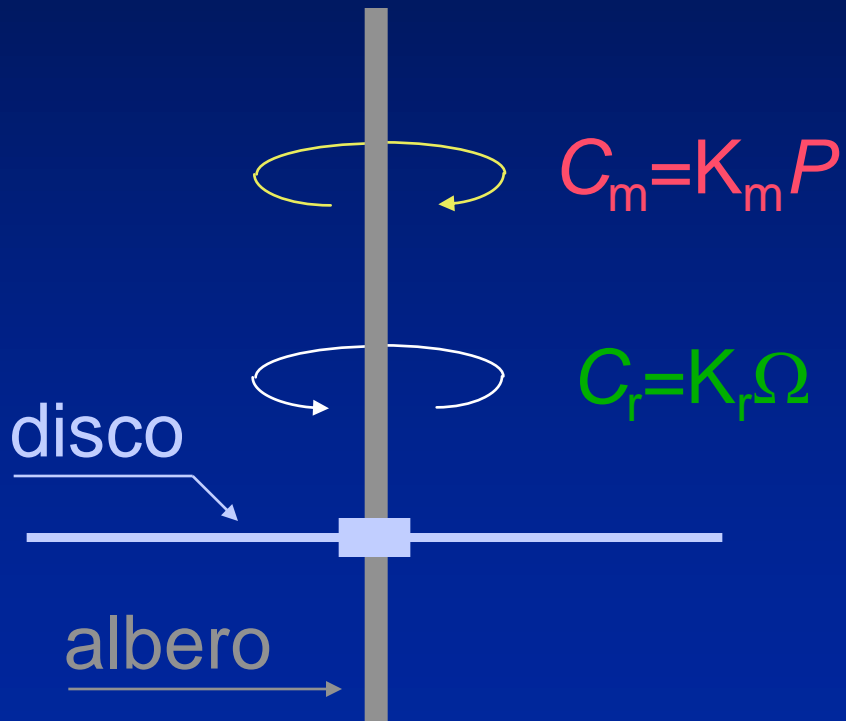


Misure di energia elettrica contatore monofase a induzione



Misure di energia elettrica contatore monofase a induzione

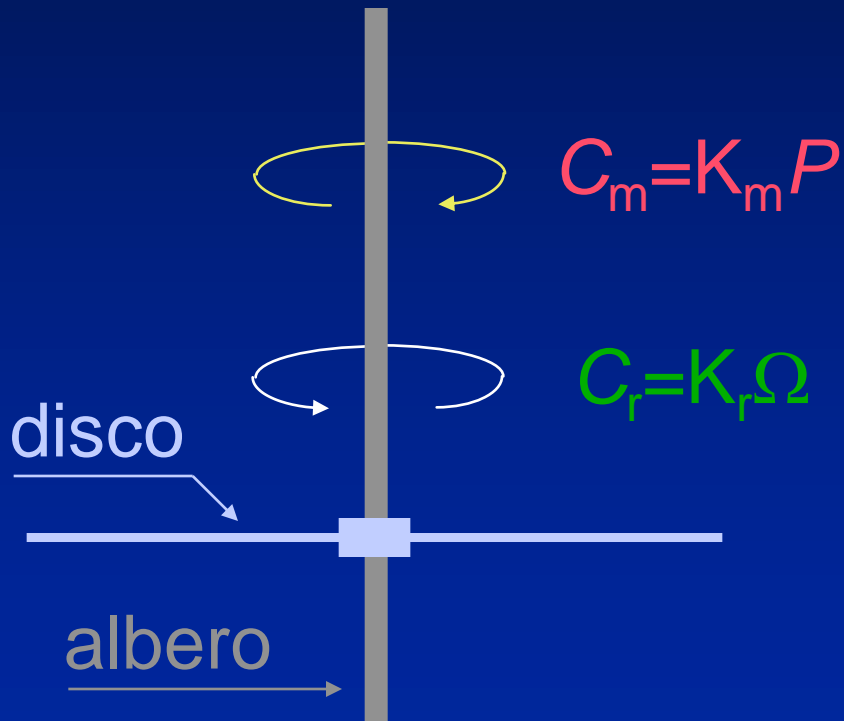
Principio di funzionamento:



C_m : coppia motrice
proporzionale alla
potenza attiva P

Misure di energia elettrica contatore monofase a induzione

Principio di funzionamento:

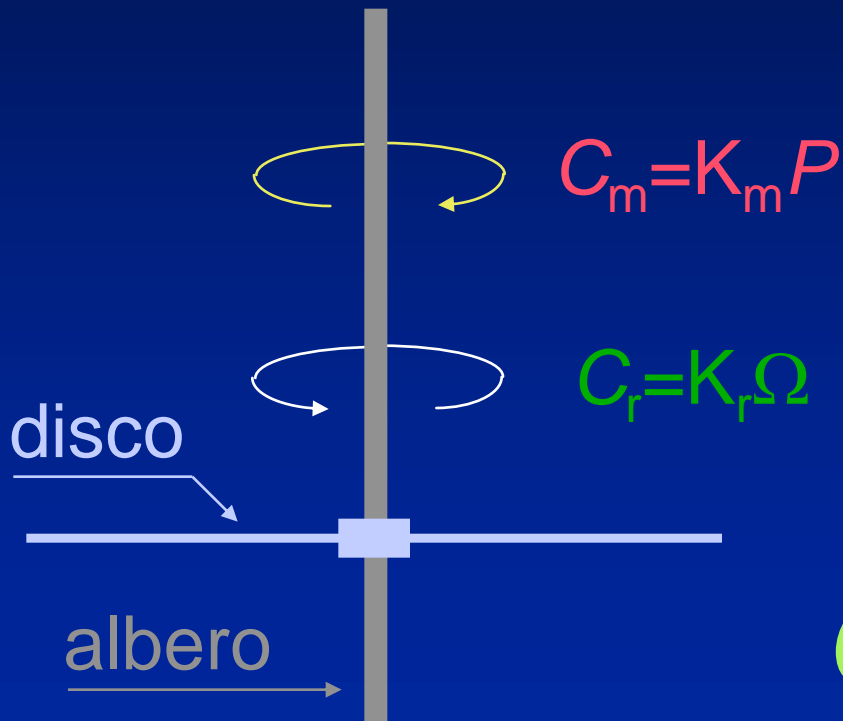


C_m : coppia motrice
proporzionale alla
potenza attiva P

C_r : coppia
resistente
proporzionale alla
velocità di
rotazione Ω
dell'albero

Misure di energia elettrica contatore monofase a induzione

Principio di funzionamento:

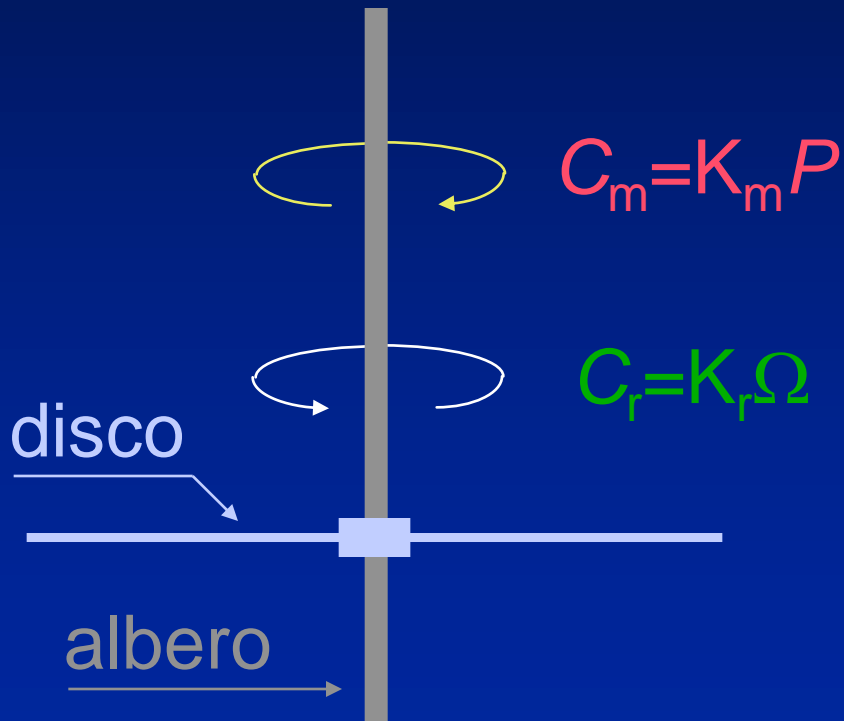


A regime trascurando
gli attriti, sussiste la
relazione:

$$C_m = C_r \quad \Rightarrow \quad k_m \cdot P = k_r \cdot \Omega$$

Misure di energia elettrica contatore monofase a induzione

Principio di funzionamento:

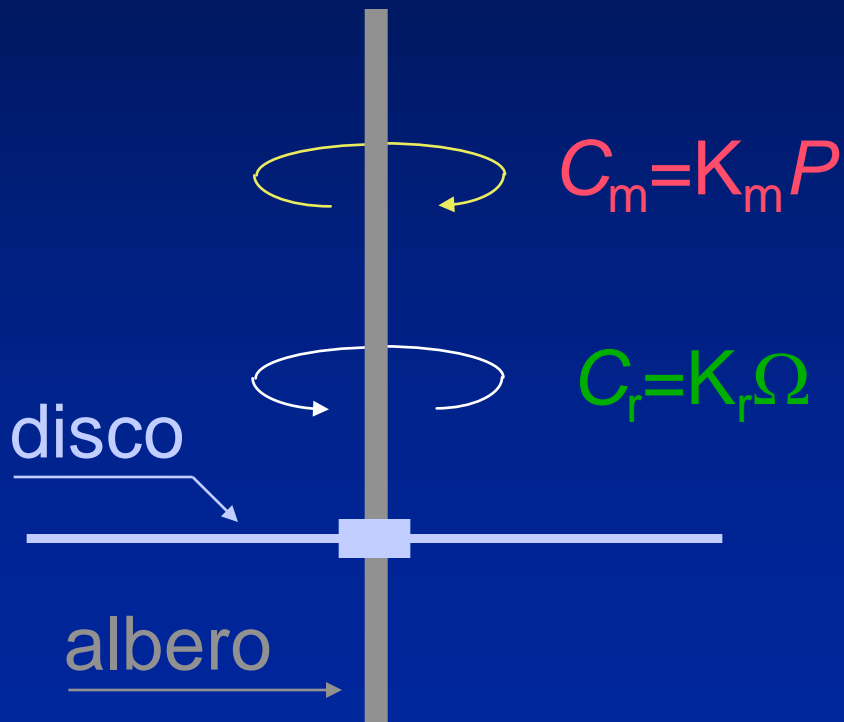


$$C_m = C_r \Rightarrow k_m \cdot P = k_r \cdot \Omega$$

$$P = \frac{k_r}{k_m} \Omega = k_p \cdot \Omega$$

Misure di energia elettrica contatore monofase a induzione

Principio di funzionamento:

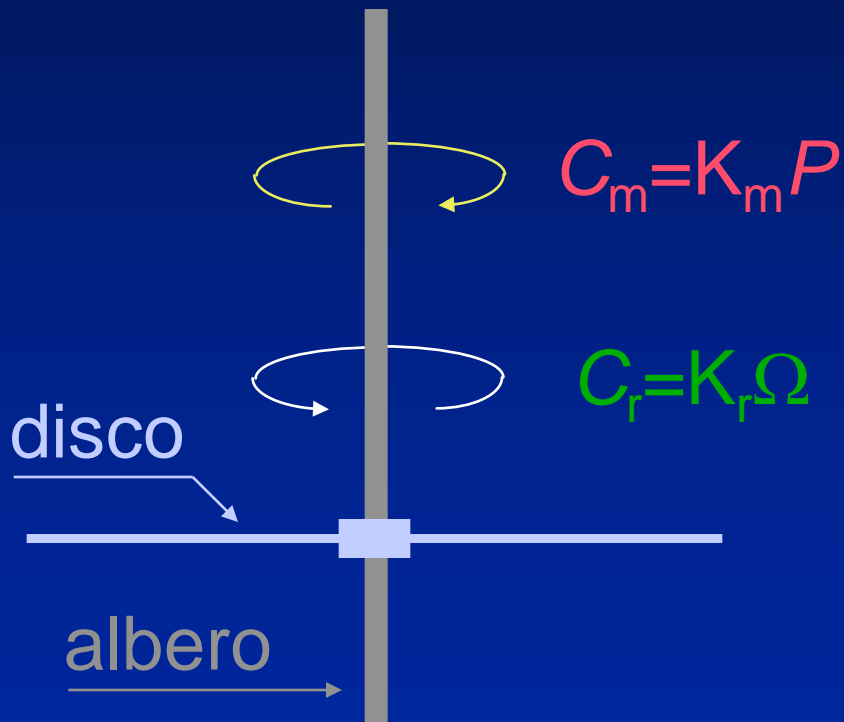


Integrando tra due istanti generici t_1 e t_2 ($t_1 < t_2$) si ottiene:

$$\begin{aligned}\Delta E &= \int_{t_1}^{t_2} P dt = \\ &= \int_{t_1}^{t_2} k_P \Omega dt\end{aligned}$$

Misure di energia elettrica contatore monofase a induzione

Principio di funzionamento:

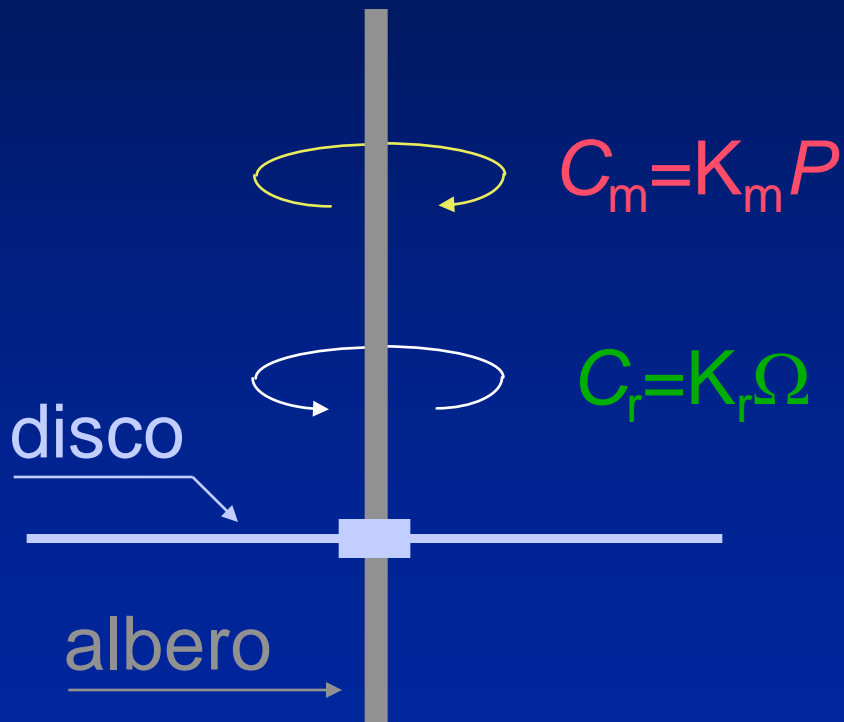


$$\Delta E = \int_{t_1}^{t_2} k_P \Omega dt = K \cdot \Delta n$$

essendo Δn il numero di
giri effettuato dal disco tra
gli istanti t_1 e t_2

Misure di energia elettrica contatore monofase a induzione

Principio di funzionamento:



La costante:

$$N = \frac{1}{K} = \frac{\Delta n}{\Delta E}$$

prende il nome di
costante del contatore e
rappresenta il *numero di
giri per kilowattora*.

Misure di energia elettrica contatore monofase a induzione

$$\Delta E = K \cdot \Delta n = \frac{\Delta n}{N}$$

kWh

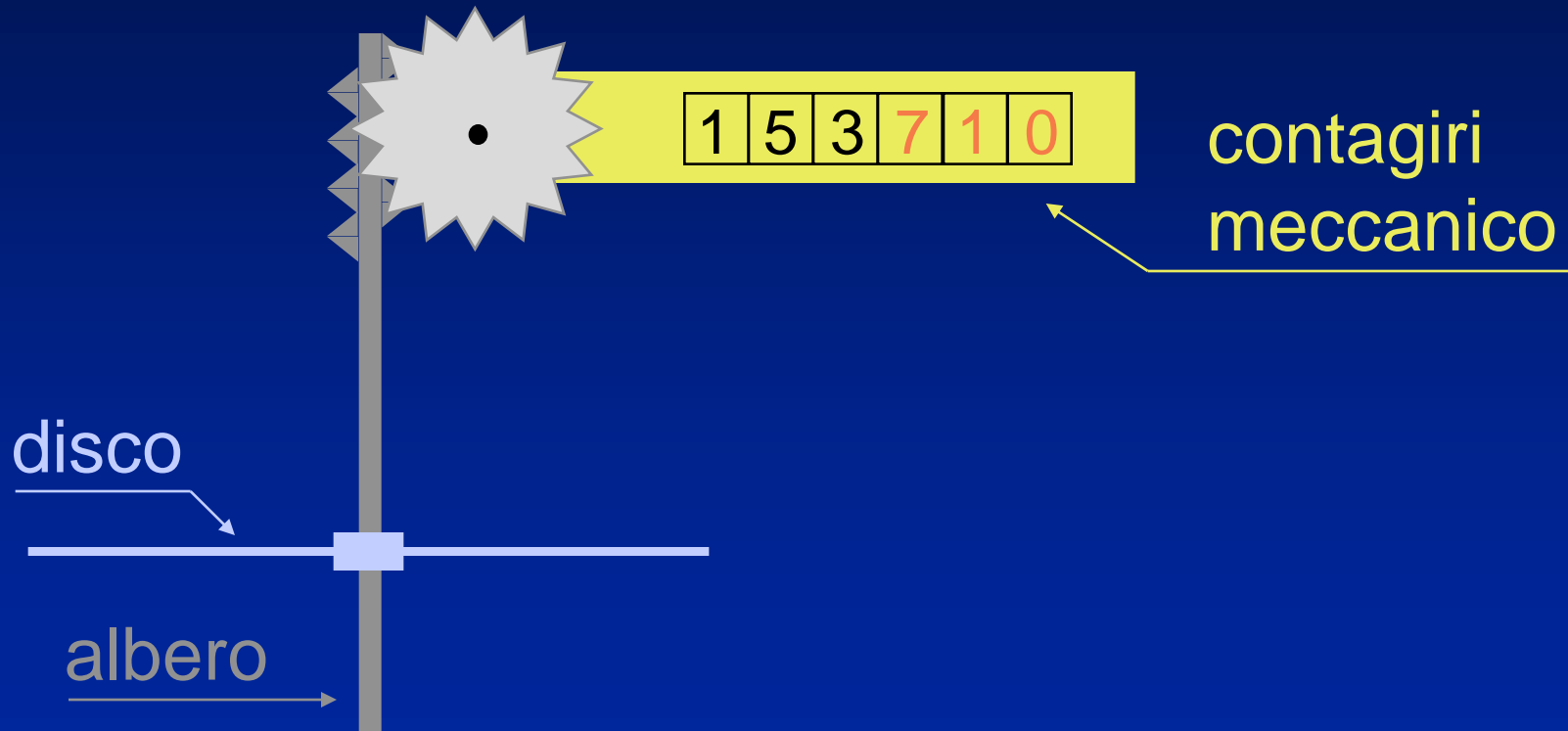
giri

$\frac{\text{giri}}{\text{kWh}}$

The diagram illustrates the relationship between energy change (ΔE), a constant K , the change in the number of revolutions (Δn), and the total number of revolutions (N). The equation is presented in a box. Three red arrows point from the equation to the units: kWh (from ΔE), *giri* (from Δn), and *$\frac{\text{giri}}{\text{kWh}}$* (from N).

Contatore a induzione

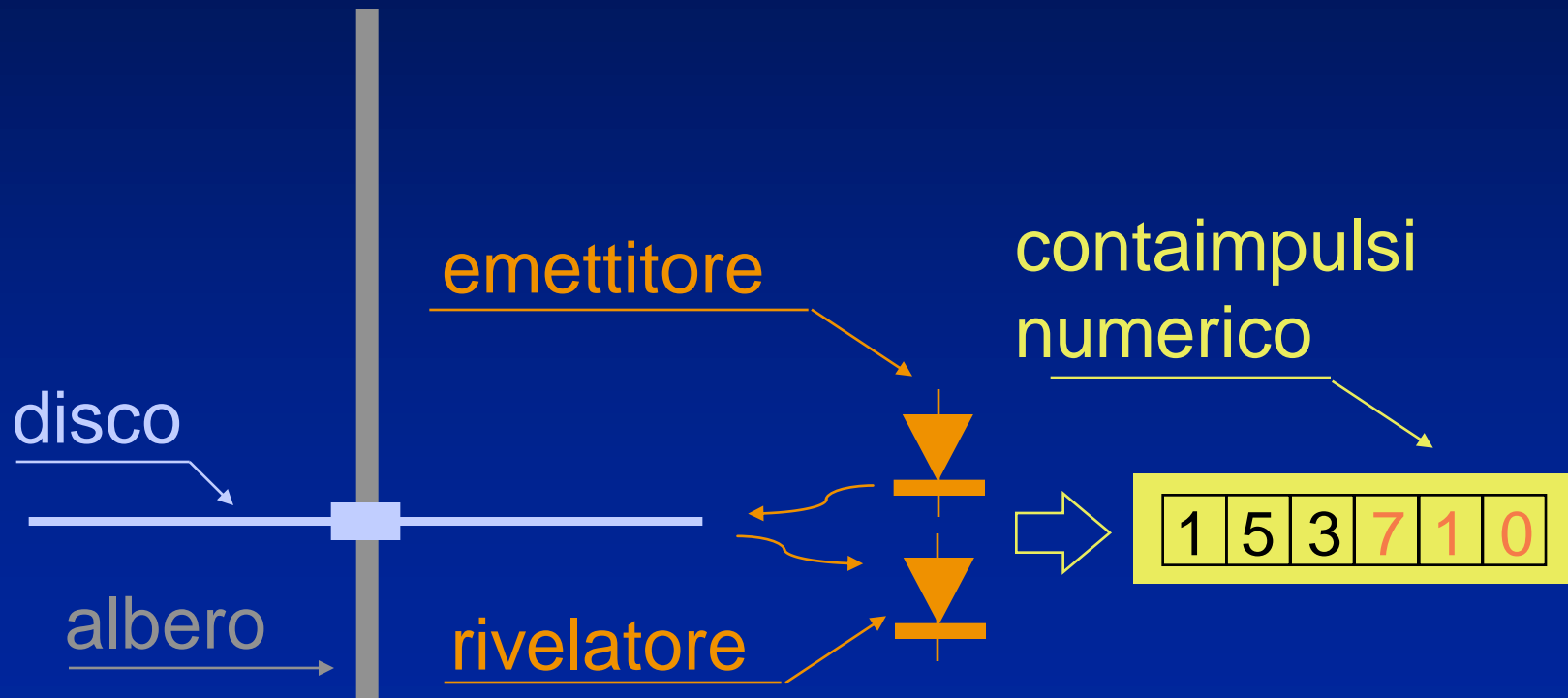
Conteggio del numero di giri



Misure di energia elettrica

L'evoluzione verso sistemi numerici

Il conteggio del numero di giri



Contatore monofase a induzione

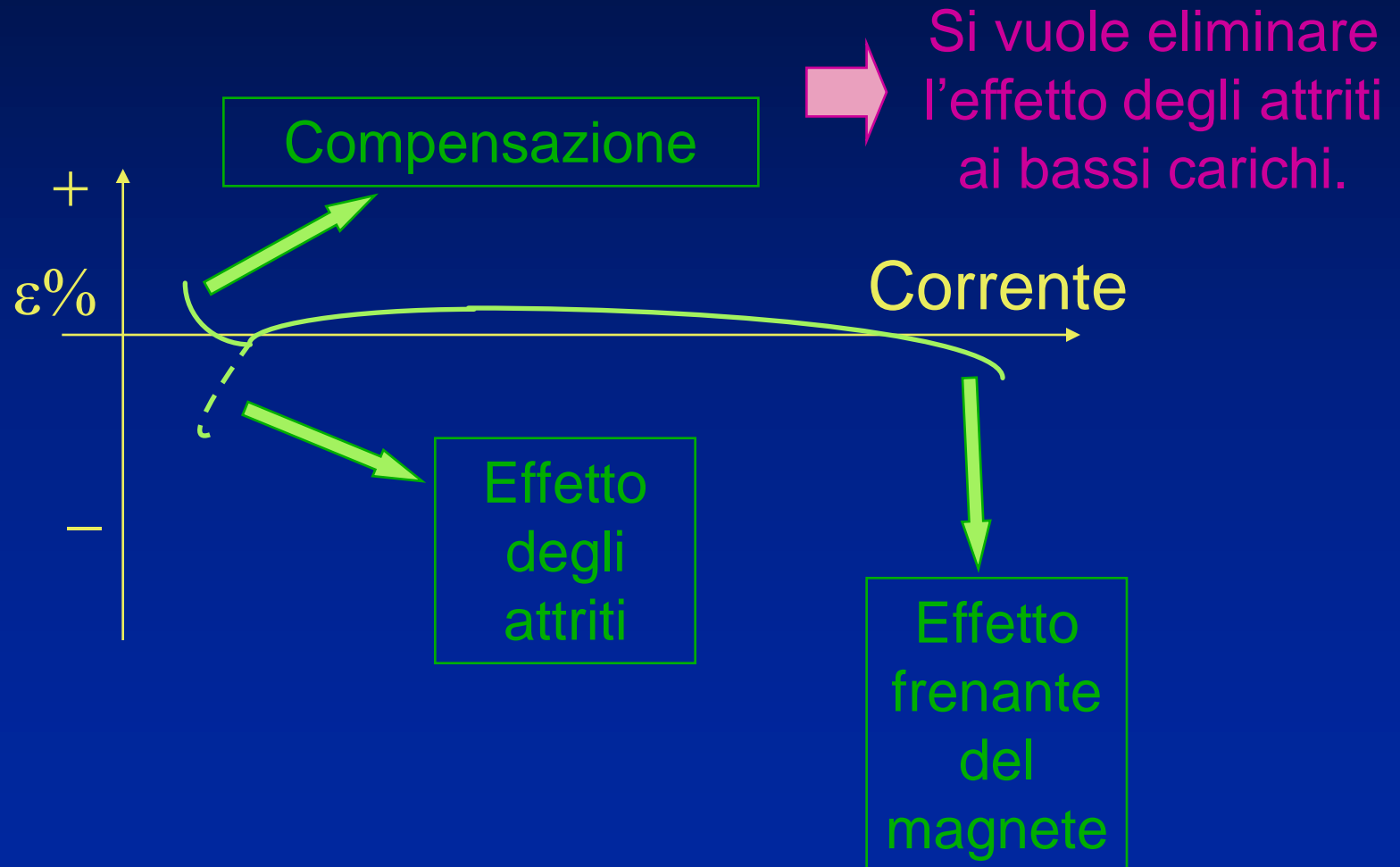
Gli attriti

Oltre che dal magnete permanente, una coppia frenante sul disco viene esercitata dall'attrito presente sui perni dell'albero.

Ciò determina un errore nella misura dell'energia

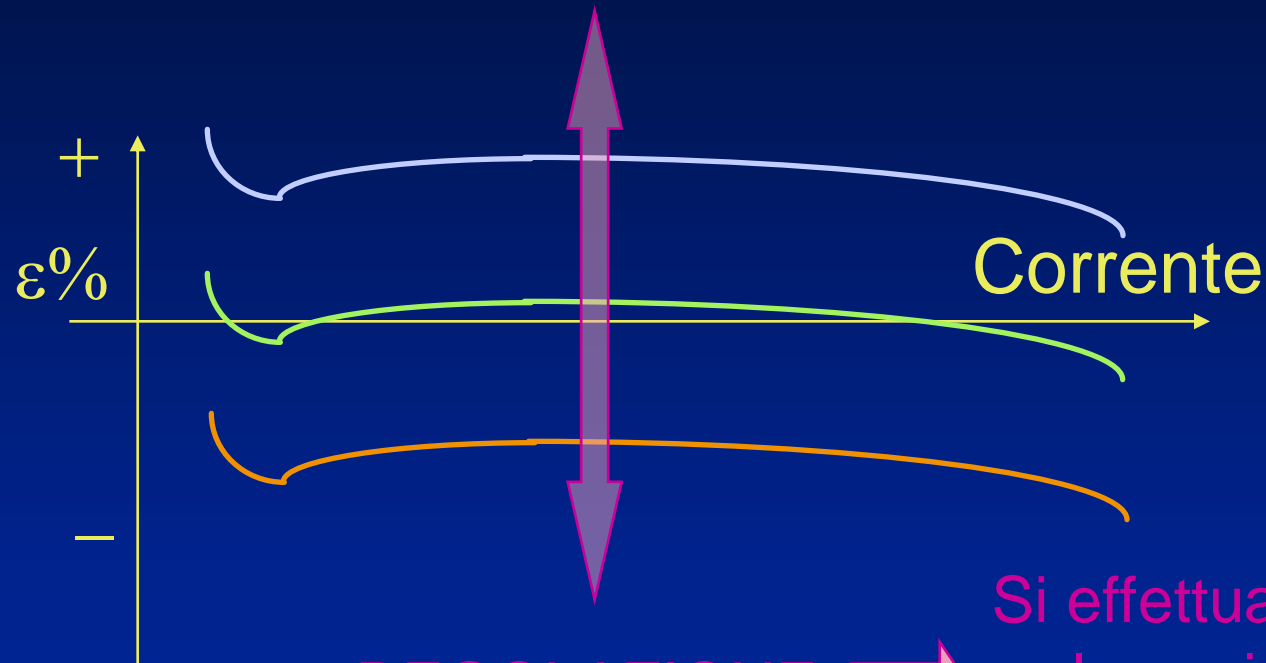
Contatore monofase a induzione

Curva d'errore

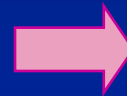


Contatore monofase a induzione

Curva d'errore



REGOLAZIONE

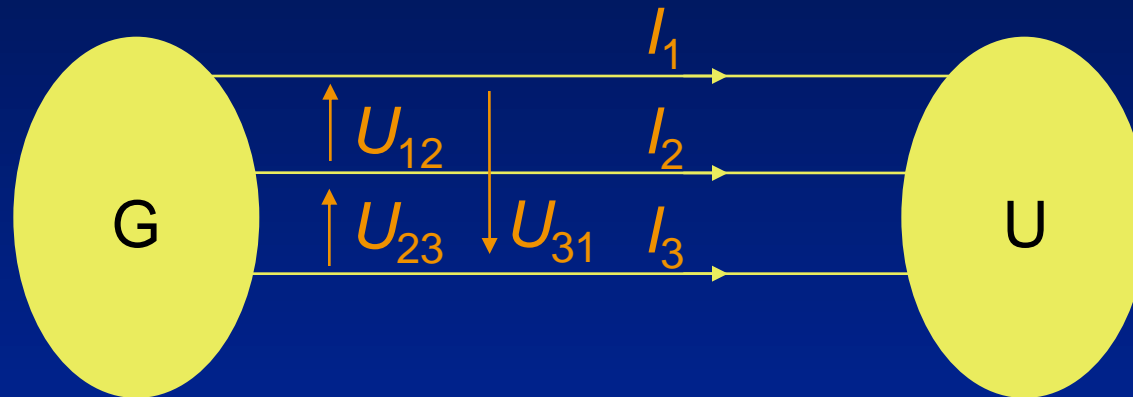


Si effettua spostando
la posizione del
magnete permanente,
ovvero andando ad
agire sulla coppia
frenante C_r

Contatore trifase ad induzione

Principio di funzionamento

- Sistemi a tre conduttori



- La potenza complessiva transitante nella sezione di misura è (teorema di Aron):

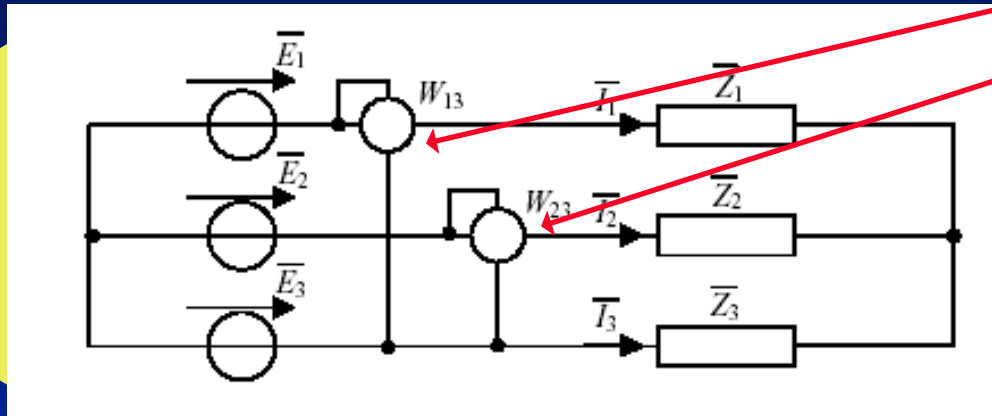
$$P = P_{mp} + P_{np} \quad (\text{es: } P = P_{13} + P_{23})$$

Contatore trifase ad induzione

Principio di funzionamento

- Sistemi a tre conduttori

$$P = P_{13} + P_{23}$$



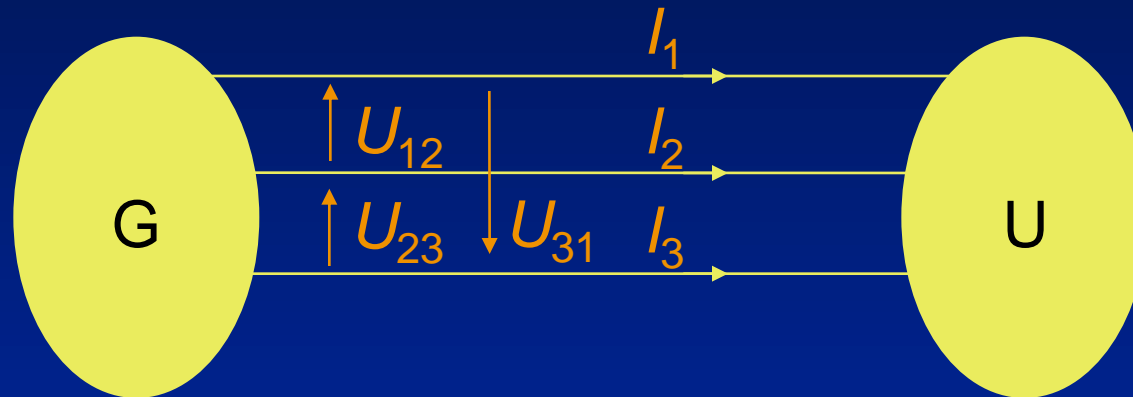
- La potenza complessiva transitante nella sezione di misura è (teorema di Aron):

$$P = P_{mp} + P_{np} \quad (\text{es: } P = P_{13} + P_{23})$$

Contatore trifase ad induzione

Principio di funzionamento

- Sistemi a tre conduttori



- L'energia che fluisce nella sezione di misura nell'intervallo $t_2 - t_1$ è quindi data da:

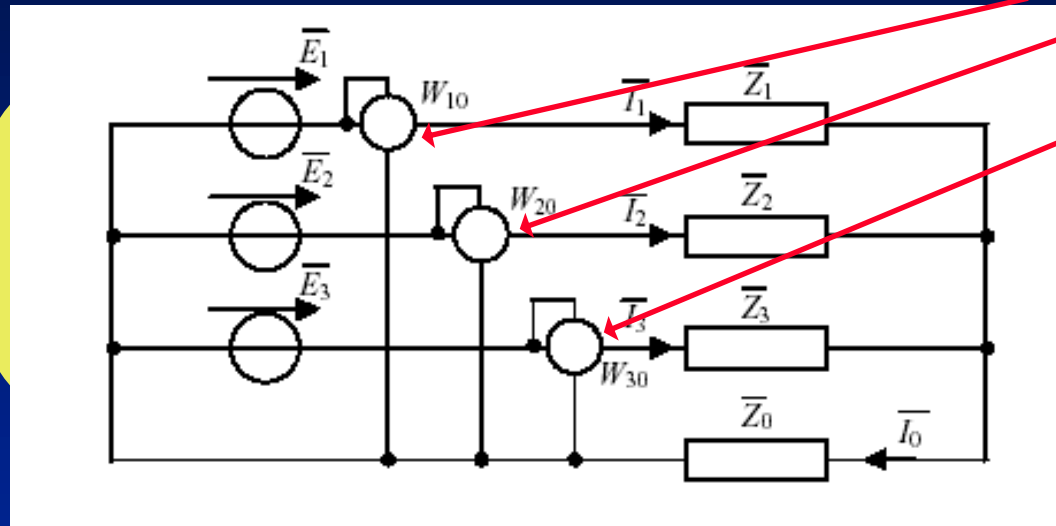
$$\Delta E = \int_{t_1}^{t_2} P dt = \int_{t_1}^{t_2} P_{mp} dt + \int_{t_1}^{t_2} P_{np} dt$$

Contatore trifase ad induzione

Principio di funzionamento

- Sistemi a quattro conduttori

$$P = P_{10} + P_{20} + P_{30}$$



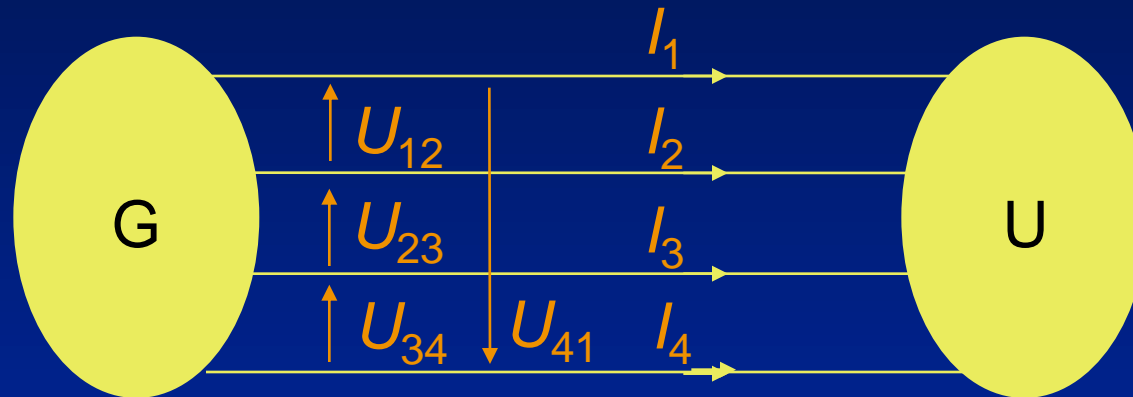
- La potenza complessiva transitante nella sezione di misura è (teorema di Aron):

$$P = P_{mq} + P_{nq} + P_{pq} \quad (\text{es: } P = P_{14} + P_{24} + P_{34})$$

Contatore trifase ad induzione

Principio di funzionamento

- Sistemi a quattro conduttori



- L'energia che fluisce nella sezione di misura nell'intervallo t_2-t_1 è quindi data da:

$$\Delta E = \int_{t_1}^{t_2} P dt = \int_{t_1}^{t_2} P_{mq} dt + \int_{t_1}^{t_2} P_{nq} dt + \int_{t_1}^{t_2} P_{pq} dt$$

Contatore trifase ad induzione

Schema di principio

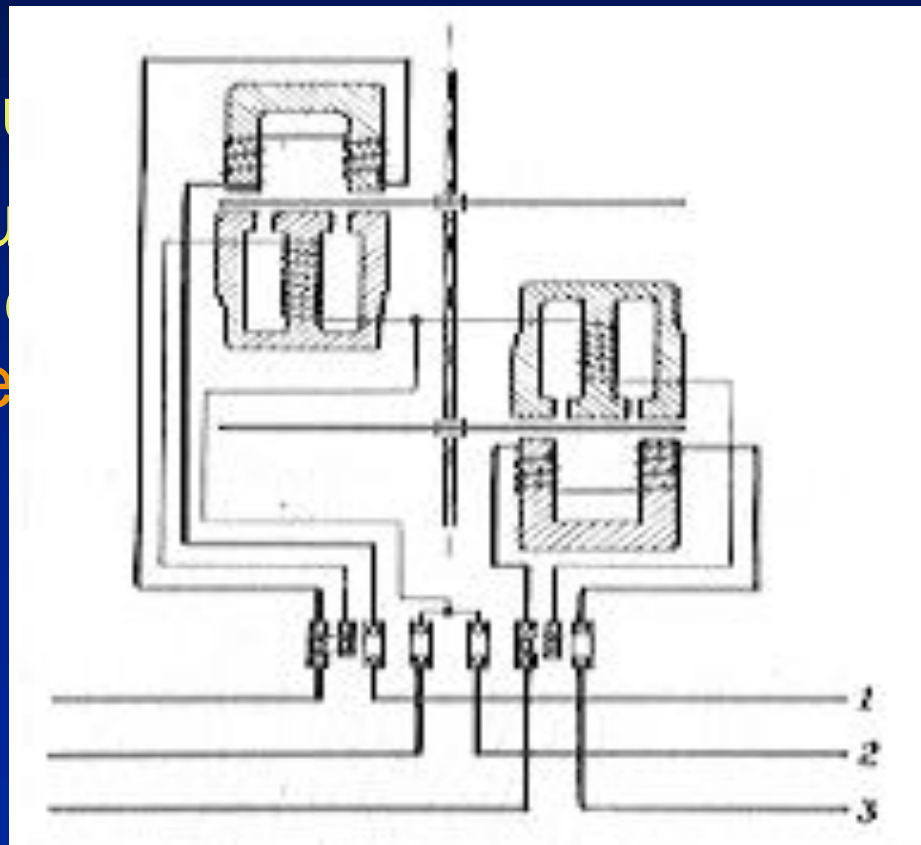
- Sistemi a tre conduttori

Si duplica la struttura del contatore monofase, mantenendo i due dischi calettati sullo stesso albero.

Contatore trifase ad induzione

Schema di principio

- Sistemi a tre conduttori
Si duplica la struttura a due fasi, mantenendo
sullo stesso albero



Contatore trifase ad induzione

Schema di principio

- Sistemi a tre conduttori

Si duplica la struttura del contatore monofase, mantenendo i due dischi calettati sullo stesso albero

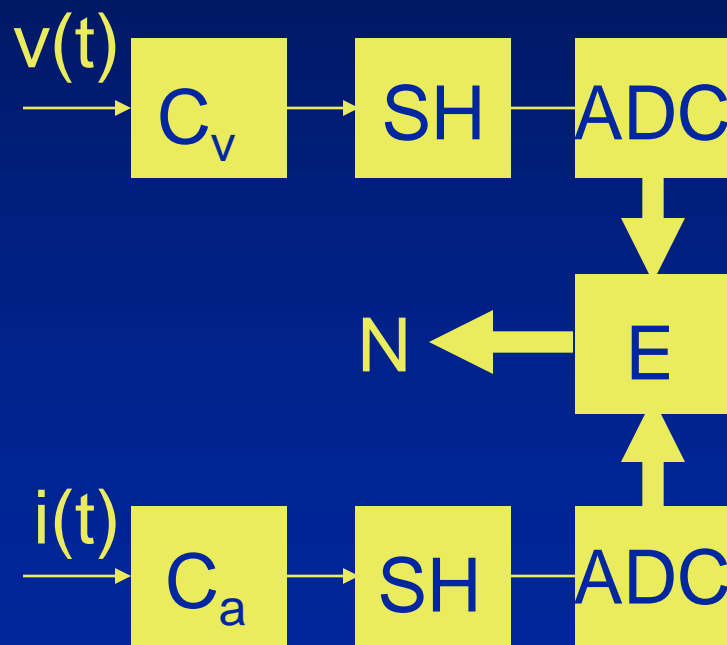
- Sistemi a quattro conduttori

Si triplica la struttura del contatore monofase, mantenendo i tre dischi calettati sullo stesso albero

I contatori statici di energia elettrica

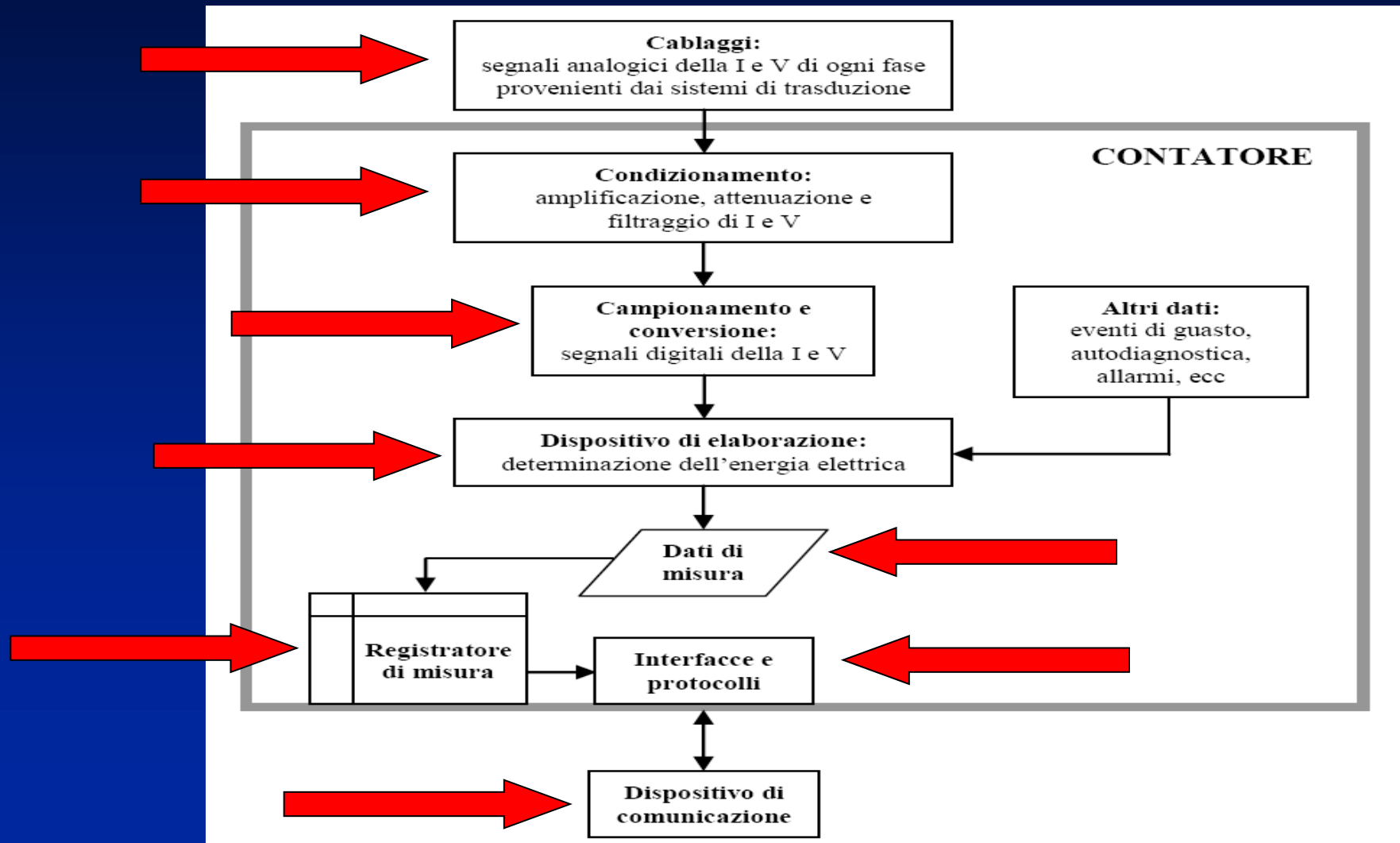
L'evoluzione verso sistemi numerici

- Un sistema totalmente numerico



- C_v ; C_a : trasduttori voltmetrico e amperometrico
- SH: Sample & Hold
- ADC: convertitore AD
- E: elaboratore numerico
- N: energia misurata

I contatori statici di energia elettrica



Misure di energia elettrica

L'evoluzione verso sistemi numerici

Negli strumenti indicatori digitali la lettura della grandezza da misurare è espressa in forma numerica attraverso un certo numero di cifre (digit).

L'indicazione sotto forma numerica permette sia di aumentare considerevolmente la velocità di lettura, sia di eliminare l'errore umano nella valutazione del dato.

Inoltre, con gli strumenti digitali è possibile pilotare direttamente sistemi di memoria, di stampa, di registrazione magnetica, o interfacciarsi direttamente con un personal computer in modo da realizzare sistemi di misura complessi.

Misure di energia elettrica

L'evoluzione verso sistemi numerici

Il problema di fondo di uno strumento digitale consiste nello stabilire una corrispondenza univoca tra la grandezza analogica di ingresso (continua sia nel tempo sia in ampiezza) e la grandezza digitale di uscita (discreta sia nel tempo sia in ampiezza).

Il grado di discretizzazione del segnale incide ovviamente sulla incertezza che caratterizza il risultato della misurazione.

Misure di energia elettrica

L'evoluzione verso sistemi numerici

I due segnali proporzionali alle tensioni e alle correnti entrano in convertitori A/D adeguatamente veloci, capaci di effettuare molte migliaia di conversioni al secondo e pertanto di eseguire, su un'onda a 50 Hz, alcune centinaia di misure per ogni periodo dell'onda stessa. I valori numerici forniti in uscita dai convertitori A/D rappresentano praticamente tanti valori istantanei U_i e I_i delle onde di tensione e di corrente che il microprocessore provvede a moltiplicare per ottenere la potenza istantanea $p(\tau)$ che poi elabora opportunamente per determinare la potenza media P nel periodo, secondo la formula:

$$P = \frac{1}{kT} \int_t^{t+kT} p(\tau) d\tau = \frac{1}{kT} \int_t^{t+kT} u(\tau) i(\tau) d\tau = UI \cos \varphi$$

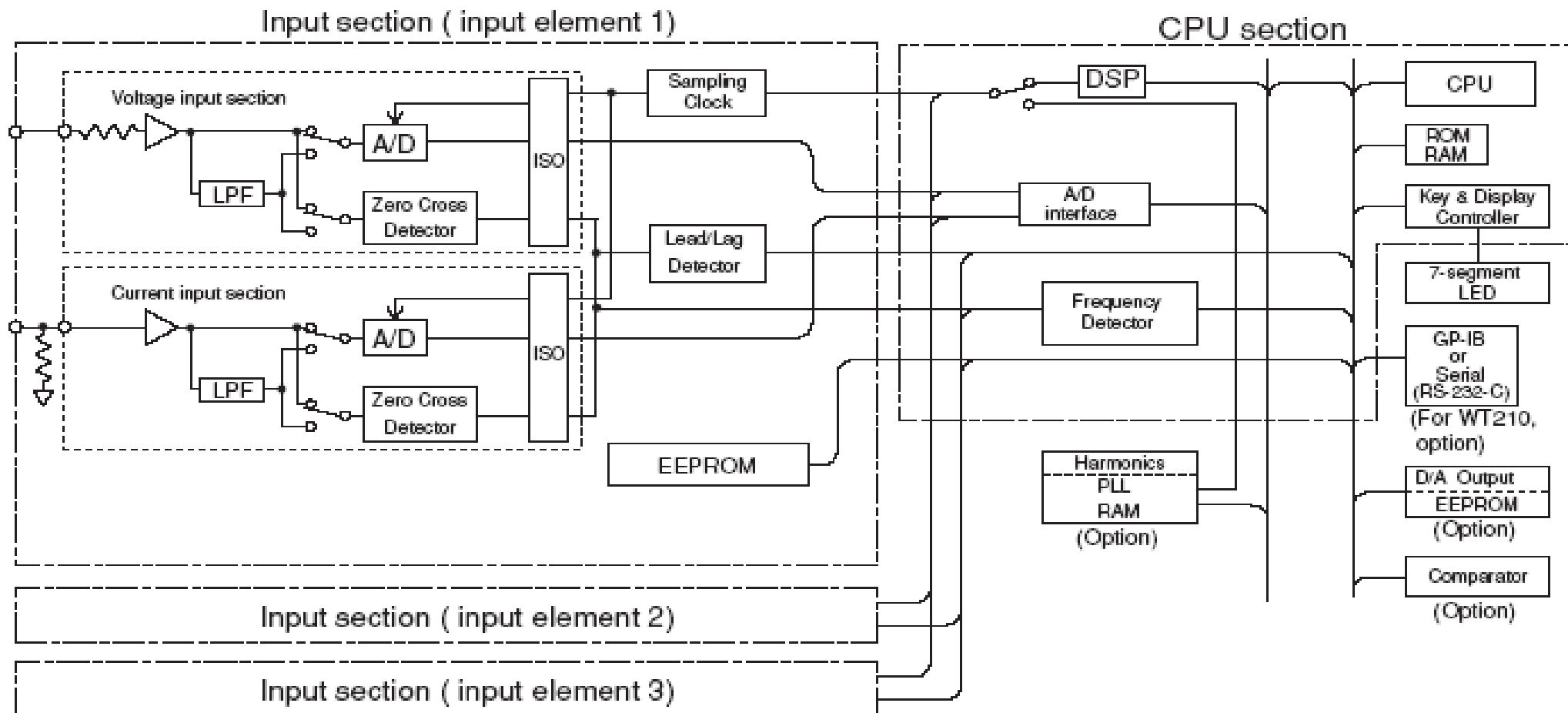
Analogico



$$P = \frac{\sum_{i=1}^n U_i I_i}{n}$$

Numerico

Esempio di contatore di energia WT230 Yokogawa



Trasformatori di misura

Gli strumenti di misura delle tensioni e delle correnti vengono costruiti per portate dirette relativamente limitate, ecco perché per misurare tali grandezze (almeno in corrente alternata) vengono utilizzati i trasformatori di misura.

Questi, riducendo mediante un fattore di scala la grandezza in esame, permettono allo *strumento indicatore* (quale può essere un **Contatore**, un **Wattmetro**, un **Voltmetro** o un **Amperometro**) di poter effettuare, una *misura indiretta* delle grandezze.

Il rapporto tra la grandezza al primario e la grandezza al secondario sia essa tensione o corrente è detto *rapporto di trasformazione* del componente o ancora meglio *rapporto di riduzione* in quanto questo componente viene sempre utilizzato per introdurre una riduzione tra primario e secondario.

Trasformatori di misura

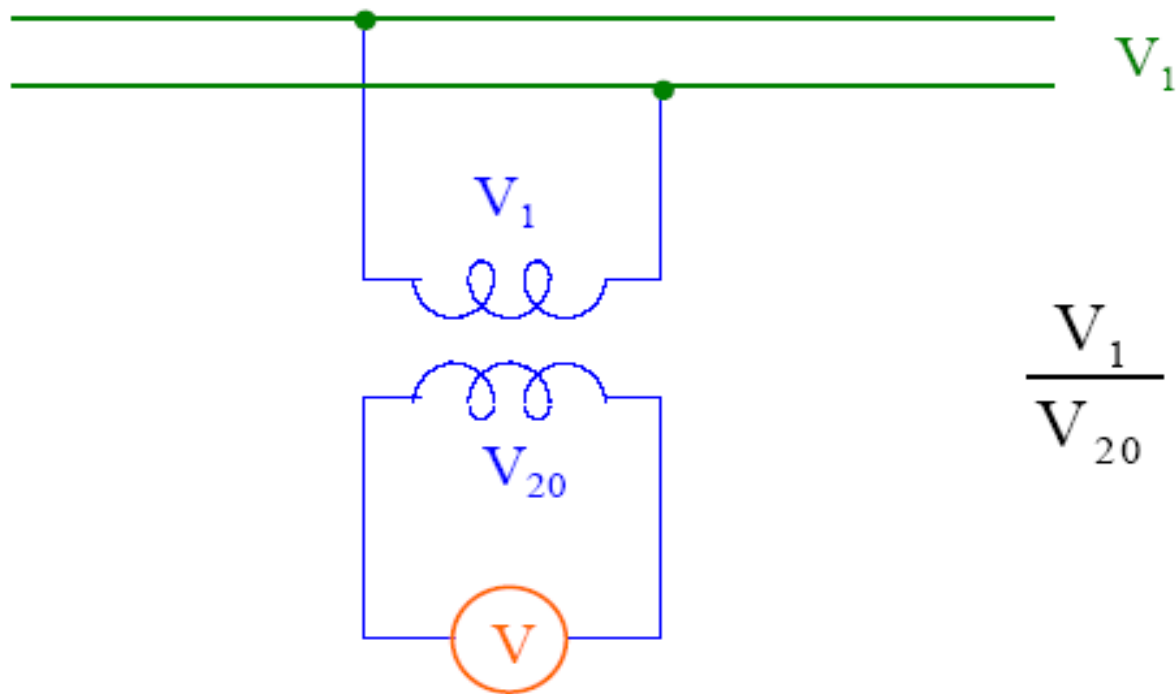
I trasformatori di misura hanno anche il pregio di separare elettricamente il circuito primario da quello secondario

riducendo la corrente di misura, così da limitare al minimo l'autoconsumo degli strumenti di misura



riducendo la tensione al secondario, in modo da offrire allo strumento indicatore una tensione molto più bassa e quindi meno pericolosa, per l'operatore che lo utilizza, qualunque sia la tensione al primario.

Un trasformatore è costituito generalmente due avvolgimenti uno *induttore* chiamato anche primario e uno *indotto* detto anche secondario, questi sono magneticamente accoppiati tra di loro, mediante un circuito magnetico

TRASFORMATORI DI TENSIONE (TV)



$$\frac{V_1}{V_{20}} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{a vuoto}$$

  Strumento voltmetrico di impedenza interna elevata ($\rightarrow \infty$)

 Il secondario del trasformatore lavora quindi praticamente a vuoto.

TRASFORMATORI DI TENSIONE (TV)

I TV si adoperano ogni qualvolta si devono misurare tensioni su linea in A.T. o M.T. per evitare il contatto tra operatori e tensioni troppo elevate.

In pratica l'impedenza interna del voltmetro è elevata ma non infinita; di conseguenza il trasformatore non lavora a vuoto.

Se l'impedenza serie della macchina è piccola, la caduta di tensione $Z_{cc}I$ è pure piccola e trascurabile.

Quindi anche a carico: $V_2 = V_{20}$

E il rapporto di trasformazione: $\frac{V_2}{V_1} = \text{costante} = \frac{N_2}{N_1}$

Un trasformatore di tensione è quindi un trasformatore con $v_{cc}\%$ molto piccola.

TRASFORMATORI DI TENSIONE (TV)

Con più strumenti in parallelo (voltmetro, bobina voltmetrica di un wattmetro, ecc.) l'impedenza risultante è ridotta.

Esiste un determinato valore di impedenza (e quindi di corrente) al di sotto del quale non si deve scendere.

Si definisce **PRESTAZIONE** di un TV il prodotto:

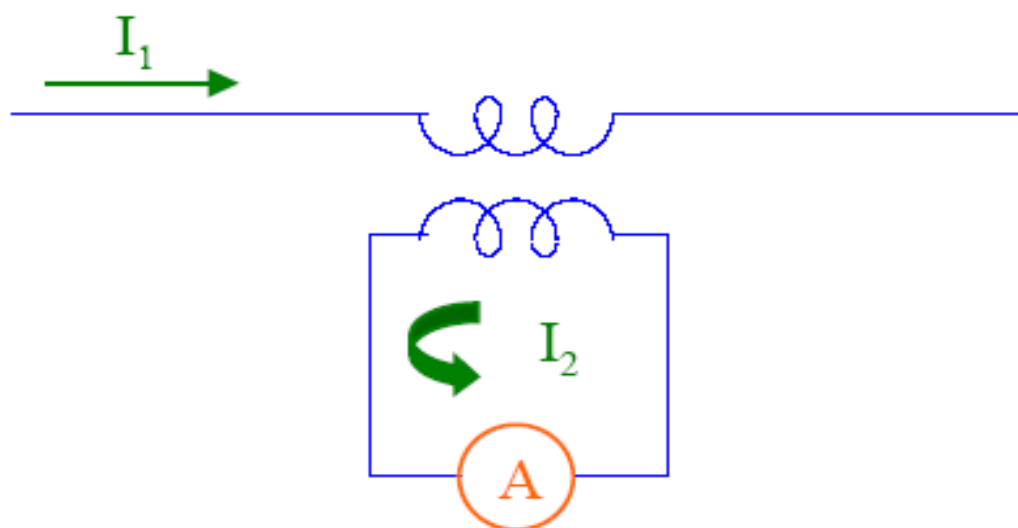
TENSIONE SECONDARIA NOMINALE * CORRENTE MASSIMA
EROGABILE CON UN CERTO $\cos\varphi$

senza che siano superati i massimi errore di rapporto e di angolo caratteristici
della classe di precisione a cui appartiene il TV

La prestazione si esprime in VA.


N.B.: Un corto circuito al secondario di un TV è estremamente pericoloso a causa dei bassi valori di $v_{cc}\%$. Quindi si prevedono sempre dei fusibili.

TRASFORMATORI DI CORRENTE (TA)



$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad \text{in corto circuito}$$

  Strumento di impedenza nulla

 Il secondario del trasformatore lavora quindi praticamente in corto circuito.

TRASFORMATORI DI CORRENTE (TA)

I TA si adoperano ogni qualvolta si deve misurare una corrente $>$ di qualche decina di Ampere.

In pratica l'impedenza dell'amperometro non è nulla e quindi il funzionamento del trasformatore non è quello di corto circuito.

Tuttavia, se la corrente a vuoto $i_0\%$ è piccola (cioè l'impedenza magnetizzante del circuito equivalente è molto grande), il rapporto tra le correnti primaria e secondaria resta costante nel funzionamento a carico.

Un trasformatore di corrente è quindi un trasformatore con una corrente a vuoto $i_0\%$ molto piccola.

TRASFORMATORI DI CORRENTE (TA)

Con più strumenti in serie (amperometro, bobina amperometrica di un wattmetro, ecc.) l'impedenza totale è la somma delle impedenze dei singoli strumenti.

Il valore risultante non deve superare un determinato valore.

Si definisce **PRESTAZIONE** di un TA il prodotto:

$$\text{CORRENTE SECONDARIA NOMINALE} * \text{TENSIONE SECONDARIA MASSIMA}$$

che il trasformatore può sopportare ai suoi morsetti senza che siano superati gli errori d'angolo e di rapporto ammessi per la classe a cui la macchina appartiene

La prestazione si misura in VA.

TRASFORMATORI DI CORRENTE (TA)

N.B.: Il secondario deve essere sempre chiuso in corto circuito.

Se il secondario fosse aperto, tutta la corrente primaria (che è la corrente di linea del carico) risulterebbe magnetizzata e, poiché $i_0\%$ è ridotta, si avrebbero tensioni elevatissime.

È quindi estremamente pericoloso interrompere i morsetti di un TA sotto carico.

