

RIPASSIAMO LE BASI DELL'ELETTROTECNICA

L'articolo offre un quadro completo ed aggiornato delle leggi che regolano l'elettrotecnica, leggi che anche un tecnico pratico, quale può essere un installatore, non può esimersi dal conoscere per svolgere razionalmente il proprio lavoro.

Parte uno: Nozioni introduttive sulle macchine elettriche

A cura della Redazione

1.1 - Classificazione delle macchine elettriche

Per macchina elettrica si intende un apparato mediante il quale è possibile svolgere una o più delle seguenti funzioni:

- convertire energia meccanica in energia elettrica o viceversa;
- modificare le caratteristiche delle grandezze elettriche in gioco nei circuiti.

Le macchine elettriche rappresentano delle applicazioni tipiche dei fenomeni dell'elettromagnetismo trattati nel corso di elettrotecnica generale che per chiarezza verranno parzialmente ripresi nei vari Capitoli di questo volume.

Le macchine elettriche che effettuano la conversione di energia meccanica in energia elettrica sono detti generatori elettrici mentre quelle che convertono energia elettrica in energia meccanica sono detti motori elettrici.

In entrambi i casi si tratta di macchine rotanti in quanto l'energia meccanica viene fornita o assorbita ad un albero in rotazione.

Una macchina di questo tipo sfrutta le reazioni meccaniche che si manifestano tra campi magnetici prodotti dalle correnti elettriche che circolano negli avvolgimenti o prodotti da magneti permanenti.

Una ulteriore distinzione delle macchine rotanti può essere fatta in base al tipo di corrente elettrica in gioco. Si hanno così generatori e motori a corrente alternata o a corrente continua.

I generatori di corrente alternata prendono il nome di sincroni o alternatori, e asincroni in relazione al principio di funzionamento. I generatori di corrente continua si chiamano anche dinamo.

I motori a corrente alternata possono essere a loro volta distinti nelle categorie dei sincroni e degli asincroni.

Le macchine che modificano grandezze elettriche in altre ancora di tipo elettrico ma di diverse caratteristiche possono a loro volta essere così classificate:

- trasformatori, che modificano contemporaneamente i valori della tensione e della corrente presenti in circuiti a corrente alternata mantenendo praticamente costante il loro prodotto (che costituisce la potenza) senza modificare la frequenza;
- convertitori di grandezze elettriche alternate in grandezze elettriche continue e viceversa;
- convertitori di grandezze elettriche alternate in altre grandezze pure alternate di diversa frequenza o di diverso numero di fasi.

I trasformatori, che sono macchine statiche e non hanno quindi parti in movimento, sfruttano i fenomeni di induzione elettromagnetica prodotti da flussi variabili. I convertitori possono essere statici o rotanti, anche se con l'avvento dei semiconduttori l'uso dei rotanti tende a ridursi sempre di più.

I convertitori statici sono realizzati mediante dispositivi a semiconduttori opportunamente alimentati e controllati.

I convertitori rotanti sfruttano gli stessi principi su cui si basano i motori e i generatori e sono ottenuti dall'accoppiamento di più macchine; possono richiedere a volte la somministrazione di energia meccanica che viene convertita in elettrica o viceversa.

Il convertitore che trasforma correnti e tensioni alternate in correnti e tensioni continue, o più precisamente in grandezze pulsanti unidirezionali, si dice anche raddrizzatore, mentre il convertitore che trasforma grandezze continue in alternata si dice invertitore (inverter).

In ragione del principio di funzionamento, le macchine rotanti fondamentali sono reversibili e quindi un generatore può anche funzionare da motore e viceversa; si deve tuttavia osservare che ogni categoria di macchine è studiata in modo specifico per una ben determinata funzione e presenta, quindi, alcune caratteristiche particolari. I convertitori statici non funzionano sugli stessi principi delle macchine rotanti o dei trasformatori (fenomeni elettromagnetici) per cui la loro inclusione tra le macchine elettriche può essere discussa. Si è però ritenuto opportuno trattare l'argomento in questo volume in quanto molte volte i convertitori sono associati a macchine elettriche vere e proprie insieme alle quali costituiscono un sistema di conversione o un azionamento elettrico.

In base ai criteri di classificazione esposti, la tabella 1.1 fornisce un quadro riassuntivo:

Tabella 1.1 - Classificazione delle macchine elettriche.

Generatori elettrici rotanti	
Generatore sincrono (o alternatore)	Converte energia meccanica in elettrica sotto forma di grandezze alternate
Dinamo	Converte energia meccanica in elettrica sotto forma di grandezze continue
Motori elettrici	
Sincrono o asincrono	Converte energia elettrica alternata in energia meccanica
A corrente continua	Converte energia elettrica continua in energia meccanica
Trasformatori e convertitori	
Trasformatore	Modifica i parametri (tensione e corrente alternata) della potenza elettrica
Convertitori rotanti	Converte grandezze alternate in continue e viceversa e grandezze alternate in alternate di diversa frequenza, ecc.
Raddrizzatore	Converte le grandezze elettriche alternate in continue
Invertitore	Converte le grandezze elettriche continue in alternate

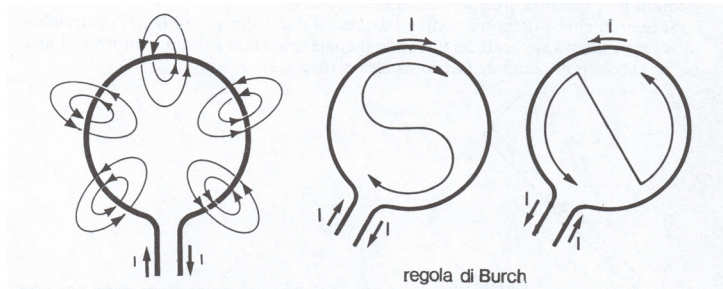


Figura 1.1 - Andamento delle linee di forza del campo magnetico in una spira percorsa da corrente e determinazione delle polarità magnetiche.

1.2 - Richiami sui principali fenomeni elettromagnetici

Una spira percorsa da corrente, libera di muoversi in un campo magnetico costante, è sottoposta ad una coppia meccanica che la fa ruotare per disporla perpendicolarmente alle linee di flusso.

È noto che una spira percorsa da corrente elettrica si comporta come un magnete. Attraverso le regole di Maxwell (o del cavatappi) e di Burch si possono definire l'andamento delle linee di forza del campo magnetico e il nome dei poli che si formano sulle due facce della spira stessa (Figura 1.1).

Un'altra regola fondamentale del magnetismo è quella secondo la quale due poli di nome eguale si respingono e due poli di nome contrario si attraggono.

Ponendo una spira percorsa da corrente entro un campo magnetico si ottiene una interazione fra i due campi magnetici e la spira viene sollecitata a disporsi in modo tale che i poli da essa prodotti si trovino affacciati ai poli di nome contrario del magnete che produce il campo in cui la spira è immersa (Figura 1.2).

Essendo i due lati della spira percorsi da corrente diretta in senso opposto, le forze che su di essi agiscono sono di senso contrario per cui la loro risultante forma una coppia. L'entità della forza che si esercita su un lato della spira è data per ogni posizione della spira dalla relazione:

$$F = B \cdot l \cdot I \cdot \cos \alpha$$

dove:

F = forza (newton);

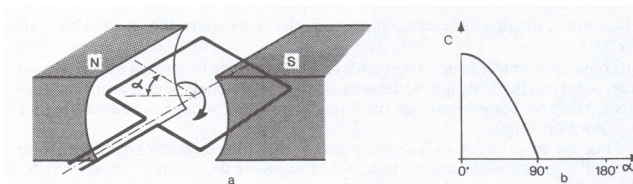


Figura 1.2 - Coppia agente su una spira percorsa da corrente e immersa in un campo magnetico.

a - rappresentazione della spira nel campo;

b - andamento della coppia in funzione dell'angolo.

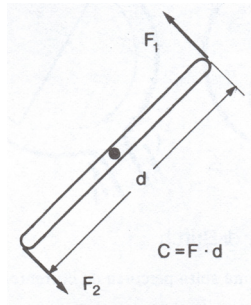


Figura 1.3 - Rappresentazione di una coppia meccanica
 F_1 e F_2 = forze;
 $d/2$ = braccio.

B = induzione del campo magnetico (tesla);

l = lunghezza di un lato della spira (metri);

α = angolo che il piano della spira forma con la direzione del flusso magnetico prodotto dal magnete.

Da questa relazione ne consegue che il momento della coppia (C) che sollecita la spira a ruotare sarà:

$$C = F \cdot d = B \cdot l \cdot I \cdot d \cdot \cos \alpha$$

dove:

d = distanza fra i due conduttori (metri).

Si ricorda che si definisce coppia l'azione di due forze eguali (F_1, F_2) parallele e di senso contrario applicate ad un solido il quale tende così a ruotare intorno all'asse perpendicolare al piano della coppia stessa (Figura 1.3).

La coppia si esprime con il suo il momento (C), il cui valore è dato dal prodotto della forza (F) per la distanza fra le due forze (d) e risulta perciò espresso in newton x metro.

Si osserva che la coppia varia con la posizione della spira. Essa assume valore nullo per $\alpha = 90^\circ$ ($\cos \alpha = 0$), quando è nullo il numero delle linee del campo magnetico che attraversano la spira, e valore massimo quando la spira è parallela alle linee di flusso per $\alpha = 0^\circ$ ($\cos \alpha = 1$) come è illustrato nella Figura 1.2. L'andamento è quello della funzione trigonometrica coseno.

Si può anche dire che la coppia è massima quando è nullo il numero delle linee di campo abbracciate dalla spira (e questo avviene appunto quando $\alpha = 0^\circ$).

Si può infine osservare che per la rotazione continua è sufficiente invertire il senso della corrente nella spira nel momento in cui il piano di questa è perpendicolare al campo.

Il campo magnetico costante può anche essere ottenuto con un elettromagnete, applicando all'avvolgimento di quest'ultimo una corrente continua.

La relazione che esprime la coppia può essere anche scritta considerando l'area (A) della spira, ossia $A = l \cdot d$.

Ricordando inoltre che il flusso ϕ corrisponde al prodotto dell'induzione per l'area considerata ($\phi = B \cdot A$), si può scrivere:

$$C = B \cdot l \cdot I \cdot d \cdot \cos \alpha = B \cdot I \cdot A \cdot \cos \alpha = \phi \cdot I \cdot \cos \alpha$$

Si può quindi affermare che il momento della coppia è direttamente proporzionale all'entità del flusso magnetico massimo che può abbracciare la spira ed alla corrente che percorre quest'ultima.

Se invece di una si utilizzano più spire (N), tanto la forza che la coppia motrice risultano moltiplicate per N .

Su questo principio si basano i motori elettrici in quanto con il procedimento descritto si ottiene una coppia meccanica.

Una spira che ruota in un campo magnetico costante in modo che vari il flusso che abbraccia, diventa sede di forza elettromotrice indotta il cui valore dipende dalla velocità di rotazione.

Se si obbliga la spira a ruotare in un campo magnetico applicando ad essa una forza meccanica esterna, in ogni lato della spira si forma una f.e.m. indotta (e) il cui valore è dato dalla relazione:

$$e = - B \cdot l \cdot v \cdot \sin \alpha$$

dove:

B = induzione del campo (tesla);

l = lunghezza del lato attivo della spira (metri);

v = velocità periferica con la quale ruota la spira (metri al secondo);

α = angolo compreso tra il piano della spira e quello perpendicolare alle linee di flusso.

Se la velocità di rotazione v è costante, la f.e.m. indotta ha andamento sinusoidale nel tempo (Figura 1.4).

Evidentemente, se la spira è chiusa su se stessa o su un carico esterno, in essa circola una corrente i .

Il segno (-) sta ad indicare che la f.e.m. indotta ha sempre un verso tale da opporsi alla variazione del flusso concatenato (legge di Lenz).

Più precisamente, la corrente che si stabilisce nella spira chiusa, assume verso tale che il campo magnetico da essa prodotto si oppone alla rotazione della spira stessa, creando quindi una coppia resistente al moto.

Se invece di una spira se ne utilizzano N avvolte assieme, la f.e.m. indotta risulta aumentata proporzionalmente.

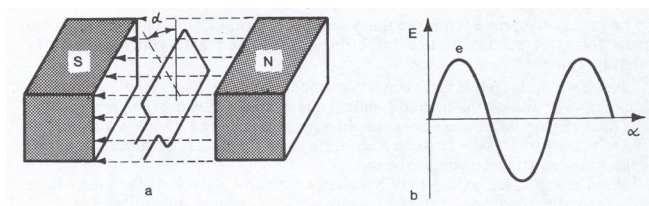


Figura 1.4 - Forza elettromotrice indotta in una spira che ruota a velocità costante in un campo magnetico costante:

a - rappresentazione della spira rotante;

b - forma dell'onda della tensione indotta.

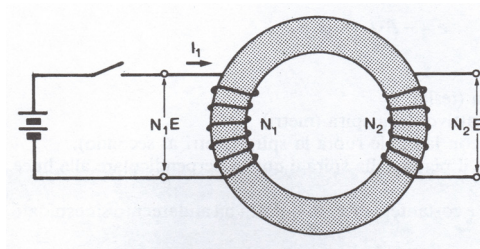


Figura 1.5 - Circuiti interessati da flusso magnetico comune.

Su questo principio si basano i generatori elettrici rotanti.

Una spira immersa in un campo magnetico variabile diventa sede di forza elettromotrice indotta il cui valore dipende dalla velocità di variazione del flusso concatenato.

L'intensità del campo prodotto da un elettromagnete è proporzionale al numero di spire della bobina ed alla corrente che la percorre (si prescinde per il momento dagli altri parametri in gioco, quali la lunghezza del solenoide ed il materiale con il quale è costituito il nucleo).

Si supponga ora di porre nel circuito illustrato nella Figura 1.5 un interruttore e di chiuderlo.

La corrente che alimenta il solenoide passa da zero (circuito aperto) ad un valore diverso da zero (circuito chiuso) e analogamente varia l'intensità del campo ed il flusso magnetico Φ abbracciato da ciascuna delle spire immerse nel campo magnetico.

In ogni spira si induce una f.e.m. che è tanto maggiore quanto più elevata è la differenza fra i valori massimo e minimo del flusso concatenato con la spira stessa; inoltre a parità di differenza fra flusso massimo e minimo, la f.e.m. è tanto maggiore quanto più velocemente avviene la variazione del flusso. La Figura 1.6 da conto dell'andamento di questo fenomeno.

Supponendo lineare la variazione del flusso, il valore della f.e.m. indotta è costante e si può quindi scrivere:

$$E = - \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t}$$

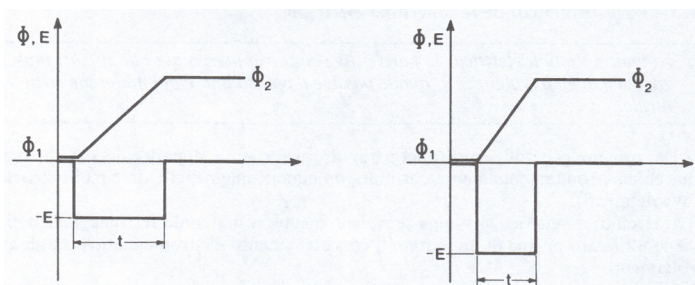


Figura 1.6 - Andamenti del flusso e della f.e.m. indotta. La stessa variazione di flusso si verifica in tempi diversi. Si noti che le aree sottese ai diagrammi della forza elettromotrice sono uguali.

dove:

Φ_2 = flusso massimo concatenato dalla spira;

Φ_1 = flusso minimo concatenato dalla spira;

t = tempo impiegato per passare dall'uno all'altro valore di flusso.

Il segno (-) indica che la f.e.m. indotta ha sempre senso tale da opporsi alla variazione del flusso

concatenato (legge di Lenz).

Se invece di una sola spira se ne hanno N_2 in serie, la f.e.m. E generata dalla variazione di flusso risulta essere moltiplicata per N_2 .

Anche in ciascuna spira della bobina dell'elettromagnete si induce una f.e.m. E (f.e.m. di autoinduzione) e quindi nell'intero avvolgimento una f.e.m. $N_1 \cdot E$ (N_1 = numero delle spire dell'elettromagnete), la quale deve essere all'incirca uguale e contraria alla tensione di alimentazione.

Invece di alimentare l'elettromagnete con corrente continua e provocare la variazione di flusso aprendo e chiudendo un interruttore, si può alimentarlo con corrente alternata il cui valore, varia da zero al massimo in un quarto di periodo.

Scegliendo opportunamente i numeri delle spire N_1 e N_2 si può ottenere dalla bobina immersa nel campo (secondario) una tensione diversa da quella di alimentazione (primario), in proporzione al numero delle spire.

Su questo principio si basa il trasformatore.

1.3 - Parti principali delle macchine elettriche

In una macchina elettrica, le parti attive sono rappresentate dai circuiti magnetici e dagli avvolgimenti, quelle passive dagli isolanti e dal materiale strutturale.

Dai principi generali, esposti nel paragrafo precedente, appare evidente che ogni macchina è fondamentalmente costituita da circuiti magnetici e da circuiti elettrici (avvolgimenti).

Il circuito magnetico si svolge prevalentemente in materiale ferromagnetico che viene utilizzato al fine di migliorare il concatenamento elettromagnetico tra gli avvolgimenti.

Gli avvolgimenti, generalmente costituiti da più spire, sono destinati a produrre i flussi magnetici od essere sedi delle f.e.m. indotte.

È logico che per realizzare una macchina elettrica è necessario ricorrere ad altri componenti: si pensi ad esempio, ai cuscinetti che sostengono la parte rotante dei motori o dei generatori, alle custodie che consentono di assiemare le varie parti, alle morsettiere attraverso le quali si effettua il collegamento elettrico fra il circuito esterno e gli avvolgimenti delle macchine, ecc..

Poiché sugli avvolgimenti delle macchine elettriche sono presenti tensioni elettriche, acquistano importanza vitale i materiali isolanti, impiegati nel rivestimento dei conduttori, per isolarli fra loro e dalle parti metalliche circostanti.

La vita di una macchina dipende essenzialmente dall'efficienza e dalla durata dei sistemi isolanti nonché dalla razionalità del loro impiego.

L'isolamento dalla carcassa di tutte le parti elettriche sotto tensione è poi importantissimo agli effetti della sicurezza delle persone. Infatti, per un difetto di isolamento o per la rottura di un conduttore potrebbero andare in tensione parti metalliche (definite genericamente con il termine di massa) che normalmente non lo sono. A questo proposito è bene ricordare che per evitare il pericolo di contatti accidentali con parti normalmente non sotto tensione, ma che lo potrebbero essere in caso di funzionamento anormale, le norme CEI ed il D.P.R. 547 (Decreto del Presidente della Repubblica per la prevenzione degli infortuni sul lavoro) prescrivono che esse siano collegate elettricamente a terra.

Quando si verifica un difetto di isolamento, la macchina deve essere ovviamente tolta dal servizio per le opportune riparazioni.

1.4 - Perdite e rendimento

Le macchine elettriche sono sedi di perdite, corrispondenti ad energia che si trasforma in calore.

Il rendimento di una macchina elettrica è dato dal rapporto tra la potenza attiva resa e la potenza attiva assorbita.

Anche nelle macchine elettriche si hanno delle perdite in quanto non tutta l'energia fornita viene resa in forma utile, ma una sua porzione, più o meno grande, si trasforma in calore.

Ad esempio, il passaggio della corrente negli avvolgimenti provoca perdite per effetto Joule, mentre la variazione periodica del flusso nei nuclei magnetici produce in questi ultimi, perdite per isteresi e per correnti parassite.

Nelle macchine rotanti si hanno inoltre perdite meccaniche per attrito e per ventilazione (Figura 1.7).

Le varie forme di perdita saranno esaminate in dettaglio nei capitoli che trattano dei diversi tipi di macchine.

Si può però già precisare che per rendimento di una macchina si intende il rapporto fra la potenza resa (P_r) e la potenza assorbita (P_a), espresse entrambe nella stessa unità di misura (il watt o i suoi multipli).

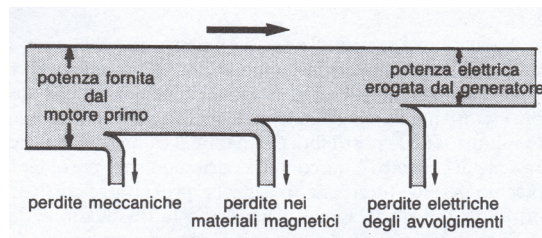


Figura 1.7 - Perdite in un generatore elettrico rotante.

Il rendimento viene rappresentato con la lettera η ed è spesso indicato in percento:

$$\eta = \frac{P_r}{P_a} \quad \text{oppure:} \quad \eta\% = 100 \frac{P_r}{P_a}$$

Poiché la potenza assorbita è la somma della potenza resa e delle perdite, si può anche scrivere che il rendimento è uguale al rapporto fra la potenza resa e la somma di questa stessa potenza e le varie perdite P_1, P_2, P_3, \dots ossia:

$$\eta = \frac{P_r}{P_r + P_1 + P_2 + P_3 + \dots}$$

Le macchine elettriche sono quelle che raggiungono i rendimenti più elevati. Infatti, mentre il rendimento di un motore a scoppio o di un motore Diesel si aggira intorno al 35-40%, il motore elettrico può raggiungere valori dell'80÷95% e il trasformatore valori del 95÷99,5%.

1.5 - Riscaldamento e smaltimento delle perdite

Le macchine elettriche si riscaldano per effetto delle perdite. Il calore prodotto deve essere asportato per non compromettere il comportamento degli isolanti.

A causa del calore sviluppato dalle perdite, le varie parti di una macchina elettrica si riscaldano assumendo temperature più elevate rispetto all'ambiente circostante. È chiaro che le temperature delle diverse parti non devono superare i valori che possono compromettere l'integrità della macchina. A questo riguardo, sono particolarmente delicati gli isolanti, ciascuno dei quali presenta una temperatura limite al di sopra della quale esso si deteriora rapidamente e perde le proprie qualità meccaniche e dielettriche.

A parità di altre condizioni, la potenza ricavabile da una macchina trova perciò un limite nelle temperature ammissibili. Gli aumenti di temperatura su quella ambiente (chiamati anche sopraelevazioni di temperatura o sovratemperature) sono tanto più elevati quanto maggiori sono le perdite per unità di volume della macchina e quanto minori sono le possibilità di smaltire il calore, ossia di cederlo all'ambiente esterno. In sede di progetto è quindi necessario non solo prevedere l'impiego di materiali con piccole perdite specifiche, ma anche progettare, costruire e installare la macchina in modo che sia facilitata al massimo la trasmissione del calore all'esterno.

Data l'importanza che rivestono le temperature per il funzionamento e la vita delle macchine elettriche, le norme CEI hanno definito delle classi di isolamento a ciascuna delle quali appartengono determinati materiali isolanti e alla quale compete una temperatura limite di funzionamento.

Di questo argomento si parlerà diffusamente più avanti.

1.6 - La normativa e l'unificazione

Le macchine elettriche devono essere realizzate in conformità alle norme CEI. Per le macchine di più larga diffusione il CEI provvede alla emissione di tabelle di unificazione tecnica e dimensionale.

Per tutto il materiale elettrico e quindi anche per le macchine, il CEI ⁽¹⁾ ha previsto delle norme attraverso le quali vengono indicati i requisiti minimi richiesti nonché i tipi di prove da eseguire per il collaudo e l'accettazione da parte dell'acquirente. Nel corso della trattazione si farà costante riferimento alle norme CEI e si avrà quindi modo di approfondire meglio questo argomento.

Per il momento si rileva che qualsiasi macchina elettrica costruita secondo le norme deve recare sulla targa il simbolo caratteristico del CEI, cioè un cerchio diviso in tre settori in ognuno dei quali è posta una lettera. Sotto il cerchio è posto un rettangolino entro il quale è riportato l'anno di pubblicazione delle norme (Figura 1.8).

I dati che devono figurare sulle targhe delle macchine elettriche sono indicati nei fascicoli specifici delle norme CEI.

Il CEI emana anche tabelle di unificazione (tabelle CEI-UNEL), sulla scorta delle prescrizioni CEI e su quanto viene effettuato dall'IEC ⁽²⁾ e dal CENELEC ⁽³⁾ per l'unificazione internazionale.

Per le macchine di più comune impiego, le tabelle in questione prevedono serie normalizzate per le quali vengono definite le caratteristiche elettriche e dimensionali. Ciò facilita evidentemente il compito dell'acquirente che può fare riferimento alla unificazione esistente.

È noto che gli scopi salienti dell'unificazione dimensionale sono quelli di consentire l'intercambiabilità fra macchine, apparecchi o componenti provenienti da costruttori diversi, evitando quindi laboriosi e costosi lavori di adattamento. L'unificazione consente anche ai costruttori di ridurre il numero dei tipi e quindi diminuire i costi di produzione.

Si ricorda che i paesi della Comunità Europea hanno l'obbligo di attenersi nella preparazione delle norme al contenuto di documenti di armonizzazione emessi dal CENELEC.



Figura 1.8 - Simbolo del Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI).

L'UNI ⁽⁴⁾ si occupa di unificazione dimensionale per l'industria in genere e ha emesso numerose tabelle di unificazione che interessano anche la costruzione delle macchine elettriche. Ci limiteremo a citare ad esempio le tabelle relative alle viti, ai bulloni, alle chiavette ed alle linguette, alle puleghe ed alle cinghie, ai profilati metallici, ecc..

(1) CEI - Comitato Elettrotecnico Italiano - Via Pietro Andrea Saccardo 9 - 20134 Milano (MI)

(2) IEC - International Electrotechnical Commission 3 rue de Varembé, PO Box 131, CH-1211 Geneva 20, Switzerland

(3) CENELEC - European Committee for Electrotechnical Standardization - Rue de la science, 23 B-1040 Brussels

(4) UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione - Via Sannio 2 - 20137 Milano