

Nicola del Ciotto

(BREVI APPUNTI DI ELETTROTECNICA – Parte 2ª)

LE TRE LEGGI FONDAMENTALI

Il calcolo del trasformatore

Prerequisiti:

Conoscenza dei principi, dei teoremi e delle leggi fondamentali dell'Elettricità.

Sufficiente conoscenza dell'analisi matematica, dei numeri complessi, dei vettori e del calcolo vettoriale.

Obiettivi:

Capacità di risoluzione di circuiti elettrici e di progettazione di semplici macchine elettriche (trasformatore monofase).

Tutti i fenomeni elettrici e magnetici sono studiati e discussi in una parte della fisica che chiamiamo "Elettricità generale" dove sono messi in evidenza i principi, i teoremi e le leggi fondamentali (principi di Kirchoff, legge di Ohm, legge di Joule, legge di Biot e Savart, teorema di Thevenin, ecc.) e in una parte teorico-applicativa che chiamiamo "Elettrotecnica", dove vengono affrontati i problemi tecnici e, in particolare, i problemi costruttivi delle macchine elettriche. Questa seconda parte, al primo impatto, sembra una montagna concettuale dalle dimensioni colossali che, a molti che vogliono scalarla, spesso fa "tremare le vene e i polsi". Ma se andiamo a scrutarla un po' più da vicino non sembra poi che questa sia così ardua da scalare. Infatti l'esperienza applicativa e la frequente "praticaccia" riescono a discriminare il necessario dal meno necessario e a ridurre questo **apparente colosso** a dimensioni molto più ragionevoli e accettabili. Alla luce di quanto detto e *dissacrandola alquanto*, possiamo asserire, **con un po' di audacia**, che **l'intera elettrotecnica delle macchine** si basa prevalentemente su **tre leggi** fondamentali, che sono dei veri pilastri.

Analizziamo brevemente questi tre pilastri.

LE TRE LEGGI FONDAMENTALI DELL'ELETTROTECNICA

Affermiamo dunque che tutta l'**elettrotecnica delle macchine** si basa sostanzialmente su queste tre leggi, che noi chiameremo *le leggi fondamentali dell'elettrotecnica*. Esse sono:

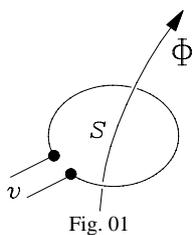
- 1) **La legge di Faraday-Neumann** o dell'induzione.
- 2) **La legge di Hopkinson** o dei circuiti magnetici.
- 3) **La legge di Lorentz** o della forza che agisce su una carica in movimento, immersa in un campo magnetico.

Il pieno dominio matematico e scientifico di queste tre leggi, insieme alla conoscenza delle leggi e dei principi dell'elettricità e del magnetismo di base è sufficiente per impostare l'intera impalcatura dell'elettrotecnica.

Facciamone, quindi, una breve ricapitolazione.

1) La legge di Faraday-Neumann

E' una legge sperimentale, basata sull'osservazione dei fenomeni elettrici che avvengono quando una spira di sezione S , formata da un conduttore elettrico, è investita da un flusso magnetico Φ comunque variabile (Fig.01).



L'esperienza ci svela che una tale spira, concatenata con le linee di forza magnetiche variabili rispetto ad essa, produce ai suoi capi una tensione elettrica "V" che è proporzionale alla **variazione vettoriale** $\vec{\Delta}\Phi$ del vettore flusso magnetico Φ nel tempo t :

$$v = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (01)$$

Quindi, attenzione! La tensione indotta non è proporzionale al flusso ma alla sua variazione, di qualsiasi natura essa sia: perciò non basta la presenza di una grossa calamita vicino alla spira, è importante che ci sia **movimento relativo** tra essa e la spira. Questa tensione elettrica “v” espressa dalla (01) è chiamata **tensione indotta**.

Quando parliamo di variazione vettoriale dobbiamo intenderla nelle tre componenti essenziali di un vettore: quindi possiamo avere variazioni di grandezza, di direzione, di verso e variazioni delle loro combinazioni.

Ad una attenta osservazione si vede anche che **la (01) lega una componente elettrica (V) alla componente magnetica (Φ)**. Ciò fa intravedere un primo legame che unisce indissolubilmente il campo elettrico al campo magnetico.

Se due spire collegate in serie per formare un induttore sono sottoposte all’identica variazione $\Delta\Phi$ di Φ , la tensione indotta V_t sarà la somma delle due tensioni “v” e quindi raddoppia, se le spire sono tre la tensione triplica (fig.01a) e così via.

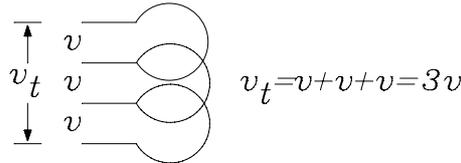


Fig.01a

Se sono N, la tensione indotta totale V_t sarà:

$$V_t = N \cdot v = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (02)$$

cioè sarà data dalla tensione indotta “v” su una spira moltiplicata per il numero N delle spire.

Con un passaggio al limite della (02), per variazioni infinitesime di Φ e di t, possiamo scrivere:

$$V_t = N \cdot v = N \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (03)$$

La (03) ci dice che la **tensione istantanea** prodotta ai capi delle N spire è funzione della derivata del flusso rispetto al tempo. Tuttavia la derivata ha significato fisico solo se conosciamo la funzione $\Phi(t)$.

Poiché l’elettrotecnica è basata in prevalenza sulle variazioni sinusoidali delle grandezze elettriche, se supponiamo quindi che la funzione sia: $\varphi(t) = \Phi_m \sin \omega t$, avremo come soluzione della (03):

$$V_t = N \cdot v = N \frac{d}{dt} \Phi_m \sin \omega t = [N \cdot \omega \cdot \Phi_m] \cos \omega t = V_m \cos \omega t \quad (04)$$

dove è evidente la quadratura di fase tra il **flusso Φ sinusoidale** e la **tensione indotta V_t cosinusoidale** (la tensione V_t è in anticipo di 90° rispetto al flusso). La (04) ci mostra anche come la tensione massima indotta V_m dipenda direttamente dal numero delle spire N, dalla velocità angolare ω e dal flusso massimo raggiunto Φ_m , cioè è espressa dal prodotto:

$$V = N \cdot \omega \cdot \Phi \quad (05)$$

dove abbiamo tolto il pedice ‘m’ a V e Φ per semplicità di scrittura. Così possiamo dire che un generatore rotante (per es. un alternatore) con poche spire deve girare più velocemente rispetto ad un altro con molte spire per avere la stessa tensione indotta, a parità di flusso magnetico Φ (eccitazione); oppure, a parità di spire e di velocità, che il generatore che ha più eccitazione (cioè con Φ più grande) genera più tensione indotta perché più grande può essere la variazione $\Delta\Phi$, e così via. Si possono fare tanti esempi, giocando sui tre parametri N, ω , Φ . Si pensi alla “dinamo” di una bicicletta che tanto più fa brillare la lampadina quanto più si va veloci!

Si può vedere, perciò, come **la semplice relazione (05) sia tra le più importanti dell’elettrotecnica, perché è alla base del calcolo di tutte le macchine elettriche**. Facciamo qualche passo avanti. Conoscendo la sezione S del conduttore magnetico o tubo di flusso (Fig.01) determinato dall’area della spira, definiamo il **flusso specifico B** (o **induzione magnetica B**) come il rapporto tra il flusso e la sezione entro cui scorre ossia mediante la:

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (\text{Wb}/\text{m}^2)$$

perciò la (05) può trasformarsi nella:

$$V = N \cdot \omega \cdot S \cdot B$$

o, ancora, in funzione della frequenza f, nella:

$$V = 2\pi \cdot f \cdot N \cdot S \cdot B \quad (08)$$

Questa importante relazione è sempre applicata quando si progettano macchine elettriche in alternata sinusoidale.

Vedremo in seguito un’applicazione interessante della (08).

2) La legge di Hopkinson

Facciamo un discorso per analogie per semplificare le cose. Sappiamo che nei circuiti elettrici, dove vige la legge di Ohm, la f.e.m. (forza elettro-motrice) V è la causa che produce il flusso elettrico I (corrente elettrica) che scorre in un circuito elettrico di resistenza elettrica R , cioè (legge di Ohm):

$$f.e.m. = R \cdot I$$

Quindi possiamo dire che la f.e.m. (per es. la batteria) è la **sorgente** del **flusso elettrico I** (corrente elettrica).

Analogamente, nei circuiti magnetici sarà la f.m.m. (forza magneto-motrice) che produrrà lo scorrere del flusso magnetico Φ (corrente magnetica) nel circuito magnetico di resistenza magnetica (riluttanza) R_H :

$$f.m.m. = R_H \cdot \Phi$$

Perciò qui la f.m.m. sarà la **sorgente** del **flusso magnetico Φ** .

Si noti come la struttura della formula appaia somigliante a quella di Ohm sia formalmente che concettualmente. In fondo, ambedue le formule analizzano circuiti simili nella forma ma con fenomenologie e parametri diversi.

Sappiamo anche dall'Elettricità Generale che la f.m.m. è generata dalla corrente elettrica I che percorre le N spire di un solenoide ed il suo valore è $N \cdot I$ (dalla legge di Biot e Savart). Perciò possiamo scrivere l'importante relazione:

$$N \cdot I = R_H \cdot \Phi \tag{06}$$

La (06) è l'espressione generale della **legge di Hopkinson**. Essa è alla base della risoluzione di tutti i circuiti magnetici.

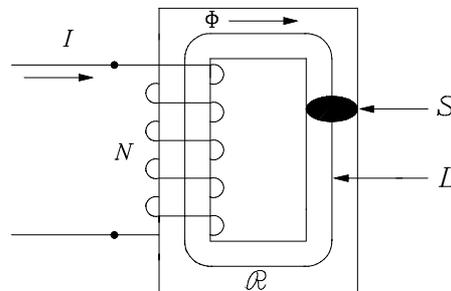


Fig. 02

Osserviamo un po' più da vicino un circuito magnetico. Esso esprime la (06) ed è rappresentato genericamente dalla Fig.02 nelle sue parti essenziali. Il circuito può essere definito come un fascio di linee di flusso Φ (**tubo di flusso**) che si svolgono in un mezzo ad alta conducibilità magnetica (permeabilità magnetica), per esempio nel ferro.

Anche qui ragioniamo per analogie. Come in un circuito di filo elettrico (per es. un filo di rame) lungo L , di sezione S e resistività ρ noi determiniamo la resistenza elettrica tramite l'espressione:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

così in un circuito magnetico (per es. un filo di ferro) determiniamo la resistenza magnetica, o **riluttanza R_H** (\mathcal{R}), attraverso il rapporto:

$$R_H = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{L}{S} \tag{07}$$

dove L è la lunghezza media del circuito, S la sua sezione, e μ il coefficiente di permeabilità magnetica (l'inverso diella resistività magnetica) del materiale adoperato per realizzare il circuito.

La (07) si aggiunge alla (06) per il calcolo dei circuiti magnetici, e tutte e due fanno parte integrante della progettazione delle macchine elettriche.

Anche qui è interessante notare come **la (06) leghi l'altra componente elettrica (I) alla componente magnetica (Φ)**. Ciò fa scorgere un secondo legame che va ad unire indissolubilmente il campo elettrico al campo magnetico.

3) La legge di Lorentz

Quando una carica q in movimento con velocità \vec{u} si immerge in un campo magnetico di induzione \vec{B} (che per semplicità poniamo perpendicolare al suo moto), viene sottoposta ad una **forza laterale** \vec{F} la cui intensità (o spinta) è data dal prodotto scalare (ossia numerico):

$$|\vec{F}| = q \cdot u \cdot B \tag{09}$$

con la direzione e il verso fornita dal prodotto vettoriale:

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{u} \wedge \vec{B}) \tag{10}$$

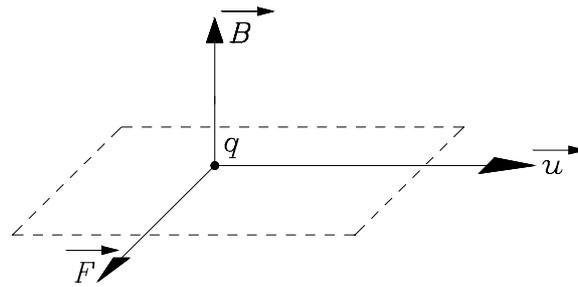


Fig.03

Il fenomeno magnetoelettrico della legge di Lorentz rappresentata dalla (10) è disegnato in Fig.03 dove sono evidenti le relazioni angolari tra i tre vettori u, B, F, nel caso in cui \vec{B} è perpendicolare a \vec{u} .

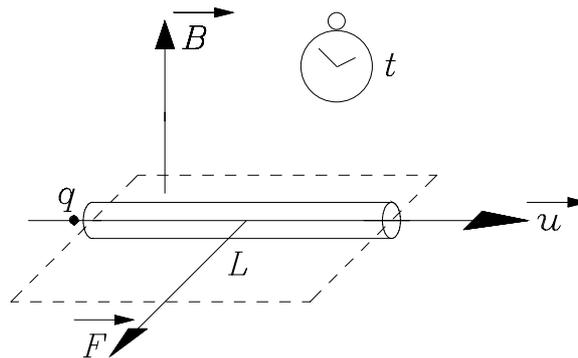


Fig.04

Ora, se la carica in movimento q percorre la lunghezza L all’interno del conduttore “L” in un tempo t (Fig.04), possiamo determinare facilmente la sua velocità \vec{u} mediante la comune legge della cinematica (“spazio fratto tempo”):

$$u = \frac{L}{t}$$

e, quindi riscrivere la (09) nel modo seguente:

$$|F| = \frac{q \cdot L \cdot B}{t} \tag{11}$$

Ricordando però che la corrente I è definita come la quantità di carica q che scorre nell’unità di tempo t all’interno del conduttore, ossia:

$$I = \frac{q}{t} \tag{12}$$

la (09), attraverso la (11) e la (12), può essere riscritta anche nel seguente modo:

$$|F| = I \cdot L \cdot B \tag{13}$$

che ci dice quant’è la forza trasversale che spinge a spostarsi lateralmente un conduttore di lunghezza L attraversato da una corrente I, quando esso è immerso in un campo magnetico perpendicolare di induzione \vec{B} . Così, per esempio, se il conduttore, posto tra due espansioni polari e legato ad un centro di rotazione mediante un raggio, è percorso da corrente, si produrrà una coppia ed esso tenderà a ruotare intorno al centro. Questo è l’embrione di un motore elettrico!

La (13) è, quindi, alla base di tutte le azioni ponderomotrici che determinano il moto di una macchina elettrica motrice (motore).

Perciò possiamo affermare che la (13) è il punto di partenza per lo studio elettromeccanico di tutte le macchine elettriche motrici (motori).

----*----

Abbiamo così passato in rassegna velocemente e in modo sufficientemente semplice le tre leggi fondamentali che, in modo più o meno evidente, regolano la progettazione di tutte le macchine elettriche.

Nel caso delle macchine elettriche statiche (trasformatori e affini) bastano le sole due leggi di Faraday e di Hopkinson. Nel caso delle macchine elettriche dinamiche (motori e generatori) entra necessariamente in campo anche la legge di Lorentz che relaziona le grandezze elettriche con quelle meccaniche (forza, coppia, ecc...).

----*----

Facciamo ora un’importante applicazione di queste leggi: **il calcolo di un trasformatore.**

Un'importante applicazione delle leggi di Faraday e di Hopkinson: IL CALCOLO DEL TRASFORMATORE

Se ci interessa il valore efficace V_{eff} della tensione indotta massima V espressa dalla (08), scriviamo:

$$V_{\text{eff}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N \cdot S \cdot B.$$

Da questa espressione, scaturisce la seguinte importantissima relazione:

$$V_{\text{eff}} = 4,44 \cdot f \cdot N \cdot S \cdot B \quad (14)$$

La (14) è la relazione fondamentale per il calcolo di tutte le macchine elettriche, generatrici e motrici, che funzionano sotto tensione alternata sinusoidale, ed in modo particolare, per il calcolo delle macchine elettriche statiche (trasformatori).

Affrontiamo, quindi, il calcolo di un trasformatore. Vedremo, alla fine, che è tutto molto semplice!

Iniziamo. Nella (14) vi sono parecchi parametri. Due di essi sono noti perché sono dati di progetto: infatti la frequenza f è implicitamente conosciuta se sappiamo in che ambiente il nostro trasformatore dovrà funzionare; anche l'induzione massima B è nota nel momento in cui decidiamo quale tipo di lamierini andremo ad utilizzare. Con i lamierini al ferro-silicio più largamente usati, possiamo imporre tranquillamente per B un valore massimo:

$$B_m = 1 \text{ Wb/m}^2$$

appena al di sotto dell'inizio della saturazione.

Poiché nella (14) rimangono ancora due incognite, si associa molto spesso ad essa la seguente relazione empirica, *valida per una frequenza $f=50\text{Hz}$* , che lega la sezione del nucleo in cm^2 alla potenza gestita dal trasformatore in Watt (o in VA per i più pignoli):

$$S_{50(\text{cm}^2)} = K \cdot \sqrt{P_{(\text{Watt})}} \quad (15)$$

dove K è definito come coefficiente di costipamento e dipende dal tipo di lamierini usati, dalla frequenza di lavoro, dalla qualità dell'avvolgimento effettuato ed anche dalla sovratemperatura accettata per la macchina durante il funzionamento. Così è determinata anche la sezione S del nucleo magnetico (lamierini).

Alla frequenza di 50Hz, con lamierini E-I a norme UNEL, e con avvolgitrici di media precisione, possiamo porre K intorno al valore $1,3 \div 1,4$. Con tale valore si può essere certi che l'avvolgimento elettrico riempie sufficientemente la finestra libera disponibile del circuito magnetico (il cartoccio), e che **la macchina costruita sarà adatta al funzionamento continuo**.

Rimane quindi, come valore incognito, solo il numero delle spire da avvolgere nel circuito elettrico:

$$N = \frac{V_{\text{eff}}}{4,44 \cdot f \cdot S \cdot B} \quad (16)$$

Nella pratica quotidiana, non viene calcolato l'intero numero di spire adatto alla tensione di lavoro V_{eff} , ma il numero di spire necessarie per un volt di tensione indotta, ossia "le spire/volt". In questo caso la (16) si trasforma così nella:

$$n(\text{sp/volt}) = \frac{1}{4,44 \cdot f \cdot S \cdot B} \quad (17)$$

Ottenuto con la (17) il numero di spire da avvolgere per avere 1 V_{eff} di tensione indotta, è facile trovare il numero totale di spire da avvolgere per realizzare il primario e i vari secondari del nostro trasformatore.

Per esempio, se la (17) ci fornisce un valore di 5,4 sp/v, avvolgeremo: per il primario sottoposto a 230V un numero $5,4 \times 230 = 1242$ spire; per un secondario che dovrà erogare 180V avvolgeremo $5,4 \times 180 = 972$ spire; per un altro secondario che dovrà fornire 6,3V avvolgeremo $5,4 \times 6,3 = 34$ spire; ecc...

----*----

E', a questo punto, *necessaria una precisazione* per quanto riguarda la frequenza f di esercizio. La frequenza $f=50\text{Hz}$ è un valore standard utilizzato in larga parte del mondo, ma vi sono altri valori di frequenze che vengono adoperati in zone molto rilevanti sia commercialmente che in termini di popolazione: si consideri il valore di 60Hz negli U.S.A. e nei territori sotto la loro influenza.

Ma si consideri pure **il valore di 400Hz a bordo degli aerei o delle navi militari, dove è importante la riduzione degli spazi e dei pesi**. Se utilizzassimo la (17) per frequenze diverse da 50Hz otterremo valori di S non ottimali e squilibrati nei rapporti Ferro/Rame: per esempio, con frequenze superiori a 50Hz avremmo una sezione S esagerata del circuito magnetico (nucleo), con un numero di spire ridotto, con la conseguenza di ottenere la finestra non riempita adeguatamente dagli avvolgimenti. Perciò è bene affiancare alla (17) la seguente relazione correttiva:

$$\frac{S_{f_x}}{S_{50}} = \sqrt{\frac{50}{f_x}} \tag{18}$$

che adatta la nuova sezione al valore della frequenza adoperata.

Esempio: Un trasformatore, in grado di gestire una potenza di 100W, ha, a 50Hz, un nucleo con una sezione di:

$$S_{50} = 1,3 \cdot \sqrt{100} = 13\text{cm}^2$$

Se, invece, la frequenza di lavoro è di 400Hz, la sua sezione S_{400} si riduce a:

$$S_{400} = 13 \cdot \sqrt{\frac{50}{400}} \cong 13 \cdot 0,35 \cong 4,6\text{cm}^2$$

molto più piccola della S_{50} . Poiché nella (14) è messa bene in evidenza la relazione inversa tra il numero delle spire N , la sezione del nucleo S e la frequenza f , una diminuzione di S porta ad un aumento di N . Ma si avrà anche una notevole riduzione di spire dovuta al valore più alto della nuova frequenza (di ben 8 volte passando da 50Hz a 400Hz). Infatti andiamo da un valore di 4,46sp/volt per i 50Hz a un valore di 1,22sp/volt per i 400Hz ottimizzando di nuovo la macchina, con il riequilibrio del rapporto Ferro/Rame.



Da quanto ora detto si può arguire facilmente come le dimensioni (e quindi il peso) delle macchine elettriche si riducano notevolmente al crescere della frequenza di funzionamento. Il calcolo appena eseguito ce ne dà un esempio. La foto riportata qui a fianco mostra la differenza sostanziale tra due trasformatori che **gestiscono la stessa potenza di 100W**.

Quello più grande, calcolato per una frequenza di 50Hz ha le dimensioni totali d'ingombro di $7,5 \times 9,2 \times 11,3 = 779,7\text{cm}^3$ e pesa 2850 grammi; quello più piccolo costruito per una frequenza di 400Hz e per la stessa potenza ha le dimensioni

totali d'ingombro di $5,5 \times 5,1 \times 6,2 = 173,9\text{cm}^3$ e pesa solo 720 grammi con una riduzione di circa 4,5 volte in meno in volume e di circa 4 volte in meno in peso.

Una domanda, allora, viene spontanea: "perché non usare sempre le frequenze elevate sulle linee di distribuzione, per es. i 400Hz?". La risposta, purtroppo, è negativa a causa della grande perdita di energia per irraggiamento sulle linee di alimentazione lunghe o lunghissime. Anzi per linee estremamente lunghe anche i 50Hz sono un valore appena accettabile. Perciò il vantaggio delle frequenze alte è confinato agli impianti realizzati in ambienti ristretti con lunghezze di distribuzione in cavi di poche centinaia di metri o al massimo di qualche chilometro.

-----*-----

Non rimane altro che il calcolo del diametro del filo che verrà utilizzato negli avvolgimenti (si tenga presente che i fili smaltati per avvolgimenti vengono forniti in commercio in base al loro diametro e non in base alla loro sezione).

In un trasformatore progettato per il funzionamento continuo, (quindi con l'applicazione della (15)), possiamo accettare una **corrente specifica δ di $2,5\text{Amp/mm}^2$** senza alcun problema derivante dall'innalzamento termico dei suoi avvolgimenti. Questo valore, inoltre, si adatta benissimo al K scelto ($K=1,3 \div 1,4$).

Perciò basta una semplice proporzione per determinare la sezione del filo, conoscendo la corrente massima che vi scorre dentro. Se con I indichiamo la corrente, con C la sezione del filo e con δ la corrente specifica, possiamo scrivere:

$$\delta : 1 = I : C$$

da cui si risale a C :

$$C = \frac{I}{\delta} \tag{19}$$

Conosciuta la sezione C del filo è facile calcolare il suo diametro d . Ricordando dalla geometria che:

$$C = \pi \frac{d^2}{4}$$

scriviamo:

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{C}{\pi}} \tag{20}$$

Ponendo la (19) nella (20), otteniamo:

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{I}{\delta \cdot \pi}} \tag{21}$$

Il semplice utilizzo della (21) ci fornirà il diametro del filo.

Applichiamo le relazioni su scritte in un reale progetto di un trasformatore.

Dobbiamo alimentare un apparato elettronico con tubi. Da considerazioni di progetto siamo arrivati alla conclusione che è necessario un trasformatore formato di due secondari: uno (A.T.) che fornisce una tensione di $200V_{eff}$ e che deve poter erogare una corrente di $100mA$, l'altro (B.T.) che fornisce una tensione di $6,3V_{eff}$ e che deve poter erogare una corrente di $2A$. La frequenza di rete è $50Hz$. L'induzione è $B=1Wb/m^2$. Scegliamo un coefficiente $K=1,3$.

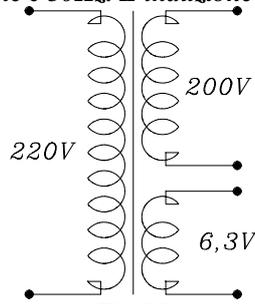


Fig.05

Realizziamo il trasformatore.

Per il rame (avvolgimenti) calcoliamo:

Secondario N° 1:	Tensione: Volt 200;	Corrente: Ampère 0,1	Potenza: Watt 20,0
Secondario N° 2:	Tensione: Volt 6,3	Corrente: Ampère 2	Potenza: Watt 12,6
Potenza totale: $20,0 + 12,6 =$ Watt 32,6			

Dalla (17) si ottiene: $S = 1,3\sqrt{32,6} = 7,42cm^2$ ($7,42/10000 m^2$)

Dalla (19) si ottengono le spire per volt: $sp/v = \frac{10000}{4,44 \cdot 50 \cdot 7,42 \cdot 1} = 6,06$ da cui:

Spire primario: $6,06 \cdot 220 = 1334$

Spire secondario A.T.: $6,06 \cdot 200 = 1213$

Spire secondario B.T.: $6,06 \cdot 6,3 = 38$

Calcolo dei diametri dei fili. Applichiamo la (23) ai due secondari:

$$d_{A.T.} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,1}{2,5 \cdot 3,14}} = 0,23mm ;$$

$$d_{B.T.} = 2 \cdot \sqrt{\frac{2}{2,5 \cdot 3,14}} = 1,01mm$$

Per il calcolo del diametro del filo del primario, si deve utilizzare prima la legge di Joule per determinare la corrente primaria.

$$I = \frac{W}{V} = \frac{32,6}{220} = 0,15Amp \quad \text{da cui immediatamente:}$$

$$d_{Prim} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0,15}{2,5 \cdot 3,14}} = 0,27mm$$

Per il ferro scegliamo un lamierino UNEL L25, con un cartoccio 25X30mm che realizza una sezione di nucleo pari a $7,5cm^2$ leggermente superiore a quella calcolata (ciò non guasta).



Una vecchia ma sempre valida bobinatrice in un ambiente dall'apparente totale disordine.



Il cartoccio in plastica, il "tacco 25X30", l'asse di trascinamento con i cunei e i bottoni di serraggio.

Sul cartoccio avvolgeremo prima le spire primarie, porremo uno strato di isolamento (se non è disponibile la carta per trasformatore o la tela sterlingata è sufficiente anche un paio di passate ben messe di comune nastro adesivo trasparente), poi avvolgeremo il secondario A.T., porremo un altro strato di isolante, infine avvolgeremo il secondario B.T. Se si usa il filo a doppio smalto non è necessario interporre l'isolamento tra strato e strato di ciascun avvolgimento. Smontato dalla bobinatrice il cartoccio così riempito, con un po' di pazienza ed attenzione introdurremo in esso i lamierini E e I, in modo alternato. E' conveniente introdurre prima tutti i lamierini a forma di E, stando attenti ad evitare

accavallamenti interni al cartoccio, specialmente verso la fine del riempimento (quando gli ultimi ormai entrano a forza nel foro del cartoccio). Poi si infileranno i lamierini a forma di I negli interstizi tra una E e l'altra. Alla fine si fisserà il tutto o tramite bulloncini o tramite calotte. Il trasformatore è finito e può essere collaudato, con la certezza quasi assoluta che funzioni correttamente. Tutto facile!

Ed ora alcune foto scattate durante la realizzazione del trasformatore.



Il cartoccio sistemato sull'asse, pronto per l'avvolgimento



Le prime 100 spire del primario



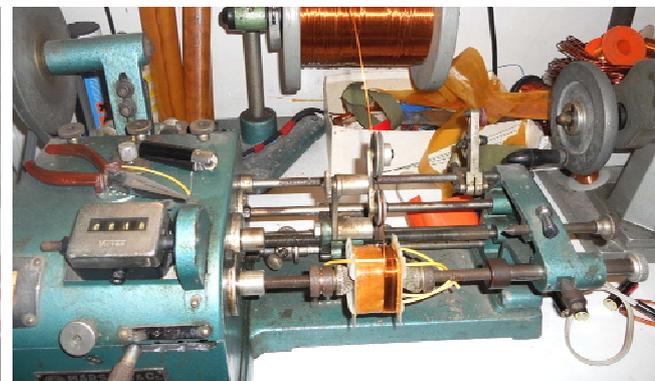
Il primario terminato e fasciato con tela sterlingata.



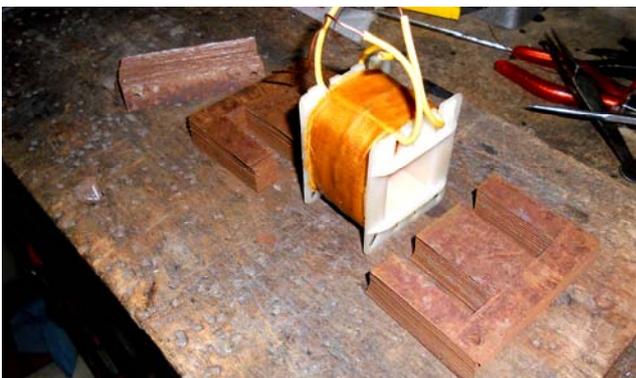
Le prime 100 spire del secondario A.T.



Il secondario A.T. terminato e fasciato con tela sterlingata.



Inizio del secondario B.T.



Il cartoccio, con gli avvolgimenti completati, è pronto per l'inserzione dei lamierini ad "E" in modo alternato



Inserzione dei lamierini ad "I" negli interstizi tra una "E" e l'altra

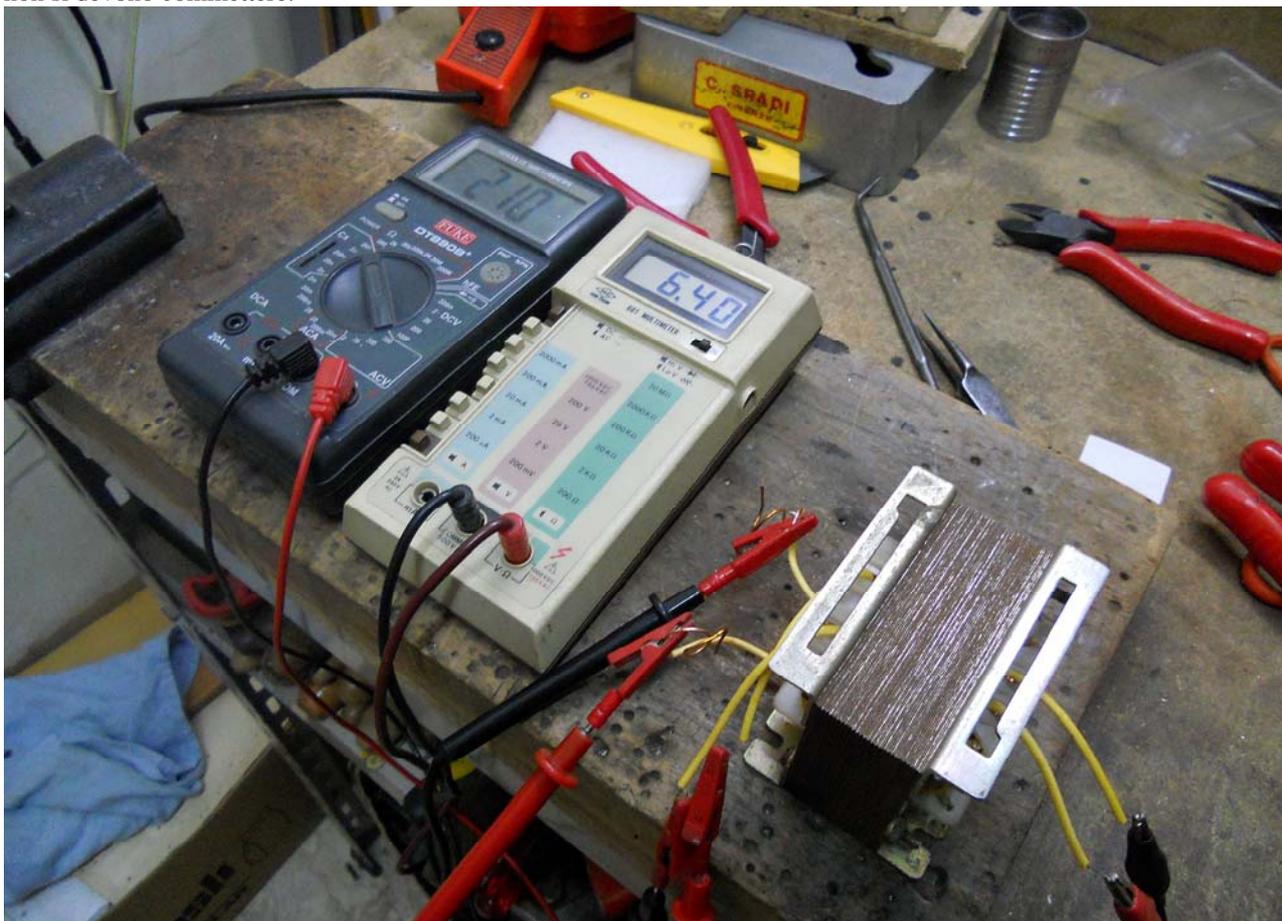
Dalle ultime due foto si può vedere come la finestra (ossia lo spazio utile del cartoccio per l'avvolgimento) sia stata sufficientemente riempita. Ciò ci conforta sulla decisione di aver utilizzato un coefficiente di costipamento K pari a 1,3. Un valore più basso di K avrebbe portato ad una riduzione del ferro ma anche ad un riempimento ridondante che poi non avrebbe permesso l'introduzione dei lamierini. Bisogna stare molto attenti nella valutazione di K perché una sua eccessiva diminuzione riduce il peso del trasformatore ma fa correre il rischio di dover rifare gli avvolgimenti con perdita di tempo e di denaro (il rame costa caro!), probabilmente anche con adeguata irritazione accompagnata da frasi a dir poco sconvenienti.

Per i curiosi faccio presente che l'accendino che compare in qualche foto serve per bruciare lo smalto sui terminali dei fili, in modo che poi possa essere più facilmente raschiato con le forbici (questo lavoro deve essere fatto con accortezza perché troppa fiamma potrebbe far fondere il filo quando è molto sottile! Anche l'uso delle forbici deve essere delicato altrimenti si possono spezzare i fili).

Collaudo

Serrati i lamierini con le appropriate flangie e i bulloni, ho sottoposto il trasformatore alle prove di collaudo. Con una tensione di 230V fornita in quel momento dalla rete ho riscontrato una tensione A.T. di 210V e una tensione B.T. di 6,4V, a vuoto. La tensione B.T. avrebbe dovuto essere di circa 6,6V, se il lavoro fosse stato fatto a regola d'arte. Ma durante l'avvolgimento del filo grosso da 1mm si sono mollati i bottoni di fermo dell'asse di trascinamento che bloccano il cartoccio, che si è fermato mentre l'asse ha continuato a girare ancora per pochi attimi fino a quando non ho tolto il piede dal pedale di comando. Così ho perso svariate spire, il cui numero non sono riuscito a determinare. Ne ho aggiunto alcune a mano che alla fine però non sono risultate sufficienti (manca una spira). A questo punto, per riparare il danno commesso, bisognerebbe smontare il trasformatore e rifare il secondario B.T. con più attenzione.

Avrei dovuto stringere con più forza i tre bottoni di serraggio godronati. Questo è uno dei classici errori che si fanno per eccesso di dimestichezza, imperdonabile per uno con abbastanza esperienza. Perciò attenzione! L'apparente semplicità del lavoro nasconde spesso ed inaspettatamente l'insidia. Certi errori così banali, ma densi di conseguenze, non si devono commettere.



La foto qui sopra mostra il trasformatore sotto collaudo. Dopo un'ora di funzionamento continuo (a vuoto) non si è notato alcun innalzamento termico apprezzabile nel ferro.