

# MOTORI PASSO-PASSO, CONSIDERAZIONI PRATICHE

## 2 – le caratteristiche

Gli amministratori ed i lettori mi vogliano scusare ma ho già problemi con Word e l'utilizzo dell'editor del sito mi complica la vita, ho quindi aggiunto un link, ad un file .pdf, alla fine dell'articolo.

Le illustrazioni sono, in parte fatte dal sottoscritto, ed in parte prese dalla rete.

Il mio primo tutorial riguardava, essenzialmente, come districarsi per selezionare le bobine da collegare all'azionamento, *drivers* per gli anglofoni, di un motore passo, *step, stepper, stepping motor*, bifase.

Per eventuali riferimenti l'articolo è qui:

<http://www.grix.it/viewer.php?page=5090>

Ora vedo, se mi riesce, di chiarire alcuni dubbi che assillano alcuni circa le caratteristiche di questo motore un po' strano.

Considererò quindi il solo motore e non entrerò in dettagli circa gli azionamenti perché non ne sono all'altezza.

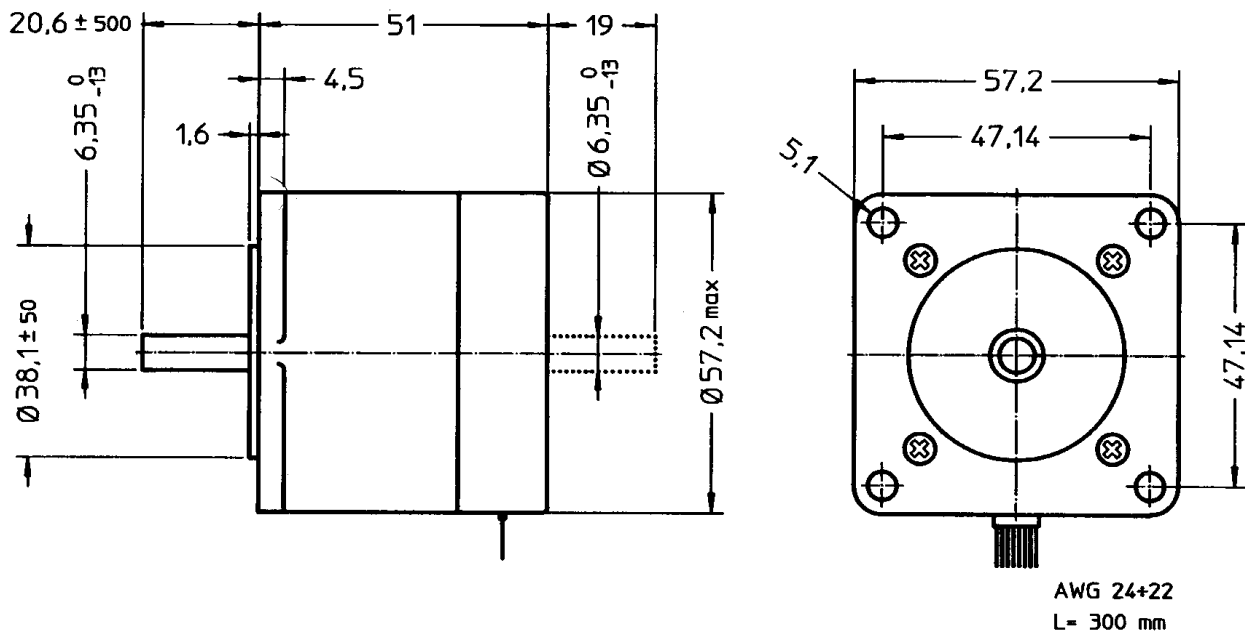
Comunque, nel forum, ci sono le competenze in questo campo!

Stesso incipit del mio articolo precedente:

*“scusate se, a volte, a qualcuno, sembrerò ovvio e prolisso ma non sono un divulgatore scientifico, ed il mio intento è di esser utile a coloro che vogliono iniziare a cimentarsi con questi motori un po' strani”*

Cominciamo considerando le caratteristiche che generalmente vengono riportate sui cataloghi. Il seguente foglio di catalogo ne è un esempio:

Data sheet - fronte -

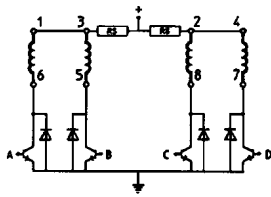


Dimensioni in mm Tolleranze in micrometri - Dimensions in mm Tolerances in micrometer

<b>Specifiche / Specifications</b>		0044 AX 08 0044 BX 08	0100 AX 08 0100 BX 08	0210 AX 08 0210 BX 08
- angolo di passo - <i>step angle</i>		1,8°	1,8°	1,8°
- precisione dell'angolo di passo - <i>step angle accuracy</i>	%	5	5	5
- corrente di fase nominale - <i>rated phase current</i>	A	0,44	1,0	2,1
- resistenza di fase - <i>phase resistance</i>	$\Omega$	23	5	1,1
- induttanza di fase - <i>phase inductance</i>	mH	43	9,5	2,0
- coppia di mantenimento unipolare - <i>holding torque unipolar</i>	Ncm	50	50	50
- coppia di mantenimento bipolare - <i>holding torque bipolar</i>	Ncm	60	60	60
- coppia residua - <i>detent torque</i>	Ncm	6	6	6
- inerzia del rotore - <i>rotor inertia</i>	gr cm <sup>2</sup>	124	124	124
- massa - <i>mass</i>	Kg	0,5	0,5	0,5
- classe di isolamento - <i>insulation class</i>		B	B	B

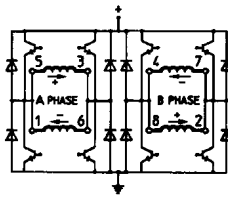
## Schema di collegamento - Connection diagram

UNIPOLARE - UNIPOLAR



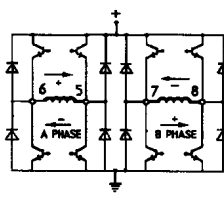
1 = BIANCO / NERO - WHITE / BLACK  
 2 = BIANCO / ROSSO - WHITE / RED  
 3 = BIANCO / ARANCIO - WHITE / ORANGE  
 4 = BIANCO / GIALLO - WHITE / YELLOW

BIPOLARE PARALLELO - BIPOLAR PARALLEL

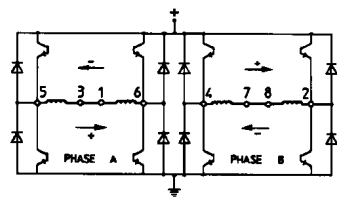


5 = ARANCIO - ORANGE  
 6 = NERO - BLACK  
 7 = GIALLO - YELLOW  
 8 = ROSSO - RED

BIPOLARE - BIPOLAR



BIPOLARE SERIE - BIPOLAR SERIES



## Sequenza di comando - Drive sequence

UNIPOLARE - UNIPOLAR

MEZZO PASSO - HALF STEP

PASSO	FASI - PHASES			
STEP	A	B	C	D
1	+	0	0	+
2	+	0	0	0
3	+	0	+	0
4	0	0	+	0
5	0	+	+	0
6	0	+	0	0
7	0	+	0	+
8	0	0	0	+
1	+	0	0	+

PASSO INTERO - FULL STEP

PASSO	FASI - PHASES			
STEP	A	B	C	D
1	+	0	0	+
2	+	0	+	0
3	0	+	+	0
4	0	+	0	+
1	+	0	0	+

BIPOLARE - BIPOLAR

MEZZO PASSO - HALF STEP

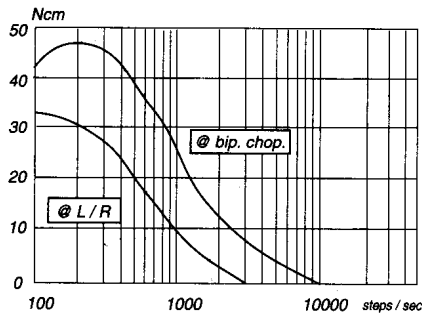
PASSO	FASI - PHASES	
STEP	A	B
1	+	+
2	0	+
3	-	+
4	-	0
5	-	-
6	0	-
7	+	-
8	+	0
1	+	+

PASSO INTERO - FULL STEP

PASSO	FASI - PHASES	
STEP	A	B
1	+	-
2	+	+
3	-	+
4	-	-
1	+	-

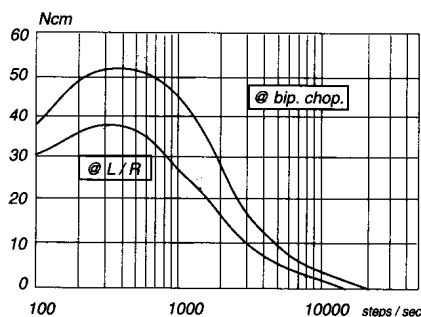
ROTAZIONE ORARIA CON MOTORE VISTO DAL LATO FLANGIA - CLOCKWISE ROTATION WITH MOTOR SEEN FROM THE FLANGE SIDE

**HY 200 2220 0044 AX 08**



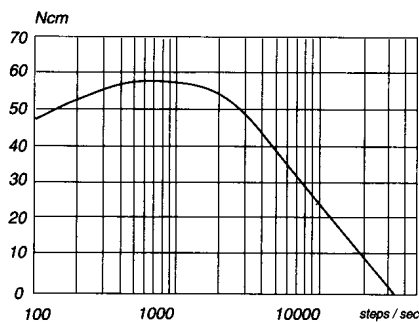
PILOTAGGIO: BIPOLARE CHOPPER 35 V - 0,62 A/F - DRIVE: BIPOLAR CHOPPER 35 V - 0,62 A/ph  
 PILOTAGGIO: UNIPOLARE L/R 25 V - Rs = 29 OHM - DRIVE: UNIPOLAR L/R 25 V - Rs = 29 OHM

**HY 200 2220 0100 AX 08**



PILOTAGGIO: BIPOLARE CHOPPER 35 V - 1,4 A/F - DRIVE: BIPOLAR CHOPPER 35 V - 1,4 A/ph  
 PILOTAGGIO: UNIPOLARE L/R 35 V - Rs = 29 OHM - DRIVE: UNIPOLAR L/R 35 V - Rs = 29 OHM

**HY 200 2220 0210 AX 08**



PILOTAGGIO: BIPOLARE CHOPPER 65 V - 2,9 A/F  
 DRIVE: BIPOLAR CHOPPER 65 V - 2,9 A/ph

TUTTI I DATI SONO TIPICI E SOGGETTI A MODIFICHE SENZA PREAVVISO - THE ABOVE MENTIONED SPECIFICATIONS ARE TYPICAL AND SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE

## TABELLA RIASSUNTIVA CARATTERISTICHE

#	caratteristica	unità	simbolo
1	angolo di passo <i>step angle</i>	gradi	°
2	precisione angolo di passo <i>step angle accuracy</i>	%	
3	corrente di fase nominale <i>rated phase current</i>	A	I
4	resistenza di fase <i>phase resistance</i>	Ω	R
5	induttanza di fase <i>phase inductance</i>	mH	L
6	coppia di mantenimento unipolare @ 2fasi on <i>holding torque unipolar @ 2 phases on</i>	Nm	HTu
7	coppia di mantenimento bipolare @ 2fasi on <i>holding torque bipolar @ 2 phases on</i>	Nm	HTb
8	coppia residua <i>detent torque</i>	Nm	DT
9	inerzia rotore <i>rotor inertia</i>	gr*cm <sup>2</sup>	J
10	massa <i>mass</i>	kg	m
11	classe d'isolamento <i>insulation class</i>		
12	curve di coppia <i>pull out curves</i>		
13	schema di collegamento <i>connection diagram</i>		
14	sequenza di comando <i>drive sequence</i>		

Vediamole ora più in dettaglio.

## 1. angolo di passo

Rappresenta lo spostamento elementare del rotore ottenuto eccitando opportunamente due fasi consecutive.

## 2. precisione angolo di passo

E' la massima deviazione percentuale dalla posizione teorica, riferita all'angolo di passo, che avviene su una rivoluzione completa del rotore .

Per posizione teorica esistono molte interpretazioni dipendendo dal tipo di lavoro che si vuol fare.

E' più facile capirsi con esempi!

Esempio con motore di 30°/step, 12 passi/giro:

N° passo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>TEST A</b>												
passo teorico	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
misura	30,45	59,10	90,72	117,96	150,00	184,50	207,06	237,84	273,24	305,10	333,30	359,86
deviazione	0,45	-0,90	0,72	-2,04	0,00	4,50	-2,94	-2,16	3,24	5,10	3,30	-0,14
errore %	1,50	-1,50	0,80	-1,70	0,00	<b>2,50</b>	-1,40	-0,90	1,20	1,70	1,00	-0,04

### TEST B

passo teorico	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
misura	30,45	28,65	31,62	27,24	32,04	34,50	22,56	30,78	35,40	31,86	28,20	26,56
deviazione	0,45	-1,35	1,62	-2,76	2,04	4,50	-7,44	0,78	5,40	1,86	-1,80	-3,44
errore %	1,50	-4,50	5,40	-9,20	6,80	15,00	-24,80	2,60	18,00	6,20	-6,00	<b>-11,48</b>

*NB I dati sono stati messi un po' a caso*

I confronto è fatto con lo stesso motore ma nel *test B*, viene preso come zero il passo precedente.

Generalmente la precisione del costruttore è del 5% ma anche del 3% per i motori *ibridi* mentre per quelli a *magnete permanente* si viaggia sul 6%; il riferimento è al *test A*.

NB:

*-Il numero di steps/giro non dipende dal numero dei fili del motore ma dalla conformazione del circuito magnetico e dalla logica adottata per alimentarne le fasi.*

*-Se pilotato correttamente lo step farà tutti i passi richiesti ne uno in più od in meno.*

*-Gli errori angolari non si cumulano. Dopo aver fatto un giro la posizione finale sarà 360° più l'errore.*

*-Esistono anche errori d'isteresi, dovuti essenzialmente a varie coppie tra cui quelle d'attrito, che fanno sì che, invertendo la rotazione, il rotore non ritroverà esattamente le precedenti posizioni, anche quest'errore non si cumula.*

## 3. corrente di fase nominale

E' la massima corrente che può circolare continuamente, negli avvolgimenti, senza porre il motore in rotazione, frequenza di pilotaggio = 0 steps/s, senza che il motore si riscaldi oltre quanto ammesso dalla classe d'isolamento, che generalmente prevede una temperatura massima degli avvolgimenti di 130°C.

Per inciso, faccio notare che il riscaldamento è, se non la principale caratteristica, una tra le più importanti su cui ci si deve basare per impostare un motore elettrico.

Nulla vieta di sovraalimentare il motore, fermo restando quanto detto prima (duty cycle ridotto), salvo il caso di motori ibridi con magneti fusi: se si supera di molto la corrente nominale si rischia di smagnetizzare il magnete e, quindi, perdere in prestazioni.

#### 4. resistenza di fase

È la resistenza che si rileva ai capi di una fase:

per motori a 4 fili è ovvia, per quelli a 5 fili è quella tra il comune ed uno degli altri cavetti, per i 6 fili è quella tra il comune ed uno degli altri cavetti della stessa fase e per gli 8 fili è quella rilevabile tra due qualsiasi cavetti che diano continuità.

La tolleranza, di solito, è inferiore al 10%.

È una delle fonti di generazione del calore che limitano le prestazioni del motore; infatti le perdite per effetto joule di un avvolgimento sono date da  $P_j = R I^2$ .

A pari struttura del motore a R alta corrisponde una I bassa e viceversa.

Infatti l'ipotesi di progetto sono di lavorare a pari perdite nel rame,  $P_j$ , a pari dimensioni del motore.

La resistenza può essere utile per calcolare la temperatura, in °C, raggiunta dagli avvolgimenti:

$$\text{Formu- } \theta = \frac{R_c}{R_f} \cdot (235 + T_f) - 235 \quad \text{la 1 @ rame}$$

dove :

$\theta$  rappresenta la temperatura dell'avvolgimento considerato,

$R_c$  la sua resistenza a caldo dopo il test di riscaldamento,

$R_f$  quella a freddo,

$T_f$  la temperatura a freddo prima del test.

Prima di rilevare la  $R_f$  assicurarsi che il motore abbia raggiunto l'equilibrio termico alla temperatura  $T_f$ , solitamente un paio d'ore per i motori più piccoli.

Si può anche calcolare  $\theta$  sostituendo  $R_c / R_f$ , in formula 1, con  $V_c / V_f$ , dove le V sono, rispettivamente, le tensioni ai capi dell'avvolgimento a caldo ed a freddo, questo nel caso di alimentazione a tensione costante  $V_f = R_f \cdot I$ .

Se si alimenta il motore a corrente costante sostituire  $R_c / R_f$  con  $V_f / V_c$  ma occorre controllare di avere a disposizione almeno una  $V_f$  circa il 25÷40 % in più di  $V_f = R_f \cdot I$  onde evitare che all'aumentare della R non vi sia più tensione disponibile per mantenere la I costante.

Fare le prove con due fasi in parallelo od in serie raddoppiando la V.

Sempre a proposito della resistenza può essere utile calcolarne il valore ad una determinata temperatura:

$$R_{x0} = R_{t0} \cdot \left( \frac{235 + x0}{235 + t0} \right) \quad \text{Formula 2 @ rame}$$

dove:

$R_{x0}$  è al R prevista alla temperatura  $x0$  mentre

$R_{t0}$  è quella riferita a  $t0$ .

## 5. induttanza di fase

E' la caratteristica che permette di immagazzinare l'energia di un circuito magnetico.

Si misura ai capi di una fase:

per motori a 4 fili è ovvia, per quelli a 5 fili è quella tra il comune ed uno degli altri cavetti, per i 6 fili è quella tra il comune ed uno degli altri cavetti della stessa fase e per gli 8 fili è quella rilevabile tra due qualsiasi cavetti che diano continuità.

La tolleranza, di solito, è inferiore al 20%.

Generalmente viene misurata con ponti ad 1kHz.

E' possibile anche calcolarla indirettamente considerando la scarica di un induttore ma serve un oscilloscopio o quantomeno registrare la variazione della corrente nel tempo:

$$L = \frac{R \cdot t}{\ln \frac{I}{i}} \quad \text{Formula 3}$$

$L$ , [H], è l'induttanza

$R$ , [ $\Omega$ ], è la resistenza su cui si scarica l'induttanza, solitamente la  $R_{avv}$  più  $R_s$ , che è quella per leggere la corrente

$t$ , [s], è il tempo che impiega la corrente a passare da  $I$  ad  $i$

$I$ , [A], è la corrente circolante prima della scarica dell'induttanza

$i$ , [A], è la corrente circolante al tempo  $t$

$\ln$  sta per logaritmo naturale

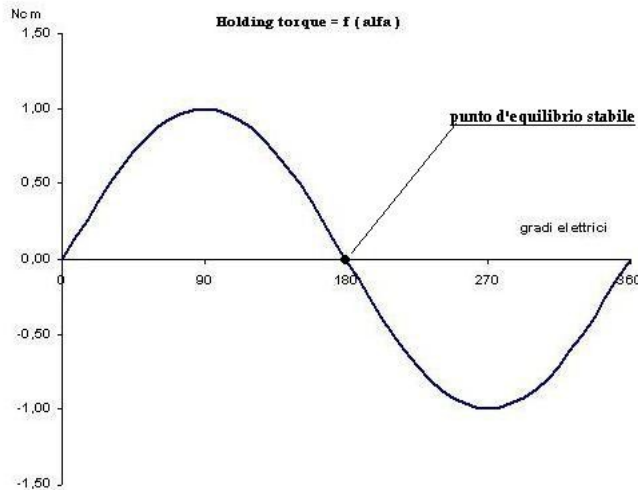
L'induttanza è sensibile alla posizione del rotore ed anche alla corrente di prova per cui è possibile trovare differenze anche forti tra un metodo e l'altro.

**Prima di specificare le varie definizioni delle coppie di tenuta, vediamo cosa significa il termine generico coppia di mantenimento, *holding torque*.**

E' la massima coppia che dobbiamo applicare all'albero per ottenere uno spostamento di un passo.

Se proviamo a far ruotare manualmente e lentamente l'albero, a motore eccitato con frequenza zero, noteremo che, inizialmente, l'albero oppone una resistenza che aumenta con l'aumento dell'angolo per poi diminuire fino al punto che sarà l'albero a muoversi nel senso in cui lo stiamo ruotando per arrestarsi in un nuovo punto d'equilibrio.

Se analizziamo la coppia al variare dell'angolo noteremo che è simile ad una sinusoidale, nella figura 1 ne è riportata una delle N.



**Fig.1- HT**

Di questi cicli, in un giro, ne esistono:

$$N = \frac{360}{4 \cdot \alpha} \quad \text{Formula 4}$$

dove  $\alpha$  è l'angolo di passo

La conseguenza è che esisteranno N punti d'equilibrio in un giro.

Per cui l'angolo di passo sarà:

$$\alpha = \frac{360}{4 \cdot N} \quad \text{Formula 5}$$

Da questo possiamo conoscere l'angolo del motore semplicemente contando i punti d'equilibrio: il motore deve essere alimentato, non necessariamente con la I nominale, è sufficiente che si possa percepire un deciso scatto dell'albero, anche un solo avvolgimento alimentato è sufficiente.

I gradi riportati nella precedente figura non sono da confondere con quelli dell'albero motore, che rappresentano i gradi meccanici.

Un ciclo è composto da 360 gradi che definiremo *elettrici*.

$$\alpha_{mecc} = \frac{4 \cdot \alpha_{elettrici}}{4 \cdot N} \quad \text{Formula 6}$$

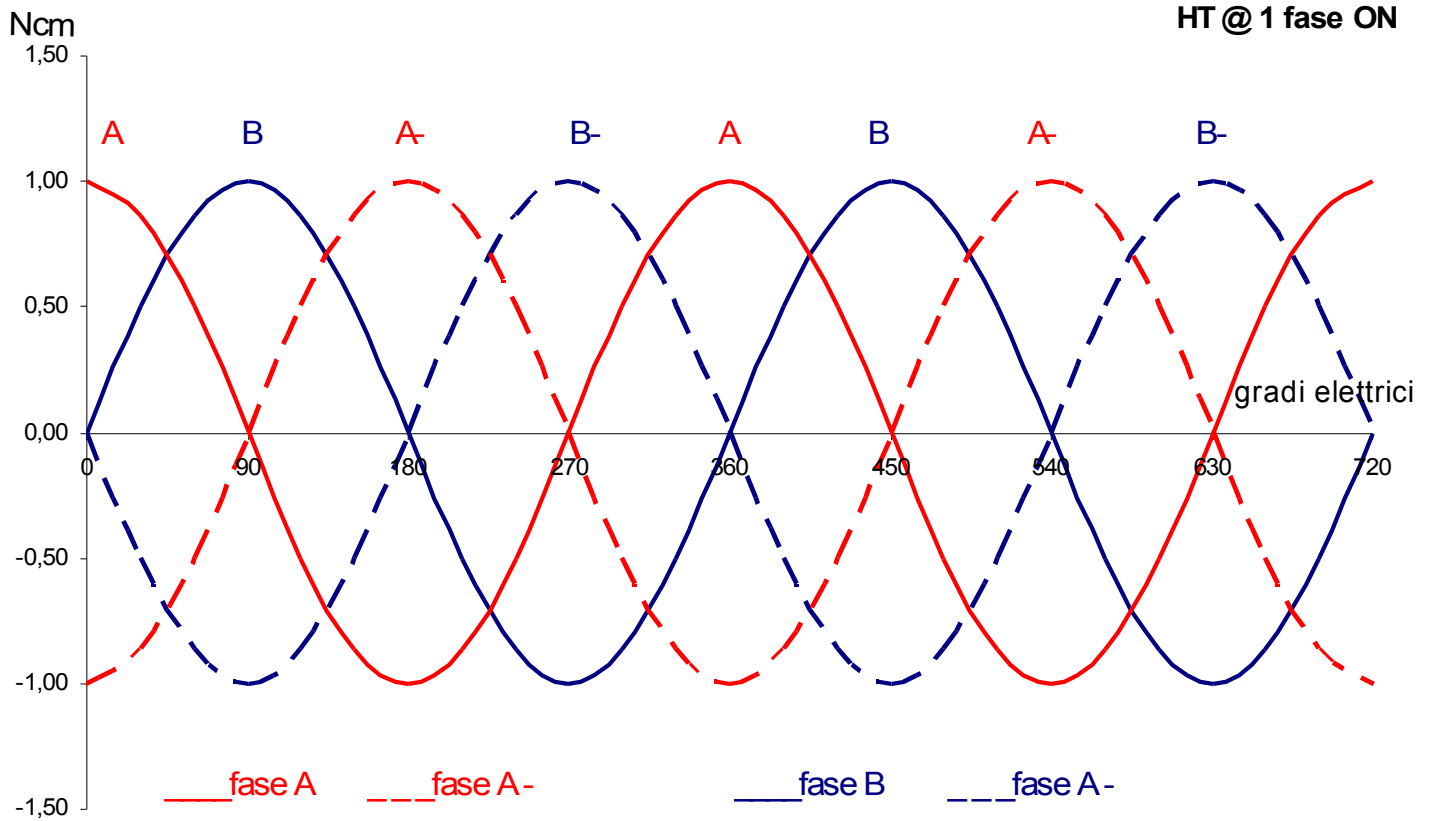
Quindi un ciclo di *HT* occupa 4 passi motore.



Per HT s'intende il valore massimo della sinusoide, che non differisce di molto tra una combinazione di fasi e le altre, se il motore è ben fatto.

L'HT è direttamente proporzionale alla I: con un incremento di quest'ultima si otterrà circa l'identico incremento della coppia, in effetti è un poco inferiore a causa della non linearità del magnete che è presente nel rotore e della non linearità del circuito magnetico.

I motori steps presi in considerazione qui possono essere considerati motori sincroni bifase. Quindi il circuito magnetico ed avvolgimenti sono combinati in modo da creare coppie sfasate di  $90^\circ$ .

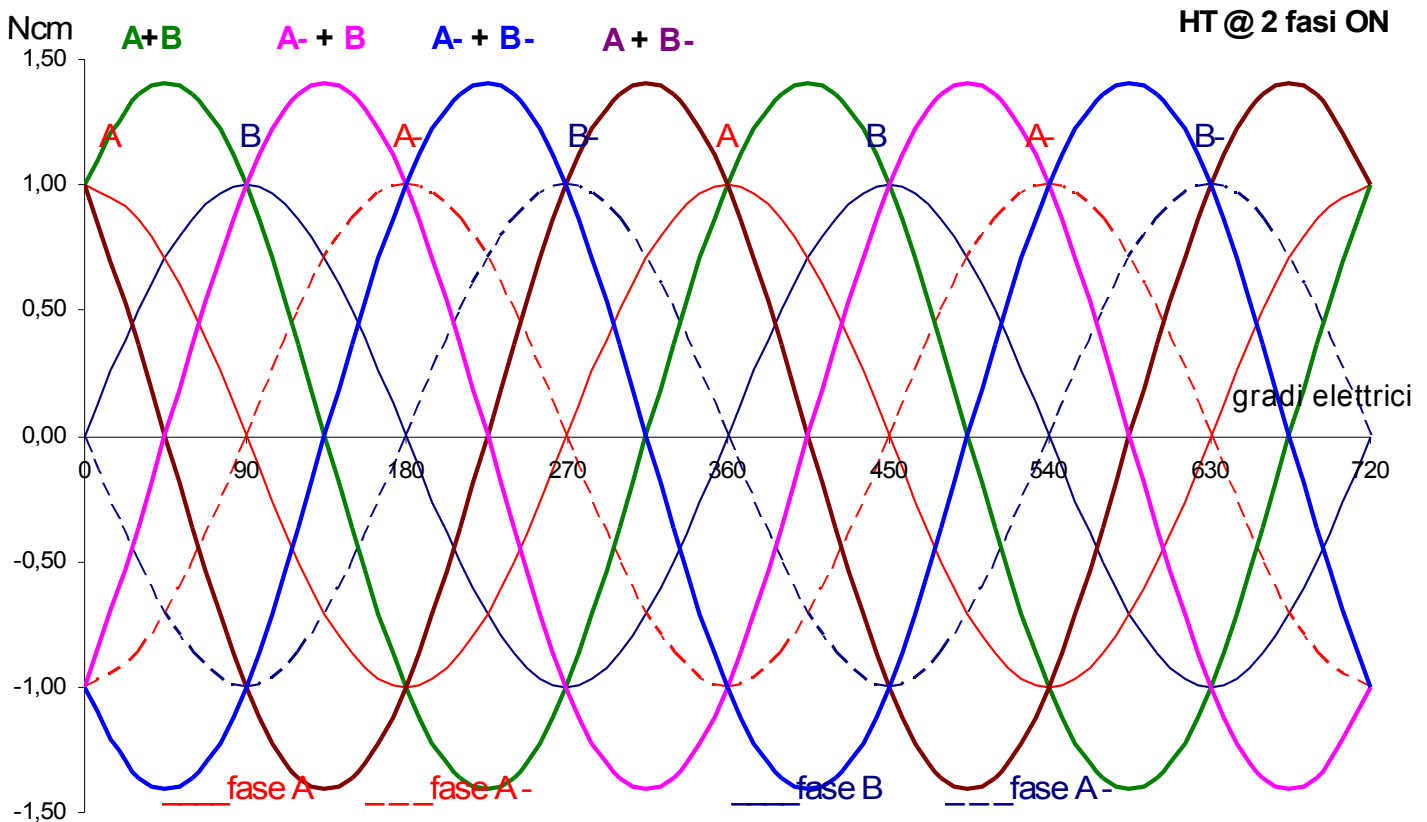


Con "A-" e "B-" s'intendono le coppie del motore eccitate con polarità opposte di statore: praticamente in un bipolare invertendo la corrente nello stesso avvolgimento.

**Fig.2 - HT @ 1 fase ON**

Quando eccitiamo una fase, per esempio la **A**, il rotore si muoverà sulla relativa posizione d'equilibrio più vicina, supponiamo sia quella dei  $90^\circ$ , ma potrebbe anche essere  $k \cdot 360$ ,  $k$  intero, non dimentichiamo che di cicli di HT ne esistono diversi, in figura 2 ne sono indicati solo alcuni.

Generalmente, per sfruttare meglio le prestazioni del motore, vengono eccitate due fasi contemporaneamente otterremo quindi:



**Fig.3 - HT @ 2 fasi ON**

Come si può constatare è esattamente quello di fig.2 con due differenze

- la HT aumenta teoricamente di  $\sqrt{2}$ , meno in verità, come detto prima
- le posizioni d'equilibrio si spostano di  $90^\circ$  rispetto all'equilibrio con 1 fase "on": se prima, con fase A "on" era a  $90^\circ$ , ora con A+B si sposta a  $135^\circ$ .

Per il resto valgono le considerazioni precedenti.

Per la misura della HT il migliore e più semplice metodo consiste nel calettare sull'albero una puleggia di raggio noto sulla cui circonferenza viene fissato un sottile filo a cui, con molta delicatezza vengono sospesi dei pesi; all'aumentare del peso il rotore ruoterà di una frazione di passo finché non cederà di colpo: il motore dev'essere alimentato con corrente costante nelle fasi del valore che interessa.

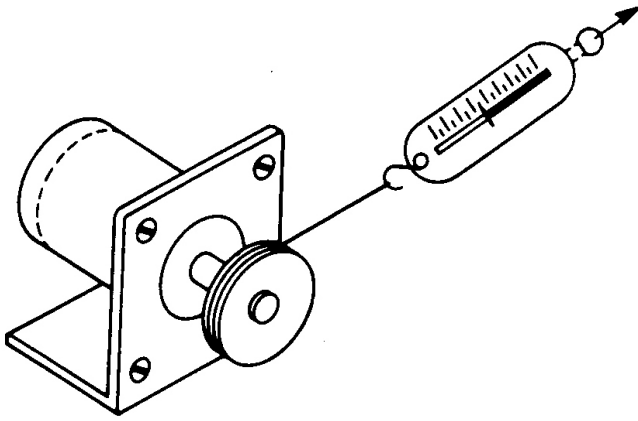
La coppia sarà data da

$$HT = R_p \cdot P$$

$R_p$ , [m], è il raggio della puleggia,

$P$ , [N], è il massimo peso supportato prima della rotazione della puleggia,

$HT$ , [Nm], holding torque.



**Fig.4 Set-up HT**

Si può anche utilizzare un'asta montata sull'albero ma occorre tenere l'albero orizzontale ma mano che ruota; per piccoli angoli di passo l'errore commesso è piccolo ma per angoli grandi comincia a diventare importante infatti è proporzionale a  $(1 - \cos \alpha)$  con  $\alpha$  angolo del passo.

Altro sistema è come da figura 4 con la precauzione di mandare in tensione il dinamometro molto lentamente e osservarne la lettura massima.

### **coppia di mantenimento unipolare @ 2fasi on**

È la coppia che dobbiamo applicare all'albero per ottenere uno spostamento di un passo con la corrente nominale unipolare e due fasi eccitate: motore a frequenza zero e corrente costante.

*Nota* eccitando i due avvolgimenti di una stessa fase otterremo coppia nulla, come si può peraltro osservare dal grafico di fig.3 o 2.

### **coppia di mantenimento bipolare @ 2fasi on**

È la coppia che dobbiamo applicare all'albero per ottenere uno spostamento di un passo con la corrente nominale bipolare e due fasi eccitate: motore a frequenza zero e corrente costante.

## **8. coppia residua**

A motore diseccitato, se i cavi delle fasi non si toccano, ruotando manualmente l'albero ci potremmo accorgere che esiste una coppia resistente che non è dovuta solamente all'attrito delle boccole o dei cuscinetti: è la coppia residua.

È dovuta principalmente al magnete presente nel rotore, ha una forma teoricamente sinusoidale, valore circa 1/10 dell'holding torque, ed in un ciclo di HT ci stanno 4 cicli di DT.

È una delle principali cause degli errori d'angolo e crea problemi in caso d'utilizzo del motore in micropassi, nel senso che più frazioniamo il passo più l'errore angolare aumenta.

Per la misura valgono le stesse considerazioni fatte per l'HT, naturalmente senza alimentare il motore e, come specificato precedentemente, assicurarsi che i cavetti non facciano contatto tra loro.

## 9. inerzia rotore

E' la caratteristica che penalizza le prestazioni in accelerazione/decelerazione del motore. Questa caratteristica entra in gioco anche quando si parla di risonanze: infatti quando l'albero ha fatto l'ultimo passo richiesto gli anziché fermarsi oscilla attorno alla sua posizione d'equilibrio per alcuni istanti.

Il periodo d'oscillazione è circa

$$\text{For- } T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{J}{HT \cdot N}} = \frac{1}{f_r} \quad \text{mula 7 - frequenza di risonanza propria motore}$$

con:

$f_r$ , [Hz], frequenza di risonanza

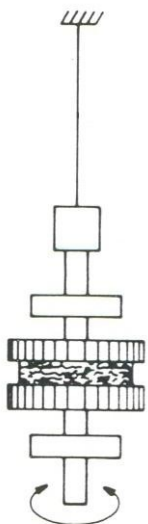
$T$ , [s], periodo d'oscillazione

$J$ , [  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$  ] inerzia rotore più carico

$HT$  [  $\text{N} \cdot \text{m}$  ], coppia di tenuta

$N$ , vedi formula 4

Per la misura dell'inerzia si tratta di sospendere il rotore, tramite una corda metallica, tipo quelle del pianoforte, di modo che la corda sia il naturale prolungamento dell'albero, come da figura 5, quindi farlo oscillare attorno all'asse di rotazione, contando quanto tempo impiega per fare alcune oscillazioni complete e calcolare il tempo medio d'oscillazione; stessa cosa va fatta con un cilindro/disco di cui si sia preventivamente calcolata l'inerzia, quindi



$$\text{F } J_R = J_d \cdot \left( \frac{T_R}{T_d} \right)^2 \quad \text{ormula 8}$$

dove:

$J_R$ , [  $\text{g} \cdot \text{cm}^2$  ], inerzia rotore

$J_d$ , [  $\text{g} \cdot \text{cm}^2$  ], inerzia cilindro

$T_R$ , [s], periodo oscillazione rotore

$T_d$ , [s], periodo oscillazione cilindro [ s ]

Fig.5 – Set-up rilievo inerzia

## 10.massa

Nessuna considerazione

## 11.classe d'isolamento

Definisce la tipologia dei materiali isolanti impiegati e stabilisce la massima sovratemperatura ammessa sul motore per il suo funzionamento.

La temperatura ambiente di riferimento è di 40°C.

Le principali sono:

- Classe E:  $T_{max}=75^{\circ}C$
- Classe B:  $T_{max}=80^{\circ}C$
- Classe F:  $T_{max}=100^{\circ}C$
- Classe H:  $T_{max}=125^{\circ}C$

La maggioranza degli step è in classe B ma, per applicazioni gravose si trovano anche in classe H.

La massima sovratemperatura si raggiunge negli avvolgimenti ma, in casi particolari, lo statore, inteso come ferro, scalda più del rame.

## 12.curve di coppia

Forniscono un grafico relativo alla coppia erogata dal motore in funzione delle velocità.

- Gli steps sono motori sincroni e, quindi, non possono lavorare a velocità differenti da quella che viene loro comandata, qualora succedesse e se il carico supera la coppia sincrona, PO, anche per alcuni msec, rischia di perder il passo.

Le curve rappresentano l'involgimento delle varie coppie sincrone alle rispettive velocità.

Ad esempio consideriamo la curva di un asincrono:

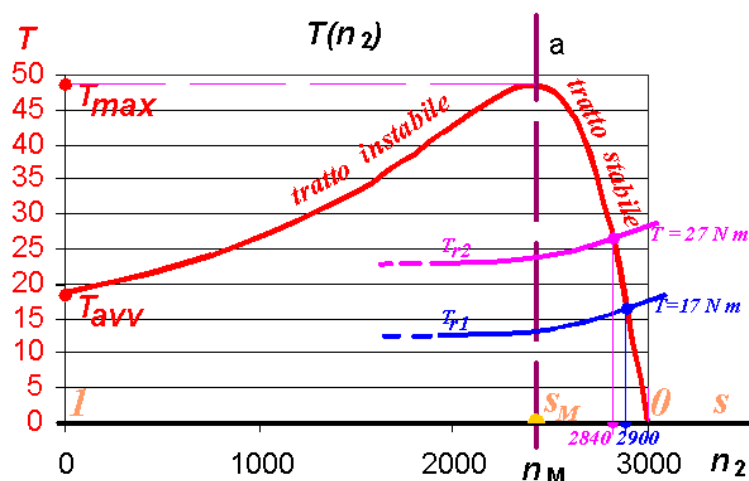
Tratto da [http://www.barrascarpetta.org/01\\_ele/m\\_5/m5\\_u04.htm](http://www.barrascarpetta.org/01_ele/m_5/m5_u04.htm)

*“ Si supponga, infatti, che il motore vinca la coppia resistente  $Tr_1$  di 17 Nm alla velocità di equilibrio  $n_2 = 2900$  giri/min. Se ad un certo istante la coppia applicata all'albero cresce e diventa  $Tr_2=27$  Nm, il motore, con coppia resistente superiore a quella motrice, deve rallentare. Ma al diminuire della velocità la coppia motrice prodotta cresce, come si vede dal grafico, e quando raggiunge il valore di quella resistente si ha la nuova condizione di equilibrio, ad una velocità inferiore e pari a  $n_2 = 2840$  giri/min. Finché il carico richiede la coppia di 27 Nm, questa nuova condizione di equilibrio viene mantenuta alla velocità costante di 2840 giri/min. L'equilibrio è stabile, poiché l'allontanamento da una iniziale condizione di equilibrio porta al raggiungimento spontaneo di una nuova situazione di equilibrio.*

*Un'analogia situazione, riproposta invece nella zona di equilibrio instabile della caratteristica, porterebbe all'arresto del motore o al funzionamento nel tratto stabile.*

*Ad esempio, partendo da una situazione di equilibrio tra coppia motrice e resistente, nel caso in cui crescesse la coppia resistente il rotore rallenterebbe. Al diminuire della velocità, però, in quel tratto della curva, anche la coppia motrice diminuirebbe e sarebbe sempre di più inferiore a quella resistente, con allontanamento dall'equilibrio, fino al bloccaggio del rotore.*

La zona di funzionamento, in condizioni normali di equilibrio, è quella del tratto stabile, compresa fra circa la metà della coppia massima  $T_M$  e il funzionamento a vuoto. In questo tratto, data l'elevata pendenza della caratteristica meccanica, per elevate variazioni della coppia applicata all'albero, la velocità non varia di molto, pur diminuendo al crescere del carico stesso (a pieno carico  $s\% = 3\div 8$ ). “



Contrariamente alla curva dell'asincrono quella dello step è da considerarsi come l'involuppo di tante caratteristiche, una per ogni frequenza, rappresentate da una retta come ad esempio quella rappresentata da  $n_M$  sulla curva precedente. Lo step a quella frequenza ha quella coppia, se il carico è superiore alla coppia generata, il motore perde il sincronismo e perde passi.

Per la misura della coppia in rotazione il sistema più semplice è schematizzato nella figura 6 seguente, è da notare che il filo deve essere avvolto attorno alla puleggia in senso contrario alla rotazione dell'albero.

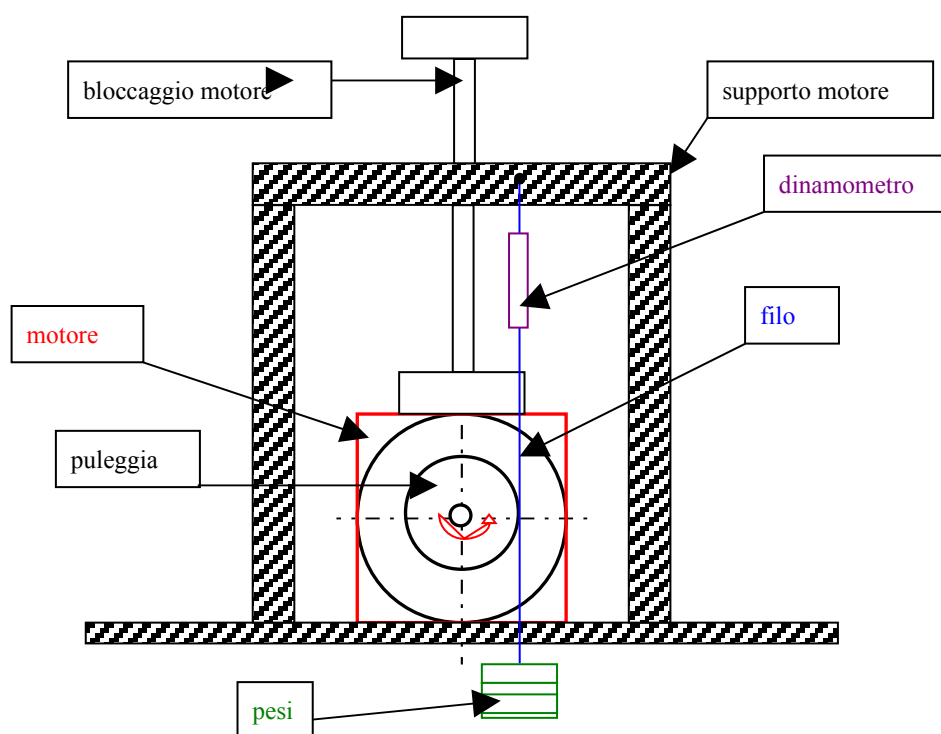


Fig.6 – Set-up per rilievo pull-out

Il procedimento da seguire. per ogni frequenza d'interesse, è il seguente:

- 1- alimentare il motore e portarlo alla frequenza di prova senza mettere alcun peso
- 2- cominciare a mettere, dolcemente i pesi finché il rotore non perde passi, e, generalmente si blocca
- 3- se il motore si è bloccato riaccelerarlo alla frequenza di prova senza mettere alcun peso
- 4- calare leggermente i pesi rispetto al punto 2 e rifare la misura leggendo il dinamometro la coppia sarà data da

$$PO = (\text{peso} - \text{lettura\_dinamometro}) * \text{raggio\_puleggia}$$

dove:

***PO***, [Nm]

***peso e lettura dinamometro***, [N]

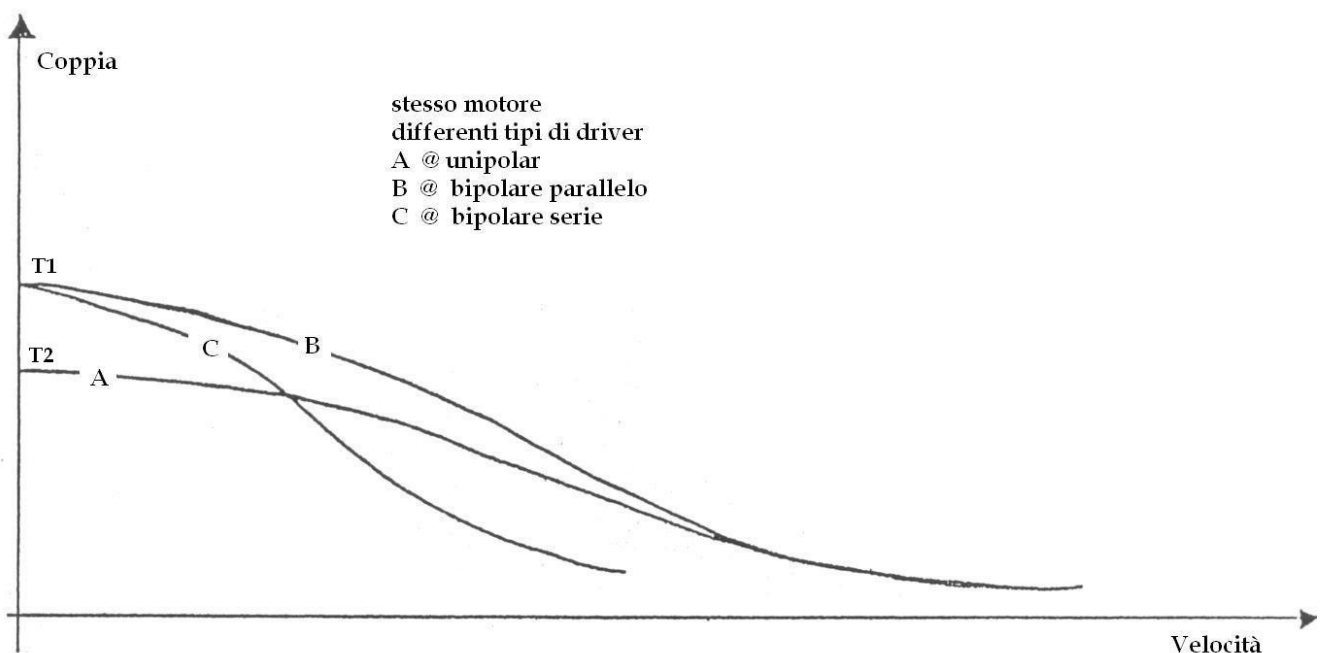
***raggio puleggia***, [m]

Come si può vedere dal *data sheet 1* nelle curve di coppia la scala delle velocità è logaritmica, per meglio evidenziare la caratteristica a basse velocità, dato che il rapporto tra la massima e minima velocità è superiore a 100.

Sono altresì riportati la tipologia del driver con relative tensione e corrente e, se necessario, il tipo di collegamento degli avvolgimenti del motore.

*La coppia fornita dal motore ad una specifica velocità dipende dal tipo di driver utilizzato dalla tensione e corrente impostata.*

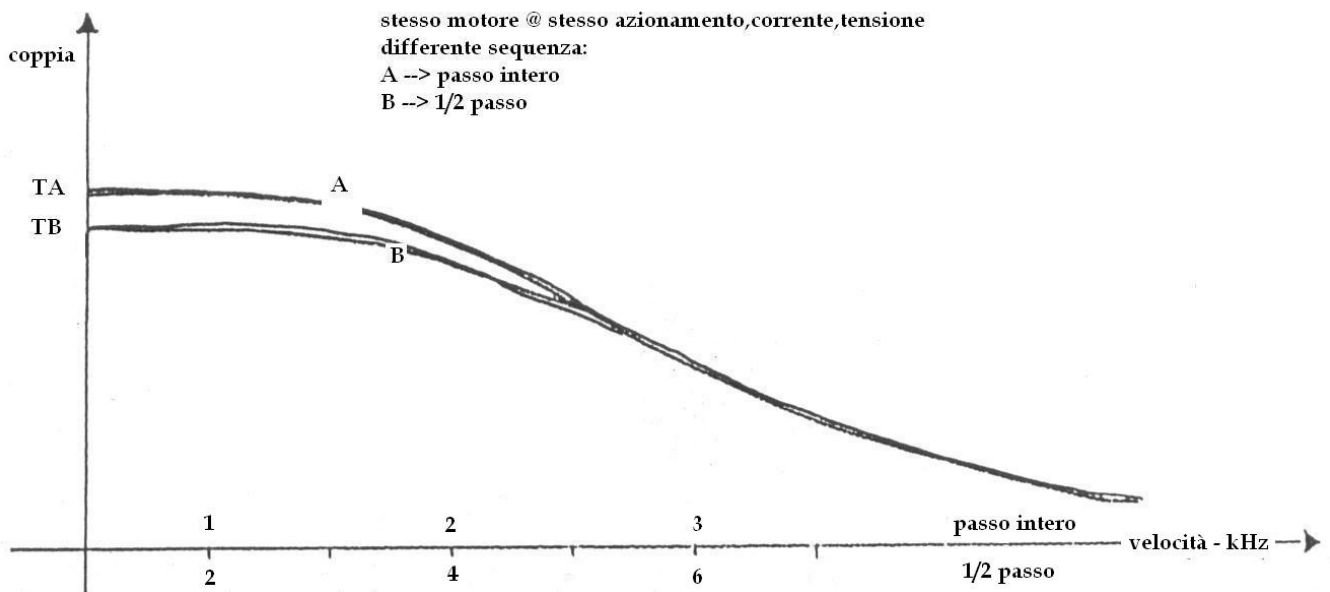
Alcune considerazioni qualitative.



**Fig. – 7 Caratteristiche al variare del driver**

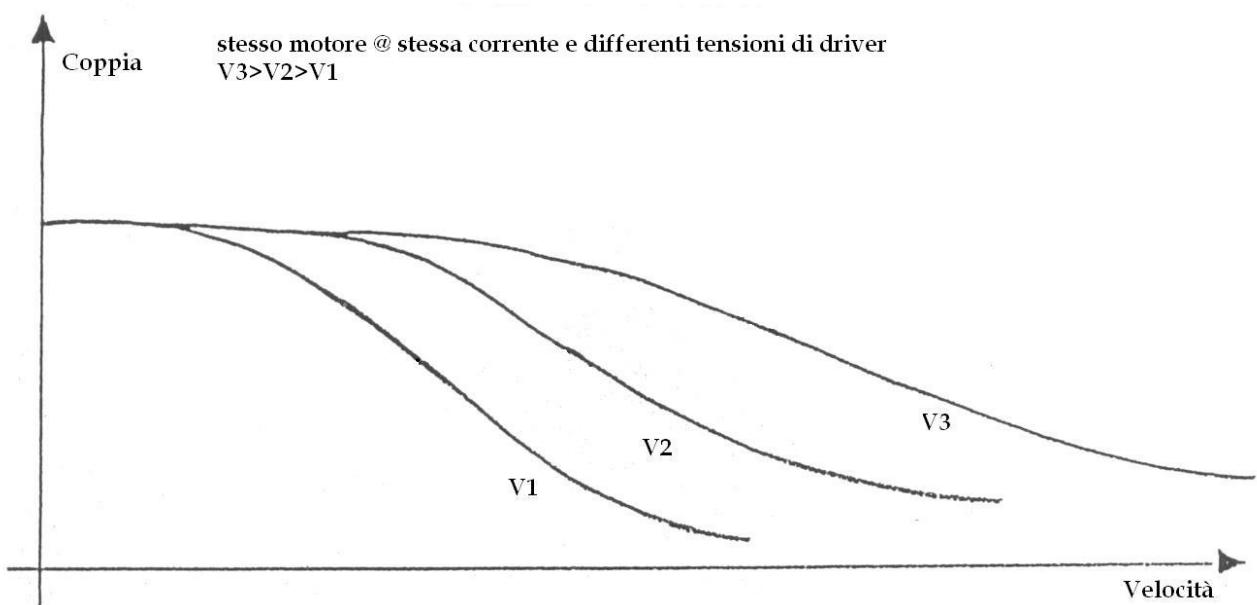
In fig.7, supponiamo la corrente in unipolare  $I_u$  allora quella relativa al bipolare parallelo  $I_{bp} = 1.41 * I_u$ , e quella bipolare serie  $I_{bs} = 0.707 * I$ ; questo per mantenere costante le perdite nel rame. Inoltre possiamo considerare che il rapporto  $T1/T2$ , coppie all'inizio della caratteristica, può variare tra 1.2 e 1.4.



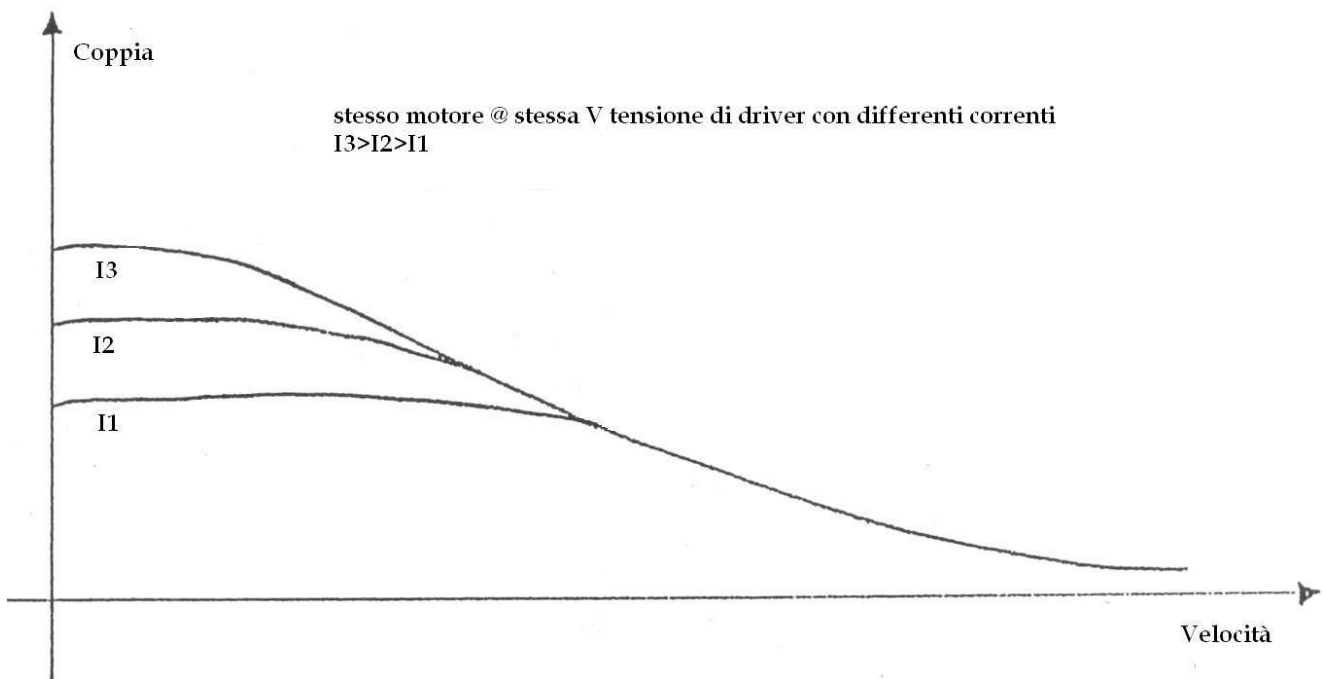


**Fig. – 8 Caratteristiche al variare della sequenza d'azionamento**

In fig.8 il rapporto tra  $TA/TB$  vale circa  $1.1$ . E' altresì importante notare che, a passo intero, si possono avere problemi di risonanza a basse velocità che col  $1/2$  passo vengono attenuati.



**Fig. – 9 Caratteristiche al variare della tensione di driver**



**Fig. – 10** Caratteristiche al variare della corrente di driver

### 13.schemi di collegamento

Come visto nel mio precedente tutorial ogni motore è composto da 2 fasi ed ogni fase può essere composta da 1 o 2 avvolgimenti. Ogni fase genera delle polarità sullo statore che si invertono quando la corrente cambia verso.

Nel motore a 4 fili ogni fase è quindi composta da 1 avvolgimento e per generare polarità diverse sullo statore si deve invertire la corrente che lo percorre: questo modo viene detto *bipolare* in quanto lo stesso avvolgimento genera due polarità.

Mentre per un motore a 5 o 6 fili si hanno 2 avvolgimenti per fase e, considerato che gli avvolgimenti hanno un punto in comune, l'inversione delle polarità è dovuta al fatto che i due avvolgimenti sono avvolti al contrario (in effetti sono avvolti nello stesso senso ma di un avvolgimento vengono invertiti inizio e fine in fase di collegamento), così la corrente che entra dal comune attraversando un avvolgimento genererà certe polarità mentre con l'altro della stessa fase genererà polarità opposte: questo modo viene detto *unipolare* in quanto lo stesso avvolgimento genera una sola polarità.

Praticamente:

- un motore con 2 fili può essere collegato solo come *bipolare*
- un motore con 3 fili può essere collegato solo come *bipolare*
- un motore con 4 fili può essere collegato solo come *bipolare*
- un motore con 5 fili può essere collegato solo come *unipolare*
- un motore con 6 fili può essere collegato sia come *unipolare* che *bipolare*:  
come unipolare

comune fase A= 1 con 3 e 4 come uscite fase

comune fase B= 2 con 5 e 6, come uscite fase.

vedi "motore a 6 fili" <http://www.grix.it/viewer.php?page=5090>

i dati nominali sono quelli di targa

come bipolare

soluzione 1

fase A = 1 e 3 o 4, isolare il conduttore non utilizzato

fase B = 2 e 5 o 6, isolare il conduttore non utilizzato

le caratteristiche sono le stesse dell'unipolare

soluzione 2

fase A, 3 e 4

fase B, 5 e 6

non considerare i due comuni, ma vanno isolati

- La  $R_b = 2 \cdot R$  ora varrà 2 volte la  $R$  unipolare
- La  $I_b = I_u / \sqrt{2}$ , ora varrà  $1/\sqrt{2}$  volte la unipolare: (a pari  $P_j = R \cdot I^2 \rightarrow R_b \cdot I_b^2 \rightarrow 2 \cdot R \cdot (I / \sqrt{2})^2 \rightarrow R I^2$ )
- La  $L$  ora varrà 4 volte la  $L$  unipolare; ci sono due avvolgimenti in serie sullo stesso supporto magnetico; ( $L_u = \Lambda \cdot N_u^2 \rightarrow L_b = \Lambda \cdot N_b^2 \rightarrow \Lambda \cdot (2 \cdot N_u)^2 \rightarrow 4 \cdot \Lambda \cdot N_u^2$ )
- La coppia di mantenimento  $\sqrt{2}$  quella in unipolare, è un valore teorico, in effetti sarà inferiore ma superiore a quella in unipolare: ( $H_{t_u} = k N_u \cdot I_u \rightarrow H_{t_b} = k N_b \cdot I_b \rightarrow k 2 N_u \cdot I_u / \sqrt{2} \rightarrow \sqrt{2} \cdot k \cdot N_u \cdot I_u$ )

- un motore con 8 fili può essere collegato sia come unipolare che bipolare:

come unipolare

Fase A : comune ( 1+2) con 5 e 6 come uscite fase

Fase B : comune ( 3+4) con 7 e 8 come uscite fase

vedi “motore a 8 fili “ <http://www.grix.it/viewer.php?page=5090>

i dati nominali sono quelli di targa

come bipolare

si possono 2 possibilità: avvolgimenti in *serie* od in *parallelo*.

Collegamento *serie*

Fase A : 5 e 6, collegare 1 con 2 ed isolarli e non utilizzarli

Fase B : 7 e 8, collegare 3 con 4 ed isolarli e non utilizzarli

Valgono le stesse considerazioni fatte per la soluzione 2 del caso precedente

Collegamento *parallelo*

Fase A : inizio fase collegare 1 con 6, fine fase collegare 2 con 5

Fase B : inizio fase collegare 3 con 8, fine fase collegare 7 con 4

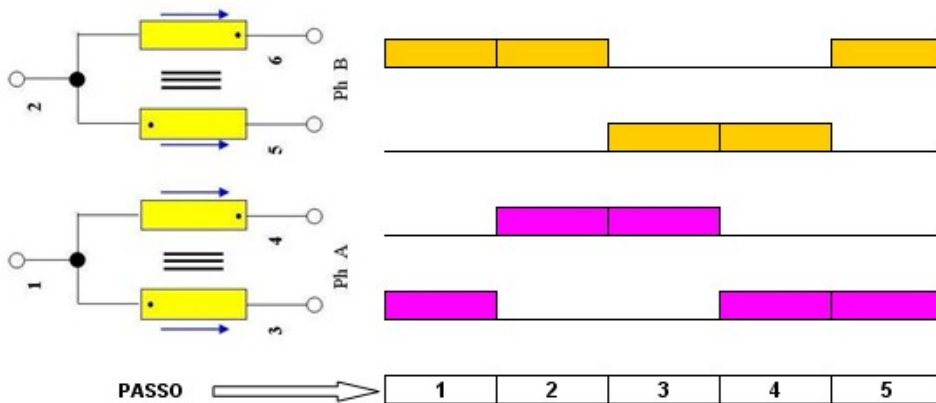
- La  $R_b = R/2$  ora varrà 0.5 volte la R unipolare
- è richiesta una  $I_b = I_u \cdot \sqrt{2}$ , stesse  $P_j$  che in unipolare
- La L è quella di targa
- La coppia di mantenimento  $\sqrt{2}$  quella in unipolare, è un valore teorico, in effetti sarà inferiore ma superiore a quella in unipolare: ( $H_{tu} = k N_u \cdot I_u \rightarrow H_{tb} = k N_b \cdot I_b \rightarrow k \cdot N_u \cdot I_u \cdot \sqrt{2} \rightarrow \sqrt{2} \cdot k \cdot N_u \cdot I_u$ )

## 14.sequenza di comando

Per fare in modo che il rotore faccia gli steps come richiesti occorre eccitare le fasi in maniera opportuna, inoltre al passo del motore si possono far assumere valori diversi:

- passo intero
- passo frazionato, generalmente  $1/n$  con  $n$  multiplo di 2: con  $n=2$  si ottiene il  $1/2$  passo
- 

Ecco la sequenza relativa ad un motore unipolare a passo intero:



La sequenza riprende da 1 dopo il passo 4. Qualora il motore ruotasse al contrario scambiare tra loro il 5 col 6 oppure il 3 col 4, oppure invertire la sequenza di comando.

Fig. – 11 Sequenza passo intero, motore unipolare

E ora la sequenza relativa ad un motore unipolare a  $1/2$  passo:

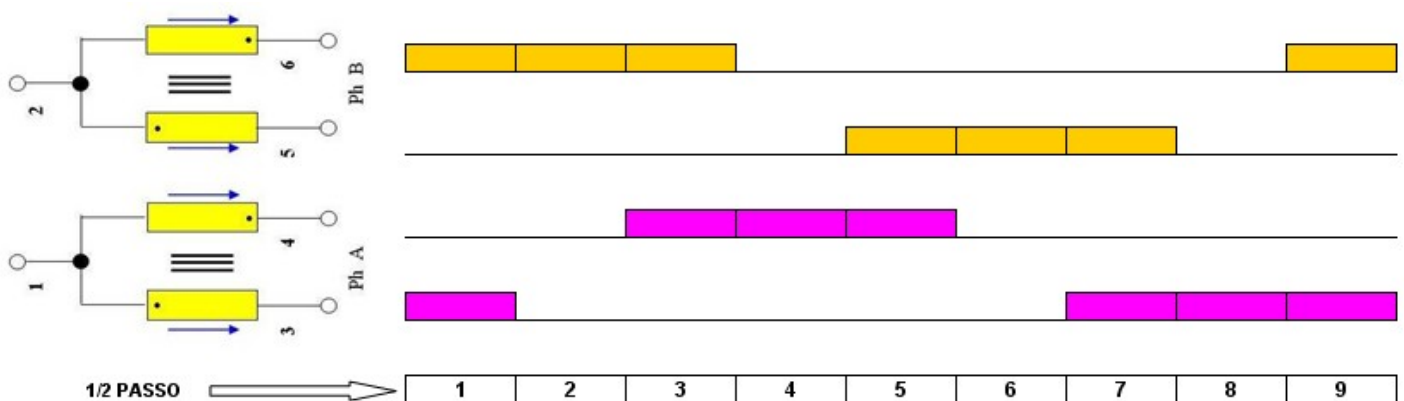
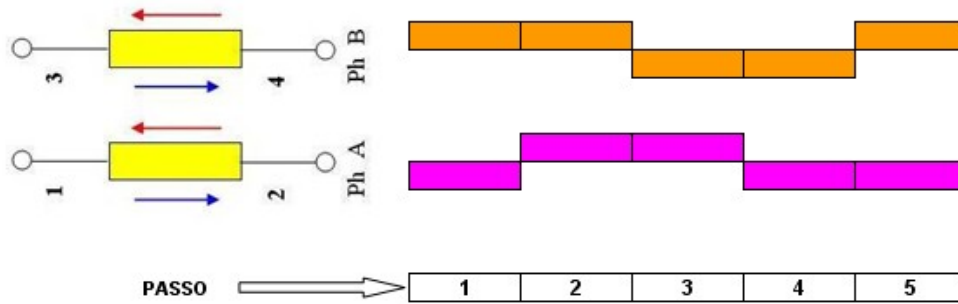


Fig. – 12 Sequenza  $1/2$  passo, motore unipolare

La sequenza riprende da 1 dopo il passo 8.

Qualora il motore ruotasse al contrario scambiare tra loro il 5 col 6 oppure il 3 col 4, oppure invertire la sequenza di comando.

Quelle relative al motore in bipolare:



**Fig. – 13 Sequenza passo intero,motore bipolare**

La sequenza riprende da 1 dopo il passo 4.

Qualora il motore ruotasse al contrario scambiare tra loro il 1 col 2 *oppure* il 3 col 4, oppure invertire la sequenza di comando.



**Fig. – 14 Sequenza 1/2 passo,motore bipolare**

La sequenza riprende da 1 dopo il passo 8.

Qualora il motore ruotasse al contrario scambiare tra loro il 1 col 2 *oppure* il 3 col 4 , oppure invertire la sequenza di comando.

## Alcune considerazioni sul funzionamento dello step

- Vediamo, ora, i motivi per cui il passo passo si muove.

Supponiamo di utilizzare il motore con lo schema a *1 fase on* e ipotizziamo che, alimentata la fase **B**, essa si sia posizionata sul punto d'equilibrio dei  $180^\circ$ . Diseccitiamo la **B** ed eccitiamo la **A-**, al motore, ora competerà la curva di coppia della fase **A-**, quindi dovrà andare a posizionarsi sul nuovo punto d'equilibrio sulla caratteristica di **A-**. Dal punto in cui è ora,  $180^\circ$ , si sposterà sulla **A-** e si troverà sul picco positivo di detta curva. Da qui si sposterà verso il punto d'equilibrio stabile più vicino,  $270^\circ$ , il  $90^\circ$  non è stabile per **A-**. Se poi spegnamo **A-** ed alimentiamo **B-** ci sposteremo ancora di un passo sui  $360^\circ$  e così via (vedi grafico verde).

Volendo ritornare non resta che fare il procedimento inverso :

**B-** off  $\rightarrow$  , **A-** on  $\rightarrow$  , **A-**  $\rightarrow$  off , **B** on (vedi grafico azzurro).

Ricordiamo che un ciclo di HT equivale a 4 passi motore, quindi, spostandosi il rotore di  $1/4$  di ciclo, avrà fatto un passo.

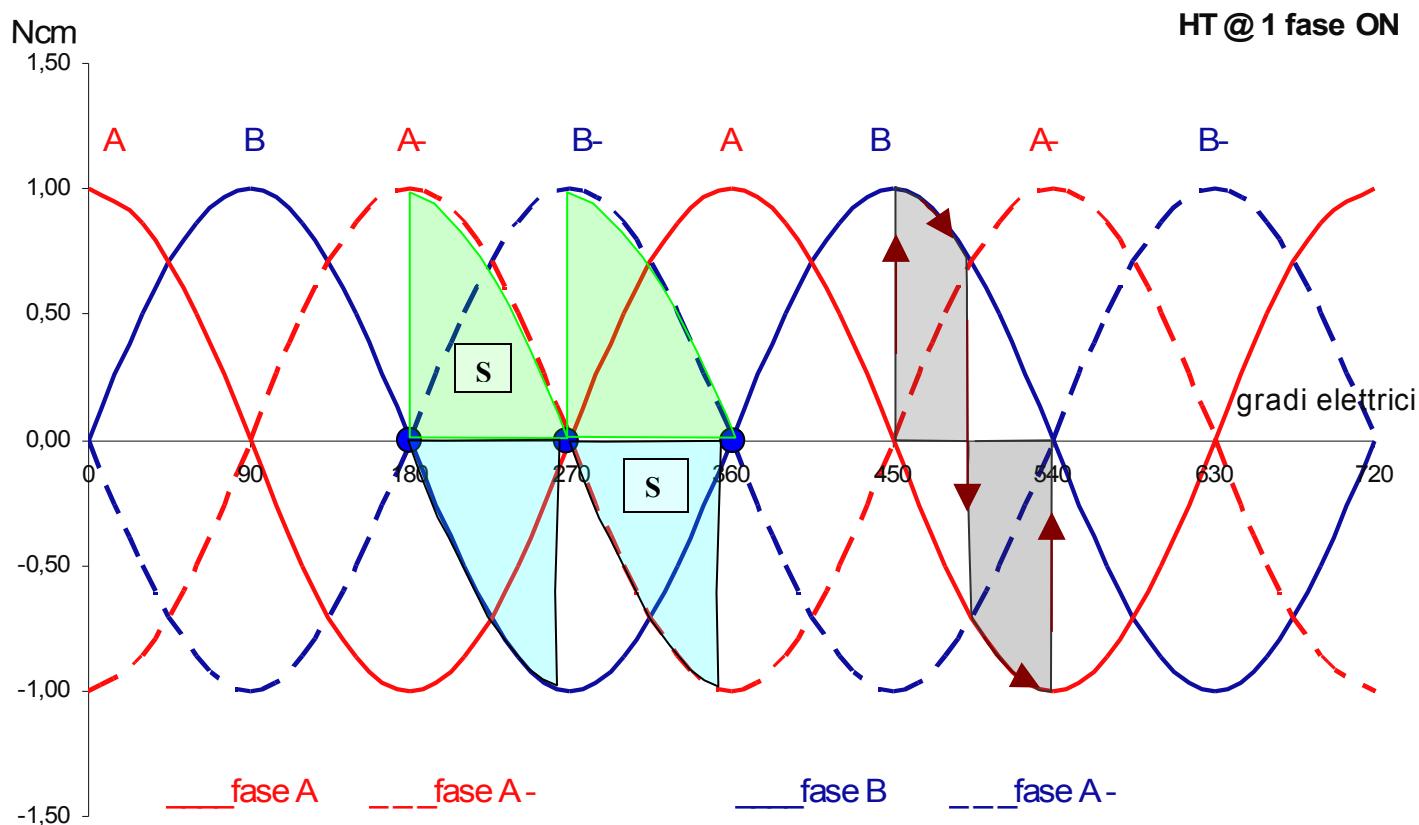


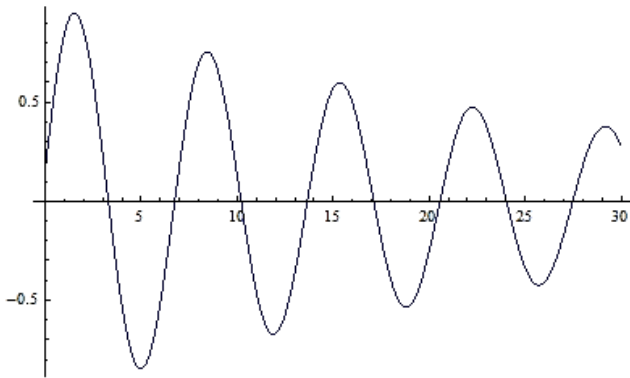
Fig. – 15 HT @ 1 fase ON

L'energia implicata a muovere il rotore di un passo è pari all'area evidenziata sulla caratteristica dell'HT,  $\int \text{coppia} \cdot d\theta$ .

Le considerazioni fatte ora sono valide anche nel caso del motore eccitato con 2 fasi, fig.3, con la sola differenza che anziché eccitare e diseccitare 1 fase alla volta, 1 phase "on", se ne utilizzano due contemporaneamente, 2 phases "on", per avere un incremento di coppia.

Allorchè al rotore viene richiesto di fare un passo, l'energia accumulata precedentemente viene trasferita, al rotore che deve dissiparla tutta: parte viene spesa per i vari tipi d'attrito, parte per il carico e la rimanente serve per accelerare l'inerzia rotore e quella eventuale del carico.

In queste condizioni il rotore dello step è assimilabile ad un pendolo che viene rilasciato ed inizia ad oscillare, con oscillazioni smorzate, finchè l'energia cinetica in eccesso non verrà completamente dissipata. I tempi dipendono dalle inerzie in gioco e dagli attriti ma solitamente sono piccoli.



**Fig. – 16 oscillazione smorzata**

Praticamente si avrà che le aree  $S$  ed  $S' < S$ , di fig.15, continueranno a diminuire man mano che l'energia verrà dissipata ed anche l'oscillazione del rotore diminuirà fino all'arresto dello stesso.

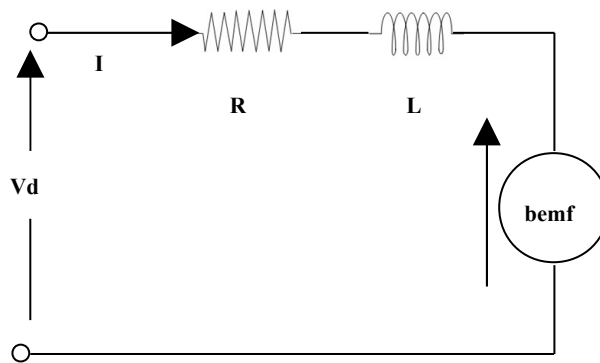
Dal diagramma della coppia di tenuta si vede che l'HT può assumere valori positivi o negativi.- Questa caratteristica viene utilizzata per frenare il rotore, ad esempio consideriamo la fig.15, aree tratteggiate in grigio, da  $450^\circ$  a  $540^\circ$ . Il motore è previsto debba arrestarsi a  $540^\circ$ , quindi per l'ultimo passo si dovrebbe passare dalla fase A alla B lasciando oscillare il rotore, per un certo tempo, fino all'arresto.

Con la tecnica detta "deadbeat", contraccolpo, si riesce a diminuire il tempo di oscillazione: alla partenza dell'ultima commutazione da A a B si lascia A eccitata per un dato tempo, inferiore a quello richiesto al rotore per raggiungere la naturale posizione d'equilibrio, quindi si passa sulla A e dopo un tempo, circa eguale al precedente, se il motore è a vuoto, si ricommuta su B. L'idea è quella di annullare le energie accumulate: infatti le due aree hanno la stessa superficie ma di segno opposto,  $\int \text{coppia} \cdot d\theta = 0$ .

Questo sistema funziona abbastanza bene se il carico è costante e comunque si può utilizzare per diminuire l'energia cinetica del rotore.



- Vediamo uno schema, semplificato, di una fase dello motore passo-passo che servirà a cercare di meglio spiegarne alcune caratteristiche.



**Fig. – 17 schema semplificato di una fase del motore:**

dove:

**I,[A]**,corrente di fase

**R, [Ω]**,resistenza di fase

**L,[H]**,induttanza fase

**bemf,[Vac]**,tensione indotta dal rotore nella fase

**Vd, [Vcc]**,tensione d'alimentazione fase

### *La forza contro elettromotrice, bemf*

Quando il motore ruota ad una data frequenza  $f$ , il rotore, che incorpora un magnete, genererà negli avvolgimenti una *forza contro elettromotrice, bemf*, che contrasterà la tensione di alimentazione nel far circolare la corrente nella fase.

La *bemf* è abbastanza sinusoidale nei motori ibridi, meno nei magneti permanenti e vale:

$$bemf = K_{ht} \cdot \omega$$

**Eq. – 1**

**bemf,[ Vac ]**, forza contro elettromotrice, supposta sinusoidale  
**Kht [Nm/A]**, costante di coppia del motore  
 **$\omega$  [ rad/s ]**, è la velocità rotore

$$K_{ht} = \frac{HT}{I_{ht} \cdot \sqrt{2}}$$

**Eq. - 2**

**I<sub>ht</sub>,[A]**, è la corrente utilizzata per alimentare il motore per il rilievo della coppia di tenuta, HT  
**HT,[ Nm ]**, coppia di tenuta @ 1 on

$$\omega = \frac{F}{360/\alpha} \cdot 2 \cdot \pi$$

**F**,[ step/s ] ,velocità motore  
**α**,[ gradi ] , angolo del passo del motore

Eq. - 3

$$\omega = \frac{rpm}{60} \cdot 2 \cdot \pi$$

**rpm**,[ giri/1' ] , velocità motore

Eq. - 4

Da queste equazioni si può ricavare

$$HT = \frac{bemf \cdot I_{ht} \cdot 60}{rpm \cdot \pi \cdot \sqrt{2}}$$

oppure

$$HT = \frac{bemf \cdot I_{ht} \cdot 360}{F \cdot \pi \cdot \alpha \cdot \sqrt{2}}$$

Eq. - 5

Eq. - 6

Quindi l'HT può essere calcolata misurando la tensione, bemf, in alternata, ai capi di una fase, dopo aver trascinato il rotore ad una velocità nota magari tramite un motore in corrente continua; non usare velocità troppo basse o troppo alte: qualche centinaio di giri/1' possono essere ok.

### *La costante di tempo*

Si è visto che la coppia del motore è proporzionale alla corrente nelle fasi: prima questa corrente diviene disponibile, prima avremo coppia. Dallo schema, fig.17, si vede che è presente un'induttanza, L, che si oppone alle variazioni di corrente.

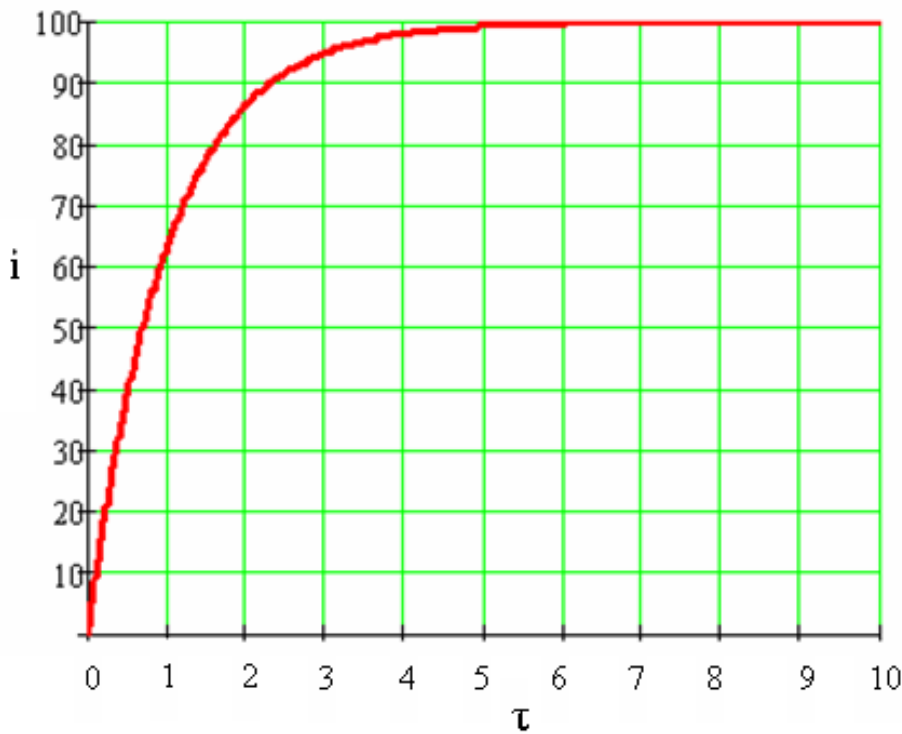
Indicando con **i** la corrente dopo il tempo **t**, intercorso dal momento dell'accensione, avremo

$$i = \frac{V_d}{R} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

con **e** base dei logaritmi naturali  
**τ**,[s] = L/R costante di tempo

Eq. - 7

l'andamento della corrente è di questo tipo:



**Fig. – 18**

Andamento corrente in un circuito RL con:

$$R=1 \text{ [}\Omega \text{]}$$

$$V=100 \text{ [V]}$$

$$L=0.1 \text{ [H]}$$

$$t \text{ [s]}$$

Si vede che la corrente si stabilizza al valore di  $I=V/R$  dopo un tempo pari a, circa  $5 \tau$ .

Può essere utile la formula inversa per calcolare il tempo in cui viene raggiunta la corrente  $i$ .

$$t = \tau \cdot \ln\left(1 - \frac{i}{I}\right)$$

$i$  è la corrente da raggiungere  
 $I$  è la corrente che verrebbe raggiunta dopo circa  $5 \tau$  e che sarebbe limitata dalla sola  $R : I=V_d/R$

**Eq. – 8**

Tempi dell'ordine dei millisecondi e più, per raggiungere la corrente nominale, sono normali nei passo passo ed è per questo che, in alcuni drivers,  $L/R$ , viene aggiunta una resistenza esterna, in serie alla fase del motore, onde ridurre  $\tau$ .

Sempre per lo stesso fine in altri drivers, chopper e bi-level, si aumenta la  $V_d$ .

Altro fatto che rallenta la salita della corrente è la *bemf*: in effetti questa tensione si oppone a quella d'alimentazione del motore, ergo più il motore ruota velocemente più la *bemf* aumenta e la tensione disponibile per alimentare la fase cala. In pratica converrebbe utilizzare, al posto della  $V_d$ , l'espressione  $V_d - \textit{bemf}$ .

Dalla sequenza scelta per il pilotaggio si può vedere il tempo che la fase interessata resta accesa, ON, che per il passo intero è pari al tempo per fare 2 passi,  $t[s] = 2/f[\textit{step/s}]$ , mentre per il  $\frac{1}{2}$  passo è pari al tempo per fare 3 mezzi passi,  $t[s] = 3/f[\textit{step/s}]$ . Quindi sapendo la frequenza di pilotaggio sapremo quanto tempo avremo a disposizione per far salire la corrente o, che è la stessa cosa, a che valore arriverà la corrente in quel dato tempo e quindi la coppia.

## Note sulle curve caratteristiche.

Due motori, strutturalmente identici quindi anche il riscaldamento per perdite nel rame,  $R \cdot I^2$ , ma con  $R$  e  $I$  diverse avranno la stessa HT ma  $K_{ht}$  diverse e ricordando che la tensione utile per far circolare la corrente è  $(V_{in} - b_{emf})$  e siccome  $b_{emf} = HT / I_{ht}$ , all'aumentare di  $I_{ht}$ , a pari  $\omega$ ,  $\rightarrow b_{emf}$  scende  $\rightarrow I$  aumenta  $\rightarrow$  coppia aumenta. Il motore con  $I$  nominale superiore sarà più potente, a pari velocità.

Questo è ben visibile nel caso di fig.7 relativo ai casi B e C come pure in fig.9.

Il caso di fig.10 si giustifica col fatto che il motore viene sovraalimentato in corrente, quindi l'HT aumenta ma  $K_t = HT / I_{ht}$  rimane costante quindi anche  $b_{emf}$  non varia come pure la differenza  $V_d - b_{emf}$ .

Le curve di fig.8 si differenziano per il motivo che nel pilotaggio a  $\frac{1}{2}$  passo ci sono 2 passi in cui risulta eccitata una sola fase, viene quindi a mancare l'apporto di coppia di una fase.

## Risonanze

Uno degli inconvenienti dello step sono le risonanze dovute alla sua strana andatura: saltella appunto perché è uno stepper.

Gli step hanno due distinte zone di risonanza: quelle a bassa frequenza e quelle dette di "mid range".

- *Quelle di bassa frequenza* tipicamente sono pari od al di sotto di 1 giro/s (fondamentale) ma possono sussistere anche delle subarmoniche e le più importanti sono pari a  $\frac{1}{2}$  o  $\frac{1}{3}$  della fondamentale ed è di solito in questa zona che si trova la  $f$  di risonanza dello step. Si possono attenuare molto spezzettando l'angolo di passo: dal  $\frac{1}{2}$  passo sino ai microstep, l'ideale sarebbe un pilotaggio in sinusoidale.

Il motore produce coppia solo quando il campo rotore è sfasato rispetto a quello di statore. La coppia varia, per lo step motor, in modo circa sinusoidale. Questi due fenomeni si combinano in modo tale da comportarsi come un pendolo formato da una massa rotante (il rotore + il carico) e una molla (la coppia): questo è un sistema non lineare. Ogni commutazione degli avvolgimenti sposta il punto di equilibrio del pendolo stabilendo così un nuovo sfasamento tra campo rotore e statore. Questo nuovo sfasamento impone al rotore una nuova coppia, che cerca di seguire, comportandosi come un pendolo. Se il sistema è debolmente smorzato, come sovente capita, ed al sistema è dato tempo sufficiente il rotore oltrepassa il punto di equilibrio oscillando avanti ed indietro finché non si stabilizza. Se il passo seguente viene dato quando il sistema possiede una sufficiente velocità, mentre sta muovendosi in direzione opposta il picco di coppia istantanea disponibile al momento, può non essere sufficiente a mantenere il rotore entro i  $\pm 180^\circ$  elettrici. Quando accade il motore salta sulla caratteristica adiacente coppia/angolo e se non riesce a raggiungere il sincronismo, perde passi (può anche capitare che inverta la rotazione ma la velocità è superiore e multipla di quella di pilotaggio).

- *Quelle di "mid range"* avvengono, all'incirca, quando il driver non è più in grado di controllare la corrente. Sembrerebbe che quando la bembf generata dal motore considerando anche le cadute ohmiche ed induttive raggiunge la tensione del driver il motore viene a trovarsi a funzionare in tensione e non in corrente causando perturbazioni alla corrente, quindi alla coppia.

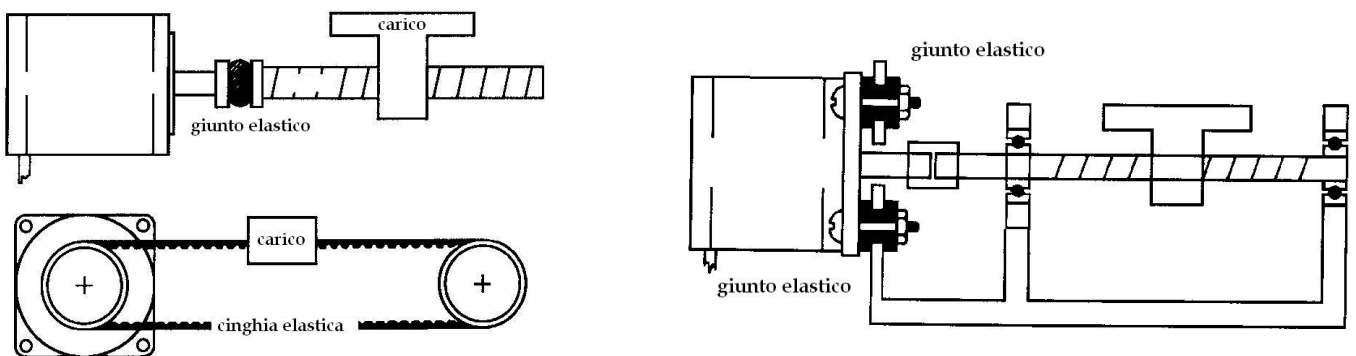
Ogni perturbazione sul rotore lo porta in oscillazione e questo comporta una variazione in ampiezza e fase della bembf rispetto alla fase al momento eccitata. In questa situazione il funzionamento dello step continua ad oscillare tra tensione costante e corrente costante con una riduzione dello smorzamento o anche un incremento delle oscillazioni rotoriche fino alla perdita del passo.

- **Rimedi contro risonanze**

Non spaventarsi delle eventuali, mica tanto, vibrazioni che potranno verificarsi, è una cosa normale con gli step specialmente con quelli più potenti. In effetti possiamo pensare che lo step agisca come un martello sulla struttura, più è potente più i suoi colpi ecciteranno la struttura.

Quando lo step comincia ad entrare in risonanza si può notare una variazione della forma d'onda della corrente di fase rispetto alla condizione di stabilità che aveva poco prima dell'inizio del fenomeno. Molte risonanze sono create e/o amplificate dalla meccanica di tutto il sistema. Il problema comunque non è di semplice soluzione.

- Per le risonanze a bassa frequenza sarebbe opportuno far partire il motore da frequenze superiori a quella naturale del sistema motore/carico comunque l'ideale sarebbe avviare il motore, alla massima frequenza possibile, col massimo carico.
- Utilizzare accoppiamenti elastici per sostenere il motore e trasmettere il moto; alcuni esempi:



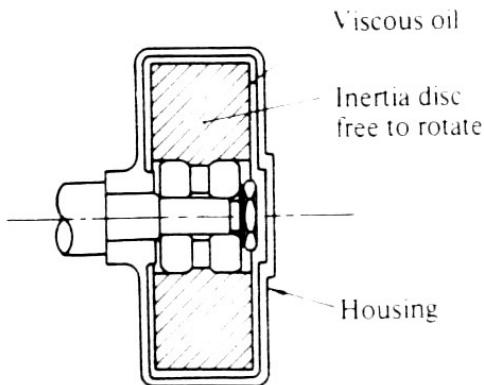
I giunti per accoppiare il motore non vanno serrati molto stretti con le viti, che devono essere isolate dalla struttura, si può andare per tentativi, variando così la risposta degli attenuatori.

- Troppo, non significa nulla, gioco tra i vari organi meccanici è nocivo, come pure il contrario.
- Non utilizzare un motore troppo potente per muovere un carico troppo piccolo.

- Smorzatori

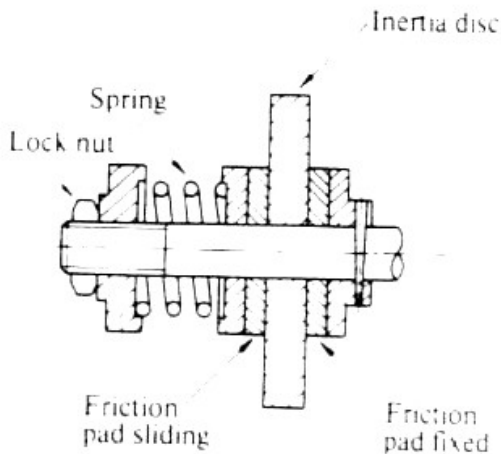
ne esistono basati su vari principi, ecco un paio d'esempi:

*inerziali accoppiati viscosamente*



Sono composti da una massa, libera di ruotare immersa in un fluido viscoso che trascina la massa: più è alta la differenza di velocità tra albero ed inerzia più si fa sentire l'inerzia che tende ad opporsi alla variazione di velocità.

*frizione/inerziali*



Son composti da un'inerzia libera di ruotare, sistemata tra due feltrini che producono attrito. Si possono tarare comprimendo una molla che regola l'attrito.

**Frequenza di risonanza propria del rotore**

E' possibile rilevare la frequenza d'oscillazione disponendo d'un oscilloscopio:

si alimenta una fase del motore con la corrente nominale per stabilizzare il rotore su un punto d'equilibrio, quindi si forza l'albero in rotazione per fargli fare circa un passo e finchè non entrerà nella zona d'instabilità e si muoverà verso il nuovo punto d'equilibrio e comincerà ad oscillare. Se avremmo collegato ai capi dell'altra fase l'oscilloscopio potremo rilevare la forma d'onda della tensione indotta e valutarne la frequenza. Naturalmente, se all'albero è connesso un carico si rileverà l'oscillazione dell'intero sistema.

## Smontaggio e rimontaggio

Qualora qualcuno voglia vedere com'è fatto uno step internamente vedrebbe qualcosa di simile a questa:



In questo caso si tratta di uno step, ibrido, a  $1.8^\circ$ /passo, 200 passi/giro. Il rotore è composto da due coppette con 50 denti fra cui si trova il magnete, ogni coppetta è sfasata rispetto all'altra in modo tale che dove c'è un dente su di una c'è un vuoto sull'altra. Lo statore è formato da otto espansioni polari, quattro per ogni fase, ed ogni espansione termina con dei denti, generalmente come quelli di rotore. Sulle espansioni polari si trovano gli avvolgimenti, generalmente avvolti direttamente in cava. Ogni fase è composta da quattro

avvolgimenti in serie, ognuno su una scarpa polare che si trova a  $90^\circ$  dalla precedente. Ogni avvolgimento è avvolto in senso opposto al precedente. Il rotore è montato su cuscinetti a sfere, il magnete è in genere di tipo fuso, Alnico, od in terre rare, samario cobalto o neodimio, magnetizzato assialmente. L'albero è in acciaio inox amagnetico diversamente cortocircuiterebbe parte del flusso uscente dal magnete e che serve a generare la coppia. Pur sembrando molto semplice, la lavorazione delle sue parti deve essere molto curata e precisa: si consideri che una volta assemblato la distanza tra statore e rotore può arrivare a  $30\ \mu\text{m}$ ,  $0.03\ \text{mm}$ , per quelli più piccoli e a  $80\ \mu\text{m}$ ,  $0.08\ \text{mm}$  per le taglie superiori; poi ci sono le tolleranze che entrano in giuoco, sedi cuscinetti, accoppiamenti fianchi, albero, gioco cuscinetti ecc, quindi i valori di traferro precedentemente visti scenderanno ancora.

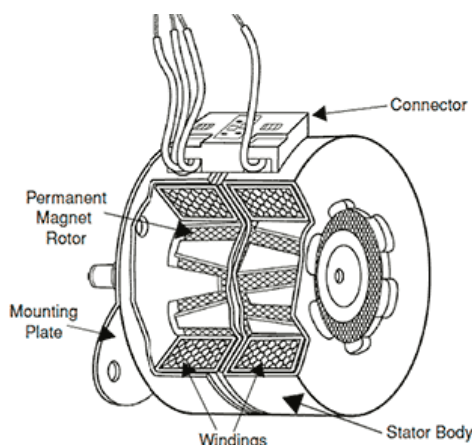
Se togliamo il rotore dallo statore rischiamo, dopo averlo rimontato, di perdere circa il 30% della coppia a causa del magnete che si smagnetizza.

Non tutti i tipi di magnete si comportano così: quelli in terre rare, samario/cobalto, neodimio/ferro/boro, non risentono praticamente di questo problema ma, è difficile riconoscerli.

Nei motori ibridi di piccola taglia, 43 mm, i magneti sono praticamente tutti in terre rare.

Prima di smontare il motore assicurarsi di non aver trucioli o polveri metalliche nei paraggi od altre particelle che possano cadere all'interno del motore dati i traferri in giuoco.

Attenzione a maltrattare i cuscinetti con colpi sull'albero



Non avendo trovato foto di motori a magnete permanente, canstack, smontati accludo questo spaccato tratto dal sito della MINEBEA. Questi sono motori più semplici ed economici, il rotore è montato su una o due boccole quindi attenzione ai carichi, sia radiali, es. tensione cinghia, spinte nel senso dell'albero; il magnete è di tipo ceramico, magnetizzato radialmente a poli alternati e non soffre dell'effetto della smagnetizzazione se smontato.

Un ringraziamento a coloro che hanno avuto la pazienza di leggere tutto quanto.

Ci sarebbero ancora molti altri campi da analizzare ma penso possa bastare.

C.G.2009