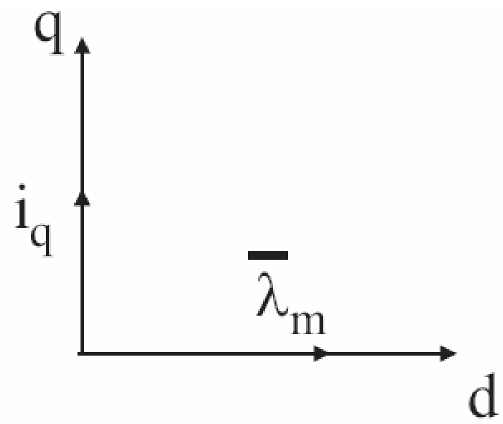
Lezione 16

Controllo di Macchina: Brushless Sinusoidale

Occorre controllare il vettore corrente in modo che sia sincrono ed in quadratura con λm



$$T(t) = \frac{3}{2} p \lambda_m i_q$$

$i_d = 0$ (controllo)

Scriviamo le equazioni con riferimento agli assi rotanti (d,q).

Le equazioni di macchina nel sistema di riferimento (1,2,3):

$$\left[\lambda\right] = L_{eq}[i] + [\lambda_m]$$

$$[V] = R[i] + \frac{d[\lambda]}{dt}$$

Trasformazione *trifase* → *bifase* (Clarke) si moltiplica per $B' = \frac{2}{3}B$ l'equazione di $[\lambda]$:

$$\overline{\lambda}_{\alpha\beta} = L_{eq}\,\overline{i}_{\alpha\beta} + \overline{\lambda}_{m\alpha\beta}$$

dove: $\overline{\lambda}_{\alpha\beta} = B'\left[\lambda\right]$ $\overline{i}_{\alpha\beta} = B'\left[i\right]$ $\overline{\lambda}_{m\alpha\beta} = B'\left[\lambda_m\right]$

Trasformazione *assi fissi* (α, β) → *assi rotanti* (d, q) (Park) si moltiplica per $A(\theta)$:

$$\overline{\lambda}_{dq} = L_{eq}\overline{i}_{dq} + \overline{\lambda}_{mdq}$$

dove: $\overline{\lambda}_{dq} = A(\theta)\overline{\lambda}_{\alpha\beta}$ $\quad$ $\overline{i}_{dq} = A(\theta)\overline{i}_{\alpha\beta}$ $\quad$ $\overline{\lambda}_{mdq} = A(\theta)\overline{\lambda}_{m\alpha\beta}$

La validità dell'equazione si ha per:

- Linearità (niente saturazioni nei materiali ferromagnetici)
- rotore isotropo (L_{eq} non dipendente da θ)

Trasformazione *trifase* → *bifase* (Clarke) si moltiplica per $B' = \frac{2}{3}B$ l'equazione di $[V]$:

$$[V] = R[i] + \frac{d[\lambda]}{dt}$$

$$\overline{V}_{\alpha\beta} = R\overline{i}_{\alpha\beta} + \frac{d\overline{\lambda}_{\alpha\beta}}{dt}$$

dove: $\overline{V}_{\alpha\beta} = B'[V]$ $\quad \overline{i}_{\alpha\beta} = B'[i]$ $\quad \frac{d\overline{\lambda}_{\alpha\beta}}{dt} = B'\frac{d[\lambda]}{dt} = \frac{d[B'\lambda]}{dt}$

Trasf. *assi fissi (α, β)* → *assi rotanti (d, q)* (Park), abbiamo visto che: $A(\theta) \Leftrightarrow e^{-j\theta}$:

$$\overline{V}_{dq} = e^{-j\theta}\overline{V}_{\alpha\beta} \quad \Longrightarrow \quad \overline{V}_{\alpha\beta} = e^{j\theta}\overline{V}_{dq}$$

analogamente: $\overline{\lambda}_{\alpha\beta} = e^{j\theta}\overline{\lambda}_{dq}$ $\quad \overline{i}_{\alpha\beta} = e^{j\theta}\overline{i}_{dq}$

$$e^{j\theta}\overline{V}_{dq} = R\ e^{j\theta}\overline{i}_{dq} + \frac{d\left(e^{j\theta}\overline{\lambda}_{dq}\right)}{dt}$$

Dato che $$\frac{d\left(e^{j\theta}\overline{\lambda}_{dq}\right)}{dt} = e^{j\theta} j\omega\overline{\lambda}_{dq} + e^{j\theta}\frac{d\overline{\lambda}_{dq}}{dt}$$

Sostituendo nell'equazione ed eliminando $e^{j\theta}$ si ottiene:

$$\overline{V}_{dq} = R\overline{i}_{dq} + \frac{d\overline{\lambda}_{dq}}{dt} + j\omega\overline{\lambda}_{dq}$$

Dove $j\omega\lambda_{dq}$ viene detto *f.e.m.mozionale*, la presenza è dovuta al termine derivativo portato in un sistema di riferimento in movimento.

Con le trasformazioni di coordinate si perviene alle:

$$\overline{\lambda}_{dq} = L_{eq}\overline{i}_{dq} + \overline{\lambda}_{mdq}$$

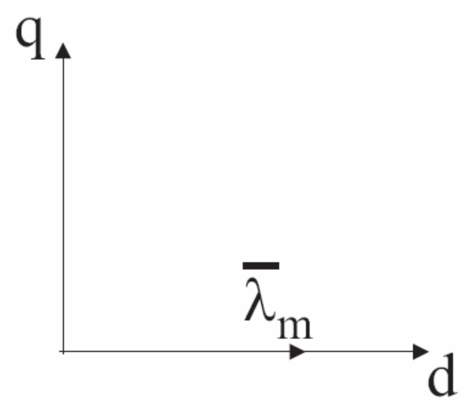
$$\overline{V}_{dq} = R\overline{i}_{dq} + \frac{d\overline{\lambda}_{dq}}{dt} + j\omega\overline{\lambda}_{dq}$$

Se consideriamo l'equazione del flusso:

$$\begin{cases} \lambda_d = L_{eq} i_d + \lambda_{md} \\ \lambda_q = L_{eq} i_q + \lambda_{mq} \end{cases}$$

Dalla definizione di assi (d,q) si ha:

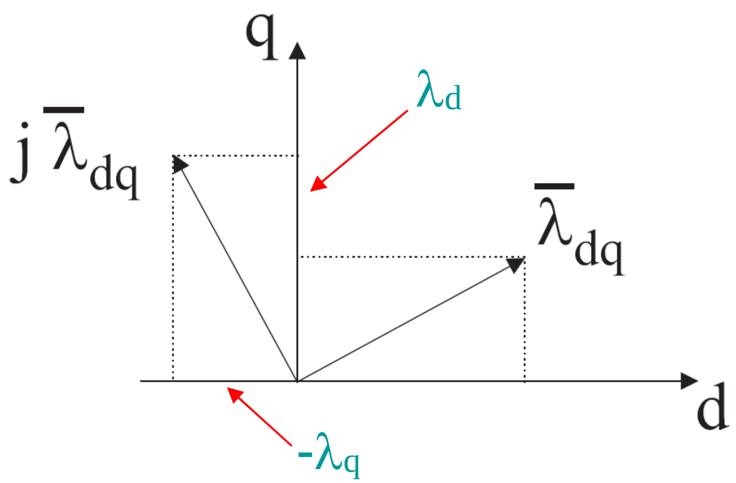
$$\begin{cases} \lambda_{md} = \lambda_m \\ \lambda_{mq} = 0 \end{cases}$$



$$\begin{cases} \lambda_d = L_{eq} i_d + \lambda_m \\ \lambda_q = L_{eq} i_q \end{cases}$$

- controllo: $i_d \approx 0$

Analizzando il termine: $j\omega\bar{\lambda}_{dq}$



$$(j\lambda)_d = -\lambda_q$$

$$(j\lambda)_q = \lambda_d$$

Sostituendo queste relazioni nella seconda equazione:

$$\begin{cases} V_d = Ri_d + \dfrac{d\lambda_d}{dt} + j\omega\lambda_d = Ri_d + \dfrac{d\lambda_d}{dt} - \omega\lambda_q \\ V_q = Ri_q + \dfrac{d\lambda_q}{dt} + j\omega\lambda_q = Ri_q + \dfrac{d\lambda_q}{dt} + \omega\lambda_d \end{cases}$$

considerando l'espressione dei flussi:

$$\begin{cases} \lambda_d = L_{eq} i_d + \lambda_m \\ \lambda_q = L_{eq} i_q \end{cases}$$

Si ricavano le equazioni di macchina nel sistema (d,q):

$$\begin{cases} V_d = R\, i_d + L_{eq} \dfrac{di_d}{dt} - \omega L_{eq} i_q \\ V_q = R\, i_q + L_{eq} \dfrac{di_q}{dt} + \omega L_{eq} i_d + \omega\lambda_m \end{cases}$$

Se imponiamo *id* = 0, l'equazione dell'asse q diventa analoga a quella di un motore in corrente continua:

$$V_q = Ri_q + L_{eq}\frac{di_q}{dt} + \omega\lambda_m$$

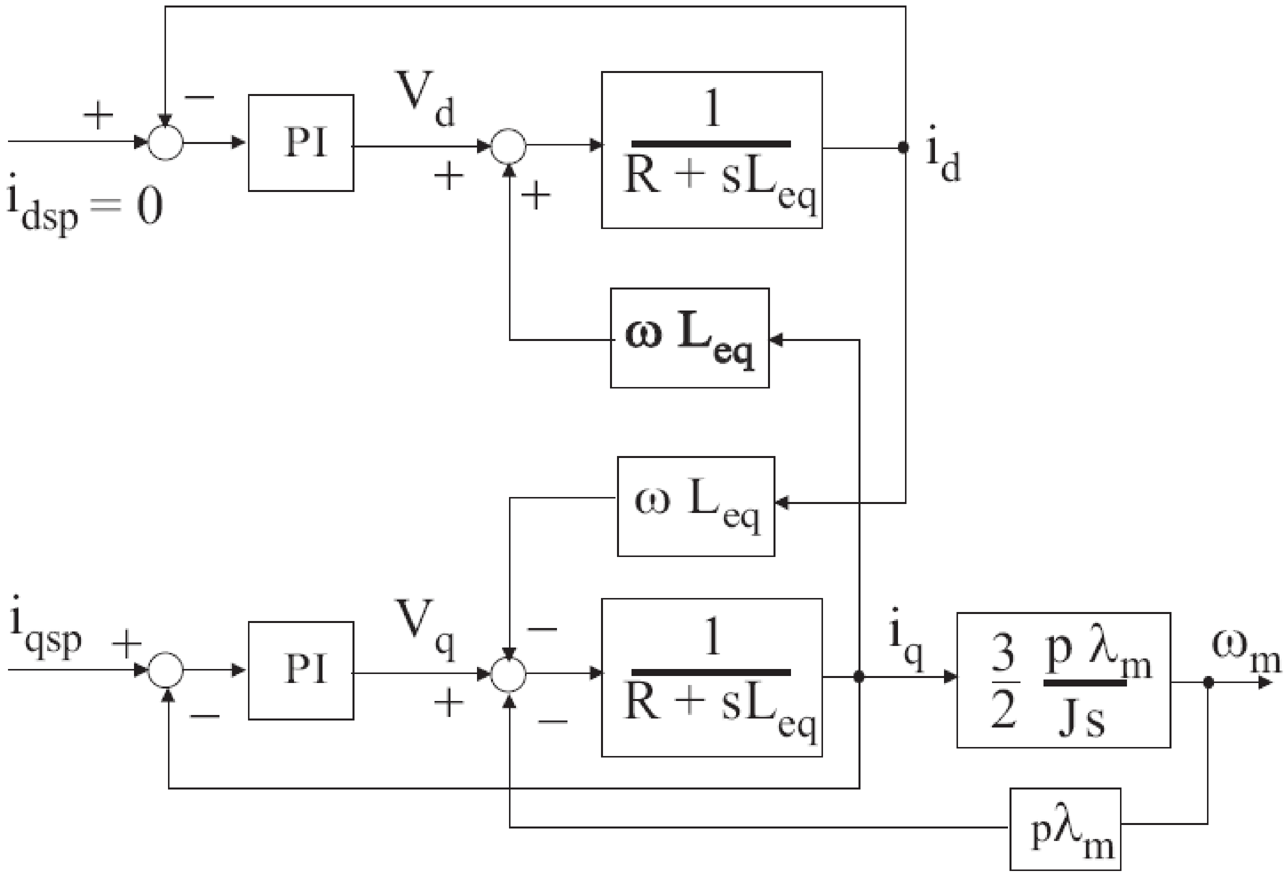
infatti:

$$V_a = Ri_a + L_a\frac{di_a}{dt} + K_\phi\omega$$

Trasformo con Laplace e ricavo le correnti:

$$\begin{cases} i_d = \dfrac{V_d + \omega L_{eq} i_q}{R + sL_{eq}} \\ i_q = \dfrac{V_q - \omega L_{eq} i_d - \omega\lambda_m}{R + sL_{eq}} \end{cases}$$

• La retroazione di corrente elimina l'interazione tra gli assi d,q, nell'ipotesi di banda sufficientemente elevata (guadagni del regolatore elevati)



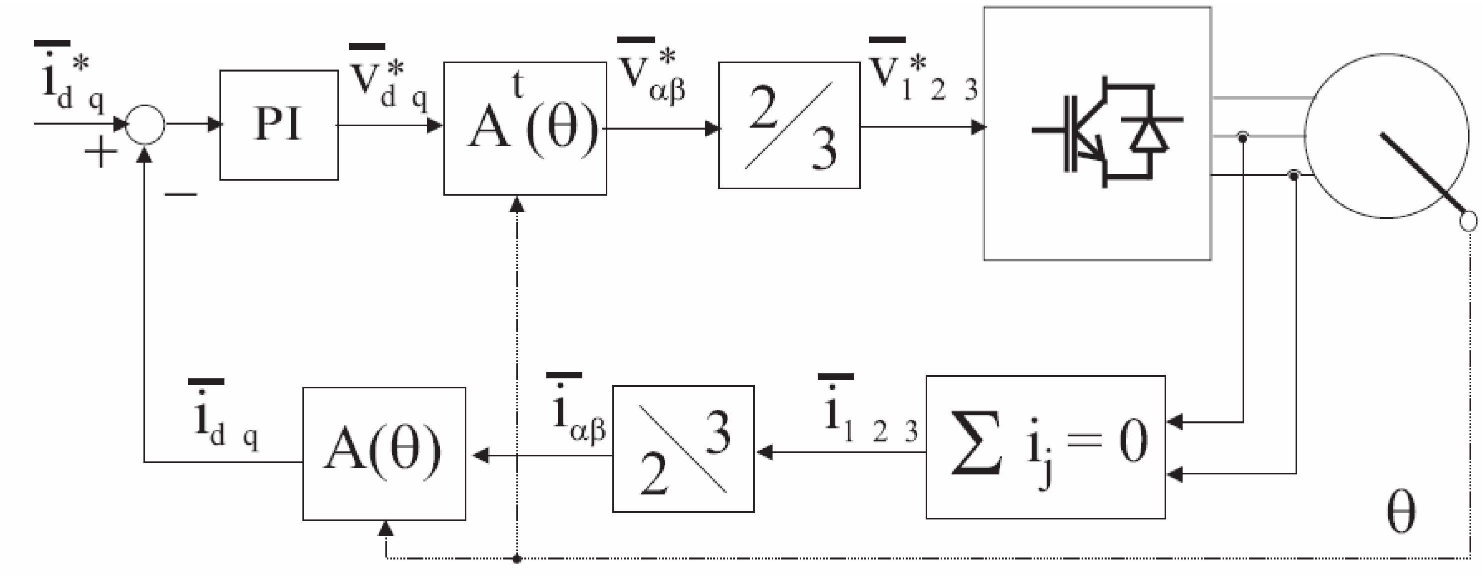
La retroazione di corrente elimina anche la f.e.m. *($\omega\lambda_m$)* come nel motore in corrente continua.

• Il controllo di macchina del motore brushless sinusoidale viene realizzato in due modi:

– controllo su assi rotanti

– controllo su assi fissi

• Realizzazione del controllo vettoriale su *ASSI ROTANTI*:

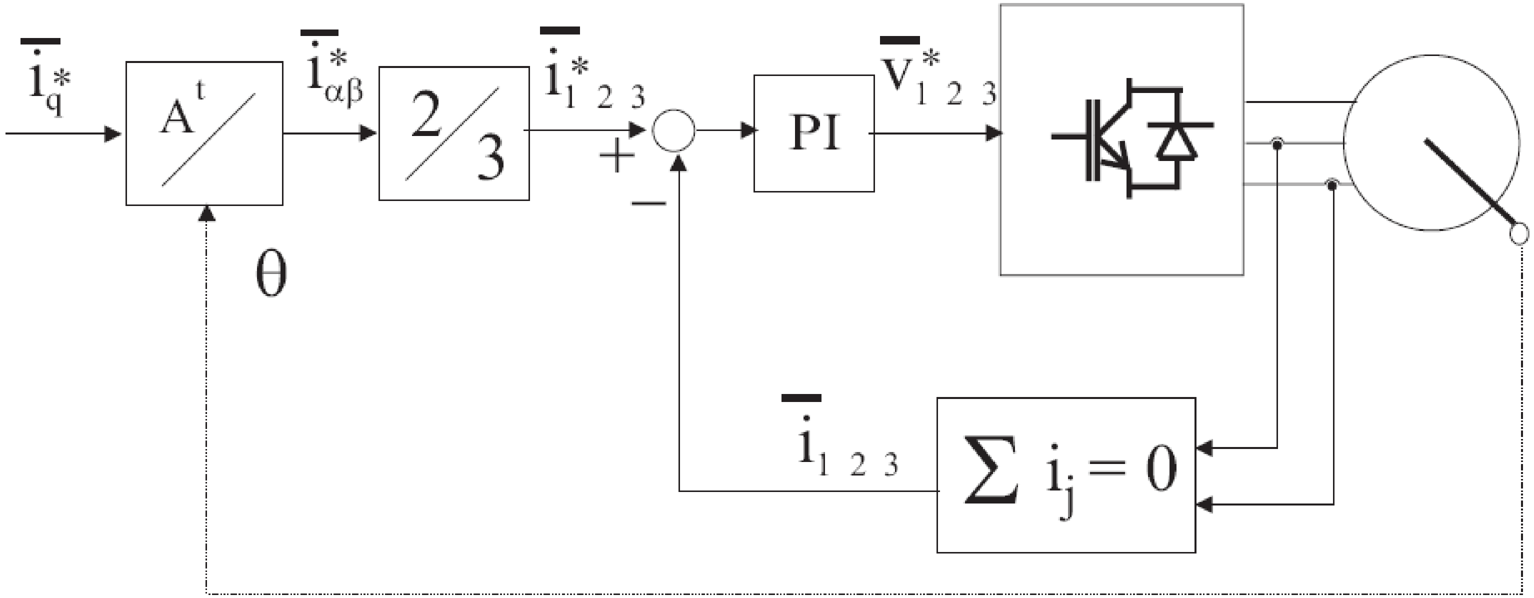


per semplicità si è posto: $V_{123} = [V], \quad i_{123} = [i], \quad ....$

- Caratteristiche del controllo su *ASSI ROTANTI*

1. A regime gli errori sono nulli: i regolatori PI controllano grandezze continue (a regime).
2. Sono necessarie due matrici complete di trasformazione: $A(\theta)$ e $At(\theta)$.
3. Occorre effettuare 8 moltiplicazioni per le trasformazioni.

• Realizzazione del controllo vettoriale su *ASSI FISSI* :

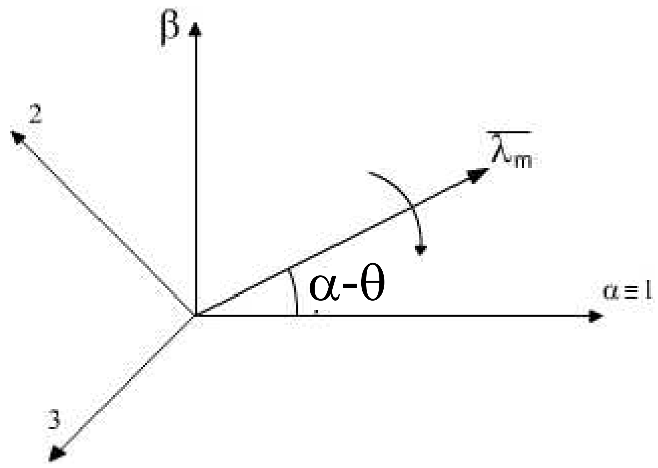


- Caratteristiche del controllo su *ASSI FISSI*

1. Serve soltanto una mezza matrice $A^t(\theta)$, dato che $i_d = 0$.
2. I tre anelli i_{123} sono ridondanti ($\sum i_j = 0$).
3. Le prestazioni del controllo sono inadeguate ad alta velocità, gli anelli i_1, i_2, i_3 ”lavorano”, a regime, su grandezze sinusoidali.

NOTE: I sensori di posizione, resolver o encoder incrementale, devono essere allineati con il campo magnetico del rotore. Per effettuare l'allineamento si utilizza l'equazione:

$$T = \frac{3}{2} p \left| \overline{\lambda}_m \wedge \overline{i} \right| \quad \Longrightarrow \quad T = \frac{3}{2} p \lambda_m i \sin(\alpha - \theta)$$



quando il vettore corrente *i* e flusso magnetico concatenato *λm* sono allineati, la coppia è nulla.

La scelta del sensore di posizione deve essere fatta in base al tipo di applicazione: in genere si preferisce il resolver per applicazioni a basse velocità e l’encoder incrementale ad alte.

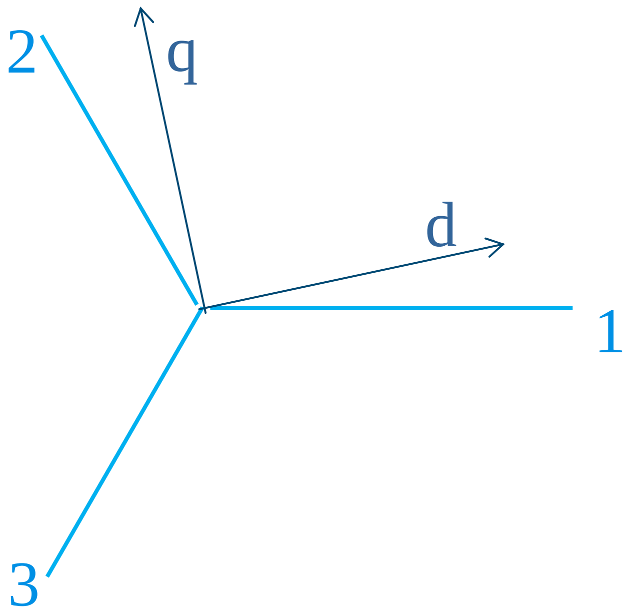
Si stanno sviluppando altri sensori, quali i SINCODER, per applicazioni di elevata precisione.

•*COSTANTE DI COPPIA* :

Definizione di K_T: $$T = K_T I_{f_{RMS}}$$

La corrente di fase efficace ha senso solo nel caso stazionario:

$$i_1 = I_m \cos(\omega_0 t - \alpha) \quad \Longrightarrow \quad I_{f_{RMS}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$



Meglio usare iq, dato che nel sistema trifasico la corrente ha un andamento sinusoidale (a regime) oppure più contorto (in transitorio), invece nel sistema (d,q) iq è proporzionale alla coppia T istante per istante, in qualsiasi condizione.

$$I_{f_{RMS}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{i_q}{\sqrt{2}}$$

Dall’espressione della coppia:

$$T = \frac{3}{2} p \lambda_m i_q \quad \Longrightarrow \quad T = \frac{3}{2} p \lambda_m i_q = \frac{3}{2} p \lambda_m \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}} i_q = \left(\frac{3}{\sqrt{2}} p \lambda_m \right) \frac{i_q}{\sqrt{2}} = K_T \frac{i_q}{\sqrt{2}}$$

$$K_T = \frac{3}{\sqrt{2}} p \lambda_m$$

•COSTANTE ELETTRICA

Def. : K_E è la *f.c.e.m. fase-fase efficace*, misurata, divisa per ω_m

Dall'espressione della Vq: $\Longrightarrow$ $\omega\lambda_m$ *f.c.e.m. fase*

$\dfrac{\omega\lambda_m}{\sqrt{2}}$ *f.c.e.m. efficace fase* $\Longrightarrow$ $\sqrt{3}\dfrac{\omega\lambda_m}{\sqrt{2}}$ *f.c.e.m. efficace fase-fase*

$$\sqrt{3}\frac{\omega\lambda_m}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{3}{2}}\omega\lambda_m = p\sqrt{\frac{3}{2}}\lambda_m\omega_m = K_E\omega_m$$

$$K_E = p\sqrt{\frac{3}{2}}\lambda_m$$

$$K_T = \frac{3}{\sqrt{2}} p\lambda_m = \frac{\sqrt{3}\sqrt{3}}{\sqrt{2}} p\lambda_m = \sqrt{3}\left(\sqrt{\frac{3}{2}} p\lambda_m\right) = \sqrt{3} K_E$$

$$K_T = \sqrt{3} K_E$$

K_T: rappresenta il contributo di tutte le fasi alla produzione di coppia

K_E: rappresenta la misura della f.c.e.m. tra due fasi (tensione concatenata)

Es:

$$K_E = K_{E_{fase-fase\ RMS}} = \sqrt{3}\, K_{E_{fase\ RMS}} \quad \Longrightarrow \quad K_{E_{fase\ RMS}} = \frac{K_T}{3}$$

$$K_E = \sqrt{3}\, K_{E_{fase\ RMS}} = \sqrt{3}\,\frac{K_T}{3} = \frac{K_T}{\sqrt{3}} \quad \Longrightarrow \quad K_T = \sqrt{3} K_E$$

DATI TECNICI / *TECHNICAL DATA*

(vedere note generali a pag.5 / *see general rem*

Caratteristiche e valori nominali con azionamento sinusoidale ***Characteristics and nominal values with sinusoidal drive***		**Taglia motore** ***Motor size***	
		M	**M2 030**
		V	**V2 030**
Numero dei moduli rotore / Number of rotor modules			2
Coppia in servizio continuo, rotore bloccato con $\Delta\theta_{avv}$=65K•		**M**	7.5
Nominal torque, continuous duty, locked rotor $\Delta\theta_{win}$=65K •		**V**	7.5
Coppia in servizio continuo, rotore bloccato con $\Delta\theta_{avv}$=110K•		**M**	9.1
Nominal torque, continuous duty, locked rotor $\Delta\theta_{win}$=110K •		**V**	9.6
Coppia di picco / *Peak torque*			25
Azionamento consigliato *Recommended Drive*	DBM03 (DBCIII)	**M**	10/25 (F10)
	DBS / DBM04	**V**	8/22
	DS2000 400 Vac	**V**	8/22
Coppia max con azionamento consigliato *Max torque with recommended drive*	DBM03 (DBCIII)	**M**	14.5 (16)
	DBS / DBM04	**V**	22
	DS2000 400 Vac	**V**	22
Velocità nominale / Nominal speed			3000
Coppia nominale in servizio continuo, velocità nom. ($\Delta\theta_{avv}$ = 65K•)		**M**	5.5
Nominal torque, continuous duty, nominal speed ($\Delta\theta_{win}$ = 65K •)		**V**	5.6
Coppia nominale in servizio continuo, velocità nom. ($\Delta\theta_{avv}$ = 110K•)		**M**	8
Nominal torque, continuous duty, nominal speed ($\Delta\theta_{win}$ = 110K •)		**V**	8

Coppia max con azionamento consigliato alla velocità nominale *Max torque, at nominal speed with recom. drive*	DBM03 (DBCIII)	**M**	6.5
	DBS / DBM04	**V**	17
	DS2000 400 Vac	**V**	19
Velocità di taglio alla coppia max con azionamento consigliato •• *Cutoff speed at max torque with recom. drive ••*	DBM03 (DBCIII)	**M**	2000 (1900)
	DBS / DBM04	**V**	1500
	DS2000 400 Vac	**V**	1800
Potenza resa in servizio continuo alla velocità nom. ($\Delta\theta$ aw = 65K•) *Output power, continuous duty, nominal speed ($\Delta\theta$ win = 65K •)*		**M**	1.73
		V	1.9
Potenza resa in servizio continuo alla velocità nom. ($\Delta\theta$ aw = 110K•) *Output power, continuous duty, nominal speed ($\Delta\theta$ win = 110K •)*		**M**	2.51
		V	2.51
Momento d'inerzia rotorico (compreso resolver) *Rotor inertia (resolver included)*			1450
Costante di tempo meccanica *Mechanical time constant*		**M**	4.47
		V	3.54
Massa / *Weight*			11
Costante di tempo termica / *Thermal time constant*			1180
Costante di coppia *Torque constant*		**M**	0.88
		V	1.59
Costante di tempo elettrica *Electrical time constant*		**M**	7.19
		V	6.18

Resistenza a 20° tra le fasi	**M**	1.39
Winding resistance at 20°C (phase to phase)	**V**	3.4
Induttanza tra le fasi	**M**	10
Winding inductance (phase to phase)	**V**	21.95
Corrente nominale a rotore bloccato •••	**M**	8.5
Nominal current, locked rotor •••	**V**	4.7
Morsettiera potenza (vedere pag.21)	**M**	B
Power terminal board (see page 21)	**V**	B
Connettore potenza (vedere pag.21)	**M**	B
Power connector (see page 21)	**V**	B
Sezione cavo consigliata (4x)	**M**	2.5 (14)
Recommended power cable square section (4x)	**V**	1.5 (16)