Electric Drives
Laboratory
DII - UniPD

Azionamenti Elettrici

Lezioni a.a. 2020-2021

prof. Silverio Bolognani

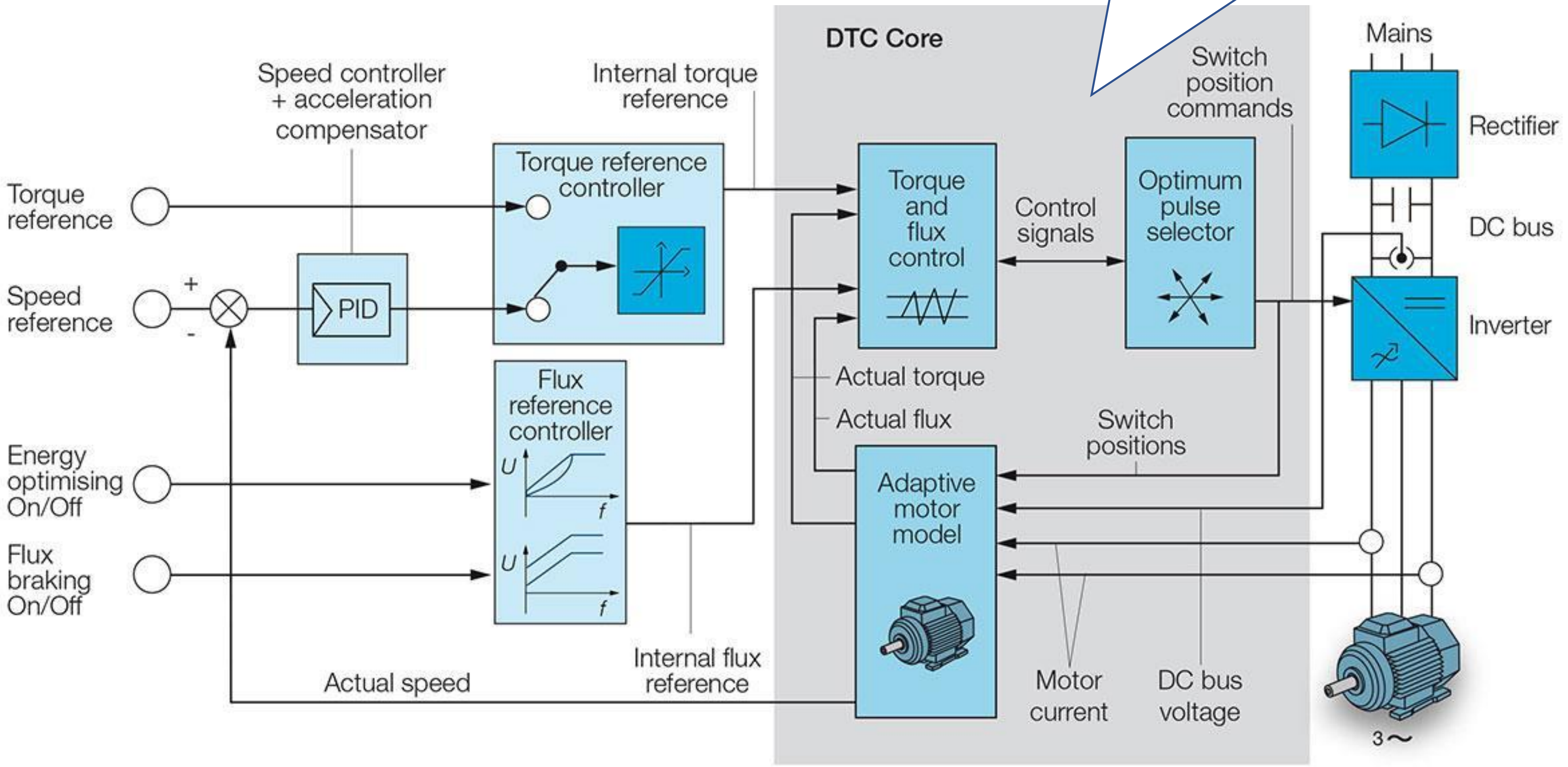
PARTE IV

Macchina asincrona
(Macchina a induzione)

Controllo diretto di coppia (e di flusso)
Direct **T**orque (and flux) **C**ontrol - DTC

Da: https://new.abb.com/drives/it/dtc

Non ci sono anelli di corrente e quindi non ci sono riferimenti di tensione;
non c’è controllo a PWM per l’invertitore

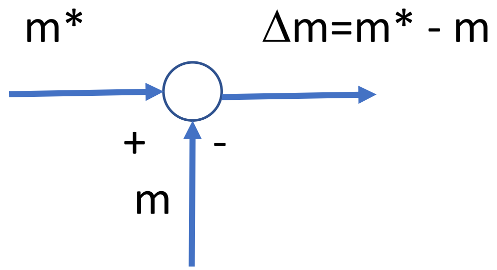


Principio del DTC

- Sulla base degli errori di coppia e di flusso si sceglie la tensione da applicare (tale da ridurre gli errori!). Non ci sono anelli di corrente (e quindi riferimenti di tensione), né controllo di PWM.

- Nella versione base (originale) la tensione è scelta fra i sei vettori attivi in uscita dell’invertitore, più il vettore nullo (Insieme finito di controllo; Finite Control Set)

- La strategia di scelta del vettore di tensione è qui illustrata (con riferimento alla coppia):



se $\Delta m > 0$ scelgo (seleziono) una tensione che produca $d\Delta m/dt < 0$
cioè $dm/dt > 0$ e viceversa.

Elemento chiave per l’implementazione del DTC è quindi conoscere l’effetto dei vettori di tensione sulle derivate di flusso (ampiezza) e coppia

Derivata dell'ampiezza del flusso statorico (1)

Nel DTC si fa riferimento al flusso statorico

Equazione della tensione statorica in $d^s q^s$ ($\alpha\beta$ di statore)

$$\boldsymbol{u}_s^s = R_s \boldsymbol{i}_s^s + \frac{d\boldsymbol{\lambda}_s^s}{dt}$$

Scomposta per gli assi d e q ed esplicitando i termini derivativi diventa

$\frac{d\lambda_{sd}^s}{dt} = u_{sd}^s - R_s i_{sd}^s$ moltiplico per λ_{sd}^s

$\frac{d\lambda_{sq}^s}{dt} = u_{sq}^s - R_s i_{sq}^s$ moltiplico per λ_{sq}^s

Derivata dell'ampiezza del flusso statorico (2)

$$\frac{d\lambda_{sd}^s}{dt}\lambda_{sd}^s = \frac{1}{2}\frac{d(\lambda_{sd}^s)^2}{dt} = u_{sd}^s\lambda_{sd}^s - R_s i_{sd}^s\lambda_{sd}^s$$

$$\frac{d\lambda_{sq}^s}{dt}\lambda_{sq}^s = \frac{1}{2}\frac{d\left(\lambda_{sq}^s\right)^2}{dt} = u_{sq}^s\lambda_{sq}^s - R_s i_{sq}^s\lambda_{sq}^s$$

e sommando termine e termine si ottiene

$$(i_{sd}^s\lambda_{sd}^s + i_{sq}^s\lambda_{sq}^s) = Re(\bar{\boldsymbol{\imath}}_s\check{\boldsymbol{\lambda}}_s) = |\bar{\boldsymbol{\imath}}_s|\left|\bar{\boldsymbol{\lambda}}_s\right|cos\vartheta_{i_s}^{\lambda_s} = \lambda_{\boldsymbol{s}}\boldsymbol{i}_{\boldsymbol{sd}}^{\lambda_s}$$

$$\frac{1}{2}\frac{d\left|\bar{\boldsymbol{\lambda}}_{\boldsymbol{s}}\right|^2}{dt} = \frac{1}{2}\frac{d\lambda_{\boldsymbol{s}}{}^2}{dt} = \frac{d\lambda_{\boldsymbol{s}}}{dt}\lambda_{\boldsymbol{s}} = (u_{sd}^s\lambda_{sd}^s + u_{sq}^s\lambda_{sq}^s) - R_s(i_{sd}^s\lambda_{sd}^s + i_{sq}^s\lambda_{sq}^s)$$

$$(u_{sd}^s\lambda_{sd}^s + u_{sq}^s\lambda_{sq}^s) = Re(\bar{\boldsymbol{u}}_s\check{\boldsymbol{\lambda}}_s) = |\bar{\boldsymbol{u}}_s|\left|\bar{\boldsymbol{\lambda}}_s\right|cos\vartheta_{u_s}^{\lambda_s} = \lambda_{\boldsymbol{s}}u_{sd}^{\lambda_s}$$ (*prodotto scalare*)

$\boldsymbol{u}_{\boldsymbol{sd}}^{\lambda_s} = |\bar{\boldsymbol{u}}_s|cos\vartheta_{u_s}^{\lambda_s}$ è la proiezione del vettore $\bar{\boldsymbol{u}}_s$ sul vettore spaziale del flusso statorico, cioè la componente diretta del vettore $\bar{\boldsymbol{u}}_s$ in un sistema di riferimento $d^{\lambda s},q^{\lambda s}$ orientato con il flusso statorico.

Derivata dell'ampiezza del flusso statorico (3)

$$\boxed{\frac{d\lambda_s}{dt} = u_{sd}^{\lambda_s} - R_s i_{sd}^{\lambda_s}}$$

se la caduta di tensioni resistiva è trascurabile, allora:

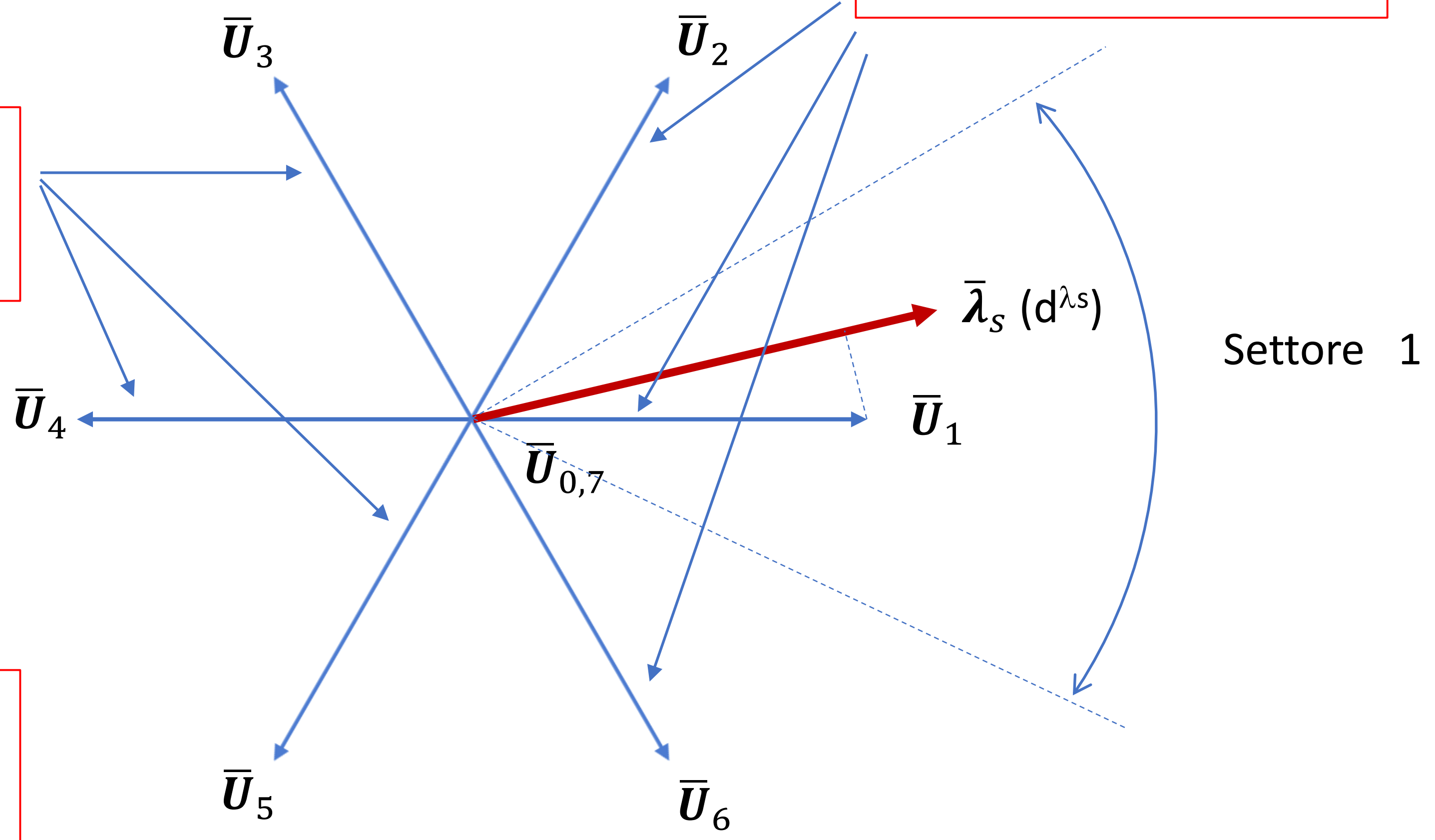
$\Rightarrow$ il segno della derivata dell'ampiezza del flusso statorico (quindi il segno della variazione dell'ampiezza del flusso) coincide con il segno della tensione dell'asse diretto $d^{\lambda s}$ orientato con il flusso statorico stesso.

$\Rightarrow$ per aumentare l'ampiezza del flusso statorico occorre applicare un vettore di tensione statorica avente una componente sull'asse $d^{\lambda s}$ (la sua proiezione sul vettore spaziale del flusso statorico) positiva; viceversa se si desidera una diminuzione dell'ampiezza del flusso statorico la stessa componente di tensione deve essere negativa.

Esemplificazione

Applicando questi vettori di tensione l'ampiezza del flusso **cresce**

Applicando questi vettori di tensione l'ampiezza del flusso **decresce**



Applicando il vettore nullo di tensione $\overline{U}_{0,7}$ l'ampiezza del flusso **rimane costante** (circa)

Derivata della coppia (1)

Espressioni della coppia

	$\mathbf{i}_s$	$\mathbf{i}_r$	$\boldsymbol{\lambda}_s$	$\boldsymbol{\lambda}_r$
$\mathbf{i}_s$	XXX	$\frac{3}{2} p L_M [\ i_{rd}^x i_{sq}^x - i_{rq}^x i_{sd}^x]$	$\frac{3}{2} p [\ \lambda_{sd}^x i_{sq}^x - \lambda_{sq}^x i_{sd}^x]$	$\frac{3}{2} p \frac{L_M}{L_r} [\ \lambda_{rd}^x i_{sq}^x - \lambda_{rq}^x i_{sd}^x]$
$\mathbf{i}_r$	$\frac{3}{2} p L_M [\ i_{rd}^x i_{sq}^x - i_{rq}^x i_{sd}^x]$	XXX	$\frac{3}{2} p \frac{L_M}{L_s} [\ \lambda_{sq}^x i_{rd}^x - \lambda_{sd}^x i_{rq}^x]$	$\frac{3}{2} p [\ \lambda_{rq}^x i_{rd}^x - \lambda_{rd}^x i_{rq}^x]$
$\boldsymbol{\lambda}_s$	$\frac{3}{2} p [\ \lambda_{sd}^x i_{sq}^x - \lambda_{sq}^x i_{sd}^x]$	$\frac{3}{2} p \frac{L_M}{L_s} [\ \lambda_{sq}^x i_{rd}^x - \lambda_{sd}^x i_{rq}^x]$	XXX	$\frac{3}{2} p \frac{L_M}{L_r L_t} [\ \lambda_{rd}^x \lambda_{sq}^x - \lambda_{rq}^x \lambda_{sd}^x]$
$\boldsymbol{\lambda}_r$	$\frac{3}{2} p \frac{L_M}{L_r} [\ \lambda_{rd}^x i_{sq}^x - \lambda_{rq}^x i_{sd}^x]$	$\frac{3}{2} p [\ \lambda_{rq}^x i_{rd}^x - \lambda_{rd}^x i_{rq}^x]$	$\frac{3}{2} p \frac{L_M}{L_r L_t} [\ \lambda_{rd}^x \lambda_{sq}^x - \lambda_{rq}^x \lambda_{sd}^x]$	XXX

Derivata della coppia (2)

Da:

$$m = \frac{3}{2} p \frac{L_M}{L'_s L_r} \left(\lambda_{rd}^s \, \lambda_{sq}^s \; - \; \lambda_{rq}^s \, \lambda_{sd}^s \right)$$

(ove $L'_s = L_t = L_s - L_M^2 / L_r$ induttanza transitoria di statore)

Già ricavate

la derivata è:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{3}{2} p \frac{L_M}{L'_s L_r} \left(\frac{d\lambda_{rd}^s}{dt} \lambda_{sq}^s + \lambda_{rd}^s \frac{d\lambda_{sq}^s}{dt} - \frac{d\lambda_{rq}^s}{dt} \lambda_{sd}^s - \lambda_{rq}^s \frac{d\lambda_{sd}^s}{dt} \right)$$

Servono le derivate dei flussi rotorici

Derivata della coppia (3)

Equazione della tensione rotorica in $d^s q^s$ ($\alpha\beta$ di statore)

$$0 = R_r \boldsymbol{i}_r^s + \frac{d\boldsymbol{\lambda}_r^s}{dt} - j\omega_{me}\boldsymbol{\lambda}_r^s$$

Scomposta per gli assi d e q ed esplicitando i termini derivativi diventa

$$\frac{d\lambda_{rd}^s}{dt} = -R_r i_{rd}^s - \omega_{me}\lambda_{rq}^s$$

$$\frac{d\lambda_{rq}^s}{dt} = -R_r i_{rq}^s + \omega_{me}\lambda_{rd}^s$$ <u>da sostituire nell’espressione della derivata della coppia</u>

Derivata della coppia (4)

Sostituendo le espressioni delle derivate dei flussi statorico e rotorico e ordinando si ottiene:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{3}{2} p \frac{L_M}{L'_s L_r} \left(\lambda_{rd}^s u_{sq}^s - \lambda_{rq}^s u_{sd}^s\right) + \qquad \text{(a)}$$

$$+ (-R_r) \frac{3}{2} p \frac{L_M}{L'_s L_r} \left(i_{rd}^s \lambda_{sq}^s - i_{rq}^s \lambda_{sd}^s\right) + \qquad \text{(b)}$$

$$+ (-R_s) \frac{3}{2} p \frac{L_M}{L'_s L_r} \left(i_{sq}^s \lambda_{rd}^s - i_{sd}^s \lambda_{rq}^s\right) + \qquad \text{(c)}$$

$$+ \omega_{me} \frac{3}{2} p \frac{L_M}{L'_s L_r} \left(\lambda_{rd}^s \lambda_{sd}^s + \lambda_{rq}^s \lambda_{sq}^s\right) \qquad \text{(d)}$$

4 addendi

Derivata della coppia (5)

<u>Addendo (a)</u>

Ricordando che

$\overline{\boldsymbol{\lambda}}_r = \frac{L_r}{L_M}(\overline{\boldsymbol{\lambda}}_s - L'_s \overline{\boldsymbol{\imath}}_s)$ (scritta sia per d che per q)

si ottiene

$$Im(\overline{\boldsymbol{u}}_s \check{\boldsymbol{\lambda}}_s) = |\overline{\boldsymbol{u}}_s||\overline{\boldsymbol{\lambda}}_s| sin\vartheta_{u_s}^{\lambda_s} = \lambda_s u_{sq}^{\lambda_s}$$ *(prodotto vettoriale)*

$$\frac{3}{2}p\frac{L_M}{L'_s L_r}(\lambda_{rd}^s u_{sq}^s - \lambda_{rq}^s u_{sd}^s) = \frac{3}{2}p\frac{1}{L'_s}\left[(\lambda_{sd}^s u_{sq}^s - \lambda_{sq}^s u_{sd}^s) - L'_s(i_{sd}^s u_{sq}^s - i_{sq}^s u_{sd}^s)\right]$$

$$Im(\overline{\boldsymbol{u}}_s \check{\boldsymbol{\imath}}_s) = |\overline{\boldsymbol{\imath}}_s||\overline{\boldsymbol{u}}_s| sin\vartheta_{u_s}^{i_s} = i_s u_s sin\varphi$$

Derivata della coppia (6)

<u>Addendo (a)</u>

In definitive per l'addendo (a):

$$\frac{3}{2}p\frac{L_M}{L'_sL_r}\left(\lambda_{rd}^s u_{sq}^s - \lambda_{rq}^s u_{sd}^s\right) = \frac{3}{2}p\frac{\lambda_s}{L'_s}\left(u_{sq}^{\lambda_s} - u_s\underbrace{\frac{L'_s i_s sin\varphi}{\lambda_s}}\right)$$

Molto piccolo:
$u_{sq}^{\lambda_s}$ è dominante

Derivata della coppia (7)

Addendo (b)

$$(-R_r)\ \frac{3}{2}p\,\frac{L_M}{L'_s L_r}\left(i^s_{rd}\lambda^s_{sq} - i^s_{rq}\lambda^s_{sd}\right) = -\,\frac{R_r}{L'_r}\,m$$

(ove $L'_r = L_r - L^2_M/L_s$ induttanza transitoria di rotore)

$$m = \frac{3}{2}p\,\frac{L_M}{L_s}\left(i^s_{rd}\lambda^s_{sq} - i^s_{rq}\lambda^s_{sd}\right)$$

Derivata della coppia (8)

<u>Addendo (c)</u>

$$(-R_s)\ \frac{3}{2}p\frac{L_M}{L'_s L_r}\ \left(i^s_{sq}\lambda^s_{rd} - \ i^s_{sd}\lambda^s_{rq}\right) = \ -\ \frac{R_s}{L'_s}\ m$$

$$m = \frac{3}{2}p\frac{L_M}{L_r}\ \left(i^s_{sq}\lambda^s_{rd} - \ i^s_{sd}\lambda^s_{rq}\right)$$

Derivata della coppia (9)

Addendo (d)

$$\omega_{me}\,\frac{3}{2}p\,\frac{L_M}{L_s'L_r}\left(\lambda_{rd}^s\lambda_{sd}^s+\ \lambda_{rq}^s\lambda_{sq}^s\right)=\frac{3}{2}p\,\frac{1}{L_s'}\lambda_s\underbrace{(\omega_{me}\,\frac{L_M}{L_r}\lambda_r cos\vartheta_{\lambda_r}^{\lambda_s})}$$

Prodotto scalare

E’ una fem dovuta al flusso rotorico riportato a (visto da) statore a causa della rotazione del rotore stesso.
Cresce con la velocità.

Derivata della coppia (10)

In conclusione, per la derivata della coppia si ha:

Il segno della derivata della coppia «coincide» con quello di $u_{sq}^{\lambda_s}$

$$\frac{dm}{dt}=\frac{3}{2}p\frac{\lambda_s}{L'_s}\left(u_{sq}^{\lambda_s}-u_s\frac{L'_s i_s sin\varphi}{\lambda_s}-\omega_{me}\frac{L_M}{L_r}\lambda_r cos\vartheta_{\lambda_r}^{\lambda_s}\right)-\left(\frac{R_r}{L'_r}+\frac{R_s}{L'_s}\right)m$$

E' il termine dominante fino ad una certa velocità (velocità base) oltre la quale si può andare riducendo l'ampiezza del flusso (deflussaggio).

oppure

$$\frac{dm}{dt}+\left(\frac{R_r}{L'_r}+\frac{R_s}{L'_s}\right)m=\frac{3}{2}p\frac{\lambda_s}{L'_s}\left(u_{sq}^{\lambda_s}-u_s\frac{L'_s i_s sin\varphi}{\lambda_s}-\omega_{me}\frac{L_M}{L_r}\lambda_r cos\vartheta_{\lambda_r}^{\lambda_s}\right)$$

Costanti di tempo piccole
$\Rightarrow$ risposta pronta

Esemplificazione

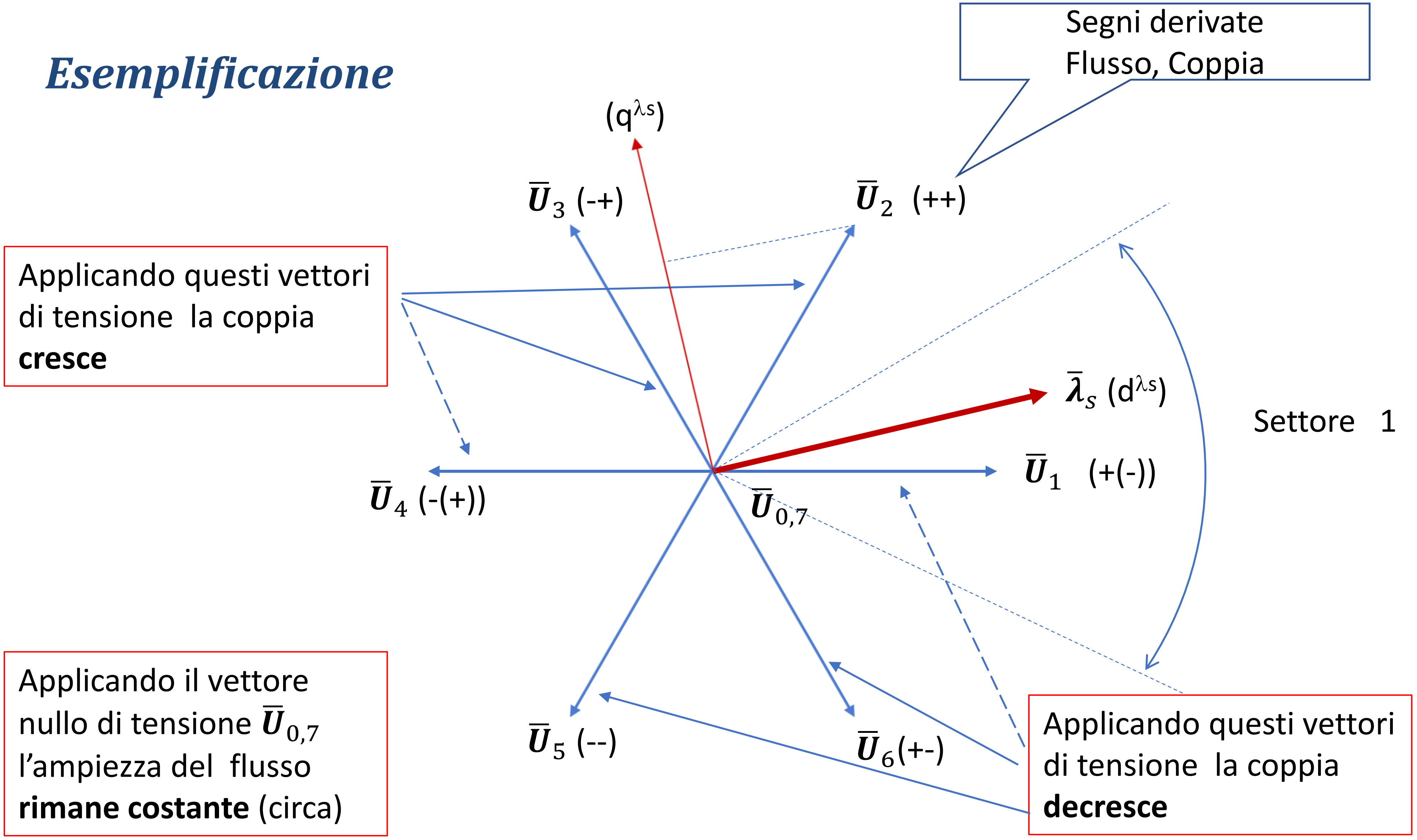
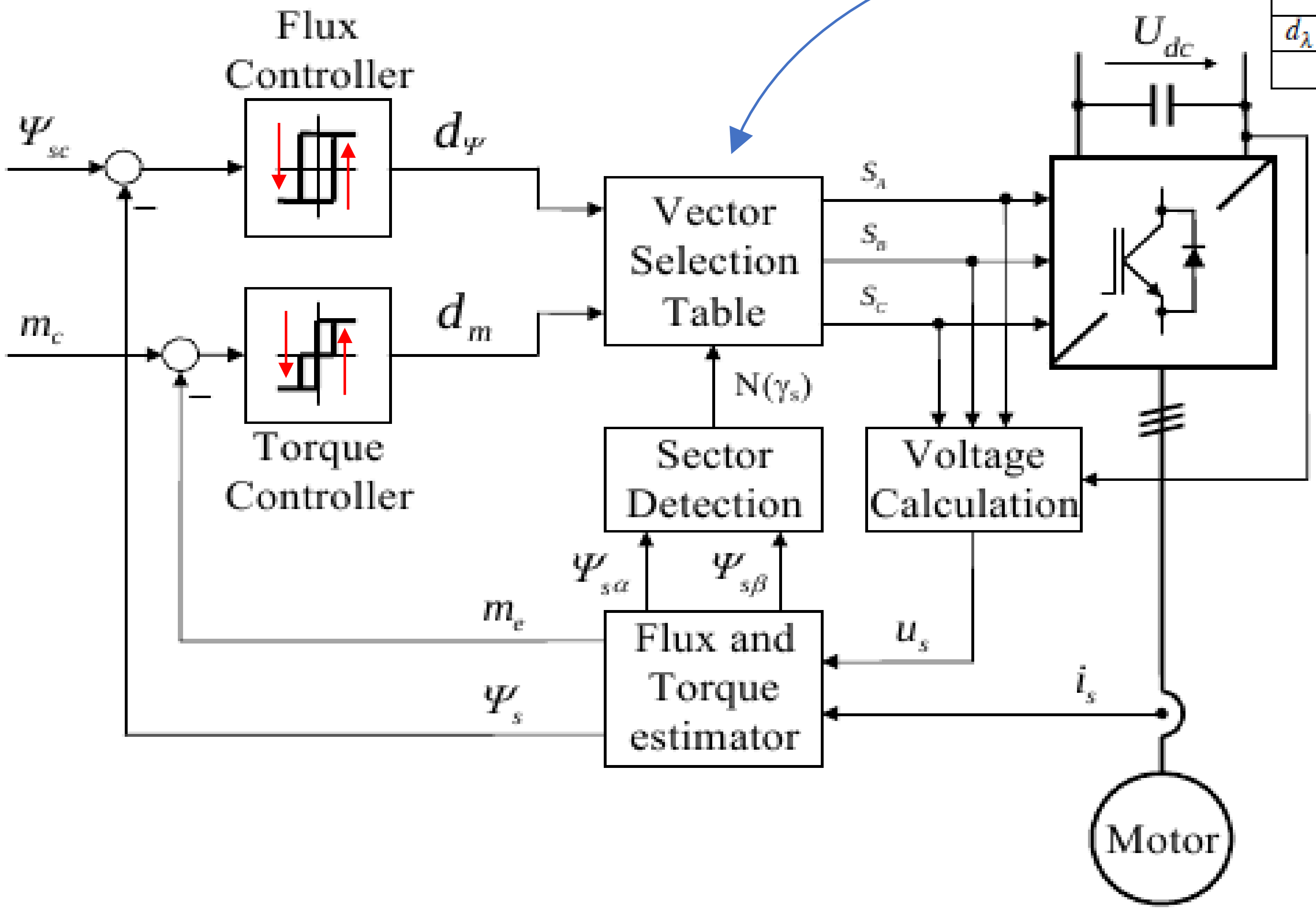


Tabella di commutazione (switching table)

$d_\lambda d_m \backslash N(\gamma_s)$		N=1	N=2	N=3	N=4	N=5	N=6
	$d_m = 1$	$V_2(110)$	$V_3(010)$	$V_4(011)$	$V_5(001)$	$V_6(101)$	$V_1(100)$
$d_\lambda = 1$	$d_m = 0$	$V_7(111)$	$V_0(000)$	$V_7(111)$	$V_0(000)$	$V_7(111)$	$V_0(000)$
	$d_m = -1$	$V_6(101)$	$V_1(100)$	$V_2(110)$	$V_3(010)$	$V_4(011)$	$V_5(001)$
	$d_m = 1$	$V_3(010)$	$V_4(011)$	$V_5(001)$	$V_6(101)$	$V_1(100)$	$V_2(110)$
$d_\lambda = -1$	$d_m = 0$	$V_0(000)$	$V_7(111)$	$V_0(000)$	$V_7(111)$	$V_0(000)$	$V_7(111)$
	$d_m = -1$	$V_5(001)$	$V_6(101)$	$V_1(100)$	$V_2(110)$	$V_3(010)$	$V_4(011)$

Schema di DTC

$d_\lambda d_m \backslash N(\gamma_s)$		N=1	N=2	N=3	N=4	N=5	N=6
$d_\lambda = 1$	$d_m = 1$	$V_2(110)$	$V_3(010)$	$V_4(011)$	$V_5(001)$	$V_6(101)$	$V_1(100)$
	$d_m = 0$	$V_7(111)$	$V_0(000)$	$V_7(111)$	$V_0(000)$	$V_7(111)$	$V_0(000)$
	$d_m = -1$	$V_6(101)$	$V_1(100)$	$V_2(110)$	$V_3(010)$	$V_4(011)$	$V_5(001)$
$d_\lambda = -1$	$d_m = 1$	$V_3(010)$	$V_4(011)$	$V_5(001)$	$V_6(101)$	$V_1(100)$	$V_2(110)$
	$d_m = 0$	$V_0(000)$	$V_7(111)$	$V_0(000)$	$V_7(111)$	$V_0(000)$	$V_7(111)$
	$d_m = -1$	$V_5(001)$	$V_6(101)$	$V_1(100)$	$V_2(110)$	$V_3(010)$	$V_4(011)$



- Non ci sono anelli di corrente e relativi regolatori
- Non si misura la velocità
- Lo schema si riferisce all’implementazione analogica
- (a tempo continuo)

Note conclusive

- DTC è un controllo di coppia (e di flusso) senza misura di velocità (sensorless), come il FOC con stima del flusso rotorico dalle tensioni e correnti statoriche.
- La stima della posizione del flusso statorico per definire il settore di funzionamento è più tollerante agli errori di stima
- Le tensioni applicate (interi vettori spaziali) sono sempre molto più grandi delle cadute di tensione resistive, anche a velocità basse: vantaggio per lo stimatore di flusso
- Non ci sono guadagni di regolatori da impostare; la dinamica è elevata
- *Le oscillazioni di flusso e di coppia (quindi corrente) sono grandi*
- *La frequenza di commutazione non è controllata*