

Electric Drives  
Laboratory  
DII - UniPD

# Azionamenti Elettrici

Lezioni a.a. 2020-2021

prof. Silverio Bolognani

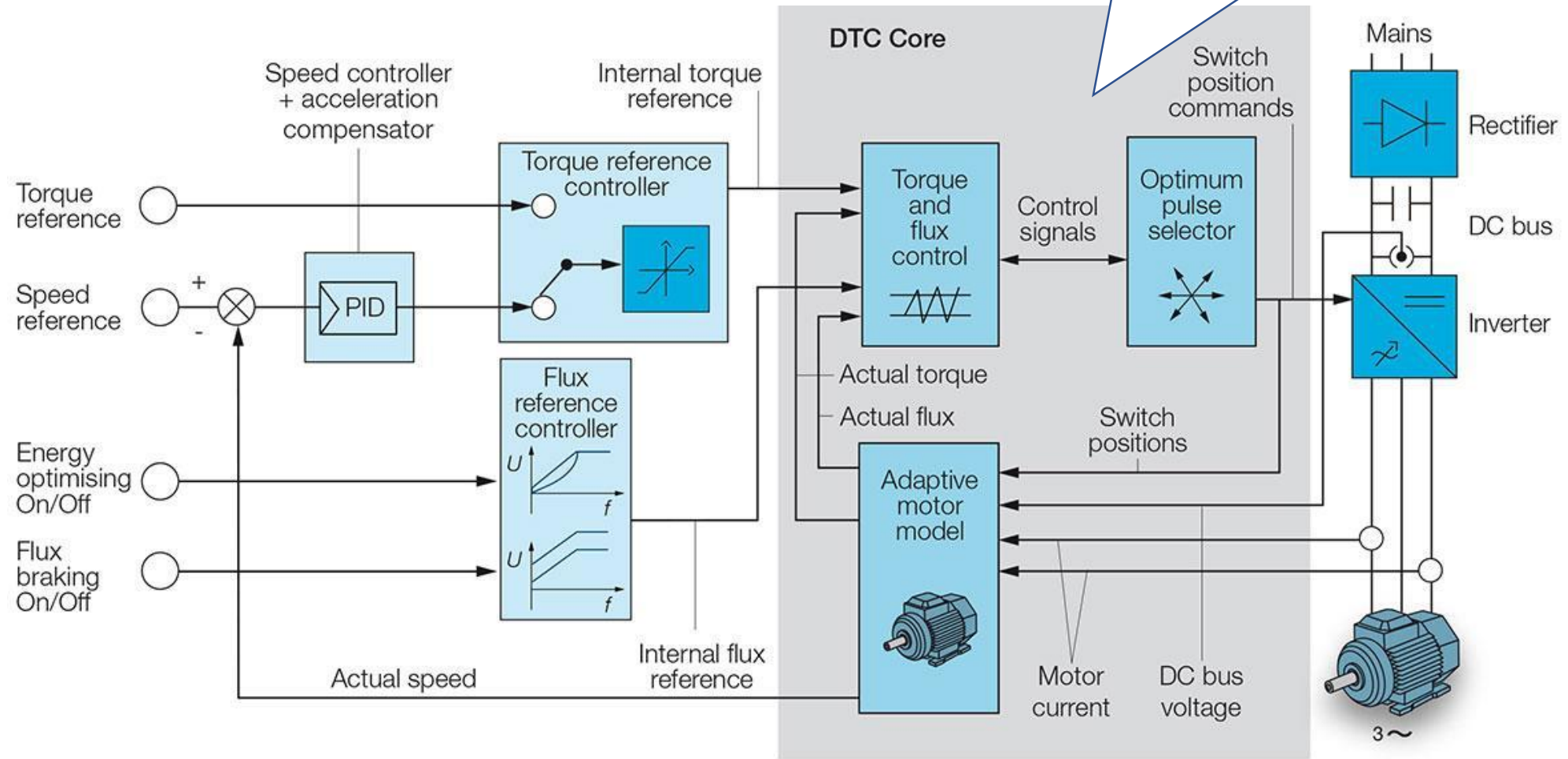
PARTE IV

# Macchina asincrona (Macchina a induzione)

Controllo diretto di coppia (e di flusso)  
**Direct Torque (and flux) Control - DTC**

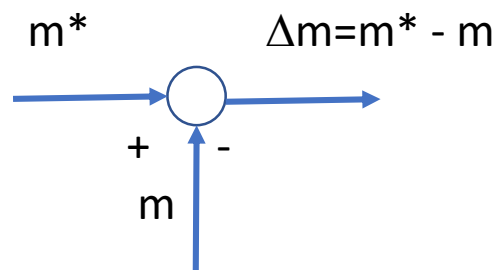
Da: <https://new.abb.com/drives/it/dtc>

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)**

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

$$\bar{\lambda}_s^s = \lambda_s^s e^{j\theta_s^s} \quad \frac{d\bar{\lambda}_s^s}{dt} = \frac{d\lambda_s^s}{dt} e^{j\theta_s^s} + j\lambda_s^s \omega_s^s$$

$$\mathbf{u}_s^s = R_s \mathbf{i}_s^s + \frac{d\lambda_s^s}{dt}$$

→ sia  $R_s \approx 0$

$$\mathbf{u}_s^s e^{-j\theta_s^s} = \frac{d\lambda_s^s}{dt} + j\omega_s^s \lambda_s^s = u_{sd}^s + j u_{sq}^s$$

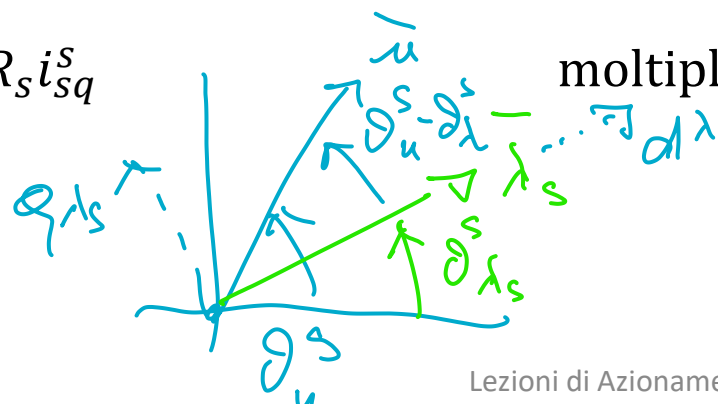
Scomposta per gli assi d e q ed esplicitando i termini derivativi diventa

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

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

$$u_s^s e^{j\theta_s^s} e^{-j\theta_s^s} = u_s^s e^{j\theta_s^s} = u_{sd}^s + j u_{sq}^s$$

moltiplico per  $\lambda_{sd}^s$



$j \frac{d\lambda_s^s}{dt} e^{j\theta_s^s}$   
 $\omega_s^s$   
 Nel DTC si fa riferimento al flusso statorico

$$\frac{d\lambda_s^s}{dt} = u_{sd}^s$$

$$\omega_s^s \lambda_s^s = u_{sq}^s$$

## Derivata dell'ampiezza del flusso statorico (2)

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

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

e sommando termine e termine si ottiene

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

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

$$(u_{sd}^s \lambda_{sd}^s + u_{sq}^s \lambda_{sq}^s) = \operatorname{Re}(\bar{\mathbf{u}}_s \check{\lambda}_s) = |\bar{\mathbf{u}}_s| |\check{\lambda}_s| \cos \vartheta_{\mathbf{u}_s}^{\lambda_s} = \lambda_s \mathbf{u}_{sd}^{\lambda_s} \quad (\text{prodotto scalare})$$

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

## Derivata dell'ampiezza del flusso statorico (3)

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

se la caduta di tensioni resistiva è trascurabile, allora:

⇒ 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.

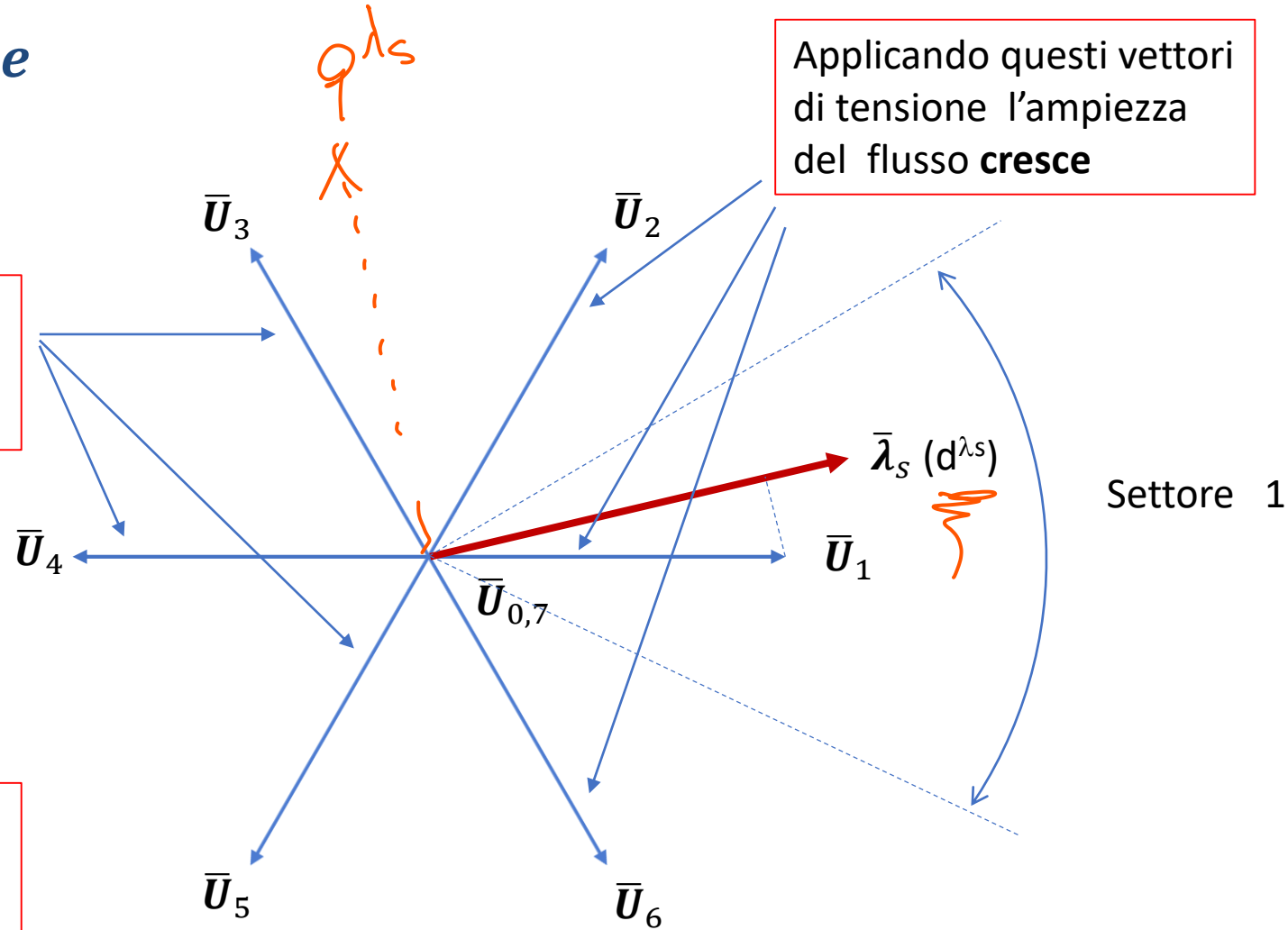
⇒ **per aumentare l'ampiezza del flusso statorico** occorre applicare un **vettore di tensione** statorica **avente una componente sull'asse  $d^{\lambda_s}$**  (la sua proiezione sul vettore spaziale del flusso statorico) **positiva**; viceversa se si desidera una diminuzione dell'ampiezza del flusso 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 **decrece**

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





## Derivata della coppia (1)

### Espressioni della coppia

	$i_s$	$i_r$	$\lambda_s$	$\lambda_r$
$i_s$	XXX	$\frac{3}{2}pL_M [ i_{rd}^x i_{sq}^x - i_{rq}^x i_{sd}^x ]$	$\frac{3}{2}p [ \lambda_{sd}^x i_{sq}^x - \lambda_{sq}^x i_{sd}^x ]$	$\frac{3}{2}p \frac{L_M}{L_r} [ \lambda_{rd}^x i_{sq}^x - \lambda_{rq}^x i_{sd}^x ]$
$i_r$	$\frac{3}{2}pL_M [ i_{rd}^x i_{sq}^x - i_{rq}^x i_{sd}^x ]$	XXX	$\frac{3}{2}p \frac{L_M}{L_s} [ \lambda_{sq}^x i_{rd}^x - \lambda_{sd}^x i_{rq}^x ]$	$\frac{3}{2}p [ \lambda_{rq}^x i_{rd}^x - \lambda_{rd}^x i_{rq}^x ]$
$\lambda_s$	$\frac{3}{2}p [ \lambda_{sd}^x i_{sq}^x - \lambda_{sq}^x i_{sd}^x ]$	$\frac{3}{2}p \frac{L_M}{L_s} [ \lambda_{sq}^x i_{rd}^x - \lambda_{sd}^x i_{rq}^x ]$	XXX	$\frac{3}{2}p \frac{L_M}{L_r L_t} [ \lambda_{rd}^x \lambda_{sq}^x - \lambda_{rq}^x \lambda_{sd}^x ]$
$\lambda_r$	$\frac{3}{2}p \frac{L_M}{L_r} [ \lambda_{rd}^x i_{sq}^x - \lambda_{rq}^x i_{sd}^x ]$	$\frac{3}{2}p [ \lambda_{rq}^x i_{rd}^x - \lambda_{rd}^x i_{rq}^x ]$	$\frac{3}{2}p \frac{L_M}{L_r L_t} [ \lambda_{rd}^x \lambda_{sq}^x - \lambda_{rq}^x \lambda_{sd}^x ]$	XXX

## Derivata della coppia (2)

Da:

$$m = \frac{3}{2} p \frac{L_M}{L'_s L_r} (\lambda_{rd}^s \lambda_{sq}^s - \lambda_{rq}^s \lambda_{sd}^s) \quad (\text{ove } L'_s = L_t = L_s - L_M^2/L_r \text{ induttanza transitoria di statore})$$

la derivata è:

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

Già ricavate

Servono le derivate dei flussi rotorici

## ***Derivata della coppia (3)***

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

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

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

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

$$\frac{d\lambda_{rq}^s}{dt} = -R_r i_{rq}^s + \omega_{me} \lambda_{rd}^s \quad \underline{\text{da sostituire nell'espressione della derivata della coppia}}$$

## Derivata della coppia (4)

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

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

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

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

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



4 addendi

## Derivata della coppia (5)

Addendo (a)

Ricordando che

$$\bar{\lambda}_r = \frac{L_r}{L_M} (\bar{\lambda}_s - L'_s \bar{i}_s) \quad (\text{scritta sia per } d \text{ che per } q)$$

si ottiene

$$\text{Im}(\bar{\mathbf{u}}_s \check{\lambda}_s) = |\bar{\mathbf{u}}_s| |\bar{\lambda}_s| \sin \vartheta_{u_s}^{\lambda_s} = \lambda_s u_{sq}^{\lambda_s} \quad (\text{prodotto vettoriale})$$

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

$$\text{Im}(\bar{\mathbf{u}}_s \check{i}_s) = |\bar{i}_s| |\bar{\mathbf{u}}_s| \sin \vartheta_{u_s}^{i_s} = i_s u_s \sin \varphi$$

## Derivata della coppia (6)

Addendo (a)

In definitiva per l'addendo (a):

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

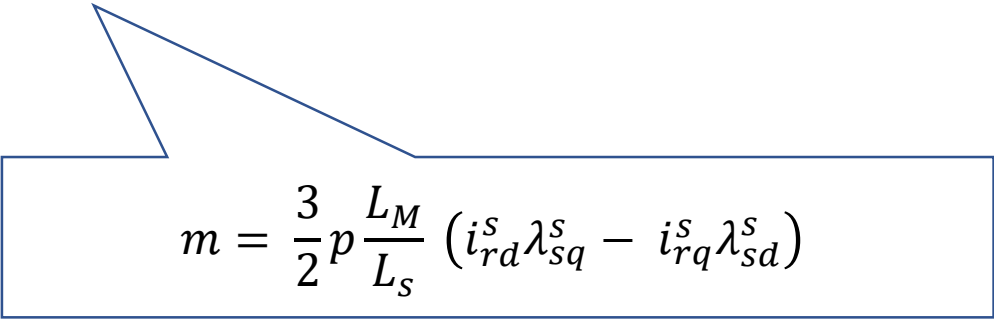
Molto piccolo:

$u_{sq}^{\lambda_s}$  è dominante

## Derivata della coppia (7)

Addendo (b)

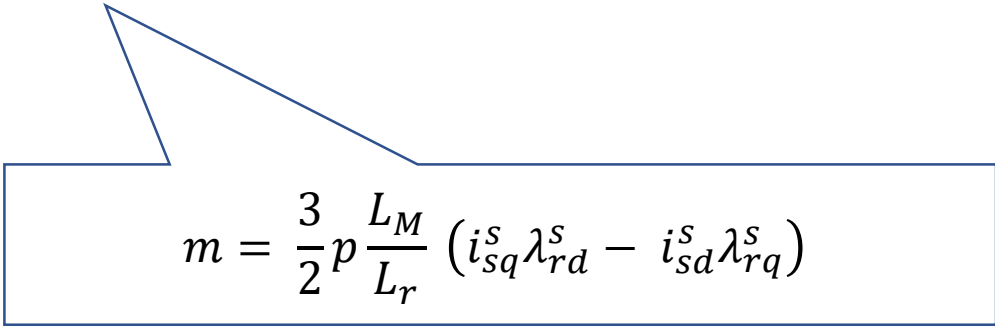
$$(-R_r) \frac{3}{2} p \frac{L_M}{L'_s L_r} (i_{rd}^s \lambda_{sq}^s - i_{rq}^s \lambda_{sd}^s) = - \frac{R_r}{L'_r} m \quad (\text{ove } L'_r = L_r - L_M^2/L_s \text{ induttanza transitoria di rotore})$$


$$m = \frac{3}{2} p \frac{L_M}{L_s} (i_{rd}^s \lambda_{sq}^s - i_{rq}^s \lambda_{sd}^s)$$

## ***Derivata della coppia (8)***

Addendo (c)

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


$$m = \frac{3}{2} p \frac{L_M}{L_r} (i_{sq}^s \lambda_{rd}^s - i_{sd}^s \lambda_{rq}^s)$$



## Derivata della coppia (9)

Addendo (d)

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

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  $u_{sq}^{\lambda_s}$

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

oppure

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

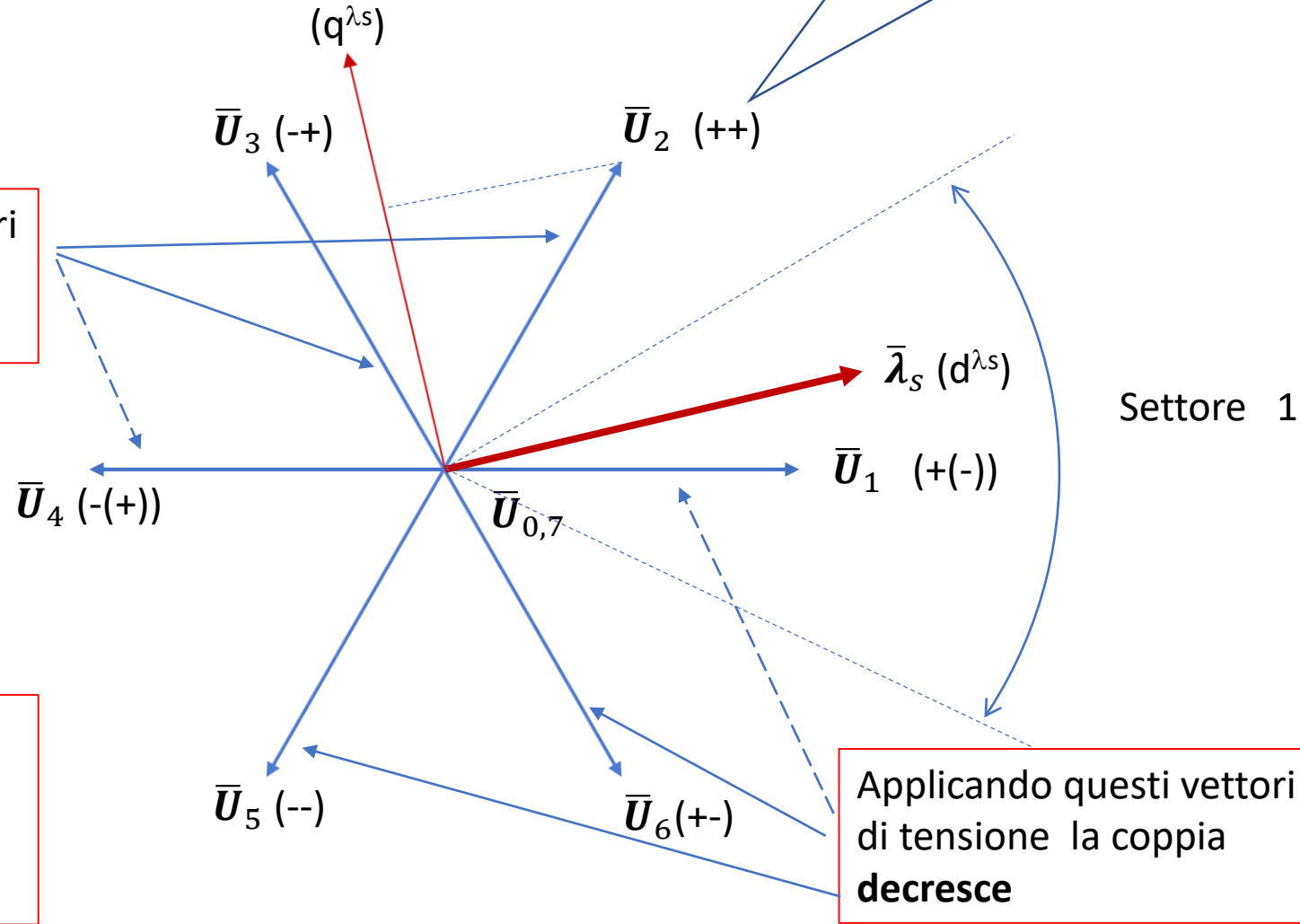
$$\frac{dm}{dt} + \left( \frac{R_r}{L'_r} + \frac{R_s}{L'_s} \right) m = \frac{3}{2} p \frac{\lambda_s}{L'_s} \left( u_{sq}^{\lambda_s} - u_s \frac{L'_s i_s \sin \varphi}{\lambda_s} - \omega_{me} \frac{L_M}{L_r} \lambda_r \cos \vartheta_{\lambda_r}^{\lambda_s} \right)$$

Costanti di tempo piccole  
⇒ risposta pronta

# Esemplificazione

Segni derivate  
Flusso, Coppia

Applicando questi vettori di tensione la coppia **crece**



## Tabella di commutazione (switching table)

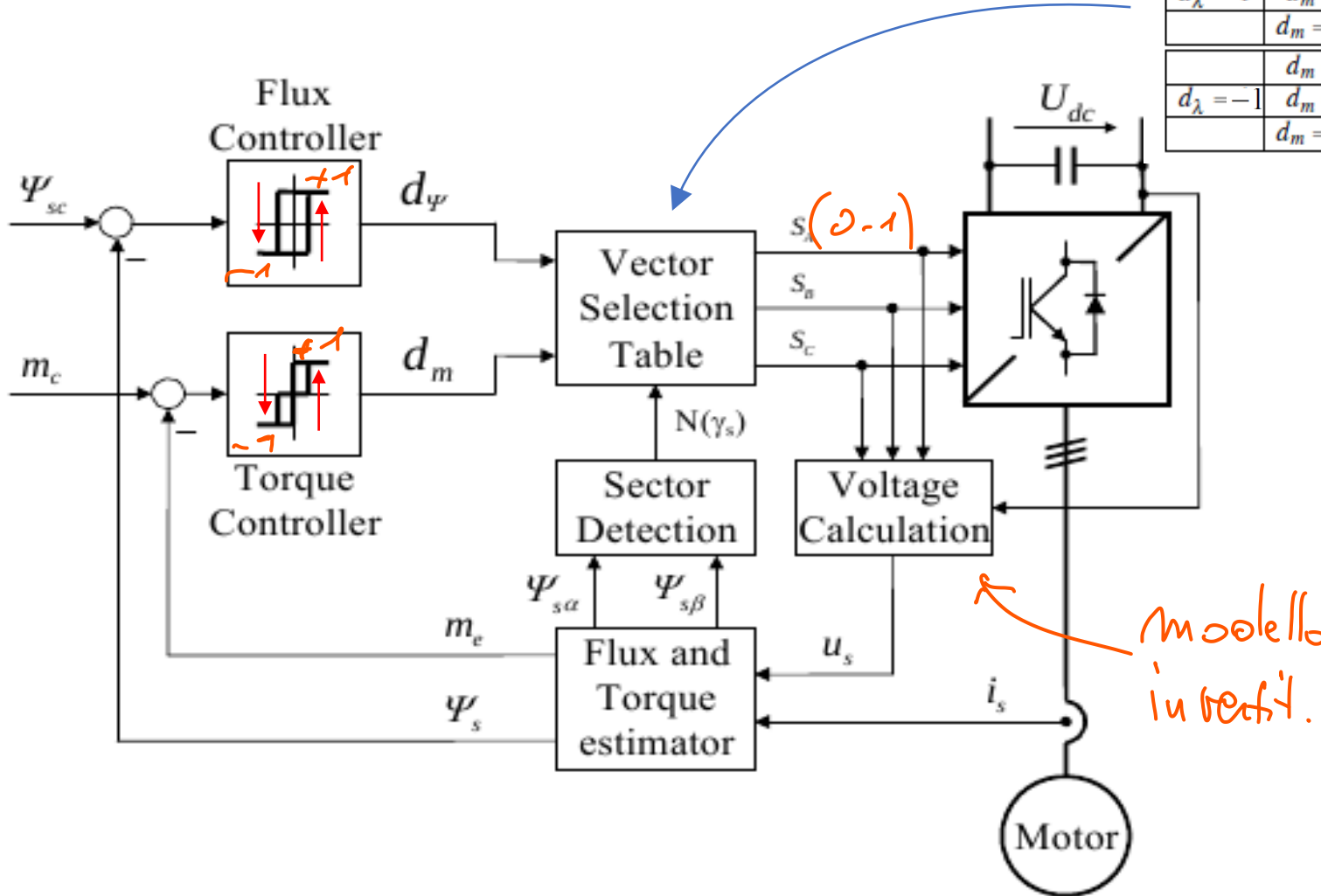
lettori

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

deriv.

# Schema di DTC

$d_\lambda d_m \setminus N(\gamma_s)$	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*