

Electric Drives
Laboratory
DII - UniPD

Azionamenti Elettrici

Lezioni a.a. 2020-2021

prof. Silverio Bolognani

PARTE IV

Macchina asincrona (Macchina a induzione)

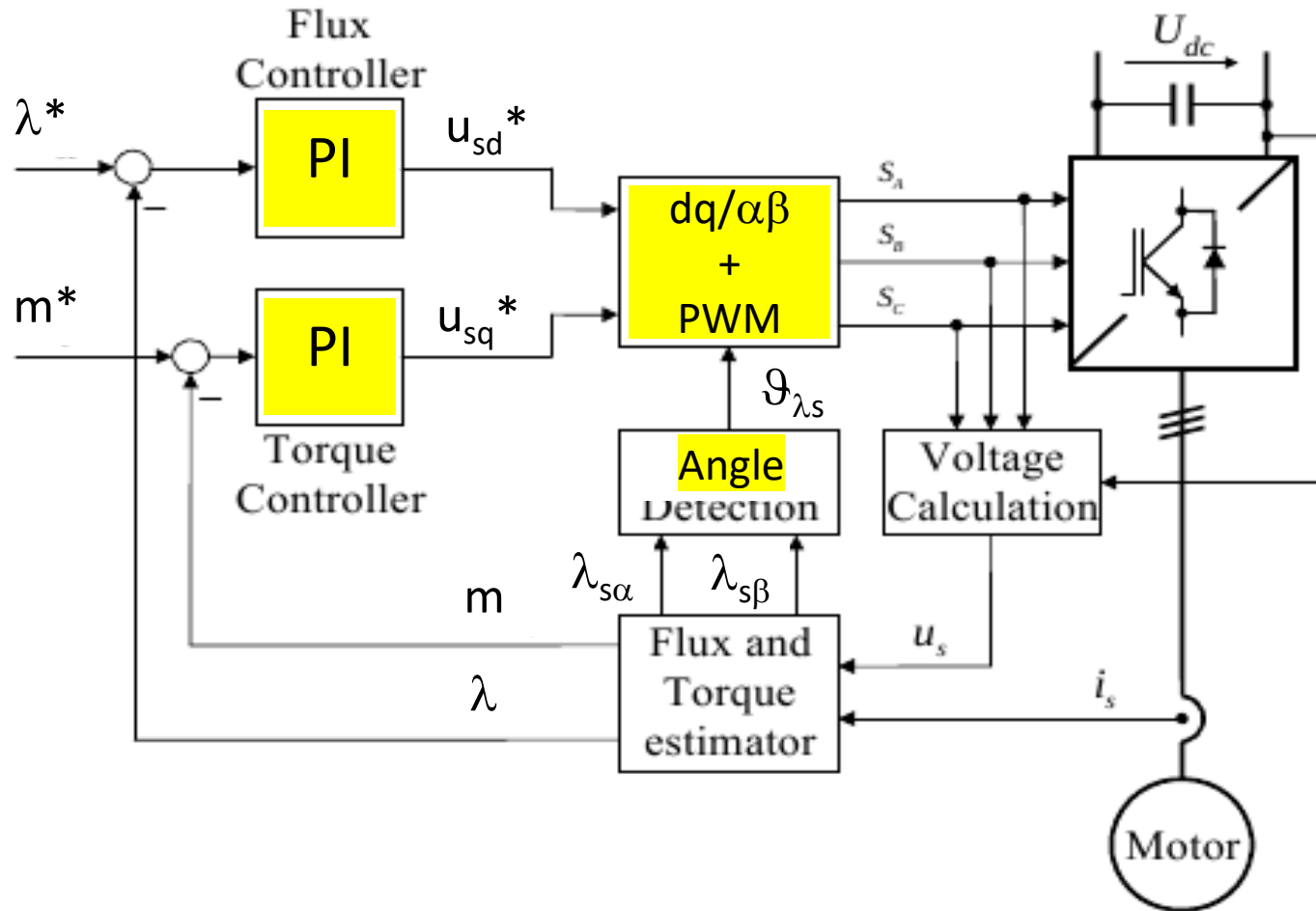
Controllo predittivo diretto di coppia (e di flusso)
Predictive **D**irect **T**orque (and flux) **C**ontrol

Varianti del DTC

Sono dovute ad almeno due fattori:

- L'intenzione di **eliminare/attenuare alcuni svantaggi del DTC** originale (per es. frequenza non controllate di commutazione dell'invertitore, grande ripple di corrente/coppia,)
- Il passaggio a **implementazioni digitali** che impongono accorgimenti non richiesti nella soluzione analogica ed , al tempo stesso, offrono consentono potenzialità di elaborazione dei segnali molto più ampie.
- In seguito si fa cenno della soluzione con PWM e si descrive con maggior dettaglio quella predittiva.

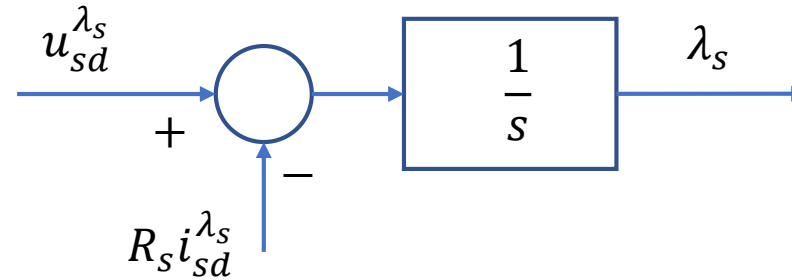
Schema di DTC con PWM : schema a blocchi



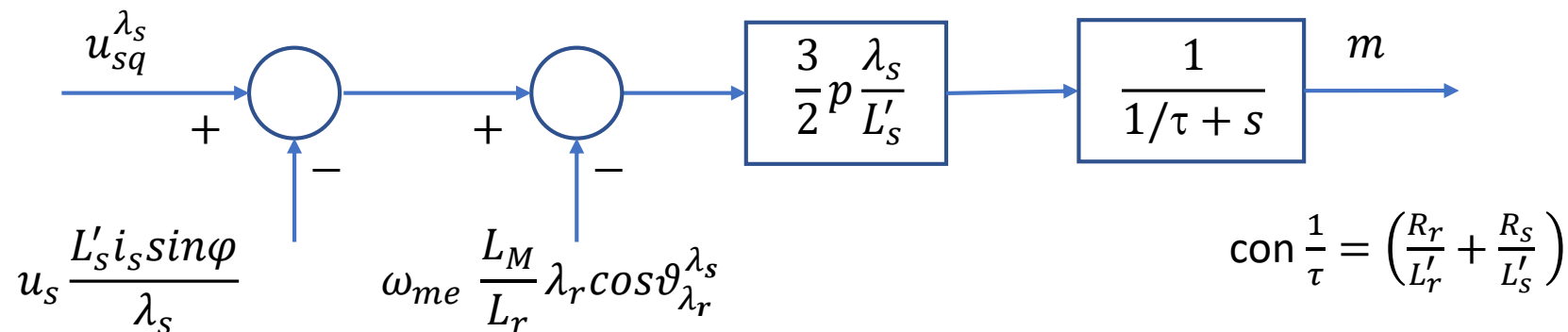
- Il sistema di riferimento dq è orientato con λ_s
- Adatto ad un implementazione digitale (a tempo discreto)
- Prestazioni simili a quelle di un azionamento FOC diretto
- Consente di attenuare il ripple delle correnti (e della coppia) e di controllare la frequenza di commutazione

Schema di DTC con PWM : fdt del motore per il progetto dei regolatori

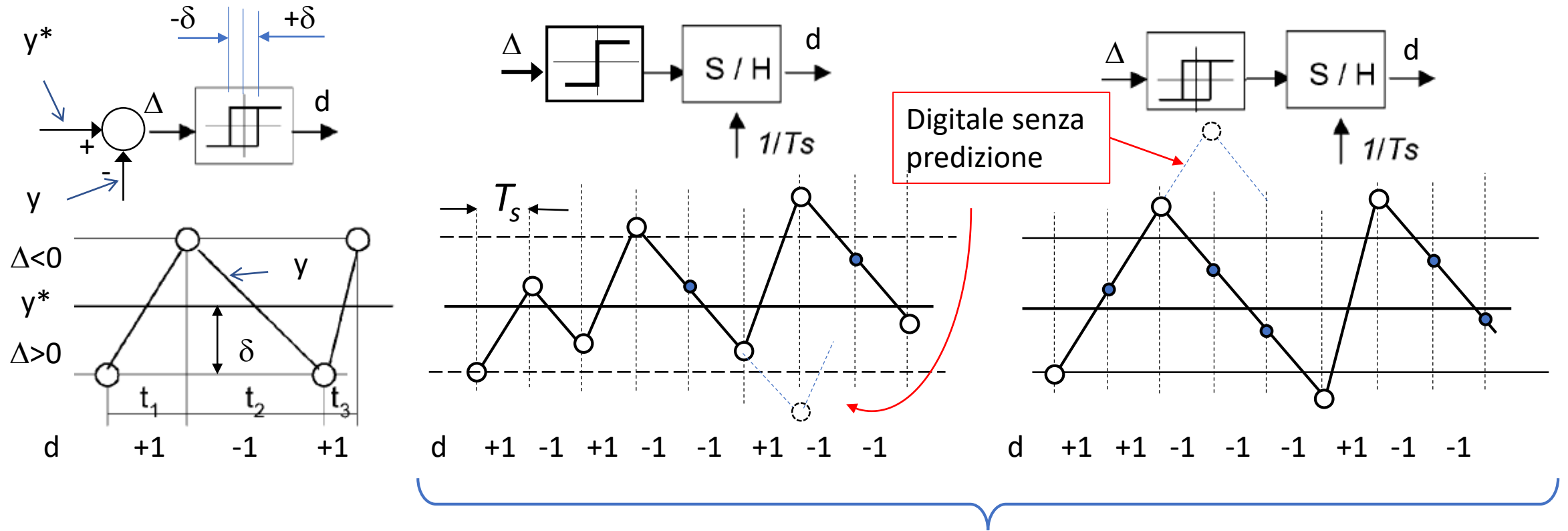
$$\frac{d\lambda_s}{dt} = u_{sd}^{\lambda_s} - R_s i_{sd}^{\lambda_s}$$



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



Considerazioni sul controllo ad isteresi



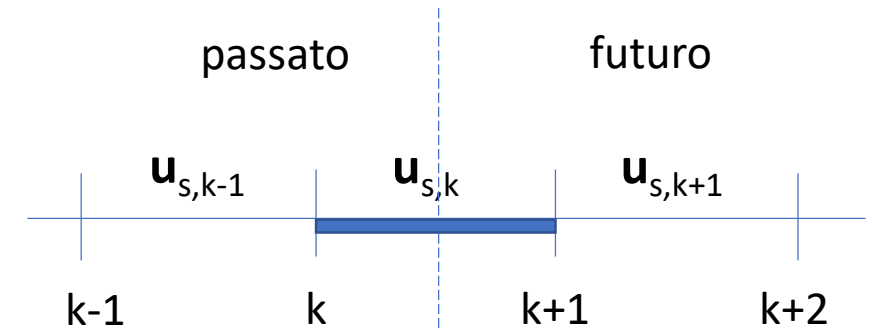
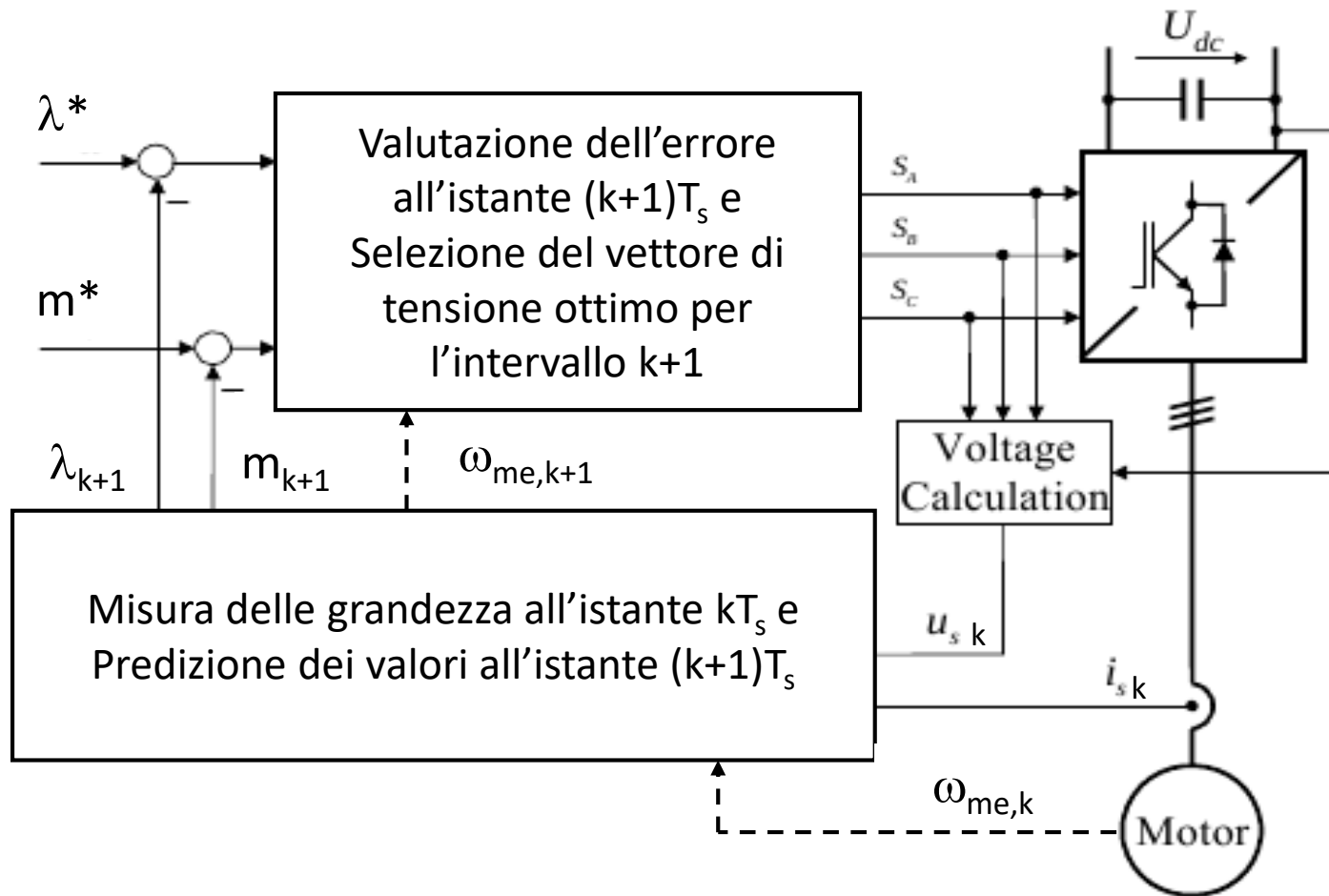
Adatto ad un'implementazione digitale, ma serve un'azione di **predizione di cambio di segno o di superamento della soglia di Δ al successivo (futuro) istante di campionamento**, al fine di predisporre in tempo utile l'aggiustamento del comando

Controllo diretto di coppia predittivo a modello: note preliminari

Predictive DTC

- Il controllo con PID decide l'azione di controllo sulla base dei valori attuali e passati dell'errore della grandezza controllata. Nessuna valutazione viene fatta sugli effetti del comando scelto.
- Nel controllo «predittivo» si decide l'azione di controllo sulla base della «predizione» dell'effetto del comando sull'errore della grandezza controllata. Nessuna importanza ha la storia passata dell'errore.
- Per fare la «predizione» serve conoscere il modello dinamico preciso del sistema che si controlla. Per il controllo con PID il modello che serve è «più grossolano» o addirittura non si usa.
- Il controllo ad isteresi è classificabile come controllo predittivo: viene scelto un comando sulla base della derivata dell'uscita che quel comando produrrà.

Controllo diretto di coppia predittivo a modello: schema (Predictive DTC)



- L'implementazione è digitale
- La velocità può essere stimata o misurata.
- Lo schema è un:
 - controllo diretto di coppia e di flusso,
 - predittivo ad isteresi,
 - basato sul modello,
 - con insieme finito di controllo.

Predictive DTC - 1^o passo: Predizione flussi e coppia all'istante $(k+1)T$

Usiamo le grandezze/equazioni già impiegate nella formulazione «analogica» del DTC.

La sequenza dei calcoli è: (NB - grandezze con indice $k, k-1, \dots$ sono misure o grandezze comunque attuali; quelle con indice $k+1, k+2, \dots$ sono predizioni)

a) Flusso statorico

$$\left(\frac{d\lambda_s^s}{dt}\right)_k = \mathbf{u}_{s,k}^s - R_s \mathbf{i}_{s,k}^s$$

da cui

$$\lambda_{s,k+1}^s = \lambda_{s,k}^s + T_s \left(\frac{d\lambda_s^s}{dt}\right)_k$$

b) Flusso rotorico

$$\left(\frac{d\lambda_r^s}{dt}\right)_k = -R_r \mathbf{i}_{r,k}^s + j\omega_{me,k} \lambda_{r,k}^s$$

ma

$$\mathbf{i}_{r,k}^s = \frac{\lambda_{r,k}^s}{L_r} - \frac{L_M}{L_r} \mathbf{i}_{s,k}^s$$

Predizione flussi e coppia all'istante $(k+1)T$ (continua)

b) Flusso rotorico (segue)

$$\left(\frac{d\lambda_r^s}{dt}\right)_k = -R_r \frac{\lambda_{r,k}^s}{L_r} + R_r \frac{L_M}{L_r} \mathbf{i}_{s,k}^s + j\omega_{me,k} \lambda_{r,k}^s \quad \text{da cui}$$

$$\lambda_{r,k+1}^s = \lambda_{r,k}^s + T_s \left(\frac{d\lambda_r^s}{dt}\right)_k$$

c) Coppia

$$m_{k+1} = \frac{3}{2} p \frac{L_M}{L'_s L_r} (\lambda_{rd,k+1}^s \lambda_{sq,k+1}^s - \lambda_{rq,k+1}^s \lambda_{sd,k+1}^s)$$

Predictive DTC - 2^o passo: Predizione dell'errore all'istante (k+1)T

Definiamo la grandezza complessa ausiliaria

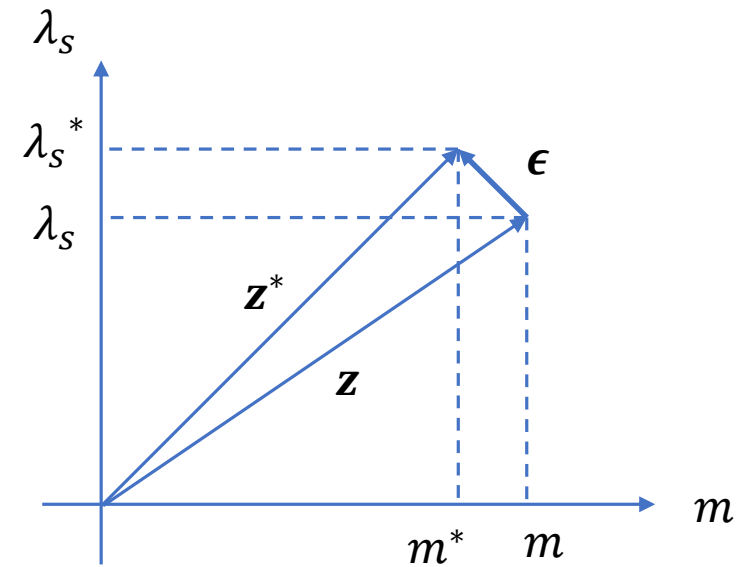
$$\mathbf{z} = \frac{m}{M_n} + j \frac{|\lambda_s|}{\Lambda_{s,n}} = \frac{m}{M_n} + j \frac{\lambda_s}{\Lambda_{s,n}}$$

Allora possiamo definire un errore complesso

$$\boldsymbol{\epsilon} = \mathbf{z}^* - \mathbf{z} = \frac{m^* - m}{M_n} + j \frac{\lambda_s^* - \lambda_s}{\Lambda_{s,n}} = \epsilon_m + j\epsilon_\lambda$$

Nell'istante (k+1)T

$$\boldsymbol{\epsilon}_{k+1} = \mathbf{z}^* - \mathbf{z}_{k+1} = \frac{m^* - m_{k+1}}{M_n} + j \frac{\lambda_s^* - \lambda_{s,k+1}}{\Lambda_{s,n}} = \epsilon_{m,k+1} + j\epsilon_{\lambda,k+1}$$



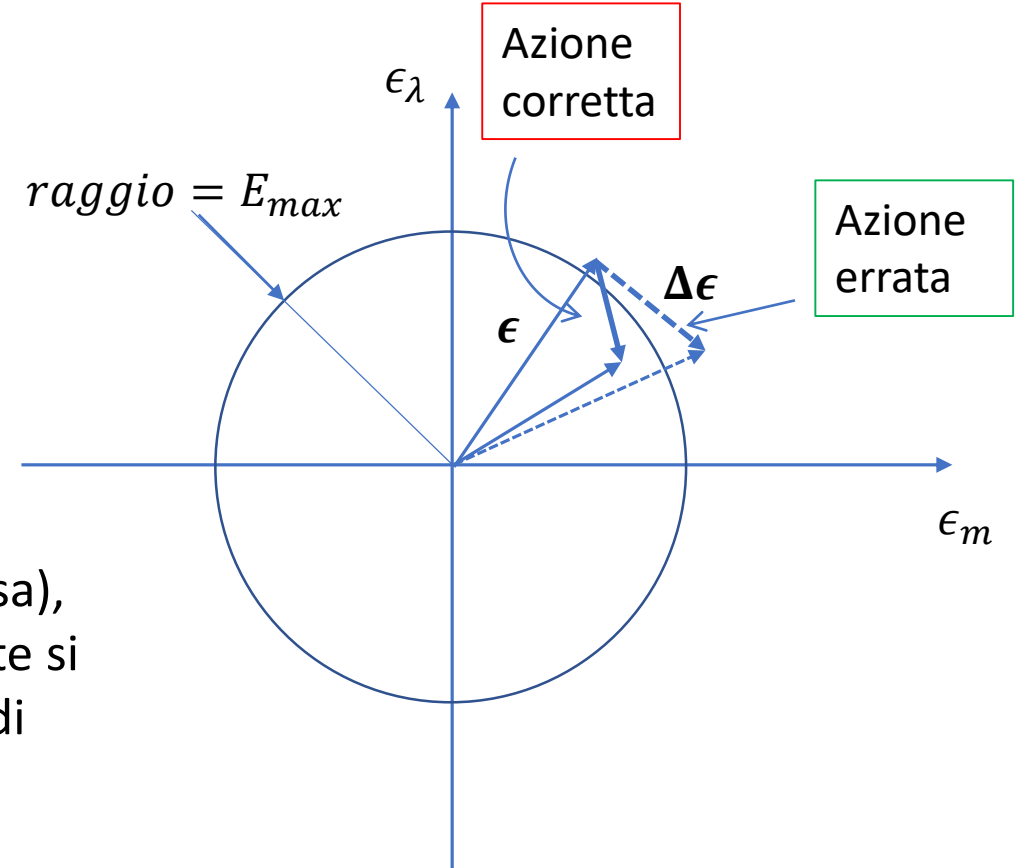
Predictive DTC : Condizione di convergenza

Obiettivo del controllo è che sia:

$$|\epsilon| = \epsilon = \sqrt{\epsilon_m^2 + \epsilon_\lambda^2} < E_{max}$$

Secondo la strategia del controllo ad isteresi (complessa), quando il modulo dell'errore raggiunge (supera) il limite si comanda un'azione tale da ridurre l'ampiezza ovvero di riportare l'errore complesso ϵ entro il cerchio limite:

$$\frac{d|\epsilon|}{dt} < 0 \quad \text{condizione di convergenza}$$



Predictive DTC : Condizione di convergenza

La condizione di convergenza diventa anche:

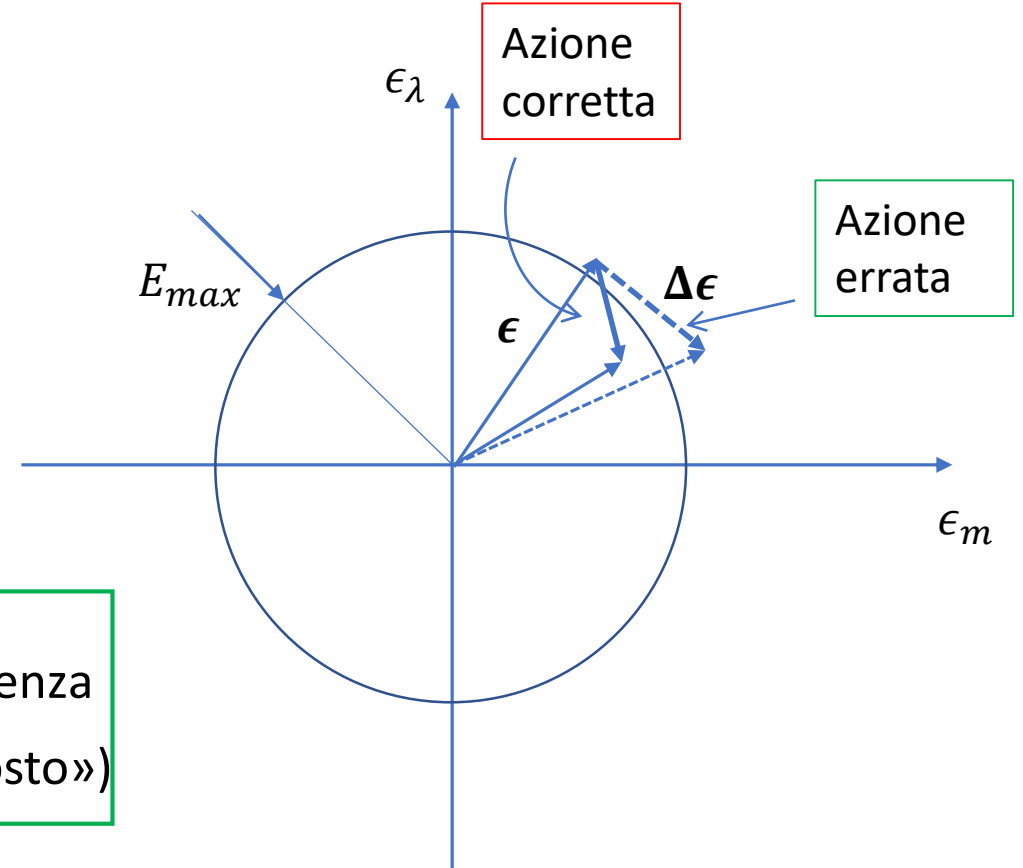
$$\frac{d|\epsilon|}{dt} = \frac{d\sqrt{\epsilon_m^2 + \epsilon_\lambda^2}}{dt} = \frac{\epsilon_m \frac{d\epsilon_m}{dt} + \epsilon_\lambda \frac{d\epsilon_\lambda}{dt}}{|\epsilon|} < 0$$

ovvero deve essere

$$J = \epsilon_m \frac{d\epsilon_m}{dt} + \epsilon_\lambda \frac{d\epsilon_\lambda}{dt} < 0 \quad \text{condizione di convergenza} \\ \text{(J è detta «funzione costo»)}$$

ed anche, in altra forma

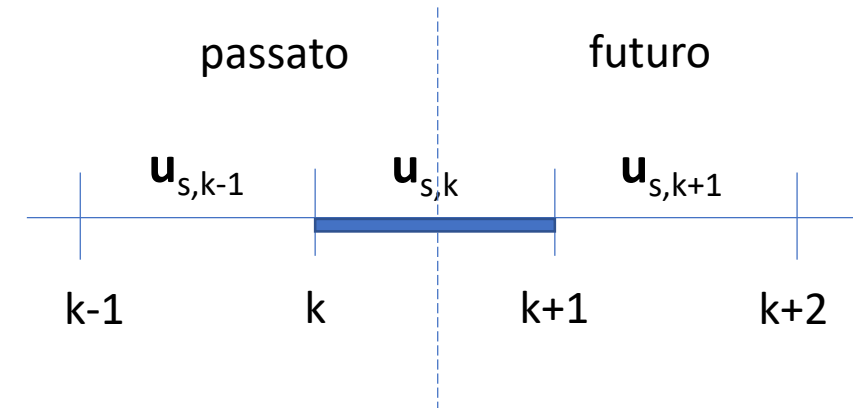
$$J = -\epsilon_m \frac{dm}{dt} \frac{1}{M_n} - \epsilon_\lambda \frac{d\lambda_s}{dt} \frac{1}{\Lambda_{s,n}} < 0 \quad \text{condizione di convergenza}$$



Predictive DTC - 3^a passo: Selezione del vettore di tensione $u_{s,k+1}$ ottimo

Sulla base dell'entità dell'errore $|\epsilon_{k+1}| = \epsilon_{k+1}$, predetto durante l'intervallo k-esimo che va da kT_s a $(k+1)T_s$, si decide la tensione $u_{s,k+1}$ da applicare nell'istante $(k+1)T_s$ che sarà quella agente nell'intervallo che va da $(k+1)T_s$ a $(k+2)T_s$.

- Se $\epsilon_{k+1} < E_{max}$ $\Rightarrow u_{s,k+1} = u_{s,k}$ (si mantiene lo stesso vettore)



- Se $\epsilon_{k+1} \geq E_{max}$ $\Rightarrow u_{s,k+1}$: si seleziona fra $U_0, U_1, \dots, U_6, U_7$, un vettore che soddisfa la condizione di convergenza (funzione costo):

$$h=0,1,\dots,7 \quad J_{k+1}^{(h)} < 0$$

Selezione del vettore di tensione $u_{s,k+1}$ ottimo (continua)

La funzione costo è valutata per ciascun vettore $\mathbf{U}_0, \mathbf{U}_1, \dots, \mathbf{U}_6, \mathbf{U}_7$

$$h=0,1,\dots,7 \quad J_{k+1}^{(h)} = -\epsilon_{m,k+1} \left(\frac{dm}{dt}\right)_{k+1}^{(h)} \frac{1}{M_n} - \epsilon_{\lambda,k+1} \left(\frac{d\lambda_s}{dt}\right)_{k+1}^{(h)} \frac{1}{\Lambda_{s,n}} < 0?$$

- Un solo vettore (sia \mathbf{U}_n) soddisfa $J < 0$: si sceglie $\mathbf{u}_{s,k+1} = \mathbf{U}_n$
- Più di un vettore (per es. \mathbf{U}_{n1} e \mathbf{U}_{n2}) soddisfa $J < 0$: si sceglie $\mathbf{u}_{s,k+1} = \mathbf{U}_{n1}$ se $J_{k+1}^{(n1)} < J_{k+1}^{(n2)}$
 - (si sceglie il vettore per la funzione costo «più negativa»)
 - (oppure si aggiunge ulteriore criterio: p.es. minimo numero di commutazioni)
- Nessun vettore soddisfa $J < 0$: controllo «non converge» (possibile $\omega > \omega_{base}$)

Calcolo della funzione costo $J_{k+1}^{(h)}$

Già calcolati

$$J_{k+1}^{(h)} = -\epsilon_{m,k+1} \left(\frac{dm}{dt} \right)_{k+1}^{(h)} \frac{1}{M_n} - \epsilon_{\lambda,k+1} \left(\frac{d\lambda_s}{dt} \right)_{k+1}^{(h)} \frac{1}{\Lambda_{s,n}}$$

Da calcolare per ciascun vettore di tensione

Per il calcolo di entrambe le derivate servirà la corrente $\mathbf{i}_{s,k+1}$

$$\mathbf{i}_{s,k+1}^s = \left(\frac{1}{L_s L_r - L_M^2} \right) (L_r \boldsymbol{\lambda}_{s,k+1}^s - L_M \boldsymbol{\lambda}_{r,k+1}^s)$$

Calcolo della funzione costo $J_{k+1}^{(h)}$

Si è visto $\frac{d\lambda_s}{dt} \lambda_s = (u_{sd}^s \lambda_{sd}^s + u_{sq}^s \lambda_{sq}^s) - R_s (i_{sd}^s \lambda_{sd}^s + i_{sq}^s \lambda_{sq}^s)$ da cui

$$\left(\frac{d\lambda_s}{dt}\right)_{k+1}^{(h)} = \frac{(u_{sd,k+1}^{s,(h)} \lambda_{sd,k+1}^s + u_{sq,k+1}^{s,(h)} \lambda_{sq,k+1}^s) - R_s (i_{sd,k+1}^s \lambda_{sd,k+1}^s + i_{sq,k+1}^s \lambda_{sq,k+1}^s)}{\lambda_{s,k+1}}$$

$h=0,1,\dots,7$

Calcolo della funzione costo $J_{k+1}^{(h)}$

L'espressione vista della derivata della coppia

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

riscritta per l'istante $(k+1)T_s$ diventa: $\left(\frac{dm}{dt}\right)_{k+1}^{(h)} =$

$$= \frac{3}{2} p \frac{L_M}{L'_s L_r} \left[\left(\frac{d\lambda_{rd}^s}{dt}\right)_{k+1} \lambda_{sq,k+1}^s + \lambda_{rd,k+1}^s \left(\frac{d\lambda_{sq}^s}{dt}\right)_{k+1}^{(h)} - \left(\frac{d\lambda_{rq}^s}{dt}\right)_{k+1} \lambda_{sd,k+1}^s - \lambda_{rq,k+1}^s \left(\frac{d\lambda_{sd}^s}{dt}\right)_{k+1}^{(h)} \right]$$

con:

Calcolo della funzione costo $J_{k+1}^{(h)}$

$$\left(\frac{d\lambda_{sd}^s}{dt} \right)_{k+1}^{(h)} = u_{sd,k+1}^{s(h)} - R_s i_{sd,k+1}^s$$

$$\left(\frac{d\lambda_{sq}^s}{dt} \right)_{k+1}^{(h)} = u_{sq,k+1}^{s(h)} - R_s i_{sq,k+1}^s$$

Si può usare $\omega_{me,k}$

$$\left(\frac{d\lambda_{rd}^s}{dt} \right)_{k+1} = -R_r \frac{\lambda_{rd,k+1}^s}{L_r} + R_r \frac{L_M}{L_r} i_{sd,k+1}^s - \omega_{me,k+1} \lambda_{rq,k+1}^s$$

$$\left(\frac{d\lambda_{rq}^s}{dt} \right)_{k+1} = -R_r \frac{\lambda_{rq,k+1}^s}{L_r} + R_r \frac{L_M}{L_r} i_{sq,k+1}^s + \omega_{me,k+1} \lambda_{rd,k+1}^s$$

Controllo diretto di coppia predittivo a modello: flow-chart del controllo

