

Electric Drives
Laboratory
DII - UniPD

Azionamenti Elettrici

Lezioni a.a. 2020-2021

prof. Silverio Bolognani

PARTE IV

Macchina asincrona (Macchina a induzione)

Stima della velocità in azionamenti con IM
Azionamenti sensorless

Generalità

- L'obiettivo per gli azionamenti sensorless con motore asincrono è la stima della velocità (negli azionamenti con motore sincrono era la posizione rotorica).
- Ragioni:
 - Affidabilità, manutenzione,...
 - Costo, ingombro, ...
 - Installazione, disturbi, ...
- Gli azionamenti a tensione impressa (V/F) sono sensorless (senza sensore di velocità), ma hanno bassa dinamica.
- Negli azionamenti FOC serve una velocità molto precisa per la stima della posizione del vettore flusso rotorico, salvo che per il caso di stima del flusso dalle tensioni e correnti statoriche (metodo 1).
 - Negli azionamenti FOC sensorless si usa il «metodo 1» per stimare il flusso rotorico.
 - Stima della velocità è solo per l'anello di velocità.
 - Criticità ai bassi giri.

Metodi di stima della velocità per FOC

- a) Basati sulle equazioni elettromagnetiche del motore (come per la stima del vettore flusso rotorico). Dalla misura delle tensioni e correnti statoriche.
- b) Basati sul comportamento magnetico del motore (effetto cave rotoriche, presenza terza armonica nella fem, ..)
- c) Basati su iniezione di segnale (come per i motori sincroni): anisotropia intenzionalmente inserita nel rotore o dovuta alla saturazione del ferro.

Qui di seguito si descriveranno alcuni metodi del tipo a).

Metodo a.1) – Dalla stima dei flussi

Dal primo metodo di stima del vettore flusso rotorico (metodo 1)

$$\lambda_s^s = \int_{-\infty}^t (\mathbf{u}_s^s - R_s \mathbf{i}_s^s) dt \quad \lambda_r^s = \frac{L_r}{L_M} (\lambda_s^s - L_{st} \mathbf{i}_s^s) \quad \begin{array}{l} \nearrow d \\ \searrow q \end{array}$$

e quindi anche

$$\frac{d\lambda_r^s}{dt} = \frac{L_r}{L_M} \left(\frac{d\lambda_r^s}{dt} - L_{st} \frac{d\mathbf{i}_s^s}{dt} \right) = \frac{L_r}{L_M} \left((\mathbf{u}_s^s - R_s \mathbf{i}_s^s) - L_{st} \frac{d\mathbf{i}_s^s}{dt} \right) \quad \begin{array}{l} \nearrow d \\ \searrow q \end{array}$$

Metodo a.1) –(continua)

Dal secondo metodo di stima del vettore flusso rotorico (metodo 2)

$$\frac{d\lambda_r^s}{dt} = (j\omega_{me} - \frac{R_r}{L_r})\lambda_r^s + \frac{R_r L_M}{L_r} \mathbf{i}_s^s$$

...ossia

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\lambda_{rd}^s}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \lambda_{rd}^s = -\omega_{me} \lambda_{rq}^s + \frac{R_r L_M}{L_r} i_{sd}^s \\ \frac{d\lambda_{rq}^s}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \lambda_{rq}^s = \omega_{me} \lambda_{rd}^s + \frac{R_r L_M}{L_r} i_{sq}^s \end{array} \right.$$

Metodo a.1) –(continua)

Dalla prima equazione dinamica del flusso rotorico

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

ove tutti i termini sono noti dalle precedenti elaborazioni a partire dalle tensioni e correnti statoriche.

Metodo a.1) –(continua)

Simile risultato si ottiene dalla seconda equazione del flusso rotorico.

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

ove ancora tutti i termini sono noti dalle precedenti elaborazioni a partire dalle tensioni e correnti statoriche.

Metodo a.1) –(continua)

Discussione

- a) Sia una che l'altra delle espressioni della velocità sono il rapporto di due grandezze (numeratore e denominatore) sinusoidali:
⇒ Si manifestano problemi numerici quando il denominatore passa per lo zero!
- b) Si può (deve) prendere la stima della velocità dall'espressione con il denominatore di maggiore valore assoluto.
- c) Oppure formulare la stima in modo diverso

Metodo a.1) –(continua)

Dal secondo metodo di stima del vettore flusso rotorico

$$\frac{d\lambda_r^s}{dt} = (j\omega_{me} - \frac{R_r}{L_r})\lambda_r^s + \frac{R_r L_M}{L_r} \mathbf{i}_s^s$$

...ossia, in forma complessa:

$$\omega_{me} = -j \frac{\frac{d\lambda_r^s}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \lambda_r^s - \frac{R_r L_M}{L_r} \mathbf{i}_s^s}{\lambda_r^s}$$

...che è un rapporto fra numeri complessi. Razionalizzando risulta:

Metodo a.1) –(continua)

...(si moltiplica sopra e sotto per il complesso coniugato del denominatore):

$$\omega_{me} = \frac{-j \left(\frac{d\lambda_r^s}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \lambda_r^s - \frac{R_r L_M}{L_r} \mathbf{i}_s^s \right) \check{\lambda}_r^s}{\lambda_r^s \check{\lambda}_r^s} \equiv$$

NB: il prodotto è reale

↓

↓

$$\equiv \frac{Re \left[-j \left(\frac{d\lambda_r^s}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \lambda_r^s - \frac{R_r L_M}{L_r} \mathbf{i}_s^s \right) \check{\lambda}_r^s \right]}{\lambda_r^s \check{\lambda}_r^s} = \frac{Im \left[\left(\frac{d\lambda_r^s}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \lambda_r^s - \frac{R_r L_M}{L_r} \mathbf{i}_s^s \right) \check{\lambda}_r^s \right]}{\lambda_r^s \check{\lambda}_r^s} = \frac{Im \left[\left(\frac{d\lambda_r^s}{dt} - \frac{R_r L_M}{L_r} \mathbf{i}_s^s \right) \check{\lambda}_r^s \right]}{\lambda_r^s \check{\lambda}_r^s}$$

che svolta diventa:

Metodo a.1) –(continua)

ω_l^s

$$\omega_{me} = \frac{\text{Im} \left[\left(\frac{d\lambda_r^s}{dt} - \frac{R_r L_M}{L_r} \mathbf{i}_s^s \right) \check{\lambda}_r^s \right]}{\lambda_r^s \check{\lambda}_r^s}$$

$$\omega_{me} = \frac{\frac{d\lambda_{rq}^s}{dt} \lambda_{rd}^s - \frac{d\lambda_{rd}^s}{dt} \lambda_{rq}^s - \frac{R_r L_M}{L_r} (i_{sq}^s \lambda_{rd}^s - i_{sd}^s \lambda_{rq}^s)}{(\lambda_{rd}^s)^2 + (\lambda_{rq}^s)^2}$$

ω_l^r

$\Leftarrow \omega_l^s - \omega_l^r$

Ancora le grandezze che servono per risolvere l'espressione sono note dall'elaborazione delle tensioni e correnti statoriche

Metodo a.2) – Dalla stima dello scorrimento

L'equazione differenziale già vista per il flusso rotorico

$$\frac{d\lambda_r^s}{dt} = \frac{L_r}{L_M} \left(\frac{d\lambda_r^s}{dt} - L_{st} \frac{di_s^s}{dt} \right) = \frac{L_r}{L_M} \left((\mathbf{u}_s^s - R_s \mathbf{i}_s^s) - L_{st} \frac{di_s^s}{dt} \right)$$

si può integrare osservando che vale:

$$\frac{d\lambda_r^s}{dt} = \frac{d(|\lambda_r^s| e^{j\vartheta_\lambda^s})}{dt} = \frac{d(|\lambda_r^s|)}{dt} e^{j\vartheta_\lambda^s} + |\lambda_r^s| \frac{d(e^{j\vartheta_\lambda^s})}{dt} = \frac{d(|\lambda_r^s|)}{dt} e^{j\vartheta_\lambda^s} + |\lambda_r^s| (j\omega_\lambda^s) e^{j\vartheta_\lambda^s}$$

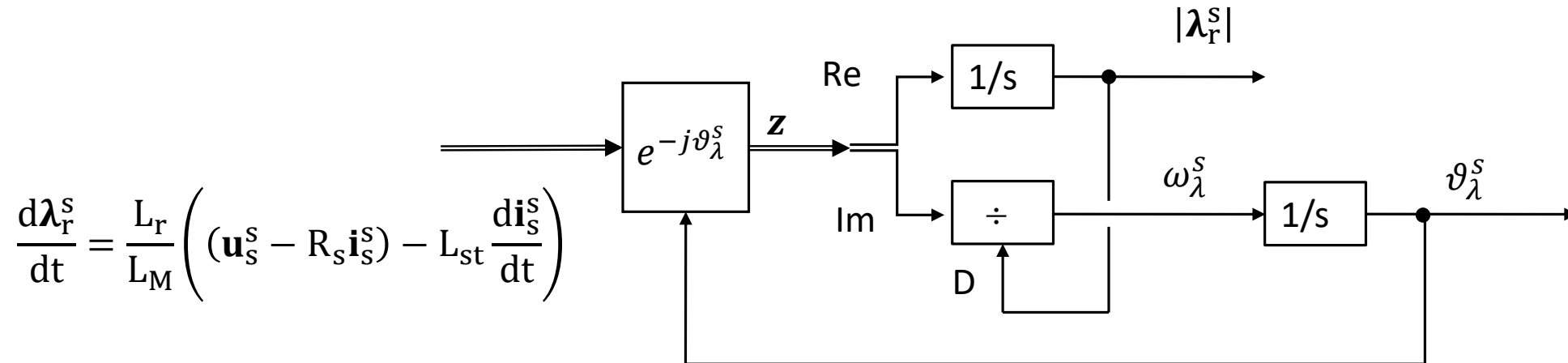
Metodo a.2) – Dalla stima dello scorrimento

Per cui

$$\mathbf{z} = \frac{d\lambda_r^s}{dt} e^{-j\vartheta_\lambda^s} = \frac{d(|\lambda_r^s|)}{dt} + j\omega_\lambda^s |\lambda_r^s|$$

Parte reale
Parte immaginaria

Si può allora integrare in questo modo



Metodo a.2) – Dalla stima dello scorrimento

Infine ricordando che $\omega_{me} = \omega_{\lambda}^s - \omega_{\lambda}^r$, uno stimatore di velocità potrebbe essere implementato secondo lo schema seguente:

