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). <u>Dalla misura delle tensioni e correnti statoriche</u>.

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)

$$\boldsymbol{\lambda}_s^s = \int_{-\infty}^{t} (\mathbf{u}_s^s - R_s \mathbf{i}_s^s)\,dt \qquad \boldsymbol{\lambda}_r^s = \frac{L_r}{L_M}\left(\boldsymbol{\lambda}_s^s - L_{st}\mathbf{i}_s^s\right)$$

d

q

e quindi anche

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

d

q

Metodo a.1) –(continua)

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

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

…ossia

$$\begin{cases} \dfrac{d\lambda_{rd}^s}{dt} + \dfrac{R_r}{L_r}\lambda_{rd}^s = -\omega_{me}\lambda_{rq}^s + \dfrac{R_r L_M}{L_r} i_{sd}^s \\ \dfrac{d\lambda_{rq}^s}{dt} + \dfrac{R_r}{L_r}\lambda_{rq}^s = \omega_{me}\lambda_{rd}^s + \dfrac{R_r L_M}{L_r} i_{sq}^s \end{cases}$$

Metodo a.1) –(continua)

Dalla prima equazione dinamica del flusso rotorico

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

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.

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

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:
$\Rightarrow$ <u>Si manifestano problemi numerici quando il denominatore passa per lo zero!</u>

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

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

…ossia, in forma complessa:

$$\omega_{me} = -j\,\frac{\dfrac{d\boldsymbol{\lambda}_r^s}{dt} + \dfrac{R_r}{L_r}\boldsymbol{\lambda}_r^s - \dfrac{R_r L_M}{L_r}\mathbf{i}_s^s}{\boldsymbol{\lambda}_r^s}$$

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

Metodo a.1) –(continua)

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

NB: il prodotto è reale

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

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

che svolta diventa:

Metodo a.1) –(continua)

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

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

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

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}}}{\mathrm{dt}} = \frac{\mathrm{L_r}}{\mathrm{L_M}}\left(\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}}}{\mathrm{dt}} - \mathrm{L_{st}}\frac{\mathrm{d}\mathbf{i}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{s}}}{\mathrm{dt}}\right) = \frac{\mathrm{L_r}}{\mathrm{L_M}}\left((\mathbf{u}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{s}} - \mathrm{R_s}\mathbf{i}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{s}}) - \mathrm{L_{st}}\frac{\mathrm{d}\mathbf{i}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{s}}}{\mathrm{dt}}\right)$$

si può integrare osservando che vale:

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}}}{\mathrm{dt}} = \frac{\mathrm{d}\left(|\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}}|e^{j\vartheta_{\lambda}^{s}}\right)}{\mathrm{dt}} = \frac{\mathrm{d}(|\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}}|)}{\mathrm{dt}}e^{j\vartheta_{\lambda}^{s}} + |\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}}|\frac{\mathrm{d}\left(e^{j\vartheta_{\lambda}^{s}}\right)}{\mathrm{dt}} = \frac{\mathrm{d}(|\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}}|)}{\mathrm{dt}}e^{j\vartheta_{\lambda}^{s}} + |\boldsymbol{\lambda}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{s}}|(j\omega_{\lambda}^{s})e^{j\vartheta_{\lambda}^{s}}$$

Metodo a.2) – Dalla stima dello scorrimento

Per cui

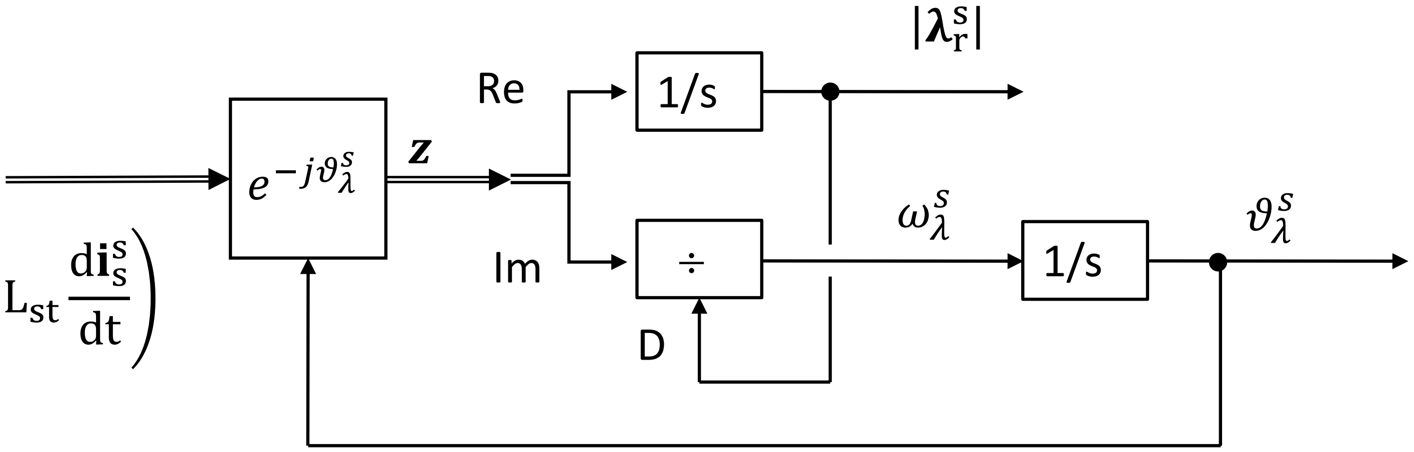
Parte reale

Parte immaginaria

$$\boldsymbol{z} = \frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\lambda}_\mathrm{r}^\mathrm{s}}{\mathrm{dt}} e^{-j\vartheta_\lambda^s} = \frac{\mathrm{d}(|\boldsymbol{\lambda}_\mathrm{r}^\mathrm{s}|)}{\mathrm{dt}} + j\omega_\lambda^s |\boldsymbol{\lambda}_\mathrm{r}^\mathrm{s}|$$

Si può allora integrare in questo modo

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\lambda}_\mathrm{r}^\mathrm{s}}{\mathrm{dt}} = \frac{\mathrm{L_r}}{\mathrm{L_M}}\left((\mathbf{u}_\mathrm{s}^\mathrm{s} - \mathrm{R_s}\mathbf{i}_\mathrm{s}^\mathrm{s}) - \mathrm{L_{st}}\frac{\mathrm{d}\mathbf{i}_\mathrm{s}^\mathrm{s}}{\mathrm{dt}}\right)$$



Metodo a.2) – Dalla stima dello scorrimento

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