



## فصل اول:

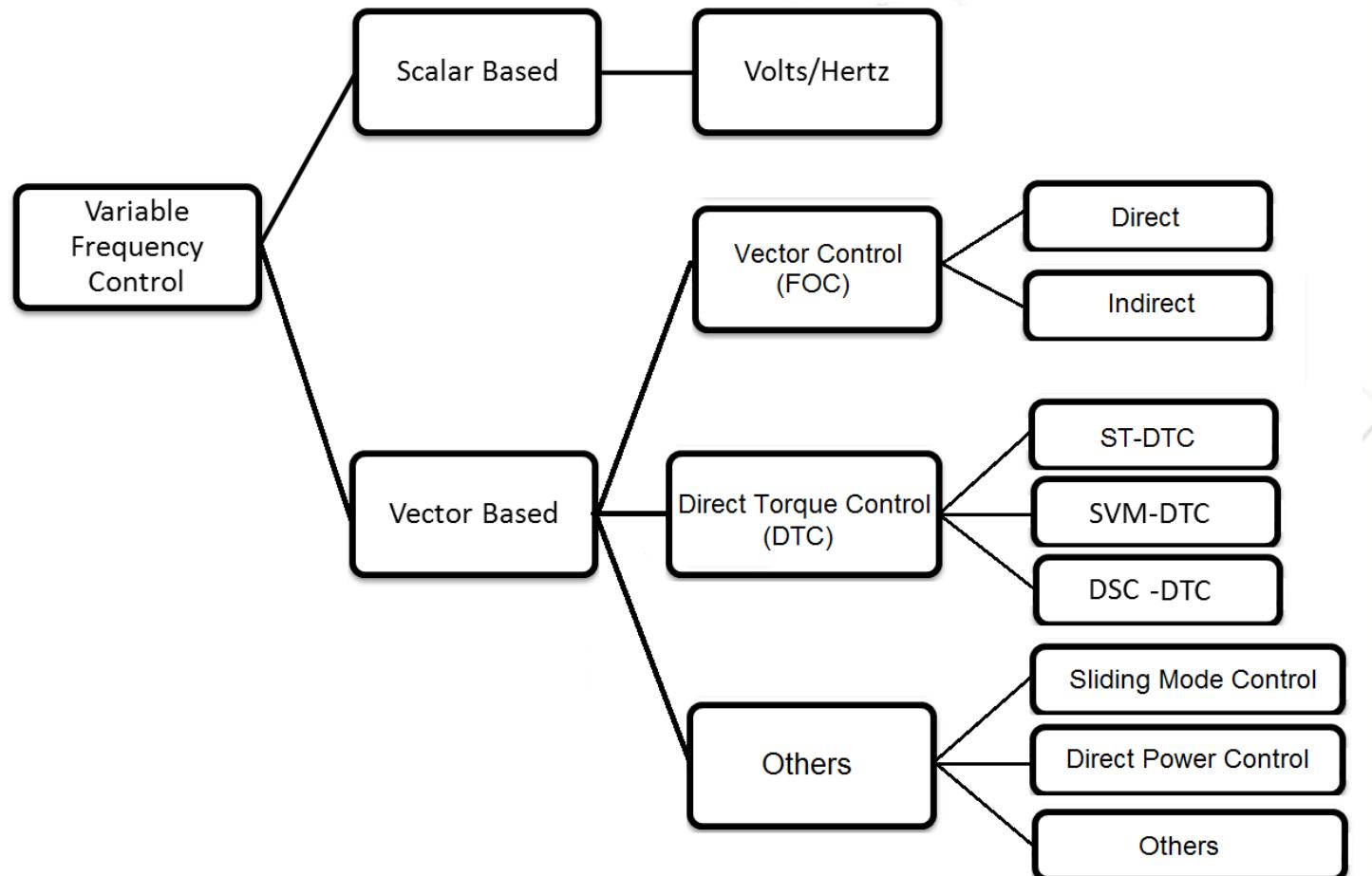
# درايو موتورهای القایی (سه فاز)

- مدل دینامیکی موتور القائی
- کنترل برداری موتور القائی
- کنترل مستقیم گشتاور موتور القائی
- سایر روش‌های کنترلی خاص در درايو موتورهای القایی





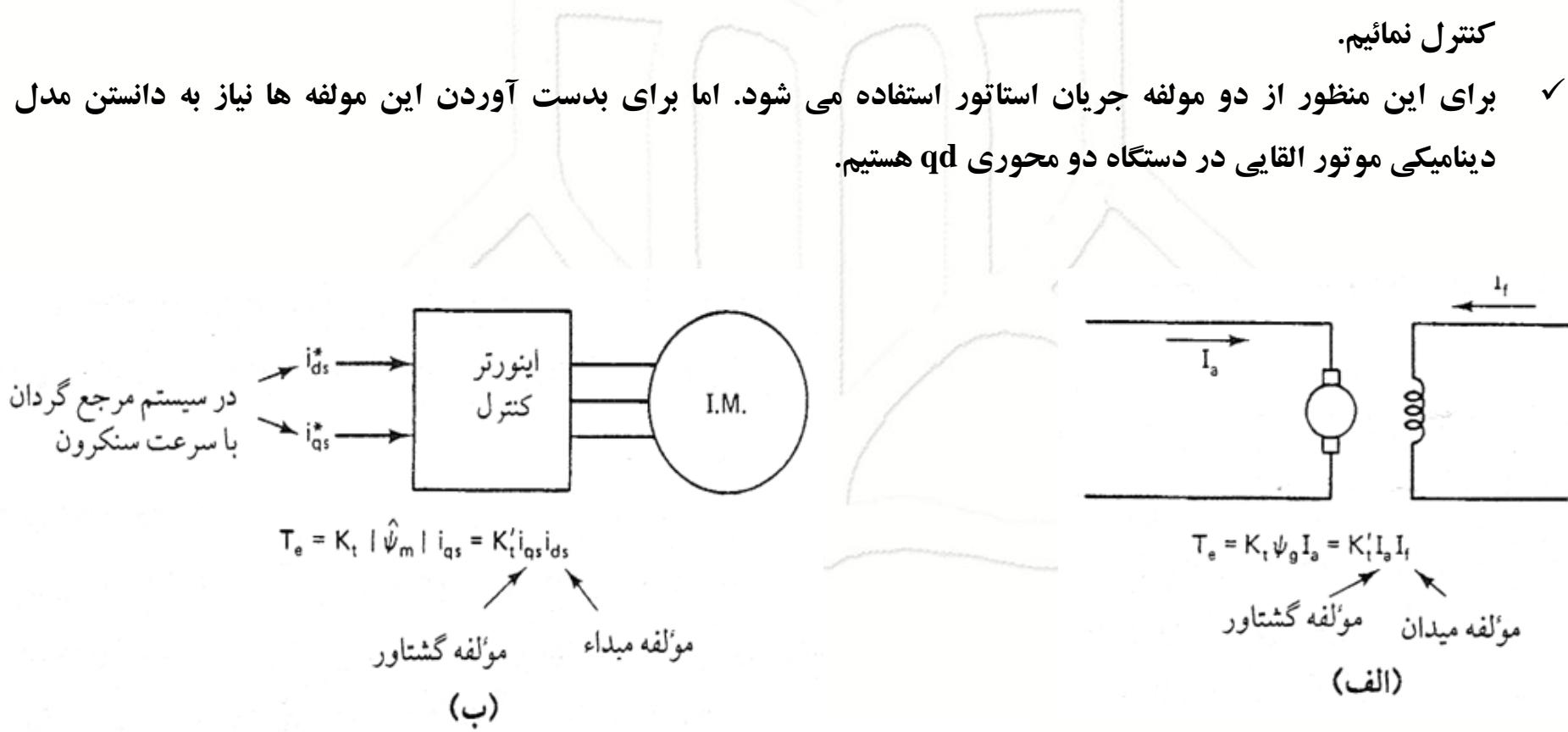
- ✓ امروزه استفاده از روش‌های کنترلی فرکانس-ولتاژ متغیر (VVVF) در کنترل موتورهای الکتریکی بویژه القایی، کاملاً پذیرفته شده است و روش‌های کنترل غیرفرکانسی عملاً منسوخ شده‌اند.



انواع روش‌های کنترل فرکانسی (VVVF) موتورهای القایی



- ✓ در روش‌های قبلی کنترل موتورهای القایی (کنترل اسکالر به قبل) نیازی به استفاده از مدل دینامیکی موتور القایی نبود و در صورت نیاز حداکثر از مدل حالت دائم استفاده می‌شد.
- ✓ اما در روش‌های کنترل مدرن موتورهای القایی نظیر روش‌های کنترل برداری، مدل دینامیکی موتور مورد نیاز است.
- ✓ در روش کنترل برداری، به دنبال آن هستیم که همانند موتور dc گشتاور را با کنترل یک جریان و شار را با جریان دیگری کنترل نمائیم.
- ✓ برای این منظور از دو مولفه جریان استاتور استفاده می‌شود. اما برای بدست آوردن این مولفه‌ها نیاز به دانستن مدل دینامیکی موتور القایی در دستگاه دو محوری  $qd$  هستیم.



شباهت موتور القایی و ماشین dc در کنترل برداری

## مدل مداری ماشین القایی سه فاز در دستگاه abc

- ✓ با استفاده از نمادسازی ماشین با سیم پیچی های تزویج شده، معادلات ولتاژ سیم پیچی های استاتور و روتور بصورت زیر خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{as} \\ \mathbf{v}_{bs} \\ \mathbf{v}_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \end{bmatrix}$$

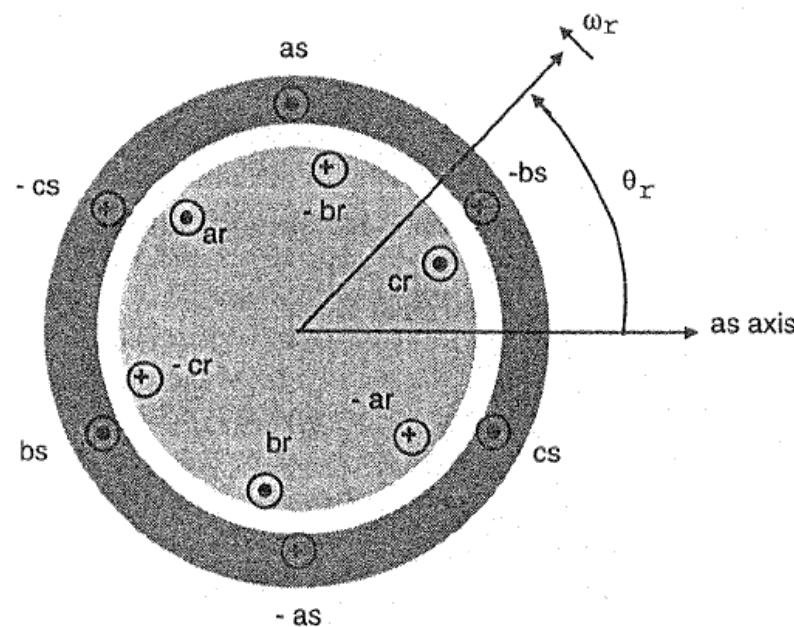
$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{ar} \\ \mathbf{v}_{br} \\ \mathbf{v}_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{ar} \\ \lambda_{br} \\ \lambda_{cr} \end{bmatrix}$$

(۱)

(۲)

معادلات ولتاژ استاتور:

معادلات ولتاژ روتور:





## ➤ معادلات شار در دستگاه abc

✓ در نمایش ماتریسی، شار-دوار سیم پیچی روتور و استاتور بر حسب جریان و اندوکتانس سیم پیچی بصورت زیر نوشته می شود:

$$\begin{bmatrix} \lambda_s^{abc} \\ \lambda_r^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} & L_{sr}^{abc} \\ L_{rs}^{abc} & L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \lambda_s^{abc} &= (\lambda_{as}, \lambda_{bs}, \lambda_{cs})^t \\ \lambda_r^{abc} &= (\lambda_{ar}, \lambda_{br}, \lambda_{cr})^t \\ i_s^{abc} &= (i_{as}, i_{bs}, i_{cs})^t \\ i_r^{abc} &= (i_{ar}, i_{br}, i_{cr})^t \end{aligned} \quad (4)$$

✓ ماتریسهای اندوکتانس استاتور، اندوکتانس روتور و اندوکتانس متقابل استاتور و روتور بصورت زیر تعریف می شوند:

$$L_{ss}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$L_{rr}^{abc} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} \end{bmatrix} \quad (6)$$

## □ مدل دینامیکی موتور القایی



### ➤ معادلات شار در دستگاه abc

$$L_{sr}^{abc} = [L_{rs}^{abc}]^t = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$L_{ss} = N_s^2 P_g$$

$$L_{rr} = N_r^2 P_g$$

$$L_{sr} = N_s N_r P_g$$

$$L_{sm} = N_s^2 P_g \cos(\frac{2\pi}{3})$$

$$L_{rm} = N_r^2 P_g \cos(\frac{2\pi}{3})$$

$P_g$  : هدایت مغناطیسی (پرمانس) فاصله هوایی

$N_s$  : تعداد دور هر فاز سیم پیچی استاتور

$N_r$  : تعداد دور هر فاز سیم پیچی روتور

(8)

✓ در روابط اندوکتانسها داریم:

$L_{ls}$  : اندوکتانس پراکندگی هر فاز سیم پیچی استاتور

$L_{lr}$  : اندوکتانس پراکندگی هر فاز سیم پیچی روتور

$L_{ss}$  : اندوکتانس خودی هر فاز سیم پیچی استاتور

$L_{rr}$  : اندوکتانس خودی هر فاز سیم پیچی روتور

$L_{sm}$  : اندوکتانس متقابل بین دو فاز سیم پیچی های استاتور

$L_{rm}$  : اندوکتانس متقابل بین دو فاز سیم پیچی های روتور

✓ نکته ۱: ماتریس اندوکتانس متقابل بین استاتور و روتور تابعی از موقعیت روتور است که در نتیجه حل معادلات دیفرانسیل را پیچیده می کند.

✓ نکته ۲: با استفاده از دستگاه دواری که همراه با روتور می چرخد، روابط ساده تر شده و عناصر ماتریس  $L_{sr}$  نیز ثابت می شوند.



### ➤ مدل ماشین در دستگاه (قاب) مرجع گردان $qd0$

- ✓ در ماشین القایی ایده آل فرض بر آنست که ماشین دارای فاصله هوایی متقاضی می باشد.
- ✓ ماشین القایی یک دستگاه معادلات دیفرانسیل از مرتبه ۶ است که با یکدیگر تزویج شده اند. مشکل موجود در این معادلات آنست که تزویج موجود با گذشت زمان (تغییر موقعیت روتور)، تغییر می کنند که استفاده از دستگاه مرجع  $qd0$  گردان، معادلات دیفرانسیل فوق را به معادلاتی با ضرائب ثابت تبدیل می کند.

✓ دو نوع دستگاه مرجع  $qd0$  برای مدلسازی ماشین القایی وجود دارند که هر یک برای مقصودی مناسب هستند:

- ۱- دستگاه مرجع ساکن که مدل مرجع ساکن ماشین را القایی را می دهد.
  - ۲- دستگاه مرجع گردان که با سرعت  $\omega$  در جهت روتور می گردد که مدل مرجع گردان ماشین القایی را خواهد داد.
- ✓ در مدل مرجع ساکن، متغیرهای  $dq$  ماشین شبیه مدلی هستند که در شبکه استفاده می شوند. این انتخاب زمانی که شبکه بزرگ و یا پیچیده است مناسب است.
  - ✓ در مدل مرجع گردان، متغیرهای  $dq$  در حالت ماندگار ساکن هستند که برای مدل سیگنال کوچک در یک نقطه کار انتخابی و همچنین اهداف کنترلی مناسب می باشند.
  - ✓ در ادامه بحث، ابتدا معادلات ماشین القایی در مدل مرجع گردان با سرعت  $\omega$  دلخواه را بدست می آوریم. سپس از روی آن با قراردادن  $\omega=0$  مدل مرجع ساکن را بدست می آوریم. همچنین با قرار دادن  $\omega_m=0$  مدل مرجع سنکرون را بدست خواهیم آورد. در برخی از مراجع با قراردادن  $m=0$  مدل مرجع گردان با سرعت روتور را نیز بدست آورده و استفاده می کنند.



## □ مدل دینامیکی موتور القایی

### ➤ مدل ماشین در دستگاه (قاب) مرجع گردان qd0

$$\begin{bmatrix} f_q \\ f_d \\ f_0 \end{bmatrix} = [T_{qd0}(\theta_r)] \times \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt + \theta(0) \quad (10)$$

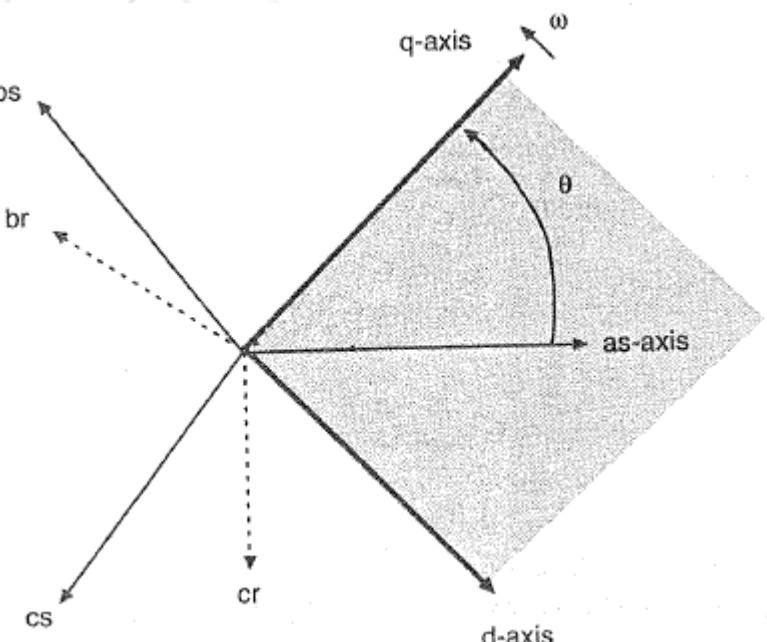
✓ با معادلات ولتاژ فازی و گشتاور شروع خواهیم کرد.

✓ با بکاربردن تبدیل qd0 متغیرهای abc از متغیرهای abc بصورت روبرو حاصل می شود، که f می تواند ولتاژ فاز، جریان و یا شار دور باشد:

✓ مطابق شکل زیر، در مدل مرجع qd، محور q نسبت به محور a استاتور با سرعت  $\omega$  می چرخد که موقعیت آن نسبت به محور فاز a استاتور برابر خواهد بود با:

✓ با توجه به شکل، ماتریس تبدیل  $T_{qd0}$  برابر است با:

$$[T_{qd0}(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (11)$$





## مدل ماشین در دستگاه (قاب) مرجع گردان qd0

✓ و معکوس آن نیز بصورت زیر است:

$$[T_{qdo}(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

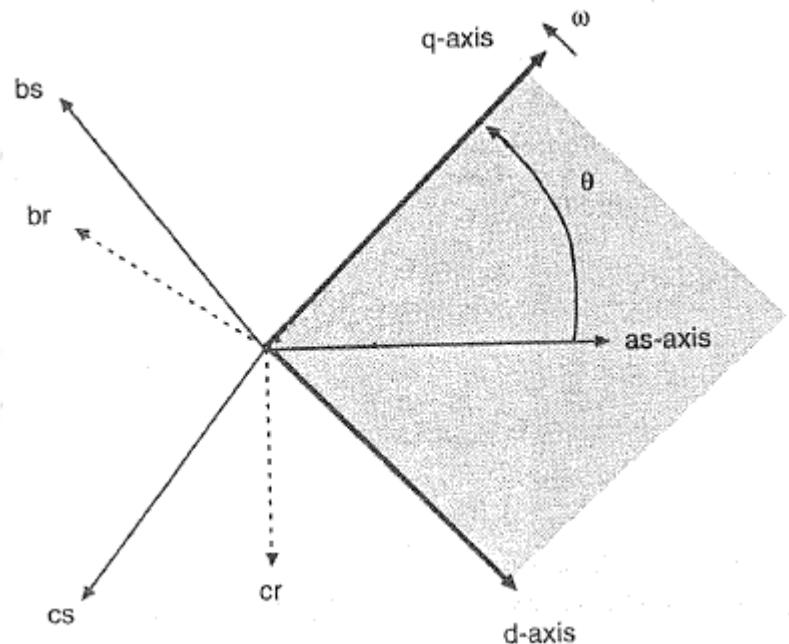
$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

(۱۲)



$$[T_{qdo}(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

(۱۳)



### ➢ معادلات ولتاژ ماشین در دستگاه 0

✓ نمایش ماتریسی معادلات ولتاژ استاتور بصورت زیر می باشد:

$$[\mathbf{v}_s^{abc}] = [\mathbf{r}_s^{abc}] [\mathbf{i}_s^{abc}] + \frac{d}{dt} [\lambda_s^{abc}] \quad (14)$$

✓ با بکاربردن تبدیل  $[T_{qdo}(\theta)]$  برای ولتاژ، شار و جریان ماشین خواهیم داشت:

$$[\mathbf{v}_s^{abc}] = [T_{qdo}(\theta)]^{-1} [\mathbf{v}_s^{qdo}] \quad (15)$$

$$[\mathbf{i}_s^{abc}] = [T_{qdo}(\theta)]^{-1} [\mathbf{i}_s^{qdo}] \quad (16)$$

$$[\lambda_s^{abc}] = [T_{qdo}(\theta)]^{-1} [\lambda_s^{qdo}] \quad (17)$$

✓ با جایگزینی روابط فوق در رابطه اصلی ولتاژ (14) خواهیم داشت:

$$[T_{qdo}(\theta)]^{-1} [\mathbf{v}_s^{qdo}] = [\mathbf{r}_s^{abc}] [T_{qdo}(\theta)]^{-1} [\mathbf{i}_s^{qdo}] + \frac{d}{dt} ([T_{qdo}(\theta)]^{-1} [\lambda_s^{qdo}]) \quad (18)$$

✓ حال طرفین رابطه فوق را در ماتریس تبدیل  $(T_{qdo}(\theta))$  ضرب نموده و آنرا ساده می کنیم:

$$[T_{qdo}(\theta)] [T_{qdo}(\theta)]^{-1} [\mathbf{v}_s^{qdo}] = [T_{qdo}(\theta)] [\mathbf{r}_s^{abc}] [T_{qdo}(\theta)]^{-1} [\mathbf{i}_s^{qdo}] + [T_{qdo}(\theta)] \frac{d}{dt} ([T_{qdo}(\theta)]^{-1} [\lambda_s^{qdo}]) \quad (19)$$

## □ مدل دینامیکی موتور القایی



### ➤ معادلات ولتاژ ماشین در دستگاه qd0

$$[r_s^{abc}] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} = r_s[I] \quad (20)$$

✓ ماتریس مقاومت استاتور متعادل را می توان به این صورت زیر نوشت:

✓ در نتیجه به رابطه زیر خواهیم رسید:

$$[v_s^{qdo}] = r_s[T_{qdo}(\theta)][I][T_{qdo}(\theta)]^{-1}[i_s^{qdo}] + [T_{qdo}(\theta)] \frac{d}{dt} ([T_{qdo}(\theta)]^{-1}[\lambda_s^{qdo}]) \quad (21)$$

✓ بخش مشتق طرف راست رابطه فوق به طریق زیر محاسبه می شود:

$$\frac{d}{dt} ([T_{qdo}(\theta)]^{-1}[\lambda_s^{qdo}]) = \frac{d}{dt} ([T_{qdo}(\theta)]^{-1})[\lambda_s^{qdo}] + [T_{qdo}(\theta)]^{-1} \frac{d}{dt} ([\lambda_s^{qdo}]) \quad (22)$$

$$= \frac{d}{dt} \left( \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \right) [\lambda_s^{qdo}] + [T_{qdo}(\theta)]^{-1} \frac{d}{dt} ([\lambda_s^{qdo}]) \quad (23)$$

$$= \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix} \times \frac{d\theta}{dt} \times [\lambda_s^{qdo}] + [T_{qdo}(\theta)]^{-1} \frac{d}{dt} ([\lambda_s^{qdo}]) \quad (24)$$

## ➤ معادلات ولتاژ ماشین در دستگاه qd0

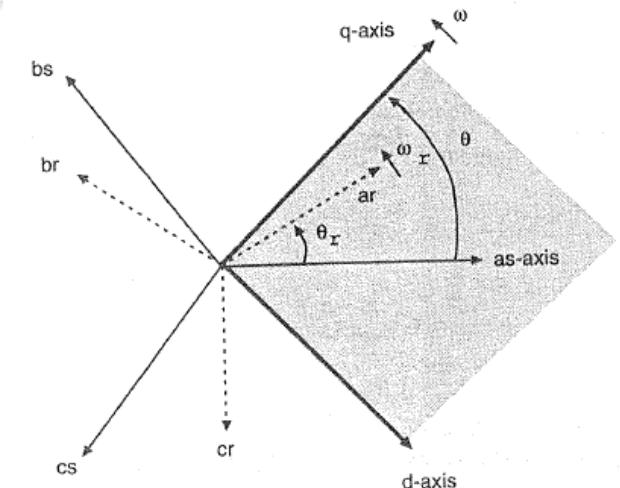
✓ با جایگذاری روابط (ب) و (ج) در (الف) و مرتب سازی خواهیم داشت:

$$[v_s^{qdo}] = \underbrace{r_s[i_s^{qdo}]}_{\text{ولتاژ اهمی}} + \omega \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [\lambda_s^{qdo}]}_{\text{ولتاژ ترانسفورمری}} + \underbrace{\frac{d}{dt}([\lambda_s^{qdo}])}_{\text{ولتاژ گردشی}} \quad (25)$$

$$\theta_r(t) = \int_0^t \omega_r(t) dt + \theta_r(0)$$

✓ در نتیجه با استفاده از تبدیل  $T_{qdo}(\theta_r - \theta_r)$  معادلات ولتاژ qd0 برای سیم پیچی رotor معادله زیر حاصل می شود:

$$[v_r^{qdo}] = r_r[i_s^{qdo}] + (\omega - \omega_r) \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [\lambda_r^{qdo}]}_{\text{ولتاژ ترانسفورمری}} + \underbrace{\frac{d}{dt}([\lambda_r^{qdo}])}_{\text{ولتاژ گردشی}} \quad (26)$$



## □ مدل دینامیکی موتور القایی



### ➤ معادلات شار-دور ماشین در دستگاه qd0

✓ شار-دور استاتور در مرجع qd0 با اعمال تبدیل  $T_{qdo}(\theta)$  روی شار-دور abc حاصل می‌شود:

$$[\lambda_s^{abc}] = [L_{ss}^{abc}] [i_s^{abc}] + [L_{sr}^{abc}] [i_r^{abc}] \quad (27)$$

$$\Rightarrow [\lambda_s^{qdo}] = [T_{qdo}(\theta)] [\lambda_s^{abc}] = [T_{qdo}(\theta)] [L_{ss}^{abc}] [i_s^{abc}] + [T_{qdo}(\theta)] [L_{sr}^{abc}] [i_r^{abc}] \quad (28)$$

✓ اگر بردارهای جریان استاتور و روتور abc در معادله فوق با استفاده از تبدیل معکوس مناسب با مقادیر qd0 متناظرشان جایگزین شوند، خواهیم داشت:

$$[\lambda_s^{qdo}] = \underbrace{[T_{qdo}(\theta)] [L_{ss}^{abc}] [T_{qdo}(\theta)]^{-1}}_{[L_{ss}^{qdo}]} [i_s^{qdo}] + \underbrace{[T_{qdo}(\theta)] [L_{sr}^{abc}] [T_{qdo}(\theta) - \theta_r]^{-1}}_{[L_{sr}^{qdo}]} [i_r^{qdo}] \quad (29)$$

ماتریس اندوکتانس خودی استاتور در دستگاه qd0

ماتریس اندوکتانس متقابل روتور-استاتور در دستگاه qd0

✓ با انجام محاسبات مربوطه بدست خواهیم آورد:

$$[\lambda_s^{qdo}] = \begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{3}{2}L_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + \frac{3}{2}L_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} [i_s^{qdo}] + \begin{bmatrix} \frac{3}{2}L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [i_r^{qdo}] \quad (30)$$

## □ مدل دینامیکی موتور القایی



### ➤ معادلات شار-دور ماشین در دستگاه qd0

✓ به طریق مشابه، معادلات شار-دور روتور نیز به صورت زیر بدست خواهد آمد:

$$[\lambda_r^{qd0}] = \begin{bmatrix} \frac{3}{2}L_{sr} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_{sr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [i_s^{qd0}] + \begin{bmatrix} L_{lr} + \frac{3}{2}L_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{lr} + \frac{3}{2}L_{rrs} & 0 \\ 0 & 0 & L_{lr} \end{bmatrix} [i_r^{qd0}] \quad (31)$$

✓ و بطور کلی، شار-دورهای استاتور و روتور ارجاع شده به استاتور بصورت زیر خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{os} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{os} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{or} \end{bmatrix} \quad (32)$$

✓ مقادیر انتقال یافته روتور به استاتور با معادلات زیر داده می‌شوند:

$$\lambda'_{qr} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{qr}, \quad \lambda'_{dr} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{dr}$$

$$i'_{qr} = \frac{N_s}{N_r} i_{qr}, \quad i'_{dr} = \frac{N_s}{N_r} i_{dr}$$

$$L'_{lr} = \left( \frac{N_s}{N_r} \right)^2 L_{lr}$$

$$L_m = \frac{3}{2} L_{ss} = \frac{3 N_s}{2 N_r} L_{sr} = \frac{3 N_s}{2 N_r} L_{rr}$$

(۳۳)

(۳۴)

(۳۵)

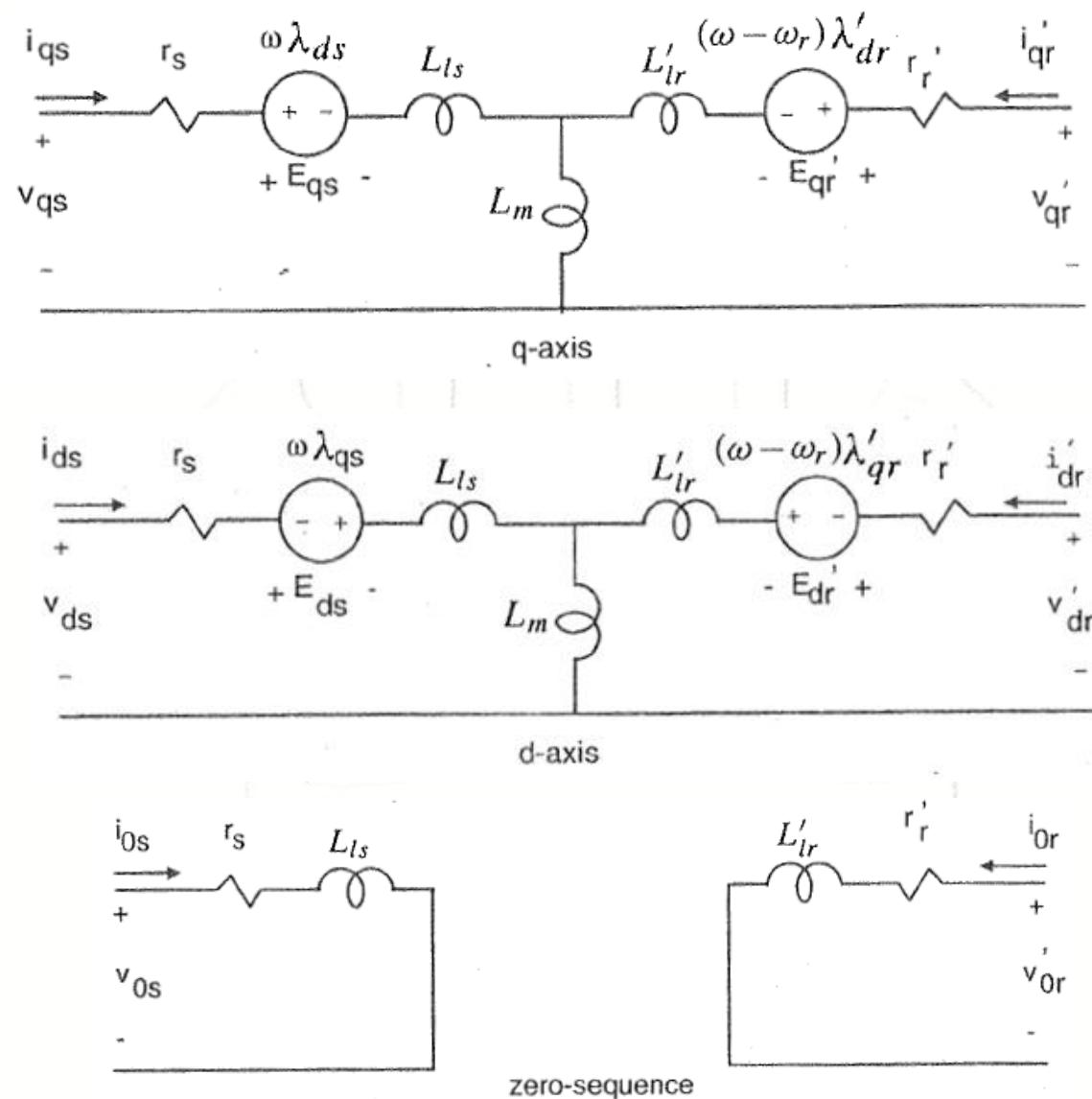
(۳۶)

## □ مدل دینامیکی موتور القایی



### ➢ مدار معادل مدل دینامیکی در دستگاه گردان qd0 با سرعت $\omega$

✓ در نتیجه مدار معادل دینامیکی در دستگاه مرجع qd0 گردان با سرعت دلخواه  $\omega$  به صورت زیر خواهد بود:



## □ مدل دینامیکی موتور القایی



### ➤ معادله گشتاور در دستگاه 0qd0

✓ مجموع توان ورودی به هر ۶ سیم پیچی روتور و استاتور برابر است با:

$$P_{in} = v_{as}\dot{i}_{as} + v_{bs}\dot{i}_{bs} + v_{cs}\dot{i}_{cs} + v'_{ar}\dot{i}'_{ar} + v'_{br}\dot{i}'_{br} + v'_{cr}\dot{i}'_{cr} \quad (37)$$

✓ در مدل مرجع 0qd0، توان ورودی برابر خواهد بود با:

$$P_{in} = \frac{3}{2} \left( v_{qs}\dot{i}_{qs} + v_{ds}\dot{i}_{ds} + 2v_{0s}\dot{i}_{0s} + v'_{qr}\dot{i}'_{qr} + v'_{dr}\dot{i}'_{dr} + 2v'_{0r}\dot{i}'_{0r} \right) \quad (38)$$

✓ اگر در رابطه فوق، از معادلات KVL استاتور و روتور، ولتاژها بر حسب جریان‌ها و شار-دورها جایگزین شوند، سه نوع عبارت  $r\dot{i}^2$ ،  $\omega\lambda i$  و  $i d\lambda/dt$  خواهیم داشت:

○ عبارت  $r\dot{i}^2$  میان تلفات مسی است.

○ عبارت  $i d\lambda/dt$  نیز بیانگر نرخ مبادله انرژی میدان مغناطیسی بین سیم پیچی هاست.

○ عبارت  $\omega\lambda$  میزان تبدیل انرژی به کار مکانیکی است.

✓ گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی ماشین از تقسیم مجموع عبارات  $\omega\lambda$  یعنی کل توان مکانیکی بر سرعت مکانیکی حاصل می‌شود. یعنی:

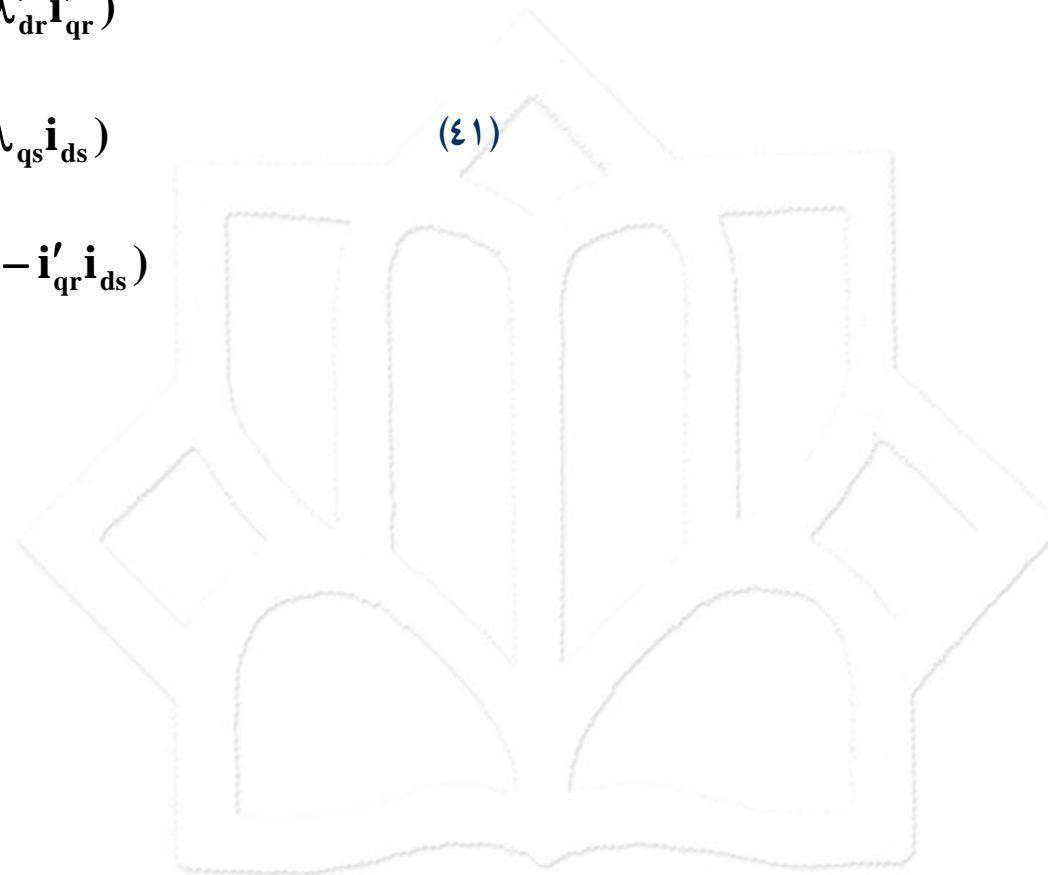
$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_r} \left[ \omega (\lambda_{ds}\dot{i}_{qs} - \lambda_{qs}\dot{i}_{ds}) + (\omega - \omega_r)(\lambda'_{dr}\dot{i}'_{qr} - \lambda'_{qr}\dot{i}'_{dr}) \right] \quad (39)$$

✓ از روابط شار-دور می‌توان نشان داد که:

$$\lambda_{ds}\dot{i}_{qs} - \lambda_{qs}\dot{i}_{ds} = -(\lambda'_{dr}\dot{i}'_{qr} - \lambda'_{qr}\dot{i}'_{dr}) = L_m \dot{i}_{dr}\dot{i}_{qs} - \dot{i}_{qr}\dot{i}_{ds} \quad (40)$$

✓ لذا گشتوار می تواند از روابط زیر بدست آید:

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda'_{qr} i'_{dr} - \lambda'_{dr} i'_{qr}) \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i'_{dr} i_{qs} - i'_{qr} i_{ds}) \end{aligned} \quad (41)$$



## □ مدل دینامیکی موتور القایی



➢ جمع بندی معادلات در دستگاه مرجع گردان qd0

### معادلات ولتاژ استاتور در دستگاه qdo

$$\begin{cases} v_{qs} = r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \\ v_{ds} = r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} \\ v_{os} = r_s i_{os} + \frac{d\lambda_{os}}{dt} \end{cases} \quad (42)$$

### معادلات ولتاژ روتور در دستگاه qdo

$$\begin{cases} v'_{qr} = r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} + \frac{d\lambda'_{qr}}{dt} \\ v'_{dr} = r'_r i'_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} + \frac{d\lambda'_{dr}}{dt} \\ v'_{0r} = r'_r i'_{0r} + \frac{d\lambda'_{0r}}{dt} \end{cases} \quad (43)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{os} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{os} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{or} \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda'_{qr} i'_{dr} - \lambda'_{dr} i'_{qr}) = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i'_{dr} i_{qs} - i'_{qr} i_{ds}) \quad (45)$$

### ➢ بازنویسی معادلات $qd = 0$ بر حسب شار-دور بر ثانیه ( $\psi$ ) بجای $\lambda$

- ✓ اغلب مواقع، در معادلات ماشین بجای اندوکتانس  $L$  و شار-دور  $\lambda$  از راکتانسها ( $x$ ) و شار-دور بر ثانیه ( $\psi$ ) استفاده می‌شود.
- ✓ این مقادیر به سادگی با ضرب مقدار فرکانس زاویه ای پایه  $\omega_b$  در شار-دور و اندوکتانس بطريق زیر تبدیل می‌شوند:

$$\psi = \omega_b \lambda \quad (46)$$

$$x = \omega_b L \quad (47)$$

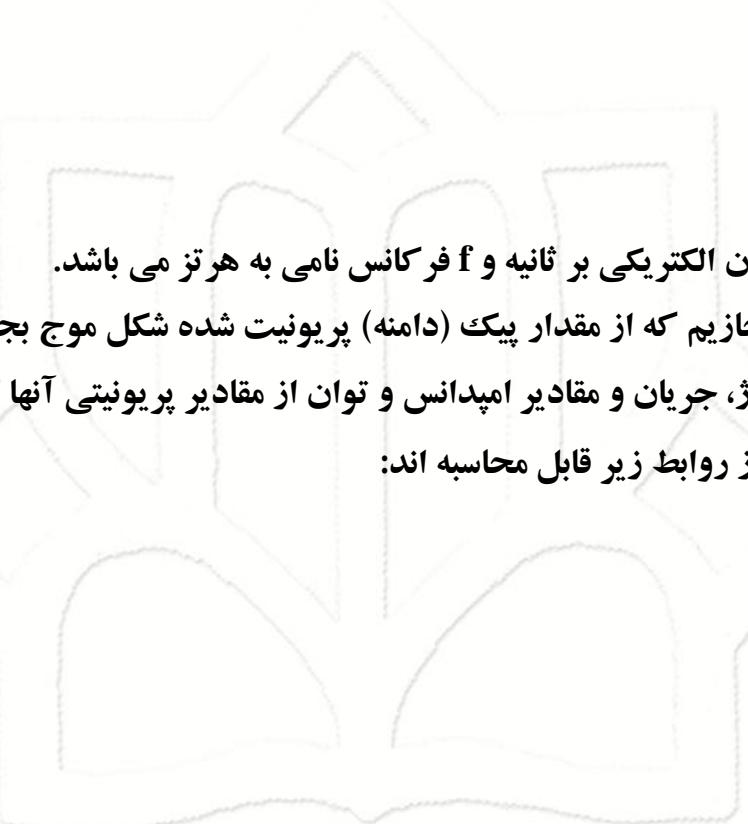
- ✓ در روابط فوق  $\omega_b = 2\pi f$  رادیان الکتریکی بر ثانیه و  $f$  فرکانس نامی به هرتز می‌باشد.
- ✓ برای شکل موجه‌ای پیچیده، مجازیم که از مقدار پیک (دامنه) پریونیت شده شکل موج بجای مقدار موثر ولتاژ استفاده شود. در اینحالت، بجای مقادیر موثر ولتاژ، جریان و مقادیر امپدانس و توان از مقادیر پریونیتی آنها استفاده می‌شود.
- ✓ مقادیر پایه برای ماشین سه فاز از روابط زیر قابل محاسبه اند:

$$V_b = \sqrt{2/3} V_{rated}$$

$$S_b = S_{rated}$$

$$Z_b = V_b / I_b$$

$$T_b = S_b / \omega_{bm}$$



- ✓ که در روابط فوق،  $P = 2\omega_b / V_b$  فرکانس پایه مکانیکی است.

- ✓ با بازنویسی روابط اسلاید قبل، معادلات جدید بر حسب  $x$  و  $\psi$  بصورت زیر بدست خواهند آمد:

## □ مدل دینامیکی موتور القایی



➤ معادلات ماشین القایی در دستگاه مرجع گردان qd0 بر حسب  $\psi$  و  $x$

### معادلات ولتاژ استاتور در دستگاه qdo

$$\begin{cases} v_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{ds} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{qs}}{dt} \\ v_{ds} = r_s i_{ds} - \frac{\omega}{\omega_b} \psi_{qs} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{ds}}{dt} \\ v_{os} = r_s i_{os} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{os}}{dt} \end{cases} \quad (48)$$

### معادلات ولتاژ رotor در دستگاه qdo

$$\begin{cases} v'_{qr} = r'_r i'_{qr} + \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} \psi'_{dr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi'_{qr}}{dt} \\ v'_{dr} = r'_r i'_{dr} - \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} \psi'_{qr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi'_{dr}}{dt} \\ v'_{or} = r'_r i'_{or} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi'_{or}}{dt} \end{cases} \quad (49)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \\ \psi_{os} \\ \psi'_{qr} \\ \psi'_{dr} \\ \psi'_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 \\ 0 & 0 & x_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ x_m & 0 & 0 & x'_{lr} + x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_m & 0 & 0 & x'_{lr} + x_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{os} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{or} \end{bmatrix} \quad (50)$$

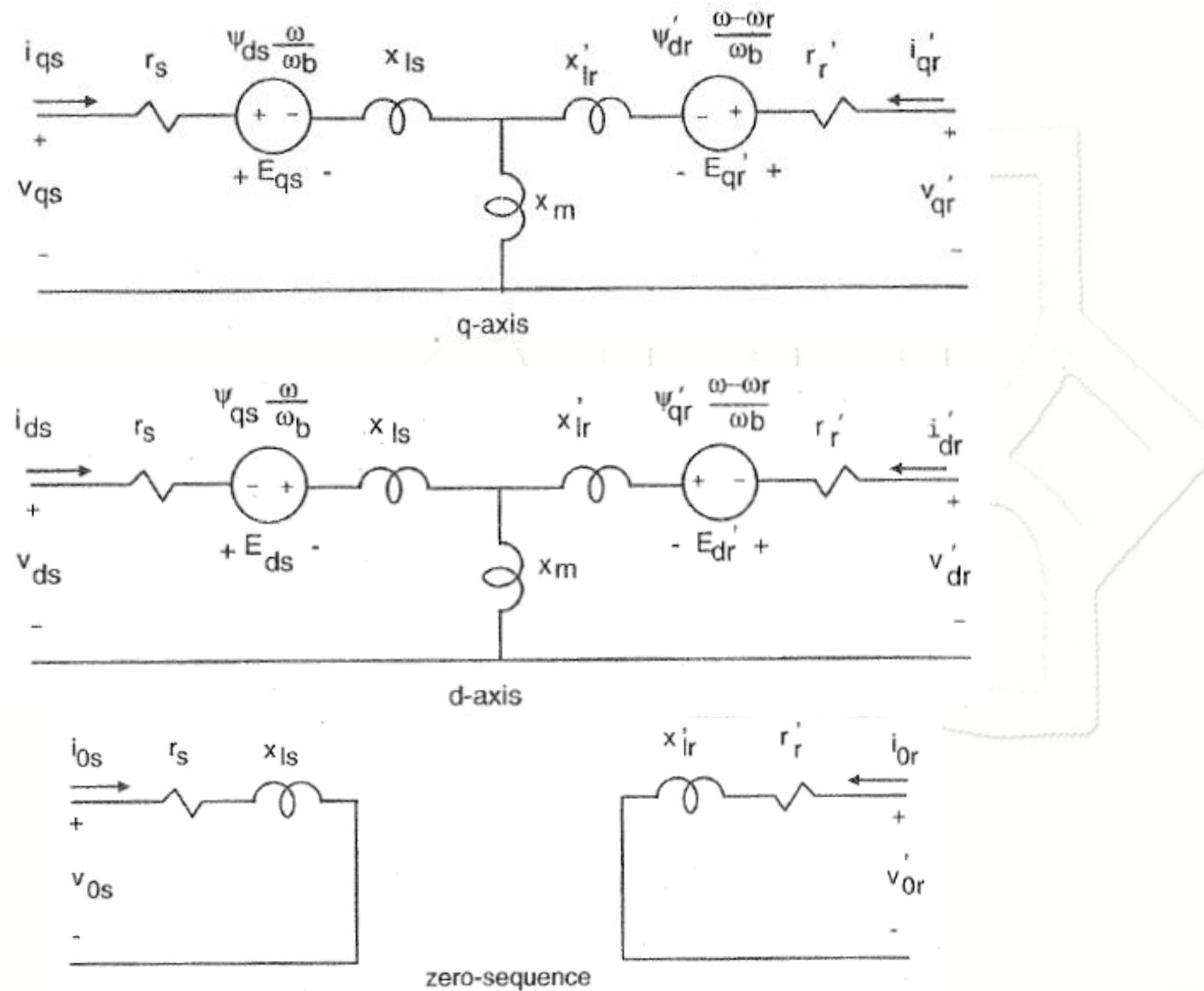
$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\psi'_{qr} i'_{dr} - \psi'_{dr} i'_{qr}) = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} L_m (i'_{dr} i_{qs} - i'_{qr} i_{ds}) \quad (51)$$

## □ مدل دینامیکی موتور القایی



➤ مدار معادل دینامیکی در دستگاه مرجع گردان  $qd0$  بر حسب  $\psi$  و  $x$

✓ در نتیجه مدار معادل دینامیکی در دستگاه مرجع گردان  $qd0$  با سرعت دلخواه  $\omega$  بر حسب  $\psi$  و  $x$  به صورت زیر خواهد بود:





## □ مدل دینامیکی موتور القایی

### ➤ معادلات ماشین القایی در قاب مرجع ساکن و گردان $qd0$

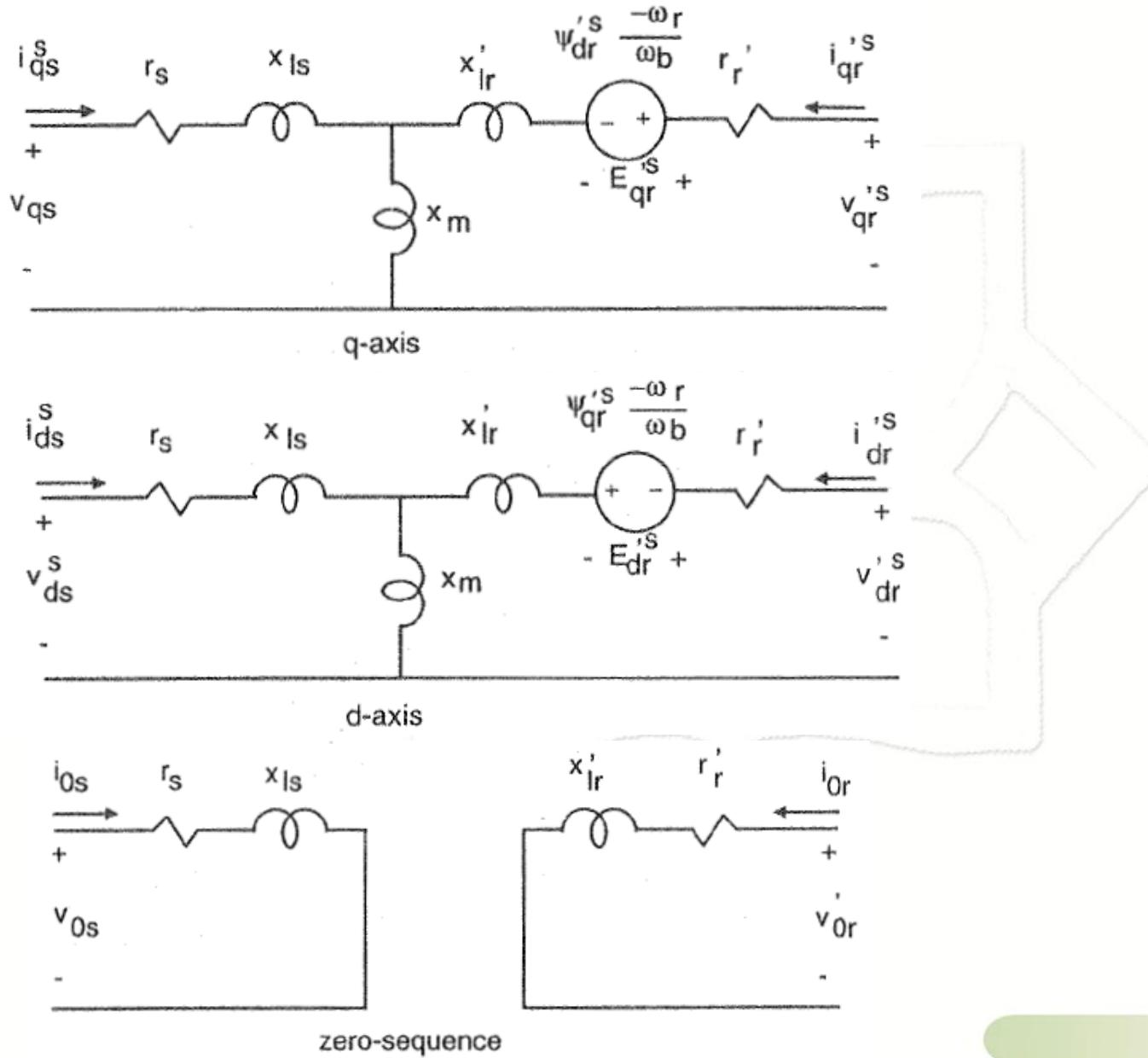
- ✓ معادلات دینامیکی بدست آمده در دستگاه مرجع گردان با سرعت دلخواه  $\omega$  بودند.
- ✓ همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، می‌توان معادلات  $qd0$  بدست آمده برای ماشین القایی را دستگاه ساکن استاتور و یا دستگاه گردان سنکرون تبدیل نمود.
- ✓ برای تشخیص متغیرها در قاب مرجع ساکن، در معادلات از بالانویس  $S$  و برای قاب مرجع سنکرون از بالانویس  $s$  استفاده می‌شود.
- ✓ لازم بذکر است که تبدیل از قاب مرجع ساکن به سنکرون و بالعکس به راحتی و با استفاده از تبدیلات مناسب قابل انجام است. این تبدیلات از ساکن به سنکرون و بالعکس در درایوهای الکترونیکی کاربرد فراوان دارد.
- ✓ لازم به ذکر است که در بعضی مراجع، بجای دستگاه مرجع ساکن  $qd0$  با بالانویس  $S$  از نمادهای  $\alpha-\beta$  استفاده می‌شود. برای دستگاه مرجع سنکرون از نمادهای دیگر نظیر  $y-x$  و یا  $d-q$  استفاده می‌شود.

## □ مدل دینامیکی موتور القایی



### ► مدار معادل مدل دینامیکی در قاب مرجع ساکن $qd0$

✓ با جایگزینی  $\omega = 0$  در معادلات، مدار معادل دینامیکی در دستگاه مرجع ساکن به شکل زیر خواهد بود:





## معادلات ماشین القایی در قاب مرجع ساکن qdo

### معادلات ولتاژ استاتور در دستگاه ساکن qdo

$$\begin{cases} v_{qs}^s = r_s i_{qs}^s + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{qs}^s}{dt} \\ v_{ds}^s = r_s i_{ds}^s + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{ds}^s}{dt} \\ v_{os} = r_s i_{os} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{os}}{dt} \end{cases} \quad (52)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{qs}^s \\ \psi_{ds}^s \\ \psi_{os} \\ \psi'_{qr}^s \\ \psi'_{dr}^s \\ \psi'_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 \\ 0 & 0 & x_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ x_m & 0 & 0 & x'_{lr} + x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_m & 0 & 0 & x'_{lr} + x_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^s \\ i_{ds}^s \\ i_{os} \\ i'_{qr}^s \\ i'_{dr}^s \\ i'_{or} \end{bmatrix}$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\psi'_{qr}^s i'_{dr}^s - \psi'_{dr}^s i'_{qr}^s) = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\psi_{ds}^s i_{qs}^s - \psi_{qs}^s i_{ds}^s) = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} x_m (i'_{dr}^s i_{qs}^s - i'_{qr}^s i_{ds}^s) \quad (55)$$

### معادلات ولتاژ روتور در دستگاه ساکن qdo

$$\begin{cases} v'_{qr}^s = r_r i'_{qr}^s - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi'_{dr}^s + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi'_{qr}^s}{dt} \\ v'_{dr}^s = r_r i'_{dr}^s + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi'_{qr}^s + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi'_{dr}^s}{dt} \\ v'_{0r} = r_r i'_{0r} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi'_{0r}}{dt} \end{cases} \quad (53)$$

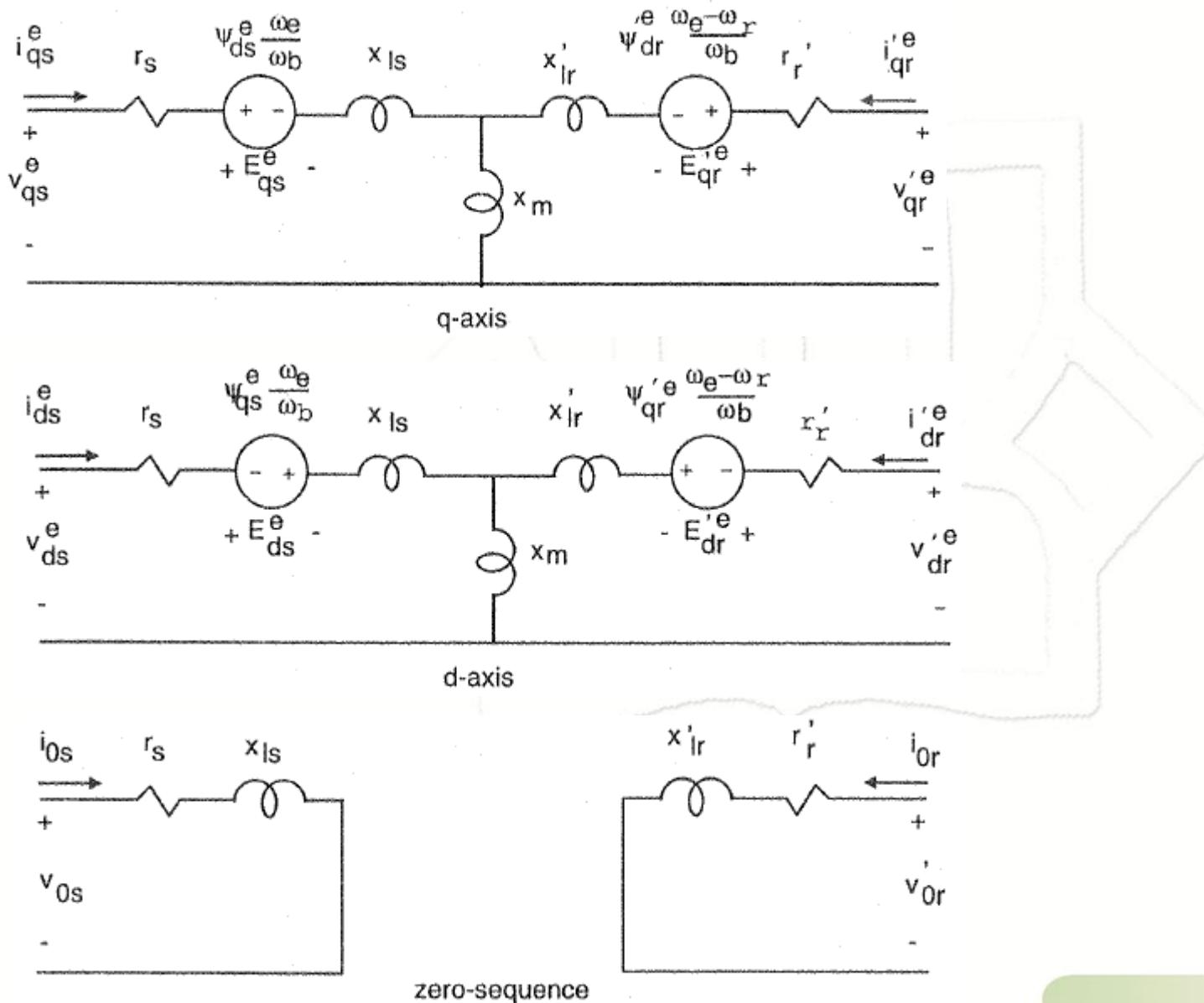


## □ مدل دینامیکی موتور القایی



### ➢ مدار معادل مدل دینامیکی در قاب مرجع سنکرون 0qd0

✓ با جایگزینی  $\omega = \omega_e$  در مدار معادل اسلاید ۱۰۳، مدار معادل دینامیکی در دستگاه مرجع سنکرون به شکل زیر خواهد بود:



## □ مدل دینامیکی موتور القایی



➤ معادلات ماشین القایی در قاب مرجع سنکرون qd0

معادلات ولتاژ استاتور در دستگاه سنکرون qdo

$$\begin{cases} \mathbf{v}_{qs}^e = \mathbf{r}_s \mathbf{i}_{qs}^e + \frac{\omega_e}{\omega_b} \Psi_{ds}^e + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\Psi_{qs}^e}{dt} \\ \mathbf{v}_{ds}^e = \mathbf{r}_s \mathbf{i}_{ds}^e - \frac{\omega_e}{\omega_b} \Psi_{qs}^e + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\Psi_{ds}^e}{dt} \\ \mathbf{v}_{os} = \mathbf{r}_s \mathbf{i}_{os} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\Psi_{os}}{dt} \end{cases} \quad (56)$$

معادلات ولتاژ روتور در دستگاه سنکرون qdo

$$\begin{cases} \mathbf{v}'_{qr} = \mathbf{r}'_r \mathbf{i}'_{qr} + \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} \Psi'_{dr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\Psi'_{qr}}{dt} \\ \mathbf{v}'_{dr} = \mathbf{r}'_r \mathbf{i}'_{dr} - \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} \Psi'_{qr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\Psi'_{dr}}{dt} \\ \mathbf{v}'_{0r} = \mathbf{r}'_r \mathbf{i}'_{0r} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\Psi'_{0r}}{dt} \end{cases} \quad (57)$$

$$\begin{bmatrix} \Psi_{qs}^e \\ \Psi_{ds}^e \\ \Psi_{os} \\ \Psi'_{qr} \\ \Psi'_{dr} \\ \Psi'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{ls} + \mathbf{x}_m & 0 & 0 & \mathbf{x}_m & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{x}_{ls} + \mathbf{x}_m & 0 & 0 & \mathbf{x}_m & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{x}_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{x}_m & 0 & 0 & \mathbf{x}'_{lr} + \mathbf{x}_m & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{x}_m & 0 & 0 & \mathbf{x}'_{lr} + \mathbf{x}_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{x}'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{qs}^e \\ \mathbf{i}_{ds}^e \\ \mathbf{i}_{os} \\ \mathbf{i}'_{qr} \\ \mathbf{i}'_{dr} \\ \mathbf{i}'_{0r} \end{bmatrix} \quad (58)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\Psi'_{qr} \mathbf{i}'_{dr} - \Psi'_{dr} \mathbf{i}'_{qr}) = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\Psi_{ds}^e \mathbf{i}_{qs}^e - \Psi_{qs}^e \mathbf{i}_{ds}^e) = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} \mathbf{x}_m (\mathbf{i}'_{dr} \mathbf{i}_{qs}^e - \mathbf{i}'_{qr} \mathbf{i}_{ds}^e) \quad (59)$$

## □ مدل دینامیکی موتور القایی



### ➤ شبیه سازی ماشین القایی در قاب مرجع ساکن $qd0$

- ✓ منظور از شبیه سازی ماشین القایی، بدست آوردن تغییرات ( تعیین مقادیر لحظه ای) تمامی متغیرهای ماشین نظیر جریانها، شارها، گشتاور و سرعت ماشین به ازای یک مقادیر معلوم ولتاژ و گشتاور بار اعمالی به ماشین می باشد.
- ✓ بدست آوردن مقدار متغیرهای ماشین، مستلزم حل ۶ معادله دیفرانسیل در دستگاه  $abc$  یا  $qd0$  می باشد. با توجه به مطالب ارائه شده در بخش‌های قبلی، نتیجه گرفته شد که حل معادلات دیفرانسیل ماشین در قاب  $qd0$  از قاب  $abc$  مناسب تر است.
- ✓ توجه شود که با فرض تقارن فازهای ماشین و همچنین متعادل بودن ولتاژ اعمالی به ماشین، ۶ معادله دیفرانسیل عملاً به ۴ معادله دیفرانسیل تبدیل خواهند گردید. اما در صورت عدم تقارن ماشین و یا عدم تعادل ولتاژی، در دستگاه  $qd0$  نیز باید ۶ معادله دیفرانسیل حل نمود.
- ✓ در این بخش، برای شبیه سازی از معادلات قاب مرجع ساکن استاتور استفاده می گردد. اما بطريق مشابه و یا با استفاده از تبدیلات مناسب می توان مقادیر متناظر در قاب مرجع سنکرون را نیز بدست آورد.

## ➤ شبیه سازی ماشین القایی در قاب مرجع $qd0$

### ❖ محاسبه جریانها:

- ✓ در محاسبات عددی و همچنین در پیاده سازی سخت افزاری، سعی بر عدم استفاده از اپراتور مشتق گیری است، زیرا مشتق گیری در حالت وجود نویز و اغتشاش و یا تغییرات فرکانس بالای سیگنال، سبب بروز خطاهای محاسباتی فاحش می‌گردد.
- ✓ فرض کنید که بخواهیم جریان ماشین را به ازای یک ولتاژ داده شده بدست آوریم. جریان در واقع خروجی است.
- ✓ مثلاً در معادله دیفرانسیل روبرو (KVL) روی محور  $q$  استاتور، هیچگاه برای محاسبه جریان  $i_{qs}$  از شار مشتق گیری نمی‌کنند.

$$v_{qs}^s = r_s i_{qs}^s + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{qs}^s}{dt} \Rightarrow i_{qs}^s = \frac{v_{qs}^s - \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{qs}^s}{dt}}{r_s}$$

- ✓ بجای مشتق گیری، روابط به شکلی بازنویسی می‌گردند که از انتگرالگیری استفاده شود. یعنی از معادله فوق شار با انتگرالگیری بدست می‌آید:

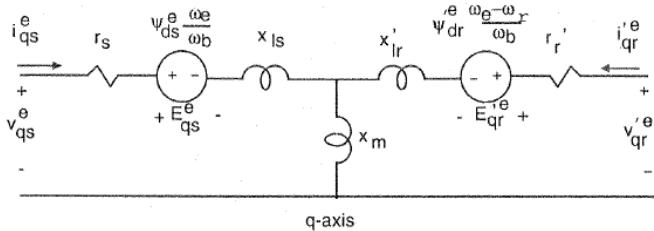
$$\Rightarrow \psi_{qs}^s = \omega_b \int (v_{qs}^s - r_s i_{qs}^s) dt$$

- ✓ اما ممکن است این سؤال مطرح شود که در انتگرالگیری فوق، جریان از کجا بدست می‌آید؟ و اصولاً ما مگر بدنبال محاسبه جریان نبودیم؟

- ✓ پاسخ سؤال فوق این است که جریان در معادله فوق، با بازنویسی روابط بر حسب شارها بدست می‌آیند.

## □ مدل دینامیکی موتور القایی

➢ شبیه سازی ماشین القایی در قاب مرجع ساکن  $qd0$



❖ بازنویسی جریان ها بر حسب شارها و محاسبه شارها:

○ شار-دور در حلقه استاتور:

$$\Psi_{qs}^s = (x_{ls} + x_m) i_{qs}^s + x_m i_{qr}'^s \Rightarrow \Psi_{qs}^s = x_{ls} i_{qs}^s + \underbrace{x_m (i_{qs}^s + i_{qr}'^s)}_{\Psi_{mq}^s} \Rightarrow i_{qs}^s = \frac{\Psi_{qs}^s - \Psi_{mq}^s}{x_{ls}}$$

○ شار-دور در حلقه روتور:

$$\Psi_{qr}'^s = x_m i_{qs}^s + (x'_{lr} + x_m) i_{qr}'^s \Rightarrow \Psi_{qr}'^s = x'_{lr} i_{qr}'^s + \underbrace{x_m (i_{qs}^s + i_{qr}'^s)}_{\Psi_{mq}^s} \Rightarrow i_{qr}'^s = \frac{\Psi_{qr}'^s - \Psi_{mq}^s}{x'_{lr}}$$

○ شار-دور در هسته محور q:

$$\Psi_{mq}^s = x_m (i_{qs}^s + i_{qr}'^s) \Rightarrow \frac{\Psi_{mq}^s}{x_m} = \frac{\Psi_{qs}^s - \Psi_{mq}^s}{x_{ls}} + \frac{\Psi_{qr}'^s - \Psi_{mq}^s}{x'_{lr}} \Rightarrow \Psi_{mq}^s = x_M \left( \frac{\Psi_{qs}^s}{x_{ls}} + \frac{\Psi_{qr}'^s}{x'_{lr}} \right)$$

$$\frac{1}{x_M} = \frac{1}{x_m} + \frac{1}{x_{ls}} + \frac{1}{x'_{lr}}$$

که در آن:

✓ حال می توان از رابطه انتگرالی اسلامید قبل و بدون وارد نمودن جریان، شار را پیدا نمود:

$$\Psi_{qs}^s = \omega_b \int (v_{qs}^s - r_s \frac{\Psi_{qs}^s - \Psi_{mq}^s}{x_{ls}}) dt \quad \text{✓ در این رابطه، مقدار شار } \Psi_{qs}^s \text{ بر حسب مقدار قبلی اش و شار مغناطیس کننده } \Psi_{mq}^s \text{ قابل محاسبه است.}$$



## □ مدل دینامیکی موتور القایی



### ► شبیه سازی ماشین القایی در قاب مرجع ساکن qd0

❖ جمع بندی روابط مدل بازنویسی شده ماشین القایی برای شبیه سازی بدون استفاده از اپراتور مشتق گیری:

$$\begin{aligned}\psi_{qs}^s &= \omega_b \int \left\{ v_{qs}^s + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{mq}^s - \psi_{qs}^s) \right\} dt \\ \psi_{ds}^s &= \omega_b \int \left\{ v_{ds}^s + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{md}^s - \psi_{ds}^s) \right\} dt\end{aligned}\quad (6.112)$$

$$i_{0s} = \frac{\omega_b}{x_{ls}} \int \{v_{0s} - i_{0s} r_s\} dt$$

$$\begin{aligned}\psi_{qr}^{s'} &= \omega_b \int \left\{ v_{qr}^{s'} + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{dr}^{s'} + \frac{r'_r}{x'_{lr}} (\psi_{mq}^s - \psi_{qr}^{s'}) \right\} dt \\ \psi_{dr}^{s'} &= \omega_b \int \left\{ v_{dr}^{s'} - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_{qr}^{s'} + \frac{r'_r}{x'_{lr}} (\psi_{md}^s - \psi_{dr}^{s'}) \right\} dt\end{aligned}\quad (6.113)$$

$$i'_{0r} = \frac{\omega_b}{x'_{lr}} \int \{v'_{0r} - i'_{0r} r'_r\} dt$$

$$\begin{aligned}\psi_{mq}^s &= x_m (i_{qs}^s + i_{qr}^{s'}) \\ \psi_{md}^s &= x_m (i_{ds}^s + i_{dr}^{s'})\end{aligned}\quad (6.114)$$

$$\frac{1}{x_M} = \frac{1}{x_m} + \frac{1}{x_{ls}} + \frac{1}{x'_{lr}} \quad (6.116)$$

$$\begin{aligned}i_{qs}^s &= \frac{\psi_{qs}^s - \psi_{mq}^s}{x_{ls}} \\ i_{ds}^s &= \frac{\psi_{ds}^s - \psi_{md}^s}{x_{ls}}\end{aligned}\quad (6.115)$$

$$i_{qr}^{s'} = \frac{\psi_{qr}^{s'} - \psi_{mq}^s}{x'_{lr}}$$

$$i_{dr}^{s'} = \frac{\psi_{dr}^{s'} - \psi_{md}^s}{x'_{lr}}$$

$$\begin{aligned}\psi_{mq}^s &= x_M \left( \frac{\psi_{qs}^s}{x_{ls}} + \frac{\psi_{qr}^{s'}}{x'_{lr}} \right) \\ \psi_{md}^s &= x_M \left( \frac{\psi_{ds}^s}{x_{ls}} + \frac{\psi_{dr}^{s'}}{x'_{lr}} \right)\end{aligned}\quad (6.117)$$

### ➢ شبیه سازی ماشین القایی در قاب مرجع ساکن $qd0$

❖ محاسبه سرعت موتور: برای محاسبه سرعت از معادله حرکت نیوتن استفاده می شود.

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\Psi_{ds}^s i_{qs}^s - \Psi_{qs}^s i_{ds}^s) \quad (61)$$

$$J \frac{d\omega_{rm}}{dt} = T_{em} + T_{mech} - T_{damp} \quad (62)$$

در رابطه فوق،  $T_{mech}$  گشتاور مکانیکی اعمال شده از بیرون در جهت چرخش موتور و  $T_{damp}$  گشتاور اصطکاک در خلاف جهت چرخش است. مثلا برای بار مکانیکی پسیو اعمالی به موتور، مقدار  $T_{mech}$  منفی خواهد بود و برای بار فعال مثبت است.

✓ قبل ابدست آوردیم:

✓ معادله حرکت نیوتن برای روتور عبارتست از:

✓ بازنویسی معادله حرکت فوق بر حسب سرعت پریونیتی  $\omega_r / \omega_b$  خواهیم داشت:

$$\frac{2J\omega_b}{P} \frac{d(\omega_r / \omega_b)}{dt} = T_{em} + T_{mech} - T_{damp} \quad (63)$$

$$H = \frac{J\omega_{bm}^2}{2S_b} \quad (64)$$

✓ با تعریف ثابت اینرسی  $H$  بصورت روبرو، معادله فوق بصورت زیر قابل بازنویسی است:

$$2H \frac{d(\omega_r / \omega_b)}{dt} = T_{em} + T_{mech} - T_{damp} \quad (65)$$

در رابطه فوق، تغییرات سرعت روتور بر حسب پریونیت بدست می آید.

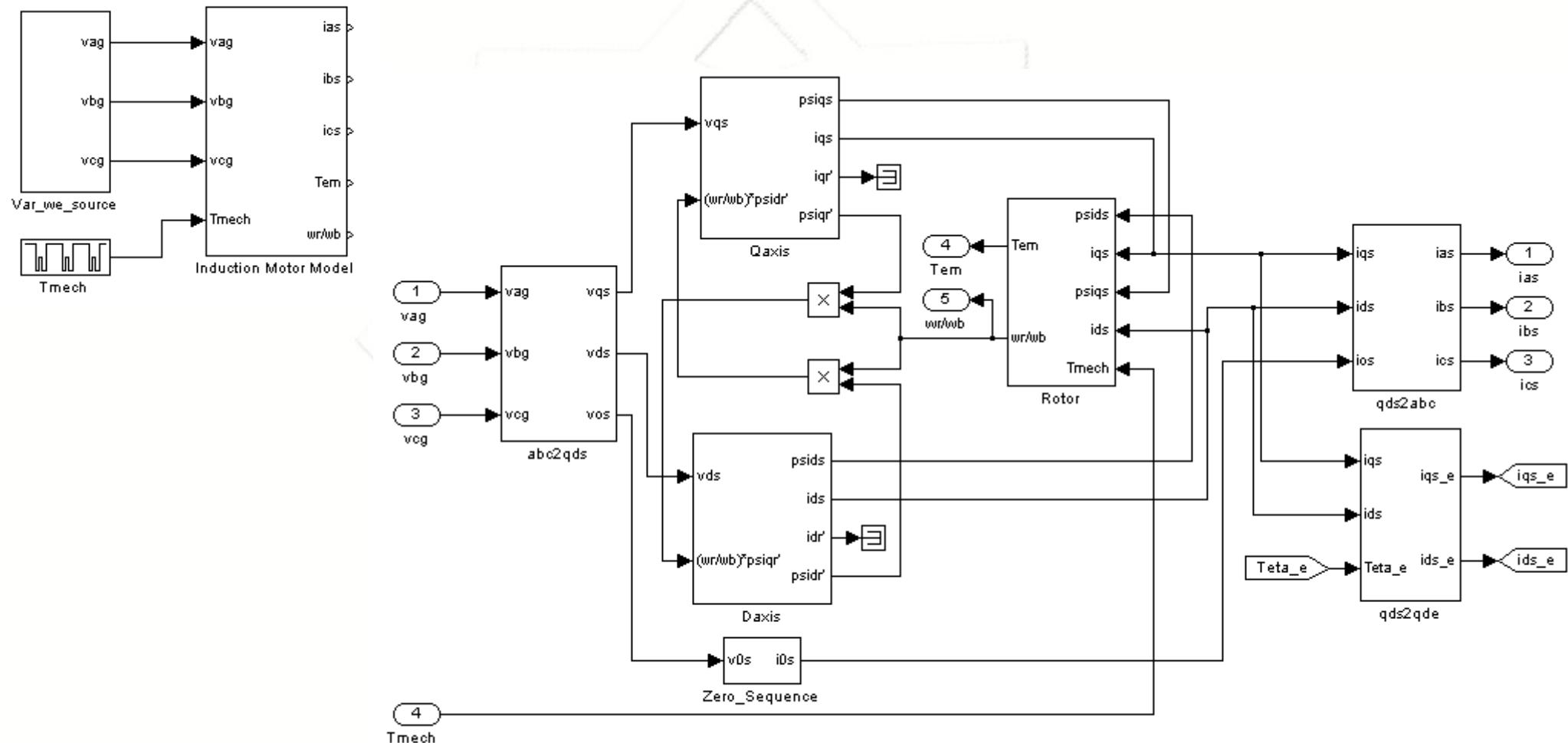
## □ مدل دینامیکی موتور القایی



➤ شبیه سازی ماشین القایی در قاب مرجع  $qd0$

❖ پیاده سازی مدل در نرم افزار سیمولینک:

✓ مطابق اسلاید قبل، در این بخش، مدل موتور در سیمولینک پیاده سازی و چند شبیه سازی برای آن انجام می گردد.



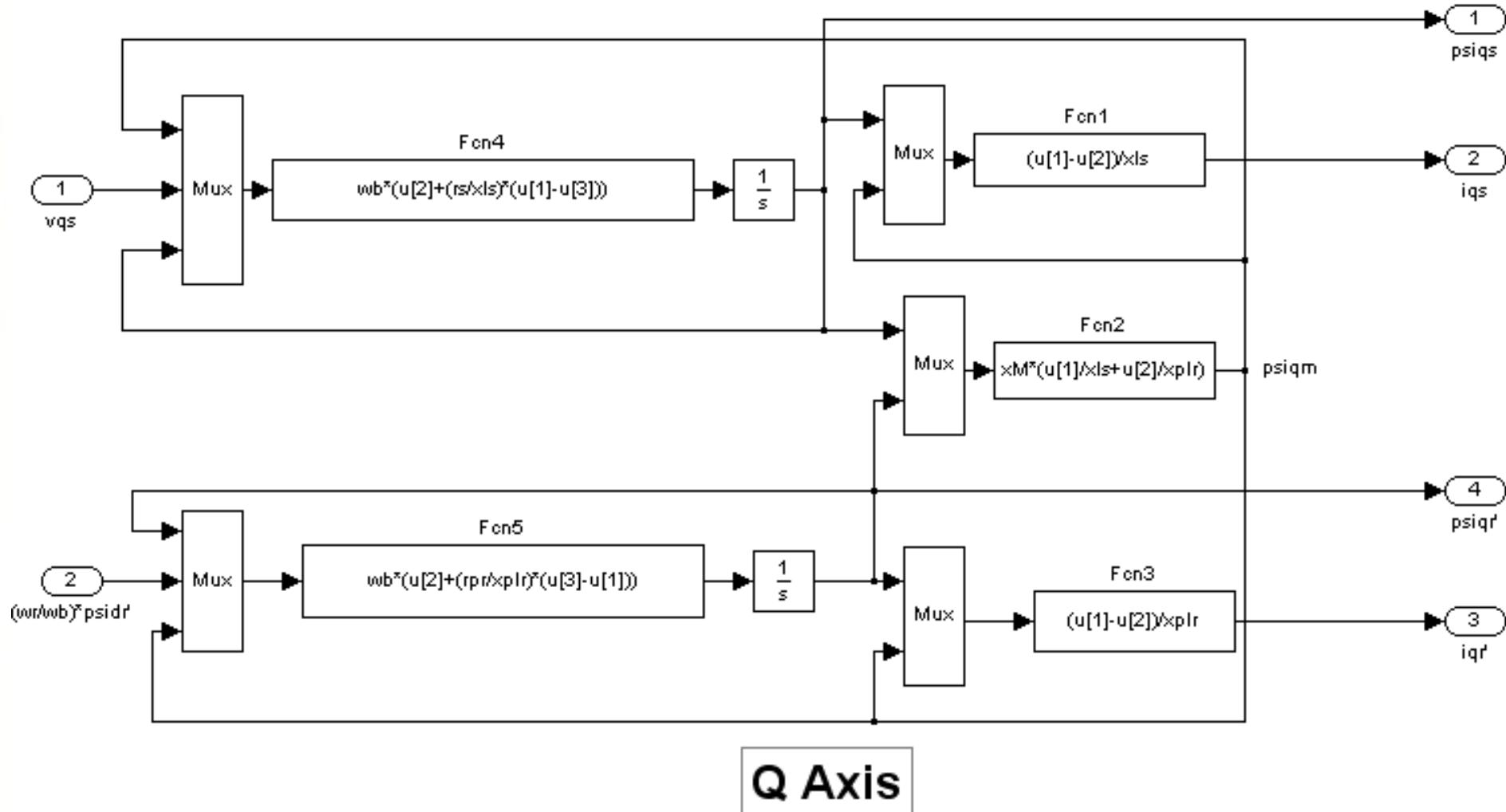
Induction Machine Model in Stationary Frame

## □ مدل دینامیکی موتور القایی



► شبیه سازی ماشین القایی در قاب مرجع qd0

❖ پیاده سازی مدل در نرم افزار سیمولینک:

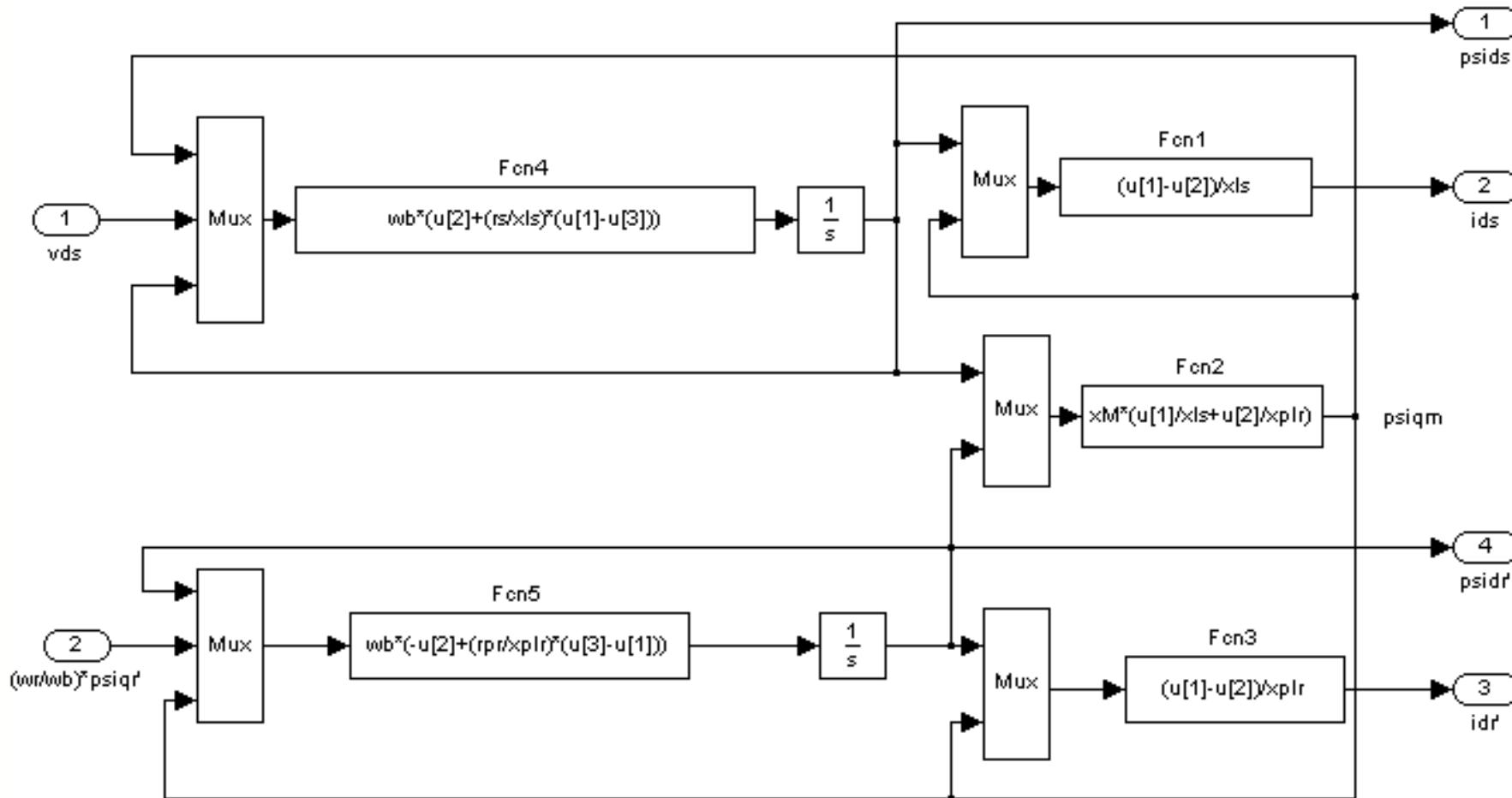


# □ مدل دینامیکی موتور القایی



➤ شبیه سازی ماشین القایی در قاب مرجع qd0

❖ پیاده سازی مدل در نرم افزار سیمولینک:

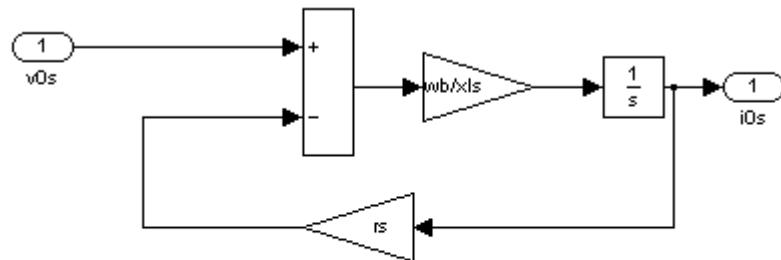


**D Axis**

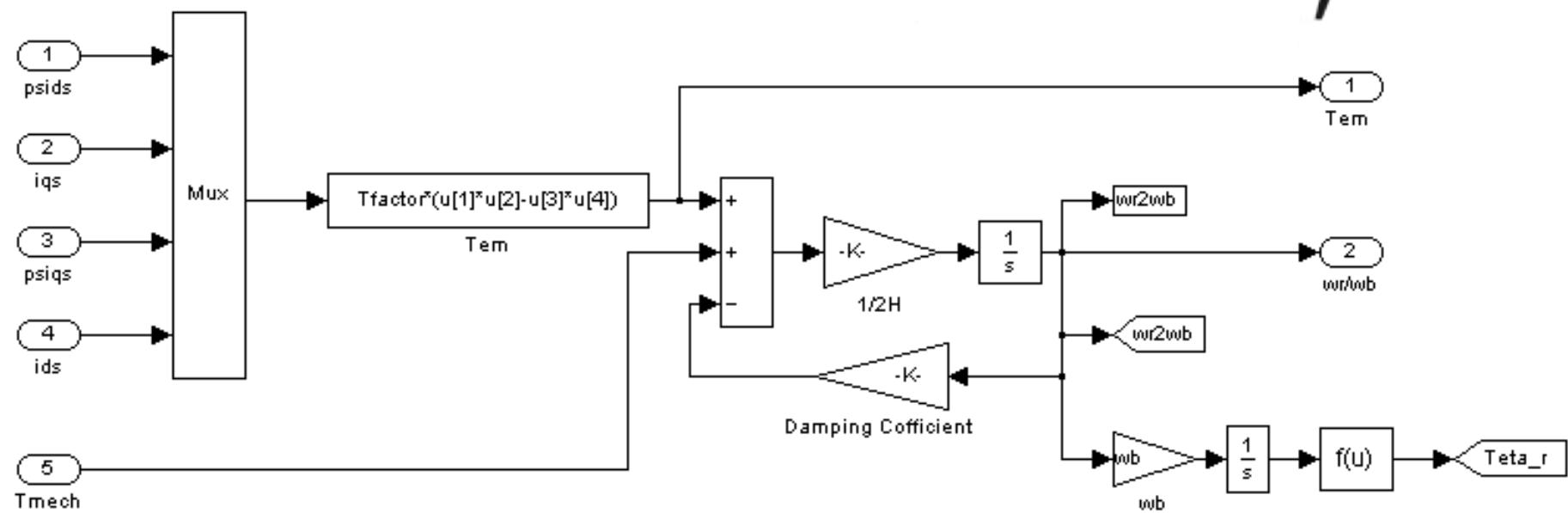
## □ مدل دینامیکی موتور القایی

➤ شبیه سازی ماشین القایی در قاب مرجع  $qd0$

❖ پیاده سازی مدل در نرم افزار سیمولینک:



**Zero Sequence**



**Rotor Block**

## □ مدل دینامیکی موتور القایی



➤ شبیه سازی ماشین القایی در قاب مرجع qd0

### ❖ پارامترهای موتور

- ✓ موتور القایی با مشخصات ذیل بوسیله ولتاژ نامی ۲۲۰ ولت و تحت گشتاور بار ثابت که متناظراً با تغییر می کند، راه اندازی می گردد.

```
1 -      tstop=2;
2 -
3 -      rs=0.1062;
4 -      xls=0.2145;
5 -      rpr=0.0764;
6 -      xplr=0.2145;
7 -      xr=xplr;
8 -      rr=rpr;
9 -
10 -     xm=5.834;
11 -     xM=inv(1/xm+1/xls+1/xplr);
12 -     J=2.5;
13 -
14 -     Vrated=220;          %line to line rms voltage
15 -     Srated=20*745.5;    %rated volt-ampere
16 -     Trated=81.49;
17 -     frated=60;
18 -     smax=0.1758;

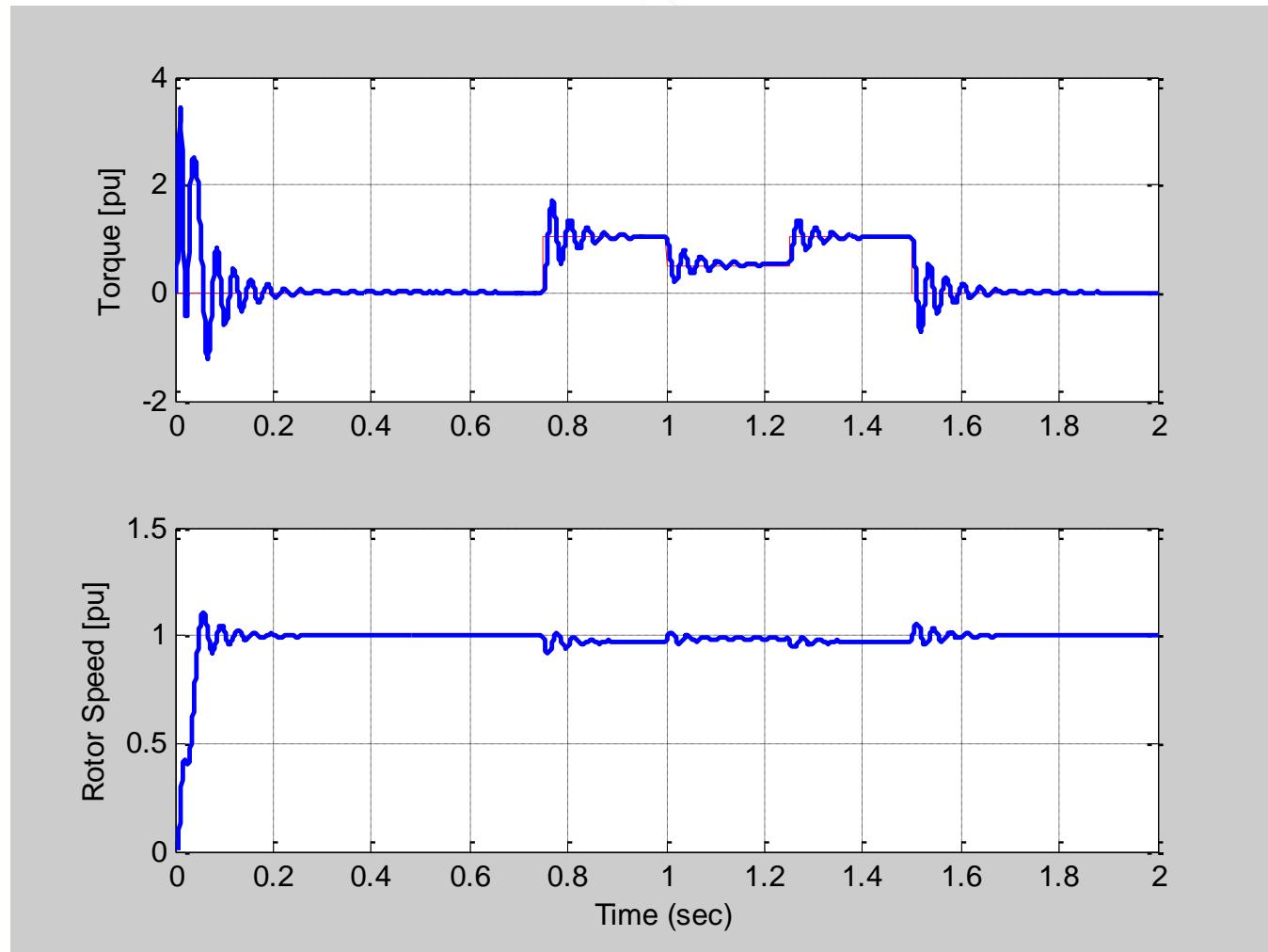
19 -
20 -     P=4;
21 -     wb=2*pi*frated;    %376.9911 [rad/sec]
22 -     wbm=2*wb/P;        %188.4956 [rad/sec]
23 -     we=wb;              %188.4956 [rad/sec]
24 -
25 -     Sb=Srated;          %14910 [kVA]
26 -     Vb=sqrt(2/3)*Vrated; %179.6292 [V]
27 -     Ib=2*Sb/(3*Vb);    %55.3362 [A]
28 -     Zb=Vb/Ib;           %3.2461 [ohm]
29 -     Tb=Sb/wbm;          %79.1 [N.m]
30 -
31 -     H=J*wbm^2/(2*Sb);   %2.9788 [sec]
32 -     Domega=1;
33 -     Tfactor=(3*P)/(4*wb); %0.0080
```

## □ مدل دینامیکی موتور القایی



► شبیه سازی ماشین القایی در قاب مرجع  $qd0$

❖ نتایج شبیه سازی



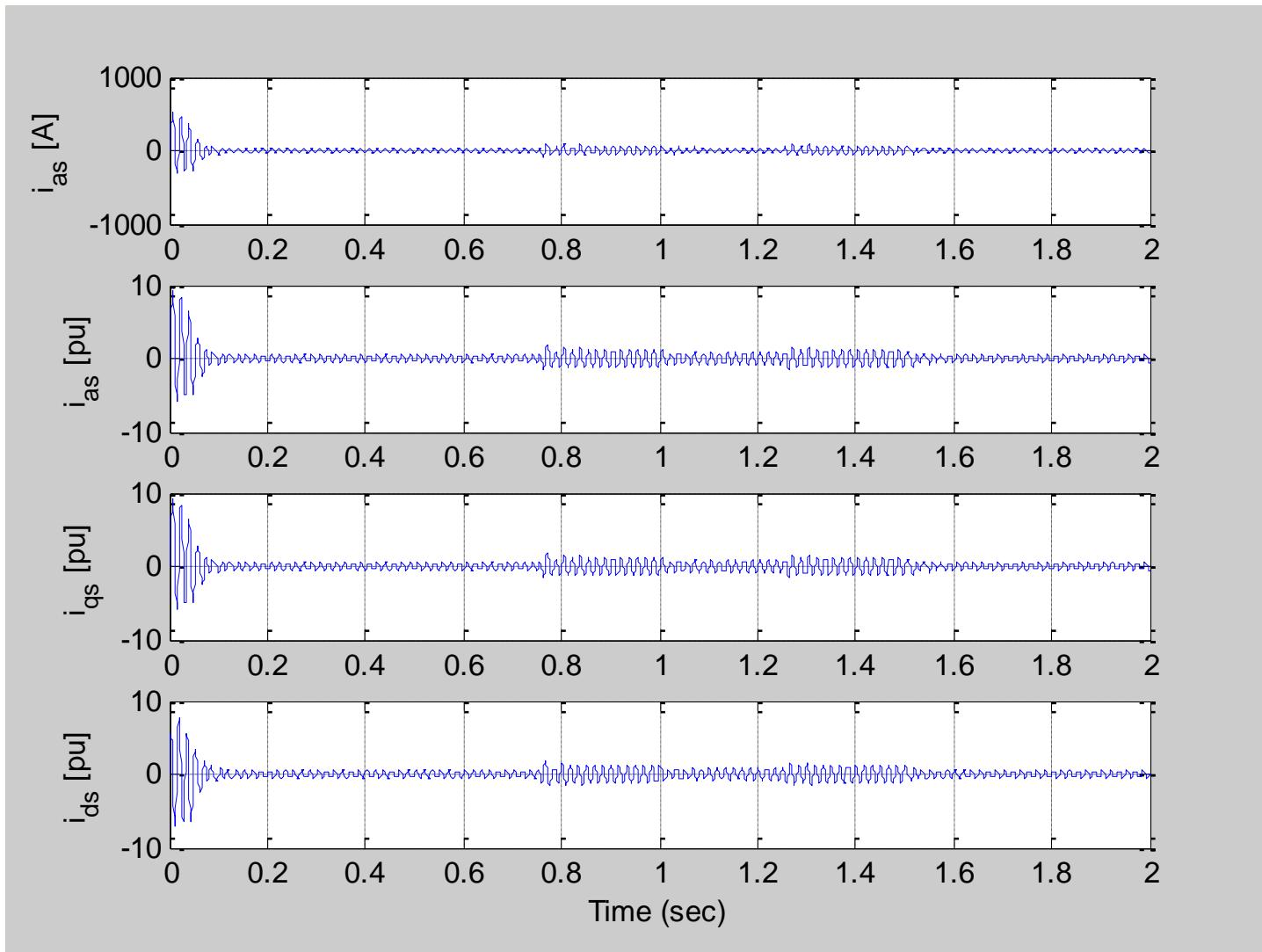
تغییرات گشتاور و سرعت

## □ مدل دینامیکی موتور القایی



► شبیه سازی ماشین القایی در قاب مرجع  $qd0$

❖ نتایج شبیه سازی



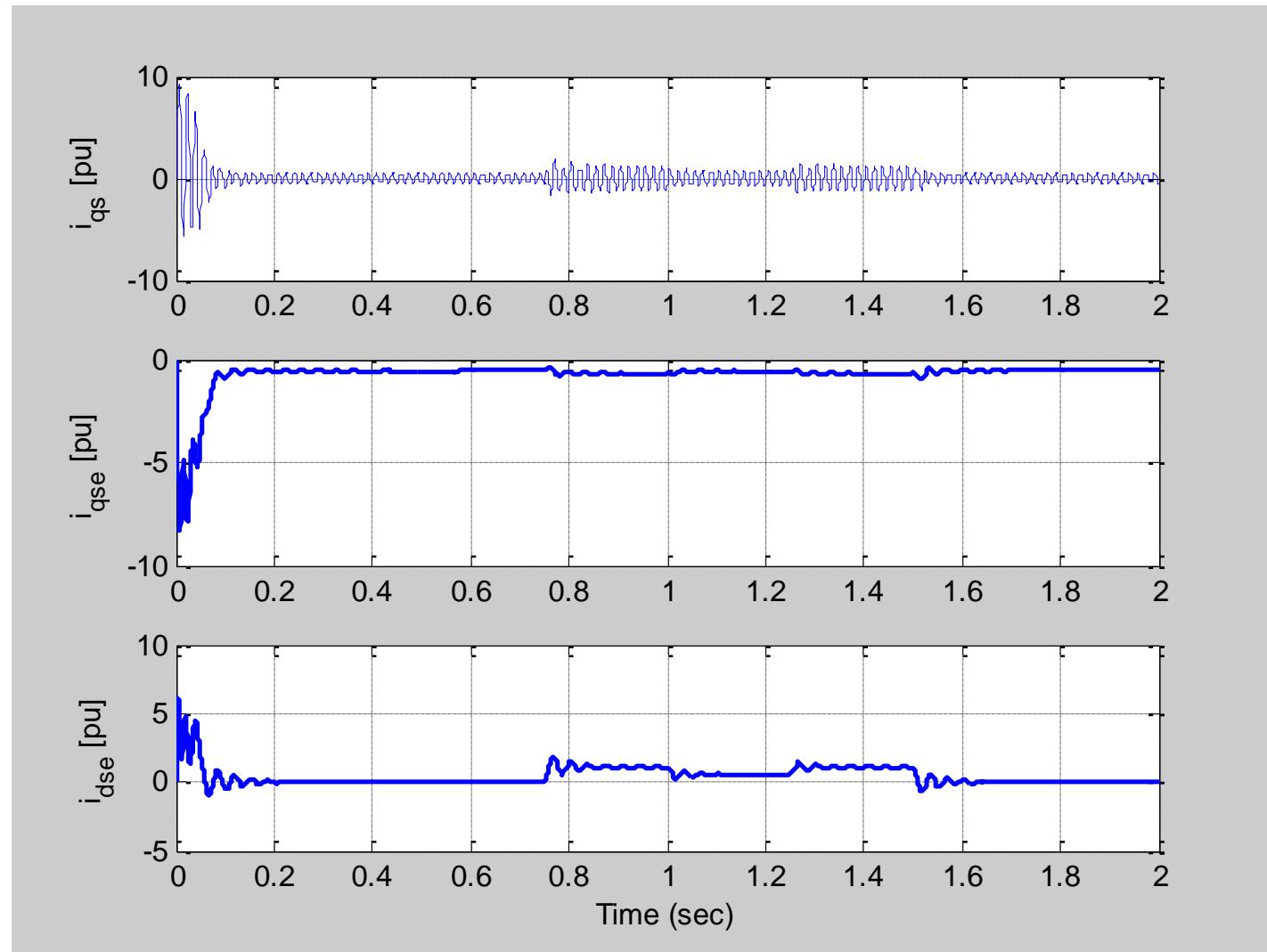
تغییرات جریان فازها در دستگاه ساکن استاتور



## □ مدل دینامیکی موتور القایی

➢ شبیه سازی ماشین القایی در قاب مرجع  $qd0$

❖ نتایج شبیه سازی



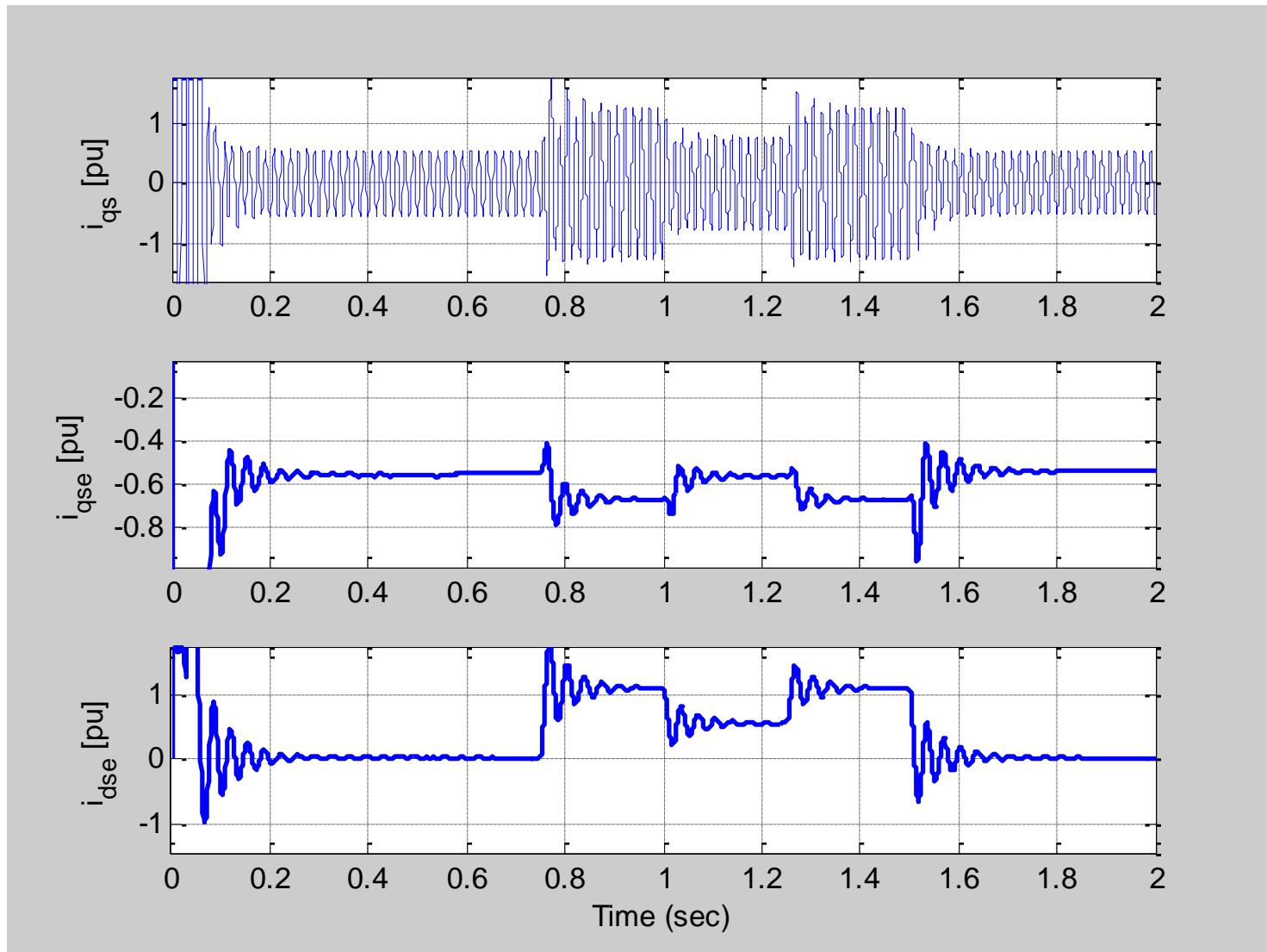
تغییرات جریان فازها در دستگاه گردان با سرعت سنکرون



## □ مدل دینامیکی موتور القایی

➢ شبیه سازی ماشین القایی در قاب مرجع  $qd0$

❖ نتایج شبیه سازی



تغییرات جریان فازها در دستگاه گردان با سرعت سنکرون (بزرگنمایی شده)



## □ کنترل برداری موتور القایی

### ➢ مفهوم کنترل به روش برداری (یا کنترل به روش جهت دهی میدان)

- ✓ مشاهده نمودیم که در موتور DC، محورهای سیم پیچهای آرمیچر و تحریک بر یکدیگر عمود بوده و در نتیجه mmf های ایجاد شده توسط جریانهای آرمیچر و تحریک بر یکدیگر عمودند.

$$T_{em} = k_a \phi(I_f) I_a$$

- ✓ در موتور DC، شار توسط جریان  $I_f$  قابل کنترل است. گشتاور نیز مستقل از شار توسط جریان  $I_a$  قابل کنترل است.

- ✓ اما در موتور القایی، میدان های استاتور و روتور که در تولید گشتاور نقش دارند مستقل از یکدیگر نبوده، زاویه بین آنها ۹۰ درجه نبوده و بر یکدیگر اثر متقابل دارند.

- ✓ شاید بتوان سیم پیچ روتور موتور القایی را مشابه با سیم پیچ تحریک در موتور DC درنظر گرفت، اما جریان روتور وابسته به ولتاژ القا شده در روتور و یا ولتاژ استاتور و یا بعبارتی جریان استاتور است.

- ✓ بدون استفاده از روش کنترل برداری با تغییر جریان استاتور، شار و گشتاور موتور هر دو تغییر می کنند.

- ✓ هدف از کنترل برداری یا کنترل با جهت دهی میدان (Field Oriented Control (FOC)) آن است که شار و گشتاور موتور القایی مستقل از یکدیگر و همانند موتور DC کنترل گرددند.

- ✓ در روش کنترل برداری، با جهت دهی مناسب بردار شار در راستای محور d دستگاه دومحوری  $q_d$ ، به هدف فوق دست می یابیم.

- ✓ اثبات می کنیم که با جهت دهی مناسب بردار شار، دامنه شار توسط جریان  $i_{ds}$  و گشتاور توسط جریان  $i_{qs}$  کنترل می گردد.

- ✓ در نتیجه شار و گشتاور موتور القایی همانند یک موتور DC توسط دو جریان واقعا مستقل از هم  $i_{ds}$  و  $i_{qs}$  کنترل می شود.

## □ کنترل برداری موتور القایی



➤ چرا باید بردار شار در راستای محور d جهت دهی شود؟

- ✓ فرض کنید که شار روتور همراستا با محور d دستگاه مختصات qd0 دوار سنکرون می باشد ( $\lambda'_{r}^e = \lambda'_{dr}^e$ ). با این فرض مولفه محور q شار روتور صفر خواهد شد ( $\lambda'_{qr}^e = 0$ ). لذا خواهیم داشت:

$$\lambda'_{qr}^e = L_m i_{qs}^e + L'_r i_{qr}^e = 0 \quad Wb. turn \quad (9.15)$$

$$i_{qr}^e = -\frac{L_m}{L'_r} i_{qs}^e \quad A \quad (9.16)$$

- ✓ با صفر در نظر گرفتن  $\lambda'_{qr}^e$ ، از معادله گشتاور (۶-۳۸)، گشتاور به صورت زیر بدست خواهد آمد:

$$T_{em} = -\frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda'_{dr}^e i_{qr}^e \quad N.m \quad (9.17)$$

- ✓ با جایگذاری  $i_{qr}^e$  از معادله (۹-۱۶)، رابطه گشتاور (۹-۱۷) به صورت زیر تبدیل می شود:

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L'_r} \lambda'_{dr}^e i_{qs}^e \quad (9.18)$$

- ✓ رابطه فوق نشان می دهد که با جهت دهی بردار شار در راستای محور d، می توان گشتاور را مستقل از شار و فقط با تنظیم جریان  $i_{qs}^e$  کنترل نمود.

## □ کنترل برداری موتور القایی



► چگونه باید شار روتور در راستای محور d جهت دهی شود؟

- ✓ برای صفر باقی ماندن  $\lambda'_{qr}^e$  باید مشتق این مولفه نیز صفر باشد ( $d\lambda'_{qr}^e/dt = 0$ ). در چنین حالتی، معادله ولتاژ در محور q سیم پیچی روتور بدون اعمال ولتاژ

$$\underbrace{v'_{qr}^e}_{=0} = r'_r i'_{qr}^e + \underbrace{p\lambda'_{qr}^e}_{=0} + (\omega_e - \omega_r) \lambda'_{dr}^e \quad V \quad (9.19)$$

به شکل زیر تغییر می یابد. به عبارت دیگر سرعت لغزش باید در معادله ذیل صدق نماید:

$$\omega_e - \omega_r = -\frac{r'_r i'_{qr}^e}{\lambda'_{dr}^e} \quad \text{elect. rad/s} \quad (9.20)$$

- ✓ همچنین اگر  $\lambda'_{dr}^e$  بدون تغییر باقی بماند  $d\lambda'_{dr}^e/dt = 0$  صفر خواهد شد.

- ✓ با شرط فوق و شرط صفر بودن  $\lambda'_{qr}^e$  در معادله ولتاژ در محور d روتور، نتیجه می گردد که  $i'_{dr}^e$  می باید صفر باشد، بطوریکه:

$$\underbrace{v'_{dr}^e}_{=0} = r'_r i'_{dr}^e + \underbrace{p\lambda'_{dr}^e}_{=0} - (\omega_e - \omega_r) \underbrace{\lambda'_{qr}^e}_{=0} \quad V \quad (9.21)$$

- ✓ زمانیکه  $i'_{dr}^e$  صفر باشد،  $\lambda'_{dr}^e$  برابر با  $L_m i_{ds}^e$  خواهد شد.

- ✓ با جایگذاری رابطه فوق و رابطه (۹-۱۶) در رابطه (۹-۲۰)، سرعت لغزش از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\omega_e - \omega_r = \frac{r'_r}{L'_r} \frac{i_{qs}^e}{i_{ds}^e} \quad \text{elect. rad/s} \quad (9.22)$$

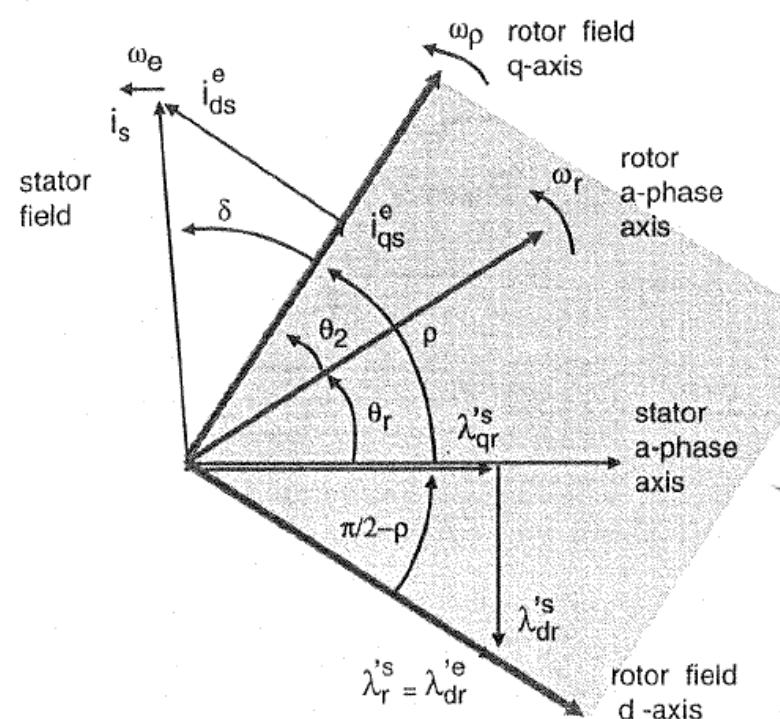
## □ کنترل برداری موتور القایی



► چگونه باید شار روتور در راستای محور d جهت دهی شود؟

- ✓ در عمل، دامنه شار روتور با تنظیم جریان  $i_{ds}^e$  قابل کنترل بوده و جهت محور d میدان روتور می تواند با نگهداری سرعت لغزش و یا جریان  $i_{qs}^e$  مطابق معادله (۲۲-۹) کنترل گردد.
- ✓ با جهت یابی مناسب میدان، دینامیک  $\lambda'_{dr}^e$  به محور d و با ثابت زمانی مدار روتور محدود می گردد.
- ✓ این مطلب را از رابطه (۲۱-۹) و با جایگزینی  $i_{dr}^e - L_m i_{ds}^e$  با  $\lambda'_{dr}^e$  به صورت ذیل مشاهده کرد:

$$\lambda'_{dr}^e = \frac{r'_r L_m}{r'_r + L'_r p} i_{ds}^e \quad Wb. \text{ turn} \quad (9.23)$$



### ➢ دسته بندی انواع روش‌های کنترل برداری

✓ مفهوم کنترل برداری ارائه شده بر مبنای جهت دهی شار روتور بود. اما در مراجع مختلف، بجای شار روتور، شارهای دیگر موتور جهت دهی می‌شوند. روش‌های مختلف کنترل برداری بر مبنای شار مورد استفاده عبارتند از:

- جهت دهی شار روتور
- جهت دهی شار استاتور
- جهت دهی شار مغناطیس کنندگی (شار فاصله هوایی)
- ویژگیهای هر یک از این روشها، روابط مربوطه و کاربردشان در کتاب Peter Vas, 1990 به تفسیر بیان شده‌اند.

✓ روش کنترل برداری بر مبنای اینکه زاویه روتور چگونه اندازه‌گیری می‌شود به دو دسته کلی زیر نیز تقسیم بندی می‌گردد:

- روش مستقیم: موقعیت روتور با استفاده از سنسورهای اثر هال اندازه‌گیری می‌شود.
- روش غیر مستقیم: موقعیت روتور از برخی پارامترها نظیر سرعت لغزش تخمین زده می‌شود.

✓ همچنین بسته به اینکه اینورتر مورد استفاده از نوع منبع جریان/ ولتاژ باشد و اینکه کنترل شده با ولتاژ باشد و یا کنترل شده با جریان، به انواع مختلف دسته بندی می‌شود. در صنعت اینورتر منبع ولتاژ رایج‌تر است. لذا انواع اینورترهای مورد بحث در این درس عبارتند از:

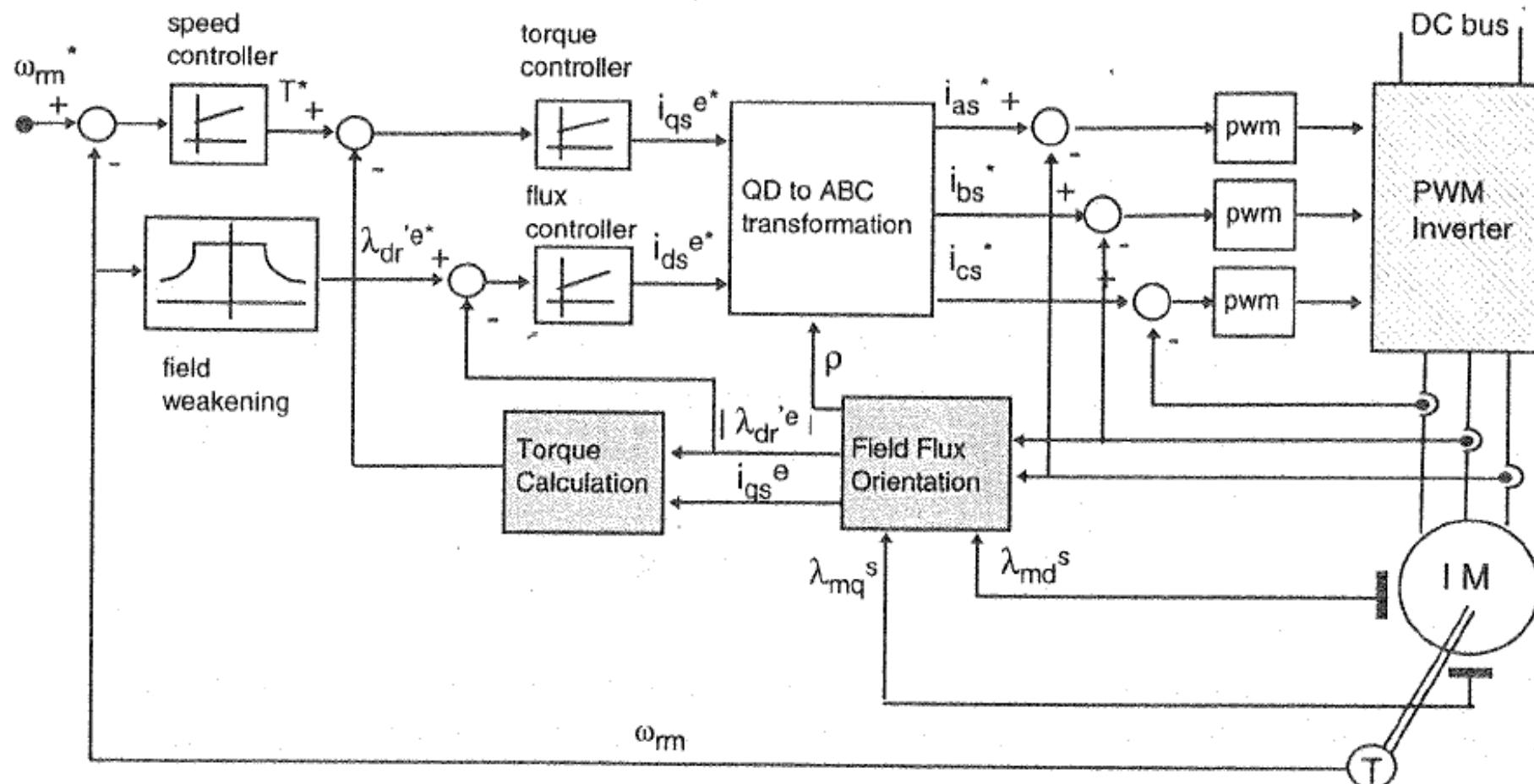
- اینورتر منبع ولتاژ کنترل شده با جریان
- اینورتر منبع ولتاژ کنترل شده با ولتاژ

## □ کنترل برداری موتور القایی



### ➤ روش مستقیم کنترل برداری و با اینورتر VSI کنترل شده با جریان

- ✓ در روش مستقیم کنترل برداری، موقعیت شار روتور با استفاده از حسگرهای شار اثر هال بدست می‌آید.
- ✓ برای جهت دادن به میدان استفاده از کنترل جریان استاتور، از کنترل ولتاژ استاتور سهول تر انجام می‌شود چرا که در روش کنترل ولتاژ استاتور، افت ولتاژ اندوکتانسیهای گذاری استاتور نیز باید در نظر گرفته شوند.



## □ کنترل برداری موتور القایی



### ➤ روش مستقیم کنترل برداری و با اینورتر VSI کنترل شده با جریان

✓ شار اندازه گیری شده، شار فاصله هوائی و یا شار متوجه  $\lambda_m^s$  ( $\lambda_{md}^s, \lambda_{mq}^s$ ) است. اما ما نیاز به شار روتور ( $\lambda_{dr}^e$ ) داشتیم که برای محاسبه آن باید زاویه سیم پیچهای روتور (موقعیت روتور یا زاویه  $\rho$  در شکل قبل) را داشته باشیم.

✓ مقدار  $\rho$  و دامنه شار روتور را با جریانهای اندازه گیری شده استاتور به طریق زیر تعیین می کنیم:

- جریانهای abc اندازه گیری شده استاتور به جریانهای qd0 مختصات ساکن استاتور تبدیل می گردند:

$$i_{qs}^s = \frac{2}{3}i_{as} - \frac{1}{3}i_{bs} - \frac{1}{3}i_{cs} \quad A \quad (9.24)$$

$$i_{ds}^s = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{cs} - i_{bs})$$

- با اضافه کم و نمودن قسمت  $L'_{lr} i_{qs}^s$  به طرف راست معادله شار، محور q در مختصات مرجع ساکن می تواند بصورت

ذیل داده شود:

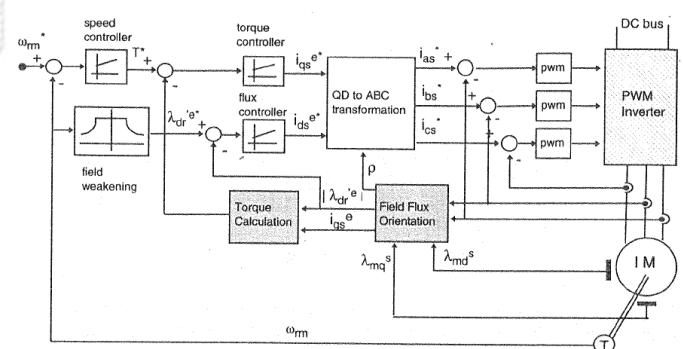
$$\lambda'_{qr} = (L_m + L'_{lr} - L'_{lr})i_{qs}^s + (L_m + L'_{lr})i'_{qr} \quad Wb. turn \quad (9.25)$$

- چون  $L_m(i_{qs}^s + i'_{qr})$  معادل  $\lambda_{mq}^s$  می باشد، می توانیم  $\lambda'_{qr}$  را از کمیتهای اندازه گیری شده بطريق زیر به دست آوریم:

$$\lambda'_{qr} = \frac{L'_r}{L_m} \lambda_{mq}^s - L'_{lr} i_{qs}^s \quad (9.26)$$

- به طریق مشابه  $\lambda'_{dr}$  می تواند از رابطه زیر بدست آید:

$$\lambda'_{dr} = \frac{L'_r}{L_m} \lambda_{md}^s - L'_{lr} i_{ds}^s \quad (9.27)$$



## □ کنترل برداری موتور القایی



### ➤ روش مستقیم کنترل برداری و با اینورتر VSI کنترل شده با جریان

✓ با استفاده از  $\lambda'_{dr}^s$  و  $\lambda'_{qr}^s$  محاسبه شده، سینوس و کسینوس زاویه  $\rho$  (موقعیت شار روتور) مطابق با شکل ذیل و از روابط زیر قابل محاسبه اند:

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - \rho\right) = \cos \rho = \frac{\lambda'_{dr}^s}{|\lambda'_r|^s} \quad (9.28)$$

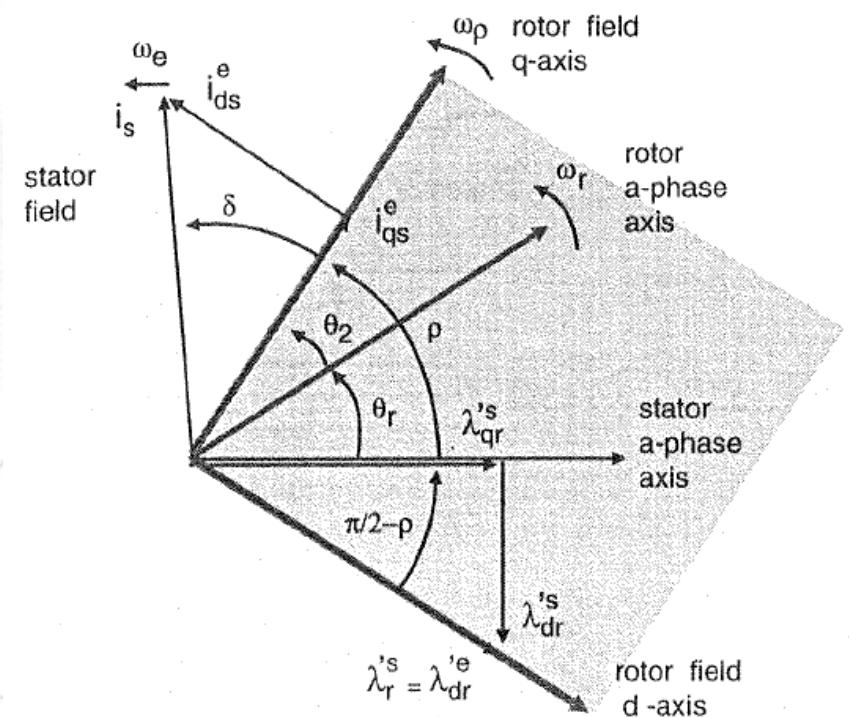
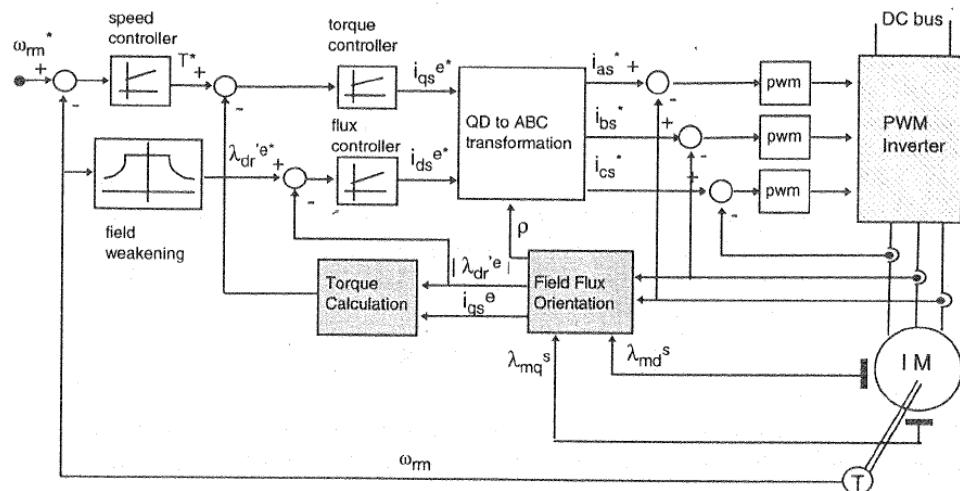
$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \rho\right) = \sin \rho = \frac{\lambda'_{qr}^s}{|\lambda'_r|^s} \quad (9.29)$$

$$|\lambda'_r| = |\lambda'_r|^s = \sqrt{\lambda'^s_{dr} + \lambda'^s_{qr}} \quad (9.29)$$

○ دامنه شار محاسبه شده به عنوان فیدبک به کنترلر شار وارد می گردد.

○ گشتاور مورد نیاز نیز از رابطه (۱۸-۹) و یا رابطه زیر تعیین می گردد:

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L'_r} \lambda'_{dr}^s i_{qs}^e$$



## □ کنترل برداری موتور القایی



### ➤ روش مستقیم کنترل برداری و با اینورتر VSI کنترل شده با جریان

- ✓ خروجی های کنترلرهای شار و گشتاور به ترتیب فرمانهای  $i_{ds}^*$  و  $i_{qs}^*$  در واقع در مختصات مرجع میدان دوار با شار روتور (سنکرون) می باشند.

- ✓ در داخل بلوک QD to ABC تبدیلات زیر (abc) به qds و qde به qds مرجع اینورتر انجام می شود:

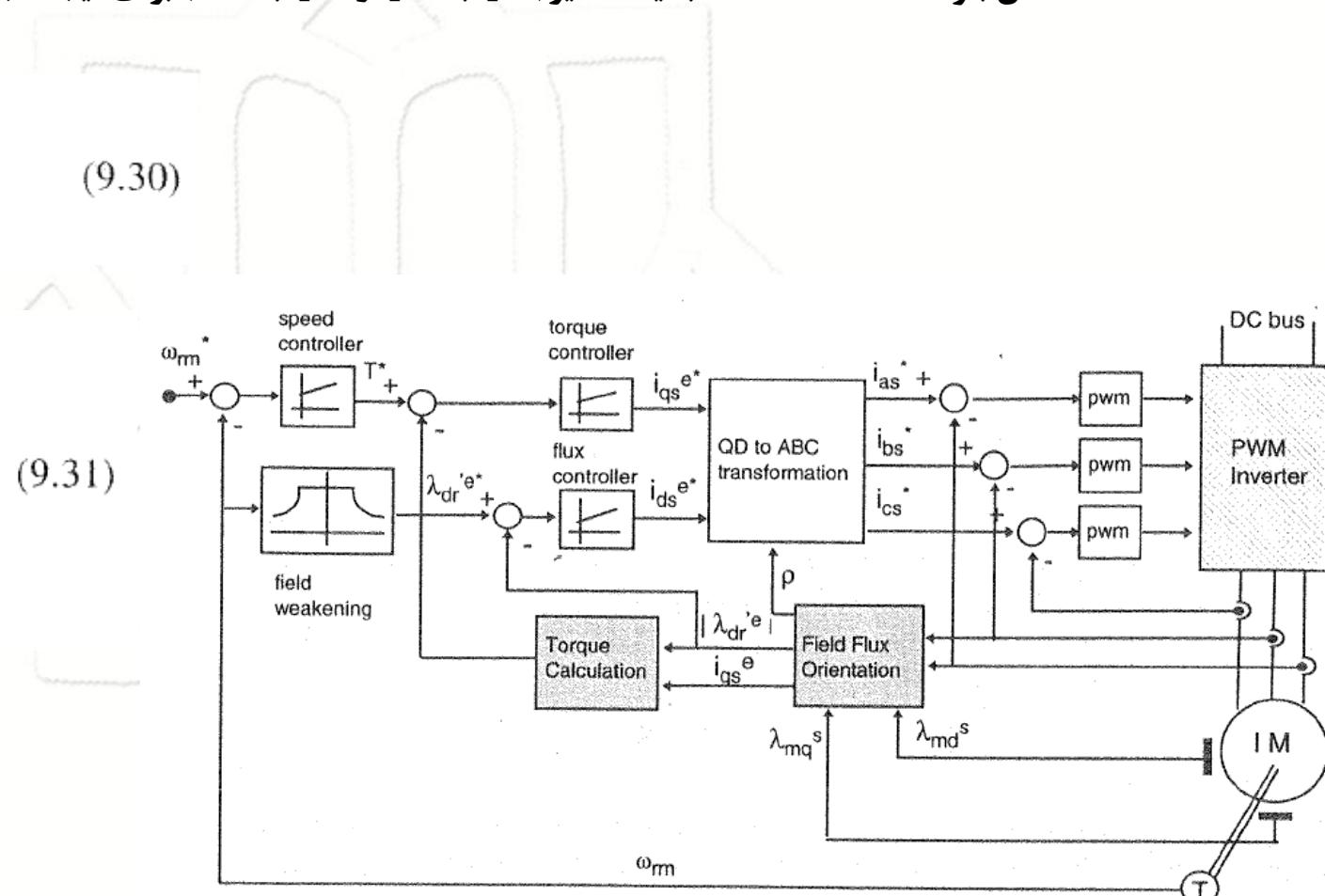
$$i_{qs}^{s*} = i_{qs}^{e*} \cos \rho + i_{ds}^{e*} \sin \rho \quad A \quad (9.30)$$

$$i_{ds}^{s*} = -i_{qs}^{e*} \sin \rho + i_{ds}^{e*} \cos \rho$$

$$i_{as}^{*} = i_{qs}^{s*} \quad A$$

$$i_{bs}^{*} = -\frac{1}{2}i_{qs}^{s*} - \frac{\sqrt{3}}{2}i_{ds}^{s*}$$

$$i_{cs}^{*} = -\frac{1}{2}i_{qs}^{s*} + \frac{\sqrt{3}}{2}i_{ds}^{s*}$$

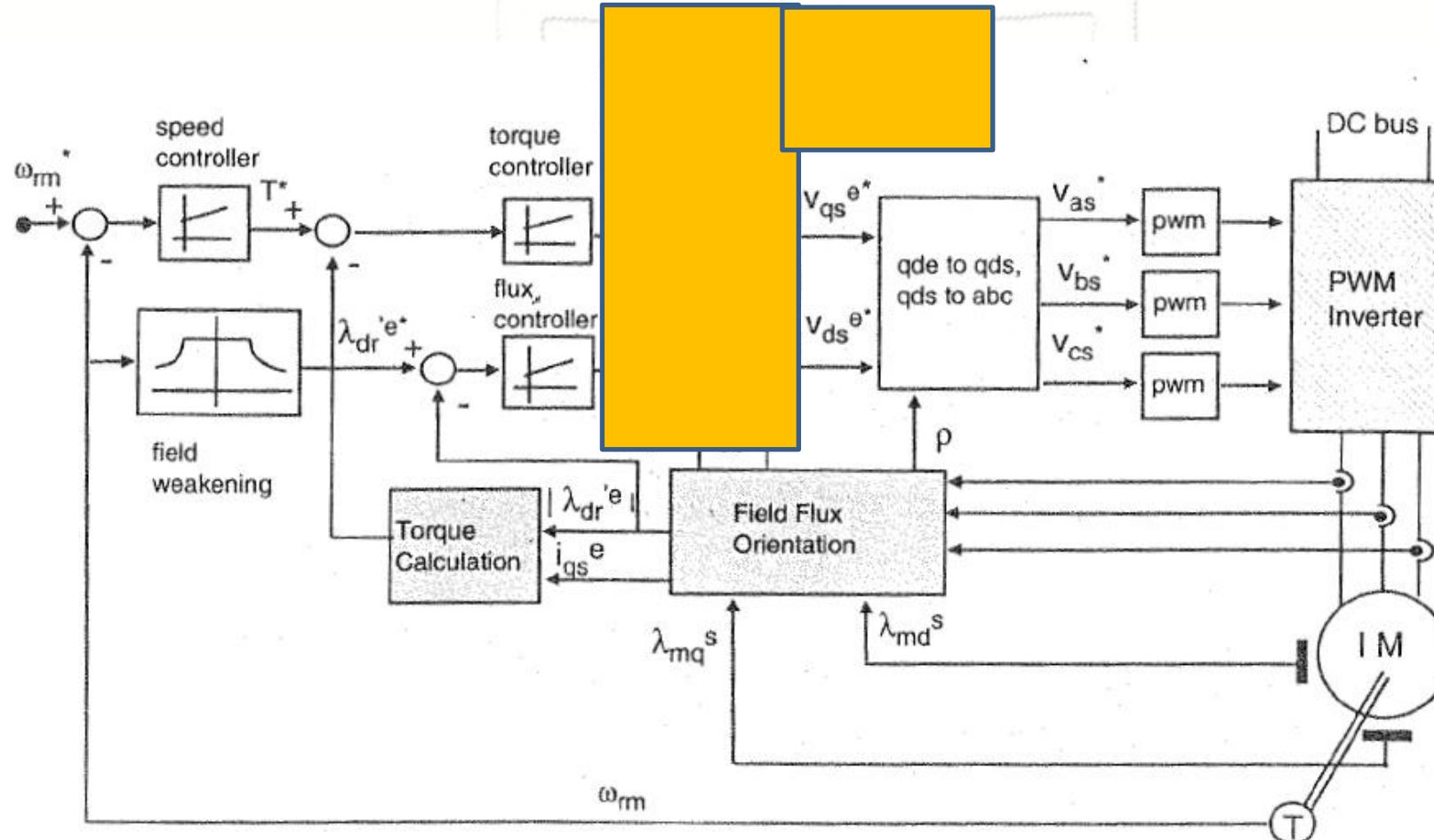


## □ کنترل برداری موتور القایی



### ➤ روش مستقیم کنترل برداری و با اینورتر VSI کنترل شده با ولتاژ

- ✓ جهت دادن جریانهای استاتور می‌تواند با اعمال ولتاژهای مناسب به استاتور قابل دسترس باشد.
- ✓ در این روش، کنترلرهای شار و گشتاور مطابق شکل زیر، مقادیر مرجع ولتاژ را ایجاد می‌نمایند که این مقادیر مرجع ولتاژ به اینورتر منبع ولتاژ اعمال می‌گردند تا جریانهای مناسب استاتور ایجاد گردند و در نتیجه آن گشتاور و شار مقادیر مرجع خود را دنبال نمایند.



## □ کنترل برداری موتور القایی



### ➤ روش مستقیم کنترل برداری و با اینورتر VSI کنترل شده با ولتاژ

- ✓ جهت دادن جریانهای استاتور می‌تواند با اعمال ولتاژهای مناسب به استاتور قابل دسترس باشد.
- ✓ در این روش، کنترلرهای شار و گشتاور مطابق شکل زیر، مقادیر مرجع ولتاژ را ایجاد می‌نمایند که این مقادیر مرجع ولتاژ به اینورتر منبع ولتاژ اعمال می‌گردند تا جریانهای مناسب استاتور ایجاد گردند و در نتیجه آن گشتاور و شار مقادیر مرجع خود را دنبال نمایند.
- ✓ در مدل گذرای ماشین القایی، در مواردی که شار روتور ثابت فرض شود، می‌توان ماشین القایی را با ولتاژهای ثابت پشت اندوکتانس‌های گذرای استاتور بیان نمود.
- ✓ لذا معادلات ولتاژ استاتور در مدل گذرای ماشین القایی بصورت زیر می‌توانند بیان شوند:

$$r_s i_{qs}^e + L'_s \frac{di_{qs}^e}{dt} + E'_{qs} = v_{qs}^e - \omega_e L'_s i_{ds}^e \quad (9.35)$$

$$r_s i_{ds}^e + L'_s \frac{di_{ds}^e}{dt} + E'_{ds} = v_{ds}^e + \omega_e L'_s i_{qs}^e$$

- ✓ در روابط فوق،  $E'_{qs}$  و  $E'_{ds}$  ولتاژهای پشت اندوکتانس گذرا هستند که با فرض ثابت بودن شار روتور دارای مقادیر ثابتی هستند.
- ✓ بقیه عبارات سمت چپ نیز افت ولتاژ مربوط به امپدانسهای گذرای استاتور هستند.
- ✓ فرض می‌شود که دو مقدار سمت چپ معادلات (۹-۳۵) توسط کنترل کننده‌های گشتاور و شار تولید می‌شوند. برای تولید ولتاژ مناسب توسط اینورتر ( $V_{qs}^e$  و  $V_{ds}^e$ )، عبارات مناسب به خروجی‌های کنترلرهای گشتاور ( $Q^*$ ) و شار ( $D^*$ ) باید اضافه شوند.

## □ کنترل برداری موتور القایی



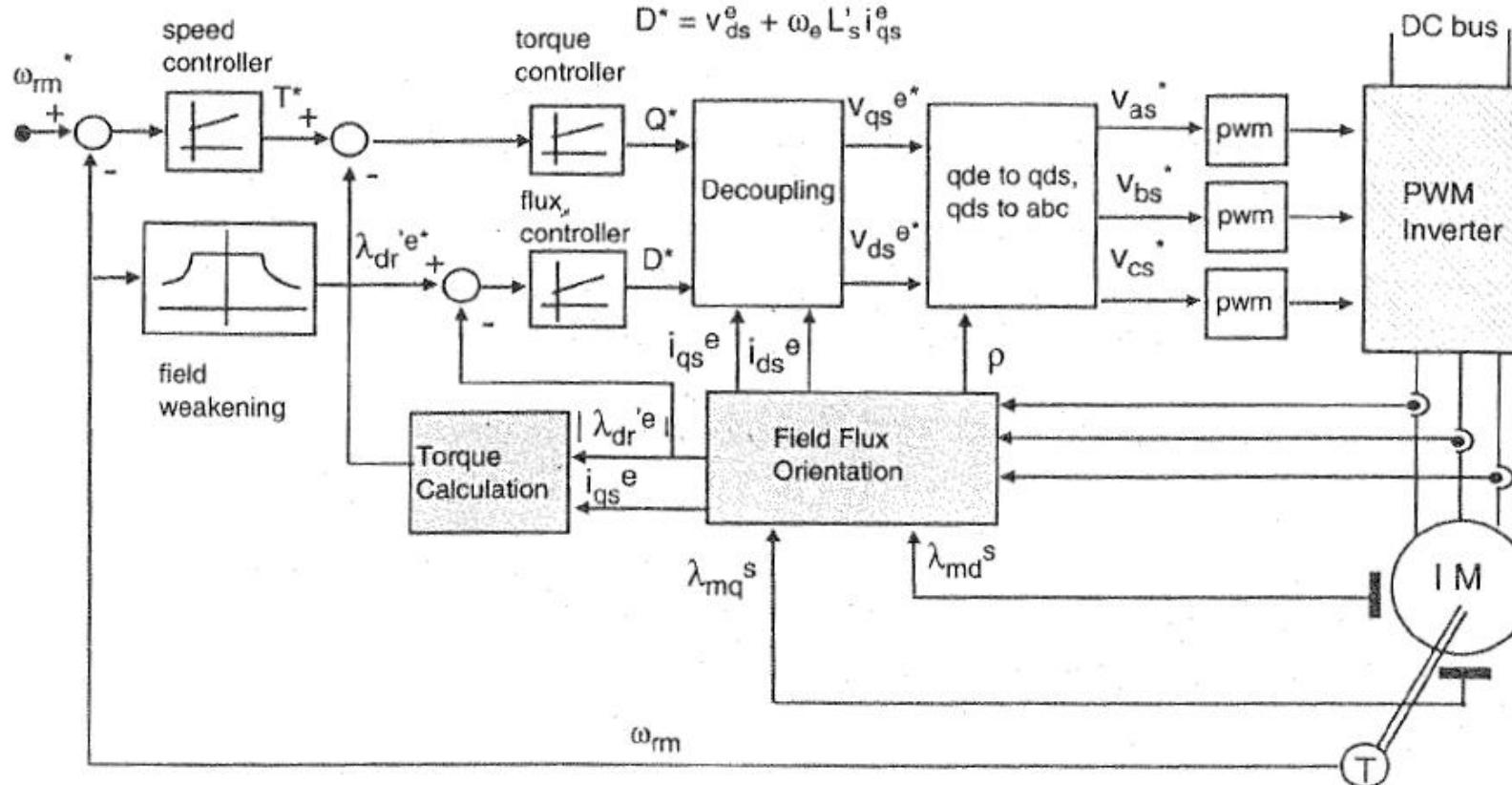
### ➤ روش مستقیم کنترل برداری و با اینورتر VSI کنترل شده با ولتاژ

✓ به عبارت دیگر، مثلا برای آنکه بتوان توسط ولتاژ  $V_{qs}^e$  جریان  $i_{qs}^e$  را مستقل از تغییرات  $i_{ds}^e$  کنترل نمود، معادله اول (۳۵-۹) نباید شامل عبارت  $i_{ds}^e L'_s \omega_e$  باشد. لذا عبارت  $(\omega_e L'_s i_{ds}^e)$  باید به خروجی کنترلر گشتوار یعنی  $Q^*$  اضافه گردد. به این عمل دکوپله سازی معادلات ولتاژ گویند. مشابه همین عمل بر روی معادله محور d انجام می گردد.

$$r_s i_{qs}^e + L'_s \frac{di_{qs}^e}{dt} + E'_{qs} = v_{qs}^e - \omega_e L'_s i_{ds}^e$$

$$Q^* = v_{qs}^e - \omega_e L'_s i_{ds}^e$$

$$D^* = v_{ds}^e + \omega_e L'_s i_{qs}^e$$



## □ کنترل برداری موتور القایی



### ► روش مستقیم کنترل برداری و با اینورتر VSI کنترل شده با ولتاژ

- ✓ پس از تعیین مقادیر مرجع ولتاژ در راستاهای  $d$  و  $q$  دستگاه دوار سنکرون، مقادیر مرجع ولتاژ در مرجع  $qd0$  ساکن استاتور و سپس مقادیر مرجع ولتاژ سه فاز  $abc$  برای اعمال به اینورتر منبع ولتاژ بدست می‌آیند.

$$v_{qs}^{s*} = v_{qs}^e \cos \rho + v_{ds}^e \sin \rho \quad V$$

(9.36)

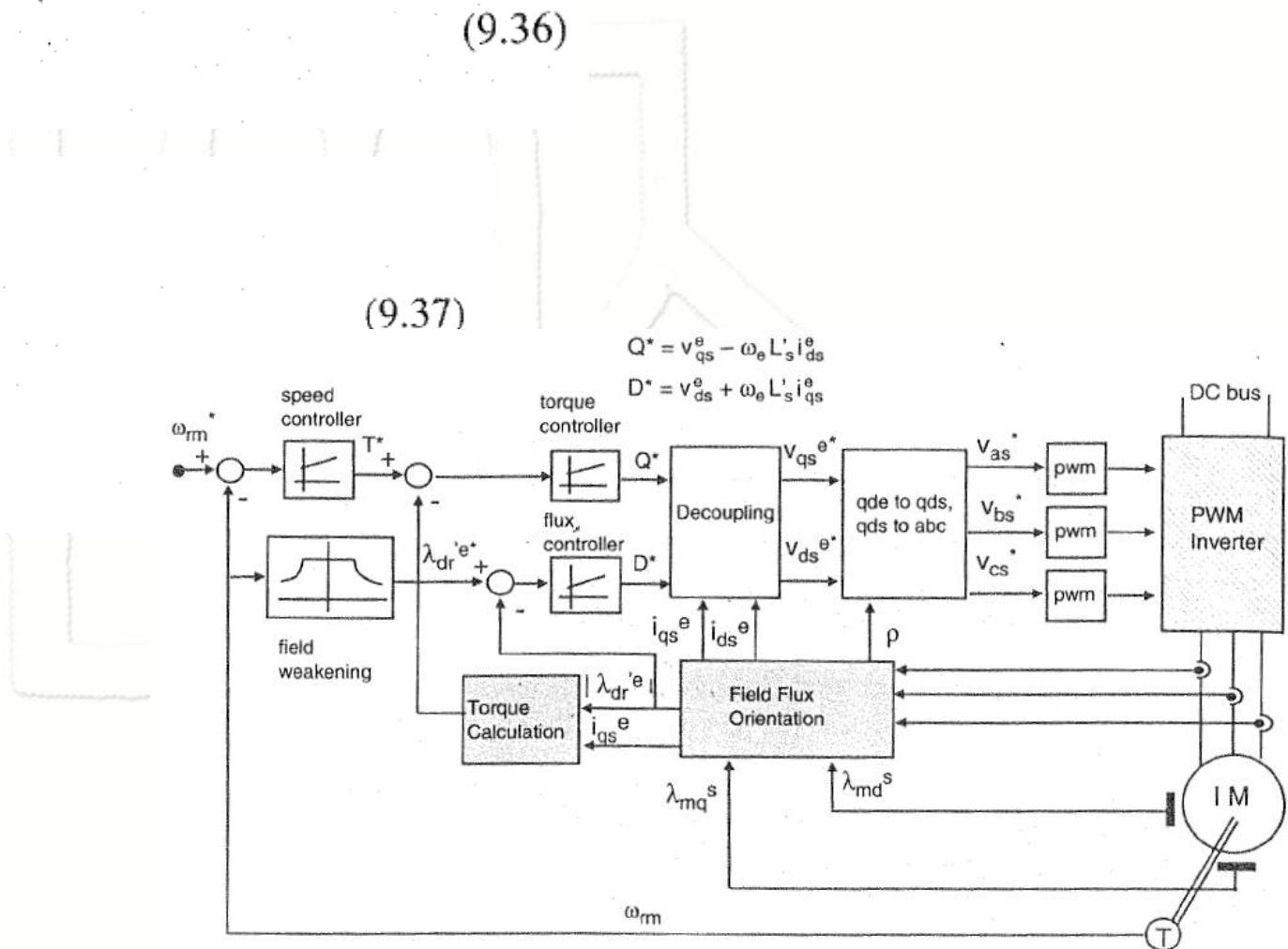
$$v_{ds}^{s*} = -v_{qs}^e \sin \rho + v_{ds}^e \cos \rho$$

$$v_{as}^* = v_{qs}^{s*}$$

$$v_{bs}^* = -\frac{1}{2}v_{qs}^{s*} - \frac{\sqrt{3}}{2}v_{ds}^{s*}$$

$$v_{cs}^* = -\frac{1}{2}v_{qs}^{s*} + \frac{\sqrt{3}}{2}v_{ds}^{s*}$$

(9.37)



## □ کنترل برداری موتور القایی



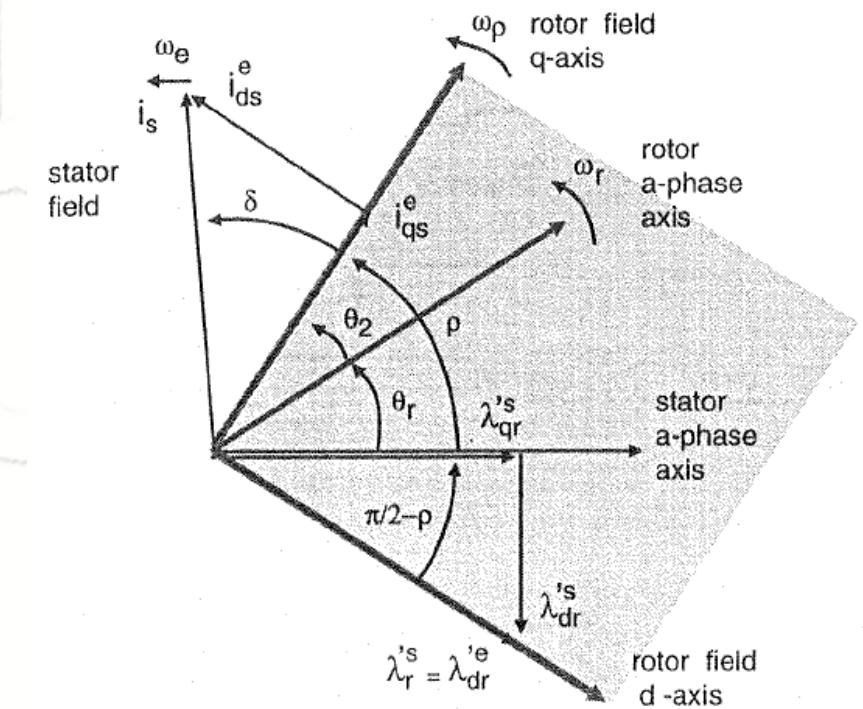
### ► روش غیر مستقیم کنترل برداری

- ✓ در عملکردهای سرعت پائین و همچنین در کنترل موقعیت، استفاده از حسگرهای اثر هال به دلیل وجود خطاهای مختلف، نتایج مطلوبی بهمراه ندارد. گزینه رایج در این حالت روش غیرمستقیم کنترل برداری است که از اندازه گیری مستقیم شار فاصله هوایی استفاده نمی کند.
- ✓ در روش غیر مستقیم، زاویه شار روتور  $\rho$  مورد نیاز در تبدیلات  $qd$  با توجه به شکل زیر از جمع دو زاویه موقعیت روتور ( $\theta_r$ ) و موقعیت متناظر با سرعت لغزش (زاویه  $\theta_2$ ) بدست می آید.
- ✓ سرعت لغزش نیز قبلاً به صورت زیر بدست آورده شد:

$$\omega_2^* = \omega_e - \omega_r = \frac{r'_r}{L'_r} \frac{i_{qs}^{e*}}{i_{ds}^{e*}} \quad \text{elect. rad/s} \quad (9.40)$$

✓ در نتیجه با توجه به آنکه زاویه  $\rho = \theta_2 + \theta_r$  است، سینوس و کسینوس زاویه  $\rho$  برابر خواهند بود با:

$$\begin{aligned} \cos \rho &= \cos(\theta_r + \theta_2) = \cos \theta_r \cos \theta_2 - \sin \theta_r \sin \theta_2 \\ \sin \rho &= \sin(\theta_r + \theta_2) = \sin \theta_r \cos \theta_2 + \cos \theta_r \sin \theta_2 \end{aligned} \quad (9.41)$$

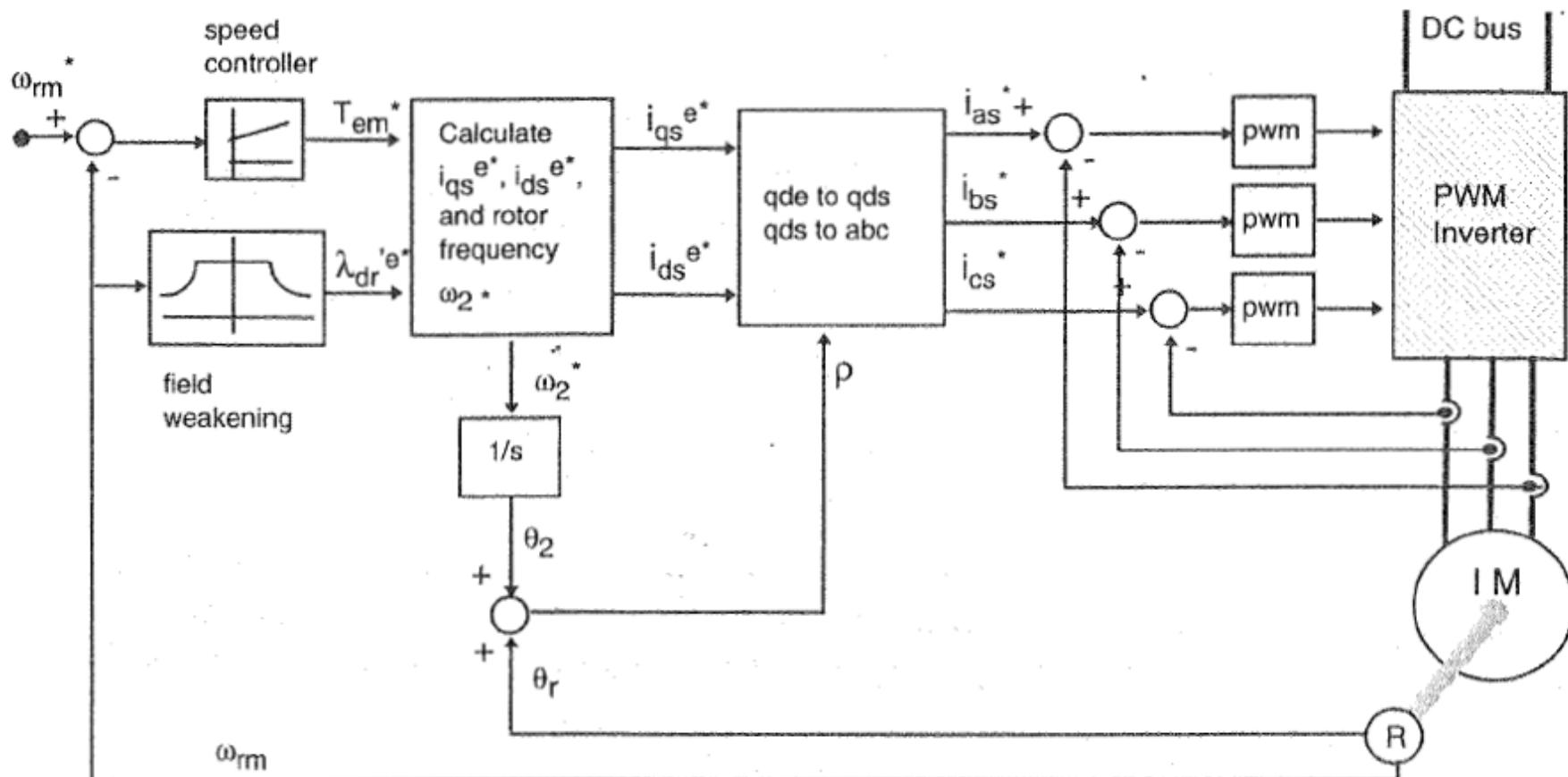


## □ کنترل برداری موتور القایی



### ➤ روش غیرمستقیم کنترل برداری با اینورتر VSI کنترل شده با جریان

- ✓ در شکل زیر، کنترلر سرعت مقدار مرجع گشتاور را می سازد. با استفاده از روابط محاسبه سرعت لغزش و گشتاور (روابط ۲۲-۹ و ۱۸-۹)، مقادیر مرجع جریانهای محورهای  $q$  و  $d$  استاتور ساخته می شوند.
- ✓ سپس با استفاده از زاویه  $\rho$  محاسبه شده، مقادیر مرجع جریانهای سه فاز استاتور تولید و به اینورتر منبع ولتاژ PWM اعمال می گردد.

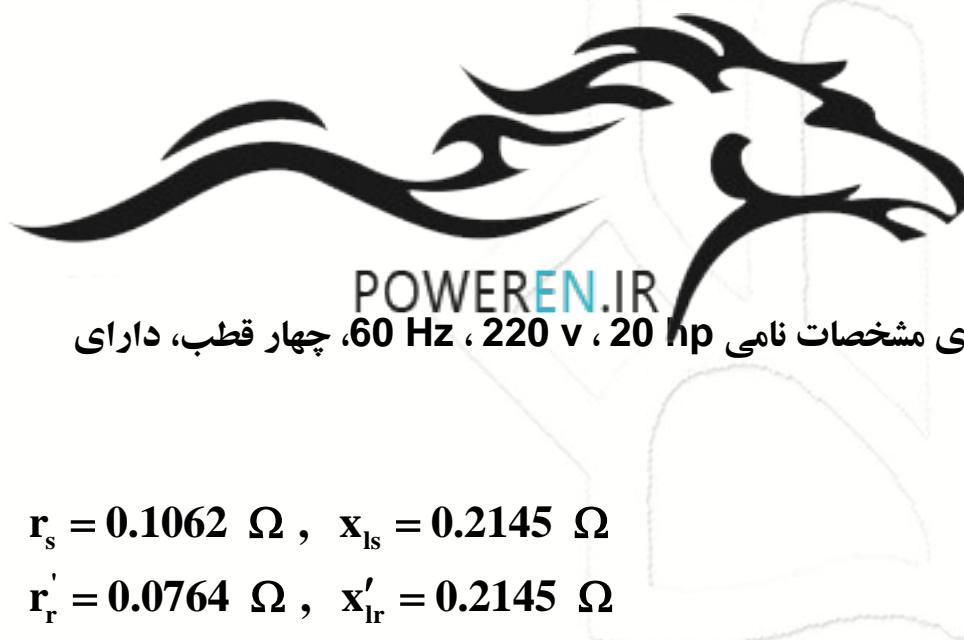




## ► شبیه سازی روش‌های کنترل اسکالار و برداری

در این بخش، روش‌های کنترل اسکالار و کنترل برداری ارائه شده بوسیله مدل دینامیکی بدست آورده شده برای موتور القایی، در محیط سیمولینک شبیه سازی می‌گردند. شبیه سازیهای ارائه شده عبارتند از:

- کنترل حلقه باز موتور و راه اندازی با ولتاژ نامی
- کنترل حلقه بسته موتور به روش کنترل اسکالار و اینورتر ایده آل
- کنترل برداری غیرمستقیم و اینورتر ایده آل



مشخصات موتور شبیه سازی شده:

- موتور القایی بکار رفته از نوع قفس سنجابی، دارای مشخصات نامی  $220\text{ V}$ ،  $20\text{ hp}$ ،  $60\text{ Hz}$ ، چهار قطب، دارای پارامترهای ذیل می‌باشد:

$$r_s = 0.1062 \Omega, x_{ls} = 0.2145 \Omega$$

$$r'_r = 0.0764 \Omega, x'_{lr} = 0.2145 \Omega$$

$$x_m = 5.834 \Omega, J_{rotor} = 2.5 \text{ Kgm}^2$$

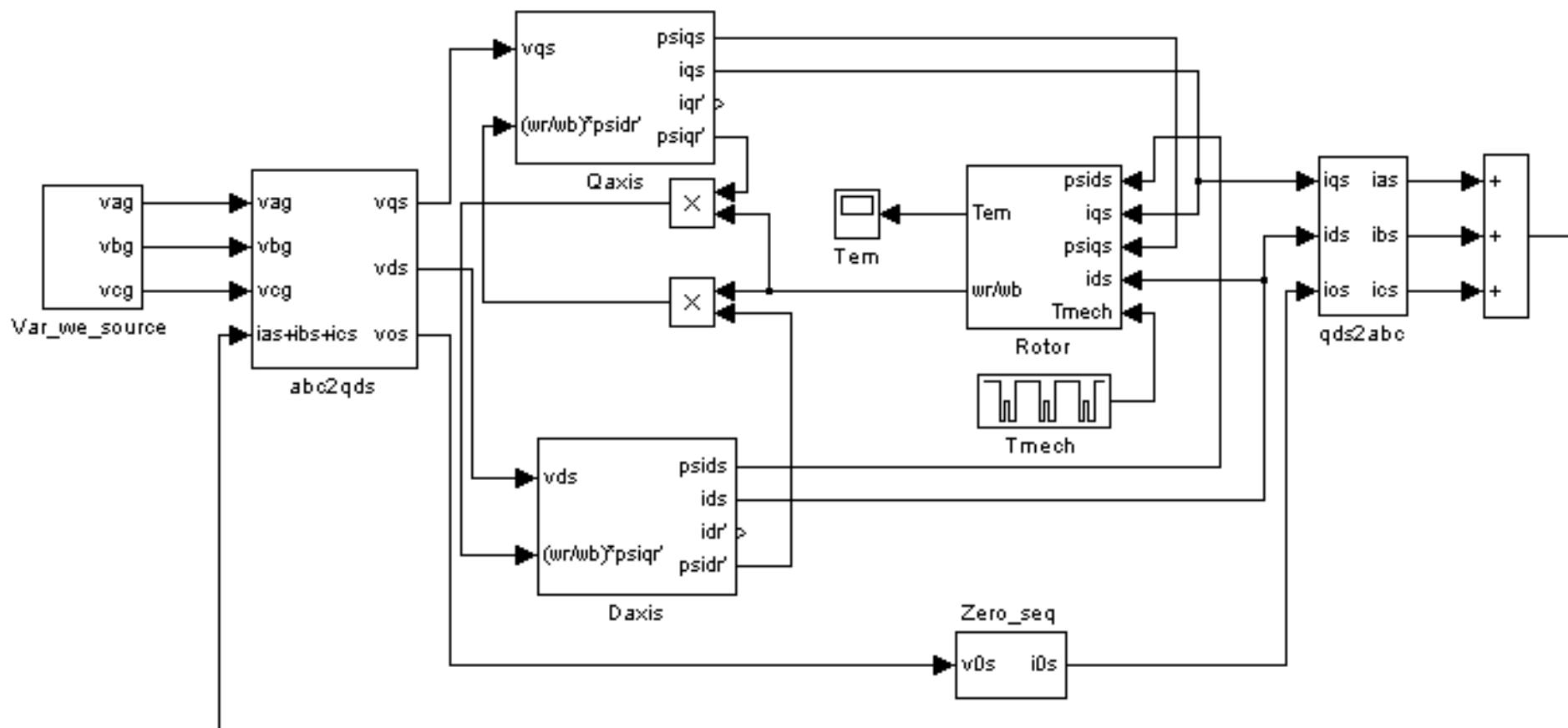
- جریان نامی استاتور:  $49.68\text{ A}$
- سرعت نامی:  $1748.3\text{ rpm}$
- لغزش نامی:  $0.0278$
- گشتاور نامی:  $81.49\text{ N.m}$
- لغزش نقطه شکست:  $0.1758$

## □ کنترل برداری موتور القایی



### ➢ کنترل حلقه باز و راه اندازی با ولتاژ و فرکانس نامی

- ✓ در ابتدا موتور بصورت حلقه باز و با ولتاژ و فرکانس ثابت راه اندازی می شود.
- ✓ علت انجام این شبیه سازی، مقایسه رفتار موتور در حالت حلقه باز با حلقه بسته است.

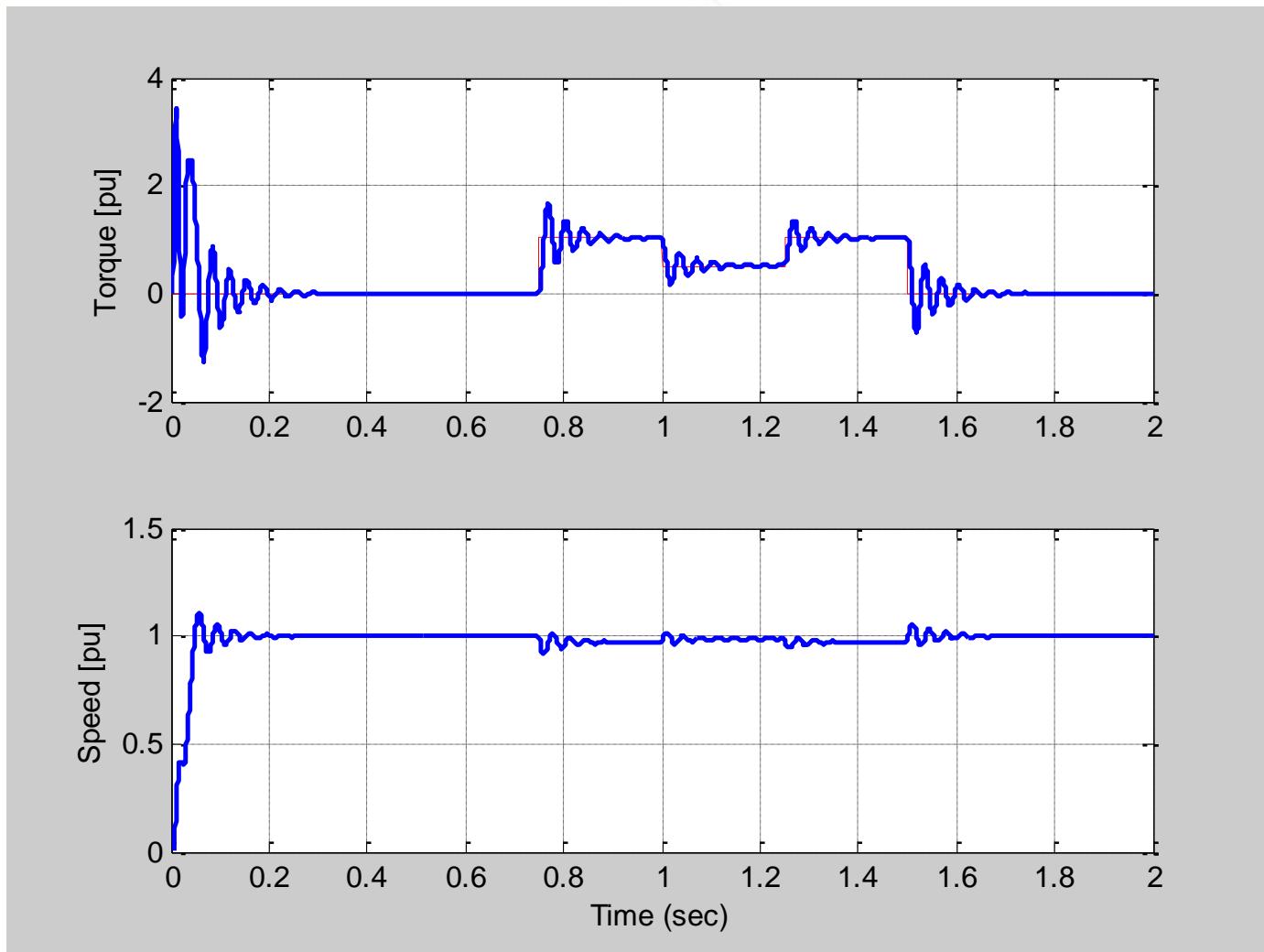


## □ کنترل برداری موتور القایی



### ➢ کنترل حلقه باز و راه اندازی با ولتاژ و فرکانس نامی

- ✓ گشتاور راه اندازی حدوداً  $\frac{3}{5}$  برابر گشتاور نامی است.
- ✓ با بارگذاری روی موتور، سرعت افت پیدا می کند.

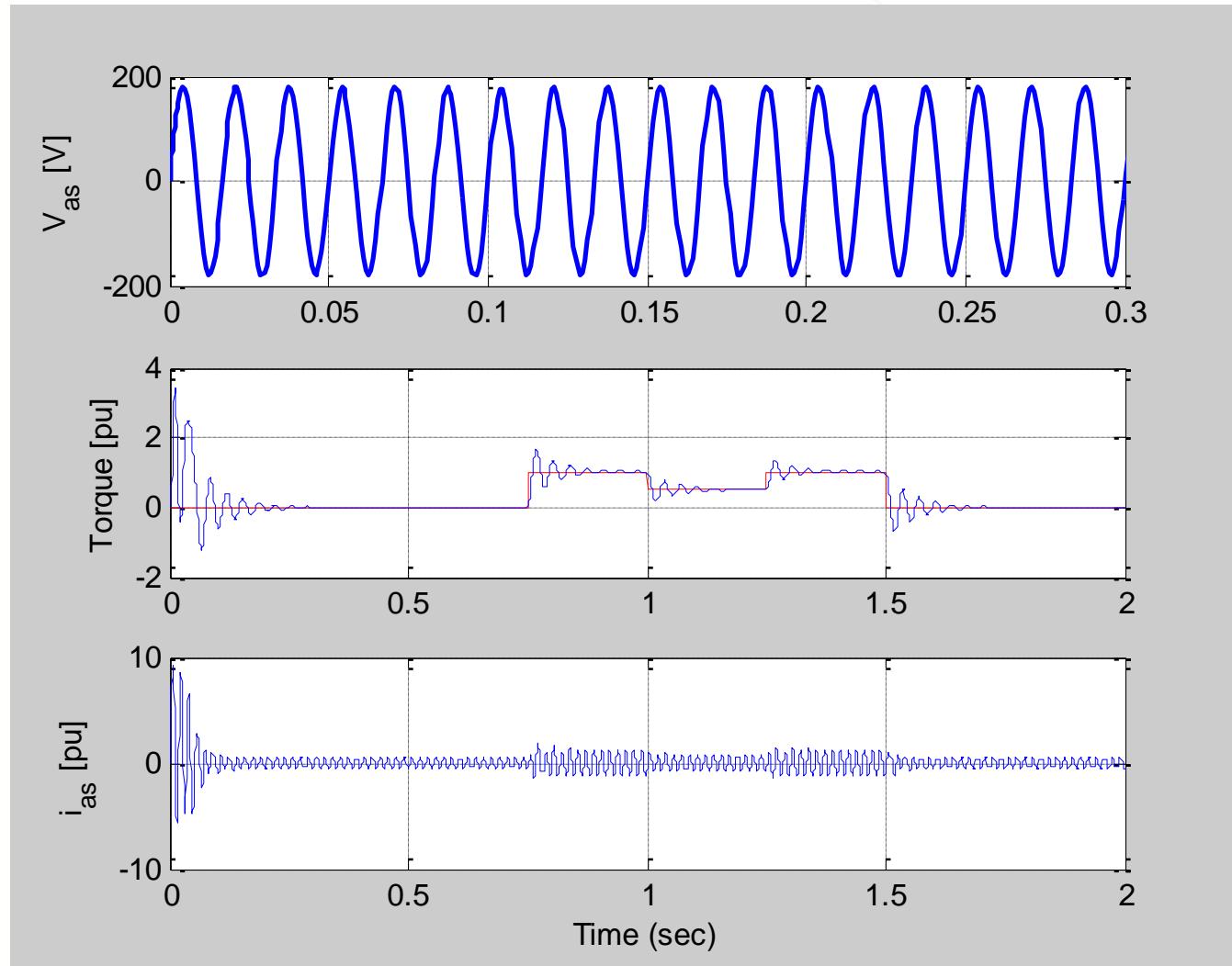


## □ کنترل برداری موتور القایی



### ► کنترل حلقه باز و راه اندازی با ولتاژ و فرکانس نامی

- ✓ جریان راه اندازی با اعمال ولتاژ ثابت حدود ۱۰ برابر جریان نامی است در حالیکه گشتاور راه اندازی حدوداً  $\frac{3}{5}$  برابر گشتاور نامی است.



## □ کنترل برداری موتور القایی



### ► کنترل حلقه بسته به روش اسکالر و اینورتر ایده آل

✓ در این بخش موتور به روش اسکالار ( $V/f$  ثابت) و بصورت حلقه بسته کنترل می شود. ولتاژ و فرکانس با توجه به منحنی  $V$  شکل زیر تغییر می کنند.

✓ در این روش بجای کنترل (حلقه) جریان، لغزش کنترل شده است. عبارتی خروجی کنترلر سرعت، مقدار رفرنس لغزش است.

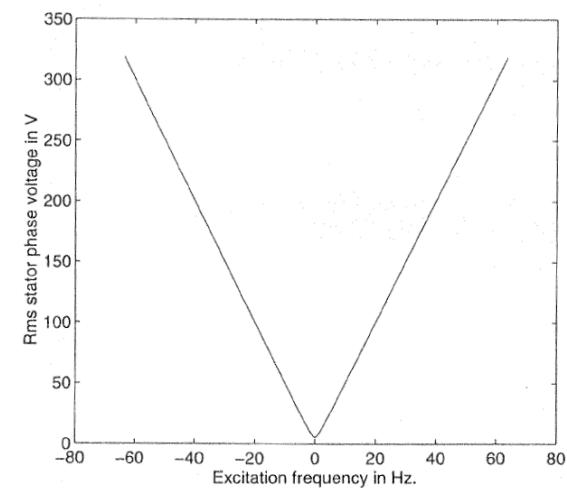
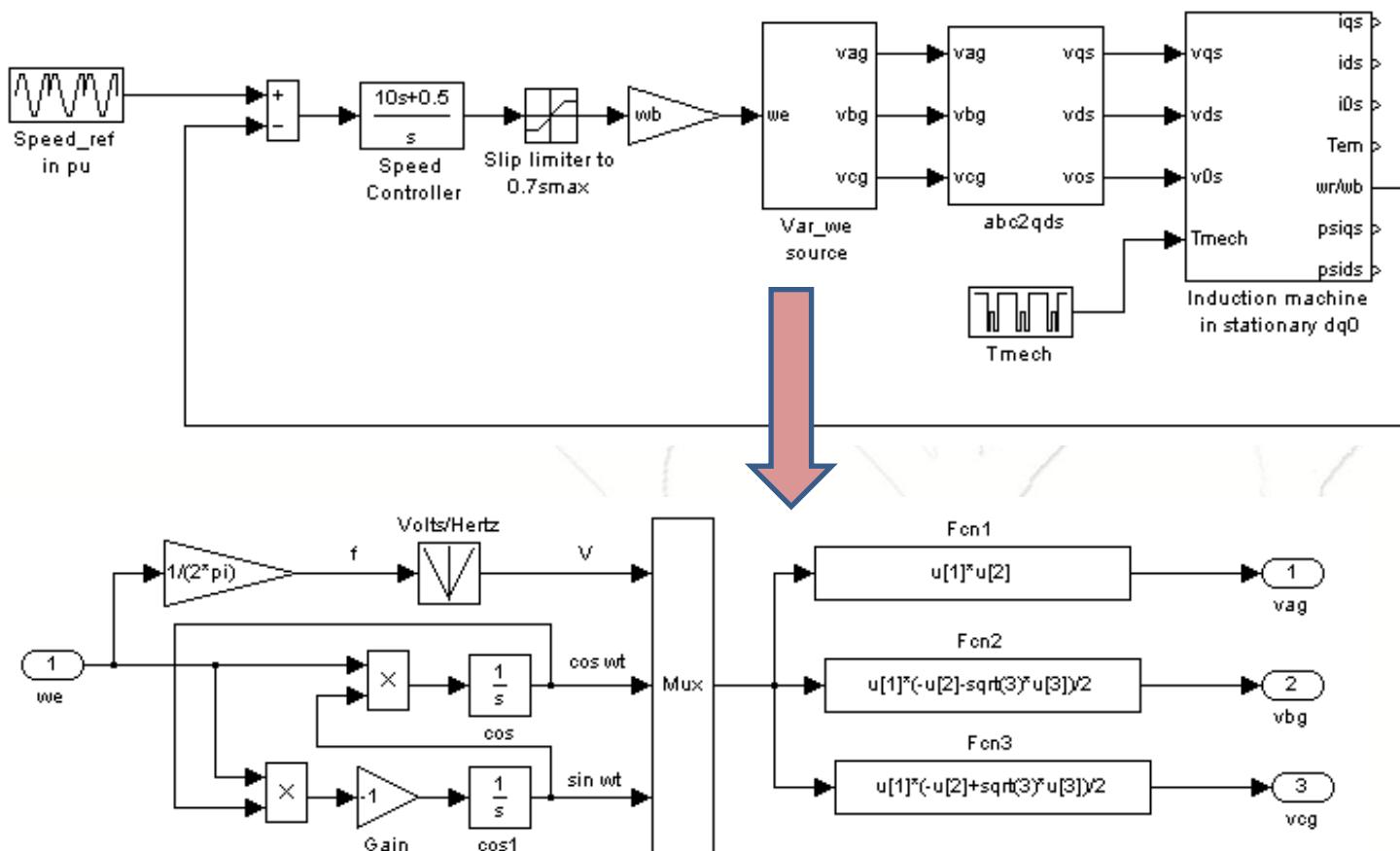


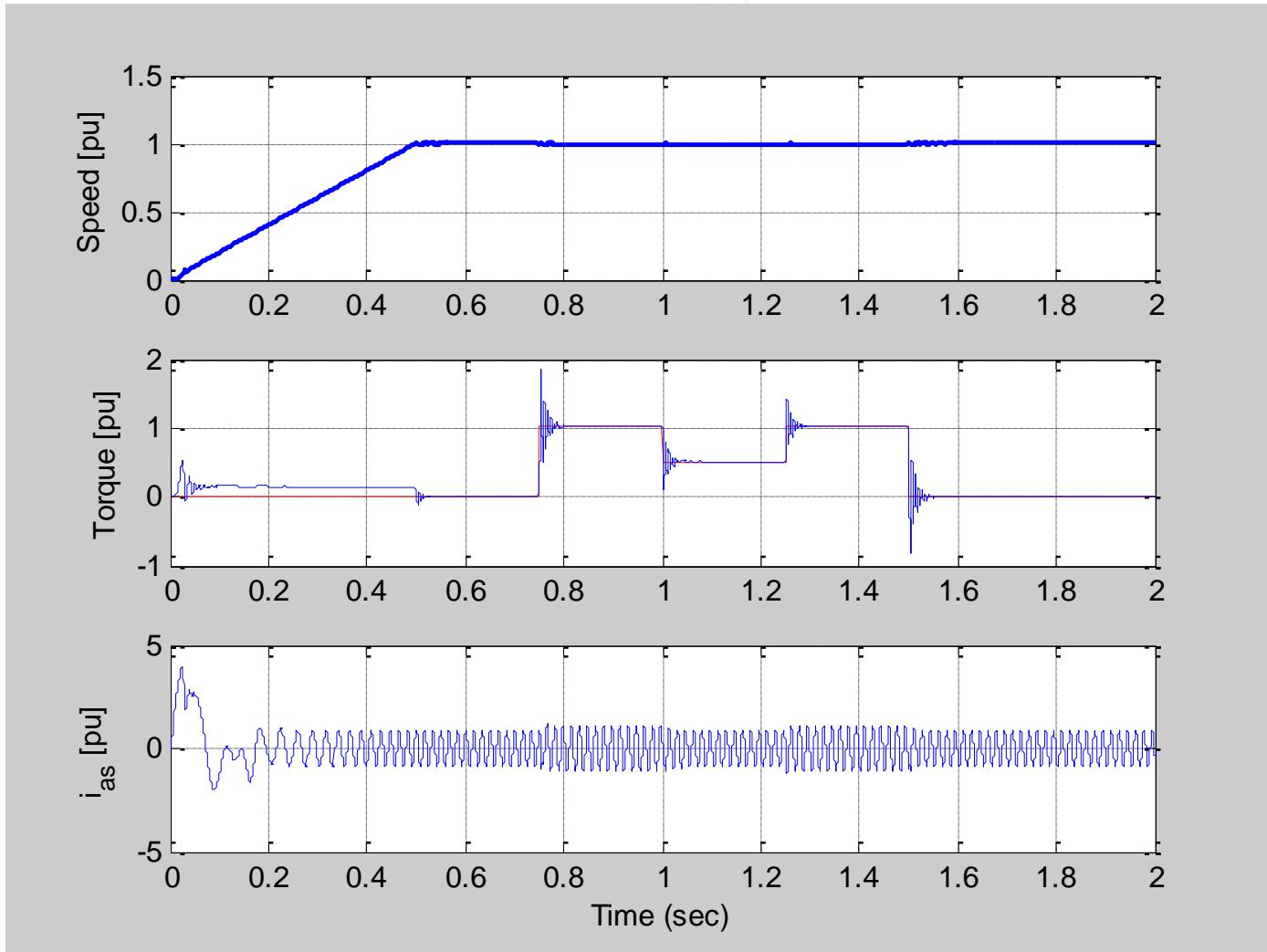
Figure 9.24 Volts per hertz curve.

## □ کنترل برداری موتور القایی



➤ کنترل حلقه بسته به روش اسکالر و اینورتر ایده آل

✓ ابتدا راه اندازی موتور شبیه سازی می گردد.



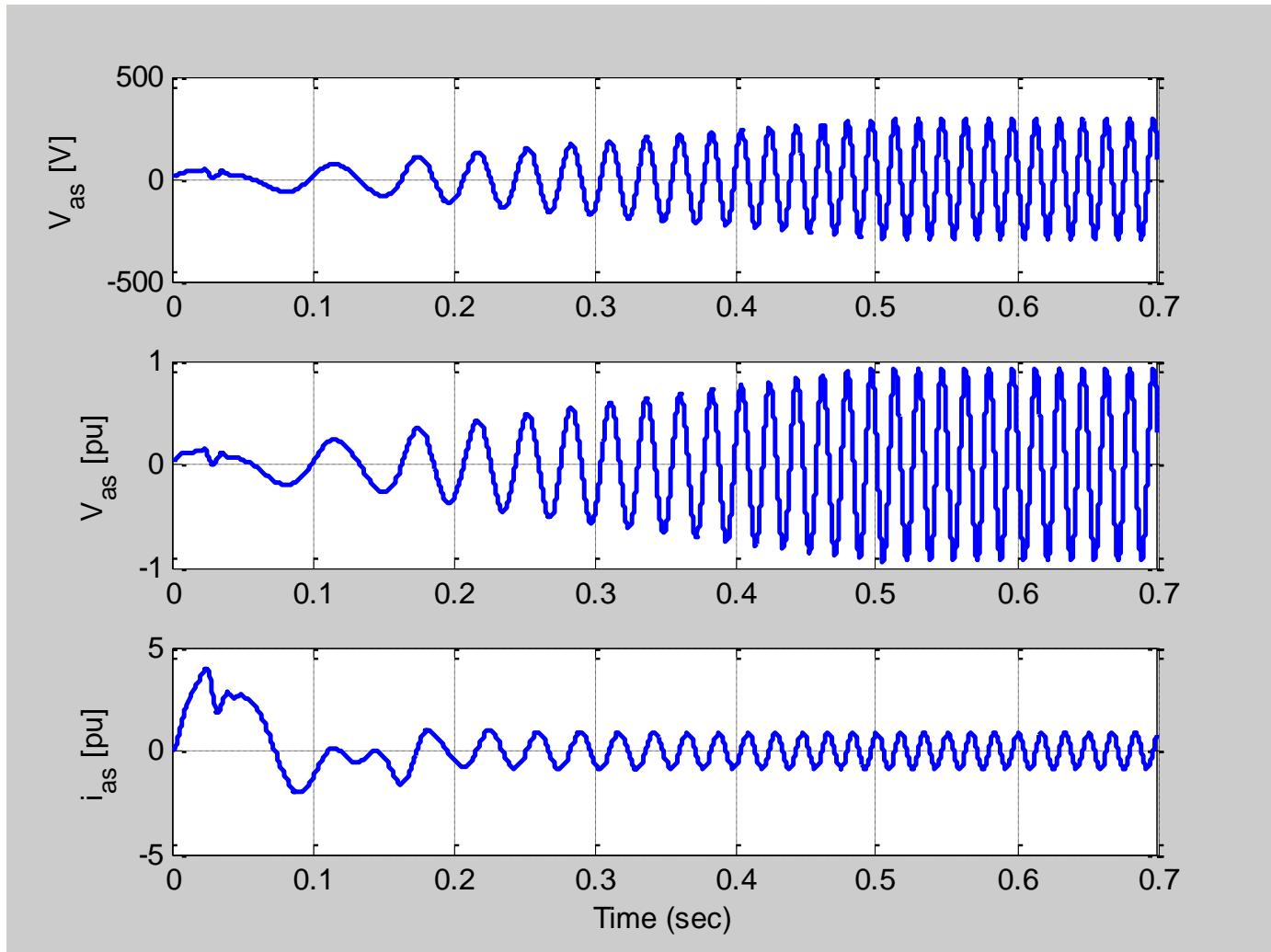
تغییرات سرعت، گشتاور و جریان فاز در طی راه اندازی

## □ کنترل برداری موتور القایی



### ➤ کنترل حلقه بسته به روش اسکالر و اینورتر ایده آل

✓ مشاهده می گردد که ولتاژ به تدریج زیاد می شود و در نتیجه جریان راه اندازی محدود می گردد.



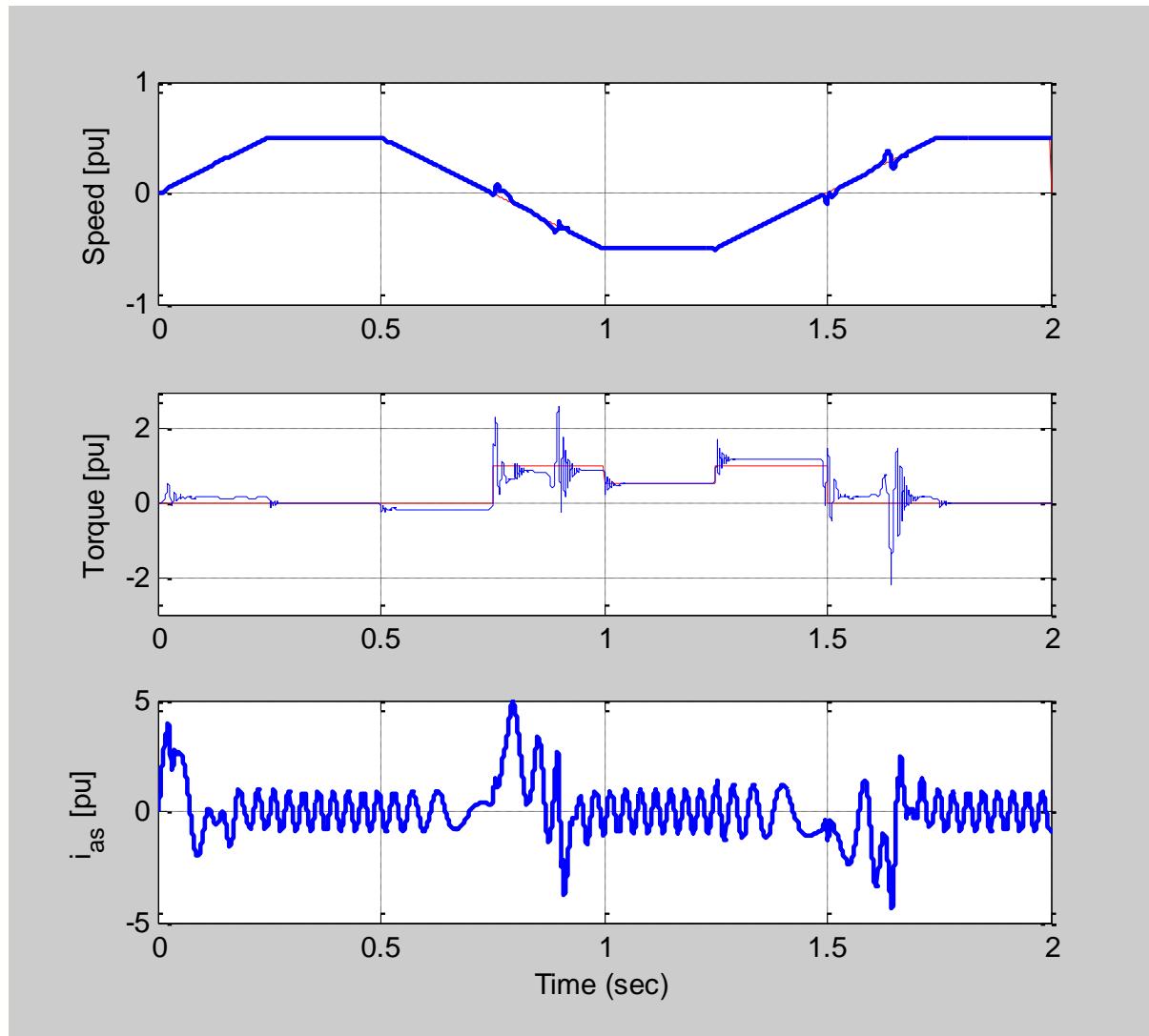
تغییرات ولتاژ و جریان فاز در طی راه اندازی

## □ کنترل برداری موتور القایی



### ➤ کنترل حلقه بسته به روش اسکالر و اینورتر ایده آل

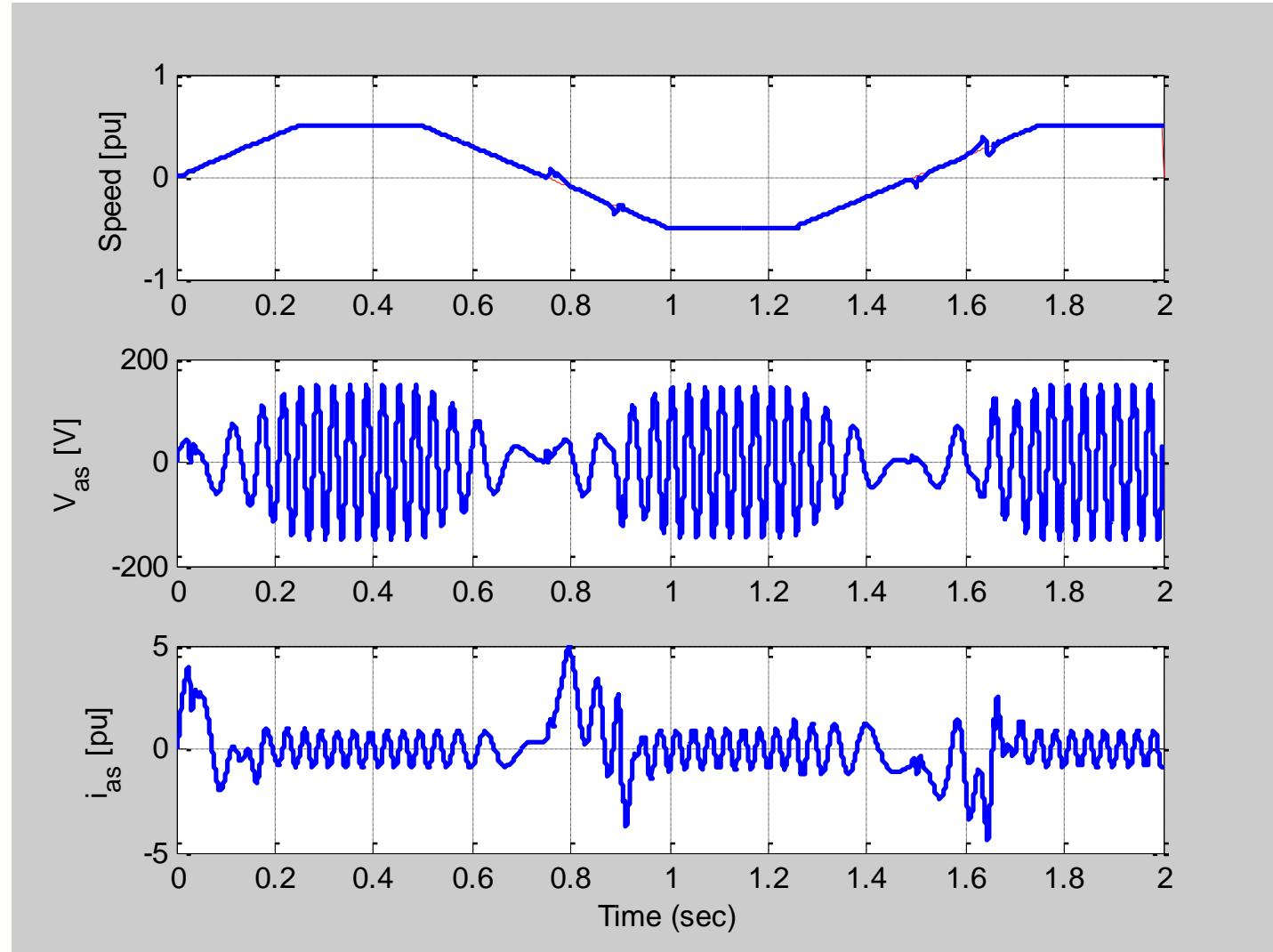
✓ رفتار موتور به تغییرات مرجع سرعت نیز شبیه سازی شده است.



تغییرات سرعت، گشتاور و جریان فاز در پاسخ به تغییرات مرجع سرعت

## □ کنترل برداری موتور القایی

➤ کنترل حلقه بسته به روش اسکالر و اینورتر ایده آل



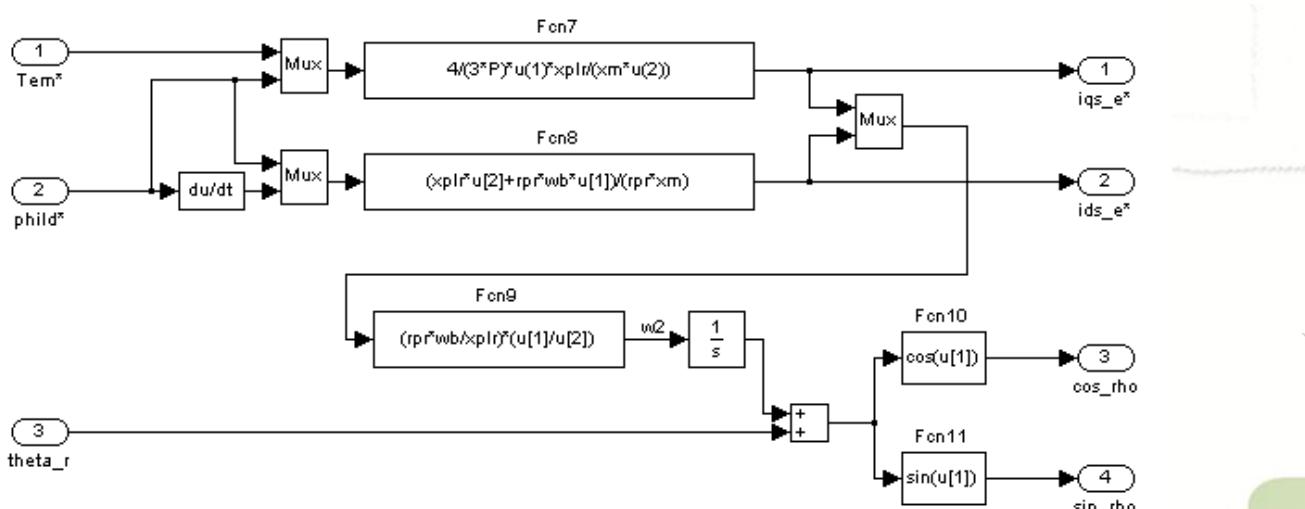
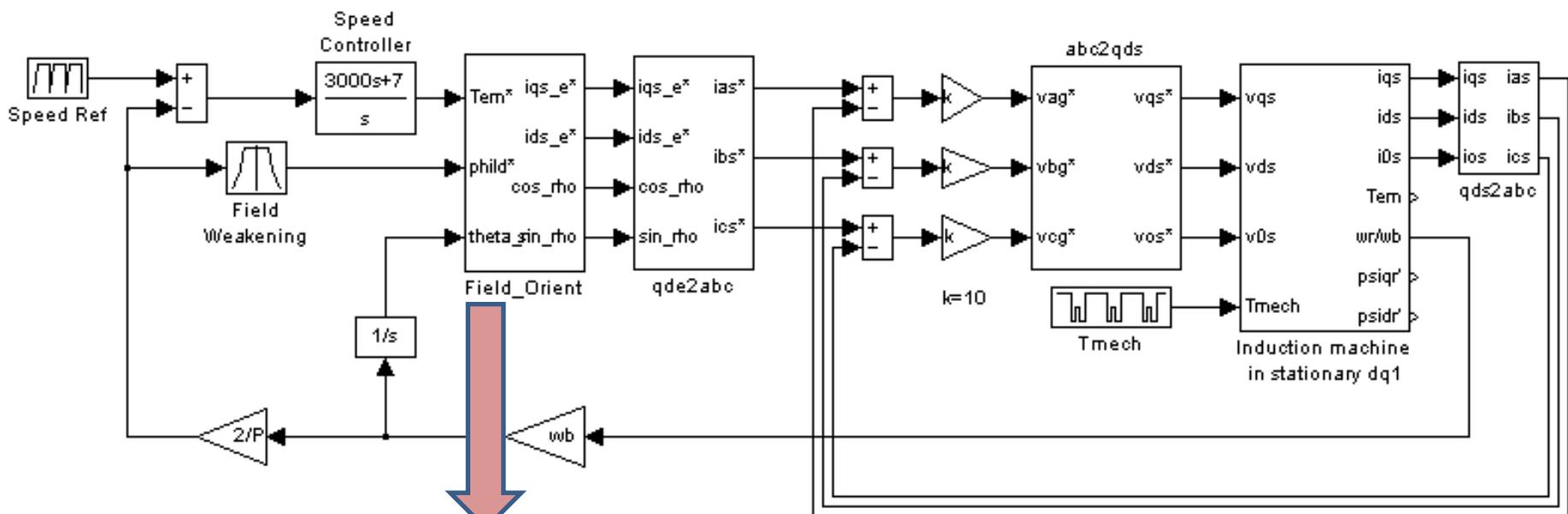
تغییرات سرعت، ولتاژ و جریان فاز در پاسخ به تغییرات مرجع سرعت

# □ کنترل برداری موتور القایی



## ➤ کنترل برداری غیرمستقیم

- ✓ در بلوک Field\_Orient شکل زیر، مقادیر مرجع مولفه های  $d$  و  $q$  جریان استاتور ساخته می شوند.
- ✓ همچنین بردارهای واحد  $\cos$  و  $\sin$  مورد نیاز در تبدیلات با استفاده از لغزش محاسبه شده، تعیین می گردند.

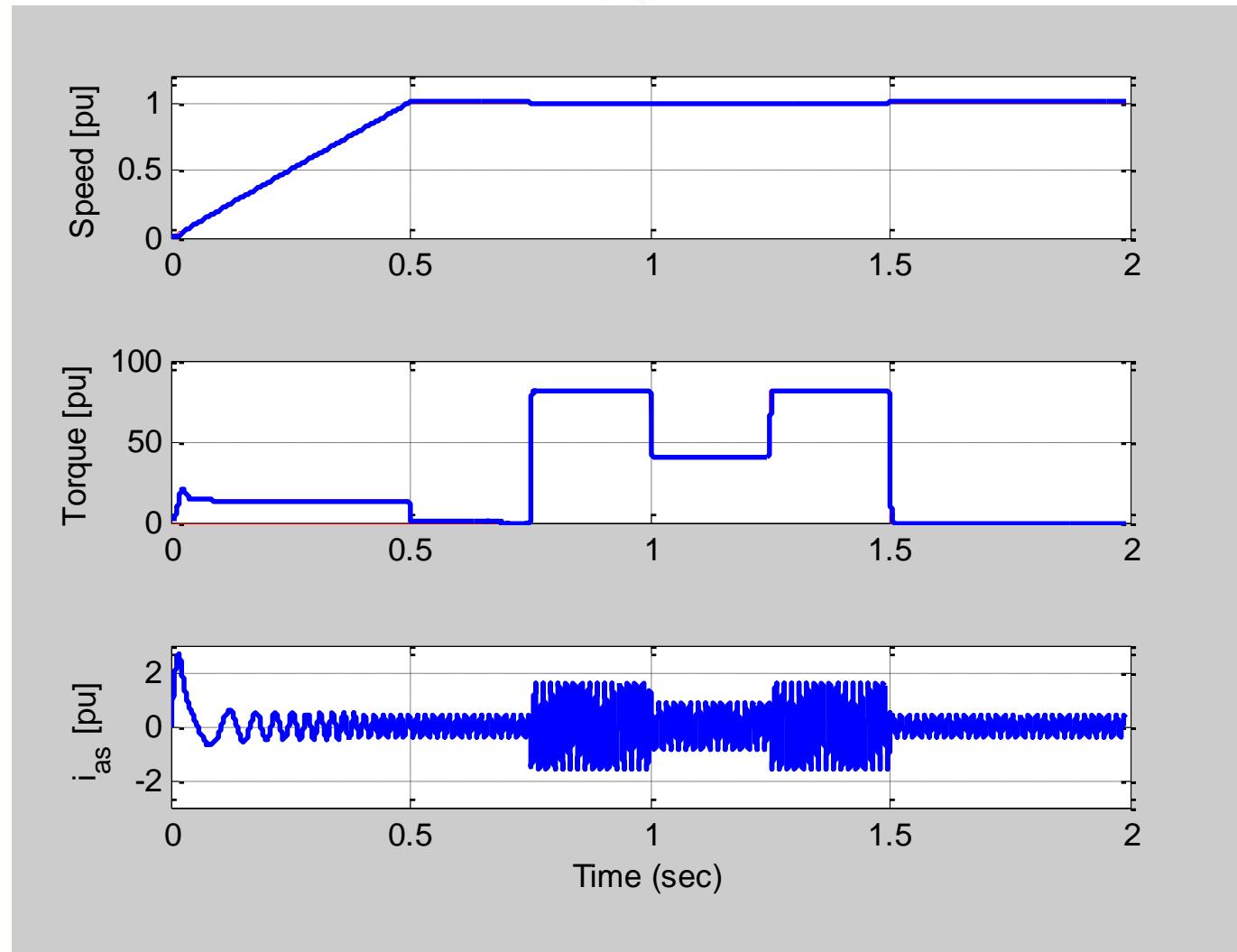


## □ کنترل برداری غیرمستقیم



### ► شبیه سازی حالت راه اندازی: تغییرات سرعت و گشتاور

- ✓ ابتدا حالت راه اندازی موتور شبیه سازی گشته و تغییرات متغیرها رسم می گردند.



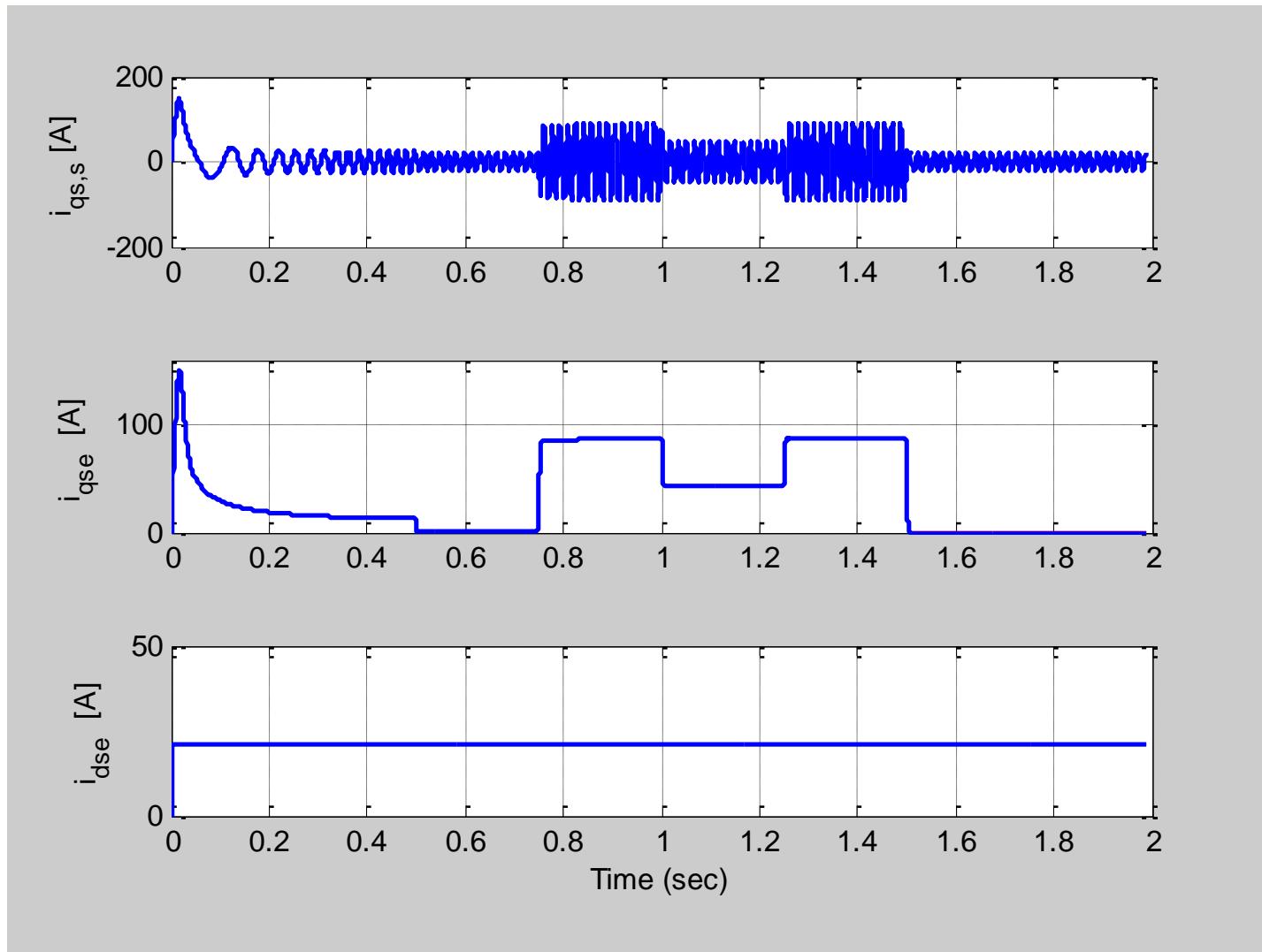
تغییرات سرعت، گشتاور و جریان فاز در طی راه اندازی

## □ کنترل برداری غیرمستقیم



### ► شبیه سازی حالت راه اندازی: تغییرات جریان استاتور

- ✓ شکل زیر نشان می دهد که مقادیر مولفه های جریان  $q$  و  $d$  در دستگاه گردان سنکرون سینوسی نبوده و ثابت شده اند.



تغییرات مولفه های  $d$  و  $q$  جریان استاتور در دستگاه مرجع ساکن استاتور و گردان سنکرون

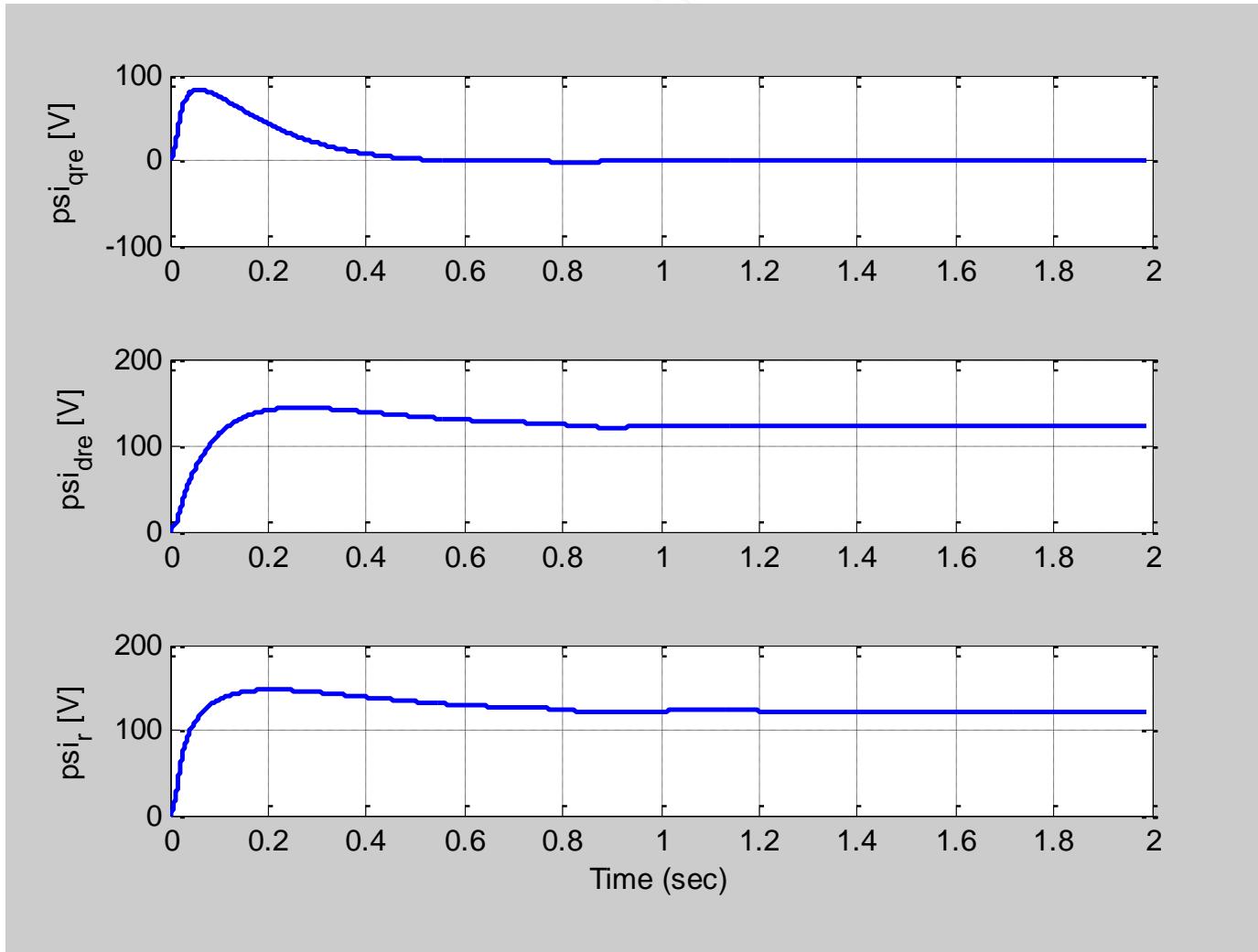


## □ کنترل برداری غیرمستقیم



### ► شبیه سازی حالت راه اندازی: تغییرات شار-دور روتور

- ✓ مشاهده می شود که شار (یا شار-دور) در راستای محور  $d$  جهت دهی می شود و مولفه  $q$  آن صفر می گردد.



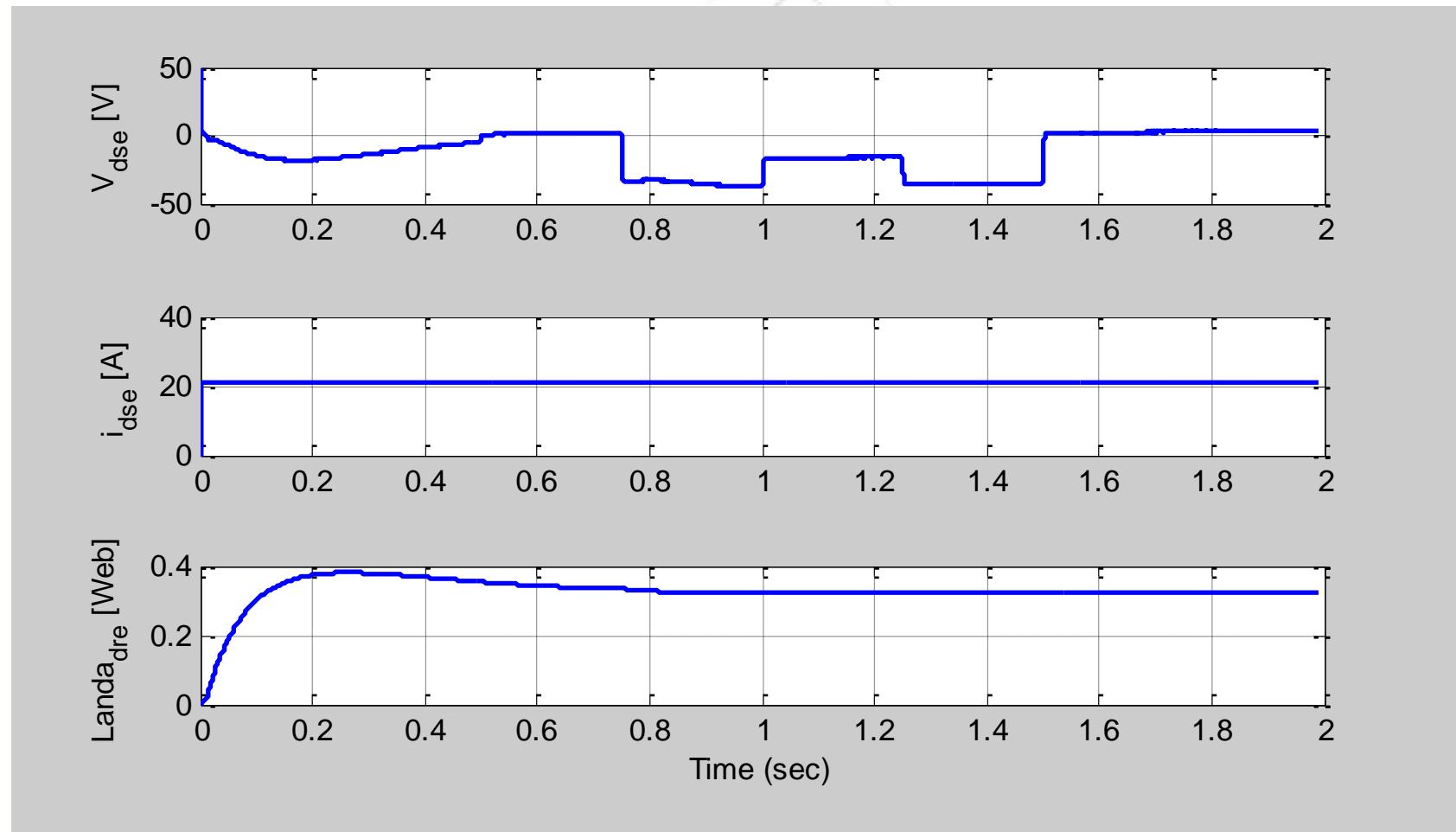
تغییرات شار روتور و مولفه های  $d$  و  $q$  آن

## □ کنترل برداری غیرمستقیم



### ► شبیه سازی حالت راه اندازی: تغییرات مولفه ها روی محور d

- ✓ مشاهده می شود که شار روتور در راستای محور d توسط مولفه  $d$  جریان استاتور کنترل می گردد.
- ✓ اما مولفه  $d$  ولتاژ استاتور ثابت نبوده و به دلیل اثر ولتاژ محور  $q$  روی آن دارای تغییرات است. زیرا در این ساختار جریان کنترل می گردد.



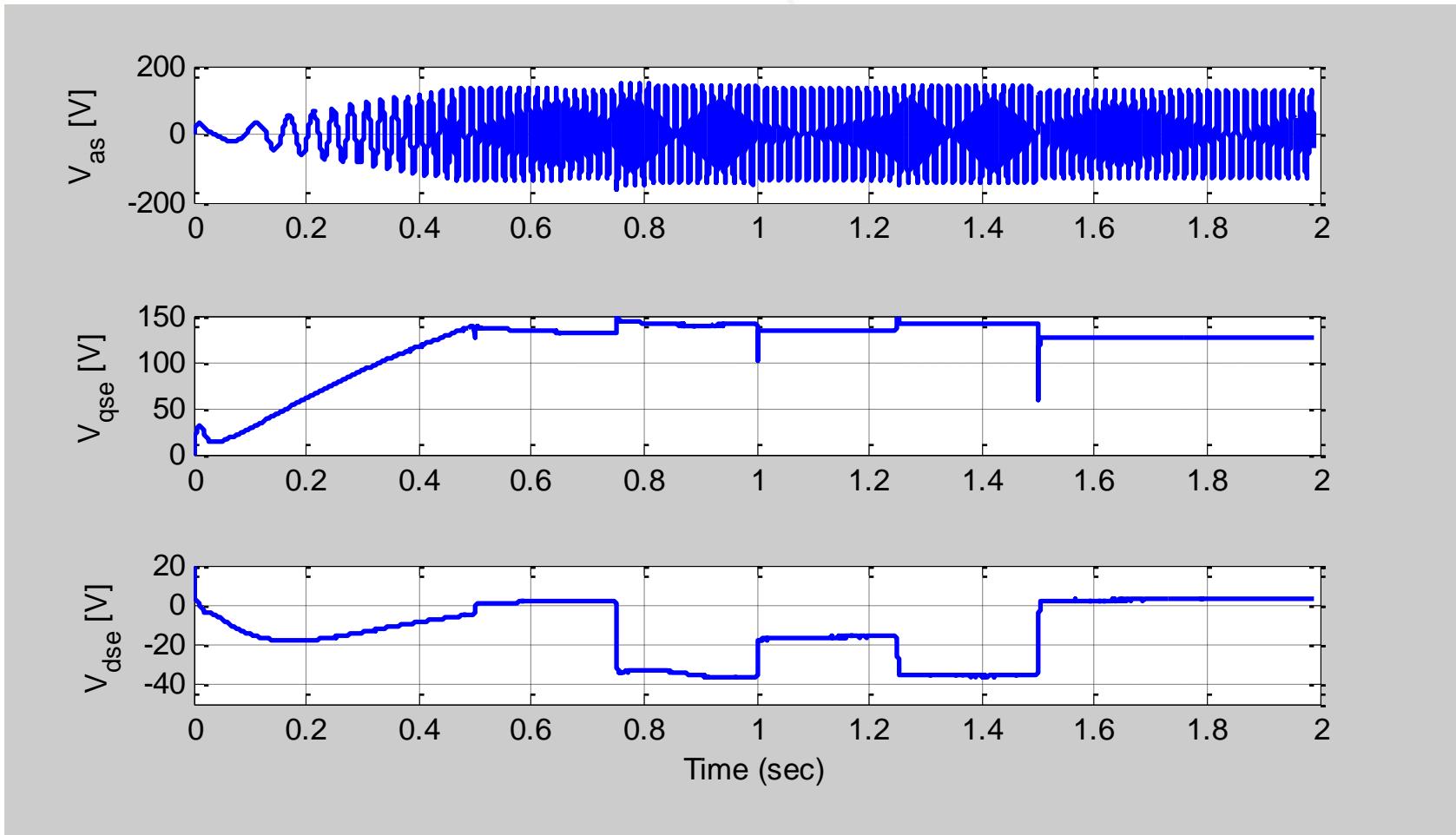
تغییرات مولفه های d ولتاژ و جریان استاتور و شار روتور

## □ کنترل برداری غیرمستقیم



### ► شبیه سازی حالت راه اندازی: تغییرات ولتاژ استاتور

- ✓ مشاهده می شود که مولفه  $q$  ولتاژ با تغییرات بار تغییر می کند که طبیعی است.
- ✓ مولفه  $d$  ولتاژ نیز به دلیل اثر متقابل از محور  $q$  تاثیر پذیرفته و تغییر می کند.



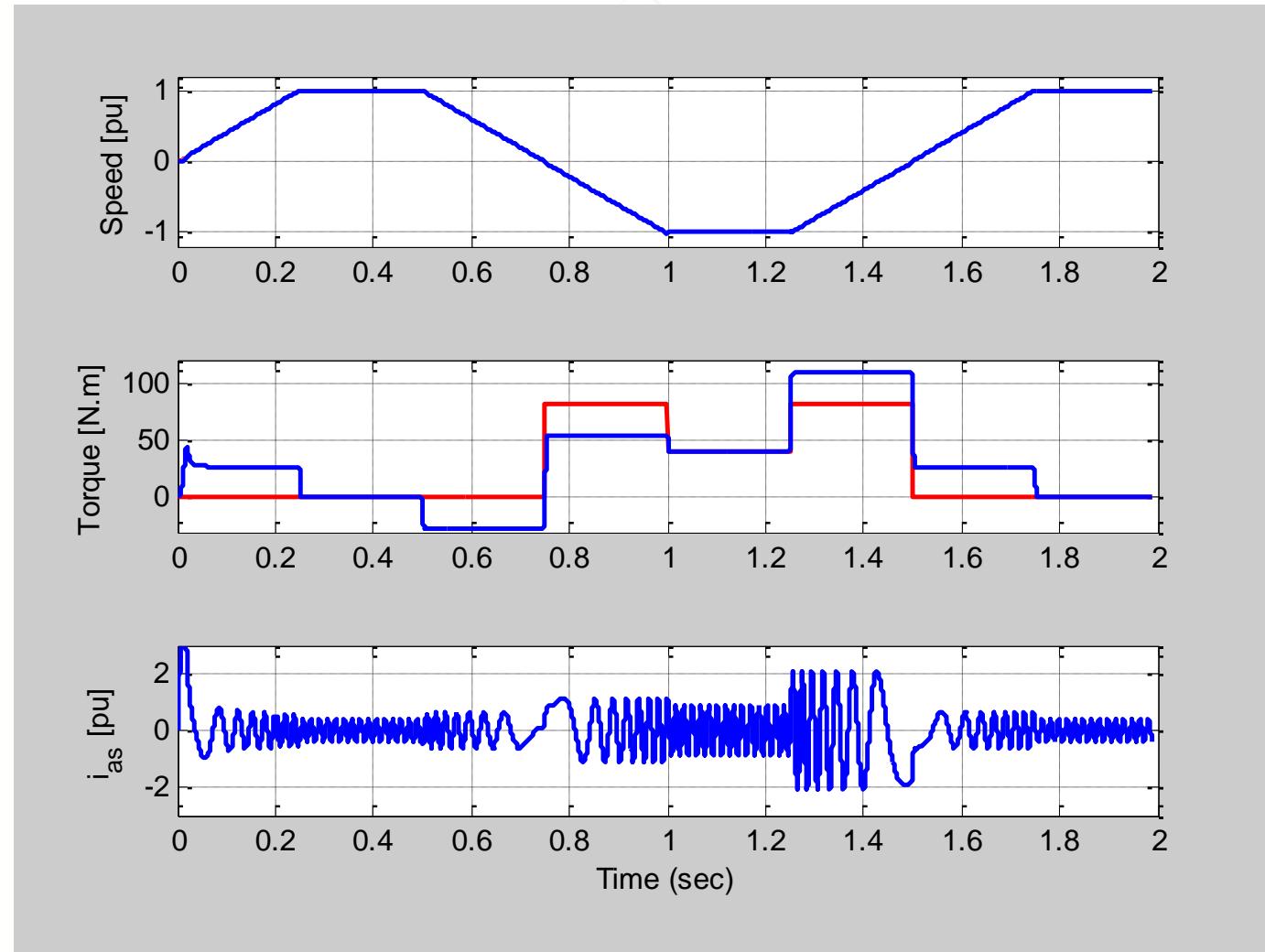
تغییرات مولفه های  $d$  ولتاژ و جریان استاتور و شار روتور

## □ کنترل برداری غیرمستقیم



### ► شبیه سازی با تغییرات سرعت مرجع: تغییرات سرعت و گشتاور

- ✓ مشاهده می شود برای افزایش سرعت، گشتاور تولیدی از گشتاور بار زیادتر شده و برای کاهش آن کمتر می شود.



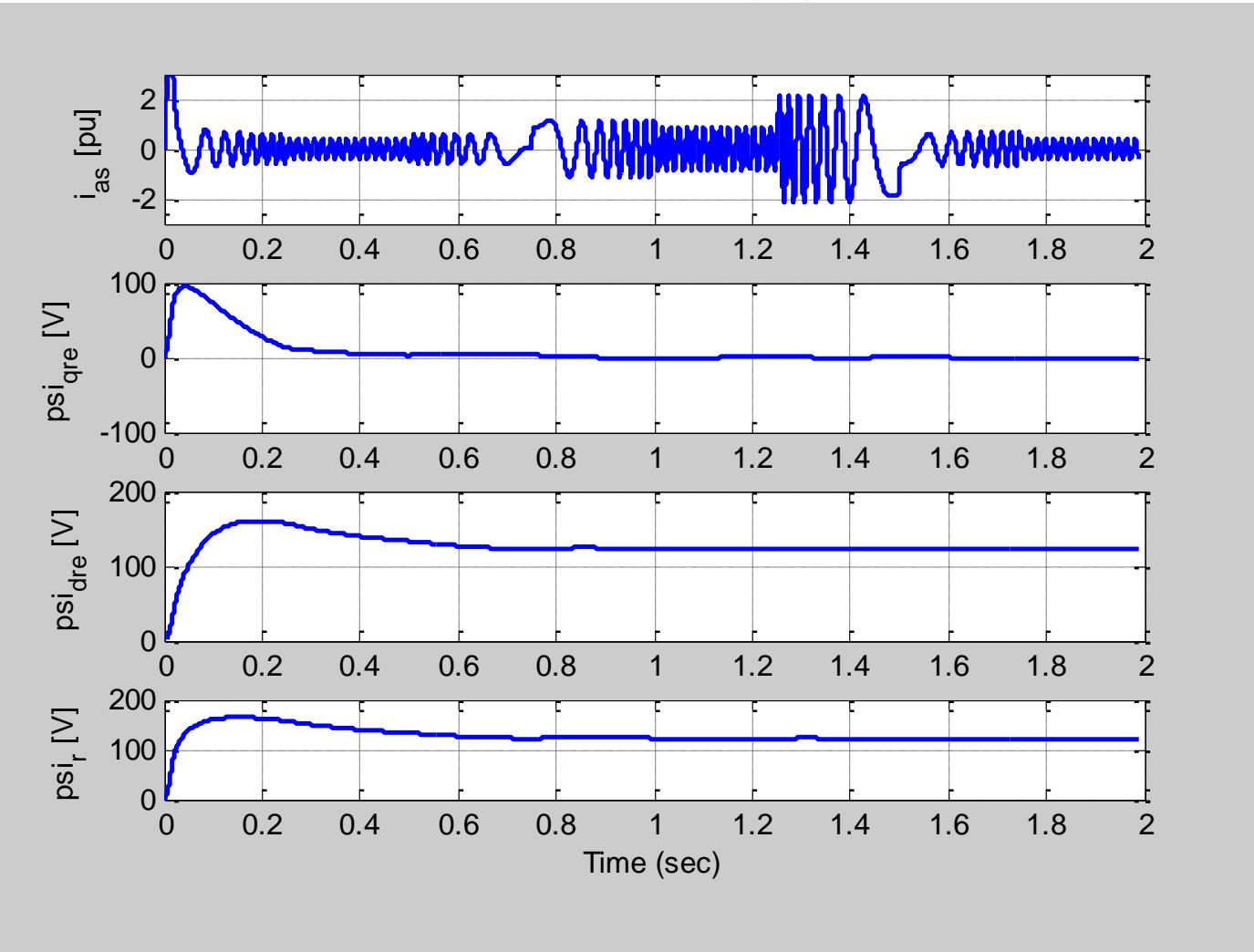
تغییرات سرعت، گشتاور و جریان فاز با تغییرات سرعت مرجع

## □ کنترل برداری غیرمستقیم



► شبیه سازی با تغییرات سرعت مرجع: تغییرات شار-دور روتور

✓ مشاهده می شود که علیرغم تغییرات گشتاور و سرعت، شار روتور همواره در جهت محور  $d$  مقدار ثابتی دارد.



تغییرات شار روتور و مولفه های  $d$  و  $q$  آن

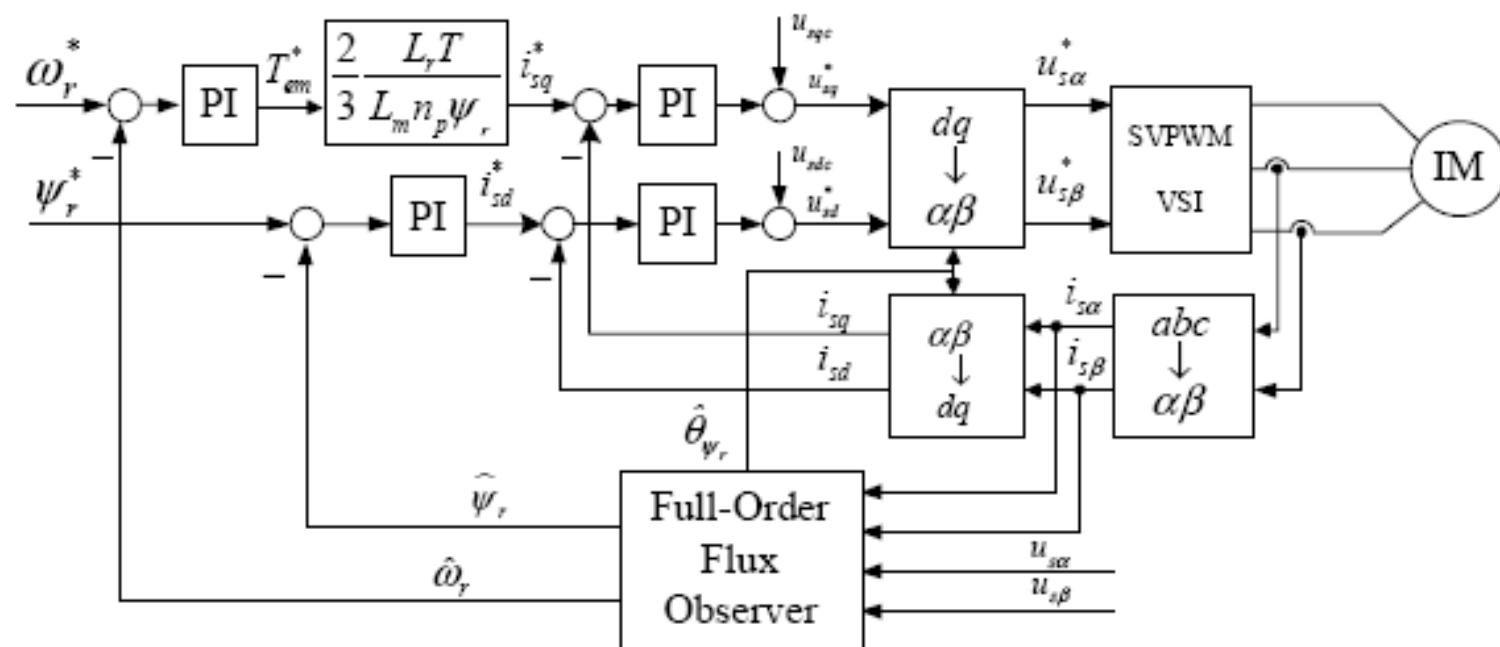


## □ کنترل مستقیم گشتاور (DTC) موتور القایی



### ► مشکلات روش کنترل برداری

- ✓ مشاهده شد که در روش کنترل برداری، برای کنترل گشتاور و شار باید جریانهای متناظر (مولفه گشتاور ساز یا  $i_{qs}$  و مولفه شار ساز یا  $i_{ds}$ ) کنترل گردند. کنترل این مولفه های جریان نیز با ایجاد مناسب ولتاژهای  $V_{qs}$  و  $V_{ds}$  امکانپذیر است.
- ✓ لذا برای کنترل گشتاور، دو حلقه جریان در درایو وجود دارد که به همراه تبدیلات  $dq$  و معکوس این تبدیلات، حجم محاسباتی بالایی برای روش کنترل برداری ایجاد خواهد نمود.
- ✓ محاسبات بالا، نیاز به پردازنده قدرتمند، پیچیدگی روش، تنظیم حلقه های کنترل، سبب شده است که محققین بجای کنترل غیرمستقیم گشتاور و شار در روش کنترل برداری، به دنبال روشهایی برای کنترل مستقیم گشتاور بدون کنترل جریان باشند.



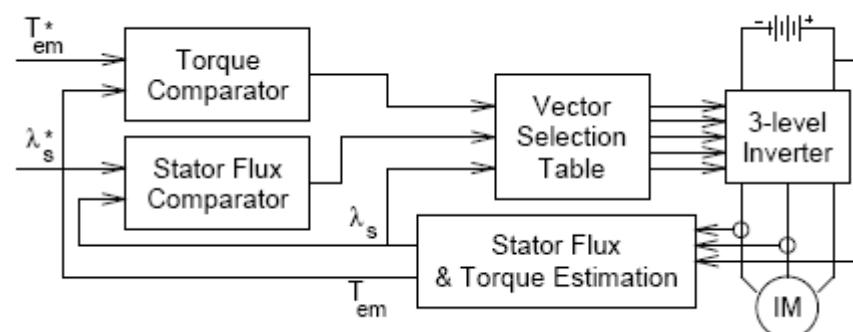
بلوک دیاگرام روش کنترل برداری بدون استفاده از حسگر سرعت

## □ کنترل مستقیم گشتاور (DTC) موتور القایی

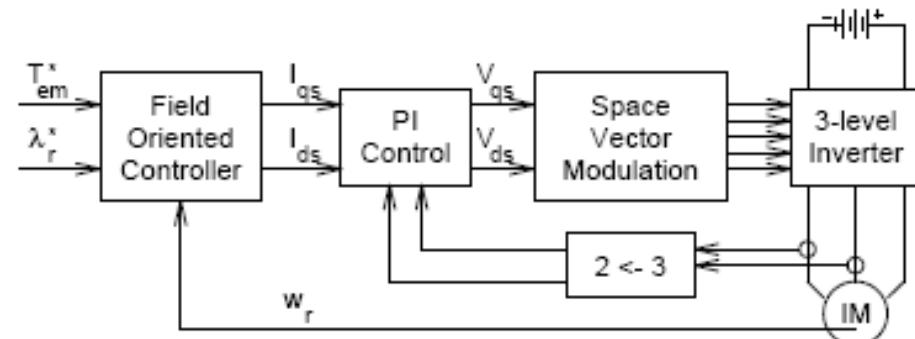


### ➤ مقایسه روش کنترل برداری و روش کنترل مستقیم گشتاور

- ✓ مطابق شکل‌های زیر، برای جهت دهی شار در روش کنترل برداری نیاز به استفاده از تبدیلات ۳ به ۲ و تبدیل بین دستگاهها است.
- ✓ علاوه بر آن در روش کنترل برداری حداقل نیاز به چهار کنترل کننده که معمولاً از نوع PI هستند، می‌باشد.
- ✓ اما در روش کنترل مستقیم گشتاور، با سوئیچینگ مناسب اینورتر، گشتاور و شار بصورت مستقیم کنترل خواهند شد. لذا از دو کنترل کننده (شار و گشتاور) بیشتر استفاده نمی‌شود.
- ✓ نکته مهم تر در روش DTC آنست که کنترلرهای مورد استفاده از ساده‌ترین نوع کنترل‌ها یعنی از نوع هیسترزیس هستند.



کنترل گشتاور موتور القایی به روش کنترل مستقیم گشتاور

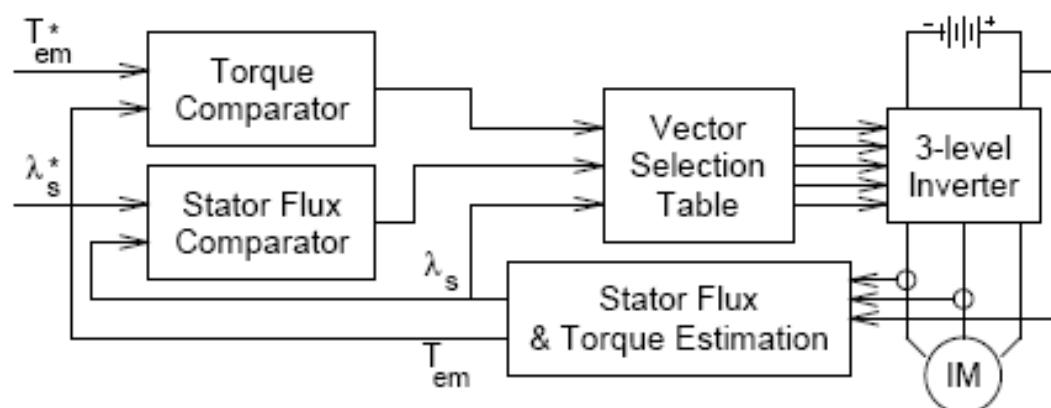


کنترل گشتاور موتور القایی به روش کنترل برداری

## □ کنترل مستقیم گشتاور (DTC) موتور القایی

### ► ویژگی های روش کنترل مستقیم گشتاور

- ✓ کنترل مستقیم شار و گشتاور
- ✓ کنترل غیرمستقیم جریان استاتور
- ✓ عملکرد دینامیکی بسیار بالا و پاسخ خیلی سریع حتی در حالت راه اندازی
- ✓ عدم نیاز به تبدیلات dq و عکس آنها
- ✓ عدم وجود مدولاتورهای ولتاژ و کنترلهای PID (در نوع جدول سوئیچینگ)
- ✓ کلیدزنی سوئیچها به روش مدولاسیون بردار فضایی (SVM) Space Vector Modulation
- ✓ نیاز به تخمینگرهای شار و گشتاور
- ✓ فرکانس سوئیچینگ بالا در اینورتر
- ✓ وجود ریپلهای دائمی در گشتاور و شار
- ✓ مشکلات احتمالی در راه اندازی



بلوک دیاگرام روش کنترل مستقیم گشتاور



## □ کنترل مستقیم گشتاور (DTC) موتور القایی

### ➤ انواع مختلف روش های کنترل مستقیم گشتاور

□ روش های مطرح شده DTC از نقطه نظر فرکانس سوئیچینگ اینورتر به دو دسته زیر تقسیم می شود:

- استراتژی های با فرکانس سوئیچینگ متغیر
- استراتژی های با فرکانس سوئیچینگ ثابت

□ روش های با فرکانس سوئیچینگ متغیر که قدمت بیشتری نسبت به نوع دوم دارند عبارتند از:

- کنترل مستقیم گشتاور مبتنی بر جدول سوئیچینگ یا ST-DTC (توسط تاکاهاشی و نوگوچی در سال ۱۹۸۶)
- کنترل مستقیم گشتاور معروف کنترل خود تنظیم یا DSC-DTC (توسط دیپنبروک در سال ۱۹۸۸)

□ روش های با فرکانس سوئیچینگ ثابت:

- کنترل مستقیم گشتاور با باندهای هیسترزیس متغیر
- کنترل مستقیم گشتاور با مدولاسیون بردار فضایی (SVM-DTC)
- کنترل مستقیم گشتاور با مدل های پیش بین (MPC-DTC)

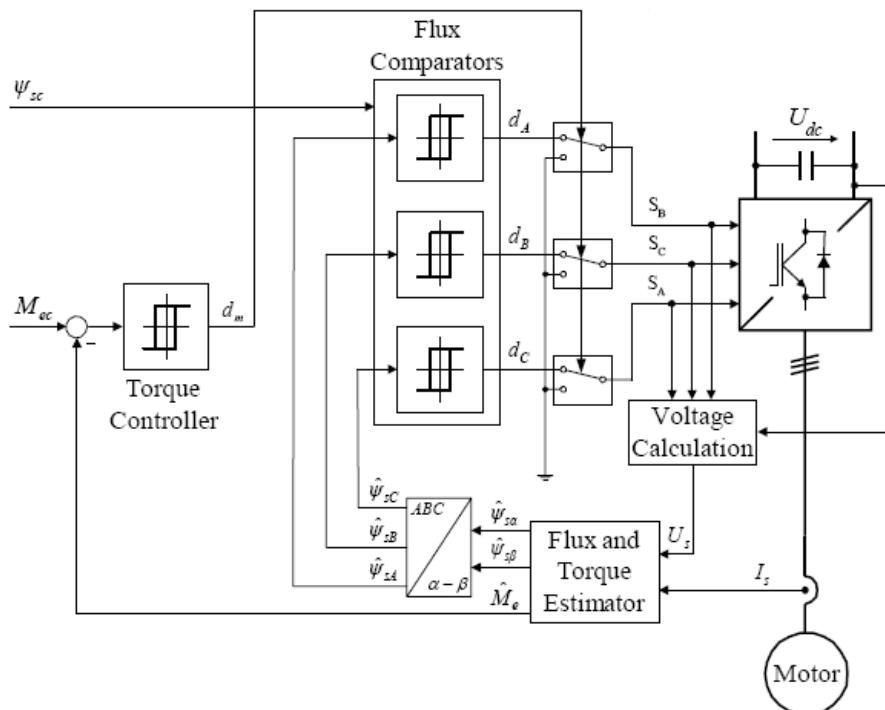
نکته: روش های با فرکانس سوئیچینگ ثابت اگرچه توانستند مشکل متغیر بودن فرکانس سوئیچینگ را حل کنند اما در عوض به خاطر استفاده از روش های کنترل پیچیده تر، سادگی روش های فرکانس متغیر را که ویژگی اصلی گشتاور بود از دست دادند.

در این درس دو روش SVM-DTC و ST-DTC مطالعه می شوند.

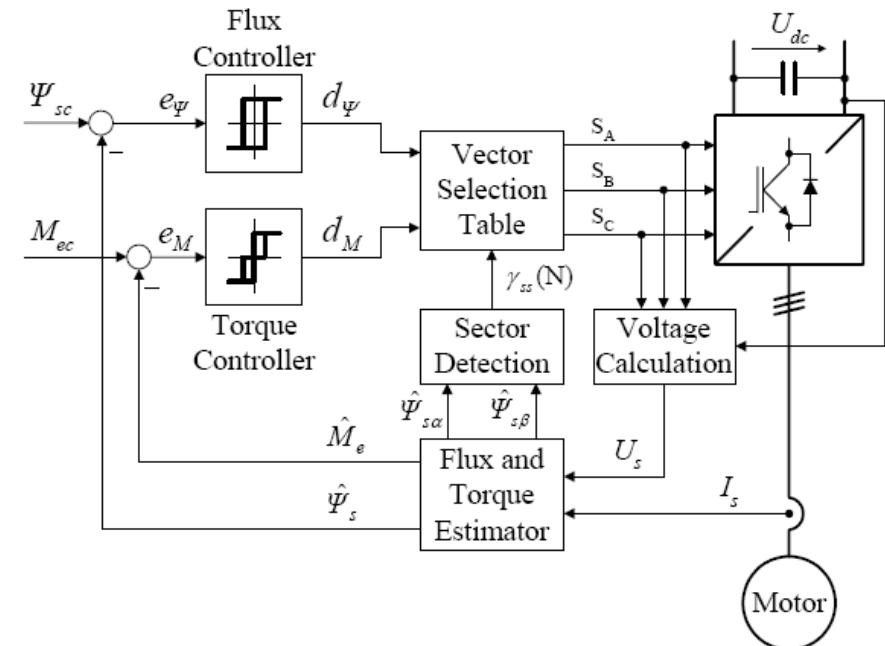
## □ کنترل مستقیم گشتاور (DTC) موتور القایی



### ► انواع مختلف روش های کنترل مستقیم گشتاور



طرح دیپنروک (DSC-DTC)



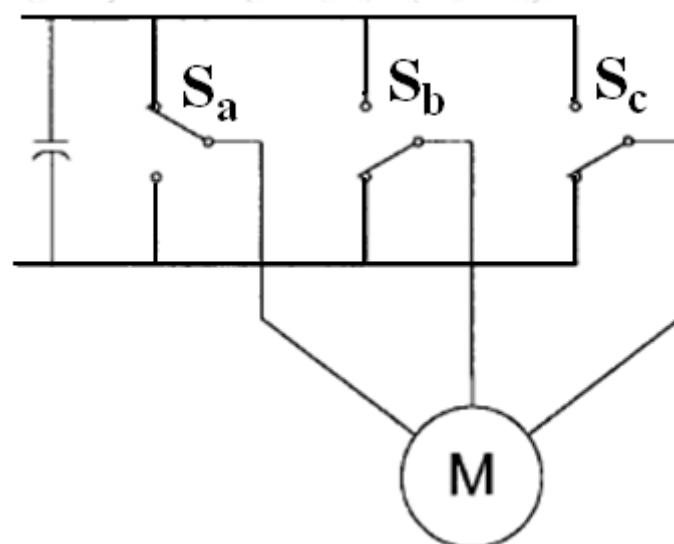
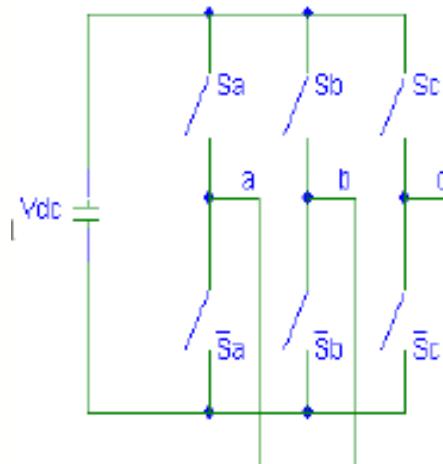
طرح تاکاهاشی (DSC-DTC)



## □ کنترل مستقیم گشتاور پایه ای (ST-DTC) موتور القایی

### ► اینورتر ولتاژ با مدولاسیون بردار فضایی (SVM)

- ✓ سوئیچینگ اینورتر در روش DTC با استفاده از روش مدولاسیون بردار فضایی (SVM) ولتاژ استاتور است.
- ✓ لذا قبل از پرداختن به این روش، ابتدا بردار ولتاژ فضایی بر حسب حالات مختلف سوئیچینگ در اینورتر بیان می گردد.
- ✓ در اینورتر، شش سوئیچه، هشت حالات سوئیچینگ را می توان تصور نمود: مثلا یک سوئیچ از بالا و دو سوئیچ از پائین بسته باشند – دو سوئیچ از بالا و یک سوئیچ از پائین بسته باشند. – سه سوئیچ بالا بسته باشند. – سه سوئیچ پائین بسته باشند.
- ✓ فرض کنید اگر سوئیچ بالایی هر ساق وصل باشد، ولتاژ فاز متناظر با آن ساق را مثبت  $V_{dc}$  یا یک درنظر گرفته و اگر سوئیچ پائینی هر ساق وصل باشد، ولتاژ متناظر با آنرا یا صفر درنظر بگیریم.
- ✓ اگر فازور ولتاژ استاتور را بصورت زیر تعریف کنیم:
- ✓ در اینصورت اگر حالات سوئیچها مطابق شکل زیر  $100 = S_a S_b S_c$  یا  $-- + +$  باشد، جهت فازور ولتاژ در راستای نشان داده شده خواهد بود.



$$\bar{V}_s^s = \frac{2V_{dc}}{3}$$

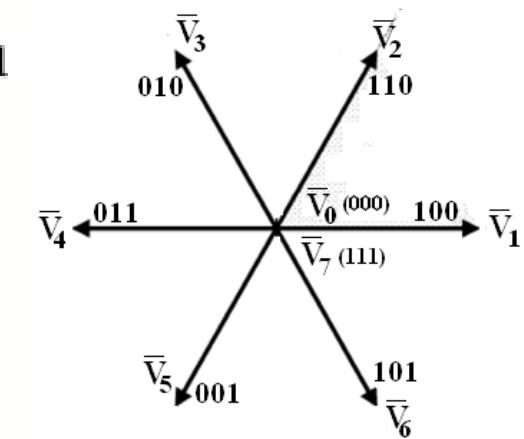
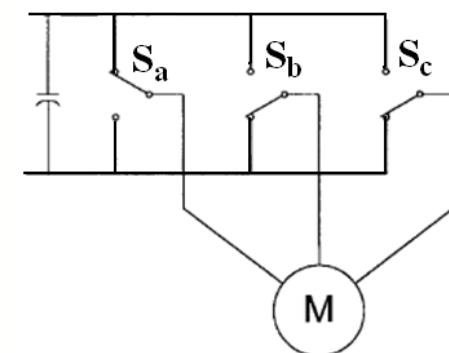
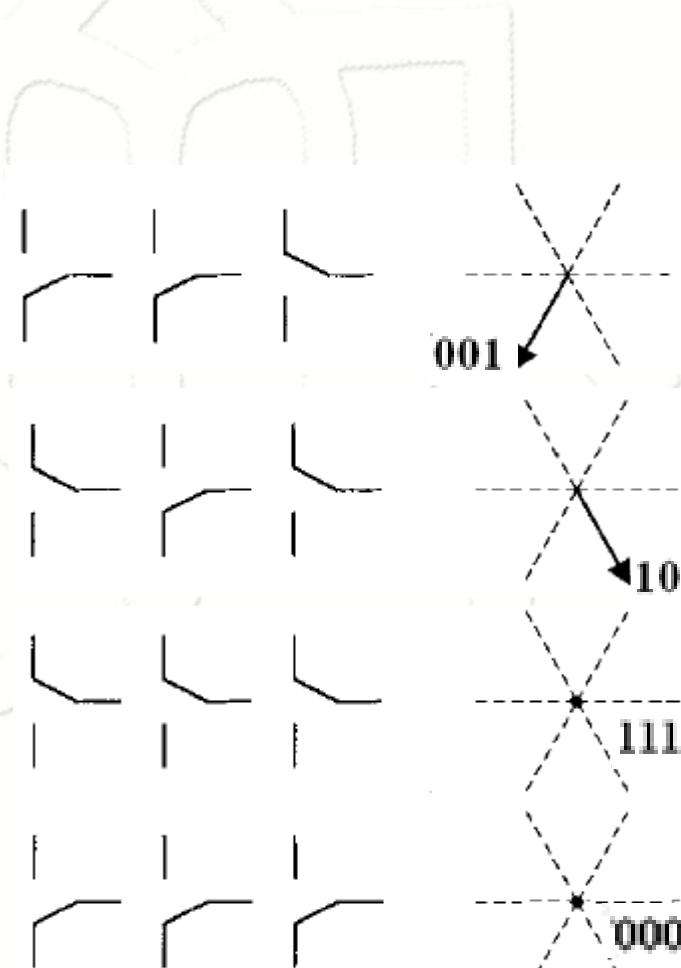
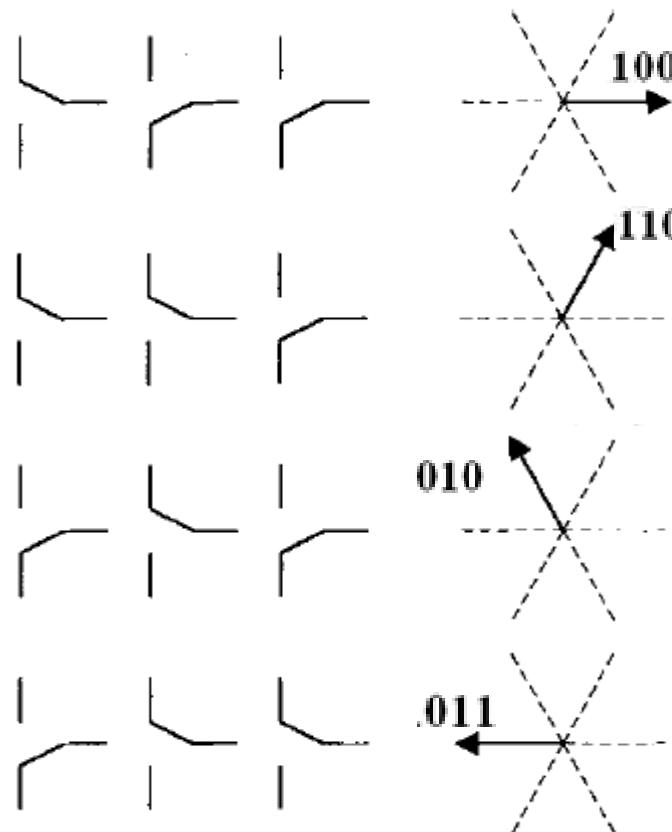
## □ اینورتر ولتاژ با مدولاسیون بردار فضایی (SVM)



### ► حالات مختلف سوئیچینگ در اینورتر SVM

- ✓ بدین ترتیب با جایگذاری حالات مختلف کلیدزنی (بغیر از ۰۰۰ و ۱۱۱) در عبارت زیر، شش بردار برای فازور ولتاژ ولتاژ استاتور مطابق شکلهای زیر بدست خواهد آمد:
- ✓ برای دو حالت ۰۰۰ و ۱۱۱، فازور ولتاژ دامنه صفر خواهد داشت که به آن بردارهای ولتاژ خنثی گویند.

$$\bar{V}_s^s = \frac{2V_{dc}}{3} \left( S_a + e^{j\frac{2\pi}{3}} S_b + e^{j\frac{4\pi}{3}} S_c \right)$$

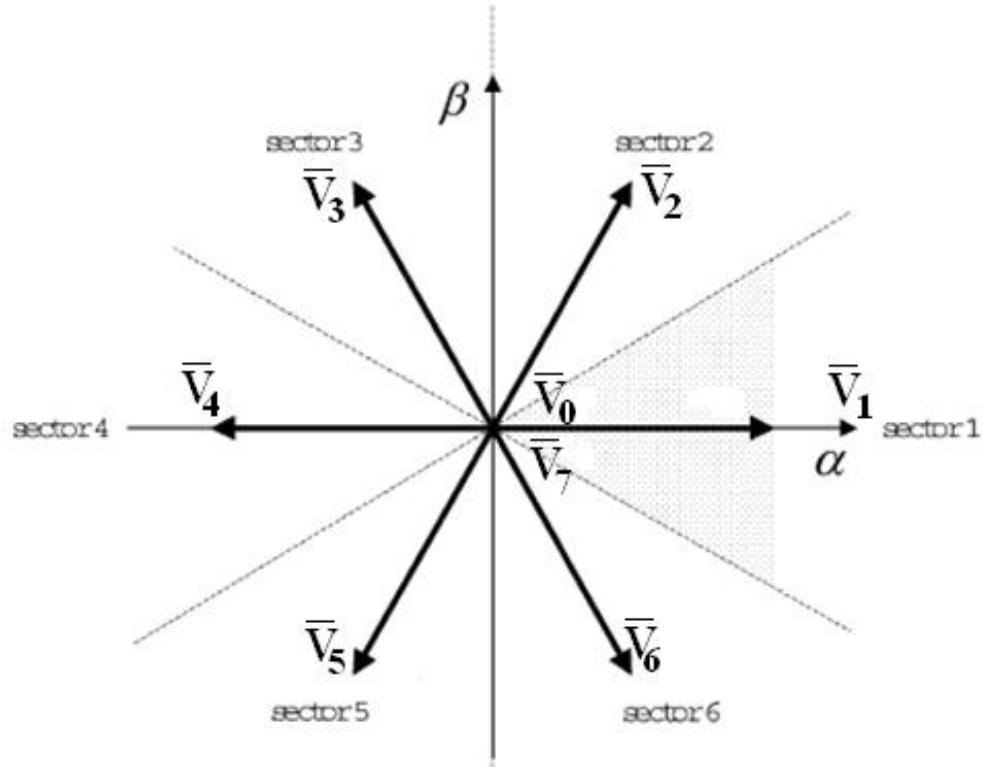


## □ اینورتر ولتاژ با مدولاسیون بردار فضایی (SVM)

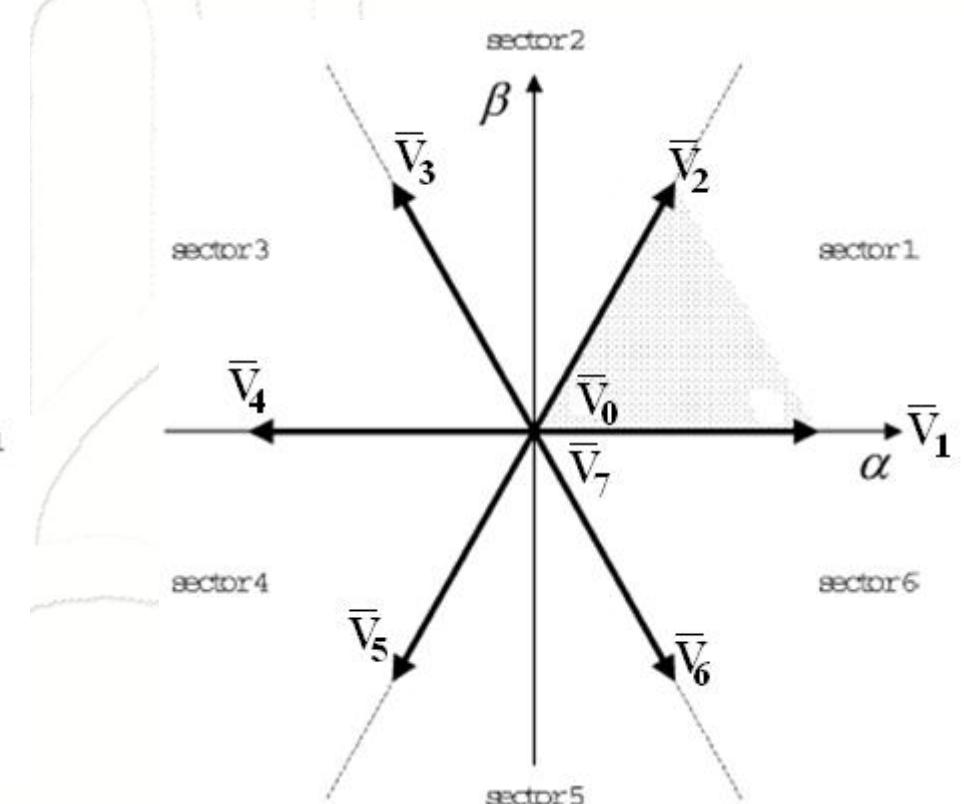


### ► بردارهای ولتاژ و Sector ها در اینورتر SVM

- ✓ لذا بر حسب حالات مختلف اینورتر، بردار ولتاژ اینورتر در یکی از راستاهای شش گانه و یا نقطه صفر قرار خواهد گرفت.
- ✓ می توان شش ناحیه را (۱) بین این بردارهای شش گانه درنظر گرفت که به آن نواحی شش وجهی (Hexagonal) گویند و یا (۲) شش ناحیه را طوری درنظر گرفت که این بردارها در مرکز نواحی قرار گیرند. به این نواحی، نواحی دایره ای گویند.



(ب) تعریف نواحی برداری بصورت دایره ای



(الف) تعریف نواحی برداری بصورت شش وجهی

## □ اینورتر ولتاژ با مدولاسیون بردار فضایی (SVM)



### ➤ ایجاد بردارهای ولتاژ در اینورتر SVM

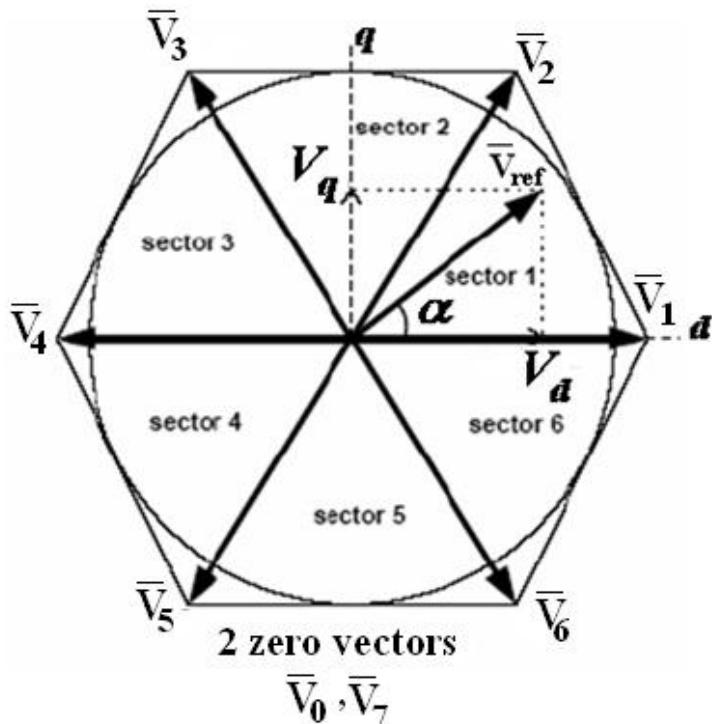
- ✓ در روش مدولاسیون بردار فضایی (SVM) می‌توان فازور بردار ولتاژ استاتور مورد نیاز (شامل اندازه و فاز) را با سوئیچینگ مناسب بین دو بردار ولتاژ نزدیکتر به بردار ولتاژ موردنیاز، ایجاد نمود.

$$\bar{V}_{ref} = V_d + jV_q = \frac{2}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c)$$

$$a = e^{j2\pi/3}$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

$$|\bar{V}_{ref}| = \sqrt{V_d^2 + V_q^2}, \quad \alpha = \tan^{-1} \frac{2}{3} \left( \frac{V_q}{V_d} \right)$$



- ✓ برای مثال در شکل مقابل، برای ایجاد ولتاژ مرجع دلخواه با فازور  $V_{ref}$ ، باید سوئیچینگ اینورتر به نحوی انجام شود که ولتاژ بوجود آمده در ناحیه ۱ قرار گیرد.

- ✓ به عبارت دیگر، با تغییر حالت سوئیچینگ بین دو بردار  $V_1$  و  $V_2$  به نحویکه به اندازه زمان مناسب  $T_1$ ، حالت سوئیچینگ متناظر با ولتاژ  $V_1$  باشد و به اندازه زمان مناسب  $T_2$  حالت سوئیچینگ متناظر با بردار ولتاژ  $V_2$  باشد، می‌توان بردار ولتاژ دلخواه  $V_{ref}$  را بوجود آورد.

## □ اینورتر ولتاژ با مدولاسیون بردار فضایی (SVM)

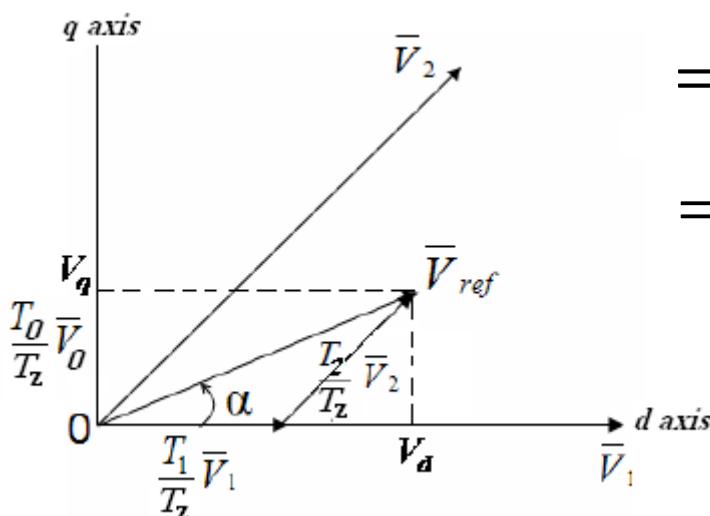
➤ تعیین زمانهای کلیدزنی متناظر با هر بردار در اینورتر SVM

- ✓ در اینورتر با مدولاسیون بردار فضایی، برای ایجاد ولتاژ  $V_{ref}$ ، آرایش سوئیچینگ اینورتر با فرکانس  $f_s$  (یا دوره تناوب  $T_s$ ) بین دو آرایش متناظر با بردارهای  $\bar{V}_1$  و  $\bar{V}_2$  تغییر حالت می‌یابد.
- ✓ اینورتر در آرایش متناظر با  $\bar{V}_1$  زمان  $2T_1$  و در آرایش متناظر با  $\bar{V}_2$  به اندازه زمان  $2T_2$  کار می‌کند. بقیه زمان را هم  $(2T_0)$  در یکی آرایش‌های متناظر با حالت بردارهای خنثای  $\bar{V}_0$  یا  $\bar{V}_7$  قرار خواهد داشت.

❖ سوال: چگونه زمانهای کلیدزنی  $T_1$  و  $T_2$  تعیین می‌شوند؟

- ✓ برای تعیین مقادیر زمانی  $T_1$  و  $T_2$  از خاصیت برابر بودن شار در دو حالت استفاده از بردارهای  $\bar{V}_1$ ،  $\bar{V}_2$  و استفاده مستقیم از بردار  $\bar{V}_{ref}$  استفاده می‌گردد. عبارتی:

$$\bar{\varphi} = \int_0^{T_z} \bar{V}_{ref} dt \Rightarrow \int_0^{T_z} \bar{V}_{ref} dt = \int_0^{T_1} \bar{V}_1 dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} \bar{V}_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_z} \bar{V}_0 dt$$



$$\begin{aligned} \Rightarrow T_z \cdot \bar{V}_{ref} &= T_1 \cdot \bar{V}_1 + T_2 \cdot \bar{V}_2 \\ \Rightarrow T_z \cdot \left| \bar{V}_{ref} \right| \begin{bmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \end{bmatrix} &= T_1 \cdot \frac{2}{3} V_{dc} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + T_2 \cdot \frac{2}{3} V_{dc} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\pi/3) \\ \sin(\pi/3) \end{bmatrix} \\ (0 \leq \alpha \leq 60^\circ) \end{aligned}$$

- ✓ در عبارات فوق،  $T_z$  نصف دوره تناوب سوئیچینگ اینورتر یعنی  $T_s$  است.



## □ اینورتر ولتاژ با مدولاسیون بردار فضایی (SVM)

► تعیین زمانهای کلیدزنی متناظر با هر بردار در اینورتر SVM

✓ از تساوی ماتریسی بدست آمده نتیجه می شود:

$$T_1 = T_z \cdot a \frac{\sin(\pi/3 - \alpha)}{\sin(\pi/3)}, \quad T_2 = T_z \cdot a \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\pi/3)}, \quad T_0 = T_z - (T_1 + T_2), \quad (a = \frac{|\bar{V}_{ref}|}{\frac{2}{3}V_{dc}})$$

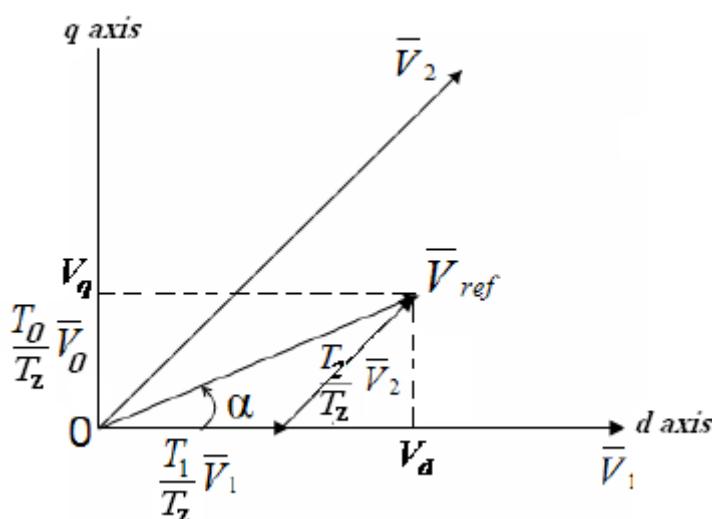
✓ در حالت کلی در هر ناحیه  $k$  ( $k=1-6$ ), زمانهای سوئیچینگ  $T_0$ ,  $T_1$  و  $T_2$  مربوط به آن ناحیه برابرند با:

$$T_1 = T_z \cdot \frac{2a}{\sqrt{3}} \sin\left(\frac{k\pi}{3} - \alpha\right), \quad T_2 = T_z \cdot \frac{2a}{\sqrt{3}} \sin\left(\alpha - \frac{(k-1)\pi}{3}\right), \quad T_0 = T_z - (T_1 + T_2), \quad (0 \leq \alpha \leq 60^\circ)$$

✓ حال سؤال این است که در هر ناحیه، هر سوئیچ چه مقدار زمان بر حسب  $T_1$ ,  $T_2$  و  $T_0$  به دست آمده روشن خواهد بود؟

✓ دو روش برای کلیدزنی سوئیچها در اینورتر SVM وجود دارد: مقارن - نامقarn

✓ در ادامه روش مقارن کلیدزنی سوئیچها ارائه می شود.



## □ اینورتر ولتاژ با مدولاسیون بردار فضایی (SVM)

### ► تعیین زمانهای کلیدزنی متناظر با هر سوئیچ در اینورتر SVM

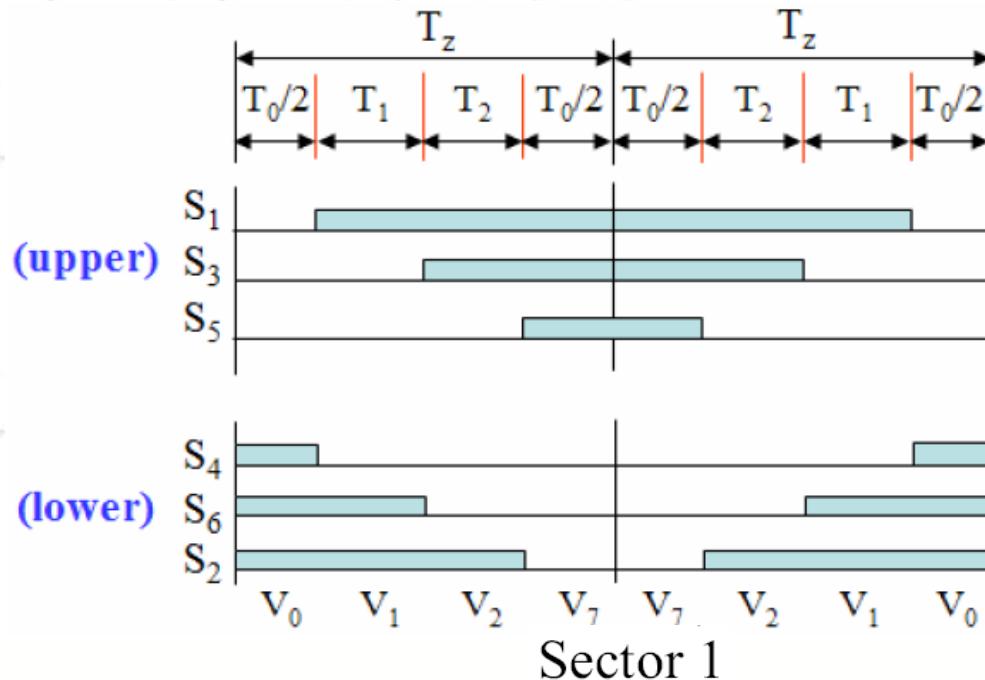
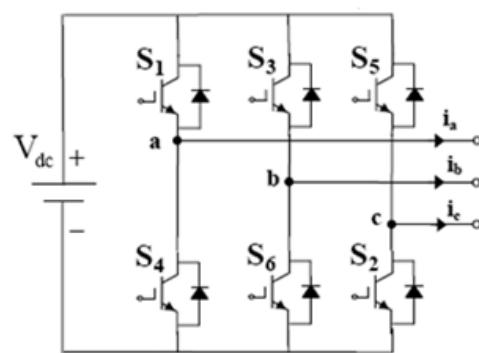
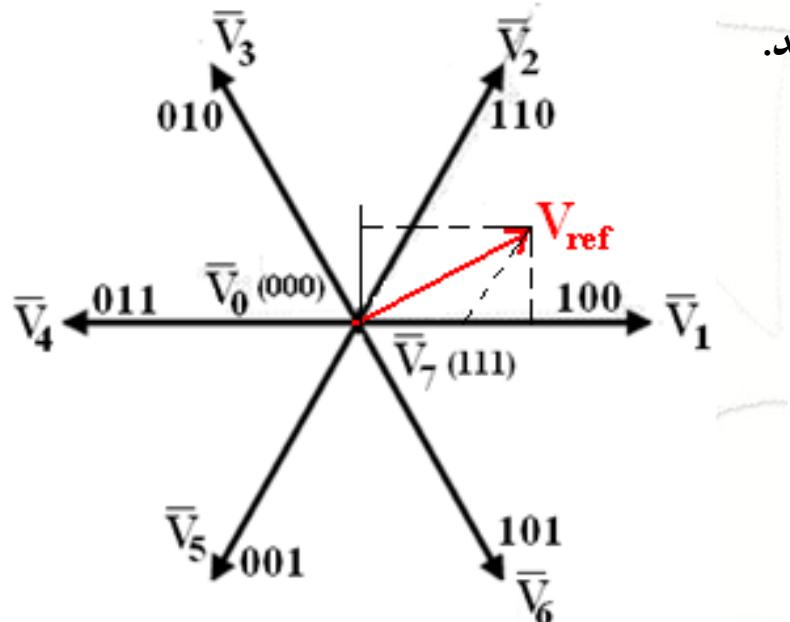
✓ مطابق با شکل بردارهای ولتاژ، اگر بردار ولتاژ مرجع در ناحیه ۱ و بین دو بردار  $V_1(100)$  و  $V_2(110)$  قرار داشته باشد،

- سوئیچ  $S_1$  همواره یک است و لذا زمان روشن بودن آن ( $T_s = 2T_z = 2T_1 + 2T_2 + 2T_0$ ) خواهد بود.
- سوئیچ  $S_3$  نیز صفر (قطع) و یک (وصل) می‌شود که زمان قطع بودن آن  $2T_1$  و زمان وصل بودن آن  $2T_0$  است.

▪ سوئیچ  $S_5$  نیز به مدت  $2T_1 + 2T_2$  قطع است.

▪ سوئیچ‌های  $S_4$  و  $S_6$  نیز مکمل سوئیچ‌های  $S_1$ ,  $S_3$  و  $S_5$  هستند.

✓ شکل زیر پالسهای اعمالی به هر سوئیچ را برای ناحیه ۱ نشان می‌دهد.

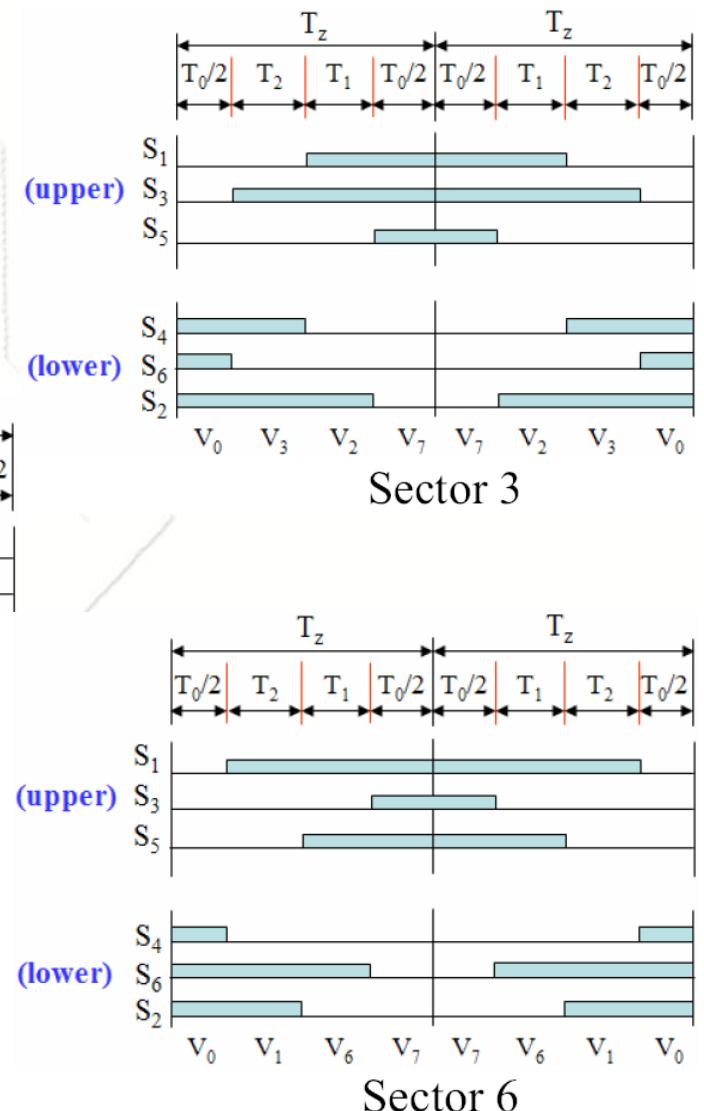
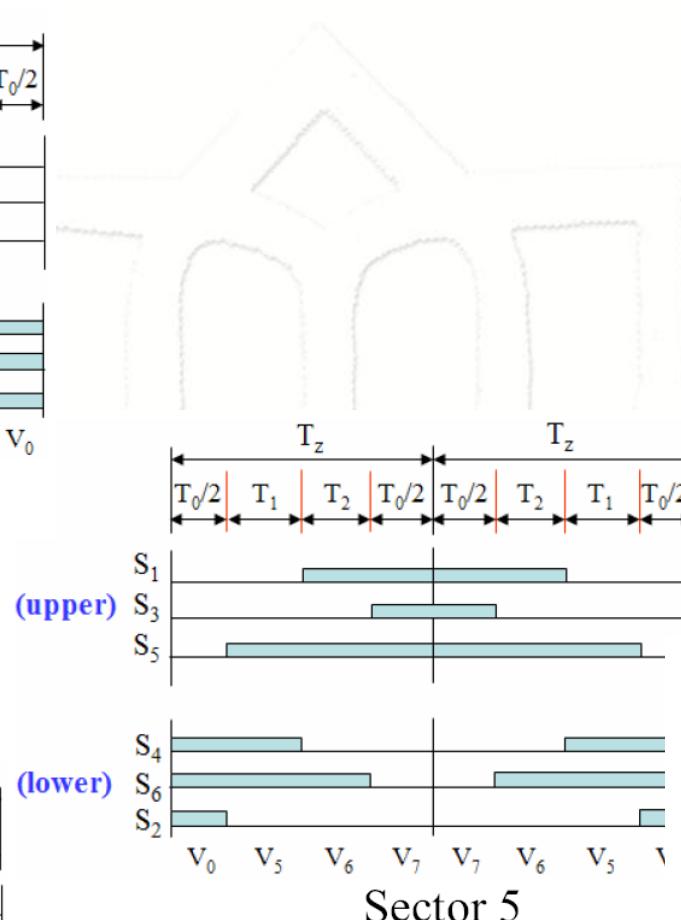
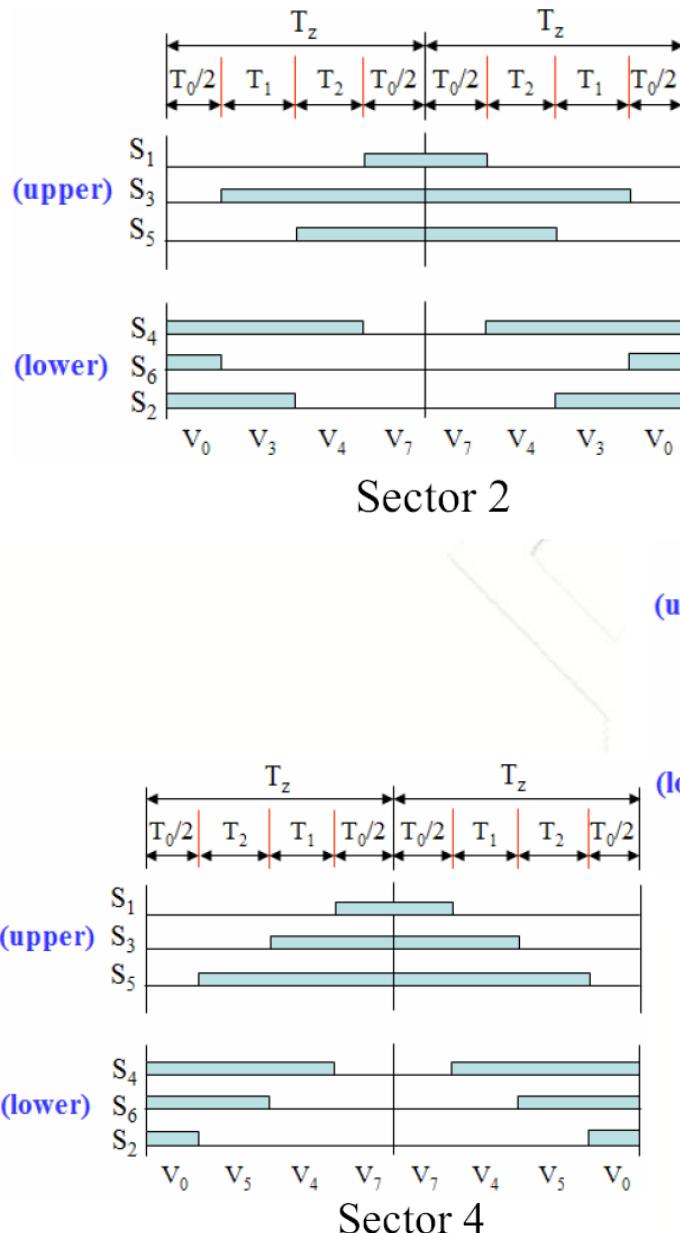


## □ اینورتر ولتاژ با مدولاسیون بردار فضایی (SVM)



### ► تعیین زمانهای کلیدزنی متناظر با هر سوئیچ در اینورتر SVM

✓ به طریق مشابه، پالسهای فرمان کلیدزنی سوئیچها در ناحیه های دیگر نیز قابل تعیین هستند که نتایج در شکلها آورده شده اند.



## □ اینورتر ولتاژ با مدولاسیون بردار فضایی (SVM)



### ► تعیین زمانهای کلیدزنی متناظر با هر سوئیچ در اینورتر SVM

✓ جدول زیر نیز پالسهای فرمان کلیدزنی سوئیچها در ناحیه های مختلف در اینورتر SVM را خلاصه نموده است.

Switching sequence table

Sector	Upper Switches ( $S_1, S_3, S_5$ )	Lower Switches ( $S_4, S_6, S_2$ )
1	$S_1 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_3 = T_2 + T_0 / 2$ $S_5 = T_0 / 2$	$S_4 = T_0 / 2$ $S_6 = T_1 + T_0 / 2$ $S_2 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$
2	$S_1 = T_1 + T_0 / 2$ $S_3 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_5 = T_0 / 2$	$S_4 = T_2 + T_0 / 2$ $S_6 = T_0 / 2$ $S_2 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$
3	$S_1 = T_0 / 2$ $S_3 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_5 = T_2 + T_0 / 2$	$S_4 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_6 = T_0 / 2$ $S_2 = T_1 + T_0 / 2$
4	$S_1 = T_0 / 2$ $S_3 = T_1 + T_0 / 2$ $S_5 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$	$S_4 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_6 = T_2 + T_0 / 2$ $S_2 = T_0 / 2$
5	$S_1 = T_2 + T_0 / 2$ $S_3 = T_0 / 2$ $S_5 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$	$S_4 = T_1 + T_0 / 2$ $S_6 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_2 = T_0 / 2$
6	$S_1 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_3 = T_0 / 2$ $S_5 = T_1 + T_0 / 2$	$S_4 = T_0 / 2$ $S_6 = T_1 + T_2 + T_0 / 2$ $S_2 = T_2 + T_0 / 2$

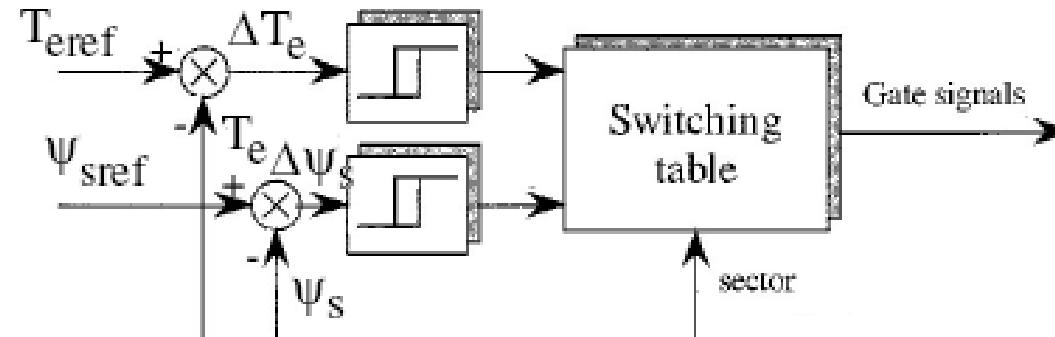
## □ کنترل مستقیم گشتاور پایه ای (ST-DTC) موتور القایی

### ➤ کنترل شار و گشتاور

- ✓ اشاره گردید که در روش DTC شار و گشتاور مستقیماً کنترل می‌شوند.
- ✓ به عبارت دیگر از خطای شار و گشتاور ایجاد شده توسط مقایسه گرهای شار و گشتاور مستقیماً برای سوئیچینگ اینورتر استفاده می‌شود.

$$\Delta T_e = T_{eref} - T_e$$

$$\Delta \Psi_s^S = \Psi_{sref}^S - \Psi_s^S$$



- ✓ کنترلهای هیسترزیس، علامت تغییرات شار و گشتاور، یعنی نیاز موتور به افزایش شار/گشتاور و یا کاهش آنها را در هر لحظه زمانی نشان می‌دهند.
- ✓ در بلوک جدول سوئیچینگ، بر حسب اینکه افزایش/کاهش مقادیر گشتاور/شار مورد نیاز باشد، سوئیچینگ مناسب انجام گیرد و به عبارتی کلیدهای مناسب وصل و یا قطع می‌گردد.
- ✓ در ادامه، منطق کلیدزنی در اینورتر و ارتباط آرایش کلیدزنی با افزایش/کاهش مقادیر گشتاور/شار توضیح داده می‌شوند.

## □ کنترل مستقیم گشتاور پایه ای (ST-DTC) موتور القایی

### ➢ چگونگی تغییر شار بوسیله بردارهای ولتاژ در اینورتر SVM

✓ ابتدا کنترل (تغییر هدفمند) شار را بررسی می کنیم.

✓ در موتور القایی، تغییرات لحظه ایی بردار شار پیوندی استاتور توسط ولتاژ استاتور از رابطه زیر تعیت می کند:

$$\frac{d\bar{\psi}_s}{dt} = \bar{V}_s - r_s \bar{i}_s$$

$$\frac{d\bar{\psi}_s}{dt} \cong \bar{V}_s$$

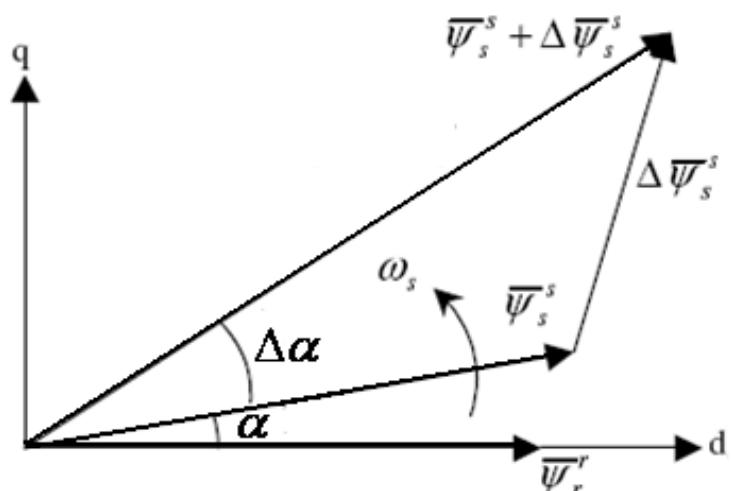
✓ با صرفنظر از افت ولتاژ اهمی استاتور خواهیم داشت:

✓ این رابطه بازگوی این مطلب است که با تغییر بردار ولتاژ خروجی اینورتر، می توان اندازه و جهت بردار شار استاتور را تغییر داد:

$$\Delta\bar{\psi}_s \cong \bar{V}_s \Delta t$$

✓ شکل مقابل بیان می دارد که برای تغییر دامنه و راستای شار استاتور، باید بردار  $\Delta\bar{\psi}_s$  به بردار شار استاتور  $\bar{\psi}_s$  اضافه گردد.

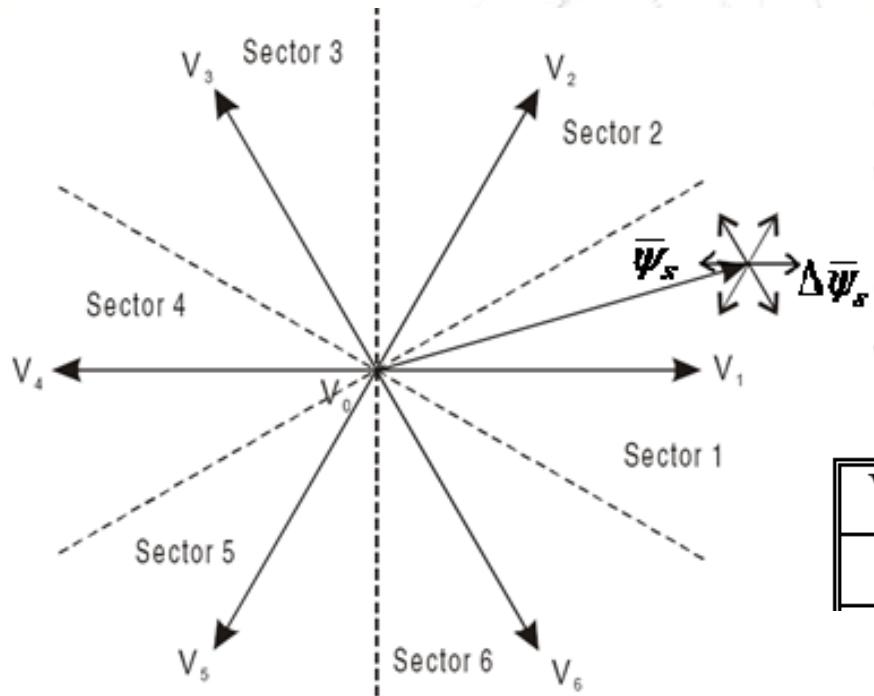
✓ برای ایجاد بردار  $\Delta\bar{\psi}_s$  مطابق رابطه فوق، باید از بردار  $\bar{V}_s$  با راستای مناسب استفاده نمود.



## □ کنترل مستقیم گشتاور پایه ای (ST-DTC) موتور القایی

### ► چگونگی تغییر شار بوسیله بردارهای ولتاژ در اینورتر SVM

- ✓ همانطور که قبلاً گفته شد در اینورتر SVM، تنها شش بردار ولتاژ در راستاهای مختلف وجود داردند.
- ✓ لذا مطابق شکل زیر، برای تغییر راستای شار در جهت دلخواه، از یکی از بردارهای ششگانه ولتاژ استفاده نمود.
- ✓ مطابق شکل زیر، به عنوان مثال اگر بردار شار در ناحیه ۱ باشد، استفاده از بردارهای ولتاژ  $V_1, V_2$  و  $V_6$  سبب افزایش دامنه شار خواهد شد و استفاده از بردارهای  $V_3, V_4$  و  $V_5$  سبب کاهش دامنه شار می‌گردد.
- ✓ لذا هرگاه، جهت بردار ولتاژ به جهت بیرون از دایره‌ای باشد که مرکز آن مبدأ، و شعاع آن مقدار قبلی شار است، آن بردار ولتاژ سبب افزایش شار خواهد گردید و همینطور بالعکس.
- ✓ واضح است که در صورت قرار داشتن بردار شار در نواحی دیگر، ولتاژهای افزاینده شار و کاهنده شار با حالت فوق متفاوت خواهند بود.



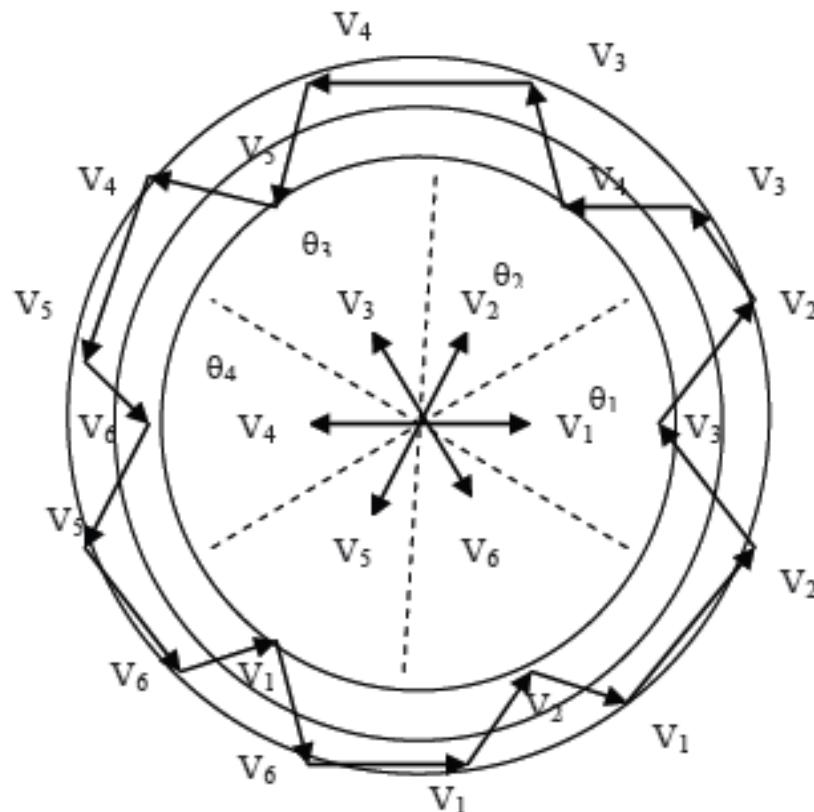
✓ در حالت کلی برای سکتور  $k$ ، بردارهای ولتاژ  $V_{k-1}$ ،  $V_k$  و  $V_{k+1}$  سبب افزایش دامنه شار می‌گردند و بردارهای ولتاژ  $V_{k+2}$ ،  $V_{k+3}$  و  $V_{k-2}$  سبب کاهش شار خواهند گردید.

VOLTAGE VECTOR	INCREASE	DECREASE
Stator Flux	$V_k, V_{k+1}, V_{k-1}$	$V_{k+2}, V_{k-2}, V_{k+3}$

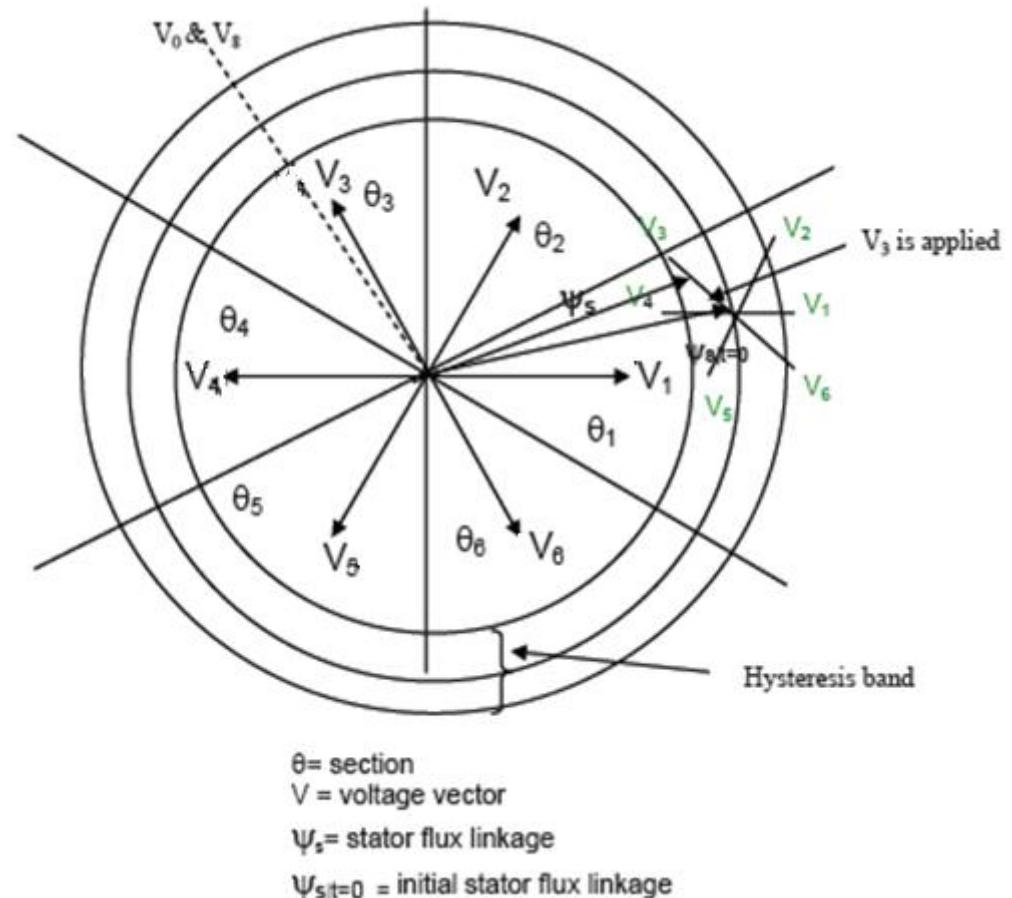
## □ کنترل مستقیم گشتاور پایه ای (ST-DTC) موتور القایی

► چگونگی تغییر شار بوسیله بردارهای ولتاژ در اینورتر SVM

- ✓ شکل ۱ نشان می دهد که با استفاده از بردارهای مناسب ولتاژ، دامنه شار استاتور در باند هیسترزیس قابل کنترل است.



شکل ۲: کنترل دامنه شار در محدوده باند هیسترزیس



شکل ۱: حرکت انتهای بردار شار پیوندی در صفحه

## □ کنترل مستقیم گشتاور پایه ای (ST-DTC) موتور القایی

### ► چگونگی تغییر گشتاور بوسیله بردارهای ولتاژ در اینورتر SVM

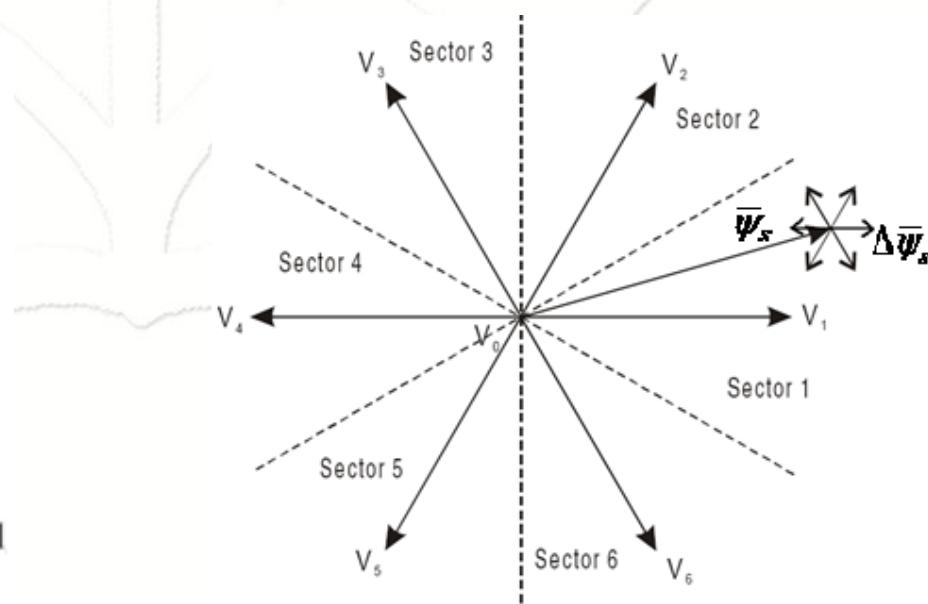
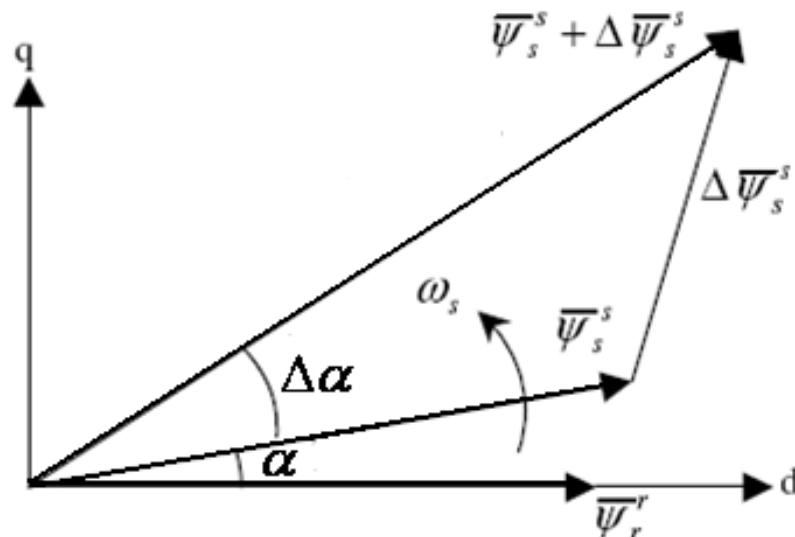
$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \frac{L_m}{L_s L_r - L_m^2} \left| \bar{\psi}_s^s \right| \left| \bar{\psi}_r^s \right| \sin \alpha$$

✓ رابطه کلی گشتاور در ماشینهای الکتریکی به قرار زیر است:

✓ با توجه به ثابت زمانی بالای مدار روتور، تغییرات شار روتور بسیار آرام بوده و می‌توان آنرا در مقایسه با تغییرات سریع شار استاتور تقریباً ثابت در نظر گرفت.

✓ در اینصورت با ثابت نگهدارشتن دامنه شار استاتور  $\psi_s$  می‌توان گشتاور را با افزایش زاویه بین شارهای استاتور و روتور یعنی  $\alpha$  زیادتر نمود.

✓ مطابق شکل زیر، برخی از بردارهای ولتاژ، زاویه  $\alpha$  را افزایش داده و لذا گشتاور را زیاد می‌کنند و برخی دیگر، زاویه  $\alpha$  و در نتیجه گشتاور را کاهش می‌دهند.



## □ کنترل مستقیم گشتاور پایه ای (ST-DTC) موتور القایی

### ► چگونگی تغییر گشتاور بوسیله بردارهای ولتاژ در اینورتر SVM

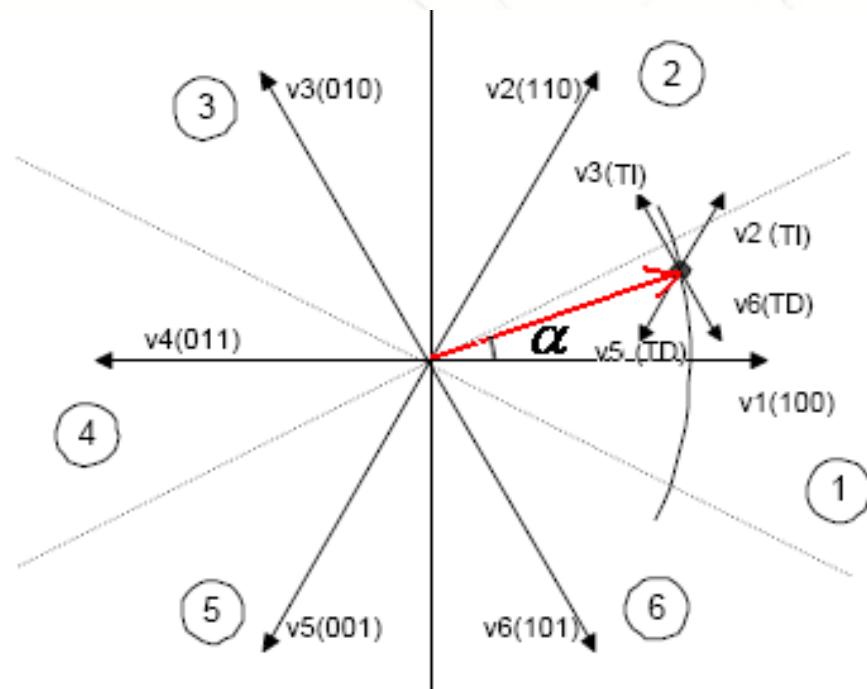
$$\alpha = \angle \bar{\Psi}_S^S = \tan^{-1} \left( \frac{\Psi_{qs}^S}{\Psi_{ds}^S} \right)$$

✓ مطابق رابطه مقابل، زاویه  $\alpha$  در صورتی زیاد می گردد که بردار ولتاژ مولفه  $q$  شار استاتور را افزایش و یا مولفه  $d$  شار استاتور را کاهش دهد.

✓ فرض کنید که انتهای بردار شار در ناحیه ۱ قرار داشته باشد.

✓ با کمی دقت می توان فهمید که بردارهای ولتاژ  $V_2$  و  $V_3$  زاویه  $\alpha$  را افزایش داده و بردارهای ولتاژ  $V_5$  و  $V_6$  زاویه  $\alpha$  و در نتیجه گشتاور را کاهش می دهند.

✓ اما در مورد دو بردار ولتاژ  $V_1$  و  $V_4$  به سادگی می توان فهمید که این دو بردار در یک ۳۰ درجه از ۶۰ درجه ناحیه ۱، گشتاور را افزایش داده و در ۳۰ درجه بعدی کاهش می دهند. (مثلاً اگر راستای شار در ۳۰ درجه پائین تر از بردار  $V_1$  باشد، استفاده از بردار  $V_1$  گشتاور را افزایش می دهد و اگر راستای شار در ۳۰ درجه بالاتر از بردار  $V_1$  باشد، گشتاور را کاهش می دهد.



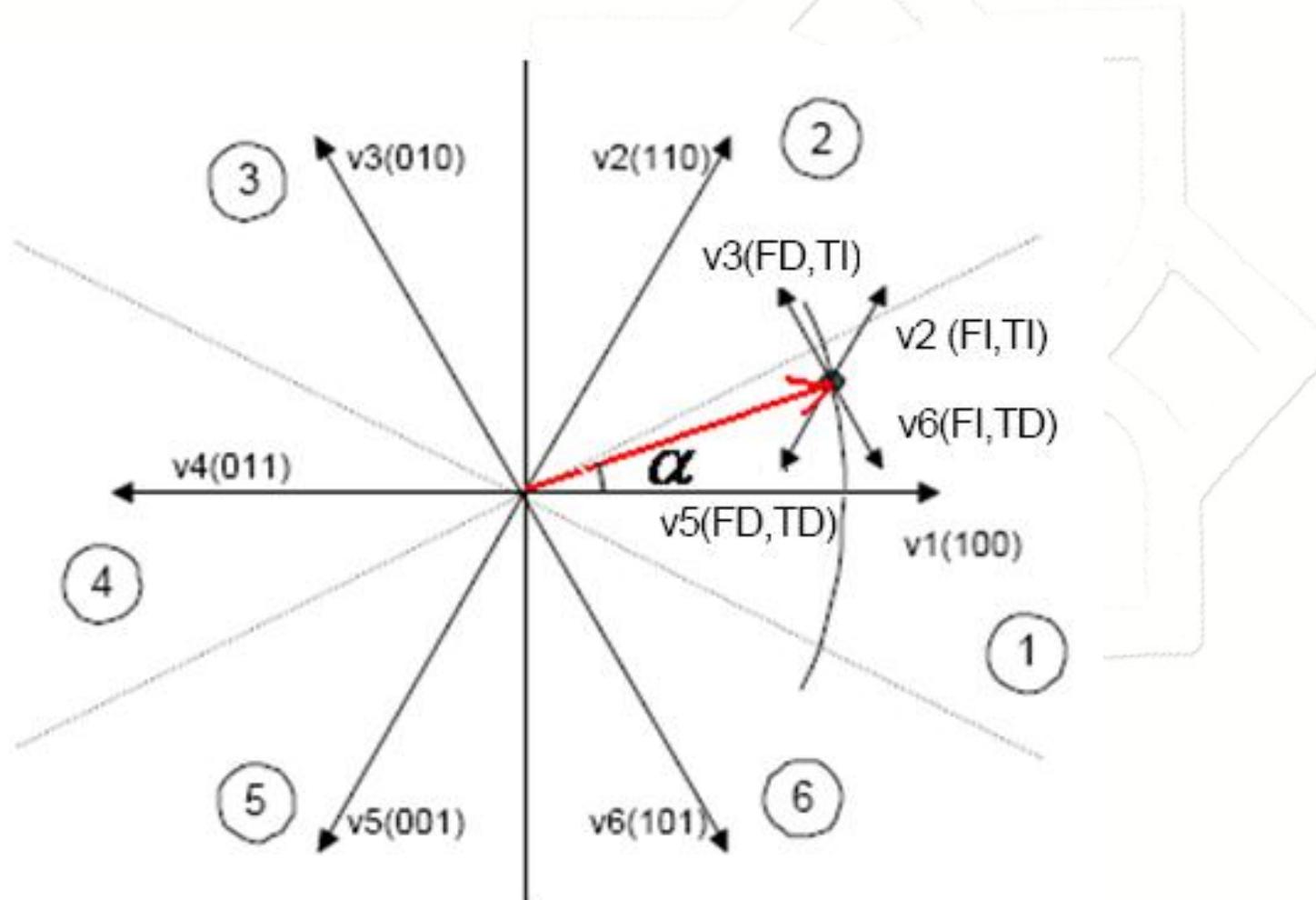
✓ در حالت کلی، اگر بردار شار در سکتور  $k$  باشد، بردارهای ولتاژ  $V_{k+1}$  و  $V_{k-2}$  سبب افزایش  $\alpha$  و در نتیجه گشتاور خواهند گردید و بردارهای ولتاژ  $V_{k-1}$  و  $V_{k-2}$  سبب کاهش  $\alpha$  و در نتیجه گشتاور خواهند شد.

VOLTAGE VECTOR	INCREASE	DECREASE
Torque	$V_{k+1}, V_{k+2}$	$V_{k-1}, V_{k-2}$

## □ کنترل مستقیم گشتاور پایه ای (ST-DTC) موتور القایی

### ► جدول سوئیچینگ اینورتر در روش DTC

- ✓ بسته به اینکه بخواهیم شار یا گشتاور را مستقلانم و یا زیاد نمائیم، چهار حالت متفاوت خواهیم داشت.
- ✓ برای مثال در شکل زیر، برای ناحیه ۱، بردار ولتاژ  $V_2$  سبب افزایش شار-افزایش گشتاور (FI,TI) می‌گردد. بردار  $V_6$  سبب افزایش شار-کاهش گشتاور (FI,TD) می‌گردد و قس علیهذا.





## □ کنترل مستقیم گشتاور پایه ای (ST-DTC) موتور القایی

### ► جدول سوئیچینگ اینورتر در روش DTC

- ✓ لذا با انجام تحلیل های ارائه شده در هر ناحیه، جدول کلیدزنی اینورتر نیز بر اساس حالت مورد نظر (افزایش و کاهش شار/گشتاور) در هر ناحیه ( $S_i$ ) بصورت زیر قابل بیان است:

شار	گشتاور	ناحیه $S_1$	ناحیه $S_2$	ناحیه $S_3$	ناحیه $S_4$	ناحیه $S_5$	ناحیه $S_6$
FI افزایش	TI افزایش	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>1</sub>
	T= بدون تغییر	V <sub>0</sub>	V <sub>7</sub>	V <sub>0</sub>	V <sub>7</sub>	V <sub>0</sub>	V <sub>7</sub>
	TD کاهش	V <sub>6</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>
FD کاهش	TI	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>
	T=	V <sub>7</sub>	V <sub>0</sub>	V <sub>7</sub>	V <sub>0</sub>	V <sub>7</sub>	V <sub>0</sub>
	TD	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>



## □ کنترل مستقیم گشتاور پایه ای (ST-DTC) موتور القایی

### ► تخمین مقادیر واقعی شار و گشتاور

- ✓ از ملزومات استفاده از روش DTC، دانستن مقادیر لحظه‌ای شار و گشتاور است.
- ✓ شار پیوندی استاتور با داشتن مقادیر بردارهای ولتاژ و جریان استاتور از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\bar{\psi}_s^s = \int (\bar{V}_s^s - r_s \bar{i}_s^s) dt$$

- ✓ همچنین مقدار گشتاور نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است (قبل در بحث مدلسازی موتور القایی اثبات شده بود):

$$T_e = \frac{3P}{2} \cdot (\psi_{ds}^s i_{qs}^s - \psi_{qs}^s i_{ds}^s)$$

- ✓ در محاسبه مقادیر شار و گشتاور، تعیین بردارهای ولتاژ و جریان استاتور الزامی است.
- ✓ بردار جریان استاتور با اندازه گیری جریان فازهای استاتور و استفاده از روابط تبدیل ۳ به ۲ بدست می آید.
- ✓ برای محاسبه بردار ولتاژ استاتور نیازمند دانستن مقدار ولتاژهای سه فاز استاتور هستیم.
- ✓ اما نیازی به اندازه گیری ولتاژهای فازها نمی باشد و می توان فقط از اندازه گیری ولتاژ بس DC و فرمانهای صادره به اینورتر ولتاژهای سه فاز را ساخت.



## □ کنترل مستقیم گشتاور موتور الکتری به روش SVM-DTC

### ➢ انواع روش های SVM-DTC

- ✓ به دلیل مشکلات روش DTC پایه یا ST-DTC که از جمله آنها می توان به فرکانس سوئیچینگ متغیر، ریپل دائمی شار و گشتاور و وجود خطای حالت دائمی در شار و گشتاور اشاره نمود، استفاده از کنترلهای PI در روش DTC در توجه نظر قرار گرفت.
- ✓ در این دسته از روشها بجای کنترلهای هیسترزیس شار و گشتاور از کنترلهای PI شار و شگتاور و مدولاسیون با روش SVM استفاده می گردد.

### ✓ انواع روش های DTC بر مبنای SVM عبارتند از:

- طرح SVM-DTC با کنترل حلقه بسته شار
- طرح SVM-DTC با کنترل حلقه بسته گشتاور
- طرح SVM-DTC با کنترل حلقه بسته شار و گشتاور در مختصات قطبی و روش ISC
- طرح SVM-DTC با کنترل حلقه بسته شار و گشتاور در مختصات کارتزین و کنترل شار استاتور
- طرح SVM-DTC با کنترل پیش بین Dead-BEAT
- طرح SVM-DTC با کنترل Neuro-Fuzzy

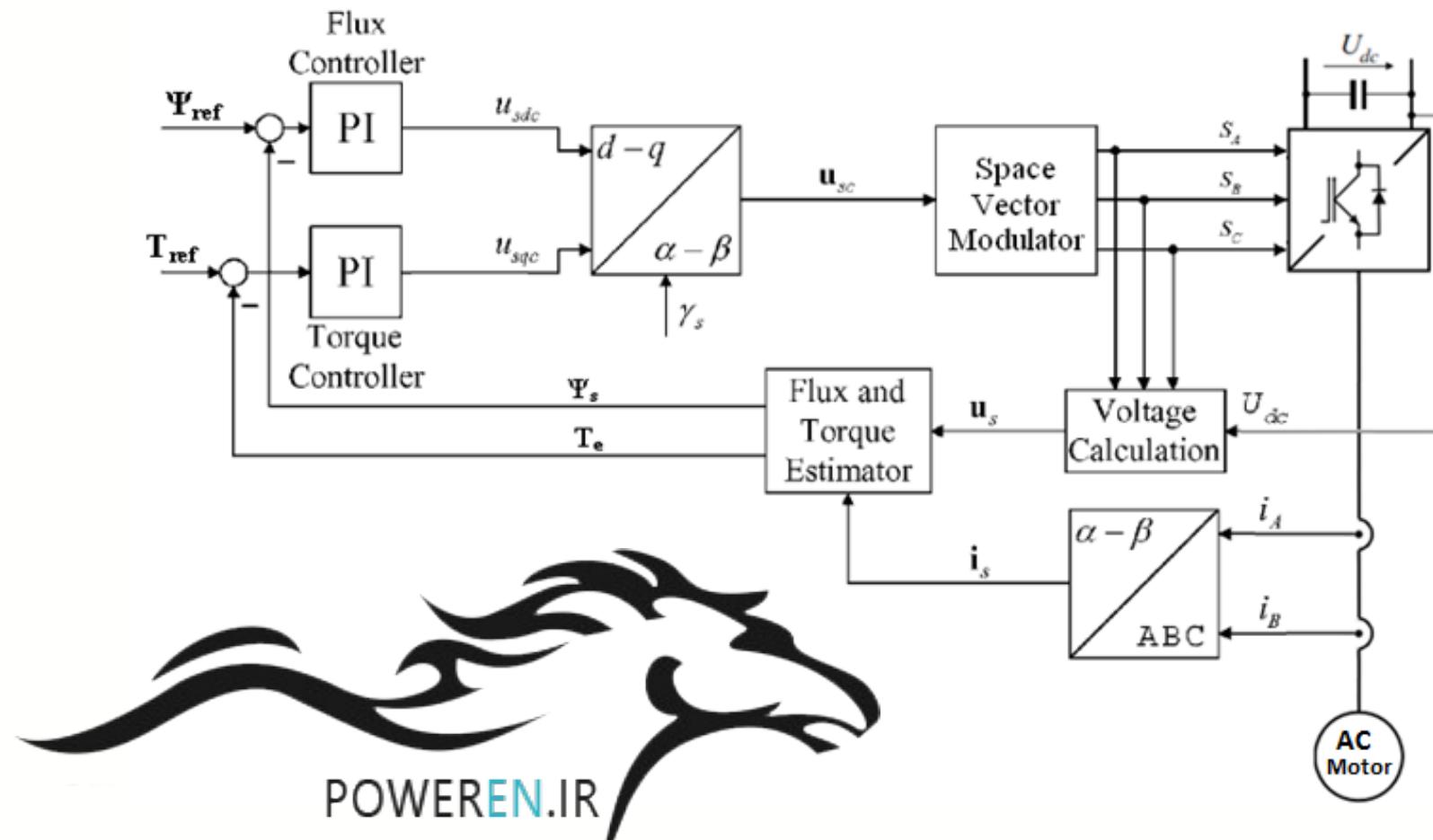
- ✓ اغلب طرحهای فوق از حداقل یک کنترل کننده PI برای تنظیم مقادیر شار/ گشتاور استفاده می کنند که نتیجتاً سادگی روش ST-DTC را از دست داده اند. اما در عوض ریپل گشتاور کمتری را ایجاد می کنند.
- ✓ از بین طرحهای فوق، طرح «کنترل حلقه بسته شار و گشتاور در مختصات کارتزین و کنترل شار استاتور» بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. این روش با نام اختصاری SVM-DTC شناخته می شود و در درایوهای تجاری ساخته شده نیز مورد استفاده قرار گرفته است.



## □ کنترل مستقیم گشتاور موتور الکتری به روش SVM-DTC

### ➤ کنترل حلقه بسته شار و گشتاور در مختصات کارتزین

- ✓ به دلیل مشکلات روش DTC پایه یا ST-DTC که از جمله آنها می توان به فرکانس سوئیچینگ متغیر، ریپل دائمی شار و گشتاور و وجود خطای حالت دائمی در شار و گشتاور اشاره نمود، استفاده از کنترلرهای PI در روش DTC در توجه نظر قرار گرفت.



- ✓ خروجی های کنترلرهای PI مقادیر ولتاژ محورهای  $d$  و  $q$  هستند که پس از افزودن مولفه های دکوپله ساز ولتاژ و انتقال به دستگاه ساکن  $\alpha\beta$  به عنوان ولتاژ مرجع استاتور شناخته شده و برای ایجاد به اینورتر SVM اعمال می گردند.