



مبحث سوم:

محركه های موتورهای القایی

- ☐ مروری بر موتورهای القایی سه فاز
- ☐ روشهای قدیمی کنترل سرعت موتورهای القایی
- ☐ روشهای جدید کنترل سرعت موتورهای القایی
- ☐ کنترل سرعت موتور القایی به روش اسکالر
- ☐ کنترل برداری موتور القایی





❖ مزایای موتورهای القایی:

- ✓ نیاز به نگهداری کمتر
- ✓ قابلیت اطمینان بالاتر
- ✓ هزینه اولیه کمتر و ارزانتر
- ✓ وزن، حجم و اینرسی کمتر
- ✓ راندمان بیشتر
- ✓ استحکام بالاتر و قابلیت کار در محیطهای همراه با گرد و غبار و در محیطهای قابل انفجار

❖ مهم ترین عیب موتورهای القایی:

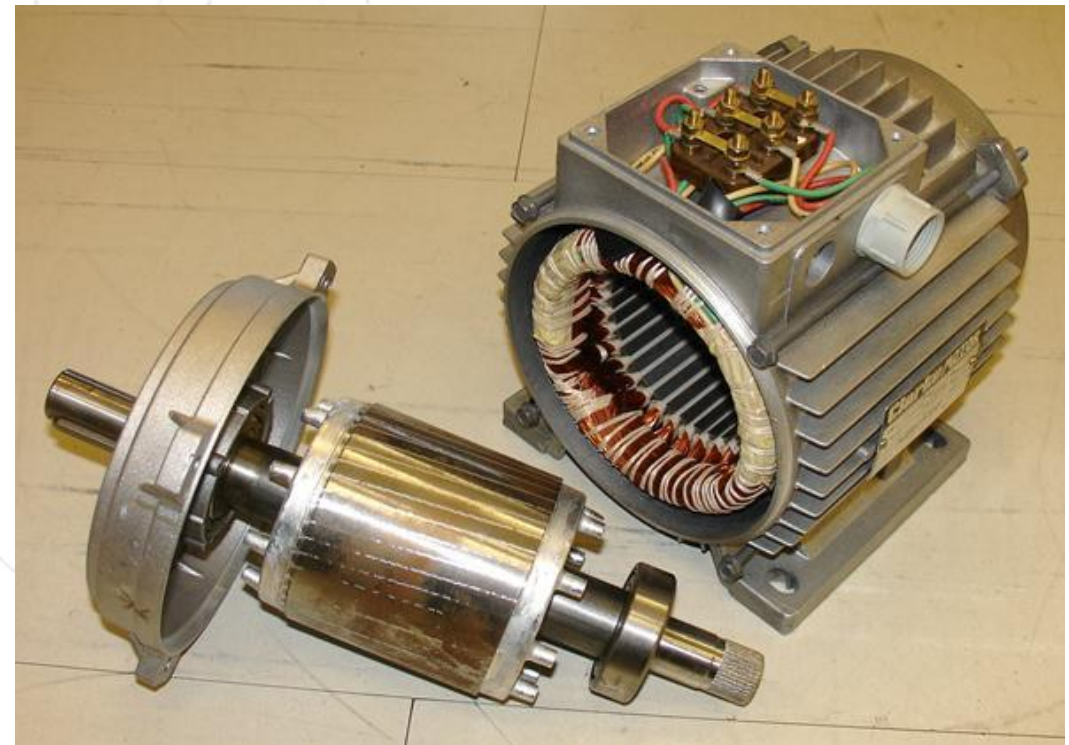
- ✓ وابسته بودن سرعت به گشتاور بار در حالت بدون استفاده از سیستم کنترل خارجی

❖ کاربرد:

- ✓ در اغلب کاربردهای صنعتی و غیرصنعتی



(ب) روتور موتور القایی نوع روتور سیم پیچی شده



(الف) موتور القایی نوع قفس سنجابی

❖ چگونگی ایجاد گشتاور در موتور القایی:

✓ اعمال ولتاژ به استاتور سبب ایجاد جریان در سیم پیچهای استاتور و در نتیجه سبب بوجود آمدن میدان دوار مغناطیسی استاتور (F_s) در مدار مغناطیسی (شامل هسته استاتور، فاصله هوایی و هسته روتور) می گردد. عبور شار از میان هسته روتور و در نتیجه سیم پیچهای روتور سبب القای ولتاژ در سیم پیچهای روتور می گردد. با توجه به اتصال کوتاه بون سیم پیچهای روتور و یا اتصال روتور به منبع خارجی، جریانی در سیم پیچهای روتور القا می گردد که سبب ایجاد میدان مغناطیسی دوار روتور (F_r) می شود. بر هم کنش این دو میدان (همانند اثر دو آهنربا بر یکدیگر) سبب ایجاد گشتاور و در نتیجه چرخش روتور می گردد.

$$\omega_{ms} = \frac{2}{P} \omega = \frac{4\pi f}{P} \text{ rad / sec} \quad (1)$$

P = تعداد قطبها

f = فرکانس تغذیه استاتور

$$\omega_{sl} = \omega_{ms} - \omega_m \quad (2)$$

ω_{ms} = سرعت سنکرون

ω_m = سرعت روتور

$$s = \frac{\omega_{ms} - \omega_m}{\omega_{ms}} \quad (3)$$

ω_{sl} = سرعت لغزش

s = لغزش

$$\omega_m = (1 - s) \omega_{ms} \quad (4)$$

$$T = K \hat{F}_s \hat{F}_r \sin \delta_r \quad (5)$$

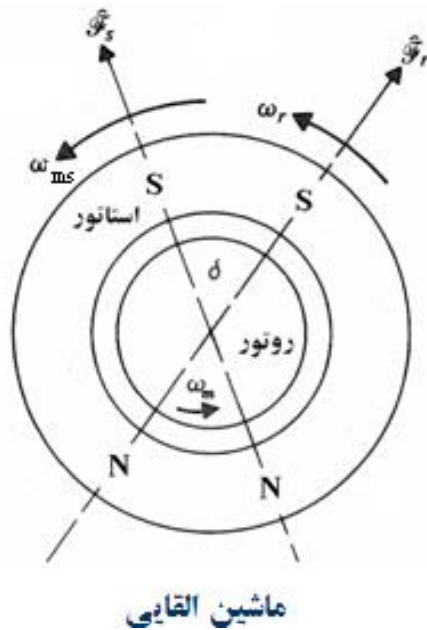
T = گشتاور الکترومغناطیسی لحظه ای

K = ضریب ثابت

$\hat{F}_s$ = دامنه میدان دوار استاتور

$\hat{F}_r$ = دامنه میدان دوار روتور

δ_r = زاویه گشتاور یا اختلاف فاز میان mmf های استاتور و روتور

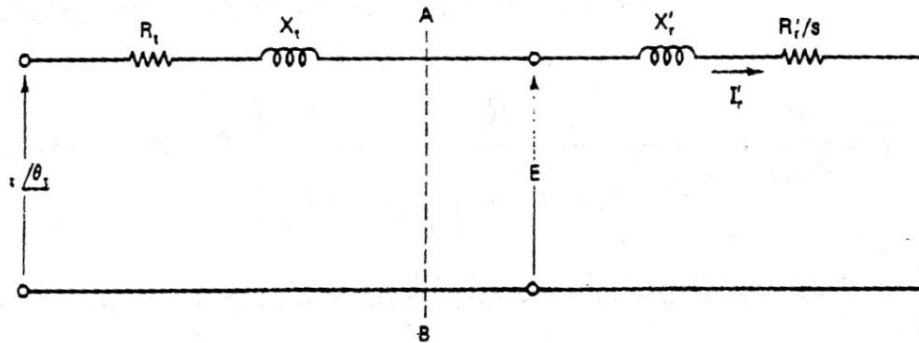


❖ گشتاور در حالات مختلف روتور نسبت به سرعت سنکرون:

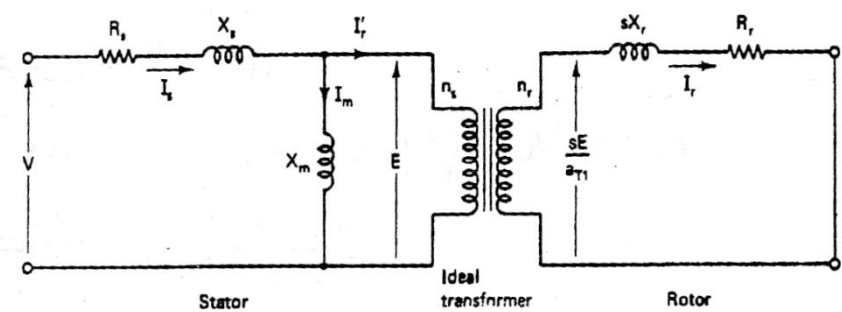
$$\omega_m < \omega_{ms} \Rightarrow T > 0 \quad (6)$$

$$\omega_m = \omega_{ms} \Rightarrow T = 0 \quad (7)$$

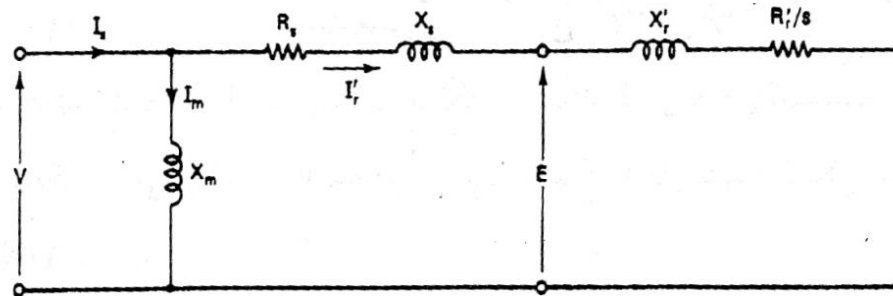
$$\omega_m > \omega_{ms} \Rightarrow T < 0 \quad (8)$$



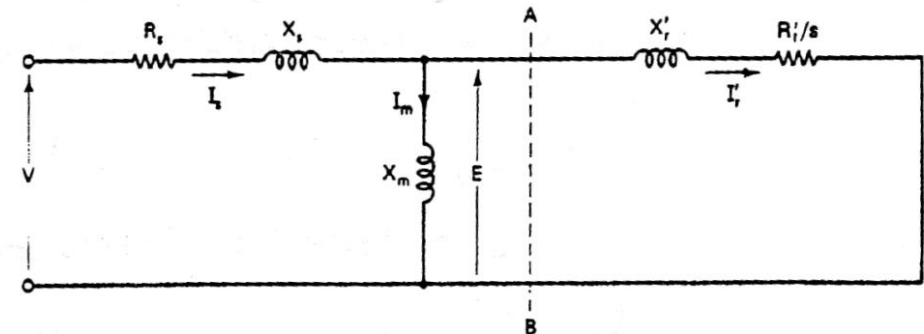
(ج) مدار معادل فاز ساده شده رجوع شده به استاتور



(الف) مدار معادل در فاز



(د) مدار معادل تقریبی در فاز رجوع شده به استاتور



(ب) مدار معادل فاز رجوع شده به استاتور

$$\omega_m = \omega_{ms}(1 - s) \quad (9)$$

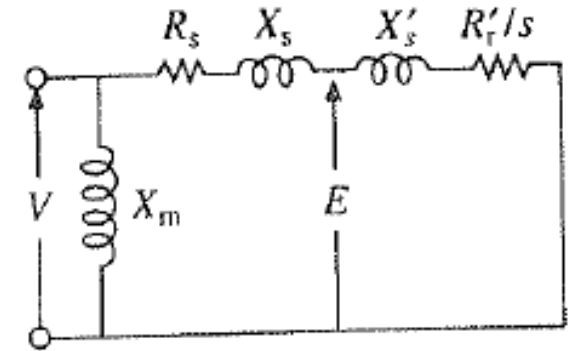
$$\bar{I}'_r = \frac{V}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right) + j(X_s + X'_r)} \quad (10)$$

$$P_g = 3I'^2_r \frac{R'_r}{s} \quad (11)$$

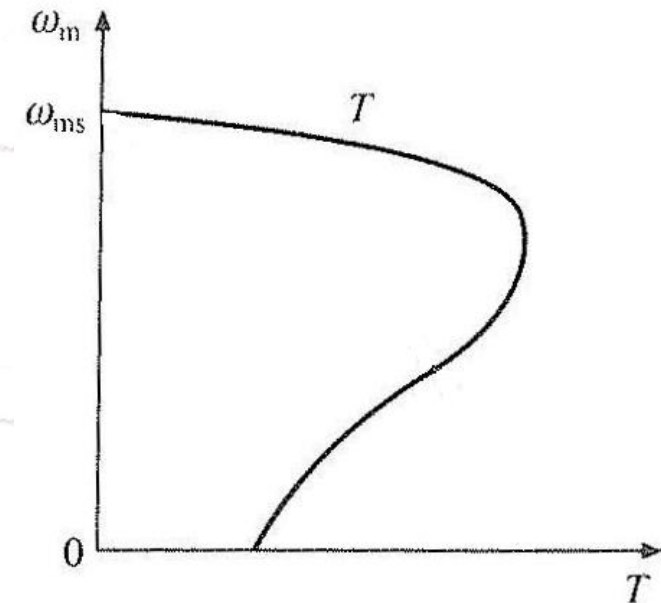
$$T = P_g / \omega_{ms} = P_m / \omega_m \quad (12)$$

$$T = \frac{3}{\omega_{ms}} I'^2_r \frac{R'_r}{s} \quad (13)$$

$$T = \frac{3}{\omega_{ms}} \left[\frac{V^2 R'_r / s}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_s + X'_r)^2} \right] \quad (14)$$



مدار معادل تقریبی



مشخصه گشتاور-سرعت موتور القایی سه فاز

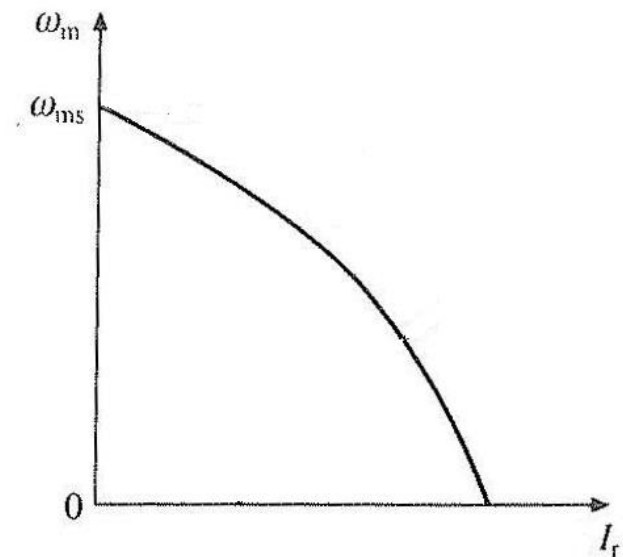
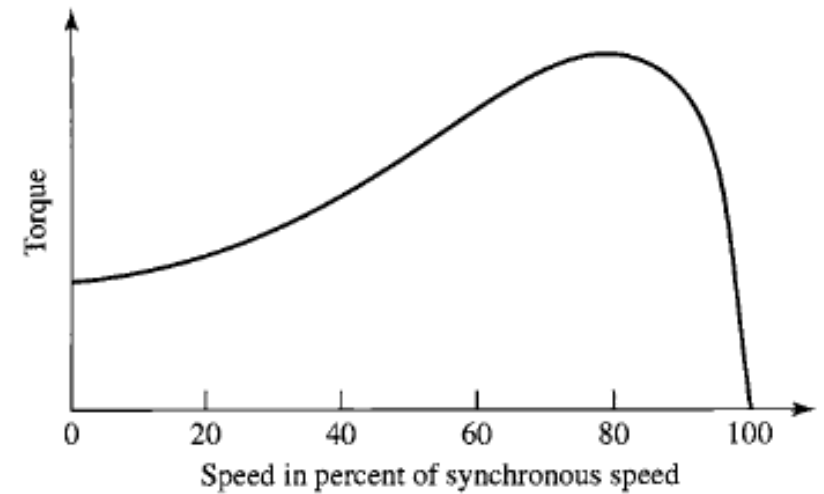
$$T = \frac{3}{\omega_{ms}} \left[\frac{V^2 R'_{r/s}}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s} \right)^2 + (X_s + X'_r)^2} \right] \quad (14)$$

گشتاور زمانی حداکثر است که توان فاصله هوایی P_g ماکزیمم باشد. لذا باید:

$$\frac{R'_r}{s_m} = \pm \sqrt{R_s^2 + (X'_r + X_s)^2} \quad (15)$$

$$s_m = \pm \frac{R'_r}{\sqrt{R_s^2 + (X_s + X'_r)^2}} \quad (16)$$

$$T_{max} = \frac{3}{2\omega_{ms}} \left[\frac{V^2}{R_s \pm \sqrt{R_s^2 + (X_s + X'_r)^2}} \right] \quad (17)$$

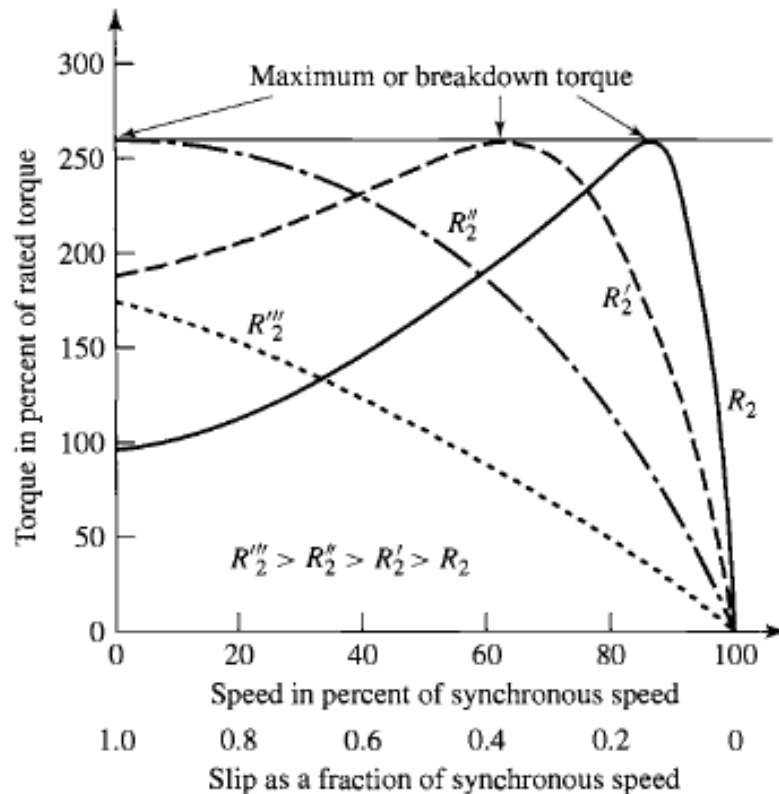


تغییرات جریان موتور القایی بر حسب سرعت

✓ مقدار گشتاور شکست به مقاومت روتور بستگی ندارد، اما سرعت متناظر با گشتاور شکست با تنظیم دلخواه مقاومت روتور قابل تغییر است.

✓ گشتاور راه اندازی با افزایش مقاومت روتور افزایش می یابد.

✓ جریان راه اندازی نیز با افزایش مقاومت روتور کاهش می یابد.



$$T_{\max} = \frac{3}{2\omega_{ms}} \left[\frac{V^2}{R_s \pm \sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r')^2}} \right] \quad (17)$$

مشخصه های گشتاور-سرعت موتور القایی سه فاز با مقاومتیهای

روتور متفاوت



❖ روشهای راه اندازی موتور القایی:

- ✓ کاهش ولتاژ تغذیه به روش اتصال ستاره - مثلث (موتور با اتصال دائم مثلث ابتدا ستاره بسته می شود)
- ✓ کاهش ولتاژ تغذیه با استفاده از اتوترانس
- ✓ کاهش ولتاژ تغذیه با استفاده از راه انداز راکتور (سلف) سری با استاتور
- ✓ راه اندازی با سیم پیچ های چند تکه در استاتور
- ✓ استفاده از مقاومت خارجی روتور در مورد موتورهای با روتورسیم پیچی شده
- ✓ کاهش ولتاژ تغذیه استاتور با استفاده از راه انداز نرم (Soft Starter) (مدار کنترل کننده ولتاژ AC)
- ✓ راه اندازی با استفاده از اینورتر فرکانسی

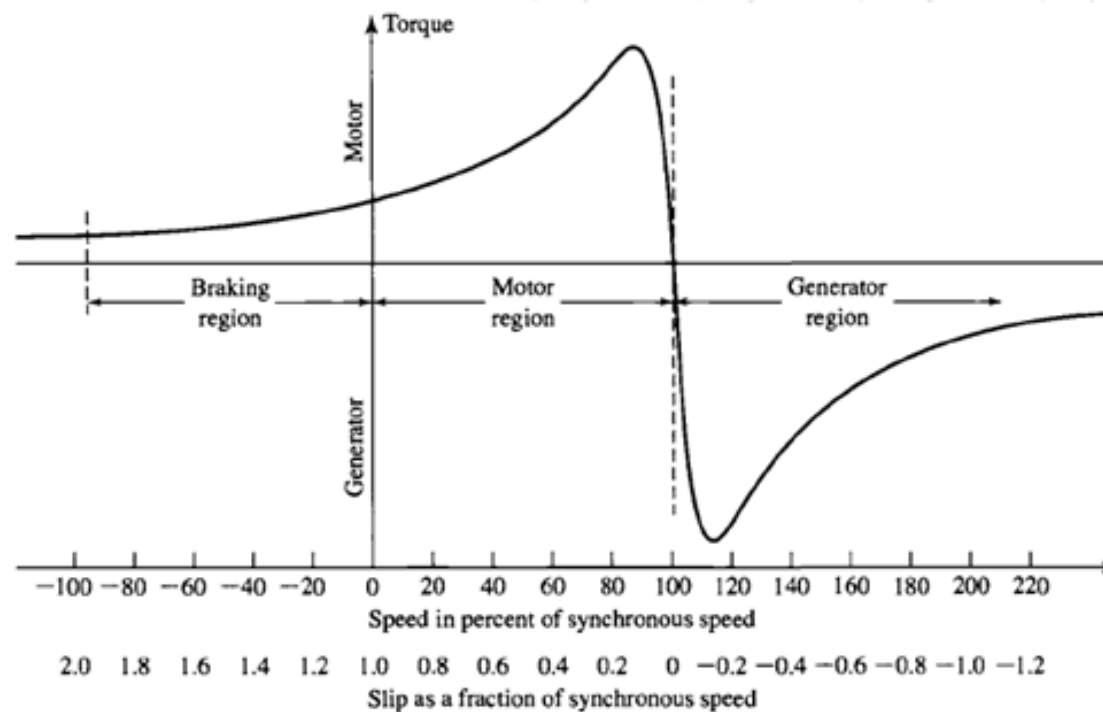


❖ روشهای ترمز کردن موتور القایی:

✓ ترمز ژنراتوری

✓ ترمز با معکوس کردن تغذیه (Plugging)

✓ ترمز دینامیکی (ac، خازنی، **dc**)



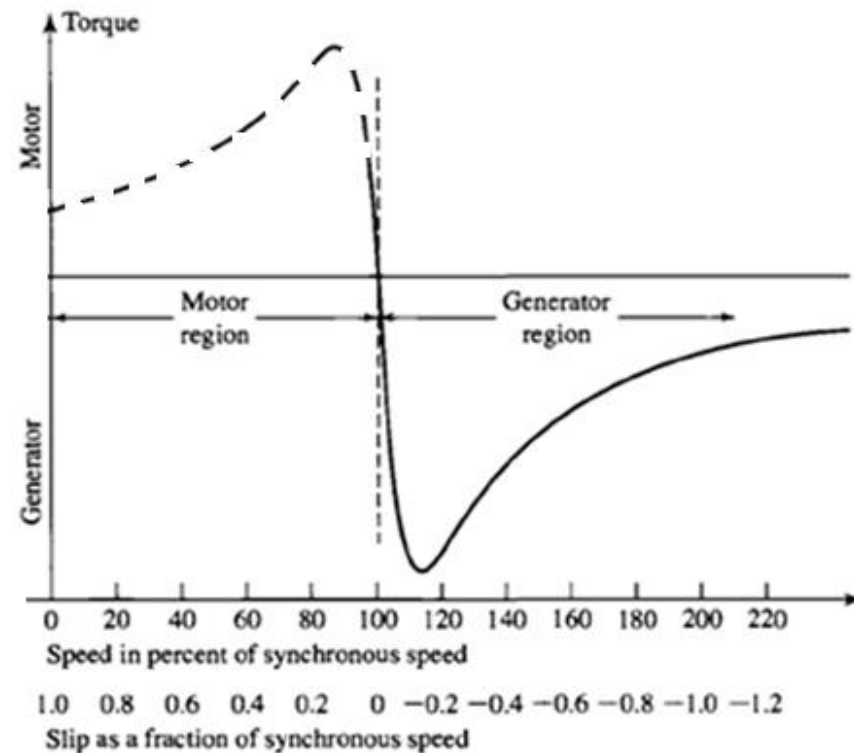
Induction-machine torque-slip curve showing braking, motor, and generator regions.

مشخصه کامل گشتاور - سرعت ماشین القایی در سرعتهای بالاتر و پائین تر از سرعت سنکرون

➤ روش های ترمز کردن موتورهای القایی: **ترمز ژنراتوری**

- ✓ در این روش ترمزی، انرژی مکانیکی محور پس از تبدیل به انرژی الکتریکی توسط ماشین القایی به منبع AC متصل به موتور تحویل می شود.
- ✓ اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان استاتور که در حالت موتوری بین صفر تا ۹۰ درجه بود به ۹۰ تا ۱۸۰ درجه تغییر می یابد.

$$P_{in} = 3V I_s \cos \phi_s \quad (6.26)$$



مشخصه گشتاور - سرعت موتور القایی در ناحیه ترمز ژنراتوری



❖ **ترمز ژنراتوری:**

✓ در این حالت موتور القایی در سرعت بالاتر از سرعت سنکرون کار کرده و بصورت یک ژنراتور آسنکرون قادر به تحویل انرژی به منبع است (ماشین در این حالت حتما باید به شبکه (و یا خازن باردار) متصل باشد تا توان راکتیو مورد نیازش توسط شبکه فراهم شود)

❖ **توجیه عمل ترمز ژنراتوری:**

✓ در سرعت بالاتر از سرعت سنکرون، سرعت نسبی بین میدان دوار استاتور و روتور منفی است. لذا ولتاژ و جریان روتور برعکس حالت موتوری خواهند بود. بنابراین جهت جریان استاتور نیز برای تعادل mmf ها منفی خواهد گشت. لذا جهت قدرت الکتریکی نیز تغییر نموده و قدرت از سوی ماشین به منبع جریان پیدا می کند. جریان مغناطیس کنندگی مورد نیاز (توان راکتیو مصرفی) برای ایجاد میدان گردان از منبع تغذیه استاتور تامین می شود. لذا استاتور حتما باید به منبع وصل باشد.

❖ **محدوده عملکرد ترمز ژنراتوری:**

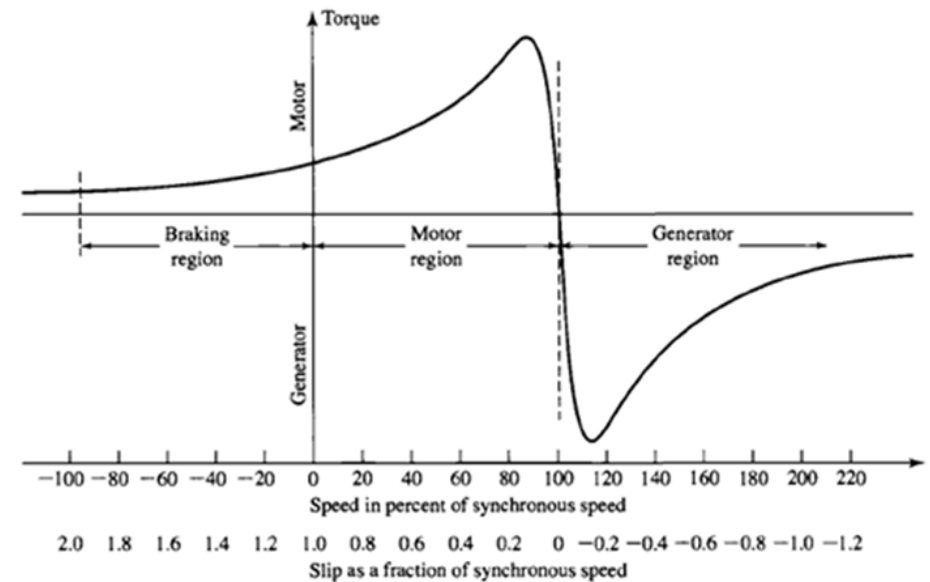
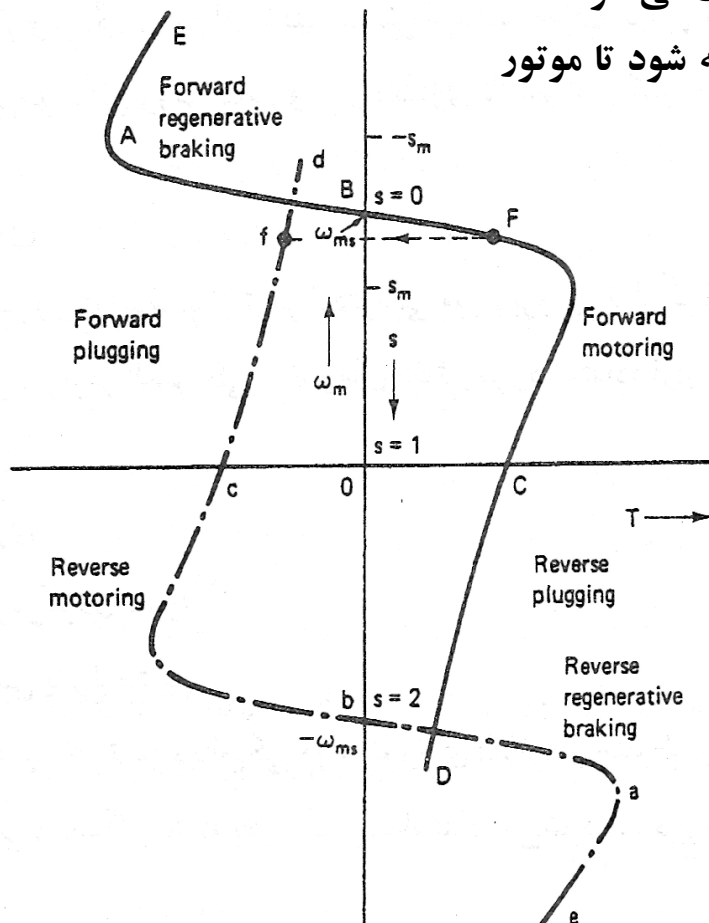
✓ برای کار ترمز ژنراتوری، سرعت موتور باید از فرکانس سنکرون بالاتر باشد. در صورت استفاده از منبع با فرکانس متغیر، می توان با تنظیم فرکانس، سرعت میدان گردان (سنکرون) را همواره کوچکتر از سرعت موتور قرار داد.

✓ در صورتیکه از ترمز ژنراتوری برای ثابت نگهداشتن سرعت بارهای فعال استفاده شود، نباید سرعت ماشین از سرعت متناظر گشتاور شکست معکوس بیشتر شود. برای این کار می توان از ترمز مکانیکی در کنار ترمز ژنراتوری استفاده نمود تا از افزایش سرعت جلوگیری نمود.

روش های ترمز کردن موتورهای القایی: ترمز پلاگینگ

ترمز با معکوس کردن تغذیه:

- ✓ با جابجایی توالی تغذیه استاتور، حالت ترمزی ایجاد می شود (ناحیه cd از منحنی نقطه چین). با اینکار سرعت سنکرون ω_{ms} منفی شده و مقدار لغزش s از یک بیشتر می گردد. گشتاور ترمزی ایجاد شده سبب کاهش سرعت می شود.
- ✓ با نزدیک شدن به سرعت صفر، باید تغذیه از روی موتور برداشته شود تا موتور در جهت عکس نچرخد.
- ✓ لذا نیاز به سنسور سرعت جزو ملزومات این روش است.



(الف) مشخصه گشتاور - سرعت موتور القایی با توالی تغذیه مثبت (ABC)

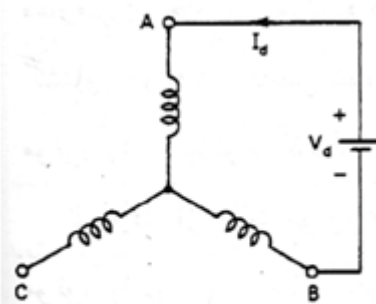
(ب) تغییر مشخصه گشتاور - سرعت موتور القایی با تغییر توالی

تغذیه از ABC به ACB

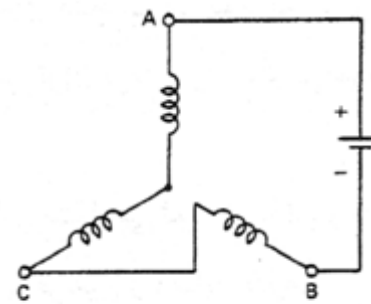
➤ روش های ترمز کردن موتورهای القایی: **ترمز دینامیکی dc**

❖ ایده این روش ترمز:

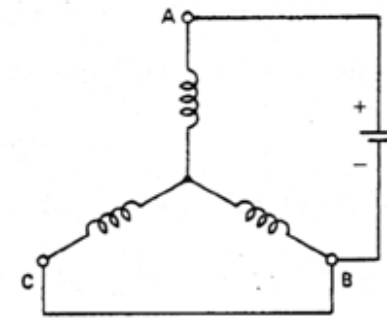
- ✓ در این روش موتور از منبع تغذیه ac قطع و به منبع تغذیه dc متصل می شود.
- ✓ لذا میدان دوار به یک میدان ساکن تبدیل شده و سرعت موتور کاهش یافته تا نهایتاً موتور متوقف گردد.



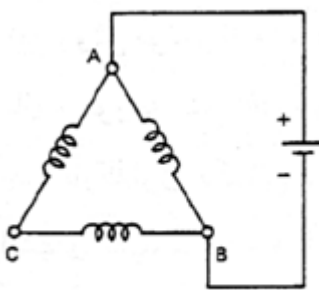
(الف)



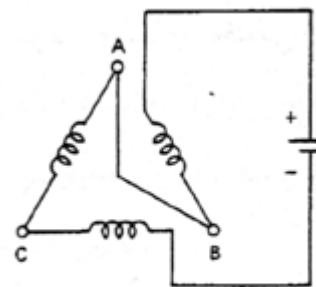
(ب)



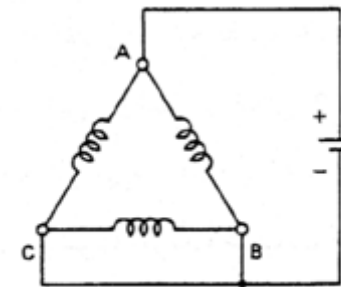
(ج)



(د)



(ز)



(هـ)

آرایش های مختلف استاتور در حالت ترمز دینامیکی



❖ روشهای قدیمی:

- ✓ روش تغییر تعداد قطبها (با تغییر سیم پیچها)
- ✓ روش مدولاسیون دامنه قطب
- ✓ روش تغییر ولتاژ استاتور
- ✓ روش تغییر مقاومت روتور (فقط در نوع روتور سیم بندی شده)

❖ روشهای جدید:

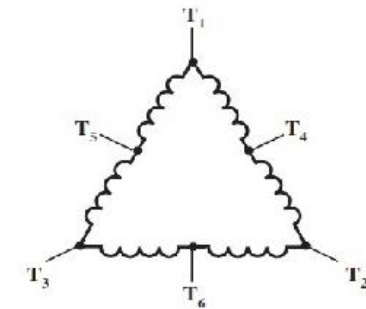
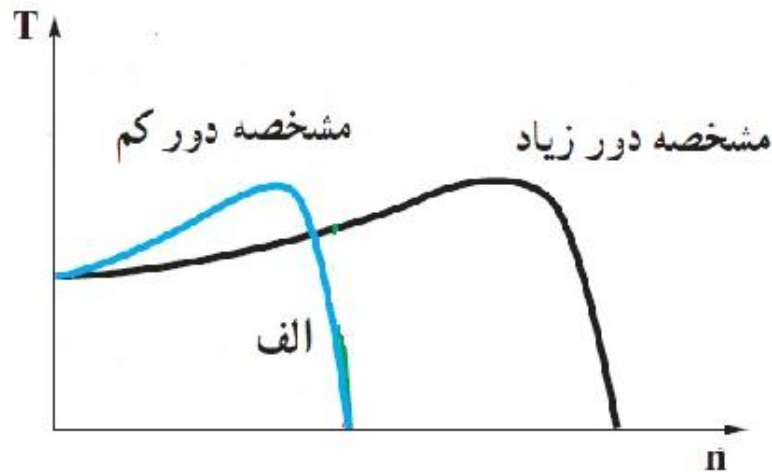
- ✓ روش تنظیم توان لغزش (فقط در نوع روتور سیم بندی شده)
- ✓ روشهای کنترل اسکالر (در همه انواع موتورها)
- ✓ تغییر فرکانس (کمتر استفاده می شود)
- ✓ تغییر همزمان ولتاژ – فرکانس (کنترل اسکالر یا روش V/f ثابت) (بسیار رایج است)

❖ روشهای مدرن:

- ✓ روشهای کنترل برداری
- ✓ روشهای کنترل مستقیم گشتاور
- ✓ سایر روشهای جدید کنترلی نظیر کنترل مستقیم توان، کنترل خطی سازی با فیدبک

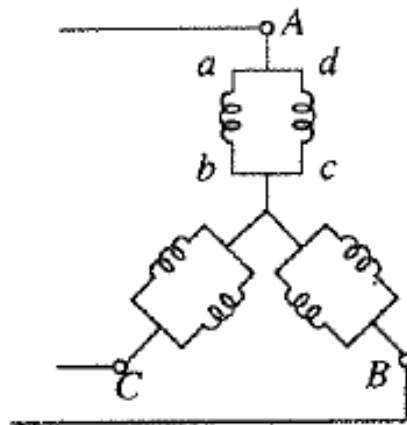


- ✓ با توجه به آنکه سرعت موتور اندکی کمتر از سرعت سنکرون است و سرعت سنکرون نیز به فرکانس تغذیه و تعداد قطبهای موتور بستگی دارد، با تغییر آرایش سیم بندی و سربندی کلافها، تعداد قطبها را می توان به شماره های بسیار محدود تغییر داد.
- ✓ موتورهایی که با این روش سرعت شان تغییر داده می شود، موتورهای چندسرعه و یا موتورهای با تغییر قطب نامیده می شوند.
- ✓ با توجه به آنکه تعداد قطبهای استاتور و روتور باید با هم برابر باشند، در موتورهای القایی با روتور سیم پیچی شده، تغییر تعداد قطبها در روتور بسیار سخت است، اما در موتور قفس سنجابی، تعداد قطبهای روتور تابع تعداد قطبهای استاتور هستند. لذا این روش فقط مخصوص موتورهای القایی قفس سنجابی است.
- ✓ سیم پیچهای لازم برای تغییر تعداد قطبها و سربندیهای مربوطه در مرحله طراحی و ساخت موتور باید در نظر گرفته شوند.
- ✓ در برخی طراحی ها، از دو دسته سیم پیچ استفاده می شود که در هر سرعت فقط یک دسته از آنها کار می کنند، اما در برخی دیگر نظیر طرح دالاندر، در هر سرعت، تمامی سیم پیچها درگیر هستند و لذا از کل ظرفیت موتور در هر لحظه استفاده می شود.

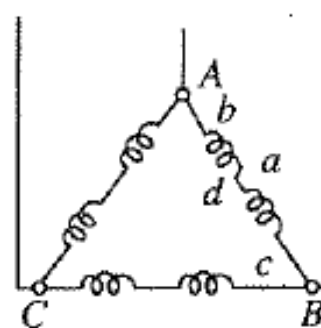


سرعت	سه فاز			
	L ₁	L ₂	L ₃	
کم	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄ , T ₅ , T ₆ باز
زیاد	T ₄	T ₅	T ₆	T ₁ , T ₂ , T ₃ وصل به هم

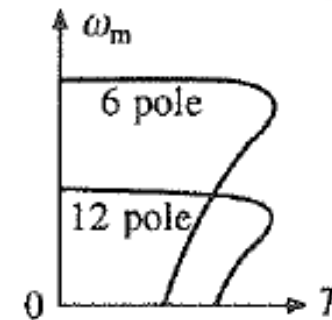
الف - مثلث، ستاره دابل



(a) High speed (6-pole)



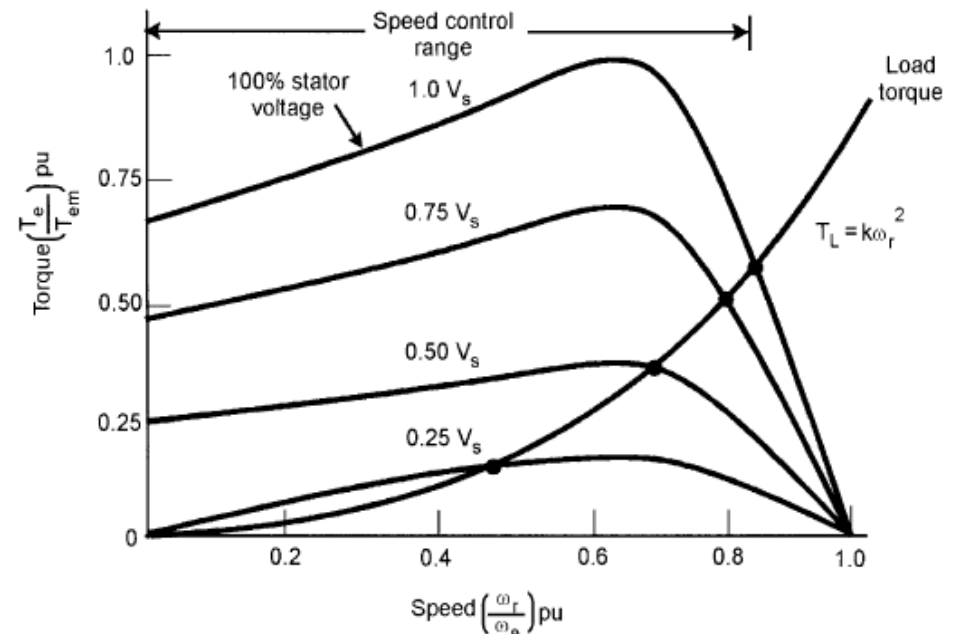
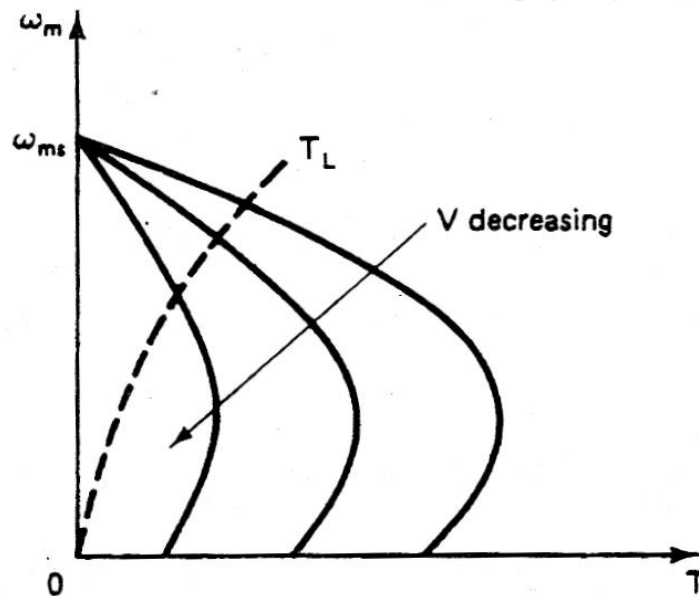
(b) Low speed (12-pole)



(c) Speed-torque curves

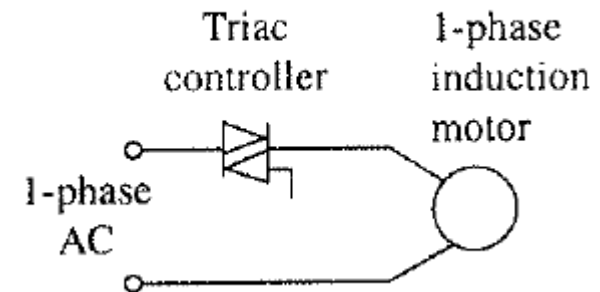
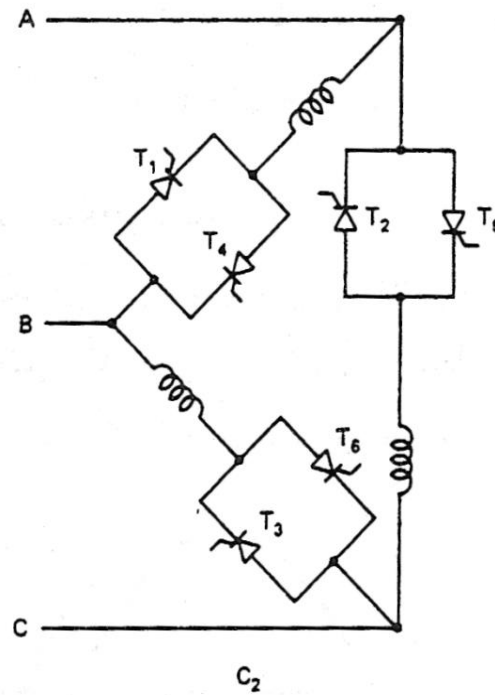
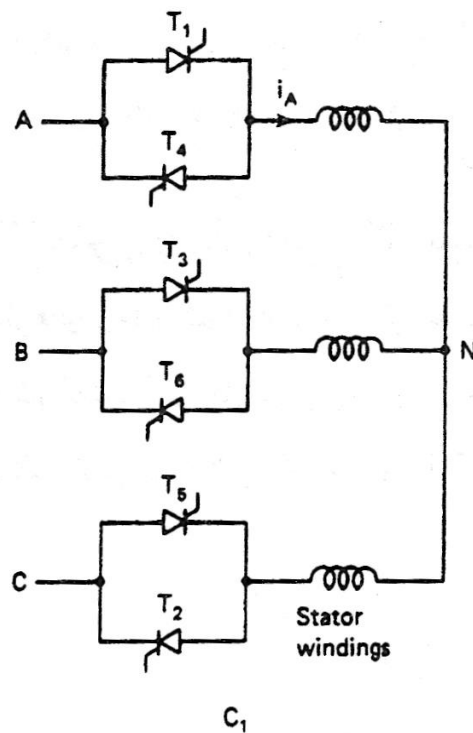
Fig. 6.26 Constant torque control

- ✓ گشتاور فاصله هوایی در موتورهای القایی متناسب با مجذور ولتاژ تغذیه است. لذا برای کنترل سرعت، ولتاژ تغذیه به نحوی تنظیم می شود که در سرعت مورد نظر، گشتاور بار بوسیله موتور ایجاد شود.
- ✓ افزایش سرعت در این روش تا سرعت نامی امکان پذیر است. زیرا نمی توان ولتاژ را به مقدار بالاتر از مقدار نامی آن تغییر داد.
- ✓ **کاربرد:** این روش برای کاربردهایی مناسب است که گشتاور بار با کاهش سرعت تقلیل می یابد. نظیر بارهای پنکه ای و پمپها.



کنترل سرعت با تغییر مقدار موثر ولتاژ استاتور

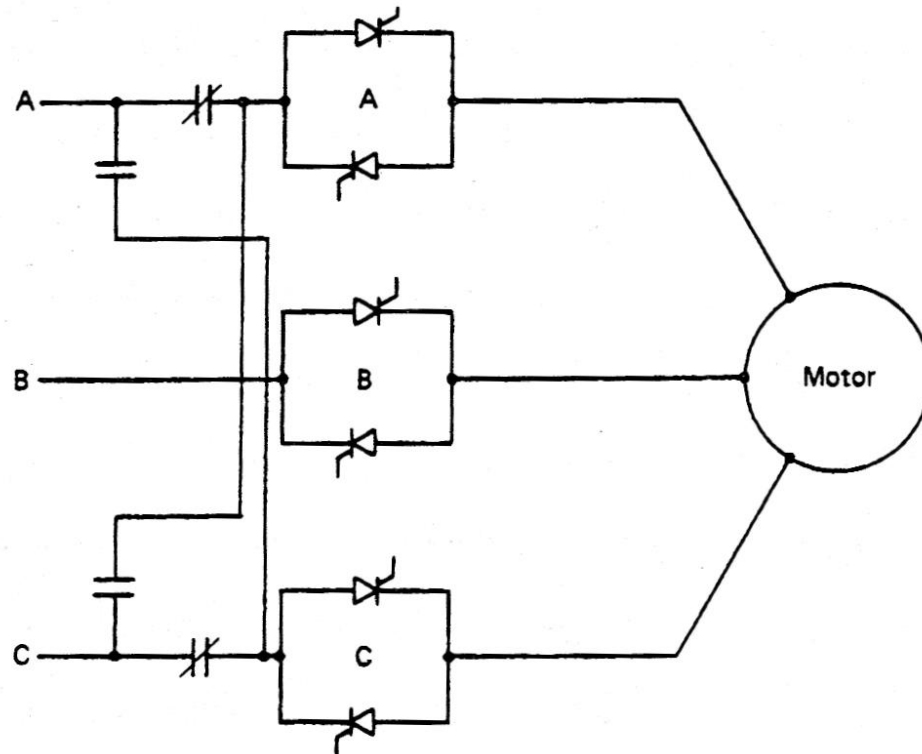
- ✓ ولتاژ متغیر با استفاده از مدارها و کنترل کننده های ولتاژ ac بدست می آید.
- ✓ این مدارها، مقدار موثر ولتاژ موتور را در فرکانس ثابت تغییر می دهند.
- ✓ **معایب این کنترل کننده ها:** ایجاد هارمونیک قابل ملاحظه در ولتاژ خروجی، ضریب قدرت پائین، افزایش تلفات، افت ظرفیت موتور
- ✓ در کاربردهای توان پائین امکان جایگزینی هر دو ترستور آنتی پارالل با یک تریاک وجود دارد.
- ✓ با استفاده از مدارهای زیر، عملکرد دو ربع (نواحی I و IV)، یعنی موتور در سرعت پائین و ترمزی در سرعت بالا امکان پذیر است.



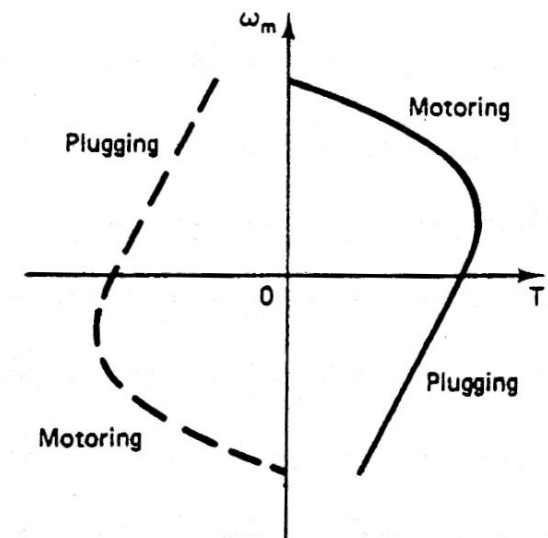
(ب) مدار کنترل کننده ولتاژ تکفاز با استفاده از تریاک

(الف) مدار کنترل کننده ولتاژ سه فاز با استفاده از ترستور

- ✓ با جابجایی دو فاز امکان عملکرد چهار ربعی هم وجود دارد.
- ✓ جابجایی دو فاز توسط مدارات کنتاکتوری و یا سوئیچهای تریستوری نیز قابل انجام است.
- ✓ برای کاهش ظرفیت نامی کنتاکتورها، تغییر وضعیت کنتاکتور پس از صفر شدن جریان انجام می گیرد.
- ✓ همچنین می توان از مدارهای تریستوری برای جابجایی دو فاز استفاده نمود.
- ✓ از روش کنترل ولتاژ می توان در مدارات راه انداز نرم موتورهای القایی و بمنظور کاهش جریان راه اندازی استفاده نمود.

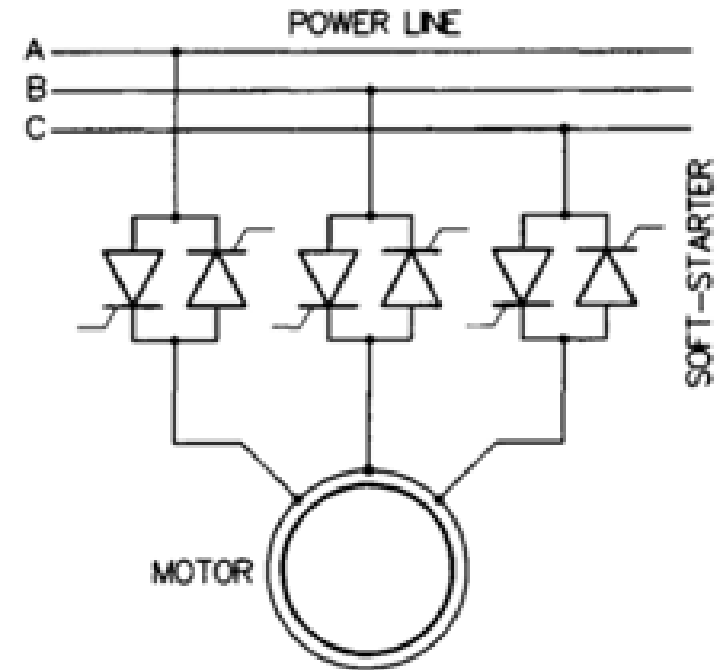
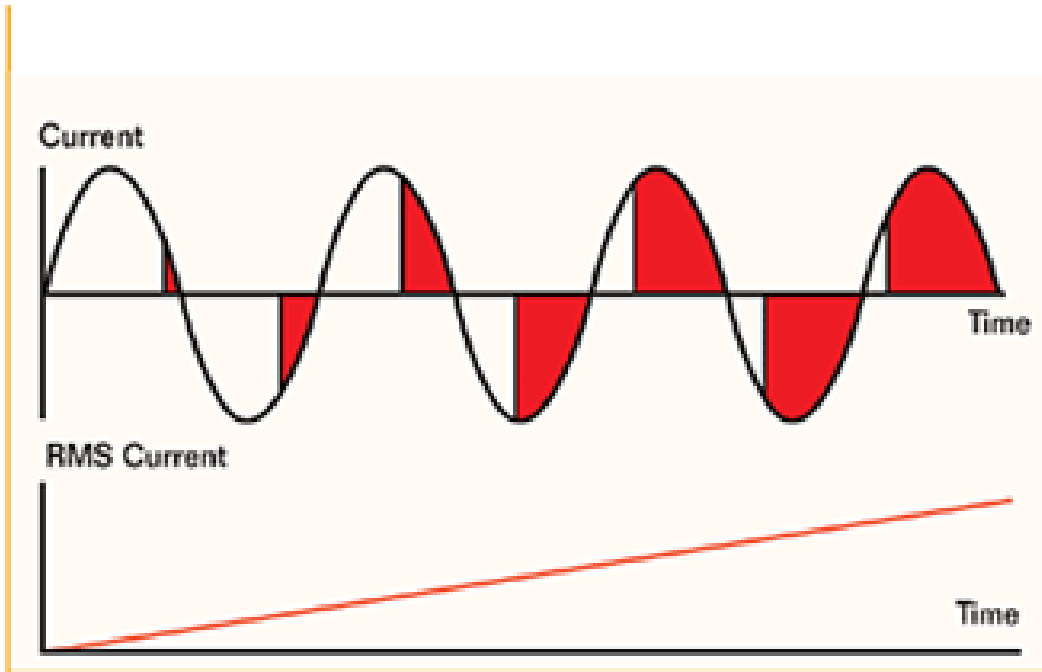


(الف) مدار کنترل کننده ولتاژ سه فاز با عملکرد چهار ربعی



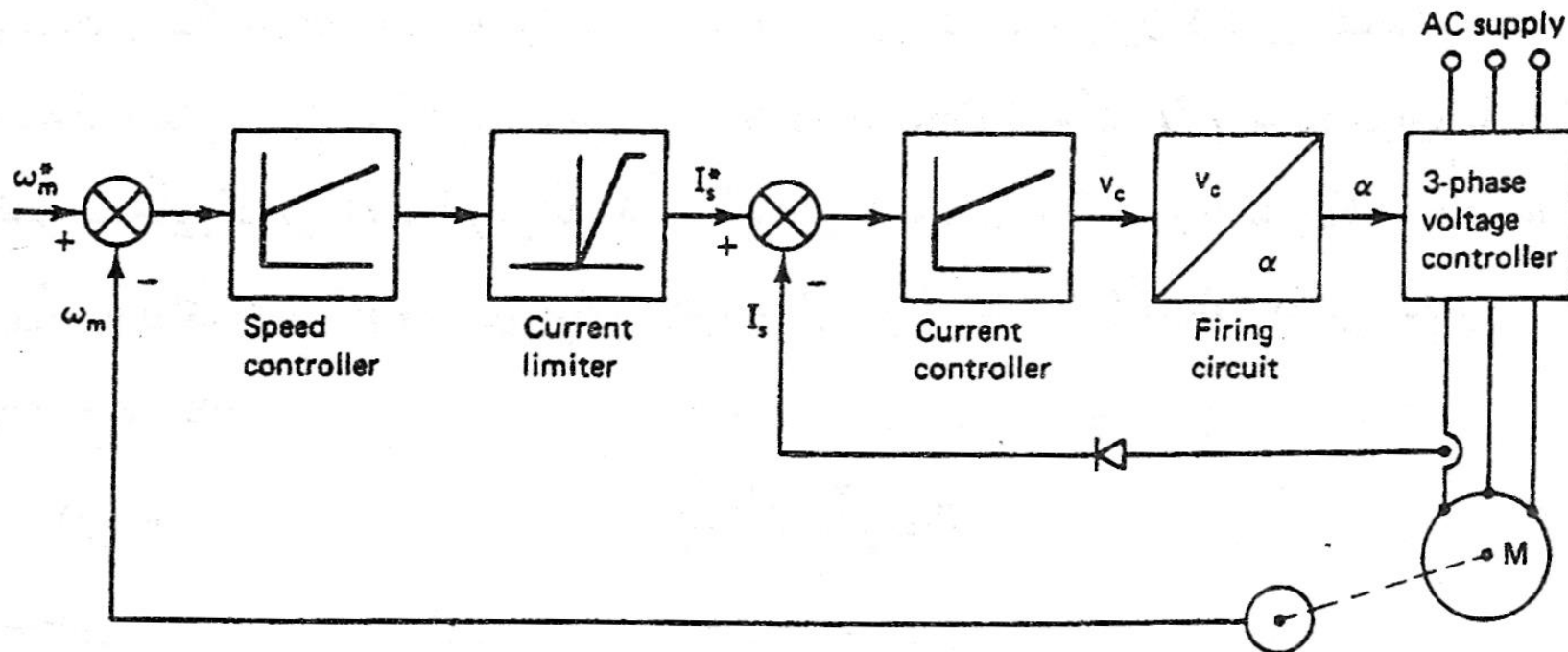
(ب) منحنی های سرعت - گشتاور در ولتاژ استاتور ثابت برای دو توالی فاز مثبت و منفی

✓ جهت راه اندازی نرم موتورهای القایی توان بالا و محدود نمودن جریان راه اندازی می توان از این روش استفاده نمود.



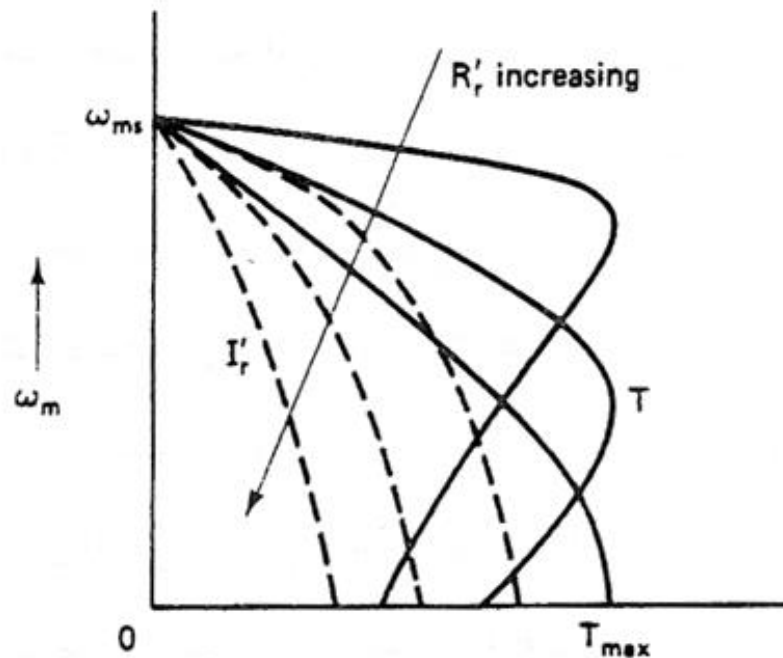
طرح کلی راه انداز نرم و تغییرات جریان موتور در حین راه اندازی

- ✓ در بسیاری از کاربردها، برای اتوماتیک نمودن کار، از حلقه کنترل سرعت استفاده می شود.
- ✓ مطابق شکل، از یک حلقه داخلی جریان و یک حلقه خارجی سرعت استفاده شده است.
- ✓ جریان همواره باید کنترل شود تا اضافه جریان ناشی از افزایش بار سبب صدمه دیدن موتور نشود.
- ✓ کنترلر سرعت معمولاً از نوع PI است. کنترلر جریان نیز از نوع PI می باشد.
- ✓ خروجی کنترلر سرعت، همان مرجع جریان است که باید در حد نامی جریان موتور، محدود گردد.
- ✓ مدار آتش بر اساس ولتاژ مورد نیاز موتور که توسط کنترلر جریان تعیین می گردد زاویه آتش تریستورها را تعیین می کند.



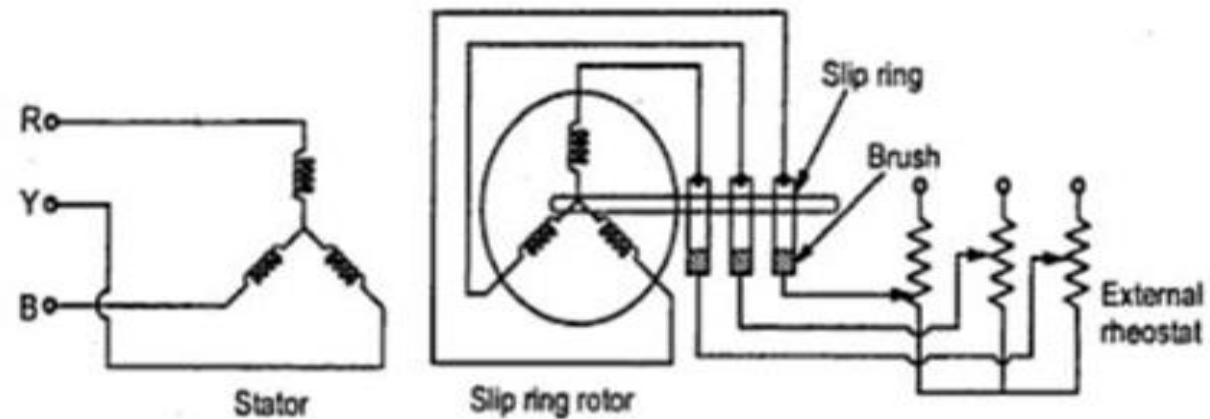
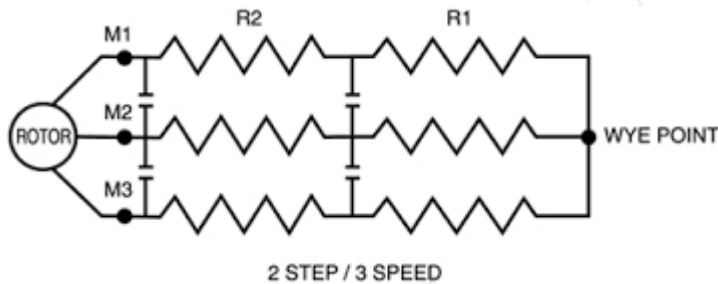
کنترل حلقه بسته سرعت تک ربعی با مدار کنترل ولتاژ

- ✓ این روش مخصوص موتورهای با روتور سیم بندی شده است.
- ✓ در گشتاور بار مشخص، سرعت روتور با افزایش مقاومت روتور کاهش می یابد. اما سرعت بی باری موتور از تغییرات مقاومت روتور تاثیر نمی پذیرد.
- ✓ راندمان موتور و تلفات مسی روتور در این روش با کاهش سرعت کم می شوند. لذا این روش، روش مفیدی نیست.
- ✓ از مزایای این روش می توان به ایجاد گشتاور ثابت و نسبت گشتاور به جریان بالا نام برد.

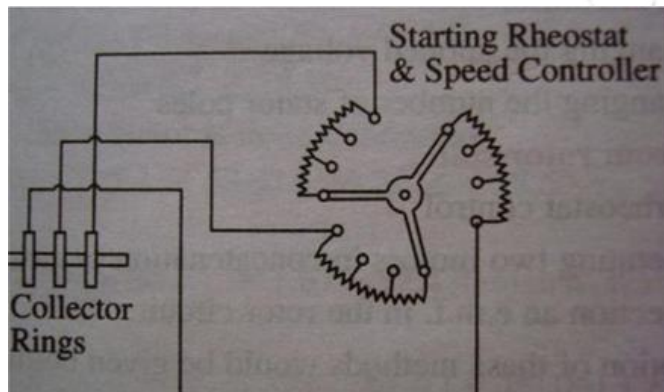


مشخصه های سرعت - گشتاور (خط پر) و سرعت - جریان رتور (خط چین)
در موتورهای رتور سیم بندی شده

- ✓ در طرح های اولیه این روش، از رئوستای سه فاز و یا مقاومتهای پله ای سه فاز در مدار روتور استفاده می شد.
- ✓ در طرحهای جدیدتر، ایجاد مقاومت متغیر در مدار روتور با استفاده از مدارات استاتیکی انجام می شود که در بخشهای بعد به آن اشاره می شود.



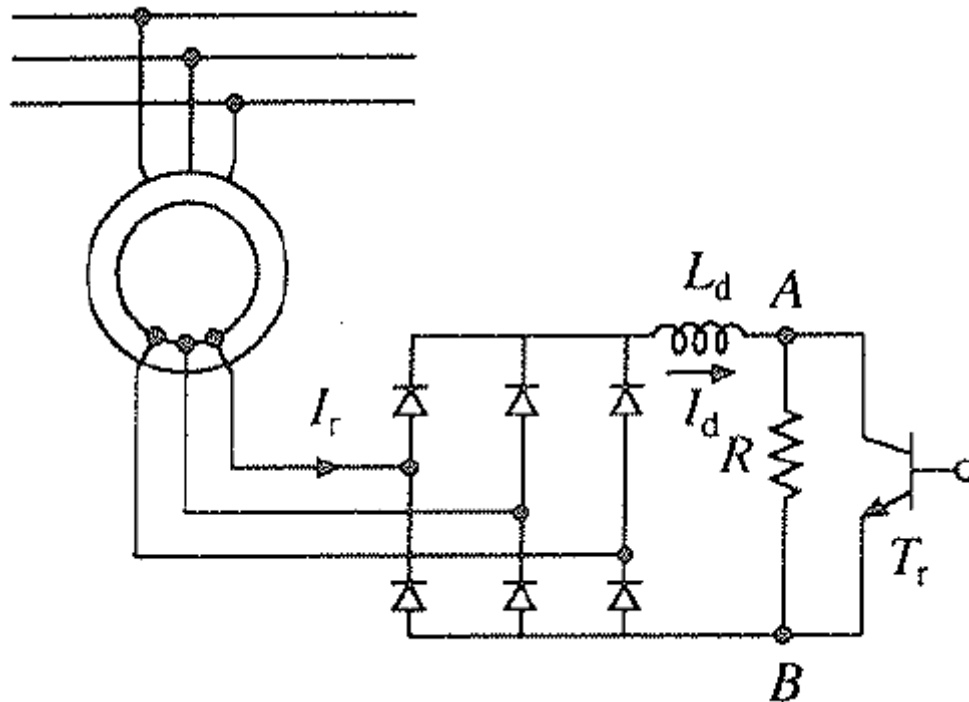
(الف) تغییر مقاومت روتور با رئوستای سه فاز



(ب) طرحهای مختلف تغییر پله ای مقاومت روتور

تغییر مقاومت روتور به روش کنترل استاتیکی

- ✓ یکی از روشهای کنترل سرعت موتور القایی که قبلاً راجع به آن صحبت شد، تغییر مقاومت روتور بود که طی آن برای تغییر سرعت موتور، بخشی از توان وارد شده به مدار روتور در مقاومت‌های سه فاز روتور بصورت حرارت تلف می‌گردد.
- ✓ مقاومت موثر روتور با استفاده از کنترل کننده های استاتیکی نیز قابل تنظیم است.
- ✓ در این طرح بجای استفاده از سه مقاومت رئوستایی خارجی در مدار روتور، از تنها یک مقاومت ثابت استفاده می‌شود.
- ✓ توان تلف شده در این مقاومت بوسیله کنترل یک سوئیچ استاتیکی تنظیم می‌شود.



تغییر مقاومت روتور به روش استاتیکی

$$\delta = \frac{t_{on}}{T} \quad (30)$$

ضریب وظیفه کلید:

$$E_R = I_d' R (T - t_{on}) \quad (31)$$

انرژی جذب شده توسط R طی یک پریود T:

$$P_r = \frac{1}{T} [I_d' R (T - t_{on})] \quad (32)$$

قدرت متوسط جذب شده توسط R طی یک پریود T:

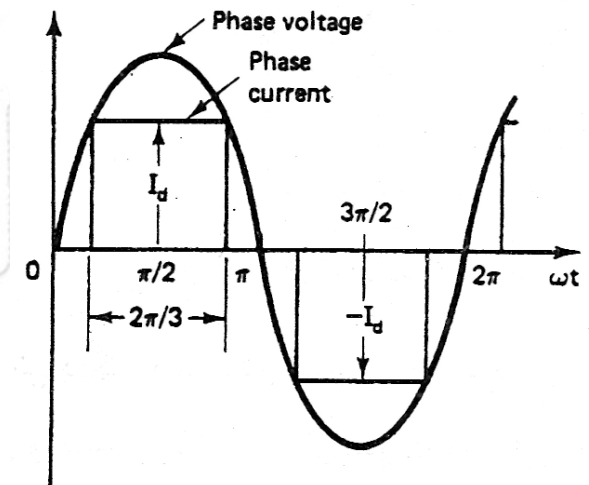
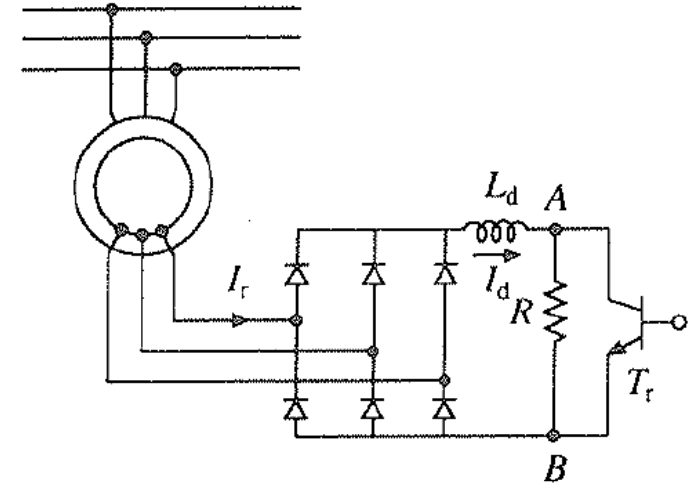
$$P_r = I_d' R (1 - \delta) \quad (33)$$

با جایگزینی (30) در (32) داریم:

$$R_{AB} = (1 - \delta) R \quad (34)$$

لذا مقدار موثر مقاومت R برابرست با:

✓ سؤال: مقاومت سری شده با هر فاز چقدر است؟



تغییرات ولتاژ و جریان قبل از یکسوساز در مدار روتور

✓ توان تلف شده در مقاومت R_{AB} با جریانی غیر سینوسی ایجاد می شود و حال می خواهیم ببینیم چه بخشی از این تلفات سبب کاهش سرعت می گردد. به عبارت دیگر چه مقاومتی سری با مقاومت روتور در هر فاز قرار می گیرد؟

✓ مطابق شکل (الف)، مقدار موثر جریان سینوسی روتور عبارتست از:

$$I_r = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \quad (6.88)$$

✓ توان تلف شده در مقاومت R_{AB} برابر است با:

$$P_{AB} = I_d^2 R_{AB} = I_d^2 R(1 - \delta) \quad (6.89)$$

✓ لذا توان تلفاتی P_{AB} در هر فاز روتور بر حسب I_r (از رابطه 6.88) برابر است با:

$$\text{Power consumed per phase} = \frac{P_{AB}}{3} = 0.5 R(1 - \delta) I_r^2 \quad (6.90)$$

✓ در نتیجه مقاومت متناظر با R در هر فاز روتور عبارتست از: $0.5R(1 - \delta)$ (۳۵)

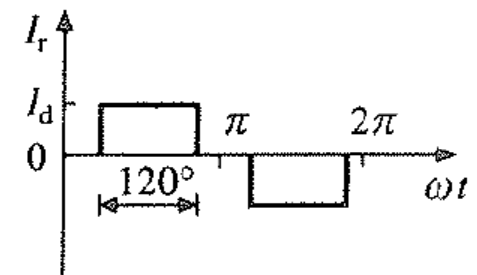
✓ با در نظر گرفتن مقاومت دیود در پل دیودی مقاومت متناظر با R در هر فاز روتور

$$R_d + 0.5R(1 - \delta) \quad (۳۶) \quad \text{عبارتست از:}$$

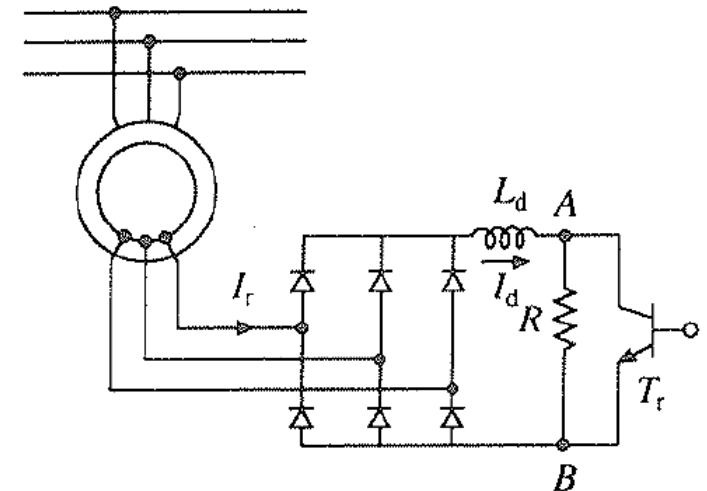
✓ در نهایت با در نظر گرفتن مقاومت دیود در پل دیودی، مقاومت کل در هر فاز

روتور برابر است با:

$$R_{rT} = R_r + R_d + 0.5R(1 - \delta) \quad (۳۷)$$

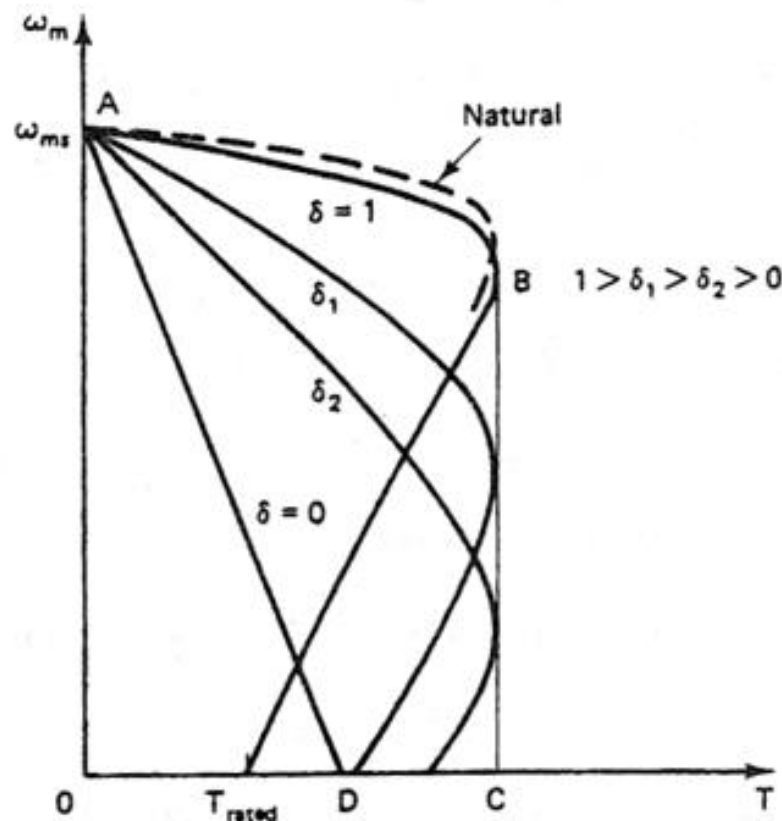


(الف) شکل موج جریان روتور

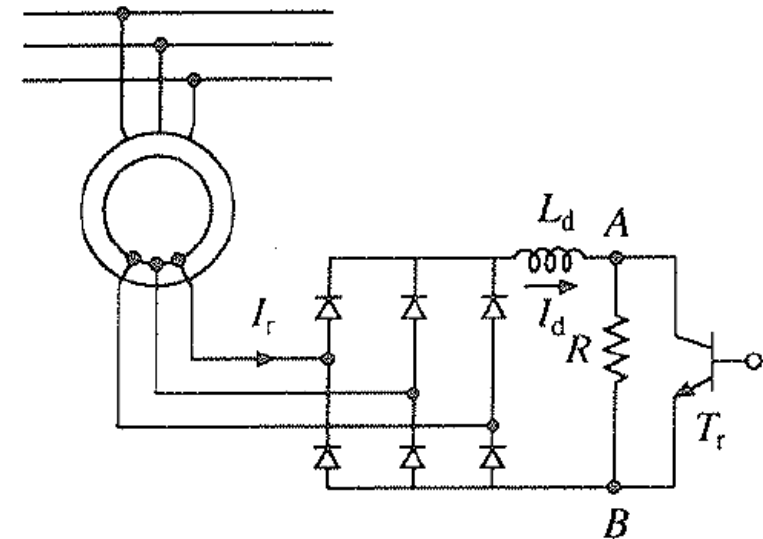


(ب) کنترل استاتیکی مقاومت روتور

- ✓ با تغییر دوره عملکرد سوئیچ استاتیکی، مقاومت موثر روتور تغییر می نماید و مشخصه گشتاور-سرعت جابجا می شود.
- ✓ لازم به ذکر است که در این روش تنها امکان کاهش سرعت از سرعت نامی وجود دارد.



مشخصه های سرعت - گشتاور برای کنترل استاتیکی مقاومت رتور



- ✓ برای کنترل حلقه بسته سرعت به روش کنترل استاتیکی مقاومت روتور می توان از بلوک دیاگرام شکل زیر استفاده نمود.
- ✓ خروجی کنترلر سرعت جریان لینک dc است که این جریان متناظر با توان مصرف شده در مقاومت خارجی R است.

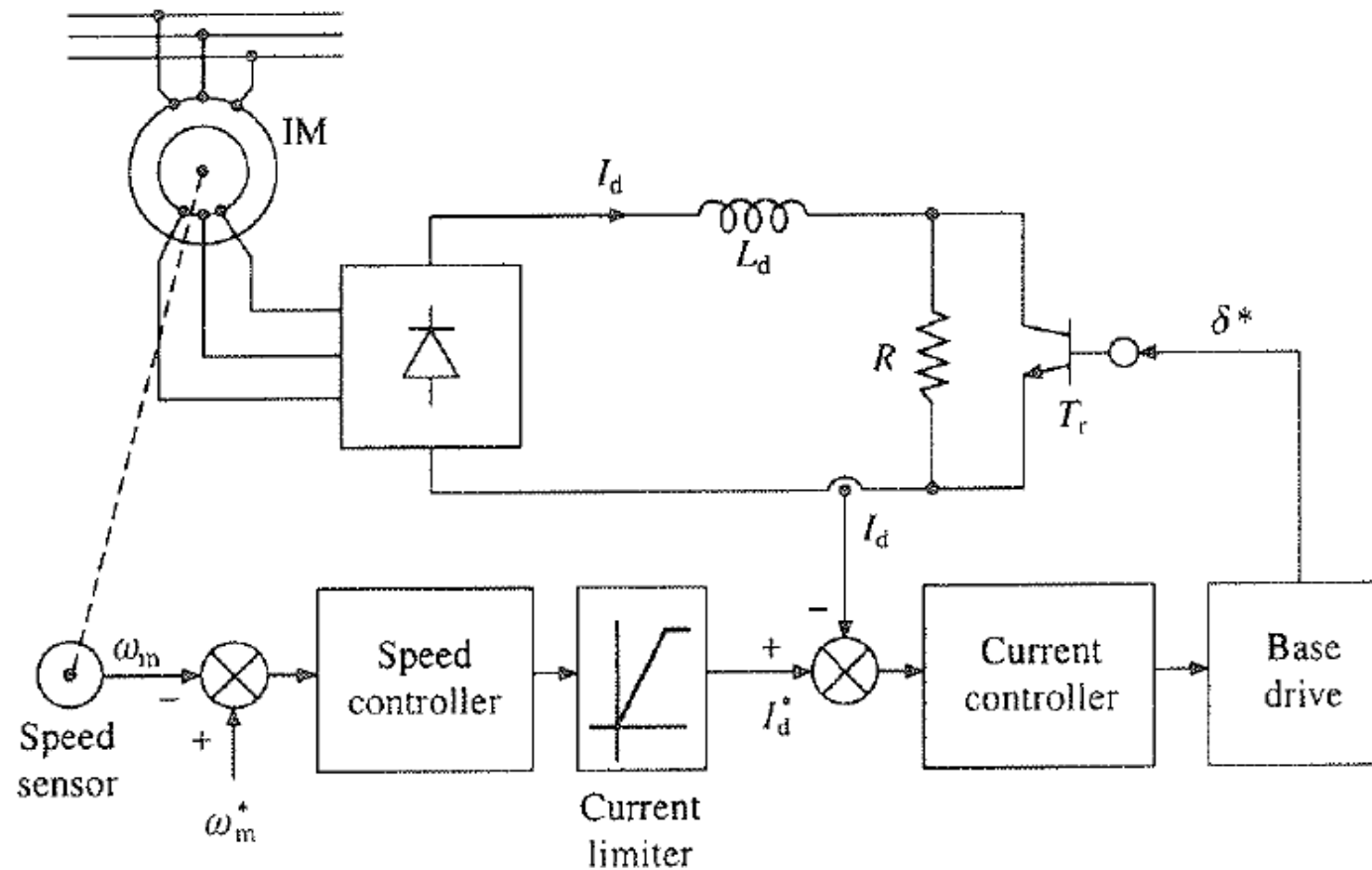
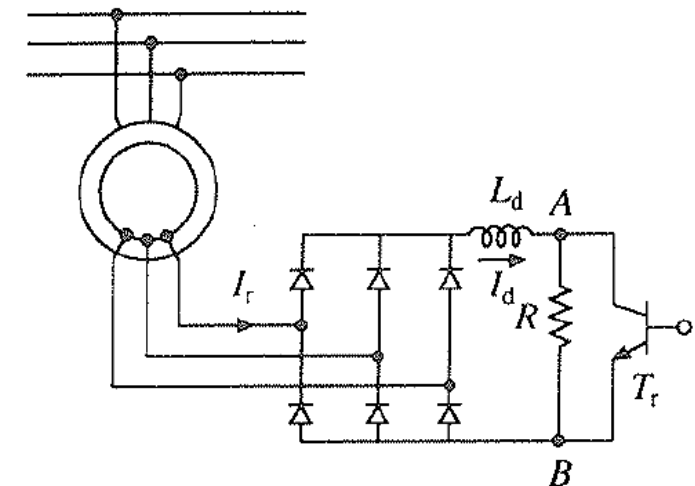
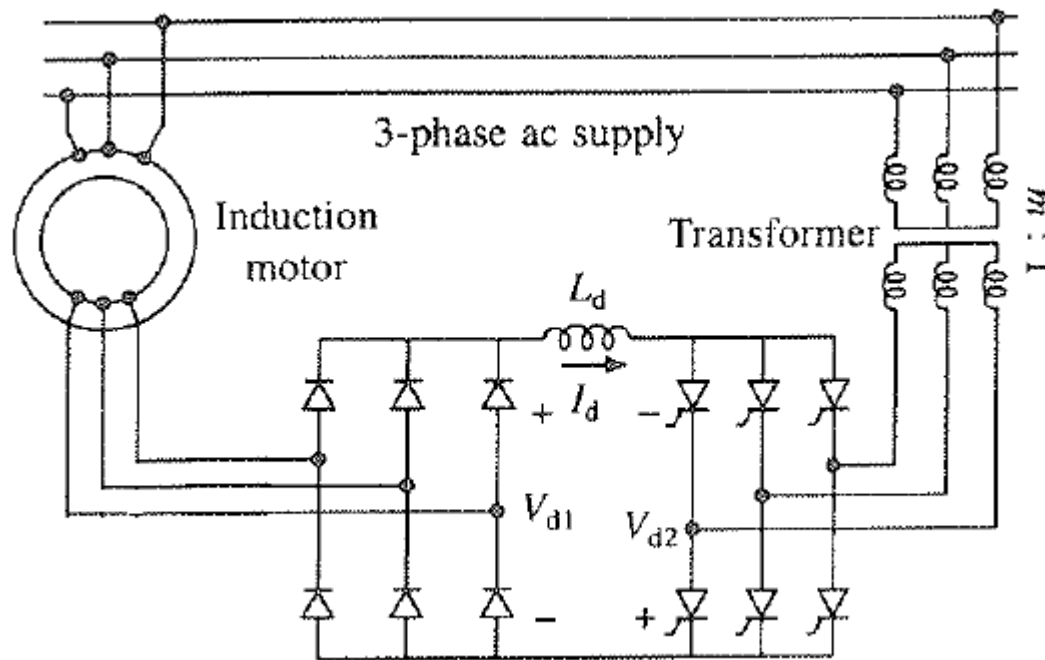


Fig. 6.52 Closed-loop speed control with static rotor resistance control

- ✓ به جای تلف کردن توان لغزش در مقاومت روتور (در روش کنترل استاتیکی مقاومت روتور)، می توان آنرا با استفاده از مبدل های مناسب و از طریق مدار روتور به منبع تغذیه باز گرداند.
- ✓ مبدل مورد استفاده یک اینورتر (dc به ac از طرف روتور به منبع) است.
- ✓ در واقع در این روش به مدار روتور، ولتاژی با دامنه و فرکانس مناسب اعمال می گردد.
- ✓ در برخی مراجع به این روش کنترل سرعت، **کنترل سرعت با تزریق ولتاژ به مدار روتور** نیز می گویند.
- ✓ محرکه های پیشنهادی **شریوس** و **کرامر** جزو این دسته هستند.



(الف) اتلاف توان لغزش در مقاومت R

(ب) بازگشت توان لغزش به منبع در محرکه شریوس

- ✓ قبل از پرداختن به محرکه شریوس، در مورد اثر تزریق ولتاژ به مدار روتور توضیحات کلی ارائه می شود.
- ✓ با فرض نسبت 1:1 سیم پیچهای استاتور و روتور و صرفنظر از تلفات اهمی روتور (ناچیز فرض کردن R_r)، توان مکانیکی موتور القایی از رابطه زیر حساب می شود:

$$P_m = P_g - P_r \quad (6.92)$$

که در رابطه فوق P_g توان فاصله هوایی و P_r توان جذب شده توسط منبع ولتاژ V_r در مدار روتور است.

- ✓ در صورتیکه توان جذب شده توسط منبع روتور صفر باشد، موتور در سرعت طبیعی خودش طبق مشخصه گشتاور-سرعت خواهد چرخید.
- ✓ اگر توان جذب شده توسط منبع V_r مثبت باشد، موتور در سرعتی کمتر از سرعت طبیعی اش خواهد چرخید. در این حالت بخشی از توان وارده به مدار روتور از فاصله هوایی، بدون تبدیل به توان مکانیکی و افزایش سرعت، جذب منبع روتور می شود.
- ✓ اگر توان جذب شده توسط منبع V_r منفی باشد، موتور در سرعتی بیشتر از سرعت طبیعی اش خواهد چرخید. در این حالت علاوه بر توان وارده به مدار روتور از طریق فاصله هوایی، توان از منبع نیز به مدار روتور سرازیر شده و سبب افزایش توان مکانیکی و در نتیجه افزایش سرعت موتور می گردد. **موتور در این حالت بالاتر از سرعت سنکرونش خواهد چرخید!!!!**

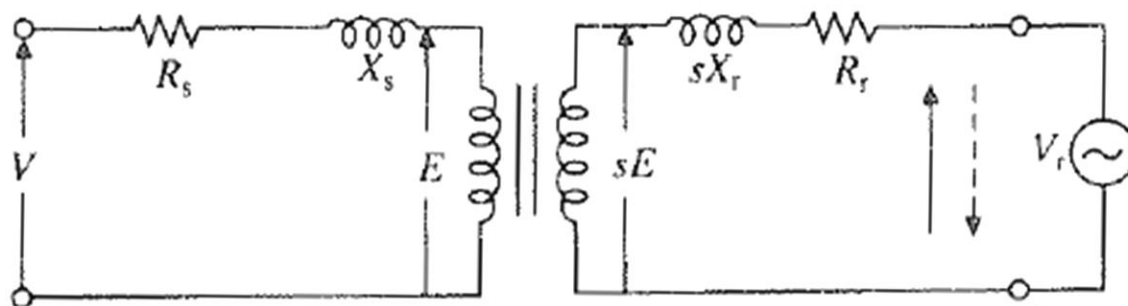


Fig. 6.53 Induction motor operation with an injected voltage in its rotor

✓ برای درک بهتر موضوع، فقط حالت بی باری موتور را تحلیل می کنیم.

✓ در حالت بی باری (ایده آل) باید جریان I_r صفر باشد. برای صفر شدن جریان روتور، دامنه ولتاژ تزریقی V_r از رابطه زیر بدست

$$V_r = sE \quad (38)$$

آید:

$$s = \frac{V_r}{E} \quad (39)$$

✓ لذا با تغییر ولتاژ V_r از صفر تا E مقدار لغزش از مقدار صفر تا یک تغییر می کند:

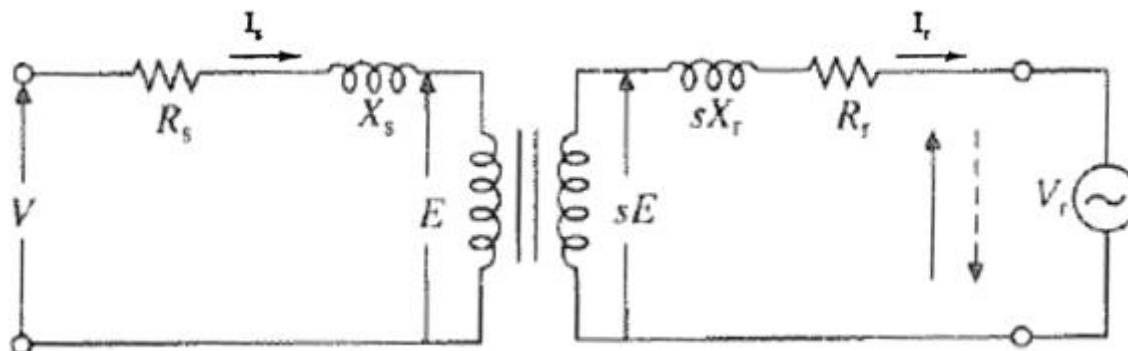
✓ در نتیجه، سرعت موتور در بی باری با تغییر ولتاژ V_r از صفر تا E به ترتیب از سرعت سنکرون تا سکون تغییر می کند:

$$\omega_{mo} = (1 - \frac{V_r}{E}) \omega_{ms} \quad (40)$$

سرعت بی باری:

✓ با اعمال V_r منفی، ماشین حتی در سرعتهای بالاتر از سرعت سنکرون نیز می تواند بصورت موتور کار کند که به آن عملکرد موتوری فوق سنکرون موتور القایی گویند.

✓ همچنین مشابه با حالات فوق و در صورت اعمال گشتاور بار منفی، ماشین می تواند در دو حالت ترمز ژنراتوری زیرسنکرون و ترمز ژنراتوری فوق سنکرون کار کند.





□ کنترل سرعت با تنظیم توان لغزش

➤ اثر تزریق ولتاژ به مدار روتور

✓ در جدول زیر، حالت مختلف عملکردی موتور بر حسب نوع ولتاژ تزریق شده به مدار روتور خلاصه گردیده اند.

مقایسه علامت های توان و ولتاژ در حالات مختلف

نوع عملکرد	توالی فاز	جملات مثبت	جملات منفی
۱- موتور زیر سنکرون	مثبت	V_r, P_g, P_m, sP_g, P_r	—
۲- ترمزی زیر سنکرون	مثبت	V_r	P_g, P_m, sP_g, P_r
۳- موتوری فوق سنکرون	منفی	P_g, P_m	V_r, sP_g, P_r
۴- ترمزی فوق سنکرون	منفی	sP_g, P_r	V_r, P_m, P_g

P_r : توان منبع ولتاژ واقع در روتور

P_m : توان مکانیکی بار

P_g : توان فاصله هوایی

P_{cr} : توان تلفات مسی مدار روتور

s : لغزش

V_r : ولتاژ منبع روتور

✓ در سیستم کنترل حلقه بسته محرکه شریوس، خروجی کنترلر سرعت، گشتاور و یا متناظرا جریان لینک dc است.

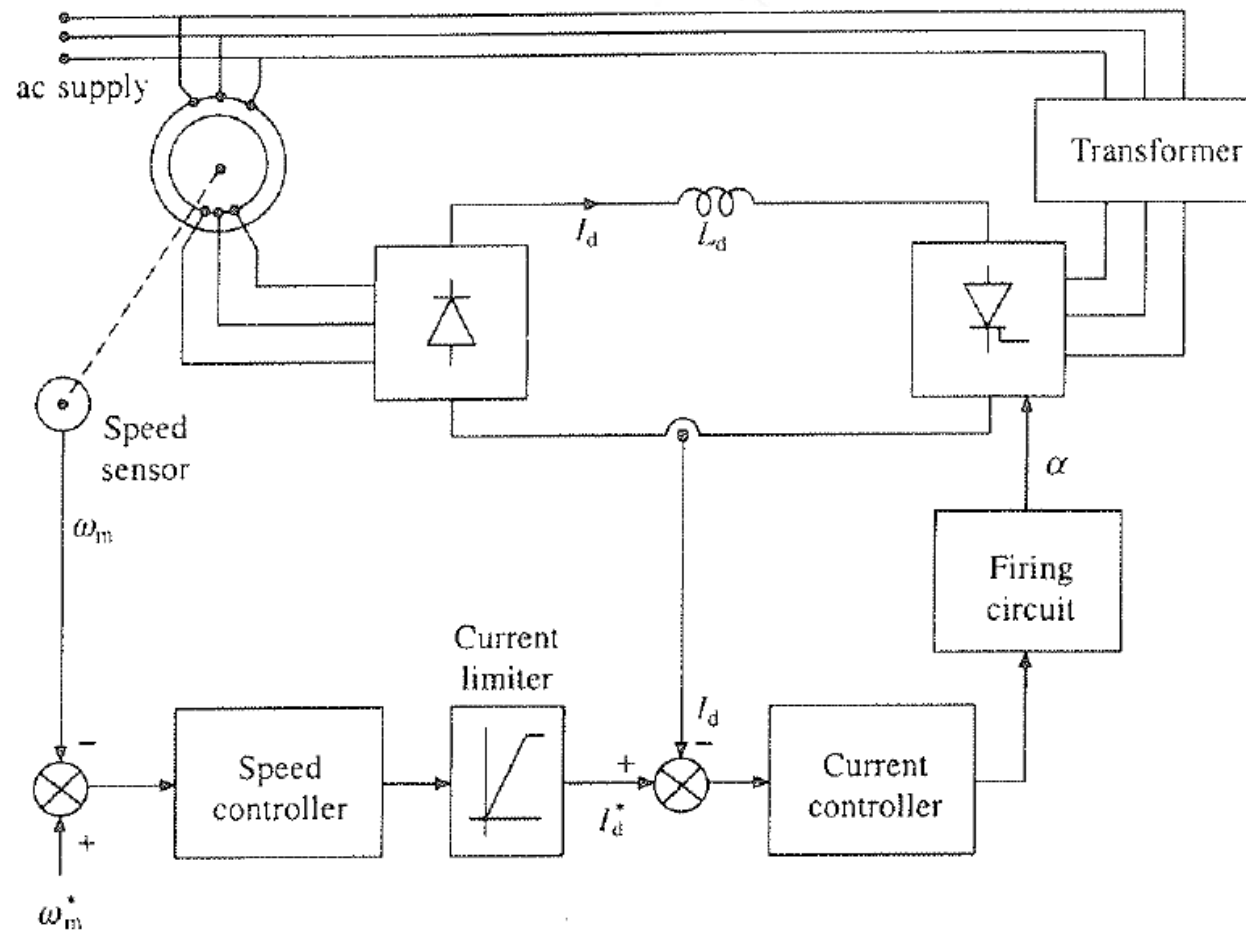
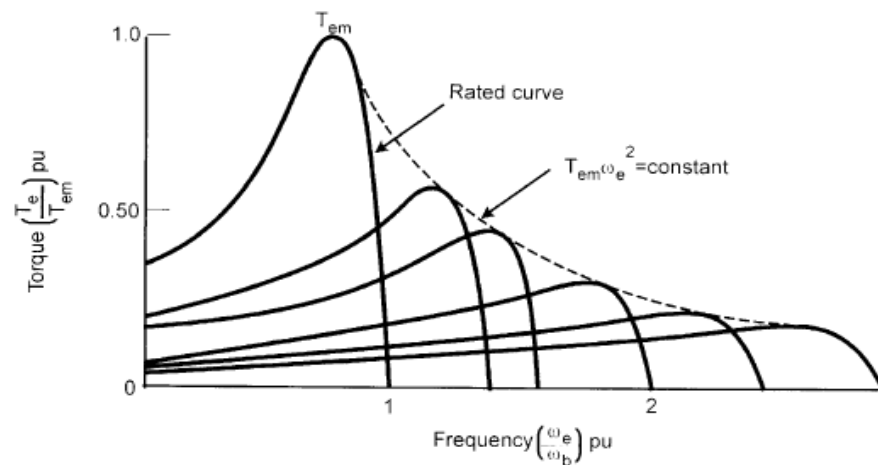


Fig. 6.56 Closed-loop control of static Scherbius drive

- ✓ در روش های کنترل اسکالر، به کمک اینورترهای فرکانسی، **فرکانس** و یا **فرکانس و ولتاژ** تغذیه موتور تغییر داده می شوند.
- ✓ با تغییر فرکانس تغذیه، سرعت سنکرون تغییر نموده و در نتیجه سرعت موتور نیز تغییر خواهد نمود.
- ✓ در این حالت شکل مشخصه گشتاور- سرعت موتور تغییر خواهد کرد.
- ✓ اما مشاهده می گردد که با افزایش فقط فرکانس گشتاور تولیدی موتور کاهش می یابد.



مشخصه های گشتاور-سرعت موتور القایی در فرکانس های تغذیه مختلف برای یک موتور نمونه

- ✓ طبق رابطه $E = 4.44 f N \phi_{\max}$ ، اگر تنها فرکانس تغییر کند، شار $\phi_{\max}$ افزایش و یا کاهش می یابد و در واقع از مقدار بهینه آن که نقطه زانویی مشخصه مغناطیسی است، دور می شود. لذا از این روش در ناحیه زیر سرعت نامی اصلاً استفاده نمی شود.
- ✓ کاربرد این روش فقط مختص به محدوده سرعتی بالاتر از سرعت نامی موتور است.
- ✓ لذا برای داشتن شار ثابت باید فرکانس و ولتاژ همزمان و با نسبت یکسان تغییر نمایند که در ادامه به آن پرداخته می شود.

✓ روش تغییر همزمان ولتاژ - فرکانس به دو گونه اصلی انجام می شود:

❖ تغییر همزمان E و f (یا E/f ثابت) که به روش شار ثابت معروف است.

❖ تغییر همزمان V و f (یا V/f ثابت) که در صنعت به روش کنترل اسکالر شناخته می شود.

✓ استفاده از روش E/f ثابت یا روش کنترل شار به دلیل نیازمندی به حلقه کنترل شار، در صنعت کمتر مورد استفاده قرار می گیرد.

✓ در عوض از روش V/f ثابت یا روش کنترل اسکالر بیشتر در اغلب کاربردها استفاده می شود که نیاز به اندازه گیری شار ندارد. در ادامه بحث فقط روش کنترل اسکالر بررسی می گردد.

✓ کنترل سرعت موتور القایی به روشهای فوق را در دو محدوده پائین و بالای سرعت نامی را بطور جداگانه انجام می دهیم.

الف: عملکرد موتور در فرکانسهای کمتر از فرکانس نامی ($a < 1$)

ب: عملکرد موتور در فرکانسهای بالاتر از فرکانس نامی ($a > 1$)

$$a = \frac{f}{f_{rated}} \quad (46)$$

a = فرکانس پریونیتی

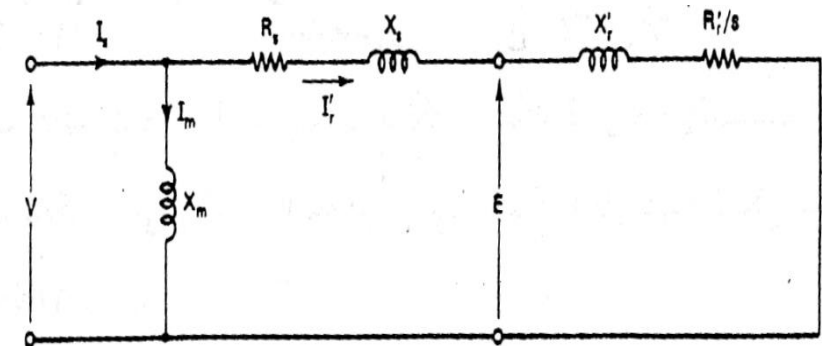
✓ همانطور که اشاره گردید، کار موتور در شار ثابت، نیازمند ایجاد حلقه کنترل شار است که برای این کار باید اندازه گیری شود. اما اندازه گیری شار کار پیچیده ای است. لذا در عمل با فرض برابر بودن E با V ، از روش V/f ثابت برای ثابت نگهداشتن شار استفاده می شود.

✓ به عبارتی، شاخه مغناطیس کنندگی را در ابتدای مدار معادل در نظر می گیریم تا ولتاژ E با V یکسان در نظر گرفته شود.

✓ حال برای اینکه، جریان مغناطیس کنندگی یا شار ثابت باشد باید ولتاژ و فرکانس همزمان کم و یا زیاد شوند.

روابط گشتاور در فرکانس و ولتاژ نامی:

$$T = \frac{3}{\omega_{ms}} \left[\frac{V_{rated}^2 (R_r'/s)}{(R_s + R_r'/s)^2 + (X_s + X_r')^2} \right] \quad (47)$$



(د) مدار معادل تقریبی در فاز رجوع شده به استاتور

$$T_{max} = \frac{3}{\omega_{ms}} \left[\frac{V_{rated}^2}{R_s \pm \sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r')^2}} \right] \quad (48)$$

❖ الف: عملکرد موتور در فرکانسهای کمتر از فرکانس نامی ($a < 1$)

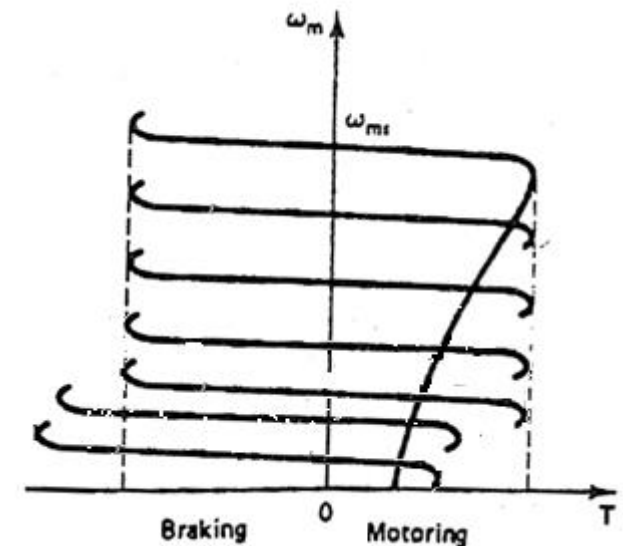
✓ با انجام اندکی محاسبات در فرکانس پریونیتی a خواهیم داشت:

$$T = \frac{3}{\omega_{ms}} \left[\frac{V_{rated}^2 R_r' / (as)}{\left(\frac{R_s}{a} + \frac{R_r'}{sa} \right)^2 + (X_s + X_r')^2} \right], \quad a < 1 \quad (49)$$

$$T_{max} = \frac{3}{2\omega_{ms}} \left[\frac{V_{rated}^2}{(R_s/a) \pm \sqrt{(R_s/a)^2 + (X_s + X_r')^2}} \right], \quad a < 1 \quad (50)$$

❖ نکات:

- ✓ گشتاور شکست (T_{max}) و فرکانس لغزش (ω_{sl}) در تمامی فرکانسهای متوسط به بالا (به غیر از فرکانسهای پائین یا سرعتهای پائین) بدون تغییر باقی می ماند.
- ✓ لغزش مربوط به گشتاور ماکزیمم (s_{Tmax}) با تغییر فرکانس تغییر می کند.
- ✓ منحنی ها در ناحیه $0 < s < s_{Tmax}$ بصورت منحنی های موازی هستند.
- ✓ گشتاور شکست در فرکانس های پائین کاهش می یابد. علت آن کاهش شار ناشی از کاهش E است.
- ✓ کاهش E بخاطر قابل ملاحظه شدن افت ولتاژ روی امپدانس استاتور نسبت به ولتاژ پائین V است.



منحنی های سرعت گشتاور در روش V/f ثابت
در فرکانسهای کمتر از نامی ($a < 1$)

- ✓ در ادامه اثبات می شود که در ناحیه سرعتی بین فرکانس سنکرون و گشتاور شکست، گشتاور متناسب با فرکانس لغزش است.
- ✓ در فرکانسهای زیر فرکانس نامی ($a < 1$)، و در فرکانس پریونیتی a ، گشتاور از رابطه زیر حاصل می شود:

$$T = \frac{3}{\omega_{ms}} \left[\frac{V_{rated}^2 R_r' / (as)}{\left(\frac{R_s}{a} + \frac{R_r'}{sa} \right)^2 + (X_s + X_r')^2} \right] \quad (49)$$

$$T = \frac{3}{\omega_{ms}} \frac{V_{rated}^2}{R_r' / (as)} = \frac{3}{\omega_{ms}} \frac{V_{rated}^2}{R_r'} (as) \quad (53)$$

- ✓ چون مقدار لغزش s عدد کوچکی است، می توان از عبارات $(X_s + X_r')$ و $\frac{R_s}{a}$ در مقابل $\frac{R_r'}{sa}$ صرفنظر نمود و لذا گشتاور بصورت رابطه (53) خواهد شد.

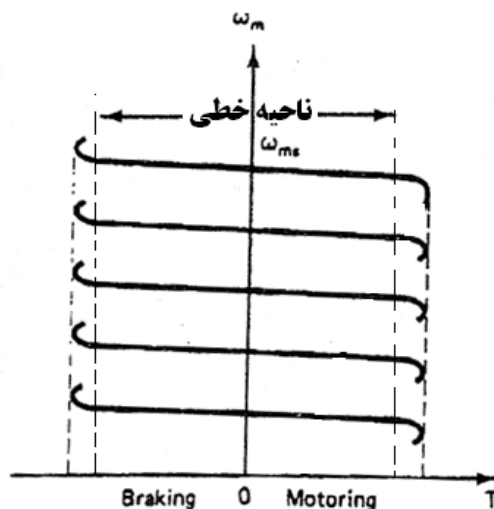
- ✓ با ضرب صورت و مخرج رابطه (53) در سرعت سنکرون ω_{ms} نتیجه می شود:

$$T = \frac{3a}{\omega_{ms}^2} \frac{V_{rated}^2}{R_r'} (s \omega_{ms}) = \text{constant} \cdot \omega_{sl} \quad (54)$$

- ✓ معنای رابطه (54) آنست که مشخصه گشتاور بر حسب سرعت لغزش در ناحیه $0 < s < s_{Tmax}$ بصورت خطی است.

- ✓ نکته جالب آنکه اگر گشتاور بار ثابت باشد، در سرعتها یا فرکانسهای مختلف، سرعت لغزش ω_{sl} ثابت باقی می ماند.

- ✓ جالب تر آنکه اگر فقط علامت گشتاور تغییر کند ولی دامنه اش ثابت بماند، سرعت لغزش فقط علامتش تغییر می کند.



❖ ب: عملکرد موتور در فرکانسهای بالاتر از فرکانس نامی ($a > 1$)

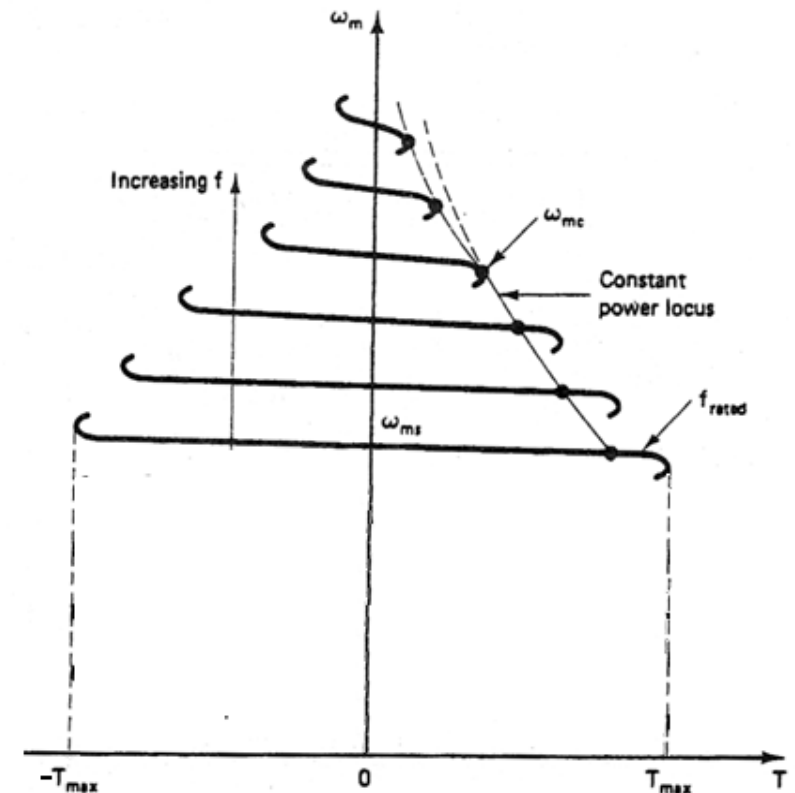
- ✓ در کار با فرکانس بالاتر از فرکانس نامی، ولتاژ تغذیه در ولتاژ نامی تثبیت شده و فرکانس افزایش می یابد.
- ✓ ثابت بودن ولتاژ و افزایش فرکانس باعث کاهش شار در فاصله هوایی می گردد.

$$T = \frac{3}{\omega_{ms}} \left[\frac{V_{rated}^2 R_r' / (as)}{(R_s + R_r'/s)^2 + a^2 (X_s + X_r')^2} \right], \quad a > 1 \quad (51)$$

$$T_{max} = \frac{3}{2\omega_{ms} a} \left[\frac{V_{rated}^2}{R_s \pm \sqrt{R_s^2 + a^2 (X_s + X_r')^2}} \right], \quad a > 1 \quad (52)$$

❖ نکات قابل توجه:

- ✓ گشتاور موتور در سرعتهای بالاتر از نامی کاهش می یابد.
- ✓ در نتیجه گشتاور بار متصل به موتور نیز باید با افزایش سرعت کاهش یابد.
- ✓ لذا اگر بار ثابتی به یک موتور وصل شود، چرخاندن این بار در سرعتهای بالاتر از سرعت نامی، سبب اضافه بار موتور و داغ کردن آن می شود.
- ✓ در ناحیه بالای سرعت نامی، موتور نمی تواند گشتاور نامی تولید کند ولی توان نامی خود را می تواند ایجاد نماید.



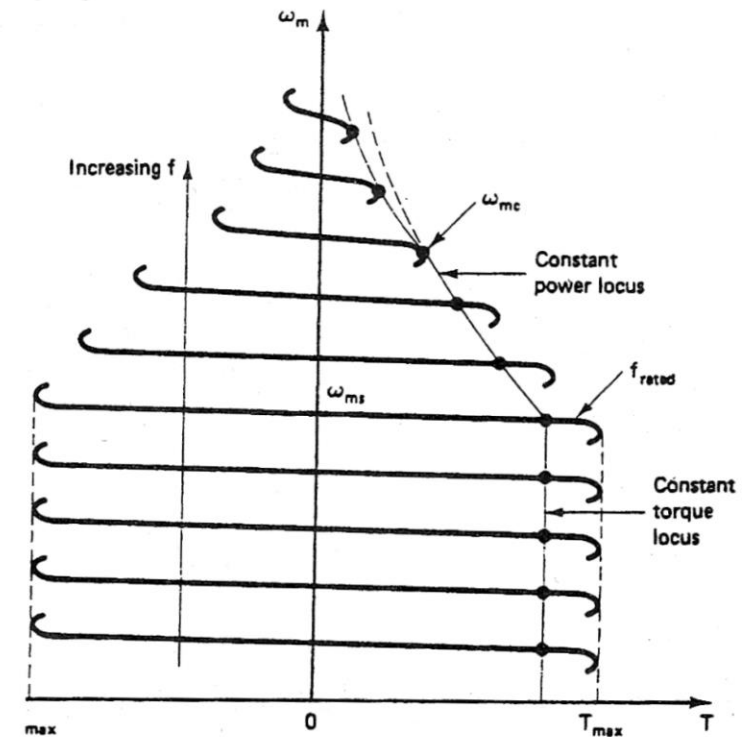
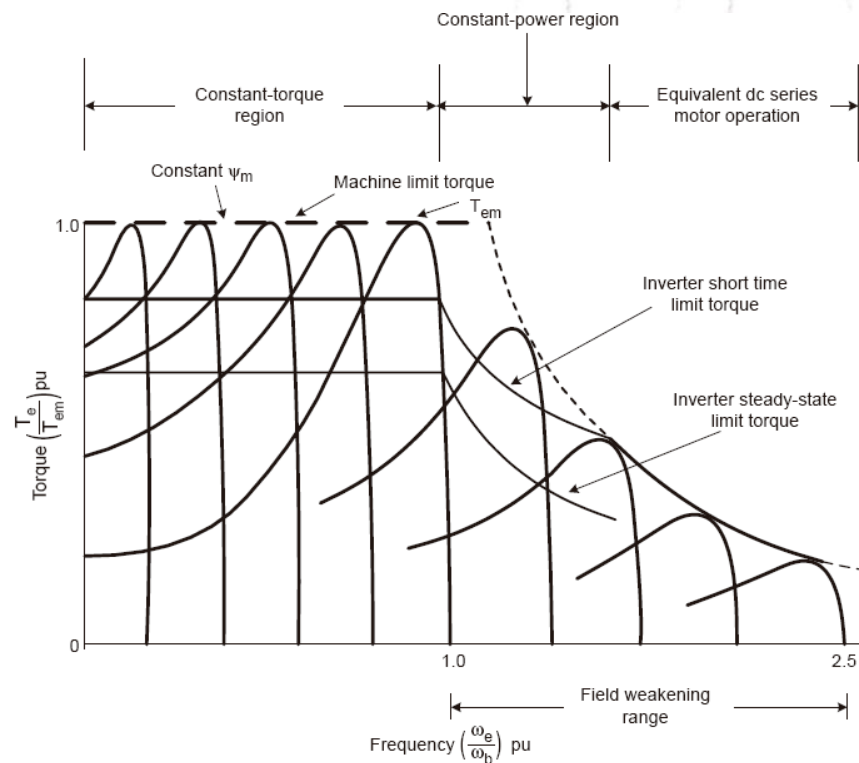
منحنی های سرعت گشتاور در روش V/f ثابت
در فرکانسهای بالاتر از نامی ($a > 1$)

□ کنترل سرعت موتور القایی به روش اسکالر

➤ روش تغییر همزمان ولتاژ-فرکانس (یا روش V/f ثابت)

❖ روش کنترل اسکالر در تمام بازه ها:

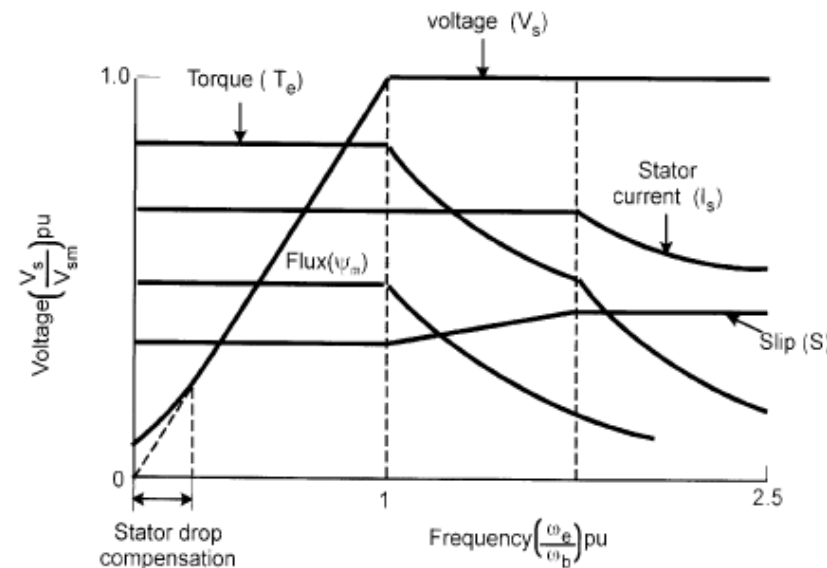
- ✓ لذا در کنترل اسکالر، از سرعت صفر تا سرعت نامی (فرکانس سنکرون صفر تا فرکانس سنکرون نامی)، ولتاژ و فرکانس همزمان زیاد می شوند. در سرعت نامی، مقادیر فرکانس و ولتاژ موتور همان مقادیر نامی روی پلاک موتور هستند.
- ✓ در سرعتهای بالاتر از سرعت نامی، ولتاژ در مقدار نامی اش ثابت می ماند و تنها فرکانس تغییر می کند.
- ✓ به ناحیه زیر سرعت نامی، **ناحیه گشتاور ثابت** و به ناحیه بالای سرعت نامی، **ناحیه توان ثابت** گویند.



(ب) منحنی های گشتاور - سرعت موتور القایی با روش کنترل اسکالر در تمامی بازه فرکانسی

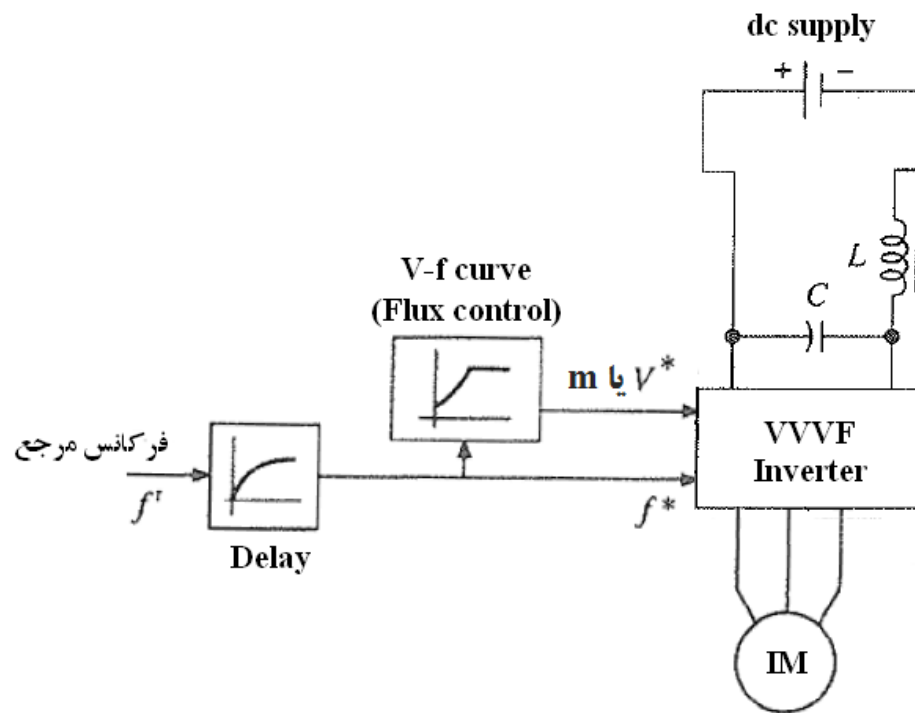
(الف) منحنی های سرعت - گشتاور موتور القایی با روش کنترل اسکالر در تمامی بازه فرکانسی

- ✓ اگر شار موتور ثابت بماند، در جریان استاتور مشخص، گشتاور و سرعت لغزش ثابت هستند. لذا در $a < 1$ ، داشتن فرکانس متغیر با شار ثابت، رفتار گشتاور ثابت را نتیجه می دهد.
- ✓ می توان اثبات نمود که در $a > 1$ ، در یک جریان روتور مشخص (و یا نتیجتاً I_s مشخص)، سرعت لغزش بطور خطی با افزایش a تغییر می کند.
- ✓ در سرعت های بالاتر از ۲ برابر سرعت نامی ($a > 2$)، برای جلوگیری از تجاوز گشتاور از گشتاور شکست، موتور در سرعت لغزش ثابت کار می کند و اجازه داده می شود تا توان و جریان ماشین کاهش یابد. به این ناحیه، ناحیه لغزش ثابت گویند.
- ✓ در روش V/f ثابت اگر گشتاور بار ثابت باشد، با تقریب می توان گفت سرعت لغزش در تمامی سرعت های زیر سرعت نامی، ثابت باقی می ماند. حتی اگر با همان مقدار گشتاور منتهی در ناحیه ترمزی کار کند، اندازه سرعت لغزش ثابت باقی می ماند منتهی علامتش منفی می شود.

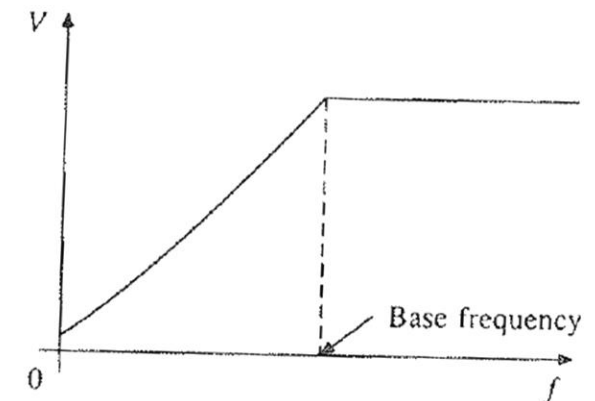


تغییرات متغیرهای مختلف موتور القایی در روش کنترل اسکالر از فرکانس صفر تا فرکانس حداکثر

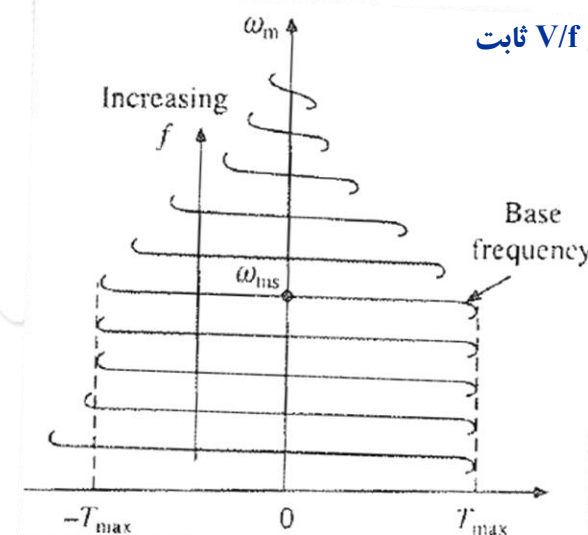
- ✓ در بسیاری از کاربردهای سرعت متغیر که تغییرات گشتاور بار زیاد نیست و تنظیم سرعت هم با دقت بالا مورد نیاز نیست، از روش کنترل اسکالر حلقه باز استفاده می شود. تقریباً در اغلب درایوهای تجاری موجود در بازار این روش وجود دارد.
- ✓ اینورتر مورد استفاده از نوع ولتاژ متغیر-فرکانس متغیر (VVVF) است که دارای انواع مختلف نظیر اینورتر پله ای و PWM است.



(الف) محرکه موتور القایی با روش کنترل اسکالر حلقه باز

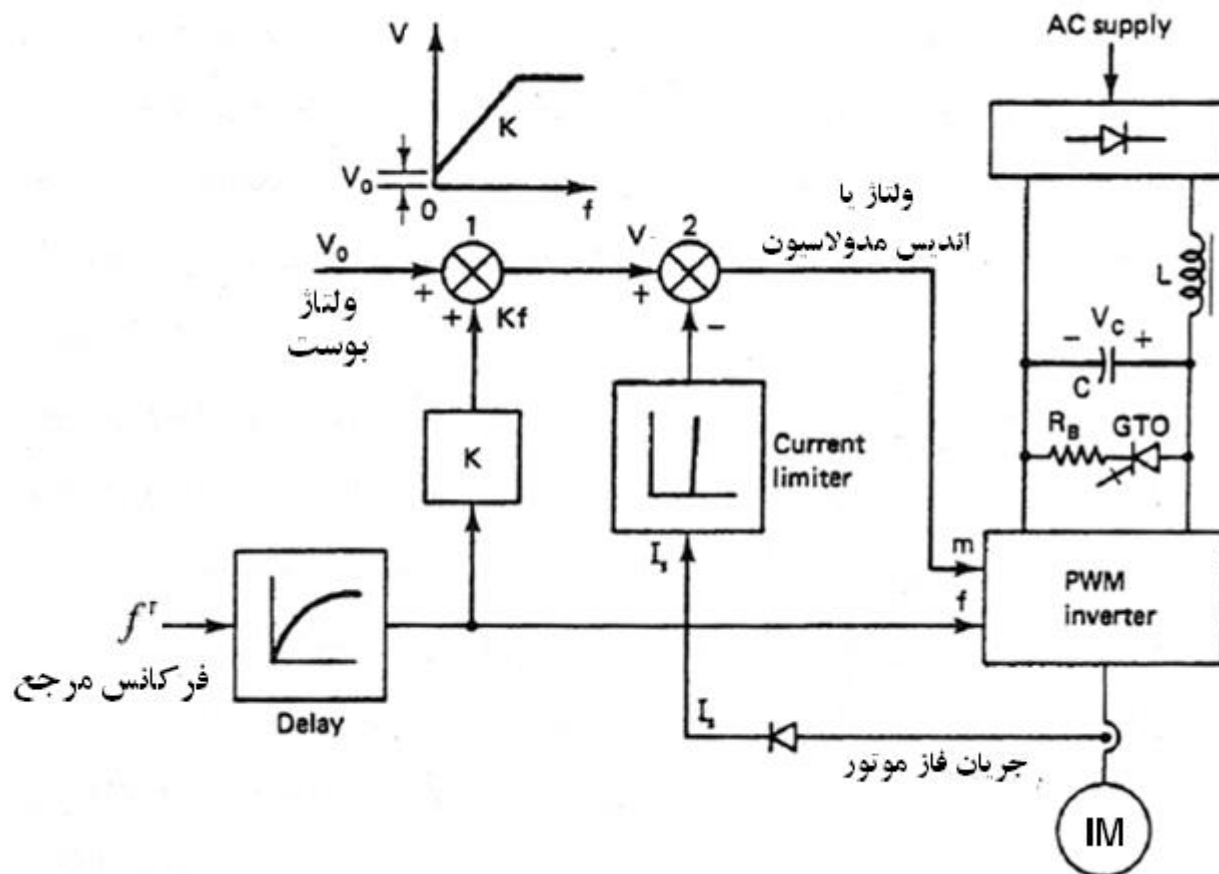


(ب) منحنی ولتاژ-فرکانس در روش V/f ثابت

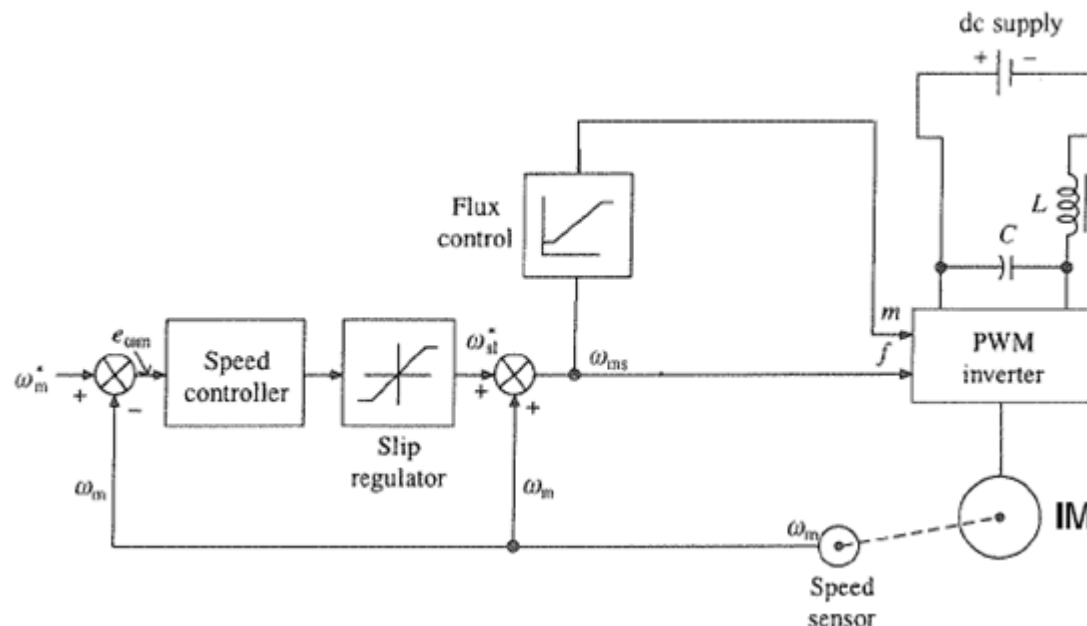


(ج) منحنی های گشتاور-سرعت در روش V/f ثابت

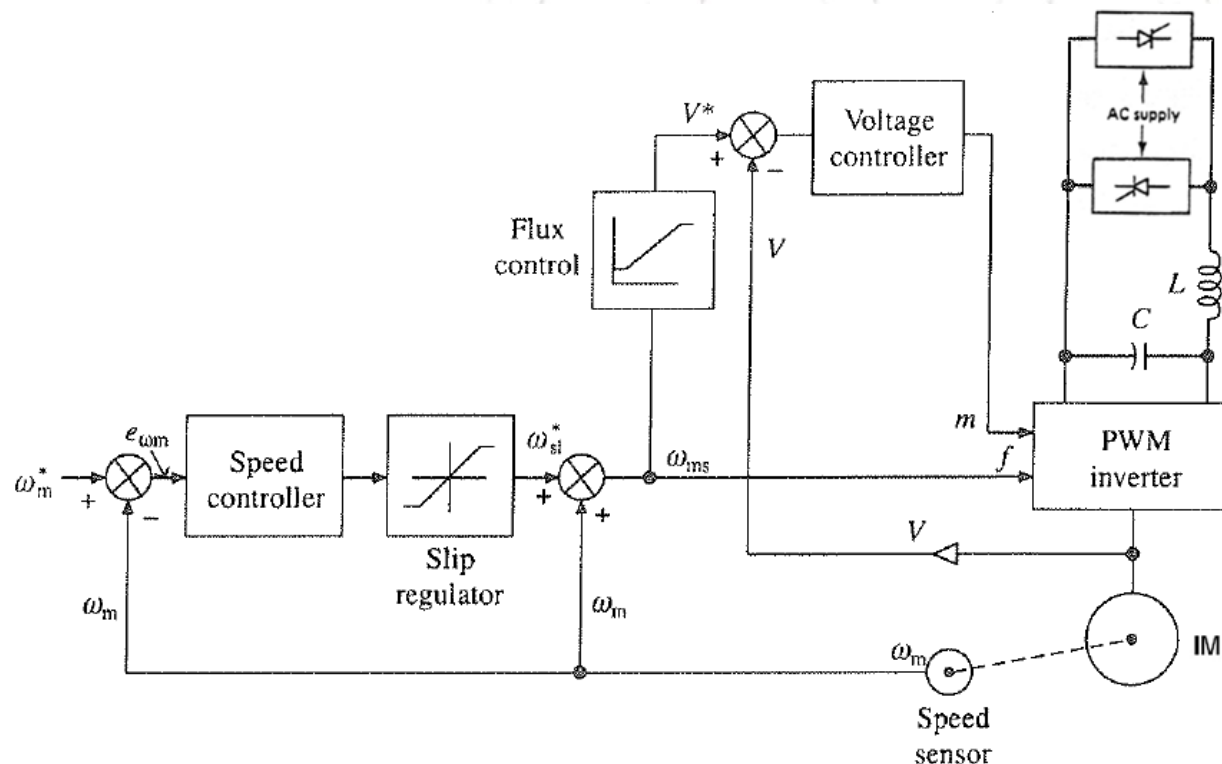
- ✓ در هنگام استفاده از روش کنترل اسکالر حلقه باز، ممکن است به دلایلی نظیر زیاد بودن گشتاور بار، جریان موتور از حد نامی اش فراتر رود. برای جلوگیری از آسیب دیدن موتور و یا مختل نشدن عملکرد محرکه بواسطه عمل کردن سیستم حفاظت فیوزی، می توان از روش کنترل حدی جریان استفاده نمود.
- ✓ مطابق شکل زیر، در صورتیکه جریان موتور از حد نامی اش فراتر رود، اندیس مدولاسیون و یا ولتاژ اعمالی به موتور آنقدر کاهش می یابد تا جریان در حد معقول باقی بماند.



- ✓ در بسیاری از کاربردها، به دلیل تغییرات پیوسته گشتاور بار و سرعت دلخواه، روش حلقه باز عملکرد خوبی ندارد. در این کاربردها، ساده ترین و مطمئن ترین روش استفاده از روش کنترل اسکالر حلقه بسته است.
- ✓ خروجی کنترلرهای سرعت در اغلب محرکه های الکتریکی سیگنال گشتاور مرجع است و یا سیگنال دیگر از سیستم است که با گشتاور متناسب است.
- ✓ مثلاً در درایو موتور DC، خروجی کنترلر سرعت، مقدار مرجع جریان آرمیچر است که متناسب با مقدار گشتاور است. همچنین در محرکه شریوس موتور القایی، خروجی کنترلر سرعت، جریان لینک dc است که مطابق رابطه (۴۵) در اسلاید ۵۵ متناسب با گشتاور است.
- ✓ در روش کنترل اسکالر حلقه بسته موتور القایی، خروجی کنترلر سرعت را برابر سرعت لغزش در نظر می گیرند، زیرا همانطور که قبلاً بیان شد و در ادامه با روابط اثبات می گردد، سرعت لغزش با مقدار گشتاور موتور متناسب است.



- ✓ شکل کامل تری از کنترل اسکالر حلقه بسته در ذیل نشان داده شده است که از یک حلقه داخلی کنترل ولتاژ برای بهبود پاسخ دینامیکی محرکه و غلبه بر تغییرات ولتاژ لینک dc استفاده شده است.
- ✓ همچنین این محرکه قابلیت ترمز ژنراتوری و تحویل توان به منبع AC را دارد.
- ✓ در روش کنترل سرعت لغزش، نیازی به کنترل جریان نیست، زیرا لغزش که محدود گردد، بالطبع، مقادیر گشتاور و جریان موتور هم به مقادیر حداکثرشان محدود می گردند.



کنترل سرعت موتور القایی به روش اسکالر حلقه بسته با کنترل سرعت لغزش و قابلیت ترمز ژنراتوری و حلقه داخلی کنترل ولتاژ



اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

➤ انواع مبدل‌های فرکانسی

- ✓ با پیشرفت در ساخت قطعات نیمه هادی و سوئیچ‌های با توان و فرکانس بالا و همچنین وجود پردازنده های دیجیتالی سرعت بالا، استفاده از مبدل های فرکانسی از لحاظ اقتصادی کاملاً مقرون بصره می باشد.
- ✓ طیف متنوعی از مبدل‌ها در درایو موتورهای AC بخصوص القایی پیشنهاد شده اند.

❖ انواع مبدل های فرکانسی رایج در صنعت:

- اینورتر منبع ولتاژ (VSI)
 - اینورتر منبع جریان (CSI)
 - سیکلکانورتر
- ✓ اینورترهای منبع ولتاژ بسیار ساده و کم هزینه هستند، دارای ولتاژ تقریباً ثابتی بوده و برای کاربردهای تک موتور و چند موتور مناسب هستند. اما در مقابل اتصال کوتاه، ضربه پذیر بوده و حفاظت باید توسط فیوزهای تندکار انجام شود. در اغلب کاربردهای صنعتی از اینورترهای منبع ولتاژ استفاده می شود.
- ✓ اینورترهای منبع جریان در مقابل اتصال کوتاه حفاظت ذاتی دارند. اما پیاده سازی آنها پیچیده و هزینه بر است. همچنین پاسخ دینامیکی کندی دارند. در کاربردهای بسیار خاص از اینورترهای منبع جریان استفاده می شود.
- ✓ سیکلکانورها از منبع ولتاژ ac ثابت می توانند، توان ac با فرکانس متغیر تولید نمایند. معمولاً در توانهای بالا استفاده می شوند.
- ✓ انواع دیگری از اینورترهای جدید نظیر **اینورترهای منبع امپدانس (ZSI)** هم هستند که هنوز در صنعت متداول نشده اند.



اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

➤ انواع اینورترهای منبع ولتاژ (VSI)

❖ انواع اینورترهای VSI از نظر ورودی کنترلی:

- اینورتر VSI کنترل شده با ولتاژ
- اینورتر VSI کنترل شده با جریان

❖ انواع اینورترهای VSI از شکل موج:

- اینورتر VSI پله ای (یا شش پالسی)
- اینورتر VSI با مدولاسیون پهنای پالس (PWM)

❖ انواع روشهای PWM:

- ✓ PWM سینوسی یا SPWM
- ✓ PWM با نمونه برداری یکنواخت
- ✓ PWM با حذف هارمونیک انتخابی (SHE-PWM)
- ✓ PWM با کاهش هارمونیک انتخابی (SHM-PWM)
- ✓ PWM با مدولاسیون بردار فضایی (SV-PWM)
- ✓ و سایر روشهای PWM خاص

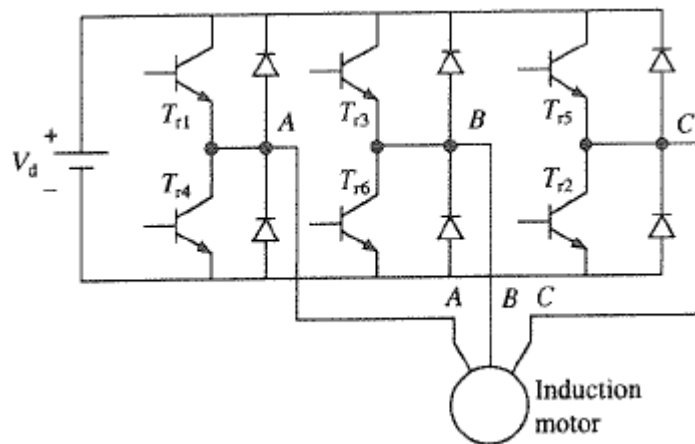
❖ اینورترها از جنبه های دیگر هم دارای انواع متفاوتی هستند. مثلاً از نظر تعداد سوئیچ ها (اینورترهای کاهش ساختار یافته)،

از نظر تعداد سطوح ولتاژ (اینورترهای چندسطحی)، که در این درس به آنها پرداخته نمی شود.

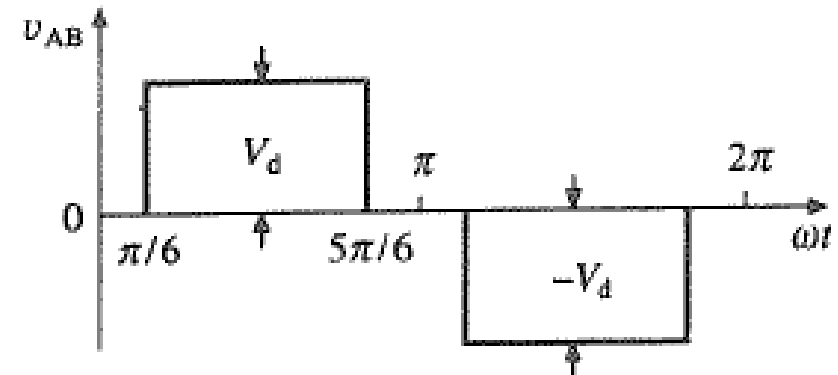
□ اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

➤ مقایسه دو اینورتر منبع ولتاژ پله ای و PWM

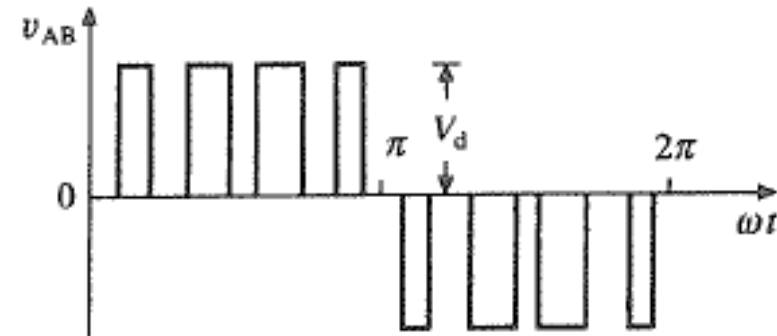
- ✓ اغلب موتورهای القایی سه فاز از اینورتر شش سوئیچه سه ساق همانند شکل (الف) استفاده می کنند.
- ✓ سوئیچ های مورد استفاده باید حتما از نوع کموتاسیون خودی باشد که قطع و وصل آن کاملا در اختیار سیستم کنترل باشد.
- ✓ برای کاربردهای توان پائین تا توان متوسط اغلب از سوئیچهای ترانزیستور قدرت، ماسفت قدرت و IGBT استفاده می شود.
- در حالیکه برای توان های بالا از سوئیچهای GTO و IGCT استفاده می گردد.



(الف) اینورتر سه ساق ۶ سوئیچه مورد استفاده در درایو موتور القایی سه فاز



(ب) ولتاژ خط خروجی اینورتر پله ای

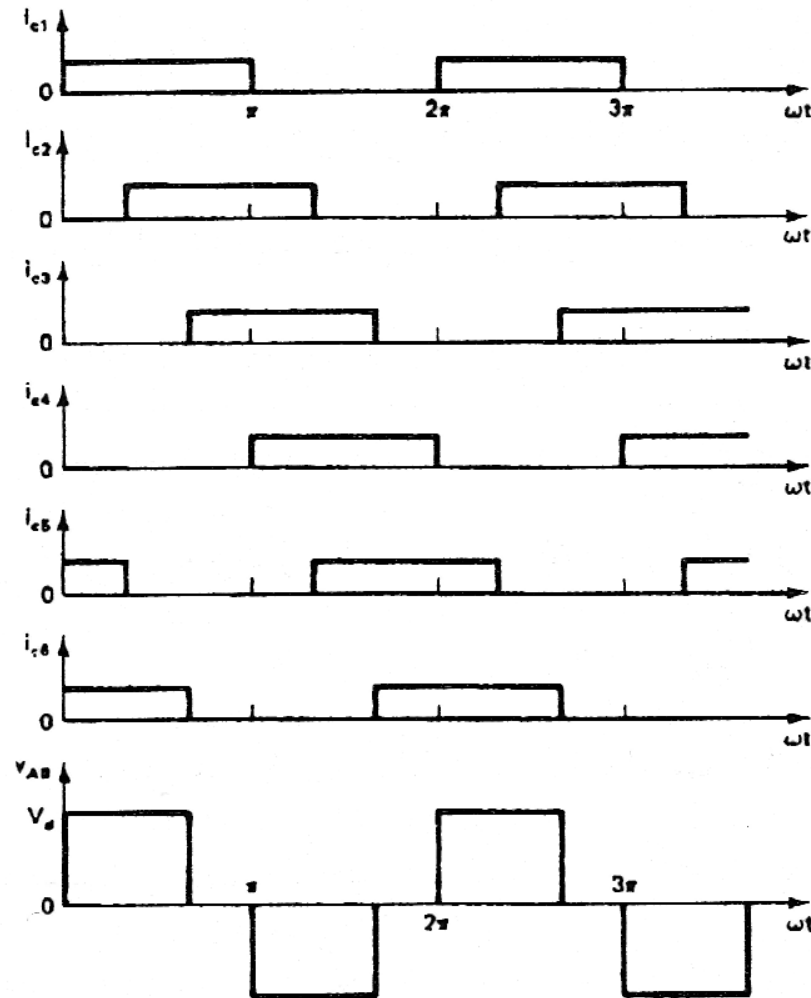


(ج) ولتاژ خط خروجی اینورتر PWM

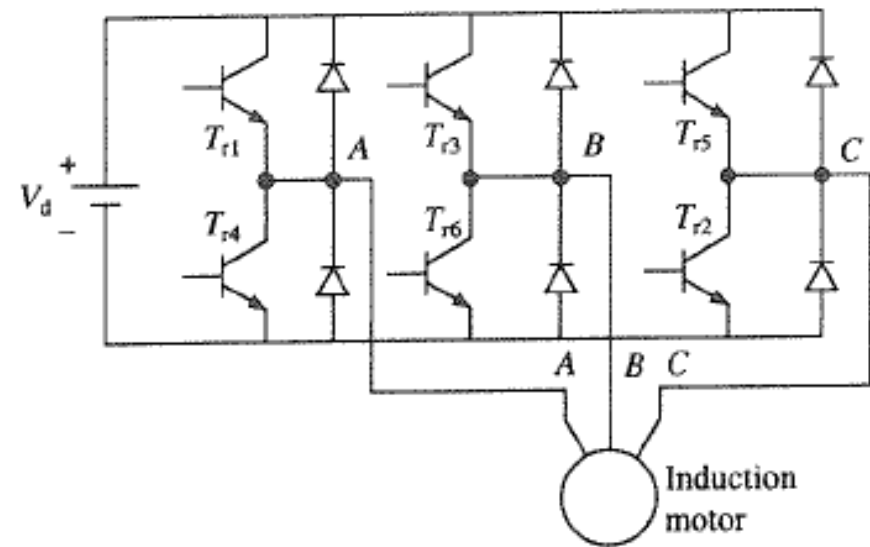
اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

➤ اینورتر VSI پله ای: فرمانهای سوئیچینگ

✓ این نوع اینورتر ساده ترین نوع اینورتر فرکانسی بوده که به خاطر شکل پله ای ولتاژ فاز آن، شش پالسی نیز نامیده می شود.



(ب) فرمان به سوئیچ ها در اینورتر پله ای



(الف) اینورتر سه ساق ۶ سوئیچه مورد استفاده در درایو موتور القایی سه فاز

✓ ترتیب سوئیچ زنی:

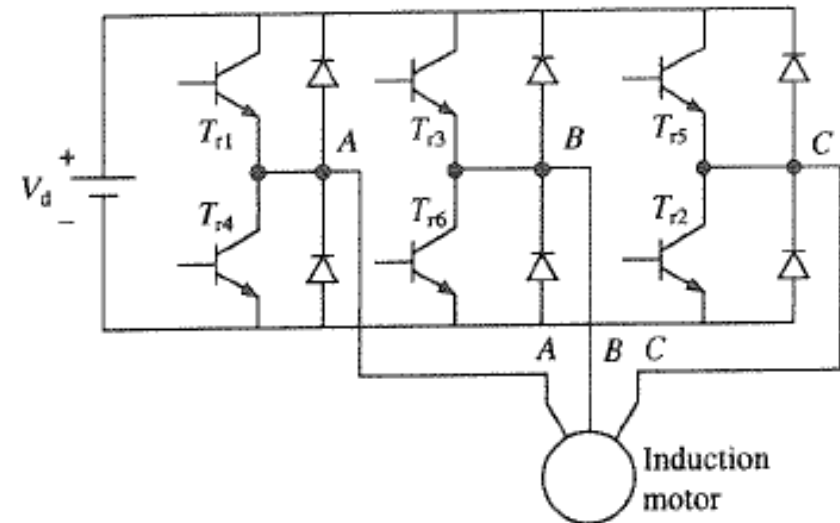
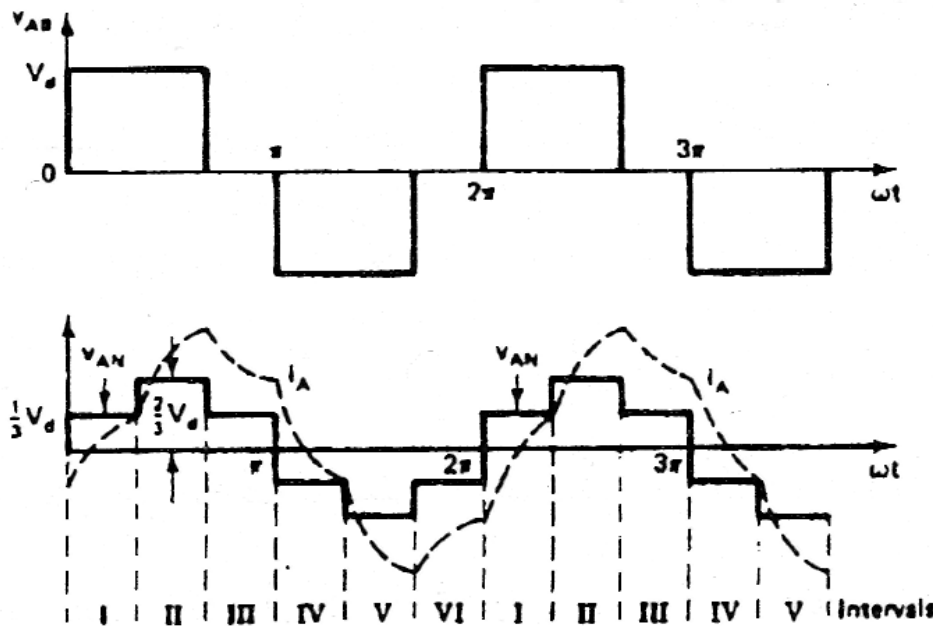
612 - 123 - 234 - 345 - 456 - 561 - 612

اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

➤ اینورتر VSI پله ای: شکل موج های ولتاژ خط و فاز

ارسال فرمان به کلید	فاصله زمانی	ارسال فرمان به کلید	فاصله زمانی
۲ و ۳ و ۴	IV	۱ و ۵ و ۶	I
۵ و ۴ و ۳	V	۱ و ۲ و ۶	II
۵ و ۴ و ۶	VI	۱ و ۲ و ۳	III

جدول کلیدزنی سوئیچها در اینور پله ای



(الف) اینورتر سه ساق ۶ سوئیچ مورد استفاده در درایو موتور القایی سه فاز

(ب) شکل موج های ولتاژهای خط و فاز در اینورتر پله ای

✓ بسط فوریه ولتاژ خط:

$$V_{AB} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} V_d \left[\sin \omega t - \frac{1}{5} \sin 5\omega t - \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \frac{1}{13} \sin 13\omega t \dots \right] \quad (6.77)$$

✓ بسط فوریه ولتاژ فاز:

$$V_{AN} = \frac{2}{\pi} V_d \left[\sin \omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t \right] \quad (6.78)$$

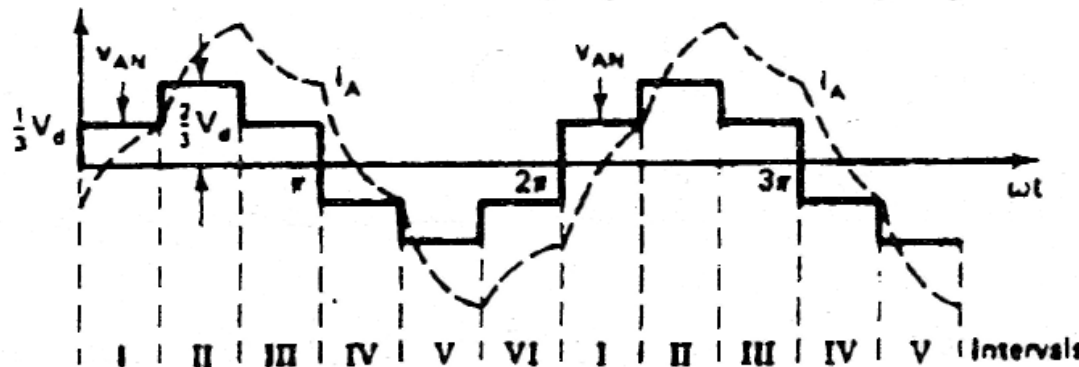
✓ مقدار موثر هارمونیک اول ولتاژ فاز:

$$V_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_d \quad (6.79)$$

✓ مقدار موثر ولتاژ فاز:

$$V = \frac{\sqrt{2}}{3} V_d$$

✓ برای تغییر موثر ولتاژ باید مقدار ولتاژ باس dc تغییر کند.



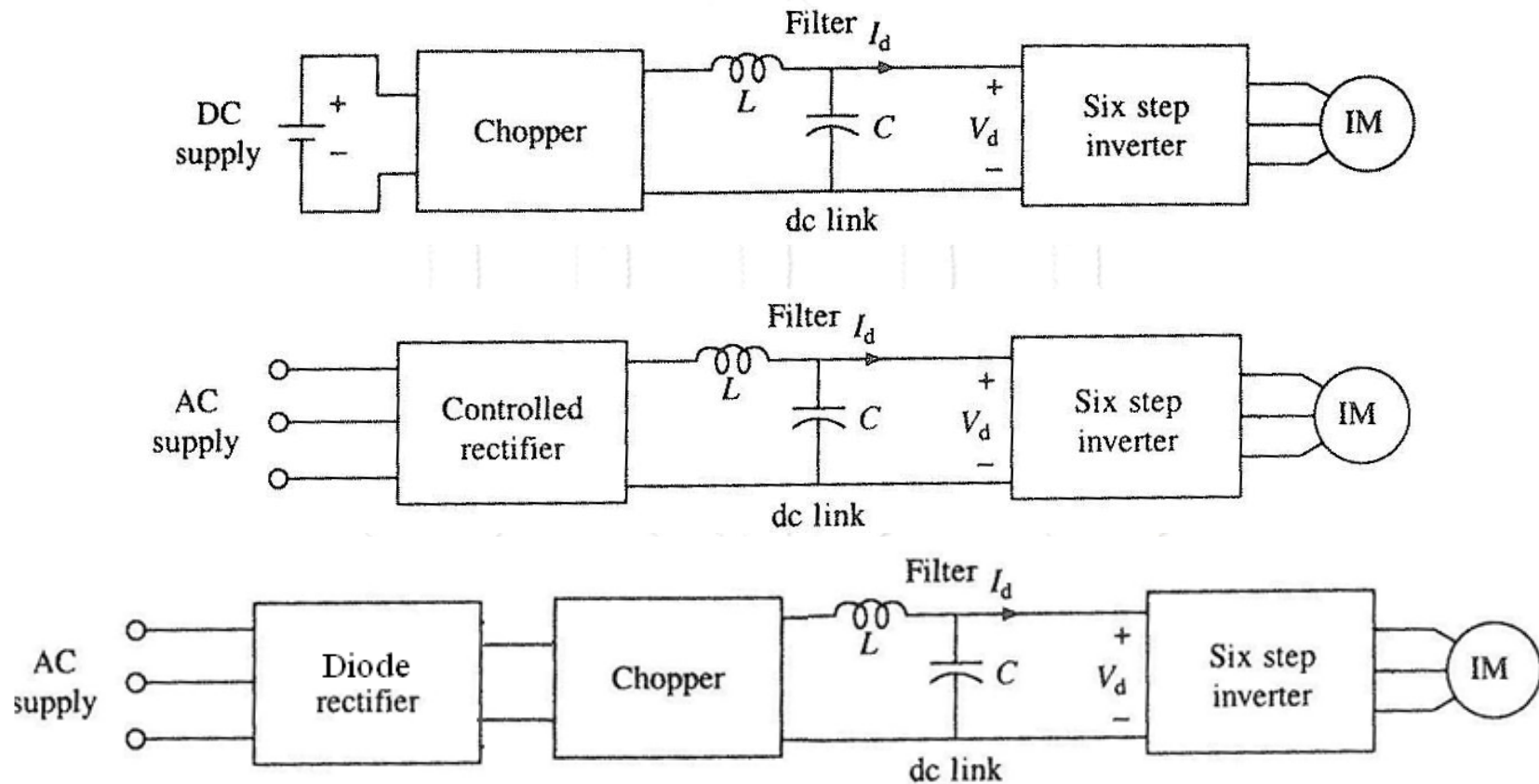
شکل موج های ولتاژهای خط و فاز در اینورتر پله ای

اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

➤ اینورتر VSI پله ای: **تغییر مقدار موثر ولتاژ**

❖ **کنترل ولتاژ در اینورتر پله ای:**

✓ برای تغییر موثر ولتاژ باس dc از آرایشهای زیر می توان استفاده نمود:



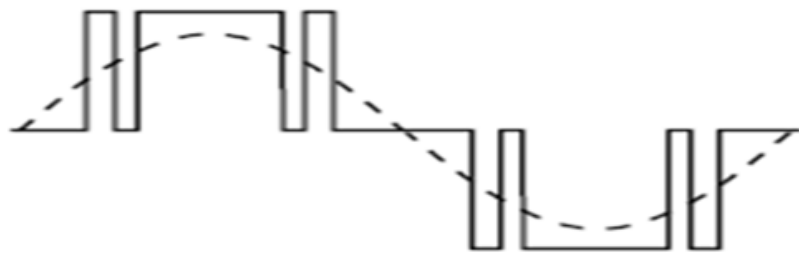
❖ **عیوب اینورتر پله ای:**

✓ برای ایجاد ولتاژ و فرکانس متغیر در اینورتر پله ای به حداقل دو مبدل نیاز است که هم قیمت را بالا برده و هم کنترل سخت تر می شود.

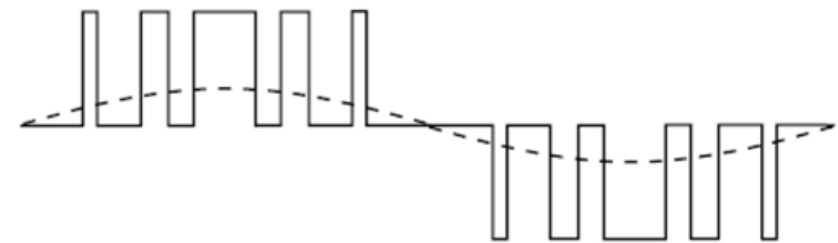
✓ دامنه هارمونیکها بالاست.

- ✓ با استفاده از تکنیک مدولاسیون پهنای باند یا PWM می توان مشکلات اینورتر پله ای را برطرف نمود.
- ✓ به اینورترهایی که با تکنیک PWM کار می کنند، اینورتر PWM گفته می شود.
- ✓ در این اینورترها مقدار موثر ولتاژ را نیز می توان با کنترل پهنای پالس تنظیم نمود و دیگر نیازی به مدار مجزای افزایش ولتاژ همانند اینورتر پله ای نیست.
- ✓ با استفاده از اینورتر PWM محتوای هارمونیک را کاهش داد و لذا ضریب توان ورودی بالاتر بوده و ضربان های گشتاور نیز کم می شوند.
- ✓ مقدار موثر هارمونیک اصلی ولتاژ در روش PWM برابر است با:

$$V = m \frac{V_d}{\sqrt{2}} \quad (6.80)$$
- ✓ لذا حتی با ثابت بودن ولتاژ لینک dc، تنها با تغییر اندیس مدولاسیون m می توان ولتاژ موثر هارمونیک اصلی را تغییر داد.



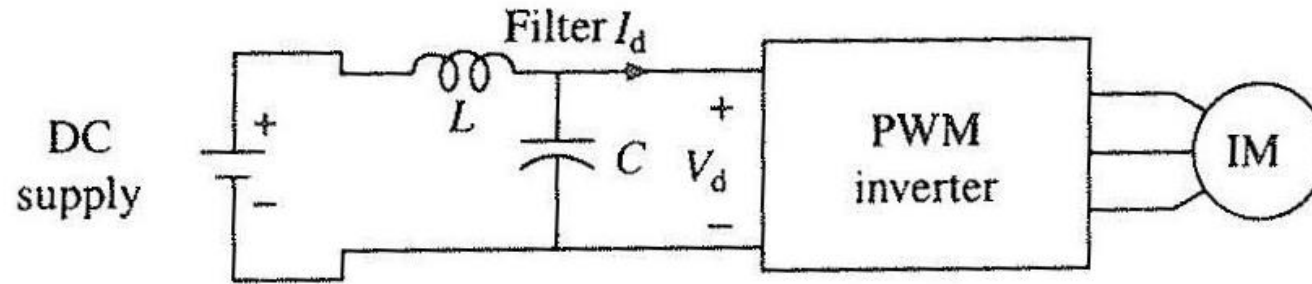
(ب) شکل موج ولتاژ PWM با مقدار موثر زیاد (عرض پالس پهن)



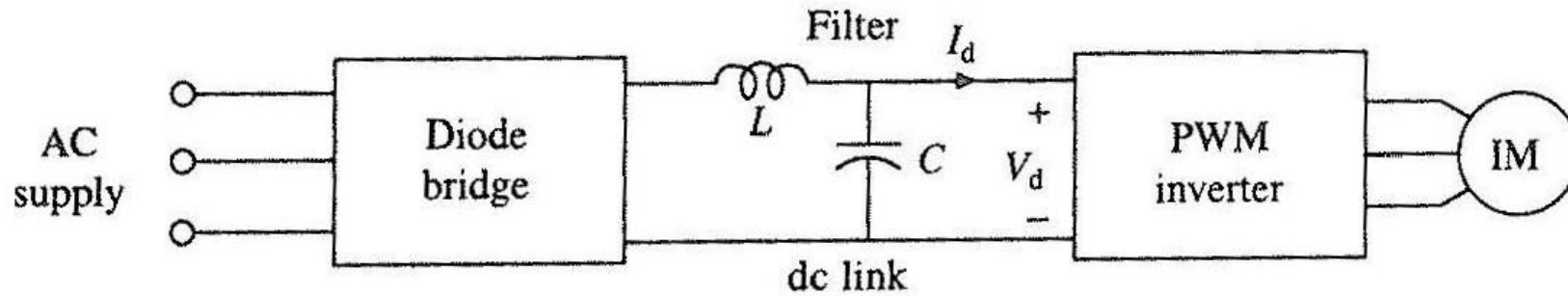
(الف) شکل موج ولتاژ PWM با مقدار موثر کم (عرض پالس باریک)

□ اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

➤ اینورتر VSI نوع PWM: آرایش های مختلف

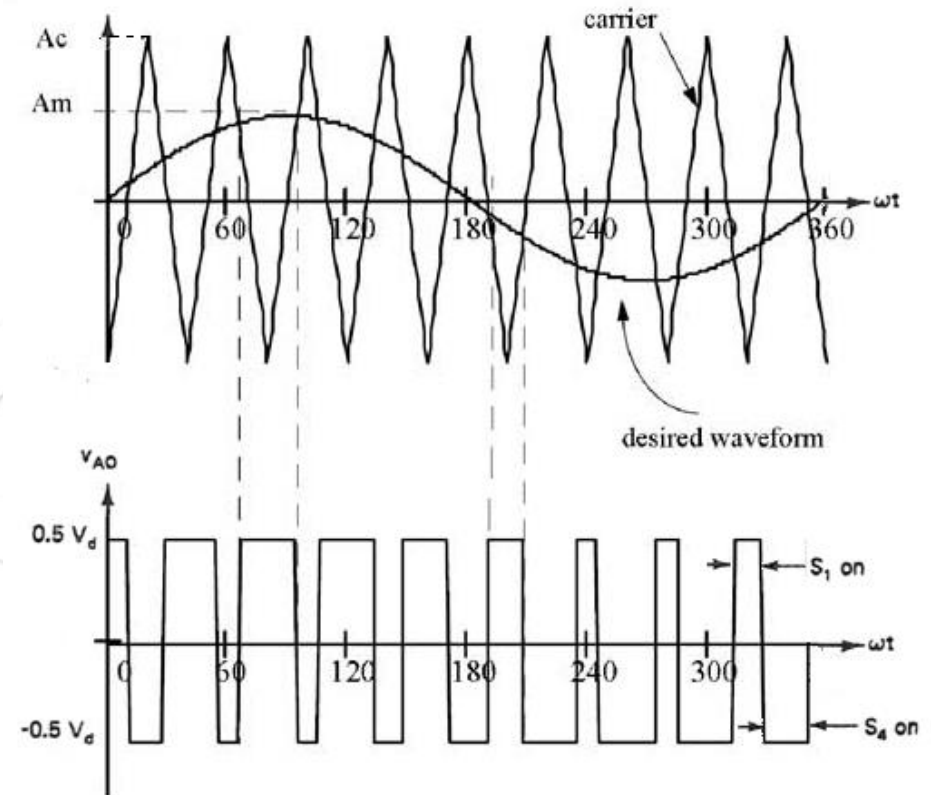
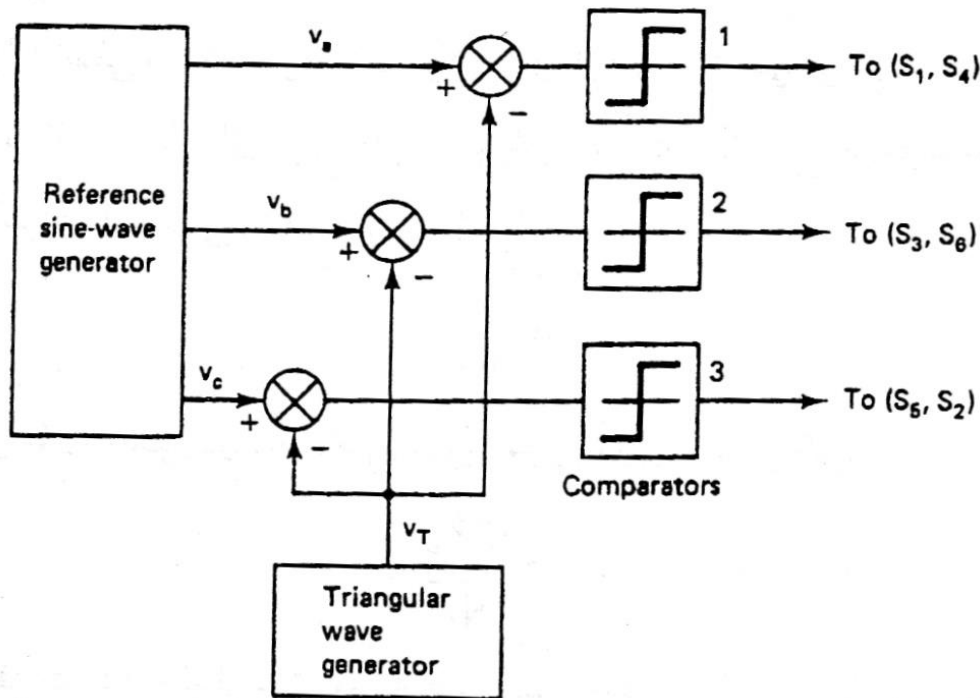


(الف) تغذیه اینورتر PWM وقتی منبع ولتاژ dc در دسترس باشد.



(ب) تغذیه اینورتر PWM وقتی منبع ولتاژ ac در دسترس باشد.

- ✓ سه ولتاژ مرجع V_a, V_b, V_c با ولتاژ مثلثی V_T مقایسه شده و خروجی آنها برای فرمان به سوئیچهای متناظر ارسال می گردد.
- ✓ فرکانس موج مثلثی اعمالی بالاست (بالتر از 1kHz) و لذا از سوئیچهای سریع نظیر ماسفت و IGBT بجای ترستور باید استفاده نمود.
- ✓ فرکانس مولفه اصلی شکل PWM برابر با فرکانس موج مرجع سینوسی (ولتاژ دلخواه برای اعمال به موتور) می باشد.



(الف) تولید سیگنال های فرمان به سوئیچها در اینورتر PWM

(ب) شکل موج PWM ایجاد شده برای ولتاژ فاز a

❖ مقدار موثر مولفه اصلی شکل موج V_{AO} :

$$V_1 = \frac{m V_d}{2\sqrt{2}}$$

❖ شاخص مدولاسیون m :

$$m = \frac{A_m}{A_c}$$

A_c = دامنه موج مثلی

A_m = دامنه موج سینوسی

✓ اگر $m = 1$: دامنه ولتاژ مرجع برابر با ولتاژ موج حامل می شود.

✓ اگر $m > 1$: مدولاسیون از حالت PWM سینوسی خارج می شود که به آن فوق مدولاسیون گویند و کار بصورت پله ای خواهد بود.

❖ مولفه های هارمونیک شکل موج PWM: $f_h = K f_c \pm k f$

$K=1, \quad k=2,4,6,\dots$

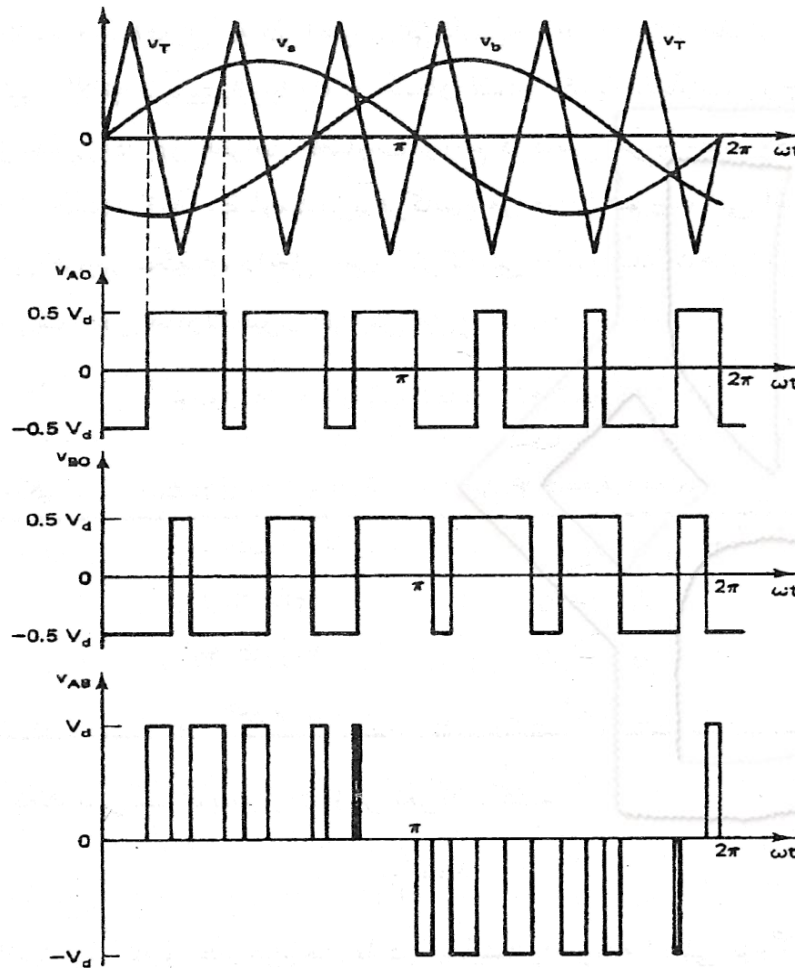
$K=2, \quad k=1,3,5,\dots$

$K=3, \quad k=2,4,6,\dots$

f_h = فرکانس مولفه های جانبی

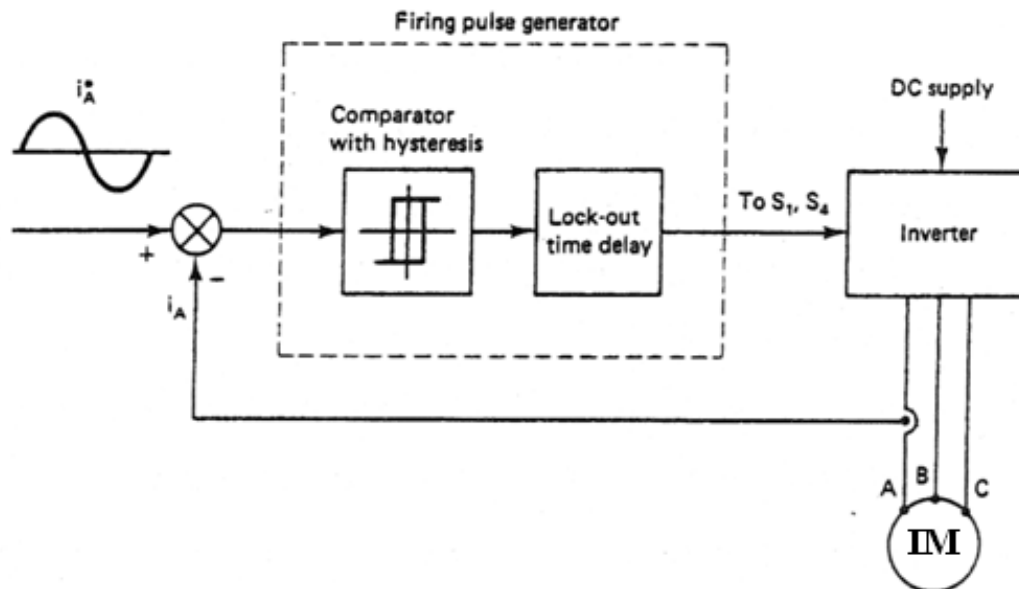
f = فرکانس موج مرجع

f_c = فرکانس موج حامل مثلی

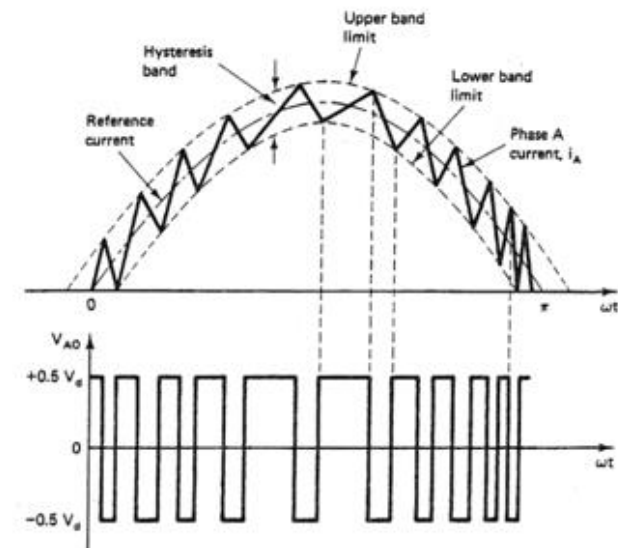


شکل موج PWM ایجاد شده برای ولتاژ خط V_{AB}

- ✓ اغلب اینورترهای منبع ولتاژ PWM ارائه شده، کنترل شده با ولتاژ هستند که در آن سیگنال ولتاژ مرجع سینوسی برای ایجاد شکل موج PWM بکار می رود. مزیت عمده این اینورترها، فرکانس سوئیچینگ ثابت است.
- ✓ در این بخش یک اینورتر پر کاربرد از نوع منبع ولتاژ PWM کنترل شده با جریان ارائه می شود.
- ✓ این روش به روش **کنترل جریان هیستریزس** نیز معروف بوده و در صنعت کاربرد زیادی دارد.
- ✓ در این روش، چون عملاً جریان فازها کنترل می شود، عملکرد محرکه مانند هنگامی است که از اینورتر CSI استفاده می شود.



(الف) کنترل جریان به روش هیستریزس



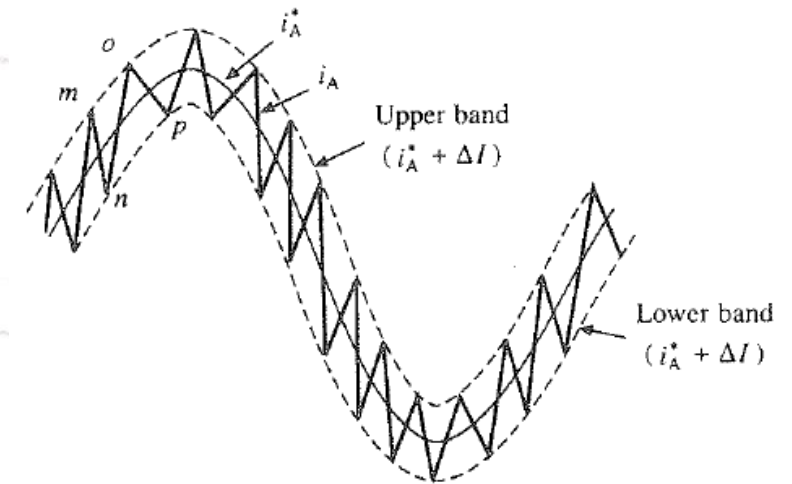
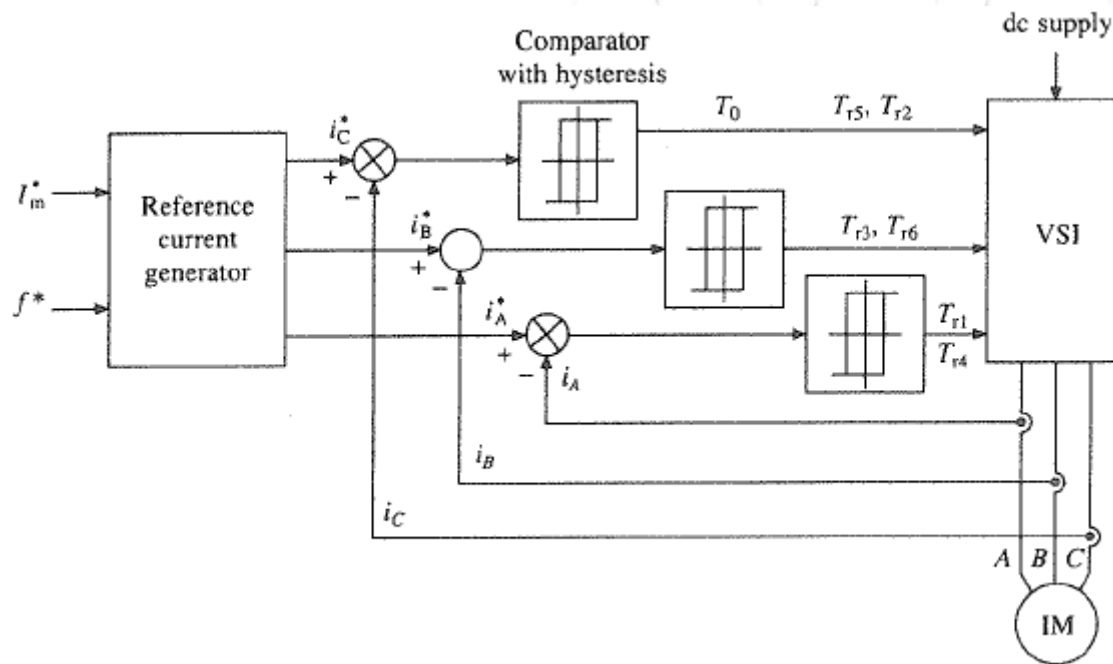
(ب) شکل موجهای جریان در روش هیستریزس

اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

➤ اینورتر VSI نوع PWM کنترل شده با جریان

❖ ویژگی های این اینورتر:

- مزیت: ساده بودن آن
- عیب: متغیر بودن فرکانس سوئیچینگ، بالا بودن تعداد سوئیچینگ، نوسانات فرکانس بالای جریان
- ✓ روشهایی برای تثبیت فرکانس سوئیچینگ در این روش ارائه گردیده است.
- ✓ پهنای باند هیستریزس کوچکتر، شکل موج سینوسی تری را نتیجه می دهد اما مقدار سوئیچینگ و لذا تلفات سوئیچینگ زیاد می شود.



(الف) محرکه حلقه باز موتور القایی

با استفاده از اینورتر منبع ولتاژ PWM کنترل شده با جریان

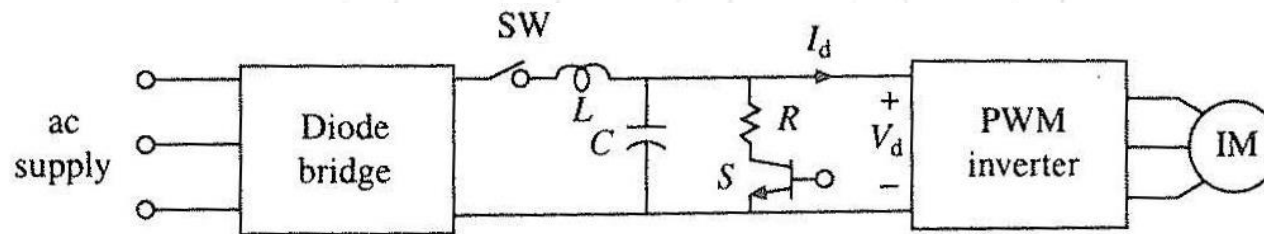
(ب) شکل موج جریان فاز موتور القایی در هنگام استفاده از اینورتر VSI کنترل شده با جریان

مبحث سوم: محرکه های موتورهای القایی

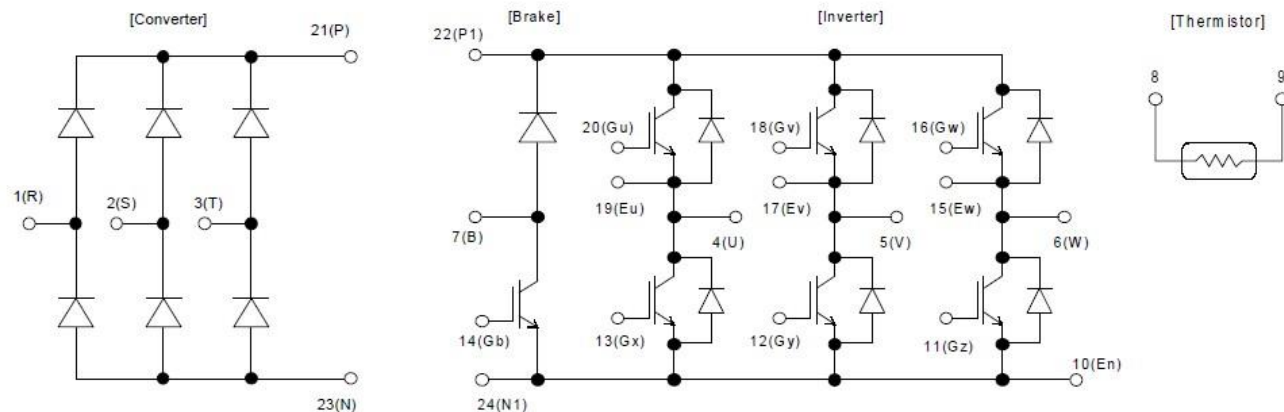
اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

ترمز دینامیکی در هنگام استفاده از اینورتر VSI نوع PWM

- ✓ در بسیاری از کاربردهای صنعتی، ترمز دینامیکی برای توقف موتور القایی مورد استفاده قرار می گیرد. برای این منظور، از ترکیب سری یک مقاومت و سوئیچ نیمه هادی قدرت در لینک dc استفاده می گردد.
- ✓ در هنگام عمل ترمزی و برگشت توان به لینک dc، ولتاژ خازن شروع به افزایش می کند. اگر ولتاژ خازن از حد معینی فراتر رود، سوئیچ S وصل شده و انرژی ذخیره شده در خازن را بصورت حرارت تلف می کند.
- ✓ توجه نمایید که بخاطر عدم امکان عبور جریان از دیودهای پل دیودی، انرژی قادر به بازگشت به منبع AC نیست.



(الف) ترمز دینامیکی در محرکه موتور القایی تغذیه شده با اینورتر VSI



(ب) مدار الکترونیک قدرت اینورتر VSI با قابلیت ترمز دینامیکی

□ اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

➤ ترمز دینامیکی در هنگام استفاده از اینورتر VSI نوع PWM

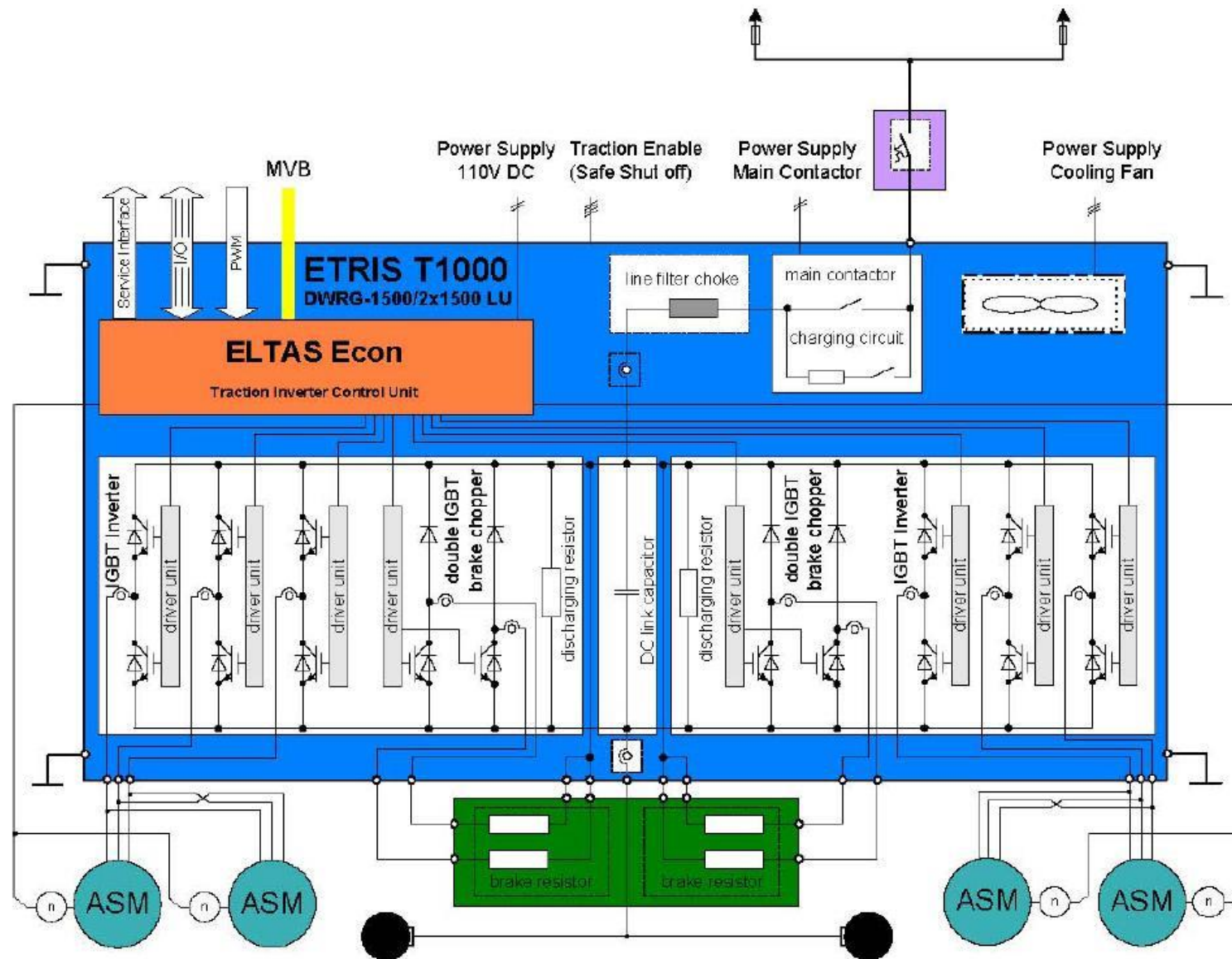
- ✓ بر حسب نوع کاربرد و توان ترمزی، اندازه مقاومتها متفاوت هستند.
- ✓ مقاومت مورد استفاده در ترمز دینامیکی باید قابلیت تحمل حرارت بالا را داشته باشد و مقدار آن بر مبنای توان ترمزی تعیین می گردد.
- ✓ در کاربردهای با توان بالا نظیر قطارهای مترو از بانکهای مقاومتی مجهز به سیستمهای خنک ساز برای ترمز دینامیکی استفاده می شود.

Braking Resistors for Variable Frequency Drives



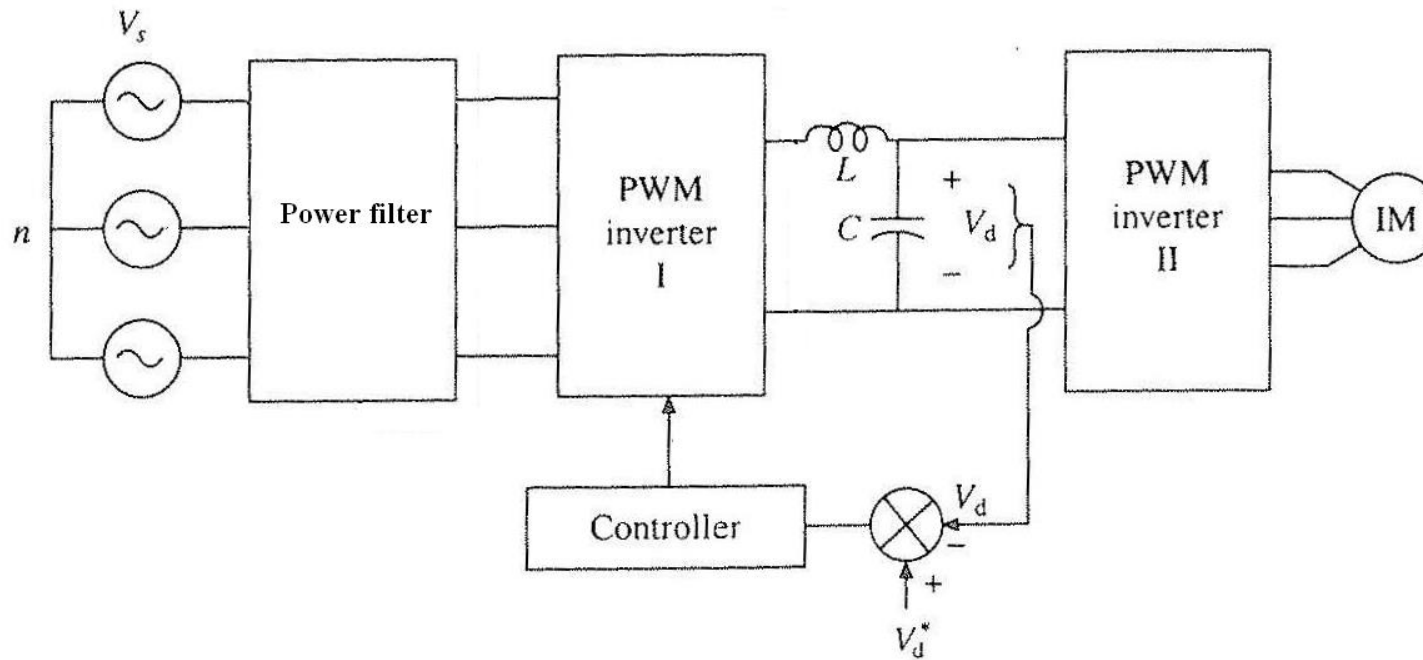
اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

➤ ترمز دینامیکی در هنگام استفاده از اینورتر VSI نوع PWM



نمونه ای از سیستم محرکه موتور القایی مورد استفاده در لوکوموتیو مترو مجهز به ترمز دینامیکی

- ✓ در برخی کاربردهای با عملکرد بالا نظیر خودروهای برقی و هیبریدی، قطارهای مترو و امثالهم، انرژی ناشی از ترمزی زیاد بوده که در صورتیکه بتوان آنرا به منبع یا شبکه باز گرداند، بهره کلی سیستم تا ۳۰ درصد هم افزایش می یابد.
- ✓ برای این منظور موتور القایی بصورت ژنراتور عمل کرده و توان مکانیکی را به توان الکتریکی ac تبدیل می کند. توان ac از طریق اینورتر متصل به موتور (II) به توان dc در لینک تبدیل شده و این توان dc از طریق اینورتر متصل به منبع ac (I) به منبع باز می گردد.
- ✓ حلقه کنترل ولتاژ در لینک dc بمنظور انتقال مقدار مناسب توان و تثبیت ولتاژ باس dc برای عملکرد درست موتور القایی است.
- ✓ در درایوهای واقعی، علاوه بر ترمز ژنراتوری، بمنظور حفاظت در مقابل اضافه ولتاژ در لینک dc از ترمز دینامیکی هم در مواقع لزوم استفاده می شود.





□ اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

➤ اثر ولتاژ تغذیه غیر سینوسی بر روی موتور

✓ ولتاژهای خروجی منابع ولتاژ متغیر یا ولتاژ-فرکانس متغیر، که با استفاده از ادوات نیمه هادی طراحی می شوند، غیر سینوسی هستند. می خواهیم اثر هارمونیکهای ولتاژ بر رفتار موتور القایی را بررسی نماییم.

$$V_{AN} = V_1 \sin \omega t$$

✓ هارمونیکهای اصلی ولتاژها، میدان گردانی با سرعت سنکرون ایجاد می کنند که فرض کنیم دارای توالی مثبت هستند:

$$V_{BN} = V_1 \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$V_{CN} = V_1 \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right)$$

✓ هارمونیکهای پنجم ولتاژها، میدان گردانی با سرعت ۵ برابر سرعت سنکرون ایجاد می کنند که در خلاف جهت میدان اصلی می چرخد یعنی دارای توالی منفی است:

$$V_{AN} = V_5 \sin 5\omega t$$

$$V_{BN} = V_5 \sin 5(\omega t - 2\pi/3) = V_5 \sin (5\omega t - 4\pi/3)$$

$$V_{CN} = V_5 \sin 5(\omega t - 4\pi/3) = V_5 \sin (5\omega t - 2\pi/3)$$



□ اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

➤ اثر ولتاژ تغذیه غیر سینوسی بر روی موتور

✓ هارمونیکهای هفتم ولتاژها، میدان گردانی با سرعت ۷ برابر سرعت سنکرون ایجاد می کنند که در جهت میدان اصلی می چرخد یعنی دارای توالی مثبت است:

$$V_{AN} = V_v \sin \sqrt{3} \omega t$$

$$V_{BN} = V_v \sin \sqrt{3} (\omega t - \frac{2\pi}{3}) = V_v \sin (\sqrt{3} \omega t - \frac{2\pi}{3})$$

$$V_{CN} = V_v \sin \sqrt{3} (\omega t - \frac{4\pi}{3}) = V_v \sin (\sqrt{3} \omega t - \frac{4\pi}{3})$$

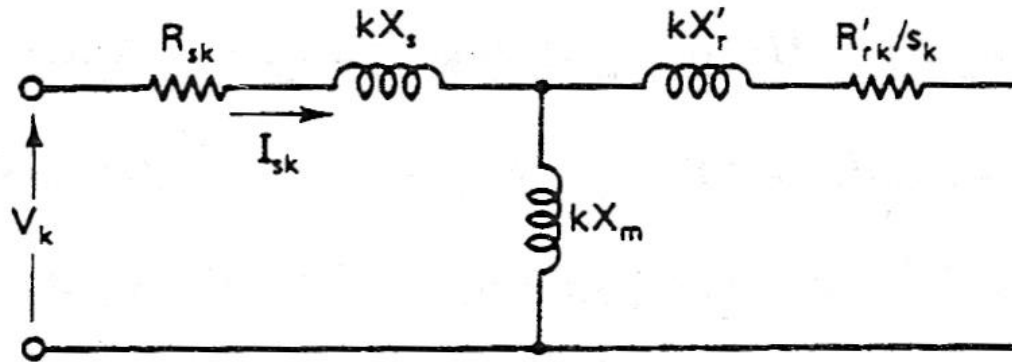
✓ لذا هارمونیکهای از مرتبه $k=6n+1$ مثل ۷، ۱۳، ۱۹ و ...، دارای توالی مثبت بوده و هارمونیکهای از مرتبه $k=6n-1$ مثل ۵، ۱۱، ۱۷، ... دارای توالی منفی می باشند.

✓ همچنین هارمونیکهای زوج نیز به دلیل تقارن وجود ندارند.

✓ هارمونیکهای از مرتبه $k=3n$ نیز هارمونیکهای توالی صفر نام داشته که چون میدان گردانی ایجاد نمی کنند، در محاسبات گشتاور لحاظ نمی شوند و فقط جریان هارمونیک سوم ایجاد نموده و سبب تلفات حرارتی می شوند.

✓ برای بررسی اثر هارمونیکها بر گشتاور تولید شده، از مدار معادل هارمونیک موتور القایی استفاده می کنیم.

❖ مدار معادل هارمونیک موتور القایی در حالت ماندگار:



✓ در هارمونیک مرتبه k ام، راکتانسها در ضریب k ضرب می شوند و مقاومتهای اهمی هم به دلیل اثرات پوستی اندکی افزایش می یابند.

$$S_k = \frac{k\omega_{ms} \pm \omega_m}{k\omega_{ms}} \quad (19)$$

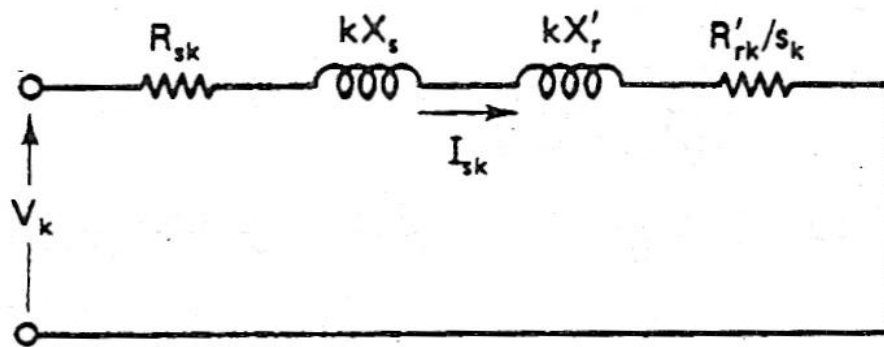
✓ لغزش هارمونیک k ام برابرست با:

✓ علامت - مربوط به هارمونیکهای توالی مثبت

✓ علامت + مربوط به هارمونیکهای توالی منفی

$$S_k = 1 \pm \frac{1-s}{k} \quad (20)$$

✓ می توان در مدار معادل از شاخه مغناطیس کنندگی به دلیل مقدار بالای راکتانس آن صرف نظر کرد:



$$I_{sk} = \frac{V_k}{\sqrt{\left(R_{sk} + \frac{R'_{rk}}{s_k}\right)^2 + k^2 (X_s + X'_r)^2}} \quad (21)$$

$$S_k = 1 \pm \frac{1-s}{k} \quad (22)$$

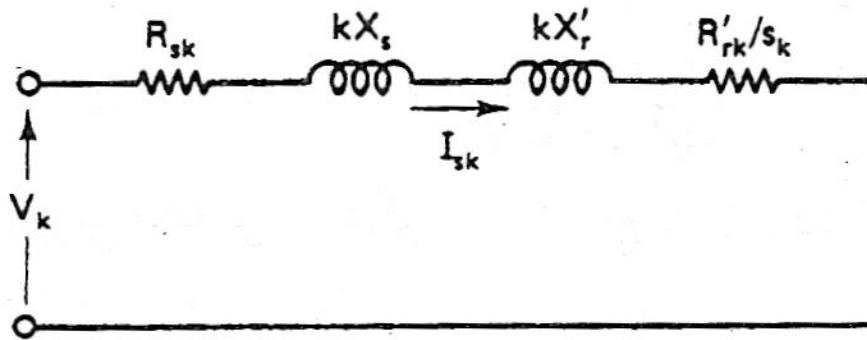
✓ با تغییر سرعت موتور از سرعت سنکرون به سرعت صفر، لغزش s از صفر تا ۱ تغییر می کند.

✓ اما تغییرات متناظر S_5 از ۱.۲ تا ۱ و تغییرات S_7 از ۰.۸۵۷ تا ۱ است. لذا S_k ها تقریباً به ۱ نزدیکند و برای هارمونیکهای مرتبه

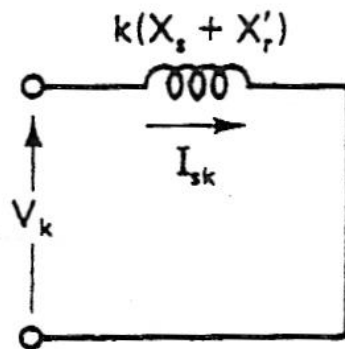
بالاتر هم لغزشهای متناظر به ۱ نزدیکتر می شوند.

□ اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

➤ اثر ولتاژ تغذیه غیر سینوسی بر روی موتور



✓ با توجه به تغییرات زیادتر راکتانس بر اثر افزایش فرکانس در مقابل افزایش تغییرات مقاومتهای اهمی ناشی از اثر پوستی می توان از مقاومتهای اهمی در مقابل راکتانسها صرف نظر نمود:



✓ لذا جریان را می توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$I'_{sk} \cong \frac{V_k}{k(X_s + X'_r)} \quad (23)$$

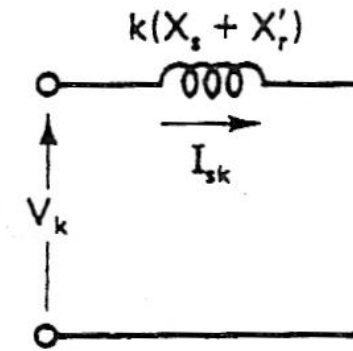
❖ معادلات گشتاور هارمونیکهای مختلف:

$$I'_{sk} \cong \frac{V_k}{k(X_s + X'_r)} \quad (24)$$

$$T_k = \pm \frac{3 I_{sk}^2 R'_{rk} / s_k}{k \omega_{ms}} \quad (25)$$

$$T_1 = \frac{3 I_r^2 R'_r / s}{\omega_{ms}} \quad (26)$$

$$\frac{T_k}{T_1} = \pm \left(\frac{I_{sk}}{I'_r} \right)^2 \left(\frac{R'_{rk}}{R'_r} \right) \left(\frac{s}{k s_k} \right) \quad (27)$$

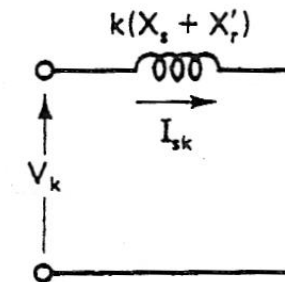


✓ رابطه فوق نشان می دهد که نسبت گشتاور هارمونیک k ام به گشتاور هارمونیک اصلی خیلی کمتر است.

✓ لذا اثر هارمونیکها، ایجاد ضربانهای گشتاور ناچیز است که البته سبب لرزش و نویز صوتی می گردد.

✓ اثر دیگر هارمونیکها، بالا بردن دامنه جریان موثر استاتور و افزایش تلفات مسی موتور است:

$$I'_{sk} \cong \frac{V_k}{k(X_s + X'_r)} \quad (24)$$



$$I_{rms}^2 = I_s^2 + \sum_{k=5,7,11,\dots} I_k^2 \quad (28)$$

✓ مقدار موثر جریان استاتور از رابطه زیر قابل محاسبه است:

✓ اگر اتصال موتور به صورت مثلث باشد، هارمونیک سوم و مضارب آن نیز در رابطه فوق (جریان فاز موتور) ظاهر می شوند، اما در جریان خط ظاهر نمی گردند. البته برای محاسبه جریان خط باید در رادیکال ۳ هم ضرب شود.

✓ توان تلفات مسی موتور در هر فاز نیز از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$P_h = \sum_{k=5,7} I_{sk}^2 (R_{sk} + R'_{rk}) \quad (29)$$



□ اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

➤ اینورتر منبع جریان (CSI)

✓ از اینورترهای منبع جریان نیز در کنترل موتورهای القایی البته در کاربردهای خاص استفاده می شود.

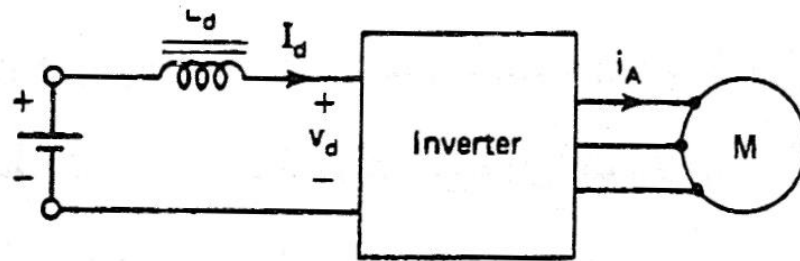
❖ مقایسه CSI با VSI:

- ✓ اینورتر CSI در مقابل اتصال کوتاه (وصل همزمان دو کلید روی یک ساق)، حفاظت ذاتی نسبت به اینورتر VSI دارد.
- ✓ بعلت وجود اندوکتانس بزرگ L_d در اینورتر CSI، پاسخ دینامیکی CSI نسبت به VSI کندتر است.
- ✓ در شرایط استفاده از منبع dc، محرکه VSI بسیار ارزاتر از CSI در قدرت برابر می باشد. زیرا از خازنهای بزرگ کموتاسیون و اندوکتانس بزرگ L_d در لینک dc اینورتر CSI استفاده می شود.
- ✓ حوزه فرکانس اینورتر CSI محدودتر از VSI است.

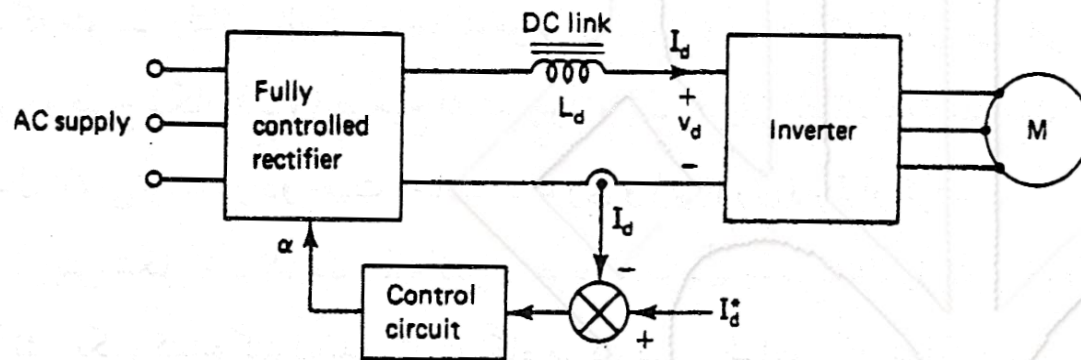
❖ انواع اینورترهای CSI:

- ✓ آرایش های متنوعی برای اینورترهای CSI وجود دارد.
- ✓ بر حسب شکل موج جریان، همانند اینورترهای VSI، اینورترهای CSI نیز به دو دسته کلی اینورتر پله ای و PWM دسته بندی می شود.
- ✓ استراتژی سوئیچینگ در اینورترهای CSI نوع PWM نیز دارای انواع متفاوتی نظیر سینوسی، مدولاسیون فضای برداری و ... هستند.
- ✓ همچنین روشهای کنترل موتور القایی با استفاده از CSI نیز متنوع هستند که ساده ترین آنها روش شار ثابت (یا I_m ثابت) است.

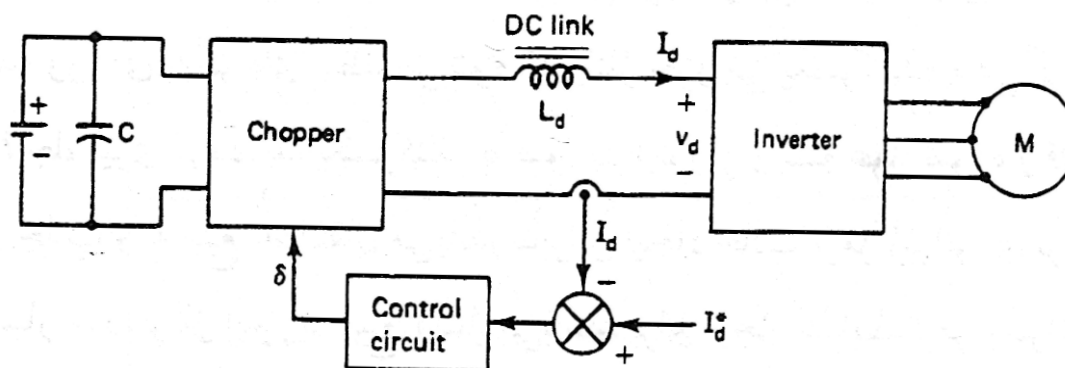
❖ چگونگی ایجاد منبع جریان:



(الف) با استفاده از منبع ولتاژ: اگر L_d بزرگ باشد، جریان I_d صاف و بدون اعوجاج خواهد بود.



(ب) با استفاده یکسوساز کنترل شده و حلقه جریان:

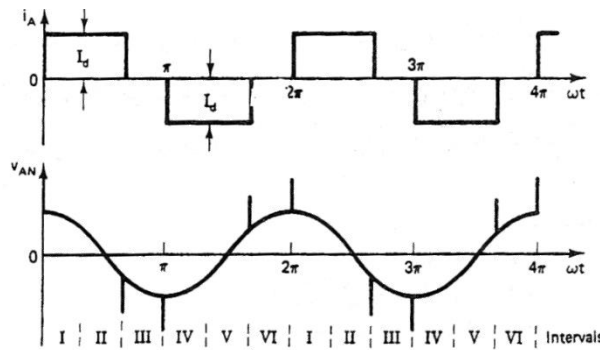


(ج) با استفاده از چاپر DC و حلقه جریان:

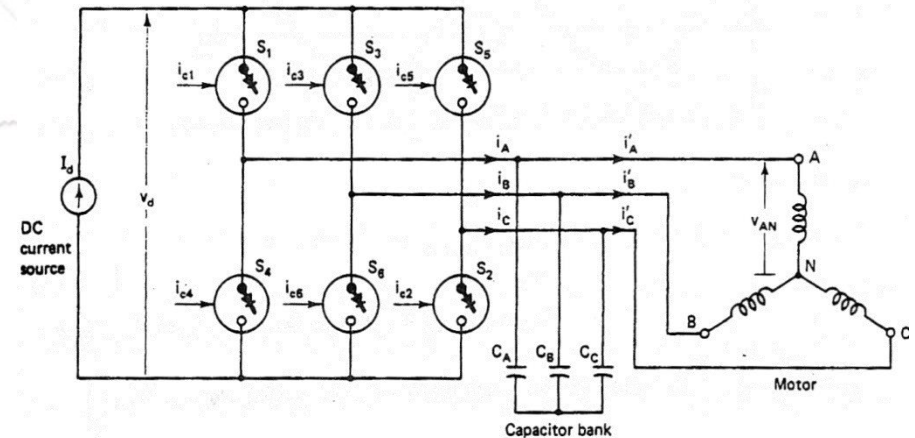
اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

اینورتر منبع جریان: نوع پله ای

- ✓ در هر لحظه از زمان تنها از دو سوئیچ موتور جریان عبور می کند.
- ✓ مجموعه خازنی برای جلوگیری از ایجاد اضافه ولتاژ ناشی از تغییر ناگهانی جریان موتور بواسطه سوئیچینگ در اینورتر بکار می رود.



(ج) شکل موج جریان و ولتاژ هر فاز موتور القایی تغذیه شده با CSI



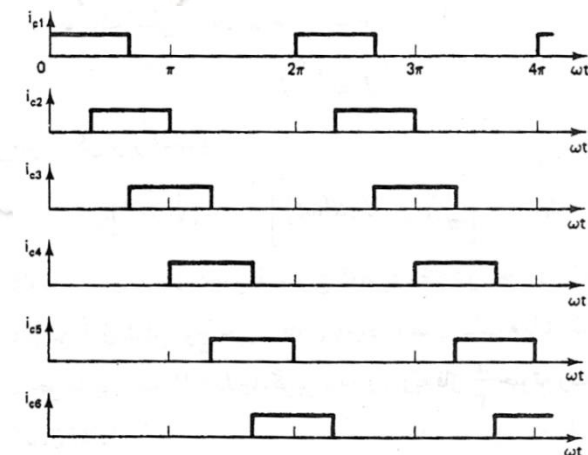
(الف) یک نوع اینورتر منبع جریان سه فاز

تحلیل فوریه شکل موج جریان فاز:

○ مقدار موثر هارمونیک اصلی جریان فاز: $I_s = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d$ (۵۵)

○ مقدار موثر جریان فاز: $I_{rms} = \sqrt{2/3} I_d$ (۵۶)

- ✓ مشاهده می شود که برای تغییر مقدار موثر جریان باید جریان لینک dc تغییر نماید.



(ب) فرمان ۶۰ درجه ایی هدایت به سوئیچها

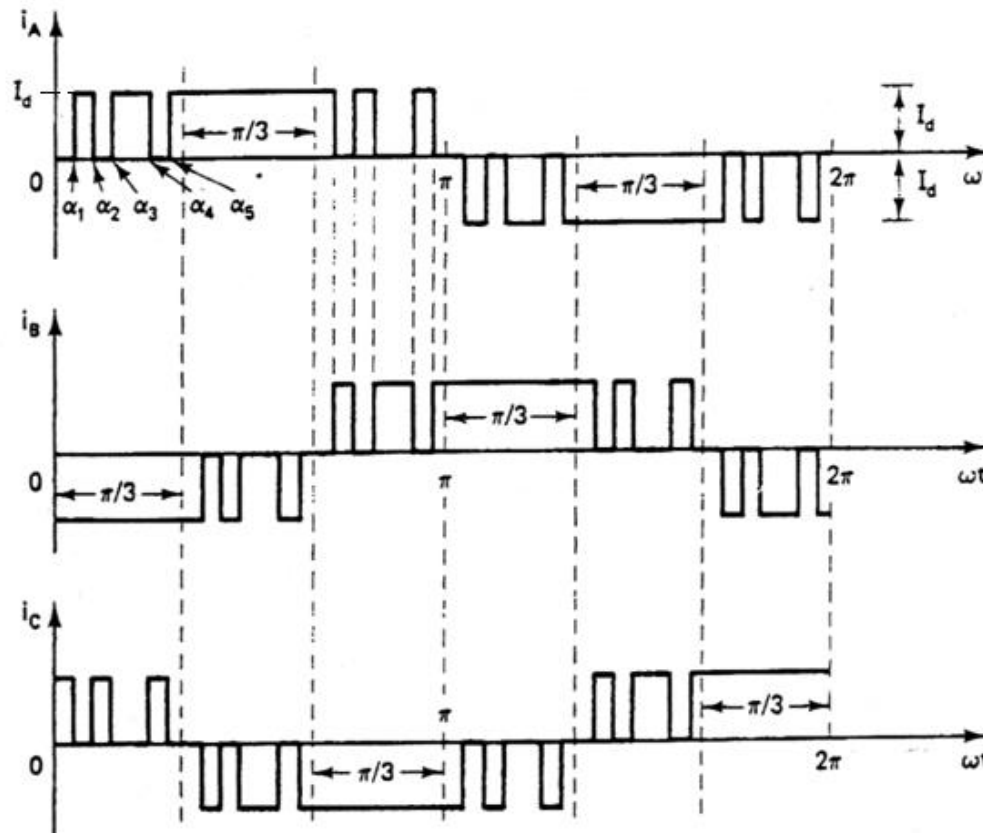
□ اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

➤ اینورتر منبع جریان: نوع PWM

✓ همانند اینورترهای VSI، در اینورترهای CSI نیز بمنظور ایجاد جریان متناوب با حداقل هارمونیک، می توان از روشهای کلیدزنی PWM استفاده نمود.

✓ روش های مختلفی نظیر PWM سینوسی، SV-PWM و PWM های بهینه استفاده نمود.

✓ به روشهای سوئیچینگ بهینه می توان هارمونیکهای مشخصی از شکل موج جریان را حذف نمود.

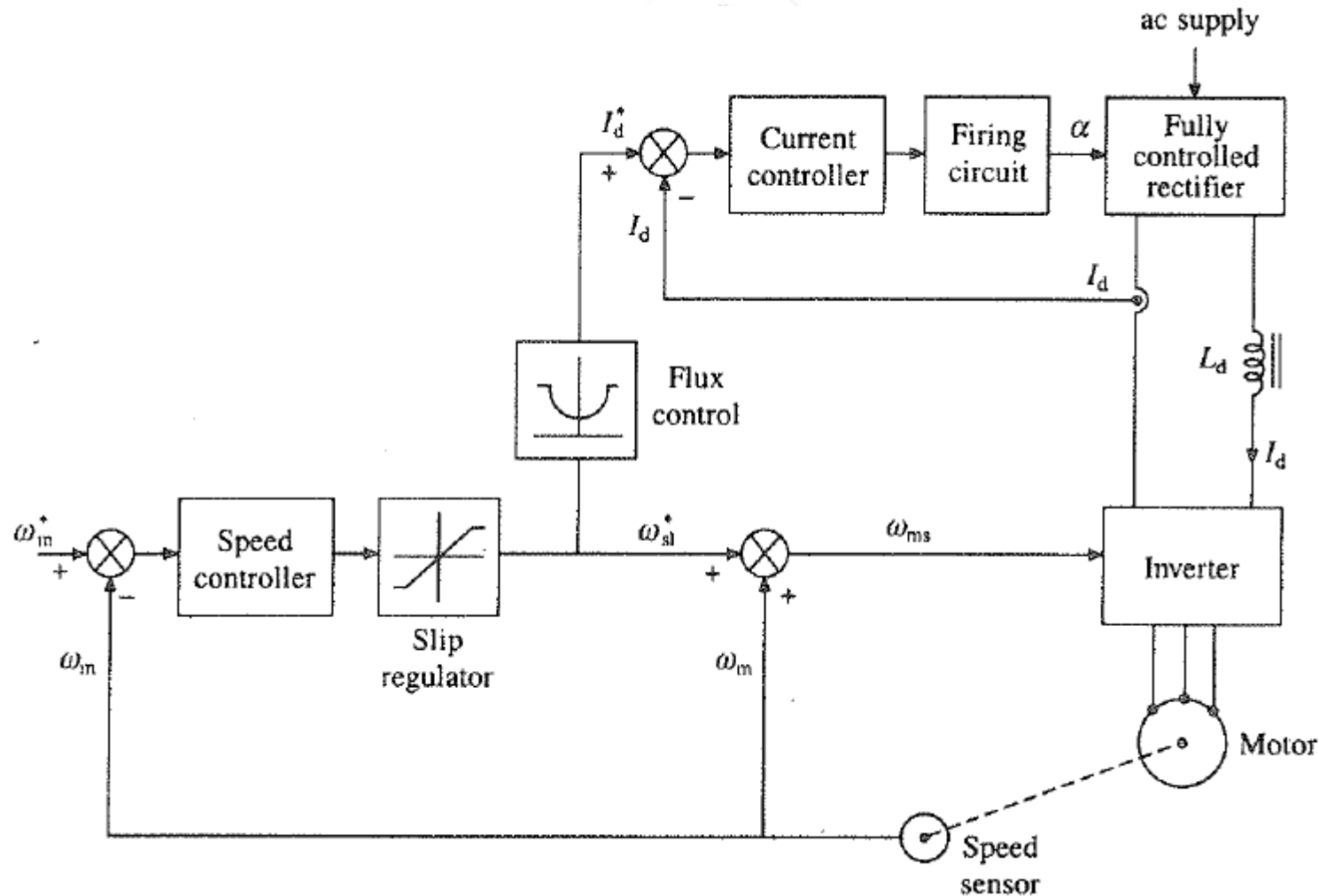


شکل موج جریان PWM اینورتر CSI با استراتژی کلیدزنی بهینه جهت حذف یا کاهش برخی هارمونیکها

اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

➤ اینورتر منبع جریان: کنترل حلقه بسته سرعت

- ✓ همانند اینورترهای VSI، سرعت موتور القایی را می توان به صورت کنترل حلقه بسته و با استفاده از اینورترهای CSI تنظیم نمود.
- ✓ در شکل زیر، بلوک Flux control، مقدار مرجع دامنه جریان فاز را بر حسب فرکانس لغزش تعیین می کند.



کنترل حلقه بسته سرعت لغزش و با استفاده از اینورتر CSI

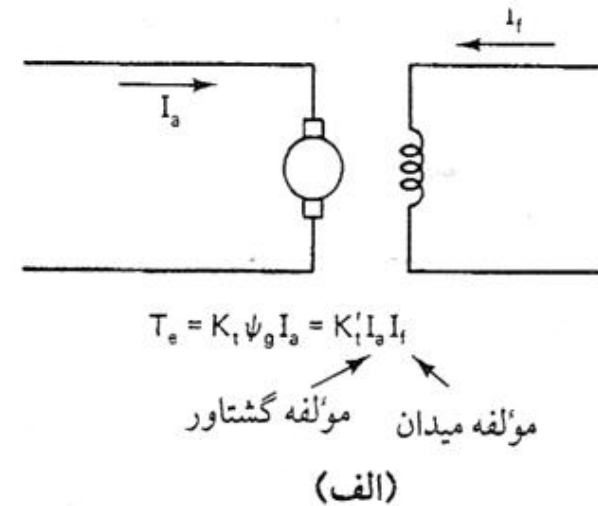
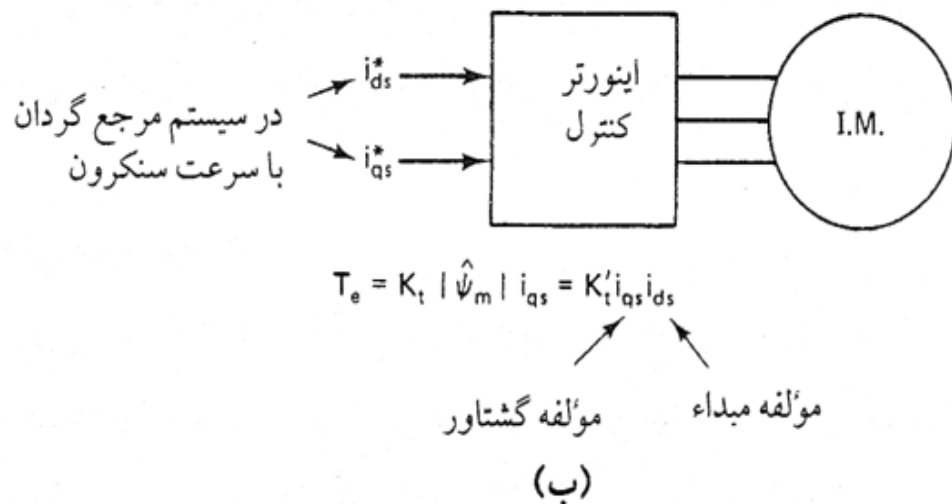


کنترل موتورهای القایی به روش

کنترل برداری

یا کنترل با جهت دهی میدان (FOC)

- ✓ 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 می شد.
- ✓ 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 می شود. اما برای بدست آوردن این مولفه ها نیاز به دانستن مدل دینامیکی موتور القایی در دستگاه دو محوری qd هستیم.



شباهت موتور القایی و ماشین dc در کنترل برداری

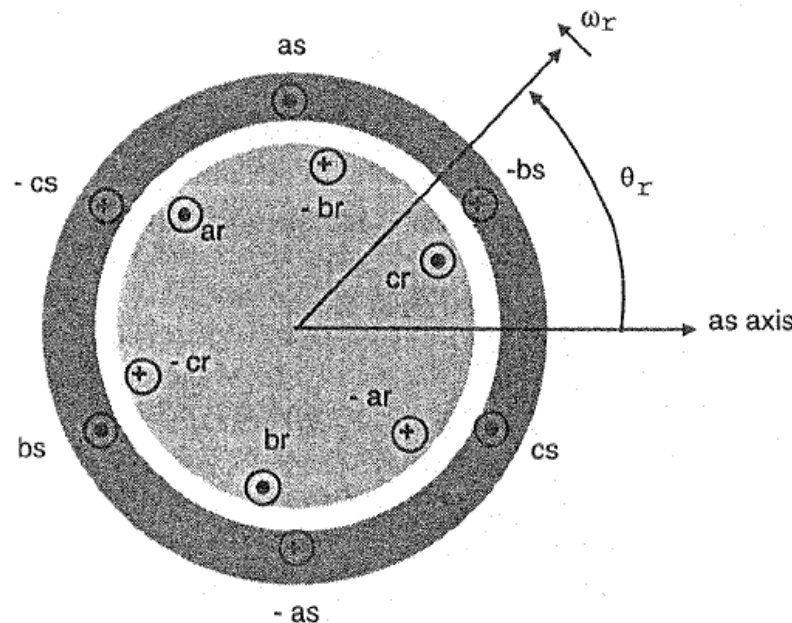
✓ با استفاده از نمادسازی ماشین با سیم پیچی های تزویج شده، معادلات ولتاژ سیم پیچی های استاتور و روتور بصورت زیر خواهند بود:

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{as} \\ \lambda_{bs} \\ \lambda_{cs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

○ معادلات ولتاژ استاتور:

$$\begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{ar} \\ \lambda_{br} \\ \lambda_{cr} \end{bmatrix} \quad (2)$$

○ معادلات ولتاژ روتور:



✓ در نمایش ماتریسی، شار-دور 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:

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

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

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

✓ در روابط اندوکتانسها داریم:

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

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

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

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

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

(8)

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.

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

- ✓ در ماشین القایی ایده آل فرض بر آنست که ماشین دارای فاصله هوایی متقارن 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 ω 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 ω دلخواه را بدست می آوریم. سپس از روی آن با قراردادن $\omega=0$ مدل مرجع ساکن را بدست می آوریم. همچنین با قرار دادن $\omega=\omega_e$ مدل مرجع سنکرون را بدست خواهیم آورد. در برخی از مراجع با قراردادن $\omega=\omega_m$ مدل مرجع گردان با سرعت روتور را نیز بدست آورده و استفاده می کنند.

✓ با معادلات ولتاژ فازی و گشتاور شروع خواهیم کرد.

✓ با بکاربردن تبدیل qd0 متغیرهای qd0 از متغیرهای abc بصورت روبرو حاصل

می شود، که f می تواند ولتاژ فاز، جریان و یا شار-دور باشد:

$$\begin{bmatrix} f_q \\ f_d \\ f_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{qdo}(\theta) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

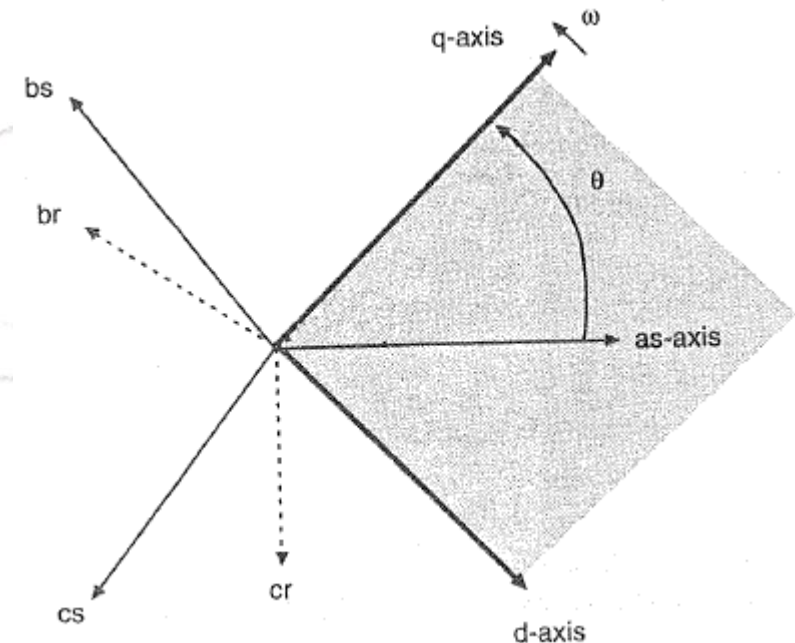
✓ مطابق شکل زیر، در مدل مرجع qd، محور q نسبت به محور a استاتور با سرعت

ω می چرخد که موقعیت آن نسبت به محور فاز a استاتور برابر خواهد بود با:

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

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

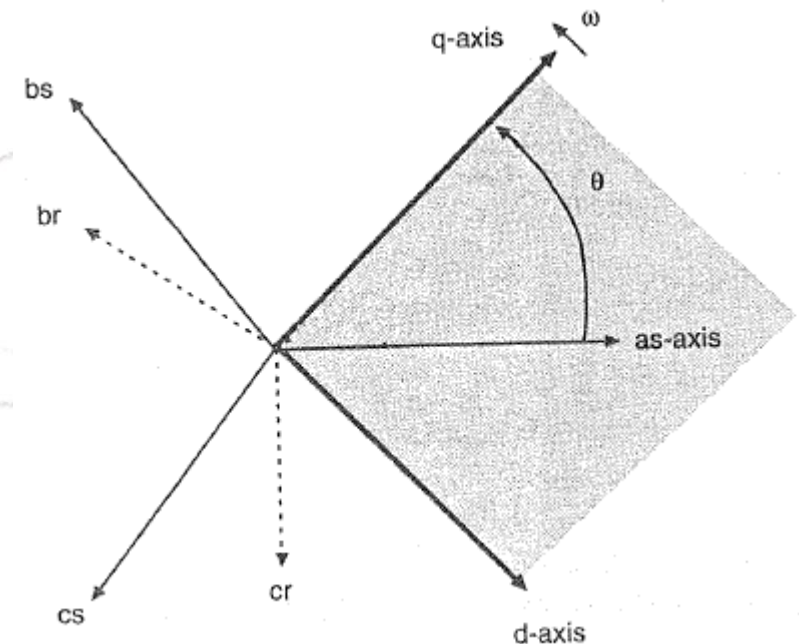
$$\begin{bmatrix} T_{qdo}(\theta) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (11)$$



✓ و معکوس آن نیز بصورت زیر است:

$$[T_{qdo}(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$[T_{qdo}(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (13)$$



معادلات ولتاژ استاتور در دستگاه $qd0$

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

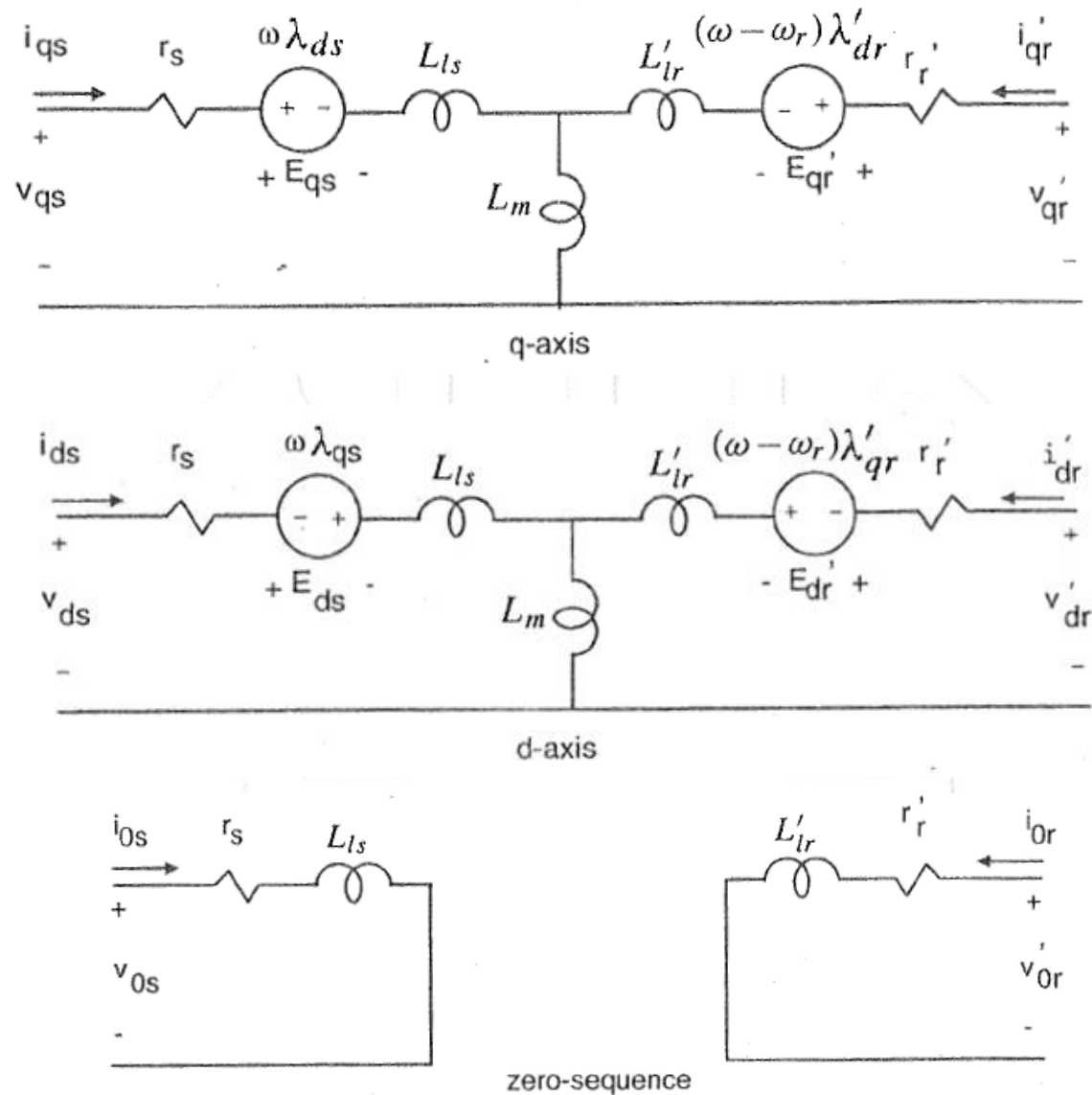
معادلات ولتاژ روتور در دستگاه $qd0$

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

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

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

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



- ✓ اغلب مواقع، در معادلات ماشین بجای اندوکتانس L و شار-دور λ از راکتانسها (x) و شار-دور بر ثانیه (ψ) استفاده می شود.
- ✓ این مقادیر به سادگی با ضرب مقدار فرکانس زاویه ای پایه ω_b در شار-دور و اندوکتانس بطریق زیر تبدیل می شوند:

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

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

- ✓ در روابط فوق $\omega_b = 2\pi f$ رادیان الکتریکی بر ثانیه و f فرکانس نامی به هرتز می باشد.
- ✓ 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 می شود.
- ✓ مقادیر پایه برای ماشین سه فاز از روابط زیر قابل محاسبه اند:

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

$$S_b = S_{\text{rated}}$$

$$Z_b = V_b / I_b$$

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

- ✓ که در روابط فوق، $\omega_{bm} = 2\omega_b / P$ فرکانس پایه مکانیکی است.

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

معادلات ولتاژ استاتور در دستگاه $qd0$

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

معادلات ولتاژ روتور در دستگاه $qd0$

$$\begin{cases} v'_{qr} = r'_r i'_{qr} + \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} \psi'_{dr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi'_{qr}}{dt} \\ v'_{dr} = r'_r i'_{dr} - \frac{(\omega - \omega_r)}{\omega_b} \psi'_{qr} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi'_{dr}}{dt} \\ v'_{0r} = r'_r i'_{0r} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi'_{0r}}{dt} \end{cases} \quad (49)$$

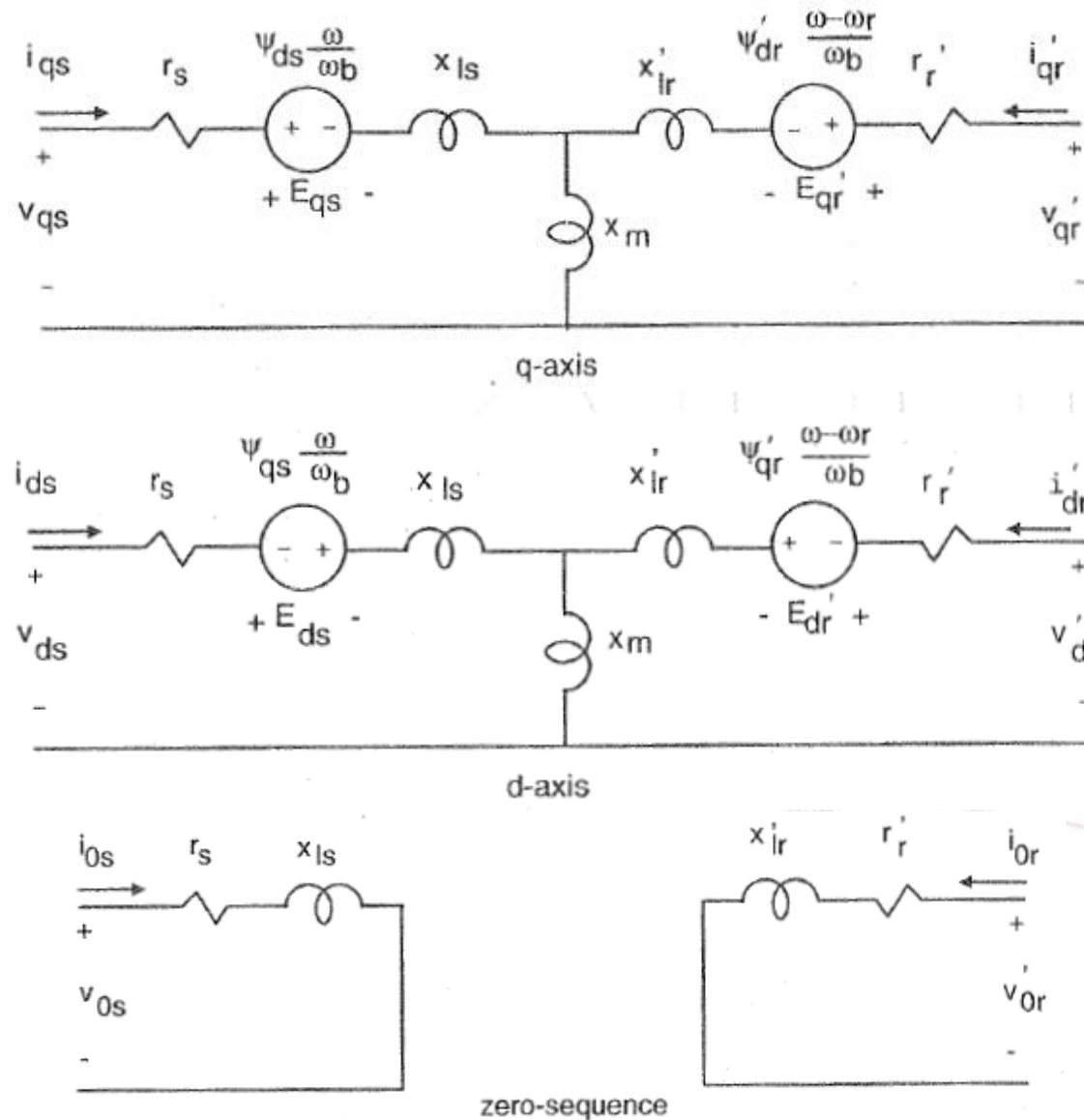
$$\begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \\ \psi_{os} \\ \psi'_{qr} \\ \psi'_{dr} \\ \psi'_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 \\ 0 & 0 & x_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ x_m & 0 & 0 & x'_{lr} + x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_m & 0 & 0 & x'_{lr} +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

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

□ مدل دینامیکی موتور القایی

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

✓ در نتیجه مدار معادل دینامیکی در دستگاه مرجع $qd0$ با سرعت دلخواه ω بر حسب ψ و x به صورت زیر خواهد بود:





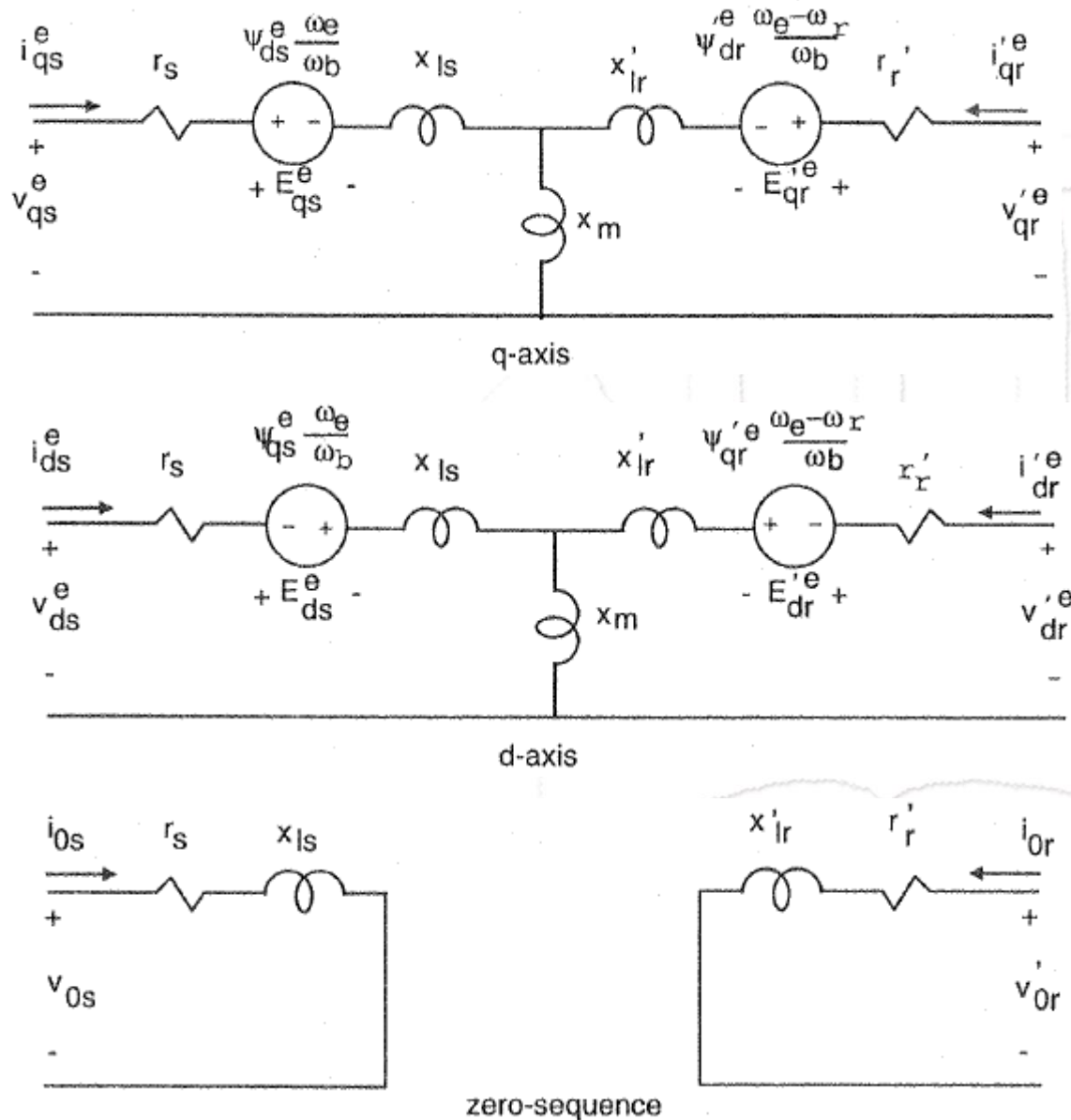
□ مدل دینامیکی موتور القایی

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

- ✓ معادلات دینامیکی بدست آمده در دستگاه مرجع گردان با سرعت دلخواه ω بودند.
- ✓ همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، می توان 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 می شود.
- ✓ 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 الکتریکی کاربرد فراوان دارد.
- ✓ لازم به ذکر است که در بعضی مراجع، بجای دستگاه مرجع ساکن $qd0$ با بالانویس s از نمادهای $\alpha\text{-}\beta$ استفاده می شود. برای دستگاه مرجع سنکرون از نمادهای دیگر نظیر $x\text{-}y$ و یا $d\text{-}q$ استفاده می شود.



✓ با جایگزینی $\omega = \omega_e$ در مدار معادل اسلاید ۹۲، مدار معادل دینامیکی در دستگاه مرجع سنکرون به شکل زیر خواهد بود:



معادلات ولتاژ استاتور در دستگاه سنکرون qdo

$$\begin{cases} v_{qs}^e = r_s i_{qs}^e + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds}^e + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{qs}^e}{dt} \\ v_{ds}^e = r_s i_{ds}^e - \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs}^e + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{ds}^e}{dt} \\ v_{os} = r_s i_{os} + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{os}}{dt} \end{cases} \quad (56)$$

معادلات ولتاژ روتور در دستگاه سنکرون qdo

$$\begin{cases} v_{qr}'^e = r_r' i_{qr}'^e + \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} \psi_{dr}'^e + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{qr}'^e}{dt} \\ v_{dr}'^e = r_r' i_{dr}'^e - \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} \psi_{qr}'^e + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{dr}'^e}{dt} \\ v_{or}' = r_r' i_{or}' + \frac{1}{\omega_b} \frac{d\psi_{or}'}{dt} \end{cases} \quad (57)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{qs}^e \\ \psi_{ds}^e \\ \psi_{os} \\ \psi_{qr}'^e \\ \psi_{dr}'^e \\ \psi_{or}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_{ls} + x_m & 0 & 0 & x_m & 0 \\ 0 & 0 & x_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ x_m & 0 & 0 & x_{lr}' + x_m & 0 & 0 \\ 0 & x_m & 0 & 0 & x_{lr}' + x_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{lr}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs}^e \\ i_{ds}^e \\ i_{os} \\ i_{qr}'^e \\ i_{dr}'^e \\ i_{or}' \end{bmatrix} \quad (58)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\psi_{qr}'^e i_{dr}'^e - \psi_{dr}'^e i_{qr}'^e) = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} (\psi_{ds}^e i_{qs}^e - \psi_{qs}^e i_{ds}^e) = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_b} x_m (i_{dr}'^e i_{qs}^e - i_{qr}'^e i_{ds}^e) \quad (59)$$



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

✓ قبلاً بدست آوردیم:

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

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

✓ معادله حرکت نیوتن برای روتور عبارتست از:

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. مثلاً برای بار مکانیکی پس‌یو اعمالی به موتور، مقدار T_{mech} منفی خواهد بود و برای بار فعال مثبت است.

✓ با بازنویسی معادله حرکت فوق بر حسب سرعت پر یونیتی ω_r / ω_b خواهیم داشت:

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

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

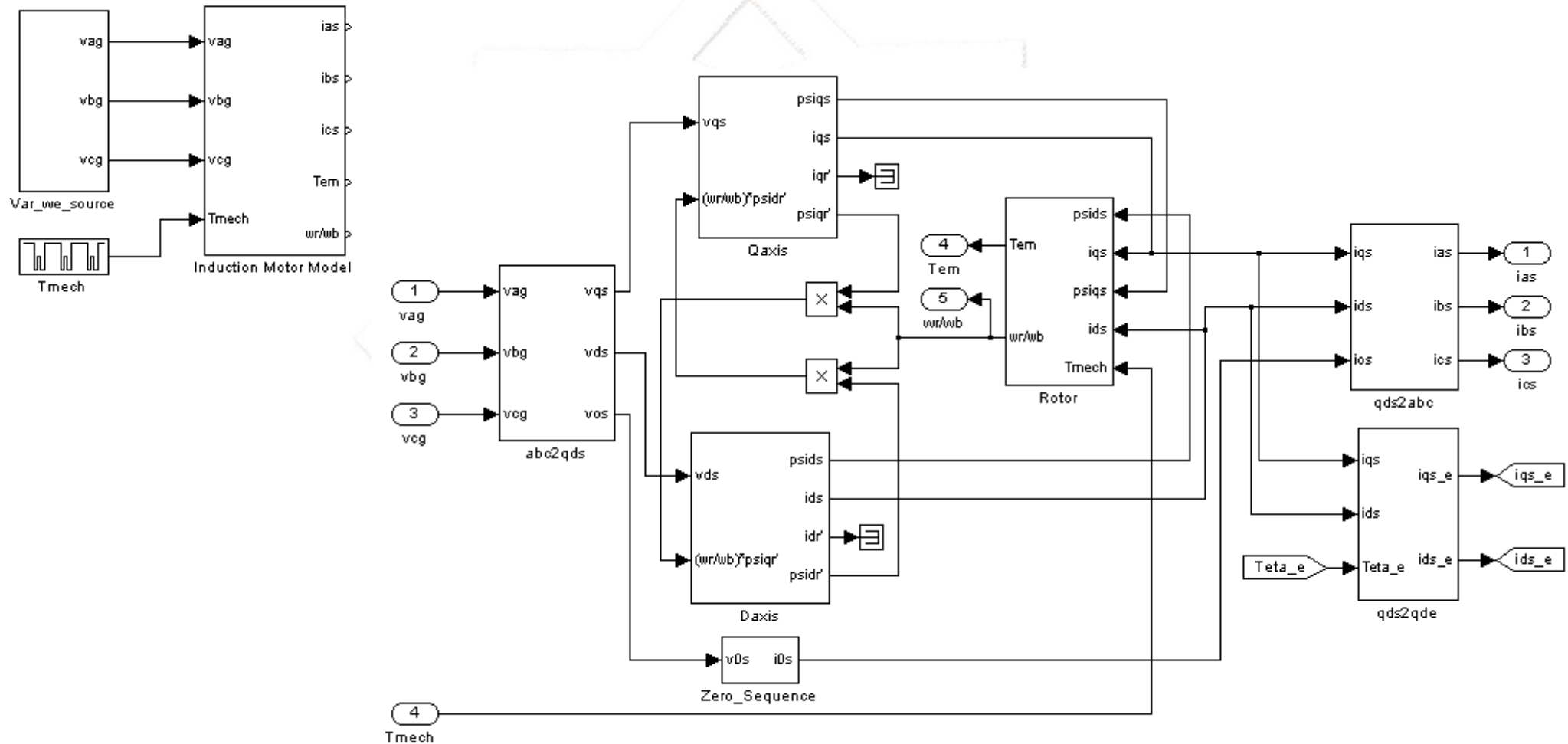
✓ با تعریف ثابت اینرسی H بصورت روبرو، معادله فوق بصورت زیر قابل بازنویسی است:

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

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

❖ 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.



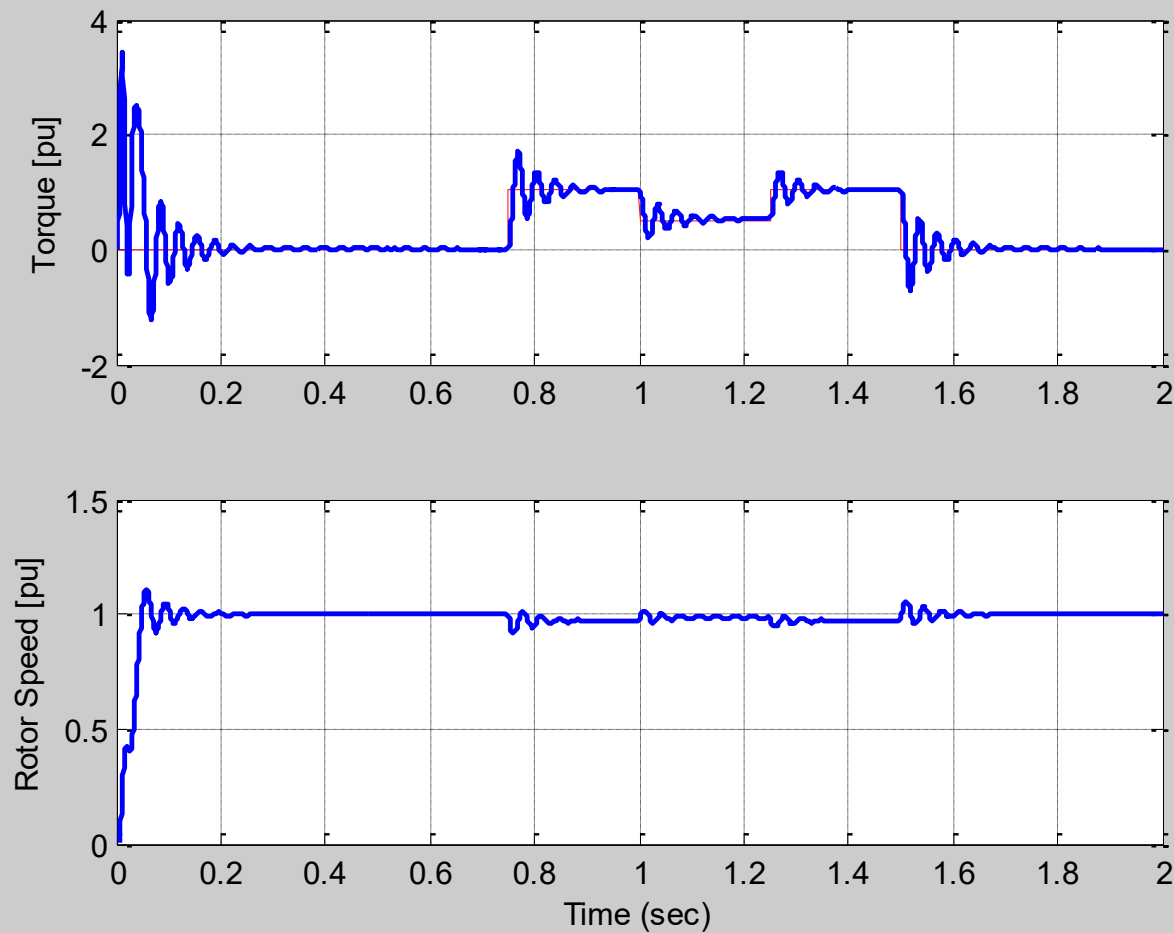
Induction Machine Model in Stationery Frame



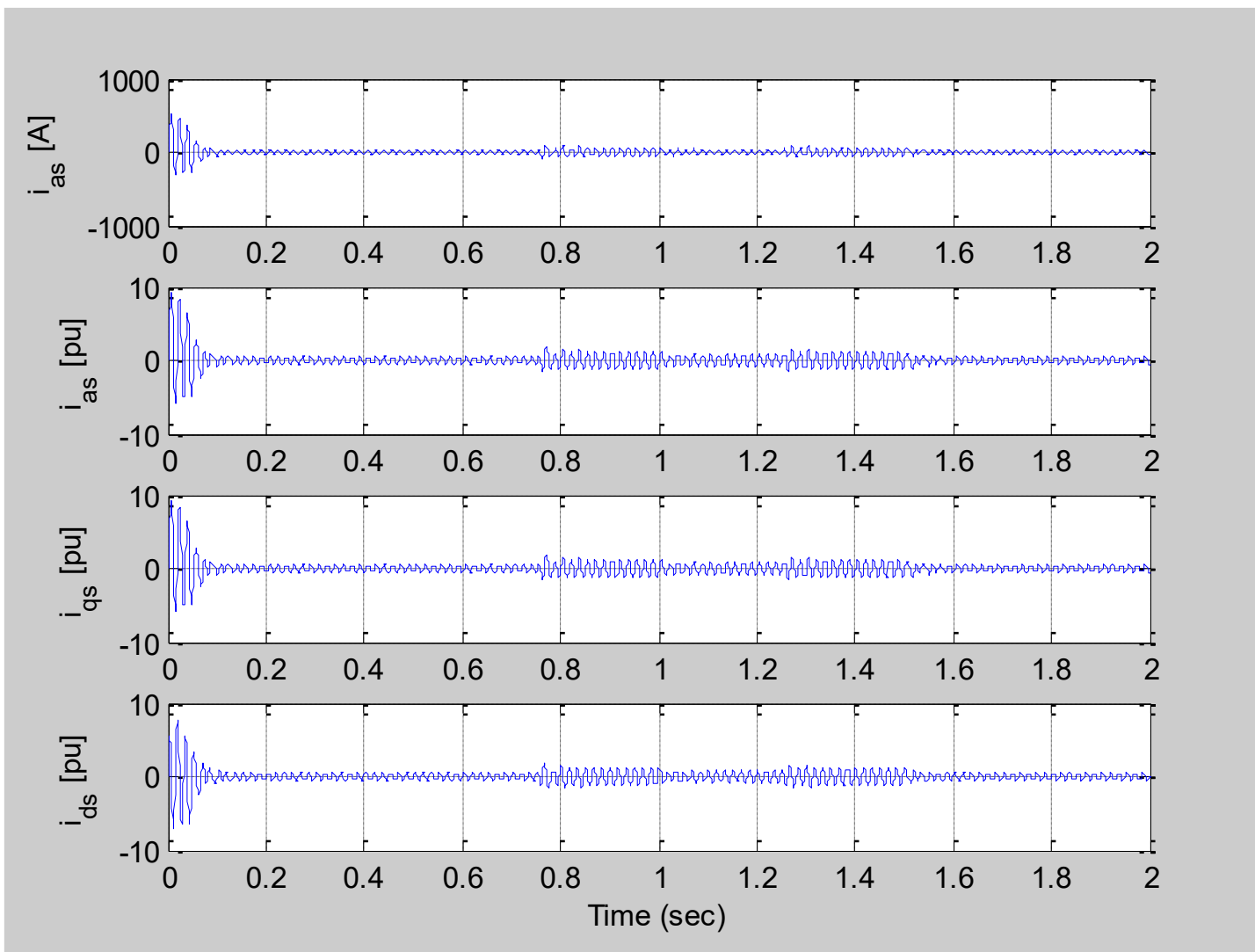
□ مدل دینامیکی موتور القایی

➤ شبیه سازی ماشین القایی در قاب مرجع $qd0$

❖ نتایج شبیه سازی



تغییرات گشتاور و سرعت



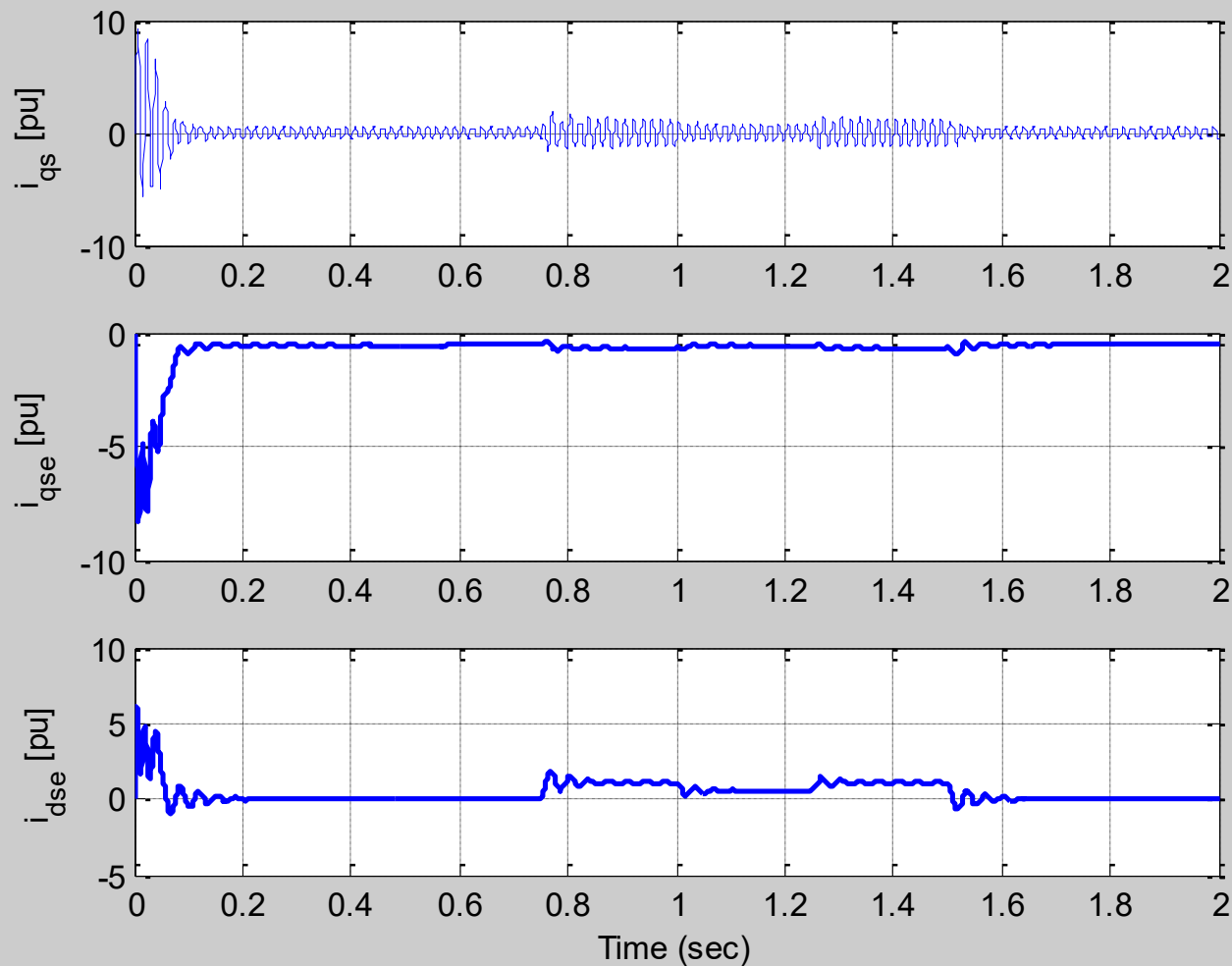
تغییرات جریان فازها در دستگاه ساکن استاتور



□ مدل دینامیکی موتور القایی

➤ شبیه سازی ماشین القایی در قاب مرجع $qd0$

❖ نتایج شبیه سازی



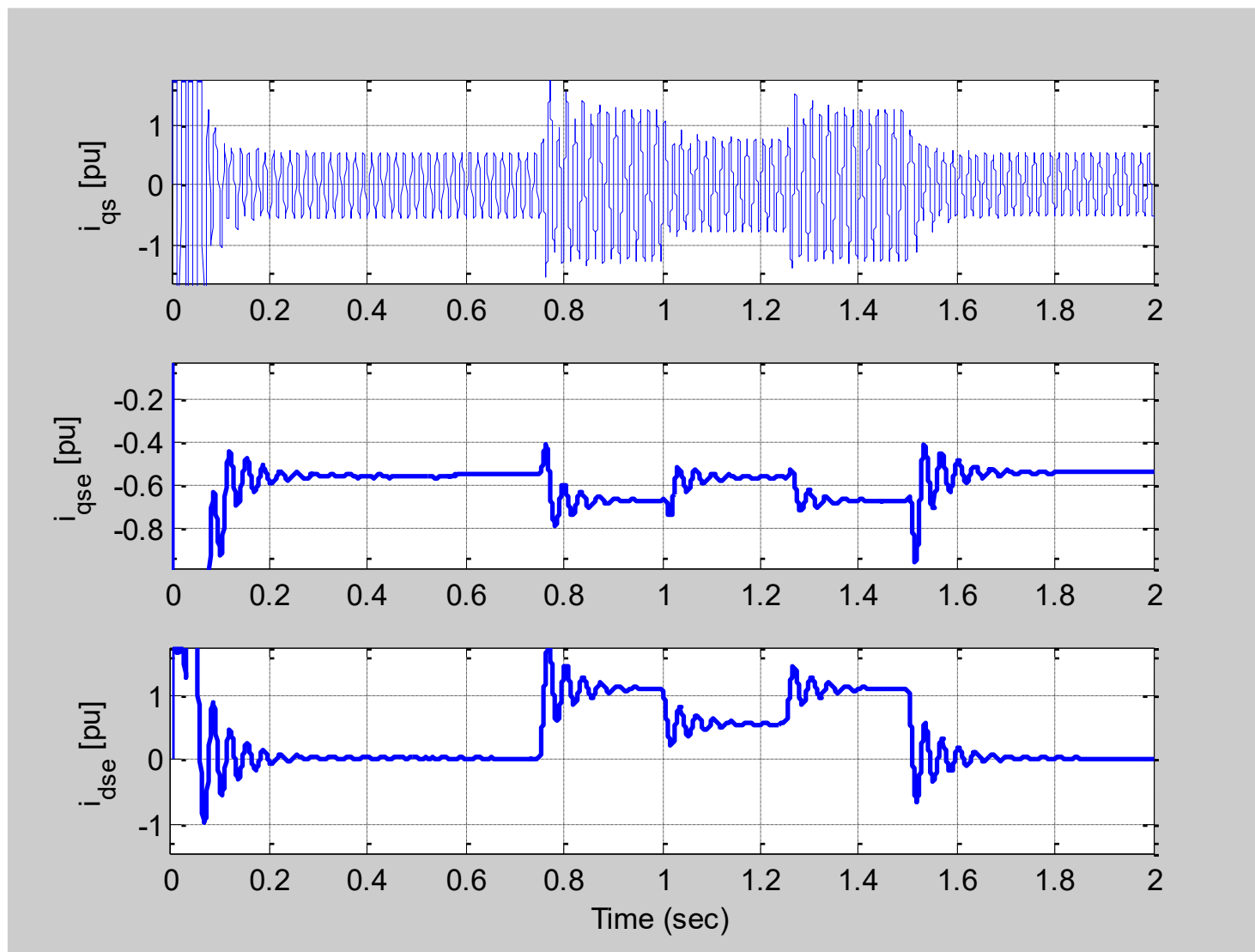
تغییرات جریان فازها در دستگاه گردان با سرعت سنکرون



□ 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)

✓ 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 در نظر 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 گردند.

✓ در روش کنترل برداری، با جهت دهی مناسب بردار شار در راستای محور d دستگاه دوجریه 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.

✓ 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:

$$\lambda_{qr}^e = L_m i_{qs}^e + L_r' i_{qr}^e = 0 \quad \text{Wb. turn} \quad (9.15)$$

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

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

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

✓ 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.

✓ برای صفر باقی ماندن λ'_{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

$$\underbrace{v_{qr}^e}_{=0} = r_r' \underbrace{i_{qr}^e}_{=0} + p \underbrace{\lambda_{qr}^e}_{=0} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr}^e \quad V \quad (9.19)$$

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

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

$$\underbrace{v_{dr}^e}_{=0} = r_r' i_{dr}^e + p \underbrace{\lambda_{dr}^e}_{=0} - (\omega_e - \omega_r) \underbrace{\lambda_{qr}^e}_{=0} \quad V \quad (9.21)$$

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

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

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

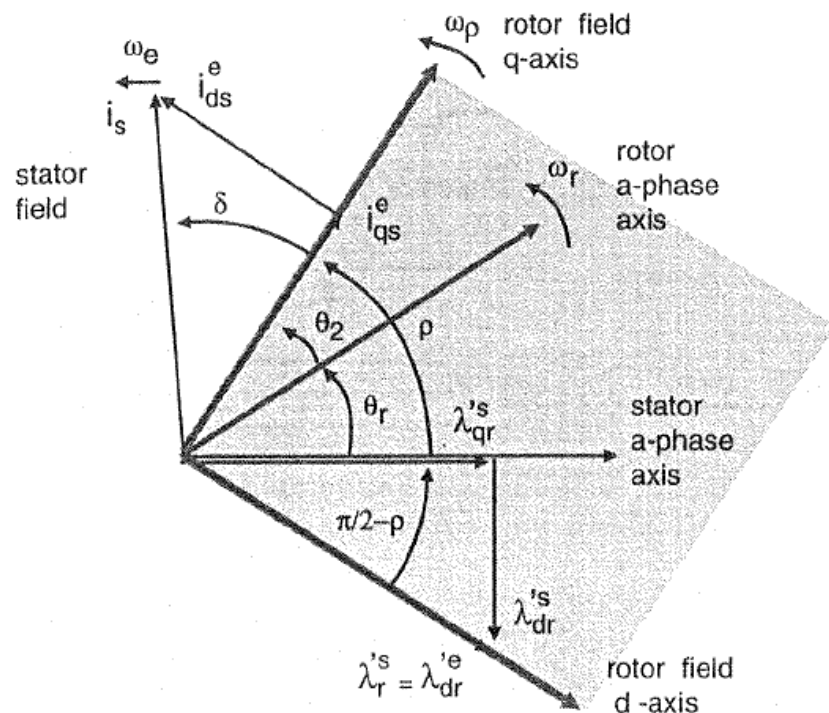
➤ چگونه باید شار روتور در راستای محور d جهت دهی شود؟

✓ 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 (۹-۲۲) 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 (۹-۲۱) و با جایگزینی $i_{dr}'^e$ با $\lambda_{dr}'^e - L_m i_{ds}^e$ به صورت ذیل مشاهده کرد:

$$\lambda_{dr}'^e = \frac{r_r' L_m}{r_r' + L_r' p} i_{ds}^e \quad \text{Wb. turn} \quad (9.23)$$





□ کنترل برداری موتور القایی

➤ 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 می شوند. 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 کاربردها در کتاب Peter Vas, 1990 به تفسیر بیان شده اند.

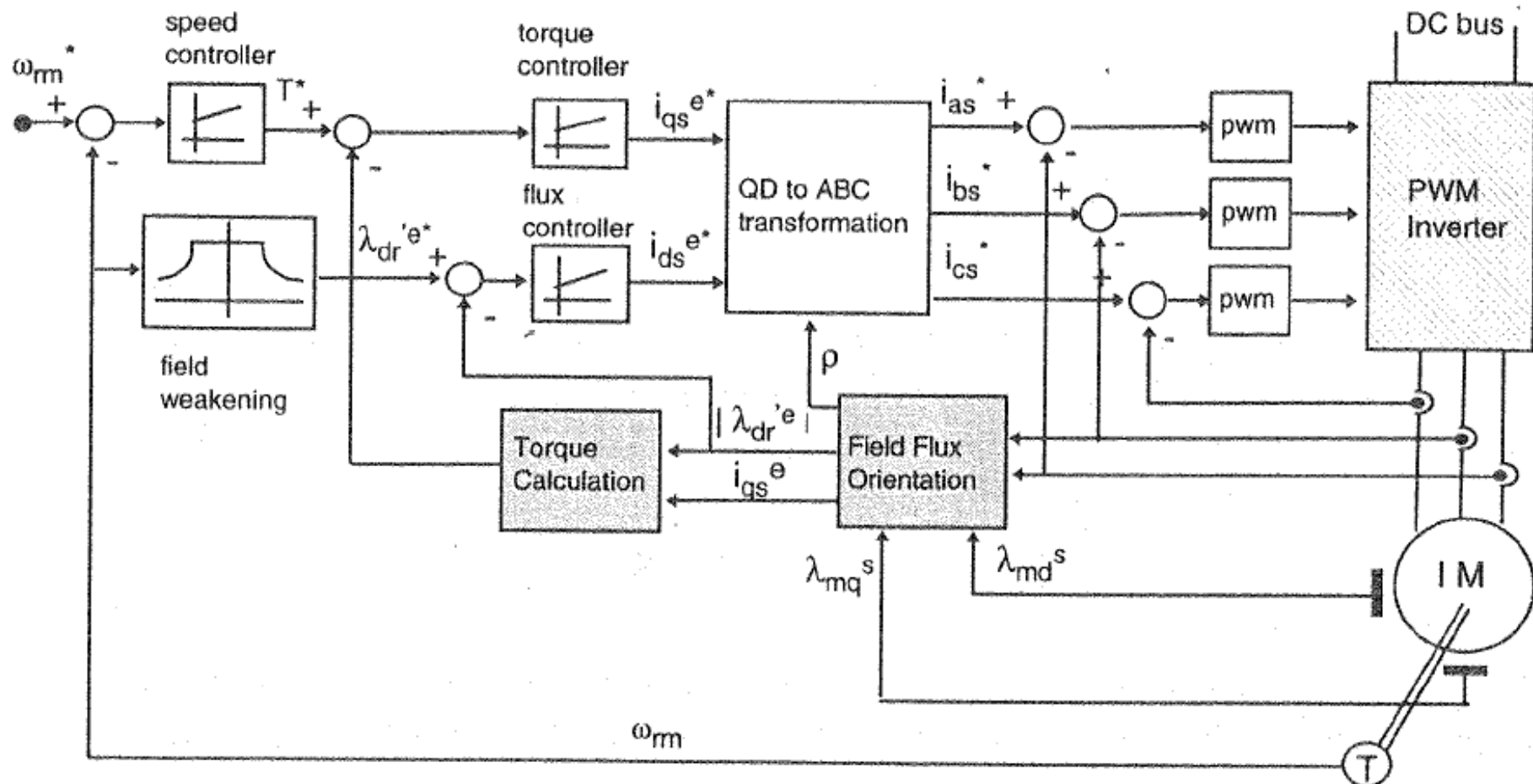
✓ روش کنترل برداری بر مبنای اینکه موقعیت یا زاویه شار روتور چگونه اندازه گیری می شود به دو دسته کلی زیر نیز تقسیم بندی می گردد:

- روش مستقیم: زاویه شار روتور با استفاده از سنسورهای اثر هال شار (و یا ولتاژ و جریان) اندازه گیری می شود.
- روش غیر مستقیم: زاویه شار روتور با استفاده از سرعت لغزش تخمین زده می شود.

✓ 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 می شود. در صنعت اینورتر منبع ولتاژ رایج تر 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

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



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

✓ مقدار p 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:

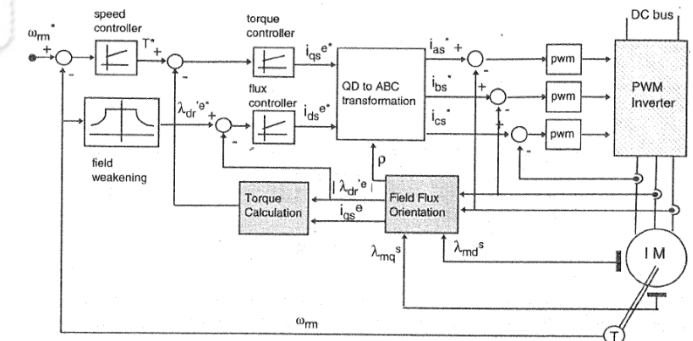
$$\lambda_{qr}'^s = (L_m + L_{lr}' - L_{lr}') i_{qs}^s + (L_m + L_{lr}') i_{qr}'^s \quad \text{Wb. turn} \quad (9.25)$$

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

$$\lambda_{qr}'^s = \frac{L_r'}{L_m} \lambda_{mq}^s - L_{lr}' i_{qs}^s \quad (9.26)$$

○ به طریق مشابه $\lambda_{dr}'^s$ می تواند از رابطه زیر بدست آید:

$$\lambda_{dr}'^s = \frac{L_r'}{L_m} \lambda_{md}^s - L_{lr}' i_{ds}^s \quad (9.27)$$



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

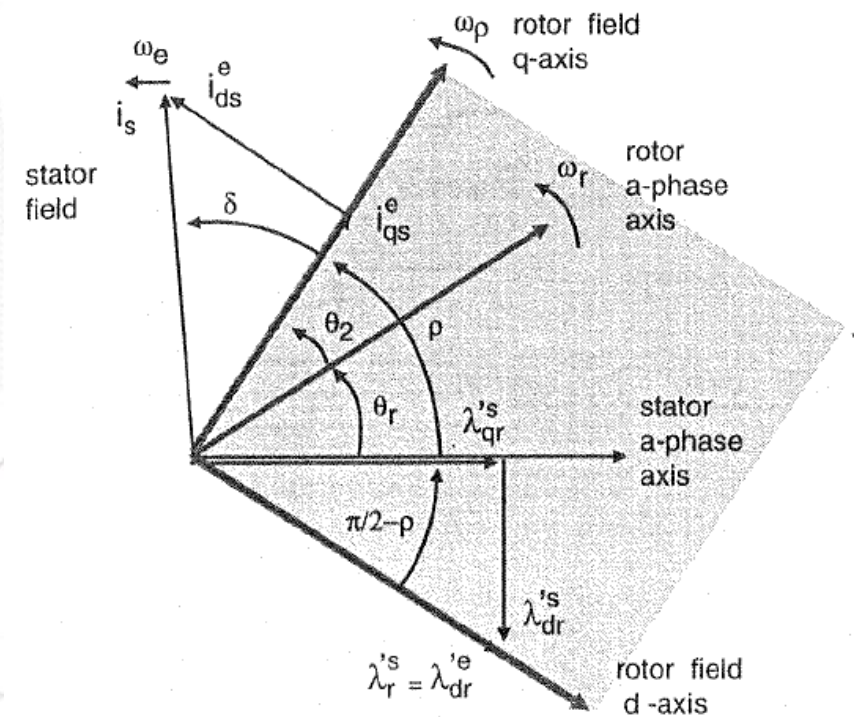
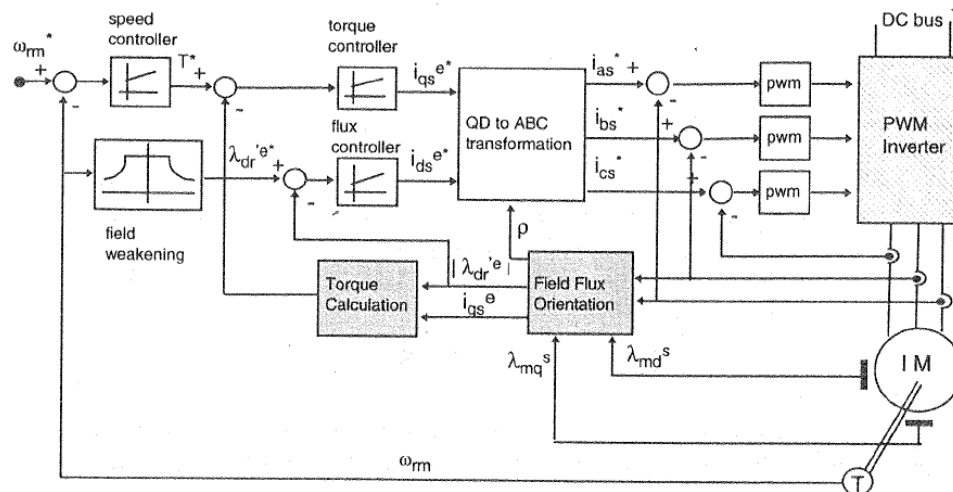
$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - \rho\right) = \cos \rho = \frac{\lambda_{dr}'^s}{|\lambda_r'^s|} \quad (9.28)$$

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \rho\right) = \sin \rho = \frac{\lambda_{qr}'^s}{|\lambda_r'^s|}$$

$$|\lambda_r'^e| = |\lambda_r'^s| = \sqrt{\lambda_{dr}'^s{}^2 + \lambda_{qr}'^s{}^2} \quad (9.29)$$

- دامنه شار محاسبه شده به عنوان فیدبک به کنترلر شار وارد می گردد.
- گشتاور مورد نیاز نیز از رابطه (۹-۱۸) و یا رابطه زیر تعیین می گردد:

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r'} \lambda_{dr}'^e i_{qs}^e$$

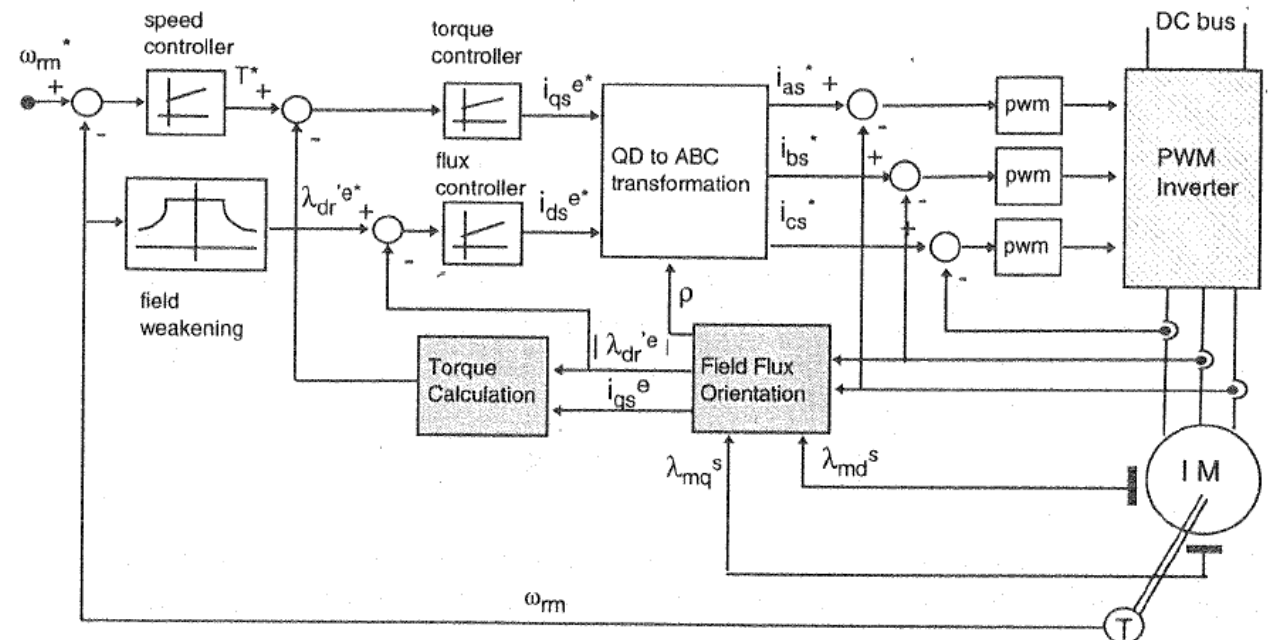


✓ خروجی های کنترلرهای شار و گشتاور به ترتیب فرمانهای i_{ds}^{*e} و i_{qs}^{*e} در واقع در مختصات مرجع میدان دوار با شار روتور (سنکرون) می باشند.

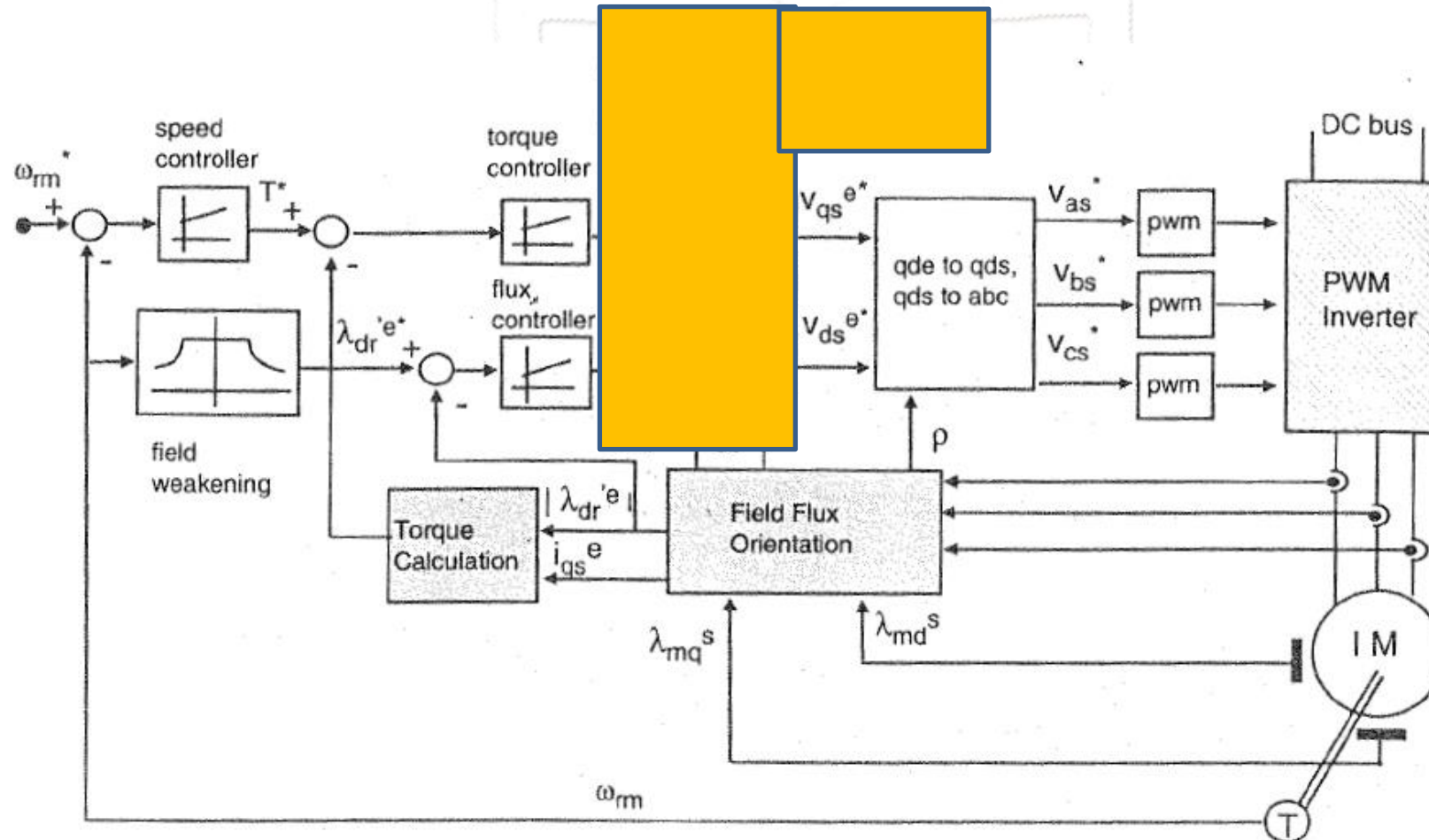
✓ در داخل بلوک QD to ABC تبدیلات زیر (qde به qds و qds به abc) برای ایجاد جریانهای مرجع اینورتر انجام می شود:

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

$$\begin{aligned} i_{as}^* &= i_{qs}^{s*} \\ i_{bs}^* &= -\frac{1}{2} i_{qs}^{s*} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{ds}^{s*} \\ i_{cs}^* &= -\frac{1}{2} i_{qs}^{s*} + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{ds}^{s*} \end{aligned} \quad A \quad (9.31)$$



- ✓ جهت دادن جریانه‌های 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 جریانه‌های مناسب استاتور ایجاد گردند و در نتیجه آن گشتاور و شار مقادیر مرجع خود را دنبال نمایند.



- ✓ جهت دادن جریانهای استاتور می تواند با اعمال ولتاژهای مناسب به استاتور قابل دسترس باشد.
- ✓ در این روش، کنترلرهای شار و گشتاور مطابق شکل زیر، مقادیر مرجع ولتاژ را ایجاد می نمایند که این مقادیر مرجع ولتاژ به اینورتر منبع ولتاژ اعمال می گردند 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، می توان ماشین القایی را با ولتاژهای ثابت پشت اندوکتانس های گذرای استاتور بیان نمود.
- ✓ لذا معادلات ولتاژ استاتور در مدل گذرای ماشین القایی بصورت زیر می توانند بیان شوند:

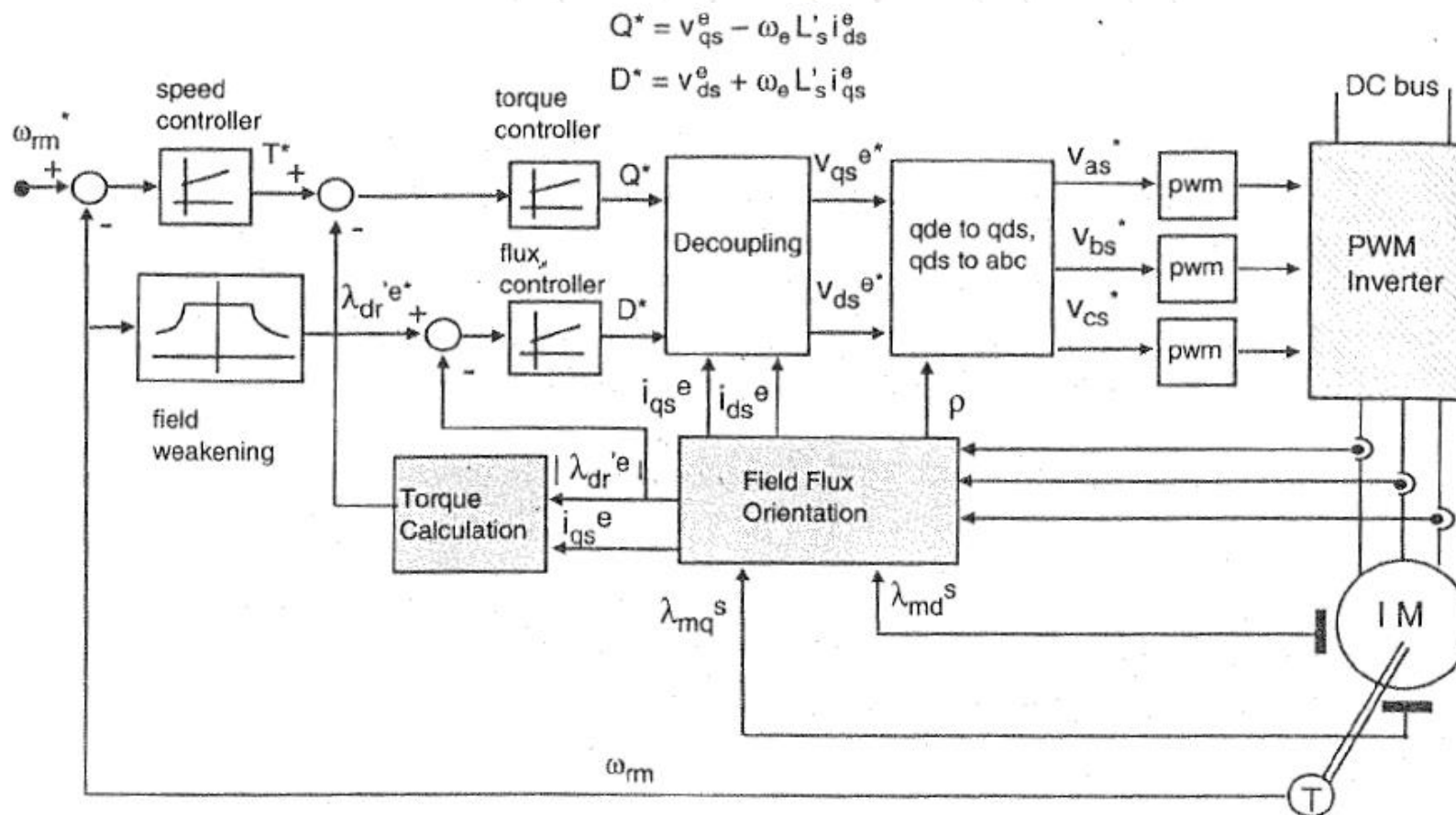
$$r_s i_{qs}^e + L_s' \frac{di_{qs}^e}{dt} + E_{qs}' = v_{qs}^e - \omega_e L_s' i_{ds}^e \quad (9.35)$$

$$r_s i_{ds}^e + L_s' \frac{di_{ds}^e}{dt} + E_{ds}' = v_{ds}^e + \omega_e L_s' i_{qs}^e$$

- ✓ 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 می شود که دو مقدار سمت چپ معادلات (۹-۳۵) توسط کنترل کننده های گشتاور و شار تولید می شوند. برای تولید ولتاژ مناسب توسط اینورتر (v_{qs}^e و v_{ds}^e)، عبارات مناسب به خروجی های کنترلرهای گشتاور (Q^*) و شار (D^*) باید اضافه شوند.

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

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



✓ 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 می آیند.

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

(9.36)

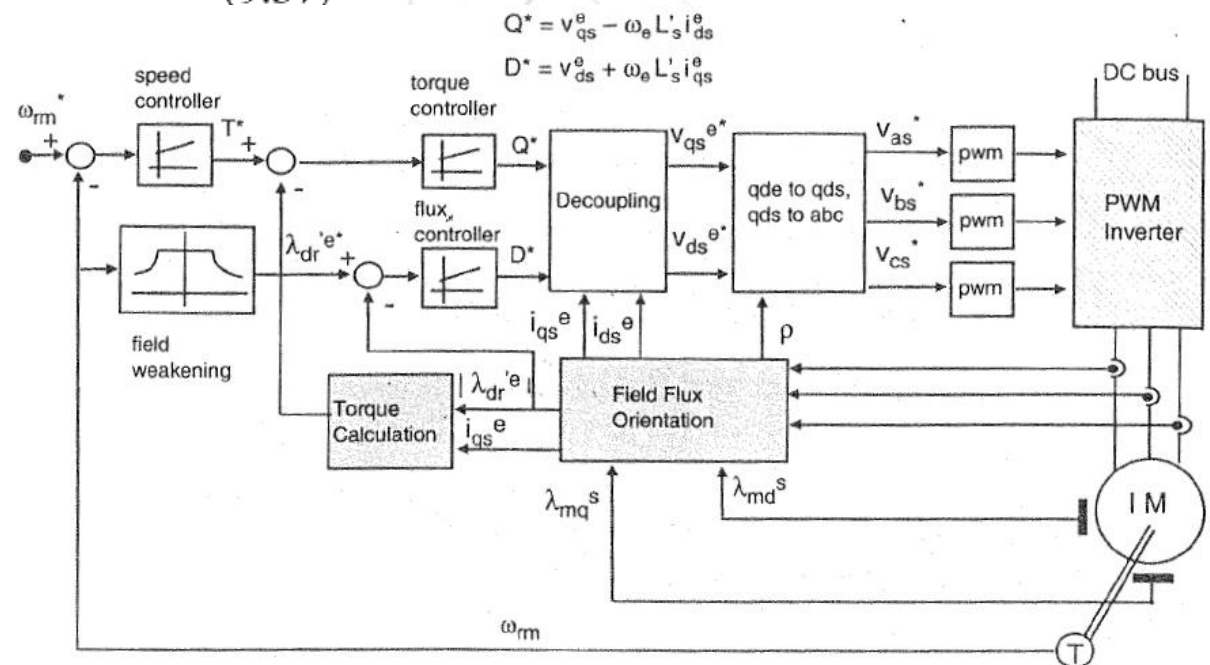
$$v_{ds}^{s*} = -v_{qs}^e \sin \rho + v_{ds}^e \cos \rho$$

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

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

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

(9.37)



✓ در عملکردهای سرعت پائین و همچنین در کنترل موقعیت، استفاده از حسگرهای اثر هال به دلیل وجود خطاهای مختلف، نتایج مطلوبی به همراه ندارد. گزینه رایج در این حالت روش غیر مستقیم کنترل برداری است که از اندازه گیری مستقیم شار فاصله هوایی استفاده نمی کند.

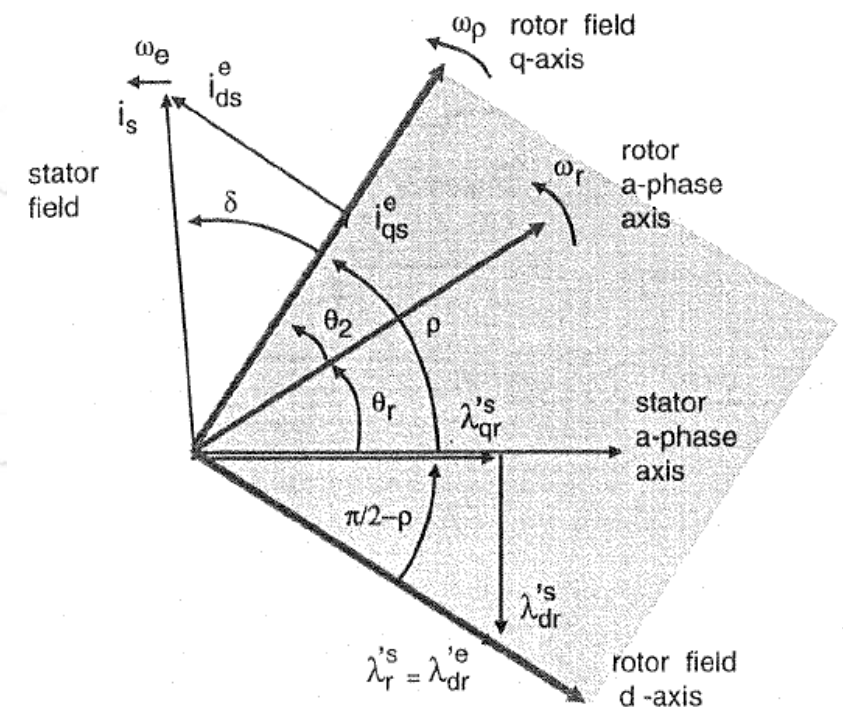
✓ در روش غیر مستقیم، زاویه شار روتور p مورد نیاز در تبدیلات qd با توجه به شکل زیر از جمع دو زاویه موقعیت روتور (θ_r) و موقعیت متناظر با سرعت لغزش (زاویه θ_2) بدست می آید.

✓ سرعت لغزش نیز قبلاً به صورت زیر بدست آورده شد:

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

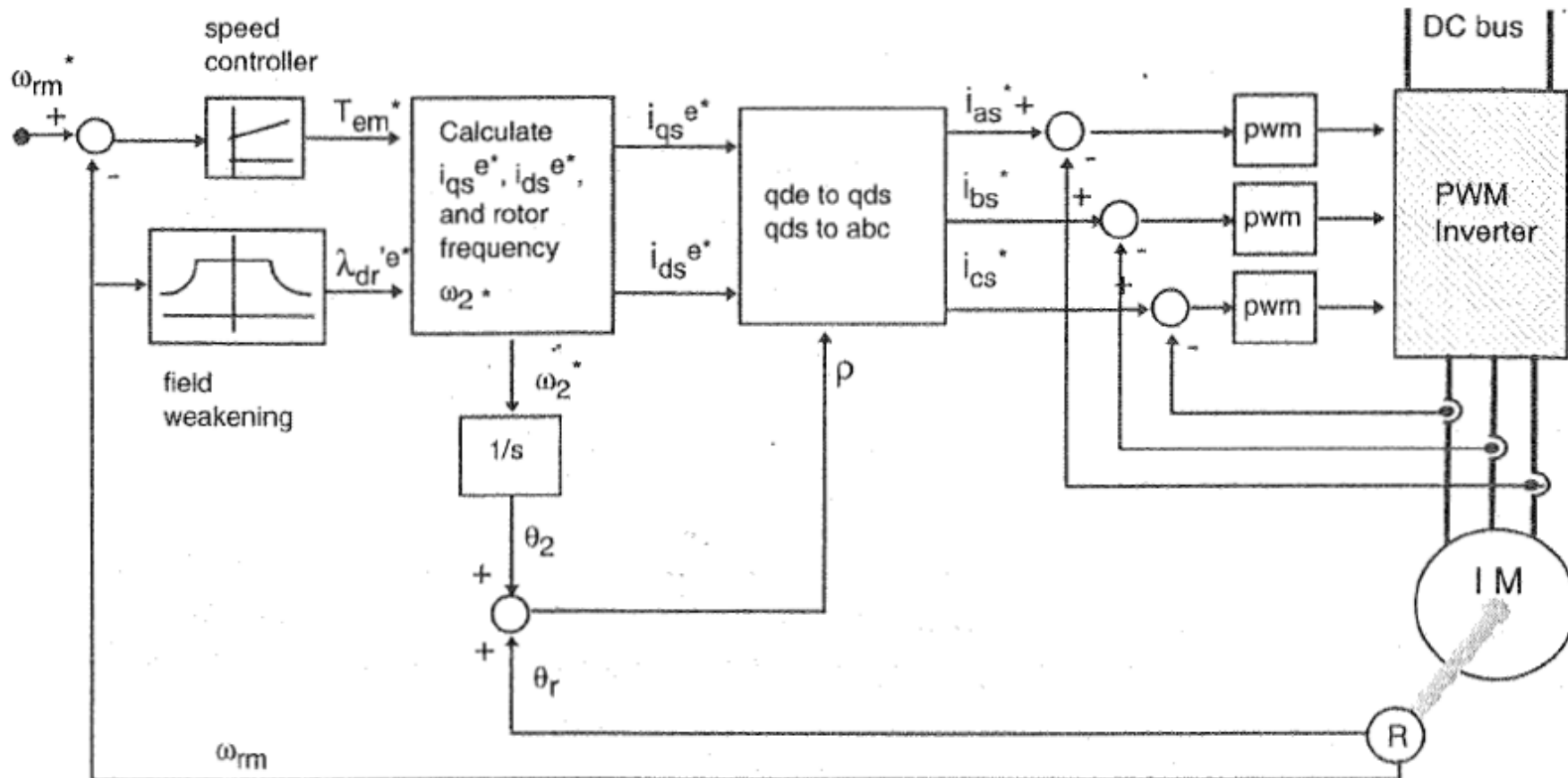
✓ در نتیجه با توجه به آنکه زاویه $p = \theta_2 + \theta_r$ است، سینوس و کسینوس زاویه p برابر خواهند بود با:

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



➤ 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، مقادیر مرجع جریانهای محوره های q و d استاتور ساخته می شوند.
- ✓ سپس با استفاده از زاویه p محاسبه شده، مقادیر مرجع جریانهای سه فاز استاتور تولید و به اینورتر منبع ولتاژ PWM اعمال می گردند.





□ کنترل برداری موتور القایی

➤ شبیه سازی روش های کنترل اسکالر و برداری

✓ در این بخش، روشهای کنترل اسکالر و کنترل برداری ارائه شده، با بکارگیری مدل دینامیکی بدست آورده شده برای موتور القایی، در محیط سیمولینک شبیه سازی می گردند. شبیه سازیهای ارائه شده عبارتند از:

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

✓ مشخصات موتور شبیه سازی شده:

○ موتور القایی بکار رفته از نوع قفس سنجایی، دارای مشخصات نامی 20 hp ، 220 v ، 60 Hz ، چهار قطب، دارای پارامترهای ذیل می باشد:

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

$$r_r' = 0.0764 \, \Omega , \quad x_{lr}' = 0.2145 \, \Omega$$

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

• جریان نامی استاتور: 49.68 A

• سرعت نامی: 1748.3 rpm

• لغزش نامی: 0.0278

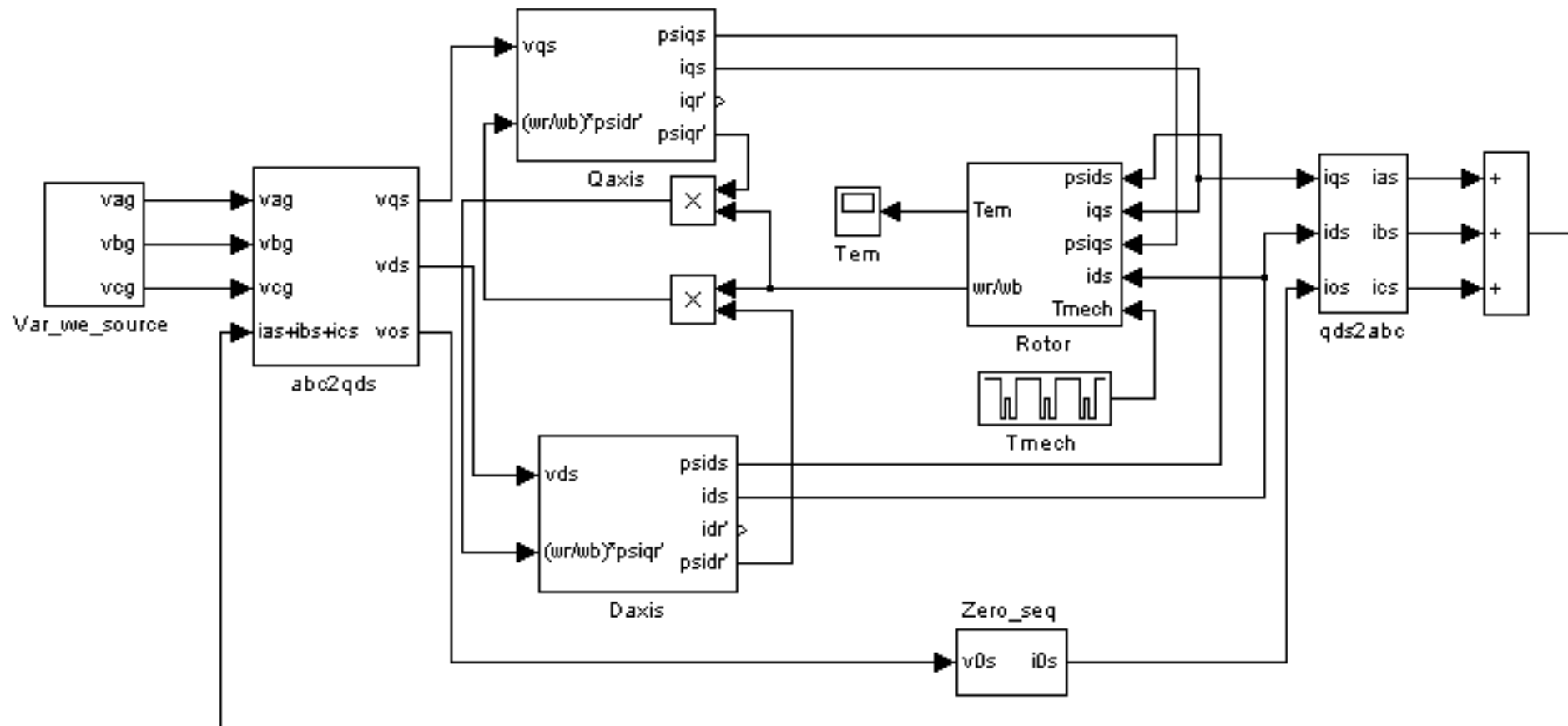
• گشتاور نامی: 81.49 N.m

• لغزش نقطه شکست: 0.1758

شبیه سازی راه اندازی با خط موتور القایی

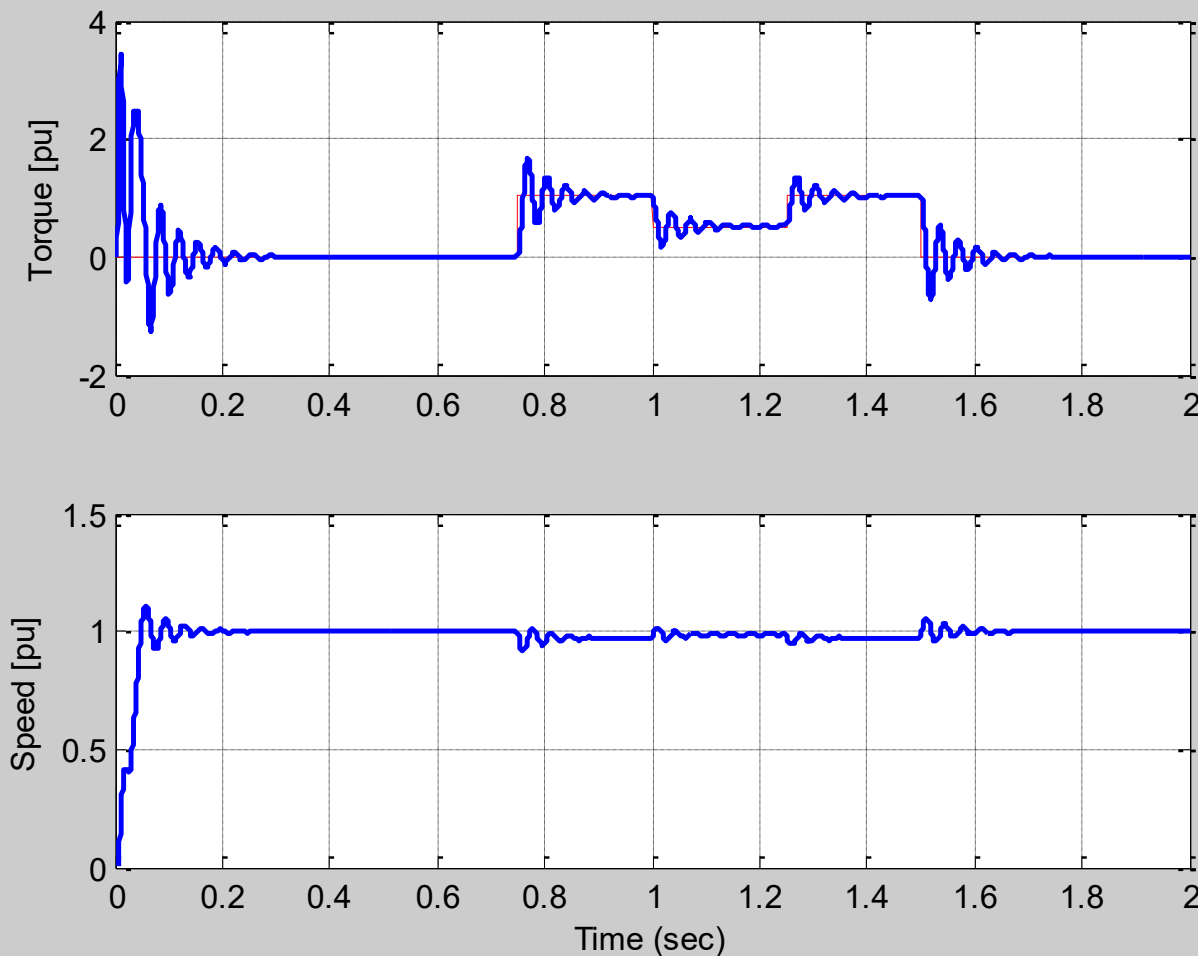
➤ کنترل حلقه باز و راه اندازی با ولتاژ و فرکانس نامی

- ✓ 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.



✓ گشتاور راه اندازی حدوداً $3/5$ برابر گشتاور نامی است.

✓ با بارگذاری روی موتور، سرعت افت پیدا می کند.

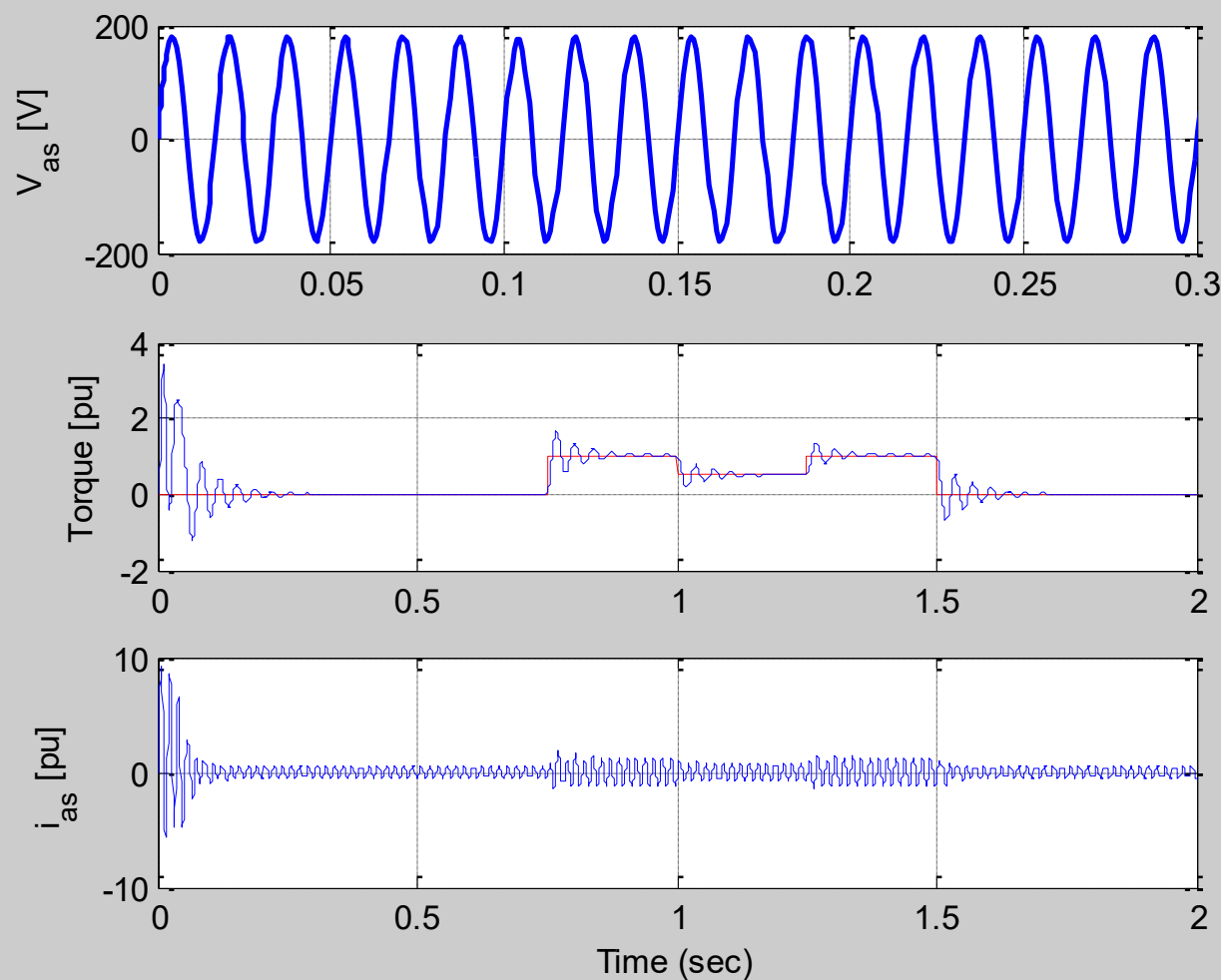




□ شبیه سازی راه اندازی با خط موتور القایی

➤ 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 حدود ۳/۵ برابر گشتاور نامی است.



✓ در این بخش موتور به روش اسکالر (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. بعبارتی خروجی کنترلر سرعت، مقدار رفرنس لغزش است.

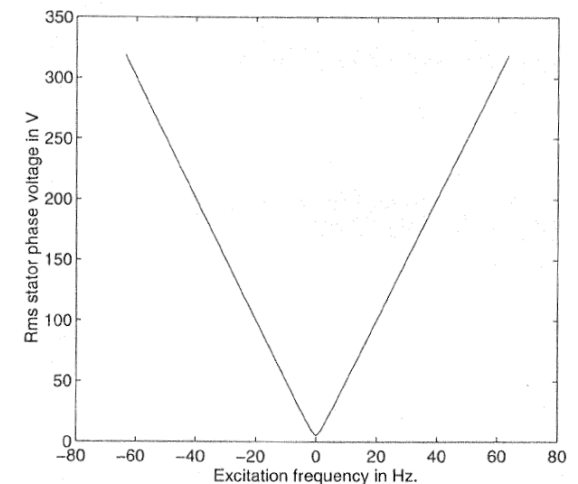
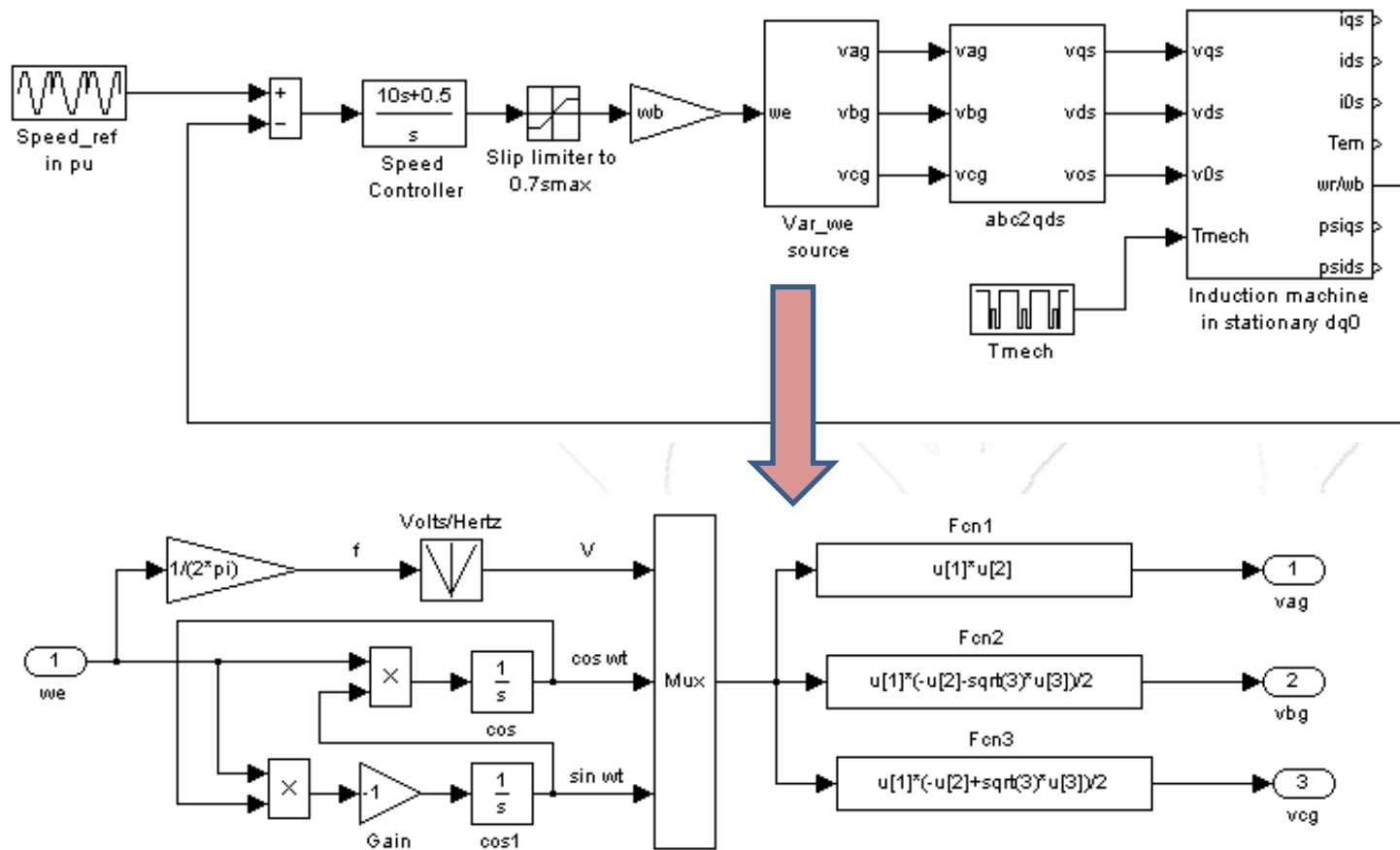


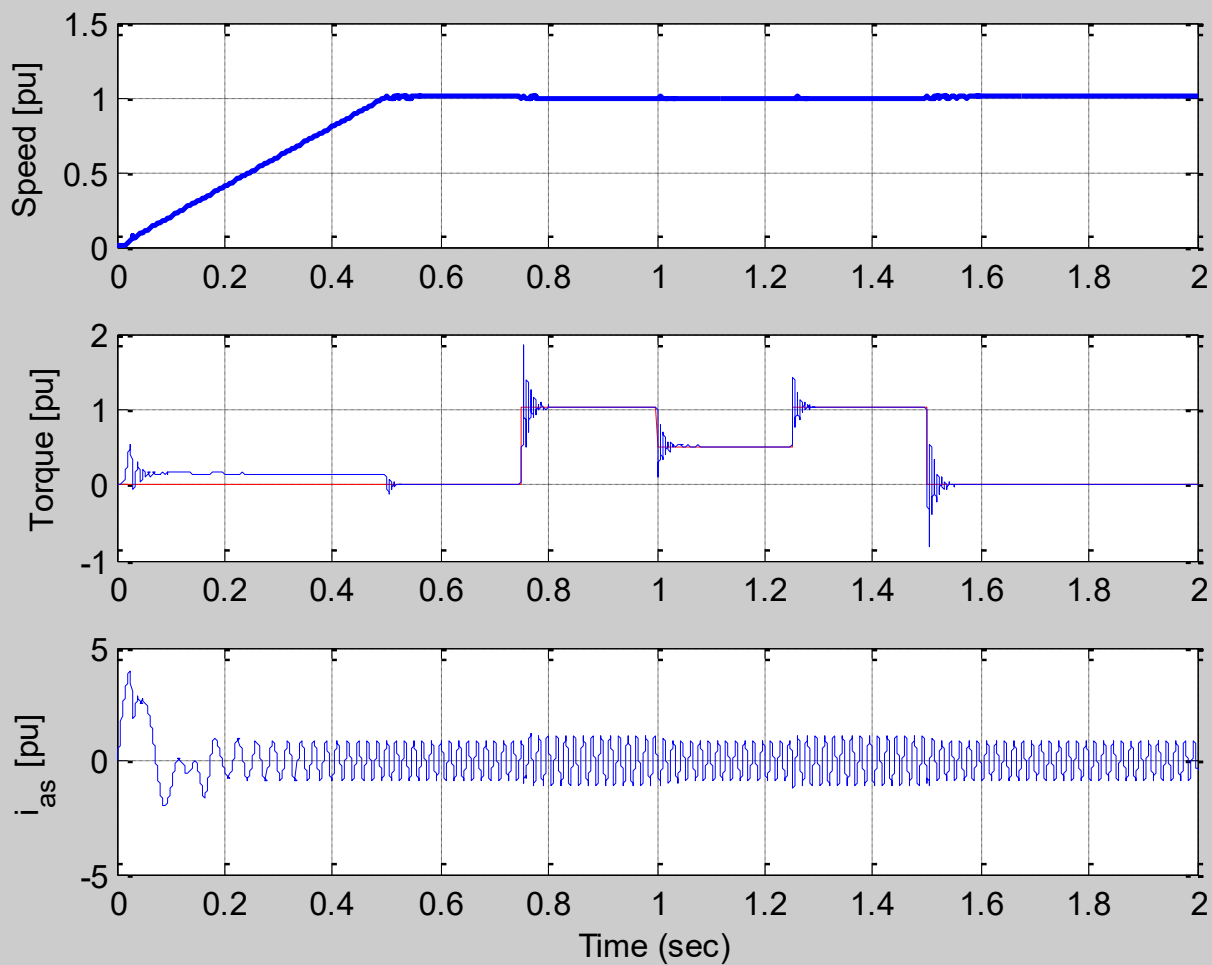
Figure 9.24 Volts per hertz curve.



□ شبیه سازی کنترل اسکالر موتور القایی

➤ کنترل حلقه بسته به روش اسکالر و اینورتر ایده آل

✓ ابتدا راه اندازی موتور شبیه سازی می گردد.



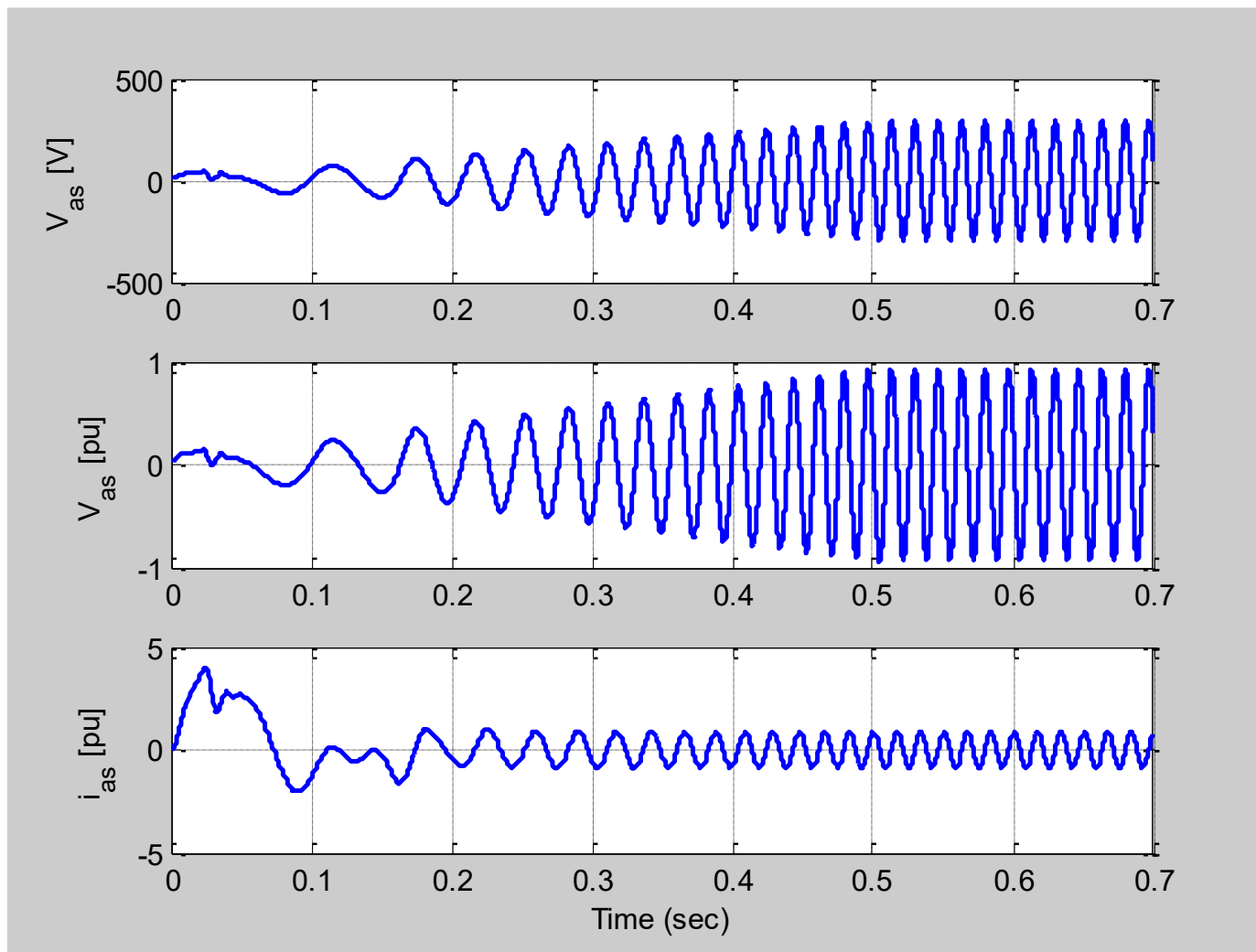
تغییرات سرعت، گشتاور و جریان فاز در طی راه اندازی



□ شبیه سازی کنترل اسکالر 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.



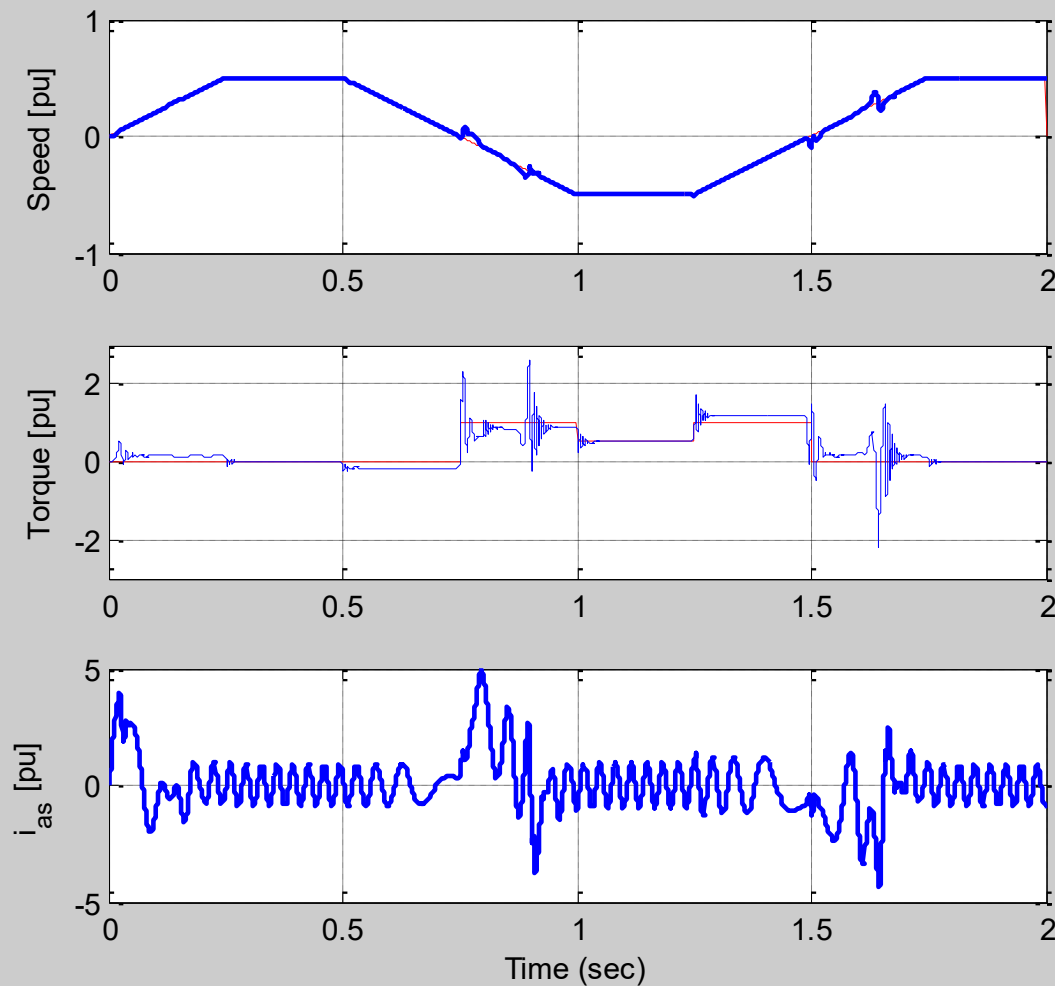
تغییرات ولتاژ و جریان فاز در طی راه اندازی



□ شبیه سازی کنترل اسکالر موتور القایی

➤ کنترل حلقه بسته به روش اسکالر و اینورتر ایده آل

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

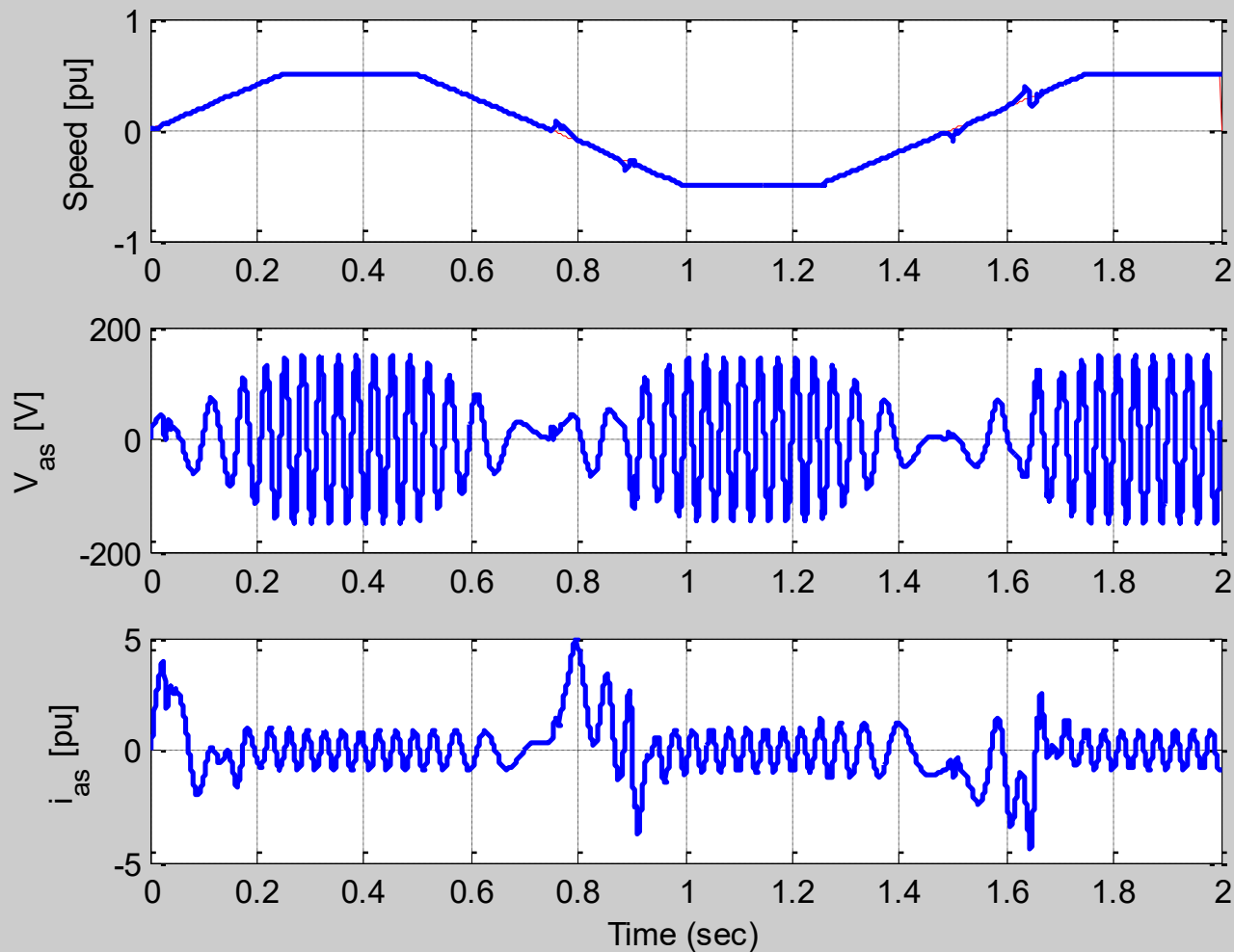


تغییرات سرعت، گشتاور و جریان فاز در پاسخ به تغییرات مرجع سرعت



□ شبیه سازی کنترل اسکالر موتور القایی

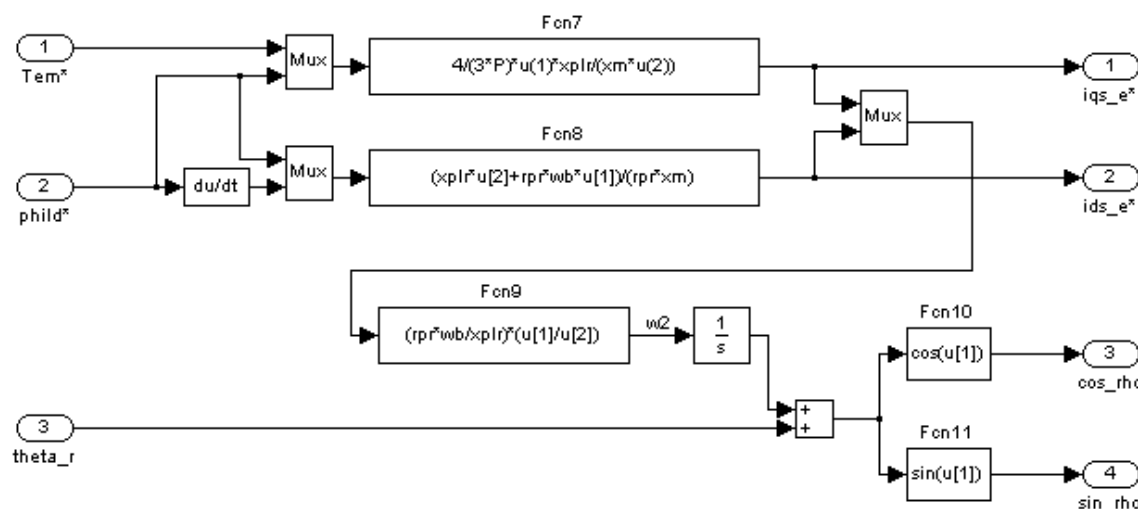
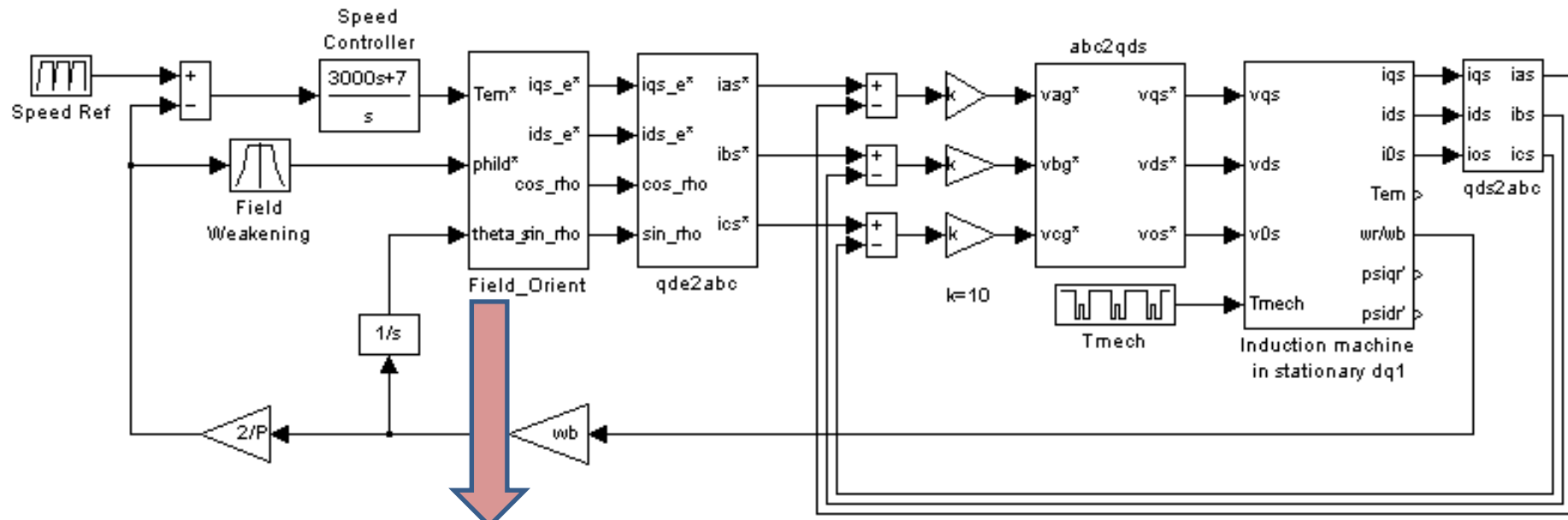
➤ کنترل حلقه بسته به روش اسکالر و اینورتر ایده آل



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

✓ در بلوک Field_Orient شکل زیر، مقادیر مرجع مولفه های d و q جریان استاتور ساخته می شوند.

✓ همچنین بردارهای واحد $\sin$ و $\cos$ مورد نیاز در تبدیلات با استفاده از لغزش محاسبه شده، تعیین می گردند.

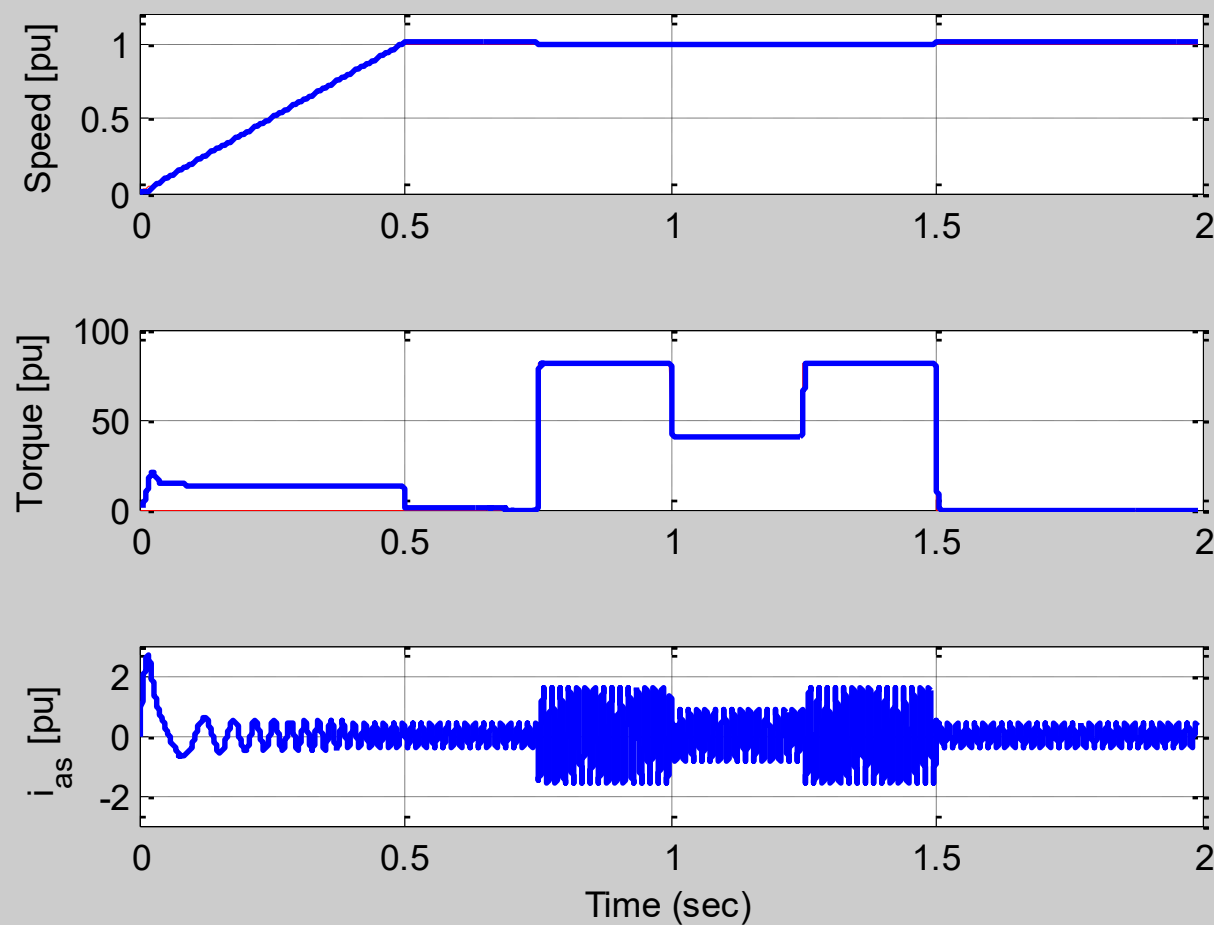




شبیه سازی کنترل برداری موتور القایی

➤ شبیه سازی حالت راه اندازی: تغییرات سرعت و گشتاور

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



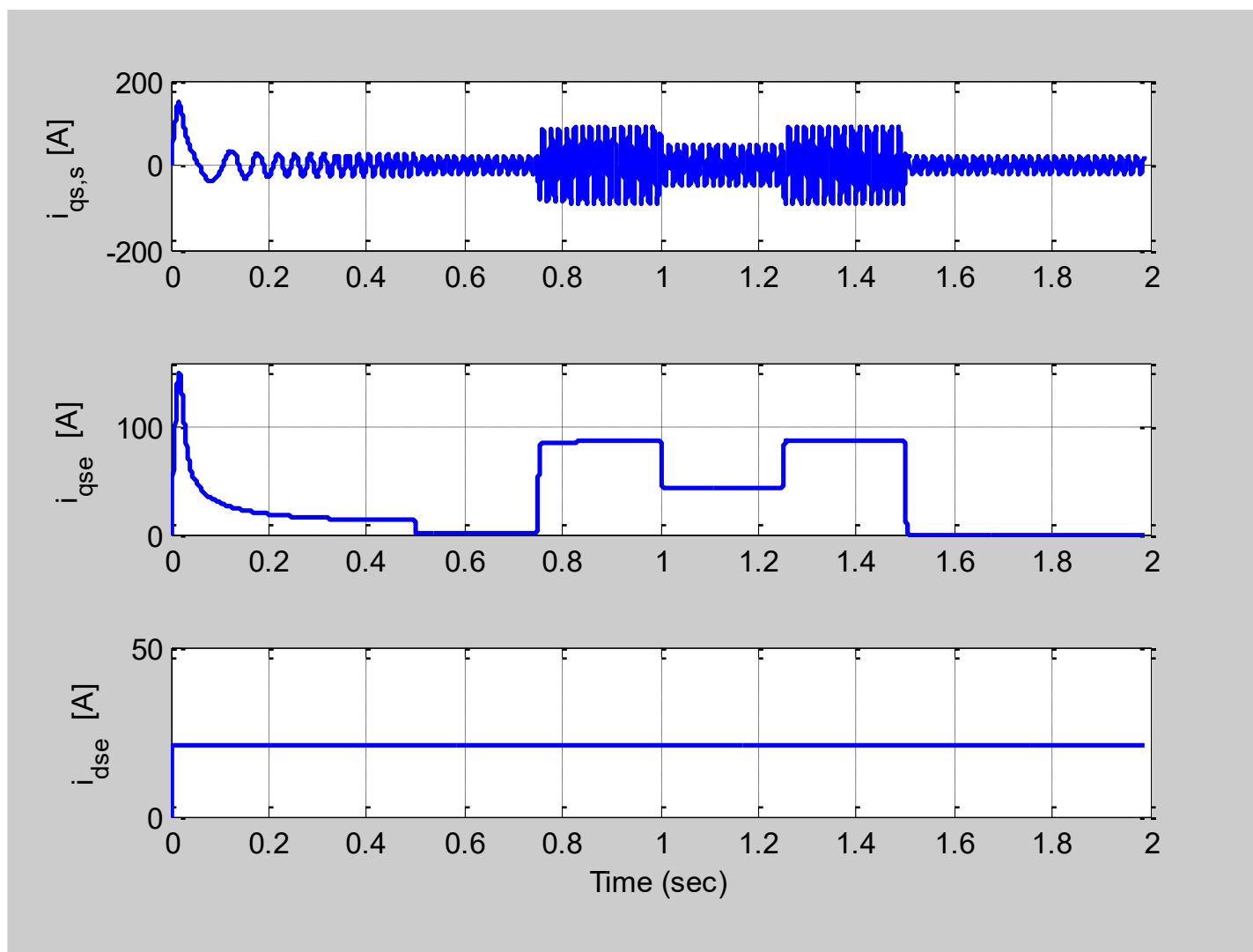
تغییرات سرعت، گشتاور و جریان فاز در طی راه اندازی



شبیه سازی کنترل برداری موتور القایی

➤ 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.



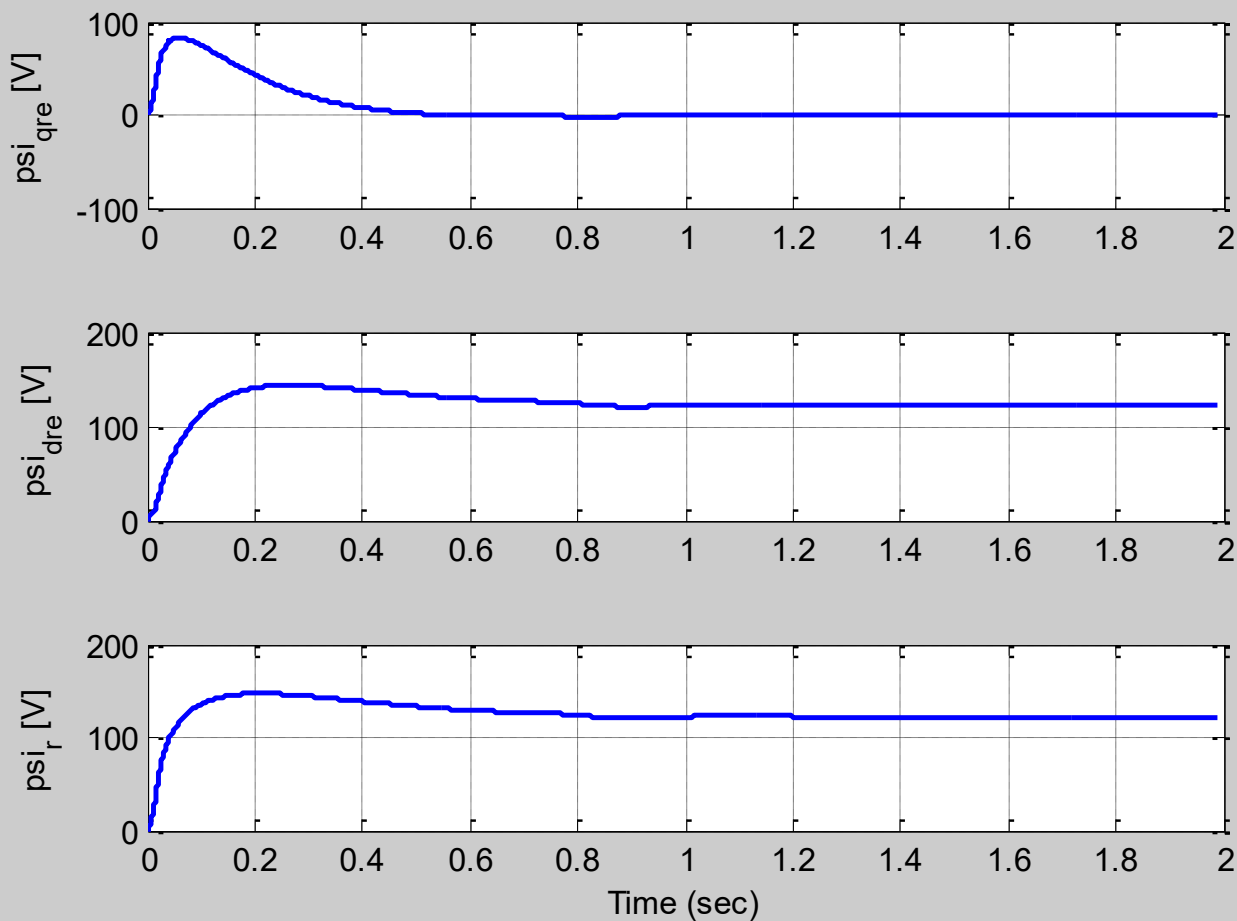
تغییرات مولفه های d و q جریان استاتور در دستگاه مرجع ساکن استاتور و گردان سنکرون



□ شبیه سازی کنترل برداری موتور القایی

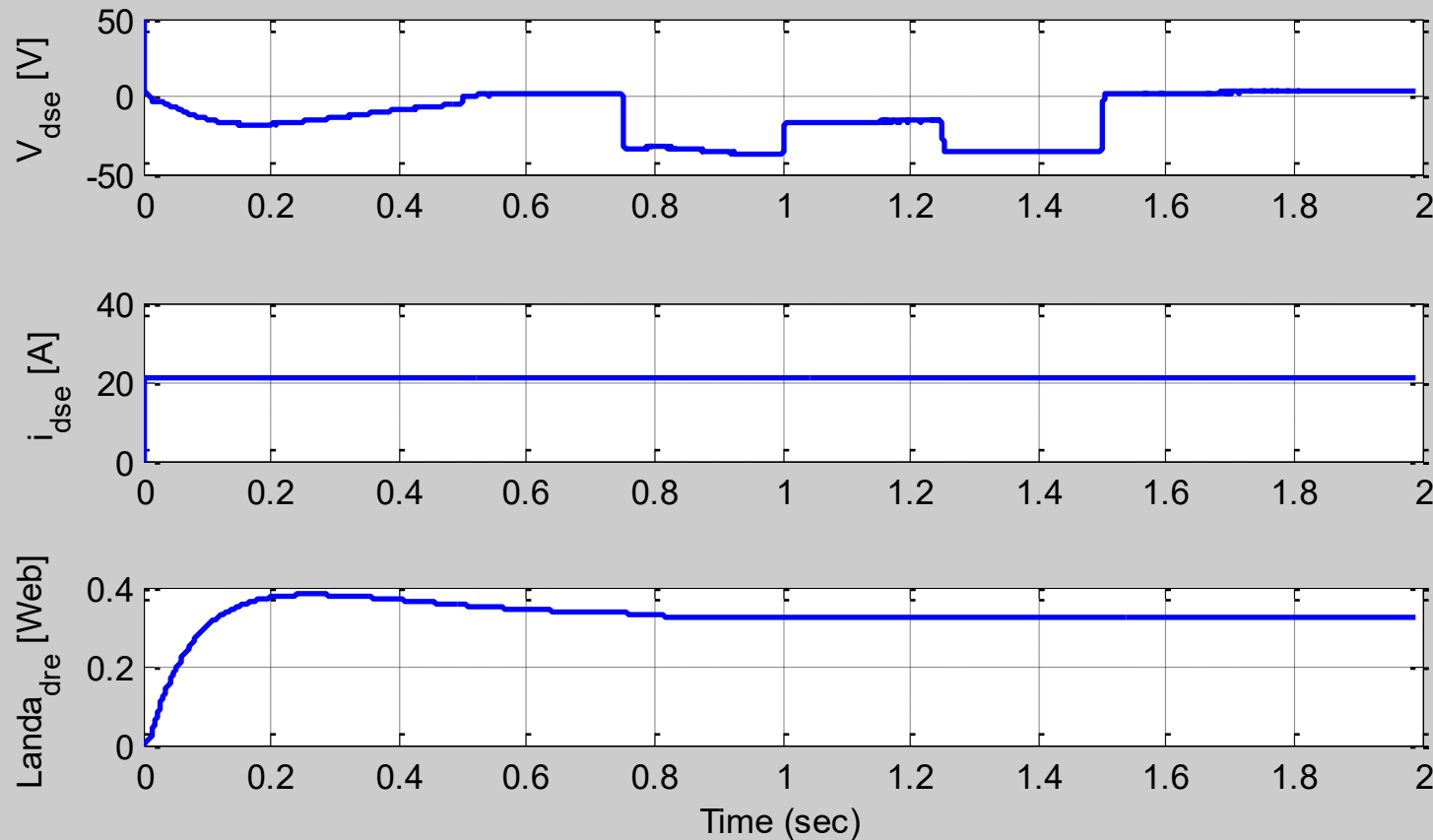
➤ شبیه سازی حالت راه اندازی: تغییرات شار-دور روتور

✓ 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

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

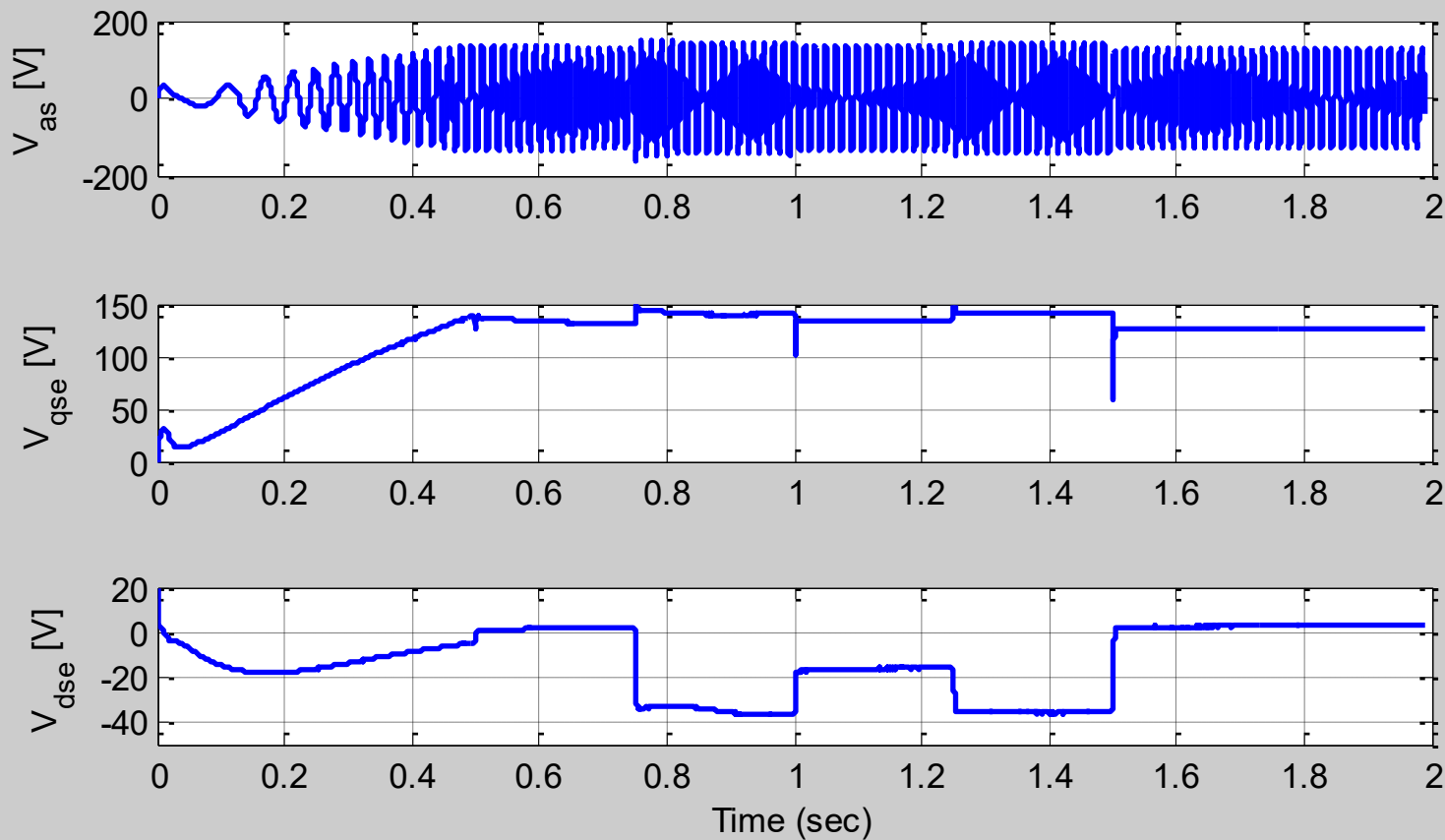


تغییرات مولفه های d ولتاژ و جریان استاتور و شار روتور

□ شبیه سازی کنترل برداری موتور القایی

➤ 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.



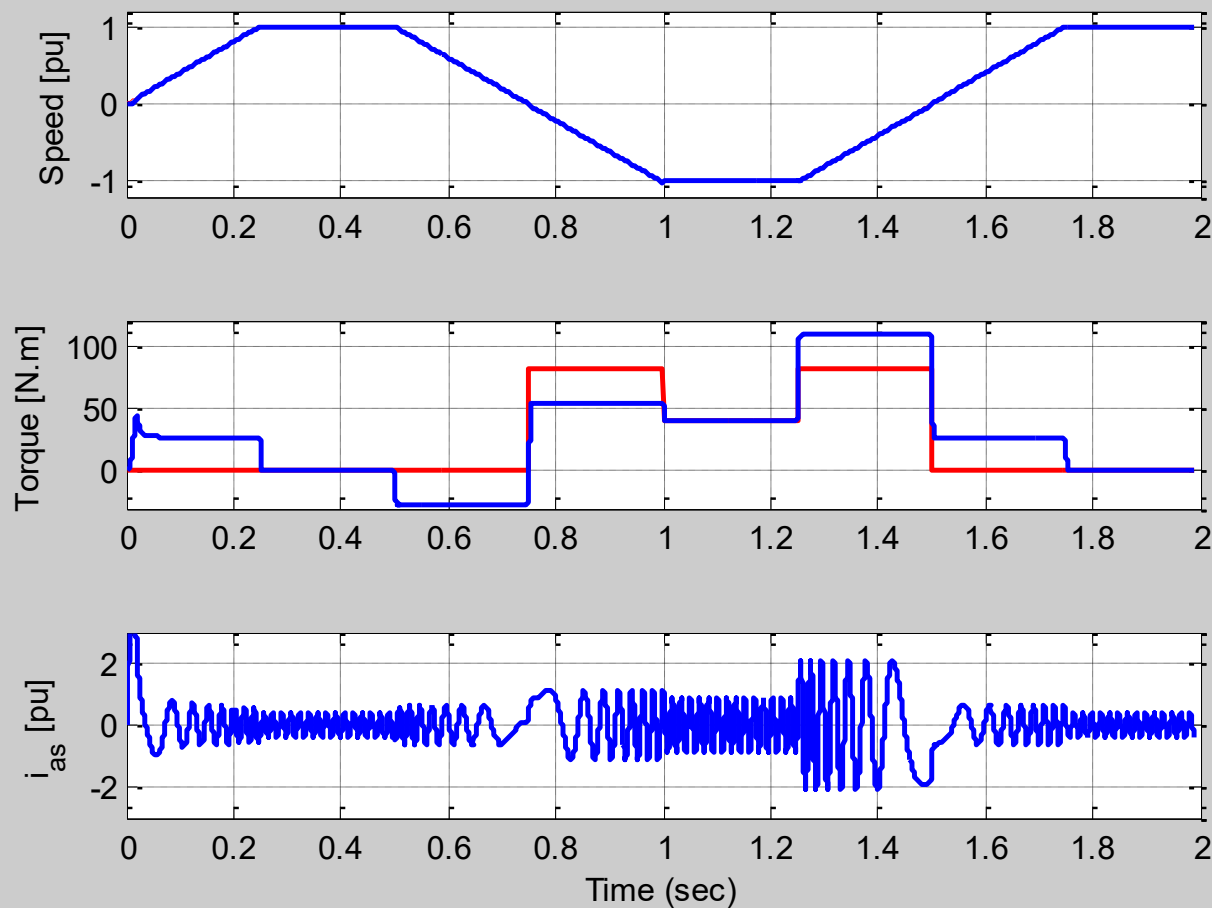
تغییرات مولفه های d ولتاژ و جریان استاتور و شار روتور



□ شبیه سازی کنترل برداری موتور القایی

➤ 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.

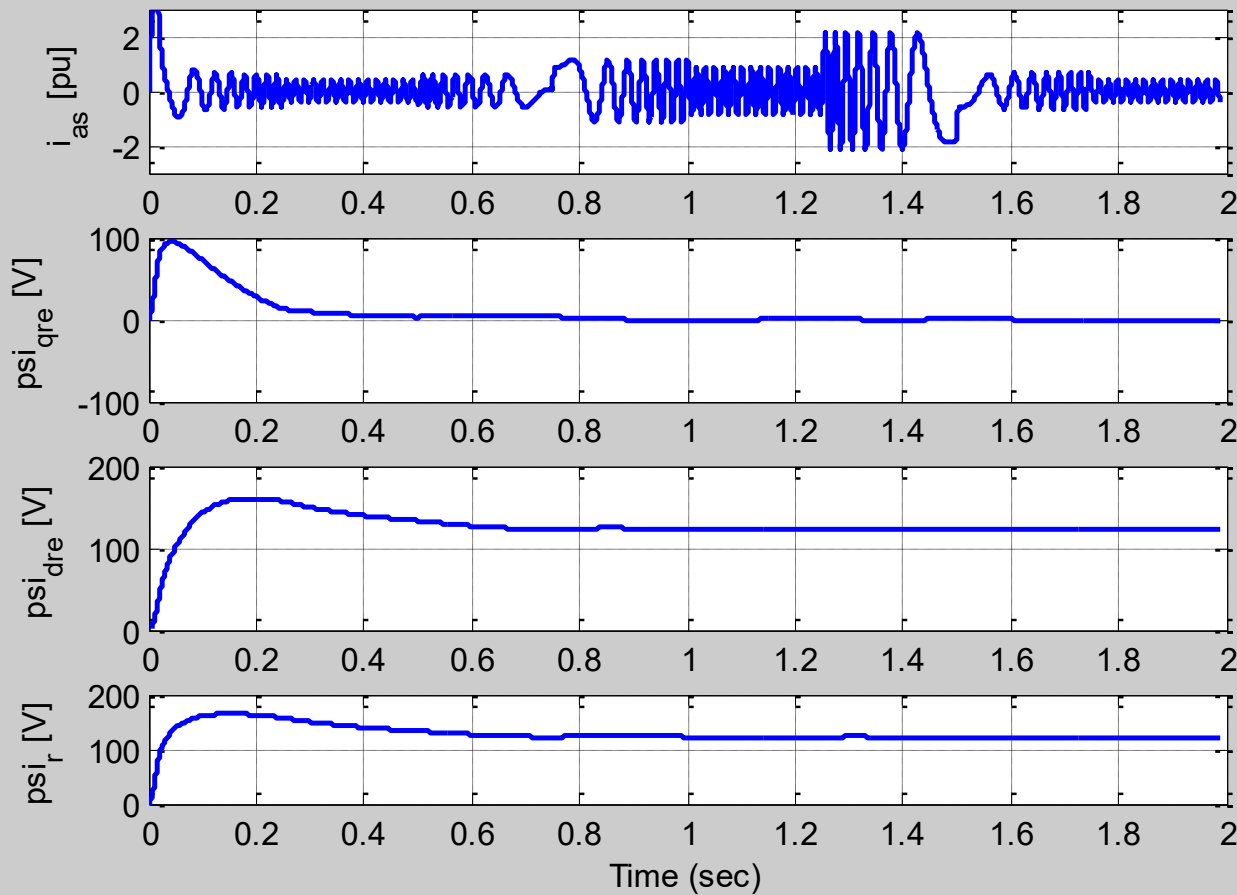


تغییرات سرعت، گشتاور و جریان فاز با تغییرات سرعت مرجع

شبیه سازی کنترل برداری موتور القایی

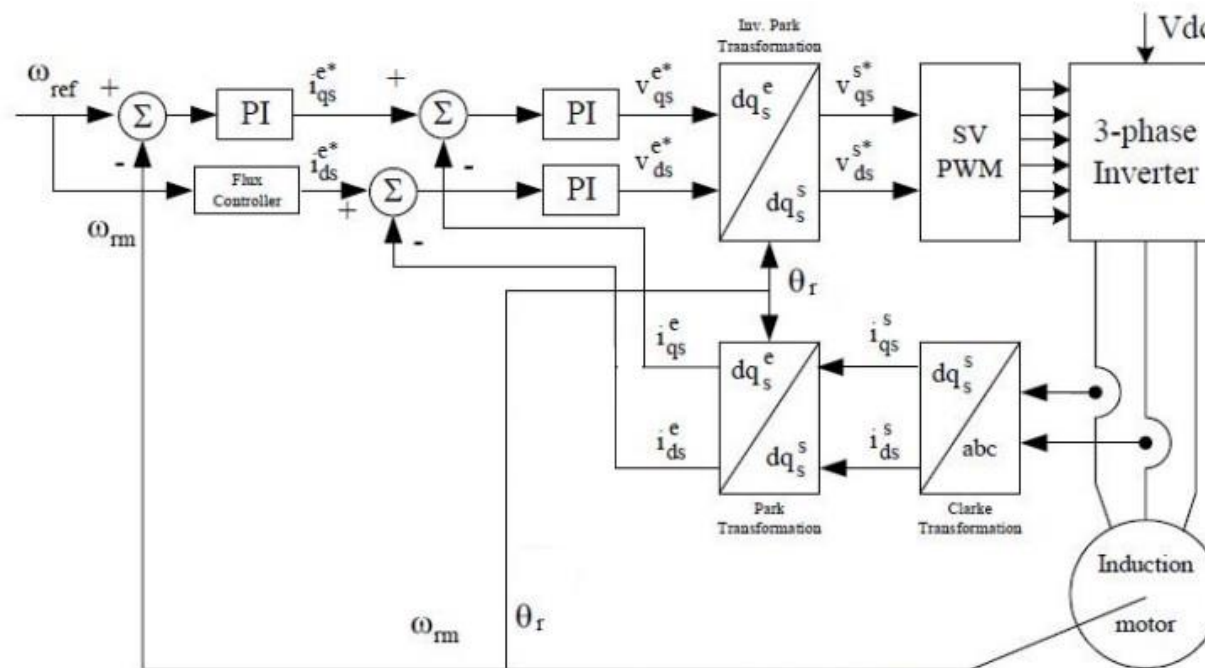
➤ شبیه سازی با تغییرات سرعت مرجع: **تغییرات شار-دور روتور**

✓ 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

- ✓ مشاهده شد که در روش کنترل برداری، برای کنترل گشتاور و شار باید جریانه‌های متناظر (مولفه گشتاور ساز یا i_{qs} و مولفه شار ساز یا i_{ds}) کنترل گردند. کنترل این مولفه‌های جریان نیز با ایجاد مناسب ولتاژهای V_{ds} و V_{qs} 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 خواهند نمود.
- ✓ محاسبات بالا، نیاز به پردازنده قدرتمند، پیچیدگی روش، تنظیم حلقه‌های 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.

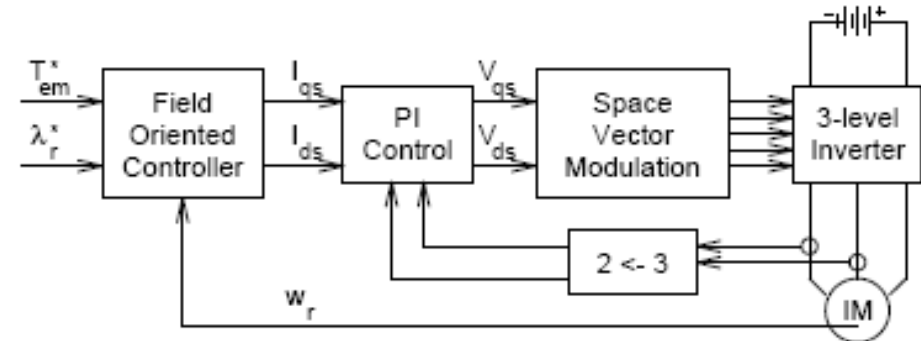


بلوک دیاگرام روش کنترل برداری بدون استفاده از حسگر سرعت

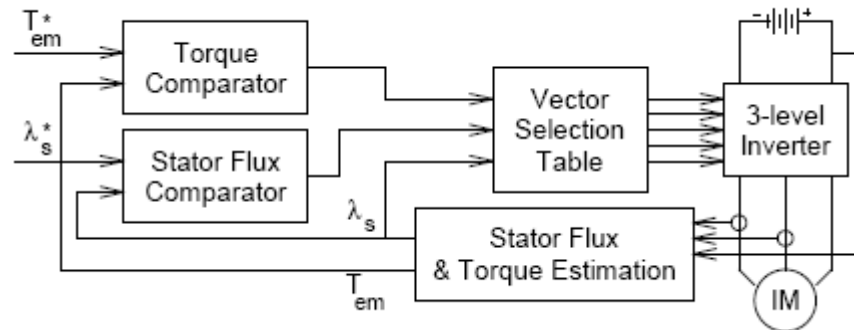
❑ مشکلات روش کنترل برداری موتورهای القایی

➤ 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، می باشد.
- ✓ 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 نمی شود.
- ✓ نکته مهم تر در روش DTC آنست که کنترلرهای مورد استفاده از ساده ترین نوع کنترلرها یعنی از نوع هیستریزیس هستند.



کنترل گشتاور موتور القایی به روش کنترل برداری

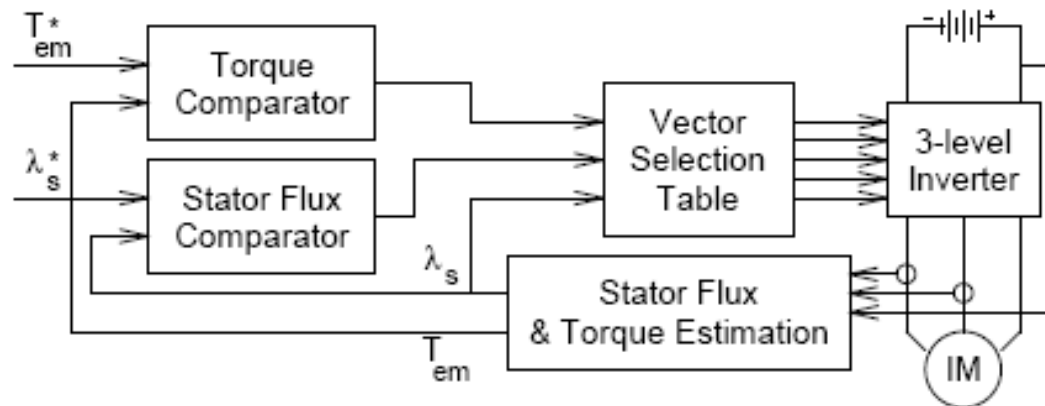


کنترل گشتاور موتور القایی به روش کنترل مستقیم گشتاور

❑ مشکلات روش کنترل برداری موتورهای 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 کنترلرهای 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 ریبلهای دائمی در گشتاور و شار
- ✓ مشکلات احتمالی در راه اندازی

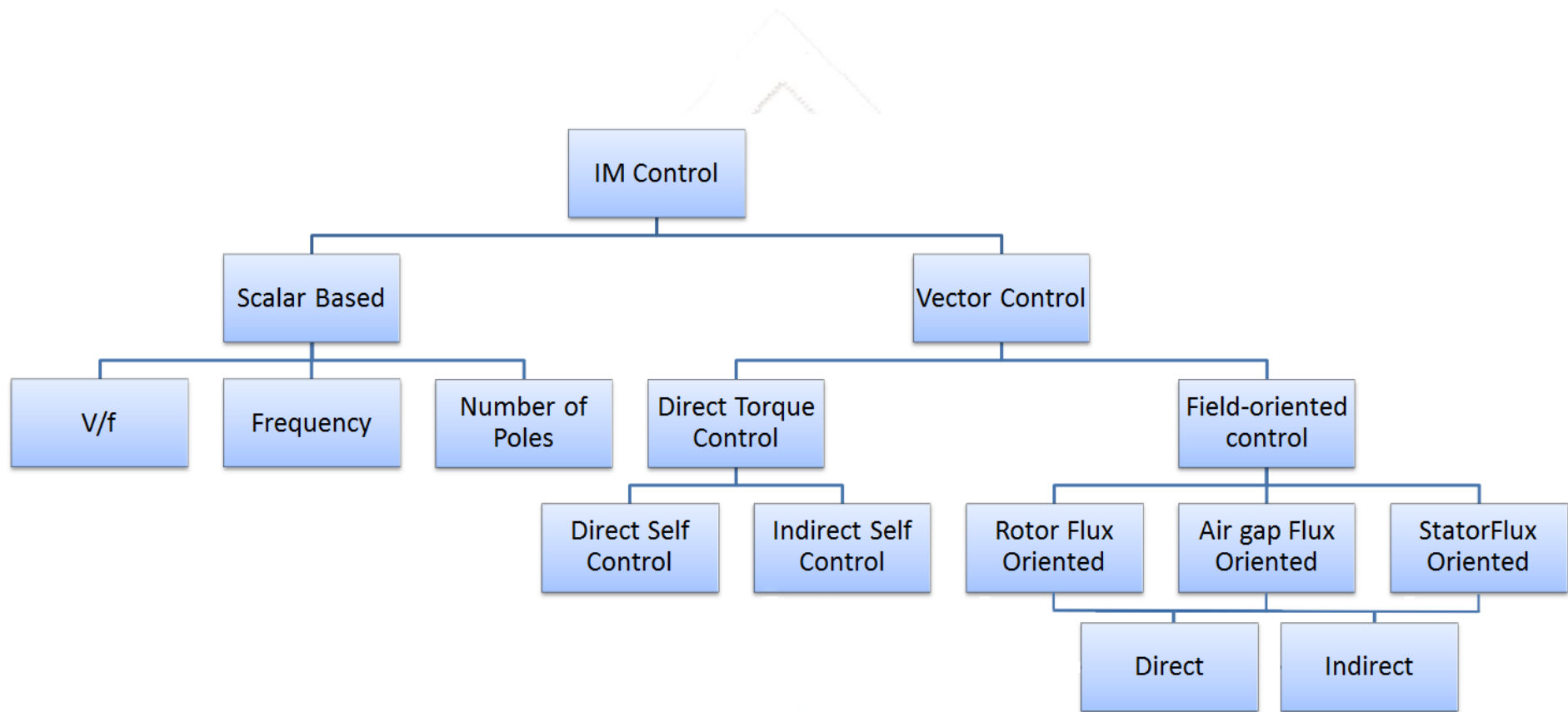


بلوک دیاگرام روش کنترل مستقیم گشتاور



❑ مشکلات روش کنترل برداری موتورهای القایی

➤ ویژگی های روش کنترل مستقیم گشتاور



دسته بندی روشهای متداول کنترلی موتورهای القایی مورد استفاده در درایوها