فصل سوم:
درایو موتورهای القایی

- مروری بر موتورهای القایی سه فاز
- انواع روش های کنترل سرعت موتورهای القایی
- کنترل سرعت با تغییر قطب ها
- کنترل سرعت با تغییر ولتاژ استاتور
- کنترل سرعت با تغییر مقاومت روتور
- کنترل سرعت به روش اسکالر (تغییر فرکانس-ولتاژ)
- اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایوهای موتورهای القایی سه فاز

❖ **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:**

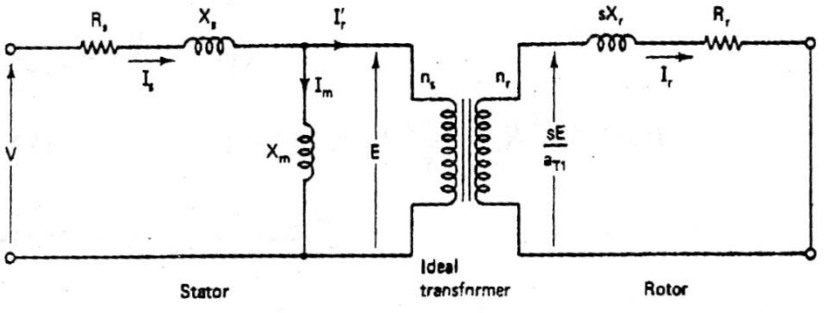
- ✓ **وابسته بودن سرعت به گشتاور بار در حالت بدون استفاده از سیستم کنترل خارجی**

❖ **کاربرد:**

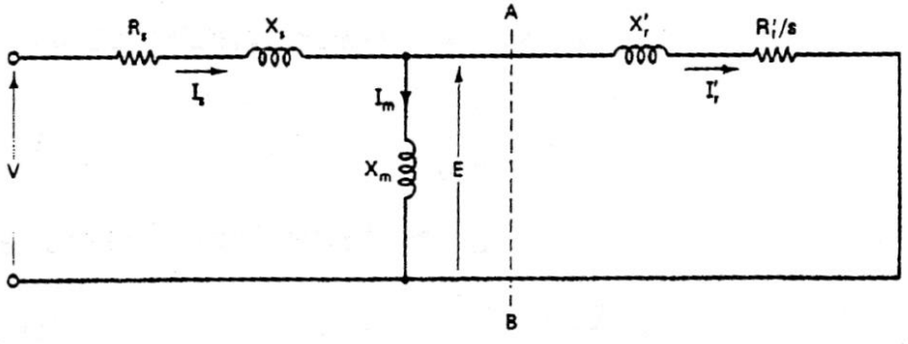
- ✓ **در اغلب کاربردهای صنعتی و غیرصنعتی**

(الف) روتور موتور القایی نوع روتور سیم پیچی شده

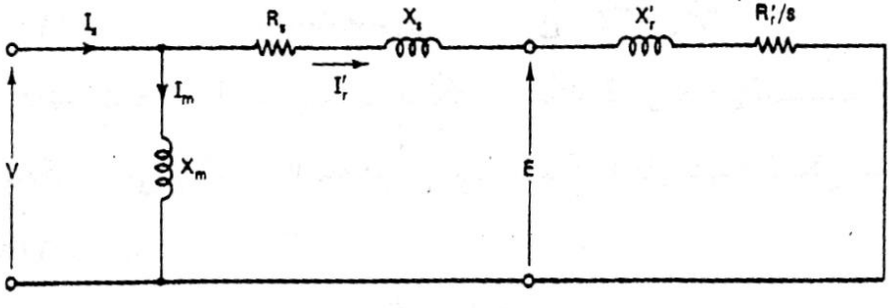
(ب) موتور القایی نوع قفس سنجابی



(الف) مدار معادل در فاز



(ب) مدار معادل فاز رجوع شده به استاتور



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

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

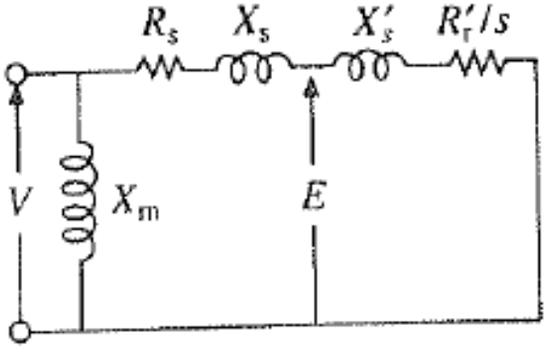
$$\bar{I}'_r = \frac{V}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right) + j(X_s + X'_r)} \quad (2)$$

$$P_g = 3I'^2_r R'_r / s \quad (3)$$

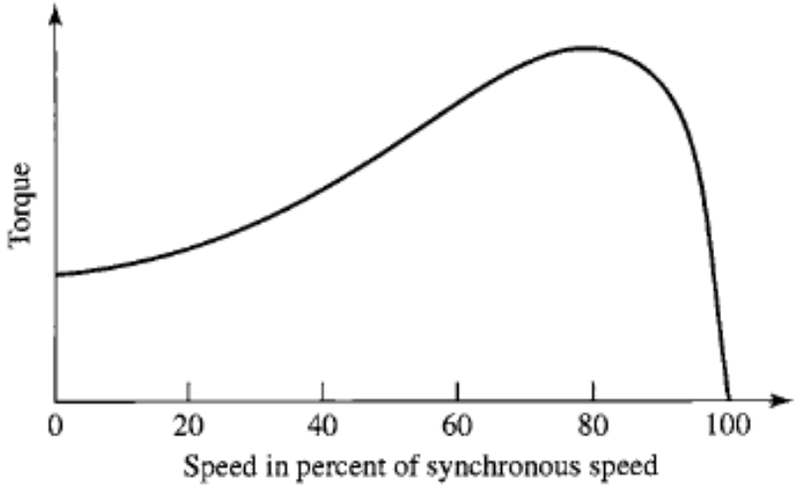
$$T = P_g/\omega_{ms} = P_m/\omega_m \quad (4)$$

$$T = \frac{3}{\omega_{ms}} I'^2_r \frac{R'_r}{s} \quad (5)$$

$$T = \frac{3}{\omega_{ms}} \left[\frac{V^2 R'_{r/s}}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_s + X'_r)^2} \right] \quad (6)$$

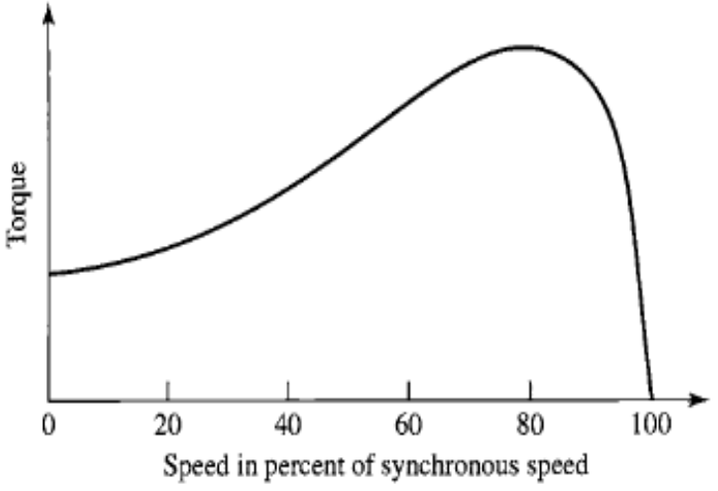


(الف) مدار معادل تقریبی



(ب) مشخصه گشتاور-سرعت موتور القایی سه فاز

$$T = \frac{3}{\omega_{ms}} \left[\frac{V^2 R'_{r/s}}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_s + X'_r)^2} \right] \quad (۷)$$

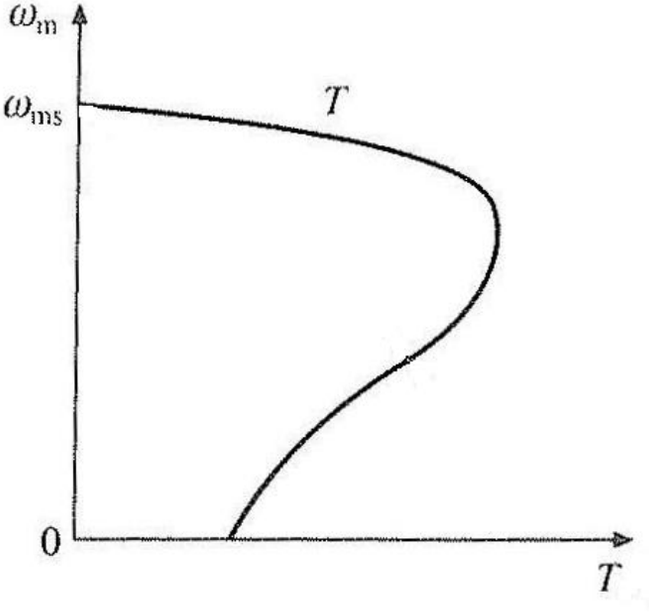


گشتاور زمانی حداکثر است که توان فاصله هوایی P_g ماکزیمم باشد. لذا باید:

$$\frac{R_r'}{s_m} = \pm\sqrt{R_s^2 + (X_r' + X_s)^2} \quad (۸)$$

$$s_m = \pm \frac{R'_r}{\sqrt{R_s^2 + (X_s + X'_r)^2}} \quad (۹)$$

$$T_{max} = \frac{3}{2\omega_{ms}} \left[\frac{V^2}{R_s \pm \sqrt{R_s^2 + (X_s + X'_r)^2}} \right] \quad (۱۰)$$

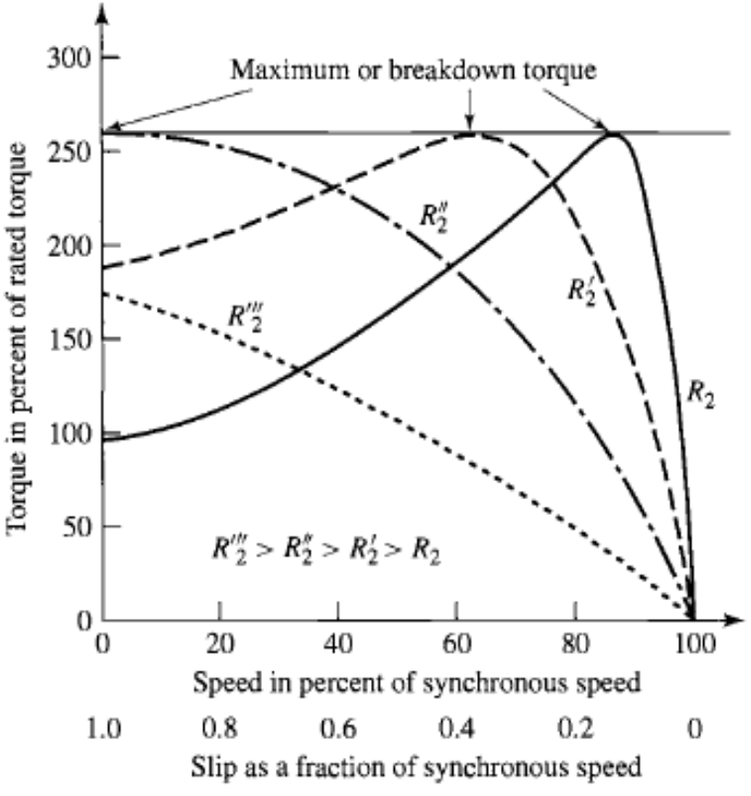


مشخصه گشتاور-سرعت موتور القایی سه فاز

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

$$T_{max} = \frac{3}{2\omega_{ms}} \left[\frac{V^2}{R_s \pm \sqrt{R_s^2 + (X_s + X_r')^2}} \right] \qquad (11)$$

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



مشخصه های گشتاور-سرعت موتور القایی سه فاز با مقاومتهای روتور متفاوت

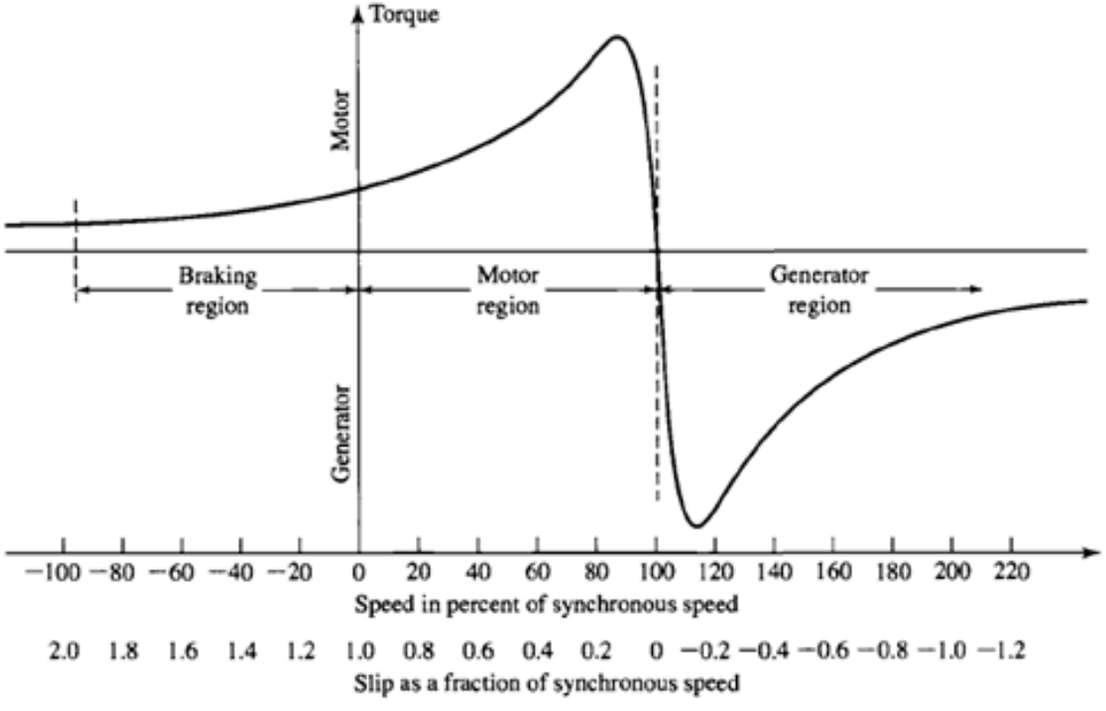
- ✓ موتورهای القایی متصل به شبکه برق، حتی وقتی به بار مکانیکی هم وصل نیستند، هنگام راه اندازی، تا چندین برابر جریان نامی خود، جریان می کشند.
- ✓ این جریان بالا ممکن است توسط سیستم حفاظت موتور به عنوان اتصال کوتاه تشخیص داده بشود و سیستم حفاظت عمل کرده و موجب قطع تغذیه و عدم راه اندازی موتور بشود.
- ✓ لذا جریان راه انداری موتور القایی باید محدود بشود.

❖ **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
- ✓ 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 دینامیکی (یا dc)
- ✓ ترمز ژنراتوری
- ✓ ترمز با معکوس کردن تغذیه (Plugging)



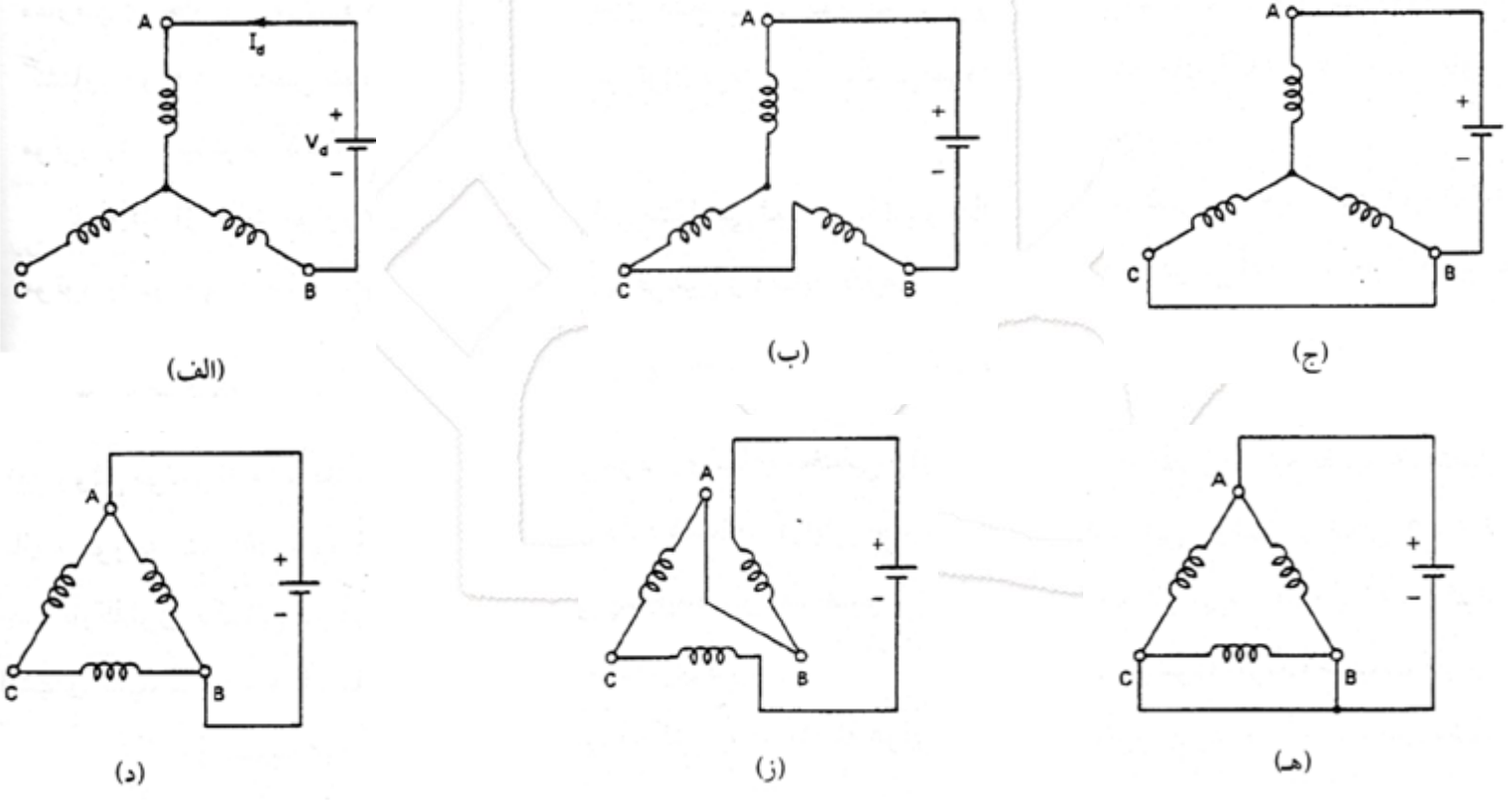
Induction-machine torque-slip curve showing braking, motor, and generator regions.

مشخصه گشتاور – سرعت موتور القایی در سرعتهای بالاتر و پائین تر از سرعت سنکرون

➢ 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 نهایتا موتور متوقف گردد.



آرایش‌های مختلف استاتور در حالت ترمز دینامیکی

❖ **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 اینحالت 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.

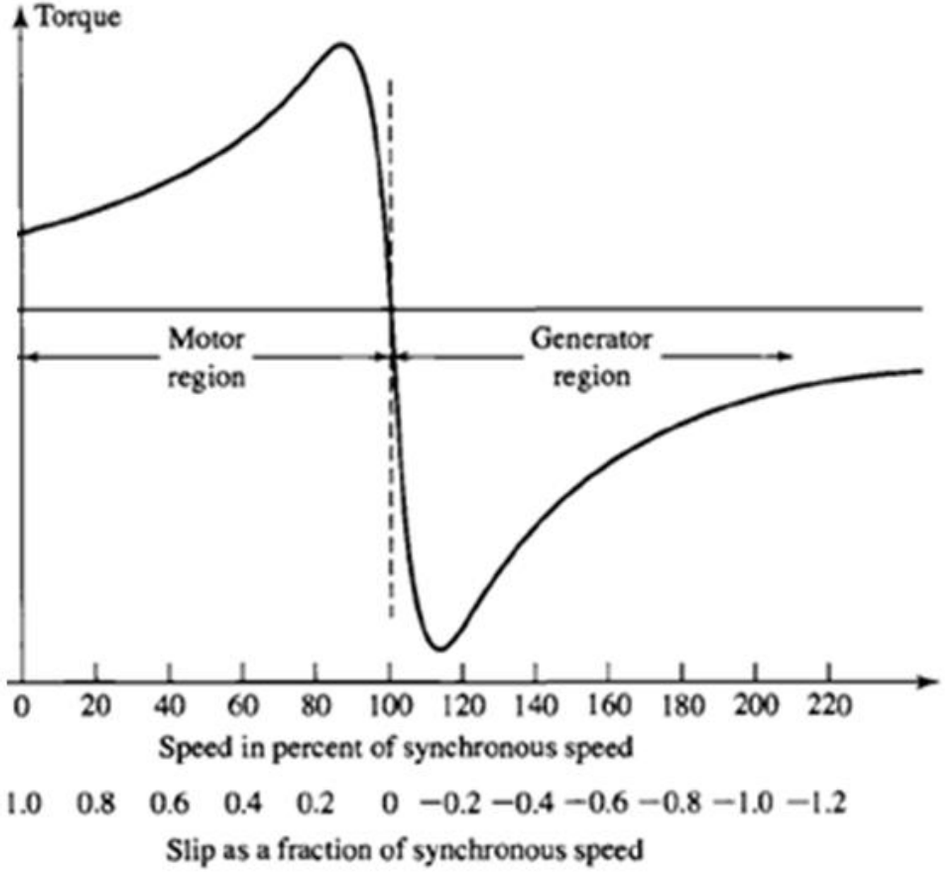
❖ **محدوده عملکرد ترمز ژنراتوری:**

✓ 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.

✓ 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.

$$P_{in} = 3VI_s \cos \phi_s \qquad (6.26)$$

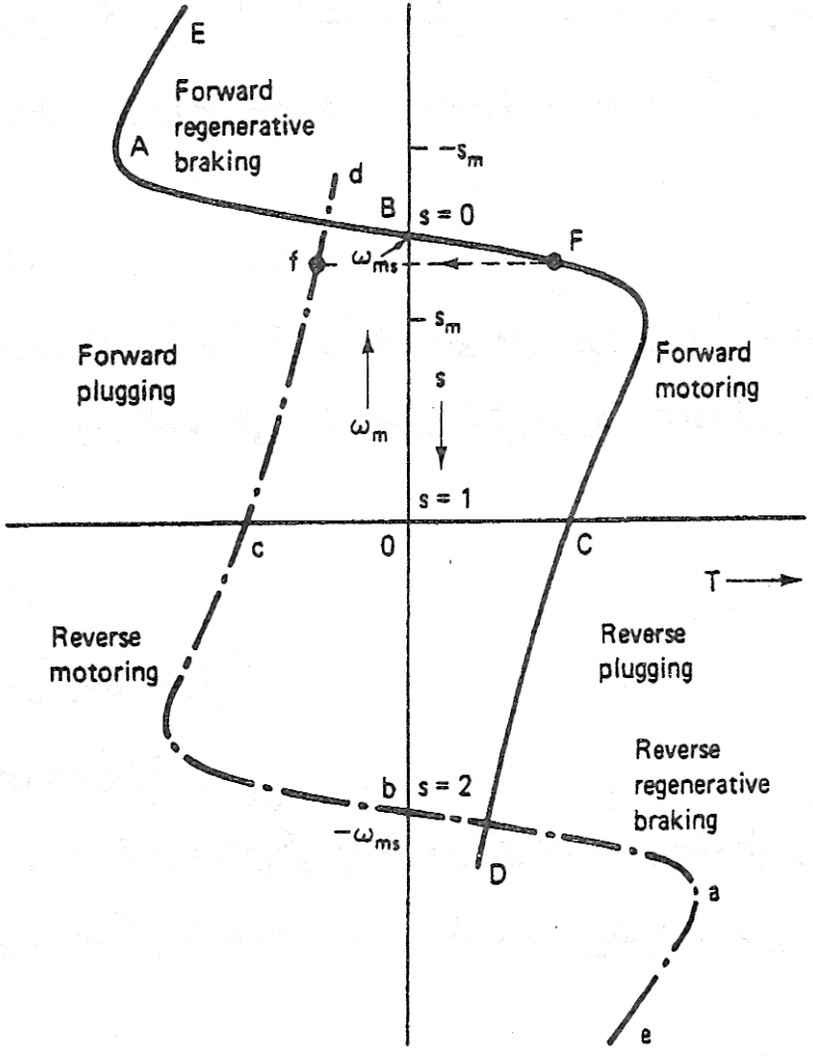


مشخصه گشتاور – سرعت موتور القایی در سرعتهای بالاتر و پائین تر از سرعت سنکرون

➢ 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.



❑ روش های کنترل سرعت موتورهای القایی

➢ انواع روش ها

❖ 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

➢ ایده این روش

- ✓ 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.

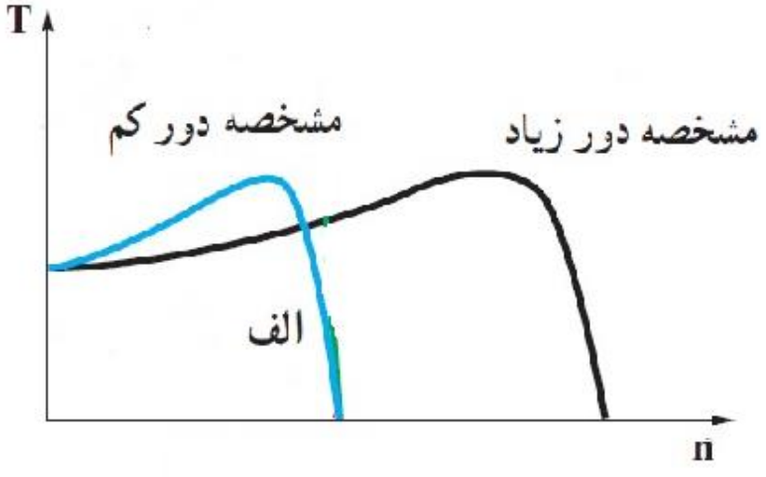
- ✓ موتورهایی که با این روش سرعت شان تغییر داده می شود، موتورهای چندسرعته و یا موتورهای با تغییر قطب نامیده می شوند.

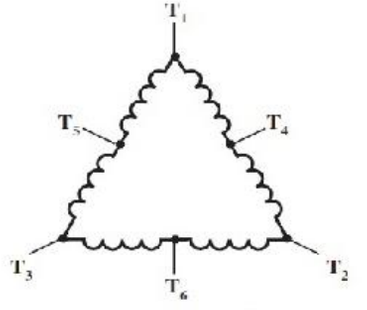
- ✓ با توجه به آنکه تعداد قطبهای استاتور و روتور باید با هم برابر باشند، در موتورهای القایی با روتور سیم پیچی شده، تغییر تعداد قطبها در روتور بسیار سخت است، اما در موتور قفس سنجابی، تعداد قطبهای روتور تابع تعداد قطبهای استاتور هستند. لذا این روش فقط مخصوص موتورهای القایی قفس سنجابی است.

- ✓ 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.

❑ کنترل سرعت با تغییر تعداد قطبها

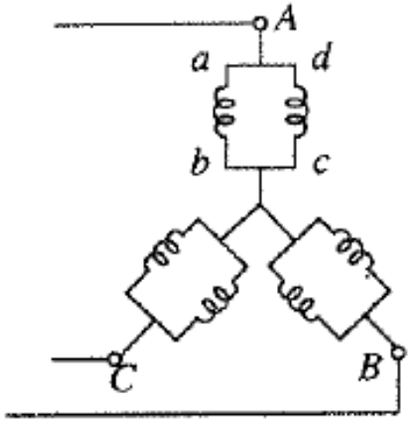
➢ طرح دالاندر

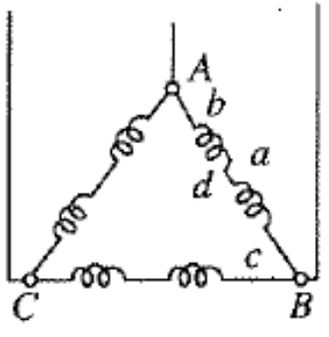


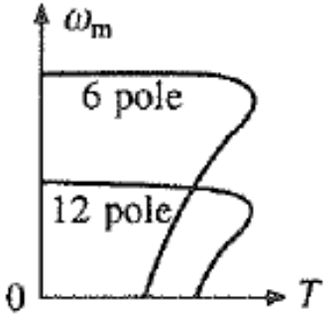


سرعت	سه فاز			
	L_1	L_2	L_3	
کم	T_1	T_2	T_3	T_4 ، T_5 ، T_6 باز
زیاد	T_4	T_5	T_6	T_1 ، T_2 ، T_3 وصل به هم

الف ــ مثلث، ستاره دوبل







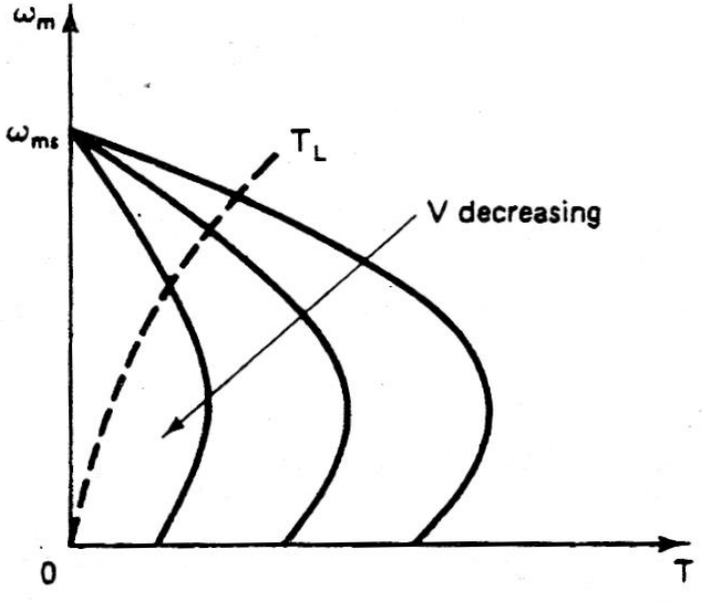
(a) High speed (6-pole) (b) Low speed (12-pole) (c) Speed-torque curves

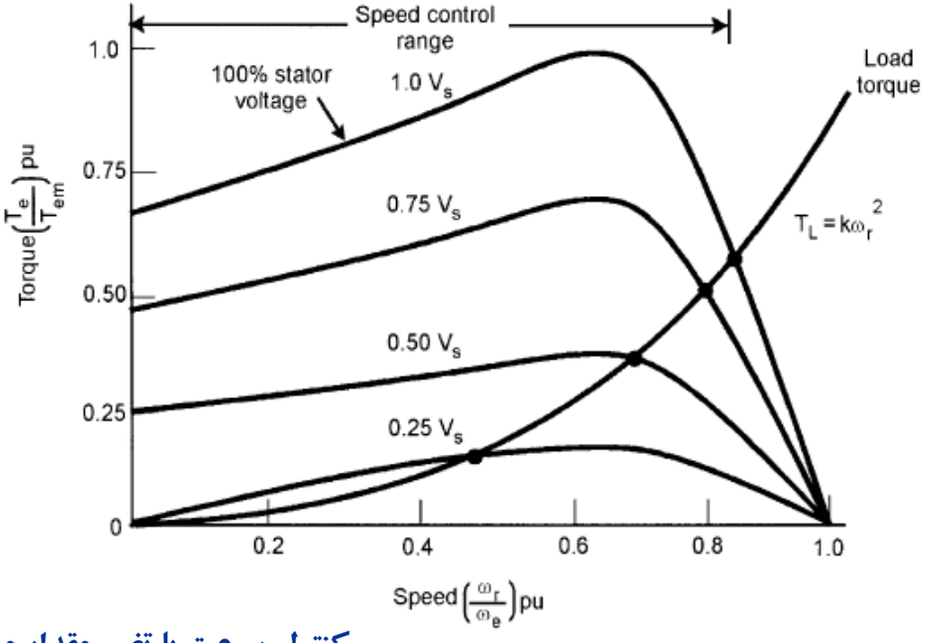
Fig. 6.26 Constant torque control

❑ کنترل سرعت با تغییر ولتاژ استاتور

➢ ایده این روش

- ✓ 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.



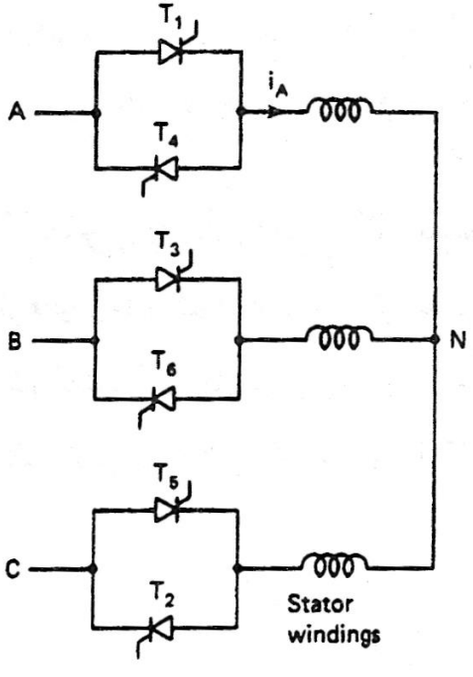


کنترل سرعت با تغییر مقدار موثر ولتاژ استاتور

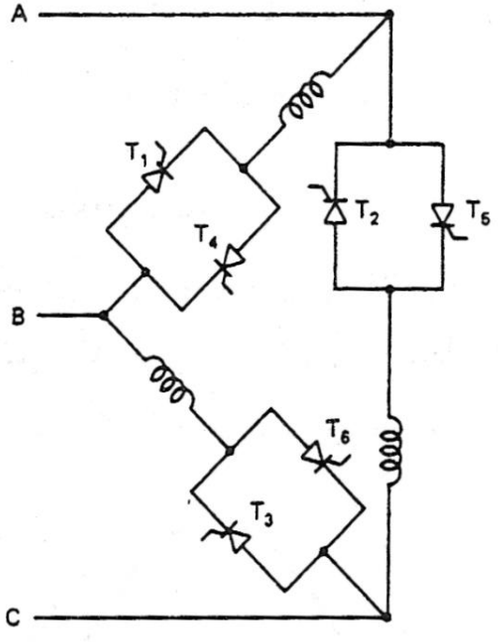
❑ کنترل سرعت با تغییر ولتاژ استاتور

➢ مدارات کنترل کننده ولتاژ

- ✓ 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 تریستور آنتی پارالل با یک تریاک وجود دارد.



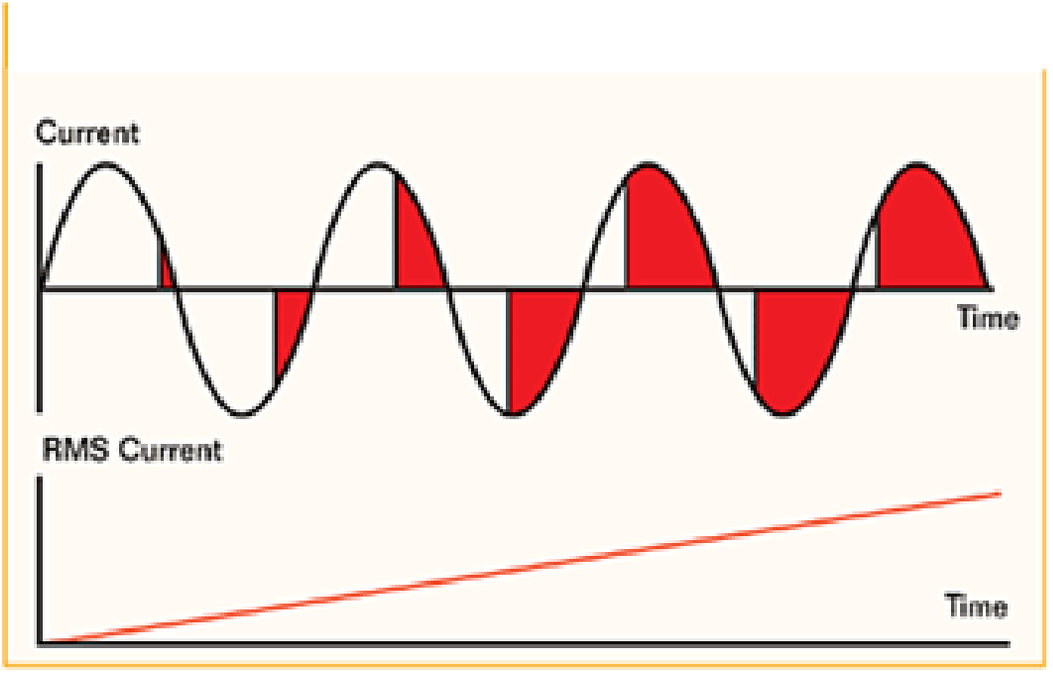
C_1

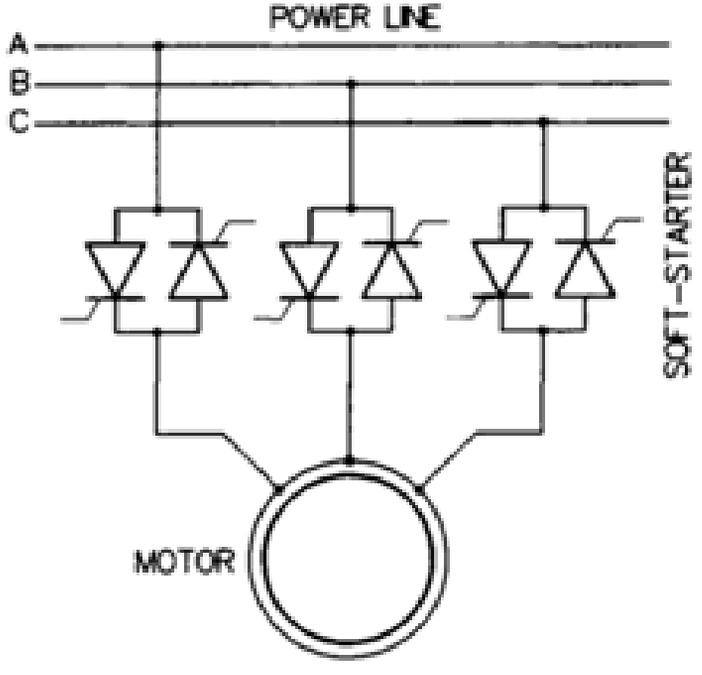


C_2

مدار کنترل کننده ولتاژ سه فاز با استفاده از تریستور

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



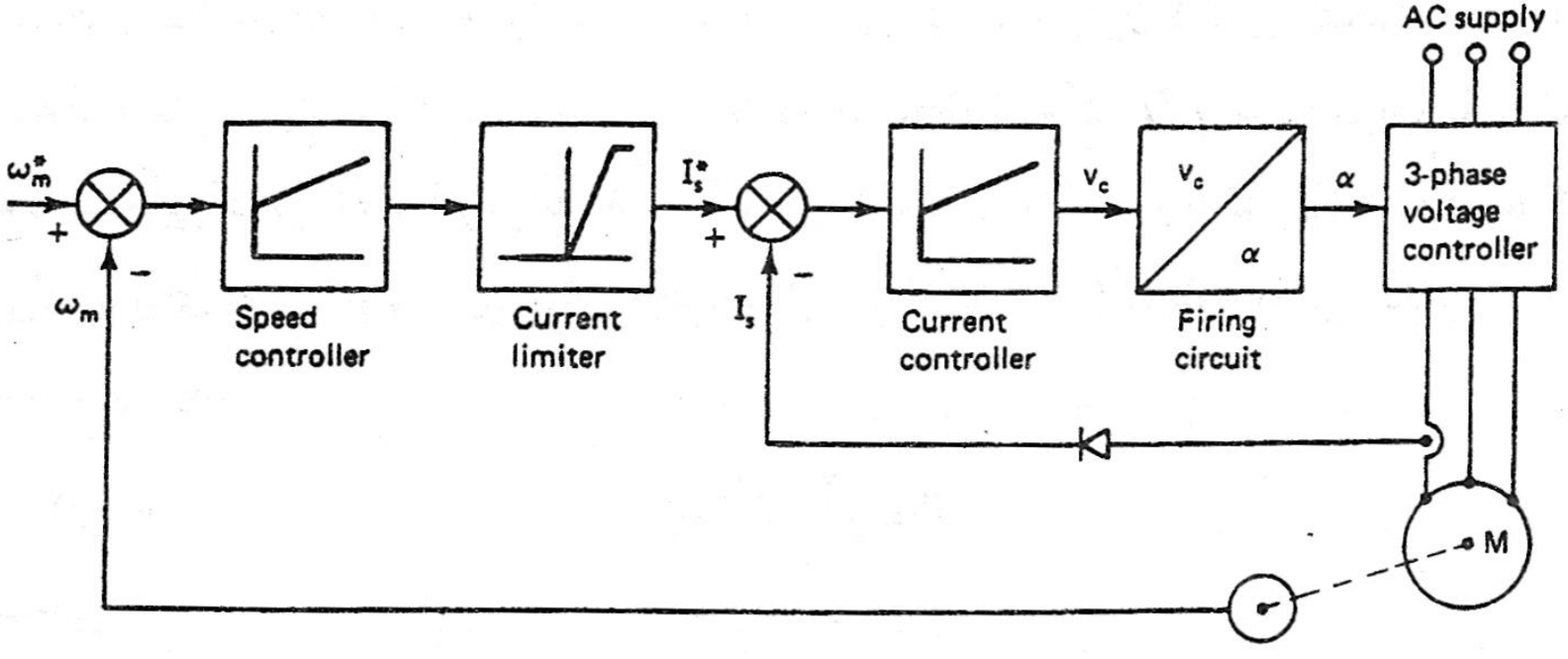


طرح کلی راه انداز نرم و تغییرات جریان موتور در حین راه اندازی

❑ کنترل سرعت با تغییر ولتاژ استاتور

➢ کنترل حلقه بسته سرعت موتور القایی

- ✓ 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 معمولا 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.

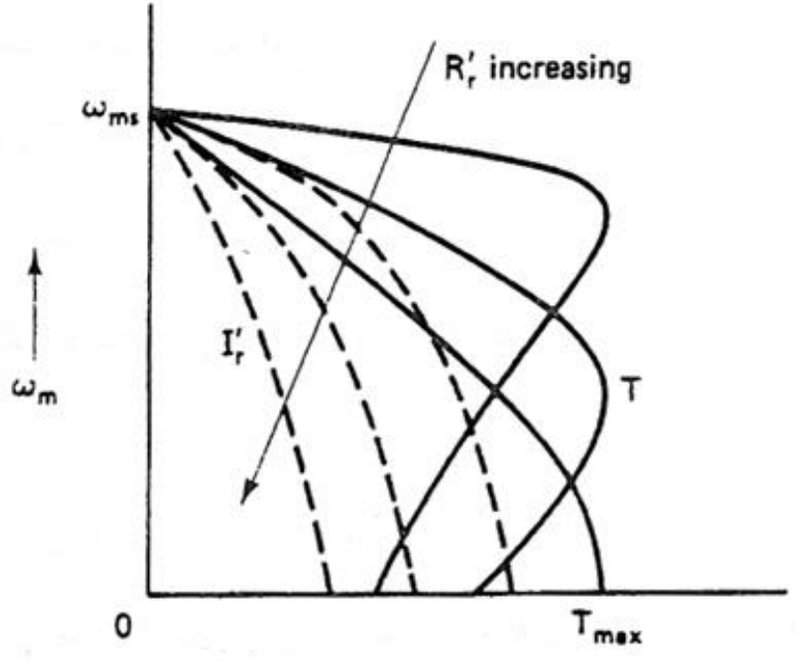


کنترل حلقه بسته سرعت تک ربعی با مدار کنترل ولتاژ

❑ کنترل سرعت با تغییر مقاومت روتور

➢ ایده این روش

- ✓ 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.

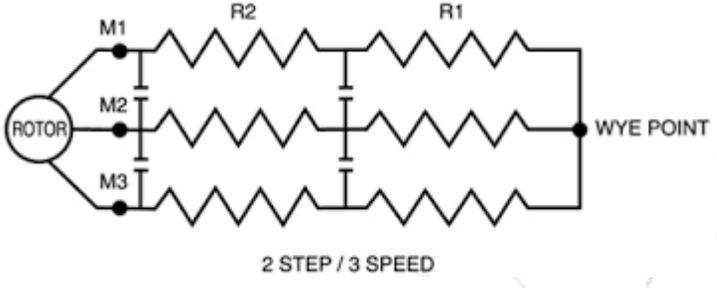


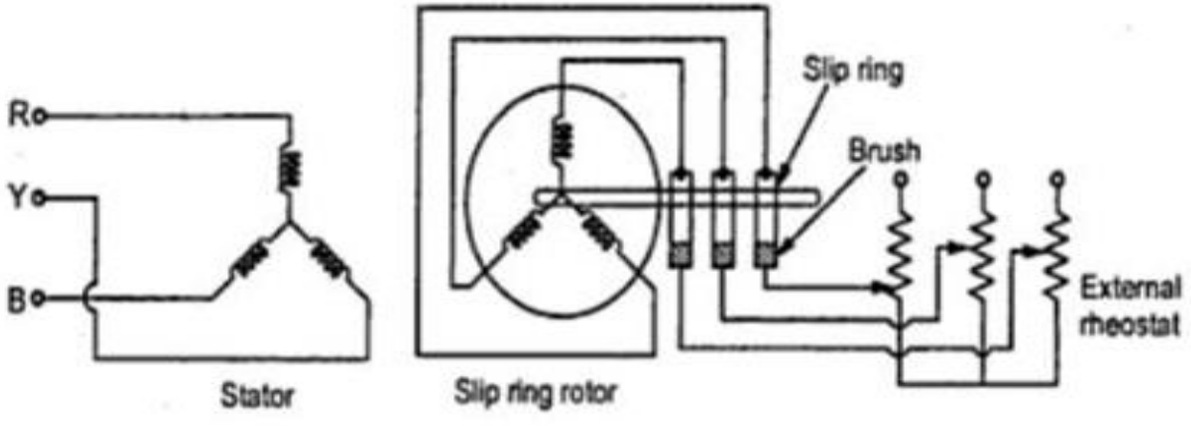
مشخصه‌های سرعت ـ گشتاور (خط پر) و سرعت ـ جریان رتور (خط‌چین)
در موتورهای رتور سیم‌بندی شده

❑ کنترل سرعت با تغییر مقاومت روتور

➢ روش های تغییر مقاومت روتور

- ✓ 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.





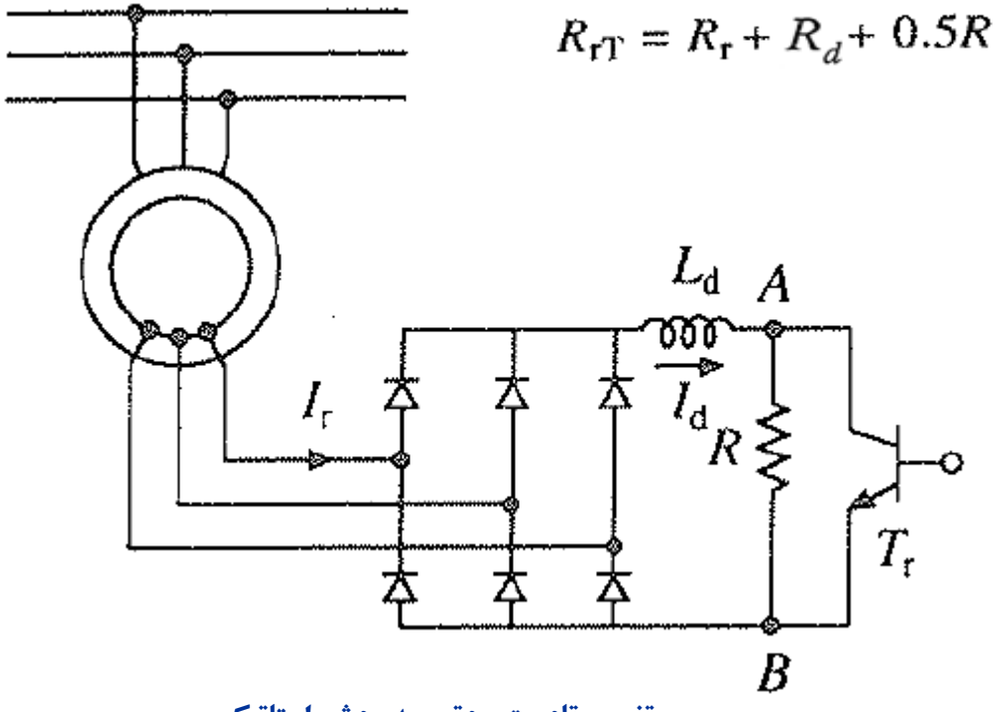
(الف) تغییر مقاومت روتور با رئوستای سه فاز

❑ کنترل سرعت با تغییر مقاومت روتور

➢ تغییر مقاومت روتور به روش کنترل استاتیکی

- ✓ 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 می شود.
- ✓ توان تلف شده در این مقاومت بوسیله کنترل یک سوئیچ استاتیکی تنظیم می شود.
- ✓ با درنظر گرفتن مقاومت دیود در پل دیودی، مقاومت کل در هر فاز روتور برابر است با:

$$R_{rT} = R_r + R_d + 0.5R\,(1 - \delta) \quad (۱۳)$$

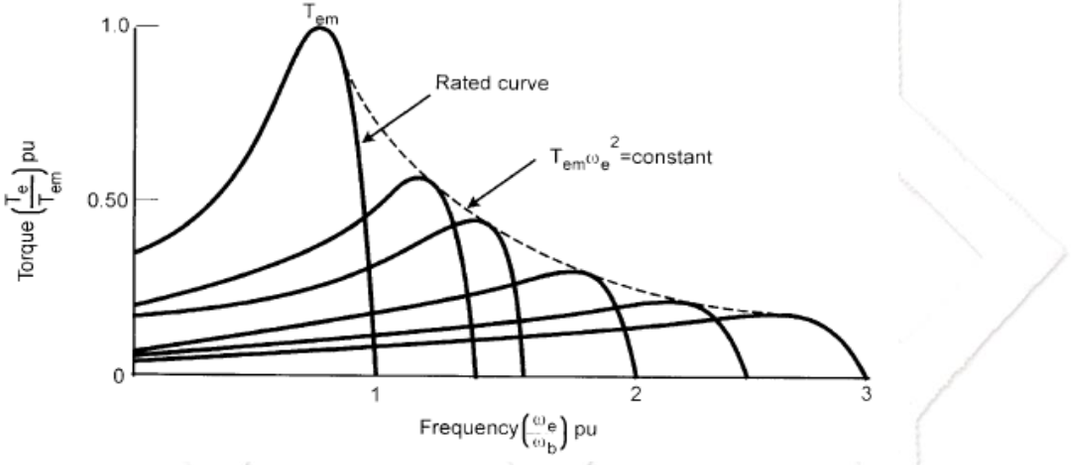


تغییر مقاومت روتور به روش استاتیکی

❑ کنترل سرعت موتور القایی به روش اسکالر

➢ روش تغییر فرکانس

- ✓ 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 اینحالت 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 $E=4.44\ f\ N\ \varphi_{max}$، اگر تنها فرکانس تغییر کند، شار φ_{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 اصلا 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.

❑ کنترل سرعت موتور القایی به روش اسکالر

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

- ✓ 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)

$$a = \frac{f}{f_{rated}} \qquad (14)$$

a = فرکانس پریونیتی

❑ کنترل سرعت موتور القایی به روش اسکالر

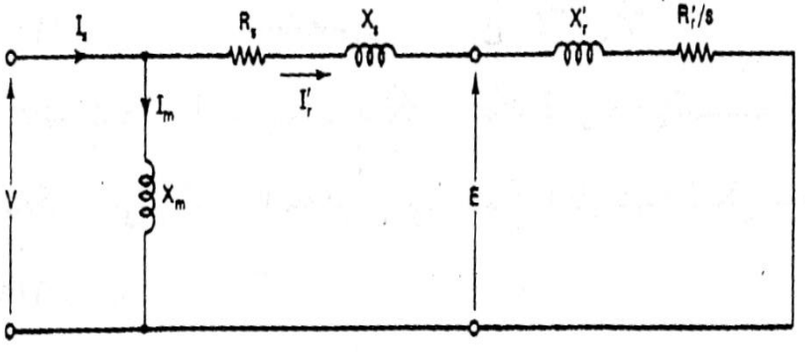
➢ روش تغییر همزمان ولتاژ- فرکانس (یا روش V/f ثابت)

- ✓ همانطور که اشاره گردید، کار موتور در شار ثابت، نیازمند ایجاد حلقه کنترل شار است که برای این کار شار 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 درنظر می گیریم تا ولتاژ E با V یکسان درنظر 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:

$$T=\frac{3}{\omega_{ms}}\left[\frac{V_{rated}^{2}(R_r'/s)}{(R_s+R_r'/s)^{2}+(X_s+X_r')^{2}}\right] \qquad (15)$$

$$T_{max}=\frac{3}{2\omega_{ms}}\left[\frac{V_{rated}^{2}}{R_s\pm\sqrt{R_s^{2}+(X_s+X_r')^{2}}}\right] \qquad (16)$$



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

❑ کنترل سرعت موتور القایی به روش اسکالر

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

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

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

$$T = \frac{3}{\omega_{ms}} \left[\frac{V_{rated}^2 R_r'/(as)}{\left(\frac{R_s}{a} + \frac{R_r'}{sa}\right)^2 + (X_s + X_r')^2} \right], \quad a<1 \qquad (17)$$

$$T_{max} = \frac{3}{2\omega_{ms}} \left[\frac{V_{rated}^2}{(R_s/a) \pm \sqrt{(R_s/a)^2 + (X_s + X_r')^2}} \right], \quad a<1 \qquad (18)$$

❖ نکات:

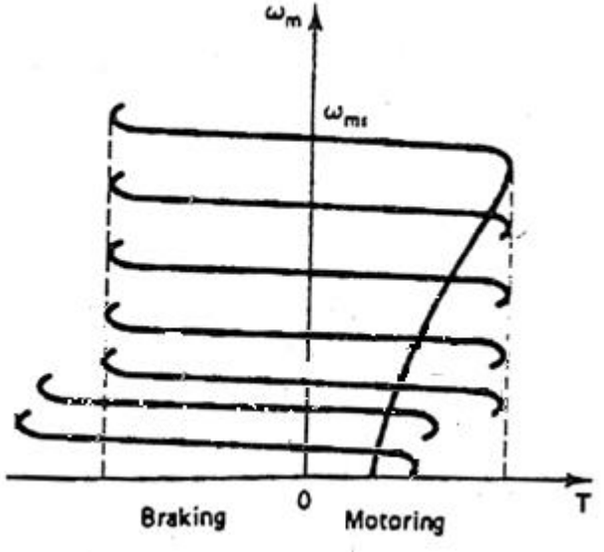
✓ گشتاور شکست (T_{max}) و فرکانس لغزش (ω_{sl}) در تمامی فرکانسهای متوسط به بالا (به غیر از فرکانسهای پائین یا سرعتهای پائین) بدون تغییر باقی می مانند.

✓ لغزش مربوط به گشتاور ماکزیمم (s_{Tmax}) با تغییر فرکانس تغییر می کند.

✓ 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 ها در ناحیه $0 < s < s_{Tmax}$ بصورت منحنی های موازی هستند.



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

❑ کنترل سرعت موتور القایی به روش اسکالر

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

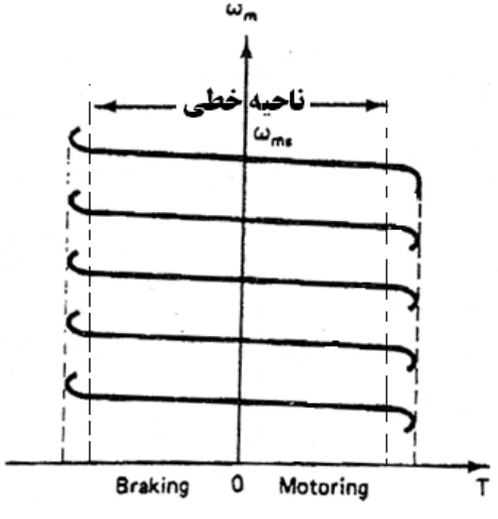
- ✓ در ادامه اثبات می شود که در ناحیه سرعتی بین فرکانس سنکرون و گشتاور شکست، گشتاور متناسب با فرکانس لغزش است.
- ✓ در فرکانسهای زیر فرکانس نامی ($a < 1$)، و در فرکانس پریونیتی a، گشتاور از رابطه زیر حاصل می شود:

$$T = \frac{3}{\omega_{ms}} \left[\frac{V_{rated}^2 R_r'/(as)}{\left(\frac{R_s}{a} + \frac{R_r'}{sa}\right)^2 + (X_s + X_r')^2} \right] \qquad (19)$$

$$T = \frac{3}{\omega_{ms}} \frac{V_{rated}^2}{R_r'/(as)} = \frac{3}{\omega_{ms}} \frac{V_{rated}^2}{R_r'} (as) \qquad (20)$$

- ✓ 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 (۵۳) خواهد شد.
- ✓ با ضرب صورت و مخرج رابطه (۵۳) در سرعت سنکرون ω_{ms} نتیجه می شود:

$$T = \frac{3a}{\omega_{ms}^2} \frac{V_{rated}^2}{R_r'} (s\omega_{ms}) = \text{constant} \cdot \omega_{sl} \qquad (21)$$



- ✓ معنای رابطه (٥٤) آنست که مشخصه گشتاور برحسب 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.

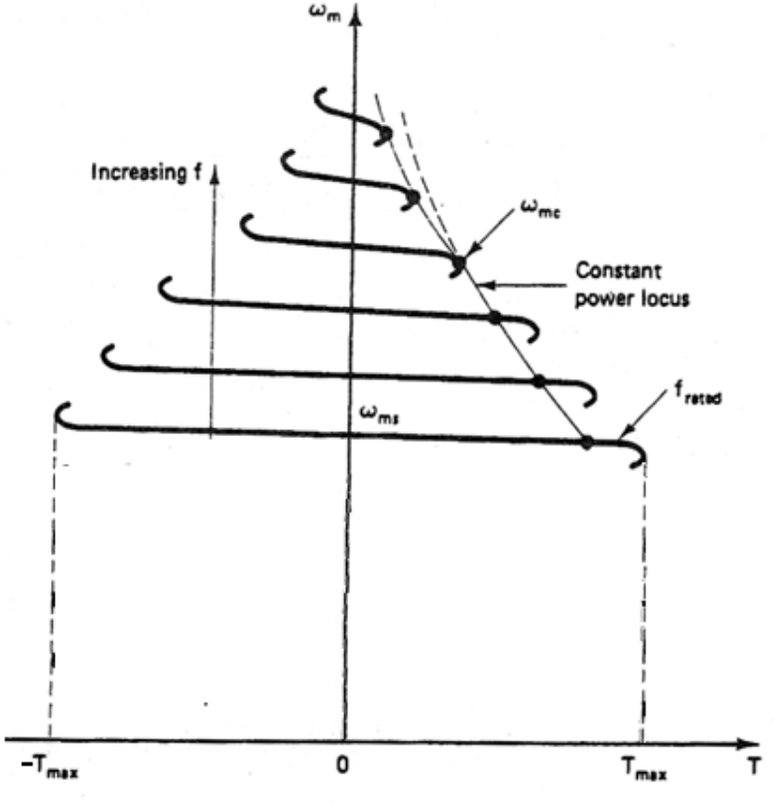
❖ ب: عملکرد موتور در فرکانسهای بالاتر از فرکانس نامی (a>1)

✓ 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.

$$T=\frac{3}{\omega_{ms}}\left[\frac{V_{rated}^{2}R_r'/(as)}{(R_s+R_r'/s)^{2}+a^{2}(X_s+X_r')^{2}}\right], \qquad a>1 \qquad (22)$$

$$T_{max}=\frac{3}{2\omega_{ms}a}\left[\frac{V_{rated}^{2}}{R_s\pm\sqrt{R_s^{2}+a^{2}(X_s+X_r')^{2}}}\right], \qquad a>1 \qquad (23)$$



منحنی های سرعت گشتاور در روش V/f ثابت

در فرکانسهای بالاتراز نامی (a>1)

❖ 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.

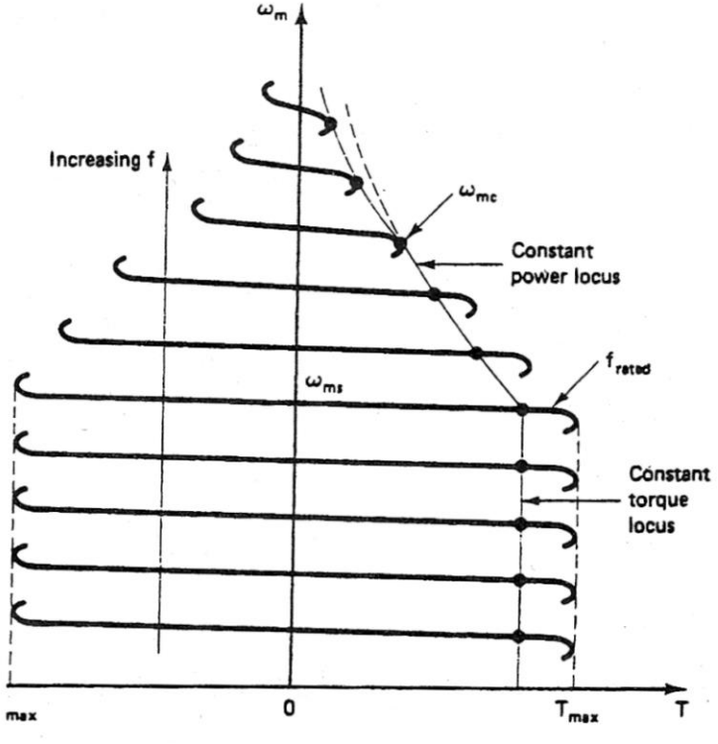
✓ در ناحیه بالای سرعت نامی، موتور نمی تواند گشتاور نامی تولید کند ولی توان نامی خود را می تواند ایجاد نماید.

❑ کنترل سرعت موتور القایی به روش اسکالر

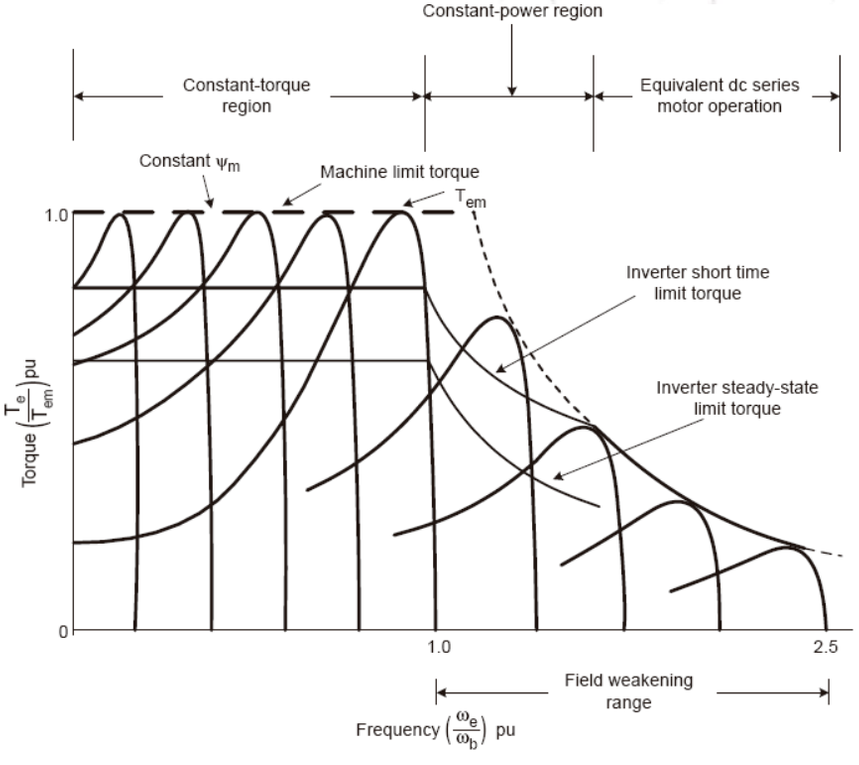
➢ روش تغییر همزمان ولتاژ- فرکانس (یا روش V/f ثابت)

❖ 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.



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

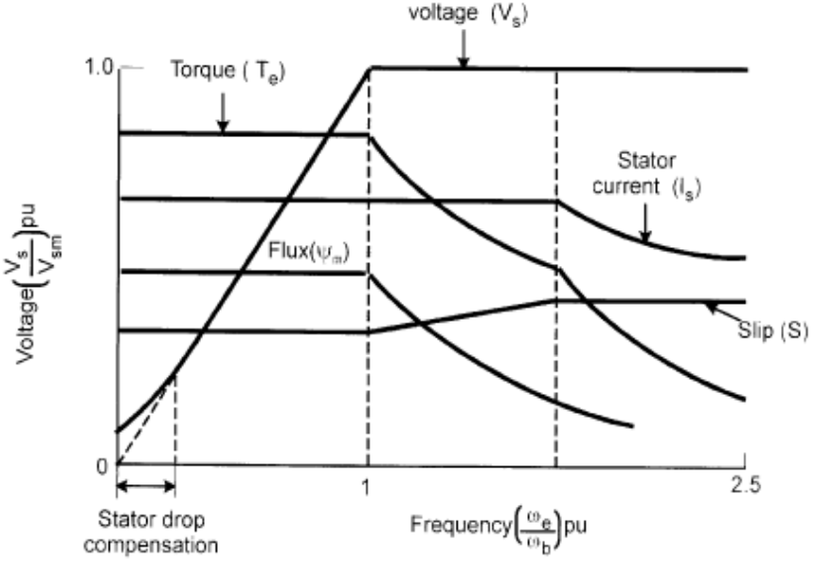


(ب) منحنی های گشتاور - سرعت موتور القایی با روش کنترل اسکالر در تمامی بازه فرکانسی

❑ کنترل سرعت موتور القایی به روش اسکالر

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

- ✓ 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 نتیجتا I_s مشخص)، سرعت لغزش بطور خطی با افزایش a تغییر می کند.
- ✓ در سرعتهای بالاتر از ۲ برابر سرعت نامی (a > 2)، برای جلوگیری ازتجاوز 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 سرعتهای زیرسرعت 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.

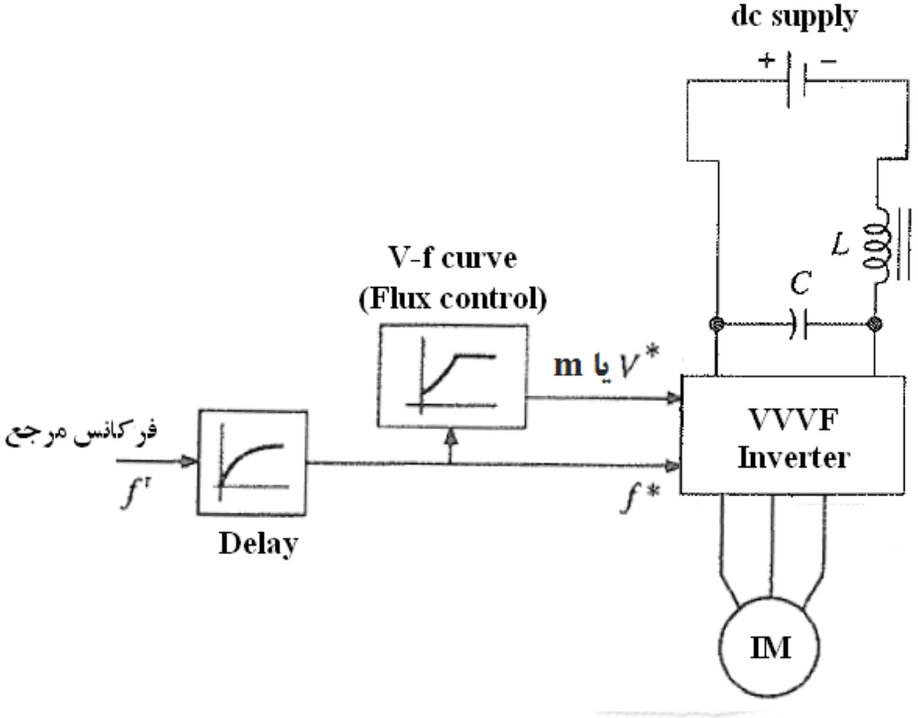


تغییرات متغیرهای مختلف موتور القایی در روش کنترل اسکالر از فرکانس صفر تا فرکانس حداکثر

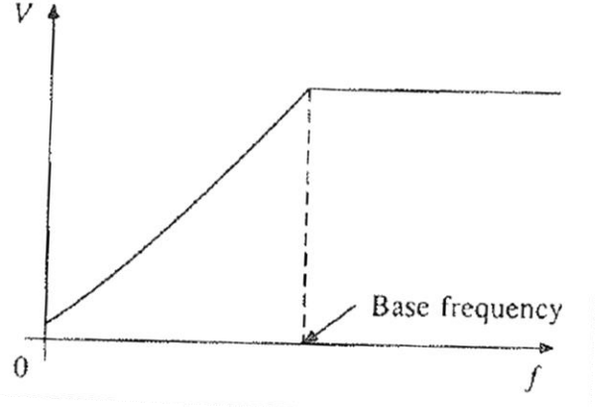
❑ کنترل سرعت موتور القایی به روش اسکالر

➢ کنترل اسکالر به روش حلقه باز

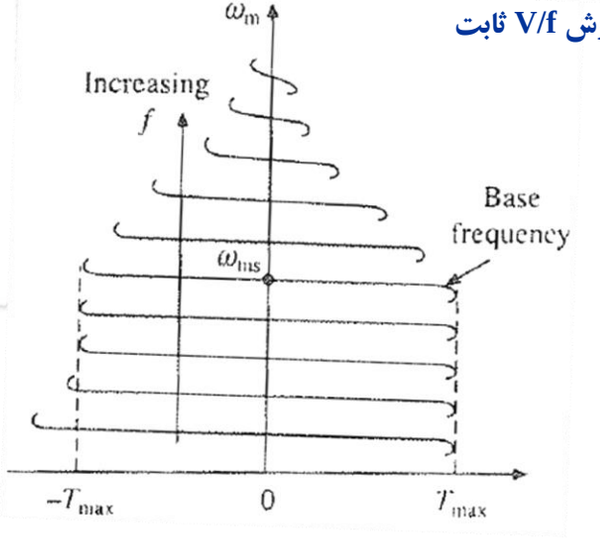
- ✓ در بسیاری از کاربردهای سرعت متغیر که تغییرات گشتاور بار زیاد نیست و تنظیم سرعت هم با دقت بالا مورد نیاز نیست، از روش کنترل اسکالر حلقه باز استفاده می شود. تقریبا در اغلب درایوهای تجاری موجود در بازار این روش وجود دارد.
- ✓ اینورتر مورد استفاده از نوع ولتاژ متغیر-فرکانس متغیر (VVVF) است که دارای انواع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

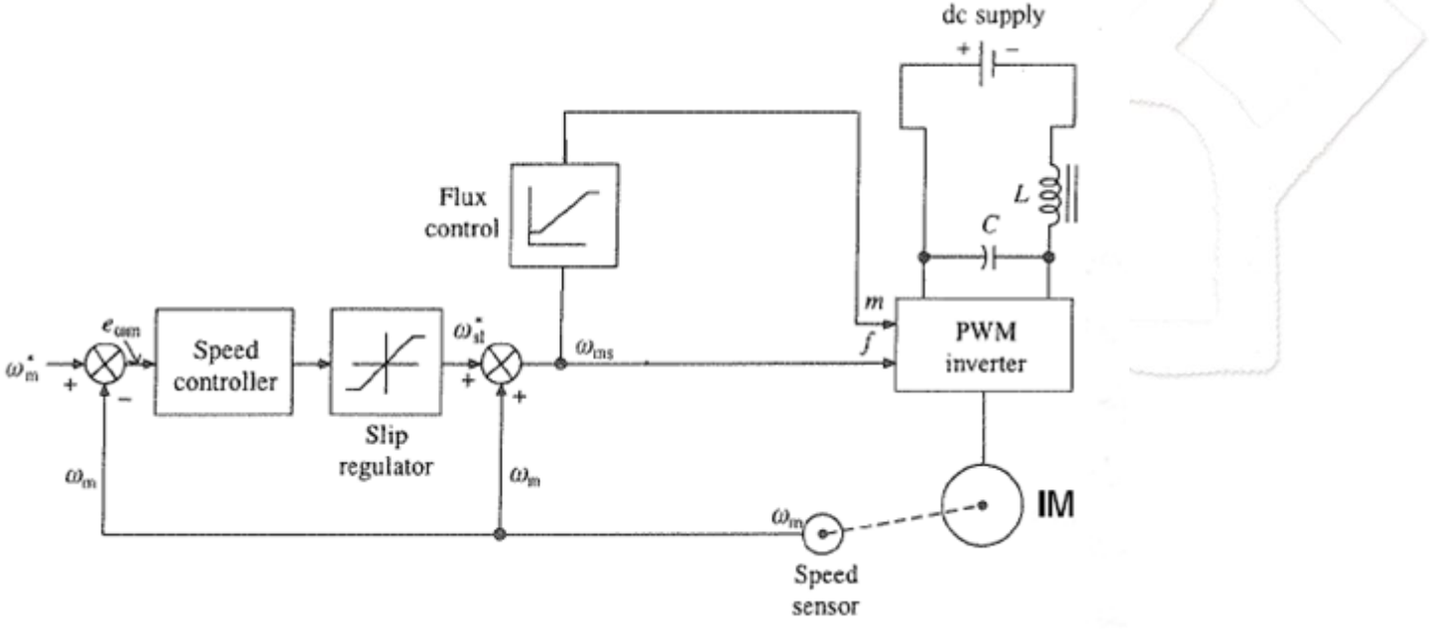


(ج) منحنی های گشتاور-سرعت در روش V/f ثابت

❑ کنترل سرعت موتور القایی به روش اسکالر

➢ کنترل اسکالر به روش حلقه بسته

- ✓ 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.
- ✓ مثلا در درایو موتور DC، خروجی کنترلر سرعت، مقدار مرجع جریان آرمیچر است که متناسب با مقدار گشتاور است.
- ✓ در روش کنترل اسکالر حلقه بسته موتور القایی، خروجی کنترلر سرعت را برابر سرعت لغزش درنظر می گیرند، زیرا همانطور که قبلا بیان شد و در ادامه با روابط اثبات می گردد، سرعت لغزش با مقدار گشتاور موتور متناسب است.



کنترل سرعت موتور القایی به روش اسکالر حلقه بسته با کنترل سرعت لغزش

➢ 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 کاملا مقرون بصرفه 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)
- سیکلوکانورتر

- ✓ اینورترهای منبع ولتاژ بسیار ساده و کم هزینه هستند، دارای ولتاژ تقریبا ثابتی بوده و برای کاربردهای تک موتوره و چند موتوره 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.
- ✓ سیکلو کانورترها از منبع ولتاژ ac ثابت می توانند، توان ac با فرکانس متغیر تولید نمایند. معمولا 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.

➢ 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:**

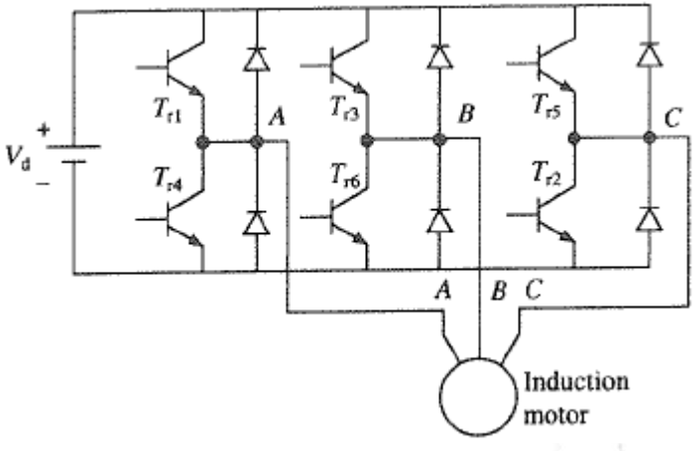
- ✓ PWM سینوسی یا SPWM
- ✓ PWM با نمونه برداری یکنواخت
- ✓ PWM با حذف هارمونیک انتخابی (SHE-PWM)
- ✓ PWM با کاهش هارمونیک انتخابی (SHM-PWM)
- ✓ PWM با مدولاسیون بردار فضایی (SV-PWM)
- ✓ و سایر روشهای PWM خاص

❖ اینورترها از جنبه های دیگر هم دارای انواع متفاوتی هستند. مثلا 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.

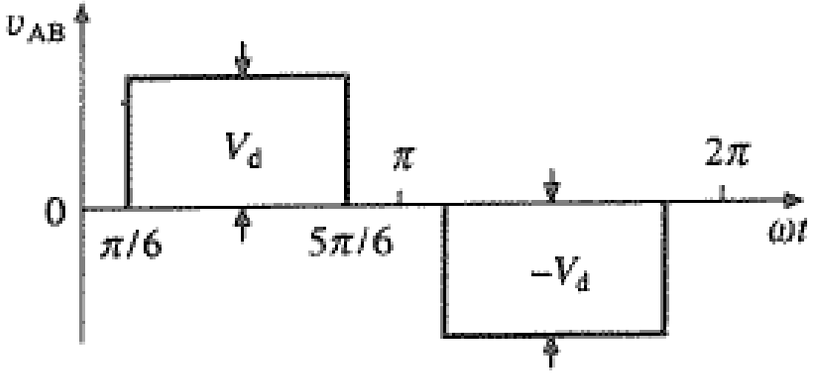
❑ اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

➢ مقایسه دو اینورتر منبع ولتاژ پله ای و PWM

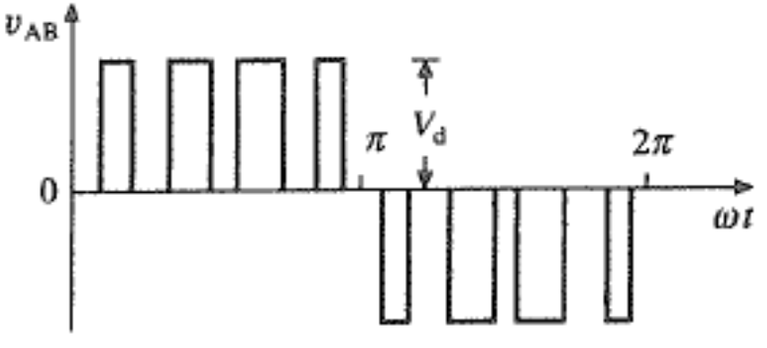
- ✓ اغلب موتورهای القایی سه فاز از اینورتر شش سوئیچه سه ساق همانند شکل (الف) استفاده می کنند.
- ✓ سوئیچ های مورد استفاده باید حتما از نوع کموتاسیون خودی باشد که قطع و وصل آن کاملا در اختیار سیستم کنترل باشد.
- ✓ برای کاربردهای توان پائین تا توان متوسط اغلب از سوئیچهای ترانزیستور قدرت، ماسفت قدرت و IGBT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



(الف) اینورتر سه ساق ٦ سوئیچه مورد استفاده در درایو موتور القایی سه فاز

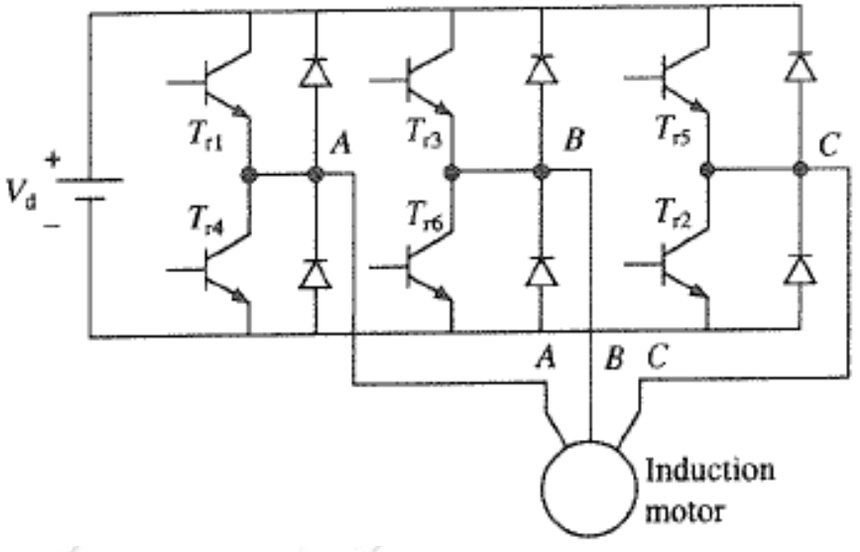


(ب) ولتاژ خط خروجی اینورتر پله ای



(ج) ولتاژ خط خروجی اینورتر PWM

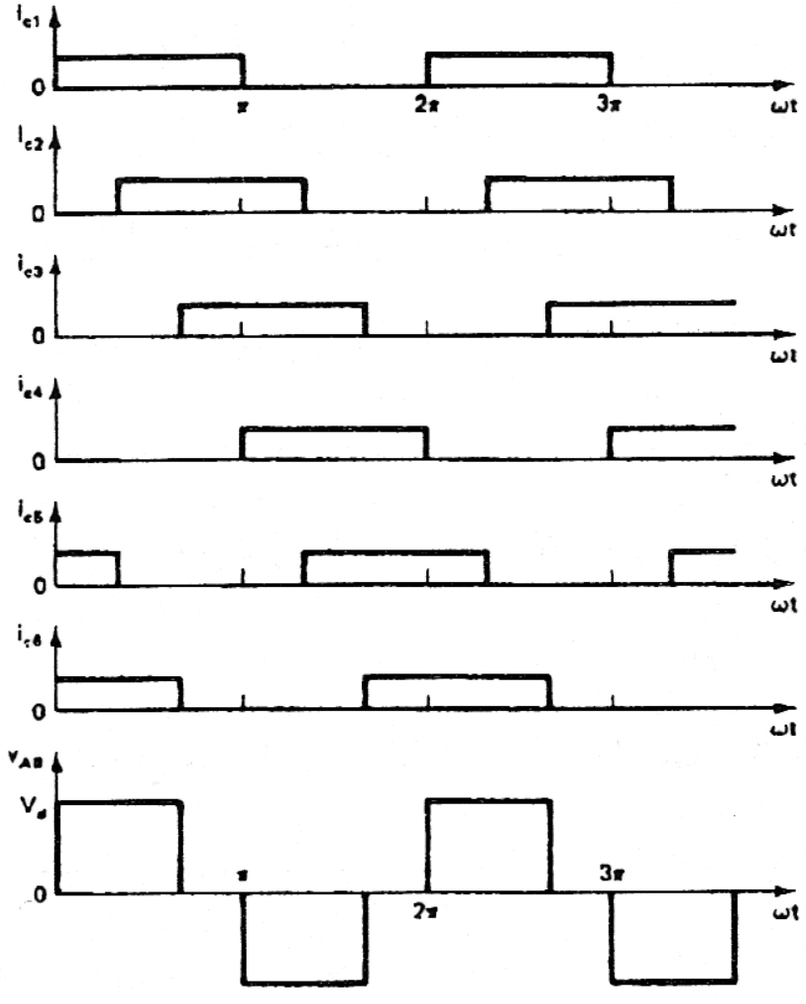
✓ این نوع اینورتر ساده ترین نوع اینورتر فرکانسی بوده که به خاطر شکل پله ایی ولتاژ فاز آن، شش پالسی نیز نامیده می شود.



(الف) اینورتر سه ساق ٦ سوئیچه مورد استفاده در درایو موتور القایی سه فاز

✓ ترتیب سوئیچ زنی:

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



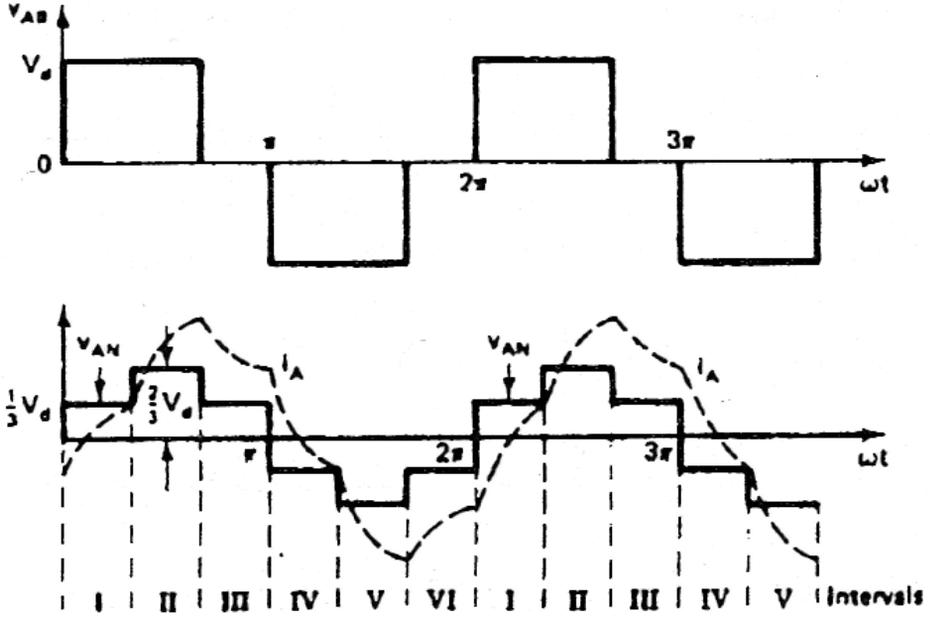
(ب) فرمان به سوئیچ ها در اینورتر پله ای

❑ اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

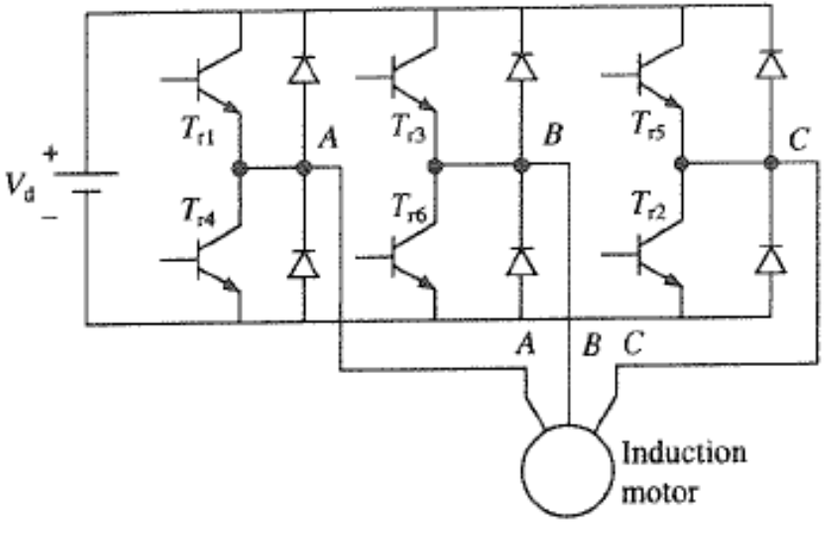
➢ اینورتر VSI پله ای: شکل موج های ولتاژ خط و فاز

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

جدول کلیدزنی سوئیچها در اینور پله ای



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



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

➢ اینورتر VSI پله ای: تحلیل فوریه شکل موج های ولتاژ

✓ بسط فوریه ولتاژ خط:

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

✓ بسط فوریه ولتاژ فاز:

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

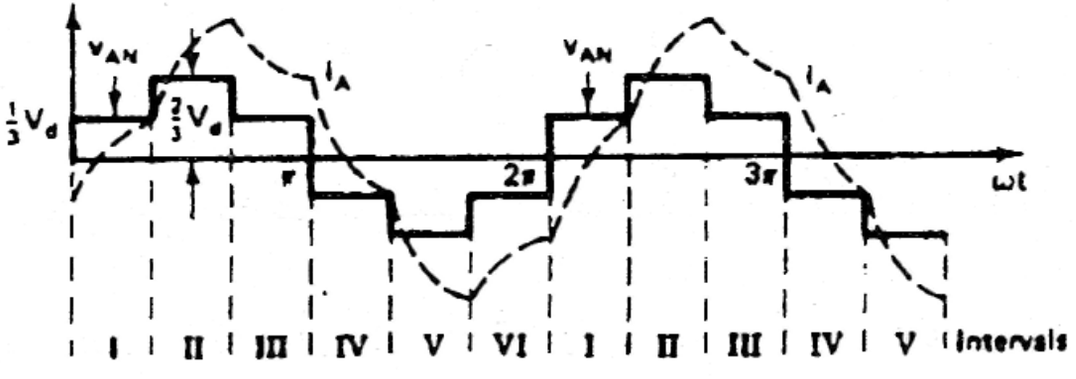
✓ مقدار موثر هارمونیک اول ولتاژ فاز:

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

✓ مقدار موثر ولتاژ فاز:

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

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

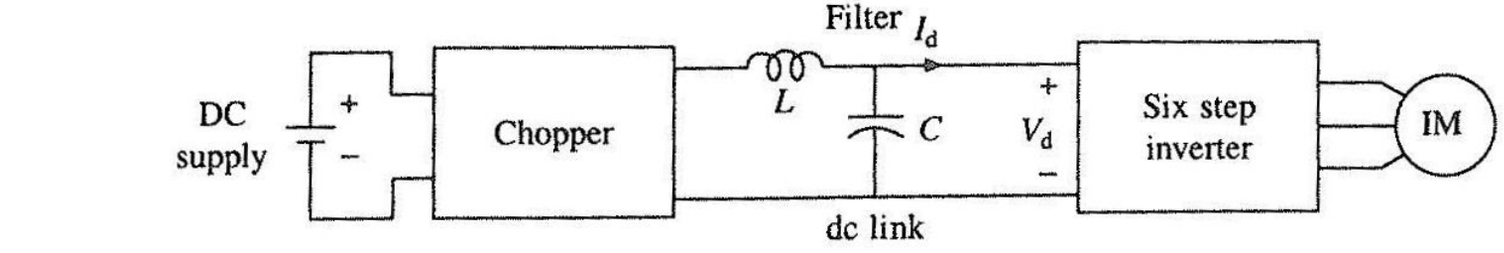


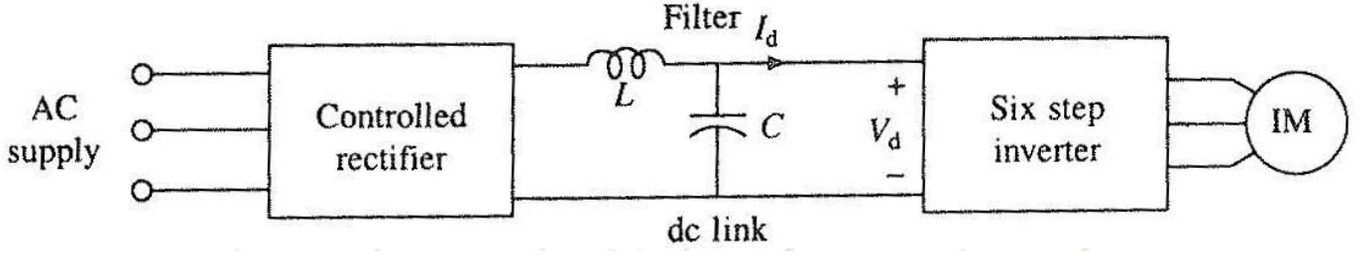
شکل موج های ولتاژهای خط و فاز در اینورتر پله ای

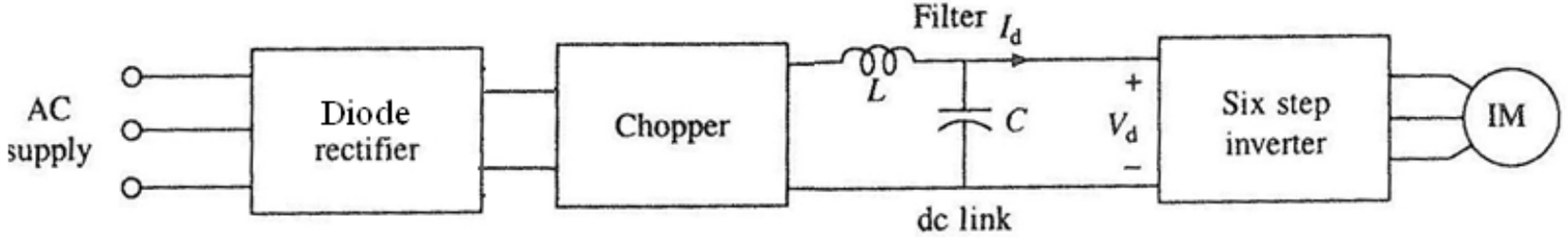
➢ اینورتر VSI پله ای: تغییر مقدار موثر ولتاژ

❖ 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.

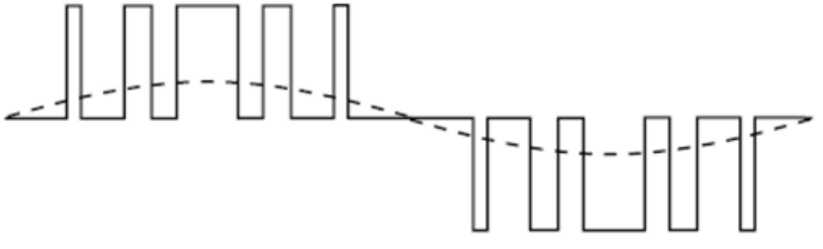
❑ اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

➢ اینورتر VSI نوع PWM

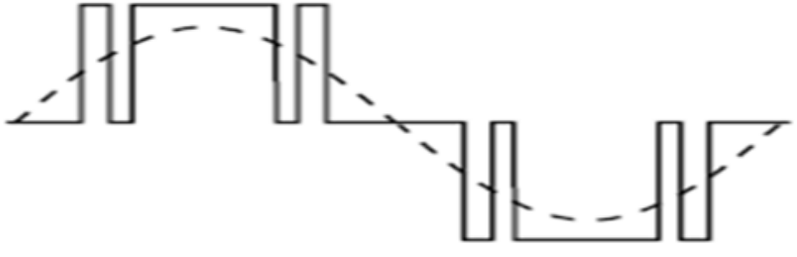
- ✓ با استفاده از تکنیک مدولاسیون پهنای باند یا PWM می توان مشکلات اینورتر پله ایی را برطرف نمود.
- ✓ به اینورترهایی که با تکنینک PWM کار می کنند، اینورتر PWM گفته می شود.
- ✓ در این اینورترها مقدار موثر ولتاژ را نیز می توان با کنترل پهنای پالس تنظیم نمود و دیگر نیازی به مدار مجزای افزاینده ولتاژ همانند اینورتر پله ایی نیست.
- ✓ با استفاده از اینورتر PWM محتوای هارمونیکی 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:

$$V = m\frac{V_d}{\sqrt{2}} \qquad (6.80)$$

- ✓ لذا حتی با ثابت بودن ولتاژ لینک dc، تنها با تغییر اندیس مدولاسیون m می توان ولتاژ موثر هارمونیک اصلی را تغییر داد.

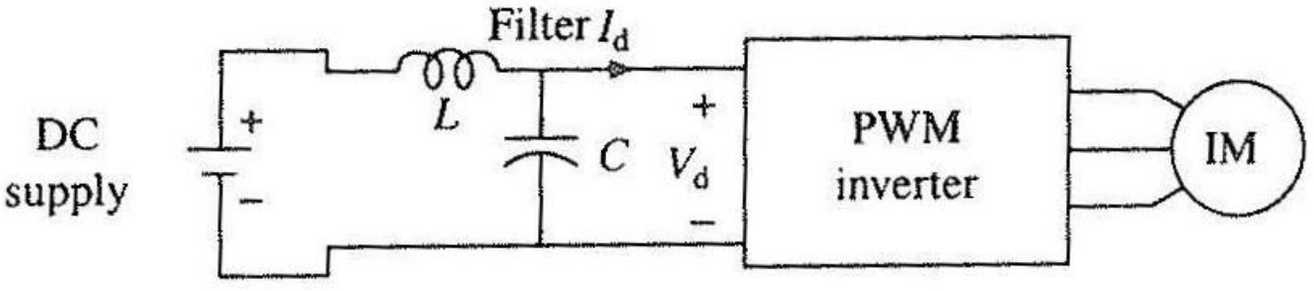


(الف) شکل موج ولتاژ PWM با مقدار موثر کم (عرض پالس باریک)

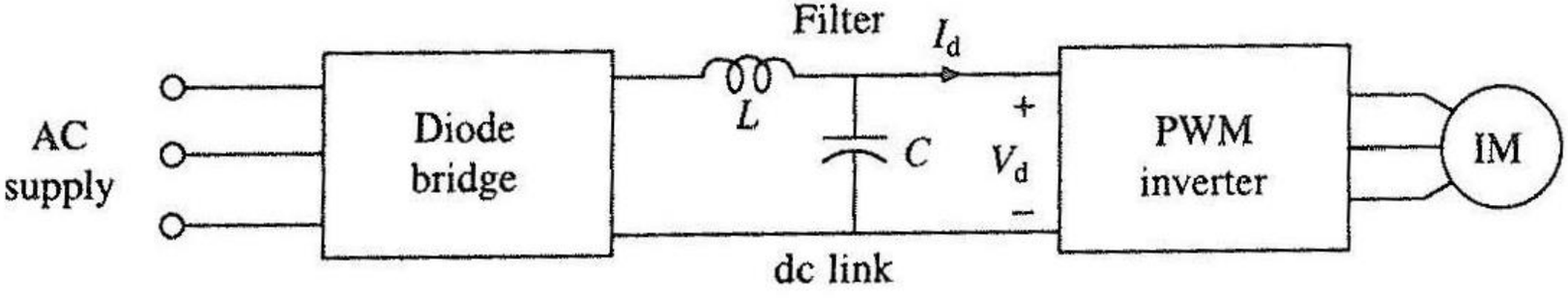


(ب) شکل موج ولتاژ PWM با مقدار موثر زیاد (عرض پالس پهن)

➢ اینورتر VSI نوع PWM: آرایش های مختلف



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

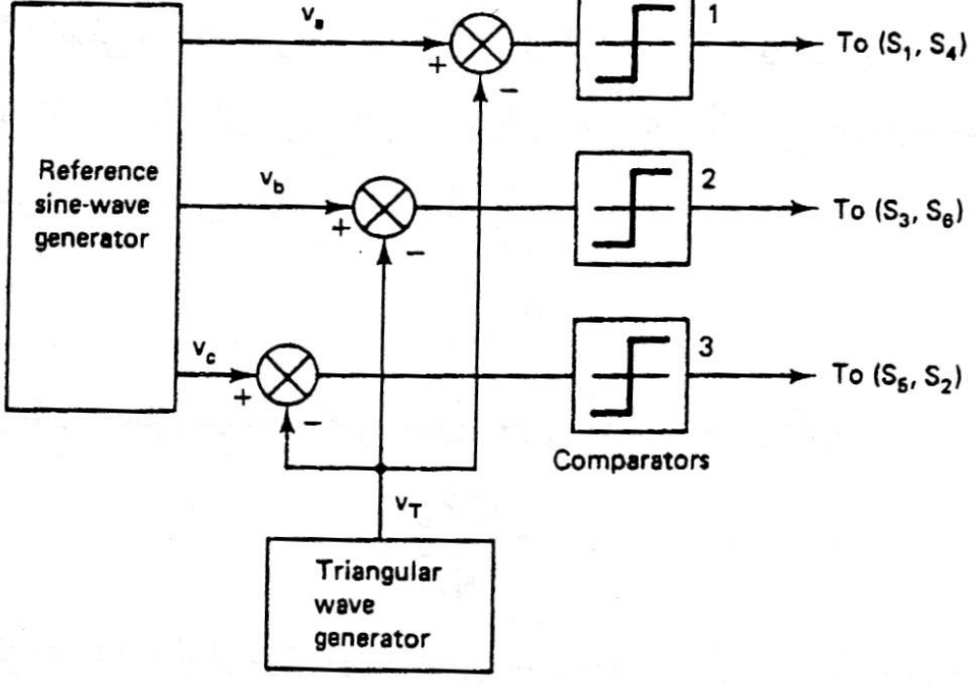


(ب) تغذیه اینورتر PWM وقتی منبع ولتاژ ac در دسترس باشد.

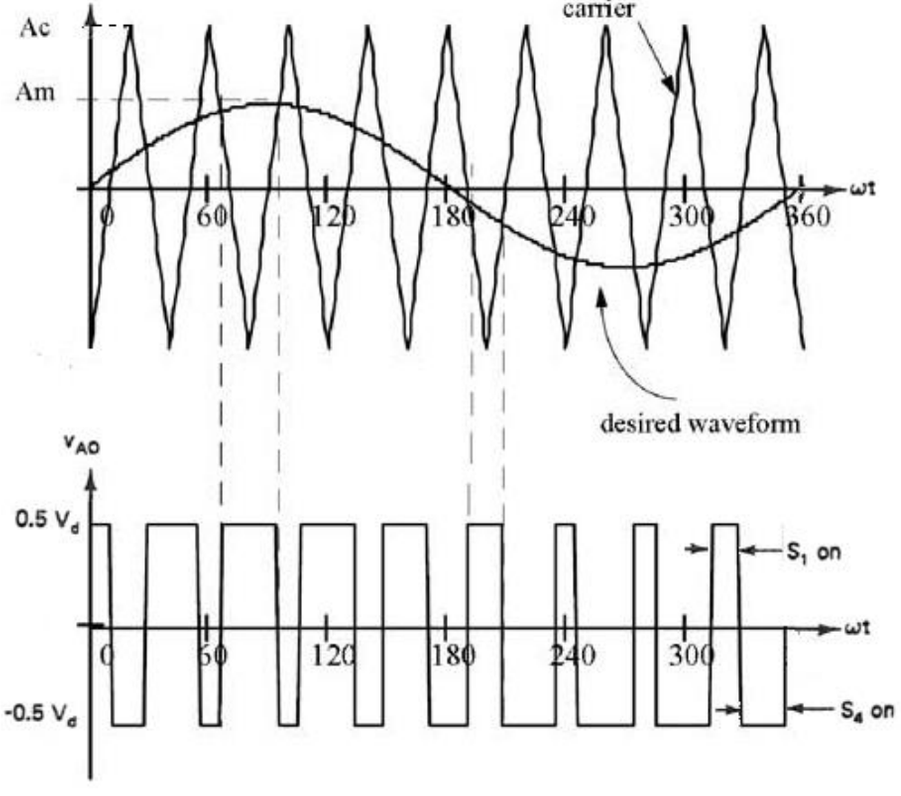
❑ اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

➢ اینورتر VSI نوع PWM سینوسی (SPWM)

- ✓ سه ولتاژ مرجع V_a، V_b و 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 (بالاتر از 1kHz) و لذا از سوئیچهای سریع نظیر ماسفت و IGBT بجای تریستور 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}:

$$V_1 = \frac{mV_d}{2\sqrt{2}}$$

❖ شاخص مدولاسیون m:

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

A_c = دامنه موج مثلثی

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 ایی خواهد بود.

❖ مولفه های هارمونیکی شکل موج PWM:

$$f_h = Kf_c \pm kf$$

f_h = فرکانس مولفه های جانبی

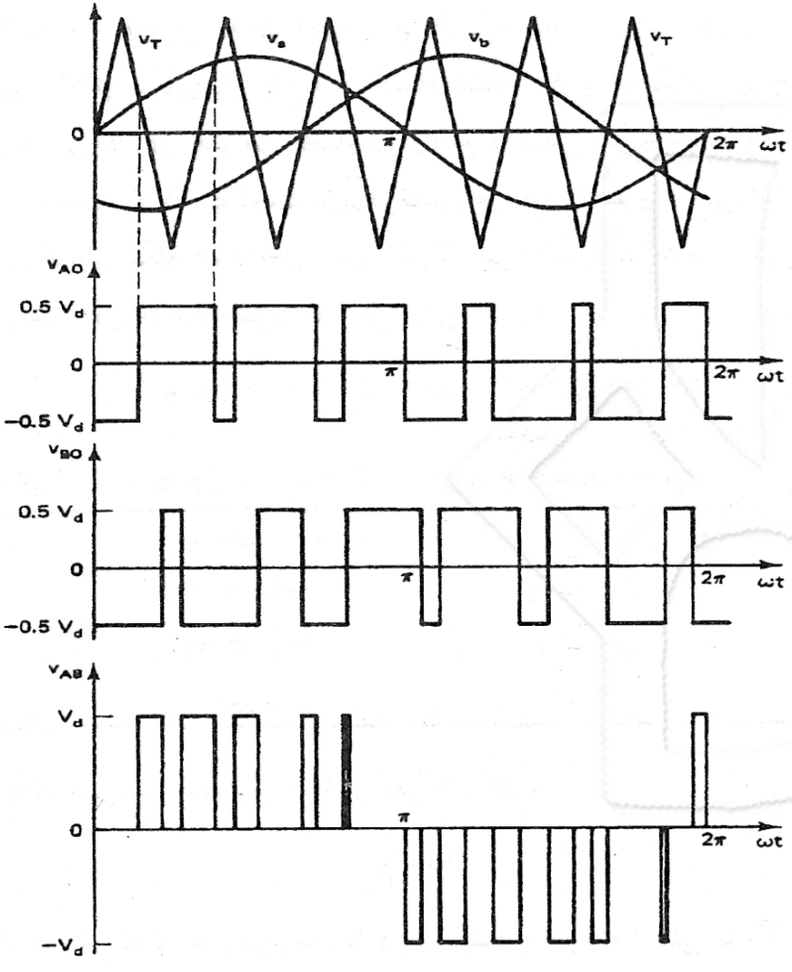
f = فرکانس موج مرجع

f_c = فرکانس موج حامل مثلثی

K =1, k=2,4,6,…

K=2, k=1,3,5,…

K=3, k=2,4,6,…

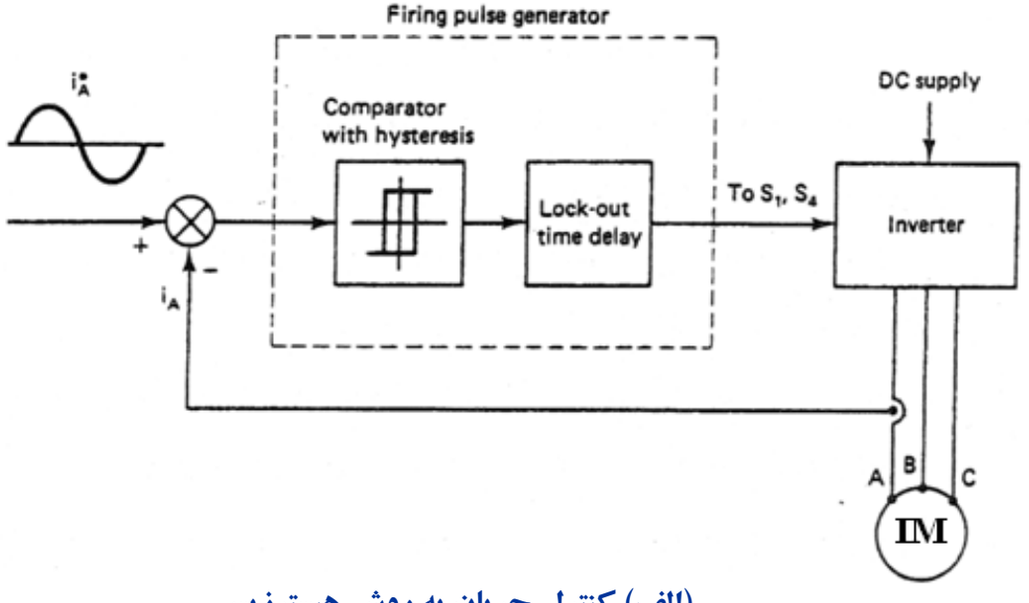


شکل موج PWM ایجاد شده برای ولتاژ خط V_{AB}

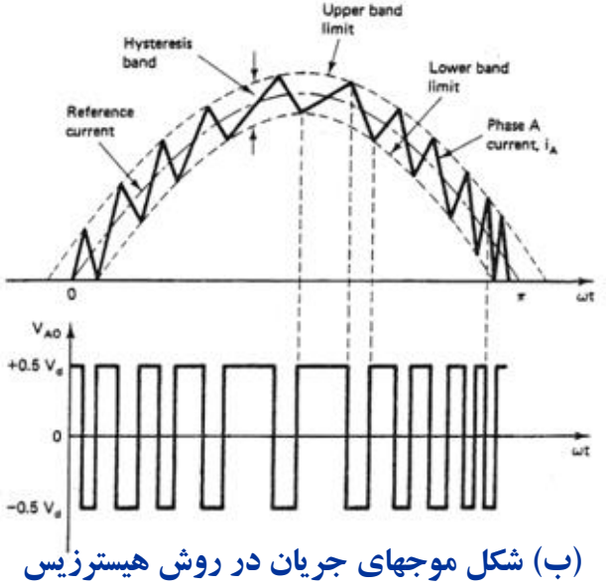
❑ اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

➢ اینورتر VSI نوع PWM کنترل شده با جریان

- ✓ 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 پرکاربرد از نوع منبع ولتاژ PWM کنترل شده با جریان ارائه می شود.
- ✓ این روش به روش کنترل جریان هیسترزیس نیز معروف بوده و در صنعت کاربرد زیادی دارد.
- ✓ در این روش، چون عملا جریان فازها کنترل می شود، عملکرد محرکه مانند هنگامی است که از اینورتر CSI استفاده می شود.



(الف) کنترل جریان به روش هیسترزیس



(ب) شکل موجهای جریان در روش هیسترزیس

❑ اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

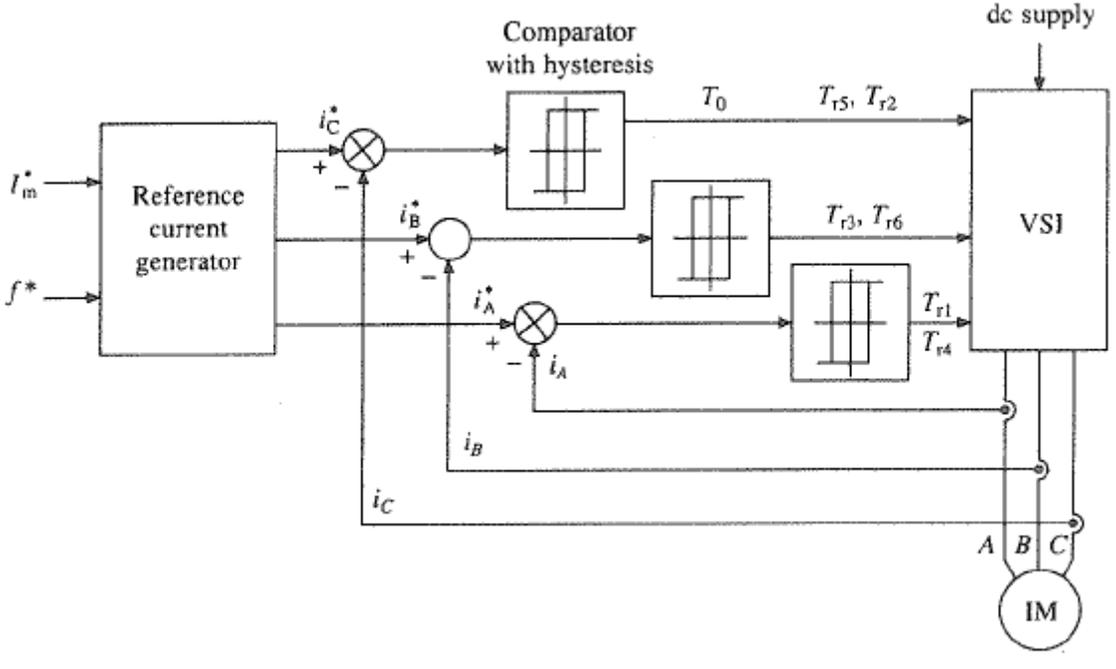
➢ اینورتر VSI نوع PWM کنترل شده با جریان

❖ ویژگی های این اینورتر:

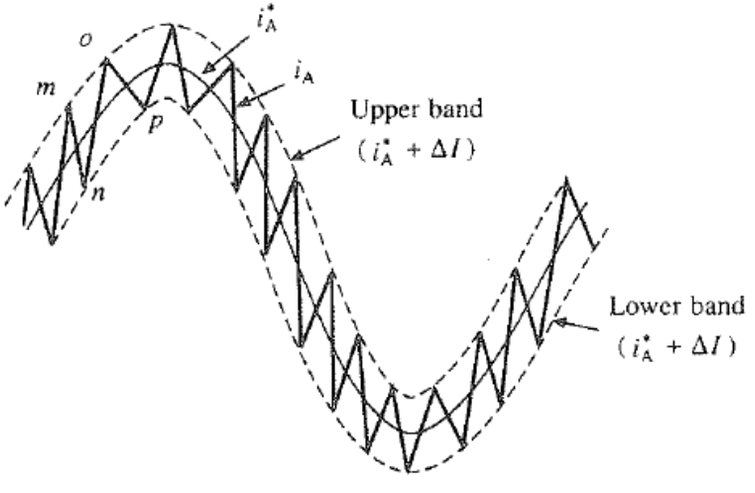
- مزیت: ساده بودن آن
- عیب: متغیر بودن فرکانس سوئیچینگ، بالا بودن تعداد سوئیچنگ، نوسانات فرکانس بالای جریان

✓ روشهایی برای تثبیت فرکانس سوئیچینگ در این روش ارائه گردیده است.

✓ پهنای باند هیسترزیس کوچکتر، شکل موج سینوسی تری را نتیجه می دهد اما مقدار سوئیچینگ و لذا تلفات سوئیچینگ زیاد می شود.



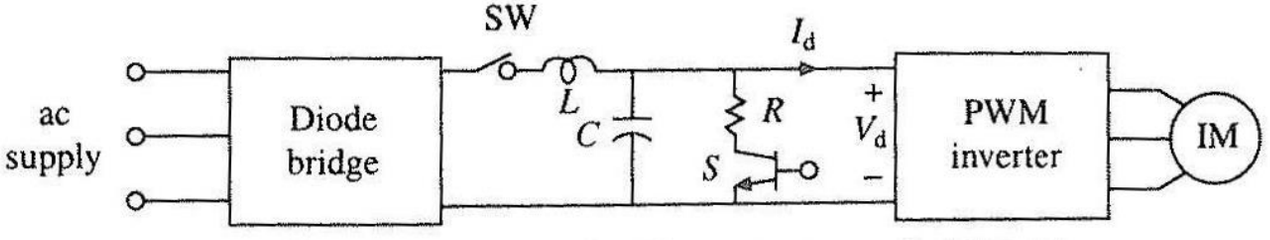
(الف) محرکه حلقه باز موتور القایی
با استفاده از اینورتر منبع ولتاژ PWM کنترل شده با جریان



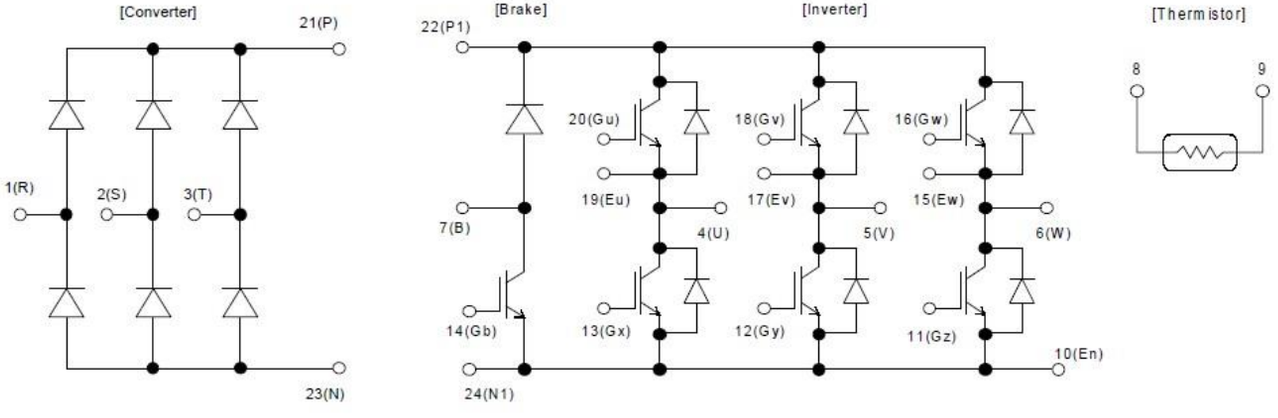
(ب) شکل موج جریان فاز موتور القایی در هنگام استفاده
از اینورتر VSI کنترل شده با جریان

➢ 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 نمائید 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

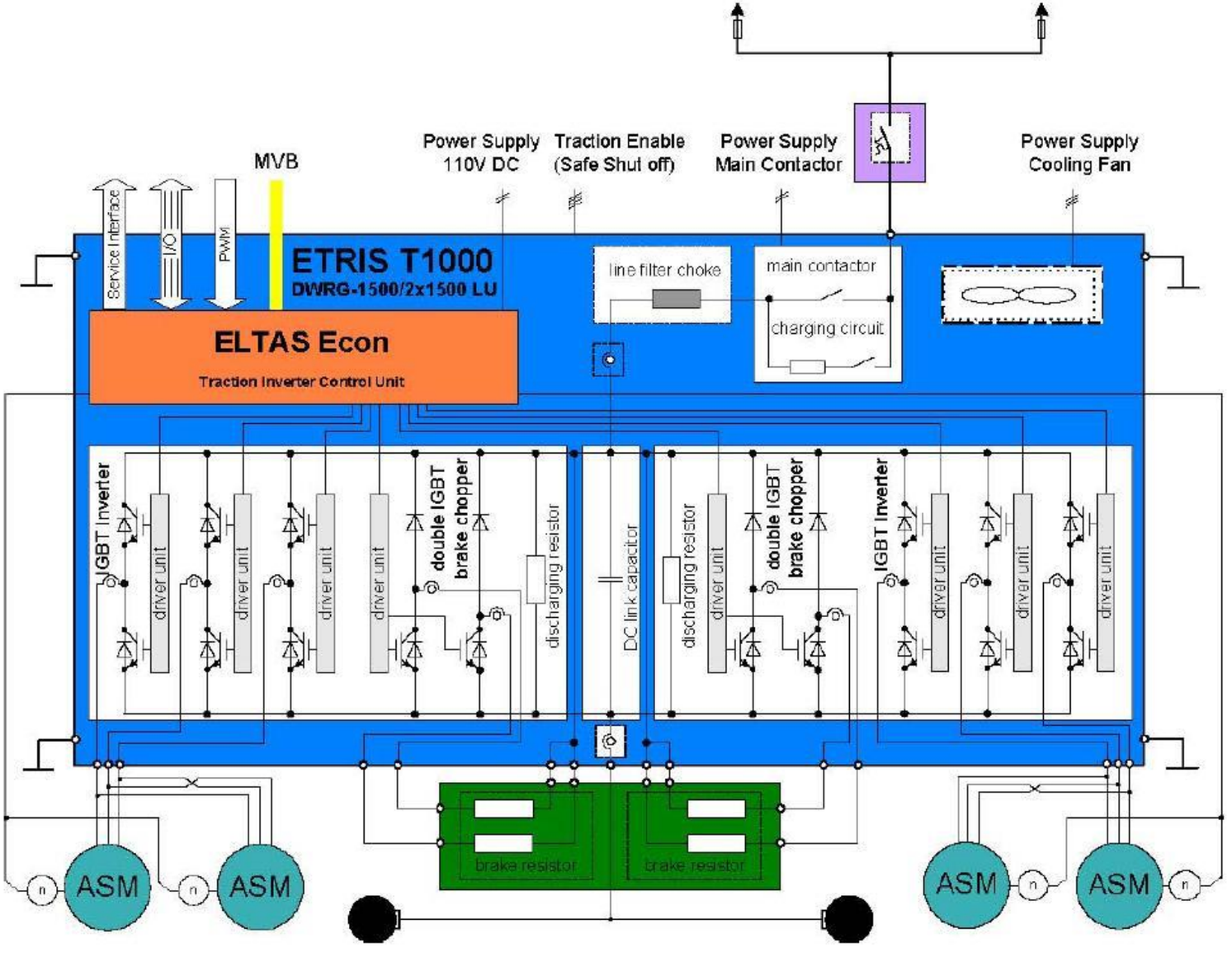
❑ اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

➢ ترمز دینامیکی در هنگام استفاده از اینورتر VSI نوع PWM

- ✓ برحسب 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 برمبنای 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.

❑ اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

➢ ترمز دینامیکی در هنگام استفاده از اینورتر VSI نوع PWM

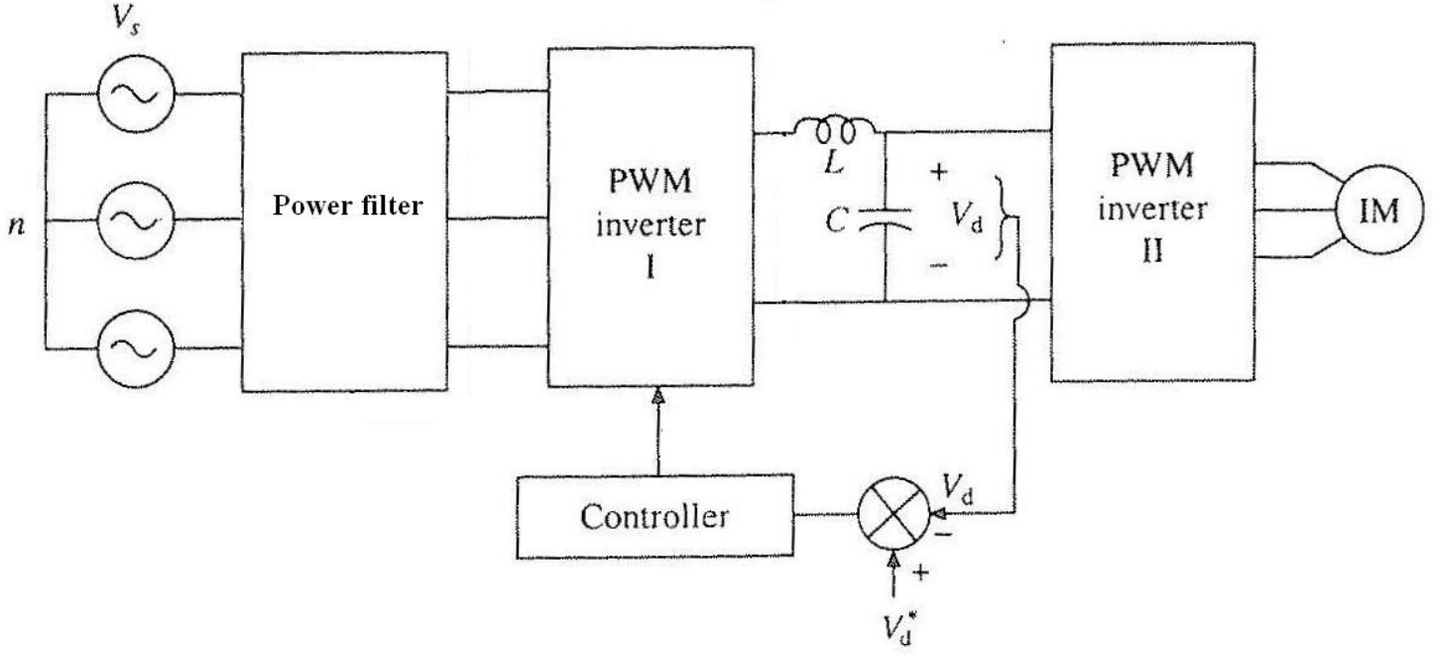


نمونه ای از سیستم محرکه موتور القایی مورد استفاده در لوکوموتیو مترو مجهز به ترمز دینامیکی

❑ اینورترهای فرکانسی مورد استفاده در درایو موتور القایی

➢ ترمز ژنراتوری در هنگام استفاده از اینورتر VSI نوع PWM

- ✓ 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 dc 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.



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

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

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

$$V_{BN} = V_1 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \qquad (24)$$

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

✓ 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:

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

$$V_{BN} = V_5 \sin 5(\omega t - 2\pi/3) = V_5 \sin(5\omega t - 4\pi/3) \qquad (25)$$

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

✓ 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:

$$V_{AN}=V_{۷}\ sin\ ۷\omega t$$

$$V_{BN}=V_{۷}\ sin\ ۷(\omega t-۲\pi/۳)=V_{۷}\ sin\ (۷\omega t-۲\pi/۳) \qquad (۲۶)$$

$$V_{CN}=V_{۷}\ sin\ ۷(\omega t-۴\pi/۳)=V_{۷}\ sin\ (۷\omega t-۴\pi/۳)$$

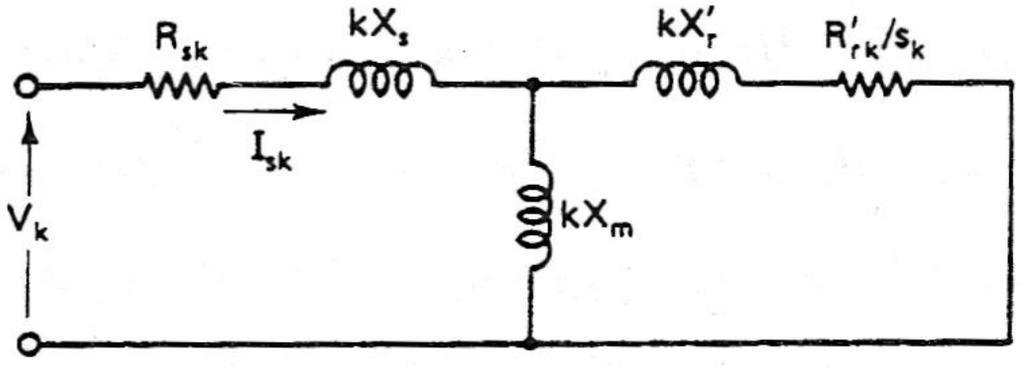
✓ لذا هارمونیکهای از مرتبه $k=6n+1$ مثل ۷، ۱۳، ۱۹ و ...، دارای توالی مثبت بوده و هارمونیکهای از مرتبه $k=6n-1$ مثل ۵، ۱۱، ۱۷، ... دارای توالی منفی می باشند.

✓ 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 هارمونیکی موتور القایی استفاده می کنیم.

❖ **مدار معادل هارمونیکی 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.

✓ لغزش هارمونیک kام برابرست با:

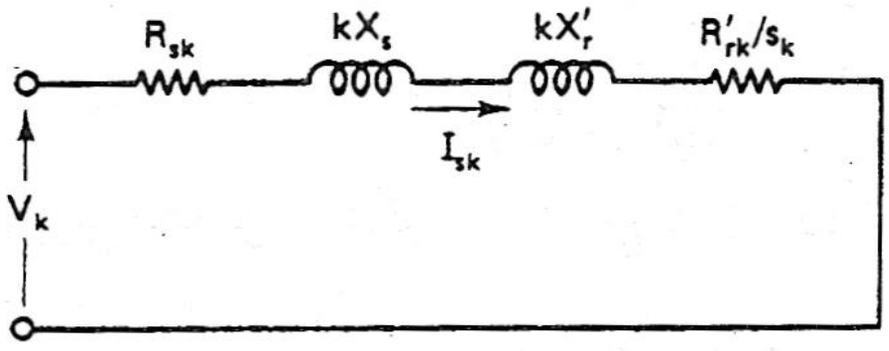
✓ علامت - مربوط به هارمونیکهای توالی مثبت

✓ علامت + مربوط به هارمونیکهای توالی منفی

$$S_k = \frac{k\omega_{ms} \pm \omega_m}{k\omega_{ms}} \qquad (۲۷)$$

$$S_k = 1 \pm \frac{1-s}{k} \qquad (۲۸)$$

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

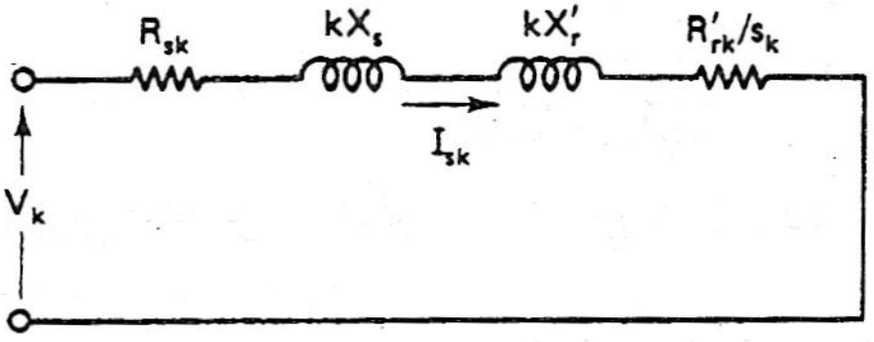


$$I_{sk}=\frac{V_k}{\sqrt{\left(R_{sk}+\frac{R'_{rk}}{s_k}\right)^2+k^2\left(X_s+X'_r\right)^2}} \qquad (۲۹)$$

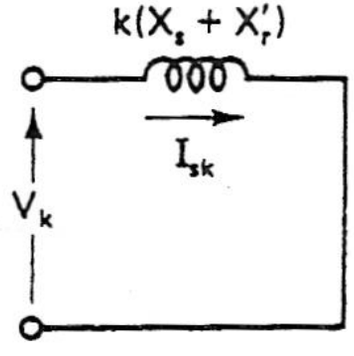
$$S_k=1\pm\frac{1-s}{k}$$

✓ 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 1.2 تا 1 و تغییرات S_7 از 0.857 تا 1 است. لذا S_k ها تقریبا به 1 نزدیکند و برای هارمونیکهای مرتبه بالاتر هم لغزشهای متناظر به 1 نزدیکتر می شوند.



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

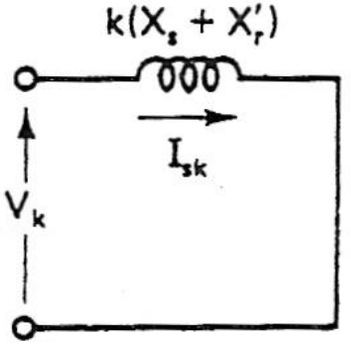


✓ لذا جریان را می توان از رابطه زیر بدست آورد:

$$I'_{sk} \cong \frac{V_k}{k(X_s + X'_r)} \qquad (۳۰)$$

❖ **معادلات گشتاور هارمونیکهای مختلف:**

$$I'_{sk} \cong \frac{V_k}{k(X_s + X'_r)} \qquad (۳۱)$$



$$T_k = \pm \frac{۳ I'^{۲}_{sk} R'_{rk}/s_k}{k\omega_{ms}} \qquad (۳۲)$$

$$T_۱ = \frac{۳ I'^{۲}_{r} R'_{r}/s}{\omega_{ms}} \qquad (۳۳)$$

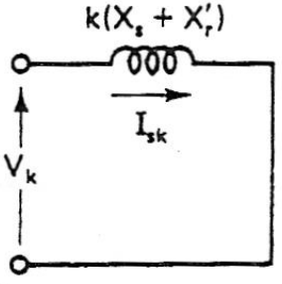
$$\frac{T_k}{T_۱} = \pm \left(\frac{I_{sk}}{I'_r}\right)^{۲} \left(\frac{R'_{rk}}{R'_r}\right) \left(\frac{s}{ks_k}\right) \qquad (۳٤)$$

✓ **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 ایجاد نویز صوتی می گردد.**

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

$$I'_{sk} \cong \frac{V_k}{k(X_s + X'_r)} \qquad (۳۱)$$



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

$$I_{rms}^2 = I_s^2 + \sum_{k=5,7,11,\ldots} I_k^2 \qquad (۳۵)$$

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

$$P_h = \sum_{k=5,7} I_{sk}^2 \left(R_{sk} + R'_{rk}\right) \qquad (۳۶)$$