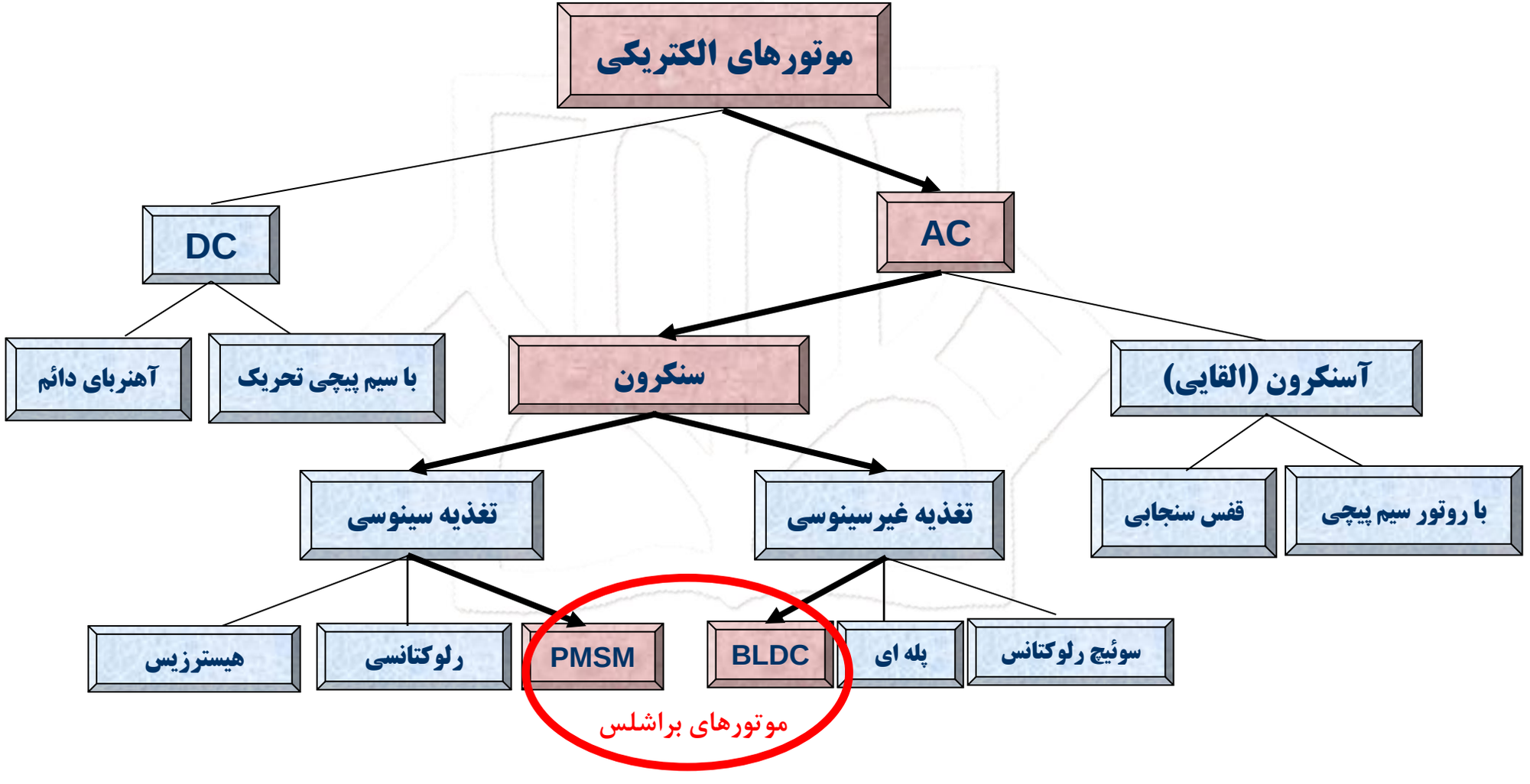
فصل چهارم:
درایو موتورهای سنکرون آهنربای دائم (PMSM)

- معرفی موتور PMSM
- کاربردهای موتورهای PMSM
- کنترل موتور PMSM به روش اسکالر V/f ثابت
- مدل حالت دائم موتور PMSM
- مدل دینامیکی موتور PMSM در دستگاه دوار dq
- کنترل برداری موتور PMSM

❑ معرفی موتور PMSM

➢ جایگاه موتور PMSM در بین موتورهای الکتریکی

✓ موتور مورد مطالعه در این فصل موتورهای سنکرون آهنربای دائم یا PMSM است که یک نوع خاص از موتورهای براشلس است.



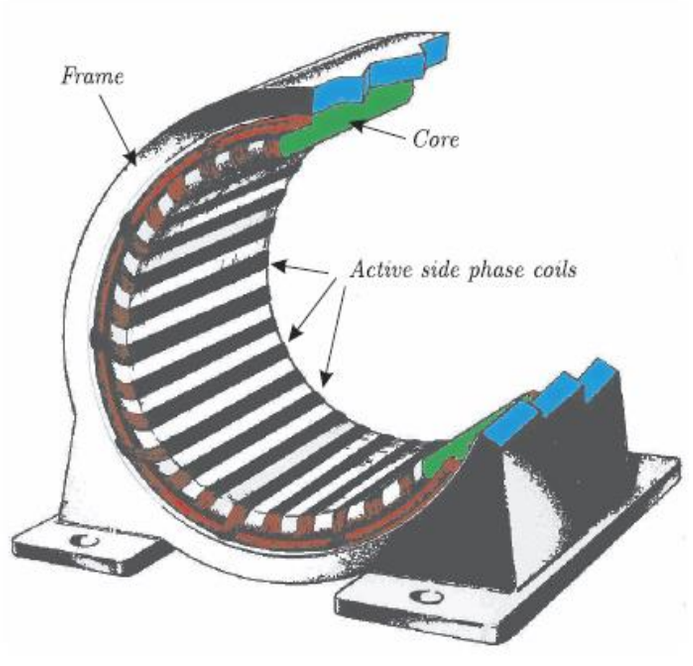
طبقه بندی مختصر شده انواع موتورهای الکتریکی

❑ معرفی موتور PMSM

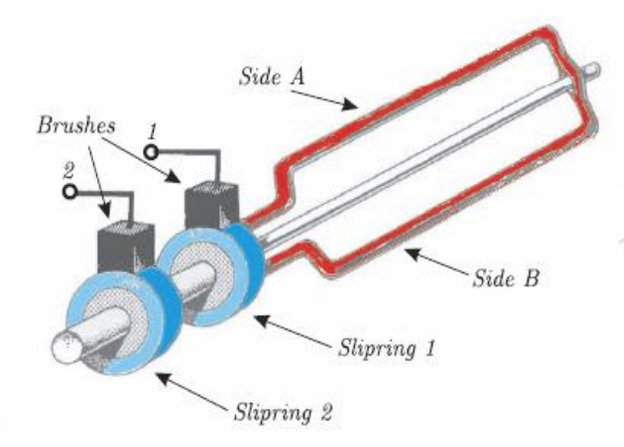
➢ ساختمان موتور سنکرون (معمولی) با سیم پیچی تحریک

❖ موتور سنکرون معمولی از دو قسمت تشکیل شده است:

- استاتور (آرمیچر)
  - ۱- هسته مغناطیسی
  - ۲- سیم پیچی (اکثرا سه‌فاز)
- روتور (تحریک)
  - ۱- هسته
  - ۲- سیم پیچی تغذیه شده توسط جریان DC



(الف) استاتور موتور سنکرون سه فاز

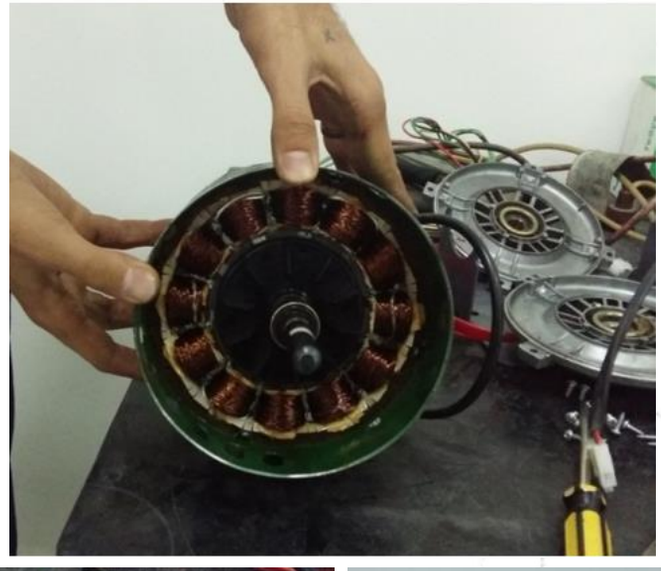


(ب) نمونه روتور موتور سنکرون سه فاز با سیم پیچی تحریک

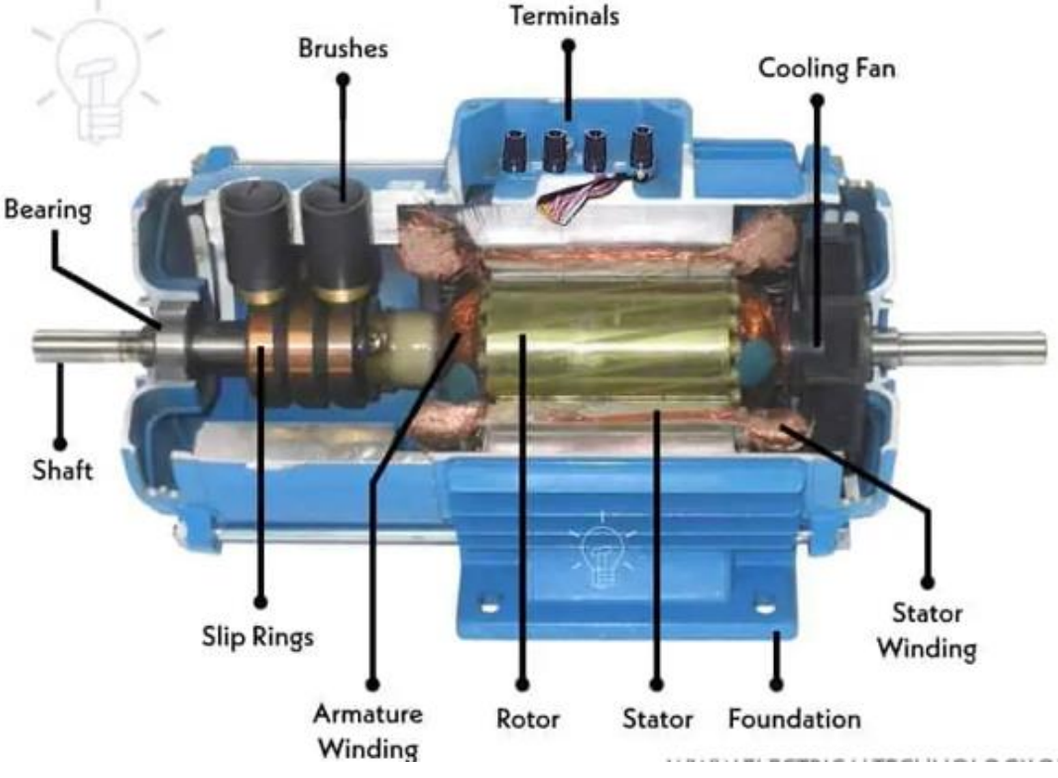
❑ معرفی موتور PMSM

➢ مقایسه موتور سنکرون معمولی با موتور PMSM

- ✓ با توجه به مشکلات جاروبک و حلقه لغزان و تامین برق dc برای سیم پیچی تحریک، اگر بجای سیم پیچ تحریک از آهنربای دائم استفاده شود، ساختار موتور بسیار ساده تر و مشکلات فوق مرتفع می گردد.
- ✓ به این موتورهایی که از آهنربا در روتورآنها استفاده می شود، موتور آهنربای دائم براشلس یا بدون جاروبک هم گفته می شود.



(ب) ساختار یک موتور آهنربای دائم بدون جاروبک سه فاز

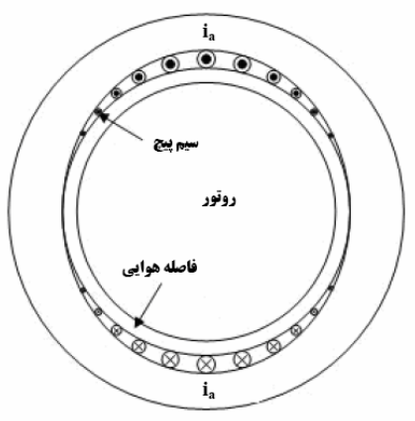


(الف) ساختار یک موتور سنکرون معمولی سه فاز

❑ معرفی موتور PMSM

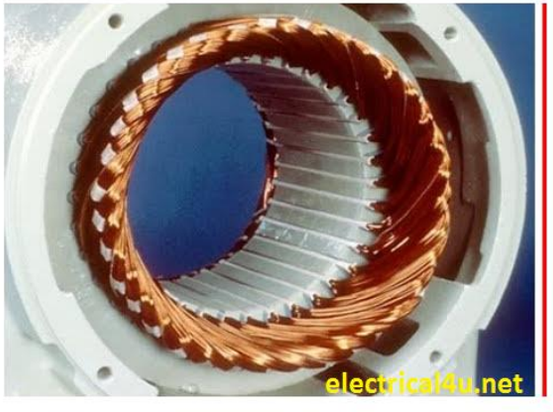
➢ مقایسه موتور براشلس PMSM با موتور براشلس BLDC

- ✓ دو نوع اصلی موتورهای براشلس عبارتند از موتور PMSM (یا BLAC) و موتور BLDC
- ✓ تفاوت این دو نوع موتور در نوع سیم پیچی استاتور آنهاست.

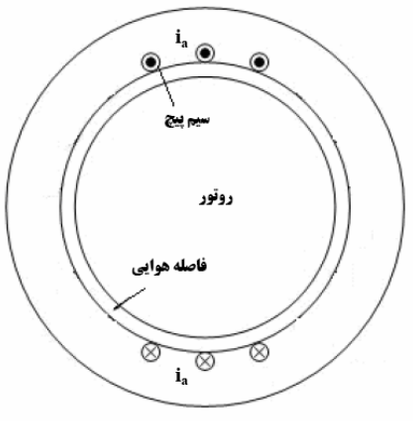


الف- نوع BLAC (شار سینوسی) با آرایش سیم‌پیچی توزیع شده

Distributed Winding



(ج)استاتور یک موتور PMSM واقعی
(دارای سیم پیچی استاتور توزیع شده)



ب- نوع BLDC (شار ذوزنقه‌ای) با آرایش سیم‌پیچی متمرکز

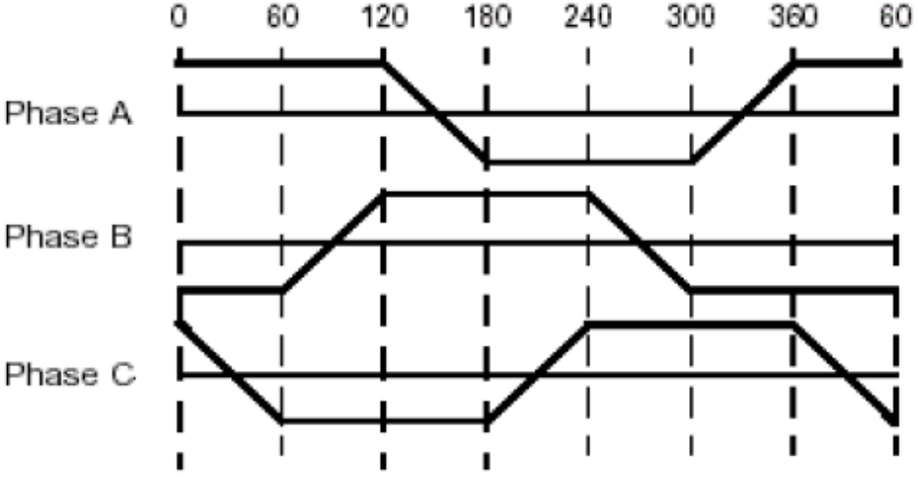
Concentrated winding

(د) استاتور یک موتور BLDC واقعی
(دارای سیم پیچی استاتور متمرکز)

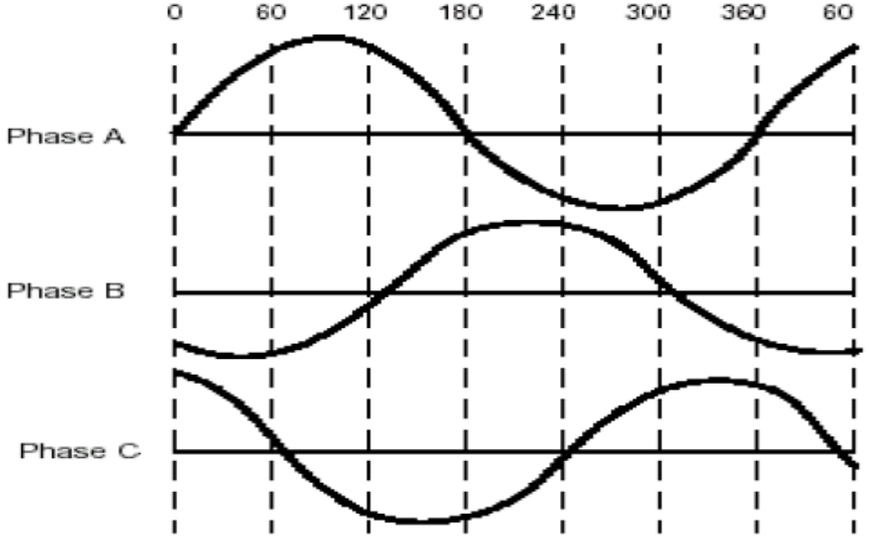
❑ معرفی موتور PMSM

➢ مقایسه موتور براشلس PMSM با موتور براشلس BLDC

- ✓ سیم پیچی استاتور موتور BLDC متمرکز است اما در موتور PMSM توزیع شده است.
- ✓ به همین دلیل شکل موج ولتاژ ضدمحرکه موتور BLDC ذوزنقه ای است و در PMSM سینوسی.



(ب) شکل موج ولتاژ در یک موتور BLDC
(به شکل ذوزنقه ای)



(الف) شکل موج ولتاژ در یک موتور PMSM
(به شکل سینوسی)

❑ معرفی موتور PMSM

➢ ویژگی های موتورهای PMSM

✓ برای تعیین موقعیت موتور PMSM از **اینکودر** که به محور موتور کوپل می شود، استفاده می شود.

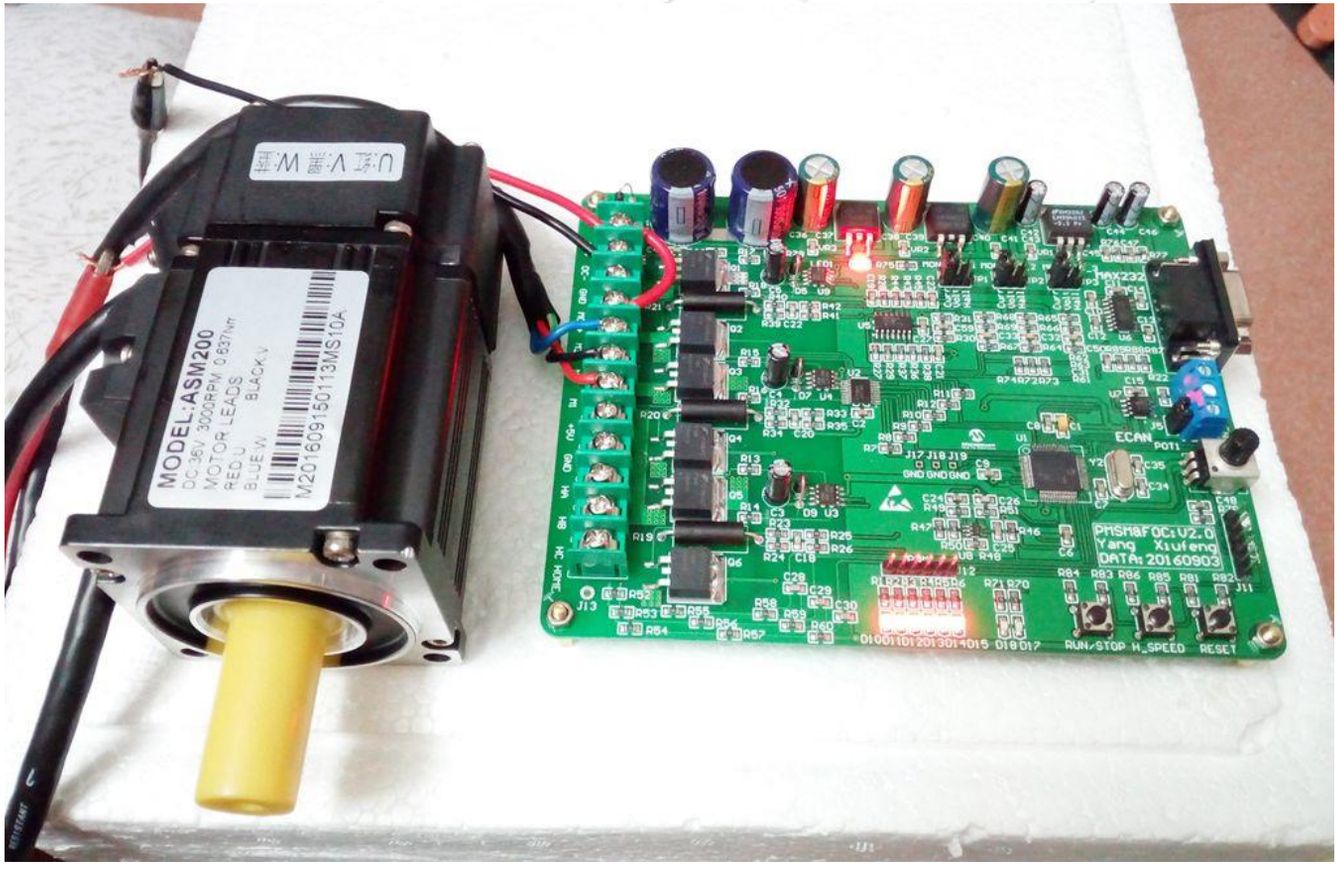
(الف) موتور PMSM با اینکودر کوپل شده به آن

(ب) موتور PMSM با اینکودر متصل به آن
(فابریک کارخانه ای)

❑ معرفی موتور PMSM

➢ درایو موتور PMSM

✓ **درایو موتور PMSM با توجه به نیاز به محاسبات بیشتر نیازمند پردازنده قوی تر، تعداد سنسورهای جریان بیشتر و البته مدار جانبی مفصل تر است.**



درایو کنترل برداری موتور PMSM

❖ **مزایای PMSM:**

- ✓ بالاترین راندمان
- ✓ بالاترین دانسیته گشتاور و توان
- ✓ کنترل پذیری آسان
- ✓ قابلیت اطمینان بالا
- ✓ حجم و وزن کم
- ✓ قابلیت تنظیم سرعت بواسطه داشتن درایو

❖ **کاربردها:**

- ✓ رباتیک و ماشینهای CNC
- ✓ حمل و نقل الکتریکی
- ✓ خودروهای برقی و هیبریدی
- ✓ صنایع هوافضا
- ✓ صنعت حمل و نقل دریایی و زیردریایی ها
- ✓ کاربردها و صنایع حساس
- ✓ سیستم های سروی صنعتی
- ✓ صنایع خانگی
- ✓ ...

❖ **ملاحظات بکارگیری با موتورهای PMSM:**

- ✓ تامین آهنربای ارزان
- ✓ مشکل طول عمر آهنربا
- ✓ نیاز دائمی به درایو

❑ معرفی موتور PMSM

➢ سایر کاربردهای موردی موتورهای PMSM

- ❑ فن کامپیوتر
- ❑ آسانسورهای گیرلس
- ❑ درب آسانسور
- ❑ پنکه های سقفی
- ❑ انواع سیستمهای HVAC خانگی و تجاری
- ❑ پمپهای روغن و بنزین و آب
- ❑ دینام خودرو
- ❑ و ....

❑ معرفی موتور PMSM

➢ کاربردهای لوازم خانگی موتورهای PMSM

✓ استفاده از موتورهای با راندمان بسیار بالا نظیر موتورهای براشلس یا PMSM در کاربردهای mass production (یا تولید انبوه) مثل لوازم خانگی، تجاری و ..

❑ معرفی موتور PMSM

➢ کاربرد موتور PMSM در کولر آبی

- ✓ در کشور ایران حدود ۲۰ میلیون کولر آبی با موتورهای تکفاز وجود دارد که توان مصرفی متوسط برابر ۵۰۰ وات با راندمان ۴۰٪ دارند. (در سال ۹۱، حدود ۱۳ میلیون و در سال ۹۷ حدود ۱۶ میلیون کولر آبی وجود داشته اند).
- ✓ با محاسبه سرانگشتی، توان مصرفی آنها حدود ۱۰ گیگاوات می شود.

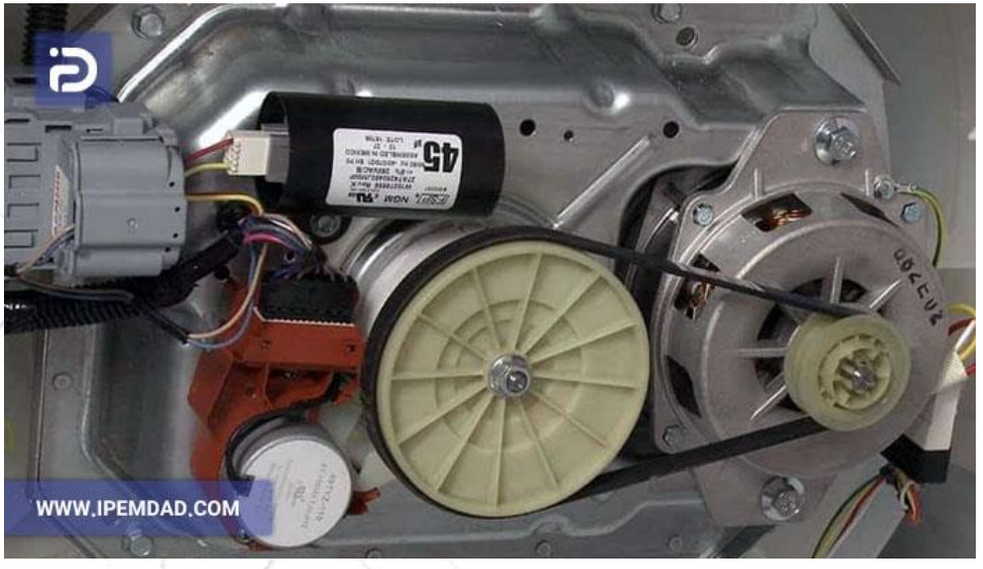
(الف) کولرهای آبی کم مصرف با موتورهای براشلس

(ب) کولرهای آبی معمولی با موتور تکفاز القایی

- ✓ با راندمان ۴۰ درصد حدود ۴ گیگاوات فقط در کولرهای آبی انرژی تلف می شود.

❑ معرفی موتور PMSM

➢ کاربرد موتور PMSM در ماشینهای لباسشویی و ظرفشویی

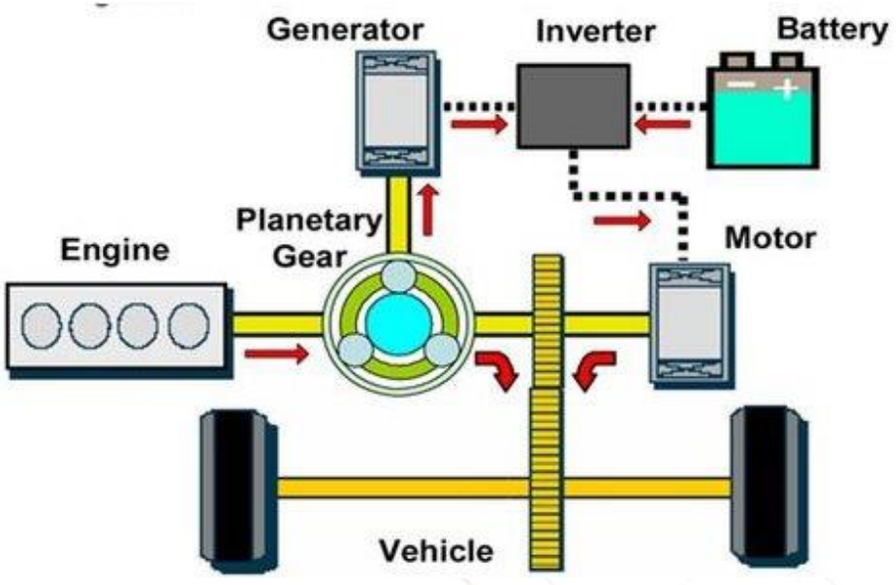


موتور براشلس ماشین لباسشویی با اتصال غیرمستقیم
(با تسمه) یا موتور براشلس روتور داخلی

موتور براشلس ماشین لباسشویی با اتصال Direct
(بدون تسمه) یا موتور براشلس روتور خارجی

❑ معرفی موتور PMSM

➢ کاربرد موتور PMSM در خودروهای برقی و هیبریدی



➢ **تویوتای پریوس ۲۰۱۸**

- نوع هیبریدی: سری - موازی
- حجم موتور احتراقی: ۱۸۰۰ سی سی
- توان موتور احتراقی: ۹۰ کیلووات
- مصرف بنزین: ۳,٦ لیتر در ۱۰۰ کیلومتر
- توان موتور الکتریکی: ۵۳ کیلووات
- ولتاژ باتری: ۲۰۱ وات
- تعداد باتری: ۲۸ عدد باتری ۱,۳ kWh

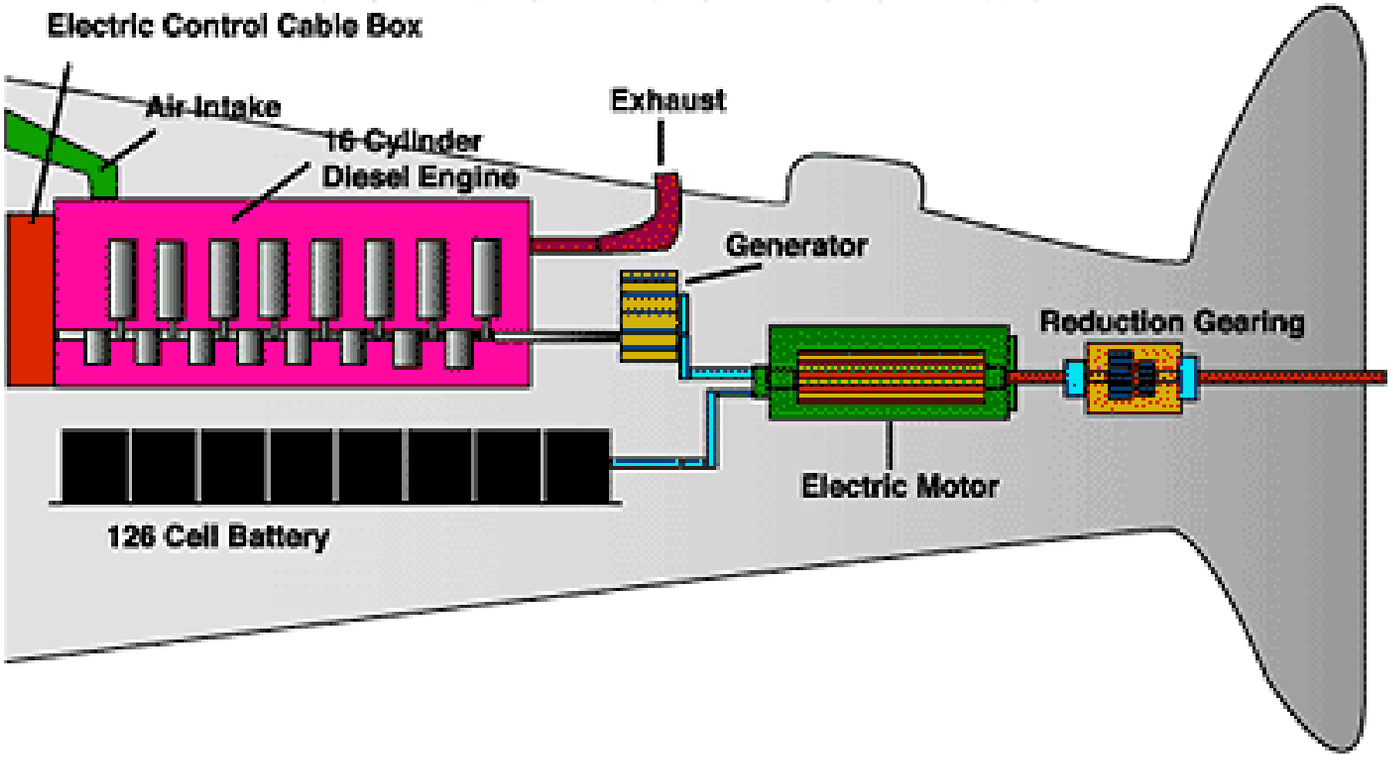
➢ کاربرد موتور PMSM در صنایع دریایی و زیردریایی ها

✓ **البته در کاربردهای خاص نظیر زیردریایی و کشتی، از موتورهای PMSM یا BLDC چند فاز (بیش از سه فاز مثل ٦ فاز و ١٢ فاز) با توانهای مگاواتی و حتی چند ده مگاواتی هم استفاده شده است.**

❑ معرفی موتور PMSM

➢ کاربرد موتور PMSM در صنایع دریایی و زیردریایی ها

- ✓ علت استفاده از موتورهای PMSM در زیردریایی بخاطر کم صدا و کم نویز بودن آنهاست که بهتر می توانند از دسترس رادارهای سونار مخفی بمانند.
- ✓ موتور PMSM از طریق باتری شارژ می شود و شارژ باتری هم از طریق یک ژنراتور الکتریکی متصل به یک موتور دیزلی انجام می گردد.
- ✓ البته برای شارژ باتری، باید موتور دیزلی کار کند و چون نیازمند اکسیژن و اتمسفر است، باید به سطح آب بیاید.



❑ معرفی موتور PMSM

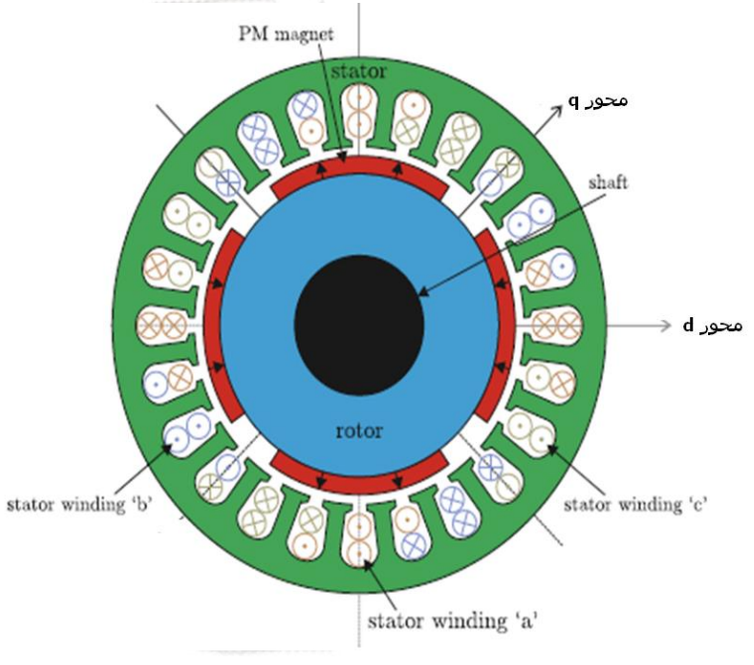
➢ کاربرد موتور PMSM در صنایع دریایی و زیردریایی ها

- ✓ شرکت زیمنس آلمان سازنده موتور ۱۲ فاز BLDC و PMSM مگاواتی با نام پرماسین در شناورهای زیرسطحی و زیردریایی ها
- ✓ توان موتور PMSM ۱۲ فاز پرماسین در زیردریایی کلاس ۲۱۲ حدود ۱.۲ مگاوات است.

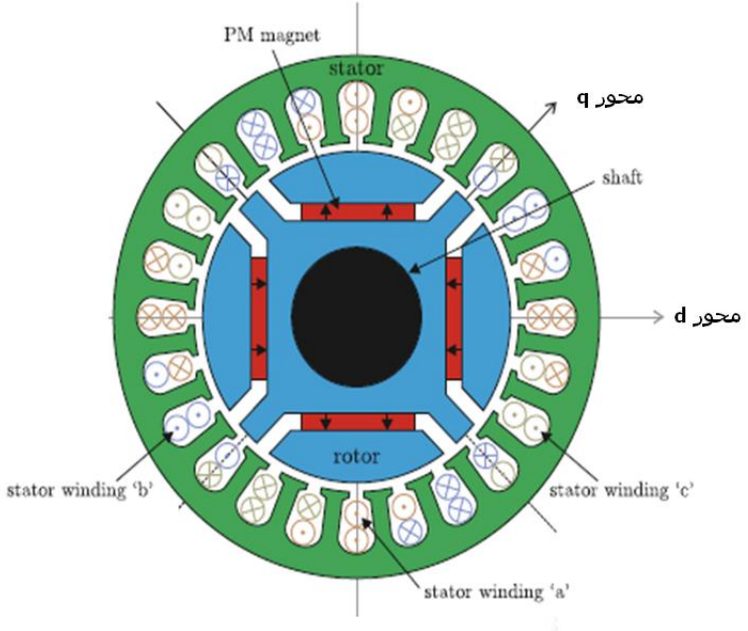
شکلهای واقعی از موتور PMSM با توان 1.2 MW ساخت شرکت زیمنس

❖ **انواع موتورهای سنکرون آهنربای دائم برحسب نوع قرارگیری آهنربای دائم در روتور:**

- ✓ نوع آهنربای سطحی (Surface Permanent Magnet) یا SPM
- ✓ نوع آهنربای داخلی (Interior Permanent Magnet) یا IPM



(الف) نوع آهنربای سطحی (بدون Saliency)



(ب) نوع آهنربای داخلی (با Saliency)

- ✓ موتورهای نوع IPM دارای اندوکتانسه یا راکتانسهای متفاوتی روی محورهای d و q روتور بوده و لذا مولفه گشتاور رلوکتانسی هم دارند.

$$X_{sd} < X_{sq}$$

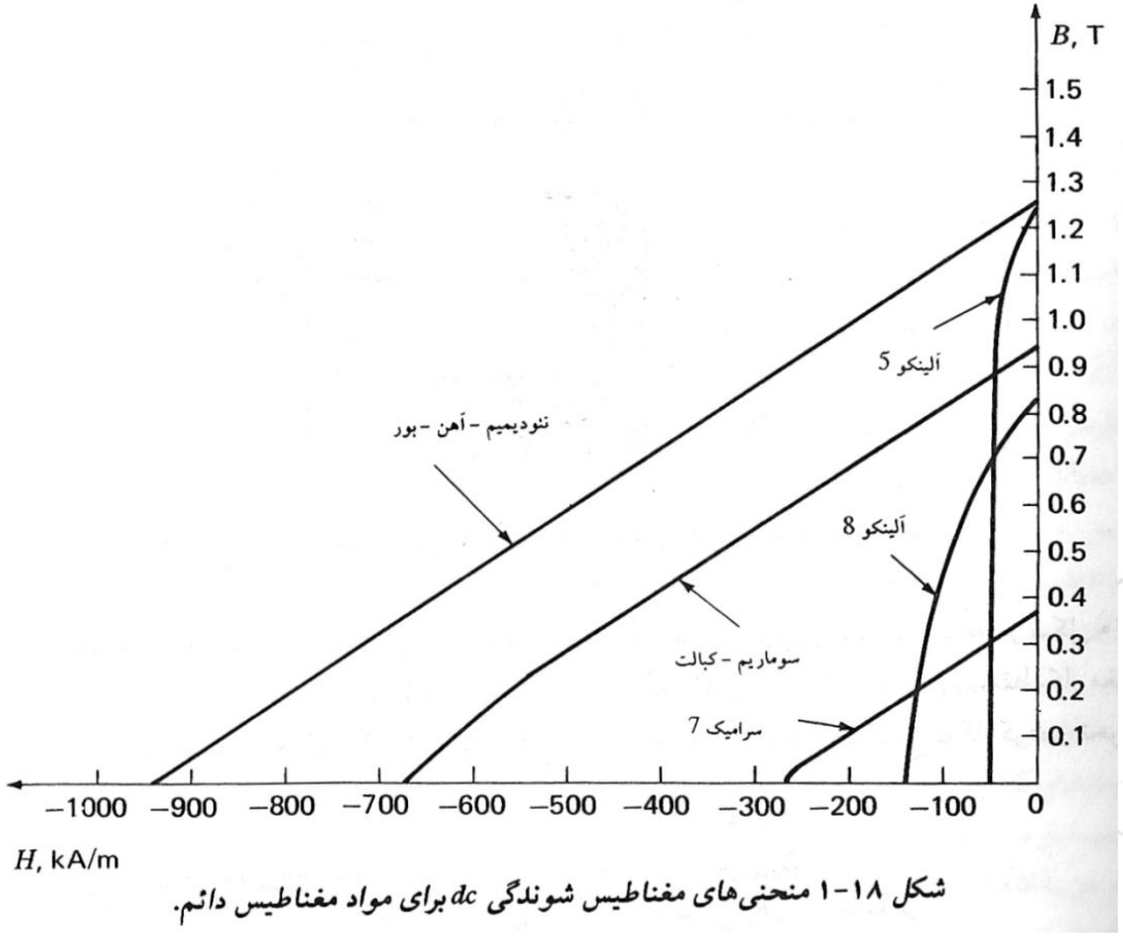
➢ انواع مواد آهنربای دائم مورد استفاده در موتورهای سنکرون

۱- خانواده آلنیکو (Alnico)

۲- فریت ها

۳- ساماریوم –کبالت (Sm-Co)

٤- نئودیم-آهن- بور (Nd-Fe-B)



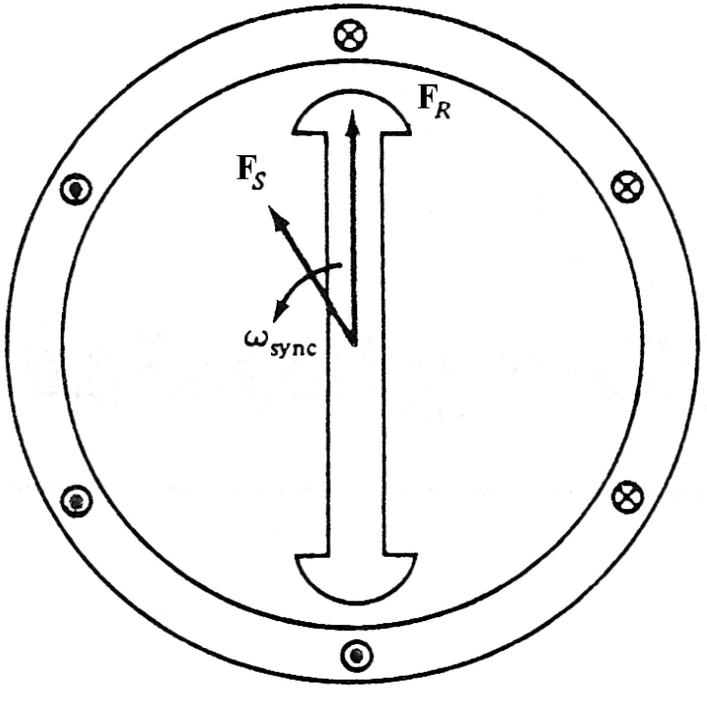
شکل ۱۸-۱ منحنی‌های مغناطیس شوندگی dc برای مواد مغناطیس دائم.

✓ در موتورهای PMSM بیشتر از مواد ساماریوم-کبالت و آلیاژ نئودیم-آهن-بور استفاده می شود.

- ✓ در موتور سنکرون دو میدان مستقل روتور و استاتور وجود دارند.
- ✓ میدان روتور تمایل دارد که با میدان استاتور همراستا شود و در نتیجه روتور شروع به چرخش می‌کند.
- ✓ همواره یک زاویه‌ای بین دو میدان وجود دارد که با افزایش مقدار گشتاور بار، زیاد می‌شود.

بنابراین، روتور، میدان مغناطیسی استاتور را همواره تعقیب می‌کند.

$$T_e = kF_S F_r \sin\delta$$



نیروهای مغناطیسی موجود در یک موتور سنکرون

❑ مدار معادل حالت دائم موتور سنکرون

➢ موتور سنکرون استوانه ای

✓ با صرفنظر از مقاومت آرمیچر موتور سنکرون استوانه ای، در حالت دائم می توان مدار معادل هر فاز موتور را بصورت یک سلف X_s سری با منبع ولتاژ E به شکل زیر مدل کرد (بسیار شبیه مدار معادل موتور DC است):

- X_s: راکتانس سنکرون
- E: ولتاژ ضدمحرکه
- V: ولتاژ استاتور یا آرمیچر
- I_s: جریان استاتور یا آرمیچر
- δ: زاویه قدرت یا زاویه بار
- φ: شار تحریک ناشی از آهنربا یا سیم پیچ DC
- ω_{ms}: سرعت سنکرون

رابطه ولتاژ ضدمحرکه با شار: (۱) $E = k\varphi\omega_m$

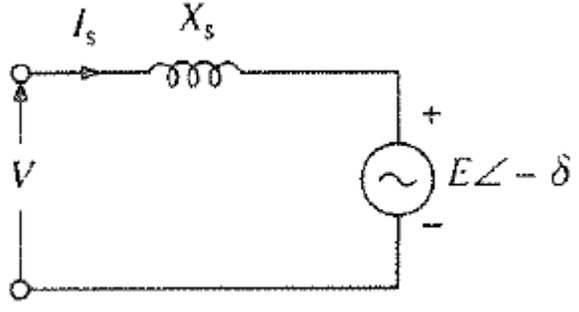
رابطه برداری ولتاژ استاتور: (۲) $\vec{V} = \vec{E} + jX_s\vec{I}_s$

رابطه توان ورودی با زاویه قدرت: (۳) $P_m = \frac{3EV}{X_s}\sin\delta$

رابطه توان ورودی با جریان: (٤) $P_m = 3VI_s\cos\varphi$

رابطه گشتاور با زاویه قدرت: (٥) $T_e = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{3EV}{X_s\omega_{ms}}\sin\delta$

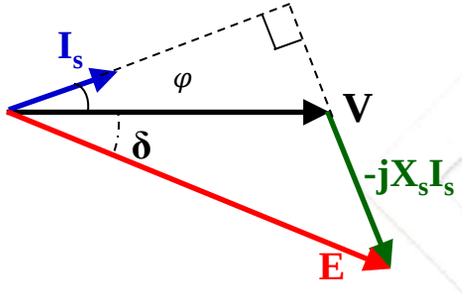
رابطه سرعت سنکرون با قطبها: (٦) $\omega_{ms} = \frac{4\pi f}{p}(rad/\sec)$



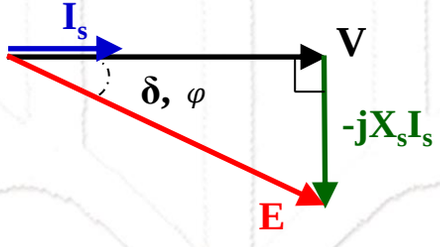
مدار معادل حالت دائم موتور سنکرون استوانه ای

$$\vec{V} = \vec{E} + jX_s\vec{I}_s \qquad (۲)$$

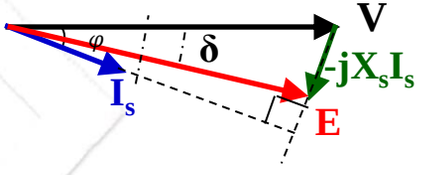
✓ موتور سنکرون، برحسب مقدار تحریک (ویا ولتاژ E) و مقدار گشتاور بار مکانیکی اعمالی به موتور می تواند در سه حالت پسفاز، تحریک نرمال و یا پیشفاز کار کند:



(ج) حالت پیش‌فاز



(ب) حالت هم‌فاز



(الف) حالت پس‌فاز

✓ اما برای موتورهای PMSM چون سیم پیچ تحریک وجود ندارد، حالت کاری موتوررا فقط مقدار گشتاور بار تعیین می کند

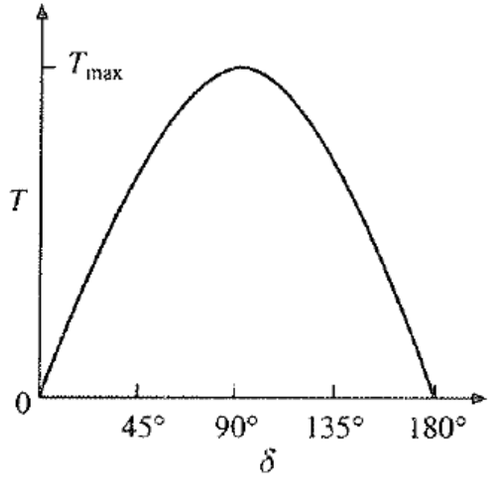
❑ مدار معادل حالت دائم موتور سنکرون

➢ مشخصه های کاری موتور سنکرون استوانه ای

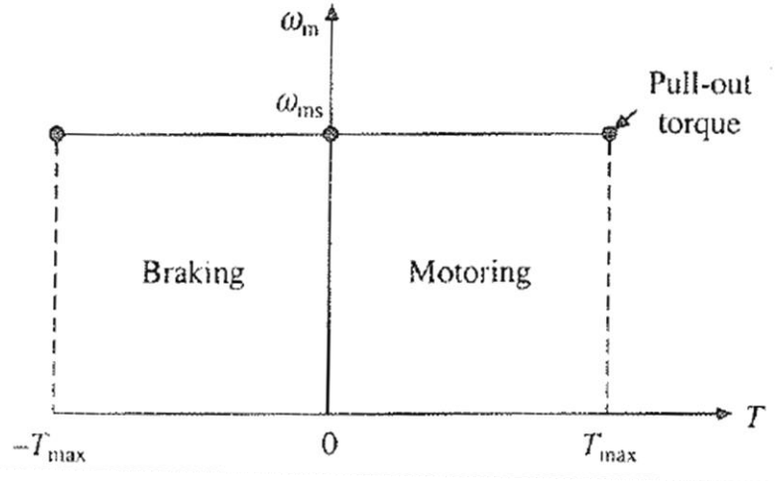
✓ موتور سنکرون متصل به تغذیه با ولتاژ و فرکانس ثابت، می تواند در سرعتی ثابت می تواند باری با گشتاور متغیر و تا گشتاور حداکثر خود (T_{max}) را بحرکت در آورد.

✓ با افزایش تدریجی و آرام بار، در زاویه بار ۹۰ درجه، گشتاور موتور به مقدار حداکثر خود می رسد. این نقطه کار را حد پایداری استاتیکی موتور سنکرون گویند.

$$T_e = \frac{3EV}{X_s \omega_{ms}} \sin\delta = \boldsymbol{T_{max}\, sin\delta} \qquad (۷)$$



(ب) مشخصه گشتاور-زاویه بار موتور سنکرون



(الف) مشخصه سرعت – گشتاور موتور سنکرون

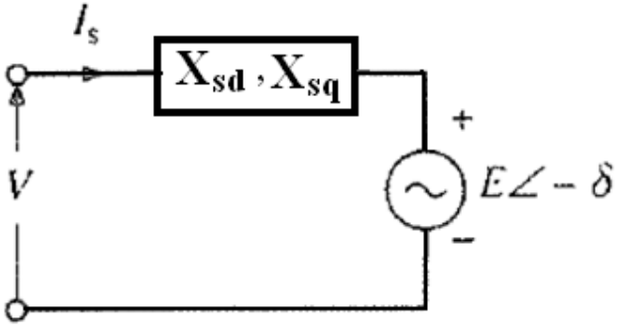
❑ مدار معادل حالت دائم موتور سنکرون

➢ موتور سنکرون قطب برجسته

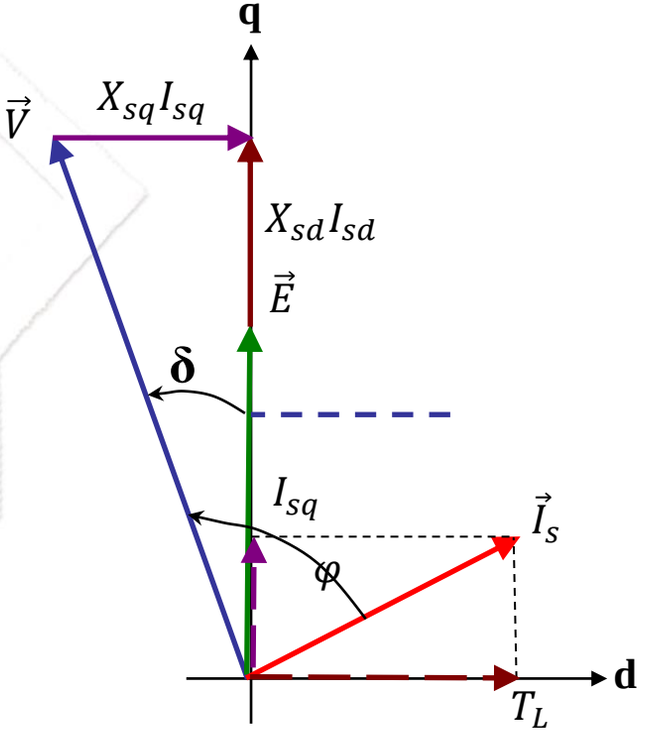
✓ در موتور سنکرون قطب برجسته، چون رلوکتانس متغیر است لذا راکتانس سنکرون X_s دیگر ثابت نخواهد بود و مقدار آن بین دو مقدار حداقلی X_d و حداکثری X_q تغییر می کند. (البته در ماشین های سنکرون با سیم پیچی تحریک برعکس است یعنی در آنجا $X_q < X_d$)

✓ لذا مدار معادل حالت دائم موتور سنکرون قطب برجسته با صرفنظر از مقاومت آرمیچر بصورت زیر خواهد بود:

✓ با مدل سازی روابط در دستگاه دو محوری بلوندل یا dq، دیاگرام برداری موتور سنکرون پسفاز بصورت زیر می باشد:



(الف) مدار معادل حالت دائم موتور سنکرون قطب برجسته



(ب) دیاگرام برداری موتور قطب برجسته (در حالت پسفاز)

رابطه ولتاژ برای موتورقطب برجسته:

$$\vec{V} = \vec{E} + j(X_{sd}I_{sd} + X_{sq}I_{sq}) \qquad (۸)$$

محاسبه زاویه بار δ برای موتور پسفاز:

$$\tan\delta = \frac{X_{sq}I_s\cos\varphi}{V - X_{sq}I_s\sin\varphi} \qquad (۹)$$

❑ مدار معادل حالت دائم موتور سنکرون

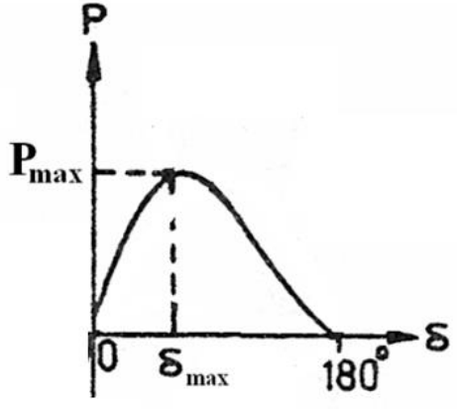
➢ موتور سنکرون قطب برجسته

✓ **رابطه توان – زاویه بار در موتور سنکرون قطب برجسته نیز بصورت زیر بدست می آید:**

رابطه توان برای موتور قطب برجسته:

$$P = 3\left[\frac{VE}{X_{sd}}\sin\delta + \frac{V^2}{2}\left(\frac{1}{X_{sq}} - \frac{1}{X_{sd}}\right)\sin 2\delta\right] \qquad (10)$$

✓ **در رابطه فوق، توان موتور دارای دو بخش است که اولی توان ناشی از آهنربا یا تحریک نام دارد و دومی، توان رلوکتانسی نام دارد.**



(ج) مشخصه توان-زاویه بار موتور قطب برجسته

✓ **گشتاور موتور قطب برجسته هم از رابطه زیر قابل محاسبه است:**

رابطه گشتاور برای موتور قطب برجسته:

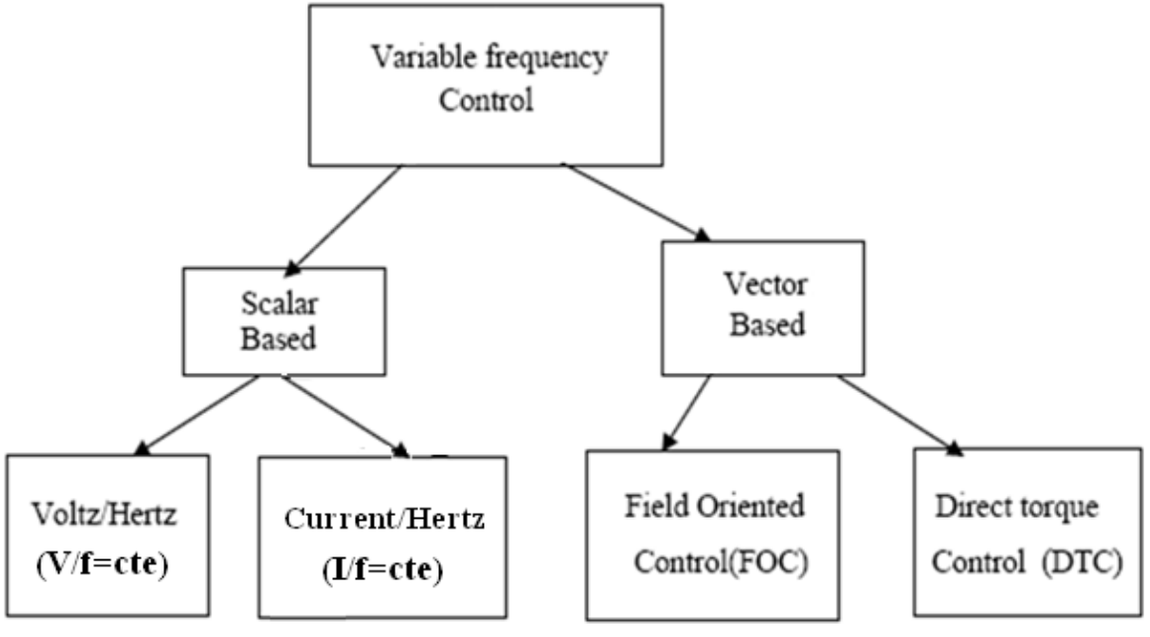
$$T_e = \frac{3}{\omega_{ms}}\left[\frac{VE}{X_{sd}}\sin\delta + \frac{V^2}{2}\left(\frac{1}{X_{sq}} - \frac{1}{X_{sd}}\right)\sin 2\delta\right] \qquad (11)$$

❑ کنترل سرعت موتورهای PMSM

➢ معرفی انواع روشها

- ✓ در کنترل موتورهای PMSM، به دلیل داشتن عملکرد مناسب و بهره بالا، از روشهایی استفاده می شود که عملکرد و بهره کلی درایو را پائین نمی آورد.
- ✓ لذا برخلاف موتورهای القایی که از روشهای کنترلی کم بازده ایی هم استفاده می شد (نظیرکاهش ولتاژ)، در اینگونه موتورها از روشهای پربازده که همگی برمبنای تغییر فرکانس – ولتاژ هستند، استفاده می گردد.

- ✓ **نکته:** روشهای ذیل مخصوص موتورهای سنکرون با تغذیه (یا توزیع شار) سینوسی است و روشهای کنترل موتورهای با تغذیه غیرسینوسی مانند BLDC متفاوت از این روشها هستند.

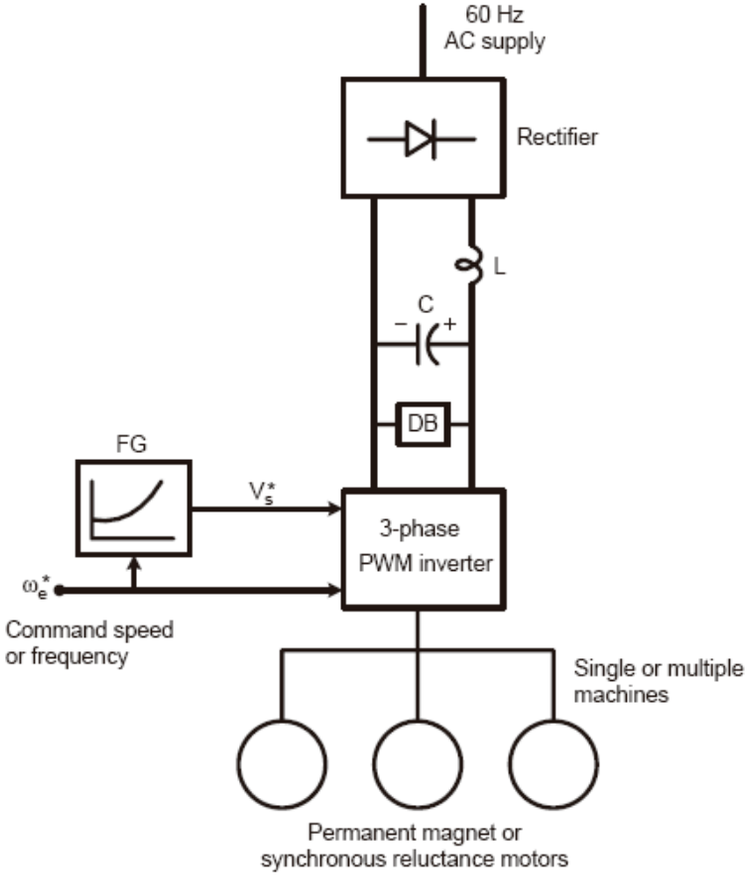


انواع روشهای کنترل سرعت موتور PMSM

❑ کنترل سرعت موتورهای PMSM

➢ روش کنترل اسکالر V/f ثابت

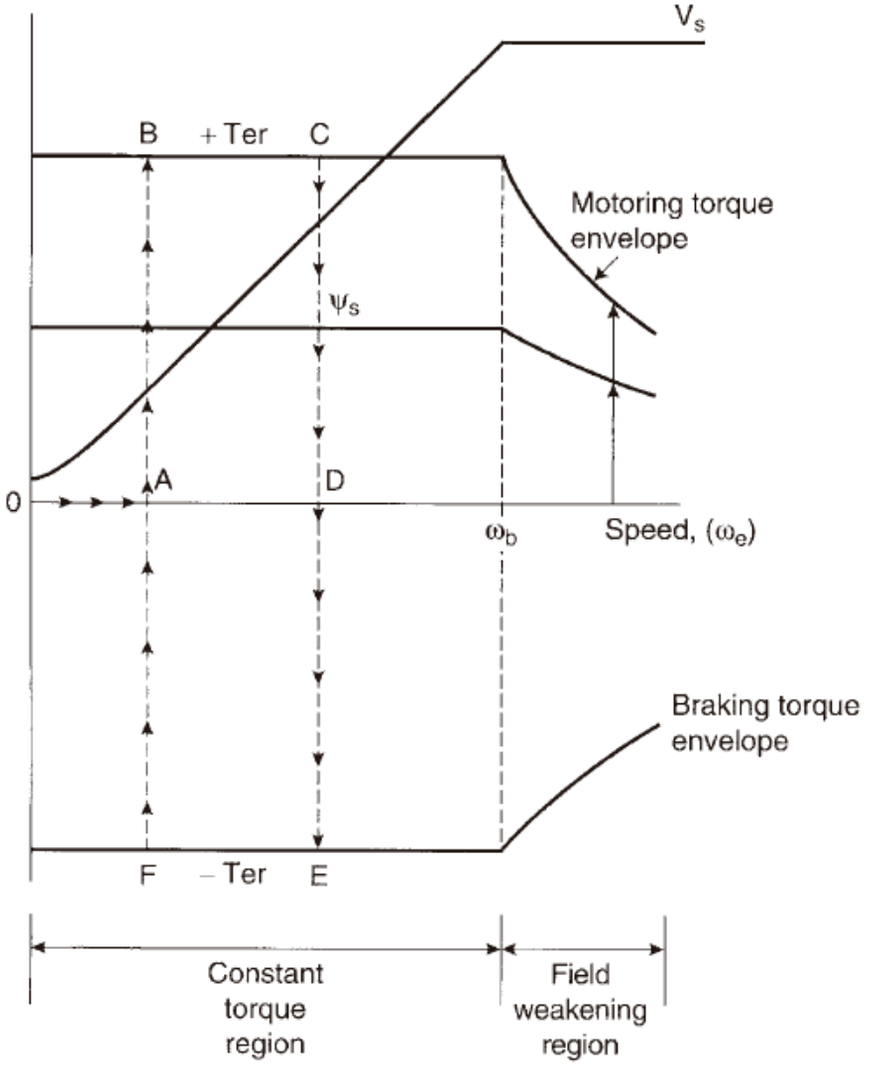
- ✓ روش کنترل اسکالر V/f ثابت روشی ساده و ارزان و صتعتی برای کنترل انواع موتورهای سنکرون نظیر با روتور سیم پیچی شده، نوع آهنربای دائم (PMSM)، رلوکتانس سنکرون، و هیسترزیس است.
- ✓ به دلیل قابلیت خود سنکرون کنندگی موتورهای سنکرون، احتیاجی به طرح سیستم حلقه بسته کنترل سرعت در روش V/f ثابت وجود ندارد.



- ✓ می توان چندین موتور PMSM یا سنکرون را که حتی تحت گشتاور بارهای مختلفی هستند توسط یک اینورتر و بصورت حلقه باز کنترل نمود.
- ✓ **مثال آن:** زنجیره های غنی سازی یا کانویرها یا کارخانجات نساجی و خطوط تولید پیوسته
- ✓ توجه شود که به هیچ وجه نمی توان چندین موتور القایی را با یک اینورتر تغذیه نمود. زیرا با توجه به گشتاور بار روی هر موتور، ممکن است هر کدام در سرعت متفاوتی بچرخند.

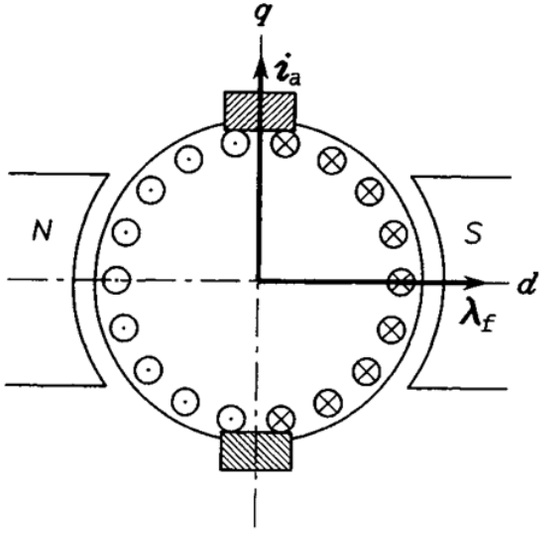
- ✓ همانند روش V/f ثابت برای موتور القایی، تا سرعت نامی ولتاژ افزایش می یابد اما پس از آن ولتاژ در مقدار نامی اش ثابت نگهداشته می شود و فرکانس افزایش می یابد.

- ✓ تحت روش V/f ثابت، موتور تا سرعت نامی، گشتاور نامی می تواند بدهد. اما بعد از آن گشتاور موتور باید کاهش پیدا کند. لذا بار هم باید طوری باشد تا در سرعتهای بالاتر از سرعت نامی، گشتاوری کمتر از مقدار نامی داشته باشد.

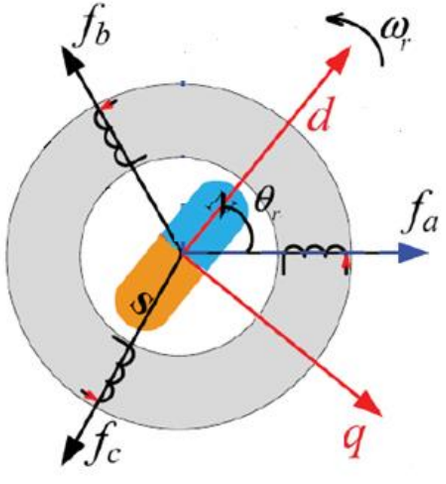


تغییرات ولتاژ و فرکانس در روش V/f ثابت

- ✓ مطابق شکل (الف) در یک موتور DC، بردار شار تحریک بر بردار شار آرمیچر همواره عمود است.
- ✓ جهت هر دو میدان همواره ثابت است و این ویژگی به دلیل DC بودن جریان تحریک برای میدان تحریک و همچنین عملکرد کموتاتورها برای مدار آرمیچر است.
- ✓ می توان میدان تحریک را در راستای افقی (محور d) درنظر گرفت و میدان آرمیچر را در راستای عمود آن (محور q)
- ✓ همچنین شار آرمیچر هیچگاه شار تحریک را تضعیف نمی کند (با صرفنظر از عکس العمل آرمیچر).
- ✓ از طرفی مطابق شکل (ب) در یک موتور PMSM، شار میدان تحریک (PM روتور) همواره منطبق بر محور d است. با روش کنترل برداری می خواهیم کاری کنیم که میدان ناشی از آرمیچر موتور PMSM همواره بر محور d عمود باشد. به عبارت دیگر، باید میدان ناشی از آرمیچر تنها در راستای q باشد و میدان آرمیچر در راستای محور d مولفه ای نداشته باشد.



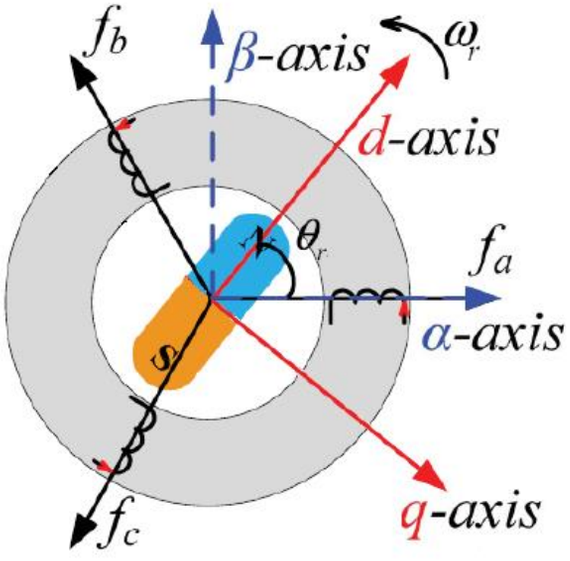
(الف) بردار شار تحریک و بردار میدان ناشی از آرمیچر در موتور DC



(ب) بردار شار در موتور PMSM

➢ مدل دینامیکی موتور PMSM در دستگاه abc ساکن

✓ برای مدلسازی دینامیکی موتور PMSM، دستگاه دومحوری dq را مطابق شکل مقابل درنظر می گیریم (d نسبت به q پیشفاز است):



✓ معادلات ولتاژ موتور در دستگاه abc (استاتور) به فرم ماتریسی زیر قابل بیان است:

$$v_{abc} = p\lambda_{abc} + r_s i_{abc} \qquad (۱۲)$$

✓ که در آن، p بیانگر عملگر مشتق بوده و v_{abc} بردار ولتاژ استاتور، i_{abc} بردار جریان استاتور و λ_{abc} بردار شار پیوندی استاتور هستند که عبارتند از:

$$v_{abc} = [v_a \quad v_b \quad v_c]^t \qquad (۱۳)$$

$$i_{abc} = [i_a \quad i_b \quad i_c]^t \qquad (۱۴)$$

$$\lambda_{abc} = [\lambda_a \quad \lambda_b \quad \lambda_c]^t \qquad (۱۵)$$

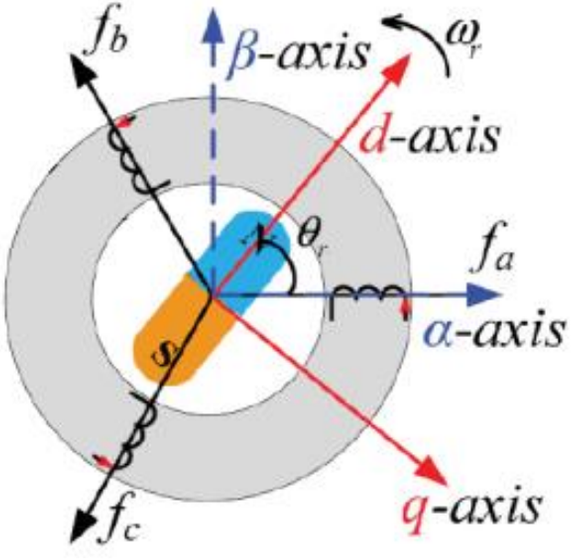
✓ بردار شار استاتور λ_{abc} از معادله زیر بدست می‌آید:

$$\lambda_{abc} = \lambda_{abc(s)} + \lambda_{abc(r)} \quad (16)$$

✓ در رابطه (۱۶) $\lambda_{abc(s)}$ ناشی از جریان‌های سیم‌پیچ‌های استاتور و $\lambda_{abc(r)}$ شار روتور القا شده در سیم‌پیچ‌های سه فاز استاتور هستند که از روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$\lambda_{abc(s)} = Li_{abc} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} i_{abc} \quad (17)$$

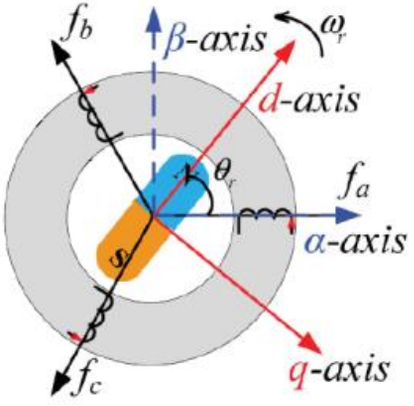
$$\lambda_{abc(r)} = \lambda_m \begin{bmatrix} \cos\theta_r \\ \cos(\theta_r - 120^o) \\ \cos(\theta_r + 120^o) \end{bmatrix} \quad (18)$$



✓ که λ_m مقدار شار ایجاد شده توسط آهنربای روتور در راستای محور d است.

✓ همچنین مقادیر اندوکتانس خودی هر فاز استاتور در رابطه (۱۷) از روابط زیر قابل محاسبه هستند:

$$L_{aa} = L_{ls} + L_{m1} - L_{m2}\cos 2\theta_r$$
$$L_{bb} = L_{ls} + L_{m1} - L_{m2}\cos 2(\theta_r - 120^o)$$
$$L_{cc} = L_{ls} + L_{m1} - L_{m2}\cos 2(\theta_r + 120^o) \qquad (۱۹)$$



✓ که در آنها L_{ls} اندوکتانس نشتی سیم‌پیچی استاتور، L_{m1} بخش ثابت اندوکتانس مغناطیسی هر سیم‌پیچ استاتور و L_{m2} بخش متغیر اندوکتانس مغناطیسی هر سیم‌پیچ استاتور هستند.

✓ در رابطه (٦) اندوکتانسهای متقابل بین فازهای استاتور نیز از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$L_{ab} = L_{ba} = -\frac{L_{m1}}{2} - L_{m2}\cos(2\theta_r - 120^o)$$
$$L_{bc} = L_{cb} = -\frac{L_{m1}}{2} - L_{m2}\cos(2\theta_r + 120^o)$$
$$L_{ca} = L_{ac} = -\frac{L_{m1}}{2} - L_{m2}\cos 2\theta_r \qquad (۲۰)$$

✓ با توجه به متغیر با زمان بودن ضرایب اندوکتانس و به منظور کاهش حجم محاسبات، مدل دینامیکی را به دستگاه گردان دو محوری dq منتقل می کنیم.

➢ مدل دینامیکی موتور PMSM در دستگاه dq سنکرون

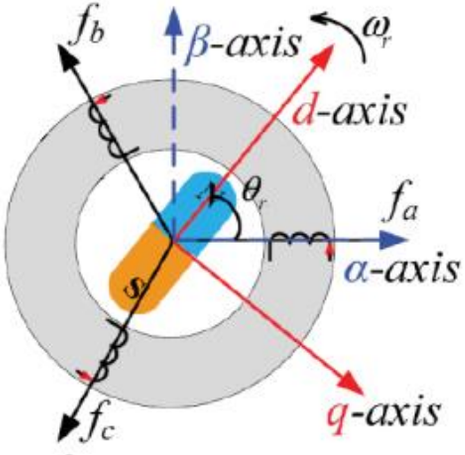
✓ متغیرهای شار، ولتاژ و جریان استاتور از دستگاه ساکن abc را با استفاده از تبدیل پارک زیر به دستگاه dq دوار منتقل می کنیم:

$$f_{dq0} = T_{dqo} f_{abc} \qquad (۲۱)$$

✓ که در آن:

$$f_{dq0}{}^{T} = [f_d \quad f_q \quad f_0]$$

$$f_{abc}{}^{T} = [f_a \quad f_b \quad f_c] \qquad (۲۲)$$



$$[T_{dqo}(\theta_r)] = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r - 120^o) & \cos(\theta_r + 120^o) \\ \sin\theta_r & \sin(\theta_r - 120^o) & \sin(\theta_r + 120^o) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \qquad (۲۳)$$

✓ مولفه صفر کمیت f (که می‌تواند ولتاژ، جریان و یا شار باشد) از رابطه زیر قابل محاسبه است که در صورت متعادل بودن تغذیه، برابر با صفر خواهد بود:

$$f_0 = \frac{1}{3}(f_a + f_b + f_c) \qquad (۲۴)$$

✓ با اعمال ماتریس تبدیل T_{dq0} به معادلات ولتاژ و شار (۱۲) و (۱۶)، معادلات ولتاژ در دستگاه dq بصورت زیر بدست خواهند آمد:

➢ مدل دینامیکی موتور PMSM در دستگاه dq سنکرون

✓ در نهایت، معادلات ولتاژ استاتور در دستگاه dq به صورت زیر قابل بازنویسی هستند:

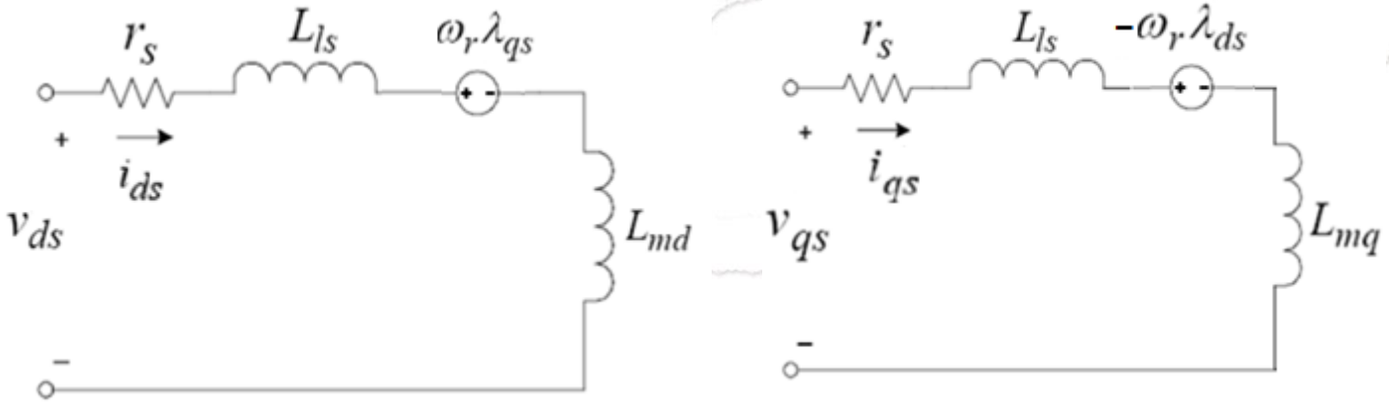
$$\begin{cases} v_{ds} = r_s i_{ds} + L_d \dfrac{di_{ds}}{dt} + \omega_r \lambda_{qs} & (۲۵) \\ v_{qs} = r_s i_{qs} + L_q \dfrac{di_{qs}}{dt} - \omega_r \lambda_{ds} & (۲۶) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \lambda_{ds} = L_d i_{ds} + \lambda_m & (۲۷) \\ \lambda_{qs} = L_q i_{qs} & (۲۸) \end{cases}$$

$$\begin{cases} L_d = L_{md} + L_{ls} \\ L_q = L_{mq} + L_{ls} \end{cases} \quad (۲۹)$$

$$T_e = \frac{3P}{4}\left[\lambda_m i_{qs} + (L_d - L_q) i_{ds} i_{qs}\right] \quad (۳۰)$$

✓ مدار معادل دینامیکی موتور PMSM در دستگاه dq دوار با استفاده از روابط فوق بصورت شکل زیر قابل استخراج است:



الف- مدار معادل محور d ب- مدار معادل محور q

مدار معادل مدل دینامیکی موتور PMSM سه فاز در دستگاه دومحوری dq دوار

✓ جهت کنترل برداری موتور PMSM، برای آنکه میدان ناشی از عکس العمل آرمیچر (یعنی میدان ایجاد شده توسط آرمیچر) بر میدان ناشی از آهنربای دائم روتور تاثیری نداشته باشد، مولفه d جریان استاتور را صفر نموده و فقط مولفه q آنرا کنترل می کنیم.

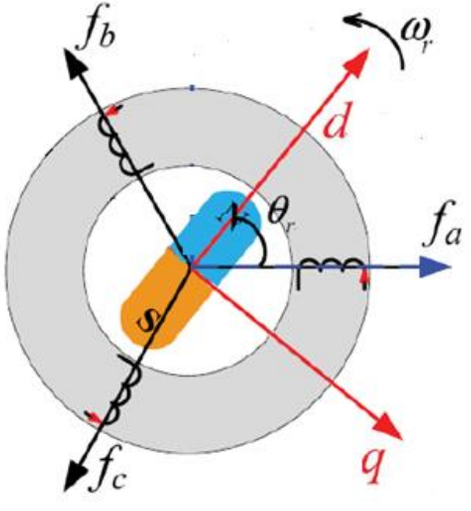
✓ در صورت عدم نیاز به کاهش شار تولید شده توسط PM (که برای سرعتهای بالای سرعت نامی ضروریست)، مولفه تولید شار جریان استاتور یعنی i_{ds} باید صفر شود تا گشتاور کاهش نیابد. لذا از سرعت صفر تا سرعت نامی موتور، مقدار مرجع آن برابر با صفر قرار داده می شود.

✓ با صفر قرار دادن جریان i_{ds}، رابطه (۳۰) گشتاور موتور PMSM به رابطه (۳۱) تبدیل می شود که مشابه رابطه گشتاور موتور DC یعنی رابطه (۳۲) است.

$$T_{em} = \frac{3P}{4}\left[\lambda_m i_{qs} + (L_d - L_q) i_{ds} i_{qs}\right] \qquad (۳۰)$$

$$i_{ds} = 0 \Rightarrow T_{em} = \frac{3P}{4}\lambda_m i_{qs} \qquad (۳۱)$$

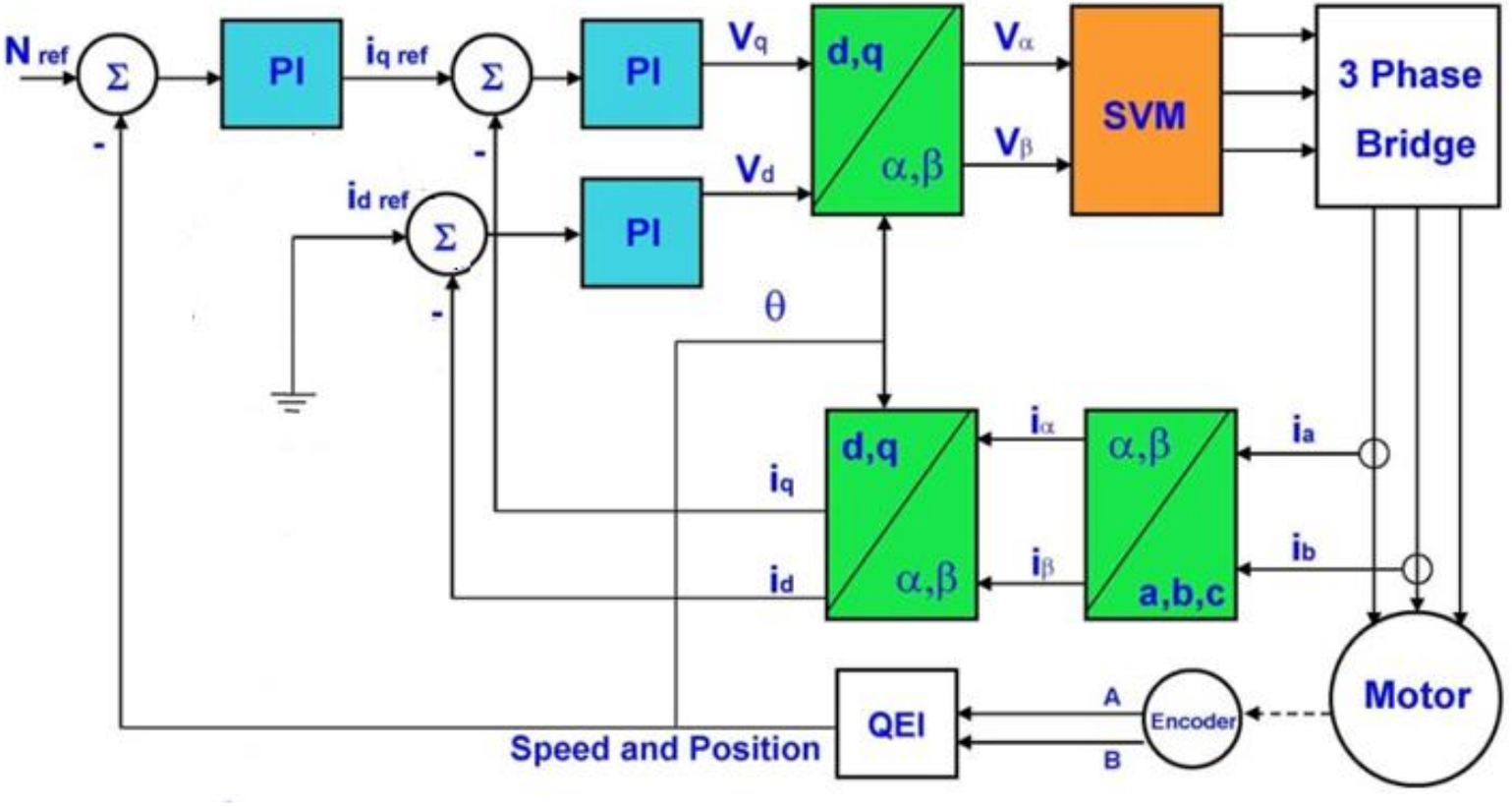
$$T_{\text{موتور}\square DC} = k \quad \phi i_a \qquad (۳۲)$$



❑ کنترل برداری موتور PMSM

➢ کنترل برداری با اینورتر VSI کنترل شده با ولتاژ

- ✓ خروجی کنترل کننده سرعت، مقدار مرجع جریان محور q یعنی i_{qs} را می سازد و خروجی کنترل کننده جریان محور q ولتاژ مرجع محور q یعنی V_q (یا V_{qs}) را می سازد.
- ✓ جریان مرجع محور d یعنی i_{ds} را خودمان صفر درنظر می گیریم و خروجی کنترل کننده جریان محور d ولتاژ مرجع محور d یعنی V_d (یا V_{ds}) را می سازد.

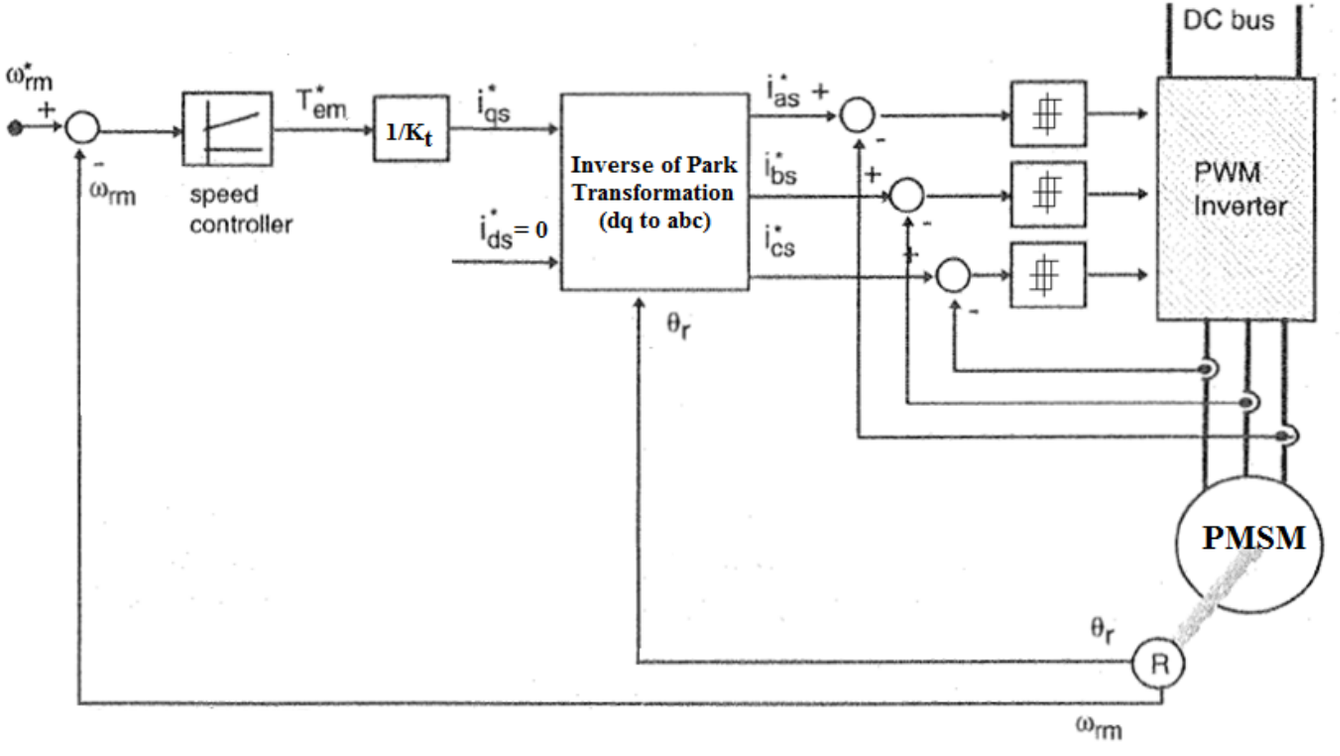


بلوک دیاگرام سیستم کنترل برداری موتور PMSM با اینورتر منبع ولتاژ کنترل شده با ولتاژ و مدولاسیون SVM

❑ کنترل برداری موتور PMSM

➢ کنترل برداری با اینورتر VSI کنترل شده با جریان

- ✓ در این روش، خروجی کنترل کننده های شار و سرعت، جریانهای مرجع در دو راستای d و q را می سازند که با استفاده از تبدیل معکوس پارک، جریانهای مرجع در دستگاه ساکن abc ساخته می شوند.
- ✓ از سه کنترل کننده هیسترزیس برای تنظیم جریانهای مرجع سینوسی و نهایتا فرمان به سوئیچهای اینورتر استفاده می شود.
- ✓ از مزایای این روش، سادگی محاسبات و پیاده سازی می باشد.



بلوک دیاگرام سیستم کنترل برداری موتور PMSM با اینورتر VSI کنترل شده با جریان