بخش اول:

مقدمه و معرفی انواع
موتورهای آهنربای دائم بدون جاروبک (براشلس)

- مقدمه ای بر درایوهای الکتریکی
- معرفی موتورهای BLDC
- معرفی موتورهای BLAC یا PMSM
- معرفی موتورهای براشلس غیرایده‌آل
- مواد مغناطیسی مورد استفاده در موتورهای براشلس
- مزایا و معایب موتورهای براشلس

❑ مقدمه ای بر درایوهای الکتریکی

➢ تعاریف

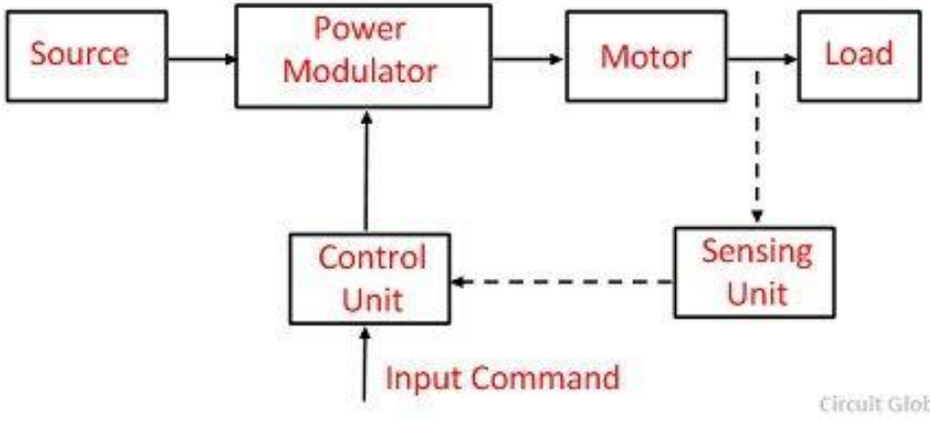
❖ **محرکه الکتریکی (یا درایو الکتریکی):** به یک سیستم کنترل مبتنی بر مبدلهای نیمه‌هادی (الکترونیک قدرت) گفته می شود که برای تنظیم یا کنترل حرکت یک بار مکانیکی با استفاده از یک موتور الکتریکی بکار می‌رود.

❖ **علت استفاده از درایو الکتریکی:** تنظیم سرعت یا گشتاور یا موقعیت یک بار مکانیکی.

❖ **کاربردهای درایوهای الکتریکی:**

- ✓ کاربردهای حمل و نقل، قطارها و خودرویی (Automotive).
- ✓ خطوط تولید سرعت (گشتاور) متغیر نظیر صنایع فولاد، نورد، کاغذسازی، نساجی سیمان و امثالهم.
- ✓ کاربردهای لوازم خانگی
- ✓ رباتیک و ماشینهای ابزار
- ✓ کاربردهای نظامی نظیر actuator های موشکها، رادارها و ...

- **منبع انرژی الکتریکی (یا Source):** می تواند برق DC، برق AC تکفاز یا سه فاز و یا باطری باشد.
- **مبدل نیمه‌هادی قدرت:** انتقال قدرت از منبع به موتور تنظیم تغذیه موتور به نحوی که مشخصه‌های موتور در مقادیر مطلوب قرار گیرند.
- **موتور:** مبدل انرژی الکترومکانیکی که توان الکتریکی را به توان مکانیکی (کار) تبدیل می کند.
- **واحد اندازه‌گیری:** تشخیص و شناسایی پارامترهای خاصی از موتور نظیر جریان، ولتاژ، گشتاور، سرعت و غیره را انجام می‌دهد.
- **واحد کنترل:** در این واحد، با توجه به فیدبک های ارسال شده توسط واحد اندازه‌گیری، فرمانهای کنترلی مبدل ساخته می شوند.



بلوک دیاگرام کلی یک درایو الکتریکی

❖ **انواع درایوها از نظر متغیر تحت کنترل:**

۱- درایو کنترل سرعت

۲- درایو کنترل موقعیت

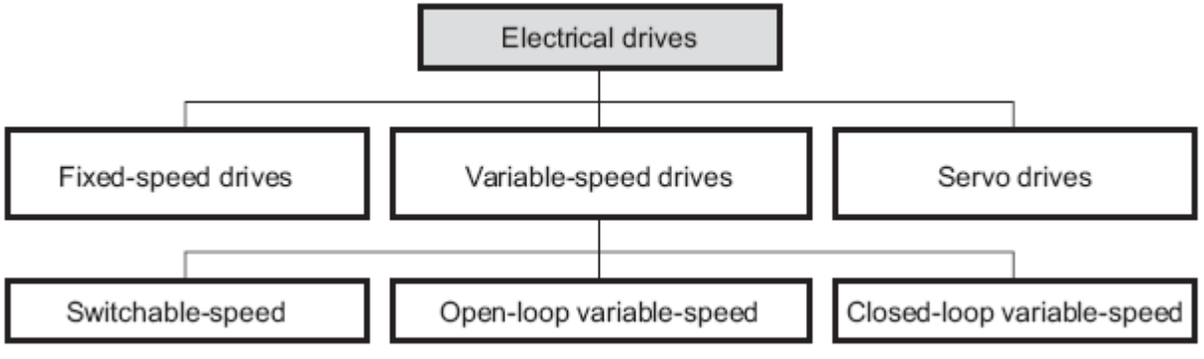
۳- درایو کنترل گشتاور

❖ **درایو سرعت ثابت:** فقط در یک سرعت مشخص می چرخد و قابلیت تغییر سرعت ندارد. مانند اغلب فن ها و پمپ ها

❖ **درایو سرعت متغیر:** قابلیت چرخش در سرعتهای مختلف را دارد

- **switchable:** فقط در دو یا سه سرعت می چرخد.
- **حلقه باز:** فیدبک سرعتی وجود ندارد
- **حلقه بسته:** فیدبک سرعت وجود دارد.

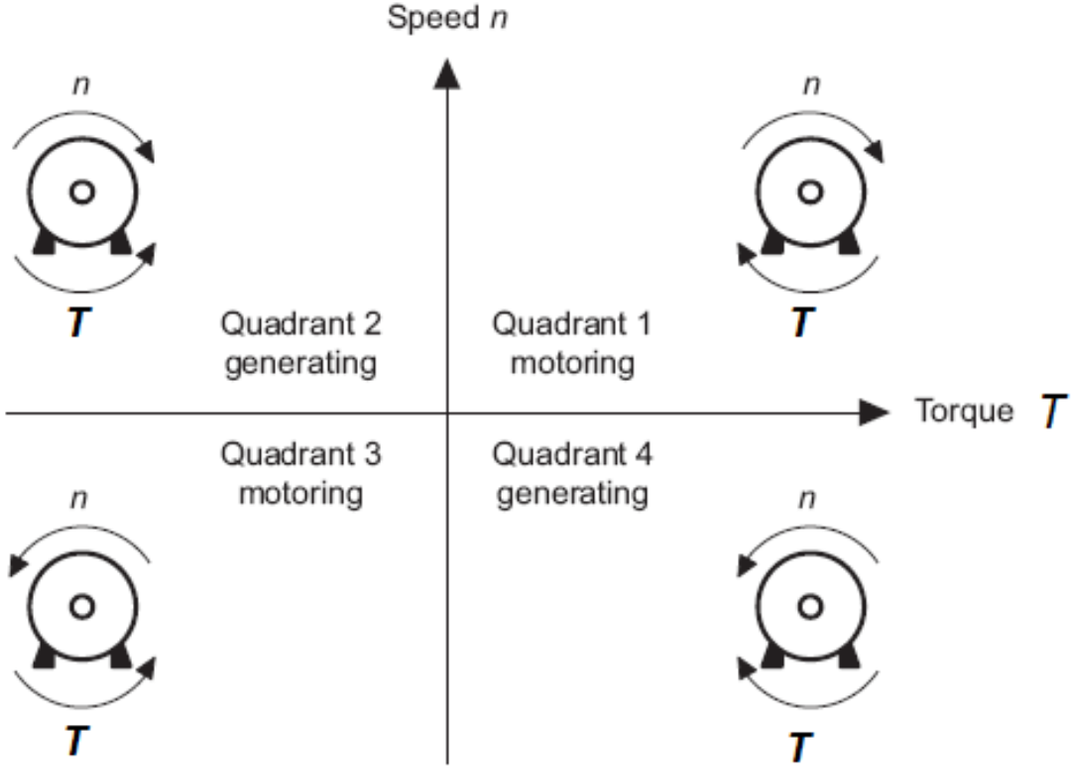
❖ **درایوهای سرو:** مدل خاصی از درایوهای حلقه بسته هستند که بسیار سریع و دقیق بوده و برای کاربردهای خاص استفاده می شوند.



انواع درایوهای الکتریکی (با کنترل سرعت)

➢ ربع های کاری

- ✓ بسته به مبدل الکترونیک قدرت مورد استفاده و همچنین گشتاور بار روی محور، درایو می تواند موتور را به حالت موتوری یا ژنراتوری (یا ترمزی) ببرد.
- ✓ حالت کارکرد موتوری یا ژنراتوری می تواند در جهت مستقیم و یا معکوس باشد.



ربع های کاری یک درایو الکتریکی

دانشگاه کاشان / دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر / گروه قدرت/ درس کنترل موتورهای براشلس/ دکتر حلوایی

➢ سنسورها در درایوهای الکتریکی

- ✓ اینکه از چه سنسور (حسگر) و یا سنسورهایی در درایوهای الکتریکی استفاده می شود، بسته به این دارد که از چه سیستم حلقه بسته و یا چه استراتژی کنترلی استفاده می گردد.
- ✓ منظور از سنسورها، آنهایی هستند که برای اهداف کنترلی استفاده می گردند. منظور ما سنسورهایی که برای کارهای صرفا مانیتورینگ و یا حفاظتی (مثل سنسور دما) نیستند.

❖ انواع سنسور مورد استفاده در درایوهای الکتریکی

۱- سنسور جریان

۲- سنسور ولتاژ

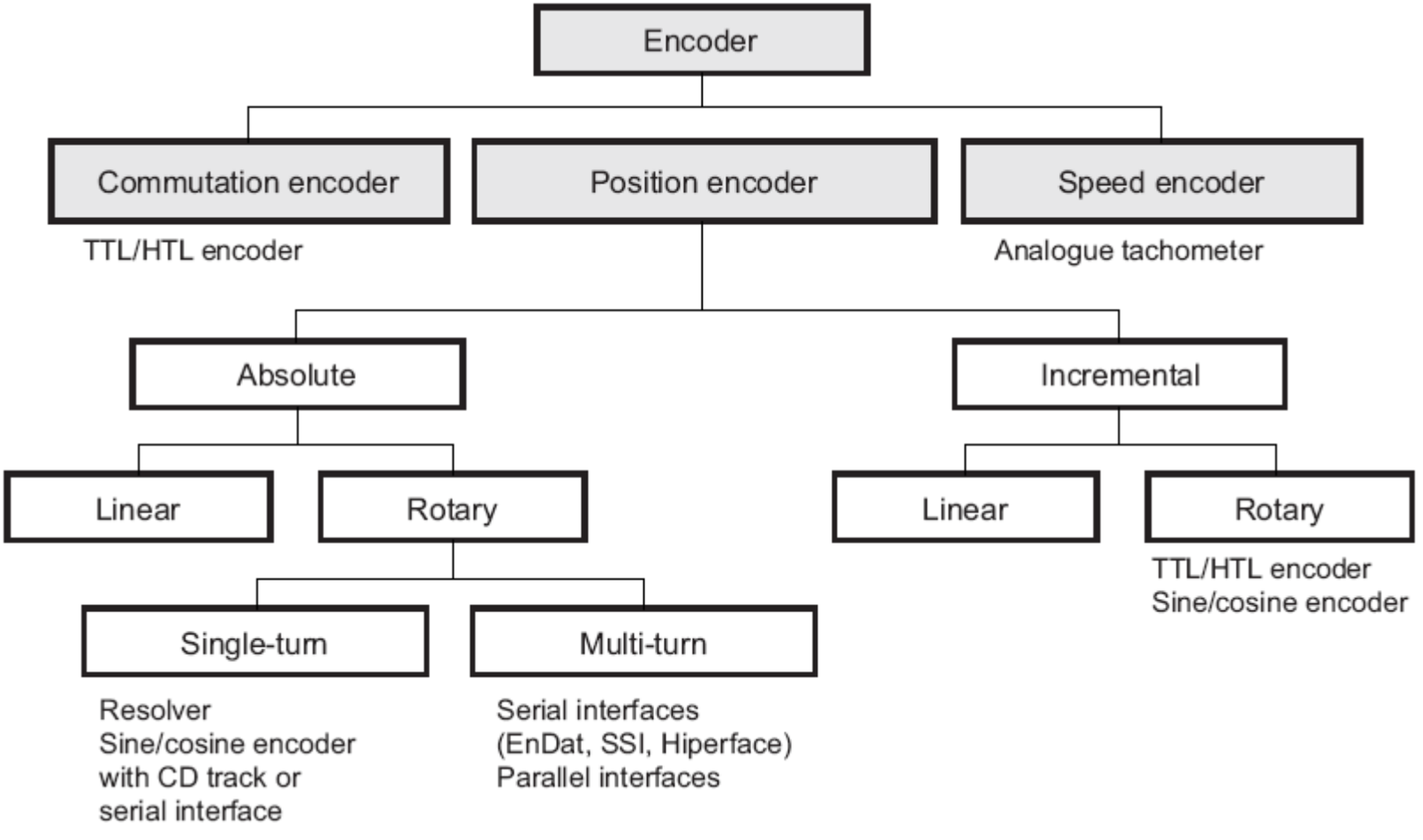
۳- سنسور شار

٤- سنسور سرعت

٥- سنسور موقعیت

٦- سنسور گشتاور

✓ سنسورهای سرعت و موقعیت از اساسی ترین سنسورهای مورد استفاده در درایوهای الکتریکی هستند.



انواع سنسورهای سرعت و موقعیت

❑ سنسورها در درایوهای الکتریکی

➢ کنترل به روش بدون سنسور (Sensorless Control)

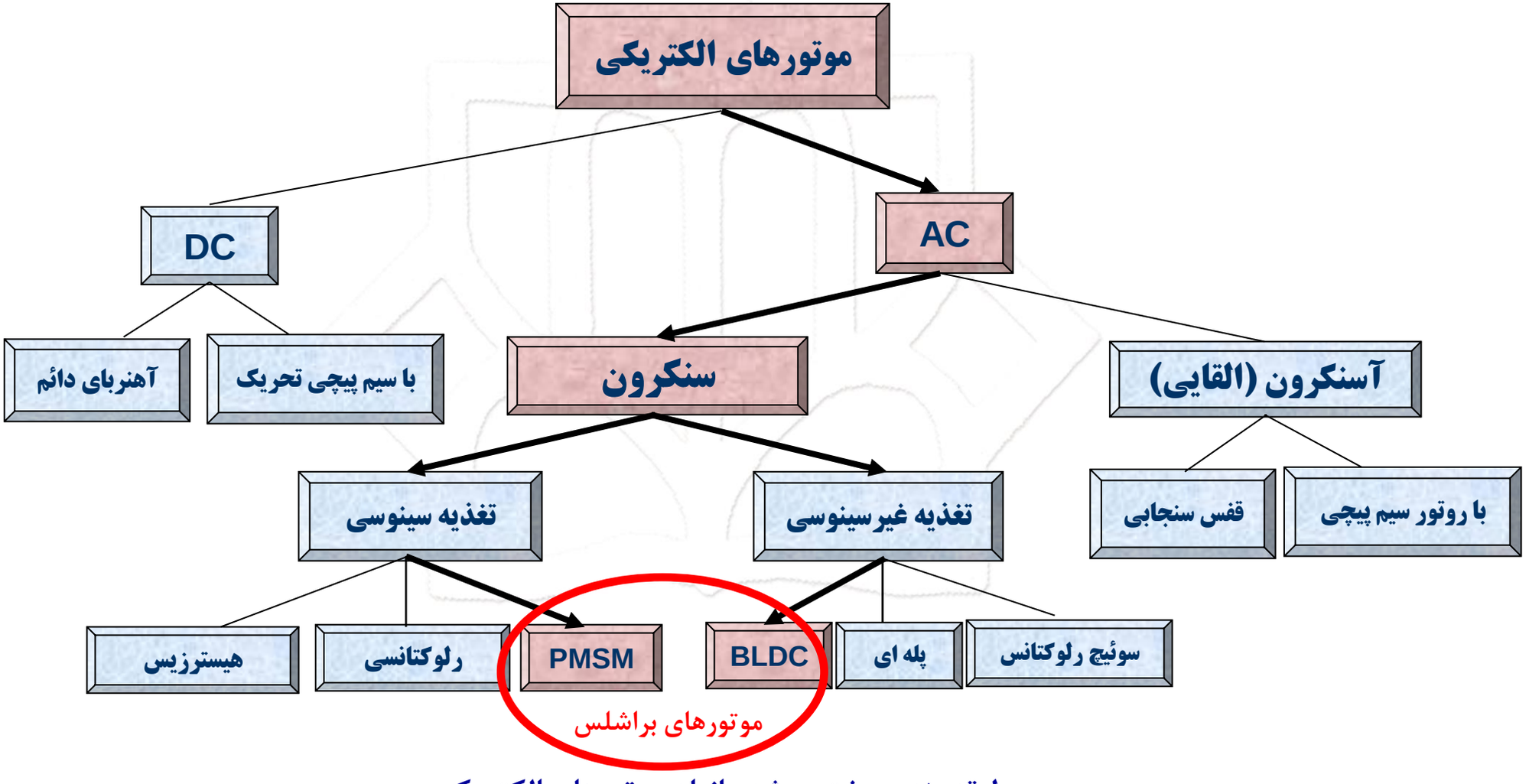
- ✓ استفاده از سنسورهای جریان و ولتاژ در اغلب درایوهای الکتریکی معمول است.
- ✓ اما از سنسورهای شار و گشتاور در کاربردهای صنعتی متداول به دلیل گرانی، پیچیدگی سخت افزار و ... بسیار کمتر استفاده می شود. بجای اندازه گیری مستقیم در کاربردهای صنعتی از روشهای تخمین شار و گشتاور استفاده می گردد.
- ✓ در خصوص سنسورهای سرعت و موقعیت، بسته به نوع کاربرد هم می توان مستقیما از سنسور استفاده نمود و هم می توان سرعت و موقعیت روتور را تخمین زد. به درایوهای الکتریکی که از سنسور سرعت/موقعیت استفاده نمی کنند و این کمیتها را تخمین می زنند، **درایوهای سنسورلس و یا با روش کنترل سنسورلس** گویند.
- ✓ اخیرا به دلایل کاهش پیچیدگی و هزینه درایو، استفاده از روشهای کنترل سنسورلس بسیار رایج شده است.

❖ **روشهای مختلف تخمین سرعت و موقعیت روتور در درایوهای الکتریکی:**

۱- روشهای حلقه باز تخمین و استفاده مستقیم از روابط مدل دینامیکی موتور

۲- روشهای تخمین حلقه بسته: استفاده از روئیتگرهای لیونبرگر، مود لغزشی، فیلتر کالمن، MRAS و روشهای هوشمند.

✓ موتورهای مورد مطالعه در این درس موتورهای آهنربای دائم بدون جاروبک موسوم به براشلس هستند.



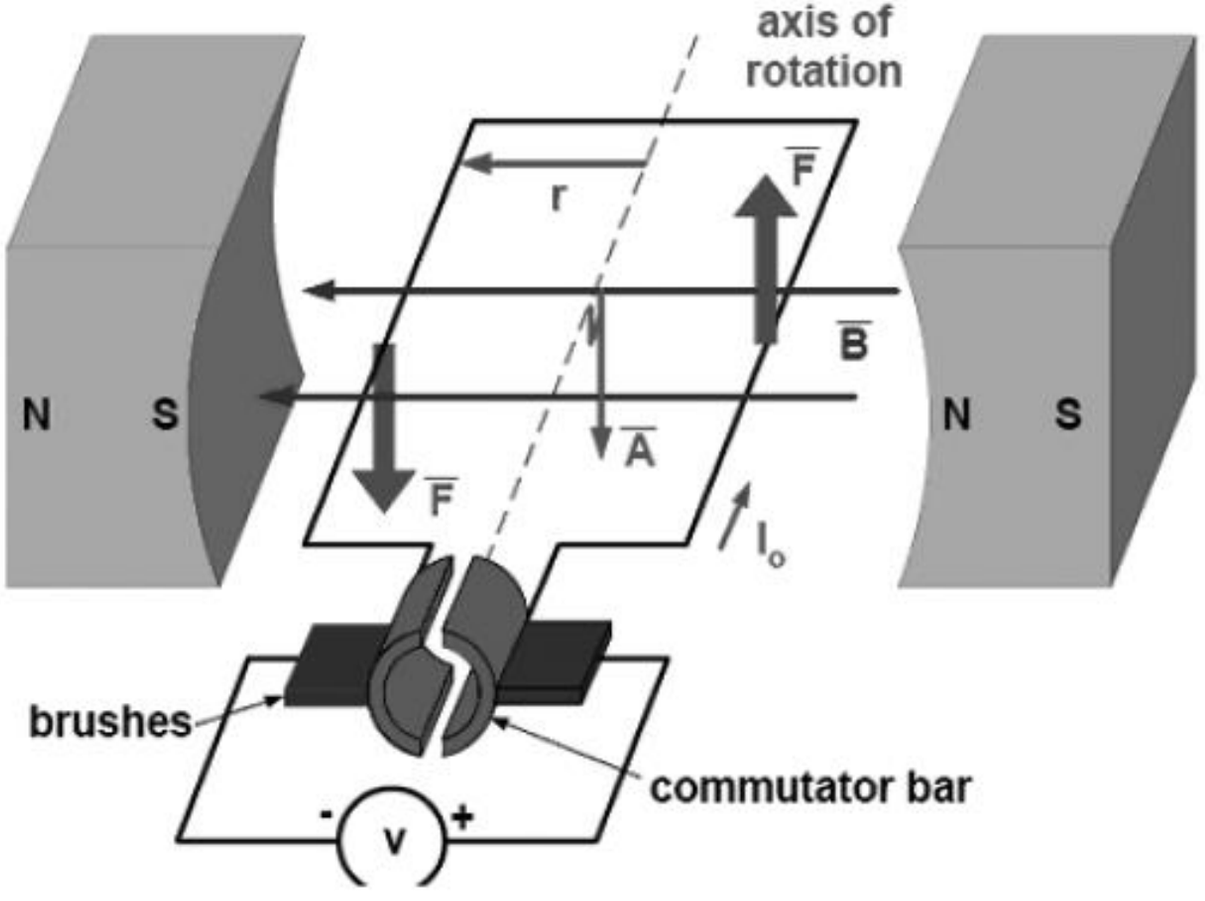
طبقه بندی مختصر شده انواع موتورهای الکتریکی

معرفی موتور بدون جاروبک DC یا BLDC

❑ معرفی موتور BLDC

➢ مروری بر موتور DC

✓ برای درک بهتر عملکرد موتور DC بدون جاروبک (BLDC) ابتدا عملکرد موتور DC با جاروبک (یا DC معمولی) مرور می شود.



$$T = 2NBrlI_0 = K_T \cdot I_0$$

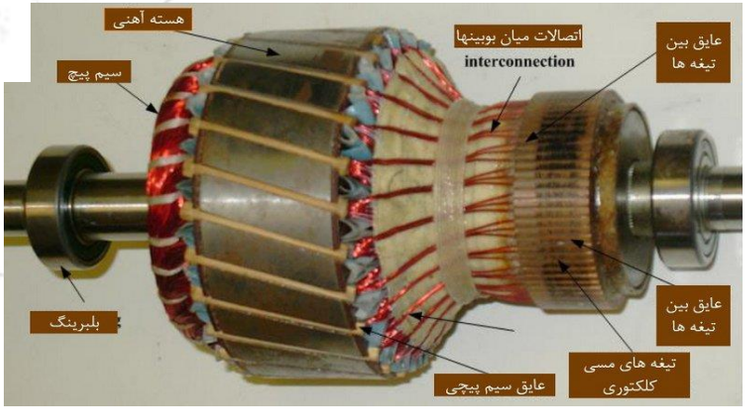
$$e = 2NBrl\omega = K_e \cdot \omega$$

❑ معرفی موتور BLDC

➢ اجزای یک موتور DC

DC motor, field structure, and armature assembly. (Courtesy Reliance Electric Co.)

(الف) ساختار موتور DC معمولی (کموتاتور دار)



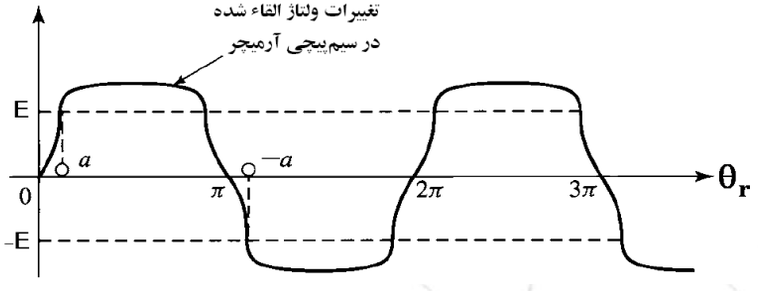
(ب) آرمیچر یک موتور DC

❑ معرفی موتور BLDC

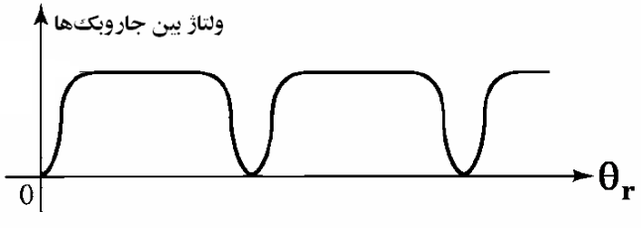
➢ کموتاتور در موتور DC

- **دو وظیفه مهم کموتاتور در ماشین DC:** ۱- تبدیل یک کمیت متناوب (AC) به کمیت مستقیم (DC) و بالعکس (یکسوسازی مکانیکی)
  ۲- ثابت نگه‌داشتن نیروی محرکه مغناطیسی آرمیچر (روتور) در فضا علیرغم چرخش سیم پیچ‌ها

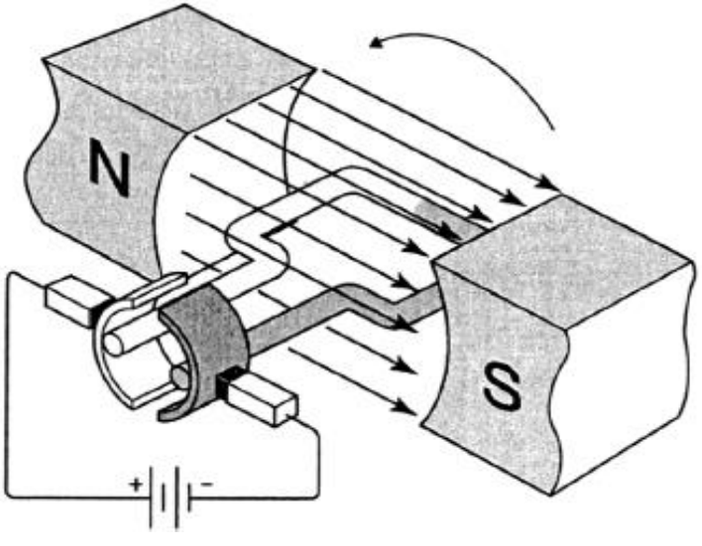
- **نکته بسیار مهم:** ولتاژ و جریان موجود در سیم‌پیچ‌های آرمیچر ماشین DC کمیتی متناوب است و لذا مقدار DC آن صفر می‌باشد. اما ولتاژ و جریان دو سر جاروبک‌ها کمیتی یکسو شده بوده که دارای کمی ریپل می‌باشد و درنتیجه دارای مقدار DC غیرصفر است.



(ب) ولتاژ متناوب القاء شده در سیم‌پیچ‌های آرمیچر



(ج) ولتاژ القایی دو سر جاروبک‌ها در ماشین DC



(الف) چرخش آرمیچر در میدان استاتور

❑ معرفی موتور BLDC

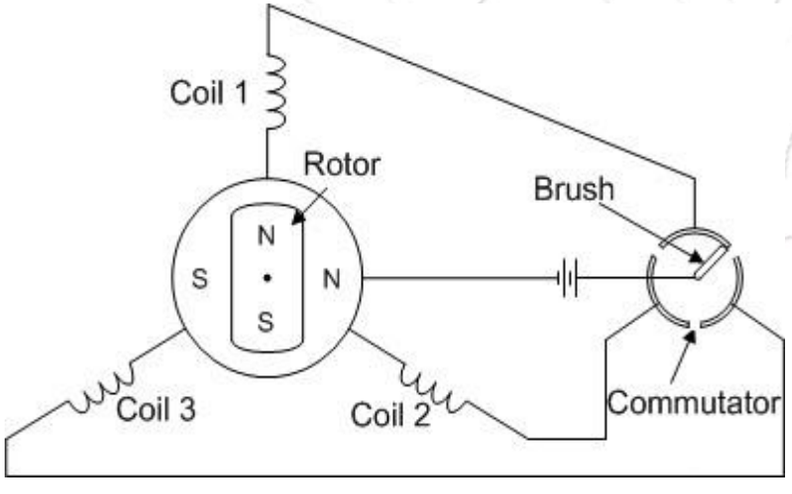
➢ موتور DC آهنربای دائم (PMDC) با آرمیچر ساکن

- ✓ در موتورهای DC معمولی (حتی PMDC)، تحریک ثابت بوده و سیم پیچهای آرمیچر می چرخند.
- ✓ در این موتورها، سیم‌پیچ‌های آرمیچر روی روتور با سرعت ω_m نسبت به جاروبک‌های ساکن روی استاتور می‌چرخند.
- ✓ می‌توان آرمیچر را روی استاتور ساکن نگه داشت و جاروبک‌ها را روی روتور با سرعت ω_m چرخاند.

- ✓ **مزایای موتور PMDC با آرمیچر ساکن:**

(۱) انتقال حرارت ساده‌تر مدار آرمیچر به بیرون

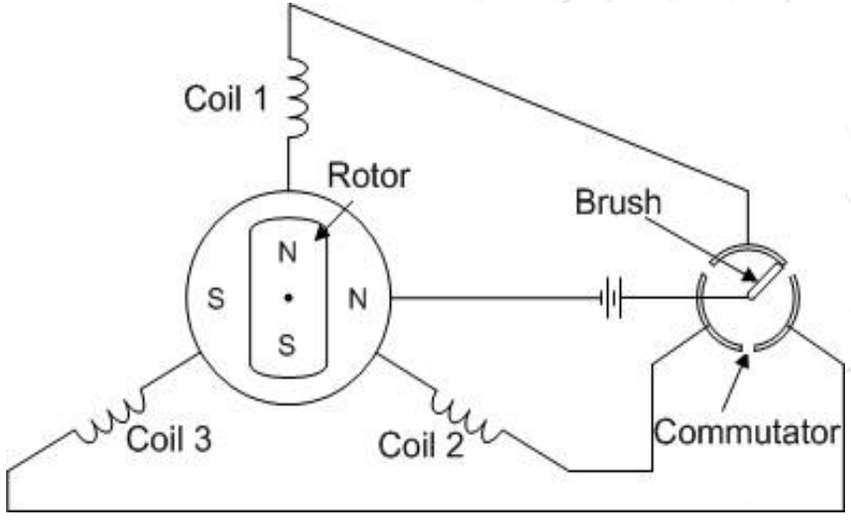
(۲) ساختار ساده‌تر آرمیچر به دلیل عدم وجود نیروی گریز از مرکز و لذا عدم نیاز به مهار کردن سیم‌پیچ‌ها.



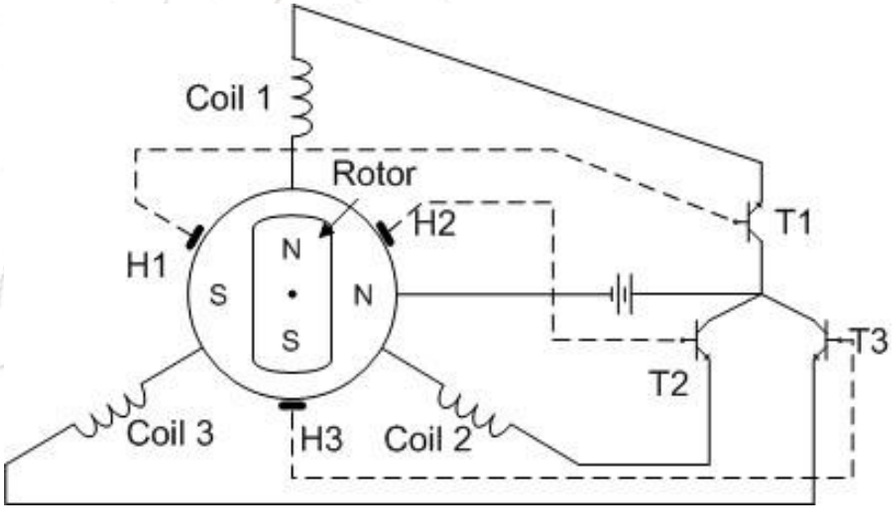
❑ معرفی موتور BLDC

➢ شباهت موتور DC با آرمیچر ساکن با موتور BLDC

- ✓ در موتور BLDC، بجای استفاده از کموتاتور و جاروبک برای هدایت جریانها در سیم پیچهای موردنظر، از سوئیچهای الکترونیکی و سنسورهای تشخیص موقعیت روتور (تشخیص جهت میدان ناشی از آهنربا) استفاده می شود.
- ✓ در حالت کلی نیاز به دانستن لحظه ای موقعیت روتور در موتور BLDC نیست و تنها دانستن ٦ لحظه زمانی کفایت می کند. لذا استفاده از سنسورهای ارزان موقعیت اثر هال، یکی از مزایای این موتورهاست.
- ✓ در موتورهای BLDC، وجود حداقل سه سوئیچ الکترونیکی ضروری است. اما آرایش ٦ سوئیچه از همه متداول تر است.
- ✓ به موتورهای BLDC، موتور با کموتاسیون الکترونیکی یا ECM (Electronic Commutation Motor) نیز گفته می شود.



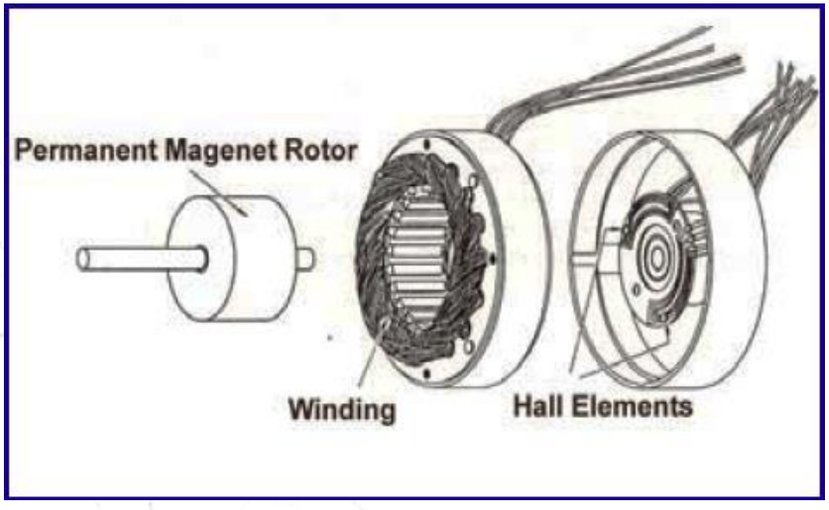
(الف) موتور DC با ۳ جزء کموتاتور و ۲ جاروبک

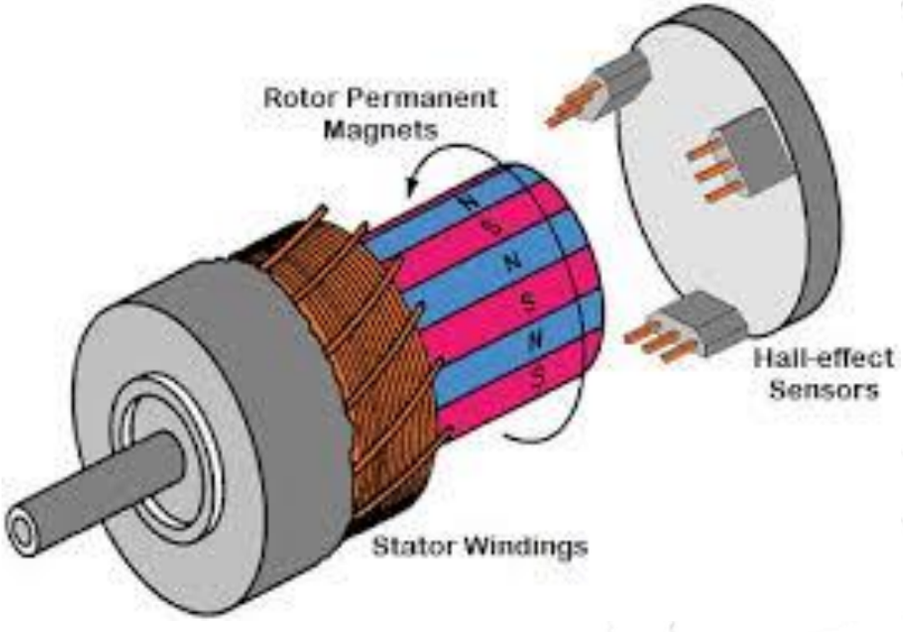


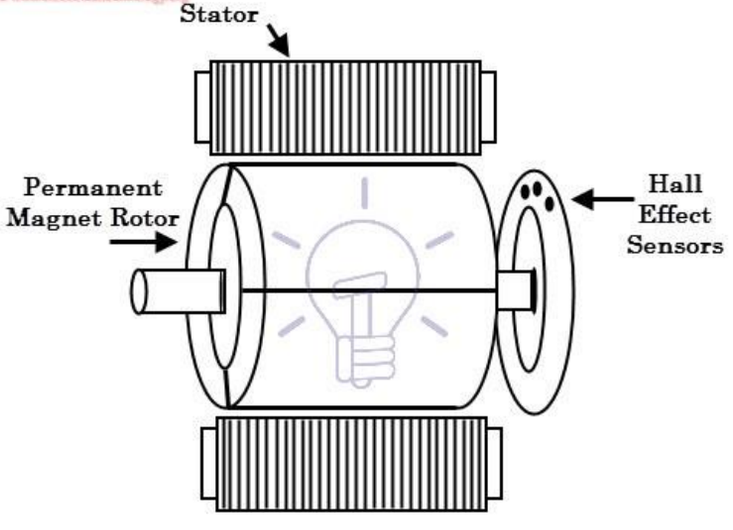
(ب) موتور BLDC

❑ معرفی موتور BLDC

➢ ساختمان موتور BLDC





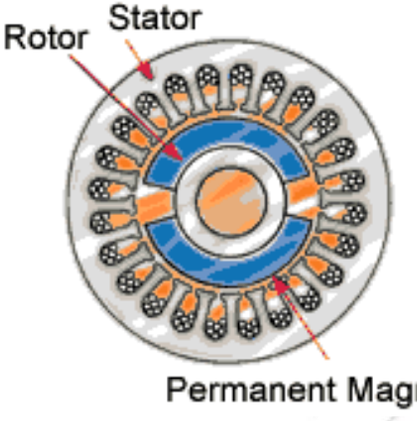


سه جزء اصلی موتور BLDC

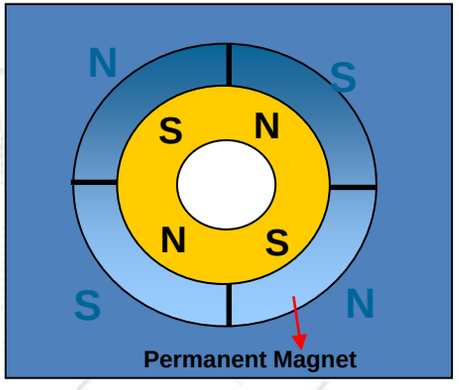
❑ معرفی موتور BLDC

➢ ساختمان موتور BLDC

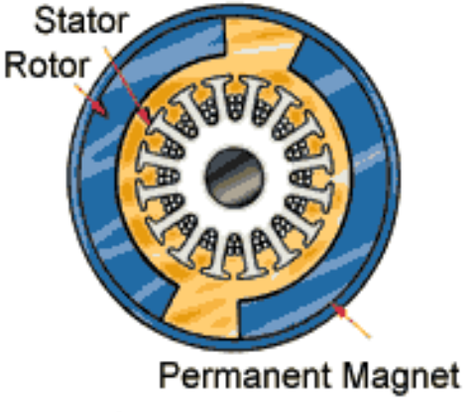
- ✓ آهنربای دائم در بخش روتور موتور BLDC همانند موتور PMSM می تواند در داخل روتور قرار گیر د و یا در سطح آن.
- ✓ همچنین بسته به نوع کاربرد، روتور می تواند داخل استاتور قرار گیرد و یا خارج آن (مثلا در کاربرد دوچرخه و scooter)



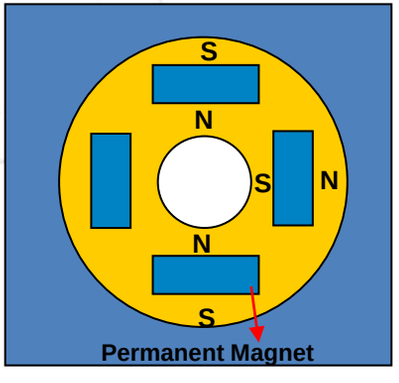
Inner Rotor Type



SMPM (Surface-mounted PM Rotor)



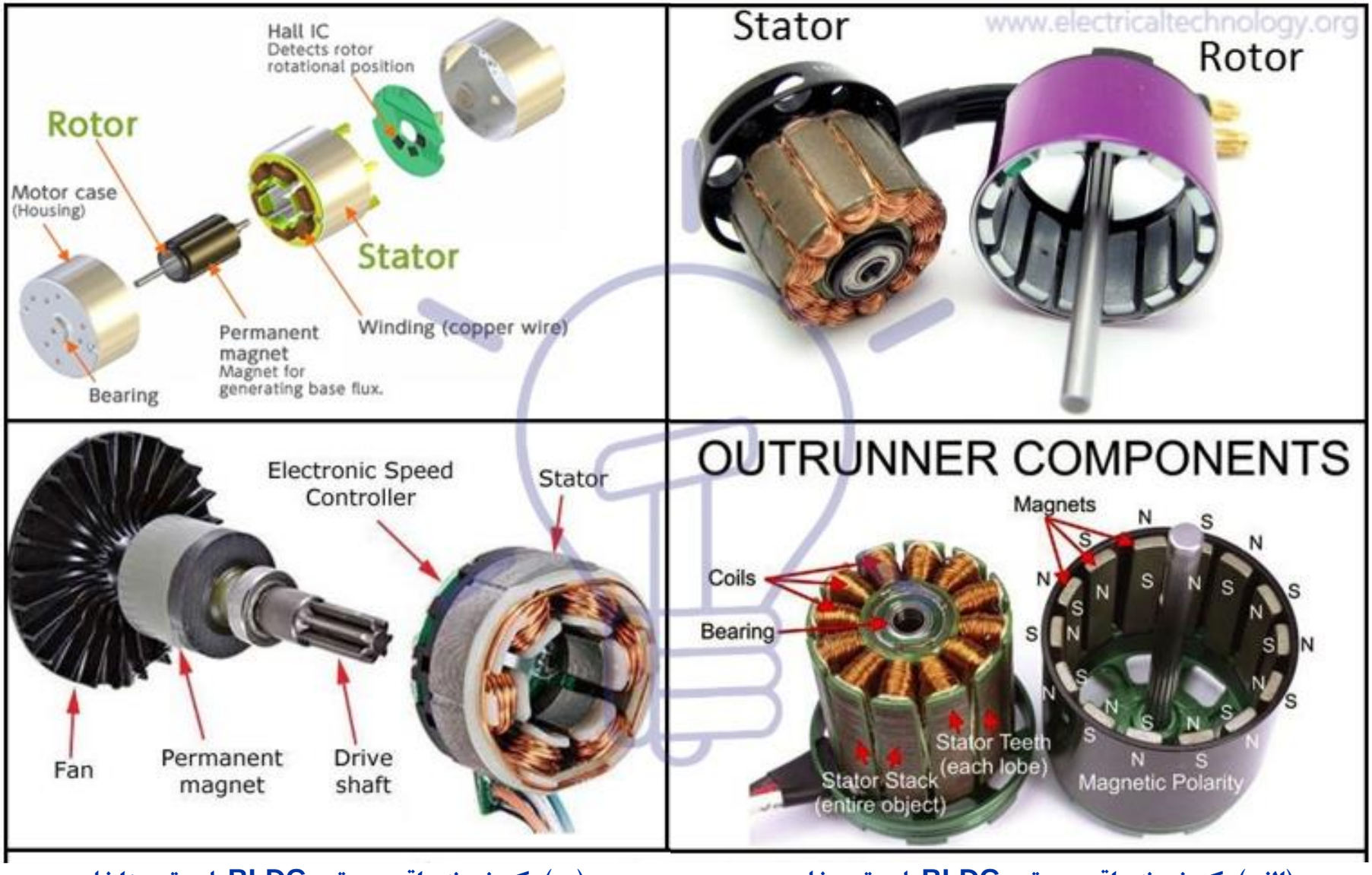
Outer Rotor Type



IPM (Interior-mounted PM Rotor)

❑ معرفی موتور BLDC

➢ ساختمان موتور BLDC

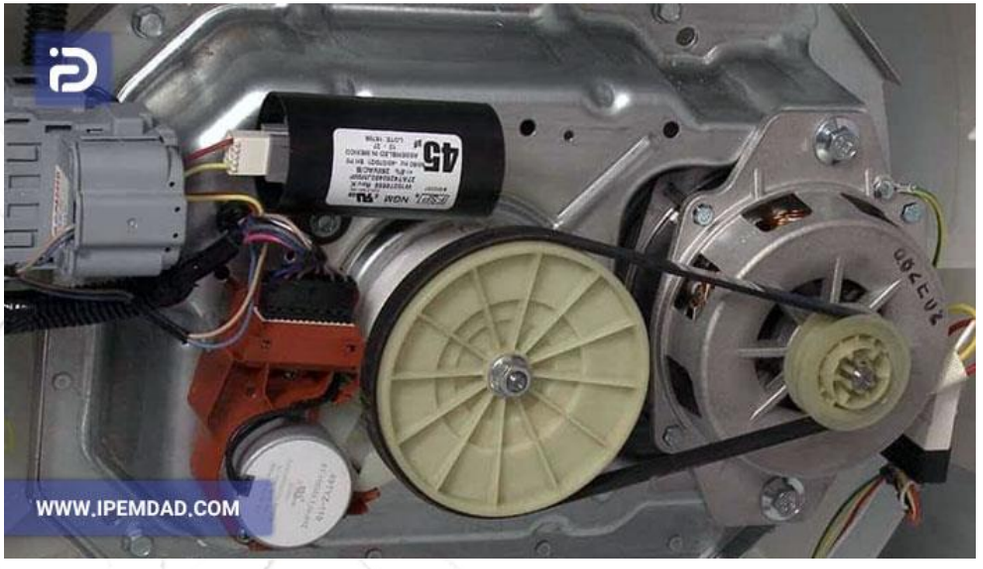


(ب) یک نمونه واقعی موتور BLDC با روتور داخلی

(الف) یک نمونه واقعی موتور BLDC با روتور خارجی

❑ معرفی موتور BLDC

➢ ساختمان موتور BLDC



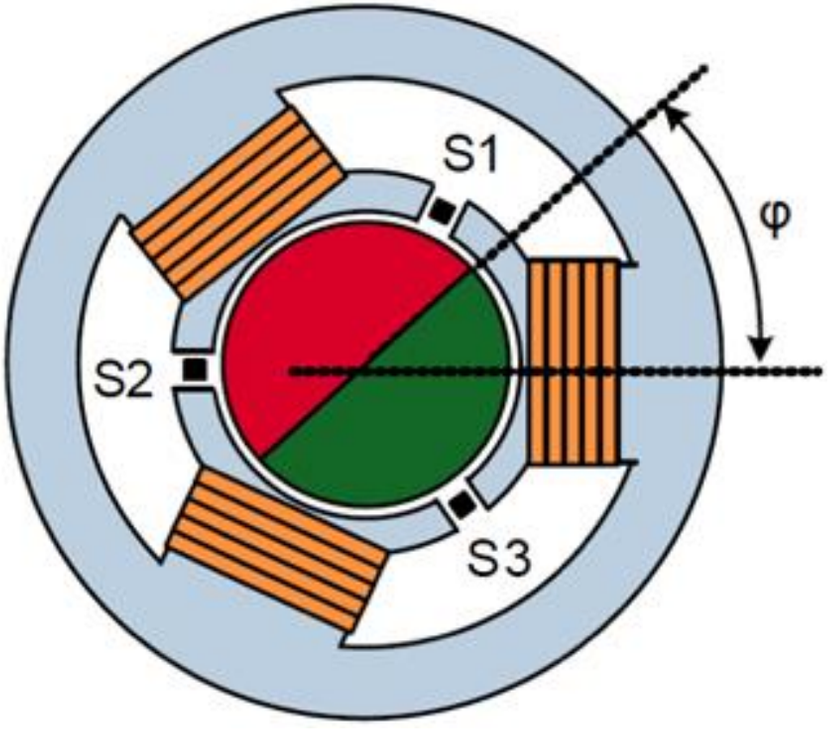
موتور BLDC ماشین لباسشویی با اتصال غیرمستقیم
(با تسمه) یا موتور براشلس روتور داخلی

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

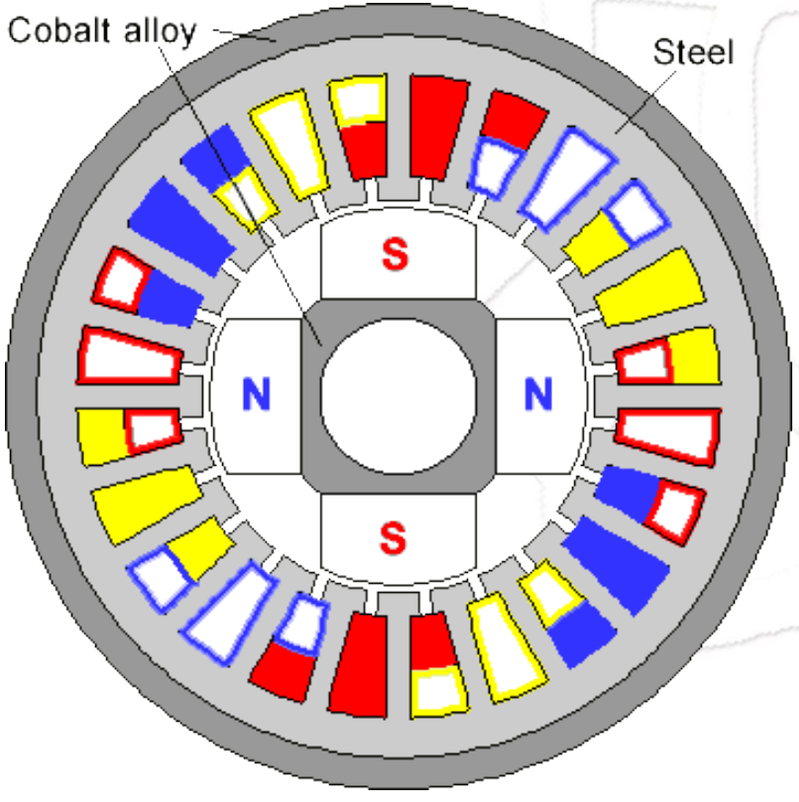
❑ معرفی موتور BLDC

➢ ساختمان موتور BLDC

- ✓ استاتور موتورهای BLDC می توانند بصورت یوک برجسته یا استوانه ای طراحی شوند.
- ✓ تعداد شیارهای استاتور در BLDC محدود بوده و مثل موتورPMSM تعداد شیارها برای ایجاد توزیع سینوسی شار زیاد نیستند.



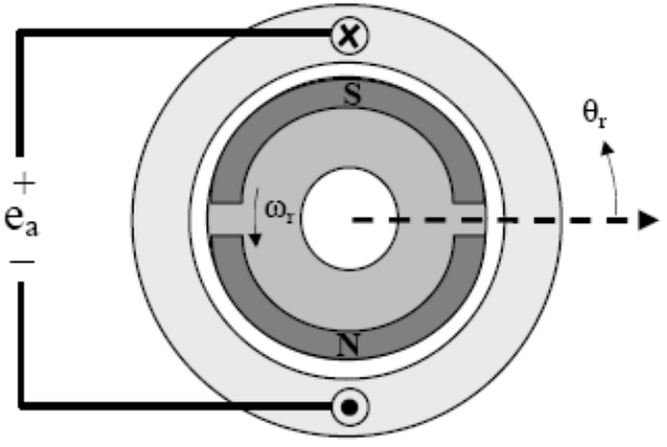
(الف) استاتور موتور BLDC دو قطبی از نوع یوک برجسته

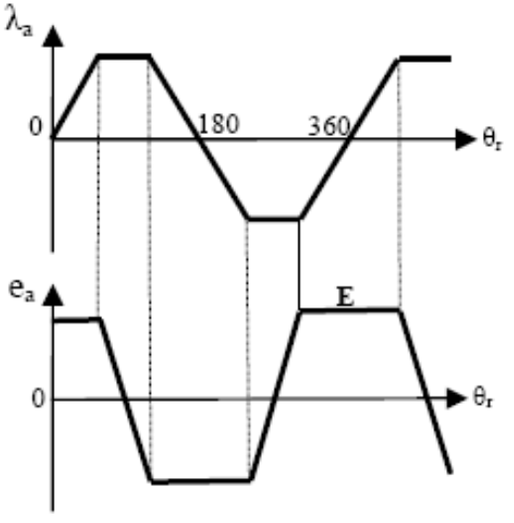


(ب) استاتور موتور BLDC چهارقطبی از نوع استوانه ای

❑ معرفی موتور BLDC

➢ ایجاد ولتاژ در سیم پیچی استاتور موتور BLDC





شار پیوندی در یک دور سیم‌پیچ استاتور

$$\lambda_a = \pi r l B \theta_r / (\pi/2) \qquad (-\pi/2 \le \theta_r \le \pi/2)$$

دامنه ولتاژ القا شده در یک دور سیم‌پیچ

$$e_a = \frac{d\lambda_a}{dt} = \frac{d\lambda_a}{d\theta_r} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{\pi r l B \omega_r}{\pi/2} = 2Blr\omega_r$$

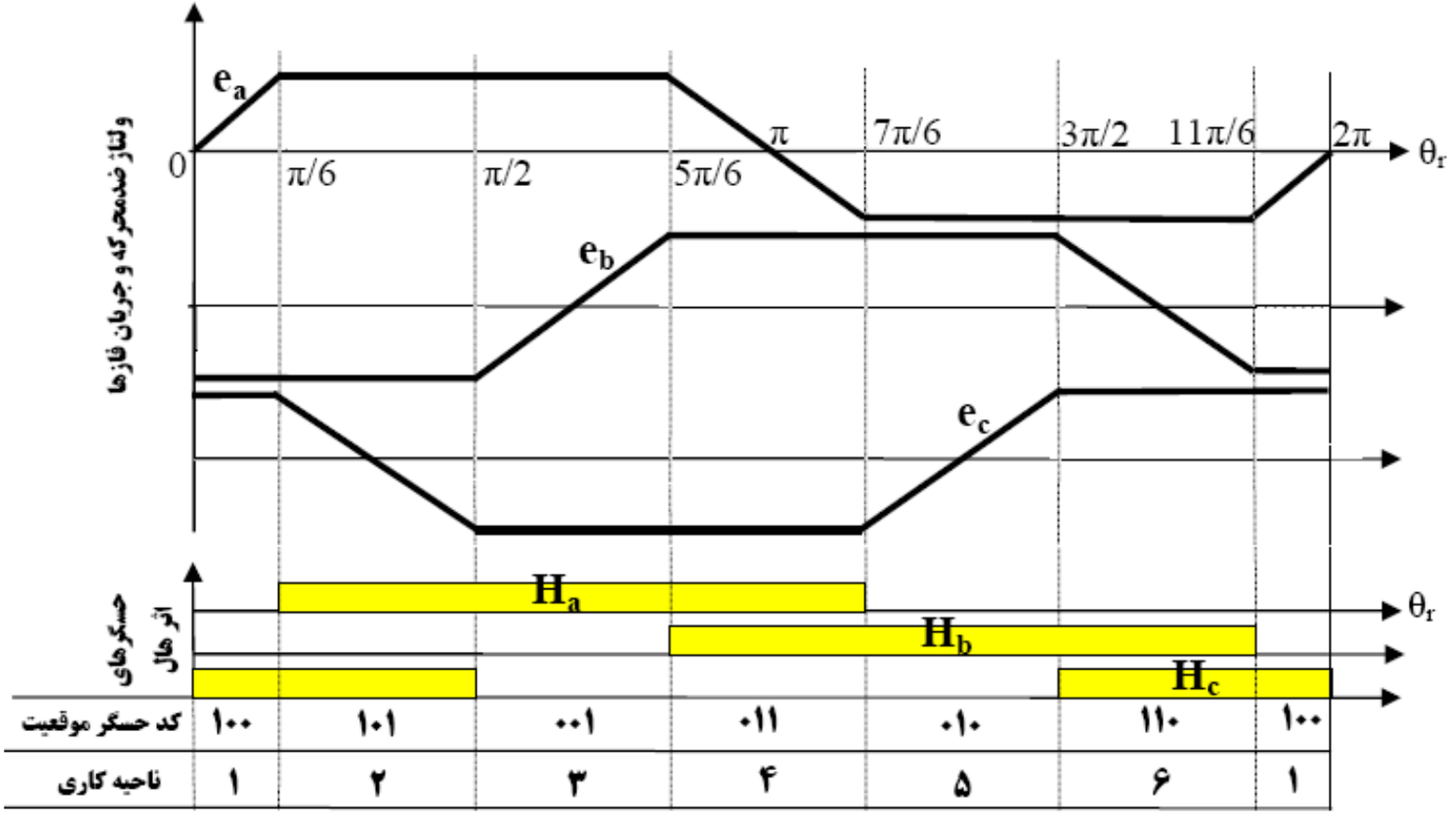
دامنه ولتاژ القـایی ضـدمحرکه در سیم‌پیچ‌های یک فاز از استاتور

$$E = 2N_S Blr\omega_r$$

❑ معرفی موتور BLDC

➢ شکل موج ولتاژ ضدمحرکه و ارتباط آن با حسگرهای موقعیت اثر هال

- ✓ در موتور BLDC ایده آل، ولتاژ ضدمحرکه هر فاز دارای دو بخش ۱۲۰ درجه ای با دامنه ثابت دارد.
- ✓ از سه حسگر موقعیت اثرهال برای تشخیص شش نقطه تغییر وضعیت ولتاژهای ضدمحرکه (یا نقاط کموتاسیون) استفاده می شود.
- ✓ برای داشتن گشتاور لحظه ای ثابت در هر لحظه، در موتور BLDC تنها در این بازه های ۱۲۰ درجه باید جریان ثابتی از موتور بگذرد.

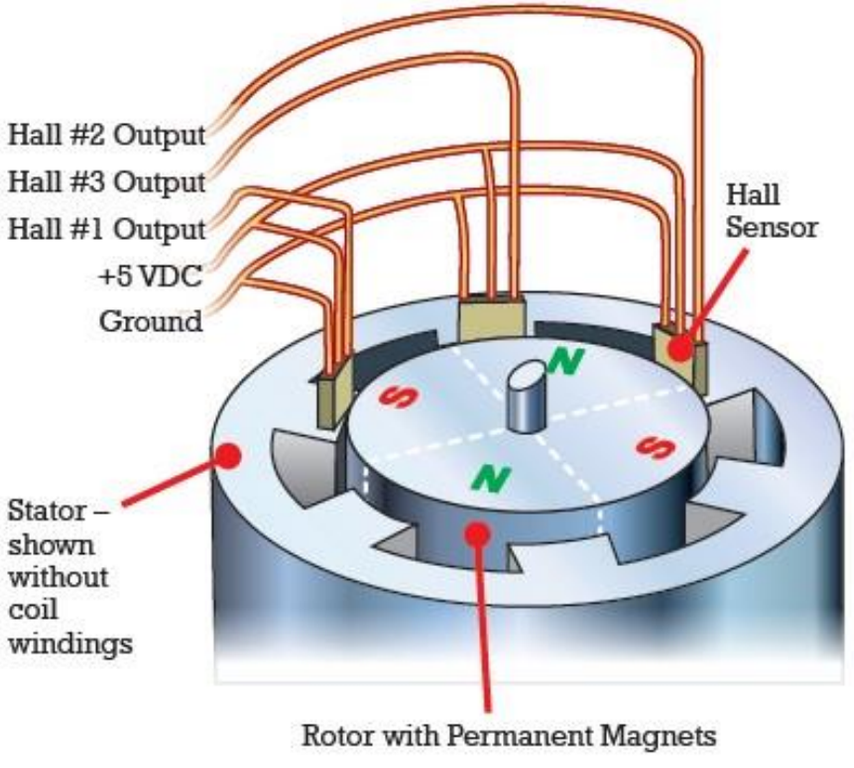


❑ معرفی موتور BLDC

➢ شکل موج ولتاژ ضدمحرکه و ارتباط آن با حسگرهای موقعیت اثر هال

✓ **برای تعیین موقعیت روتور در موتور BLDC از ۳ عدد حسگر ارزان قیمت موقعیت اثر هال که فاصله ۱۲۰ درجه الکتریکی نسبت به هم دارند، استفاده می شود.**

سه حسگر موقعیت اثر هال در موتور BLDC نوع روتور خارجی

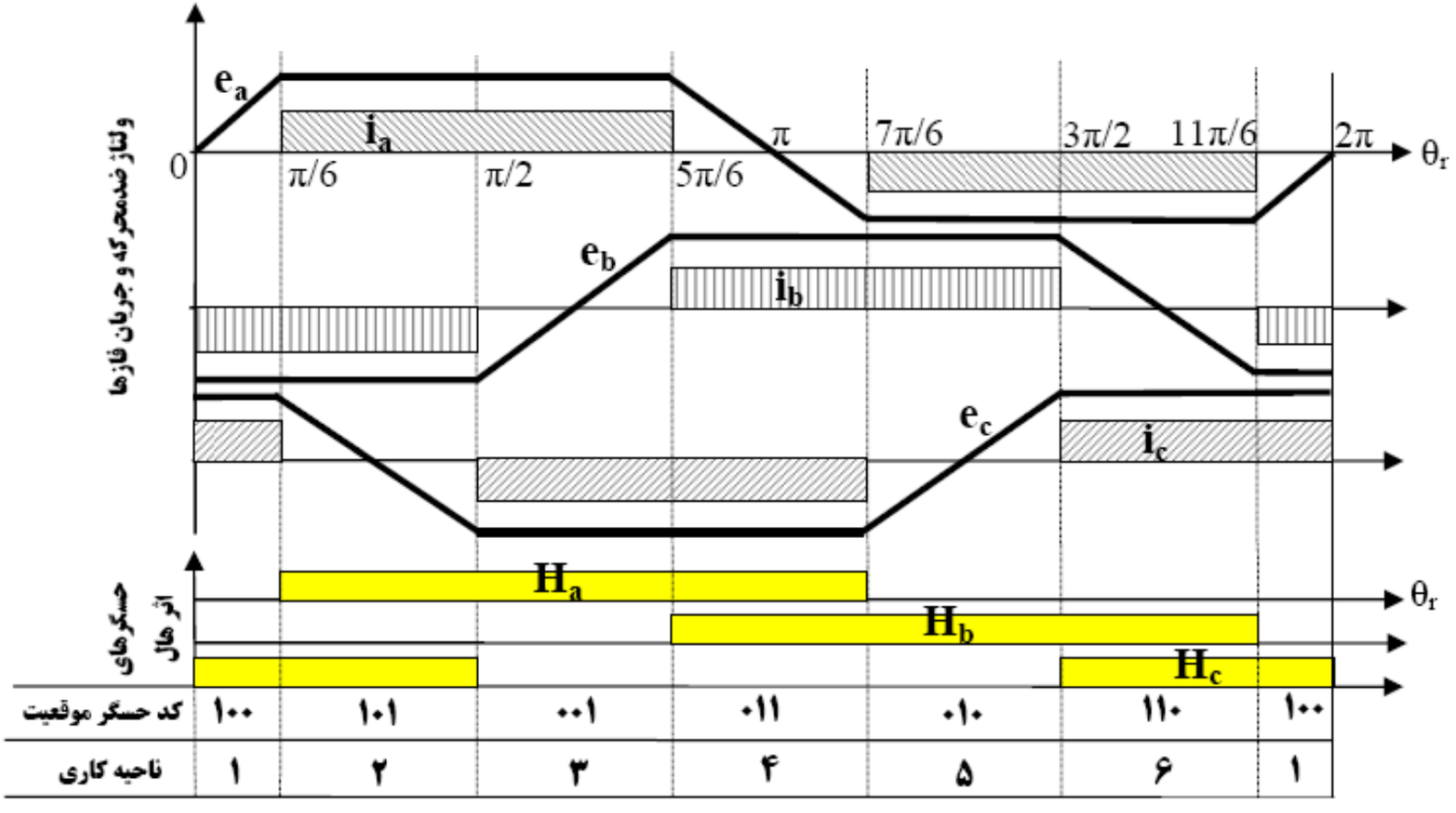


سه حسگر موقعیت اثر هال در موتور BLDC نوع روتور داخلی

❑ معرفی موتور BLDC

➢ ایجاد جریان در موتور BLDC و سنکرون بودن با ولتاژ ضدمحرکه

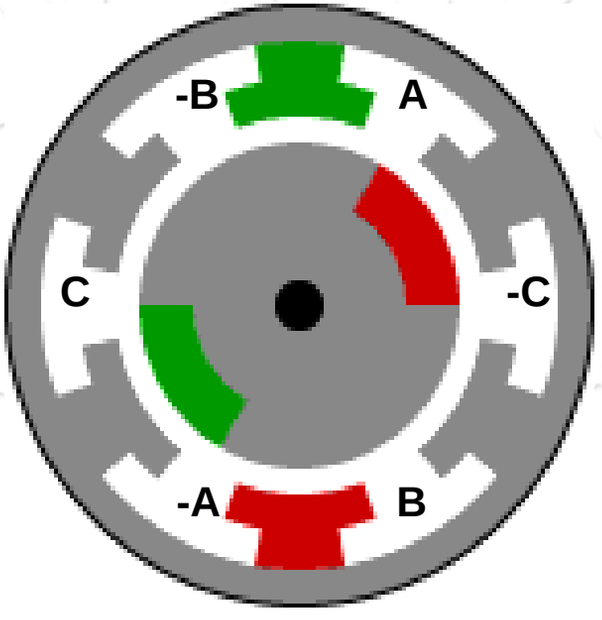
- ✓ جریان هر فاز وقتی برقرار می گردد که ولتاژ ضدمحرکه آن فاز در حداکثر مقدار دامنه خود قرار داشته باشد.
- ✓ از روی شکل پیداست که در هر لحظه از زمان فقط جریان در دو فاز برقرار است و همواره یکی از فازها خاموش است.
- ✓ اینکه به این موتور BLDC گفته می شود، به دلیل جریان DC موقتی (مستطیلی) هر فاز استاتور است.



❑ معرفی موتور BLDC

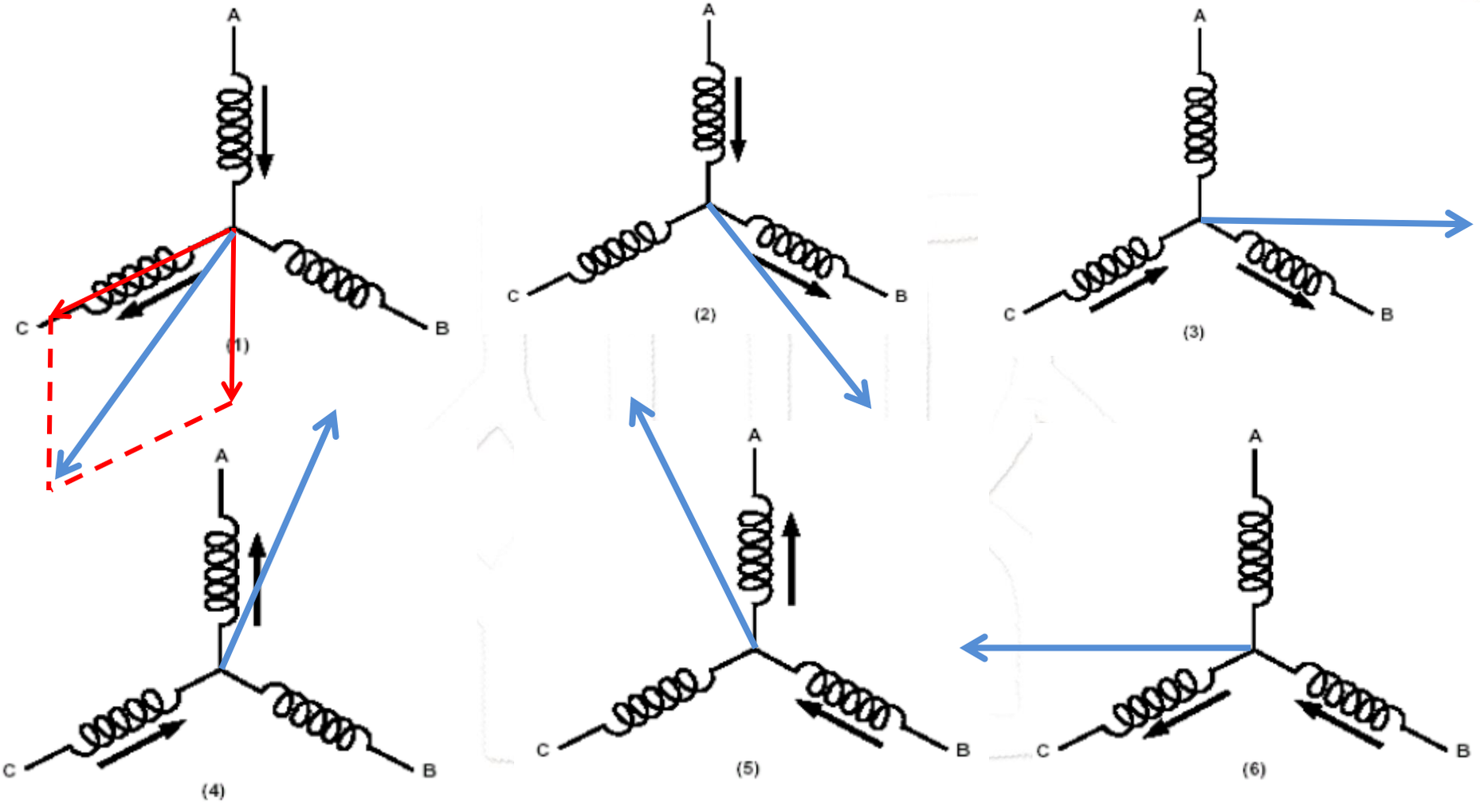
➢ تحریک فازها در موتور BLDC

- ✓ در موتورهای با تغذیه سینوسی میدان دوار ناشی از استاتور در هر لحظه در حال حرکت است و تمام زوایا را جاروب می کند.
- ✓ اما در موتور BLDC، میدان دوار استاتور هر ٦٠ درجه از حرکت می ایستد تا روتور به آن برسد و سپس با تغییر جریان در فازها مجددا ٦٠ درجه دیگر حرکت می کند.
- ✓ این حرکت باعث ایجاد نوسانات جریان و گشتاور می شود و یکی از عیوب این موتور نسبت به موتور PMSM همین سوئیچینگ جریان و کموتاسیون فازها است که سبب بروز ریپل گشتاور می شود.
- ✓ لذا استفاده از این موتور در سرعتهای خیلی پائین بدون استفاده از سنسورهای موقعیت دقیق مناسب نمی باشد.



❑ معرفی موتور BLDC

➢ تغییر میدان دوار استاتور در موتور BLDC

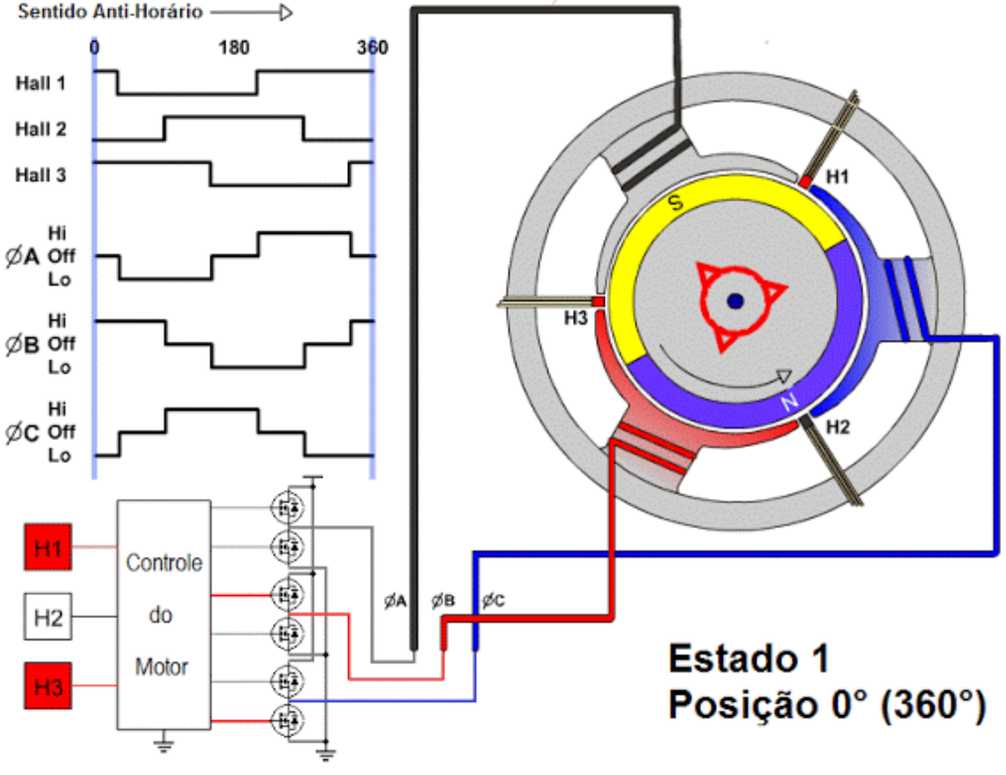


- ✓ میدان مغناطیسی ناشی از سیم پیچهای استاتور، یک میدان دوار بوده که دامنه آن ثابت بوده اما مرتبا می چرخد.
- ✓ این میدان بر میدان ناشی از آهنربای روتور اثر گذاشته و سبب چرخش روتور می گردد.
- ✓ سئوال: جهت چرخش موتور چگونه تغییر می کند؟

❑ معرفی موتور BLDC

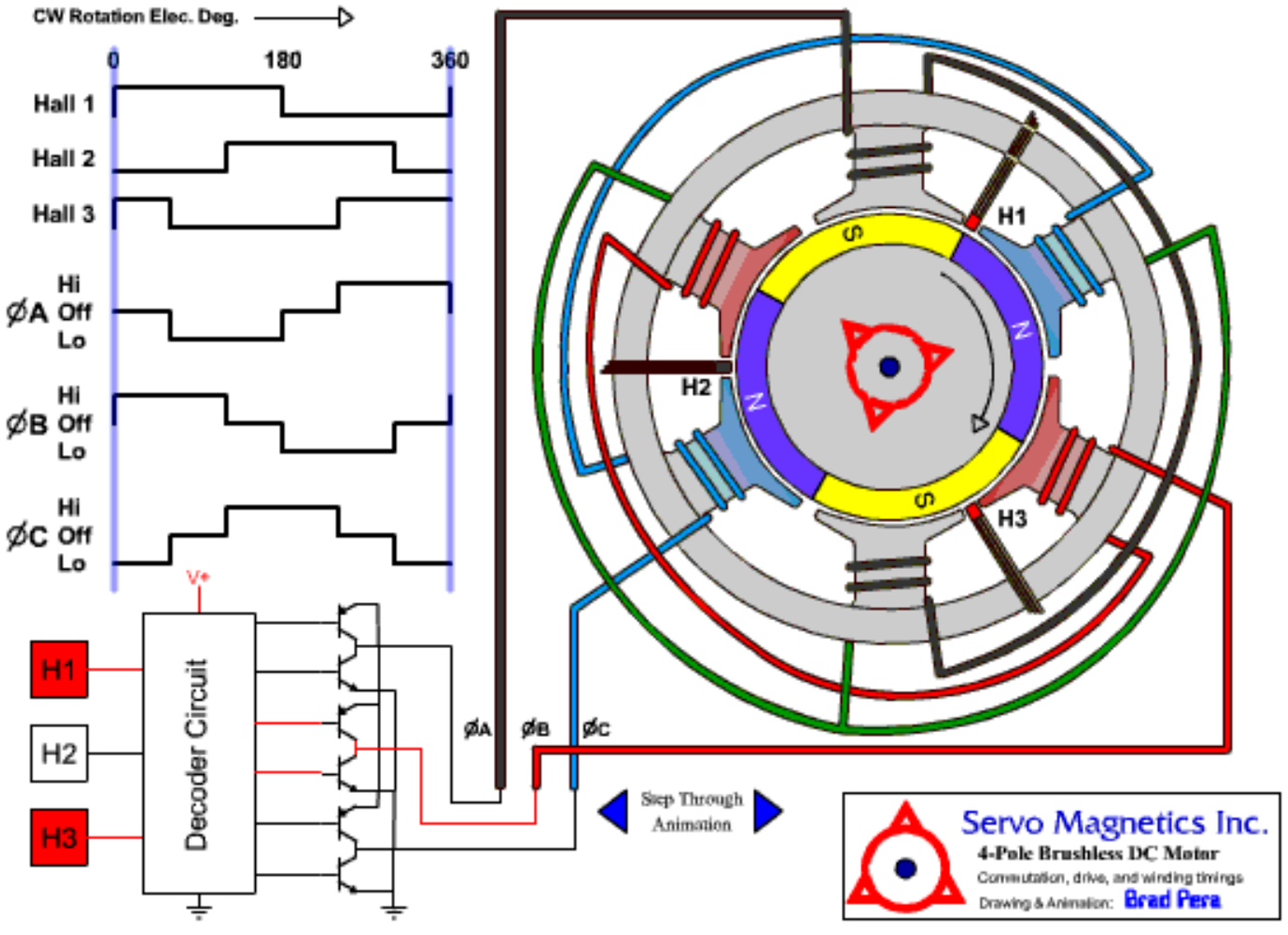
➢ ساختار کلی موتور BLDC و اینورتر آن

- ✓ سنسورهای اثر هال بین سیم پیچی ها قرار می گیرند.
- ✓ با عبور قطب N روتور از مقابل هر سنسور اثر هال، خروجی سنسور ۱ منطقی می شود.
- ✓ با عبور قطب S روتور از مقابل هر سنسور اثر هال، خروجی سنسور صفر منطقی می شود.
- ✓ در یک موتور BLDC سه فاز دو قطبی، سنسورهای اثر هال به فاصله ۱۲۰ درجه مکانیکی نسبت به یکدیگر قرار گرفته اند.
- ✓ لذا خروجیهای سنسورهای اثر هال با یکدیگر اختلاف فاز ۱۲۰ درجه دارند.
- ✓ حالتی که خروجی هر سه سنسور اثر هال صفر و یا یک باشند، اصلا وجود ندارد.



❑ معرفی موتور BLDC

➢ تحریک فازها در موتور BLDC

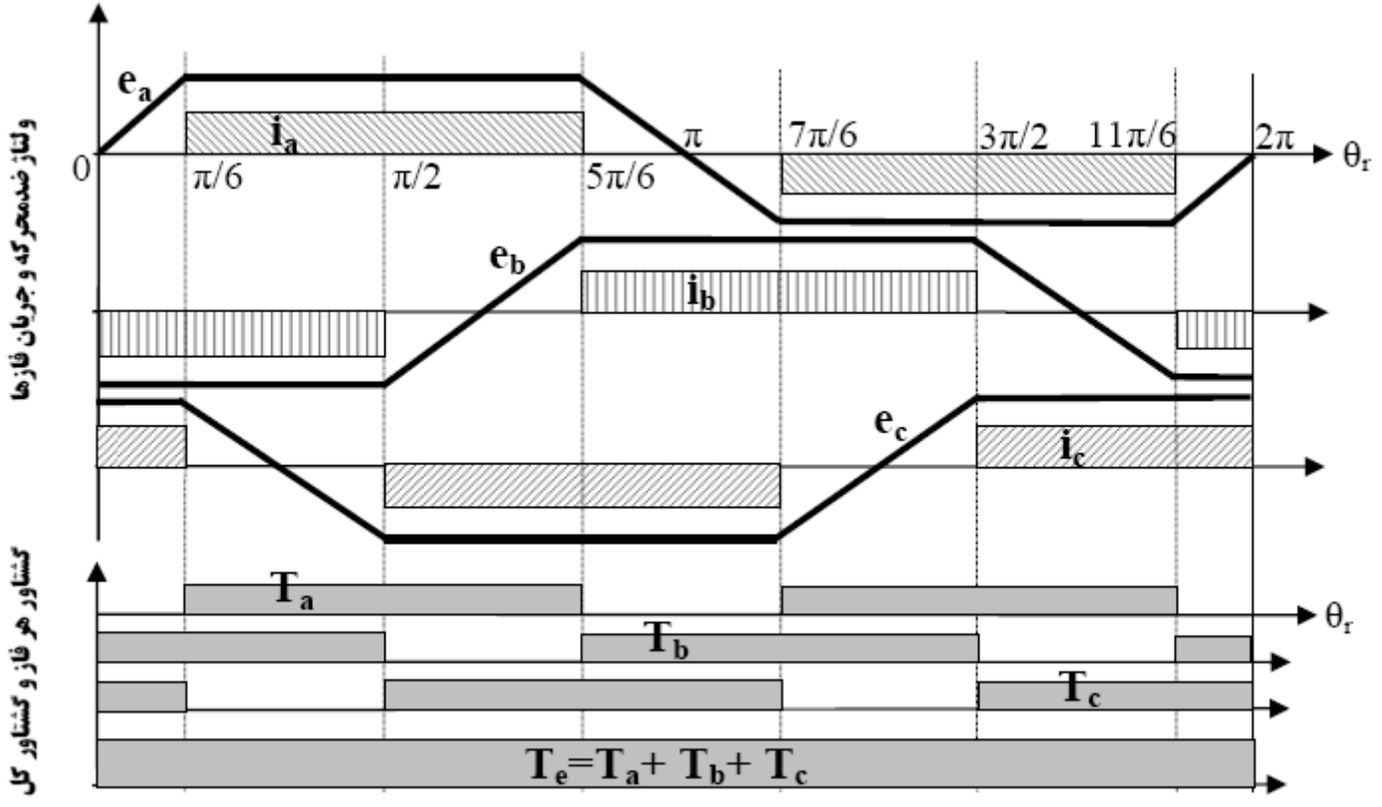


❑ معرفی موتور BLDC

➢ گشتاور ایجاد شده در موتور BLDC

✓ با توجه به اینکه $e_a i_a = T_a \times \omega_m$ است، با ایجاد جریان شبه مربعی، گشتاور هر فاز در بازه هائی دارای مقدار ثابتی همانند موتور DC ($k_a \varphi\, i_a$) است. در نتیجه گشتاور کل همواره ثابت خواهد بود.

✓ مطابق شکل زیر، در هر لحظه تنها دو فاز در ایجاد گشتاور مشارکت دارند.



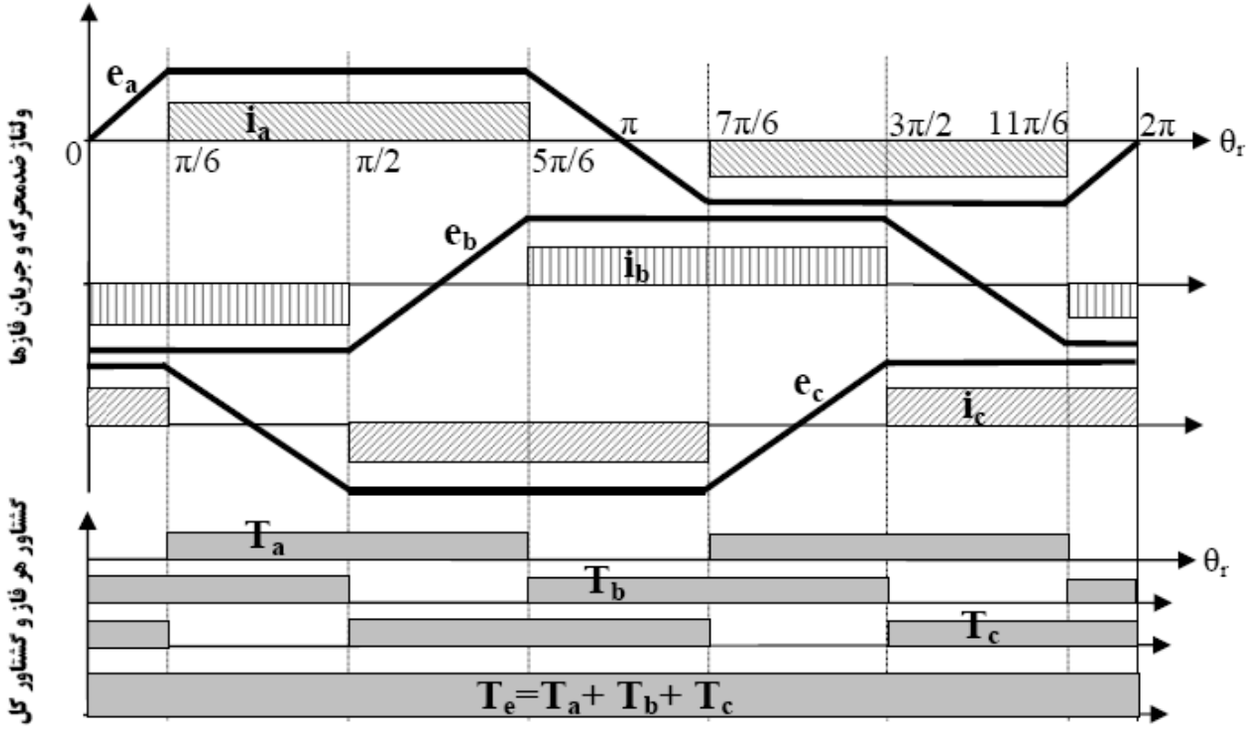
✓ نکته بسیار مهم اینکه در موتور BLDC برای کنترل گشتاور (جریان) اصلا نیازی به مدل دینامیکی موتور نیست.

❑ معرفی موتور BLDC

➢ گشتاور ایجاد شده در موتور BLDC

✓ با توجه به اینکه $e_a i_a = T_a \times \omega_m$ است، با ایجاد جریان شبه مربعی، گشتاور هر فاز در بازه هائی دارای مقدار ثابتی همانند موتور DC ($k_a \varphi\, i_a$) است. در نتیجه گشتاور کل همواره ثابت خواهد بود.

✓ مطابق شکل زیر، در هر لحظه تنها دو فاز در ایجاد گشتاور مشارکت دارند.



✓ نکته بسیار مهم اینکه در موتور BLDC برای کنترل گشتاور (جریان) اصلا نیازی به مدل دینامیکی موتور نیست.

✓ لذا ساختار سیستم کنترل موتور BLDC بسیار ساده است.

❑ معرفی موتور BLDC

➢ گشتاور ایجاد شده در موتور BLDC

✓ ساختار سیستم کنترل موتور BLDC بسیار ساده تر از موتور PMSM است.

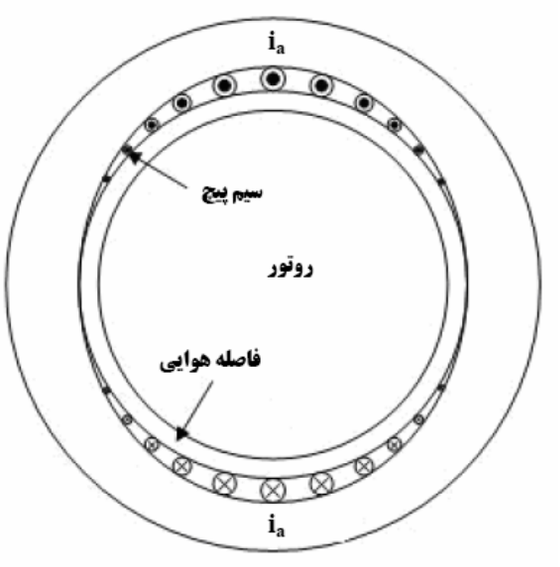
درایو موتور BLDC با ابعاد کوچک نصب شده بر روی موتور BLDC

درایو کامل موتور BLDC با ابعاد کوچک

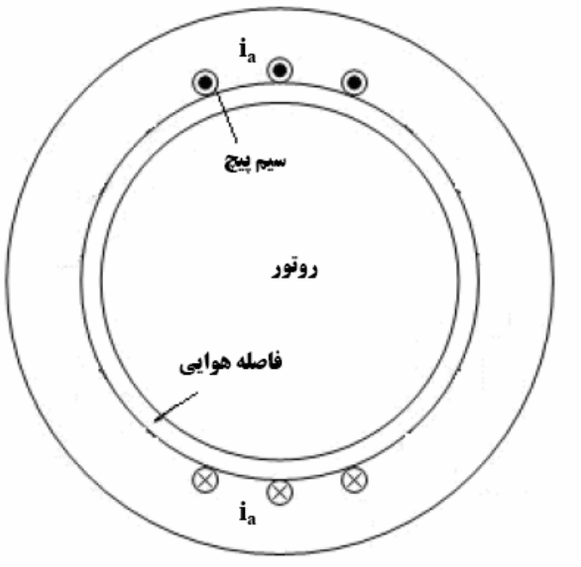
معرفی
موتور بدون جاروبک AC (BLAC)
یا
موتور سنکرون آهنربای دائم (PMSM)

❑ مقایسه موتور BLDC و موتور PMSM

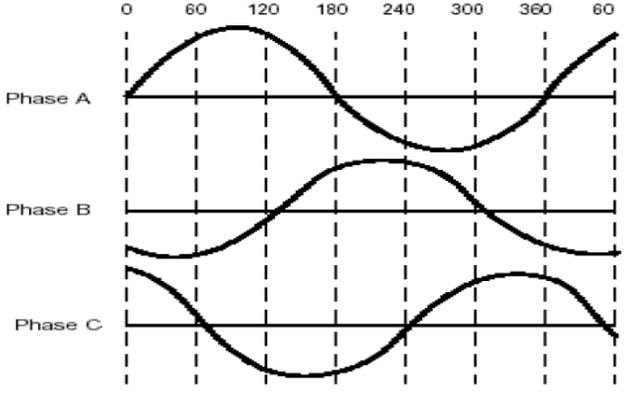
✓ **سیم پیچی استاتور موتور BLDC متمرکز است اما در موتور PMSM توزیع شده است. به همین دلیل شکل موج ولتاژ ضدمحرکه موتور BLDC ذوزنقه ای است و در PMSM سینوسی.**

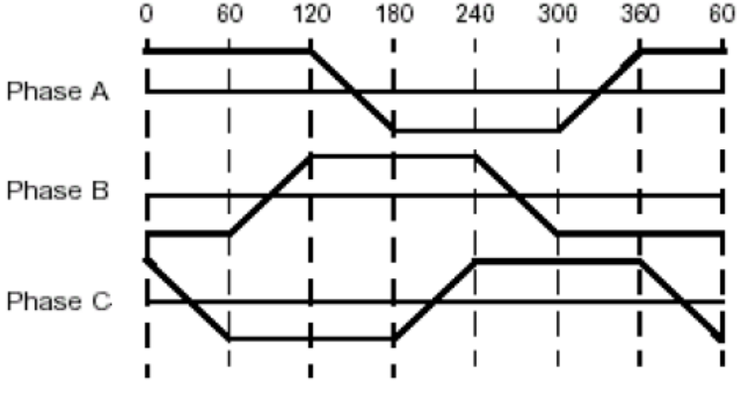


الف- نوع BLAC (شار سینوسی) با آرایش سیم‌پیچی توزیع شده



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

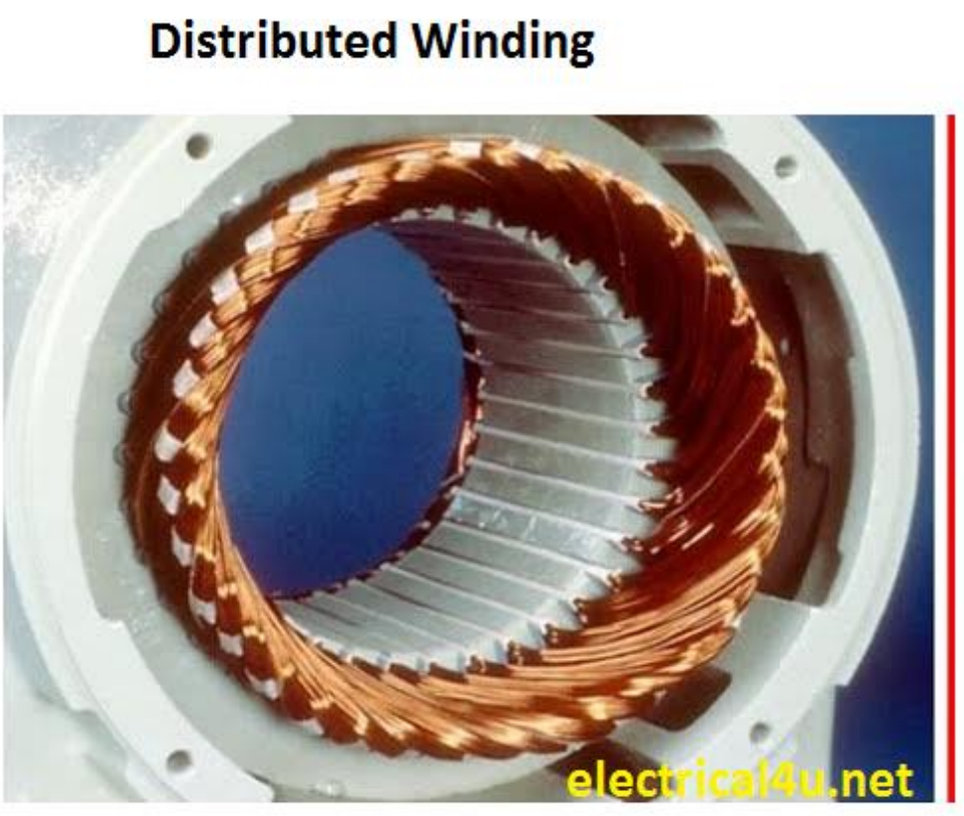




❑ مقایسه موتور BLDC و موتور PMSM

✓ 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.

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

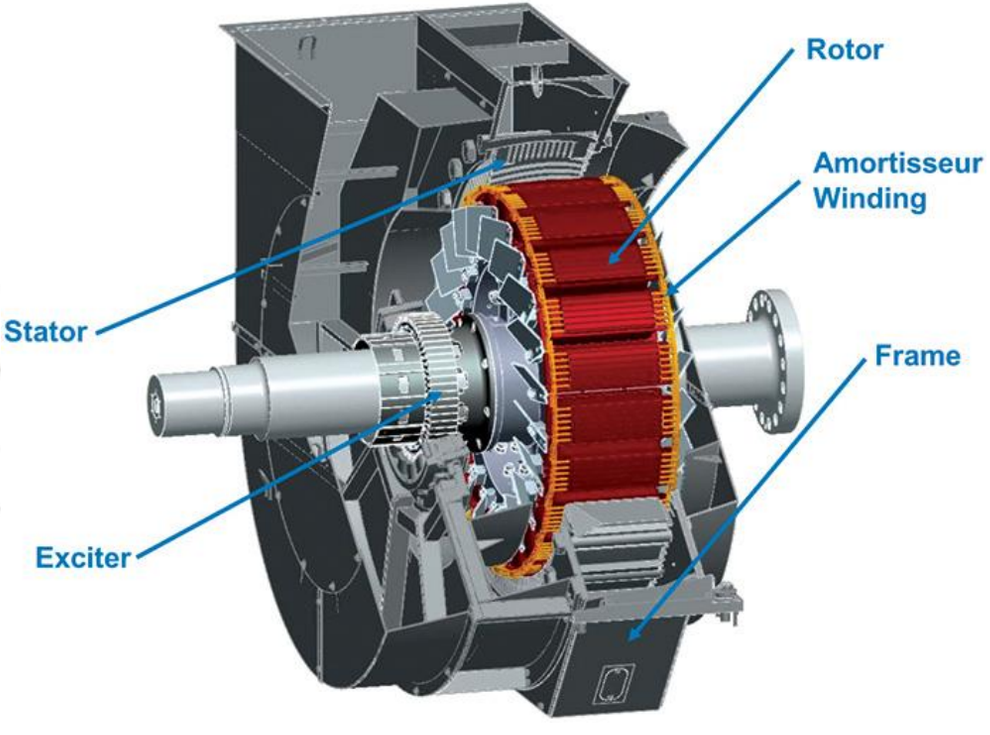


استاتور یک موتور PMSM واقعی
(دارای سیم پیچی استاتور توزیع شده)

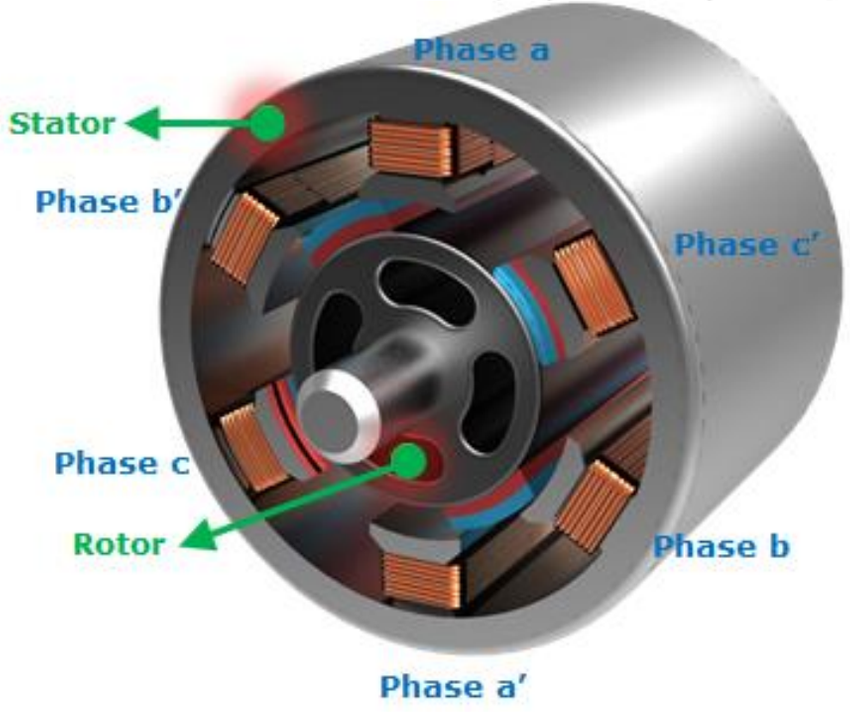
❑ معرفی موتور PMSM

➢ مقایسه موتور سنکرون معمولی (با سیم پیچی تحریک) و موتور PMSM

- ✓ در موتور سنکرون معمولی برای ایجاد میدان مغناطیسی ثابت در روتور، جریان DC در سیم پیچ روتور تزریق می شود که برای انتقال جریان DC از منبع DC ساکن روی زمین از جاروبک ها و حلقه های لغزان استفاده می شود.
- ✓ می توان برای ایجاد میدان مغناطیسی ثابت در روتور، از آهنربای دائم استفاده کرد که جاروبکها و حلقه های لغزان حذف می شوند. با حذف جاروبک ها، اسم این موتو ر را براشلس AC می گذاریم یا همان PMSM.



(الف) موتور سنکرون با سیم پیچی تحریک (جاروبک دار)



(ب) موتور سنکرون آهنربای دائم (PMSM یا BLAC)

❑ معرفی موتور PMSM

➢ ویژگی های موتورهای PMSM

- ✓ پس با حذف جاروبکها در موتور سنکرون، موتوری بدست می آید که به آن، موتور بدون جاروبک یا Brushless و یا به اختصار PMBL یا PMSM یا BLAC نیز گفته می شود.
- ✓ موتورهای PMSM در توانهای پائین از نوع آهنربای دائم هستند. از توان چند ده وات تا چند صد کیلووات.

❖ مزایا:

۱- حذف تلفات اهمی بخش تحریک موتور و در نتیجه افزایش بهره

۲- ساختار ساده تر، استحکام بیشتر و نیاز به نگهداری کمتر

۳- وزن و حجم کمتر و درنتیجه نسبت توان (گشتاور) به وزن (حجم) بیشتر در مقایسه با دیگر انواع موتورهای AC

❖ معایب:

۱- هزینه بالای مغناطیس دائم (در صورت استفاده از مواد مغناطیس دائم با کیفیت نظیر ساماریوم –کبالت ها و عناصر خاک نادر

۲- حساسیت به دما و تغییر مشخصات مغناطیسی آهنربای دائم به افزایش بیش از حد دمای داخل موتور

❖ کاربردها:

هوا-فضا، حمل و نقل و خودرو، رباتیک، لوازم خانگی، سیستم های کنترل حرکت پیشرفته و ...

❑ معرفی موتور PMSM

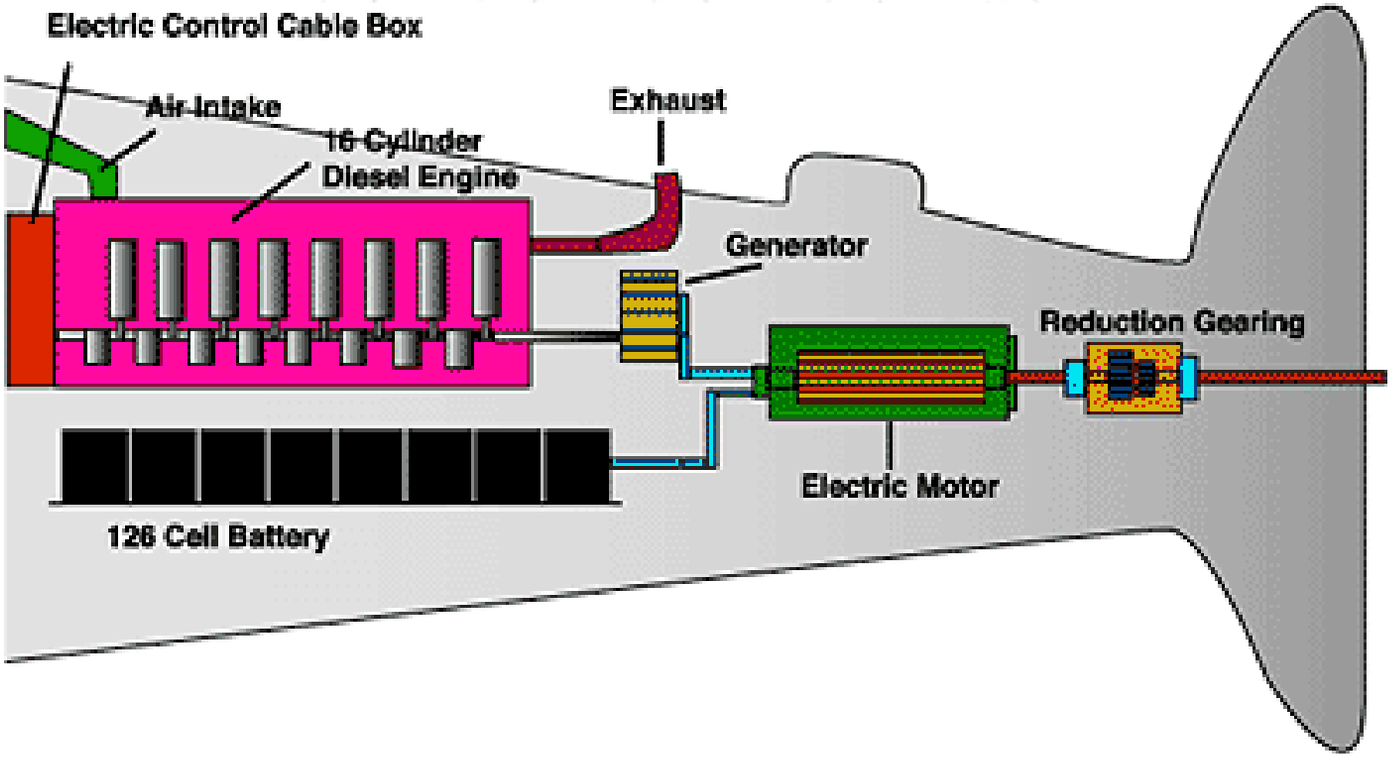
➢ کاربرد موتورهای PMSM در صنایع نظامی دریایی

✓ **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 موتورهای PMSM در صنایع نظامی دریایی

- ✓ 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 موتورهای PMSM در صنایع نظامی دریایی

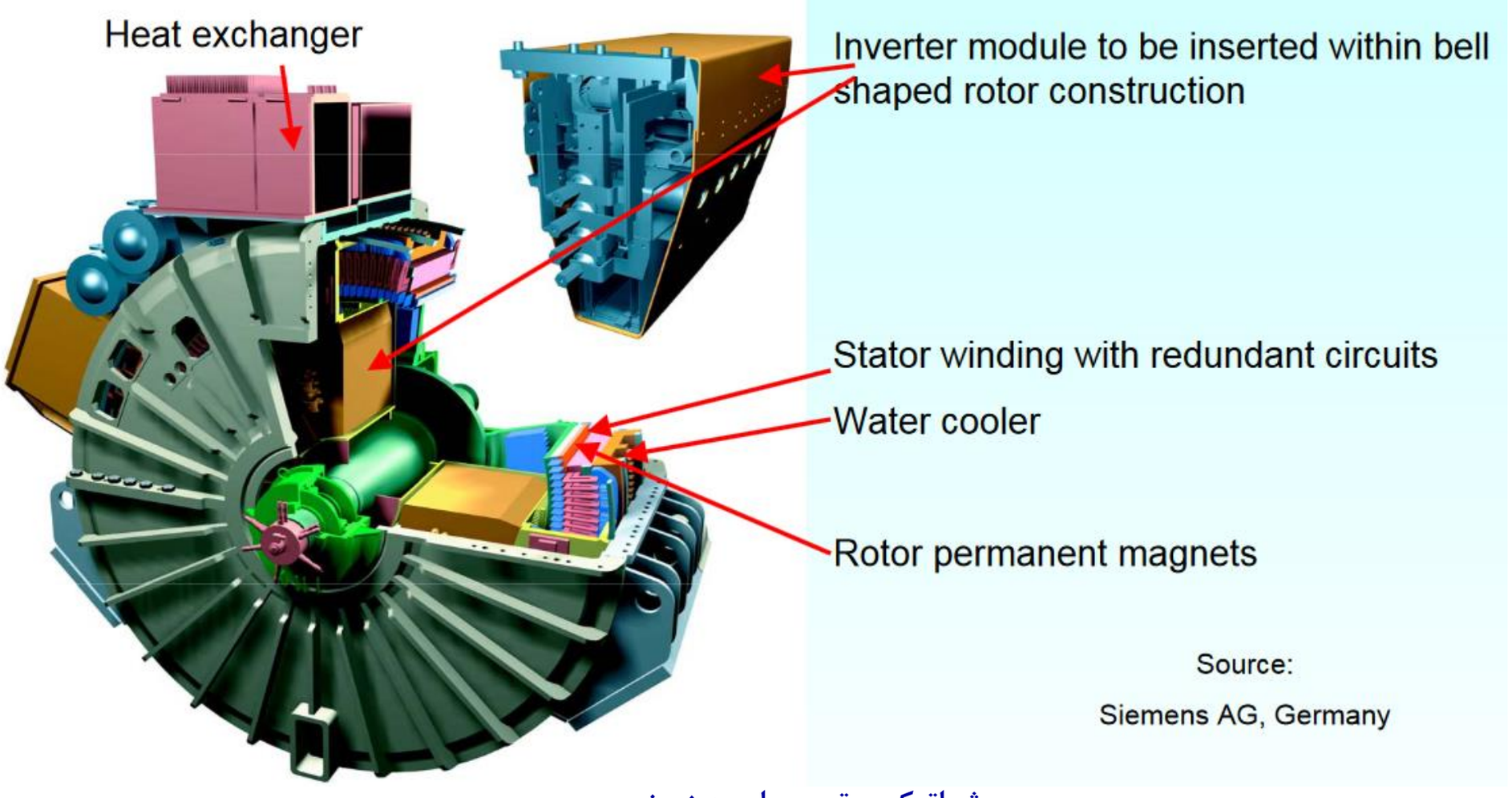
- ✓ شرکت زیمنس آلمان سازنده موتور ۱۲ فاز BLDC و PMSM مگاواتی با نام پرماسین در شناورهای زیرسطحی و زیردریایی ها
- ✓ توان موتور PMSM ۱۲ فاز پرماسین در زیردریایی کلاس ۲۱۲ حدود ۱.۲ مگاوات است.

شکلهای واقعی از موتور پرماسین زیمنس

❑ معرفی موتور PMSM

➢ کاربرد موتورهای PMSM در صنایع نظامی دریایی

✓ طراحی موتور و درایو پرماسین بصورت ماژولار است یعنی هر فاز موتور از درایو جداگانه ای کنترل می شود.



شماتیک موتور پرماسین زیمنس

❑ معرفی موتور PMSM

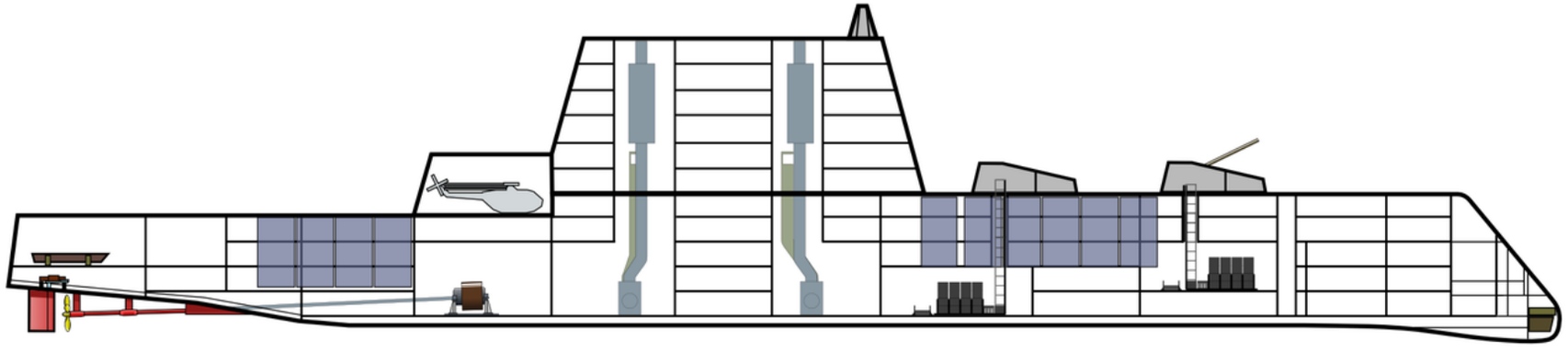
➢ کاربرد موتورهای PMSM در صنایع نظامی دریایی

✓ موتورPMSM توان بالایی با توان ۳۶ مگاوات برای ناوشکن کاملا پنهان کار DDG1000 کلاس زام والت (Zumwalt) توسط کشور ایالات متحده ساخته شده است.

Fig. 2. DRS' 36MW permanent magnet propulsion motor and variable frequency drive.

❑ معرفی موتور PMSM

➢ کاربرد موتورهای PMSM در صنایع نظامی دریایی



151207-N-ZZ999-435 ATLANTIC OCEAN (Dec. 7, 2015) The future USS Zumwalt (DDG 1000) is underway for the first time conducting at-sea tests and trials in the Atlantic Ocean Dec. 7, 2015. The multimission ship will provide independent forward presence and deterrence, suppo ...

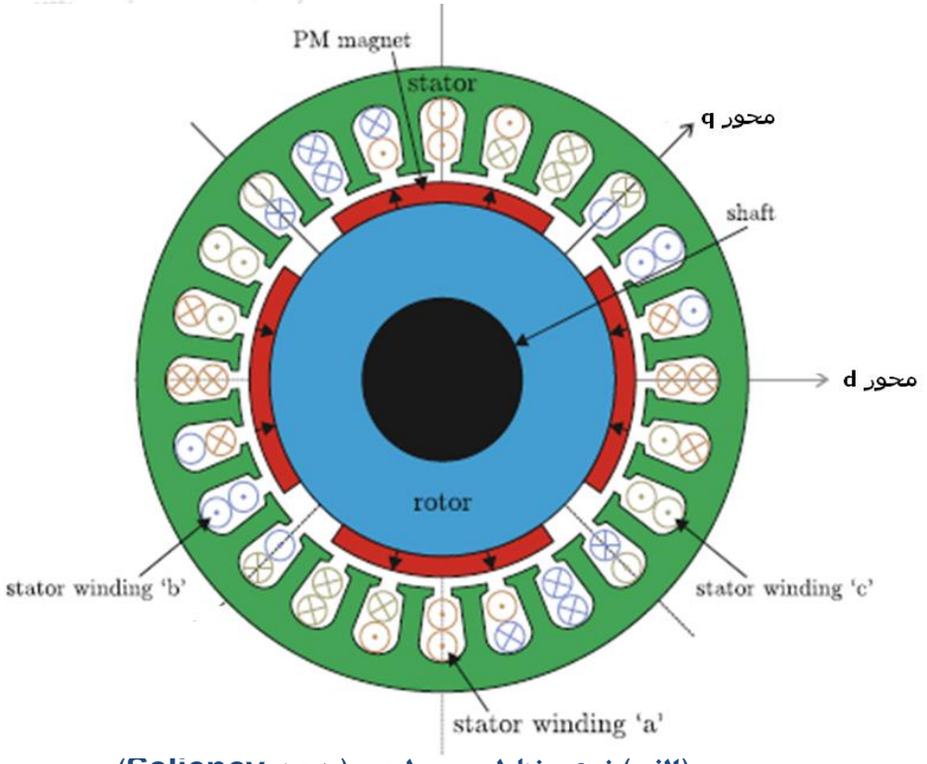
More detai

❑ معرفی موتور PMSM

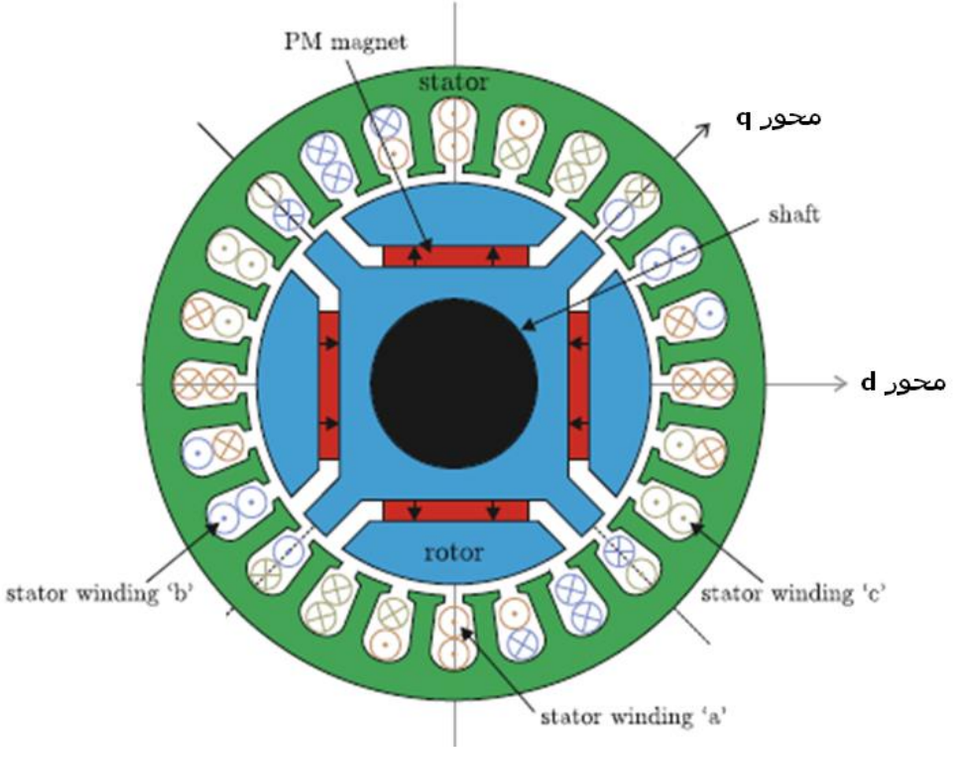
➢ انواع موتورهای PMSM

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

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



(الف) نوع مغناطیس سطحی (بدون Saliency)



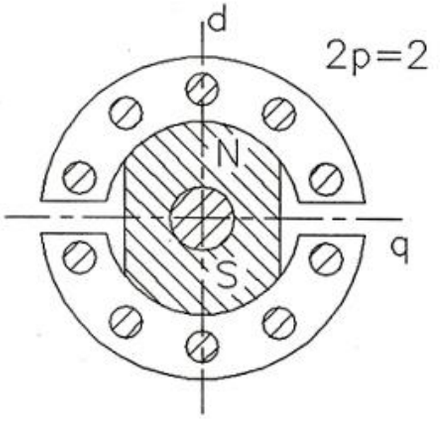
(ب) نوع مغناطیس داخلی (با Saliency)

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

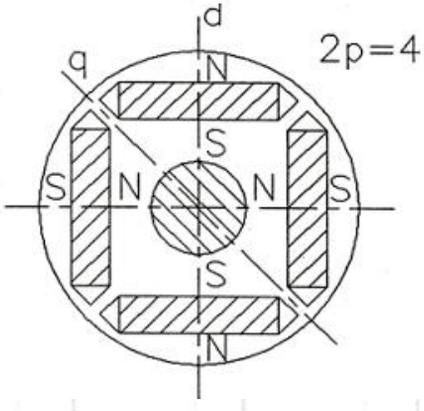
❑ معرفی موتور PMSM

➢ انواع موتورهای PMSM

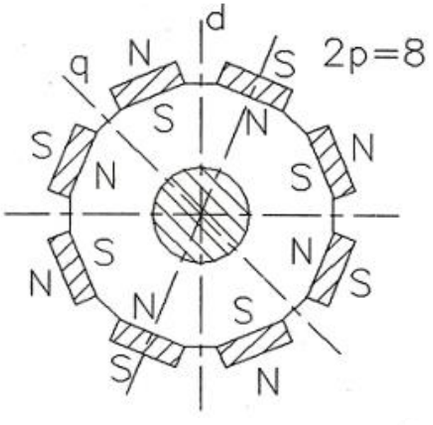
❖ دیگر انواع ساختار روتور در موتورهای سنکرون آهنربای دائم:



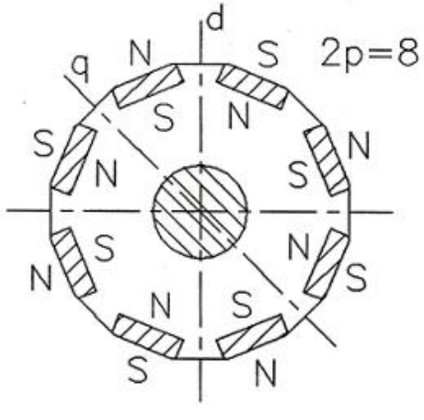
(الف) نوع کلاسیک



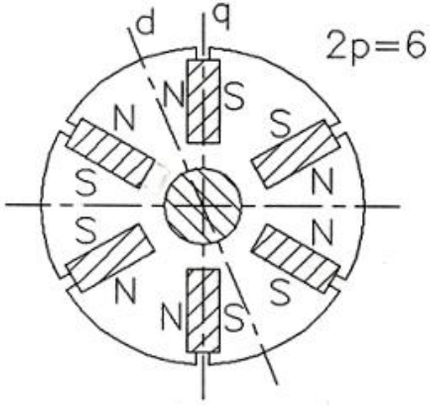
(ب) نوع داخلی Interior



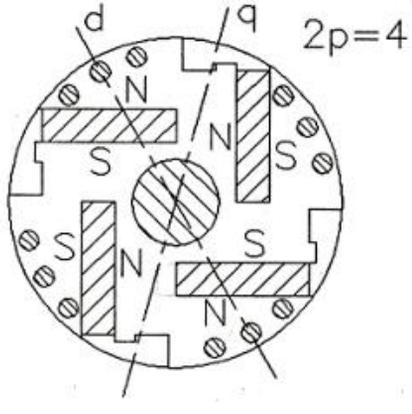
(ج) نوع سطحی



(د) نوع inset



(و) نوع buried (مدفون) متقارن



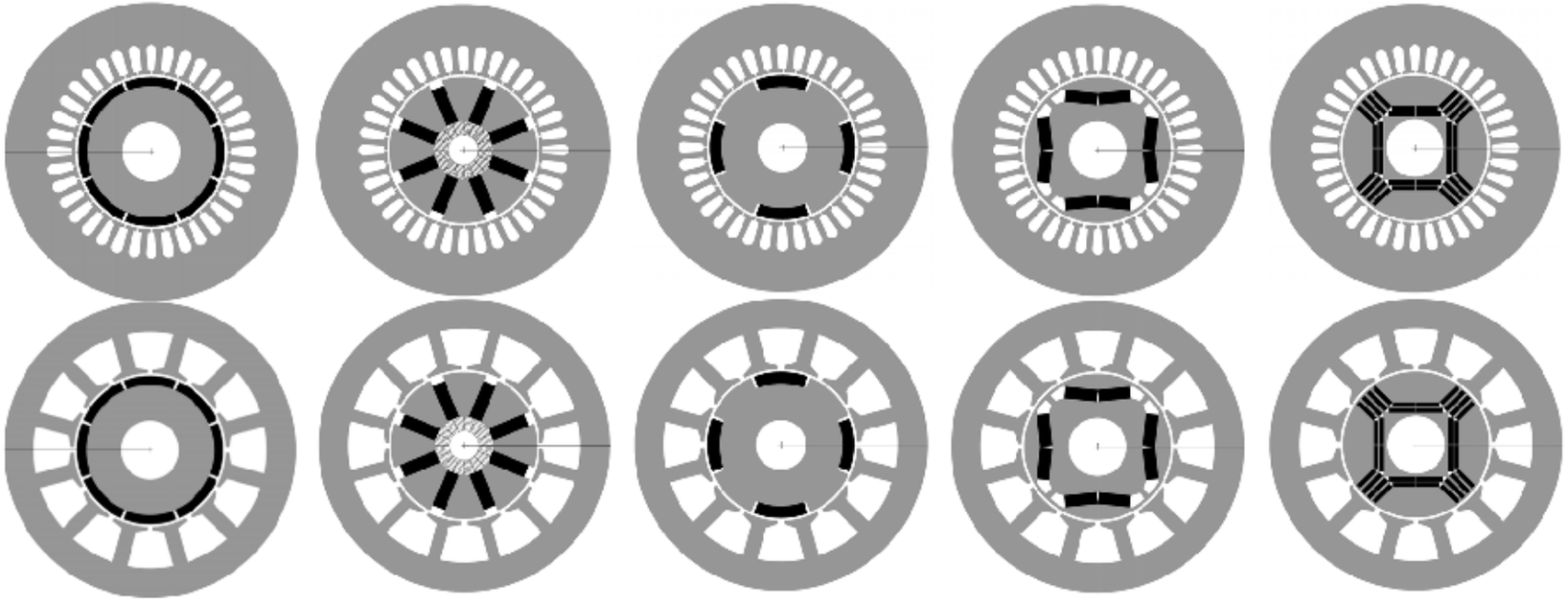
(ه) نوع buried نامتقارن

✓ موتورهای با مگنت نصب شده در داخل، علیرغم پیچیدگی ساخت از استحکام بیشتری برخوردار هستند و در کاربردهای دور بالا از آنها استفاده می شود.

❑ معرفی موتور PMSM

➢ انواع موتورهای PMSM

- ✓ البته در هر دو نوع موتور PMSM و BLDC، آرایش آهنرباها می تواند متفاوت باشد.
- ✓ ردیف اول در شکل زیر مربوط به موتور PMSM است و ردیف دوم شکلها از موتور BLDC است.



(a) SM PM motor | *(b) Flux-concentrating PM motor* | *(c) Inset PM motor* | *(d) Single layer IPM moto* | *(e) Multi-layer IPM moto*

برش مقطعی از پرکاربردترین موتورهای بدون جاروبک، نمایش ورقه‌های استاتور و روتور (خاکستری)، آهنرباهای دائم (مشکی)، شیارهای استاتور (سفید) و شامل سیم‌پیچی توزیع‌شده (ردیف بالا) یا سیم‌پیچی متمرکز (ردیف پایین)

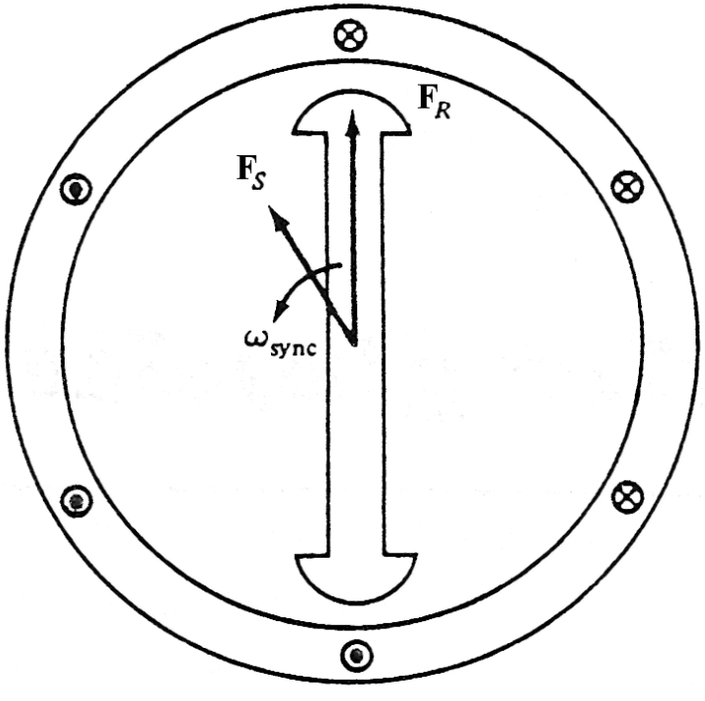
❑ معرفی موتور PMSM

➢ مکانیزم ایجاد گشتاور در موتور سنکرون

- ✓ 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، اما هیچگاه به آن نمی‌رسد.

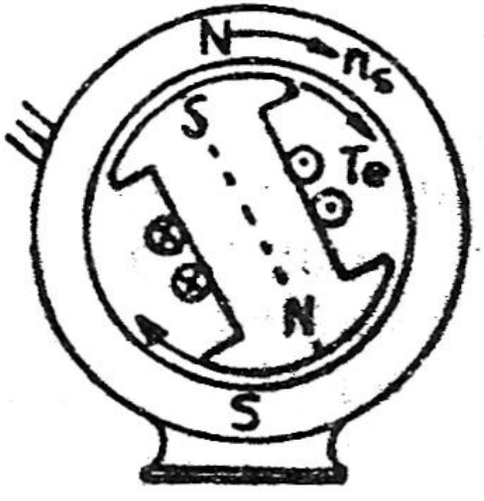
$$T_e = k F_s F_r \sin\delta$$



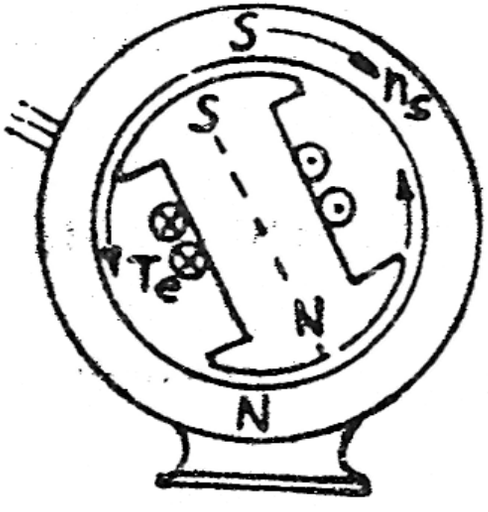
نیروهای مغناطیسی موجود در یک موتور سنکرون

❖ **موتور سنکرون، گشتاور راه‌اندازی ندارد. چرا؟**

- ✓ **از آنجا که میدان مغناطیسی دوار استاتور با سرعت بسیار زیادی می‌چرخد، این سرعت زیاد مانع می‌شود که روتور به علت وجود لختی بتواند تغییرات سریع میدان را دنبال نموده و به دنبال آن شروع به چرخش کند. لذا موتور سنکرون راه‌اندازی نمی شود.**
- ✓ **گشتاور الکترومغناطیسی حالت دائمی در موتور سنکرون وقتی تولید می شود که میدان‌های روتور و استاتور با هم قفل مغناطیسی شوند. این قفل شدن (جذب قطب‌های غیرهمنام روتور و استاتور) وقتی اتفاق می‌افتد که سرعت نسبی بین میدان‌های استاتور و روتور صفر باشد.**



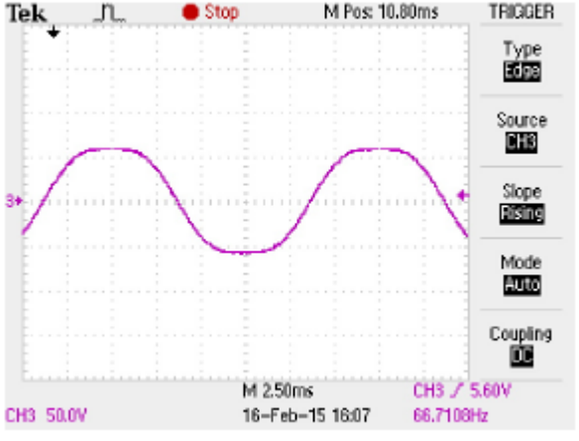
(الف) حالت جذب میدان‌های روتور و استاتور

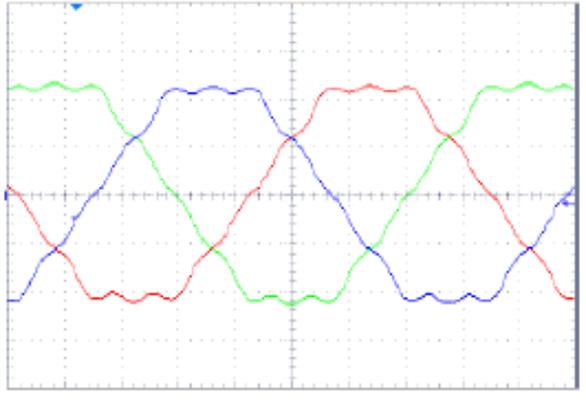


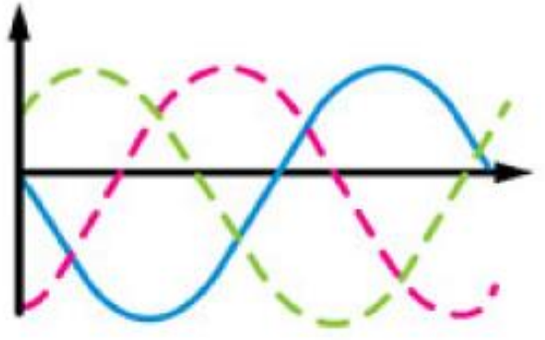
(ب) حالت دفع میدان‌های روتور و استاتور

❑ معرفی موتورهای براشلس غیرایده آل

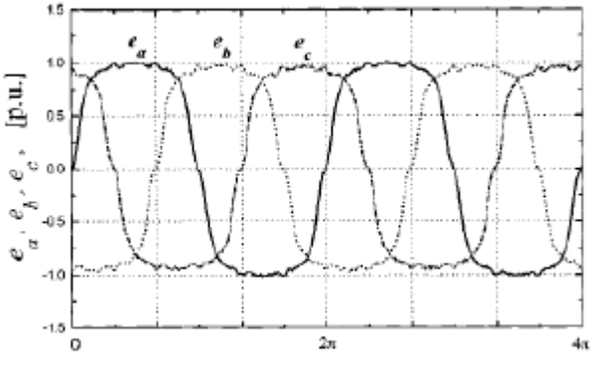
- ✓ در طراحی و ساخت موتورهای سنکرون آهنربای دائم ، مطابق دو شکل زیر سعی می شود تا ولتاژ ضدمحرکه موتور نوع سینوسی ایده آل باشد (یعنی ساخت PMSM) و یا از نوع ذوزنقه ای ایده آل باشد (یعنی موتور BLDC)
- ✓ اما در عمل و در ساخت موتورهای PMSM، به دلیل مسائلی همچون عدم توزیع مناسب سیم پیچی استاتور، شکل نامناسب قطبها و ...، ولتاژ ضدمحرکه موتور سینوسی نمی باشد و دارای هارمونیکهای مضارب بالاتر مانند شکل های زیر است.

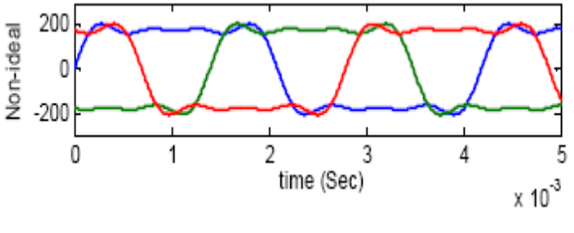


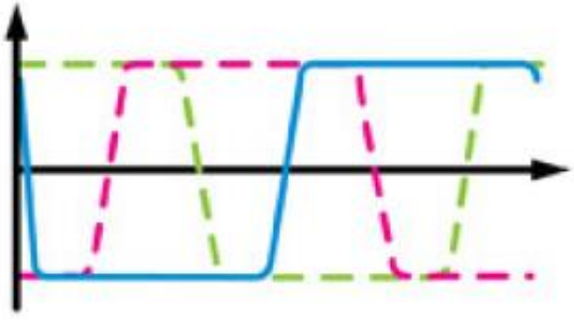




الف- موتور PMSM







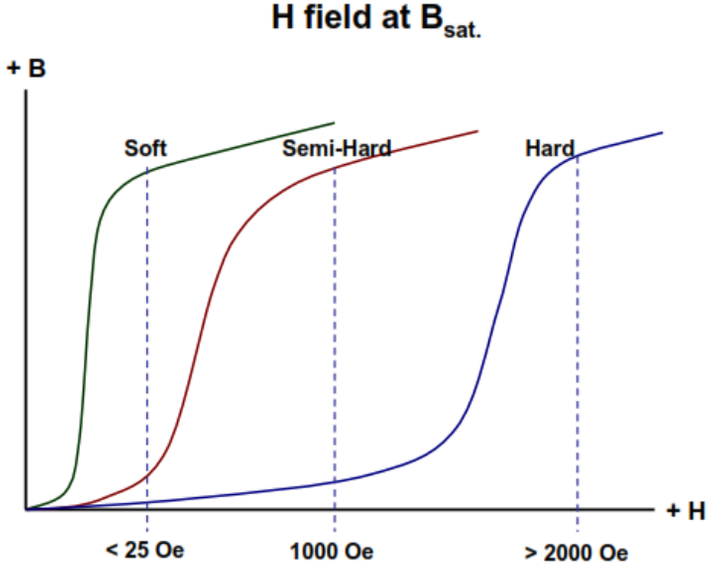
ب- موتور BLDC

(ج) چند نمونه از ولتاژهای ضدمحرکه موتورهای براشلس غیرایده آل

❑ مواد مغناطیسی مورد استفاده در موتورهای براشلس

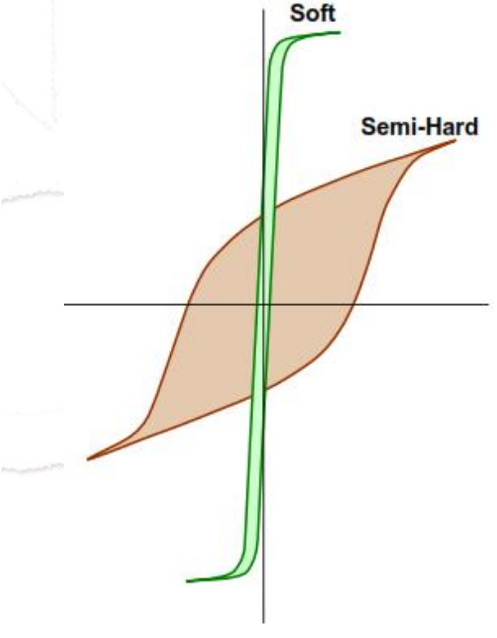
➢ انواع مواد مغناطیسی

- ✓ مواد آهنربای دائم جزء مواد سخت مغناطیسی محسوب می شوند که خاصیت آهنربایی را برای دراز مدت در خود حفظ می کنند.
- ✓ مواد نرم مغناطیسی برای هسته موتورهای الکتریکی استفاده می شود و از مواد سخت برای ایجاد شار (به عنوان منبع شار)
- ✓ البته دسته دیگری از مواد مغناطیسی بین مواد نرم و سخت هم وجود دارند که به مواد نیمه سخت مشهور هستند و برای کاربردهای خاص و بویژه در موتورهای هیسترزیس (پسماندی) مورد استفاده قرار می گیرند.



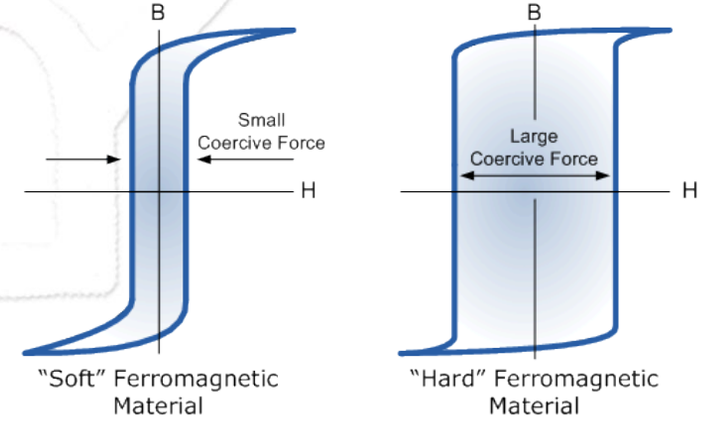
(ج) مقایسه منحنی B-H

مواد سخت، نیمه سخت و نرم مغناطیسی



(ب) مقایسه حلقه B-H

مواد نیمه سخت و نرم مغناطیسی



(الف) مقایسه حلقه B-H

مواد سخت و نرم مغناطیسی

❑ مواد مغناطیسی مورد استفاده در موتورهای براشلس

➢ انواع مواد آهنربای دائم مورد استفاده در موتورهای براشلس

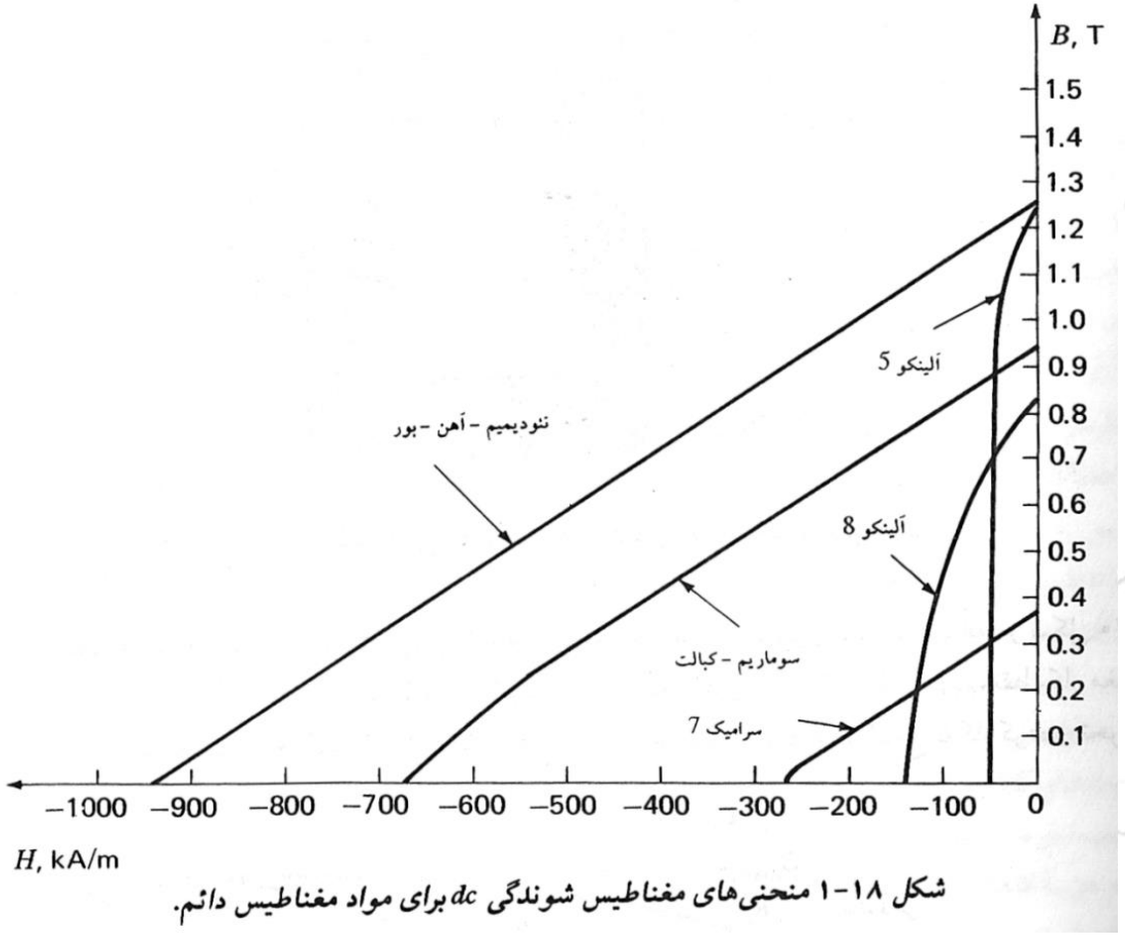
۱- خانواده آلنیکو (Alnico)

۲- فریت ها

۳- ساماریوم –کبالت (Sm-Co)

٤- نئودیم-آهن- بور (Nd-Fe-B)

٥- مواد جدیدتر ...



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

✓ در موتورهای براشلس متداول کنونی، بیشتر از مواد ساماریوم-کبالت و آلیاژ نئودیم-آهن-بور استفاده می شود.