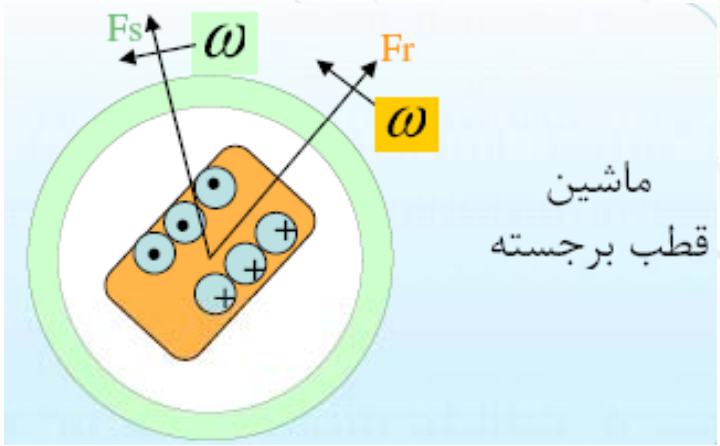
مبحث هشتم:

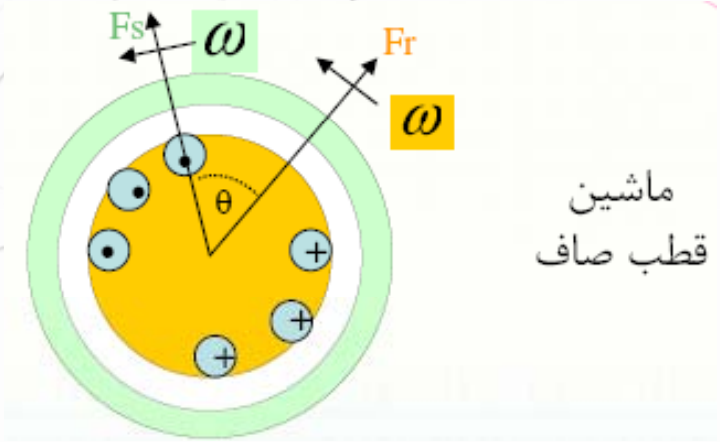
ماشین های سنکرون قطب برجسته

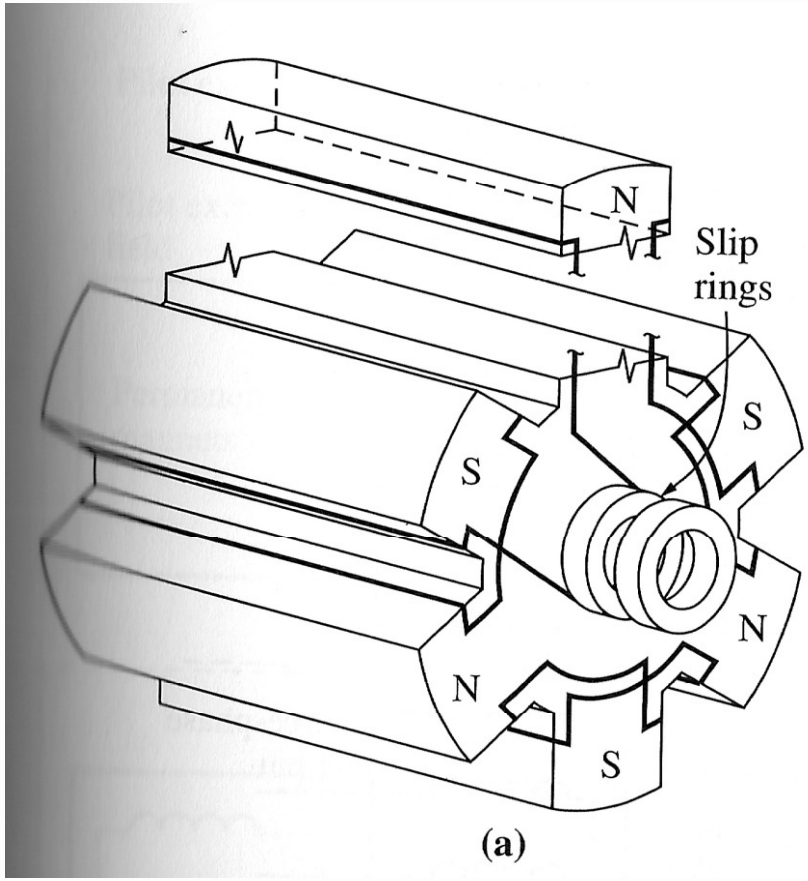
- خصوصیات – کاربردها
- مدار معادل ماشین قطب برجسته
- دیاگرام برداری ماشین قطب برجسته

❑ خصوصیات - کاربردها

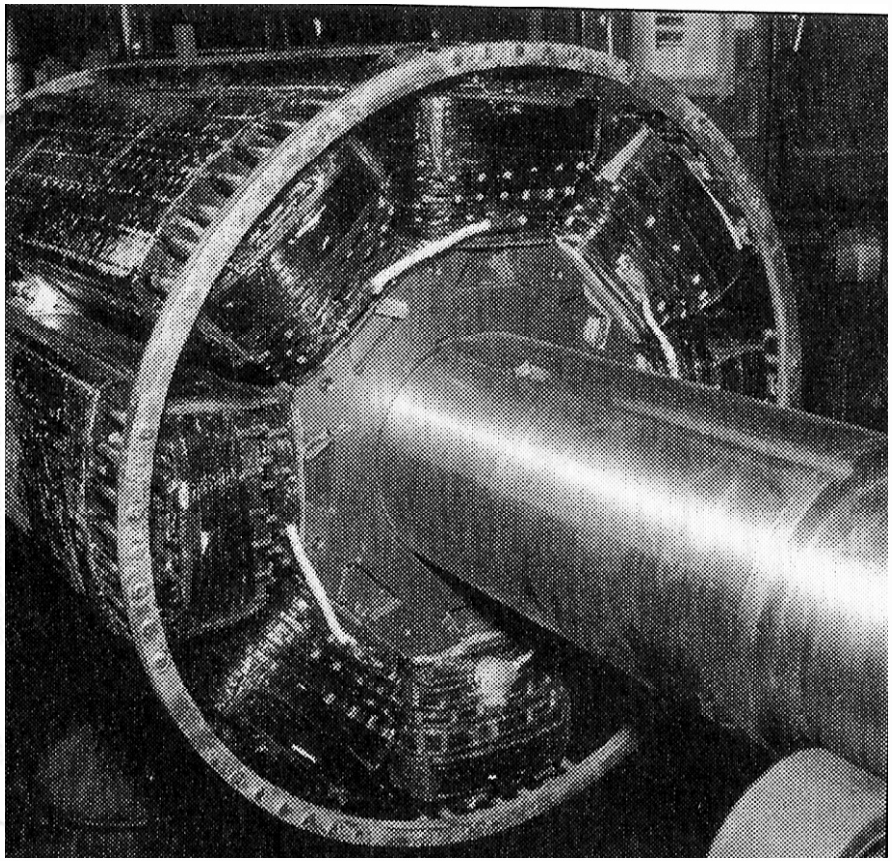
- **استاتور ماشین قطب برجسته:** همانند استاتور ماشین های قطب صاف (و یا روتور استوانه ای) است.
- **روتور ماشین قطب برجسته:** حالت و شکل سیلندری نداشته و ناظر ساکن روی استاتور در زوایای مختلف چرخش روتور، رلوکتانس های مغناطیسی متفاوتی می بیند.
- **کاربرد:** در ماشین هایی که سرعت آنها کم است مانند نیروگاههای آبی مورد استفاده قرار می گیرد. در ماشین های با سرعت بالا مانند ژنراتورهای با توربین گازی به دلیل سرعت بالا و نیروی گریز از مرکز زیاد، استفاده از ماشین های با قطب صاف ارجح است.





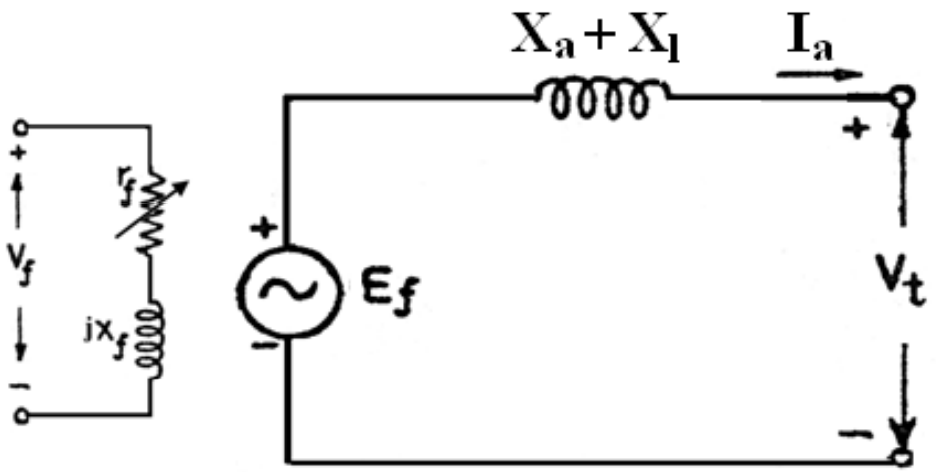


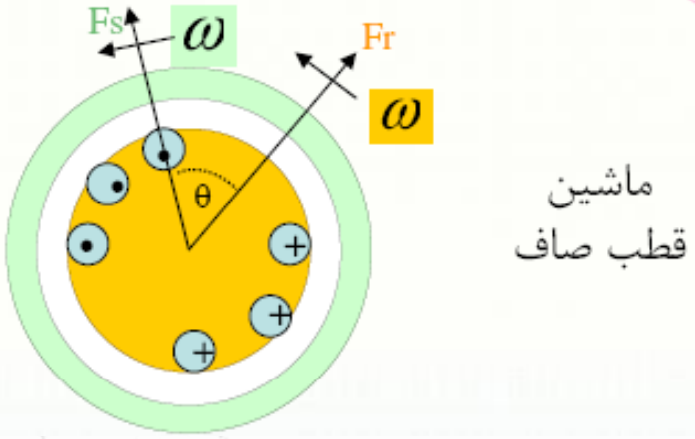
(الف) شماتیک روتور یک ماشین قطب برجسته ٦ قطبی

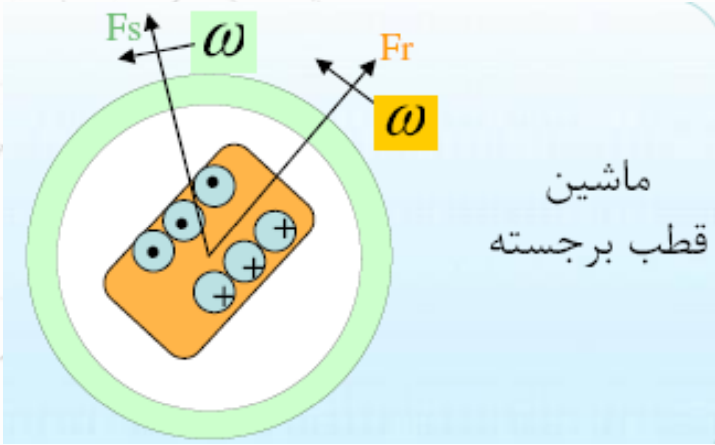


(ب) شکل واقعی روتور یک ماشین قطب برجسته ۸ قطبی

❑ مدار معادل ماشین با قطب برجسته







- **نکته ۱: به دلیل یکسان بودن تولید شار و میزان توزیع آن در هر دو نوع ماشین، ولتاژ القاء شده در آرمیچر یکسان است.**
- **نکته ۲: تفاوت دو نوع ماشین در نوع عکس العمل آرمیچر است.**

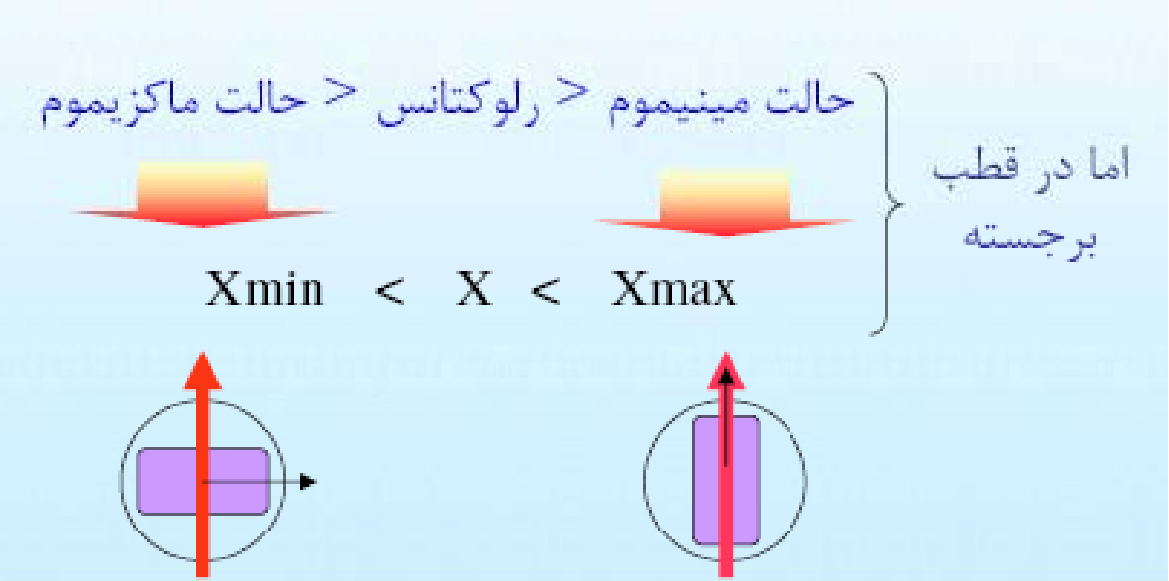
- شار استاتور یا شار عکس العمل آرمیچر به دو عامل وابسته است:
  - ۱- جریان آرمیچر
  - ۲- مقدار رلوکتانس مسیر شار

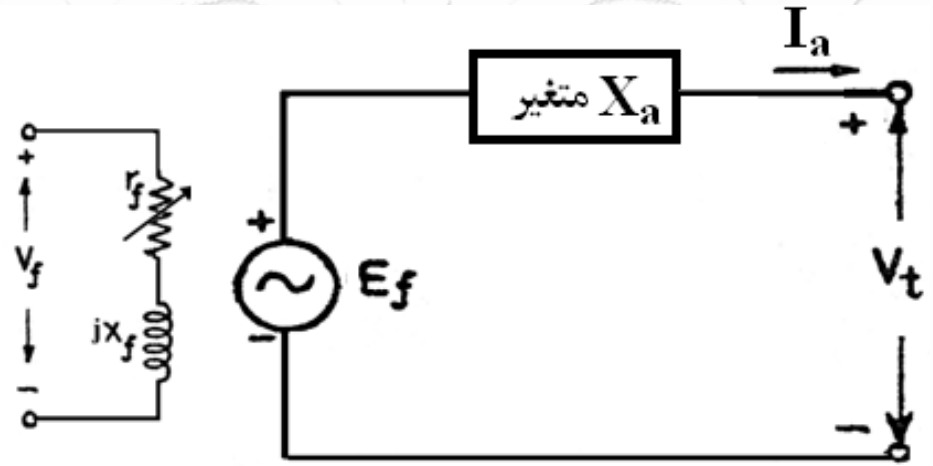
شار عکس العمل آرمیچر $\propto$ X_a $\propto$ عکس رلوکتانس

- در ماشین با قطب صاف، رلوکتانس در تمام حالات ثابت است. ⟸ X_a ثابت است.

- در ماشین با قطب برجسته، رلوکتانس متغیر است و از مقدار حداقل آن تا یک مقدار حداکثر تغییر می کند.

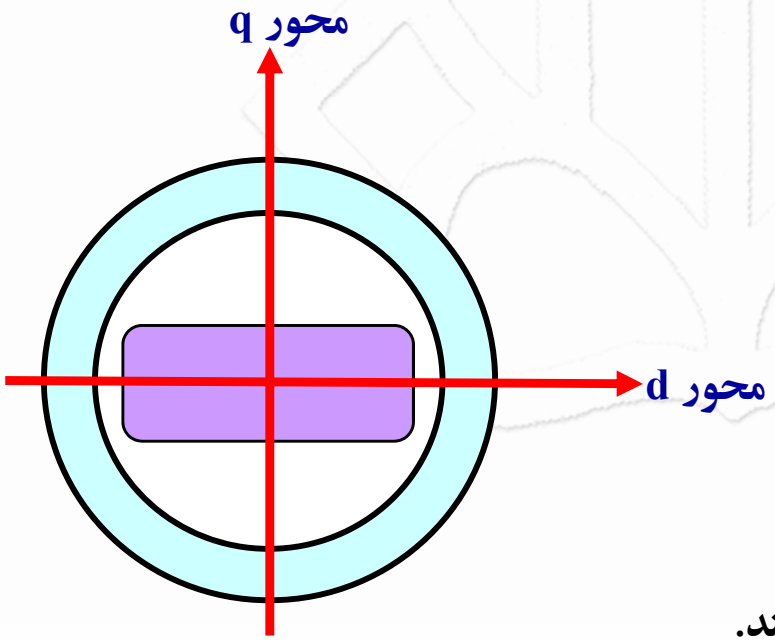
❑ مدار معادل ماشین با قطب برجسته





- برای اینکه راکتانس متغیر عکس العمل آرمیچر در محاسبات و تحلیل ها وارد نشود، از تئوری دو محوری بلوندل بهره گرفته می شود.

- برای این کار، ما دو جهت یا محور مستقیم (d) و عرضی (q) را تعریف می کنیم.
  - محور d همراستا با محور روتور است.
  - محور q عمود بر محور روتور است.

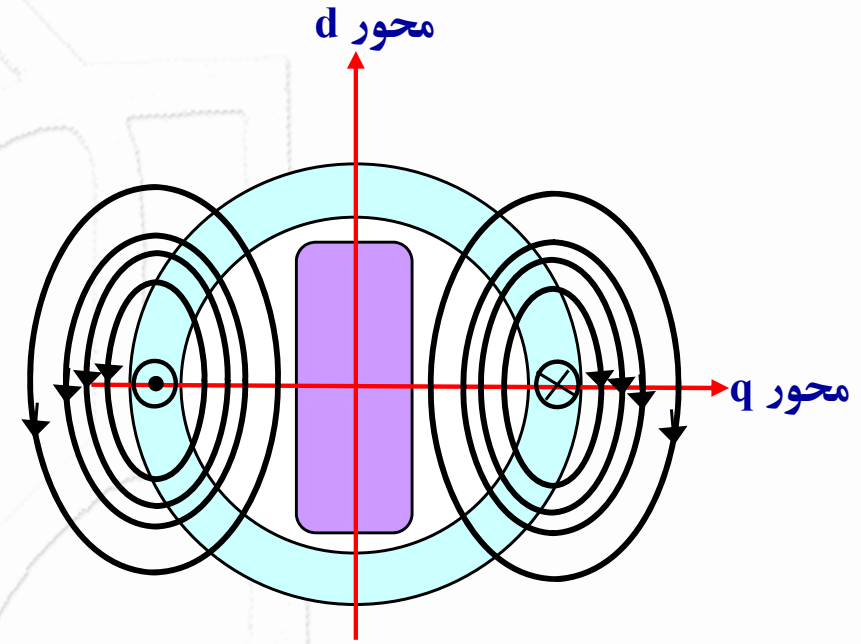


- **توجه:** محورهای d و q با چرخش روتور می چرخند.

❑ مدار معادل ماشین با قطب برجسته

➢ راکتانسها در راستای محورهای d و q:

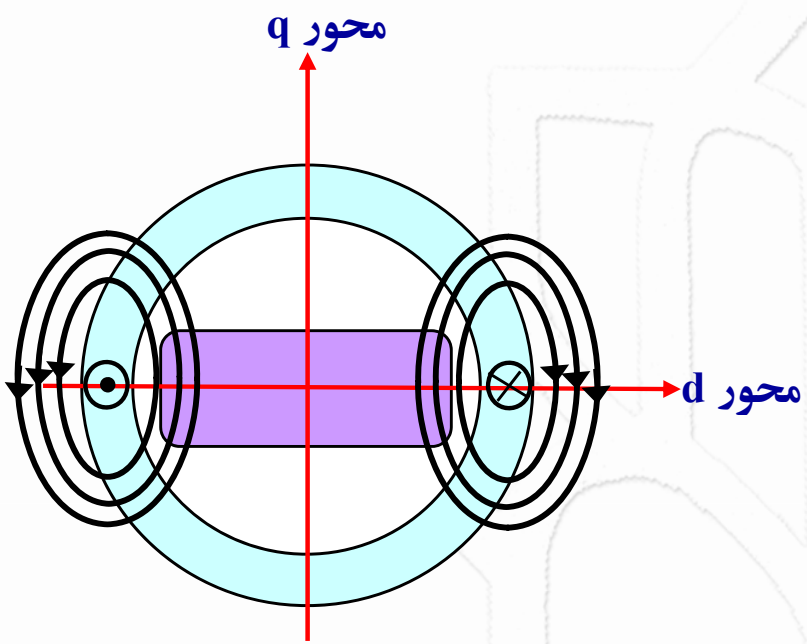
- راکتانس در راستای محور d = X_d
- راکتانس در راستای محور q = X_q



فاصله هوایی مسیر شار استاتور حداکثر است.

رلوکتانس مغناطیسی حداکثر است ($R=R_{max}$)

$X = X_{min} = X_q$



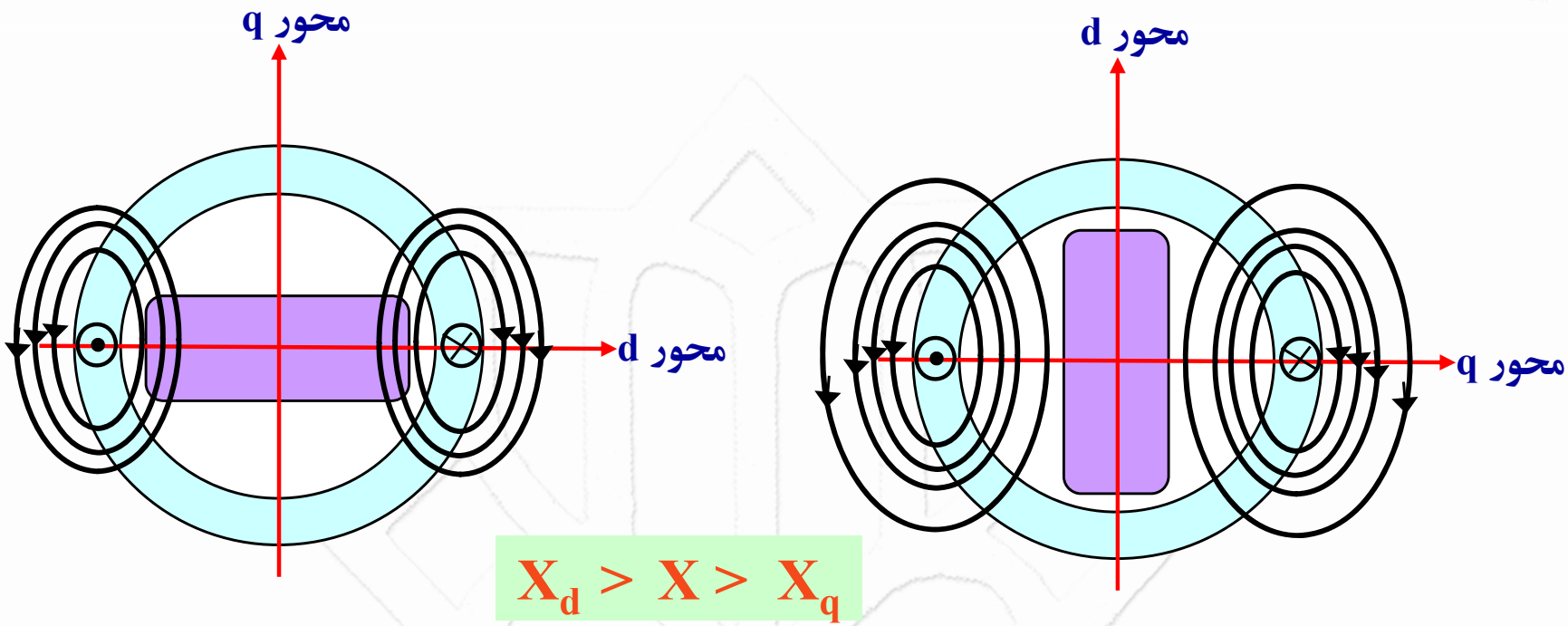
فاصله هوایی مسیر شار استاتور حداقل است.

رلوکتانس مغناطیسی حداقل است ($R=R_{min}$)

$X = X_{max} = X_d$

❑ مدار معادل ماشین با قطب برجسته

➢ راکتانسها در راستای محورهای d و q:



$$X_d > X > X_q$$

- بسته به زاویه بین محور روتور و شارهای استاتور، راکتانسهای متفاوتی را می توان درنظر گرفت. اما با استفاده از تئوری بلوندل، تنها مقادیر راکتانس در راستاهای d و q در روابط ظاهر می شوند.

- **نکته ۱:** راکتانس های نشتی در راستاهای d و q ثابت می باشند.
- **نکته ۲:** به X_d و X_q راکتانس های سنکرون در راستاهای d و q گویند.

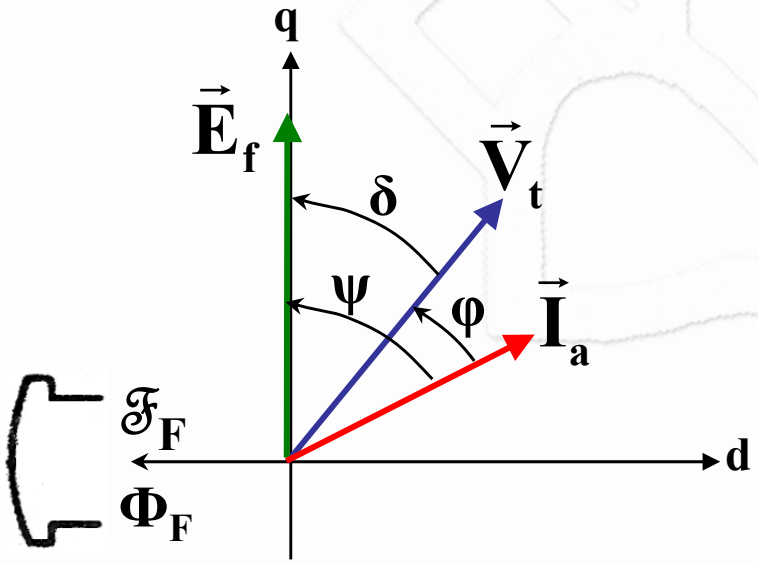
$$\begin{cases} X_d = X_{ad} + X_l \\ X_q = X_{aq} + X_l \end{cases} \quad (۱)$$

- به دو روش متفاوت می توان به استخراج روابط و مدار معادل پرداخت که هر کدام در جای خود تسهیلات ویژه ای دارند.

۱- در روش اول کمیات I_d ، V_d، I_q و V_q را کمیاتی برداری در جهت محورهای d و q می دانیم.

۲- در روش دوم کمیات I_d ، V_d، I_q و V_q را کمیاتی اسکالر واقع بر محورهای d و q می دانیم.

- دلیل قرار داشتن بردار E_f بر راستای q آنست که این بردار به اندازه ۹۰ درجه نسبت به بردار Φ_F که روی محور d و البته در خلاف جهت آن است، پسفاز است.



δ = زاویه بار

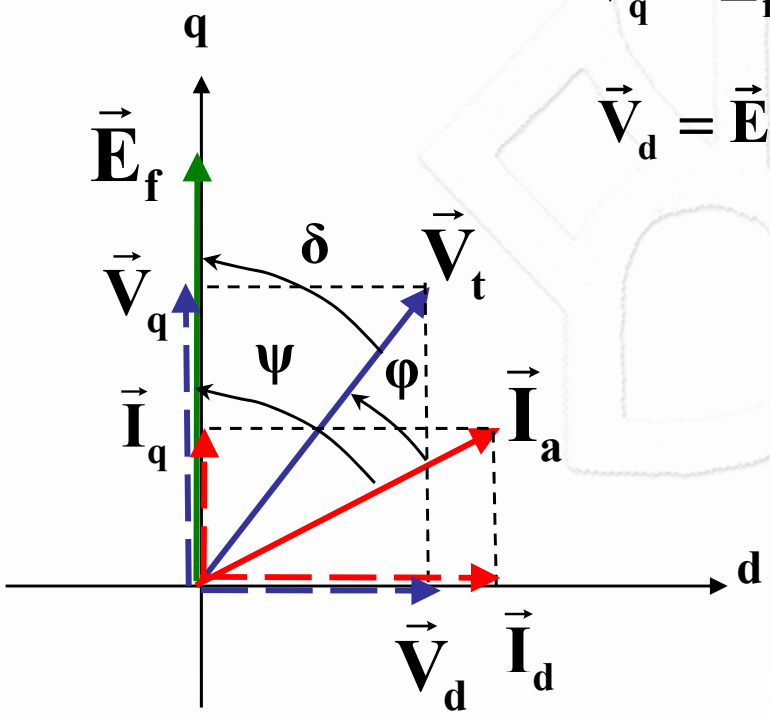
φ = زاویه ضریب توان بار

ψ = زاویه ضریب توان داخلی

➢ استخراج معادله ولتاژ استاتور به روش اول با فرض $r_a = 0$:

■ بردارهای I_a و V_t را در دو راستای d و q تجزیه می نمائیم:

$$\begin{cases} \vec{V}_t = \vec{V}_d + \vec{V}_q \\ \vec{I}_a = \vec{I}_d + \vec{I}_q \end{cases} \quad (۲) \qquad \begin{cases} V_d = V_t \sin\delta \\ V_q = V_t \cos\delta \end{cases} \quad (۳) \qquad \begin{cases} I_d = I_a \sin\psi \\ I_q = I_a \cos\psi \end{cases} \quad (٤)$$



اما داریم:

$$\vec{V}_q = \vec{E}_{fq} + \vec{E}_{aq} = \vec{E}_f + (-jX_q\vec{I}_q) \quad (۵)$$

$$\vec{V}_d = \vec{E}_{fd} + \vec{E}_{ad} = 0 + (-jX_d\vec{I}_d) \quad (٦)$$

با جایگذاری روابط (۵) و (٦) در رابطه (۲) خواهیم داشت:

$$\vec{V}_t = \vec{E}_f - jX_d\vec{I}_d - jX_q\vec{I}_q \quad (۷)$$

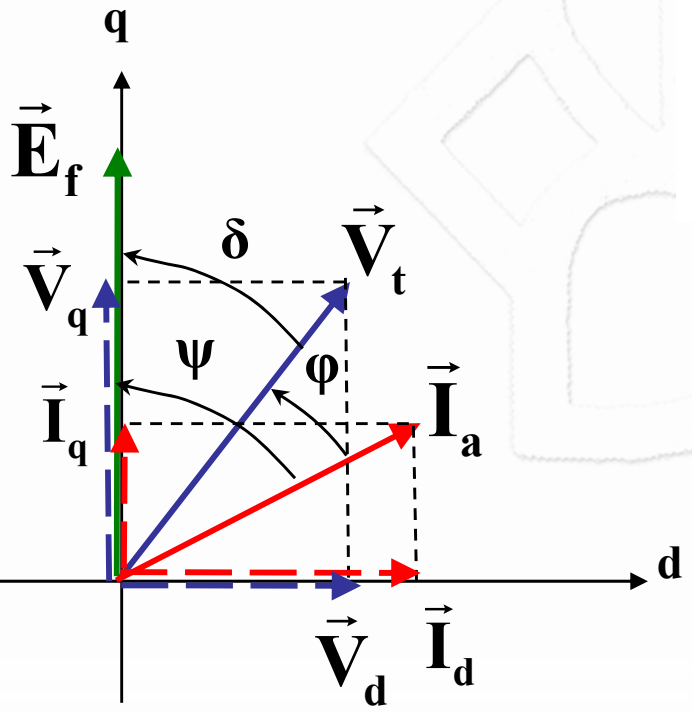
$$\vec{E}_f = \vec{V}_t + j(X_d\vec{I}_d + X_q\vec{I}_q) \quad (۸)$$

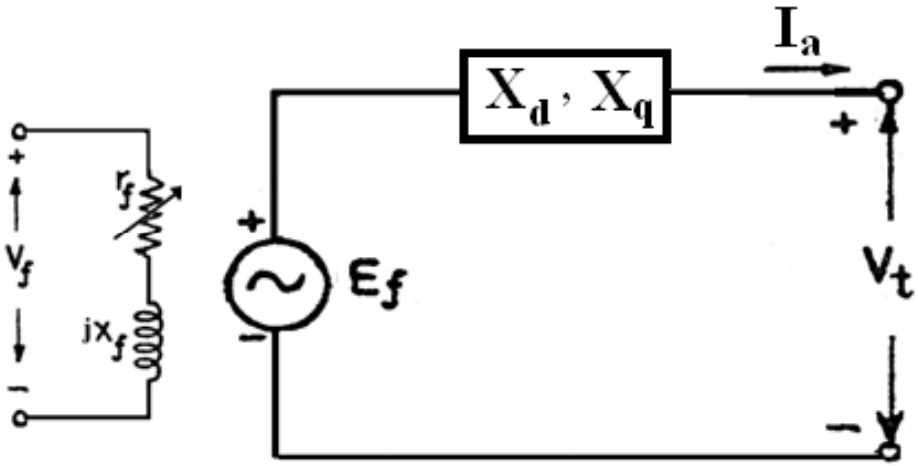
و یا:

و اگر $r_a \neq 0$ باشد:

$$\vec{E}_f = \vec{V}_t + j(X_d\vec{I}_d + X_q\vec{I}_q) + r_a\vec{I}_a \quad (۹)$$

■ بنابراین مدار معادل ماشین سنکرون را می توان بصورت زیر بدست آورد:





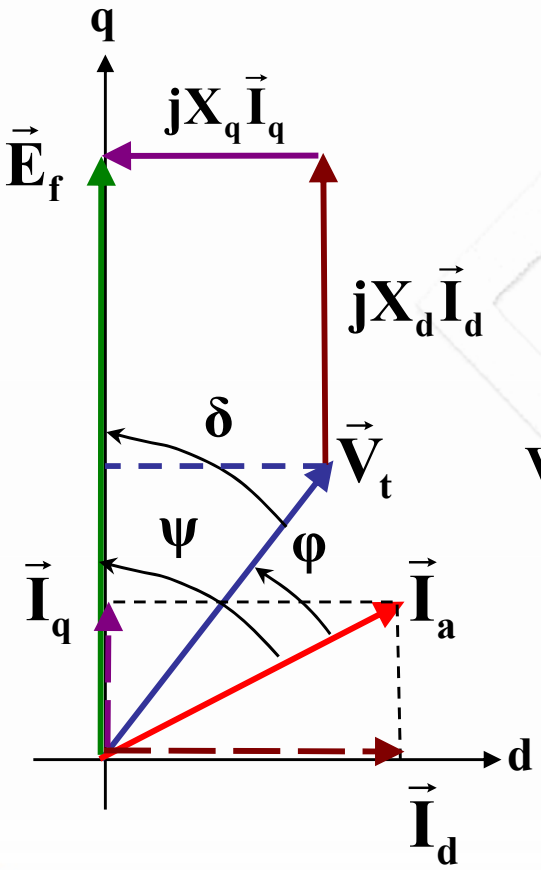
$$\vec{E}_f = \vec{V}_t + j(X_d\vec{I}_d + X_q\vec{I}_q) \qquad (۸)$$

❑ دیاگرام برداری ماشین قطب برجسته

➢ الف- دیاگرام برداری در حالت ژنراتوری با بار پس فاز و فرض $r_a = 0$:

$$\vec{E}_f = \vec{V}_t + jX_d\vec{I}_d + jX_q\vec{I}_q \qquad (۸)$$

- رابطه ولتاژ (۸) را می توان بصورت دیاگرام برداری زیر نمایش داد.



❖ محاسبه زاویه بار (δ) و یا tan δ برحسب دامنه جریان از روی دیاگرام برداری:

$$\begin{cases} I_d = I_a \sin\psi \\ I_q = I_a \cos\psi \end{cases} \quad (٤) \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} I_d = I_a \sin(\delta+\varphi) & (۱۰) \\ I_q = I_a \cos(\delta+\varphi) & (۱۱) \end{cases}$$

$$V_t \sin\delta = X_q I_q \qquad (۱۲)$$

با جایگذاری بسط رابطه (۱۱) در رابطه (۱۲) خواهیم داشت:

$$V_t \sin\delta = X_q I_a \cos(\delta+\varphi) = X_q I_a \cos\delta\cos\varphi - X_q I_a \sin\delta\sin\varphi$$

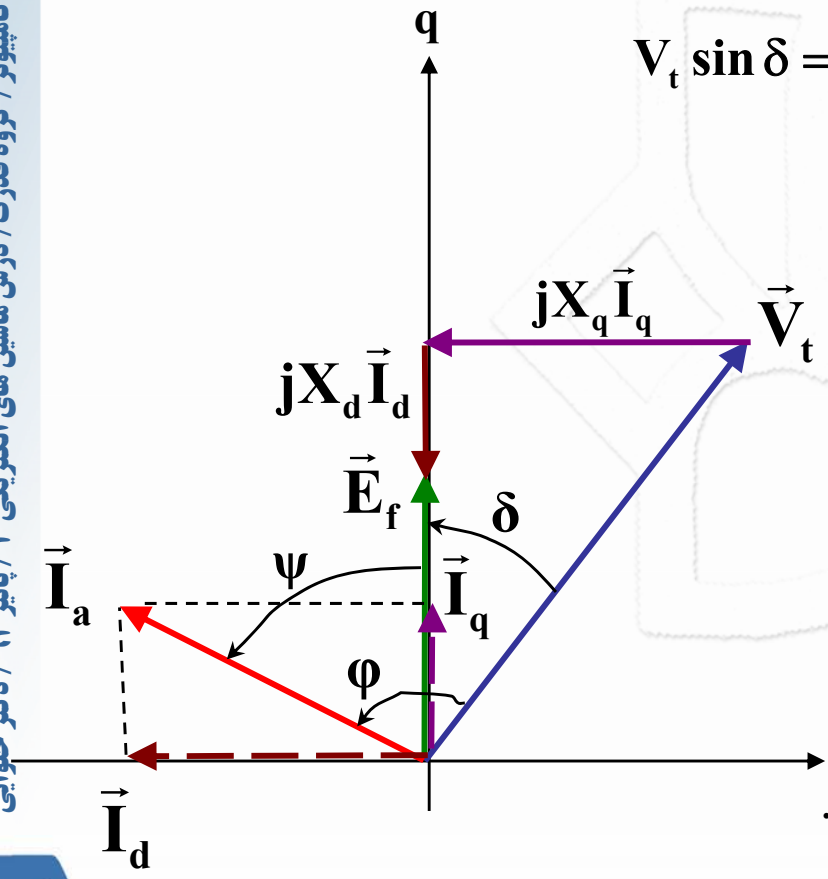
$$\Rightarrow (V_t + X_q I_a \sin\varphi)\sin\delta = X_q I_a \cos\varphi\cos\delta$$

$$\Rightarrow \boxed{\tan\delta = \frac{X_q I_a \cos\varphi}{V_t + X_q I_a \sin\varphi}} \qquad (۱۳)$$

❑ دیاگرام برداری ماشین قطب برجسته

➢ ب- دیاگرام برداری در حالت ژنراتوری با بار پیش فاز و فرض $r_a = 0$:

$$\begin{cases} I_d = I_a \sin\psi \\ I_q = I_a \cos\psi \end{cases} \quad (٤) \qquad \Rightarrow \begin{cases} I_d = I_a \sin(\varphi - \delta) & (١٤) \\ I_q = I_a \cos(\varphi - \delta) & (١٥) \end{cases}$$



همچنین:

$$V_t \sin\delta = X_q I_q \qquad (١٦)$$

مشابه با حالت قبل، با بسط رابطه (۱۵) و جایگزینی در (۱۶) و مقداری ساده سازی خواهیم داشت:

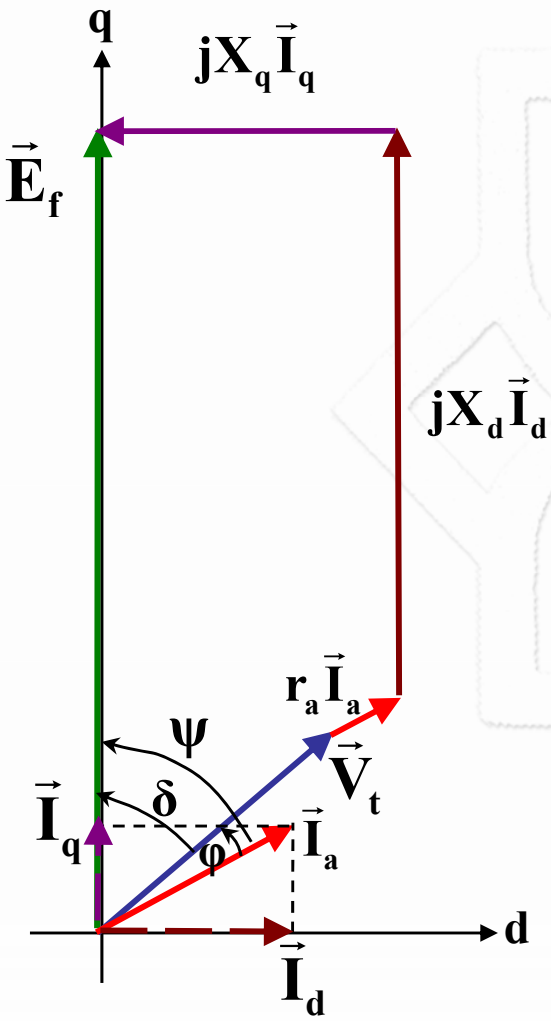
$$\Rightarrow \quad \tan\delta = \frac{X_q I_a \cos\varphi}{V_t - X_q I_a \sin\varphi} \qquad (١٧)$$

- **نکته ۱:** در حالت بار پیش فاز، همانند ماشین قطب صاف، دامنه E_f کوچک تر از ولتاژ V_t است.
- **نکته ۲:** تفاوت رابطه فوق با رابطه (۱۳) فقط در علامت منفی φ است.

❑ دیاگرام برداری ماشین قطب برجسته

➢ الف- دیاگرام برداری در حالت ژنراتوری با بار پس فاز و فرض $r_a \neq 0$:

$$\vec{E}_f = \vec{V}_t + j(X_d\vec{I}_d + X_q\vec{I}_q) + r_a\vec{I}_a \qquad (۹)$$



- رابطه ولتاژ (۹) را می توان بصورت دیاگرام برداری زیر نمایش داد.
- در این حالت زاویه δ مستقیما قابل محاسبه نیست، اما می توان زاویه ψ را بدست آورد.

❑ دیاگرام برداری ماشین قطب برجسته

... الف- دیاگرام برداری در حالت ژنراتوری با بار پس فاز و فرض $r_a \neq 0$:

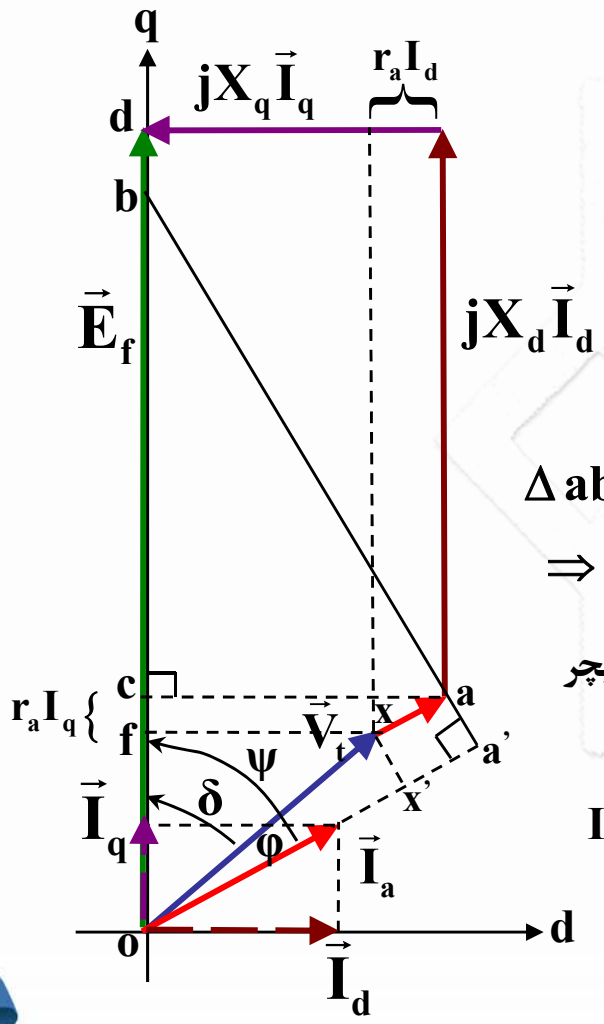
■ **محاسبه زاویه ψ:**

✓ در مثلث $oa'b$ داریم:

$$\tan\psi = \frac{ba'}{oa'} = \frac{ba + aa'}{ox' + x'a'} \qquad (۱۸)$$

✓ در رابطه فوق بخش های مختلف به قرار زیر هستند:

$$\begin{cases} aa' = xx' = V_t \sin\varphi \\ ox' = V_t \cos\varphi \\ x'a' = r_a i_a \end{cases} \qquad (۱۹)$$



✓ حال نشان می دهیم که ba در رابطه (۱۸) برابر با X_qI_a است:

$$\Delta abc \text{ متشابه } \Delta oa'b \Rightarrow \angle cab = \psi = \varphi + \delta$$

$$\Rightarrow ac = ba \times \cos\angle cab = ba \times \cos\psi = XI_a \times \cos(\delta + \varphi) \qquad (۲۰)$$

✓ به دلیل عمود بودن ba بر بردار I_a، می توان ba را از جنس ولتاژ عکس العمل آرمیچر به مقدار XI_a درنظر گرفت. از طرف دیگر داریم:

$$I_q = I_a \cos\psi = I_a \cos(\delta + \varphi) \Rightarrow X_qI_q = X_qI_a \cos(\delta + \varphi) \qquad (۲۱)$$

✓ لذا با مقایسه (۲۰) و (۲۱) داریم:

$$X = X_q \quad , \quad ba = X_qI_a$$

❑ دیاگرام برداری ماشین قطب برجسته

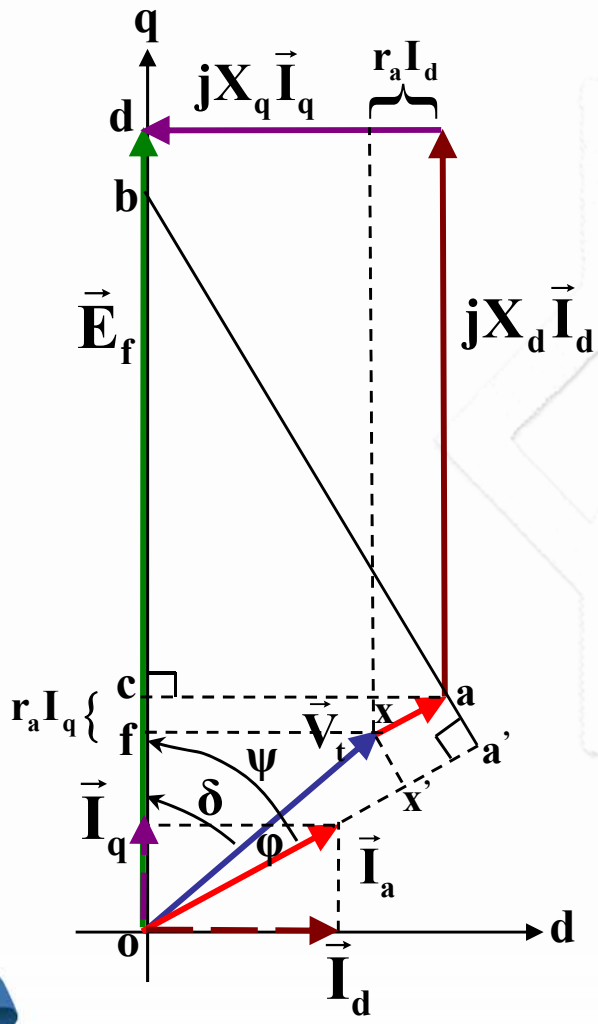
... الف- دیاگرام برداری در حالت ژنراتوری با بار پس فاز و فرض $r_a \neq 0$:

✓ در نتیجه:

$$\tan\psi = \frac{X_q I_a + V_t \sin\varphi}{r_a I_a + V_t \cos\varphi} \qquad (۲۲)$$

✓ لذا با محاسبه ψ و داشتن φ زاویه بار δ بدست می آید.

$$\psi = \varphi + \delta \qquad (۲۴)$$



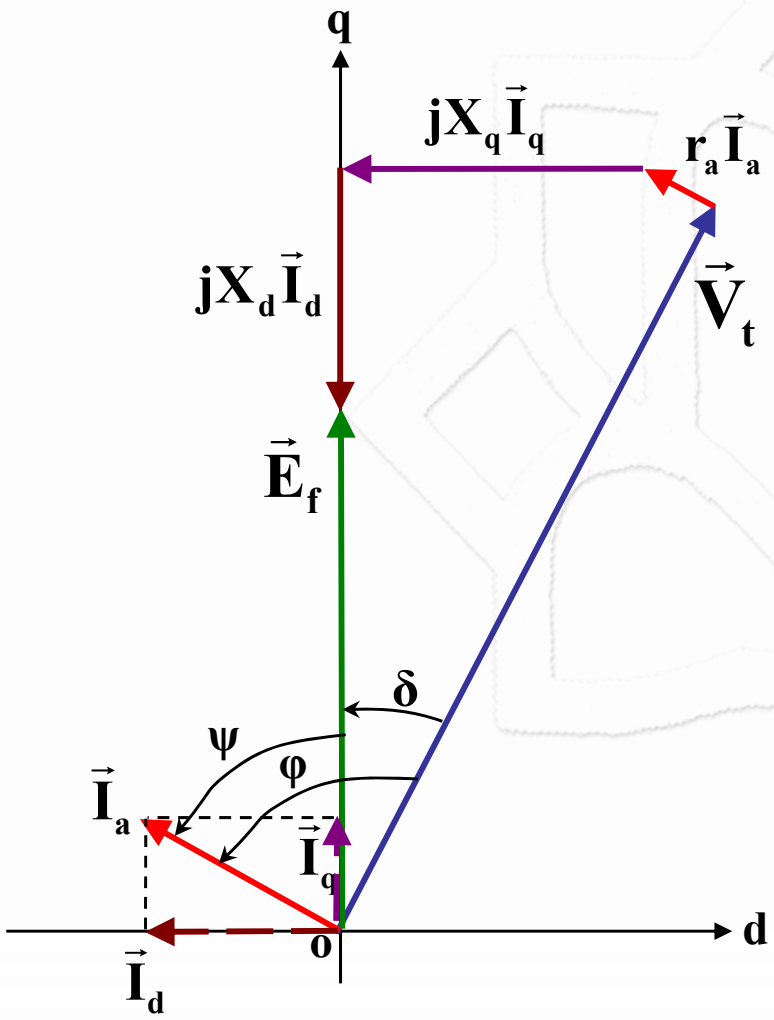
❖ تمرین ۱: با استفاده از دیاگرام برداری شکل روبرو، ثابت کنید در حالت ژنراتوری با بار پسفاز داریم:

$$\vec{E}_f = \vec{V}_t + r_a\vec{I}_a + j\vec{I}_d(X_d - X_q) + j\vec{I}_a X_q \qquad (۲۵)$$

❑ دیاگرام برداری ماشین قطب برجسته

➢ ب - دیاگرام برداری در حالت ژنراتوری با بار پیش فاز و فرض $r_a \neq 0$:

❖ تمرین ۲: دیاگرام برداری ژنراتور سنکرون با بار پیش فاز را رسم نموده و با استفاده از آن ثابت نمائید:



$$\tan\psi = \frac{V_t \sin\varphi - X_q I_a}{V_t \cos\varphi + r_a I_a} \qquad (۲۶)$$

و:

$$\psi = \varphi - \delta \qquad (۲۷)$$

❑ دیاگرام برداری ماشین قطب برجسته

➢ ج - دیاگرام برداری در حالت موتوری با فرض $r_a \neq 0$:

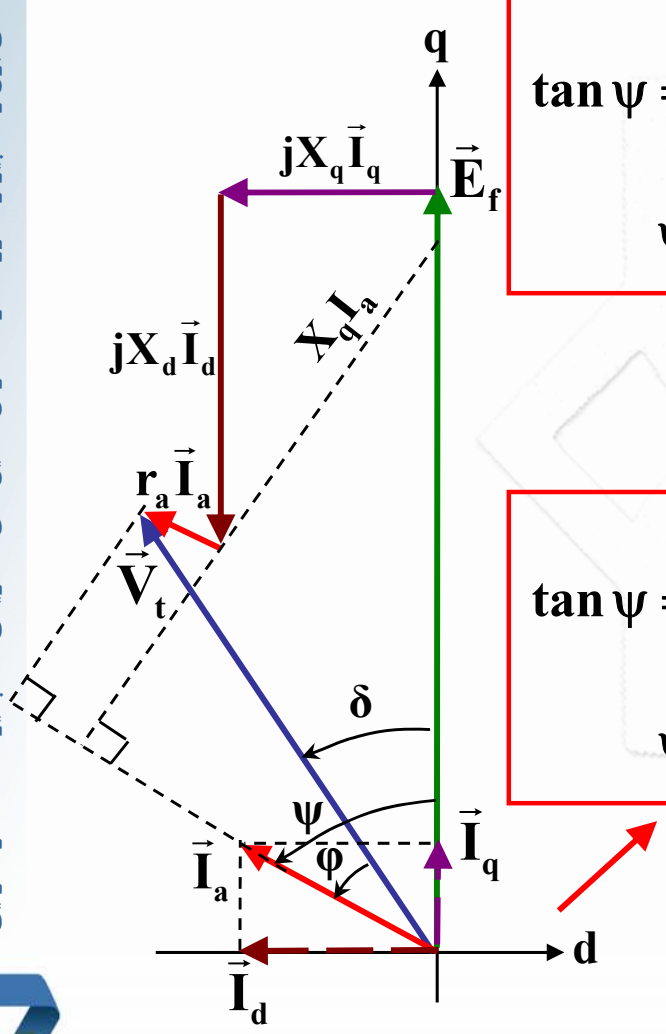
❖ تمرین ۳: دیاگرام برداری موتور سنکرون با بارهای پس فاز و پیش فاز را رسم نموده و با استفاده از آن ثابت نمائید:

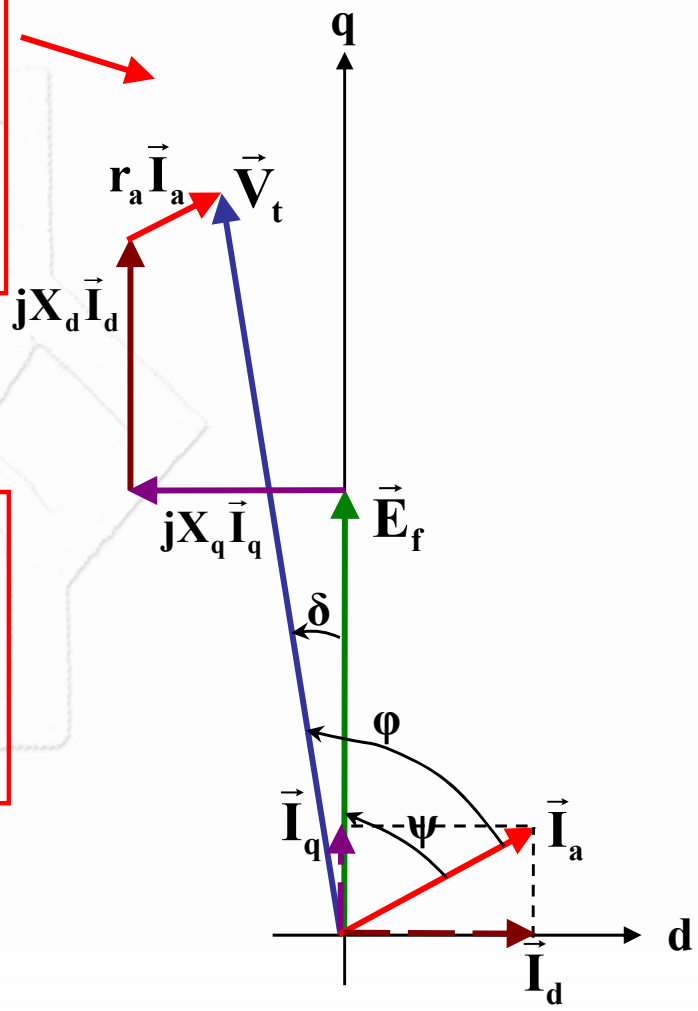
$$\tan\psi = \frac{V_t \sin\varphi - X_q I_a}{V_t \cos\varphi - r_a I_a} \qquad (۲۸\text{-الف})$$

حالت پسفاز: $\psi = \varphi - \delta$

$$\tan\psi = \frac{V_t \sin\varphi + X_q I_a}{V_t \cos\varphi - r_a I_a} \qquad (۲۸\text{-ب})$$

حالت پیشفاز: $\psi = \varphi + \delta$





❑ دیاگرام برداری ماشین قطب برجسته

➢ رابطه بین بردارهای نیرو محرکه mmf و شار در ماشین قطب برجسته:

✓ **نکته:** در ماشین قطب برجسته، نیروی محرکه مغناطیسی و شار مغناطیسی همراستا نیستند.

$$\vec{F}_a = \vec{F}_{ad} + \vec{F}_{aq} \qquad (۲۹)$$

$$\vec{\Phi}_a = \vec{\Phi}_{ad} + \vec{\Phi}_{aq} \qquad (۳۰)$$

مولفه روی محور d شار عکس العمل آرمیچر یعنی Φ_{ad} از مولفه F_{ad} نتیجه می شود یعنی:

$$\Phi_{ad} = \frac{F_{ad}}{\Re_d} \qquad (۳۱)$$

به همین ترتیب:

$$\Phi_{aq} = \frac{F_{aq}}{\Re_q} \qquad (۳۲)$$

چون $\Re_d \neq \Re_q$ است، لذا:

$$\frac{F_{aq}}{F_{ad}} \neq \frac{\Phi_{ad}}{\Phi_{aq}} \qquad (۳۳)$$