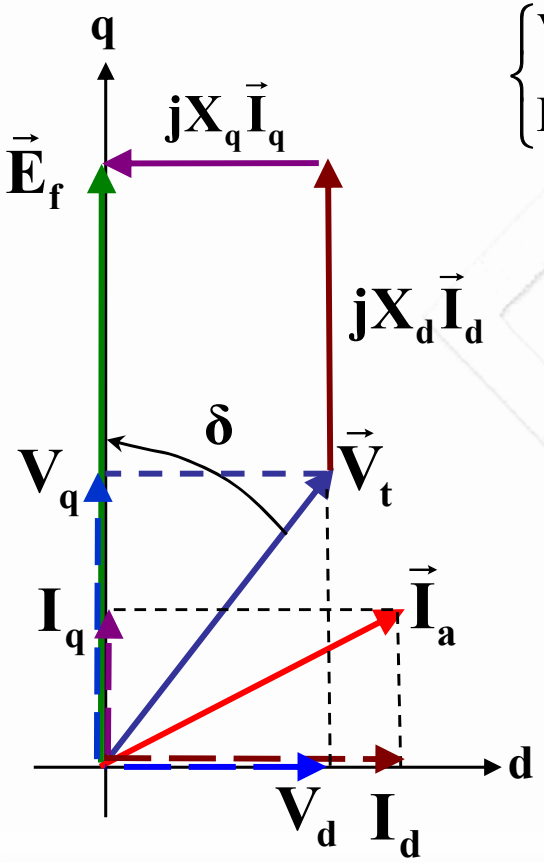
مبحث نهم:

توان و گشتاور در ماشین سنکرون قطب برجسته

- مشخصه قدرت –زاویه
- قدرت و ضریب قدرت سنکرون کننده
- هانتینگ در ماشین سنکرون و نقش سیم پیچهای میرایی (دمپرها)
- محاسبه پارامترهای X_d و X_q در ماشین سنکرون قطب برجسته

■ توان اکتیو ماشین برابر با مجموع توانهای اکتیو روی محورهای q و d است:

$$P = P_d + P_q = 3V_d I_d + 3V_q I_q = 3V_t \sin\delta\, I_d + 3V_t \cos\delta\, I_q \qquad (۱)$$



از طرف دیگر مطابق با شکل زیر داریم:

$$\begin{cases} V_t \sin\delta = X_q I_q \\ E_f = V_t \cos\delta + X_d I_d \end{cases} \qquad (۲)$$

با جایگذاری روابط (۲) در رابطه (۱) خواهیم داشت:

$$P = 3V_t \sin\delta \frac{E_f - V_t \cos\delta}{X_d} + 3V_t \cos\delta \frac{V_t \sin\delta}{X_q} \qquad (۳)$$

در نتیجه:

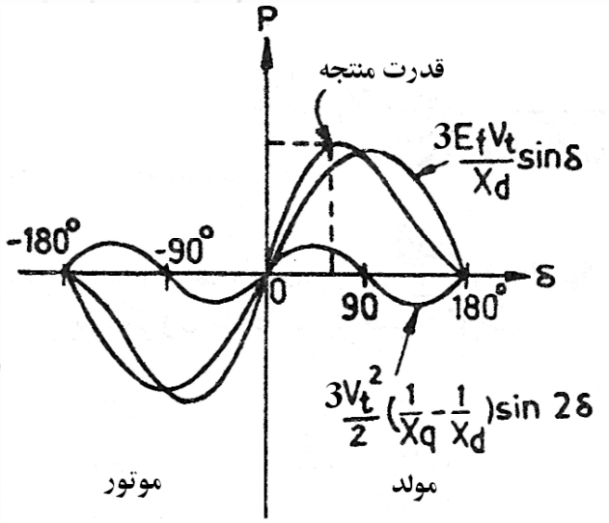
$$P = \underbrace{\frac{3V_t E_f}{X_d}\sin\delta}_{\text{توان ناشی از تحریک}} + \underbrace{\frac{3V_t^2}{2}\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\sin 2\delta}_{\text{توان رلوکتانسی}} \qquad (٤)$$

❑ مشخصه قدرت-زاویه

... رابطه توان اکتیو با فرض $r_a = 0$

- **نکته ۱:** حد پایداری در حالتی که فقط گشتاور رلوکتانسی وجود داشته باشد، ٤٥ درجه است.
- **نکته ۲:** حد پایداری در حالتی که فقط گشتاور ناشی از تحریک وجود داشته باشد، ۹۰ درجه است.
- **نکته ۳:** حد پایداری در حالتی که هر دو مولفه گشتاور وجود دارند، بین ٤٥ و ۹۰ درجه است.

$$P = \frac{3V_tE_f}{X_d}\sin\delta + \frac{3V_t^2}{2}\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\sin 2\delta$$



- **نکته ٤:** در حالت اتصال به شین بی نهایت بوسیله امپدانس X:

$$P = \frac{3V_tE_f}{X_d + X}\sin\delta + \frac{3V_t^2}{2}\left(\frac{1}{X_q + X} - \frac{1}{X_d + X}\right)\sin 2\delta \qquad (۵)$$

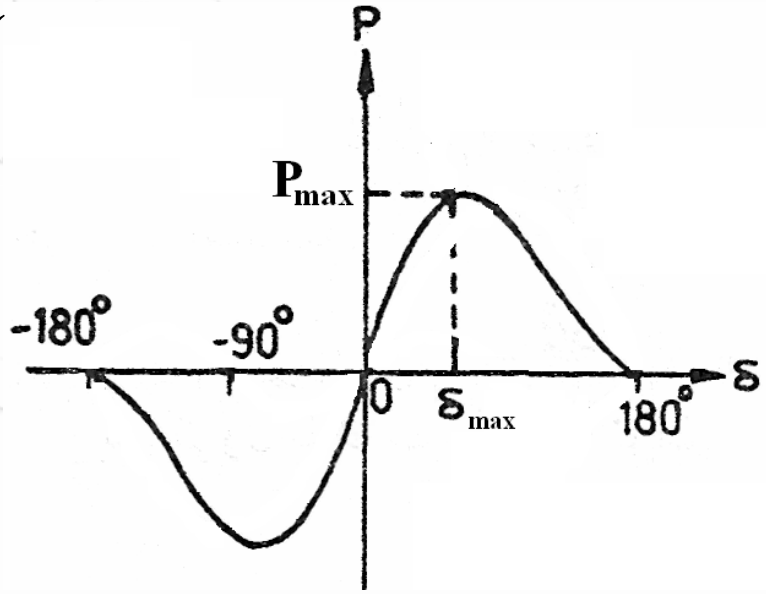
- از رابطه توان P نسبت به زاویه δ مشتق گرفته می شود:

$$P = \frac{3V_t E_f}{X_d}\sin\delta + \frac{3V_t^2}{2}\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\sin 2\delta$$

$$\frac{dP}{d\delta} = 0 \Rightarrow \frac{3V_t E_f}{X_d}\cos\delta + \frac{3V_t^2}{2}\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\times 2\cos 2\delta = 0 \qquad (٦)$$

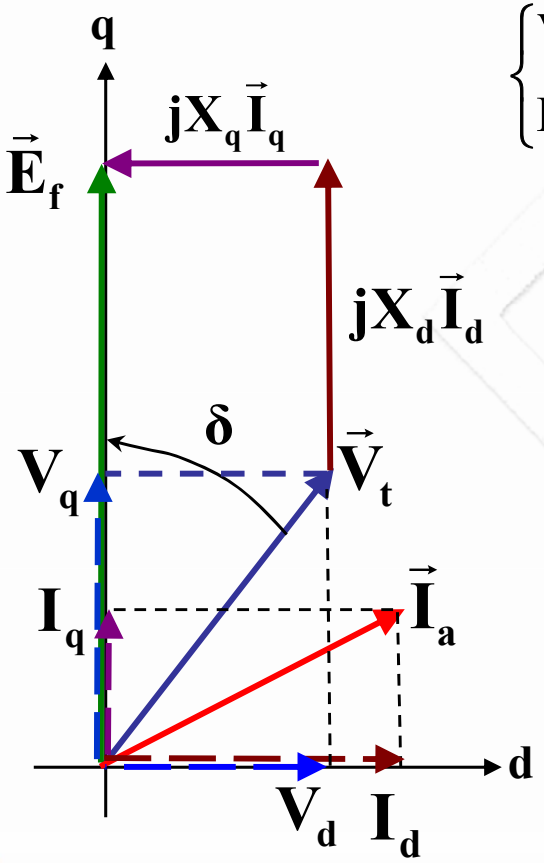
✓ با استفاده از رابطه مثلثاتی روبرو: $\cos 2\delta = 2\cos^2\delta - 1$ (۷)

- یک معادله مرتبه ۲ با دو جواب برای δ بدست می آید که مقدار δ بین ٤٥ تا ۹۰ درجه قابل قبول است.



- توان راکتیو ماشین برابر با مجموع توان های راکتیو روی محورهای q و d است:

$$Q = Q_d + Q_q = 3V_d(-I_q) + 3V_q I_d = -3V_t \sin\delta\, I_q + 3V_t \cos\delta\, I_d \qquad (۸)$$



از طرف دیگر مطابق با شکل زیر داریم:

$$\begin{cases} V_t \sin\delta = X_q I_q \\ E_f = V_t \cos\delta + X_d I_d \end{cases} \qquad (۹)$$

با جایگذاری روابط (۹) در رابطه (۸) خواهیم داشت:

$$Q = -3V_t \sin\delta \frac{V_t \sin\delta}{X_q} + 3V_t \cos\delta \frac{E_f - V_t \cos\delta}{X_d} \qquad (۱۰)$$

در نتیجه:

$$Q = \frac{3V_t E_f}{X_d}\cos\delta - \frac{3V_t^2 \cos^2\delta}{X_d} - \frac{3V_t^2 \sin^2\delta}{X_q} \qquad (۱۱)$$

- از رابطه توان Q نسبت به زاویه δ مشتق گرفته می شود:

$$Q = \frac{3V_t E_f}{X_d}\cos\delta - \frac{3V_t^2\cos^2\delta}{X_d} - \frac{3V_t^2\sin^2\delta}{X_q}$$

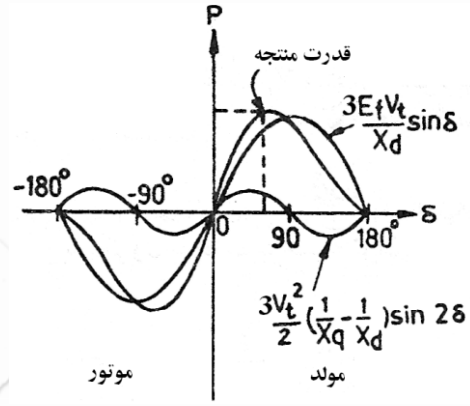
$$\frac{dQ}{d\delta} = 0 \Rightarrow -\frac{3V_t E_f}{X_d}\sin\delta - 3V_t^2\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)2\sin\delta\cos\delta = 0 \qquad (۱۲)$$

$$\Rightarrow \cos\delta = \frac{X_q}{X_q - X_d}\frac{E_f}{2V_t} \qquad (۱۳)$$

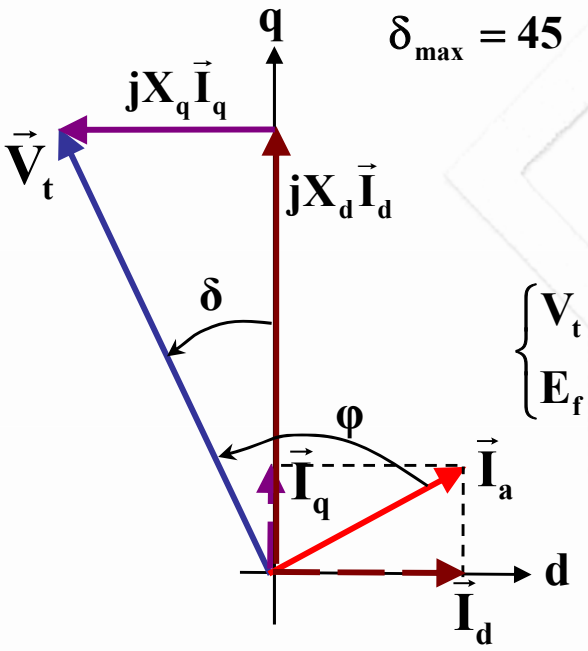
$$, \boxed{Q_{max} = \frac{3V_t^2}{X_d} + \frac{3X_q}{4X_d(X_d - X_q)}E_f^2} \qquad (۱٤)$$

- یک موتور سنکرون سه فاز ۴۰۰ ولت با اتصال ستاره و $X_d = 6\ \Omega$ و $X_q = 4\ \Omega$ با یک شین بی نهایت موازی شده است. اگر جریان میدان آن به صفر کاهش یابد، حداکثر باری که می توان روی موتور گذاشت را بیابید. همچنین جریان موتور و ضریب توان را در توان ماکزیمم حساب کنید.

$$P = \frac{3V_t^2}{2}\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\sin 2\delta \qquad (۱۵)$$



$$\delta_{max} = 45 \Rightarrow P_{max} = \frac{3}{2}\left(\frac{400}{\sqrt{3}}\right)^2\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{6}\right) = 6660\ W$$



دیاگرام برداری در حالت صفر بودن تحریک ($E_f = 0$)

✓ مولفه های جریان عبارتند از:

$$\begin{cases} V_t \sin\delta = X_q I_q \\ E_f = V_t\cos\delta - X_d I_d \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_q = \dfrac{V_t \sin\delta}{X_q} \\ I_d = \dfrac{V_t\cos\delta}{X_d} \end{cases} \Rightarrow I_a = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = 49.1\ A$$

✓ محاسبه ضریب توان:

$$P = P_{max} = \sqrt{3}V_t I_a \cos\varphi \Rightarrow$$

$$\cos\varphi = \frac{6660}{\sqrt{3}\times 400 \times 49.1} = 0.1958\ \ lag$$

- **تعریف ضریب قدرت سنکرون کننده:** نرخ تغییرات قدرت سنکرون P به زاویه بار δ را ضریب قدرت سنکرون کننده P_{sy} نامند.

✓ برای ماشین استوانه ای:

$$P(\delta)=\frac{3V_tE_f}{X_s}\sin\delta \quad \Rightarrow P_{sy}=\frac{dP(\delta)}{d\delta}=\frac{3V_tE_f}{X_s}\cos\delta \qquad (16)$$

✓ برای ماشین قطب برجسته:

$$P(\delta)=\frac{3V_tE_f}{X_d}\sin\delta+\frac{3V_t^2}{2}\left(\frac{1}{X_q}-\frac{1}{X_d}\right)\sin 2\delta$$

$$\Rightarrow P_{sy}=\frac{3V_tE_f}{X_d}\cos\delta+3V_t^2\left(\frac{1}{X_q}-\frac{1}{X_d}\right)\cos 2\delta \qquad (17)$$

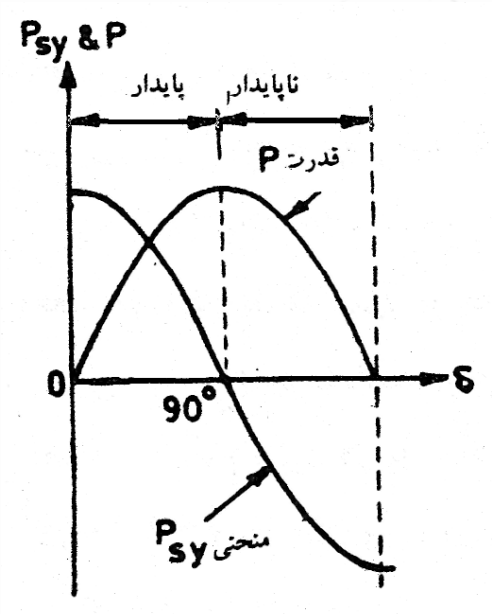
- **نکته ۱:** در هنگام تغییر بار و یا وجود اغتشاش، بالاتر بودن ضریب قدرت سنکرون کننده سبب می شود تا ماشین سریعا به حالت پایدار خود برسد.
- **نکته ۲:** هرچه E_f بیشتر باشد و یا به عبارتی ماشین فوق تحریک باشد، ضریب قدرت سنکرون کننده بیشتر است.
- **نکته ۳:** هرچه X_d و X_q کمتر باشند و یا فاصله هوایی بیشتر باشد، بازهم ضریب قدرت سنکرون کننده بیشتر است.

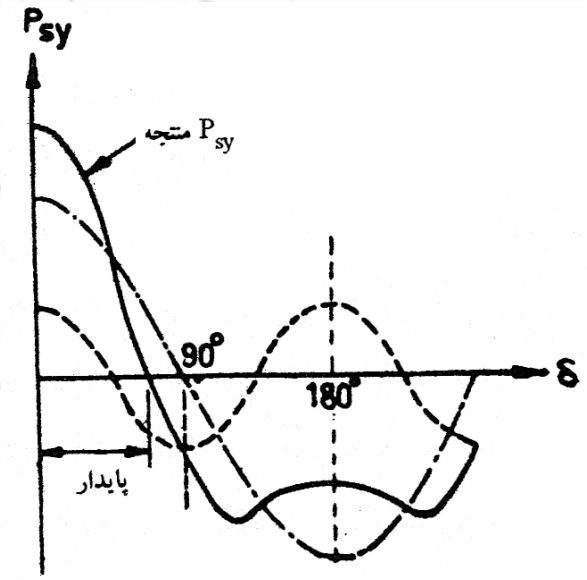
✓ محاسبه قدرت سنکرون کننده (P_s):

$$P_s = \frac{dP}{d\delta}\Delta\delta \qquad (۱۸)$$

$$\Rightarrow P_s = \left[\frac{3V_tE_f}{X_d}\cos\delta + 3V_t^2\left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right)\cos 2\delta\right]\Delta\delta \qquad (۱۹)$$

- رابطه فوق نشان می دهد که با تغییرات گشتاور بار و یا شرایط اغتشاشی، $\Delta\delta$ بوجود می آید و ماشین توان (گشتاور) سنکرون کننده P_s را بوجود می آورد تا به حالت پایدار برسد. پس از آن مقدار P_s صفر می شود.

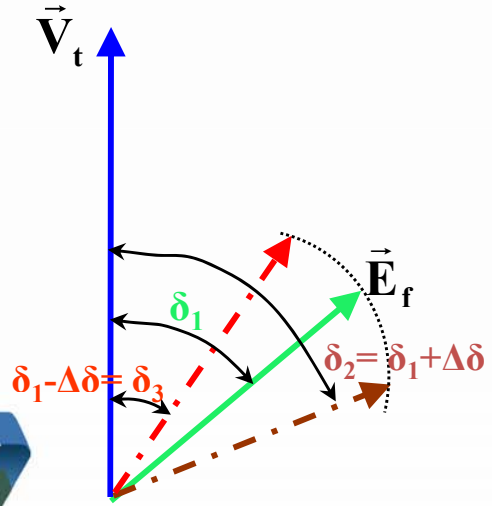




✓ **تعریف هانتینگ (Hunting) یا پاندولی شدن:** نوسانات سرعت (یا زاویه بار) حول نقطه کار ماشین بواسطه تغییرات ناگهانی بار را هانتینگ گویند.

✓ **چگونگی ایجاد هانتینگ (تحلیل کیفی):**

1) به فرض ماشین موردنظر، یک موتور سنکرون بدون بار است. در حالت بی باری، ناگهان باری با توان P_1 به محور موتور اعمال می شود. در نتیجه سرعت موتور سریعا کند شده و به کمتر از سرعت سنکرون می رسد.
2) زاویه بار ماشین برای ایجاد توان P_1 به تدریج زیاد می شود تا به مقدار δ_1 برسد. لذا $P_e = P_{max}\sin\delta_1 = P_1$.
3) توان $P_e = P_1$، ایجاد می شود، اما سرعت روتور N_r از سرعت سنکرون N_s کوچکتر است. لذا توان الکتریکی ورودی P_e افزایش می یابد و در نتیجه زاویه بار از δ_1 به $\delta_2 = \delta_1 + \Delta\delta$ افزایش می یابد.
4) افزایش P_e سبب شتاب گیری موتور شده و سرعت روتور N_r از N_s فزونی یافته و زیادتر می گردد.
5) به دلیل $N_r > N_s$، زاویه بار از δ_2 به δ_1 کاهش یافته و توان تولیدی نیز برابر با توان بار P_1 می شود. ما چون $N_r > N_s$ است، توان تولیدی P_e بازهم کاهش می یابد.
6) کاهش توان سبب کاهش زاویه بار از δ_1 به $\delta_3 = \delta_1 - \Delta\delta$ می گردد. در این حالت سرعت روتور کم شده تا به مقدار $N_r = N_s$ برسد. اما چون توان تولیدی P_e کمتر از P_1 است، سرعت بازهم کاهش می یابد.
7) روند فوق در صورت عدم وجود میرایی تکرار می شود. اگر میرایی وجود داشته باشد دامنه نوسانات به مرور زمان کمتر شده تا سرعت N_r در N_s و توان P_e در P_1 تثبیت گردند.



❑ پدیده پاندولی شدن (هانتینگ)

➢ اثرات بد هانتینگ:

1) اگر بار متصل به ماشین حاوی هارمونیک هایی باشد که برابر با فرکانس نوسانات هانتینگ باشد، ماشین ممکن است دچار رزونانس شده و از حالت سنکرون خارج شود.
2) نوسان روتور تنش مکانیکی و خستگی شدید در محور ایجاد می کند.
3) نوسان روتور در جریان و قدرت، موج ضربه ای ایجاد می کند.
4) تلفات افزایش یافته و باعث افزایش درجه حرارت می شود.
5) حالت ژنراتوری و برگشت توان ممکن است سبب ایجاد مشکل در سیستم تغذیه گردد.

➢ علل مختلف نوسان یا هانتینگ:

1) تغییر ناگهانی در بار
2) خطا در منبع تغذیه
3) تغییر ناگهانی در جریان تغذیه
4) بار روی موتور یا ولتاژ تغذیه موتور و یا چرخاننده ژنراتور حاوی هارمونیک باشند.

➢ روش های مقابله با هانتینگ در روتور:

1) استفاده از چرخ طیار (فلایویل)
2) با طراحی مناسب ماشین و ایجاد ضریب قدرت سنکرون کننده و یا ضریب سختی مناسب
3) به کار گیری سیم پیچهای میرایی

❑ پدیده پاندولی شدن (هانتینگ)

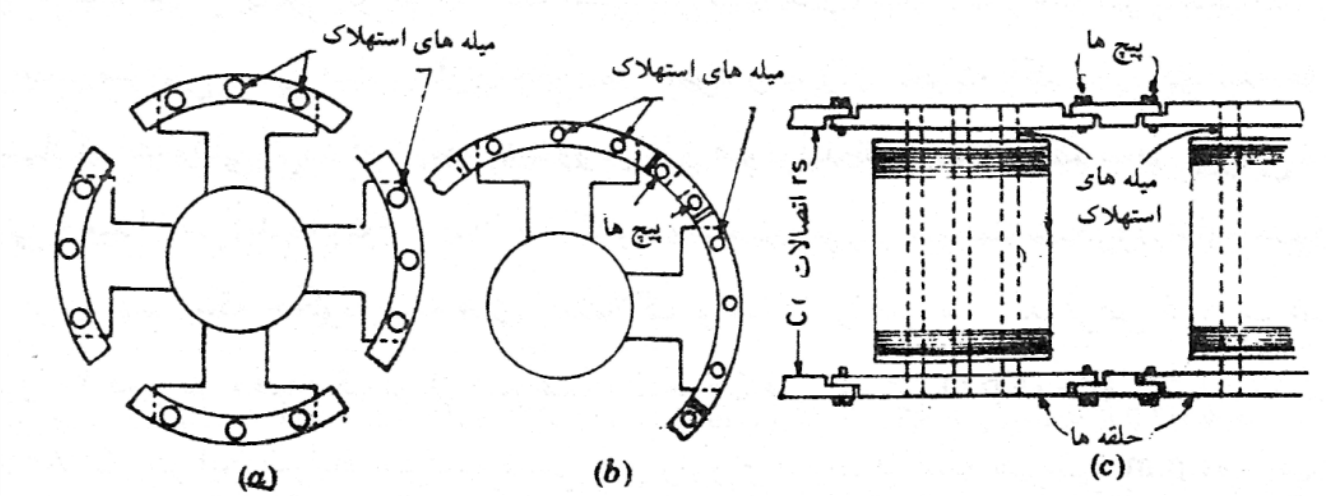
➢ سیم پیچ های میرایی (Damper)

❖ **سیم پیچ های میرایی:** از میله های مسی، برنجی، و یا آلومینیومی کم مقاومتی تشکیل شده اند که در شیارهای کفش قطب های ماشین جاسازی شده اند.

❖ **نکته ۱:** مقدار مقاومت سیم پیچ های میرایی برای ایجاد گشتاور راه اندازی بالا باید زیاد باشد و برای کاهش هانتینگ باید کم باشد. لذا انتخاب آن باید طبق مصالحه ایی بین گشتاور راه اندازی و حذف هانتینگ صورت گیرد.

❖ **نکته ۲:** دمپرها وقتی به کار می آیند که روتور از حالت سنکرونیزم خارج شود.

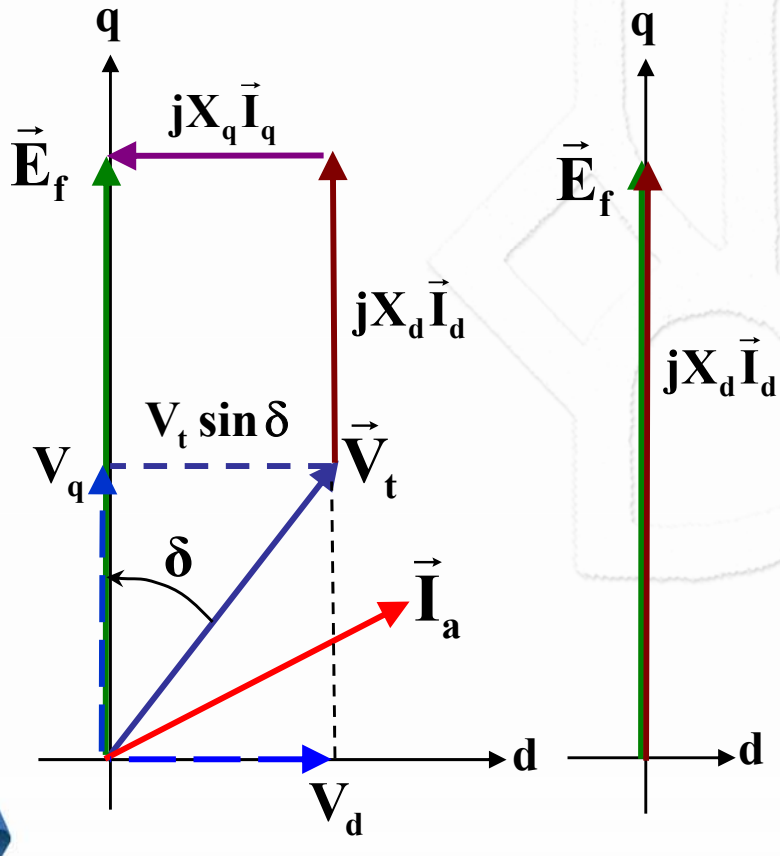
❖ **نکته ۳:** سیم پیچ های میراکننده در توربو ژنراتورها بکا نمی رود. اما هسته چنین ماشین هایی که در آنها جریانهای فوکو جاری می شود، نقش سیم پیچهای میرایی را ایفا می نماید.



- در این روش فقط پارامتر X_d تعیین می شود و پارامتر X_q باید از روش های دیگر محاسبه گردد.

✓ در شرایط اتصال کوتاه ($I_a = I_{SC}$) داریم:

$$V_d = V_t \sin\delta = X_q I_q \xrightarrow{V_t=0} I_q = 0 \Rightarrow \vec{I}_a = \vec{I}_q + \vec{I}_d = \vec{I}_d \qquad (۲۰)$$



✓ لذا نمودار برداری به شکل ساده شده زیر در خواهد آمد:

$$X_d I_d = E_f \Rightarrow X_d I_{SC} = E_f$$

$$\Rightarrow \boxed{X_d = \left.\frac{E_f}{I_{SC}}\right|_{I_f=cte}} \qquad (۲۱)$$

❑ تعیین پارامترهای ماشین سنکرون قطب برجسته

➢ روش آزمایش لغزش

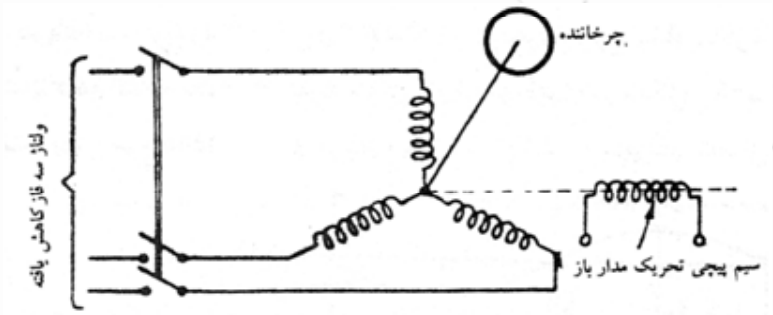
- **از این روش می توان هر دو پارامتر X_d و X_q را تعیین نمود.**

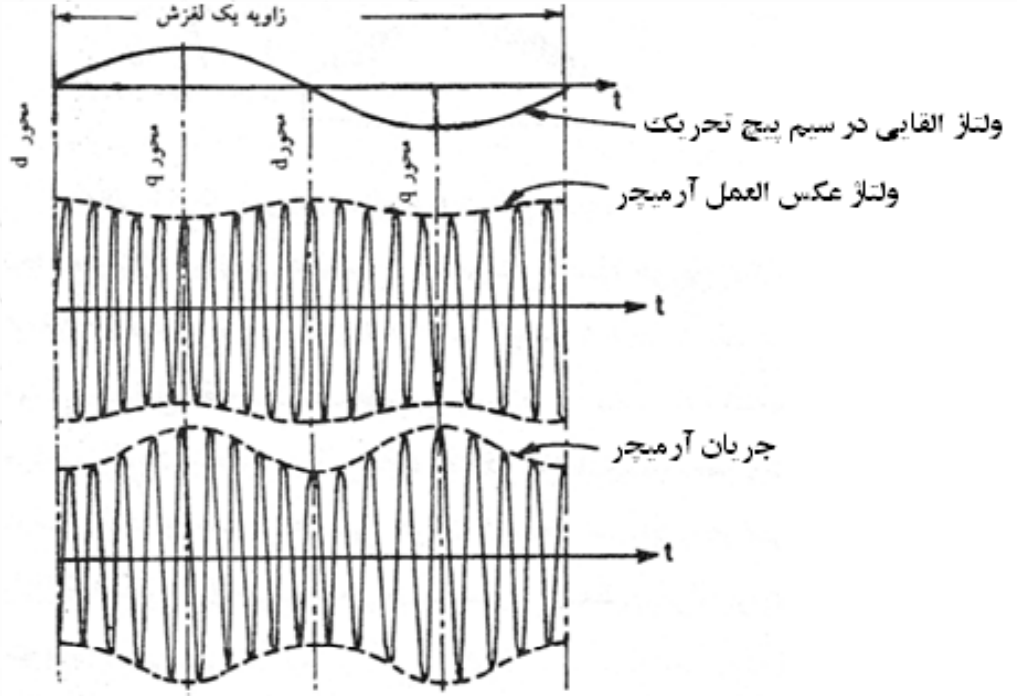
✓ **در این روش جریان تحریک صفر بوده و سیم پیچ تحریک نیز مدار باز است.**

✓ **ماشین سنکرون به یک شبکه سه فاز با ولتاژی در حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد ولتاژ نامی (معمولا با استفاده از واریاک) متصل می شود.**

✓ **یک چرخاننده خارجی، روتور را در سرعت اندکی بالاتر از سرعت سنکرون می چرخانند تا ولتاژ القایی کوچکی در سیم پیچ تحریک بوجود آید.**

✓ **اگر اسیلوسکوپ در اختیار باشد، با اندازه گیری ولتاژ و جریان آرمیچر، می توان مقدار راکتانسهای X_d و X_q را محاسبه نمود.**





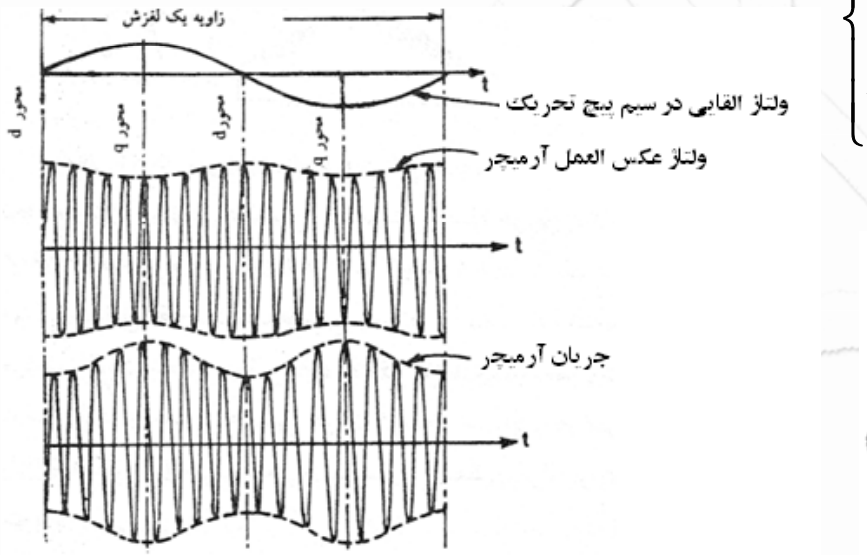
✓ در حالتی که جریان آرمیچر حداقل است، یعنی راکتانس آرمیچر حداکثر مقدار خود یعنی X_d را داراست.

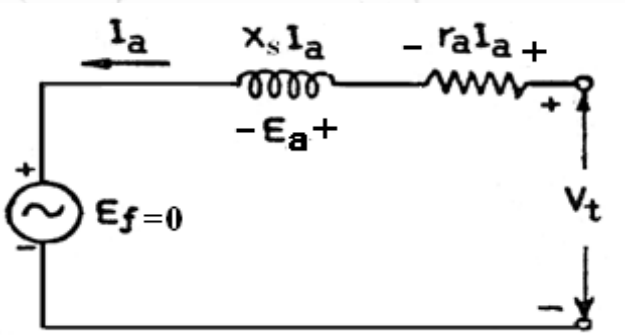
✓ در حالت جریان حداکثر آرمیچر، راکتانس آرمیچر حداقل بوده و برابر با X_q است.

$$\begin{cases} X_d = \dfrac{V_t}{I_{a,min}} \\ X_q = \dfrac{V_t}{I_{a,max}} \end{cases} \qquad (۲۲)$$

✓ اما روابط دقیق تر برای ولتاژ راکتانس عکس العمل آرمیچر عبارتند از:

$$\begin{cases} X_d = \dfrac{V_t - r_a I_{a,min}}{I_{a,min}} \\ X_q = \dfrac{V_t - r_a I_{a,max}}{I_{a,max}} \end{cases} \qquad (۲۳) \Rightarrow \begin{cases} X_d = \dfrac{E_{a,max}}{I_{a,min}} \\ X_q = \dfrac{E_{a,min}}{I_{a,max}} \end{cases} \qquad (۲۴)$$





... روش آزمایش لغزش

- ✓ **نکته ۱: لغزش (تفاوت سرعت چرخاننده خارجی و فرکانس تغذیه) باید تا حد امکان کوچک باشد، در غیر اینصورت جریان های القایی در مدارهای میراکننده باعث ایجاد خطاهای بزرگی در اندازه گیری X_d و X_q می شوند.**

- ✓ **نکته ۲: اما نگهداشتن لغزش در مقادیر خیلی کم مشکل است، زیرا گشتاور رلوکتانسی سعی در سنکرون کردن ماشین و از بین بردن لغزش دارد. لذا باید آزمایش لغزش در مقادیر کم ولتاژ تغذیه انجام شود به نحویکه گشتاور رلوکتانسی کم باشد.**

- ✓ **نکته ۳: منابع عمده خطا در این روش عبارتند از خطاهای خواندن – اثرات لختی ولت متر و آمپرمتر.**

- ✓ **نکته ٤: برای حذف اثرات خطا، در این آزمایش معمولا، نسبت X_q/X_d اندازه گیری می شود و سپس با استفاده از X_d بدست آمده از آزمایش اتصال کوتاه، X_q محاسبه می شود.**

- ✓ **نکته ٥: مقادیر اندازه گیری شده X_d و X_q در این آزمایش مقادیر غیر اشباع هستند، زیرا ولتاژ اعمالی و شار ایجاد شده کم هستند.**
- ✓ **نکته ٦: بجای اسیلوسکوپ می توان از آمپرمتر و ولتمتر نیز استفاده نمود.**

- ✓ **نکته آخر: روش موتور رلوکتانسی نیز برای محاسبه نسبت پارامترهای X_d و X_q وجود دارد که برای مطالعه به کتاب بیم بهارا مراجعه بفرمائید.**