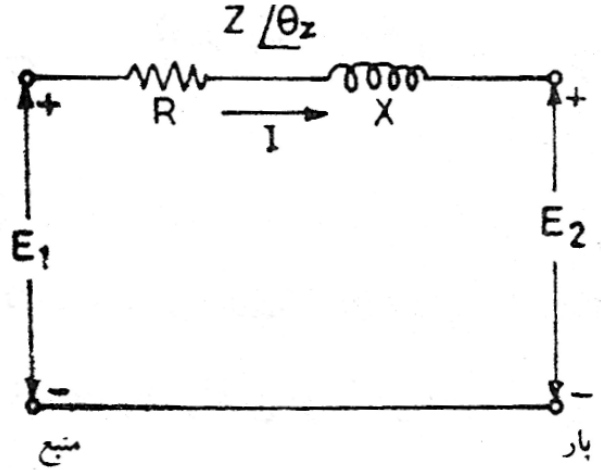
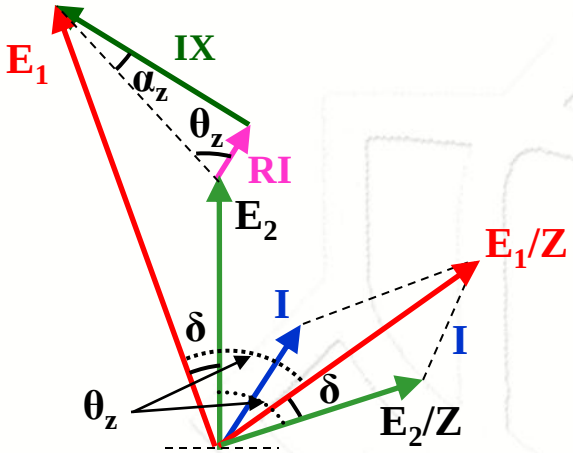
مبحث پنجم:

توان در ژنراتور سنکرون

- توان جاری شده در امپدانس اندوکتیو
- مشخصه توان – زاویه قدرت
- کنترل ضریب توان
- منحنی‌های قابلیت ژنراتور سنکرون
- تلفات و بازده در ژنراتور سنکرون



(الف) مدار امپدانس اندوکتیو بین دو ولتاژ



(ب) نمودار برداری مدار امپدانس اندوکتیو

توان خروجی از منبع E_1: $P_1 = E_1 \times$ (مولفه‌ای از I که هم‌فاز E_1 است)

توان ورودی به محل E_2: $P_2 = E_2 \times$ (مولفه‌ای از I که هم‌فاز E_2 است)

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_2 + \vec{I}\vec{Z} \qquad (1)$$

$$\vec{I} = \frac{\vec{E}_1 - \vec{E}_2}{\vec{Z}} = \frac{\vec{E}_1}{\vec{Z}} - \frac{\vec{E}_2}{\vec{Z}} \qquad (2)$$

❑ توان جاری شده در امپدانس اندوکتیو

...توان اکتیو:

$$P_1 = E_1 \times (\text{مولفه‌ای از I که هم‌فاز } E_1 \text{ است}) \quad (۳)$$

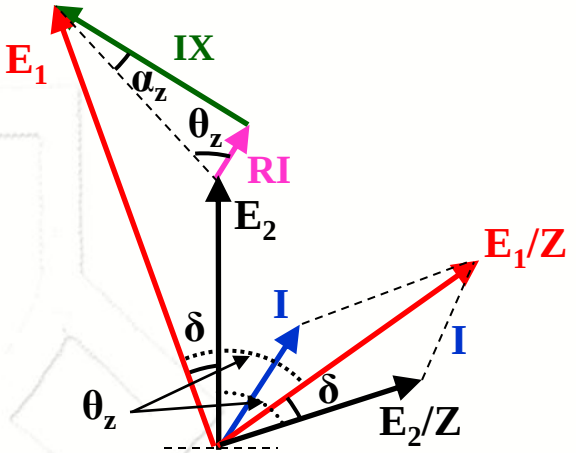
$$E_1 \text{ هم‌فاز I مولفه} = [\frac{E_1}{Z}\cos\theta_z - \frac{E_2}{Z}\cos(\delta+\theta_z)] \quad (۴)$$

$$\therefore P_1 = E_1[\frac{E_1}{Z}\cos\theta_z - \frac{E_2}{Z}\cos(\delta+\theta_z)] \quad (۵)$$

$$\cos\theta_z = \cos(\frac{\pi}{2}-\alpha_z) = \frac{R}{Z} \quad (۶)$$

$$\Rightarrow \boxed{P_1 = \frac{E_1^2 R}{Z^2} + \frac{E_1 E_2}{Z}\sin(\delta-\alpha_z)} \quad (۷)$$

$$\therefore \boxed{P_2 = \frac{E_1 E_2}{Z}\sin(\delta+\alpha_z) - \frac{E_2^2 R}{Z^2}} \quad (۸)$$



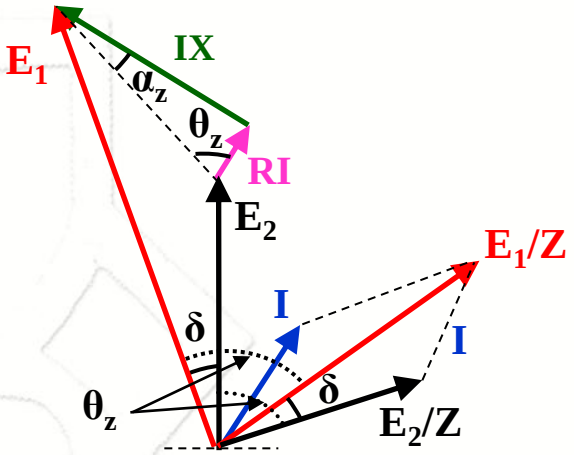
نمودار برداری مدار امپدانس اندوکتیو

به طریق مشابه توان خروجی از محل E_2 برابر خواهد بود با:

$$Q_2 = E_2 \times (\text{مولفه I عمود بر } E_2 \text{ و عقب نسبت به آن}) \qquad (۹)$$

$$\text{مولفه I عمود} = [\frac{E_1}{Z}\sin(\theta_z - \delta) - \frac{E_2}{Z}\sin\theta_z] \qquad (۱۰)$$

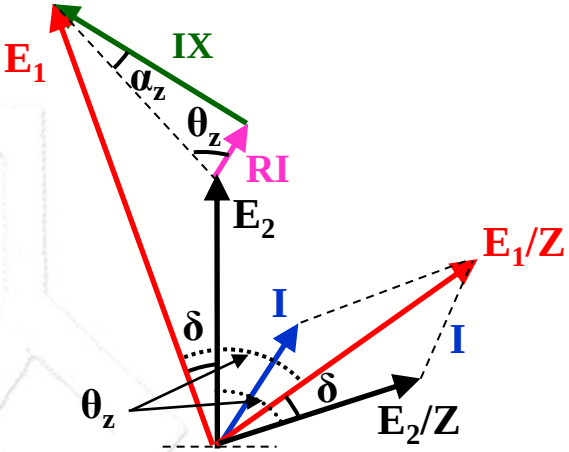
$$\Rightarrow \boxed{Q_2 = \frac{E_1 E_2}{Z}\cos(\delta + \alpha_z) - \frac{E_2^2}{Z^2}X_s} \qquad (۱۱)$$



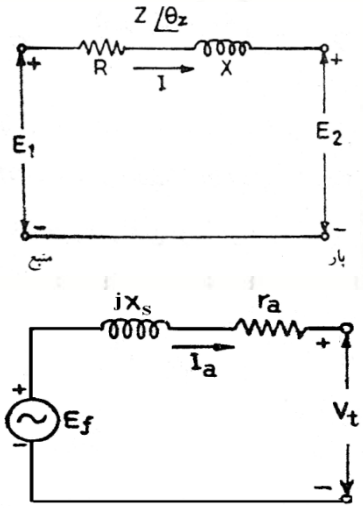
نمودار برداری مدار امپدانس اندوکتیو

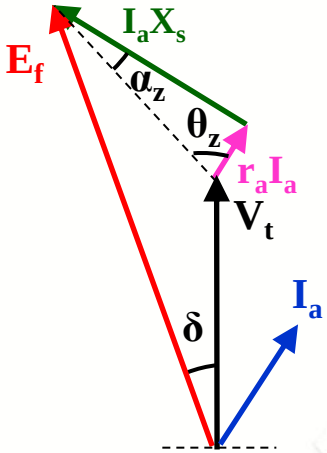
❑ توان جاری شده در امپدانس اندوکتیو

➢ توان اکتیو در ژنراتور سنکرون:



نمودار برداری مدار امپدانس اندوکتیو





نمودار برداری ژنراتور سنکرون استوانه‌ای

- بنابراین توان جاری شده در ژنراتور سنکرون استوانه‌ای حالت خاصی از توان در مدار امپدانس اندوکتیو است.

توان در محل E_f یا ورودی ژنراتور:

$$P_{ig} = \frac{E_f V_t}{Z_s}\sin(\delta - \alpha_z) + \frac{E_f^2}{Z_s^2} r_a \qquad (۱۲)$$

توان در محل V_t یا خروجی ژنراتور:

$$P_{og} = \frac{E_f V_t}{Z_s}\sin(\delta + \alpha_z) - \frac{V_t^2}{Z_s^2} r_a \qquad (۱۳)$$

توان اکتیو خروجی ژنراتور سنکرون با فرض $r_a = 0$:

$$P_{og} = \frac{E_f V_t}{Z_s}\sin(\delta + \alpha_z) - \frac{V_t^2}{Z_s^2} r_a \qquad (14)$$

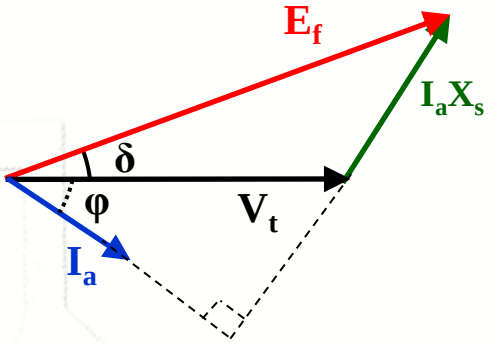
با فرض مقاومت آرمیچر صفر: $r_a = 0 \Rightarrow \alpha_z = 0,\ Z_s = X_s$ (۱۵)

$$P = \frac{3V_t E_f}{X_s}\sin\delta$$ توان ژنراتور سه‌فاز: (۱۶)

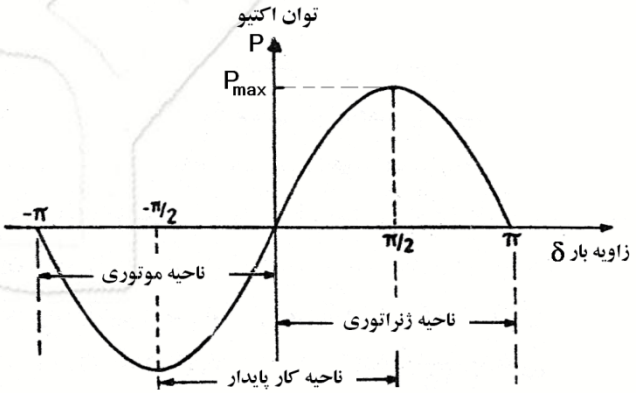
$$P_{max} = \frac{3V_t E_f}{X_s}$$ توان خروجی حداکثر: (۱۷)

توان خروجی حداکثر با احتساب r_a:

$$P_{max} = \frac{3V_t E_f}{Z_s} - \frac{3V_t^2}{Z_s^2} r_a \qquad (18)$$



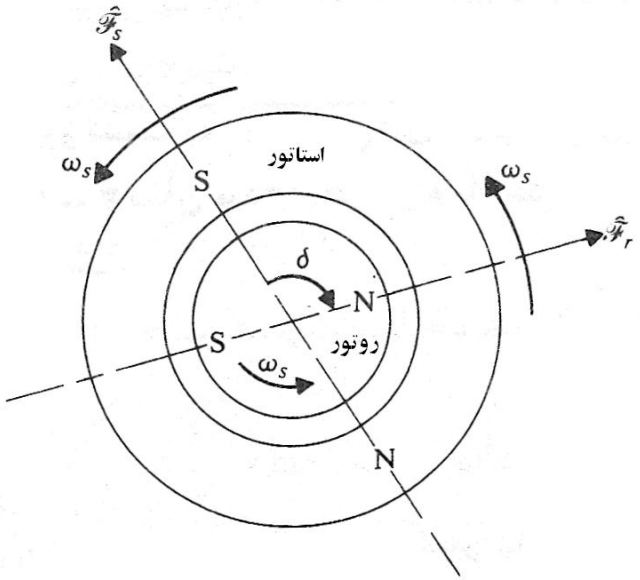
نمودار برداری ژنراتور سنکرون استوانه‌ای با فرض $r_a = 0$



تغییرات توان اکتیو برحسب زاویه بار

- زاویه قدرت δ، در واقع زاویه بین دو میدان مغناطیسی در ماشین سنکرون است که وابسته به مقدار توان بار است.

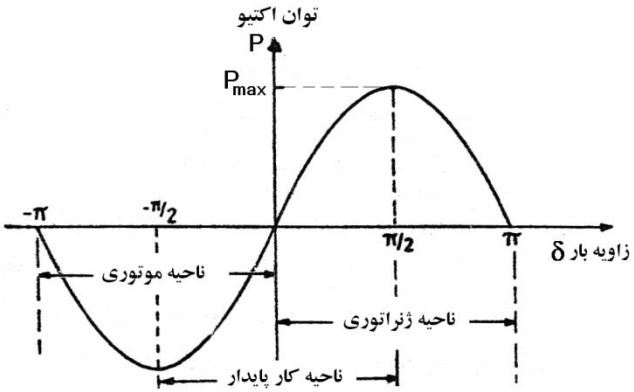
$$T_e = k\,\hat{\Im}_s \hat{\Im}_r \sin\delta \qquad (۱۹)$$



وضعیت نیروهای محرکه مغناطیسی روتور و استاتور در ماشین سنکرون

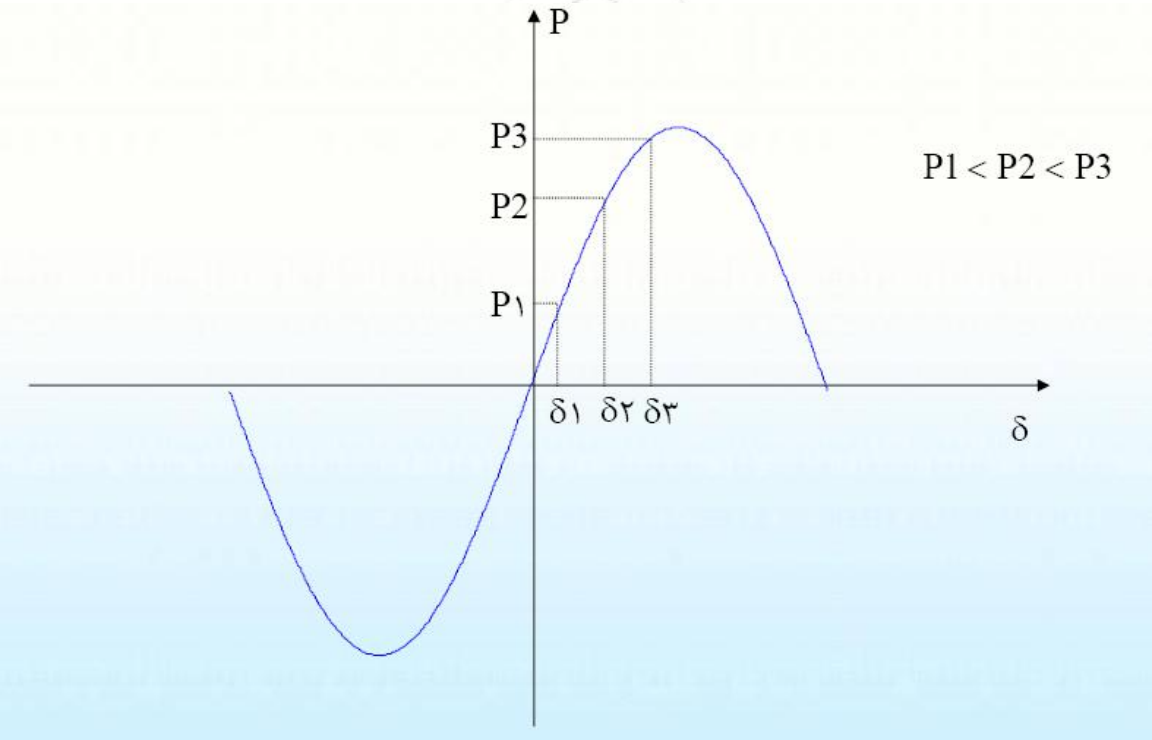
توان ژنراتور سه‌فاز:

$$P = \frac{3V_t E_f}{X_s}\sin\delta$$



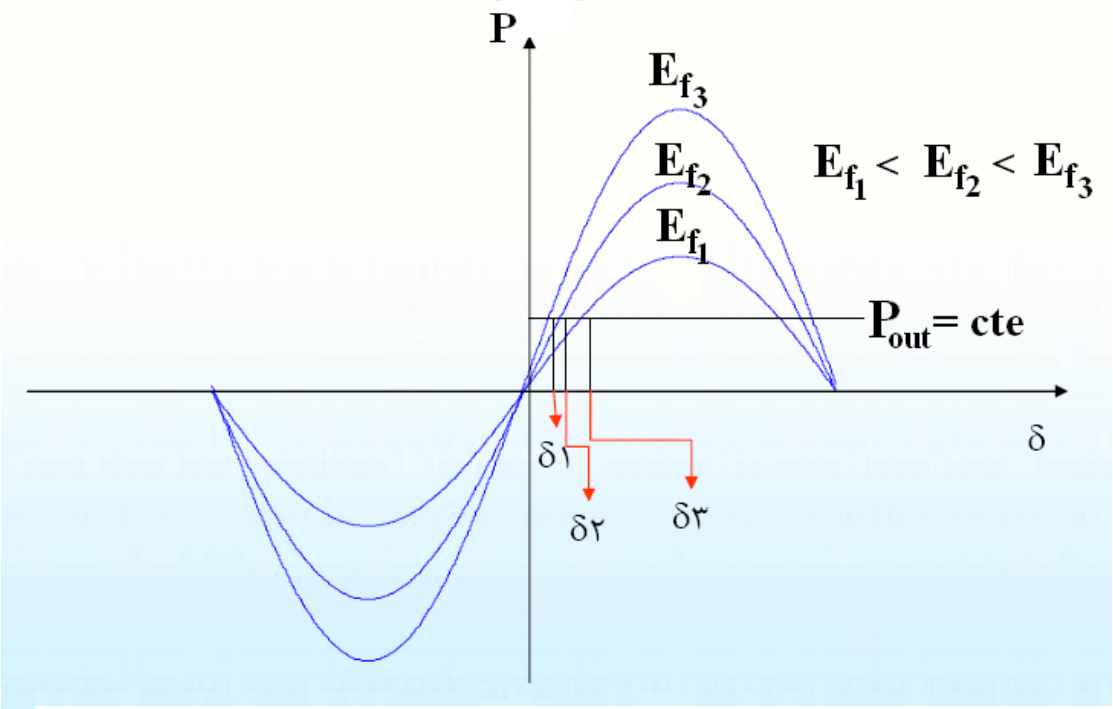
تغییرات توان اکتیو برحسب زاویه بار

- با افزایش توان بار، زاویه قدرت δ نیز زیادتر شده و درنتیجه حاشیه پایداری ماشین کاهش می‌یابد.



اثر افزایش توان بار بر تغییرات زاویه قدرت

- با افزایش ولتاژ بی‌باری ژنراتور سنکرون، به ازای یک بار ثابت، زاویه قدرت کمتر شده و از ناحیه ناپایدار دورتر می‌گردد.



تغییرات زاویه قدرت برای یک بار ثابت در تحریک‌های مختلف

توان راکتیو خروجی ژنراتور سنکرون:

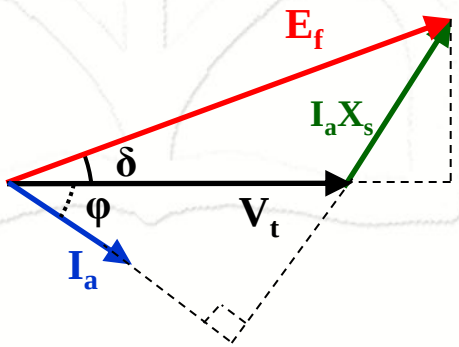
$$Q_2 = \frac{E_1 E_2}{Z}\cos(\delta + \alpha_z) - \frac{E_2^2}{Z^2} X_s \qquad (۲۰)$$

$$\Rightarrow Q = \frac{E_f V_t}{Z_s}\cos(\delta + \alpha_z) - \frac{V_t^2}{Z_s^2} X_s \qquad (۲۱)$$

توان راکتیو خروجی:

$$Q = \frac{3V_t}{X_s}(E_f \cos\delta - V_t) \qquad (۲۲)$$

لذا در ژنراتور سه‌فاز با فرض صفر بودن مقاومت آرمیچر داریم:



نمودار برداری ژنراتور سنکرون استوانه‌ای با فرض $r_a = 0$

دانشگاه کاشان / دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر / گروه قدرت / درس ماشین های الکتریکی ۳ / پائیز ۹۲ / دکتر حلوایی

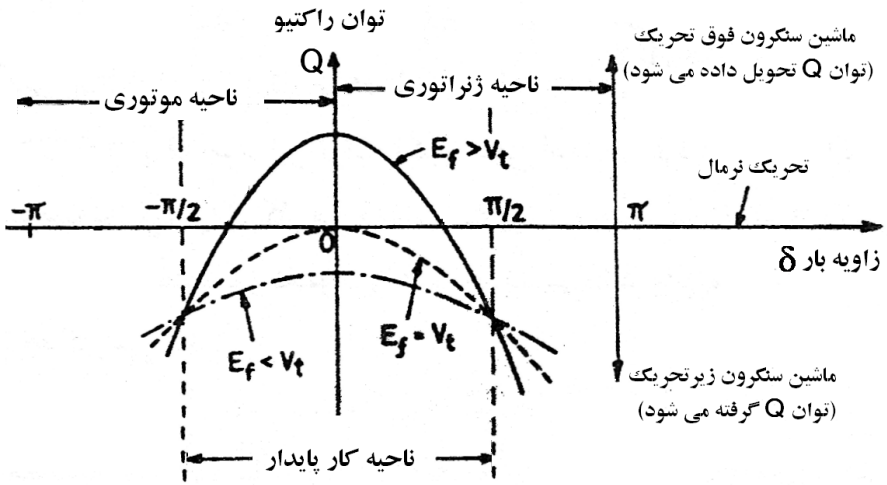
❑ مشخصه توان – زاویه قدرت

... توان راکتیو خروجی ژنراتور سنکرون:

- اگر $E_f \times \cos\delta - V_t > 0$ باشد (ژنراتور فوق تحریک): در این حالت Q مثبت بوده و بنابراین توان راکتیو به بیرون تحویل می دهد. در این حالت ضریب توان ژنراتور پس فاز است.

- اگر $E_f \times \cos\delta - V_t = 0$ باشد (تحریک نرمال): در این حالت Q صفر بوده و بنابراین ژنراتور نه توان راکتیو تحویل می‌دهد و نه جذب می‌کند. در این حالت ضریب توان ژنراتور برابر واحد است.

- اگر $E_f \times \cos\delta - V_t < 0$ باشد (ژنراتور زیرتحریک): در این حالت Q منفی بوده و بنابراین توان راکتیو جذب می‌کند. در این حالت ضریب توان ژنراتور پیش‌فاز است.

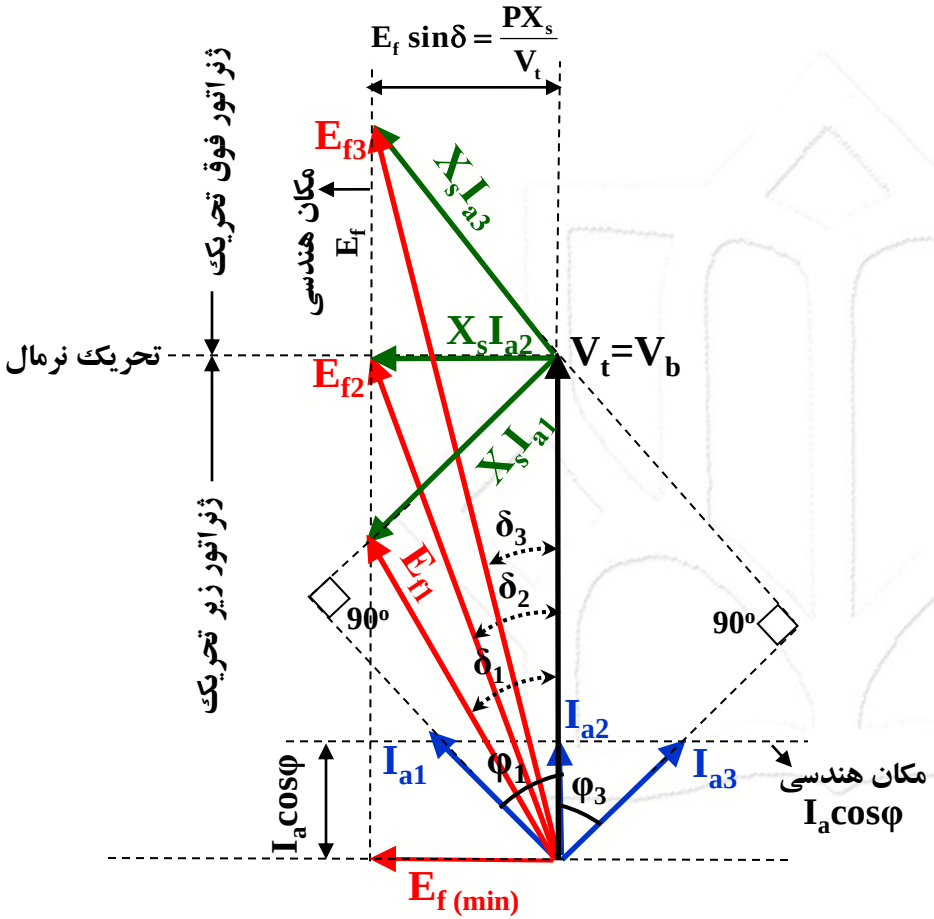


تغییرات توان راکتیو برحسب زاویه بار

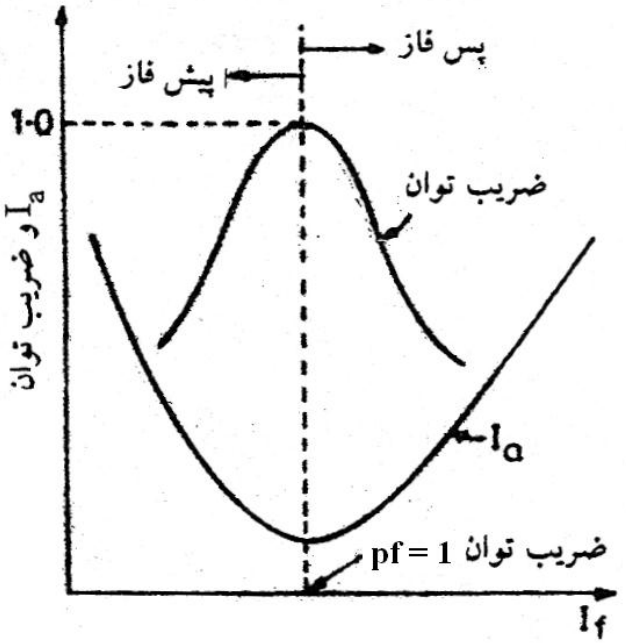
$$Q = \frac{3V_t}{X_s}(E_f \cos\delta - V_t)$$

کنترل ضریب توان

- اثر تغییر جریان تحریک بر ژنراتور سنکرون متصل به شین بی‌نهایت:



(الف) نمودار برداری اثر تغییر جریان تحریک بر ژنراتور متصل به شین بی‌نهایت



(ب) تغییرات جریان و ضریب توان برحسب تغییر جریان تحریک

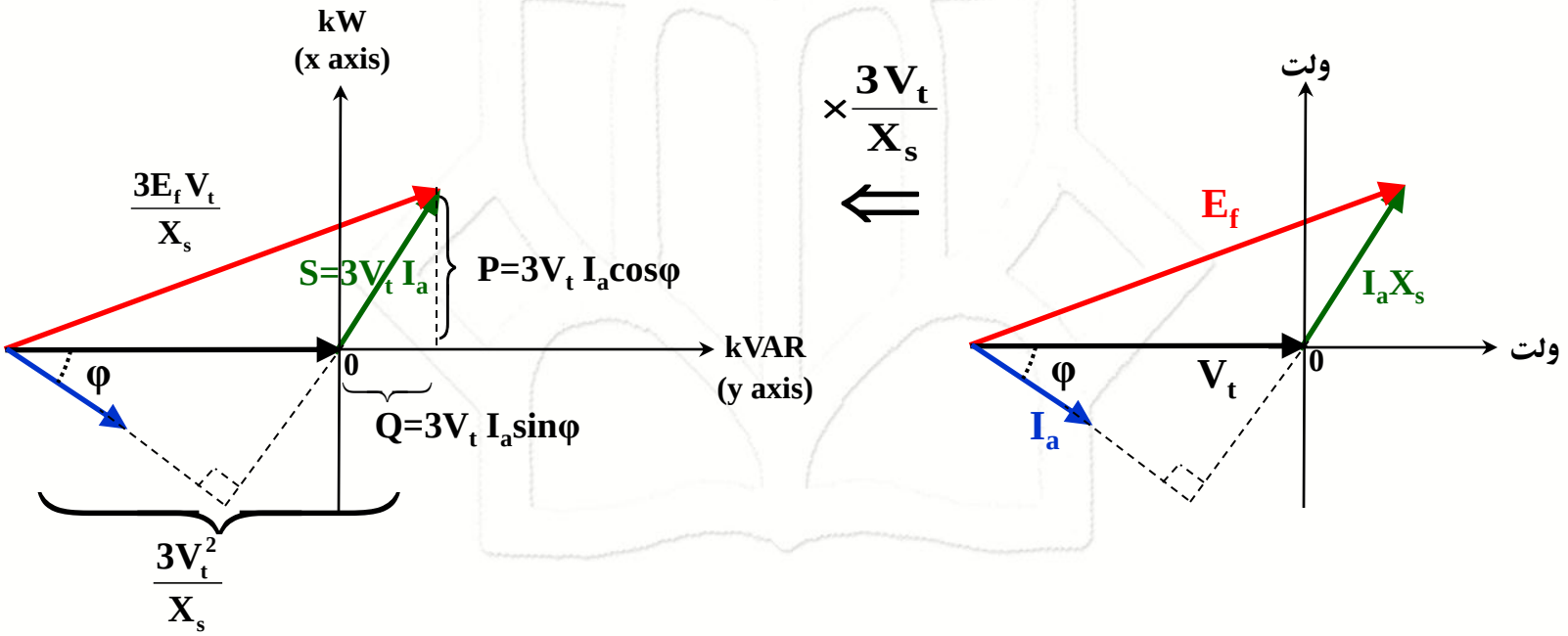
- به فرض A_1 ژنراتور مجزا و A_2 ژنراتور متصل به شین بی‌نهایت باشد:

(۱) تحریک میدان: در A_1، با افزایش تحریک، E_f و V_t هر دو افزایش می‌یابند. اما ضریب توان بستگی به طبیعت بار دارد.
اما برای A_2، افزایش تحریک باعث تغییر ضریب توان از پیش‌فازی به پس‌فازی می‌گردد.

(۲) توان ورودی چرخاننده: در A_1 با افزایش توان چرخاننده، E_f و V_t و f هر سه افزایش یافته و توان تحویلی به بار زیاد می‌شود.
اما برای A_2، V_t و فرکانس ثابت می‌مانند. لذا زاویه بار δ زیاد شده و توان تحویلی به شین بی‌نهایت بالا می‌رود.

❑ منحنی‌های قابلیت ژنراتور سنکرون

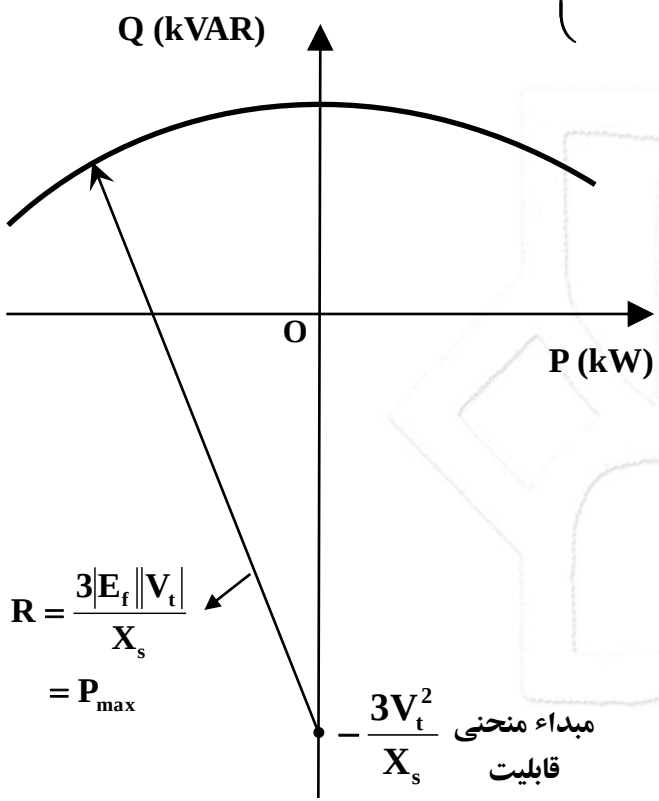
- مکان هندسی توان مختلط $S=P+jQ$ دایره‌ای است که منحنی قابلیت نام دارد.
- منحنی قابلیت را با فرض ثابت بودن ولتاژ آرمیچر ($V_t=cte$) از روی دیاگرام برداری ژنراتور می‌توان بدست آورد.



(ب) نمودار توانی نظیر نمودار برداری

(الف) نمودار برداری ژنراتور سنکرون

- منحنی قابلیت یک ژنراتور دایره‌ای است به شعاع $\frac{3|E_f||V_t|}{X_s}$ و مبداء $\left(0, -\frac{3|V_t|^2}{X_s}\right)$.



منحنی قابلیت ژنراتور

اثبات دایره بودن منحنی قابلیت $S = P + jQ$:

$$P = \frac{3E_f V_t}{X_s}\sin\delta \quad , \quad Q = \frac{3(E_f V_t \cos\delta - V_t^2)}{X_s} \qquad (۲۳)$$

$$\sin\delta = \frac{P}{3E_f V_t / X_s} \qquad \cos\delta = \frac{Q + 3V_t^2 / X_s}{3E_f V_t / X_s} \qquad (۲۴)$$

$$\sin^2\delta + \cos^2\delta = 1 \qquad (۲۵)$$

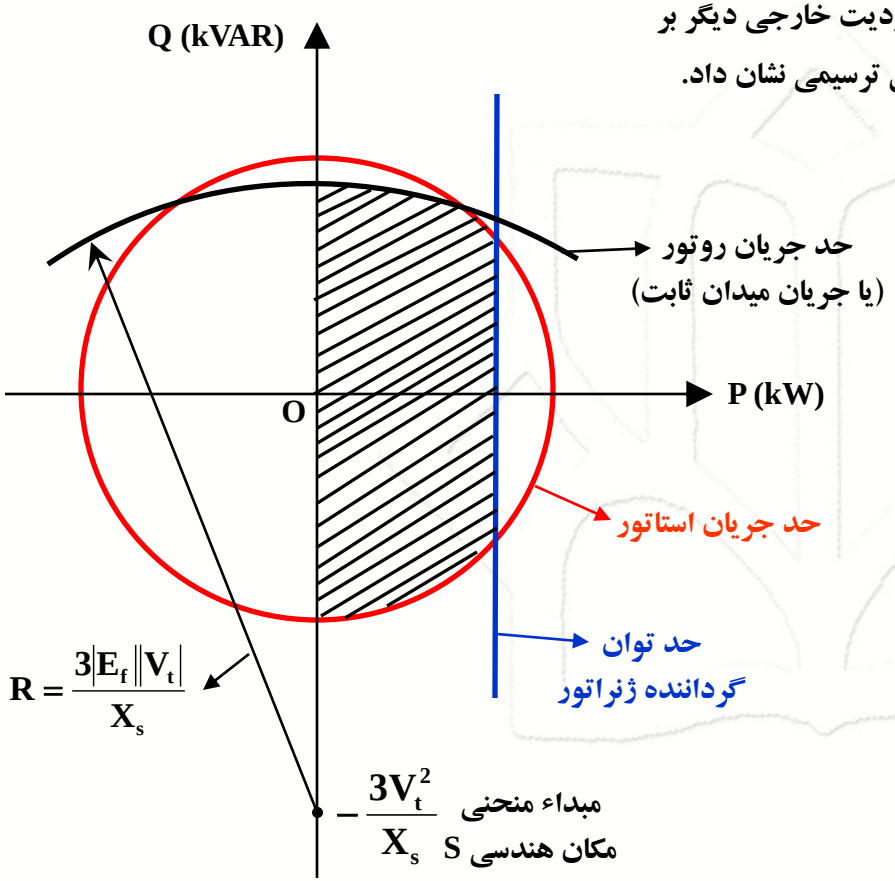
$$P^2 + (Q + \frac{3V_t^2}{X_s})^2 = (\frac{3E_f V_t}{X_s})^2 = P_{max}^2 \qquad (۲۶)$$

- محدودیت‌های حرارتی استاتور و روتور و همچنین هر محدودیت خارجی دیگر بر روی ژنراتور سنکرون را می‌توان با منحنی قابلیت ژنراتور به شکل ترسیمی نشان داد.

- هر نقطه‌ای که در درون هر دو دایره جریان روتور و استاتور قرار گیرد یک نقطه ایمن کاری محسوب می‌شود.

- با توجه به اینکه توان اکتیو تولیدی ژنراتور نمی تواند منفی بشود، سمت چپ صفحه توان مختلط، نقاط کاری ژنراتور نمی تواند باشد.

- محدودیت‌های دیگر نظیر توان گرداننده ژنراتور و حد پایداری استاتیک را نیز می‌توان در منحنی قابلیت نشان داد.



منحنی قابلیت ژنراتور و اعمال محدودیت‌ها

۱- تلفات مدار تحریک

۲- تلفات مستقیم بار

۳- تلفات سرگردان بار

٤- تلفات گردشی یا تلفات ثابت ← الف- تلفات اصطکاک یاتاقانها و مالش هوا
ب- تلفات هسته مدار باز

۱- تلفات مدار تحریک: از رابطه $r_f I^2_f$ قابل محاسبه بوده و مقدار آن همواره ثابت است.

۲- تلفات مستقیم بار: از رابطه $3r_a I^2_a$ قابل محاسبه بوده که r_a مقدار موثر مقاومت هر فاز است.

۳- تلفات سرگردان بار: شامل دو بخش زیر است:

(الف)تلفات آهن یا هسته که به علت شار نشتی آرمیچر بوجود می آید.

(ب) تلفات مس آرمیچر که به علت اثر پوستی در هادی های آرمیچر بوجود می آید. علت آن شار نشتی آرمیچر است که خود ناشی از تلفات پسماند و فوکو در دندانه ها و پوشش ها است.

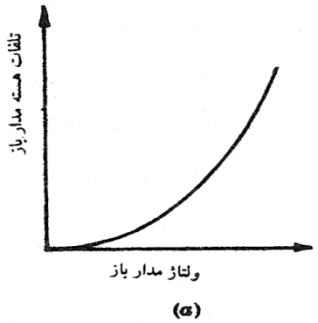
٤- تلفات گردشی یا تلفات ثابت

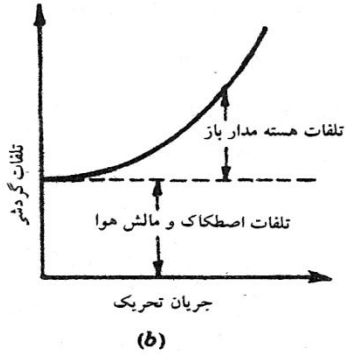
الف- تلفات اصطکاک یاتاقانها و مالش هوا

مقدار این تلفات را می توان با چرخاندن ماشین سنکرون در سرعت نامی و بدون تحریک سیم پیچ میدان تعیین نمود.

ب- تلفات هسته مدار باز

- ✓ اگر در آزمایش فوق، مدار تحریک وصل شود، در این حالت، توان مکانیکی ورودی شامل تلفات اصطکاک و تلفات هسته مدار باز می باشد.
- ✓ تلفات هسته مدار باز شامل دو تلفات پسماند و فوکو است که تقریبا متناسب با مجذور ولتاژ هستند.





$$\eta = \frac{\text{توان خروجی}}{\text{توان ورودی}} = \frac{\text{توان ورودی} - \text{تلفات}}{\text{توان ورودی}} = \frac{\text{توان خروجی}}{\text{توان خروجی} + \text{تلفات}}$$