مبحث چهارم:

تنظیم ولتاژ ژنراتور سنکرون و مشخصه های کاری

- مقدمه
- محاسبه رگولاسیون (تنظیم ولتاژ) به روش امپدانس سنکرون (یا روش emf)
- محاسبه رگولاسیون به روش آمپر دور (یا روش mmf)
- محاسبه رگولاسیون به دیگر روش‌ها
- مشخصه های خارجی بار
- مشخصه های ترکیبی ژنراتور

- در مبحث قبل دیدیم که بسته به اینکه جریان، پیش‌فاز و یا پس‌فاز باشد، ولتاژ ترمینال ژنراتور (V_t) می‌تواند، کوچکتر، مساوی یا بزرگ‌تر از ولتاژ القایی (E_f) باشد.
- رگولاسیون یا تنظیم ولتاژ شاخصی برای سنجش تغییرات ولتاژ ترمینال از بی‌باری تا بار کامل می‌باشد که از رابطه زیر محاسبه می شود که در آن اندازه ولتاژها درنظر گرفته می‌شوند:

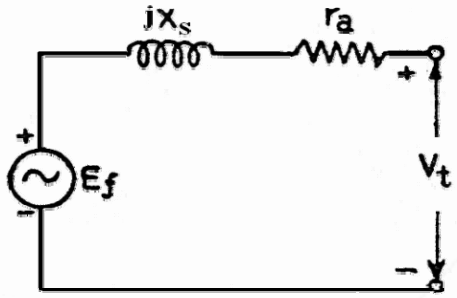
$$\%R = \frac{E_f - V_t}{V_t} \times 100 \qquad (۱)$$

- روش‌های محاسبه رگولاسیون ولتاژ:
  - روش مستقیم (برای ماشین‌های کوچک)
  - روش‌های غیرمستقیم
    - ۱- روش امپدانس سنکرون (یا روش emf)
    - ۲- روش آمپر-دور (یا روش mmf)
    - ۳- روش پوتیه (یا روش ضریب قدرت صفر)
    - ٤- روش جدید A.S.A
    - ٥- روش راکتانس سنکرون اشباع شده

❑ محاسبه رگولاسیون به روش امپدانس سنکرون (روش emf)

➢ رگولاسیون برای بار هم‌فاز (بار با ضریب توان واحد):

- با داشتن مقادیر راکتانس سنکرون و مقاومت اهمی، می‌توان رگولاسیون ولتاژ را برای بارهای مختلف محاسبه نمود.
- این روش فقط برای ژنراتورهای با روتور استوانه‌ای کاربرد دارد.
- از اثر اشباع هم صرفنظر می شود.

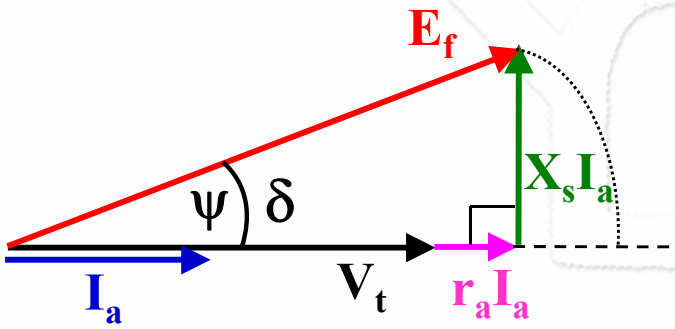


مدار معادل ژنراتور سنکرون استوانه‌ای

$$E_f = \sqrt{(V_t + I_a r_a)^2 + (I_a X_s)^2} \qquad (۲)$$

$$\%R = \frac{E_f - V_t}{V_t} \times 100 \qquad (۳)$$

V_t را به عنوان بردار مبنا درنظر می‌گیریم.



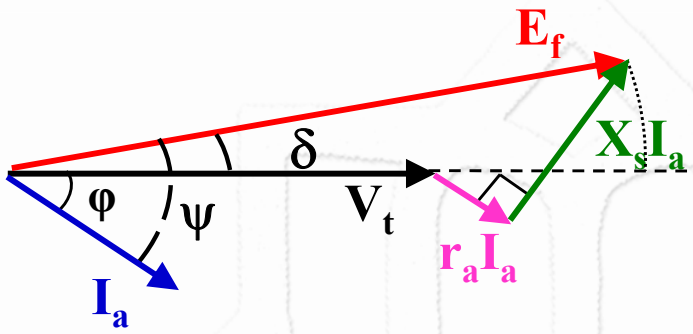
دیاگرام برداری بار با ضریب توان واحد

- برای محاسبه ولتاژ E_f می توان بجای روش هندسی فوق از روش فازوری (اعداد مختلط) استفاده نمود.

❑ محاسبه رگولاسیون به روش امپدانس سنکرون (روش emf)

➢ رگولاسیون برای بار پس‌فاز (بار سلفی):

اگر V_t به عنوان بردار مبنا درنظر گرفته شود:

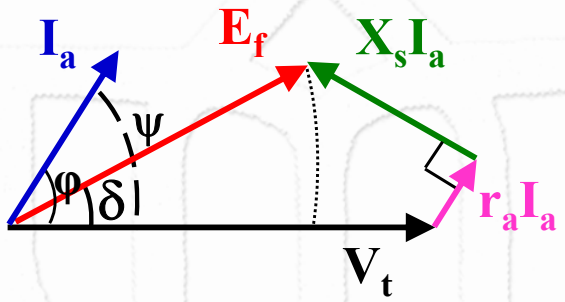


دیاگرام برداری بار با ضریب توان پس‌فاز

$$E_f = \sqrt{(V_t + I_a r_a \cos\varphi + I_a X_s \sin\varphi)^2 + (-I_a r_a \sin\varphi + I_a X_s \cos\varphi)^2} \qquad (٤)$$

$$\%R = \frac{E_f - V_t}{V_t} \times 100 \qquad (٥)$$

اگر V_t به عنوان بردار مبنا درنظر گرفته شود:



دیاگرام برداری بار با ضریب توان پیش‌فاز

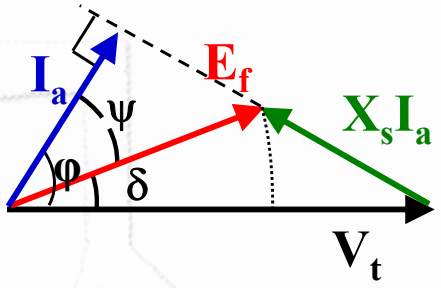
$$E_f = \sqrt{(V_t + I_a r_a \cos\varphi - I_a X_s \sin\varphi)^2 + (I_a r_a \sin\varphi + I_a X_s \cos\varphi)^2} \qquad (٦)$$

$$\%R = \frac{E_f - V_t}{V_t} \times 100 \qquad (٧)$$

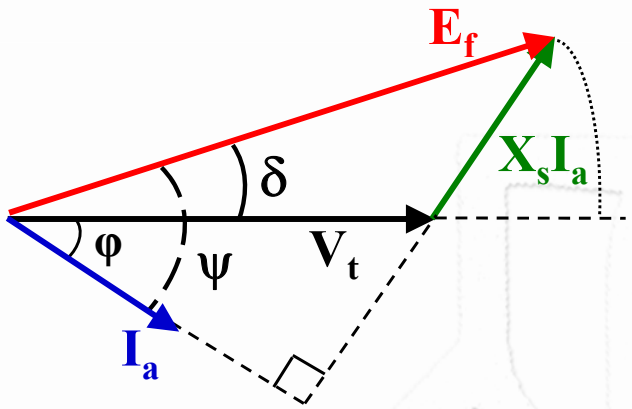
❑ محاسبه رگولاسیون به روش امپدانس سنکرون (روش emf)

➢ رگولاسیون با صرفنظر از مقاومت آرمیچر:

معمولا در محاسبه رگولاسیون، از مقاومت آرمیچر به دلیل کوچکی آن صرفنظر می شود.



دیاگرام برداری بار با ضریب توان پیش‌فاز



دیاگرام برداری بار با ضریب توان پس‌فاز با صرفنظر از مقاومت آرمیچر

$$E_f = \sqrt{(V_t - I_a X_s \sin\varphi)^2 + (I_a X_s \cos\varphi)^2} \qquad (۹)$$

$$E_f = \sqrt{(V_t + I_a X_s \sin\varphi)^2 + (I_a X_s \cos\varphi)^2} \qquad (۸)$$

نکته ۱: r_a معمولا، ۰/۰۱ پریونیت است. X_l در حدود ۰/۱ تا ۰/۲ پریونیت بوده و X_a در حدود ۰/۸۵ تا ۰/۹ پریونیت است.

نکته ۲: چون X_s بکار رفته در شرایط غیر اشباع (آزمایش اتصال کوتاه) محاسبه می شود، مقدار آن زیاد بوده و لذا رگولاسیون ولتاژ با این روش زیاد بدست می‌آید. لذا به این روش روش بدبینانه تنظیم ولتاژ گویند.

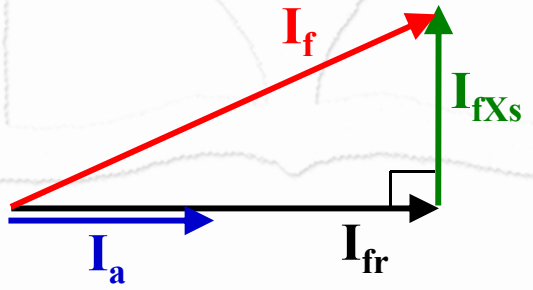
نکته ۳: در حل مسائل در صورت ندادن مقدار صریح X_s و یا دادن جداول یا منحنی های OCC و SCC، کوچکترین مقدار X_s را از روی جداول (که متناظر با با بیشترین جریان تحریک داده شده در هر دو منحنی SCC و OCC است) را بدست آورده و بکار می گیریم. زیرا ماشین معمولا در ناحیه غیرخطی و نزدیک به اشباع کار می کند.

❑ محاسبه رگولاسیون به روش آمپر- دور (روش mmf)

- در روش امپدانس سنکرون، ماهیت عکس‌العمل آرمیچر و شارهای پراکندگی به صورت ولتاژهای القایی (emf) در نظر گرفته شدند.
- اما در روش آمپر-دور، ماهیت عکس‌العمل آرمیچر و شارهای پراکندگی به صورت میدان (mmf) درنظر گرفته می‌شوند.
- فرض می‌کنیم ماشین در بار کامل بوده و ولتاژ نامی را می‌دهد. جریان تحریک I_f در این حالت شامل مولفه‌های زیر است:

۱- مولفه I_{fr} یا جریان تحریک متناظر با شار فاصله هوایی که ولتاژ فاصله هوایی E_r را تولید می کند.

۲- مولفه I_{fXs} که صرف غلبه بر شار عکس‌العمل آرمیچر و شار پراکندگی می شود.



مولفه‌های جریان در حالت بار هم‌فاز

■ روش بدست آوردن هر یک از این مولفه‌ها بصورت زیر است:

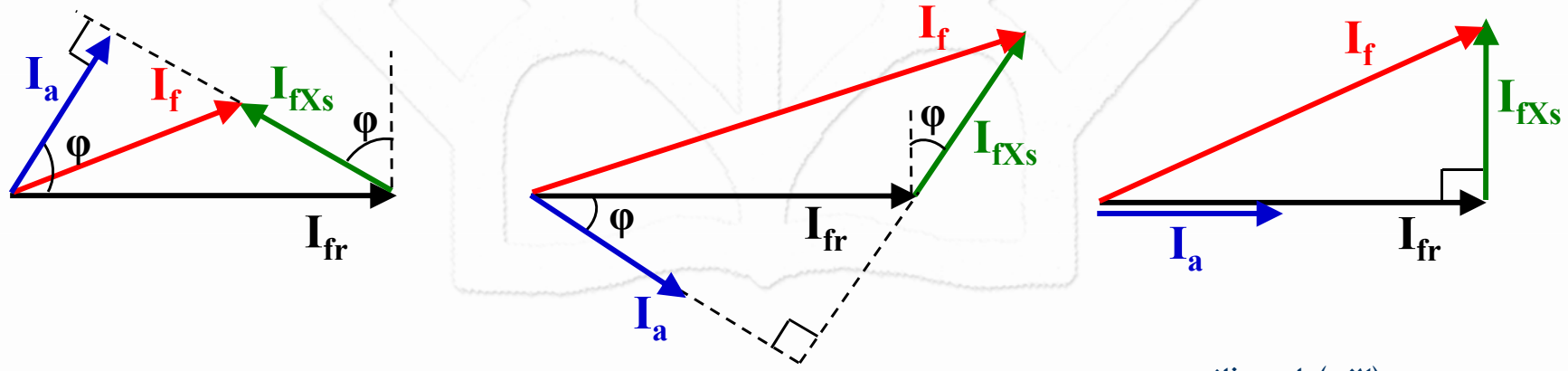
۱- از منحنی مدار باز، جریان تحریکی را بدست می‌آوریم که ولتاژ بی‌باری ناشی از آن با ولتاژ نامی برابر باشد. این جریان همان جریان I_{fr} است.

(در حالتیکه r_a مخالف صفر است، جریان تحریک متناظر با بردار ولتاژ $V_t + r_a\bar{I}_a$ را به عنوان I_{fr} درنظر می گیریم.)

۲- از منحنی اتصال کوتاه، جریان تحریکی را بدست می‌آوریم که جریان اتصال کوتاه ناشی از آن برابر جریان نامی باشد. این جریان I_{fXs} است.

۳- این دو جریان را با توجه به نوع بار (مطابق شکلهای زیر) با هم ترکیب کرده و I_f را محاسبه می‌نمائیم.

٤- از منحنی بی‌باری، E_f متناظر با I_f محاسبه شده را بدست آورده و از رابطه رگولاسیون (۱) تنظیم ولتاژ را محاسبه می‌نمائیم.



(ج) بار پیش‌فاز (ب) بار پس‌فاز (الف) بار هم‌فاز

مولفه‌های جریان تحریک در حالات مختلف بار

➢ مثال:

نتایج زیر از آزمایش بر روی یک ژنراتور ۶۶۰۰ ولت بدست آمده است:

I_f (A)	16	25	37.5	50	70
E_f (V)	3100	4900	6600	7500	8300

یک جریان تحریک ۲۰ آمپری جهت به گردش درآوردن جریان بار کامل در حالت اتصال کوتاه مورد نیاز می‌باشد.

از طریق دو روش آمپر-دور و روش امپدانس سنکرون، رگولاسیون بار کامل را در ضریب قدرت ۰/۸پس‌فاز حساب کنید.

از مقاومت سیم‌پیچی آرمیچر صرفنظر می‌شود.

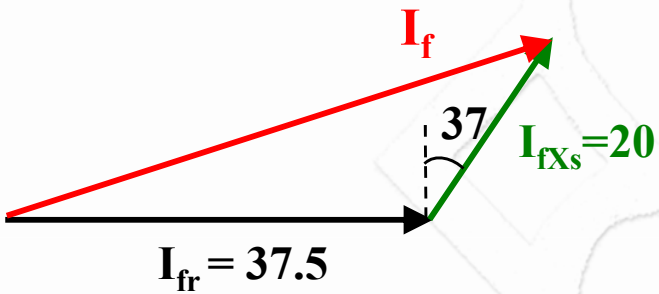
❑ محاسبه رگولاسیون به روش آمپر- دور (روش mmf)

➢ حل مثال به روش آمپر-دور:

۱- از روی جدول متناظر با ولتاژ ٦٦٠٠ ولت در منحنی OCC، جریان I_{fr} برابر با ۳۷/۵ آمپر بدست می‌آید.

۲- همچنین از فرض مساله جریان تحریک مورد نیاز برای غلبه بر عکس‌العمل آرمیچر برابر با $I_{fXs} = 20$ آمپر است.

۳- برای بار پس‌فاز ۰/۸، زاویه φ برابر با ۳۷ درجه است. لذا I_f را از دیاگرام برداری زیر محاسبه می‌کنیم:



$$I_f = \sqrt{(37.5 + 20\times 0.6)^2 + (20\times 0.8)^2} = 52\ A$$

٤- از روی منحنی OCC (جدول داده شده) برای جریان $I_f = 52A$، ولتاژ بی‌باری E_f برابر با ۷٦۰۰ ولت بدست می‌آید

۵- بنابراین رگولاسیون برابر در بار نامی ۰/۸پس‌فاز برابر است با:

$$\%R = \frac{7600-6600}{6600}\times 100 = 15\%$$

❑ محاسبه رگولاسیون به روش آمپر- دور (روش mmf)

➢ حل مثال به روش امپدانس سنکرون:

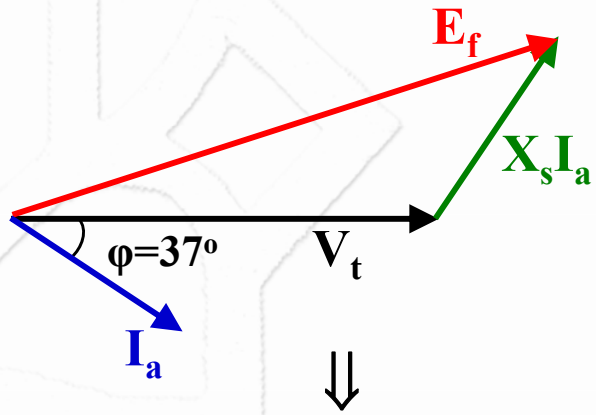
در ابتدا امپدانس سنکرون یعنی X_s را از رابطه زیر بدست می‌آوریم:

$$|Z_s| = \left.\frac{E_f}{I_{SC}}\right|_{I_f=cte} \qquad (11)$$

در رابطه فوق، جریان تحریک در هر دو حالت اتصال کوتاه و مدار باز یکی درنظر گرفته می شود.

به ازای جریان تحریک $I_f = 20$ آمپر، جریان اتصال کوتاه برابر با جریان بار کامل (یعنی ۱ pu) است. حال جریان اتصال کوتاه را به ازای تحریک در حالت بی‌باری محاسبه می‌نمائیم:

$$I_f \rightarrow I_{SC}$$
$$20 \rightarrow 1\ pu$$
$$37.5 \rightarrow ? = 1.88$$



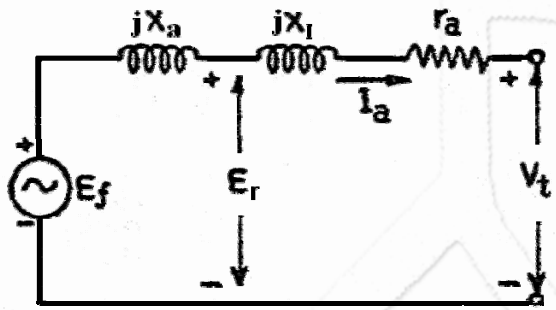
$$X_s = |Z_s| = \left.\frac{E_f}{I_{SC}}\right|_{I_f=37.5\ A} = \frac{1}{1.88} = 0.53$$

$$E_f = \sqrt{(V_t + I_a X_s \sin\varphi)^2 + (I_a X_s \cos\varphi)^2} = 1.387\ pu \Rightarrow$$

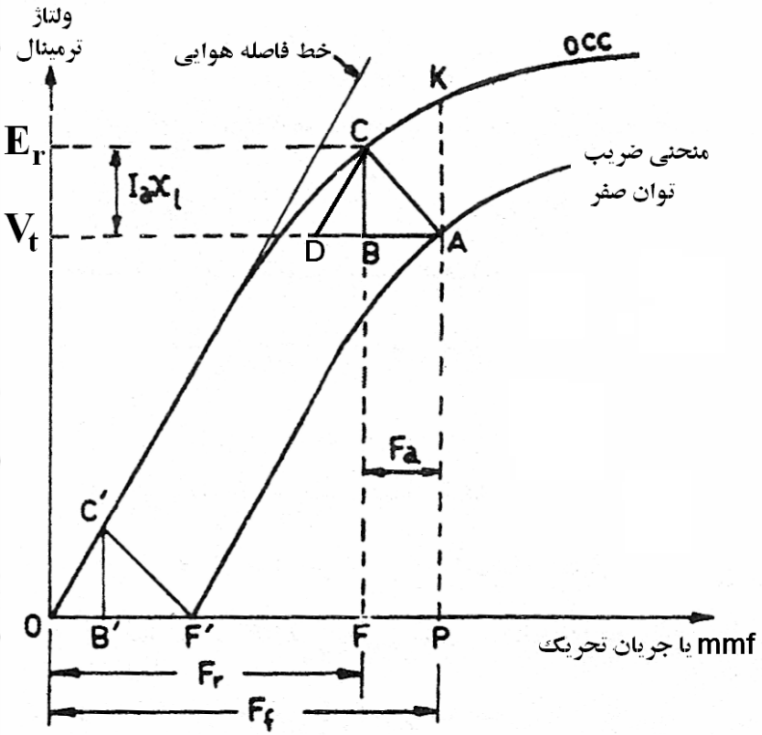
$$\%R = \frac{1.387-1}{1}\times 100 = 38.7\%$$

نکته: اگر منحنی I_{SC} برحسب I_f داده شده بود، مقدار Z_s (یا X_s) در حداکثر مقدار I_{SC} محاسبه می گردد تا حداقل مقدار Z_s بدست آید.

این روش ترکیب از دو روش قبلی است که در آن، emfها بصورت ولتاژ، و mmf ها به صورت آمپر-دور میدان یا جریان میدان بکار می‌روند.



مدار معادل ژنراتور سنکرون



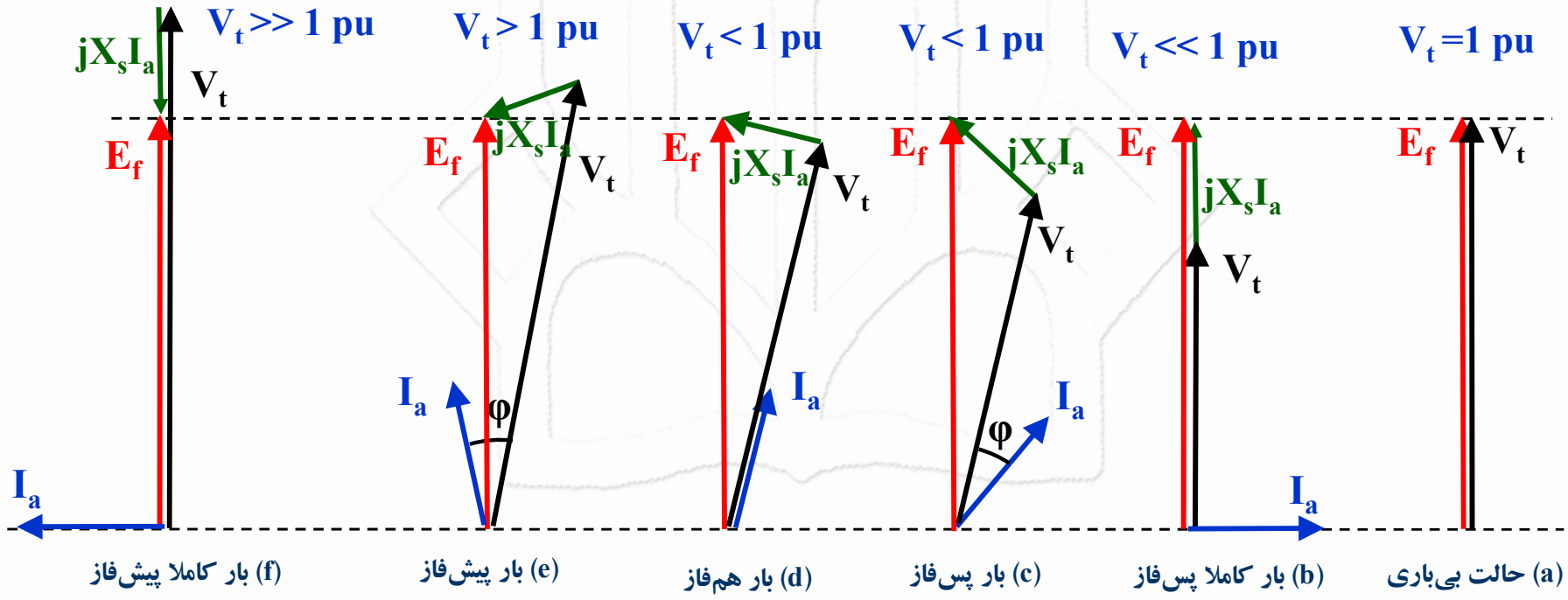
استفاده از مثلث پوتیه برای تعیین mmf عکس‌العمل آرمیچر و افت ولتاژ ناشی از پراکندگی

❑ مشخصه‌های خارجی بار

➢ برای ولتاژ بی‌باری ثابت 1pu و در بارهای مختلف:

- در یک ژنراتور سنکرون، در یک جریان تحریک و دور معین، مقدار ولتاژ بی‌باری E_f همواره ثابت است. اما ولتاژ ترمینال به مقدار جریان آرمیچر و نوع بار بستگی دارد.
- بار سلفی ولتاژ ترمینال را کاهش داده اما بار خازنی، ولتاژ ترمینال را افزایش می دهد.

$$\vec{E}_f = \vec{V}_t + jX_s\vec{I}_a \qquad (۱۲)$$

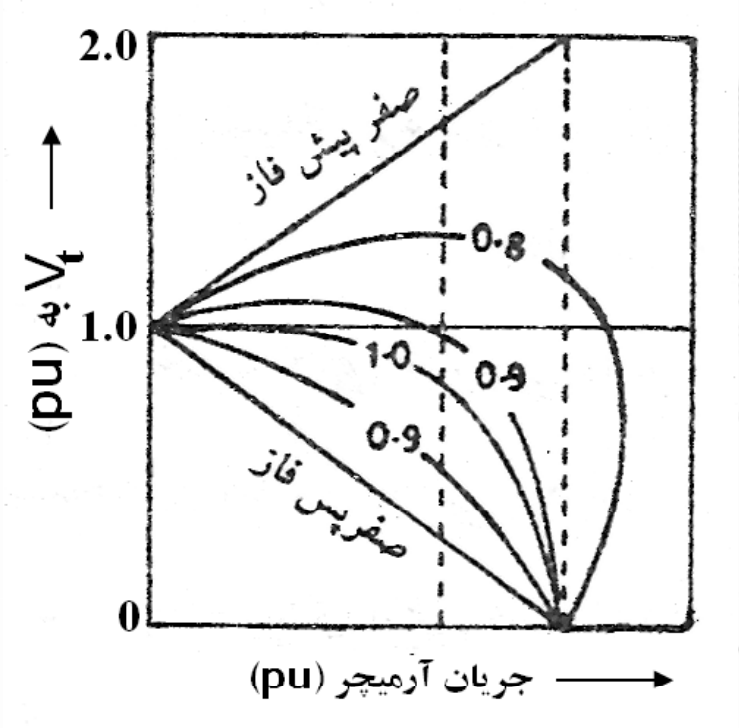


نمودار برداری ژنراتور در I_f ثابت و به ازای $V_t = 1$ pu در حالت بی‌باری و برای حالات مختلف بار

❑ مشخصه‌های خارجی بار

... برای ولتاژ بی‌باری ثابت 1pu و در بارهای مختلف:

- **مشخصه‌های خارجی بار یا منحنی‌های ولت آمپر ژنراتورها:** تغییرات ولتاژ ورودی آرمیچر (V_t) را نسبت به جریان آرمیچر (I_a) به ازای مقادیر ثابت جریان میدان نشان می‌دهند.



مشخصه خارجی ژنراتور در I_f ثابت و به ازای V_t=1pu در حالت بی‌باری و برای حالات مختلف بار

$$\vec{E}_f = \vec{V}_t + jX_s\vec{I}_a \qquad (۱۳)$$

مشخصه درحالت صفر پیش‌فاز:

$$V_t = E_f + X_sI_a \qquad (۱٤)$$

مشخصه در حالت صفر پس‌فاز:

$$V_t = E_f - X_sI_a \qquad (۱۵)$$

در حالت صفر پس‌فاز:

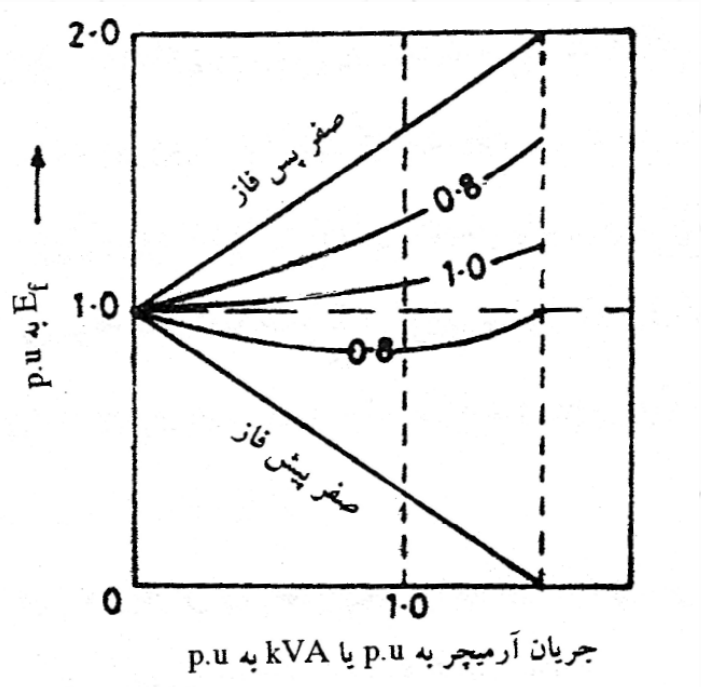
$$I_a = \frac{E_f}{X_s} \Rightarrow V_t = 0 \qquad (۱٦)$$

در حالت صفر پیش‌فاز:

$$I_a = \frac{E_f}{X_s} \Rightarrow V_t = 2E_f \qquad (۱۷)$$

❑ مشخصه‌های ترکیبی ژنراتور

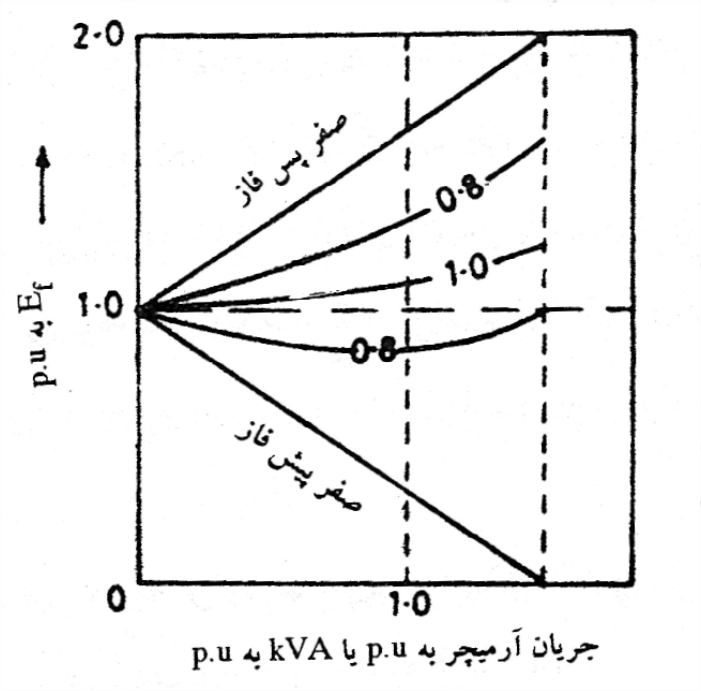
- این مشخصه‌ها در حالی‌که بار در ضریب توان معینی افزایش می‌یابد، تغییر جریان میدان را که برای باقی ماندن ولتاژ خروجی در مقدار نامی لازم است، نشان می‌دهند.
- با توجه به شکل، بار خازنی در شرایطی حتی می تواند رگولاسیون مثبت نیز ایجاد نماید.
- در عمل با کنترل جریان میدان ژنراتور بصورت دستی یا اتوماتیک (AVR)، ولتاژ خروجی ژنراتور عملا ثابت نگهداشته می‌شود.



منحنی‌های ترکیبی ژنراتور برای ثابت نگه داشتن ولتاژ خروجی نامی V_t

❑ مشخصه‌های ترکیبی ژنراتور

- در ضریب توان پس‌فاز و با افزایش بار، جریان تحریک باید از مقدار نامی آن فراتر رود.
- اما در ضریب توان پیش‌فاز و با افزایش بار، جریان تحریک باید کاهش یابد.
- مسائل حرارتی و خنک‌کاری در مورد افزایش دمای سیستم تحریک بواسطه افزایش جریان تحریک باید مدنظر قرار گیرد.



منحنی‌های ترکیبی ژنراتور برای ثابت نگه داشتن ولتاژ خروجی نامی V_t

منحنی درحالت صفر پس‌فاز: $E_f = V_t + X_s I_a$ (۱۸)

منحنی در حالت صفر پیش‌فاز: $E_f = V_t - X_s I_a$ (۱۹)

در حالت بار با ضریب توان صفر پیش‌فاز:

$$E_f = 0 \Rightarrow I_a = \frac{V_t}{X_s} \qquad (۲۰)$$

در حالت بار با ضریب توان صفر پس‌فاز:

$$E_f = 2V_t \Rightarrow I_a = \frac{V_t}{X_s} \qquad (۲۱)$$