

ادامه فصل چهارم

پایداری در سیستم های قدرت

Power Systems Stability

$$\begin{array}{ccc} \text{افزایش بار الکتریکی} & p_{e_0} \rightarrow p_{e_1} & \Rightarrow & P_{m_0} \rightarrow P_{m_1}, \delta_0 \rightarrow \delta_1 \\ \text{برقراری} & \text{استاتیکی} & & \text{پایداری} \end{array}$$

$$\text{قطع بار الکتریکی} \quad p_{m_1} \rightarrow p_{m_0} \Rightarrow p_{m_0} < p_1 \Rightarrow p_a = p_{m_0} - p_{e_1} < 0 \Rightarrow \delta_1 \rightarrow \delta_0$$

حال اگر نقطه کار حول نقطه A باشد باتوجه به اینکه نقطه A يك نقطه *stable* (پایدار) است خواهیم گفت پایداری استاتیکی وجود دارد ولی نقطه B حتی برای تغییرات جزئی، يك نقطه غیر استاتیکی است.

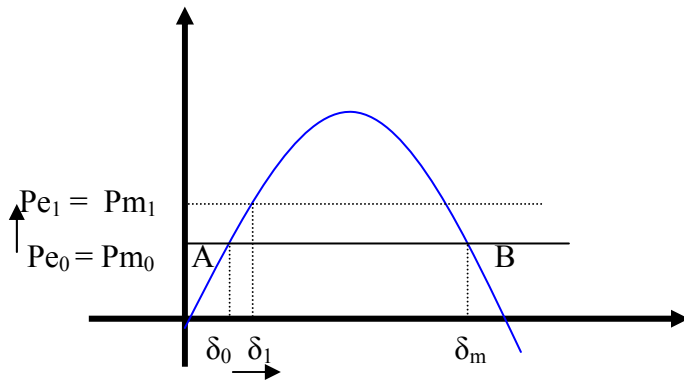
$$P_{m_0} \rightarrow P_{m_1} \rightarrow P_{m_0}$$

زیرا :

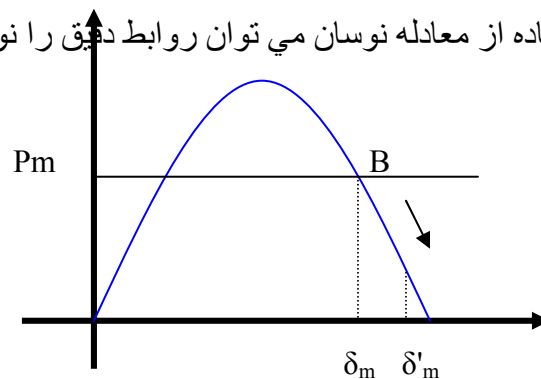
۱- بطور لحظه ای از ژنراتور بار کشیده و سپس قطع می کنیم. فرض می کنیم که چنین ژنراتوری به شین بی نهایت وصل بوده و تغییرات جزئی قدرت در شبکه بی نهایت پیش آید. مثلاً توان بیشتری لازم باشد. در این صورت فرض کنیم توان بعلت اتصال بارهای اضافی يك مقدار جزئی افزایش یابد (البته با فرض ثابت بودن قدرت مکانیکی) در اینصورت حتی اگر این قدرت خواسته شده بصورت لحظه ای هم باشد، با فرض ثابت بودن قدرت مکانیکی این قدرت اضافه خواسته شده از انرژی جنبشی ماشین تامین می شود. می خواهیم رفتار ژنراتور را در این حالت بررسی کنیم. در این حالت داریم:

$$p_m < p_e \Rightarrow \delta_1 \rightarrow \delta_0$$

شتاب منفی بوده و سرعت روتور به نقطه قبلی بر می گردد. پس A بطور استاتیکی پایدار است.



هرگاه این مسئله را از دید نقطه B بررسی کنیم اگر زاویه بار از δ_m به مقدرا δ'_m افزایش یابد چون P_e کاهش یافته ولی P_m ثابت است پس δ افزایش می یابد (افزایش سرعت روتور و افزایش ناپایداری). بصورت کلی تر با استفاده از معادله نوسان می توان روابط دقیق را نوشت.



افزایش سرعت روتور و افزایش ناپایداری $\delta \rightarrow \delta'_m \rightarrow P_m > P_e \rightarrow p_a > 0$

حالت اولیه $A_0 = P_{e0} = P_{m0}$

$$P_{m_0} \rightarrow P_{m_1} \Rightarrow P_{m_1} > P_{e_0} \Rightarrow p_a = P_{m_1} - P_{e_0} > 0 \Rightarrow \delta_0$$

$$\delta_0 \rightarrow \delta_1 \quad A_1 : P_e \rightarrow P_{m_1} \quad P_a = P_{m_1} - P_{e_1} = 0 \rightarrow \delta = \delta_1$$

اما تغییرات زاویه δ متوقف نمی شود زیرا انرژی جنبشی ذخیره شده در روتور بایستی آزاد شده و بصورت انرژی الکتریکی به شبکه به علاوه اصطکاک تبدیل شود.

$$\delta_1 \rightarrow \delta \quad P_{e_1} \rightarrow P_e > P_{m_1} \quad P_a = P_{m_1} - P_{e_1} < 0 \rightarrow A_2 : \delta = \delta_2$$

$$P_a = P_{m_1} - P_{e_2} < 0$$

$$\delta_2 \rightarrow \delta, P_{e_2} \rightarrow P_e \Rightarrow \delta_2 \rightarrow \delta_1. \quad A_1 = P_e$$

اما تغییرات زاویه δ متوقف نمی شود و انرژی جنبشی آزاد شده + اصطکاک بایستی بصورت انرژی الکتریکی از شبکه اخذ شود.

$$\delta_1 \rightarrow \delta \quad p_{e1} \rightarrow p_e \rightarrow P_e \langle p_{m1} \quad p_a \rangle 0 \rightarrow A_0 : \delta = \delta_0$$

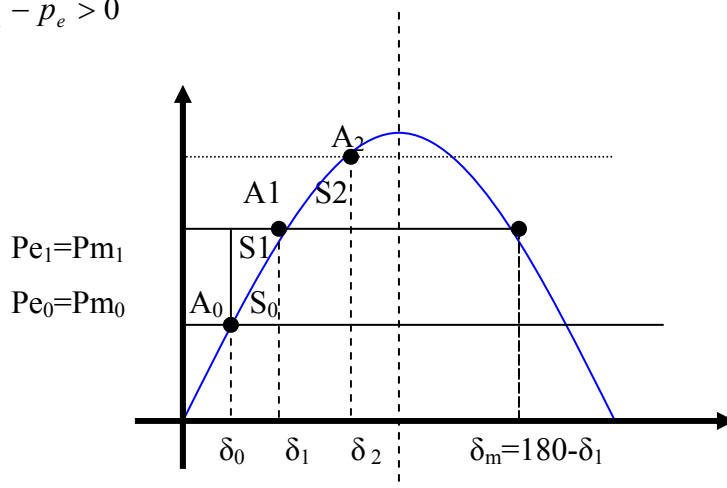
$$P_a = P_{m1} - P_{e0}$$

برای کار ماشین باید همیشه:

$$\delta_0 < \pi/2$$

۲- حال برای تحقیق پایداری دینامیکی قدرت مکانیکی را بطور ناگهانی زیاد می کنیم و در همانجا نگه می داریم تا اینکه پس از نوسانات متعدد $\delta_1 \Rightarrow \delta_0$ بر عکس حالت قبل که بطور لحظه ای بار کشیده و قطع می کردیم باز به همان حالت ماشین را در نظر می گیریم و فرض می کنیم قدرت مکانیکی داده شده را به ۲۰٪ افزایش دهیم $p_{m0} \rightarrow p_{m1}$ که در این حالت ماشین می خواهد با زاویه δ_1 کار کند. حال با توجه به اینکه زاویه مکانیکی نمی تواند جهشی باشد لذا زاویه الکتریکی هم به تبعیت از آن تغییرات تدریجی خواهد داشت و علی رغم تغییر pm ، δ هم تقریباً δ_0 است و قدرت الکتریکی تحویل همان مقدار قبلی p_e است پس $p_{m1} > p_e$ و مابقی قدرت صرف شتاب دادن روتور می شود و با گذشت زمان

$$p_a = p_{m1} - p_e > 0$$



با افزایش δ P_e افزایش می یابد و در نقطه A' $\begin{cases} p_{m1} = p_e \\ p_a = 0 \end{cases}$ در لحظه t_1 زاویه بار به δ_1 رسیده و در

این حالت سطح مستطیلی S ، مجموع سطح مثلث پائینی (قدرت الکتریکی داده شده S_0) و مثلث بالایی (هاشور خورده S_1) است که بصورت انرژی جنبشی (صرف شتاب شده) در سیستم باقی میماند.

$$S = S_0 + S_1$$

سپس قدرت معادل همان سطح بالا می رود تا همان مقدار انرژی جنبشی ذخیره شده را بصورت الکتریکی به شبکه تحویل دهد (مثلاً تا نقطه F) در این نقطه $P_e > P_m$ بوده و سرعت روتور کمتر می

شود باز هم به همان ترتیب p_{m1} ثابت بوده و $P_e \uparrow$ و $p_a = p_{m1} - p_e < 0$ و روتور سرعتش را کاهش

می دهد تا در حالت ثابت بماند.

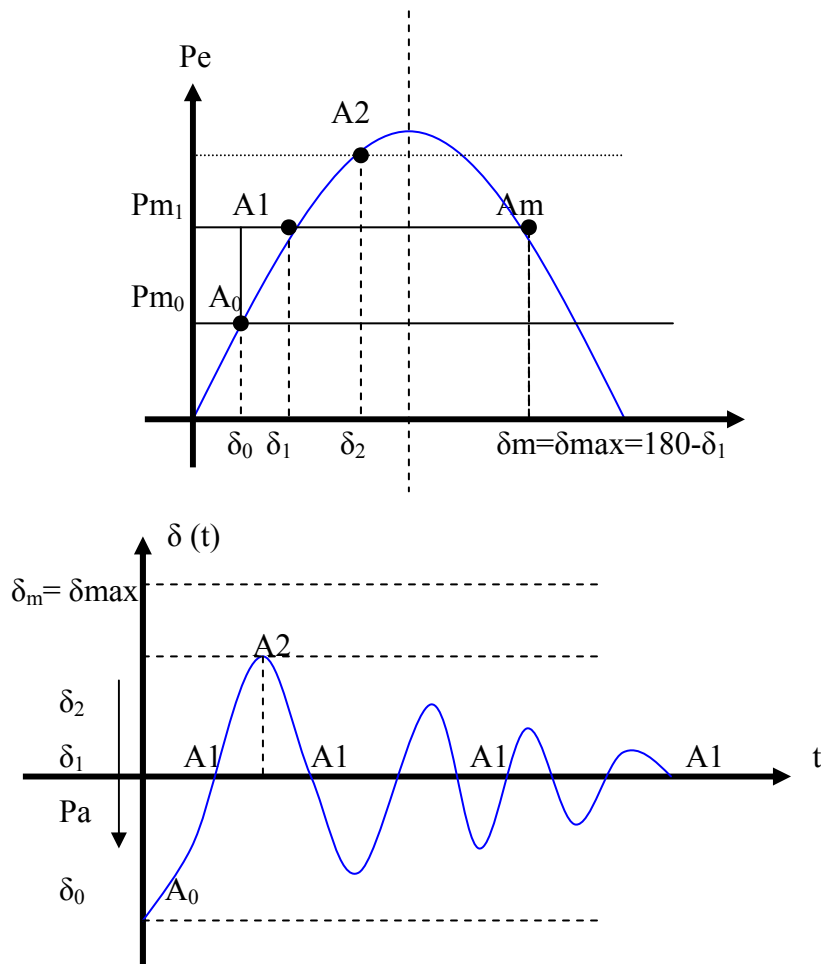
$$\begin{cases} p_{m_1} = p_e \\ p_a = 0 \end{cases}$$

$$S_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (p_{m_1} - p_e) ds \quad S_2 = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (p_e - p_{m_1}) d\delta$$

به علت وجود انرژی جنبشی نوسان بین δ_0 و δ_2 ادامه می یابد (مربوط به نقطه F) ولی با توجه به تلفات اصطکاک دامنه نوسان بصورت میرایی کاهش یافته و در نهایت بر هم منطبق می شود (وضعیت جدید) ولی باید توجه کرد که باید سطح بالایی تا نقطه F برابر سطح پائینی $A_1=A_2$ هاشور خورده باشد. منظور سطحی است که تا δ_M باشد و اگر سطح بالایی که معادل افزایش قدرت مکانیکی است، برای نوسان کافی نباشد δ از δ_M عبور کرده و پایداری از بین خواهد رفت و همین مسئله است که ما را بر آن می دارد که تغییرات افزایش P_m را بطور تدریجی انجام دهیم تا دامنه نوسان زیاد نباشد.

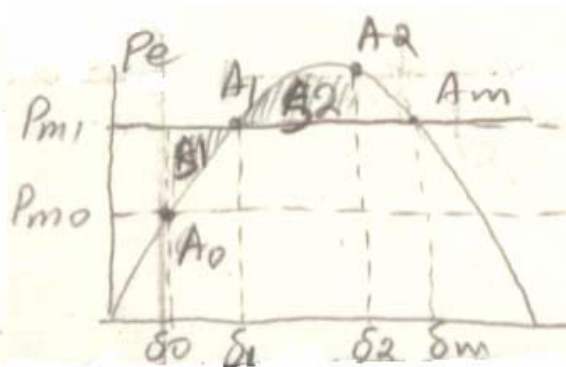
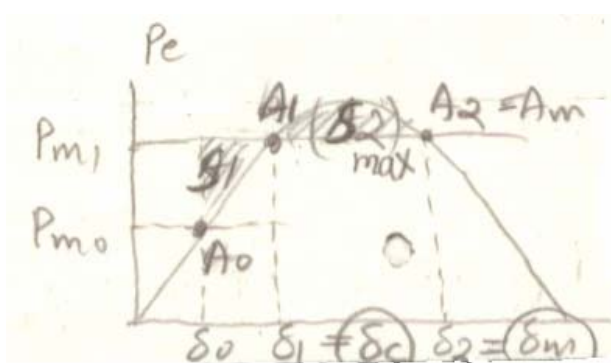
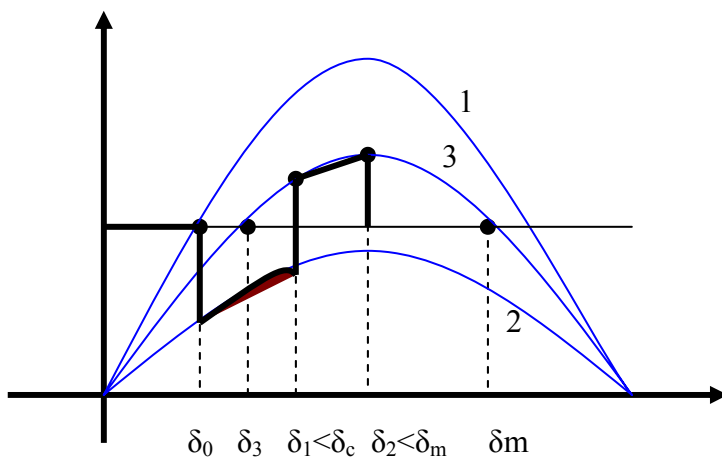
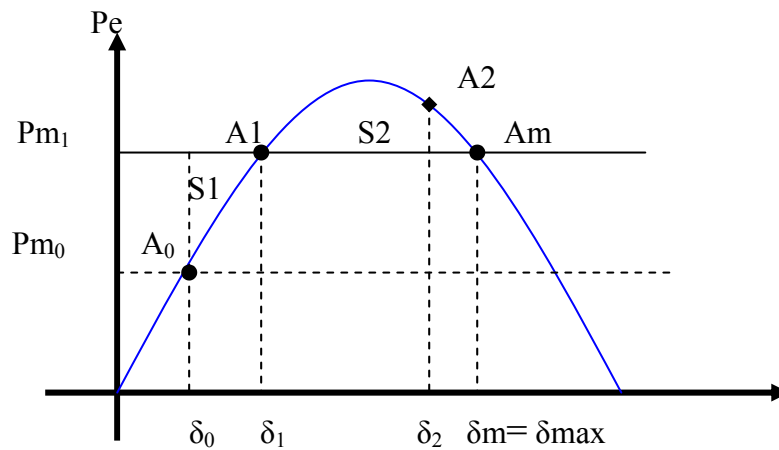
رسم نمودار توان شتاب دهنده Pa

در حالت کلی اصطکاک به پایداری شبکه های قدرت کمک می کند. $\delta_m = \delta_{max}$ حداکثر زاویه بار در شرایط پایداری گذرا می باشد. $\delta_m = 90$ حداکثر زاویه بار در شرایط پایداری استاتیکی (ماندگار) است.



این منحنی می تواند منحنی توان الکتریکی و توان شتاب دهنده هم (بصورت معکوس) باشد. البته تغییرات ناگهانی قدرت نمی تواند در شبکه رخ دهد ولی عیب و اتصالی زیاد پیش می آید. در شبکه اتصالی ایجاد شده است. شرط کامل وجود پایداری گذرا بصورت معیار سطوح برابر:

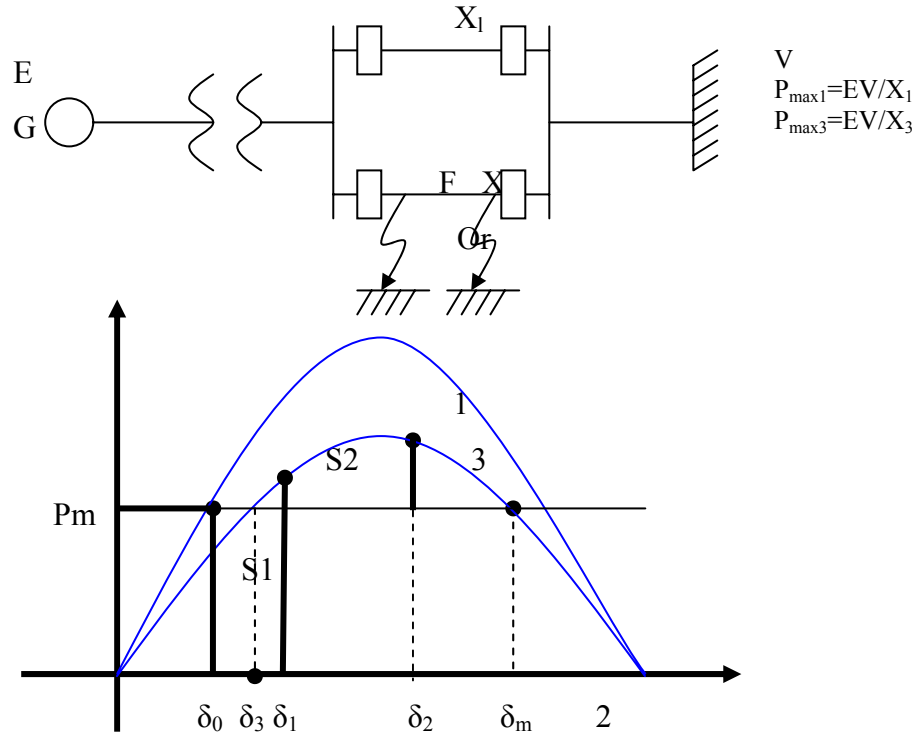
$$S_1 = S_2 \leq S_{2,max}$$



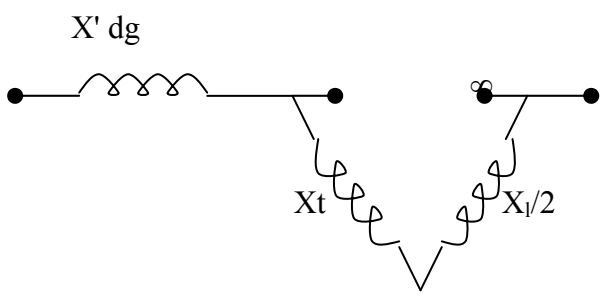
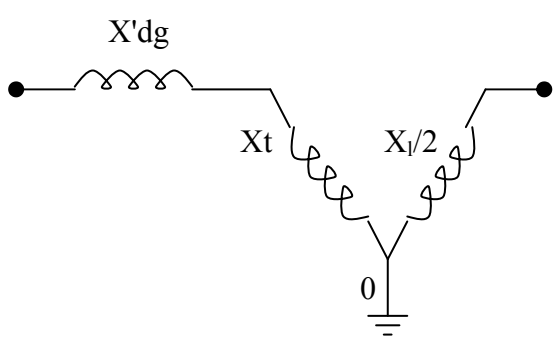
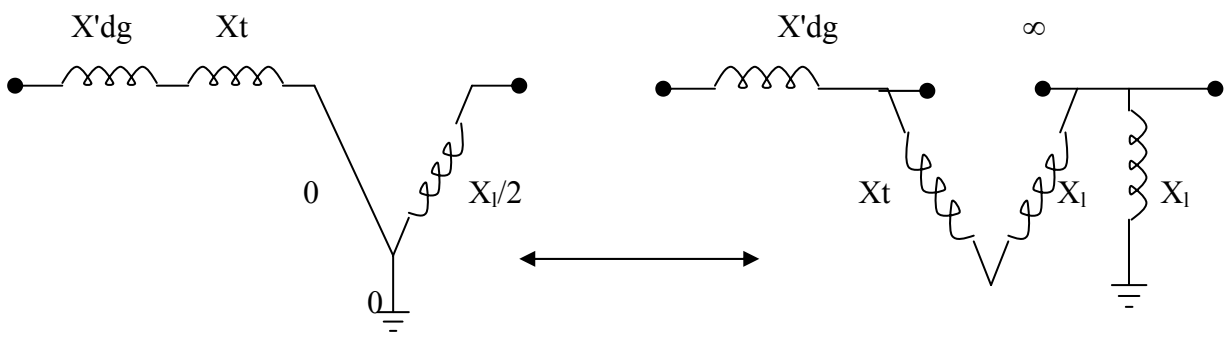
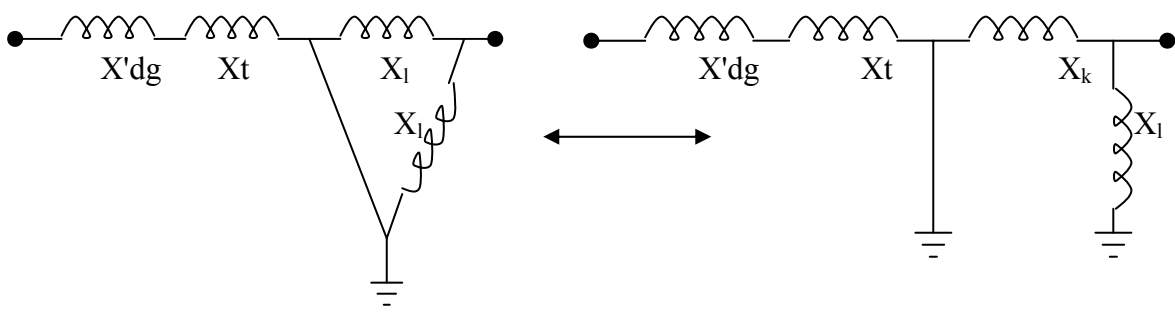
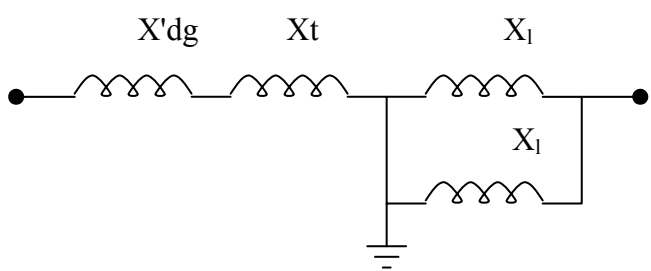
بررسی تغییرات زاویه بار ماشین

الف- اتصال کوتاه در یک طرف خط انتقال

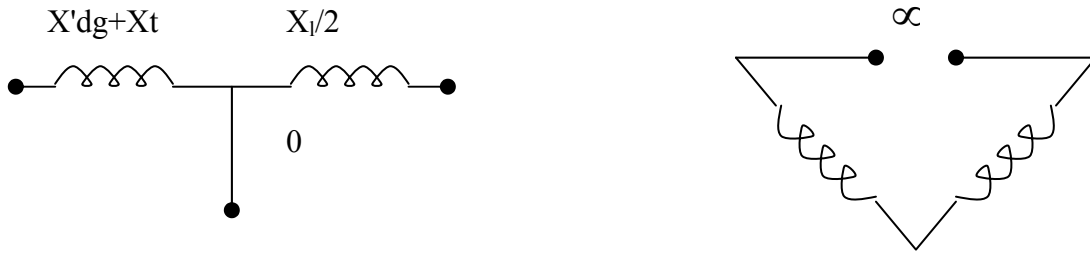
اتصال کوتاهی در اول یا آخر یکی از خطوط بوقع می پیوندد. مسلماً دژنکتور بلافاصله قطع نمی کند.



با توجه به اینکه اتصال کوتاه ۳ فاز است، در زمان عیب از $t_0 \rightarrow t_1$ قدرت انتقالی به شبکه صفر است که در منحنی فوق نشان داده شده است حال می خواهیم X بین ژنراتور و شبکه را حساب کنیم.



یا به طور ساده تر:



در زمان عیب $(P_{e2} = 0) (p_{\max 2} = 0) \rightarrow x_2 = \infty$ (دژنکتور بلافاصله عمل نمی کند و پس از Δt خط معیوب را جدا می سازد).

بعد از رفع عیب برداشته شدن خط معیوب داریم:

$$X_3 = X'_{dg} + X_l + X_l$$

$$P_{e3} = \frac{EV}{X_3} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta$$

پس با توجه به X_3 ملاحظه می شود که توان انتقالی کاهش خواهد یافت. با توجه به اینکه در فاصله زمانی رفع عیب سرعت زاویه ای و انرژی جنبشی روتور افزایش می یابد منحنی قدرت روی منحنی جدید آمده (منحنی ۳) و باید سطح بالایی منحنی جدید با منحنی انرژی جنبشی ذخیره شده باشد برابر باشد. برای پایدار بودن سیستم سطح ضد شتاب دهنده بایستی با سطح شتاب دهنده مساوی باشد.

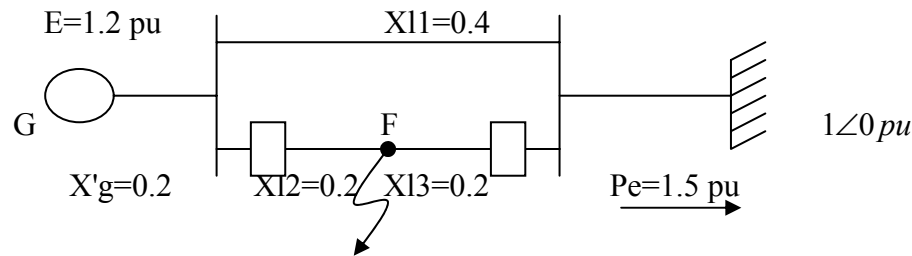
$$S_1 \leq (S_2)_{\max}$$

شرط وجود پایداری گذرا معیار سطوح برابر است. Equal Area Criterion.

سطح S_1 بستگی به زمان $\Delta t = t_1 - t_0$ برای رسیدن به $\delta_1 \rightarrow \delta_0$ دارد که پایداری را کوچک بودن این زمان Δt و کوچک شدن سطح S_1 بهتر میکند.

پس از نوسان سیستم حالت پایدار خواهد یافت ولی ممکن است زاویه بار تا یک حدی مثلاً δe (بحرانی) بتواند پیش رود تا پایداری سیستم از بین نرود.

مثال: ژنراتوري توسط دو خط پارالل مطابق شکل قدرت معادل ۱/۵ پریونیت را به شبکه تحویل می دهد. در نقطه F عیبی پیش می آید که بلافاصله دژنکتورهای طرفین خط معیوب عمل کرده و خط معیوب را از شبکه حذف می کنند تغییرات زاویه ای بار را روی این شبکه بررسی کنید .



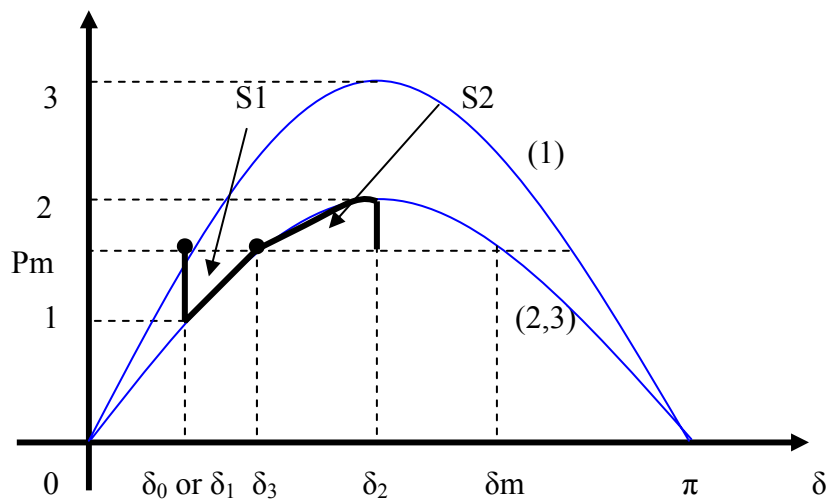
حل

$$X_1 = 0.2 + \frac{4}{2} + 0 = 0.4$$

قبل از عیب

$$\frac{EV}{X_1} \sin \delta = \frac{1.2 \times 1}{4} \sin \delta_c \Rightarrow 1.5 = 3 \sin \delta_0$$

$$\delta_0 = 30 = 0.524 \text{ rad}$$



چون دژنکتورها بلافاصله عمل کردند پس قدرت انتقالی روی منحنی يك خط سالم قرار خواهد گرفت (نه روی خط صفر مثل حالت قبل)

$$X_3 = 0.2 + 0.4 + 0 = 0.6 \quad \frac{EV}{X_3} \sin \delta = 2 \sin \delta \rightarrow$$

$$2 \sin \delta_3 = 1.5 \rightarrow \delta_3 = 48.6 = 0.848 \text{ rad}$$

$$\delta_m = 90^\circ + (90 - \delta_3) = 180 - \delta_3 = 131.4^\circ \rightarrow 2.293 \text{ rad}$$

حال باید دید بالای p_m می توان سطحی بدست آورد که معادل سطح پائینی باشد. δ بر حسب رادیان است.

$$A_1 = \left| \int_{\delta_0}^{\delta_3} (1.5 - 2 \sin \delta) d\delta \right| = 0.773$$

$$(A_2)_{\max} = \left| \int_{\delta_3}^{\delta_2} (25m\delta - 1.5) d\delta \right| = .478$$

برای تعیین δ_2 :

$$S_1 = S_2 \rightarrow 0 / 0773 = \int_{\delta_3}^{\delta_2} (2 \sin \delta - 1.5) d\delta = (-2 \cos \delta - 1.5\delta) \Big|_{\delta_3}^{\delta_2}$$

$$1.5\delta_2 + 2 \cos \delta_2 = 2.518$$

$$\delta_2 = 10218 \text{ rad} = 69.8^\circ$$

تغییرات زاویه بار δ از روی معادله نوسان بررسی می شود.

$$1.5 - 2 \sin \delta = M \frac{d^2 \delta}{dt^2}$$

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e = P_m - \frac{EV}{X} \sin \delta = P_a$$

طرفین به $\frac{d\delta}{dt}$ ضرب می شود.

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} \cdot \frac{d\delta}{dt} = (p_m - p_e) \cdot \frac{d\delta}{dt}$$

$$\frac{M}{2} \frac{d}{dt} \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = (p_m - p_e) \frac{d\delta}{dt}$$

$$\frac{d}{dt} \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = 2 \left(\frac{d^2 \delta}{dt^2} \right) \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^{2-1} = 2 \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} \cdot \frac{d\delta}{dt}$$

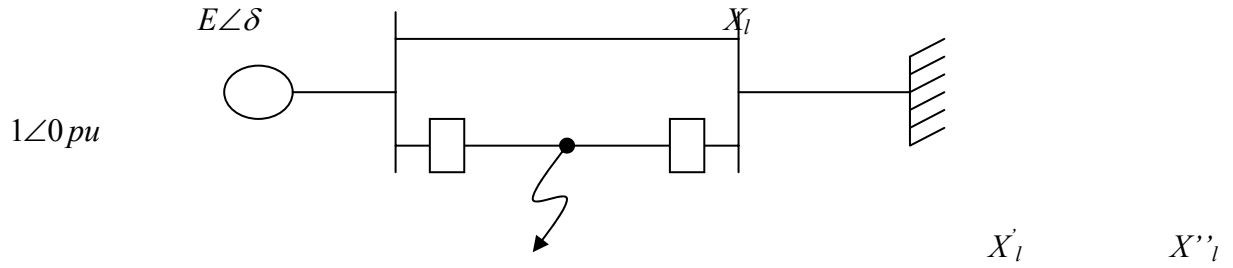
$$\frac{M}{2} d \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = (p_m - p_e) d\delta$$

سطح زیر منحنی

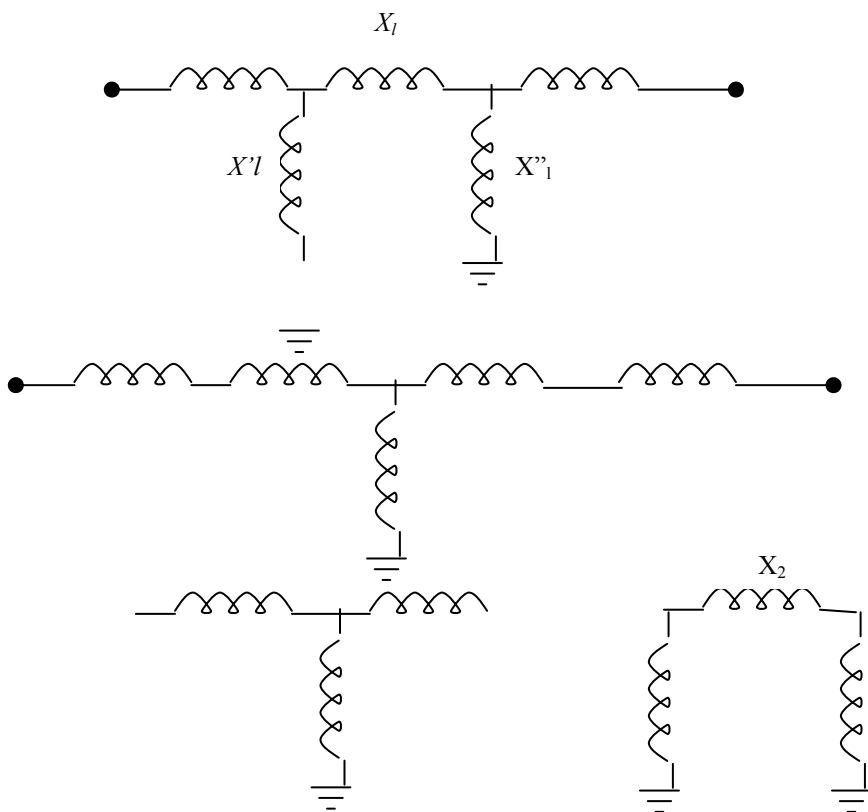
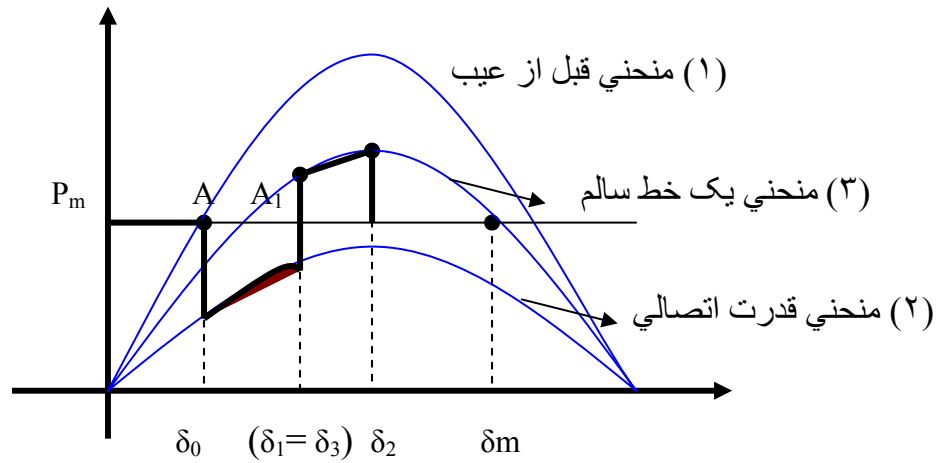
$$\frac{M}{2} \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 = \int (p_m - p_e) d\delta = \int \left(p_m - \frac{Ev}{x} \sin \delta \right) d\delta$$

و از همین رابطه نتیجه می گیریم که سطح مشخص شونده در منحنیهای قبل معادل انرژی جنبشی است.

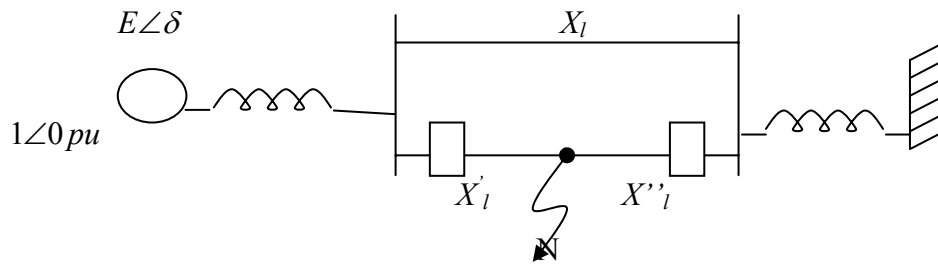
در حالت اتصال کوتاه غیر ۳ فاز (مثلاً تکفاز) و به غیر از ابتدا و انتهای خط انتقال اتصال کوتاه در وسط یکی از خطوط می‌گیرد. نقطه عیب هر نقطه دیگر می‌تواند باشد.



$$X_l = X'_1 + X''_1$$



عیب غیر از اول یا انتهای خطوط صورت می گیرد که می تواند L-L یا L-L-L یا L-G یا L-L-G باشد. در این صورت $X_2 \neq \infty$ خواهد بود (در زمان عیب). در شبکه های قدرت ماشین های سنکرون ممکن است از حالت سنکرون خارج شوند و بعلت های مختلف ممکن است این مساله بوقوع بپیوندد. مثلاً اتصال کوتاهی که بر طرف نشود، عملیات سویچینگ و یا افزایش ناگهانی بار. بطور کلی این مورد در مورد یک سیستم دو ماشینه که قدرت توسط دو خط پارالل انتقال یابد و در یکی اتصال کوتاه پیش آید می تواند مطرح باشد. دیاگرام تک خطی شبکه ای مطابق شکل زیر است:

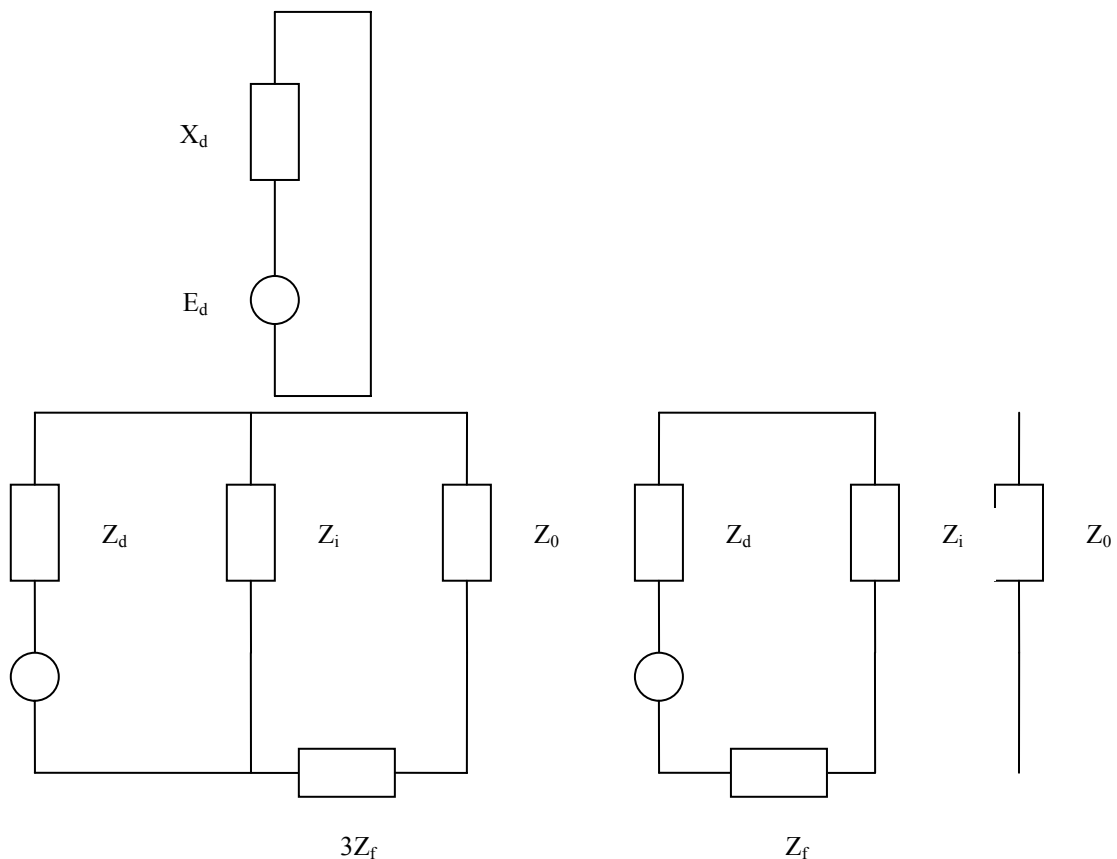


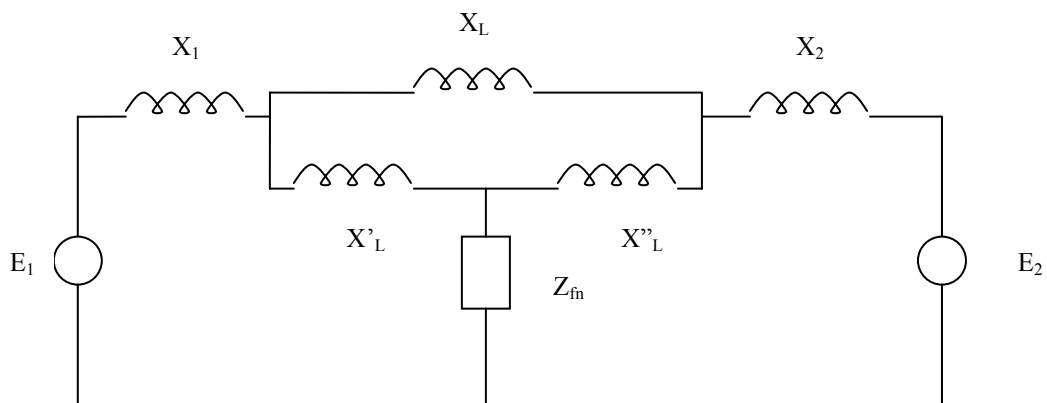
اتصال کوتاه از هر نوع در یکی از خطوط

$$X_l = X'_l + X''_l$$

انتقال رخ می دهد (F)

اگر اتصال کوتاه از نوع ۳ فاز باشد. بین N,F شمایی مستقیم را پیدا کرده و NF را اتصال کوتاه می کنیم. اگر از نوع ۲ فاز بدون زمین باشد شمایی مستقیم و راکتانس معکوس و هموپلر را حساب کرده و راکتانس معکوس را با شمایی مستقیم موازی می کنیم یعنی بین N,F راکتانس معکوس قرار می دهیم در اتصال کوتاه ۲ فاز با زمین در شمایی مستقیم بین N,F موازی شده راکتانس معکوس و هموپلر را قرار می دهیم.





اتصال کوتاه ۳ فاز (LLL)

$$Z_{FN} = \begin{cases} 0 & \text{(LL)} \\ Z_i & Z_i + Z_f & \text{(LG)} \\ Z_i + Z_0 & Z_i + Z_0 + 3Z_f & \text{(LLG)} \\ Z_i \parallel Z_0 & Z_i \parallel (Z_0 + 3Z_f) \end{cases}$$

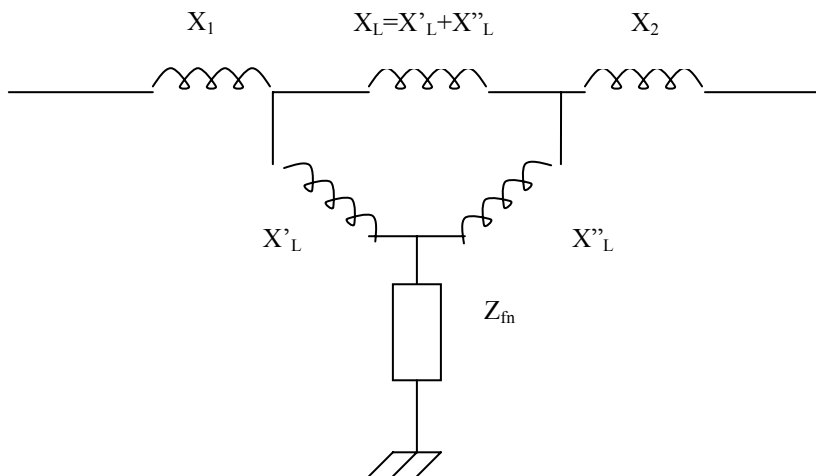
این امپدانس بین N,F در شبکه ترتیب مستقیم قرار می گیرد. برای هر اتصالی مسئله پایداری را در این شبکه باید بررسی کرد.

قدرت منتقله در حین اتصالی بین E_2, E_1 (از ژنراتور به شبکه)

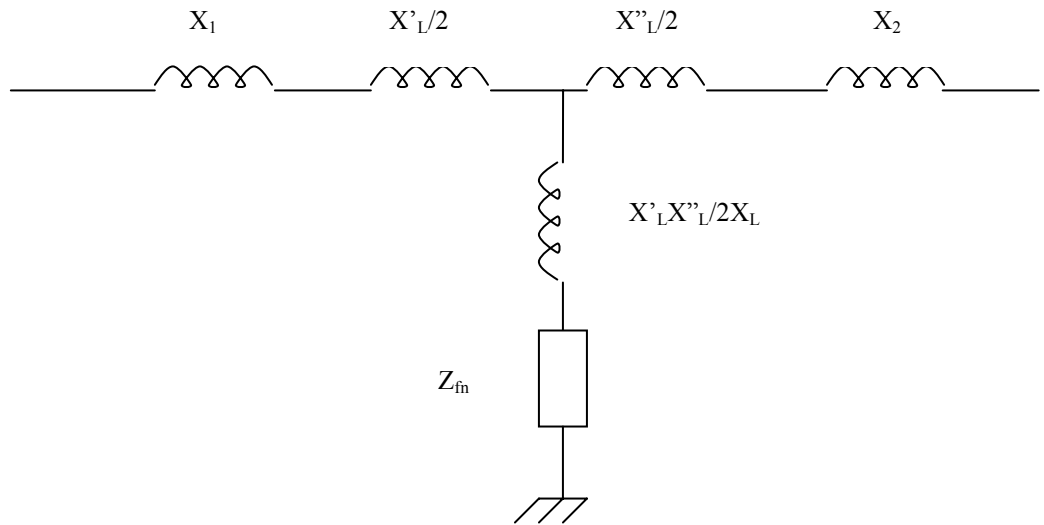
$$p = \frac{E_1 E_2}{X_{12}} \sin \delta$$

X_{12} راکتانس سری بین E_2, E_1

δ زاویه بار بین E_2, E_1



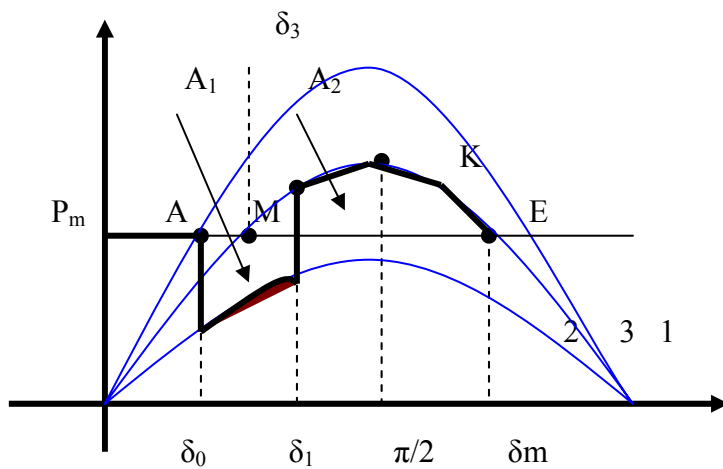
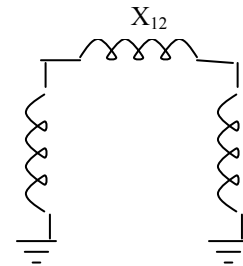
با تبدیل مثلث به ستاره در شبکه انتقال داریم



با تبدیل ستاره به مثلث با احتساب مقاومت های دیگری سری به ستاره قبلی و در این Δ به ضلع بالا

این که قدرت را منتقل می کند احتیاج داریم:

$$X_{12,2} = \left(X_1 + \frac{X'l}{2}\right) + \left(X_2 + \frac{X''l}{2}\right) + \frac{\left(X_1 + \frac{x'l}{2}\right)\left(X_2 + \frac{X''l}{2}\right)}{\left(\frac{x'l x''l}{2X_l} + Z_{FN}\right)}$$



قبل از عیب

$$\begin{cases} P = \frac{E_1 E_2}{X_{12,1}} \sin \delta = r_1 P_{\max} \sin \delta \\ X_{12,1} = X_1 + \frac{Xl}{2} + X_2 \end{cases} \quad r_1 = 1$$

در زمان عیب

$$p = \frac{E_1 E_2}{X_{12,2}} \sin \delta = r_2 \frac{E_1 E_2}{X_{12,1}} \sin \delta$$

$$r_2 < r_1 = 1$$

در اینجا $X_{12,2} > X_{12,1}$ پس در زمان عیب $X_{12,2} = \frac{1}{r_2} X_{12,1}$ و $P = r_2 P_{\max} \sin \delta$

قدرت منتقله بوسیله توربین ژنراتور E_1 تولید می شود. نقطه کار P_m تحت زاویه δ_0 می باشد. در حالت عیب منحنی قدرت منتقله منحنی پائینی شده و نقطه کار بطور ناگهانی بعلت عیب از A به B نزول کرده و توسط منحنی پائین قدرت منتقل می شود اگر این عیب به همین ترتیب ادامه یابد باید δ آنقدر افزایش یابد تا P_m لازم را به شکل تحویل دهد ولی این تا آخر نمی تواند ادامه داشته باشد چون وضع p_m ژنراتور خراب تر شده و ژنراتور از حالت سنکرون خارج می شود و باید این ادامه در جایی قطع شود در زاویه قدرت δ_1 کلید قدرت عمل کرده و خط معیوب را از مدار قطع می کند که در این حال قدرت از طریق یکی از خطوط منتقل می شود.

بعد از رفع عیب

$$P = \frac{E_1 E_2}{X_{12,3}} \sin \delta = r_3 P_{\max} \sin \delta$$

$$x = x_1 + x_l + x_2 \quad r_2 < r_3 < r_1 = 1$$

در نوزنقه پائینی در ژنراتور انرژی جنبشی در اینرسی ماشین ذخیره شده که بایستی این انرژی جنبشی به شبکه تحویل داده شود. از نقطه D به بعد شتاب ژنراتور در حال کند شدن است و این کند شدن تا t_c مانده به E ادامه پیدا خواهد کرد (شرط برای پایداری گذرا $A_1 \leq A_2$).

هر چه دژنکتور زودتر عمل کند انرژی ذخیره شده در اینرسی ماشینی کمتر بوده و زودتر مساحت بالایی مساوی با مساحت پائین را پیدا می کنیم. این زاویه بحرانی رفع عیب δ_c است و آن زاویه ای که در آن $A_1 = A_{2\max}$ و در بیشتر از این زاویه، پایداری از دست می رود اگر زاویه در کمتر از δ_c عمل کند آنجا $A_1 < A_{2\max}$ و پایداری صددرصد خواهد بود. پس سرعت عمل دژنکتورها خیلی مهم است. t_c زمان بحرانی رفع عیب، حداکثر زمانی است که در شبکه می توان تحمل کرد تا پایداری در

شبکه از دست نرود ولي عمل تنظيم بين ۱-۵/۰ ثانيه صورت مي گيرد. ۷-۵ سيكل بعد دژنکتور قطع مي کند که اين حداکثر مقدار براي دژنکتور است. اگر دژنکتور بعد از اين سيكل عمل کند پايداري از دست مي رود.

Case c: Recloser

حالت ۴ اگر کلید قدرت خط شماره ۲ بطور موفقیت آمیزي reclose يا دوباره بسته شود (يعني عيب خط دوم بصورت گذرا بوده و بنا بر اين بعد از مدتي از بين رفته است) داریم:

$$P_{e4} = P_{el} = P_{max1} \sin \delta$$

چون با عمل دوباره بسته شدن کلید دوباره همان قدرت اولیه به سیستم داده مي شود پس عملکرد پايدار سیستم توسعه مي يابد. براي شرايط کلي داریم:

$$\delta_m = \pi - \sin^{-1} \left(\frac{pm}{P_{max4} \text{ or } P_{max1}} \right)$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (p_m - p_{max2} \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_1}^{\delta_{rc}} (p_{max3} \sin \delta - p_m) d\delta$$

$$+ \int_{\delta_{rc}}^{\delta_2} (P_{max4} \sin \delta - p_m) d\delta$$

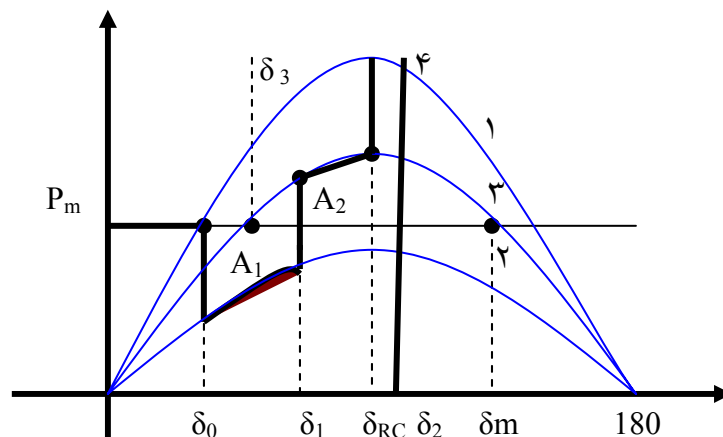
براي شرايط زاويه رفع عيب بحراني δ_c داریم:

$$\delta_1 \rightarrow \delta_c \Rightarrow \delta_2 \rightarrow \delta_m$$

$$\delta_2 = \delta_m = \pi - \sin^{-1} \left(\frac{pm}{P_{max4}} \right)$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} (p_m - p_{max2} \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_{rc}} (p_{max} \sin \delta - pm) d\delta$$

$$+ \int_{\delta_{rc}}^{\delta_m} (p_{max4} \sin \delta - p_m) d\delta$$



پیدا کردن زاویه بحرانی رفع عیب

$$A_1 = A_{2_{\max}}$$

$$\delta_c \rightarrow S_{ABCMA} = S_{MDKEM}$$

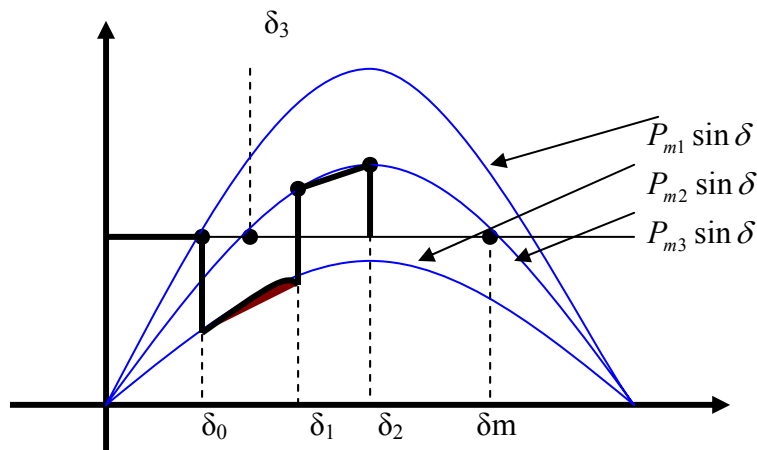
$$P_m(\delta_c - \delta_0) - \int_{\delta_0}^{\delta_c} (r_2 p_{\max} \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_m} (r_3 P_{\max} \sin \delta) d\delta$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} (pm - Pe_2) d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_m} (pe_3 = p_m) d\delta$$

$$-p_m \delta_0 + r_2 p_{\max} (\cos \delta_c - \cos \delta_0) - r_3 p_{\max} (\cos \delta_c - \cos \delta_m) - p_m \delta_m$$

$$p_{\max} (r_2 \cos \delta_c - r_3 \cos \delta_c) = p_m (\delta_c - \delta_m) + P_{\max} (r_2 \cos \delta_0 - r_3 \cos \delta_m)$$

$$\cos \delta_c = \frac{\frac{pm}{p_{\max}} (\delta_0 - \delta_m) + (r_2 \cos \delta_0 - r_3 \cos \delta_m)}{r_2 - r_3}$$



فقط δ_m, δ_0 به رادیان می باشد.

P_M قدرت منتقله قبل از عیب

نقطه $p_0 = p_m \frac{EV}{X_0} \sin \delta_0$

روی منحنی (۱) $\delta_0 = \sin^{-1} \left(\frac{P_m}{P_{\max 1}} \right)$

پایداری

$\delta_m = \pi - \sin^{-1} \frac{pm}{P_{\max}}$

روی منحنی (۳) $\delta_m = \sin^{-1} \frac{P_m}{P_{\max 3}}$

معلوم $\rightarrow tc=?$

زمان بحراني رفع عيب از روي زاويه معلوم مي شود

$$\delta_c =$$

اگر مقدار تغييرات زاويه بار را بر حسب زمان رسم كنيم از روي منحنی مي توان زمان بحراني را حساب كرد.

$$P_{e2} = \frac{EV}{X_0} \sin \delta_0 \quad p_a = p_m - r_2 \sin \delta_0 = M \frac{d^2 \delta}{dt^2}$$

$$p_a = p_m - \frac{EV}{X_0} \sin \delta_0 = M \frac{d^2 \delta}{dt^2}$$

از حل اين معادله غير خطي به صورت غير خطي زاويه بار تعيين خواهد شد.

$$p_m^{MW} - p_e^{MW} = M^{MJ \text{ sec/rad}} \frac{d^2 \delta^{rad/sec^2}}{dt^2}$$

$$M = HS_b / (F_s \pi)$$

$$p_m^{Pu} - p_e^{Pu} = M^{MJ \text{ sec/rad}} \frac{d^2 \delta^{rad/sec^2}}{dt^2}$$

مي توان زواياي استفاده شده در معادله بالا را بر حسب درجه هم بيان كرد.

$$M' = M \frac{H}{f_s \pi} \left[\frac{\text{sec}^2}{\text{rad}} \right] \text{ or } \frac{H}{f_s 180} \left[\frac{\text{sec}^2}{\text{deg}} \right] \quad \Delta t = \frac{tc - t_0}{n}$$

در روش گام بگام زمان را به n قسمت مساوي تقسيم کرده و بزرگی n روي تقريباً محاسبات اثر دارد.

$$(n-2)\Delta t \quad (n-1)\Delta t \quad (n)\Delta t \Rightarrow t_0 + (n-2)\Delta t \dots (t_0 + n\Delta t = t_c)$$

بجاي اينکه شتاب را بصورت يك منحنی الخط حساب كنيم آنرا بصورت خط شکسته فرض مي كنيم، از وسط گام قبل آخر تا وسط گام آخر، در لحظه $(n-1)\Delta t$ شتابي داريم و براي گام هايي ديگر نيز چنين عمل مي كنيم. از وسط يك گام تا وسط گام ديگر شتاب را ثابت فرض مي كنيم و به اين ترتيب منحنی توان شتاب دهنده بوجود مي آيد. در لحظه n و n-1 شتاب را ثابت فرض مي كنيم. سرعت را هم در

لحظه $n - \frac{3}{2}, n - \frac{1}{2}$ ثابت فرض مي كنيم. تغييرات سرعت و جهش سرعت مربوط به توان شتاب دهنده

$$\alpha = \frac{\omega'_{n-1} - \omega'_{n-\frac{3}{2}}}{\Delta t} = \frac{d^2 \delta}{dt^2} \Big|_{n-1} = \frac{p_a(n-1)}{M}$$

$$\omega'_{n-\frac{1}{2}} - \omega'_{n-\frac{3}{2}} = \Delta t \cdot \frac{Pa(n-1)}{M} \quad \text{همان بازه در منحنی اول است.}$$

$$\omega'_{n-\frac{3}{2}} - \omega'_{n-\frac{5}{2}} = \Delta t \cdot \frac{pa(n-2)}{M}$$

يکي از روش هاي حل عددي اين معادله ديفرانسيل روش گام به گام است.

توان شتاب دهنده يك تابع نقصاني است که رفته رفته کم مي شود. تغييرات سرعت ماشين بر حسب

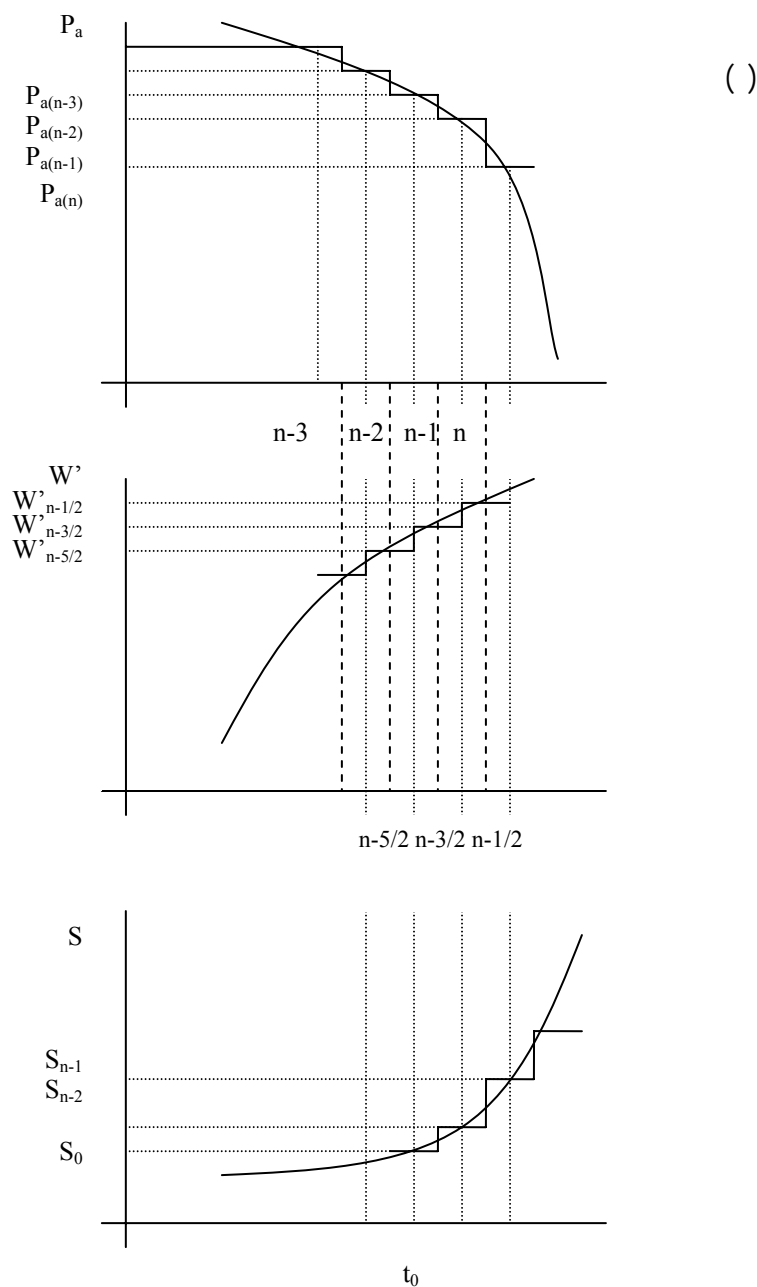
زمان

را در منحنی دوم رسم مي کنيم. در زمان غير از عيب $\omega - \omega_s = 0$. در لحظه $t=0$ با زياد شدن زمان

افزايش $w-w_s$ مي يابد. در منحنی دوم زاويه δ بر حسب زمان را رسم مي کنيم در لحظه $t=t_0$ ،

$\delta = \delta_0$ و با افزايش زمان افزايش مي يابد. خط معيوب قبل از δ_c بايد قطع شود. اگر δ را بر حسب

زمان پيدا کرديم از روی منحنی tc را مي توان پيدا کرد. پس مهم رسم منحنی $\delta(t)$ است.



در لحظه $t = \bar{0}$ ← منجني (۱) پایدار در δ_0

$$P_{a\bar{0}} = p_m - p_{e1,\delta_0} = 0$$

در لحظه $t = 0^+$ ← منجني (۲) در حال نوسان در شروع از δ_0

$$P_{a0^+} = p_m - p_{e2,\delta_0} \neq 0$$

پس بطور متوسط در $t=0$ توان شتاب دهنده P_{a0} جمع مقادیر فوق و تقسیم بر ۲ خواهد شد. مقدار میانگین فقط در لحظه $t=0$ به صورت زیر است:

$$P_{a_0} = \frac{P_{a\bar{0}} + P_{a0^+}}{2}$$

$$M = \frac{S_b H}{\pi f_s} \left[\frac{MJ \text{ sec}}{rad} \right] \quad \frac{s_b H}{180 f_s} \left[\frac{MJ \text{ Sec}}{deg} \right]$$

$$M' = \frac{M}{S_b} = \frac{H}{\pi f_s} \left[\frac{\text{sec}^2}{rad} \right] \quad \text{or} \quad \frac{H}{180 f_s} \left[\frac{\text{sec}^2}{deg} \right]$$

$$\frac{\Delta t^2}{M} \cdot P_{a(n-1)}^{[MW]} \rightarrow [rad] \text{ or } [deg]$$

$$\frac{\Delta t^2}{M'} \cdot P_{a(n-1)}^{[pu]} \rightarrow [rad] \text{ or } [deg]$$

حال تغییرات δ را به تغییرات ω ربط می دهیم. تغییرات δ بیان لحظه $n-2$ و $n-1$ مربوط به $\omega'_{n-\frac{1}{2}}$

است و همینطور بقیه. پس می نویسیم

$$\frac{\Delta \delta}{\Delta t} \text{ شتاب} \quad \frac{\Delta \omega}{\Delta t} \text{ سرعت}$$

$$\Delta \delta_{n-1} = \delta_{n-1} - \delta_{n-2} = \Delta t \cdot \omega'_{n-\frac{3}{2}}$$

$$\Delta \delta_n = \delta_n - \delta_{n-1} = \Delta t \cdot \omega'_{n-\frac{1}{2}}$$

$$\Delta \delta_n - \Delta \delta_{n-1} = \Delta t (\omega'_{n-\frac{1}{2}} - \omega'_{n-\frac{3}{2}}) = \Delta t \cdot \Delta t \cdot P_{a(n-1)}$$

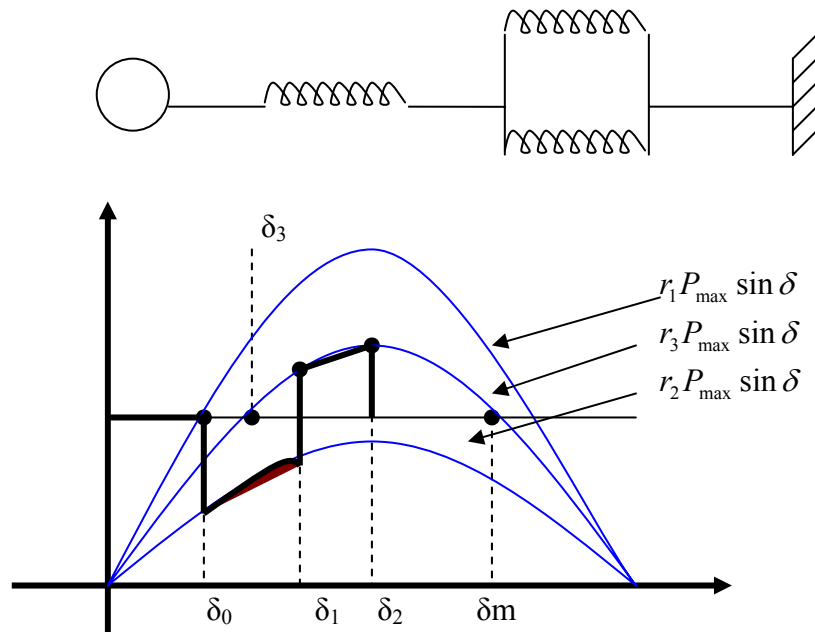
$$\Delta \delta_n = \Delta \delta_{n-1} + \left(\frac{\Delta t^2}{M} \right) P_{a(n-1)}$$

$$t = 0 \rightarrow \Delta \delta_1 = \Delta \delta_0 + \frac{(5 \times 10^{-2})^2}{M} P_{a0}$$

$$\Delta \delta_0 = 0$$

$\Delta \delta_n$ بر روی منحنی (۲) درجه یا رادیان است که بستگی به واحد M یا M' خواهد داشت.

مثال - يك ژنراتور قدرت $P_m = P_e = 1pu$ را به شين بي نهايت مي فرستند قبل از وقوع اتصالي ژنراتور قدرت ماكزيمم $1.8pu$ را دارا بود و در زمان اتصالي اين قدرت به 0.4 کاهش مي يابد و پس از رفع عيب در خط معيوب قدرت منتقله توسط خط سالم به $1.3pu$ افزايش مي يابد مطلوبست الف - محاسبه زاويه بحراني بار δ_c ب- اگر مقدار حرکت زاويه اي ماشين $M' - 3 \times 10^{-4} \text{ sec}^2/\text{deg}$ (پس $\Delta\delta$ درجه خواهد بود). فرض شود باانتخاب گام زماني $\Delta t = 0.05 \text{ sec}$ تغييرات را بر حسب زمان بروش گام بگام پيدا کرده و رسم كنيد و زمان مي نيمم قطع دژنكتورها را از روي آن بدست آوريد (t_c)



$$P_{\max_1} = r_1 P_{\max} = 1.8 pu$$

$$P_{\max} = 1.8 pu$$

$$P_{\max_2} = r_2 P_{\max} = 0.4 \rightarrow r_2 = \frac{0.4}{1.8} = 0.222$$

$$P_{\max} = r_3 P_{\max} = 1.3 \rightarrow r_3 = \frac{1.3}{1.8} = 0.722$$

$$\cos \delta_c = \frac{\frac{P_m}{P_{\max}}(\delta_0 - \delta_m) + (r_2 \cos \delta_0 - r_3 (\cos \delta_m))}{r_2 - r_3}$$

$$1 = 1.8 \sin \delta_0 \rightarrow \delta_0 = 33.7^\circ \text{ or } 0.589 \text{ rad}$$

$$1 = 1.3 \sin \delta_m \rightarrow \delta_m = 129.7^\circ \text{ or } 2.226 \text{ rad}$$

$$\cos \delta_c = \dots \rightarrow \delta_c = 67.8^\circ \text{ or } 1.18 \text{ rad}$$

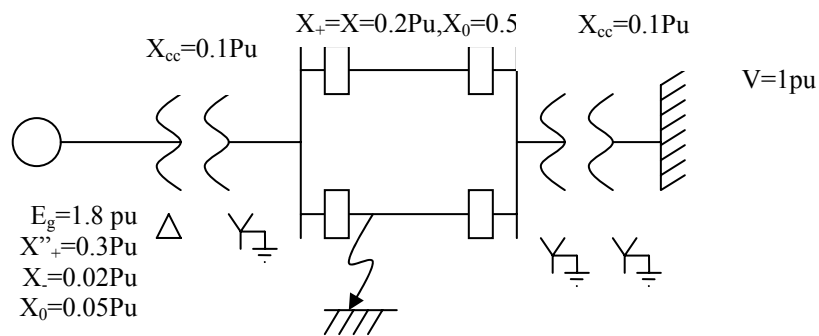
تغییرات δ_0 تا δ_c را بایستی رسم کرد. در لحظه $t=0^-$ ، $p_{a(0)} = 0$ در لحظه

$$P_a(0) = 1 - 4st = 0 \quad t=0^+$$

$$(۲) \quad \Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + \frac{(\Delta t)^2}{M'} Pa(n-1) \quad \frac{(\Delta t)^2}{M'} = \frac{25}{3} [\text{deg}]$$

$$n=1 \quad \Delta\delta_1 = \Delta\delta_c + \frac{(\Delta t)^2}{M'} \quad Pa(0) = 0 + \frac{25}{3} \left(\frac{1 - 0.4 \sin \delta_c}{2} \right) \approx 3.23^\circ$$

مثال - نمایش تک خطی شبکه ای طبق شکل زیر است



۱- مطلوب است حد پایداری استاتیکی شبکه فوق

۲- اگر با یک مانور یکی از خطوط پارالل قطع شود تخصص کنید شبکه پایدار خواهد بود یا نه (قدرت انتقالی قبل از مانور ۱ pu بوده است)

۳- اگر یک اتصال کوتاه تکفاز زمین در نقطه F بلافاصله بعد از دژنکتور مانند شکل رخ دهد تحقیق کنید حتی اگر اتصال در سیستم دوام یابد شبکه پایدار است.

۴- اگر یک اتصال کوتاه سه فاز در F رخ دهد مطلوب است زاویه قطع بحرانی کلیدهای K_1, K_2

۵- با فرض اینکه مقدار حرکت زاویه ای ماشین $M' = 3 \times 10^{-4} \left[\frac{\text{sec}}{\text{deg}} \right]^2$ باشد با انتخاب گام زمانی

$\Delta t = 0.03^s$ مطلوب است رسم تغییرات δ بر حسب زمان پیدا کردن زمان بحرانی قطع عیب کلیدهای K_1, K_2

$$۱- \quad X_1 = X'_+ + X_{cc} + \frac{Xd}{2} + X_{cc} + 0 = 0.3 + 0.1 + \frac{0.2}{2} + 0.1 = 0.6 \text{ pu}$$

$$\frac{EV}{X} \sin \delta = 1 \text{ pu} = \frac{1.8 \times 1}{0.6} \times \sin \delta_0 = 1 \rightarrow \delta_0 = 19.5^\circ$$

$$2- \quad X_2 = X'_+ + X_{cc} + X_+ + X_{cc} + 0 = 0.7$$

$$\frac{EV}{X} \sin \delta = 1 \text{ pu} \rightarrow \frac{1.8 \times 1}{0.7} \sin \delta_1 = 1 \rightarrow \delta_1 = 22.9$$

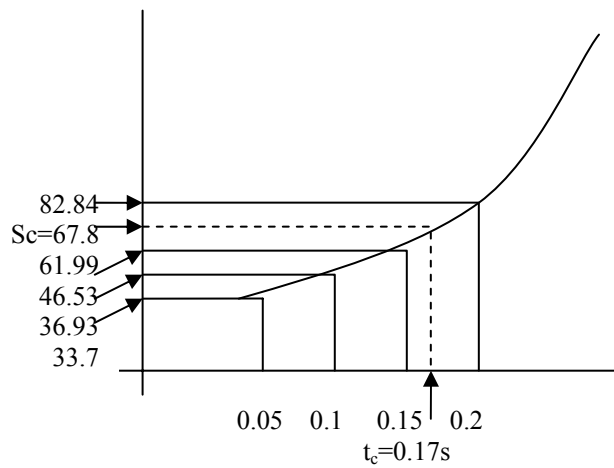
توان شتاب دهنده این مقدار تقسیم بر ۲ خواهد شد (مقدار میانگین) فقط در لحظه صفر

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_1 = \delta_0 + \Delta\delta_1 = 33.7 + 3.23^\circ = 36.93^\circ \\ t = 0 + 0.05 = 0.05 \text{ sec} \end{array} \right.$$

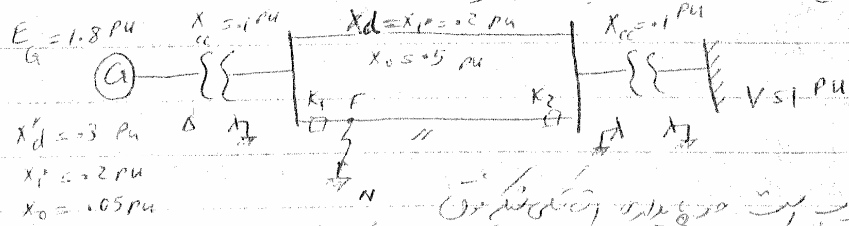
$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\delta_2 = \Delta\delta_1 + \frac{25}{3} P_a(1) = 3.23 + \frac{25}{3} (1 - 0.04 \sin 36.13) = 9.6^\circ \\ \delta_2 = 36.93 + 9.6 = 46.53^\circ \\ t = 2 \times 0.05 = 0.1 \text{ sec} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\delta_3 = 9.6 + \frac{25}{3} (1 - 4 \sin 46.53) = 15.96^\circ \\ \delta_3 = 46.53 + 15.46 = 61.99^\circ \\ t = 3 \times 0.05 = 0.15 \text{ sec} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\delta_4 = 15.46 + \frac{25}{3} (1 - 4 \sin 61.99) = 20.89^\circ \\ \delta_4 = 82.84^\circ \\ t = 4 \times 0.05 = 0.20 \text{ sec} \end{array} \right.$$



حل مسئله شبکه توان



۱- محاسبه توان خروجی و زاویه بار در حالت پایدار
 ۲- اگر یک خط انتقال را قطع کنیم چه اتفاقی می افتد؟
 (قدرت انتقالی قبل از خط ۱ pu بود)

۳- اگر یک اتصال کوتاه در میانه خط انتقال در نقطه F رخ دهد چه اتفاقی می افتد؟
 محاسبه زاویه بار و توان خروجی در حالت پایدار

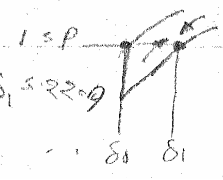
۴- اگر یک اتصال کوتاه سه فاز در F رخ دهد چه اتفاقی می افتد؟
 ۵- محاسبه توان برداشت شده از بار و زاویه بار در حالت پایدار
 $M = 3 \times 10^{-4} \frac{\text{sec}}{\text{deg}}$ باشد و در حالت پایدار
 $\delta = 0.035$ در تمام محاسبات در نظر گرفته شود.

۱- قبل از خط ۱- $X = X'_d + X''_d + \frac{X_d}{2} + X_0 + 0 = 0.3 + 0.1 + \frac{0.2}{2} + 0.1 = 0.6 \text{ pu}$

$\frac{EV}{X} \sin \delta = 1 \text{ pu} \rightarrow \frac{1.8 \times 1}{0.6} \times \sin \delta = 1 \rightarrow \delta_0 = 19.5^\circ$

۲- $X_2 = X'_d + X''_d + X_d + X_0 + 0 = 0.7$

$\frac{EV}{X} \sin \delta = 1 \text{ pu} \rightarrow \frac{1.8 \times 1}{0.7} \sin \delta = 1 \rightarrow \delta_1 = 22.9^\circ$



عوامل پایداری در شبکه قدرت

۱- کوچک بودن زمان بحرانی رفع عیب.

اگر کلیدهای قطع در زمان کوتاه سیستم را قطع کنند بهتر است ولی این عمل از لحاظ هزینه گرانتر است در واقع سرعت عمل دژنکتور باید بالا باشد.

۲- $p = \frac{EV}{X} \sin \delta$ شبکه

اگر X کوچک شود قدرت حداکثر زیاد می شود. اگر در شبکه X پائین بیاید قدرت مستقیم بالا می رود. پارالل کردن خطوط انتقال انرژی و استفاده از خازنهای سری راکتانس بین E_2, E_1 را پائین می آورد.

۳- نیروی محرکه ژنراتور $p = \frac{EV}{X} \sin \delta$ افزایش E در زمان اتصال کوتاه.

تحریک ژنراتور را بطور مصنوعی و گذر افزایش می دهیم لذا پیک منحنی بالا می رود که به پایداری کمک می کند.

۴- با تنظیم سرعت توربین.

در حالت اتصال کوتاه روتور ژنراتور سرعت گرفته و از حالت سنکرون خارج می شود. سرعت روتور را با استفاده از شیر بخار کم می کنیم ولی بستن شیر بخار ممکن است باعث از بین رفتن سنکرونیزاسیون و زیاد توصیه نمی شود (ثابت زمانی سیستم مکانیکی بیشتر از سیستم الکتریکی است). مثال - یک موتور سنکرون ۴۰٪ قدرت ماکزیمم را از شبکه ∞ جذب می کند بار موتور را بطور ناگهانی حداکثر به چند درصد قدرت ماکزیمم موتور می توان رسانید تا موتور سنکرونیزمی خودش را از دست ندهد؟

ملاحظات کلی

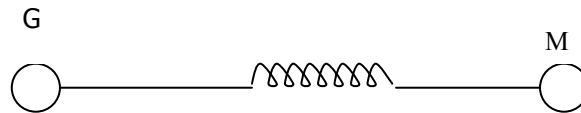
۱- افزایش تدریجی قدرت برای شبکه خطرناک نیست ولی اگر تغییرات ناگهانی باشد اگر بالای سطح pm نتوان سطح معادل را پیدا کرد ممکن است پایداری از دست برود. اگر بخواهیم قدرت انتقالی را افزایش دهیم $1.5 pu \rightarrow 1$ بایستی تدریجی باشد.

۲- حد پایداری دینامیکی از حد پایداری استاتیکی کوچکتر است.

$$90^\circ < 90^\circ$$

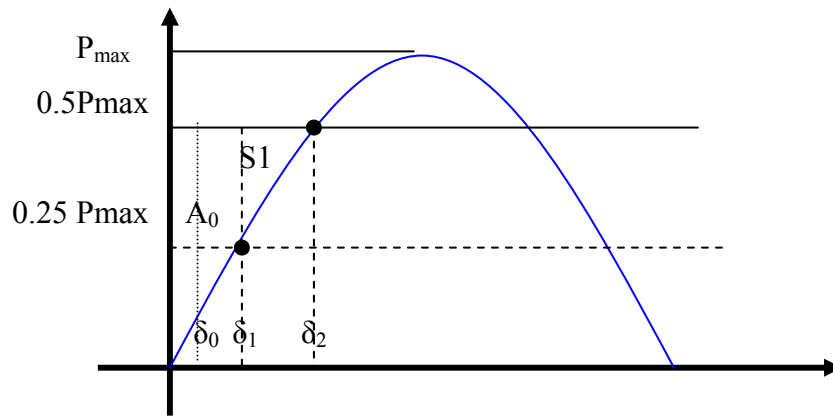
۳- زاویه بحرانی رفع عیب 0

مثال - موتوری که به یک شبکه بی نهایت وصل شده ۲۵٪ قدرت ماکزیمم را جذب می کند. بار موتور را ۲ برابر می کنیم برای اینکه موتور به نقطه تعادل حد ماشین برسد حداکثر تغییرات زاویه δ چقدر است.



$$25P_{\max} = P_{\max} \sin \delta_0$$

$$\delta_0 = 14.48^\circ$$



$$0.5 P_{\max} = P_{\max} \sin \delta_1$$

$$\delta_1 = 30^\circ$$

$$\int_{14.48}^{30} (0.5 p_{\max} - P_{\max} \sin \delta) d\delta = \int_{30}^{\delta_2} (p_{\max} \sin \delta - 0.5 P_{\max}) d\delta$$

$$0.5 \left(\frac{\pi}{6} - \frac{14.46 \times \pi}{180} \right) + \cos \frac{\pi}{6} - \cos 14.48^\circ$$

$$= \cos \frac{\pi}{6} - \cos \delta_2 + 0.5 \left(\frac{\pi}{6} - \delta_2 \right)$$

$$2 \cos \delta_2 + \delta_2 - 1.43 = 0$$