ادامه فصل چهارم

پایداری در سیستم های قدرت

Power Systems Stability

افزایش بار الکتریکی $p_{e_0} \to p_{e_1} \xRightarrow[\text{پایداري استاتیکي}]{\text{پس از برقراري}} P_{mo} \to P_{m1}, \delta_0 \to \delta_1$

قطع بار الکتریکی $p_{m_1} \to p_{m_0} \Rightarrow p_{m_0} < p_1 \Rightarrow p_a = p_{m_0} - p_{e1} < 0 \Rightarrow \delta_1 \to \delta_0$

حال اگر نقطه کار حول نقطه A باشد باتوجه به اینکه نقطه A يك نقطه *stable* (پایدار) است خواهیم گفت پایداري استاتیکي وجود دارد ولي نقطه B حتي براي تغییرات جزیي، يك نقطه غیر استاتیکي است.

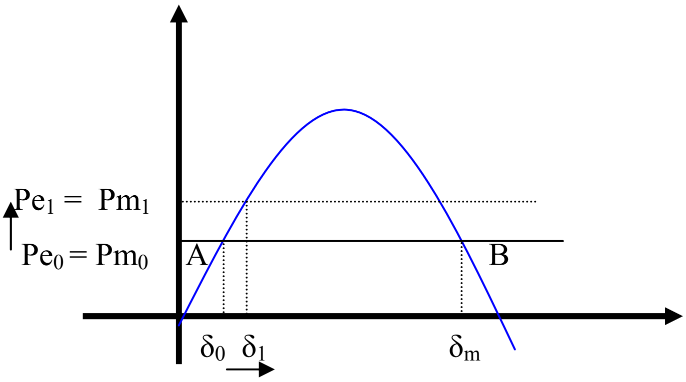
$p_{m_0} \to p_{m1} \to p_{m_0}$

زیرا :

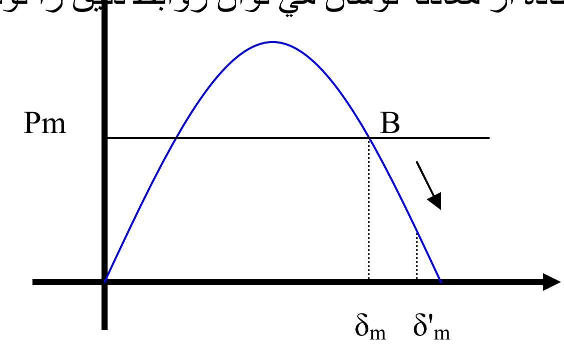
۱- بطور لحظه اي از ژنراتور بار کشیده و سپس قطع مي کنیم. فرض مي کنیم که چنین ژنراتوري به شین بي نهایت وصل بوده و تغییرات جزئي قدرت در شبکه بي نهایت پیش آید. مثلاً توان بیشتري لازم باشد. در این صورت فرض کنیم توان بعلت اتصال بارهاي اضافي يك مقدار جزیي افزایش یابد (البته با فرض ثابت بودن قدرت مکانیکي) در اینصورت حتي اگر این قدرت خواسته شده بصورت لحظه‌اي هم باشد، با فرض ثابت بودن قدرت مکانیکي این قدرت اضافه خواسته شده از انرژي جنبشي ماشین تامین مي شود. مي خواهیم رفتار ژنراتور را در این حالت بررسي کنیم. در این حالت داریم:

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

شتاب منفي بوده و سرعت روتور به نقطه قبلي بر مي گردد. پس A بطور استاتیکي پایدار است.



هرگاه این مسئله را از دید نقطه B بررسي كنيم اگر زاويه بار از δm به مقدرا $\delta' m$ افزايش يابد چون Pe كـاهش يافتـه ولـي Pm ثابـت اسـت پـس δ افـزايش مـي يابـد(افـزايش سـرعت روتـور و افـزايش ناپايداري). بصورت كلي تربا استفاده از معادله نوسان مي توان روابط دقيق را نوشت.



$\delta \rightarrow \delta'_m \quad \rightarrow \quad p_m > p_e \quad \rightarrow \quad p_a \rangle 0$ افزايش سرعت روتور و افزايش ناپايداری

حالت اوليه $A_0 = Peo = Pmo$

$p_{m_0} \rightarrow P_{m_1} \Rightarrow P_{m_1} > P_{e_0} \Rightarrow pa = p_{m_{10}} - p_{e_0} > 0 \Rightarrow \delta_0$ افزايش می يابد

$\delta_0 \rightarrow \delta_1$ ذخيره شدن انرژي جنبشي ناشي از شتاب مثبت $A_1 : pe \rightarrow pm_1 \quad p_a = p_{m1} - p_{a1} = 0 \quad \rightarrow \delta = \delta_1$

اما تغييرات زاويه δ متوقف نمي شود زيرا انرژي جنبشي دحيره شده در رونور بايسني آزاد شده و بصورت انرژي الكتريكي به شبكه به علاوه اصطكاك تبديل شود.

$\delta_1 \rightarrow \delta \quad p_{e1} \rightarrow p_e \rangle p_{m1} \quad p_a = p_{m1} - p_{a1} \langle 0 \quad \rightarrow A_2 : \delta = \delta 2$

تمامي انرژي جنبشي ذخيره شده آزاد مي شود

$p_a = p_{m1} - p_{e2} < 0$

$\delta 2 \rightarrow \delta, Pe2 \rightarrow Pe \Rightarrow \delta 2 \rightarrow \delta 1.$ آزادشدن انرژي جنبشي ناشي از شتاب منفي $.A1 = Pe$ -

اما تغييرات زاويه δ متوقف نمي شود و انرژي جنبشي آزاد شده + اصطكاك بايستي بصورت انرژي الكتريكي از شبكه اخذ شود.

تمام انرژي جنبشي آزاد شده جذب مي شود.

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

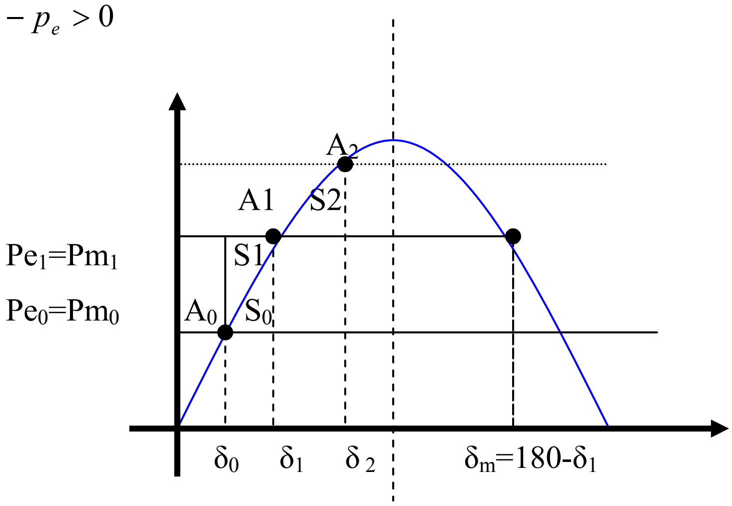
$Pa = Pm1 - Pe0$

براي كار ماشين بايد هميشه:

$\delta_0 \langle \pi / 2$

۲- حال براي تحقيق پايداري ديناميكي قدرت مكانيكي را بطور ناگهاني زياد مي كنيم و در همانجا نگه مي داريم تا اينكه پس از نوسانات متعدد $\delta_0 \Rightarrow \delta_1$. بر عكس حالت قبل كه بطور لحظه اي بار كشيده و قطع ميكرديم باز به همان حالت ماشين را در نظر مي گيريم و فرض مي كنيم قدرت مكانيكي داده شده را به ۲۰% افزايش دهيم $p_{m_0} \to p_{m_1}$ كه در اين حالت ماشين مي خواهد با زاويه δ_1 كار كند. حال با توجه به اينكه زاويه مكانيكي نمي تواند جهشي باشد لذا زاويه الكتريكي هم به تبعيت از آن تغييرات تدريجي خواهد داشت و علي رغم تغيير pm ، δ هم تقريباً δ_0 است و قدرت الكتريكي تحويل همان مقدار قبلي pe است پس $p_{m_1} > p_e$ و مابقي قدرت صرف شتاب دادن روتور مي شود و با گذشت زمان

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



با افزايش δ Pe افزايش مي يابد و در نقطه A’ $\begin{cases} p_{m_1} = pe \\ p_a = 0 \end{cases}$. در لحظه t_1 زاويه بار به δ_1 رسيده و در اين حالت سطح مستطيلي S، مجموع سطح مثلث پائيني(قدرت الكتريكي داده شده S_0) و مثلث بالايي(هاشور خورده S_1) است كه بصورت انرژي جنبشي (صرف شتاب شده) در سيستم باقي ميماند.

$S=S_0+S_1$

سپس قدرت معادل همان سطح بالا مي رود تا همان مقدار انرژي جنبشي ذخيره شده را بصورت الكتريكي به شبكه تحويل دهد(مثلاً تا نقطه F) در اين نقطه $P_e > P_m$ بوده و سرعت روتور كمتر مي شود باز هم به همان ترتيب p_{m_1} ثابت بوده و $P_e \uparrow$ $p_a = p_{m_1} - p_e < 0$ و روتور سرعتش را كاهش مي دهد تا در حالت ثابت بماند.

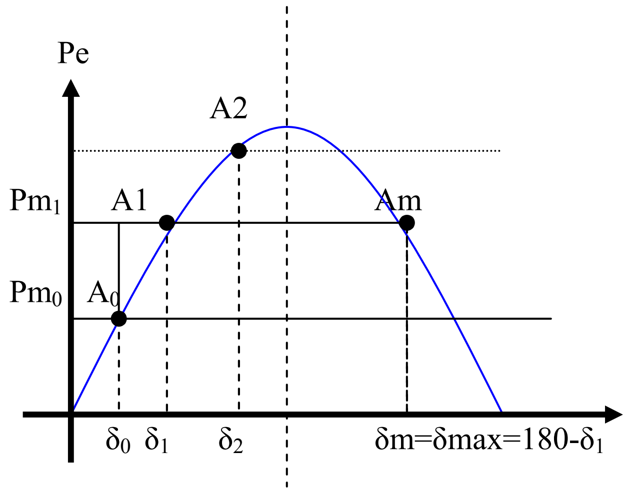
$$\begin{cases} p_{m_1} = p_e \\ p_a = 0 \end{cases}$$

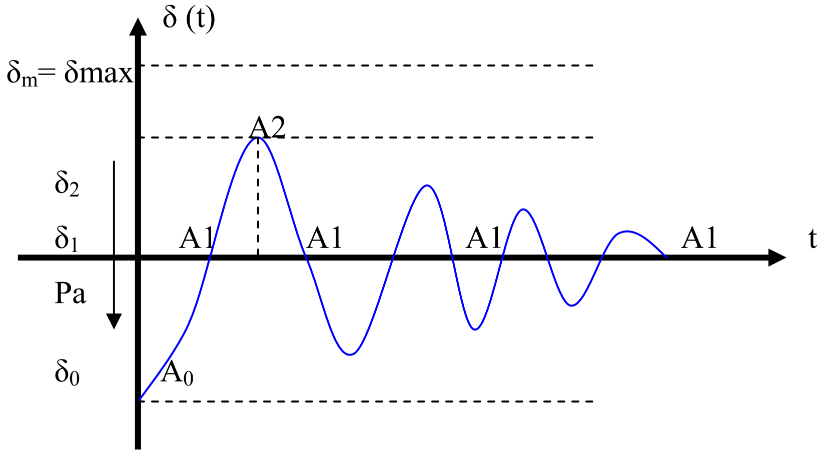
$$S_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (p_{m_1} - p_e) ds \qquad S_2 = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (p_e - p_{m_1}) d\delta$$

به علت وجود انرژي جنبشي نوسان بين δ_0 و δ_2 ادامه مي يابد (مربوط به نقطه F) ولي با توجه به تلفات اصطكاك دامنه نوسان بصورت ميرايي كاهش يافته و در نهايت بر هم منطبق مي شود (وضعيت جديد) ولي بايد توجه كرد كه بايد سطح بالايي تا نقطه F برابر سطح پائيني $A_1=A_2$ هاشور خورده باشد . منظور سطحي است كه تا δ_M باشد و اگر سطح بالايي كه معادل افزايش قدرت مكانيكي است، براي نوسان كافي نباشد δ از δ_M عبور كرده و پايداري از بين خواهد رفت و همين مسئله است كه ما را بر آن مي‌دارد كه تغييرات افزايش P_m را بطور تدريجي انجام دهيم تا دامنه نوسان زياد نباشد.

رسم نمودار توان شتاب دهنده Pa

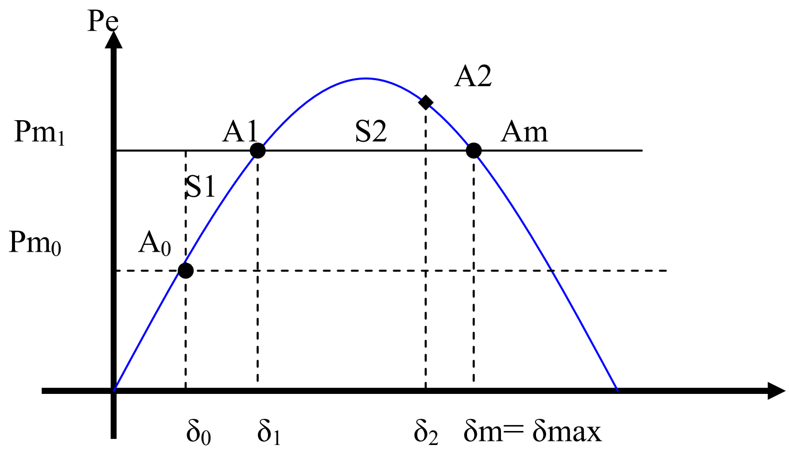
در حالت كلي اصطكاك به پايداري شبكه هاي قدرت كمك مي كند. δm=δmax حداكثر زاويه بار در شرایط پایداری گذرا می باشد. δm=90 حداکثر زاویه بار در شرایطپایداری استاتیکی (ماندگار) است.

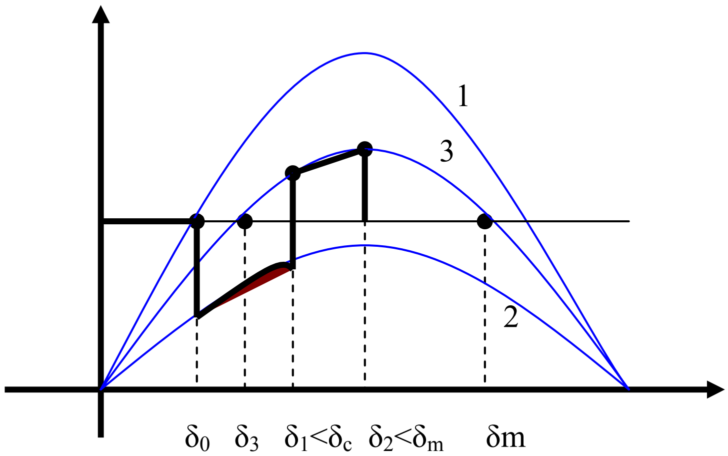


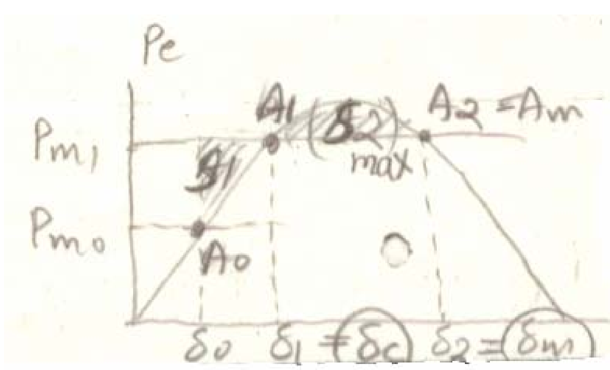


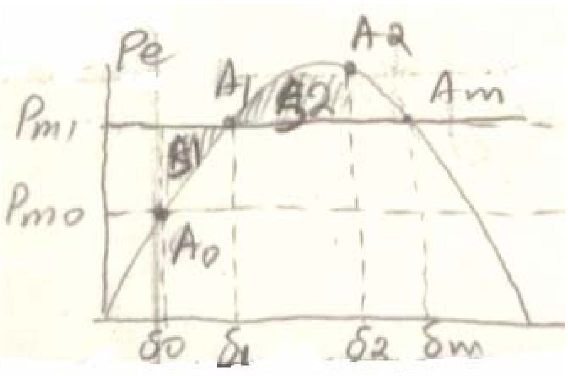
اين منحني مي تواند منحني توان الكتريكي و توان شتاب دهنده هم (بصورت معكوس) باشد. البته تغييرات ناگهاني قدرت نمي تواند درشبكه رخ دهد ولي عيب واتصالي زياد پيش مي آيد. در شبكه اتصالي ايجاد شده است. شرط كامل وجود پايداری گذرا بصورت معيار سطوح برابر:

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





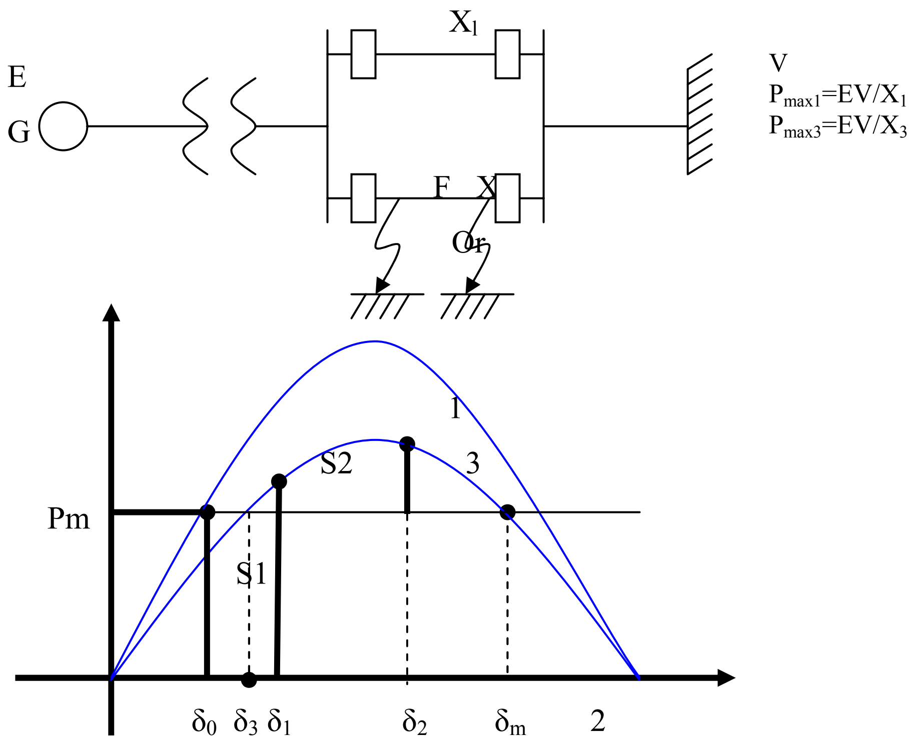




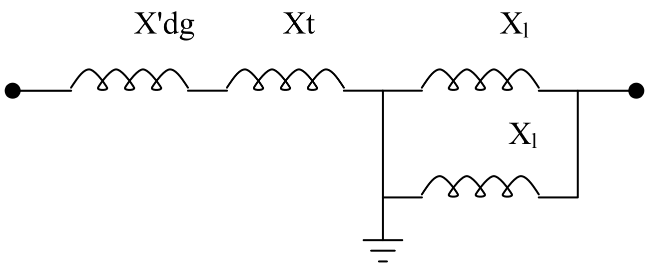
بررسي تغيرات زاويه بار ماشين

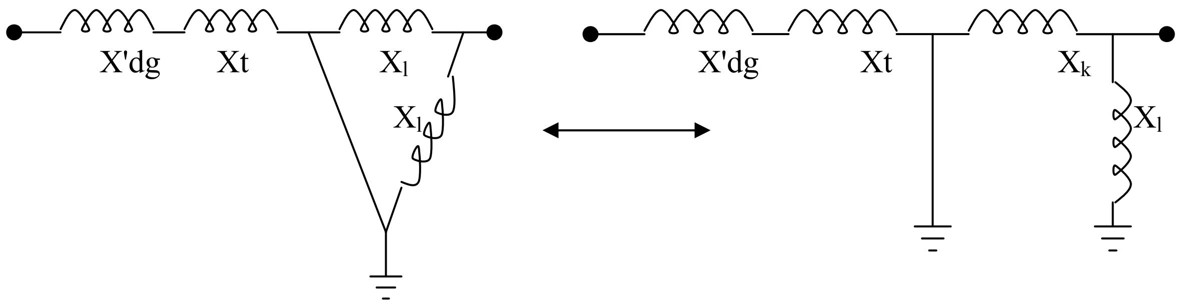
الف- اتصال کوتاه در يک طرف خط انتقال

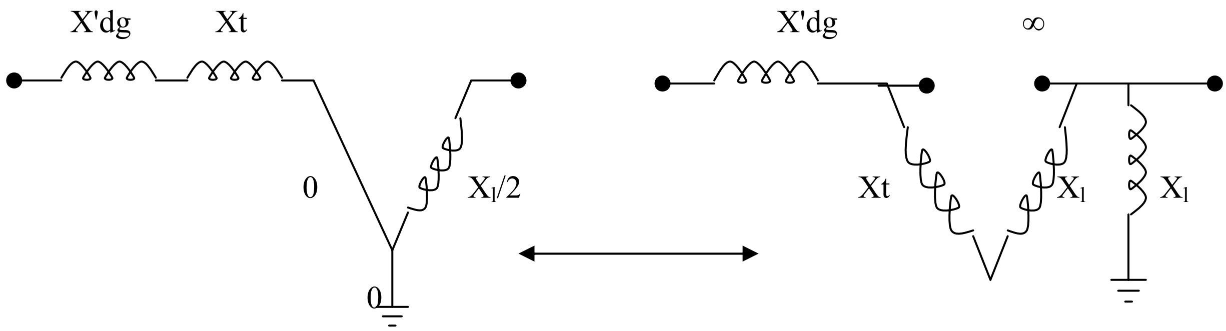
اتصال کوتاهي در اول يا آخر يکي از خطوط بوقع مي پيوندد. مسلماً دژنکتور بلافاصله قطع نمي کند.

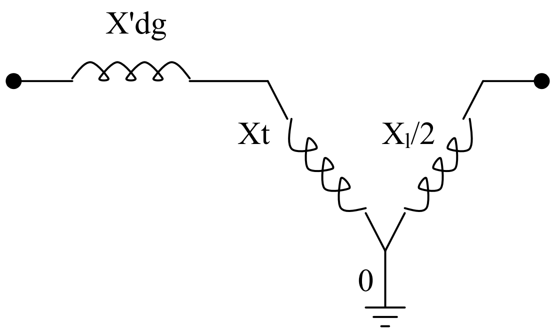


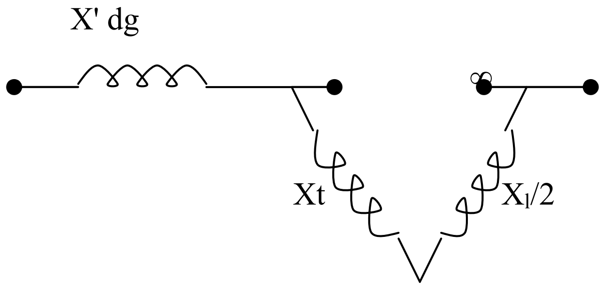
با توجه به اينکه اتصال کوتاه ۳ فاز است، در زمان عيب از $t_0 \rightarrow t_1$ قدرت انتقالي به شبکه صفر است که در منحني فوق نشان داده شده است حال مي خواهيم X بين ژنراتور و شبکه را حساب کنيم.


X'dg
Xt
Xl
Xl

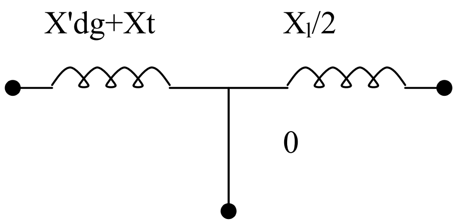

X'dg
Xt
Xl
Xl
X'dg
Xt
Xk
Xl

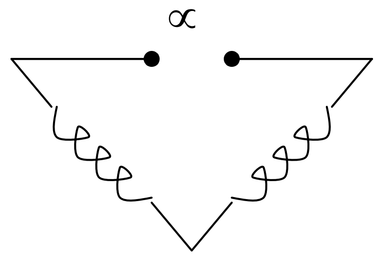

X'dg
Xt
0
Xl/2
0
X'dg
∞
Xt
Xl
Xl


X'dg
Xt
Xl/2
0


X' dg
∞
Xt
Xl/2

یا به طور ساده تر:





در زمان عیب $(p_{\max 2}=0)$ $x_2=\infty \rightarrow P_{e_2}=0$ (دژنکتور بلافاصله عمل نمي كند و پس از Δt خط معيوب را جدا مي سازد.

بعد از رفع عيب برداشته شدن خط معيوب داريم:

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

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

پس با توجه به X_3 ملاحظه مي شود كه توان انتقالي كاهش خواهد يافت. با توجه به اينكه در فاصله زماني رفع عيب سرعت زاويه اي و انرژي جنبشي روتور افزايش مي يابد منحني قدرت روي منحني جديد آمده (منحني۳) و بايد سطح بالاي منحني جديد با منحني انرژي جنبشي ذخيره شده باشد برابر باشد. براي پايدار بودن سيستم سطح ضد شتاب دهنده بايستي با سطح شتاب دهنده مساوي باشد.

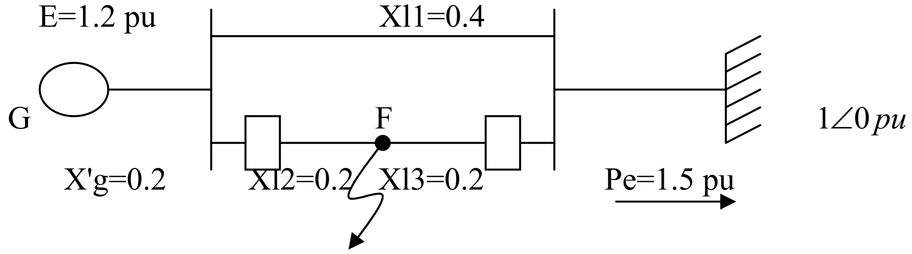
$$S_1 \le (S_2)_{\max}$$

شرط وجود پايداري گذرا معيار سطوح برابراست.Equal Area Criterion

سطح S_1 بستگي به زمان $\Delta t = t_1 - t_0$ براي رسيدن به $\delta_0 \rightarrow \delta_1$ دارد كه پايداري را كوچك بودن اين زمان Δt و كوچك شدن سطح S_1 بهتر ميكند.

پس از نوسان سيستم حالت پايدار خواهد يافت ولي ممكن است زاويه بار تا يك حدي مثلاً δe (بحراني) بتواند پيش رود تا پايداري سيستم از بين نرود.

مثال: ژنراتوري توسط دو خط پارالل مطابق شكل قدرت معادل ۱/۵ پريونيت را به شبكه تحويل مي دهد. در نقطه F عيبي پيش مي آيد كه بلافاصله دژنكتورهاي طرفين خط معيوب عمل كرده و خط معيوب را از شبكه حذف مي كنند تغييرات زاويه اي بار را روي اين شبكه بررسي كنيد .

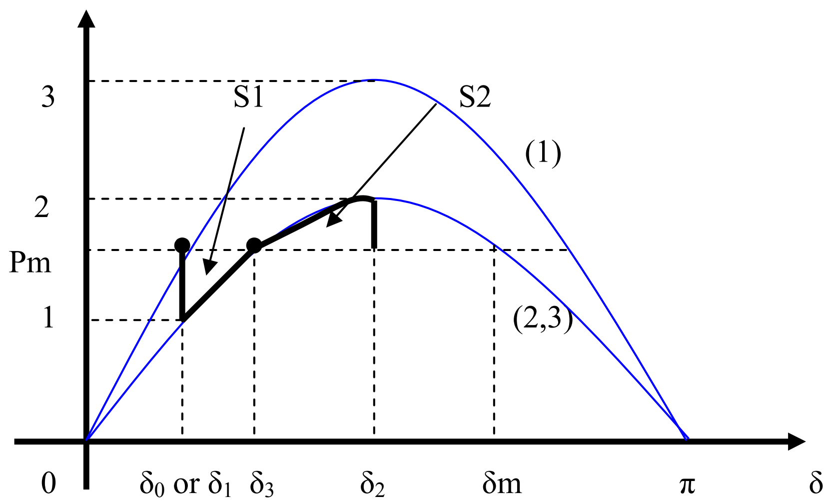


حل

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

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

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



چون دژنكتورتها بلافاصله عمل كردندپس قدرت انتقالي روي منحني يك خط سالم قرار خواهد گرفت (نه روي خط صفر مثل حالت قبل)

$X_3 = 0.2 + 04 + 0 = 0.6 \qquad \frac{EV}{X_3}\sin\delta = 2\sin\delta \rightarrow$

$$2\sin\delta_3 = 1.5 \rightarrow \delta_3 = 48.6 = 0.848 rad$$

$$\delta_m = 90^0 + (90 - \delta_3) = 180 - \delta_3 = 131.4^o \rightarrow 2.293 rad$$

حال بايد ديد بالاي p_m مـي تـوان سطحي بدست آورد كـه معـادل سطح پـائيني باشـد. δ بـر حسب راديـان است.

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

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

براي تعين δ_2 :

$$S_1 = S_2 \rightarrow 0/0773 = \int_{848=\delta_3}^{\delta_2} (2\sin\delta - 1.5) d\delta = (-2\cos\delta - 1.5\delta)\Big|_{\delta_1}^{\delta_2}$$

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

$$\delta_2 = 10218 rad = 69.8^o$$

تغييرات زاويه بار δ از روي معادله نوسان بررسي مي شود.

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

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

طرفين به $\frac{d\delta}{dt}$ ضرب مي شود.

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

$$\frac{M}{2}\frac{d}{dt}[(\frac{d\delta}{dt})^2] = (pm - pe)\frac{d\delta}{dt}$$

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

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

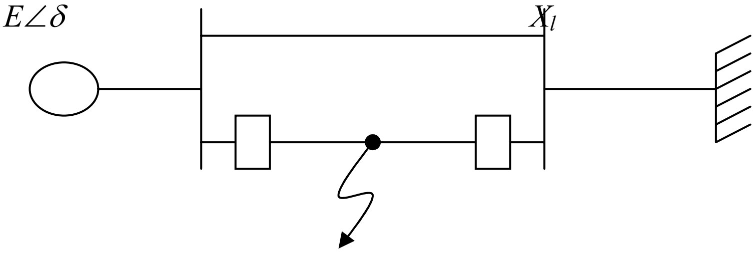
سطح زير منحني

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

و از همين رابطـه نتيجـه مـي گيـريم كـه سطح مشخص شونده در منحنيهـاي قبل معـادل انـرژي جنبشي است.

در حالت اتصال کوتاه غیر ۳ فاز (مثلاً تکفاز) و به غیر از ابتدا و انتهای خط انتقال

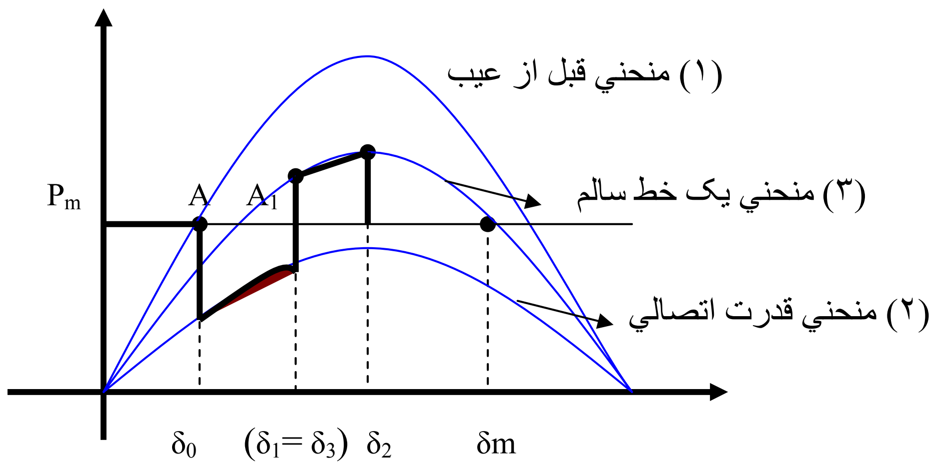
اتصال کوتاه در وسط یکي از خطوط صورت مي گیرد. نقطه عیب هر نقطه دیگر می تواند باشد.

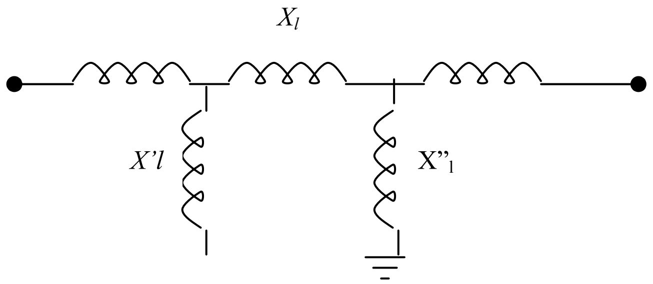


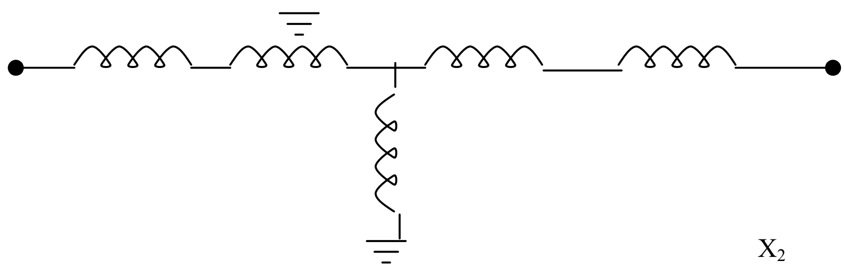
X'_l X''_l

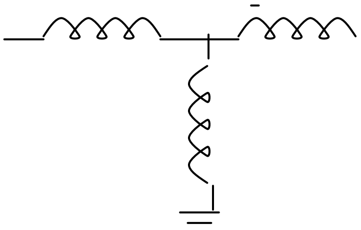
Z_f

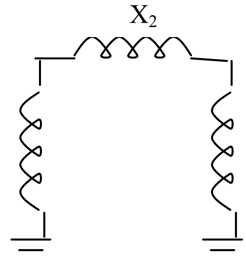
$X_l = X'_l + X''_l$



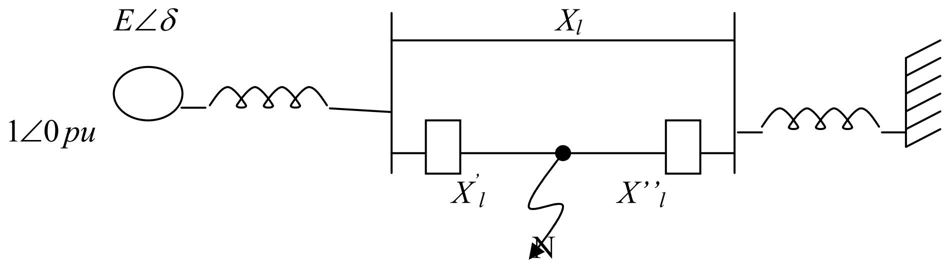








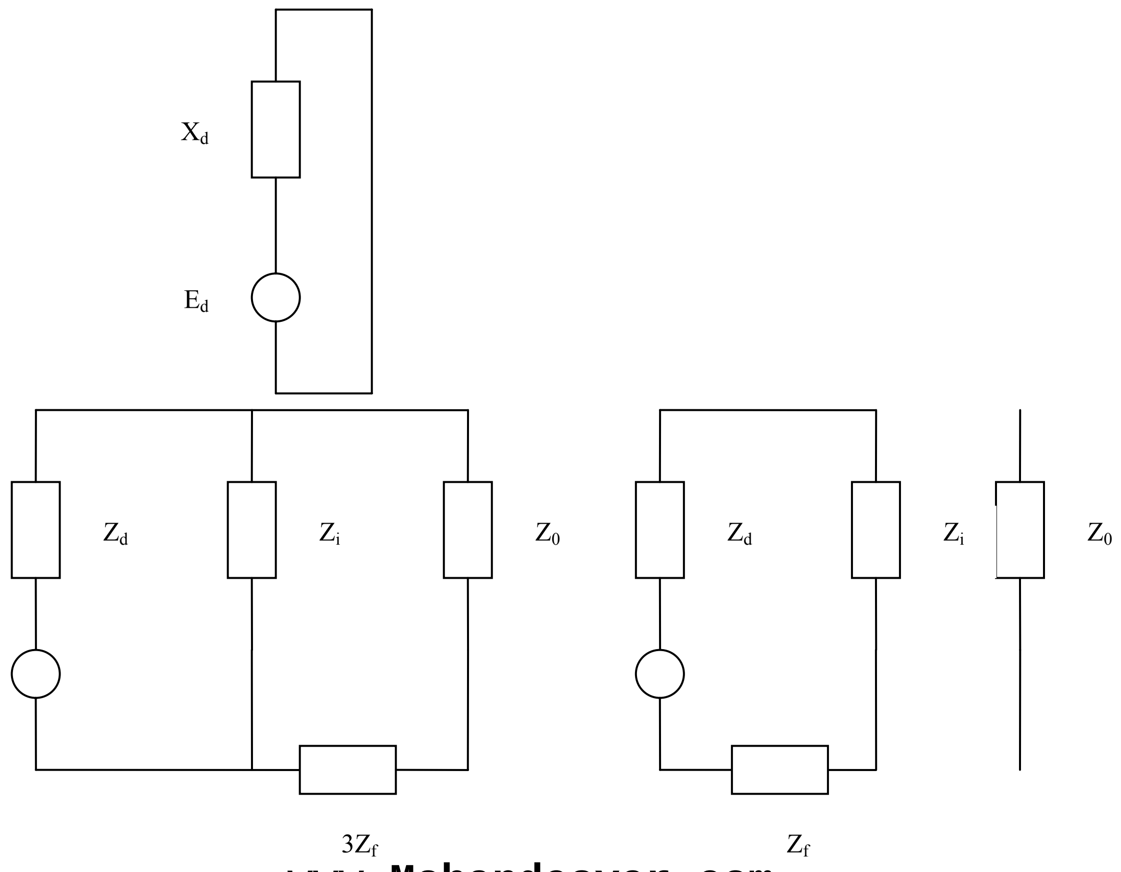
عيب غير از اول يا انتهاي خطوط صورت مي گيرد كه مي تواند L-L يا L-L-L يا L-G يا L-L-G باشد. در اينصورت $X_2 \neq \infty$ خواهد بود (در زمان عيب). در شبكه هاي قدرت ماشين هاي سنكرون ممكن است از حالت سنكرون خارج شوند و بعلت هاي مختلف ممكن است اين مساله بوقوع بپيوندد. مثلاًاتصال كوتاهي كه برطرف نشود، عمليات سويچينگ ويا افزايش ناگهاني بار. بطور كلي اين مورد در مورد يك سيستم دو ماشينه كه قدرت توسط دو خط پارالل انتقال يابد و در يكي اتصال كوتاه پيش آيد مي تواند مطرح باشد. دياگرام تك خطي شبكه اي مطابق شكل زير است:

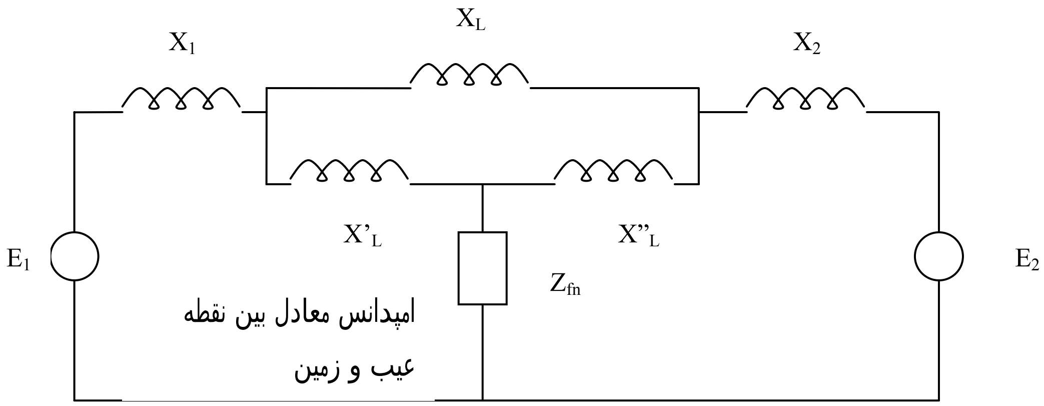


اتصال كوتاه از هرنوع در يكي از خطوط انتقال رخ مي دهد (F)

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

اگر اتصال كوتاه از نوع ۳ فاز باشد. بين N,F شماي مستقيم را پيدا كرده و NF را اتصال كوتاه مي كنيم. اگر از نوع ۲ فاز بدون زمين باشد شماي مستقيم و راكتانس معكوس و هموپولر را حساب كرده و راكتانس معكوس را با شماي مستقيم موازي ميكنيم يعني بين N,F راكتانس معكوس قرار مي دهيم در اتصال كوتاه ۲ فاز با زمين در شماي مستقيم بين N,F موازي شده راكتانس معكوس و هموپولر را قرار مي‌دهيم.





اتصال کوتاه ۳ فاز (LLL)

۲ فاز بدون زمين (LL)

۱فاز با زمين (LG)

۲ فاز با زمين (LLG)

$$Z_{FN}=\begin{cases}0\\ Z_i \qquad Z_i+Z_f\\ Z_i+Z_0 \quad Z_i+Z_0+3Z_f\\ Z_i \parallel Z_0 \quad Z_i \parallel (Z_0+3Z_f)\end{cases}$$

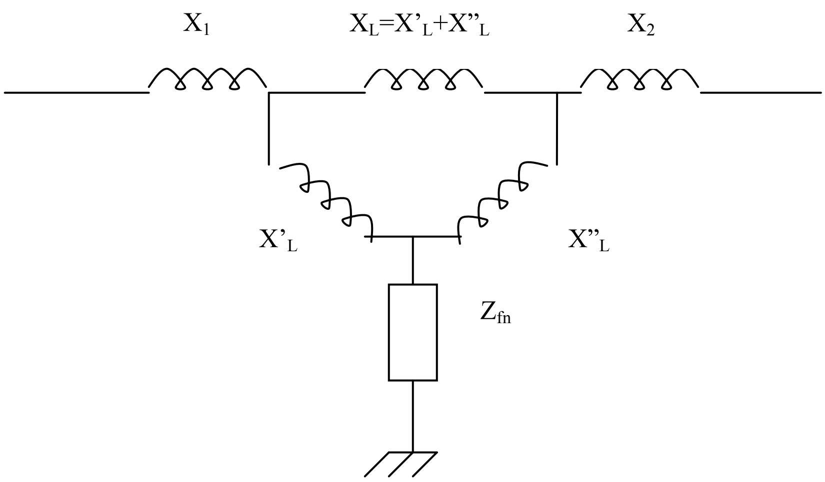
اين امپدانس بين N,F در شبکه ترتيب مستقيم قرار مي گيرد. براي هر اتصالي مسئله پايداري را در اين شبکه بايد بررسي کرد.

قدرت منتقله در حين اتصالي بين E_2,E_1 (از ژنراتور به شبکه)

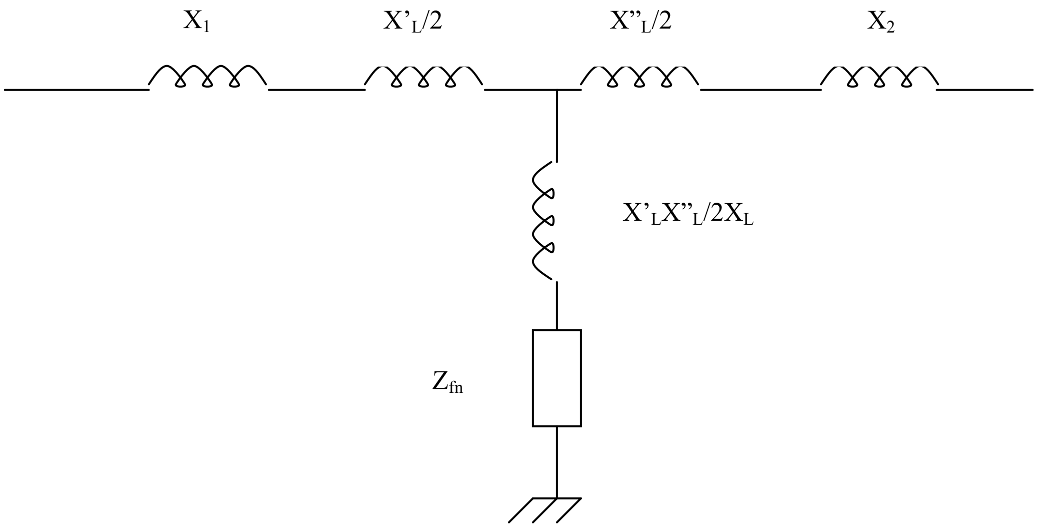
$$p=\frac{E_1E_2}{X_{12}}\sin\delta$$

X_{12} راکتانس سري بين E_2,E_1

δ زاويه بار بين E_2,E_1

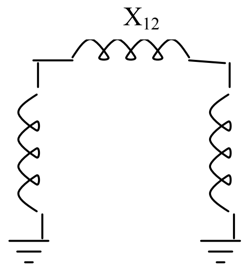


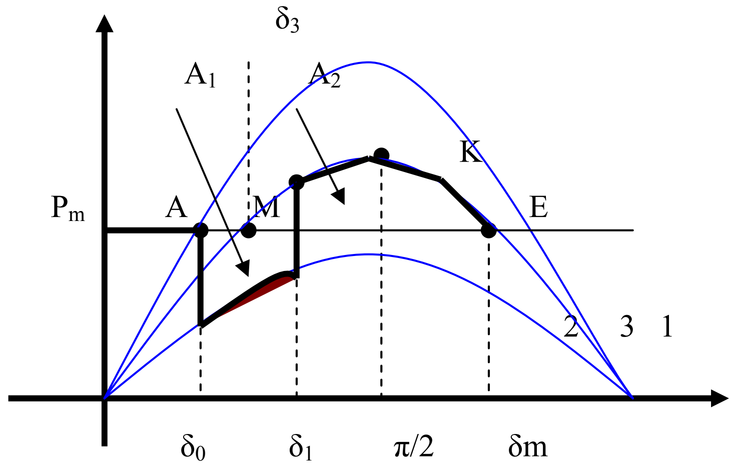
با تبديل مثلث به ستاره در شبكه انتقال داريم



با تبديل ستاره به مثلث با احتساب مقاومت هاي ديگري سري بـه ستاره قبلي و در اين Δ به ضلع بالا اين كه قدرت را منتقل مي كند احتياج داريم:

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





قبل از عيب

$$\begin{cases} P = \dfrac{E_1E_2}{X_{12,1}}\sin\delta = r_1 P_{\max}\sin\delta \\ X_{12,1} = X_1 + \dfrac{Xl}{2} + X_2 \end{cases} \quad r_1 = 1$$

در زمان عيب

$$p = \frac{E_1E_2}{X_{12,2}}\ \sin\delta = r_2\,\frac{E_1E_2}{X_{12,1}}\sin\delta$$

$$r_2 \langle r_1 = 1$$

در اينجا $X_{12,2}\rangle X_{12,1}$ پس در زمان عيب $X_{12,2} = \dfrac{1}{r_2}X_{12,1}$ و $P = r_2 P_{\max}\sin\delta$.

قدرت منتقله بوسيله توربين ژنراتور E_1 توليد مي شود. نقطه كار P_m تحت زاويه δ_0 مي باشد. در حالت عيب منحني قدرت منتقله منحني پائيني شده و نقطه كار بطور ناگهاني بعلت عيب از A به B نزول كرده و توسط منحني پائين قدرت منتقل مي شود اگر اين عيب به همين ترتيب ادامه يابد بايد δ آنقدر افزايش يابد تا P_m لازم را به شكل تحويل دهد ولي اين تا آخر نمي تواند ادامه داشته باشد چون وضع p_m ژنراتور خراب تر شده و ژنراتور از حالت سنكرون خارج مي شود و بايد اين ادامه در جايي قطع شود در زاويه قدرت δ_1 كليد قدرت عمل كرده و خط معيوب را از مدار قطع مي كند كه در اين حال قدرت از طريق يكي از خطوط منتقل مي شود.

بعد از رفع عيب

$$P = \frac{E_1E_2}{X_{12,3}}\sin\delta = r_3\,P_{\max}\sin s$$

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

در ذوزنقه پائيني در ژنراتور انرژي جنبشي در اينرسي ماشين ذخيره شده كه بايستي اين انرژي جنبشي به شبكه تحويل داده شود. از نقطه D به بعد شتاب ژنراتور در حال كند شدن است و اين كند شدن تا ε مانده به E ادامه پيدا خواهد كرد(شرط براي پايداري گذرا $A_1 \le A_2$ **).**

هر چه دژنكتور زودتر عمل كند انرژي ذخيره شده در اينرسي ماشيني كمتر بوده و زودتر مساحت بالاي مساوي با مساحت پائين را پيدا مي كنيم. اين زاويه زاويه بحراني رفع عيب δ_c است و آن زاويه اي كه در آن $A_1 = A_{2\max}$ و در بيشتر از اين زاويه، پايداري از دست مي رود اگر زاويه در كمتر از δ_c عمل كند آنجا $A_1 < A_{2_{\max}}$ و پايداري صددرصد خواهد بود. پس سرعت عمل دژنكتورها خيلي مهم است. t_c زمان بحراني رفع عيب، حداكثر زماني است كه در شبكه مي توان تحمل كرد تا پايداري در

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

Case c: Recloser

حالت ٤ اگر کليد قدرت خط شماره ۲ بطور موفقيت آميزي reclose يا دوباره بسته شود (يعني عيب خط دوم بصورت گذرا بوده و بنابراين بعد از مدتي از بين رفته است) داريم:

$$P_{e4} = P_{el} = P_{\max l} \sin\delta$$

چون با عمل دوباره بسته شدن کليد دوباره همان قدرت اوليه به سيستم داده مي شود پس عملکرد پايدار سيستم توسعه مي يابد. براي شرايط کلي داريم:

$$\delta_m = \pi - \sin^{-1}\left(\frac{pm}{p_{\max 4} or P_{\max 1}}\right)$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (p_m - p_{\max 2}\sin\delta)d\delta = \int_{\delta_1}^{\delta rc} (p_{\max 3}\sin\delta - p_m)d\delta$$

$$+\int_{\delta_{rc}}^{\delta_2} (P_{\max 4}\sin\delta - p_m)d\delta$$

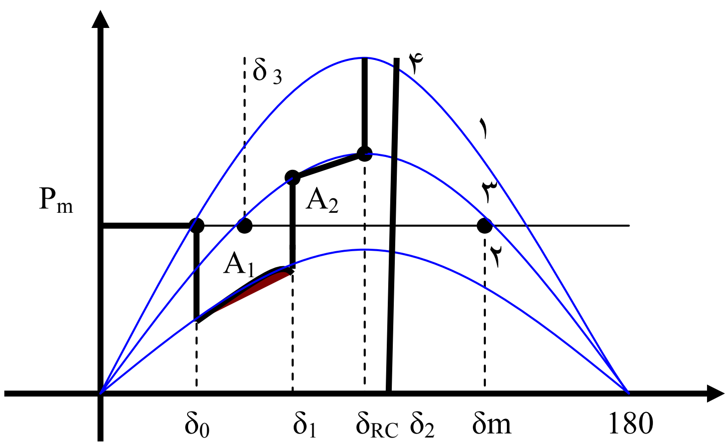
براي شرايط زاويه رفع عيب بحراني δ_c داريم:

$$\delta_1 \to \delta_c \Rightarrow \delta_2 \to \delta_m$$

$$\delta_2 = \delta_m = \pi - \sin^{-1}\left(\frac{pm}{p_{\max 4}}\right)$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta c} (p_m - p_{\max 2}\sin\delta)d\delta = \int_{\delta c}^{\delta rc} (p_{\max}\sin\delta - pm)d\delta$$

$$+\int_{\delta rc}^{\delta m} (p_{\max 4}\sin\delta - p_m)d\delta$$



پيدا كردن زاويه بحراني رفع عيب

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

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

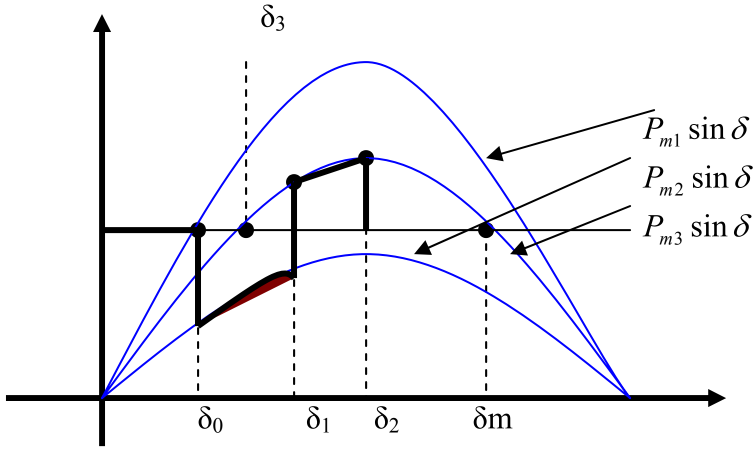
$$P_m(\delta_c - \delta_0) - \int_{\delta 0}^{\delta c} (r_2 p_{max} \sin\delta) d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_m} (r_3 P_{max} \sin\delta) d\delta$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta c} (pm - Pe2) d\delta = \int_{\delta c}^{\delta m} (pe_3 = p_m) d\delta$$

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

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

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



فقط δ_m, δ_0 به راديان مي باشد.

P_Mقدرت منتقله قبل از عيب

روي منحني (۱) $\delta_0 = \sin^{-1}(\frac{p_m}{p_{max1}})$ راديان $\quad$ $p_0 = p_m \frac{EV}{X_0}\sin\delta_0$ نقطه

پايداري

روي منحني(۳) $\delta_m = \sin^{-1}\frac{p_m}{p_{max3}}$ $\quad$ $\delta_m = \pi - \sin^{-1}\frac{pm}{p_{max}}$

زمـان بحرانـي رفـع عيـب از روي زاويـه معلـوم مـي شـود ⟶معلوم tc=?

$\delta c =$

اگرمقدارتغييرات زاويـه بـار را بـر حسب زمـان رسـم كنيم از روي منحنـي مـي تـوان زمـان بحرانـي را حساب كرد.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$(n-2)\Delta t \qquad (n-1)\Delta t \quad (n)\Delta t \Rightarrow t_o + (n-2)\Delta t....(t_o + n\Delta t = t_c)$$

بجاي اينكه شتاب را بصورت يك منحني الخط حساب كنيم آنرا بصورت خط شكسته 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 ديگرشتاب را ثابت فرض مـي كنيم وبـه اين ترتيب منحنـي تـوان شتاب دهنده بوجود مـيآيد. در لحظـه n و n-1 شتاب را ثابت فرض مـيكنيم. 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

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

همان بازه در منحني اول است.

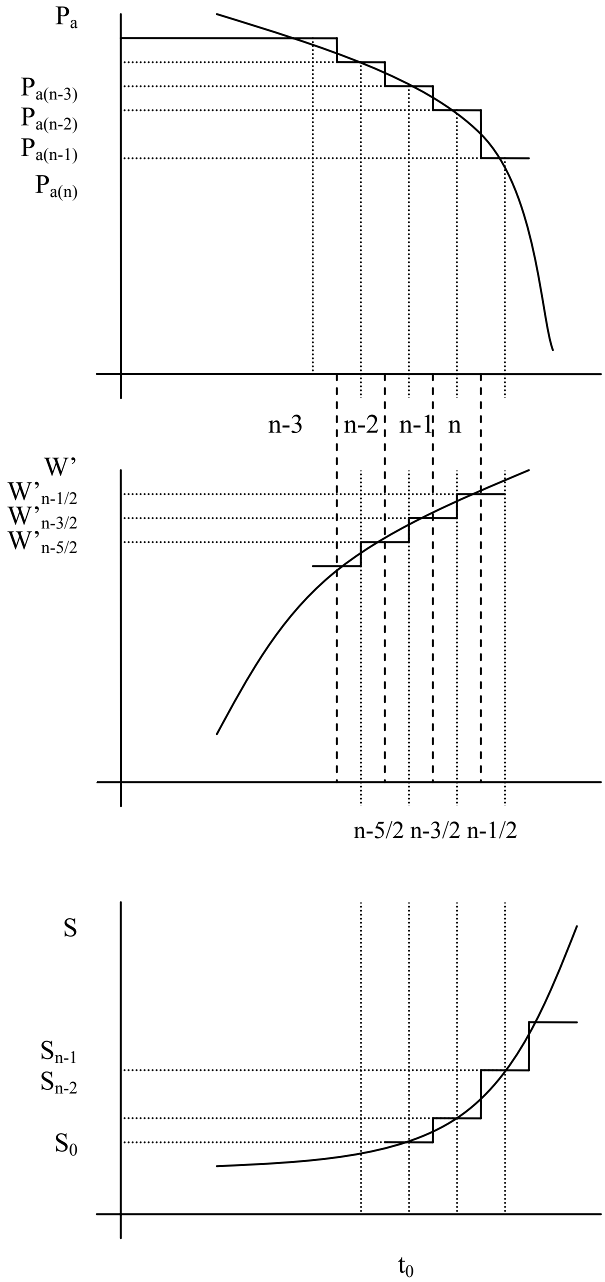
$$\omega'_{n-\frac{1}{2}} - \omega'_{n-\frac{3}{2}} = \Delta t.\frac{Pa(n-1)}{M}$$

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

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

توان شتاب دهنده يك تابع نقصاني است كه رفته رفته كم مي شود. تغييرات سرعت ماشين بر حسب زمان

را در منحني دوم رسم مي كنيم. در زمان غير از عيب $\omega - \omega_s = 0$.در لحظه $t=0$ با زياد شدن زمان $w-w_s$ افزايش مي يابد.در منحني دوم زاويه δ بر حسب زمان را رسم مي كنيم 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 كرديم از روي منحني tc را مي توان پيدا كرد. پس مهم رسم منحني $\delta(t)$ است.



منحني (۲)

در لحظه $t=\bar{o}$ ←منجني (۱) پايدار در δ_0

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

در لحظـــــــه $t=0^+$ ←منجنـــــــــي (۲) در حـــــــال نوســـــــان در شـــــــروع از δ_0

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

پس بطـور متوسـط در t=0 تـوان شـتاب دهنـده P_{a0} جمـع مقـادير فـوق و تقسيم بـر ۲ خواهد شد. مقدار ميانگين فقط در لحظه t=0 به صورت زير است:

$$P_{a_0} = \frac{p_{a\bar{o}} + P_{aot}}{2}$$

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

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

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

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

حال تغييرات δ را به تغييرات ω ربط مي دهيم. تغييرات δ بيان لحظـه n-۲ و n-۱ مربـوط بـه $\omega'_{n-\frac{1}{2}}$ است و همينطور بقيه. پس مي نويسيم

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

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

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

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

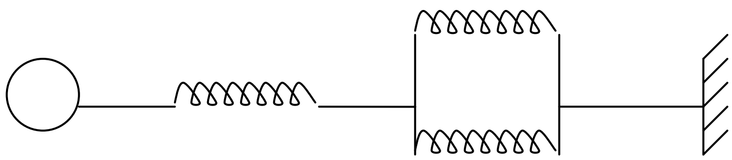
$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + (\frac{\Delta t^2}{M})Pa(n-1)$$

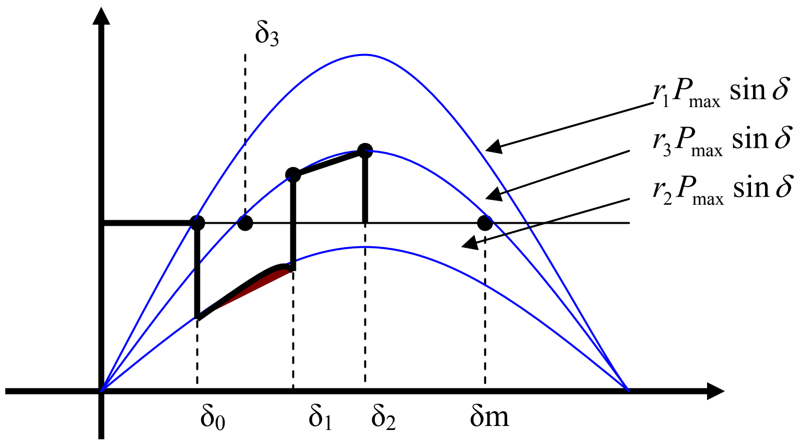
$$t=0 \to \Delta\delta_1 = \Delta\delta_0 + \frac{(5\times10^{-2})^2}{M}P_{a0}$$

$$\Delta\delta_0 = 0$$

$\Delta\delta_n$ بر روي منحني (۲) درجه يا راديان است كه بستگي به واحد MياM' خواهد داشت.

مثال – يك ژنراتور قدرت $P_m = P_e = 1pu$ را به شين بي نهايت مي فرستد قبل از وقوع اتصالي ژنراتور قدرت ماكزيمم 1.8pu را دارا بود و در زمان اتصالي اين قدرت به 0.4 كاهش 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 δc ب- اگر مقدار حركت زاويه اي ماشين $M' - 3\times10^{-4}\sec^2/\deg$ (پس $\Delta\delta$ درجه خواهد بود). فرض شود باانتخاب گام زماني $\Delta t = 0.05\sec$ تغييرات را بر حسب زمان بروش گام بگام پيدا كرده ورسم كنيد و زمان مي نيم قطع دژنكتورها را از روي آن بدست آوريد (t_c)





$$P_{\max_1} = r_1 P_{\max} = 1.8pu$$
$$P_{\max} = 1.8pu$$
$$P_{\max_2} = r_2 P_{\max} = 0.4 \rightarrow r_2 = \frac{0.4}{1.8} = 0.222$$
$$P_{\max} = r_3 P_{\max} = 1.3 \rightarrow r_3 = \frac{1.3}{1.8} = 0.722$$
$$\cos\delta_c = \frac{\frac{p_m}{p_{\max}}(\delta_0 - \delta_m) + (r_2\cos\delta_0 - r_3(\cos\delta_m)}{r_2 - r_3}$$

منحني ۱ $\quad 1 = 1.8\sin\ \delta_0 \rightarrow \delta_0 = 33.7^o\ \ or\ \ 0.589rad$

(۳) منحني $1 = 1.3\sin\delta_m \rightarrow \delta_m = 129.7^o\, or 2.226rad$ زاويه منفرجه بدست مي آيد

$$\cos\delta_c = ... \qquad \rightarrow \delta_c = 67.8^o\ \ or\ \ 55.3rad$$

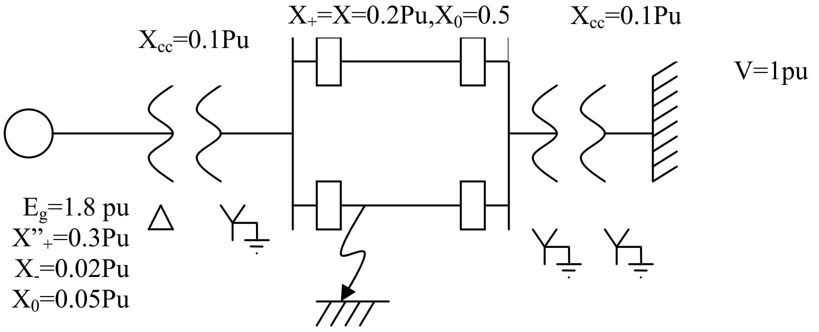
تغییـــرات δ_0 تـــا δ_c را بايـــستي رســـم كـــرد. در لحظـــه $t=0^-$، $p_{a(0)}=0$ در لحظـــه ,

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

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

$$n=1 \quad \Delta\delta_1=\Delta\delta_c+\frac{(\Delta t)^2}{M'} \qquad Pa(0)=0+\frac{25}{3}\left(\frac{1-04\sin\delta_c}{2}\right)\approx 3.23^\circ$$

مثال ـ نمايش تك خطي شبكه اي طبق شكل زير است



۱-مطلوب است حد پايداري استاتيكي شبكه فوق

۲-اگر با يك مانور يكي ازخطوط پارالل قطع شود تخصص كنيد شبكه پايدار خواهد بوديا نه (قدرت انتقالي قبل از مانور pu ۱ بوده است)

۳-اگر يك اتصال كوتاه تكفاز زمين در نقطه F بلافاصله بعد از دژنكتور مانند شكل رخ دهد تحقيق كنيد حتي اگر اتصال در سيستم دوام يابد شبكه پايدار است.

٤-اگر يك اتصال كوتاه سه فاز در F رخ دهد مطلوب است زاويه قطع بحراني كليدهاي K_2,K_1

۵-بـا فـرض اينكـه مقدار حركـت زاويـه اي ماشـين $M'=3\times10^{-4}\left[\frac{\sec}{\deg}\right]^2$ باشـد بـا انتخـاب گـام زمـاني $\Delta t=0.03^s$ مطلوب است رسم تغييرات δ بر حسب زمان پيدا كردن زمان بحراني قطع عيب كليدهاي K_1,K_2

۱ـ قبل از عيب $X_1=X'_+ + X_{cc}+\frac{Xd}{2}+X_{cc}+0=0.3+0.1+\frac{0.2}{2}+0.1=0.6pu$

$$\frac{EV}{X}\sin\delta=1pu=\frac{1.8\times1}{0.6}\times\sin\delta_0=1\to\delta_0=19.5^o$$

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

$$\frac{EV}{X}\sin\delta=1pu\to\frac{1.8\times1}{0.7}\sin\delta_1=1\to\delta_1=22.9$$

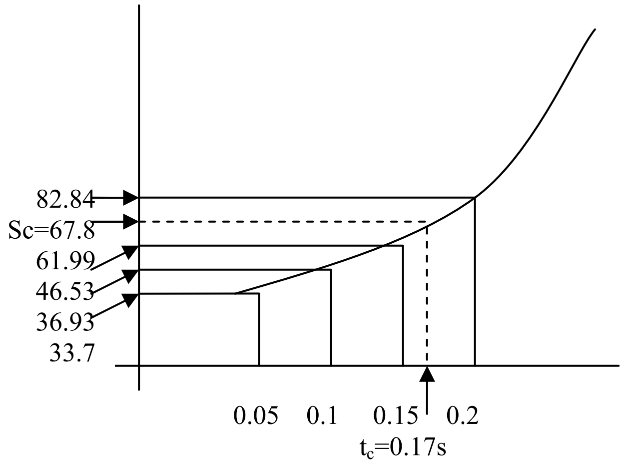
توان شتاب دهنده اين مقدار تقسيم بر 2 خواهد شد (مقدار ميانگين) فقط در لحظه صفر

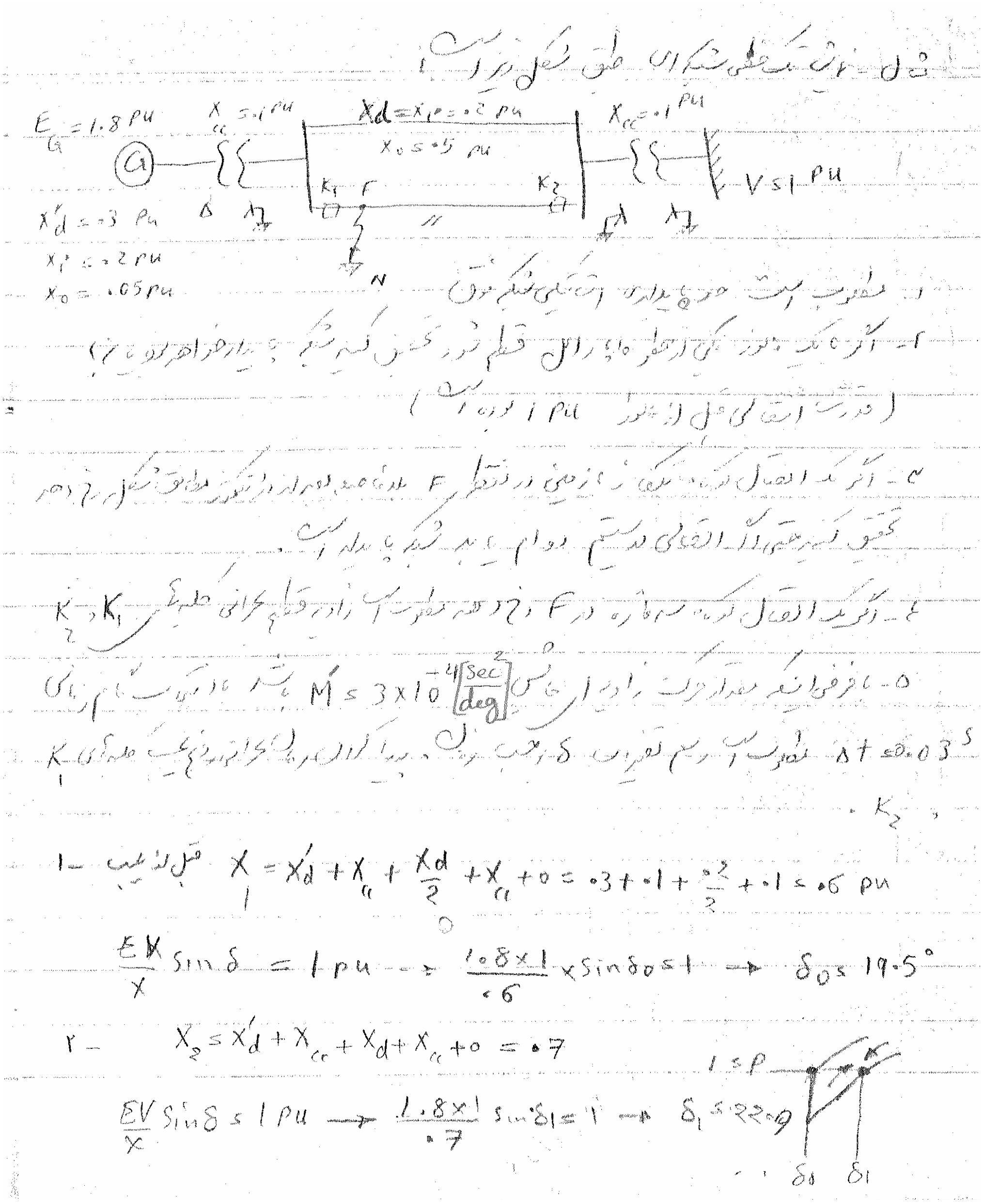
$$\begin{cases} \delta_1 = \delta_0 + \Delta\delta_1 = 33.7 + 3.23^o = 36.93^o \\ t = 0 + 0.05 = 0.05\sec \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta\delta_2 = \Delta\delta_1 + \frac{25}{3}P_a(1) = 3.23 + \frac{25}{3}(1 - 0.04\sin 36.13) = 9.6^o \\ \delta_2 = 36.93 + 9.6 = 46.53^o \\ t = 2 \times 0.05 = 0.1\sec \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta\delta_3 = 9.6 + \frac{25}{3}(1 - 4\sin 46.53) = 15.96° \\ \delta_3 = 46.53 + 15.46 = 61.99° \\ t = 3 \times 0.05 = 0.15\sec \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta\delta_4 = 15.46 + \frac{25}{3}(1 - 4\sin 61.99) = 20.89 \\ \delta_4 = 82.84 \\ t = 4 \times 0.05 = 0.20 \end{cases}$$





عوامل پايداري در شبكه قدرت

۱-كوچك بودن زمان بحراني رفع عيب.

اگر كليدهاي قطع در زمان كوتاه سيستم را قطع كنند بهتر است ولـي اين عمل از لحـاظ هزينـه گرانتـر است در واقع سرعت عمل دژنكتور بايد بالا باشد.

۲- راكتانسهاي شبكه $p = \frac{EV}{X}\sin\delta$.

اگر X كوچك شود قدرت حداكثر زيادمي شود. اگر در شبكه X پائين بيايد قدرت مستقيم بـالا مـي رود. پارالل كردن خطوط انتقال انرژي و استفاده از خازنهاي سري راكتانس بين E_2,E_1 را پائين مي آورد.

۳-نيروي محركه ژنراتور $p=\frac{EV}{X}\sin\delta$ افزايش E درزمان اتصال كوتاه.

تحريك ژنراتوررابطور مصنوعي و گذراافزايش مي دهيم لذا پيك منحني بالا مي رود كه به پايداري كمك مي كند.

٤-با تنظيم سرعت توربين.

در حالت اتصال كوتاه روتور ژنراتور سرعت گرفته واز حالت سنكون خارج مي شود. سرعت روتوررا با استفاده از شير بخار كم مي كنيم ولي بستن شير بخار ممكن است باعث از بين رفتن سنكرونيزاسيون و زياد توصيه نمي شود (ثايت زماني سيستم مكانيكي بيشتر از سيستم الكتريكي است).

مثال – يك موتور سنكرون ٤٠% قدرت ماكزيمم را از شبكه ∞ جذب مي كند بار موتور را بطور ناگهاني حداكثر به چند درصد قدرت ماكزيمم موتور مي توان رسانيد تا موتور سنكرونيزمي خودش را از دست ندهد؟

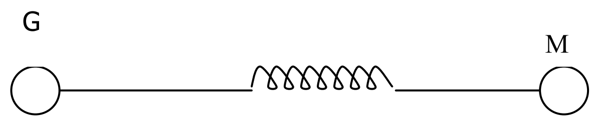
ملاحظات كلي

۱-افزايش تدريجي قدرت براي شبكه خطرناك نيست ولي اگر تغييرات ناگهاني باشد اگر بالاي سطح pm نتوان سطح معادل را پيداكرد ممكن است پايداري از دست برود. اگر بخواهيم قدرت انتقالي را افزايش دهيم $1\rightarrow 1.5pu$ بايستي تدريجي باشد.

۲-حد پايداري ديناميكي از حد پايداري استاتيكي كوچكتر است.

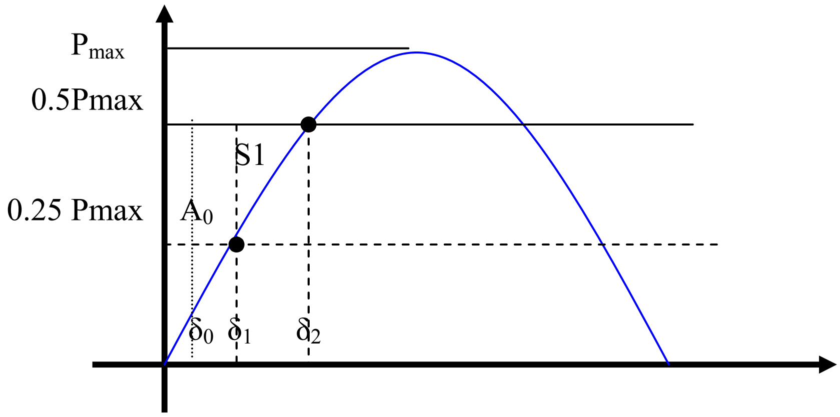
	$<90^o$	90^o
۳-زاويه بحراني رفع عيب		0

مثال – موتوري كه به يك شبكه بي نهايت وصل شده ۲۵ % قدرت ماكزيمم را جذب مي كند. بار موتور را ۲ برابر مي كنيم براي اينكه موتور به نقطه تعادل حد ماشين برسدحداكثر تغييرات زاويه δ چقدر است.



$$25P_{\max}=P_{\max}\sin\delta_0$$
$$\delta_0=14.48^o$$

Pe



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

$$\delta_1 = 30^o$$

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

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

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

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