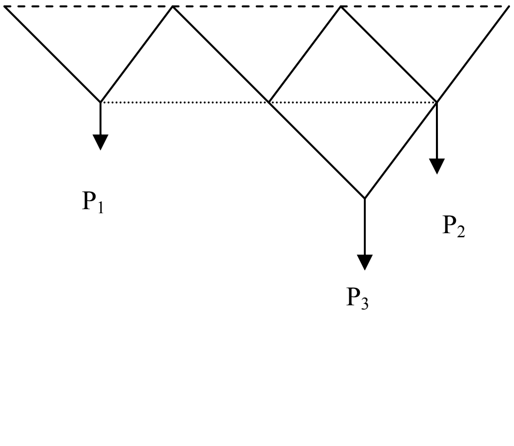
پایداری در سیستم های قدرت

Power Systems Stability

براي يك شبكه در حالت عادي مي توان ولتاژها و جريانها را حساب كرد. وقتي بار جديدي را از شبكه حذف و يا به آن اعمال كنيم ويا اتصال كوتاه در شبكه ايجاد شود و در اينحال تغييراتي در شبكه ايجاد خواهد شد كه اگر اين تغييرات بطور تدريجي و آهسته باشد ممكن است شبكه تحمل كرده و به شرايط ديگر ازپايداري برسد ولي اگر شبكه نتواند اين تغييرات را تحمل كند، اجباراً با آمدن بار جديد شبكه فرو ريخته و ناپايدار خواهد شد. ژنراتورهاي موجود در شبكه چون سنكرون بوده و براي حالت هاي ديناميكي حساس هستند اگر تغييرات ناگهاني پيش آيد و در حالي كه بارها ثابتند ژنراتوري از مدار خارج شده، موجب خواهد شد قدرت آن ژنراتور به روي ديگر ژنراتورها تحميل شده و زاويه بارها و فلوهاي ژنراتورهاي ديگر افزايش يابد. در اين حال قدرت توربينها بايد بيشتر شود. افزايش قدرت ژنراتور با افزايش زاويه بار انجام خواهد شد. در اين حال اگر زاويه بار به حد 60° (زاويه بار بحراني) برسد، با افزايش ازمقدار 60° به بعد و باتوجه به رابطه $P=\frac{EV}{X}\sin\delta$ اين كار باعث كاهش P خواهد بود و ژنراتور نخواهد توانست اين بار تحميل شده را تحمل كند. در مواقع پيك بار (شب) كنترل شبكه مهم است چرا كه اگر نتوان پايداري كل شبكه را ايجاد كرد، بايستي قسبتي از شبكه را از مدار خارج كرد.



پايداري سيستم دوشينه يا دوماشينه را بحث و بررسي خواهيم كرد. اگر از سقفي وزنه هايي را از بعضي نقاط يك شبكه توري آويزان كرده باشيم، اگر طنابي از نقطه اي قطع شود، وضع ايستايي شبكه فرق خواهد كرد و سيستم وضعيت ديگري براي تحمل وزنه ها براي خود ايجاد مي كند. اما اگر طناب اصلي از سيستم قطع شود، ممكن است شبكه تحمل نكرده و از هم بپاشد ويا ممكن است وزن وزنه ها را زياد كنيم كه در نهايت سيستم تا حدي مي تواند افزايش تدريجي را تحمل كند. ولي اگر اضافه كردن وزنه از يك حد افزايش يابد ممكن است بعضي از طنابها و يا حتي خود سيستم از هم بپاشد.

انواع پايداري

۱) استاتيكي (ماندگار)

در این نوع پایداری تغییرات بصورت تدریجی و کم دامنه می باشد. در بررسی پایداری ماندگار از مدل ماشین ساده (بصورت یک منبع ولتاژ) برای ژنراتور سنکرون استفاده می شود. در این حالت، حد پایداری ماندگار ماشین سنکرون بصورت زاویه بار بحرانی ماشین (δ_C) زاویه قبل از خارج شدن ماشین از حالت سنکرونیزاسیون تعریف می شود. پایداری استاتیکی به شرایط بهره برداری سیستم قدرت اعم از تولید، انتقال و مصرف بستگی دارد.

۲)- ديناميكي

مسائل مربوط به پایداری استاتیکی و دینامیکی تقریبا یکسان می باشند. در پایداری دینامیکی نیز تغییرات بصورت تدریجی و جزئی در شبکه اتفاق می افتد. تغییرات زمانی در پایداری دینامیکی از حدود چند ده ثانیه تا چند دقیقه می باشد. در پایداری دینامیکی اثرات سیستم تحریک و سیستم گاورنر نیز در مدل ماشین سنکرون بررسی می شوند. پایداری دینامیکی با استفاده از پایدارسازهای سیستم قدرت PSS بهبود می یابد.
وجود تغییرات تدریجی و کوچک باعث ایجاد نوسانات طبیعی در شبکه می شود. هرگاه دامنه نوسانات کم باشد درآنصورت نوسانات در زمان کوتاه مستهلک شده و پایداری دینامیکی واقع می شود. هرگاه دامنه نوسانات زیاد باشد درآنصورت نوسانات در زمان طولانی ادامه یافته و ناپایداری دینامیکی ایجاد می گردد.

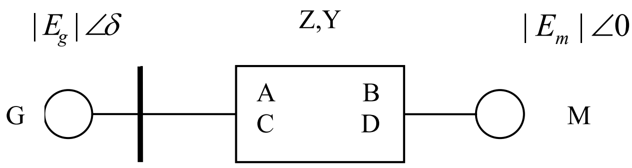
۳)- گذرا (Transient)

پایداری گذرا در اثر وقوع تغییرات و اختلال ناگهانی و شدید در سیستم شامل اتصال کوتاه، خروج بار، قطع خط، خروج ژنراتور و ... ایجاد می شود. تغییرات زمانی در پایداری گذرا در حدود چند صدم ثانیه تا چند ثانیه می باشد. در مساله پایداری گذرا، سرعت ماشین سنکرون در اثر تغییرات شدید قدرت الکتریکی و زاویه قدرت نقاط مختلف سیستم تغییر می یابد. در صورت عدم برطرف شدن عیب، ماشین های سنکرون در شبکه از سنکرونیزاسیون خارج می شود. در صورت برطرف شدن عیب شبکه به شرایط پایداری استاتیکی

قبل از وقوع غیب برگشته و در غیر اینصورت با قطع محل عیب از شبکه با حفظ یکپارچگی شبکه به شرایط پایداری استاتیکی بعدی خواهیم رفت.

پایداري ماندگار

در بررسي پايداري فرض مي شود ژنراتوري را با خط انتقال بلندي به يك بار وصل كرده ايم. ژنراتور با يك خط بلند به يك بار موتوري (سيستم يك ماشينه متصل به شبکه ∞) در نظر گرفته می شود.



$$\begin{bmatrix}\bar E_g\\ \bar I_g\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\bar A & \bar B\\ \bar C & \bar D\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\bar E_m\\ \bar I_m\end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases}\bar E_g = \bar E_m \cosh \bar\gamma\ell + \bar I_m \bar Z_C \sinh \bar\gamma\ell\\ \bar I_g = \dfrac{\bar E_m}{\bar{Zc}}\sinh \bar\gamma\ell + \bar I_m \sinh \bar\gamma\ell\end{cases}$$

ثابت انتشار $\bar\gamma = \alpha + j\beta,\ \bar Z = R + j\omega L,\ \bar Y = G + j\omega C,\ \bar Z_c = \sqrt{\dfrac{Z}{Y}},\ \bar\gamma = \sqrt{ZY}$

$$\begin{cases}\bar A = \cos h\bar\gamma\ell = \bar D \quad \bar A\bar D - \bar B\bar C = 1\\ \bar B = \bar Z_c \sin h\bar\gamma\ell \quad \bar C = \dfrac{1}{\bar Z_c}\sin h\bar\gamma\ell\end{cases}$$

$$\bar A = \bar D = 1 + \frac{\bar Z\bar Y}{2},\ \bar B = \bar Z(1 + \frac{\bar Z\bar Y}{6}),\ \bar C = \bar Y(1 + \frac{\bar Z\bar Y}{6})$$

$$\bar S_g = P_g + jQ_g = \bar E_g . I_g^* = \frac{|A||Eg|^2}{|B|}\angle b - a - \frac{|E_m||E_g|}{|B|}\angle b + \delta$$

$$\bar A = |A|\angle a \quad \bar B = |B|\angle b \quad \bar C = |C|\angle c \quad \bar D = |D|\angle d$$

$$\bar E_g = |E_g|\angle\delta \quad \bar E_m = |E_m|\angle 0 \qquad \bar A = \bar D \quad \bar A\bar D - \bar B\bar C = 1$$

اگر بتوانیم δ را تغییر دهیم:

$$Cos(b + \delta) = -1 \Rightarrow b + \delta = \pi \Rightarrow (P_g \to P_g|_{\max})$$

$b \approx \dfrac{\pi}{2}$ بنابراين وقتي b به حدود ۹۰° رسيد قدرت ماكزيمم از فرستنده گرفته مي شود در اين صورت داريم:

$$\bar B = jX = X\angle 90$$
$$|B| = X$$
$$b = 90$$

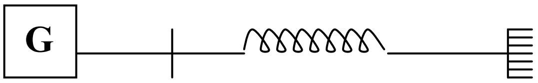
مقدار P_g همچنین وقتی به مقدار حداکثر خود خواهد رسید که داشته باشیم:

$a=0$

$|A|=|D|=1$

همچنين براي خطوط كوتاه $A=D=1, B=Z, C=0$ يعني از مقاومت خط صرف نظر مي شود.

براي يك ژنراتور كه به شين ∞ وصل شده است داريم:



$V=1\angle 0\text{pu}$

$f=\text{cte}$

$\overline{E}=jX_s\overline{I}+\overline{V}$

$$\begin{cases} D=A=1 \\ B=jXs \\ C=0 \end{cases}$$

$$P_{eg}=\frac{|E||V|}{X_s}\sin\delta$$

$$Q=\frac{|E|}{X_s}(|E|-|V|\cos\delta)$$

$$P_{ij}=\frac{|A|}{|B|}|V_i|^2\cos(b-a)-\frac{|V_i||V_j|}{|B|}\cos(b+\delta)$$

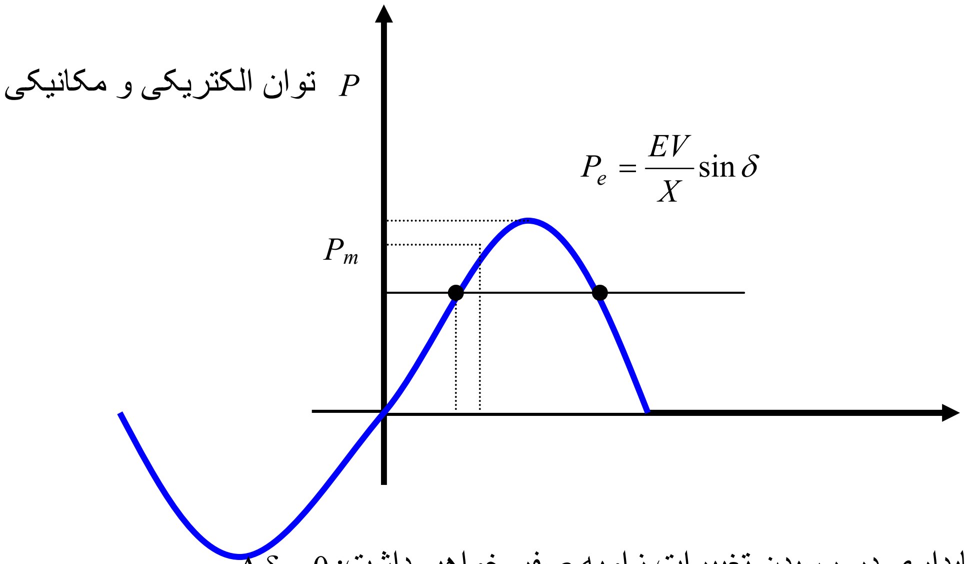
$$Q_{ij}=\frac{|A|}{|B|}|V_i|^2\sin(b-a)-\frac{|V_i||V_j|}{|B|}\sin(b+\delta)$$

پس تغييرات قدرت براي يك ژنراتور بصورت تغييرات سينوسي از δ است.

$P_m=P_e+P_{loss}$

$P_{loss}\rightarrow 0$

اگر از تلفات مكانيكي ژنراتور صرفنظر شود آنگاه خواهيم داشت $P_m=P_e$ (معادله نوسان در حالت پايدار)

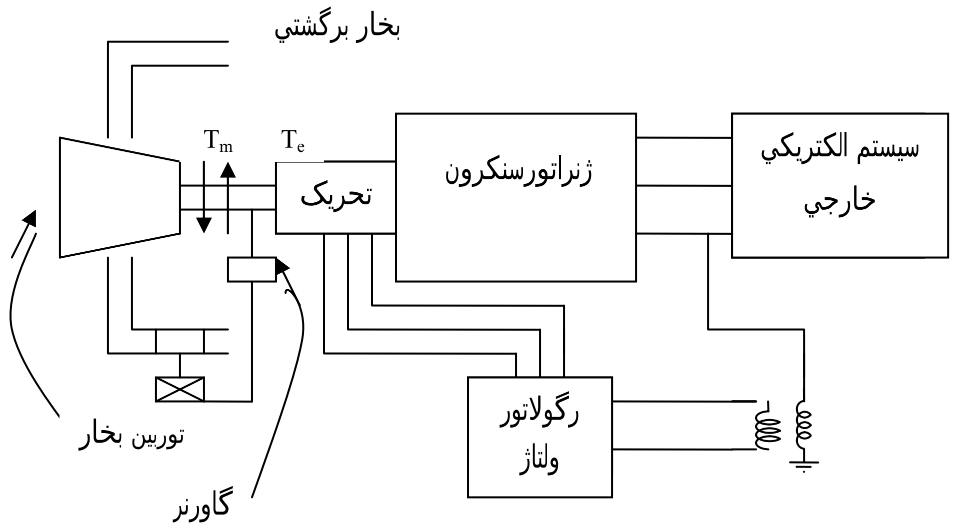


در حالت پايداري در رسيدن تغييرات زاويه صفر خواهيم داشت: $\Delta\delta=0$

P_m را تا جايي مي توان افزايش داد تا δ به ۹۰ درجه برسد و از اين محدوده به بعد ژنراتور از حالت پايداري خارج مي شود. اگر افزايش قدرت تدريجي باشد زاويه بار فرصت پيدا خواهد كرد تا خروجيش را با شرايط جديد تطبيق دهد ولي تا محدوده °۹۰ (مرحله استاتيكي) ميتوان آنرا زياد كرد. پايداري ديناميكي يكدفعه (لحظه اي) خواهد بود وافزايش قدرت از ٦٠% بار تا ۹۵% بار خواهدبود. هر چند شايد امكان نداشته باشد ولي اين افزايش به صورت تدريجي رخ مي دهد. پس براي پايداري در يك شبكه قدرت ايجاد شود افزايش تدريجي قدرت توصيه مي شوند نه افزايش دفعه اي.

كنترل قدرت اكتيو

گاورنر بصورت يك سيستم مكانيكي خود كار عمل مي كند و از روي شفت توربين كم سرعتي يا پرسرعتي آنرا با فرمان دادن به شير اصلي بخار تنظيم ميكند



با افت ولتاژ در يك فاز اثرآن در ثانويه ترانس مشاهده شده و با تنظيم كننده ولتاژ به تحريك كننده، فرمان افزايش ولتاژ داده يا با افزايش ولتاژ در خروجي فرمان كاهش تحريك را مي دهد (سيستم خودكار الكتريكي)

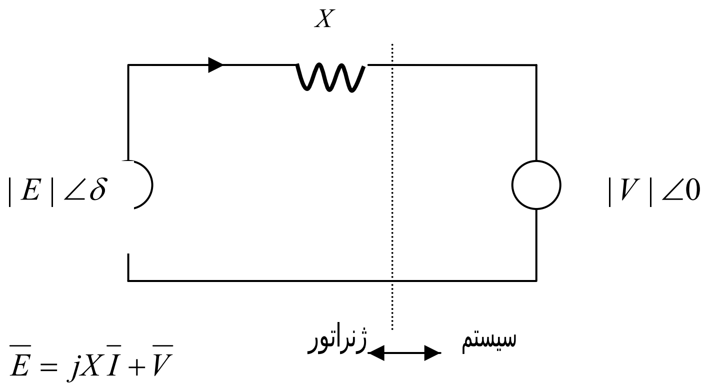
نتيجه:

۱-توان مكانيكي تبديلي به توان الكتريكي توسط شير بخار كنترل شود (تنظيم قدرت).

۲- ولتاژ ترمينال ماشين توسط تنظيم كننده يا رگولاتور ولتاژكنترل مي شود (تنظيم ولتاژ).

مدل تك ماشينه

اتصال ژنراتور به شين بي نهايت:



$$\bar{E} = jX\bar{I} + \bar{V}$$

$$\bar{S} = \bar{V}\bar{I}^* = \bar{V}\left(\frac{\bar{E} - \bar{V}}{jX}\right)^*$$

$$\bar{S} = \frac{|E||V|}{X}\angle 90 - \delta - j\frac{|V|^2}{X}$$

$$= \frac{|E||V|}{X}\sin\delta + j\left(\frac{|E||V|}{X}\cos\delta - \frac{|V|^2}{X}\right)$$

$$= P + jQ$$

توان اكتيو وراكتيوي كه يك ژنراتور به شبكه تحويل مي دهد به صورت زير است:

$$P = \frac{|E||V|}{X}\sin\delta \qquad Q = \frac{|E||V|}{X}\cos\delta - \frac{|V|^2}{X}$$

با باز كردن هر چه بيشتر شير اصلي توربين T_m و نهايتاً P_m افزايش مي يابد. لذا T_e و P_e نيز افزايش مي يابد از آنجائيكه $X, |V|, |E|$ ثابت هستند δ افزايش خواهد يافت.

$$P_m \rightarrow \langle P'_m \;\Rightarrow\; \delta_0 \rightarrow \langle \delta'$$

پس با افزودن توان از P_m به P'_m زاويه δ نيز از δ_0 به δ' افزايش خواهد يافت. براي P بايستي حدي قايل شد و اين حد (P_{max}) همان حد پايداي استاتيكي ناميده مي شود كه مقدار آن برابراست با:

$$P_{max} = \frac{EV}{X} \qquad \sin\delta = 1 \qquad \delta = 90^o$$

زاويه بحراني $\delta = \delta_c$

اگر به فرض توان مكانيكي P_m از حد فوق فراتر رود ژنراتور از حالت سنكرونيزاسيون خارج مي شود. براي جلوگيري از اين امر در شبكه هاي قدرت ژنراتورها تحت زاويه كوچكی حدوداً °۱۰ الی °۲۰ كار مي كنند. از نظر پايداري زاويه بار ژنراتور هر چقدر كمتر باشد بهتر است. اگر دومين سيستم كنترل را در نظر بگيريم (تنظيم ولتاژ) با افزايش توان راكتيو تقاضا Q_D ، چون δ, X, V ثابت فرض مي شوند با افزايش تحريك ژنراتور E زياد شده نتيجتاً Q زياد مي شود (با افزايش E، P نيز افزايش مي يابد اما چون ثابت زمان

مكانيكي را بيشتر از الكتريكي فرض كرده ايم شير بخار و گاورنرنمي تواند به سرعت عمل كند) پس Q زياد شده و قدرت راكتيو تحويلي به شبكه افزايش مي يابد.

مثال – ژنراتور مربوط به سيستم فوق تحت شرايط نامي، ضريب قدرت ۰/۸ پس فاز كار مـي كننـد X=0.7Pu بر مبناي ولتاژو قدرت نامي ژنراتور($\cos\varphi = 0.8\ \text{lag}$)

الف- محاسبه δ, E, Q, P

ب – شيربخار را باز كنيم تا P بيشتر از ۲۰% زياد شود فرض الف را تكرار كنيد.

ج- سيستم را به فرض الف بازگردانده و حال تحريك كننده را طوري تنظيم مي كنيم كه E به ميزان ۲۰% زياد شود. مجدداً فرض الف را تكرار كنيد.

$$\bar{V} = 1\angle 0\ pu$$

$$\cos\varphi = 0.8 \quad \varphi = \arccos 0.8 = 36.9°$$

$$\bar{I} = 1pu\angle -36.9^o = 0.8 - j0.6$$

$$\bar{E}_0 = jX\bar{I}_0 + \bar{V} = j0.7(0.8 - j0.6) + 1 = 1.42 + j0.56$$

$$= 1.53\angle 21.5^o = \delta_0$$

$$= |E|\angle\delta_0$$

$$P_0 = \frac{E_0 V}{X}\sin\delta_0 = \frac{1.53\times 1}{0.7}\sin 21.5^0 = 0.8$$

$$Q_0 = \frac{E_0 V}{X}\cos\delta_0 - \frac{V^2}{X} = \frac{1.53\times 1}{0.7}\cos 21.5° - \frac{1^2}{0.7} = 0.6$$

ب- افزايش قدرت اكتيو نتيجه خواهد داد:

$$P_1 = 1.2P_0 = 1.2(0.8pu) = 0.96pu$$

$$E_1 = E = 1.53pu$$

$$\sin\delta_1 = \frac{P_1 X}{E_1 V} = \frac{0.96\times 0.7}{1.53\times 1} \rightarrow \delta_1 = 26.1°$$

افزايش δ نتيجه شده است. همچنين كاهش قدرت راكتيو نتيجه شده است:

$$Q_1 = \frac{1.53\times 1}{0.7}\cos 26.1° - \frac{1^2}{0.7} = 0.535pu$$

بنابراين با E ثابت، افزايش P به ميزان ۲۰% كاهش ۱۱% در Q را بما خواهد داد.

ج) با فرض اينكه تغييرات E بلافاصله روي P اثر نمي گذارد. باثابت نگه داشتن P بر روي تحريك عمل كرده و ۲۰ درصد نيروي محركه را افزايش مي دهيم در نتيجه قدرت راكتيو را نيز افزايش داده ايم.

$$P_2 = 0.8 \quad \Delta P = 0$$

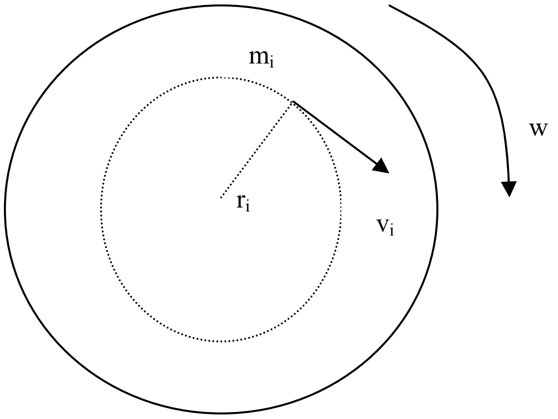
$$E_2 = 1.2E_0 = 1.84$$

$$\delta_2 = \arcsin\frac{0.8\times 0.7}{1.84\times 1} = 17.8°$$

$$Q_2 = \frac{1.84\times 1}{0.7}\cos 17.8 - \frac{1^2}{0.7} = 1.07pu$$

افزايش بيش از ٤٤ %

موقعي كه ناپايداري در شبكه روي مي دهد از حالت ديناميكي مي گذريم. حال روتوري كه با سرعت ω مي چرخد با تغييراتي در شبكه، تغييرات در سرعت را خواهد داشت. بايد ديد اين تغييرات چگونه است. جرم كوچك mi در داخل سيلندر نيز با سرعت ω مي چرخد.



$$\omega = \frac{d\theta}{d_t}$$

$$v_i = r_i\omega = r_i\frac{d\theta}{dt}$$

$$\gamma_i = \frac{dv_i}{dt} = r_i\frac{d\omega}{dt} = ri\frac{d^2\theta}{dt^2}$$

$F_i = m_i\gamma_i = m_i r_i\dfrac{d^2\theta}{dt^2}$ نيروي جزيي كه روي جرم اعمال مي شود.

$\Gamma_i = F_i r_i = m_i r_i^2\dfrac{d\theta^2}{dt^2}$ كوپلي كه اين جرم جزيي بوجود مي آورد

تمامي جرمهائي كه سيلندر را پر كرده و كوپل هايي كه تشكيل مي دهند برابر است با (n جرم جزئي):

$$\Gamma_T = \Sigma T_i = \sum_{i=1}^{n} m_i r_i\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d^2\theta}{dt^2}\sum_{i=1}^{n} m_i' r_i^2$$

اگرw=cte

$$\Gamma_T = J.\frac{d^2\theta}{dt^2}$$

كار جزيي كه جرم جزيي انجام مي دهيد.

$$dw_i = F_i(r_i d\theta)$$

$$p_i = \frac{dwi}{dt} = \frac{Firid\theta}{dt} = F_i r_i.\omega$$

$$P_T = \sum P_i = \omega\sum F_i.r_i = \omega.\Gamma_T$$

انرژي جنشي روتور برحسب ممان اينرسي و سرعت زاويه ای

$$[MJ]E_k = \frac{1}{2}J\omega_m^2 = \frac{1}{2}M\omega_m = \frac{1}{2}M\omega_e$$

H ثابت اينرسي ماشين سنكرون است كه برابر است با نسبت انرژي جنبشي ذخيره شده در سرعت نامي به قدرت نامي ماشين. در مطالعه پايداري سيستم ها معمولاً از ثابت اينرسي ماشين ها استفاده مي شود. در شرايط نامي $W_m=W_s$.

$$H_n = \frac{E_{k,n}}{S_n}[\frac{MJ}{MVA}][\frac{MW\sec}{MVA}]$$

اگر قدرت مبناي سيستم S_b با قدرت نامي ماشين متفاوت باشد S_bH جايگزين S_nH_n مي‌شود

$$E_k = S_nH_n = S_bH$$

در اينجا ω_s و مقادير زاويه اي بصورت مكانيكي هستند

$$M = \frac{2S_bH}{\omega_s}$$

$$M = \frac{S_bH}{\pi f}\left[\frac{Mj\sec}{rad}\right] = \frac{S_bH}{180f_s}\left[\frac{MJ\sec}{dag}\right]$$

با تقسيم بر S_b بصورت پريونيت تبديل مي شود

$$P_m - P_e = M\alpha = \frac{S_bH}{\pi f_s}\alpha \quad \frac{-\deg}{s^2}$$

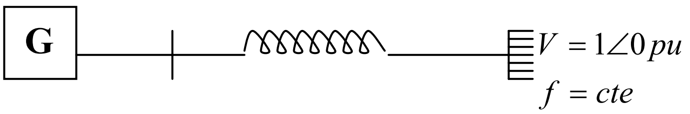
$$M' = \frac{M}{S_b} = \frac{H}{\pi f_s}\left[\frac{\sec^2}{rad}\right]$$

$$P_m - P_e = M'.\alpha = \frac{H}{\pi f_s}\alpha = \frac{H}{180fs}\left[\frac{\sec^2}{\deg}\right]$$

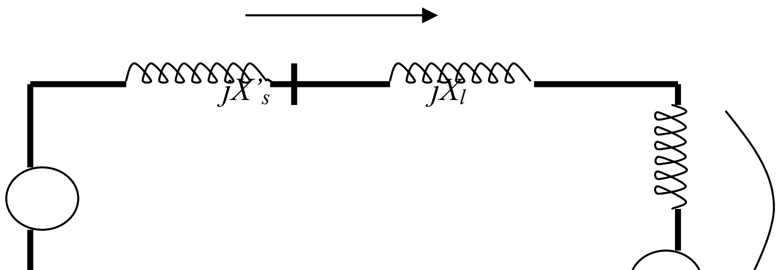
مزيت استفاده از H بجاي E_k آن است كه H مستقل از اندازه ماشين بوده و مقدار معمول آن در ماشين ها بين ۲ تا ۸ است.

مدل تك ماشينه

فرض مي كنيم يك ژنراتور به شين بي نهايت (با ولتاژ ۱ پريونيت و فاز صفر و راكتانس X_l) وصل باشد.



در حالت اتصال كوتاه و اختلال داريم:



jXs_m

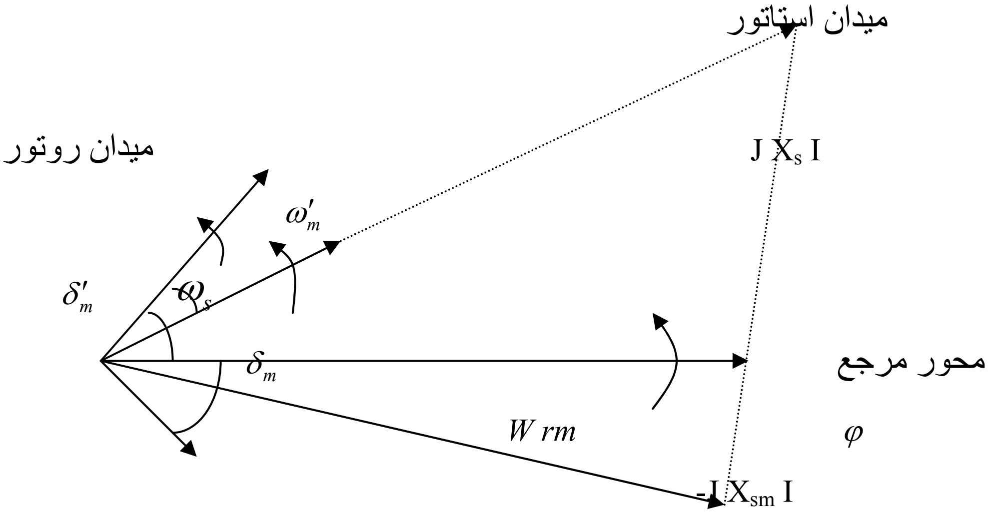
$E_1 = |E_1| \angle \delta$

$E_2 = |V| \angle 0$

قدرت اكتيو تحويلي به سيستم خارجي به صورت زير است:

$$P = \frac{E_g V}{x'_s + x_l = x}$$

با توجه به اينكه ژنراتور سنكرون است، ميدان روتور با اندازه δ'_m از ميدان استاتور جلوتر است در شرايط عادي كار $\omega_m = \omega_s = \omega_{rm}$



I

E_m

فرض كنيد كوپل مكانيكي شفت موتور بيشتر بشود واتصال كوتاهي در سيستم پيش آيد در اين صورت حالت استاتيكي بهم خورده و حالت ديناميكي پيش خواهد آمد. دراينصورت δ يا زاويه بار تغيير خواهد كرد. با اتصال كوتاه در سيستم خارجي يك جريان سلفي خواهيم داشت كه ۹۰ درجه پس فاز است (چون خط انتقال سلفي(X) است) و قدرت راكتيو به زمين را خواهيم داشت؛ لذا روتور سرعتش افزاش خواهد يافت كه تغيير δ_m باعث تغيير ω_s خواهد شد. دو حالت كلي ديناميكي داريم كه به صورت زير است:

مكانيکی $\omega = P\omega_m$ الکتريکی

$$\omega_m = \omega_s + \frac{d\delta'_m}{dt}$$

$$\omega_s = \omega_{rm} + \frac{d}{dt}(\delta_m - \delta'_m) \quad \omega_{rm} = \omega_{reference\,\mathrm{machine}}$$

$$\omega_m = \omega_{rm} + \frac{d\delta_m}{dt}$$

$$\omega = \omega_r + d\delta / dt$$

حال اگر اتصال كوتاه ۳ فاز پيش آيد تمام قدرت به قدرت راكتيو تبديل مي شود ولي اگر تك فاز باشد علاوه بر قدرت راكتيو به زمين، قدرت اكتيو هم به شبكه داده مي شود.

P_m-P_e=P_a

توان شتاب دهنده برابر است با توان مكانيكي روي شفت موتور منهای توان الکتریکی داده شده به شبكه در طول اختلال

با توجه به اينكه موتور يك اينرسي دارد و نمي تواند زاويه بار خود را دفعتاً تغيير دهد بايد بتدريج اينكارصورت گيرد و اين عمل بوسيله توان Pa صورت مي گيرد.

$$P_a = \omega_m T_a = \omega_m J\alpha$$

$$\text{Accelerating Power} = P_a[\mathrm{MW}] \text{ or } [\mathrm{MJsec/rad_{elect}}]$$

$$\alpha\left[\mathrm{rad_{elect}} / \sec^2\right]$$

J [MJsec2/rad2 elec or mech] or [Kgm2] ممان اينرسي ماشين

=M [MJsec/rad elec or mech] $w_m J$ ممنتم زاويه اي ماشين (اندازه حركت زاويه اي ماشين)

$$P_a = P_m - P_e = \omega_m J \frac{d\omega}{dt} + \text{اصطکاک}$$

$$P_a = \omega_m T_m - \omega_m T_e = \omega_m \begin{cases}\mathrm{mech}\\ \mathrm{elect}\end{cases} J \begin{cases}\mathrm{mech}\\ \mathrm{elect}\end{cases} \frac{d\omega}{dt} \begin{cases}\mathrm{elect}\\ \mathrm{elect}\end{cases} + \text{اصطکاک}$$

$$P_a = P_m - P_e = \omega_m J \frac{d}{dt}(\omega_r + \frac{d\delta}{dt}) \quad \omega_r = \omega_{reference} \quad \omega_{re} = \omega_{reference\,electrical} = \omega_s$$

$$P_a = P_m - P_e = \omega_\mathrm{m} J (d\frac{\omega_r}{dt} + \frac{d^2\delta}{dt^2})$$

و با فرض صفر بودن اصطكاك و ثابت بودن ω_r داريم:

معادله نوسان ماشين سنكرون

$$P_a = P_m - P_e = M(\frac{d^2\delta}{dt^2}) = M(\frac{d\omega}{dt}) = M\alpha$$

$$P_a = P_m - P_e = M\alpha$$

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

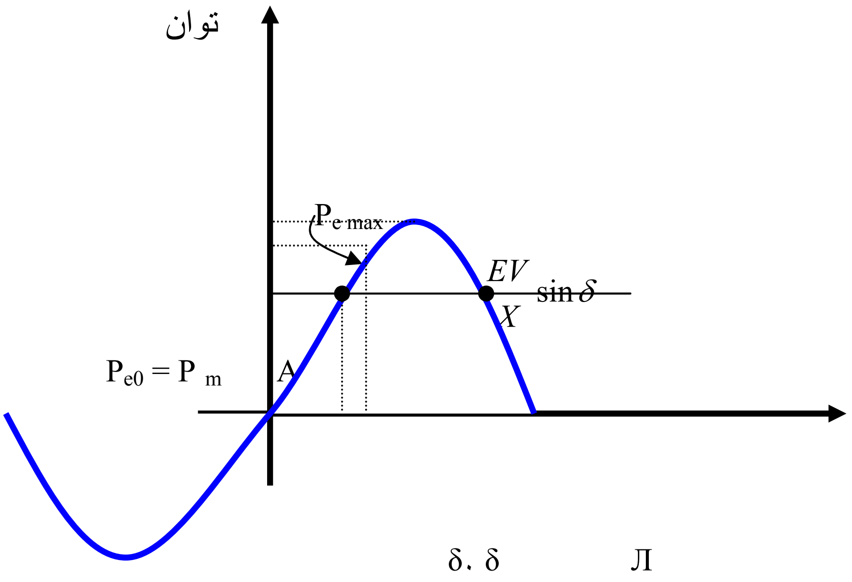
$$P_a = P_m[\text{pu}] - \frac{EV}{X}\sin\delta_{elect} = M\frac{d^2\delta}{d^2t} \qquad \Rightarrow \qquad \delta(t)$$

باحل معادله ديفرانسيل فوق مي توان δ را بر حسب زمان رسم نمود و پس از اين مورد كار ساده است. چون مي خواستيم ببينيم δ_m تغيراتش با زمان چگونه است و آيا حالت ديناميكي يا گذرا است و پاسخ به چه صورتي است و در حالت كلي مسئله پايداري به اين صورت حل مي شود.

فرض مي كنيم كه ژنراتوري طبق رابطه زير به شبكه اي قدرتي را تحويل مي دهد.

$$P_m = P_e = \frac{EV}{x}\sin\delta$$

اين رابطه فقط در حالت استاتيكي صدق مي كند. چون ω ثابت است پس $o = \frac{d\omega}{dt}$



مثال – يك توربور ژنراتور چهار قطبي، با فركانس ۵۰ هرتز،توان نامي MVA ۲۰ و ولتاژ نامي kv ۱۱ داراي ثابت اينرسي ماشين برابر Mw.S/MVA ۹=H است. هر گاه قدرت ورودي مكانيكي با در نظر گرفتن تلفات برابر hp ۲۶۸۰۰ و قدرت الكتريكي MV ۱۶ باشد مقدار شتاب روتور را بدست آوريد.

$$P_M = 26800 \times 746 \times 10^{-6} = 19.99MW$$

$$Pe = 16MW$$

$$Pa = Pm - Pe = 19.99 - 16 = 3.99MW$$

$$S = 20MVA, H = 9S$$

$$M = \frac{SH}{\pi f} = \frac{20M \times 9}{\pi .50} = 1.146Mws^2 / rod(elect)$$

$$Pa = M\frac{d^2\delta}{dt^2} \Rightarrow 1.146\frac{d^2\delta}{dt^2} = 3.99$$

$$\alpha = \frac{d^2\delta}{dt^2} = 3.48 \quad rad(elect)/s^2 = 199.5\deg(elect)/s^2$$

افزایش بار الکتریکی $p_{e_0} \to p_{e_1} \underset{\text{استاتیکي}}{\overset{\text{برقراري}}{}} \underset{\text{پایداري}}{\overset{\text{پس از}}{\Rightarrow}} P_{mo} \to P_{m1}, \delta_0 \to \delta_1$

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 یك نقطه *stable* (پایدار) است خواهیم گفت پایداري استاتیکي وجود دارد ولي نقطه B حتي براي تغییرات جزیي، یك نقطه غیر استاتیکي است.

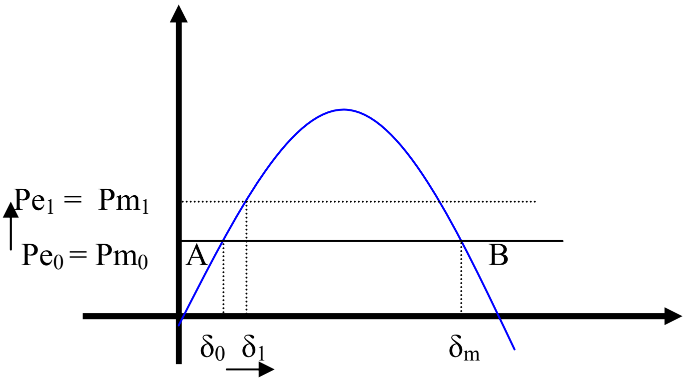
$p_{m_0} \to p_{m1} \to p_{m_0}$

زیرا :

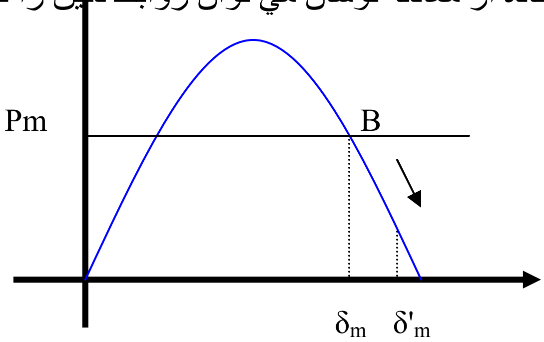
۱- بطور لحظه اي از ژنراتور بار کشیده و سپس قطع مي کنیم. فرض مي کنیم که چنین ژنراتوري به شین بي نهایت وصل بوده و تغییرات جزئي قدرت در شبکه بي نهایت پیش آید. مثلاً توان بیشتري لازم باشد. در این صورت فرض کنیم توان بعلت اتصال بارهاي اضافي یك مقدار جزیي افزایش یابد (البته با فرض ثابت بودن قدرت مکانیکي) در 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 كاهش يافته ولي Pm ثابت است پس δ افزايش مي يابد(افزايش سرعت روتور و افزايش ناپايداري). بصورت كلي تربا استفاده از معادله نوسان مي توان روابط دقيق را نوشت.



$\delta \to \delta'_m \to p_m > p_e \to p_a \rangle 0$ افزایش سرعت روتور و افزایش ناپایداری

حالت اولیه $A_0 = Peo = Pmo$

$p_{m_0} \to P_{m_1} \Rightarrow P_{m_1} > P_{e_0} \Rightarrow pa = p_{m_{10}} - p_{e_0} > 0 \Rightarrow \delta_0$ افزایش می یابد

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

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.

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

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

$\delta 2 \to \delta, Pe2 \to Pe \Rightarrow \delta 2 \to \delta 1.$ آزادشدن انرژي جنبشي ناشي از شتاب منفي $.A1 = Pe$ - تمامي انرژي جنبشي ذخيره شده آزاد مي شود

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.

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

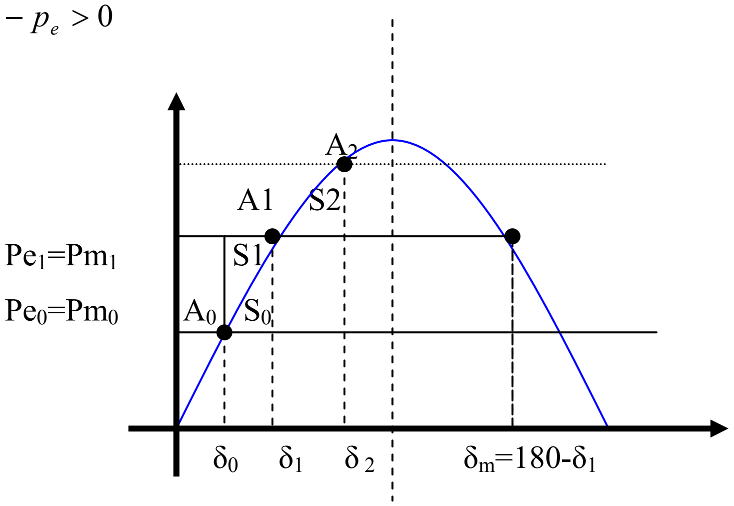
$Pa = Pm1 - Pe0$

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 t1 زاويه بار به δ_1 رسيده و در اين حالت سطح مستطيلي S، مجموع سطح مثلث پائيني(قدرت الكتريكي داده شده S0) و مثلث بالايي(هاشور خورده S1) 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.

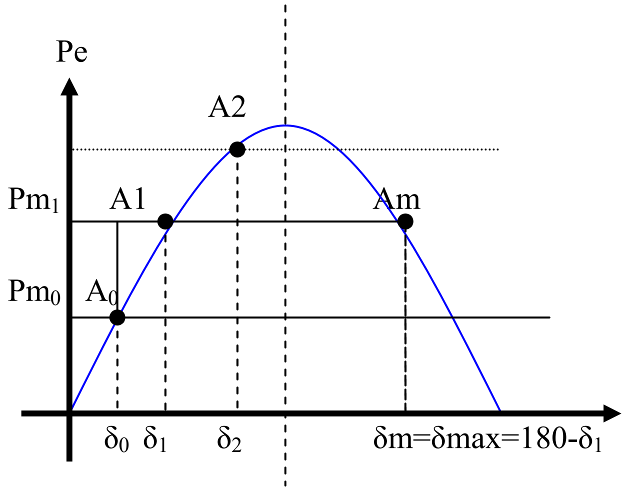
$$\begin{cases} p_{m_1} = p_e \\ p_a = 0 \end{cases}$$

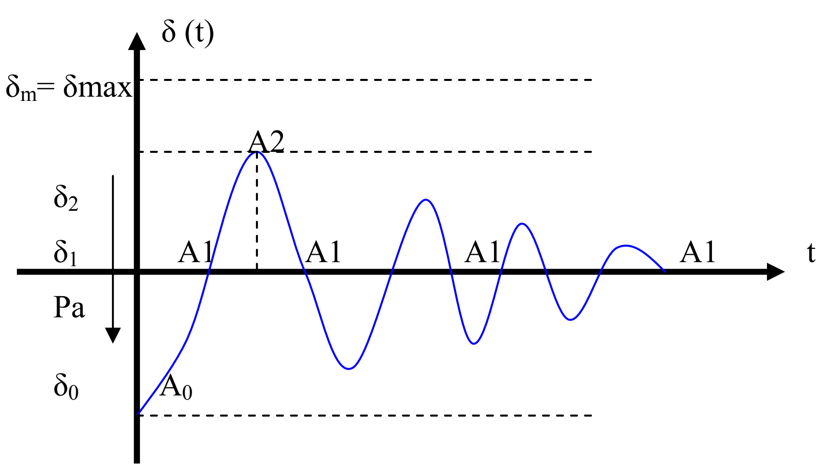
$$S_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (p_{m_1} - p_e) ds \qquad S_2 = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (p_e - p_{m_1}) d\delta$$

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

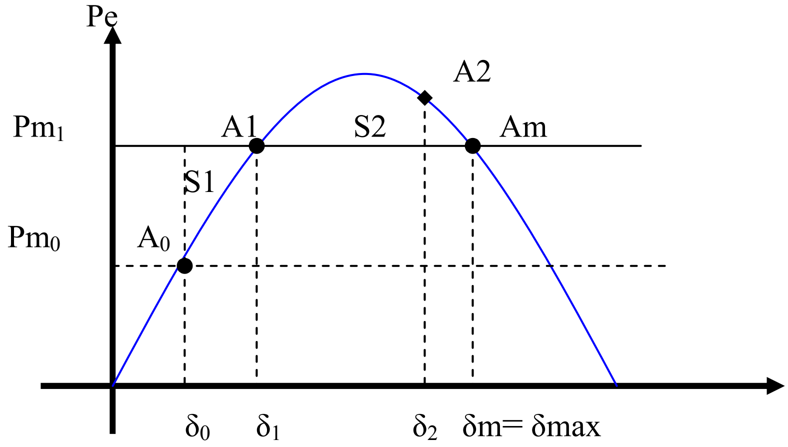
در حالت كلي اصطكاك به پايداري شبكه هاي قدرت كمك مي كند. $\delta m=\delta max$ حداكثر زاويه بار در شرايط پایداری گذرا می باشد. $\delta m=90$ حداكثر زاويه بار در شرايطپایداری استاتیکی (ماندگار) است.

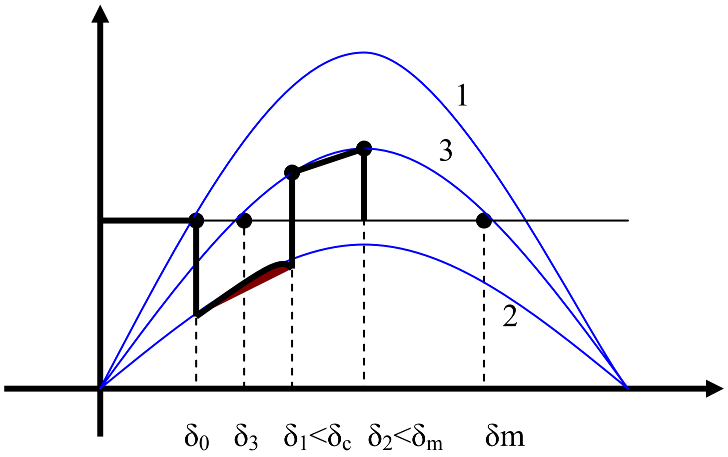


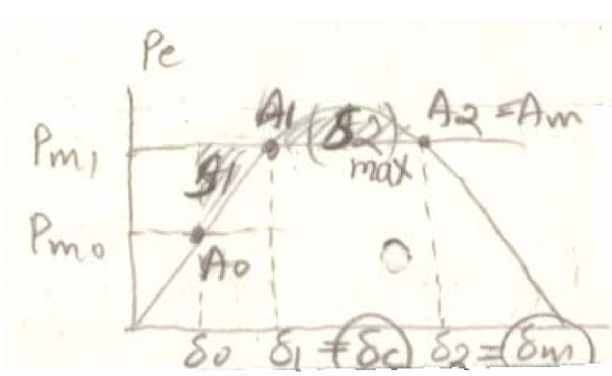


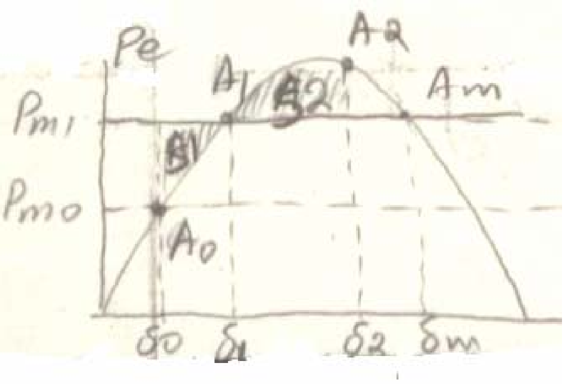
اين منحني مي تواند منحني توان الكتريكي و توان شتاب دهنده هم (بصورت معكوس) باشد. البته تغييرات ناگهاني قدرت نمي تواند درشبكه رخ دهد ولي عيب واتصالي زياد پيش مي آيد. در شبكه اتصالي ايجاد شده است. شرط كامل وجود پایداری گذرا بصورت معيار سطوح برابر:

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





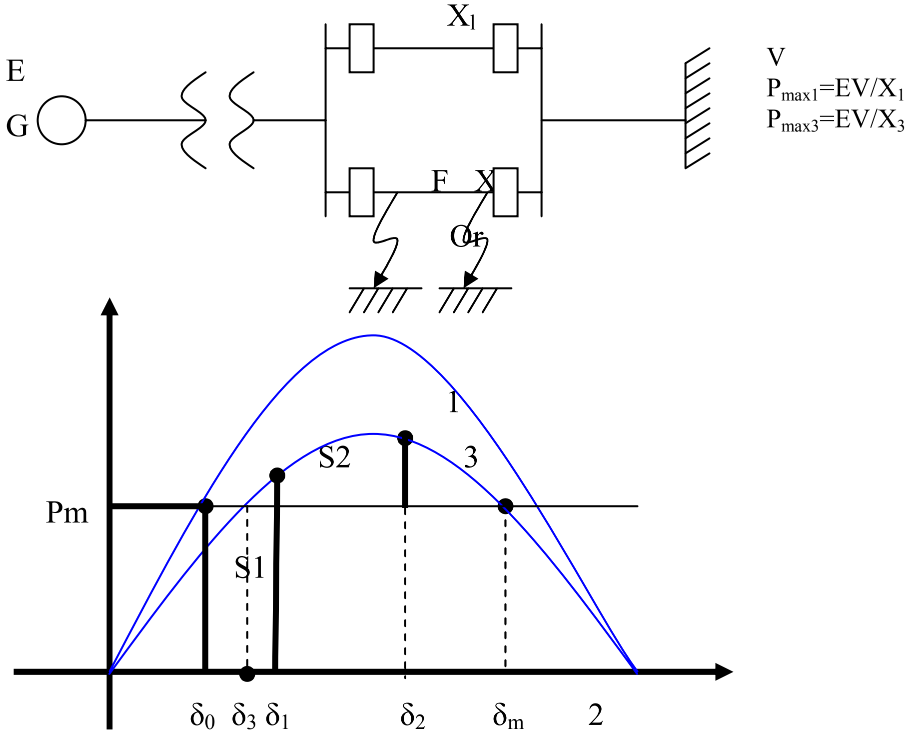




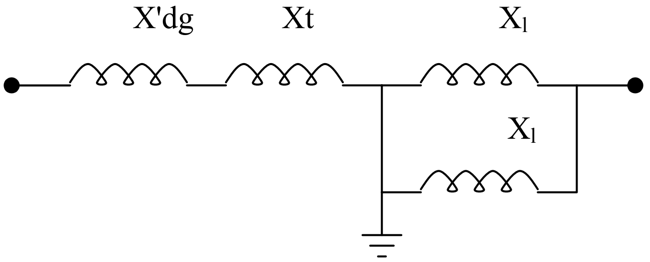
بررسي تغيرات زاويه بار ماشين

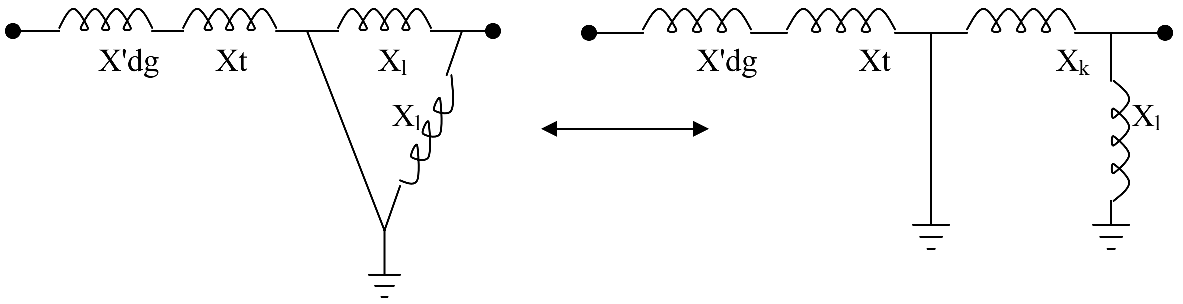
الف- اتصال كوتاه در يک طرف خط انتقال

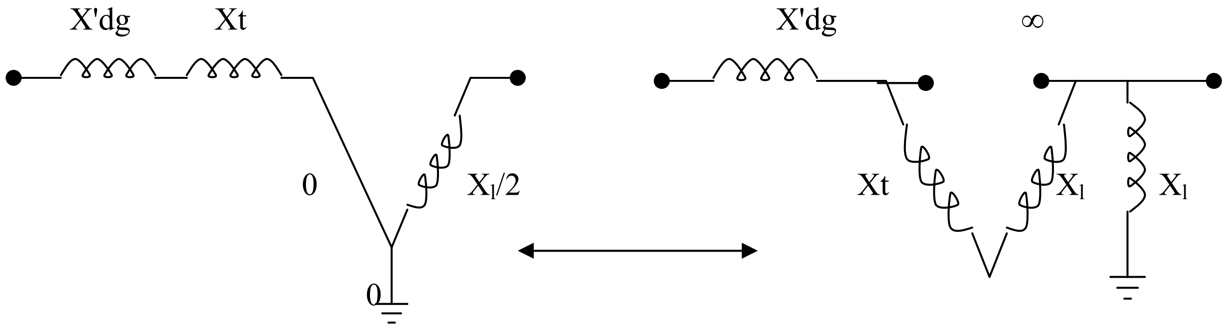
اتصال كوتاهي در اول يا آخر يكي از خطوط بوقع مي پيوندد. مسلماً دژنكتور بلافاصله قطع نمي كند.

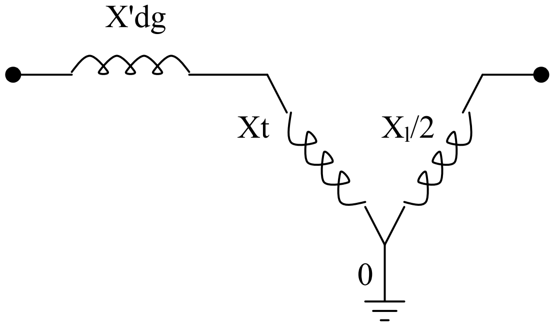


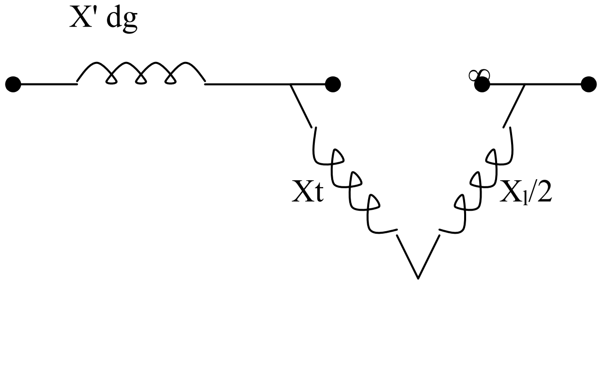
با توجه به اينكه اتصال كوتاه ۳ فاز است، در زمان عيب از $t_0 \to t_1$ قدرت انتقالي به شبكه صفر است كه در منحني فوق نشان داده شده است حال مي خواهيم X بين ژنراتور و شبكه را حساب كنيم.


X'dg
Xt
X_l
X_l

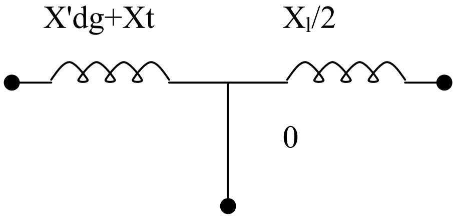

X'dg
Xt
X_l
X_l
X'dg
Xt
X_k
X_l

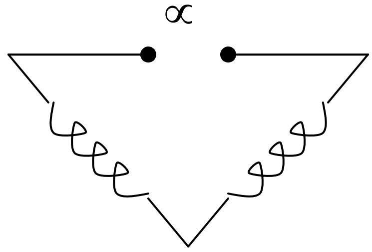

X'dg
Xt
0
$X_l/2$
0
X'dg
∞
Xt
X_l
X_l


X'dg
Xt
$X_l/2$
0


X' dg
∞
Xt
$X_l/2$

يا به طور ساده تر:





در زمان عیب $(x_2 = \infty \to P_{e_2} = 0\ (p_{\max 2} = 0)$ دژنكتور 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.

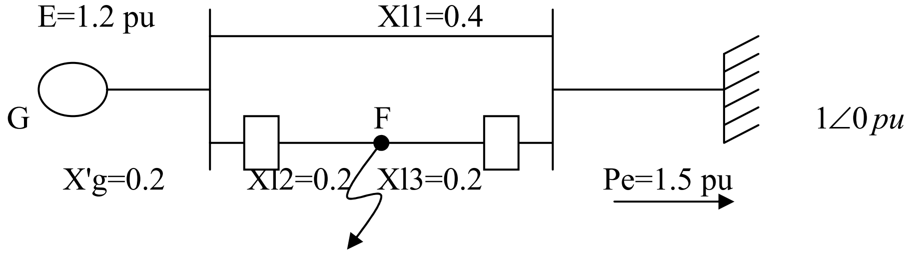
$$S_1 \le (S_2)_{\max}$$

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 $\delta_0 \to \delta_1$ 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 .

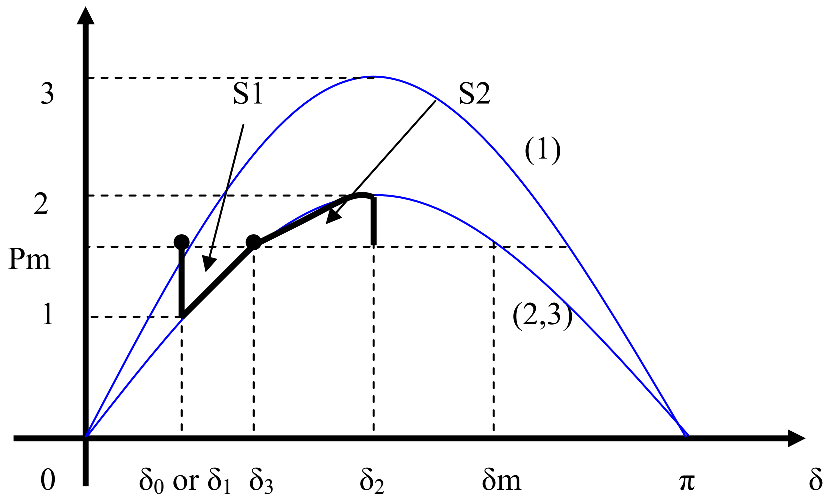


حل

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 باید دید بالاي p_m مـي تـوان سـطحي بدسـت آورد کـه معـادل سـطح پـائيني باشـد. δ بـر حـسب 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.

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} . \frac{d\delta}{dt} = (p_m - p_e) . \frac{d\delta}{dt}$$
$$\frac{M}{2} \frac{d}{dt} [(\frac{d\delta}{dt})^2] = (pm - pe) \frac{d\delta}{dt}$$
$$\frac{d}{dt} [(\frac{d\delta}{dt})^2] = 2(\frac{d^2\delta}{dt^2})(\frac{d\delta}{dt})^{2-1} = 2. \frac{d^2\delta}{dt^2} . \frac{d\delta}{dt}$$
$$\frac{M}{2} d[(\frac{d\delta}{dt})^2] = (p_m - p_e) d\delta$$

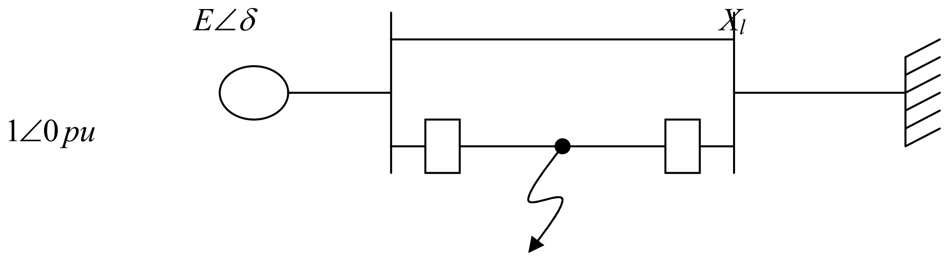
سطح زير منحني

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

و از همين رابطـه نتيجـه مـي گيـريم کـه سـطح مـشخص شـونده در منحنيهـاي قبل معـادل انـرژي جنبـشي است.

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

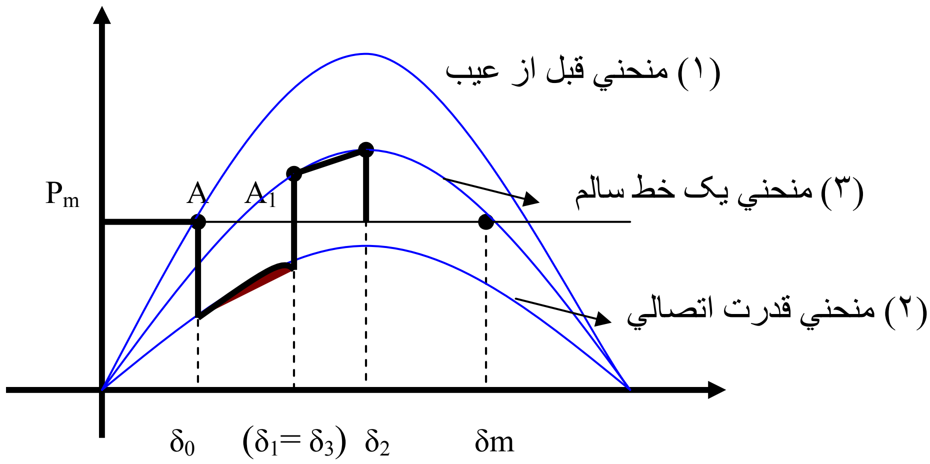
اتصال کوتاه در وسط یکي از خطوط صورت مي گیرد. نقطه عیب هر نقطه دیگر می تواند باشد.

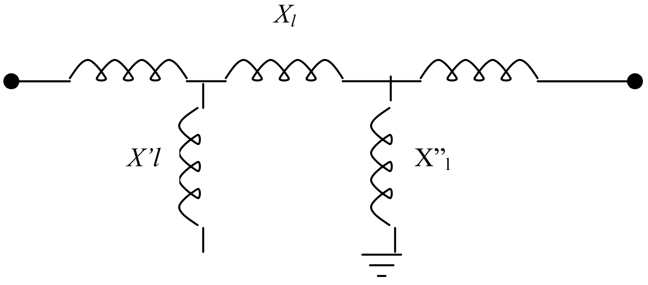


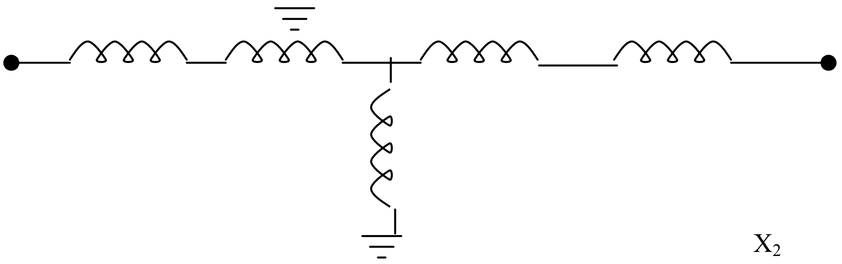
X'_l X''_l

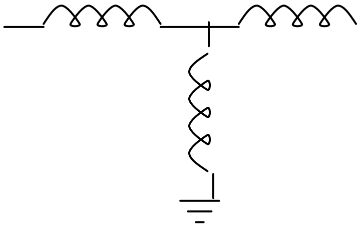
Z_f

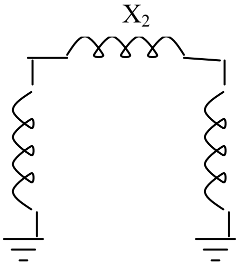
$X_l = X'_l + X''_l$



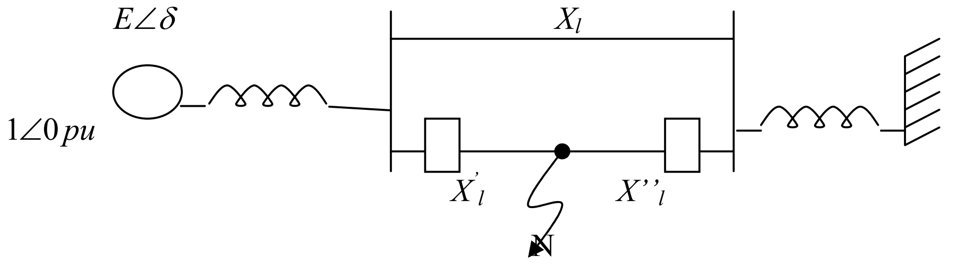








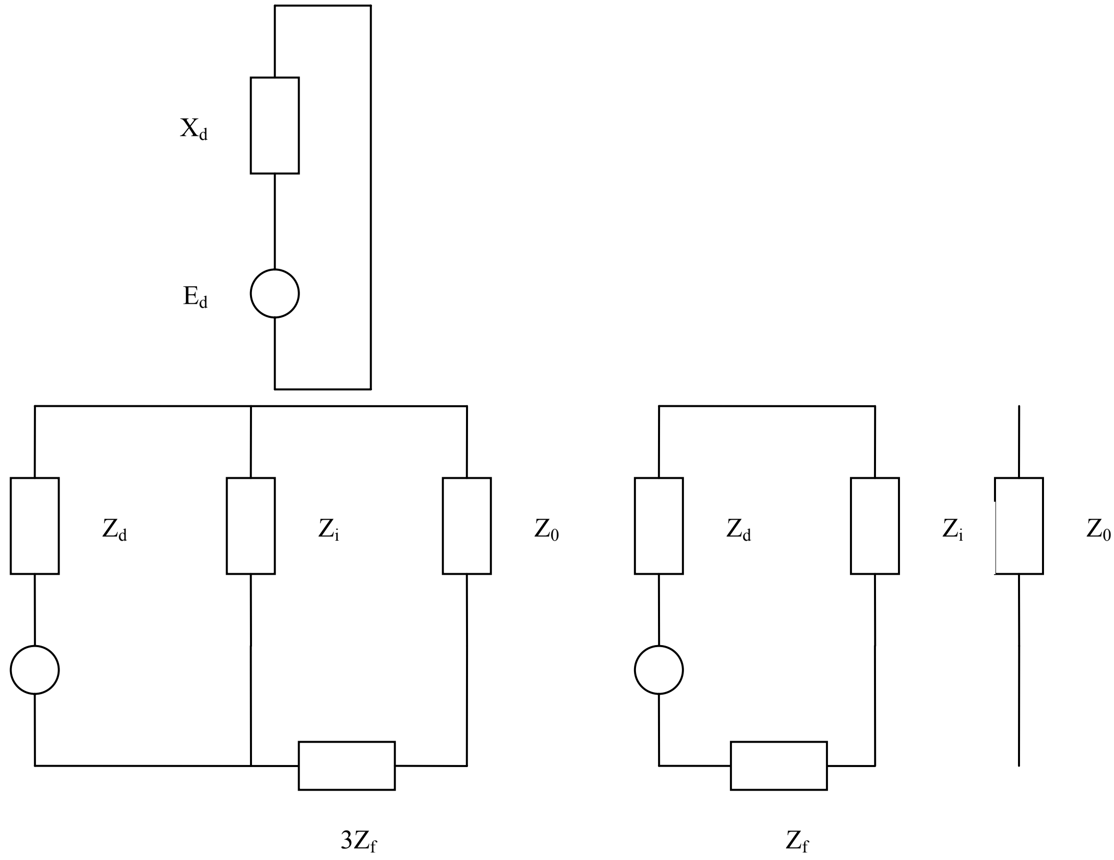
عيب غير از اول يا انتهاي خطوط صورت مي گيرد كه مي تواند L-L يا L-L-L يا L-G يا L-L-G باشد. در اينصورت $X_2 \neq \infty$ خواهد بود (در زمان عيب). در شبكه هاي قدرت ماشين هاي سنكرون ممكن است از حالت سنكرون خارج شوند و بعلت هاي مختلف ممكن است اين مساله بوقوع بپيوندد. مثلاًاتصال كوتاهي كه برطرف نشود، عمليات 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:

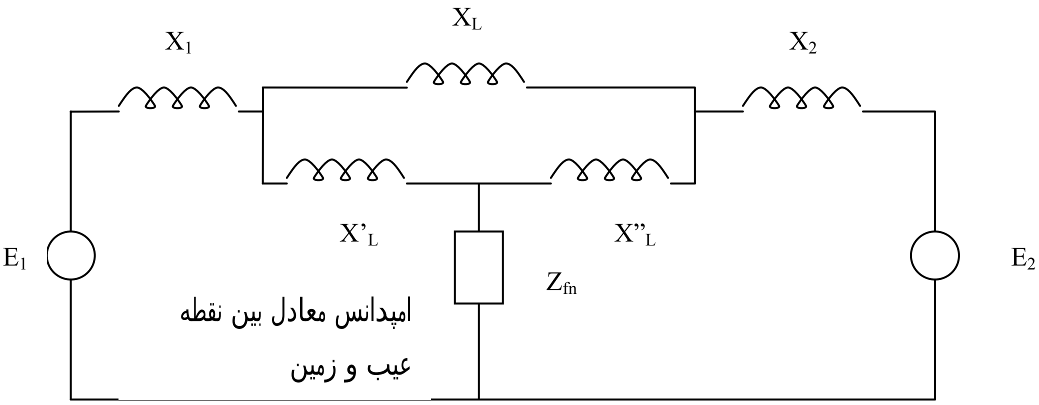


اتصال كوتاه از هرنوع در يكي از خطوط انتقال رخ مي دهد (F)

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

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 زمین (LL)

۱فاز با زمین (LG)

۲ فاز با زمین (LLG)

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

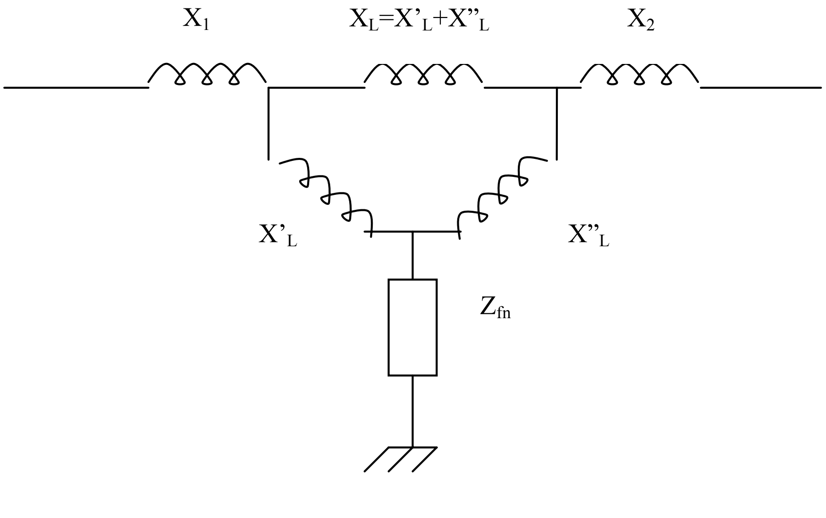
این امپدانس بین N,F در شبکه ترتیب مستقیم قرار مي گیرد. براي هر اتصالي مسئله پایداري را در این شبکه باید بررسي کرد.

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

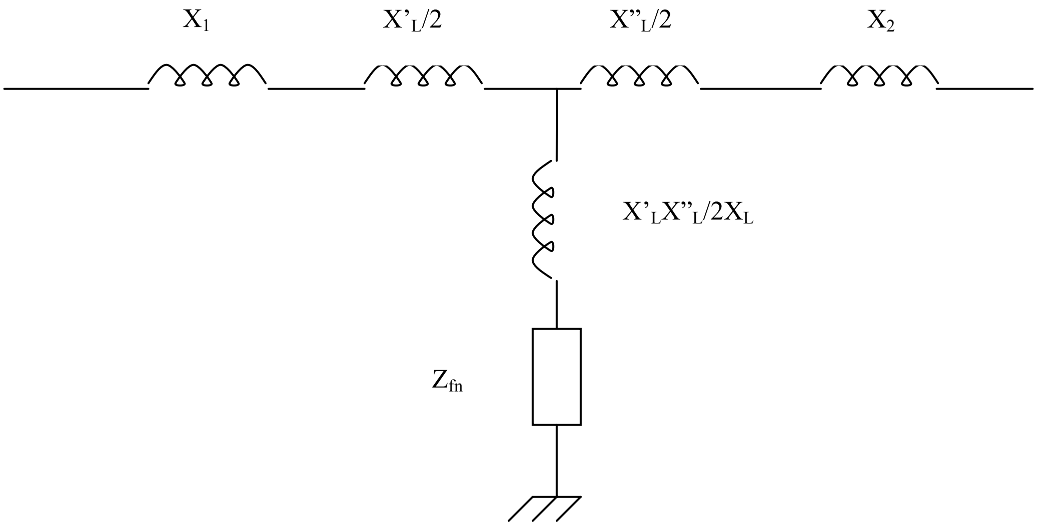
$$p=\frac{E_1E_2}{X_{12}}\sin\delta$$

X_{12} راکتانس سري بین E_2,E_1

δ زاویه بار بین E_2,E_1



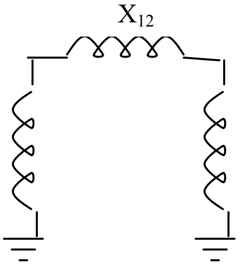
با تبديل مثلث به ستاره در شبكه انتقال داريم

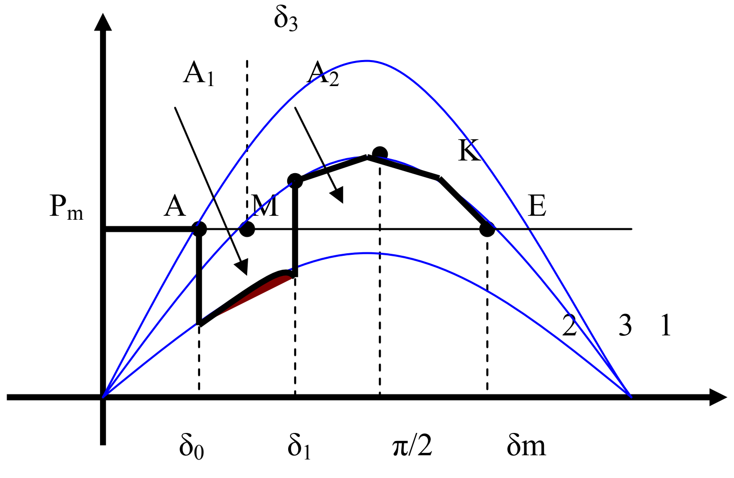


با تبديل ستاره به مثلث با احتساب مقاومت هاي ديگري سري بـه ستاره قبلي و در اين Δ بـه ضلع بـالا

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

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

در زمان عيب

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

$$r_2 \langle r_1 = 1$$

در اينجا $X_{12,2} \rangle X_{12,1}$ پس در زمان عيب $X_{12,2} = \frac{1}{r_2} X_{12,1}$ 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

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

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

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 ازاين 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:

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

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

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

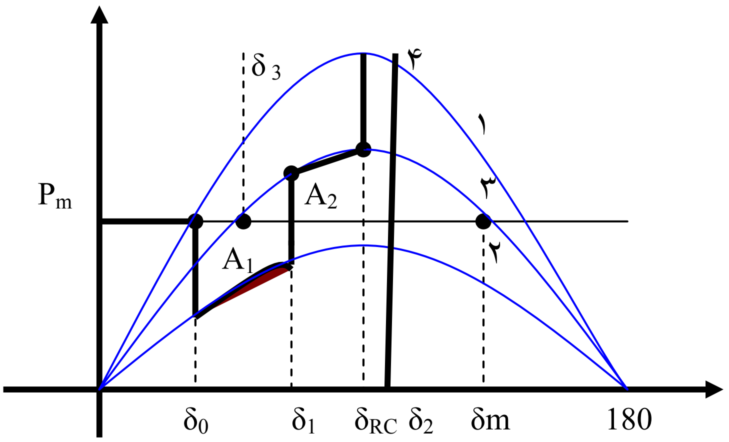
براي شرايط زاويه رفع عيب بحراني δ_c داريم:

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

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

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

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



پيدا كردن زاويه بحراني رفع عيب

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

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

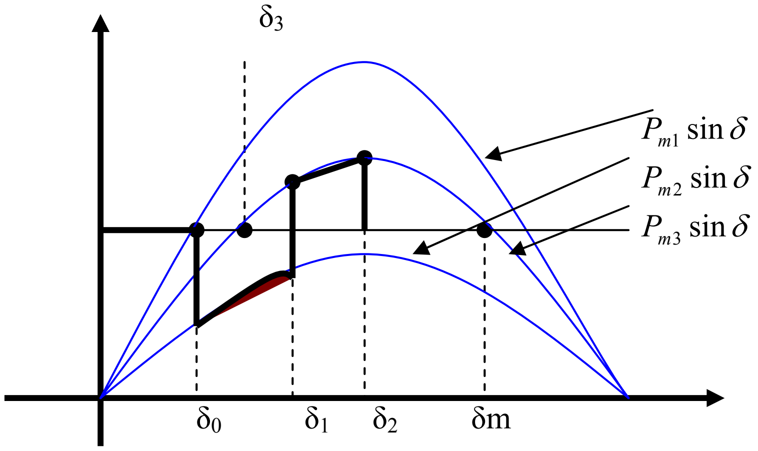
$P_m(\delta_c - \delta_0) - \int_{\delta 0}^{\delta c} (r_2 p_{max} \sin\delta) d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_m} (r_3 P_{max} \sin\delta) d\delta$

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

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

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

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



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

پايداري

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

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

$\delta c =$

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 شـتاب دهنـده بوجـود مـي‌آيـد. در لحظـه n و n-1 شـتاب را ثابـت فـرض مـي‌كنيم. سـرعت را هـم در لحظه $n-\frac{3}{2}, n-\frac{1}{2}$ ثابت فرض مي كنيم. تغييرات سرعت و جهش سرعت مربوط به توان شتاب دهنده

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

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.

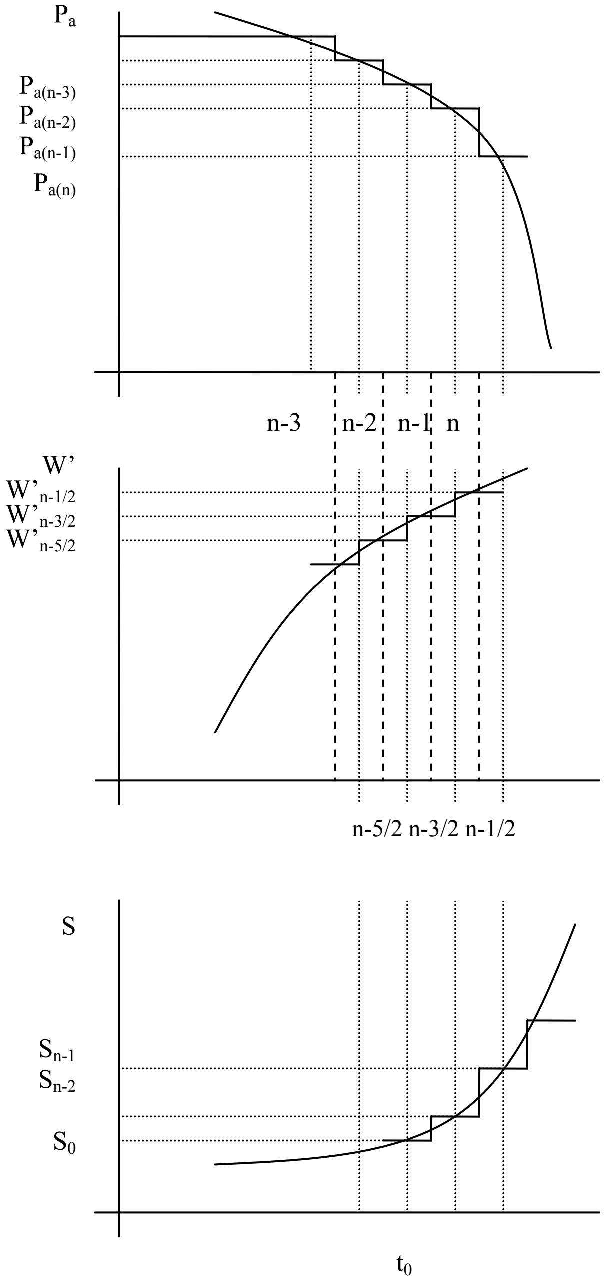
توان شتاب دهنده يك تابع نقضاني است كه رفته رفته كم مي شود. تغييرات سرعت ماشين بر حسب زمان

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-ws افزايش مي يابد.در منجني 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 (٢)

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

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

در لحظـــــــــه $t = 0^+$ ←منجنـــــــــي (۲) در حـــــــــال نوســـــــــان در شـــــــــروع 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 مربوط 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

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

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

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

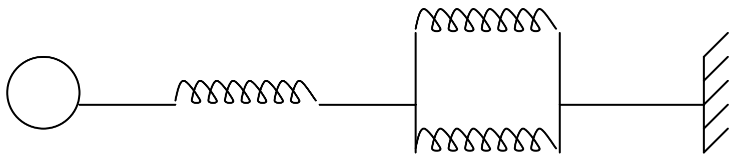
$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + (\frac{\Delta t^2}{M})Pa(n-1)$$

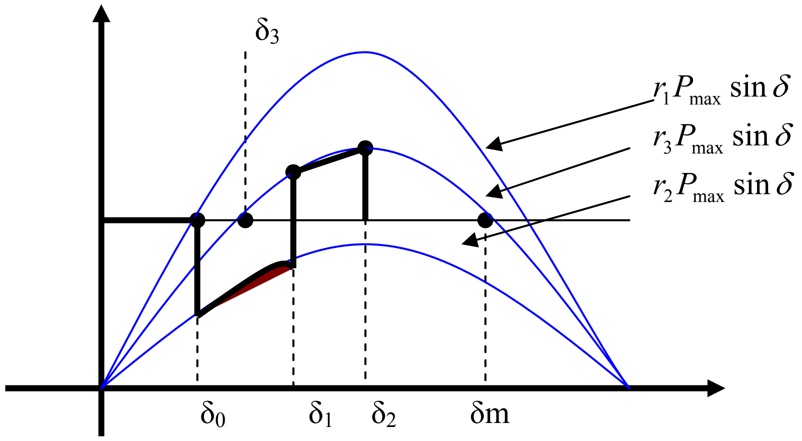
$$t = 0 \to \Delta\delta_1 = \Delta\delta_0 + \frac{(5\times10^{-2})^2}{M}P_{a0}$$

$$\Delta\delta_0 = 0$$

$\Delta\delta_n$ بر روي منحني (۲) درجه يا راديان است كه بستگي به واحد M يا M' 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 نيمم قطع دژنكتورها را از روي آن بدست آوريد (tc)





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

$P_{\max} = 1.8pu$

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

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

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

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

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

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

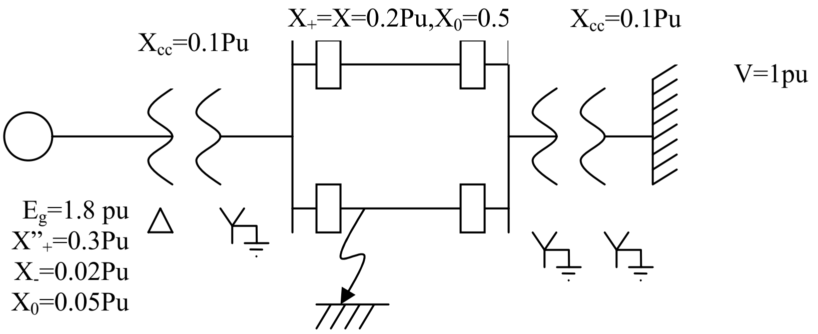
تغییـــرات δ_0 تـــا δ_c را بایـــستي رســـم کـــرد. در لحظـــه $t=0^-$، $p_{a(0)}=0$ در لحظـــه ,

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

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

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

مثال ـ نمایش تك خطي شبکه اي طبق شكل زیر است



۱-مطلوب است حد پایداري استاتیکي شبکه فوق

۲-اگر با يك مانور یکي ازخطوط پارالل قطع شود تخصص کنید شبکه پایدار خواهد بودیا نه (قدرت انتقالي قبل از مانور ۱ pu بوده است)

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

٤-اگر يك اتصال کوتاه سه فاز در F رخ دهد مطلوب است زاویه قطع بحراني کلیدهاي K2,K1

۵-با فرض اینکه مقدار حرکت زاویه اي ماشین $M'=3\times10^{-4}\left[\frac{\sec}{\deg}\right]^2$ باشد با انتخاب گام زماني $\Delta t=0.03^s$ مطلوب است رسم تغییرات δ بر حسب زمان پیدا کردن زمان بحراني قطع عیب کلیدهاي K1,K2

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

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

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

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

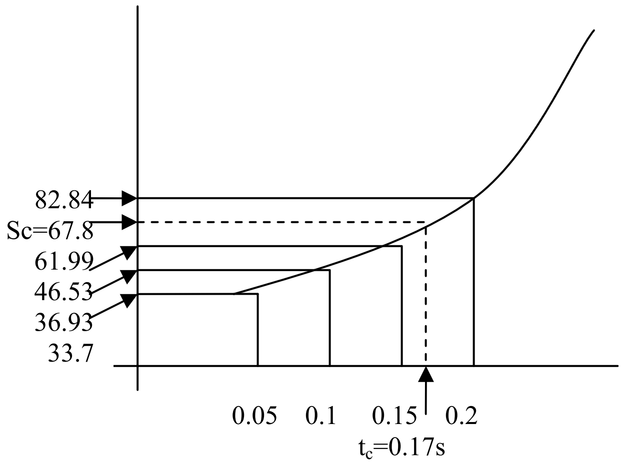
توان شتاب دهنده این مقدار تقسیم بر 2 خواهد شد (مقدار میانگین) فقط در لحظه صفر

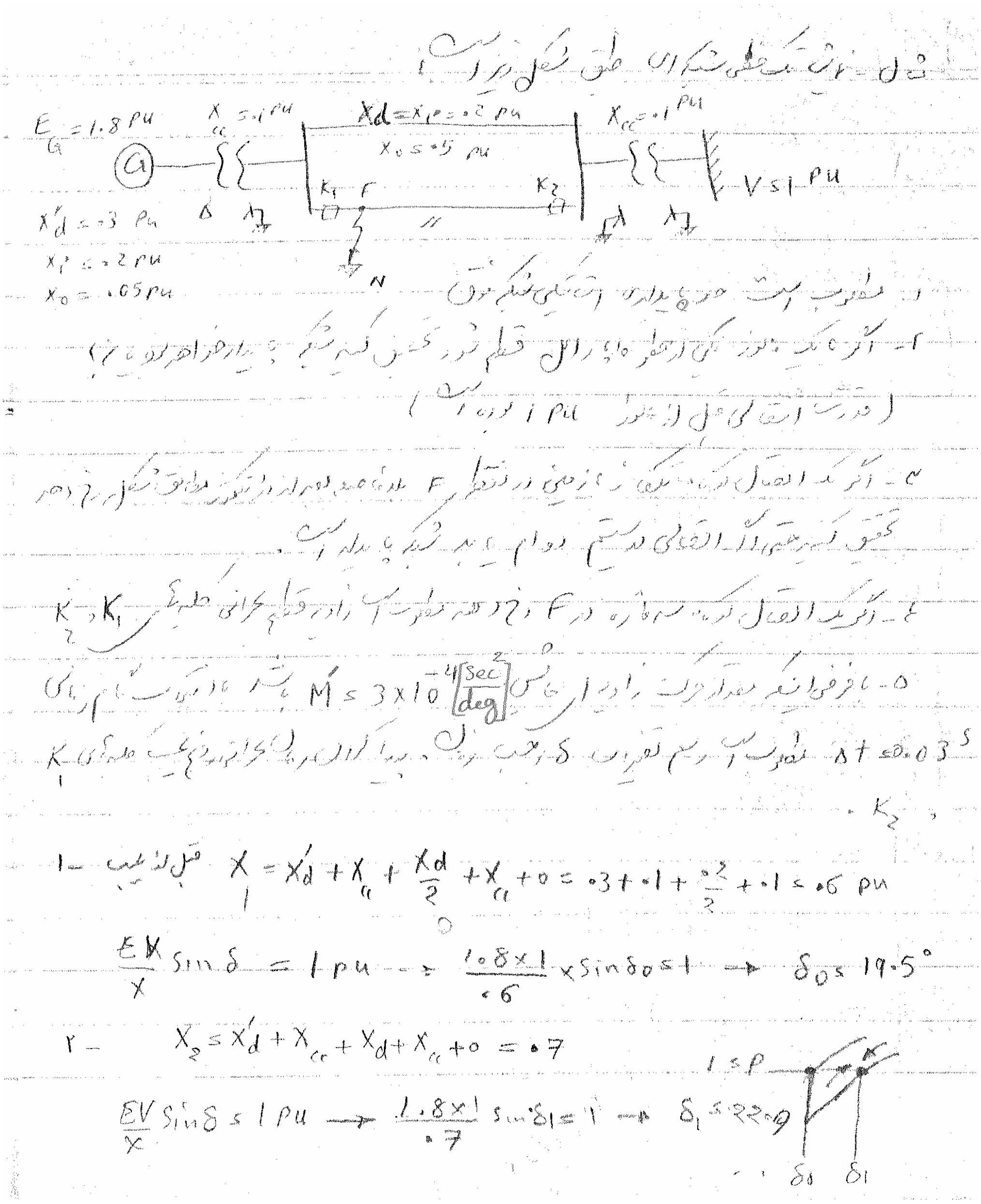
$$\begin{cases}\delta_1 = \delta_0 + \Delta\delta_1 = 33.7 + 3.23^o = 36.93^o \\ t = 0 + 0.05 = 0.05\sec\end{cases}$$

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

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

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





عوامل پايداري در شبكه قدرت

۱-كوچك بودن زمان بحراني رفع عيب.

اگر كليدهاي قطع در زمان كوتاه سيستم را قطع كنند بهتر است ولي اين عمل از لحاظ هزينه گرانتر 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 بالا مي 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 (ثابت 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

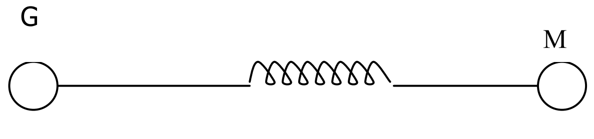
۱-افزايش تدريجي قدرت براي شبكه خطرناك نيست ولي اگر تغييرات ناگهاني باشد اگر بالاي سطح pm نتوان سطح معادل را پيداكرد ممكن است پايداري از دست برود. اگر بخواهيم قدرت انتقالي را افزايش دهيم $1 \rightarrow 1.5pu$ بايستي تدريجي باشد.

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

$<90^o$ $\quad 90^o$

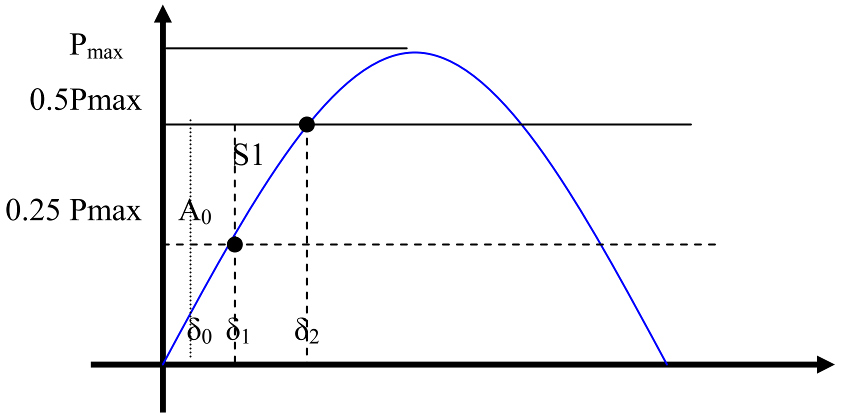
۳-زاويه بحراني رفع عيب $\quad 0$

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



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

$$\delta_1 = 30^o$$

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

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

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

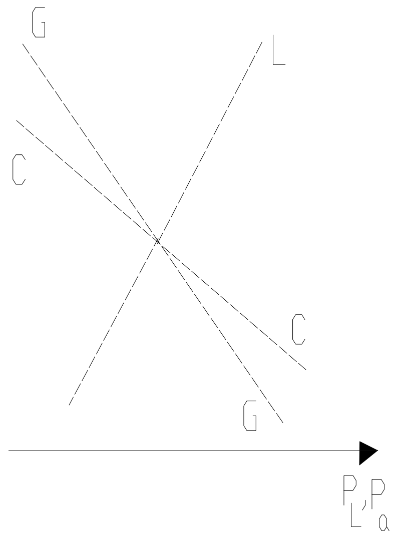
$$2\cos\delta_2 + \delta_2 - 1.43 = 0$$

کنترل توان اکتیو و فرکانس

Interconnected Tie line system

بهره‌برداري سیستم‌هاي به هم پیوسته

اگر به دلایلي بار سیستم تغییر یابد مشخصات بار سیستم پارالل با مشخصات قبلي خواهد بود که موجب کاهش فرکانس خواهد شد. براي آنکه سیستم را در همان فرکانس قبلي بکار ببریم باید مشخصات G را پارالل با حالت قبلي تغییر دهیم در این حالت مشخصات سیستم نیز پارالل تغییر خواهد کرد.



$$P_{G1} - P_{load} = P_{G0} + 10\beta_1(f_{act} - f_0) - 10\beta_2(f_{act} - f_0) - P_{L0}$$

این براي یك واحد است.

حال اگر در بار تقاضا به اندازه dp_L تغيير حاصل شود. با افزايش dp_G سعي مي‌شود اين تغييرات به صفر رسد حال اگر با تغييرات در توليد نتوان در تغييرات بار تقاضا را به صفر رساند در آن صورت به اندازه dp در سيستم نامتعادلي به وجود مي‌آيد.

$$- dP = dP_D - dP_G = dP_D \pm dP_{tie} \quad (+\text{ exit from region}) \ (-\text{enter to region})$$

$$-\frac{dP}{df} = \frac{dP_D}{df} - \frac{dP_G}{df}$$

$$K = \frac{dP_D}{df} - \frac{dP_G}{df} \quad \left[\frac{\text{MW}}{\text{Hz}}\right]$$

اين نسبت Stiffness يا سفتي ناميده مي‌شود. اگر به اندازه ۱۰% در تغييرات بار داشته باشيم به اندازه ۱% تغييرات در فركانس باشد سيستم نرمال است.

$\frac{dP_G}{df}$ به وسيله منحني GG يا G′G′ بدست مي‌آيد

$\frac{dP_D}{df}$ به وسيله منحني LL يا L′L′ بدست مي‌آيد

پس داريم:

$$dP = dP_G - dP_D \quad K = -\frac{dP}{df} \rightarrow df = -\frac{dP}{K}$$

df بخاطر افت فركانس در اثر نامتعادلي مى باشد.

دو ناحيه را به صورت پيوسته به هم در نظر بگيريم و تحت اين شرايط بايستي نواحي و علت بهم پيوسته بودن را اشاره كنيم. هر ناحيه از واحد توليدي و بارهاي مخصوص بخود تشكيل مي‌شود.

A_{KA} tie line dp dp_D B dp_G K_B

dptie

dp_{AB}

dp_{12}

هر ناحيه بايستي Reserve مخصوص بخود داشته باشد توسط خط مشترك اين دو سيستم به صورت بهم پيوسته مورد بهره‌برداري قرار مي‌گيرند اين مي‌تواند اطمينان سيستم را بالا ببرد. سيستم قوي مي‌شود انرژي KE ذخيره شده در سيستم افزايش مي‌يابد براي تغييرات جز بار فركانس بدان صورت تغييرات ندارد. هر چه سيستم بزرگ باشد بر سيستم بي‌نهايت بيشتر نزديك مي‌شويم سيستم‌ها به صورت پيوسته بهم مورد مصرف قرار مي‌گيرند.

ظرفيت انتقال اين خط نسبت به ظرفيت انتقال هر كدام از نواحي كمتر است.

توان از ناحيه خارج شود +   توان به ناحيه داده شود-

در ناحیه B به اندازه dP_D تغییراتي در بار مصرفي بطور ناگهاني رخ مي‌دهد. ابتدا خود ناحیه این مقدار تغییرات ناگهاني بار را تامین مي‌کند. حال اگر خودش نتواند این ناحیه باندازه dP نامتعادلي دارد که مي‌تواند از A کمك بگیرد چون این دو ناحیه بصورت بهم پیوسته مورد بهره‌برداري هستند داراي فرکانس مشخص هستند اگر این ناحیه به اندازه dP کمبود داشته باشد بایستي قدرت از A بگیرد.

تغییرات در قدرت ارسالي dP_{tie} (از A بر B) وقتي از ناحیه خارج مي‌شود + و قتي به ناحیه وارد مي‌شود – است این dP_{tie} که از ناحیه A گرفته شود و به B وارد بشود – است.

تغییرات فرکانس
$$df_B = -\left(\frac{dP_D - \Delta(dP_{tie})}{K_B}\right) = -\frac{(0 + dP_{tie})}{K_A} = df_A$$

چون توان از ناحیه A به سمت ناحیه B است پس در ناحیه A توان تبادلی بصورت $+dP_{tie}$ و درناحیه B بصورت dP_{tie} - می باشد.

اگر ناحیه ضریب سفتي هر ناحیه و نامتعادلي ناحیه B در دست باشد مقدار قدرت ارسالي tie line را بدست آورده و فرکانس جدید سیستم را بدست می آوریم.

$$dP_{tie} = \left(\frac{K_A}{K_A + K_B}\right) dP \Rightarrow f$$

در دو ناحیه متصل و بهم پیوسته داریم. $df_A = df_B$

مثال ـ دو سیستم بهم پیوسته قدرت که داراي فرکانس 50Hz مي‌باشد بوسیله B و A مشخص شده‌اند و به ترتیب داراي ضریب سفتي (stiffness) $750\frac{\text{MW}}{\text{HZ}}, 500\frac{\text{MW}}{\text{HZ}}$ مي‌باشند که به وسیله tie line بهم پیوسته‌اند اگر بار سیستم B بطور ناگهاني 300MW افزایش یابد: الف ـ مقدار قدرت انتقالي از tie line به فرکانس جدید بهم پیوسته را پیدا کنید

حل ـ چون دو ناحیه بهم پیوسته هستند، با وجود تغییرات بار در ناحیه B، توان انتقالی از ناحیه A خارج و به ناحیه B وارد مي‌شود و برای این دو ناحیه به هم پیوسته $\Delta f_A = \Delta f_B$.

$$-\frac{(dP - dP_{tie})}{K_B} = -\frac{(0 + dP_{tie})}{K_A}$$

$$-\frac{300 - dP_{tie}}{500} = -\frac{dP_{tie}}{750} \rightarrow dP_{tie} = 180\text{MW}$$

$$\Delta f_A = \frac{0 + \Delta P_{tie}}{K_A} = \frac{180}{750} = 0.24\text{Hz}$$

$$\Delta f_B = \frac{\Delta P - \Delta P_{tie}}{K_B} = \frac{300-180}{500} = 0.24\text{Hz}$$

$$f_{act} = f_0 - \Delta f = 50 - 0.24 = 49.76\text{Hz}$$

هر دو سيستم در فركانس مشترك f در حال كار هستند.

هر گاه خط ارتباطي tie بين دو سيستم قطع شود. فركانس هر كدام از سيستمها به صورت زير خواهد بود:

$$f_A = f + \frac{dP_{tie}}{K_A}$$

افزايش فركانس به خاطر افزايش توليد توان در ناحيه A

$$f_B = f - \frac{dp_{tie}}{K_B}$$

كاهش فركانس به خاطر كاهش توليد توان در ناحيه B

در اين صورت

$$\frac{dP_{tie}}{f_A - f_B} = \frac{K_A K_B}{K_A + K_B}$$

$$dP_{tie} = \frac{K_A K_B}{K_A + K_B}(f_A - f_B) = \frac{K_A K_B}{K_A + K_B}\Delta f_{AB}$$

بنابراين با قطع خط ارتباطي و اندازه‌گيري فركانسهاي f_A و f_B مرتبط به هر ناحيه مقادير ضرايب سفتي K_A و K_B بر ناحيه محاسبه مي‌شود.

ب- در قسمت بعد فرض مي‌شود كه اين دو ناحيه بصورت بهم پيوسته كار مي‌كنند و فركانس سيستم f است حال اگر بطور ناگهاني اين tie line باز مي‌شود حال بايد ديد فركانس هر ناحيه چقدر مي‌شود.

$$f_A = f + \frac{\Delta P_{tie}}{K_A} = 49.76 + \frac{180}{750} = 50\text{Hz}$$

$$f_B = f - \frac{\Delta P_{tie}}{K_B} = 49.76 + \frac{180}{500} = 49.4\text{Hz}$$

$$K = \frac{dP_D}{df} - \frac{dP_G}{df}$$

تاثير مشخصه فركانس بروي بار مصرفي را اندازه‌گيري مي‌كند $\frac{dP_D}{df}$

$dP_G \alpha (P_T - P_G)$ ظرفيت توان توربين متصل به شبكه   توان خروجي از ژنراتورها

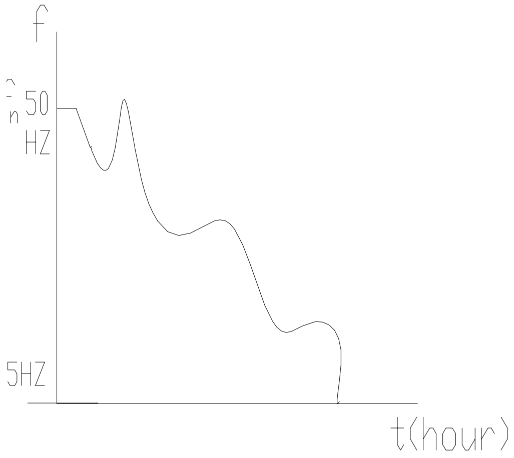
با صرف نظر كردن از تلفات، در شرايط ماندگار SS دوباره $P_D = P_G$

بنابراين $K = K_1 P_T - K_2 P_L$

در اينجا براي هر شبكه مقدار K بصورت آزمايشي و در رنج قدرت مناسبي (حداقل و حداكثر قدرت انتقالي) براي دو سيستم مجزاي بزرگ كه توسط يك لينك بهم متصل شده‌اند مشخص مي‌شود. در اين آزمايش اتصال بين دو سيستم قطع شده تغييرات فركانس اندازه‌گيري مي‌شود.

درسيستمهاي كوچك تغييرات بار باعث بوجود آمدن تغييرات زياد در فركانس مي‌شوند بنابراين در اينگونه سيستم‌ها لازم است گاورنرهاي الكتريكي مشخصه بار – فركانس را بهبود بخشند.

ناشي از تغييرات بار شديد در سيستم شامل صاعقه، ممكن است اين سيستم اصلي قطع شود در آن صورت توليد داخلي سيستم جوابگوي مصرف داخلي نبوده و فركانس بشدت افت مي‌كند.



مدل سازي خط رابط بين دو ناحيه ۱ و ۲

در كاركرد عادي شبكه، توان عبوري از خط رابط توان عبوري از ۱ به ۲ مثبت است.

$$P_{12}^0 = \frac{|V_1^0||V_2^0|}{X} \quad \sin(\delta_1^0 - \delta_2^0)$$

ولتاژ ابتداي خط رابط $\overline{V_1} = |V_1^0| < \delta_1^0$

$$\overline{V_2} = |V_2^0| < \delta_2^0$$

تغييرات توان خط رابط به ازاي تغييرات بسيار كوچك δ_1 و δ_2

$$\delta_1 = \delta_1^0 + \Delta\delta_1 \qquad , \qquad \delta_2 = \delta_2^0 + \Delta\delta_2$$

$$\Delta P_{12} \approx \frac{|V_1^0||V_2^0|}{X}\cos(\delta_1^0 - \delta_2^0)(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2)$$

ضريب هم گاهي = ضريب سنكرونيزه كننده

$$T_{12}^0 \triangleq \frac{|V_1^0||V_2^0|}{X}\cos(\delta_1^0 - \delta_2^0)$$

رابطه تغييرات فركانس با تغييرات زاويه بار

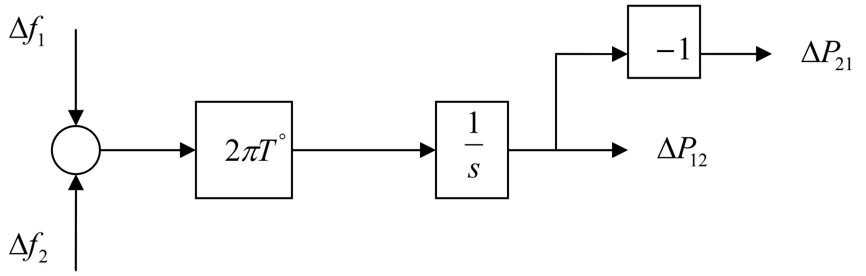
$$\omega = 2\pi f \Rightarrow \Delta\omega = 2\pi\Delta f \Rightarrow \begin{cases} \Delta f = \dfrac{1}{2\pi}\dfrac{d}{dt}(\Delta\delta) \Rightarrow \Delta\delta = 2\pi\int \Delta f dt \\ \Delta f = \dfrac{1}{2\pi}\dfrac{d}{dt}(\delta_0 + \Delta\delta) \end{cases}$$

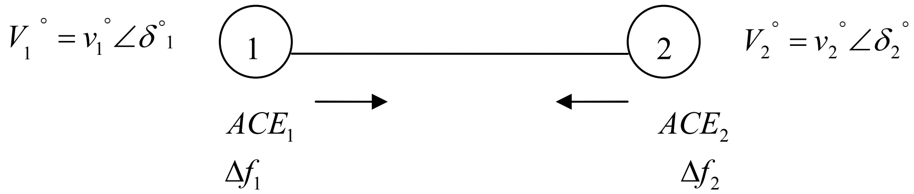
$$\Delta P_{12} \approx 2\pi T_{12}^0(\int \Delta f_1 dt - \int \Delta f_2 dt)$$

$$\Delta P_{12}(S) = \frac{2\pi T_{12}^0}{s}(\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s))$$

نمايش مدل خطي دو ناحيه با يك خط رابط Tie Line

$$\Delta P_{12} + \Delta P_{21} = \Delta P_{LOSS} \to 0 \quad \Rightarrow \Delta P_{21} = -\Delta P_{12}$$

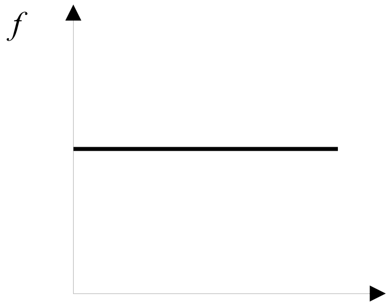




انواع بهره‌برداري از سيستم‌هاي بهم پيوسته

۱- در اين حالت سيستم‌ها طوري بهره‌برداري مي‌شوند كه تك‌تك سيستم‌ها فقط فركانس خود را كنترل مي‌كنند.

Flat frequency control (infinile Bias)



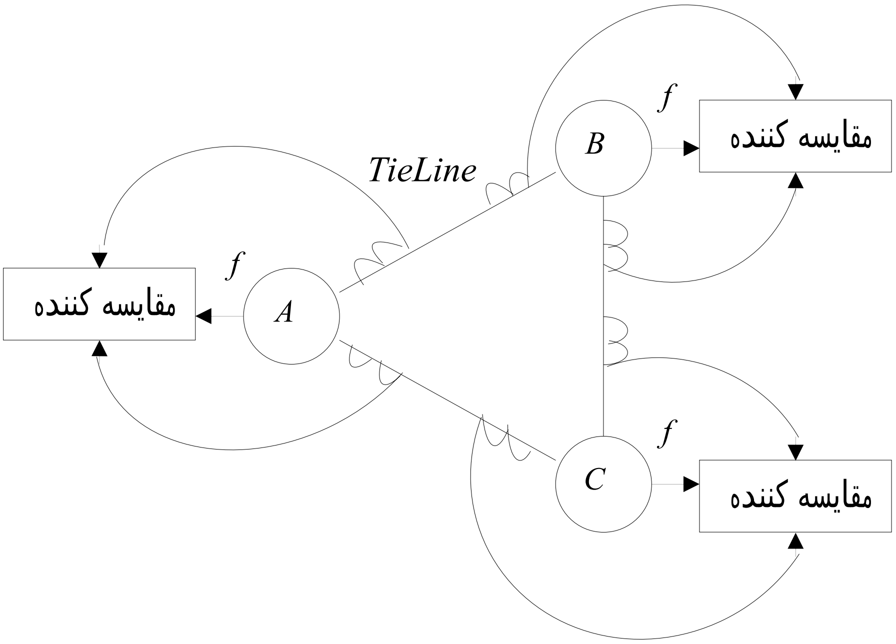
۲- هر سيستم قدرت tie line را بدون توجه به فركانس سيستم كنترل مي‌كند. هر ناحيه سعي دارد مقدار قدرت لازم براي فرستادن به نواحي ديگر را بدون توجه به فركانس تهيه كند.

Flat tie line control (zero bias)

۳- هيچ كدام از اين كنترل‌ها براي بهره‌برداري مناسب نيستند.

Tie Line with frequency Bias

براي ۳ ناحيه بهم پيوسته هر ناحيه بايستي قدرت فرستاده شده از tie line را اندازه‌گيري كرده و به سيستم مقايسه كننده بدهد تا قدرت انتقالي از يك ناحيه بر ناحيه مقايسه مي‌شود، قدرتي كه بايستي دريافت مي‌شد و در اينجا يك tie Line error داريم و همچنين فركانس بايستي به يك مقايسه كننده داده شود تا خطاي فركانس نيز مشخص شود.



B يا قبلي عبارت است از :

$$\begin{cases} ACE = (P_0 - P_{act}) - 10\beta(f_0 - f_{act}) \\ ACE = \Delta P_{AB} + K_A \Delta f \end{cases}$$

و مقداري منفي است.

β : Area Bias $\frac{MW}{0.1Hz}$

ACE : Area Control Error

P_0 , f : Programmed Power and Frequency

P_{act} , f_{act} : Actual Power and Frequency

براي نواح ديگر نيز همچون كاري بايستي انجام شود.

مثال ـ در دو سيستم بهم پيوسته A و B تبادل خالص قدرت براساس برنامه‌ريزي قبلي 200MW درسيستم A و B مي‌باشد اگر مقدار حقيقي تبادل از سيستم A و B 150MW و فركانس 50HZ و فركانس حقيقي 50.05HZ در منطقه B باشد خطاي كنترل منطقه B را پيدا كنيد.

مقدار باياس برابر است با $\frac{-50MW}{0.1HZ}$

$$ACB_B = (-200 - (-1501) - 10(-50)(50 - 50p5) = -75MW$$

اين نشانگر اين است كه چون اين خطاي منطقه منفي است پس در ناحيه B بيش از مورد نياز قدرت وجود دارد و لازم است قدرت ناحيه B به اندازه 75MW پائين آورده شود.

کنترل باياس فرکانس سيستم دوناحيه‌اي Frequency Control

در کنترل انتگرالي يا کنترل کامل سيستم کنترل بار ـ فرکانس حلقه بسته با مطالعه منحني‌هاي پاسخ در مي‌يابيم که براي بازگرداندن فرکانس به مقدار اوليه خود بايد نوعي کنترل کننده انتگرالي باز نشاننده به سيستم دو ناحيه‌اي مورد بحث افزوده شود. خطاي ايستاي فرکانس بطور دپريا، به همان دليلي که براي حالت تك ناحيه‌اي گفته شد، در اينجا نيز غيرقابل تحمل است. همچنين، يك خطاي ايستاي ديرپا يا شارش توان خط رابط ـ يا به عبارت ديگر «مبادله سهوي» به معني پشتيباني دائمي يك ناحيه بوسيله ناحيه ديگر است. يکي از اصول اساسي همياري آن است که هر ناحيه بايد قادر به تامين بار خود باشد.

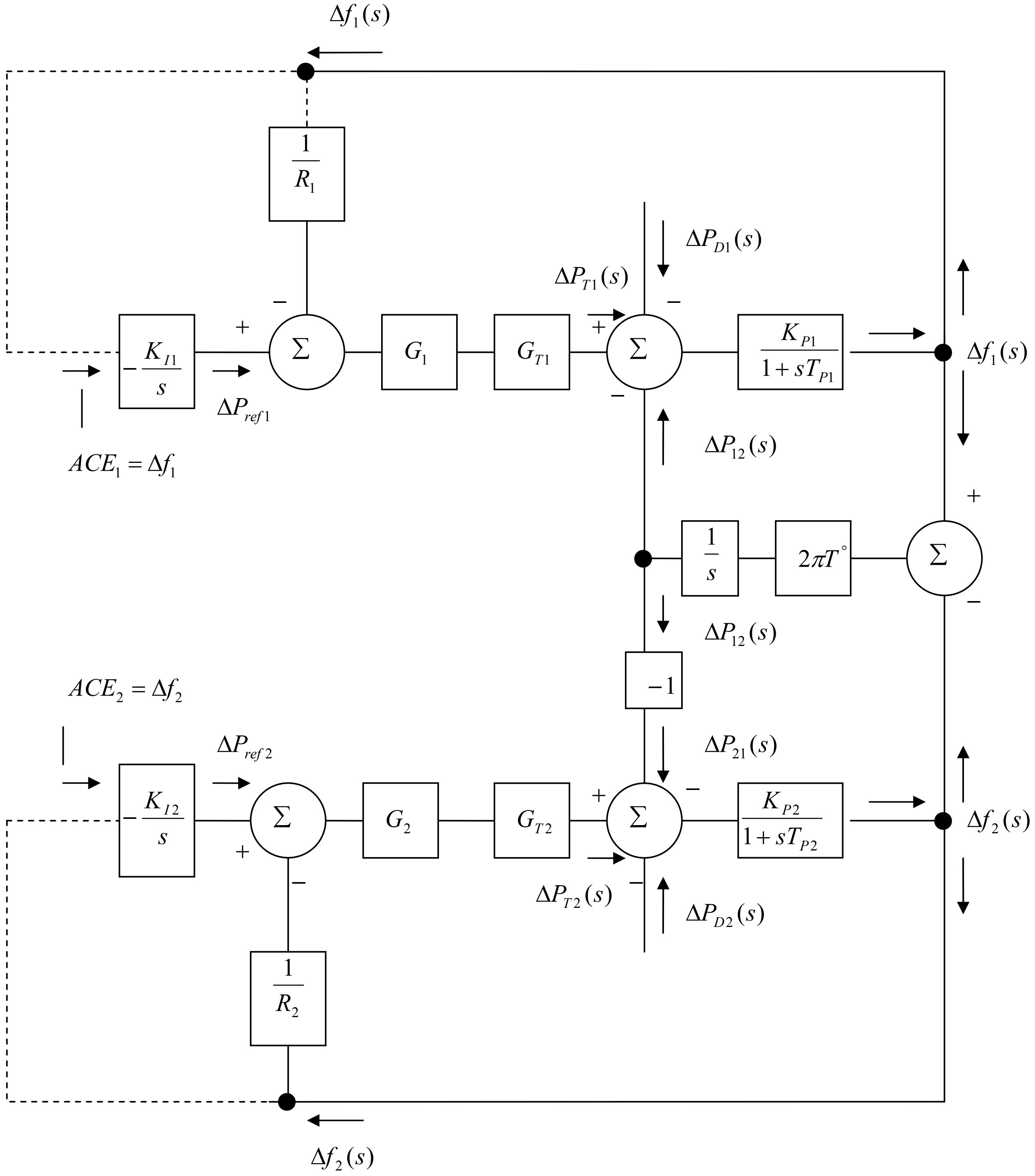
در طي سالهاي گذشته روش‌هاي گوناگون کنترل انتگرالي در مورد سيستم‌هاي چند ناحيه‌اي آزمايش شده‌اند و پيوسته جاي خود را به روش‌هاي جديدتري داده‌اند. براي مثال، در سيستم دو ناحيه‌اي مورد بحث مي‌توانستيم فرض کنيم که ناحيه ۱ عهده‌دار بازگرداندن فرکانس به مقدار اوليه باشد و ناحيه ۲ شارش توان خط ارتباط را کنترل کند. در اين صورت خطاي کنترل ناحيه‌ها به صورت زير مي‌بودند:

$$ACE_1 \triangleq \Delta f_1$$

$$ACE_2 \triangleq \Delta f_2$$

اين خطاها (ACE)ها از طريق انتگرال‌گيرهاي کند به تغيير دهنده‌هاي سرعت مربوطه وارد مي‌شدند. چنين طرحي ممکن است عملي باشد ولي کارکرد خوبي نخواهد داشت. در واقع در سالهاي اوليه هم ياري بين ناحيه‌ها، يك ناحيه عهده‌دار تنظيم فرکانس سيستم و وظيفه ناحيه‌هاي ديگر آن بود که هر يك «مبادلات خالص توان» خود را در حد صفر نگه دارند. مشکل اين طرح آن بود که ناحيه مرکزي مسئول کنترل فرکانس سعي در تنظيم فرکانس هر ناحيه داشت در حالي که خود آن ناحيه‌ها در حال تنظيم مبادلات توان با نواحي ديگر بودند. در نتيجه نوسان گسترده‌اي در محدوده‌هاي توان توليدي ناحيه مرکزي به چشم مي‌خورد.

در نتيجه تحقيقات اوليه‌اي که توسط کوهن صورت گرفت، استانداردي براي کنترل سيستم بنام «کنترل باياس خط رابط» ارائه شد و بر اين اصل استوار است که تمامي اعضاي همياري افزون بر کنترل مبادله خالص خود، بايستي در کنترل فرکانس نيز مشارکت داشته باشند.


$\Delta f_1(s)$
$\frac{1}{R_1}$
$\Delta P_{D1}(s)$
$\Delta P_{T1}(s)$
$-\frac{K_{I1}}{s}$
Σ
G_1
G_{T1}
$\frac{K_{P1}}{1+sT_{P1}}$
$\Delta f_1(s)$
ΔP_{ref1}
$ACE_1 = \Delta f_1$
$\Delta P_{12}(s)$
$\frac{1}{s}$
$2\pi T^{\circ}$
$\Delta P_{12}(s)$
-1
$ACE_2 = \Delta f_2$
ΔP_{ref2}
$\Delta P_{21}(s)$
$-\frac{K_{I2}}{s}$
G_2
G_{T2}
$\frac{K_{P2}}{1+sT_{P2}}$
$\Delta f_2(s)$
$\Delta P_{T2}(s)$
$\Delta P_{D2}(s)$
$\frac{1}{R_2}$
$\Delta f_2(s)$

کنترل بایاس توان خط رابط و فرکانس در سیستم دو ناحیه‌اي Tie Line with Frequency Bias

به منظور اعمال کنترل بایاس خط رابط به سیستم دوناحیه‌اي، در شکل زیر حلقه‌هاي خط چین را به نمودار قبلي مي‌افزاييم. در اين حالت خطاي کنترل هر ناحيه به صورت يك تركيب خطي فركانس و خط رابط خواهد بود:

$$ACE_1 \triangleq \Delta P_{12} + B_1 \Delta f_1 \rightarrow O$$

$$ACE_2 \triangleq \Delta P_{21} + B_2 \Delta f_2 \rightarrow O$$

در اين صورت خروجي‌هاي تغيير دهنده‌هاي سرعت نيز به صورت زير خواهند بود:

$$\Delta P_{ref,1} = -K_{11} \int (\Delta P_{12} + B_1 \Delta F_1) dt$$

$$\Delta P_{ref,2} = -K_{12} \int (\Delta P_{21} + B_2 \Delta F_2) dt$$

ثابت‌هاي K_{11} و K_{12} بهره‌هاي انتگرال‌گيرها هستند و ثابت‌هاي B_1 و B_2 پرامترهاي باياس فركانس مي‌باشند. علامت منفي بدان خاطر است كه اگر در هر ناحيه هر كدام از كميتةاي خطاي فركانس و يا نمي‌توان خط رابط منفي شوند، بايد به ميزان توليد آن ناحيه افزوده شود.

پاسخ ايستاي سيستم

بنابه دلائلي كه در زير خواهد آمد، راهبرد كنترلي بالا انحرافات حالت دائم فركانس و توان خط رابط را حذف خواهد كرد.

به دنبال تغيير پله‌اي بار در هر ناحيه، تنها هنگامي تعادل ايستاي جديد – اگر چنين تعادلي وجود داشته باشد - حاصل خواهد شد كه خروجي تغيير دهنده‌اي سرعت به مقادير ثابتي رسيده باشند. ولي اين شرط لازم مي‌دارد كه انتگراندهاي معادله صفر باشند، يعني

$$\Delta P_{12.0} + B_1 \Delta fo = o$$

$$\Delta P_{21.0} + B_2 \Delta fo = o$$

$$\Delta f_1^0 = \Delta f_2^0 = \Delta f^0$$

$$\Delta P_{21} = -\Delta P_{12} MW$$

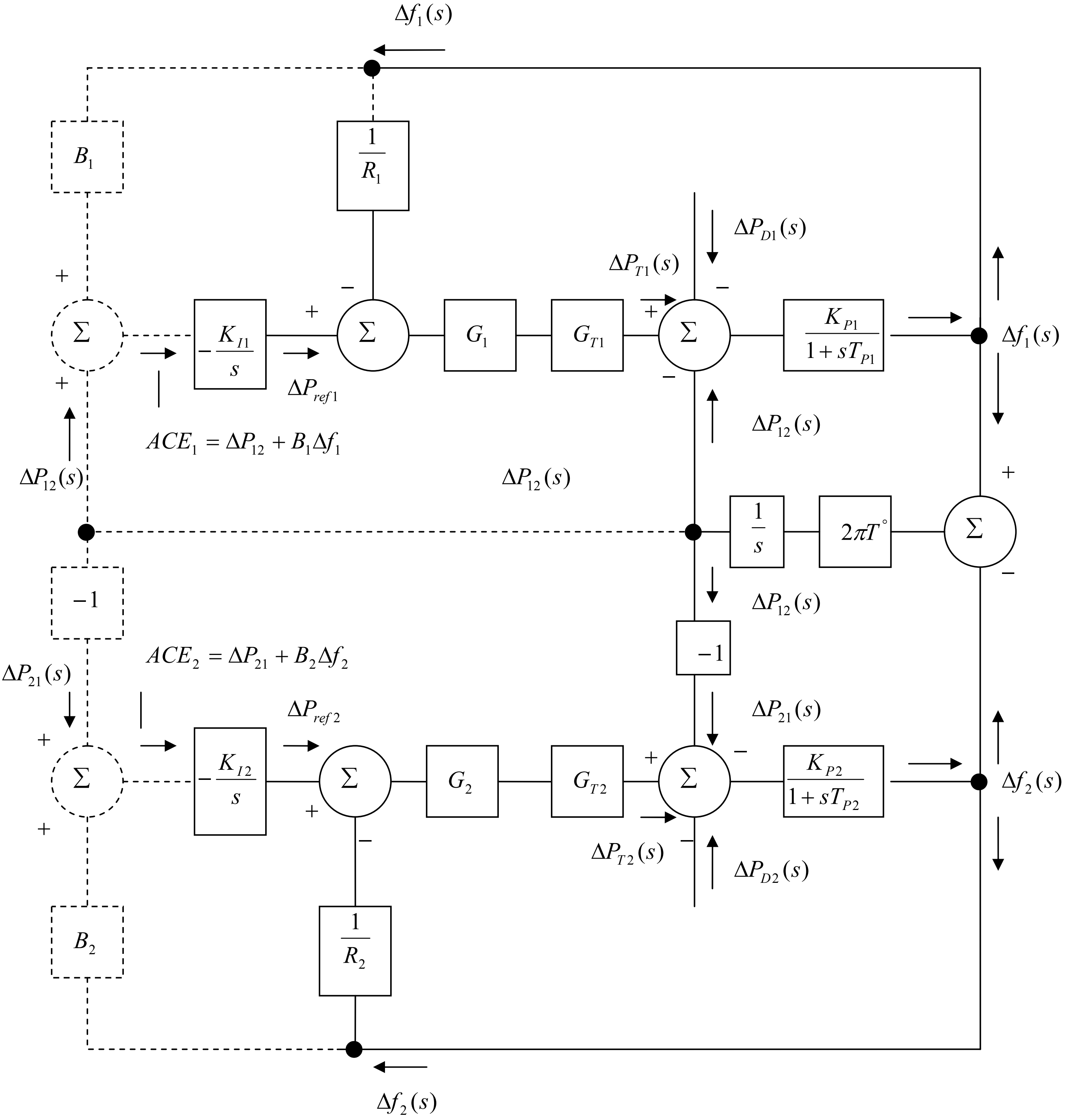
$$(\Delta P_{loss} = 0)$$

از ديد معادله، اين شرايط تنها وقتي برقرار خواهند بود كه:

در حالت ماندگار $(B_1 + B_2)\Delta f^0 = 0 \rightarrow \Delta f_0 = \Delta P_{12.0} = \Delta P_{21.0} = 0$

كنترل باياس توان خط رابط و فركانس در سيستم‌هاي چند ناحيه‌اي

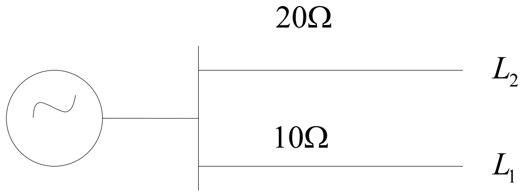
$$ACE_i = \sum \Delta P_{ij} + B_i \Delta f_i$$



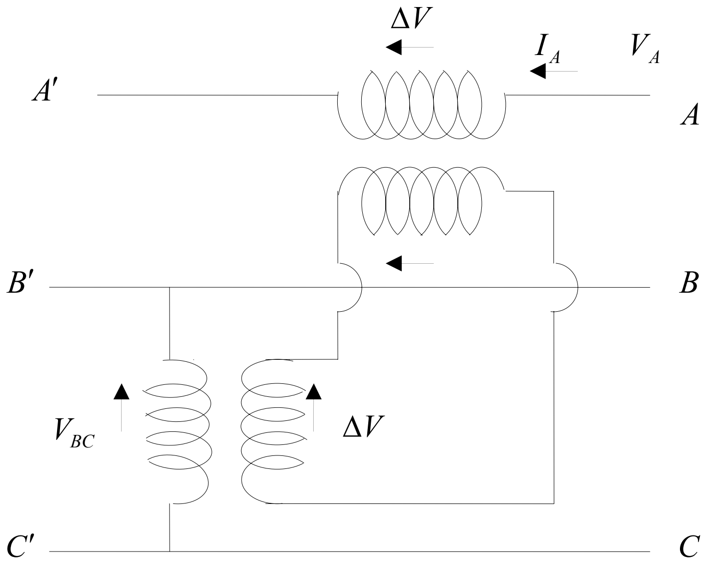
Δf1(s)
B1
1/R1
ΔPD1(s)
ΔPT1(s)
K_I1/s
G1
GT1
K_P1/(1+sT_P1)
Δf1(s)
ΔPref1
ACE1 = ΔP12 + B1Δf1
ΔP12(s)
ΔP12(s)
ΔP12(s)
1/s
2πT°
−1
ΔP12(s)
−1
ACE2 = ΔP21 + B2Δf2
ΔP21(s)
ΔPref2
ΔP21(s)
K_I2/s
G2
GT2
K_P2/(1+sT_P2)
Δf2(s)
ΔPT2(s)
ΔPD2(s)
B2
1/R2
Δf2(s)

کنترل قدرت به وسيله ترانسفورماتورهاي شيفت فاز

وقتي قدرتي از طريق دو خط موازي هم عبور دهيم مقدار قدرت به اندازه عكس امپدانس‌ها تقسيم مي‌شود A_2 قدرت كمتري نسبت به L_1 انتقال مي‌دهد و امكان اين كه خط L_1 زودتر Overload بشود بيشتر است.

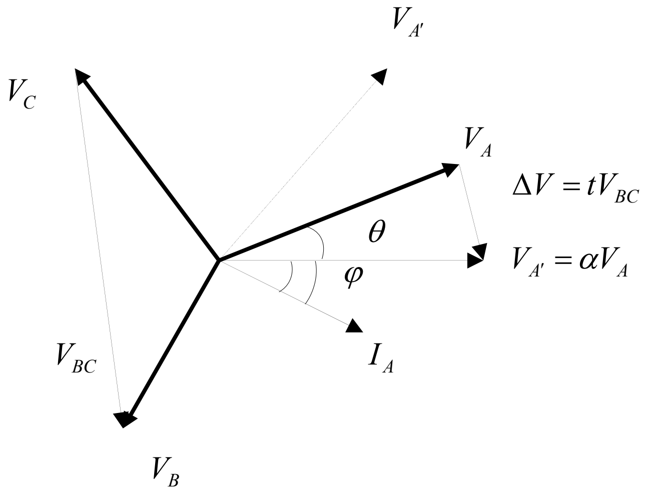


با استفاده از خازنهاي سري مي‌توان راكتانس خط را پائين آورد. راه حل ديگر استفاده از ترانسفورماتورهاي شيفت فاز است (براي پايين آوردن Overload خط) سيستم تحريك اين ترانسفورماتور موازي با دو فاز ديگر است تا بتواند از دو فاز ديگر تحريك شود.



$$V_{A'N} = V_{AN} + \Delta V = V_{AN} + tV_{BC} = (1 - j\sqrt{3}t)V_{AN} = \alpha V_{AN}$$

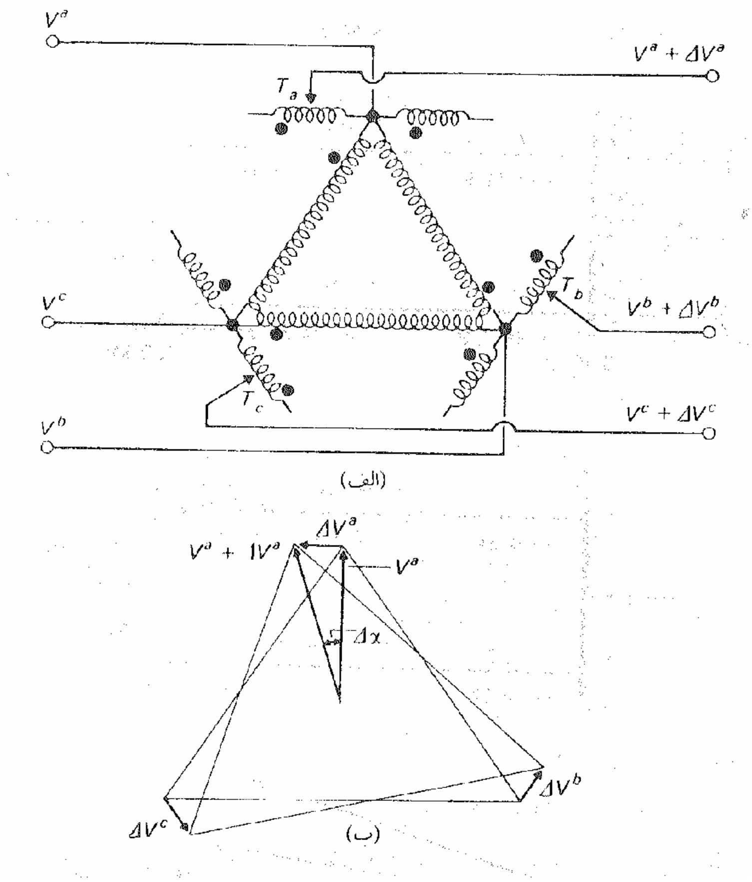
V_A و $V_{A'}$ از لحاظ مقدار تقريباً باهم برابر هستند فقط $V_{A'}$ شيفت فاز داده شده است. اين كار عينا براي دو فاز ديگر نيز بايستي تكرار شود.



پس به وسیله این ترانسفورماتورها مي‌توان در فازها تغيير طولي نداد و فقط تغيير عرضي (تغيير شيفت فاز) داد پس در خطي كه مي‌خواهيم قدرت انتقال بيشتري داشته باشيم اختلاف فازي بيشتري نسبت به دو فاز به وجود مي‌آيد، پس براي كنترل جريان اكتيو در باي‌ها مي‌توان از ترانس فاز شيفت استفاده كرد. هر چقدر در يك خط اختلاف فاز V و I را كمتر كنيم P بيشتري از آن خط مي‌گذرد.

$P = VI\cos\varphi$

در نوع دیگری از ترانسفورماتور شیفت فاز، سیم پیچ سری هر فاز به وسیله سیم‌پیچ تحریک متصل به دوفاز دیگر تحریك مي‌شود .



ترانسفورماتور تنظیم زاویه فاز ولتاژ

$$\Delta V_{an} = \begin{cases} 0 \\ 180^\circ \end{cases} \parallel V_{bc}$$

اگر سیم پیچ سري با سیم پیچ تحريك هم سو باشد ΔV به صورت تقدم فاز نسبت به ولتاژ خودش خواهد بود.

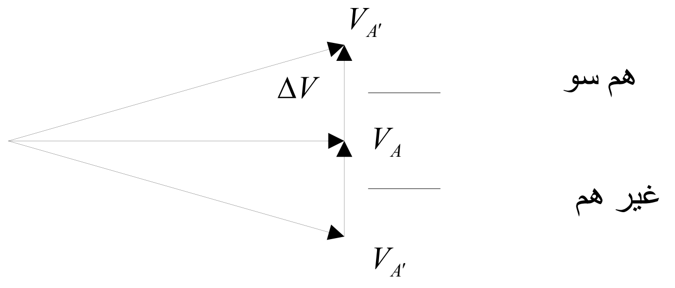
$|V_A| \cong |V_{A'}| \qquad |V_C| \cong |V_{C'}|$

$|V_B| \cong |V_{B'}|$

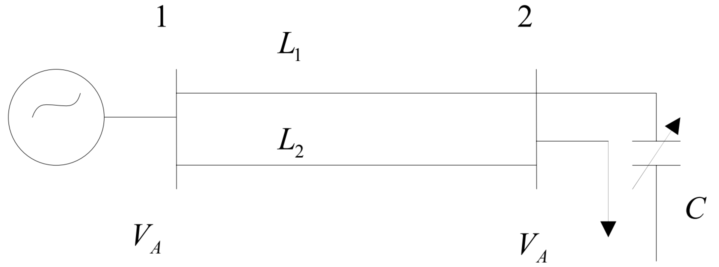
تقدم فاز اگر سیم پیچ سري با سیم پیچ تحريك غير هم سو باشد ΔV نسبت به فاز 90° اختلاف فاز داشته و 90° تاخير فاز دارد.

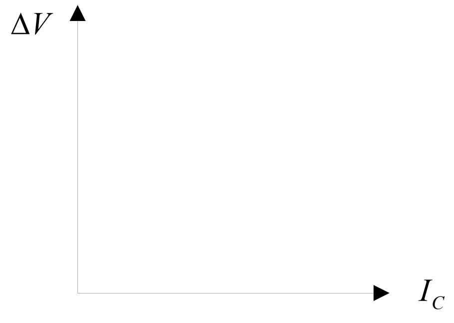
تقدم فاز يا تاخير فاز بودن ΔV بستگي به هم سو يا غير هم سو بودن سيم پيچ سري با سيم پيچ تحريك دارد.

پس در اين سيستم $|V|$ تقريباً ثابت مي‌ماند $|V_A| \cong |V_{A'}|$ و اختلاف فاز ايجاد مي‌شود كه در سيستم پارالل كه مي‌خواستيم قدرت بيشتري به وسيله خط انتقال دهيم اختلاف فاز بيشتري بين دو باست براي آن خط را بيشتر كرده و جريان اكتيو خط را بالا ببرد.

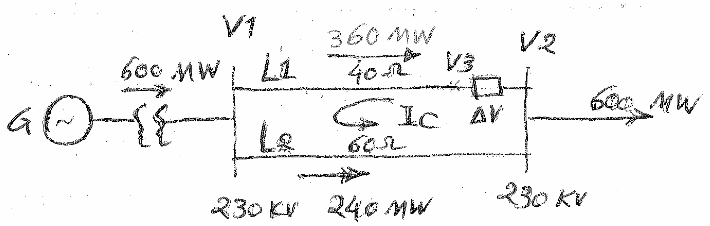


كنترل ولتاژ و ضريب قدرت (و فركانس) در مصرف كننده ها و خطوط انتقال با تزريق قدرت راكتيو نيز انجام می شود. اين كار با تزريق قدرت راكتيو در حالت پس فاز و پيش فاز امكان پذير می باشد. در متيج اين عمل سطوح ولتاژ بالا يا پائين رفته و ضريب قدرت اصلاح می گردد.





مثال - در شکل زیر دو خط انتقال 230kv موازي 600MW قدرت را از باس نیروگاه 1 به باس 2 که باس بار است انتقال مي‌دهد خط L_1 داراي راکتانس $40\frac{\Omega}{phase}$ و خط L_2 داراي راکتانس $60\frac{\Omega}{phase}$ مي‌باشد به وسیله کنترل ژنراتور باس 1 روي 23okv نگه داشته مي‌شود و یك خازن متغیر به باس بار 2 وصل شده براي ثابت نگه داشتن قدر مطلق باس شماره 2 به 23okv به وسیله نصب ترانس تنظیم کننده زاویه فاز به خط L_1 در باس 2 مي‌خواهیم قدرت بین L_1 و L_2 را به طور مساوي انتقال یابد پیدا کنید. همچنین زاویه فاز جدید ولتاژهاي شین‌هاي ۱ و ۲ را محاسبه نمائید.



حل تقریبي

$$p = \frac{|V_1||V_2|}{X}\sin\delta \qquad |V_1| \approx |V_2|$$

$$p_1 = \frac{230^2}{40}\sin\delta$$

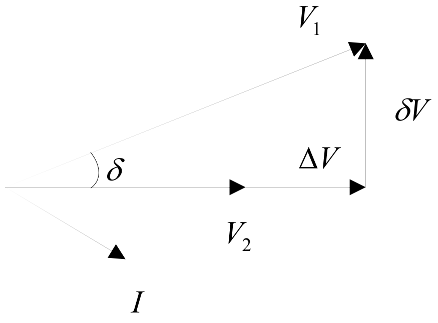
$$|V_1|\,|V_2|$$

$$p_2 = \frac{230^2}{60}\sin\delta \quad p_1 + p_2 = 600 \quad \delta = 15.796^\circ \quad \begin{cases} p_1 = 360\text{MW} \\ p_2 = 240\text{MW} \end{cases} \quad \Delta p_{3\phi} = 60\text{MW}$$

$$p_1 = 300 = \frac{230^2}{40}\sin(\delta - \alpha) \quad |V_2| \approx |V_3|$$

$$p_2 = 300 = \frac{230^2}{60}\sin(\delta)$$

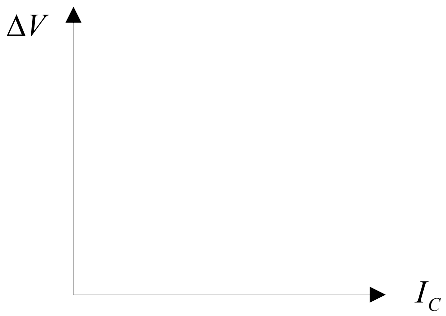
$$\delta = 19.893^\circ, \alpha = 6.78^\circ$$



پس قدرتهاي راكتيو براي حالت ۲ و يا حالت قبل مي‌شود پيدا كرد.

ترانس بايستي يك شدت جريان دوراني در حلقه ايجاد كند و از شدت جريان مولفه اكتيو ۱ بكاهد (به اندازه $\Delta P_{3\phi}$)

هم جهت با شدت جريان ۲ باشد شدت جريان Ic هم فاز V_2 و 90° اختلاف با ΔV دارد (چون جريان تقريباً سلفي است نسبت به ΔV) و اين Ic فقط مولفه راكتيو دارد اين جريان به مولفه اكتيو I_2 و از مولفه اكتيو I_1 كم مي‌كند.



$\Delta V = 27.344 kv / line$

$Ic = \dfrac{\Delta V}{Zloop} \quad Tan\alpha = \dfrac{\Delta V}{V_2} \Rightarrow \Delta V = 15.78 kv / phase$ راه حل تقريبي

$$Ic = \frac{j15.78}{j100} = 0.1578\angle 0 KA / phase$$

$\Delta P1_{\phi} = |V_2||Ic| = \dfrac{230}{\sqrt{3}} \times 0.1578 = 20.45 MW / phase \simeq 20 MW$ براي هر فاز

$$\Delta P_{3\phi} = 3\Delta P_{1\phi} \simeq 60 MW$$

کنترل توان راکتیو و ولتاژ

در سیستم دوباس زیر افت ولتاژ مابین آنها بصورت زیر نوشته مي‌شود :

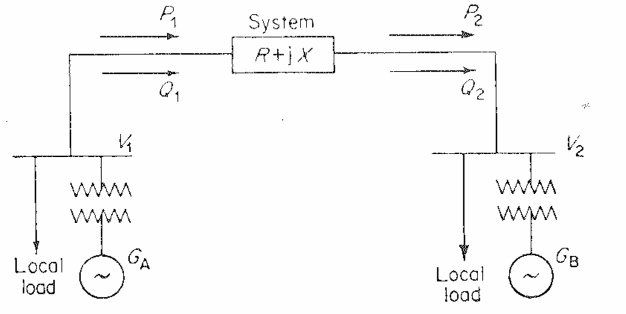
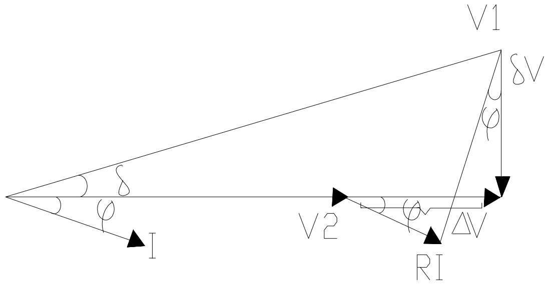


Figure 4.7 Two generating stations linked by an interconnector of impedance $(R+jX)\Omega$. The rotor of A is in phase advance of B and $V_1 > V_2$.



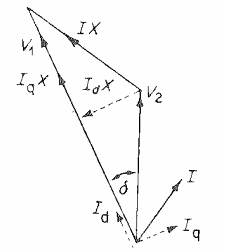
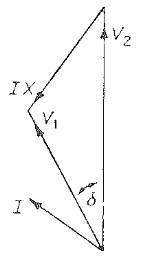


Figure 5.1 Phasor diagram for system shown in Figure 4.7; $V_1 > V_2$. Resistance of line zero, inductive reactance X ohms. I_d and I_q in-phase and quadrature components of the current $\mathbf{I}$.



Phasor diagram for system in Figure 4.7. $V_2 > V_1$.

$$V_1^2 = (V_2 + \Delta V)^2 + \delta V^2 = (V + RI\cos\varphi + I\sin\varphi)^2 + (XI\cos\varphi - RI\sin\varphi)^2$$

$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V_2} \quad , \quad \delta V = \frac{XP - RQ}{V_2}$$

$$If \quad \delta V << V_2 + \Delta V \quad then \quad V_1^2 = \left(V_2 + \frac{RP + XQ}{V_2} \right)^2$$

$$and \quad V_1 - V_2 = \frac{RP + XQ}{V_2} = \Delta V$$

بنابراين اختلاف ولتاژ بين دوشين V_2, V_1 توسط رابطه تقريبي ΔV بيان مي‌شود.

$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V_2}$$

$$Q = \frac{V_2 \Delta V}{X} - \frac{R}{X} P$$

اگر X, V_2 ثابت باشند و رابطه بين قدرت اكتيو و راكتيو

$$Q = K - \frac{R}{X} P$$

$$Q' = K - \frac{R}{X} P' \qquad \Rightarrow \qquad Q - Q' = \frac{R}{X}(P' - P)$$

تغييرات در توان اكتيو باعث تغييرات در توان راكتيو مي‌شود. اما مقدار R بخاطر بزرگ بودن X مقدار كوچكي است و مي‌توان در قسمت دوم صرفنظر كرد. پس مي‌توان نتيجه گرفت كه تغييرات اندازة ولتاژ بيشتر در ارتباط با تغييرات توان راكتيو است.

$Q \, \alpha \, V_2$

در مولد $\begin{cases} \text{تولید راکتیو قدرت} > 0 \\ \text{راکتیوجذب قدرت} < 0 \end{cases}$

در بار (ترانسفورماتورها، خطوط، کابل‌ها) $\begin{cases} \text{تولید راکتیو قدرت} < 0 \\ \text{راکتیوجذب قدرت} > 0 \end{cases}$

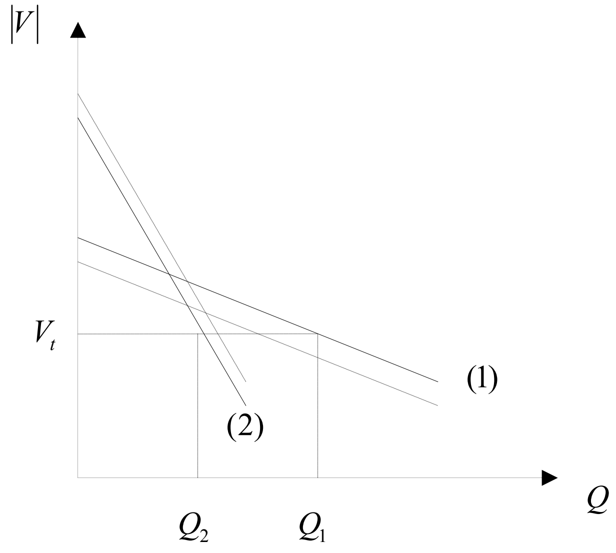
ارتباط بين اين دو كانال توليد مشابه هم هستند اين دو موضوع را موضوع دوگانه گويند.

dual concept applying to P' V.S. f and $|V|$ V. S Var

در بحث پارالل بار بين دو ژنراتور در اينجا نيز قابل بحث است.

$\left.\begin{matrix} P, F \\ Q, V \end{matrix}\right\}$ رابطه دوگانه

براي كم كردن قدرت واحد ۱ و زياد كردن قدرت واحد ۲ با كم كردن قدرت واحد ۱ براي ثابت بودن فركانس بايستي مشخصه آن به پائين آمده و به يك V ديگر افت پيدا خواهد كرد. براي رساندن V به V_t بايستي تحريك ژنراتور ۲ را زياد كنيم كه با اينكار مشخصه ۲ به بالا مي‌رود.



ميزان قدرت راكتيو در ژنراتور بوسيله نسبت اتصال كوتاه (عكس راكتانس سنكرون) مشخص مي‌شود.

در اينصورت ميزان جذب يا توليد قدرت راكتيو در ژنراتور بستگي به پيش فاز (زيرتحريک Under excited) يا پس‌فاز (فوق تحريک Over excited) بودن ژنراتور دارد.

براي يك ژنراتور ۲۰۰MW و ضريب قدرت ۰/۸۵ با ميزان پايداري ۱۰ درصد ظرفيت قدرت راكتيو برابر ۴۵MVAR است.

مقدار قدرت راكتيو جذب شده در بار نيز به ميزان I^2X ارتباط دارد.

در برخي از بارها كه در آنها خازن وجود دارد (در خطوط طويل) تبديل به توليدكننده قدرت راكتيو مي‌شوند.

در ترانسفورماتورها اغلب قدرت راكتيو جذب مي‌شود.

$X_{T(pu)}$ راکتانس ترانسفورماتور

$3VI_{rated}$ قدرت تولید توان نامي

$$(\text{اهم}) \text{ راکتانس} = X_{Base} X_{T(pu)} = \frac{V}{I_{rated}} X_T$$

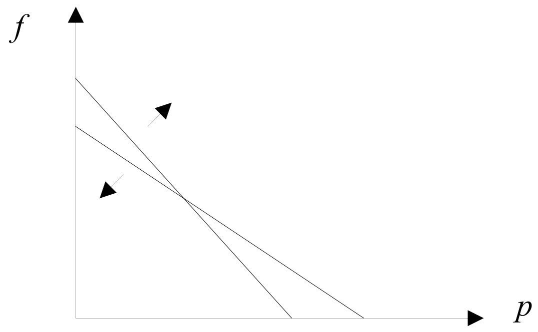
$$\text{میزان قدرت جذب شده} = 3I^2 \frac{VX_T}{I_{rated}} = 3\frac{I^2V^2}{(IV)_{rated}} X_T = \frac{(VA\,load)^2}{VA\,rated} X_T$$

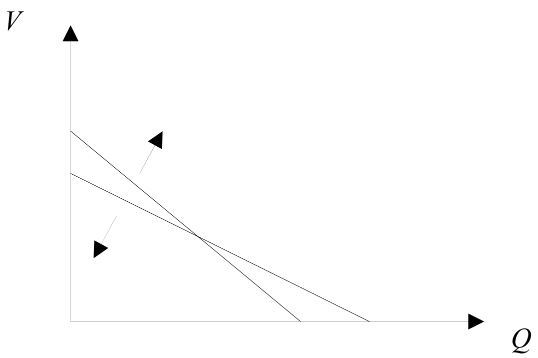
کابل‌ها با ظرفیت بالا به مثابه ژنراتورهاي تولید قدرت راکتیو هستند.

در يك كابل ۲۷۵KV و ۲٤۰MVA مقدار قدرت راکتیو تولیدي $\frac{MVAR}{Km}$ ۷/۵ – ۶/۲۵ است.

۱۳۲ KV	۱/۹
۳۳ KV	۰/۱۲۵

$\lvert V\rvert$ V.S Var	P V.S f
۱- کنترل میدان تحریك ژنراتور	۱- کنترل سرعت محرکة اصلي
۲- ولتاژ ترمینال	۲- فرکانس
۳- $Q_L = Q_1 + Q_2$	۳- $P_L = P_1 + P_2$
٤- $\lvert V\rvert$ V.S Q	٤- f V.S P
۵- بوسیلة افزایش تحریك یکي از ژنراتورها ولتاژ ترمینان تنظیم $Q - V \propto AVR$	۵- بوسیلة افزایش سرعت نیروي محرکة فرکانس تنظیم $f \propto P \propto$
۶- براي کنترل ولتاژ ترمینان تحریك دو نیروگاه بصورت عکس هم عمل مي‌کنند.	۶- براي کنترل فرکانس کنترل نیروي محرکة دو نیروگاه بصورت عکس هم عمل مي‌کنند.

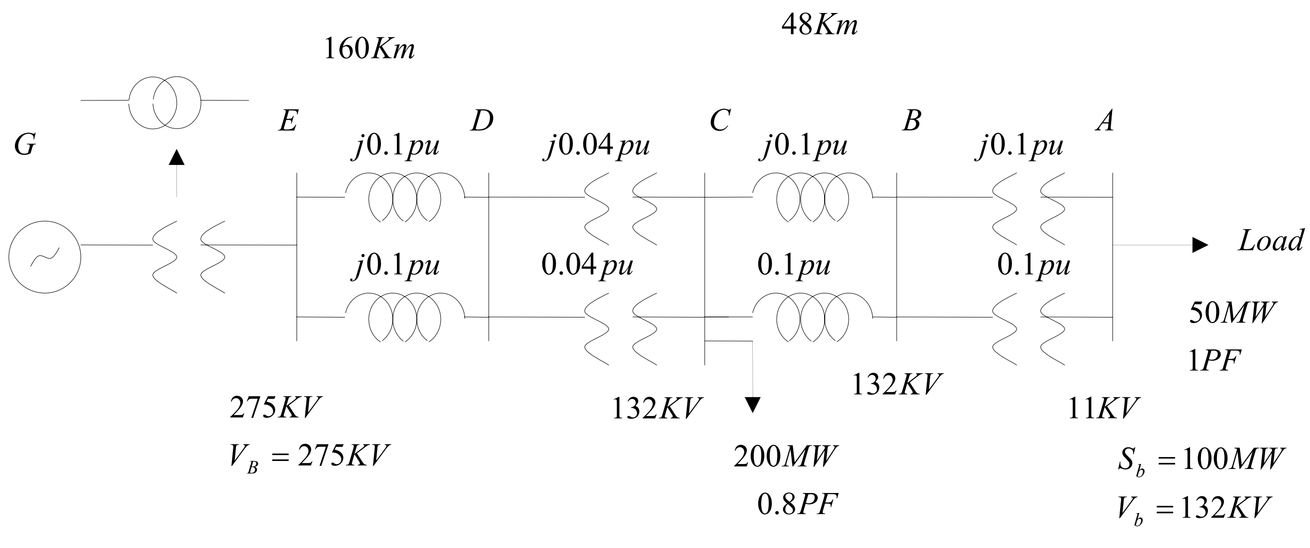




پس بين اين دو سيستم يك دوگانگي ديده مي‌شود. پس ژنراتور خودش يك عامل جذب براي كنترل بار است فقط عيب آن اين است كه قابليت و ظرفيت آن بحد كافي نيست و نمي‌توان تمامي بار شبكه را بوسيلة ژنراتور تنظيم نمائيم.

المانهاي موجود در شبكه ترانسفورمرها كه همواره قدرت راكتيو جذب مي‌كنند خطوط انتقال مخصوصاً خطوط انتقال طولاني و كابل‌ها كه قدرت راكتيو ايجاد مي‌كنند مخصوصاً در بار كه ژنراتورها خود مي‌توانند توليد و يا جذب قدرت راكتيو كنند و يا موتورهاي سنكرون بعنوان كمپانزاتور كه با دست زدن به تحريك آنها مي‌شود كه آنرا بعنوان مولد قدرت راكتيو بكار برد.

مثال : يك بار با ظرفيت 50MW با ضريب قدرت واحد در شين A در شبكه زير مفروض است. در اين شبكه براي تنظيم ولتاژ چقدر قدرت راكتيو احتياج است تا ژنراتور توليد نمايد كه بايد آيا به تنهايي كافي است يا نه؟



$$V \propto Q \begin{cases} Q_G \\ Q_C \\ Q_L \end{cases}$$

از انتهاي خط شروع كرده و جلو مي‌رويم و مقدار قدرت اكتيو و راكتيو موردنياز را در بارها بدست آوريم.

در شين A   بار $P = 0.5\,Pu \qquad Q = 0$

در شين B $X_{AB} = X_{BC} = 0.05$

$X_{CA} = 0.05 + 0.05 = 0.1$

افت قدرت راكتيو خط (فقط سلفي است) $I^2 X_{CA} = ?$

$$|I|^2 = \frac{Q^2 + P^2}{V_2} = \frac{0^2 + 0.5^2}{1}$$

$$I_2^2 X_{CA} = \frac{0.5^2}{1} \times .025 = Q_{CA}$$

$$\cos\varphi = 0.8 \quad \rightarrow \quad \mathrm{Q} = \tan\varphi \times \mathrm{P} = 1.5$$

در شين C $\quad Q_c = 0.025 + 1.5 = 1.525 \qquad P_C = 2 + 0.5 = 2.5 \quad pu$

$$X_{EC} = X_{ED} + X_{DC} = 0.05 + 0.02 = 0.07$$

$$I^2 X_{EC} = \frac{1.525^2 + 2.5^2}{1} \times 0.07 = 0.6$$

اگر از تلفات ترانس و ژنراتور صرفنظر شود

$$\begin{cases} P_E = P_{EC} + P_C \\ \quad P = 2.5\, pu \end{cases} \qquad \begin{cases} Q_E = Q_{EC} + Q_C \\ Q = 1.525 + .6 = 2.125\, pu \end{cases} \quad \rightarrow \quad \cos\varphi = .7619$$

حال بايد ديد ژنراتور تحت اين PF و قدرت ميتواند ظرفيت توليد داشته باشد يا نه؟

رابطه بين ولتاژ و قدرت اكتيو و راكتيو در يك نقطه (باس)

در يك نقطه ولتاژ تابع قدرت اكتيو و راكتيو است.

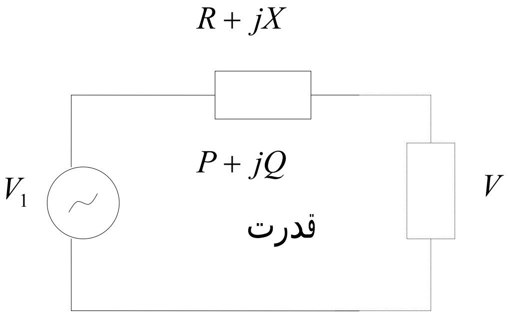
$$V = f(P, Q)$$

$$dV = \frac{\partial V}{\partial P} dP + \frac{\partial V}{\partial Q} dQ$$

$$\frac{\partial P}{\partial V} \cdot \frac{\partial V}{\partial P} = 1 \qquad \frac{\partial Q}{\partial V} \cdot \frac{\partial V}{\partial Q} = 1$$

$$(١) \quad dV = \frac{dP}{\frac{\partial P}{\partial V}} + \frac{dQ}{\frac{\partial Q}{\partial V}}$$

تغييرات ولتاژ در يك نقطه بستگي به تغييرات قدرت اكتيو و راكتيو نسبت به ولتاژ دارد كه اين تغييرات ميتواند قبلاً مشخص شود. براي پيدا كردن اين تغييرات در يك مدار ساده بصورت زير اقدام می شود.



$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V}$$

$$(V_1 - V)\ V = RP + XQ$$

حال اگر V_1 ثابت باشد V بستگي به مقدار قدرت انتقالي اكتيو و راكتيو دارد. اين معادله را نسبت به P حل مي‌كنيم :

$$P = \frac{(V_1 - V)}{R}V - \frac{XQ}{R} \qquad Q = \frac{(V_1 - V)}{X}V - \frac{RP}{X}$$

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{V_1 - 2V}{R} \qquad \frac{\partial Q}{\partial V} = \frac{V_1 - 2\partial}{X}$$

با جايگزين كردن اين دو معادله در بالا داريم : (۱)

$$dV = \frac{dP.R + dQ.X}{V_1 - 2V}$$

هرگاه V_1, dV ثابت باشند $dV = 0$

تغييرات قدرت اكيتو نسبت به تغييرات قدرت اكتيو $\quad R\,dP + X\,dQ = 0 \ \ \rightarrow \ dQ = -\frac{R}{X}dP$

$$V \alpha Q \ \ \alpha \ P \alpha f$$

ضريب سفتي يا stiffness يك ناحيه كه قبلاً اشاره شد :

$$\frac{\Delta P}{\Delta f} = K$$

هرگاه $\frac{\Delta Q}{\Delta V} \propto \frac{V}{X}$ براي يك شبكه يا يك باس در دست داشته باشيم مي‌توان از روي اين نسبت مقدار قدرت راكتيو تزريق شده به آن منطقه براي ترميم افت و ولتاژ مشخص ساخت و از روي آزمايش بدست مي‌آيد.

در حالتي مي‌دانيم كه وقتي قدرت راكتيو مثلاً Q_{before} و ولتاژ در آن نقطه V_{before} (قبل از موقعيكه به آن نقطه قدرت راكتيو تزريق كنيم حالت معمولي before)

حال يك قدرت راكتيو معلوم به آن نقطه تزريق مي‌كنيم و مي‌توان ولتاژ را در آن نقطه اندازه گرفت.

Q_{after} $$\frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{Q_{after} - Q_{before}}{V_{after} - V_{before}}$$

V_{after}

تغييرات $\frac{\Delta Q}{\Delta V}$ نيز قبلاً بدست آمده است هرچه راكتانس آن نقطه كمتر باشد اين نسبت بزرگتر خواهد بود. وقتي چند خط در يك باس تلاقي كنند X كوچك بوده و اين نسبت بزرگ خواهد بود پس اين نسبت بستگي به شرايط شبكه دارد و مقدار آن بطور متوسط $10 - 15\frac{\text{MVar}}{1\text{KV}}$ مي‌باشد.

مثال : اگر افت طبيعي در يك نقطه بدون تزريق‌وار مصنوعي 5KV باشد و تغييرات $\frac{\Delta Q}{\Delta V}$ در آن نقطه برابر $15\frac{\text{KVAR}}{\text{KV}}$ باشد براي ترميم 5KV افت ولتاژ چقدر قدرت راكتيو بايستي بدان نقطه تزريق گردد؟

نتيجه مهم : $\frac{\Delta Q}{\Delta V}$ برابر شدت جريان اتصالي در همان نقطه (باس) است.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{V_1 - 2V}{X}$$

حال اگر شكل قبل ولتاژ خروجي اتصال كوتاه شود $V = 0$ از روي مدار مشخص است كه

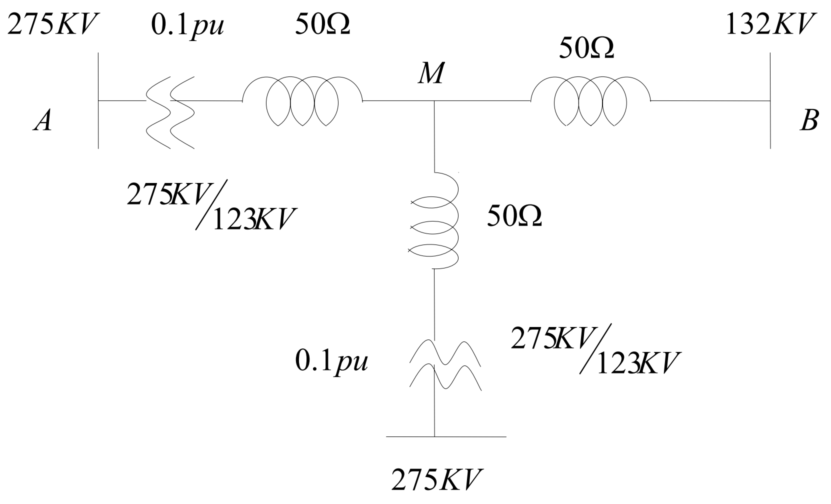
$$I_{S.C} = \frac{V_1}{X} \text{ [A]} \quad R << X$$

در حالت بي‌باري كه مدار باز است. $\frac{\partial Q}{\partial V} = -\frac{V_1}{X} \quad (V = V_1)$

$\frac{\partial Q}{\partial V}$ از نظر قدرمطلق برابر شدت جريان اتصال كوتاه است.

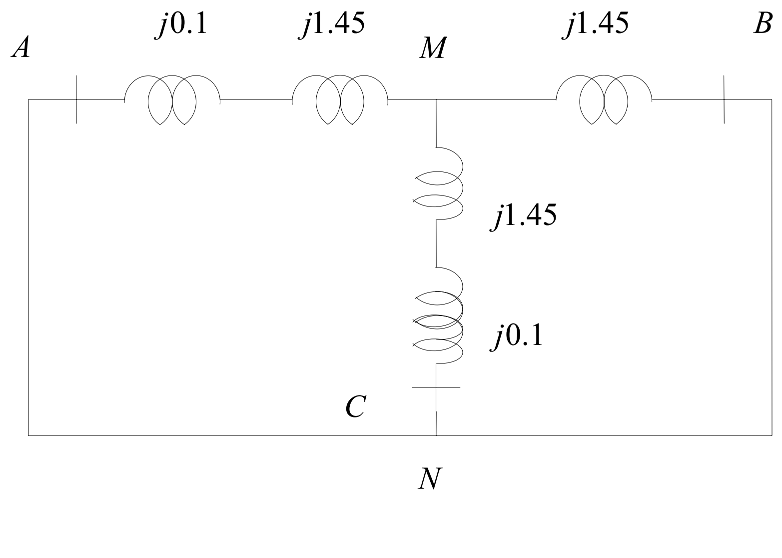
$$\left|\frac{\partial Q_P}{\partial V_{Phase}}\right| = I_{S.C,Phase}$$

مثال : سه نقطه تغذيه CBA به يك باس مشترك m وصل شده‌اند نقطه تقديه A روي 275KV ثابت نگه داشته شده و از طريق ترانس 275/132KV به نقطة m وصل شده اند. راكتانس ترانسفورماتورها $0.1pu$ مى باشد.



راكتانس خط 132KV برابر 50Ω است. نقطه تغذيه B داراي ولتاژ اسمي 132KV بوده و از طريق خط 132KV با راكتانس 50Ω به نقطه m اتصال داده شده است. نقطه تغذيه C دارای ولتاژ اسمي 275KV است و از طريق ترانسفورماتور 275/132KV كه داراي راكتانس $0.1pu$ و خط 132KV با راكتانس 50Ω به نقطة m وصل شده است. اگر در يك بار معيني ولتاژ خط در نقطه m، 5KV از مقدار اسمي افت پيدا كند حساب كنيد قدرمطلق ظرفيت جبران ساز راكتيو (خازن) را كه به نقطه m تزريق نمود تا ولتاژ اوليه بدست آيد. مقادير پريونيت در مقدار 500MVA داده شده و از مقاومت خطوط صرفنظر شده است.

مدار معادل حالت اتصال كوتاه



$$Z_b = \frac{132^2}{500} = 34.85\Omega$$

$$X_{MN} = 0.505057\text{pu} \cong 0.5 \text{ pu}$$

شدت جريان اتصال كوتاه سه فاز

$$Z(\Omega) = Z_{base} \times Z(\text{pu}) = \left(\frac{V}{I_{Full\ Load}} \right) \times Z(\text{pu})$$

$$I_{S.C.} = \frac{V}{Z_{S.C}(\Omega)} = \frac{V}{Z_{base} \times Z_{SC}(\text{pu})} = \frac{V}{\frac{V}{I_{Full\ Load}} \times Z_{S.C.}(\text{pu})} = \frac{I_{Full\ Load}}{Z_{S.C}.(\text{pu})}$$

$$S_{3phase_{S.C}} = \sqrt{3}\ V_{Line} I_{S.C_{Line}} = \sqrt{3}\ V \frac{I_{Full\ Load}}{Z_{S.C}(\text{pu})} = \frac{S_{Full\ Load}}{Z_{S.C}(\text{pu})}$$

$$S_{3phase\ S.C} = \frac{500}{0.5} = 1000\text{MVA}$$

$$I_{S.C,Line} = \frac{S_{3phase S.C}}{\sqrt{3}\ V} = \frac{1000\text{M}}{\sqrt{3} \times 132\text{K}} = 4373.86\ \ \text{A}$$

در بحث سه فاز

$$\frac{\partial Q_{3phase}}{\sqrt{3}\ \ \partial V_L} = I_{S.C,Line} \quad \rightarrow \quad \frac{\partial Q_{phase}}{\partial V_{phase}} = \frac{\frac{\partial Q_{3phase}}{3}}{\frac{\partial V_L}{\sqrt{3}}} = \frac{\partial Q_{3phase}}{\sqrt{3}\ \ \partial V_L}$$

كل قدرت اكتيو سه تار در نقطه M

$$\Delta Q_M = \sqrt{3} I_{S.C.,Line} V_L = \sqrt{3} \times 5\text{KV} \times 4.37386\text{KA} = 37.88\ \ \text{MVAR}$$

جبران سازها

قدرت انتقالي در يك شبكه غيرواحد بصورت زير است.

از رابطه $\Delta \text{V} = \frac{\text{RP} + \text{XQ}}{\text{V}}$ مشخص است كه افت فشار بشدت به مقدار توان راكتيو Q وابسته است.

افزايش عبور جريان خط باعث ايجاد افت I^2R و كاهش ظرفيت حرارتي خط خواهد بود.

يكي از بهترين محل‌ها براي تزريق قدرت راكتيو در محل بار مي‌باشد. براي تزريق قدرت راكتيو سه روش زير وجود دارد :

1. Static shnnt Capacitors and Reactors

در سيستم‌هاي توزيع و فوق توزيع (بهمراه ترانسفورماتورهاي تپ چنجر)

خازنهاي موازي براي پيش فاز نمودن ضريب قدرت مدارات استفاده مي‌شود. (در مدارات پس‌فاز بكار مي‌روند) توليدكننده توان اكتيو

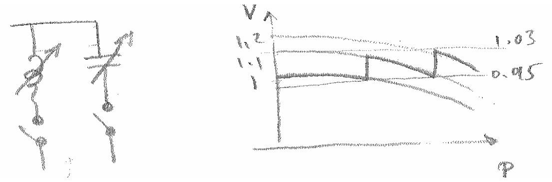
سلفهاي موازي پس‌فاز (در مدارات پيش‌فاز مثل كابل‌ها بكار مي‌روند) مصرف‌كننده توان راكتيو هستند. در هر دو حالت هدف تأمين توان راكتيو Q روي تثبيت مقدار ولتاژ مي‌باشد.

خازنها بصورت مستقيم و يا از طريق سيم‌پيچ ثالثيه يك ترانسفورماتور به شين متصل شده و مقدار تلفات و افت ولتاژ را كاهش مي‌دهند.

بدبختانه با كاهش ولتاژ شين، توان راكتيو توليد شده توسط خازن يا سلف (راكتور) نيز كاهش مي‌يابد.

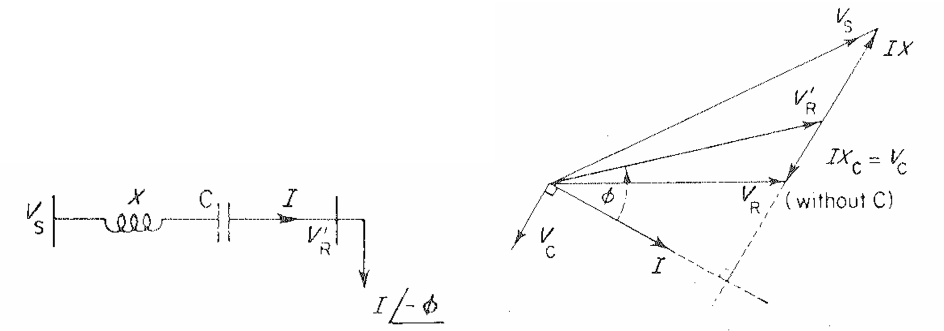
همينطور در بارهاي روشنائي با افزايش ولتاژ به سمت مقادير غيرمجاز خروجي خازن موازي نيز افزايش مي‌يابد. كنترل ولتاژ در چند مرحله (پله) انجام مي‌شود.

پس ΔV توسط توليد محلي Q در شين بار با افزايش ولتاژ دو طرف خط كاهش مي‌يابد.



2. Series Capacitors

اين خازنها بصورت سري با خط انتقال متصل مي‌شوند و براي كاهش ميزان راكتانس سلفي خط بين شين توليد و مصرف بكار مي‌روند. يكي از شرايط خطرناك، وجود اضافه ولتاژ توليدي در حين عبور جريان اتصال كوتاه از خازن سري خواهد بود كه توسط جرقه‌گيرها باتي حفاظت شوند.



(خازنهاي سري در خلال خطاها، اتصال كوتاه مي‌شوند تا به آنها آسيبي نرسد). (كليدهاي اتصال كوتاه‌كننده معمولاً تريسقدري است).

اختلافات اساسي بين تأثير خازنهاي سري و موازي :

۱- در صورتيكه ميزان وار موردنياز بار كم باشد خازنهاي سري به تعداد كم استفاده مي‌شوند.

۲- تأثير خازن سري در كاهش جريان خط كم است. در صورتيكه شرايط ظرفيت حرارتي خط در نظر گرفته شود خازن موازي تأثير بيشتري بر جريان خط مي‌گذارد.

۳- هر گاه افت ولتاژ عامل محدودكننده مي‌باشد در آنصورت تأثير خازنهاي سري در اينمورد بيشتر خواهد بود.

٤- هرگاه راكتانس كل خط بزرگ باشد خازنهاي سري بسيار سودمند بوده و حتي پايداري را نيز بهبود مي‌بخشند.

در حقيقت نقش اصلي خازن سري در بهبود پايداري خطوط بلند است.

وقتي در خطوط بسيار بلند خازن سري استفاده مي‌شود از راكتور موازي نيز براي كنترل ولتاژ حالتهاي كم‌بار و بي‌بار استفاده مي‌شود.

نتايج در نصب خازنهاي سري

۱- افزايش قدرت انتقالي ماكزيمم و بهبود پايداري ماندگار

۲- افزايش بار طبيعي خط $SIL\uparrow = P_C = \dfrac{V^2}{Z_C\downarrow}$ بار طبيعي

۳- كاهش زاويه انتقال δ در قدرت ثابت $P = \dfrac{|V_1||V_2|}{X\downarrow}\sin\delta\downarrow \Rightarrow \delta\downarrow$ ثابت

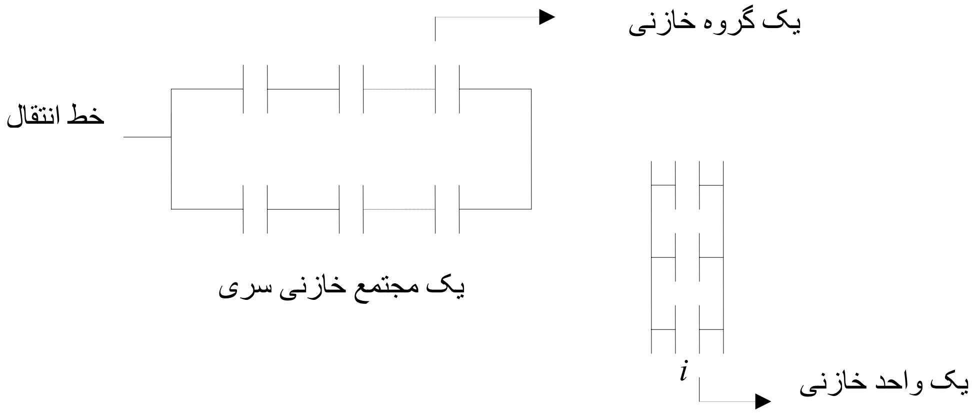
٤- كاهش تلفات خط

٥- كاهش افت ولتاژ و ايجاد پروفيل ولتاژ بهتر در طول خط

٦- بهبود پايداري گذرا

۷- كاهش حساسيت ولتاژ به اختلالات گذرا

محل نصب خازنهاي سري (بسته به عوامل اقتصادي) در يك يا در محل در ابتدا، انتها و وسط خط انتقال است.



3. Synchronous Compensators

جبران سازهای سنکرون

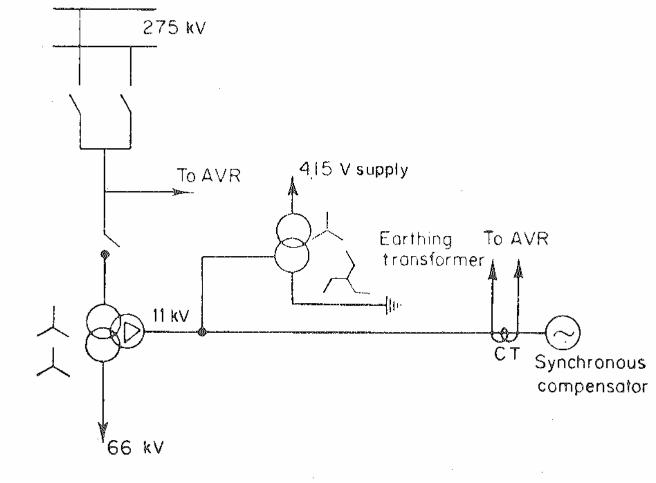
(هم در سيستم فوق توزيع و هم انتقال)

جبران كننده سنكرون در واقع يك موتور سنكرون بي‌بار است و جذب يا توليد توان راكتيو در آن به مقدار تحريك بستگي دارد.

تلفات آن قابل مقايسه با خازنهاي استاتيك است در حاليكه ضريب قدرت آن غيرصفر مي‌باشد.

در حالت high load بصورت overxcited بعنوان جبران و تنظیم‌کننده ولتاژ بکار مي‌رود (بصورت اتوماتیکی).

در حالت light load بصورت underexcited



سیستم AVR مربوط به کمپاتراتور توسط ولتاژ خط 275kv و جریان کمپانزاتور کنترل مي‌شود.

این کار باعث ایجاد تغییرات لازم در مشخصه V-Q مربوط به سیستم خواهد شد.

از ویژگیهاي مهم این روش انعطاف عملکرد آن در شرایط بارداري مختلف است. هزینه نصف چنین تاسیساتي نیز بالاست.

براي خطوط بلند HV در انتهاي بار با ضریب قدرت کمتر از ۱ این تجهیزات توجیه نمي‌شوند و بجاي آنها در قسمت LV از خازن موازي استفاده مي‌شود.

۱- کنترل ولتاژ در یك نقطه

۲- تنظیم خط و در نتیجه افزایش قدرت اکتانس و بهبود پایداري سیستم

۳- تأمین قدرت راکتیو در شرایط اضطراري

٤- کاهش نوسانات

4. Static Compensators

جبران‌کننده‌هاي استاتیك

۱- راکتیو کنترل‌شده با تریستور TCR

۲- TCR و خازنهاي ثابت موازي TCR/FC

۳- خازن سوییچ شده با تریستور TSC

٤- راکتور اشباع شده SR

بررسي اقتصادي ميزان ترميم قدرت راكتيو

مثال : قدرت راكتيو مي تواند در محل يا نزديك‌تر به بار توليد شود و اينكار به سود و نفع مصرف‌كننده و هم به توليدكننده است. توليدكننده مي‌خواهد فقط قدرت اكتيو انتقال دهد چون در موارد مصارف خانگي و تجاري فقط به قدرت اكتيو تعرفه پرداخت مي‌شود در اين محل براي قدرت راكتيو كشيده شده در شبكه پولي داده نمي‌شود تلفات خط و سيستم را افزايش مي‌يابد بخاطر وجود مدرك راكتيو و شدت جريان نامي خط افزايش مي‌يابد تول گيس در مصارف كه داراي ضريب قدرت پائين‌تر هستند مي‌خواهد تا ضريب قدرت خودش را بالا ببرد و يا تعرفه الكتريكي مصرف را دو قسمت كند كه براي بارهاي صنعتي صورت مي‌گيرد.

يك تعرفه براي KVA موردنظر براي مصرف محل $f\ A \times KVA + B \times KWh$

و يك تعرفه براي انرژي مصرف شده KWA مي‌تواند هم مؤلفه اكتيو دهم مؤلفه راكتيو داشته باشد. حال اگر مصرف‌كننده بخواهد VAR موردنياز خود را تأمين كند KVA پائين مي‌آيد و هر ماه يا سال و يا در هر پريود بازاي هر KVA پرداخت كسري خواهد داشت و اين كار براي كارخانه بطور جسماني صورت نمي‌گيرد بلكه آنها بايستي سرمايه‌گذاري روي كمپاترا تورها داشته باشد. اگر اين سرمايه‌گذاري انجام نشود بايستي تعرفه بپردازد بايد ديد چقدر بايد مصرف‌كننده ضريب قدرت خود را بالا برد تا برايش اقتصادي‌تر باشد؟

P_1 : قدرت قبل از اصلاح θ_1 : ضريب قدرت تأخيري

P_1, θ_2 : ضريب قدرت بعد از اصلاح

موردنياز كارخانه $KVA = \dfrac{P_1}{\cos\theta_1}$ $KVA = \dfrac{P_1}{\cos\theta_2}$

$$KVA \text{ صرفه‌جويي در } = \left(\frac{P_1}{\cos\theta_1} - \frac{P_1}{\cos\theta_2}\right).A$$

خازنهاي موجود در بازار بازاي هر KVAR ظرفيت خازن مطرح مي‌شود.

قدرت راكتيو موردنياز قبل از اصلاح $\cos^0_\varphi$ $P_1 \tan\theta_1$

بعد از اصلاح $P_1 \tan\theta_2$

KVAR مورد احتياج بوسيله كمپاتورتورها $KVAR = P_1 \tan\theta_1 - P_1 \tan\theta_2$

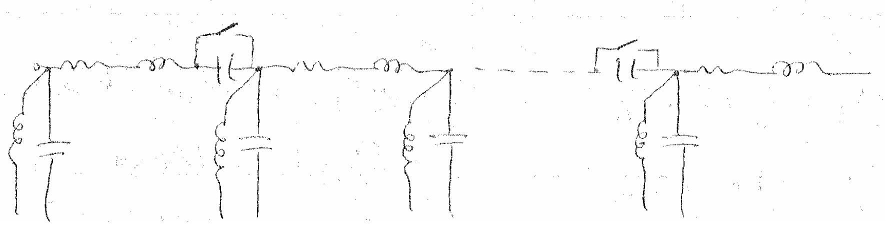
هزينه سالانه مسئله اگر برابر هر $C\ f/KVAR$ KVAR سرمايه‌گذاري شود اگر به بالا ضرب شود كل هزينه سرمايه‌گذاري است اين هزينه در طي عمر خازنها استهلاك دارد براي هر سال استهلاكهاي فراوان از جمله استهلاك ارزش پول و نرخ بهره بوجود مي‌آيد.

$C'\ f/KVAR =$ هزينه سالانه سرمايه‌گذاري

$$KVA \text{ صرفه‌جويي خالص } = \left[AP_1\left(\frac{1}{\cos\theta_1} - \frac{1}{\cos\theta_2}\right) - C'P_1(\tan\theta_1 - \tan\theta_2)\right]$$

θ_2 متغير است. مي‌توان از اين صرفه‌جويي نسبت به θ_2 مشتق گرفته و مساوي صفر قرار دهيم.

θ_2 بيشتر بستگي به هزينه سرمايه‌گذاري سالانه و تعرفه KVA دارد. $\sin\theta_2 = \frac{C'}{A}$



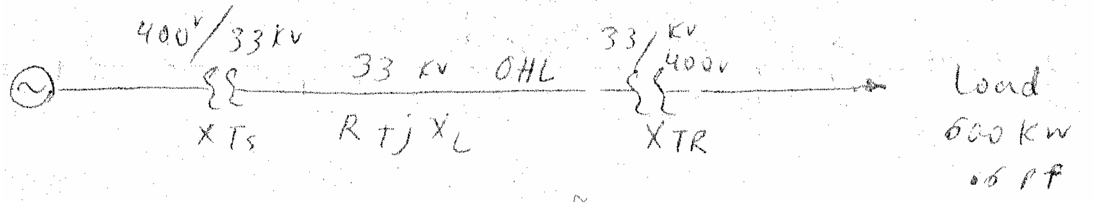
خازنهاي سري و كاهش افت ولتاژ، يا اتصال كوتاه كردن اين خازنهاي سري مي‌توان فقط بارهاي راكتور (سلف) را به مدار آورد. خازنهاي سري در مواقع بار زياد كه افت ولتاژ بيشتر مطرح است مورد استفاده است و راكتورها در مواقع بار سبك خازنهاي موازي عمده/ كاهش تلفات مي‌تواند قابليت انتقال خط را به حد قابل معيني افزاي دهد در خازنهاي سري افت ولتاژي را مي‌تواند جبران كند از خازنهاي موازي براي تقسيم بار بين خطوط استفاده مي‌شود چون بار بصورت عكس امپدانس بين خطوط تقسيم مي‌شود.

مثال : در شكل زير مي خواهيم ضريب قدرت را ابتدا توسط خازن موازي و سپس توسط خازن سري برابر 1 نمائيم. مقدار بار 600KW $PF = 0.6$ ترانسفورماتور $33^{KV}/_{400V}$ خط overhead 33KV $R_L + JX_L$ و ترانسفورماتور ديگر $400V/_{33KV}$ است.

$X_{TS} = 87\,\Omega/_{pu}$

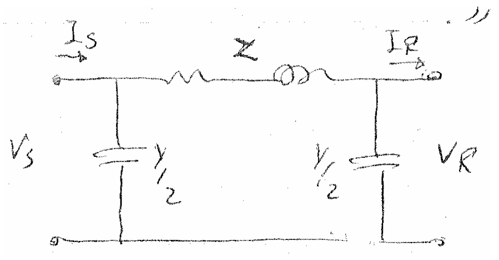
$X_{TR} = 87\,\Omega/_{pu}$

$R = 6u\ \Omega/_{pu}$ $X_L = 22\,\Omega/_{pu}$



قدرت راكتيو لازم براي كنترل ولتاژ يك خط طولاني

خط طولاني را مي‌توان بصورت مدار معادل π معادل‌سازي كرد.



بازاي اينكه V_R چه مقداري از V_S باشد مقدار قدرت راكتيو لازم براي انتقال يك قدرت معيني را بررسي كنيم. B , A به مشخصات خط مربوط هستند.

$$V_S = (V_R \frac{Y}{Z} + I_R) Z + V_R \qquad A = \frac{zy}{2} + 1 = |A| < \alpha$$

$$V_S = (\frac{ZY}{2} + 1) V_R + Z I_R \qquad B = Z \quad = |B| < \beta$$

$$V_r = |V_r| < 0 \quad , \quad I_r = |I_r| < -\phi r$$ طرف دريافتي

$$V_S = |V_S| < \delta_S$$ طرف ارسالي

$$|V_S|^2 = |A|^2 |V_r|^2 + |B|^2 + |I_r|^2 + |A||B||V_r||I_r| [\cos(\alpha - \beta)\cos\phi_r - \sin(\alpha - \beta)\sin\phi_r]$$

ايجاد نول بايستي برحسب قدرت انتقالي نوشته شود تا پارامترها قابل اندازه‌گيري باشند.

$$P_r = V_r I_r \cos\phi_r \qquad Q_r = V_r I_r \sin\phi_r$$

$$I_r = I_P + jI_q \qquad I_r^2 = I_p^2 + I_q^2$$

مؤلفه اكتيو شدت جريان دريافتي $I_P = \frac{P_r}{V_r}$ $\qquad I_q = \frac{Q_r}{V_r}$

$$V_S^2 = A^2 V_r^2 + B^2 \left(\frac{P_r^2}{V_r^2} + \frac{Q_r^2}{V_r^2} \right) + 2AB \;\; P_r \cos(\alpha - \beta) - 2ABQ_r \sin(\alpha - \beta)$$

براي يك شبكه قدرت اكتيو و راكتيو انتقالي Q_r, P_r در دست باشد، بازاي اينكه V_r داراي چه نسبتي با V_S باشد Q_r را مي‌توان مشخص ساخت و از روي آن مي‌توان ديد چقدر كمپاتره نمودن در پايان خط لازم است.

اقتصادي و راحت‌ترين راه براي كنترل ولتاژ ترانس‌هاي مجهز به tap changing هستند.

كنترل ولتاژ مي‌تواند بصورت استفاده از خازنهاي سري و موازي يا با استفاده از راكتور نيز باشد كه قبلاً بحث آن رفت. اين ترانس‌ها به ترتيبات مختلف مي‌توانند در خط استفاده شوند : دو عدد ترانسفور مانند تپ‌چنجر در دو طرف خط

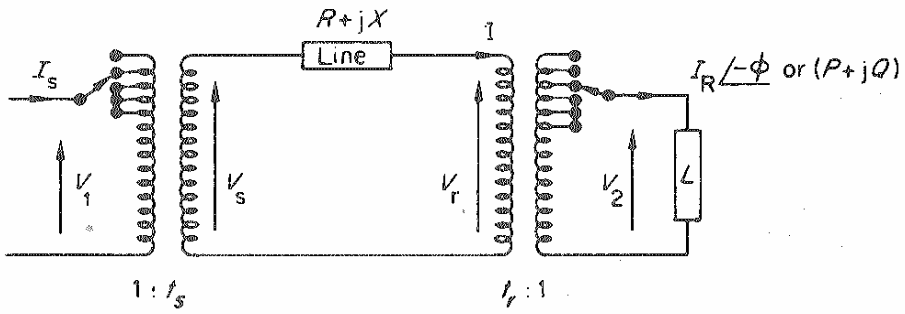


Figure 5.10 (a) Coordination of two tap-changing transformers in a radial transmission link.

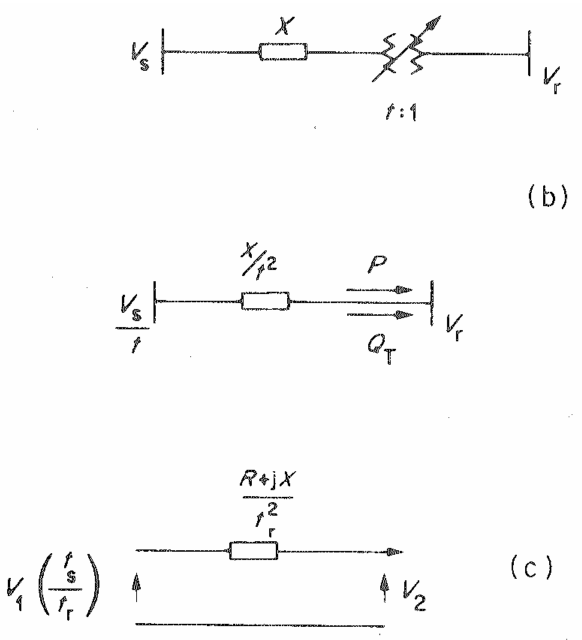


Figure 5.10 (b) and (c) Equivalent circuits for dealing with off-nominal tap ratio. (b) single transformer (c) two transformers.

V_1	ولتاژ اسمي nominal voltage	تنظيم واحد
V_S	ولتاژ حقيقي actual voltage	t_S تنظيم off- nominal
V_r	actual voltage	t_r تنظيم off- nominal
V_2	actual voltage	تنظيم واحد

نسبت ترانس‌ها t = of nominal tap ratio Or perunit tap setting

t_S , t_r نسبتي از نسبتهاي اسمي ترانسفورماتورها fraction of nominal transformation ratio

نسبت ترانس‌ها وقتي تپينگ صورت مي‌گيرد به نسبت ترانس وقتي كه تپ صورت نمي‌گيرد يعني (در حالت عادي)

$$t_S = \frac{\text{tap ratio}}{\text{nominal ratio}}$$

$$t_S = \frac{(\frac{T}{P})\,\text{tap}}{(\frac{T}{P})\,\text{nominal}}$$

مثلاً اگر نسبت اسمي ترانس ۱ و ۲ $6.6/33^{KV}$ باشد و وقتي كه تپينگ انجام مي‌شود نسبت ترانس به $6.6/36$ تبديل مي‌شود (تپينگ در step هاي مختلف صورت مي‌گيرد).

$$t_S = \frac{36/6.6}{33/6.6} = \frac{36}{33} = 1.09 \qquad t_S.t_r = 1 \quad \rightarrow \quad t_r = 0.917$$

اگر $t_S.t_r = 1$

$$V_S = V_1 t_S \qquad \mathrm{V_r = t_r V_2}$$

براي جبران كامل افت ولتاژ و براي داشتن حداقل tap cho در كنترل ولتاژ بايستي داشته باشيم :

$$t_r.t_S = 1$$

$$\overline{V}_S = \Delta\overline{V} + \overline{V}_r \qquad t_S V_1 = I_{2t} t_r V_2 \qquad I_2 = \Delta V = \frac{RP + XQ}{V_r = t_r V_2}$$

$$\Delta\overline{V} = V_1(\frac{t_S}{t_r}) - \overline{V}_2 \equiv \frac{\frac{R}{t_r^2}P + \frac{x}{t_r^2}Q}{\overline{V}_2}$$

طرفين در $\frac{\mathrm{t_S}}{\mathrm{V_1}}$ ضرب

$$\begin{cases} t_S V_1 = t_r V_2 + \dfrac{RP + XQ}{t_r V_2} \\ t_r.t_S = 1 \end{cases} \rightarrow t_S V_1 = \frac{V_2}{t_S} + \frac{RP + XQ}{\frac{V_2}{t_S}}$$

$$t_S{}^2 = \frac{V_2}{V_1} + \frac{RP + XQ}{V_1 V_2}.t_S{}^2 \qquad \frac{V_2}{V_1} = t_S{}^2(1 - \frac{RP + XQ}{V_1 V_2})$$

$$t_S^2 V_1 V_2 - V_2^2 = (RP + XQ) t_S^2$$

بازاي يك مقدار قدرت انتقالي از خط و بازاي اينكه $\mathrm{V_2}$ چه نسبتي از $\mathrm{V_1}$ باشد $\mathrm{t_r, t_S}$ را مشخص سازيم و بخواهيم افت ولتاژ متوسط ترانس مجهز به tapch كمپانزه باشد يعني $\mathrm{V_1 = V_2}$ باشد خواهيم داشت :

$$t_S = \sqrt{\frac{V_2/V_1}{1 - \frac{RP + XQ}{V_1 V_2}}} \xrightarrow{V_1 = V_2} \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{RP + XQ}{V_1^2}}}$$

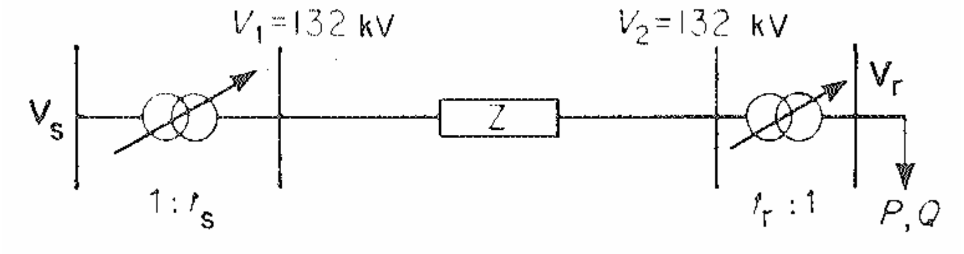
$$V_2 = \frac{1}{2}\left(t_S{}^2 V_1 \pm t_S\sqrt{t^2 = V_1{}^2 - 4(RP + XQ)}\right)$$

براي يك مشخصه معيني از خط و براي يك اتصال يك قدرت معيني و يك تصحيح معيني با داشتن $\mathrm{V_1}$ مي‌توان ولتاژ $\mathrm{V_2}$ را مشخص ساخت.

مثال- يك خط انتقال ۱۳۲KV از طريق ترانسفوماتور 11/132 KV تغذيه مي‌شود. در طرف ديگر خط (طرف بار) اين ولتاژ توسط ترانسفورماتور ديگر 132/11 KV كاهش مي‌يابد. امپدانس كل خط و ترانسفورماتورها در طرف 132 KV برابر $25 + j66\Omega$ است.

هر دو ترانسفورماتور، داراي سيستم تپ چنجر هستند كه در آنها حاصلضرب تنظيمات طرف off- nominal برابر واحد است.

اگر بار انتهاي خط برابر 100MW در ضريب قدرت ۰/۹ پس‌فاز باشد در آنصورت تنظيمات $t_S.t_r = 1$ تپ‌چنجرها را براي ثابت نگه‌داشتن ولتاژ شين بار در 11KV محاسبه كنيد (توان مثبت 100MW).



حالت جبران كامل مي‌باشد (طبق شرايط مسئله) $V_S = V_r = 132KV = 1pu$

$t_S \times t_r = 1$ $Z_{un} = 25 + j66\Omega = 0014 + j0.38$ pu

load $= P + jQ = 100MW + j48.3MVAR = 1 + j0.483$ Pu

از معادلة كلي

$$1 = \frac{1}{2}\left[(t_S{}^2.1) \pm t_S\sqrt{(t_S{}^2.1^2 - 4(0.14 \times 0.38 \times 0.483)}\right]$$

$$2 = t_S{}^2 \pm t_S\sqrt{t_S{}^2 - 1.28}$$

$$(2 - t_S{}^2)^2 = t_S{}^2(t_S{}^2 - 1.28) \quad \rightarrow \quad t_S = 1.21 \quad \rightarrow \quad t_r = \frac{1}{1.21} = 0.83$$

شرايط عادي براي تپ‌چنجر بيش از ۲۰ درصد نمي‌باشد و مقادير بدست آمده كمي بيشتر از حالت معمول است. بنابراين لازم است براي تثبيت ولتاژ در شين بار از تزريق وار نيز استفاده شود.

دقت شود كه اين ترانسفورماتورها مقدار قدرت راكتيو را تغيير نمي‌دهند بلكه با افزايش نسبت تنظيم t_S (با كاهش t_r) جريان خط افزايش مي‌يابد.

قبل از تپ‌چنجر $I = 100A$

ratio 1:1

بعد از تپ‌چنجر $\frac{I'}{100} = \frac{1.1}{1} \quad \rightarrow \quad I' = 100 \times 1.1$

$$\Delta V_L' = 1.1\,\Delta V_L$$

از طرف ديگر افزايش ولتاژ ثانويه (كاهش t_r) نيز باعث افزايش اين افت ولتاژ (افزايش جريان) خواهد بود.

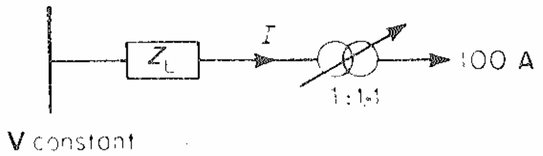


Figure 5.12 Effect of tap changing on line current and voltage drop.

ترکیب ترانسفورماتورهای تنظیم Tap-changing و تزریق توان راکتیو

در بعضي از منابع $t_S = a_1$, $t_r = a_2$ t per unit tap setting

در طرف دريافتي وقتي t_r را كاهش مي‌دهيم شدت جريان در اين قسمت افزايش مي‌يابد و لذا با كاهش t_r كه مي‌خواهيم افت ولتاژ را جبران كنيم از طرف ديگر شدت جريان را افزايش داده‌ايم. پس بايستي توجه داشت اين ترانس‌ها را در خطوطي بكار برد كه داراي امپدانس كمتري باشند.

اين ترانس‌ها حداكثر تا 20% ولتاژ را كنترل كنند اگر ترميم ولتاژ بيشتر از آن مورد احتياج باشد لازم است ترانسفورماتورها را همراه با ساير كمپانزاتورها مثل خازنها يا موتورهاي سنكرون استفاده كنيم كه آنها به ثالثيه ترانسفورماتورهاي سه‌سيم‌پيچه اتصال پيدا مي‌كنند.

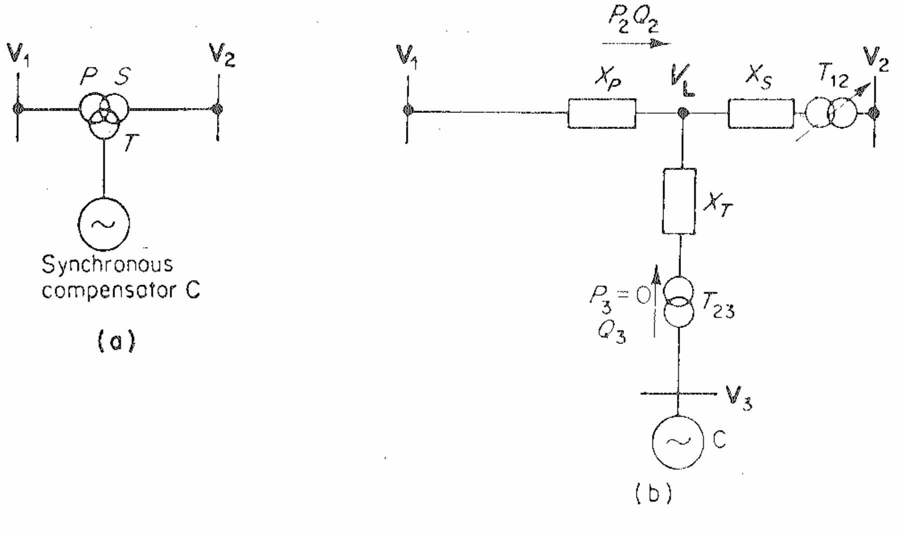


Figure 5.13 (a) Schematic diagram with combined tap changing and synchronous compensation. (b) Equivalent network.

براي انتقال يك قدرت معيني و بازاي اينكه ولتاژ ثانويه چه نسبتي با ولتاژ اوليه داشته باشد و با توجه به محدود بودن setting , tapهاي اين ترانس مقدار قدرت راكتيوي كه اين كمپانزاتور بايستي بدهد چقدر بايد باشد؟

در طرف ثالثيه $P_3 = 0$, Q_3 افت ولتاژ در نقطة V_1 تا V_n با صرفنظر از R

$$\Delta V = \frac{X_P Q_2 / 3}{V_n} = X_P \frac{Q_2}{\sqrt{3} V_b} \quad V_L = \sqrt{3} V_n$$

$$\delta V = X_P \frac{P_2}{\sqrt{3}V_L}$$

$$(V_n + \Delta V)^2 + (\delta V)^2 = V_1^2$$

$$(V_L^2 + X_P Q_2)^2 + (X_P\ P_2)^2 = 3V_1^2 V_L^2$$

$$V_{1L} = \sqrt{3}V_1$$

$$V_L^4 + X_P^2 Q_2^2 + 2X_P Q_2 V_L^2 + X_P^2 P_2^2 = V_{1L}^2 V_L^2 = 0$$

$$\mathrm{V_L}^4 + (2\mathrm{X_P Q_2} - \mathrm{V_{1L}}^2)\mathrm{V_L}^2 + (\mathrm{X_P}^2\mathrm{Q_2}^2 + \mathrm{X_P}^2\mathrm{P_2}^2) = 0$$

$$V_L^2 = \frac{(V_{1L}^2 - 2X_P Q_2)}{2} \pm \frac{1}{2}\sqrt{V_{1L}^2 (V_{1L}^2 - 4X_P Q_2) - 4X_P^2 P_2^2}$$

Example 5.4 A three-winding grid transformer has windings rated as follows: 132 kV (line), 75 MVA, star connected; 33 kV (line), 60 MVA, star connected; 11 kV (line), 45 MVA, delta connected. A synchronous compensator is available for connexion to the 11-kV winding.

The equivalent circuit of the transformer may be expressed in the form of three windings, star connected, with an equivalent 132 kV primary reactance of 0.12 p.u., negligible secondary reactance, and an 11 kV tertiary reactance of 0.08 p.u., both values expressed on a 75 MVA base.

In operation, the transformer must deal with the following extremes of loading:

(a) Load of 60 MW, 30 MVAr with primary and secondary voltages governed by the limits 120 kV and 34 kV; synchronous compensator disconnected.

(b) No load. Primary and secondary voltage limits 143 kV and 30 kV; synchronous compensator in operation and absorbing 20 MVAr.

Calculate the range of tap changing required. Ignore all losses.

روش ديگر مورد استفاده از ترانس‌هاي مجهز به tap chan در خطوط براي كنترل جريان قدرت راكتيو است VAR

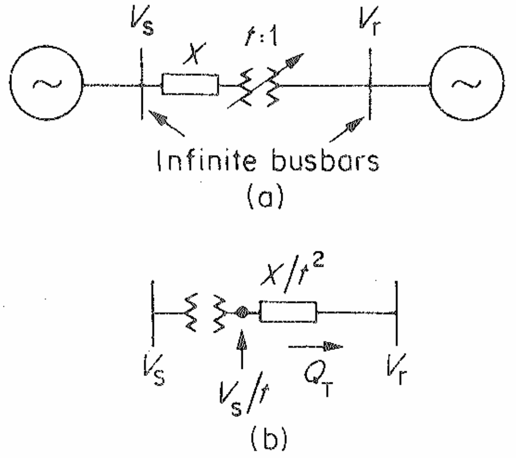


Figure 5.15 (a) Two power systems connected via a tap-change transformer. (b) Equivalent circuit with impedance transferred to receiver side.

اگر V_r, V_S ثابت باشند و ترانس مجهز به t.cH با tap nominal ratio t باشد مي‌توان مدار را بصورت زير در نظر گرفت :

تمام پارامترها را به سمت راست ترانس مي‌توان انتقال داد.

افت ولتاژ در خط $\Delta V = \frac{V_S}{t} - V_r = \frac{X}{t^2}\frac{Q_r}{V_r}$

اگر طرفين به $\frac{V_r.t^2}{X}$ ضرب شود. $Q_r = (V_S v_r t - V_r^2 t^2)\frac{1}{X}$

تحت اين شرايط داريم :

$V_S = V_r = V$

$tV^2(1-t)\frac{1}{X} = Q_T$ $\qquad S = \frac{V^2}{X}$ قدرت اتصال كوتاه

$St(1-t) = Q_T$

$t < 1$ $\qquad$ Q_T مثبت است. V_S بزرگتر از V_r بوده و جريان از باس V_S بطرف V_r است.

$t > 1$ $\qquad$ Q_T منفی است. V_S كمتر از V_r بوده و جهت جريان قدرت راكتيو از V_r به طرف V_S است.

بنابراين با تنظيم مناسب ترانسفورماتور تبديل مقدار توان راكتيو بين دو ناحيه كنترل می شود. در حالت پيشرفته می توان از تعداد دو ترانسفورماتور تنظيم تبديل موازی بين دو ناحيه استفاده نمود. هرگاه يكی از ترانسفورماتورها در نسبت تبديل off-nominal برابر 1:1.1 و ديگری در جهت مخالف يعنی 1:0.8 تنظژم

شونددرآنصورت جریان گردشی متناسب با توان راکتیو در حلقه بین دو ترانسفورماتور ظاهر می شود. این روش بنام Tap Stagger یا اتصال قابل تغییر نامیده شده و راه حل مناسبی برای جذب توان راکتیو می باشد.

ترانسفورماتور تقويت **Booster Transformers**

Booster transformer = دو نوع هستند و ترانس‌هاي تنظيم‌كننده يا regulating trans هستند كه ولتاژ را در جهت طولي تغيير مي‌دهند (كه قبلاً توضيح داده شده است) ترتيب سيم‌پيچهاي سري و تحريك كه در مدار قرار مي‌گيرند Phase shift صورت مي‌گرفت در اين ترانس‌ها سيم‌پيچ تحرك و سري از يك باس گرفته مي‌شود. افزايش ولتاژ خواهيم داشت بدون Phase shift

تحريك سيم‌پيچ سري از خود همان فاز است. در حاليكه در حالت قبل تحريك سيم‌پيچ سري از دو فاز ديگر گرفته مي‌شد كه 90 نسبت به ولتاژ ديگر فاز اختلاف فاز دارند.

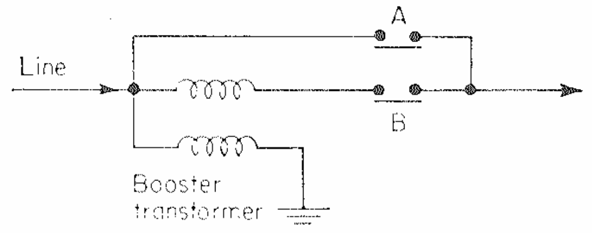
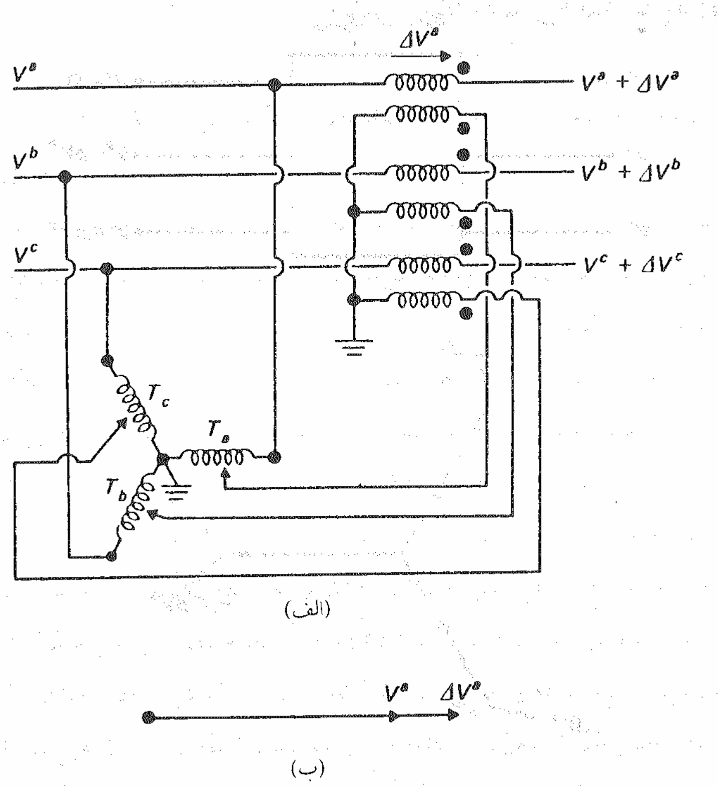


Figure 5.16 Connexion of in-phase booster transformer. One phase only shown.



ترانسفورماتور تنظیم مخصوص تنظیم دامنه ولتاژ

Example 5.5 In the system shown by the line diagram in Figure 5.17 each transformer T_A and T_B have tap ranges of ±10 per cent in 14 steps of 1.43 per

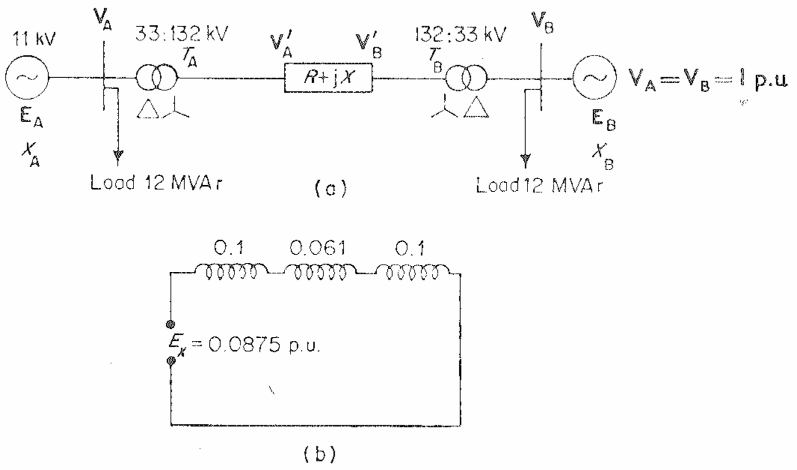
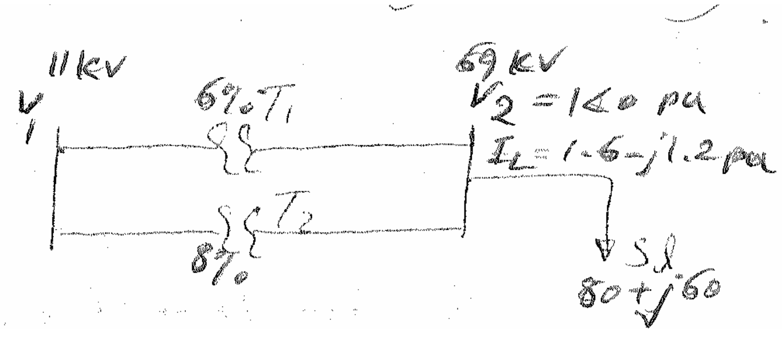


Figure 5.17 (a) Line diagram of system for Example 5.5. (b) Equivalent network with voltage boost E_x acting.

cent. Initially $V'_A = V'_B$ and hence no power or var transfer takes place through the line. It is required to calculate the magnitude of the circulating current resulting from an in-phase boost of 8.75 per cent on T_A, with the busbar voltages maintained constant by automatic voltage regulators on generators A and B. The plant data are as follows expressed on a 20 MVA base, resistance ignored. Generators A and B: 20 MVA, $X = 0.2$ p.u. Transformers T_A and T_B: 20 MVA, 132/33, $X = 0.1$ p.u.; 132 kV line, 8 km, $X = 3.85\ \Omega = 0.061$ p.u.

مثال - در شكل زير 2 ترانسفورماتور بطور موازي مورد بهره‌برداري قرار گرفته و قدرت را بين باس $V_1 = 11KV$ و باس $V_2 = 69KV$ انتقال مي‌دهند. S_L قدرت بار دريافتي $80MW + j60MVAR$ و تحت ولتاژ 50MVA تغذيه مي‌شود دو ترانسفورماتور داراي قدرت 50MVA مساوي هم بوده و ولتاژ نامي آنها $^{11}/_{69KV}$ است. دو ترانس قدرت 100MVA را تغذيه مي‌نمايند.



حال اگر امپدانس اين ترانس‌ها با هم برابر بودند قدرت بطور مساوي بين دو ترانس تقسيم مي‌شد مسئله‌اي نبود اما امپدانس ترانس‌ها متفاوت است. $X_{T2} = j.08 , X_{T1} = j.06$ است،

وقتي نسبت ترانس‌ها $1/1$ است يعني بدون تغيير دادن t.ch بار بطور مساوي بين آنها تقسيم نخواهد شد چون امپدانس ترانس 1 كمتر است Overload مي‌شود ولي T_2 تحت شرايط under load مورد استفاده قرار مي‌گيرد حال اگر بوسيلهٔ تغييرات نسبت ترانس‌ها تا چه اندازه مي‌توان بارها را بطور مطلوب بين ترانس‌ها تقسيم نمود. ميدانيم نسبت هر يك از ترانس‌ها بين %110-90 از نسبت نامي $a^0 = 11/69KV$ در 32 مرحله يا پله step بطوريكه در هر مرحله يا پله $5/8\%$ تغيير يابد.

Nominal ratio تغيير پيدا خواهد كرد (هر كدام از اين 32 پله $5/8\%$ ولتاژ را تغيير خواهند داد).

حل : در صورتيكه هيچ اصلاحي صورت نمي‌گيرد حل مي‌كنيم پس بررسي مي‌كنيم كه با تغييرات مناسب بار را به چه شكل مطلوب مي‌توان بين دو خط تقسيم نمود : $S_b = 50MVA$

$V_b = 11KV, 69KV$

چون 69KV ولتاژ V_2 را 1 پريونيت در نظر گرفته‌ايم.

$I_L = 1.6 - j1.2 \qquad S = VI_L^*$

با داشتن شدت جريان مي‌توان شدت جريان هر خط را بدست آورد به نسبت عكس امپدانس‌ها.

$$I_{L1} = \frac{j.08}{j.08 + j.06} I_L = .914 - j.686 \text{ Pu}$$

$$I_{L2} = \frac{j.06}{j.08 + j.06} I_L = .686 - j.514 \text{ Pu} \qquad \frac{|I_{L2}|}{|I_{L1}|} = \frac{6}{8} = .75$$

$|I_{L1}| = 1.14$ طرف 1 14 درصد Over load كار مي‌كند

$|I_{L2}| = .86$ طرف 2 14 درصد Under load كار مي‌كند

اختلاف ولتاژي كه مي‌خواهيم ايجاد كنيم فرض مي‌كنيم اختلاف ولتاژ ΔV در بين ثانويه ترانس 1 و ثانويه ترانس 2 بوجود مي‌آوريم و اين اختلاف ولتاژ بايستي موجب ايجاد يك شدت جريان دوراني V_{I_L} كه از شدت جريان خط L_1 كم و به شدت جريان خط L_2 اضافه نمايد.

ΔV اختلاف ولتاژ بين ثانويه T_1 و ثانويه T_2 شدت جريان دوراني $I_C = \frac{\Delta V}{Z_{Loop}}$ فرض مي‌شود تغييرات 1tap را فقط در يك ترانس انجام مي‌دهيم tapهاي T_2 را ثابت نگه داشته و tap ترانس 1 را مقداري افزايش مي‌دهيم

پس نسبت ترانس 2 روي مقدار نامي ثابت نگه مي‌داريم روي ترانس 1 به اندازه Δa افزايش مي‌دهيم :

$$a^0 = {}^{11}\!/_{69}\,KV$$

$$T_2 : a^0 \rightarrow t_2 = \frac{a^0}{a^0} = 1$$

$$T_1 : a^0 + \Delta a \rightarrow t_1 = \frac{a^0 + \Delta a}{a^0} = 1 + \frac{\Delta a}{a^0}$$

Δa مقدار كوچكي است پس $\Delta a.a_0 \rightarrow 0$

$$T_2 \Delta a^0 = \frac{V_1}{V_2}$$

اگر صورت و مخرج كسر را به V_2 تقسيم كنيم ΔV برحسب Pu بدست مي‌آيد.

$$T_1 \;\; a^0 + \Delta a = \frac{V_1}{V_2}$$

$$\Delta V = \frac{V_1}{a_0} - \frac{V_1}{a_0 + \Delta a} = \frac{V_1(a_0 + \Delta a) - V_1 a_0}{a_0(a_0 + \Delta a)} = \frac{V_1 \Delta a}{a_0^{\,2} + \Delta a.a_0} \cong \frac{V_1 \Delta a}{(a_0)^2}$$

به $V_1 = 1 \;\; Pu$ يا برحسب پريونيت

$$\frac{\Delta V}{V_2} \cong \frac{V_1}{V_2}.\frac{\Delta a}{a_0^{\,2}} Pu \;\; (\Delta V)_{Pu} \cong \frac{\Delta a}{a_0} Pu$$

با داشتن شدت جريان دوراني مي‌توان نسبت ترانس را بدست آورد.

$$I_C = \frac{\Delta a / a_0}{j./4} = \frac{\Delta V}{\Sigma X}$$

بصورت ترسيمی مي‌توان

$$\begin{cases} I_1 = I_{L1} - I_C \\ I_2 = I_{L2} + I_C \end{cases} \rightarrow |I_{L1} - I_C| = |I_{L2} + I_C|$$

چون I_C فقط مؤلفه راكتيو دارند لذا $I_C = -jb$ (در كتاب $b \rightarrow a$ نوشته شده است)

$-ja =$ قدرمطلق شدت جريان دوراني

$$|.914 - j.686 + ja| = |.686 - j.514 - ja| \rightarrow a = .238$$

كل تغييرات

$$\frac{\Delta a}{a_0} = I_C(j.14) \rightarrow \frac{\Delta a}{a_0} = .0333\,Pu \rightarrow \begin{cases} t_2 = 1 \\ t_1 = 1 + \dfrac{\Delta a}{a^0} = \pm .0333 \end{cases}$$

در هر مرحله فقط $\%\, {}^{5}\!/_{8}$ اين نسبت تغيير پيدا مي‌كند.

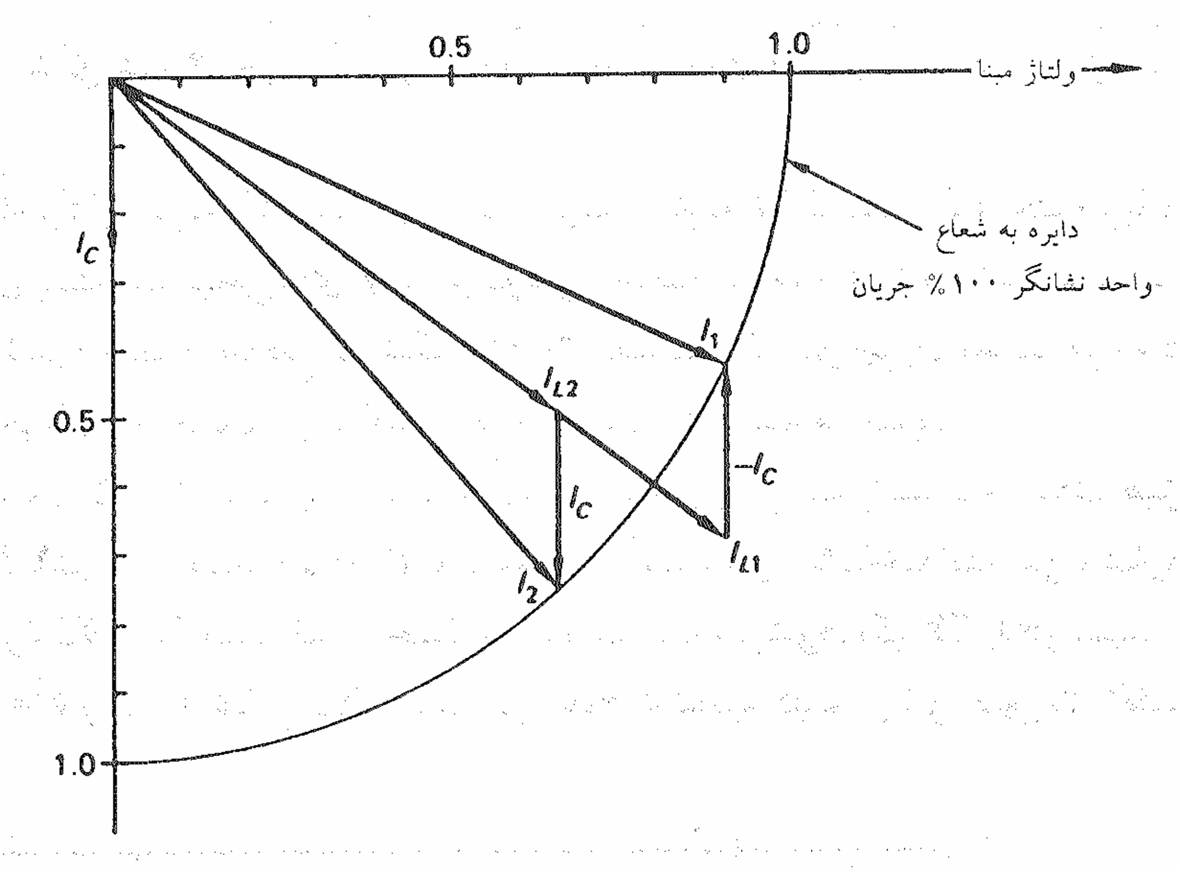
$$\text{تعداد پله} = \frac{\text{تپ ترانسفورماتور } t}{\text{مقدار تپ هر پله}}$$

تعداد پله‌ها

$$= 5.33 = \frac{.0333}{({}^{5}\!/_{8})\frac{1}{1000}} \text{تعداد پله}$$

اگر ترانسفورماتور T_1 را 6 پله تغییر بدهیم اختلاف ولتاژ باعث می‌شود بار بطور مساوي بين خط تقسيم شود اين 6 پله خوب است. اگر 3 پله يكي را افزايش مي‌دهيم (T_1) ديگري را 3 پله كاهش دهيم (T_2) و بدين ترتيب به 6 پله برسيم.

روش ترسيم آموزنده است. I_C در خلاف جهت I_{L1} است. مقدار I_C بايستي طوري انتخاب شود كه I_{L1} بعد از tap cha... روي دايره بيفتد و I_C روي شدت جريان I_{L2} اضافه شده و آنرا روي دايره بيندازد.



محاسبه جریان گردشی به روش ترسیمی

Voltage Stability

Voltage Control in Distribution Networks

Voltage Control in Long Lines

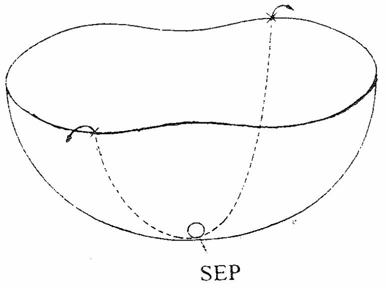
پایداری و کنترل سیستم های قدرت

۱-۷ روش مستقیم تحلیل پایداری گذرا

روش های مستقیم پایداری را بدون حل صریح معادلات دیفرانسیل سیستم تعیین می کنند. این روش, از نظر اکادمیک جذاب است و از زمان کارهای اولیه ماگنوسن و آیلت, که انرژی گذرا را برای ارزیابی پایداری گذرا به کار گرفتند, تاکنون توجه زیادی را به خود جلب کرده است. روشهای مبتنی برانرژی , حالت خاصی از روش کلی دوم لیاپانوف یا روش مستقیم است و تابع انرژی, یک تابع مناسب لیاپانوف است. این بخش مفاهیم اساسی را توضیح می دهدکه روشهای مستقیم بر آنها استوار شده است.

۲-۷ توصیف روش تابع انرژی گذرا

همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است, روش انرژی گذرا را میتوان با در نظر گرفتن توپی که بر روی سطح داخلی یک کاسه می چرخد توصیف کرد. محدوده داخل کاسه نشان دهنده ناحیه پایداری است و محدوده خارج آن ناپایداری را نشان می دهد.لبه کاسه, صورت نامنظمی دارد و از این رو نقاط مختلف روی لبه دارای ارتفاعات متفاوتی هستند.



نمایش توپ چرخان بر روی سطح داخلی یک کاسه

در آغاز توپ در پایین کاسه در حالت سکون است, این حالت را نقطه تعادل پایدار(Stable Equilibrium Point) می نامند. هنگامی که مقداری انرژی جنبشی به توپ وارد شود , توپ در جهت خاصی حرکت می کند و بر روی سطح داخلی کاسه بر روی مسیری که با جهت حرکت اولیه تعیین می گردد به طرف بالا غلت خواهد زد. نقطه ای که توپ از حرکت باز خواهد ایستاد با مقدار اولیه انرژی پتانسیل وارد شده به سیستم, تعیین میشود. اگر توپ قبل از آنکه به لبه کاسه برسد تمامی انرژی جنبشی خود را به انرژی پتانسیل تبدیل کند, به طرف پایین غلت می خورد و در نهایت بعدازمقداری رفت و برگشت درنقطه تعادل پایدار, مستقر خواهد شد. لیکن اگر انرژی جنبشی وارد بر سیستم به اندازه کافی بزرگ باشد, توپ به لبه کاسه رسیده و از آن بیرون می افتد. در این صورت توپ به محدوده ناپایداری وارد می شودوبه نقطه تعادل پایدار, باز نخواهد گشت.سطح داخل کاسه, سطح انرژی پتانسیل و لبه کاسه , سطح مرزی انرژی پتانسیل(Potential Energy Boundary Surface) را نشان می دهند.

برای تعیین اینکه آیا توپ وارد محدوده ناپایداری خواهد شد یا نه, دو کمیت لازم است: الف) انرژی اولیه جنبشی وارد شده به سیستم و ب) ارتفاع لبه در نقطه عبور, موقعیت نقطه عبور به جهت حرکت اولیه بستگی دارد.

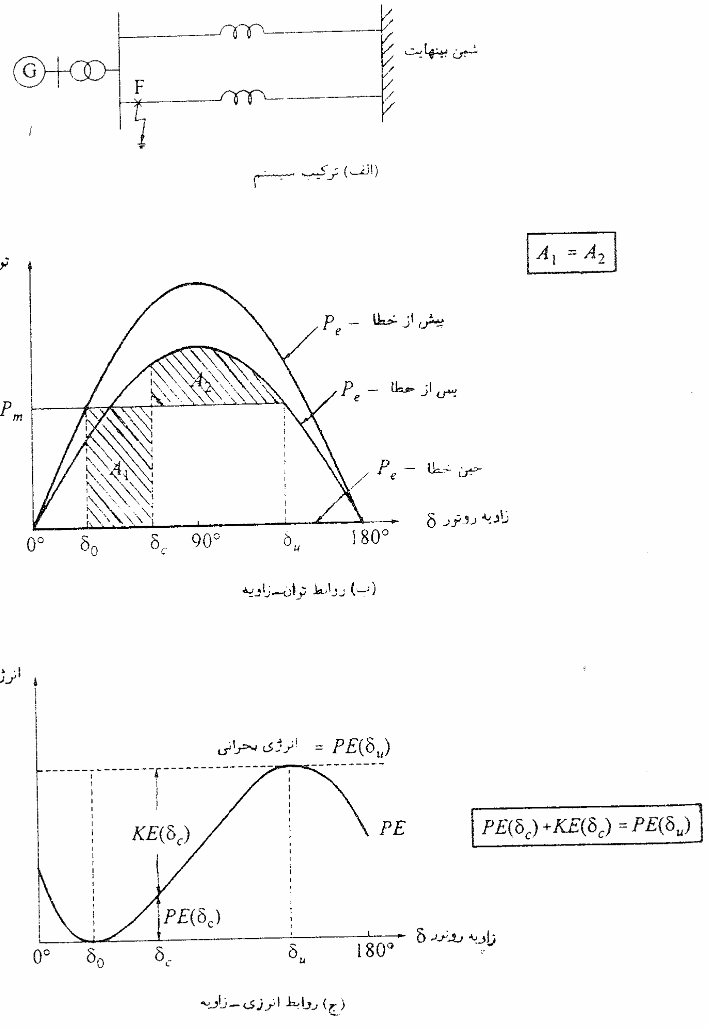
۲-۷ کاربرد در سیستمهای قدرت

اصول لازم برای اعمال روش تابع انرژی گذرا TEF (Transient Energy Function) به تحلیل پایداری سیستم قدرت, به طور مفهومی مشابه اصول حاکم بر توپ غلتان در کاسه است. در آغاز, سیستم در یک نقطه تعادل پایدارعمل می نماید; اگر خطایی رخ دهد, تعادل دچار اغتشاش می شود و ماشینهای سنکرون شتاب می گیرند. در طول زمان خطا, سیستم قدرت مقداری انرژی جنبشی و پتانسیل می گیرد و از SEP دور می شود. بعد ازرفع خطا, سیستم انرژی جنبشی خود را مشابه توپ غلتان روی به بالای سطح انرژی پتانسیل, به انرژی پتانسیل تبدیل می کند. برای اجتناب از ناپایداری در زمانیکه نیروهای وارد بر ژنراتورسعی در آوردن آنها به طرف موقعیتهای تعادل جدید دارند, سیستم باید توانایی جذب انرژی جنبشی را داشته باشد. این موضوع به توانایی جذب انرژی پتانسیل به وسیله سیستم بعد از اغتشاش, بستگی دارد.در یک ترکیب مشخص و پس از بروز اغتشاش در شبکه, مقدارانرژی گذرای حداکثری وجود دارد که سیستم توانایی جذب آنرا دارد.در نتیجه, ارزیابی پایداری گذرا مستلزم موارد ذیل است:

الف) توابعی که بطورکافی انرژی گذرای مسبب جداسازی یک یا چند ماشین سنکرون از باقیمانده سیستم را توصیف می کنند.

ب) تخمینی از انرژی بحرانی مورد نیاز برای از دست دادن سنکرونیزم.

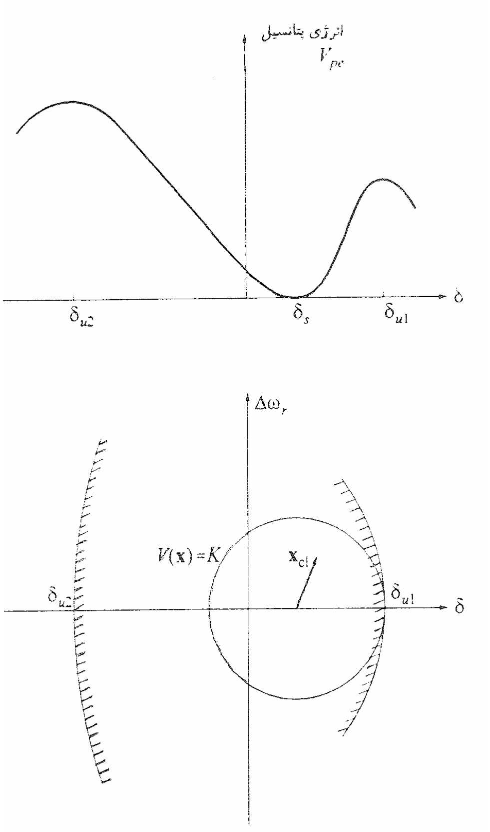
برای یک سیستم دو ماشینه, انرژی بحرانی به طور منحصر به فردی تعریف میشود و تحلیل TEF معادل با معیار سطوح مساوی توضیح داده شده در قصل پایداری گذرا است. این موضوع در شکل زیر نمایش داده شده است, که دو نمودار را با زاویه روتور (δ) بعنوان محور افقی نشان می دهد. نمودار بالا معیارسطوح مساوی را نشان می دهد, که درآن زاویه بحرانی رفع (δ_c) از تساوی سطوحA1وB1 به دست می اید. نمودار پایین روش انرژی گذرا را نمایش می دهد که از آن می توان برای مشخص کردن زاویه بحرانی رفع بر حسب انرژی جنبشی و پتانسیل استفاده کرد. انرژی جنبشی به دست آمده در طول دوره وجود خطا با انرژی پتانسیل در زاویه روتور متناظر جمع می شود و برای تعیین پایداری, با انرژی پتانسیل بحرانی مقایسه می گردد.



نمایش معادل بودن روش انرژی گذرا و معیار سطوح معادل

با بروز اغتشاش, نقطه تعادل پایداری برای سیستم پس از خطا وجود خواهد داشت.می توان برای این SEP پس از خطا ناحیه جذبی را مطابق شکل زیر تعریف کرد. بطوریکه هر مسیر سیستم پس از خطا در حالتی

که حالت سیستم در رفع خطا (x_d) در راخل این ناحیه جذب قرار داشته باشد, در نهایت به سمت SEP همگرا خواهد شد وسیستم, پایدار می ماند. از طرف دیگر, اگر x_d خارج از ناحیه جذب قرار داشته باشد, سیستم پس از خطا به نقطه تعادل پایدار همگرا نمی شود و آنرا ناپایدار می نامند.



ناحیه پایدار و تقریب محلی ئن

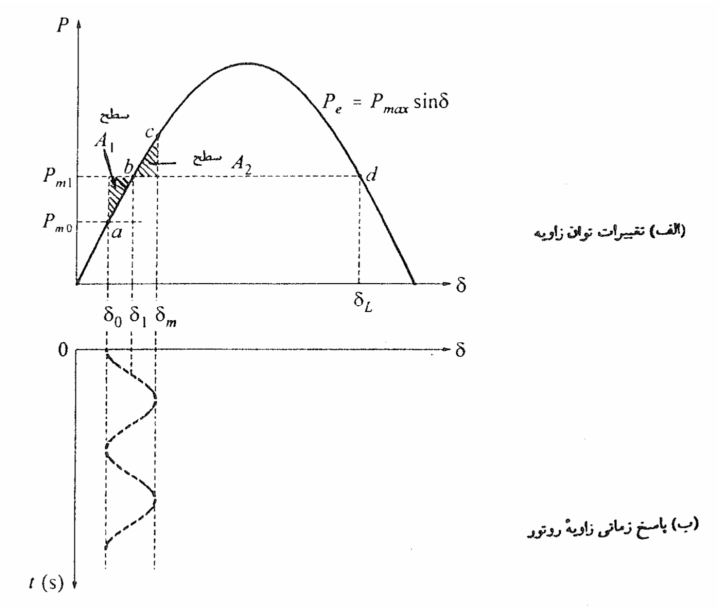
حالت سیستم در رفع خطا(x_d)را می توان با مقدار تابع انرژی محاسبه شده درx_d , به عبارت دیگر ($V(x_d$ توصیف کرد. از این رو روش مستقیم , مساله پایداری را با مقایسه($V(x_{C1}$ با انرژی بحرانی V_{Cr} حل می کند.سیستم, پایدار است اگر($V(x_{C1}$کمتر از V_{Cr}باشد و کمیت(V_{Cr} -$V(x_{C1}$ معیار خوبی از پایداری نسبی سیستم است. این کمیت بعنوان حاشیه انرژی گذرا تعریف می شود.

کمیت($V(x_{C1}$, مقدار انرژی گذرای وارد به سیستم به وسیله خطا را اندازه گیری می کند. حال آنکه انرژی بحرانی, قدرت سیستم را پس از خطا اندازه گیری می کند. به طور دقیق تر, انرژی بحرانی توانایی سیستم را در جذب انرژی پس از خطا, اندازه گیری می کند.

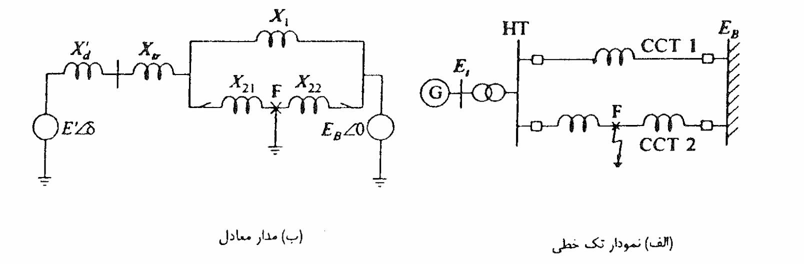
با مراجعه به شکل فوق ملاحظه می شود اگر روتور در گستره δ_{U1} تا δ_{U2} نوسان کند, سیستم پایدار گذرا باقی می ماند و اگر فراتر از این نوسان کند سیستم ناپایدار خواهد شد. از این رو نقاط δ_{U1} و δ_{U2} بر روی

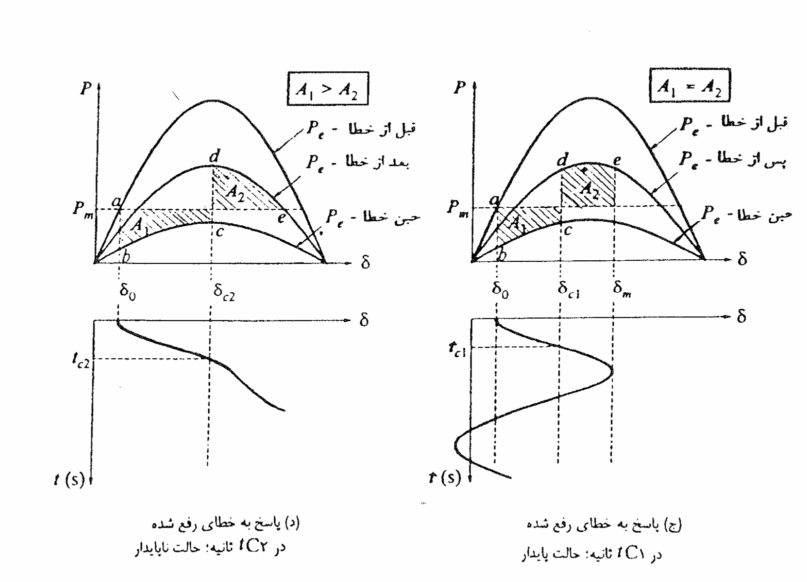
منحنی انرژی پتانسیل, مرزی را برای کلیه مسیرهای زاویه روتور پایدار تشکیل می دهند. این مرز را سطح مرزی انرژی پتانسیل(PEBS)می نامند و نقاط روی این مرز اوجهای محلی انرژی پتانسیل هستند.

مرز ناحیه پایداری, همانطور که در شکل فوق نشان داده شده است, معمولا با یک سطح انرژی ثابت{ X/ V(x)=k} تقریب زده میشود که در آن k نشاندهنده انرژی بحرانی V_{CR} سیستم پس از خطا می باشد.



پاسخ به تغییر پله ای در ورودی توان مکانیکی





مقدمه ای بر مساله پایداری سیستم های قدرت

در این فصل به معرفی کلی مساله پایداری قدرت شامل مفاهیم فیزیکی ، طبقه بندی و تعارف واژه های مربوطه پرداخته می شود. بررسی ساختار های ابتدایی سیستم قدرت با استفاده از مدلسازی ایده آل، ویژگی های اساسی پایداری سیستم قدرت را نشان می دهد. به علاوه، بر پیدایش انواع مسائل پایداری که در حین تکامل سیستم های قدرت شکل گرفته، ضروری شده، بسط و توسعه روش های مطالعهٔ آنها شرح داده خواهد شد. هدف این است که دیدگاه کلی از پدیدهٔ پایداری سیستم قدرت عرضه شود و پایهٔ لازم بر اساس دلایل فیزیکی نسبتا ساده بنیانگذاری گردد. این موضوع کمک خواهد کرد که در فصول آینده به بررسی جامع موضوع از جنبه های مختلف پرداخته شود.

۲ – ۱ مفاهیم اولیه و تعاریف

پایداری سیستم قدرت را می توان به طور کلی آن ویژگی از سیستم قدرت دانست که آن را قادر می سازد تا تحت وضع عادی، در حالت تعادل باقی بماند و در صورتی که تحت تاثیر اغتشاشی قرار گیرد، مجددا حالت قابل قبول متفاوتی را به دست آورد. ناپایداری در یک سیستم قدرت ممکن است بستگی به ترکیب سیستم و حالت کاری آن به شکل های مختلفی بروز کند. معمول بوده است که مساله پایداری را به عنوان مساله حفظ عملکرد سنکرون ژنراتور ها بشناسند. از آنجا که تولید در سیستم قدرت بر پایه ماشین های سنکرون (ژنراتور ها) استوار است، شرط لازم برای عملکرد قابل قبول سیستم این است که همه ماشین های مزبور با یکدیگر در حالت سنکرون یا همامنگ باقی بمانند. این جنبه پایداری تحت تاثیر دینامیک روابط زاویهٔ روتور و توان حقیقی – زاویه ژنراتور قرار دارد.

همچنین ممکن است سیستم بدون آنکه سنکرون از دست برود، ناپایدار شود. به عنوان مثال ممکن است سیستمی شامل یک ماشین سنکرون که از طریق یک خط انتقال، یک موتور القائی را تغذیه می کند، در اثر

فروپاشی ولتاژ بار، ناپایدار شود. حفظ عملکرد سنکرون در این حالت مطرح نیست بلکه مسالهٔ، پایداری و حفظ ولتاژ است. این نوع ناپایداری می تواند در مورد بارهایی که در یک محدودهٔ وسیع قرار دارند واز یک سیستم بزرگ تغذیه می شوند نیز اتفاق افتد.

در ارزیابی پایداری، مسالهٔ مهم رفتار سیستم در زمانی است که تحت تأثیر یک اغتشاش گذرا قرار گیرد. اغتشاش ممکن است کوچک یا بزرگ باشد. اغتشاش های کوچک به شکل تغییرات بار دائما اتفاق می افتد و سیستم خود را با وضعیت متغیر حاصل، تنظیم می کند. سیستم باید قادر باشد که تحت این حالت، عملکرد قابل قبولی داشته باشد و بتواند حداکثرمقدار بار را تأمین نماید. نیز باید بتواند در مقابل اغتشاش های سخت از قبیل اتصال کوتاه یک خط انتقال، از دست دادن یک ژنراتور یا بار بزرگ و یا از دست دادن خط ارتباطی بیت دو زیرسیستم، مقاوم باقی بماند. عملکرد سیستم در مقابل اغتشاش عمدتا ناشی از نحوهٔ عملکرد تجهیزات تشکیل دهندهٔ آن است. به عنوان مثال، اتصال کوتاهی که بر یک جزء حساس واقع می شودو آن جزء به وسیلهٔ رله های محافظ از سیستم جدا می گردد، باعث می شودکه تغییراتی را در توان های انتقالی خطوط ارتباطی، سرعت های روتور ژنراتورها و ولتاژ شینها داشته باشیم. تغییرات ولتاژ خود باعث عملکرد تنظیم کننده های ولتاژ ژنراتورها و سیستم انتقال می شود، حال آنکه تغییرات سرعت روتور ژنراتورها، گاورنر محرکها (توربین ها) را به عکس العمل وا می دارد. تغییرات در توان های انتقالی خطوط ارتباطی ممکن است سیستم های کنترل تولید را به کار اندازد. تغییرات ولتاژ و فرکانس باعث می شود که بستگی به مشخصات آنها، بارهای سیستم به درجات متفاوتی تغییر نماید. به علاوه، سیستم های محافظ اجرا ممکن است نسبت به تغییرات در متغییرهای سیستم، عکس العمل نشان دهدو بدینگونه بر عملکرد سیستم تأثیر بگذارد. با وجود این، در هر وضع بخصوص،عکس العمل تعداد محدودی از تجهیزات ممکن است قابل توجه باشد. از این رو معمولا فرضیات زیادی انجام می پذیرد تا مساله، ساده شود و بتوان کار را بر روی عواملی که بر روی یک مسالهٔ پایداری بخصوص تأثیر می گذارند، متمرکز کرد. درک مسالهٔ پایداری را می توان تا حد زیادی با طبقه بندی آن به انواع مختلف، تسهیل کرد.

بخش هایی که به دنبال می آید انواع مختلف ناپایداری سیستم های قدرت به همراه مفاهیم مربوط و نیز در موارد لازم، ترکیب سادهٔ سیستم قدرت را مطرح می نماید. بررسی چنین سیستم هایی با استفاده از مدل های ایده آل کمک می نماید تا ویژگی های اساسی هر شکل از شکل های پایداری را تشخیص داد.

۲-۱-۱ پایداری زاویه ای روتور

پایداری زاویه ای روتور توانایی ماشین های به هم پیوستهٔ سنکرون یک سیستم قدرت است که در حالت سنکرون با یکدیگر باقی بمانند. مسالهٔپایداری در این حالت شامل مطالعه نوسان های الکترومکانیکی است که به طور ذاتی در سیستم های قدرت وجود دارد. عامل مهم در این مساله، نحوهٔ رفتار توان های خروجی ماشین های سنکرون در مقابل نوسان های روتور آنهاست. در گام اول، بحث کوتاهی در خصوص مشخصه های ماشین های سنکرون می تواند در درک مفاهیم اولیهٔ مربوطه، مفید واقع شود.

مشخصه های ماشین های سنکرون

مشخصه ها و مدلسازی ماشین های سنکرون به طور مفصل در فصل سوم، چهارم و پنجم مطرح خواهد شد. در این جا بحث به مشخصه های اولیهمربوط به عملکرد سنکرون محدود می شود.

یک ماشین سنکرون دو جزء اساسی شامل تحریک و آرمچیر دارد. معمولا، تحریک روی روتور و آرمچیر روی استاتور واقع است. سیم پیچ تحریک با استفاده از جریان مستقیم تغذیه می شود.زمانی که روتور را با یک تحریک (توربین) بچرخانیم، میدان مغناطیسی دوارسیم پیچ تحریک، ولتاژ های متناوبی در سه فاز سیم پیچ های آرمیچر استاتور، القا می نماید. فرکانس ولتاژ متناوب القا شده و جریان های حاصل در سیم پیچ های استاتور (زمانی که بار به آن متصل است) بستگی به سرعت روتور دارد. از این رو مشاهده می شود که فرکانس متغیرهای الکتریکیاستاتور با سسرعتمکانیکی روتور، سنکرون یا هماهنگ شده اند. از این روست که واژۀ ماشین سنکرون به کار می رود.

زمانی که دو یا چند ماشین سنکرون به یکدیگر متصل می شوند، باید ولتاژ وجریان استاتور همۀ ماشین ها دارای فرکانس باشندو سرعت مکانیکی هر یک از این فرکانس، هماهنگ باشند. از این رو روتور تمام ماشین های سنکرون به هم پیوسته، باید با یکدیگر سنکرونیزه باشند.

ترکیب فیزیکی (توزیع فضایی) سیم پیچ های آرمیچر استاتور به گونه ای است که جریان های متغیر با زمان که از سیم پیچهای سه فاز عبور می کنن، در حالت ماندگار میدان مغناطیسی دواری را ایجاد می کنند که با سرعت روتور می چرخد(به فصلسوم بخش ۳-۱-۳ مراجعه شود). میدان های روتور و استاتور بر یکدیگر تأثیر می گذارند و از اینکه دو میدان سعی می کنند در یک جهت قرار گیرند، گشتاور الکترومغناطیسی ایجاد می شود. در یک ژنراتور، این گشتاور با جهت حرکت روتور مقابله می کند به گونه ای که لازم است گشتاور مکانیکی به وسیلۀ توربین اعمال شود تا چرخش روتور همچنان حفظ گردد. گشتاور (یا توان) الکتریکی خروجی ژنراتور تنها زمتنی تغییر می کند که گشتاور ورودی مکانیکی که به وسیلۀ محرک اعمال می شود، تغییر نماید. تأثیر افزایش گشتاور مکانیکی آن است که روتور را در وضعیت جدیدی قرار می دهد که نسبت به میدان دوار مغناطیسی استاتور جلوتر واقع می شود. یا برعکس، کاهش گشتاور یا توان مکانیکی ورودی ، روتور را عقب تر از میدان دوار مغناطیسی استاتور قرار می دهد. در حالت ماندگار، میدان روتور و میدان دوار حاصل از جریان های استاتور دارای سرعت مشابههستند. با وجود این، مقداری اختلاف زاویه ای بین آنها وجود دارد که بستگی به گشتاور (توان) خروجی الکتریکی ژنراتور دارد.

در یک موتور سنکرون نقش گشتاور های الکتریکی و مکانیکی نسبت به آنچه که در ژنراتور وجود دارد، جابجا می شود. گشتاور الکتریکی چرخش ا حفظ می کندحال آنکه بار مکانیکی با چرخش، مخالفت می کند. افزایش بار مکانیکی باعث عقب افتادن موقعیت روتور نسبت به میدان دوار استاتور می شود.

در بحث فوق دو واژۀ توان و گشتاور تواما استفاده شد. این مسأله در فرهنگ پایداری سیستم های قدرت رایج است زیرا که سرعت چرخشی متوسط ماشین ها ثابت است هر چند که ممکن است تغییرات زود گذری،

بالا و پایین سرعت سنکرون اتفاق افتد. در حقیقت مقادیر توان و گشتاور در مبنای واحد، تقریبا با هم مساوی است.

رابطۀ توان – زاویه

مشخصۀ مهمی که در خصوص پایداری سیستم قدرت اهمت دارد رابطۀ بین توان مبادله شده و موقعیت زاویه ای روتور ماشین سنکرون است. این رابطه به شدت غیر خطی است. برای نشان دادن موضوع، سیستم ساده شکل ۲-۱ "الف" را در نظر بگیرید. این سیستم شامل دو ماشین سنکرون است که از طریق خط انتقالی با راکتانس X_L به یکدیگر متصل شده اند. از مقاومت وظرفیت خازنی خط صرف نظر شده است. فرض کنید که ماشین شمارۀ ۱ ژنراتور سنکرونی است که ماشین شماره ۲ را، که یک موتور سنکرون است، تغذیه می کند. توان انتقال یافته از ژنراتور به موتور تابعی از زاویه δ است که اختلاف زاویه بین روتورهای دو ماشین را نشان می دهد. زاویۀ δ

خود از سه مولفه تشکیل شده است: یکی زاویۀ داخلی ژنراتور به نام δ_G (که زاویه ای است که روتور ژنراتور نسبت به میدان حاصل از استاتور آن جلوتر است)، دیگری δ_L. اختلاف زاویه بین ولتاژ های پایانۀ ژنراتور و موتور (یعنی زاویه ای که میدان استاتور ژنراتور از میدان استاتور موتور جلوتر است) و دیگری δ_M ، زاویۀ داخلی موتور (که زاویه ای است که روتور موتور نسبت به میدان حاصل از اتاتور عقبتر است). شکل ۲-۱ "ب" مدلی از سیستم را نشان می دهد که به کمک آن می توان رابطۀ توان – زاویه را به دست آورد. برای هر ماشین، مدل ساده ای شامل یک منبع داخلی ولتاژ و یک راکتانس موثر فرض شده است. مقدار راکتانس ماشین، بستگی به نوع مطالعه ای دارد که در پی آن هستیم. برای مطالعات حالت ماندگار، کافی است که راکتانس سنکرون ماشین را به همراه ولتاژ تحریک به عنوان منبع داخلی ولتاژ به کار برد. اساس لازم برای چنین مدلی و تقریبهایی را که در آن به کار رفته در فصل سوم بیان خواهیم کرد.

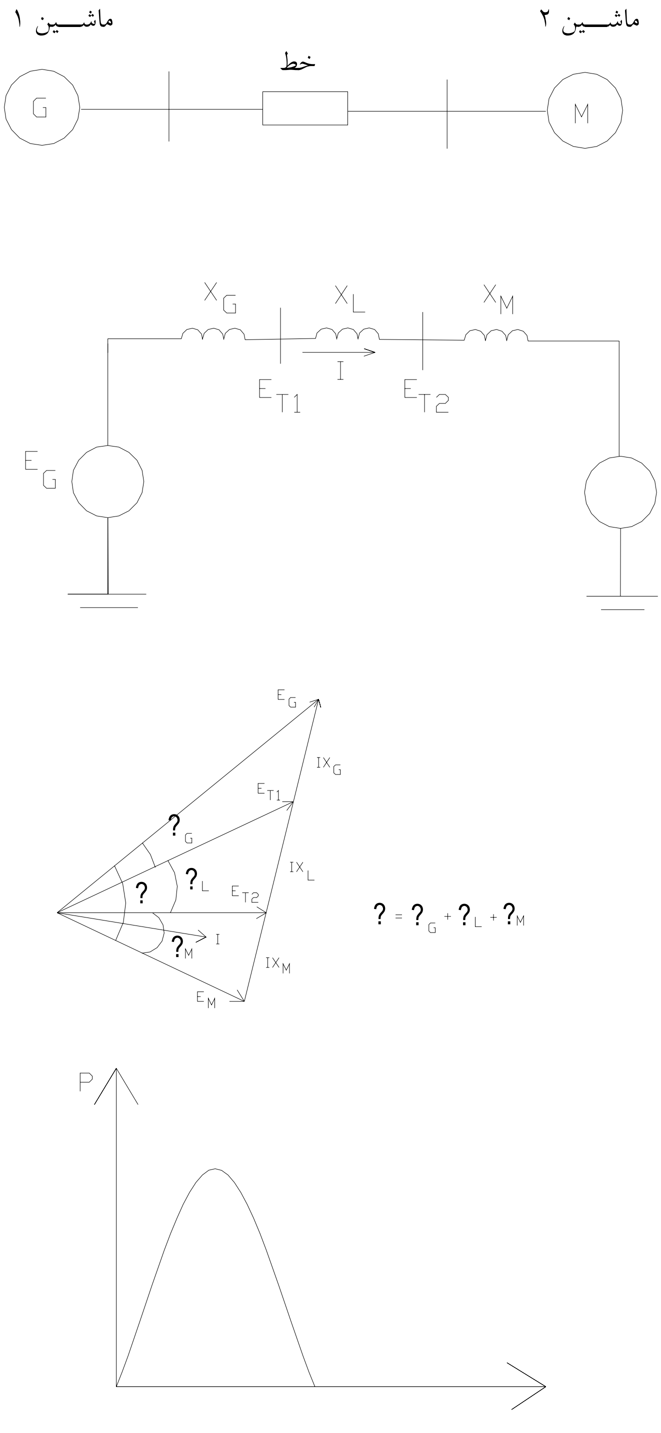
نمودار فازوری که ارتباط بین ولتاژ ها را نشان می دهد در شکل ۲-۱ "ج" نشان داده شده است. توان انتقالی از ژنراتور به موتور برابر است با:

$$P = \frac{E_G E_M}{X_T} \sin \delta \qquad (۲-۱)$$

که :

$$X_T = X_G + X_L + X_M$$

رابطۀ توان – زاویه در شکل ۲-۱ "د" رسم شده است. با مدل های نسبتا ایده آلی که برای ماشین ها فرض شد، رابطۀ بدست آمده به صورت سینوسی استکه رابطۀ کاملا غیر خطی را نشان می دهد. با مدل های دقیق تر ماشین، که تأثیر سیستم های تحریک (تنظیم کننده های خود کار ولتاژ) را نیز در نظر گرفته، رابطۀ توان – زاویه به میزان زیادی از حالت سینوسی خارج می شوداما به هر حال شکل کلی آن باز هم مشابه است.



الف) نمودار تـک خطـی

ب) مدل ایده ال

ج)نمـودار فـازوری

د) منحـنی تـوان – زاویـه

شکل ۲-۱ مشخصه انتقال توان یک سیستم دو ماشینه

زمانی که زاویه صفر است هیچ توانی مبادله نمی شود. هر چه زاویه افزایش داده شود توان نیز افزایش می یابد تا به حداکثر خود برسد. اگر زاویه از 90° بیشتر شود، توان، کاهش می یابد. از این رو در حالت مانگار می توان حداکثر توانی مشخص را از ژنراتور به موتور منتقل کرد. مقدار این توان مستقیما با ولتاژهای داخلی ژنراتور . موتور به طور معکوس با مجموع راکتانس های هر دو ماشین و خط انتقال، متناسب است.

زمانی که بیش از دو ماشین وجود داشته باشد، موقعیت نسبی روتورها نسبت به هم بر تبادل توان به طور مشابهی تأثیر می گذارد. با وجود این، مقادیر حداکثر توان های مبادله شده و اختلاف زوایا تابعی پیچیده از توزیع، تولید و بار است. اختلاف زاویه 90° بین هر دو ماشین (که در مورد حالت دو ماشینه محدود کننده بود)به خودی خود هیچ اهمیت مشخصی ندارد.

پدیدهٔ پایداری

پایداری حالت تعادل بین نیروهای متضاد را نشان می دهد. مکانیزمی که به وسیلهٔ آن ماشین های سنکرون به هم پیوسته، حالت سنکرون را بین یکدیگر حفظ می کنند از طریق نیروهای باز یافت است که، زمانی عمل می نماید که نیروهایی وجود داشته باشدتا یک یا چند ماشین را نسبت به سایر ماشین ها شتاب مثبت یا منفی دهد. در حالت ماندگار، تعادل بین گشتاور میکانیکی ورودی و گشتاور الکتریکی خروجی وجود دارد و سرعت، ثابت باقی می ماند. اگر سیستم دستخوش تغییر شود این تعادل از بین می رود و در نتیجه روتور ماشین ها بر اساس قوانین حرکت اجسام دوار، شتاب مثبت یا منفی پیدا می کند. اگر به طور موقت ژنراتوری نسبت به دیگری سریعتر بچرخد، موقعیت زاویه ای روتور آن نسبت به ماشین کندتر، جلوتر قرار می گیرد. بسته به رابطهٔ توان – زاویه ، اختلاف زاویه بین روتور بین دو ماشین باعث می شود تا بخشی از بار ماشین کند به ماشین تند منتقل شود. این موضوع سبب می شود که اختلاف سرعت و در نتیجه اختلاف زاویهٔ روتورها کاهش یابد. همچنان که ذکر شد، رابطهٔ توان – زاویه بشدت غیر خطی است. بالاتر از حد مشخصی، افزایش در اختلاف زاویه، باعث کاهش در توان مبادله شده می شود. این موضوع سبب می شود که اختلاف زاویهٔ باز هم بیشتر شود و منجر به ناپایداری گردد. در هر وضعیت بخصوص، پایداری سیستم به این بستگی دارد که آیا انحراف زوایای روتور ماشین ها منجر به گشتاورهای باز یافت کافی می شود یا خیر. زمانی که یک ماشین سنکرون، حالت سنکرونیزه یا هماهنگ خود با سایر ماشین ها را از دست داد، روتور آن در سرعتی بالاتر یا پایین تر از سرعتی که برای تولید ولتاژ در فرکانس سیستم لازم است، می چرخد. اغزش بین میدان دوار استاتور (مربوط به فرمانس سیستم) و تحریک روتور منجر به تغییرات بزرگی در توان خروجی، جریانو ولتاژ ماشین می شود. این موضوع باعث می شود که سیستم های حفاظتی، ماشین ناپایدار را از سیستم جدا کنند.

از دست رفتن حالت سنکرونیزه ممکن است بین یک ماشین و بقیهٔ سیستم یا بین گروهی از ماشین ها اتفاق افتد. در حالت دوم، ممکن است بعد از جدائی گروه ها از یکدیگر، حالت سنکرونیزه بین ماشین های هر گروه را حفظ کرد.

عملکرد سنکرونیزه ماشین های سنکرون به هم پیوسته را می توان به مجموعه ای از خودروهایی تشبیه کرد که به کمک تسمه های لاستیکی به یگدیگر متصل شده اند و در یک مسیر دایره وار می چرخند. روتور ماشین های سنکرون به خودرو و خطوط انتقال به تسمه تشبیه شده است. زمانی که خودرو ها با یکدیگر هم نوا و هم سرعت باشند تسمه های لاستیکی دست نخورده باقی می مانند. زمانی که نیروی یکی از خودرو ها

افزایش یابد، سرعت آن نیز موقتا افزایش می یابد. این موضوع باعث می شود که تسمهٔ متصل به آن کش بیابد که درنتیجه سرعت آن کاهش و سرعت سایر خودروها افزایش می یابند. بدین ترتیب عکس العملی زنجیروار اتفاق می افتد تا مجددا تمام خودروها در سرعت مشابه ادامه طریق دهند. اگر نیروی وارده به یکی از تسمه ها از حد توانایی آن بیستر شود، پاره می شود و باعث می شود که یک یا چندین خودرو از سایر خودروها جدا شوند.

در سیستم های قدرت می توان با بروز اغتشاش، تغییرات گشتاور الکتریکی یک ماشین سنکرون را، به دو مولفه تجزیه کرد:

$$\Delta T_e = T_S \Delta\delta + T_D \Delta\omega \qquad (۲-۲)$$

که $T_S \Delta\delta$ مولفه ای از تغییرات گشتاور است که با تغییرات زاویهٔ روتور، $\Delta\delta$ ، هم فاز است و از آن به نام مولفهٔ گشتاور سنکرون کننده یاد می شود. T_S ، ضریب گشتاور سنکرون کننده است. $T_D \Delta\omega$ مولفه ای از تغییرات گشتاور است که با تغییرات سرعت، $\Delta\omega$ ، هم فاز است و از آن به نام مولفهٔ گشتاور میرا کننده یاد می شود. T_D ، نیز ضریب گشتاور میرا کننده است.

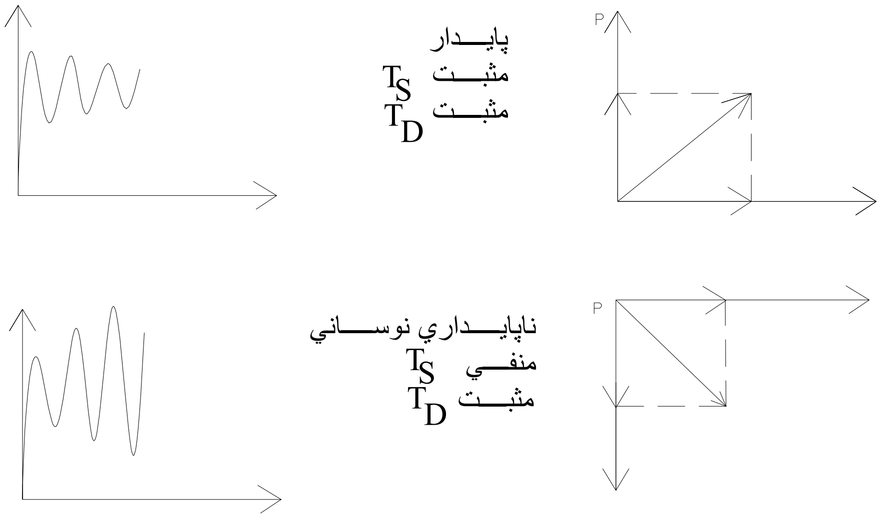
پایداری سیستم بستگی به وجود هر دو مولفهٔ گشتاور برای هر ماشین سنکرون دارد. کمبود گشتاور سنکرون کننده منجر به ناپایداری از طریق رانش غیر نوسانی زاویه روتور می شود. از طرف دیگر، کمبود گشتاور میرا کننده هم منجر به ناپایداری نوسانی می شود.

به منظر سهولت در امر بررسی پایداری و کسب نگرشی مفید بر طبیعت مسائل پایداری، مناسب است که پایداری زاویهٔ روتور را بر حسب دو طبقه بندی ذیل، تقسیم کرد:

الف) پایدار اغتشاش کوچک یا سیگنال کوچک ، توانایی سیستم را برای حفظ حالت سنکرونیزه در اثر اغتشاش های کوچک نشان می دهد. این اغتشاش ها به علت تغییرات کوچک بار و تولید، دائما اتفاق می افتد. اغتشاش ها را می توان به اندازهٔ کافی کوچک به حساب آورد تا اجازهٔ خطی کردن معادلات سیستم را برای بررسی پایداری داشته باشیم. ناپایداری که ممکن است اتفاق بیفتد به دو صورت باشد: یکی اینکه زاویهٔ روتور به علت کمبود گشتاور سنکرون کننده دائما افزایش یابد و دیگری حالتی که به کمبود توان میرا کننده، نوسان های روتور با دامنهٔ در حال افزایش اتفاق افتد. عکس العمل سیستم در مقابل اغتشاش های کوچک، به عوامل چندی از جمله: نقطهٔ کار اولیه، قدرت سیستم انتقال و نوع سیستم کنترل تحریک بستگی دارد. برای ژنراتوری که به طور شعاعی به یک سیستم قدرت بزرگ متصل است، ناپایداری در غیاب تنظیم کننده های خودکار ولتاژ (AVR) (یعنی با ولتاژ تحریک ثابت)، به علت کمبود گشتاور سنکرون کننده، اتفاق می افتد. این مسأله منجر به ناپایداری غیر نوسانی مطابق با شکل ۲-۲-"الف" می شود. با وجود تنظیم کننده های خودکار ولتاژ، زمانی سیستم در مقابل اغتشاش کوچک پایدار است که اطمینان حاصل شود نوسان های سیستم میرایی کافی دارند. ناپایداری معمولا خود را به صورت نوسان هایی با دامنهٔ در حال افزایش نشان می دهد. شکل ۲-۲ "ب" عکس العمل سیستم را با وجود تنظیم کنندهٔ خودکار ولتاژ به تصویر کشیده است.

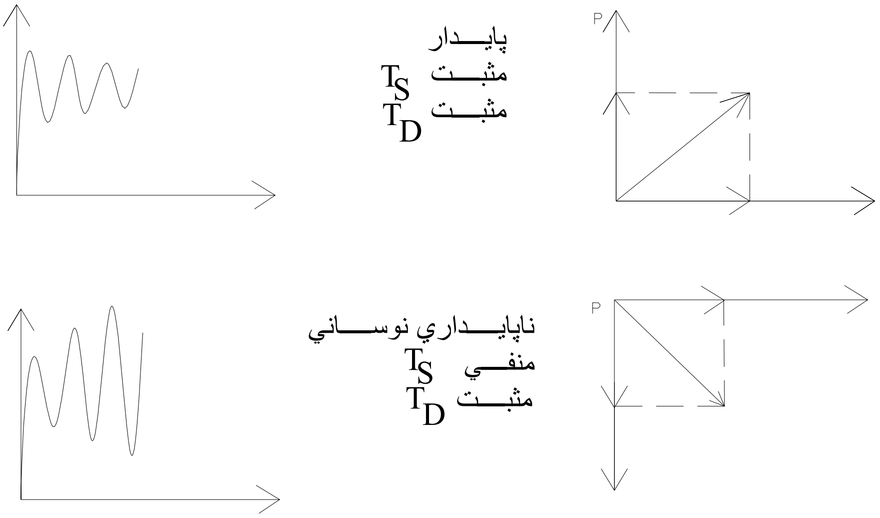
در سیستم های قدرت امروزی، پایداری اغتشاش کوچک، عمدتا به علت کمبود میرایی نوسان ها اتفاق می افتد. پایداری انواع نوسان های زیر مورد توجه است:

- **مد های محلی یا مد های ماشین** – سیستم که مربوط به نوسان هی واحد های یک نیروگاه نسبت به بقیهٔ سیستم قدرت است. واژهٔ محلی به این علت استفاده می شود که نوسان ها به یک نیروگاه یا بخشی کوچک از سیستم قدرت محدود می شود.
- **مد های بین ناحیه ای** – که مربوط به نوسان های تعدادی ماشین سنکرون در یک بخش سیستم نسبت به ماشین های سنکرون سایر بخش هاست. این مدها زمانی اتفاق می افتد که دو یا چند بخش که هر بخش از تعدادی ماشین سنکرون کاملا نزدیک به هم متصل تشکیل شده است، به وسیلهٔ خطوط ارتباطی ضعیف به هم متصل شده باشند.
- **مد های کنترلی** – که مربوط به کنترلگرهای نیروگاه، کنوروتورهای HVDC وجبرانگرهای استاتیکی توان راکتیو (SVC)، بد تنظیم شده باشد، ناپایداری این گونه مدها اتفاق می افتد.
- **مدهای پیچشی** – که مربوط به اجزای چرخان روی محور توربین – ژنراتور است. ناپایداری این مدها ممکن است به علت تأثیر متقابل اجزای مذکور با سیستم تحریک، گاورنر، کنترولگرهای HVDC وخطوط انتقالی که با خازن سری جبران شده اند، اتفاق افتد.



الف) با

ولتاژ تحریک



(ب) با کنترل تحریک

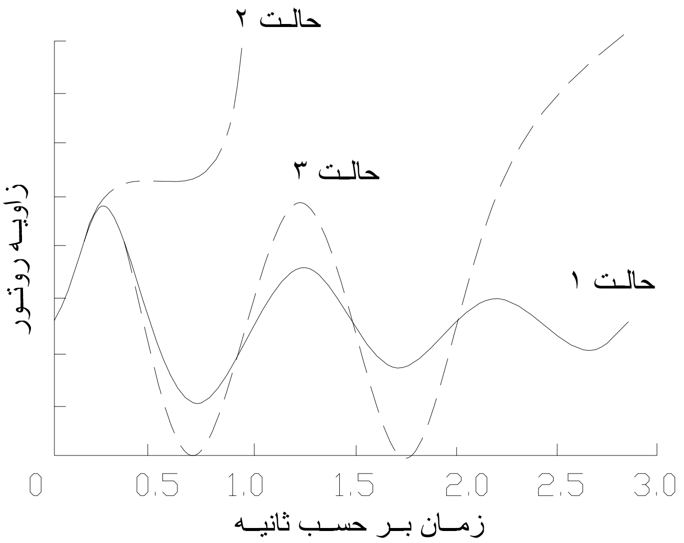
شکل ۲-۲ طبیعت پاسخ اغتشاش کوچک

ب) پایداری گذرا، توانایی سیستم را به منظور حفظ حالت سنکرونیزه در اثر بروز یک اغتشاش شدید گذرا نشان می دهد. عکس العمل سیستم، شامل بغییرات بزرگ زاویهٔ روتور ژنراتور است و از رابطهٔ غیر خطی توان – زاویه تأثیر می پذیرد. پایداری، هم به نقطهٔ کار اولیهٔ سیستم و هم به شدت اغتشاش بستگی دارد. معمولا در این حالت، سیستم دستخوش تغییر می شود به گونه ای که نقطهٔ کار حالت ماندگار سیستم بعد از اغتشاش با نقطهٔ کار قبل از اغتشاش متفاوت است.

در سیستم ممکن است اغتشاش هایی با شدت درجات و احتمال وقوع بسیار متفاوت روی دهد. با وجود این، سیستم به گونه ای طراحی می شود که در مقابل مجموعه ای از پیشامدهای برگزیده، پایدار بماند. این پیشامدها، عمدتا اتصال کوتاه فاز به زمین، فاز به فاز به زمین و سه فاز است. معمولا اتصال کوتاه را روی خطوط انتقال فرض می کنند اما گاهی اتصال کوتاه در شین یا ترانسفورمر نیز در نظر گرفته می شود. فرض می شود که به وسیلهٔ کلید زنی لازم، بخشی که تحت تأثیر خطا واقع شده از بقیهٔ سیستم جدا می گردد. در بعضی شرایط، می توان باز بست سریع را فرض کرد.

شکل ۲-۳ رفتار ماشینی سنکرون را در وضعیتهای پایدار و ناپایدار نشان می دهد. این شکل، عکس العمل زاویهٔ روتور را برای یک حالت پایدار و دو حالت ناپایدار نشان می دهد. در حالت پادار (حالت۱)، زاویهٔ روتور ابتدا افزایش یافته ، به حداکثر خود می رسد و سپس کاهش یافته و با دامنهٔ در حال کاهش به صورت نوسانی در می آید تا اینکه به حالت ماندگار می رسد. در حالت۲ ، زاویهٔ روتور به طور پیوسته و یکنوا افزایش می یابد تا اینکه حالت سنکرون از دست برود. این شکل ناپایداری موسوم به ناپایداری اولین

نوسان است و به علت کمبود گشتاور سنکرون کننده ایجاد می شود. در حالت۳ ، سیستم ابتدا در اولین نوسان پایدار است اما با افزایش دامنۀ نوسان ها، تدریجا ناپایدار می شود. این شکل ناپایداری عموما زمانی اتفاق می افتد که شرایط حالت ماندگار سیستم بعد از خطا، خود از دیدگاه "سیگنال کوچک " ناپایدار است و لزوما به علت اغتشاش گذرا اتفاق نمی افتد.



شکل ۲-۳

پاسخ زاویه روتور به یک اغتشاش گذرا

در سیستم های قدرت بزرگ، ممکن است ناپایداری گذرا همیشه به صورت ناپایداری اولین نوسان بروز نکند بلکه می تواند به علت جمع آثار چندین مد نوسانی باشدکه اعث تغییرات شدید زاویۀ روتور بعد از اولین نوسان می شود. در مطالعات پایداری گذرا، زمان مطالعه معمولا محدود به ۳ تا ۵ ثانیه بعد از اغتشاش می شود هر چند که ممکن است برای سیستم های بسیار بزرگ با مد های نوسانی بین ناحیه ای غالب، این زمان به ۱۰ ثانیه هم برسد.

از واژۀ پایداری دینامیکی نیز در آثار چاپ شده به عنوان نوعی از پایداری زاویۀ روتور یاد شده است. با وجود این، نویسندگان مختلف از این واژه برای جنبه های متفاوت پدیده استفاده کرده اند. در امریکای شمالی، از این واژه به همان معنای پایداری سیگنال کوچک با وجود تجهیزات کنترل خودکار (عمدتا تنظیم کننده های ولتاژ ژنراتور) در مقابل پایداری بدون وجود این تجهیزات یاد شده است[۲،۱]. در فرانسه و آلمان، از این واژه به همان معنای پایداری گذرا، که در اینجا استفاده شده است یاد گردیده است. از آنجا که استفاده از این واژه ابهامات زیادی را ایجاد کرده، هم CIGRE و هم IEEE به عدم استفاده از آن توصیه نمودهاند[۳،۴].

۲-۱-۲ پایداری ولتاژ و فرو پاشی ولتاژ

پایداری ولتاژ عبارت است از توانایی سیستم قدرت برای حفظ ولتاژ ماندگار قابل قبول در تمام شین های سیستم در شرایط عادی عملکرد و بعد از اینکه تحت یک اغتشاش قرار گرفت. زمانی که حضور اغتشاش، افزایش تقاضای بار، یا تغییر در وضعیت سیستم باعث افت فزاینده و غیر قابل کنترل در ولتاژ گردد سیستم وارد حالت ناپایداری ولتاژ می شود. دلیل اصلی ناپایداری، عدم توانایی سیستم قدرت در تأمین توان راکتیو مورد تقاضاست. قلب مسأله معمولا افت ولتاژی است که به هنگام عبور توان حقیقی و راکتیو از راکتانس های خطوط انتقال ایجاد می گردد[۵ تا ۷].

یکی از معیار های پایداری ولتاژ آن است که در وضعیت کاری خاصی، در هر شین سیستم و در زمانی که توان راکتیو تزریقی به آن شین افزایش می یابد، دامنهٔ ولتاژ نیز افزایش یابد. سیستم، از دید ولتاژ، ناپایدار است اگر حداقل برای یک شین سیستم، افزایش توان راکتیو تزریقی به آن (Q)، باعث کاهش دامنهٔ ولتاژ آن (V)شود. به عبارت دیگر سیستمی از نظر ولتاژ پایدار استکه حساسیت V-Q آن برای هر شین مثبت باشد و ناپایدار است اگر این حساسیت حداقل برای یک شین منفی شود.

افت ولتاژ شین ممکن است به علت از دست رفتن حالت سنکرونیزه و افزایش زاویهٔ روتور نیز صورت پذیرد. به عنوان مثال، از دست دادن تدریجی حالت سنکرونیزه ماشین ها، زمانی که زوایای روتور بین دو گروه از ماشین ها به 180°نزدیک شده یا از آن فراتر رود، منجر به ولتاژهای بسیار پایین در نقاط واسطه ای از شبکه می شود(به فصل سیردهم، بخش ۱۳-۵-۳ مراجعه کنید). در مقابل، کاهش مداوم ولتاژ، که مربوط به ناپایداری ولتاژ است، زمانی اتفاق می افتد که از نظر پایداری پاویهٔ روتور مشکلی وجود نداشته باشد.

اساسا ناپایداری ولتاژ یک پدیدهٔ محلی است. با وجود این، آثار آن ممکن است تأثیر فراگیر داشته باشد. فروپاشی ولتاژ پدیده ای پیچیده تر از ناپایداری سادهٔ ولتاژ است و معمولا اثر رشته ای از حوادث ناپایداری ولتاژ است که منجر به ولتاژ پایین در بخش عمده ای از سیستم قدرت می شود.

ناپایداری ولتاژ ممکن است به صورت های مختلفی بروز کند. در ساده ترین شکل، موضوع را می توانبا توجه به شبکه ساده شکل ۲-۴ نشان داد[۵]. این شبکه، شامل یک منبع ثابت ولتاژ (E_S) است که باری ($\overline{Z}_D$) را از طریق یک امپدانس سری ($\overline{Z}_L$) تغذیه می کند. این شبکهنمونه ای از یک سیستم شعاعی است که در آن بار یا ناحیهای از بارها به وسیلهٔ یک خط انتقال از سیستمی بزرگ تغذیه می شود. جریان $\overline{I}$ در شکل ۲- ۴ برابر است با:

$$\overline{I} = \frac{\overline{E}_S}{\overline{Z}_L + \overline{Z}_D} \qquad (۳\text{-}۲)$$

که $\overline{I}$و $\overline{E}_S$مقادیر فازوری هستند و داریم:

$$\overline{Z}_L = Z_L \angle \theta \qquad , \qquad \overline{Z}_D = Z_D \angle \varphi$$

دامنهٔ جریان برابر است با:

$$I = \frac{E_S}{\sqrt{(Z_L\cos\theta + Z_D\cos\varphi)^2 + (Z_L\sin\theta + Z_D\sin\varphi)^2}}$$

که این رابطه را به صورت زیر هم می توان بیان کرد:

$$I = \frac{1}{\sqrt{A}}\frac{E_S}{Z_L} \qquad (۴-۲)$$

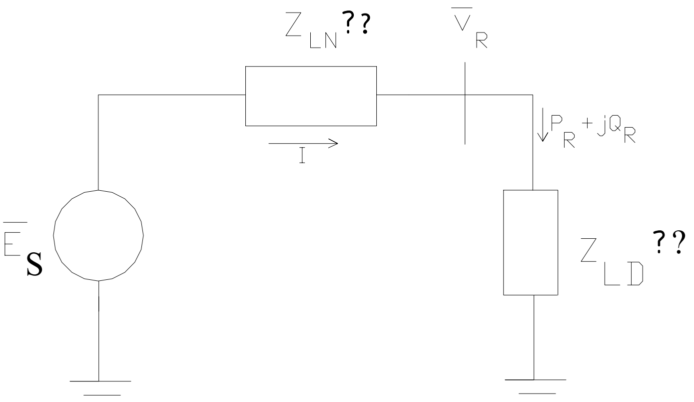
که:

$$A = 1 + \left[\frac{Z_D}{Z_L}\right]^2 + 2\left[\frac{Z_D}{Z_L}\right]\cos(\theta - \varphi)$$

دامنهٔ ولتاژ طرف گیرنده (بار) برابر است با :

$$\overline{V}_R = \overline{Z}_{LD}\overline{I} \qquad \rightarrow V_R = Z_{LD} I$$

$$= \frac{1}{\sqrt{A}}\frac{Z_D}{Z_{LN}} E_S \qquad (۵-۲)$$



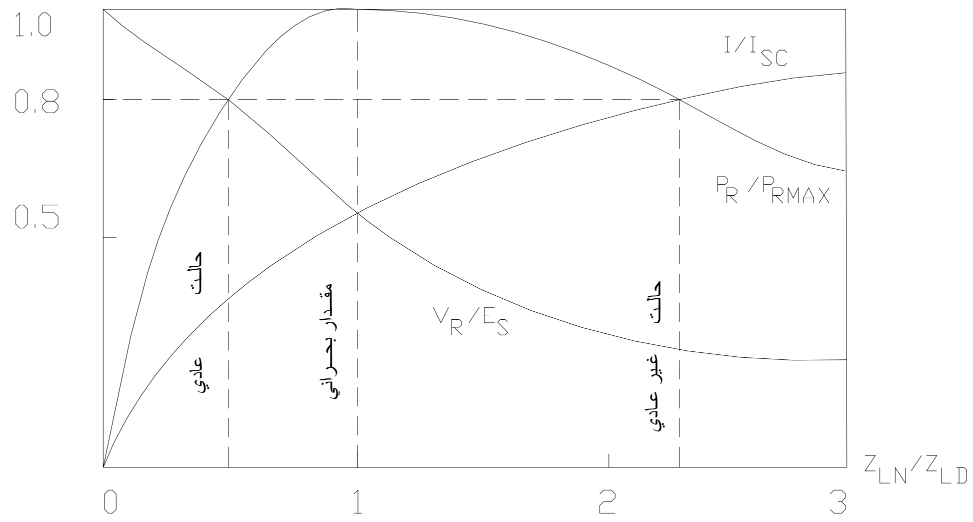
شکل ۲-۴ یک سیستم ساده شعاعی برای نمایش پدیده پایداری ولتاژ

و توان حقیقی برابر است با:

$$P_R = V_R I \cos\varphi$$

$$= \frac{Z_D}{A}\left[\frac{E_S}{Z_L}\right]^2 \cos\varphi \qquad (۶-۲)$$

نمودار I ، V_R ، P_R برحسب Z_L/Z_D برای حالتی که $\tan\theta = 0.0$ و $\cos\varphi = 0.95$ است در شکل ۲-۵ رسم شده است. برای اینکه بتوان نتایج را برای هر مقدار Z_L به کاربرد، مقادیر I ، V_R ، P_R به طور مناسبی نرمالیزه شده اند.



شکل ۲-۵ ولتاژ، جریان وتوان طرف گیرنده به صورت تابعی از تقاضای جریان بار برای سیستم شکل ۲-۴

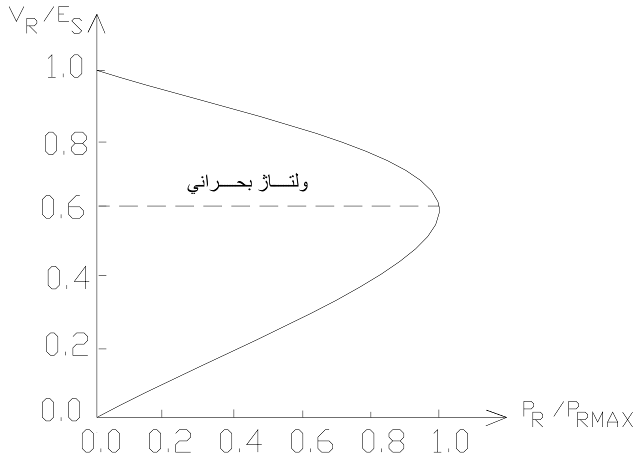
اگر با کاهش Z_D ، بار مورد تقاضا (جریان بار) را افزایش دهیم، P_R قبل از رسیدن به یک حداکثر، ابتدا سریعا و سپس کندتر افزایش می یابد و بعد از آن شروع به کاهش می کند. از این رو مقدارحداکثری برای توان حقیقی وجود دارد که می توان آن را با منبع ولتاژ ثابتی از طرق یک امپدانس، انتقال داد. توان، زمانی حداکثر است که افت ولتاژ خط، از نظر مقدار مساوی V_R ، باشد یعنی زمانی که $Z_L / Z_D = 1$ است. زمانی که Z_D رفته رفته کاهش یابد، I زیاد می شود و V کم می گردد. در ابتدا در مقادیر بزرگ Z_{LD} ، افزایش در جریان بر کاهش در ولتاژ غالب است و در نتیجه با کاهش Z_D ، P_R سریعا افزایش می یابد. زمانی که Z_D به Z_L نزدیک شد، تأثیر کاهش I فقط کمی بیشتر از تأثیر کاهش در V_R است. زمانی که Z_D کمتر از Z_L باشد، کاهش در V_R بر افزایش در I غالب می شود که در نتیجه تأثیر خالص آن، کاهش P_R است.

حالت بحرانی کاری که در آن توان، حداکثر است، حد بهره برداری قابل قبول را نشان می دهد. در تقاضاهای بیشتر بار، کنترل توان به وسیلۀ تغییر بار ممکن است به ناپایداری بینجامد یعنی کاهش امپدان بار منجر ه کاهش توان می شود. اینکه آیا ولتاژ به طور فزاینده ای کاهش یابد و سیستم ناپایدار گردد بستگی به مشخصه های بار دارد. با باری با مشخصه استاتیکی امپدانس ثابت، سیستم در توان و ولتاژی کمتر از حدود مطلوب، پایدار می شود. از طرفی اگر مشخصۀ بار به صورت توان ثابت باشد، سیستم با فرو پاشی ولتاژ شین بار، ناپایدار می شود. با مشخصه های دیگر بار، ولتاژ به کمک ترکیب مشخصه های خط انتقال و بار، تعیین می گردد. اگر بار به وسیلۀ ترانسفورمرهایی با وجود تغییر دهنده های خودکار تپ زیربار (ULTC) تغذیهشود، تغییر دهنده سعی خواهد کرد که ولتاژ را بالا ببرد. این موضوع باعث می شودکه Z_D موثر از

دیدگاه سیستم کاهش یابد که خود باعث می شود V_Rباز هم کاهش یابد و سرانجام منجر به کاهش فزایندۀ ولتاژ شود. این موضوع، شکل ساده و خالص ناپایذاری ولتاژ است.

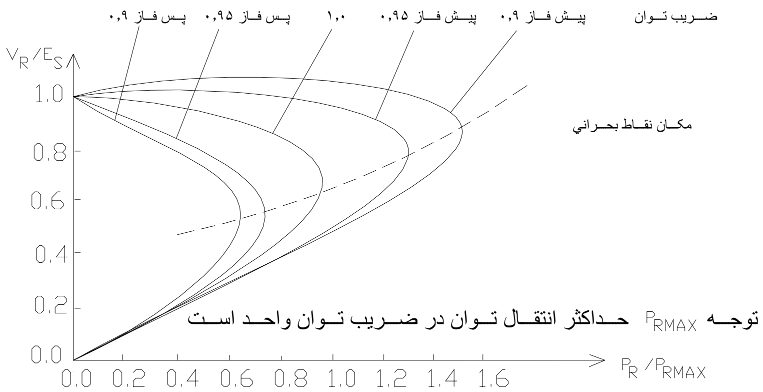
از دیدگاه پایداری ولتاژ، رابطۀ بین P_R و V_R مورد توجه است. این رابطه در شکل ۲-۶ برای سیستم مورد مطالعه، زمانی که ضریب توان بار مساوی ۰٫۹۵ پس فاز است، نشان داده شده است.

با توجه به معادلات۲-۵ و ۲-۶ ، ضریب توان تأثیر مهمی بر مشخصه توان – ولتاژ سیستم دارد. این موضوع، منطقی است زیرا افت ولتاژ در خط انتقال تابعی هم از توان حقیقی و هم از توان راکتیو انتقالی است. پایداری ولتاژ در حقیقت به روابط بین P، Q و V بستگی دارد.



شکل ۲-۶ مشخصه های توان- ولتاژ سیستم شکل ۲-۴

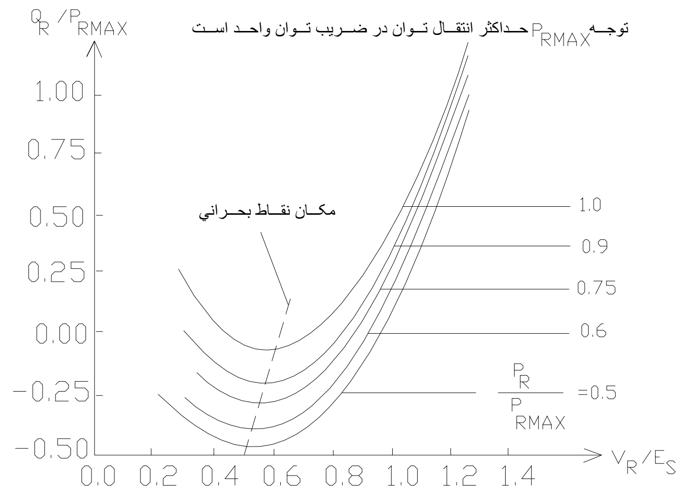
صورت های مرسوم جهت نمایش این ارتباط ها در شکل های ۲-۷ و ۲-۸ نشان داده شده است. شکل ۲-۷ منحنی های V_R-P_R را برای مقادیر مختلف ضریب توان در سیستم قدرت شکل ۲-۴ نشان می دهد. مکان هندسی نقاط بحرانی به صورت نقطه چین در شکل نشان داده شده است. معمولا تنها نقاط کاری بالای نقاط بحرانی، شرایط کاری قابل قبول را نشان می دهند. کاهش ناگهانی در ضریب توان (افزایش Q_R) می تواند سیستم را از حالت کاری پایدار به یک حالت کاری غیر قابل قبول و احتمالا ناپایدار (در محدودۀ پایین منحنی ها) سوق دهد.



شکل ۲-۷ مشخصه های V_R-P_R مربوط به سیستم شکل ۲-۴ با ضریبهای مختلف توان بار

تأثیر مخصه های توان راکتیو تجهیزات و وسایلی که در طرف گیرنده قرار دارند (بار و تجهیات جبرانگر) بیشتر در شکل ۲-۸ نمایان است. این شکل، مجموعه ای از منحنی ها برای سیستم قدرت ۲-۴ است که هر منحنی رابطهٔ بین V_R و Q_R را برای یک P_R ثابت نشان می دهد. سیستم در محدوده ای که مشتق dQ_R/dV_R مثبت است، پایدار است. حد پایداری ولتاژ (نقطهٔ بحرانی) زمانی فرا می رسد که مشتق، صفر باشد. از این رو بخشی از منحنی ها که در طرف راست نقطهٔ حداقل قرار دارد، نماینگر محدودهٔ عملکرد پایدار و بخش طرف چپ نمایانگر محدودهٔ ناپایدار است. عملکرد پایدار در محدوده ای که dQ_R/dV_R منفی است، فقط زمانی قابل کسب است که یک جبرانگر قابل تنظیم توان راکتیو با محدودهٔ کافی کنترلی با بهرهٔ Q/V بالا و با پلاریته عکس حالت عادی، در دسترس باشد.

شرح فوق در خصوص پدیدهٔ پایداری ولتاژ، ابتدایی است و هدف، کمک به طبقه بندی و درک جنبه های متفاوت پایداری سیستم قدرت است. بررسی، محدود به یک سیستم شعاعی شد که تصویری ساده و در عین حال گویا از مسألهٔ پایداری ولتاژ را نشان دهد. در یک سیستم عملی پیچیدهٔ قدرت، عوامل زیادی به فرایند فروپاشی ولتاژ سستم در اثر ناپایداری ولتاژ، کمک می کنند؛ از آن جمله، می توان از قوت سیستم انتقال، سطوح توانی انتقالی، مشخصه های بارها، حدود توانایی توان راکتیو ژنراتورها و مشخصه های تجهیزات جبران گر توان راکتیو نام برد. در بعضی حالات، مسأله با عملکرد ناهماهنگ سیستم های گوناگون حفاظتی و کنترل، ترکیب می شود.



شکل ۲-۸ مشخصه های V_R-Q_R مربوط به سیستم شکل ۲-۴ با نسبتهای مختلف P_R/P_{RMAX}

به منظور بررسی، مناسب است که پایداری ولتاژ را به دو طبقهٔ ذیل تقسیم نمود:

الف) پایداری اغتشاش بزرگ ولتاژ، مربوط به توانایی سیستم در کنترل ولتاژ به دنبال وقوع اغتشاش ها بزرگ از جمله خطاهای سیستم، از دست دادن تولید یا پیشامدهای خطوط است. این توانایی به وسیلهٔ مشخصه های بار سیستم و تأثیر متقابل سیستم های کنترلی و حفاظت پیوسته و گسسته مشخص می شود. تعیین پایداری اغتشاش بزرگ، مستلزم آن است که عملکرد غیر خطی دینماکی سیستم در محدودهٔ زمانی کافی که تأثیر متقابل تجهیزاتی از قبیل تغییر دهنده های تپ زیر بار (ULTC) و محدود کننده های جریان تحریک ژنراتور مشخص می شود، تعیین گردد. زمان مطالعه ممکن است از چند ثانیه تا چندین دقیقه طول بکشد. از این رو شبیه سازی دینامیکی بلند مدت برای بررسی مسأله، ضروری است. معیاری جهت پایداری اغتشاش بزرگ ولتاژ آن است که به دنبال بروز اغتشاش و بعد از عمل کنترل کننده های سیستم، ولتاژ تمام شین ها به سطوح ماندگار قابل قبول برسند.

ب) پایداری اغتشاش کوچک ولتاژ، مربوط به توانایی سیستم در کنترل ولتاژ به دنبال وقوع اغتشاش های کوچک، مثلا تغییرات کوچک در بار سیستم، است. این نوع پایداری به کمک مشخصه های بار، کنترل کننده های پیوسته و کنترل کننده های گسسته در یک لحظهٔ زمانی مشخص، تعیین می گردد. این مفهوم، مشخص می کند که در هر زمان سیستم چگونه در مقابل اغتشاش های کوچک،عکس العمل نشان می دهد.

فرایند های اصلی که به پایداری اغتشاش کوچک ولتاژ کمک می کند اساسا دارای طبیعت حالت ماندگار هستند. از این رو می توان به طور موثر از بررسی استاتیکی برای تعیین حاشیهٔ پایداری، عوامل موثر بر پایداری و مطالعهٔ تأثیر محدودهٔ ئسیعی از وضعیت های سیستم و تعداد زیادی سناریو که به دنبال پیشامدها و اغتشاشات رخ می دهد، استفاده کرد.

معیاری جهت پایداری اغتشاش کوچک ولتاژ آن است که در یک حالت کاری مشخص، دامنهٔ ولتاژ هر شین سیستم، زمانی که توان راکتیو تزریقی به آن شین افزایش می یابد، زیاد شود.سیستم، از نظر ولتاژ، ناپایدار است اگر حداقل در یک شین سیستم، دامنهٔ ولتاژ (V)، زمانی که توان راکتیو تزریقی (Q) به آن افزایش یابد، کم شود. به عبارت دیگر، سیستم از نظر ولتاژ،پایدار است اگر حساسیت V-Q برای هر شین، مثبت و ناپایدار است اگر حساسیت V-Q حداقل برای یک شین، منفی باشد.

ناپایداری ولتاژ همیشه به شکل خالص خود بروز نمی کند. اغلب، ناپایداری ولتاژ و زاویه با یکدیگر تداخل می کنند. ناپایداری از یک نوع ممکن است به ناپایداری از نوع دیگر منجر شود و تفکیک، واضح و روشن نباشد. با وجود این، تفکیک مهم است زیرا به دنبال درک و تعیین عوامل موثر بر مساله است که می توان روش های مناسب بهره برداری و طراحی را برگزید. شرح مفصل تر پایداری ولتاژ شامل روش های مطالعه و جلوگیری از فرو پاشی ولتاژ در فصل چهاردهم آمده است. بررسی جامع و عمیق مسأله در کتاب پایداری ولتاژ سیستم قدرت که قلم تیلور تألیف شده، بیان گردیده است.

۲-۱-۳ پایداری میان مدت و بلند مدت

واژه های پایداری بلند مدت و میان مدت در فرهنگ پایداری سیستم های قدرت نسبتا جدید هستند. این واژه ها به دنبال نیاز به بررسی عکس العمل دینامیکی سیستم قدرت در حالی که سیستم، دستخوش آشفتگی های شدید می شود، مطرح شده اند. آشفتگی های شدید در سیستم منجر به تغییرات بزرگی در ولتاژ، فرکانس و توان های انتقالی می شود و فرایندها، کنترل کننده ها و سیستم های حفاظتی کُند را که در مطالعات سنتی پایداری گذرا، مدل نمی شوند به عکس العمل وا می دارد. مشخصه های زمانی ای فرایند ها و تجهیزات، که در اثر تغییرات بزرگ فرکانس و ولتاژ تحریک می شوند و از محدودهٔ چند ثانیه (در خصوص تجهیزاتی از قبیل کنترل کننده ها و سیستم های حفاظتی ژنراتور)تا چند دقیقه (در خصوص تجهیزاتی از قبیل سیستم های تأمین انرژی چرخاننده ها و تنظیم کننده های بار – ولتاژ) متغییر است.

در پایداری بلند مدت فرض می شود که نوسان های توان سنکرون کنندهٔ بین ماشین های سنکرون، میرا شده است و در نتیجه فرکانس یکنواختی در کل سیستم برقرار است. در اینجا تأکید بر پدیده های گُندتر و بلند مدت تر است که همراه با آشفتگی های شدید سیستم ودر نتیجه عدم تطابق زیاد و طولانی بین تولید و مصرف توان های حقیقی و راکتیو است. پدیده ها شامل عکس العمل دینامیکی دیگ های بخار واحد های حرارتی، عکس العمل دینامیکی آبگذر و کانال آب واحدهای آبی، کنترل خودکار تولید، کنترل کننده ها و سیستم های حفاظتی نیروگاه ها و سیستم انتقال، اشباع در ترانسفورمر وتأثیرات فرکانس غیر اسمی بر بار و شبکه است.

عکس العمل میان مدت نمایشگر انتقال بین عکس العمل های کوتاه مدت و بلند مدت است. در مطالعات پایداری میان مدت، تأکید بر نوسان های توان سنکرون کننده بین ماشین های سنکرون و از جمله تأثیر بعضی از پدیده های گُندتر و احتمالا تغییرات شدید ولتاژ یا فرکانس است. از نظر زمانی، بازه های نوعی به صورت زیر است:

- کوتاه مدت یا گذرا : صفر تا ۱۰ ثانیه
- میان مدت : ۱۰ ثانیه تا چند دقیقه
- بلند مدت : چندین دقیقه تا چندین ده دقیقه

باید خاطر نشان کرد که تمایز بین پایداری میان مدت و بلند مدت عمدتا بر اساس پدیده های مورد بررسی و مدلسازی مورد استفاده سیستم بخصوص با توجه به نوسان های زودگذر و بین ماشینی و نه با توجه به دورهٔ زمانی مورد نظر، صورت می پذیرد. به طور کلی مسائل پایداری بلند مدت و کوتاه مدت مربوط به نقص در عکس العمل تجهیزات، هماهنگی ضعیف بین سیستم های کنترلی و حفاظتی یا کمبود ذخیرهٔ توان های حقیقی و راکتیو اتفاق می افتد.

پایداری بلند مدت معمولا مربوط به عکس العمل سیستم در مقابل اغتشاش های بزرگی استکه از محدودهٔ معیار های طراحی معمولی سیستم خارج است. این موضوع ممکن است به وقفه های متوالی و پارگی سیستم به چندین زیر سیستم منجر شود که در هر زیر سیستم، ژنراتورها در حالت سنکرونیزه باقی بمانند. مفهوم پایداری در این حالت آن است که " آیا هر زیر سیستم به حالت قابل قبول تعادلی با حداقل بار زدایی می رسد یا خیر" . این موضوع از عکس العملی کلی زیر سیستم با توجه به فرکانس متوسط آن و نه با توجه به حرکت نسبی بین ماشین های سنکرون، تعیین می شود. در بدین وضع، ممکن است عکس العمل تجهیزات حفاظتی سیستم و واحدها وضعیت را باز هم بدتر کند و فروپاشی سیستم یا بخشی از آن رخ دهد.

کاربردهای دیگر بررسی پایداری بلند مدت و کوتاه مدت، در خصوص بررسی دینامیکی پایداری ولتاژ است که نیازمند بهشبیه سازی تأثیر تغییر دهنده های تپ ترانسفورمرها، حفاظت فوق تحریک ژنراتورها، حدود منابع توان راکتیو و بارهای ترموستاتی است. در این حالت، کمتر متحمل است که نوسان های بین ماشین های سنکرون، مهم باشد. با وجود این، باید دقت کردکه از بعضی از عکس العمل های دینامیکی سریع چشم پوشی کرد.

در خصوص بررسی پایداری بلند مدت و میان مدت تجربه م مطالعه به صورت محدود انجام گرفته است. همچنان که بر تجربه ها افزوده گردد و روش های بهبود یافته در خصوص شبیه سازی عکس العمل های دینامیکی گند و سریع مطرح شود، تمایز بین پایداری بلند مدت اهمیت کمتری پیدا می کند.

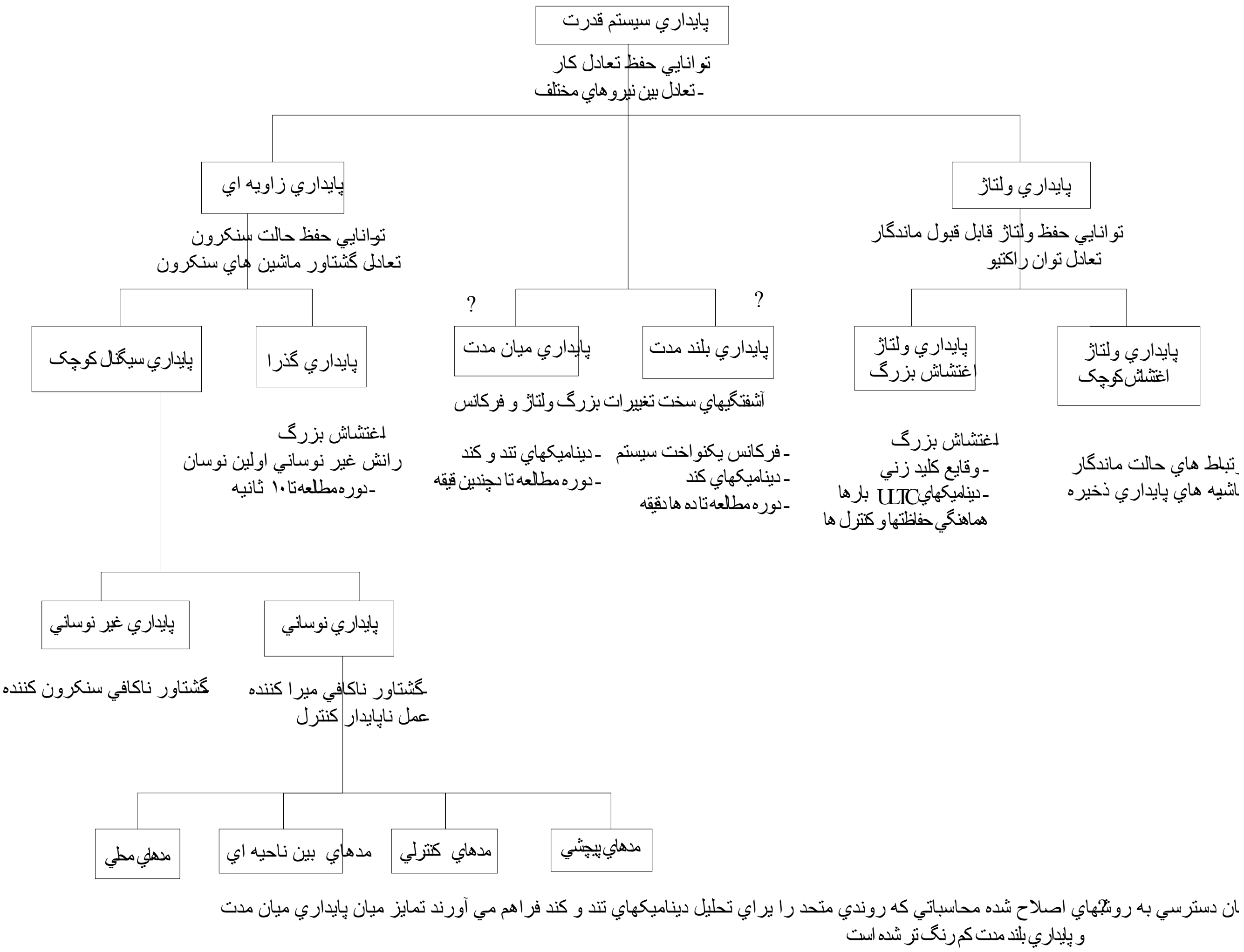
۲-۲ طبقه بندی پایداری

پایداری سیستم قدرت یک مسألهٔ منفرد است اما عملی نیست که آن را بدین صورت مطالعه کرد. همچنان که در بخش قبل مطرح گردید، ناپایداری یک سیستم قدرت می تواند شکل های مختلفی داشته باشد و از عوامل گوناگونی تأثیر پذیرد. با طبقه بندی مناسب پایداری، می توانبررسی مسائل مربوطه، تشخیص عوامل اصلی سهیم در ناپایداری و ایجاد روش های بهبود عملکرد پایدار سیستم را تا حد زیادی تسهیل بخشید. این طبقه بندی بر اساس نکات زیر صورت می پذیرد:

- طبیعت فیزیکی ناپایداری حاصل؛

- اندازۀ اغتشاش موجود؛
- تجهیزات، فرایندها و محدودۀ زمانی که برای تعیین پایداری لازم است مورد توجه قرار کیرند؛
- مناسب ترین روش محاسبه و پیش بینی پایداری.

شکل ۲-۹ شکل کلی مسألۀ پایداری سیستم قدرت را به تصویر کشیده است که در آن طبقات و زیر طبقه ها بر اساس آنچه که در بخش قبلی بیان گردید، مشخص شده اند. از بعد عملی، طبقه بندی بر اساس نکات متنوعی انجام گرفته که مرزبندی مشخص را بین طبقات و تعیین تعاریفی را که دقیق و در عین حال از دید عملی مفید باشند، مشکل می نماید. به عنوان مثال، همیشه نوعی هم پوشانی بین پایداری میان مدت، بلند مدت وپایداری ولتاژ وجود دارد. با مدل سازی مناسب بارها، تغییر دهنده زیر بار تپ ترانسفورمرها و حدود توان راکتیو ژنراتورها، شبیه سازی پایداری میان مدت و بلند مدت، مناسب بررسی دینامیکی پایداری ولتاژ نیز خواهد بود. به طور مشابه، هم پوشانی بین پایداری گذرا، میان مدت و بلند مدتوجود دارد، بدین صورت که که روش های محاسباتی مشابه برای پیش بینی عکس العمل غیر خطی زمانی سیستم در مقابل اغتشاش های بزرگ استفاده می کنند. اگر چه این سه طبقه، مسألۀ پایداری را از جنبه های مختلف مورد توجه قرار می هند، از دیدگاه محاسباتی و شبیه سازی، هر یک تعمیمی از دیگری است و مرز بندی مشخص، مشکل است



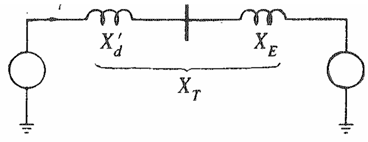
شکل ۲-۹ طبقه بندی پایداری سیستم قدرت

هر چند که طبقه بندی پایداری سیستم قدرت، وسیلهٔ موثر و مناسبی در برخورد با پیچیدگی های موجود در مسأله است، اما باید همواره پایداری کلی سیستم را مد نظر داشت. حل مسألهٔ پایداری یک طبقه نباید منجر به تأثیر منفی بر پایداری طبقهٔ دیگر شود. این نکته، اساسی است که باید تمام جنبه های پدیدهٔ پایداری را مورد توجه قرار داد و هر جنبه را از بیش از یک دیدگاه بررسی کرد. لازمهٔ این امر آن است که انواع روش های محاسباتی گوناگون ایجاد گردد و از آنها به صورت منطقی استفاده شود. در این صورت است که تا حدی، هم پوشانی در پدیدهٔ مورد بررسی، مطلوب است.

پایداری سیگنال کوچک سیستم مدرن یک ماشینه متصل به شین بینهایت

برای ژنراتور سیستم وبا صرفنظر از کلیه مقاومتها نمایش سیستم بصورت زیر خواهد بود. نیروی محرکه $\overline{E}$ متصل به راکتانس X_d بوده و اندازه آن قبل از وقوع اغتشاش ثابت فرض می شود. δزاویه ولتاژ $\overline{E}$ می باشد که نسبت به ولتاژ $\overline{V}$ پیش فاز می باشد.

I $\overline{V}_T$

$\overline{E} = E\angle\delta$  $\overline{V} = V\angle 0$

در اینصورت با وقوع نوسان در روتور مقدارδ تغییر می یابد. با در نظر گرفتن $\overline{V}$ به عنوان فازور مرجع داریم:

$$\overline{I} = = \frac{E\angle\delta - V\angle 0}{jX_T}$$

$$X_T = X_d + X_E$$

توان مختلط متصل به X_d به صورت زیر داده می شود:

$$\overline{S} = \text{P+jQ} = \overline{E}\ \overline{I^*}$$

$$E\angle\delta\left(\frac{E\angle\delta - V\angle 0}{-jX_T}\right) = \frac{EV\sin\delta}{X_T} + j\frac{E(E - V\cos\delta)}{X_T}$$

با در نظر نگرفتن مقاومت استاتور, توان فاصله هوایی P_e با توان پایانه P برابر می باشد و در مبنای واحد گشتاور فاصله هوایی با توان فاصله هوایی برابر است. از این رو داریم:

$$T_e = P = \frac{EV}{X_T}\sin\delta$$

خطی سازی حول نقطه کار نشان داده شده با δ= δ_o نتیجه می دهد:

$$\Delta T_e = \frac{\partial T_e}{\partial \delta}\Delta\delta = \frac{EV}{X_T}\cos\delta_o(\Delta\delta)$$

معادله نوسان با در نظر گرفتن مولفه گشتاور میرا کننده:

$$\Delta w_r = w_r - w_o$$

$$dw_r = \frac{\Delta w_r}{w_c} = \frac{1}{w_o}\frac{ds}{dt}$$

$$\frac{ds}{dt} = w_o dw_r$$

$$\frac{2H}{w_o}\frac{d^2\delta}{dt^2} = T_m - T_e - K_D dw_r$$

معادلات حرکت در مبنای واحد عبارت است از:

$$\frac{d\Delta w_r}{dt} = P\Delta w_r = \frac{1}{2H}(T_m - T_e - k_D \Delta w_r)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = p\delta = w_o \Delta w_r$$

که در آن Δw_r انحراف سرعت در مبنای واحد , δ زاویه روتور بر حسب رادیان الکتریکی , w_o سرعت مبنای زاویه روتور بر حسب رادیان بر ثانیه , و P عملکرد دیفرانسیلی d/dt با زمان t به ثانیه است. با خطی سازی معادله $\frac{d\Delta w_r}{dt}$ وجایگزینی ΔT_e داده شده با معادله مربوطه به دست می آوریم:

گشتاور در فاصله هوائی

$$T_e = P = \frac{EV}{X_T}\sin\delta \rightarrow \Delta T_e = \frac{\partial T_e}{\partial \delta}\Delta\delta = \frac{EV}{X_T}\cos\delta_o(\Delta\delta) = K_S\Delta\delta$$

$$p\Delta w_r = \frac{1}{2H}[\Delta T_m - K_S\Delta\delta - K_D\Delta w_r]$$

که در آن K_S ضریب گشتاور سنکرون کننده داده سده با معادله زیر است:

$$K_S = [\frac{EV}{X_T}]\cos\delta_o$$

از خطی سازی معادله $\frac{d\delta}{dt}$ داریم:

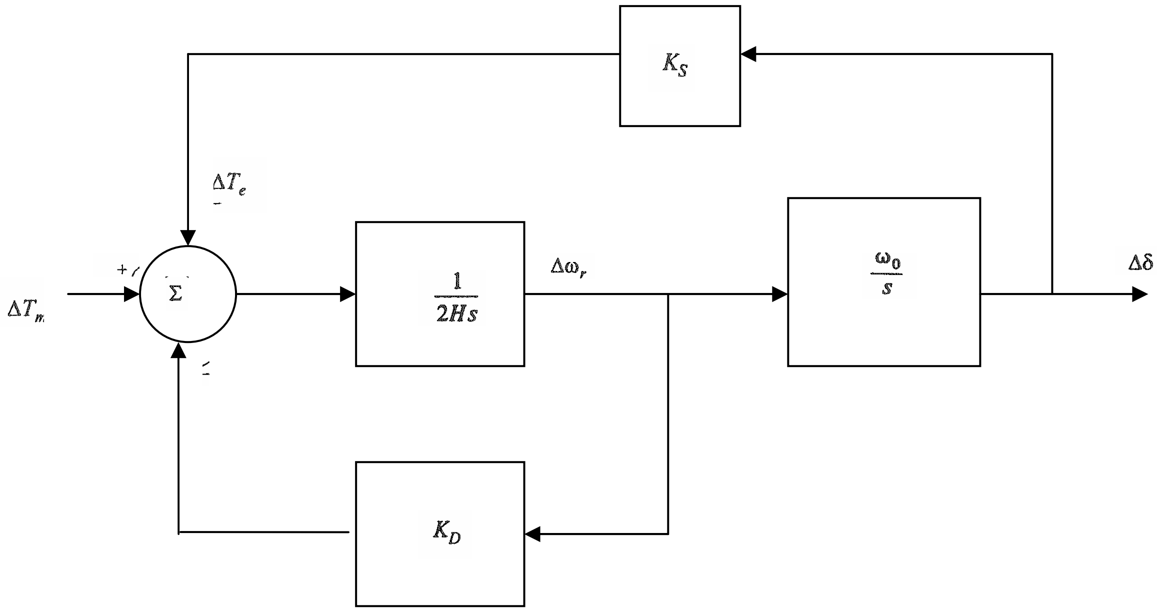
$p\Delta\delta = w_o \Delta w_r$

با نوشتن معادلات $p\Delta w_r$ و $p\Delta\delta$ بصورت بردار-ماتریسی,به دست می آوریم:

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix}\Delta w_r \\ \Delta\delta\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\frac{-K_D}{2H} & \frac{-K_S}{2H} \\ w_o & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\Delta w_r \\ \Delta\delta\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}\frac{1}{2H} \\ 0\end{pmatrix}\Delta T_m$$

که بصورت $x = Ax + bu$ است و مشاهده می شود که عناصر ماتریس A به پارامترهای سیستم K_D, H, X_T و شرایط اولیه نشان داده شده با مقادیر E و δ_o بستگی دارند. می توان از نمایش نمودار بلوکی شکل ۱۲-۵ برای توصیف عملکرد سیگنال کوچک استفاده کرد.

مولفه گشتاور سنکرون کننده



مولفه گشتاور میراکننده

نمودار بلوکی سیستم تک ماشینه متصل به شین بینهایت با مدل کلاسیک ژنراتور

K_S= ضریب گشتاور سنکرون کننده بر حسب مبنای واحد گشتاور بر رادیان

K_D= ضریب گشتاور میرا کننده بر حسب گشتاور مبنای واحد انحراف سرعت مبنای واحد

H = ثابت لختی بر حسب $MW.S/MVA$

Δw_r = انحراف سرعت بر حسب $(w_r - w_o)/w_o$

$\Delta\delta$= انحراف زاویه روتور بر حسب رادیان الکتریکی

S= عملگر لاپلاس

w_o= سرعت ناشی بر حسب $2\pi f_o = elec.rad/s$

از نمودار بلوکی شکل فوق داریم:

$$\Delta\delta = \left[\frac{1}{2HS}(-K_S\Delta\delta - K_D\Delta w_r + \Delta T_m)\right] = \frac{w_o}{S}\left[\frac{1}{2HS}(-K_S\Delta\delta - K_D S\frac{\Delta\delta}{w_o} + \Delta T_m)\right]$$

از مرتب کردن این رابطه نتیجه می شود:

$$S^2(\Delta\delta) + \frac{K_D}{2H}S(\Delta\delta) + \frac{K_S}{2H}w_o(\Delta\delta) = \frac{w_0}{2H}\Delta T_m$$

بنابراین معادله مشخصه بصورت زیر داده می شود:

$$S^2 + \frac{K_D}{2H}S + \frac{K_S w_0}{2H} = 0$$

که بصورت کلی زیر است:

$$S^2 + \xi w_n S + w_n^2 = 0$$

بنابر این فرکانس طبیعی میرا نشده عبارت است از:

$$w_n = \sqrt{K_S\frac{w_0}{2H}}rad/s$$

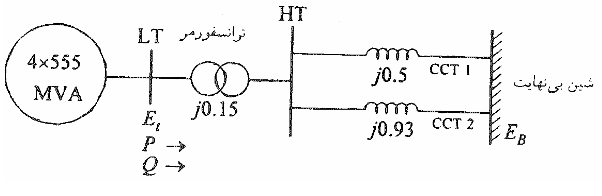
و نسبت میرایی برابر است با:

$$\xi = \frac{1}{2}\frac{K_D}{2Hw_n}$$

$$= \frac{1}{2}\frac{K_D}{\sqrt{K_S 2Hw_0}}$$

با افزایش ضریب گشتاور سنکرون کننده K_S, فرکانس طبیعی افزایش یافته و نسبت میرای کاهش می یابد. از سویی افزایش ضریب گشتاور میرا کننده K_D نسبت میرایی را افزایش داده, حال آنکه افزایش در ثابت لختی هر دو w_n, ξ را کاهش می دهد.

مثال- شکل زیر سیستمی قابل اعمال به نیروگاهی حرارتی (تشکیل شده از چهار واحد 555MVA , 24KV , 60Hz)را نشان می دهد.



راکتانسهای شبکه نشان داده شده در شکل , در مبنای واحد بر پایه مقادیر2220MVA , 24KV هستند (به طرف فشارضعیف ترانسفورمر بالا برنده ارجاع شده است)و فرض شده مقاومتها قابل چشم پوشی باشند. هدف از این مثال تحلیل مشخصه های پایداری سیگنال کوچک سیستم حول نقطه کارحالت ماندگار به دنبال از دست دادن مدار ۲ می باشد. وضعیت پیش از خطای سیستم در مبنای واحد رب پایه مقادیر 2220MVA , 24KV به صورت زیر است:

$$P=0.9 \quad Q=0.3 \quad \overline{V_T}=1.0\angle 36 \quad \overline{V}=0.995\angle 0$$

ژنراتورها به صورت یک ژنراتورمعادل منفرد توصیف شده در مبنای واحد بر پایه مقادیر 2220MVA , 24KV مدل می شوند:

$$X_a=0.3 \qquad H=3.5 \quad MWS/MVA$$

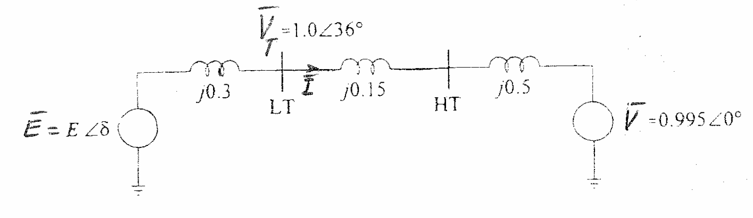
الف) معادلات حالت خطی شده سیستم را بنویسید. مقادیر ویژه فرکانس میرا شده نوسان (برحسبHz), نسبت میرایی و فرکانس طبیعی غیر میرا را برای هر یک از مقادیر ضریب میرایی (بر حسب سرعت مبنای واحد بر گشتاور مبنای واحد) تعیین کنید.

$$(i)K_D=0(ii)K_D=-10/0(iii)K_D=10/0$$

برای حالتی که $K_D=10/0$باشد بردارهای ویژه چپ و راست و ماتریس مشارکت را پیدا کنید. اگر در $t=0$, $\Delta\delta=5$و $\Delta w=0$ باشد, پاسخ زمانی را تعیین کنید

حل

الف) شکل زیر مدل مدار نشان دهنده نقطه کار حالت-ماندگار را پس از بروز خطا با کلیه پارامترهای توصیف شده در مبنای واحدبر پایه2220MVA نشان می دهد:



با در نظر گرفتن $\overline{V_T}$ بعنوان فازورمرجع جریان استاتورژنراتوربه صورت زیر داده می شود :

$$T=\frac{(P+jQ)^*}{\overline{V_T^*}}=\frac{0.9-j0.3}{1/0} \qquad \overline{V_T}=1\angle 36 \quad \text{مرجع اول}$$

$$=0.9-j0.3 \quad pu \qquad \overline{V_T}=1\angle 0 \quad \text{مرجع دوم}$$

ولتاژمتصل به راکتانس گذرا عبارت است از :

$$\overline{E}=\overline{V_T}+jX_d\overline{I}$$

$$=1/0+j0/3(0/9-j0/3)$$

$$=1/09+j0/27=1/123\angle 13/92 \qquad pu$$

زاویه پیش فاز بودن $\overline{E}$ نسبت به V عبارت است از :

$$\delta_0=13/92+36=49/92$$

مجموع راکتانس سیستم خواهد شد:

$$X_T=0/3+0/15+0/5=0/95 \qquad pu$$

ضریب گشتاور سنکرون کننده متناظر از معادله ۱۲-۷۶ برابر است با :

$$K_S=\frac{EV}{X_T}\cos\delta_0$$

$$=\frac{1/123\times 0/995}{0/95}\cos 49/92$$

$$=0/757 \qquad pu$$ گشتاور بر رادیان

بنابراین معادلات حالت خطی شده عبارت است از :

$$\begin{pmatrix}\Delta w_r\\ \Delta\delta\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\frac{-K_D}{2H} & \frac{-K_S}{2H}\\ w_0 & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\Delta w_r\\ \Delta\delta\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}\frac{1}{2H}\\ 0\end{pmatrix}\Delta T_m$$

$$=\begin{pmatrix}-0/143K_D & -0/108\\ 377/0 & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\Delta w_r\\ \Delta\delta\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}0/143\\ 0\end{pmatrix}\Delta T_m$$

مقادیر ویژه ماتریس به صورت زیر داده می شوند:

$$\begin{vmatrix}-0/143K_D-\lambda & -0/108\\ 377/0 & -\lambda\end{vmatrix}=0$$

یا:

$$\lambda^2+0/143K_D\lambda+40/79=0$$

وبا مقایسه با شکل استاندارد ذیل:

$$\lambda^2+2\zeta w_n\lambda+w_n^2=0$$

خواهیم داشت:

$$w_n=\sqrt{40/79}=6/387 rad/s=1/0165 Hz$$

$$\zeta=0/143K_D/(2\times 6/387)=0/0112K_D$$

پس مقادیر ویژه عبارتند از:

$$\lambda_1,\lambda_2=\pm w_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

فرکانس میرا شده خواهد شد:

$$w_d = w_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

در زیر نتایج خواسته شده برای مقادیر مختلف K_D آورده شده است:

K_D	۰	۱۰	-۱۰
مقادیر ویژه λ	۰+j۶/۳۹	-۰/۷۱۴+j۶/۳۵	۰/۷۱۴+j۶/۳۶
فرکانس میرا w_r	۱/۰۱۶۵Hz	۱/۰۱۰۱Hz	۱/۰۱۰۱Hz
نسبت میرایی ζ	۰	۰/۱۱۲	-۰/۱۱۲
فرکانس طبیعی غیر میرا w_n	۱/۰۱۶۵Hz	۱/۰۱۶۵Hz	۱/۰۱۶۵Hz

ب) بردارهای ویژه راست به صورت زیر داده می شود:

$$(A-\lambda I)\phi = 0$$

برای سیستم داده شده با $K_D = 10$ معادله بالا چنین می شود:

$$\begin{pmatrix} -1/43-\lambda_1 & -0/108 \\ 377/0 & -\lambda_2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{21} \end{pmatrix} = 0$$

برای $\lambda = -0/714 + j6/35$ معادلات متناظر عبارت است از:

$$(0/714 + j6/35)\phi_{11} + 0/108\phi_{21} = 0$$

$$377/0\phi_{11} + (0/714 - j6/35)\phi_{21} = 0$$

معادلات بالا سمتقل خطی نیستند. همانطور که در مثال ۱۲-۱ بحث شد باید یکی از عناصر بردار ویژه متناظر با یک مقدار ویژه را به دلخواه انتخاب کنید. بنابراین, با فرض:

$$\phi_{21} = 1/0$$

داریم:

$$\phi_{11} = -0/0019 + j0/0168$$

بطور مشابهی بردار ویژه متناظر با $\lambda_2 = -0/714 - j6/35$ عبارت است از:

$\phi_{12} = -0/0019 - j0/0168$ $\quad$ $\phi_{22} = 1/0$ $\quad$ لذا ماتریس مدال بردار ویژه راست عبارت است از:

$$\phi = \begin{pmatrix} -0/0019 + j0/0168 & -0/0019 - j0/0168 \\ 1/0 & 1/0 \end{pmatrix}$$

بردارهای ویژه چپ نرمالیزه شده به صورت $\psi_1\phi_1 = 1/0$ عبارت است از:

$$\psi = \phi^{-1} = \frac{adj(\phi)}{|\phi|}$$

$$= \frac{\begin{pmatrix} 1/0 & -1/0 \\ 0/0019 + j0/0168 & -0/0019 + j0/0168 \end{pmatrix}^T}{(-0/0019 + j0/0168 + 0/0019 + j0/0168)}$$

$$= \begin{pmatrix} -j29/76 & 0/5 - j0/056 \\ j29/76 & 0/5 + j0/056 \end{pmatrix}$$

ماتریس مشارکت برابر می شود با:

$$P = \begin{pmatrix} \phi_{11}\psi_{11} & \phi_{12}\psi_{12} \\ \phi_{21}\psi_{21} & \phi_{22}\psi_{22} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 0/5 + j0/056 & 0/5 - j0/056 \\ 0/5 - j0/056 & 0/5 + j0/056 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0/503\angle 6/4 & 0/503\angle -6/4 \\ 0/503\angle -6/4 & 0/503\angle 6/4 \end{pmatrix}$$

وپاسخ زمانی به صورت زیر داده می شود:

$$\begin{pmatrix} \Delta w_r(t) \\ \Delta\delta(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 e^{\lambda_1 t} \\ c_2 e^{\lambda_2 t} \end{pmatrix}$$

که با فرض (رادیان) $\Delta\delta = 5 = 0/0873$ و $\Delta w_r = 0$ در $t = 0$ داریم:

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \psi_{11} & \psi_{12} \\ \psi_{21} & \psi_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta w_r(0) \\ \Delta\delta(0) \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} -j29/76 & 0/5 - j0/056 \\ j29/76 & 0/5 - j0/056 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0/0873 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 0/0436 - j0/0049 \\ 0/0436 + j0/0049 \end{pmatrix}$$

پاسخ زمانی انحراف سرعت عبارت است از:

$$\Delta w_r(t) = \phi_{11}c_1 e^{\lambda_1 t} + \phi_{12}c_2 e^{\lambda_2 t}$$

$$= (-0/0019 + j0/0168)(0/0436 - j0/0049)e^{(-0/714 + j6/35)t} +$$

$$(-0/0019 - j0/0168)(0/0436 + j0/0049)e^{(-0/714 - j6/35)t}$$

$$= -0/0015 e^{-0/714t} \sin(6/35t)$$

به طور مشابه پاسخ زمانی انحراف زاویه روتور عبارت است از:

$$\Delta\delta(t) = 0/088 e^{-0/714t} \cos(6/35t - 0/112)$$

پس با سیستمی مرتبه دوم با یک مد نوسانی پاسخ با فرکانس میراشده ۶/۳۵ رادیان بر ثانیه با $1/0101$ هرتز سرو کارداریم. نوسانها با ثابت زمانی $\frac{1}{0/714}$ ثانیه از بین خواهند رفت (که متناظر با نسبت میرایی $0/112\zeta$ است). از آنجا که این یک مد زاویه روتور است Δw_r و $\Delta\delta$ به طور مساوی در آن مشارکت دارند.

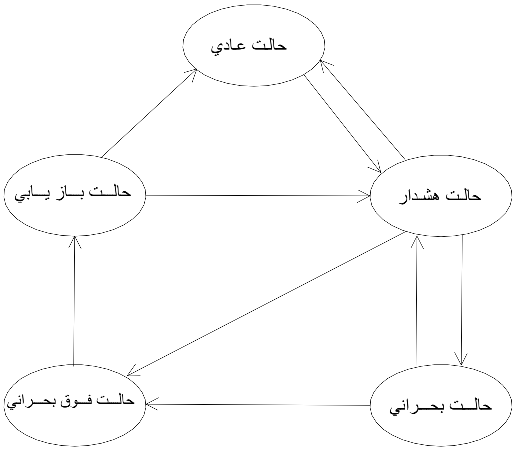
پایداری میان مدت و بلند مدت

پایداری میان مدت و پایداری بلند مدت، مربوط به پاسخ سیستم های قدرت به آشفتگی های شدید، است. آشفتگی های شدید، اغتشاش هایی هستند که به انحراف های فرکانس، ولتاژ و توان های انتقالی منجر می شوند که این انحراف ها چنان بزرگ یا ماندنی هستند که اقدامات فرایند های گُند، سیستم های حفاظتی و کنترل هایی را که در مطالعات مرسوم پایداری گذرا مدل نشده اند، بر میانگیزانند.

این فصل ماهیت پاسخ سیستم را، هنگامی که تحت آشفتگی های شدید قرار گرفته باشد، نشان می دهد و نیاز به تمایز بین پایداری میان مدت و بلند مدت را بررسی می کند. همچنین در این فصل ملاحظات مدلسازی و روش های تحلیلی شبیه سازی پاسخ دینامیکی بلند مدت توصیف و مثال هایی توضیحی و رهنمودهایی برای افزایش توانمندی سیستم های قدرت در مواجهه با این آشفتگی ها بیان شده است.

۱-۱۶ ماهیت پاسخ سیستم به اغتشاش های شدید

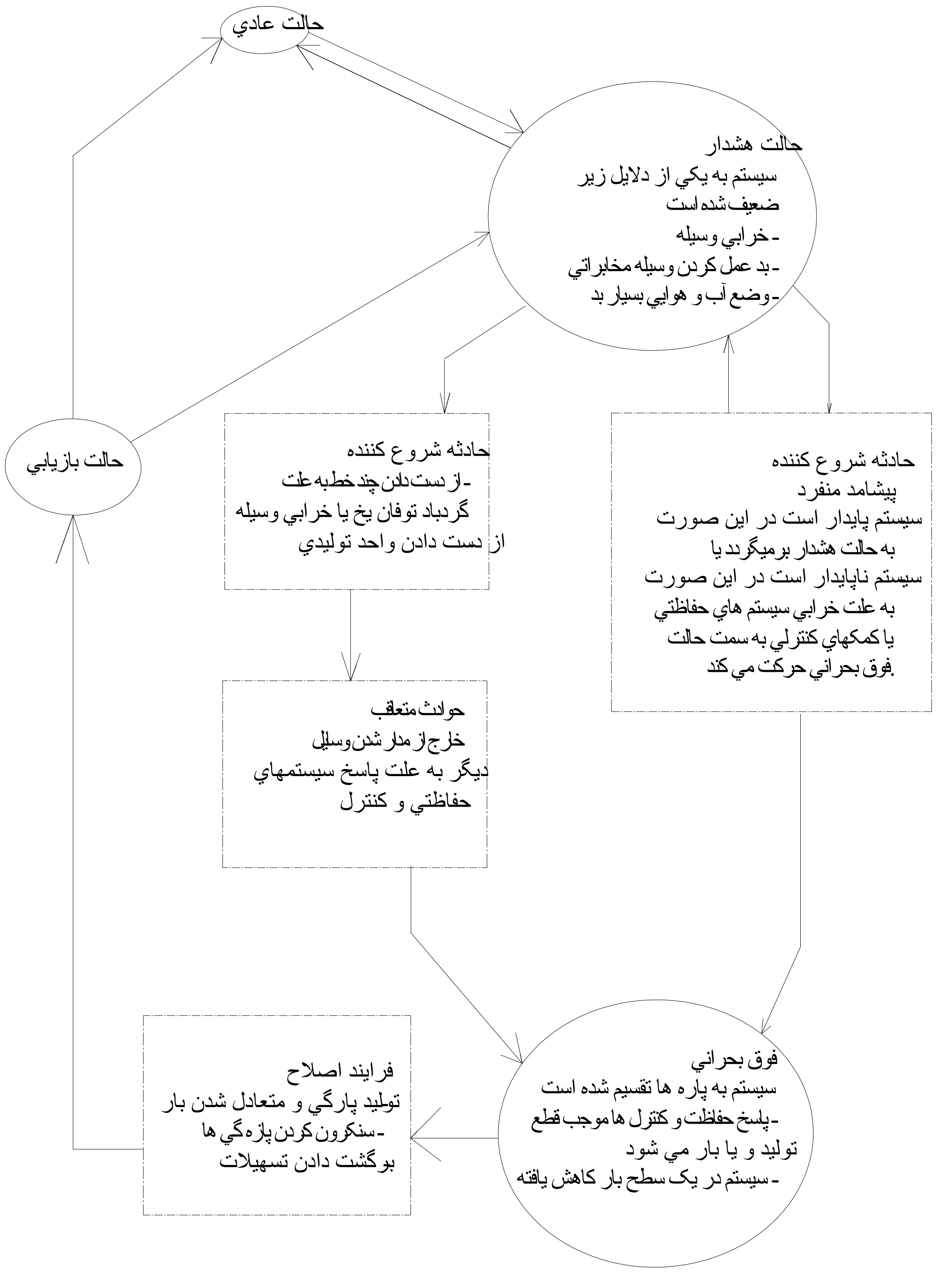
در مطالعهٔ ماهیت پاسخ سیستم به اغتشاش های بزرگ، به تصویر در آوردن وضعیت کاری سیستم بر حسب پنج حالت نشان داده شده در شکل ۱-۱۶ سودمند است. توصیفی از این حالت ها و راه های انتقال از یک حالت به حالت دیگر، در فصل اول (بخش ۱-۳)، آورده شده است. این فصل بر وقایع و شرایط سیستمی تمرکز دارد که با حالت فوق بحرانی مرتبط است.



شکل۱۶-۱ حالت های عمل سیستم قدرت

بررسی اغتشاش های واقعی سیستم [۱-۶] نشان می دهد که الگویی اساسی در شکل ۱۶-۲ شرح داده شده است که در آن وقایعی که ممکن است منجر به انتقال از حالت هشدار به حالت فوق بحرانی شود، نشان داده شده است. حادثهٔ آغازگر می تواند اغتشاشی با مبداء طبیعی، بد عمل کردن یک وسیله، یا نتیجهٔعملکرد نیروی انسانی باشد. سیستم های مدرن قدرت به گونه ای طراحی و راه اندازی می شوند که در مواجهه با پیشامدهای احتمالی با احتمال وقوع بیشتر، عملکردیمطمئن داشته باشد (برای توصیف پیشامدهای احتمالی طراحی فصل ۱ را ببینید). در اکثرموارد، سیستم های قدرت می توانندهر پیشامد احتمالی منفرد و بسیاری از پیشامدهای احتمالی را که با هم رخ می دهند، تحمل کنند. سیستم های حفاظتی و کنترل برای جلوگیری ار انتشار اغتشاش به سایر قسمت های شبکه عمل می کنند.

لیکن گاهی ، ترکیب غیر عادی حوادث باعث می شود که قسمتی از سیستم به هم پیوسته، به طور کامل جدا شده و یک یا چندپارهٔ الکتریکی را تشکیل دهد. حادثهٔ آغازگر معمولا پیشامدی است که از مواردبر نظر گرفته شده در معیار طبیعی طراحی، شدیدتر است: برای نمونه، خارج شدن چندین خط انتقال در اثر گردبادی سخت؛ برمز توفان یخ؛ یا بد عمل کردن وسیلهٔ مخابراتی. حوادث ناشی از حادثهٔ آغازگر، با تحت فشار قرار دادن بیشتر سیستم، باعثوقفه های زنجیره ای غیر قابل کنترل می شود. ممکن است در طی وضعیت پیش آمده تغییرات وسیعی در فرکانس (از ۵۸ تا ۶۳ هرتز) و نیز در ولتاژ (از ۵۰% تا ۱۲۰% مقدار قبل از اغتشاش) به وجود آید. بدین ترتیب سیستم می تواند به حالت فوق بحرانی نیز تنزل موقعیت پیدا کند، که نتیجهٔ آن از دست دادن قسمت های اعظم بار سیستم است. به طور کلی، اعمال منترلی و سیستم های حفاظتی، پاسخ سیستم را در طی این وضعیت، تحت شعاع خود قرار می دهند. در برخی موارد، این موقعیت با هماهنگی ضعیف بین سستم های حفاظتی و کنترل، تشدید می شود. در اینجا باید به منظور نجات هر چه بیشتر سیستم از فروپاشی کامل، از عمل کنترل اظترار ی استفاده کرد.



شکل۱۶-۲ انتقال حالت های سیستم حین آشفتگی های شدید

پاسخ سیستم به حالت پارگی

پاسخ سیستم به وضعیت پارگی، در اصل یک گذرای فرکانس مداوم است. بنابر این، کنترل سرعت و پاسخ های متعاقب توربین و سیستم های تغذیهٔ انرژی نقشی اساسی در تعیین ماهیت عملکرد دینامیکی سیستم ایفا می کنند. اعلب، وضعیت با شرایط ولتاژ بالا یا پایین ترکیب می شود.

پاره های کم تولید. در یک پاره گی با مجموع تولیداولیهٔ کمتر از مجمع بار، فرکانس کاهش پیدا می کند. اگر ذخیرهٔ چرخان کافی در داخل پارگی وجود داشته باشد، فرکانس سیستم در چند ثانیه به نزدیکی مقدار عادی باز می گردد، اما اگر تولید کافی با توانایی افزایش ریع خروجی در دسترس نباشد، فرکانس ممکن است به مقادیری برسد که به وسیلهٔ رله های حفاظتی کمبود فرکانس به خارج از مدار کردن واحد های تولید حرارتی منجر شود و بدین ترتیب وضعیت را تشدید کند. بنابر این، از اغلب طراحی های بار زدایی کمبود فرکانسی، برای کاهش بار وصل شده به سطحی که بتواند به طور رضایت بخشی به وسیلهٔ تولید تأمین گردد، استفاده می شود.

در نتیجه، در یک پارهٔ کم تولید، گذرای اولیه به پاسخ های ذخیرهٔ چرخان تولید و رله های بار زدایی وابسته است. ظرف چندین ثانیه، حداقل مقدار فرکانس به دست خواهد آمد. پس از این، نقطه، پاسخ فرکانسی سیستم به مشخصه های توربین بستگی خواهد داشت.

پاره های پر تولید. در پاره ای با تولید اضافی اولیه، فرکانس بالاخواهد رفت، و سیستم کنترل سرعت با کاهش توان مکانیکی تولید شده حاصل از توربین ها، پاسخ خواهد داد.در عمل، نیروگاه ها در این حالت، یک «بار برداری جزئی » را تجربه می کنند. عملکرد پاره و توانایی آن در پایدار سازی، بدون از دست دادن بار به توانایی نیروگاه ها در تحمل بار برداری جزئی، بستگی دارد. این موضوع در بخش ۱۶-۳ بیشتر توضیح داده خواهد شد.

تعادل توان راکتیو. عملکرد سیستم در داخل پارگی، تحت تأثیر تعادل توان راکتیو نیز قرار دارد. ممکن است عدم تطابق زیاد در مجموع توان راکتیو تولید شده و جذب شده به شرایط ولتاژ بالا یا پایین منجر شود و ممکن است محدود کننده های فوق و یا زیر تحریک گاورنر و کنترل ها فعال گردند. در بدترین حالت، پاسخ رله های حفاظتی، به خارج کردن واحد های تولید منجر می شود. برای نمونه، یک پارگی با خطوط و یا کابل های FHV ی کم بار، ممکن است باعث جذب مقادیر بالایی از توان راکتیو به وسیلهٔ ژنراتورها شود و اگر این موقعیت بسرعت اصلاح نشود، اینا‌حتمال وجود دارد که به خارج شدن واحد ها (به وسیلهٔ حفاظت بی تحریکی) منهی گردد.

تجهیزات جنبی نیروگاه. بروز تغییرات، بخصوص کاهش، در ولتاژ و فرکانس منبع تغذیه ممکن است باعث تنزل عملکرد آن دسته از تجهیزات جنبی نیروگاه شود که با موتورهای القایی کار می کنند. برای نمونه، پمپ های گردش آب، آب حاصل از میعان، تخلیهٔ گرم کن، و آب تغذیه با موتورهای القایی کار می کنند. تنزل عملکرد این پمپ ها ممکن است به از دست دادن خلا کندانسور، درجه حرارت بالای خروجی توربین و

جریان ناکافی آب تغذیه و یا آب حاصل ازمیعان منجر شود. بنابر این، بسیاری از نیروگاه های هسته ای، به رله های کمبود ولتاژ و کمبود فرکانس مجهز می شوند تا نیروگاه را در حالت ولتاژ های پایین (به طور نوعی،۷۰% مقدار نامی)+و یا حالت فرکانس های پایین (به طور نوعی، ۵۹,۲ هرتز) از مدار خارج کنند.

معمولا موتورهای نیروگاه، در مدارهای راه اندازی و حفاظتی از رله ها و کنتاکتورهای الکترومغناطیسی استفاده می کنند. پاسخ این کنداکتورها و رله ها به افت های شدید یا طوفانی ولتاژ می توان مونورها را قطع کند.

بازیابی سیستم

هنگامی که پارگی ها به وضعیت حالت دائمی می رسند، اپراتورها اقداماتی اتخاذ می کنند تا سیستم به هم پیوسته را باز یابی کنند. این اقدامات شامل تنظیم تولید و بار در هر پارگی، دوباره سنکرون کردن پارکی ها و باز یابی واحدهای تولیدی، باره و سایر امکانات است که به هنگام بروز اغتشاش، از مدار خارج سده اند. راه اندازی و بارگذاری مجدد واحد های حرارتی با چندین عامل محدود می شود، وممکن است که توان کامل برای چندین ساعت وجود نداشته باشد. اگر واحدهای حرارتی بسرعت برای بارگذاری مجدد در دسترس باشند، می توان باز یابی توان را به میزان چشم گیری سرعت داد. بنابر این، بسیاری ازشرکت ها روش «عمل به بار خانگی» را اختیار کرده اند. در زیر چند روش مختلف استفاده شده برای این کار آورده شده است:

الف) در هنگام قطع، آتش را خاموش کنید و برای مدت تقریبا ۲۰ دقیقه به ذخیرهٔ حرارتی دیگ بخار تکیه کنید.

ب)همانند «الف». لیکن آتش را مجددا روشن کنید و اجازه دهید دیگ بخار با مشعل های مشتعل کار کند.

ج) در بار بسیار پایین یکی از روش های خاص آتش را اعمال کنید.

د) دیگ بخر را در توان کمل رها کنید یا توان را به حداقل کاهش دهید. بخار اضافی را در جو رها سازید واز ذخیرهٔ آب تغذیه (معمولا برای چند ساعت) استفاده کنید.

ه) دیگ بخار را در بار حداقل رها کرده، بخار اضافی را به طور میان بُر به داخل کندانسور وارد کنید.

۲-۱۶ تفاوت بین پایداری میان مدت و بلند مدت

همان طور کهدر فصل دوماشاره شد، عبارت های پایداری میان مدت و پایداری بلند مدت، واژه های جدیدی در مراجع پایداری سیستم قدرت هستند. معرفی این عبارت ها، به دلیل نیازی بود که در برخورد با مسائل مرتبط با پاسخ دینامیکی سیستم های قدرت به آشفتگی های شدید، احساس می شد.

پایداری بلند مدت، آنگونه که در مراجع ۱۱ تا ۱۵ تعریف شده است، فرض می کند ک نوسان های توان سنکرون کنندهٔ بین ماشینی میرا شده و در نتیجهٔ آن یکنواختی فرکانس سیستم است. در اینجا، تمرکز بر پدیده های گندتر و طولانی تر همراه با آشفتگی های مقیاس بزرگ سیستم و عدم تطابق های مداوم حاصل بین تولید و مصرف توان حقیقی و راکتیو می باشد و عواملی چون دینامیک دیگ بخار واحدهای حرارتی، دینامیک

کانال و آبگذر واحدهای آبی، کنترل خود کار تولید، حفاظت ها و یا کنترل های سیستم انتقال نیروگاه، اشباع ترانسفورمر، و اثر غیر اسمی بر بارها و شبکه، به احتمال زیاد بر پایداری بلند مدت نقش خواهند داشت.

عبارت پایداری میان مدت در مراجع ۱۴ و ۱۵ معرفی شده است که انتقال بین پاسخ های گذرا و پاسخ های بلند مدت را نشان می دهد. در پایداری میان مدت، مرکز توجه نوسان هاس توان سنکرون کنندۀ بین ماشین ها، برخی از پدیده های کُندتر، و احتمالا انحراف های بزرگ ولتاژ یا فرکانس است.

از این تعاریف مشاهده می شود، تفاوت چندانی بین پایداری میان مدت و بلند مدت وجود نداری. آنچه که پایداری بلند مدت را متمایز می کند فرض یکنواخت بودن فرکانس سیستم است و اینکه دینامیک های سریع، قابل توجیه نیستند. این فرضیات در صورتی سودمندند که ابزار تحلیلی، آنها را برای پیاده کردن شبیه سازی لازم داشته باشد؛ لیکن با نرم افزارهای امروزی که روش های پیشرفته مبتنی بر پراکندگی و روش های موثر انتگرال گیری ضمنی را بکار می گیرند، شبیه سازی چارچوب های بلند زمان با مدل سازی دینامیک سریع، کمتر موجب نگرانی است.

تا آنجا که ملاحظات مدل سازی مورد نظر باشد، تفاوت تعریف شدۀ مشخصی بین چارچوب زمانی میان مدت و چارچوب زمانی بلند مدت وجود ندارد. برای دوره های زمانی پس از دورۀ گذرا، باید انتخاب مدل های کاربردی در شبیه سازی، بر اساس پدیده های مورد تحلیل و نمایش سیستم به کار گرفته شده (به جاب طول واقعی شبیه سازی)، باشد. برای نمونه ممکن است نادیده گرفتن دینامیک های دیگ بخار یا کنترلفرایند بخار در شبیه سازی «میان مدت» برای شبیه سازیاغتشاش هایی که برای آنها توابع محرک این دینامیک ها کوچک هستند، قابل قبول باشد. لیکن، نادیده گرفتن این دینامیک های کُند برای اغتشاش های شدیدتری، که ممکن است حفاظت های مربوط به متغیرهایی مانند فشارهای بخار را تحریک کند، می توان اثر فوق العاده ای بر نتایج شبیه سازی داشته باشد. تجربیات بدست آمده از چندین شرکت، نیاز به نمایش نوسان های بین ماشینی و گذراهای سریع مربط به سیستم های تحریک را در مطالعات پایداری بلند مدت مشخص کرده است. از این رو تفاوت بین پایداری بلند مدت و میان مدت را نمی توان به طور رضایت بخشی بر مبنای ثابت چارچوب زمانی و یا ملاحظات مدل سازی بنا کرد. با توجه به این نکات، بهترین روش برای دسته بندی مسائل پایداری مرتبط با آشفتگی های شدیدسیستم، حذف ایدۀ میان مدت به عنوان یک دستۀ جدا و استفاده از بلند مدت برای شامل کردن کلیۀ مطالعات پس از چارچوب زمانی گذرا می باشد.

در این صورت پایداری بلند مدت به صورت « توانایی سیستم قدرت در دستیابی به یک تعادل قابل قبول کاری پس از بروز اغتشاش شدید در سیستم» تعریف می شود، که ممکن است سیستم را به چندین زیر سیستم تقسیم کرده یا نکند. چارچوب زمانی موزد نظر، به انداۀ کافی بیش از دورۀ گذراست تا علاوه بر دینامیک های سریع، اثر دینامیک های کُند سیستم های خودکار کنترل و حفاظتی را نیز شامل شود. ممکن است شیه سازی های بلند مدت، اغتشاش های شدید فراتر از پیشامدهای احتمالی عادی طراحی را نیز شامل شود، پیشامدهایی که سبب شود تاسیستم قدرت به چندین پارۀ مجزای متوالی تجزیه شود، به طوری که ژنراتورها

در هر پاره، به صورت سنکرون باقی بمانند. پایداری در این حالت، بدین ترتیب تعریف می شود که آیا هر پارهبا حداقل اختلال در سرویس ها به یک تعدل قابل قبول کاری می رسد یا خیر.در بدترین وضعیت، حفاظت های سیستمی و واحدی ممکن است به طور ترکیبی شرایط را خراب کنند و منجر به فروپاشی بخش یا تمام پاره شوند.

به طور کلی، مسائل پایداری بلند مدت با پاسخ های غیر کافی وسایل، هماهنگی ضعیف تجهیزات کنترلی و حفاظتی، یا ذخیرهٔ ناکافی توان حقیقی یا راکتیو مرتبط می باشد.

زمان های مشخصهٔ فرایندها و وسایلی از قبیل کنترل های ژنراتورها و حفاظت ها، تا چندین دقیقه متناظر با پاسخ های وسایلی از قبیل سیستم های تغذیهٔ انرزی توربین ها و تنظیم کننده های ولتاژ بار است.

از دیدگاه تحلیلی، برنامه های پایداری بلند مدت، برنامه های تعمیم یافتهٔ پایداری گذراست که در آنه توانایی تنظیم مرحلهٔ زمانی انتگرالگیری بر حسب گذرهای غالب، ایجاد شده است.

یکی از کاربردهای شبیه سازی پایداری بلند مدت، که مورد توجه روزافزون نیز قرار گرفته استف تحلیل دینامیکی پایداری ولتاژ (که در فصل ۱۴ بررسی شد) است، که در آن لازم است اثر تغییر دهندهٔ یک ترانسفورمر، حفاظت فوق تحریک ژنراتور و حدود توان راکتیو، و بارهای ترموستاتی، شبیه سازی شوند. در این حالت، نوسان های بین ماشینی، چندان مهم نیستو گذراهای سیستم منبع تغذیهٔ انرژی نیز ممکن است حیاتی نباشد. لیکن، باید برای نادیده گرفتن برخی از دینامیک های سریع با احتیاط عمل کرد.

۱۶-۳ پاسخ نیروگاه حین آشفتگی های شدید

۱۶-۳-۱ نیروگاه های حرارتی

توانایی نیروگاه ها در پشت سر گذاشتن بار برداری جزئی، از اهمیت فراوانی در حداقل کردن اثر آشفتگی شدید و باز یافتن سریع کاری عادی نیروگاه برخوردار است. مراجع ۱۸ تا ۲۱ پاسخ های نیروگاه ها را به بار برداری های جزئی و مسائل تجربه شده در برخورد موفقیت آمیز با چنین آشفتگی هایی توصیف می کنند.

مرجع ۲۲ ، که به وسیلهٔ یک گروه کاری از IEEE تهیه شده است، رهنمودهایی را برای بهبود پاسخ نیروگاه به بار برداری های جزئی ارائه می کند. خلاصه ای از این رهنمودها در زیر آورده شده است:

الف) کنترل کلی نیروگاه؛ برای تحمل باربرداری جرئی، کنترل کلی نیروگاه باید برای تطابق با توان الکتریکی خروجی بی درنگ توان ورودی (جریان سوخت) را کم کند. از آنجا که در این کاهش تأخیرهای زمانی وجود دارند، باید توان ورودی به طور موقت، کاهش زیادی در توان خروجی ایجاد کند. بهترین منبع برای تعیین میزان کاهش توان ورودی، توان خروجی واقعی است.

ب) کنترل دیگ بخار؛ بدون سیستم کنارگذر توربین، بار برداری جزئی از نظر دیگ بخار تزویج شده است، نیز لازم است. لیکن، دیگ های بخار یکبار عبور اغلب دارای سیستم های کنارگذر فوق حرارت ده و

یا توربین با ظرفیت محدود برای حفاظت رله های کوره و کمک به کنترل فشار هستند. از این توانمدی کنار گذر می توان برای ایجاد سهولت در آهنگ کاهش سوخت و جریان اب تغذیه استفاده کرد.

برای دیگ خای نوع طبله ای، باید برای کاهش جریان آب تغذیه به تأخیر انداخته شود زیرا پاسخ بلافاصلهٔ سطحآب طبله، با جریان بخار افزایش حاصل در فشار طبله، کاهش می یابد.به علاوه، برای به دست آوردن سطح بالاتری از آب ذخیره در سطح توان پایین تر اضافه تغذیه الزامی می باشد. کنترل مناسب سطح آب ، بخصوص برای تغییرات بزرگ در جریان بخار، مهم است.به منظور تقویت توانایی کنترل سطح آب طی یک بار برداری جزئی، باید به افزایش موقتبازهٔ بین حدود عمل کنندهٔ بالا و پایین سطح آب، توجه کرد یا عمل کننده را برای جریان شدید آب تغذیه به تأخیر انداخت.

برای هر کدام از انواع دیگ بخار به طور کلی تأخیر در کاهش جریان هوا مطلوب است زیرا اثر سرمایشی جریان هوای اضافی عقب افتادگی های پاسخ جریان سوخت را جبران می کند. لیکن، باید ورود هوا به مشعل های در حال کار نسبت به جریان سوخت کنترل شود تا احتراق پایدار، حفظ شود.

برای پمپ های تغذیه ای که به وسیلهٔ توربین های بخار کمکی کار می کنند، بستن شیرهای میان راهی در جریان بخار،وقفه ایجاد می کنند، بنابر این لاز است که از یک منبع بخار جایگزین و یا از پمپ هایی که به وسیلهٔ موتور کار می کنند استفاده شود.

ج) کنترل – توربین ژنراتور (توربوژنراتور)؛ کنترل های اضافه سرعت توربین به گونه ای طراحی شده اند تا اضافه سرعت پیش آمده ناشی از باربرداری کامل را به حدود ۱% زیر نقاط تنظیم رلهٔ اضافه سرعت، محدود کنند. بدهی است که بدین ترتیب از عمل کردن اضافه سرعت حین باربرداری جزئی جلوگیری می شود.