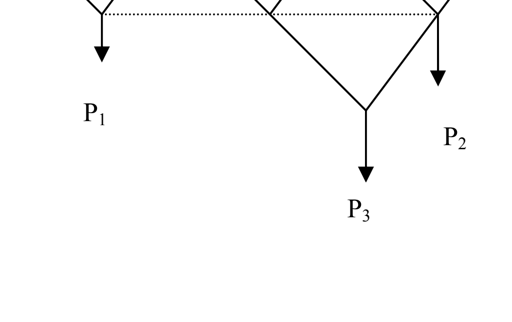
# فصل چهارم

# 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 ٦٠° (زاويه بار بحراني) برسد، با افزايش ازمقدار ٦٠° 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 $(\delta_C)$ 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.

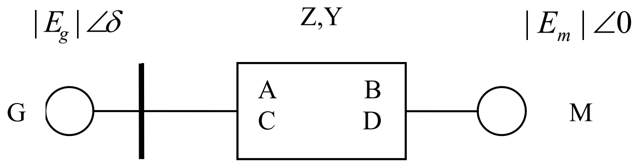
۳)- گذرا (Transient)

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.

***پايداري 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 شبكه ∞) در نظر گرفته می شود.




$$\begin{bmatrix}\overline{E}_g\\ \overline{I}_g\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\overline{A}&\overline{B}\\ \overline{C}&\overline{D}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\overline{E}_m\\ \overline{I}_m\end{bmatrix}\Rightarrow\begin{cases}\overline{E}_g=\overline{E}_m\cosh\overline{\gamma}\ell+\overline{I}_m\overline{Z}_C\sinh\overline{\gamma}\ell\\ \overline{I}_g=\dfrac{\overline{E}_m}{\overline{Zc}}\sinh\overline{\gamma}\ell+\overline{I}_m\sinh\overline{\gamma}\ell\end{cases}$$

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

$$\begin{cases}\overline{A}=\cos h\overline{\gamma}\ell=\overline{D}\quad \overline{A}\overline{D}-\overline{B}\overline{C}=1\\ \overline{B}=\overline{Z}_c\sin h\overline{\gamma}\ell\qquad \overline{C}=\dfrac{1}{\overline{Z}_c}\sin h\overline{\gamma}\ell\end{cases}$$

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

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

$$\overline{A}=|A|\angle a\quad \overline{B}=|B|\angle b\quad \overline{C}=|C|\angle c\quad \overline{D}=|D|\angle d$$

$$\overline{E}_g=|E_g|\angle\delta\quad \overline{E}_m=|E_m|\angle 0\qquad \overline{A}=\overline{D}\quad \overline{A}\overline{D}-\overline{B}\overline{C}=1$$

اگر بتوانیم $\delta$ را تغییر دهیم:

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

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

$$\overline{B}=jX=X\angle 90$$
$$|B|=X$$
$$b=90$$

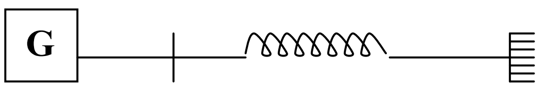
مقدار $P_g$ همچنین وقتی به مقدار حداکثر خود خواهد رسید که داشته باشیم:

$a = 0$

$|A| = |D| = 1$

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

براي يك ژنراتور كه به شين $\infty$ وصل شده است داريم:




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

$f = \text{cte}$

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

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

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

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

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

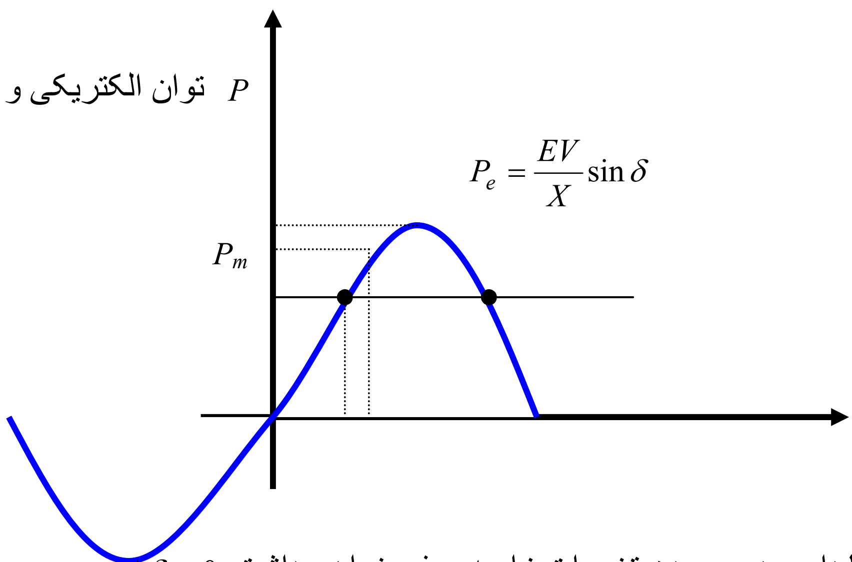
$$Q_{ij} = \frac{|A|}{|B|}|V_i|^2\sin(b-a) - \frac{|V_i||V_j|}{|B|}\sin(b+\delta)$$

پس تغييرات قدرت براي يك ژنراتور بصورت تغييرات سينوسي از $\delta$ است.

$P_m = P_e + P_{loss}$

$P_{loss} \to 0$

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

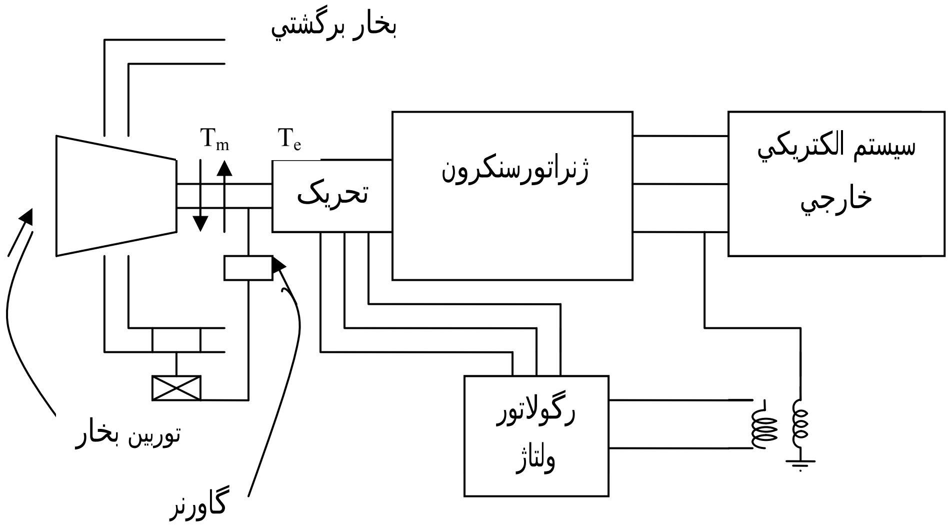



در حالت پايداري در رسيدن تغييرات زاويه صفر خواهيم داشت: $\Delta\delta = 0$

$P_m$ را تا جايي مي توان افزايش داد تا $\delta$ 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 $90^{\circ}$ (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)

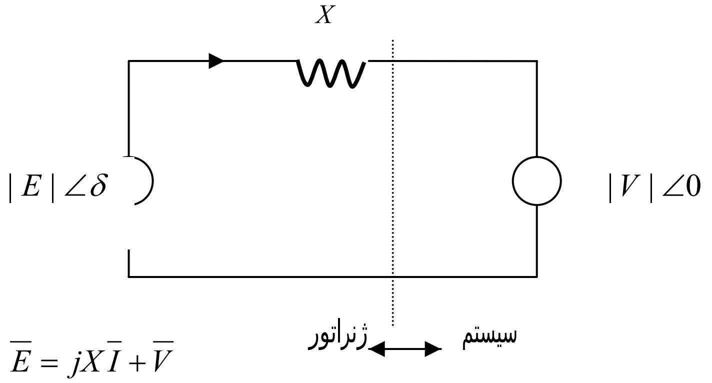
*نتيجه:*

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:




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

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

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

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

$$=P+jQ$$

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 $|E|,|V|,X$ ثابت هستند $\delta$ 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 $\delta$ نيز از $\delta_0$ به $\delta'$ 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:

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

$\delta=\delta_c$ زاويه بحراني

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 كوچكى حدوداً ۱۰° الى 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 $\delta, X, V$ 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 مي كنند $X$=0.7Pu بر مبناي ولتاژو قدرت نامي ژنراتور $(\cos\varphi = 0.8\ \text{lag})$

**الف-** محاسبه $\delta, E, Q, P$

**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.

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

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

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

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

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

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

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

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

ب- افزايش قدرت اكتيو نتيجه خواهد داد:

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

$$E_1 = E = 1.53\,pu$$

$$s\text{in}\,\delta_1 = \frac{P_1 X}{E_1 V} = \frac{0.96\times 0.7}{1.53\times 1} \rightarrow \delta_1 = 26.1°$$

افزايش $\delta$ نتيجه شده است. همچنين كاهش قدرت راكتيو نتيجه شده است:

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

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.

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

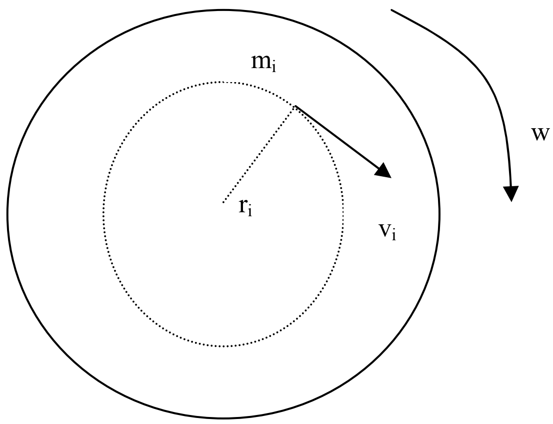
$$E_2 = 1.2E_0 = 1.84$$

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

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

افزايش بيش از ٤٤ %

موقعي كه ناپايداري در شبكه روي مي دهد از حالت ديناميكي مي گذريم. حال روتوري كه با سرعت $\omega$ 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 $\omega$ 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 $\omega_s$ 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

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

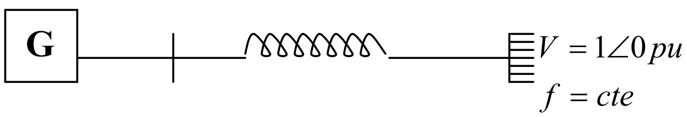
$$M' = \frac{M}{S_b} = \frac{H}{\pi f_s}\left[\frac{\sec^2}{rad}\right]$$

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

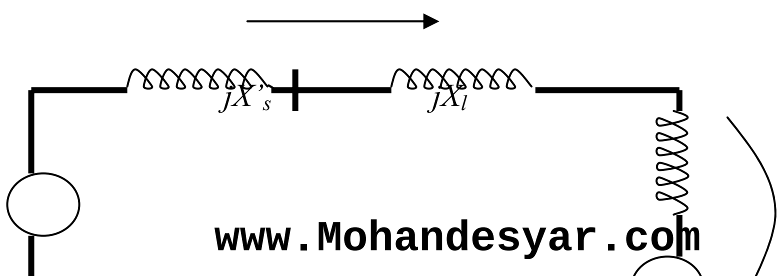
مزيت استفاده از H بجاي $E_k$ آن است كه H مستقل از اندازه ماشين بوده و مقدار معمول آن در ماشين ها بين ۲ تا ۸ است.

## 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:



$jXs_m$

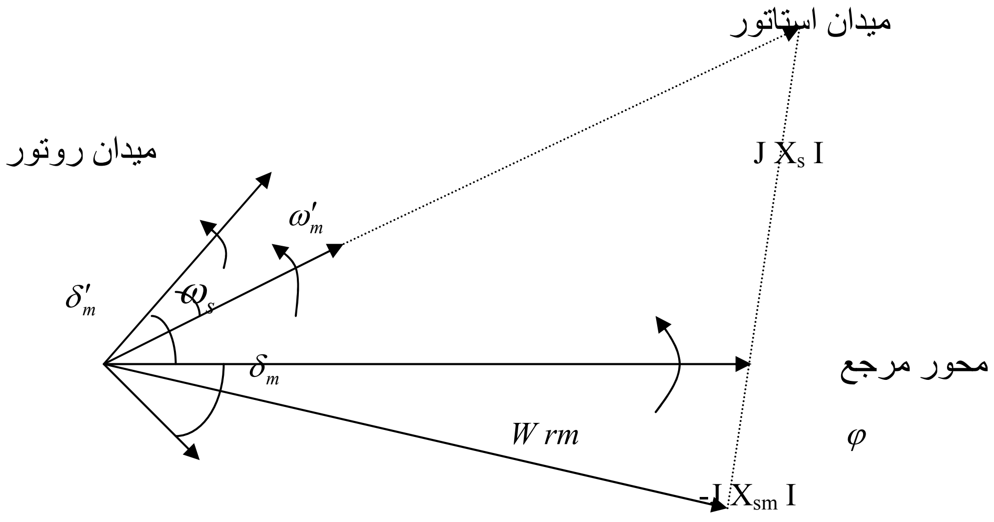
$E_1 = |E_1| \angle \delta$

$E_2 = |V| \angle 0$

قدرت اکتیو تحویلي به سیستم خارجي به صورت زیر است:

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

با توجه به اینکه ژنراتور سنکرون است، میدان روتور با اندازه $\delta_m'$ از میدان استاتور جلوتر است در شرایط عادي کار $\omega_m = \omega_s = \omega_{rm}$




I

$E_m$

فرض کنید کوپل مکانیکي شفت موتور بیشتر بشود واتصال کوتاهي در سیستم پیش آید در این صورت حالت استاتیکي بهم خورده و حالت دینامیکي پیش خواهد آمد. دراینصورت $\delta$ یا زاویه بار تغییر خواهد کرد. با اتصال کوتاه در سیستم خارجي یك جریان سلفي خواهیم داشت که ۹۰ درجه پس فاز است (چون خط انتقال سلفي( X) است) و قدرت راکتیو به زمین را خواهیم داشت؛ لذا روتور سرعتش افزاش خواهد یافت که تغییر $\delta_m$ باعث تغییر $\omega_s$ خواهد شد. دو حالت کلي دینامیکي داریم که به صورت زیر است:

مکانیکی $\omega = P\omega_m$ الکتریکی

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

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

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

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

حال اگر اتصال کوتاه ۳ فاز پیش آید تمام قدرت به قدرت راکتیو تبدیل مي شود ولي اگر تك فاز باشد علاوه بر قدرت راکتیو به زمین، قدرت اکتیو هم به شبکه داده مي شود.

$P_m$-$P_e$=$P_a$

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

با توجه به اینکه موتور یك اینرسي دارد و نمي تواند زاویه بار خود را دفعتاً تغییر دهد باید بتدریج اینکارصورت گیرد و این عمل بوسیله توان Pa صورت مي گیرد.

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

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

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

ممان اینرسي ماشین $J$ [MJsec2/rad2 elec or mech] or [Kgm2]

ممنتم زاویه اي ماشین (اندازه حرکت زاویه اي ماشین) $=M$ [MJsec/rad elec or mech] $w_m J$

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

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

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

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

و با فرض صفر بودن اصطكاك و ثابت بودن $\omega_r$ داريم:

معادله نوسان ماشين سنكرون

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

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

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

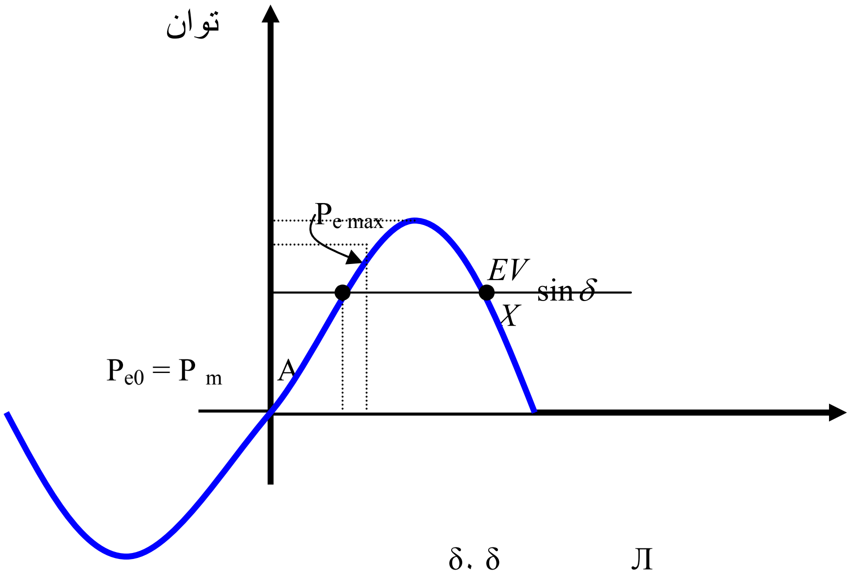
$$P_a = P_m[\text{pu}] - \frac{EV}{X}\sin\delta_{elect} = M\frac{d^2\delta}{d^2t} \qquad \Rightarrow \qquad \delta(t)$$

باحل معادله ديفرانسيل فوق مي توان $\delta$ را بر حسب زمان رسم نمود و پس از اين مورد كار ساده است. چون مي خواستيم ببينيم $\delta_m$ تغييراتش 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 $\omega$ 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 H=۹ 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.

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

$$Pe = 16MW$$

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

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

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

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

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