

تهیه دو فصل (دوم و نهم) توسط

حسن کرامت‌لو دانشجوی دانشگاه آزاد واحد علی آباد

استان گلستان

فصل نهم

پایداری سیستم‌های قدرت

۱-۹ مقدمه

یک سیستم قدرت دارای چندین ماشین سنکرون است. این ماشینها بعلت داشتن سیستم گردنده، با مسأله حفظ سنکرونیزم^(۱) خود با شبکه مواجه هستند. در سیستم قدرت اختلالات^(۲) زیادی بوجود می‌آید که بعضی از آنها کم دامنه و تدریجی، و بعضی پر دامنه و شدید هستند. پایداری یک سیستم قدرت خاصیتی از سیستم است که باعث می‌شود ماشین‌های الکتریکی سیستم بر اثر اختلالات بوجود آمده بتوانند سنکرونیزم خود را با شبکه حفظ نمایند.

یک سیستم قدرت را در نظر بگیرید که تحت شرایط عادی کار می‌کند. اگر اختلالی در سیستم بوجود آید و ماشین‌های الکتریکی موجود در سیستم به این اختلال طوری پاسخ دهند که شرایط کار جدیدی حاصل شود، در اینصورت می‌گوئیم سیستم پایدار^(۳) است. مطالعه پایداری سیستم قدرت^(۴) با توجه به نوع و دامنه اختلال به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شود:

الف) پایداری ماندگار^(۵): در این حالت اثر تغییرات تدریجی و کم دامنه را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در این مطالعه معمولاً تعیین حداکثر قدرت بار گذرای بر ماشین قبل از اینکه ماشین از حالت سنکرونیزم خارج شود، بعنوان حد پایداری ماندگار^(۶)، مورد نظر است.

ب) پایداری گذرا^(۷): امروزه پایداری گذرا تحلیل اصلی مطالعه در مورد رفتار الکترو دینامیکی ماشین را تشکیل می‌دهد. مطالعه پایداری گذرا مشخص می‌کند که آیا سیستم قدرت بر اثر

1- Synchronism

2- Disturbances

3- Stable

4- Power System Stability

5- Steady State Stability

6- Steady - State Stability Limit

7- Transient Stability

اختلالات ناگهانی و شدید، نظیر اتصال کوتاه، خروج بار، باز شدن ناگهانی خط انتقال، خروج ژنراتور و... سنکرونیزم خود را حفظ می‌کند یا نه. بر اثر اختلالات ناگهانی و شدید در سیستم، سرعت ماشین‌ها، قدرت الکتریکی در نقاط مختلف سیستم و زاویه قدرت ماشین‌ها تغییرات شدیدی می‌نمایند. اگر این اختلالات بموقع کنترل و برطرف شوند سیستم پایدار خواهد ماند. اگر بموقع و مناسب برطرف نشوند ماشین‌ها از حالت سنکرونیزم خارج شده و سیستم ناپایدار^(۱) می‌گردد.

مطالعه پایداری گذرای یک سیستم معمولاً برای مدت یک ثانیه کفایت می‌کند و در این فاصله زمانی قدرت مکانیکی ماشین‌ها ثابت فرض می‌شوند، اگر ماشین‌های الکتریکی یک سیستم در یک ثانیه سنکرونیزم خود را با شبکه حفظ کند (سیستم پایدار بماند)، در ادامه مطالعه پایداری گذرا برای چند ثانیه بعدی باید سیستم کنترل ماشین‌ها (سیستم کنترل تحریک و سیستم گاورنر) را در مدل سیستم قدرت منظور نمود.

از نظر پایداری گذرا بدترین نوع اختلال اتصال کوتاه سه فاز (متقارن) و بدترین محل وقوع اختلال، خطوط انتقال نزدیک به ژنراتورها می‌باشند. بنابراین برای اطمینان از پایداری یک سیستم قدرت محاسباتی لازم است که نشان دهد به ازاء وقوع اتصال کوتاه سه فاز (متقارن) در هر یک از خطوط اطراف ژنراتورها، و برطرف شدن اتصال کوتاه در زمان مشخص، همه ژنراتورهای سیستم سنکرونیزم خود را حفظ می‌نمایند. حد پایداری گذرا^(۲) از حد پایداری ماندگار کمتر بوده و به نوع و شدت اختلال و محل وقوع آن بستگی دارد.

ج) پایداری دینامیک^(۳): مطالعه پایداری ماندگار و پایداری دینامیک هر دو به تغییرات تدریجی و کم دامه در اطراف نقطه کار سیستم مربوط می‌شود. بنابراین مسائل آنها ذاتاً یکسان بوده و تنها تفاوت آنها در میزان جزئیاتی است که در مدل ماشین‌ها بکار گرفته می‌شود. در مطالعات پایداری دینامیک، اثرات سیستم‌های تحریک و گاورنر در مدل ماشین در نظر گرفته می‌شوند. در بررسی پایداری ماندگار مدل بسیار ساده‌ای از ژنراتور را در نظر می‌گیریم که در آن ژنراتور بعنوان یک منبع ولتاژ عمل می‌نماید.

تغییرات تدریجی و کوچک معمولاً ژنراتورها را از حالت سنکرونیزم خارج نمی‌کنند، ولی باعث ایجاد نوسانات طبیعی در سیستم می‌گردند. اگر دامنه این نوسانات زیاد نباشد و در زمان کوتاهی مستهلک شود در این صورت دارای پایداری دینامیکی خواهد بود. اگر دامنه نوسانات زیاد باشد و مدت زمان طولانی ادامه یابد سیستم از نظر دینامیکی ناپایدار محسوب می‌شود. معمولاً پایداری دینامیکی برای حدود ۳۰ ثانیه بعد از بروز اختلال انجام می‌شود، و

1- Unstable

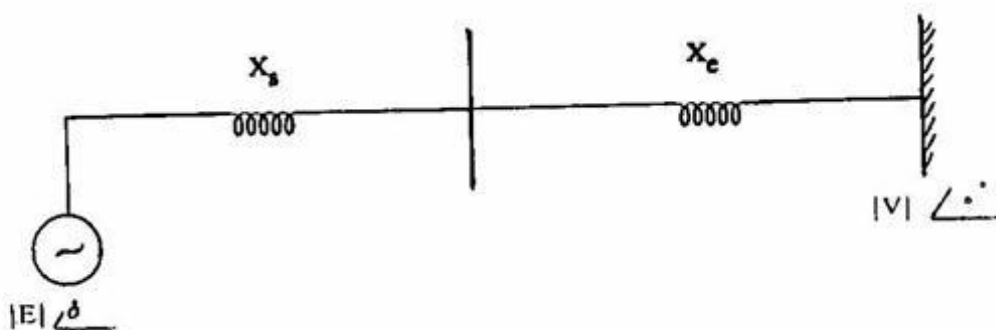
2- Transient Stability Limit

3- Dynamic Stability

دینامیک بلندمدت سیستم^(۱) نیز ممکن است برای یک تا چند دقیقه مورد مطالعه قرار گیرد. برای افزایش پایداری دینامیک از پایدارکننده‌های سیستم قدرت^(۲) (PSS) استفاده شود. در کلیه مطالعات پایداری (ماندگار، گذرا و دینامیک) هدف این است که تعیین کنیم که بر اثر اختلال بوجود آمده، آیا رتور ماشین به شرایط سرعت ثابت می‌رسد یا خیر. در انواع این مطالعات، ولتاژ داخلی هر ماشین سنکرون در خلال محاسبات ثابت فرض می‌شود، و از تأثیر تغییرات دور بر آن صرف‌نظر می‌شود.

۹-۲ مطالعه پایداری ماندگار

همانطور که دیدیم، در بررسی پایداری ماندگار، که مربوط به تغییرات و اختلالات تدریجی و کم دامنه می‌باشد، مدل ماشین سنکرون بصورت ولتاژ داخلی آن سری با راکتانس سنکرون در نظر گرفته می‌شود. دامنه ولتاژ داخلی $|E|$ در فاصله شروع تغییرات و اختلالات تا انتهای آن و رسیدن سیستم به وضع پایدار جدید ثابت فرض می‌شود. در شکل (۹-۱) یک ژنراتور سنکرون نشان داده شده است که از طریق راکتانس X_e به یک شین بی‌نهایت متصل شده است.



شکل ۹-۱: اتصال ژنراتور به شین بی‌نهایت

قدرت الکتریکی که از ژنراتور به شین بی‌نهایت منتقل می‌گردد براساس مباحث فصل دوم برابر است با:

$$P_e = \frac{|E| |V|}{X} \sin \delta \quad (9-1)$$

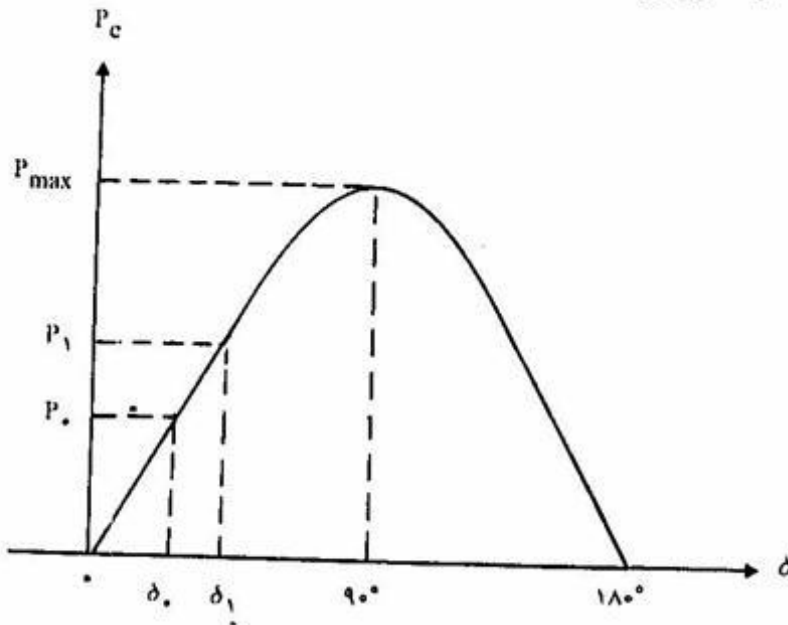
که در آن:

$$X = X_s + X_c$$

در اینجا $|V|$ ولتاژ شین بی‌نهایت و مقدار آن ثابت است، و زاویه δ زاویه جلو افتادگی ولتاژ داخلی ژنراتور نسبت به شین بی‌نهایت می‌باشد. تغییرات قدرت الکتریکی ژنراتور P_c بر حسب زاویه قدرت δ در شکل (۹-۲) رسم شده است. چنانچه نقطه کار در شرایط عادی (P_0 و δ_0) باشد و بر اثر تغییرات کوچک و تدریجی بار، قدرت مصرفی به P_1 برسد، نقطه کار جدید ژنراتور بطور تدریجی با افزایش δ به (P_1 و δ_1) می‌رسد. حداکثر قدرت قابل انتقال ماشین که به ازاء آن سیستم پایداری خود را از دست ندهد، حد پایداری ماندگار نامیده می‌شود که در اینجا برابر است با:

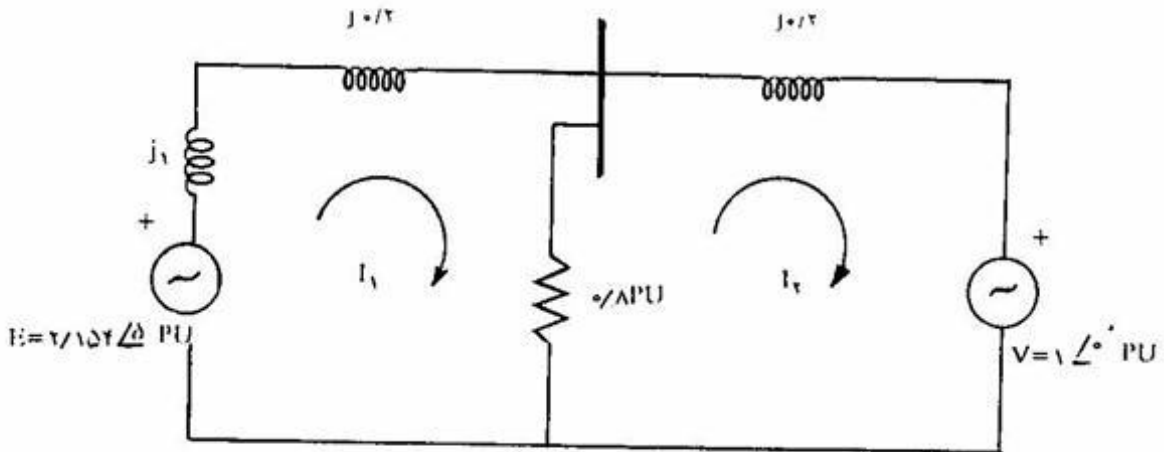
$$P_{max} = \frac{|E| |V|}{X} \quad (9-2)$$

این مقدار در $\delta = 90^\circ$ بدست می‌آید و بعد از 90° هر کوششی برای افزایش قدرت مکانیکی ماشین جهت افزایش δ ، قدرت الکتریکی را کاهش می‌دهد و شتاب ایجاد شده در ماشین باعث افزایش بیشتر δ می‌گردد. در نتیجه قدرت الکتریکی ماشین بمرور به صفر می‌رسد و لذا ماشین و شبکه از نظر الکتریکی از یکدیگر جدا می‌شوند.



شکل ۹-۲: مشخصه قدرت - زاویه ژنراتور سنکرون

ب) مدار معادل سیستم قدرت پس از اتصال کوتاه کلید K مطابق شکل (۹-۴) می باشد. در این مدار قدر مطلق نیروی محرکه $|E|$ ثابت فرض می شود ولی بخاطر افزایش بار، زاویه نیروی محرکه (δ) تغییر می کند. لذا E را در مدار معادل مذکور بصورت $2/154 \angle \delta$ PU نشان داده ایم.



شکل ۹-۴: مدار معادل سیستم قدرت شکل (۹-۳)

معادله دو حلقه را برای محاسبه I_2 می نویسیم:

$$2/154 \angle \delta = (0.8 + j1/2)I_1 - 0.8I_2$$

$$0.8I_1 - (0.8 + j0.2)I_2 = 1$$

و از آنجا I_2 را برحسب δ بدست می آوریم:

$$I_2 = 1/5.04 \angle \delta - 1.02/1^\circ - 1/259 \angle -45/79^\circ$$

قدرت منتقله به شین بی نهایت عبارتست از:

$$S = VI_2^* = 1/5.04 \angle 1.02/1^\circ - \delta - 1/259 \angle 45/79^\circ$$

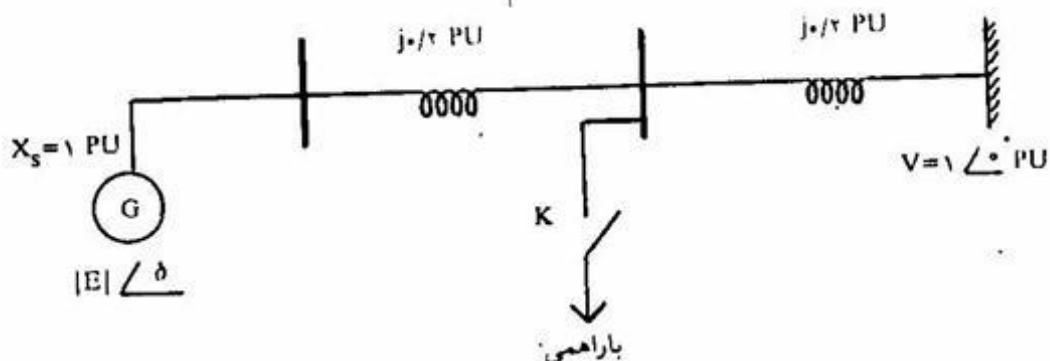
و قدرت اکتیو منتقله برحسب δ برابر است با:

۴۰۳

مثال ۹-۱: در سیستم قدرت شکل (۹-۳) قبل از اتصال کلید K، قدرت $0.8 + j0.6$ PU به شبکه بی نهایت منتقل می شود.

الف) حد پایداری ماندگار ژنراتور را بدست آورید.

ب) اگر کلید K وصل شود بار اهمی 0.8 PU وارد شبکه می گردد. آیا ژنراتور می تواند با اتصال این کلید، قدرت 0.8 PU قبلی را برای شبکه بی نهایت تأمین نماید؟



شکل ۹-۳: مربوط به مثال (۹-۱)

حل:

الف): راکتانس معادل بین ژنراتور و شبکه بی نهایت برابر است با:

$$X = 1 + 0.2 + 0.2 = 1.4 \text{ PU}$$

حال جریان عبوری از ژنراتور و نیروی محرکه آنرا محاسبه می کنیم:

$$S = VI^*$$

$$0.8 + j0.6 = 1 \angle 0^\circ \times I^*$$

$$I = 0.8 - j0.6$$

$$E = V + jXI = 1 + j1.4(0.8 - j0.6) = 2.154 \angle 31.3^\circ \text{ PU}$$

حد پایداری ماندگار ژنراتور عبارتست از:

$$P_{max} = \frac{|E| |V|}{X} = \frac{2.154 \times 1}{1.4} = 1.538 \text{ PU}$$

۴۰۵

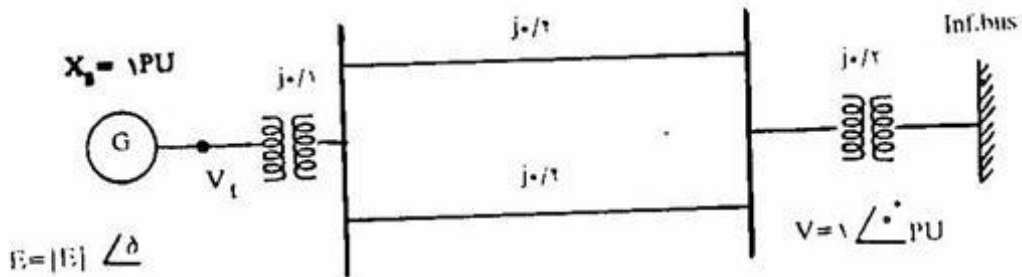
$$P = 1/504 \cos(102/1^\circ - \delta) - 1/259 \cos 45/79^\circ$$

حداکثر قدرت قابل انتقال به شبکه مذکور را برای بررسی پایداری ماندگار محاسبه می‌کنیم:

$$P_{max} = 1/504 \cos 0^\circ - 1/259 \cos 45/79^\circ = 0/626 \text{ PU}$$

همانطوریکه ملاحظه می‌شود، ژنراتور نمی‌تواند قدرت ۰/۸PU را به شبکه بی‌نهایت منتقل نماید و لذا با اتصال کلید K سیستم ناپایدار خواهد شد. بررسی‌های بیشتر نشان می‌دهد که اگر مقدار امپدانس اهمی بار را به $R = 1 \text{ PU}$ برسانیم قدرت انتقالی به شین بی‌نهایت ۰/۸PU خواهد بود.

مثال ۹-۲: در سیستم قدرت شکل (۹-۵) قدرت ۱PU از ژنراتور سنکرون به شبکه بی‌نهایت منتقل می‌شود. ولتاژ ترمینالهای ژنراتور $|V_1| = 1/02 \text{ PU}$ است و ولتاژ شین بی‌نهایت $1 \angle 0^\circ \text{ PU}$ می‌باشد. نیروی محرکه ژنراتور و حداکثر قدرت قابل انتقال ژنراتور را محاسبه نمائید.



شکل ۹-۵: مربوط به مثال (۹-۲)

حل: ولتاژ ترمینالهای ژنراتور عبارتست از:

$$V_1 = 1/02 \angle \delta' \text{ PU}$$

که در آن δ' زاویه V_1 نسبت به زاویه ولتاژ شین بی‌نهایت است. راکتانس بین ترمینالهای ژنراتور تا شین بی‌نهایت را بدست می‌آوریم تا از آنجا معادله قدرت - زاویه را تعیین کنیم:

$$X = 0.1 + \frac{0.4}{3} + 0.2 = 0.5 \text{ PU}$$

بنابراین معادله قدرت انتقالی از ترمینالهای ژنراتور به شبکه بی نهایت عبارتست از:

$$P_c = \frac{|V_t| |V|}{X} \sin \delta' = \frac{1.02 \times 1}{0.5} \sin \delta' = 2.04 \sin \delta'$$

$$P_c = 2.04 \sin \delta'$$

اگر $P_c = 1 \text{ PU}$ را در معادله اخیر قرار دهیم، δ' بدست می آید:

$$1 = 2.04 \sin \delta'$$

$$\delta' = 29/35^\circ$$

بنابراین:

$$V_t = 1.02 \angle 29/35^\circ \text{ PU}$$

حال جریان و ولتاژ داخلی ژنراتور را محاسبه می کنیم:

$$I = \frac{V_t - V}{jX} = \frac{1.02 \angle 29/35^\circ - 1 \angle 0^\circ}{j0.5}$$

$$I = 1 + j0.222 \text{ PU}$$

$$E = V_t + jX_s I = 1.02 \angle 29/35^\circ + j1(1 + j0.222)$$

$$I = 1/642 \angle 66/0.3^\circ \text{ PU}$$

معادله قدرت انتقالی از ژنراتور به شین بی نهایت برحسب زاویه δ این چنین نوشته می شود:

$$P_c = \frac{|E| |V|}{X} \sin \delta$$

که در آن X راکتانس بین ولتاژ داخلی ژنراتور تا شین بی نهایت، و δ زاویه ولتاژ داخلی ژنراتور نسبت به زاویه ولتاژ شین بی نهایت می باشند. با جایگزینی مقادیر عددی در معادله اخیر داریم:

$$P_c = \frac{1/642 \times 1}{(1 + 0/5)} \sin \delta$$

$$P_c = 1/095 \sin \delta$$

چنانچه زاویه $\delta = 66/03^\circ$ را در معادله اخیر قرار دهیم $P_c = 1$ PU بدست می آید که همان نقطه کار داده شده است.

۹-۳ معادله نوسان (۱)

بر اثر اختلال ناگهانی در شبکه، قدرت الکتریکی هر یک از ماشین‌ها تغییر می نماید، بدون اینکه قدرت مکانیکی آن فرصت کافی برای بروز عکس العمل داشته باشد. اگر از تلفات ماشین صرف نظر کنیم و اختلال طوری باشد که قدرت مکانیکی (P_m) از قدرت الکتریکی (P_c) بیشتر شود، قدرت اضافی باعث ایجاد شتاب ماشین شده و در نتیجه سرعت و زاویه قدرت (δ) ژنراتور را افزایش می دهد. در فاصله زمانی مورد مطالعه برای بررسی پایداری گذرا (حدود یک ثانیه) معمولاً قدرت مکانیکی ثابت فرض می شود و قدرت الکتریکی بر اثر اختلال ایجاد شده متغیر است. قدرت شتاب دهنده (۲) طبق تعریف از اختلاف قدرت مکانیکی و الکتریکی ماشین بدست می آید:

$$P_a = P_m - P_c \quad (9-3)$$

اگر طرفین این رابطه را در سرعت زاویه ای رتور ضرب کنیم، خواهیم داشت:

$$T_a = T_m - T_c \quad (9-4)$$

که در آن T_a گشتاور شتاب دهنده (۳)، T_m گشتاور مکانیکی و T_c گشتاور الکترومغناطیسی ماشین هستند. رابطه P_a بر حسب T_a بصورت زیر نوشته می شود.

$$P_a = T_a \omega = I \alpha \omega$$

$$P_m - P_e = I\alpha\omega \quad (9-5)$$

در اینجا ω سرعت زاویه‌ای رتور برحسب rad/s، α شتاب زاویه‌ای رتور برحسب rad/s² و I ممان اینرسی ماشین برحسب $\frac{MJS^2}{rad}$ می‌باشند. در اینصورت قدرت شتاب دهنده P_{α} برحسب MW خواهد بود. در همه این پارامترها مقصود از رادیان، رادیان مکانیکی است. حال مومنتم زاویه‌ای $M^{(1)}$ را طبق رابطه زیر تعریف می‌کنیم:

$$M = I\omega \quad (9-6)$$

واحد مومنتم زاویه‌ای MJS/rad می‌باشد. انرژی جنبشی رتور در ماشین سنکرون با ممان اینرسی I و سرعت زاویه‌ای ω برابر است:

$$KE = \frac{1}{2} I\omega^2 = \frac{1}{2} M\omega \quad (9-7)$$

قبلاً با ثابت اینرسی ماشین سنکرون آشنا شده‌ایم. در مطالعه پایداری سیستم‌ها معمولاً از ثابت اینرسی ماشین‌ها H_{mach} بجای ممان اینرسی آنها استفاده می‌کنیم. انرژی جنبشی ذخیره شده، در سرعت سنکرون را برحسب ثابت اینرسی این چنین نشان می‌دهیم:

$$KE = SH_{mach} \quad (9-8)$$

که در آن H_{mach} ثابت اینرسی ماشین برحسب MJ/MVA و یا ثانیه، و S قدرت نامی ماشین است. از طرف دیگر انرژی جنبشی در سرعت سنکرون را می‌توان برحسب سرعت زاویه‌ای سنکرون مطابق زیر نوشت:

$$KE = \frac{1}{2} M \omega_s \quad (9-9)$$

در اینجا ω_s سرعت زاویه‌ای سنکرون بر حسب رادیان مکانیکی بر ثانیه است. با مقایسه دو رابطه اخیر داریم:

$$SH_{mach} = \frac{1}{2} M \omega_s \quad \text{و از آنجا:}$$

$$M = \frac{2SH_{mach}}{\omega_s}$$

اگر قدرت مبنای سیستم ($S_{1\phi}$) با قدرت نامی ماشین متفاوت باشد $S_{1\phi}H$ جایگزین SH_{mach} خواهد شد و هر دو نشان دهنده انرژی جنبشی در سرعت سنکرون هستند. بنابراین رابطه اخیر به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$M = \frac{2S_{1\phi}H}{\omega_s} \quad (9-10)$$

در اینجا H ثابت اینرسی ماشین در قدرت مبنای سیستم است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$H = H_{mach} \frac{S}{S_{1\phi}} \quad (9-11)$$

تا اینجا مقادیر زاویه‌ای ω و ω_s در معادلات (۹-۵) تا (۹-۱۰) بر حسب رادیان مکانیکی بیان شده‌اند. حال می‌خواهیم مقادیر رادیان مکانیکی را به رادیان الکتریکی تبدیل کنیم. تبدیل این مقادیر با رابطه زیر انجام می‌شود:

$$\text{نصف تعداد قطب‌ها} \times \text{رادیان مکانیکی} = \text{رادیان الکتریکی} \quad (9-12)$$

برای این کار کافی است که در معادله (۹-۱۰) بجای واحد مگاژول ثانیه بر رادیان مکانیکی برای M ، از واحد مگاژول ثانیه بر رادیان الکتریکی استفاده کنیم. در نتیجه ω_s نیز سرعت سنکرون بر حسب رادیان الکتریکی بر ثانیه خواهد بود که مقدار آن برابر است با:

$$\omega_s = 2\pi f^*$$

با جایگزینی این مقدار در معادله (۹-۱۰) مومنتم زاویه‌ای را بدست می‌آوریم:

$$M = \frac{S_b H}{\pi f^2} \quad \text{MJS/rad} \quad (9-13)$$

$$= \frac{S_b H}{180 f^2} \quad \text{MJS/deg}$$

در این رابطه، و از این بیعد در کلیه بحث‌ها مقصود از رادیان، رادیان الکتریکی می‌باشد. همانطوریکه این رابطه نشان می‌دهد M به اندازه ماشین و سرعت آن بستگی دارد. با توجه به رابطه $M = I\omega$ معادله (۹-۵) را می‌توان مطابق زیر نوشت:

$$P_m - P_c = M\alpha = \frac{S_b H}{\pi f^2} \alpha \quad (9-14)$$

چنانچه طرفین رابطه را بر S_b تقسیم کنیم قدرت‌های P_m و P_c در سمت چپ معادله برحسب PU خواهند بود:

$$P_m - P_c = \frac{H}{\pi f^2} \alpha \quad [\text{PU}] \quad (9-15)$$

در اینجا α شتاب زاویه‌ای برحسب رادیان الکتریکی بر توان دوم ثانیه (rad/s^2) می‌باشد. حال رابطه شتاب زاویه‌ای α را با زاویه قدرت δ بررسی می‌کنیم. براساس مباحث فصل پنجم داریم:

$$\omega = \frac{d}{dt} (\omega^\circ + \delta) \quad (9-16)$$

که در آن ω سرعت زاویه‌ای برحسب رادیان الکتریکی بر ثانیه است. δ نیز زاویه قدرت (زاویه جلوفتادگی نیروی محرکه ماشین نسبت به ولتاژ آن) می‌باشد که برابر است با:

$$\delta = \delta^\circ + \Delta\delta \quad (9-17)$$

با توجه به رابطه (۹-۱۶) سرعت زاویه‌ای عبارتست از:

$$\omega = \omega^\circ + \frac{d\delta}{dt} \quad (9-18)$$

با مشتق‌گیری از ω ، شتاب زاویه‌ای را بدست می‌آوریم:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\delta}{dt^2} \quad \text{rad/s}^2 \quad (9-19)$$

با ترکیب معادلات (۹-۱۵) و (۹-۱۹) داریم:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_c) \quad (9-20)$$

این معادله به معادله نوسان موسوم است که در آن P_m و P_c برحسب PU، H ثابت اینرسی در قدرت مبنای سیستم و δ زاویه قدرت برحسب رادیان الکتریکی هستند. تا زمانی که اختلالی در سیستم وجود نداشته باشد $P_m = P_c$ بوده و شتاب صفر است. در نتیجه سرعت ماشین ثابت بوده و ماشین در شرایط پایدار می‌باشد. بر اثر یک اختلال ناگهانی در سیستم، P_c تغییر می‌کند و شتاب بوجود آمده باعث تغییر سرعت و زاویه قدرت می‌گردد. اگر اختلال بوجود آمده شدید بوده و برطرف نشود سیستم به سمت ناپایداری میل می‌کند. در معادله اخیر از زمان وقوع اختلال ($t=0$) تا زمان مورد مطالعه (حدود یک ثانیه) قدرت مکانیکی P_m ثابت بوده و قدرت الکتریکی P_c متغیر می‌باشد. بنابراین شتاب زاویه‌ای نیز متغیر بوده و چنانچه در فاصله زمانی مناسبی اختلال بوجود آمده برطرف شود پارامترهای مکانیکی سیستم (ω و δ) طبق معادله (۹-۲۰) نوسان می‌کنند. حل این معادله دیفرانسیل درجه ۲، نحوه تغییرات δ و احتمال پایداری را مشخص می‌کند. منحنی تغییرات δ برحسب رادیان به منحنی نوسان^(۱) معروف است. اگر δ پس از رسیدن به مقدار ماکزیمم شروع به کاهش نماید و نوساناتی را انجام دهد، سیستم پایدار می‌ماند و این نوسانات مستهلک خواهند شد.

۹-۴ معادله نوسان سیستم‌های چند ماشینی

در یک سیستم قدرت با چندین ماشین الکتریکی مختلف که از لحاظ جغرافیائی در کل سیستم پراکنده‌اند، بر اثر اختلال در نقطه‌ای از سیستم، نوسانات زاویه‌ای قدرت ژنراتورها با یکدیگر متفاوت بوده و نمی‌توان یک معادله نوسان برای کل سیستم نوشت. بنابراین در حالت کلی باید معادلات نوسان کلیه ماشینها را نوشت و با انجام محاسبات کامپیوتری و حل همزمان این معادلات، که معادلات دیفرانسیل هستند، پایداری سیستم را مورد بررسی قرار داد. لیکن در حالت ایده‌آل با فرض مشابه بودن نوسانات زاویه قدرت کلیه ماشینها، می‌توان همه ماشینهای

الکتریکی را با هم ترکیب نمود و یک ماشین معادل بدست آورد. درست مثل اینکه رتور همه آنها از نظر مکانیکی بیکدیگر کوپل شده و فقط یک معادله نوسان باید نوشته و حل گردد. فرض کنید در یک نیروگاه m ژنراتور به یک شین متصل هستند. معادله نوسان هریک از این ژنراتورها عبارتست از:

$$\begin{aligned} \frac{H_1}{\pi f^{\circ}} \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} &= P_{m_1} - P_{c_1} \\ \frac{H_2}{\pi f^{\circ}} \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} &= P_{m_2} - P_{c_2} \\ &\vdots \\ \frac{H_m}{\pi f^{\circ}} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} &= P_{m_m} - P_{c_m} \end{aligned}$$

چون فرض بر آن است که رتور این ژنراتورها با هم نوسان می‌کنند، لذا داریم:

$$\delta_1 = \delta_2 = \dots = \delta_m = \delta$$

بنابراین در معادلات نوسان ژنراتورها به جای δ_1 ، δ_2 و \dots مقدار δ را قرار داده و طرفین این معادلات را با هم جمع می‌کنیم، در اینصورت خواهیم داشت:

$$\frac{(H_1 + H_2 + \dots + H_m)}{\pi f^{\circ}} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = (P_{m_1} + P_{m_2} + \dots + P_{m_m}) - (P_{c_1} + P_{c_2} + \dots + P_{c_m})$$

$$\frac{H}{\pi f^{\circ}} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_c$$

و یا:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi f^{\circ}}{H} (P_m - P_c) \quad (9-21)$$

که در آن:

$$H = H_1 + H_2$$

$$P_m = P_{m1} + P_{m2}$$

$$P_e = P_{e1} + P_{e2}$$

معادله (۹-۲۱) دقیقاً مشابه معادله نوسان (۹-۲۰) است.

اگر سیستم قدرت دارای دو ماشین الکتریکی باشد که نوسانات رتور آنها با یکدیگر متفاوت است (سیستم دو ماشینی)، و یا در یک سیستم قدرت n ماشینی، قادر باشیم کلیه ماشینهای سیستم را به دو گروه تقسیم‌بندی کنیم، بطوریکه ماشینهای گروه ۱ با یکدیگر و ماشینهای گروه ۲ نیز با یکدیگر نوسان می‌کنند، در اینصورت می‌توان نوشت:

$$\frac{d^2 \delta_1}{dt^2} = \frac{\pi f^0}{H_1} (P_{m1} - P_{e1})$$

$$\frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = \frac{\pi f^0}{H_2} (P_{m2} - P_{e2})$$

با تفریق روابط اخیر از یکدیگر داریم:

$$\frac{d^2 \delta_1}{dt^2} - \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = \pi f^0 \left(\frac{P_{m1} - P_{e1}}{H_1} - \frac{P_{m2} - P_{e2}}{H_2} \right)$$

طرفین این معادله را در $\frac{H_1 H_2}{H_1 + H_2}$ ضرب کرده و پس از مرتب کردن خواهیم داشت:

$$\frac{H_1 H_2}{H_1 + H_2} \frac{d^2 (\delta_1 - \delta_2)}{dt^2} = \pi f^0 \left(\frac{P_{m1} H_2 - P_{m2} H_1}{H_1 + H_2} - \frac{P_{e1} H_2 - P_{e2} H_1}{H_1 + H_2} \right)$$

و یا:

$$\frac{d^2 \delta_{12}}{dt^2} = \frac{\pi f^0}{H_{12}} (P_{m_{12}} - P_{e_{12}}) \quad (9-22)$$

که در آن:

$$\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2 \quad (9-23)$$

$$H_{12} = \frac{H_1 H_2}{H_1 + H_2} \quad (9-24)$$

$$P_{e12} = \frac{P_{e1} H_2 - P_{e2} H_1}{H_1 + H_2} \quad (9-25)$$

$$P_{m12} = \frac{P_{m1} H_2 - P_{m2} H_1}{H_1 + H_2} \quad (9-26)$$

معادله (۹-۲۲) کاملاً شبیه نوسان (۹-۲۰) می‌باشد و می‌توان با استفاده از روش مشابهی، پایداری سیستم دو ماشینی و یا سیستم n ماشینی را که به دو ماشین مدل‌سازی شده، بررسی نمود.

یکی از کاربردهای معادله (۹-۲۲) استفاد در سیستم دو ماشینی شامل ژنراتور و موتور سنکرون است. اگر ماشین ۱ ژنراتور، و ماشین ۲ موتور سنکرون باشند، داریم:

$$P_{e1} = -P_{e2} = P_e$$

$$P_{m1} = -P_{m2} = P_m$$

بنابراین:

$$P_{m12} = P_m$$

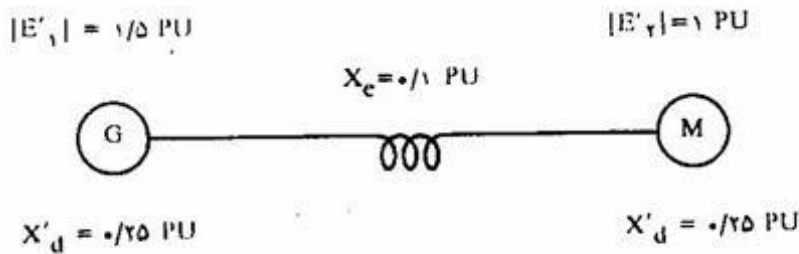
$$P_{e12} = P_e$$

در نتیجه معادله (۹-۲۲) بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{d^2 \delta_{12}}{dt^2} = \frac{\pi f^2}{H_{12}} (P_m - P_e) \quad (9-27)$$

و این معادله شبیه معادله (۹-۲۰) است که برای بررسی پایداری سیستم تک ماشینی بکار می‌رود. در سیستم تک ماشینی می‌توان شین بی‌نهایت را مشابه یک ماشین با ولتاژ داخلی ثابت، امپدانس صفر و ثابت اینرسی بی‌نهایت منظور نمود. معمولاً محل اتصال یک ژنراتور با یک سیستم قدرت بزرگ را می‌توان یک شین بی‌نهایت در نظر گرفت.

مثال ۹-۳: سیستم قدرتی شامل یک ژنراتور و یک موتور سنکرون مطابق شکل (۹-۶) را در نظر بگیرید. قدرت مکانیکی ژنراتور $P_m = 1$ PU بوده و ثابت‌های اینرسی ژنراتور و موتور به ترتیب ۳ و ۶ ثانیه می‌باشند. معادله نوسان را برای بررسی پایداری گذرا در سیستم مذکور تشکیل دهید.



شکل ۹-۶: مربوط به مثال (۹-۳)

حل: مقادیر نیروی محرکه و راکتانس ژنراتور و موتور سنکرون در شکل (۹-۶) برای محاسبات گذرا داده شده‌اند، زیرا معادله نوسان برای بررسی پایداری گذرای سیستم مورد نیاز است. ابتدا ثابت اینرسی معادل H_{12} را بدست می‌آوریم:

$$H_{12} = \frac{H_1 H_2}{H_1 + H_2} = \frac{3 \times 6}{3 + 6} = 2 \text{ S}$$

زاویه قدرت ژنراتور δ_1 ، و زاویه قدرت موتور δ_2 می‌باشد، لذا داریم:

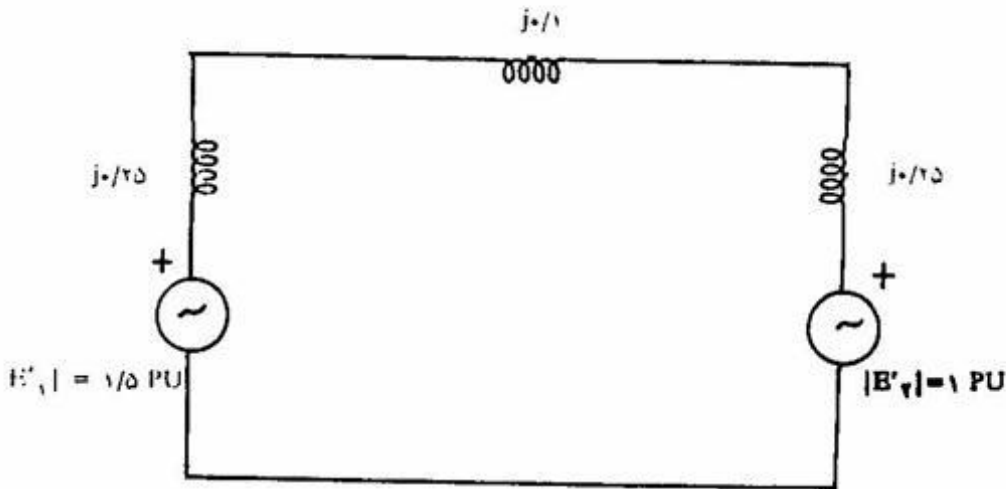
$$\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2$$

بنابراین معادله قدرت منتقله در شرایط عادی عبارتست از:

$$P_c = \frac{|E'_1| |E'_2|}{X} \text{Sin} \delta_{12} = \frac{1/5 \times 1}{0.6} \text{Sin} \delta_{12}$$

$$P_c = 2/5 \text{Sin} \delta_{12}$$

مدار معادل شکل (۹-۶) را در شکل (۹-۷) نشان داده‌ایم:



شکل ۹-۷: مدار معادل سیستم قدرت شکل (۹-۶)

حال معادله نوسان را با توجه به مقادیر محاسبه شده می‌نویسیم:

$$\frac{d^2 \delta_{12}}{dt^2} = \frac{\pi f^0}{H_{12}} (P_m - P_c)$$

$$\frac{d^2 \delta_{12}}{dt^2} = \frac{3/14 \times 50}{2} (1 - 2/5 \sin \delta_{12})$$

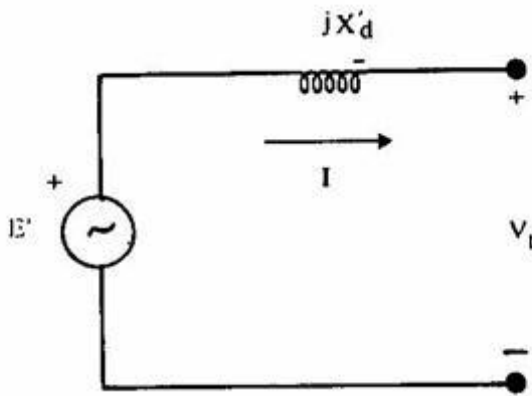
$$\frac{d^2 \delta_{12}}{dt^2} = 78/54 (1 - 2/5 \sin \delta_{12})$$

که یک معادله دیفرانسیل غیرخطی برحسب δ_{12} می‌باشد. پس از حل این معادله می‌توان در مورد نوسانات δ_{12} و پایداری سیستم بحث نمود. البته در این معادله، قدرت الکتریکی P_e در شرایط عادی دارای معادله مشخص $2/5 \sin \delta_{12}$ می‌باشد. بدیهی است در شرایط وقوع خطاها و اختلالات مختلف تعیین معادله قدرت برحسب زاویه پیچیده‌تر خواهد بود. قبل از بررسی نحوه حل معادله نوسان، روش تعیین معادله قدرت - زاویه را در شرایط مختلف مطالعه می‌کنیم.

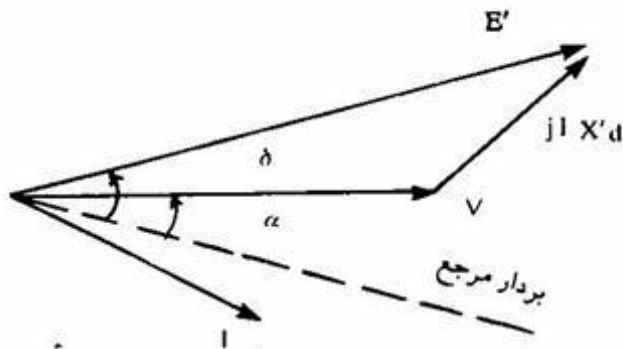
۹-۵ معادله قدرت - زاویه (۱)

در معادله نوسان، قدرت مکانیکی ورودی ژنراتور P_m ثابت فرض می‌شود، زیرا شرایط

الکتريکی شبکه قدرت قبل از عمل گاورنر تغيير می نماید. چون P_m ثابت است، لذا قدرت الکتريکی خروجی P_e می تواند تعيين کننده شتاب رتور و در نتیجه پايداری سيستم باشد. در شرايط کار ماندگار، هنگامی که P_e با P_m برابر است، ماشين در سرعت سنکرون کار می کند. بر اثر تغيير P_e ، سرعت ماشين از مقدار سنکرون آن انحراف پیدا می کند. اينکه P_e چگونه و به میزانی تغيير می کند بستگی به شرايط شبکه انتقال و توزيع، و همچنين بارهای سيستم دارد. اختلالات ناشی از تغييرات شديد بار، خطاهای سيستم، و يا عمل کلیدها ممکن است قدرت خروجی ژنراتور P_e را بسرعت تغيير دهند. در مطالعه پايداری گذرا، فرض بر اين است که تأثیر تغييرات سرعت ماشين روی ولتاژ توليد شده (نیروی محرکه) قابل صرفنظر است. هر ماشين با ولتاژ داخلی گذرا E' سری با راکتانس گذرای محور مستقيم X'_d ، مطابق شکل (۸-۹ الف) نشان داده می شود. با صرفنظر از مقاومت اهمی آر میچر، دیاگرام برداری مربوطه را می توان طبق شکل (۸-۹ ب) نشان داد که در آن α و δ بترتيب زاويه ولتاژ ترمینالهای ژنراتور و ولتاژ داخلی آن نسبت به بردار مرجع می باشند.



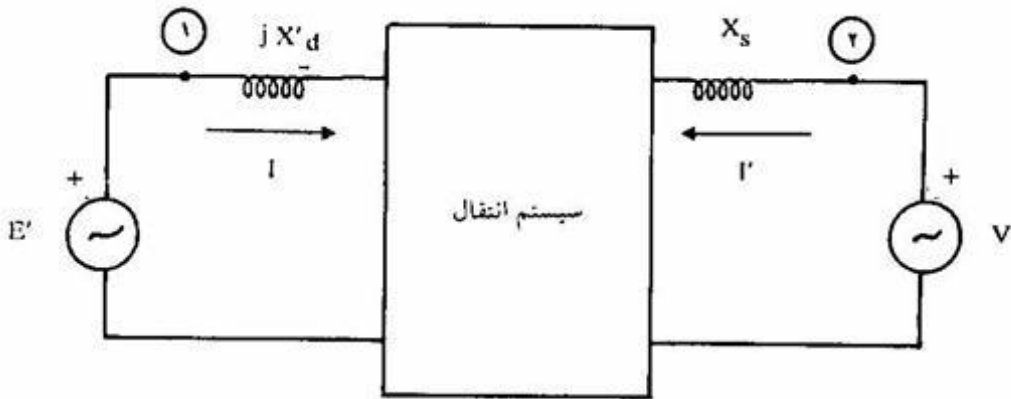
الف) مدار معادل



ب) دیاگرام برداری

شکل ۸-۹: مدار معادل و دیاگرام برداری ماشين سنکرون در مطالعه پايداری گذرا

برای تعیین معادله قدرت الکتریکی برحسب زاویه قدرت، شکل (۹-۹) را در نظر بگیرید که در آن ژنراتور سنکرونی قدرت خود را از طریق یک سیستم انتقال به سیستم قدرتی منتقل می‌کند. ماشین سنکرون را با ولتاژ داخلی گذرا (E') سری با راکتانس گذرا (X'_d)، و سیستم قدرت را با مدار معادل تونن آن، شامل ولتاژ تونن V و راکتانس تونن X_s نشان داده‌ایم. سیستم انتقال شامل ترانسفورماتورها، خطوط انتقال، خازنها و راکتورهای اصلاح ولتاژ می‌باشد.



شکل ۹-۹: اتصال ژنراتور سنکرون به سیستم قدرت برای مطالعه پایداری گذرا

ماتریس ادمیتانس شین برای شبکه نشان داده شده در شکل (۹-۹) با در نظر گرفتن دو نقطه گره ۱ و ۲ عبارتست از:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \quad (9-28)$$

بنابراین:

$$\begin{bmatrix} I \\ I' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E' \\ V \end{bmatrix}$$

و از این معادله جریان ژنراتور عبارتست از:

$$I = Y_{11}E' + Y_{12}V \quad (9-29)$$

معادله پخش بار را یادآوری می‌کنیم:

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j$$

اگر مقادیر E' ، V ، Y_{11} و Y_{12} را بصورت زیر نشان دهیم:

$$\begin{aligned} E' &= |E'| \angle \delta_1 & V &= |V| \angle \delta_2 \\ Y_{11} &= |Y_{11}| \angle \phi_{11} & Y_{12} &= |Y_{12}| \angle \phi_{12} \end{aligned}$$

با جایگزین کردن این کمیت‌ها در معادله پخش بار، و همچنین قرار دادن ا از رابطه (۹-۲۹) در این معادله، قدرت الکتریکی خروجی ژنراتور بدست می‌آید:

$$P_c = P_1 = \text{Real} \{ E' I_1 \} = \text{Real} \{ E' (Y_{11} E' + Y_{12} V) \}$$

$$P_c = \text{Real} \left\{ |E'|^2 |Y_{11}| \angle \phi_{11} + |E'| |V| |Y_{12}| \angle \phi_{12} + \delta_2 - \delta_1 \right\}$$

$$P_c = |E'|^2 |Y_{11}| \cos \phi_{11} + |E'| |V| |Y_{12}| \cos (\delta_1 - \delta_2 - \phi_{12})$$

و یا:

$$P_c = P_c + P_{\max} \cos (\delta - \phi_{12}) \quad (9-30)$$

که در آن:

$$P_c = |E'|^2 |Y_{11}| \cos \phi_{11} \quad (9-31)$$

$$P_{\max} = |E'| |V| |Y_{12}| \quad (9-32)$$

اگر از مقاومت‌های اهمی شبکه صرف‌نظر شود $\phi_{11} = -90^\circ$ و $\phi_{12} = 90^\circ$ بوده و خواهیم داشت:

$$P_c = 0$$

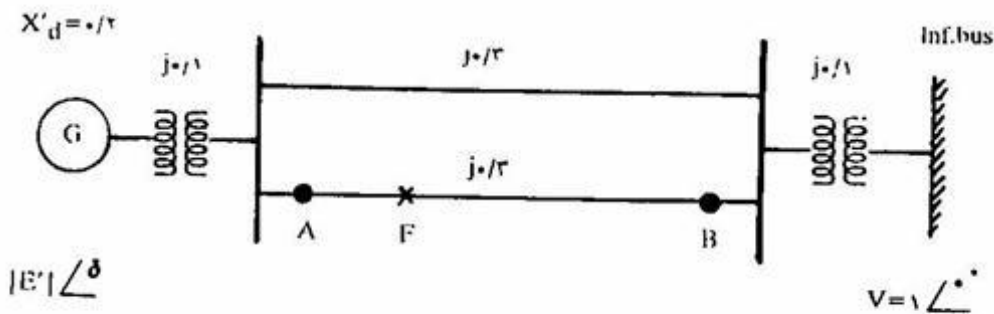
$$P_c = P_{\max} \sin \delta$$

و این معادله ایست که قبلاً نیز با آن آشنا بوده ایم. در این معادله P_{max} برابر است با:

$$P_{max} = \frac{|E'| |V|}{X}$$

که در آن X راکتانس معادل بین E' و V می باشد.

مثال ۴-۹: در سیستم قدرت شکل (۹-۱۰) قدرت ۱ PU از ژنراتور سنکرون به شین بی نهایت منتقل می شود. نیروی محرکه ژنراتور $|E'| = 1/0.84$ PU است. در نقطه F ($BF = 2 AF$) اتصال کوتاه سه فاز (متقارن) بوقوع می پیوندد. معادله نوسان را برای فاصله زمانی که اتصال کوتاه در سیستم وجود دارد بدست آورید. راکتانس ها در شکل برحسب PU مشخص شده اند. ثابت اینرسی ژنراتور $H = 5$ S است.



شکل ۹-۱۰: مربوط به مثال (۴-۹)

حل: ابتدا راکتانس بین E' و V را بدست می آوریم:

$$X = 0.2 + 0.1 + \frac{0.3}{2} + 0.1 = 0.55 \text{ PU}$$

قدرت انتقالی ژنراتور برحسب زاویه قدرت δ قبل از وقوع اتصال کوتاه عبارتست از:

$$P_c = \frac{|E'| |V|}{X} \sin \delta = \frac{1/0.84 \times 1}{0.55} \sin \delta$$

$$P_c = 1/971 \sin \delta$$

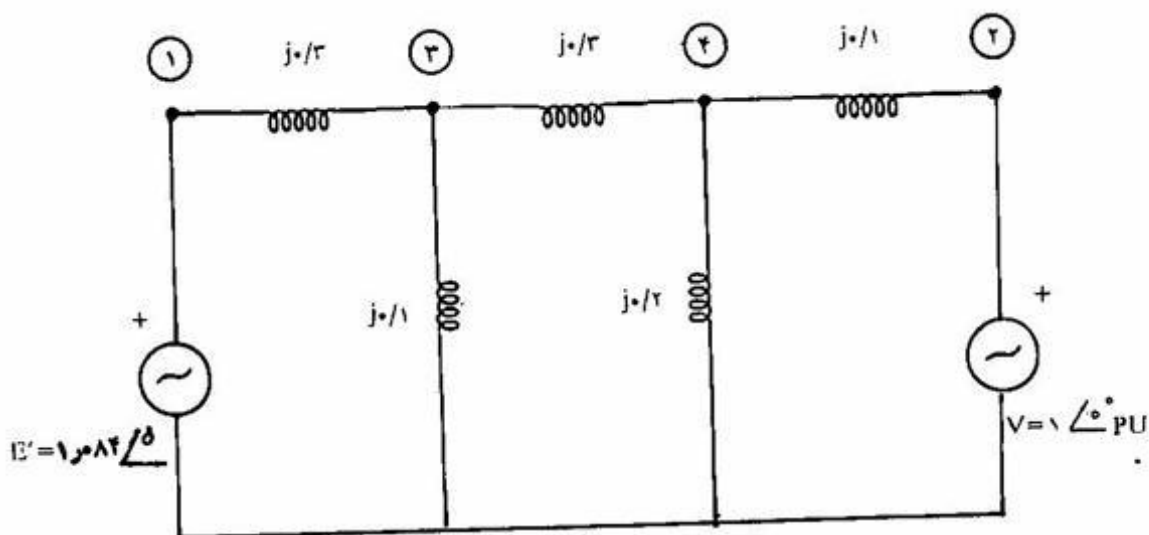
۴۲۱

با قراردادن $P = 1$ PU در این معادله، خواهیم داشت:

$$1 = 1/971 \sin \delta$$

$$\delta = 30/5^\circ$$

δ زاویه قدرت ژنراتور در شرایط عادی کار (قبل از اتصال کوتاه) است. شکل (۹-۱۱) مدار معادل سیستم قدرت شکل (۹-۱۰) را در حین اتصال کوتاه در نقطه F نشان می دهد.



شکل ۹-۱۱: مدار معادل سیستم قدرت شکل (۹-۱۰) بر اثر اتصال کوتاه در نقطه F

با توجه به ۴ نقطه گره شکل اخیر، ماتریس ادمیتانس شین Y_{bus} برابر است:

$$Y_{bus} = j \begin{bmatrix} -3/33 & 0 & 3/33 & 0 \\ 0 & -10 & 0 & 10 \\ 3/33 & 0 & -16/67 & 3/33 \\ 0 & 10 & 3/33 & -18/33 \end{bmatrix} \text{ PU}$$

حال نقاط ۳ و ۴ را حذف کرده و ماتریس ادمیتانس (2×2) را برای نقاط ۱ و ۲ بدست می آوریم:

$$Y_{bus_{new}} = Y_1 - Y_r Y_r^{-1} Y_r$$

$$Y_{bus_{new}} = j \left\{ \begin{bmatrix} -۳/۳۳ & ۰ \\ ۰ & ۱۰ \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} ۳/۳۳ & ۰ \\ ۰ & ۱۰ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -۱۶/۶۷ & ۳/۳۳ \\ ۳/۳۳ & -۱۸/۳۳ \end{bmatrix}^{-۱} \begin{bmatrix} ۳/۳۳ & ۰ \\ ۰ & ۱۰ \end{bmatrix} \right\}$$

$$Y_{bus_{new}} = j \begin{bmatrix} -۴/۰۱۹ & ۰/۳۷۶ \\ ۰/۳۷۶ & -۴/۳۴ \end{bmatrix} \text{ PU}$$

و از آنجا:

$$|Y_{۱۲}| = ۰/۳۷۶ \text{ PU}$$

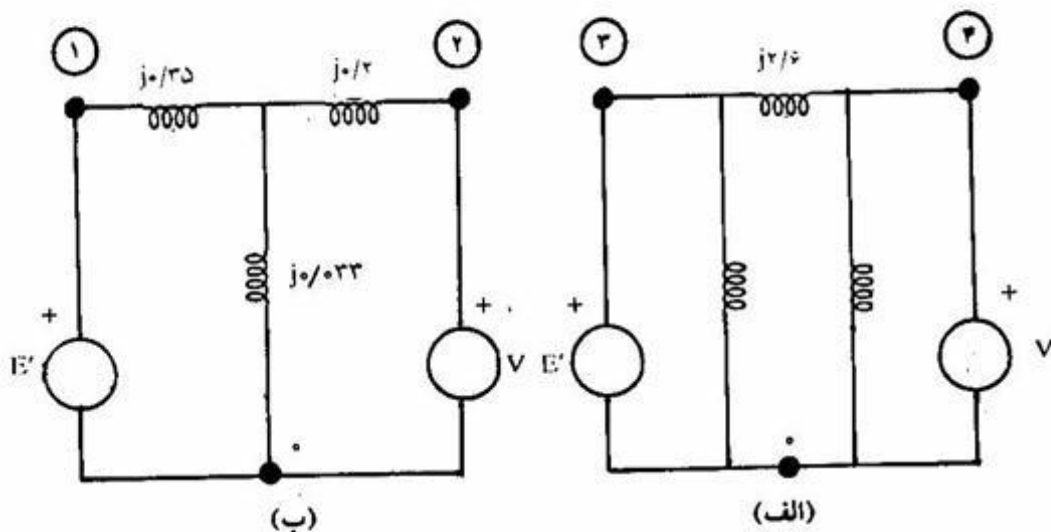
به این ترتیب معادله قدرت - زاویه با استفاده از رابطه (۹-۳۰) تا (۹-۳۲) مطابق زیر بدست می‌آید:

$$P_c = ۰$$

$$P_c = |E'| |V| |Y_{۱۲}| \text{ Sin} \delta$$

$$P_c = ۱/۰۸۴ \times ۱ \times ۰/۳۷۶ \text{ Sin} \delta = ۰/۴۰۷۶ \text{ Sin} \delta$$

معادله قدرت - زاویه را برای شکل (۹-۱۱) از روش دیگری نیز می‌توان بدست آورد. در این روش با تبدیل مثلث بین نقاط ۰ و ۳ و ۴ به اتصال ستاره و ترکیب سری راکتانس‌های بدست آمده، مدار شکل (۹-۱۲ الف) را خواهیم داشت. با تبدیل ستاره بدست آمده بین نقاط ۰ و ۱ و ۲ در شکل اخیر به اتصال مثلث، شکل (۹-۱۲ ب) حاصل خواهد شد.



شکل ۹-۱۲: تعیین راکتانس معادل بین نقاط ۱ و ۲ بر اثر اتصال کوتاه

با توجه به شکل (۹-۱۲) راکتانس بین E' و V بدست می آید:

$$X = 2/6 \text{ PU}$$

بنابراین رابطه قدرت انتقالی به شین بی نهایت عبارتست از:

$$P_e = P_{\max} \sin \delta = \frac{|E'| |V|}{X} \sin \delta = \frac{1/0.84 \times 1}{2/6} \sin \delta$$

$$P_e = 0.4076 \sin \delta$$

که با نتیجه بدست آمده از روش اول یکسان است.
حال معادله نوسان در خلال اتصال کوتاه را می نویسیم:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi f^0}{H} (P_m - P_e)$$

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi \times 50}{5} (1 - 0.4076 \sin \delta)$$

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = 31/416 (1 - 0.4076 \sin \delta)$$

۹-۶ شرط وجود پایداری گذرا

معادله نوسان را برای یک ژنراتور سنکرون که از طریق یک سیستم انتقال به یک سیستم قدرت متصل است، مطابق زیر بدست آوردیم:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\pi f^{\circ}}{H} (P_m - P_e)$$

که در آن P_e تابعی از زاویه قدرت δ می‌باشد. روش تعیین معادله قدرت - زاویه $P_e(\delta)$ را در بخش (۹-۵) مطالعه کردیم. طرفین رابطه اخیر را در $\gamma \frac{d\delta}{dt}$ ضرب می‌کنیم:

$$\gamma \frac{d\delta}{dt} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\gamma \pi f^{\circ}}{H} (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt}$$

با انتگرال‌گیری از معادله فوق خواهیم داشت:

$$\left(\frac{d\delta}{dt}\right)^{\gamma} = \frac{\gamma \pi f^{\circ}}{H} \int_{\delta_0}^{\delta_{\max}} (P_m - P_e) d\delta$$

و یا:

$$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{\frac{\gamma \pi f^{\circ}}{H} \int_{\delta_0}^{\delta_{\max}} (P_m - P_e) d\delta} \quad (9-33)$$

در این رابطه δ زاویه قدرت قبل از اختلال و δ_{\max} حداکثر زاویه قدرت در نوسان δ می‌باشد. قبل از اختلال $\frac{d\delta}{dt} = 0$ بوده است. بعد از اختلال و نوسان δ ، هنگامی که مجدداً $\frac{d\delta}{dt}$ برابر صفر شود حالت پایدار جدید بدست می‌آید. بنابراین شرط وجود پایداری گذرا با توجه به معادله (۹-۳۳) این است که:

$$\frac{d\delta}{dt} = 0$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{\max}} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (9-34)$$

و این بدان معنی است که سطح زیر منحنی $(P_m - P_c)$ در فاصله نوسانات بین δ و δ_{max} برابر صفر گردد.

۹-۷ معیار سطوح برابر (۱)

سیستم قدرت شکل (۹-۱۳) را در نظر بگیرید که در آن ژنراتور سنکرون از طریق راکتانس X_c به شین بی نهایت متصل شده است. مدل ژنراتور سنکرون با راکتانس زیرگذرا (X'_d) و ولتاژ داخلی گذرا E' نشان داده شده است. قدرت الکتریکی انتقالی از ژنراتور برابر است با:

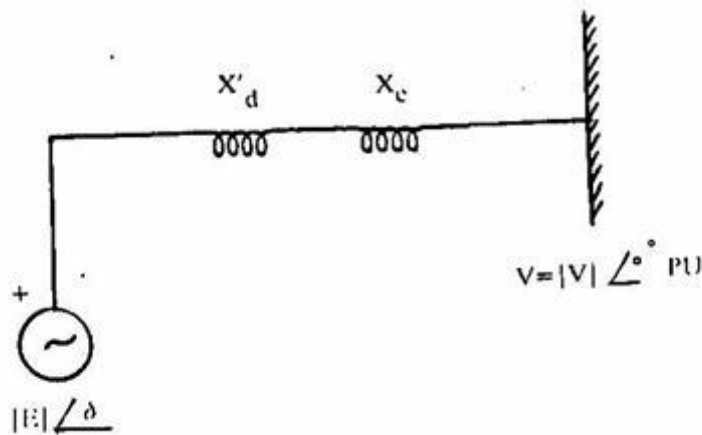
$$P_c = \frac{|E'| |V|}{X'_d + X_c} \text{Sin}\delta$$

و یا:

$$P_c = P_{max} \text{Sin}\delta$$

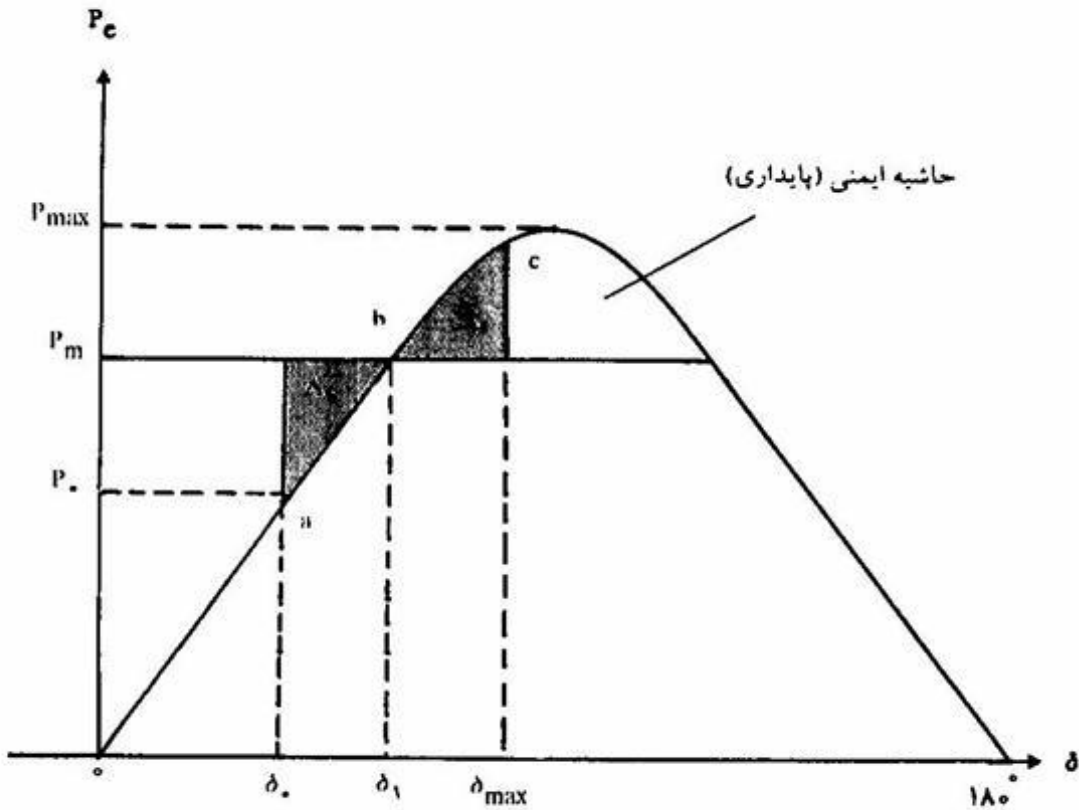
که در آن:

$$P_{max} = \frac{|E'| |V|}{X'_d + X_c}$$



شکل ۹-۱۳: اتصال ژنراتور سنکرون به شین بی نهایت برای بررسی پایداری گذرا

منحنی تغییرات $P_c(\delta)$ در شکل (۹-۱۴) رسم شده است. نقطه کار ژنراتور در شرایط عادی نقطه a (P_a و δ_a) است که در آن $P_m = P_c = P_a$ می باشد. معمولاً بر اثر اختلالاتی که در سیستم بوجود می آید قدرت الکتریکی P_c تغییر می نماید و قدرت مکانیکی P_m در فاصله بررسی پایداری گذرا ثابت فرض می شود. لیکن برای مطالعه اولیه آشنائی با معیار سطوح برابر فرض می کنیم که قدرت مکانیکی ماشین بطور ناگهانی از P_{m0} به P_m افزایش یابد.



شکل ۱۴-۹: بررسی معیار سطوح برابر در حالتی که قدرت مکانیکی بطور ناگهانی افزایش می‌یابد

در نقطه a قدرت شتاب دهنده $P_m - P_e$ باعث شتاب رتور می‌گردد. δ نیز زیادتر می‌شود تا به δ_1 برسد (نقطه b). در نقطه b ، $P_m = P_e$ است ولی سرعت رتور از سرعت سنکرون بیشتر است. δ به افزایش خود ادامه می‌دهد و از δ_1 به بعد که $P_e > P_m$ است، شتاب رتور منفی شده و باعث کاهش سرعت ماشین می‌گردد. در نقطه c سرعت مجدداً به مقدار سنکرون می‌رسد. رتور به کاهش شتاب خود ادامه می‌دهد و نقطه کار از c به طرف b برمی‌گردد که در این فاصله سرعت رو به کاهش رفته و در نقطه b سرعت از مقدار سنکرون کمتر خواهد بود. با ادامه کاهش δ از نقطه b به طرف a ، شتاب مجدداً مثبت شده و در نقطه a سرعت مجدداً به مقدار سنکرون می‌رسد. به این ترتیب یک سیکل نوسان خاتمه یافته است. نوسانات حول نقطه b ادامه می‌یابد تا بالاخره در نقطه b به ازاء δ_1 و P_m نقطه تعادل جدید بدست می‌آید.

با توجه به معادله (۳۴-۹) شرط پایداری گذرا این است که :

$$\int_{\delta_2}^{\delta_{max}} (P_m - P_c) d\delta = \bullet$$

انتگرال فوق الذکر را از روی شکل (۹-۱۴) می توان به دو قسمت تبدیل نمود:

$$\int_{\delta_2}^{\delta_1} (P_m - P_c) d\delta + \int_{\delta_1}^{\delta_{max}} (P_m - P_c) d\delta = \bullet$$

و یا:

$$\int_{\delta_2}^{\delta_1} (P_m - P_c) d\delta = \int_{\delta_1}^{\delta_{max}} (P_c - P_m) d\delta \quad (9-35)$$

سمت چپ این رابطه، سطح محصور بین P_m و P_c در فاصله δ_2 تا δ_1 است که چون در این فاصله $P_m - P_c > 0$ است آنرا سطح شتاب دهنده^(۱) می نامیم و در آن از δ_2 به طرف δ_1 سرعت ماشین رو به افزایش می رود و در δ_1 به حداکثر می رسد. بنابراین:

$$A_1 = \int_{\delta_2}^{\delta_1} (P_m - P_c) d\delta$$

از δ_1 تا δ_{max} ، سطح محصور بین P_m و P_c (انتگرال سمت راست معادله (۹-۳۵)) را سطح گیرنده شتاب^(۲) (سطح کند کننده) رتور می نامیم که در آن از δ_1 تا δ_{max} سرعت رو به کاهش می رود و در δ_{max} سرعت به مقدار سنکرون می رسد. نوسانات در اطراف نقطه h (زاویه قدرت δ_1) ادامه می یابد تا در این نقطه ماشین به حالت پایدار می رسد. سطح کند کننده A_2 برابر است با:

$$A_2 = \int_{\delta_1}^{\delta_{max}} (P_c - P_m) d\delta$$

1- Accelerating Area

2- Decelerating Area

بنابراین شرط حصول پایداری گذرا این است که :

$$A_1 = A_2$$

معیار سطوح برابر روشی را بدست می دهد که توسط آن در یک سیستم تک ماشینی بدون حل معادله دیفرانسیل (معادله نوسان) می توان پایداری گذرا را مطالعه نمود. با توجه به تساوی سطوح A_1 و A_2 برای حصول پایداری ، داریم:

$$A_1 = A_2$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_{max} \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_1}^{\delta_{max}} (P_{max} \sin \delta - P_m) d\delta$$

در این رابطه δ_0 و δ_1 معلوم هستند زیرا:

$$P_c = P_{max} \sin \delta$$

$$\delta_0 = \sin^{-1} \frac{P_c}{P_{max}}$$

$$\delta_1 = \sin^{-1} \frac{P_m}{P_{max}}$$

بنابراین تنها مجهول یعنی δ_{max} بدست خواهد آمد.

اگر در شکل (۹-۱۵) سطح محصور بین P_c و P_m در فاصله δ_1 تا δ_M را با A_{2max} نشان

دهیم، داریم:

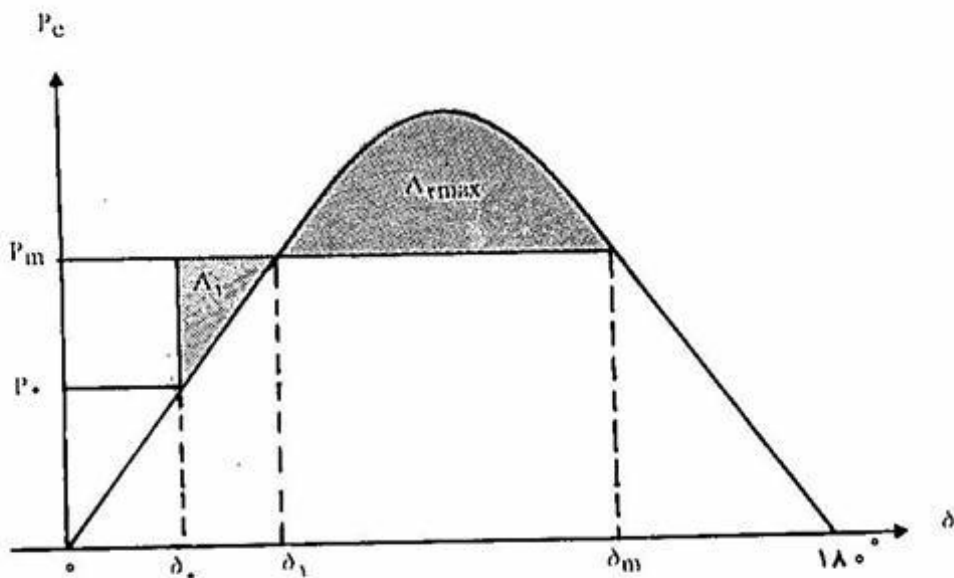
$$\delta_M = 180^\circ - \sin^{-1} \frac{P_m}{P_{max}}$$

$$\delta_1 = \sin^{-1} \frac{P_m}{P_{max}}$$

$$A_{2max} = \int_{\delta_1}^{\delta_M} (P_c - P_m) d\delta \quad (9-36)$$

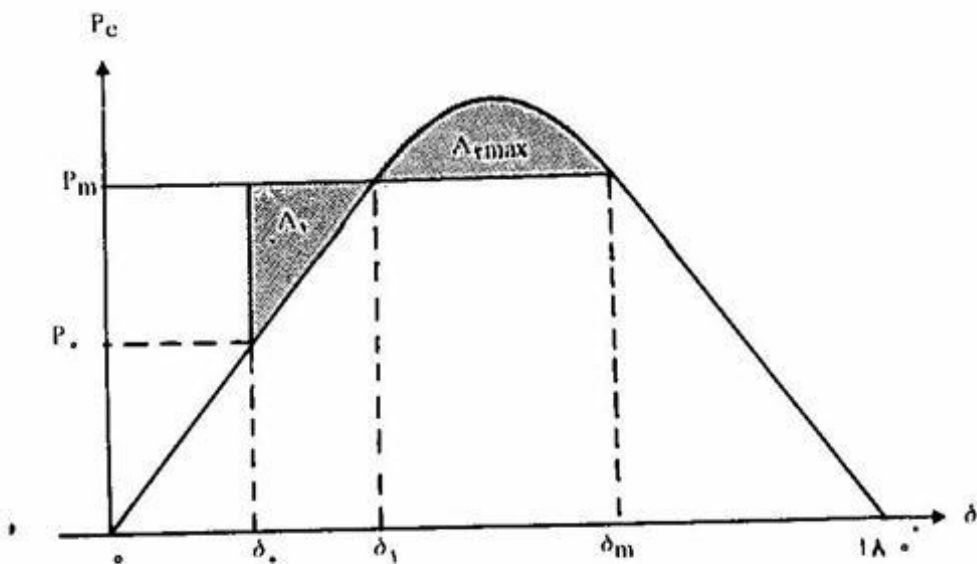
شرط وجود پایداری گذرا این است که :

$$A_{2max} \geq A_1 \quad (9-37)$$



شکل ۹-۱۵: افزایش ناگهانی قدرت در حالتی که $A_{rmax} \geq A_1$

یعنی هرچه حاشیه ایمنی در A_{rmax} بیشتر باشد احتمال پایداری گذرا بیشتر است. اگر تغییرات قدرت مکانیکی خیلی زیاد باشد ممکن است سیستم پایداری خود را از دست بدهد. شکل (۹-۱۶) چنین وضعیتی را نشان می‌دهد. همانطوریکه ملاحظه می‌شود در این شکل $A_{rmax} < A_1$ بوده و سیستم ناپایدار خواهد شد.

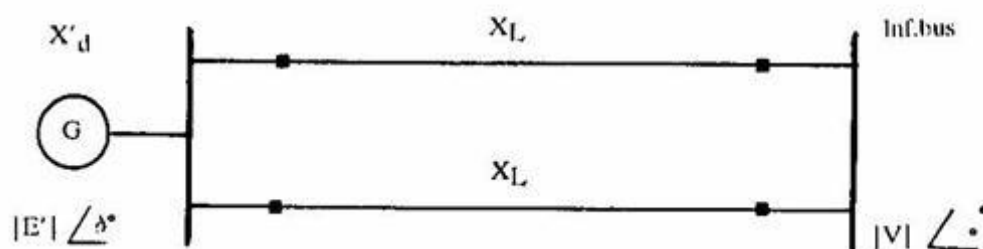


شکل ۹-۱۶: افزایش ناگهانی قدرت مکانیکی در حالتی که $A_{rmax} < A_1$

۸-۹ کاربردهای معیار سطوح برابر

بررسی پایداری گذرای سیستم‌های قدرت بزرگ فقط با استفاده از کامپیوترهای دیجیتال امکان‌پذیر است. لیکن از آنجائیکه معیار سطوح برابر در بررسی پایداری سیستم‌های قدرت دو ماشینی و یا سیستم تک ماشینی متصله به شین بی‌نهایت بسیار مفید است، کاربردهای بیشتری از این روش را مورد مطالعه قرار می‌دهیم.

اغلب اختلالات منجر به کاهش قدرت الکتریکی P_e می‌گردند. برای مثال یکی از انواع اختلالات را که باعث کاهش قدرت الکتریکی انتقالی می‌شود مورد بررسی قرار می‌دهیم. سیستم قدرت شکل (۹-۱۷) را در نظر بگیرید. می‌خواهیم پایداری گذرای این سیستم را بر اثر خروج یکی از خطوط انتقال مطالعه کنیم. قبل از خروج خط مذکور قدرت $P_m = P_e$ به شین بی‌نهایت منتقل می‌شود.



شکل ۹-۱۷: اتصال ژنراتور به شین بی‌نهایت از طریق دو خط موازی

معادله قدرت الکتریکی انتقالی، قبل از باز شدن خط انتقال عبارتست از:

$$P_{e_1} = \frac{|E'| |V|}{X'_d + \frac{1}{\gamma} X_L} \sin \delta = P_{\max \gamma} \sin \delta$$

معادله قدرت انتقالی برحسب زاویه δ ، بعد از باز شدن خط انتقال نیز به ترتیب زیر تعیین می‌شود:

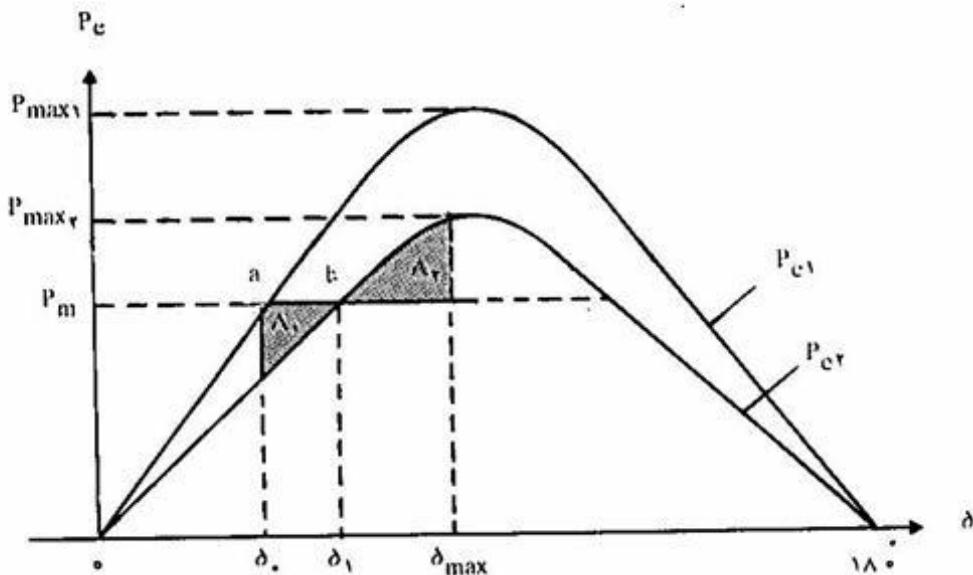
$$P_{e_2} = \frac{|E'| |V|}{X'_d + X_L} \sin \delta = P_{\max \gamma} \sin \delta$$

شکل (۹-۱۸) منحنی‌های P_{e1} و P_{e2} را برحسب δ نشان می‌دهد. نقطه کار سیستم قبل از باز شدن خط انتقال، نقطه a بوده‌است. بر اثر باز شدن خط، زاویه δ تا حدی افزایش می‌یابد که سطح A_1 را معادل A_2 ایجاد کند و پس از مستهلک شدن نوسانات δ حالت تعادل جدید در نقطه b (δ_1 و P_m) بدست خواهد آمد. یعنی ژنراتور مجدداً همان قدرت P_m را به شین بی‌نهایت منتقل می‌کند، ولی این انتقال فقط از طریق یک خط انتقال و در زاویه قدرت بزرگتری (δ_1) انجام می‌شود.

زوایای δ_1 و δ_0 عبارتند از:

$$\delta_0 = \sin^{-1} \frac{P_m}{P_{max1}}$$

$$\delta_1 = \sin^{-1} \frac{P_m}{P_{max2}}$$



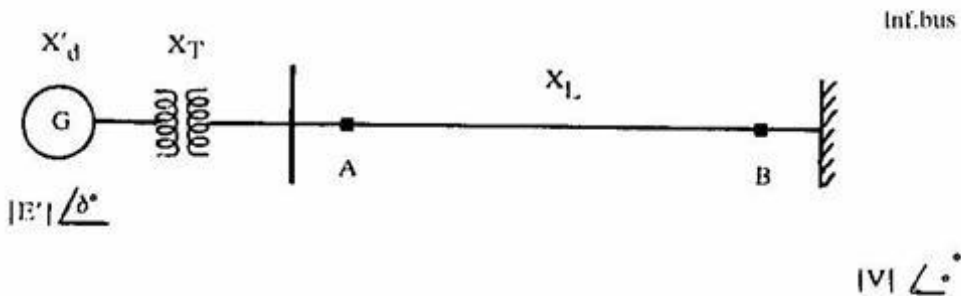
شکل ۹-۱۸: بررسی معیار سطوح برابر در حالت خروج یکی از خطوط موازی شکل (۹-۱۷)

برای تعیین حداکثر زاویه نوسان δ_{max} از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$A_1 = A_2$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_{max1} \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_1}^{\delta_{max}} (P_{max2} - P_m) d\delta$$

در بعضی از اختلالات سیستم، ممکن است قدرت انتقالی به شبکه به صفر برسد. شکل (۹-۱۹) را در نظر بگیرید. چنانچه خط انتقال باز شود، و یا بر اثر اتصال کوتاه در خط کلیدهای A و B اتصال کوتاه را برطرف نمایند، قدرت انتقالی به شین بی نهایت صفر خواهد شد. اگر در $\delta = \delta_c$ مجدداً خط انتقال در مدار قرار گیرد (مثلاً کلیدهای A و B از نوع وصل مجدد بوده و در δ_c وصل شوند)، با بررسی سطوح برابر A_1 و A_2 (طبق شکل (۹-۲۰)) شرایط پایداری سیستم را مطالعه می‌کنیم.



شکل ۹-۱۹: ژنراتور متصل به شین بی نهایت

قبل از اختلال، معادله قدرت انتقالی به شین بی نهایت عبارتست از:

$$P_c = \frac{|E'| |V|}{X'_d + X_T + X_L} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta$$

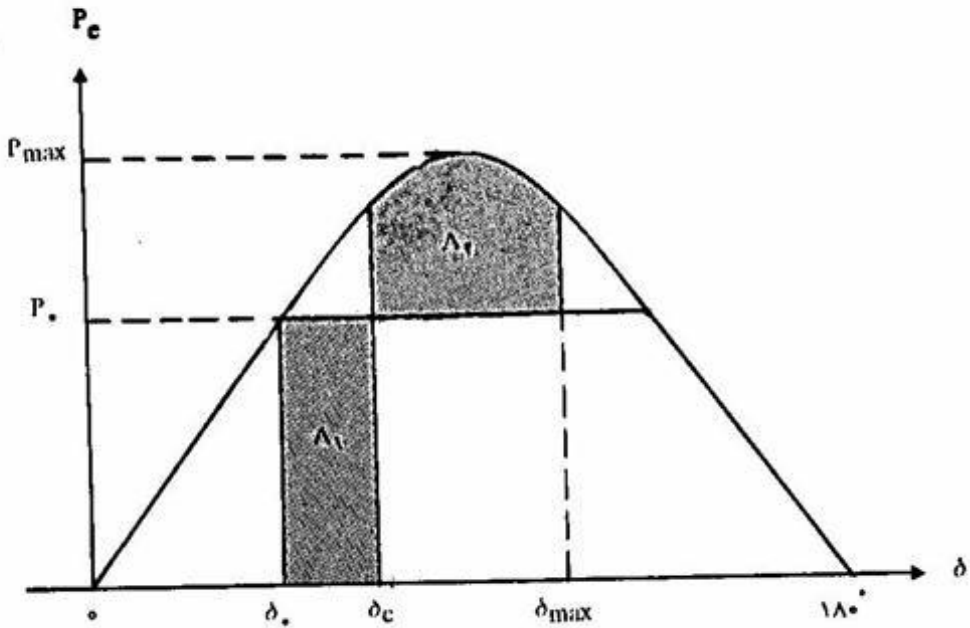
که در آن:

$$P_{\max} = \frac{|E'| |V|}{X'_d + X_T + X_L}$$

برای تعیین δ_{\max} داریم:

$$A_1 = A_2$$

$$P_c(\delta_c - \delta_s) = \int_{\delta_s}^{\delta_{\max}} (P_{\max} \sin \delta - P_c) d\delta$$



شکل ۹-۲۰: معیار سطوح برابر در حالت قطع ناگهانی قدرت انتقالی

حداکثر زاویه قدرتی که به ازاء آن باید خطا برطرف شود تا سیستم پایداری خود را از دست ندهد به زاویه بحرانی رفع خطا^(۱) (δ_{cr}) موسوم است. برای تعیین این زاویه، طبق شکل (۹-۲۱) باید دو سطح A_1 و A_{Tmax} را مساوی هم قرار دهیم.

$$A_1 = A_{Tmax}$$

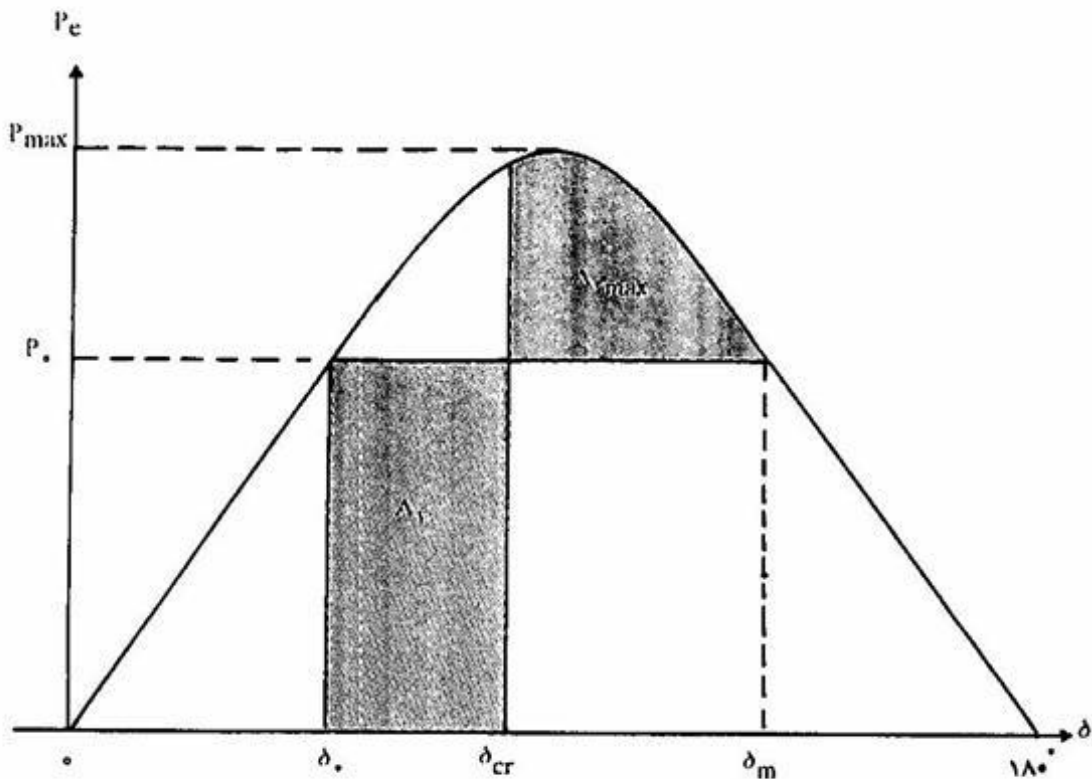
$$P_s(\delta_{cr} - \delta_s) = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_M} (P_{max} \sin \delta - P_s) d\delta$$

که در آن:

$$\delta_s = \sin^{-1} \frac{P_s}{P_{max}}$$

$$\delta_M = \pi - \delta_s$$

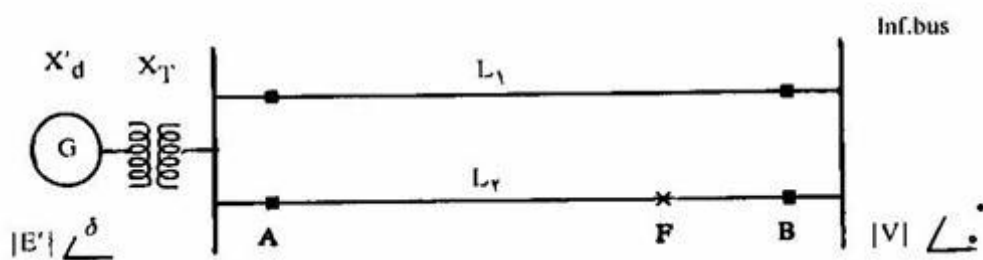
1- Critical Clearing Angle



شکل ۹-۲۱: معیار سطوح برابر و تعیین زاویه بحرانی رفع خطا ($A_1 = A_{2max}$)

مهمترین اختلالاتی که می‌توانند سیستم‌های قدرت را ناپایدار کنند، انواع اتصال کوتاه‌ها هستند. شکل (۹-۲۲) یک سیستم قدرت را نشان می‌دهد که در آن قدرت تولیدی ژنراتور سنکرون از طریق دو خط انتقال به شین بی‌نهایت منتقل می‌شود. اگر اتصال کوتاه سه‌فاز (متقارن) در ابتدا و یا انتهای خط بوقوع پیوندد، قدرت انتقالی به صفر خواهد رسید. ولی اگر این اتصال کوتاه در نقطه‌ای مانند F رخ دهد، امپدانس‌های موازی بین شین‌ها و نقطه صفر ظاهر می‌شوند و لذا قدرت انتقالی صفر نبوده و در خلال اتصال کوتاه قدرت کمی منتقل می‌گردد. بر اثر انواع اتصال کوتاه‌های نامتقارن نیز در نقاط مختلف سیستم (حتی ابتدا و انتهای خط انتقال) قدرت محدودی منتقل می‌شود.

بدترین نوع اتصال کوتاه از دید پایداری گذرا اتصال کوتاه سه‌فاز (متقارن) می‌باشد. پس از آن به ترتیب اتصال کوتاه دوفاز به زمین، دوفاز بیکدیگر و یک فاز به زمین بیشترین تأثیر را در احتمال ناپایداری دارند.



شکل ۹-۲۲: دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت برای مطالعه پایداری گذرا بر اثر وقوع اتصال کوتاه

معادله قدرت انتقالی برحسب زاویه قدرت δ قبل از وقوع اتصال کوتاه بصورت زیر نوشته می شود:

$$P_{e1} = P_{max1} \text{Sin}\delta \quad (9-38)$$

قدرت انتقالی در حین اتصال کوتاه عبارتست از:

$$P_{e1} = P_{max1} \text{Sin}\delta \quad (9-39)$$

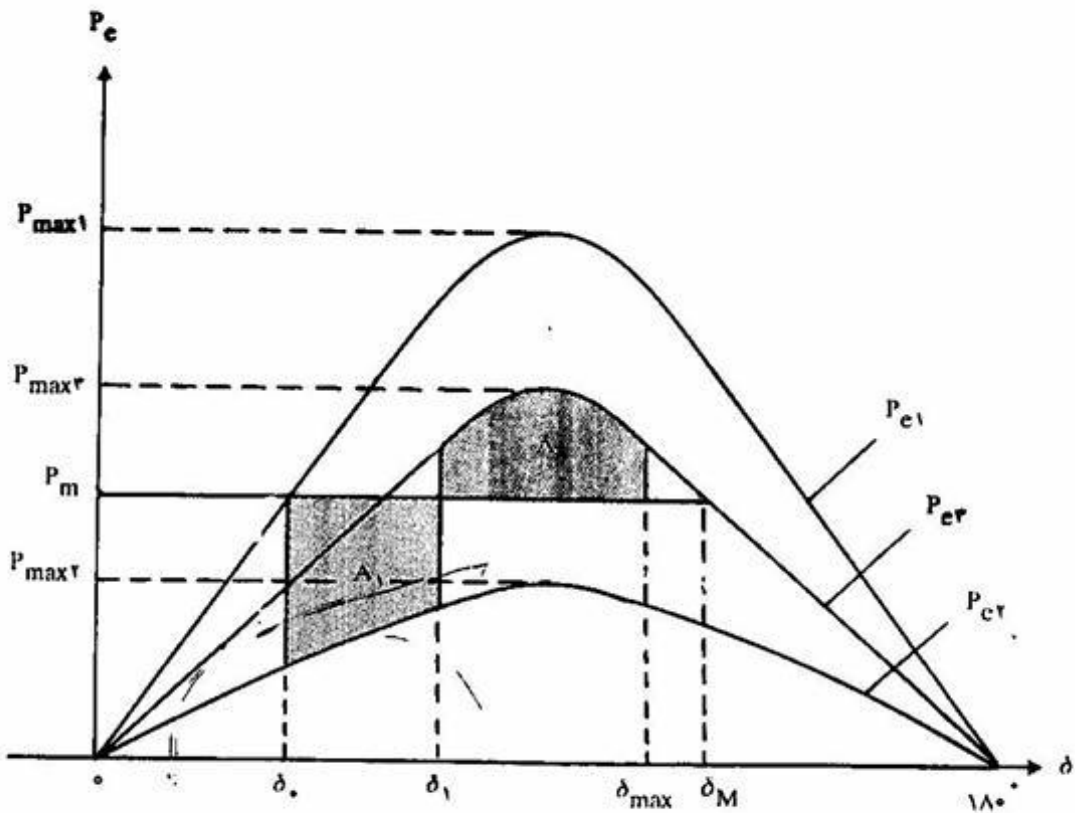
که در آن $P_{max1} < P_{maxr}$ می باشد. چنانچه اتصال کوتاه با عمل به موقع کلیدهای قدرت برطرف شود، قدرت انتقالی بیشتر شده و معادله آن بترتیب زیر خواهد بود:

$$P_{er} = P_{maxr} \text{Sin}\delta \quad (9-40)$$

در این رابطه $P_{max1} < P_{maxr} \leq P_{max1}$ است. شکل (۹-۲۳) مشخصه های قدرت-زاویه را برای سه حالت فوق نشان می دهد.

قبل از اتصال کوتاه، قدرت انتقالی $P_m = P_e$ بوده و زاویه قدرت در این نقطه کار δ_0 می باشد که مقدار آن برابر است با:

$$\delta_0 = \text{Sin}^{-1} \frac{P_m}{P_{max1}}$$



شکل ۲۳-۹: معیار سطوح برابر برای بررسی پایداری گذرا بر اثر وقوع اتصال کوتاه

پس از وقوع اتصال کوتاه بلافاصله نقطه کار از منحنی P_{e1} به منحنی P_{e2} منتقل می‌گردد. در اینجا δ شروع به افزایش می‌کند. چنانچه در زاویه قدرت δ_1 اتصال کوتاه برطرف شود معادله قدرت انتقالی از P_{e1} به P_{e2} تبدیل می‌شود. برای تعیین حداکثر زاویه نوسان δ_{max} دو سطح شتاب دهنده (A_1) و گیرنده شتاب (A_2) را مساوی هم قرار می‌دهیم:

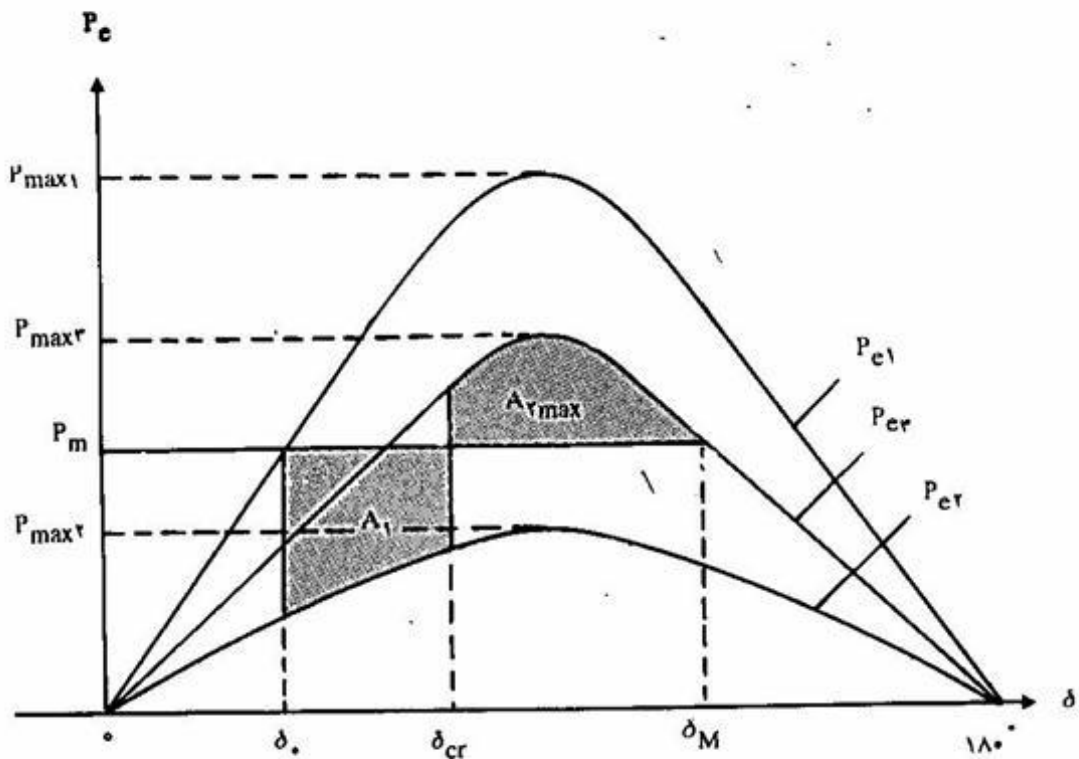
$$A_1 = A_2$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_{max1} \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_1}^{\delta_{max}} (P_{max2} \sin \delta - P_m) d\delta$$

چون δ_0 و δ_1 معلوم هستند، δ_{max} از رابطه اخیر بدست می‌آید.

بطور کلی شرط وجود پایداری گذرا با توجه به شکل (۲۴-۹) این است که:

۴۳۷



شکل ۹-۲۴: معیار سطوح برابر و تعیین زاویه بحرانی رفع اتصال کوتاه ($A_1 = A_{rmax}$)

$$A_1 = A_{rmax}$$

$$\int_{\delta_*}^{\delta_{cr}} (P_m - P_{maxr} \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_M} (P_{maxr} \sin \delta - P_m) d\delta \quad (9-41)$$

که در آن δ_M از معادله زیر معلوم است:

$$\delta_M = \pi - \sin^{-1} \frac{P_m}{P_{maxr}}$$

پس از انتگرال‌گیری از معادله (۹-۴۱)، جایگزینی δ_M و حل معادله نهائی بر حسب $\cos \delta_{cr}$ خواهیم داشت:

$$\cos \delta_{cr} = \frac{P_m(\delta_M - \delta_*) + P_{maxr} \cos \delta_M - P_{maxr} \cos \delta_*}{P_{maxr} - P_{maxt}} \quad (9-42)$$

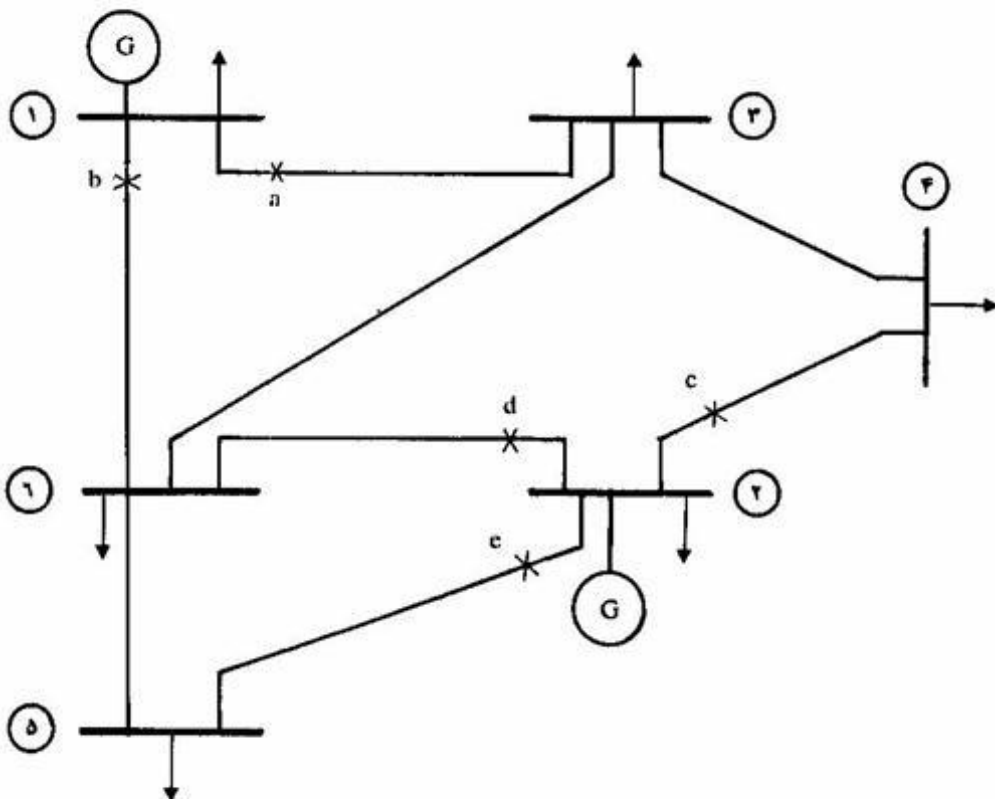
۹-۹ بررسی پایداری سیستم‌های قدرت بزرگ

معیار سطوح برابر نمی‌تواند در بررسی پایداری گذرای سیستم‌های قدرت واقعی که در آن‌ها تعداد شین‌ها و ژنراتورها زیاد است مورد استفاده قرار گیرد. برای سیستم قدرتی با n شین که دارای m ژنراتور است، ابتدا باید معادلات نوسان را برای m ماشین نوشت و سپس از روش‌های آنالیز عددی و با استفاده از کامپیوترهای دیجیتال این معادلات را حل کرد. اگر شین‌های دارای ژنراتور از ۱ تا m نام‌گذاری شوند، معادلات نوسان که باید حل شوند عبارتند از:

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{\pi f^*}{H_i} (P_{mi} - P_{ci}) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (9-23)$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \gamma \pi f^* \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (9-24)$$

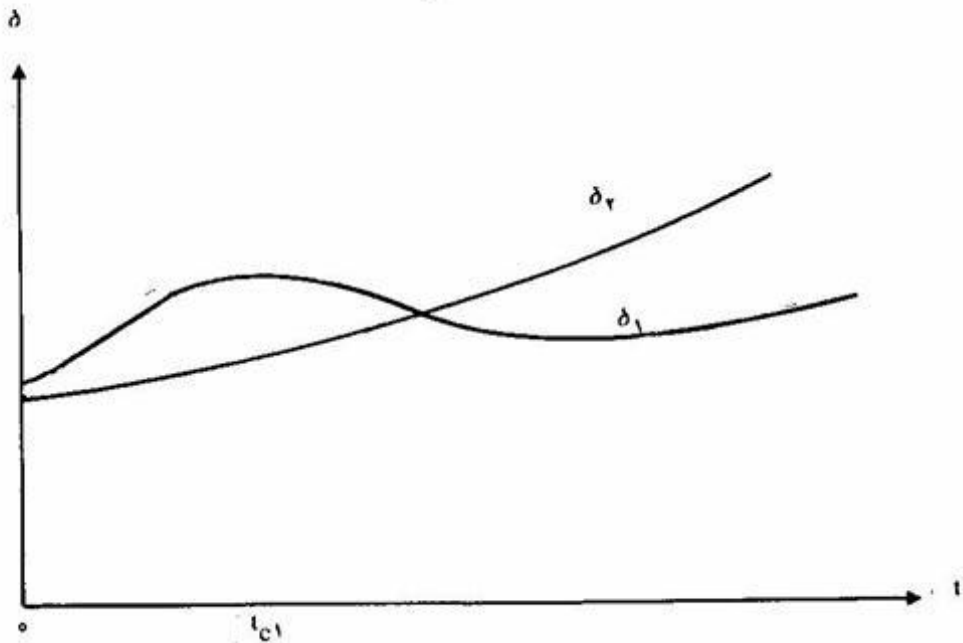
روش کار به این ترتیب خواهد بود که ابتدا اتصال کوتاه متقارن را در نزدیکترین نقطه به ژنراتور، نقطه a ، مطابق شکل (۹-۲۵) در نظر می‌گیریم. این اتصال کوتاه در $t=0$ برطرف می‌شود (برای عمل کلیدهای قدرت).



شکل ۹-۲۵: دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت برای مطالعه پایداری گذرا

حال $2m$ معادله دیفرانسیل درجه اول (معادلات ۹-۲۳ و ۹-۲۴) را به ازاء این اتصال کوتاه در $t=0$ و رفع آن در $t=t_{c1}$ با استفاده از کامپیوتر حل می‌کنیم. در اینجا تعداد معادلات ۴ می‌باشد. خروجی کامپیوتر تغییرات ω_1 و ω_2 و همچنین δ_1 و δ_2 بر حسب زمان خواهند بود. در اینجا تغییرات δ_i اهمیت بیشتری داشته و معمولاً پایداری گذرای سیستم‌ها را با استفاده از تغییرات δ_1 و δ_2 و ... مورد بحث قرار می‌دهند.

فرض کنیم به ازاء اتصال کوتاه در نقطه a و حل معادلات نوسان مربوطه، تغییرات نشان داده شده در شکل (۹-۲۶) را برای δ_1 و δ_2 (زاویه قدرت ژنراتورهای ۱ و ۲) داشته باشیم. در اینصورت سیستم قدرت به ازاء این اتصال کوتاه و رفع آن در t_{c1} پایدار تلقی می‌شود.

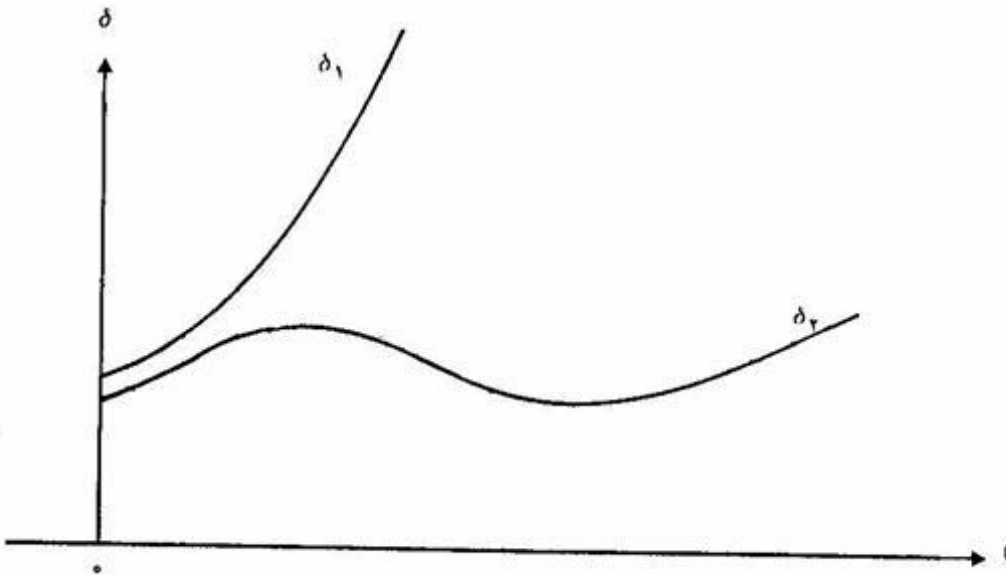


شکل ۹-۲۶: تغییرات زاویه قدرت ژنراتورها بر اثر اتصال کوتاه در حالتی که سیستم پایدار می‌ماند

هرچه زمان برطرف کردن خطا بزرگتر انتخاب شود احتمال ناپایداری سیستم بیشتر می‌شود و اگر زمان رفع خطا از زمان بحرانی رفع اتصال کوتاه بیشتر باشد، سیستم ناپایدار خواهد شد. تعیین زمان بحرانی رفع اتصال کوتاه با انتخاب مقادیر مختلف t_{c1} و انجام محاسبات تکراری امکان‌پذیر است.

بهین ترتیب نقاط دیگری را که اهمیت آنها از لحاظ پایداری گذرا مانند نقطه a می‌باشد در نظر می‌گیریم و برای هر یک از آنها $2m$ معادله نوسان را بر اثر اتصال کوتاه نامتقارن آن نقطه در $t=0$ و رفع آن در لحظه‌ای مانند t_{c1} حل کرده و تغییرات δ_1 و δ_2 را بدست می‌آوریم. اگر نتایج

تقریباً مشابه شکل (۹-۲۶) باشد که در آنها δ_1 و δ_2 تغییرات نوسانی داشته و مقدار آنها در فاصله زمانی کوتاهی بشدت بالا نرود، در اینصورت سیستم پایدار است. این نقاط مهم در شکل (۹-۲۵) با c, b, c, d و نشان داده شده‌اند. بنابراین برای سیستم قدرت مذکور باید ۵ دسته منحنی مجزا نظیر شکل (۹-۲۶) بدست آید. اگر حتی در یکی از دسته منحنی‌ها، یکی از توابع δ_1 و δ_2 بشدت بالا رود، مطابق شکل (۹-۲۷)، در اینصورت سیستم ناپایدار است.



شکل ۹-۲۷: تغییرات زاویه ژنراتورها بر اثر اتصال کوتاه در حالتی که سیستم ناپایدار است

بنابراین یکی از عوامل مهم پایداری سیستم‌ها، انتخاب مناسب زمان قطع کلیدهای قدرت می‌باشد.

مثال ۹-۵: در سیستم قدرت شکل (۹-۱۹) زاویه بحرانی رفع خطا را بر اثر اتصال کوتاه سه فاز در ابتدای خط انتقال بدست آورید. در اینجا مقصود از زاویه بحرانی رفع خطا، زاویه قدرتی است که به ازاء آن کلیدهای وصل مجدد A و B مجدداً وصل شده و سیستم را به حال عادی برمی‌گردانند. قبل از اتصال کوتاه قدرت $P_{max} = 1$ PU به شین بی‌نهایت منتقل می‌شود و ولتاژ ترمینالهای ژنراتور و شین بی‌نهایت نیز 1 PU می‌باشند. راکتانس عناصر سیستم عبارتند از:

$$X'_{d1} = 0.2 \text{ PU}$$

$$X_{T1} = 0.1 \text{ PU}$$

$$X_{L1} = 0.2 \text{ PU}$$

حل: راکتانس سری بین ترمینالهای ژنراتور و شین بی نهایت برابر است با:

$$X = 0.1 + 0.2 = 0.3 \text{ PU}$$

با داشتن قدرت انتقالی $P_e = 1 \text{ PU}$ ، زاویه ولتاژ ترمینالهای ژنراتور محاسبه می‌شود:

$$P_e = \frac{|V_1| |V|}{X} \sin \delta$$

$$1 = \frac{1 \times 1}{0.3} \sin \delta$$

$$\delta = 17/46^\circ$$

بنابراین:

$$V_1 = 1 \angle 17/46^\circ = 0.954 + j0.3 \text{ PU}$$

حال جریان ژنراتور و متعاقب آن ولتاژ داخلی گذرا را محاسبه می‌کنیم:

$$I = \frac{V_1 - V}{jX} = \frac{1 \angle 17/46^\circ - 1 \angle 0^\circ}{j0.3} = 1.012 \angle 8/73^\circ \text{ PU}$$

$$= 1 + j0.1535 \text{ PU}$$

$$E' = V_1 + jIX' = 0.954 + j0.3 + j0.2(1 + j0.1535)$$

$$E' = 0.923 + j0.5 = 1.05 \angle 28/44^\circ \text{ PU}$$

$$\delta_e = 28/44^\circ = 0.496 \text{ rad}$$

معادله قدرت انتقالی برحسب زاویه قدرت بترتیب زیر بدست می‌آید:

$$X = 0.2 + 0.1 + 0.2 = 0.5 \text{ PU}$$

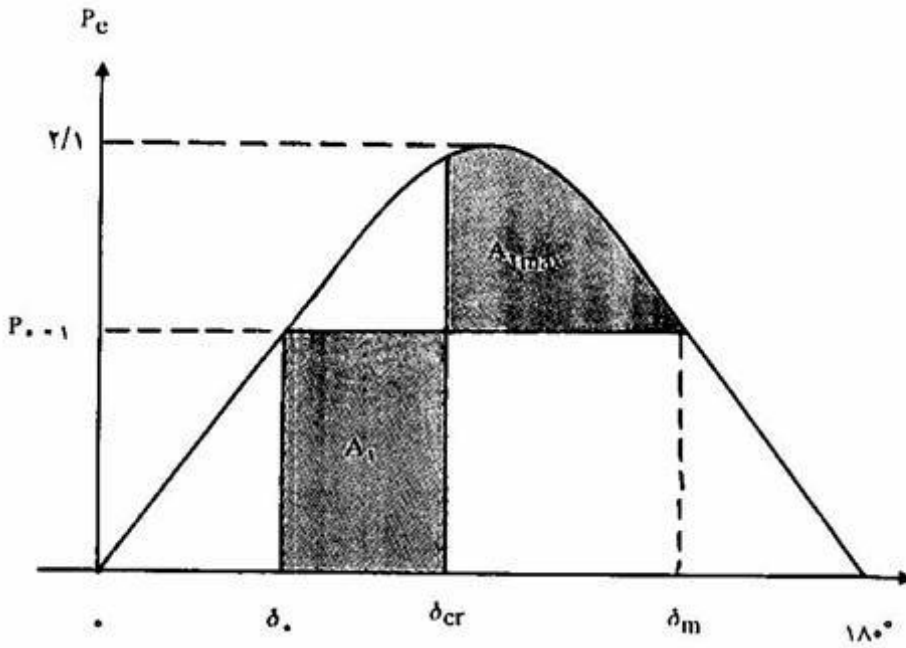
$$P_e = \frac{|E'| |V|}{X} \sin \delta = \frac{1.05 \times 1}{0.5} \sin \delta$$

$$P_e = 2.1 \sin \delta \text{ PU}$$

که در اینجا δ زاویه ولتاژ داخلی ژنراتور نسبت به شین بی نهایت است.

برای تعیین زاویه بحرانی رفع خطا، شکل (۹-۲۸) را در نظر بگیرید. زاویه δ_M با توجه به این شکل برابر است با:

$$\delta_M = 180^\circ - \delta_c = 180^\circ - 28/44^\circ = 151/56^\circ = 2/645 \text{ rad}$$



شکل ۹-۲۸: مربوط به مثال (۹-۵) ($A_1 = A_{2max}$)

سطوح A_1 و A_{2max} را برای دست یابی به δ_{cr} مساوی هم قرار می دهیم:

$$A_1 = A_{2max}$$

$$P_c(\delta_{cr} - \delta_c) = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_M} (P_{max} \sin \delta - P_c) d\delta$$

با حل این انتگرال بر حسب $\cos \delta_{cr}$ داریم:

$$\cos \delta_{cr} = \frac{P_c}{P_{max}} (\delta_M - \delta_c) + \cos \delta_M$$

با جایگزین کردن مقادیر عددی خواهیم داشت:

$$\cos \delta_{cr} = \frac{1}{2/1} (2/645 - 0/496) + \cos 151/56^\circ = 0/144$$

$$\delta_{cr} = 81/72^\circ$$

مثال ۶-۹: در سیستم قدرت شکل (۹-۲۲) اگر خط انتقال L_4 باز شود، بررسی کنید که آیا سیستم پایدار می ماند یا خیر، و اگر پایدار ماند زاویه قدرت δ حداکثر تا چه مقدار نوسان می کند. برای شکل مذکور داریم:

$$|E'| = 1/0.5 \text{ PU}$$

$$|V| = 1 \text{ PU}$$

$$X'_d = 0/2 \text{ PU}$$

$$X_T = 0/1 \text{ PU}$$

$$X_{L1} = X_{L2} = 0/4 \text{ PU}$$

$$P_s = P_m = 1 \text{ PU}$$

حل: راکتانس بین ولتاژ داخلی گذرای ژنراتور و شین بی نهایت برابر است با:

$$X = 0/2 + 0/1 + 0/2 = 0/5 \text{ PU}$$

بنابراین:

$$P_{e1} = \frac{|E'| |V|}{X} \sin \delta = \frac{1/0.5 \times 1}{0/5} \sin \delta$$

$$P_{e1} = 2/1 \sin \delta$$

که با قراردادن $P_s = 1 \text{ PU}$ در آن، زاویه قدرت δ بدست می آید:

$$1 = 2/1 \sin \delta$$

$$\delta_s = 28/44^\circ = 0/496 \text{ rad}$$

پس از بازشدن خط L_2 ، قدرت فقط از خط L_1 منتقل می‌شود. در این حالت، معادله قدرت انتقالی را بترتیب زیر بدست می‌آوریم:

$$X = 0.2 + 0.1 + 0.4 = 0.7 \text{ PU}$$

$$P_{e_1} = \frac{|E'| |V|}{X} \sin \delta = \frac{1.05 \times 1}{0.7} \sin \delta$$

$$P_{e_1} = 1.5 \sin \delta$$

تغییرات P_{e_1} و P_{e_2} برحسب زاویه قدرت δ ، در شکل (۹-۲۹) رسم شده است. δ_1 ، محل تلاقی منحنی P_{e_1} با $P_m = 1 \text{ PU}$ ، را محاسبه می‌کنیم:

$$1 = 1.5 \sin \delta_1$$

$$\delta_1 = 41.81^\circ = 0.73 \text{ rad}$$

δ_M نیز با توجه به شکل (۹-۲۹) برابر است با:

$$\delta_M = 180^\circ - \delta_1 = 180^\circ - 41.81^\circ = 138.19^\circ = 2.42 \text{ rad}$$

شرط پایداری گذرای سیستم آن است که:

$$A_{2\max} \geq A_1$$

بنابراین مقادیر سطوح فوق‌الذکر را محاسبه می‌کنیم:

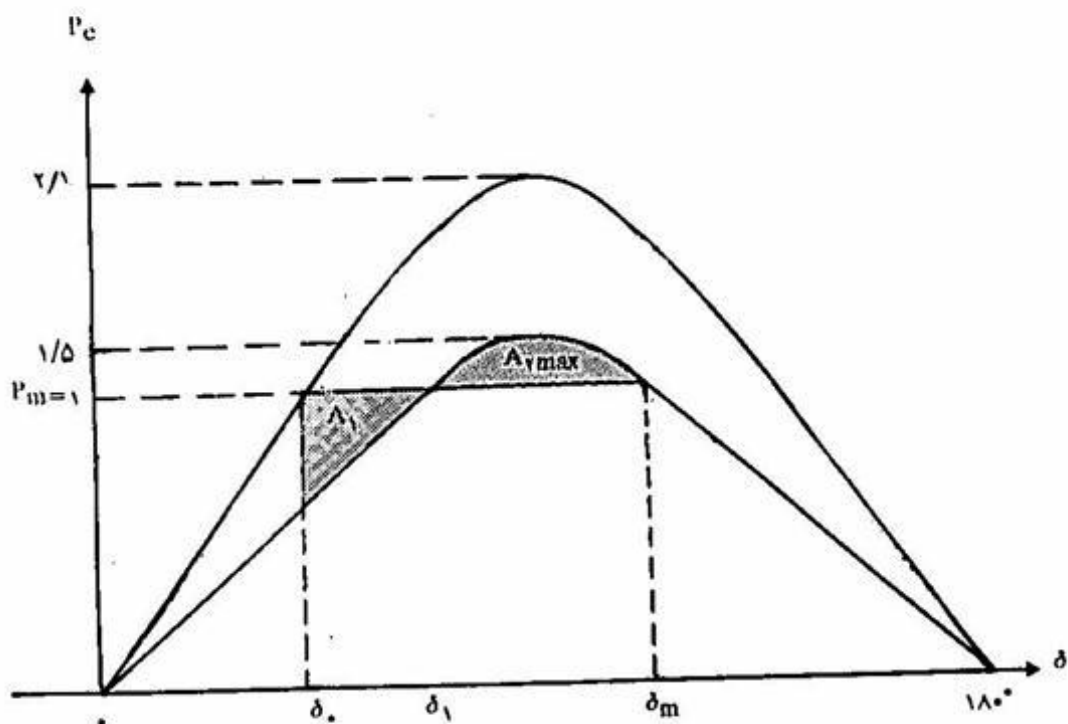
$$A_1 = \int_{28.44}^{41.81} (1 - 1.5 \sin \delta) d\delta = 0.32$$

$$A_{2\max} = \int_{41.81}^{138.19} (1.5 \sin \delta - 1) d\delta = 0.554$$

$$A_{2\max} > A_1$$

بنابراین سیستم پایدار می‌ماند. برای تعیین δ_{\max} با توجه به شکل (۹-۱۸) سطوح A_1 و A_2 را

۴۴۵



شکل ۹-۲۹: مربوط به مثال (۹-۶)

مساوی هم قرار می دهیم:

$$A_1 = A_\gamma$$

$$A_1 = 0.32$$

$$0.32 = \int_{41/81}^{\delta_{max}} (1/\delta \sin \delta - 1) d\delta$$

با انتگرال گیری از سمت راست معادله فوق، معادله غیرخطی زیر بدست می آید:

$$\cos \delta_{max} + 0.667 \delta_{max} = 1/21$$

که با روش سعی و خطا مقدار δ_{max} را محاسبه می کنیم:

$$\delta_{max} = 56^\circ$$

مثال ۷-۹: در مثال (۴-۹) زاویه بحرانی رفع اتصال کوتاه را برای حالتی که اتصال کوتاه سه فاز در نقطه F از شکل (۱۰-۹) بوقوع می‌پیوندد محاسبه کنید.

حل: معادله قدرت - زاویه را در مثال (۴-۹) در دو حالت بدست آوردیم. این معادله در شرایط کار عادی (قبل از اتصال کوتاه) عبارتست از:

$$P_{e1} = 1/971 \delta_{max} \quad \text{PU}$$

که با قرار دادن $P_{e1} = 1 \text{ PU}$ در آن، زاویه δ قبل از اتصال کوتاه بدست می‌آید:

$$1 = 1/971 \text{ Sin} \delta_*$$

$$\delta_* = 30/5^\circ$$

همچنین در خلال اتصال کوتاه معادله قدرت - زاویه مطابق زیر بدست می‌آید است:

$$P_{e2} = 0/4076 \delta_{max} \quad \text{PU}$$

هنگامی که اتصال کوتاه با عمل کلیدهای A و B برطرف می‌شود، خواهیم داشت:

$$X = 0/2 + 0/1 + 0/3 + 0/1 = 0/7 \quad \text{PU}$$

$$P_{e2} = \frac{|E'| |V|}{X} \sin \delta = \frac{1/0.84 \times 1}{0/7} \sin \delta$$

$$P_{e2} = 1/548 \sin \delta \quad \text{PU}$$

که نشان دهنده معادله قدرت - زاویه پس از رفع اتصال کوتاه است. زاویه δ_M با در نظر گرفتن شکل (۲۴-۹) برابر است با:

$$\delta_M = 18.0^\circ - \sin^{-1} \frac{P_m}{P_{max2}} = 18.0^\circ - \sin^{-1} \frac{1}{1/548}$$

$$\delta_M = 139/76^\circ = 2/439 \text{ rad}$$

با قرار دادن مقادیر عددی در معادله (۹-۲۴) خواهیم داشت:

$$\cos \delta_{cr} = \frac{1(2/439 - 0/532) + 1/548 \cos 139/76^\circ - 0/4076 \cos 30/5^\circ}{1/548 - 0/4076}$$

$$\cos \delta_{cr} = 0/328$$

$$\delta_{cr} = 70/84^\circ$$

مثال ۸-۹: در مثال (۹-۷) فرض کنید که کلیدهای نصب شده در نقاط A و B از نوع کلیدهای اتوماتیک وصل مجدد^(۱) باشند. اگر بر اثر اتصال کوتاه متقارن در نقطه F کلیدهای A و B در $\delta_1 = 50^\circ$ عمل نموده و خط انتقال را از مدار خارج نمایند. سپس در $\delta_2 = 60^\circ$ مجدداً کلیدها وصل شده و خط را وارد مدار نمایند. با فرض اینکه در این فاصله اتصال کوتاه از بین رفته باشد، حداکثر زاویه نوسان δ_{max} را محاسبه کنید.

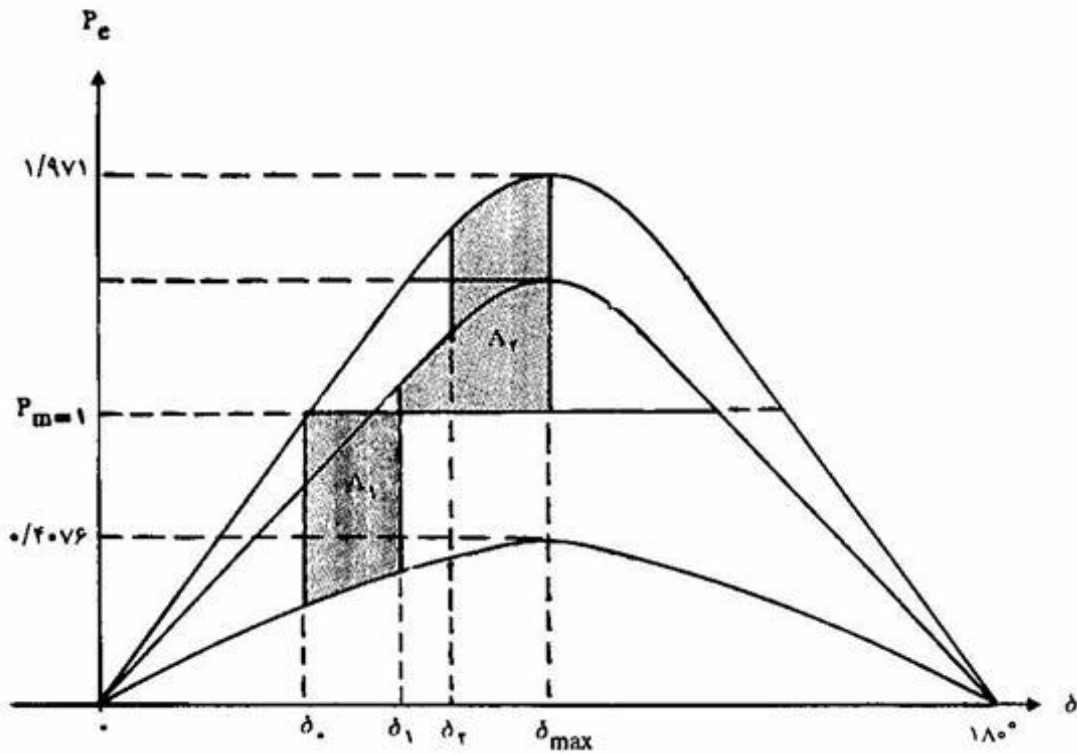
حل: مشخصه‌های قدرت - زاویه مانند مثال (۹-۷) هستند که در شکل (۹-۳۰) رسم شده‌اند. با توجه به تساوی سطوح A_1 و A_2 در شکل (۹-۳۰) داریم:

$$\int_{30/5^\circ}^{50^\circ} (1 - 0/4076 \sin \delta) d\delta = \int_{50^\circ}^{60^\circ} (1/548 \sin \delta - 1) d\delta + \int_{60^\circ}^{\delta_{max}} (1/971 \sin \delta - 1) d\delta$$

و از آنجا:

$$\cos \delta_{max} + 0/5076 \delta_{max} = 0/9274$$

$$\delta_{max} = 74/5^\circ$$

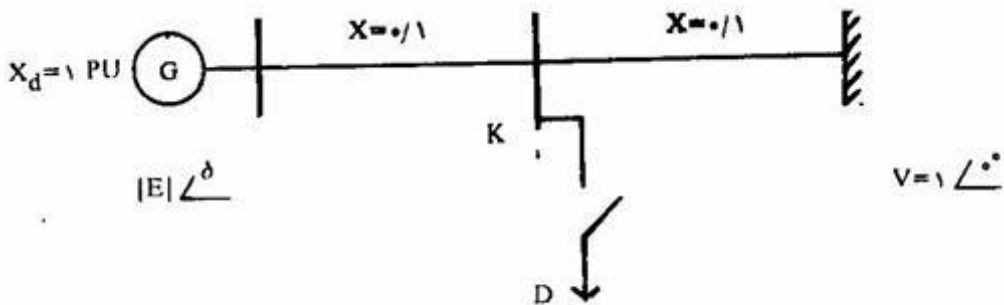


شکل ۳۰-۹: معیار سطوح برابر در حالتی که کلیدهای وصل مجدد در مدار قرار دارند

مسائل فصل نهم

۹-۱ یک ژنراتور سنکرون ۲۰۰ MVA، با راکتانس سنکرون $X_s = 1$ PU توسط یک ترانسفورماتور ۲۰۰ MVA و $X = 0.1$ و خط انتقال با راکتانس $X = 0.05$ PU در مبنای ۱۰۰ MVA، به شین بی نهایت متصل است. قدرت های انتقالی به شین بی نهایت ۱۴۰ MVA و ۱۰۰ MVA هستند و ولتاژ شین بی نهایت $V = 1 \angle 0^\circ$ PU می باشد. حد پایداری ماندگار این ژنراتور را بر حسب مگاوات محاسبه کنید.

۹-۲ در سیستم قدرت نشان داده در شکل (۹-۳۱) قبل از اتصال کلید K، قدرت $0.75 + j0.3$ PU به شبکه بی نهایت منتقل می شود. الف) حد پایداری ماندگار ژنراتور را بدست آورید. ب) اگر کلید K وصل شود بار D با امپدانس $0.8 + j0.3$ PU وارد شبکه می گردد. آیا ژنراتور می تواند با اتصال این کلید، قدرت اکتیو 0.75 PU را برای شبکه بی نهایت تأمین نماید؟



شکل ۹-۳۱: مربوط به مسأله (۹-۲)

۹-۳ در مسأله (۹-۲) اگر امپدانس بار D فقط اهمی و مقدار آن $R = 1$ PU باشد آیا با اتصال کلید K سیستم پایداری ماندگار خود را حفظ می کند یا نه؟

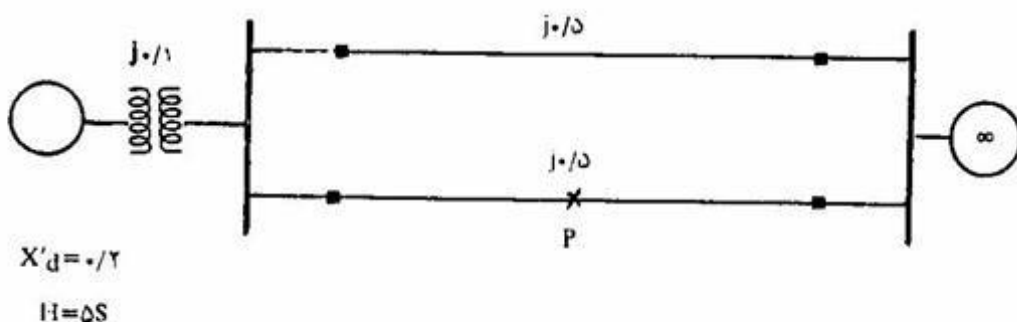
۹-۴ یک توربوژنراتور با مشخصات 20KV ، 50 هرتز و دو قطب دارای ثابت اینرسی ۵ ثانیه است. بر اثر یک اختلال ناگهانی قدرت الکتریکی به 80MW می رسد. در شرایط کار عادی قدرت ۱ PU به شین بی نهایت تحویل داده می شود.

الف) انرژی ذخیره شده در سرعت سنکرون و شتاب رتور را بدست آورید.
 ب) اگر در فاصله زمانی ۲۰ سیکل، شتاب محاسبه شده فوق ثابت فرض شود، تغییرات زاویه قدرت (δ) در فاصله مذکور و همچنین سرعت ماشین (دور در دقیقه) را در انتهای این فاصله زمانی محاسبه کنید.

۹-۵ یک ژنراتور با ثابت اینرسی ۶ ثانیه به موتور سنکرون با ثابت اینرسی ۴ ثانیه متصل است. ژنراتور قدرت ۱ P.U را به موتور منتقل می‌کند. بر اثر وقوع اختلالی، قدرت انتقالی به ۰/۶ P.U می‌رسد. شتاب زاویه‌ای ژنراتور را نسبت به موتور بدست آورید.

۹-۶ یک ژنراتور سنکرون نصف قدرت ماکزیمم خود را توسط یک خط انتقال به شین بی‌نهایت می‌دهد. بر اثر وقوع اتصال کوتاه در سیستم، راکتانس بین ژنراتور و شین بی‌نهایت به سه برابر مقدار آن قبل از اتصال کوتاه می‌رسد. پس از برطرف شدن اتصال کوتاه، قدرت انتقالی ماکزیمم به ۸۰ درصد قدرت ماکزیمم اولیه می‌رسد. زاویه بحرانی رفع اتصال کوتاه (δ_{cr}) را محاسبه کنید.

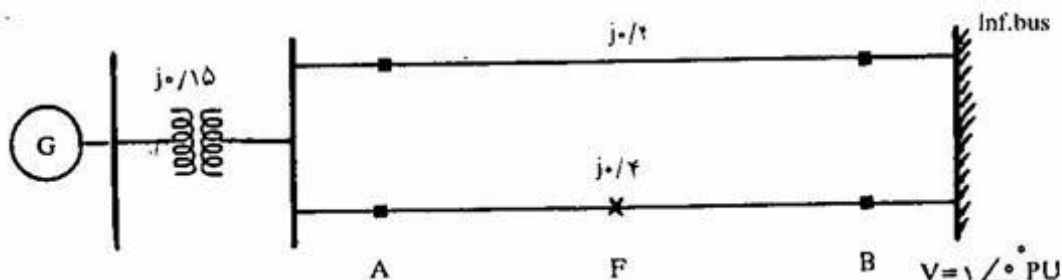
۹-۷ دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت در شکل (۹-۳۲) نمایش داده شده است. ژنراتور قدرت ۰/۸ P.U را در شرایطی که ولتاژ ترمینالهای آن و ولتاژ شین بی‌نهایت ۱ P.U است، به شین بی‌نهایت منتقل می‌کند، معادله قدرت - زاویه سیستم را در شرایط کار ذکر شده بدست آورید.



شکل ۹-۳۲: مربوط به مسأله (۹-۷)

۹-۸ اگر در مسأله (۹-۷) اتصال کوتاه متقارنی در نقطه P بوقوع پیوندد، معادله قدرت - زاویه را در خلال اتصال کوتاه بنویسید.

۹-۹ شکل (۹-۳۳) دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت را نشان می‌دهد. راکتانس گذرای محرر مستقیم ماشین $X'_d = 0.35$ PU است و راکتانس‌های بقیه عناصر سیستم در شکل مذکور برحسب PU در قدرت مبنای یکسان مشخص شده‌اند.



شکل ۹-۳۳: مربوط به مسأله (۹-۹)

در شرایط کار عادی قدرت $1 + j0.2$ PU به شین بی‌نهایت تحویل داده می‌شود. الف) نیروی محرکه ژنراتور E' را محاسبه کنید.

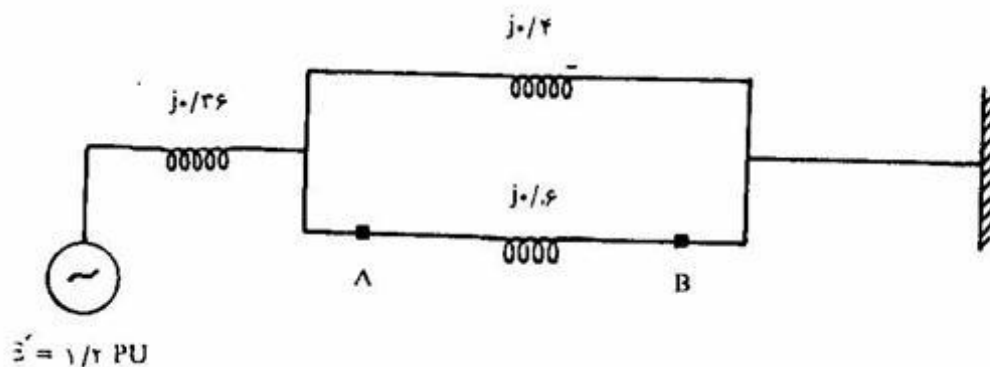
ب) اگر خط انتقال در نقطه F باز شود و در همان حالت باز باقی بماند، آیا سیستم قدرت پایدار گذرای خود را حفظ خواهد کرد؟ اگر سیستم پایدار می‌ماند، حداکثر زاویه قدرت نوسان δ_{max} را محاسبه کنید.

ج) اگر در نقطه F (وسط خط انتقال) اتصال کوتاه سه فاز (مقارن) رخ دهد بطوریکه این اتصال کوتاه توسط کلیدهای مربوطه برطرف نشود، آیا سیستم پایدار خواهد ماند؟ چرا؟ اگر پایدار می‌ماند حداکثر زاویه قدرت نوسان δ_{max} را بدست آورید و اگر سیستم پایدار نمی‌ماند زاویه بحرانی رفع اتصال کوتاه (δ_{cr}) را محاسبه کنید.

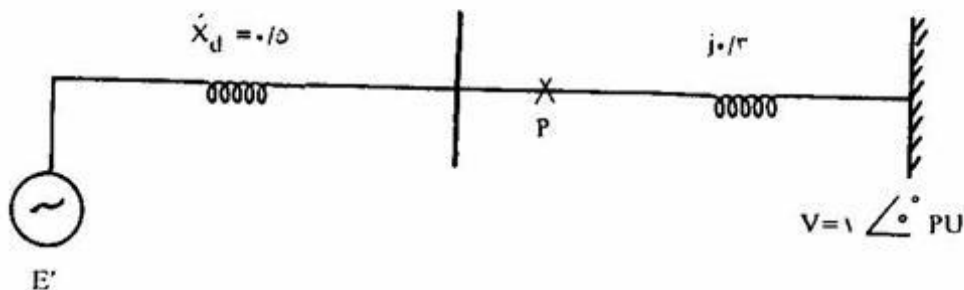
۹-۱۰ در شکل (۹-۳۴) در شرایط کار عادی قدرت ۱ PU به شین بی‌نهایت با ولتاژ $V = 1 \angle 0^\circ$ PU تحویل داده می‌شود. اگر در نقطه F از خط انتقال AB اتصال کوتاه سه فاز اتفاق بیفتد ($AF = \frac{2}{3} BA$) زاویه بحرانی رفع اتصال کوتاه را بدست آورید.

۹-۱۱ در سیستم قدرت شکل (۹-۳۵) قدرت $0.6 + j0.18$ PU به شین بی‌نهایت منتقل می‌گردد. الف) ولتاژ داخلی گذرای ژنراتور E' را محاسبه کنید.

ب) اگر خط انتقال در نقطه P باز شود حداکثر باید در چه زاویه‌ای (δ_{cr}) مجدداً بسته شود تا سیستم پایداری گذرای خود را حفظ کند.



شکل ۹-۳۴: مربوط به مسأله (۹-۱۰)



شکل ۹-۳۵: مربوط به مسأله (۹-۱۱)

۹-۱۲ در مسأله (۹-۱۰) اگر بر اثر اتصال کوتاه ذکر شده کلیدهای A و B در $\delta = 50^\circ$ اتصال کوتاه را برطرف نمایند، حداکثر زاویه قدرت نوسان (δ_{max}) را بدست آورید.

۹-۱۳ فرض کنید کلیدهای A و B شکل (۹-۳۴) از مسأله (۹-۱۰) از نوع وصل مجدد باشند. چنانچه بر اثر اتصال کوتاه مذکور، کلیدهای A و B در $\delta_1 = 60^\circ$ اتصال کوتاه را برطرف نمایند و در $\delta_1 = 75^\circ$ وصل شوند و در فاصله مذکور اتصال کوتاه از بین رفته باشد، آیا سیستم قدرت پایدار خواهد ماند؟ در صورتیکه سیستم پایدار می ماند حداکثر زاویه قدرت نوسان (δ_{max}) را محاسبه کنید.