

پایداری سیستم قدرت

وقتی موتورهای بخار پیستونی، ژنراتورهای ac را می چرخانند يك مشکل بزرگ کار ماشین، گنجی بود: تغییرهای تناوبی گشتاور اعمال شده به ژنراتور، سبب تغییرهای تناوبی سرعت می شد و در نتیجه، ولتاژ و فرکانس موتورهای وصل به سیستم به تناوب تغییر کرد. اگر فرکانس طبیعی نوسان موتورها با فرکانس نوسان ناشی از موتورهای پشیران ژنراتورها برابر بود، نوسان موتورها در اثر تغییر ولتاژ و فرکانس، باعث از دست رفتن همزمانی موتورها می شد. سیم پیچهای میراکن را برای مینیمم کردن گنجی به کار گرفتند زیرا اتلاف ناشی از جریانهای القا شده در آنها که از هر حرکت نسبی بین روتور و میدان چرخان حاصل از جریان آرمچر، ناشی می شد عمل میرایی را انجام می داد. استفاده از توربینها مشکل گنجی را تا حدی حل کرد ولی هر جا که نخست-دانه موتور دیزل باشد این مشکل هنوز وجود دارد. هر قدر که سیستمهای قدرت و به هم پیوستگی آنها توسعه می یابد حفظ همزمانی بین قسمتهای مختلف سیستم دشوار تر می شود.

۱-۱۴ مسئله پایداری

پایداری سیستم قدرت، خاصیتی از سیستم است، که به ماشینهای سنکرون سیستم، توانایی می دهد تا به اختلال در وضعیت کارعادی پاسخ دهند و به وضعیت کارعادی دیگری بازگردند. بررسیهای پایداری، بسته به ماهیت و اندازه اختلال معمولاً بر سه نوع اند: بررسی پایداری

در حالت گذرا، در حالت دینامیک، و در حالت ماندا.

امروزه بررسی پایداری حالت گذرا، راه تحلیلی اصلی برای بررسی رفتار پویای الکترومکانیکی سیستم قدرت است. هدف بررسیهای پایداری حالت گذرا تعیین این است که آیا سیستم به دنبال اختلالاتی بزرگی نظیر اتصالهای سیستم انتقال تغییرهای ناگهانی بار، از کار افتادن واحدهای تولید، یا کلید زنی خط، همزمان خواهد ماند یا نه. چنین بررسیهایی از ۵۰ سال پیش آغاز شد اما به در نظر گرفتن مسائل پایداری حالت دینامیکی فقط دو ماشین، محدود ماند سیستمهای قدرت امروزی سیستمهای گسترده بسیار به هم تنیده و باصدها ماشین است که می توانند از طریق شبکههای واسطه با ولتاژ بسیار بالا (EHV) و ولتاژ بسیار بسیار بالا (UHV) بر کار دینامیکی یکدیگر تأثیر بگذارند. لذا، سیستم تحریک و سیستم کنترل فرمان توربین این ماشینها باید در برخی حالتها اما نه در همه حالتها برای انعکاس درست پاسخ دینامیکی مناسب سیستم قدرت به اختلالات معین، مدل سازی شود.

حوزه بررسی پایداریهای حالت دینامیک و حالت مانا تنگتر است و شامل یک یا فقط چند ماشین است که وضعیت کارشان به آداهمی یا به تدریج دستخوش تغییر می شود. بنابراین بررسی پایداریهای حالت دینامیک و حالت مانا به پایداری مکان نقاط کار حالت اساساً مانای سیستم، ارتباط می یابد. تمایز قائل شده بین بررسی پایداریهای حالت مانا و حالت دینامیک واقعاً ساختگی است زیرا ماهیت مسائل پایداری در آنها یکی است و تفاوت آنها فقط در میزان تفصیلی است که در مدل سازی ماشینها به کار می رود. در بررسیهای پایداری حالت دینامیک، مدل ماشینهای سنکرون که تغییر شار حلقه زن را در شکاف هوایی ماشین فراهم می کند و سیستم تحریک و سیستم فرمان توربین نمایش داده می شوند. در مسائل پایداری حالت مانای ژنراتور، مدل خیلی ساده ای به کار می رود که ژنراتور را منبعی با ولتاژ ثابت در نظر می گیرد. شیوه حل مسائل پایداری حالت مانا و حالت دینامیک، بررسی پایداری سیستم در هنگام تغییرهای جزئی حول یک نقطه تعادل است. می توان به جای معادله های غیر خطی دیفرانسیل و جبری سیستم، یک دسته معادله های خطی قرارداد سپس با حل این معادله ها به روش تحلیل خطی، تعیین کرد که آیا ماشین یا ماشینها پس از تغییرهای کوچک حول نقطه کار، همزمان خواهند ماند یا نه.

به بررسیهای پایداری حالت گذرا عموماً بسیار بیشتری پرداختند زیرا در عمل اهمیت بیشتری دارند. در این مسائل، اختلالات چنان بزرگ اند که نمی توان فرایند خطینگی را به کار برد و باید معادله های ناخطی دیفرانسیل و جبری را به روش مستقیم یا به روش گام-به-گام بساو ردی حل کرد. می توان مسائل پایداری حالت گذرا را به مسائل پایداری در تاب خورد اول و در چند تاب خورد تقسیم کرد. پایداری تاب خورد اول بر اساس یک مدل ساده و معقول ژنراتور، بدون نمایش سیستمهای کنترل است. معمولاً فاصله زمانی بررسی، نخستین ثانیه پس از اتصال سیستم است. اگر ماشینهای سیستم در ثانیه نخست، همزمان بمانند سیستم پایدار است. مسائل پایداری در چند تاب خورد، زمان بررسی درازتری می خواهد و بنا بر این

باید اثرهای سیستمهای کنترل ژنراتور را که در این زمان طولانی بر عملکرد ماشین تأثیر می گذارند در نظر بگیرد. برای انعکاس درست این رفتار، باید مدل ماشین پیچیده تری به کار برد.

هدف همه بررسیهای پایداری تعیین این است که آیا روتور ماشینهای اختلال یافته به کارکرد سرعت ثابت باز می گردند یا نه. مسلماً این بدان معناست که سرعت روتورها باید حداقل موقتاً از سرعت همزمان، منحرف شده باشد. برای آسانی محاسبات، در همه بررسیهای پایداری فرض می کنند:

۱. فرکانس جریانهها و ولتاژهای سیم پیچ استاتورها و سیستم قدرت، برابر فرکانس سنکرون است. یعنی از مؤلفه dc و هارمونیکها صرف نظر می شود.

۲. در نمایش اتصالیهای نامتعادل، از مؤلفه های متقارن استفاده می شود.

۳. تغییر سرعت ماشین، برولتاژ تولیدی بی اثر است.

با این فرضها امکان استفاده از جبر فاز برداری در شبکه انتقال و روشهای حل پخش بار با پارامترهای ω هر تزی به دست می آید. همچنین می توان در نقطه اتصالی، شبکه های ترتیب منفی و صفرا در شبکه ترتیب مثبت وارد کرد. چنانکه خواهیم دید عموماً اتصالیهای سه فاز متعادل در نظر گرفته می شوند. ولی ممکن است در برخی بررسیها عملکرد مدار شکن در حذف اتصالی، طوری باشد که در نظر گرفتن وضعیت نامتعادل اجتناب ناپذیر شود.*

۱۴-۲ دینامیک روتور و معادله تابخورد

معادله حاکم بر حرکت روتور يك ماشین سنکرون، بر پایه این اصل اساسی دینامیک است که می گوید: گشتاور شتاباننده، برابر حاصل ضرب لنگر لختی روتور در شتاب زاویه ای روتور است. در سیستم واحدهای MKS می توان این معادله را برای ژنراتور سنکرون به شکل زیر نوشت:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad \text{N-m} \quad (1-14)$$

که در آن

J = کل لنگر لختی جرمهای روتور، بر حسب kg-m^2

θ_m = فاصله زاویه ای روتور از يك محور ساکن، بر حسب رادیان مکانیکی

t = زمان، بر حسب ثانیه

T_m = گشتاور مکانیکی یا محوری ناشی از نخست رانه، منهای گشتاور مقاوم ناشی

* مراجعه کنید به،

P. M. Anderson and A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, The Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1977.

از اتلافهای چرخشی، بر حسب $N-m$

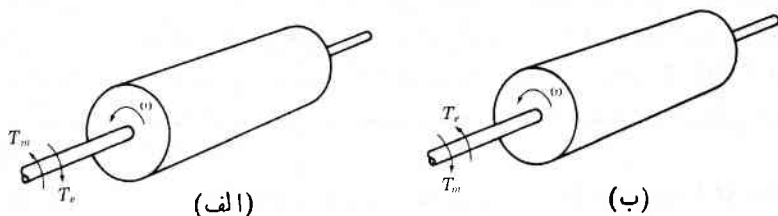
T_e = گشتاور الکتریکی با الکترومغناطیسی خالص، بر حسب $N-m$

T_e = گشتاور شتاباننده خالص، بر حسب $N-m$

در ژنراتور سنکرون، گشتاور مکانیکی، T_m و گشتاور الکتریکی، T_e ، مثبت فرض می‌شوند. این بدان معناست که T_m ، گشتاور محوری بر آندگی است که مطابق شکل ۱۴-۱ (الف)، تمایل دارد روتور را در جهت مثبت چرخش θ_m بشتاباند. در کارکرد حالت مانای ژنراتور، T_e و T_m مساوی‌اند و گشتاور شتاباننده T_e صفر است. در این حالت، جریمهای روتور نه شتاب دارند و نه واشتافت و سرعت ثابت برابند، سرعت همزمان است. جریمهای چرخان شامل روتور و ژنراتور و نخست‌رانه، با ماشینهای دیگری که در سیستم قدرت با سرعت سنکرون کار می‌کنند همزمان‌اند. نخست‌رانه ممکن است توربین آبی یا توربین بخار باشد که مدلهای کم و بیش پیچیده‌ای برای نمایش اثر آنها بر T_m وجود دارد. در این متن، به‌ازای هر وضعیت کاری، T_m ثابت فرض می‌شود. این فرض حتی برای ژنراتورهایی که در آنها ورودی نخست‌رانه به ژنراتور را یک فرمانه، کنترل می‌کند، صادق است. زیرا فرمانه تا پیش از حس کردن تغییر سرعت عمل نمی‌کند و بنابراین، در فاصله زمانی بررسی پایداری، بر دینامیک روتور بی‌تأثیر است. گشتاور الکتریکی T_e ، متناظر با توان خالص شکاف هوایی ماشین است، لذا، مساوی توان کل خروجی ژنراتور، به‌علاوه اتلاف سیم‌پیچ آرمچر، $|I|^2 R$ ، است. جهت‌گذر توان در موتور سنکرون، مخالف ژنراتور است. از این رو مطابق شکل ۱۴-۱ (ب)، برای موتور، علامت T_e و T_m در معادله (۱۴-۱) عوض می‌شود. پس T_e ، متناظر با توان شکاف هوایی ناشی از سیستم الکتریکی برای داندن روتور است. در حالی که T_m ، گشتاور مقاوم بار و اتلافهای چرخشی کندکننده حرکت روتور است.

θ_m ، اندازه مطلق زاویه روتور است زیرا نسبت به یک محور مرجع ساکن بر روی استاتور، اندازه‌گیری می‌شود. در نتیجه، حتی در سرعت ثابت سنکرون نیز مدام با زمان افزایش می‌یابد. چون سرعت روتور را نسبت به سرعت سنکرون می‌خواهیم بسیار بهتر است که وضع زاویه‌ای روتور را نسبت به محور مرجعی اندازه بگیریم که با سرعت همزمان می‌چرخد. بنابراین، تعریف می‌کنیم که:

$$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m \quad (2-14)$$



شکل ۱۴-۱ نمایش روتور ماشین برای مقایسه جهت چرخش و گشتاور مکانیکی و الکتریکی (الف) در ژنراتور و (ب) در موتور.

که در آن ω_m ، سرعت سنکرون ماشین برحسب رادیان مکانیکی بر ثانیه و δ_m ، فاصله زاویه‌ای روتور برحسب رادیان مکانیکی از محور مرجعی است که با سرعت همزمان می‌چرخد. مشتقهای معادله (۲-۱۴) نسبت به زمان چنین‌اند

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (۳-۱۴)$$

و

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (۴-۱۴)$$

معادله (۳-۱۴) نشان می‌دهد که سرعت زاویه‌ای روتور، $d\theta_m/dt$ تنها وقتی ثابت و برابر سرعت سنکرون است که $d\delta_m/dt$ صفر باشد. بنا براین $d\delta_m/dt$ ، انحراف سرعت روتور از همزمانی را می‌نمایاند و واحد آن رادیان مکانیکی بر ثانیه است. معادله (۴-۱۴)، شتاب روتور را برحسب رادیان مکانیکی بر مربع ثانیه می‌نمایاند. با گذاردن معادله (۴-۱۴) در معادله (۱-۱۴) به دست می‌آوریم:

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad \text{N-m} \quad (۵-۱۴)$$

از نظر نمادی، بهتر است سرعت زاویه‌ای روتور چنین تعریف شود:

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} \quad (۶-۱۴)$$

بنا بر دینامیک مقدماتی (بایه) می‌دانیم که توان برابر حاصل ضرب گشتاور در سرعت زاویه‌ای است، لذا با ضرب معادله (۵-۱۴) در ω_m به دست می‌آوریم:

$$J \omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \text{W} \quad (۷-۱۴)$$

که در آن P_m ، توان محوری ورودی ماشین منهای اتلافهای چرخشی است P_e ، توان الکتریکی گذرنده از شکاف هوایی ماشین است، و P_a توان شتاباننده‌ای است که نامتعادل بودن دو کمیت بالا را بیان می‌کند معمولاً اتلافهای چرخشی و اتلافهای $|I|^2 R$ آرمچر را ندیده می‌گیریم و P_m را توان ناشی از نخست-رانه و P_e را توان الکتریکی خروجی می‌انگاریم.

ضریب $J \omega_m$ لنگره زاویه‌ای روتور است که در سرعت سنکرون ω_m با M نمایانده می‌شود و ثابت لختی ماشین نام دارد. واضح است که واحد M باید با واحدهای J و ω_m متناظر باشد. کنترل دقیق واحد در جمله‌های معادله (۷-۱۴) نشان می‌دهد که M برحسب

ژول-ثانیه برادیان مکانیکی بیان می‌شود و داریم

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad W \quad (۸-۱۴)$$

ضریب M به کار رفته در این معادله، ضریب کاملاً ثابتی نیست زیرا ω_m در همه وضعیتهای کار، برابر سرعت همزمان نیست. اما در عمل، به هنگام پایداری ماشین، ω_m تفاوت چندانی با سرعت سنکرون ندارد و چون محاسبه با توان، بهتر از گشتاور است معادله (۸-۱۴) ترجیح داده می‌شود. در بررسیهای پایداری، داده‌های ماشین، اغلب ثابت دیگری را نیز در بر می‌گیرد که مربوط به لختی است. این همان ثابت H است که چنین تعریف می‌شود:

$$H = \frac{\text{انرژی جنبشی ذخیره شده در سرعت سنکرون بر حسب مگاژول}}{\text{ظرفیت ماشین بر حسب MVA}}$$

و

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{sm}^2}{S_{mach}} = \frac{\frac{1}{2} M \omega_{sm}}{S_{mach}} \quad \text{MJ/MVA} \quad (۹-۱۴)$$

که در آن S_{mach} ، ظرفیت سه فاز ماشین بر حسب MVA است. از حل معادله (۹-۱۴)، M چنین به دست می‌آید:

$$M = \frac{2H}{\omega_{sm}} S_{mach} \quad \text{MJ/mech rad} \quad (۱۰-۱۴)$$

و با گذاشتن این معادله در معادله (۸-۱۴) داریم

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \frac{P_a}{S_{mach}} = \frac{P_m - P_e}{S_{mach}} \quad (۱۱-۱۴)$$

این معادله به نتیجه بسیار ساده‌ای می‌انجامد.

دقت کنید که δ_m در صورت معادله (۱۱-۱۴) بر حسب رادیان مکانیکی و ω_{sm} در مخرج آن، بر حسب رادیان مکانیکی بر ثانیه بیان می‌شود. بنابراین اگر واحدهای δ و ω سازگار باشند - درجه یا رادیان مکانیکی یا الکتریکی - می‌توانیم معادله را به شکل زیر بنویسیم:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \text{در-يك} \quad (۱۲-۱۴)$$

واحدهای H و t سازگارند زیرا؛ مگاژول بر مگاوات آمپر، همان ثانیه است و مبنای در-یکی P_a ، P_m ، و P_e باید با مبنای H یکی باشد. زیرنویس m در ω ، ω_s ، و δ

به معنای استفاده از واحد مکانیکی است در غیر این صورت واحد الکتریکی به کار رفته است. در نتیجه ω_s سرعت سنکرون بر حسب واحد الکتریکی است. در سیستمی بسا فرکانس الکتریکی f هر تزی وقتی δ بر حسب رادیان الکتریکی باشد معادله (۱۴-۱۲) چنین می شود:

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \text{در-يك} \quad (14-13)$$

در حالی که وقتی δ بر حسب درجه الکتریکی باشد داریم:

$$\frac{H}{180 f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \text{در-يك} \quad (14-14)$$

معادله (۱۴-۱۲)، به نام معادله تابخورد، معادله اساسی حاکم بر دینامیک چرخشی ماشین همزمان در بررسیهای پایداری است و چنانکه دیده می شود يك معادله دیفرانسیل مرتبه دوم است، که می توان آن را به شکل دو معادله دیفرانسیل مرتبه اول زیر نوشت که در آنها ω_s ، ω و δ بر حسب رادیان الکتریکی یا درجه الکتریکی اند:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \quad \text{در-يك} \quad (14-15)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (14-16)$$

در این فصل برای تعیین پایداری يك ماشین در سیستم قدرت، از شکلهای مختلف معادله تابخورد استفاده می کنیم. با حل معادله تابخورد، عبارت δ را بر حسب زمان به دست می آوریم نمودار پاسخ، منحنی تابخورد ماشین نامیده می شود و بررسی منحنی تابخورد ماشینهای سیستم نشان خواهد داد که آیا ماشینها پس از اختلال، همزمان می مانند یا نه.

۱۴-۳ بررسیهای بیشتر معادله تابخورد

مبنای MVA که در معادله (۱۴-۱۱) به کار بردیم ظرفیت ماشین است که با تعریف H به میان می آید. در بررسی پایداری يك سیستم قدرت دارای تعدادی ماشین سنکرون، تنها يك مبنای مشترك MVA برای همه قسمت های سیستم می توان انتخاب کرد. چون طرف راست معادله تابخورد هر ماشین باید بر حسب در-يك همین مبنای مشترك سیستم بیان شود، روشن است که H در طرف چپ هر معادله تابخورد نیز باید با مبنای سیستم سازگار باشد. این امر با تبدیل ثابت H هر ماشین، که مبنایش ظرفیت آن ماشین است، به مقدار که مبنای سیستم، سیستم S ، تعیین می کند انجام می شود. با ضرب طرفین معادله (۱۴-۱۱) در نسبت: سیستم S /ماشین S ، رابطه تبدیل به دست می آید:

$$H_{\text{سیستم}} = H_{\text{ماشین}} \frac{S_{\text{ماشین}}}{S_{\text{سیستم}}} \quad (۱۷-۱۴)$$

که زیر نویس هر جمله اش مبنای متناظر به کار رفته در آن جمله را نشان می دهد. در بررسیهای صنعتی، مبنای سیستم را معمولا ۱۰۰ MVA انتخاب می کنند. در عمل به ندرت از ثابت لختی M استفاده می شود و اغلب، صورتهای شامل H معادله تابخورد به کار می رود. زیرا مقدار M ، با اندازه و نوع ماشین بسیار تغییر می کند در حالی که مطابق جدول ۱۴-۱ به نسبت تغییر مقادیر H تنگتر است. سازندگان ماشین علامت WR^2

جدول ۱۴-۱ ثابتهای لختی نوعی در ماشینهای سنکرون*

نوع ماشین	ثابت لختی H^{**} MJ/MVA
ژنراتور توربینی:	
چگالش، ۱۸۰۰ r/min	۶-۹
۳۶۰۰ r/min	۷-۲
غیر چگالش، ۳۶۰۰ r/min	۴-۳
ژنراتور چرخ آبی:	
سرعت پایین، $200 \text{ r/min} >$	۲-۳
سرعت بالا، $200 \text{ r/min} <$	۲-۲
خازن سنکرون***	
بزرگ	۱۲۵
کوچک	۱۰۰
موتور سنکرون با بارهای متغیر از ۱۰ تا ۵۰ و بالاتر برای چرخ طیارهای بزرگتر	۲۰۰

* استخراج از:

"Electrical Transmission and Distribution Reference Book."

Westinghouse Electric Corporation

با اجازه،

** رقم اول محدوده ها مربوط به ماشینهای با اندازه نامی کوچکتر است.

*** خنک شونده با هیدروژن، ۲۵٪ کمتر.

را برای مشخص کردن حاصل ضرب وزن اجزای چرخان يك واحد تولیدی (از جمله نخست-رانه) - برحسب پوند - درمربع شعاع چرخندگی - برحسب فوت به کار می برند. از این رو $WR^2/3222$ لنگرلختی ماشین برحسب slug-ft² است. مثال ۱۴-۱ رابطه ای برای محاسبه ثابت H از WR^2 به دست آورید و H يك واحد تولید نوع هسته ای را با اندازه های نامی ۱۳۳۳ MVA، ۱۸۰۰ r/min و $WR^2 = 5820000 \text{ lb-ft}^2$ ، محاسبه کنید. حل: انرژی جنبشی چرخش در سرعت همزمان برحسب فوت-پوند عبارت است از:

$$KE = \frac{1}{2} \frac{WR^2}{3222} \left[\frac{2\pi(r/\text{min})}{60} \right]^2 \quad \text{ft-lb}$$

چون ۵۵۰ ft-lb/s برابر ۷۴۶ W است نتیجه می گیریم که هر ft-lb/s برابر $746/550$ است. از این رو با تبدیل فوت-پوند به مگاژول و با تقسیم بر ظرفیت ماشین برحسب مگاوات آمپر، به دست می آوریم:

$$H = \frac{\left(\frac{746}{550} \times 10^{-6} \right) \frac{1}{2} \frac{WR^2}{3222} \left[\frac{2\pi(r/\text{min})}{60} \right]^2}{S_{\text{ماشین}}}$$

و پس از ساده کردن:

$$H = \frac{231 \times 10^{-10} WR^2 (r/\text{min})^2}{S_{\text{ماشین}}}$$

با گذاشتن داده های ماشین در این معادله، داریم

$$H = \frac{231 \times 10^{-10} (5882 \times 10^6) (1800)^2}{1333} \\ = 3227 \text{ MJ/MVA}$$

با تبدیل H به مبنای سیستم، ۱۰۰ MVA؛

$$\square \quad H = 3227 \times \frac{1333}{100} = 43056 \text{ MJ/MVA}$$

در بررسی پایداری يك سیستم بزرگ که ماشینهایش در ناحیه جغرافیایی وسیعی پراکنده اند بهتر است که تعداد معادله های تابخوردی را که باید حل شوند مینیمم کرد. این به شرطی انجام پذیر است که عیب در خط انتقال یا هر اختلال دیگر در سیستم، طوری بر

ماشینهای نیروگاه اثر بگذارند که روتورهاشان باهم تاب بخورند. در چنین حالتی می توان با ترکیب ماشینهای نیروگاه، يك ماشین معادل ساخت چنانکه گویی روتورهاشان به طور مکانیکی جفت شده اند. فقط به نوشتن يك معادله تاب خورد نیاز باشد. نیروگاهی را با دو ژنراتور متصل به شینه ای که از نظر الکتریکی از اختلالات شبکه دور است، در نظر بگیریم. معادله های تاب خورد، بر مبنای مشترك سیستم، عبارت اند از:

$$\frac{2H_1}{\omega_s} \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} = P_{m1} - P_{e1} \quad \text{در-يك} \quad (14-18)$$

$$\frac{2H_2}{\omega_s} \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = P_{m2} - P_{e2} \quad \text{در-يك} \quad (14-19)$$

با افزودن معادله ها به یکدیگر، و نمایش δ_1 و δ_2 با δ - چون روتورها باهم تاب می خورند - به دست می آوریم:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad \text{در-يك} \quad (14-20)$$

که در آن $H = (H_1 + H_2)$ ، $P_m = (P_{m1} + P_{m2})$ ، و $P_e = (P_{e1} + P_{e2})$. حل این تک معادله، که به شکل معادله (14-21) است، دینامیک نیروگاه را نمایش می دهد. مثال ۱۴-۲ در يك نیروگاه دو واحد تولید ۵۰۰ Hz به توانی کار می کنند و دارای اندازه های نامی زیرند:

واحد ۱: ۵۰۰ MVA، ضریب توان ۰.۸۵، ۲۰ kV و ۳۶۰۰ r/min

$$H_1 = 4.78 \text{ MJ/MVA}$$

واحد ۲: ۱۳۳۳ MVA، ضریب توان ۰.۹، ۲۲ kV و ۱۸۰۰ r/min

$$H_2 = 3.27 \text{ MJ/MVA}$$

ثابت معادل مجموعه، H ، را بر مبنای ۱۰۰ MVA محاسبه کنید.
حل: انرژی جنبشی کل چرخش دو ماشین برابر است با:

$$KE = (4.78 \times 500) + (3.27 \times 1333) = 6759 \text{ MJ}$$

بنابراین ثابت H ماشین معادل، بر مبنای ۱۰۰ MVA برابر است با:

$$H = 67.59 \text{ MJ/MVA}$$

و اگر ماشینها طوری تاب بخورند که زاویه روتورهاشان در هر لحظه همگام باشد، می توان این مقدار را در يك تک معادله تاب خورد به کار برد. □

ماشینهایی که با هم تاب می‌خورند، ماشینهای سازگار (همدوس) نام دارند. باید دانست که وقتی هم ω و هم δ بر حسب درجه یا رادیان الکتریکی بیان شوند می‌توان معادله‌های تاب خورد ماشینهای سازگار را، حتی اگر سرعتهای نامیشان همانند مثال، متفاوت باشند، بایکدیگر ترکیب کرد. در بررسی پایداری چند ماشین، برای کاهش تعداد معادله‌های تاب خوردی که باید حل کرد اغلب از این امر استفاده می‌شود. می‌توان برای هر جفت ماشین ناسازگار سیستم، معادله‌های تاب خوردی مانند معادله‌های (۱۴-۱۸) و (۱۴-۱۹) نوشت. با تقسیم هر معادله به ضریب طرف چپ خود و تفریق معادله‌های حاصل، به دست می‌آوریم:

$$\frac{d^2\delta_1}{dt^2} - \frac{d^2\delta_2}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2} \left(\frac{P_{m1} - P_{e1}}{H_1} - \frac{P_{m2} - P_{e2}}{H_2} \right) \quad (14-21)$$

با ضرب دو طرف در $H_1 H_2 / (H_1 + H_2)$ و پس از مرتب کردن، داریم:

$$\frac{2}{\omega_s} \left(\frac{H_1 H_2}{H_1 + H_2} \right) \frac{d^2(\delta_1 - \delta_2)}{dt^2} = \frac{P_{m1} H_2 - P_{m2} H_1}{H_1 + H_2} - \frac{P_{e1} H_2 - P_{e2} H_1}{H_1 + H_2} \quad (14-22)$$

که می‌توان به شکل بسیار ساده‌تر معادله اساسی تاب خورد (۱۴-۱۲) نیز نوشت:

$$\frac{2}{\omega_s} H_{12} \frac{d^2\delta_{12}}{dt^2} = P_{m12} - P_{e12} \quad (14-23)$$

در اینجا زاویه نسبی δ_{12} برابر $\delta_1 - \delta_2$ است. لختی و توانهای ورودی و خروجی وزن دار معادل نیز عبارت انداز:

$$H_{12} = \frac{H_1 H_2}{H_1 + H_2} \quad (14-24)$$

$$P_{m12} = \frac{P_{m1} H_2 - P_{m2} H_1}{H_1 + H_2} \quad (14-25)$$

$$P_{e12} = \frac{P_{e1} H_2 - P_{e2} H_1}{H_1 + H_2} \quad (14-26)$$

يك کاربرد قابل توجه اين معادله‌ها مربوط به سیستم دو-ماشینه‌ای دارای يك ژنراتور (ماشین يك) و يك موتور سنكرون (ماشین دو) است که با شبکه‌ای از رکتانسه‌های خاص به یکدیگر وصل شده‌اند. هر تغییری که در خروجی ژنراتور رخ دهد جذب موتور می‌شود و می‌توانیم بنویسیم:

$$P_{m1} = -P_{m2} = P_m \quad (14-27)$$

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

در این صورت $P_{m12} = P_m$ ، $P_{e12} = P_e$ ، و معادله (۱۴-۲۲) به شکلی از معادله (۱۴-۱۲) که برای يك تك ماشین به کار می رود، درمی آید:

$$\frac{2H_{12}}{\omega_s} \frac{d^2\delta_{12}}{dt^2} = P_m - P_e$$

معادله (۱۴-۲۲) نشان می دهد که پایداری يك ماشین سیستم، خاصیتی نسبی است وابسته به عملکرد دینامیک آن ماشین نسبت به ماشینهای دیگر سیستم. می توان زاویه روتور يك ماشین را، δ ، برای مقایسه با زاویه روتور هر ماشین دیگر، δ_p ، انتخاب کرد. برای پایدار بودن، باید اختلاف زاویه بین همه ماشینها پس از کلید زنی نهایی از قبیل باز کردن مدار شکن برای حذف عیب، کاهش یابد. با آنکه ممکن است بخواهیم زاویه بین روتور ماشین و يك محور مرجع با چرخش همزمان را رسم کنیم. با این حال آنچه اهمیت دارد زاویه نسبی بین ماشینهاست. این بحث بر طبیعت نسبی خاصیت پایداری سیستم تأکید می کند و نشان می دهد که ویژگی اصلی بررسی پایداری با در نظر گرفتن مسائل جفت-ماشین مشخص می شود. چنین مسائلی بر دو نوع اند: آنهایی که دارای يك ماشین با لختی محدودند که نسبت به يك شینه بی نهایت تاب می خورد و آنهایی که دارای دو ماشین با لختی محدودند که نسبت به یکدیگر تاب می خورند. از نظر پایداری، شینه بی نهایت، شینه ای است که ماشینی با ولتاژ داخلی ثابت، امپدانس صفر، و لختی نامحدود دارد. نقطه اتصال هر ژنراتور به يك سیستم قدرت بزرگ را می توان چنین شینه ای در نظر گرفت. در همه حالاتها معادله تاب خوردن به شکل معادله (۱۴-۱۲) درمی آید که برای حل آن باید هر جمله اش را دقیقاً بررسی کرد. معادله P_e ، که اکنون برای يك سیستم کلی دو ماشین مشخص می کنیم، اساس این بررسی است.

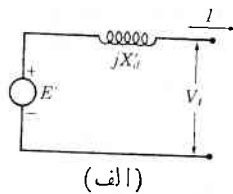
۱۴-۳ معادله توان-زاویه

در معادله تاب خوردن ژنراتور، توان مکانیکی ورودی از نخست-رانه، P_m ، ثابت فرض خواهد شد. چنانکه گفتیم این يك فرض معقولی است زیرا می توان انتظار داشت که شرایط شبکه الکتریکی، پیش از آنکه فرمانه کنترل بتواند توربین را به واکنش وادارد تغییر کنند. چون در معادله (۱۴-۱۲)، P_m ثابت است توان الکتریکی خروجی، P_e ، تعیین خواهد کرد که آیا روتور می شتابد، و امی شتابد و یا در سرعت سنکرون باقی می ماند. وقتی P_e برابر P_m است ماشین با سرعت سنکرون در حالت مانا کار می کند؛ وقتی P_e اندازه ای غیر از این مقدار دارد روتور از همزمانی درمی آید. تغییرات P_e را وضعیت شبکه های انتقال و توزیع، و بارهای ژنراتور سیستم تعیین می کنند. اختلالات شبکه الکتریکی-ناشی از تغییرات حاد بار، عیبهای شبکه، یا عمل مدار شکنها-ممکن است باعث تغییر سریع توان خروجی

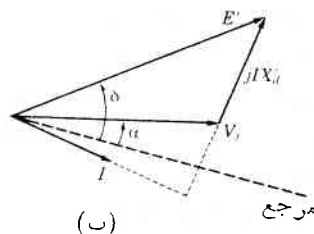
ژنراتور، P_e شوند در این صورت، حالت گذرای الکترودینامیکی به وجود می آید. فرض بنیادین آن است که تأثیر تغییر سرعت ماشین بر ولتاژ تولیدی ناچیز است به طوری که معادله های پخش بار مربوط به حالت شبکه الکتریکی و مدل انتخاب شده برای نمایش رفتار الکتریکی ماشین، نحوه تغییرات P_e را تعیین می کنند. در بررسیهای پایداری حالت گذرا، هر ماشین را با ولتاژ داخلی گذرای E' ، به توالی رئکتانس گذرای X_d' ، نمایش می دهند، مطابق شکل ۲-۱۴ (الف) که در آن V_t ولتاژ بین سرهاست. این متناظر با نمایش حالت ماناست که در آن رئکتانس سنکرون، X_d ، با ولتاژ داخلی سنکرون یا بی-باری، E ، متوالی است. در بیشتر حالتها مقاومت آرمچر ناچیز است و بنابراین می توان نمودار فاز-برداری شکل ۲-۱۴ (ب) را به کار برد. چون باید هر ماشین را نسبت به سیستمی که جزء آن است در نظر گرفت، زاویه فاز کمیتهای ماشین نسبت به مرجع مشترك سیستم سنجیده می شود.

شکل ۳-۱۴ نمودار طرحواره ای ژنراتوری را نشان می دهد که از طریق يك سیستم انتقال، سیستمی را در سر دریافت در شینه ۲ تغذیه می کند. مستطیل، يك سیستم انتقال دارای مؤلفه های نا فعال خطی مانند ترانسفورماتور، خط انتقال، و خازن را می نمایاند و رئکتانس گذرای ژنراتور را نیز شامل می شود. بنابراین E'_t ولتاژ داخلی گذرای ژنراتور را در شینه ۱ نمایش می دهد. E'_t نیز در سر دریافت، ولتاژ شینه بی نهایت یا ولتاژ داخلی گذرای يك موتور سنکرون فرض می شود که رئکتانس گذرای در شبکه انتقال گنجانده شده است. بعداً حالت دو ژنراتور را در نظر خواهیم گرفت که بارهایی با امپدانس ثابت را تغذیه می کنند. ماتریس ادمیتانس شینه شبکه کاهش یافته به دو گره (علاوه بر گره مرجع) عبارت است از:

$$Y_{شینه} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \quad (۲۸-۱۴)$$

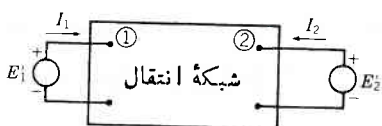


(الف)



(ب)

شکل ۲-۱۴ نمودار فاز برداری يك ماشین سنکرون برای بررسی پایداری حالت گذرا.



شکل ۳-۱۴ نمودار طرحواره‌ای برای بردسیه‌های پایداری. شبکه انتقال شامل رئیختانهای گذرای وابسته به، E'_1 و E'_2 است.

بنابر معادله (۷-۸)

$$P_k - jQ_k = V_k^* \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \quad (۲۹-۱۲)$$

اگر k و N را به ترتیب برابر ۱ و ۲ بگیریم و E'_1 را جانشین V کنیم می‌توانیم بنویسیم:

$$P_1 + jQ_1 = E'_1 (Y_{11} E'_1)^* + E'_1 (Y_{12} E'_2)^* \quad (۳۰-۱۲)$$

که در آن

$$\begin{aligned} E'_1 &= |E'_1| \angle \delta_1 & E'_2 &= |E'_2| \angle \delta_2 \\ Y_{11} &= G_{11} + jB_{11} & Y_{12} &= |Y_{12}| \angle \theta_{12} \end{aligned}$$

در نتیجه:

$$P_1 = |E'_1|^2 G_{11} + |E'_1| |E'_2| |Y_{12}| \cos(\delta_1 - \delta_2 - \theta_{12}) \quad (۳۱-۱۲)$$

$$Q_1 = -|E'_1|^2 B_{11} + |E'_1| |E'_2| |Y_{12}| \sin(\delta_1 - \delta_2 - \theta_{12}) \quad (۳۲-۱۲)$$

از دو معادله بالا، با تعویض زیرنویسها دو معادله مشابه، برای شیئه ۲ به دست می‌آید. اگر فرض کنیم:

$$\delta = \delta_1 - \delta_2$$

و زاویه جدیدی، γ ، چنین تعریف کنیم:

$$\gamma = \theta_{12} - \frac{\pi}{2}$$

از معادله‌های (۳۱-۱۲) و (۳۲-۱۲) به دست می‌آوریم:

$$P_1 = |E'_1|^2 G_{11} + |E'_1| |E'_2| |Y_{12}| \sin(\delta - \gamma) \quad (۳۳-۱۲)$$

$$Q_1 = -|E'_1|^2 B_{11} - |E'_1| |E'_2| |Y_{12}| \cos(\delta - \gamma) \quad (۳۴-۱۲)$$

معادله (۳۳-۱۴) را می توان به صورت بسیار ساده تر زیر نوشت:

$$P_e = P_e + P_{\max} \sin(\delta - \gamma) \quad (۳۵-۱۴)$$

که در آن

$$P_e = |E'_1|^2 G_{11} \quad P_{\max} = |E'_1| |E'_2| |Y_{12}| \quad (۳۶-۱۴)$$

چون P_1 توان الکتریکی خروجی ژنراتور را نمایش می دهد (از اتلاف آرمچر صرف نظر شده است) در معادله (۳۵-۱۴)، P_e را جانشین آن کرده ایم. این معادله اغلب، معادله توان-زاویه نامیده می شود و نمودار آن تابعی است از δ که منحنی توان-زاویه نام دارد. پارامترهای P_e و $P_{\max}$ ، γ برای یک آرایش معین شبکه و با اندازه ولتاژهای ثابت $|E'_1|$ و $|E'_2|$ ، ثابت اند. وقتی شبکه بدون مقاومت فرض شود همه عناصر Y_{bus} سوسپانسی اند و بنابراین، G_{11} و γ صفر ند. به این ترتیب، معادله توان-زاویه شبکه رنکتناسی خالص، این معادله ساده و آشناست:

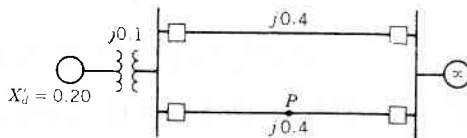
$$P_e = P_{\max} \sin \delta \quad (۳۷-۱۴)$$

که در آن $P_{\max} = |E'_1| |E'_2| / X$ و X رنکتناس انتقالی بین E'_1 و E'_2 است. مثال ۳-۱۴ نمودار تک خطی شکل ۴-۱۴، ژنراتوری را نشان می دهد که از طریق خطهای انتقال موازی، به سیستم شهری بزرگی که می تواند شینه بی نهایت فرض شود بسته شده است. توان تحویلی ماشین، ۱۰۰ pu است و ولتاژ بین سرها و ولتاژ شینه بی نهایت نیز هر دو ۱۰۰ pu است. علدهای روی نمودار، مقدار رنکتناسها را بر مبنای مشترک سیستم نشان می دهند. رنکتناس گذرای ژنراتور چنانکه دیسه می شود برابر ۲۰۰ pu است. معادله توان-زاویه سیستمی را بیابید که با این شرایط کار می کند. حل: شکل ۴-۱۴ (الف)، نمودار رنکتناسی سیستم را نشان می دهد. رنکتناس متوالی بین ولتاژ دوسر و شینه بی نهایت یعنی:

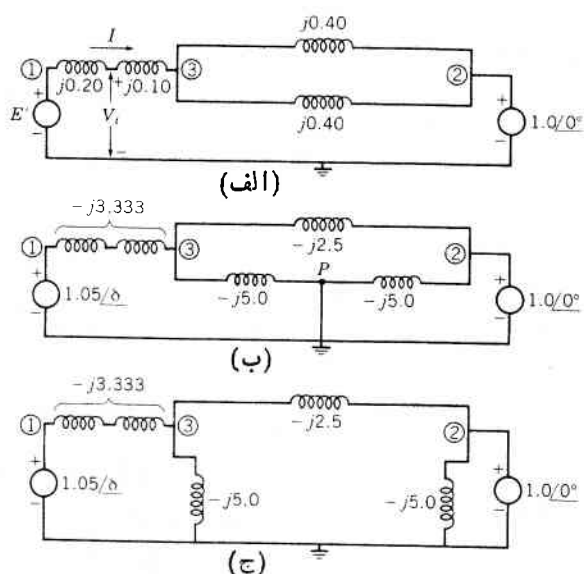
$$X = 0.10 + \frac{0.4}{2} = 0.3 \text{ در-یک}$$

و توان خروجی ۱۰۰ pu را در معادله توان-زاویه قرار می دهیم:

$$\frac{|V_1| |V_2|}{X} \sin \alpha = \frac{(1.0)(1.0)}{0.3} \sin \alpha = 1.0$$



شکل ۴-۱۴ نمودار تک-خطی مثالهای ۳-۱۴ و ۴-۱۴. نقطه P ، وسط خط است.



شکل ۵-۱۴ نمودار رئکتانسی، (الف) برای شبکه پیش از عیب مثال ۱۴-۳ با امپدانسهای در-یکی؛ (ب) و (ج) برای شبکه پس از عیب مثال ۱۴-۴ با همان امپدانسهای تبدیل شده به ادمیتانس در-یکی.

که در آن V ، ولتاژ شینه بی نهایت و α ، زاویه ولتاژ بین سرها در شینه بی نهایت است. α از این معادله چنین به دست می آید

$$\alpha = \sin^{-1} 0.3 = 17.458^\circ$$

بنابراین ولتاژ بین سرها برابر است با

$$V_i = 1.0 \angle 17.458^\circ = 0.945 + j0.300 \text{ در-یک}$$

حال جریان خروجی ژنراتور به این صورت محاسبه می شود:

$$I = \frac{1.0 \angle 17.458^\circ - 1.0 \angle 0^\circ}{j0.3}$$

$$= 1.0 + j0.1535 = 1.012 \angle 8.729^\circ \text{ در-یک}$$

پس، ولتاژ داخلی گذرا برابر است با:

$$E' = (0.945 + j0.300) + j(0.2)(1.0 + j0.1535)$$

$$= 0.923 + j0.5 = 1.050 \angle 28.44^\circ \text{ در-یک}$$

رئکتانس متوالی کل برای تعیین معادله توان-زاویه مربوط به ولتاژ داخلی گذرا، و ولتاژ شینه بی نهایت، V ، برابر است با:

$$X = 0.2 + 0.1 + \frac{0.4}{2} = 0.5 \text{ در-یک}$$

پس معادله موردنظر عبارت است از:

$$P_e = \frac{(1.05)(1.0)}{0.5} \sin \delta = 2.1 \sin \delta \text{ در-یک}$$

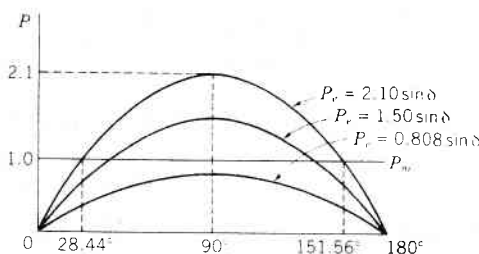
که در آن δ ، زاویه روتور ماشین نسبت به شینه بی نهایت است.

این معادله توان-زاویه در شکل ۱۴-۶ رسم شده است. البته توان مکانیکی ورودی، P_m ، ثابت است و نقطه نظیرش بر منحنی توان-زاویه سینوسی، زاویه کار $\delta_o = 28.44^\circ$ را تعیین می کند که زاویه وضع ابتدایی روتور ژنراتور، و متناظر با شرایط کار داده شده است. معادله تابخورد ماشین به صورت زیر است:

$$\frac{H}{180f} \frac{d^2\delta}{dt^2} = 1.0 - 2.1 \sin \delta \text{ در-یک} \quad (14-38)$$

که در آن H بر حسب مگاژول بر مگاوات آمپر، f فرکانس الکتریکی سیستم، و δ بر حسب درجه الکتریکی است. می توانیم به سادگی نتایج را کنترل کنیم زیرا در شرایط کار، $P_e = 2.1 \sin 28.44^\circ = 1.0 \text{ pu}$ دقیقاً متناظر با توان مکانیکی ورودی P_m است و شتاب صفر است. □

در مثال بعد، معادله توان-زاویه را برای همان سیستم با اتصالی سه فاز در نقطه P ، وسط یکی از خطهای انتقال، تعیین می کنیم. مادامی که عیب باقی است شتاب مثبت است. مثال ۱۴-۴ وقتی سیستم مثال ۱۴-۳ در شرایط ذکر شده کار می کند یک اتصالی سه فاز در نقطه P شکل ۱۴-۴ رخ می دهد. معادله توان-زاویه سیستم اتصالی کرده و معادله



شکل ۱۴-۶ رسم منحنیهای توان-زاویه مثالهای ۱۴-۳ تا ۱۴-۵.

متناظر تا بخورد را تعیین کنید H را 5 MJ/MVA بگیرید.
 حل: شکل ۵-۱۴ (ب)، نمودار رئکتانسی را به فرض اتصالی در نقطه P از سیستم نشان می‌دهد. اعداد روی شکل، مقدار ادمیتانسها به دریک‌اند. رسم دوباره نمودار رئکتانسی شکل ۵-۱۴ (ج) به وضوح، تأثیر اتصال کسوتاه ناشی از اتصالی را نمایش می‌دهد. مطابق محاسبات مثال ۳-۱۴، ولتاژ داخلی گذرای ژنراتور با فرض ثابت بودن حلقه‌زننده‌های شار در ماشین، برابر $284.4^\circ / 105 \text{ E}'$ باقی می‌ماند. باید ادمیتانس انتقالی خالص وصل‌کننده منابع ولتاژ را تعیین کرد. شینه‌ها چنانکه دیدیم شماره‌گذاری شده‌اند و Y_{bus} با ملاحظه شکل ۵-۱۴ (ج) چنین نوشته می‌شود:

$$Y_{bus} = j \begin{bmatrix} -3.333 & 0 & 3.333 \\ 0 & -7.50 & 7.50 \\ 3.333 & 7.50 & -10.833 \end{bmatrix}$$

شینه ۳ به هیچ منبع خارجی وصل نیست و می‌توان آن را به‌روش حذف گره بخش ۷-۴ حذف کرد و ماتریس ادمیتانس شینه کاهش یافته را چنین به‌دست آورد:

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} -2.308 & 0.769 \\ 0.769 & -6.923 \end{bmatrix}$$

اندازه ادمیتانس انتقالی برابر 0.769 است و بنابراین:

$$P_{\max} = |E'_1| |E'_2| |Y_{12}| = (105)(105)(0.769) = 808 \text{ دریک}$$

پس معادله توان دریک زاویه، با فرض اتصالی در سیستم، عبارت است از:

$$P_e = 808 \sin \delta \text{ دریک}$$

و معادله تا بخورد متناظر عبارت است از:

$$\frac{5}{180f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = 105 - 808 \sin \delta \text{ دریک} \quad (39-14)$$

دقت کنید که روتور به علت لختی خود نمی‌تواند در هنگام وقوع اتصالی آنرا تغییر وضعیت بدهد. بنابراین زاویه ابتدایی روتور، δ مطابق مثال ۳-۱۴ برابر 284.4° است. توان الکتریکی خروجی و توان شتاباننده ابتدایی نیز به ترتیب عبارت انداز:

$$P_e = 808 \sin 284.4^\circ = 385 \text{ دریک}$$

$$P_a = 105 - 385 = -280 \text{ دریک}$$

شتاب ابتدایی، مثبت است و اندازه‌اش برابر است با:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{180f}{\delta} (0.615) = 2214f \quad \text{elec deg/s}^2$$

که در آن f ، فرکانس سیستم است. سیستم رله گذاری خط، اتصالی خط را حس می کند و با باز کردن همزمان مدارشکتهای سرخط، اتصالی را حذف می کند. با این رویداد، معادله توان-زاویه دیگری حاکم می شود زیرا شبکه تغییر یافته است. □

مثال ۵-۱۴ باز شدن همزمان مدارشکتهای دوسر خط اتصالی کرده، اتصالی سیستم مثال ۴-۱۴ را حذف می کند. معادله توان-زاویه و معادله تابخورد پس از عیب را تعیین کنید.

حل: ملاحظه شکل ۵-۱۴ (الف)، نشان می دهد که پس از حذف خط اتصالی کرده، ادمیتانس انتقالی خالص سراسری سیستم برابر است با:

$$Y_{12} = \frac{1}{j(0.02 + 0.01 + 0.04)} = -j19429 \quad \text{در يك}$$

یا در ماتریس ادمیتانس شینه:

$$Y_{12} = j19429$$

بنابراین، معادله توان-زاویه پس از عیب عبارت است از:

$$P_e = (1.05)(1.0)(19429) \sin \delta = 19500 \sin \delta$$

و معادله تابخورد عبارت است از:

$$\frac{\delta}{180f} \frac{d^2\delta}{dt^2} = 1.0 - 19500 \sin \delta$$

شتاب در لحظه حذف اتصالی، به وضع زاویه ای روتور در آن لحظه بستگی دارد. شکل ۵-۱۴، منحنیهای توان-زاویه مثالهای ۳-۱۴ تا ۵-۱۴ را مقایسه می کند. □

۵-۱۴ همگرایی توانهای همزمان ساز

در مثال ۳-۱۴، نقطه کار بر روی منحنی سینوسی P_e در شکل ۵-۱۴ به ازای $\delta_0 = 28.4^\circ$ به دست آمده که در آن توان مکانیکی ورودی P_m ، برابر توان الکتریکی خروجی P_e است.

1. Coefficient

در همان شکل دیده می‌شود که در $\delta_o = 15.1856^\circ$ نیز P_e برابر P_m است و این نیز ممکن است نقطه کار قابل قبول دیگری باشد. اما اکنون نشان می‌دهیم که چنین نیست.

شرط بدیهی قابل قبول بودن نقطه کار آن است که وقتی توان الکتریکی خروجی ماشین موقتاً تغییر می‌کند ژنراتور همزمانیش را از دست ندهد. برای بررسی این شرط به فرض توان ورودی مکانیکی ثابت، تغییر جزئی زیر را در پارامترهای نقطه کار در نظر بگیرید

$$\delta = \delta_o + \delta_\Delta \quad P_e = P_{eo} + P_{e\Delta} \quad (40-14)$$

که در آنها زیر نویس صفر، مقادیر نقطه کار حالت مانا را نشان می‌دهد و زیر نویس دلتا تغییر جزئی نسبت به این مقادیر را مشخص می‌کند. با گذاشتن معادله‌های (۴۰-۱۴) در معادله (۳۷-۱۴)، معادله توان-زاویه سیستم کلی دو ماشین به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} P_{eo} + P_{e\Delta} &= P_{\max} \sin(\delta_o + \delta_\Delta) \\ &= P_{\max} (\sin \delta_o \cos \delta_\Delta + \cos \delta_o \sin \delta_\Delta) \end{aligned}$$

چون انحراف δ_Δ از δ_o جزئی است؛

$$\sin \delta_\Delta \cong \delta_\Delta \quad \text{و} \quad \cos \delta_\Delta \cong 1 \quad (41-14)$$

و معادله قبل چنین می‌شود:

$$P_{eo} + P_{e\Delta} = P_{\max} \sin \delta_o + (P_{\max} \cos \delta_o) \delta_\Delta \quad (42-14)$$

که در آن بازهم از علامت تساوی استفاده شده است. در نقطه کار ابتدایی δ_o داریم؛

$$P_m = P_{eo} = P_{\max} \sin \delta_o \quad (43-14)$$

و بنابراین از دو معادله اخیر می‌توان نوشت

$$P_m - (P_{eo} + P_{e\Delta}) = -(P_{\max} \cos \delta_o) \delta_\Delta \quad (44-14)$$

با گذاشتن متغیرهای جزئی معادله (۴۰-۱۴) در معادله (۴۲-۱۴) تا بخورد، به دست می‌آوریم:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2(\delta_o + \delta_\Delta)}{dt^2} = P_m - (P_{eo} + P_{e\Delta}) \quad (45-14)$$

چون δ_o مقدار ثابتی است، با گذاشتن معادله (۴۴-۱۴) به جای طرف راست این معادله و سپس جا به جایی جمله‌ها، داریم:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta_\Delta}{dt^2} + (P_{\max} \cos \delta_o) \delta_\Delta = 0 \quad (46-14)$$

اما $P_{\max} \cos \delta_0$ ، شیب منحنی توان-زاویه به ازای زاویه δ_0 است، این شیب را با S_P تعریف می‌کنیم:

$$S_P = \left. \frac{dP_e}{d\delta} \right|_{\delta=\delta_0} = P_{\max} \cos \delta_0 \quad (۴۷-۱۴)$$

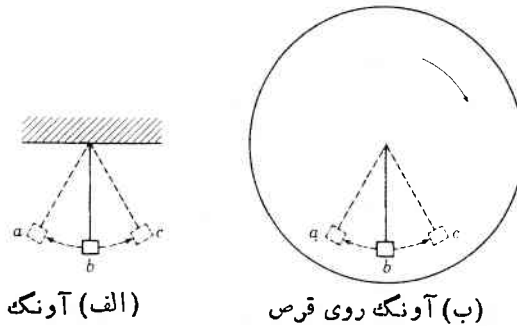
S_P را همگر توان همزمان ساز می‌نامیم. اگر در معادله (۴۶-۱۴) از S_P استفاده کنیم می‌توانیم معادله تابخورد حاکم بر تغییرات جزئی زاویه روتور را چنین بنویسیم:

$$\frac{d^2 \delta_\Delta}{dt^2} + \frac{\omega_s S_P}{2H} \delta_\Delta = 0 \quad (۴۸-۱۴)$$

که یک معادله دیفرانسیل مرتبه دوم خطی است و پاسخش به علامت جبری S_P بستگی دارد. وقتی S_P مثبت است پاسخ $\delta_\Delta(t)$ با حرکت نوسانی ساده متناظر است، نوسانهای نامیرای یک آونگ* چنین حرکتی را نمایش می‌دهد. وقتی S_P منفی است پاسخ $\delta_\Delta(t)$ بدون حد به‌طور نمایی افزایش می‌یابد. بنابراین در شکل ۱۴-۶، نقطه کار $\delta = ۲۸.۴۴^\circ$ ، نقطه تعادلی پایدار است زیرا تابخورد زاویه روتور در حد یک اختلال کوچک است. از نظر فیزیکی، پس از اختلال موقت الکتریکی، میرایی، زاویه روتور را به $\delta_0 = ۲۸.۴۴^\circ$ باز می‌گرداند. از طرف دیگر، نقطه $\delta = ۱۵۱.۵۶^\circ$ ، نقطه تعادلی ناپایدار است زیرا در آنجا S_P منفی است. لذا این نقطه، نقطه کار معتبری نیست.

ممکن است وضعیت متغیر روتور ژنراتور را که نسبت به‌شینه بی‌نهایت تاب می‌خورد، با مثالی مجسم کرد. مطابق شکل ۱۴-۷ (الف)، آونگی را که نسبت به‌محوری از یک قصاب ساکن تاب می‌خورد در نظر بگیرید. نقاط a و c ، نقاط نهایی نوسان آونگ حول نقطه تعادل b اند. میرایی، سرانجام، آونگ را در b متوقف می‌کند. حال قرصی را که در جهت عقربه‌های ساعت حول محور آونگ می‌چرخد همانند شکل ۱۴-۷ (ب)، در نظر بگیرید و حرکت آونگ را به حرکت قرص ضمیمه کنید. وقتی آونگ از a به c حرکت می‌کند سرعت زاویه‌ای کل کمتر از سرعت قرص است. وقتی آونگ از c به a حرکت می‌کند سرعت زاویه‌ای کل بیشتر از سرعت قرص است. در نقاط a و c سرعت زاویه‌ای آونگ، صفر است و سرعت زاویه‌ای کل، برابر سرعت زاویه‌ای قرص است. اگر سرعت زاویه‌ای قرص، برابر سرعت همزمان روتور باشد و اگر حرکت آونگ، به‌تنهایی، تابخورد روتور را نسبت به‌شینه بی‌نهایت نمایش بدهد برهم‌نهی حرکت آونگ و قرص، حرکت واقعی روتور را می‌نمایاند.

* معادله حرکت نوسانی ساده عبارت است از $d^2x/dt^2 + \omega_n^2 x = 0$ که دارای پاسخ عمومی $A \cos \omega_n t + B \sin \omega_n t$ است. ثابتهای A و B را شرایط ابتدایی تعیین می‌کنند. پاسخ، یک منحنی سینوسی نامیرا با فرکانس زاویه‌ای ω_n است.



شکل ۱۴-۷ آونک و قرص چرخان برای نمایش تابخورد روتور نسبت به شینه بی نهایت.

از بحث بالا نتیجه می گیریم، که اگر همگر توان همزمان ساز، S_p ، مثبت باشد پاسخ معادله (۱۴-۴۸) نوسانهای سینوسی خواهد بود. فرکانس زاویه ای نوسانهای نامیرا عبارت است از:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\omega_s S_p}{2H}} \quad \text{elec rad/s} \quad (14-49)$$

که متناظر با فرکانس نوسان زیر است:

$$\square \quad f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\omega_s S_p}{2H}} \quad \text{Hz} \quad (14-50)$$

مثال ۱۴-۶ وقتی ماشین مثال ۱۴-۳ در $\delta = 28.44^\circ$ کار می کند در معرض اختلال موقت و کوچک سیستم الکتریکی واقع می شود. اگر پیش از آنکه نخست رانه پاسخ دهد اختلال برداشته شود، فرکانس دوره نوسان روتور ماشین را تعیین کنید. $H = 5 \text{ MJ/MVA}$.

حل: معادله تابخورد قابل اجرا، معادله (۱۴-۴۸) است و همگر توان همزمان ساز در نقطه کار، برابر است با:

$$S_p = 210 \cos 28.44^\circ = 184.66$$

بنابراین، فرکانس زاویه ای نوسان برابر است با:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\omega_s S_p}{2H}} = \sqrt{\frac{377 \times 184.66}{2 \times 5}} = 83.43 \text{ elec rad/s}$$

فرکانس متناظر نوسان برابر است با:

$$f_n = \frac{8333}{2\pi} = 133 \text{ Hz}$$

و دوره نوسان برابر است با:

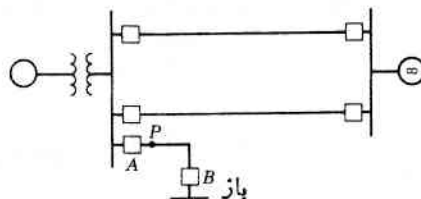
$$T = \frac{1}{f_n} = 0.0075 \text{ s}$$

این مثال ازدیدگاه عملی بسیار مهم است زیرا حدود اندازه فرکانسهای را نشان می‌دهد که در یک سیستم قدرت بزرگ دارای چند ماشین به هم پیوسته، به فرکانس نامی ۶۰ Hz اضافه می‌شود. چون در طی روز، بار سیستم به تصادف تغییر می‌کند ماشینها بین خود با فرکانسی در حدود ۱ Hz نوسان می‌کنند اما اثر میراکننده‌های مختلف ناشی از نخست رانه، بارهای سیستم و خود ماشینها، این نوسانها را به سرعت میرا می‌کنند. باید دانست که حتی اگر سیستم انتقال دارای مقاومت باشد باز هم حرکت روتور، نوسانی ساده و نامیراست. مسئله ۱۴-۸، تأثیر مقاومت را بر همگر توان همزمان ساز و فرکانس نوسان بررسی می‌کند در یکی از بخشهای بعدی باز هم از مفهوم همگر توان همزمان ساز بحث خواهد شد. در بخش بعد، روش تعیین پایداری در حالت گذرای ناشی از اختلال بزرگ را بررسی می‌کنیم.

۱۴-۶ معیار مساحتی برای پایداری

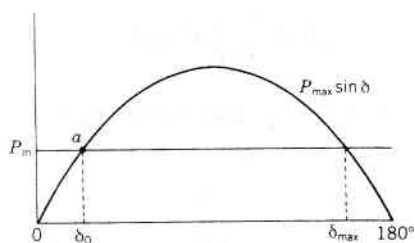
در بخش ۱۴-۴، معادله‌های تابخورد را که ذاتاً ناخطی اند به دست آوردیم. پاسخ واقعی چنین معادله‌هایی را نمی‌توان به صراحت پیدا کرد. حتی در حالتی که یک تک ماشین نسبت به شینه بی نهایت تاب می‌خورد بسیار مشکل است که شکل درست پاسخها را به دست آورد. از این روست که معمولاً روشهای کامپیوتری به کار می‌رود. برای بررسی پایداری یک سیستم دو ماشین، بدون حل معادله تابخورد، روش مستقیمی وجود دارد که اکنون از آن بحث خواهیم کرد.

سیستم نمایانده شده در شکل ۱۴-۸، صرف نظر از اضافه شدن یک خط انتقال کوتاه، همان سیستم مفروض قبلی است. ابتدا مدار شکن A، بسته است اما مدار شکن B، در سر

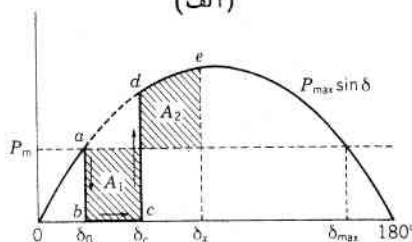


شکل ۱۴-۸ نمودار تک-خطی سیستم شکل ۱۴-۴ با اضافه شدن یک خط انتقال کوتاه.

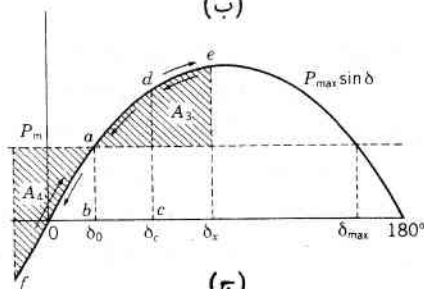
دیگر خط کوتاه، باز است. بنابراین، شرایط ابتدایی کار مثال ۱۲-۳ بی هیچ تغییری معتبر می ماند. مدار شکن A ، غیب سه فاز را که در نقطه P ، نزدیک شینه، رخ می دهد پس از زمان کوتاهی حذف می کند. بنابراین به استثنای زمانی که اتصال وجود دارد سیستم انتقال تغییری نمی کند. اتصال کوتاه ناشی از اتصال واقعی روی شینه است و لذا، توان الکتریکی خروجی ژنراتور تا زمان حذف اتصال صفر است. با تحلیل منحنیهای توان-زاویه شکل ۱۲-۹ می توانیم شرایط واقعی را پیش از اتصال، در زمان اتصال و پس از آن دریا بیم. نخست، ژنراتور در سرعت همزمان بازوایه ژنراتور δ_0 کار می کند و مطابق نقطه α در شکل ۱۲-۹ (الف)، توان مکانیکی ورودی P_m برابر توان الکتریکی خروجی P_e است. وقتی در $t = 0$ اتصال رخ می دهد توان الکتریکی خروجی، ناگهان صفر می شود در حالی که توان مکانیکی ورودی، مطابق شکل ۱۲-۹ (ب)، تغییر نمی کند. اختلاف توان را باید با آهنگ تغییر انرژی جنبشی ذخیره شده در جرمهای ژنراتور توضیح داد. لذا، سرعت در



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۲-۹ منحنیهای توان-زاویه ژنراتور شکل ۱۲-۸. مساحتهای A_1 و A_2 همانند مساحتهای A_3 و A_4 با یکدیگر مساوی اند.

اثر توان شتاباننده ثابت، P_m ، افزایش می‌یابد. اگر زمان حذف اتصالی را با t_e نشان دهیم، در زمان t کوچکتر از t_e ، شتاب ثابت است و داریم:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2H} P_m \quad (51-14)$$

مادامی که اتصالی وجود دارد افزایش سرعت، بالای سرعت همزمان را با انتگرالگیری از معادله بالا پیدامی‌کنیم:

$$\frac{d\delta}{dt} = \int_0^t \frac{\omega_s}{2H} P_m dt = \frac{\omega_s}{2H} P_m t \quad (52-14)$$

يك انتگرالگیری نسبت به زمان، وضع زاویه‌ای روتور را مشخص می‌کند:

$$\delta = \frac{\omega_s P_m}{4H} t^2 + \delta_0 \quad (53-14)$$

معادله‌های (52-14) و (53-14) نشان می‌دهند که وقتی زاویه روتور از مقدار δ_0 به سوی مقدار هنگام حذف اتصالی، δ_e ، پیش می‌رود یعنی در شکل ۹-۱۴، زاویه δ از b به c می‌رود، سرعت روتور نسبت به سرعت سنکرون به طور خطی با زمان، افزایش می‌یابد. در لحظه حذف اتصالی، افزایش سرعت روتور و زاویه بین ژنراتور و شینه بی‌نهایت عبارت‌اند از:

$$\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{t=t_c} = \frac{\omega_s P_m}{2H} t_c \quad (54-14)$$

و

$$\delta(t) \Big|_{t=t_c} = \frac{\omega_s P_m}{4H} t_c^2 + \delta_0 \quad (55-14)$$

وقتی در زاویه δ_e ، اتصالی حذف می‌شود توان الکتریکی خروجی دفعته‌اً زیاد می‌شود و به مقدار متناظر با نقطه d از منحنی توان-زاویه می‌رسد. در d ، توان الکتریکی خروجی از توان مکانیکی ورودی تجاوز می‌کند و لذا توان شتاباننده منفی است. در نتیجه وقتی که در شکل ۹-۱۴ (ج)، P_e از d به e می‌رود، روتور و امی شتابد. در e ، سرعت روتور دوباره برابر سرعت همزمان است هر چند زاویه روتور تا δ_e پیش رفته است. چنانکه خواهیم دید تساوی مساحت‌های A_1 و A_2 ، زاویه δ_e را معین می‌کند. توان شتاباننده در e ، هنوز منفی (کندکننده) است و بنابراین روتور نمی‌تواند در سرعت همزمان بماند و باید به واشتابیدن ادامه دهد. سرعت نسبی منفی است و زاویه روتور از δ_e در e روی منحنی توان-زاویه شکل ۹-۱۴ (ج)، تا نقطه a که در آن سرعت روتور از سرعت سنکرون کمتر است

برمی گردد. از a تا f توان مکانیکی از توان الکتریکی تجاوز می کند و سرعت روتور دوباره زیاد می شود تا اینکه در f به سرعت همزمان می رسد. نقطه f درجایی است که مساحت های A_p و A_f برابرند. اگر میرایی نباشد روتور در چرخه $e-a-f$ ، $f-a-e$ و غیره نوسان می کند و در e و f به سرعت همزمان می رسد.

چنانکه خواهیم دید مساحت های سایه خورده A_p و A_f در شکل ۹-۱۴ (ب)، و همچنین مساحت های A_p و A_f در شکل ۹-۱۴ (ج)، باید مساوی باشند. در سیستمی که یک ماشین نسبت به شینه بی نهایت تاب می خورد برای تعیین پایداری حالت گذاری سیستم، بدون حل معادله تاب خورد، می توان اصل تساوی مساحتها را به نام معیار مساحت های مساوی به کار برد. هر چند این روش برای سیستم های چند ماشین عملی نیست اما به فهم چگونگی اثر بعضی عوامل بر پایداری حالت گذرای سیستم کمک می کند.

معیار مساحت های مساوی که برای یک ماشین و یک شینه بی نهایت به دست آمده است بنا بر ملاحظات بخش ۱۴-۳ می تواند به آسانی به سیستم های دو ماشین کلی انطباق داده شود. معادله تاب خورد برای ماشین متصل به شینه عبارت است از:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (۵۶-۱۴)$$

سرعت زاویه ای روتور را نسبت به سرعت سنکرون به این صورت تعریف می کنیم:

$$\omega_r = \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (۵۷-۱۴)$$

با مشتق گیری از این معادله نسبت به t و گذاشتن در معادله (۵۶-۱۴) داریم:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega_r}{dt} = P_m - P_e \quad (۵۸-۱۴)$$

واضح است که در سرعت سنکرون، ω برابر ω_s است و ω_r صفر است. با ضرب طرفین معادله (۵۸-۱۴) در $\omega_r = d\delta/dt$ داریم:

$$\frac{H}{\omega_s} 2\omega_r \frac{d\omega_r}{dt} = (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt} \quad (۵۹-۱۴)$$

یا

$$\frac{H}{\omega_s} \frac{d(\omega_r^2)}{dt} = (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt} \quad (۶۰-۱۴)$$

با ضرب در dt و انتگرال گیری داریم:

$$\frac{H}{\omega_s} (\omega_{r2}^2 - \omega_{r1}^2) = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_m - P_e) d\delta \quad (۶۱-۱۴)$$

زیر نویس جمله‌های ω_p و ω_r با هم متناظرند یعنی سرعت روتور ω_r با زاویه δ_r و سرعت ω_p با زاویه δ_p متناظر است. چون ω_r ، انحراف سرعت روتور از سرعت همزمان را می‌نمایاند، واضح است که اگر روتور در δ_r و δ_p دارای سرعت سنکرون باشد متناظرآ $\omega_r = \omega_p = 0$. در این صورت، معادله (۱۴-۶۱) به شکل زیر در می‌آید:

$$\int_{\delta_r}^{\delta_p} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (14-62)$$

این معادله برای هر دو نقطه δ_r و δ_p ، از نمودار توان-زاویه، به شرطی صادق است که روتور در آن نقاط دارای سرعت سنکرون باشد. چنین دو نقطه‌ای در شکل ۱۴-۹ (ب) عبارت اند از a و e که با δ_o و δ_x متناظرند. اگر انتگرالگیری را در دو مرحله انجام دهیم، می‌توانیم بنویسیم:

$$\int_{\delta_o}^{\delta_c} (P_m - P_e) d\delta + \int_{\delta_c}^{\delta_x} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (14-63)$$

یا

$$\int_{\delta_o}^{\delta_c} (P_m - P_e) d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_x} (P_e - P_m) d\delta \quad (14-64)$$

انتگرال طرف چپ در زمان عیب صادق است در حالی که انتگرال طرف راست متناظر با مدت زمان بلافاصله پس از اتصالی تا نقطه نهایی تابخورد δ_x است. در شکل ۱۴-۹ (ب)، P_e در زمان اتصالی صفر است. طرفهای چپ و راست معادله (۱۴-۶۴) به ترتیب با مساحت‌های سایه خورده A_1 و A_2 برابرند. پس، دو مساحت A_1 و A_2 مساوی‌اند. چون در شکل ۱۴-۹ (ج)، روتور در δ_x و همچنین در δ_p دارای سرعت سنکرون است، مطابق استدلال بالا A_2 برابر A_1 است. مساحت‌های A_1 و A_2 مادامی‌که روتور برمی‌شتابد مستقیماً با افزایش انرژی جنبشی روتور متناسب‌اند در حالی‌که مساحت‌های A_1 و A_2 مادامی‌که روتور وادی شتابد با کاهش انرژی جنبشی روتور متناسب‌اند. می‌توان از ملاحظه معادله (۱۴-۶۱) نیز به این نکته پی‌برده بنا براین، معیار مساحت‌های مساوی صرفاً بیان می‌کند که برای بازگشت روتور به سرعت سنکرون باید انرژی جنبشی را که عیب به روتور می‌دهد پس از اتصالی از آن پس گرفت.

مساحت سایه خورده A_1 به زمان لازم برای حذف عیب بستگی دارد. اگر حذف، با تأخیر باشد زاویه δ افزایش می‌یابد در نتیجه، مساحت A_1 زیاد می‌شود و معیار مساحت‌های مساوی ایجاب می‌کند که مساحت A_2 نیز زیاد شود تا روتور را با زاویه ماکزیمم تابخورد بزرگتری، δ_x ، به سرعت همزمان بازگرداند. اگر زمان حذف اتصالی طولانی شود به نحوی که در شکل ۱۴-۹، زاویه روتور δ تا ماورای δ_{max} تاب بخورد، آن‌گاه در

آن نقطه از منحنی توان - زاویه، اگر توان شتاباننده مثبت باشد روتور از سرعت سنکرون بیستراست. این توان شتاباننده مثبت، زاویه δ را بدون حد افزایش خواهد داد و ناپایداری به وجود می آید. بنابراین به منظور اینکه شرط معیار مساحت‌های مساوی برای پایداری صادق باشد زاویه حذف اتصالی باید مقداری بحرانی داشته باشد. شکل ۱۴-۱۵، این زاویه را که زاویه بحرانی حذف δ_{cr} نامیده می‌شود، نشان می‌دهد. زمان بحرانی متناظر با حذف اتصالی را زمان بحرانی حذف t_{cr} می‌نامند.

در حالت خاص شکل ۱۴-۱۵، می‌توان هم زاویه بحرانی حذف و هم زمان بحرانی حذف را به صورت زیر محاسبه کرد. مساحت مستطیل A_1 برابر است با:

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} P_m d\delta = P_m(\delta_{cr} - \delta_0) \quad (۶۵-۱۴)$$

در حالی که مساحت A_2 برابر است با:

$$\begin{aligned} A_2 &= \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} (P_{max} \sin \delta - P_m) d\delta \quad (۶۶-۱۴) \\ &= P_{max}(\cos \delta_{cr} - \cos \delta_{max}) - P_m(\delta_{max} - \delta_{cr}) \end{aligned}$$

بامساوی قراردادن عبارات A_1 و A_2 و جابه‌جایی جمله‌ها، داریم:

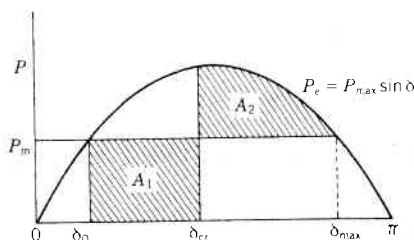
$$\cos \delta_{cr} = (P_m / P_{max})(\delta_{max} - \delta_0) + \cos \delta_{max} \quad (۶۷-۱۴)$$

در منحنی سینوسی توان - زاویه می‌بینیم که:

$$\delta_{max} = \pi - \delta_0 \text{ elec rad} \quad (۶۸-۱۴)$$

و

$$P_m = P_{max} \sin \delta_0 \quad (۶۹-۱۴)$$



شکل ۱۴-۱۵ منحنی توان - زاویه نشان‌دهنده زاویه بحرانی حذف δ_{cr} . مساحت‌های A_1 و A_2 مساوی‌اند.

با گذاشتن $\delta_{\max}$ و P_m در معادله (۶۷-۱۴) و ساده کردن نتیجه، زاویه بحرانی حذف، δ_{cr} ، چنین به دست می آید:

$$\delta_{cr} = \cos^{-1}[(\pi - 2\delta_o) \sin \delta_o - \cos \delta_o] \quad (۷۰-۱۴)$$

با گذاشتن مقدار محاسبه شده بالا در طرف چپ معادله (۵۵-۱۴)، داریم:

$$\delta_{cr} = \frac{\omega_s P_m}{4H} t_{cr}^2 + \delta_o \quad (۷۱-۱۴)$$

که از روی آن زمان بحرانی حذف پیدا می شود:

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{cr} - \delta_o)}{\omega_s P_m}} \quad (۷۲-۱۴)$$

مثال ۷-۱۴ وقتی يك اتصالی سه فاز در نقطه P از خط انتقال کوتاه سیستم شکل ۸-۱۴ رخ می دهد، زاویه و زمان بحرانی حذف را حساب کنید. شرایط ابتدایی همانند مثال ۳-۱۴ است و $H = 5 \text{ MJ/MVA}$.
حل: از مثال ۳-۱۴ معادله توان-زاویه عبارت است از:

$$P_e = P_{\max} \sin \delta = 210 \sin \delta$$

زاویه ابتدایی روتور برابر است با:

$$\delta_o = 28.44^\circ = 0.496 \text{ elec rad}$$

و توان مکانیکی ورودی $P_m = 100 \text{ pu}$. بنابراین زاویه بحرانی حذف را از معادله (۷۰-۱۴) به دست می آوریم:

$$\begin{aligned} \delta_{cr} &= \cos^{-1}[(\pi - 2 \times 0.496) \sin 28.44^\circ - \cos 28.44^\circ] \\ &= 81.697^\circ = 1.4226 \text{ elec rad} \end{aligned}$$

با گذاشتن این مقدار و کمیت های معلوم دیگر در معادله (۷۲-۱۴) داریم:

$$\begin{aligned} t_{cr} &= \sqrt{\frac{4 \times 5(1.4226 - 0.496)}{377 \times 1}} \\ &= 0.222 \text{ s} \end{aligned}$$

این مقدار بر مبنای فرکانس ۶۰ هرتز، معادل زمان بحرانی حذف ۱۳۳ سیکل است. □

این مثال، مفهوم زمان بحرانی حذف را، که در طراحی مدارهای مناسب رله گذاری برای حذف اتصالی ضروری است، مطرح می کند. در حالت های کلی تر، نمی توان بدون حل معادله های تا بخورد با شبیه سازی کامپیوتری زمان بحرانی حذف را پیدا کرد.

۷-۱۴ کاربردهای دیگر معیار مساحت‌های مساوی

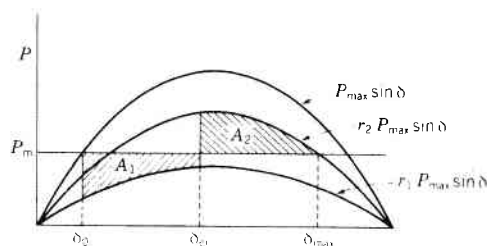
هر چند معیار مساحت‌های مساوی را فقط می‌توان در حالت دو ماشین، با يك ماشین و يك شینه بی‌نهایت، به کار برد این روش برای فهم آنچه هنگام وقوع اتصالی روی می‌دهد مفید است. کامپیوتر رقمی تنها وسیله عملی تعیین پایداری يك سیستم بزرگ است. به هر حال چون معیار مساحت‌های مساوی، برای فهم پایداری حالت گذرا بسیار مفید است، پیش از بحث تعیین منحنیهای تابخورد و روش کامپیوتری، بررسی آن را دنبال می‌کنیم.

وقتی يك ژنراتور از طریق دو خط انتقال موازی به يك شینه بی‌نهایت، توان می‌دهد قطع یکی از خطوط-حتی اگر خط دیگر بتواند بار را در وضعیت حالت مساوی تغذیه کند-ممکن است باعث از دست رفتن همزمانی ژنراتور شود. اگر در شینه‌ای که دو خط موازی به آن بسته شده است يك اتصال-کوتاه سه فاز رخ دهد هیچ يك از خطها نمی‌تواند توانی را انتقال دهد. این در اصل همان حالت مثال ۷-۱۴ است. اما اگر عیب در سر یکی از خطها باشد باز کردن مدار شکنهای دو سر آن خط، اتصالی را از سیستم جدا خواهد کرد و امکان انتقال توان از خط دیگر را خواهد داد. وقتی يك اتصالی سه فاز در نقطه‌ای از يك خط دو-مداره، جز در شینه‌های موازی‌کننده یا سرهای خط، رخ می‌دهد بین شینه‌های موازی‌کننده و اتصالی، امپدانس وجود دارد. بنابراین مادامی که عیب در سیستم باقی است، مقداری توان انتقال می‌یابد. معادله توان-زاویه مثال ۴-۱۴ این واقعیت را نشان می‌دهد.

وقتی در زمان اتصالی، توان منتقل می‌شود، معیار مساحت‌های مساوی مطابق شکل ۱۱-۱۴، که شبیه نمودار توان-زاویه شکل ۱۴-۶ است اجرا می‌شود. $P_{\max} \sin \delta$ ، $r_1 P_{\max} \sin \delta$ و $r_2 P_{\max} \sin \delta$ به ترتیب توانهایی است که می‌توان پیش از اتصالی، در زمان اتصالی و پس از حذف اتصالی با کلیدزنی در لحظه $\delta = \delta_{cr}$ ، انتقال داد. بررسی شکل ۱۱-۱۴ نشان می‌دهد که در این حالت، δ_{cr} زاویه بحرانی حذف است. با محاسبه مساحت‌های A_1 و A_2 از طریق روش مرحله‌ای بخش پیش داریم:

$$\cos \delta_{cr} = \frac{(P_m / P_{\max})(\delta_{\max} - \delta_0) + r_2 \cos \delta_{\max} - r_1 \cos \delta_0}{r_2 - r_1} \quad (۷۳-۱۴)$$

در این حالت برای زمان بحرانی حذف، t_{cr} پاسخ دقیق وجود ندارد. برای سیستم و محل



شکل ۱۱-۱۴ معیار مساحت‌های مساوی به کار رفته برای حذف اتصالی وقتی در زمان عیب، توان منتقل می‌شود. مساحت‌های A_1 و A_2 مساوی‌اند.

اتصال نشان داده شده در شکل ۱۴-۸، داریم $r_1 = 0$ و $r_2 = 1$ ، پس معادله بالا به شکل معادله (۱۴-۶۷) در می آید.

اتصال-کوتاههای غیر سه فاز، صرف نظر از محلشان، اجازه انتقال مقداری توان را می دهند زیرا در نمودار امیدانس ترتیب-مثبت به جای اتصال کوتاه کردن نقطه اتصال و شینه مرجع، با یک امیدانس نمایانده می شوند. هر قدر امیدانس موازی دو سر شبکه ترتیب-مثبت، که اتصال را می نمایاند، بزرگتر باشد توان انتقال یافته در زمان اتصال بیشتر است. به ازای هر زاویه حذف معین، میزان توان منتقل شده در زمان اتصال بر اندازه A_1 اثر می گذارد. لذا، هر چه مقدار r_1 کوچکتر باشد اختلال سیستم بزرگتر است زیرا کوچک بودن r_1 به معنای کم بودن توان منتقل شده در زمان اتصال و بزرگ بودن A_1 است. اتصالیها به ترتیب وخامت صعودی (کاهش $r_1 P_{max}$ عبارت اند از: ۱) اتصال تک خط-به-زمین، ۲) اتصالی خط-به-خط، ۳) اتصالی دو خط-به-زمین، ۴) اتصالی سه فاز. اتصالی یک خط-به-زمین بیشتر از همه و اتصالی سه فاز کمتر از همه روی می دهد برای اینکه یک سیستم کاملاً قابل اطمینان باشد باید برای پایداری در برابر اتصالیهای سه فاز در بدترین محلها طراحی شود و این روش عملاً در همه جا متداول است.

مثال ۱۴-۸ آرایش ابتدایی سیستم و شرایط کار پیش از اتصال، مطابق مثال ۱۴-۳، است. زاویه بحرانی حذف را در اتصالی سه فاز مثالهای ۱۴-۴ و ۱۴-۵ تعیین کنید.

حل: معادله های توان زاویه بنابر مثالهای پیش عبارت اند از:

$$P_{max} \sin \delta = 2100 \sin \delta \quad \text{پیش از اتصالی}$$

$$r_1 P_{max} \sin \delta = 0808 \sin \delta \quad \text{در زمان اتصالی}$$

$$r_2 P_{max} \sin \delta = 1500 \sin \delta \quad \text{پس از اتصالی}$$

لذا

$$r_1 = \frac{0808}{2100} = 0385 \quad r_2 = \frac{1500}{2100} = 0714$$

از مثال ۱۴-۳ داریم:

$$\delta_0 = 28.44^\circ = 0.496 \text{ rad}$$

و بنابر شکل ۱۴-۱۱ می توان نوشت

$$\delta_{max} = 180^\circ - \sin^{-1} \frac{1500}{1500} = 138.19^\circ = 2.412 \text{ rad}$$

بنابراین با گذاشتن مقادیر عددی در معادله (۱۴-۷۳) به دست می آوریم:

$$\cos \delta_{cr} = \frac{(100/210)(2412 - 0496) + 0714 \cos(13819^\circ) - 0385 \cos(2874^\circ)}{0714 - 0385}$$

$$= 0.127$$

لذا

$$\delta_{cr} = 82.726^\circ$$

برای تعیین زمان بحرانی حذف باید منحنی تاب خورد δ در برابر t را برای این مثال به دست آوریم. در بخش ۱۴-۹ یکی از روشهای تعیین چنین منحنی تاب خوردی را بررسی خواهیم کرد. □

۱۴-۸ بررسی پایداری سیستم چند ماشینه: نمایش سمتی

در سیستمهای سه یا چند ماشینه نمی توان مستقیماً معیار مساحت های مساوی را به کار برد. هر چند اساس پدیده فیزیکی مشاهده شده در مسائل دو ماشینه با حالت چند ماشینه یکی است، در بررسی پایداری حالت گذرا با افزایش تعداد ماشینها محاسبات نیز پیچیده تر می شوند. وقتی يك سیستم چند ماشینه در شرایط گذرای الکترومکانیکی کار می کند ماشینها، از طریق سیستم انتقال واسطه ای که آنها را به هم وصل می کند، بین خودشان نوسان می کنند. اگر فرض کنیم که هر ماشین به عنوان يك منبع نوسان منفرد کار می کند، این ماشین، يك نوسان الکترومکانیکی به سیستم به هم پیوسته ارسال می دارد. لختی و توان همزمان ساز ماشین، این نوسان را مشخص می کنند. فرکانس نوعی چنین نوسانی حدود ۱ تا ۲ Hz است که به فرکانس نامی سیستم، ۶۰ Hz اضافه می شود. وقتی روتور چند ماشین به طور همزمان متحمل نوسان گذرا می شوند منحنیهای تاب خورد، حضور ترکیبی از این نوع نوسانها را نشان خواهد داد. بنابراین مسلماً فرکانس سیستم انتقال نسبت به فرکانس نامی تغییر می کند ولی فرض می کنیم که پارامترهای شبکه ۶۰ Hz هنوز برقرار اند. به علاوه، در بررسیهای پایداری حالت گذرا برای کاستن پیچیدگی مدل سازی سیستم و بنا بر این کاهش بار محاسبات، معمولاً فرض می کنند:

الف) در سراسر زمان محاسبه منحنی تاب خورد، توان مکانیکی ورودی هر ماشین ثابت می ماند.

ب) توان میراکننده ناچیز است.

ج) می توان هر ماشین را با يك رئکتنانس گذرای ثابت به توالی يك ولتاژ داخلی گذرای ثابت نمایاند.

(د) زاویه مکانیکی روتور هر ماشین برابر زاویه فاز الکتریکی ولتاژ داخلی گذرا، δ ، است.

(ح) همه بارها امپدانسهایی موازی و نسبت به زمین اند که مقدار آنها از شرایط بلافاصله پیش از شرایط گذرا، تعیین می شود.

مدل پایداری براساس این فرضها را مدل کلاسیک پایداری سیستم می گویند و بررسیهایی که این مدل را به کار می برند بررسیهای کلاسیک پایداری نام دارند. این فرضها، که آنها را می پذیریم، به فرضهای بنیادینی که پیشتر در بخش ۱۴-۱ برای همه بررسیهای پایداری در نظر گرفتیم، افزوده می شوند. البته می توان برای تغییر يك یا چندتا از فرضهای (الف) تا (ح)، از برنامه های مفصل کامپیوتری و مدل های پیچیده تر بار و ماشین استفاده کرد. اما در این فصل برای بررسی اختلالاتی سیستم، ناشی از اتصالهای سه فاز، مدل کلاسیک را به کار خواهیم برد.

چنانکه دیدیم، در هر بررسی پایداری حالت گذرا باید وضعیت پیش از اتصال سیستم و آرایش شبکه را در زمان اتصال و پس از آن بدانیم. در نتیجه، در سیستم چندماشینه، دو مرحله مقدماتی ضرورت دارد:

۱. با استفاده از يك برنامه بخش بار تولید نوعی، وضعیت پیش از اتصال حالت مانای سیستم را محاسبه می کنند.

۲. نمایش پیش از اتصال شبکه را تعیین می کنند و سپس برای منظور کردن اتصال و وضعیت پس از اتصال آن را تغییر می دهند.

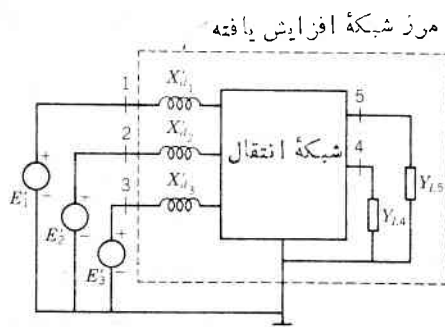
از اولین مرحله مقدماتی، مقادیر توان، توان واکنشی، و ولتاژ بین سرهای هر ژنراتور و شینه بار را می یابیم. همه زاویه ها را نسبت به شینه تابخور اندازه می گیریم. سپس ولتاژ داخلی هر ژنراتور را از معادله زیر محاسبه می کنیم.

$$E' = V_i + jX'_d I \quad (۷۴-۱۴)$$

که در آن V_i ، ولتاژ متناظر بین سرها و I ، جریان خروجی است. با استفاده از معادله زیر هر يك از بارها را در شینه اش به يك ادمیتانس ثابت نسبت به زمین، تبدیل می کنیم:

$$Y_L = \frac{P_L - jQ_L}{|V_L|^2} \quad (۷۵-۱۴)$$

که در آن $P_L + jQ_L$ ، بار است و $|V_L|$ ، اندازه ولتاژ شینه متناظر آن است. رثکنانس گذرای هر ژنراتور و ادمیتانس بارهای موازی را، مطابق شکل ۱۴-۱۲، به ماتریس ادمیتانس شینه ای که در محاسبه بخش بار پیش از اتصال کار رفت اضافه می کنیم. البته جریان تزریقی همه شینه ها جز شینه های داخلی سه ژنراتور صفر است. مرحله مقدماتی دوم، ماتریسهای تغییر یافته ادمیتانس شینه متناظر با وضعیت اتصال و پس از اتصال را تعیین می کند. چون فقط شینه داخلی ژنراتورها تزریق دارند می توان با حذف همه



شکل ۱۴-۱۳ شبکه افزایش یافته يك سیستم قدرت.

شینه‌های دیگر، ابعاد مساتریسهای تغییر یافته را تا حد تعداد ژنراتورها کاهش داد. توان تحویلی هر ژنراتور به شبکه را، در زمان عیب و پس از آن، با استفاده از معادله‌های توان-زاویه متناظر محاسبه می‌کنند. برای مثال در شکل ۱۴-۱۲، توان خروجی ژنراتور ۱ عبارت است از:

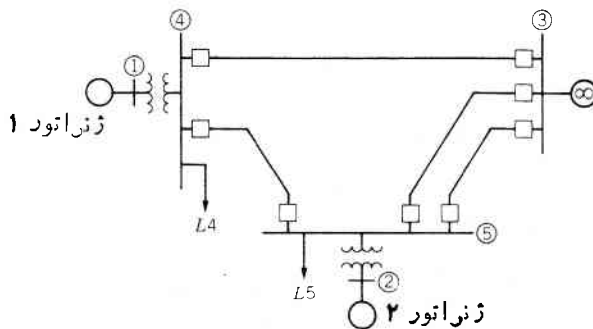
$$P_{e1} = |E'_1|^2 G_{11} + |E'_1| |E'_2| |Y_{12}| \cos(\delta_{12} - \theta_{12}) + |E'_1| |E'_3| |Y_{13}| \cos(\delta_{13} - \theta_{13}) \quad (۱۴-۷۶)$$

که در آن $\delta_{12} - \delta_{13}$ برابر است با $\delta_{12} - \delta_{13}$. با انتخاب مقادیر Y_{ij} از ماتریسهای 3×3 ادمیتانس شینه مربوط به وضعیت زمان اتصالی یا پس از عیب، معادله‌های مشابهی برای P_{e2} و P_{e3} می‌نویسیم. معادله‌های توان-زاویه، برای نمایش حرکت هر روتور در زمان اتصالی و پس از اتصالی، بخشی از معادله‌های تابخورد را تشکیل می‌دهند:

$$\frac{2H_i}{\omega_s} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_{mi} - P_{ei} \quad i = 1, 2, 3 \quad (۱۴-۷۷)$$

پاسخها به محل و زمان عیب و به شینه Y_{bus} حاصل پس از حذف خط اتصالی کرده، بستگی دارند. در مثالهای زیر روشهای اصلی به کار رفته در برنامه‌های کامپیوتری بررسیهای کلاسیک پایداری، نشان داده می‌شوند.

مثال ۱۴-۹ يك خط انتقال $۲۳۰ \text{ kV}, ۶۰ \text{ Hz}$ مطابق شکل ۱۴-۱۳ دارای دو ژنراتور و يك شینه بی‌نهایت است. پارامترهای ترانسفورماتور و خط در جدول ۱۴-۲ داده شده‌اند. يك اتصالی سه‌فاز در خط ۴-۵ نزدیک شینه ۴ رخ می‌دهد. با استفاده از پاسخ پخش بار پیش از اتصالی نشان داده شده در جدول ۱۴-۳، معادله تابخورد هر ماشین را در زمان اتصالی تعیین کنید. ژنراتورها که مبنای رنکته‌نرها و مقادیر H آنها ۱۰۰ MVA است به شرح زیر توصیف می‌شوند:



شکل ۱۴-۱۳ نمودار تک-خطی مثال ۹-۱۴

جدول ۲-۱۴ پارامترهای خط و ترانسفورماتور مثال ۹-۱۴ به دریک با مبنای ۲۳۰ kV و ۱۰۰ MVA

Y موازی B	Z های متوالی		شینه به شینه
	X	R	
	۰.۰۰۲۲	.....	ترانسفورماتور ۴-۱
	۰.۰۰۴۰	.....	ترانسفورماتور ۵-۲
۰.۰۰۸۲	۰.۰۰۴۰	۰.۰۰۰۷	خط ۲-۳
۰.۰۰۹۸	۰.۰۰۴۷	۰.۰۰۰۸	خط ۵-۳ (۱)
۰.۰۰۹۸	۰.۰۰۴۷	۰.۰۰۰۸	خط ۵-۳ (۲)
۰.۰۲۲۶	۰.۰۱۱۰	۰.۰۰۱۸	خط ۵-۴

ژنراتور ۱: $H = ۱۱۲ \text{ MJ/MVA}$, $X'_d = ۰.۰۰۶۷ \text{ pu}$, ۲۰ kV , ۴۰۰ MVA

ژنراتور ۲: $H = ۸۰ \text{ MJ/MVA}$, $X'_d = ۰.۰۱۰ \text{ pu}$, ۱۸ kV , ۲۵۰ MVA

حل: برای تعیین معادله‌های تاب‌خورد باید ولتاژهای داخلی گذرا را بیابیم. جریان ورودی شبکه از شینه ۱ بر اساس داده‌های جدول ۳-۱۴ برابر است با:

$$I_1 = \frac{(P_1 + jQ_1)^*}{V_1^*} = \frac{۳۰۵۰ - j۰.۷۱۲}{۱۰۰۳۰ \angle -۸۸.۸^\circ} = ۳.۴۶۸ \angle -۲۶.۱۹^\circ$$

و همچنین:

جدول ۳-۱۴ مشخصات شینه و مقادیر پیش از اتصال پخش بار به در-یک بر مبنای ۲۳۰kV و ۱۰۰MVA

شینه	ولتاژ	تولید		بار	
		Q	P	Q	P
۱	۱۲۰۳۰ / ۸۸.۸°	۰.۷۱۲	۳.۵۰۰		
۲	۱۲۰۲۰ / ۶۳.۸°	۰.۲۹۸	۱.۸۵۰		
۳	۱۲۰۰۰ / ۰°	.....	.....		
۴	۱۲۰۱۸ / ۴۶.۸°	.....	.....	۰.۴۴	۱.۰۰۰
۵	۱۲۰۱۱ / ۲۲.۷°	.....	.....	۰.۱۶	۰.۵۰۰

$$I_r = \frac{1.85 - j0.298}{12020 \angle -63.8^\circ} = 12837 \angle -27.71^\circ$$

پس:

$$E'_1 = 12030 \angle 88.8^\circ + j0.067 \times 3468 \angle -27.69^\circ = 12100 \angle 20.82^\circ$$

$$E'_2 = 12020 \angle 63.8^\circ + j0.10 \times 12837 \angle -27.71^\circ = 12065 \angle 16.19^\circ$$

در شینه بی نهایت:

$$E'_r = E_r = 12000 \angle 0^\circ$$

و بنابراین:

$$\delta_{1r} = \delta_1 \text{ و } \delta_{2r} = \delta_2$$

ادمیتانسهای محاسبه شده از معادله (۷۵-۱۴)، بارهای شینه‌های ۴ و ۵ را چنین می‌نمایانند:

$$Y_{L4} = \frac{1000 - j0.44}{(12018)^2} = 0.9649 - j0.4246$$

$$Y_{L5} = \frac{0.50 - j0.16}{(12011)^2} = 0.4892 - j0.1565$$

این ادمیتانسها به همراه رثکتانسهای گذرا و پارامترهای خط و ترانسفورماتور، ماتریس افزایش یافته ادمیتانسهای شینه سیستم را پیش از عیب - شامل رثکتانس گذرای ماشینها -

تشکیل می‌دهند. بنا بر این اکنون گره‌های داخلی مجازی بین ولتاژهای داخلی و رئکتانسهای گذرای ماشینها را شینه‌های ۱ و ۲ می‌گیریم. به این ترتیب در ماتریس، برای مثال، داریم:

$$Y_{11} = \frac{1}{j0.0067 + j0.0022} = -j11.236$$

$$Y_{22} = -\frac{1}{0.0007 + j0.0040} = -4.2450 + j24.2571$$

مجموع ادمیتانسهای متصل به گره‌های ۳، ۴، ۵ باید ظرفیت موازی خطوط انتقال را شامل بشوند. بنا بر این:

$$Y_{33} = -j11.236 + \frac{j0.0082}{2} + \frac{j0.2226}{2} + 4.2450$$

$$-j24.2571 + \frac{1}{0.0018 + j0.0110} + 0.9649 - j0.4246$$

$$= 6.6587 - j44.6175$$

جدول ۱۴-۴، کل ماتریس افزایش یافته را به نمایش می‌گذارد.

جدول ۱۴-۴: عناصر ماتریس ادمیتانس شینه پیش از عیب در مثال ۱۴-۹، ادمیتانسها بر حسب دریک‌اند.

شینه	۱	۲	۳	۴	۵
۱	$-j11.2360$	۰.۰۰	۰.۰۰	$j11.2360$	۰.۰۰
۲	۰.۰۰	$-j7.1429$	۰.۰۰	۰.۰۰	$j7.1429$
۳	۰.۰۰	۰.۰۰	11.2841	-4.2450	-7.0392
۴	$j11.2360$	۰.۰۰	-4.2450	6.6588	-1.4488
۵	۰.۰۰	$j7.1429$	-7.0392	-1.4488	8.9772
			$+j41.3550$	$+j8.8538$	$-j57.2972$
			$-j65.4731$	$+j24.2571$	$+j41.3550$
				$+j24.2571$	$+j41.3550$

در زمان عیب باید شینه ۴ را به زمین اتصال کوتاه کرد. پس سطر وستون ۴ جدول ۱۴-۲، حذف می شوند زیرا گره ۴ و گره مرجع یکی است. معادله (۷-۳۰)، سطر وستون جدید ۴ را (گره ۵) حذف می کند تا ماتریس ادمیتانس شینه اتصالیه کرده را به صورت نیمه بالای جدول ۱۴-۵ کاهش دهد. Y_{bus} سیستم معیوب نشان می دهد که در زمان عیب، شینه ۱ از شینه های دیگر جدا می شود و شینه ۲ مستقیماً به شینه ۳ وصل می شود. این امر حاکی از آن است که اتصال کوتاه در شینه ۴، توان تزریقی ژنراتور ۱ به سیستم را به صفر می رساند و سبب می شود که ژنراتور ۲ توانش را به طور شعاعی به شینه ۳ تحویل دهد. با بروز اتصالیه، به کمک مقادیر جدول ۱۴-۵، معادله های

جدول ۱۴-۵: عناصرهای ماتریسهای ادمیتانس شینه در زمان اتصالیه و پس از آن در مثال ۱۴-۹ (ادمیتانسها به در-یک اند).

شبهه اتصالیه کرده			
شینه	۱	۲	۳
۱	$0.00000 - j11.2360$ ($11.2360 / -90^\circ$)	$0.00 + j0.00$	$0.00 + j0.00$
۲	$0.00 + j0.00$	$0.1362 - j6.2737$ ($6.2752 / -88.7563^\circ$)	$-0.0681 + j5.1661$ ($5.1665 / 90.7552^\circ$)
۳	$0.00 + j0.00$	$-0.0681 + j5.1661$ ($5.1665 / 90.7552^\circ$)	$5.7986 - j3.56299$ ($3.60987 / -80.7564^\circ$)
شبهه پس از عیب			
۱	$0.5005 - j7.7897$ ($7.8058 / -86.3237^\circ$)	$0.00 + j0.00$	$-0.2216 + j7.6291$ ($7.6323 / 91.6638^\circ$)
۲	$0.00 + j0.00$	$0.1591 - j6.1168$ ($6.1189 / -88.5101^\circ$)	$-0.0901 + j6.0975$ ($6.0982 / 90.8466^\circ$)
۳	$-0.2216 + j7.6291$ ($7.6323 / 91.6638^\circ$)	$-0.0901 + j6.0975$ ($6.0982 / 90.8466^\circ$)	$1.3927 - j1.38728$ ($1.39426 / -84.2267^\circ$)

توان-زاویه به در-يك چنین به دست می آید.

$$P_{e1} = 0$$

$$\begin{aligned} P_{e2} &= |E'_1|^2 G_{22} + |E'_1| |E_2| |Y_{23}| \cos(\delta_{23} - \theta_{23}) \\ &= (1.065)^2 (0.1362) + (1.065)(1.0)(0.1665) \cos(\delta_2 - 90.755^\circ) \\ &= 0.1525 + 0.17523 \sin(\delta_2 - 0.755^\circ) \end{aligned}$$

بنابراین مادامی که عیب در سیستم باقی است معادله‌های تابخورد مورد نظر (مقادیر P_{m1} و P_{m2} از جدول ۱۴-۳ گرفته می‌شوند) عبارت‌اند از:

$$\frac{d\delta_1}{dt} = \frac{180f}{H_1} (P_{m1} - P_{e1}) = \frac{180f}{H_1} P_{a1}$$

$$= \frac{180f}{11.2} (3.75) \text{ elec deg/s}^2$$

$$\frac{d\delta_2}{dt} = \frac{180f}{H_2} (P_{m2} - P_{e2}) = \frac{180f}{H_2} P_{a2}$$

$$= \frac{180f}{11.2} \left\{ \overbrace{1.185}^{P_m} - \left[\overbrace{0.1525 + 0.17523 \sin(\delta_2 - 0.755^\circ)}^{P_c} \right] \right\}$$

$$\square \quad = \frac{180f}{11.2} \left[\underbrace{1.185}_{P_m - P_c} - \underbrace{0.17523}_{P_{max}} \sin(\delta_2 - \underbrace{0.755^\circ}_{\gamma}) \right] \text{ elec deg/s}^2$$

مثال ۱۴-۱۰ در مثال ۱۴-۹، باز شدن همزمان مدار شکنهای سرخط اتصالی کرده، اتصالی سه فاز را حذف می‌کند. معادله‌های تابخورد را در زمان پس از عیب تعیین کنید. حل: وقتی با قطع خط ۵-۴، اتصالی حذف می‌شود، باید Y_{bus} پیش از اتصالی در جدول ۱۴-۴ دوباره تغییر کند. این عمل با صفر کردن Y_{45} و Y_{54} و تفریق ادمیتانسهای متوالی خط ۵-۴ و سوسپتانسهای خازنی نصف خط از عنصرهای Y_{55} و Y_{44} جدول ۱۴-۴ انجام می‌شود. نیمه پایینی جدول ۱۴-۵، ماتریس کاهش یافته ادمیتانسهای شینه مربوط به شبکه پس از اتصالی را نشان می‌دهد. البته يك عنصر صفر در سطرهاي اول و دوم ظاهر می‌شود و حاکی از آن است که با قطع خط ۵-۴، ژنراتورها از هم جدا می‌شوند. در نتیجه، هر ژنراتور به طور شعاعی به شینه بی‌نهایت وصل می‌شود. بنابراین معادله‌های در-يكی توان-زاویه وضعیت پس از اتصالی عبارت‌اند از:

$$\begin{aligned}
 P_{e1} &= |E'_1|^2 G_{11} + |E'_1| |E_r| |Y_{1r}| \cos(\delta_{1r} - \theta_{1r}) \\
 &= (1.100)^2 (0.05005) + (1.100)(1.0)(0.76323) \cos(\delta_1 - 91.664^\circ) \\
 &= 0.06056 + 0.83955 \sin(\delta_1 - 1.6664^\circ)
 \end{aligned}$$

و

$$\begin{aligned}
 P_{e2} &= |E'_2|^2 G_{22} + |E'_2| |E_r| |Y_{2r}| \cos(\delta_{2r} - \theta_{2r}) \\
 &= (1.065)^2 (0.1591) + (1.065)(1.0)(0.982) \cos(\delta_2 - 90.847^\circ) \\
 &= 0.1804 + 0.9934 \sin(\delta_2 - 0.847^\circ)
 \end{aligned}$$

معادله‌های تابخورد در زمان پس از اتصال نیز عبارت‌اند از:

$$\begin{aligned}
 \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} &= \frac{180f}{11.2} \{ 3.0 - [0.06056 + 0.83955 \sin(\delta_1 - 1.6664^\circ)] \} \\
 &= \frac{180f}{11.2} [2.93944 - 0.83955 \sin(\delta_1 - 1.6664^\circ)] \quad \text{elec deg/s}^2
 \end{aligned}$$

و

$$\begin{aligned}
 \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} &= \frac{180f}{8.0} \{ 1.85 - [0.1804 + 0.9934 \sin(\delta_2 - 0.847^\circ)] \} \\
 \square &= \frac{180f}{8.0} [1.6696 - 0.9934 \sin(\delta_2 - 0.847^\circ)] \quad \text{elec deg/s}^2
 \end{aligned}$$

هر کدام از معادله‌های توان-زاویه به دست آمده در این مثال مثال ۱۴-۹ با معادله (۱۴-۳۵)، همشکل است. معادله تابخورد حاصل در هر حالت به شکل زیر است:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{180f}{H} [P_m - P_c - P_{\max} \sin(\delta - \gamma)] \quad (14-78)$$

که در آن کر و شطه طرف راست، توان شتاباننده روتور را نمایش می‌دهد. در نتیجه ممکن است معادله را به صورت زیر بنویسیم:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{180f}{H} P_a \quad \text{elec deg/s}^2 \quad (14-79)$$

که در آن

$$P_a = P_m - P_c - P_{\max} \sin(\delta - \gamma) \quad (14-80)$$

در بخش بعد، نحوه حل معادله‌هایی به شکل معادله (۱۴-۷۹) را بررسی می‌کنیم و به‌ازای زمانهای حذف اتصالی مشخص، δ را برحسب زمان به‌دست می‌آوریم.

۹-۱۴ حل گام به گام منحنی تابخورد

در سیستمهای بزرگ، از کامپیوترهایی که δ ی همه ماشینهای مورد نظر را برحسب t تعیین کنند بهره می‌گیریم زیرا برای به دست آوردن منحنی تابخورد هر ماشین باید δ برحسب t رسم شود. زاویه δ را به عنوان تابع زمان در زمانی نسبتاً طولانی محاسبه می‌کنیم تا تعیین کنیم که آیا δ بی حد زیاد می‌شود یا آنکه پس از رسیدن به يك ماکزیمم شروع به کاهش می‌کند. هر چند نتیجه اخیر معمولاً نشانه پایداری است، در يك سیستم واقعی که چندین متغیر در آن دخالت دارند برای اطمینان از زیاد نشدن دوباره δ ، بدون رسیدن به يك مقدار پایین، ممکن است لازم باشد δ را در يك زمان نسبتاً طولانی برحسب زمان رسم کنیم.

با تعیین منحنیهای تابخورد به ازای زمانهای مختلف حذف اتصالی می‌توان اندازه زمان مجاز پیش از حذف اتصالی را تعیین کرد. زمانهای استاندارد قطع مدارشکنها ورله‌های مربوط به آنها معمولاً ۸، ۵، ۳، یا ۲ سیکل پس از وقوع اتصالی است و بدین‌سان، سرعت مدارشکنها تعیین می‌شود. محاسبات را باید در دو حالت زیر انجام داد:

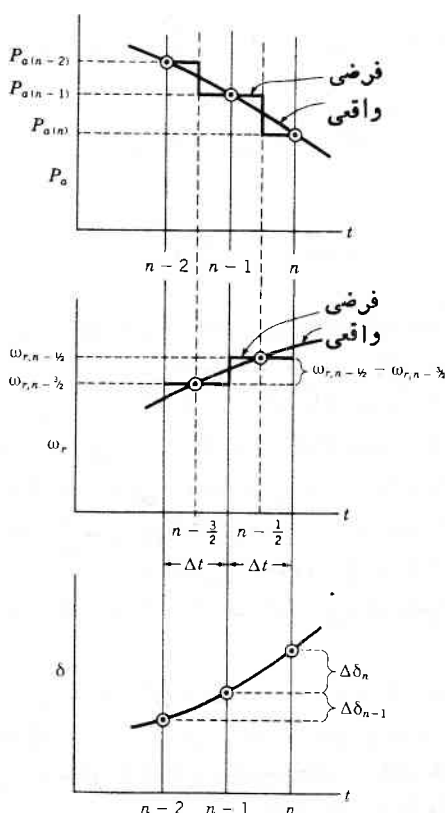
(۱) برای موقعیت اتصالی که حداقل توان ماشین را انتقال می‌دهد؛ (۲) برای حادثه‌ترین اتصالی که در مقابل از دست رفتن پایداری از آن حفاظت می‌شود.

در محاسبات گام به گام نموجزئی متغیرهای مستقل، برای حل عددی معادله‌های دیفرانسیل مرتبه دوم، چندروش مختلف وجود دارد. روشهای بفرج‌تر محاسبه، تنها به کمک کامپیوتر می‌تواند اجرا شود. روش گام به گام که در محاسبات دستی به کار می‌رود ضرورتاً از روشهای کامپیوتری ساده‌تر است. در روش محاسبه دستی تغییر وضع زاویه‌ای روتور در يك فاصله زمانی کوتاه به کمک فرضهای زیر حساب می‌شود.

۱. توان شتاباننده محاسبه شده در ابتدای فاصله زمانی، P_e ، از نیمه فاصله قبلی تا نیمه فاصله فعلی، ثابت است.

۲. سرعت زاویه‌ای در سراسر هر فاصله زمانی، ثابت و برابر مقدار محاسبه شده در نیمه فاصله است. البته هیچ يك از این فرضها درست نیست زیرا δ پیوسته تغییر می‌کند و P_e و ω هر دو تابع δ هستند. هر قدر فاصله زمانی کوچکتر شود منحنی تابخورد محاسبه شده به منحنی واقعی نزدیکتر می‌شود.

شکل ۱۴-۱۴ به تصور این فرضها کمک خواهد کرد. توان شتاباننده را به ازای نقطه‌های داخل دایره‌های واقع در انتهای فاصله‌های ۱، ۲، $n-1$ ، و n که ابتدای فاصله‌های ۱، $n-1$ ، و $n+1$ اند محاسبه می‌کنیم. در شکل ۱۴-۱۴، منحنی پله‌ای P_e از فرض ثابت بودن P_e بین نقطه‌های میانی فاصله‌ها، به دست می‌آید. همچنین ω را که تجاوز سرعت زاویه‌ای ω از سرعت زاویه‌ای سنكرون ω_s است به صورت يك منحنی



شکل ۱۴-۱۴ تغییرات مقادیرهای واقعی و فرضی P_a ، ω_r و δ در برابر زمان.

پله‌ای، که در سراسر فاصله ثابت و برابر مقدار محاسبه شده در نیمه فاصله است، نشان می‌دهیم. توان شتاباننده ثابت، سرعت روتور را بین عرضهای $n - 3/2$ و $n - 1/2$ تغییر می‌دهد. تغییر سرعت برابر حاصل ضرب شتاب در فاصله زمانی است و بنابراین:

$$\omega_{r, n-1/2} - \omega_{r, n-3/2} = \frac{d^2\delta}{dt^2} \Delta t = \frac{180f}{H} P_{a, n-1} \Delta t \quad (14-11)$$

تغییر δ در هر فاصله برابر حاصل ضرب ω_r مربوط به فاصله در زمان فاصله است. به این ترتیب تغییر δ طی فاصله $n - 1$ عبارت است از:

$$\Delta\delta_{n-1} = \delta_{n-1} - \delta_{n-2} = \Delta t \omega_{r, n-3/2} \quad (14-12)$$

و طی فاصله n :

$$\Delta\delta_n = \delta_n - \delta_{n-1} = \Delta t \omega_{r, n-1/2} \quad (14-13)$$

با تفریق معادله (۸۲-۱۴) از (۸۳-۱۴) و گذاشتن معادله (۸۱-۱۴) در معادله حاصل و حذف همه مقادیرهای ω ، داریم:

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + kP_{a, n-1} \quad (82-14)$$

که در آن

$$k = \frac{180f}{H}(\Delta t)^2 \quad (85-14)$$

معادله (۸۴-۱۴) در حل معادله تابخورد به روش گام-به-گام همراه با فرضهای ضروری قبلی مهم است. زیرا نحوه محاسبه تغییر δ را در يك فاصله، در صورت مشخص بودن تغییر δ در فاصله قبلی و مشخص بودن توان شتاباننده در فاصله فعلی، نشان می‌دهد. معادله (۸۴-۱۴) براساس فرضهای قبل بیان می‌کند که تغییر زاویه گشتاور طی يك فاصله معین، برابر تغییر زاویه گشتاور طی فاصله پیشین به اضافه توان شتاباننده در ابتدای فاصله ضربدر k است. توان شتاباننده را در ابتدای هر فاصله جدید محاسبه می‌کنند. برای به دست آوردن نقاط لازم برای رسم منحنی تابخورد، حل را تا تعداد کافی فاصله‌ها ادامه می‌دهیم. با کاهش مدت فاصله‌ها، دقت افزایش می‌یابد. معمولاً فاصله ۵۵۰۰ ثانیه‌ای مناسب است.

وقوع اتصالی باعث ناپیوستگی توان شتاباننده می‌شود زیرا P_a پیش از اتصالی صفر است و بلافاصله پس از اتصالی برابر مقدار معینی می‌شود. ناپیوستگی در ابتدای فاصله، $t=0$ ، رخ می‌دهد. شکل ۱۴-۱۲ نشان می‌دهد که روش محاسبه بر مبنای این فرض است که توان شتاباننده محاسبه شده در ابتدای يك فاصله از نیمه فاصله پیشین تا نیمه فاصله مورد نظر، ثابت است. در هنگام وقوع اتصالی، P_a در ابتدای فاصله دارای دو مقدار است و میانگین این دو مقدار را به عنوان توان شتاباننده ثابت در نظر می‌گیریم. مثال زیر این روند را نمایش می‌دهد.

مثال ۱۴-۱۱ جدولی را برای نمایش مراحل لازم برای رسم منحنی تابخورد ماشین ۲، به ازای اتصالی در سیستم ۶۰ Hz ۶ مثالهای ۱۴-۹ و ۱۴-۱۰، ترتیب دهید. مدار شکنهای واقع در سرهای خط اتصالی کرده، اتصالی را ظرف ۲۲۵۰۰ ثانیه به طور همزمان حذف می‌کنند.

حل: بدون از دست دادن عمومیت، محاسبات تفصیلی را برای ماشین ۲ می‌آوریم. محاسبات رسم منحنی تابخورد ماشین ۱ را به عهده خواننده می‌گذاریم. در نتیجه زیر نویس ۲ را که معرف شماره ماشین است از همه نمادهای زیر حذف می‌کنیم. همه محاسبات بر حسب در-یک و مبنای ۱۰۰ MVA انجام شده است. به ازای فاصله زمانی ۵۵۰۰ $\Delta t = 0.05$ ثانیه، پارامتر k برای ماشین ۲ برابر است با:

$$k = \frac{180f}{H}(\Delta t)^2 = \frac{180 \times 60}{80} \times 25 \times 10^{-4} = 3.375 \text{ elec deg}$$

وقتی در $t = 0$ ، اتصال رخ می‌دهد زاویه روتور ماشین ۲ نمی‌تواند فوراً تغییر کند. از این رو، از مثال ۹-۱۴ داریم:

$$\delta_0 = 16.19^\circ$$

و در زمان اتصال

$$P_e = 0.1545 + 0.5023 \sin(\delta - 0.755^\circ)$$

بنابراین، چنانکه پیشتر در مثال ۹-۱۴ دیدیم:

$$P_a = P_m - P_e = 1.6955 - 0.5023 \sin(\delta - 0.755^\circ)$$

در ابتدای فاصله اول، توان شتاباننده هر ماشین، ناپیوسته است: درست پیش از وقوع اتصال، P_a صفر است و درست پس از وقوع اتصال:

$$P_a = 1.6955 - 0.5023 \sin(16.19^\circ - 0.755^\circ) = 0.231 \text{ دریک}$$

مقدار میانگین P_a در $t = 0$ برابر 0.1155 pu است. پس داریم:

$$kP_a = 3.375 \times 0.1155 = 0.3898^\circ$$

و در نتیجه، در زمان فاصله اول یعنی از 0 تا Δt ، تغییر زاویه روتور ماشین ۲ برابر است با:

$$\Delta\delta_1 = 0 + 0.3898 = 0.3898^\circ$$

که در آن زیر نویس عددی، فاصله را مشخص می‌کند. بنابراین در انتهای فاصله زمانی اول:

$$\delta_1 = \delta_0 + \Delta\delta_1 = 16.19 + 0.3898 = 16.5798^\circ$$

و

$$\delta_1 - \gamma = 16.5798 - 0.755 = 15.8248^\circ$$

پس، در $\Delta t = 0.05$ ثانیه داریم:

$$kP_{a,1} = 3.375[(P_m - P_e) - P_{\max} \sin(\delta_1 - \gamma)]$$

$$= 3.375[1.6955 - 0.5023 \sin(15.8248^\circ)] = 0.6583^\circ$$

در نتیجه، افزایش زاویه روتور در فاصله زمانی دوم برابر است با:

$$\Delta\delta_2 = \Delta\delta_1 + kP_{a,1} = 0.3898 + 0.6583 = 1.0481^\circ$$

لذا در انتهای فاصله زمانی دوم:

$$\delta_2 = \delta_1 + \Delta\delta_2 = 16.5798 + 1.0481 = 17.6279^\circ$$

جدول ۱۴-۶، مراحل بعدی محاسبات را نشان می‌دهد. یادآور می‌شود که به معادله پس از اتصالی که در مثال ۱۴-۱۰ به دست آوردیم نیاز داریم:

در جدول ۱۴-۶، مقدار جمله‌های $(\delta - \gamma)$ ، P_e ، $P_{\max} \sin(\delta - \gamma)$ و δ_n در زمان ذکر شده در ستون اول، محاسبه شده‌اند اما $\Delta\delta_n$ تغییر زاویه روتور طی فاصله‌ای است که زمان

جدول ۱۴-۶ محاسبه منحنی تاب خورد ماشین ۲ مثال ۱۴-۱۱ به ازای زمان حذف ۲۲۵ ر ثانیه. $P_m - P_e = 1.6955 \text{ pu}$ قبل از حذف. $k = (180f/H)(\Delta t)^2 = 3375 \text{ elec deg}$ ، $P_{\max} = 5850.23 \text{ pu}$ و $\gamma = 75.5^\circ$. پس از حذف، این مقادیر به ترتیب برابر 1.69696 ، 64934 ، و 847 می‌شوند.

t, s	$\delta_n - \gamma$ elec deg	$P_{\max} \sin(\delta_n - \gamma)$ per unit	P_e , per unit	$kP_{e,n-1}$, elec deg	$\Delta\delta_n$, elec deg	δ_n , elec deg
0 -	.....	.....	0.00	.....	.....	16.19
0 +	15.435	1.4644	0.2310	.....	.....	16.19
0 av	.....	.....	0.1155	0.3898	.....	16.19
0.05	15.8248	1.5005	0.1950	0.6583	0.3898	16.5798
0.10	16.8729	1.5970	0.0985	0.3323	1.0481	17.6279
0.15	18.2533	1.7234	-0.0279	-0.0942	1.3804	19.0083
0.20	19.5395	1.8403	-0.1448	-0.4886	1.2862	20.2945
0.25	20.2451	2.2470	-0.5774	-1.9487	0.7976	21.0921
0.30	19.0940	2.1241	-0.4545	-1.534	-1.1511	19.9410
0.35	16.4088	1.8343	-0.1647	-0.5559	-2.6852	17.2558
0.40	13.1678	1.4792	0.1904	0.6425	-3.2410	14.0148
0.45	10.5693	1.1911	0.4785	1.6151	-2.5985	11.4163
0.50	9.5860	1.0813	0.5883	1.9854	-0.9833	10.4330
0.55	10.5880	1.1931	0.4765	1.6081	1.0020	11.4350
0.60	13.1981	1.4826	0.1870	0.6312	2.6101	14.0451
0.65	16.4395	1.8376	-0.1680	-0.5672	3.2414	17.2865
0.70	19.1137	2.1262	-0.4566	-1.5411	2.6742	19.9607
0.75	20.2468	2.2471	-0.5775	-1.9492	1.1331	21.0938
0.80	19.4307	2.1601	-0.4905	-1.6556	-0.8161	20.2777
0.85	.....	.....	.....	.....	-2.4716	17.8061

شروعش ذکر شده است. برای مثال، در ستون $t = 0.10$ ثانیه، اولین زاویه 17.6279° را با افزودن تغییر زاویه در فاصله زمانی قبلی (0.05 تا 0.10 ثانیه) به مقدار زاویه در $t = 0.05$ ثانیه، محاسبه کرده ایم. پس از آن، $P_{\max} \sin(\delta - \gamma)$ را به ازای $\delta = 17.6279^\circ$ حساب کرده ایم. سپس، $P_a = (P_m - P_e) - P_{\max} \sin(\delta - \gamma)$ و kP_a را به دست آورده ایم. تغییر زاویه ای 1.3804° در ابتدای فاصله یا $t = 0.10$ ثانیه برابر مجموع مقدارهای kP_a (0.3323°) و تغییر زاویه ای در فاصله قبلی یعنی 1.0481° است. این مقدار به اضافه 17.6279° ، مقدار 19.0083° را در $t = 0.15$ ثانیه می دهد. دیده می شود که با حذف اتصالی در 0.225 s، مقدار $P_m - P_e$ در لحظه 0.25 s تغییر کرده است. زاویه γ نیز از 0.755 تا 0.847° تغییر کرده است. $\square$

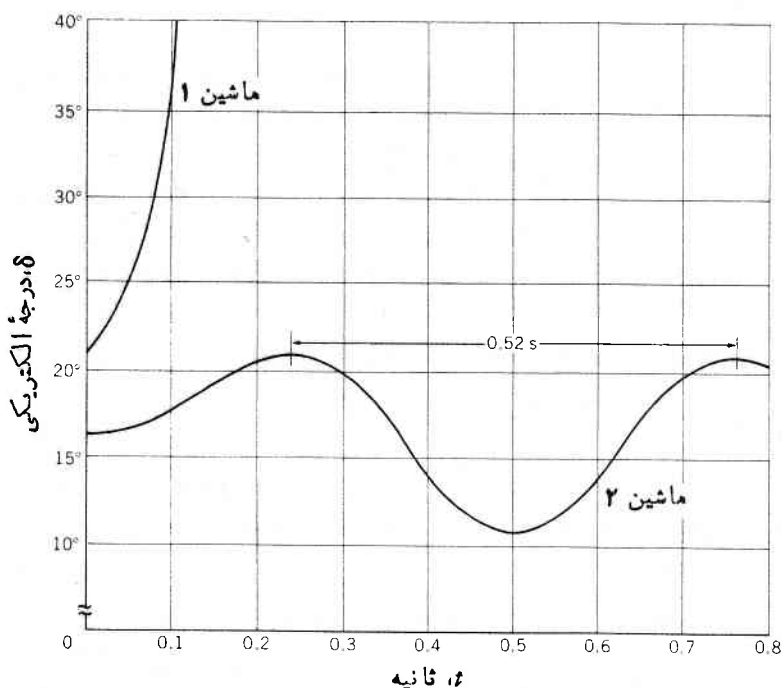
هر گاه که يك اتصالی حذف می شود يك ناپیوستگی در توان شنا باننده رخ می دهد. اگر زمان حذف، مانند حالت محاسبات جدول ۱۴-۶، برابر 0.225 s باشد به هیچ شیوه خاصی نیاز نیست زیرا در این روش، فرض می شود که ناپیوستگی در نیمه فاصله است. مقدار ثابت مفروض P_a در ابتدای فاصله پس از حذف، برابر مقدار تعیین شده برای δ در ابتدای فاصله پس از حذف است.

وقتی حذف در ابتدای يك فاصله مثلاً در سیکل سوم (0.05 ثانیه) است دو عبارت توان خروجی ژنراتور در ابتدای فاصله، (یکی در زمان اتصالی و دیگری پس از اتصالی) دو مقدار توان شنا باننده را ایجاد می کنند. اگر در سیستم مثال ۱۴-۱۱، ناپیوستگی لحظه 0.05 s رخ دهد میانگین این دو مقدار، مساوی مقدار ثابت P_a ، از ثانیه 0.25 s تا 0.75 s، فرض می شود و ایسن همان روش به کار رفته در جدول ۱۴-۶ به ازای رویداد اتصالی در $t = 0$ است.

به همان روشی که در جدول ۱۴-۶ به کار بردیم می توانیم δ در برابر t را برای ماشین ۱ به ازای زمان حذف 0.225 s و برای هر دو ماشین به ازای زمان حذف 0.05 s تعیین کنیم. در بخش بعد، برون- نوشته کامپیوتری δ در برابر t را برای هر دو ماشین که به ازای زمان حذفهای 0.05 s و 0.225 s ثانیه محاسبه شده اند، خواهیم دید. شکل ۱۴-۱۵، منحنیهای تابخورد دو ماشین را به ازای زمان حذف 0.225 s ثانیه نشان می دهد. بدیهی است که در این حالت، ماشین ۱ ناپایدار است.

منحنیهای تابخورد به ازای زمان حذف 0.20 s ثانیه نشان دهنده پایداری سیستم خواهند بود. از آنجا که خروجی ماشین ناپایدار، در زمان اتصالی، صفر است می توان با حل مسئله ۱۴-۱۶، به روش معیار مساحت های مساوی، زمان بحرانی حذف واقعی را که بین 0.20 s و 0.225 s ثانیه است پیدا کرد.

منحنیهای تابخورد شکل ۱۴-۱۵ نشان می دهند که حتی اگر حذف تا 0.35 s سیکل پس از آغاز اتصالی، صورت نگیرد تغییر زاویه روتور ماشین ۲ بسیار کوچک است. در نتیجه، محاسبه فرکانس تقریبی نوسان روتور، بر پایه روش خطی سازی شرح داده شده در



شکل ۱۴-۱۵ منحنیهای تابخورد ماشینهای ۱ و ۲ در مثالهای ۱۴-۹ تا ۱۴-۱۱ به ازای زمان حذف ۲۲۵ روزه ثانیه.

بخش ۱۴-۵، جالب خواهد بود. همگر توان همزمان ساز ماشین ۲ که از معادله توان-زاویه پس از عیب محاسبه شده است برابر است با:

$$S_P = \frac{dP_e}{d\delta} = \frac{d}{d\delta} [0.1804 + 6.4934 \sin(\delta - 0.847^\circ)]$$

$$= 6.4934 \cos(\delta - 0.847^\circ)$$

دیده می شود که برای ماشین ۲، زاویه δ به ازای نقطه های محاسبه شده در جدول ۱۴-۶، بین 10.43° و 21.09° تغییر می کند. استفاده از این یا آن زاویه، تفاوت جزئی در مقدار S_P ایجاد می کند. اگر از مقدار میانگین 15.76° استفاده کنیم، داریم:

$$S_P = 6.274 \text{ elec rad/توان در-یکی}$$

و به کمک معادله (۱۴-۵)، فرکانس نوسان برابر است با:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{377 \times 6.274}{2 \times 8}} = 1.935 \text{ Hz}$$

و دوره نوسان برابر است با:

$$T = \frac{1}{1.935} = 0.517 \text{ s}$$

بررسی شکل ۱۴-۱۵ یا جدول ۱۴-۶ درستی محاسبات مربوط به ماشین ۲ را، وقتی زمان اتصالی ۰.۲۲۵ ثانیه است، تأیید می‌کند. برای زمانهای کمتر اتصالی می‌توان نتایج مشابهی انتظار داشت زیرا متناظراً زاویه تابخورد روتور کوچکتر است. در مثالهای بالا، به علت محل در نظر گرفته عیب، امکان محاسبه جداگانه منحنیهای تابخورد هر ماشین وجود دارد. وقتی برای عیب، محلهای دیگر انتخاب شود دو ژنراتور نسبت به هم نوسان می‌کنند زیرا دو ماشین به هم وصل‌اند. محاسبات منحنی تابخورد پیچیده‌تر می‌شود. در چنین حالتی باید از محاسبات وقت گیر دستی پرهیز کرد. عموماً باید از برنامه‌های کامپیوتری که انعطاف زیادی دارند بهره‌جست.

۱۰-۱۴ برنامه‌های کامپیوتری برای بررسیهای پایداری حالت گذرا

برنامه‌های امروزی کامپیوتری برای بررسیهای پایداری حالت گذرا ناشی از دو نیاز اساسی‌اند: (الف) ضرورت بررسی سیستمهای بسیار بزرگ به هم پیوسته دارای ماشینهای زیاد و (ب) نیاز به مدلهای مفصل‌تر برای نمایش ماشینها و سیستمهای کنترلشان. در بسیاری از بررسیها نمایش کلاسیک ماشین مناسب است. اما ممکن است برای نمایش آلترناتورهای توربینی امروزی، که مشخصه‌های دینامیکی آنها را پیشرفتهای طراحی فنی ماشین و سیستمهای کنترل تعیین می‌کند به مدلهای مفصل‌تری نیاز باشد.

مدل استفاده شده در بررسیهای کلاسیک پایداری، ساده‌ترین مدل ممکن ماشین همزمان است. در مدلهای دو-محوری بسیار پیچیده‌تر پس از اختلال در سیستم، در زمان زیر گذرا و گذرا از شارمحور طولی و عرضی استفاده می‌شود. برای مثال اگر مدل ماشین، تغییر حلقه زندهای شار سیم‌پیچ تحریک را در محور طولی دقیقاً تعیین نکند امکان نمایش عملکرد تنظیم کننده خودکار ولتاژ و سیستم تحریک که دائم در مدارند و همه ماشینهای امروزی به آنها مجهزند، وجود ندارد. مشخصه‌های پاسخ دینامیک سیستمهای کنترل توربین که توان مکانیکی ورودی واحد تولیدی را به طور خودکار فرمان می‌دهد نیز بر پویایی روتور اثر می‌گذارند. اگر بخواهیم این طرحواره‌های کنترل را نیز نمایش دهیم باید به مدل واحد تولیدی بیشتر تفصیل بدهیم. هر چه مدل ژنراتور پیچیده‌تر باشد تعداد معادله‌های دیفرانسیل و جبری هر ماشین بیشتر می‌شود. در بررسی سیستمهای بزرگ، تعداد بسیار زیادی معادله جبری نیز عملکرد سیستم انتقال گسترده‌ای را نمایش می‌دهند که ژنراتورهای زیاد به هم پیوسته، و مراکز بسیار پراکنده بار را به هم پیوند می‌دهد. بنابراین برای هر فاصله زمانی پس از وقوع اختلال در سیستم، باید دو دسته معادله را به‌طور همزمان حل کرد. دسته اول، شامل معادله‌های جبری رفتار حالت مسانای شبکه و بارهایش و معادله‌های جبری ربط دهنده V

و E' ماشینهای سنکرون است. دسته دیگر، شامل معادله‌های دیفرانسیلی است که عملکرد دینامیک ماشینها و سیستمهای کنترل مربوط به آنها را توصیف می‌کنند.

روش پخش بار نیوتون-رافسون* توصیف شده در فصل ۸، احتمالاً معمولترین شیوه حل معادله‌های شبکه است. برای انتگرالگیری عددی معادله‌های دیفرانسیل ممکن است هر يك از چند روش مشهور گام-به-گام را انتخاب کنیم. در برنامه‌های پایداری حالت گذرای تولید نوعی، اغلب از روش مرتبه چهارم رانگ-کوتا** استفاده می‌کنیم. روشهای دیگر، عبارت‌اند از: روش اولر***، روش اولر اصلاح شده، روش ذوزنقه‌ای، روشهای پیش‌بینی‌کننده-تصحیح‌کننده نظیر روش گام-به-گام ارائه شده در بخش ۱۴-۹. هر کدام از این روشها از لحاظ پایداری عددی، اندازه گام زمانی، مقدار محاسبات در هر مرحله انتگرالگیری و دقت پاسخهای به دست آمده مزایا و معایبی دارند.****

جدول ۱۴-۷، برن-نوشته کامپیوتر را برای رسم منحنیهای تابخورد ماشینهای ۱ و ۲ مثال ۱۴-۱۱ نشان می‌دهد. زمانهای حذف با استفاده از برنامه پایداری تولید نوعی، که برنامه پخش بار نیوتون-رافسون را با روش مرتبه چهارم رانگ-کوتا تلفیق می‌کند، عبارت‌اند از ۲۲۵ ر و ۵۵ ر و ۲ ثانیه. جالب است که نزدیکی مقدارهای محاسبه‌دستی جدول ۱۴-۶ را با مقدارهایی که در جدول ۱۴-۷ به‌ازای زمان حذف ۲۲۵ ر و ۲ ثانیه برای ماشین ۲ به دست آمده‌اند، مقایسه کنیم.

فرض ثابت بودن ادمیتانس بارها به ما اجازه داد این ادمیتانسها را در Y_{bus} بگذاریم و این امر وقتی پاسخهای دقیقتری با استفاده از محاسبه‌های رانگ-کوتا مطلوب‌اند، از محاسبه‌های پخش بار موردنیاز جلوگیری می‌کند زیرا مرتبه چهارم بودن روش رانگ-کوتا در هر گام زمانی، چهارمحاسبه بساوردی پخش بار را ایجاب می‌کند.

۱۴-۱۱ عاملهای مؤثر بر پایداری حالت‌گذرا

دو عاملی که می‌توانند معیار راهنمای پایداری نسبی يك واحد تولیدی در سیستم قدرت باشند عبارت‌اند از: تابخورد زاویه‌ای ماشین در زمان اتصال و پس از آن، و زمان بحرانی حذف. از معادله‌هایی که در این فصل آوردیم آشکار است که ثابت H و رثکنانس گذرای واحد تولیدی X'_d ، بر این دو معیار اثر مستقیم دارند.

بررسی معادله (۱۴-۸۴) و (۱۴-۸۵) نشان می‌دهد که در هر فاصله زمانی، هر قدر ثابت H کوچکتر باشد تابخورد زاویه‌ای بزرگتر می‌شود. از طرف دیگر، معادله (۱۴-۳۶) نشان می‌دهد که با افزایش رثکنانس گذرای ماشین، P_{max} کاهش می‌یابد زیرا رثکنانس

* Newton-Raphson

** Runge-Kutta

*** Euler

**** رجوع کنید به،

G. W. Stagg and A. H. El-Abiad, *Computer Methods in Power System Analysis* chaps. 9 and 10, McGraw-Hill Book Company, New York, 1968.

جدول ۱۴-۷ برون-نوشته کامپیوتری منحنیهای تابخورد ماشینهای ۱ و ۲ در مثالهای ۱۲-۹ تا ۱۴-۱۱ به ازای حذف در ۲۲۵ و ۵۵۰ره ثانیه.

حذف در ۲۲۵ره ثانیه			حذف در ۵۵۰ره ثانیه		
ماشین ۲		ماشین ۱	ماشین ۲		ماشین ۱
زاویه	زمان	زاویه	زاویه	زمان	زاویه
۱۶.۲	۰.۰۰	۱۶.۲	۱۶.۲	۰.۰۰	۲۰.۸
۱۶.۶	۰.۰۵	۱۶.۶	۱۶.۶	۰.۰۵	۲۵.۱
۱۷.۲	۰.۱۰	۱۷.۶	۱۷.۲	۰.۱۰	۳۲.۹
۱۷.۲	۰.۱۵	۱۹.۰	۱۷.۲	۰.۱۵	۳۷.۳
۱۶.۷	۰.۲۰	۲۰.۳	۱۶.۷	۰.۲۰	۳۶.۸
۱۵.۹	۰.۲۵	۲۰.۹	۱۵.۹	۰.۲۵	۳۱.۷
۱۵.۰	۰.۳۰	۱۹.۹	۱۵.۰	۰.۳۰	۲۳.۴
۱۴.۴	۰.۳۵	۱۷.۴	۱۴.۴	۰.۳۵	۱۴.۶
۱۴.۳	۰.۴۰	۱۴.۳	۱۴.۳	۰.۴۰	۸.۶
۱۴.۷	۰.۴۵	۱۱.۸	۱۴.۷	۰.۴۵	۶.۵
۱۵.۶	۰.۵۰	۱۰.۷	۱۵.۶	۰.۵۰	۱۰.۱
۱۶.۴	۰.۵۵	۱۱.۴	۱۶.۴	۰.۵۵	۱۷.۷
۱۷.۱	۰.۶۰	۱۳.۷	۱۷.۱	۰.۶۰	۲۶.۶
۱۷.۲	۰.۶۵	۱۶.۸	۱۷.۲	۰.۶۵	۳۴.۰
۱۶.۸	۰.۷۰	۱۹.۴	۱۶.۸	۰.۷۰	۳۷.۶
۱۶.۰	۰.۷۵	۲۰.۸	۱۶.۰	۰.۷۵	۳۶.۲

گذرا قسمتی از کل رثکنانس متوالی سیستم را تشکیل می‌دهد که برابر عکس ادیمتانس انتقالی است. بررسی شکل ۱۴-۱۱ نشان می‌دهد که با کاهش P_{max} ، هر سه منحنی قدرت، پایین‌تر می‌آیند. در نتیجه به ازای توان محور معین P_m ؛ زاویه ابتدایی روتور، δ_0 افزایش و δ_{max} کاهش می‌یابد و به ازای P_{max} کوچکتر؛ اختلاف δ_0 و δ_{cr} کمتر می‌شود. نتیجه نهایی آن است که کاهش P_{max} ، ماشین را مقید می‌کند که پیش از رسیدن به زاویه بحرانی حذف در زاویه کوچکتری، نسبت به وضعیت اولیه‌اش، تاب بخورد. لذا هر رویدادی که ثابت H را کاهش دهد و رثکنانس گذرای ماشین را زیاد کند زمان بحرانی حذف را کاهش می‌دهد و احتمال حفظ پایداری حالت گذرا را کم می‌کند. با افزایش مستمر ابعاد سیستمهای قدرت، متناظراً به واحدهای تولیدی پر ظرفیت‌تری نیاز داریم. این واحدهای بزرگتر باعث پیشرفت سیستمهای خنک‌کنی شده‌اند که، بدون افزایش متناسب اندازه روتور، ظرفیتهای نامی را بیشتر می‌کنند در نتیجه، با کاهش ثابتهای پایداری H ، پایداری واحد تولیدی روبه کم شدن می‌گذارد در همان حال افزایش اندازه نامی، رثکنانسهای گذرا و سنکرون را افزایش می‌دهد و این امر کار طراحی سیستمهای پایدار و قابل اطمینان را بیشتر مطرح می‌کند.

خوشبختانه روشهای کنترل پایداری و طراحی سیستمهای انتقال نیز در جهت افزایش پایداری کل سیستم اند. طر حواره های کنترل، در بر گیرنده اینهاست:

سیستمهای تحريك
كنترل شیر بخار توربین
عملکرد تك-قطبی مدارشكنها
زمان حذف کوتا هتر اتصالی
روشهای طراحی برای کاهش رثكنانس سیستم عبارت اند از:
مینیمم كردن رثكنانس ترانسفورماتور
جبران رثكنانس خطها باخازنهای متوالی
افزودن خطهای انتقال

وقتی يك اتصالی در سیستم رخ می دهد ولتاژ همه شینه ها کاهش می یابد. تنظیم کننده های خودكار ولتاژ، کاهش ولتاژ بین سرهای ژنراتورها را حس می کنند و با تغییر تحريك، ولتاژ را به حالت اول باز می گردانند. تأثیر کلی سیستم تحريك، کاهش زاویه تابخورد ابتدایی روتور در اثر اتصالی است. این كار را تقویت کننده های درجهت مستقیم تنظیم کننده های ولتاژ، با افزایش ولتاژ اعمال شده به سیم پیچ تحريك ژنراتور، انجام می دهند شار افزایش یافته شكاف هوایی، گشتاوری بازدارنده به روتور اعمال می كند كه حرکت روتور را كند می سازد. سیستمهای تحريك امروزی با استفاده از كنترل های تیرستوری، سریعاً به کاهش ولتاژ شینه پاسخ می دهند و می توانند زمان بحرانی حذف اتصالیهای سه فاز در طرف شینه فشار قوی ترانسفورماتور فزاینده ولتاژ ژنراتور را از نیم تا يك و نیم سیكل افزایش دهند.

سیستمهای امروزی فرماندهی الكتر وهی در ولیکی توربین قادرند با بستن شیر بخار توربین، شتاب آن واحد را، در زمان اتصالیهای حاد نزدیک آن واحد، کاهش دهند. عملکرد كنترل به محض مشاهده اختلاف بین توان مکانیکی ورودی و توان الكتریکی خروجی، شروع به بستن شیر بخار می كند تا توان ورودی کاهش یابد. این می تواند زمان بحرانی حذف را يك تا دوسیکل افزایش دهد.

كاهش رثكنانس سیستم در زمان اتصالی، $P_{\max}$ را افزایش ومساحت برشتافت را درشكل ۱۱-۱۴ کاهش می دهد و بنا براین، امکان حفظ پایداری را بیشتر می كند. چون اتصالیهای تكفاز نسبت به اتصالیهای سه فاز، بسیار بیشتر رخ می دهند می توان برای حذف فاز اتصالی کرده و در مدار نگهداشتن فازهای سالم از طر حواره رله گذاری ای كه امکان عملکرد مستقل یا انتخابی هر قطب مدارشكن را می دهد استفاده كرد. می توان سیستم رله ها، پیچكهای قطع، ومكانیزم عمل جدا گانه ای در هر قطب قرار داد تا در عیبه ای سه فاز، احتمال عمل نكردن مدارشكنها کاهش یابد. عملکرد مستقل هر قطب مدارشكنهای مهم بسته به اینکه ۱ یا ۲ قطب نتواند در شرایط اتصالی باز كند می تواند زمان بحرانی حذف را از ۲ تا ۵ سیكل افزایش دهد. این افزایش به ویژه هنگامی اهمیت دارد كه زمانهای حذف پشتیبان،

مشکل پایداری سیستم باشند.

کاهش رُکتنانس خط انتقال، روش دیگر افزایش P_{max} است. جبران رُکتنانس خط با خازنهای متوالی، برای افزایش پایداری، اغلب به صرفه است. ازدیاد خطهای موازی بین دو نقطه، روش متداول کاهش رُکتنانس است. وقتی به جای یک خط، از خطهای انتقال موازی استفاده می شود حتی وقتی روی یکی از خطها اتصالی سه فاز رخ می دهد خط باقیمانده، مقداری توان را منتقل می کند. مگر اینکه اتصالی در شینه موازی کننده روی دهد. در انواع دیگر اتصالیهای یک خط اگر دو خط موازی وجود داشته باشد در زمان اتصالی توان بیشتری نسبت به حالتی که یک خط اتصالی کرده داریم منتقل می شود. اگر تعداد خطهای موازی، بیش از دو تا باشد توان منتقل شده در زمان عیب، باز هم بیشتر است. برای به دست آوردن توان شتاباننده، توان انتقال یافته را از توان ورودی کم می کنیم. لذا، هر چه توان انتقال یافته در زمان اتصالی بیشتر باشد توان شتاباننده ماشین کمتر، و شانس پایداری بیشتر است.

مسائل

۱-۱۴ یک ژنراتور توربینی 60 Hz ، چهار قطب، 500 MVA و 22 kV ، دارای ثابت لختی $H = 7.5\text{ MJ/MVA}$ است. پیدا کنید: (الف) انرژی جنبشی ذخیره شده در روتور را در سرعت سنکرون و (ب) شتاب زاویه ای اگر وقتی توان ورودی منهای اتلافهای چرخشی برابر 740000 hp است، توان الکتریکی تولید شده برابر 400 MW باشد.

۲-۱۴ اگر شتاب محاسبه شده برای ژنراتور مسئله ۱-۱۴ در زمان ۱۵ سیکل، ثابت باشد تغییر δ را در این زمان، بر حسب درجه الکتریکی، و سرعت را در پایان ۱۵ سیکل، بر حسب دور بر دقیقه، بیابید. فرض کنید ژنراتور با یک سیستم بزرگ همزمان است و پیش از شروع زمان ۱۵ سیکل، گشتاور شتاباننده ندارد.

۳-۱۴ در حالی که ژنراتور مسئله ۱-۱۴ مگاوات-آمپر نامی را در ضریب توان ۰.۸ پس افی تحویل می دهد یک اتصالی، توان الکتریکی خروجی را ۴۰٪ کاهش می دهد. در زمان وقوع اتصالی، گشتاور شتاباننده را بر حسب نیوتن-متر بیابید. از اتلافها صرف نظر کنید و توان ورودی به محور را ثابت در نظر بگیرید.

۴-۱۴ WR^2 ژنراتور مسئله ۱-۱۴ را تعیین کنید.

۵-۱۴ یک شبکه رُکتنانسی، ژنراتوری با $H = 6\text{ MJ/MVA}$ را به یک موتور همزمان با $H = 2\text{ MJ/MVA}$ وصل می کند. در حالی که ژنراتور توان 100 pu را به موتور تحویل می دهد، اتصالی رخ می دهد که توان تحویلی را کاهش می دهد. موقعی که توان تحویلی کاهش یافته برابر 60 pu است، شتاب زاویه ای ژنراتور را نسبت به موتور تعیین کنید.

۶-۱۴ در سیستم قدرت مسئله ۱۴-۳، امپدانس هر کدام از خطهای انتقال موازی برابر $z = ۰.۵ pu$ ، توان تحویلی برابر $۸۰۰ pu$ و ولتاژ بین سرهای ماشین و ولتاژ شینه بی نهایت برابر $۱.۰ pu$ است. معادله توان-زاویه سیستم را در زمان شرایط کار مشخص شده تعیین کنید.

۷-۱۴ اگر در سیستم قدرت مسئله ۱۴-۶، يك اتصال سی سه فاز در نقطه ای روی یکی از خطهای انتقال به فاصله ۳۰٪ طول خط، از سر ارسال خط، رخ دهد تعیین کنید: (الف) معادله توان-زاویه را در زمان اتصال و (ب) معادله تابخورد را. فرض کنید در موقع وقوع اتصال، سیستم در شرایط مشخص شده در مسئله ۱۴-۶ کار می کند. همانند مثال ۱۴-۴، $H = ۵۰۰ MJ/MVA$.

۸-۱۴ مقاومتهای متوالی شبکه انتقال، باعث مقادیر مثبت P_e و γ در معادله (۱۴-۸۰) می شوند. به ازای يك توان الکتریکی خروجی معین، اثر مقاومت را بر همگر همزمان ساز S_p ، فرکانس نوسانهای روتور، و میرایی این نوسانها بیان کنید.

۹-۱۴ درحالی که يك ژنراتور با $H = ۶۰۰ MJ/MVA$ ، توان $۱۰۰ pu$ را از طریق يك شبکه رثکتانسی خالص به يك شینه بی نهایت تحویل می دهد وقوع يك اتصال، توان خروجی ژنراتور را به صفر می رساند ماکزیم توانی که می توانست انتقال یابد $۲۵ pu$ است. وقتی اتصال حذف می شود شرایط ابتدایی شبکه دوباره برقرار می شود. زاویه و زمان بحرانی حذف را تعیین کنید.

۱۰-۱۴ يك ژنراتور $۶۰ Hz$ ، ۶۰ درصد P_{max} را از طریق يك شبکه واکنشی به يك شینه بی نهایت می دهد. اتصالی رخ می دهد که رثکتانس شبکه بین ولتاژ داخلی ژنراتور و شینه بی نهایت را ۴۰٪ افزایش می دهد. وقتی اتصال حذف می شود، ماکزیم توانی که می توان انتقال داد ۸۰٪ مقدار ماکزیم ابتدایی است. زاویه بحرانی حذف را در وضع توصیف شده تعیین کنید.

۱۱-۱۴ اگر در ژنراتور مسئله ۱۴-۱۰، $H = ۶ MJ/MVA$ و P_m (مساوی P_{max} ۶۰) برابر توان $۱۰۰ pu$ باشد، زمان بحرانی حذف را در حالت مسئله ۱۴-۱۰ بیابید. برای رسم منحنی تابخورد لازم، Δt را برابر $۵۵ s$ در ۵۰۰ بگیرد.

۱۲-۱۴ اگر در سیستم و شرایط اتصال توصیف شده در مسائل ۱۴-۶ و ۱۴-۷، باز کردن همزمان مدار شکنهای دوسر خط اتصال کرده در ۴۵۰ سیکل پس از وقوع اتصال، اتصال را حذف کند معادله توان-زاویه را تعیین کنید. سپس منحنی تابخورد ژنراتور را در مدت $t = ۰.۲۵$ ثانیه رسم کنید.

۱۳-۱۴ جدول ۱۴-۶ را توسعه دهید تا δ را در $t = ۱.۰۰$ ثانیه بیابید.

۱۴-۱۴ برای ماشین ۲ مثالهای ۹-۱۴ تا ۱۱-۱۴، منحنی تابخورد را، به ازای حذف عیب در ۵۵۰ میلی ثانیه، به روش توصیف شده در بخش ۹-۱۴ محاسبه کنید. نتایج را با مقادیر به دست آمده از برنامه تولید نوعی و فهرست شده در جدول ۷-۱۴ مقایسه کنید.

۱۵-۱۴ اگر اتصالی سه فاز روی شینه ۵ خط ۴-۵ از سیستم مثال ۹-۱۴ رخ دهد و باز کردن همزمان مدار شکنهای دوسرخط در ۴۵ سیکل پس از وقوع اتصالی، اتصالی را حذف کند برای رسم منحنی تابخورد ماشین ۲ در مدت $t = 0.35$ s، جدولی مشابه جدول ۶-۱۴ تهیه کنید.

۱۶-۱۴ با اعمال معیار مساحتی مساوی به منحنی تابخورد به دست آمده در مثالهای ۹-۱۴ و ۱۰-۱۴ برای ماشین ۱، (الف) معادله ای برای زاویه بحرانی حذف به دست آورید، (ب) با حل معادله به روش تقریب پیاپی، δ_{cr} را محاسبه کنید، و (ج) به یاری معادله (۷۲-۱۴) زمان بحرانی حذف را پیدا کنید.

پیوست

جدول پد-۱ مشخصات الکتریکی هادیهای لغت آلومینیومی با فولاد مسلح (ACSR)*

علامت شناسایی	مساحت آلومینیم cmil	لایه‌های Al/St	لایه‌های آلومینیم	قطر خارجی in/1,000 ft	مقاومت			GMR D_g , ft	رنگارنی بر مادی تاسله گذاری $f_{\sigma}=10^6$ Hz	
					D_e , 20°C, in/1,000 ft	Ac, 60 Hz			الفابی X_{σ} , Ω /mi	ظرفیتی X_{ω} , Ω /mi
						20°C, ft/mi	50°C, ft/mi			
Waxwing	286,800	18/1	2	0.609	0.0046	0.3488	0.3831	0.0198	0.476	0.1090
Partridge	286,800	26/7	2	0.642	0.0040	0.3452	0.3762	0.0217	0.465	0.1074
Ostrich	300,000	26/7	2	0.680	0.0069	0.3070	0.3372	0.0229	0.458	0.1057
Martin	336,400	18/1	2	0.684	0.0612	0.2767	0.3037	0.0222	0.462	0.1055
Linnet	336,400	26/7	2	0.721	0.0507	0.2737	0.3006	0.0243	0.451	0.1040
Oriole	336,400	30/7	2	0.741	0.0504	0.2719	0.2987	0.0255	0.445	0.1032
Chickadee	397,500	18/1	2	0.743	0.0433	0.2342	0.2572	0.0241	0.452	0.1031
Ibis	397,500	26/7	2	0.783	0.0430	0.2323	0.2551	0.0264	0.441	0.1015
Pelican	477,000	18/1	2	0.814	0.0361	0.1957	0.2148	0.0284	0.441	0.1015
Flicker	477,000	24/7	2	0.846	0.0359	0.1933	0.2134	0.0284	0.432	0.0992
Hawk	477,000	26/7	2	0.856	0.0357	0.1931	0.2120	0.0289	0.430	0.0988
Hen	477,000	30/7	2	0.883	0.0355	0.1919	0.2107	0.0304	0.424	0.0980
Omprey	556,500	18/1	2	0.879	0.0309	0.1679	0.1843	0.0284	0.432	0.0981
Parakeet	556,500	24/7	2	0.914	0.0308	0.1669	0.1832	0.0306	0.423	0.0969
Dove	556,500	26/7	2	0.927	0.0307	0.1663	0.1826	0.0314	0.420	0.0965
Rook	636,000	24/7	2	0.977	0.0289	0.1461	0.1603	0.0327	0.415	0.0950
Greenback	636,000	26/7	2	0.990	0.0288	0.1454	0.1590	0.0335	0.412	0.0946
Drake	795,000	28/7	2	1.108	0.0215	0.1172	0.1284	0.0373	0.399	0.0912
Tern	795,000	45/7	3	1.063	0.0217	0.1188	0.1302	0.0352	0.406	0.0925
Rail	954,000	45/7	3	1.165	0.0181	0.0997	0.1092	0.0386	0.395	0.0897
Cardinal	954,000	54/7	3	1.165	0.0180	0.0988	0.1082	0.0402	0.390	0.0890
Oriole	1,033,500	45/7	3	1.259	0.0167	0.0924	0.1011	0.0402	0.390	0.0885
Bluejay	1,113,000	45/7	3	1.259	0.0155	0.0861	0.0941	0.0415	0.386	0.0874
Finch	1,113,000	54/19	3	1.293	0.0155	0.0856	0.0937	0.0436	0.380	0.0866
Bittern	1,272,000	45/7	3	1.345	0.0136	0.0762	0.0832	0.0444	0.378	0.0855
Phoebe	1,272,000	54/19	3	1.382	0.0135	0.0751	0.0821	0.0466	0.372	0.0847
Bobolink	1,431,000	45/7	3	1.457	0.0121	0.0684	0.0746	0.0470	0.371	0.0837
Plover	1,431,000	54/19	3	1.455	0.0120	0.0673	0.0735	0.0494	0.365	0.0829
Lapwing	1,590,000	45/7	3	1.502	0.0109	0.0623	0.0678	0.0498	0.364	0.0822
Falcon	1,590,000	54/19	3	1.545	0.0108	0.0612	0.0667	0.0523	0.358	0.0814
Bluebird	2,156,000	54/19	4	1.762	0.0080	0.0476	0.0515	0.0586	0.344	0.0776

* اغلب از اندازه‌های چند لایه‌ای استفاده می‌شود.

جدول پ-۲ ضریب فاصله گذاری رنک تانس X_d در 60 Hz (هم بر مایل بر هادی)

فاصله

فوت	انج										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11
0	0.3015	-0.2174	-0.1692	-0.1333	-0.1062	-0.0841	-0.0654	-0.0492	-0.0349	-0.0221	-0.0106
1	0.0897	0.0137	0.0271	0.0349	0.0423	0.0492	0.0558	0.0620	0.0679	0.0735	0.0789
2	0.0841	0.0333	0.0538	0.0628	0.0711	0.0782	0.0841	0.0897	0.0951	0.1004	0.1057
3	0.1333	0.1396	0.1396	0.1430	0.1471	0.1512	0.1552	0.1590	0.1627	0.1663	0.1699
4	0.1682	0.1707	0.1732	0.1756	0.1779	0.1802	0.1825	0.1847	0.1867	0.1884	0.1901
5	0.1953	0.1973	0.1993	0.2012	0.2031	0.2050	0.2069	0.2087	0.2105	0.2123	0.2140
6	0.2174	0.2191	0.2207	0.2224	0.2240	0.2256	0.2271	0.2287	0.2302	0.2317	0.2332
7	0.2361	0.2376	0.2390	0.2404	0.2418	0.2431	0.2445	0.2458	0.2472	0.2485	0.2501
8	0.2523	0.2538	0.2552	0.2566	0.2580	0.2594	0.2608	0.2622	0.2636	0.2650	0.2664
9	0.2678	0.2692	0.2706	0.2720	0.2734	0.2748	0.2762	0.2776	0.2790	0.2804	0.2818
10	0.2832	0.2846	0.2860	0.2874	0.2888	0.2902	0.2916	0.2930	0.2944	0.2958	0.2972
11	0.2986	0.3000	0.3014	0.3028	0.3042	0.3056	0.3070	0.3084	0.3098	0.3112	0.3126
12	0.3140	0.3154	0.3168	0.3182	0.3196	0.3210	0.3224	0.3238	0.3252	0.3266	0.3280
13	0.3294	0.3308	0.3322	0.3336	0.3350	0.3364	0.3378	0.3392	0.3406	0.3420	0.3434
14	0.3448	0.3462	0.3476	0.3490	0.3504	0.3518	0.3532	0.3546	0.3560	0.3574	0.3588
15	0.3602	0.3616	0.3630	0.3644	0.3658	0.3672	0.3686	0.3700	0.3714	0.3728	0.3742
16	0.3756	0.3770	0.3784	0.3798	0.3812	0.3826	0.3840	0.3854	0.3868	0.3882	0.3896
17	0.3910	0.3924	0.3938	0.3952	0.3966	0.3980	0.3994	0.4008	0.4022	0.4036	0.4050
18	0.4064	0.4078	0.4092	0.4106	0.4120	0.4134	0.4148	0.4162	0.4176	0.4190	0.4204
19	0.4218	0.4232	0.4246	0.4260	0.4274	0.4288	0.4302	0.4316	0.4330	0.4344	0.4358
20	0.4372	0.4386	0.4400	0.4414	0.4428	0.4442	0.4456	0.4470	0.4484	0.4498	0.4512
21	0.4526	0.4540	0.4554	0.4568	0.4582	0.4596	0.4610	0.4624	0.4638	0.4652	0.4666
22	0.4680	0.4694	0.4708	0.4722	0.4736	0.4750	0.4764	0.4778	0.4792	0.4806	0.4820
23	0.4834	0.4848	0.4862	0.4876	0.4890	0.4904	0.4918	0.4932	0.4946	0.4960	0.4974
24	0.4988	0.5002	0.5016	0.5030	0.5044	0.5058	0.5072	0.5086	0.5100	0.5114	0.5128
25	0.5142	0.5156	0.5170	0.5184	0.5198	0.5212	0.5226	0.5240	0.5254	0.5268	0.5282
26	0.5296	0.5310	0.5324	0.5338	0.5352	0.5366	0.5380	0.5394	0.5408	0.5422	0.5436
27	0.5450	0.5464	0.5478	0.5492	0.5506	0.5520	0.5534	0.5548	0.5562	0.5576	0.5590
28	0.5604	0.5618	0.5632	0.5646	0.5660	0.5674	0.5688	0.5702	0.5716	0.5730	0.5744
29	0.5758	0.5772	0.5786	0.5800	0.5814	0.5828	0.5842	0.5856	0.5870	0.5884	0.5898
30	0.5912	0.5926	0.5940	0.5954	0.5968	0.5982	0.5996	0.6010	0.6024	0.6038	0.6052
31	0.6066	0.6080	0.6094	0.6108	0.6122	0.6136	0.6150	0.6164	0.6178	0.6192	0.6206
32	0.6220	0.6234	0.6248	0.6262	0.6276	0.6290	0.6304	0.6318	0.6332	0.6346	0.6360
33	0.6374	0.6388	0.6402	0.6416	0.6430	0.6444	0.6458	0.6472	0.6486	0.6500	0.6514
34	0.6528	0.6542	0.6556	0.6570	0.6584	0.6598	0.6612	0.6626	0.6640	0.6654	0.6668
35	0.6682	0.6696	0.6710	0.6724	0.6738	0.6752	0.6766	0.6780	0.6794	0.6808	0.6822
36	0.6836	0.6850	0.6864	0.6878	0.6892	0.6906	0.6920	0.6934	0.6948	0.6962	0.6976
37	0.6990	0.7004	0.7018	0.7032	0.7046	0.7060	0.7074	0.7088	0.7102	0.7116	0.7130
38	0.7144	0.7158	0.7172	0.7186	0.7200	0.7214	0.7228	0.7242	0.7256	0.7270	0.7284
39	0.7298	0.7312	0.7326	0.7340	0.7354	0.7368	0.7382	0.7396	0.7410	0.7424	0.7438
40	0.7452	0.7466	0.7480	0.7494	0.7508	0.7522	0.7536	0.7550	0.7564	0.7578	0.7592
41	0.7606	0.7620	0.7634	0.7648	0.7662	0.7676	0.7690	0.7704	0.7718	0.7732	0.7746
42	0.7760	0.7774	0.7788	0.7802	0.7816	0.7830	0.7844	0.7858	0.7872	0.7886	0.7900
43	0.7914	0.7928	0.7942	0.7956	0.7970	0.7984	0.7998	0.8012	0.8026	0.8040	0.8054
44	0.8068	0.8082	0.8096	0.8110	0.8124	0.8138	0.8152	0.8166	0.8180	0.8194	0.8208
45	0.8222	0.8236	0.8250	0.8264	0.8278	0.8292	0.8306	0.8320	0.8334	0.8348	0.8362
46	0.8376	0.8390	0.8404	0.8418	0.8432	0.8446	0.8460	0.8474	0.8488	0.8502	0.8516
47	0.8530	0.8544	0.8558	0.8572	0.8586	0.8600	0.8614	0.8628	0.8642	0.8656	0.8670
48	0.8684	0.8698	0.8712	0.8726	0.8740	0.8754	0.8768	0.8782	0.8796	0.8810	0.8824
49	0.8838	0.8852	0.8866	0.8880	0.8894	0.8908	0.8922	0.8936	0.8950	0.8964	0.8978

در 60 Hz ، بر حسب مگا اهم بر مایل بر هادی
 $\text{ft } X_d = \% 6831 \log d$
 فاصله d برای خطوط
 $d = D_{eq}$

جدول پد-۳ ضریب فاصله گذاری در تکانس ظرفیتی موازی در X در HZ ۱۰ (مگا اهم-مایل بر هادی)

فاصله

اینج

نرت	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	.....	-0.0737	-0.0532	-0.0411	-0.0326	-0.0260	-0.0206	-0.0160	-0.0120	-0.0085	-0.0054	-0.0026
1	0.0046	0.0024	0.0046	0.0066	0.0085	0.0103	0.0120	0.0136	0.0152	0.0166	0.0180	0.0193
2	0.0206	0.0218	0.0229	0.0241	0.0251	0.0262	0.0272	0.0282	0.0291	0.0300	0.0309	0.0318
3	0.0326	0.0334	0.0342	0.0350	0.0357	0.0365	0.0372	0.0379	0.0385	0.0390	0.0399	0.0405
4	0.0411	0.0417	0.0423	0.0429	0.0435	0.0441	0.0446	0.0450	0.0455	0.0462	0.0467	0.0473
5	0.0478	0.0482	0.0487	0.0492	0.0498	0.0502	0.0506	0.0510	0.0515	0.0519	0.0523	0.0527
6	0.0532	0.0536	0.0540	0.0544	0.0548	0.0552	0.0555	0.0559	0.0563	0.0567	0.0570	0.0574
7	0.0577	0.0581	0.0584	0.0588	0.0591	0.0594	0.0598	0.0601	0.0604	0.0608	0.0611	0.0614
8	0.0617	0.0621	0.0625	0.0628	0.0632	0.0635	0.0638	0.0641	0.0644	0.0647	0.0650	0.0653
9	0.0656	0.0659	0.0662	0.0665	0.0668	0.0671	0.0674	0.0677	0.0680	0.0683	0.0686	0.0689
10	0.0692	0.0695	0.0698	0.0701	0.0704	0.0707	0.0710	0.0713	0.0716	0.0719	0.0722	0.0725
11	0.0728	0.0731	0.0734	0.0737	0.0740	0.0743	0.0746	0.0749	0.0752	0.0755	0.0758	0.0761
12	0.0764	0.0767	0.0770	0.0773	0.0776	0.0779	0.0782	0.0785	0.0788	0.0791	0.0794	0.0797
13	0.0799	0.0802	0.0805	0.0808	0.0811	0.0814	0.0817	0.0820	0.0823	0.0826	0.0829	0.0832
14	0.0835	0.0838	0.0841	0.0844	0.0847	0.0850	0.0853	0.0856	0.0859	0.0862	0.0865	0.0868
15	0.0871	0.0874	0.0877	0.0880	0.0883	0.0886	0.0889	0.0892	0.0895	0.0898	0.0901	0.0904
16	0.0907	0.0910	0.0913	0.0916	0.0919	0.0922	0.0925	0.0928	0.0931	0.0934	0.0937	0.0940
17	0.0943	0.0946	0.0949	0.0952	0.0955	0.0958	0.0961	0.0964	0.0967	0.0970	0.0973	0.0976
18	0.0979	0.0982	0.0985	0.0988	0.0991	0.0994	0.0997	0.1000	0.1003	0.1006	0.1009	0.1012
19	0.1015	0.1018	0.1021	0.1024	0.1027	0.1030	0.1033	0.1036	0.1039	0.1042	0.1045	0.1048
20	0.1051	0.1054	0.1057	0.1060	0.1063	0.1066	0.1069	0.1072	0.1075	0.1078	0.1081	0.1084
21	0.1087	0.1090	0.1093	0.1096	0.1099	0.1102	0.1105	0.1108	0.1111	0.1114	0.1117	0.1120
22	0.1123	0.1126	0.1129	0.1132	0.1135	0.1138	0.1141	0.1144	0.1147	0.1150	0.1153	0.1156
23	0.1159	0.1162	0.1165	0.1168	0.1171	0.1174	0.1177	0.1180	0.1183	0.1186	0.1189	0.1192
24	0.1195	0.1198	0.1201	0.1204	0.1207	0.1210	0.1213	0.1216	0.1219	0.1222	0.1225	0.1228
25	0.1231	0.1234	0.1237	0.1240	0.1243	0.1246	0.1249	0.1252	0.1255	0.1258	0.1261	0.1264
26	0.1267	0.1270	0.1273	0.1276	0.1279	0.1282	0.1285	0.1288	0.1291	0.1294	0.1297	0.1300
27	0.1303	0.1306	0.1309	0.1312	0.1315	0.1318	0.1321	0.1324	0.1327	0.1330	0.1333	0.1336
28	0.1339	0.1342	0.1345	0.1348	0.1351	0.1354	0.1357	0.1360	0.1363	0.1366	0.1369	0.1372
29	0.1375	0.1378	0.1381	0.1384	0.1387	0.1390	0.1393	0.1396	0.1399	0.1402	0.1405	0.1408
30	0.1411	0.1414	0.1417	0.1420	0.1423	0.1426	0.1429	0.1432	0.1435	0.1438	0.1441	0.1444
31	0.1447	0.1450	0.1453	0.1456	0.1459	0.1462	0.1465	0.1468	0.1471	0.1474	0.1477	0.1480
32	0.1483	0.1486	0.1489	0.1492	0.1495	0.1498	0.1501	0.1504	0.1507	0.1510	0.1513	0.1516
33	0.1519	0.1522	0.1525	0.1528	0.1531	0.1534	0.1537	0.1540	0.1543	0.1546	0.1549	0.1552
34	0.1555	0.1558	0.1561	0.1564	0.1567	0.1570	0.1573	0.1576	0.1579	0.1582	0.1585	0.1588
35	0.1591	0.1594	0.1597	0.1600	0.1603	0.1606	0.1609	0.1612	0.1615	0.1618	0.1621	0.1624
36	0.1627	0.1630	0.1633	0.1636	0.1639	0.1642	0.1645	0.1648	0.1651	0.1654	0.1657	0.1660
37	0.1663	0.1666	0.1669	0.1672	0.1675	0.1678	0.1681	0.1684	0.1687	0.1690	0.1693	0.1696
38	0.1699	0.1702	0.1705	0.1708	0.1711	0.1714	0.1717	0.1720	0.1723	0.1726	0.1729	0.1732
39	0.1735	0.1738	0.1741	0.1744	0.1747	0.1750	0.1753	0.1756	0.1759	0.1762	0.1765	0.1768
40	0.1771	0.1774	0.1777	0.1780	0.1783	0.1786	0.1789	0.1792	0.1795	0.1798	0.1801	0.1804
41	0.1807	0.1810	0.1813	0.1816	0.1819	0.1822	0.1825	0.1828	0.1831	0.1834	0.1837	0.1840
42	0.1843	0.1846	0.1849	0.1852	0.1855	0.1858	0.1861	0.1864	0.1867	0.1870	0.1873	0.1876
43	0.1879	0.1882	0.1885	0.1888	0.1891	0.1894	0.1897	0.1900	0.1903	0.1906	0.1909	0.1912
44	0.1915	0.1918	0.1921	0.1924	0.1927	0.1930	0.1933	0.1936	0.1939	0.1942	0.1945	0.1948
45	0.1951	0.1954	0.1957	0.1960	0.1963	0.1966	0.1969	0.1972	0.1975	0.1978	0.1981	0.1984
46	0.1987	0.1990	0.1993	0.1996	0.1999	0.2002	0.2005	0.2008	0.2011	0.2014	0.2017	0.2020
47	0.2023	0.2026	0.2029	0.2032	0.2035	0.2038	0.2041	0.2044	0.2047	0.2050	0.2053	0.2056
48	0.2059	0.2062	0.2065	0.2068	0.2071	0.2074	0.2077	0.2080	0.2083	0.2086	0.2089	0.2092
49	0.2095	0.2098	0.2101	0.2104	0.2107	0.2110	0.2113	0.2116	0.2119	0.2122	0.2125	0.2128

در 90 Hz ، بر حسب مگا اهم مایل بر هادی
 $d \log X_d = 0.06831 \text{ ft}$ ، فاصله d برای
خطوط سه فاز $D_{eq} = d$

جدول پ-۴ رثكتانسهای نوعی ماشینهای سنكرون سه فاز*
مقادير بر حسب دريك اند. برای هر رثكتانس يك رده از مقادير در زیر مقدار نوعی
نوشته شده اند.**

ژنراتور-توربینی						
	۲ قطبی		۴ قطبی		ژنراتورهای قطب-برجسته	
	در خنك كندگى معمولی	با خنك كندگى هادى	در خنك كندگى معمولی	با خنك كندگى هادى	بدون میراكن	با میراكن
X_d	1.76 1.7-1.82	1.95 1.72-2.17	1.38 1.21-1.55	1.87 1.6-2.13	1 0.6-1.5	1 0.6-1.5
X_q	1.66 1.63-1.69	1.93 1.71-2.14	1.35 1.17-1.52	1.82 1.56-2.07	0.6 0.4-0.8	0.6 0.4-0.8
X'_d	0.21 0.18-0.23	0.33 0.264-0.387	0.26 0.25-0.27	0.41 0.35-0.467	0.32 0.25-0.5	0.32 0.25-0.5
X''_d	0.13 0.11-0.14	0.28 0.23-0.323	0.19 0.184-0.197	0.29 0.269-0.32	0.2 0.13-0.32	0.30 0.2-0.5
X_2	$= X''_d$	$= X''_d$	$= X''_d$	$= X''_d$	0.2 0.13-0.32	0.40 0.30-0.45
$X_{0\delta}$						

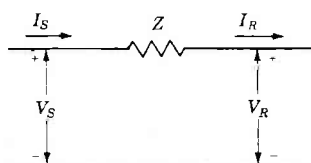
* داده ها توسط Westinghouse Electric Corporation داده شده است.
** رثكتانس ماشینهای قدیمی تر معمولاً نزدیک به مقادير مینیمم خواهد بود.
*** X_0 به طور شدیدی با گام سیم پیچ آرمچر تغییر می کند، به نحوی که به دشواری می توان يك مقدار میانگین برای آن به دست داد. تغییر از ۱۰ تا ۷۰ برابر X''_d است.

جدول پ-۵ رده نوعی رثكتانس ترانسفورماتورها*
ترانسفورماتورهای قدرت ۲۵۰۰۰kVA و بزرگتر.

ولتاژ نامی سیستم، kV	خنك كندگى واداشته هوا، %	خنك كندگى واداشته روغن، %
34.5	5-8	9-14
69	6-10	10-16
115	6-11	10-20
138	6-13	10-22
161	6-14	11-25
230	7-16	12-27
345	8-17	13-28
500	10-20	16-34
700	11-21	19-35

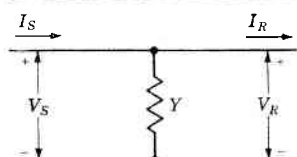
* درصد بر مبنای کیلو ولت-آمپر نامی. اکنون ترانسفورماتورهای نوعی برای مقدار مینیمم رثكتانس نشان داده شده طراحی می شوند. رثكتانس ترانسفورماتورهای توزیع، بسیار کوچکتر است. مقاومت ترانسفورماتورها معمولاً کوچکتر از ۱٪ هستند.

جدول پ-۶ ثابتهای DCBA شبکه‌های مختلف.



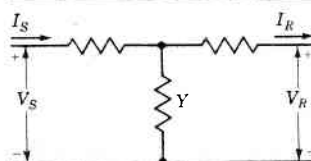
امپدانس متوالی

$$\begin{aligned} A &= 1 \\ B &= Z \\ C &= 0 \\ D &= 1 \end{aligned}$$



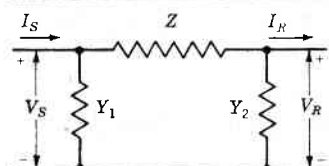
ادمیتانس موازی

$$\begin{aligned} A &= 1 \\ B &= 0 \\ C &= Y \\ D &= 1 \end{aligned}$$



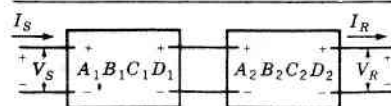
T نامتقارن

$$\begin{aligned} A &= 1 + YZ_1 \\ B &= Z_1 + Z_2 + YZ_1Z_2 \\ C &= Y \\ D &= 1 + YZ_2 \end{aligned}$$



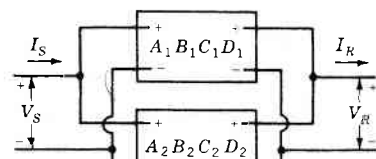
π نامتقارن

$$\begin{aligned} A &= 1 + Y_2Z \\ B &= Z \\ C &= Y_1 + Y_2 + ZY_1Y_2 \\ D &= 1 + Y_1Z \end{aligned}$$



شبکه‌های متوالی

$$\begin{aligned} A &= A_1A_2 + B_1C_2 \\ B &= A_1B_2 + B_1D_2 \\ C &= A_2C_1 + C_1D_1 \\ D &= B_2C_1 + D_1D_2 \end{aligned}$$



شبکه‌های موازی

$$\begin{aligned} A &= (A_1B_2 + A_2B_1)/(B_1 + B_2) \\ B &= B_1B_2/(B_1 + B_2) \\ C &= C_1 + C_2 + (A_1 - A_2)(D_2 - D_1)/(B_1 + B_2) \\ D &= (B_2D_1 + B_1D_2)/(B_1 + B_2) \end{aligned}$$

واژه‌نامه

fault 1	اتصال ۱
fault 2	عیب
three phase fault	اتصال سه فاز
hysteresis loss	اتلاف پسماند
eddy current loss	اتلاف جریان گردابی
skin effect	اثر پوستی
transfer impedance	امپدانس انتقالی
zero-sequence impedance	امپدانس ترتیب-صفر
positive-sequence impedance	امپدانس ترتیب-مثبت
negative-sequence impedance	امپدانس ترتیب-منفی
surge impedance	امپدانس ضربه‌ای
driving point impedance	امپدانس نقطه رانش
Y-connected load	بار اتصال-ستاره‌ای
Δ -connected load	بار اتصال-مثلثی
reach	برد
iteration	بساورد
matrix partitioning	پارشی ماتریس
load flow	پخش بار
hyperbolic function	تابع هذلولی
exciter	تحریرگر
Δ -y transformer	ترانسفورماتور مثلث-ستاره‌ای

phase sequence	ترتیب فاز
load dispatching	مته: توالی فاز
pick-up setting	تسهیم بار
complex power	تنظیم برداشت
reactive power	توان مختلط
	توان واکنشی
inertia constant	ثابت لختی
trans position	جایگشت
reactive compensation	جبران واکنشی
charging current	جریان باردارکننده
zero-sequence current	جریان ترتیب-صفر
positive-sequence current	جریان ترتیب-مثبت
negative-sequence current	جریان ترتیب-منفی
subtransient current	جریان زیرگذرا
transient current	جریان گذرا
steady-state current	جریان مانا
magnetizing current	جریان مغناطنده
stability limit	حد پایداری
transient stability limit	حد پایداری گذرا
steady-state stability limit	حد پایداری مانا
back-up protection	حفاظت پشتیبان
primary protection	حفاظت مقدم
single phase two-wire line	خط تکفاز دوسیمه
transposed three-phase line	خط سه فاز جایگشت دار
parallel circuit three-phase lines	خطهای سه فاز دابل
subtrans mission lines	خطهای انتقال فرعی
per-unit reactance	رئکتانس در-یکی
subtransient reactance	رئکتانس زیرگذرا
transient reactance	رئکتانس گذرا

direct-axis synchronous reactance	رئکتانس سنکرون طولی
quadrature-axis synchronous reactance	رئکتانس سنکرون عرضی
leakage reactance	رئکتانس نشت
overcurrent relay	رله اضافه جریان
impedance relay	رله امپدانس
pilot relay	رله پیلوتی
differential relay	رله تفاضلی
percent differential relay	رله تفاضلی درصدی
directional relay	رله سودار
phase relay	رله فاز
distance relay	رله فاصله
magnitude relay	رله مقداری
ratio relay	رله نسبتی
Seidel-iterative method	روش بساوردی زایدل
power angle	زاویه توان
torque angle	زاویه گشتاور
ground wire	سیم زمین
tap setting	سرك تنظیم
flux linkage	شار حلقه زن
sequence network	شبکه ترتیبی
simulation	شبیه سازی
geometric mean radius	شعاع میانگین هندسی
incremental fuel cost	شیب هزینه سوخت
bus	شینّه
infinite bus	شینّه بینهایت
swing bus	شینّه تابخورد
surge arrester	ضربه گیر
voltage range factor	ضریب پهنه ولتاژ
power factor	ضریب توان
compensation factor	ضریب جبران

penalty factor	ضریب جریمه
spacing factor	ضریب فاصله گذاری
fault through impedance	عیب از طریق امپدانس
line-to-line fault	عیب خط به خط
line-to-ground fault	عیب خط به زمین
double line-to-ground fault	عیب دو خط به زمین
equilateral spacing	فاصله گذاری منتظم
unsymmetrical spacing	فاصله گذاری نامنتظم
geometric mean distance	فاصله میانگین هندسی
governor	فرمانه
voltage regulation	فروافت ولتاژ
Thevenin theorem	قضیه تونن
per-unit quantities	کمیات در-یکی
balanced three-phase circuit	مدار سه فاز متعادل
circuitbreaker	مدار شکن
zero-sequence components	مؤلفه های ترتیب-صفر
positive-sequence components	مؤلفه های ترتیب-مثبت
negative-sequence components	مؤلفه های ترتیب-منفی
symmetrical	مؤلفه های متقارن
swing equation	معادله تابخورد
per-unit resistance	مقاومت در-یکی
over-excited motor	موتور پرتحرک
under excited motor	موتور کم تحرک
traveling waves	موجهای رونده
swing curve	منحنی تابخورد
overreaching zone	ناحیه پربرد
underreaching zone	ناحیه کم برد
mismatch	ناهمخوانی

prime mover
polarity marks
phasor diagram
armature reaction

نخست-رانه
نشانه‌های قطب‌داشت
نمودار فاز-بردار
واکنش آرمچر

reflected voltage
incident voltage

ولتاژ بازتاب
ولتاژ تابنده

stranded conductors
bundled conductors
synchronizing power coefficient
power coefficients

هادیهای رشته‌ای
هادیهای گروهی
همگر توان همزمان‌ساز
همگرهای توان

فهرست راهنما

- ترتیب-مثبت (امپدانس ترتیب-مثبت را ببینید)
- ترتیب-منفی (امپدانس ترتیب-منفی را ببینید)
- ضربه‌ای ۱۱۴
- مشخصه (امپدانس مشخصه را ببینید)
- نقطهٔ رانش‌گرها ۲۰۵
- اندازه‌گیری - ۲۰۷
- نمودارهای - ۱۸۵-۱۸۰
- (رئکتانس را نیز ببینید)
- امپدانس ترتیب-صفر ۳۳۶-۳۳۵
- عناصر مدار ۳۴۰-۳۳۸
- ماشینهای همزمان ۳۳۹-۳۳۸
- جدول - ۴۸۴
- امپدانس ترتیب-مثبت ۳۳۵
- عناصر مدار ۳۴۰-۳۳۸
- امپدانس ترتیب-منفی ۳۳۶-۳۳۵
- عناصر مدار ۳۳۹-۳۳۸
- ماشینهای همزمان ۳۳۸
- جدول - ۴۸۴
- امپدانسهای ترتیبی عناصر مدار ۳۳۸ تا ۳۴۰
- امپدانسهای متوالی نامتقارن ۳۳۵-۳۳۳
- امپدانس مشخصه ۱۱۲-۱۱۴، ۱۳۵
- اتلاف پسماند ۱۶۴
- اتلاف جریان گردابی ۱۶۴
- اتلافها به‌عنوان تابعی از تولید نیروگاه ۲۷۴-۲۷۰
- اتوترانسفورماتور ۱۶۸-۱۶۷
- اثر پوستی ۵۰
- ادمیتانس:
- خود-گرها ۱۹۵
- اندازه‌گیری - ۲۰۵
- به‌عنوان داده در بررسی پخش بار ۲۲۳، ۲۲۲
- متقابل گرها ۱۹۵
- اندازه‌گیری - ۲۰۶
- به‌عنوان داده در بررسی پخش بار ۲۲۳، ۲۲۲
- امپدانس:
- انتقالی گرها ۲۰۵
- اندازه‌گیری - ۲۰۷
- اندازه‌گیری - از طریق ترانسفورماتور ۱۶۳
- ترانسفورماتور ۱۶۷-۱۶۴
- جدول - ۴۸۴
- ترتیب-صفر (امپدانس ترتیب-صفر را ببینید)

- پایان گیری خط با - ۱۳۶، ۱۱۴
امواج تابنده و بازتابنده ۱۳۹-۱۳۵، ۱۱۳
انتقال جریان یکسو «dc» ۱۴۲-۱۴۱، ۴
انتقال زیرزمینی ۸
کابل های - ۴۸-۴۷
اندوکنانس:
تعریف - ۵۳-۵۲
جایگشت برای تعادل - ۷۰
خط تکفاز دوسیمه ۶۰-۵۸
خط سه فاز: بسا فاصله گذاری منتظم
۶۹-۶۸
بسا فاصله گذاری نامنتظم ۷۲-۶۹
خط سه فاز دابل ۷۶-۷۴
خلاصه محاسبات - ۷۷-۷۶
مقابل ۵۳
محاسبه به روش فاصله میانگین هندسی
۷۷-۶۴
ناشی از شار درونی ۵۶-۵۳
(رئکتانس را نیز ببینید)
انرژی جنبشی ۴۳۴
بار زنش یا بارگذاری امیدانس ضربه ای
۱۱۴
بایاس فرکانس یا بسامد ۲۸۲
بررسی بخش بار:
- بر روی کامپیوتر رقمی، داده های ۲۳۴
اطلاعات به دست آمده - ۲۳۵
نتیجه های عددی - ۲۳۷-۲۳۵
به روش گوس-زایدل ۲۲۶-۲۲۳
به روش نیوتون-رافسون ۲۳۰-۲۲۶
داده های - ۲۳۴، ۲۲۳-۲۲۲
بررسی پدیده های گذرا در خط انتقال:
بازتابشها ۱۳۹-۱۳۵
ضریب بازتابش ۱۳۶، ۱۳۹
موجهای رونده ۱۳۱ تا ۱۳۵
سرعت - ۱۳۴
موج بازتابنده ۱۳۹-۱۳۵
موج تابنده ۱۳۹-۱۳۵
نمودار نردبانی ۱۳۹
بهره برداری اقتصادی از سیستم قدرت
(توزیع اقتصادی بار را ببینید)
به هم پیوستگی سیستم های قدرت ۶-۵
به عنوان عنصری از کنترل خودکار تولید
۲۸۳-۲۸۰
پارش ماتریس ۱۹۹-۱۹۸
حذف گره با - ۲۰۴-۲۰۰
پایداری:
انواع - ۴۲۷-۴۲۶
بررسی های - ۱۲-۱۱
انواع - ۴۲۷-۴۲۶
به دست آوردن معادله تساخورد
۴۳۴-۴۲۸
دینامیک روتور ۴۳۲-۴۲۸
فرضهای - مدل کلاسیک ماشین
۴۵۸-۴۵۷
فرضهای همه - ۴۲۸
تعریف - ۴۲۶
حد - ۱۲
دینامیک روتور برای - ۴۳۲-۴۲۸
عاملهای مؤثر بر - ۴۷۷-۴۷۴
پایداری حالت گذرا ۴۲۸-۴۲۶
عاملهای مؤثر بر - ۴۷۷-۴۷۴
(بررسی پایداری را نیز ببینید)
پدیده های گذرا در خط انتقال ۱۴۰-۱۳۰
تابهای هذلولوی ۱۱۹-۱۱۵
تأخیر زمان هماهنگی ۴۰۷، ۴۰۴

تبادل توان ۲۸۱-۲۸۲	(ترانسفورماتور ولتاژ برای حفاظت سیستم را ببینید)
ترانسفورماتور:	ترانسفورماتور ستاره-مثلثی: (ترانسفورماتور مثلث-ستاره ای را ببینید)
آزمون اتصال-کوتاهی- ۱۶۷	ترانسفورماتور مثلث-ستاره ای: ۱۷۴
آزمون مدار-وازی- ۱۶۶	امپدانس در-یکی- ۱۷۴
اتلاف پسماند در- ۱۶۹	تغییر فاز در- ۳۳۱-۳۲۴
اتلاف جریان گردابی در- ۱۶۴	حفاظت - ۴۲۲-۴۱۹
امپدانس از دیدگاه- ۱۶۳	ترانسفورماتورهای ولتاژ برای حفاظت سیستم ۳۹۵-۳۹۴
اتو ترانسفورماتور ۱۶۷-۱۶۸	ترتیب یا توالی فاز ۲۹-۳۲
- ایدئال ۱۵۹-۱۶۴	تسهیم اقتصادی (توزیع اقتصادی بار را ببینید)
- با سرک تعویض شونده در زیر بار ۲۴۶	تسهیم بار (توزیع اقتصادی بار را ببینید)
- با نسبت تبدیل ورای نامی ۲۴۶-۲۵۰	تغییر فاز در ترانسفورماتورهای سه فاز ۳۳۲-۳۲۴
تغییر فاز در-ستاره-مثلثی ۳۲۴-۳۳۲	توان:
- تنظیم ۲۴۶-۲۵۶	- با مؤلفه های متقارن ۳۳۲-۳۳۳
- برای تعدیل اندازه ولتاژ ۲۴۶-۲۵۰، ۲۴۸-۲۵۴	جهت گذر- ۲۴-۲۸
- برای تعدیل زاویه فاز ۲۴۶-۲۴۸، ۲۵۴-۲۵۶	- در مدارهای تکفاز ۱۸-۲۳
جدول رثکتانس - ۴۸۴	- در مدارهای سه فاز ۳۵-۳۶
جریان مغناطنده در - ۱۶۴-۱۶۷	زاویه - ۲۳۷-۲۴۰، ۱۵۸
حفاظت - ۴۱۹-۴۲۲	کنترل گذر- با ترانسفورماتور ۲۴۶-۲۵۶
رثکتانس نش - ۱۶۴	گذر- در خط انتقال ۱۲۳-۱۲۷
- سه سیم پیچ ۱۷۵-۱۷۸	(توان واکنشی را نیز ببینید)
- سه فاز ۱۷۲-۱۷۵	- لحظه ای ۱۸
مدار معادل - ۱۶۴-۱۶۷	- مختلط ۲۳
- برای جریان ترتیب- صفر ۳۴۳-۳۴۷	معادله های- زاویه ۴۳۷-۴۵۹، ۴۴۴
نشانه گذاری قطب داشت در - ۱۶۱، ۳۲۴-۳۲۸	تعریف - ۴۴۰
نقطه گذاری بر سرهای - ۱۶۱	مثالهای - ۴۴۰-۴۵۹، ۴۴۴-۴۶۵
رانسفورماتور جریان ۳۹۳-۳۹۴	مقدار متوسط - ۲۱
تنظیم برداشت - ۳۹۷	منحنیهای- زاویه ۴۴۰
سرکهای تنظیم - ۳۹۷	- در بررسی مساحت های برابر
نسبت - ۳۹۴	۴۲۸-۴۵۴
انسفورماتور جریان با خازن توزیع «CVT»	

ثابت‌های عمومی مدار (ثابت‌های DCBA)

را ببینید)

ثابت‌های H:

تعریف - ۴۳۱-۴۳۲

جدول - ۴۳۳

محاسبه - ۴۳۲-۴۳۷

جایگشت در خط انتقال:

- برای تعادل اندوکتانسی ۷۰

- برای تعادل ظرفیتی ۹۲-۹۴

جبران واکنشی خط‌های انتقال:

- متوالی ۱۲۷، ۱۲۸-۱۲۹

- موازی ۱۲۷، ۱۲۹-۱۳۰

جریان:

- زودگذر در مدار شکنها ۳۰۷

جهت - ۱۶

- زیرگذر ۲۹۰-۳۰۰

- گذر: در ماشین همزمان ۲۸۹-۲۹۲

در مدار R-L ۲۸۶

معادله‌های - برای خط انتقال بلند

۱۱۱-۱۱۲، ۱۱۶

برای خط انتقال کوتاه ۱۰۶-۱۰۸

برای خط انتقال متوسط ۱۰۸-۱۰۹

موج بازتابنده - ۱۱۳، ۱۳۴-۱۳۷

۱۳۹-۱۴۰

موج تابنده - ۱۱۳، ۱۳۴-۱۳۷

۱۳۹-۱۴۰

جریان باردارکننده ۸۲، ۹۱-۹۲

جریان و ولتاژ تابنده ۱۱۳، ۱۳۵-۱۳۹

حفاظت:

- پشتیبان ۴۰۳-۴۰۵، ۴۰۸-۴۱۱

- ترانسفورماتور ۴۱۹-۴۲۳

- خط‌های انتقال HV و EHV ۴۱۲-۴۱۷

- واکنشی، علامت ۲۲-۲۷

توان مختلط ۲۳

توان واکنشی:

تعریف - ۲۱

- تولیدی خازنها ۲۲-۲۳

جهت گذر - ۲۴-۲۸

علامت - ۲۲، ۲۷

کنترل گذر -

- با تحریک ماشین ۱۵۸-۱۵۹

- با ترانسفورماتور تنظیم ۲۴۶-۲۵۶

- ماشینهای سنکرون:

- بر تحریک ۱۵۸-۱۵۹

- کم تحریک ۱۵۸-۱۵۹

توزیع اقتصادی بار:

بسط ریاضی - ۲۶۵-۲۶۶

- بین نیروگاهها:، بسط ریاضی

۲۷۴-۲۷۶

صرفه‌جویی حاصل از - ۲۷۸

مثال - ۲۷۶-۲۷۷

- بین واحدهای یک نیروگاه ۲۶۲-۲۷۰

درک مستقیم - ۲۶۵

مثال - ۲۶۶-۲۶۹

صرفه‌جویی ناشی از - ۲۶۹-۲۷۰

ثابت انتشار ۱۱۲

ثابت تضعیف ۱۱۳

ثابت فاز ۱۱۳

ثابت لختی ۴۳۰ (ثابت‌های H را نیز

ببینید)

ثابت‌های DCBA ۱۰۹

جدول - شبکه‌های مختلف ۴۸۵

- در معادله‌های پخش توان ۱۲۴

- در معادله‌های نمودار دایره‌ای

۱۲۵-۱۲۶

- عناصر مدار ۳۳۸-۳۳۹
- ماشینهای همزمان ۳۳۸
- جدول ۴۸۴
- زیر گذرا ۲۹۱
- ضریب فاصله گذاری - ۸۸
- جدول- برای ACSR ۲۸۳
- ظرفیتی: با فاصله گذاری فوت ۸۸
- جدول- برای ACSR ۴۸۱
- گذرا ۲۹۰
- محور طولی ۱۵۸، ۲۸۹
- نشت: در ترانسفورماتور ۱۶۴
- در ماشینهای همزمان ۱۵۵
- هادیهای گروهی: القایی ۷۲-۷۳
- ظرفیتی ۹۷-۹۹
- همزمان ۲۸۹
- (ظرفیت و اندوکتانس را نیز ببینید)
- ریکتانس در-یکی:
- ترانسفورماتورها، جدول ۴۸۴
- ترانسفورماتورهای سه سیم پیچه ۱۷۵
- تا ۱۷۸
- ماشینهای همزمان، جدول ۴۸۲
- (کمیتهای در-یکی را نیز ببینید)
- رسانایی ۴۵، ۸۱
- رله: ۱۱
- اضافه جریان ۳۹۶-۳۹۹، ۴۰۸-۴۱۱
- امیدانس ۴۰۰-۴۰۱، ۴۱۲-۴۱۷
- برد- ۳۹۰
- پیلوتی ۴۰۳
- تعریف- ۳۸۹
- تفاضلی ۴۰۱-۴۰۳
- تفاضلی درصدی ۴۰۳
- سودار ۳۹۹
- فاز ۴۱۲
- فاصله ۴۰۰-۴۰۱، ۴۱۲-۴۱۷
- با رله های پیلوتی ۴۱۷-۴۱۸
- خطهای انتقال فرعی ۴۰۵-۴۱۱
- سیستم ۳۸۷
- سیستمهای - ۳۸۸-۳۹۰
- (رله ها را نیز ببینید)
- شینه ۴۰۳
- مولد و موتور ۴۰۱-۴۰۳
- خازن:
- برای جبران نوع متوالی ۱۲۷-۱۲۸
- برای کنترل ولتاژ شینه ۲۰۸-۲۰۹،
- ۲۴۳-۲۴۶
- به عنوان مولد توان واکنشی ۲۲-۲۳
- خازن سنکرون ۲۴۵
- خطای کنترل ایستگاه «SCE» ۲۸۲
- خطای کنترل منطقه «ACE» ۲۸۲
- خط انتقال:
- با طول متوسط ۱۰۸-۱۰۹
- بلند ۱۱۰-۱۲۳
- پدیده های گذرا در- ۱۳۰-۱۴۰
- رده بندی- بر حسب طول ۱۰۵-۱۰۶
- ریکتانس ترتیب- صفر- ۳۳۴-۳۴۰
- کوتاه ۱۰۶-۱۰۸
- خط نامحدود ۱۱۴، ۱۳۶
- خود ادمیتانس گر ها (ادمیتانس را ببینید)
- درجه دقت ۲۲۵، ۲۲۸، ۲۳۴
- ریکتانس:
- القایی: با فاصله گذاری فوت ۶۷
- جدول- برای ACSR ۴۸۱
- ضریب فاصله گذاری- ۶۸
- جدول- برای ACSR ۴۸۲
- ترتیبی (مثبت، منفی و صفر) ۳۳۵

نقطه مرجع - ۳۴۱
 شبکه‌های ترتیب-مثبت
 (رئکتانس و نمودارهای شبکه‌های ترتیبی
 را ببینید)
 شبکه‌های ترتیب-منفی (شبکه‌های ترتیبی
 را ببینید)
 شبکه‌های ترتیبی ۳۳۵-۳۳۸، ۳۴۰-۳۴۶
 به هم پیوستگی برای محاسبه عیب،
 ۳۶۳-۳۷۰، ۳۷۶-۳۸۲
 شدت میدان:
 - الکتریکی ۸۳
 - مغناطیسی ۵۴-۵۶
 شعاع میانگین هندسی «GMR»:
 تعریف - ۶۴
 جدول - برای ACSR ۴۸۱
 مثال: در محاسبه اندوکتانس ۶۴-۷۷
 در محاسبه ظرفیت ۹۶-۱۰۱
 - هادیهای گروهی ۶۱-۶۲، ۹۷-۹۹
 شیب هزینه سوخت ۲۶۲-۲۶۶
 شینه بینهایت ۱۵۸
 - در بررسی پایداری ۴۳۷
 شینه تابخور ۲۲۳-۲۲۸
 ضربه:
 سیم زمین برای حفاظت در برابر -
 ۱۰۳، ۱۳۰
 - گیر ۱۴۰
 ضریب بازتابش ۱۳۶
 ضریب توان ۲۱، ۲۲
 ضریب جبران:
 - متوالی ۱۲۷
 - موازی ۱۲۹
 ضریب جریمه ۲۷۵
 ضریبهای اتلاف (ضریبهای B را ببینید)

- مقداری ۳۹۶-۳۹۹
 منحنيهای مشخصه - «IFC-۵۳» ۳۹۸
 - مهو «mho» ۴۰۱، ۴۱۵
 - نسبتی ۴۰۰-۴۰۱
 (حفاظت را نیز ببینید)
 راه‌های فاز ۴۱۲
 روش گوس-زایدل برای بررسی بخش بار
 ۲۲۳-۲۲۶
 روش نیوتون-رافسون برای بررسی بخش
 بار ۲۲۶-۲۳۰
 زاویه بحرانی حذف ۴۵۳-۴۵۵
 زاویه گشتاور (زاویه توان را ببینید)
 زمین:
 اثر - بر ظرفیت ۹۵-۹۷
 ساده کردن شبکه‌ها ۲۰۰-۲۰۵
 سرعت انتشار ۱۱۵، ۱۳۳-۱۳۴
 سیم تصویر ۹۵-۹۶
 سیمهای زمین ۱۰۳، ۱۳۰-۱۳۱
 شار حلقه زن:
 - پیچك ۵۲
 - جزئی ۵۳-۵۶
 - درونی ۵۳-۵۶
 - هر سیم از يك گروه ۶۰-۶۲
 شبکه‌ها:
 ثابتهای ABCD -، جدول ۴۸۵
 (شبکه‌های ترتیبی را نیز ببینید)
 شبکه‌های ترتیب-صفر:
 - بارهای اتصال-ستاره‌ای ۳۴۱
 - بارهای اتصال-مثلثی ۳۴۲-۳۴۳
 - ترانسفورماتورهای سه فاز ۳۴۳-۳۴۵
 - مولدهای بی بار ۳۳۶-۳۳۸

- ضرریهای B ۲۷۰-۲۸۰
محاسبه ۲۷۰-۲۷۲
ضرریهای لاگرانژ ۲۶۶
- طول موج ۱۱۵
- ظرفیت:
- اثر توزیع نسیکنواخت باربر-
۸۷-۸۸
اثر زمین بر- ۹۵-۹۷
اثر سیجهای رشتهای بر- ۸۷-۸۸
به خنثا ۸۷-۸۹
تعریف- ۴۵، ۸۱
جایگشت برای تعادل- ۹۲-۹۴
خطهای دوسیمه ۸۴-۸۹
خطهای سه فاز: با فاصله گذاری منتظم
۸۹-۹۲
با فاصله گذاری نامنتظم ۹۲-۹۵
خطهای سه فاز دابل ۹۹-۱۰۰
خلاصه محاسبات- ۱۰۰-۱۰۱
محاسبه به روش فاصله میانگین هندسی
اصلاح شده ۹۷-۱۰۰
(رنکتانس را نیز ببینید)
- عوامل شتاب ۲۲۵
عیب:
- از طریق امیدانس ۳۷۹-۳۸۲
انواع گوناگون، پیش آمد ۱۰
تعریف- ۱۰
خط به خط ۳۵۵-۳۵۸، ۳۶۶
دو خط به زمین ۳۵۸-۳۶۲
۳۶۶-۳۶۷
سه فاز: در سیستم قدرت ۳۰۰-۳۰۷
ماشینهای همزمان ۲۸۸-۲۹۴
- محاسبه به کمک Z_{bus} ۳۰۷-۳۰۰،
۳۷۶-۳۷۹
وخامت افزون شونده- ۴۵۶
یک خط به زمین ۳۵۱-۳۵۴،
۳۶۵-۳۶۶
عیب خط به خط (عیب را ببینید)
عیب خط به زمین (عیب را ببینید)
عیبهای دو خط به زمین:
از طریق امیدانس ۳۷۹-۳۸۲
در سیستم قدرت ۳۶۶-۳۶۷
در مولدهای بی بار ۳۵۸-۳۶۲
عیبهای سه فاز ۲۸۶-۳۰۷
عیبهای نامتقارن (عیبها را ببینید)
- فاصله گذاری منتظم معادل ۷۱، ۹۳
فاصله میانگین هندسی «GMD»
خودی (شعاع میانگین هندسی را
ببینید)
سیم تا سیم ۶۴
متقابل ۶۴
محاسبه اندوکتانس به روش- ۶۴-۷۷
محاسبه ظرفیت به روش- ۹۶-۱۰۱
فرکانس نوسان ۴۴۷-۴۴۸، ۴۷۲
فروافت ولتاژ:
تعریف- ۱۰۷
کاهش- با جبران واکنشی ۱۲۹-۱۳۰
معادله به کمک ثابت A ۱۰۹
فورتسکیو، سی.ال. ۳۱۷
- قضیه تونن:
در محاسبه جریان عیب سه فاز ۲۹۵-۳۰۰،
۳۰۳
در نمایش سیستمهای قدرت ۲۰۸،
۲۴۰-۲۴۳