

## پایداری سیستم‌های الکتریکی

تهیه کننده :

مهدی رفیعیان

فارغ التحصیل دانشکده فنی و مهندسی وزارت آب و برق

### پایداری یک سیستم انرژی

وقتی محرك ژنراتورهای جریان متناوب ماشینهای بخار دوطرفه بود ، یکی از مشکلات اساسی در کار سیستم تغییر متناوب کوپل داده شده به ژنراتور و در نتیجه تغییر متناوب سرعت بود . در اثر تغییر سرعت ژنراتور ، تغییر متناوبی در فرکانس و ولتاژ انرژی الکتریکی حاصله پدید آمده که این تغییرات به موتورهای وصل به شبکه الکتریکی ژنراتور منتقل میگردد . نوسانات فرکانس موتورهای در اثر تغییرات ولتاژ و فرکانس ژنراتور چنانچه فرکانس طبیعی نوسانات موتورها با فرکانس نوسانات که در اثر موتور محرك ژنراتورها بوجود میآید مطابقت میداشت در پاره ی موارد موجب از بین رفتن کامل سنکرونیسم میگردد .

اولین اقدام برای بحداقل رسانیدن اشکالات فوق (Hunting) استفاده ازسیم پیچی مستهلک کننده نوسانات (Damper Winding) بود ، زیرا هرگونه حرکت نسبی بین استاتور و رتور ( لغزش ) موجب القاء جریان در سیم پیچی دامپر میگردد که عکس العمل آن باعث تخفیف افتهای ناشی از لغزش میگردد . استفاده ازتوربین باعث کم شدن نوسانات گردید . گرچه هنوز در مواردی که موتورهای دیزل محرك ژنراتور هستند موجود میباشد .

ثابت نگهداشتن (ابقای) سنکرونیسم بین قسمتهای مختلف یک سیستم انرژی وقتیکه شبکه انرژی توسعه می یابد مشکلتر می شود . عمل نگهداری سنکرونیسم و حفظ تعادل یک سیستم انرژی را وقتیکه سیستم با اجزاء مشکله آن رو به توسعه اند پایداری و یا استابیلته می نامیم . مطالعات اختصاصی راجع به استابیلته از سال ۱۹۲۰ شروع شده است .

اکنون یک موتور سنکرون را که بکمک یک ترانسفورماتور به منبع انرژی وصل شده در نظر میگیریم چنانکه بعداً خواهیم دید قدرت داده شده به موتور بوسیله ولتاژ منبع انرژی ، ولتاژ داخلی موتور و زاویه فاز بین این دو ولتاژ مشخص می شود .

این زاویه فاز بستگی به وضعیت موتور دارد، بدیهی است قدرت داده شده به موتور با سرعت ثابت مساوی است با توان مکانیکی گرفته شده از موتور با ضافه افت‌های آن. اگر بار مکانیکی اضافه شود، موتور نمیتواند قدرت خروجی را کاملاً تأمین نماید مگر اینکه قدرت ورودی آن افزایش یابد. بنابراین از سرعت موتور کاسته می‌شود و زاویه فاز بین ولتاژ داخلی موتور و ولتاژ سیستم اضافه می‌شود تا زمانی که قدرت ورودی موتور مساوی قدرت خروجی با ضافه افت‌های موتور گردد. مادامیکه زاویه اضافه می‌شود اضافه قدرت لازم برای موتور بوسیله انرژی جنبشی موتور تأمین می‌شود.

زیرا در اثر کاهش سرعت، انرژی ذخیره شده اضافه قدرت خروجی لازم را جبران می‌کند. اگر موتور حول نقطه تعادل جدید نوسان نماید و سرانجام تعادل گردد، این اضافه شدن بار موجب از بین رفتن استابیلته نمی‌گردد. اگر اضافه شدن بار خیلی زیاد و ناگهانی باشد ممکن است موتور را از سنکرونیسم خارج سازد، که در چنین حالتی می‌گوئیم موتور از استابیلته خارج شده است. اگر راکتانس ترانسفورماتور یا خط انتقال بین موتور و منبع انرژی اضافه شود بطوریکه بعداً خواهیم دید احتمال ادامه استابیلته را کم می‌کند.

خطوط با قیمت کم و امیدانس زیاد بکمک رگولاتورهای ولتاژ قابل استفاده می‌شود ولی افزایش راکتانس مهندسين سیستم انرژی را با مسئله حد استابیلته مواجه می‌سازد. توسعه سریع سیستم‌های انرژی بعد از جنگ جهانی اول فقط در اوائل سال ۱۹۳۰ متوقف گردید و پس از آن بموازات پیشرفت درسیستم‌های منفرد سیستم ارتباط بین آنها نیز توسعه یافت. لزوم مبادله قدرت بین کمپانی‌های مختلف تولید انرژی بوسیله خطوط طویل انتقال مهندسين را بر آن داشت که مسئله استابیلته را علیرغم راکتانس زیاد که جزو لاینفک خطوط انتقال طویل می‌باشد از پیش پا بردارند.

استابیلته و حد آن در هر حالت دائمی و گذرا باید تعیین شود. حد استابیلته دائمی براساس ماکزیمم قدرت قابل انتقال بدون از بین رفتن استابیلته در یک سیستم بشرط آنکه افزایش قدرت یکنواخت باشد معین می‌شود. حد استابیلته گذرا براساس ماکزیمم قدرت قابل انتقال بدون از بین رفتن استابیلته در یک سیستم بشرط آنکه این افزایش بطور ناگهانی پیش آید معین می‌شود. یک افزایش بار ناگهانی که باعث از بین رفتن استابیلته می‌شود چنانچه بطور تدریجی انجام پذیرد ممکن است باعث از بین رفتن استابیلته نشود.

بیشتر اختلالاتی که بوسیله آن حد استابیلته گذرا معین می‌شود در اثر اتصالی یا قطع کلید در یک یا چند انشعاب موازی و یا جمع ایندو یعنی وقوع اتصالی و جدا شدن قسمتی از سیستم در آن ایجاد میشود. بعلاوه آنکه اختلالات گذرا در یک سیستم زیاد بود و از طرفی حد استابیلته گذرا از حد استابیلته دائمی کمتر است.

در بحث‌های زیر بیشتر از استابیلته دائمی صحبت خواهیم کرد.

در پاره‌ای موارد استابیلته دائمی ممکن است بیشتر از استابیلته گذرا باعث محدودیت اضافه بار سیستم بعد از حالت گذرا باشد. بسط و توسعه در استفاده از کمپیوترهای دیجیتال بمنظور تعیین نوسانات گذرا ممکن است در تعیین حد استابیلته دائمی در این زمان مورد استفاده قرار گیرد.

ساده‌ترین مدار الکتریکی از یک ژنراتور یا موتور متصل بیک شین با قدرت بینهایت و یا مدار حاصله از دو ماشین سنکرون بوجود می‌آید. با توجه باینکه ماشینهای که بیک نقطه از سیستم الکتریکی وصل شده‌اند معمولاً باهم کار می‌کنند در استایبلته این ماشینها را بعنوان یک ماشین بزرگ بحساب می‌آوردند. اغلب ماشینهای که دقیقاً به یک شین بسته نشده ولی بوسیله خطوط با راکتانس زیاد از هم جدا نشده باشند بعنوان یک ماشین بزرگ در نظر گرفته می‌شوند.

وقتی که یک ماشین بیک شبکه بزرگ وصل شود ولتاژ و فرکانس شبکه ثابت فرض می‌شود یک چنین سیستمی را سیستم با قدرت بینهایت یا شین با قدرت بینهایت (Infinitive Bus) می‌نامند. گرچه اغلب اوقات یک سیستم با مقدار زیادی ماشین را میتوان به یک سیستم معادل که فقط شامل دو ماشین است تبدیل نمود. ولی ضرایبی که روی استایبلته یک سیستم تشکیل شده از دو ماشین و یا سیستم حاصله از اتصال یک ماشین به یک شین با قدرت بینهایت مؤثر است همانست که روی یک سیستم وسیع مؤثر و مورد لزوم است. بررسی مفصل یک سیستم بزرگ از حوصله این مقاله بیرون است، در این مورد از دستگاههای محاسبه A-C و یا کمپوترهای دیجیتال استفاده میشود.

### ۱- استایبلته دائمی (Steady-state Stability)

در حالت تعادل مدار معادل یک سیستم دو ماشین را میتوان یک مدار چهار قطبی دانست. ولتاژ نقطه ورودی برای حالت دائمی ولتاژ عادی ژنراتور، و در نقطه خروجی ولتاژ عادی موتور است. معادلاتی که از دیاگرام دایره‌ای بدست آمده در اینجا مورد استفاده قرار میگیرد با توجه باینکه  $V_s$  ولتاژ ورودی و  $V_r$  ولتاژ خروجی است.

قدرت موتور برابرست با :

$$(۱) \quad P_m = \frac{|E_g| \cdot |E_m|}{|B|} \cos(\beta - \delta) - \frac{|A| \cdot |E_m|^2}{|B|} \cos(\beta - \alpha)$$

برای ژنراتور :

$$(۲) \quad P_g = -\frac{|E_g| \cdot |E_m|}{|B|} \cos(\beta + \delta) + \frac{|D| \cdot |E_g|^2}{|B|} \cos(\beta - \Delta)$$

مقدار ماکزیمم قدرتهای فوق برابرست با :

$$(۳) \quad P_{m \cdot \text{Max}} = \frac{|E_g| \cdot |E_m|}{|B|} - \frac{|A| \cdot |E_m|^2}{|B|} \cos(\beta - \alpha)$$

$$(۴) \quad P_{g \cdot \text{Max}} = -\frac{|E_g| \cdot |E_m|}{|B|} + \frac{|D| \cdot |E_g|^2}{|B|} \cos(\beta - \Delta)$$

در فرمولهای بالا اگر ولتاژ فاز به صفر منظور شود قدرت هر فاز و اگر ولتاژ فاز به فاز گرفته شود (قدرت سه فاز است).

بطوریکه در دیاگرامهای دایره‌ای گفته شد چنانچه مدارمقاومت اهمی داشته باشد ما کزیمم قدرت خروجی ژنراتور قابل قبول نیست، زیرا قدرت ورودی موتور پیش از آنکه قدرت خروجی ژنراتور به ما کزیمم برسد افزایش یافته و ما کزیمم می‌شود.

دیاگرام دایره‌ای قدرت برای ژنراتور و موتور در شکل (۱) نشان داده شده است. دایره‌ها برای مقادیر مساوی  $E_g$  و  $E_m$  رسم شده است. نقطه  $P_{Max}$  نشان دهنده ما کزیمم قدرتی است که موتور دریافت میکند. اگر زاویه پیچش  $\delta$  کمتر از  $\beta$  باشد هر اضافه باری روی محور موتور باعث افزایش  $\delta$  خواهد شد. این اضافه بار ممکن است افزایش یابد تا اینکه  $\delta = \beta$  گردد در این حال موتور ما کزیمم قدرت را دریافت میکند.

اگر بار روی محور موتور انرژی بیشتری که در حالت  $\delta = \beta$  دریافت میدارد بخواید، مقدار  $\delta$  همچنان افزایش می‌یابد تا جائیکه موتور در اثر کمتر بودن قدرت ورودی از قدرت خروجی سرعت سنکرونیسم خود را از دست بدهد. در اینحال تفاوت قدرت خروجی (بار) و ورودی (الکتریکی) از انرژی جنبشی رتور که در اثر کم شدن سرعت ایجاد گردیده حاصل می‌شود. نتیجه افزایش  $\delta$  نسبت به  $\beta$  باعث کم شدن قدرت ورودی و بالتیجه کم شدن بیشتر سرعت موتور میگردد و تسلسل این وضع همچنان باعث تقلیل قدرت ورودی و نقصان سرعت موتور میگردد، و بالاخره موتور حالت سنکرونیسم خود را بکلی از دست میدهد.

نقطه  $P_{g,Max}$  در شکل (۱) قدرتی است که بطور نظری می‌تواند ژنراتور تولید نماید، اما نباید تصور شود که در یک سیستم که از دو ماشین تشکیل شده همواره از دست دادن سنکرونیسم وقتی است که  $\delta = \beta$  و قبل از آنست که ژنراتور ما کزیمم قدرت را بدهد. تفاوت انرژی خروجی از ژنراتور و ورودی به موتور در هر زاویه پیچش همان تلف انرژی در مدار رابط است.

اگر از مقاومت اهمی صرفنظر شود دیاگرام امپدانس برای سکانس مثبت (Sequence-Positive) در شکل (۲) نشان داده شده است  $X$  مجموع راکتانسهای عادی ژنراتور، موتور و مدار رابط به واحد است از مقاومت اهمی و خازنی موازی صرفنظر شده است ضرایب برابرست با:

$$\begin{aligned} A &= 1 \angle 0^\circ & B &= |X| \angle 90^\circ \\ C &= 0 & D &= 1 \angle 0^\circ \end{aligned}$$

اگر در معادلات (۱ و ۲) مقادیر فوق را بگذاریم نتیجه می‌شود:

$$(۵) \quad P = \frac{|E_g| \cdot |E_m|}{|X|} \sin \delta$$

و مقدار ما کزیمم قدرت برابرست با:

$$(۶) \quad P_{Max} = \frac{|E_g| \cdot |E_m|}{|X|}$$

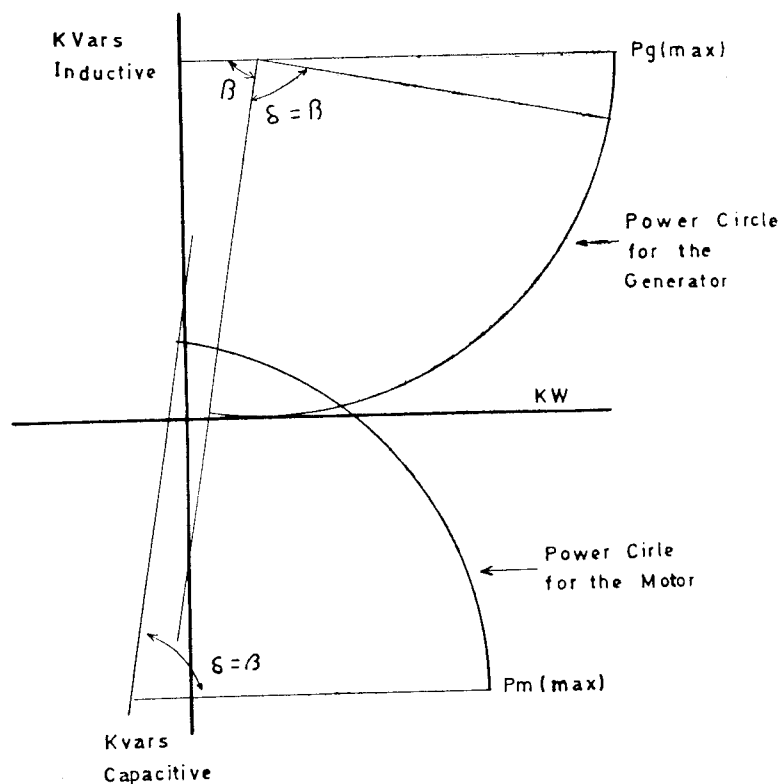
با صرفنظر کردن از مقاومت اهمی مقادیر افت  $I^2R$  صفر بود و تمام انرژی تولید شده توسط ژنراتور

بوسیله موتور جذب می‌شود.

در نظر گرفتن مقاومت اهمی و خازنی و اثر آن در حد استابیلته را با مقایسه فرمولهای (۳ و ۴) می توان ملاحظه کرد. ثابت B در معادله (۳) نشان دهنده امپدانس مدار می باشد و اگر مقاومت اهمی بحساب آید  $|B|$  از  $|X|$  در معادله (۴) بزرگتر بوده و همچنین زاویه  $\beta$  از  $90^\circ$  درجه کمتر می شود. هر دو مقدار فوق باعث کم شدن قدرت در حالتی که مقاومت در نظر گرفته شود می گردد. وقتی خازن را در نظر بگیریم مقادیر A و B برابرست با:

$$A = 1 + \frac{ZY}{\gamma} \quad \text{و} \quad B = Z$$

وقتی  $Y = 0$  باشد  $A = 1$  خواهد بود. در صورتیکه Z و Y هیچکدام صفر نباشند A از یک کمتر بوده و  $\alpha$  زاویه مثبت کوچکی خواهد بود. کاهش A و افزایش  $\alpha$  اثر معکوس روی قدرت ما کریم دارند. معمولاً حذف کاپاسیتور تأثیر نامطلوبی روی حد استابیلته دارد. در نظر گرفتن مقاومت و کاپاسیتور در محاسبات استابیلته دارای همان اهمیت است که در مورد سایر محاسبات خط دارا است. معمولاً درجه دقت بر مبنای دقت در انجام محاسبه و صرف نظر کردن یا نکردن از پارامترهای اضافی می باشد. در حالت استابیلته دائمی مقاومت اهمی در کم کردن نوسانات واجد اهمیت است و صرف نظر کردن از آن نتیجه نامطمئن بیا میدهد.



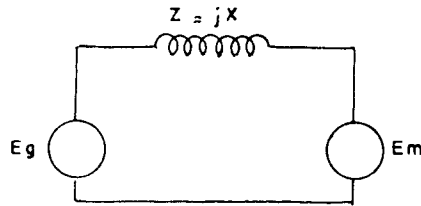
شکل (۱)

دیاگرام دایره ای قدرت برای یک ژنراتور متصل به یک موتور در یک سیستم دوماشین

روشهای افزایش استابیلته دائمی یک سیستم از معادله (۴) نتیجه می شود.

افزایش تحریک در ژنراتور یا موتور و یا هر دو آنها باعث افزایش قدرت ما کریم جاری بین

ماشینها می شود. اگر ولتاژ نهائی بدون افزایش قدرت جاری فزونی یابد زاویه پیچش  $\delta$  بطوریکه از معادله (۵) نتیجه می شود کاهش می یابد. هر کاهش در راکتانس سیستم باعث افزایش حد استابیلته می شود.



شکل (۲)

دیاگرام امیدانس سکانس مثبت یک سیستم دو ماشین

خط انتقال میتواند مقدار قابل ملاحظه ای راکتانس سیستم را فزونی دهد. بنابراین افزایش در حد استابیلته را میتوان با استفاده از دوخط سوازی بدست آورد. نصب دوخط سوازی همچنین بالا رفتن اطمینان شبکه است بقسمی که یک خط در حالیکه خط دیگر در آن اتصالی رخ داده باشد میتواند انرژی را انتقال دهد. کاپاسیتور سری در خطها تنظیم ولتاژ را بهتر میکند.

### استابیلته گذرا: (Transient-Stability)

بررسی یک سیستم انرژی برای تعیین استابیلته دائمی مستلزم دانستن پاره ای مشخصات مکانیکی ماشینهای سیستم است، زیرا بعد از هر اختلالی ماشین باید بتواند زاویه نسبی روتور را با شرایط شبکه تطبیق دهد. در این قسمت مسائل مکانیکی باندازه مسائل الکتریکی قابل تأمل و توجه است و شرایط مکانیکی باید بصورت یکی از عوامل اصلی در نظر گرفته شد. جدول شماره (۱) مقدار مکانیکی خطی را نشان میدهد. مقادیر مشابه برای مکانیک دورانی نیز در جدول آمده است. مقادیر اخیر برای حل مسائل استابیلته گذرا مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

انرژی جنبشی روتور مساویست با:

$$K.E. = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad \text{ژول}$$

که نظیر انرژی جنبشی یک جسم با سرعت  $v$  است.  $\frac{1}{2} m v^2$

واحد  $\omega$  رادیان بر ثانیه است. با توجه به فرمول بالا میتوان گفت که واحد ممان ایزسی ژول بر مجذور ثانیه بر مجذور رادیان است بهمین جهت است که ژول ثانیه بر رادیان بعنوان ممان زاویه ای انتخاب شده شده است. انرژی ذخیره یک ماشین الکتریکی معمولاً بواحد مگاژول بیان می شود و زاویه به درجه بیان میگردد، بنابراین ممان زاویه ای  $M$  بر حسب مگاژول ثانیه بدرجه معین میشود. وقتی  $M$  بر اساس  $I \omega$  حساب شود و  $\omega$  سرعت زاویه ای ماشین در حال سنکرونیسم باشد  $M$  را ثابت اینرسی می نامند. در پاره ای

جدول شماره ۱

مقادیری که در مکانیک حرکت خطی و دورانی مورد استفاده اند

خطی			دورانی				
کمیت	علامت اختصاری	معادله	دستگاه واحد M.K.S.	کمیت	علامت اختصاری	معادله	دستگاه واحد M.K.S.
طول	s	.....	متر	زاویه تغییر مکان	$\theta$	$\theta = \frac{s}{r}$	رادیان
جرم	m	.....	کیلوگرم	زمان	I	$I = \int r^2 dm$	Kgrm <sup>۲</sup>
زمان	t	.....	ثانیه	سرعت زاویه ای	t	.....	ثانیه
سرعت	v	$v = \frac{ds}{dt}$	متر بر ثانیه	شتاب زاویه ای	$\omega$	$\omega = \frac{d\theta}{dt}$	رادیان بر ثانیه
شتاب	a	$a = \frac{dv}{dt}$	متر بر مجذور ثانیه	شتاب زاویه ای	a	$a = \frac{d\omega}{dt}$	رادیان بر مجذور ثانیه
نیرو	F	$F = ma$	نیوتن	ممان چرخشی	T	$T = Fr = Ia$	نیوتن متر یا ژول بر رادیان
مقدار حرکت	M'	$M' = mv$	نیوتن ثانیه	ممان زاویه ای	M	$M = I\omega$	ژول ثانیه بر رادیان
کار	W	$W = \int F ds$	ژول	کار	W	$W = \int t d\theta$	ژول
قدرت	P	$P = \frac{dW}{ds}$	وات	قدرت	P	$P = \frac{dW}{dt} = T\omega$	وات

موارد H را هم بنام ثابت اینرسی نامیده‌اند این موضوع نباید باعث اشتباه H و M گردد زیرا تعریف H بقرار زیر است :

مقدار H برابرست با مقدار انرژی ذخیره شده در ماشین برحسب مگاژول بر مگاوات آمپر ماشین .

$$H = \frac{\text{انرژی ذخیره برحسب مگاژول}}{\text{قدرت ماشین برحسب مگاوات آمپر}}$$

اگر قدرت ماشین را به G نمایش دهیم خواهیم داشت :

$$G = MVA \quad \text{قدرت ماشین برحسب}$$

$$GH = \text{انرژی ذخیره‌ای برحسب مگاژول}$$

$$(۸) \quad \text{انرژی ذخیره‌ای} = \frac{1}{2} I \omega^2 = \frac{1}{2} M \omega$$

اگر M برحسب مگاژول ثانیه بدرجه و  $\omega$  درجه برثانیه باشد مقدار معادله (۸) برحسب مگاژول خواهد بود. مقدار  $\omega$  اگر مساوی درجه برثانیه باشد  $\omega = ۳۶۰f$  خواهد بود که در آن f فرکانس برحسب سیکل برثانیه است. به توجه با مقدار  $\omega$  معادله (۸) برابرست با :

$$GH = \frac{1}{4} M (۳۶۰f)$$

$$M = \frac{GH}{۱۸۰f} \quad \text{مگاژول ثانیه بدرجه}$$

بطوریکه بعداً خواهیم دید مقدار M در مطالعه استابیلته گذرا لازم است. مقدار M بستگی به اندازه ماشین و همچنین تیب آن دارد در حالیکه H چندان به اندازه ماشین مربوط نیست، مقدار H به میزان کمی با تیب ماشین صرفنظر از KVA و سرعت آن مربوط است. مقدار متوسط H در جدول (۲) و شکل‌های (۳ و ۴) داده شده است.

### جدول شماره ۲ ثابت اینرسی برای ماشینهای سنکرون

برای توربوژنراتورها به شکل شماره ۳ مراجعه شود.

توربورژنراتور آبی شکل شماره (۴)

### کاپاستیورهای سنکروه

۱۲۲۵ بزرگ

۱۲۰۰ کوچک

۲۲۰۰ موتورهای سنکرون

اگر ژنراتور با هیدرژن خنک شود باید از مقادیر فوق ۲۵٪ کاست.

اگر  $WR^2$  ماشین و همچنین گرداننده ژنراتور و بار موتور معلوم باشد. H از فرمول زیر

بدست می‌آید.

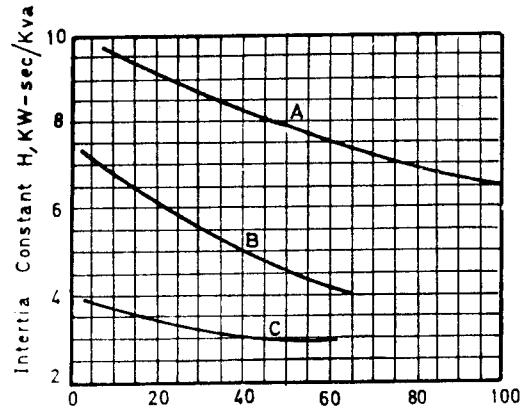


$$(10) \quad KE = \frac{1}{2} \frac{WR^2}{32.2} \left[ \frac{2\pi(\text{rpm})}{60} \right]^2 \quad \text{پوند - فوت}$$

با تبدیل فوت پوند به مگاژول و تقسیم آن بر MVA ماشین مقدار H بدست میآید:

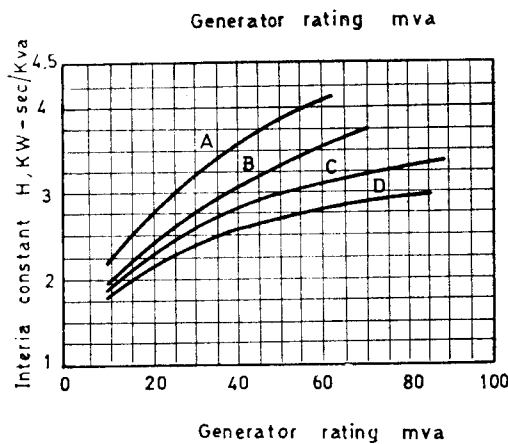
$$(11) \quad H = \frac{746 \times 10^{-6} \times \frac{1}{2} \frac{WR^2}{32.2} \left[ \frac{2\pi(\text{rpm})}{60} \right]^2}{MVA}$$

$$(12) \quad H = \frac{231 \times 10^{-1} \cdot WR^2(\text{rpm})^2}{MVA}$$



شکل (۳)

ثابت اینرسی برای ژنراتورهای بزرگ با محرك توربین بخار و خود توربین. منحنی A برای ۱۸۰۰ دور. منحنی B برای ۳۶۰۰ دور (A و B) با کندانسور. منحنی C برای ۳۶۰۰ دور بدون کندانسور



شکل (۴)

ثابت اینرسی برای ژنراتورهای بزرگ با توربین آبی بطور قائم قابل استفاده با ۱۰٪ تغییرات منحنی. منحنی A برای ۴۰ تا ۱۴۰ دور. منحنی B برای ۲۰۰ تا ۴۰۰ دور. منحنی C برای ۱۳۸ تا ۱۸۰ دور. منحنی D برای ۸۰ تا ۱۲۰ دور

وقتی چند ماشین در یک وضعیت کار کنند، ماشین معادل دارای مشخصاتی برابر مجموع مشخصات ماشینهایی است که فرض می‌شود با یکدیگر در حالت کار دائمی می‌باشند.  
مقدار  $M$  ماشین معادل نیز برابر مجموع  $M$  های تک تک ماشینها است.

### معادله نوسانی : (The Swing Equation)

اگر از کوپل تلف شده بعلاوه اصطکاک و از تلفات انرژی در سیم پیچی و هسته آهنی صرف نظر شود، هر تفاوتی بین کوپل محور و کوپل الکتریکی باعث شتاب منفی یا مثبت در ماشین میشود.  
اگر  $T_s$  کوپل محور و  $T_e$  کوپل الکترومنیوتیک باشد، اگر این مقادیر کوپل برای ژنراتور مثبت فرض شود. ( در اینجا قدرت مکانیکی به محور داده و کوپل الکتریکی از آن گرفته میشود ). کوپل تفاضل که باعث شتاب میشود برابر است با :

$$(13) \quad T_a = T_s - T_e$$

اگر  $T_s$  بزرگتر از  $T_e$  باشد  $T_a$  مثبت و شتاب مثبت خواهد بود.  
اگر همین معادله برای موتور بکار رود  $T_s$  و  $T_e$  هر دو منفی است زیرا قدرت ورودی الکتریکی و خروجی مکانیکی می‌باشد در این صورت وقتی  $T_a$  مثبت است که  $T_e$  بزرگتر از  $T_s$  باشد و در این حال شتاب نیز مثبت است. می‌توان معادله (۱۳) را بر حسب قدرت بصورت زیر نوشت :

$$(14) \quad P_a = P_s - P_e$$

که  $P_s$  قدرت روی محور  $P_e$  قدرت الکتریکی ژنراتور است.  
برای موتور تفاوت بین قدرت الکتریکی ورودی و تلفات الکتریکی موتور با علامت منفی است بنابراین  $P_e$  که همان قدرت الکتریکی مفید است با علامت منفی نشان داده میشود.  
اگر افتهای ناشی از اصطکاک، تلفات سیم پیچی و قسمتهای آهنی بانضمام افت سیم پیچی خفه کن در نظر گرفته شوند. برای موتور  $P_s$  قدرت محور خروجی با اضافه افتهای حاصله از قسمتهای گردان با علامت منفی است و برای ژنراتور قدرت ورودی منهای افتهای حاصله از قسمتهای گردان با علامت منفی میباشد.  
بطوریکه میدانیم قدرت مساوی کوپل در سرعت زاویه‌ای است.

$$(15) \quad P_a = T_a \omega = I \alpha \omega = M a$$

قدرت شتاب دهنده  $P_a$  بر حسب مگناوات است اگر  $M$  بر حسب مگاژول ثانیه بر درجه بوده و شتاب زاویه‌ای  $a$  بر حسب درجه بر مجذور ثانیه باشد. مقدار  $a$  بر حسب زاویه چرخش موتور  $\theta$  بصورت زیر بیان می‌شود.

$$(16) \quad a = \frac{d^2 \theta}{dt^2}$$

که در آن  $\theta$  تابعی از زمان است، اندازه گیری  $\theta$  با توجه به سرعت سنکرونیسم محور بسیار آسان است. اگر

$\delta$  انحراف سرعت روتور از سرعت سنکرونیزم برحسب درجه و  $\omega_s$  سرعت سنکرونیزم به درجه برثانیه باشد داریم :

$$(17) \quad \theta = \omega_s t + \delta$$

اگر از معادله بالا برحسب  $t$  دیفرانسیل بگیریم نتیجه می شود :

$$(18) \quad \frac{d\theta}{dt} = \omega_s + \frac{d\delta}{dt}$$

اگر بار دوم دیفرانسیل بگیریم :

$$(19) \quad \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d^2\delta}{dt^2}$$

باتوجه به معادلات (۱۵ و ۱۶ و ۱۹) نتیجه میشود :

$$(20) \quad M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_s - P_c$$

معادله (۲۰) را معادله نوسان می گویند. زاویه  $\delta$  برای یک ماشین که بیک شین با قدرت بینهایت وصل شده باشد، همان زاویه پیچش  $\delta$  است که در معادله (۱ و ۲ و ۵) بکار رفته است. این زاویه تفاوت بین زاویه داخلی ماشین و زاویه چرخش سنکرونیزم بود که در اینجا همان شین با قدرت بینهایت است. باید دانست چنانچه سیستم ما دارای دو ماشین باشد دو معادله نوسان لازم داریم زیرا زاویه پیچش بین دو ماشین بستگی به زاویه بین هر ماشین و زاویه سنکرونیزم مینا دارد.

ممان زاویه ای  $M$  (Angular Momentum) یک ماشین وقتی سرعت زاویه ای تغییر کند ثابت نیست ولی  $M$  را می توان مادامیکه سرعت ماشین از سرعت سنکرونیزم تغییر زیادی نکرده باشد ثابت فرض کرد، مگر آنکه این تغییر از حد استابیلته تجاوز نماید. ثابت اینرسی (که بهمان علامت  $M$  مشخص میشود) دقیقاً ثابت است زیرا مانند ممان زاویه ای در سرعت سنکرونیزم تعریف میشود.

قدرت روی محور  $P_s$  در حل معادلات ثابت فرض می شود. برای یک ژنراتور این فرض مناسب است حتی اگر دستگاه گرداننده ژنراتور مجهز به فرمان تنظیم باشد، اگرچه این فرمان برای تغییر سرعت کمتر از ۱٪ عمل نمیکند و عکس العمل آن برای تغییرات سرعت در هر حال آنی نیست. بوسیله یک کامپیوتر دیجیتال اثر تنظیم کننده ها را میتوان بحساب آورد.

در نظر گرفتن پارامتر فوق در دیاگرام کامپیوتر چنانکه مطالعه روی آن بیش از دو ثانیه طول بکشد مناسب است. برای یک موتور مادام که سرعت بطور قابل ملاحظه ای تغییر نکند بار را میتوان ثابت فرض کرد مگر آنکه استابیلته در اثر تغییر سرعت از بین برود. قدرت الکتریکی از معادلات (۱ و ۲) یا (۵) بدست می آید.

از راکتانس حالت گذرا برای تعیین پارامترهای ثابت معادلات (۱ و ۲) و همچنین تعیین  $X$  در معادله (۵) استفاده می شود، در صورتیکه از مقاومت اهمی صرف نظر شود.

راکتانس حالت گذرا بهترین مقدار قابل استفاده است زیرا رتور ماشین دائماً وضعیت خود را برحسب

mmf حاصله از جریان آرمیچر تغییر می دهد و تغییر شار مغناطیسی سطح روتور در وقتی که راکتانس حالت گذرا منظور شود مشابه با تغییر شار مغناطیسی است.

$E_g$  و  $E_m$  ولتاژهای قبل از راکتانس حالت گذرای ژنراتور و موتور است.  
باتوجه بمعادله (۵) معادله نوسان بصورت زیر درمی آید:

$$(۲۱) \quad M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_s - \frac{|E_g| \cdot |E_m|}{X} \sin \delta$$

و باتوجه بمعادله (۶) نتیجه میشود:

$$(۲۲) \quad M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_s - P_{Max} \sin \delta$$

در یک سیستم با تعداد زیادی ماشین که چندین معادله نوسان خواهد داشت راه حل معمولی برای معادلات فوق وجود ندارد.

راه حل نقطه بنقطه (رسم منحنی از طریق نقطه یابی) درحالی که محاسبه با کامپیوتر دیزینال یا تابلو محاسبه (Calculating-Board) بعمل آید بکار برده می شود. حتی در حالت ساده ای که سیستم از یک ماشین متصل بیک شین با قدرت بینهایت تشکیل شده باشد و از مقاومت اهمی صرف نظر شود معادله (۲۲) فقط در صورتی که  $P_s = 0$  باشد قابل حل است و در اینحال نیز به انتگرال بیضوی احتیاج است. حل معادله فوق مقادیر مختلف  $\delta$  را برحسب زمان بما میدهد که منحنی آنرا میتوان رسم نمود. این منحنی را منحنی نوسان میگویند. اگر منحنی نوسان نشان دهد که زاویه  $\delta$  بعد از رسیدن بمقدار ماکزیمم شروع بکاهش می نماید معمولاً دلیل بر آنست که سیستم استابیلته خود را از دست نخواهد داد و این نوسانات  $\delta$  در حول و حوش نقطه تعادل کمتر خواهد شد و بالاخره از بین خواهد رفت.

استفاده از سطح معادل در استابیلته: (Equal-area Criterion of Stability)

در یک سیستم ساده که یک ماشین به یک شین با قدرت بینهایت وصل شده و با آن نوسان میکند لازم است که منحنی نوسان را برای تعیین اینکه آیا زاویه پیچش ماشین از مقدار معین افزایش مییابد و یا حول نقطه تعادل نوسان میکند داشته باشیم. حل معادله نوسان با فرض اینکه  $P_s$  و ولتاژ بعد از راکتانس گذرا و حد استابیلته و حد استابیلته گذرا ثابت باشد نشان میدهد که  $\delta$  حول نقطه تعادل با دامنه ثابت نوسان میکند.

مشخصه ای که در آن استابیلته زیر شرایط گذرا قرار گرفته باشد بدون حل معادله نوسان با استفاده از سطح معادل بدست می آید.

گرچه این روش در یک سیستم با تعداد زیادی ماشین عملی نیست معهداً به فهم ضرایب معین مؤثر در استابیلته گذرای هر سیستم می نماید.

روش استفاده از سطح معادل در استابیلته گرچه برای یک ماشین متصل به یک شین با قدرت

بینهایت بکار می‌رود ولی می‌توان در مورد سیستم دو ماشین نیز آنرا تعمیم داده و با معادلات قبلی تطبیق داد. معادله نوسان در حالت اول برابرست با :

$$(۲۳) \quad M_{ds}^{d^2\delta} = P_s - P_e$$

اگر طرفین معادله بالا را در  $\frac{d\delta}{dt}$  ضرب کنیم نتیجه می‌شود :

$$(۲۴) \quad M_{ds}^{d^2\delta} \cdot \frac{d\delta}{dt} = (P_s - P_e) \frac{d\delta}{dt}$$

طرف اول را بصورت زیر می‌توان نوشت :

$$(۲۵) \quad \frac{1}{2} M_{ds} \frac{d\left(\frac{d\delta}{dt}\right)^2}{dt} = (P_s - P_e) \frac{d\delta}{dt}$$

اگر طرفین را در  $dt$  ضرب کنیم حاصل می‌شود :

$$(۲۶) \quad \left(\frac{d\delta}{dt}\right)^2 = \int_{\delta_0}^{\delta} \frac{2(P_s - P_e)}{M} d\delta$$

$$(۲۷) \quad \frac{d\delta}{dt} = \sqrt{\int_{\delta_0}^{\delta} \frac{2(P_s - P_e)}{M} d\delta}$$

$\delta_0$  برابرست با زاویه پیچش ماشین در حالت سنکرونیسم قبل از آنکه اختلالی پیش آید و در این حال  $\frac{d\delta}{dt} = 0$  می‌باشد. زاویه  $\delta$  بعد از هر اختلالی دوباره بمقدار معمولی برمیگردد.  $\frac{d\delta}{dt}$  می‌شود و در نتیجه طرف دوم معادله بالا مساوی صفر خواهد شد.

$$\int_{\delta_0}^{\delta} \frac{2(P_s - P_e)}{M} d\delta = 0$$

بطوریکه بعداً خواهیم دید باتوجه باینکه ماشین به یک شین با قدرت بینهایت وصل است در یک حال باقی نخواهد ماند.

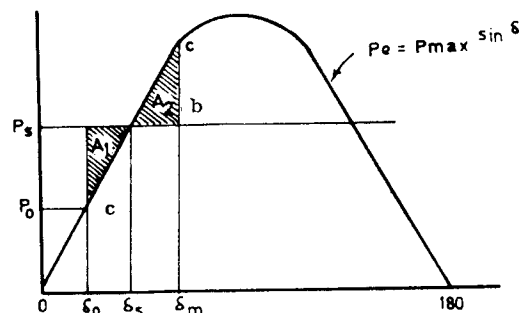
در لحظات اول  $\frac{d\delta}{dt} = 0$  می‌شود ولی با ملاحظه اینکه  $\delta$  دارای تغییرات آنی است که ممکن است در حدود استابیلته باشد و مشابه است با اینکه بگوئیم منحنی نوسان دلالت بر استابیلته دارد وقتی مقدار  $\delta$  به ماکزیمم برسد و شروع به کم شدن نماید. بعضی شرایط که بعلافت افزایش ناگهانی بار مکانیکی روی یک موتور سنکرون که بیک شین با قدرت بینهایت بسته شده اتفاق می‌افتد ممکن است با آنالیز شکل (۵) پیش بینی شود. منحنی سینوسئیدال  $P_e$  نشان دهنده قدرت الکتریکی ورودی به موتور بدون مقاومت اهمی میباشد. منحنی

$P_e$  از معادلات (۵) و (۶) نتیجه شده است. و تئیکه  $E_g$  ولتاژ شین با قدرت بینهایت و  $E_m$  ولتاژ قبل از رآکتانس گذرای موتور و  $X$  رآکتانس گذرای موتور بعلاوه رآکتانس خط بین موتور و شین باشد، در حالت عادی موتور با سرعت سنکرونیسم و زاویه پیچش  $\delta$  کار میکند و قدرت مکانیکی خروجی  $P_o$  معادل قدرت الکتریکی ورودی  $P_e$  مشابه  $\delta$  است.

وقتی قدرت مکانیکی افزایش ناگهانی یابد در این حال قدرت خروجی  $P_s$  بزرگتر از قدرت الکتریکی ورودی در  $\delta$  است پس تفاوت انرژی از انرژی ذخیره شده در روتور جبران میشود و این کار تنها با کاهش سرعت امکان پذیر است که باعث افزایش زاویه پیچش  $\delta$  میشود.

وقتی که  $\delta$  افزایش یافت قدرت دریافتی زیاد شده تا آنکه در نقطه  $b$  منحنی  $P_e = P_s$  بشود. در این نقطه بین کوپل خروجی و ورودی تقارن برقرار بوده و بنابراین شتاب صفر است اما موتور در سرعتی کمتر از سنکرونیسم میچرخد، بنابراین  $\delta$  افزایش می یابد. این افزایش ادامه می یابد تا از نقطه  $b$  بگذرد در این حال قدرت الکتریکی ورودی  $P_e$  بزرگتر از  $P_s$  است و تفاضل باید در سیستم ذخیره شود که بصورت انرژی جنبشی درآمده و باعث افزایش سرعت می شود تا اینکه دوباره به سرعت سنکرونیسم در نقطه  $c$  برسیم که در این حال زاویه پیچش  $\delta_m$  در نقطه  $c$  است، در این نقطه  $P_e$  هنوز از  $P_s$  بزرگتر است و افزایش سرعت ادامه دارد اما  $\delta$  شروع بکاهش میکند تا وقتی که سرعت به سنکرونیسم برسد. پس ما کزیمم  $\delta$  در نقطه  $c$  و برابر  $\delta_m$  است. همچنانکه  $\delta$  کم میشود به نقطه  $b$  با سرعتی بیش از سنکرونیسم میرسد، بنابراین  $\delta$  کاهش می یابد تا به نقطه  $a$  برسد و موتور در حالت سنکرونیسم کار کند و سیکل تکرار شود.

موتور در اطراف حالت تعادل با زاویه پیچش  $\delta_s$  بین  $\delta_m$  و  $\delta_o$  نوسان می کند. اگر دامپر موجود باشد نوسان کاهش یافته و موتور و زاویه  $\delta_s$  بطور ثابت نوسان می کند. جدول (۲) تغییرات سرعت زاویه ای قدرت الکتریکی ورودی، قدرت مکانیکی خروجی انرژی ذخیره ای و شتاب مثبت یا منفی را بر حسب زاویه نوسان ماشین نشان میدهد، مطالعه این جدول ما را به بهتر فهمیدن اختلالات گذرا راهنمایی میکند.



شکل (۵)

قدرت الکتریکی ورودی به موتور بصورت تابعی از زاویه پیچش  $\delta$  و افزایش بار از  $P_o$  به  $P_s$  و نوسان موتور حول  $\delta_s$  بین دو مقدار  $\delta_m$  و  $\delta_o$

تغییرات وضع یک موتور سنکرون متصل به یک شبکه با قدرت بینهایت را می‌توان بصورت زیر تشبیه کرد.

فرض کنیم پاندولی به یک نقطه ثابت بسته شده باشد شکل (a) ۶، نقاط a و c ماکزیمم دامنه نوسان پاندول در حول نقطه تعادل b است. اثر اصطکاک و مقاومت هوا برای پاندول نقش دامپر را در موتور دارد و باعث بازگشتن پاندول بوضعیت تعادل است.

حال فرض کنیم صفحه‌ای در جهت عقربه ساعت در حول نقطه تعلیق پاندول میچرخد بطوریکه در

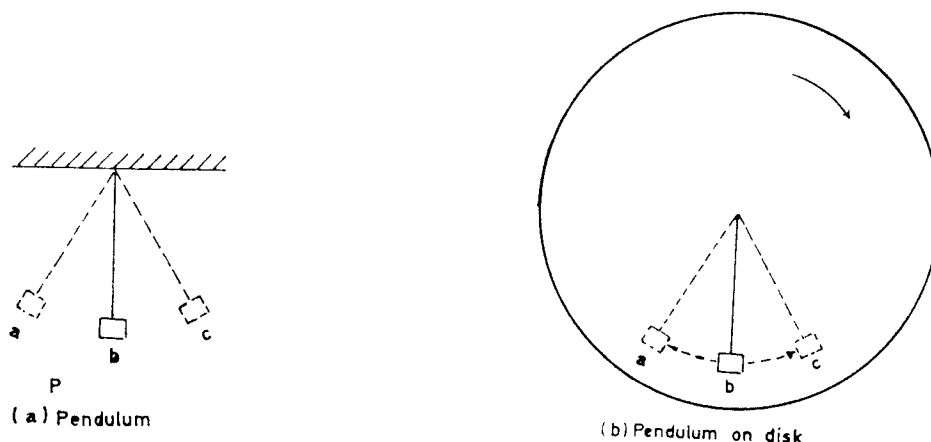
### جدول شماره ۳

نوسانات موتور سنکرون که به یک شین با قدرت بینهایت وصل شده است

موقعیت روتور	سرعت موتور $\omega$	زاویه پیچش $\delta$	قدرت الکتریکی $P_e$	انرژی ذخیره‌ای $W = \frac{1}{2} I \omega^2$	تغییرات سیستم دورانی
در نقطه a	$\omega = \omega_s$ کاهش	$\delta = \delta_o$ حداقل	$P_e < P_s$ حداقل (می‌نیمم)	$W < W_s^*$ کاهش	شتاب کم میشود » » »
از a به b	$\omega < \omega_s$ کاهش	افزایش	$P_e < P_s$ افزایش	$W < W_s$ کاهش	
در نقطه b	$\omega < \omega_s$ حداقل	$\delta = \delta_s$ افزایش	$P_e = P_s$ افزایش	$W < W_s$ حداقل	
از b به c	$\omega < \omega_s$ افزایش	افزایش	$P_e > P_s$ افزایش	$W < W_s$ افزایش	شتاب زیاد میشود
در نقطه c	$\omega = \omega_s$ افزایش	$\delta = \delta_m$ ماکزیمم (حداکثر)	$P_e > P_s$ حداکثر	$W = W_s$ افزایش	» » »
از c به b	$\omega > \omega_s$ افزایش	کاهش	$P_e > P_s$ کاهش	$W > W_s$ افزایش	» » »
در نقطه b	$\omega > \omega_s$ حداکثر (ماکزیمم)	$\delta = \delta_s$ کاهش	$P_e = P_s$ کاهش	$W > W_s$ حداکثر	
از b به a	$\omega > \omega_s$ کاهش	کاهش	$P_e < P_s$ حداقل	$W > W_s$ کاهش	شتاب کم میشود
در نقطه b	سیکل بالا مجدداً تکرار میشود				

$W_s^*$  انرژی ذخیره‌ای در سرعت صفر می‌باشد.  $W_s = \frac{1}{2} I \omega_s^2$

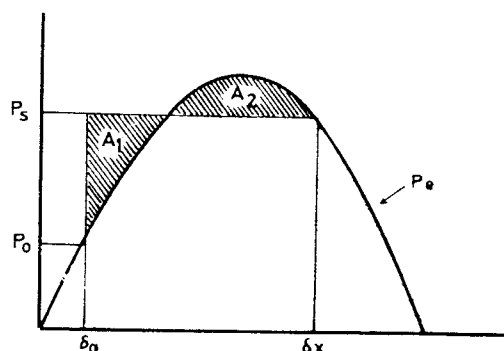
شکل (b) نشان داده شده است و پاندول در همین صفحه متحرک نوسان می‌نماید. وقتی پاندول از a بطرف b حرکت می‌کند سرعت زاویه‌ای مطلق پاندول (جمع دوسرعت نسبی و کششی) موجود کمتر از



شکل (۶)

پاندول و صفحه گردان بمنظور مقایسه نوسانات موتوروشین مربوط بان

سرعت صفحه است. وقتی پاندول از C بطرف a حرکت می‌کند سرعت زاویه‌ای مطلق پاندول از سرعت صفحه بیشتر است. در نقاط a و c سرعت زاویه‌ای نسبی پاندول صفر بوده و سرعت زاویه‌ای مطلق آن برابر سرعت صفحه است. اگر سرعت زاویه‌ای صفحه را مشابه سرعت سنکرونیسم یک موتور فرض کنیم و حرکت پاندول را بجای نوسانات موتور متصل به شین با قدرت بینهایت در نظر بگیریم، سرعت نسبی پاندول نسبت به صفحه مشابه سرعت زاویه‌ای حقیقی موتور در هر لحظه است.



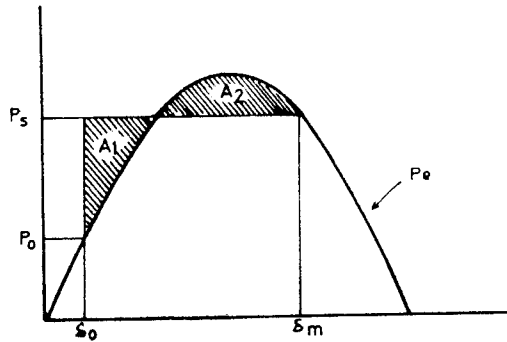
شکل (۷)

قدرت ورودی به موتور بصورت تابعی از زاویه پیچش  $\delta$  برای یک افزایش ناگهانی بار بطوریکه  $A_2 < A_1$  شود

ماکزیمم نوسان موتور در زاویه پیچش  $\delta$  بوسیله معادله (۲۸) معین شده و می‌توان آنرا ترسیم

کرد وقتی مقدار  $\delta$  در معادله ماکزیمم شود.  $\frac{d\delta}{dt} = 0$  خواهد شد (مشتق در نقطه ماکزیمم برابر صفر است)





شکل (۸)

قدرت الکتریکی ورودی بموتور بصورت تابعی از زاویه پیچش  $\delta$  برای ماکزیمم افزایش ناگهانی بار بدون از بین رفتن استابیلته

مقدار سطح هاشور زده  $A_1$  طبق شکل (۵) برابر است با :

$$(۲۹) \quad A_1 = \int_{\delta_o}^{\delta_s} (P_s - P_e) d\delta$$

همینطور سطح هاشور زده  $A_2$  برابر است با :

$$(۳۰) \quad A_2 = \int_{\delta_s}^{\delta_m} (P_e - P_s) d\delta$$

و نتیجه می شود :

$$(۳۱) \quad A_1 - A_2 = \int_{\delta_o}^{\delta_s} (P_s - P_e) d\delta - \int_{\delta_s}^{\delta_m} (P_e - P_s) d\delta$$

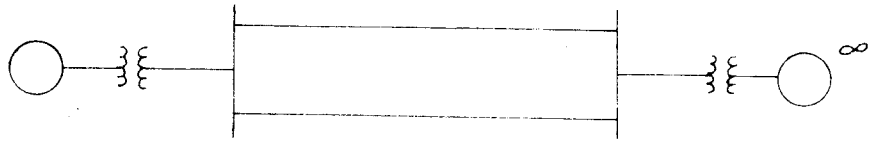
و بطور خلاصه :

$$(۳۲) \quad A_1 - A_2 = \int_{\delta_o}^{\delta_m} (P_s - P_e) d\delta$$

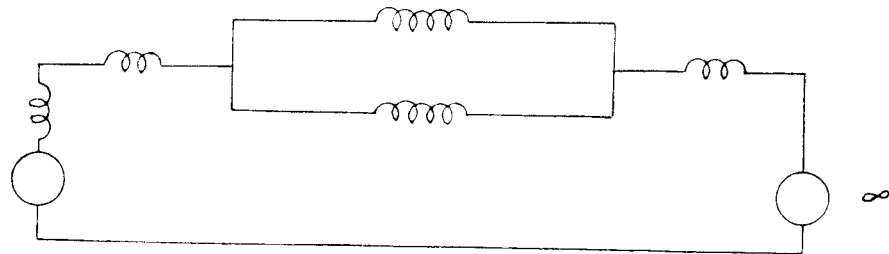
معادله (۳۲) کامل است و  $\frac{d\delta}{dt} = 0$  است وقتی  $A_1 = A_2$  باشد. ماکزیمم زاویه پیچش  $\delta_m$  زوی گرافیک در جائی قرار گرفته که  $A_1 = A_2$  باشد. مطالعه در جدول شماره (۳) نشان میدهد که انرژی تلف شده در موقعی که شتاب کاهش یافته و زاویه  $\delta$  به  $\delta_s$  افزایش یابد برابر است با انرژی که دوباره موتور بدست میآورد وقتی که زاویه پیچش به  $\delta_m$  برسد.

شکل (۷) نشان دهنده یک بار ناگهانی است که بیشتر از شکل (۵) باشد. سطح  $A_2$  بالای  $P_s$

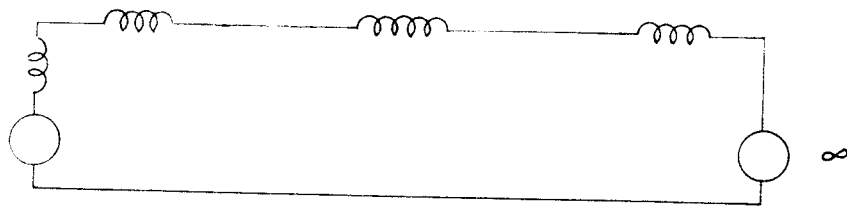
و زیرمنحنی  $P_e$  از  $A_1$  کمتر است و  $\frac{d\delta}{dt} \neq 0$  در  $\delta = \delta_x$  می باشد .



شین با قدرت بینهایت  
(a) : دیاگرام تک خطی



(b) : دیاگرام امپدانس سکانس مثبت



(c) : دیاگرام امپدانس سکانس مثبت بایک خط باز

شکل (۹)

دیاگرام تک خطی و دیاگرام امپدانس سکانس مثبت یک زنراتور که قدرت را بوسیله دو خط به شین با قدرت بینهایت منتقل می کند

بنابراین افزایش  $\delta$  بعد از  $\delta_x$  ادامه می یابد و  $P_e$  تدریجاً از  $P_s$  کمتر میشود . اگر زاویه پیچش  $\delta$  همچنان افزایش یابد و از  $\delta_x$  بیشتر شود و انرژی ذخیره ای هنوز جبران نشده باشد فقط در صورتی سیستم پایدار است که سطح  $A_2$  که در بالای منحنی  $P_s$  قرار گرفته بتواند مساوی  $A_1$  بشود .

این روش تساوی مساحتها بنام استفاده از سطح معادل در استابلیته معروف است . ماکزیمم افزایش مجاز در قدرت دریافتی یک موتور که در حالت عادی قدرت  $P_e$  بیا میدهد در شکل (۸) نشان داده شده است .

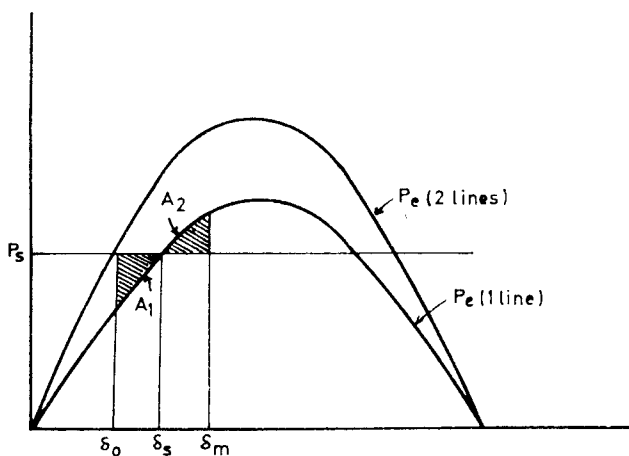
یک افزایش بار بیشتر از آنچه در شکل (۸) نشان داده شده است باعث توقف افزایش زاویه

پیشش نخواهد شد مگر آنکه قدرت ورودی کمتر از قدرت خواسته شده شود. در اینحال سطح بالای  $P_s$  کمتر از  $A_1$  خواهد شد.

### موارد استفاده از سطح معادله در استابیلته

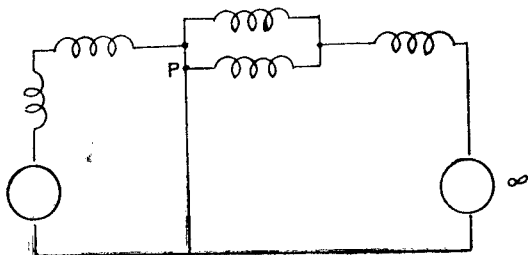
#### (Futher Applications of the Equal-Area Criterien)

سطح معادل در استابیلته گذرا را میتوان در سایر اختلالاتی که ممکن است در اثر افزایش ناگهانی بار موتور بوجود آید مورد استفاده قرار دارد. پاره‌ای از اختلالات مهم را مورد بحث قرار میدهم. وقتی یک ژنراتور روی یک شین کار کند و انرژی توسط دو خط منتقل شود اگر یکی از خطها اتصالی کند ژنراتور سنکرونیسم خود را از دست میدهد و لولاینگه خط دیگر قادر باشد تمام انرژی را منتقل نماید. دیاگرام تک خطی چنین سیستمی در شکل (۹ a) نشان داده شده است.



شکل (۱۰)

سطح معادل در موقع قطع یکی از خطهای انتقال شکل ۹



شکل (۱۱)

دیاگرام آمپدانس را کتانس برای اتصال کوتاه سه فاز در انتهای یک خط دومداره که ژنراتور را به شین با قدرت بینهایت وصل می‌کند

دیاگرام امپدانس برای سکانس مثبت در شکل (۹b) نشان داده شده است. وقتی یکی از خطها باز شود (اتصالی شود) دیاگرام سکانس مثبت بشکل (۹c) درمیآید. اتصالی یک خط باعث افزایش

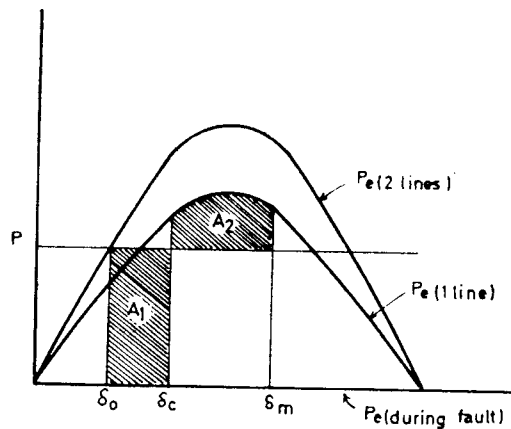
راکتانس بین ژنراتور و شین میشود. افزایش رآکتانس بدینمعنی است که زاویه پیچش باید افزایش یابد زیرا همان قدرت قبل از باز شدن یکی از دوخط باید انتقال یابد در اینحال ژنراتور شروع بشتاب گرفتن میکند. زیرا قدرت خروجی در اثر افزایش رآکتانس کمتر از قدرت ورودی میباشد. منحنی قدرت خروجی بر حسب زاویه پیچش  $\delta$  برای دو مدار و یک مدار در شکل (۱۰) رسم شده است.  $P_s$  قدرت مکانیکی ورودی به ژنراتور است. وقتی یک خط باز شود، قدرت خروجی در نقطه تعیین شده توسط  $\delta_e$  از روی منحنی بالائی تنزل یافته و بمقدار روی منحنی پائین میرسد. اضافه قدرت ورودی نسبت بخروجی باعث شتاب در ژنراتور میشود که نتیجه آن افزایش زاویه پیچش است. زاویه پیچش بین  $\delta_e$  و  $\delta_m$  در اطراف نقطه تعادل  $\delta_s$  نوسان میکند. همانطوریکه توسط سطح معادل نشان داده شده است.

وقتی  $P_s$  افزایش مییابد مقداری از  $P_s$  را میتوان یسافت که بازاء آن سطح های  $A_1$  و  $A_2$  مساوی باشند. سطح  $A_2$  در زیر منحنی پائین و تقاطع خط  $P_s$  و  $\delta_m$  واقع شده است، این مقدار  $P_s$  حد استابیلته گذرا میباشد.

اتصال کوتاه اغلب باعث از بین رفتن استابیلته می شود هر چند قسمت اتصالی را در زمان کمی از مدار جدا کنیم.

یک اتصال سه فاز در انتهای یک خط دو مداره در شکل (۱۱) نشان داده شده است در این حال تمام جریان ژنراتور به نقطه اتصال جاری میشود ولی فقط قدرت رناکتیو جریان می یابد و قدرت حقیقی خروجی ژنراتور صفر است.

اگر اتصال برقرار بماند و قدرت ورودی ثابت فرض شود.  $\delta$  افزایش نامحدودی می یابد و تمام قدرت ورودی صرف ایجاد شتاب میشود.

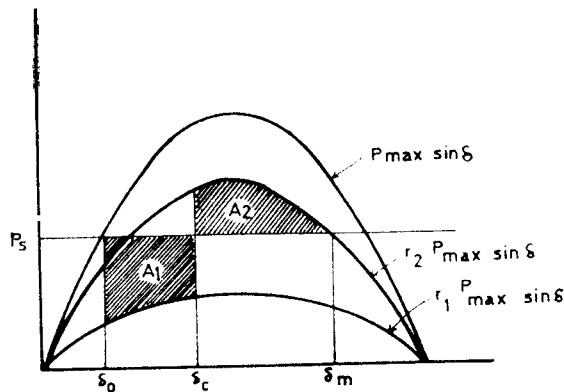


شکل (۱۲)

سطح معادل بدست آمده در یک اتصال سه فاز وقتی یکی از دوخط موازی قطع شود هیچ قدرتی در حین اتصال منتقل نمیشود

وقتی اتصال سه فاز در دو مداره فوق با باز کردن دژنگتور دو طرف نقطه اتصالی از مدار

خارج شود. قدرت ژنراتور به شین و بقیه خط انتقال میرسد و در اینحال سطح معادل در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۳)

سطح معادل در موقع قطع اتصال وقتی درحین اتصال قدرتی انتقال یابد

منحنی فوقانی نشان دهنده قدرت منتقله برحسب زاویه پیچش قبل از اتصال کوتاه است. درحین اتصال کوتاه هیچ قدرتی منتقل نمیشود همینکه اتصال در  $\delta = \delta_c$  برطرف شد منحنی قدرت برحسب  $\delta$  بصورت منحنی پائین بیرون میآید.

ما کزیمم زاویه نوسان در موقعی که  $A_1 = A_2$  است بدست میآید. اگر قطع اتصال در زمانی بیشتر از آنچه در شکل (۱۲) نشان داده شده انجام گیرد چون برای مقدار بزرگتر از  $\delta_c$  ممکن نیست که سطح  $A_2$  بالای منحنی  $P_s$  برابر  $A_1$  شود، سیستم استابیلته خود را از دست میدهد. بنابراین برای هر  $P_s$  یک زاویه قطع اتصال وجود دارد مگر آنکه اتصال قبل از زاویه پیچش معادل از مدار جدا شود و در غیر اینصورت مدار سنکرونیسم خود را از دست میدهد.

بطوریکه در شکل (۱۲) معلوم است برای مقادیر بزرگتر  $P_s$  زمان لازم برای قطع اتصالی برای حفظ استابیلته کمتر است.

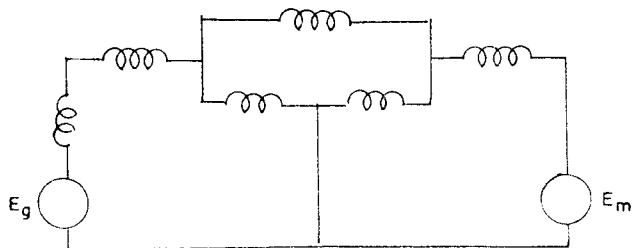
وقتی اتصالی سه فاز در نقطه‌ای از یک خط دو مداره غیر از شین یا دو انتهای خط اتفاق افتد امپدانس بین شین و نقطه اتصالی وجود دارد. بنابراین مقداری انرژی در زمانیکه اتصالی هنوز در سیستم است انتقال مییابد.

صرفنظر از موقعیت اتصالی اگر اتصالی در سه فاز نباشد مقداری انرژی انتقال می‌یابد زیرا بین نقطه اتصال و شین اصلی مقداری امپدانس وجود دارد که در مدار امپدانس سکانس مثبت در حالت کور-سیر کوئی نشان داده شده است. اتصال کوتاه سه فاز در شکل (۱۱) دیده میشود.

هرچه امپدانس موازی سکانس مثبت بزرگتر باشد قدرت منتقله درحین اتصال کوتاه بیشتر است. قدرت منتقله درحین اتصال کوتاه با تبدیل مداری که در آن اتصال اتفاق افتاده به مدار  $\Delta$  (مثلاً) معادل بین ژنراتور و شین با قدرت بینهایت بدست میآید. دو مدار قبل از تبدیل در شکل (۱۳ a) و (۱۳ b)

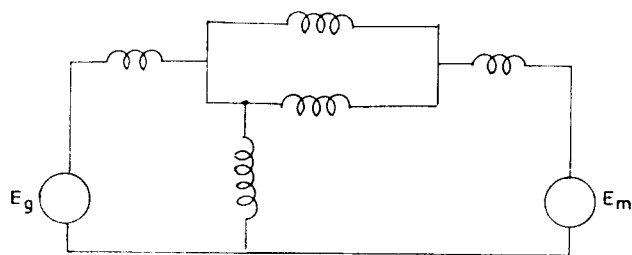
دیده میشود. مدار معادل مثلث در شکل (c) نشان داده شده است. جزیان در راکتانس  $X_a$   $90^\circ$  درجه نسبت به ولتاژ ژنراتور پس. فاز است و قدرت در این قسمت رثا کتیو میباشد. قدرت حقیقی منتقله برابر است با:  $\frac{|E_g| \cdot |E_m|}{|X_b|} \sin \delta$  در صورتیکه  $E_g$  ولتاژ قبل از راکتانس گذرای ژنراتور و  $E_m$  ولتاژ شین باشد.

### مدارهای مربوط به محاسبه استابیلته

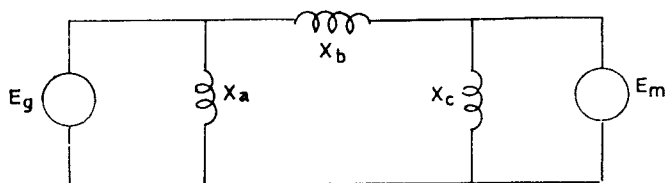


شکل (۱۳)

(a) : مدار اتصال سه فاز در وسط یکی از دوخط موازی



(b) : مدار اتصال کوتاه غیر سه فاز در انتهای یکی از دوخط



(c) : مدار معادل (a) یا (b)

اگر قدرت در حین اتصال کوتاه منتقل شود سطح معادل بصورت شکل (۱۴) درمیآید.

$P_{Max} \sin \delta$  قدرت منتقله قبل از اتصال ،  $\Gamma_1 P_{Max} \sin \delta$  قدرت منتقله در حین اتصال ،  $\Gamma_2 P_{Max} \sin \delta$

قدرت منتقله بعد از اینکه اتصالی بوسیله دژنکتور در لحظه  $\delta = \delta_c$  قطع شود می باشد.  $\Gamma_1$  و  $\Gamma_2$  نسبت قدرت ماکزیمی است که میتواند در حین اتصال و بعد از آن منتقل شود به ماکزیمم قدرت منتقله قبل از وقوع اتصال کوتاه برای حالت شکل (۱۴)  $\delta_c$  مقدار زاویه پیش بحرانی است که در آن قسمت اتصالی از مدار

جدا شده است. در زمانی که  $A_1 = A_2$  شود زاویه پیش طول نقطه‌ای از منحنی  $r_1 P_{Max} \sin \delta$  است که عرض آن  $P_s$  باشد.

قدرت منتقله در طول زمان اتصالی برای تقلیل  $A_1$  بازاء هر مقدار زاویه قطع (Clearing Angle) بما کمک میکند، بنابراین حداقل  $r_1$  وقتی است که بزرگترین اختلال در سیستم بروز کند و مقادیر کم  $r_1$  بدین معنی است که قدرتهای کمی در حین زمان اتصالی انتقال یافته است.

برای افزایش دقت در مورد (کاهش  $r_1 P_{Max}$ ) انواع اختلالات را در نظر میگیریم.

۱- اتصال یک فاز به زمین.

۲- دو فاز بهم.

۳- دو فاز بهم و بزمین.

۴- اتصال سه فاز.

اتصال یکفاز بزمین مکرراً اتفاق میافتد، ولی اتصال سه فاز معمولاً کم اتفاق میافتد. برای اطمینان کافی بایستی یک شبکه برای استابیلته گذرا در مورد اتصال کوتاه سه فاز در بدترین حالات طرح شود. اگر این کار از نظر اقتصادی قابل قبول باشد شبکه برای اتصال دو فاز به زمین قابل اطمینان خواهد بود.

یک تجزیه و تحلیل بر اساس شکل ۱-۴ برای بدست آوردن زاویه بحرانی میتوان انجام داد. سطوح هاشور زده برابرند با:

$$(۳۲) \quad A_1 = P_s(\delta_c - \delta_o) - \int_{\delta_o}^{\delta_c} r_1 P_{Max} \sin \delta d\delta$$

$$(۳۴) \quad A_1 = P_s(\delta_c - \delta_o) + r_1 P_{Max}(\cos \delta_c - \cos \delta_o)$$

$$(۳۵) \quad A_2 = \int_{\delta_c}^{\delta_m} r_2 P_{Max} \sin \delta d\delta - P_s(\delta_m - \delta_c)$$

$$(۳۶) \quad A_2 = r_2 P_{Max}(\cos \delta_c - \cos \delta_m) - P_s(\delta_m - \delta_c)$$

برای برقراری استابیلته باید  $A_1 = A_2$  باشد.

$$(۳۷) \quad P_s \delta_c - P_s \delta_o + r_1 P_{Max} \cos \delta_c - r_1 P_{Max} \cos \delta_o = r_2 P_{Max} \cos \delta_c - r_2 P_{Max} \cos \delta_m - P_s \delta_m + P_s \delta_c$$

و یا:

$$(۳۸) \quad (r_1 - r_2) P_{Max} \cos \delta_c = P_s(\delta_o - \delta_m) + r_1 P_{Max} \cos \delta_o - r_2 P_{Max} \cos \delta_m$$

اگر معادله بالا را بر حسب  $\delta_c$  حل کنیم نتیجه میشود:

$$(۳۹) \quad \delta_c = \text{Arccos} \frac{(P_s/P_{\text{Max}})(\delta_m - \delta_o) + r_r \cos \delta_m - r_l \cos \delta_o}{r_r + r_l}$$

برای تعیین  $\delta_c$  ملاحظه می‌شود که:

$$(۴۰) \quad P_s = P_{\text{Max}} \sin \delta_o$$

$$(۴۱) \quad P_s = r_r P_{\text{Max}} \sin \delta_m$$

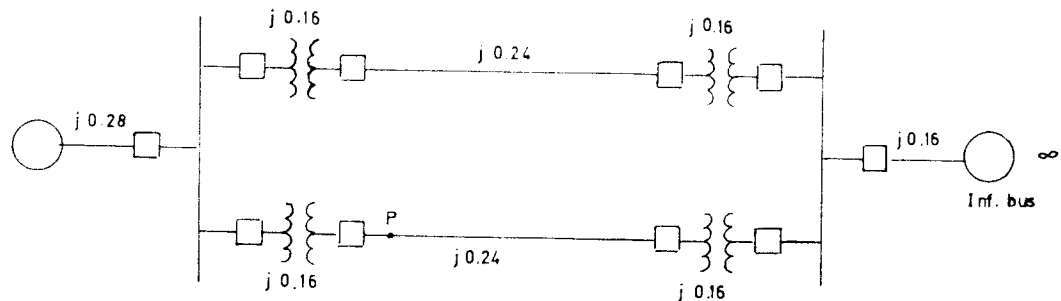
$$(۴۲) \quad \delta_o = \text{Arcsin} \frac{P_s}{P_{\text{Max}}} \quad \text{در حالت } \delta_o < ۹۰^\circ$$

$$(۴۳) \quad \delta_m = \text{Arcsin} \frac{P_s}{r_r P_{\text{Max}}} \quad \text{در حالت } \delta_m > ۹۰^\circ$$

خوانندگان میتوانند فرمولهای مخصوص دیگری برای زاویه بحرانی با قدرت منتقله صفر در حین اتصال یا برای مقدار ماکزیممی از  $P_s$  در حال ادامه اتصال بدست آورند.

### مثال ۱ :

دیاگرام تک خطی نشان داده شده در شکل (۱۰) از یک ژنراتور که دو خط فشار قوی را تغذیه میکند تشکیل شده است. این خط فشار قوی یک شبکه بزرگ را تغذیه میکند. مقادیر راکتانس برحسب واحد و همچنین راکتانس گذرای ژنراتور در شکل نشان داده شده است. دژنگتورهای نصب شده در صورت بروز اتصالی مدار را از دو طرف قطع میکند. مقدار زاویه بحرانی را وقتی اتصال سه فاز در نقطه P روی دهد و ژنراتور قدرتی برابر ۱ برحسب واحد تحویل دهد حساب کنید. مقدار ولتاژ قبل از راکتانس گذرا ۱٫۲۰ برای ژنراتور و برای شین ۱ برحسب واحد فرض کنید.



شکل (۱۰)

دیاگرام تک خطی مثال ۲

### حل :

دیاگرام امیدانسی سکانس مثبت در شکل (۱۱) نشان داده شده. قبل از اتصالی امیدانسی بین

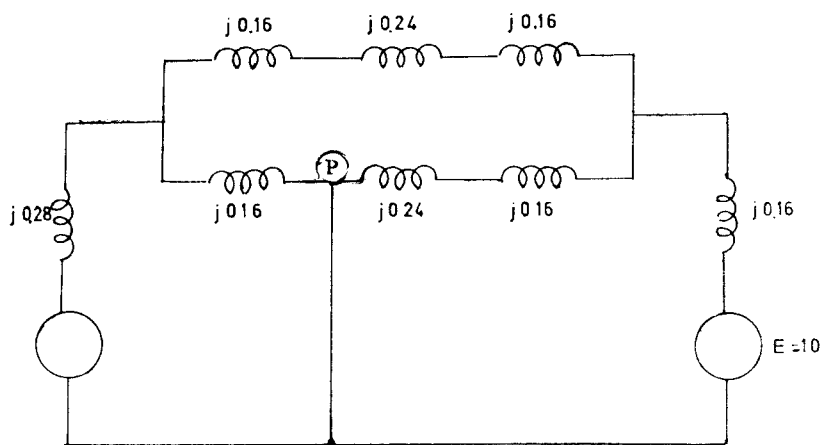
ژنراتور و شین با قدرت بی‌نهایت برابرست با :

$$X = ۰.۲۸ + ۰.۱۶ + \frac{۰.۱۶ + ۰.۲۴ + ۰.۱۶}{۲} = ۰.۷۲ \quad \text{P. U.}$$



بعد از اتصال و باز شدن دژنکتور در دوطرف نقطه اتصالی امپدانس بین ژنراتور و شین با قدرت بی نهایت برابرست با :

$$X = 0.28 + 0.16 + 0.16 + 0.24 + 0.16 = 1.00$$



شکل (۱۶)

دیاگرام امپدانس سکانس مثبت شکل ۱۵ برای مثال ۱

در حین اتصال مدار بشکل (۱۷a) درمیآید. با تبدیل مدار فوق از مثلث به ستاره (Y) از طریق ماتریس ویا با استفاده از فرمول مقدار امپدانس هر یک از شاخه های ستاره را بطریق زیر حساب می کنیم . مدار ستاره معادل در شکل (۱۷ b) نشان داده شده است.

$$X_{b_0} = \frac{0.28 \times 0.16}{0.28 + 0.16 + 0.24} = \frac{0.0448}{0.68} = 0.066$$

$$X_{c_0} = \frac{0.24 \times 0.28}{0.68} = \frac{0.0672}{0.68} = 0.099$$

$$X_{n_0} = \frac{0.16 \times 0.24}{0.68} = \frac{0.0384}{0.68} = 0.056$$

مدار ستاره فوق را به مدار مثلث شکل (۱۷ c) تبدیل می کنیم در این مدار فقط امپدانس یک شاخه لازم است.

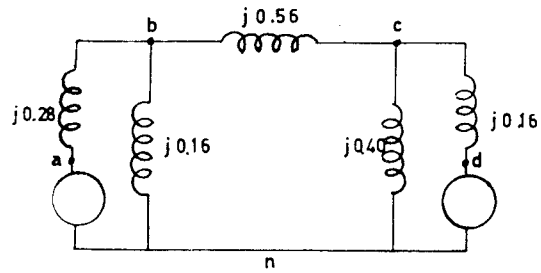
$$X_{a_0} = 0.28 + 0.066 = 0.346$$

$$X_{d_0} = 0.24 + 0.099 = 0.339$$

$$X_{a_d} = \frac{0.346 \times 0.056 + 0.346 \times 0.346 + 0.346 \times 0.056}{0.056} = 2.998$$

بطوریکه گفته شد  $X_{nd}$  و  $X_{ad}$  لازم نیست، این دو را کتانس موازی که دارای مقدار کمی هستند مقدار بسیار کمی از انرژی حقیقی را جذب می کنند.  
معادلات قدرت خروجی ژنراتور بقرار زیر است :

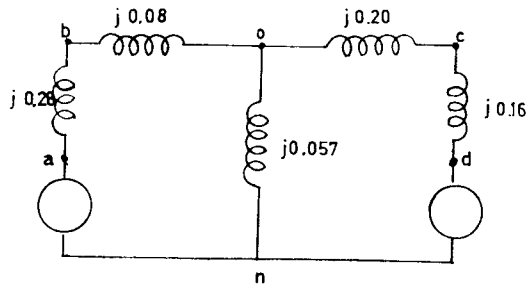
شکل (۱۷)



مدارهای مختلف مثال ۱

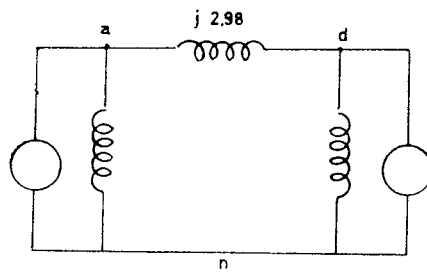
شکل (a)

مدار اصلی



شکل (b)

مدار بالا بعد از تبدیل مثلث - ستاره



شکل (c)

مدار مثلث معادل

قبل از اتصالی :

$$P_{\text{Max}} \sin \delta = \frac{1 \times 1.25}{0.72} \sin \delta = 1.735 \sin \delta$$

درحین اتصالی :

$$r_{1Max} \sin \delta = \frac{1 \times 120}{2298} \sin \delta = 0.042 \sin \delta$$

بعد از اتصالی :

$$r_{2P_{Max}} \sin \delta = \frac{1 \times 120}{1} \sin \delta = 120 \sin \delta$$

بنابراین :

$$r_1 = \frac{0.042}{1.1730} = 0.0242$$

$$r_2 = \frac{120}{1.1730} = 0.072$$

از معادلات (۴۲) و (۴۳) نتیجه می شود .

$$\delta_o = \text{Arcsin} \frac{1}{1.1730} = 3.072^\circ \text{ یا } 0.610 \text{ رادیان}$$

$$\delta_m = \text{Arcsin} \frac{1}{120} = 126.9^\circ \text{ یا } 2.22 \text{ رادیان}$$

با گذاشتن مقادیر فوق در معادله ۳۹ بدست می آید .

$$\delta_c = \text{Arccos} \frac{(1/1.1730)(2.22 - 0.610) + 0.072 \cos 126.9^\circ}{0.072 - 0.0242} = \text{Arccos} \frac{0.920 - 0.439 - 0.197}{0.0478} = \cos 0.62 = 0.16^\circ$$

**حل نقطه بنقطه منحنی نوسان . (رسم منحنی نوسان از طریق نقطه یابی)**

سطح معادل استایبلته، برای تعیین اینکه آیا سیستم در حال استایبلته برای یک اتصال دائمی باقی خواهد ماند یا نه و همچنین تعیین زاویه ای که ماشین میتواند قبل از قطع اتصالی بان اندازه نوسان نماید مورد استفاده قرار میگیرد. این معیار بطور درست مدت نوسانی را که میتوان استایبلته را قبل از ازین رفتن اتصالی باقی نگهداشت تعیین مینماید. زمان قطع استاندارد برای دژنگتورها و رله های کمکی ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و یا ۸ سیکل بعد از اتصال کوتاه است. پیشرفتهای مداوم در طرح دژنگتورها سازندگان را برای ساختن دژنگتورهای سریع برای ولتاژهای زیاد موفق ساخته است. برای ساختن یک دژنگتور با سرعت کافی باید مهندسین اطلاع لازم از زمان قطع بحرانی (Critical Clearing Time) که در آن ماشین از وضعیت معمولی به زاویه بحرانی میرسد بدانند. زمان قطع بحرانی برای حالت اتصالی در شرائطی که در آن حداقل انرژی توسط ماشین منتقل میشود در انواع اختلااتی که برای آنها حفاظت در نظر گرفته شده بایستی حساب شود. اگر زاویه قطع بحرانی از روی سطح معادل بدست آمده باشد باید متدی یافت که بتوان زاویه وضعیت موتور را به زمان تبدیل کرد.

بطوریکه قبلاً گفته شد برای حل معادله نوسان احتیاج به مقادیری است که از روی منحنی نوسان (زاویه برحسب زمان) بدست میآید. از روی منحنی نوسان زمان شروع اختلال تا زمانی که موتور به هر وضعیتی برسد میتوان اندازه گیری نمود. از منحنی نوسان مثال ۱ برای تعیین زمان قطع بحرانی برحسب زاویه قطع بحرانی که از طریق سطح معادل تعیین میشود میتوان استفاده نمود.

معمولاً تنها طریق ساده حل معادله نوسان بوسیله روش نقطه یابی امکان پذیر است ولی ساده ترین راه استفاده از کمپیوترهای دیجیتال میباشد. در متد معمولی که محاسبات با دست انجام میشود تعیین تغییر زاویه وضعیت موتور در حین اتصال کوتاه با مفروضات زیر عملی است.

۱- قدرت شتاب دهنده  $P_a$  که در شروع هر لحظه حساب میشود از وسط  $\Delta t$  قبلی تا وسط  $\Delta t$  بعدی ثابت باشد.

۲- سرعت زاویه ای در هر فاصله زمانی ثابت بوده و مقدار متوسط آن منظور میشود. البته هیچیک از این مفروضات صحیح نیست زیرا  $\delta$  دائماً تغییر میکند و  $P_a$  و  $\omega$  هر دو تابع  $\delta$  هستند. وقتی مقدار  $\Delta t$  بسمت صفر میل کند منحنی نوسان گفته شده به منحنی حقیقی نزدیک میشود.

شکل ۱۸ نشان دهنده مفروضات (۱) و (۲) میباشد. قدرت شتاب دهنده برای نقاط مشخص شده در شکل (بوسیله دایره های کوچک) در انتهای لحظات  $n-2$ ،  $n-1$  و  $n$  حساب شده است، که این نقاط شروع لحظات  $n-1$ ،  $n$  و  $n+1$  میباشد.

منحنی قدرت  $P_a$  در شکل ۱۸ با فرض اینکه  $P_a$  در زمان بین وسطهای دو زمان بینهایت کوچک ثابت باشد بدست آمده است. همچنین  $\omega'$  با افزایش سرعت زاویه ای  $\omega$  و گذشتن آن از سرعت زاویه ای سنکرونیسم  $\omega_s$  نشان داده شده در شکل و مقدار آن برای یک فاصله زمانی کوتاه ثابت بوده و مقدار آن برابر متوسط لحظه ای است. بین لحظات  $n-\frac{3}{4}$  و  $n-\frac{1}{4}$  تغییر سرعتی بعلت قدرت ثابت شتاب دهنده وجود دارد. تغییر سرعت متناسب با شتاب و زمان میباشد بنابراین:

$$(44) \quad \omega'_{n-\frac{1}{4}} - \omega'_{n-\frac{3}{4}} = \frac{d^2\delta}{dt^2} \Delta t = \frac{P_{a(n-1)}}{M} \Delta t$$

تغییر  $\delta$  در هر فاصله زمان متناسب با  $\omega'$  در همان فاصله زمانی میباشد. بنابراین تغییر  $\delta$  در طول  $n-1$  برابرست با:

$$(45) \quad \Delta\delta_{n-1} = \delta_{n-1} - \delta_{n-2} = \Delta t \omega'_{n-\frac{3}{4}}$$

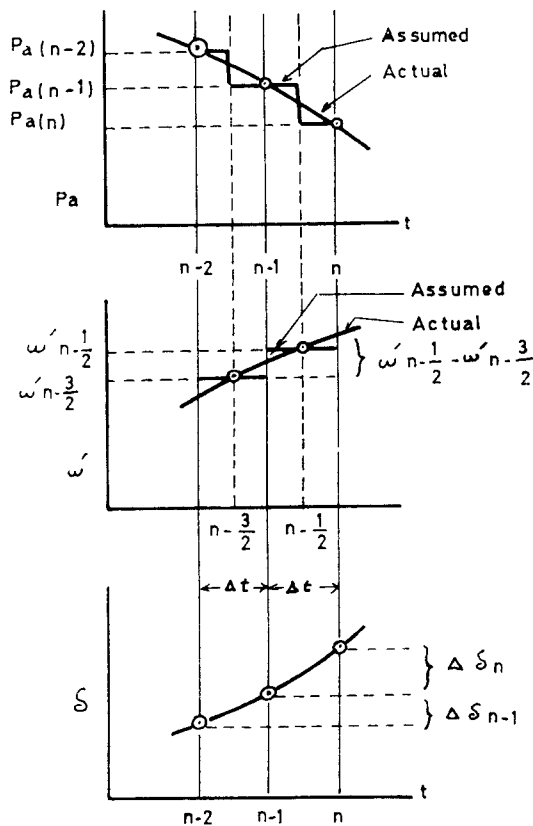
و در حین زمان  $n$ :

$$(46) \quad \Delta\delta_n = \delta_n - \delta_{n-1} = \Delta t \omega'_{n-\frac{1}{4}}$$

با توجه بمعادلات (۴۴) و (۴۵) و (۴۶) نتیجه میشود:

$$(47) \quad \Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + \frac{P_{a(n-1)}}{M} (\Delta t)^2$$

معادله (۴۷) برای حل معادله نوسان از طریق نقطه یابی حائز اهمیت است ، زیرا بتوسط معادله فوق میتوان تغییرات  $\delta$  را در یک فاصله زمانی حساب کرد . چنانچه تغییر  $\delta$  در فاصله زمانی قبلی و قدرت شتاب دهنده در هر فاصله زمانی مورد بحث معلوم باشد . معادله (۴۷) نشان میدهد که زاویه پیچش در فاصله زمانی معین برابر است با تغییر زاویه پیچش در طول فاصله زمان قبلی با اضافه قدرت شتاب دهنده حساب شده در ابتدای هر فاصله زمانی  $\frac{(\Delta t)^2}{M}$  . قدرت شتاب دهنده در شروع هر فاصله زمانی حساب میشود . با بدست آوردن مقادیر فوق برای تعداد زیادی از فاصله های زمانی نقاطی از منحنی را بما میدهد . هرچه این فاصله زمانی  $\Delta t$  کوتاهتر باشد طبق معمول محاسبه دقیقتر است . فاصله زمانی  $\delta$  . ثانیه معمولاً کافی است .



شکل (۱۸)

مقادیر فرضی و حقیقی  $P_a$  ،  $\omega'$  و  $\delta$  بر حسب زمان

یک اتصال باعث عدم تداوم در مقدار قدرت شتاب دهنده  $P_a$  میشود ، زیرا  $P_a$  قبل از اتصال صفر درست در لحظه بعد از اتصال نامشخص است . این عدم تداوم در لحظه  $t = 0$  شروع فاصله زمانی اتفاق میافتد . با برگشت بشکل (۱۸) معلوم میشود که در محاسبات فوق ما فرض کردیم که قدرت شتاب دهنده از وسط فاصله زمانی قبلی تا بعدی ثابت باشد . وقتی یک اتفاق میافتد ، دومقدار  $P_a$  در شروع اولین فاصله زمانی داریم و معادل این دو را برای قدرت شتاب دهنده باید در نظر گرفت . این روش در مثال زیر توضیح داده شده است .

مثال ۲ :

زمان قطع دژنگتور موجود در انتهای خط فشار قوی مثال ۱ در موقعی که اتصال شرح داده شده در مثال فوق اتفاق افتد برحسب سیکل معین کنید. همچنین منحنی نوسان را برای قطع اتصال در دو زمان  $t$  کمتر از زمان قطع بحرانی حساب کنید. برای ژنراتور  $H$  را مساوی ۳ انتخاب نموده و محاسبات را بطریق تبدیل بواحد انجام دهید.

حل :

وقتی  $t = ۰.۰۵$  ثانیه باشد :

$$\delta_n = ۳۰.۲^\circ + ۳.۴۱^\circ = ۳۳.۶۱^\circ$$

$$P_a = 1 - ۰.۴۲ \sin ۳۳.۶۱^\circ = 1 - ۰.۲۶۲ = ۰.۷۳۸$$

$$\frac{(\Delta t)^2}{M} P_a = ۹ \times ۰.۷۳۸ = ۶.۶۴^\circ$$

$$\Delta \delta_n = ۳.۴۱^\circ + ۶.۶۴ = ۱۰.۰۵ \text{ یا } ۱۰.۱^\circ$$

وقتی  $t = ۰.۱$  ثانیه باشد :

$$\delta_n = ۳۳.۶^\circ + ۱۰.۱^\circ = ۴۳.۷^\circ$$

برای مقادیر مختلف  $t$  و  $\delta_n$  حساب شده و در جدول  $\epsilon$  دیده میشود.

جدول شماره ۴

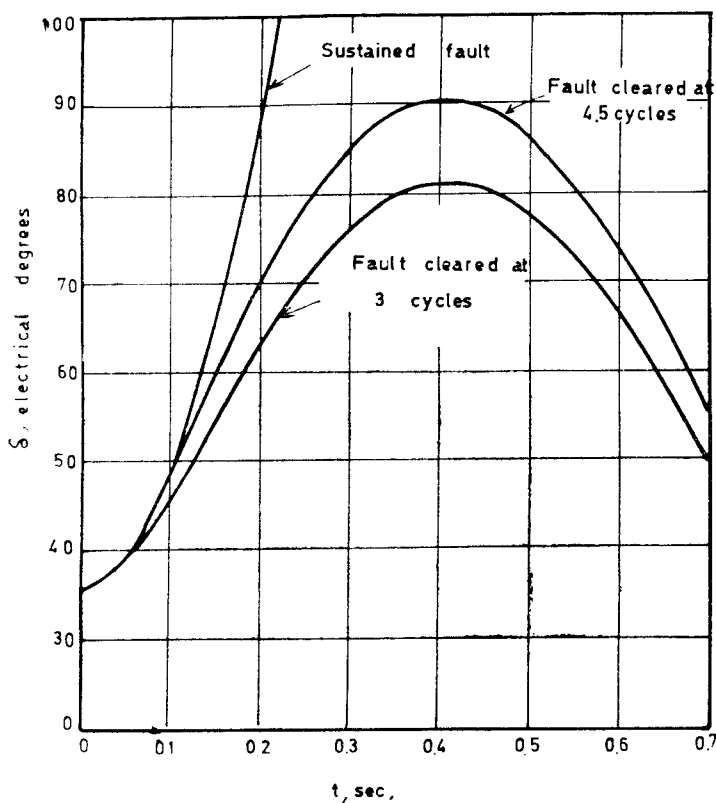
$t$	$P_e$	$P_a$	$\frac{(\Delta t)^2}{M} P_a$	$\Delta \delta_n$ برحسب درجه	$\delta_n$ برحسب درجه
۰-	۱	۰	۰۰۰	۰۰۰۰	۳۰.۲
۰+	۰.۲۴۲	۰.۷۵۸	۰۰۰۰	۰۰۰	۳۰.۲
متوسط ۰	۰.۰۰۰	۰.۳۷۹	۳.۴۱	۳.۴۱	۳۰.۲
۰.۰۵	۰.۲۶۲	۰.۷۳۸	۶.۶۴	۱۰.۰۵	۳۳.۶
۰.۱	۰.۳۱۵	۰.۶۸۵	۶.۱۷	۱۶.۲۲	۴۳.۷
۰.۱۵	۰.۳۸۰	۰.۶۲۰	۵.۵۸	۲۱.۷۸	۶۴.۹
۰.۲۰	۰.۴۱۹	۰.۵۸۱	۵.۲۳	۲۷.۰۳	۸۶.۷
۰.۲۵	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۱۱۳.۷

در جدول  $\epsilon$  ،  $P_a$  و  $\delta_n$  برحسب  $t$  که در ستون اول نشان داده شده محاسبه شده‌اند ولی  $\Delta \delta_n$  تغییرات  $\delta$  در یک فاصله زمانی است که از زمان  $t$  شروع میشود. در مثال برای  $t = ۰.۱$  ثانیه زاویه

$\delta_n$  برابر  $48.7^\circ$  درجه اولین مقدار محاسبه شده است که از اضافه کردن تغییر زاویه در فاصله زمانی قبلی به زاویه شروع همان فاصله زمانی بدست آمده است.

$P_e$  براساس  $\delta = 48.7^\circ$  درجه بدست آمده و بعد از آن  $P_a$  و ضریب  $\frac{(\Delta t)^2}{M}$  محاسبه شده است، مقدار فوق  $6.17^\circ$  بدست آمده که بمقدار  $10.0^\circ$  تغییر زاویه در فاصله زمانی قبلی اضافه شده مقدار  $16.22^\circ$  در شروع فاصله زمانی  $t = 0.1$  ثانیه را بما میدهد. اضافه این مقدار به  $48.7^\circ$  مقدار  $\delta$  را برابر  $64.9^\circ$  در  $t = 0.2$  ثانیه بما میدهد.

در مثال (۱) زاویه قطع بحرانی  $51.6^\circ$  بدست آمد. زمان قطع بحرانی را ممکن است از مقدار نشان داده شده در جدول ۴ تخمین زد. منحنی نوسان در شکل ۱۹ دیده میشود و زمان قطع بحرانی نظیر زاویه قطع بحرانی را از روی منحنی میتوان خواند. زاویه قطع بحرانی برابر  $1.1$  ثانیه یا  $3.3$  سیکل است. یک دژنگتور با زمان قطع  $0$  سیکل در اینجا کافی است و یک دژنگتور با تأخیر زمانی  $8$  سیکل نمیتواند اتصال را با سرعت کافی قطع کند و ماشین ممکن است سنکرونیسم خود را از دست دهد. منحنی های نوسان برای اتصال سه و سه و سه سیکل در شکل ۱۹ نشان داده شده است. اعداد لازم برای رسم منحنی های اخیر در جدول ۴ و ۵ نوشته شده است.



شکل (۱۹)

منحنی های نوسان مثال ۲ برای اتصال کوتاههایی که در ۳ و یا ۵ سیکل قطع شود

در لحظه قطع اتصال در قدرت شتاب دهنده  $P_a$  یک گسیختگی بوجود میآید، وقتی قطع اتصال

جدول ۵ :

محاسبه منحنی نوسان برای زمان قطع ۰.۰۵ ثانیه

t برحسب ثانیه	P <sub>e</sub>	P <sub>a</sub>	$\frac{(\Delta t)^2}{M} P_a$	$\Delta \delta_n$ برحسب درجه	$\delta_n$ برحسب درجه
0—	0.0	000	0000	0000	۳۵۲
0+	۰.۲۴۴	۰.۷۵۸	۰۰۰۰	۰۰۰۰	۳۵۲
متوسط 0	۰۰۰۰	۰.۳۷۹	۳۴۱	۳۴۱	۳۵۲
۰.۰۵—	۰.۲۶۲	۰.۷۳۸	۰۰۰۰	۰۰۰۰	۳۸۶
۰.۰۵+	۰.۷۸۰	۰.۲۲۰	۰۰۰۰	۰۰۰۰	۳۸۶
متوسط ۰.۰۵	۰۰۰۰	۰.۴۷۹	۴۳۱	۷۷۲	۳۸۶
۰.۱	۰.۹۰۵	۰.۰۹۵	۰.۸۶	۸۵۸	۴۶۳
۰.۱۵	۱.۰۲	۰.۰۲	—۰.۲	۸۳۸	۵۴۹
۰.۲	۱.۱۲	—۰.۱۲	—۱.۰۸	۷۳۰	۶۳۳
۰.۲۵	۱.۱۸	—۰.۱۸	—۱.۶۲	۵۶۸	۷۰۶
۰.۳	۱.۲۲	—۰.۲۲	—۱.۹۸	۳۷	۷۶۳
۰.۳۵	۱.۲۳	—۰.۲۳	—۲.۰۷	۱۶۳	۸۰
۰.۴	۱.۲۴	—۰.۲۴	—۲.۱۶	—۰.۵۳	۸۱.۶
۰.۴۵	۱.۲۴	—۰.۲۴	—۲.۱۶	—۲.۶۹	۸۱.۱
۰.۵	۱.۲۳	—۰.۲۳	—۲.۰۷	—۴.۷۶	۷۸.۴
۰.۵۵	۱.۲	—۰.۲	—۱.۸	—۶.۵۶	۷۳.۶
۰.۶	۱.۱۰	—۰.۱۵	—۱.۳۵	—۷.۹۱	۶۷
۰.۶۵	۱.۰۷	—۰.۰۷	—۰.۶۳	—۸.۵۴	۵۹.۱
۰.۷	۰۰۰	۰۰۰۰	۰۰۰۰	۰۰۰	۵۰.۶



جدول ۶

محاسبه معادله نوسان برای زمان قطع  $t = ۰.۷۰$  ثانیه

t ثانیه	$P_e$	$P_a$	$\frac{(\Delta t)^2}{M} P_a$	$\Delta \delta_m$ درجه	$\delta_m$ درجه
0—	۱	000	0000	0000	۳۵۲
0+	۰.۲۴۲	۰.۷۵۸	0000	0000	۳۵۲
متوسط 0	0000	۰.۳۷۹	۳۴۱	۳۴۱	۳۵۲
۰.۰۵	-۰.۲۶۲	۰.۷۳۸	۶۰۶۴	۱۰.۰۵	۳۸۷
۰.۱۰	۰.۹۴	۰.۰۶	۰.۵۴	۱۰.۵۹	۴۸۷
۰.۱۵	۱.۰۸	-۰.۰۸	-۰.۷۲	۹.۸۷	۵۹۳
۱.۲۰	۱.۱۷	-۰.۱۷	-۱.۵۳	۸.۳۴	۶۹۲
۰.۲۵	۱.۲۲	-۰.۲۲	-۱.۹۸	۶.۳۶	۷۸۲
۰.۳۰	۱.۲۴	-۰.۲۴	-۲.۱۶	۴.۲	۸۴۵
۰.۳۵	۱.۲۵	-۰.۲۵	-۲.۲۵	۱.۹۵	۸۸۷
۰.۴۰	۱.۲۵	-۰.۲۵	-۲.۲۵	-۰.۳	۹۰۷
۰.۴۵	۱.۲۵	-۰.۲۵	-۲.۲۵	-۲.۵۵	۹۰۴
۰.۵۰	۱.۲۵	-۰.۲۵	-۲.۲۵	-۴.۸	۸۷۱
۰.۵۵	۱.۲۴	-۰.۲۴	-۲.۱۶	-۶.۹۶	۸۲۳
۰.۶۰	۱.۲۱	-۰.۲۱	-۱.۷۹	-۸.۸۵	۷۵۳
۰.۶۵	۱.۱۵	-۰.۱۵	-۱.۳۵	-۱۰.۲۰	۶۶۴
۰.۷۰	0000	0000	0000	0000	۵۶۲

تبصره - درحین اتصال  $P_e = ۰.۴۲ \sin \delta$  و بعد از اتصال  $P_e = ۱.۲۵ \sin \delta$ .

بعد از سه سیکل باشد گسیختگی در زمان  $0.5$  ر. ثانیه اتفاق میافتد. دومقدار برای قدرت شتاب دهنده در دو حالت (یکی در حین اتصال و دیگری بلافاصله بعد از قطع) در شروع این فاصله زمانی بوجود میآید. وقتی این گسیختگی در شروع فاصله زمانی اتفاق میافتد مقدار متوسط بعنوان مقدار ثابت  $P_a$  از زمان  $0.7$  ر. تا  $1.2$  ر. ثابت فرض میشود.

وقتی قطع اتصال در  $0.5$  ر. سیکل باشد گسیختگی در  $0.7$  ر. ثانیه وجود دارد که در وسط فاصله زمانی  $\Delta t$  است که مقدار معینی ندارد زیرا فرض میشود که گسیختگی قدرت شتاب دهنده در وسط فاصله زمانی  $\Delta t$  است مقدار مفروض ثابت  $P_a$  در شروع فاصله زمانی در حینی که اتصال قطع شده بوسیله قدرت الکتریکی ورودی برای مقدار  $\delta$  در شروع فاصله زمانی مشخص میشود.

در شروع فاصله زمانی بعد از قطع مقدار مفروض ثابت قدرت الکتریکی ورودی بعد از قطع  $P_a$  برای زاویه  $\delta$  در شروع فاصله زمانی بعد از قطع حساب میشود. مطالعه دقیق در جدول (۶) متد فوق را روشن می نماید.

### تعیین منحنی های نوسان بوسیله مدارهای الکتریکی معادل و کمپوترهای دیجیتال

(Calculating Boards and Digital Computers for Determining Swing Curves)

برای یک سیستم دارای تعداد زیادی ماشین محاسبات معمولی حتی در مورد سیستم های کوچک بعلت احتیاج به وقت زیاد عملی نیست. منحنی های نوسان برای تمام ماشینهای یک سیستم را ممکن است بدون زحمت با استفاده از کمپیوتر یا مدارهای محاسبه  $a-c$  بدست آورد. معمولاً کمپیوترهای دیجیتال کوچک برای کمک به مدارهای محاسبه مورد استفاده قرار میگیرند.

متد نقطه بنقطه که قبلاً شرح داده شد اساس کار با مدارهای محاسبه است. توسط تابلو محاسبه ابتداء قدرت شتاب دهنده برای هر ماشین حساب میشود و سپس شبکه سکانس مثبت مدار محاسبه گذاشته میشود. هر ماشین بوسیله رآکتانس گذرا بصورت سری با ولتاژ قبل از رآکتانس گذرا با زاویه فاز و دامنه متناسب با قدرت و ولتاژ موجود در شین در شرایط نرمال مشخص میگردد.

قدرت خروجی هر ژنراتور قبل از هر اتصال  $P_s$  است میتوان با تغییرات لازم در دستگاه محاسبه اثر اتصالی را در وضع شبکه بعد از قطع و وصل کلید دانست. قدرت شتاب دهنده برای هر ماشین تفاضل قدرت جدید خوانده شده روی دستگاه  $P_e$  و مقدار ثابت  $P_s$  است.

تغییر زاویه نسبت به وضعیت سنکرونیسم برای هر ماشین برای فاصله زمانی معین  $\Delta t$  از روی معادله (۷) حساب میشود، این محاسبه را ممکن است با دست یا با کمپیوتر کوچک انجام داد. مولدی که در تابلو محاسب بجای ژنراتور اصلی گذارده میشود باید از نظر زاویه وضعیت روتور با ژنراتور اصلی تطبیق داشته باشد. قدرت  $P_e$  برای هر ماشین دوبار اندازه گیری میشود و از روی آن زوایای جدید حساب میشود. بدین طریق نقاط کافی روی منحنی نوسان بدست میآوریم تا بدینوسیله بتوان تعیین کرد که کدام ماشین در وضعیت خروج از استابیلته است. وقتی کمپیوتر برای محاسبه تغییر زاویه وضعیت هر ماشین در هر مرحله بکار رود مقادیر

$M$  و  $P_s$  هرماشین در کمپیوتر نگهداشته میشود. مقدار قدرت خروجی از روی دستگاه محاسب خوانده شده و به کمپیوتر داده میشود که محاسبه کرده و زاویه جدید ژنراتور را بدست میدهد. وقتی هرژنراتور برای زاویه مزبور میزان شد. یک مقدار جدید برای قدرت شتاب دهنده خوانده میشود و به کمپیوتر داده میشود. علاوه بر زاویه ها که کمپیوتر حساب میکنند برای هر مرحله میتوان متد بهتری برای محاسبه تغییر  $\delta$  ارائه داد.

کمپیوترهای دیجیتال برای تعیین منحنی نوسان ماشینیهای یک سیستم قدرت با مقایسه بادستگاههای محاسبه  $a-c$  ساده تر میباشدند.

در اینجا دو مسئله مطرح میشود. مسئله اول تعیین قدرت شتاب دهنده و مسئله دوم تعیین تغییر زاویه در یک زمان کوتاه است. مقایسه  $P_e$  و  $P_s$  برای هرماشین (درحالیکه  $P_e$  بوسیله کمپیوتر یا خواندن روی تابلو محاسب بدست) مقدار قدرت شتاب دهنده را برای زاویه پیشش شروع یک فاصله زمانی بما میدهد. یک راه برای محاسبه  $P_e$  بوسیله کمپیوتر دیجیتال استفاده مکرر از روش مشابه محاسبه جریان بار یک خط میباشد. متد دیگر مختصر کردن شبکه با کم کردن مقدار نقاط اتصال (گره) بجز گره محل اتصال ژنراتور به راکتانس داخلی آن است. در متد اخیر قدرت خروجی هرماشین بدون تکرار سیکل مانند مثال (۲) بدست میآید.

محاسبه تغییرات زاویه هرماشین برحسب زمان را میتوان با تنظیم پروگرام برای کمپیوتر انجام داد بدینوسیله معادله (۴۷) را برای ماشین حل نمود. ولی بوسیله کمپیوتر میتوان معاله نوسان خیلی دقیقتر از روش قبلی حساب کرد. در اینجا نیز حل مسئله بصورت تدریجی (نقطه یابی) حساب میشود ولی استفاده از کمپیوتر نتیجه را بسرعت ودقت بیشتر در اختیار ما میگذارد.

یک عامل برتری محاسبه استایلیته با کمپیوتر از لحاظ مقایسه با تابلوی محاسب عدم احتیاج به نیروی انسانی است، سرعت عمل یکی دیگر از عوامل مهم برتری محاسبه با کمپیوتر است. بطور مثال محاسبه استایلیته یک سیستم شامل ۱۶ ژنراتور ۷۱ شین و ۸۹ خط مدت ۱۶ دقیقه توسط کمپیوتر دیجیتال بطول میانجامد. در صورتیکه همین محاسبه در روی تابلو محاسب حدود ۴ ساعت دقت لازم دارد. برتری دیگر امکان یک مطالعه مفصل در کمپیوتر دیجیتال است و همچنین عدم احتیاج به مهندس برای تهیه پروگرامهای لازم وثبت و برداشت نتیجه است.

### ضرائب مؤثر بر روی استایلیته گذرا

#### (Some Factors Affecting Transient Stability)

علاوه بر نوع اتصال و محل آن که تحت کنترل طرح کننده سیستم است ضرائب مشخص دیگری روی استایلیته گذرا اثر میگذراند که برای بالابردن حد استایلیته گذرا باید در نظر گرفته شوند. توجه بمعادله (۴۷) برای ما مشخص میکنند که افزایش ثابت اینرسی  $M$  یک ماشین باعث کاهش زاویه نوسان در هر فاصله

زمانی  $\Delta t$  میشود و بنابراین برای دژنگتور این امکان نیست که در زمان بیشتری بعد از اتصال مدار را قطع کند .

قبل از اینکه ماشین از زاویه قطع گذشته باشد ، افزایش  $M$  مرادف با افزایش استابیلته است . ولی این افزایش بمقدار زیاد از لحاظ اقتصادی مقذور نیست .

روشهای معمول برای افزایش استابیلته عبارتست از :

۱- افزایش ولتاژ سیستم .

۲- کم کردن رآکتانس با موازی کردن خطها .

۳- استفاده از دژنگتورهای سریع و همچنین دژنگتورهای مجهز به دستگاه قطع و وصل اتوماتیک (Recloser) ، بطوریکه معادله (۶) نشان میدهد در اثر افزایش ولتاژ نهائی ژنراتور یا ولتاژ شین با قدرت بینهایت که ژنراتور بآن با یک رآکتانس وصل شده  $P_{Max}$  افزایش می یابد . برای قدرت معین روی محور زاویه پیچش اولیه  $\delta$  در اثر افزایش  $P_{Max}$  کاهش می یابد (همانطوریکه از معادله (۴) نتیجه می شود) . شکل (۱۴) نشان میدهد که هر سه منحنی قدرت با افزایش  $P_{Max}$  افزایش می یابد و نتیجه آن :  $\delta_c$  کمتر و  $\delta_{m}$  بیشتر و تفاوت بزرگتر بین  $\delta_c$  و  $\delta_m$  است . بنابراین زیاد شدن  $P_{Max}$  باعث میشود که ماشین بتواند در فاصله زاویه ای بیشتری نوسان کند قبل از آنکه به زاویه قطع بحرانی برسد ، بنابراین افزایش  $P_{Max}$  موجب افزایش قطع بحرانی و محتملاً بقاء استابیلته است .

کاهش رآکتانس خط انتقال نیرو دارای اثری مشابه افزایش  $P_{Max}$  است و کمپانسه کردن رآکتانس خط با خازنهای سری برای افزایش استابیلته در خطوط بلندتر از . . ۲ مایل اقتصادی است . افزایش تعداد خطوط موازی بین دو نقطه اثر کم کردن رآکتانس را دارد . وقتی خطوط موازی انتقال بجای یک خط بکار رود چنانچه حتی در سه فاز یکی از خطها اتصالی رخ دهد خط دیگر میتواند مقداری از قدرت را انتقال دهد مگر اینکه اتصالی روی شین پارالل باشد . برای سایر انواع اتصالات در یک خط قدرت بیشتری در حین اتصال اگر دو خط موازی موجود باشد انتقال مییابد . برای بیش از دو خط موازی قدرت زیادتری در زمان اتصال انتقال می یابد . قدرت منتقله تفاضل قدرت ورودی و قدرت شتاب دهنده است .

بنابراین افزایش قدرت منتقله در حین اتصال بمعنای کم شدن قدرت شتاب دهنده برای هر شین و

افزایش میزان استابیلته است .

بدیهی است که هرچه اتصال زودتر رفع شود اختلال کمتری در سیستم اتفاق می افتد و همچنین نباید از نظر دور داشت که یک زمان قطع بحرانی وجود دارد که قبل از آن باید دژنگتور کار کرده و قسمت اتصالی را از مدار جدا کند تا استابیلته باقی بماند . استفاده از دژنگتورهای با قطع سریع در یک سیستم باعث افزایش استابیلته و همچنین عدم احتیاج به سایر تغییرات در طرح برای برقراری استابیلته سیستم در همان زمان کوتاه قطع اتصال می باشد . ناگفته نماند که هنوز برای طراحان سیستم ها پیدا کردن علت از بین رفتن استابیلته و چگونگی جلوگیری از آن مهم و حائز اهمیت است .

### نتیجه

با توجه بمطالب گفته شده باین نتیجه میرسیم که اصولاً محاسبه استایبلته در یک سیستم بزرگ با دست عملی نیست زیرا همانطوریکه دیده شد حل معادله نوسان که کلید یافت چگونگی کار ماشین و نوسانات مجاز آنست حتی در ساده ترین سیستم ها بمعادله دیفرانسیلی منجر میشود که احتیاج به انتگرال گیری بیضوی برای حل آن بوده و اصولاً در تمام شرائط قابل حل نیست ( معادله ۲۲ ) . بنابراین برای تعیین استایبلته در سیستم های بزرگ احتیاج به کمپیوتر و یا حداقل به تابلوهای محاسب است که تا حدودی راجع بآنها در متن شرح داده شده است . این مقاله بدنبال مطالعاتی که بمنظور تعیین استایبلته در سیستم اطراف دریاچه رضائیه بعمل آمد تهیه گردید .