

# کنترل توان و فرکانس در سیستم برق بهم پیوسته

نوشته

فرخ حبیبی اشرفی

مهندس برق

قسمت اول

چکیده :

چکیده: در این نوشته اصول کنترل توان و فرکانس بعنوان قسمتی از مسئله کنترل تولید مورد مطالعه قرار گرفته است. ضمن این بررسی نشان داده شده است که دستگاه تنظیم کننده توربین بخار (یا توربین-آبی) پتتهائی نمیتواند خطای فرکانس را در حالت ماندگار بصفر برساند و لازم است کنترل اضافی دیگری به - دستگاه تنظیم کننده افزود. در سیستم بهم پیوسته این کنترل اضافی از یک مرکز فرمان مشترک بمولدهای موجود در سیستم فرستاده میشود.

## مقدمه

منظور اصلی هر سیستم نیروی برق عبارتست از رساندن انرژی الکتریکی به مصرف کنندهای مختلفی که در حوزه عملیات سیستم قرار گرفته اند. مصرف کنندگان خواستار آن هستند که سیستم توانائی تأمین بار را در تمام مدت داشته و در ضمن از لحاظ کیفیت واجد شرایط زیر باشد :

۱- فرکانس ثابت

ب- ولتاژ ثابت

پ- قابلیت اطمینان زیاد

از طرف دیگر لازم است که این انرژی با کمترین هزینه تولید و توزیع گردد [۱]. بهم پیوستن (۱) سیستم نیروی برق بهترین روش (از نقطه نظر اقتصاد سرمایه گذاری و بهره برداری) برای بالابردن توانائی تأمین بار شناخته شده و وظیفه تأمین کیفیت لازم نیز بعهده سیستم کنترل کننده واگذار شده است بدیهی

است تنها سیستمی که درست طرح شده و از آن بطرز صحیحی بهره برداری میشود تمام نیازمندیهای بالا را برآورده خواهد ساخت .  
 نقش مهم دستگاههای کنترل خود کار در بهبود قابلیت اطمینان و بهره برداری اقتصادی از مدتها پیش شناخته شده است بطوریکه در تمام نیروگاههای جدید بطرز بی سابقه ای از دستگاههای کنترل خود - کار استفاده میشود . اساسی ترین قسمت مسئله کنترل توازن بین تولید و مصرف میباشد . برای اولین بار James Watt پس از بکار انداختن ماشین بخارش با این مسئله مواجه شد و توسط تنظیم کننده سرعت شهورش آنرا حل کرد . هنوز هم تنظیم کننده های سرعت راه حلی برای قسمتی از مسئله کنترل که امروزه با آن روبرو هستیم میباشد . Watt فقط بایک منبع نیرو و سروکار داشت و یک تنظیم کننده بتنهایی میزان تولید و مصرف را باهم هماهنگ میکرد ولی در سیستمهای بهم پیوسته امروزی تعداد زیادی مولد بطور موازی باهم کار میکنند که هر یک سهمی از مصرف کل را تأمین میکنند و بهمین جهت تقسیم اقتصادی بار بین مولدها نیز بر پیچیدگی مسئله کنترل میافزاید .

در گذشته مطالعه کنترل سیستم نیروی برق اصولاً بصورت تجربی صورت میگرفته و فقط چندسالی پیش نیست که از تئوری سیستم های کنترل<sup>۱</sup> برای بررسی این مسئله استفاده شده است [۲] و [۳] . در سالهای اخیر نیز تمایل زیادی برای بکار بردن تئوری جدید سیستم های کنترل در مسائل مختلف سیستم نیروی برق بخصوص مسئله کنترل آن نشان داده میشود که پیشرفتهای بزرگی در این زمینه پیش بینی میشود [۴] و [۵] .

### سیستم بهم پیوسته

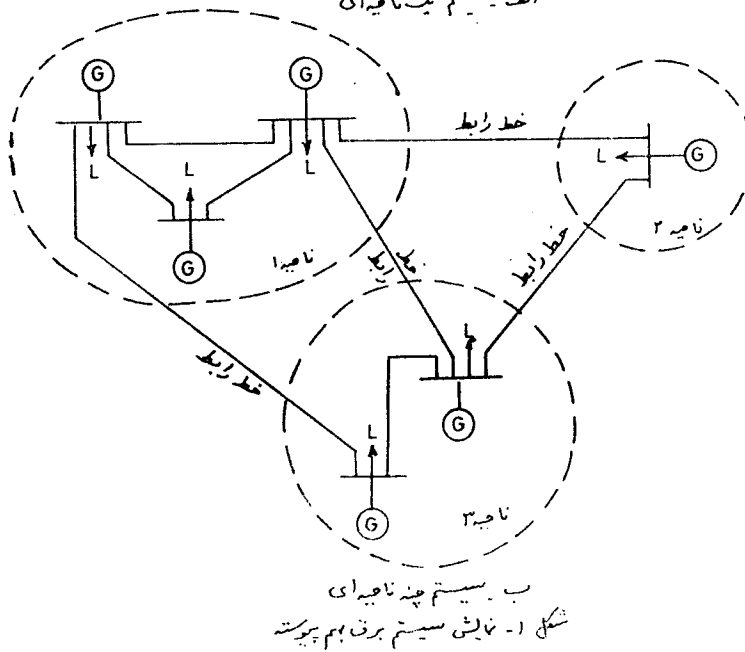
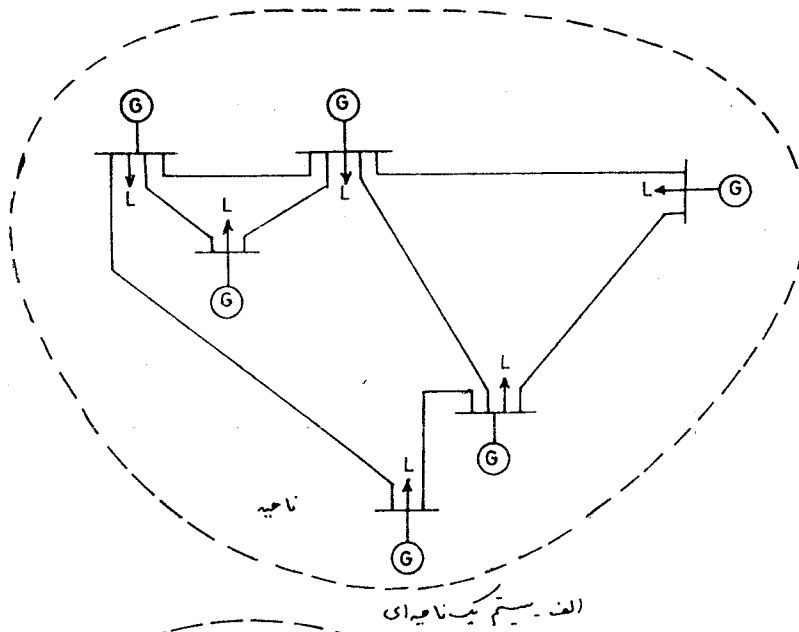
مؤسسات برق در ابتدا بطور منفرد تأسیس و بهره برداری میشده اند ولی استلزام تولید توانهای خیلی زیاد وهم چنین برای بنسنت آوردن قابلیت اطمینان بیشتر مؤسسات مجاور بهم دیگر وصل شدند . مصرف نیروی برق در ساعات مختلف شبانه روز متغیر است و هر مؤسسه برای اینکه بتواند توان لازم در ساعات قله بار<sup>۲</sup> را تأمین کند ناچار است چندین واحد ذخیره داشته باشد حتی چون امکان دارد - گاهی مصرف بطور ناگهانی تغییر کند تعدادی از موادهای ذخیره که واحدهای ذخیره چرخان<sup>۳</sup> نامیده میشوند بایستی بدون بار در حال کار کردن و آماده بار گرفتن باشند . بهم پیوسته شدن مؤسسات برق از نقطه نظر اقتصادی دارای محاسن زیادی است ، زیرا تعداد کمتری واحد ذخیره برای ساعات قله بار و تعداد کمتری واحد ذخیره چرخان برای بهره برداری تمام سیستم لازم خواهد بود . بهم پیوسته شدن حسن دیگری نیز دارد مثلاً هر وقت یکی از مؤسسات عضو سیستم بهم پیوسته بتوان اضافی احتیاج داشته باشد میتواند آنرا از مؤسسات مجاور بگیرد و از همه مهمتر بهم پیوسته بودن امکان میدهد که از اقتصادی ترین منابع انرژی بهترین وجهی استفاده شود [۶] .

۱ - Control System Theory

۲ - Peak Loads

۳ - Spinning reserve

مراجعه به شکل (۱) معنی و مفهوم اصطلاحاتی را که در سیستم بهم پیوسته مرسوم هستند بخوبی روشن میسازد. تمام سیستم مرکب از مولدها و مصرف کننده های مؤسسات برق مختلفی که از طریق شبکه انتقال بهمدیگر وصل هستند سیستم بهم پیوسته نامیده میشود.



بهره برداری و کنترل سیستم بهم پیوسته ممکن است بدو صورت انجام شود. اگر سیستم بهم پیوسته بصورت واحد کنترل شود، سیستم یک ناحیه ای<sup>۲</sup> نامیده میشود (شکل ۱-الف) در غیر این صورت سیستم به چند

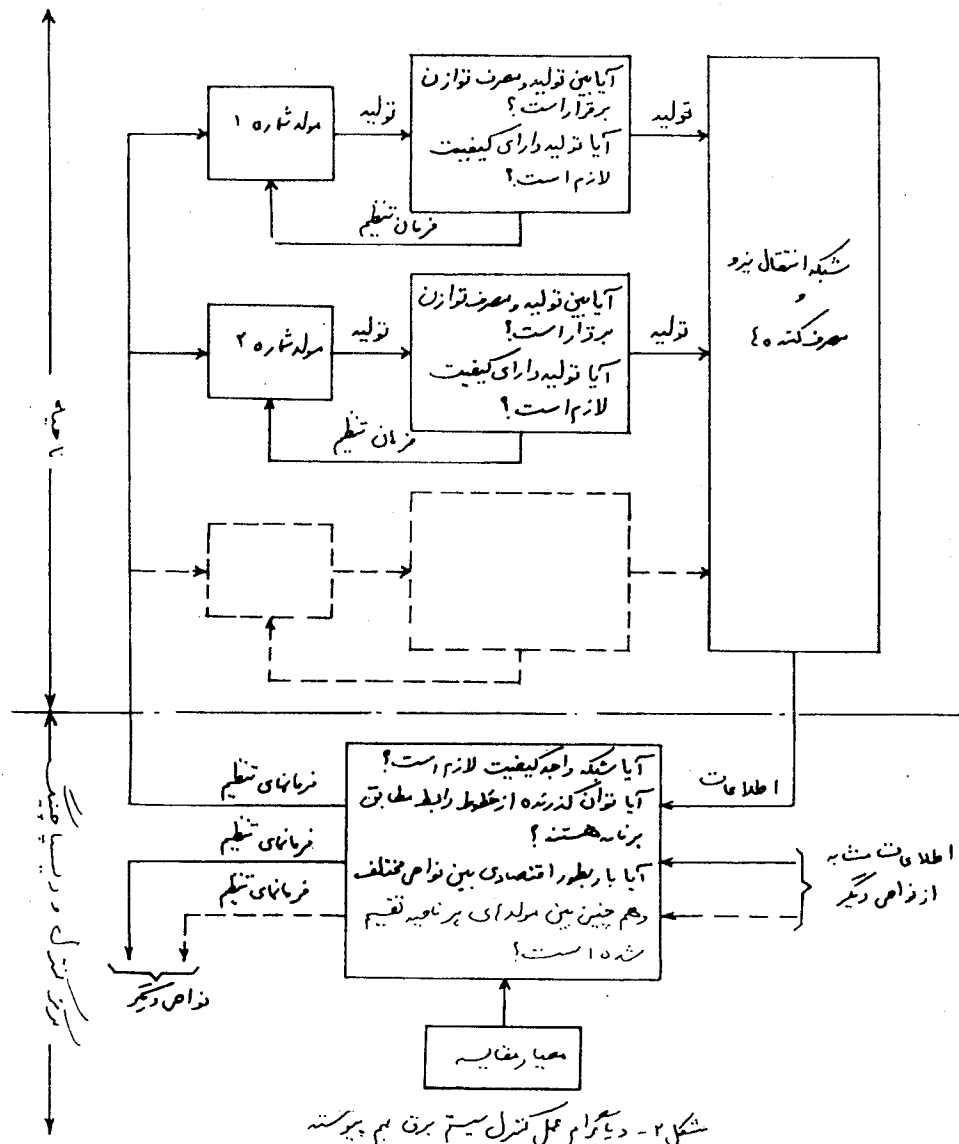
۱ - Interconnected

۲ - Single - area interconnected system

ناحیه بهره‌برداری تقسیم شده و تحت عنوان سیستم چندناحیه‌ای مشخص می‌گردد (شکل ۱-ب). ناحیه<sup>۱</sup> بخشی از سیستم اطلاق می‌شود که مسئول تأمین بار حوزه خودش است و خطوطی که نواحی مختلف را بهم وصل می‌کند خطوط رابط<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. هر ناحیه ممکن است از یک یا چند مؤسسه برق و یا حتی فقط قسمتی از یک مؤسسه برق تشکیل شده باشد. در شرایط عادی سعی می‌شود که توان گذرنده از خطوط رابط همیشه ثابت بماند. مقدار توان گذرنده از خطوط رابط براساس شرایط تولید و مصرف نواحی مجاور هم ظرفیت خطوط رابط و هم چنین توزیع اقتصادی توان در سیستم بهم پیوسته تعیین می‌شود [۲].

### کنترل سیستم برق بهم پیوسته

دیگرام عمل شکل (۲) بطور ساده وظایفی را که بعد از سیستم کنترل کننده واگذار شده اند.

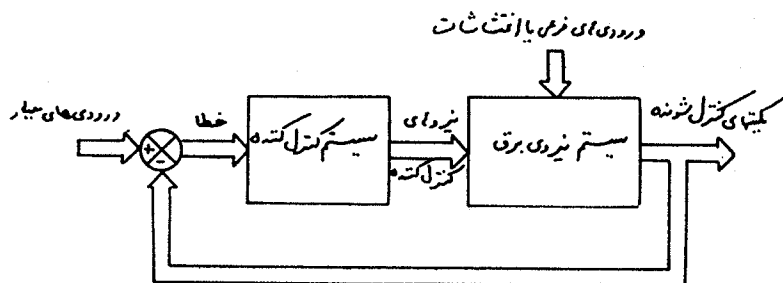


۱ - Multiple - area interconnected system

۲ - Area

۳ - Tie - lines

نشان میدهد. از نظر تئوری سیستم های کنترل یک چنین سیستمی بطور خلاصه بوسیله دیاگرام شکل (۳) نمایش داده میشود [۷]. مطابق این شکل کمیت هائی که بایستی کنترل شوند با ورودی های معیار مقایسه شده و میزان خطا را تعیین میکنند. این خطاها وارد سیستم کنترل کننده شده و نیروهای کنترل کننده را ایجاد میکنند.



شکل ۳. سامان مگر کنترل سیستم برق بهم برتته

نکته مهمی که در اینجا لازم است بان اشاره شود اینست که عمل سیستم شکل (۳) بر اساس متغیرها نیست که مبین انحراف از شرایط کار عادی سیستم هستند و بهمین جهت در این بررسی منحصرأ بانمو متغیرها<sup>۲</sup> سروکار خواهیم داشت.

سیستمی که در اینجا معرفی شده دارای چندین ورودی و چندین خروجی است و کسانیکه با تئوری سیستم های کنترل آشنا هستند بخوبی از میزان پیچیدگی طرح این نوع سیستم آگاه هستند. پیچیدگی واشکا-لات طرح تا اندازه زیادی به میزان وابستگی<sup>۳</sup> ورودی ها و خروجی های مختلف با همدیگر، سخت گیری از نیازمندی-یهای کنترل، و پیچیده بودن نمایش ریاضی سیستم ارتباط دارد. در اینجا لازم است علاوه بر ثابت نگاه داشتن فرکانس، ولتاژ شاید صدها شمش<sup>۴</sup> نیز کنترل شوند و در ضمن توان خروجی مولدهای مختلف نیز بطور اقتصادی شده و حتی لازم باشد که توان گذرنده از بعضی خطوط (خطوط رابط بین دوناحیه) هم در حدود معینی باقی بماند.

در نگاه اول چنین بنظر میرسد که کنترل سیستم نیروی برق مسئله بسیار پیچیده و مشکلی را پیش میآورد، ولی عملا این مسئله با مطرح کردن دلایل منطقی ای که از شناسائی سیستم نیروی برق ناشی شده اند خیلی ساده تر میشود. نکاتی که باعث ساده شدن نمایش ریاضی سیستم میشوند عبارتند از:

- ۱- وابستگی بین کنترل فرکانس و کنترل ولتاژ بسیار ضعیف است بطوریکه میتوان این دو کنترل را بطور جدا از هم بررسی کرد.
- ۲- وابستگی بین کنترل ولتاژ شمش های مختلف سیستم نیز بسیار ضعیف است بطوریکه میتوان ولتاژ شمش های مختلف را بطور مستقل از هم کنترل کرد.
- ۳- بخاطر بهم پیوستگی مستحکم تری که بین شمش های مختلف هر ناحیه موجود است میتوان

۱ - Error signals

۲ - Incremental analysis

۳ - Degree of Coupling

۴ - Bus

تغییر فرکانس تمام شمش های ناحیه را یکسان فرض کرده و بعنوان تغییر فرکانس ناحیه در نظر گرفت. بدیهی است چون نواحی مختلف بوسیله خطوط رابط نسبتاً ضعیف تری بهم وصل هستند، تغییر فرکانس نواحی مختلف متفاوت خواهند بود.

باتوجه به نکات بالا و در نظر گرفتن اینکه چون ثابت های زمانی مربوط به کنترل توان و فرکانس خیلی بزرگتر از ثابت های زمانی مربوط به کنترل ولتاژ هستند میتوان مسئله کنترل تولید را بدون دخالت دادن کنترل ولتاژ مطالعه و بررسی کرد و این روشی است که که در این نوشته دنبال خواهد شد. از طرف دیگر چون گنجاندن تمام مطالب مربوط به کنترل تولید باعث طولانی شدن نوشته خواهد شد، بهمین جهت در این نوشته فقط راجع به کنترل توان و فرکانس گفتگو میشود و تقسیم اقتصادی توان بین نواحی مختلف و هم چنین بین نیروگاه های هر ناحیه بنوشته دیگری که مکمل نوشته های قبلی در این زمینه خواهد بود [۸] و [۹] موقوف میشود.

## نمایش ریاضی سیستم نیروی برق

### مفاهیم اساسی

بطور کلی در اصطلاح نظریه سیستم ها<sup>۱</sup> هر اسباب یا شیبی واقعی بنام یک سیستم فیزیکی<sup>۲</sup> شناخته میشود. برای اینکه بتوان سیستم فیزیکی را بطور تحلیلی بررسی ویا طرح کرد لازم است ابتدا آنرا بیک صورت ایده آل در آورد. صورت ایده آل<sup>۳</sup> هر سیستم فیزیکی بعنوان مدل<sup>۴</sup> آن شناخته میشود. بدیهی است که بر حسب شرایط مسئله ممکن است مدلهای مختلفی برای یک سیستم فیزیکی بدست آید، مثلاً یک شبکه الکتریکی را میتوان بامدلی که کلیه عناصرش خطی باشند نمایش داد ولی گاهی لازم است که غیر خطی بودن بعضی از عناصر شبکه را نیز مورد نظر گرفت. مرحله بعدی بدست آوردن یک نمایش ریاضی برای مدل است. در اینجا لازم است محورهای مختصات و متغیرهای لازم را انتخاب کرده و قوانین فیزیکی مربوط را در موردشان اجرا کرد. مثلاً برای یک مدل معین شبکه الکتریکی میتوان نقطه ای بعنوان نقطه مبنا انتخاب کرده و ولتاژ هر یک از گروه های شبکه را نسبت باین نقطه مبنا بعنوان متغیرها در نظر گرفته و معادلات ولتاژ گرهی<sup>۵</sup> را برای آن نوشت، در صورتیکه اگر برای همین مدل شبکه جهت های مقایسه انتخاب کرده و شدت جریان حلقه های اصلی<sup>۶</sup> را بعنوان متغیرها در نظر بگیریم بابکار بردن قانون ولتاژ کیرشهف در حلقه ها و قانون جریان کیرشهف در گره ها معادلات دیگری برای مدل شبکه بدست خواهد آمد. بنابراین برای هر مدل میتوان چندین سری معادله مختلف بدست آورد که هر کدامشان بنوبه خود یک نمایش ریاضی<sup>۷</sup> برای مدل مورد بحث بحساب می آیند. قسمت مهم کار عبارتست از انتخاب نمایش ریاضی ای که رفتار واقعی سیستم فیزیکی را بطرز مناسبی نشان دهد [۱۰].

۱ — Systems theory

۲ — Physical system

۳ — Idealized

۴ — Model

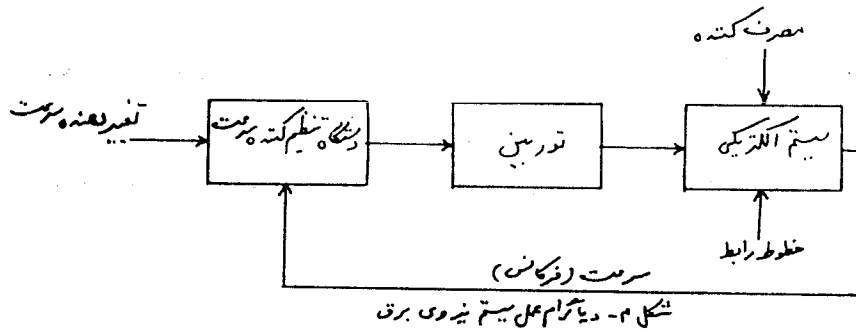
۵ — Node voltage equations

۶ — Basic loops

۷ — Mathematical representation

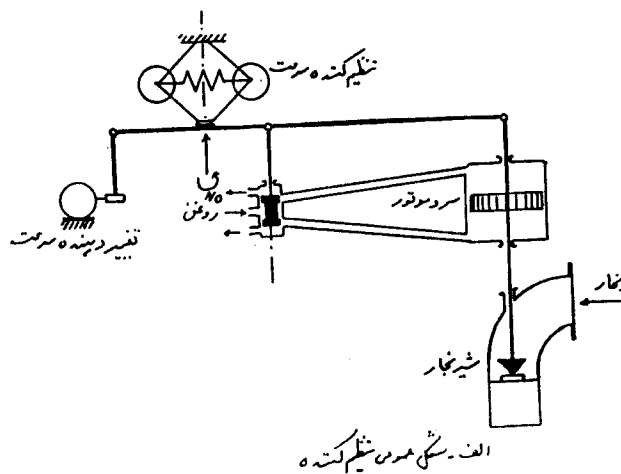
چون منظور این نوشته عبارتست از تشریح مبانی و اصول کنترل برق و بررسی عواملی است که در این مسئله دخالت دارند بهمین جهت ساده‌ترین مدلها و نمایشهای ریاضی را برای قطعات مختلف سیستم نیروی برق انتخاب کرده و ارتباط پیوستگی این قطعات را باهمدیگر بصورتی که در شکل (ع) نشان داده شده در نظر خواهیم گرفت.

برای آشنائی با نمایشهای ریاضی کامنتر به منابع شماره [۱۱] و [۱۲] مراجعه شود.



### نمایش ریاضی توربین و دستگاه تنظیم کننده سرعت

در شکل (ه-الف) یک تنظیم کننده سرعت هیدرو مکانیکی<sup>۱</sup> که معمول ترین نوع تنظیم کننده های سرعت است بطور ساده نشان داده شده است. بطور کلی هر تنظیم کننده سرعت هیدرو مکانیک از یک تنظیم کننده سرعت<sup>۲</sup> و یک سروموتور هیدرولیکی<sup>۳</sup> تشکیل شده که مطابق دیاگرام عمل شکل (ه-ب) با همدیگر مربوط میشوند. طرز کار این تنظیم کننده در مرجع شماره [۱۳] تشریح شده و لزومی به تکرار آن نیست، فقط نکته ای که باید یادآوری شود اینست که دستگاه تغییر دهنده سرعت<sup>۴</sup> در واقع سرعت توربین را در بار ثابت تغییر میدهد.

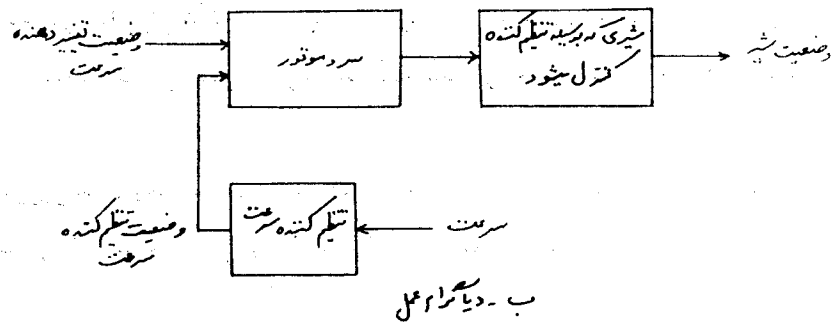


۱ - Mechanical - Hydraulic Speed - Governing System

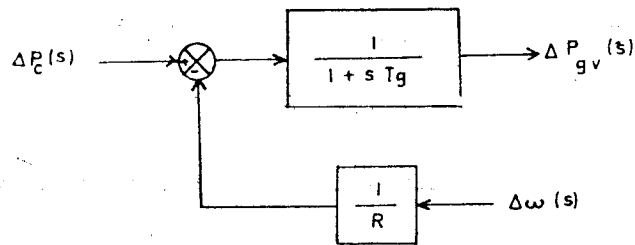
۲ - Speed Governor

۳ - Hydraulic Servomotor

۴ - Speed Changer



ب - دیاگرام عمل



پ - نمایش ریاضی

شکل ۵ - تنظیم کننده سرعت هیبرید مکانیکی

معمولا مدل این تنظیم کننده سرعت غیر خطی است ولی در مطالعات مربوط به کنترل تولید از این غیر خطی بودن صرف نظر کرده و برای آن یک مدل خطی در نظر گرفته میشود. نمایش ریاضی مدل خطی تنظیم کننده سرعت بوسیله دیاگرام شکل (۵-ب) نشان داده شده است [۱۴].

در این دیاگرام  $T_g$  عبارتست از ثابت زمانی مکانیسم تنظیم کننده سرعت

$R$  عبارتست از افت یا تنظیم سرعت که از رابطه زیر

حساب میشود:

$$R = \frac{N_0 - N}{N_r} \quad (1)$$

$N_0$ : سرعت بدون بار توربین

$N_r$ : سرعت نامی<sup>۳</sup> توربین

$N$ : سرعت توربین در بار نامی<sup>۴</sup>

$\Delta P_g$  عبارتست از نمو توانی که با عمل تغییر دهنده سرعت

میتوان بدست آورد

$\Delta P_{gv}$  عبارتست از نمو توانی که تغییر وضعیت شیر بخار

بوجود خواهد آورد

$\Delta \omega$  عبارتست از تغییر سرعت زاویه‌ای

$S$  عبارتست از متغیر تبدیل لاپلاس

۱ - Speed Regulation or Droop

۲ - No - load speed

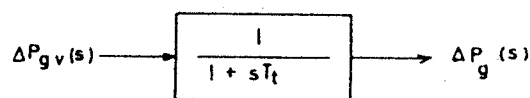
۳ - Rated Speed

۴ - Speed at rated Speed



تمام کمیت‌هایی که در دیاگرام شکل (۵-پ) بکار رفته‌اند با استثنای زمان که برحسب ثانیه است، نسبت بواحد بیان شده‌اند. ضمناً مقادیر معمول پارامترهایی که بکار رفته‌اند در حدود  $R=0.00$  و  $T_g=0.02-0.03$  ثانیه میباشند.

مدل توربین‌های بخار نیز برحسب انواع مختلف توربین متفاوت خواهد بود [۱۲]. در دیاگرام شکل (۶) نمایش ریاضی یک توربین بخار ساده نشان داده شده است.

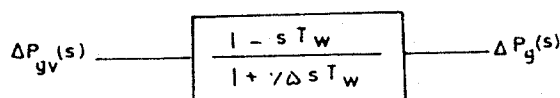


شکل ۶-۶. نمایش ریاضی یک توربین بخار ساده

در این دیاگرام  $T_t$  عبارتست از ثابت زمانی توربین بخار و مقدار آن معمولاً در حدود  $0.05-0.02$  ثانیه است.

$\Delta P_g$  عبارتست از نمو توانی که در مولد برق ایجاد میشود.

ضمناً بازهم تمام کمیت‌های بالا با استثنای زمان که برحسب ثانیه است، بر حسب نسبت بواحد میباشند. نمایش ریاضی یک توربین آبی ساده نیز بوسیله دیاگرام شکل (۷) نشان داده شده است [۱۲].

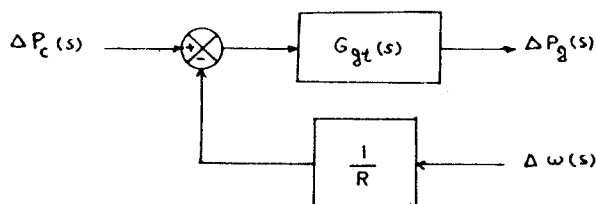


شکل ۷-۲. نمایش ریاضی یک توربین آبی

در این دیاگرام  $T_w$  ثابت زمانی آب نامیده شده و مقدار آن در حدود  $0.0-0.05$  ثانیه است.

در دنباله این نوشته بمنظور نشان دادن روش مطالعه کنترل تولید، تنظیم کننده سرعت هیدرو- مکانیکی (شکل ۵-پ) و توربین بخار ساده (شکل ۶) را در نظر گرفته و نمایش ریاضی توربین بخار و تنظیم کننده سرعتش را مطابق دیاگرام شکل (۸) با تابع تبدیل  $G_{gt}(s)$  نمایش خواهیم داد:

$$G_{gt}(s) = \frac{1}{(1 + sT_g)(1 + sT_t)} \quad (۲)$$



شکل ۸. نمایش ریاضی یک توربین بخار و تنظیم کننده سرعت

بدیهی است که در شرایط و وضعیت‌های دیگر به‌سہولت میتوان نمایش‌های مناسب مربوط بآن شرایط را جایگزین این نمایش ریاضی نمود.

## نمایش ریاضی سیستم الکتریکی

پس از تشریح نمایشهای ریاضی دستگاه تنظیم کننده سرعت و توربین لازم است برای سیستم متشکل از شبکه انتقال و مصرف کننده‌ها نیز نمایش مناسبی بدست آورد. برای این منظور یکی از نواحی سیستم بهم پیوسته شکل (۱-ب) را در نظر گرفته و فرض میکنیم که بار (مصرف) این ناحیه باندازه  $\Delta P_1$  تغییر کند. در نتیجه این تغییر بار فرکانس سیستم تغییر کرده و موجب میشود که تنظیم کننده سرعت توربین عمل کرده و توان مولد را باندازه  $\Delta P_G$  تغییر دهد. اما چون قسمتی از بار سیستم را موتورهای الکتریکی تشکیل میدهند و تغییر فرکانس نیز بنوبه خود موجب تغییر توان این نوع مصرف کننده‌ها میشود لذا تغییر مؤثر با سیستم  $\Delta P_L$  تابعی از تغییر بار  $\Delta P_1$  و تغییر سرعت  $\Delta \omega$  خواهد بود و رابطه آنها با همدیگر بطور تقریبی با معادله زیر بیان میشود:

$$\Delta P_L = \Delta P_1 + \frac{\partial P_L}{\partial \omega} \Delta \omega \quad (۲)$$

به همین ترتیب تغییر مؤثر توان مولد  $\Delta P_G$  نیز از دو قسمت تشکیل میشود: قسمتی از آن یعنی  $\Delta P_g$  از عمل تنظیم کننده سرعت توربین بدست میآید و قسمت دیگر از تغییر سرعت  $\Delta \omega$  ناشی میشود و رابطه آنها نیز با همدیگر بطور تقریبی با معادله زیر بیان میشود:

$$\Delta P_G = \Delta P_g + \frac{\partial P_G}{\partial \omega} \Delta \omega \quad (۳)$$

اضافه توان  $(\Delta P_G - \Delta P_L)$  بمصرف تغییر سرعت زاویه‌ای (یا فرکانس) ناحیه و تغییر توان در خطوط رابط با نواحی مجاور یعنی  $\Delta P_{tie}$  میرسد:

$$M \frac{d\Delta \omega}{dt} + \Delta P_{tie} = \Delta P_G - \Delta P_L \quad (۴)$$

در رابطه بالا  $M$  عبارتست از تعداد حرکت زاویه‌ای<sup>۱</sup> رتورهای توربین و مولد و مقدار آن بسهولت بکمک ثابت اینرسی<sup>۲</sup>  $H$  که در محاسبات مربوط به پایداری سیستم نیروی برق معرفی شده است محاسبه میگردد [۱۵]:

$$H = \frac{\text{انرژی ذخیره شده در رتور توربین و مولد بر حسب کیلوژول}}{\text{توان مولد بر حسب کیلوولت آمپر}} \quad (۵)$$

$$M = \frac{H}{180 \cdot f_0} \quad (۶)$$

$f_0$  فرکانس نامی سیستم برق است.

۱ - Angular momentum

۲ - Inertia Constant

بازهم تمام کمیت‌هایی که در معادله (۵) بکار رفته‌اند با استثنای زمان که بر حسب ثانیه است، بر حسب نسبت بواحد بیان شده‌اند.

با استفاده از روابط (۳) و (۴) معادله (۵) بصورت زیر در می‌آید

$$M \frac{d\Delta\omega}{dt} + D\Delta\omega + \Delta P_{tie} = \Delta P_g - \Delta P_l \quad (8)$$

که در آن

$$D = \frac{\partial P_L}{\partial \omega} - \frac{\partial P_G}{\partial \omega} \quad (9)$$

ضریب استهلاك سیستم نامیده میشود.

اما چون در بهره برداری و کنترل سیستم نیروی برق بجای سرعت زاویه‌ای معمولاً با فرکانس سرو کار داریم بهمین جهت بهتر است که معادله تغییرات نمود فرکانس بر حسب زمان را بدست آوریم. خوشبختانه چون تمام کمیت‌هایی که در معادله (۸) بکار رفته‌اند بر حسب نسبت بواحد هستند و در ضمن بخاطر وجود رابطه ساده  $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$  مقدار نسبت بواحد نمود سرعت زاویه‌ای با مقدار نسبت بواحد نمود فرکانس یکسان هستند و معادله تغییرات نمود فرکانس درست بهمان صورت معادله (۸) میباشد:

$$M \frac{d\Delta f}{dt} + D\Delta f + \Delta P_{tie} = \Delta P_g - \Delta P_l \quad (10)$$

اکنون برای بدست آوردن نمایش ریاضی سیستم کافی است که از معادله (۱۰) تبدیل لاپلاس

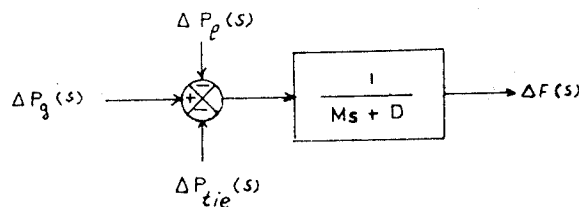
گرفت.

$$Ms\Delta F(s) + D\Delta F(s) + \Delta P_{tie}(s) = \Delta P_g(s) - \Delta P_l(s) \quad (11)$$

وبالاخره شکل نهائی معادله (۱۱) بصورت زیر در می‌آید:

$$\Delta F(s) = \frac{1}{Ms + D} [\Delta P_g(s) - \Delta P_l(s) - \Delta P_{tie}(s)] \quad (12)$$

معادله (۱۲) بوسیله دیاگرام شکل (۹) نشان داده خواهد شد.



شکل ۹-۴ نمایش ریاضی سیستم الکتریکی

### نمایش ریاضی خطوط رابط بین نواحی مختلف

اگر ناحیه‌ای بایشتر از یک خط رابط بنواحی مجاورش متصل باشد، در اینحالت جمع جبری<sup>۱</sup> توان

۱ - System damping Coefficient

۲ - علامت منتهت برای توانی که از ناحیه خارج میشود و علامت منفی برای توانی که وارد ناحیه میشود.

گذرنده از خطوط رابط یعنی مقدارخالص توان مبادله شوند: باناحیه ' مبین آنستکه آیا تولید ناحیه تغییرات بار ناحیه خودش را دنبال میکند. بهمین جهت خطوط رابط براین اساس نمایش داده خواهند شد که مقدار خالص توان مبادله شونده کنترل خواهد شد .

ناحیه  $i$  را در نظر بگیرید ، تغییر مقدار خالص توان مبادله شونده با ناحیه  $i$  برابر  $\Delta P_{tie, i}$  است باجمع جبری تغییر توان های گذرنده از خطوط رابط بین این ناحیه با نواحی دیگر، یعنی :

$$\Delta P_{tie, i} = \sum_k \Delta P_{tie, ik} \quad (13)$$

در معادله بالا  $\Delta P_{tie, ik}$  عبارتست از تغییر توان گذرنده از خطوط رابط بین ناحیه  $i$  و ناحیه  $k$  و وزیر نویس  $k$  فقط بنواحی ای که با ناحیه  $i$  ارتباط دارند تعلق میگیرد .

اکنون اگر ولتاژ ناحیه  $i$  را با  $E_i = V_i e^{j\theta_i}$  و ولتاژ ناحیه  $k$  را با  $E_k = V_k e^{j\theta_k}$  و امپدانس معادل خطوط رابط بین ناحیه  $i$  و ناحیه  $k$  را با  $Z_{ik} = R_{ik} + jX_{ik}$  نشان دهیم، توان گذرنده از خطوط رابط بین ناحیه  $i$  و ناحیه  $k$  از رابطه زیر بدست خواهد آمد :

$$P_{tie, ik} = \Re \{ E_i I_{ik}^* \} = \Re \left\{ E_i \frac{E_i^* - E_k^*}{Z_{ik}^*} \right\}$$

$$= \frac{1}{R_{ik} + X_{ik}} \left[ R_{ik} V_i^2 - R_{ik} V_i V_k \cos(\theta_i - \theta_k) + X_{ik} V_i V_k \sin(\theta_i - \theta_k) \right] \quad (14)$$

در رابطه بالا  $\Re$  و  $*$  بترتیب معرف قسمت حقیقی و علامت مزدوج موهومی یک کمیت مختلط بیباشند. چون معمولا مقدار مقاومت الکتریکی خطوط انتقال در مقایسه با راکتانسشان کوچک و ناچیز هستند بهمین جهت برای ساده تر شدن معادلات از مقاومت الکتریکی خطوط انتقال صرف نظر کرده و رابطه (۱۴) را بصورت خلاصه شده زیر مینویسیم :

$$P_{tie, ik} = \frac{V_i V_k}{X_{ik}} \sin(\theta_i - \theta_k) \quad (15)$$

تغییر توان گذرنده از خطوط رابط بین ناحیه  $i$  و ناحیه  $k$  سهولت از رابطه (۱۵) قابل محاسبه

است .

$$\Delta P_{tie, ik} = \frac{V_i V_k}{X_{ik}} \cos(\theta_i - \theta_k) (\Delta \theta_i - \Delta \theta_k)$$

$$= T_{ik} (\Delta \theta_i - \Delta \theta_k) \quad (16)$$

که در رابطه (۱۶) عبارت زیر

$$T_{ik} = \frac{V_i V_k}{X_{ik}} \cos(\theta_i - \theta_k) \quad (17)$$

بنام ضریب سنکر ونیزاسیون و یا ضریب استحکام خط انتقال نامیده میشود.  
چون  $\Delta\omega$  و  $\Delta f$  و  $\Delta\theta$  توسط فرمول زیر باهم مربوط میشوند:

$$\Delta\omega = 2\pi\Delta f = \frac{d}{dt} \Delta\theta \quad (18)$$

بنابراین رابطه (۱۶) بصورت زیر در خواهد آمد،

$$\Delta P_{tie, ik} = 2\pi T_{ik} \left( \int \Delta f_i dt - \int \Delta f_k dt \right) \quad (19)$$

وبالاخره تغییر توان گذرنده از کلیه خطوط رابطه ناحیه  $i$  از روی رابطه (۱۳) عبارت خواهد بود از:

$$\Delta P_{tie, i} = 2\pi \sum_k T_{ik} \left( \int \Delta f_i dt - \int \Delta f_k dt \right) \quad (20)$$

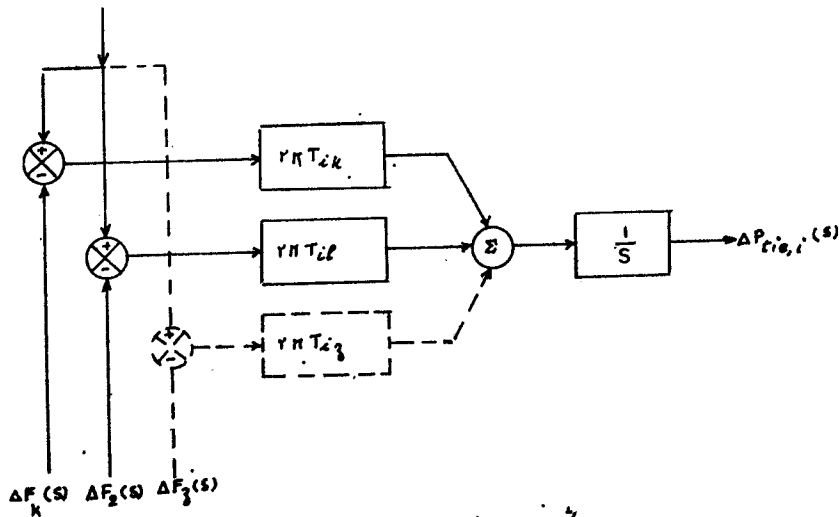
تبدیل لاپلاس رابطه (۲۰) عبارتست از

$$\Delta P_{tie, i}(s) = \frac{2\pi}{s} \sum_k T_{ik} \left[ \Delta F_i(s) - \Delta F_k(s) \right] \quad (21)$$

وسرانجام (۲۱) بدیالگرام شکل (۱۰) که نمایش ریاضی خطوط رابط ناحیه  $i$  است منتهی خواهد شد.

با ترکیب شکل‌های (۸) و (۹) و (۱۰) نمایش ریاضی کامل ناحیه تحت کنترل بصورتی که در

شکل (۱۱) نشان داده شده در می‌آید.

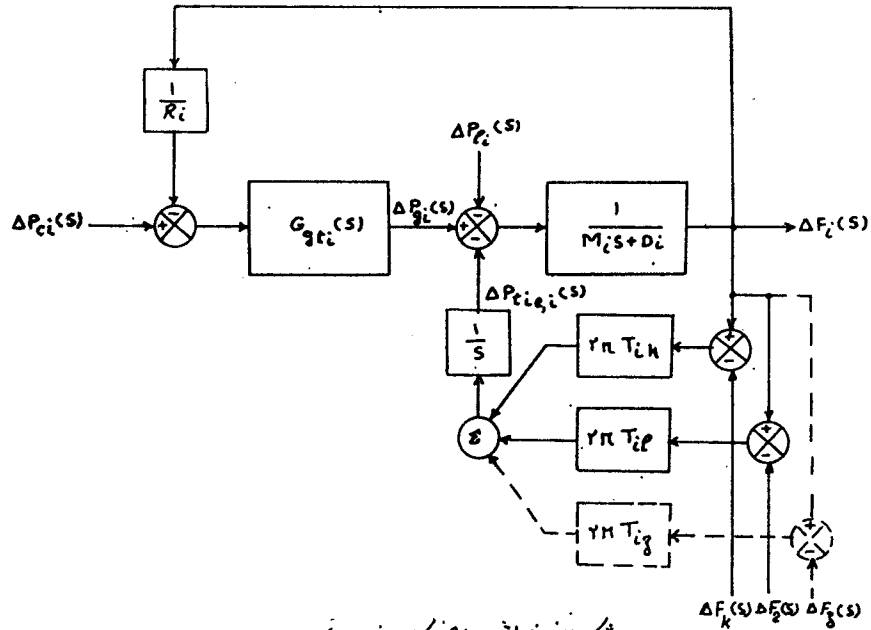


شکل ۱۰ - نمایش ریاضی خطوط رابط ناحیه  $i$

#### ۱ - Synchronizing or stiffness Coefficient

۲ - اگر مقدار  $\frac{V_i V_k}{X_{ik}}$  در مقایسه با توان نامی ناحیه  $i$  کوچک باشد خطوط رابطه بین  $i$  و ناحیه  $k$

ضعیف تلقی خواهند شد.



شکل ۱۱- نمایش ریاضی کامل ناحیه ۲

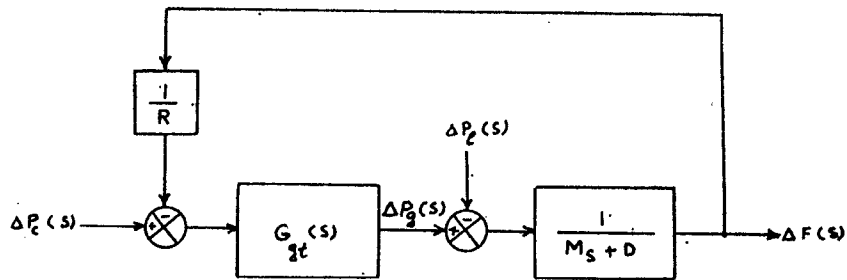
### بررسی کنترل

برای اینکه دینامیک کنترل تولید بهتر نمایان شود، در اینجا از ساده‌ترین سیستم یعنی سیستمی که فقط از یک ناحیه تشکیل شده شروع نموده و پس از بدست آوردن نتایج لازم موضوع را بحالتی که سیستم از چندین ناحیه تشکیل شده است تعمیم خواهیم داد.

۱- سیستم یک ناحیه‌ای

### ۱- سیستم یک ناحیه‌ای

چون سیستم فقط از یک ناحیه تشکیل شده است بنابراین سیستم فاقد خطوط رابط بوده و نمایش آن بسادگی از روی شکل (۱۱) پس از حذف  $\Delta P_{ci}(s)$  بدست خواهد آمد، شکل (۱۲) این نمایش را نشان میدهد.



شکل ۱۲- نمایش ریاضی سیستم یک ناحیه‌ای

ابتدا فرض میشود که سیستم هیچ کنترل اضافی دیگری بجز دستگاه تنظیم کننده سرعت توربین نداشته باشد در اینصورت  $\Delta P_c = 0$  خواهد بود.

از دیاگرام شکل (۱۲) پس از قرار دادن  $\Delta P_c(s) = 0$  نتیجه زیر بدست میآید:

$$\Delta F(s) = \frac{R}{R(Ms+D) + G_{gt}(s)} \Delta P_1(s) \quad (22)$$

و پس از جانشین کردن  $G_{gt}(s)$  از رابطه (۲) عبارت (۲۲) بشکل زیر در میآید:

$$\Delta F(s) = \frac{R(1+sT_g)(1+sT_t)}{1+R(1+sT_g)(1+sT_t)(Ms+D)} \Delta P_1(s) \quad (23)$$

حال فرض میکنیم که بار بطور ناگهانی وبصورت پله‌ای<sup>۱</sup> بمقدار  $\Delta P_1$  تغییر کند در اینصورت

تبدیل لاپلاس آن عبارتست از:

$$\Delta P_1(s) = \frac{1}{s} \Delta P_1 \quad (24)$$

تغییر فرکانس سیستم یعنی  $\Delta f$  پس از اینکه سیستم بحالت ماندگار رسیده است باسانی با استفاده از قضیه مقدار نهائی<sup>۲</sup> بشرح زیر تعیین خواص شد [۱۶]:

$$\Delta f = \lim_{s \rightarrow 0} [s \Delta F(s)] \quad (25)$$

پس از جانشین کردن (۲۴) در (۲۳) و قرار دادن (۲۳) در (۲۵) نتیجه زیر برای  $\Delta f$  بدست میآید:

$$\Delta f = - \frac{\Delta P_1}{D + \frac{1}{R}} = - \frac{\Delta P_1}{\beta} \quad (26)$$

که در آن

$$\beta = D + \frac{1}{R} \quad (27)$$

مشخصه فرکانس ناحیه<sup>۳</sup> نامیده میشود.

رفتار دینامیک تغییر فرکانس یعنی تغییرات نمو فرکانس  $\Delta f(t)$  بر حسب زمان را میتوان

با گرفتن عکس تبدیل لاپلاس<sup>۴</sup> از معادله (۲۳) بدست آورد. شکل (۱۳) نمونه‌ای از این تغییرات را نشان میدهد.

بررسی شکل (۱۳) نشان میدهد در حالتیکه سیستم کنترل اضافی دیگری نداشته باشد حتی پس از آنکه سیستم از

حالت گذرا به حالت ماندگار رسیده باشد فرکانس ناحیه باندازه  $\Delta f$  تغییر خواهد کرد. باتوجه بانچه که

در ابتدای این نوشته راجع به لزوم ثابت نگاهداشتن فرکانس گفته شده ملاحظه میشود که نباید فقط به

عمل تنظیم کننده توربین اکتفا کرد بلکه لازم است در فکر چاره‌ای برای ثابت نگاهداشتن فرکانس بود.

برای رسیدن باین منظور کافی است که وضعیت تغییر دهنده سرعت را، بر حسب قانون خاصی که

۱ - Step load change

۲ - Steady - state

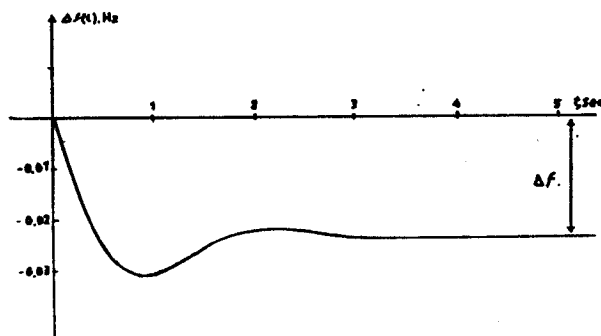
۳ - Final value theorem

۴ - Area frequency response characteristic

۵ - Inverse Laplace Transform

تمام نیازمندیهای کنترل را برآورده میسازد، تغییر داد. این نیازمندیها را بطور خلاصه میتوان بشرح زیر بیان کرد [۱]:

۱- پایداری همیشه یکی از مسائل مهم سیستمهای کنترل با مدار برگشت میباشد بنابراین سیستم کنترلی که عرضه میشود بایستی بقدر کافی پایدار باشد.



شکل ۱-۳. نمایش تغییرات نمودار کانس پس از افزایش بار بصورت پدهای و فقدان کنترل

۲- خطای فرکانس در حالت ماندگار بایستی صفر شود، ضمناً بایستی میزان تغییرات فرکانس در در حالت گذرا حتی المقدور کم باشد.

۳- انتگرال خطای فرکانس نیز نباید از مقدار معینی تجاوز کند. چون با اینکه پس از رسیدن سیستم بحالت ماندگار خطای فرکانس صفر میشود، هیچ سیستم کنترلی نمیتواند خطای فرکانس در حالت گذرا را کاملاً از بین ببرد و چون خطای زمان ساعتی الکتریکی متناسب با انتگرال خطای فرکانس است به همین جهت لازم است حدی برای این انتگرال قائل شد.

۴- بار کل ناحیه بایستی طوری بین مولدها موجود در ناحیه تقسیم شود که اقتصادیترین حالت از نظر هزینه بدست آید [۸]. سیستم کنترلی که بتواند تمام شرایط بالا را در یک مرحله برآورده سازد بسیار پیچیده و مشکل خواهد بود به همین جهت برحسب اهمیت نسبی نیازمندیهای بالا معمولاً کنترل در دو مرحله صورت میگیرد. ابتدا سه شرط اول بوسیله سیستم کنترل سریعی که زمان عمل کردنش<sup>۱</sup> در حدود چند ثانیه است برآورده میشوند و سپس کنترل دیسپاچینگ اقتصادی<sup>۲</sup> که زمان عمل کردنش بیشتر از یک دقیقه است شرط چهارم یعنی توزیع اقتصادی بار بین مولدها را تأمین خواهد کرد. همانطور که قبلاً هم گفته شده در این نوشته فقط راجع به مرحله اول کنترل یعنی کنترل فرکانس گفتگو خواهد شد.

برای تعیین فرمانی که نیازمندیهای اساسی کنترل فرکانس را برآورده سازد، فرض میکنیم که تغییر وضعیت تغییر دهنده سرعت از طریق تابع تبدیل  $G_C(s)$  بدست آید، یعنی:

$$\Delta P_c(s) = G_C(s) \Delta F(s) \quad (28)$$

در این حالت سیستم بصورت شکل (۱۴) نمایش داده خواهد شد.

۱ - Closed-loop control system

۲ - Response time

۱ - Economic Dispatch Controller

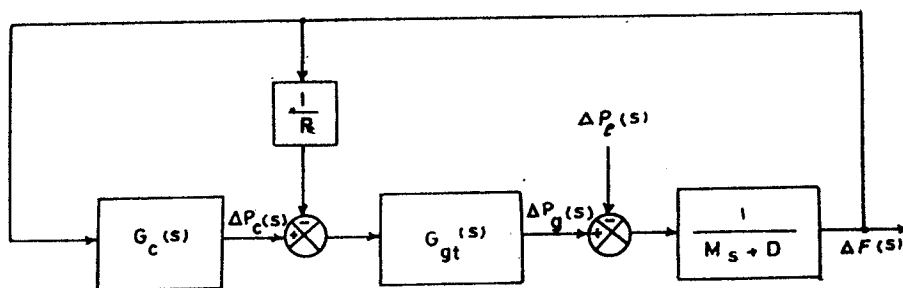


اکنون از روی شکل (۱۴) رابطه بین تغییر فرکانس و تغییر بار بصورت زیر خواهد بود :

$$\Delta F(s) = - \frac{1}{Ms + D + G_{gt}(s) \left[ \frac{1}{R} - G_c(s) \right]} \Delta P_1(s) \quad (29)$$

باز هم اگر تغییر بار را بصورت پله‌ای در نظر بگیریم، با توجه بمعادله (۲۴) رابطه (۲۹) بصورت زیر در در می‌آید :

$$\Delta F(s) = - \frac{\Delta P_1}{s \left\{ Ms + D + G_{gt}(s) \left[ \frac{1}{R} - G_c(s) \right] \right\}} \quad (30)$$



شکل ۱۴ - نشان سیستم نیمه‌ای کنترل‌شده

و تغییر فرکانس سیستم در حالت ماندگار یعنی  $\Delta f$  با استفاده از قضیه مقدار نهائی عبارتست از :

$$\begin{aligned} \Delta f &= \lim_{s \rightarrow 0} s \Delta F(s) \\ &= - \frac{\Delta P_1}{D + \lim_{s \rightarrow 0} G_{gt}(s) \left[ \frac{1}{R} - \lim_{s \rightarrow 0} G_c(s) \right]} \end{aligned} \quad (31)$$

مراجعه به رابطه (۲) نشان میدهد که  $\lim_{s \rightarrow 0} G_{gt}(s) = 1$  ، بنابراین معادله (۳۱) بصورت زیر خلاصه خواهد شد :

$$\Delta f = - \frac{\Delta P_1}{D + \frac{1}{R} - \lim_{s \rightarrow 0} G_c(s)} \quad (32)$$

از روی معادله (۳۲) سهولت دیده میشود برای اینکه  $\Delta f$  بصفر برسد لازم است که  $\lim_{s \rightarrow 0} G_c(s) = \infty$  بشود، یعنی  $G_c(s)$  بایستی لافل یک قطب در  $s=0$  داشته باشد :

$$G_c(s) = - \frac{K}{s} \quad (33)$$

که در (۳۳) ضریب تقویت نام دارد. علامت منفی در رابطه (۳۳) بخاطر آنستکه با بالا رفتن فرکانس

(یعنی  $\Delta f$  مثبت) فرمانی بدست آید که عملش روی تغییر دهنده سرعت سبب پائین آمدن فرکانس شود و همین طور برعکس. در این حالت معادله (۲۸) بصورت زیر در میآید:

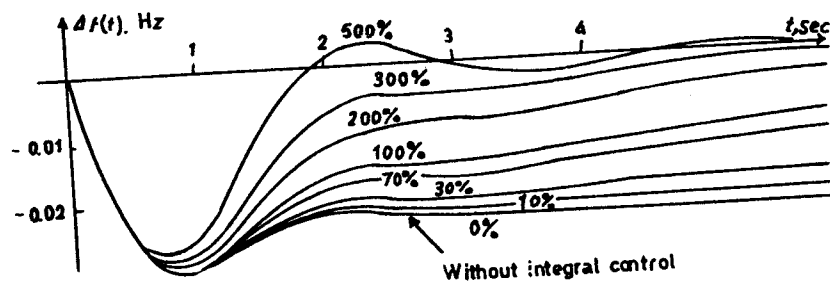
$$\Delta P_c(s) = -k \frac{\Delta F(s)}{s} \quad (۲۴)$$

و عکس تبدیل لاپلاس معادله (۲۴) عبارتست از:

$$\Delta P_c = -k \int \Delta f dt \quad (۲۵)$$

رابطه (۳۵) نشان میدهد برای اینکه خطای فرکانس در حالت ماندگار بصفر برسد لازم است از فرمان متناسب با انتگرال خطای فرکانس استفاده کرد و تقریباً تمام کنترل کننده های فرکانس بر این اساس طرح و ساخته شده اند. علت اینکه در رابطه (۳۳) تنها بیک قطب ساده در  $s=0$  اکتفا شده بخاطر پایداری سیستم میباشد. چون هرچه به تعداد قطب در  $s=0$  افزوده شود سیستم ناپایدارتر خواهد شد (۱۶). ضمناً از روی رابطه (۳۵) سهولت دیده میشود تا هنگامیکه خطای فرکانس بصفر نرسد فرمان کنترل کننده آنقدر وضعیت مکانیسم تغییر دهند سرعت را تغییر خواهد داد تا اینکه خطای فرکانس را بصفر برساند. میزان سرعت پاسخ بوسیله ضریب تقویت  $K$  کنترل میشود.

شکل (۱۵) تغییرات نمو فرکانس  $\Delta f(t)$  را نسبت بزمان برحسب مقادیر مختلف  $K$  نشان میدهد. توجه باین شکل نشان میدهد که هرچه ضریب تقویت  $K$  بزرگتر باشد به سرعت پاسخ افزوده میشود وای بخاطر نوسانی تر شدن منحنی تغییرات از درجه پایداری آن کاسته میشود، بهمین جهت برای تعیین مقدار  $K$  لازم است سیستم مورد نظر را تحت تحلیل قرار داده و مناسب ترین مقدار را برای آن انتخاب کرد.



شکل ۱۵

نمایش تغییرات نمو فرکانس پس از افزایش بار بصورت پله ای و تأثیر فرمان متناسب با انتگرال خطای فرکانس برحسب مقادیر مختلف ضریب تقویت  $K$

بقیه در نشریه شماره ۳۷

### منابع مراجعه

- 1 – N. Cohn, «Control of Generation and Power Flow on Interconnected System» Second Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1971.
- 2 – L.K. Kirchmayer, «Economic Control of Interconnected Systems», John Wiley and Sons, Inc., New York, 1959.
- 3 – G. Quazza, «Noninteracting Controls of Interconnected Electric Power Systems», IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-85, No. 7, July 1966, pp. 727–741.
- 4 – O.I. Elgerd, C.E. Fosha, Jr., «The Megawatt-Frequency Problem: A New Approach Via Optimal Control Theory» IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-89, No. 4, April 1970, pp. 563–577.
- 5 – E. Handschin (Ed.), «Real-Time Control of Electric Power Systems», Elsevier Publishing Co., Amsterdam, 1972.
- 6 – Philip Sporn, «The Integrated Power System», Mc Graw - Hill Book Co., New York, 1950.
- 7 – O.I. Elgerd, «Electric Energy Systems Theory: An Introduction», Mc Graw-Hill Book Co., New York, 1971.
- ۸ – فرخ حبیبی اشرفی، « بهره‌برداری اقتصادی از سیستم نیروی برق»، نشریه دانشکده فنی، دوره دوم شماره ۲۷، دی‌ماه ۱۳۵۲، صفحات ۳۲۷ - ۳۰۸
- ۹ – فرخ حبیبی اشرفی، « فرمول تلفات انتقال نیرو برای محاسبات دپسپاچینگ اقتصادی»، نشریه دانشکده فنی، دوره دوم شماره ۳۰، دی‌ماه ۱۳۵۳، صفحات ۱۴۶ - ۱۱۲
- 10 – L. A. Zadeh, C.A. Desoer, «Linear System Theory -The State Space Approach», Mc Graw - Hill Book Co., New York, 1963.
- 11 – IEEE Power Engineering Society, «Symposium on Adequacy and Philosophy of Modeling: Dynamic System Performance», 1975 Winter Meeting, Publication No. 75 CHO975-4-PWR
- 12 – IEEE Committee Report, «Dynamic Models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies», IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-92, No. 6, Nov./Dec. 1973, pp. 1904--1915.

- ۱۳ - کمال تابا ، « اصول تنظیم خودکار تولید و انتقال نیرو در شبکه های بهم پیوسته » ، نشریه دانشکده فنی ، دوره دوم شماره ۳۲ ، مهرماه ۱۳۵۴ ، صفحات ۲۷ - ۱۴
- 14—M.A. Eggenberger, «A Simplified Analysis of No Load Stability of Mechanical-Hydraulic Speed Control System for Steam Turbines» , ASME paper 60—WA—34 , Dec. 1960.
- ۱۵ - مهدی رفیعیان ، « هایداری سیستم های الکتریکی » ، نشریه دانشکده فنی ، دوره دوم شماره ۱ ، دی ماه ۱۳۴۸ ، صفحات ۱۲۶ - ۹۰
- ۱۶ - کمال تابا ، « سرو مکانیسم : اصول مقدماتی و تئوری عمومی سیستم های خطی با مدار برگشت » ، انتشارات دانشگاه تهران ، تهران ، ۱۳۴۷
- 17—N. Cohn , S.B. Biddle , Jr. , R. G. Lex , Jr. , E.H. Preston , C. W. Ross , and D.R. Whitten, On - Line Computer Applications in the Electric Power Industry » , Proc. of the IEEE, Vol. 58 , No. 1 , Jan. 1970 , pp. 78—87.
- 18 - W. G. Beyer , H.J. Fiedler , and L. Kirchmayer , « Digital Computer Dispatching Systems » , PICA Conf. Proc. , 1963 , pp. 52 - 69.
- ۱۹ - کمال تابا ، « سیستم های فرمان خودکار ( جلد دوم سرو مکانیسم ) ، انتشارات دانشگاه تهران ، تهران ، ۱۳۵۱
- 20 - C.W.Ross , « A Comprehensive Direct - Digital Load - Frequency Controller » , PICA Conf. Proc. , 1967 , pp. 231 - 238.
- 21 - L.H. Fink , Concerning Power System Control Structures » , ISA , Advances in Instrumentation , Vol. 26 , Part 1 , Oct. 1971 , pp. 1—11.