

فصل پنجم

کنترل توان اکتیو و راکتیو

۱-۵ مقدمه

در یک سیستم قدرت ایده‌آل، فرکانس ثابت است و ولتاژ نقاط مختلف آن در محدوده مناسبی کنترل می‌گردد. در مباحث قبلی، وابستگی توان راکتیو به ولتاژ را در یک سیستم مشاهده کردیم. بنابر این می‌توان ولتاژ و توان راکتیو را همزمان و در یک کانال کنترل نمود. همچنین دیدیم که تغییرات توان اکتیو به زاویه قدرت (δ) بستگی داشته و تقریباً مستقل از ولتاژ است. در این فصل خواهیم دید که زاویه δ بر اثر تغییر سرعت و فرکانس ماشین تغییر می‌نماید و لذا قدرت اکتیو، زاویه قدرت و فرکانس در یک کانال قابل کنترل می‌باشند. برای آشنائی بیشتر با این دو کانال کنترل، هر یک را بطور مشروح معرفی می‌کنیم.

۱-۱-۵ معرفی کانال کنترل توان راکتیو و ولتاژ

توان راکتیو یکی از مهمترین عواملی است که در طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت AC منظور می‌گردد. علاوه بر بارها، اغلب عناصر یک شبکه مصرف‌کننده توان راکتیو هستند. بنابر این باید توان راکتیو در بعضی نقاط سیستم تولید و به محل‌های مورد نیاز منتقل شود.

در خطوط انتقال دیدیم که قدرت راکتیو انتقالی یک خط، به اختلاف ولتاژ ابتدا و انتهای خط بستگی دارد. همچنین با افزایش دامنه ولتاژ شین ابتدائی خط، قدرت راکتیو جدا شده از این شین افزایش می‌یابد. در فصل (۲) مشاهده کردیم که قدرت راکتیو تولید شده توسط ژنراتور، به تحریک آن بستگی داشته و با تغییر نیروی محرکه ژنراتور می‌توان میزان قدرت راکتیو تولیدی و یا مصرفی آنرا تنظیم نمود. در یک سیستم بهم پیوسته نیز با انجام پخش بار در وضعیت‌های مختلف می‌توان دید که تزریق قدرت راکتیو به یک شین، ولتاژ همه شین‌ها را بالا می‌برد و بیش

از همه روی ولتاژ همان شین تأثیر می‌گذارد، لیکن تأثیر زیادی بر زاویه ولتاژ شین‌ها و فرکانس سیستم ندارد. بنابر این قدرت راکتیو و ولتاژ در یک کانال کنترل می‌شوند که آنرا کانال کنترل QV، قدرت راکتیو - ولتاژ، یا مگاوار - ولتاژ می‌نامیم.

در عمل تجهیزات یک سیستم قدرت برای ولتاژ مشخصی، ولتاژ نامی، طراحی می‌شوند. اگر ولتاژ از مقدار نامی خود منحرف شود ممکن است باعث صدمه رساندن به تجهیزات سیستم و یا کاهش عمر آنها گردد. برای مثال گشتاور یک موتور القائی با توان دوم ولتاژ ترمینالهای آن متناسب است و یا شار نوری یک لامپ مستقیماً با ولتاژ آن تغییر می‌نماید. بنابر این تثبیت ولتاژ نقاط یک سیستم از لحاظ اقتصادی کاملاً ضروری است. بدیهی است که کنترل و تثبیت ولتاژ تمام نقاط سیستم از لحاظ اقتصادی عملی نمی‌باشد. از طرف دیگر کنترل ولتاژ در حد کنترل فرکانس ضرورت نداشته و در بسیاری از سیستم‌ها خطای ولتاژ در محدوده $\pm 0.5\%$ تنظیم می‌شود.

توان راکتیو مصرفی بارها در ساعات مختلف در حال تغییر است، لذا ولتاژ و توان راکتیو باید دائماً کنترل شوند. در ساعات پربار، بارها قدرت راکتیو بیشتری مصرف می‌کنند و نیاز به تولید قدرت راکتیو زیادی در شبکه می‌باشد. اگر قدرت راکتیو مورد نیاز تأمین نشود اجباراً ولتاژ نقاط مختلف شبکه کاهش یافته و ممکن است از محدوده مجاز خارج شود. نیروگاهها دارای سیستم کنترل ولتاژ هستند که کاهش ولتاژ را حس کرده و فرمان کنترل لازم را برای بالا بردن تحریک ژنراتور و در نتیجه افزایش ولتاژ ژنراتور تا سطح ولتاژ نامی صادر می‌کنند. با بالا بردن تحریک (حالت کار فوق تحریک) قدرت راکتیو توسط ژنراتورها تولید می‌شود. لیکن قدرت راکتیو تولیدی ژنراتورها بخاطر مسائل حرارتی سیم‌پیچ‌ها محدود بوده و ژنراتورها به تنهایی نمی‌توانند در ساعات پربار تمام قدرت راکتیو مورد نیاز سیستم را تأمین کنند. بنابراین در این ساعات به وسائلی نیاز است که بتوانند قدرت راکتیو به شبکه تزریق نمایند تا سطوح ولتاژ در محدوده مجاز قرار گیرند.

در ساعات کم بار، بارها و عناصر شبکه، قدرت راکتیو کمی مصرف می‌نمایند و کاپاسیتانس خطوط انتقال باعث اضافه شدن قدرت راکتیو تولیدی در شبکه می‌گردد. در این حالت ژنراتورها بصورت زیر تحریک بکار افتاده و مقداری از قدرت راکتیو اضافی سیستم را مصرف می‌نمایند. لیکن بخاطر ملاحظات پایداری، قدرت راکتیو مصرفی ژنراتورها نیز محدود بوده و ژنراتورها نمی‌توانند به تنهایی مسأله قدرت راکتیو اضافی و افزایش ولتاژ ناشی از آنرا حل کنند. بنابر این به وسائلی که بتوانند در این ساعات قدرت راکتیو اضافی سیستم را مصرف نمایند نیاز می‌باشد.

وسائلی را که برای کنترل توان راکتیو ولتاژ بکار می‌روند "جبران کننده" ^(۱) می‌نامیم. همانطوریکه ملاحظه می‌شود توازن قدرت راکتیو در سیستم، تضمینی بر ثابت بودن ولتاژ، و کنترل قدرت راکتیو بمنزله کنترل ولتاژ می‌باشد.

۲-۱-۵ معرفی کانال کنترل توان اکتیو و فرکانس

قدرت اکتیو هنگام نیاز باید تولید شود و چون مصرف بارها در ساعات مختلف شبانه روز تغییر می‌نماید، لذا قدرت تولیدی ژنراتورها نیز باید کنترل گردد. قدرت خروجی یک ژنراتور با تغییر دادن قدرت مکانیکی ورودی آن کنترل می‌شود. برای این کار با باز کردن یا بستن شیر بخار ^(۲) و یا دریچه آب ^(۳)، جریان بخار و یا آب روی توربین تنظیم شده و باعث کنترل قدرت مکانیکی و در نتیجه قدرت اکتیو خروجی ژنراتور می‌گردد. اگر قدرت مصرفی بار افزایش یابد، باید شیر بخار و یا دریچه آب بیشتر باز شود که بهمان میزان قدرت تولیدی ژنراتور افزایش داده شود، و چنانچه قدرت مصرفی بار کاهش یابد، باید شیر بخار و دریچه آب تا حدی بسته شود که بهمان نسبت باعث کاهش قدرت تولیدی ژنراتور شده و در نتیجه توازن قدرت اکتیو برقرار گردد.

عدم توازن قدرت، از تأثیر آن بر سرعت و یا فرکانس ژنراتور حس می‌گردد. در صورت کاهش بار و اضافه بودن تولید، ژنراتور تمایل به افزایش سرعت و فرکانس خود دارد، و در صورت افزایش بار و کمبود تولید، سرعت و فرکانس ژنراتور رو به کاهش می‌رود. انحراف فرکانس از مقدار نامی آن بعنوان سیگنالی جهت تحریک سیستم کنترل اتوماتیک انتخاب می‌شود. توازن قدرت اکتیو بمنزله ثابت بودن فرکانس سیستم است که این موضوع به نوبه خود دارای اهمیت فراوانی می‌باشد.

اگر فرکانس ژنراتور را در شرایط ماندگار با f° و ولتاژ آنرا با $V^\circ = |\underline{V}^\circ|$ نشان دهیم، معادله ولتاژ را می‌توانیم بصورت زیر بنویسیم:

$$V = \sqrt{2} |V^\circ| \sin(\omega^\circ t + \delta^\circ) \quad (5-1)$$

که در آن $\omega^\circ = 2\pi f^\circ$ فرکانس زاویه‌ای ماشین در حالت ماندگار است.

برآثر یک تغییر کوچک و آرام در سیستم، تغییرات دینامیکی در فرکانس و ولتاژ بوجود می‌آید و مدت زمانی طول می‌کشد تا سیستم به حالت ماندگار جدید برسد. در این فاصله زمانی، زاویه قدرت و ولتاژ متغیر بوده و از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$\delta = \delta^{\circ} + \Delta\delta$$

$$|V| = |V^{\circ}| + \Delta |V| \quad (5-2)$$

در اینجا $\Delta\delta$ و $\Delta|V|$ بترتیب خطای زاویه قدرت و خطای ولتاژ می‌باشند که در حالت دینامیک سیستم، مقادیر آنها متغیر است. بنابر این معادله ولتاژ در حالت دینامیک را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$v = \sqrt{2} (|V^{\circ}| + \Delta|V|) \sin(\omega^{\circ} + \delta^{\circ} + \Delta\delta) \quad (5-3)$$

و از اینجا فرکانس زاویه‌ای ω در شرایط دینامیک برابر است با:

$$\omega = \frac{d}{dt} (\omega^{\circ} + \delta^{\circ} + \Delta\delta) = \omega^{\circ} + \frac{d}{dt} \Delta\delta$$

و یا:

$$\Delta\omega = \omega - \omega^{\circ} = \frac{d}{dt} \Delta\delta \quad (5-4)$$

اگر فرکانس در حالت دینامیک را با f نشان دهیم، داریم:

$$\omega = 2\pi f$$

$$\Delta\omega = 2\pi\Delta f \quad (5-5)$$

با جایگزینی $\Delta\omega$ در رابطه (5-4) خواهیم داشت:

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \Delta\delta \quad (5-6)$$

این رابطه نحوه تغییر فرکانس Δf برحسب تغییر زاویه قدرت $\Delta\delta$ و بالعکس را نشان می‌دهد. قبلاً دیدیم که تغییرات قدرت اکتیو به زاویه قدرت بستگی دارد. بنابر این قدرت اکتیو، زاویه

قدرت و فرکانس در یک کانال کنترل می‌شوند که آنرا کانال کنترل Pf ، قدرت - فرکانس^(۱)، و یا مگاوات - فرکانس می‌نامیم. سیستم کنترل مربوطه نیز به سیستم کنترل اتوماتیک بار - فرکانس^(۲)، LFC، معروف است.

حلقه کنترل LFC فقط به تغییرات کم دامنه و آرام بار و فرکانس پاسخ می‌دهد و در شرایط اضطراری و عدم توازن قدرت ناشی از آن قادر به کنترل نمی‌باشد. کنترل سیستم در شرایط اضطراری و تغییرات ناگهانی با مطالعه پایداری گذرا و حفاظت سیستم‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

کنترل توان راکتیو جزو مباحث درس بررسی سیستم‌های قدرت ۲ نمی‌باشد، لیکن برای آشنائی دانشجویان با این مبحث پراهمیت، در این فصل بطور خلاصه مطالبی را در مورد آن بیان خواهیم کرد و بقیه فصل را به مطالعه کنترل توان اکتیو و فرکانس اختصاص خواهیم داد.

۲-۵ کنترل توان راکتیو و ولتاژ

بطور کلی کنترل توان راکتیو و ولتاژ از سه روش اصلی زیر انجام می‌شود:

- ۱- با تزریق توان راکتیو به سیستم توسط جبران‌کننده‌هایی که بصورت موازی متصل می‌شوند (مانند خازن - راکتور - کندانسور سنکرون و جبران‌کننده‌های استاتیک).
- ۲- با جابجا کردن قدرت راکتیو در سیستم توسط ترانسفورماتورهای متغیر.
- ۳- از طریق کم کردن راکتانس القائی خطوط انتقال با نصب خازن سری.

قبل از بررسی روش‌های فوق‌الذکر، سیستم کنترل ولتاژ ژنراتورها را مطالعه می‌کنیم، گرچه در دسته‌بندی سه‌گانه فوق، کنترل ولتاژ و قدرت راکتیو ژنراتورها می‌تواند در دسته اول قرار گیرد.

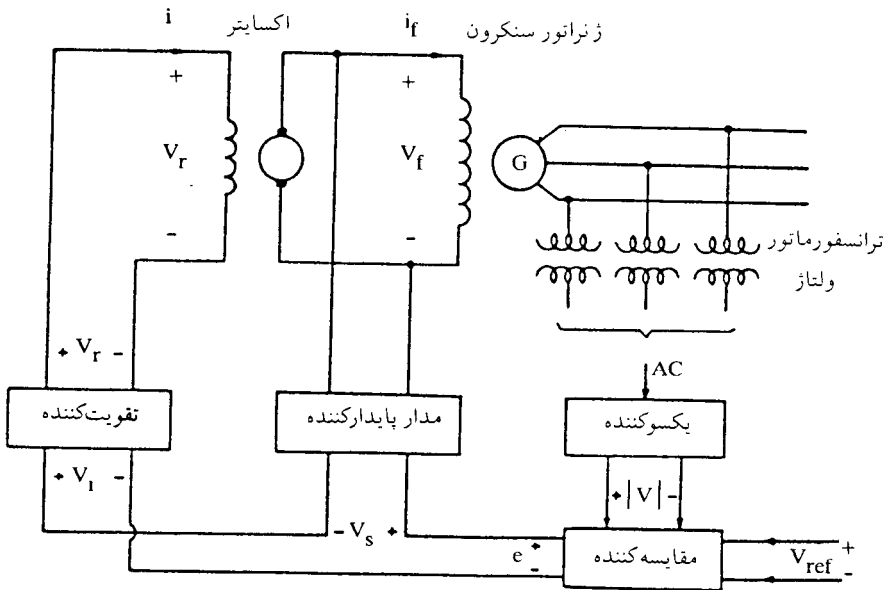
۱-۲-۵ سیستم کنترل ولتاژ ژنراتورها

جریان تحریک ژنراتورها معمولاً بوسیله یک ژنراتور DC (اکسایتر)^(۳) که توسط یک موتور و یا محور توربین - ژنراتور می‌گردد تأمین می‌شود. یکسوکننده‌ها^(۴) و واحدهای تریستوری^(۵) که ولتاژهای AC را به DC تبدیل می‌کنند به طرق مختلف در سیستم کنترل ولتاژ

بکار می‌روند. همچنین مقایسه‌کننده‌ها^(۱)، حلقه‌های فیدبک و تقویت‌کننده‌ها^(۲) نیز با انواع روش‌های موجود در این سیستم بکار گرفته می‌شوند. سیستم کامل کنترل ولتاژ به "رگولاتور اتوماتیک ولتاژ"^(۳) AVR، موسوم است.

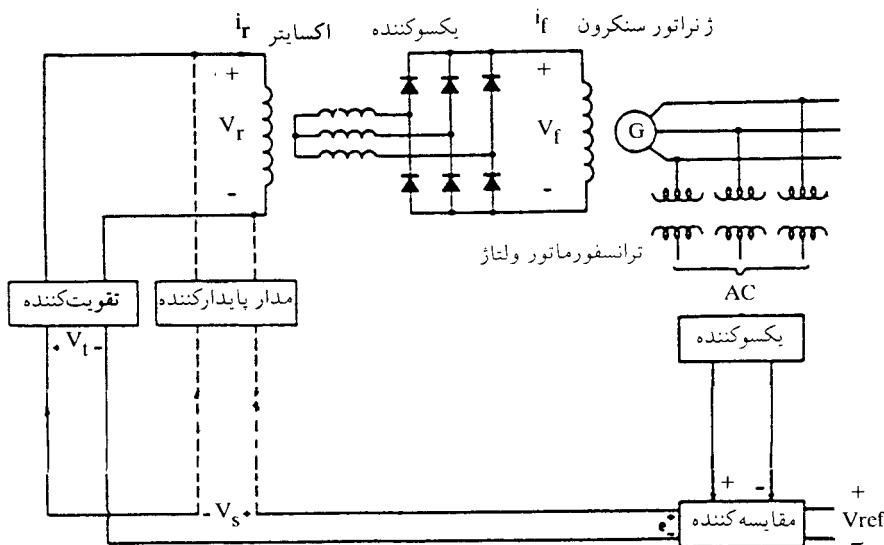
یکی از انواع سیستم‌های AVR در شکل (۱-۵) نشان داده شده است. ولتاژ اندازه‌گیری شده و یکسو شده ژنراتور $|V|$ با ولتاژ مرجع^(۴) مقایسه می‌شود و خطای حاصله پس از تقویت به میدان تحریک یک نوع ژنراتور DC با ضریب تقویت بالا موسوم به آمپلیدین^(۵) اعمال می‌گردد. آمپلیدین (اکسایتر) میدان اصلی ژنراتور را تحریک و کنترل می‌کند.

چنانچه ولتاژ ژنراتور نسبت به مقدار نامی آن کاهش یابد، خطای ولتاژ $e = V_{ref} - |V|$ مثبت بوده و این خطا پس از تقویت، باعث افزایش جریان تحریک آمپلیدین و در نتیجه افزایش تحریک ژنراتور شده و ولتاژ ژنراتور را افزایش می‌دهد و این کار تا رسیدن ولتاژ ژنراتور به مقدار نامی ادامه می‌یابد.



شکل ۱-۵: شمای یک نوع سیستم AVR

در مدار AVR ثابت زمانی های تقویت کننده و سیستم اکسایتر نسبتاً زیاد بوده و بترتیب حدود ۱/۰ ثانیه و ۱ ثانیه می باشند. ثابت زمانی مدار تحریک ژنراتور نیز حدود چند ثانیه است. این سه ثابت زمانی، بخصوص ثابت زمانی مدار تحریک می توانند سیستم را ناپایدار کنند. برای پایدار کردن و کاهش ثابت زمانی کل سیستم معمولاً از مدار پایدار کننده^(۱) استفاده می شود. مدارهای پایدار کننده دارای انواع مختلف هستند و طرح اغلب آنها طوری است که مانند یک مشتق گیر عمل کرده و باعث تسریع در پاسخ مدار و پایدار شدن سیستم می گردد. بطور کلی ثابت زمانی کل سیستم کنترل ولتاژ AVR در مقایسه با ثابت زمانی سیستم کنترل بار-فرکانس LFC بسیار کمتر بوده و بر اثر اختلالات کم دامنه، حلقه کنترل ولتاژ با سرعت خوبی پاسخ می دهد، در حالیکه پاسخ حلقه کنترل LFC چند ثانیه بطول می انجامد. سیستم های اکسایتر جدید معمولاً بدون جاروبک^(۲) بوده و در آنها از عناصر ساکن (غیردوار) استفاده می شود. یکی از معمول ترین و مدرن ترین سیستم های کنترل ولتاژ AVR بدون جاروبک در شکل (۲-۵) نشان داده شده است.



شکل ۲-۵: سیستم کنترل ولتاژ AVR بدون جاروبک

در این سیستم، اکسایتر شامل یک ژنراتور ستنکرون سه فاز است که سیم پیچ‌های سه فاز آن روی رتور، و میدان تحریک آن روی استاتور قرار دارند. ولتاژ AC ایجاد شده در سیم پیچ‌های رتور توسط دیودهایی که روی محور گردنده نصب شده‌اند یکسو شده، و ولتاژ DC بدست آمده میدان اصلی ژنراتور را تحریک می‌کند. به این ترتیب در طرح این سیستم، رینگ‌ها و جاروبکها حذف شده‌اند.

۳-۵ کنترل قدرت راکتیو و ولتاژ توسط ترانسفورماتورهای متغیر

ترانسفورماتورهای متغیر یکی از وسائل کنترل قدرت اکتیو و راکتیو در سیستم‌ها می‌باشند. اغلب ترانسفورماتورهای متغیر برای تنظیم دامنه ولتاژ بکار می‌روند. در این صورت قدرت راکتیوی به شبکه تزریق نمی‌شود و فقط قدرت‌های راکتیو موجود در خطوط و دیگر عناصر شبکه جابجا می‌شوند. محدوده کنترل دامنه ولتاژ با ترانسفورماتورهای متغیر حدود $\pm 10\%$ است. بعضی ترانسفورماتورها بمنظور تغییر زاویه فاز مورد استفاده قرار گرفته و در نتیجه قدرت اکتیو را جابجا و کنترل می‌کنند. در بعضی ترانسفورماتورها نیز هر دو کمیت دامنه ولتاژ^(۱) و زاویه فاز^(۲) کنترل می‌شوند.

ترانسفورماتورهای متغیر که دارای تپ چنجر هستند با کنترل نسبت تبدیل در حالت بار داری، ولتاژ را بصورت پله‌ای کنترل می‌کنند. کنترل اتوماتیک تعداد حلقه‌های سیم پیچ‌ها در این ترانسفورماتورها توسط موتورهای الکتریکی و یا کنترل کننده‌های تریستوری انجام می‌شود. از این نوع ترانسفورماتورها برای ثابت نگه داشتن ولتاژ در بعضی شین‌های سیستم توزیع^(۳) و فوق توزیع^(۴) و سیستم شعاعی استفاده می‌گردد.

۴-۵ تزریق قدرت راکتیو به شبکه

در یک سیستم قدرت ایده آل، ولتاژ و فرکانس در شین‌های تولید کننده^(۵) باید مقدار ثابتی بوده و سیستم بدون هارمونی و با ضریب قدرت یک باشد. معمولاً کنترل ولتاژ و ضریب قدرت در مصرف کننده‌ها و خطوط انتقال با تزریق قدرت راکتیو انجام می‌شود. تولید قدرت راکتیو توسط جبران کننده‌ها و تحویل آن به شبکه بمیزان مناسب، باعث بالا رفتن سطوح ولتاژ و اصلاح ضریب قدرت نقاط مورد نظر شبکه شده، و جذب قدرت راکتیو اضافی شبکه توسط جبران کننده‌ها بمیزان مناسب نیز باعث پائین آمدن سطوح ولتاژ خواهد شد.

1- Voltage Magnitude

2- Phase Angle

3- Distribution

4- Subtransmission

5- Generating Bus

معمولاً عبارت "اصلاح ضریب قدرت" ^(۱) هنگامی بکار می‌رود که مسأله جبران کنندگی ^(۲) توان راکتیو یک بار و یا گروهی از بارها مورد نظر باشد. بررسی کنترل توان راکتیو را با جبران کنندگی بار ادامه می‌دهیم.

۱-۴-۵ جبران کنندگی بار ^(۳)

مقصود از جبران کنندگی بار این است که کل توان راکتیو مورد نیاز بار و یا قسمت اعظم آن توسط جبران کننده در محل تأمین شود. هدف‌های جبران کنندگی و روشهایی که برای این کار مورد استفاده قرار می‌گیرد با جبران کنندگی کل سیستم قدرت متفاوت است. هدف‌های اساسی جبران کنندگی بار، اصلاح ضریب قدرت، بهبود ضریب تنظیم ولتاژ ^(۴) و در بعضی موارد متقارن کردن بار ^(۵) می‌باشد.

اغلب بارهای صنعتی دارای ضریب قدرت پس فاز بوده و لذا مصرف کننده قدرت راکتیو هستند. بنابر این جریان بار بیشتر از مقدار مورد نیاز برای مصرف قدرت اکتیو است. علاوه بر پرداخت اضافی برای این جریان، قطر کابل‌ها باید بیشتر انتخاب گردد و تلفات سیستم قدرت نیز بیشتر خواهد شد. از طرف دیگر اگر قدرت راکتیو مورد نیاز این بارها در محل تأمین شود، نیازی به تولید قدرت راکتیو توسط ژنراتورها و انتقال آنها نمی‌باشد.

وسائلی که بعنوان جبران کننده‌های بار استفاده می‌شوند علاوه بر اهداف ذکر شده باید هارمونی‌های اضافی در سیستم ایجاد نکنند، به تغییرات پاسخ سریع بدهند و خود مصرف کننده توان اکتیو نباشند. در بررسی اصلاح ضریب قدرت و تنظیم ولتاژ بار، سیستم قدرت را مطابق شکل (۳-۵) با مدار معادل تونن آن و جبران کننده را با یک امپدانس نشان می‌دهیم. جبران کننده توان راکتیو در یک شین بار برای یکی از دو منظور زیر طراحی و محاسبه می‌شود: الف) اصلاح ضریب قدرت: اگر ادمیتانس بار را با $Y_L = G_L + jB_L$ نشان دهیم و P_L ، Q_L و S_L بترتیب توانهای اکتیو، راکتیو و ظاهری بار باشند، ضریب قدرت بار قبل از نصب جبران کننده برابر است با:

$$\cos \Phi_L = \frac{G_L}{|Y_L|} = \frac{P_L}{S_L} \quad (5-7)$$

توان راکتیو مورد نیاز بار Q_L نیز برحسب P_L عبارتست از:

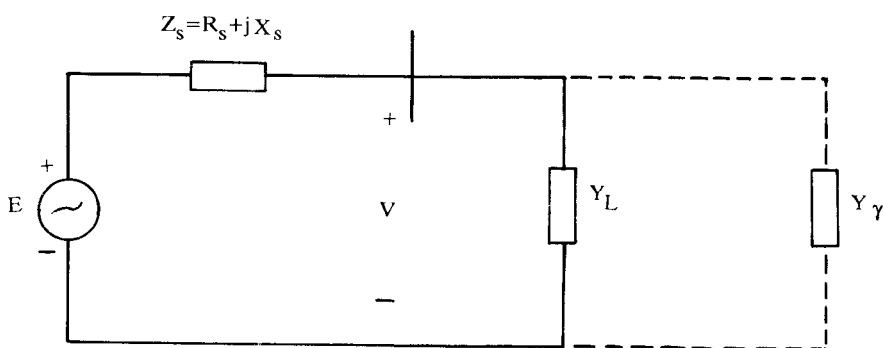
$$Q_L = S_L \sin \Phi_L = \frac{P_L}{\cos \Phi_L} \sin \Phi_L$$

بنابر این:

$$Q_L = P_L \tan \Phi_L$$

از آنجائیکه کل قدرت راکتیو مورد نیاز بار در این حالت توسط جبران کننده تأمین می شود، لذا قدرت راکتیو جبران کننده برابر است با:

$$Q_Y = P_L \tan \Phi_L$$



شکل ۳-۵: جبران کنندگی بار

و در اینصورت ضریب قدرت سیستم از $\cos \Phi_L$ به یک می رسد.
 ب) تنظیم ولتاژ: در شکل (۳-۵) در حالتی که جبران کننده وصل نشده باشد درصد تنظیم ولتاژ (رگولاسیون) طبق تعریف از رابطه زیر تعیین می شود:

$$\% \text{ Reg} = \frac{|E| - |V|}{|V|} \times 100 \quad (۵-۹)$$

در این حالت قدرت جبران کننده Q_Y باید طوری انتخاب شود که با نصب آن، ولتاژ شین بار در حالت بارداری $|V|$ ، با مقدار آن در حالت بی باری $|E|$ برابر باشد. به این تریب درصد تنظیم ولتاژ (رگولاسیون) به صفر می رسد.

بنابر این یک جبران کننده باید طوری طرح شود که یکی از دو منظور (الف) و (ب) را عملی نماید. یعنی یا ضریب قدرت را به یک برساند و یا ولتاژ را ثابت نگاه دارد. از آنجا که مقدار توان راکتیو جبران کننده در دو حالت فوق متفاوت می باشد. لذا یک جبران کننده نمی تواند ضریب قدرت را به یک برساند و همزمان ولتاژ را نیز ثابت نگاه دارد.

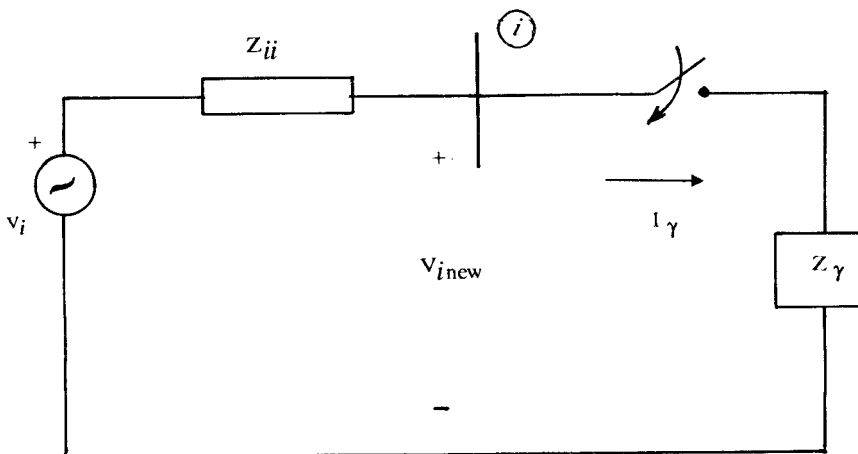
۵-۴-۲ جبران کننده ثابت موازی در سیستم بهم پیوسته

خازن‌ها و راکتورهای موازی جبران کننده‌های ثابتی هستند که برای تولید و یا مصرف توان راکتیو بطور موازی در شین‌های مناسب سیستم قدرت نصب می‌شوند. شکل (۵-۴) مدار معادل تونن یک سیستم قدرت را از دیدگاه شین شماره i نشان می‌دهد. ولتاژ تونن V_i از پخش بار بدست آمده است. امپدانس تونن $Z_{ii} = Z_{ih}$ نیز با استفاده از ماتریس Z_{bus} تعیین می‌گردد. جبران کننده‌ای با قدرت راکتیو (مصرفی) Q_γ و ولتاژ نامی V_γ به شین i متصل شده‌است. راکتانس و امپدانس این جبران کننده عبارتست از:

$$X_\gamma = \frac{V_\gamma^2}{Q_\gamma} \quad (5-10)$$

$$Z_\gamma = \pm jX_\gamma \quad (5-11)$$

در این رابطه علامت مثبت برای راکتور و علامت منفی برای خازن بکار می‌رود. راکتور مصرف کننده توان راکتیو بوده و Q_γ برای آن مثبت می‌باشد. خازن نیز تولید کننده توان راکتیو است و Q_γ برای آن منفی در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۵-۴: جبران کننده ثابت موازی در سیستم قدرت

ولتاژ شین i پس از نصب جبران کننده از V_i به V_{inew} تغییر می‌یابد. جریان جبران کننده و ولتاژ جدید شین i بترتیب زیر محاسبه می‌شوند:

$$I_{\gamma} = \frac{V_i}{Z_{ij} + Z_{\gamma}} \quad (5-12)$$

$$V_{i_{new}} = V_i - Z_{ij}I_{\gamma} = Z_{\gamma} I_{\gamma} \quad (5-13)$$

ولتاژ شین‌های دیگر سیستم نیز با نصب جبران‌کننده در شین i تغییر می‌نمایند. ولتاژ جدید شین j برابر است با:

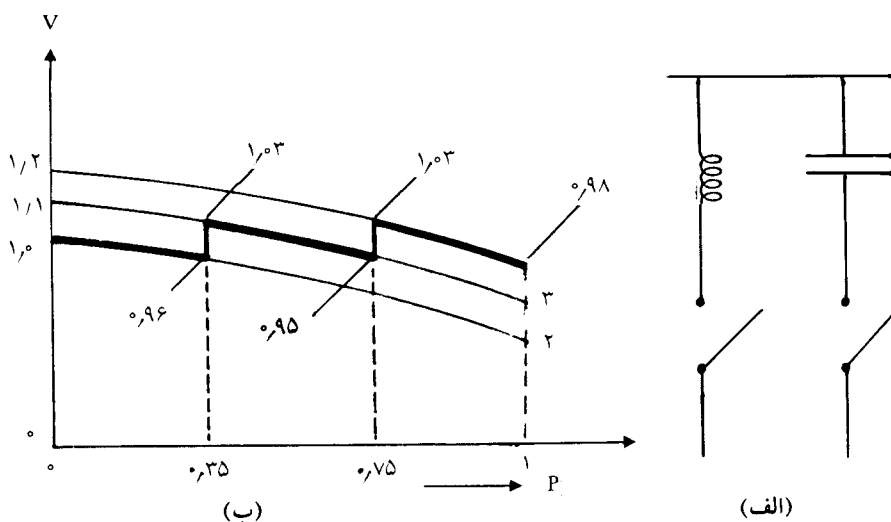
$$V_{j_{new}} = V_j - Z_{ji}I_{\gamma} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (5-14)$$

که در آن V_j ولتاژ شین شماره j قبل از نصب جبران‌کننده و Z_{ji} عنصر موجود در سطر j و ستون i از ماتریس Z_{bus} می‌باشد.

برای محاسبات دقیق سیستم و تعیین پخش قدرت‌ها می‌توان Q_{γ} را در Q_D (قدرت راکتیو مصرفی بار) تأثیر داد و پخش بار سیستم را با $Q_{D_{new}} = Q_D + Q_{\gamma}$ انجام داد تا ولتاژ شین‌ها و پخش قدرت‌ها را بدست آورد. همچنین می‌توان X_{γ} را در ماتریس Y_{bus} تأثیر داد و پخش بار را با Y_{bus} جدید انجام داد.

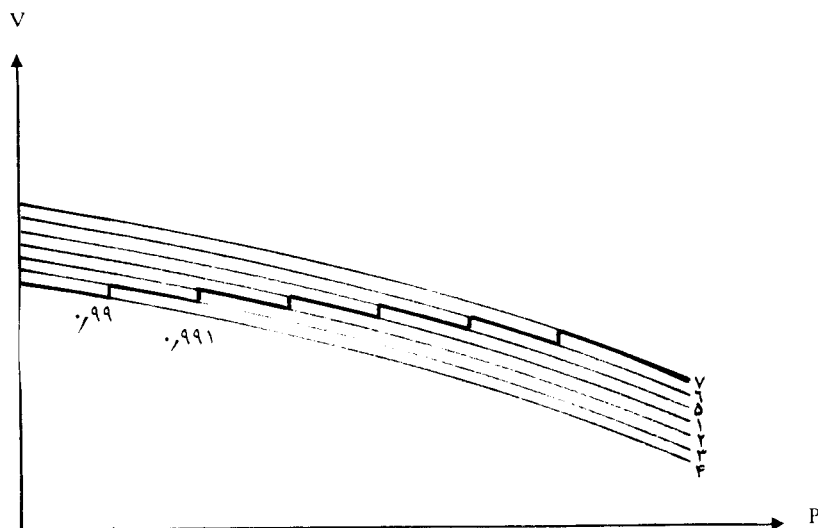
کنترل ولتاژ با استفاده از جبران‌کنندگی ثابت موازی بطریق فوق‌الذکر فقط در یک پله انجام می‌شود. برای کنترل مناسب ولتاژ، معمولاً از جبران‌کنندگی ثابت کنترل شده ^(۱) استفاده می‌شود که در آن خازن و راکتور هنگام لزوم قطع و وصل می‌شوند. شکل (۵-۵الف) اتصال خازن و راکتور کنترل شده را به شین مورد نظر نشان می‌دهد. کلیدهای نشان داده شده به حلقه‌های کنترل مربوط هستند و برای کار مناسب سیستم قطع و وصل می‌شوند. دیاگرام کنترل ولتاژ مربوطه نیز در شکل (۵-۵ب) نشان داده شده‌است.

منحنی ۱ مربوط به شرایط کار سیستم بدون جبران‌کننده و منحنی‌های ۲ و ۳ بترتیب برای جبران‌کنندگی با راکتور و خازن می‌باشند. همانطوریکه در شکل مذکور دیده می‌شود، از بی‌باری تا ۳۵٪ بار نامی راکتور متصل است. هنگامی که بار به ۳۵٪ مقدار نامی می‌رسد ولتاژ تا ۹۶PU/۰ کاهش یافته‌است. در اینجا راکتور قطع شده و ولتاژ بصورت پله‌ای به ۱/۰۳PU می‌رسد. از ۳۵٪ تا ۷۵٪ بار نامی، سیستم بدون جبران‌کننده کار می‌کند و ولتاژ از ۱/۰۳PU به ۹۵PU/۰ می‌رسد. در ۷۵٪ بار نامی خازن وصل می‌شود و ولتاژ از ۹۵PU/۰ به ۱/۰۳PU افزایش می‌یابد و از این بابت تا رسیدن به بار نامی، ولتاژ از ۱/۰۳PU تا ۹۸PU/۰ متغیر است. به این ترتیب ولتاژ این شین در فاصله ۹۵PU/۰ تا ۱/۰۳PU کنترل شده‌است.



شکل ۵-۵: کنترل ولتاژ بوسیله جبران کنندگی ثابت کنترل شده

برای کنترل دقیق تر می توان حالتی را در نظر گرفت که چندین راکتور و خازن موازی در زمانهای مناسب قطع و وصل می شوند و کنترل ولتاژ در محدوده باریکتری (مثلاً $\pm 1\%$) انجام می شود. شکل (۵-۶) دیاگرام کنترل ولتاژ چنین حالتی را نشان می دهد.

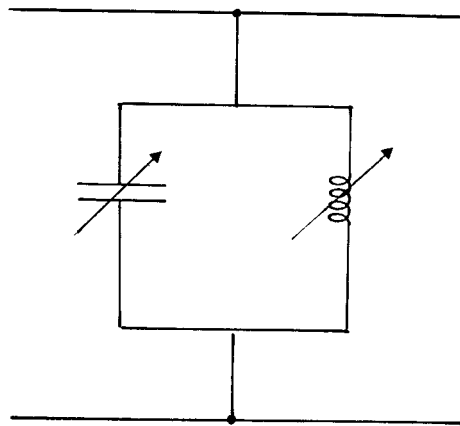


شکل ۵-۶: دیاگرام کنترل ولتاژ با نصب خازنها و راکتورهای چند مرحله ای

منحنی شماره ۱ مشخصه ولتاژ - قدرت را برای حالت بدون جبران کننده نشان می‌دهد. منحنی‌های ۲ و ۳ و ۴ بترتیب مربوط به اتصال یک، دو و سه راکتور، و منحنی‌های ۵ و ۶ و ۷ بترتیب مربوط به اتصال یک، دو و سه خازن می‌باشند.

۳-۴-۵ جبران کننده‌های دینامیک (۱)

کنترل ایده‌آل آنست که مشخصه ولتاژ - قدرت، خط مستقیمی بدون شیب (ولتاژ ثابت) باشد. برای این کار از لحاظ تئوری باید تعداد بی‌نهایت خازن و راکتور بصورت موازی در شین مورد کنترل نصب شده و با کوچکترین تغییر در بار سیستم، قطع و وصل شوند. کنترل و تثبیت ولتاژ بطور لحظه‌ای در عمل توسط کندانسورهای سنکرون (۲) و جبران کننده‌های استاتیک (۳) امکان پذیر است. در حقیقت مدار معادل این جبران کننده‌ها را می‌توان مطابق شکل (۵-۷) بصورت یک ساسپتانس (۴) قابل تنظیم در هر دو جهت خازنی و سلفی در نظر گرفت. در این جبران کننده‌ها، چنانچه ولتاژ در محل اتصال جبران کننده از حدود تعیین شده منحرف شود، مدار کنترل مربوطه ساسپتانس موازی را طوری تغییر می‌دهد که مجدداً ولتاژ به حدود تعیین شده برگردد. از آنجائیکه اصولاً نحوه عمل این جبران کننده‌ها پیوسته و دینامیک می‌باشد، آنها را جبران کننده‌های دینامیک می‌نامند.



شکل ۵-۷: مدار معادل یک جبران کننده دینامیک

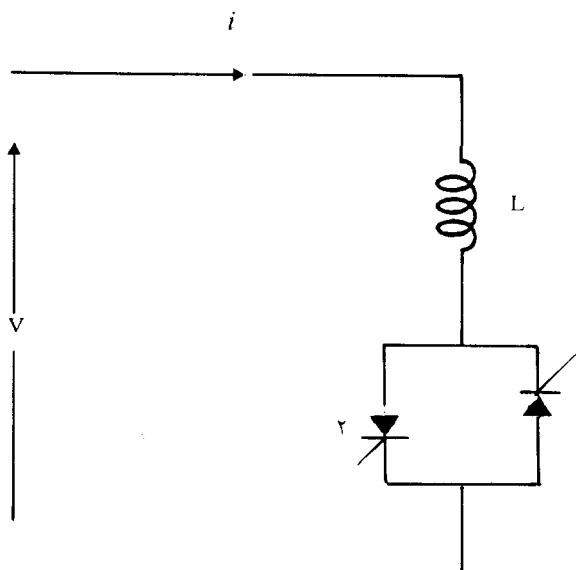
کندانسور سنکرون یک ماشین سنکرون است که پس از راه اندازی، با شبکه سنکرونیزه می شود. مدار کنترل ولتاژ این ماشین، وظیفه اندازه گیری انحراف ولتاژ و کنترل تحریک را بعهده دارد. با کنترل تحریک، ماشین در رژیم های کار مورد نیاز، فوق تحریک و یا زیر تحریک، توان راکتیو تولید و یا جذب می نماید تا ولتاژ ترمینالهای کندانسور را در مقدار ثابتی تنظیم نماید. در حقیقت مدار کنترل ولتاژ در کندانسورهای سنکرون مشابه سیستم کنترل ولتاژ اتوماتیک (AVR) ژنراتورها است که در بخش (۱-۲-۵) مورد بحث قرار گرفت. لیکن در سیستم های قدرت مدرن امروزه، بخاطر کند بودن سرعت پاسخ سیستم کنترل، ظرفیت محدود قدرت راکتیو، مصرف توان اکتیو و همچنین ملاحظات پایداری، از کندانسورهای سنکرون کمتر استفاده می شود.

در حال حاضر استفاده از جبران کننده های استاتیک در سیستم ها رو به افزایش است. در این جبران کننده ها عمل کنترل ولتاژ توسط یک ساسپتانس قابل کنترل انجام می شود. مدار کنترل این جبران کننده ها ولتاژ را اندازه گیری نموده و فرمان کنترل از طریق پالس هایی با زاویه آتش مناسب، کنترل کننده های تریستوری را بکار می اندازند و عمل کنترل ساسپتانس با کنترل زاویه آتش تریستورها انجام می شود. از آنجا که این جبران کننده ها دارای قطعات دوار نیستند (وبه همین علت استاتیک نامیده می شوند)، مسأله پایداری ندارند. از طرف دیگر سرعت پاسخ آنها بسیار خوب بوده (یک تا دو سیکل) و توان اکتیو ناچیزی مصرف می نمایند. جبران کننده های استاتیک دارای انواع زیادی هستند. مهمترین آنها عبارتند از:

- ۱- راکتور کنترل شده با تریستور $TCR^{(۱)}$
- ۲- خازن سویچ شده با تریستور $TSC^{(۲)}$
- ۳- راکتور اشباع شده $SR^{(۳)}$

ساختمان TCR بطور شماتیک در شکل (۵-۸) نشان داده شده است. عنصر کنترل کننده، مدار کنترل کننده تریستوری است و شامل دو تریستور موازی است که قطب های غیر همنام آنها بهم متصل شده اند.

اگر تریستور شماره ۱ در زاویه آتش $\alpha = 90^\circ$ و تریستور ۲ در زاویه آتش $\alpha = 270^\circ$ روشن شوند هدایت کامل صورت می گیرد و اگر تریستورها بترتیب در زاویه های آتش 90° تا 180°

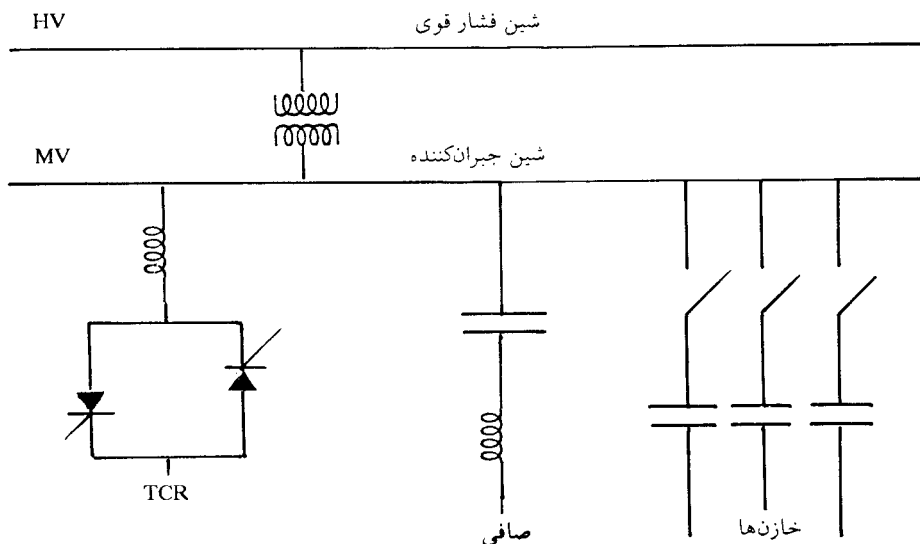


شکل ۵-۸: شمای راکتور کنترل شده با تریستور TCR

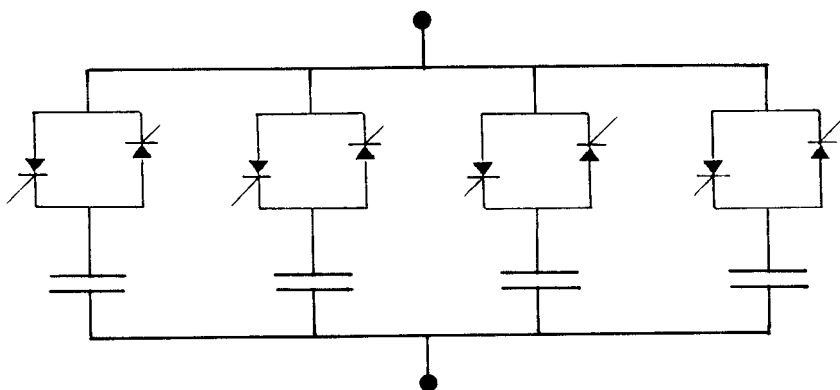
۲۷۰° تا ۳۶۰° روشن شوند هدایت ناقص بوده و مقدار مؤثر جریان کمتر خواهد بود و این بمنزله افزایش اندوکتانس و کاهش قدرت راکتیو مصرفی راکتور است. بنابراین این TCR یک ساسپتانس قابل کنترل بوده که حداقل اندوکتانس آن L بوده و تا حدود مورد نیاز قابل افزایش می باشد.

جریان TCR همیشه پس فاز بوده و TCR فقط قدرت راکتیو مصرف می کند. اگر یک خازن با TCR موازی شود می تواند ضریب قدرت پیش فاز نیز برای جبران کننده ایجاد کند و قدرت راکتیو کنترل شده به شبکه تزریق نماید. برای کنترل بیشتر و بهتر می توان چند خازن موازی با TCR را قطع و وصل نمود. شمای اتصال این جبران کننده استاتیک که به TCR/FC ^(۱) موسوم است در شکل (۵-۹) نشان داده شده است. در این شکل صافی نشان داده شده برای حذف هارمونی های ایجاد شده توسط TCR می باشد.

در خازن سویچ شده با تریستور TSC، ساسپتانس قابل تنظیم با کنترل تعداد خازنهایی که بطور اتوماتیک با کلیدهای تریستوری قطع و وصل می شوند بدست می آید. به این ترتیب کنترل ساسپتانس فقط بصورت پله ای انجام می شود. در شکل (۵-۱۰) مدار یک فاز این جبران کننده نشان داده شده است.



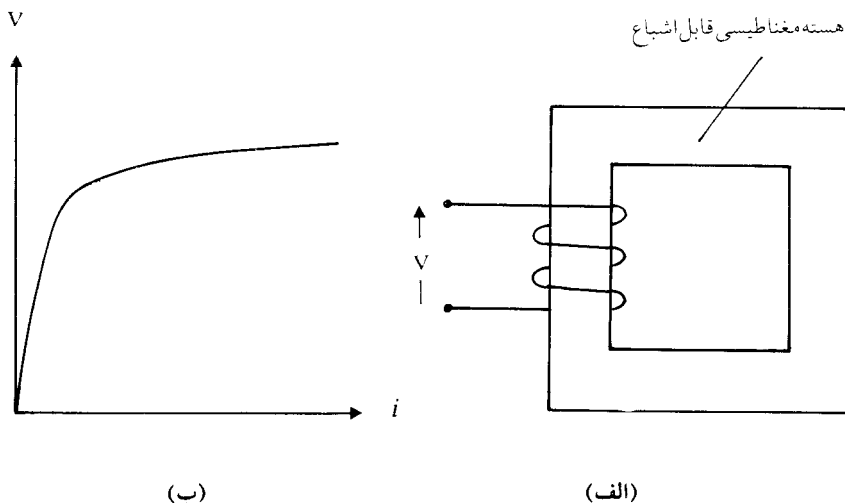
شکل ۹-۵: شمای اتصال TCR/FC به شبکه قدرت



شکل ۱۰-۵: اساس کار TSC

مدار کنترل اتوماتیک TSC، با اندازه‌گیری ولتاژ، فرمان لازم را به تریستورهایی که باید خازن‌ها را قطع و یا وصل نمایند صادر می‌کند. اگر ولتاژ از "محدوده کنترل ولتاژ" کمتر باشد خازن‌ها یکی پس از دیگری وصل می‌شوند تا جائیکه ولتاژ به محدوده کنترل برگردد، و اگر ولتاژ بیشتر از محدوده کنترل باشد تعدادی از خازن‌ها قطع می‌شوند تا ولتاژ مجدداً به محدوده قابل قبول کنترل برگردد.

شکل (۱۱-۵ الف) ساختمان راکتور اشباع شده SR را نشان می‌دهد. وسیله کنترل در این جبران کننده یک هسته مغناطیسی قابل اشباع است که مشخصه ولتاژ - جریان آن در شکل (۱۱-۵ ب) نشان داده شده است. مشخصه TCR نیز تقریباً شبیه مشخصه SR می‌باشد.



شکل ۱۱-۵: ساختمان راکتور اشباع شده و مشخصه ولتاژ - جریان آن

۵-۵ خازن سری^(۱)

- نصب خازن سری در یک خط انتقال بلند باعث کاهش راکتانس القایی خط شده و نتایج زیر را بدست خواهد داد:
- الف) افزایش قدرت انتقالی ماکزیمم و بهبود پایداری ماندگار
 - ب) افزایش بار طبیعی خط
 - ج) کاهش زاویه انتقال در یک قدرت داده شده
 - د) کاهش تلفات خط
 - ه) کاهش افت ولتاژ در طول خط
 - و) بهبود پایداری گذرا
 - ز) کاهش حساسیت ولتاژ به اختلالات در حالت گذرا

رابطه زیر درجه جبران کنندگی سری $K_{sc}^{(1)}$ را تعریف می نماید:

$$K_{sc} = \frac{X_{cy}}{X_L} \quad (5-15)$$

که در آن X_L راکتانس القائی خط و X_{cy} راکتانس خازن سری می باشد. اگر مقدار K_{sc} زیاد و نزدیک عدد یک انتخاب شود، راکتانس سری خیلی کم شده و جریان آن بسیار زیاد می شود. از طرف دیگر ممکن است رزونانس سری ایجاد شود که در اینصورت کنترل ولتاژها و جریانهای حالت گذرا بر اثر اختلالات بوجود آمده بسیار مشکل خواهد بود. معمولاً K_{sc} در حدود ۰/۲۵ تا ۰/۷ انتخاب می شود. راکتانس خط با اضافه شدن خازن سری برابر است با:

$$X = X_L - X_{cy} = X_L - K_{sc} X_L = X_L (1 - K_{sc})$$

چنانچه از کاپاسیتانس خط صرف نظر کنیم، با جایگزین کردن راکتانس X در رابطه انتقال قدرت خط انتقال داریم:

$$P = \frac{|V_s| |V_r|}{X_L(1 - K_{sc})} \sin \delta \quad (5-16)$$

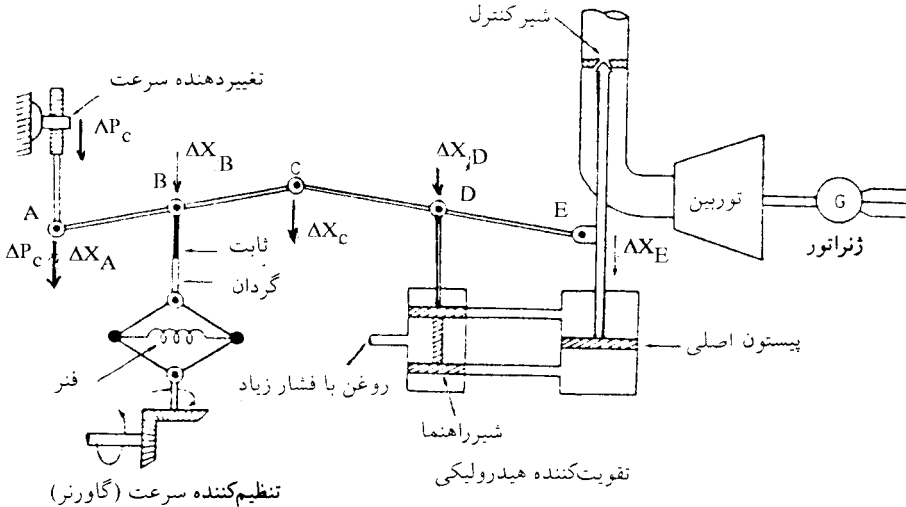
که در آن $|V_s|$ و $|V_r|$ به ترتیب ولتاژهای ابتدا و انتهای خط انتقال می باشند. این رابطه نشان می دهد که قدرت انتقالی ماکزیمم با افزایش درجه جبران کنندگی سری افزایش می یابد. همچنین در قدرت داده شده P ، زاویه δ کاهش می یابد و این دو عامل باعث افزایش پایداری ماندگار و پایداری گذرای سیستم خواهند شد. درحقیقت نقش اصلی خازن سری در بهبود پایداری خطوط انتقال بلند است.

۵-۶ کنترل توان اکتیو و فرکانس

سیستم کنترل مربوط به کانال PF (قدرت اکتیو - فرکانس) به سیستم کنترل بار - فرکانس، LFC، معروف است. قسمت اصلی سیستم کنترل بار - فرکانس، سیستم تنظیم سرعت^(۱) می باشد که انحراف فرکانس را دریافت کرده و آنرا به عکس العمل مناسبی جهت کنترل بخار و یا آب ورودی به توربین تبدیل می نماید. در این بخش ابتدا مدل دینامیک این سیستم را بررسی می کنیم. سپس ارتباط آنرا با وضعیت دینامیک توربین و ژنراتور مطالعه می کنیم و بعد از آن حلقه کنترل را برای از بین بردن خطای فرکانس تکمیل می کنیم.

۵-۶-۱ سیستم تنظیم سرعت

در شکل (۵-۱۲) سیستم تنظیم سرعت توربین بطور شماتیک نشان داده شده است. با کنترل موقعیت X_E ، شیر کنترل^(۲) بخار (و یا درجه آب در توربین آبی)، می توان جریان بخار (و یا آب) با فشار زیاد را بطرف توربین کنترل نمود. با پائین آمدن نقطه E، جریان بخار (و یا آب) بطرف توربین افزایش یافته و باعث افزایش قدرت خروجی ژنراتور بمیزان ΔP_T می گردد.



شکل ۵-۱۲: شمای سیستم تنظیم سرعت ژنراتور

برای تغییر دادن وضعیت شیر کنترل به نیروی مکانیکی زیادی نیاز است. این نیروی مکانیکی از چندین طبقه تقویت کننده هیدرولیکی^(۱) تأمین می شود. در شکل (۱۲-۵) فقط یک طبقه از این تقویت کننده ها نشان داده شده است. ورودی این تقویت کننده موقعیت X_D مربوط به شیر راهنما^(۲) و خروجی آن موقعیت X_I مربوط به پیستون اصلی^(۳) است.

بنابر این کنترل این سیستم باید طوری باشد که در هر صورت منجر به تغییر وضعیت در نقطه D گردد تا بتوان از آن طریق میزان بخار (یا آب) ورودی به توربین و در نتیجه سرعت و قدرت ژنراتور را کنترل نمود. نقطه D از سه طریق قابل کنترل است:

الف) توسط تغییر دهنده سرعت^(۴): در شکل (۱۲-۵) تغییر دهنده سرعت در سمت چپ نشان داده شده است. با حرکت این تغییر دهنده بطرف پائین، بخار ورودی به توربین افزایش، و با حرکت آن به طرف بالا بخار ورودی به توربین کاهش می یابد. به این ترتیب که با پائین آمدن تغییر دهنده سرعت، نقطه A نیز بطرف پائین کشیده می شود. نقطه B ثابت است. بنابر این نقطه C بالا رفته و نقطه D را هم با خود بالا می برد. بالا رفتن نقطه D در تقویت کننده هیدرولیکی باعث پائین آمدن نقطه E می شود که به این ترتیب شیر بخار بیشتر باز شده، بخار بیشتری روی توربین رفته و باعث افزایش سرعت آن می گردد که خود افزایش قدرت اکتیو خروجی ژنراتور را به همراه دارد.

ب) توسط تنظیم کننده سرعت^(۵) (گاورنر): تا زمانی که سرعت توربین ثابت باشد نقطه B ثابت است و حرکت نمی کند. بر اثر افزایش سرعت ژنراتور (افزایش فرکانس) گوی ها بطرف خارج متمایل شده و فنر باز می شود. در نتیجه نقطه B بطرف پائین کشیده می شود. پائین آمدن نقطه B باعث پائین آمدن نقاط C و D شده و بخار ورودی به توربین کاهش می یابد و به این ترتیب سرعت توربین و قدرت خروجی ژنراتور کاهش می یابد. چنانچه سرعت ژنراتور کم شود، نقطه B بالا رفته و باعث پائین آمدن نقطه E و افزایش سرعت و قدرت خروجی آن می گردد.

ج) از طریق فیدبک: پائین آمدن نقطه E بر اثر هر یک از دو عامل الف) و ب) فوق الذکر، باعث پائین آمدن نقطه D و در نتیجه بالا رفتن نسبی نقطه E می گردد.

حال مدل خطی عملکرد گاورنر را در اطراف نقطه کار مشخصی بررسی می‌کنیم. چون نقاط A و B و C روی یک خط مستقیم قرار دارند، موقعیت نقطه C توسط A و B تعیین می‌شود:

$$\Delta X_C = K_B \Delta X_B - K_A \Delta X_A \quad (5-17)$$

علامت منفی جلوی K_A بخاطر این است که بالا رفتن نقطه A باعث پائین آمدن نقطه C می‌گردد و بالعکس.

ΔX_A و ΔX_B نیز به ترتیب با ΔP_C (فرمان ورودی) و Δf (تغییر فرکانس) متناسب هستند:

$$\Delta X_A = K'_A \Delta P_C \quad (5-18)$$

$$\Delta X_B = K'_B \Delta f$$

با قرار دادن مقادیر ΔX_A و ΔX_B در رابطه (5-17) خواهیم داشت:

$$\Delta X_C = K_1 \Delta f - K_2 \Delta P_C \quad (5-19)$$

که در آن :

$$K_1 = K_B K'_B$$

$$K_2 = K_A K'_A$$

نقاط C و D و E نیز در یک خط مستقیم قرار گرفته‌اند و لذا موقعیت نقطه D توسط نقاط C و E تعیین می‌شود:

$$\Delta X_D = K_2 \Delta X_C + K_3 \Delta X_E \quad (5-20)$$

در تقویت کننده هیدرولیکی، خروجی آن ΔX_E برحسب ورودی ΔX_D بصورت زیر نوشته می‌شود:

$$\Delta X_E = -K_5 \int \Delta X_D dt \quad (5-21)$$

با استفاده از تبدیل لاپلاس روابط (۵-۱۹)، (۵-۲۰) و (۵-۲۱) داریم:

$$\Delta X_C(s) = K_1 \Delta F(s) - K_r \Delta P_C(s)$$

$$\Delta X_D(s) = K_r \Delta X_C(s) + K_r \Delta X_E(s)$$

$$\Delta X_E(s) = -\frac{K_\delta}{S} \Delta X_D(s)$$

با حذف $\Delta X_C(s)$ و $\Delta X_D(s)$ از سه رابطه فوق، خروجی سیستم تنظیم سرعت $\Delta X_E(s)$ برحسب دو ورودی $\Delta P_C(s)$ و $\Delta F(s)$ بدست می‌آید:

$$\Delta X_E(s) = \frac{\frac{K_r K_r}{K_r}}{1 + S \frac{1}{K_r K_\delta}} \left[\Delta P_C(s) - \frac{K_1}{K_r} \Delta F(s) \right]$$

این رابطه را بصورت زیر می‌نویسیم:

$$\Delta X_E(s) = \frac{K_G}{1 + ST_G} \left[\Delta P_C(s) - \frac{1}{R} \Delta F(s) \right] \quad (5-22)$$

که در آن:

$$G_G(s) = \frac{K_G}{1 + ST_G} \quad \text{تابع انتقال سیستم گاورنر}$$

$$K_G = \frac{K_r K_r}{K_r} \quad \text{بهره}^{(۱)} \text{ ماندگار گاورنر}$$

$$T_G = \frac{1}{K_r K_\delta} \quad \text{ثابت زمانی سیستم گاورنر}$$

$$R = \frac{K_r}{K_1} \quad \text{ضریب تنظیم}^{(۲)} \text{ سرعت گاورنر}$$

ثابت زمانی گاورنر T_G حدود ۱/۰ ثانیه است. ضریب ثابت R به ضریب تنظیم سرعت یا دروپ^(۳) موسوم است و واحد آن هرتز بر مگاوات می‌باشد.

۲-۶-۵ مدل سیستم توربین - ژنراتور

خروجی سیستم گاورنر ΔX_E ، باعث کنترل شیر بخار می‌شود و در نتیجه قدرت مکانیکی خروجی توربین را تغییر می‌دهد. تغییرات بوجود آمده در قدرت مکانیکی خروجی توربین ΔP_T آنی نبوده و ثابت زمانی‌های توربین نسبتاً زیاد هستند. در مدل ساده شده، فقط یک ثابت زمانی برای توربین در نظر گرفته می‌شود و از ثابت زمانی‌های کوچکتر صرف‌نظر می‌کنیم. چنانچه بهره استاتیک (ماندگار) توربین را با K_T و ثابت زمانی آنرا با T_T نشان دهیم، تابع انتقال مدل ساده شده توربین عبارتست از:

$$G_T(s) = \frac{K_T}{1 + ST_T}$$

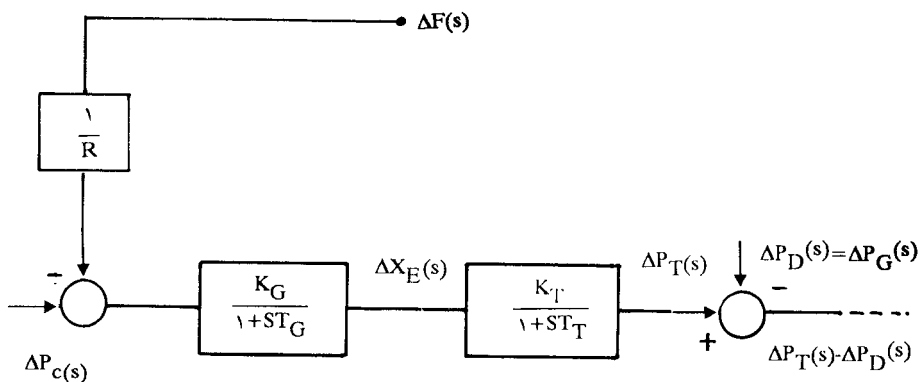
بنابر این تغییرات قدرت خروجی توربین برابر است با:

$$\Delta P_T(s) = \frac{K_T}{1 + ST_T} \Delta X_E(s) \quad (5-23)$$

ثابت زمانی توربین T_T حدود ۰/۲ تا ۲ ثانیه می‌باشد. تغییرات قدرت خروجی ژنراتور ΔP_G بطور پیوسته به تغییرات ΔP_D در بار بستگی دارد. بنابر این می‌توان نوشت:

$$\Delta P_G = \Delta P_D \quad (5-24)$$

در شکل (۵-۱۳) بلوک دیاگرام سیستم گاورنر و توربین - ژنراتور نشان داده شده‌است.



شکل ۵-۱۳: بلوک دیاگرام سیستم گاورنر و توربین - ژنراتور

معمولاً برای سهولت $K_T K_G$ را برابر یک فرض می‌کنیم. همانطوریکه در این شکل مشاهده می‌شود در حالت ماندگار P_G برابر P_T می‌باشد و در حالت دینامیک اختلاف $\Delta P_T - \Delta P_D$ باعث شتاب گرفتن ژنراتور می‌گردد.

قبل از تکمیل نمودن بلوک دیاگرام شکل (۵-۱۳)، سیستم گاورنر را در حالت ماندگار مورد بررسی قرار داده و ضریب تنظیم سرعت را با دقت بیشتری تعریف می‌کنیم. در بلوک دیاگرام شکل (۵-۱۳) با در نظر گرفتن $S \rightarrow 0$ ، حالت ماندگار سیستم تنظیم سرعت بدست می‌آید. اگر مقادیر ماندگار را با ΔP_T° ، ΔP_C° و Δf° نشان دهیم، خواهیم داشت:

$$\Delta P_T^\circ = \Delta P_C^\circ - \frac{1}{R} \Delta f^\circ \quad (5-25)$$

ΔP_T° خروجی سیستم در حالت ماندگار، و ΔP_C° و Δf° ورودی‌های آن در حالت ماندگار می‌باشند. برای مطالعه حالت ماندگار سیستم گاورنر سه حالت را در نظر می‌گیریم: الف) ژنراتور به یک شین بی‌نهایت متصل است و لذا فرکانس شبکه ثابت بوده و تغییرات قدرت خروجی ژنراتور تأثیری در آن ندارد، بنابر این:

$$\Delta f^\circ = 0$$

با استفاده از معادله (۵-۲۵) داریم:

$$\Delta P_T^\circ = \Delta P_C^\circ \quad (5-26)$$

یعنی برای یک ژنراتور متصله به شین بی‌نهایت که فرکانس آن ثابت است، قدرت خروجی توربین متناسب است با فرمان ورودی سیستم.

ب) ژنراتور به شبکه‌ای متصل است که تغییر قدرت خروجی ژنراتور در فرکانس شبکه تأثیر دارد. در این حالت برای بررسی عملکرد سیستم فیدبک گاورنر، تغییر دهنده سرعت را ثابت نگه می‌داریم، یعنی:

$$\Delta P_C = 0$$

بنابر این با توجه به رابطه (۵-۲۵) می‌توان نوشت:

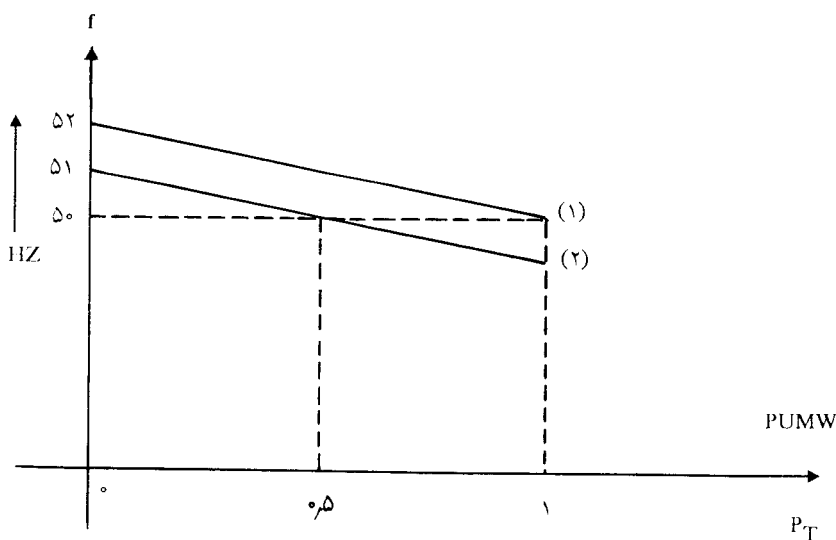
$$\Delta P_T^\circ = -\frac{1}{R} \Delta f^\circ \quad (5-27)$$

و از آنجا R طبق رابطه زیر تعریف می شود:

$$R = - \frac{\Delta f^{\circ}}{\Delta P_T^{\circ}} \quad (5-28)$$

واحد R، HZ/MW و یا HZ/PU MW می باشد.

ج) حالت کلی که هر دو نوع تغییر یعنی Δf و ΔP_C وجود دارند. در اینصورت با استفاده از رابطه (5-25) می توان تغییر قدرت خروجی توربین را در حالت ماندگار بدست آورد. شکل (5-14) تغییرات فرکانس ژنراتور را برحسب قدرت خروجی توربین نشان می دهد. اگر تغییر دهنده سرعت در وضعیتی قرار گیرد که فرکانس نامی ژنراتور 50 HZ، در قدرت نامی آن 1 PU، حاصل شود مشخصه شماره (1) بدست می آید، و چنانچه تغییر دهنده سرعت در وضعیتی باشد که فرکانس نامی در نصف قدرت نامی (0/5 PU) حاصل شود، مشخصه شماره (2) بدست می آید. هر دو مشخصه دارای شیب یکسان (R) می باشند. در شکل مذکور $R = 2 \text{ HZ/PU MW}$ است.



شکل 5-14: مشخصه فرکانس - قدرت گاورنر در حالت ماندگار

مثال 5-1: یک ژنراتور 250 MVA و 50 هرتز دارای مشخصه فرکانس - قدرت مطابق شکل (5-14) می باشد (مشخصه شماره 1). اگر تغییر دهنده سرعت را ثابت نگه داریم ($\Delta P_C = 0$) و بار سیستم به اندازه 50 MW افزایش یابد، فرکانس سیستم در حالت ماندگار جدید چند هرتز خواهد شد؟

حل: ابتدا ضریب تنظیم سرعت R را بدست می آوریم:

$$R = - \frac{\Delta f^\circ}{\Delta P_T^\circ} = - \frac{50 - 52}{1 - 0} = 2 \text{ HZ/PU MW}$$

در حالت ماندگار جدید، افزایش بار ۵۰ MW باید با افزایش قدرت خروجی ژنراتور تأمین گردد، بنابراین:

$$\Delta P_T^\circ = \Delta P_G^\circ = \Delta P_D = \frac{50}{250} = 0.2 \text{ PU MW}$$

بنابر این تغییر فرکانس در حالت ماندگار برابر است با:

$$\Delta f^\circ = - R \Delta P_T^\circ = -2 \times 0.2 = -0.4 \text{ HZ}$$

و از آنجا فرکانس سیستم بدست می آید:

$$f = f^\circ + \Delta f^\circ = 50 - 0.4 = 49.6 \text{ HZ}$$

۳-۶-۵ مدل الکتریکی سیستم قدرت

قسمت بعدی سیستم کنترل بار - فرکانس، سیستم الکتریکی است که شامل ژنراتور و بار می باشد. چنانچه این قسمت از سیستم را نیز مدلسازی کنیم، حلقه کنترل در شکل (۱۳-۵) تکمیل و بسته خواهد شد. برای بستن این حلقه باید رابطه ریاضی بین ΔP_T و Δf را بدست آوریم.

در اینجا منطقه ای را در نظر می گیریم که فقط دارای یک ژنراتور با قدرت خروجی P_G° در حالت ماندگار می باشد. این ژنراتور مجموعه بارهای منطقه $P_D^{(1)}$ و تلفات منطقه را تأمین می نماید. فرکانس نامی منطقه f° و انرژی جنبشی $W^{(2)}$ ژنراتور در این فرکانس W° می باشد. انرژی جنبشی طبق رابطه زیر با فرکانس زاویه ای ω° متناسب است:

$$W^\circ = \frac{1}{2} I \omega^\circ{}^2$$

و چون فرکانس زاویه‌ای ω° نیز با f° متناسب است، لذا انرژی جنبشی با فرکانس ماشین نسبت مستقیم دارد.

با افزایش بار منطقه بمیزان ΔP_D ، بلافاصله قدرت خروجی ژنراتور به ΔP_G می‌رسد تا بار را تأمین نماید. در اینصورت عدم توازن قدرت بین قدرت مکانیکی ژنراتور و قدرت الکتریکی خروجی آن بوجود می‌آید که آنرا با $\Delta P_T - \Delta P_D$ و یا $\Delta P_T - \Delta P_G$ نشان می‌دهیم. این اختلاف قدرت باعث تغییر سرعت و فرکانس شده و انرژی جنبشی ژنراتور نیز تغییر می‌نماید که آنرا از رابطه زیر بدست می‌آوریم:

$$W = W^\circ \left(\frac{f}{f^\circ}\right)^2 \quad \text{MJ} \quad (5-29)$$

که در آن :

$$f = f^\circ + \Delta f$$

تغییر فرکانس ایجاد شده Δf ، باعث می‌شود که قدرت مصرفی بارها نیز بمیزان $D\Delta f$ تغییر نماید. بنابر این اختلاف قدرت $\Delta P_T - \Delta P_D$ به دو طریق تأمین و یا جذب می‌شود:
 الف) از طریق قدرت مربوط به تغییر انرژی جنبشی ذخیره شده در ژنراتور بمیزان $\frac{d}{dt} W$
 ب) از طریق تغییر قدرت بارها بر اثر تغییر فرکانس بمیزان $D\Delta f$
 به این ترتیب رابطه توازن قدرت به این صورت نوشته می‌شود:

$$\Delta P_T - \Delta P_D = \frac{d}{dt} W + D\Delta f \quad [\text{MW}] \quad (5-30)$$

انرژی جنبشی ژنراتور براساس معادله (۵-۲۹) برابر است با:

$$W = W^\circ \left(\frac{f^\circ + \Delta f}{f^\circ}\right)^2 = W^\circ \left(1 + 2\frac{\Delta f}{f^\circ} + \frac{\Delta f^2}{f^{\circ 2}}\right)$$

اگر از Δf^2 صرف‌نظر کنیم، داریم:

$$W = W^\circ \left(1 + \frac{2\Delta f}{f^\circ}\right) \quad [\text{MJ}] \quad (5-31)$$

قدرت مربوط به این انرژی برابر است با:

$$\frac{d}{dt} W = \frac{\gamma W^\circ}{f^\circ} \frac{d}{dt} D \Delta f \quad [MW] \quad (5-32)$$

در اینجا "ثابت اینرسی" یک ماشین را تعریف می‌کنیم. ثابت اینرسی $H^{(1)}$ در یک ماشین برابر است با نسبت انرژی جنبشی ذخیره شده در سرعت نامی به قدرت نامی ماشین، بنابراین:

$$H = \frac{W^\circ}{S} \quad [\text{ثانیه}] \quad (5-33)$$

که در آن S قدرت نامی ماشین می‌باشد. با توجه به رابطه اخیر داریم:

$$W^\circ = HS$$

W° را از رابطه اخیر در معادله (۵-۳۲) جایگزین کرده و پس از تقسیم طرفین بر S خواهیم داشت:

$$\frac{d}{dt} W = \frac{\gamma H}{f^\circ} \frac{d}{dt} D \Delta f \quad \text{PU MW} \quad (5-34)$$

مزیت استفاده از H بجای W° این است که H مستقل از اندازه ماشین بوده و مقدار معمول آن در ماشین‌ها بین ۲ تا ۸ ثانیه است.

با جایگزین کردن $\frac{d}{dt} W$ از معادله (۵-۳۴)، در رابطه (۵-۳۰) داریم:

$$\Delta P_T - \Delta P_D = \frac{\gamma H}{f^\circ} \frac{d}{dt} W + D \Delta f \quad \text{PU MW} \quad (5-35)$$

قدرت مبنا برای این رابطه، قدرت نامی ماشین S می‌باشد. همچنین در این رابطه D برحسب PU MW/HZ می‌باشد. چنانچه در رابطه اخیر تبدیل لاپلاس طرفین را بدست آوریم، داریم:

$$\Delta P_T(s) - \Delta P_D(s) = \frac{\gamma H}{f^\circ} S \Delta F(s) + D \Delta F(s) \quad (5-36)$$

و از این رابطه $\Delta F(s)$ را بدست می‌آوریم:

$$\Delta F(s) = \frac{\frac{1}{D}}{1 + S \frac{T_H}{T_D}} [\Delta P_T(s) - \Delta P_D(s)]$$

و یا:

$$\Delta F(s) = \frac{K_P}{1 + ST_P} [\Delta P_T(s) - \Delta P_D(s)] \quad (5-37)$$

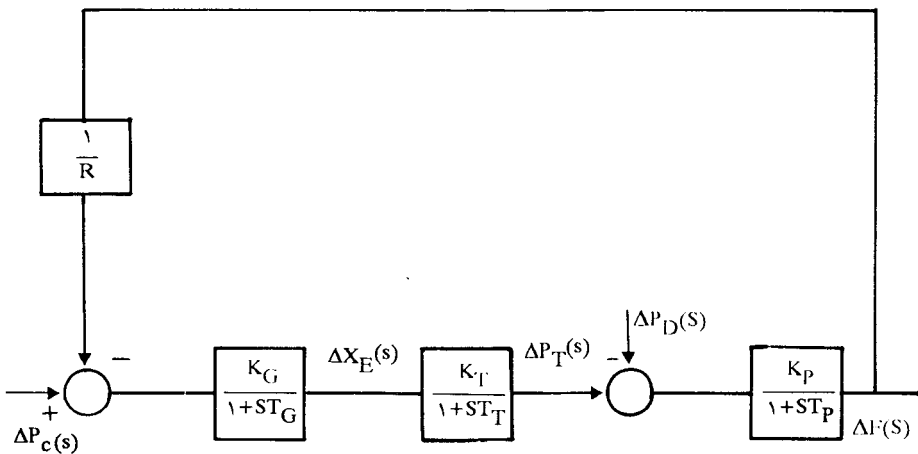
که در آن:

$$G_P(s) = \frac{K_P}{1 + ST_P} \quad \text{تابع انتقال سیستم الکتریکی} \quad (5-38)$$

$$K_P = \frac{1}{D} \quad \text{بهره ماندگار سیستم الکتریکی} \quad \text{HZ/PU MW} \quad (5-39)$$

$$T_P = \frac{T_H}{T_D} \quad \text{ثابت زمانی سیستم الکتریکی (ثانیه)} \quad (5-40)$$

ثابت زمانی سیستم الکتریکی T_P نسبتاً زیاد بوده و معمولاً چندین ثانیه می باشد. حال با استفاده از رابطه (۵-۳۷) حلقه کنترل شکل (۵-۱۳) تکمیل می شود. بلوک دیاگرام کامل سیستم کنترل LFC در شکل (۵-۱۵) رسم شده است.



شکل ۵-۱۵: بلوک دیاگرام سیستم کنترل بار - فرکانس LFC

۵-۷ پاسخ سیستم کنترل بار - فرکانس

در اینجا پاسخ سیستم کنترل بار - فرکانس را به تغییر بار پله‌ای در حالتی که تغییر دهنده سرعت در وضعیت مشخصی قرار دارد ($\Delta P_C = 0$) بدست آوریم. برای تغییر بار پله‌ای ΔP_C داریم:

$$\Delta P_D(s) = \frac{\Delta P_D}{s}$$

با استفاده از شکل (۵-۱۵)، معادله خروجی سیستم کنترل، $\Delta F(s)$ ، برحسب ورودی آن $\Delta P_D(s)$ در حالتی که $\Delta P_C = 0$ است بدست می‌آید:

$$\Delta F(s) = \frac{K_P}{1 + ST_P} \left[-\frac{1}{R} \Delta F(s) \frac{K_G K_T}{(1 + ST_G)(1 + ST_T)} - \frac{\Delta P_D}{s} \right] \quad (5-41)$$

از این رابطه ابتدا $\Delta F(s)$ را بدست می‌آوریم. سپس پاسخ ماندگار سیستم Δf° را به این طریق محاسبه می‌کنیم:

$$\Delta f^\circ = \lim_{s \rightarrow 0} [s \Delta F(s)] = -\frac{K_P \Delta P_D}{1 + \frac{K_G K_T K_P}{R}}$$

با فرض $K_G K_T = 1$ خواهیم داشت:

$$\Delta f^\circ = -\frac{\Delta P_D}{\frac{1}{K_P} + \frac{1}{R}} = -\frac{\Delta P_D}{D + \frac{1}{R}}$$

و یا:

$$\Delta f^\circ = -\frac{\Delta P_D}{\beta} \quad (5-42)$$

که در آن β مشخصه پاسخ فرکانس منطقه نامیده می‌شود و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\beta = D + \frac{1}{R} \quad \text{PU MW/HZ} \quad (5-43)$$

اگر همزمان با تغییر بار پله‌ای، تغییر دهنده سرعت هم پله‌ای تغییر نماید، داریم:

$$\Delta P_C(s) = \frac{\Delta P_D}{S}$$

حال چنانچه در شکل (۵-۱۵)، $\Delta P_C(s)$ را دخالت دهیم و معادله خروجی سیستم $\Delta F(s)$ را برحسب ΔP_D و ΔP_C بنویسیم و از آنجا Δf° را بدست آوریم، خواهیم داشت:

$$\Delta f^\circ = - \frac{\Delta P_D - \Delta P_C}{\beta} \quad (5-44)$$

بنابر این با تغییر بار، می توان تغییر دهنده سرعت را طوری کنترل کرد که $\Delta P_C = \Delta P_D$ ، و در نتیجه $\Delta f^\circ = 0$ گردد.

حال پاسخ دینامیکی را بدست می آوریم. در رابطه (۵-۴۱) چنانچه $K_G K_T = 1$ باشد و از T_T و T_G در مقایسه با T_P صرف نظر کنیم، داریم:

$$\Delta F(s) = \frac{K_P}{1 + ST_P} \left[- \frac{1}{R} \Delta F(s) - \frac{\Delta P_D}{S} \right]$$

و از آنجا:

$$\begin{aligned} \Delta F(s) &= - \frac{\Delta P_D}{S} \frac{\frac{K_P}{1 + ST_P}}{1 + \frac{1}{R} \frac{K_P}{1 + ST_P}} \\ &= - \Delta P_D \frac{RK_P}{R + K_P} \left[\frac{1}{S} - \frac{1}{S + \frac{R + K_P}{RT_P}} \right] \\ &= - \frac{\Delta P_D}{\beta} \left(\frac{1}{S} - \frac{1}{S + \frac{R + K_P}{RT_P}} \right) \end{aligned}$$

با تبدیل معکوس $\Delta F(s)$ ، پاسخ سیستم کنترل $\Delta f(t)$ بدست می آید:

$$\Delta f(t) = - \frac{\Delta P_D}{\beta} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (5-45)$$

در این رابطه T ثابت زمانی سیستم کنترل LFC است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T = \frac{RT_P}{R + K_P} \quad (5-46)$$

مثال ۵-۲: یک سیستم دارای ژنراتوری با مشخصات زیر است:

$$S = 500 \text{ MVA}$$

$$f^\circ = 50 \text{ HZ}$$

$$H = 5 \text{ S}$$

$$R = 2/5 \text{ HZ/PUMW}$$

جمع بارهای منطقه $P_D^\circ = 400 \text{ MW}$ می‌باشد. چنانچه بار بصورت پله‌ای بمیزان 15 MW افزایش یابد، پاسخ سیستم کنترل $\Delta f(t)$ را در دو حالت زیر بدست آورید:

$$T_G = T_T = 0 \text{ (الف)}$$

$$T_T = 0.5 \text{ S}, T_G = 0.1 \text{ S (ب)}$$

حل: تغییرات بار را بر اثر تغییر فرکانس خطی فرض می‌کنیم، به این ترتیب خواهیم داشت:

$$P_D^\circ = \frac{400}{500} = 0.8 \text{ PU}$$

$$D = \frac{\partial P_D}{\partial f} = \frac{0.8}{50} = 0.016 \text{ PUMW/HZ}$$

$$K_P = \frac{1}{D} = \frac{1}{0.016} = 62.5 \text{ HZ/PUMW}$$

$$T_P = \frac{2H}{f^\circ D} = \frac{2 \times 5}{50 \times 0.016} = 12.5 \text{ S}$$

$$\beta = D + \frac{1}{R} = 0.016 + \frac{1}{2/5} = 0.416 \text{ PUMW/HZ}$$

$$\Delta f^\circ = -\frac{\Delta P_D}{\beta} = -\frac{0.3}{0.416} = -0.72 \text{ HZ}$$

الف) اگر از T_G و T_T در مقایسه با T_P صرف‌نظر کنیم داریم:

$$\Delta f(t) = -\frac{\Delta P_D}{\beta} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) = -\Delta f^{\circ} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$$

ثابت زمانی T را مطابق رابطه (۵-۴۶) محاسبه می‌کنیم:

$$T = \frac{RT_P}{R + K_P} = \frac{2/5 \times 12/5}{2/5 + 62/5} = 0/481 \text{ S}$$

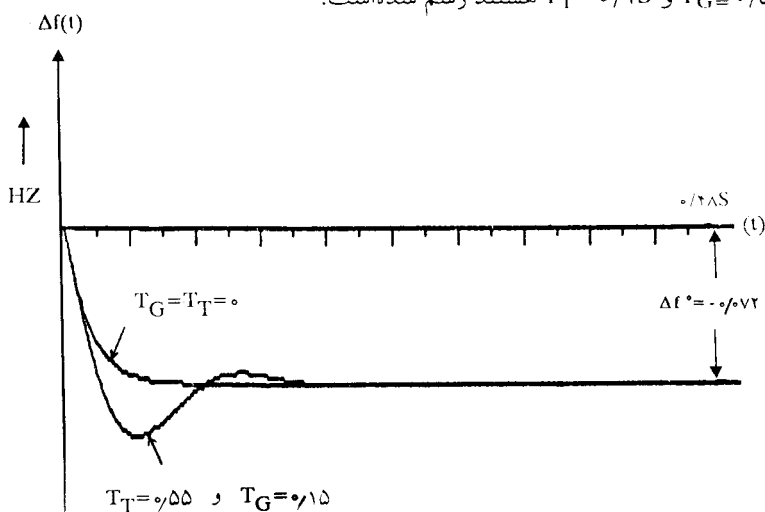
$$\frac{1}{T} = \frac{1}{0/481} = 2/08 \text{ S}^{-1}$$

پاسخ دینامیکی تغییر فرکانس عبارتست از:

$$\Delta f(t) = -0/072(1 - e^{2/08t}) \text{ HZ}$$

این تغییرات برحسب زمان در شکل (۵-۱۶) رسم شده است.

ب) چنانچه از T_G و T_T صرف‌نظر نکنیم، سیستم کنترل LFC دارای سه ثابت زمانی T_G و T_T و T_P خواهد بود که از روش‌های آنالیز عددی باید معادلات دیفرانسیل مربوط به بلوک دیاگرام شکل (۵-۱۵) را حل نمود و $\Delta f(t)$ را بدست آورد. در شکل (۵-۱۶) پاسخ سیستم کنترل در حالتی که $T_G = 0/5 \text{ S}$ و $T_T = 0/1 \text{ S}$ هستند رسم شده است.



شکل ۵-۱۶: پاسخ دینامیکی سیستم LFC به افزایش پلادی بار
نتیجه استخراج شده: مرکز کامپیوتر دانشگاه علم و صنعت ایران

در اینجا نقش گاورنر و وجود فیدبک سیستم کنترل را مورد بررسی قرار می‌دهیم. همانطوریکه دیدیم عامل مشخص‌کننده تغییرات فرکانس، مشخصه پاسخ فرکانس $\beta = D + \frac{1}{R}$ می‌باشد. مشخصه پاسخ فرکانس از مجموع دو قسمت $\frac{1}{R}$ و D تشکیل شده است، بطوریکه مقدار $\frac{1}{R}$ به مراتب بیشتر از D می‌باشد. در این مثال MW/HZ $\frac{1}{R} = \frac{1}{2/5} = 0/4$ و $D = 0/016$ است. بنابراین اگر گاورنر وجود نداشته باشد مقدار $\beta = D$ بسیار کوچک بوده و تغییرات فرکانس بسیار زیاد خواهد بود. در این مثال اگر ژنراتور دارای سیستم گاورنر نباشد، داریم:

$$\beta = D + \frac{1}{R} = 0/016 + 0 = 0/016 \text{ PU MW/HZ}$$

$$\Delta f^\circ = - \frac{\Delta P_D}{\beta} = - \frac{0/03}{0/016} = -1/875 \text{ HZ}$$

وجود فیدبک باعث شده است که ثابت زمانی سیستم کنترل از مقدار $T_p = 12/5$ به مقدار قابل ملاحظه $T = 0/481$ ثانیه تقلیل یابد و در نتیجه زمان استقرار فرکانس جدید حدود ۴ الی ۵ ثانیه شده است (حدود ۱۰ برابر ثابت زمانی). هرچه ضریب تنظیم سرعت R کمتر شود براساس رابطه (۴۶-۵) ثابت زمانی T کمتر شده و سیستم زودتر پایدار می‌شود.

هنگامی که افزایش باری معادل ۱۵ MW در سیستم بوجود می‌آید، در لحظات اول انرژی جنبشی ماشین تا حدی کاهش می‌یابد که بار مذکور تأمین گردد. با کاهش انرژی جنبشی و سرعت ماشین، سیستم کنترل LFC شروع بکار نموده و قدرت تولیدی ژنراتور را افزایش می‌دهد. همچنین بر اثر کاهش فرکانس، بارهای منطقه نیز قدرت مصرفی خود را کاهش می‌دهند. با افزایش قدرت تولیدی ژنراتور، سرعت و فرکانس ماشین بمرور افزایش می‌یابند و پس از حدود ۴ تا ۵ ثانیه، تغییر فرکانس ماندگار $\Delta f^\circ = -0/072$ هرتز حاصل می‌گردد. در شرایط ماندگار جدید قدرت ۱۵ MW مورد نیاز از دو قسمت زیر تأمین می‌شود:

$$\text{افزایش تولید ژنراتور} = - \frac{\Delta f^\circ}{R} = - \frac{-0/072}{2/5} = 0/0288 \text{ PU MW}$$

$$= 0/288 \times 500 = 14/4223 \text{ MW}$$

$$\text{کاهش قدرت مصرفی بارها} = D \Delta f^\circ = 0/016 \times 0/072 = 0/001152 \text{ PU MW}$$

$$= 0/001152 \times 500 = 0/576 \text{ MW}$$

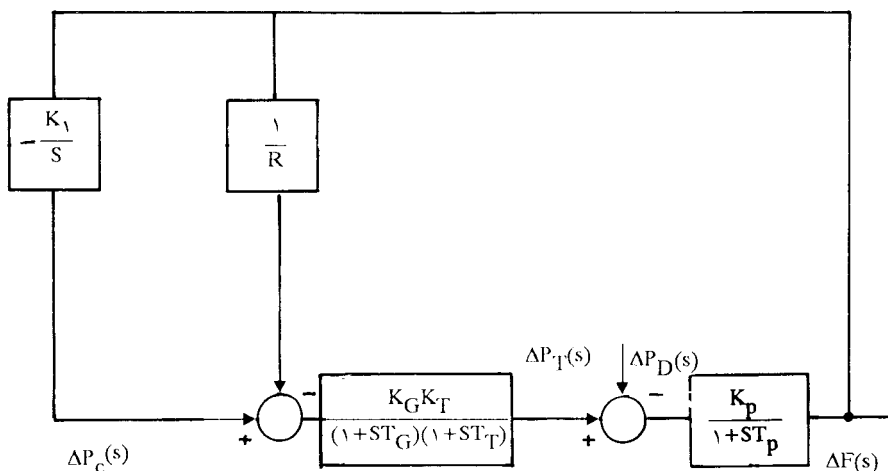
بنابر این حدود ۹۶٪ قدرت مورد نیاز بارها از طریق افزایش تولید ژنراتور و حدود ۴٪ از طریق کاهش مصرفی بارها تأمین می‌شود.

۵-۸ کنترل کامل در سیستم کنترل بار - فرکانس

معادله (۵-۴۲) نشان می‌دهد که اگر $\Delta P_C = 0$ باشد، با وجود عملکرد سیستم کنترل بار - فرکانس، مقدار Δf° هیچگاه به صفر نمی‌رسد و فرکانس بطور کامل کنترل نمی‌گردد. برای اینکه در سیستم‌های قدرت، فرکانس ثابت نگه داشته شود باید به ازاء تغییرات پله‌ای بار، خطای فرکانس Δf° به صفر برسد. برای این کار از تغییر دهنده سرعت (ΔP_C) استفاده می‌کنیم. نحوه کنترل باید طوری باشد که علاوه بر صفر کردن خطای فرکانس حالت ماندگار، دامنه خطای فرکانس در حالت گذرا نیز حداقل گردد و در ضمن سیستم کنترل از درجه پایداری خوبی برخوردار باشد.

براساس رابطه (۵-۴۴) تغییر دهنده سرعت را می‌توان طوری تغییر داد که خطای فرکانس در حالت ماندگار Δf° را به صفر برساند. این کار باید بطور اتوماتیک انجام شود تا وضعیت مطلوبی در سیستم کنترل داشته باشیم. در شکل (۵-۱۷) سیستم کنترل بار-فرکانس با اضافه شدن حلقه فیدبک دوم نشان داده شده است. همانطوریکه در این شکل دیده می‌شود سیگنال خطای فرکانس Δf بمیزان K_I تقویت شده و سپس از طریق انتگرال‌گیر، فرمان ΔP_C را ایجاد می‌کند. به این ترتیب خواهیم داشت:

$$\Delta P_C = -K_I \int \Delta f \, dt \quad (5-47)$$



شکل ۵-۱۷: بلوک دیاگرام سیستم کنترل بار - فرکانس در حالت کنترل کامل

علامت منفی در رابطه اخیر بخاطر این است که خطای فرکانس مثبت باید باعث بوجود آمدن فرمان منفی به سیستم گردد. تا زمانی که خطای فرکانس وجود دارد، خروجی انتگرال‌گیر یعنی ΔP_C متغیر بوده و به سیستم اثر می‌نماید. موقعیت تغییر دهنده سرعت هنگامی ثابت خواهد بود که خطای فرکانس به صفر برسد. ضریب K_I (ضریب انتگرالیون) سرعت پاسخ حلقه را کنترل می‌کند. اگر تبدیل لاپلاس رابطه (۵-۴۷) را بدست آوریم، داریم:

$$\Delta P_C(s) = -\frac{K_I}{S} \Delta F(s)$$

در بلوک دیاگرام شکل (۵-۱۷) در حالتی که $K_G K_T = 1$ و $T_T = T_G = 0$ می‌توان نوشت:

$$\Delta F(s) = \frac{K_P}{1 + ST_P} \left[-\frac{K_I}{S} \Delta F(s) - \frac{1}{R} \Delta F(s) - \frac{\Delta P_D}{S} \right]$$

و از آنجا:

$$\Delta F(s) = -\frac{K_P}{T_P} \frac{\Delta P_D}{S^2 + \left[\left(1 + \frac{K_P}{R} \right) / T_P \right] S + \frac{K_I K_P}{T_P}} \quad (5-48)$$

مخرج این رابطه یک معادله درجه ۲ برحسب S می‌باشد. بنابر این نوع ریشه‌های مخرج نشان دهنده چگونگی تغییرات پاسخ دینامیکی می‌باشد. ریشه‌های مخرج عبارتند از:

$$S = -\frac{1 + \frac{K_P}{R}}{2T_P} \pm \sqrt{\left(1 + \frac{K_P}{R} \right)^2 / 4T_P^2 - \frac{K_I K_P}{T_P}}$$

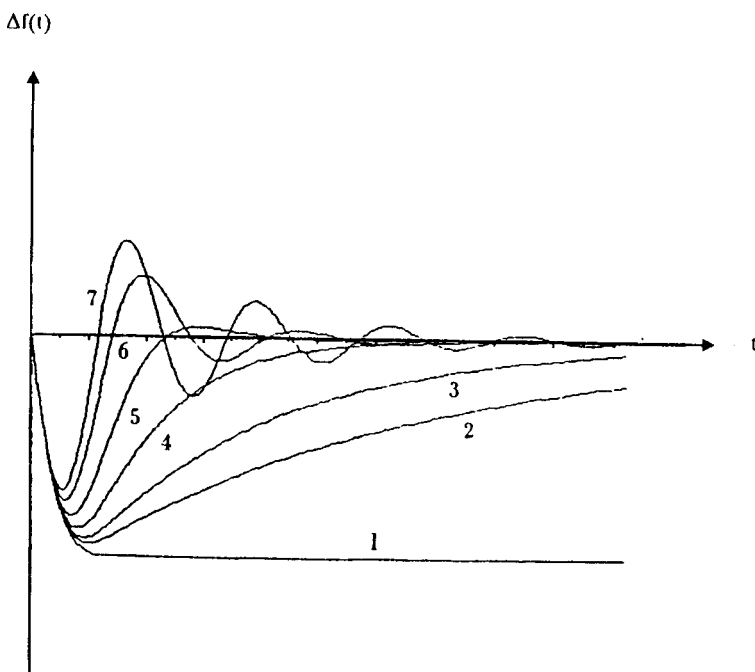
برای اینکه تغییرات $\Delta F(s)$ میراثی بحرانی باشد، داریم:

$$\left(1 + \frac{K_P}{R} \right)^2 / 4T_P^2 - \frac{K_I K_P}{T_P} = 0$$

و از آنجا K_I بدست می‌آید که آنرا با $K_{I_{crit}}$ نشان می‌دهیم:

$$K_{I_{crit}} = \frac{1}{4T_P K_P} \left(1 + \frac{K_P}{R} \right)^2 \quad (5-49)$$

بنابر این اگر $K_I = K_{I_{crit}}$ باشد پاسخ میرائی بحرانی حاصل می‌گردد. اگر $K_I > K_{I_{crit}}$ باشد، پاسخ سیستم نوسانی میرا (زیر میرائی) و در صورتیکه $K_I < K_{I_{crit}}$ باشد پاسخ غیرنوسانی (فوق میرائی) بدست می‌آید. شکل (۵-۱۸) تغییرات خطای فرکانس $\Delta f(t)$ را برحسب زمان بر اثر تغییر پله‌ای بار به ازاء مقادیر مختلف K_I نشان می‌دهد. منحنی شماره ۱ مربوطه به $K_I = 0$ (بدون حلقه فیدبک دوم یعنی $\Delta P_C = 0$) می‌باشد. منحنی‌های شماره ۲ و ۳ به ترتیب به ازاء $K_I = 0/3 K_{I_{crit}}$ و $K_I = 0/5 K_{I_{crit}}$ رسم شده‌اند و دارای تغییرات فوق میرا هستند. منحنی‌های ۴ و ۵ و ۶ به ازاء ۲ و ۴ و ۶ برابر $K_{I_{crit}}$ رسم شده‌اند که نشان دهنده تغییرات زیر میرائی هستند. منحنی شماره ۷ نیز به ازاء $K_I = K_{I_{crit}}$ (حالت میرائی بحرانی) بدست آمده است.



شکل ۵-۱۸: پاسخ سیستم کنترل LFC در حالت کنترل کامل
نتایج استخراج شده: مرکز کامپیوتر دانشگاه علم و صنعت ایران

۵-۹ مناطق کنترل

یک منطقه کنترل^(۱) سیستم قدرتی است که در آن مجموعه‌ای از ژنراتورها تأمین

بارهای آن را بعهده داشته باشد. در چنین سیستمی همه ژنراتورها دارای سیستم کنترل بار - فرکانس LFC هستند و معمولاً ضریب تنظیم سرعت آنها تقریباً با هم برابر است. یک منطقه کنترل را می توان با یک ژنراتور و یک بار معادل سازی نمود. قدرت نامی ژنراتور معادل از جمع قدرت های نامی ژنراتورها بدست می آید. ضریب تنظیم سرعت ژنراتور معادل به قدرت ژنراتورها و ضرائب تنظیم سرعت آنها بستگی دارد که روش تعیین آنرا در بخش بعدی مطالعه خواهیم نمود. بار معادل نیز از مجموع بارهای منطقه بدست می آید. در اینصورت بلوک دیاگرام و نتایج سیستم کنترل بار - فرکانس یک ژنراتور را می توان برای سیستم کنترل یک منطقه بکار گرفت.

امروزه اغلب سیستم های قدرت به مناطق مجاور خود متصل هستند و اتصال این مناطق کنترل، یک سیستم قدرت چند منطقه ای^(۱) را بوجود می آورد. در یک سیستم قدرت چند منطقه ای، هر منطقه کنترل در شرایط عادی باید بارهای منطقه خود را تأمین نماید مگر اینکه با توافق دو منطقه مجاور، قدرت مورد نیاز یک منطقه از طریق منطقه دیگر تأمین شود. غیر از کمک دو جانبه فوق، مزایای دیگر اتصال مناطق کنترل بیکدیگر عبارتند از:

۱- خطای فرکانس کمتر: تغییر فرکانس یک سیستم چند منطقه ای در مقایسه با سیستم تک منطقه ای^(۲) بر اثر یک تغییر بار مساوی، کمتر می باشد و هر چه اندازه سیستم^(۳) چند منطقه ای بزرگتر باشد تغییرات فرکانس کمتر خواهد بود. بعبارت دیگر اگر چند منطقه بهم متصل باشند هر یک از مناطق می تواند تغییر بار بیشتری را بپذیرد بدون اینکه تغییر فرکانس زیادی را حس نماید.

۲- کاهش قدرت ذخیره: یک سیستم تک منطقه ای علاوه بر بارهای پیش بینی شده باید دارای قدرت نصب شده ذخیره برای شرایط اضطراری باشد. از آنجائیکه زمان پیک بار در مناطق مختلف، متفاوت است لذا قدرت ذخیره کمتری در سیستم های چند منطقه ای مورد نیاز خواهد بود.

۱۰-۵ سیستم قدرت تک منطقه ای

از آنجائیکه سیستم قدرت تک منطقه ای قابل تبدیل به یک ژنراتور معادل می باشد، لذا بلوک دیاگرام شکل (۱۷-۵) را می توان برای سیستم قدرت تک منطقه ای و بررسی پاسخ فرکانس منطقه در نظر گرفت. با این تفاوت که کلیه پارامترها نظیر R ، T_p ، K_p و ... مربوط به منطقه است. قدرت نامی ژنراتور معادل از جمع قدرت های نامی ژنراتورها تعیین می شود.

اگر سیستم قدرت دارای m ژنراتور با قدرت های نامی S_1, S_2, \dots, S_m و ضرائب تنظيم سرعت R_1, R_2, \dots, R_m باشد، بر اثر تغيير بار پله ای ΔP_D در منطقه، خطای فركانس حالت ماندگار منطقه Δf° ایجاد می گردد، بطوریکه برای ژنراتور ۱ طبق تعريف می توان نوشت:

$$R_1 = - \frac{\Delta f^\circ}{\Delta P_{G1}} \text{ HZ/PU MW}$$

قدرت مبنا در رابطه فوق برای ΔP_{G1}° ، همان قدرت نامی ژنراتور ۱، S_1 می باشد. بهمین ترتیب برای ژنراتورهای ۲ و \dots و m در قدرت های مبنای S_2, \dots, S_m داریم:

$$\begin{aligned} R_2 &= - \frac{\Delta f^\circ}{\Delta P_{G2}^\circ} \\ &\vdots \\ R_m &= - \frac{\Delta f^\circ}{\Delta P_{Gm}^\circ} \end{aligned}$$

در حالت ماندگار ΔP_D برحسب PU در مبنای قدرت نامی منطقه $S = S_1 + S_2 + \dots + S_m$ برابر است با:

$$\Delta P_D = \Delta P_{G1}^\circ + \Delta P_{G2}^\circ + \dots + \Delta P_{Gm}^\circ \quad [\text{PU MW}]$$

در این رابطه قدرت مبنا برای $\Delta P_D, \Delta P_{G1}^\circ, \Delta P_{G2}^\circ, \dots, \Delta P_{Gm}^\circ$ ، قدرت نامی منطقه S می باشد و بنابر این داریم:

$$\Delta P_D = - \frac{\Delta f^\circ}{R_1} \frac{S_1}{S} - \frac{\Delta f^\circ}{R_2} \frac{S_2}{S} + \dots - \frac{\Delta f^\circ}{R_m} \frac{S_m}{S}$$

و از آنجا Δf° بدست می آید:

$$\Delta f^\circ = - \frac{S \Delta P_D}{\frac{S_1}{R_1} + \frac{S_2}{R_2} + \dots + \frac{S_m}{R_m}} \quad [\text{HZ}] \quad (5-50)$$

که در آن S_1, S_2, \dots, S_m برحسب HZ/PU MW هستند. اگر قدرت های S_1, S_2, \dots, S_m و رابرحسب PU MW جایگزین کنیم، در اینصورت $S = 1 \text{ PU}$ بوده و داریم:

$$\Delta f^{\circ} = - \frac{\Delta P_D}{\frac{S_1}{R_1} + \frac{S_r}{R_r} + \dots + \frac{S_m}{R_m}} \quad [HZ] \quad (5-51)$$

و یا:

$$\Delta f^{\circ} = - \frac{\Delta P_D}{\sum_{i=1}^m \frac{S_i}{R_i}} \quad [HZ] \quad (5-52)$$

حال اگر منطقه را با ژنراتوری به قدرت نامی S و ضریب تنظیم سرعت R معادل سازی کنیم، خطای فرکانس ماندگار آن بر اثر تغییر بار پله ای ΔP_D برابر است با:

$$\Delta f^{\circ} = - \frac{\Delta P_D}{D + \frac{1}{R}}$$

و چون D در مقایسه با $\frac{1}{R}$ بسیار کوچک است، می توان نوشت:

$$\Delta f^{\circ} = - \frac{\Delta P_D}{\frac{1}{R}} \quad (5-53)$$

با مقایسه روابط (5-51) و (5-53) ضریب تنظیم سرعت منطقه R بدست می آید:

$$\frac{1}{R} = \frac{S_1}{R_1} + \frac{S_r}{R_r} + \dots + \frac{S_m}{R_m}$$

$$R = \frac{1}{\frac{S_1}{R_1} + \frac{S_r}{R_r} + \dots + \frac{S_m}{R_m}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{R_i}} \quad (5-54)$$

که در آن S_1 ، S_r ، S_m بر حسب MW PU و ضرائب تنظیم سرعت بر حسب MW PU/ HZ می باشند.

اگر ضریب تنظیم سرعت همه ژنراتورها برابر باشند در این صورت ضریب تنظیم معادل برابر ضریب تنظیم هر یک از ژنراتورها خواهد بود.

حال می توان تعیین کرد که ژنراتورهای منطقه چگونه تغییر بار ΔP_D را بین خود تقسیم می کنند. برای ژنراتور ۱ داریم:

$$\Delta P_{G1}^{\circ} = - \frac{\Delta f^{\circ}}{R_1} \frac{S_1}{S} \quad [\text{PU MW}]$$

در اینجا نیز S_1 و S برحسب MVA و یا هر دو برحسب PU MW می‌باشند. با جایگزین کردن Δf° از رابطه (۵-۵۰) در معادله اخیر ΔP_{G1}° بدست می‌آید:

$$\Delta P_{G1}^{\circ} = \frac{\frac{S_1}{R_1}}{\sum_{i=1}^m \frac{S_i}{R_i}} \Delta P_D \quad [\text{PU MW}] \quad (5-55)$$

بنابر این سهم هر ژنراتور در تأمین ΔP_D از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\Delta P_{Gj}^{\circ} = \frac{\frac{S_j}{R_j}}{\sum_{i=1}^m \frac{S_i}{R_i}} \Delta P_D \quad [\text{PU MW}] \quad (5-56)$$

در این رابطه نیز S_j و S_i برحسب MVA و یا هر دو برحسب PU MW هستند. اگر ΔP_D برحسب PU MW جایگزین شود مقدار ΔP_{Gj}° نیز برحسب PU MW، و اگر ΔP_D برحسب MW جایگزین شود مقدار ΔP_{Gj}° برحسب MW بدست خواهد آمد. در حالتی که ضرایب تنظیم ژنراتورها با هم برابر باشند، یعنی:

$$R_1 = R_2 = \dots = R_m = R$$

در اینصورت طبق رابطه زیر ژنراتورها به نسبت قدرت نامی خود، تغییر بار را بین خود تقسیم میکنند:

$$\Delta P_{Gj}^{\circ} = \frac{S_j}{S_1 + S_2 + \dots + S_m} \Delta P_D = \frac{S_j}{S} \Delta P_D \quad (5-57)$$

حال برای تعیین دقیق‌تر Δf° در منطقه، می‌توان مشخصه پاسخ فرکانس منطقه β را بدست آورد. ضریب D برای منطقه مقدار معلومی است. لذا داریم:

$$\beta = D + \frac{1}{R}$$

و از آنجا:

$$\Delta f^\circ = - \frac{\Delta P_D}{\beta} \quad (5-58)$$

پارامتر دیگری که در ژنراتور معادل باید بدست آید، ثابت اینرسی منطقه H می‌باشد. اگر H_1 ، H_2 ، ... و H_m ثابت‌های اینرسی ژنراتورهای ۱ و ۲ و ... و m باشند، طبق تعریف ثابت اینرسی داریم:

$$H = \frac{W^\circ}{S}$$

که در آن H ثابت اینرسی منطقه و W° انرژی جنبشی کل ژنراتورهای منطقه می‌باشد. اگر انرژی جنبشی ژنراتورها را با W_1° ، W_2° ، ... و W_m° نشان دهیم، خواهیم داشت:

$$H = \frac{W_1^\circ + W_2^\circ + \dots + W_m^\circ}{S} = \frac{S_1 H_1 + S_2 H_2 + \dots + S_m H_m}{S} \quad \text{و یا:}$$

$$H = \frac{\sum_{i=1}^m S_i H_i}{S} \quad (5-59)$$

با معلوم بودن D، و تعیین H معادل از معادله اخیر، می‌توان K_P و T_P را برای منطقه قدرت نیز بدست آورد. این مقادیر عبارتند از:

$$K_P = \frac{1}{D} \quad (5-60)$$

$$T_P = \frac{2H}{f^\circ D} \quad (5-61)$$

به این ترتیب با فرض $K_G K_T \approx 1$ و $T_G \cong T_T \cong 0$ کلیه پارامترهای منطقه برای بلوک دیاگرام نشان داده شده در شکل (5-17) بدست آمده‌اند و از این بلوک دیاگرام می‌توان در بررسی پاسخ خطای فرکانس منطقه استفاده نمود.

مثال ۳-۵: یک سیستم قدرت تک منطقه‌ای شامل سه ژنراتور با قدرت‌های نامی ۵۰۰، ۲۵۰ و ۲۵۰ مگاوات آمپر و ثابت اینرسی‌های ۴ و ۶ و ۶ می‌باشد. جمع بارهای منطقه ۵۰۰ مگاوات

و ضریب تنظیم سرعت همه ژنراتورها 2 HZ/PU MW می باشد. اگر بار منطقه 50 مگاوات افزایش یابد، در حالت کنترل نشده ($\Delta P_C = 0$)، خطای فرکانس حالت ماندگار و تغییرات فرکانس در حالت دینامیک را بدست آورید. همچنین مشخص نمایید که هر یک از ژنراتور چه سهمی از تأمین افزایش بار 50 مگاوات را بعهده خواهند گرفت.

حل: قدرت نامی منطقه برابر است با:

$$S = 500 + 250 + 250 = 1000 \text{ MVA} = 1 \text{ PU}$$

و در این قدرت مبنا، مقادیر D ، P_D و K_P با فرض خطی بودن تغییرات توان اکتیو بار نسبت به تغییرات فرکانس عبارتند از:

$$P_D = \frac{500}{1000} = 0.5 \text{ PU MW}$$

$$D = \frac{\partial P_D}{\partial f} = \frac{0.5}{50} = 0.01 \text{ PU MW/HZ}$$

$$K_P = \frac{1}{D} = \frac{1}{0.01} = 100 \text{ HZ/PU MW}$$

حال ثابت اینرسی ژنراتور معادل را بدست می آوریم:

$$H = \frac{S_1 H_1 + S_2 H_2 + \dots + S_m H_m}{S} = \frac{(500 \times 4) + (250 \times 6) + (250 \times 6)}{1000} = 5 \text{ S}$$

و از آنجا ثابت زمانی سیستم الکتریکی منطقه محاسبه می گردد:

$$T_P = \frac{2H}{f^0 D} = \frac{2 \times 5}{50 \times 0.01} = 20 \text{ S}$$

تغییر بار منطقه برحسب PU MW برابر است با:

$$\Delta P_D = \frac{50}{1000} = 0.05 \text{ PU MW}$$

حال مشخصه پاسخ فرکانس منطقه و متعاقب آن خطای فرکانس ماندگار را محاسبه می کنیم:

$$\beta = D + \frac{1}{R} = 0.01 + \frac{1}{2} = 0.51 \text{ PU MW/HZ}$$

$$\Delta f^{\circ} = -\frac{\Delta P_D}{\beta} = -\frac{0.05}{0.51} = -0.098 \approx -0.1 \text{ HZ}$$

ثابت زمانی کل سیستم در منطقه عبارتست از:

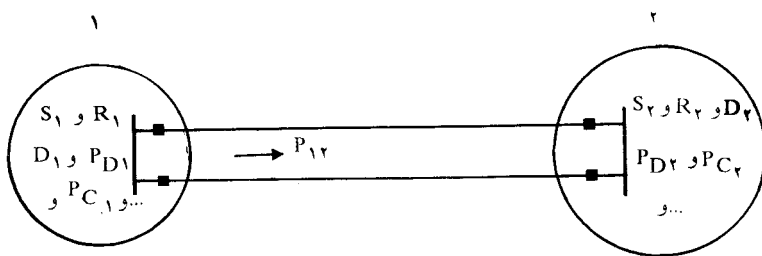
$$T = \frac{RT_P}{R + K_P} = \frac{2 \times 20}{2 + 100} = 0.392 \text{ S}$$

و به این ترتیب تغییرات فرکانس در حالت دینامیک سیستم بدست می‌آید:

$$\Delta f(t) = -\Delta f^{\circ} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) = -0.1 (1 - e^{-\frac{t}{0.392}}) \text{ HZ}$$

۵-۱۱ سیستم قدرت دو منطقه‌ای

شکل (۵-۱۹) دو منطقه کنترل ۱ و ۲ را با پارامترهای مربوطه نشان می‌دهد که از طریق خطوط رابط^(۱) به یکدیگر متصل شده‌اند. قدرت انتقالی خطوط رابط P_{12} معمولاً باید صفر باشد و هر منطقه تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز خود را بعهده داشته باشد، مگر در شرایطی که بواسطه کمبود انرژی در یک منطقه (بواسطه خروج نیروگاهها و یا اتفاقات غیر منتظره) براساس توافق دو منطقه قدرت P_{12} از منطقه ۱ به منطقه ۲ جاری باشد.



شکل ۵-۱۹: سیستم قدرت منطقه‌ای

هر یک از مناطق ۱ و ۲ خود دارای چندین ژنراتور و مجموعه‌ای از بارها هستند که هر منطقه را با ژنراتور معادل مدلسازی کرده‌ایم و پارامترهایی نظیر T_{p1} , β_1 , R_1 , S_1 و ... پارامترهای منطقه ۱ (ژنراتور معادل منطقه ۱) هستند. اگر $V_1^\circ = |V_1^\circ| \angle \delta_1^\circ$ و $V_2^\circ = |V_2^\circ| \angle \delta_2^\circ$ باشند، قدرت منتقله از منطقه ۱ به منطقه ۲ در شرایط عادی و طبق توافق دو منطقه عبارتست از:

$$P_{12}^\circ = \frac{|V_1^\circ| |V_2^\circ|}{X} \sin (\delta_1^\circ - \delta_2^\circ) \quad (5-62)$$

برای تغییر بار در یکی از دو منطقه و یا در هر دو منطقه، تغییراتی در δ_1 و δ_2 ایجاد می‌شود که آنها را با $\Delta\delta_1$ و $\Delta\delta_2$ نشان می‌دهیم. قدرت انتقالی از منطقه ۱ به منطقه ۲ نیز بمیزان ΔP_{12} تغییر خواهد کرد که مقدار آن برابر است با:

$$\Delta P_{12} = \frac{|V_1^\circ| |V_2^\circ|}{X} \cos (\delta_1^\circ - \delta_2^\circ) (\Delta\delta_2 - \Delta\delta_1) \quad (5-63)$$

و یا:

$$\Delta P_{12} = P_{\max} \cos (\delta_1^\circ - \delta_2^\circ) (\Delta\delta_2 - \Delta\delta_1) \quad (5-64)$$

که در آن:

$$P_{\max} = \frac{|V_1^\circ| |V_2^\circ|}{X} \quad (5-65)$$

حداکثر قدرت قابل انتقال بین دو منطقه می‌باشد. طبق تعریف ضریب استحکام^(۱) یا ضریب سنکرونیزه کننده^(۲) یک خط انتقال از معادله زیر بدست می‌آید:

$$T_{12}^\circ = \frac{|V_1^\circ| |V_2^\circ|}{X} \cos (\delta_1^\circ - \delta_2^\circ) = P_{\max} \cos (\delta_1^\circ - \delta_2^\circ) \quad (5-66)$$

بنابر این رابطه (۵-۶۴) را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$\Delta P_{12} = T_{12}^{\circ} (\Delta \delta_2 - \Delta \delta_1) \quad (5-67)$$

براساس رابطه (۵-۶) تغییرات زاویه قدرت $\Delta \delta$ برحسب خطای فرکانس Δf عبارتست از:

$$\Delta \delta = 2\pi \int \Delta f \, dt \quad (5-68)$$

با قرار دادن $\Delta \delta$ در رابطه (۵-۶۷) تغییر قدرت انتقالی بین دو منطقه برحسب خطای فرکانس این دو منطقه بدست می‌آید:

$$\Delta P_{12} = 2\pi T_{12}^{\circ} \left(\int \Delta f_1 \, dt - \int \Delta f_2 \, dt \right) \quad (5-69)$$

تبدیل لاپلاس طرفین رابطه اخیر را بدست می‌آوریم:

$$\Delta P_{12}(s) = \frac{2\pi T_{12}^{\circ}}{s} [\Delta F_1(s) - \Delta F_2(s)] \quad (5-70)$$

اگر از تلفات خطوط رابط بین دو منطقه صرف‌نظر کنیم، داریم:

$$\Delta P_{12} = -\Delta P_{21} \quad (5-71)$$

که در آن ΔP_{21} تغییر قدرت انتقالی از منطقه ۲ به منطقه ۱ می‌باشد.

حال مدل الکتریکی سیستم قدرت را برای سیستم قدرت دو منطقه‌ای با دقت بیشتری مورد مطالعه قرار می‌دهیم. در بخش (۵-۶-۳) دیدیم که اختلاف قدرت $\Delta P_{T1} - \Delta P_{D1}$ بر اثر یک تغییر بار، از دو طریق تأمین و یا جذب می‌شود: از طریق قدرت مربوط به تغییر انرژی جنبشی ژنراتور و تغییر قدرت بارها، و برای آن معادله (۵-۳۶) را تشکیل دادیم. در سیستم قدرت دو منطقه‌ای، انتقال قدرت به منطقه دیگر هم به دو مورد بالا اضافه می‌شود و در نتیجه $\Delta P_{12}(s)$ با طرف دوم معادله (۵-۳۶) جمع می‌شود. بنابراین برای منطقه ۱ خواهیم داشت:

$$\Delta P_{T1}(s) - \Delta P_{D1}(s) = \frac{2H_1}{f^{\circ}} S \Delta f_1(s) + D_1 \Delta f_1(s) + \Delta P_{12}(s) \quad (5-72)$$

و از این معادله، $\Delta F_1(s)$ را بدست می‌آوریم:

$$\Delta F_1(s) = \frac{K_{P1}}{1 + ST_{P1}} [\Delta P_{T1}(s) - \Delta P_{D1}(s) - \Delta P_{12}(s)] \quad (5-73)$$

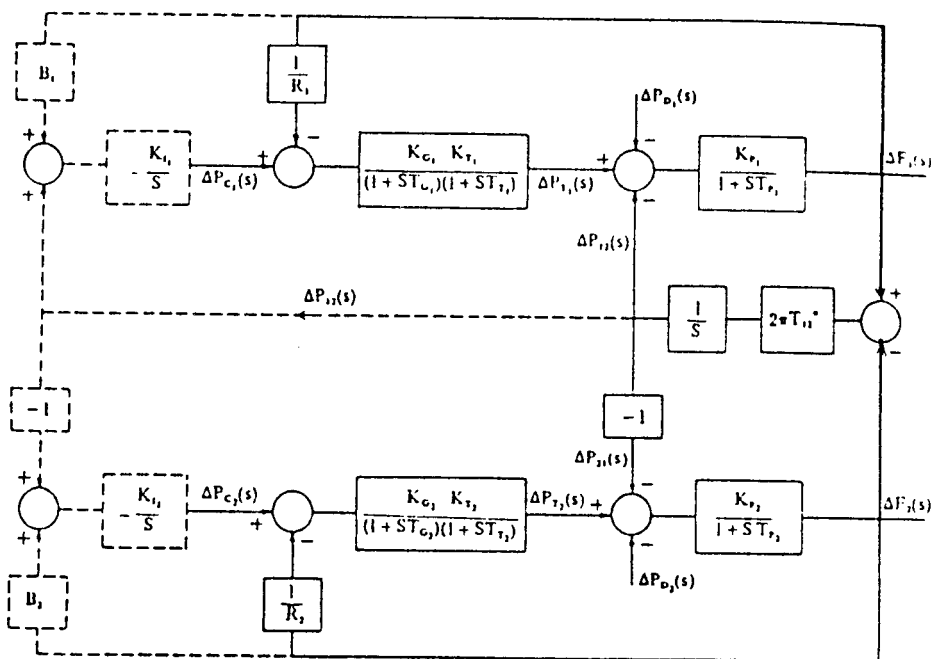
$$K_{P1} = \frac{1}{D_1}$$

$$T_{P1} = \frac{\gamma H_1}{f^\circ D_1} \quad (5-74)$$

خطای فرکانس منطقه ۲، $\Delta F_2(s)$ را نیز مشابه معادله (۵-۷۳) می‌توان نوشت:

$$\Delta F_2(s) = \frac{K_{P2}}{1 + ST_{P2}} [\Delta P_{T1}(s) - \Delta P_{D2}(s) - \Delta P_{r1}(s)] \quad (5-75)$$

با توجه به روابط (۵-۷۰) تا (۵-۷۵) بلوک دیاگرام یک سیستم قدرت دو منطقه‌ای در شکل (۵-۲۰) نشان داده شده‌است. در این شکل قسمت خط چین مربوط به حالت کنترل کامل سیستم است که هنوز مورد بحث قرار نگرفته است.



شکل ۵-۲۰: دیاگرام سیستم قدرت دو منطقه‌ای

۱-۱۱-۵ پاسخ سیستم کنترل دو منطقه‌ای در حالت کنترل نشده

ابتدا پاسخ حالت ماندگار سیستم را در حالتی که تغییر دهنده‌های سرعت دو منطقه در وضعیت مشخصی قرار دارند ($\Delta P_{C1} = \Delta P_{C2} = 0$) بدست می‌آوریم. بر اثر تغییر بار پله‌ای ΔP_{D1} و ΔP_{D2} در دو منطقه، خطای فرکانس حالت ماندگار Δf° و تغییر قدرت انتقالی حالت ماندگار ΔP_{12}° بدست می‌آیند. در حالت ماندگار سیستم، با استفاده از بلوک دیاگرام شکل (۵-۲۰) به ازاء $1 = K_G K_T$ و $T_G = T_T = 0$ ، و یا با استفاده از تعریف ضریب تنظیم سرعت داریم:

$$\Delta P_{T1}^\circ = -\frac{1}{R_1} \Delta f^\circ \quad (5-76)$$

$$\Delta P_{T2}^\circ = -\frac{1}{R_2} \Delta f^\circ \quad (5-77)$$

معادله (۵-۷۲) در شرایط ماندگار به ازاء $S = 0$ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\Delta P_{T1}^\circ - \Delta P_{D1}^\circ - \Delta P_{12}^\circ = D_1 \Delta f^\circ \quad (5-78)$$

به‌همین ترتیب خواهیم داشت:

$$\Delta P_{T2}^\circ - \Delta P_{D2}^\circ + \Delta P_{12}^\circ = D_2 \Delta f^\circ \quad (5-79)$$

در رابطه اخیر بجای ΔP_{21} معادل آن یعنی $-\Delta P_{12}$ را جایگزین کرده‌ایم. چهار معادله (۵-۷۶) تا (۵-۷۹) را برحسب Δf° و ΔP_{12}° حل می‌کنیم:

$$\Delta f^\circ = -\frac{\Delta P_{D1} + \Delta P_{D2}}{\beta_1 + \beta_2} \quad [\text{HZ}] \quad (5-80)$$

$$\Delta P_{12}^\circ = \frac{\beta_1 \Delta P_{D2} - \beta_2 \Delta P_{D1}}{\beta_1 + \beta_2} \quad [\text{PU MW}] \quad (5-81)$$

که در آنها β_1 و β_2 بعنوان مشخصه پاسخ فرکانس هر منطقه از روابط زیر تعریف می‌شوند:

$$\beta_1 = D_1 + \frac{1}{R_1}$$

$$\beta_r = D_r + \frac{1}{R_r}$$

برای سهولت مقایسه عملکرد یک سیستم دو منطقه‌ای با یک سیستم تک منطقه‌ای، اگر دو منطقه را کاملاً مشابه فرض کنیم، داریم:

$$D_1 = D_r = D$$

$$R_1 = R_r = R$$

$$\beta_1 = \beta_r = \beta$$

بنابر این:

$$\Delta f^\circ = - \frac{\Delta P_{D1} + \Delta P_{D2}}{2\beta} \quad [\text{HZ}] \quad (5-82)$$

$$\Delta P_{12}^\circ = \frac{\Delta P_{D2} - \Delta P_{D1}}{2} \quad [\text{PU MW}] \quad (5-83)$$

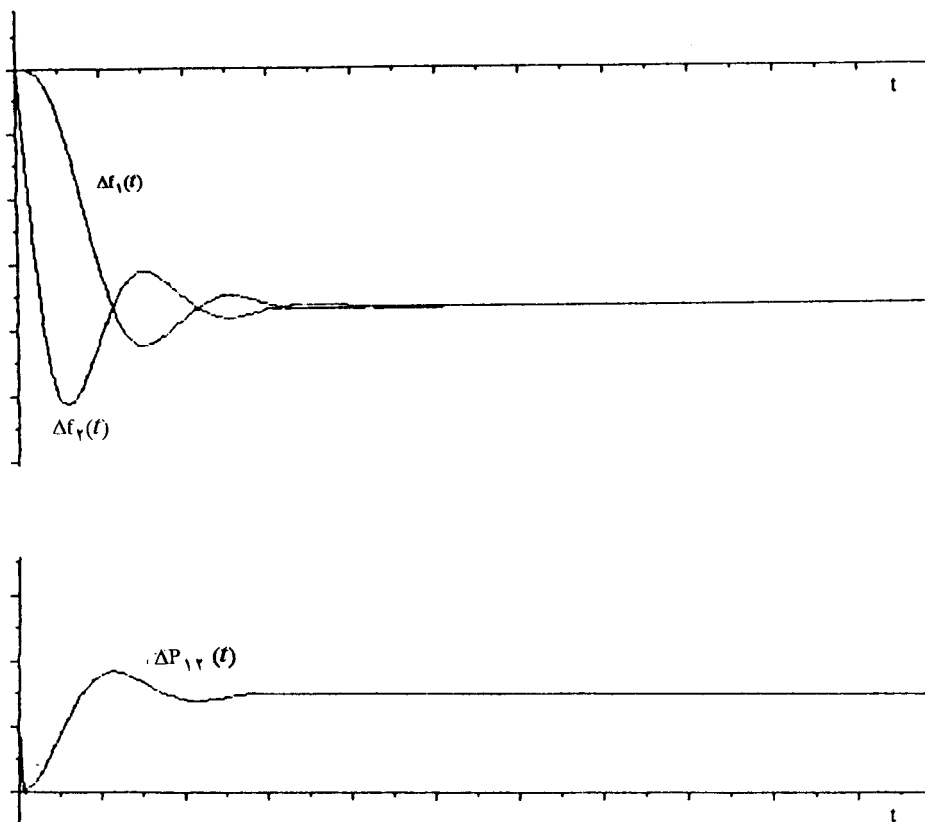
اگر تغییر بار فقط در یک منطقه، مثلاً منطقه ۲، بوجود آید خواهیم داشت:

$$\Delta f^\circ = - \frac{\Delta P_{D2}}{2\beta} \quad [\text{HZ}] \quad (5-84)$$

$$\Delta P_{12}^\circ = \frac{\Delta P_{D2}}{2} \quad [\text{PU MW}] \quad (5-85)$$

این روابط نشان می‌دهند که در سیستم دو منطقه‌ای، بر اثر تغییر بار پله‌ای در یک منطقه، مثلاً منطقه ۲، خطای فرکانس به نصف حالتی می‌رسد که این منطقه بصورت سیستم تک منطقه‌ای عمل نماید. همچنین نیمی از قدرت مورد نیاز بر اثر افزایش بار منطقه ۲ توسط منطقه ۱ تأمین می‌شود.

حال پاسخ دینامیکی سیستم را مورد مطالعه قرار می‌دهیم. سیستم قدرت دو منطقه‌ای از درجه هفتم است و با روش‌های تحلیلی مستقیم نمی‌توان آنرا بدست آورد. ابتدا باید با استفاده از شکل (۵-۲۰) معادلات دیفرانسیل درجه اول سیستم را که هفت معادله حالت خواهند بود بدست آورد. سپس از روش‌های آنالیز عددی و با استفاده از کامپیوترهای دیجیتال پاسخ دینامیکی سیستم $\Delta f_1(t)$ ، $\Delta f_2(t)$ و $\Delta P_{12}(t)$ را بدست آورد. در شکل (۵-۲۱) این پاسخ‌ها به ازاء پارامترهای مشخصی از دو منطقه و تغییر بار پله‌ای ΔP_{D2} توسط کامپیوتر رسم شده‌اند.



شکل ۵-۲۱: پاسخ دینامیکی سیستم قدرت دو منطقه‌ای در حالت کنترل نشده

نتایج استخراج شده: مرکز کامپیوتر دانشگاه علم و صنعت ایران

مثال ۵-۴: دو منطقه کنترل با مشخصات زیر از طریق خطوط رابط بیکدیگر متصل هستند:

$$S_1 = 1000 \text{ MVA}$$

$$S_2 = 4000 \text{ MVA}$$

$$R_1 = 2/5 \text{ HZ/PU MW}$$

$$R_2 = 2 \text{ HZ/PU MW}$$

$$D_1 = 0.016 \text{ PU MW/HZ}$$

$$D_2 = 0.01 \text{ PU MW/HZ}$$

افزایش باری معادل ۵۰ MW در منطقه ۱ اتفاق می افتد. خطای فرکانس و تغییر انتقال قدرت بین دو منطقه را در حالت ماندگار بدست آورید.

حل: قدرت اسمی منطقه ۱ را بعنوان قدرت مبنا انتخاب می کنیم:

$$S_b = 1000 \text{ MVA}$$

مشخصه پاسخ فرکانس و افزایش قدرت بار منطقه ۱ براساس مبنای انتخاب شده عبارتند از:

$$\beta_1 = D_1 + \frac{1}{R_1} = 0.016 + \frac{1}{2/5} = 0.416 \text{ PU MW/HZ}$$

$$\Delta P_{D1} = \frac{50}{1000} = 0.05 \text{ PU MW}$$

مشخصه پاسخ فرکانس منطقه ۲ در مبنای ۴۰۰۰ MVA بترتیب زیر محاسبه می شود:

$$\beta_2 = D_2 + \frac{1}{R_2} = 0.01 + \frac{1}{2} = 0.51 \text{ PU MW/HZ}$$

مقدار β_2 در مبنای $S_b = 1000 \text{ MVA}$ برابر است با:

$$\beta_2 = 0.51 \times \frac{4000}{1000} = 2.04 \text{ PU MW/HZ}$$

از معادلات (۵-۸۰) و (۵-۸۱) مقادیر Δf° و ΔP_{12}° را محاسبه می کنیم:

$$\Delta f^\circ = - \frac{0.05}{0.416 + 2.04} = -0.02036 \text{ HZ}$$

$$\Delta P_{12}^\circ = \frac{2.04 \times 0.05}{0.416 + 2.04} = -0.0415 \text{ PU MW}$$

$$= -0.0415 \times 1000 = -41.5 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{r1}^\circ = 41.5 \text{ MW}$$

اگر سیستم قدرت ۱ بصورت یک سیستم تک منطقه ای عمل نماید، بر اثر افزایش بار مذکور خطای فرکانس ماندگار برابر است با:

$$\Delta f^\circ = - \frac{\Delta P_{D1}}{\beta} = - \frac{0/0.5}{0/416} = -0/1202 \text{ HZ}$$

$$\frac{0/1202}{0/0.2036} = 5/9$$

و این نشان می‌دهد که خطای فرکانس این سیستم دو منطقه‌ای ۵/۹ برابر کمتر از خطای فرکانس سیستم تک منطقه‌ای شماره ۱ می‌باشد و این نتیجه مطلوب بخاطر جاری شدن قدرت ۴۱/۵ MW از منطقه ۲ به منطقه ۱ بدست آمده است.

اگر هر منطقه کنترل را معادل یک ژنراتور در نظر بگیریم، با استفاده از رابطه (۵۱-۵) نیز می‌توانیم نتایج فوق را بدست آوریم. برای این کار قدرت مبنا را ۵۰۰۰ MVA (جمع قدرت‌های اسمی دو منطقه) انتخاب می‌کنیم. با صرف‌نظر از D_1 و D_2 داریم:

$$S_1 = \frac{1000}{5000} = 0/2 \text{ PU MW}$$

$$S_2 = \frac{4000}{5000} = 0/8 \text{ PU MW}$$

$$\Delta P_{D1} = \frac{50}{5000} = 0/01 \text{ PU MW}$$

$$\Delta f^\circ = - \frac{\Delta P_D}{\frac{S_1}{R_1} + \frac{S_2}{R_2}} = - \frac{0/01}{\frac{0/2}{2/5} + \frac{0/8}{2}} = -0/2083 \text{ HZ}$$

اگر از D_1 و D_2 صرف‌نظر نکنیم، Δf° را با توجه به معادله (۵۱-۵) بصورت زیر می‌نویسیم:

$$\Delta f^\circ = \frac{-\Delta P_D}{(D_1 + \frac{1}{R_1})S_1 + (D_2 + \frac{1}{R_2})S_2}$$

و یا:

$$\Delta f^\circ = \frac{-\Delta P_D}{\beta_1 S_1 + \beta_2 S_2} = \frac{-0/01}{(0/416 \times 0/2) + (0/51 \times 0/8)}$$

$$= -0/02036 \text{ HZ}$$

۲-۱۱-۵ پاسخ سیستم کنترل دو منطقه‌ای در حالت کنترل شده

معادلات (۵-۸۰) و (۵-۸۱) و همچنین شکل (۵-۲۱) نشان می‌دهند که براثر تغییر بار در مناطق کنترل، خطای فرکانس ماندگار Δf° به صفر نمی‌رسد. همچنین قدرت انتقالی از منطقه ۱ به منطقه ۲ بمیزان ΔP_{12}° از حد قدرت انتقالی مورد توافق دو منطقه تجاوز می‌کند. برای اینکه خطای فرکانس و تغییر قدرت انتقالی بین دو منطقه در حالت ماندگار را به صفر برسانیم، از حلقه فیدبک دوم شامل انتگرال‌گیرها استفاده می‌کنیم (قسمت خط‌چین در بلوک دیاگرام شکل ۵-۲۰). همچنانکه در این بلوک دیاگرام دیده می‌شود علاوه بر خطای فرکانس Δf ، تغییر قدرت انتقالی بین دو منطقه نیز بعنوان ورودی انتگرال‌گیرها در نظر گرفته شده است تا ΔP_{12}° نیز صفر گردد. خطای کنترل منطقه $^{(1)}ACE$ ، عبارتست از ترکیب خطی دو خطای سیستم یعنی Δf و ΔP_{12} که در سیستم کنترل باید صفر گردند. در اینجا برای دو منطقه داریم:

$$ACE_1 = \Delta P_{12} + B_1 \Delta f_1$$

(۵-۸۶)

$$ACE_2 = \Delta P_{21} + B_2 \Delta f_2$$

ضرائب B_1 و B_2 به این خاطر در نظر گرفته شده‌اند تا با انتخاب مناسب آنها بتوان نحوه تغییرات خطای فرکانس هر منطقه در حالت دینامیکی را بصورت مطلوبی بدست آورد. خطای کنترل هر منطقه، ورودی انتگرال‌گیر مربوطه می‌باشد. بنابراین:

$$\Delta P_{C1} = -K_{I1} \int (\Delta P_{12} + B_1 \Delta f_1) dt = -K_{I1} \int ACE_1 dt \quad (5-87)$$

$$\Delta P_{C2} = -K_{I2} \int (\Delta P_{21} + B_2 \Delta f_2) dt = -K_{I2} \int ACE_2 dt \quad (5-88)$$

برای تعیین پاسخ سیستم در حالت ماندگار داریم:

$$\Delta P_{12}^\circ + B_1 \Delta f^\circ = 0$$

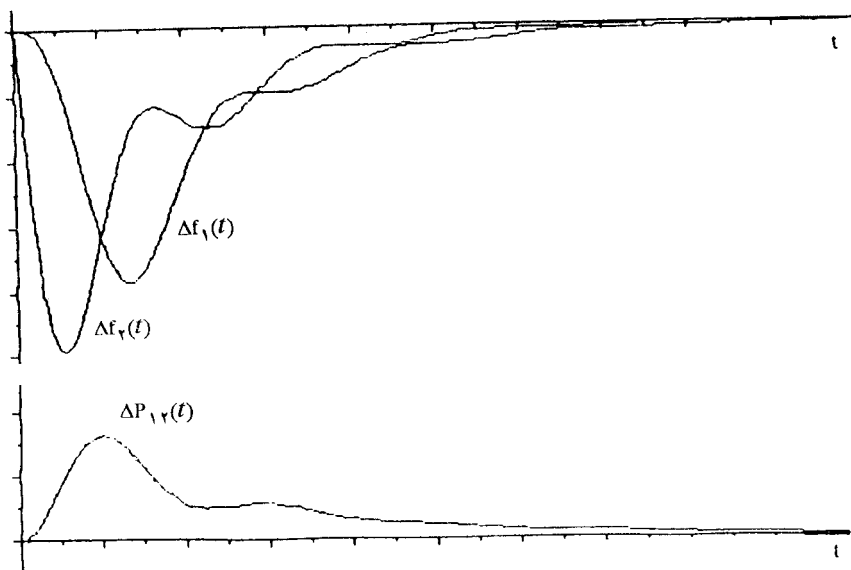
$$-\Delta P_{12}^\circ + B_2 \Delta f^\circ = 0$$

این معادلات فقط در شرایط زیر برقرار خواهند بود:

$$\Delta f^{\circ} = 0$$

$$\Delta P_{12}^{\circ} = 0$$

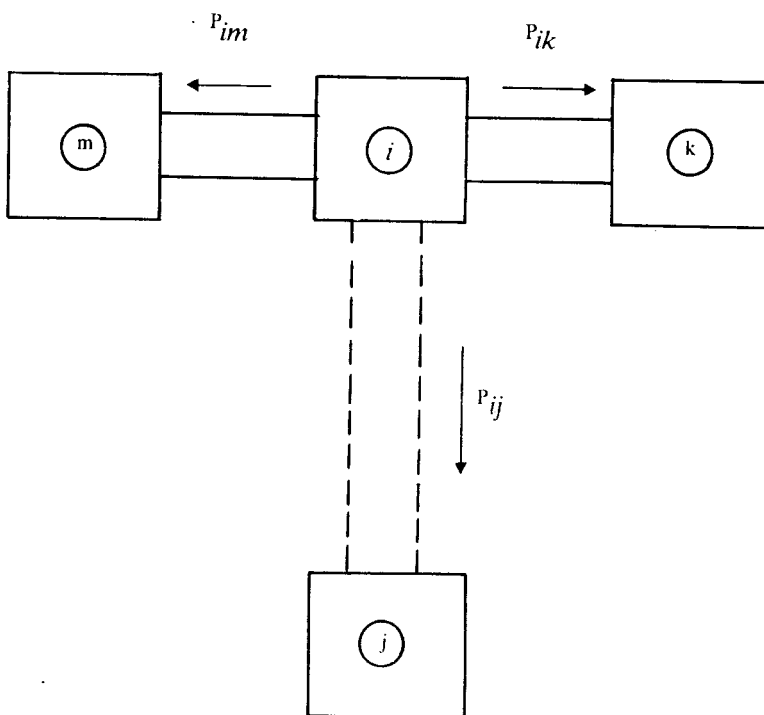
برای بررسی پاسخ دینامیکی سیستم، باید معادلات حالت سیستم توسط کامپیوتر حل شوند. تعداد معادلات حالت در بررسی پاسخ دینامیکی ۹ خواهد بود. از نظر کیفیت و سرعت پاسخ باید به ازاء مقادیر مختلف B_1, B_2, K_{I1}, K_{I2} منحنی‌های $\Delta f_1(t)$ و $\Delta f_2(t)$ را رسم نمود و پاسخ مطلوب را انتخاب کرد. تجربه نشان می‌دهد که اگر K_I کمتر از K_{Icrit} و نزدیک به آن، و کمیت B در حدود مقدار β (مشخصه پاسخ فرکانس منطقه) انتخاب گردند پاسخ نسبتاً مطلوبی بدست خواهد آمد. در شکل (۵-۲۲) پاسخ‌های $\Delta f_1(t)$ و $\Delta f_2(t)$ و $\Delta P_{12}(t)$ برای تغییر بار پله‌ای در منطقه ۲، به ازاء پارامترهای مشخص یک سیستم دو منطقه‌ای در شرایطی که $B_1=B_2=0/5$ و $K_{I1}=K_{I2}=0/4$ هستند توسط کامپیوتر رسم شده‌اند.



شکل ۵-۲۲: پاسخ دینامیکی سیستم دو منطقه‌ای در حالت کنترل شده

۵-۱۲ سیستم قدرت چند منطقه‌ای

مباحث و نتایج مربوط به سیستم قدرت دو منطقه‌ای برای یک سیستم n منطقه‌ای قابل تعمیم است. در شکل (۵-۲۳) یک سیستم قدرت n منطقه‌ای نشان داده شده‌است که در آن منطقه کنترل i به مناطق k, \dots, j, \dots, n متصل می‌باشد.



شکل ۲۳-۵: سیستم قدرت n منطقه‌ای

بر اثر تغییر بار، تغییر قدرت انتقالی از منطقه i به مناطق دیگر عبارتست از:

$$\Delta P_{ik} + \Delta P_{im} + \dots + \Delta P_{ij} + \dots + \Delta P_{in} = \sum_{j=1}^n \Delta P_{ij}$$

تغییر قدرت بین در منطقه i و زیرساخت معادله (۵-۶۹) برابر است با:

$$\Delta P_{ij} = \gamma \pi T_{ij}^{\circ} \left[\int \Delta f_i dt - \int \Delta f_j dt \right]$$

تبدیل لاپلاس طرفین معادله اخیر را بدست آوریم:

$$\Delta P_{ij}(s) = \frac{\gamma \pi T_{ij}^{\circ}}{s} \left[\Delta F_i(s) - \Delta F_j(s) \right]$$

بنابراین تغییر قدرت انتقالی از منطقه i به مناطق دیگر در حوزه لاپلاس بدست می‌آید:

$$\sum_{j=1}^n \Delta P_{ij}(s) = \frac{\gamma \pi}{S} \sum_{j=1}^n T_{ij}^{\circ} [\Delta F_i(s) - \Delta F_j(s)] \quad (5-89)$$

رابطه توازن قدرت برای منطقه i بر اثر تغییر بار را این چنین می نویسیم:

$$\Delta P_{Ti}(s) - \Delta P_{Di}(s) - \sum_{j=1}^n \Delta P_{ij}(s) = \frac{\gamma H_i}{f^{\circ}} S \Delta F_i(s) + D_i \Delta F_i(s) \quad (5-90)$$

و از آن جا $\Delta F_i(s)$ را بدست می آوریم:

$$\Delta F_i(s) = \frac{K_{Pi}}{1 + ST_{Pi}} \left[\Delta P_{Ti}(s) - \Delta P_{Di}(s) - \sum_{j=1}^n \Delta P_{ij}(s) \right] \quad (5-91)$$

که در آن:

$$K_{Pi} = \frac{1}{D_i} \quad (5-92)$$

$$T_{Pi} = \frac{\gamma H_i}{f^{\circ} D_i}$$

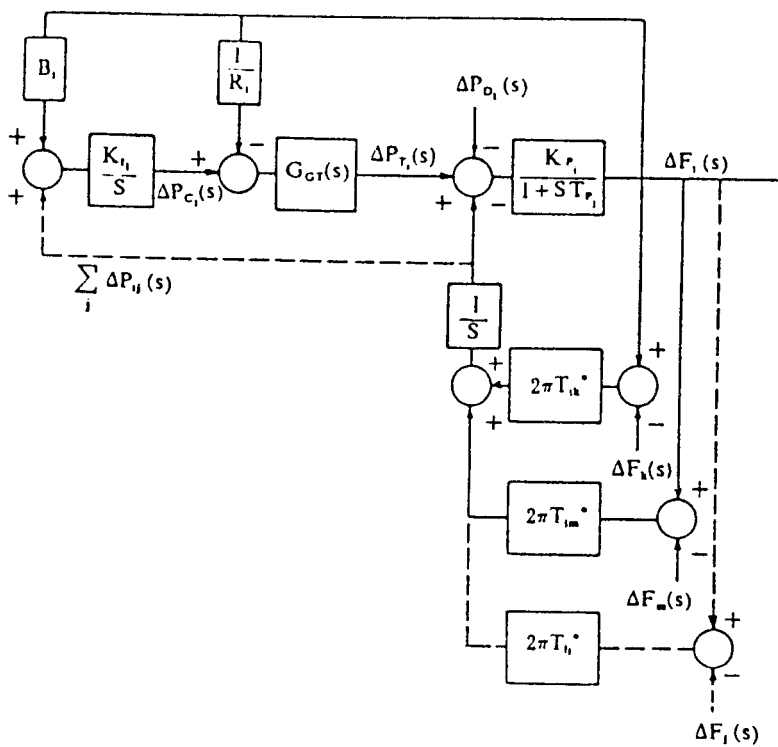
بلوک دیاگرام منطقه کنترل i از سیستم n منطقه ای را می توان مطابق شکل (۵-۲۴) رسم نمود. خطای کنترل منطقه i ، ACE_i ، برابر است با:

$$ACE_i = B_i \Delta f_i + \sum_{j=1}^n \Delta P_{ij} \quad (5-93)$$

فرمان کنترل منطقه ΔP_{Ci} از انتگرال ACE_i به این ترتیب بدست می آید:

$$\Delta P_{Ci} = -K_{Ii} \int ACE_i dt = -K_{Ii} \int (B_i \Delta f_i + \sum_{j=1}^n \Delta P_{ij}) dt \quad (5-94)$$

به این ترتیب باید در زمان کوتاهی اطلاعات قدرت های انتقالی همه خطوط رابط به مرکز سیستم کنترل داده شود. سپس جمع این قدرت ها با قدرت تعیین شده در قرارداد مناطق مقایسه گردد تا بتوان خطای کنترل منطقه را از معادله (۵-۹۳) تعیین نمود و فرمان کنترل لازم و مناسب ΔP_{Ci} را به سیستم اعمال کرد تا خطای مذکور به صفر برسد.



شکل ۲۴-۵: بلوک دیاگرام منطقه از یک سیستم n منطقه‌ای

مسائل فصل پنجم

۵-۱ در یک سیستم قدرت، ماتریس Z_{bus} و ولتاژ شین‌ها (از محاسبه پخش بار) داده شده‌اند. اگر در شین ۳ خازنی قرار دهیم تا دامنه ولتاژ این شین را از ۰/۹ PU به ۱ PU برساند، قدرت این خازن را بدست آورید. همچنین ولتاژ شین‌های ۱ و ۲ را پس از نصب خازن محاسبه نمایید.

| شماره شین | ۱ | ۲ | ۳ |
|-----------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| ولتاژ | $1.04 \angle -5^\circ$ | $0.96 \angle -6^\circ$ | $0.92 \angle -10^\circ$ |

$$Z_{bus} = j \begin{bmatrix} 0.15 & 0.12 & 0.1 \\ 0.12 & 0.2 & 0.14 \\ 0.1 & 0.14 & 0.25 \end{bmatrix} \text{ PU}$$

۵-۲ یک سیستم قدرت تک منطقه‌ای شامل دو ژنراتور با مشخصات زیر است:

$$S_1 = 100 \text{ MVA} \quad H_1 = 2 \text{ S} \quad R_1 = 2 \text{ HZ/PU MW}$$

$$S_2 = 150 \text{ MVA} \quad H_2 = 4 \text{ S} \quad R_2 = 3 \text{ HZ/PU MW}$$

الف) اگر بار سیستم بمیزان ۵۰ MW افزایش یابد، فرکانس منطقه در حالت ماندگار جدید چقدر کاهش خواهد یافت. همچنین هر یک از ژنراتورها چه سهمی در تولید و تأمین این افزایش بار خواهند داشت. از D صرف‌نظر کنید.

ب) چنانچه از ثابت زمانی‌های گاورنر و توربین صرف‌نظر شود و $D = 0.01 \text{ PU MW/HZ}$ منظور گردد، معادله تغییرات خطای فرکانس $\Delta f(t)$ را بر اثر تغییر بار فوق‌الذکر بدست آورید.

۵-۳ یک ژنراتور با مشخصات زیر توسط خط رابط به شبکه بزرگی متصل است. ضریب سنکرونیزه کننده خط رابط $T_{12} = 2 \text{ PU}$ می‌باشد. شبکه بزرگ را یک شین بی‌نهایت فرض کنید. تغییرات $\Delta f(t)$ را بدست آورید.

$$\begin{array}{lll}
 T_G = 0 & T_T = 1 \text{ S} & f^\circ = 50 \text{ HZ} \\
 \Delta P_D = 0.1 \text{ PU} & \Delta P_C = 0 & H = 5 \text{ S} \\
 R = 2 \text{ HZ/PU MW} & T_P = 20 \text{ S} &
 \end{array}$$

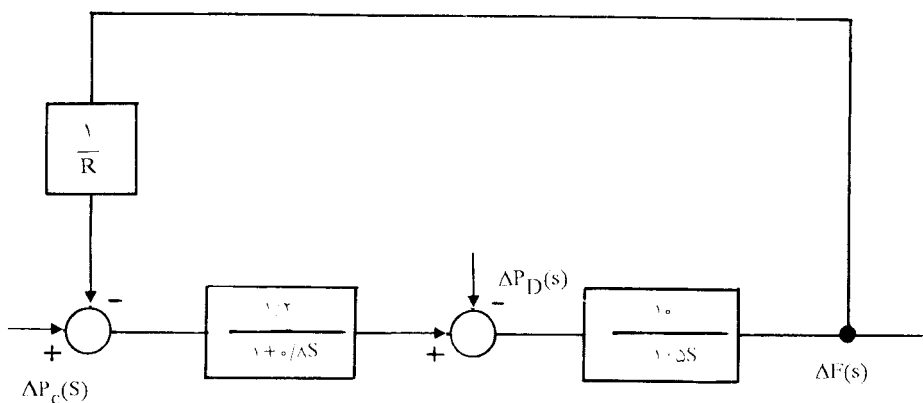
۴-۵ سه ژنراتور با قدرت‌های نامی ۱۰۰ و ۲۵۰ و ۳۰۰ مگاوات آمپر بارهای شبکه بزرگی را تغذیه می‌کنند. ضریب تنظیم ژنراتورها ۲ و ۴ و ۵ درصد نسبت به مقادیر نامی آنها است. بر اثر افزایش بار سیستم، فرکانس آن ۰/۳ هرتز کاهش می‌یابد. سهم هر یک از ژنراتورها را برای افزایش تولید برحسب مگاوات بدست آورید.

۵-۵ بلوک دیاگرام سیستم کنترل بار - فرکانس یک منطقه کنترل در شکل (۵-۲۵) نشان داده شده است. فرکانس نامی $f^\circ = 50 \text{ HZ}$ است. بر اثر افزایش باری معادل $\Delta P_D = 0.1 \text{ PU}$ فرکانس منطقه ۰/۲ هرتز کاهش می‌یابد.

(الف) ضریب تنظیم سرعت منطقه R را بدست آورید.

(ب) در حالت ماندگار جدید، چه مقدار از افزایش بار مذکور توسط ژنراتور و چه مقدار از طریق کاهش مصرف بارها تأمین می‌شود.

(ج) برای اینکه مقدار نهائی تغییر فرکانس (Δf°) به صفر برسد، از تغییر دهنده سرعت استفاده می‌کنیم. برای این منظور ΔP_C را محاسبه کنید. تغییرات ΔP_C را پله‌ای فرض کنید.



شکل ۵-۲۵: مربوط به مسأله (۵-۵)

۵-۶ در یک سیستم قدرت دو منطقه‌ای، در اثر افزایش بار ۲۰۰ مگاوات در منطقه ۱، قدرت ۱۵۰ مگاوات از منطقه ۲ به منطقه ۱ جاری می‌شود. اگر خط رابط بین دو منطقه باز باشد در این حالت فرکانس منطقه ۱ به $49/5$ هرتز و فرکانس منطقه ۲ به ۵۰ هرتز می‌رسد. در صورتیکه $D_1 = D_2 = 10 \text{ MW/HZ}$ باشند، ضریب تنظیم سرعت هریک از مناطق را برحسب HZ/MW بدست آورید.

۵-۷ ژنراتوری با ضریب تنظیم $R = 2/5 \text{ HZ/PU MW}$ بار امپدانسی $Z = 1 + j 0.3 \text{ PU}$ را در فرکانس $f^\circ = 50 \text{ HZ}$ تغذیه می‌کند. حلقه کنترل دوم باز است ($\Delta P_c = 0$). قسمت حقیقی امپدانس باید چقدر کاهش یابد تا فرکانس به ۴۹ هرتز برسد. فرض کنید مدار کنترل ولتاژ ژنراتور، ولتاژ آنرا ثابت نگه می‌دارد.