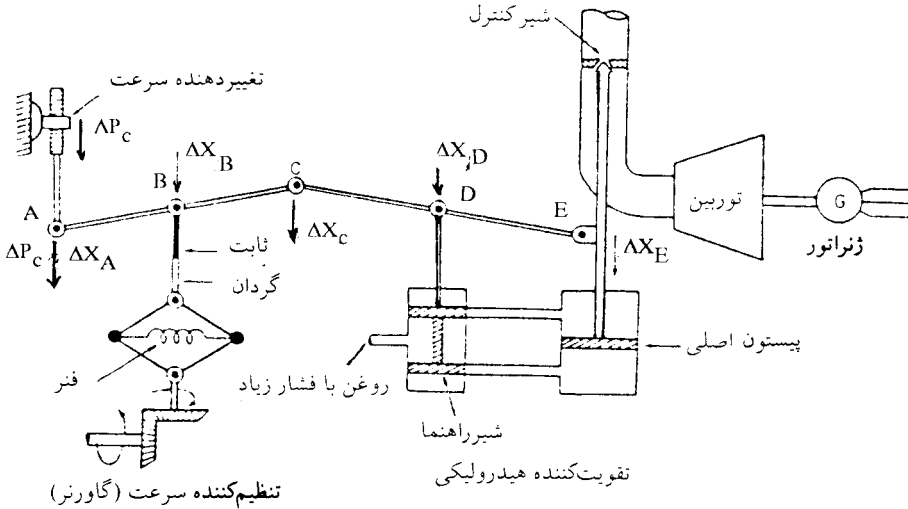


۵-۶ کنترل توان اکتیو و فرکانس

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 می‌شود. در شکل (۱۲-۵) فقط یک طبقه از این تقویت کننده‌ها 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 می‌یابد. به این ترتیب که با پائین آمدن تغییر دهنده سرعت، نقطه A نیز بطرف پائین کشیده می‌شود. نقطه B ثابت است. بنابر این نقطه C بالا رفته و نقطه D را هم با خود بالا می‌برد. بالا رفتن نقطه D در تقویت کننده هیدرولیکی باعث پائین آمدن نقطه E می‌شود که به این ترتیب شیر بخار بیشتر باز شده، بخار بیشتری روی توربین رفته و باعث افزایش سرعت آن می‌گردد 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 نمی‌کند. بر اثر افزایش سرعت ژنراتور (افزایش فرکانس) گوی‌ها بطرف خارج متمایل شده و فنر باز می‌شود. در نتیجه نقطه B بطرف پائین کشیده می‌شود. پائین آمدن نقطه B باعث پائین آمدن نقاط C و D شده و بخار ورودی به توربین کاهش می‌یابد و به این ترتیب سرعت توربین و قدرت خروجی ژنراتور کاهش می‌یابد. چنانچه سرعت ژنراتور کم شود، نقطه B بالا رفته و باعث پائین آمدن نقطه E و افزایش سرعت و قدرت خروجی آن می‌گردد.

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

1- Hydraulic Amplifier

2- Pilot Valve

3- Main Piston

4- Speed Changer

5- Speed Governor

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_B و ΔX_A نیز بترتیب 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_B و ΔX_A 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:

$$\Delta X_D = K_3 \Delta X_C + K_4 \Delta X_E \quad (5-20)$$

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:

$$\Delta X_C(s) = K_1 \Delta F(s) - K_2 \Delta P_C(s)$$

$$\Delta X_D(s) = K_3 \Delta X_C(s) + K_4 \Delta X_E(s)$$

$$\Delta X_E(s) = -\frac{K_5}{S} \Delta X_D(s)$$

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:

$$\Delta X_E(s) = \frac{\frac{K_1 K_3}{K_2}}{1 + S \frac{1}{K_3 K_5}} \left[\Delta P_C(s) - \frac{K_1}{K_2} \Delta F(s) \right]$$

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:

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

$$K_G = \frac{K_1 K_3}{K_2} \quad \text{بهره (۱) ماندگار گاورنر}$$

$$T_G = \frac{1}{K_3 K_5} \quad \text{ثابت زمانی سیستم گاورنر}$$

$$R = \frac{K_2}{K_1} \quad \text{ضریب تنظیم (۲) سرعت گاورنر}$$

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 هر تیز 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:

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

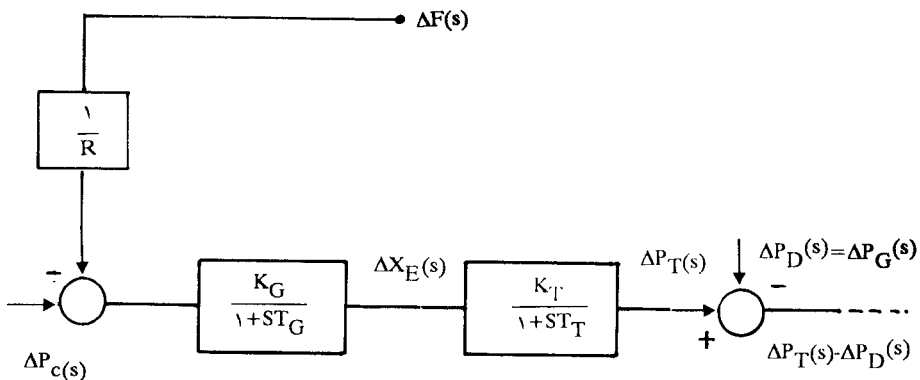
بنابر این تغییرات قدرت خروجی توربین برابر است با:

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

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، بنابراین:

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

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:

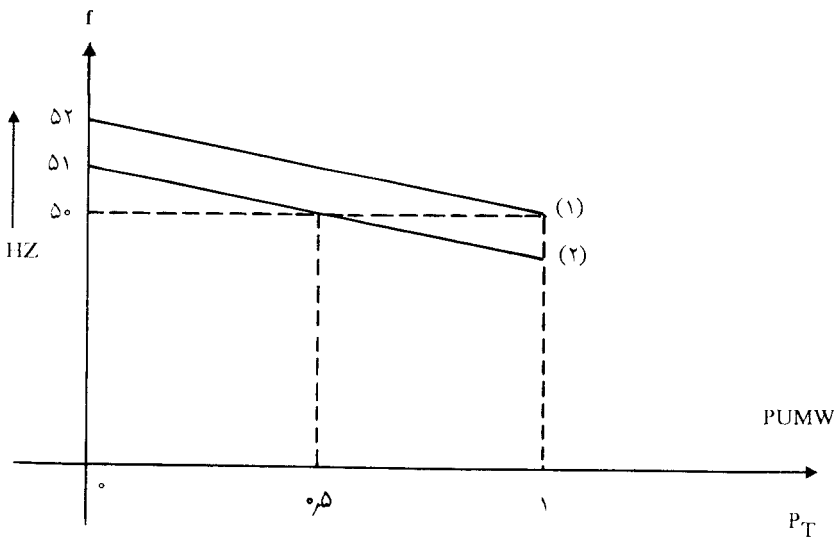
$$\Delta P_T^\circ = -\frac{1}{R} \Delta f^\circ \quad (5-27)$$

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 ΔP_C و Δf 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 وضعیت 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 وضعیت 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 منطقه‌ای را در نظر می‌گیریم که فقط دارای یک ژنراتور با قدرت خروجی P_G° در حالت ماندگار می‌باشد. این ژنراتور مجموعه بارهای منطقه $P_D^{(1)}$ و تلفات منطقه را تأمین می‌نماید. فرکانس نامی منطقه f° و انرژی جنبشی $W^{(2)}$ ژنراتور در این فرکانس W° می‌باشد. انرژی جنبشی طبق رابطه زیر با فرکانس زاویه‌ای 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 $\Delta P_T - \Delta P_D$ 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. بنابراین 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 مبنای 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:

$$\Delta F(s) = \frac{\frac{1}{D}}{1 + S \frac{\gamma_H}{f^{\circ}D}} [\Delta P_T(s) - \Delta P_D(s)]$$

و یا:

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

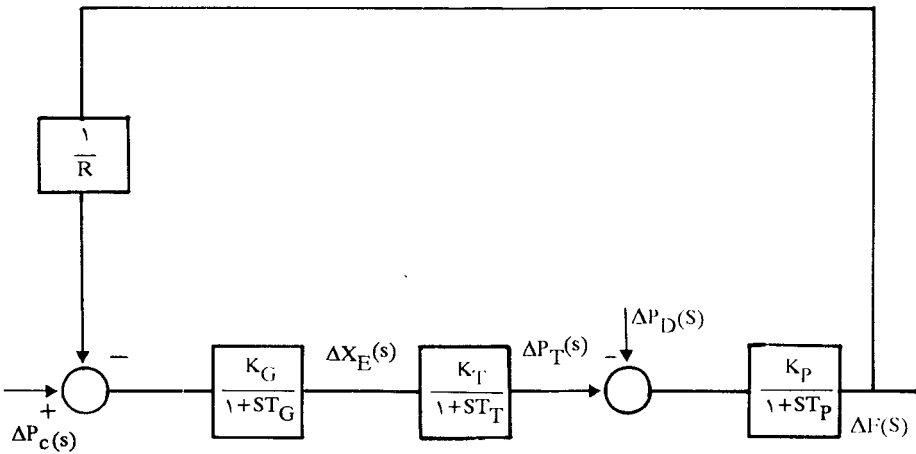
که در آن:

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

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

$$T_P = \frac{\gamma_H}{f^{\circ}D} \quad \text{ثابت زمانی سیستم الکتریکی (ثانیه)} \quad (5-40)$$

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

۷-۵ 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:

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

حال چنانچه در شکل (۵-۱۵)، $\Delta P_C(s)$ را دخالت دهیم و معادله خروجی سیستم $\Delta F(s)$ را برحسب ΔP_C و ΔP_D 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 ۲-۵: 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:

$$\text{الف) } T_G = T_T = 0$$

$$\text{ب) } T_T = 0/5 \text{ S}, T_G = 0/1 \text{ S}$$

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

$$P_D^\circ = \frac{400}{500} = 0/8 \text{ PU}$$

$$D = \frac{\partial P_D}{\partial f} = \frac{0/8}{50} = 0/016 \text{ PUMW/HZ}$$

$$K_p = \frac{1}{D} = \frac{1}{0/016} = 62/5 \text{ HZ/PUMW}$$

$$T_p = \frac{2H}{f^\circ D} = \frac{2 \times 5}{50 \times 0/016} = 12/5 \text{ S}$$

$$\beta = D + \frac{1}{R} = 0/016 + \frac{1}{2/5} = 0/416 \text{ PUMW/HZ}$$

$$\Delta f^\circ = -\frac{\Delta P_D}{\beta} = -\frac{0/03}{0/416} = -0/072 \text{ HZ}$$

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:

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

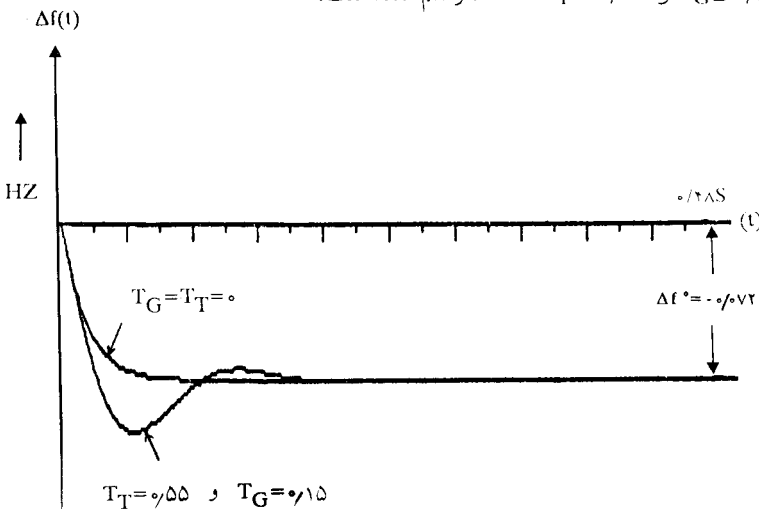
$$\frac{1}{T} = \frac{1}{0/481} = 2/081 \text{ S}^{-1}$$

پاسخ دینامیکی تغییر فرکانس عبارتست از:

$$\Delta f(t) = -0/072(1 - e^{2/081t}) \text{ HZ}$$

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 $T_T = 0/18 \text{ S}$ و $T_G = 0/5 \text{ S}$ هستند رسم شده است.



شکل ۵-۱۶: پاسخ دینامیکی سیستم LFC به افزایش پلدهای 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 مشخص کننده 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 $\frac{1}{R}$ بر مراتب بیشتر از D می‌باشد. در این مثال MW/HZ $\frac{1}{R} = \frac{1}{2/5} = 0/4$ بوده و مقدار $D = 0/016 \text{ PU MW/HZ}$ 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 $T_p = 12/5 \text{ S}$ به مقدار قابل ملاحظه $T = 0/481 \text{ S}$ 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 بر اساس رابطه (۴۶-۵) ثابت زمانی T کمتر شده و سیستم زودتر پایدار می‌شود.

هنگامی که افزایش باری معادل 15 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 $\Delta f^\circ = -0/072$ هرگز حاصل می‌گردد. در شرایط ماندگار جدید قدرت 15 MW مورد نیاز از دو قسمت زیر تأمین می‌شود:

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

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

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

$$= 0/001152 \times 500 = 0/577 \text{ MW}$$

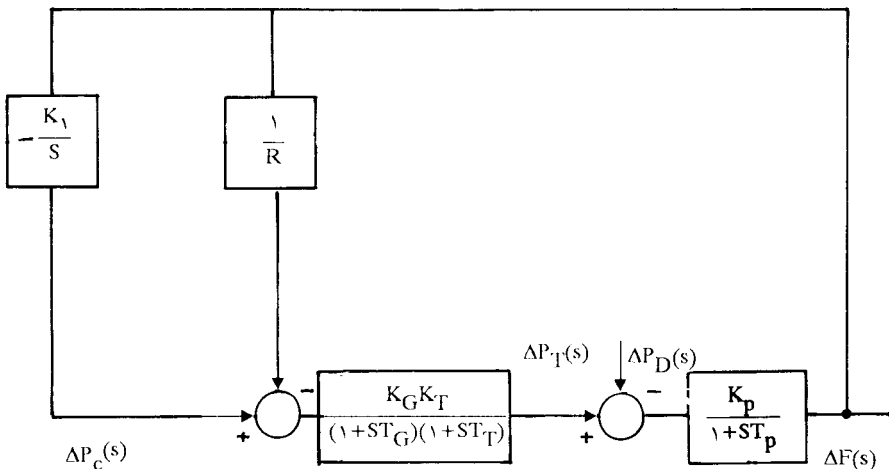
بنابر این حدود ۹۶٪ قدرت مورد نیاز بارها از طریق افزایش تولید ژنراتور و حدود ۴٪ از طریق کاهش مصرفی بارها تأمین می‌شود.

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.

بر اساس 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 $T_T = T_G = 0$ باشد، 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:

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

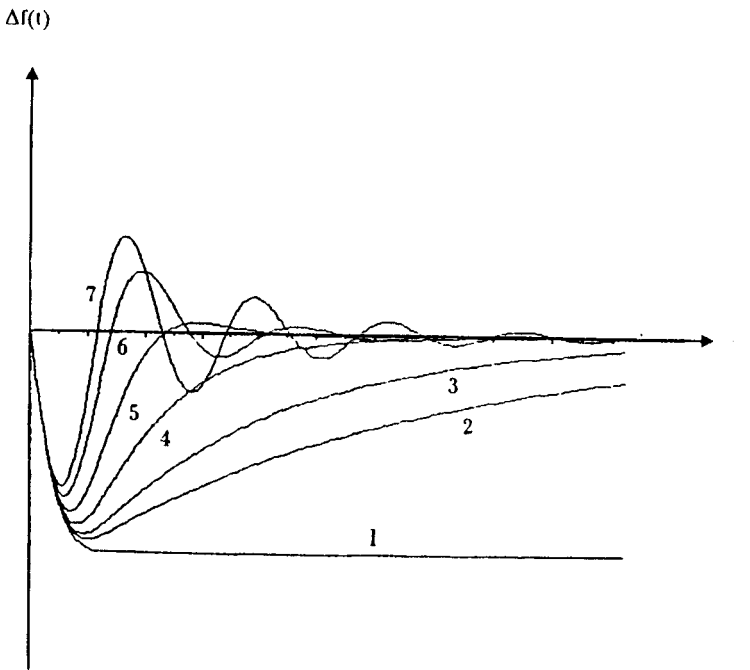
برای اینکه تغییرات $\Delta F(s)$ میراثی بحرانی باشد، داریم:

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

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 (۱۸-۵) تغییرات خطای فرکانس $\Delta f(t)$ را بر حسب 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 ۱۸-۵: 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 قدرت‌های نامی S_1, S_2, \dots, S_m و ضرایب تنظیم سرعت R_1, R_2, \dots, R_m باشد، بر اثر تغییر بار پله‌ای ΔP_D در منطقه، خطای فرکانس حالت ماندگار منطقه Δf° ایجاد می‌گردد، بطوریکه برای ژنراتور ۱ طبق تعریف می‌توان نوشت:

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

قدرت مینا در رابطه فوق برای ΔP_{G1} ، همان قدرت نامی ژنراتور ۱، S_1 می‌باشد. بهمین ترتیب برای ژنراتورهای ۲ و \dots و m در قدرت‌های مینای S_2, \dots, S_m داریم:

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

در حالت ماندگار ΔP_D برحسب PU در مینای 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 مینا برای $\Delta P_D, \Delta P_{G1}^\circ, \Delta P_{G2}^\circ, \dots, \Delta P_{Gm}^\circ$ ، قدرت نامی منطقه S می‌باشد و بنابراین 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 می‌آید:

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

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

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

و یا:

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

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 پله‌ای 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، می‌توان 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 می‌آید:

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

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

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

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

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

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

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:

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

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 $1 \approx K_G K_T$ و $T_T \approx 0$ و $T_G \approx T_T$ کلیه پارامترهای منطقه برای بلوک دیاگرام نشان داده شده در شکل (۱۷-۵) 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 می‌باشد. اگر بار منطقه ۵۰ 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 نمائید که هر یک از ژنراتور چه سهمی از تأمین افزایش بار ۵۰ 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 P_D ، 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 می‌آوریم:

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

و از آنجا ثابت زمانی سیستم الکتریکی منطقه محاسبه می‌گردد:

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

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 می‌کنیم:

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

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

ثابت زمانی کل سیستم در منطقه عبارتست از:

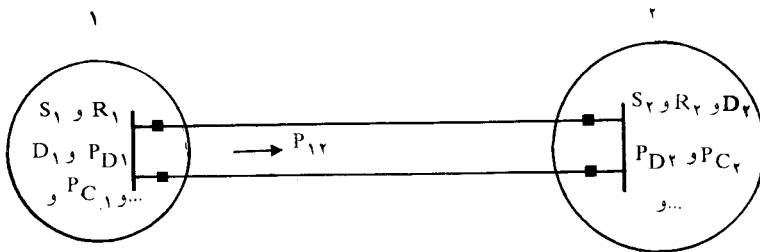
$$T = \frac{RT_P}{R + K_P} = \frac{2 \times 20}{2 + 100} = 0.392 \text{ S}$$

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

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

۱۱-۵ سیستم قدرت دو منطقه‌ای

شکل (۱۹-۵) 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 ۱۹-۵: 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 پارامترهائی نظیر $S_1, R_1, \beta_1, T_{P1}$ و ... پارامترهای منطقه ۱ (ژنراتور معادل منطقه ۱) هستند. اگر $V_1^\circ = |V_1^\circ| \angle \delta_1^\circ$ و $V_2^\circ = |V_2^\circ| \angle \delta_2^\circ$ و ولتاژ دو منطقه ۱ و ۲ 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 (5-6) 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 (5-67) 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 (5-6-3) 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 (5-36) 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 (5-36) 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:

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

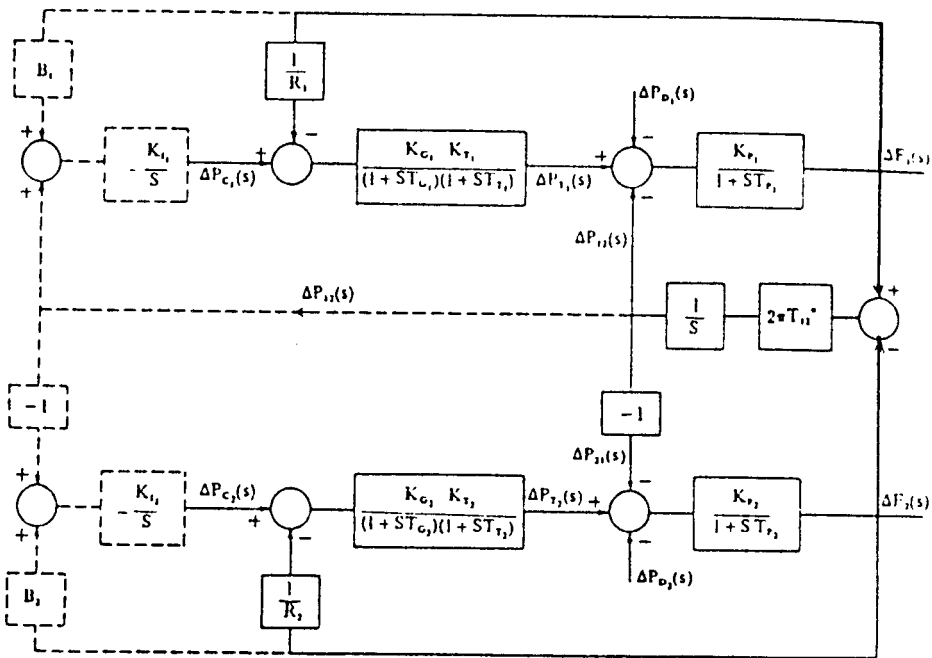
$$K_{P1} = \frac{1}{D_1} \tag{5-74}$$

$$T_{P1} = \frac{\gamma H_1}{f^\circ D_1}$$

خطای فرکانس منطقه ۲، $\Delta F_2(s)$ را نیز مشابه معادله (5-73) می توان نوشت:

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

با توجه به روابط (5-70) تا (5-75) بلوک دیاگرام یک سیستم قدرت دو منطقه‌ای در شکل (5-20) نشان داده شده‌است. در این شکل قسمت خط چین مربوط به حالت کنترل کامل سیستم است که هنوز مورد بحث قرار نگرفته است.



شکل 5-20: 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:

$$D_1 = D_r = D$$

$$R_1 = R_r = R$$

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

بنابراین:

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

$$\Delta P_{1r}^\circ = \frac{\Delta P_{Dr} - \Delta P_{D1}}{2} \quad [\text{PU MW}] \quad (5-83)$$

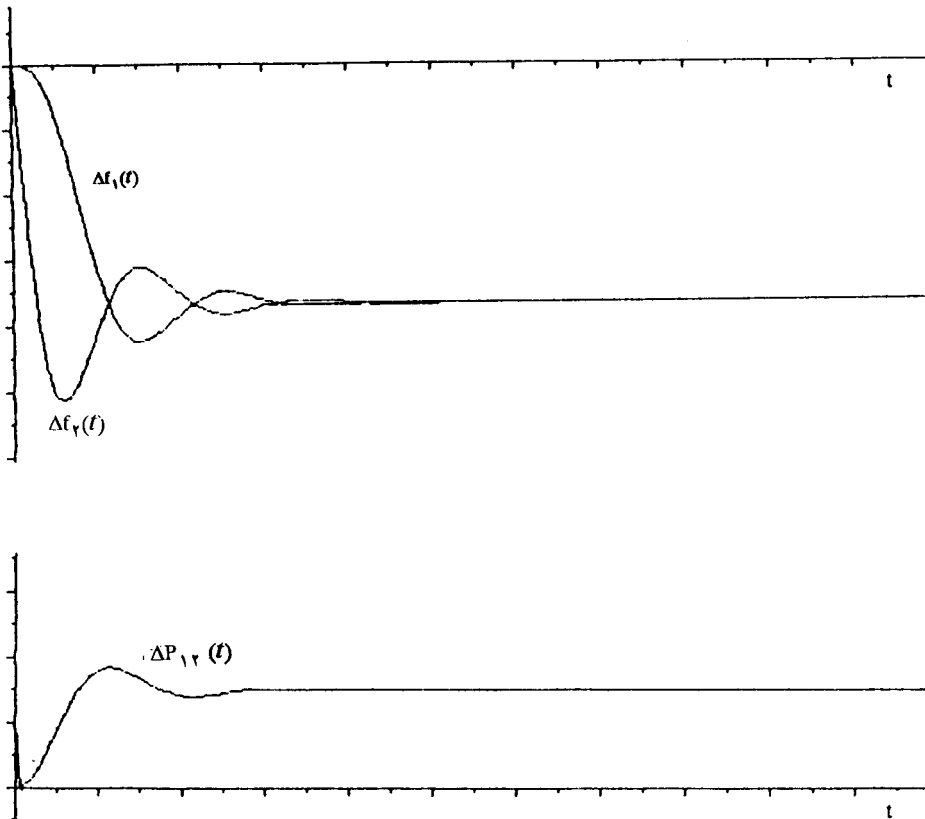
اگر تغییر بار فقط در یک منطقه، مثلاً منطقه ۲، بوجود آید خواهیم داشت:

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

$$\Delta P_{1r}^\circ = \frac{\Delta P_{Dr}}{2} \quad [\text{PU MW}] \quad (5-85)$$

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 $\Delta P_{1r}(t)$ را بدست آورد. در شکل (۵-۲۱) این پاسخ‌ها به ازاء پارامترهای مشخصی از دو منطقه و تغییر بار پله‌ای ΔP_{Dr} توسط کامپیوتر رسم شده‌اند.



شکل ۲۱-۵: پاسخ دینامیکی سیستم قدرت دو منطقه‌ای در حالت کنترل نشده
 نتایج استخراج شده: مرکز کامپیوتر دانشگاه علم و صنعت ایران

مثال ۴-۵: 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 50 MW در منطقه ۱ اتفاق می‌افتد. 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 می‌کنیم:

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

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 4000 MVA بترتیب زیر محاسبه می‌شود:

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

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 می‌کنیم:

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

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

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

$$\Delta P_{21}^\circ = 41.5 \text{ MW}$$

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

$$\Delta f^{\circ} = -\frac{\Delta P_{D1}}{\beta} = -\frac{0/05}{0/416} = -0/1202 \text{ HZ}$$

$$\frac{0/1202}{0/2036} = 5/9$$

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 مینا را ۵۰۰۰ MVA (جمع قدرت‌های اسمی دو منطقه) انتخاب می‌کنیم. با صرف نظر 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 صرف نظر 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:

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

$$= -0/2036 \text{ HZ}$$

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 بر اثر 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 $ACE^{(1)}$ ، 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:

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

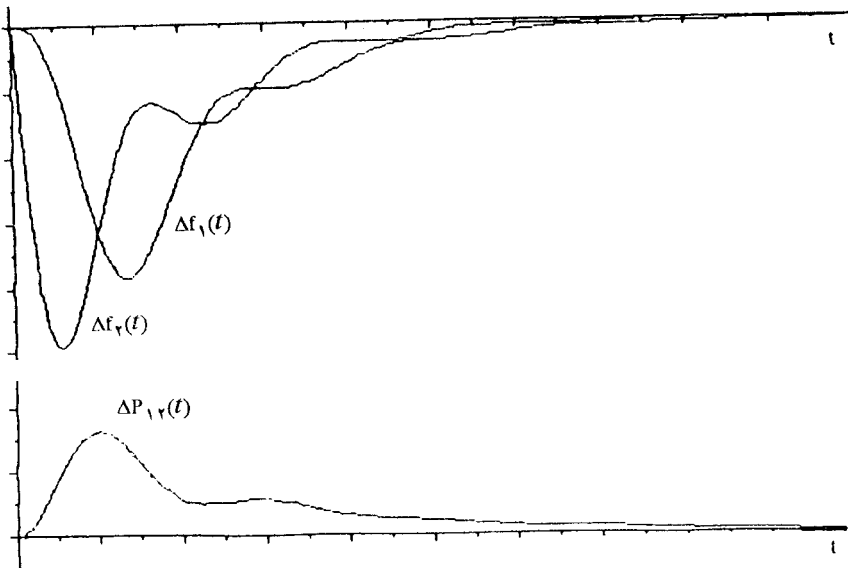
$$-\Delta P_{12}^\circ + B_2 \Delta f^\circ = 0$$

این معادلات فقط در شرایط زیر برقرار خواهند بود:

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

$$\Delta P_{1,2}^{\circ} = 0$$

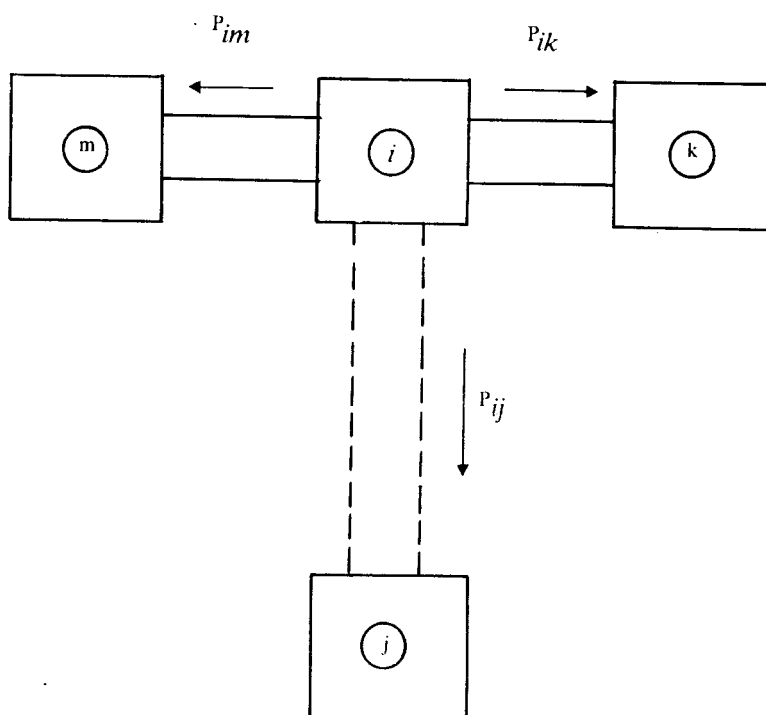
برای بررسی پاسخ دینامیکی سیستم، باید معادلات حالت سیستم توسط کامپیوتر حل شوند. تعداد معادلات حالت در بررسی پاسخ دینامیکی ۹ خواهد بود. از نظر کیفیت و سرعت پاسخ باید به ازاء مقادیر مختلف B_1, B_2, K_{I1}, K_{I2} منحنی‌های $\Delta f_1(t)$ و $\Delta f_2(t)$ را رسم نمود و پاسخ مطلوب را انتخاب کرد. تجربه نشان می‌دهد که اگر K_I کمتر از $K_{I_{crit}}$ 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 $\Delta P_{1,2}(t)$ 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 زیراساس 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:

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

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

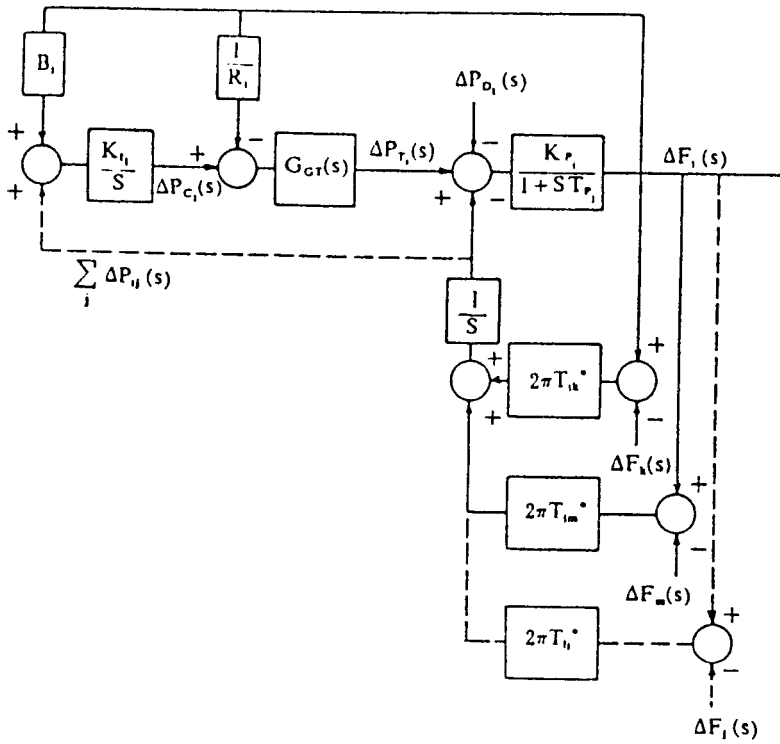
بلوک دیاگرام منطقه کنترل i از سیستم n منطقه ای را می توان مطابق شکل (۵-۲۴) رسم نمود. خطای کنترل منطقه i ، ACE_i ، برابر است با:

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

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 ۰/۹PU به ۱PU 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	$۱/۰۴\angle -۱۰^\circ$	$۰/۹\angle -۱۰^\circ$	$۰/۹\angle -۱۰^\circ$

$$Z_{bus} = j \begin{bmatrix} ۰/۱۵ & ۰/۱۲ & ۰/۱ \\ ۰/۱۲ & ۰/۲ & ۰/۱۴ \\ ۰/۱ & ۰/۱۴ & ۰/۲۵ \end{bmatrix} \text{ PU}$$

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

$$S_1 = ۱۰۰ \text{ MVA} \quad H_1 = ۲ \text{ S} \quad R_1 = ۲ \text{ HZ/PU MW}$$

$$S_2 = ۱۵۰ \text{ MVA} \quad H_2 = ۴ \text{ S} \quad R_2 = ۳ \text{ HZ/PU MW}$$

الف) اگر بار سیستم بمیزان ۵۰MW 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 $D = ۰/۰۱ \text{ PU MW/HZ}$ 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 $T_{12} = ۲ \text{ PU}$ می‌باشد. شبکه بزرگ را یک شین بی‌نهایت فرض کنید. تغییرات $\Delta f(t)$ را بدست آورید.

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

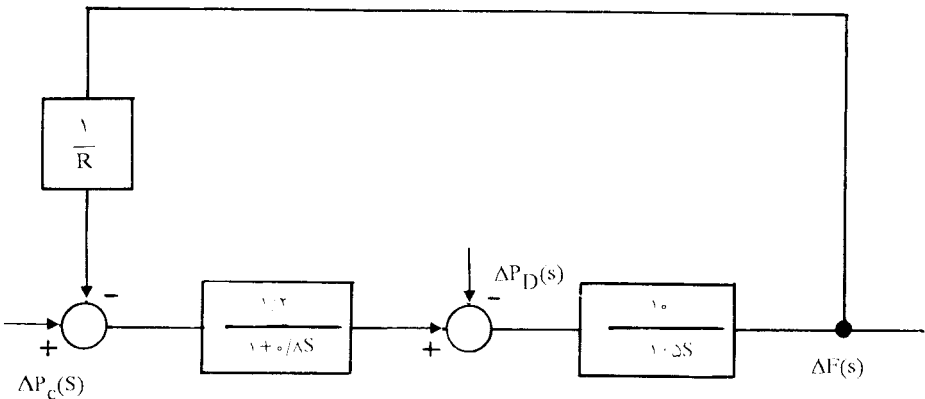
۴-۵ سه ژنراتور با قدرت‌های نامی ۱۰۰ و ۲۵۰ و ۳۰۰ مگاوات آمپر بارهای شبکه بزرگی را تغذیه می‌کنند. ضریب تنظیم ژنراتورها ۲ و ۴ و ۵ درصد نسبت به مقادیر نامی آنها است. بر اثر افزایش بار سیستم، فرکانس آن ۰/۳ هرتز کاهش می‌یابد. سهم هر یک از ژنراتورها را برای افزایش تولید برحسب مگاوات بدست آورید.

۵-۵ بلوک دیاگرام سیستم کنترل بار - فرکانس یک منطقه کنترل در شکل (۲۵-۵) 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) درحالت 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 ۲۵-۵: 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 امپدانس $Z = 1 + j0.3 \text{ PU}$ را در فرکانس $f = 50 \text{ HZ}$ 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.