به نام خدا

مجتمع آموزش عالی گناباد

مجتمع آموزش عالی گناباد

بهره برداری از سیستم های قدرت

استاد درس: امین رنجبران

عضو هیات علمی مجتمع آموزش عالی گناباد

فهرست مطالب

1 کنترل فرکانس

2 توزیع اقتصادی تولید

3 پخش بار بهینه

4 در مدار قرار دادن واحدها

5 تخمین حالت

مراجع

۱- بهره برداری و کنترل سیستم های قدرت تالیف: Wood & Voll enberg ترجمه دکتر سیف

۲- بهره برداری وکنترل سیستم های قدرت تالیف: Kundor ترجمه: دکتر سیف و دکتر خاکی صدیق

بارم

- پروژه: ۴ نمره
- پایان ترم: ۱۴ نمره
- حضور در کلاس و تمرینات: ۲ نمره

۱- کنترل فرکانس در سیستم های قدرت

۱-عوامل کنترل سیستم قدرت

۲-کنترل فرکانس

۳-خطای انباشته فرکانس

۴- کنترل تولید

۵-عملکرد کنترل تکمیلی

۶- کنترل خط ارتباطی

۷-تخصیص تولید

۸-پیاده سازی کنترل اتوماتیک تولید(AGC)

۹- ویژگیهای کنترل اتوماتیک تولید

مقدمه

- بارهای یک سیستم قدرت ثابت نبوده و دائماً در حال تغییرند.
- بخار ورودی به توربین‌های بخاری و آب ورودی به توربین‌های آبی برای تأمین مصرف توان حقیقی (اکتیو) شبکه مدام در حال تغییر می‌باشند. در غیر اینصورت فرکانس بصورت نامطلوبی تغییر خواهد نمود.
- جریان تحریک ژنراتورها می‌بایست مدام تحت کنترل باشد. زیرا در غیر اینصورت ولتاژ در نقاط مختلف شبکه از حدود متعارف خود خارج می‌گردد.

کنترل فرکانس

عوامل کنترل سیستم قدرت

هنگامی که مساله کلی تر کنترل سیستم قدرت در نظر باشد، کمیتهای متداولی که بر کل سیستم تاثیر دارند فرکانس سیستم و در سیستمهای به هم پیوسته عبور توان از خطوط رابط است. کمیت دیگری که راهنمای با ارزشی در تعیین کارآیی سیستم است، جابجایی زاویه ای در سیستم است که در بخش انتقال انرژی بحث می شود.

همان گونه که میدانیم تقریبا تمامی سیستمهای قدرت از جریان متناوب استفاده می کنند. فرکانس در تمام نقاط سیستم ثابت است، مگر تغییرات لحظه ای کوچک فرکانس که به هنگام افزایش یا کاهش بار ژنراتور با تغییرات زاویه توان آن به وجود می آید. به این ترتیب، فرکانس، کمیت پایه ای است که می توان آن را اندازه گرفت و برای بهره برداری از ژنراتورها مورد استفاده قرار داد. بعلاوه، از آن جا که تقریبا تمام مولدها از نوع سنکرون هستند، در سرعت سنکرون الکتریکی به هم قفل شده اند.

با افزایش یا کاهش فرکانس سیستم، سرعت مولدهای متصل به آن به همان اندازه از نظر الکتریکی، بالا یا پایین می رود. مفهوم این گفته آن است که اگر فرکانس از ۶۰ به ۱۶۰ هرتز افزایش یابد، تمام ژنراتورهای متصل به هم سرعتشان را افزایش میدهند تا در ۱۶۰ هرتز کار کنند. البته، تغییر سرعت فیزیکی را تعداد قطبهای ماشین بنابه رابطه زیر تعیین می کند:

$$rpm = \frac{120\,f}{NP}$$

- rpm = دور بر دقیقه
- f = فرکانس به هرتز
- NP = تعداد قطبها

مثلا یک ماشین دو قطبی در ۶۰ هرتز با سرعت

$$\frac{120 \times 60}{2} = 3600 rpm$$

این مساله، نمونه ای ازآلترناتور با توربین بخاری است.

واحدهای آبی در سرعتهای به مراتب پایین تری کار می کنند.

مثلا، یک ماشین ۱۸ قطبی در ۶۰ هرتز با سرعت ۴۰۰ rpm کار می کند

باید تاکید کرد که با وجود این که دو ماشین مثالهای فوق درسرعتهای بسیار متفاوت فیزیکی کارمی کنند، سرعتهای الکتریکی آنها، یکی است.

$$\frac{120 \times 60}{18} = 400 rpm$$

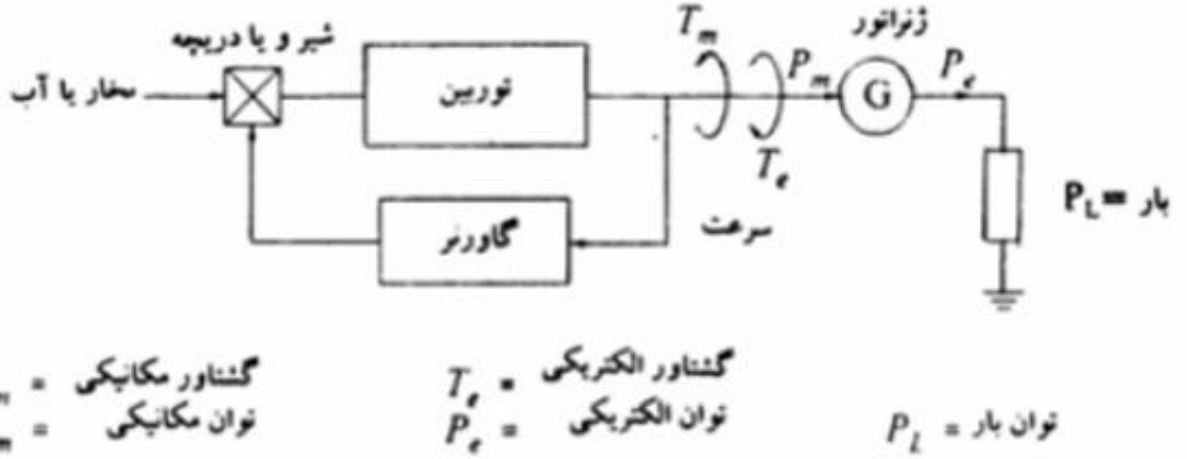
کنترل فرکانس

از آن جا که فرکانس در تمام اجزای سیستم مشترک بوده و به آسانی اندازه گیری می شود، نخستین کمیتی است که برای کنترل سیستم به کارمیرود گاورنرهای مولد از توپهای گردان بهره می گیرند. این سیستم، سیستم هیدرولیکی را به کار می اندازد که شیرهای بخار محرکهای اولیه ماشین را باز و بسته می کند. این عمل، ورود انرژی به سیستم را کم یا زیاد می کند (سوخت در نیروگاه حرارتی، یا آب در نیروگاه آبی) تا سرعت(فرکانس) را در حد مطلوب نگاه دارد. جدیداً گاورنرهای الکترونیکی مورد استفاده اند که فرکانس را حس می کنند و ابزارهیدرولیکی را به کار می اندازند تا وضعیت دریچه یا شیر کنترل را بدون استفاده از توپهای گردان کنترل کنند.

۱-۱- مبانی کنترل سرعت در یک واحد

اگر ژنراتور را یک جرم بزرگ در حال چرخش در نظر بگیریم فرکانس وقتی ثابت است که $T_{mech} = T_{elec}$ باشد.

اگر $T_{mech} > T_{elec}$ باشد سرعت افزایش می یابد ولی اگر $T_{mech} < T_{elec}$ باشد سرعت کم می شود. برای بازگرداندن سرعت به مقدار نامی باید کنترل بین تولید و مصرف صورت پذیرد .



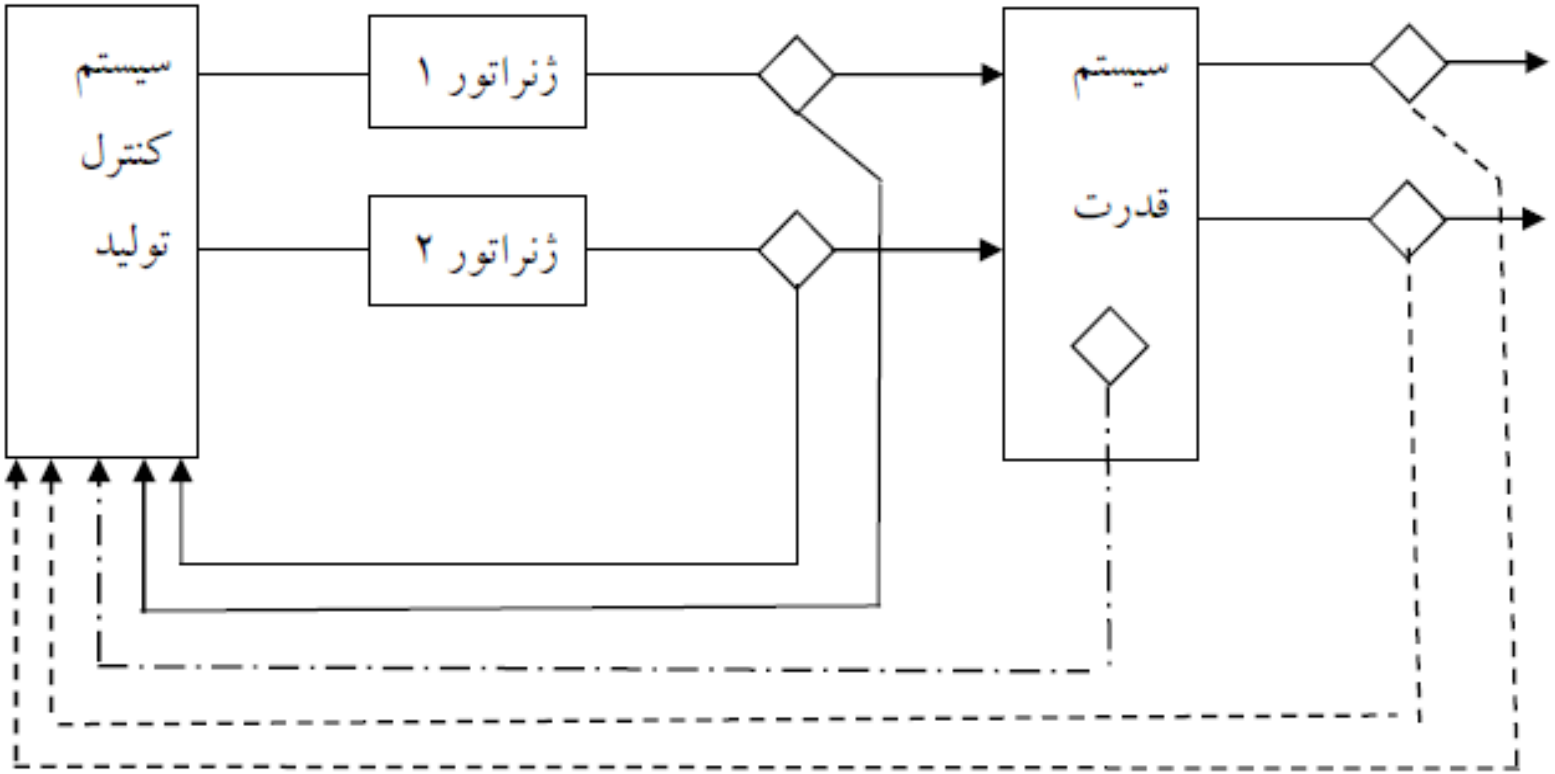
ژنراتوری که بار منفردی را تغذیه می‌کند

اگر: $T_{mech} = T_{elec}$ باشد سرعت ثابت است.

$T_{mech} > T_{elec}$ باشد سرعت افزایش می یابد .

$T_{mech} < T_{elec}$ باشد سرعت کم می شود .

شمای کلی کنترل تولید در یک سیستم قدرت در شکل زیر نشان داده شده است :



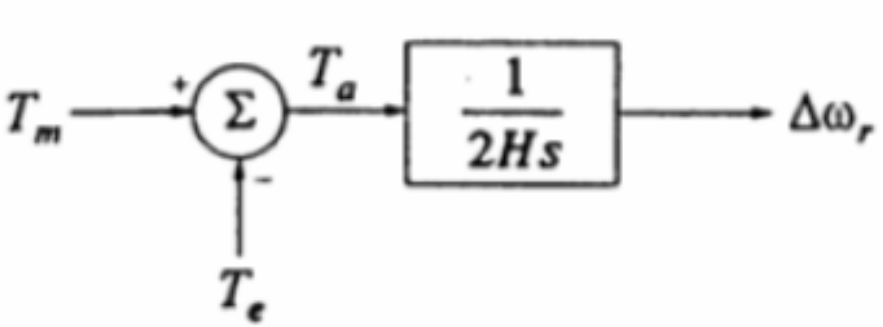
اندازه گیری سرعت فرکانس

اندازه گیری فرکانس سیستم

حفظ توان تبادلی با همسایگان

کنترل تولید در سیستم قدرت

زمانی که تغییری در بار بوجود می آید این تغییر به صورت لحظه ای در گشتاور الکتریکی خروجی ژنراتور اثر می گذارد. این موضوع باعث عدم تطابق بین گشتاور مکانیکی T_m و گشتاور الکتریکی T_e می گردد که به نوبه خود باعث تغییر در سرعت می گردد. تابع تبدیل زیر نشانگر ارتباط بین سرعت روتور به صورت تابعی از گشتاورهای الکتریکی و مکانیکی است.



تابع تبدیل مربوط به سرعت و گشتاورها

عملگر لاپلاس	=	s
گشتاور مکانیکی (pu)	=	T_m
گشتاور الکتریکی (pu)	=	T_e
گشتاور شتابدهنده (pu)	=	T_a
ثابت لختی (MW–Sec/MVA)	=	H
انحراف سرعت روتور (pu)	=	$\Delta\omega_r$

در مطالعات بار- فرکانس ترجیح دارد که رابطه فوق براساس توان های الکتریکی و مکانیکی بیان گردد رابطه بین P و T به صورت زیر است :

$$P = \omega_r T \qquad (۱-۱)$$

$$P = P_0 + \Delta P \qquad (۲-۱)$$

$$\omega_r = \omega_{r0} + \Delta\omega_r \qquad (۳-۱)$$

$$T = T_0 + \Delta T \qquad (٤-۱)$$

از رابطه(۱-۱) خواهیم داشت

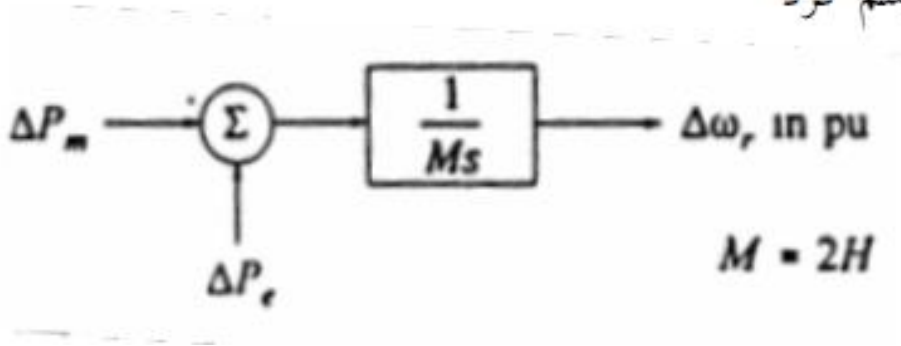
$$P_0 + \Delta P = (\Delta T + T_0)(\omega_0 + \Delta\omega_r) \qquad (۵-۱)$$

$$\Delta P = \omega_0 \Delta T + T_0 \Delta\omega_r \qquad \omega_0 = 1 \qquad (۶-۱)$$

بنابراین :

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \Delta T_m - \Delta T_e \qquad (۷-۱)$$

لذا می توان بلوک دیاگرام را به صورت زیر رسم کرد



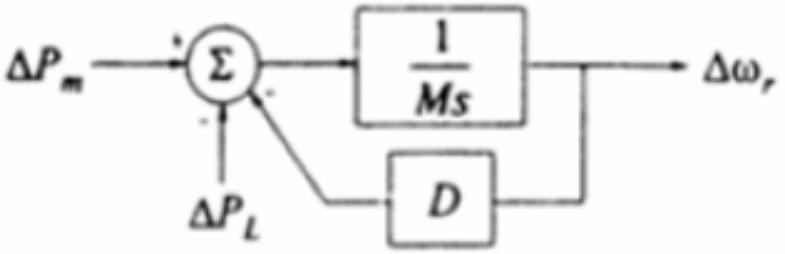
پاسخ بار به انحراف فرکانس

به طور کلی بار یک سیستم قدرت ترکیبی از انواع گوناگون تجهیزات الکتریکی است. برای بارهای اهمی از قبیل روشنایی و گرمایشی توان الکتریکی مستقل از فرکانس است اما در بارهای موتوری به علت تغییرات سرعت موتور، توان الکتریکی با فرکانس تغییر می کند.

مشخصه کلی بستگی یک بار ترکیبی به فرکانس به صورت زیر می باشد :

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D\Delta\omega_r \qquad (۸-۱)$$

ثابت میرایی بار به صورت تغییر درصدی در بار بازای یک درصد تغییر در فرکانس بیان می گردد .نمودار بلوکی سیستم که شامل تغییرات بار باشد در شکل زیرنشان داده شده است .



ΔP_L : تغییرات غیر حساس به فرکانس بار

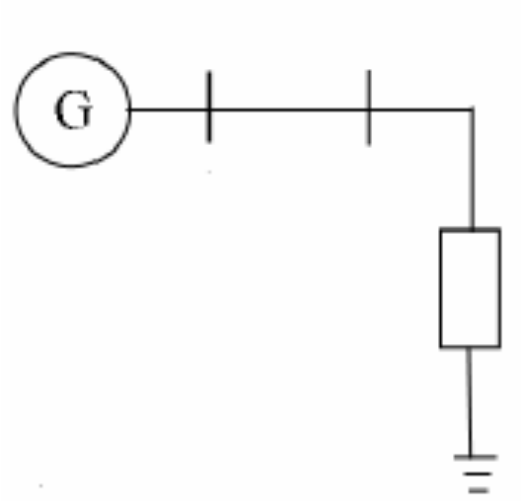
$\Delta\omega_r$: تغییر حساس به فرکانس بار

D : ثابت میرایی بار

مثال ۱

اگر بار 200 مگاواتی سیستم زیر 1.5% بازای 1% تغییر در فرکانس تغییر کند و داشته باشیم $S = 312.5MVA$ و $M = 6.4p.u$ ، بلوک دیاگرام سیستم را رسم کنید .

$$D = \frac{1.5\%}{1\%} = 1.5 \qquad D_{new} = 1.5 * \frac{200}{312.5} = 0.96$$



$$Ms + D = 6.4s + 0.96$$

مثال ۲

سیستم کوچکی شامل 4 واحد مشابه به تولید $500MVA$ است که بار کل $1020MW$ را تغذیه می کند ثابت لختی H هر واحد در پایه $500MVA$ برابر 5 است. در صورت تغییر 1% در فرکانس بار به مقدار 1.5% تغییر می کند. اگر افت ناگهانی $20MW$ در بار رخ دهد :

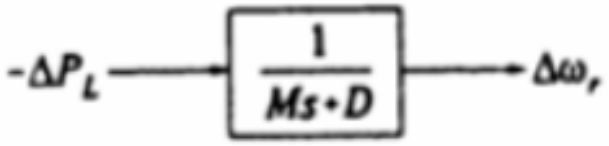
الف – نمودار بلوکی سیستم را زمانی که H و D در پایه $2000MVA$ بیان شده است تعیین کنید .

ب- با فرض آنکه هیچ کنترلی بر سرعت وجود نداشته باشد انحراف فرکانس رابیابید.

حل:

الف: برای چهار واحد در پایه $2000MVA$ داریم :

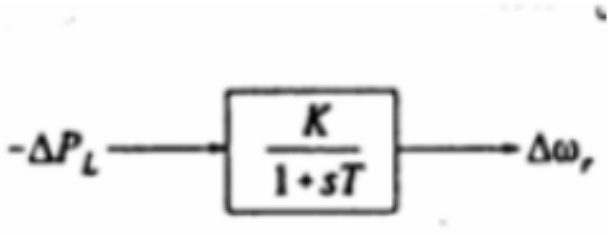
$$H = 5(\frac{500}{2000})4 = 5$$



$$D = 1.5 * \frac{1000}{2000}$$

$$M = 2H = 10$$

ب- اگر $\Delta P_m = 0$ باشد زمانی که پارامترها در مبنای واحد و در پایه $2000MVA$ بیان شده است بلوک دیاگرام به صورت زیر می باشد



$$K = \frac{1}{D} = \frac{1}{0.75} = 1.33$$

$$T = \frac{M}{D} = \frac{10}{0.75} = 13.33\sec$$

$$\Delta P_L = -20MW = \frac{-20}{2000} = -0.01p.u$$

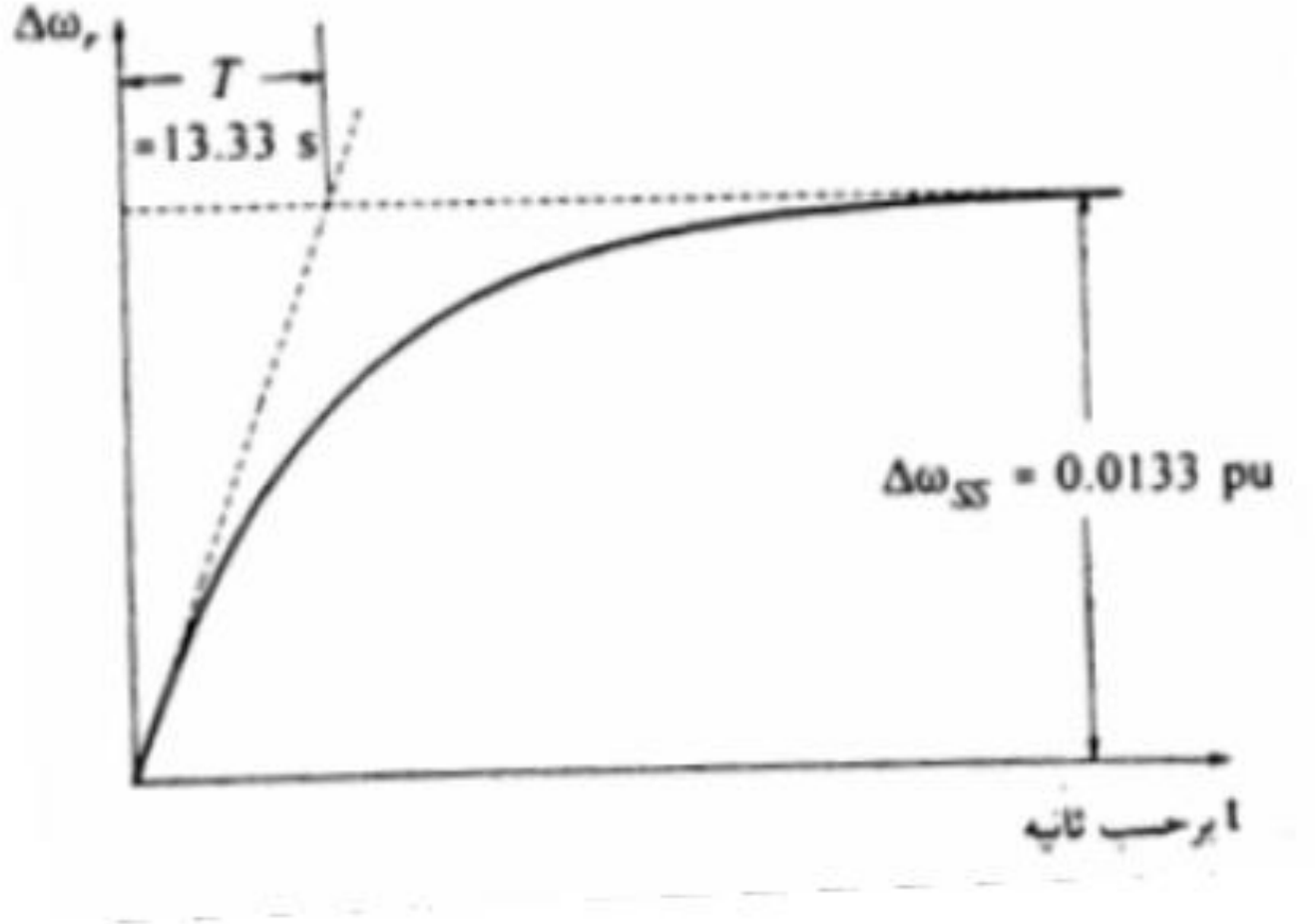
بنابراین از نمودار بلوکی می توا ن نتیجه گرفت که

$$\Delta\omega_r = -(\frac{-0.01}{s})(\frac{k}{1+Ts})$$

با استفاد از عکس تبدیل لاپلاس داریم

$$\Delta\omega_r = -0.01ke^{-\frac{t}{T}} + 0.01K = -0.0133e^{-0.075t} + 0.0133$$

$$\Delta\omega_{rss} = -\frac{\Delta P_L}{D} = 0.0133p.u = 0.0133 * 6 = 0.8Hz$$


Δω,
T
=13.33 s
Δω_ss = 0.0133 pu
ا برحسب ثانیه

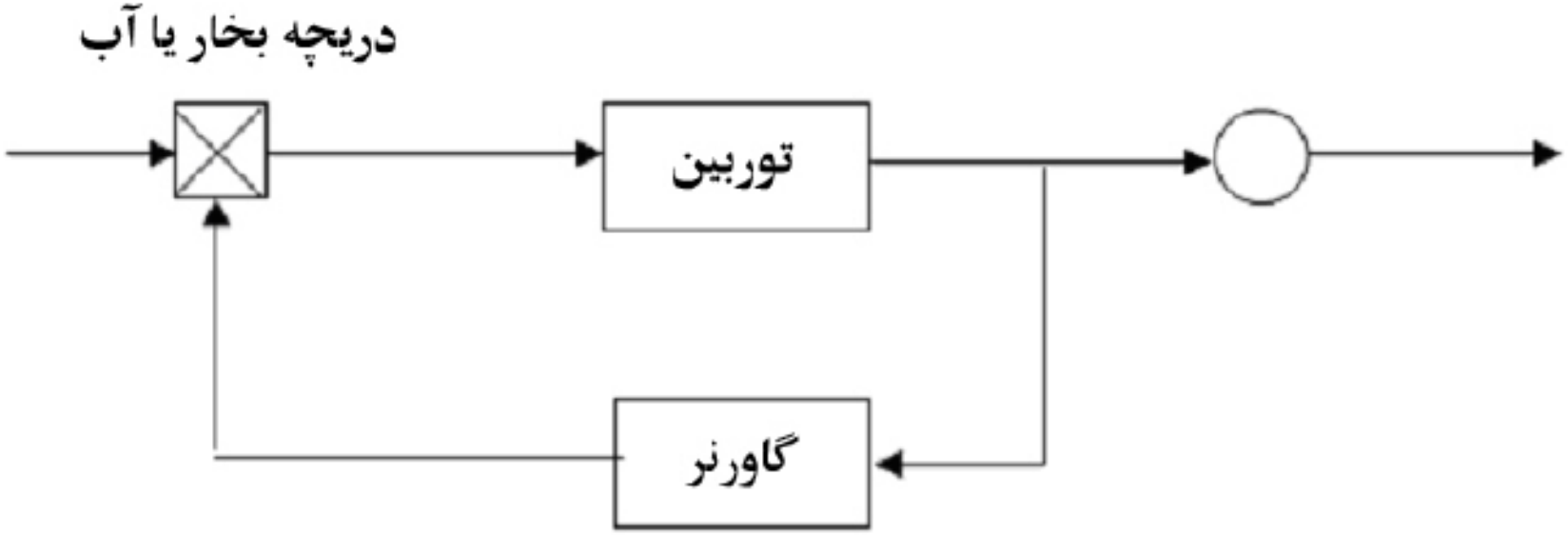
پاسخ توربین به تغییرات فرکانس از طریق گاورنر

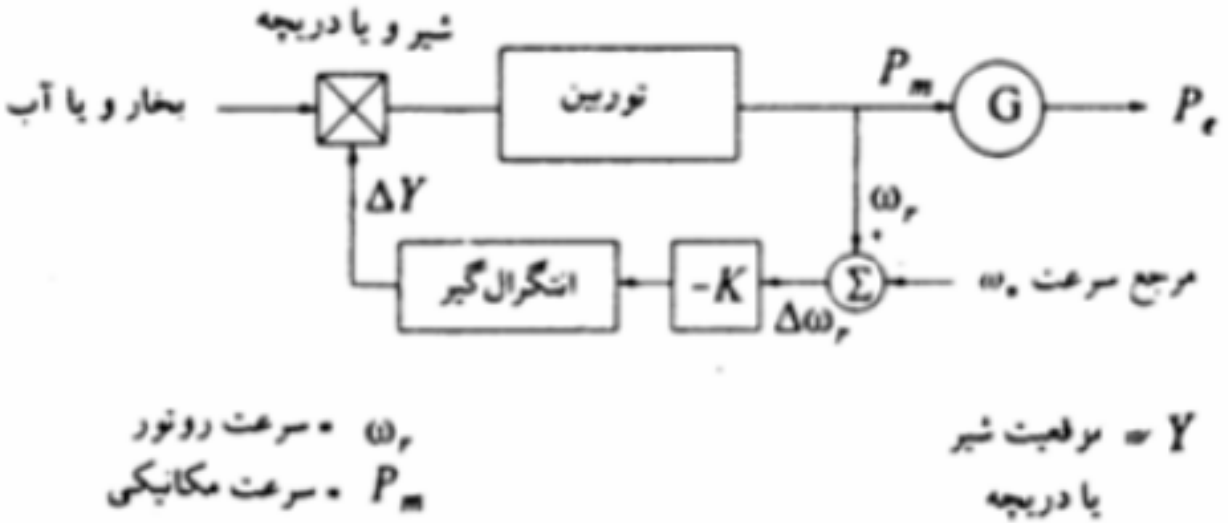
به هنگام تغییرات بار ژنراتور با ثابت لختی خود و بار سیستم با ثابت میرایی خود سعی در تثبیت فرکانس را دارند ولی در حالت ماندگار فرکانس کاهش یا افزایش خواهد یافت در این حالت جهت ایجاد تعادل دوباره بین تولید و مصرف باید با افزایشو یال کاهش توان ورودی فرکانس را به حالت اولیه برگرداند .

با انداز گیری سرعت محور و مقایسه با اندازه ایده آل مقدار باز یا بسته شدن دریچه بخار یا شیر آب مشخص و اعمال می گردد.

گاورنر سرعت ثابت

به طور کلی گاورنر با اندازه گیری سرعت محور ژنراتور و مقایسه با سرعت مرجع دریچه بخار یا آب را تنظیم می کند . به طور مثال موقعی که سرعت کم شده باشد اختلاف ω_{is} و ω_{soll} منفی شده $\omega_{is} = \omega_{sol} < 0$ که باعث می گردد دریچه باز شود





نموداری از گاورنر سرعت ثابت

تشریح بلوک دیاگرام :

۱- سرعت توربین اندازه گیری می گردد.

۲- سرعت اندازه گیری شده با یک مقدار مرجع ω_{soll} مقایسه می شود .

۳- اختلاف حاصل (سیگنال خطا) تقویت و منفی می گردد.

۴- توسط انتگرال گیر سیگنال خطا، تبدیل به سیگنالی جهت باز یا بسته کردن دریچه بخار یا شیر آب شده است .

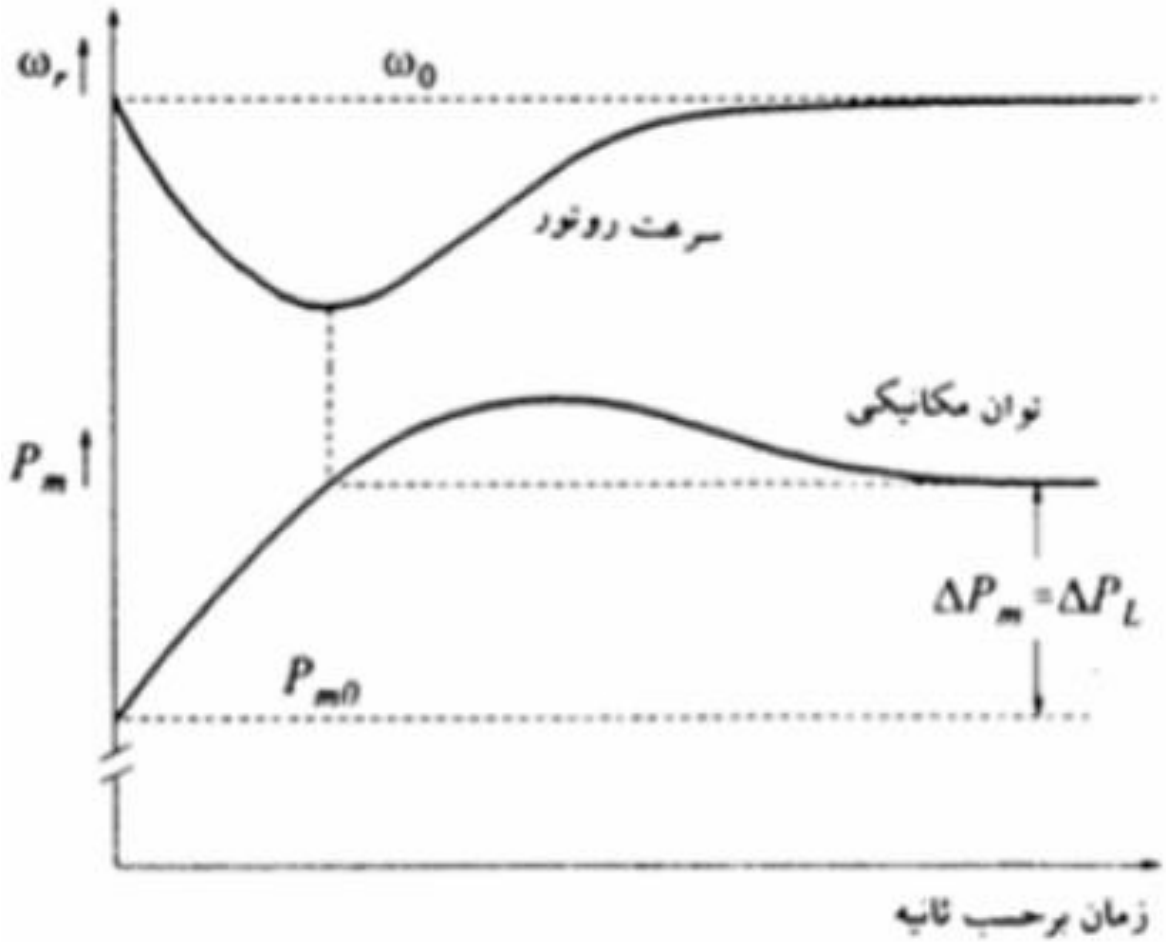
۵- زمانی که سرعت به مقدار اولیه برسد خطای سرعت $\Delta\omega_s$ صفر می گردد.

پاسخ زمانی سیستم گاورنر

با افزایش بار الکتریکی به اندازه Δp_L ، فرکانس کاهش می یابد که برای مقابله با این تغییر فرکانس توان مکانیکی توربین باید شروع به افزایش کند در نتیجه سرعت افت فرکانس کم می شود تا وقتی که توان مکانیکی وتوان الکتریکی با هم برابر می شود اما افت فرکانس جبران نشده است لذا فرکانس شروع به افزایش کرده تا این کاهش جبران گردد.

باید توجه داشت که سیسیتم گاورنر سرعت ثابت برای یک واحد تولیدی مناسب است و اگر تعداد بیشتری واحد داشته باشیم (مثلاًبرای شبکه پیوسته) این سیستم مناسب نیست و باید از سیستم دیگری با مشخصه افتی سرعت استفاده کنیم .

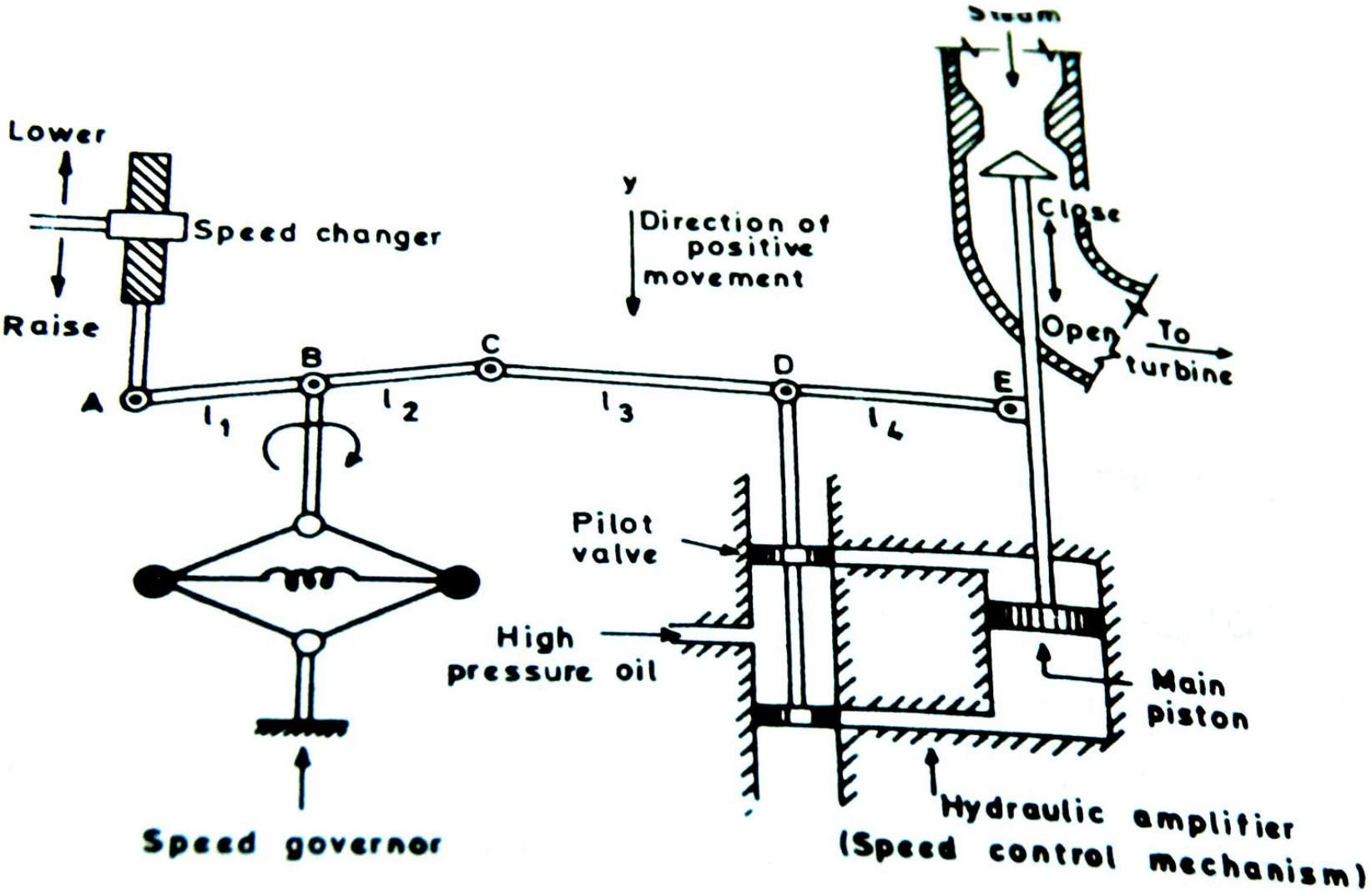
پاسخ واحد تولید با گاورنر سرعت ثابت



گاورنر

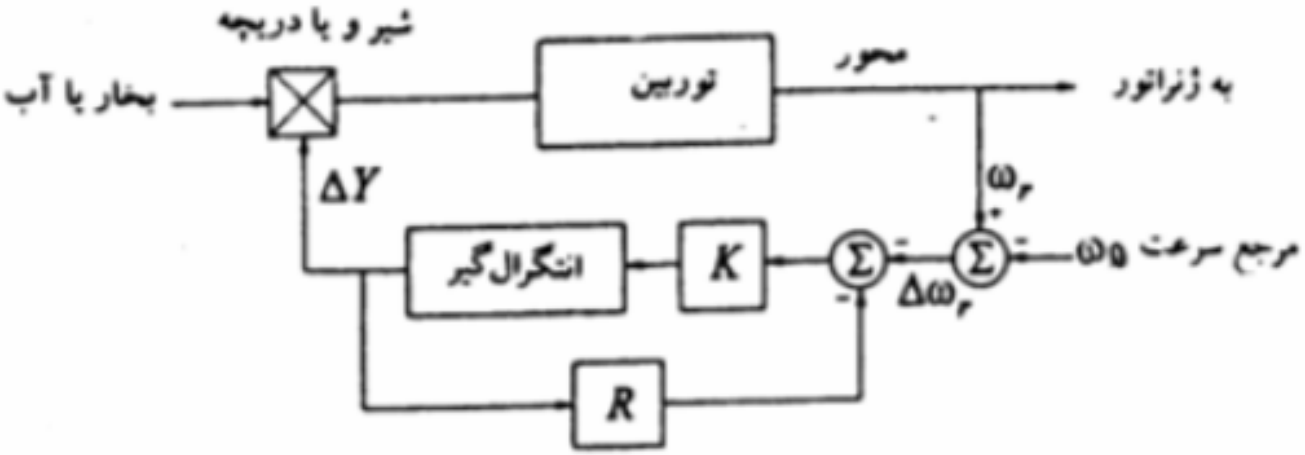
- گاورنر قسمت اساسی سیستم کنترل بار - فرکانس را تشکیل می‌دهد.
- گوی‌های چرخان قلب سیستم گاورنر بحساب می‌آیند. این گوی‌ها در هنگام افزایش سرعت به طرف خارج و در هنگام کاهش سرعت به طرف داخل متمایل می‌شوند. این عمل بترتیب نقطهٔ B را بالا یا پایین می‌برد.
- تقویت‌کنندهٔ هیدرولیکی از دو عدد شیر پیستونی و یک عدد پیستون اصلی تشکیل شده است.
- اهرمها باعث انتقال نیرو به نقاط مورد نظر گاورنر می‌شوند.
- تغییر دهندهٔ سرعت (SPCH) باعث تنظیم توان خروجی توربین در حالت مانا می‌گردد.

گاورنر


Steam
Lower
Speed changer
Raise
y
Direction of positive movement
Close
Open
To turbine
A
B
C
D
E
l_1
l_2
l_3
l_4
Pilot valve
High pressure oil
Main piston
Hydraulic amplifier
(Speed control mechanism)
Speed governor

گاورنر با مشخصه افتی سرعت

زمانی که دو یا تعداد بیشتری واحد به یک سیستم متصل شده هستند و از طریق گاورنر تنظیم سرعت و فرکانس را برعهده دارند دیگر نمی توان از گاورنر های سرعت ثابت استفاده کرد زیرا باید هر ژنراتور به طور دقیق همان نقطه تنظیم سرعت را داشته باشد در غیر این صورت هر یک از گاورنر ها به صورت اینکه به تنهایی در سیستم هستند عمل نموده و سعی در کشاندن تغییرات بار و تنظیم آن به سمت خود را می نماید و به اصطلاح واحدها با هم درگیر می شوند از اینرو برای استفاده از گاورنرها و تقسیم انحراف بار روی آنها گاورنرهای با مشخصه افتی به صورت زیر تکمیل می گردند



گاورنر با فیدبکِ حالت ماندگار

در شکل ضریب R " افت سرعت یا تنظیم درصد سرعت" نام دارد که تعین کننده سرعت حالت ماندگار در مقابل مشخصه بار واحد تولیدی می باشد .

$$R = \frac{\Delta F}{\Delta P} \qquad (۹-۱)$$

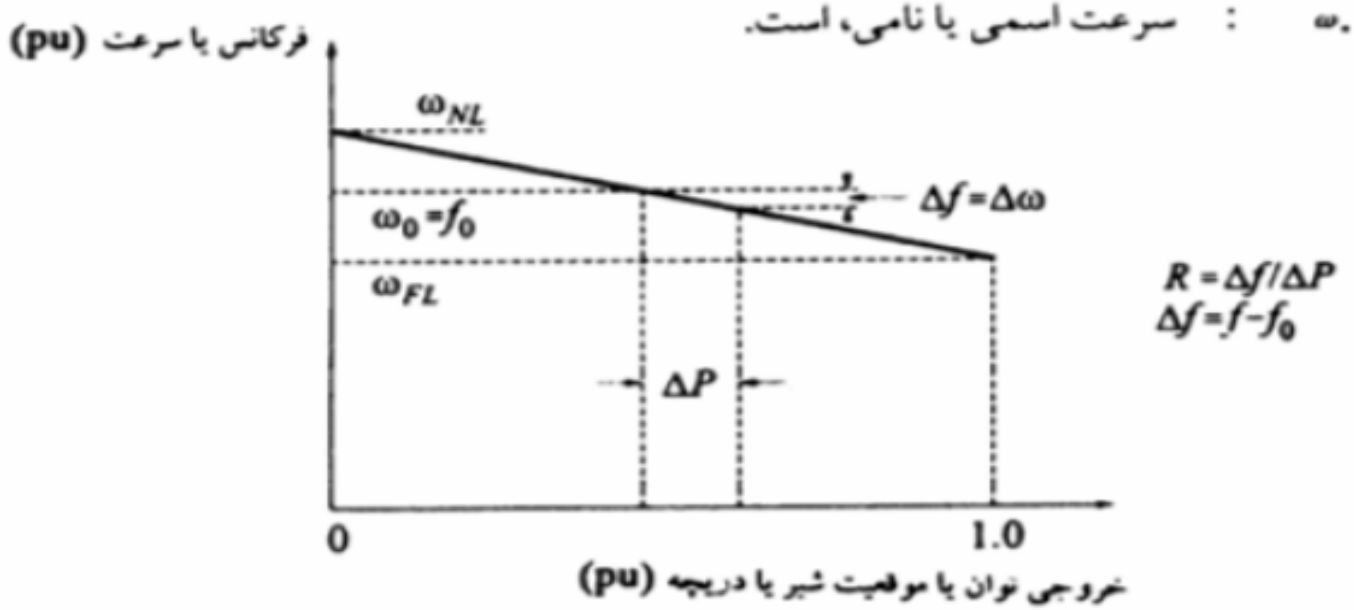
معمولا R به صورت درصد بیان می شود به طور مثال ضریب $R = 5\%$ بیانگر 5% تغییر در فرکانس بازای 100% تغییر در خروجی واحد است .

$$R = (\frac{\omega_{NL} - \omega_{FL}}{\omega_0}) * 100$$

ω_{NL} : سرعت حالت ماندگار در بی‌باری ؛

ω_{FL} : سرعت حالت ماندگار دربار کامل ؛

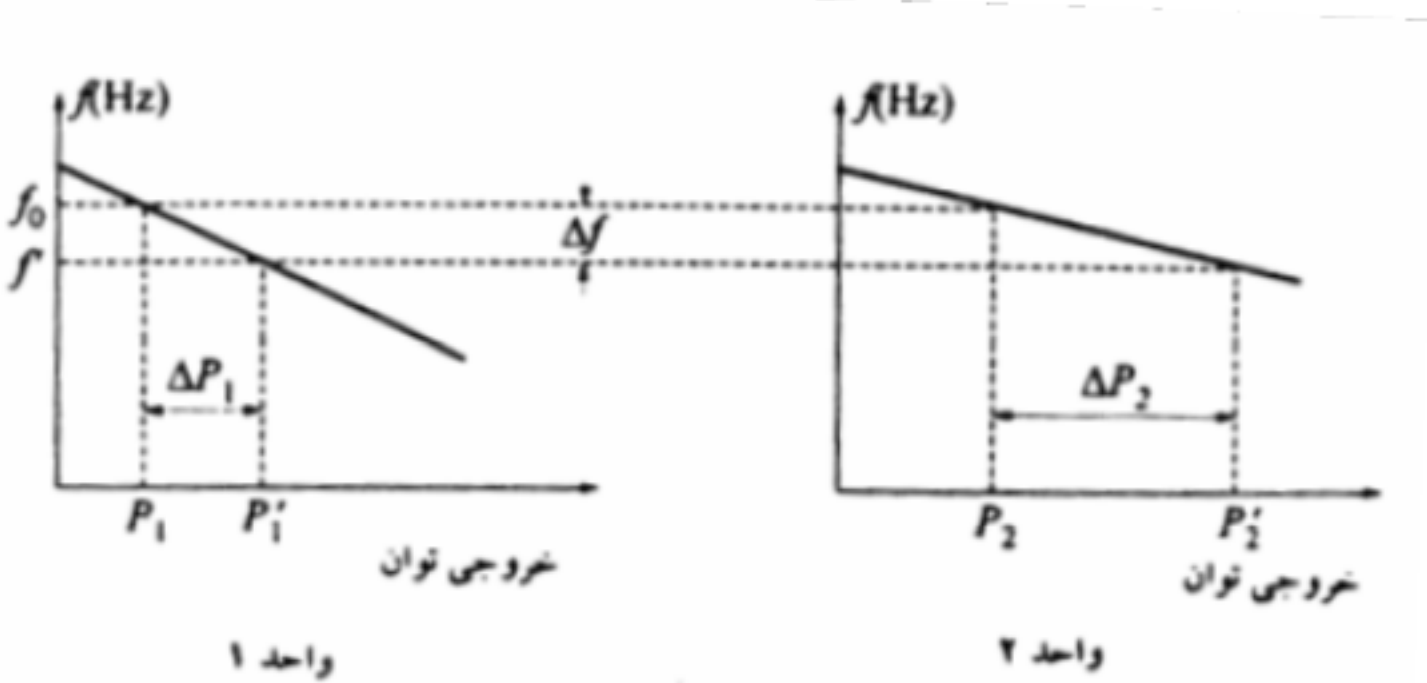
ω_0 : سرعت اسمی یا نامی، است.



مشخصه‌های ایده‌آل حالت ماندگارِ گاورنر با شیب افتی سرعت

تقسیم بار بین واحدهای موازی

اگر دو یا تعداد بیشتری واحد به یک سیستم قدرت وصل شوند معمولاً همیشه در یک فرکانس مشخص بار رابین خود تقسیم می کنند .



تقسیم توان توسط واحدهای موازی با مشخصه‌های افتی گاورنر

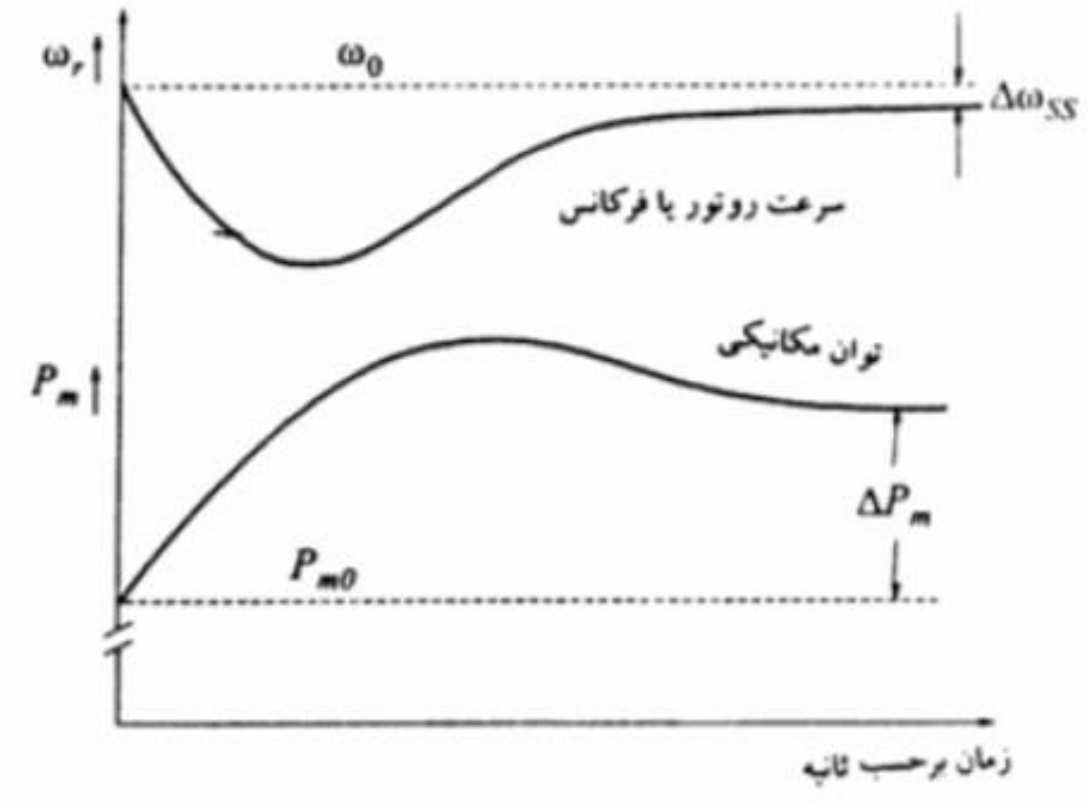
$$\Delta p_1 = p_1' - p_1 \quad \& \quad \Delta p_2 = p_2' - p_2 \quad \Rightarrow \Delta p_L = \Delta p_1 + \Delta p_2$$

اگر ضریب تنظیم در هر دو واحد مساوی باشد تغییر در خروجی های هرواحد متناسب با ظرفیت تولیدی هر واحد خواهد بود .

$$R_2 = \frac{\Delta f}{\Delta p_2} \quad \& \quad R_1 = \frac{\Delta f}{\Delta p_1} \quad \Rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} \qquad (۱۰-۱)$$

پاسخ زمانی گاورنر با مشخصه افتی سرعت

در زمانی که افزایش در بار ایجاد شود یعنی بعد از اینکه توان افزایش یافته به سیستم قدرت دقیقاً بین واحدها تقسیم شد هنوز فرکانس به مقدار نامی خود نرسیده و مقداری کمبود فرکانس در سیستم اندازه گیری می گردد.

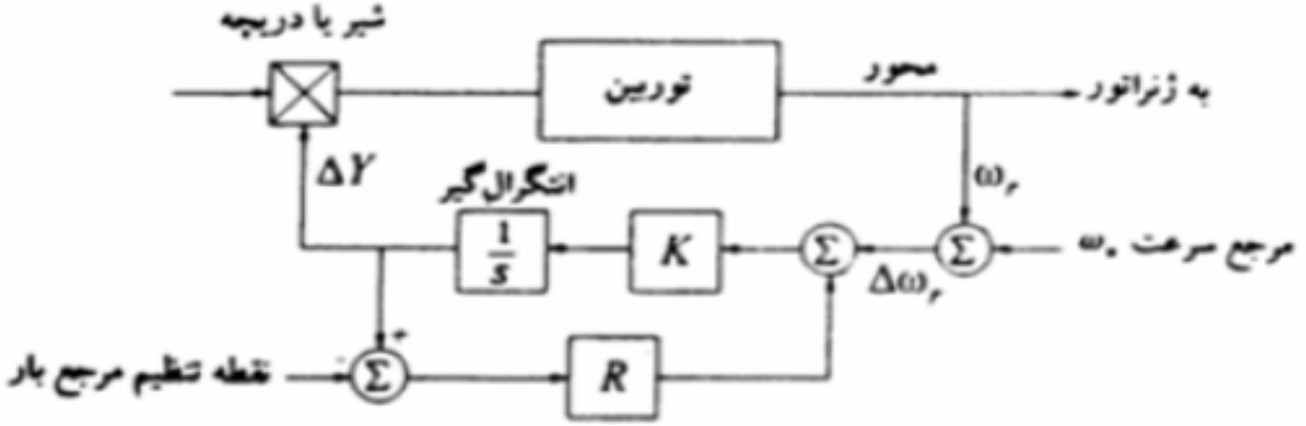


کنترل خروجی توان واحد تولیدی

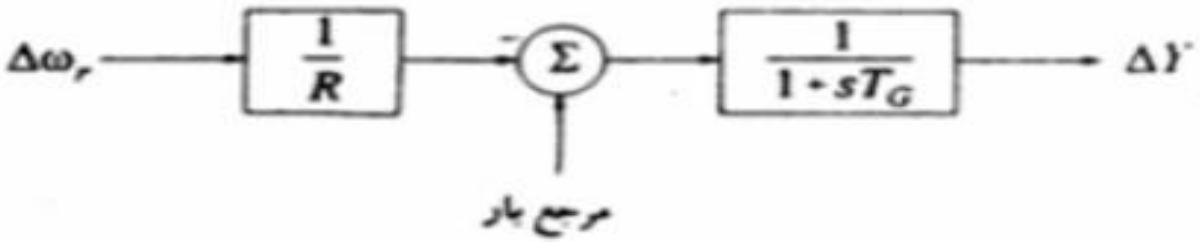
برای جبران این کمبود فرکانس باید سوخت را بیشتر کنیم و یا به عبارت دیگر توان تولیدی را بیشتر کنیم چرا که گاورنر میزان بخار را افزایش می دهد نه تولید را . وجود فیدبک R در بلوک دیاگرام زیر باعث ایجاد $\Delta\omega_{ss}$ می گردد . ولی در حالت گاورنر سرعت ثابت فیدبک R وجود نداشته و مستقلاً باید کمبود فرکانس جبران شود .

نکته :

با در نظرگرفتن کاهش و افزایش سوخت برای جبران حالت خطای ماندگار فرکانس در بلوک دیاگرام ((نقطه تنظیم مرجع بار)) درنظر گرفته شده است که تولید را برای مواقعی که تغییرات بار ماندگار شود با افزایش یا کاهش سوخت افزایش و یا کاهش می دهد . گاورنر به حالت اولیه برگشته و فرکانس به مقدار نامی می رسد .

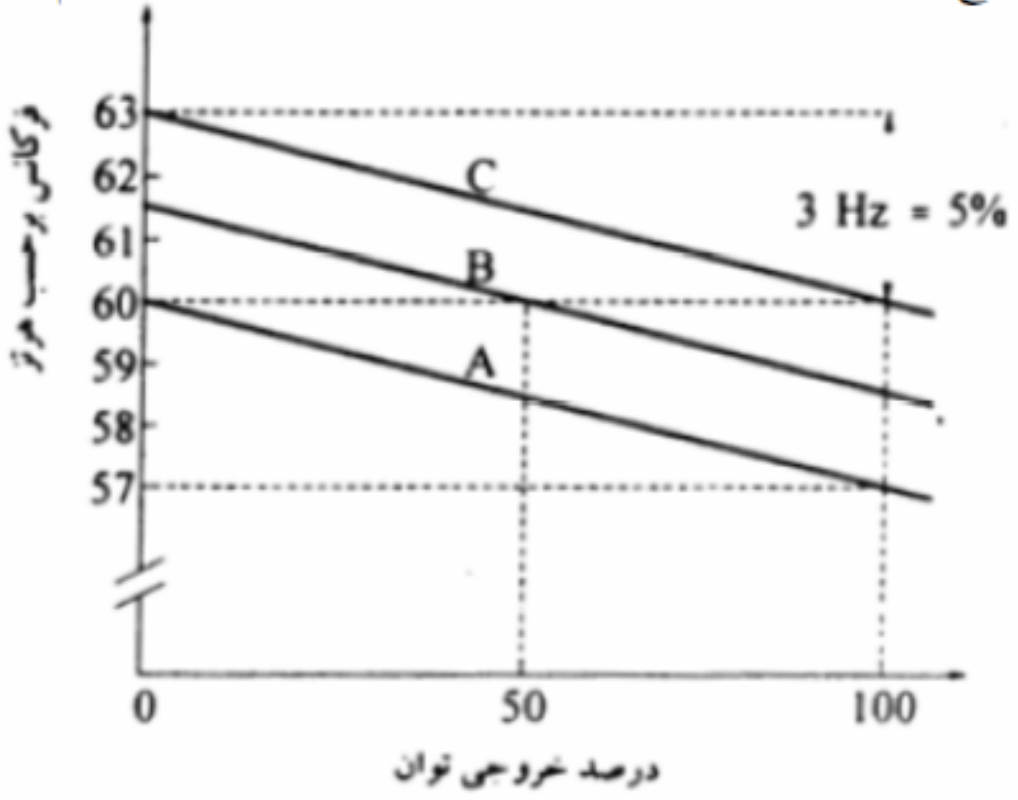


نمایش نمادین گاورنر و توربین



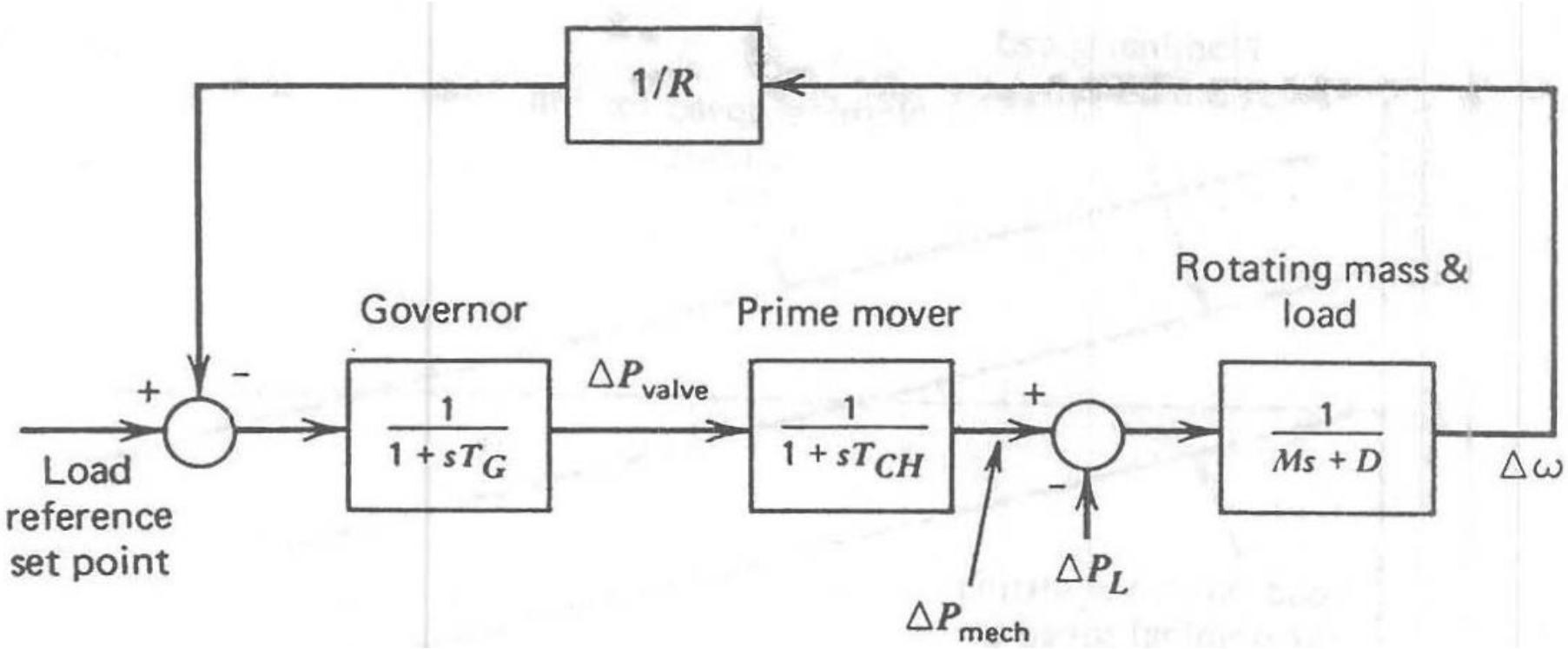
نمودار بلوکی کاهش یافتهٔ گاورنر

در حقیقت با تغییر نقطه مرجع بار منحنی فرکانس – بار را به صورت زیر تغییر می دهیم :

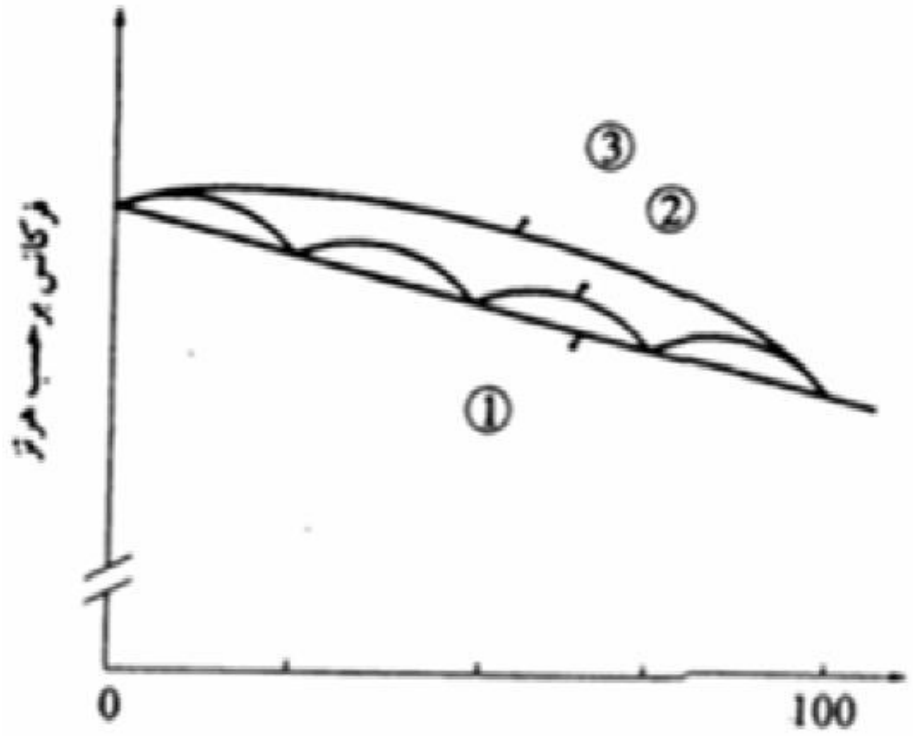


تأثیر نقطهٔ تنظیم تغییردهندهٔ تپ بر مشخصهٔ گاورنر

بلوک دیاگرام گاورنر، محرک و جرم چرخان



مشخصات واقعی و ایده آل افتی سرعت گاورنر



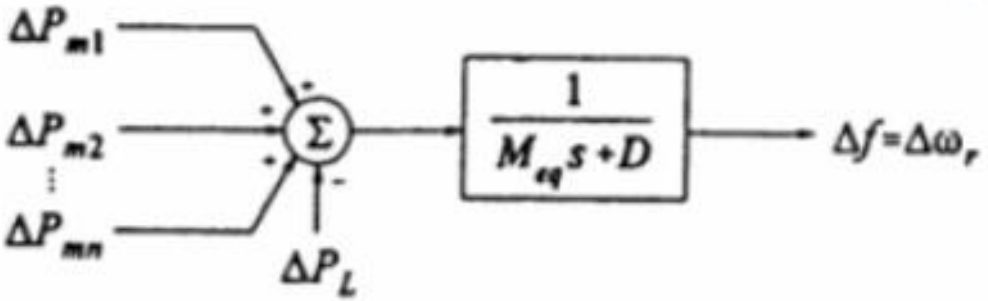
منحنی ۱ : مشخصهٔ ایده‌آل خطی

منحنی ۲ : مشخصهٔ واقعی برای واحدهای بخاری

منحنی ۳ : مشخصهٔ واقعی برای واحدهای آبی

مشخصات ترکیبی تنظیم سیستم های قدرت

با فرض اینکه پاسخ ژنراتورها به تغییرات بار را همساز (با لختی های برابر) فرض کنیم می توان همه ژنراتورها را به صورت معادل در نظر گرفت :



معادل سیستم برای تحلیل LFC

که :

$$M_{eq} = M_1 + M_2 + \ldots + M_n \qquad (۱-۱۱)$$

با توجه به آنچه گفته شد می توان نتیجه گرفت که مشخصه ترکیبی توان –فرکانس یک سیستم به پارامترهای زیر بستگی دارد :

۱- تاثیر ترکیبی ثابت لختی همه ژنراتورها

۲- ثابت میرایی بار سیستم

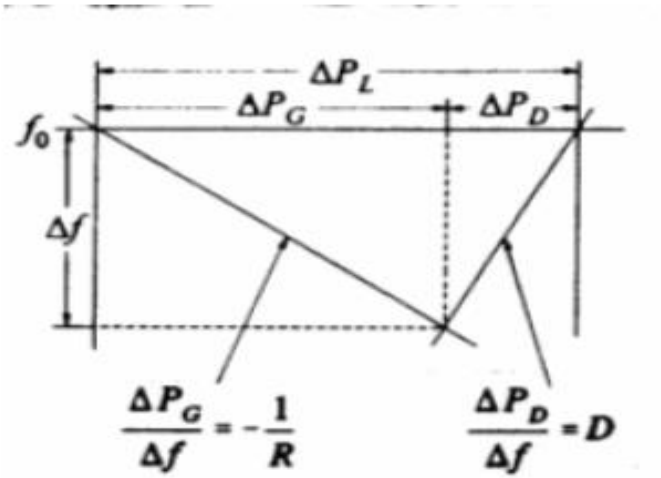
برای سیستم با n ژنراتور و ثابت میرایی بار D انحراف حالت ماندگار فرکانس سیستم از رابطه زیر بدست می آید :

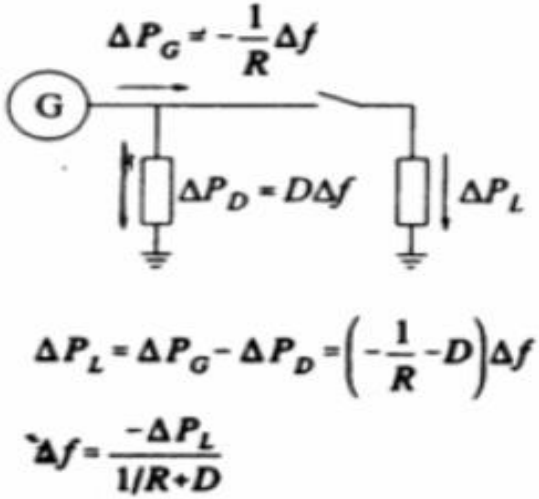
$$\Delta f_{ss} = \frac{-\Delta P_L}{(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\ldots+\frac{1}{R_n})+D} \qquad (۱۲-۱)$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\cdots+\frac{1}{R_n}$$

که $\frac{1}{\beta}$ (ضریب ترکیبی تنظیم سیستم)و یا β (سختی سیستم) را می توان از رابطه زیر بدست آورد :

$$\beta = \frac{1}{R_{eq}} + D \qquad (۱۳-۱)$$





مشخصهٔ ترکیب گاورنر و بار

مثال

یک سیستم قدرت دارای بار کل ۱۲۶۰ MW در فرکانس ۶۰ Hz است. بار به ازای ۱٪ تغییر در فرکانس، ۱/۵٪ تغییر می‌کند (D=۱/۵). زمانی که به طور ناگهانی یک بار ۶۰ MW برداشته شود، انحراف حالت ماندگار فرکانس را در حالات ذیل پیدا کنید:

الف) هیچ کنترل سرعتی وجود نداشته باشد،

ب) سیستم دارای ذخیرهٔ چرخان ۲۴۰ MW باشد که به طور یکنواخت بین ۵۰۰ MW ظرفیت تولید با ۵٪ تنظیم براساس این ظرفیت، پخش شده باشد. تمام ژنراتورهای دیگر با شیرهای کاملاً باز کار می‌کنند. فرض کنید که تأثیر باندهای راکد گاورنر به گونه‌ای است که تنها ۸۰٪ گاورنرها به کاهش بار سیستم پاسخ می‌دهند. از تأثیر تلفاتِ انتقال، چشمپوشی کنید.

بار باقیماندهٔ کل برابر با ۱۲۰۰ MW=۶۰-۱۲۶۰ است. ثابت میرایی‌بار باقیمانده برابر است با:

$$D=\left[\frac{۱/۵}{۱۰۰}\times ۱۲۰۰\right]\times\left[\frac{۱۰۰}{۶۰\times ۱}\right]=۳۰ \quad MW/Hz$$

الف) بدون هیچ کنترل سرعت، افزایش حاصل در فرکانس حالت ماندگار برابر است با:

$$\Delta f=\frac{-\Delta P_L}{D}=\frac{-(-۶۰)MW}{۳۰\ MW/Hz}$$

$$=۲/۰ \quad Hz$$

ب) از آنجا که کاهشی در بار سیستم و افزایشی در فرکانس سیستم وجود دارد، تمام واحدهای تولید و نه فقط آنهایی که دارای ذخیرهٔ جریان هستند، عکس‌العمل نشان می‌دهند. اما به علت تأثیر باند راکد، فقط ۸۰٪ تولید کل به تنظیم سرعت کمک می‌کند. ظرفیت کل تولید چرخان برابر است با:

$$\text{بار+ ذخیره}=۱۲۶۰ + ۲۴۰=۱۵۰۰\ MW$$

تولیدی که به تنظیم کمک می‌کند برابر است با:

$$۰/۸ \times ۱۵۰۰ = ۱۲۰۰ \text{ MW}$$

تنظیم ۵٪ بدین معناست که ۵٪ تغییر در فرکانس، ۱۰۰٪ تغییر در تولید توان را باعث خواهد شد.

بنابراین:

$$\frac{۱}{R} = \frac{۱۲۰۰}{(۵/۱۰۰) \times ۶۰} = ۴۰۰ \quad \text{MW/Hz}$$

مشخصهٔ ترکیبی پاسخ فرکانسی سیستم برابر است با:

$$\beta = \frac{۱}{R} + D = ۴۰۰ + ۳۰$$

$$= ۴۳۰ \text{ MW/Hz}$$

و افزایش حالت ماندگار فرکانس برابر است با:

$$\Delta f = \frac{-\Delta P_L}{\beta} = \frac{-(-۶۰) \quad \text{MW}}{۴۳۰ \quad \text{MW/Hz}}$$

$$= ۰/۱۳۹۵ \quad \text{Hz}$$

مدل خط ارتباطی

- توان انتقالی از خط ارتباطی

$$P_{\text{tie flow}} = \frac{1}{X_{\text{tie}}}(\theta_1 - \theta_2)$$

$$P_{\text{tie flow}} + \Delta P_{\text{tie flow}} = \frac{1}{X_{\text{tie}}}[(\theta_1 + \Delta\theta_1) - (\theta_2 + \Delta\theta_2)]$$

$$= \frac{1}{X_{\text{tie}}}(\theta_1 - \theta_2) + \frac{1}{X_{\text{tie}}}(\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2)$$

$$\Delta P_{\text{tie flow}} = \frac{1}{X_{\text{tie}}}(\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2) \quad \Rightarrow \quad \Delta P_{\text{tie flow}} = \frac{T}{s}(\Delta\omega_1 - \Delta\omega_2)$$

که T برای یک سیستم ۶۰ هرتز،مساوی $377 \times 1/X_{\text{tie}}$ است. توجه کنید برای اینکه ΔP_{tie} برحسب مگاوات مبنای واحد باشد،$\Delta\theta$ باید بر حسب رادیان باشد اما $\Delta\omega$ تغییر سرعت در مبنای واحد است. بنابراین باید $\Delta\omega$ را در ۳۷۷ رادیان بر ثانیه ضرب کرد (فرکانس مبنا بر حسب رادیان بر ثانیه در ۶۰ هرتز). T را می‌توان ضریب سختی خط ارتباطی[۸] به حساب آورد.

اکنون فرض کنید که سیستم قدرتی شامل دو ناحیه که هر ناحیه دارای یک واحد است،در نظر باشد. نواحی فوق توسط یک خط انتقال به هم مرتبط هستند. بستگی به جهت، توان انتقالی از خط ارتباطی برای یک ناحیه به صورت بار مثبت و برای ناحیه مقابل،باری با همان مقدار ولی با علامت منفی عمل می‌کند. جهت عبور توان،بستگی به زاویه نسبی فاز بین نواحی دارد که خود توسط انحراف نسبی سرعت در نواحی،تعیین می‌شود.بلوک دیاگرام سیستم مزبور در شکل ۱۶-۹ نشان داده شده است. توجه کنید که توان خط ارتباطی را از سوی ناحیه یک به ناحیه دو در نظر می‌گیریم و در این صورت این توان به صورت بار برای ناحیه یک و به صورت منبع تغذیه (بار منفی) برای ناحیه دو به نظر می‌رسد. اگر فرض کنیم که توانهای مکانیکی ثابت باشند اجرام چرخان و خط ارتباطی، مشخصه نوسانی میرا خواهند داشت که به نوسانات هماهنگ موسوم است

فرض کنید که تغییر بار مساوی ΔP_{L1} در ناحیه یک،اتفاق افتد. در حالت ماندگار بعد از اینکه تمام نوسانات هماهنگ میرا شد، فرکانس، ثابت و در هر دو ناحیه یکی است، بنابراین:

$$\frac{d(\Delta\omega_1)}{dt} = \frac{d(\Delta\omega_2)}{dt} = 0 \qquad (9.28)$$

$$\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2 = \Delta\omega$$

$$\Delta P_{mech_1} - \Delta P_{tie} - \Delta P_{L_1} = \Delta\omega D_1$$

$$\Delta P_{mech_2} + \Delta P_{tie} = \Delta\omega D_2$$

$$\Delta P_{mech_1} = \frac{-\Delta\omega}{R_1}$$

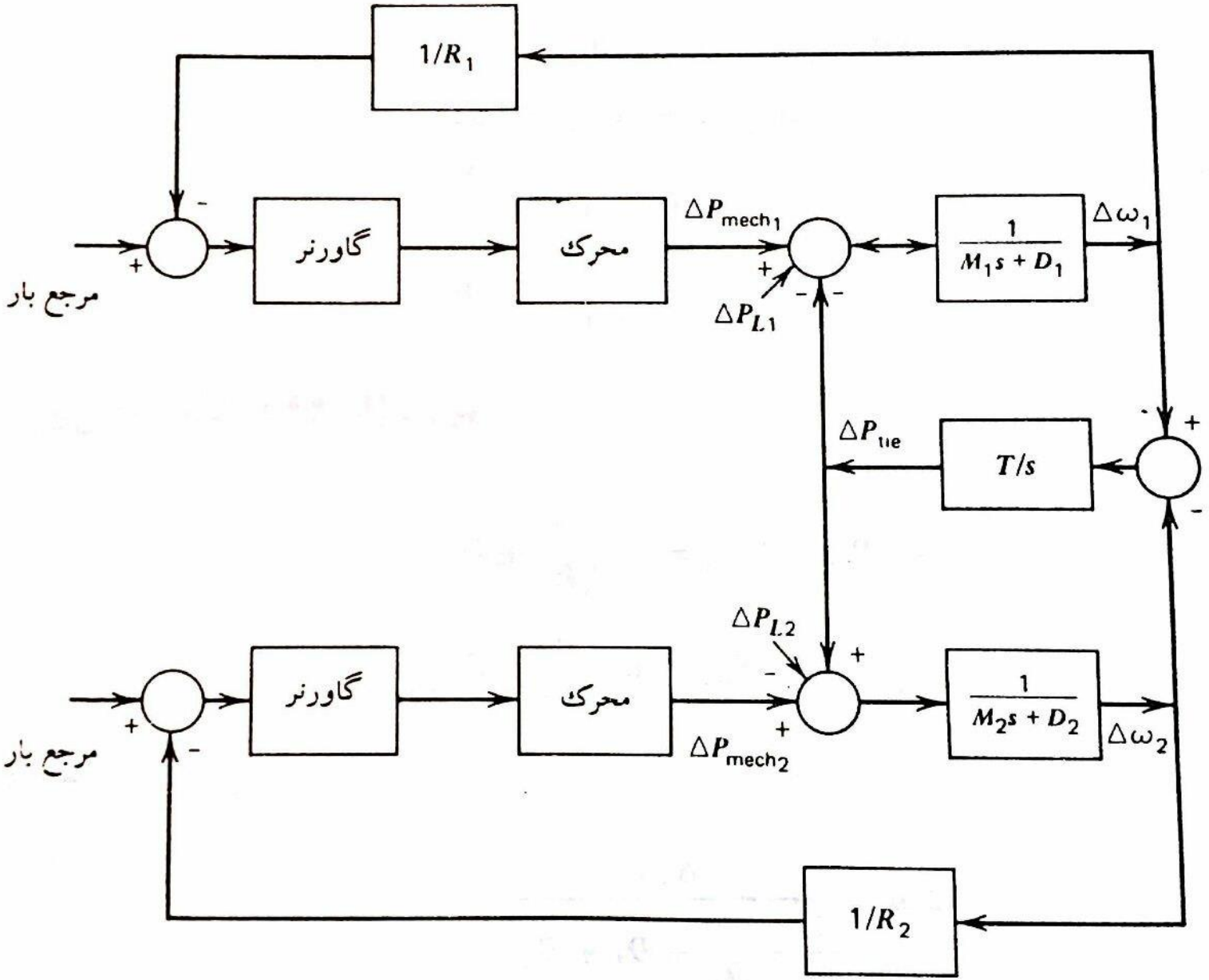
$$\Delta P_{mech_2} = \frac{-\Delta\omega}{R_2}$$

$$-\Delta P_{tie} - \Delta P_{L_1} = \Delta\omega\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right)$$

$$+\Delta P_{tie} = \Delta\omega\left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)$$

$$\Delta\omega = \frac{-\Delta P_{L_1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2}$$

$$\Delta P_{tie} = \frac{-\Delta P_{L_1}\left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2}$$



شکل ۱۶-۹: بلوک دیاگرام نواحی بهم پیوسته.

مثال

مثال ۹-ب:

سیستمی با دو ناحیه که از طریق یک خط ارتباطی به متصل هستند،در نظر است. مشخصات نواحی به صورت زیر است:

ناحیهٔ ۲	ناحیهٔ ۱
مبنای واحد $R = 0.02$	مبنای واحد $R = 0.01$
مبنای واحد $D = 1.0$	مبنای واحد $D = 0.8$
500 = مگاولت آمپر مبنا	500= مگاولت آمپر مبنا

تغییر باری مساوی ۱۰۰ مگاوات (۰/۲ در مبنای واحد) در ناحیه یک اتفاق می‌افتد. فرکانس جدید حالت ماندگار و نیز تغییر در توان خط ارتباطی چقدر است؟ فرض کنید که هر دو ناحیه در ابتدا دارای فرکانس اسمی ۶۰ هرتز باشند.

$$\Delta\omega = \frac{-\Delta P_{L_1}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + D_1 + D_2} = \frac{-.2}{\frac{1}{0.01} + \frac{1}{0.02} + 0.8 + 1} = -0.00131752 \text{ pu}$$

$$f_{new} = 60 - 0.00132(60) = 59.92 \text{ Hz}$$

$$\Delta P_{tie} = \Delta\omega\left(\frac{1}{R_2} + D_2\right) = -0.00131752\left(\frac{1}{0.02} + 1\right) = -0.06719368 \text{ pu}$$

$$= -33.6 \text{ MW}$$

تغییر در توانهای مکانیکی مساوی است با:

$$\Delta P_{mech_1} = \frac{-\Delta\omega}{R_1} = -\left(\frac{-0.00131752}{0.01}\right) = 0.13175231 \text{ pu} = 65.876 \text{ MW}$$

$$\Delta P_{mech_2} = \frac{-\Delta\omega}{R_2} = -\left(\frac{-0.00131752}{0.02}\right) = 0.06587615 \text{ pu} = 32.938 \text{ MW}$$

$$= 98.814 \text{ MW}$$

کل تغییر در تولید مساوی ۹۸/۸۱۴ مگاوات است که نسبت به ۱۰۰ مگاوات تغییر بار، ۱/۱۸۶ مگاوات کمبود دارد. تغییر در مقدار بار به علت کاهش فرکانس برابر است با:

برای ناحیه اول: $\Delta\omega D_1 = -0.0010540 \text{ pu} = -0.527 \text{ MW}$

برای ناحیه دوم: $\Delta\omega D_2 = -0.00131752 \text{ pu} = -0.6588 \text{ MW}$

بنابراین تغییر بار، جمعاً مساوی ۱/۱۸۶ مگاوات است که کمبود تولید را توجیه می‌نماید

کنترل خودکار تولید AGC

درمقابل تغییری در بار، کنترل اولیه سرعت عمل می کند که منجر به انحراف حالت ماندگار فرکانس می گردد که به دو عامل بستگی دارد:

۱- مشخص افتی گاورنر

۲- پاسخ بار به تغییرات فرکانس

بدون توجه به موقعیت افزایش یا کاهش بار، کلیه واحدهایی که گاورنر دارند سعی در جبران فرکانس می کنند دراین حالت تغییرات بار توسط واحدها جبران شده ولی فرکانس به مقدار نامی خود بازنگشته است. لذا نیاز به یک نوع کنترلی داریم که بعد از یک تأخیر زمانی وارد می گردد که با تنظیم نقطه مرجع بار تولید را به مقدار مورد نظر می رساند. از آنجاکه بار به طور مداوم در حال تغییر می باشد نیاز به یک سیستم خودکار تولید به نام AGC می باشد.

کنترل خودکار تولید AGC

به طور خلاصه می توان اهداف سیتم های AGC را به دو قسمت تقسیم کرد:

۱- اهداف اولیه ۲- اهداف ثانویه

۱- اهداف اولیه

۱- در مقابل تغییرات فرکانس از خود عکس العمل نشان می دهد و فرکانس را تنظیم می کند.

۲- کنترل توان تبادلی بین نواحی بهم پیوسته را بر عهده دارد.

توضیح اینکه از وظایف AGC این است که طبق قرارداد تنظیم شده بین مناطق ، توان تبادلی در منطقه را کنترل کرده، با مقدار سوخت لازم توان تبادلی را تنظیم کند.

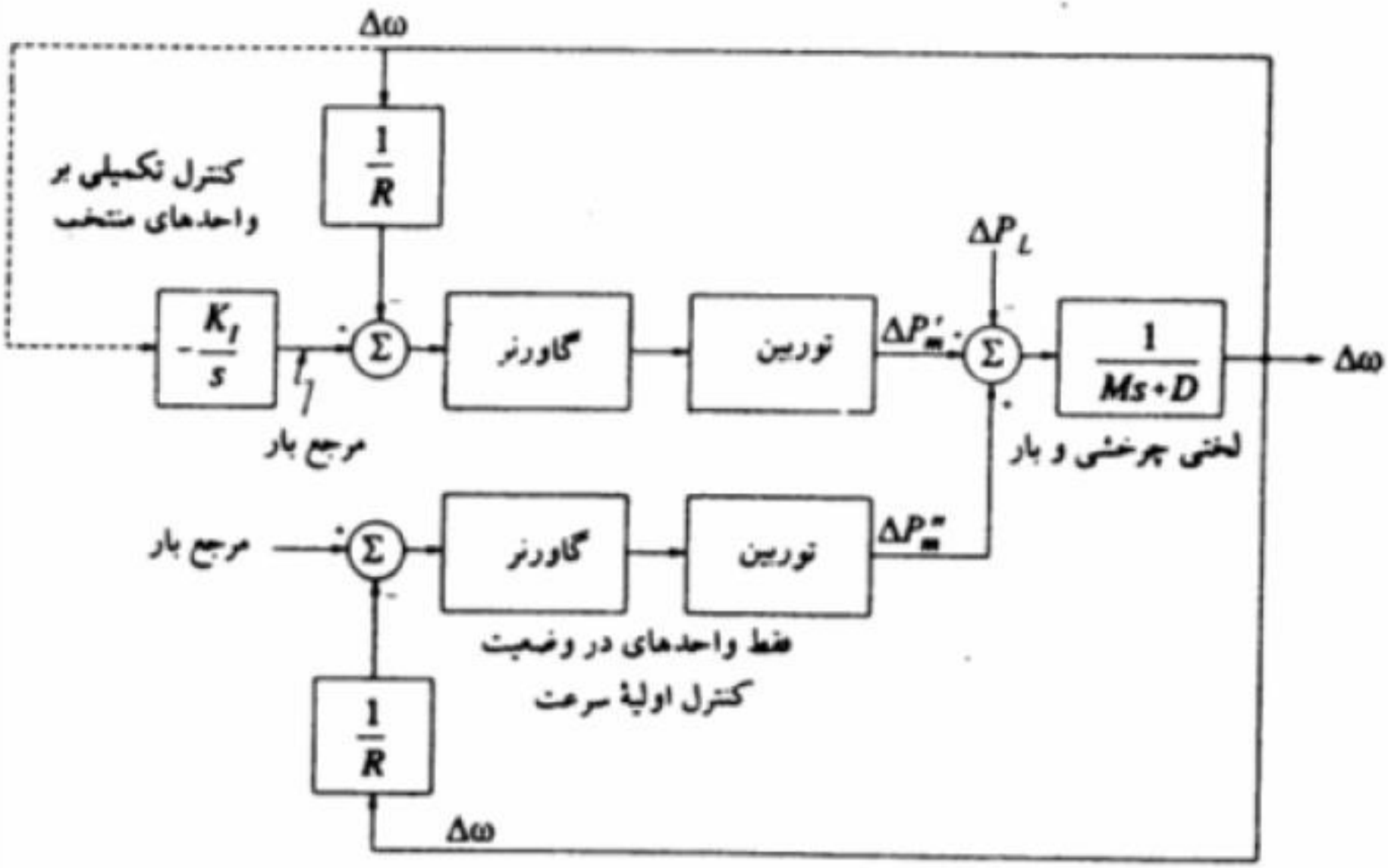
۲- اهداف ثانویه

تقسیم اقتصادی و بهینه بار روی واحدهای منتخب

نقش AGC در سیستم های قدرت

❖ الف) AGC در یک ناحیه منفرد(جزیره ای)

دراین نوع سیستم ها حفظ توان تعادلی مطرح نیست بلکه فقط بازگرداندن فرکانس سیستم به مقدار نامی هدف است.AGC با کنترل و تنظیم "نقطه تنظیم مرجع بار" روی واحدهای مختلف منتخب ، مقدار تولید را کنترل می کند. باید توجه داشت که در AGC مطالعات توزیع اقتصادی بار انجام می شود و انحراف بار به صورت اقتصادی بین واحدها تقسیم می گردد.



افزودن کنترل انتگرالی بر واحدهای تولیدِ منتخب برای AGC

باید توجه داشت که عمل کنترل تکمیلی تولید بسیار کندتر از عمل کنترل اولیه سرعت می باشد یعنی پس از آنکه کنترل اولیه سرعت بر روی کلیه واحدها انجام گرفت و فرکانس سیستم پایدار ساخت.

AGC وارد عمل شده و با تنظیم نقاط مرجع بار در واحدهای انتخابی توان خروجی آنها را تنظیم و کنترل می کند و تولید تمام واحدهای دیگر که در وضعیت AGC قرار ندارند به مقدار اولیه و برنامه ریزی شده برمی گرداند.

خلاصه:

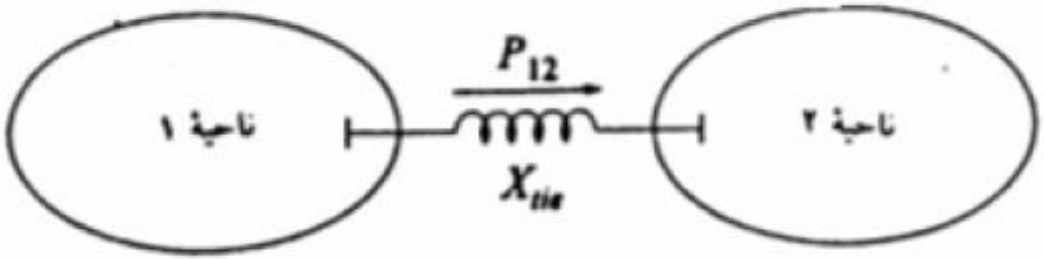
تغییرات لحظه ای ⟺ گاورنر

تغییرات کم و ماندگار ⟺ AGC

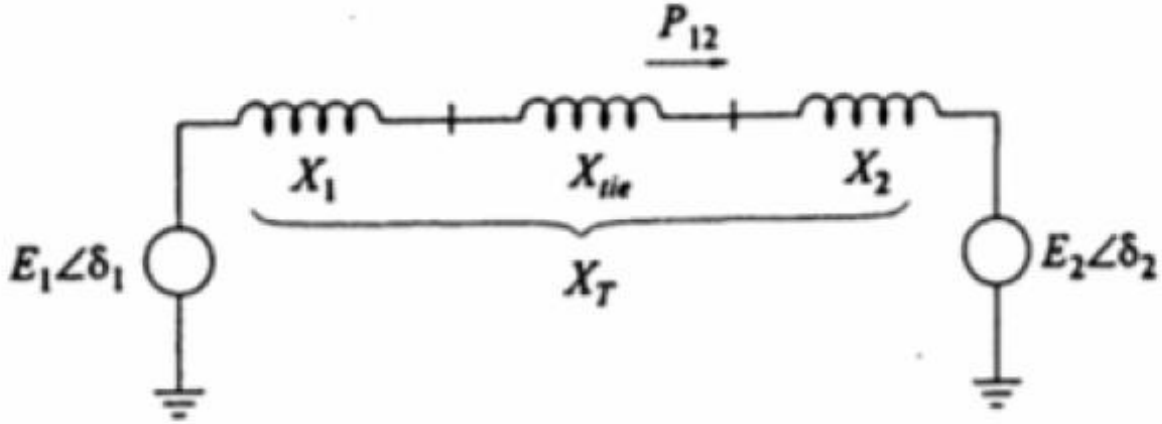
تغییرات زیاد و ماندگار ⟺ خاموشی

AGC در سیستم های بهم پیوسته

دراین حالت حفظ توان تبادلی نیز به وظایف AGC اضافه خواهد شد:

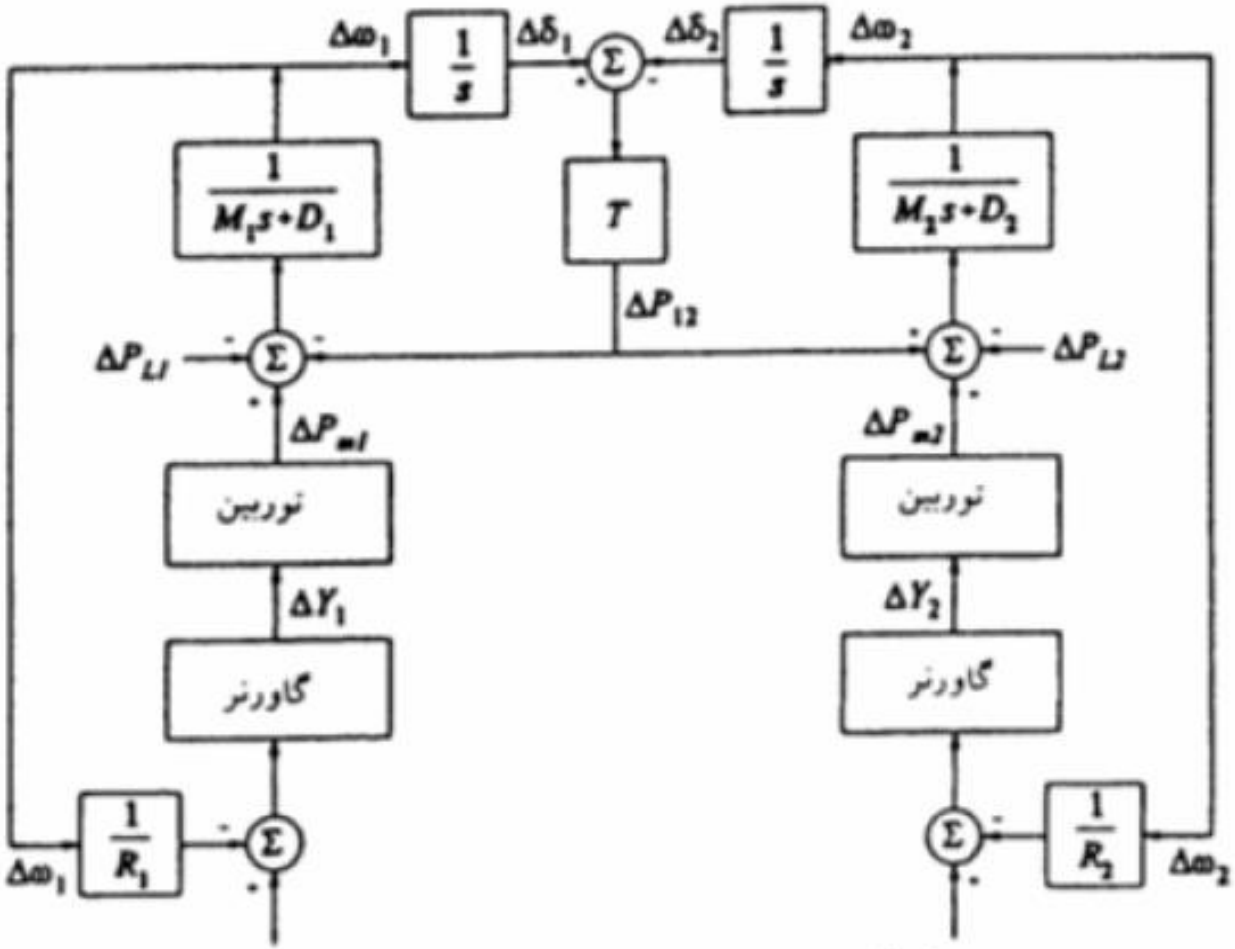


سیستم دوناحیه‌ای



معادل الکتریکی

اگر هر ناحیه را با یک واحد معادل در نظر بگیریم:



نمودار بلوکی

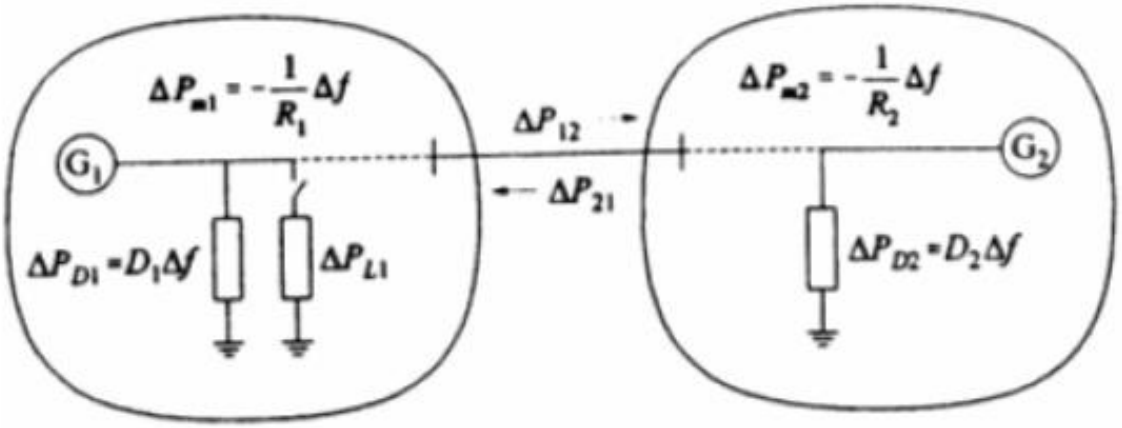
سیستم دوناحیه‌ای با فقط کنترل اولیهٔ سرعت

توضیح :

۱- هر ناحیه ای دارای لختی معادل m و ثابت میرایی بار D و سیستم گاورنرافتی R مربوط به خود می باشد.

۲- ΔP_{12} رفتی مثبت است یعنی توان از ناحیه ۱ به ۲ منتقل می شود و بالعکس.

۳- انحراف حالت ماندگار فرکانس برای هر دو ناحیه یکسان است.



تأثیر تغییر در بار ناحیهٔ ۱

ناحیه ۱

$$-\frac{\Delta f}{R_1}-\Delta f\ D_1-\Delta P_{L_1}-\Delta P_{12}=0$$

$$-\frac{\Delta f}{R_1}-\Delta f\ D_1-\Delta P_{12}=\Delta P_{12}$$

ناحیه ۲

$$-\frac{\Delta f}{R_2}-\Delta f\ D_2+\Delta P_{12}=0$$

$$-\frac{\Delta f}{R_2}-\Delta f\ D_2+\Delta P_{12}=0$$

$$\Delta P_{12}=\Delta f\ D_2+\frac{\Delta f}{R_2}$$

از رابطه (۱-۱۵) و (۱-۱۴) نتیجه می گیریم:

$$\Delta f=\frac{-\Delta P_{L1}}{\beta_1+\beta_2} \qquad (۱۶-۱)$$

$$\Delta P_{12}=\frac{-\Delta P_{L1}\cdot\beta_2}{\beta_1+\beta_2} \qquad (۱۷-۱)$$

درصورت تغییر در ناحیه ۲ خواهیم داشت:

$$\Delta f=\frac{-\Delta P_{L2}}{\beta_1+\beta_2} \qquad (۱۸-۱)$$

$$\Delta P_{12}=\frac{\beta_1\Delta P_{L2}}{\beta_1+\beta_2} \qquad (۱۹-۱)$$

ناحیه اول

$$-\frac{\Delta P}{R_1} - D_1 \Delta P - \Delta P_{L_1} - \Delta P_{12} = 0$$

$$\Delta P_{12} = -\Delta P \left[\frac{1}{R_1} + D_1\right] - \Delta P_{L_1}$$

ناحیه دوم

$$-\frac{\Delta P}{R_2} - D_2 \Delta P + \Delta P_{12} = 0$$

$$\Delta P \left[\frac{1}{R_2} + D_2\right] = \Delta P_{12}$$

$$\Rightarrow \quad \Delta P \left[\frac{1}{R_2} + D_2\right] = -\Delta P \left[\frac{1}{R_1} + D_1\right] - \Delta P_{L_1}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{\Delta P = \frac{-\Delta P_{L_1}}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)} = \frac{-\Delta P_{L_1}}{\beta_1 + \beta_2}}$$

$$\Rightarrow \quad \Delta P_{12} = \Delta P \left[\frac{1}{R_2} + D_2\right] = \Delta P \cdot \beta_2 = -\frac{\beta_2 \Delta P_{L_1}}{\beta_1 + \beta_2}$$

کنترل فرکانس در سیستم های بهم پیوسته

اگر در یکی از نواحی بهم پیوسته افزایش بار داشته باشیم این افزایش باربه طور مساوی بین دوناحیه تقسیم می گردد و توان خط ارتباطی تغییر می کند لذا به دلیل توافق قبلی و براساس تعرفه های جریمه ای سیستم یک باید سریعاً به مقدار توافقی قبلی برای تبادل توان انتقالی خود برساند.

بدین منظور نیاز به یک سیستم کنترلی است که:

۱- فرکانس را به مقدار نامی برگرداند.

۲- تغییر بار در هر ناحیه را تشخیص دهد.

۳- تغییرات توان تبادلی را تشخیص دهد.

۴- باید تغییرات تولید در همان ناحیه ای باشد که تغییرات بار در آن ایجاد شده است.

۵- تولید را به صورت اقتصادی بر روی واحدها توزیع کند.

برای انجام وظایف مذکور باید سیگنالی تشکیل گردد که بتوان به وظایف فوق رسید که به آن سیگنال ACE گویند.

$$ACE_1 = \Delta P_{12} + B_1 \Delta f$$
$$ACE_2 = -\Delta P_{12} + B_2 \Delta f \qquad (۲۰-۱)$$

B: ضریب بایاس فرکانس (معمولاً $\beta = B$ در نظر می گیرند.)

تا زمانی که انحراف فرکانس یا توان تبادلی از مقدار برنامه ریزی شده داشته باشیم این سیگنال از طریق سیستم AGC تشکیل شده و فرمان اصلاح تولید را خواهد داد.

مشخصه پاسخ فرکانس هر ناحیه که برای برقراری ضرایب بایاس لازم است می تواند از طریق بررسی نمودارهای ثبت شده به دنبال بروز اغتشاشات عمده از قبیل خارج شدن یک واحد بزرگ از سیستم تخمین زده شود.

نحوه انتخاب ضریب بایاس

در بررسی عملکرد سیستم در حالت ماندگار انتخاب ضریب بایاس فرکانس خیلی نقش ندارد زیرا در نهایت فرکانس به مقدار نامی خود باز می گردد یعنی زمانی که ACE به صفر برسد عمل کنترلی انجام خواهد شد.

به طور مثال برای افزایش باری در ناحیه ۱ ، مقادیر ACE_1 , ACE_2 را بررسی می کنیم:

فرض می کنیم $B_1 = \beta_1$ و $B_2 = \beta_2$:

$$ACE_1 = \Delta P_{12} + \beta_1 \Delta f$$
$$ACE_2 = -\Delta P_{12} + \beta_2 \Delta f \qquad (۲۱-۱)$$

و خواهیم داشت:

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_{L1}}{\beta_1 + \beta_2} \qquad \Delta P_{12} = \frac{-\Delta P_{L1}}{B_1 + B_2} B_2 \qquad (۲۲-۱)$$

از روابط فوق نتیجه می گردد:

$$ACE_1 = -\frac{\Delta P_{L1}}{\beta_1 + \beta_2}\beta_2 + \beta_1 \frac{-\Delta P_{L1}}{\beta_1 + \beta_2} \qquad (۲۳-۱)$$

$$\Rightarrow \quad ACE_1 = -\Delta P_{L1} \qquad (۲۴-۱)$$

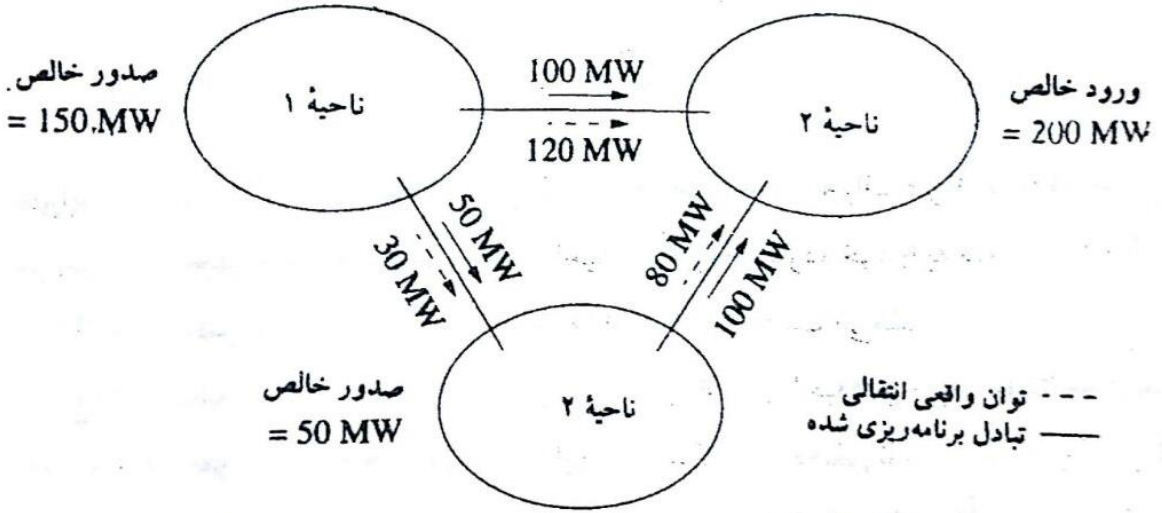
$$ACE_2 = \frac{\Delta P_{L1}}{\beta_1 + \beta_2}\beta_2 + \frac{-\Delta P_{L1}}{\beta_1 + \beta_2}\beta_2 \quad \Rightarrow \quad ACE_2 = 0 \qquad (۲۵-۱)$$

باتوجه به اینکه واحدها و بارهای یک سیستم به طور مداوم درحال خارج شدن و یا وارد شدن در سیستم می باشند باید مقدار β باتوجه به معادله $B = \beta = \frac{1}{R} + D$ تغییرنماید.

سیستم های با بیش از دو ناحیه

کنترل بایاس فرکانس و نحوه عمل ACE برای سیستم های با بیش از دو ناحیه نیز قابل تعمیم است برنامه ریزی تبادل هر ناحیه مساوی جمع جبری توانهای انتقالی تمام خطوط می باشد.

زمانی که ناحیه‌ای به بیش از یک ناحیهٔ اضافی متصل است، انتقال تبادلهای برنامه‌ریزی شده بین آنها، لزوماً به طور مستقیم از طریق خطوط ارتباطی رابط بین نواحی، انجام نمی‌پذیرد. بسته به امپدانسهای نسبی مسیرهای موازی، توانهای واقعی انتقالی را می‌توان بین مسیرهای موازی از طریق سایر نواحی تقسیم کرد. این مطلب در شکل ۱۱-۲۶ که سیستمی سه ناحیه‌ای را نشان می‌دهد، نمایش داده شده است.



عملکرد ACE در حالت عادی و غیر عادی

الف- حالت عادی

هر ناحیه توانایی اجرای دستورالعمل های کنترلی را دارد و عمل کنترلی حالت ماندگار اصلاحی ACE محدودبه ناحیه ای است که در آن کمبود یا افزایش بار رخ داده است و درنتیجه توان تبادلی بین نواحی در مقادیر برنامه ریزی شده حفظ می شود و فرکانس سیستم ثابت نگه داشته می شود.

ب- درحالت غیرعادی

ممکن است به علت عدم وجود ذخیره کافی توان تولیدی یک یا چند ناحیه توانایی تصحیح عدم تطابق بین تولید و مصرف را نداشته باشند لذا نواحی دیگر در چنین وضعیتی با اجازه دادن به توانهای انتقالی بین دوناحیه برای انحراف از حالت برنامه ریزی شده قبلی به کمک می آیند و هر ناحیه به تناسب ظرفیت خود به اغتشاش عکس العمل نشان می دهد.

خطرات کمبود فرکانس

- ۱- در نیروگاه ها:
- - به دلیل کاهش دوره موتورها و فن هایی که در نیروگاه کار می کنند نمی توانند به خوبی تعادل حرارتی در تجهیزات مورد نظر برقرار کنند و باعث گرم شدن دستگاه خواهد شد و در بلند مدت ممکن دستگاه مذکور صدمه ببیند. برای رفع این مشکل از مصرف داخلی مجزا استفاده کرد
- - پره های بلند توربین به علت وجود اختلاف دور باعث کج شدن پره های بلند و ترک خوردن و در نهایت شکستن پره ها خواهد شد.
- ۲- مصرف کننده ها

بارزدایی در فرکانس های پائین

- اولویت بارها و مقدار بارزدایی مهم است.
- برای زمانی که کمبود تولید تا ۲۵٪ باشد روش های زیر در نقاط مختلف جهان استفاده می شود:
- – بار زدایی در شبکه آمریکای شمالی(60 Hz)
- ۱– برای وقتی فرکانس به ۵۹/۲ برسد. ← ۱۰٪ بار قطع می شود.
- ۲– برای وقتی فرکانس به ۵۸/۸ برسد. ← ۱۵٪ بار باقیمانده قطع می شود.
- ۳– برای وقتی فرکانس به ۵۸/۰ برسد. ← ۲۰٪ بار باقیمانده قطع می شود.

شبکه آلمان بر اساس استاندارد DVG (سه گام)

- ۱- برای وقتی فرکانس به ۴۹ برسد. ← ۱۵٪ بار قطع می شود.
- ۲- برای وقتی فرکانس به ۴۸/۷ برسد. ← ۱۵٪ بار باقیمانده قطع می شود.
- ۳- برای وقتی فرکانس به ۴۸/۴ برسد. ← ۱۵٪ بار باقیمانده قطع می شود.
- ۴- وقتی فرکانس به ۴۸ هرتز برسد. ← نیروگاه ها بایستی تک تک از مدار خارج شوند.

روش بارزدایی در شبکه UCTE اروپا

- ۱- برای وقتی فرکانس به ۴۹/۸ برسد. ← وضعیت آلارم و هشدار
- ۲- برای وقتی فرکانس به ۴۹ برسد. ← ٪۱۰ تا ۱۵٪ کل بار قطع می شود.
- ۳- برای وقتی فرکانس به ۴۸/۷ برسد. ← ٪۱۰ تا ۱۵٪ بار باقیمانده قطع می شود.
- ۳- برای وقتی فرکانس به ۴۸/۴ برسد. ← ٪۱۵ تا ۲۰٪ بار باقیمانده قطع می شود.
- ۴- وقتی فرکانس به ۴۷/۵ هرتز برسد. ← نیروگاه ها بایستی تک تک از مدار خارج شوند.

طرح بارزدایی در شبکه ایران

- ۱- برای وقتی فرکانس به ۴۹/۲ برسد. ← ٪۶/۷ کل بار قطع می شود.
- ۲- برای وقتی فرکانس به ۴۹ برسد. ← ٪۷/۴ بار باقیمانده قطع می شود.
- ۳- برای وقتی فرکانس به ۴۸/۷ برسد. ← ٪۷/۴ بار باقیمانده قطع می شود.
- ۴- برای وقتی فرکانس به ۴۸/۴ برسد. ← ٪۹/۴ بار باقیمانده قطع می شود.

فصل دوم: توزیع اقتصادی

مشخصات واحدهای تولید حرارتی- Thermal Units

❖ پارامترهای متعدد در مطالعات سیستم قدرت

- **مشخصه ورودی-خروجی بعنوان مهم ترین پارامتر در بهره برداری اقتصادی از سیستم قدرت**

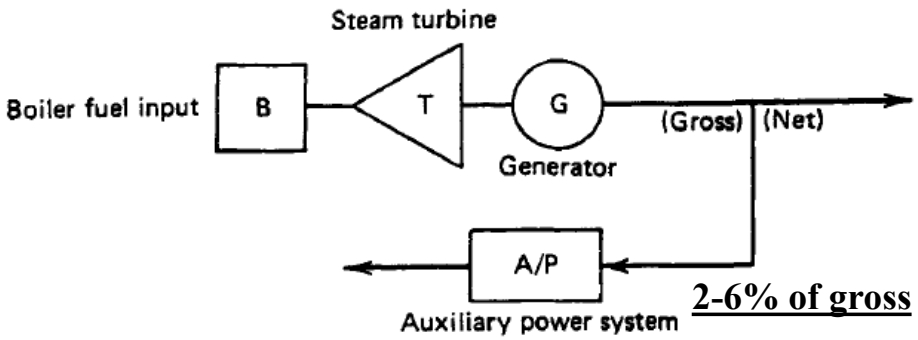


FIG. 2.1 Boiler–turbine–generator unit.

ورودی ناخالص: سوخت واحد تولید است بر حسب نرخ حجم سوخت مصرفی، نرخ ارزش حرارتی آن و یا نرخ هزینه بیان می شود.

نرخ حرارتی ورودی (Heat rate (H)): MBtu/h

F: نرخ هزینه (ضرب بهای سوخت در نرخ حرارت ورودی (بر حسب واحد پول بر ساعت)

مشخصات واحدهای تولید حرارتی(ورودی-خروجی- Input-output)

هزینه بهره برداری= هزینه پرسنل+نگهداری+هزینه سوخت

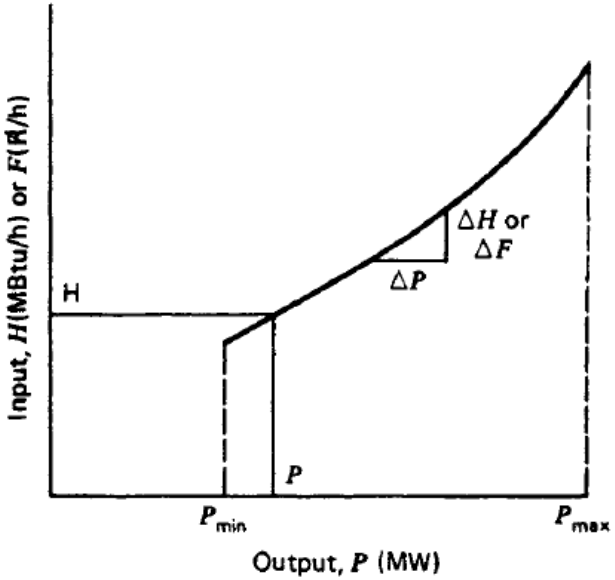


FIG. 2.2 Input–output curve of a steam turbine generator.

مشخصه ورودی-خروجی واحدهای تولید از طریق طراحی و یا آزمایش های حرارتی بدست می آید.
این مشخصه ها ممکن است با گذشت زمان از بهره برداری نیروگاه ها تغییر یابند.
در حالت ایده آل منحنی بصورت محدب و هموار نشان داده می شود.
حداقل بارقابل تولید توسط واحد به علت پایداری احتراق سوخت و محدودیتهای طراحی بویلر دیکته می گردد

مشخصات واحدهای تولید حرارتی(نرخ افزایشی حرارتی-Incremental Heat Rate)

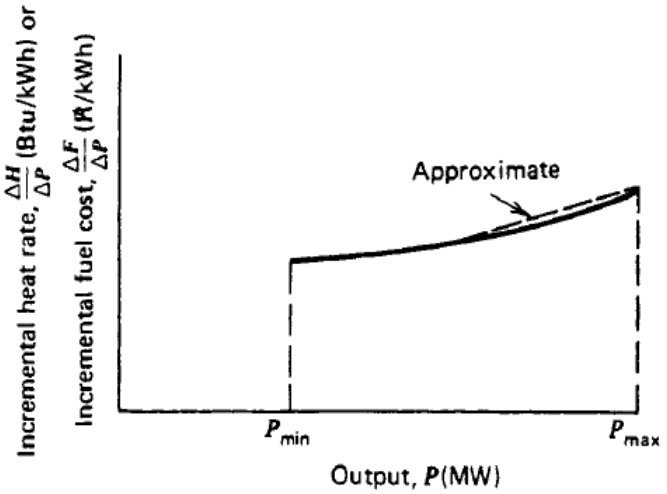


FIG. 2.3 Incremental heat (cost) rate characteristic.

- مشتق مشخصه ورودی-خروجی
- (تغییری که در نرخ حرارتی به ازای تغییر در توان خروجی واحد) ایجاد می شود
- با ضرب نرخ حرارتی افزایشی در بهای سوخت هزینه افزایشی سوخت حاصل می گردد.

مشخصات واحدهای تولید حرارتی(نرخ خالص حرارتی H/P)

نشان دهنده حرارت ورودی مورد نیاز به ازای هر کیلووات ساعت خروجی است (معکوس راندمان). تابعی از پارامترهای طراحی از قبیل شرایط اولیه بخار، مراحل احیای حرارتی، درجه حرارت احیا، فشار کندانسور و پیچیدگی سیکل احیای تغذیه است.

1 kwh=3412 Btu

راندمان واحدهای بخار=۳۰ -۳۵ درصد

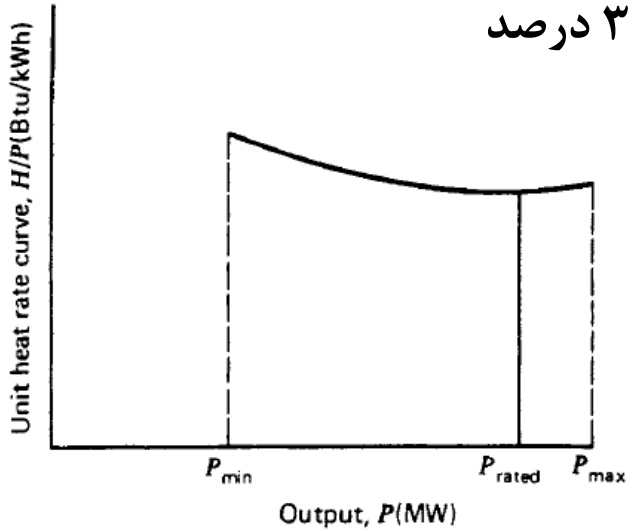


FIG. 2.4 Net heat rate characteristic of a steam turbine generator unit.

نقاط مربوط به مشخصه ورودی–خروجی بعد از تعیین به صورت چند جمله ای تقریب زده می شوند.

- تقریب به صورت درجه دوم کفایت می نماید.
- تقریب تکه ای خطی

در هر دو روش اشاره شده می توان مشخصه را بصورت جدول نشان داد

تنها در روش اول مشخصه بصورت تابع تحلیلی پیوسته قابل بیان است

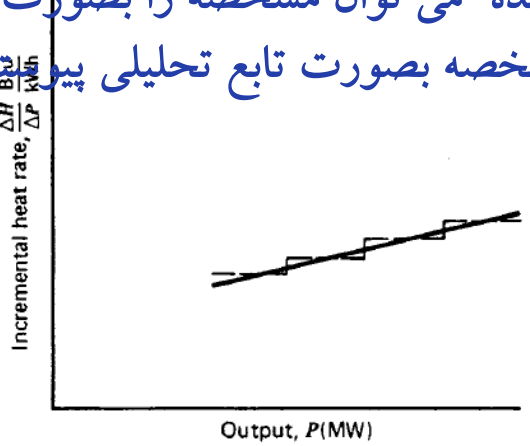


FIG. 2.5 Approximate representations of the incremental heat rate curve.

نحوه نمايش مشخصه هاي ورودي-خروجي واحدها به روش مطالعه مسئله بهره برداري بستگي دارد

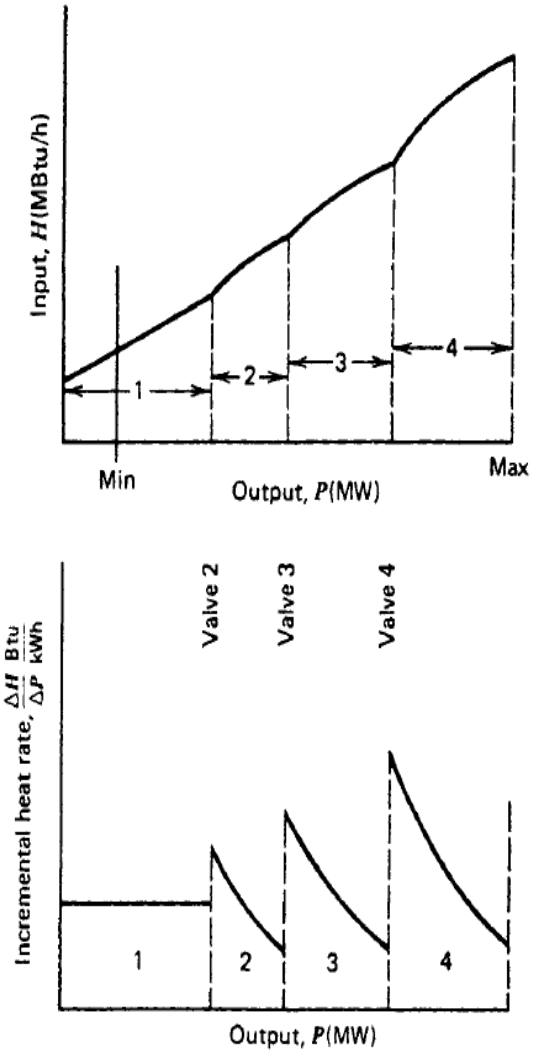


FIG. 2.6 Characteristics of a steam turbine generator with four steam ad valves.

واحدهای بزرگ بخار دارای چند شیر بخار می باشند

با افزایش بار واحد بخار ورودی نیز افزایش یافته و نرخ افزایشی بین نقاط گشایش شیرها کاهش می یابد.

با باز شدن یک شیر تلفات دریچه کنترل بخار به سرعت افزتیش یافته و موجب جهش ناگهانی در نرخ حرارت می گردد. در نتیجه موجب ناپیوستگی در مشخصه نرخ افزایشی حرارتی می گردد.

با توجه به نامحدب بودن این مشخصه ها استفاده از آنها، در روشهای بهینه سازی محدود می گردد.

تنوع مشخصات واحدهاي توليد بخاري (نيروگاه شاخك مشترك Common Header)

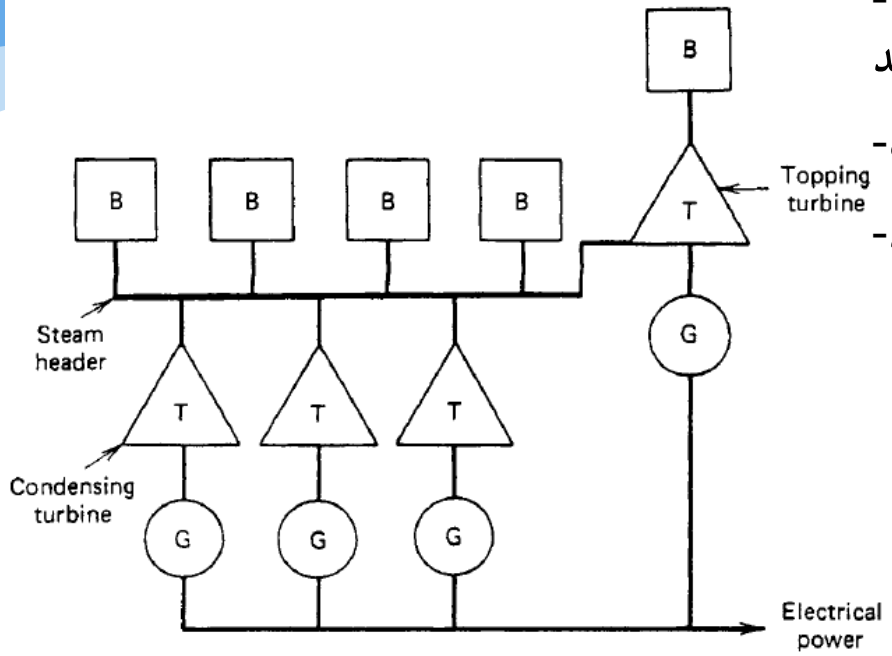


FIG. 2.7 A common-header steam plant.

- شامل تعدادی بویلر می باشد که به یک مسیر اصلی بخار (شاخک) متصل اند
- عمدتاً به منظور تامین بخار مورد نیاز برای نواحی پرجمعیت
- در طول دهه 1960 میلادی به تدریج از رده خارج شده اند

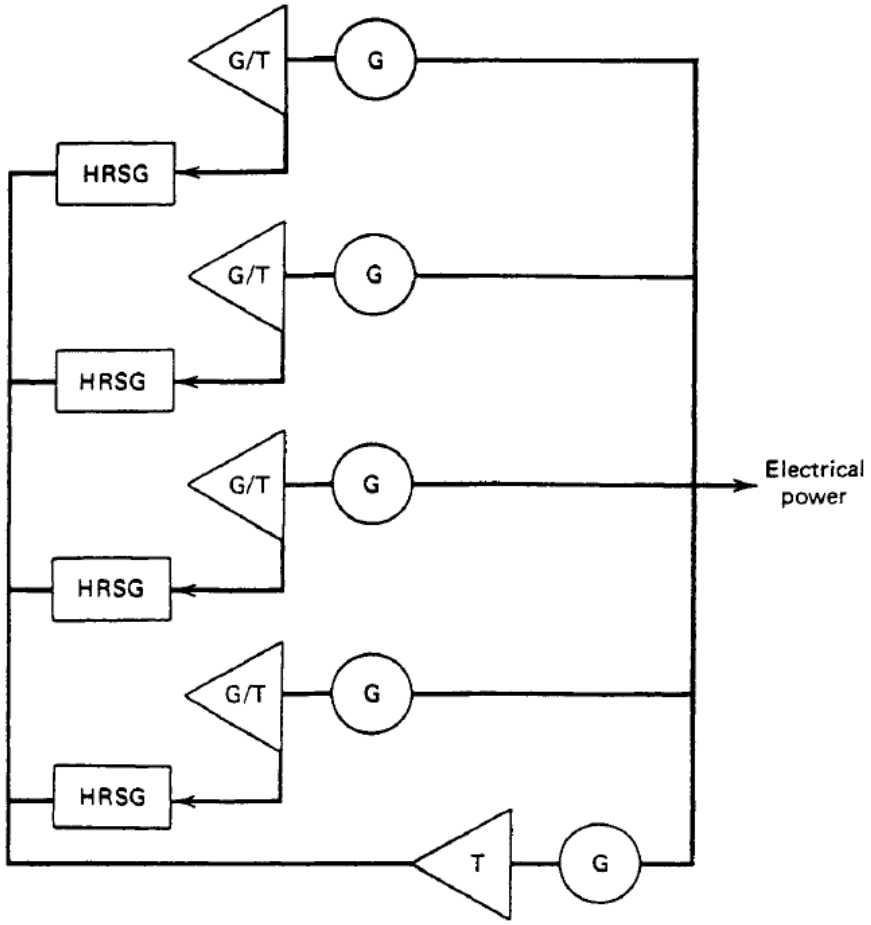


FIG. 2.9 A combined cycle plant with four gas turbines and a steam turbine generator.

1- در توربين سيكل ساده، هواى ورودى در يک كمپرسور دوار فشرده شده و سپس با سوخت گاز در محفظه احتراق تركيب مى گردد

2- انبساط ايجاد شده در محفظه احتراق موجب حركت كمپرسور، توربين و ژنراتور مى گردد.

3- گاز خروجى از دودكش به هوا وارد مى شود

4- راندمان سيكل ساده=25-30٪

5- تامين پيک بار

گاز خروجى سيكل ساده وارد توليد كننده هاى حرارتى **بازيافت** بخار مى گردد تا توربين بخار ديگرى را تغذيه نمايد

راندمان بالاى سيكل از مزاياى آن است (نرخ خالص حرارتى6600-9000Btu/Kwh(

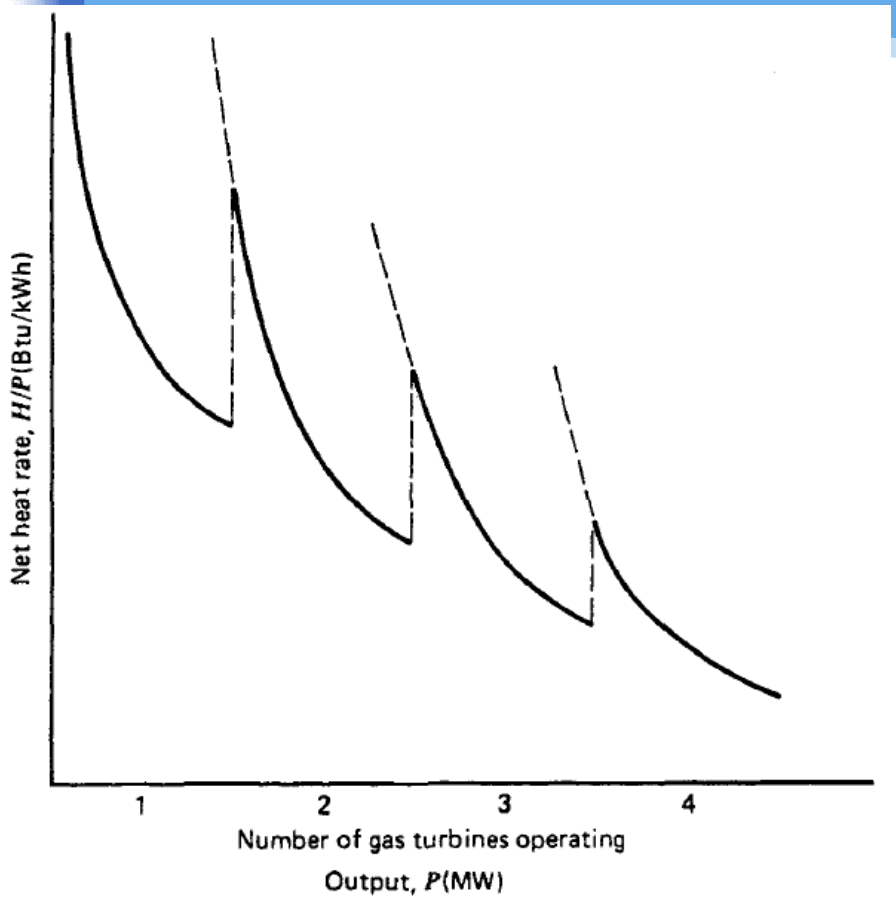


FIG. 2.10 Combined cycle plant heat rate characteristic.

وجود ناپيوستگی و شيب منفی در مشخصه نيروگاههای سيكل تركيبی، برنامه ريزی برای تئزيع اقتصادی بار را با مشكل مواجه می سازد

مشخصه راندمان نيروگاه به تعداد واحدهای گازی بستگی دارد.

دارای مشخصه ای شبیه واحدهای بخار (ورودی دبی آب؛ خروجی مگاوات)-

در محدوده حداقل خروجی تا مقدار نامی، مشخصه بصورت خطی است. لیکن در توانهای بیش از مقدار نامی به - دلیل کاهش راندمان ، میزان دبی آب مورد نیاز افزایش می یابد.

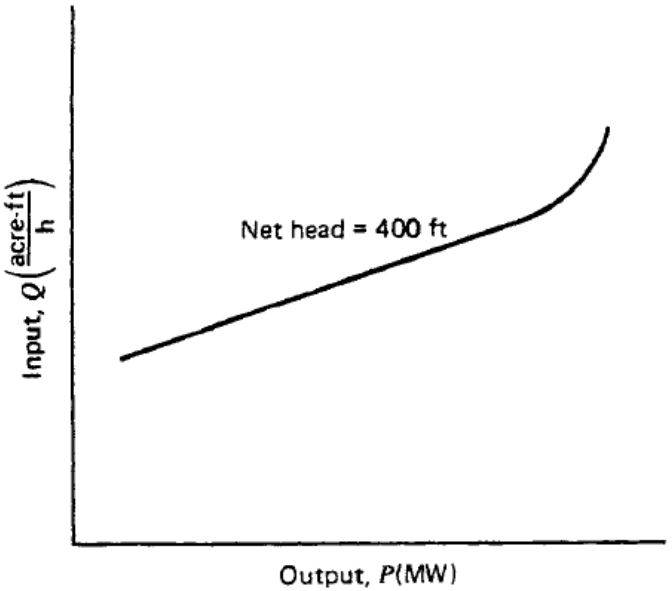


FIG. 2.12 Hydroelectric unit input–output curve.

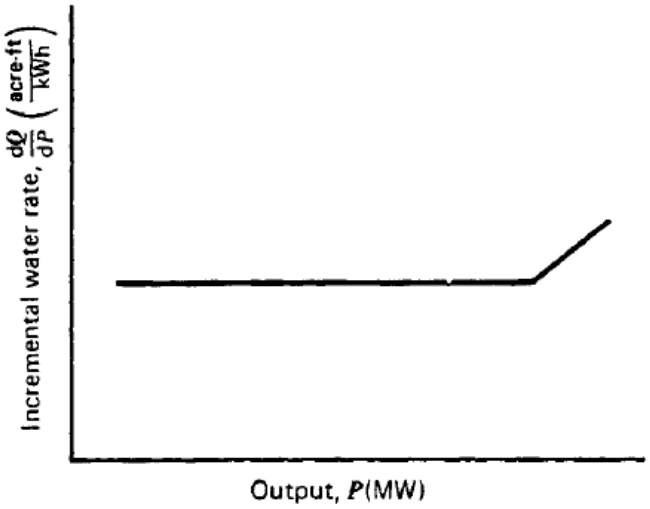


FIG. 2.13 Incremental water rate curve for hydroelectric plant.

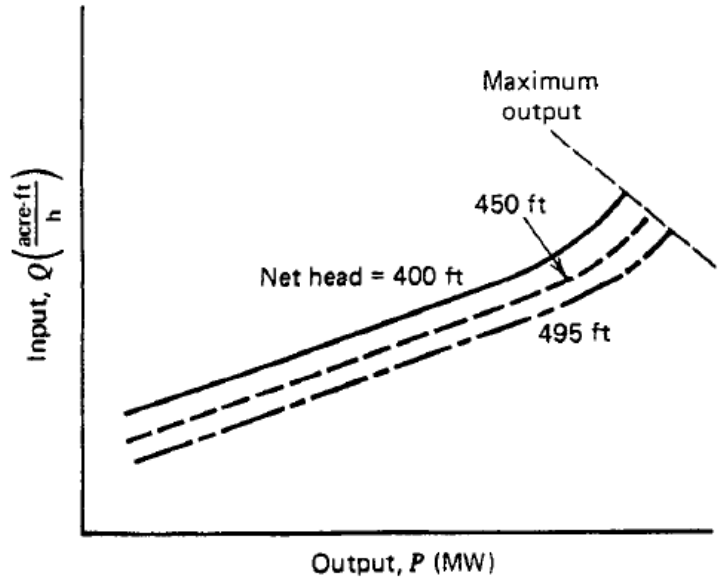


FIG. 2.14 Input–output curves for hydroelectric plant with a variable head.

با تغییر ارتفاع آب، مشخصه نیروگاه نیز تحت تاثیر قرار می گیرد. بنابراین برنامه ریزی برای این واحدها نسبت به حالتی که در آن ارتفاع آب ثابت در نظر گرفته می شود دشوار است زیرا:

1- تعداد مشخصه ها افزایش می یابد

2- حداکثر ظرفیت نیروگاه با تغییر ارتفاع آب تغییر می نماید.

Pumbed Storage Hydroelectric Plantواحدهاي توليد تلمبه اي ذخيره اي-

- آب توسط پمپ به حوضچه های بالا دست انتقال می یابد تا در زمانهای مناسب برای تولید انرژی الکتریکی مورد استفاده قرار گیرد

- در حالت نیروگاهی دارای مشخصه عادی می باشند. لیکن در حالت پمپ در بارهای کمتر از بار نامی از راندمان پمپ کاسته می شود. بنابراین بار پمپ در شرایط بهره برداری ثابت نگه داشته می شود.

- این واحدهای تولید به عنوان ذخیره چرخان نیز در بهره برداری از سیستم قدرت مورد استفاده قرار می گیرند

- مشخصه نیروگاههای آبی تحت تاثیر زیادی از ساختارهای هیدرولیکی قرار دارند. بنابراین هماهنگی نیروگاههای آبی و حرارتی از موضوعات مهم و قابل توجه در بهره برداری از سیستمهای قدرت به شمار می رود.

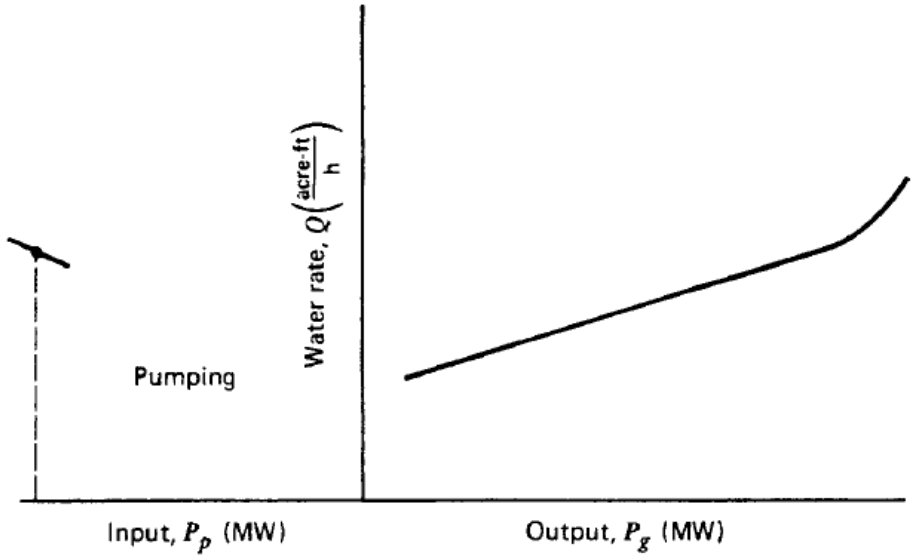


FIG. 2.15 Input–output characteristics for a pumped storage hydroplant with a fixed, net hydraulic head.

Economic Dispatch of Thermal Units and Methods of Solution

فهرست مطالب

- تکنیکهای بهینه سازی
- مسئله توزیع اقتصادی بار بین نیروگاهها
- حل مسئله ED با استفاده از روش ضرایب لاگرانژ
-

مسئله بهینه سازی در حالت کلی به این صورت
با شرط خطی یا غیر خطی fاست که تابع غیر خطی
معینی حداقل یا حداکثر گردد

$$Min..f(x_1,x_2)$$
$$S.T.....\omega(x_1,x_2)=0$$

$$df=0$$

$$L=f+\lambda.\omega$$

$$dL=0$$

$$dL=\frac{\partial L}{\partial x_1}+\frac{\partial L}{\partial x_2}$$

$$dL=0$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_1}=\frac{\partial f}{\partial x_1}+\lambda\frac{\partial \omega}{\partial x_1}=0$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_2}=\frac{\partial f}{\partial x_2}+\lambda\frac{\partial \omega}{\partial x_2}=0$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_1}=0$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_2}=0$$

$$\nabla f=\begin{bmatrix}\frac{\partial f}{\partial x_1}\\ \frac{\partial f}{\partial x_2}\end{bmatrix},\nabla\omega=\begin{bmatrix}\frac{\partial \omega}{\partial x_1}\\ \frac{\partial \omega}{\partial x_2}\end{bmatrix}$$

$$\nabla f+\lambda\nabla\omega=0$$

و گرادیان تابع قید هم fدر نقطه بهینه بردار گرادیان راستا هستند.

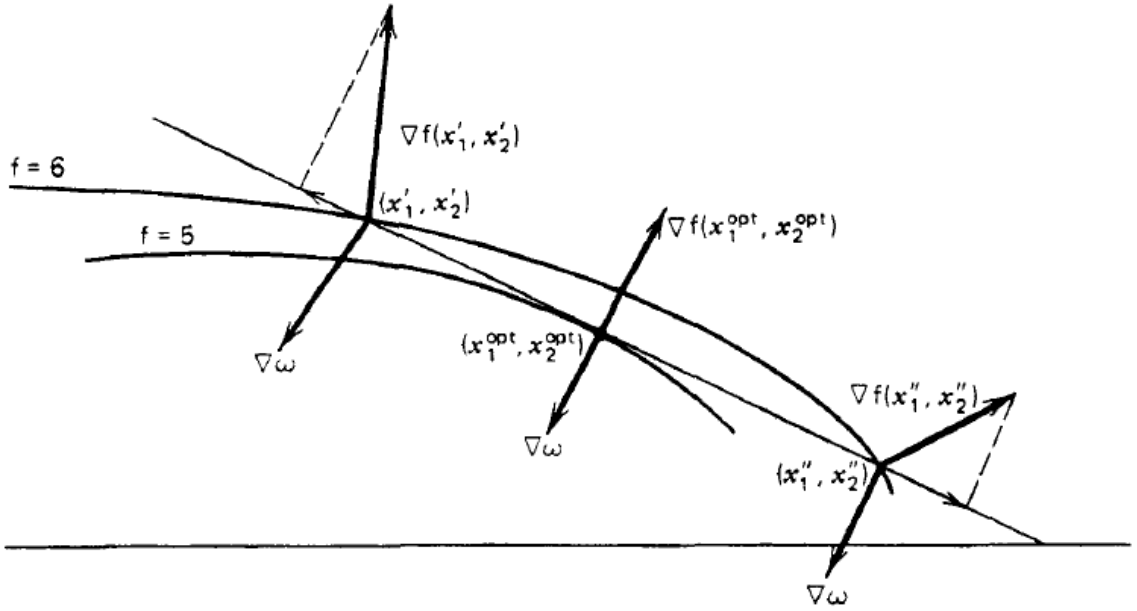


FIG. 3.10 Gradients near a constrained optimum.

و گرادیان تابع قید هم **f**در نقطه بهینه بردار گرادیان راستا هستند.

$$Min..f(x_1, x_2)$$

$$S.T.....\omega(x_1, x_2) = 0$$

$$\nabla f + \lambda \nabla \omega = 0$$

$$Min..f(x_1,x_2)=3x_1^{\ 2}+4x_2^{\ 2}$$

$$S.T.....\omega(x_1,x_2)=3.5x_1+4x_2-14=0$$

$$L=3x_1^{\ 2}+4x_2^{\ 2}+\lambda(3.5x_1+4x_2-14)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_1}=0=6x_1+3.5\lambda$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_2}=0=8x_2+4\lambda$$

$$3.5x_1+4x_2-14=0$$

$$x_1=2.02$$

$$x_2=1.73$$

$$\lambda=-3.46$$

$$f_{\min}=24.21$$

$$\frac{\partial f}{\partial x_1}=6x_1,\frac{\partial f}{\partial x_2}=6x_2$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial x_1}=3.5,\frac{\partial \omega}{\partial x_2}=4$$

$$\nabla f=18.4\angle 48.8$$

$$\nabla \omega=5.31\angle 48.8$$

در نقطه بهینه گرادیانها هم راستا هستند

در نقطه بهینه گرادیان تابع هدف و گرادیان تابع قید وابسته خطی هستند

$$Minimize.....f(x_1, x_2)$$

$$S.T.$$

$$\omega_1(x_1, x_2) = 0$$

$$\omega_2(x_1, x_2) = 0$$

$$\omega_3(x_1, x_2) = 0$$

$$\nabla f + \lambda_1 \nabla \omega_1 + \lambda_2 \nabla \omega_2 + \lambda_3 \nabla \omega_3 = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial L}{\partial x_2} = 0 \qquad \frac{\partial L}{\partial \lambda_1} = 0, \frac{\partial L}{\partial \lambda_2} = 0, \frac{\partial L}{\partial \lambda_3} = 0$$

حالت کلی با قیود تساوی

$$Minimize.....f(\bar{x}), N$$

$$S.T.$$

$$\omega_i(\bar{x}) = 0, i = 1,2,...., N_\omega$$

$$N + N_\omega$$

$$Minimize.....f(\bar{x})$$

$$S.T.$$

$$\omega_i(\bar{x}) = 0, i = 1,2,...., N_\omega$$

$$g_i(\bar{x}) \le 0, i = 1,2,....N_g$$

$$L(\bar{x}, \bar{\lambda}, \bar{\mu}) = f(\bar{x}) + \sum_{i=1}^{N_\omega} \lambda_i \omega_i(\bar{x}) + \sum_{i=1}^{N_g} \mu_i g_i(\bar{x})$$

شرط اول: مشتقات جزئی تابع لاگرانژ

شرط دوم و سوم: همان قيود است

شرط چهارم: بيان مرزی بودن غير مرزی بودن قيود

براي محاسبه نقطه بهينهKuhn-Tuckerشرايط

$$1)\ \frac{\partial L}{\partial x_i} = 0 : i = 1,2,...., N$$

$$2)\ \frac{\partial L}{\partial \lambda_i} = 0 = \omega_i = 0 : i = 1,2,...., N_\omega$$

$$3) g_i \le 0 : i = 1,2,...., N_g$$

$$4)\begin{cases} \mu_i . g_i = 0 \\ \mu_i \ge 0 \end{cases} : i = 1,2,...., N_g$$

چنانچه نقطه بهينه در مرزهای ناحيه ممكن قرار داشته باشد، آنگاه به قيد مرزی و در غير اينصورت قيد غير مرزی گفته می شود.

$$f(x_1, x_2) = 0.25x_1^2 + x_2^2$$

$$\omega(x_1, x_2) = 5 - x_1 - x_2 = 0$$

$$g(x_1, x_2) = x_1 + 0.2x_2 - 3 \leq 0$$

شرایط لازم برای وجود نقطه بهینه K-Tشرایط برای مسئله بهینه سازی مقید می باشد. برای یافتن جوابهای مسئله بهینه سازی باید پاسخهای مختلف را آزمایش کرد به این منظور که کدامیک از پاسخها تمامی شروط را تامین می نمایند.

$$\mathcal{L} = f(x_1, x_2) + \lambda[\omega(x_1, x_2)] + \mu[g(x_1, x_2)]$$
$$= 0.25x_1^2 + x_2^2 + \lambda(5 - x_1 - x_2) + \mu(x_1 + 0.2x_2 - 3)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_1} = 0.5x_1 - \lambda + \mu = 0$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_2} = 2x_2 - \lambda + 0.2\mu = 0$$

$$5 - x_1 - x_2 = 0$$

$$x_1 + 0.2x_2 - 3 \leq 0$$

$$\mu(x_1 + 0.2x_2 - 3) = 0$$

$$\mu \geq 0$$

If $\mu = 0$, then by conditions 1 and 2

$$x_1 = 4$$
$$x_2 = 1$$
$$\lambda = 2$$

but

$$g(x_1, x_2)\Big|_{\substack{x_1=4\\x_2=1}} = 4 + 0.2(1) - 3 = 1.2 \not\leq 0$$

If $\mu > 0$, then by conditions 2 and 3

$$x_1 = 2.5$$
$$x_2 = 2.5$$

by condition 1

$$\lambda = 5.9375$$
$$\mu = 4.6875$$

and

$$g(x_1, x_2)|_{x_1=x_2=2.5} = 2.5 + 0.2(2.5) - 3 = 0$$

All conditions are met.

$$f(x_1, x_2) = C_1(x_1) + C_2(x_2)$$

$$\omega(x_1, x_2) = D - x_1 - x_2 = 0$$

$$x_1^- \le x_1 \le x_1^+ \Rightarrow \begin{cases} g_1(x_1) = x_1 - x_1^+ \le 0 \\ g_2(x_1) = x_1^- - x_1 \le 0 \end{cases}$$

$$x_2^- \le x_2 \le x_2^+ \Rightarrow \begin{cases} g_3(x_2) = x_2 - x_2^+ \le 0 \\ g_4(x_2) = x_2^- - x_2 \le 0 \end{cases}$$

$$L = f(x_1, x_2) + \lambda\omega(x_1, x_2) + \mu_1 g_1(x_1) + \mu_2 g_2(x_1) + \mu_3 g_3(x_2) + \mu_4 g_4(x_2)$$

$$= C_1(x_1) + C_2(x_2) + \lambda(D - x_1 - x_2) + \mu_1(x_1 - x_1^+) + \mu_2(x_1^- - x_1) + \mu_3(x_2 - x_2^+) + \mu_4(x_2^- - x_2)$$

$$1\Rightarrow\begin{cases}C_1'(x_1)-\lambda+\mu_1-\mu_2=0\\ C_2'(x_2)-\lambda+\mu_3-\mu_4=0\end{cases}\qquad 2\Rightarrow D-x_1-x_2=0$$

$$3\Rightarrow\begin{cases}x_1-x_1^{+}\le 0\\ x_1^{-}-x_1\le 0\\ x_2-x_2^{+}\le 0\\ x_2^{-}-x_2\le 0\end{cases}$$

$$4\Rightarrow\begin{cases}\mu_1(x_1-x_1^{+})=0 & \mu_1\ge 0\\ \mu_2(x_1^{-}-x_1)=0 & \mu_2\ge 0\\ \mu_3(x_2-x_2^{+})=0 & \mu_3\ge 0\\ \mu_4(x_2^{-}-x_2)=0 & \mu_4\ge 0\end{cases}$$

$$1-x_{\min}\prec\bar{x}\prec\bar{x}_{\max}\Rightarrow\bar{\mu}=0, C_1'(x_1)=C_2'(x_2)=\lambda$$

اگر متغیرها در محدوده مجازقرار گیرند، هزینه افزایشی واحدها برابر ضریب لاگرانژ است

$$2-x_1=x_1^{+}\Rightarrow\mu_1\ge 0,\mu_2=\mu_3=\mu_4=0\Rightarrow C_1'(x_1)=\lambda-\mu_1\Rightarrow C_1'(x_1)\le\lambda, C_2'(x_2)=\lambda$$

اگر یکی از متغیرها در مقدار حداکثر محاسبه شود، هزینه افزایشی واحدمربوطه کمتر از ضریب لاگرانژ است

$$3-x_1=x_1^{-}\Rightarrow\mu_2\ge 0,\mu_2=\mu_3=\mu_4=0\Rightarrow C_1'(x_1)=\lambda+\mu_2\Rightarrow C_1'(x_1)\ge\lambda, C_2'(x_2)=\lambda$$

اگر یکی از متغیرها در مقدار حداقل محاسبه شود، هزینه افزایشی واحدمربوطه بیشتر از ضریب لاگرانژ است

$$4-x_1=x_1^{+}, x_2=x_2^{+}\Rightarrow\mu_1\ge 0,\mu_3\ge 0,\mu_2=\mu_4=0\Rightarrow C_1'(x_1)=\lambda-\mu_1, C_2'(x_2)=\lambda-\mu_3$$

اگر حل بهینه به گونه ای باشد که هر دو متغیر در مقادیر حدی خود قرار گیرند، ضریب لاگرانژ و غیر صفر نامعین خواهند بود. بعنوان مثال اگر هردو متغیر در مقدار حداکثر قرار گیرند

$$,\begin{cases}\lambda=?\\ \mu_1=?\\ \mu_3=?\end{cases}$$

۸۹

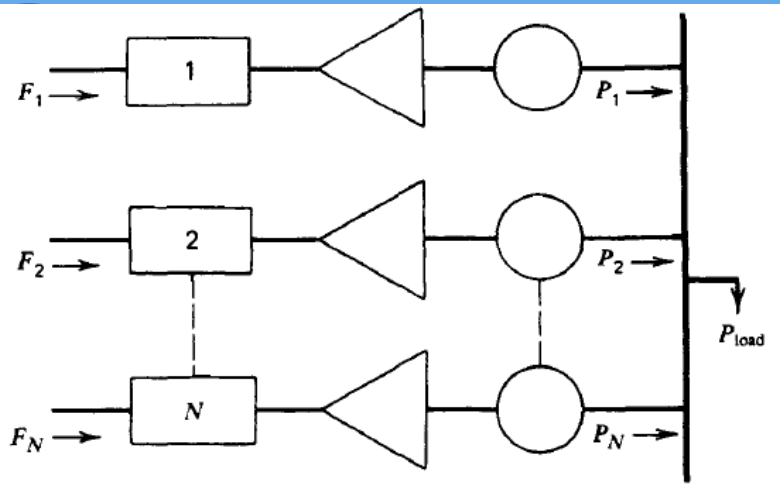


FIG. 3.1 N thermal units committed to serve a load of P_{load}.

واحد حرارتی که بار Nسیستمی متشکل از ثابت پیش بینی شده ای را در یک مقطع زمانی کوچک تامین می کنند. تمامی فرض–نیروگاهها مستقیماً به محل مصرف وصل هستند.

مسئله توزیع اقتصادی بار یک مسئله بهینه سازی مقید است که باید از روشهای مناسب حل شود. در

تابع هدف: تابع هزینه بهره برداری که باید حداقل گردد

قیود: حداقل و حداکثر تولید واحدهای حرارتی و برقراری تعادل بین عرضه و تقاضا

$$Min.....F_T = \sum_{i=1}^{N} F_i(P_i)$$

$$S.T.....\phi = P_R - \sum_{i=1}^{N} P_i$$

مسئله بهینه سازی را می توان از روشهای بهینه سازی حل کرد

$$L = F_T + \lambda\phi$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = 0 = \frac{dF_i}{dP_i} - \lambda \Rightarrow \frac{dF_i}{dP_i} = \lambda : i = 1,2,\ldots, N,, P_{i\min} \le P_i \le P_{i\max}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \dfrac{dF_i}{dP_i} = \lambda \\ P_R = \sum_{i=1}^{N} P_i \qquad i = 1,2,\ldots, N \\ P_{i\min} \le P_i \le P_{i\max} \end{cases}$$

- در نقطه بهینه هزینه افزایشی کلیه واحدها با هم برابر و مساوی ضریب لاگرانژ است
- اگر واحدی به حداکثر(حداقل) توان خود برسد آنگاه هزینه افزایشی آن کمتر یا مساوی (بزرگتر یا مساوی) ضریب لاگرانژ خواهد بود

$$\begin{cases} H_1 = 510 + 7.2P_1 + .00142P_1^2 [\frac{MBtu}{h}] & 150 \le P_1 \le 600 \\ H_2 = 310 + 7.85P_2 + .00194P_2^2 [\frac{MBtu}{h}] & 100 \le P_2 \le 400 \\ H_3 = 78 + 7.97P_3 + .00482P_3^2 [\frac{MBtu}{h}] & 50 \le P_3 \le 200 \\ P_R = 850[MW] \end{cases}$$

Unit 1: fuel cost = 1.1 ₹/MBtu

Unit 2: fuel cost = 1.0 ₹/MBtu

Unit 3: fuel cost = 1.0 ₹/MBtu

$$F_1(P_1) = H_1(P_1) \times 1.1 = 561 + 7.92P_1 + 0.001562P_1^2 \text{ ₹/h}$$

$$F_2(P_2) = H_2(P_2) \times 1.0 = 310 + 7.85P_2 + 0.00194P_2^2 \text{ ₹/h}$$

$$F_3(P_3) = H_3(P_3) \times 1.0 = 78 + 7.97P_3 + 0.00482P_3^2 \text{ ₹/h}$$

$$\frac{dF_1}{dP_1} = 7.92 + 0.003124P_1 = \lambda$$

$$\frac{dF_2}{dP_2} = 7.85 + 0.00388P_2 = \lambda$$

$$\frac{dF_3}{dP_3} = 7.97 + 0.00964P_3 = \lambda$$

$$P_1 + P_2 + P_3 = 850 \text{ MW}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \lambda = 9.148[R/MWh] \\ P_1 = 393.2[MW] \\ P_2 = 334.6[MW] \\ P_3 = 122.2[MW] \end{cases}$$

- کاهش یابد:[0.9[R/MBtu]اگر هزینه سوخت واحد 1 به

$$\lambda = 8.284 \text{ ₨/MWh}$$

$$P_1 = 704.6 \text{ MW}$$
$$P_2 = 111.8 \text{ MW}$$
$$P_3 = 32.6 \text{ MW}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} P_3 \prec P_{3\min} \\ P_1 \succ P_{3\max} \end{cases} \Rightarrow \quad P_1 = 600 \text{ MW}, \; P_2 = 200 \text{ MW}, \; P_3 = 50 \text{ MW} \Rightarrow \lambda = \left.\frac{dF_2}{dP_2}\right|_{P_2=200} = 8.626 \text{ ₨/MWh}$$

$$\left.\frac{dF_1}{dP_1}\right|_{P_1=600} = 8.016 \text{ ₨/MWh}$$

$$\left.\frac{dF_3}{dP_3}\right|_{P_3=50} = 8.452 \text{ ₨/MWh}$$

هزینه افزایشی واحد3 بیشتر از ضریب لاگرانژ نبوده و لذا پاسخ بدست آمده بهینه نمی باشد. برای تعیین پاسخ بهینه باید 250 مگاوات باقی مانده بین دو واحد2و3 تقسیم شود.

$$P_1 = 600 \text{ MW}$$

$$\frac{dF_2}{dP_2} = 7.85 + 0.00388P_2 = \lambda$$

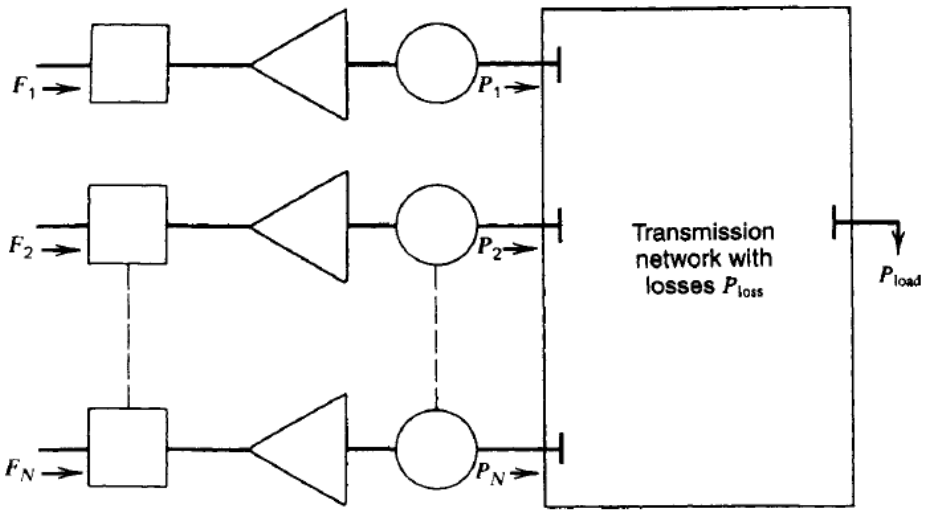
$$\frac{dF_3}{dP_3} = 7.97 + 0.00964P_3 = \lambda$$

$$P_2 + P_3 = 850 - P_1 = 250 \text{ MW}$$

$$\Rightarrow \quad \lambda = 8.576 \text{ ₨/MWh}, \; P_2 = 187.1 \text{ MW}, \; P_3 = 62.9 \text{ MW}$$

$$\left.\frac{dF_1}{dP_1}\right|_{P_1=600 \text{ MW}} = 8.016 \text{ ₨/MWh}$$

۹۳



$$P_{load} + P_{loss} - \sum_{i=1}^{N} P_i = \phi = 0$$

$$\mathcal{L} = F_T + \lambda\phi$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_i} = \frac{dF_i}{dP_i} - \lambda\left(1 - \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_i}\right) = 0$$

$$\frac{dF_i}{dP_i} + \lambda \frac{\partial P_{loss}}{\partial P_i} = \lambda$$

$$P_{load} + P_{loss} - \sum_{i=1}^{N} P_i = 0$$

معادلات هماهنگي

$$\Rightarrow \begin{cases} \left(\dfrac{1}{1 - \dfrac{\partial P_{loss}}{\partial P_i}}\right)\dfrac{dF_i}{dP_i} = \lambda \\ P_R + P_{loss} = \sum_{i=1}^{N} P_i \qquad i = 1,2,\ldots,N \\ P_{i\min} \le P_i \le P_{i\max} \end{cases}$$

$$P_{loss} = 0.00003P_1^2 + 0.00009P_2^2 + 0.00012P_3^2$$

الگوریتم حل

1- مقادیر اولیه توان تولیدی را انتخاب کنید بطوریکه مجموع آنها برابر بار باشد

2- تلفات افزایشی و تلفات را محاسبه نمایید

3- مقدار λ را که باعث می گردد مجموع تولید واحدها با بار برابر شود محاسبه کنید. همچنین توان تولیدی واحدها را بدست آورید

4- مقادیر محاسبه شده توانهای تولیدی از مرحله را با مقادیر مشابه در آغاز مرحله سوم مقایسه نمایید. در صورت عدم مشاهده تفاوت عمده به مرحله 5 بروید، در غیر اینصورت به مرحله دوم بازگردید

$$7.92 + 0.003124P_1 = \lambda[1 - 2(0.00003)P_1]$$
$$7.85 + 0.00388P_2 = \lambda[1 - 2(0.00009)P_2]$$
$$7.97 + 0.00964P_3 = \lambda[1 - 2(0.00012)P_3]$$

$$P_1 + P_2 + P_3 - 850 - P_{loss} = 0$$

$$P_1 = 400.0 \text{ MW}$$
$$P_2 = 300.0 \text{ MW}$$
$$P_3 = 150.0 \text{ MW}$$

$$\Rightarrow$$

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_1} = 2(0.00003)400 = 0.0240$$
$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_2} = 2(0.00009)300 = 0.0540$$
$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_3} = 2(0.00012)150 = 0.0360$$

$$\Rightarrow$$

$$7.92 + 0.003124P_1 = \lambda(1 - 0.0240) = \lambda(0.9760)$$
$$7.85 + 0.00388P_2 = \lambda(1 - 0.0540) = \lambda(0.9460)$$
$$7.97 + 0.00964P_3 = \lambda(1 - 0.0360) = \lambda(0.9640)$$

$$P_1 + P_2 + P_3 - 850 - 15.6 = P_1 + P_2 + P_3 - 865.6 = 0$$

Total losses are 15.6 MW.

$$\Rightarrow$$

$$\lambda = 9.5252 \text{ ₨/MWh}$$
$$P_1 = 440.68$$
$$P_2 = 299.12$$
$$P_3 = 125.77$$

$$\Rightarrow$$

$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_1} = 2(0.00003)440.68 = 0.0264$$
$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_2} = 2(0.00009)299.12 = 0.0538$$
$$\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_3} = 2(0.00012)125.77 = 0.0301$$

15.78 MW.

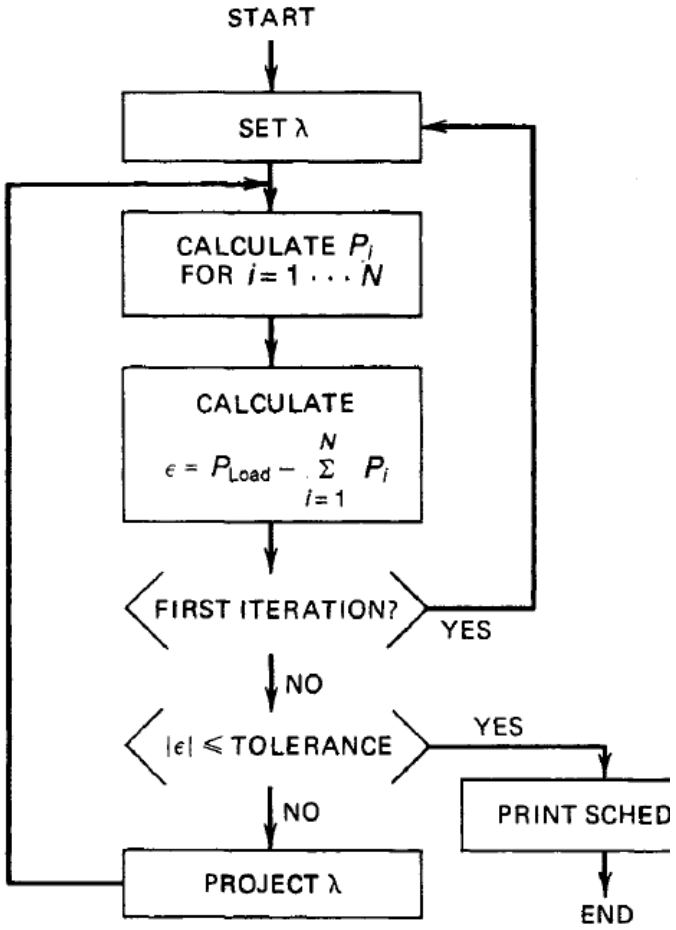
$$\Rightarrow$$

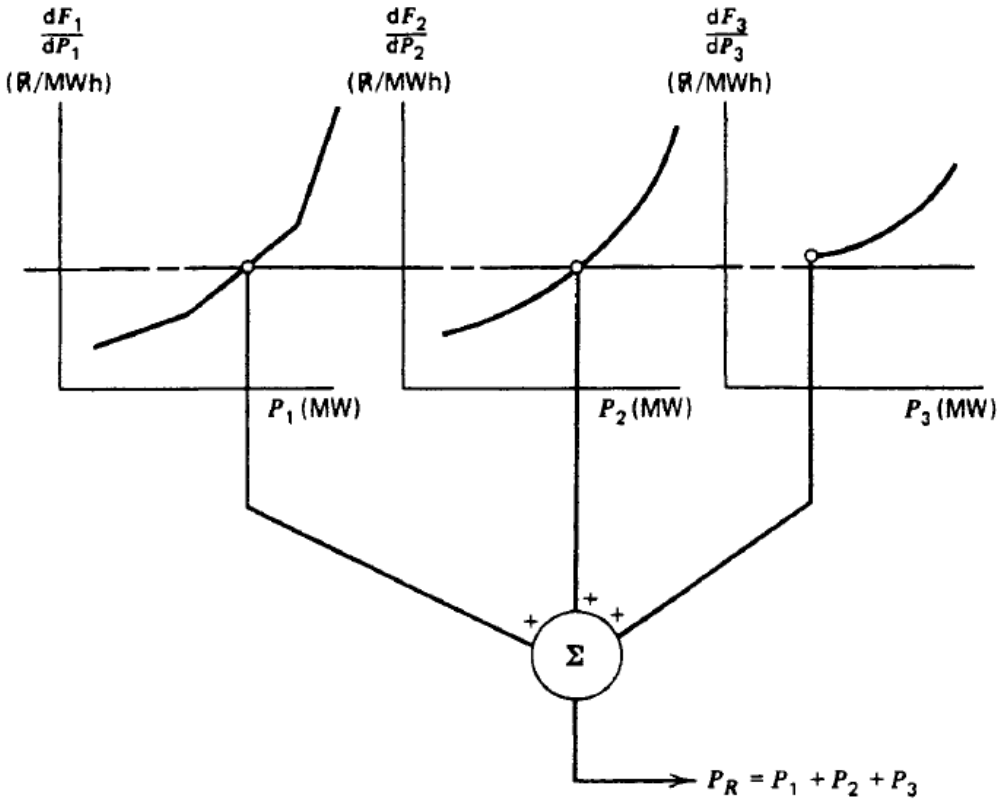
$$7.92 + 0.003124P_1 = \lambda(1 - 0.0264) = \lambda(0.9736)$$
$$7.85 + 0.00388P_2 = \lambda(1 - 0.0538) = \lambda(0.9462)$$
$$7.97 + 0.00964P_2 = \lambda(1 - 0.0301) = \lambda(0.9699)$$
$$P_1 + P_2 + P_3 - 850 - 15.78 = P_1 + P_2 + P_3 - 865.78 = 0$$

$$\Rightarrow$$

$$\lambda = 9.5275 \text{ ₨/MWh}$$
$$P_1 = 433.94 \text{ MW}$$
$$P_2 = 300.11 \text{ MW}$$
$$P_3 = 131.74 \text{ MW}$$
$$\vdots$$

Iteration	P_1 (MW)	P_2 (MW)	P_3 (MW)	Losses (MW)	λ (₨/MWh)
Start	400.00	300.00	150.00	15.60	9.5252
1	440.68	299.12	125.77	15.78	9.5275
2	433.94	300.11	131.74	15.84	9.5285
3	435.87	299.94	130.42	15.83	9.5283
4	434.13	299.99	130.71	15.83	9.5284

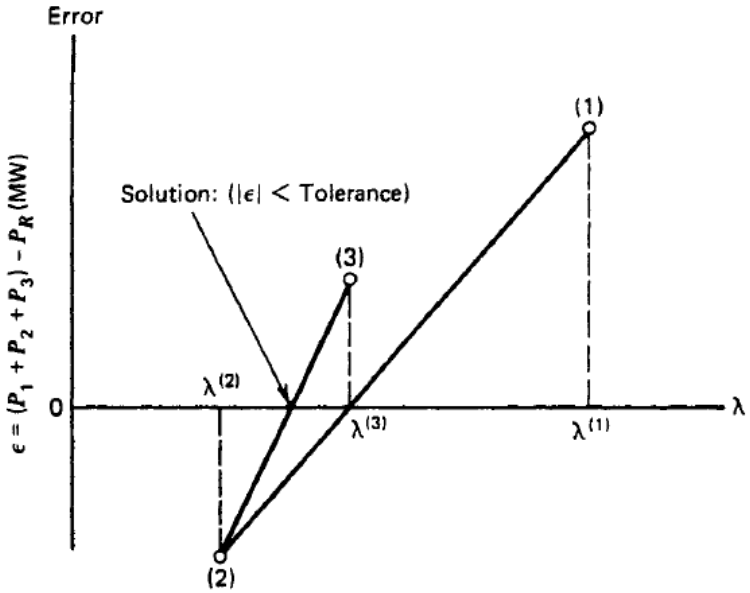




1- در روش تکرار باید حدود توان واحدها را مد نظر قرارداد

2- حدس نامناسب اولیه ممکن است موجب نوسانی شدن پاسخ شود

۹۸



$$H\ (\text{MBtu/h}) = A + BP + CP^2 + DP^3 \qquad (P \text{ in MW})$$

	A	B	C	D
Unit 1	749.55	6.95	9.68×10^{-4}	1.27×10^{-7}
Unit 2	1285.0	7.051	7.375×10^{-4}	6.453×10^{-8}
Unit 3	1531.0	6.531	1.04×10^{-3}	9.98×10^{-8}

$320\ \text{MW} \le P_1 \le 800\ \text{MW}$

$300\ \text{MW} \le P_2 \le 1200\ \text{MW}$

$275\ \text{MW} \le P_3 \le 1100\ \text{MW}$

$P_{\text{load}} = 2500\ \text{MW}$

$\lambda_{\text{start}} = 8.0\ \text{R/MWh}$

Iteration	λ	Total Generation (MW)	P_1	P_2	P_3
1	8.0000	1731.6	494.3	596.7	640.6
2	8.8000	2795.0	800.0	1043.0	952.0
3	8.5781	2526.0	734.7	923.4	867.9
4	8.5566	2497.5	726.1	911.7	859.7
5	8.5586	2500.0	726.9	912.7	860.4

$P_{load} = 2500$ MW

$\lambda_{start} = 10.0$ ₹/MWh $\Rightarrow$

Iteration	λ	Total Generation (MW)	P_1	P_2	P_3
1	10.0000	3100.0	800.0	1200.0	1100.0
2	9.0000	2974.8	800.0	1148.3	1026.5
3	5.2068	895.0	320.0	300.0	275.0
4	8.1340	1920.6	551.7	674.5	694.4
5	9.7878	3100.0	800.0	1200.0	1100.0
6	8.9465	2927.0	800.0	1120.3	1006.7
7	6.8692	895.0	320.0	300.0	275.0
8	8.5099	2435.0	707.3	886.1	841.7
9	8.5791	2527.4	735.1	924.0	868.3
10	8.5586	2500.1	726.9	912.8	860.4

در روش تکرار λ همواره باید بتوان توان تولیدی هر واحد را با فرض معلوم بوده هزینه افزایشی واحد بدست آورد. در حالتی که تابع هزینه افزایشی بصورت تکه ای خطی بیان شود این امر ممکن است. اما در شرایطی که تابع هزینه پیچیده تر می شود قابل استفاده نخواهد بود. بنابراین باید از روشهای دیگری که توانمندی بیشتری داشته باشند به منظور دستیابی به جواب بهینه استفاده کرد.

$$F(P) = A + BP + CP^2 + D\exp\left[\frac{(P-E)}{F}\right]$$

$$\nabla \mathbf{f} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x}^1 = \mathbf{x}^0 - \nabla \mathbf{f}\,\alpha$$

ضریب a تضمین می نماید که همگرایی فرآیند حل حاصل شود. مقدار آن بطور تجربی تعیین می شود

$$f = \sum_{i=1}^{N} F_i(P_i)$$

$$\Phi = \left(P_{\text{load}} - \sum_{i=1}^{N} P_i\right)$$

$$\mathscr{L} = \sum_{i=1}^{N} F_i(P_i) + \lambda\left(P_{\text{load}} - \sum_{i=1}^{N} P_i\right) \Longrightarrow \quad \nabla\mathscr{L} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathscr{L}}{\partial P_1} \\ \frac{\partial \mathscr{L}}{\partial P_2} \\ \frac{\partial \mathscr{L}}{\partial P_3} \\ \frac{\partial \mathscr{L}}{\partial \lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}P_1} F_1(P_1) - \lambda \\ \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}P_2} F_2(P_2) - \lambda \\ \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}P_3} F_3(P_3) - \lambda \\ P_{\text{load}} - \sum_{i=1}^{N} P_i \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x}^1 = \mathbf{x}^0 - (\nabla\mathscr{L})\alpha \Longrightarrow \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \vdots \\ \lambda \end{bmatrix}$$

روش حل: $\mathbf{x}$ 1– حدس اولیه بردار

2– محاسبه بردار گرادیان تابع لاگرانژ

3$\mathbf{x}$– بهنگام نمودن بردار

$$\begin{cases} H_1 = 510 + 7.2P_1 + .00142P_1^2 [\frac{MBtu}{h}] & 150 \le P_1 \le 600 \\ H_2 = 310 + 7.85P_2 + .00194P_2^2 [\frac{MBtu}{h}] & 100 \le P_2 \le 400 \\ H_3 = 78 + 7.97P_3 + .00482P_3^2 [\frac{MBtu}{h}] & 50 \le P_3 \le 200 \\ P_R = 800[MW] \end{cases}$$

Unit 1: fuel cost = 1.1 ₹/MBtu $F_1(P_1) = H_1(P_1) \times 1.1 = 561 + 7.92P_1 + 0.001562P_1^2$ ₹/h

Unit 2: fuel cost = 1.0 ₹/MBtu $F_2(P_2) = H_2(P_2) \times 1.0 = 310 + 7.85P_2 + 0.00194P_2^2$ ₹/h

Unit 3: fuel cost = 1.0 ₹/MBtu $F_3(P_3) = H_3(P_3) \times 1.0 = 78 + 7.97P_3 + 0.00482P_3^2$ ₹/h

$$\alpha = 100$$
$$P_1^0 = 300[MW]$$
$$P_2^0 = 200[MW]$$
$$P_3^0 = 300[MW]$$
$$\Rightarrow$$
$$\lambda^0 = \frac{1}{3}\sum_{i=1}^{3}\left[\frac{d}{dP_i}F_i(P_i^0)\right] = 9.4484$$

TABLE 3.2 Economic Dispatch by Gradient Method

Iteration	P_1	P_2	P_3	P_{total}	λ	Cost
1	300	200	300	800	9.4484	7938.0
2	300.59	200.82	298.59	800	9.4484	7935
3	301.18	201.64	297.19	800.0086	9.4484	7932
4	301.76	202.45	295.8	800.025	9.4570	7929.3
5	302.36	203.28	294.43	800.077	9.4826	7926.9
⋮						
10	309.16	211.19	291.65	811.99	16.36	8025.6

جدول نشان می دهد که تکرارهای انجام شده در نهایت به جواب منتهی نشده است

ملاحظه می شود که در روش گرادیان ساده نمی توان تضمین داد که مجموع تولید واحدها، بار پیش بینی شده (800 مگاوات) را تامین نمایند. بنابراین اگر یکی از واحدها را به عنوان واحد وابسته تعریف کنیم می توان با خارج نمودن آن از مسئله، تعادل بین تولید و مصرف را در هر تکرار برقرار نمود. در این مثال واحد 3 را وابسته در نظر می گیریم.

$$P_3 = 800 - P_1 - P_2 \quad \Longrightarrow \quad \text{Cost} = F_1(P_1) + F_2(P_2) + F_3(P_3) = F_1(P_1) + F_2(P_2) + F_3(800 - P_1 - P_2)$$

با استفاده از روش گرادیان خواهیم داشت:

$$\nabla \text{Cost} = \begin{bmatrix} \dfrac{d}{dP_1}\text{Cost} \\ \dfrac{d}{dP_2}\text{Cost} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{dF_1}{dP_1} - \dfrac{dF_3}{dP_1} \\ \dfrac{dF_2}{dP_2} - \dfrac{dF_3}{dP_2} \end{bmatrix}$$

$$x^1 = x^0 - \nabla \text{Cost} \times \alpha$$

$$x = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix}$$

$$P_3 = 850 - (P_1 + P_2)$$

Iteration	P_1	P_2	P_3	P_{total}	Cost
1	300	200	300	800	7938.0
2	320.04	222.36	257.59	800	7858.1
3	335.38	239.76	224.85	800	7810.4
4	347.08	253.33	199.58	800	7781.9
5	355.97	263.94	180.07	800	7764.9
⋮					
10	380.00	304.43	115.56	800	7739.2

اگر تغییر کوچکی در مقدار تولید واحدها ایجاد شود هزینه به مقدار کمی تغییر خواهد کرد.

$$\begin{cases} F_T = \sum_{i=1}^{N} F_i(P_i) \quad i = 1,2,....,N \\ P_R - \sum_{i=1}^{N} P_i = 0 \end{cases}$$

$$F_T + \Delta F_T = F_1(P_1) + F_2(P_2) + F_3(P_3) + ... + \frac{dF_1(P_1)}{dP_1}\Delta P_1 + \frac{dF_2(P_2)}{dP_2}\Delta P_2 + ... + \frac{dF_N(P_N)}{dP_N}\Delta P_N + ...$$

$$\begin{cases} \Delta F_T = \frac{dF_1(P_1)}{dP_1}\Delta P_1 + \frac{dF_2(P_2)}{dP_2}\Delta P_2 + ... + \frac{dF_N(P_N)}{dP_N}\Delta P_N \quad (1) \\ \Delta P_R = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^{N} \Delta P_i = 0 \quad (2) \end{cases}$$

$$\Delta P_x = -\sum_{i=1 \neq x}^{N} \Delta P_i \quad (3)$$

$$(1),(3) \Rightarrow \Delta F_T = \frac{dF_1(P_1)}{dP_1}\Delta P_1 + \frac{dF_2(P_2)}{dP_2}\Delta P_2 + ... + \frac{dF_N(P_N)}{dP_N}\Delta P_N + (-\sum_{i \neq x}^{N} \Delta P_i)\frac{dF_x(P_x)}{dP_x} \quad (3)$$

$$\Rightarrow \Delta F_T = \sum_{i=1 \neq x}^{N} \left[\frac{dF_i(P_i)}{dP_i} - \frac{dF_x(P_x)}{dP_x} \right] \Delta P_i$$

$$\begin{cases} H_1 = 510 + 7.2P_1 + .00142P_1^2[\frac{MBtu}{h}] & 150 \le P_1 \le 600 \\ H_2 = 310 + 7.85P_2 + .00194P_2^2[\frac{MBtu}{h}] & 100 \le P_2 \le 400 \\ H_3 = 78 + 7.97P_3 + .00482P_3^2[\frac{MBtu}{h}] & 50 \le P_3 \le 200 \\ P_R = 850[MW] \end{cases}$$

$$\Rightarrow \Delta F_T = (\frac{dF_1}{dP_1} - \frac{dF_3}{dP_3})\Delta P_1 + (\frac{dF_2}{dP_2} - \frac{dF_3}{dP_3})\Delta P_2$$

انتخاب حدس اولیه: مجموع تولید برابر مصرف گردد

$$(1) \Rightarrow \begin{cases} P_1 = 400[MW] \\ P_2 = 300[MW] \\ P_3 = 150[MW] \end{cases} \Rightarrow \Delta F_T = (-0.2464)\Delta P_1 + (-0.4020)\Delta P_2$$

$$(2) \Rightarrow \begin{cases} P_1 = 400[MW] \\ P_2 = 350[MW] \\ P_3 = 100[MW] \end{cases} \Rightarrow \Delta F_T = (0.24)\Delta P_1 + (0.27)\Delta P_2$$

- ✓ قاعده مشخصی برای توقف محاسبات وجود ندارد
- ✓ الگوریتم تا جایی ادامه می یابد که تغییرا هزینه قابل توجه نباشد
- ✓ تا تعداد تکرار معینی ادامه می یابد و آخرین جواب بعنوان پاسخ بهینه انتخاب می شود
- ✓) استFeasibleپاسخها در هر مرحله از تکرار شدنی (
- ✓ این روش گرادیان را به دلیل کاهش تعداد متغیرها(وجود متغیر وابسته)، روش گرادیان کاهش یافته نیز می نامند
- ✓ در محاسبات 50 مگاوات تغییر در توان واحد وابسته چگونه محاسبه شده است؟
- ✓ اگر واحدها به حدود رسیده باشند مجبور به تغییر واحد وابسته هستیم.

اگر عبارات درجه دوم را در بسط تیلور تابع هزینه کل در نظر بگیریم خواهیم داشت:

$$\Delta F_T = \frac{dF_1}{dP_1}\Delta P_1 + \ldots + \frac{dF_N}{dP_N}\Delta P_N + \frac{1}{2}\left(\frac{d^2F_1}{dP_1^2}\Delta P_1^{\,2} + \ldots + \frac{d^2F_N}{dP_N^2}\Delta P_N^{\,2}\right) \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{N}\Delta P_i = 0 \Rightarrow \Delta P_x = -\sum_{i\neq x}^{N}\Delta P_i \qquad (2)$$

$$(1)\ \&\ (2) \Rightarrow \Delta F_T = \sum_{i\neq x}\left(\frac{dF_i}{dP_i} - \frac{dF_x}{dP_x}\right) + \frac{1}{2}\left\{\sum_{i\neq x}\left[\frac{d^2F_1}{dP_1^2}(\Delta P_1)^2 + \ldots + \frac{d^2F_N}{dP_N^2}(\Delta P_N)^2\right] + \frac{d^2F_x}{dP_x^2}(\Delta P_1^{\,2} + \Delta P_2^{\,2} + \ldots + 2\Delta P_1\Delta P_2 + \ldots)\right\}$$

در نقطه بهینه داریم: $\frac{\partial \Delta F_T}{\partial \Delta P_i} = 0$

$$\frac{\partial \Delta F_T}{\partial \Delta P_1} = \left(\frac{dF_1}{dP_1} - \frac{dF_x}{dP_x}\right) + \frac{d^2F_1}{dP_1^2}\Delta P_1 + \frac{d^2F_x}{dP_x^2}\sum_{i\neq x}\Delta P_i$$

$$F_i' = \frac{dF_i}{dP_i}, F_i'' = \frac{d^2F_i}{dP_i^2} \Rightarrow \begin{bmatrix} F_1''+F_x'' & F_x'' & ..... \\ F_x'' & F_1''+F_x'' & F_x''..... \\ .. & .. & ..... \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_N \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} F_1'-F_x' \\ F_2'-F_x' \\ F_N'-F_x' \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} F_1''+F_x'' & F_x'' & ..... \\ F_x'' & F_1''+F_x'' & F_x''..... \\ .. & .. & ..... \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} F_1'-F_x' \\ F_2'-F_x' \\ F_N'-F_x' \end{bmatrix}$$

الگوریتم

1- با یک حل ممکن شروع کرده و عناصر ماتریس را محاسبه نمایید

2A- محاسبه معکوس ماتریس برای محاسبه تغییر در توانهای تولیدی

3- بررسی برقرار بودن قیود

4B- مقادیر بردار را در نقطه کار جدید بررسی نمایید که با توجه به قیود کاری هر واحد هزینه های افزایشی مساوی باشند. اگر هزینه های افزایشی مساوی نباشند مراحل تکرار می شود.

$$\begin{cases} H_1 = 510 + 7.2P_1 + .00142P_1^2[\frac{MBtu}{h}] & 150 \le P_1 \le 600 \\ H_2 = 310 + 7.85P_2 + .00194P_2^2[\frac{MBtu}{h}] & 100 \le P_2 \le 400 \\ H_3 = 78 + 7.97P_3 + .00482P_3^2[\frac{MBtu}{h}] & 50 \le P_3 \le 200 \\ P_R = 850[MW] \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 400 \\ 300 \\ 150 \end{bmatrix} \Rightarrow A = ?\ \&\ B = ? \Rightarrow \begin{matrix} \Delta P_1 = -6.8 \\ \Delta P_2 = 34.6 \end{matrix} \Rightarrow \begin{matrix} P_1 = 400 - 6.8 = 393.2 \\ P_2 = 300 + 34.6 = 334.6 \\ P_3 = 850 - P_1 - P_2 = 122.2 \end{matrix}$$

اگر تابع هزینه درجه 2 باشد، این روش در اولین تکرار به جواب می رسد. البته همیشه به این صورت نمی باشد و در صورت لحاظ نمودن محدودیتها مشکلات روشس بیشتر مشخص خواهد شد. عموماً وجود قیود برای روش گرادیان مشکل ایجاد می کنند.

۱۰۸

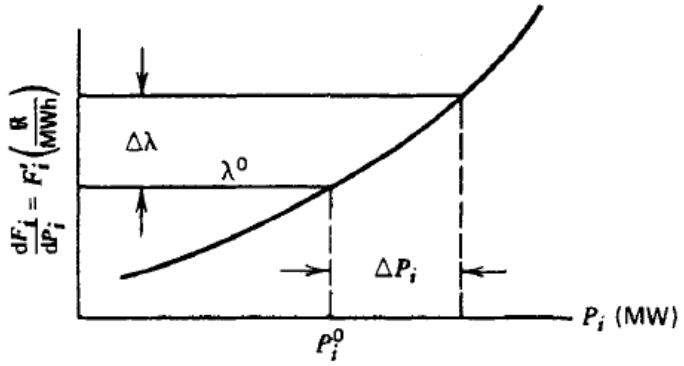


FIG. 3.7 Relationship of $\Delta\lambda$ and ΔP_i.

در مثالهای مطرح شده، اگر مصرف تغییر جزئی نماید)از 850 به 870 مگاوات)، آنگاه چگونه باید تغییر بار را بین واحدهای تولید توزیع اقتصادی نمود؟ یک راه آن است که توزیع اقتصادی بار را مجدد حل کنیم که این مستلزم زمان زیادی است. راه دیگر آن است که از ضرایب مشارکت استفاده شود.

✓ اگر بار در نقطه ای اولیه (بار پایه) به صورت بهینه توزیع شده باشد، آنگاه بار اضافی به نسبت ضرایب مشارکت واحدها بین واحدها بطور اقتصادی توزیع خواهد شد.

اگر در هزینه افزایشی به اندازه $\Delta\lambda$ تغییر ایجاد شود، در توان تولیدی نیز به اندازه ΔP_i تغییر ایجاد خواهد شد.

چون تغییرات $\Delta\lambda$ کوچک است، رابطه ΔP_i با خطی است.

$$\lambda = \frac{dF_i}{dP_i} \Rightarrow d\lambda = \frac{d^2F_i}{dP_i^2} \Rightarrow \Delta\lambda = F_i''(P_i)\Delta P_i$$

$$\Rightarrow \Delta P_i = \frac{\Delta\lambda}{F_i''}$$

$$\Delta P_D = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \ldots + \Delta P_N = \Delta\lambda \sum\left(\frac{1}{F_i''}\right)$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta P_i}{\Delta P_D} = \frac{\frac{1}{F_i''}}{\sum\left(\frac{1}{F_i''}\right)}$$

$$P_R = 850 \Rightarrow 900$$

$$\frac{\Delta P_1}{\Delta P_D} = \frac{(0.003124)^{-1}}{(0.003124)^{-1} + (0.00388)^{-1} + (0.00964)^{-1}} = \frac{320.10}{681.57} = 0.47$$

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_D} = \frac{(0.00388)^{-1}}{681.57} = 0.38$$

$$\frac{\Delta P_3}{\Delta P_D} = \frac{103.73}{681.57} = 0.15$$

$$\Delta P_D = 900 - 850 = 50$$

$$P_{\text{new}_i} = P_{\text{base}_i} + \left(\frac{\Delta P_i}{\Delta P_D}\right)\Delta P_D \qquad \text{for } i = 1, 2, 3$$

$$P_{\text{new}_1} = 393.2 + (0.47)(50) = 416.7$$

$$P_{\text{new}_2} = 334.6 + (0.38)(50) = 353.6$$

$$P_{\text{new}_3} = 122.2 + (0.15)(50) = 129.7$$

Optimal Power Flow

- The goal of an optimal power flow (OPF) is to determine the “best” way to instantaneously operate a power system.
- Usually “best” = minimizing operating cost.
- OPF considers the impact of the transmission system
- OPF is used as basis for real-time pricing in major US electricity markets such as MISO and PJM.

Real Power Markets

- Different operating regions impose constraints -- total demand in region must equal total supply
- Transmission system imposes constraints on the market
- Marginal costs become localized
- Requires solution by an optimal power flow

Optimal Power Flow (OPF)

- OPF functionally combines the power flow with economic dispatch
- Minimize cost function, such as operating cost, taking into account realistic equality and inequality constraints
- Equality constraints
  - bus real and reactive power balance
  - generator voltage setpoints
  - area MW interchange

OPF, cont'd

- Inequality constraints
  - transmission line/transformer/interface flow limits
  - generator MW limits
  - generator reactive power capability curves
  - bus voltage magnitudes (not yet implemented in Simulator OPF)
- Available Controls
  - generator MW outputs
  - transformer taps and phase angles

OPF Solution Methods

- Non-linear approach using Newton's method
  - handles marginal losses well, but is relatively slow and has problems determining binding constraints
- Linear Programming
  - fast and efficient in determining binding constraints, but can have difficulty with marginal losses.
  - used in Power World Simulator

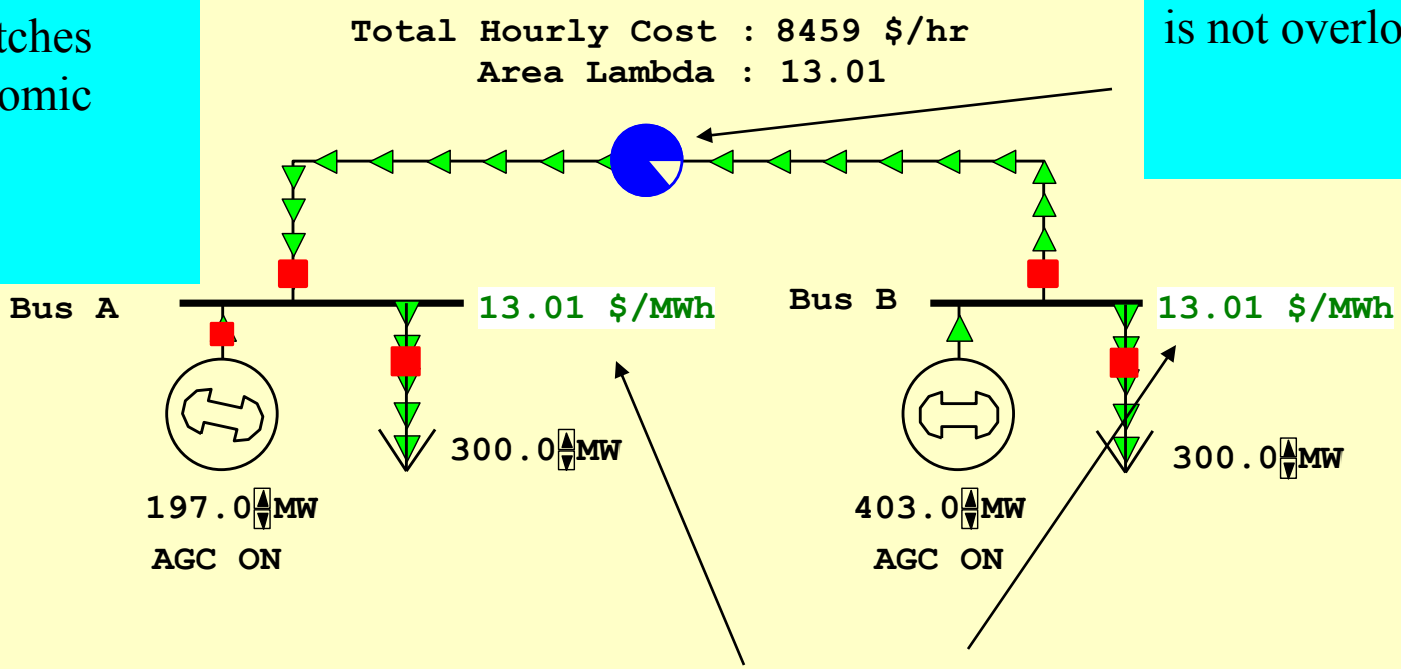
LP OPF Solution Method

- Solution iterates between
  - solving a full ac power flow solution
    - enforces real/reactive power balance at each bus
    - enforces generator reactive limits
    - system controls are assumed fixed
    - takes into account non-linearities
  - solving a primal LP
    - changes system controls to enforce linearized constraints while minimizing cost

Two Bus with Unconstrained Line

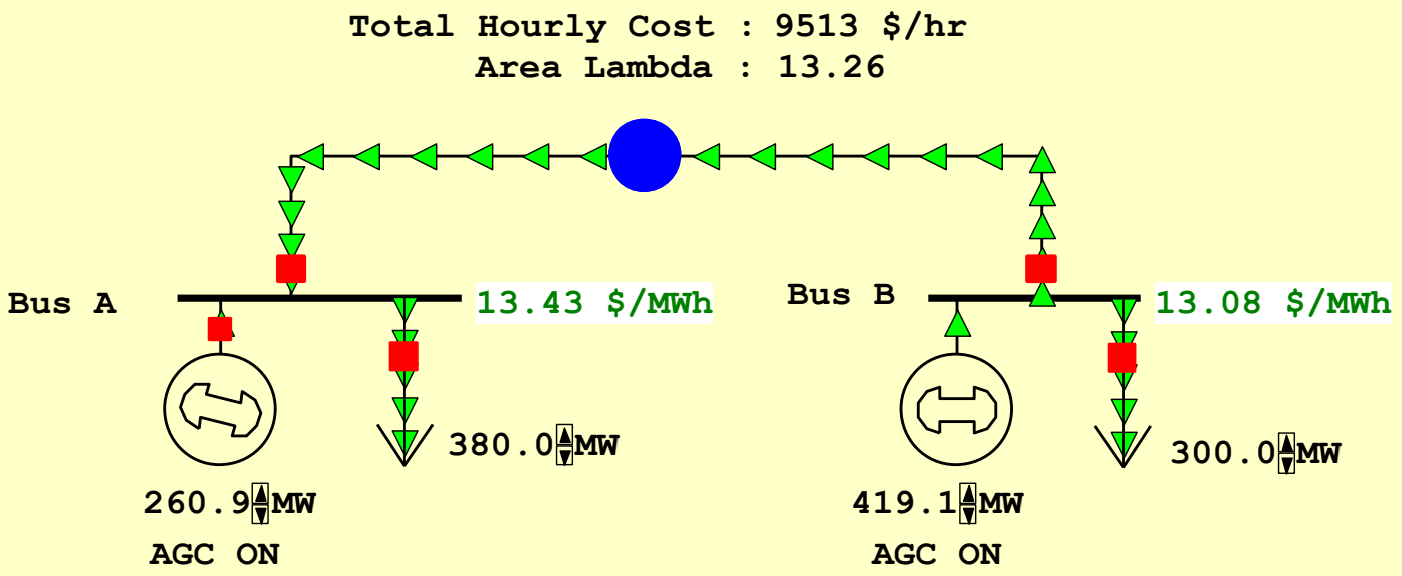
With no overloads the OPF matches the economic dispatch

Transmission line is not overloaded



Marginal cost of supplying power to each bus (locational marginal costs)

Two Bus with Constrained Line

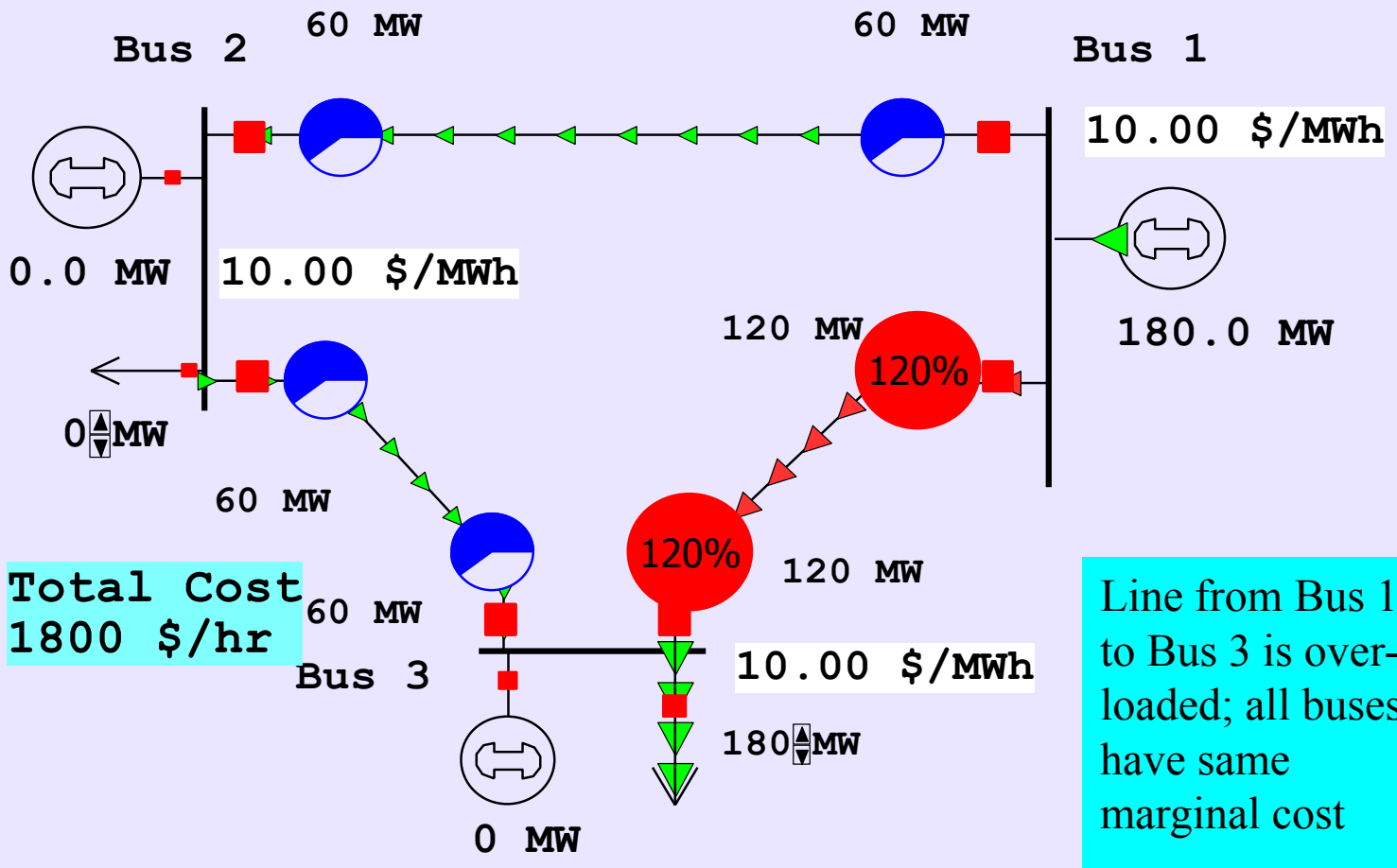


With the line loaded to its limit, additional load at Bus A must be supplied locally, causing the marginal costs to diverge.

Three Bus (B3) Example

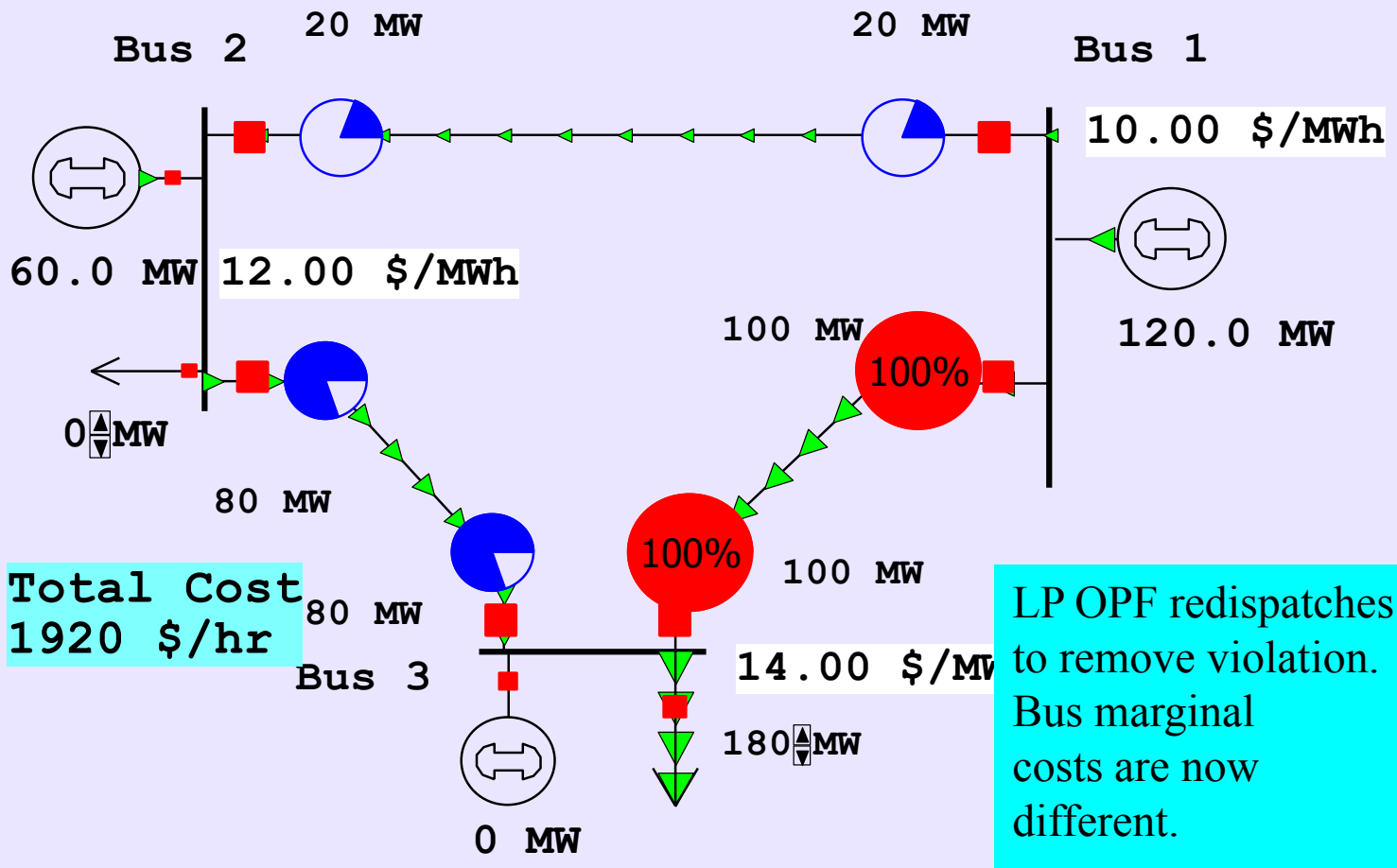
- Consider a three bus case (bus 1 is system slack), with all buses connected through 0.1 pu reactance lines, each with a 100 MVA limit
- Let the generator marginal costs be
  - Bus 1: 10 $ / MWhr; Range = 0 to 400 MW
  - Bus 2: 12 $ / MWhr; Range = 0 to 400 MW
  - Bus 3: 20 $ / MWhr; Range = 0 to 400 MW
- Assume a single 180 MW load at bus 2

B3 with Line Limits NOT Enforced



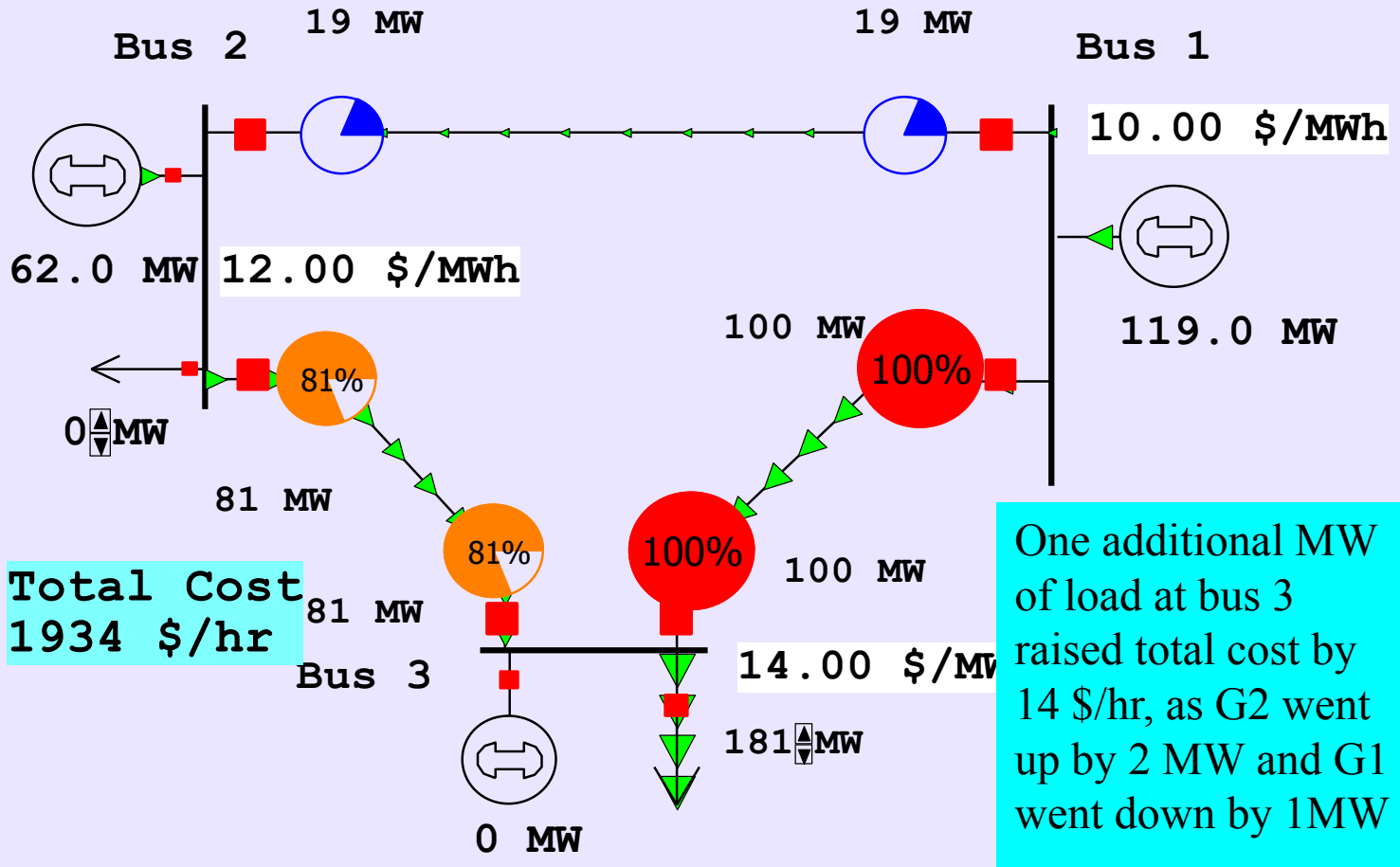
Line from Bus 1 to Bus 3 is over-loaded; all buses have same marginal cost

B3 with Line Limits Enforced



LP OPF redispatches to remove violation. Bus marginal costs are now different.

Verify Bus 3 Marginal Cost



One additional MW of load at bus 3 raised total cost by 14 $/hr, as G2 went up by 2 MW and G1 went down by 1MW

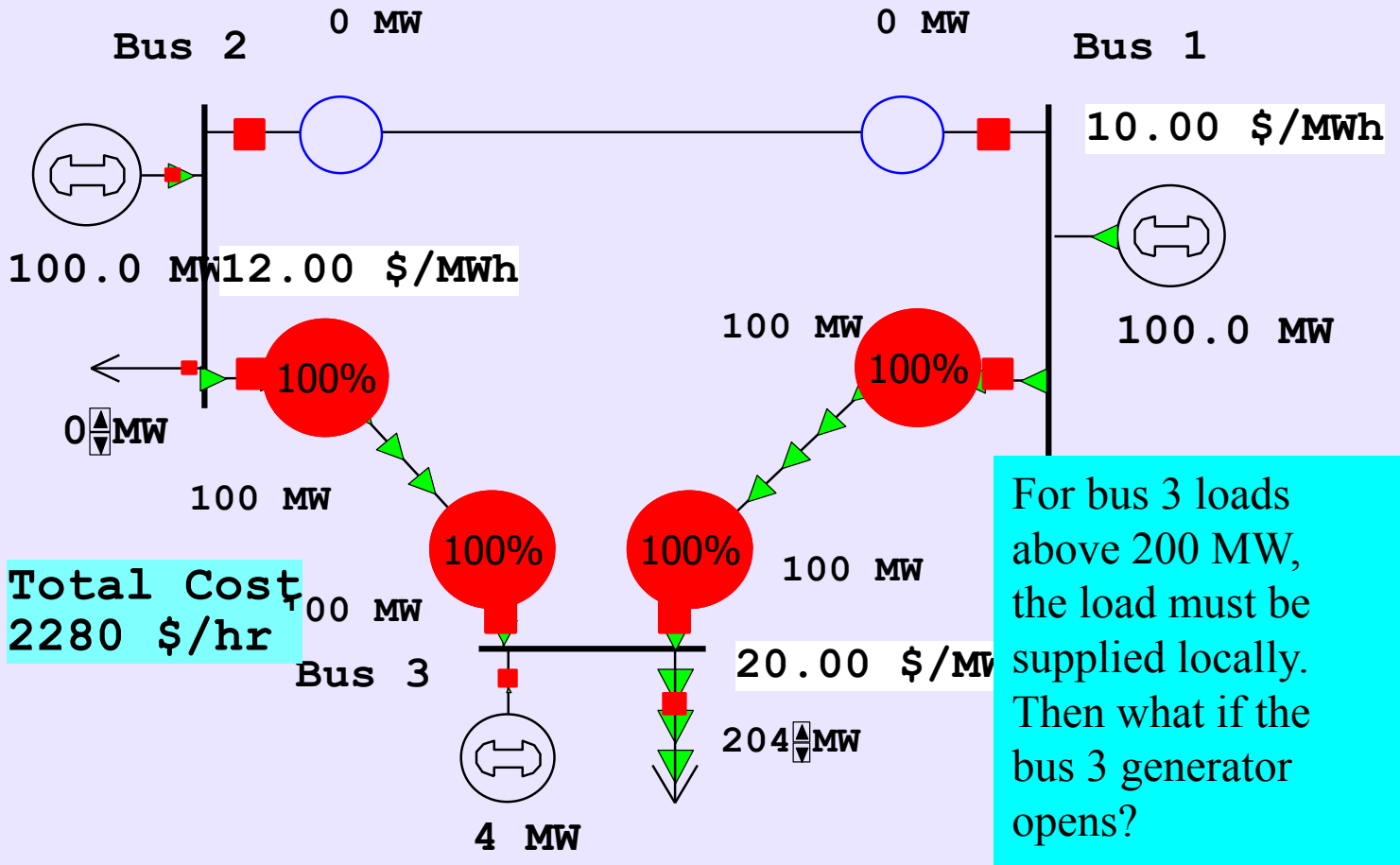
Why is bus 3 LMP = $14 /MWh

- All lines have equal impedance. Power flow in a simple network distributes inversely to impedance of path.
  - For bus 1 to supply 1 MW to bus 3, 2/3 MW would take direct path from 1 to 3, while 1/3 MW would "loop around" from 1 to 2 to 3.
  - Likewise, for bus 2 to supply 1 MW to bus 3, 2/3MW would go from 2 to 3, while 1/3 MW would go from 2 to 1to 3.

Why is bus 3 LMP $ 14 / MWh, cont'd

- With the line from 1 to 3 limited, no additional power flows are allowed on it.
- To supply 1 more MW to bus 3 we need
  - Pg1 + Pg2 = 1 MW
  - 2/3 Pg1 + 1/3 Pg2 = 0; (no more flow on 1-3)
- Solving requires we up Pg2 by 2 MW and drop Pg1 by 1 MW -- a net increase of $14.

Both lines into Bus 3 Congested



For bus 3 loads above 200 MW, the load must be supplied locally. Then what if the bus 3 generator opens?

در مدار قرار دادن نیروگاه ها

Unit Commitment

مثال ۱

- فرض کنید سه واحد زیر در نظر باشند: P_D=550 MW

Unit 1:

Min = *150* MW

Max = *600* MW

$H_1 = 510.0 + 7.2P_1 + 0.00142P_1^2$ MBtu/h

Unit 2:

Min = *100* MW

Max = *400* MW

$H_2 = 310.0 + 7.85P_2 + 0.00194P_2^2$ MBtu/h

Unit 3:

Min = 50 MW

Max = *200* MW

$H_3 = 78.0 + 7.97P_3 + 0.00482P_3^2$ MBtu/h

Fuel cost, = 1.1 ₹/MBtu

Fuel cost, = 1.0 ₹/MBtu

Fuel cost, = 1.2 ₹/MBtu

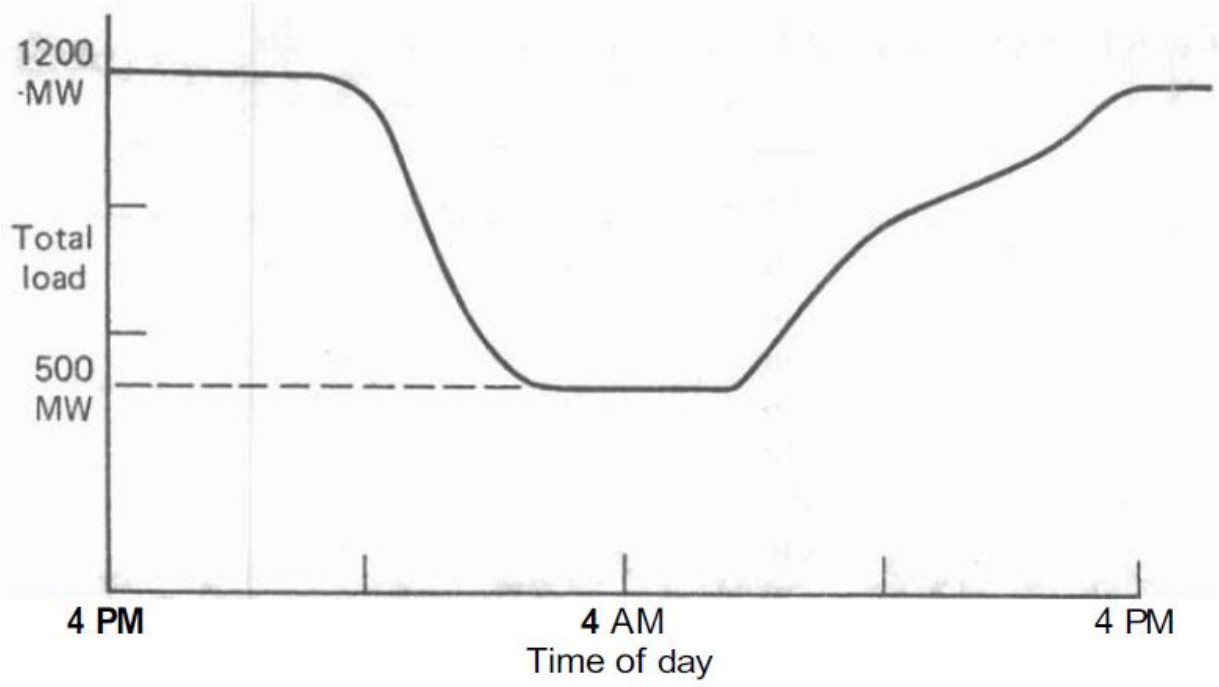
تعیین تمام ترکیبات ممکن

- جهت هر ترکیب ممکن توزیع اقتصادی انجام می شود.

واحد ۱	واحد ۲	واحد ۳	حداکثر تولید	حداقل تولید	P_1	P_2	P_3	F_1	F_2	F_3	هزینه کل تولید $F_1 + F_2 + F_3$
OFF	OFF	OFF	0	0					غیر ممکن		
OFF	OFF	ON	200	50					غیر ممکن		
OFF	ON	OFF	400	100					غیر ممکن		
OFF	ON	ON	600	150	0	400	150	0	3760	1658	5418
ON	OFF	OFF	600	150	550	0	0	5389	0	0	5389
ON	OFF	ON	800	200	500	0	50	4911	0	586	5497
ON	ON	OFF	1000	250	295	255	0	3030	2440	0	5471
ON	ON	ON	1200	300	267	233	50	2787	2244	586	5617

تغییر بار

- باید مشخص کرد که چه واحدهایی و چه زمان باید از مدار خارج و یا به آن وارد شوند.



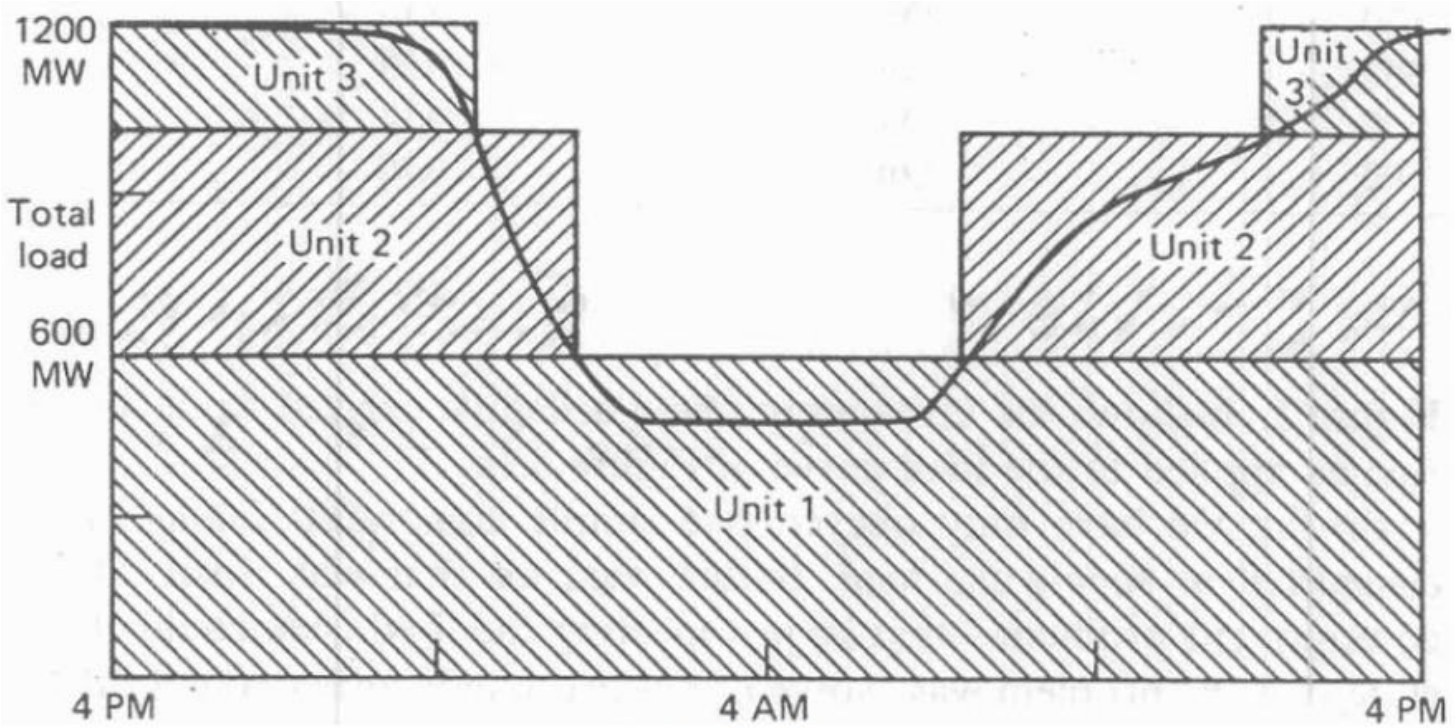
مثال ۲

- جهت رسیدن به قانونی جهت خارج کردن واحدها، اقتصادی ترین ترکیب برای هر بار بین ۵۰۰ تا ۱۲۰۰ (در پله های ۵۰ مگاواتی) مطابق با جدول زیر تعیین می کنیم.

	Optimum Combination		
Load	Unit 1	Unit 2	Unit 3
1200	On	On	On
1150	On	On	On
1100	On	On	On
1050	On	On	On
1000	On	On	Off
950	On	On	Off
900	On	On	Off
850	On	On	Off
800	On	On	Off
750	On	On	Off
700	On	On	Off
650	On	On	Off
600	On	Off	Off
550	On	Off	Off
500	On	Off	Off

یک قید را درنظر گرفتیم و آن اینکه تعداد کافی واحد جهت تامین بار باید در مدار قرار گیرد

- اگر بار بالای ۱۰۰۰ مگا وات باشد هر سه واحد، برای بار بین ۶۰۰ تا ۱۰۰۰ واحدهای ۱ و ۲ و برای بار کمتر از ۶۰۰ واحد شماره ۱ را باید در مدار قرار داد.

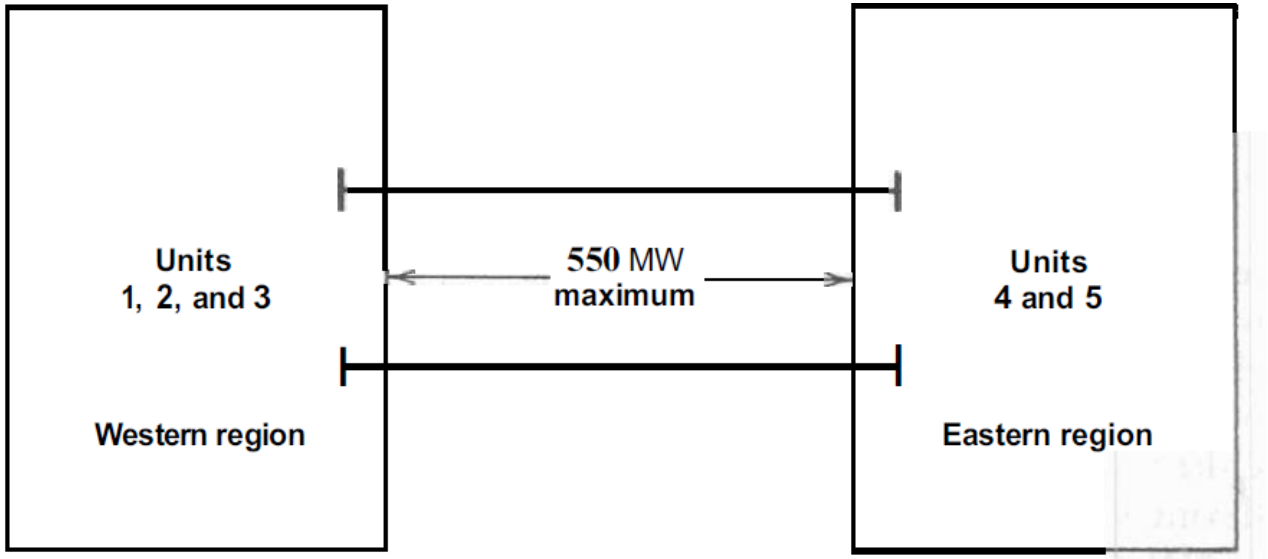


قیود

- ۱- ذخیره چرخان: spinning reserve
- تفاوت بین کل ظرفیت بالقوه فعال سیستم و مجموع بار و تلفات
- تعیین مقدار رزرو چرخان
- - درصدی از حداکثر بار پیش بینی شده
- - به اندازه پربار ترین واحد
- ذخیره ها از لحاظ مکانی باید در سرتاسر سیستم قدرت پخش شوند تا از محدودیت های انتقال جلوگیری شود.

مثال

- کل بار ۳۰۹۰ مگا وات است.



بجز واحد شماره ٤ از دست رفتن هر واحدی در سیستم می تواند با استفاده از ذخیره سایر واحدها تامین گردد

ناحیه	واحد	ظرفیت واحد (مگاوات)	خروجی واحد (مگاوات)	تولید ناحیه (مگاوات)	ذخیرهٔ چرخان	بار ناحیه (مگاوات)	تبادل (مگاوات)
غربی	1	1000	900	1740	100	1900	160 out
	2	800	420		380		
	3	800	420		380		
شرقی	4	1200	1040	1350	160	1190	160 in
	5	600	310		290		
کل		4400	3090	3090	1310	3090	

قیود واحدهای حرارتی

۱- حداقل زمان کار Min up time: زمانی که واحد فعال باشد نمی‌توان آنرا فوراً متوقف کرد.

۲- حداقل زمان فعالیت Min down time: زمانی که واحد از مدار خارج شده حداقل زمانی لازم استتا بتوان آنرا وارد مدار کرد.

۳- قیود تعداد خدمه crew constrain: اگر نیروگاهی از دو یا تعداد بیشتری واحد تشکیل شده باشد هر دو را نمی توان بطور همزمان راه اندازی کرد.

راه اندازی واحد

- استارت و گرم کردن قسمت های مختلف واحد
- در مدار قرار دادن واحد پس از گرم شدن اجزا
- کنترل درجه حرارت در حد مجاز برای جلوگیری از تغییر شکل پوسته توربین

روشهای راه اندازی واحد

- راه اندازی واحد از حالت سرد
- راه اندازی واحد از حالت گرم

راه اندازی واحد

۱- از حالت سرد

استفاده در زمانی که واحد به مدت طولانی غیر فعال بوده و حرارت تمام قسمت ها کم است

برای گرم کردن واحد زمان زیادی لازم است.

۲- از حالت گرم

هنگامیکه درجه حرارت پوسته توربین بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد باشد واحد گرم تلقی می شود

هزینه راه‌اندازی

$$\text{Start-up cost when cooling} = C_c\left(1 - e^{\frac{-t}{\propto}}\right) \times F + C_f$$

where

C_c = cold-start cost (MBtu)

F = fuel cost

C_f = fixed cost (includes crew expense, maintenance expenses) (in ₹)

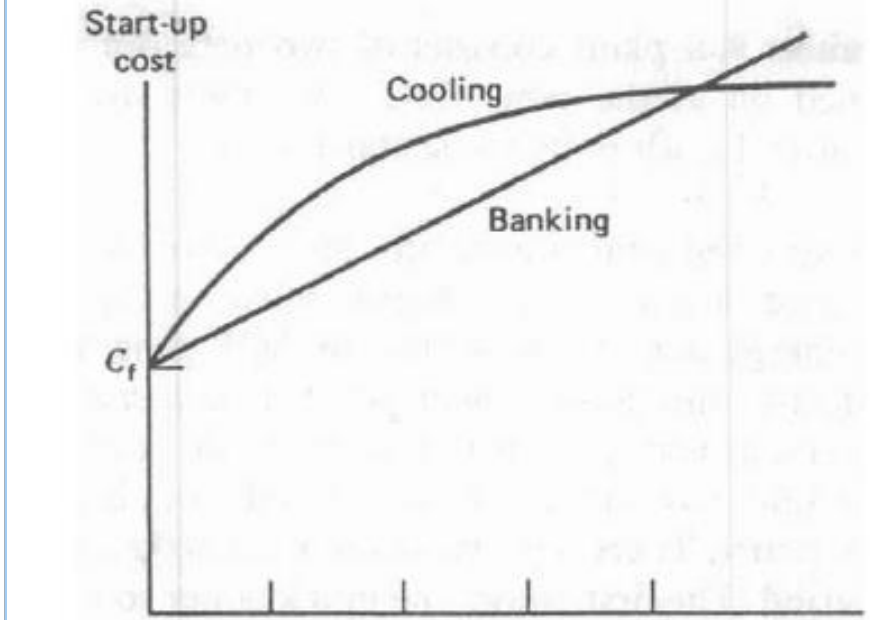
a = thermal time constant for the unit

t = time (h) the unit was cooled

$$\text{Start-up cost when banking} = C_t \times t \times F + C_f$$

where

C_t = cost (MBtu/h) of maintaining unit at operating temperature



قیود دیگر

- **۱- قیود نیروگاه های آبی**

- **۲- حالت کار اجباری: Must Run**
- به دلایل حفظ وضعیت ولتاژ در شبکه های انتقال یا جهت تامین بخار به منظور استفاده خارج از خود واحد بخاری، بعضی از واحدها باید در زمان های خاص در مدار باشند.

روش های حل در مدار قرار گرفتن نیروگاه ها

- الگوی بار برای M دوره
- دارای N واحد جهت در مدار قرار دادن
- برای هر ساعت 2^N -1 ترکیب وجود دارد.
- جهت کل M دوره زمانی $(2^N -1)^M$
- قیود واحدها و ارتباط ظرفیت و بار باعث کوچک شدن ابعاد مساله می شود.

رایج ترین روش ها

- **۱– لیست حق تقدمPriority-List Methods**
- ساده ترین روش، با سرعت بالا، ولی نمی توان کلیه قیود را براحتی در آن مدل کرد.
- **۲– برنامه ریزی دینامیکی**Dynamic programming (DP)
- از نظر دقت خوب و سرعت آن هم قابل قبول است.
- **۳– برنامه ریزی اعدا آمیخته خطی و عدد صحیح** MILP
- Mixed Integer Linear Programming
- محاسبات طولانی ولی جواب دقیق و خوبی دارد.

۱– لیست حق تقدم

- هزینه متوسط = هزینه تولید در بار کامل / تولید در بار کامل
- بررسی مثال ۱

Unit	Full Load Average Production Cost (R/MWh)
1	9.79
2	9.48
3	11.188

- ترتیب حق تقدم

Unit	R/MWh	Min MW	Max MW
2	9.48	100	400
1	9.79	150	600
3	11.188	50	200

۱– لیست حق تقدم

- با صرف نظر کردن از قیود

Combination	Min MW from Combination	Max MW from Combination
2 + 1 + 3	300	1200
2 + 1	250	1000
2	100	400

اکثر روشهای لیست حق تقدم با یک الگوریتم از مدار خارج کردن واحدها ترکیب می‌شوند که ممکن است به روش زیر عمل نمایند:

- وقتی که بار،در ساعتی کاهش می‌یابد، مشخص نمائید که آیا از مدار خارج کردن واحد بعدی از لیست حق تقدم،ظرفیت تولید کافی جهت تأمین بار و نیز تأمین ذخیره چرخان باقی می‌گذارد یا خیر؟ اگر جواب منفی است وضعیت را حفظ کنید و در غیر این صورت به مرحله بعدی بروید.
- مشخص نمائید که چند ساعت بعد، H، به واحد مجدداً نیاز است؟ یعنی با فرض کاهش بار، چند ساعت بعد بار،مجدداً افزایش می‌یابد.
- اگر Hاز حداقل زمان توقف مجاز واحد کمتر باشد وضعیت را حفظ کنید و در غیر این صورت به مرحله بعد بروید.
- دو مقدار هزینه را محاسبه نمائید. اول،مجموع هزینه‌های تولید هر ساعت (طی H ساعت آینده) را با فرض اینکه واحد فعال باشد. دوم همان مجموع را با فرض توقف واحد به این صورت که هزینه راه‌اندازی را برای یکی از دو روش سرد یا گرم (هر کدام که مقرون به صرفه‌تر است) نیز اضافه کنید. اگر از مدار خارج کردن واحد به اندازه کافی مقرون به صرفه باشد، این کار را انجام دهید و در غیر این صورت وضعیت را حفظ نمائید.
- تمام مراحل فوق را جهت واحد بعدی در لیست حق تقدم تکرار نمائید. اگر آن واحد نیز از مدار خارج شود به سراغ واحد بعدی بروید و ...

اکثر روشهای لیست حق تقدم با یک الگوریتم از مدار خارج کردن واحدها ترکیب می‌شوند که ممکن است به روش زیر عمل نمایند:

- وقتی که بار،در ساعتی کاهش می‌یابد، مشخص نمائید که آیا از مدار خارج کردن واحد بعدی از لیست حق تقدم،ظرفیت تولید کافی جهت تأمین بار و نیز تأمین ذخیره چرخان باقی می‌گذارد یا خیر؟ اگر جواب منفی است وضعیت را حفظ کنید و در غیر این صورت به مرحله بعدی بروید.
- مشخص نمائید که چند ساعت بعد، H، به واحد مجدداً نیاز است؟ یعنی با فرض کاهش بار، چند ساعت بعد بار،مجدداً افزایش می‌یابد.
- اگر Hاز حداقل زمان توقف مجاز واحد کمتر باشد وضعیت را حفظ کنید و در غیر این صورت به مرحله بعد بروید.
- دو مقدار هزینه را محاسبه نمائید. اول،مجموع هزینه‌های تولید هر ساعت (طی H ساعت آینده) را با فرض اینکه واحد فعال باشد. دوم همان مجموع را با فرض توقف واحد به این صورت که هزینه راه‌اندازی را برای یکی از دو روش سرد یا گرم (هر کدام که مقرون به صرفه‌تر است) نیز اضافه کنید. اگر از مدار خارج کردن واحد به اندازه کافی مقرون به صرفه باشد، این کار را انجام دهید و در غیر این صورت وضعیت را حفظ نمائید.
- تمام مراحل فوق را جهت واحد بعدی در لیست حق تقدم تکرار نمائید. اگر آن واحد نیز از مدار خارج شود به سراغ واحد بعدی بروید و ...