

بهره برداری اقتصادی از سیستمهای قدرت

هر مهندسی همیشه درگیر مسئله هزینه تولید و خدمات است. در هر سیستم قدرت برای به دست آوردن سود کافی از سرمایه به کار رفته، بهره برداری صحیح، اهمیت بسیاری دارد. دو عامل به شرکتهای برق، فشار زیادی وارد می آورند تا شرکتها با به دست آوردن ماکزیمم بازدهی بهره برداری و بهبود دائمی آن بتوانند رابطه معقولی بین بهای کیلووات ساعتی را که مشتری مصرف می کند و کیلووات ساعتی که شرکت تحویل می دهد حفظ، و با افزایش مداوم قیمت سوخت، کار، مواد اولیه، و نگهداری مقابله کنند. این دو عامل عبارت اند از: ۱. مقامات تنظیم گر قیمت، ۲. اهمیت ذخیره سوخت.

مهندسین، پیوسته در بالا بردن بازدهی دیگهای بخار، توربینها و ژنراتورها آن چنان موفق بوده اند که هر واحد جدیدی که به نیروگاه سیستم افزوده شده است بازدهی بیشتری نسبت به هر واحد قدیمیتر دارد. در بهره برداری سیستم باید سهم هر نیروگاه و هر واحد آن برای هر شرایط بار تعیین شود تا هزینه تسوان تحویلی مینیمم شود. چگونگی برخورد مهندسین با این مسئله حاد و شیوه حل آن، موضوع این بخش است.

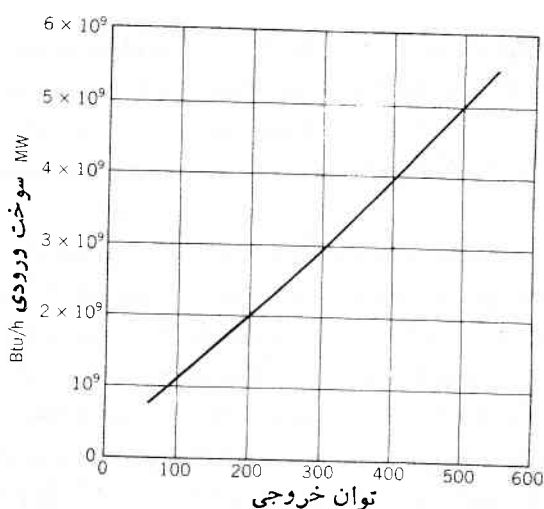
یک روش قدیمی برای حداقل سازی هزینه توان تحویلی در مواقع سبکباری این بوده که توان را فقط از کاراترین نیروگاه تأمین کنند. با افزایش بار، دریافت توان از این نیروگاه تا جایی ادامه می یافت که نقطه ماکزیمم بازدهی آن فرا رسد. سپس با ازدیاد بیشتر بار، کاراترین نیروگاه بعدی برای تغذیه سیستم راه اندازی می شد و تا نقطه ماکزیمم بازدهی آن فرا نمی رسید نیروگاه سوم به کار انداخته نمی شد. اما حتی با صرف نظر کردن

از اتلافهای انتقال، این روش در حداقل سازی هزینه باشکست رو به رو می شود. ما ابتدا اقتصادی ترین نحوه توزیع خروجی يك نیروگاه را بین ژنراتورها یا واحدهایش بررسی خواهیم کرد. از آنجا که مقدار تولید سیستم اغلب با افزودن واحدهای تازه به نیروگاههای موجود بالا می رود، واحدهای مختلف نیروگاهها معمولاً مشخصات متفاوتی پیدا می کنند. روشی که شرح خواهیم داد می تواند برای جدول بندی اقتصادی خروجی نیروگاهها برای هر بار کرد داده شده سیستم بدون در نظر گرفتن اتلافهای انتقال به کار رود. ولی ما اتلاف انتقال را به صورت تابعی از خروجی نیروگاههای مختلف در نظر خواهیم گرفت. سپس چگونگی جدول بندی خروجی هر کدام از نیروگاههای سیستم را مشخص می کنیم تا هزینه توان تحویلی به بار مینیمم شود.

۹-۱ توزیع بار بین واحدهای يك نیروگاه

برای تعیین توزیع اقتصادی بار بین واحدهای مختلف شامل توربین، ژنراتور، و منبع بخار باید هزینه بهره برداری متغیر واحدها، بر حسب توان خروجی بیان شود. هزینه سوخت، عامل اساسی در نیروگاههای سوخت فسیلی است و البته مخارج سوخت هسته ای نیز می تواند بر حسب تابعی از خروجی بیان شود. بیشترین مقدار انرژی الکتریکی تا سالیان درازی بازهم از سوختهای فسیلی و هسته ای به دست خواهد آمد مگر اینکه منابع انرژی دیگری بتوانند بخشی از این وظیفه را به عهده بگیرند. ما بحث خود را بر مبنای اقتصادی هزینه های سوخت قرار خواهیم داد زیرا مخارج دیگر که تابع توان خروجی اند نیز مسلماً می توانند در عبارت هزینه سوخت جای گیرند. شکل ۹-۱، يك منحنی نوعی ورودی-خروجی را نشان می دهد که نموداری از سوخت ورودی يك نیروگاه فسیلی بر حسب Btu بر ساعت در برابر توان خروجی آن واحد، بر حسب مگاوات است. برای تبدیل عرضهای منحنی به دلار بر ساعت می توان ورودی سوخت را در بهایش بر حسب دلار بر میلیون Btu ضرب کرد.

اگر خطی از مبدأ به هر نقطه از منحنی ورودی-خروجی وصل شود، عکس شیب آن می تواند از تقسیم مگاوات بر مقدار ورودی-بر حسب میلیون Btu بر ساعت-به دست آید که نسبت انرژی خروجی بر حسب مگاوات ساعت بر مقدار سوخت ورودی بر حسب میلیون Btu است. این نسبت، بازدهی سوخت نام دارد. نقطه بازدهی ماکزیمم درجایی است که خط واصل از مبدأ به آن نقطه از منحنی، شیب مینیمم می یابد یعنی بر منحنی مماس می شود. حداکثر بازدهی برای واحدی که منحنی ورودی-خروجیش در شکل ۹-۱ دیده می شود به ازای خروجی حدود 280 MW به دست می آید که با ورودی $288 \times 10^9 \text{ Btu/h}$ متناظر است. به این ترتیب، تقاضای سوخت برابر $10^6 \text{ Btu/MWh} \times 1000$ است. با این مقیاس، وقتشی خروجی واحد 100 MW است تقاضای سوخت $1100 \times 10^6 \text{ Btu/MWh}$ می شود.



شکل ۹-۱ منحنی ورودی-خروجی برای یک واحد تولیدی که سوخت ورودی را در برابر توان خروجی نشان می‌دهد.

البته تقاضای سوخت را برای یک خروجی مشخص می‌توان به سادگی به دلار بر مگاوات ساعت تبدیل کرد. چنانکه خواهیم دید توزیع بار بین دو واحد دلخواه بر این اساس است که آیا افزایش بار یکی از واحدها که بار دیگری را به همان میزان کاهش می‌دهد هزینه کل را می‌افزاید یا می‌کاهد. به این ترتیب با شیب هزینه سروکار داریم که از شیب منحنیهای ورودی-خروجی دو واحد به دست می‌آید. اگر مقیاس محور عرضهای منحنی ورودی-خروجی را بر حسب دلار بر ساعت بیان کنیم و داشته باشیم:

$$\text{ساعت/دلار} = F_n = \text{ورودی واحد } n$$

$$P_n \text{ MW} = \text{خروجی واحد } n$$

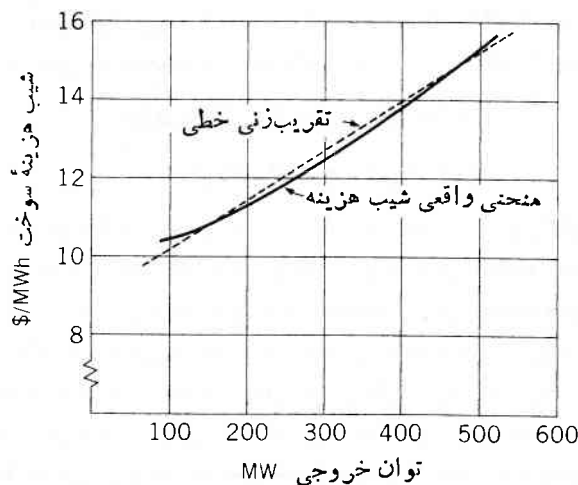
شیب هزینه سوخت هر واحد بر حسب دلار بر مگاوات ساعت برابر dF_n/dP_n می‌شود. شیب هزینه سوخت یک واحد به ازای هر توان خروجی مشخص عبارت از حد نسبت نمو هزینه سوخت ورودی (بر حسب دلار بر ساعت) بر نمو توان خروجی متناظرش (بر حسب مگاوات) است وقتی که راه تعیین مقدار افزایش هزینه سوخت در یک فاصله زمانی معین که طی آن توان خروجی به مقدار ناچیزی افزایش می‌یابد به دست آورد. برای مثال، شیب هزینه تقریبی برای هر خروجی خاص، برابر با مقدار هزینه‌ای-بر حسب دلار بر ساعت-است که باید اضافه شود تا خروجی به میزان یک مگاوات افزایش یابد. شیب هزینه واقعی از اندازه‌گیری شیب منحنی ورودی-خروجی و ضرب آن در Btu/هزینه-بر حسب

واحدهای مناسب-حساب می شود. از آنجا که يك هزارم دلار بر کیلووات ساعت برابر با يك دلار بر مگاوات ساعت است و چون يك کیلووات در مقایسه با خروجی معمولی واحد نیروگاه بخار مقدار بسیار کمی است، شیب هزینه سوخت را می توان بهای سوخت مصرفی لازم- بر حسب هزارم دلار بر ساعت- برای تولید يك کیلووات خروجی اضافی دانست.

شکل ۲-۹، يك نمودار نوعی شیب هزینه سوخت را در برابر توان خروجی نشان می دهد. این نمودار از اندازه گیری شیب منحنی ورودی-خروجی شکل ۱-۹ به ازای خروجیهای مختلف با فرض اینکه هزینه سوخت، ۱۳۰ دلار بر میلیون Btu باشد، به دست آمده است. اما هزینه سوخت بر حسب Btu، زیاد قابل پیش بینی نیست و خواننده باید بداند که ارقام هزینه ها در این بخش کاملاً فرضی اند. شکل ۲-۹ نشان می دهد که شیب هزینه سوخت بر حسب توان خروجی در پهنه زیادی کاملاً خطی است. معمولاً در کار تحلیلی، منحنی با يك یا دو پاره خط راست تقریب زده می شود. خط-چینی که در شکل می بینیم نمودار خوبی برای منحنی است. معادله خط چنین است

$$\frac{dF_n}{dP_n} = 0.00126P + 8.89$$

بنابر این به ازای توان خروجی ۳۰۰ MW، شیب هزینه به دست آمده از تقریب خطی، برابر ۱۲.۶۸ دلار بر مگاوات ساعت است. این مقدار تقریباً همان هزینه اضافی بر ساعت برای افزایش خروجی به میزان يك مگاوات و یا هزینه صرفه جویی شده بر ساعت برای کاهش خروجی به میزان يك مگاوات است. شیب هزینه واقعی به ازای ۳۰۰ MW برابر با



شکل ۲-۹ شیب هزینه سوخت بر حسب توان خروجی برای واحد دارای منحنی ورودی-خروجی شکل ۱-۹.

۱۲۵۰ دلار بر مگاوات ساعت است اما این توان خروجی در نزدیکی نقطه حداکثر انحراف بین مقدار واقعی و تقریب خطی شیب هزینه قرار دارد. برای دقت بیشتر می توان پهنه های بالایی و پایینی منحنی را با دو پاره خط نمایش داد.

اکنون زمینه برای درک اصل راهنمای توزیع بار بین واحدهای نیروگاه فراهم شده است. برای مثال فرض کنید که خروجی کل یک نیروگاه را دو واحد تأمین می کند و تقسیم بار بین این واحدها به گونه ای است که شیب هزینه سوخت یکی بیشتر از دیگری است. حال فرض کنید که مقداری از بار، از واحد با شیب هزینه بیشتر به واحد با شیب هزینه کمتر منتقل شود. کاهش هزینه ناشی از کاستن بار واحد دارای شیب هزینه بیشتر، از افزایش هزینه ناشی از افزودن همان مقدار بار به واحد دارای شیب هزینه کمتر، بیشتر می شود. انتقال بار از واحد اول به دوم و کاهش هزینه کلی سوخت تا جایی می تواند ادامه یابد که شیب هزینه سوخت دو واحد برابر شود. همین استدلال بر نیروگاههای دارای بیش از دو واحد نیز قابل تعمیم است. بنابراین معیار تقسیم اقتصادی بار بین واحدهای یک نیروگاه این است که باید همه واحدها در شیب هزینه سوخت یکسان بهره برداری شوند. اگر بخواهیم خروجی نیروگاه افزایش یابد شیب هزینه هر واحد بالا خواهد رفت اما این شیب باید برای همه واحدها یکسان باقی بماند.

معیاری را که از راه درک مستقیم به دست آوردیم می توان از طریق ریاضی نیز پیدا کرد. برای نیروگاهی با K واحد داریم:

$$F_T = F_1 + F_2 + \dots + F_K = \sum_{n=1}^K F_n \quad (1-9)$$

$$P_R = P_1 + P_2 + \dots + P_K = \sum_{n=1}^K P_n \quad (2-9)$$

که F_T هزینه کل سوخت است و P_R توان کلی است که شیب هزینه نیروگاه دریافت کرده و به سیستم قدرت انتقال داده است. هزینه های سوخت جداگانه واحدها عبارت از $F_1, F_2, \dots, F_K$ به ازای خروجیهای متناظر $P_1, P_2, \dots, P_K$ است. هدف ما به دست آوردن حداقل مقدار F_T به ازای P_R داده شده است که ایجاب می کند دیفرانسیل کامل dF_T صفر باشد زیرا هزینه کلی سوخت به توان خروجی هر واحد بستگی دارد.

$$dF_T = \frac{\partial F_T}{\partial P_1} dP_1 + \frac{\partial F_T}{\partial P_2} dP_2 + \dots + \frac{\partial F_T}{\partial P_K} dP_K = 0 \quad (3-9)$$

از آنجا که هزینه کلی سوخت F_T بستگی به خروجی واحدهای مختلف دارد شرط P_R ثابت به این معناست که معادله (۲-۹) به ازای حداقل F_T مقداری است ثابت. محدودیت ثابت ماندن P_R ایجاب می کند که داشته باشیم $dP_R = 0$ و به این ترتیب

$$dP_1 + dP_2 + \dots + dP_K = 0 \quad (4-9)$$

از ضرب معادله (۹-۴) در λ و تفریق معادله حاصل از معادله (۹-۳)، عبارت زیر به دست می آید

$$\left(\frac{\partial F_T}{\partial P_1} - \lambda\right) dP_1 + \left(\frac{\partial F_T}{\partial P_2} - \lambda\right) dP_2 + \dots + \left(\frac{\partial F_T}{\partial P_K} - \lambda\right) dP_K = 0 \quad (9-5)$$

این معادله وقتی همه جمله های آن صفر باشند برقرار است. از آنجا که با تغییر توان خروجی هر واحد، فقط هزینه سوخت همان واحد تغییر می کند مشتق جزئی به مشتق کامل تبدیل می شود. برای مثال $\partial F_T / \partial P_K$ به شکل dF_K / dP_K در می آید. معادله (۹-۵) به ازای روابط زیر برقرار است

$$\frac{dF_1}{dP_1} = \lambda, \frac{dF_2}{dP_2} = \lambda, \dots, \frac{dF_K}{dP_K} = \lambda \quad (9-6)$$

و به این ترتیب برای اینکه هزینه بر حسب دلار بر ساعت به حداقل برسد همه واحد باید در شیب هزینه سوخت یکسان بهره برداری شوند. بنابراین همان معیاری را که از راه درک مستقیم به دست آوردیم از طریق ریاضی نیز پیدا کردیم. این شیوه را روش ضریبهای لاگرانژ می نامند. وقتی تأثیر اتلاف انتقال بر توزیع بار بین چندین نیروگاه را به منظور مینیمم کردن هزینه سوخت برای بارکرد مشخص سیستم قدرت بررسی می کنیم به این روش ریاضی، نیاز پیدا خواهیم کرد.

هنگامی که رابطه بین شیب هزینه سوخت هر کدام از واحدهای یک نیروگاه و توان خروجی آن در پهنه بهره برداری مورد بررسی تقریباً خطی است معادله هایی که شیب هزینه سوخت را به شکل توابع خطی از توان خروجی نشان می دهند محاسبه را آسان می کنند. یک روش تعیین جدول بارکرد واحدهای نیروگاه عبارت از در نظر گرفتن مقادیر مختلفی برای λ ، به دست آوردن خروجیهای متناظر برای هر واحد، و اضافه کردن خروجیها به یکدیگر به منظور یافتن خروجی نیروگاه به ازای هر λ فرضی است. منحنی λ در برابر بار نیروگاه تعیین می کند که هر واحد به ازای کل بار داده شده نیروگاه، باید در چه مقدار λ ، بهره برداری شود. اگر حداکثر و حداقل بار هر واحد مشخص شود بعضی از واحدها قادر نخواهند بود با همان شیب هزینه سوخت واحدهای دیگر، بهره برداری شوند. و در عین حال در پهنه مشخص شده برای بار سبک و سنگین باقی بمانند.

مثال ۹-۱ شیب هزینه سوخت بر حسب دلار بر مگاوات ساعت برای یک نیروگاه در واحدی به شرح زیر است

$$\frac{dF_1}{dP_1} = 0.008 P_1 + 8.0 \quad \frac{dF_2}{dP_2} = 0.0096 P_2 + 6.4$$

1. lagrangian multipliers

بنا به فرض از هر دو واحد همیشه بهره برداری می شود، بار کل از ۲۵۰ تا ۱۲۵۰ MW تغییر می کند و حداکثر و حداقل بار هر واحد به ترتیب ۶۲۵ و ۱۰۰ MW است. شیب هزینه سوخت و توزیع بار بین واحدها را برای حداقل هزینه در بارهای کلی مختلف تعیین کنید.

حل: در بارهای سبک، واحد ۱ دارای شیب هزینه سوخت بالاتری خواهد بود و در حد پایینی خود یعنی ۱۰۰ MW که به ازای آن dF_1/dP_1 برابر ۸۰۸ دلار بر مگاوات ساعت است، کار خواهد کرد. وقتی که خروجی واحد ۲ نیز ۱۰۰ MW است dF_2/dP_2 برابر ۷۳۶ دلار بر مگاوات ساعت می شود. بنابراین وقتی خروجی نیروگاه افزایش می یابد بار اضافی را واحد ۲ تأمین می کند تا جایی که dF_2/dP_2 معادل ۸۰۸ دلار بر مگاوات ساعت شود. تا قبل از آنکه به این نقطه برسیم شیب هزینه سوخت نیروگاه ۱ را تنها واحد ۲ معین می کند. وقتی بار نیروگاه ۲۵۰ MW است واحد ۲ ۱۵۰ MW را با dF_2/dP_2 برابر ۷۸۴ دلار بر مگاوات ساعت، تأمین می کند. هنگامی که dF_2/dP_2 معادل ۸۰۸ دلار بر مگاوات ساعت می شود

$$۰.۰۰۰۹۶ P_2 + ۶۲۴ = ۸۰۸$$

$$P_2 = \frac{۲۰۴}{۰.۰۰۰۹۶} = ۲۱۵ \text{ MW}$$

و خروجی کل نیروگاه ۳۵۰ MW است. از این جا به بعد برای توزیع اقتصادی بار مقادیر مختلفی برای λ در نظر می گیریم و خروجی هر واحد و همه نیروگاه را حساب می کنیم. نتایج در جدول ۹-۱ داده شده اند.

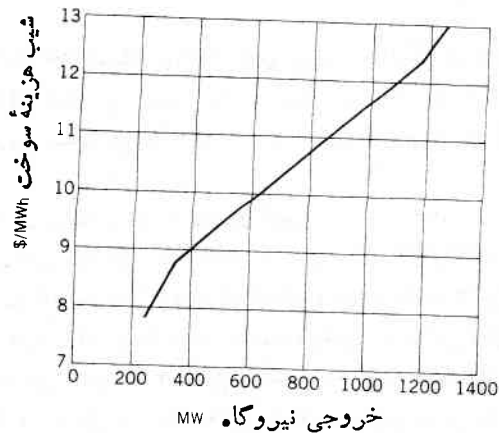
شکل ۹-۳، تغییرات λ نیروگاه را در برابر خروجی آن نمایش می دهد. در جدول ۹-۱ ملاحظه می کنیم که به ازای $\lambda = ۱۲۴$ ، واحد ۲ در حد بالای خود کار می کند و بار اضافی را واحد ۱ باید تأمین کند و همین واحد است که پس از آن، λ نیروگاه را تعیین می کند.

اگر بخواهیم توزیع بار بین واحدها را وقتی که خروجی نیروگاه ۱۰۰۰ MW است، بدانیم می توانیم خروجی هر واحد جداگانه را در برابر خروجی نیروگاه، همانند شکل ۹-۴، ترسیم کنیم که از روی آن خروجی آن واحد به ازای هر خروجی نیروگاه به دست می آید. کامپیوتر رقتی می تواند خروجی دقیق هر یک از واحدهای چندگانه را از شرط برابری شیب هزینه آنها به ازای هر خروجی کل نیروگاه به آسانی تعیین کند. برای دو واحد مثال قبل به ازای خروجی کل ۱۰۰۰ مگاوات داریم:

$$P_1 + P_2 = ۱۰۰۰$$

و

$$۰.۰۰۰۸ P_1 + ۸۰۰ = ۰.۰۰۰۹۶ (۱۰۰۰ - P_1) + ۶۲۴$$



شکل ۳-۹ شیب هزینه سوخت در برابر خروجی نیروگاه وقتی بار کل نیروگاه چنانکه در مثال ۱-۹ به دست آمد بین واحدها توزیع اقتصادی یابد.

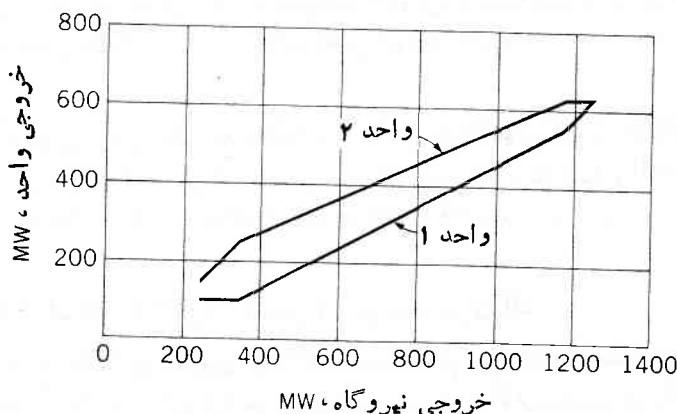
جدول ۱-۹ خروجیهای هر واحد و خروجی کل به ازای مقادیر مختلف λ در مثال ۱-۹.

نیروگاه $P_1 + P_2$ MW	واحد ۲ P_2 MW	واحد ۱ P_1 MW	λ نیروگاه \$/MWh
۲۵۰	۱۵۰	۱۰۰	۷٫۸۴
۳۵۰	۲۵۰	۱۰۰	۸٫۲۸
۵۳۳	۳۳۳	۲۰۰	۹٫۲۶
۷۱۷	۴۱۷	۳۰۰	۱۰٫۲۴
۹۰۰	۵۰۰	۴۰۰	۱۱٫۲۲
۱۰۸۳	۵۸۳	۵۰۰	۱۲٫۲۰
۱۱۷۵	۶۲۵	۵۵۰	۱۲٫۲۴
۱۲۵۰	۶۲۵	۶۲۵	۱۳٫۲۰

$$P_1 = ۴۵۲٫۵۵ \text{ MW}$$

$$P_2 = ۵۴۵٫۴۵ \text{ MW}$$

و برای هر واحد $\lambda = ۱۱٫۶۳۶$. البته چنین دقتی ضروری نیست زیرا از تعیین درست



شکل ۹-۴ خروجی هر واحد در برابر خروجی نیروگاه به ازای بهره برداری اقتصادی از نیروگاه مثال ۹-۱.

هزینه‌ها مطمئن نیستیم و در این مثال از یک معادله تقریبی برای بیان شیب هزینه سوخت استفاده کرده ایم.

صرفه جوییهای حاصل از توزیع اقتصادی و نه هر توزیع دلخواه بار می‌تواند از انتگرال گیری عبارت شیب هزینه سوخت و مقایسه افزایش و کاهش هزینه واحد وقتی بار از اقتصادی ترین توزیع خارج می‌شود به دست آید.

مثال ۹-۲ صرفه جویی در هزینه سوخت - بر حسب دلار بر ساعت - برای توزیع اقتصادی بار کل ۹۰۰ MW بین دو واحد نیروگاه مثال ۹-۱ را در مقایسه با توزیع مساوی همان بار کل تعیین کنید.

حل: مثال ۹-۱ نشان می‌دهد که واحد ۱ باید ۴۰۰ MW تأمین کند و واحد ۲ ۵۰۰ MW. اگر هر واحد، ۴۵۰ MW تحویل دهد، افزایش هزینه برای واحد ۱ برابر است با:

$$\int_{400}^{450} (0.0008P_1 + 8) dP_1 = \left| 0.0004P_1^2 + 8P_1 \right|_{400}^{450} = 570 \text{ دلار بر ساعت}$$

وعیناً برای واحد ۲

$$\int_{500}^{450} (0.00096P_2 + 6.4) dP_2 = \left| 0.00048P_2^2 + 6.4P_2 \right|_{500}^{450} = -548 \text{ دلار بر ساعت}$$

چنانکه انتظار می‌رود با کاهش خروجی، هزینه نیز کاهش می‌یابد و علامت منفی بیانگر این مطلب است. افزایش خالص هزینه برابر $22 = 548 - 570$ دلار بر ساعت است.

صرفه‌جویی به نظر كوچك می‌آید اما با این صرفه‌جویی در هر ساعت، هزینه سوخت در يك سال بهره‌برداری مداوم ۱۹۲۷۲۰ دلار کاهش خواهد یافت. □

صرفه‌جویی ناشی از توزیع اقتصادی، مخارج دستگاههای کنترل خودكار بار كرد واحد‌ها را توجیه می‌كند. پس از بررسی اثر اتلافهای انتقال در توزیع اقتصادی بار بین نیروگاهها، به مطالعه کنترل خودكار تولید خواهیم پرداخت.

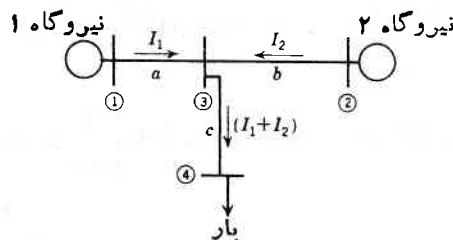
۹-۲ اتلاف انتقال به عنوان تابعی از تولید نیروگاه

در تعیین توزیع اقتصادی بار بین نیروگاهها نیاز داریم كه اتلاف خطهای انتقال را در نظر بگیریم. باینكه-به‌ازای توزیع معینی از بار بین نیروگاهها-شیب هزینه سوخت يك نیروگاه ممكن است از نیروگاه دیگر كمتر باشد امكان دارد كه نیروگاه با شیب هزینه كمتر، از مركز بار دورتر باشد. ممكن است اتلافهای انتقال از نیروگاه با شیب هزینه كمتر آن چنان زیاد باشد كه رعایت اقتصاد ما را وادار سازد تا بار این نیروگاه را کاهش دهیم و به همان میزان بر بار نیروگاه با شیب هزینه بیشتر، بیفزاییم. برای دخالت دادن اتلاف انتقال در مسئله تعیین بار كرد اقتصادی نیروگاهها، نیاز داریم كه كل اتلاف انتقال سیستم را به‌عنوان تابعی از باركردهای نیروگاه بیان كنیم.

تعیین اتلاف انتقال در يك سیستم ساده، شامل دونیروگاه و يك بار به ما كمك می‌كند تا با اصول بیان اتلاف بر حسب توان خروجی نیروگاه آشنا شویم. شكل ۹-۵، چنین سیستمی را نشان می‌دهد. اگر R_a ، R_b و R_c به ترتیب مقاومت خطهای a ، b و c باشند اتلاف كل برای سیستم انتقال سه فاز برابر است با:

$$P_L = 3|I_1|^2 R_a + 3|I_2|^2 R_b + 3|I_1 + I_2|^2 R_c \quad (9-7)$$

اگر I_1 و I_2 همفاز فرض شوند داریم



شكل ۹-۵ يك سیستم ساده اتصال دو نیروگاه به يك بار.

1. D. C. Harker, A Primer on Loss Formulas, *Trans. AIEE*, vol. 77, pt. III, 1958, pp. 1434-1436.

$$|I_1 + I_2| = |I_1| + |I_2| \quad (۸-۹)$$

$$P_L = 3|I_1|^2(R_a + R_c) + 3 \times 2|I_1||I_2|R_c + 3|I_2|^2(R_b + R_c) \quad (۹-۹)$$

اگر P_1 و P_2 ، توان خروجی سه فاز نیروگاههای ۱ و ۲ با ضریب توان pf_1 و pf_2 و V_1 و V_2 ، ولتاژ شینه‌های نیروگاه باشد داریم

$$|I_1| = \frac{P_1}{\sqrt{3}|V_1|pf_1} \quad \text{و} \quad |I_2| = \frac{P_2}{\sqrt{3}|V_2|pf_2} \quad (۱۰-۹)$$

از گذاردن در معادله (۹-۹) به دست می آوریم:

$$P_L = P_1^2 \frac{R_a + R_c}{|V_1|^2(pf_1)^2} + 2P_1P_2 \frac{R_c}{|V_1||V_2|(pf_1)(pf_2)} + P_2^2 \frac{R_b + R_c}{|V_2|^2(pf_2)^2}$$

$$= P_1^2 B_{11} + 2P_1P_2 B_{12} + P_2^2 B_{22} \quad (۱۱-۹)$$

که در آن

$$B_{11} = \frac{R_a + R_c}{|V_1|^2(pf_1)^2}$$

$$B_{12} = \frac{R_c}{|V_1||V_2|(pf_1)(pf_2)} \quad (۱۲-۹)$$

$$B_{22} = \frac{R_b + R_c}{|V_2|^2(pf_2)^2}$$

عبارت‌های B_{11} ، B_{12} و B_{22} ضرایب اتلاف یا ضرایب B نامیده می‌شوند. اگر ولتاژهای معادله (۱۲-۹) خط به خط و بر حسب کیلو ولت و مقاومتها بر حسب اهم باشند، واحد ضرایب اتلاف، عکس مگاوات است. پس در معادله (۱۱-۹)، با توانهای سه فاز P_1 و P_2 بر حسب مگاوات، P_L نیز بر حسب مگاوات خواهد بود. البته ممکن است محاسبات به صورت درستی انجام شود.

این ضرایب برای سیستم مورد بحث به فرض همفاز بودن I_1 و I_2 مقدار صحیح اتلاف را از معادله (۱۱-۹) فقط برای مقادیر مشخص P_1 و P_2 که منجر به ولتاژها و ضریب توانهای به کار رفته در معادله (۱۲-۹) می‌شود معین می‌کنند. وقتی P_1 و P_2 تغییر می‌کنند ضرایب B فقط تا وقتی ثابت می‌مانند که اندازه ولتاژ شینه‌ها و ضریب توان نیروگاهها ثابت بمانند. خوشبختانه استفاده از مقادیر ثابت برای ضرایب اتلاف در معادله (۱۱-۹)، هنگامی که ضرایب برای حالت بهره‌برداری متوسط محاسبه شود نتایجی دقیق

و پذیرفتنی به دست می‌دهد، اما به این شرط که توزیع بار بین نیروگاهها با بارکل، زیاد تغییر نکند. در عمل، بارکرد اقتصادی سیستمهای بزرگ را محاسباتی بر مبنای چند دسته ضرایب اتلاف وابسته به شرایط بار، مشخص می‌کند.^۱

مثال ۳-۹ برای سیستمی که نمودار تک خطی آن در شکل ۵-۹ آمده، فرض کنید $V_1 = 100 \angle 0^\circ \text{ pu}$ و $I_2 = 0.8 \angle 0^\circ \text{ pu}$ و $I_3 = 1.0 \angle 0^\circ \text{ pu}$ و ولتاژ شینه ۳ $V_3 = 100 \angle 0^\circ \text{ pu}$ اگر ولتاژ شینه ۳ $V_3 = 100 \angle 0^\circ \text{ pu}$ باشد ضرایب اتلاف را بیابید. امیدانس خطوط به ترتیب برای قسمتهای a ، b و c عبارت اند از $0.04 + j0.16 \text{ pu}$ ، $0.03 + j0.12 \text{ pu}$ و $0.02 + j0.08 \text{ pu}$ حل: جریان بارها و ولتاژ شینهها معمولاً از بررسیهای پخش بار به دست می‌آید. در این مسئله می‌توان ولتاژ شینهها را از روی اطلاعات داده شده محاسبه کرد:

$$V_1 = 100 + (100 + j0)(0.04 + j0.16) = 100.4 + j0.16 \text{ pu}$$

$$V_2 = 100 + (0.8 + j0)(0.03 + j0.12) = 100.24 + j0.096 \text{ pu}$$

از آنجا که همه جریانها فاز صفر دارند، ضریب توان در هر گره منبع برابر کسینوس زاویه ولتاژ آن گره است، و اندازه ولتاژ ضربدر ضریب توان، مساوی قسمت حقیقی عبارت مختلط ولتاژ است. بنابراین

$$B_{11} = \frac{0.04 + 0.02}{1.042} = 0.0552 \text{ pu}$$

$$B_{12} = \frac{0.02}{1.024 \times 1.04} = 0.0188 \text{ pu}$$

$$\square \quad B_{22} = \frac{0.03 + 0.02}{1.042} = 0.0477 \text{ pu}$$

مثال ۴-۹ اتلاف انتقال را برای مثال ۳-۹ از رابطه اتلاف معادله (۹-۱۱) محاسبه کنید و درستی نتایج را بیازمایید.

۱. برای اطلاعات بیشتر در این زمینه می‌توان از بین منابع فراوان به دو منبع زیر مراجعه کرد
L. K. Kirchmayer, *Economic Operation of Power Systems*, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1958; W. S. Meyer and V. D. Albertson, *Improved Loss Formula Computation by Optimally Ordered Elimination Techniques*, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. 90, 1971, pp. 716-731.

همچنین پانوش بخش ۴-۹ را درباره روشی که بسیاری از شرکتها به کار می‌برند ببینید.

حل: توان منبعها معمولا از بررسی بار درشرایطی که برای محاسبه ضرایب اتلاف به کار رفته به دست می آید. برای این مسئله P_1 و P_2 باید تعیین شوند.

$$P_1 = \text{Re} \{ (1.0 + j0)(1.04 + j0.16) \} = 1.04 \text{ pu}$$

$$P_2 = \text{Re} \{ (0.8 + j0)(1.024 + j0.096) \} = 0.8192 \text{ pu}$$

$$P_L = 1.04^2 \times 0.0554 + 2 \times 1.04 \times 0.8192 \times 0.0188 \\ + 0.8192^2 \times 0.0477$$

$$= 0.06 + 0.032 + 0.032 = 0.124 \text{ pu}$$

با افزودن اتلاف همه قسمتها که از $I^2 R$ حساب می شود، داریم:

$$P_L = 1.0^2 \times 0.04 + 1.8^2 \times 0.02 + 0.8^2 \times 0.03$$

$$= 0.04 + 0.0648 + 0.0192 = 0.124 \text{ pu}$$

انتظار می رود روشها بایکدیگر کاملاً سازگار باشند زیرا ضرایب اتلاف و خود اتلاف به ازای وضعیتی یکسان محاسبه شده بودند. نتایج جدول ۹-۲، میزان خطایی را که از به کار بردن همان ضرایب اتلاف برای دو وضعیت بهره برداری دیگر حاصل می شود نشان می دهد.

شکل عمومی معادله اتلاف برای هر تعداد منبع به صورت زیر است

$$P_L = \sum_m \sum_n P_m B_{mn} P_n \quad (9-13)$$

که $\sum_m$ و $\sum_n$ نشانگر جمعهای مستقل، برای زیر پوشش درآوردن همه منبعهاست. به عنوان مثال برای سه منبع:

$$P_L = P_1^2 B_{11} + P_2^2 B_{22} + P_3^2 B_{33} + 2P_1 P_2 B_{12} + 2P_2 P_3 B_{23} + 2P_1 P_3 B_{13} \quad (9-14)$$

شکل ماتریسی معادله اتلاف انتقال به صورت زیر است:

$$P_L = P^T B P \quad (9-15)$$

که برای s منبع داریم

$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_s \end{bmatrix} \quad \text{و} \quad B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & \dots & B_{1s} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & \dots & B_{2s} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_{s1} & B_{s2} & B_{s3} & \dots & B_{ss} \end{bmatrix}$$

جدول ۹-۲ مقایسه اتلاف انتقال محاسبه شده از ضریب اتلاف و به دست آمده از طریق رابطه I^2R به ازای داده های مثال ۹-۳ در شرایط مختلف بهره برداری. همه کمیتها بر حسب در-یک اند.

P_L از ضرایب						
شرایط	I^2R از P_L	اتلاف	P_2	P_1	I_2	I_1
حالت ابتدایی						
P_1 و P_2 ۵۰٪ کاهش	۰٫۱۲۲	۰٫۱۲۲	۰٫۸۱۹	۱٫۰۴۰	۰٫۸	۱٫۰
یافته اند						
۵۳٪ از P_1 به P_2	۰٫۰۳۱	۰٫۰۳۰	۰٫۴۰۵	۰٫۵۱۰	۰٫۴	۰٫۵
انتقال یافته است	۰٫۱۲۶	۰٫۱۲۸	۱٫۳۵۱	۰٫۵۱۰	۱٫۳	۰٫۵

۹-۳ توزیع بار بین نیروگاهها

روش ارائه شده برای بیان اتلاف انتقال بر حسب خروجی نیروگاهها ما را قادر می سازد تا اتلاف انتقال را در جدول بندی خروجی هر نیروگاه برای حداکثر اقتصاد و بار معین سیستم منظور کنیم. بررسی ریاضی، مشابه جدول بندی خروجی واحدهای یک نیروگاه است جز اینکه حالا اتلاف انتقال نیز به عنوان شرط اضافی وارد مسئله می شود.

در معادله

$$F_T = F_1 + F_2 + \dots + F_K = \sum_{n=1}^K F_n \quad (۹-۱۶)$$

F_T اکنون هزینه کل سوخت تمام سیستم یعنی مجموع هزینه سوخت نیروگاههای جداگانه $F_1, F_2, \dots, F_K$ است. ورودی کل نیروگاهها به شبکه عبارت است از:

$$P_T = P_1 + P_2 + \dots + P_K = \sum_{n=1}^K P_n \quad (۹-۱۷)$$

که در آن $P_1, P_2, \dots, P_K$ ورودی نیروگاههای جداگانه به شبکه اند. هزینه کل سوخت سیستم تابعی از توانهای ورودی است. شرط حداقل شدن F_T چنین است

$$\sum_{n=1}^K P_n - P_L - P_R = 0 \quad (۹-۱۸)$$

که در آن P_R ، توان کل دریافتی بارهای سیستم و P_L ، اتلاف انتقال بر حسب تابعی از ضرایب اتلاف و توان ورودی به شبکه از هر نیروگاه است. از آنجا که P_R ثابت است داریم $dP_R = 0$ ؛ بنابراین

$$\sum_{n=1}^K dP_n - dP_L = 0 \quad (19-9)$$

و با توجه به اینکه حداقل هزینه به معنی $dF_T = 0$ است

$$dF_T = \sum_{n=1}^K \frac{\partial F_T}{\partial P_n} dP_n = 0 \quad (20-9)$$

اتلاف انتقال P_L وابسته به خروجی نیروگاه‌هاست و dP_L چنین بیان می‌شود

$$dP_L = \sum_{n=1}^K \frac{\partial P_L}{\partial P_n} dP_n \quad (21-9)$$

گذاردن این مقدار در معادله (۱۹-۹) و ضرب کردن در λ و سپس تفریق کردن حاصل از معادله (۲۰-۹) نتیجه می‌دهد:

$$\sum_{n=1}^K \left(\frac{\partial F_T}{\partial P_n} + \lambda \frac{\partial P_L}{\partial P_n} - \lambda \right) dP_n = 0 \quad (22-9)$$

این معادله وقتی برقرار است که رابطه زیر به ازای تمام مقادیر n درست باشد:

$$\frac{\partial F_T}{\partial P_n} + \lambda \frac{\partial P_L}{\partial P_n} - \lambda = 0 \quad (23-9)$$

با مرتب کردن معادله (۲۳-۹) و توجه به اینکه تغییر خروجی هر نیروگاه فقط در هزینه همان نیروگاه اثر می‌گذارد، داریم:

$$\frac{dF_n}{dP_n} \frac{1}{1 - \partial P_L / \partial P_n} = \lambda \quad (24-9)$$

یا

$$\frac{dF_n}{dP_n} L_n = \lambda \quad (25-9)$$

که در آن، L_n ضریب جریمه نیروگاه n نامیده می‌شود و

$$L_n = \frac{1}{1 - (\partial P_L / \partial P_n)} \quad (26-9)$$

وقتی هزینه سوخت بر حسب دلار بر ساعت و توان بر حسب مگاوات باشد ضریب λ ، بر حسب دلار بر مگاوات ساعت خواهد بود. نتیجه شبیه حالت جدول بندی واحدهای يك نیروگاه است. هزینه سوخت وقتی به حداقل مقدار خود می‌رسد که شیب هزینه سوخت ضرب در

ضریب جریمه در همه نیروگاههای سیستم برابر باشد. این حاصل ضربها را λ می گویند که تقریباً برابر هزینه لازم بر حسب دلار بر ساعت، برای افزایش بار کل تحویلی به اندازه يك مگاوات است. برای مثال در سیستمی با سه نیروگاه، داریم

$$\frac{dF_1}{dP_1} L_1 = \frac{dF_2}{dP_2} L_2 = \frac{dF_3}{dP_3} L_3 = \lambda \quad (27-9)$$

اتلاف انتقال P_L را معادله (۹-۱۳) مشخص می کند. برای K نیروگاه، مشتق جزئی نسبت به P_n نتیجه می دهد:

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_n} = \frac{\partial}{\partial P_n} \sum_{m=1}^K \sum_{n=1}^K P_n B_{mn} P_n = 2 \sum_{m=1}^K P_m B_{mn} \quad (28-9)$$

دستگاه معادله های چند مجهولی ناشی از نوشتن معادله (۹-۲۲) برای هر نیروگاه سیستم را می توان با فرض مقداری برای λ حل کرد. در نتیجه بارکرد اقتصادی هر نیروگاه برای λ فرض شده، مشخص می شود. با حل معادلات به ازای چند مقدار λ ، اطلاعات لازم برای رسم تغییرات سهم تولید هر نیروگاه در برابر کل تولید، به دست می آید. اگر اتلاف انتقال برای هر λ محاسبه شود، تغییرات خروجی نیروگاهها در برابر بار کل دریافتی قابل رسم است. در صورتی که توانهای ثابتی از خطوط رابط، به سیستمهای دیگر منتقل یا از نیروگاههای آبی دریافت شود توزیع بقیه بار بین نیروگاههای دیگر از تغییرات اتلاف انتقال که ناشی از عبور جریان از طریق این نقاط الحاقی ورودی به طرف سیستم است متأثر می شود. هیچ متغیر تازه ای جز ضرایب اتلاف اضافی مورد نیاز نیست. برای مثال سیستمی با پنج نیروگاه بخار، سه نیروگاه آبی، و هفت به هم پیوستگی، به يك ماتریس ضرایب اتلاف 15×15 نیاز خواهد داشت اما تنها مجهولهایی که باید به ازای هر λ پیدا کرد عبارت از خروجی پنج نیروگاه بخار به سیستم است.

مثال ۹-۵ سیستمی شامل دو نیروگاه است که با يك خط انتقال به هم وصل شده اند. تنها بار موجود، روی نیروگاه ۲ قرار دارد. به هنگام انتقال 200 MW از نیروگاه ۱ به ۲، اتلاف توان در خط، 16 MW است. تولید بهینه هر نیروگاه و توان دریافتی بار را وقتی λ سیستم 1250 دلار بر مگاوات ساعت باشد، بیابید. فرض کنید شیب هزینه سوختها بتواند با معادله های زیر تقریب زده شود.

$$\frac{dF_1}{dP_1} = 0.010 P_1 + 8.5 \quad \$/\text{MWh}$$

$$\frac{dF_2}{dP_2} = 0.015 P_2 + 9.5 \quad \$/\text{MWh}$$

حل: برای سیستم دو نیروگاهی

$$P_L = P_1^2 B_{11} + 2P_1 P_2 B_{12} + P_2^2 B_{22}$$

از آنجا که همه بار روی نیروگاه ۲ قرار دارد، تغییر P_2 نمی‌تواند بر P_L تأثیر بگذارد. بنابراین:

$$B_{22} = 0 \quad \text{و} \quad B_{12} = 0$$

و به‌ازای $P_1 = 200 \text{ MW}$ و $P_L = 16 \text{ MW}$ خواهیم داشت:

$$16 = 200^2 B_{11}$$

$$B_{11} = 0.00004 \text{ MW}^{-1}$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_1} = 2P_1 B_{11} + 2P_2 B_{12} = 0.00008 P_1$$

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_2} = 2P_2 B_{22} + 2P_1 B_{12} = 0$$

ضرایب جریمه عبارت‌اند از

$$L_1 = \frac{1}{1 - 0.00008 P_1} \quad \text{و} \quad L_2 = 1.0$$

به‌ازای $\lambda = 12.5$

$$\frac{0.0010 P_1 + 12.5}{1 - 0.00008 P_1} = 12.5$$

$$P_1 = 200 \text{ MW}$$

$$0.0015 P_2 + 12.5 = 12.5$$

$$P_2 = 200 \text{ MW}$$

بنابراین تسهیم اقتصادی بار به‌ازای $\lambda = 12.5$ ایجاب می‌کند که بار بین دو نیروگاه به‌تساوی تقسیم شود. اتلاف توان در انتقال

$$P_L = 0.00004 \times 200^2 = 16 \text{ MW}$$

و بار تحویلی برابر است با

$$P_R = P_1 + P_2 - P_L = 384 \text{ MW}$$

□

مثال ۹-۶ برای سیستم مثال ۹-۵ اگر توان دریافتی بار 384 MW باشد، مقدار صرفهجویی حاصل از دخالت دادن اتلاف انتقال در تعیین بار نیروگاهها - و نه چشم پوشی از آن - بر حسب دلار بر ساعت چقدر است؟
حل: اگر از اتلاف انتقال صرف نظر شود شیب هزینه سوختهای دو نیروگاه مساوی می شوند:

$$0.010P_1 + 8.75 = 0.015P_2 + 9.75$$

توان تحویلی به بار برابر است با

$$P_1 + P_2 - 0.0004P_2^2 = 384$$

از حل این دو معادله، مقدار تولید نیروگاهها: P_1 و P_2 ، بدون دخالت دادن اتلافها - چنین به دست می آید:

$$P_1 = 290.7 \text{ MW} \quad \text{و} \quad P_2 = 127.1 \text{ MW}$$

بار نیروگاه ۱ از ۲۰۰ به ۲۹۰٫۷ مگاوات افزایش می یابد. افزایش هزینه سوخت برابر است با:

$$\int_{200}^{290.7} (0.010P_1 + 8.75) dP_1 = \left| \frac{0.010}{2} P_1^2 + 8.75P_1 \right|_{200}^{290.7} \\ = 222.53 + 770.95 = 993.48$$

بار نیروگاه ۲ از ۲۰۰ به ۱۲۷٫۱ مگاوات کاهش می یابد. کاهش (افزایش منفی) هزینه سوخت برای نیروگاه ۲ برابر است با:

$$-\int_{200}^{127.1} (0.015P_2 + 9.75) dP_2 = \left| \frac{0.015}{2} P_2^2 + 9.75P_2 \right|_{200}^{127.1} \\ = 178.84 + 692.55 = 871.39$$

صرفهجویی خالص ناشی از منظورکردن اتلاف انتقال در جدول بندی بار دریافتی 384 MW ، معادل است با:

$$\square \quad 993.48 - 871.39 = 122.09 \text{ دلار بر ساعت}$$

۹-۴ يك روش محاسبه ضرایب جریمه و اتلاف

متداولترین روش محاسبه $\partial P_L / \partial P_i$ برای حداقل سازی هزینه در سیستم انتقال این است که اتلاف را به عنوان تابعی از خروجی نیروگاهها بر حسب ضرایب B بیان کنیم. سادگی

معادله اتلاف برحسب ضرایب B ، مزیت اصلی این روش است که موجب صرفه‌جوییهای زیادی در هزینه‌های بهره‌برداری از سیستم شده است. پیشرفت سریع کامپیوترهای رقی، روشهای دیگر را نیز جالب توجه ساخته است.

يك روش ارزیابی $\partial P_L / \partial P_n$ از بردسپهای پخش بار را که تعدادی از شرکتهای برق به‌عنوان قسمتی از برنامه تعیین ضرایب B به‌کار می‌برند به‌اجمال شرح می‌دهیم.^۱ با

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_n} = \sum_{j=1}^N \frac{\partial P_L}{\partial \theta_j} \frac{\partial \theta_j}{\partial P_n} \quad (29-9)$$

که در آن، θ_j ، زاویه فاز ولتاژ در گره j از سیستمی با N شینه است. اگر ولتاژ شینه‌ها ثابت فرض شود، برحسب زاویه فاز ولتاژها داریم:

$$\frac{\partial P_L}{\partial \theta_j} = \sum_{k=1}^N |V_j| \cdot |V_k| G_{jk} \sin(\theta_k - \theta_j) \quad (30-9)$$

که در آن، G_{jk} ، قسمت حقیقی Y_{jk} از ماتریس ادمیتانس شینه است. مشکل معادله (۲۹-۹)، در محاسبه $\partial \theta_j / \partial P_n$ است که چون زاویه فاز ولتاژها را نمی‌توان برحسب توان تولیدی نیروگاهها بیان کرد امکان مشتق‌گیری مستقیم وجود ندارد.

جمله‌های $\partial \theta_j / \partial P_n$ به‌ازای تغییر سطوح بار و جدول‌بندی تولید نیروگاهها، کاملاً ثابت باقی می‌مانند. چون این جمله‌ها تغییر زاویه فاز ولتاژها θ_j را به‌ازای تغییر تولید نیروگاه P_n وقتی تولید همه نیروگاههای دیگر ثابت می‌ماند بیان می‌کنند می‌توان آنها را به‌خوبی در مطالعات پخش بار تقریب زد. برای برخی از نمونه‌های نوعی بار، بار کل دریافتی، از افزایش هر کدام از بارهای جداگانه مقداری جزئی، مثلاً ۵٪، افزایش می‌یابد. درحالی‌که خروجی نیروگاههای دیگر ثابت نگه‌داشته می‌شود، نیروگاه n ، تغییر توان کل دریافتی و اتلافها را تأمین می‌کند. تغییر هر زاویه فاز ولتاژ، θ_j ، تعیین و نسبت این تغییر به تغییر خروجی نیروگاه به‌سیستم $\Delta \theta_j / \Delta P_n$ به‌ازای همه مقادیر j برای نیروگاه n محاسبه می‌شود. برنامه کامپیوتری پخش بار به‌کار می‌رود و فرایند به‌نوبت برای هر نیروگاهی که تغییر بار را تغذیه می‌کند تکرار می‌شود و يك دسته ضرایب A_{jn} به‌دست می‌آید:

$$A_{jn} = \frac{\Delta \theta_j}{\Delta P_n} \quad (31-9)$$

پس شیب اتلاف نیروگاه n از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

1. E.F.Hill and W.D.Stevenson, Jr., An Improved Method of Determining Incremental Loss Factors from Power System Admittances and Voltages, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-87, June 1968, pp. 1419-1425.

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_n} = \sum_{j=1}^N \frac{\partial P_L}{\partial \theta_j} A_{jn} \quad (32-9)$$

صرف نظر از ترکیبهای مختلف جدول بندی تولید وسطوح بار، مقادیر A_{jn} اساساً ثابت اند. بنا براین پس از تعیین ماتریس ضرایب A_{jn} ، کامپیوتر ناظر بر پخش بار می تواند ضرایب جریمه نیروگاه را دائماً با حل معادله های (۳۰-۹) و (۳۲-۹) محاسبه کند. اما در عمل برای محاسبه ضرایب B از ضرایب A_{jn} ، معادله زیر به کار می رود*:

$$B_{mn} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial^2 P_L}{\partial \theta_i \partial \theta_j} A_{im} A_{jn} \quad (33-9)$$

در تعیین مشتق جزئی مرتبه دوم P_L نسبت به θ_i و θ_j معادله (۳۰-۹) به کار می رود که در آن از مقادیر به دست آمده از حل پخش بار نمونه نوعی بار به کار رفته در محاسبه ضرایب A_{jn} استفاده می شود. سپس کامپیوتر ناظر بر کار، شیب اتلاف $\partial P_L / \partial P_n$ را به کمک ضرایب B تعیین خواهد کرد و سیستم را به ازای توزیع اقتصادی بار - به صورتی که در بخش بعد توصیف می شود - کنترل می کند.

۵-۹ کنترل خودکار تولید

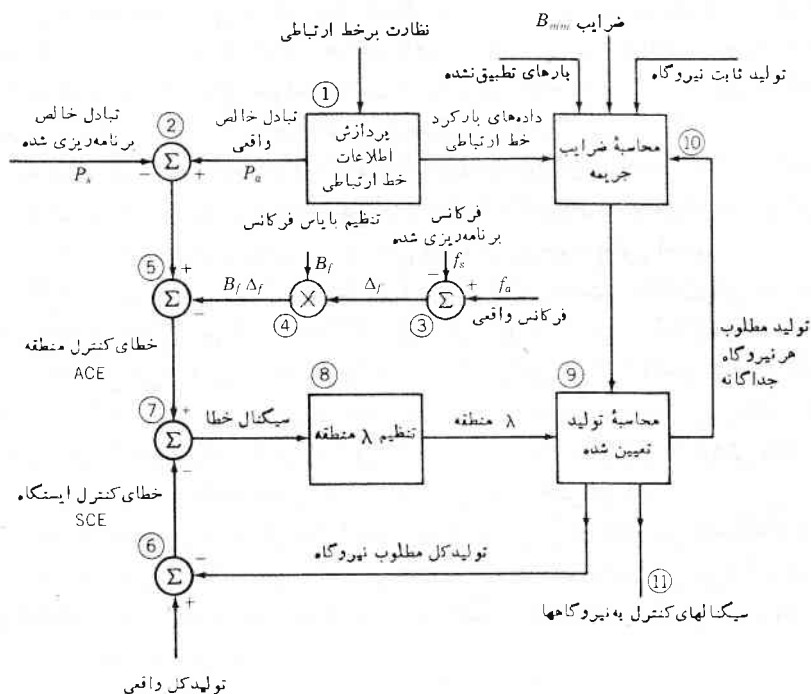
کنترل کامپیوتری خروجی هر نیروگاه و هر واحد داخل نیروگاه، رویه ای معمول در بهره برداری از سیستم قدرت است. با نظارت دائمی بر خروجی نیروگاهها و توان گذرنده از پیوستگاهها، می شود تبادل توان با سیستمهای دیگر را کنترل کرد. بیشتر سیستمهای کنترل، یا رقمی اند و یا ترکیبی از رقمی و قیاسی. در این بخش یکی از راههای مختلف کنترل کامپیوتری را بررسی خواهیم کرد.

در بحث کنترل، اصلاح منطقه به معنای قسمتی از یک سیستم به هم پیوسته است که در آن یک یا چند شرکت با کنترل تولید خود سعی دارند همه تغییر بار خویش را جذب و تبادل خالص توان از پیش برنامه ریزی شده با مناطق دیگر را در فواصل زمانی مشخص حفظ کنند. نظارت بر گذر توان در خطهای ارتباط بین مناطق، معین می کند که آیا یک منطقه ویژه، همه تغییر بار داخل مناطق مرزی خود را به طور رضایت بخش جذب می کند یا نه. وظیفه کامپیوتر عبارت است از: ۱) ملزم کردن منطقه به جذب تغییرات بار خویش، ۲) تأمین تبادل خالص توافق شده با مناطق مجاور، ۳) تعیین تولید مطلوب هر کدام از

* مراجعه کنید به،

E. F. Hill and W. D. Stevenson, Jr., A New Method of Determining Loss Coefficients, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-87, July 1968, pp. 1548-1552.

نیروگاه‌های داخل منطقه برای تسهیم اقتصادی بار، (۲) واداشتن منطقه به‌ایفای سهم خویش برای حفظ فرکانس مطلوب سیستم به‌هم پیوسته. نمودار بلوکی شکل ۹-۶، گذر اطلاعات را در کامپیوتر کنترل يك منطقه ویژه نشان می‌دهد. شماره‌های داخل دایره‌های کنار نمودار، معرف نقاطی از نمودارند و بحث دربارهٔ عملکرد کنترل را ساده می‌کنند. دایره‌های بزرگتر روی نمودار و در برگیرندهٔ علامتهای Σ یا $\times$ ، نقاط ضرب یا جمع جبری سیگنالهای ورودی را نشان می‌دهند. در نقطهٔ ۱، پردازش اطلاعات دربارهٔ گذر توان بر روی خطوط ارتباط با مناطق کنترل دیگر نشان داده می‌شود. تبادل خالص واقعی P_a برابر با جمع جبری توان خطوط ارتباط است و وقتی مثبت است که قدرت خالص به‌طرف خارج منطقه باشد. تبادل خالص از پیش تعیین شده را تبادل خالص برنامه‌ریزی شده P_p می‌نامند. در نقطهٔ ۲ این تبادل از تبادل خالص واقعی کم می‌شود. وضعیتی را که هر دوی این تبادلهای به‌طرف خارج سیستم و بنا بر این مثبت باشند بررسی خواهیم کرد.



شکل ۹-۶ نمودار بلوکی نمایش عملکرد کامپیوتر در کنترل يك منطقه ویژه.

۱. تفریق مقدار معیار یا مرجع از مقدار واقعی برای به‌دست آوردن خطا، روش پذیرفته شدهٔ مهندسين سیستم قدرت است و علامتش مخالف علامت خطای کنترل تعریف شده در فرهنگ تئوری کنترل است.

نقطه ۳ از نمودار، اختلاف فرکانس برنامه‌ریزی شده f_r (۶۰ یا ۵۰ هرتز) با فرکانس واقعی f_a را برای به‌دست آوردن انحراف فرکانس Δf نشان می‌دهد. در نقطه ۴ از نمودار، ضریبی با علامت منفی به نام تنظیم بایاس فرکانس B_f در Δf ضرب می‌شود تا $B_f \Delta f$ موسوم به بایاس فرکانس، برحسب مگاوات، به‌دست آید. در نقطه ۵، بایاس فرکانس - کسه به‌ازای کمتر بودن فرکانس واقعی از فرکانس برنامه‌ریزی شده، مثبت است از $P_s - P_e$ کاسته می‌شود تا خطای کنترل منطقه (ACE) که ممکن است مثبت یا منفی باشد به‌شرح زیر به‌دست آید

$$ACE = P_e - P_s - B_f(f_a - f_r) \quad (9-34)$$

ACE منفی به‌این معناست که منطقه، توان کافی برای ارسال مقدار درخواستی به‌خارج منطقه را تولید نمی‌کند. در این حالت در توان خالص خروجی، کمبود وجود دارد. بدون بایاس فرکانس، این کمبود ناچیز خواهد بود زیرا وقتی فرکانس واقعی کمتر از فرکانس برنامه‌ریزی شده است هیچ جبران مثبت $B_f \Delta f$ به P_s افزوده نمی‌شود (یا از P_e کاسته نمی‌شود) و در نتیجه ACE کاهش خواهد یافت. منطقه برای تغذیه بار خود و تبادل برنامه‌ریزی شده، تولید کافی خواهد داشت اما برای کمک به‌مناطق به‌هم پیوسته مجاور به‌منظور افزایش فرکانس، خروجی اضافی تحویل نمی‌دهد.

خطای کنترل ایستگاه (SCE) عبارت است از مقدار تولید واقعی همه نیروگاههای منطقه منهای تولید خواسته شده به‌صورتی که در نقطه ۶ نمودار دیده می‌شود. این SCE به‌ازای بزرگتر بودن مقدار تولید درخواستی از تولید موجود، منفی است.

کلید تمامی عملکرد کنترل، مقایسه ACE با SCE است. اختلاف این دو، همان سیگنال خطا در نقطه ۷ نمودار است. اگر SCE و ACE، منفی و مساوی باشند کمبود خروجی منطقه، برابر افزونی تولید درخواستی بر تولید واقعی می‌شود و هیچ سیگنال خطایی به‌وجود نمی‌آید. ولی این افزونی تولید درخواستی باعث ارسال سیگنالی (نقطه ۱۱ از نمودار) به‌نیروگاهها می‌شود تا تولید خود را افزایش و اندازه SCE را کاهش دهند. در نتیجه افزایش خروجی منطقه در عین حال، اندازه ACE کاهش می‌یابد.

اگر ACE منفی‌تر از SCE باشد سیگنال خطایی برای افزایش λ منطقه وجود خواهد داشت و این افزایش به‌نوبه خود موجب ازدیاد تولید درخواستی نیروگاه خواهد شد (نقطه ۹). هر نیروگاه بر طبق اصول تعیین شده تسهیم اقتصادی، سیگنالی برای افزایش خروجی خود دریافت خواهد کرد.

این بحث دقیقاً فقط حالتی را در نظر می‌گیرد که تبادل خالص برنامه‌ریزی شده به‌طرف خارج منطقه (تبادل خالص برنامه‌ریزی شده مثبت)، بزرگتر از تبادل خالص واقعی است و ACE مساوی یا منفی‌تر از SCE است. خواننده باید بتواند با مراجعه به‌شکل ۹-۶، بحث را به‌حالات ممکن دیگر توسعه دهد.

1. Area Control Error

2. Station Control Error

نقطه ۱۰ از نمودار، محاسبه ضرایب جریمه هر نیروگاه را نشان می‌دهد. در اینجا ضرایب B برای محاسبه $\partial P_n / \partial P_n$ ذخیره شده‌اند. عوامل تعیین‌کننده ضرایب جریمه عبارت‌اند از: بارهای تطبیق نشده، نیروگاه‌هایی غیرمجاز در تغییر تولید خود و بارکرد خط ارتباطی. ضرایب جریمه به‌قسمتی (نقطه ۹) ارسال می‌شوند که تولید انفرادی نیروگاه را برای تهیه تولید کلی درخواستی نیروگاه با رعایت تسهیم اقتصادی مشخص می‌کند. نکته مهم دیگر (که در شکل ۹-۶ نمایانده نشده) جبران تبادل توان خالص برنامه‌ریزی شده است که متناسب با انتگرال دوره تناوب در فاصله از فرکانس واقعی تا نامی (۶۰ Hz)، یعنی:

$$\int_{f_a}^{f_o} T dt$$

تغییر می‌کند. جبران، در جهت کمک به کاهش تفاضل انتگرال گرفته شده به سمت صفر است تا از این طریق، دقت ساعتهای الکتریکی را حفظ کند.

مسائل

۹-۱ برای يك واحد تولیدی معین در داخل يك نیروگاه، سوخت ورودی بر حسب میلیون Btu بر ساعت به‌صورت تابعی از توان خروجی P بر حسب مگاوات چنین بیان شده‌است.

$$0.0001P^3 + 0.015P^2 + 3.0P + 90$$

(الف) معادله شیب هزینه سوخت بر حسب دلار بر مگاوات ساعت را به‌صورت تابعی از توان خروجی بر حسب مگاوات، بر پایه هزینه سوخت ۱۲۴۰ دلار بر میلیون Btu تعیین کنید.

(ب) معادله را برای يك تقریب خطی خوب شیب هزینه سوخت به‌عنوان تابعی از توان خروجی، بیابید؟

(ج) میانگین هزینه سوخت بر مگاوات ساعت، وقتی که نیروگاه ۱۰۰ MW تحویل می‌دهد چقدر است؟

(د) هزینه سوخت اضافی تقریبی بر ساعت برای افزایش خروجی نیروگاه از ۱۰۰ به ۱۰۱ MW چقدر است؟

۹-۲ شیب هزینه‌های سوخت دو واحد يك نیروگاه عبارت‌اند از:

$$\frac{dF_1}{dP_1} = 0.010P_1 + 11.0 \quad \text{و} \quad \frac{dF_2}{dP_2} = 0.012P_2 + 8.0$$

که در آن، F بر حسب دلار بر ساعت و P بر حسب مگاوات است. اگر هر دو واحد دائماً در حال کار و حداکثر حداقل بار هر کدام از آنها ۶۲۵ و ۱۰۰ MW باشد، λ بر حسب

دولار بر مگاوات ساعت، را به صورت تابعی از خروجی نیروگاه بر حسب مگاوات، به ازای کمترین هزینه سوخت - وقتی که بار کل از ۲۰۰ تا ۱۲۵۰ MW تغییر می کند - رسم کنید.

۳-۹ میزان صرفه جویی دلار بر ساعت را برای بارکرد اقتصادی واحدهای مسئله ۲-۹ در مقایسه با تقسیم مساوی خروجی، وقتی که خروجی کل ۷۵۰ MW است، بیابید.

۴-۹ نیروگاهی برای تغذیه شینه خود دو ژنراتور دارد که هیچ کدام زیر ۱۰۰ MW یا بالای ۶۲۵ MW کار نمی کنند. شیب هزینه های آنها با P_1 و P_2 بر حسب مگاوات عبارت اند از:

$$\frac{dF_1}{dP_1} = 0.012P_1 + 8.0 \quad \$/MWh$$

$$\frac{dF_2}{dP_2} = 0.018P_2 + 7.5 \quad \$/MWh$$

ای نیروگاه را به ازای تسهیم اقتصادی وقتی که $P_1 + P_2$ مساوی مقادیر زیر است بیابید.

۲۰۰ MW (الف) ۵۰۰ MW (ب) و ۱۱۵۰ MW (ج)

۵-۹ اتلاف توان سیستم مثال ۳-۹ را از ضرایب اتلاف همان مثال، و از $|I^2||R|$ به ازای $I_1 = 1.5 \angle 0^\circ p.u.$ و $I_2 = 1.2 \angle 0^\circ p.u.$ محاسبه کنید. $V_2 = 1.0 \angle 0^\circ p.u.$ فرض می شود.

۶-۹ ضرایب اتلافی را که مقدار واقعی اتلاف توان را در سیستم مثال ۳-۹ به دست می دهند به ازای $I_1 = 0.8 \angle 0^\circ p.u.$ ، $I_2 = 0.8 \angle 0^\circ p.u.$ و $V_2 = 1.0 \angle 0^\circ p.u.$ بیابید.

۷-۹ یک سیستم قدرت فقط دو نیروگاه دارد و می توانند توان را به صورت اقتصادی به میزان $P_1 = 140 MW$ و $P_2 = 250 MW$ تسهیم کنند. ضرایب اتلاف عبارت اند از:

$$B_{11} = 0.10 \times 10^{-2} MW^{-1}$$

$$B_{12} = -0.01 \times 10^{-2} MW^{-1}$$

$$B_{22} = 0.13 \times 10^{-2} MW^{-1}$$

افزایش بار کل سیستم به میزان ۱ مگاوات، ۱۲ دلار بر ساعت هزینه اضافی در بر خواهد داشت. (الف) ضریب جریمه نیروگاه ۱ را بیابید، (ب) هزینه اضافی بر ساعت، برای افزایش خروجی این نیروگاه به اندازه یک مگاوات را حساب کنید.

۸-۹ در سیستمی شامل دو نیروگاه، شیب هزینه ها بر حسب دلار بر مگاوات ساعت هرگاه P_1 و P_2 بر حسب مگاوات بیان شوند عبارت اند از:

$$\frac{dF_1}{dP_1} = 0.008P_1 + 80 \quad \frac{dF_2}{dP_2} = 0.012P_2 + 90$$

سیستم براساس تسهیم اقتصادی بار بهره‌برداری می‌شود به طوری که $P_1 = P_2 = 500 \text{ MW}$ و $\partial P_L / \partial P_2 = 0.2$ ضریب جریمه نیروگاه ۱ را بیابید.

۹-۹ یک سیستم قدرت براساس تسهیم اقتصادی بار بهره‌برداری می‌شود و λ سیستم ۱۲۵ دلار بر مگاوات ساعت است. اگر افزایش خروجی نیروگاه ۲ به میزان 100 kW (درحالی که خروجیهای دیگر ثابت نگه داشته می‌شوند) باعث افزایش اتلاف $|I|^2 R$ سیستم به اندازه 12 kW شود، هزینه اضافی تقریبی بر ساعت برای افزایش خروجی این نیروگاه به میزان 1 MW چقدر است؟

۹-۱۰ یک سیستم قدرت را فقط دو نیروگاه تغذیه می‌کنند و هر دو نیروگاه براساس تسهیم اقتصادی کار می‌کنند. شیب هزینه در شینه نیروگاه ۱، 110 و در نیروگاه ۲، 150 دلار بر مگاوات ساعت است. کدام نیروگاه ضریب جریمه بزرگتری دارد؟ اگر هزینه افزایش 1 MW به بار سیستم، 125 دلار بر ساعت باشد ضریب جریمه نیروگاه ۱ چقدر است؟

۹-۱۱ در سیستم مثال ۹-۵، هرگاه $\lambda = 135$ دلار بر مگاوات ساعت و هزینه سوخت حالت بی‌باری نیروگاه ۲ و ۱ به ترتیب 200 و 400 دلار بر ساعت باشد (الف) P_1 ، P_2 و توان تحویلی به بار را در وضعیت تسهیم اقتصادی و بسا در نظر گرفتن اتلاف انتقال بیابید.

(ب) P_1 و P_2 را به‌ازای توان تحویلی به بار در قسمت (الف) ولی بدون دخالت اتلاف انتقال به‌دست آورید. البته باید اتلاف انتقال را در تعیین توان کل ورودی به سیستم در نظر گرفت.

(ج) هزینه سوخت کل را بر حسب دلار بر ساعت برای قسمتهای (الف) و (ب) حساب کنید.