طراحی چارچوب پرداخت هزینه خدمات جانبی پایداری سیگنال کوچک به پایدارسازهای سیستم قدرت در محیط تجدید ساختار

عرفان ریاحی سامانی، حسین سیفی و محمدکاظم شیخ‌الاسلامی

چکیده: حفظ محدوده‌های مجاز بهره‌برداری از جمله وظایف اصلی بهره‌بردار مستقل سیستم[1] (ISO) می‌باشد. افزایش روزافزون مصرف انرژی الکتریکی و تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت باعث شده است که این سیستم‌ها در نزدیکی حدود پایداری خود کار کنند. یکی از مسائلی که در بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت باید مد نظر قرار گیرد پایداری سیستم در مقابل اغتشاشات سیگنال کوچک می‌باشد. از جمله تجهیزاتی که می‌تواند در بهبود این پایداری مورد استفاده ISO قرار گیرد، می‌توان به پایدارساز سیستم قدرت[2] اشاره نمود. در این مقاله ابتدا مسئله تأثیر PSS بر پایداری سیگنال کوچک و تأثیر آن بر هزینه تولید پرداخته شده است و برای این منظور الگوریتم NSGA-II[3] مورد استفاده قرار گرفته شده است. همچنین سعی شده است تأثیر PSS واحدهای تولیدی در محیط تجدید ساختار بررسی شود و خدمتی که این تجهیزات ارائه می‌کنند به‌عنوان یک خدمت جانبی جدید معرفی و ارزش‌گذاری گردد. همچنین چارچوب مناسبی برای پرداخت عادلانه به PSSهای شبکه بابت خدمتی که ارائه می‌نمایند، معرفی گردد.

کلید واژه: **خدمات جانبی، پایداری سیگنال کوچک، پایدارساز سیستم قدرت، بازار برق.**

۱- مقدمه

یکی از اهداف اصلی تجدید ساختار در صنعت برق، جداکردن زنجیره به هم پیوسته تولید تا مصرف است. از این رو در کشورهای مختلف سیاست‌گذاری‌ها به‌نحوی است که صنعت برق به سمت رقابتی‌شدن کامل حرکت می‌کند، لذا خدمات گوناگونی که قبلاً توسط شرکت‌های برق به‌صورت یک‌پارچه ارائه می‌شد، اکنون به‌صورت مجزا ارائه می‌شود. گرچه در بازار برق، انرژی الکتریکی به‌عنوان کالای اصلی مورد داد و ستد قرار می‌گیرد اما انجام این داد و ستد و برآوردن نیاز مصرف توان حقیقی (MW) و انرژی مصرفی (MWh) مشتریان بازار، منوط به فراهم‌آوردن خدمات دیگری است که تحت عنوان خدمات جانبی[4] به‌صورت جداگانه عرضه و قیمت‌گذاری می‌شوند.

خدمات جانبی از جمله ابزارهای اصلی در کنترل و بهبود وضعیت بهره‌برداری سیستم توسط ISO می‌باشد. خدمات جانبی به‌طور عمده به خدماتی گفته می‌شود که علاوه بر انرژی برای بهره‌برداری ایمن از شبکه انتقال برق لازم است. اما مهم‌ترین مسأله در مورد خدمات جانبی نحوه تأمین آن و مسایل مرتبط دیگر همچون قیمت‌گذاری آن است؛ چرا که خدماتی لازم و بدیهی هستند و از طرفی قابل ارزش‌گذاری صریح، شفاف و واضح نمی‌باشند. کنترل‌کننده‌های نیروگاهی خصوصاً PSS از جمله تجهیزاتی هستند که از خدمات آنها در جهت تأمین امنیت و افزایش پایداری شبکه استفاده می‌شود. دستورالعمل کمیسیون ملی نظارت بر انرژی (FERC)[5]، شش نوع خدمات جانبی را معرفی و تعرفه‌های مربوط به هر یک از آنها را مشخص کرده است. در این مقاله سعی بر این است که خدمتی که PSSها در پایداری و افزایش امنیت سیستم ارائه می‌نمایند، تحت عنوان یک خدمت جانبی جدید معرفی و ارزش‌گذاری شود.

تاکنون یک ساختار مشخص عملی برای ارزش‌گذاری و مدیریت خدمت پایداری که توسط این تجهیزات ارائه می‌شود، وجود نداشته است. در بازارهای مختلف، کنترل و تنظیم PSSها توسط ISO صورت می‌گیرد و عموماً به‌صورت اجباری می‌بایست در مدار باشند و عملاً هیچ‌گونه پرداختی به آنها بابت خدمتی که ارائه می‌نمایند، نمی‌شود.

در شبکه‌هایی که حاشیه امنیت پایداری سیگنال کوچک از نظر بهره‌بردار سیستم مهم باشد، با استفاده از تجهیزات کنترل نیروگاهی از قبیل PSS، این حاشیه امنیت را ایجاد می‌شود. این عملکرد ISO باعث تغییراتی در بازار توان حقیقی و در پی آن باعث سود و زیان برخی تولیدکنندگان می‌شود که این سود و زیان‌ها می‌بایست محاسبه و به‌صورت عادلانه بین واحدهای تولیدی تقسیم شود.

در سیستم‌های سنتی که به‌صورت انحصاری اداره می‌شدند تولید نیروگاه‌ها و تنظیمات تجهیزات کنترلی آنها با توجه به شرایط بهره‌برداری به‌صورت اجباری تعیین می‌گردید. اما در محیط نوین رقابت و تجدید ساختار، از آنجا که هدف اساسی بازیگران بازار، بیشینه‌کردن درآمد و سود خود است، امنیت سیستم نیز از همین دیدگاه مورد توجه بازیگران قرار می‌گیرد. برای حفظ این امنیت ISO باید سیاست‌های خاصی از جمله ارزش‌گذاری برای مسأله حفظ امنیت را در محیط جدید به‌کار گیرد. با افزایش میزان مصرف، احتمال وقوع پرشدگی[6] خطوط و تخطی از حدود مجاز پایداری در شبکه پدید خواهد آمد، از این رو تأثیر تجهیزات کنترلی از قبیل PSS در بهبود وضعیت بهره‌برداری بیشتر احساس خواهد شد. در این شرایط، توانایی تجهیزات کنترلی شبکه در اجتناب از ایجاد برخی پیشامدها از قبیل پرشدگی خطوط و تخطی از حدود امنیت سیستم، به معنی ایجاد منفعت اقتصادی برای تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان است.

این مقاله در تاریخ ۲۲ تیر ماه ۱۳۸۹ دریافت و در تاریخ ۳ مهر ماه ۱۳۹۰ بازنگری شد.

عرفان ریاحی سامانی، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، (email: eriahi@modares.ac.ir).

حسین سیفی، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، (email: seifi_ho@modares.ac.ir).

محمدکاظم شیخ‌الاسلامی، دانشگاه تربیت‌مدرس، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، (email: aleslam@modares.ac.ir).

1. Independent System Operator
2. Power System Stabilizer
3. Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm (Version II)
4. Ancillary Services
5. Federal Energy Regulatory Commission
6. Congestion

Archive of SID

www.SID.ir

با بررسی تأثیر پایدارسازهای سیستم قدرت در محیط تجدید ساختار سؤالاتی از جمله موارد زیر مطرح می‌شود که در این مقاله به بررسی آنها پرداخته‌ایم:

۱) آیا خدماتی که تجهیزات کنترلی از قبیل PSS در سیستم قدرت ارائه می‌کنند، در محیط تجدید ساختار ارزش اقتصادی دارند؟

۲) کدام یک از این تجهیزات سهم بیشتری در ارائه این خدمت دارند و کدام کمتر؟

خدماتی که تجهیزات کنترلی ارائه می‌کنند عموماً در حوزه خدمات جانبی مطرح بوده و در راستای بهبود وضعیت بهره‌برداری و حفظ امنیت شبکه از آنها استفاده می‌شود. برای هر خدمت جانبی ابتدا باید ارزش ارائه خدمت در بازار مشخص شود و سپس متناسب با ارزش آن به بازیگرانی که این خدمت را ارائه می‌نمایند، پرداخت مناسب صورت پذیرد. در این راستا توسط نویسندگان این مقاله در [۱] نقش عملکرد فنی و تأثیر اقتصادی PSSها در بهره‌برداری از بازار نشان داده شد.

به‌دلیل اهمیت مسأله امنیت سیستم و استفاده از خدمات جانبی در محیط تجدید ساختار، تحقیقات زیادی در این خصوص صورت گرفته است که عموماً این تحقیقات در چارچوب خدمات جانبی که FERC معرفی نموده است، می‌باشد و در خصوص موضوع این مقاله تحقیقات محدودی صورت گرفته است. در [۲] و [۳] با استفاده از پخش بار بهینه مقید به قید پایداری سیگنال کوچک سیستم، این پایداری ارزش‌گذاری شده است و در [۴] و [۵] با استفاده از تئوری بازی سهم هر یک از PSSها در بازار مشخص شده است.

در [۶] تقسیم‌بندی جامعی از انواع پایداری صورت گرفته است و در [۷] و [۸] خدمات جانبی کنترل ولتاژ و فرکانس از دیدگاه فنی و اقتصادی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در برخی از این پژوهش‌ها به مسأله قیمت‌گذاری مسأله امنیت و پایداری از جمله پایداری ولتاژ، گذرا و سیگنال کوچک پرداخته شده است. در [۹] مسأله امنیت بر اساس مدت زمان مورد نظر برای مطالعه به قسمت‌های امنیت در بهره‌برداری زمان واقعی، کوتاه‌مدت (یک روز قبل و یا هفتگی)، میان‌مدت (ماهانه و یا سالانه) و بلندمدت (سالانه و بیشتر) تقسیم‌بندی شده است.

در [۱۰] و [۱۱] روش‌های مختلفی در خصوص پخش بار بهینه با در نظر گرفتن قیود مختلف امنیت سیستم اشاره شده است. در [۱۲] و [۱۳] تأثیر قید پایداری ولتاژ بر شرایط بازار بررسی شده است. این موضوع با در نظر گرفتن قید پایداری دینامیکی یا گذرا در [۱۴] تا [۱۷] مطالعه شده است. در [۱۸] تا [۲۳] با استفاده از پخش بار بهینه مقید به قیود امنیت سیستم، با اضافه‌نمودن قیود پایداری ولتاژ یا پایداری دینامیکی سیستم، آنها را ارزش‌گذاری کرده‌اند.

با توجه به قابلیت‌های روش‌های تکاملی در حل مسایل بهینه‌سازی مراجع مختلفی از این روش‌ها خصوصاً روش NSGA-II استفاده نموده‌اند [۲۴] تا [۲۶]. در ادامه مطالعات که در [۱] به آن اشاره شده است در این تحقیق قصد داریم چارچوبی ارئه شود که در آن بتوان سهم و نقش هر PSS در بهبود شرایط اقتصادی مشخص و متناسب با آن هزینه ارائه خدمت به آن پرداخت گردد. در مقاله حاضر تأثیر پایدارسازهای سیستم قدرت در محیط تجدید ساختار با استفاده از یک بهینه‌سازی چندهدفه بررسی شده است و ارزش اقتصادی خدماتی که این تجهیزات کنترلی در سیستم قدرت ارائه می‌کنند، مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر هر PSS بر شرایط بازار نیز به‌صورت جداگانه بررسی شده که متناسب با آن ارزش اقتصادی این تجهیز و خدمتی که ارائه می‌نمایند، محاسبه شده است.

در ادامه در قسمت دوم به شرح مدل بازار پرداخته شده است و در قسمت سوم به معرفی و نحوه محاسبه توابع هدف هزینه تولید، پایداری سیگنال کوچک و مدل‌سازی شبکه اشاره شده است. در انتهای این گزارش نتایج عددی و نمودارهای حاصل از تحلیل ارائه شده است.

۲- مدل‌سازی پایه

۲-۱ مدل بازار

مدل‌های مختلفی برای بازارهای انرژی در دنیا معرفی شده است که به‌صورت کلی می‌توان آنها را به سه مدل اصلی، حوضچه[1]، مدل قرارداد دوطرفه[2] و مدل تلفیقی از قراردادهای دوطرفه و معاملات حوضچه تقسیم نمود. البته مبانی تشکیل بازار در تمامی بازارها تقریباً یکسان است. این مبانی عموماً عبارتند از: رقابت بین تولیدکنندگان برق، تداوم انحصاری‌بودن بخش انتقال و تشکیل نهادی مستقل برای کنترل و بهره‌برداری شبکه انتقال و حفظ امنیت سیستم قدرت.

در مدل حوضچه، بازیگران اصلی بازار شامل عرضه‌کنندگان (اعم از شرکت‌های تولید[3] و تأمین‌کنندگان توان)، خریداران (اعم از شرکت‌های توزیع[4] و مصرف‌کنندگان بزرگ)، شرکت‌های انتقال[5] و مدیر بازار و بهره‌بردار سیستم می‌باشند. در مدل‌های حوضچه‌ای نهادی برای بهره‌برداری شبکه انتقال لازم است که بهره‌بردار مستقل سیستم (ISO) نامیده می‌شود و به هیچ یک از بازیگران بازار وابسته نیست. وظیفه ISO پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار در منطقه خود، تعیین آرایش تولید واحدهای تولید برای تغذیه بار و حفظ امنیت سیستم است. مدل قراردادهای دوطرفه با مدل حوضچه دو تفاوت اساسی دارد. اولین تفاوت در این است که نقش ISO در این مدل محدودتر است. تفاوت دوم آن است که خریدار و فروشنده می‌توانند برای انرژی و ظرفیت با تأیید ISO، قرارداد ببندند. در این ساختار از سیستم انتقال به‌عنوان شاه‌راهی برای انجام معاملات استفاده می‌شود. در مدل حوضچه، واحدهای تولیدی انتخاب‌شده برای ارسال برق به حوضچه باید قیمت پیشنهادی خود برای انرژی را از روز پیش به همراه میزان انرژی به ISO اعلام کنند. وظیفه ISO تضمین وجود منابع کافی برای انجام معاملات و حفظ امنیت سیستم است.

در بازار تلفیقی از قراردادهای دوطرفه و معاملات حوضچه، خواص دسترسی مستقیم مدل قراردادهای دوطرفه با مفاهیم معاملات حوضچه تلفیق می‌شوند و بازیگران (خریدار و فروشنده) که نمی‌توانند یا نمی‌خواهند قراردادهای دوطرفه ببندند در حوضچه داد و ستد می‌کنند. در این بازار واحدهای تولیدی باید قیمت پیشنهادی خود برای انرژی را به همراه میزان انرژی به ISO اعلام کنند و اگر محدودیت انتقال وجود نداشته باشد، تمام قراردادهای دوطرفه برای تغذیه بارهایشان برنامه‌ریزی می‌شوند. باقیمانده مصرف از طریق تعیین آرایش تولید اقتصادی واحدهای تولیدی شرکت‌کننده در حوضچه تأمین می‌گردد.

در این مقاله از مدل حوضچه جهت مطالعه استفاده شده است که به سادگی می‌توان آن را به مدل‌های دیگر بازار تعمیم داد. به دلیل این که هدف اصلی در این مقاله بررسی تأثیرات PSSها بر شرایط بازار است، فرض شده است پیشنهاددهندگان قیمت به بازار، تنها تولیدکنندگان

1. Pool
2. Bilateral Contracts
3. GenCo's
4. DisCo's
5. TransCo's

Archive of SID
www.SID.ir

هستند و مصرف‌کنندگان فقط میزان مصرف خود را پیش‌بینی و آن را به مدیریت بازار اعلام می‌کنند. پرداخت‌های مالی بر اساس قیمت‌های گره‌ای فرض شده است که مصرف‌کنندگان یا تولیدکنندگان بر اساس آن پرداخت یا دریافت خواهند داشت.

۲-۲ مدل‌سازی

مسأله ارزش‌گذاری خدمات ارائه‌شده به‌وسیله PSS ها را می‌توان در چارچوب یک مسأله بهینه‌سازی مدل کرد. در بازار برق، از یک طرف هدف ISO به‌عنوان برنامه‌ریز سیستم، کمینه‌کردن هزینه تولید یا افزایش رفاه اجتماعی و از طرف دیگر حفظ امنیت شبکه است. در این مقاله نیز جهت بررسی تأثیرات ناشی از تنظیمات ISO بر شرایط حاکم بر بازار، سود و زیان شرکت‌کنندگان و همچنین توابع عملکرد شبکه، با یک مسأله بهینه‌سازی چندهدفه مواجه هستیم که کماکان هدف آن کمینه‌کردن هزینه‌های تأمین بار در کوتاه‌مدت و افزایش شاخص اندیس پایداری سیگنال کوچک می‌باشد. در این مقاله با توجه به قابلیت‌های روش‌های تکاملی در حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه از روش NSGA-II استفاده شده است. در ادامه به معرفی تابع هدف و قیود مسئله پرداخته شده است.

۲-۲-۱ توابع هدف

یکی از وظایف ISO حفظ محدوده‌های امنیتی سیستم، حفظ لحظه به لحظه تعادل تولید و مصرف در سطح شبکه به همراه بهینگی اقتصادی با در نظر گرفتن قیود حاکم بر شبکه است.

پایداری نسبت به اغتشاشات کوچک، توانایی سیستم را در حفظ سنکرونیسم بر اثر بروز اغتشاش‌های کوچک در سیستم نشان می‌دهد. این اغتشاش‌ها به علت تغییرات دایمی بار همیشه در سیستم وجود دارند. اگر اغتشاش‌ها به اندازه کافی کوچک باشند می‌توان با خطی‌کردن معادلات حاکم بر سیستم حول نقطه کار، مسأله را به‌صورت مسأله‌ای خطی بررسی کرد. ناپایداری سیگنال کوچک می‌تواند به‌علت کمبود گشتاور سنکرون‌کننده یا کمبود میرایی در سیستم اتفاق بیفتد. این نوع پایداری به عواملی از جمله نقطه کار سیستم هنگام بروز خطا، سیستم انتقال و سیستم‌های کنترل نیروگاهی بستگی دارد.

عموماً تابع هدف اصلی ISO افزایش رفاه اجتماعی در کنار قیود امنیتی است. با توجه به این که در مدل بازار مورد نظر این مقاله، سمت مصرف در بازار شرکت نمی‌کند، بیشینه‌سازی رفاه اجتماعی معادل کمینه‌سازی هزینه تولید خواهد بود. بنابراین در این مطالعه هزینه تولید واحدهای پیشنهادکننده، یکی از توابع هدف اصلی می‌باشد. از طرف دیگر ISO مایل است پایداری سیگنال کوچک سیستم در بهترین شرایط بهره‌برداری قرار داشته باشد، این در حالی است که هزینه می‌بایست کمترین باشد. با توجه به آنچه گفته شد، ISO با یک مسأله بهینه‌سازی چندهدفه مواجه خواهد بود که در (۱) به آن اشاره شده است

$$\begin{aligned}&\max_{\overline{P}_s,\overline{K}_{Pss}\in S}\{-Cost, SSSI\}\\&=\max\{-1\times\sum_{i=1}^{n_{Gen}}\sum_{b=1}^{n_{Gi}}C_{isb}P_{isb}\ ,\ \min(\overline{\zeta})\}\\&\text{s.t.}\quad \overline{H}=0\ ,\ \overline{G}\le 0\end{aligned}\qquad(1)$$

که در آن تابع $Cost$ هزینه تولید واحدها می‌باشد که طبق (۲) محاسبه می‌شود. $\overline{G}$ و $\overline{H}$ به‌ترتیب بردارهای قیود تساوی و نامساوی در روند بهینه‌سازی می‌باشند

$$\min\sum_{i=1}^{n_{Gen}}\sum_{b=1}^{n_{Gi}}C_{isb}P_{isb}\qquad(2)$$

با خطی‌کردن معادلات سیستم، شاخص پایداری سیگنال کوچک (SSSI)[1] با استفاده از مقادیر ویژه سیستم $(\lambda_i=\alpha_i+j\omega_i)$ به‌صورت زیر خواهد بود

$$SSSI=\min(\overline{\zeta})\ ,\ \overline{\zeta}=\begin{bmatrix}\zeta_1\\ \vdots\\ \zeta_{n_{State}}\end{bmatrix}\ ,\ \zeta_i=\frac{-\alpha_i}{\sqrt{\alpha_i^2+\omega_i^2}}\qquad(3)$$

با توجه به کارایی الگوریتم‌های تکاملی در بهینه‌سازی چندهدفه، در این مقاله با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه (NSGA-II) عملکرد PSS ها بررسی و برای توابع هدف اشاره‌شده بهینه‌سازی صورت گرفته است. روش NSGA-II توابع هدف را به‌صورت مستقل از هم، بر اساس دو اصل فاصله ازدحام[2] و رتبه‌بندی غلبه‌نشده ارزیابی و بهینه می‌کند.

۲-۲-۲ قیود

مهم‌ترین قیود در مسأله مورد نظر عبارتند از:

توازن تولید و مصرف: قید تساوی $(\overline{H}=0)$ در مدل بهینه‌سازی، توازن مقدار تولید و مصرف بر روی کلیه شین‌ها می‌باشد. این قید برای توان‌های اکتیو و راکتیو به‌صورت (۴) در نظر گرفته شده است

$$\begin{aligned}&P_{iG}-P_{id}\\&\quad -V_i\sum_j^N V_j[G_{ij}\cos(\delta_i-\delta_j)+B_{ij}\sin(\delta_i-\delta_j)]=0\\&Q_{iG}-Q_{id}\\&\quad -V_i\sum_j^N V_j[G_{ij}\sin(\delta_i-\delta_j)-B_{ij}\cos(\delta_i-\delta_j)]=0\end{aligned}\qquad(4)$$

محدودیت‌های شبکه انتقال: از جمله محدودیت‌های اساسی که در این مطالعه از اهمیت خاصی برخوردار است، محدودیت‌های شبکه انتقال است. در (۵) محدوده‌های جریان خطوط تعریف شده است. در صورتی که خط انتقال بین شین iام و j ام باشد این محدودیت به‌صورت (۵) خواهد بود

$$\begin{aligned}&I_{ij\min}\le I_{ij}\le I_{ij\max}\\&I_{ji\min}\le I_{ji}\le I_{ji\max}\end{aligned}\qquad(5)$$

محدودیت‌های ولتاژ: از جمله محدودیت‌های کلی شبکه قدرت که در روند بهینه‌سازی اعمال می‌شود در نظر گرفتن کمترین و بیشترین مقدار دامنه ولتاژ در شین‌های PQ است که مطابق (۶) در محدوده $V_{i\min}$ تا $V_{i\max}$ در نظر گرفته شده است. شین‌های PV دارای مقدار مشخص و ثابت هستند که توسط ISO کنترل می‌شوند.

$$V_{i\min}\le V_i\le V_{i\max}\qquad(6)$$

که در آن i شاخص شین‌های PQ است.

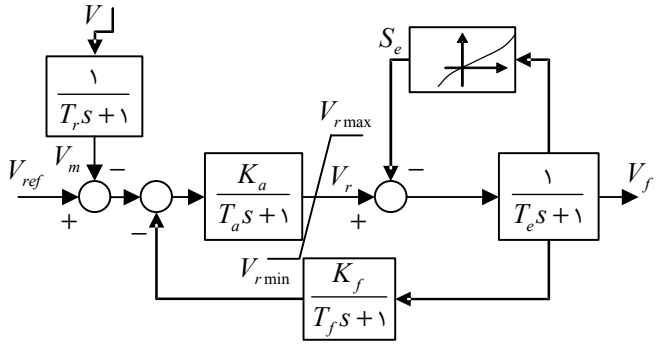
محدودیت‌های تولید و پیشنهادهای تولید: تولید توان اکتیو، راکتیو و پیشنهادهای تولید و مصرف نیز به‌صورت (۷) با محدودیت مواجه است. همچنان که از رابطه مشخص است پیشنهادهای تولید در یک محدوده حد پایین و حد بالای تولید واحدها به بازار ارائه می‌شود

$$\begin{aligned}&P_{is\min}\le P_{is}\le P_{is\max}\quad,\quad i=1,\dots,n_{Gen}\\&Q_{iG\min}\le Q_{iG}\le Q_{iG\max}\quad,\quad i=1,\dots,n_{Gen}\end{aligned}\qquad(7)$$

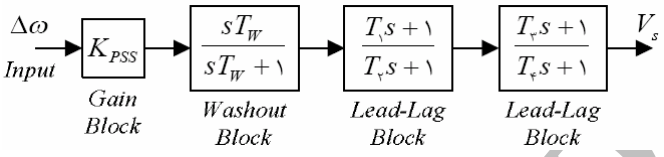
1. Small Signal Stability Index
2. Crowding Distance

Archive of SID

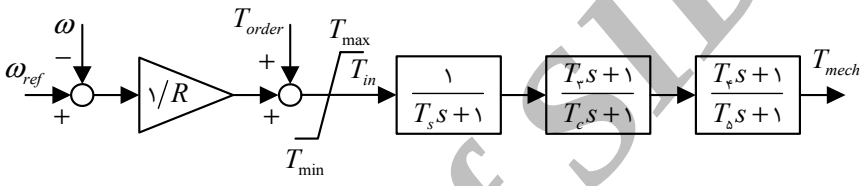
www.SID.ir



شکل ۱: بلوک دیاگرام AVR.



شکل ۲: بلوک دیاگرام پایدارساز سیستم قدرت.



شکل ۳: بلوک دیاگرام گاورنر.

۲-۲-۳ مدل‌سازی تجهیزات کنترلی

برای شبیه‌سازی رفتار سیستم تحت شرایط مختلف نیازمند مدل‌سازی عناصری از سیستم هستیم که بر رفتار سیستم تحت آن شرایط تأثیر می‌گذارد. هنگامی که بخواهیم رفتار ماشین‌های سنکرون را در مطالعات پایداری سیستم قدرت به‌طور دقیق مدل کنیم، ضروری است که سیستم‌های تحریک ماشین‌های سنکرون با جزئیات کافی مدل شوند. توابع کنترلی و حفاظتی که در مطالعات پایداری سیگنال کوچک مهم است شامل تنظیم‌کننده ولتاژ، پایدارساز سیستم قدرت و گاورنر می‌باشد. در بررسی پایداری سیگنال کوچک سیستم قدرت، تمامی المان‌های موجود در سیستم می‌بایست به‌صورت کامل مدل شوند. از جمله می‌توان به AVR، پایدارساز سیستم قدرت و گاورنر اشاره کرد.

مدل AVR: کنترل ولتاژ در سیستم‌های قدرت همواره یکی از مهم‌ترین پارامترهای کنترلی است که توسط ISO کنترل می‌شود. سیستم AVR واحدهای تولیدی به‌صورت خودکار و متناسب با تنظیمات آن در شرایط گوناگون بهره‌برداری وارد عمل می‌شود و ولتاژ شین‌ها را در یک محدوده مناسب کنترل می‌کند. در شکل ۱ بلوک دیاگرام AVR ارائه شده است.

مدل پایدارساز سیستم قدرت: یکی از کنترل‌کننده‌های کمکی است که با نصب بر روی سیستم تحریک نیروگاه‌ها به بهبود میرایی نوسانات الکترومکانیکی توربین- ژنراتور کمک می‌کند. عملکرد مطلوب پایدارساز بستگی به طراحی مناسب با توجه به مشخصات شبکه و نیروگاه دارد. در شکل ۲ بلوک دیاگرام پایدارساز ارائه شده است.

مدل گاورنر: گاورنر سرعت مکانیکی را اندازه‌گیری می‌کند و کنترل لازم را جهت تغییر توان خروجی مکانیکی به‌گونه‌ای تنظیم می‌کند که تغییر بار را جبران کرده و فرکانس را به مقدار اسمی برگرداند. در شکل ۳ بلوک دیاگرام گاورنر ارائه شده است.

۳- چارچوب پیشنهادی

اولین گام در مطالعه، مشخص‌نمودن ارزش اقتصادی خدمتی است که با عملکرد فنی PSS ها در شبکه حاصل می‌شود. با توجه به اجباری‌بودن حضور این تجهیزات در شبکه، ارزش اقتصادی به‌دست آمده ناشی از عملکرد همه PSS ها خواهد بود. از این رو در گام بعد، می‌بایست سهم هر PSS در بهبود اقتصادی حاصل‌شده مشخص گردد. دو چارچوب اصلی برای محاسبه سهم هر PSS پیشنهاد شده که شامل موارد ذیل می‌باشد:

۱) محاسبه سهم هر PSS بدون تنظیم مجدد آنها.
۲) محاسبه سهم هر PSS با تنظیم مجدد آنها.

با در نظر گرفتن توابع هزینه تولید واحدهای نیروگاهی و تابع پایداری سیگنال کوچک (SSSI)، حضور تولیدکنندگان در یک بازار رقابتی در حالت‌های مختلف با حضور و یا عدم حضور PSS های واحدهای نیروگاهی، به‌صورت مجزا بررسی شود که در ادامه به تشریح آن پرداخته شده است. حالت‌های مورد مطالعه به شرح زیر می‌باشد:

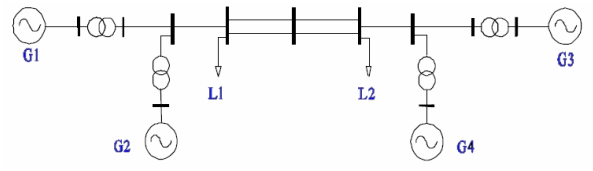
- در مداربودن همه PSS ها.
- در مدارنبودن همه PSS ها.
- خروج یک PSS در شرایطی که همه PSS ها در مدار باشند.
- در مداربودن همه PSS ها و تنظیم هم‌زمان آنها.
- خروج یک PSS در شرایطی که همه PSS ها در مدار باشند و PSS های باقیمانده هم‌زمان تنظیم شوند.

در حل این مسأله متغیرهای تصمیم‌گیری شامل تولید واحدها و گین PSS ها می‌باشند که در روند بهینه‌سازی هم‌زمان بهینه می‌شوند.

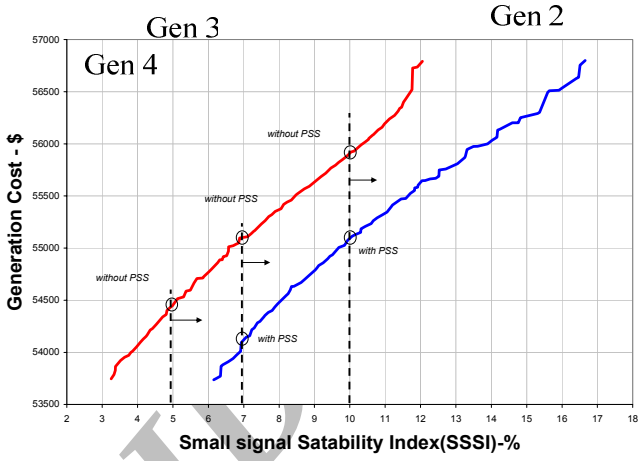
در هر مرحله از بهینه‌سازی چندهدفه، جبهه پرتو، برای توابع هدف استخراج خواهد شد و با مقایسه این جبهه‌ها در شرایط مختلف می‌توان تأثیر عملکرد PSS ها را بر توابع هدف مشخص نمود.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۴: شبکه دوناحیه‌ای نمونه.



شکل ۵: جبهه پرتو در دو حالت وجود یا عدم وجود PSS ها.

۳-۱ تأثیر PSS ها بدون تنظیم آنها

در این قسمت توابع هزینه تولید و پایداری سیگنال کوچک بر اساس مقدار تولید واحدها به‌ترتیب کمینه و بیشینه خواهند شد.

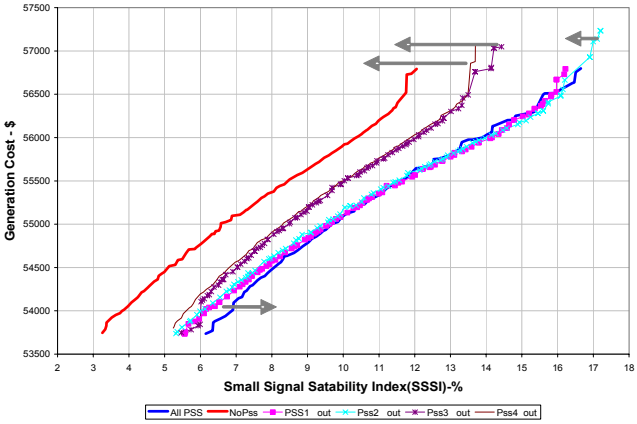
جهت بررسی تأثیر و ارزش وجود PSS ها لازم است مسأله یک بار با وجود همه PSS ها و بار دیگر بدون PSS تحلیل گردد. در نهایت با مقایسه این دو حالت می‌توان ارزش کل وجود PSS ها را ارزیابی نمود.

جهت مشخص‌نمودن تأثیر هر PSS بر بهینه‌بودن هر یک از توابع هدف و سهم این تجهیز از منفعت کل، لازم است وجود یا عدم وجود این تجهیز از لحاظ تأثیر آن بر شرایط بازار به‌صورت مجزا بررسی شود. با در نظر گرفتن قیود حاکم بر مسأله و اجباری‌بودن حضور PSS ها در شبکه، ابتدا شبکه را با همه PSS ها در نظر گرفته و بهینه‌سازی انجام می‌گیرد. سپس با خروج یک PSS و حضور دیگر PSS ها، شرایط عدم حضور آن PSS مجدداً بهینه‌سازی می‌گردد و این امر برای همه PSS ها تکرار می‌گردد و سهم هر PSS بر اساس (۸) محاسبه می‌گردد

$$B_{PSS\,i}=\frac{Cost^{out}_{PSS\,i}-Cost_{All\ PSS}}{Cost_{No\ PSS}-Cost_{All\ PSS}}=\frac{\Delta Cost_{PSS\,i}}{\Delta Cost_{Total}} \qquad (۸)$$

۳-۲ تأثیر PSS ها با تنظیم آنها

با توجه با این که تنظیم تجهیزات کنترلی می‌تواند در تأثیر آنها در شرایط بهره‌برداری از شبکه قدرت مؤثر باشد، در این قسمت توابع هزینه تولید و پایداری سیگنال کوچک بر اساس مقدار تولید واحدها و پارامتر کنترلی (K_{PSS}) بهینه خواهند شد. در این بهینه‌سازی همزمان با مشخص‌شدن مقدار تولید واحدها، تنظیم پارامتر کنترلی نیز از طرف ISO مشخص می‌شود. در شبکه‌های واقعی، تنظیمات این تجهیزات دائماً توسط ISO تغییر نمی‌کند بلکه بر اساس تغییرات کلی در شرایط شبکه و میزان بار، ممکن است تغییر در تنظیمات به آنها ابلاغ شود. در این قسمت سعی داریم نشان دهیم در صورتی که تنظیم مناسب برای تجهیزات کنترلی در نظر گرفته شود، این تجهیزات می‌توانند تأثیر و سهم متفاوت‌تری بر توابع هدف داشته باشند و به تبع آن سود آنها از کل سود متفاوت خواهد بود که سهم هر PSS بر اساس (۹) محاسبه خواهد شد



شکل ۶: جبهه پرتو برای تأثیر خروج PSS ها بر توابع هدف.

جدول ۱: پیشنهاد قیمت نیروگاه‌ها.

نام ژنراتور	قیمت پیشنهادی ($/MWh)
G۱	$MC_1=۲/۲۵P_1$
G۲	$MC_1=۱/۷۵P_1$
G۳ (swing)	$MC_1=۳/۸۷۵P_1$
G۴	$MC_1=۳P_1$

P_i: مقدار توان و MC_i: هزینه نهایی ژنراتور iام

$$B^{tune}_{PSS\,i}=\frac{Cost^{out}_{PSS\,i}-Cost^{tune}_{All\ PSS}}{Cost_{No\ PSS}-Cost^{tune}_{All\ PSS}}=\frac{\Delta Cost_{PSS\,i}}{\Delta Cost^{tune}_{Total}} \qquad (۹)$$

۴- نتایج عددی

روش پیشنهادی بر روی شبکه دوناحیه‌ای به‌عنوان یک شبکه نمونه پیاده شده است. در این شبکه ۴ واحد امکان پیشنهاد قیمت دارند که در شکل ۴ نشان داده شده است (جدول ۱). همچنان که در روند مقاله اشاره شد، می‌توان مواردی را که ناشی از وجود PSS ها تأثیر می‌پذیرند، به‌صورت زیر اشاره کرد:

- تغییر در هزینه تولید و تولید واحدها.
- تغییر در تابع پایداری سیگنال کوچک.

نتایج حاصل از بهینه‌سازی چندهدفه با وجود و عدم وجود PSS ها در شکل ۵ ارائه شده است. همچنان که شکل نشان می‌دهد، با به مدارآمدن تجهیزات کنترلی امکان بهره‌برداری از شبکه در شرایط پایداری بهتر و هزینه کمتر امکان‌پذیر خواهد بود. تفاوت هزینه در این دو حالت نشان‌دهنده ارزش اقتصادی PSS ها خواهد بود که این مقدار می‌بایست از مصرف‌کنندگان گرفته شود و به واحدهای دارای PSS تحویل گردد. هزینه‌ای که مصرف‌کنندگان پرداخت می‌کنند به‌عنوان هزینه امنیت سیستم خواهد بود. در این مقاله فرض بر این است که کلیه واحدها دارای PSS هستند و می‌بایست به‌صورت اجباری تجهیز کنترلی خود را در اختیار شبکه قرار دهند. تأثیر هر تجهیز کنترلی بر مقدار توابع هدف متفاوت خواهد بود، از این رو می‌بایست روش مناسبی برای تقسیم سود حاصله از حضور PSS ها مشخص گردد. ساده‌ترین روش، تقسیم به نسبت مساوی است که روش عادلانه‌ای نخواهد بود. با توجه به اجباری‌بودن ارائه خدمت پایداری در این مسأله، در اینجا با استفاده از خروج هر کدام از PSS ها و تأثیر آن بر تابع هزینه سهم هر PSS مشخص شده است. در شکل ۶ تأثیر ناشی از خروج PSS ها بر هزینه تولید واحدها نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است تأثیر هر تجهیز نسبت به دیگری متفاوت

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۲: تأثیر خروج PSSها بر توابع هدف.

	Generation Cost		
	Damping Factor 5%	Damping Factor 7%	Damping Factor 10%
No PSS	۵۵۹۲۱٫۶۵	۵۵۱۰۹٫۸۷	۵۴۴۴۸٫۰۳
PSS_1 out	۵۵۱۳۳٫۹۶	۵۴۲۳۴٫۳۰	۵۳۷۳۶٫۰۰
PSS_2 out	۵۵۱۹۳٫۹۷	۵۴۳۳۵٫۰۹	۵۳۷۳۶٫۰۰
PSS_3 out	۵۵۵۰۲٫۱۰	۵۴۵۰۳٫۱۱	۵۳۷۳۶٫۰۰
PSS_4 out	۵۵۵۱۲٫۱۲	۵۴۵۸۱٫۵۳	۵۳۷۳۶٫۰۰
ALL PSS	۵۵۱۱۴٫۳۷	۵۴۱۴۵٫۴۸	۵۳۷۳۶٫۰۰

جدول ۳: سهم PSSها از سود نهایی.

	PSS Benefit		
	Damping Factor 5%	Damping Factor 7%	Damping Factor 10%
PSS_1 out	۱۷٫۹	۷۹٫۹	۱۷۸٫۰
PSS_2 out	۷۲٫۶	۱۷۰٫۶	۱۷۸٫۰
PSS_3 out	۳۵۳٫۸	۳۲۱٫۷	۱۷۸٫۰
PSS_4 out	۳۶۳٫۰	۳۹۲٫۲	۱۷۸٫۰
Total Benefit 5%		۷۱۲/۰۳۱	
Total Benefit 7%		۹۶۴/۳۹۱	
Total Benefit 10%		۸۰۷/۲۸۳	

جدول ۴: تأثیر خروج PSSها بر توابع هدف و تنظیم مجدد PSSهای دیگر.

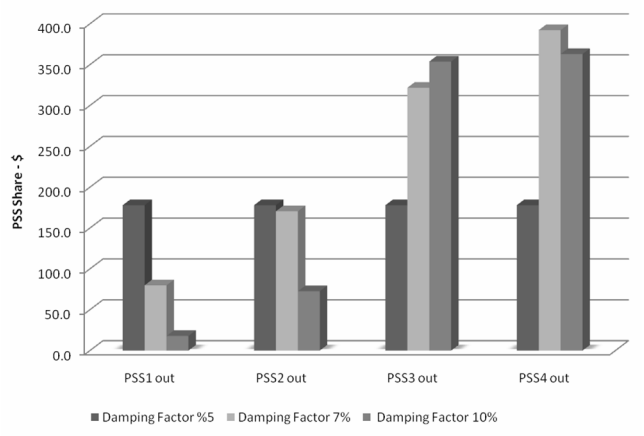
	Generation Cost with PSS tuning		
	Damping Factor 5%	Damping Factor 7%	Damping Factor 10%
No PSS	۵۵۹۳۰٫۳۶	۵۵۱۰۹٫۸۷	۵۴۵۱۵٫۶۱
PSS_1 out	۵۳۷۳۲٫۰۰	۵۳۷۳۲٫۰۰	۵۳۷۳۲٫۰۰
PSS_2 out	۵۳۷۹۵٫۱۰	۵۳۷۳۲٫۰۰	۵۳۷۳۲٫۰۰
PSS_3 out	۵۳۷۴۶٫۶۳	۵۳۷۳۲٫۰۰	۵۳۷۳۲٫۰۰
PSS_4 out	۵۳۷۸۹٫۲۰	۵۳۷۳۲٫۰۰	۵۳۷۳۲٫۰۰
ALL PSS	۵۳۷۳۲٫۰۰	۵۳۷۳۲٫۰۰	۵۳۷۳۲٫۰۰

جدول ۵: سهم PSSها از سود نهایی در شرایط تنظیم آنها.

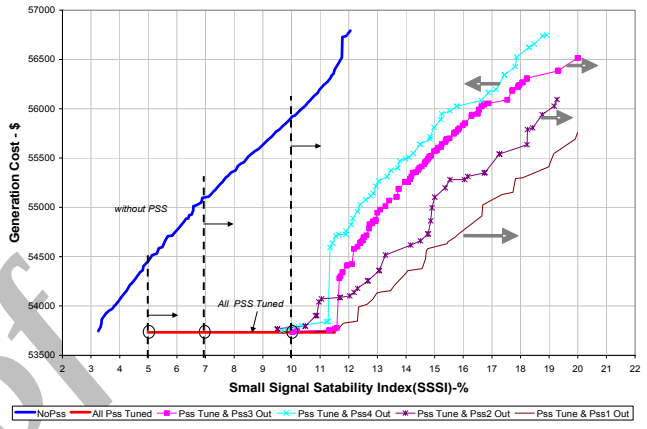
	PSS Benefit		
	Damping Factor 5%	Damping Factor 7%	Damping Factor 10%
PSS_1 out	۱۹۵٫۹۰	۳۴۴٫۴۷	۵۵۸٫۱۵
PSS_2 out	۱۹۵٫۹۰	۳۴۴٫۴۷	۵۴۲٫۱۳
PSS_3 out	۱۹۵٫۹۰	۳۴۴٫۴۷	۵۵۴٫۴۴
PSS_4 out	۱۹۵٫۹۰	۳۴۴٫۴۷	۵۴۳٫۶۳
Total Benefit 5%		۷۸۳/۶۱۰	
Total Benefit 7%		۱۳۷۷/۸۷۰	
Total Benefit 10%		۲۱۹۸/۳۶۰	

در صورتی که در مراحل بهینه‌سازی هم‌زمان PSSها تنظیم شوند همچنان که نتایج نشان می‌دهد، توابع هزینه تولید و پایداری سیگنال کوچک نسبت به حالت قبل تغییر محسوسی خواهند نمود. در این مسأله تا نزدیک میرایی ۱۰٪، تقریباً کمترین هزینه تولید را خواهیم داشت و حتی با خروج یک PSS می‌توان این شرایط بهینه را با تنظیم دیگر PSSها در نقطه بهینه قرار داد.

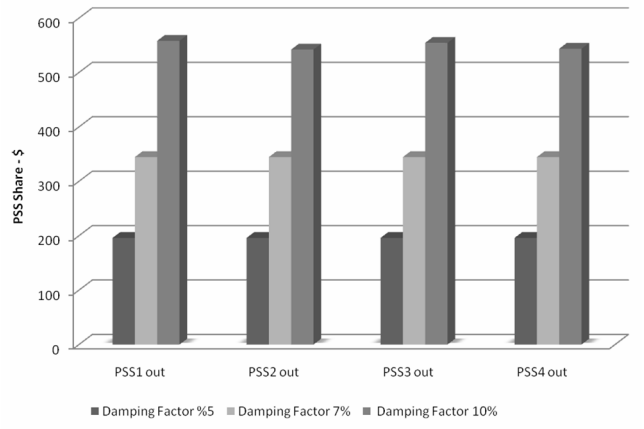
در جدول ۴ نتایج حاصل از بهینه‌سازی برای میرایی‌های ۵٪، ۷٪ و ۱۰٪ ارائه شده است و در جدول ۵ و شکل ۹ سهم هر PSS مشخص شده است.



شکل ۷: سهم PSSها از سود نهایی.



شکل ۸: جبهه پرتو برای تأثیر خروج PSS ها بر توابع هدف و تنظیم مجدد PSSهای دیگر.



شکل ۹: سهم PSSها از سود نهایی.

خواهد بود که با توجه به تأثیر محاسبه‌شده، برخی واحدها سود بیشتر کسب نموده‌اند.

در جدول ۲ نتایج حاصل از بهینه‌سازی برای میرایی‌های ۵٪، ۷٪ و ۱۰٪ ارائه شده است و در جدول ۳ و شکل ۷ سهم هر PSS از سود نهایی مشخص شده است.

همچنان که نتایج نشان می‌دهد، تأثیر PSSها بر تابع هزینه متفاوت بوده است. تأثیر تنظیم مجدد PSS ها یا تنظیم بهینه آنها در شرایط بهره‌برداری شبکه می‌تواند سهم هر PSS را از سود نهایی تغییر دهد. در شکل ۸ نتایج بهینه‌سازی توابع هدف با در نظر گرفتن تنظیم بهینه PSSها ارائه شده است.

Archive of
www.SID.ir

در دو چارچوب ارائه‌شده برای محاسبه سهم هر PSS، تفاوت‌هایی از لحاظ مقدار هر سهم به چشم می‌خورد که ناشی از تنظیم مجدد PSS ها در شرایط بهره‌برداری شبکه است اما در شبکه‌های واقعی، تنظیمات این تجهیزات دائماً توسط ISO تغییر نمی‌کند. در اینجا این سؤال مطرح می‌شود که کدام یک از روش‌های اشاره‌شده جهت پرداخت به PSS ها مناسب‌تر است.

محاسبه سهم هر PSS بدون تنظیم مجدد آنها به نظر عملی‌تر است ولی به‌دلیل این که ISO مسئول تنظیم PSS هاست و سود کم یا زیاد PSS ها می‌تواند ناشی از تنظیمات ISO باشد از این رو این روش نمی‌تواند عادلانه باشد. ولی در چارچوب محاسبه سهم هر PSS با تنظیم مجدد آنها هر چند تنظیم مجدد PSS ها در عمل ممکن است اتفاق نیفتد، ولی می‌تواند روش عادلانه‌ای برای پرداخت به خدمت پایداری باشد.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به اجباری‌بودن وجود PSS ها در اکثر بازارهای دنیا که جهت افزایش امنیت سیستم صورت می‌گیرد و همچنین عدم پرداخت هزینه متناسب با تأثیرات این کنترل‌کننده توسط ISO، در این مقاله ابتدا تأثیر PSS واحدهای تولیدی بر توابع هزینه تولید و پایداری سیگنال کوچک، مورد مطالعه قرار گرفت و سپس به سودی که واحدها به‌دلیل ارائه این خدمت کسب می‌کردند، اشاره شد. همان‌گونه که نتایج مشخص نمود، به‌کارگیری PSS ها توسط ISO و تنظیم آنها می‌تواند تأثیر زیادی بر شرایط بهره‌برداری سیستم داشته باشد. در محیط تجدید ساختار با توجه به این که سود و زیان هر شرکت‌کننده در بازار اهمیت زیادی دارد لذا در این تحقیق نشان داده شد که این تنظیمات می‌تواند باعث تغییرات در سود بازیگران بازار شود.

وجود PSS ها و تنظیم آنها علاوه بر این که از بعد بهبود وضعیت پایداری سیگنال کوچک مطرح است، با توجه به نتایج مقاله و تأثیر آن بر روی شرایط بازار می‌توان آن را به‌عنوان یک خدمت جانبی دیگری مطرح نمود. در این راستا بر اساس سهم تأثیر این تجهیزات بر شرایط بازار، سود کل محاسبه شد و دو چارچوب اصلی برای تقسیم سود حاصل بین واحدها معرفی گردید و در نهایت روش محاسبه سهم هر PSS با در نظر گرفتن تنظیم مجدد به‌عنوان یک روش عادلانه برای پرداخت به خدمت پایداری پیشنهاد گردید.

علائم و نشانه‌ها

α_i: بخش حقیقی مقدار ویژه iام

ω_i: بخش موهومی مقدار ویژه iام

λ_i: مقدار ویژه iام

ζ_i: میرایی برای مقدار ویژه iام

ζ: بردار ضریب میرایی

ω_{refi}: سرعت مبنا برای ژنراتور iام

δ_i: زاویه ولتاژ در شین iام (p.u.)

B_{ij}: سوسپتانس بین شین i و j (p.u.)

B_{PSSi}: سهم سود PSS iام (p.u.)

C_{is}: قیمت پیشنهادی واحد iام ($)

$Cost_{No\,PSS}$: هزینه تولید بدون PSS ($)

$Cost_{All\,PSS}$: هزینه تولید با وجود همه PSS ها ($)

$Cost^{out}_{PSS\,i}$: هزینه تولید در شرایطی که PSS iام در سرویس نباشد ($)

$\Delta Cost_{Total}$: کل سود ناشی از وجود PSS ها ($)

$Cost^{tune}_{All\,PSS}$: هزینه تولید با وجود همه PSS ها با تنظیم مجدد آنها ($)

$\Delta Cost^{tune}_{Total}$: کل سود ناشی از وجود PSS ها با تنظیم مجدد آنها ($)

G_{ij}: ادمیتانس بین شین i و j (p.u.)

I_{ij}: جریان بین شین i و j (p.u.)

$I_{ij\max}$: بیشترین جریان بین شین i و j (p.u.)

$I_{ij\min}$: کمترین جریان بین شین i و j (p.u.)

I_{ji}: جریان بین شین j و i (p.u.)

$I_{ji\max}$: بیشترین جریان بین شین j و i (p.u.)

$I_{ji\min}$: کمترین جریان بین شین j و i (p.u.)

$K_{PSS\,i}$: ضریب بهره PSS iام

K_{PSS}: بردار ضریب بهره PSS ها

K_{ai}: ضریب بهره AVR برای ژنراتور iام

K_{fi}: ضریب بهره پایدارساز در AVR برای ژنراتور iام

n_{Bus}: تعداد شین‌ها

n_{Gen}: تعداد ژنراتورها

n_{Gi}: تعداد پیشنهاددهندگان به بازار

P_{id}: توان مصرفی در شین iام (p.u.)

P_{is}: مقدار توان پیشنهادی (p.u.)

P_s: بردار توان پیشنهادی (p.u.)

$P_{is\max}$: حداکثر مقدار توان پیشنهادی (p.u.)

$P_{is\min}$: حداقل مقدار توان پیشنهادی (p.u.)

Q_{iG}: توان راکتیو تولیدی (p.u.)

Q_{id}: توان راکتیو مصرفی در شین iام (p.u.)

R_i: Droop برای ژنراتور iام

$SSSI$: شاخص پایداری سیگنال کوچک

T_{fi}: ثابت زمانی پایدارساز در AVR برای ژنراتور iام

T_{ai}: ثابت زمانی AVR برای ژنراتور iام

T_{ei}: ثابت زمانی تحریک برای ژنراتور iام

T_{ri}: ثابت زمانی اندازه‌گیری برای ژنراتور iام

$T_{\max i}$: بیشترین خروجی توربین برای ژنراتور iام

$T_{\min i}$: کمترین خروجی توربین

T_{si}: ثابت زمانی گاورنر برای ژنراتور iام

T_{ci}: ثابت زمانی سروو برای ژنراتور iام

$T_{\text{۳}i}$: ثابت زمانی گذرا برای ژنراتور iام

$T_{\text{۴}i}$: ثابت زمانی fraction برای ژنراتور iام

$T_{\text{۵}i}$: ثابت زمانی reheat برای ژنراتور iام

$V_{r\max i}$: حد بالای ولتاژ تنظیمی برای ژنراتور iام

$V_{r\min i}$: حد پایین ولتاژ تنظیمی برای ژنراتور iام

V_i: دامنه ولتاژ در شین iام (p.u.)

$V_{i\max}$: بیشترین ولتاژ در شین iام (p.u.)

$V_{i\min}$: کمترین ولتاژ در شین iام (p.u.)

مراجع

[1] E. Riahi Samani, H. Seifi, and M. K. Sheikh-El-Eslami, "Economic valuation of small signal stability as an ancillary service in a competitive electricity market," *Int. Review of Electrical Engineering*, pt. B, vol. 5, no. 2, pp. 608-613, Apr. 2010.

[2] S. K. M. Kodsi and C. A. Canizares, "Application of a stability-constrained optimal power flow to tuning of oscillation controls in competitive electricity markets," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 1944-1954, Nov. 2007.

Archive of SID

www.SID.ir

[3] S. K. M. Kodsi and C. A. Canizares, "Stability-constrained optimal power flow and its application to pricing, power system stabilizers," in *Power Symposium, Proc. of the 37th Annual North American*, pp. 120-126, Oct. 2005.
[4] A. Andreoiu, K. Bhattacharya, and C. Canizares, "Pricing power system stabilizers using game theory," in *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, vol. 152, no. 6, pp. 780-786, Nov. 2005.
[5] A. Andreoiu and K. Bhattacharya, "PSS-control as ancillary service," *Electric Power System Research*, vol. 4, no. 3, pp. 391-399, Jun. 2005.
[6] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. A. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. V. Cutsem, and V. Vittal, "Definition and classification of power system stability," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 19, no. 2, pp. 1387-1401, May 2004.
[7] Y. G. Rebours, D. S. Kirschen, M. Trotignon, and S. Rossignol, "A survey of frequency and voltage control ancillary services, part I: technical features," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 350-357, Feb. 2007.
[8] Y. G. Rebours, D. S. Kirschen, M. Trotignon, and S. Rossignol, "A survey of frequency and voltage control ancillary services, part II: economic features," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 22, no. 1, pp. 358-366, Feb. 2007.
[9] M. Shahidehpour, W. F. Tinney, and YongFu, "Impact of security on power systems operation," in *Proc. of The IEEE*, vol. 93, no. 11, pp. 2013-2025, Nov. 2005.
[10] C. A. Canizares and M. Kodsi, "Power system security in market clearing and dispatch mechanisms," in Proc. *IEEE Power Engineering Society General Meeting,* 6 pp., Oct./Nov. 2006.
[11] S. K. M. Kodsi and C. A. Canizares, "Application of a stability constrained optimal power flow to tuning of oscillation controls in competitive electricity markets," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 22, no. 4, pp. 1944-1954, Nov. 2007.
[12] S. K. Parida, S. N. Singh, and S. C. Srivastava, "Voltage security constrained localized reactive power market," in *IEEE Proc. of Power India Conf.*, 6 pp., Apr. 2006.
[13] X. Lin, A. K. David, and C. W. Yu, "Reactive power optimisation with voltage stability consideration in power market systems," in *IEE Proc.-Gener. Tram. Dirtrib.*, vol. 150, no. 3, pp. 305-310, May 2003.
[14] L. Y. C. Amarasinghe, B. Jayasekar, and U. D. Annakkage, "The effect of dynamic security constraints on the locational marginal prices," in *Proc. IEEE Power Engineering Society General Meeting*, vol. 1, pp. 370-375, Jun. 2005.
[15] W. Rosehart, "Optimal power flows incorporating network stability," in *Proc. of Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE*, vol. 2, pp. 1100-1104, Aug. 2002.
[16] X. J. Lin, C. W. Yu, and A. K. David, "Optimum transient security constrained dispatch in compatetive deregulated poewer system," *Electric Power Systems Research*, vol. 76, no. 4, pp. 209-216, Jan. 2006.
[17] A. K. David and X. J. Lin, "Dynamic security enhancement in poewer market system," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 17, no. 2, pp. 431-438, May 2002.
[18] A. Andreoiu and K. Bhattacharya, "PSS-control as ancillary service," *Electric Power Systems Research*, vol. 74, no. 3, pp. 391-399, Jun. 2005.
[19] A. Andreoiu, K. Bhattacharya, and C. Canizares, "Pricing power system stabilisers using game theory," in *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, vol. 152, no. 6, pp. 780-786, Nov. 2005.
[20] F. Milano, C. A. Canizares, and M. Invernizzi, "Multiobjective optimization for pricing system security in electricity markets," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 596-604, May 2003.
[21] R. Khajjayam and A. Feliachi, "Impact of VAR support on electricity pricing in voltage stability constrained OPF market model," in *IEEE Proc. of Power Engineering Society General Meeting*, 6 pp., Jun. 2007.
[22] D. Chattopadhyay Bhujanga, B. Chakrabarti, and E. Grant Read, "Pricing for voltage stability," in *Proc. of IEEE Power Engineering Society Int. Conf. on Power Industry Computer Applications*, vol. 1, pp. 235-240, May 2001.
[23] Y. Yuan, J. Kubokawa, and H. Sasaki, "Pricing for transient stability," in *IEEE Proc. of the International Conf. on Electric Utility Deregulation, Restructuring, and Power Technologies*, vol. 1, pp. 332-336, Apr. 2004.
[24] A. Konak, D. W. Coit, and A. E. Smith, "Multi-objective optimization using genetic algorithms: atutorial," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 91, pp. 992-1007, Jan. 2006.
[25] N. Srinivas and K. Deb, "Multi-objective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms," *J. of Evolutionary Computation*, vol. 2, no. 3, pp. 221-248, Fall 1995.
[26] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182-197, Apr. 2002.

عرفان ریاحی‌سامانی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد برق با گرایش قدرت به ترتیب در سالهای ۱۳۷۸ و ۱۳۸۱ از دانشگاه شهید چمران اهواز و دانشگاه تربیت مدرس تهران به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشجوی مقطع دکتری در رشته برق قدرت در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تربیت مدرس تهران می‌باشد. نامبرده علاوه بر تحصیل به عنوان محقق و پژوهشگر در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی با مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت دانشگاه تربیت مدرس همکاری داشته است.

حسین سیفی در سال ۱۳۵۹ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه شیراز و در سالهای ۱۳۶۶ و ۱۳۶۸ مدراک کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق خود را از دانشگاه یومیست منچستر در کشور انگلستان دریافت نمود. ایشان از سال ۱۳۶۸ تاکنون به عنوان مدرس و هیأت علمی در دانشگاه تربیت مدرس به کار مشغول بوده و هم‌اکنون دارای جایگاه استاد تمام می‌باشد. دکتر سیفی در این سال‌ها علاوه بر انجام تحقیقات علمی دارای سوابق و مسوولیت‌هایی از جمله مدیر دانشکده مهندسی، معاون پژوهشی دانشگاه بوده و هم‌اکنون به عنوان رئیس مرکز مطالعات و برنامه‌ریزی سیستم‌های قدرت است. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند برنامه‌ریزی، بهره‌برداری از شبکه‌های قدرت، بازار برق و دینامیک سیستم‌های قدرت است.

محمد کاظم شیخ‌الاسلامی در سال ۱۳۷۱ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه تهران و در سالهای ۱۳۸۰ و ۱۳۸۴ مدراک کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق خود را از دانشگاه تربیت مدرس تهران دریافت نمود. در حال حاضر نام‌برده به عنوان مدرس و هیأت علمی در دانشگاه تربیت مدرس به کار مشغول می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده شامل موضوعاتی مانند بازار برق و برنامه‌ریزی توسعه تولید است.

Archive of SID

www.SID.ir