

## مقایسه عملکرد جابجاگر فاز کنترل شونده با تریستور و ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی ابررسانا در کنترل بار - فرکانس

مجتبی پیامی<sup>۱</sup>، علیرضا صفاریان<sup>۲</sup>، محسن صنیعی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

<sup>۲</sup> استادیار گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

<sup>۳</sup> استادیار گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

### چکیده

در سیستم‌های قدرت متشکل از چند ناحیه، اختلال بار در هر ناحیه می‌تواند باعث انحراف فرکانس سیستم در هر ناحیه و نوسان توان در خطوط انتقال میان نواحی شود. هدف این پژوهش کاهش نوسان‌های فرکانس نواحی و توان خطوط انتقال در زمان وقوع خطا می‌باشد. در این مقاله اثر تغییر ناگهانی بار در یک سیستم قدرت دو ناحیه‌ای دارای واحدهای تولیدی حرارتی-حرارتی مورد مطالعه قرار گرفته و نشان داده می‌شود واکنش‌های غیرخطی گاورنر باعث ایجاد یک نوسان نامیرا در پاسخ‌های گذرا و ماندگار توان در خط انتقال و فرکانس درون ناحیه می‌شوند. برای پایدار ساختن سیستم به ازای این اختلال بار، دو روش استفاده شده و عملکرد سیستم برای این دو حالت تحلیل شده است. در حالت اول یک شیفت‌دهنده فاز کنترل شونده با تریستور (TCPS) به صورت سری با خط انتقال بین نواحی سیستم و یک ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی ابررسانا (SMES) در ترمینال ناحیه دو نصب شده است. در حالت دوم، دو ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی ابررسانا (SMES) در ترمینال‌های دو ناحیه قرار داده شده و نتایج شبیه‌سازی ارائه شده است. این نتایج نشان می‌دهد که پایداری سیستم در حالت اول بهبود می‌یابد و در حالت دوم، پایداری نسبت به حالت اول نیز بهتر خواهد شد.

**واژه‌های کلیدی:** ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی ابررسانا، سیستم قدرت به هم پیوسته، شیفت‌دهنده فاز کنترل شونده با تریستور، کنترل بار-فرکانس، واکنش‌های غیر خطی گاورنر.

## ۱. مقدمه

اتصال شبکه‌های قدرت به هم، بنا بر دلایل اقتصادی و به منظور بهبود قابلیت اطمینان سیستم صورت می‌گیرد و موجب تشکیل یک سیستم گسترده چند ناحیه‌ای می‌گردد. در این سیستم نواحی مختلف از طریق خطوط انتقال به هم متصل هستند. کارکرد صحیح این سیستم قدرت به هم پیوسته نیازمند تطبیق تولید کل با مجموع بار کل و تلفات سیستم است. تغییر بار نواحی و شرایط غیرعادی نظیر قطع خطوط انتقال یا خروج ژنراتورها کارکرد نرمال سیستم قدرت را مختل می‌سازد و دو متغیر مطلوب شبکه یعنی فرکانس سیستم و تبادل توان خط انتقال هم دستخوش تغییر میشوند. این انحرافات میبایست توسط یک سیستم کنترل بار فرکانس<sup>۱</sup> تصحیح شوند. هدف کنترلر بار فرکانس (LFC) بازگرداندن فرکانس به مقدار نامی آن و کاهش نوسان توان خطوط انتقال بین نواحی میباشد (ایبراهیم و همکاران، ۲۰۰۵).<sup>۲</sup>

کنترل بار- فرکانس براساس یک سیگنال خطا به نام خطای کنترل ناحیه<sup>۳</sup> انجام می‌شود که یک ترکیب خطی از خطاهای فرکانس و توان‌های مبادله شونده است. استراتژی کنترل متعارف به کار رفته در صنعت، گرفتن انتگرال سیگنال خطای کنترل ناحیه (ACE) به عنوان سیگنال کنترل است. هدف از کنترل، کاهش خطاهای توان خط انتقال و فرکانس و رساندن آن به صفر در حالت ماندگار است (رافی<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۳).

برای بهبود پایداری سیستم از طریق طراحی بهینه سیستم کنترل بار-فرکانس (LFC) روش‌های مختلفی در مقالات ارائه شده است. عمده طراحی‌های LFC به دلیل واکنش‌های غیرخطی سیستم نظیر باند مرده گاورنر یا محدودیت نرخ تولید از کارایی کنترلی کافی برخوردار نیستند. واکنش‌های غیرخطی باند مرده گاورنر<sup>۵</sup> یک نوسان افزایشی قابل انتظار در فرکانس ایجاد می‌کنند نوسانات گذرای در توان عبوری از خط انتقال ایجاد می‌نمایند (تریپسی و همکاران<sup>۶</sup>، ۱۹۸۲). هدف این مقاله جلوگیری از نوسان نامیرای ناشی از واکنش‌های غیرخطی گاورنر یا کاهش دامنه این نوسان است.

از سوی دیگر، استفاده از سیستم‌های انتقال AC انعطاف‌پذیر (ادوات FACTS) که انعطاف‌پذیری بیشتری در کنترل و بهره‌برداری سیستم قدرت فراهم می‌کنند، به صورت گسترده‌ای پذیرفته شده است. شیفتهنده فاز کنترل شونده با تریستور<sup>۷</sup> یکی از تجهیزاتی است که تأثیر زیادی بر بهبود کنترل اتوماتیک تولید و میراسازی نوسانات توان خطوط انتقال در سیستم‌های قدرت به هم پیوسته دارد (ابراهام و همکاران<sup>۸</sup>، ۲۰۰۶).

سیستم‌های ذخیره انرژی مغناطیسی که عملکرد سریعی دارند، ظرفیت ذخیره‌ای را در کنار انرژی جنبشی روتورهای ژنراتور فراهم می‌کنند که می‌تواند با تأمین ناگهانی توان مورد نیاز، نوسانات فرکانس را به طور مؤثر میرا کند. یک ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی ابررسانا<sup>۹</sup> که قادر به کنترل همزمان توان اکتیو و راکتیو می‌باشد، می‌تواند به عنوان یکی از مهم‌ترین و مؤثرترین پایدارسازهای نوسان فرکانس عمل نماید (تریپسی و همکاران<sup>۱۰</sup>، ۱۹۸۲). در این مقاله اثر TCPS و SMES بر پایداری سیستم قدرت به هم

<sup>1</sup> load Frequency Control(LFC)

<sup>2</sup> Ibrahim et al.

<sup>3</sup> Area Control Error(ACE)

<sup>4</sup> Rafi et al.

<sup>5</sup> Governor Dead Band

<sup>6</sup> Tripathy et al.

<sup>7</sup> Thyristor Controlled Phase Shifter

<sup>8</sup> Abraham et al.

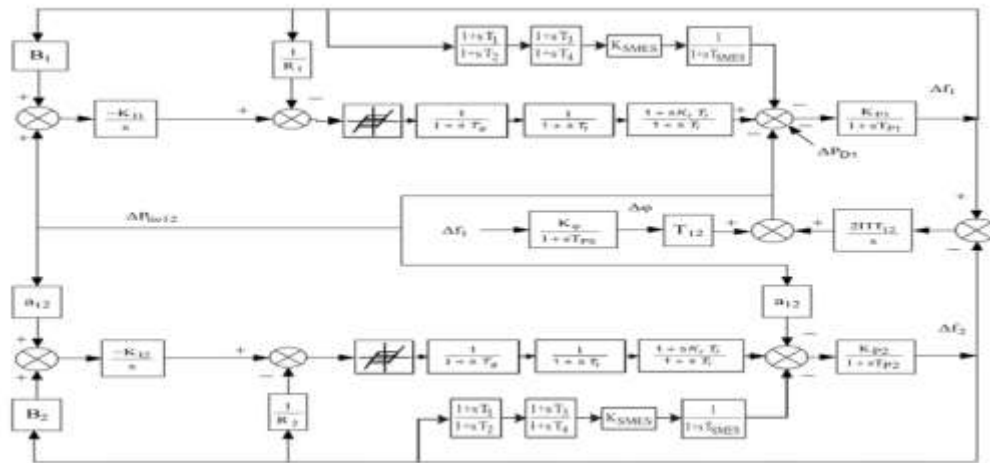
<sup>9</sup> Superconducting Magnetic Energy Storage

<sup>10</sup> Tripathy et al.

پیوسته با در نظر گرفتن واکنش‌های غیر خطی گاورنر تجزیه و تحلیل می‌گردد. سپس سیستم قدرت دو ناحیه‌ای مورد نظر و TCPS و SMES مدل سازی می‌شود. در انتها نتایج شبیه‌سازی ارائه می‌گردد.

## ۲. مدل سازی سیستم قدرت به هم پیوسته دو ناحیه‌ای

سیستم قدرت به هم پیوسته دو ناحیه‌ای شامل دو شبکه قدرت مستقل است که هر یک دارای واحدهای تولیدی و بارهایی می‌باشند و از طریق یک خط انتقال به هم متصل شده‌اند. از آن جایی که دو ناحیه به هم متصل هستند، آشفتگی بار در یک ناحیه بر فرکانس شین‌های هر دو ناحیه و پخش بار خط انتقال ارتباطی اثر می‌گذارد (لو و همکاران<sup>۱</sup>، ۱۹۹۵).



شکل ۱: مدل سیستم قدرت دو ناحیه‌ای حرارتی-حرارتی با افزودن SMES و TCPS

<sup>1</sup> Lu et al.

## جدول ۱: علائم و اصطلاحات

$T_{pi}$ : ثابت زمانی ژنراتور مربوط به ناحیه $i$	$i$ : اندیسی که به ناحیه اشاره می کند
$K_{pi}$ : ثابت بهره ژنراتور مربوط به ناحیه $i$	$f$ : فرکانس نامی سیستم (Hz)
$\Delta F_i$ : انحراف فرکانس مربوط به ناحیه $i$	$ACE_i$ : خطای کنترل ناحیه ای، مربوط به ناحیه $i$
$a_{12} : Pr1/Pr2$	$B_i$ : بهره فرکانس برای خطای کنترل ناحیه مربوط به ناحیه $i$
$TCPS(s)$ : ثابت زمانی	$DB$ : باند مرده گاورنر
$\Delta PTCPS$ : انحراف خروجی توان اکتیو $TCPS$	$K_i$ : بهره اتلافی کنترل کننده تکمیلی مربوط به ناحیه $i$
$K\phi$ : بهره های $TCPS$	$R_i$ : تنظیم سرعت گاورنر مربوط به حوزه $i$
$KSM$ : بهره های $SMES$	$T_{gi}$ : ثابت زمانی سیستم کنترل سرعت گاورنر مربوط به ناحیه $i$
$\Delta PSM$ : انحراف خروجی توان اکتیو $SMES$	$T_{ti}$ : ثابت زمانی توربین بخار مربوط به ناحیه $i$
$TSM$ : ثابت زمانی $SMES(s)$	$T_{ri}$ : ثابت زمانی گرمایش مجدد مربوط به ناحیه $i$
$\Delta P_{tie}$ : انحراف توان خط انتقال در خروجی ناحیه $i$	$K_{ri}$ : ضریب گرمایش مجدد توربین بخار مربوط به ناحیه $i$
$T_{12}$ : ضریب توان همزمان شده مربوط به خط انتقال متصل شده بین ناحیه های	$\Delta P_{tie}$ : انحراف توان خط انتقال در خروجی ناحیه $i$

۲ و ۱

سیستم کنترل هر ناحیه به اطلاعات درباره وضعیت گذرای هر دو ناحیه نیاز دارد تا بتواند فرکانس محلی را به مقدار وضعیت پایدارش باز گرداند. اطلاعات درباره ناحیه دیگر شامل تغییرات فرکانس خروجی آن ناحیه یا نوسان توان خط انتقال ارتباطی است. بنابراین توان خط انتقال ارتباطی اندازه گیری می گردد و باتوجه به این که این توان باید کنترل شود، سیگنال اندازه گیری شده به عنوان فیدبک به کنترلر محلی دو ناحیه ارسال می گردد (چیدامبارم و ولوسامی<sup>۱</sup>، ۲۰۰۵).

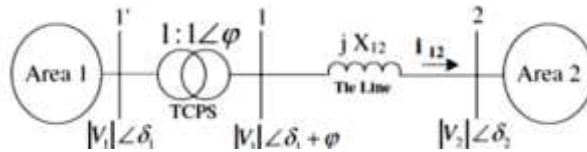
بلوک دیاگرام یک سیستم قدرت به هم پیوسته دو ناحیه ای حرارتی-حرارتی<sup>۲</sup> (دارای واحدهای تولیدی حرارتی در هر دو ناحیه) در شکل ۱ نمایش داده شده است که در آن گاورنرها، ژنراتورها و توربین های دارای گرمایش مجدد در نظر گرفته شده اند. تابع انتقال توربین های دارای گرمایش مجدد در رابطه ی (۱) ارائه شده است.

<sup>1</sup> Chidambaram and Velusami<sup>2</sup> Thermal-Thermal(T-T)

$$\frac{\Delta P_{Ei}(s)}{\Delta X_{Ei}(s)} = \frac{1+K_{Ti}T_{Ti}s}{(1+sT_{Ti})(1+sT_{Ti})}, i = 1,2 \quad (1)$$

در شکل ۱، یک کنترلر انتگرالی، توان مرجع توربین هر ناحیه را تنظیم می‌کند. آشفتگی در هر ناحیه بر فرکانس هر دو ناحیه اثر می‌گذارد و آشفتگی در یک ناحیه از طریق تغییر توان در خط انتقال ارتباطی توسط ناحیه‌ی دیگر حس می‌شود، بنابراین کنترلر مربوط به هر ناحیه نه تنها، تغییرات فرکانس بلکه باید تغییرات توان در خط انتقال را نیز به عنوان ورودی در نظر بگیرد. از آنجایی که یک کنترلر انتگرالی فقط یک ورودی دارد، این دو پارامتر، که شامل تغییر فرکانس محلی و تغییر توان خط انتقال ارتباطی هستند، باید جهت ایجاد یک سیگنال به گونه‌ای با یکدیگر ترکیب شوند که به عنوان یک ورودی برای کنترلر قابل استفاده باشد. ساده‌ترین راه برای انجام این امر ترکیب این دو به صورت خطی است، به عبارت دیگر ورودی انتگرال‌گیر در ناحیه ۱ برابر است با  $\Delta P_{tie} + B_1 \Delta F_1$  و ورودی انتگرال‌گیر در ناحیه ۲ برابر است با  $a_{12} \Delta P_{tie} + B_2 \Delta F_2$  (شکل ۱). ورودی هر کنترلر، خطای کنترل ناحیه (ACE) نامیده می‌شود.

واکنش‌های غیرخطی، سیستم را از حالت تعادل خارج کرده و سعی در تولید یک نوسان نامیرا در فرکانس ناحیه محلی و پاسخ‌های گذرای توان در خط انتقال ایجاد می‌نمایند. پارامترهای بهره فرکانس  $B_i (i=1,2)$  و بهره انتگرال‌گیر  $K_i (i=1,2)$  جهت کنترل مطلوب، قابل تغییر هستند (تی‌سی<sup>۱</sup>، ۲۰۱۱).



شکل ۲: شماتیک سیستم توان دو منطقه‌ای به هم پیوسته با TCPS سری با خط انتقال

### ۳. مدل خطی شده TCPS و SMES قابل کاربرد برای AGC

#### ۱.۳. مدل خطی شده TCPS قابل کاربرد برای AGC

شکل ۲، شماتیک یک سیستم نمونه دو ناحیه‌ای به هم پیوسته با یک TCPS به صورت سری در خط انتقال ارتباطی را نشان می‌دهد. TCPS نزدیک ناحیه‌ی ۱ قرار گرفته است. از مقاومت خط انتقال ارتباطی صرف نظر شده است. بدون TCPS، تغییر توان خط انتقال ارتباطی منتقل شده از ناحیه‌ی ۱ به ناحیه‌ی ۲ را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$\Delta P_{tie12}^0(s) = \frac{2\pi T_{12}}{s} [\Delta F_1(s) - \Delta F_2(s)] \quad (2)$$

هنگامی که TCPS به صورت سری با خط انتقال ارتباطی قرار گرفته، جریانی که از ناحیه‌ی ۱ به ناحیه‌ی ۲ جاری می‌شود را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$i_{12} = \frac{|V_1| \angle(\delta_1 + \phi) - |V_2| \angle(\delta_2)}{jX_{12}} \quad (3)$$

بر اساس شکل ۲ داریم:

$$= |V_1| \angle - (\delta_1 + \phi) \left[ \frac{|V_1| \angle(\delta_1 + \phi) - |V_2| \angle(\delta_2)}{jX_{12}} \right] P_{tie12} - jQ_{tie12} = V_1^* i_{12} \quad (4)$$

$$-j \frac{[|V_1|^2 - |V_1||V_2| \cos(\delta_1 - \delta_2 + \phi)]}{X_{12}} P_{tie12} - jQ_{tie12} = \frac{|V_1||V_2|}{X_{12}} \sin(\delta_1 - \delta_2 + \phi) \quad (5)$$

<sup>1</sup> Tsay

با جدا کردن بخش‌های حقیقی در رابطه‌ی (۵)، داریم:

$$P_{tie12} = \frac{|V_1||V_2|}{X_{12}} \sin(\delta_1 - \delta_2 + \varphi) \quad (6)$$

در رابطه‌ی (۶) با انحراف  $\delta_1$ ،  $\delta_2$  و  $\varphi$  از مقادیر نامی آن‌ها  $\delta_1^0$ ،  $\delta_2^0$  و  $\varphi^0$  داریم:

$$\Delta P_{tie12} = \frac{|V_1||V_2|}{X_{12}} \cos(\delta_1^0 - \delta_2^0 + \varphi^0) \sin(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2 + \Delta\varphi) \quad (7)$$

مقدار  $(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2 + \Delta\varphi)$  بسیار کوچک است به طوری که به ازای تغییر اندک در توان حقیقی بار، تغییرات زوایای ولتاژ باس نظیر تغییرات زاویه فاز TCPS بسیار کوچک است. بنابراین می‌توان رابطه‌ی (۷) را با تقریب به صورت رابطه‌ی (۸) نوشت:

$$\Delta P_{tie12} = \frac{|V_1||V_2|}{X_{12}} \cos(\delta_1^0 - \delta_2^0 + \varphi^0) (\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2 + \Delta\varphi) \quad (8)$$

مقدار پارامتر T12 از رابطه‌ی (۹) محاسبه می‌شود و با استفاده از آن رابطه‌ی (۸) به رابطه‌ی (۱۰) کاهش می‌یابد:

$$T_{12} = \frac{|V_1||V_2|}{X_{12}} \cos(\delta_1^0 - \delta_2^0 + \varphi^0) \quad (9)$$

$$\Delta P_{tie12} = T_{12} (\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2 + \Delta\varphi) \quad (10)$$

$$\Delta P_{tie12} = T_{12} (\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2) + T_{12} \Delta\varphi \quad (11)$$

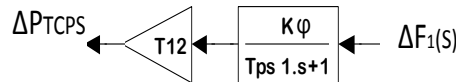
همچنین می‌دانیم:

$$\Delta\delta_1 = 2\pi \int \Delta f_1 dt \quad \text{و} \quad \Delta\delta_2 = 2\pi \int \Delta f_2 dt \quad (12)$$

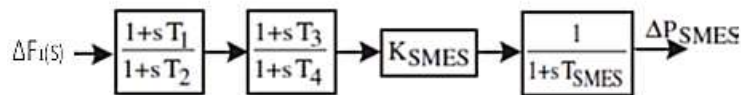
از (۱۱) و (۱۲) داریم:

$$\Delta P_{tie12} = 2\pi T_{12} (\int \Delta f_1 dt - \int \Delta f_2 dt) + T_{12} \Delta\varphi \quad (13)$$

تبدیل لاپلاس (۱۳) نتیجه می‌دهد:



شکل ۳: ساختار TCPS به عنوان پایدارساز فرکانسی



شکل ۴: ساختار SMES به عنوان پایدارساز فرکانسی [۲۶]

$$\Delta P_{tie12}(s) = \frac{2\pi T_{12}}{s} [\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)] + T_{12} \Delta\varphi(s) \quad (14)$$

بر اساس رابطه‌ی (۱۴)، توان عبوری از خط انتقال را می‌توان با کنترل کردن زاویه شیفت دهنده فاز  $\Delta\varphi$  کنترل کرد. زاویه شیفت دهنده فاز  $\Delta\varphi(s)$  را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$\Delta\varphi(s) = \frac{K_\varphi}{1+sT_{ps}} \Delta Error(s) \quad (15)$$

بنابراین می‌توان (۱۴) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$+T_{12} \frac{K_{\varphi}}{1+sT_{ps}} \Delta \text{Error}(s) \quad \Delta P_{tie12}(s) = \frac{2\pi T_{12}}{s} [\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)] \quad (16)$$

اگر فرکانس انحراف  $\Delta f_1$  تشخیص داده شود، می توان از آن به عنوان سیگنال کنترلی به واحد کرد TCPS استفاده تا زاویه شیفت دهنده فاز TCPS را کنترل کند که به نوبه خود خط انتقالی را کنترل می کند، یعنی فرض کرد  $\Delta \text{Error} = \Delta f_1$  بنابراین:

$$\Delta \varphi(s) = \frac{K_{\varphi}}{1+sT_{ps}} \Delta f_1(s) \quad (17)$$

و انحراف توان خط انتقال به صورت زیر در می آید:

$$+T_{12} \frac{K_{\varphi}}{1+sT_{ps}} \Delta f_1(s) \quad \Delta P_{tie12}(s) = \frac{2\pi T_{12}}{s} [\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)] \quad (18)$$

$$\Delta P_{tie12}(s) = \Delta P_{tie12}^0(s) + \Delta P_{TCPS}(s) \quad (19)$$

که در آن  $\Delta P_{TCPS}(s) = T_{12} \frac{K_{\varphi}}{1+sT_{ps}} \Delta f_1(s)$  می باشد.

ساختار TCPS به عنوان پایدارساز فرکانسی در شکل ۳ نشان داده شده است. از انحراف فرکانس ( $\Delta f_i, i = 1, 2$ ) به عنوان سیگنال ورودی برای پایدارساز فرکانسی استفاده می شود (راثو<sup>۱</sup>، ۲۰۰۹).

### ۲.۳ مدل خطی شده SMES قابل کاربرد برای AGC

ساختار کنترل کننده SMES برای پایدارسازی فرکانسی در شکل ۴ نشان داده شده است. سیگنال ورودی کنترل کننده، انحراف فرکانس بر حسب پریونیت ( $\Delta f_i, i=1,2$ ) است. ساختار SMES برای پایدارسازی فرکانسی شامل بلوک بهره  $K_{SMES}$ ، بلوک تناسبی با ثابت زمانی  $T_{SMES}$  و دو طبقه بلوک جبران فاز به صورت نشان داده شده در شکل ۴ است. بلوک جبران فاز با ثابت های زمانی  $T_1, T_2, T_3$  و  $T_4$  مشخصات پیش فاز مناسبی برای جبران پس فازی بین سیگنال های ورودی و خروجی ایجاد می کنند. در نتیجه شش پارامتر مثل بهره اشباع،  $K_{SMES}$  و ثابت های زمانی  $T_{SMES}, T_1, T_2, T_3$  و  $T_4$  باید برای طراحی بهینه پایدارساز فرکانسی بهینه شوند (روی و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۱).

<sup>1</sup> Rao et al.

<sup>2</sup> Roy et al.

جدول ۲: مقادیر پارامترهای مدل‌های شبیه‌سازی

ظرفیت	<b>2000MW</b>
$P_{r1} = P_{r2} =$ ناحیه	<b>1000 MW</b>
بار نامی ناحیه	<b>0.2s</b>
$T_{g1} = T_{g2}$	<b>0.3s</b>
$T_{T1} = T_{T2}$	<b>1/3</b>
$k_{r1} = k_{r2}$	<b>120 HZ/p.u. MW</b>
$=K_{p1} = K_{p2}$	<b>0.01 p.u. MW</b>
$=\Delta P_{d1}$	<b>0.00</b>
$=\Delta P_{d2}$	<b>20s</b>
$=T_{p1} = T_{p2}$	<b>2.4 HZ/P.u. mw</b>
$R_1 = R_2 =$	<b>0.425</b>
$B_1 = B_2 =$	<b>0.0707 S</b>
$T_{12} =$	<b>20s</b>
$T_{r1} = T_{r2} =$	<b>0.5</b>
$=K_1 = K_2$	<b>41.6 s</b>
$T_1$	<b>0.513 s</b>
$T_2$	<b>5 s</b>
$T_R$	<b>1 s</b>
$T_W$	

جدول ۳: مقادیر پارامترهای TCPS و SMES

$K_\phi$	<b>1.5 rad/Hz</b>
$T_{ps}$	<b>0.1 s</b>
KSM	<b>0.2035</b>
TSM	<b>0.03 s</b>
T1	<b>0.2322 s</b>
T2	<b>0.0160 s</b>
T3	<b>0.7087 s</b>
T4	<b>0.2481 s</b>

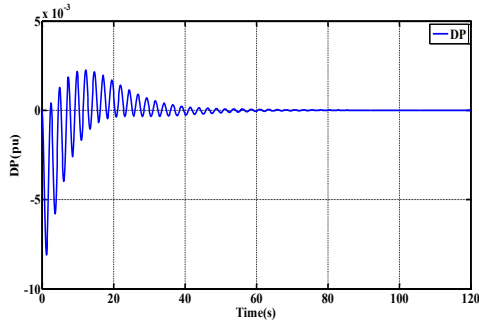


جدول ۴: مقادیر پارامترهای SMES دو ناحیه

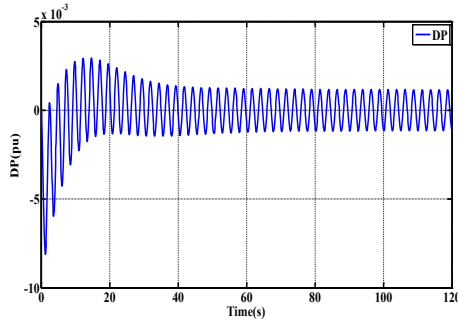
$K_{SM1}$	0.2035
$T_{SM1}$	0.03 s
$T_1$	0.2322 s
$T_2$	0.0160 s
$T_3$	0.7087 s
$T_4$	0.2481 s
$K_{SM2}$	0.2035
$T_{SM2}$	0.03 s
$T_5$	0.2322 s
$T_6$	0.0160 s
$T_7$	0.7087 s
$T_8$	0.2481 s

#### ۴. نتایج شبیه‌سازی

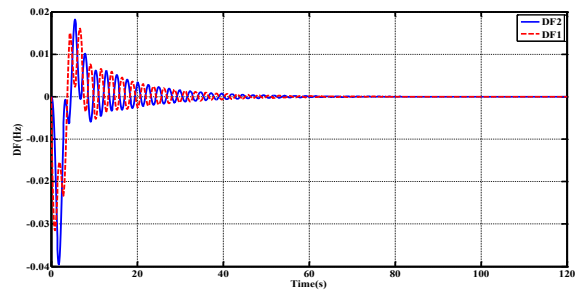
برای سیستم شکل ۱، مقادیر پارامترها مطابق جدول ۲ فرض شده است. در حالتی که TCPS سری با خط انتقال و SMES در ترمینال ناحیه دو قرار گرفته است مقادیر پارامترهای آن‌ها مطابق جدول ۳ می‌باشد. و هنگامی که SMES در ترمینال دو ناحیه قرار گیرد مقادیر پارامترها مطابق جدول شماره ۴ می‌باشد (روی و همکاران، ۲۰۱۱).



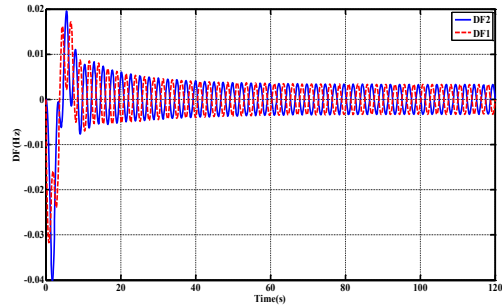
شکل ۶: انحراف توان خط انتقال به ازای افزایش بار ۱٪ بدون واکنش‌های غیرخطی باند مرده



شکل ۸: انحراف توان خط انتقال به ازای افزایش بار ۱٪ با واکنش‌های غیرخطی باند مرده



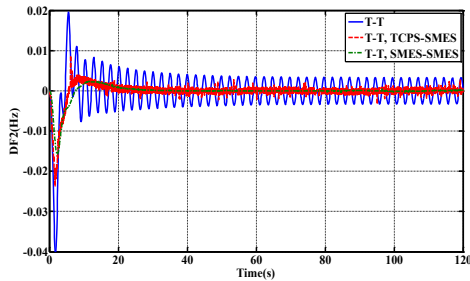
شکل ۵: انحراف فرکانس ناحیه اول و دوم به ازای افزایش بار ۱٪ بدون واکنش‌های غیرخطی باند مرده



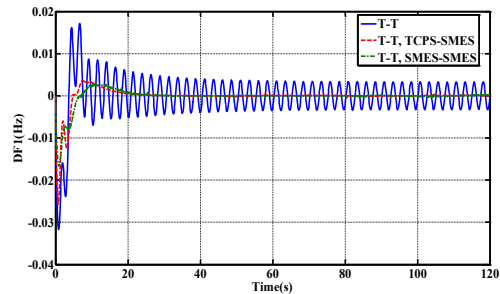
شکل ۷: انحراف فرکانس ناحیه ۱ و ۲ به ازای افزایش بار ۱٪ با واکنش‌های غیرخطی باند مرده

ابتدا تجزیه و تحلیل‌های پایداری سیستم بدون واکنش‌های غیرخطی باند مرده مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. سپس سیستم با واکنش‌های غیرخطی باند مرده بررسی می‌شود (تی‌سی، ۲۰۱۱). شکل ۵ انحراف فرکانس نواحی ۱ و ۲ و شکل ۶ تبادل توان خط انتقال را به ازای افزایش بار ۱٪ ( $\Delta P_{d1} = 0.01 \text{ P.U.}$ )، بدون واکنش غیرخطی باند مرده (سیستم خطی) را نشان می‌دهد. شکل ۷ و ۸ نیز به ترتیب انحراف فرکانس نواحی و تبادل توان خط انتقال را به ازای افزایش بار ۱٪ با در نظر گرفتن واکنش‌های غیرخطی باند مرده را نشان می‌دهد. واکنش‌های غیرخطی باند مرده پایداری سیستم را کاهش داده و نوسان نامیرا با پارامترهای چنین سیستمی همیشه وجود دارد (تی‌سی، ۲۰۱۱).

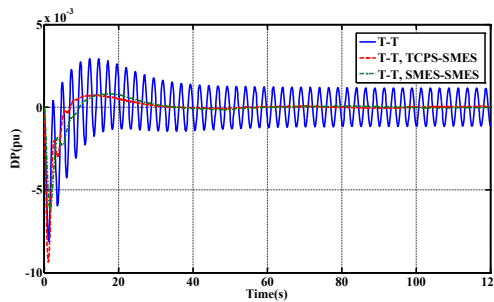
برای اینکه سیستم پایدار باشد و برای هر اختلال بار پاسخ سیستم بهینه‌ای داشته باشیم، اثرات TCPS و SMES بررسی و بحث شده است. جهت بهبود پایداری سیستم، TCPS سری با خط انتقال و SMES در ترمینال ناحیه دو قرار گرفته است. در مرحله بعد در ترمینال دو ناحیه SMES قرار داده شده است. مقایسه نتایج در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۰: مقایسه انحراف فرکانس در ناحیه ۲ در سه حالت مورد بررسی



شکل ۹: مقایسه انحراف فرکانس در ناحیه ۱ در سه حالت مورد بررسی



شکل ۱۱: مقایسه انحراف توان خط انتقال در سه حالت مورد بررسی

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که به ازای افزایش بار ۱٪ در سیستم حرارتی-حرارتی (T-T) با در نظر گرفتن واکنش غیرخطی گاورنر انحراف فرکانس نواحی و تبادل توان خط انتقال زیاد می‌باشد و در زمان استفاده از TCPS سری با خط انتقال و SMES در ترمینال ناحیه دو (T-T, TCPS-SMES) انحراف فرکانس و تبادل توان خط انتقال کاهش می‌یابد و هنگامی که از SMES در ترمینال دو ناحیه استفاده می‌شود (T-T, SMES-SMES) نوسان فرکانس نواحی و تبادل توان خط انتقال از همه حالت‌های قبل کمتر می‌شود.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله استفاده از TCPS و SMES جهت کنترل فرکانس بار با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد استفاده از TCPS سری با خط انتقال و SMES در ترمینال ناحیه دو باعث کاهش نوسان فرکانس و تبادل توان خط انتقال می‌شود. همچنین استفاده از SMES در هر دو ناحیه باعث بهبود پایداری شده و میزان نوسان‌ها در تمامی شکل موج‌ها کاهش می‌یابد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که سیستم هنگام استفاده از SMES در ترمینال دو ناحیه پایداری بیشتری دارد.

## مراجع

1. Abraham, R.J; Das, D; Patra, A;(2006). "AGC of a Hydrothermal System with Thyristor Controlled Phase Shifter in the Tie-Line," IEEE Power India Conference
2. Bhatt , p; Roy, R; Ghoshal, s.p,(2011). "Comparative performance evaluation of SMES–SMES, TCPS–SMES and SSSC–SMES controllers in automatic generation control for a two-area hydro–hydro system," Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol 33, Issue 10, PP. 1585-1597
3. Bhatt, p; Ghoshal, S.P; Roy, R.(2010). "Load frequency stabilization by coordinated control of Thyristor Controlled Phase Shifters and superconducting magnetic energy storage for three types of interconnected two-area power systems," Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol 32, Issue 10, PP. 1111-1124
4. Chidambaram IA, Velusami S.(2005). "Decentralized biased controllers for load–frequency control of interconnected power systems considering governor dead band non-linearity, " In: INDICON, 2005 Annual IEEE; p. 521–5.
5. Ibrahim, I; Kumar, P; Kothari, D.P.(2005). "Recent Philosophies of Automatic Generation Control Strategies in Power Systems," IEEE Trans. power syst., vol 20, no. 1, pp. 341- 357
6. Lu CF, Liu CC, Wu CJ.(1995). " Effect of battery energy storage system on load frequency control considering governor deadband and generation rate constraint, " IEEE Trans Energy Convers;10(1):555–61.
7. Rafi, F.H.M; Ansary, M.Z.; Rahman, M.H; Mollah, M.A.S; Rahman, M.A; Mitul, A.F.(2013). "Load Frequency Control Analysis Using AGC, TCPS and SMES," International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), PP. 1–5
8. Rao, C.S; Nagaraju, S.S; Raju , P.S.(2009). "Automatic generation control of TCPS based hydrothermal system under open market scenario: A fuzzy logic approach," Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol 31, Issues 7–8, PP. 315-322
9. Tripathy SC, Balasubramanian R, Nair PSC.(1992). "Effect of superconducting magnetic energy storage on automatic generation control considering governor deadband and boiler dynamics," IEEE Trans Power Syst;7(3):126673.
10. Tripathy SC, Hop GS, Malik OP.(1982). "Optimisation of load–frequency control parameters for power system with reed steam turbines and governor deadband nonlinearity," PROC IEE PtC;129(1):10–6.
11. Tsay, Tain-Sou. "Load–frequency control of interconnected power system with governor backlash nonlinearities," Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 33, Issue 9, PP. 1542-1549, Nov 2011.