

Online Index of Identifying effective Power System Stabilizers for Damping Inter-area Oscillations on Interconnected Power System

Soheil Ranjbar^{1*}

¹Department of Electrical Engineering, Velayat University, P.O. Box 99111-31311, Iranshahr, Iran.

E-mails: s.ranjbar@velayat.ac.ir

* means corresponding author

Short Abstract

In this paper, an adaptive controller for damping inter-area oscillations based on power system stabilizer and global signals is proposed. In order to investigate the nature of inter-area oscillations, a generalized SMIB model is introduced and the mechanism of inter-area oscillations is analyzed. In order to design the proposed adaptive controller, by using dynamic data gathered from the wide area measuring system, a new index is introduced to identify effective generators in damping the inter-area oscillations. Also, in order to design the adaptive controller, after determining effective generators, the stabilizer parameters are adjusted using intelligent methods. The proposed method for selecting effective stabilizers and selecting global signals is implemented on two different systems including the two-area power system consists of six synchronous generators and a practical nation IRAN power grid. Results indicate the ability of the proposed adaptive scheme to damp inter-area oscillation.

Keywords

Damping, Inter-area Oscillation, Power System Stabilizer, Global Signal.

1- Short Introduction (4-5 lines)

Power system dynamic processes are highly random, nonlinear and intrinsically non stationary even over short time intervals. Phenomena observed in power system oscillatory dynamics are diverse and complex. Prediction of temporal dynamics, with the ultimate application to real-time system monitoring, protection and control, remains a major research challenge for power engineers. An understanding of system dynamics is critical for reliable inference of the underlying mechanisms in the observed oscillations and is needed for the development of effective wide-area measurement and control systems, and for improved operational reliability. Accounting for nonlinear and time-varying features can not only provide a better description of the data but can also reveal crucial information on system's oscillatory behavior such as modal properties and moving patterns. Advances in signal processing algorithms, along with continuously growing computational resources and monitoring systems are beginning to make feasible the analysis and characterization of transient processes using real-time information.

2- Proposed Work and Methodology (including comprision, simulation/experimental results and discusion)

In this paper, a Wide Area Damping Controller (WADC) strategy is proposed to damp the inter-area oscillations in power systems by using Wide Area Mesearement Signals (WAMS) and Global Power System Stabilizer (GPSS). The proposed WADC scheme includes three parts as below:

1-GSG: Global Signal Generator;

2-GSC: Global Signal Combinator;

3-GPSS: Global Power System Stabilizer.

The control signals observability and GPSS controllability are considered as the main goals in this paper. The control signals are selected based on WAMS structure in GSG, while the signals with the higher observabilities in the facing of the inter-area oscillations are combined together in GSC, and a Global Signal (GS) is generated.

3- Conclusion (4-5 lines)

In this paper an effective Wide Area Damping Controller scheme to control inter-area oscillations based on Global Signals and Global PSS has been proposed. From simulation showed that Global signal is able to damp inter-area oscillations where type of global signals presented important influence on damping oscillations. Also, different combinations of global signals presented different influence on damping oscillation. In this case it is proposed a combination based on fuzzy logic will have suitable results for generating GS. If it is adopted, increasing signals Participation Factors (PF) caused different influences on damping ratio where an inappropriate PF resulted in unsuitable damping performances. Also, an incorrect combination of PSSs caused interactions between generator with a possibility of angular instability. In this case, large generators presented better damping performances on damping oscillation.

4- References (2-3 references)

- [1] سهیل رنجبر، محمدرضا آقامحمدی، فرهاد حق جو، "میراسازی نوسانات بین ناحیه‌ای در سیستم‌های قدرت با استفاده از پایدارسازهای مبتنی بر سیگنال‌های سراسری"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۶.
- [2] A. F. Snyder, et al. , "Inter-area Oscillation Damping with Power System Stabilizers and Synchronized Phasor Measurements," in International Conference on Power System Technology, 2018, Proceedings, POWERCON '98, pp 790-794 vol. 2.
- [3] Joakim Björk, Danilo Obradović, Lennart Harnefors, Karl Henrik Johansson, "Influence of Sensor Feedback Limitations on Power Oscillation Damping and Transient Stability", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.37, No.2, November 2022.
- [4] Soheil Ranjbar, "Online estimation of controlled islanding time intervals using dynamic state trajectories through cascading failures from WAMS data", Electric Power Systems Research, vol.214, pp.108890-108910, January 2023.

شاخص برخط شناسائی پایدارسازهای موثر به منظور می‌راسازی نوسانات بی‌ن ناحیه‌ای در شبکه‌های قدرت به هم پیوسته

سهیل رنجبر

استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه آموزشی برق و کامپیوتر، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران

چکیده

در این مقاله، طرح کنترل‌کننده ناحیه گسترده تطبیقی برخط به منظور انتخاب واحدهای موثر برای می‌راسازی نوسان‌های بین‌ناحیه‌ای مبتنی بر سیگنال‌های سراسری ارائه می‌شود. به منظور طراحی کنترل‌کننده پیشنهادی، با استفاده از داده‌های بدست آمده از سیگنال‌های سراسری شبکه قدرت، شاخصی برخط و غیر مبتنی بر مدل شبکه بر مبنای محاسبه برخط امپدانس تونن و توان لحظه‌ای خروجی ژنراتورها معرفی شده به نحوی که پایدارسازهای موثر با توانایی می‌راسازی نوسان‌های بین‌ناحیه‌ای شناسایی می‌شوند. در شاخص پیشنهادی، راکتانس تونن دیده شده از سمت واحدهای ژنراتوری و توان لحظه‌ای خروجی ژنراتورها به روش بهینه‌سازی و به صورت بیشینه‌سازی تابع هدف، مدل‌سازی شده و کنترل‌کننده پیشنهادی با الگوریتم ژنتیک باینری بهینه می‌شود. در این زمینه، راکتانس تونن کوچک، نشان‌دهنده لینک الکتریکی قوی واحد ژنراتوری و توان لحظه‌ای خروجی بالا بیان‌کننده توانایی مطلوب واحد در تامین توان می‌راساز بین‌ناحیه‌ای هستند. به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، دو شبکه مختلف شامل شبکه دو ناحیه کندور و شبکه ملی برق ایران معرفی شده و توانایی کنترل‌کننده پیشنهادی مورد ارزیابی می‌گیرد. نتایج به دست آمده، نشان‌دهنده توانایی کنترل‌کننده پیشنهادی در یافتن برخط واحدهای موثر برای می‌راسازی نوسان‌های بین‌ناحیه‌ای است.

کلمات کلیدی

می‌راسازی، نوسانات بین ناحیه ای، پایدارساز سیستم قدرت، سیگنال سراسری.

نام نویسنده مسئول: دکتر سهیل رنجبر

ایمیل نویسنده مسئول: s.ranjbar@velayat.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۲۳

تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۷/۲۲

فهرست اختصارات

فهرست اختصارات		فهرست علائم	
زمان بحرانی رفع خطا	CIT	مقادیر حقیقی و موهومی ولتاژ تونن دیده شده از باس ژنراتوری	Er, Ei
نرخ میرایی نوسان	DR	مقادیر حقیقی و موهومی فازور جریان	Ir, Ii
پایدارساز موثر	EP	ضریب بهره سراسری پایدارساز	K_{Gsys}
سیستم‌های انتقال جریان مستقیم ولتاژ بالا	HVDC	ضریب بهره محلی پایدارساز	K_G
الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری	ICA	ضریب بهره گشتاور میراکننده بین‌ناحیه‌ای	K_{SAB}
شناسایی نوسان بین‌ناحیه‌ای	ID	ضریب بهره میراساز ناحیه A و B	K_{iA}, K_{iB}
ناپایداری گذاری بین‌ناحیه‌ای	IATI	ضریب بهره پایدارساز	Kc
ناپایداری نوسانی بین‌ناحیه‌ای	IAOI	توان میراساز پایدارساز	ΔP_{e}^{PSS}
روش بهینه‌سازی بهبود یافته ازدحام ذرات	IPSO	توان میارساز ژنراتور نام ناحیه A و B	Pe_{iA}, Pe_{iB}
روش بهینه‌سازی حداقل واریانس	MVMO	توان میراکننده ناحیه A و B	$\Delta Pe^A, \Delta Pe^B$
روش بهینه‌سازی غیرخطی عدد مختلط	MINLP	توان انتقالی اندازه‌گیری شده بین دو ناحیه	$P(t)$
مبتنی و غیرمبتنی بر مدل شبکه	MB/NMB	توان تبادلی بین دو ناحیه قبل از وقوع خطا	$P0$
برون خط و برخط	Offline/Online	ثابت زمانی‌های پایدارساز	$T1, T2, T3, T4$
واحد اندازه‌گیری فازوری	PMU	مدت زمان میان دو پیک متوالی	T_{sw}
تحلیل مولفه اساسی	PCA	دو زمان نمونه‌برداری متوالی	$t1, t2$
آرایه بهره نسبی	RGA	مقادیر فازوری ولتاژ و جریان در شین ژنراتوری	V, I
سیستم تک ماشین به باس بی‌نهایت	SMIB	مقادیر حقیقی و موهومی فازور ولتاژ	Vr, Vi
تاخیر زمانی	TL	تغییرات سرعت محلی ژنراتور	$\Delta \omega_G$
سیستم اندازه‌گیری ناحیه گسترده	WAMS	تغییرات سرعت سراسری سیستم	$\Delta \omega_{Gsys}$
		تغییرات سرعت مرکز اینرسی بین‌ناحیه‌ای A و B	$\Delta \omega_{COIAB}$
		تغییرات سرعت مرکز اینرسی ناحیه A و B	$\Delta \omega_{COIA}, \Delta \omega_{COIB}$
		تغییرات سرعت ژنراتور نام ناحیه A و B	$\Delta \omega_{iA}, \Delta \omega_{iB}$
		دامنه پیک نخست	$X1$
		دامنه پیک دوم نوسان	$X2$
		راکتانس، مقاومت، ولتاژ و امپدانس تونن دیده شده از باس ژنراتوری	Xth, Rth, Eth, Zth
		زاویه فازور ولتاژ	θ
		زاویه فازور جریان	γ

پایداری زاویه‌ای و ضعف میرائی نوسانات، همواره به‌عنوان یک تهدید جدی برای امنیت دینامیکی سیستم‌های قدرت بوده است. نوسانات فرکانس پائین ژنراتورها به دو صورت محلی و بین‌ناحیه‌ای می‌تواند رخ دهد. در حالت اول می‌تواند منجر به ناپایداری یک ژنراتور نسبت به کل شبکه گردد. درحالی‌که نوسانات بین‌ناحیه‌ای ناپایدار می‌توانند باعث تجزیه سیستم قدرت به دو ناحیه یا بیشتر شوند که اصطلاحاً به جزیره‌ای شدن ناخواسته و کنترل نشده معروف بوده و می‌تواند مقدمه‌ای برای خاموشی‌های بزرگ در شبکه قدرت باشند. لذا، توانائی سیستم‌های قدرت برای میراسازی نوسانات بین‌ناحیه‌ای یک الزام جدی از نقطه نظر امنیت خاموشی‌های بزرگ است. به‌طور سنتی، میراسازی نوسانات محلی توسط پایدارسازهای موجود در نیروگاه‌ها انجام می‌شود. این پایدارسازها با استفاده از سیگنال‌های محلی و تنظیمات بهینه قادر هستند که میرائی کافی را برای نوسانات محلی فراهم آورند [۱]. با توجه به این‌که، پایدارسازهای سنتی تنها ادوات کنترلی موجود در نیروگاه‌ها هستند، سوالی اساسی این است که آیا این ادوات قادر به میراسازی نوسانات بین‌ناحیه‌ای هستند؟ و درصورتی‌که بخواهیم از آن‌ها برای میراسازی نوسانات بین‌ناحیه‌ای استفاده شود، چه نوع تمهیدات و تغییرات باید در عملکرد آن‌ها صورت پذیرد.

منظور کنترل مهمترین مدهای موجود در سیستم می باشد. در [۱۱] به تعیین مکان‌های مناسب به منظور نصب پایدارسازها و تنظیم بهینه پارامترهای آن با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری (ICA) پرداخته شده است. در [۱۲]، با استفاده از درخت دسته‌بندی و اطلاعات سیستم WAMS روشی برای دسته‌بندی میرایی و دامنه مدهای نوسانی و شناسایی سیگنال‌های تاثیرگذار در میرایی نوسانات معرفی شده است. در [۱۳]، با استفاده سیگنال‌های سراسری ناحیه گسترده و مبتنی بر درخت دسته‌بندی، کنترل‌کننده تطبیقی ارائه شده است. در [۱۴]، از یک شاخص ترکیبی متشکل از اینرسی و رؤیت-پذیری استفاده شده است. در این روش با تحلیل مد بین‌ناحیه‌ای از دو مفهوم مد برجسته و گروه همونا استفاده شده است. در [۱۵]، روشی سیستماتیک مبتنی بر سیگنال‌های ناحیه گسترده برای طراحی کنترل‌کننده HVDC ارائه شده است. در [۱۶]، روشی براساس ضریب مانده و مدهای بحرانی سیستم به منظور شناسایی سیگنال بین‌ناحیه‌ای ارائه شده است. انتخاب سیگنال ورودی کنترل‌کننده، براساس ضریب مشارکت در نظر گرفته شده است. مقایسه اجمالی میان روش‌های مختلف معرفی شده در زمینه میراسازی نوسان‌های بین‌ناحیه‌ای در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مقایسه روش‌های معرفی شده می‌راساز بین‌ناحیه‌ای.

Ref.	CT	ID	IATI	IAOI	TL	Offline /Online	MB/NMB
[۱]	-	✓	✓	✓	-	Online	NMB
[۲]	✓	-	✓	✓	-	Online	MB
[۳]	-	✓	-	-	✓	Offline	MB
[۴]	✓	-	-	✓	-	Online	NMB
[۵]	✓	✓	-	✓	-	Online	MB
[۶]	-	✓	✓	-	-	Offline	NMB
[۷]	✓	✓	-	✓	-	Online	MB
[۸]	✓	-	✓	-	-	Online	MB
[۹]	-	✓	-	✓	-	Offline	MB
[۱۰]	✓	-	✓	✓	-	Online	MB
[۱۱]	✓	✓	✓	✓	-	Online	MB
[۱۲]	-	✓	✓	✓	✓	Offline	MB
[۱۳]	✓	✓	✓	✓	-	Online	MB
[۱۴]	-	-	-	✓	✓	Offline	MB
[۱۵]	✓	-	-	✓	-	Offline	MB
[۱۶]	-	✓	✓	-	✓	Offline	MB

مطابق با جدول ۱، شاخص‌های معرفی شده به ترتیب عبارت هستند از: CIT (زمان بحرانی رفع خطا)، ID (شناسایی نوسان بین‌ناحیه‌ای)، IATI (ناپایداری گذاری بین‌ناحیه‌ای)، IAOI (ناپایداری نوسانی بین‌ناحیه‌ای)، TL (تاخیر زمانی)، Offline/Online (برخط و برون خط)، MB (تکنیک‌های مبتنی بر مدل شبکه) و NMB (تکنیک‌های غیرمبتنی بر مدل شبکه) هستند. مطابق با جدول ۱، می‌توان استنباط کرد که انتخاب سیگنال‌های ناحیه-گسترده موضوع مورد علاقه برای کنترل نوسان بین‌ناحیه‌ای بوده است. با این حال، ارزیابی ضریب مشارکت و مکان بهینه کنترل‌کننده ناحیه گسترده همچنان به عنوان موضوعی چالش برانگیز ادبیات گذشته باقی مانده و به طور دقیق بررسی نشده است. همچنین، بیشتر تکنیک‌های بررسی‌شده بر روی یک مد نوسانی بین‌ناحیه‌ای متمرکز شده‌اند، در حالی که با تغییر شرایط توپولوژیکی/بهره‌برداری شبکه، روش‌های پیشنهادی ممکن است دارای عملکرد مطلوبی در زمینه میراسازی نوسان بین‌ناحیه‌ای نباشند.

با شناسایی واحدهای موثر ژنراتوری با قابلیت تولید توان میراساز مطلوب، پایدارسازهای مورد نظر انتخاب و با تنظیم بهینه، به منظور میراسازی نوسانات بین‌ناحیه‌ای مورد استفاده قرار گیرند.

قابل توجه است مسئله تداخل PSSها، از جمله موارد مهم بوده و نوآوری اصلی در این مقاله بر همین مبنا و شناسایی موثرترین پایدارسازها در هر لحظه از زمان با هدف میراسازی نوسانات بین‌ناحیه‌ای طرح‌ریزی می‌شود. در این زمینه، یکی از مهمترین عوامل موثر بر میراسازی نوسانات بین-ناحیه‌ای، انتخاب پایدارسازهای موثر و با تنظیمات بهینه برای میرایی نوسانات می‌باشد. مقالات متعددی تاکنون به بررسی میراسازی نوسانات بین‌ناحیه‌ای با استفاده از ادوات کنترلی موجود در نیروگاه‌ها پرداخته‌اند. در مرجع [۲] روشی بر مبنای حساسیت مقادیر ویژه باتوجه به بهره‌های کنترلی به منظور مکان بهینه پایدارسازها معرفی شده است. در این مقاله اشاره شده است که روش پیشنهاد داده شده می‌تواند بطور موثری پایدارسازهایی را که تاثیر در میرایی مدهای ضیف دارند را شناسایی نماید. در [۳] روشی مبتنی بر حساسیت سیگنال برگشتی به پایدارسازها، به منظور شاخص شناسایی واحدهای ژنراتوری در میرایی نوسانات معرفی شده است. در این مرجع اشاره شده است، با ارزیابی تحلیل حساسیت سیگنال برگشتی به پایدارساز، می‌توان واحدی که دارای بیشترین مقدار انحراف مانده است را در نظر گرفت. در [۴] به بررسی روش تخمین مسیر معادلات حالت دینامیکی برای مکانیابی پایدارسازها به منظور میرایی نوسانات، پرداخته شده است. در این مرجع، مقایسه‌ای میان دو روش تخمین حالت دینامیکی و روش مانده انجام گردیده و نشان داده شد که روش تخمین حالت دینامیکی، دارای نتایج موثرتری است. در [۵] از الگوریتم بهینه سازی ژنتیک بر روی شبکه‌های بزرگ مجهز به ادوات جبران‌ساز توان راکتیو، به منظور مکان‌یابی پایدارسازها، بهره گرفته شده است. تابع هدف مورد نظر در این مرجع به صورت بیشینه‌سازی نرخ میرایی نوسانات با توجه به ترکیبات مختلف پایدارسازها است. باتوجه به شبکه پیشنهادی، ترکیبات پایدارسازها از ۸ الی ۱۶ ترکیب مختلف بودند که توسط الگوریتم بهینه‌سازی مودر بررسی قرار گرفتند. در [۶] نیز از الگوریتم بهینه سازی ژنتیک به منظور مکان‌یابی بهینه پایدارسازها بهره گرفته شده است. در این مرجع یک تابع چند هدفه که شامل تنظیم بهینه پارامترهای پایدارساز و مکان بهینه پایدارساز می‌باشد، معرفی شده و با تمرکز بر مقادیر ویژه سیستم، نتایج بهینه توسط الگوریتم ژنتیک حاصل گردیده است.

در [۷] نیز یک تابع چند هدفه شامل تنظیم پارامترها و مکان بهینه پایدارسازها معرفی شده و با استفاده از روش بهینه سازی غیرخطی عدد مختلط (MINLP)، تابع بهینه سازی شده است. تابع هدف مسئله در این مرجع بصورت حداکثر سازی نرخ میرایی با حداقل تعداد پایدارساز می باشد. در [۸] از روش بهینه سازی بهبود یافته ازدحام ذرات (IPSO) به منظور تعیین مکان بهینه پایدارسازها بهره گرفته شده است. تابع هدف مورد نظر در این مقاله از نوع چند هدفه می باشد. نتایج بدست آمده در این مقاله نشان داده است که الگوریتم بهبود یافته دارای سرعت همگرایی بالاتری نسبت به الگوریتم پایه PSO می باشد. در [۹] رویکردی گسترده به منظور تعیین لحظه‌ای مکان پایدارسازها و تنظیم بهینه پارامترهای پایدارساز، معرفی گردیده است. در ابتدا از تحلیل مقادیر ویژه به منظور ارزیابی خصوصیات سیستم بهره گرفته شده است. سپس از دو روش ترکیبی با یکدیگر برای تعیین سناریوهای مورد نظر در مسئله بهینه سازی استفاده شده است. به منظور حل مسئله از روش بهینه سازی حداقل واریانس (MVMO) بهره گرفته شده و توانایی روش با الگوریتم PSO مقایسه گردیده است. در [۱۰] روشی مبتنی بر تحلیل PCA به منظور تعیین مکان های مناسب به منظور نصب پایدارسازها پیشنهاد شده است. ایده پیشنهادی در این مقاله بر انتخاب پایدارسازها با حداقل هزینه مورد نیاز به

$$\Delta P_e^{PSS} = K_{G_{sys}} \times \Delta \omega_{G_{sys}} \approx K_G \times \Delta \omega_G \quad (1)$$

بنابراین توان الکتریکی میراساز هم‌فاز با تغییرات سرعت این ژنراتور می‌تواند تاثیر پایدارسازی داشته باشد. در حالت نوسانات بین‌ناحیه‌ای، نوسان‌های سرعت برابر با اختلاف سرعت دو ناحیه می‌باشد. بنابراین توان الکتریکی میراساز هم‌فاز با تغییرات سرعت ژنراتور معادل نیز می‌تواند مطابق با (۲)، تاثیر پایدار سازی داشته باشد.

$$\Delta P_e^{PSS} = K_{SAB} \times \Delta \omega_{COIAB} = K_{SAB} \times (\omega_{COIA} - \omega_{COIB}) \quad (2)$$

نکته قابل اهمیت در این بخش، انتخاب سیگنال ورودی و مکان پایدارسازها در هر ناحیه می‌باشد. چنانچه برای میراسازی نوسانات بین‌ناحیه‌ای براساس اصول پایدارسازی محلی، بخواهیم از سیگنال‌های محلی تک تک ژنراتورهای واقع در هر ناحیه بطور بهینه استفاده نمائیم در این‌صورت توان الکتریکی میراساز هر یک از ژنراتورهای واقع در نواحی هم‌فاز با سرعت آن‌ها خواهد شد. همچنین توان تولید پایدارسازی برابر مجموع توان تک تک پایدارسازها می‌باشد. عبارتی برآیند توان تک تک ژنراتورهای هر ناحیه، توان ژنراتور معادل آن ناحیه را تشکیل خواهد داد. با توجه به ماهیت نوسانات بین‌ناحیه‌ای، توان‌های اضافی تولید شده توسط مجموع پایدارسازها برای هر یک از نواحی با سرعت مرکز اینرسی نواحی متناسب نبوده و لذا از خاصیت میراکنندگی لازم برخوردار نمی‌باشند، عبارتی:

$$\Delta P_{eA} = \sum K_{iA} \times \Delta \omega_{iA} \neq K_A \times \Delta \omega_{COIA} \quad (2)$$

$$\Delta P_{eB} = \sum K_{iB} \times \Delta \omega_{iB} \neq K_B \times \Delta \omega_{COIB} \quad (3)$$

بنابراین کل توان الکتریکی میراساز تولید شده توسط ژنراتورهای معادل دو ناحیه که توان ژنراتور مدل SMIB نوسانات بین‌ناحیه‌ای را تشکیل می‌دهد برابر مجموع این دو توان خواهد بوده و برآیند توان اضافی ایجاد شده، متناسب با تغییرات سرعت نواحی و یا اختلاف آنها نمی‌باشد و لذا فاقد قدرت میراکنندگی نوسانات بین‌ناحیه‌ای خواهد بود. بدین منظور سیگنال‌های خروجی از پایدارسازها می‌بایست به‌گونه‌ای انتخاب شوند که توان تولیدی متناسب با توان مرکز اینرسی دو ناحیه بوده و دارای خاصیت میراکنندگی باشد. حال اگر مکان‌های مشخصی از پایدارساز ژنراتورهای واقع در هر ناحیه انتخاب و سیگنال کنترلی از جنس اختلاف سرعت مراکز اینرسی نواحی و اعمال گردد خواهیم داشت:

$$\Delta P_{eA} = \sum P_{iA} = \sum (K_{iA} \times \Delta \omega_{COIAB}) = (\sum K_{iA}) \times \Delta \omega_{COIAB} = K_A \times \Delta \omega_{COIAB} \quad (4)$$

$$\Delta P_{eB} = \sum P_{iB} = \sum (K_{iB} \times \Delta \omega_{COIAB}) = (\sum K_{iB}) \times \Delta \omega_{COIAB} = K_B \times \Delta \omega_{COIAB} \quad (5)$$

در نهایت کل توان اضافی تزریقی به ژنراتور معادل مدل SMIB نوسانات بین‌ناحیه‌ای خواهد شد.

$$\Delta P_{eAB} = \Delta P_{eA} + \Delta P_{eB} = (K_A + K_B) \times \Delta \omega_{COIAB} \quad (6)$$

در این حالت، توان اضافی پایدارکننده با سیگنال بین‌ناحیه‌ای هم‌فاز بوده و در نتیجه باعث بهبود میرایی نوسانات بین‌ناحیه‌ای می‌شود.

مدل شبیه‌سازی در نظر گرفته شده در این مقاله مطابق با طرح مفهومی نشان داده شده در شکل ۱ است. مطابق با شکل ۱، خروجی پایدارسازها وارد سیستم تحریک ژنراتور شده و در ادامه توان میراساز تولید مورد نیاز به منظور میراسازی نوسانات بین‌ناحیه‌ای می‌شود. قابل توجه است، اگرچه مدل کنترلی AVR در مدار حلقه بسته پایدارساز لحاظ شده است، اما بر روی پارامترهای کنترلی AVR تنظیمی انجام نشده و هدف بر توانایی کنترلی پایدارسازها برای

مطابق با ارزیابی ارائه شده در جدول ۱، نوآوری مقاله به‌صورت بندهای ذیل معرفی می‌شود:

(الف) محاسبه برخط نرخ میرایی نوسانات بین‌ناحیه‌ای با استفاده از سیگنال‌های فازوری باس ژنراتوری.

(ب) معرفی شاخص برخط شناسایی پایدارسازهای موثر مبتنی بر راکتانس تونن و توان لحظه‌ای ژنراتورها با توانایی میراسازی نوسانات بین‌ناحیه‌ای.

(ج) عدم وابستگی طرح پیشنهادی به ماتریس امپدانس شبکه (راکتانس تونن با استفاده از سیگنال‌های فازوری ولتاژ و جریان، تخمین زده می‌شوند).

(د) نیازمند تنها دو سیکل نوسان بین‌ناحیه‌ای به‌منظور شناسایی، محاسبه و اعمال سیگنال کنترلی با پتانسیل میراسازی نوسانات بین‌ناحیه‌ای.

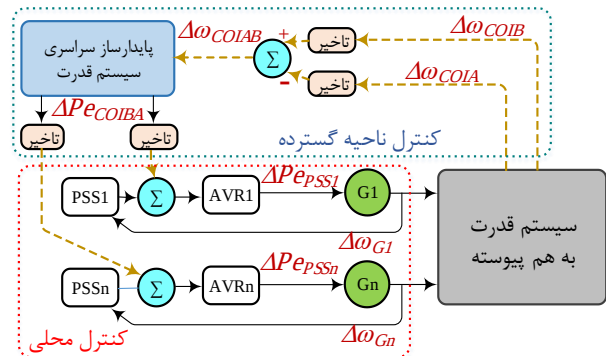
در این مقاله، با تعمیم مفهوم مدل SMIB برای نوسانات بین‌ناحیه‌ای، ناتوانی پایدارساز نیروگاه‌ها برای میراسازی نوسانات بین‌ناحیه‌ای با استفاده از سیگنال محلی به‌همراه تنظیمات بهینه نشان داده شده است. سپس نشان داده شده است که برای میرایی نوسانات بین‌ناحیه‌ای می‌توان بشرط استفاده از سیگنال کنترلی سراسری و بهینه، از پایدارساز نیروگاه‌ها استفاده نمود.

برای این‌منظور، با استفاده از داده‌های بدست آمده از سیگنال‌های فازوری ولتاژ و جریان، شاخصی برخط و غیر مبتنی بر مدل شبکه برمیانی محاسبه برخط امپدانس تونن و توان لحظه‌ای خروجی ژنراتورها معرفی شده و پایدارساز-های موثر با توانایی میراسازی نوسانات بین‌ناحیه‌ای به‌روش بهینه‌سازی و به‌صورت بیشینه‌سازی تابع هدف، مدل‌سازی و شناسایی می‌شوند. نوآوری اصلی در چگونگی مدل‌سازی شاخص برخط شناسایی پایدارسازها بوده به‌نحوی که با محاسبه برخط راکتانس تونن و توان لحظه‌ای ژنراتورها، کنترل‌کننده پیشنهادی با استفاده از الگوریتم ژنتیک با برتری بهینه می‌شود. با توجه به ماهیت نوسانات بین‌ناحیه‌ای و وجود نواحی نوسان‌کننده غیرهم‌فاز در شبکه‌های قدرت مدرن، شاخص پیشنهادی، معیاری کاربردی به‌منظور بهبود امنیت دینامیکی سیستم-های قدرت به‌هم‌پیوسته بزرگ است.

۲- اصول پایدارسازی نوسانات بین ناحیه ای

با استفاده از مدل SMIB برای نوسانات محلی و بین‌ناحیه‌ای می‌توان مکانیزم پایدارسازها مبرایی نوسانات بین‌ناحیه‌ای را مطابق با شکل ۱ بررسی و شناسایی نمود.

مطابق با شکل ۱، مکانیزم اصولی پایدارسازها برای بهبود میرایی نوسانات مبتنی بر ایجاد یک مولفه توان الکتریکی میراساز هم‌فاز با تغییرات سرعت نوسانات ژنراتور در مدل SMIB می‌باشد. این مولفه هم‌فاز با سرعت نوسانات به عنوان یک توان میراکننده باعث بهبود میرایی نوسانات خواهد شد. در حالت نوسانات محلی، با فرض بسیار بزرگ بودن شبکه واقعی، سرعت ژنراتور مطابق با (۱)، تقریباً با سرعت ژنراتور نسبت به مرکز اینرسی شبکه برابر است.



شکل ۱- مدل SMIB برای نوسانات محلی و بین‌ناحیه‌ای

میراسازی نوسانات بین ناحیه ای است.

۳- الگوریتم کنترل کننده تطبیقی پیشنهادی

در این بخش استراتژی کنترل تطبیقی پیشنهادی معرفی می گردد. نمایی از عملکرد زمان حقیقی استراتژی پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده است. مطابق با شکل (۲)، ساختار طرح پیشنهادی مطابق با گام های ذیل معرفی می شود.

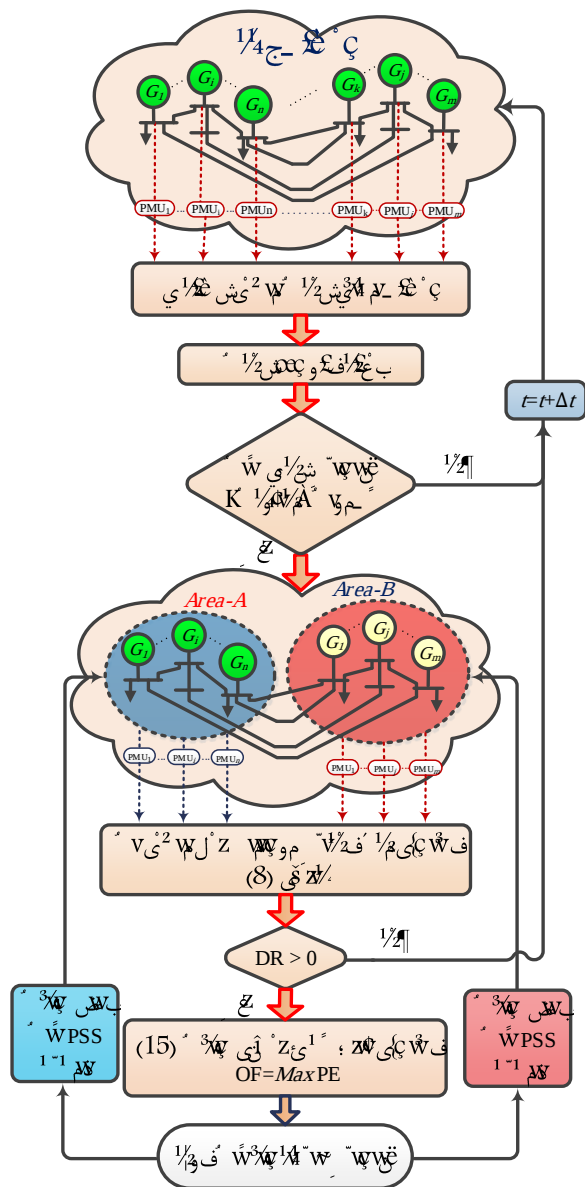
(۱) در شرایط بهره برداری زمان واقعی، در هر لحظه از زمان t ، با استفاده از واحدهای اندازه گیر فازوری، مقادیر فازوری ولتاژ و جریان باس های ژنراتوری اندازه گیری شده به نحوی که با استفاده از سیستم اندازه گیری ناحیه گسترده، اطلاعات نوسانات ژنراتورها از قبیل نوسانات سرعت و زاویه روتور ژنراتورها (۱) و (۲) تخمین زده می شوند [۲].

(۲) از آنجائی که سیگنال های اندازه گیری شده، حاوی ترکیب های مختلف فرکانسی متشکل از فرکانس های محلی و بین ناحیه ای هستند، لذا به منظور حذف نمودن فرکانس های محلی، سیگنال های سرعت و زاویه روتور تمامی واحدهای ژنراتوری از فیلتر متوسط گیری [۱۰] عبور داده شده به نحوی که خروجی فیلتر، حاوی سیگنال های در محدوده فرکانس نوسانات بین ناحیه ای، هستند.

(۳) همچنین، به منظور شناسایی برخط گروه های هم نوا، با اندازه گیری سیگنال های سرعت و زاویه روتور ژنراتورها، در ادامه با استفاده از تکنیک ضرایب هم بستگی [۱۱] میان تمامی واحدهای ژنراتوری و در پنجره های زمانی مشخص، گروه های ژنراتوری شناسایی می شوند. در صورت عدم شناسایی ژنراتورهای هم نوا، پنجره اطلاعاتی به میزان $t + \Delta t$ رو به جلو حرکت کرده، به نحوی که با به روز رسانی اطلاعات نوسانات ژنراتورها، مراحل ۱ الی ۳ مجدداً اجرا می شوند.

(۴) با شناسایی گروه های هم نوا، میرایی سیگنال ها مورد ارزیابی قرار گرفته به طوری که با شناسایی دو پیک متوالی نوسانات بین ناحیه ای، نرخ رشد نوسانات بین ناحیه ای توسط (۸) محاسبه می شود.

(۵) به ازای نوسان بین ناحیه ای ناپایدار، طرح پیشنهادی فعال شده به نحوی که با محاسبه شاخص (۱۵)، پایداری سازهای موثر به همراه بهره های مطلوب کنترلی مطلوب به صورت برخط تخمین زده می شوند و سپس، سیگنال های کنترلی برای پایداری سازهای کاندید میراساز نوسانات بین ناحیه ای ارسال می شوند.



شکل ۲- کنترل کننده تطبیقی پیشنهادی در محیط زمان واقعی

جدول ۲- پارامترهای تاثیرگذار در پایداری ساز

ضریب (بهره)	جبران ساز اول	جبران ساز دوم
K_C	$\frac{1+ST_1}{1+ST_2}$	$\frac{1+ST_3}{1+ST_4}$

به منظور بهینه سازی پارامترها، لازم است تابع هدفی با بهترین عملکرد پایداری ساز با توجه به شرایط بهره برداری و مکان پایداری ساز انتخاب شود. برای این منظور، با استفاده از تابع هدف (۷)، به صورت کمینه سازی نوسانات توان بین ناحیه ای اندازه گیری شده میان دو گروه نوسانی و ارزیابی میرایی شبکه به ازای تغییر پارامترهای کنترلی پایداری ساز، مقادیر بهینه پایداری سازهای کاندید حاصل می شوند. تابع هدف در نظر گرفته شده، به صورت کمینه سازی سطح زیر منحنی توان انتقالی بین دو ناحیه مطابق با رابطه (۷) معرفی می شود.

$$\min: F = \int |P(t) - P_0| dt \quad (7)$$

در (۷)، $P(t)$ مقدار توان انتقالی اندازه گیری شده بین دو ناحیه و P_0 توان تبدیلی بین دو ناحیه قبل از وقوع خطا می باشد. کمینه سازی تابع هدف (۷) به معنای کاهش سطح زیر منحنی نوسانات بوده که معادل افزایش میرایی نوسانات و بهبود پایداری سراسری سیستم خواهد بود.

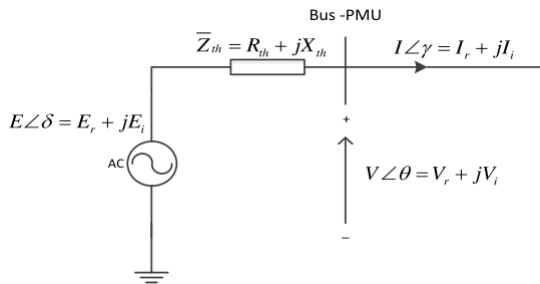
۳-۱ تنظیم بهینه پارامترهای پایداری ساز

به منظور دستیابی به بهترین عملکرد پایداری ساز سیستم قدرت لازم است که پارامترهای اصلی پایداری ساز انتخاب شده و پایداری ساز برای نقطه کار مورد نظر تنظیم گردد. برای این امر می بایست پارامترها و تابع هدف مورد نظر برای تنظیم پایداری ساز مشخص گردند.

در طرح پیشنهادی، از پایداری سازهای مرسوم و متداول در سیستم های قدرت شامل دو تابع تبدیل جبران ساز فاز متوالی مرتبه اول بهره گرفته می شود. در این زمینه، هر کدام از توابع مرتبه اول نشان داده شده در جدول ۲، توانایی ۹۰ درجه جبران سازی فاز را بر روی سیگنال دینامیکی تحریک ژنراتور خواهند داشت و به ازای دو جبران ساز متوالی، می توان به حداکثر میزان جبران سازی مورد نیاز برابر ۱۸۰ درجه دست یافت.

برای یک پایداری ساز متداول از نوع جبران ساز فاز، پارامترهای پایداری ساز شامل ضریب تقویت K_C و ثابت زمانی های T_1 ، T_2 ، T_3 و T_4 بوده که باید بشکل بهینه تنظیم گردند.

با امپدانس ولتاژ تونن مطابق با شکل ۵، مدل نمود.



شکل ۵- مدار معادل تونن از دید ترمینال ژنراتور [۳].

در شکل ۵، پارامترهای مدار معادل تونن از قبیل E_{th} و Z_{th} می تواند براساس قانون ولتاژی کیرشوف توسط اندازه گیری های PMU مطابق با رابطه ذیل حاصل گردد [۳]:

$$E - I \times Z_{th} = V \quad (9)$$

بطوریکه V و I مقادیر فازوری ولتاژ و جریان در شین ژنراتوری می باشند.

اگر در نظر بگیریم [۳]:

$$E = E \angle \delta = E_r + jE_i \quad (10)$$

$$Z_{th} = R_{th} + jX_{th} \quad (11)$$

معادله (۹) می تواند به فرم دستگاه معادلات دو معادله ای با چهار متغیر حقیقی از قبیل (E_r, E_i, R_{th}, X_{th}) مطابق ذیل نگاشته شود [۵]:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_r(t) & I_i(t) \\ 0 & 1 & -I_i(t) & -I_r(t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_r \\ E_i \\ R_{th} \\ X_{th} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_r(t) \\ V_i(t) \end{bmatrix} \quad (12)$$

با در نظر گرفتن آنکه در طول یک دوره کوتاه، معادلات تونن ثابت است،

اندازه گیری های ($n \geq 2$) نمونه منجر به تشکیل دستگاه معادله مرتبه $n \times 2$ بصورت رابطه ذیل می گردد [۵].

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -I_r(t_1) & I_i(t_1) \\ 0 & 1 & -I_i(t_1) & -I_r(t_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & -I_r(t_n) & I_i(t_n) \\ 0 & 1 & -I_i(t_n) & -I_r(t_n) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E_r \\ E_i \\ R_{th} \\ X_{th} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_r(t_1) \\ V_i(t_1) \\ \vdots \\ V_r(t_n) \\ V_i(t_n) \end{bmatrix} \quad (13)$$

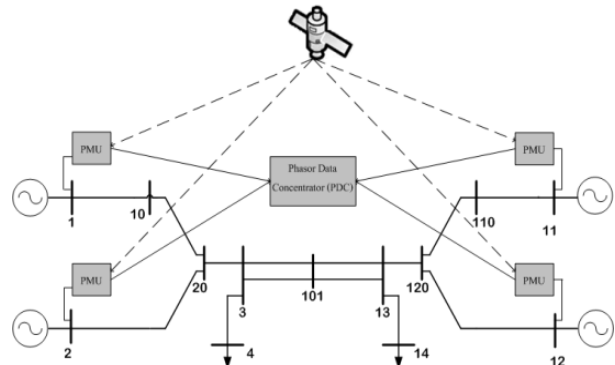
مطابق با رابطه فوق، چهار پارامتر مجهول می تواند با استفاده از روش حداقل مربعات خطا تخمین زده شود. در روش معرفی شده، منبع ولتاژ تونن بصورت یک مدل کلاسیک ژنراتوری در نظر گرفته می شود و زاویه ولتاژ تونن یک متغیر وابسته به زمان می باشد. همچنین باتوجه به کوچک بودن R_{th} برابر X_{th} از آن چشم پوشی می گردد. با توجه به (۱۳)، با استفاده از اندازه گیری PMU در دو زمان متناوب t_1 و t_2 ، مقدار ذاکتانس X_{th} می تواند با استفاده از روش حداقل مربعات، بصورت ذیل محاسبه گردد [۳]:

$$\begin{aligned} & (I(t_1)^2 - I(t_2)^2) X_{th}^2 \\ & + \left(2I(t_1) \times V(t_1) \sin(\theta(t_1) - \gamma(t_1)) \right. \\ & \left. - 2I(t_2) \times V(t_2) \sin(\theta(t_2) - \gamma(t_2)) \right) \\ & + (V(t_1)^2 - V(t_2)^2) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

بطوریکه مقادیر θ و γ بترتیب بیانگر زاویه ولتاژ و جریان بدست آمده از PMU می باشند. پس از آنکه با استفاده از رابطه فوق، X_{th} محاسبه گردید، دیگر پارامترهای مورد نظر می تواند بسادگی و با استفاده از قانون ولتاژ کیرشوف

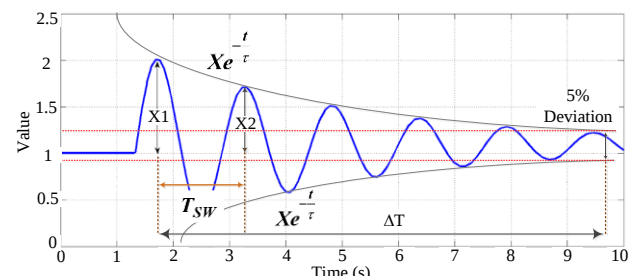
۳-۲ محاسبه میرایی سیگنال

در میراسازی نوسانات با استفاده از سیستم اندازه گیری ناحیه گسترده WAMS، لازم است که اطلاعات دریافتی از واحدهای اندازه گیری مستقر در واحدهای نیروگاهی و همچنین خطوط ارتباطی شبکه، به مرکز جمع آوری داده ها، ارسال شود.



شکل ۳- شمای کلی سیستم اندازه گیری ناحیه گسترده

مطابق با شکل ۳، در مرکز جمع آوری داده ها، با استفاده از نتایج به دست آمده از تحلیل داده های ارسالی، توان تولیدی هر واحد، مقدار توان تبدیلی بین دو ناحیه و همچنین راکتانس تونن از دید ترمینال های ژنراتور محاسبه می گردد. اطلاعات بدست آمده در این قسمت در مرحله بعد به منظور تعیین مکان و پارامترهای پایدارسازها مورد استفاده قرار می گیرد. به منظور محاسبه دقیق سیگنال های مختلف در کنترل مدهای بین ناحیه ای و تعیین پاسخ مناسب، لازم است یک شاخص عددی برای میرایی سیگنال ها ایجاد کرد تا به راحتی بتوان پاسخ ها را با یکدیگر مقایسه نمود. بدین منظور اگر نوسانی مطابق با شکل ۴ را در نظر بگیریم.



شکل ۴- شکل سیگنال نمونه جهت معرفی شاخص میرایی

شاخص مورد نظر به منظور اندازه گیری میرایی نوسانات می تواند بصورت ذیل معرفی گردد:

$$DR = \frac{\ln \frac{X_1}{X_2}}{T_{sw}} \quad (8)$$

بطوریکه X_1 برابر با دامنه پیک نخست، X_2 برابر با دامنه پیک دوم نوسان و T_{sw} مدت زمان میان دو پیک مورد نظر می باشد. با استفاده از شاخص معرفی شده، می توان مقدار عددی میرایی برای هر سیگنال را محاسبه نموده برای مقایسه دقیق نتایج به کار گرفته شود.

۳-۳ مدل محاسباتی X_{th}

در این بخش یک مدل محاسباتی بهنگام و مبتنی بر معادلات تونن شبکه به منظور محاسبه امپدانس تونن شبکه معرفی می گردد. برای مدل معرفی شده، یک روش تخمین پارامتر با استفاده از اندازه گیری های PMU پیشنهاد می گردد. مطابق با معادلات تونن شبکه، از دید هر شین می توان سیستم قدرت

بصورت ریشه مثبت معادله مربعی مورد نظر، محاسبه گردد.

۳-۴ انتخاب ژنراتورهای مناسب برای نصب پایدارساز

برای کنترل مدهای بین ناحیه‌ای با استفاده از نصب PSS، ابتدا بایستی ژنراتورهای مناسب که نصب این تجهیز در آن‌ها بیشترین تاثیر را بر میرایی مد بین ناحیه‌ای دارد انتخاب نمود. دو معیار مناسب می‌تواند برای این منظور مورد استفاده قرار گیرد، معیار شکل مد که بر اساس مدل فضای حالت سیستم قدرت عمل نموده و مدهای نوسانی سیستم را شناسایی کرده و از طریق شاخص‌هایی همچون ماتریس مقادیر ویژه، بردارهای ویژه چپ و راست و ماتریس مشارکت، پارامترهای نوسانی سیستم محاسبه می‌گردد. معیار دیگر به کار رفته بدین منظور، اندازه میرایی سیگنال‌های نوسانی سیستم است که با شاخص‌های عددی سنجیده می‌شود و به مدل سیستم وابسته نمی‌باشد. باتوجه به طرح پیشنهادی و غیرمبتنی بر مدل شبکه، در این مقاله از روش محاسبه اندازه میرایی به منظور کنترل مدهای بین ناحیه‌ای و انتخاب پایدارساز بهره گرفته می‌شود. در ادامه روش محاسبه میرایی سیگنال معرفی می‌شود.

۳-۵ تعیین پایدارساز موثر

اصول مشارکت واحدهای ژنراتوری به منظور میراسازی نوسانات بین ناحیه-ای براساس تولید توان الکتریکی تحت یک شرایط بهره‌برداری مشخص و یک توان الکتریکی میراساز هم‌فاز با نوسانات موجود در شبکه است. در این زمینه، توان تولیدی ژنراتورها و مکان الکتریکی آن‌ها نسبت به شبکه، هرکدام می‌توانند در میزان تاثیر هر واحد به منظور مشارکت در میراسازی نوسانات بین ناحیه‌ای موثر باشند به‌طوری‌که وابسته به میزان توان تولیدی ژنراتورها، میزان مشارکت آن‌ها در میراسازی نوسانات متفاوت بوده و توان مکمل میراساز متفاوتی نیز حاصل می‌شود. برای این منظور، در این مقاله از دو ویژگی توان لحظه‌ای خروجی و راکتانس تونن دیده شده از سمت ژنراتور به منظور شناسایی پایدارسازهای موثر بهره گرفته می‌شود. در شاخص پیشنهادی (۱۵)، راکتانس تونن، نشان دهنده ارتباط الکتریکی واحد ژنراتوری با مرکز ثقل شبکه است. در واقع هرچه میزان راکتانس تونن دیده شده از سمت ژنراتور کوچک‌تر و توان لحظه‌ای تولیدی ژنراتور بالاتر باشد به معنای ارتباط قوی‌تر ژنراتور با شبکه و توانایی میراسازی بهتر است. با توجه به راکتانس تونن به‌دست آمده از دید ترمینال ژنراتورهای شبکه در مرحله قبل، شاخص پیشنهادی به منظور تعیین ژنراتور تاثیرگذار در میرایی نوسانات مطابق رابطه ذیل تعریف می‌شود.

$$EP = \frac{\sum P_i \cdot X_{thi}}{\sum X_{thi}} \quad (15)$$

به‌طوری‌که P_i مقدار توان تولیدی ژنراتور واحد i ام و X_{thi} راکتانس تونن شبکه از دید ترمینال ژنراتور i ام است.

از جمله موارد مهم و تاثیرگذار در الگوریتم پیشنهادی کنترل کننده میراساز ناحیه گسترده، شناسایی زمان حقیقی واحدهای ژنراتوری موثر در زمینه میراسازی نوسانات بین ناحیه‌ای است. به همین منظور، عبارت راکتانس تونن ژنراتور در مخرج شاخص پیشنهادی (۱۵) با هدف بیشینه‌سازی شاخص پیشنهادی قرار گرفته است. همچنین، در ادامه با شناسایی واحدهای با لینک الکتریکی قوی، در مرحله دیگر انتخاب واحدهای با توان خروجی بالاتر به منظور تولید توان میراسازی مناسب در زمینه نوسانات بین ناحیه‌ای است.

قابل توجه است، به منظور شناسایی بهینه واحدهای ژنراتوری با توانایی تولید توان میراساز بین ناحیه‌ای، لازم است، در پنجره‌های زمانی مختلف، شاخص پیشنهادی (۱۵) مورد ارزیابی برخط قرار گیرد. برای این منظور، باتوجه نرخ فرکانس نوسانات بین ناحیه‌ای در بازه ۱-۰/۱ هرتز، پنجره زمانی کوچک‌تر و به میزان $\Delta t = 0/5$ ثانیه انتخاب و به صورت متناوب در طول زمان، مورد استفاده

قرار می‌گیرد. همچنین، مقصود از توان لحظه‌ای، توان اکتیو $P(t)$ خروجی ژنراتور در هر لحظه از زمان t است. در شرایط زمان-حقیقی، در هر پنجره زمانی متناوب، توان لحظه‌ای اکتیو خروجی از ژنراتورها اندازه‌گیری شده و به عنوان متغیر در شاخص پیشنهادی (۱۵) اعمال می‌شود. همچنین، در هر پنجره زمانی Δt با محاسبه شاخص پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم‌های بهینه‌سازی و به صورت بیشینه‌سازی تابع هدف، واحدهای ژنراتوری با لینک الکتریکی قوی و توان خروجی بالا، شناسایی می‌شوند.

در ادامه واحدهای شناسایی شده می‌توانند به عنوان واحدهای کاندید دریافت سیگنال سراسری و کنترل نوسانات بین ناحیه‌ای انتخاب شوند. شاخص فوق تنها برای واحدهایی که دارای پایدارساز میباشند محاسبه می‌شود. از آن جایی که مقدار راکتانس تونن، معیار مناسبی برای تعیین قدرت ژنراتور در یک سیستم است، بنابراین شاخص فوق می‌تواند به عنوان شاخص مناسبی جهت تعیین قدرت اثرگذاری هر واحد در میراسازی نوسانات به کار گرفته شود. لازم به ذکر است که انتخاب پایدارساز موثر به تنهایی منجر به میرایی نوسانات نخواهد شد و لازم است که پارامترهای پایدارساز انتخاب شده نیز توسط یک الگوریتم مناسب بطور صحیح بهینه شوند.

قابل توجه است، فرآیند اجرایی کنترل کننده پیشنهادی دارای مراحل مختلف محاسباتی بوده که هر یک دارای زمان محاسباتی مربوط به خود بوده است. برای این منظور، در این قسمت، کلیه زمان‌های مورد نیاز در اجرای کنترل کننده پیشنهادی و انجام محاسبات مختلف، اندازه‌گیری شده و به تفکیک در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: زمان محاسبات در اجرای کنترل کننده پیشنهادی.

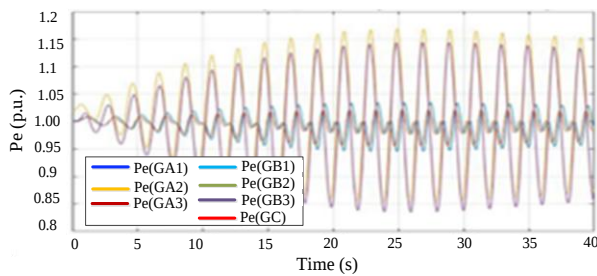
مرحله	نوع فرآیند	مدت زمان محاسبه
۱	پنجره اطلاعاتی اندازه‌گیری سیگنال‌های سرعت و زاویه روتور	۱ سیکل بین-ناحیه‌ای
۲	محاسبه ضرایب همبستگی و شناسایی گروه‌های ژنراتوری هم‌نوا	۰/۱۵ ثانیه
۳	محاسبه سیگنال مرکز اینرسی نواحی نوسانی ($\Delta\omega_{COI-AB}$, $\Delta\delta_{COI-AB}$)	۰/۰۰۵ ثانیه
۴	محاسبه میرایی نوسانات بین ناحیه‌ای DR	دو پیک نوسان
۶	محاسبه امپدانس تونن شبکه	۰/۴۷ ثانیه
۷	محاسبه شاخص ترکیب EP	۰/۵۴ ثانیه
۸	تخمین ضرایب کنترلی پایدارسازهای کاندید	۰/۳۵ ثانیه
	مجموع	دو سیکل نوسان بین ناحیه‌ای

مطابق با جدول ۳، اجرای کنترل کننده پیشنهادی در محیط زمان واقعی، نیازمند دو سیکل نوسان بین ناحیه‌ای برای شناسایی صحیح پایدارسازهای موثر و ارسال سیگنال برای ژنراتورهای کاندید است.

۴- مطالعات شبیه سازی

به منظور ارزیابی کنترل کننده پیشنهادی برای میراسازی نوسانات بین-ناحیه‌ای، دو شبکه مختلف شامل شبکه دو ناحیه‌ای کندور [۱] و شبکه ملی برق ایران شامل ۸۱۹ باس ژنراتوری معرفی شده و توانایی الگوریتم پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گرفته است. قابل توجه است، تمامی سناریوهای شبیه‌سازی و طراحی کنترل کننده پیشنهادی در محیط نرم افزاری دیگسایلنت نسخه ۱۵،۱،۷ انجام شده است.

۴-۱ شبکه دو ناحیه‌ای



(ب)

شکل ۷- نوسانات سرعت ژنراتورها بدون عملکرد پایدارسازها (الف) نوسان‌های سرعت، (ب) نوسان‌های توان الکتریکی خروجی

همان‌طور که مشخص است، به ازای پیشامد معرفی شده، ژنراتورها به صورت دو گروه هم‌نوا در مقابل یکدیگر و با میرایی منفی در حال نوسان هستند. در زمینه خروج بار L8 و تاثیر آن بر ناپایداری دینامیکی شبکه، قابل توجه است، با توجه به شبکه دو ناحیه‌ای مورد نظر در شکل ۶، شبکه دارای ساختار توپولوژیکی و تعداد بار محدودی است. در این شرایط، به ازای سناریوهای خطا از قبیل خروج خط یا خروج بار، مقادیر ویژه سیستم دچار تغییر شده به نحوی که با انتقال یک مد نوسانی به سمت راست محور موهومی، سیستم دچار ناپایداری بین‌ناحیه‌ای می‌شود. همچنین، قابل توجه است، در زمینه سناریوهای با پتانسیل شکل‌گیری نوسانات بین‌ناحیه‌ای ناپایدار، شدت خطا اهمیتی چندانی نداشته و میزان تاثیر آن بر جابجایی مقادیر ویژه حائز اهمیت است. لذا، در موارد حساس، یک خطای سیگنال کوچک هم‌چون خروج بار نیز می‌تواند موجب تحریک یک مد نوسانی و شکل‌گیری نوسانات بین‌ناحیه‌ای شود.

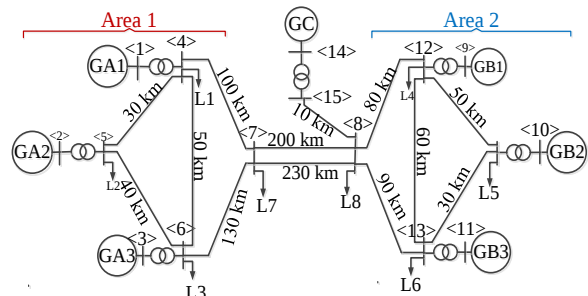
مطابق با شکل (۷)، به ازای عدم عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی، دامنه نوسان در طول زمان افزایش یافته و موجب ناپایداری ناحیه‌گسترده در سیستم قدرت می‌شود. با توجه به شبکه مورد نظر و براساس سیگنال‌های دریافتی، سناریوهای مختلفی از حضور پایدارسازها در شبکه را می‌توان در نظر گرفت. ترکیبات مورد نظر می‌تواند مطابق با جدول ۴ در نظر گرفته شوند.

مطابق با جدول ۴، به بررسی شاخص پیشنهادی در برابر ترکیبات مختلف حضور کنترل‌کننده پیشنهادی در شبکه پرداخته می‌شود. در سناریوی نخست در نظر گرفته می‌شود تنها یک کنترل‌کننده پیشنهادی در شبکه فعال باشد. نتایج بدست آمده از شاخص پیشنهادی در جدول ۵، آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، به ازای اعمال حالت نخست، کنترل‌کننده پیشنهادی GB3 دارای حداکثر مقدار شاخص پیشنهادی EP است. نتایج به دست آمده از نوسان‌های سرعت واحدهای ژنراتوری به ازای عملکرد کنترل‌کننده GB3 در شکل ۸ نشان داده شده‌اند.

جدول ۴- سناریوهای مختلف حضور پایدارسازها در شبکه

ترکیب	نوع سناریو	تعداد حالات سناریو
۱	یک پایدارساز در شبکه فعال می‌باشد.	۷ سناریو
۲	دو پایدارساز در شبکه فعال می‌باشد.	۲۱ سناریو
۳	سه پایدارساز در شبکه فعال می‌باشد.	۱۵ سناریو
۴	چهار پایدارساز در شبکه فعال می‌باشد.	۱۰ سناریو
۵	پنج پایدارساز در شبکه فعال می‌باشد.	۶ سناریو
۶	شش پایدارساز در شبکه فعال می‌باشد.	۳ سناریو
۷	هفت پایدارساز در شبکه فعال می‌باشد.	۱ سناریو

در این بخش از یک شبکه دو ناحیه‌ای کندور [۱] به منظور ارزیابی کنترل‌کننده پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است. دیاگرام تک خطی شبکه مورد نظر در شکل (۶) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، شبکه مورد نظر دارای ۷ واحد ژنراتوری بوده به نحوی که هر واحد دارای ادوات کنترلی مربوط به خود هستند. پارامترهای شبکه و ژنراتورها در پیوست آورده شده است.



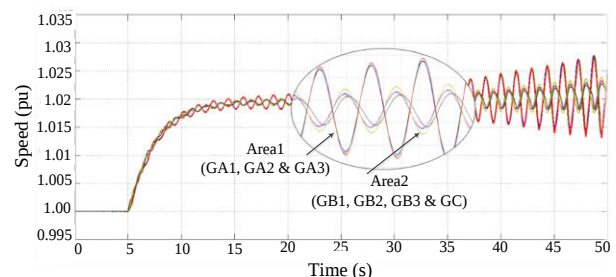
شکل ۶- شبکه دو ناحیه‌ای مورد مطالعه

مطابق با شکل ۶، در ناحیه یک این سیستم، مجموع توان مصرفی شبکه به میزان ۲۷۰۰ مگاوات و توان تولیدی واحدها به میزان ۲۸۰۰ مگاوات بوده و از طریق خط انتقال بین‌ناحیه‌ای معادل ۵۱۰ مگاوات توان منتقل می‌گردد. از هر کدام از ژنراتورهای سیستم داده‌های سرعت ژنراتور ω ، زاویه روتور δ ، توان تولیدی ژنراتور P_e و ولتاژ ترمینال V_t توسط PMU دریافت شده و از طریق بستر مخابراتی WAMS به مرکز کنترل داده‌ها منتقل می‌گردد.

به منظور بررسی روش پیشنهادی برای میراسازی نوسانات بین ناحیه‌ای، پاسخ دینامیکی سیستم تحت یک سناریوی خطای مشابه با پتانسیل نوسانات بین‌ناحیه‌ای ناپایدار، با و بدون حضور طرح کنترلی پیشنهادی، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. پاسخ دینامیکی سیستم بدون عملکرد پایدارسازها در شکل (۷) و با عملکرد بهینه پایدارسازها در شکل ۸ نشان داده شده‌اند.

هم‌چنین پیرو توضیحات ارائه شده در بخش ۳-۵، در طرح پیشنهادی، از پایدارسازهای مرسوم و متداول در سیستم‌های قدرت با دو تابع تبدیل جبران-ساز فاز متوالی مرتبه اول شامل ضریب تقویت K_C و ثابت زمانی‌های T_1 ، T_2 ، T_3 و T_4 مطابق با جدول ۲، بهره گرفته می‌شود. در این زمینه، هر کدام از توابع مرتبه اول توانایی ۹۰ درجه جبران‌سازی فاز را داشته و به ازای دو جبران‌ساز متوالی می‌توان حداکثر ۱۸۰ درجه جبران‌سازی فاز را بر روی سیگنال‌های بین‌ناحیه‌ای انجام داد.

در مرکز کنترل داده‌ها، با توجه به شرایط بهره‌برداری سیستم مکان مناسب PSS تعیین شده و پارامترهای آن تنظیم می‌شود. به منظور بررسی روش پیشنهادی، پاسخ دینامیکی سیستم با و بدون حضور پایدارسازهای معرفی شده، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این منظور، یک سناریوی پیشامد بصورت خروج بار L8 بین دو ناحیه در ثانیه ۵ از شبکه تعریف می‌شود. نمایی از نوسانات سرعت ژنراتورها بدون حضور پایدارسازها، در شکل ۷ نشان داده شده است.

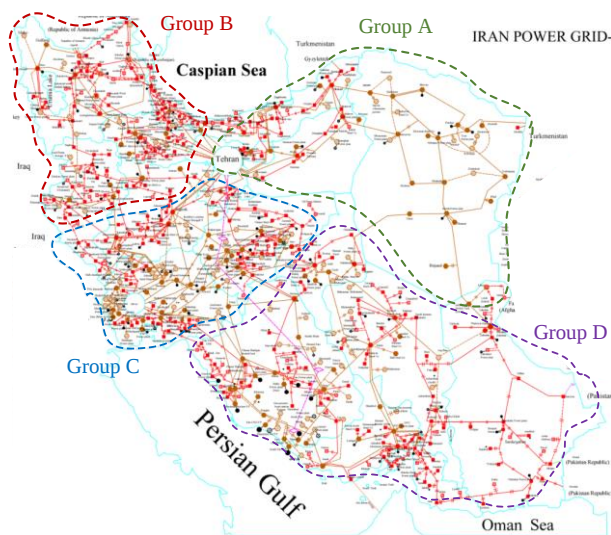


(الف)

مطابق با جدول ۶، در زمینه بهترین دوتایی، بیشینه‌سازی شاخص پیشنهادی به انتخاب دو پایدارساز از دو ناحیه مختلف شامل پایدارساز واحدهای GA2 و GB3 انجامیده است. اگر خصوصیات این دو واحد را مورد بررسی قرار دهیم، متوجه می‌شویم این دو واحد، بزرگترین واحدهای ژنراتوری در تولید توان در ناحیه مربوط به خود می‌باشند. در این قسمت مجدداً ملاحظه می‌گردد که شاخص پیشنهادی دارای توانایی تصمیم‌گیری صحیحی می‌باشد چراکه واحدهای با توان بالاتر توانایی بیشتری در میراسازی نوسانات در شبکه را دارا می‌باشند. همچنین ملاحظه می‌گردد که در ترکیبات با مرتبه بالاتر، همواره این دو واحد در ترکیب نهایی حضور خواهند داشت.

۴-۲ شبکه ملی برق ایران

در این بخش، توانایی کنترل‌کننده پیشنهادی در زمینه میراسازی سیستم قدرت با چندین مد بین‌ناحیه‌ای متفاوت مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، شبکه ملی برق به‌عنوان شبکه قدرت کاندید انتخاب می‌شود. نمایی از ساختار تک خطی شبکه ملی برق ایران در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹- شبکه ملی برق ایران.

مطابق با شکل ۹، شبکه برق ایران متشکل از ۱۲۱۹ خط انتقال فشار قوی و ۱۷۲۱ باس ژنراتوری و بار می‌باشد. با توجه به ماهیت دینامیکی، شبکه ملی برق ایران دارای پتانسیل شکل‌گیری گروه هم‌نوی ژنراتوری میان چهار گروه شمال شرق (Group A)، شمال غرب (Group B)، جنوب غرب (Group C) و جنوب شرق (Group D) نشان داده شده در شکل ۹ است. نتایج به‌دست آمده از تحلیل مقادیر وزه شبکه ایران نشان دهنده وجود چهار مد بین‌ناحیه‌ای کاندید با فرکانس و ضریب میرایی بین‌ناحیه‌ای ارائه‌شده در جدول ۷ می‌باشد.

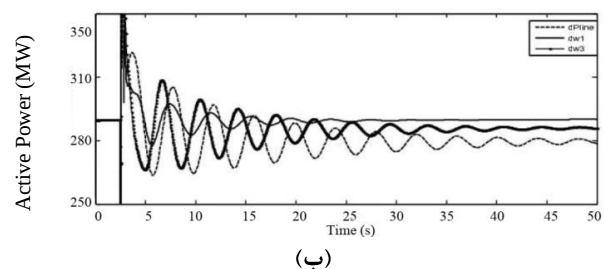
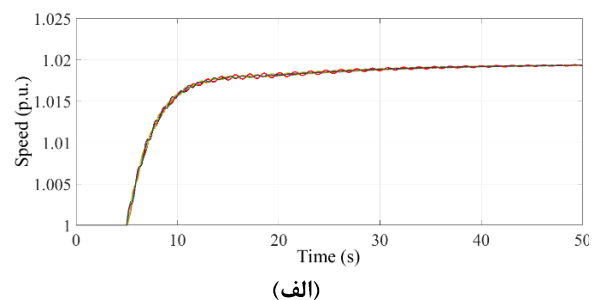
جدول ۷- مشخصات مدهای بین‌ناحیه‌ای بالقوه شبکه ملی برق ایران.

مد	گروه‌های نوسان‌کننده	فرکانس نوسان (هرتز)	ضریب میرایی
Mode 1	Group A vs. Group B	۰/۴۱۵	۰/۰۰۲۵
Mode 2	Group A vs. Group C	۰/۳۰۸	۰/۰۱۲
Mode 3	Group B vs. Group C	۰/۶۲۵	۰/۰۱۱۹
Mode 4	Group C vs. Group D	۰/۷۱۹	۰/۰۲۱۳

مطابق با جدول ۷، گروه‌های هم‌نوا دارای پتانسیل شکل‌گیری نوسان بین-ناحیه‌ای با میرایی ضعیف هستند. به منظور ارزیابی کنترل‌کننده پیشنهادی، در شرایط بهره‌برداری ۶۵۲۲۹ مگاوات، به دنبال رخداد خطا در خط DP119 بین

جدول ۵- نتایج شاخص پیشنهادی به ازای حضور یک پایدار ساز

PSS GA 1	PSS GA 2	PSS GA 3	PSS GB 1	PSS GB 2	PSS GB 3	PS S GC	EP
●	-	-	-	-	-	-	400
-	●	-	-	-	-	-	700
-	-	●	-	-	-	-	100
-	-	-	●	-	-	-	500
-	-	-	-	●	-	-	100
-	-	-	-	-	●	-	1000
-	-	-	-	-	-	●	63



شکل ۸- نوسانات سرعت ژنراتورها با عملکرد پایدارسازها
(الف) نوسان‌های سرعت، (ب) نوسان‌های توان الکتریکی خروجی

مطابق با شکل ۸، کنترل‌کننده GB3 دارای توانایی مطلوبی در زمینه پایدارسازی نوسان بین‌ناحیه‌ای بوده است. در این قسمت توانایی شاخص پیشنهادی (۱۵) در انتخاب مکان مناسب کنترل‌کننده ناحیه‌گسترده میراسازی بین‌ناحیه‌ای نشان داده شده است. این روند برای مابقی ترکیب‌های پایدارسازها انجام شده و نتایج آن بررسی گردید. نتایج بهینه شاخص پیشنهادی از ترکیب-های مختلف کنترل‌کننده میراساز ناحیه‌گسترده در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶- نتایج شاخص پیشنهادی به ازای حضور یک پایدار ساز

مؤثرترین واحدها در ترکیب‌های مختلف کنترل‌کننده پیشنهادی	EP	PSS GC	PSS GB3	PSS GB2	PSS GB1	PSS GA3	PSS GA2	PSS GA1	ترکیب
1	1000	-	●	-	-	-	-	-	1
2	849.08	-	●	-	-	-	●	-	2
3	623.73	-	●	-	-	-	●	●	3
4	378.34	-	●	-	●	●	●	-	4
5	382.58	-	●	-	●	●	●	●	5
6	299.98	-	●	●	●	●	●	●	6
7	276.58	●	●	●	●	●	●	●	7

نوسان‌های بین‌ناحیه‌ای به وضوح نشان داده شده است. در این زمینه، بیشترین تاثیر میرایی بر روی مد Mode1 میان دو گروه نوسانی Group A و Group B است. در ادامه بیشترین تاثیر کنترل‌کننده به ترتیب بر روی مدهای Mode2، Mode3 و Mode4 است. قابل ذکر است، انتخاب مکان مناسب نصب کنترل-کننده از جمله موارد مهم در حصول میرایی مطلوب بین‌ناحیه‌ای بوده است که در این زمینه با محاسبه راکتانس تونن دیده شده از سمت واحدهای ژنراتوری و توان لحظه‌ای تولید شده، واحدهای کاندید شناسایی و مجهز می‌شوند. خصوصیات شاخص پیشنهادی همواره بر شناسایی واحدهای ژنراتوری با لینک الکتریکی قوی و توان خروجی بالا بوده لذا همواره واحدهای شناسایی شده، واحدهای بزرگ با قابلیت تامین توان الکتریکی قابل توجه شبکه هستند.

۵- مقایسه طرح پیشنهادی با روش‌های پیشین

در این بخش، مقایسه جامعی میان توانایی میراسازی شاخص پیشنهادی و یکسری از روش‌های ارائه شده پیشین که در جدول (۱) خلاصه شده است، انجام می‌شود.

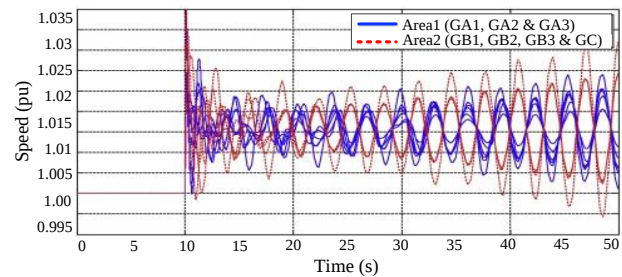
قابل توجه است، در زمینه مقایسه روش پیشنهادی با سایر روش‌ها، شبیه سازی‌ها با توجه به سناریوی خطای مشابه و بر روی یک شبکه نمونه ثابت انجام و نتایج میراسازی مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. برای این منظور، تمامی در تمامی سناریوهای شبیه‌سازی، تعداد پایدارسازها یکسان بوده و توانایی آن‌ها در تولید توان میراساز توسط با کمک روش‌های مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در صورتی که توان خروجی از پایدارساز، هم فاز با نوسانات بین‌ناحیه‌ای نباشد و یا کسری از هم فازی بین‌ناحیه‌ای را داشته باشد، ژنراتور مورد نظر توانایی میراسازی محدودی داشته و در مواردی نیز نتیجه عکس خواهد داشت. لذا در نتایج به دست آمده، توانایی پایدارسازها در تولید توان میراسازی مد نظر قرار گرفته و خروجی پایدارسازها در قالب نتایج عددی در جدول ۹ و همچنین نتایج شبیه‌سازی در شکل ۱۲ ارائه می‌شوند.

همچنین، تعداد پایدارسازها نیز باتوجه به نتایج بهینه به دست آمده از جدول (۵) انتخاب و توانایی میراسازی روش‌های مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرند.

جدول ۹- مقایسه کنترل‌کننده پیشنهادی با روش‌های پیشین.

تعداد پایدارسازها	توان خروجی پایدارسازها (درصد توان نامی)	توان خروجی پایدارسازها (درصد توان نامی)	توان خروجی پایدارسازها (درصد توان نامی)	نتیجه
[۱]	۵ سیکل	٪ ۳۰	٪ ۳۰	بله
[۲]	بالاتر از ۱۰ سیکل	٪ ۵۰	٪ ۵۰	بله
[۳]	۸ سیکل	٪ ۵۰	٪ ۸۰	خیر
[۴]	۶ سیکل	٪ ۸۰	٪ ۵۰	بله
[۵]	بالاتر از ۱۰ سیکل	٪ ۵۰	٪ ۵۰	خیر
[۶]	بالاتر از ۱۰ سیکل	٪ ۵۰	٪ ۸۰	خیر
[۷]	۷ سیکل	٪ ۵۰	٪ ۸۰	بله
[۸]	بالاتر از ۱۰ سیکل	بالا	٪ ۸۰	بله
[۹]	۹ سیکل	٪ ۵۰	٪ ۸۰	بله
[۱۰]	بالاتر از ۱۰ سیکل	٪ ۵۰	٪ ۵۰	خیر
[۱۱]	۱۰ سیکل	٪ ۵۰	٪ ۵۰	خیر
[۱۲]	۶ سیکل	٪ ۸۰	٪ ۵۰	خیر
[۱۳]	بالاتر از ۱۰ سیکل	٪ ۸۰	٪ ۵۰	خیر
[۱۴]	بالاتر از ۱۰ سیکل	٪ ۸۰	٪ ۵۰	بله

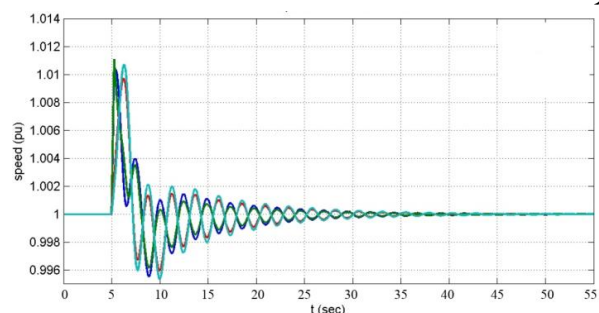
دو باس اصلی ASGS039 و ASMS016 و قطع خط، رفتار دینامیکی سیستم بدون حضور کنترل‌کننده شبیه‌سازی و در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰- نوسانات سرعت بدون حضور کنترل‌کننده پیشنهادی.

مطابق با شکل ۱۰، به‌ازای خطای اتصال کوتاه و بدون حضور کنترل‌کننده پیشنهادی، شبکه دچار نوسان بین‌ناحیه‌ای شدیدی میان دو گروه Group A و Group B می‌شود. در این شرایط و بدون حضور کنترل‌کننده مناسب، دامنه نوسان در طول زمان افزایش یافته و موجب ناپایداری ناحیه‌گسترده خواهد شد. با توجه به واحدهای ژنراتوری کاندید در سمت شمال غرب و شمال شرق شبکه ملی برق ایران و براساس شاخص پیشنهادی EP (۱۵)، سیگنال‌های دریافتی از واحدهای اندازه‌گیری فازوری ارزیابی شده و ترکیب بهینه از حضور کنترل‌کننده پیشنهادی شناسایی شده است. در این قسمت با توجه به تعداد زیاد واحدهای کاندید دریافت سیگنال کنترلی، امکان معرفی آن‌ها مقدور نبوده و لذا تاثیر کنترل‌کننده پیشنهادی بر میراسازی نوسان بین‌ناحیه‌ای مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج به‌دست آمده از نوسان‌های سرعت واحدهای ژنراتوری به‌ازای حضور کنترل‌کننده پیشنهادی ناحی گسترده در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند.

همان‌گونه که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، کنترل‌کننده پیشنهادی دارای توانایی کنترلی مطلوبی بر روی شبکه ناحیه گسترده ملی ایران بوده است. در این قسمت مجدداً، توانایی کنترل‌کننده مجهز به شاخص پیشنهادی (۱۵) در انتخاب ناحیه مناسب و اعمال سیگنال کنترلی مناسب میراساز نوسان‌های بین‌ناحیه‌ای بوده است. نتایج به‌دست آمده از تحلیل مقادیر ویژه در دو حالت بدون حضور و با حضور کنترل‌کننده پیشنهادی ناحیه گسترده در جدول ۸ آورده شده است.



شکل ۱۱- نوسانات سرعت با حضور کنترل‌کننده پیشنهادی.

جدول ۸- مقایسه مشخصات مدهای بین‌ناحیه‌ای در حضور و بدون

حضور کنترل‌کننده پیشنهادی.

مد	فرکانس نوسان (هرتز)		ضریب میرایی	
	بدون حضور	با حضور	بدون حضور	با حضور
Mode 1	۰/۴۱۵	۰/۴۲۱	۰/۰۰۲۵	۰/۶۵
Mode 2	۰/۳۰۸	۰/۳۱۹	۰/۰۱۲	۰/۵۶
Mode 3	۰/۶۲۵	۰/۶۴۴	۰/۰۱۱۹	۰/۳۶
Mode 4	۰/۷۱۹	۰/۷۳۶	۰/۰۲۱۳	۰/۴۲

مطابق با جدول ۸، توانایی کنترل‌کننده پیشنهادی در بهبود میراسازی

کنترل کننده ناحیه گسترده به منظور میراسازی نوسانات بین ناحیه‌ای ارائه شده است. به این منظور، شاخص پیشنهادی متشکل از اندازه‌گیری راکتانس تون دیده شده از سمت واحدهای ژنراتوری و توان لحظه‌ای خروجی ژنراتورها به صورت بیشینه‌سازی تابع هدف معرفی شده است. در این زمینه، راکتانس تون کوچک، نشان‌دهنده لینک الکتریکی قوی واحد ژنراتوری و توان لحظه‌ای خروجی بالا بیان‌گر توانایی مطلوب واحد در تامین توان میراساز بین ناحیه‌ای هستند. به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، دو شبکه مختلف شامل شبکه دو ناحیه کندور و شبکه بزرگ به هم پیوسته ملی برق ایران معرفی و توانایی کنترل کننده پیشنهادی مورد ارزیابی گرفت. در شبکه دو ناحیه کندور، مجموعه‌ای از سناریوهای نوسان‌های بین ناحیه‌ای شناسایی شده و تاثیر مکان و توان تولیدی واحدها را در میراسازی نوسان بین ناحیه‌ای بررسی شد. با توجه به اینکه این شاخص ترکیبی از فاصله الکتریکی واحد و همچنین توان تولیدی آن در نظر گرفته شده است، معیار مناسبی برای تعیین ژنراتور مناسب جهت نصب پایدارساز خواهد بود. همچنین در شبکه ملی ایران با پتانسیل شکل‌گیری مدهای مختلف بین ناحیه‌ای، شاخص پیشنهادی توانسته به نحو مطلوبی واحدهای مناسب را شناسایی نموده به نحوی که با نصب کنترل کننده پیشنهادی بر روی واحدهای کاندید، میرایی مطلوب نوسان بین ناحیه‌ای حاصل شده است. نتایج نشان داده است که انتخاب مکان نصب کنترل کننده ناحیه گسترده مبتنی بر شاخص پیشنهادی، میرایی نوسان‌های بین ناحیه‌ای را بهبود بخشیده و منجر به افزایش امنیت دینامیکی سیستم‌های قدرت بزرگ به پیوسته شده است.

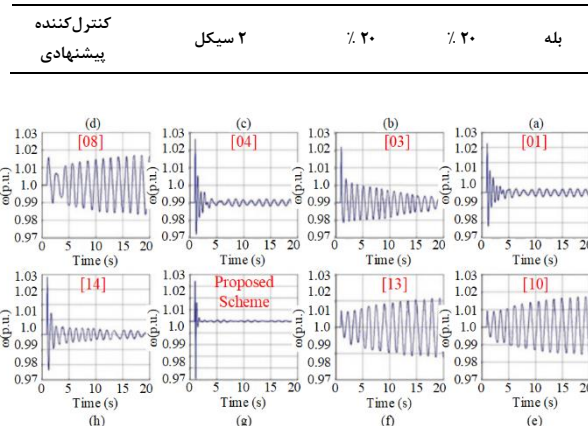
پیوست‌ها

جدول الف- پارامترهای ژنراتورهای شبکه دوناحیه کندور.

G6	G5	G4	G3	G2	G1	Unit No
						Param.
911	500	100.1	590	920.35	100	MVA
26	18	13.8	22	18	13.8	Kv
0.193	0.283	0.28	0.215	0.275	0.145	x"d
0.266	0.444	0.314	0.28	0.355	0.22	x'd
2.04	1.782	1.014	2.11	1.79	1.18	xd
0.001	0.004	0.0049	0.0046	0.0048	0.0035	ra
0.154	0.275	0.163	0.155	0.215	0.075	xl
0.035	0.055	0.039	0.032	0.032	0.042	t"d0
6	6.07	6.55	4.2	7.9	5.9	t'd0
0.052	0.152	0.071	0.062	0.055	0.092	t"q0
0.9	0.5	0.5	0.565	0.5	0.3	t'q0
2.49	3.98	3.12	2.32	3.76	4.99	H

مراجع

- [۱] سهیل رنجبر، محمدرضا آقامحمدی، فرهاد حق جو، "میراسازی نوسانات بین ناحیه‌ای در سیستم‌های قدرت با استفاده از پایدارسازهای مبتنی بر سیگنال‌های سراسری"، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۶.
- [2] A. F. Snyder, et al., "Inter-area Oscillation Damping with Power System Stabilizers and Synchronized Phasor Measurements," in International Conference on Power System Technology, 2018, Proceedings, POWERCON '98, pp 790-794 vol. 2.
- [3] Joakim Björk, Danilo Obradović, Lennart Harnefors, Karl Henrik Johansson, "Influence of Sensor Feedback Limitations on Power Oscillation Damping and Transient Stability", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.37, No.2, November 2022.
- [4] Soheil Ranjbar, "Online estimation of controlled islanding time intervals using dynamic state trajectories through cascading failures from WAMS data", Electric Power Systems Research, vol.214, pp.108890-108910, January 2023.
- [5] N.Martins, L.Lima, "Determination of suitable location for power system stabilizers and static compensators for damping electromechanical oscillations in large scale power systems", IEEE



شکل ۱۲- مقایسه میان میرایی نوسان کنترل کننده پیشنهادی و

برخی روش‌های پیشین

(a) مرجع [۱]، (b) مرجع [۳]، (c) مرجع [۴]، (d) مرجع [۸]، (e) مرجع [۱۰]، (f) مرجع [۱۳]، (g) طرح پیشنهادی، (h) مرجع [۱۴].

براساس جدول ۹ و نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده در شکل (۱۲)، مهمترین ویژگی طرح پیشنهادی توانایی میراسازی سناریوهای نوسان بین ناحیه‌ای در تمامی شرایط بهره‌برداری و مدت زمان کوتاه (کمتر از ۲ سیکل بین ناحیه‌ای) است. همچنین، وابستگی طرح پیشنهادی تنظیمات و پیچیدگی سیستم بسیار کم بود که حاکی از عملکرد قوی آن در طیف گسترده‌ای از شرایط بهره‌برداری است.

از مزایای روش پیشنهادی، استفاده از تنها دو سیکل بین ناحیه‌ای برای محاسبات و اتخاذ تصمیمات کنترلی است. با توجه به فرآیند اجرای محاسبات کنترل کننده پیشنهادی ارائه شده در جدول ۳، اجرای کنترل کننده پیشنهادی در محیط زمان واقعی، نیازمند دو سیکل نوسان بین ناحیه‌ای برای شناسایی صحیح پایدارسازهای موثر و ارسال سیگنال برای ژنراتورهای کاندید است.

همچنین، در زمینه سایر نتایج عددی ارائه شده در جدول ۹، مقادیر براساس میزان وابستگی محاسبات و به صورت تخمینی ارائه شده‌اند. به عنوان نمونه، در طرح پیشنهادی، وابستگی ۲۰٪ به مدل شبکه ارائه شده در جلد ۹ ناشی از متغیرهای مورد نیاز همانند ولتاژ و جریان باس‌های شبکه، برای محاسبه امپدانس تونن شبکه است که این مسئله می‌تواند با توجه به ساختار توپولوژیکی شبکه قدرت، هزینه و پیچیدگی هم راستا با وابستگی به مدل شبکه و در حدود ۲۰٪ برای طرح پیشنهادی و مقادیر متفاوت برای سایر روش‌ها داشته باشد. در این زمینه، در سایر الگوریتم‌ها، زمان بهره‌برداری متفاوتی برای شناسایی و میراسازی نوسان بین ناحیه‌ای در رنج ۶ الی چند ده سیکل بین ناحیه‌ای مورد نیاز است. همچنین، در اغلب موارد، وابستگی زیادی به تنظیمات سیستم وجود داشته به این معنی که مطالعات بیشتری در مورد ساختارهای توپولوژیکی مختلف مورد نیاز خواهد بود. با این حال، در مورد طبقه‌بندی کننده‌های هوشمند [۹] تا [۱۲]، روش‌های پیشین می‌توانند میرایی و سیگنال‌های کنترلی را با دقت مطلوبی تخمین بزنند، اگرچه تنظیمات آن‌ها به شدت به شبکه آزمون تحت مطالعه بستگی داشته و به روزرسانی نمونه‌های آموزشی برای شبکه‌های مختلف مورد نیاز است. طرح کنترل کننده ناحیه گسترده پیشنهادی به گونه‌ای طراحی شده است که به توان به راحتی با حداقل پیچیدگی در شبکه‌های مختلف از جمله شبکه‌های واقعی بزرگ مورد استفاده قرار داد.

۶- جمع‌بندی

در این مقاله، شاخصی برخط در زمینه شناسایی مکان‌های کاندید نصب

- Modes in Power System Using Deep Learning Approach", IEEE Access, Vol.10, November 2022.
- [12] Andrey Gorbunov, Jimmy Chih-Hsien Peng, Janusz W. Bialek, Petr Vorobev, "Can Center-of-Inertia Model be Identified From Ambient Frequency Measurements?" IEEE Transactions on Power Systems, Vol.37, No.3, May 2022.
- [13] Oscullo, J., & Gallardo, C. "Adaptive tuning of power system stabilizer using a damping control strategy considering stochastic time delay," IEEE Access, vol. 8. no.1, pp. 1-11, 2020.
- [14] Soheil Ranjbar, "Adaptive criteria of estimating power system separation times based on inter-area signal", IET Generation, Transmission & Distribution, pp.1-16, January 2023. <https://doi.org/10.1049/gtd2.12750>
- [15] Mohammadpour, A.; et.al, "Wide-Area Measurement, Monitoring and Control: PMU-Based Distributed Wide-Area Damping Control Design Based on Heuristic Optimization Using DIgSILENT PowerFactory in Advanced Smart Grid Functionalities Based on PowerFactory." Springer AG, pp.211-240, 2018.
- [۱۶] سعید، اباذری، امید، مرادی، «بهبود میرایی نوسانات سیستم قدرت با به کارگیری UPFC و تنظیم پارامترهای کنترل کننده بر اساس یک الگوریتم جدید PSO»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵.
- Transactions on Power Systems, Vol.5, No.4, November 2020.
- [6] Fang Liu, Haotian Li, Qianyi Liu, Kang-Zhi Liu, Danyun Li, "Improved Data-Driven Model-Free Adaptive Damping Controller Design for Interconnected Power Systems With Stochastic Communication Delays", Vol.38, No.1, January 2023.
- [7] Mohammadreza Hatami, Kasra Koorehdavoudi, Habib Wajid, Vaithianathan Venkatasubramanian, Patrick Panciatici, Florent Xavier, Gilles Torresan, "Online Transfer Function Estimation and Control Design Using Ambient Synchrophasor Measurements", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.38, No.1, January 2023.
- [8] Xinyi Zhou, Shu Cheng, Xun Wu, Xinliang Rao, "Influence of Photovoltaic Power Plants Based on VSG Technology on Low Frequency Oscillation of Multi-Machine Power Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.37, No.6, June 2022.
- [9] K.Sejaa, et al, "Mixed integer non-linear programming via the cross-entropy approach for power system stabilizers location and tuning", IET Gener. Transm. Distrib, Vol. 4, Iss. 8, pp. 928-939, 2020.
- [10] Amin Sharafi, Arash Vahidnia, Mahdi Jalili, Gerard Ledwich, "Adaptive Wide-Area Control of Power Systems Through Dynamic Load Modulating SVCs", IEEE Access, Vol.10, November 2022.
- [11] Rahul Satheesh, Nashida Chakkungal, Sunitha Rajan, Manu Madhavan, Hassan Haes Alhelou, "Identification of Oscillatory