

بهبود پایداری ولتاژ در شبکه های قدرت با کنترل ولتاژ شین فشار قوی نیروگاه

اصغر اکبری فرود^۱، حسین سیفی^{۲*}، علی خاکی صدیق^۳

۱- استادیار گروه برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه سمنان

۲- استاد بخش مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۳- استاد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

* تهران صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۵

seifi_ho@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: اردیبهشت ۱۳۸۴، پذیرش مقاله: اسفند ۱۳۸۴)

چکیده- یکی از ابزارهای کنترل ولتاژ در شبکه های قدرت، رگولاتور پیشرفته کنترل ولتاژ شین فشار قوی نیروگاه است. با استفاده از این رگولاتور، پایداری ولتاژ را می توان بهبود بخشید. در این مقاله روش تنظیم پارامترهای این رگولاتور به منظور بهبود پایداری ولتاژ مطالعه شده است. الگوریتم پیشنهادی بر روی دو شبکه آزمون، یکی ۲۲ شین و دیگری ۱۱۸ شین IEEE، آزمایش شده است.

کلید واژگان: رگولاتور پیشرفته کنترل ولتاژ شین فشار قوی نیروگاه، پایداری ولتاژ، کنترل ولتاژ، کنترل ژنراتور، کنترل سیستم قدرت، الگوریتم ژنتیک، تنظیم پارامترها.

۱- مقدمه

کنترل و پایداری ولتاژ از مسائل بسیار مهم در شبکه های قدرت است. امروز از روشها و تجهیزات متعددی برای بهبود پروفیل و پایداری ولتاژ استفاده می شود. برخی از این روشها در ارتباط با نیروگاهها است. حلقه اتوماتیک تنظیم ولتاژ^۱ اولین کنترلر ولتاژ شبکه است. جبرانگر افت خط^۲ یکی دیگر از روشهای کنترل ولتاژ در نیروگاه است؛ وظیفه این کنترلر جابه جایی نقطه ای است که ولتاژ آن توسط ژنراتور کنترل می شود. از این روش برای اهداف مختلفی مانند بهبود پروفیل و پایداری ولتاژ استفاده می شود [۱-۳]. کنترل یکپارچه توان راکتیو^۳ نیز

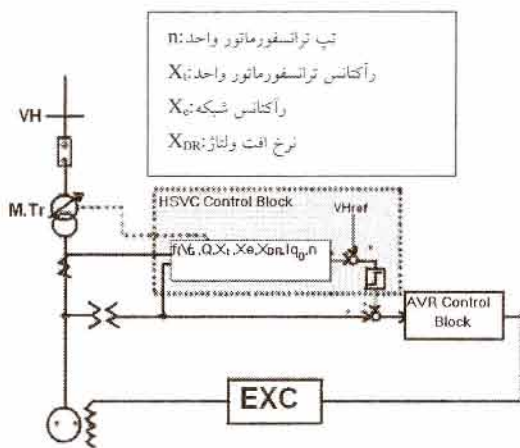
یکی از روشهای کنترل ولتاژ شین فشار قوی نیروگاه است که به بهبود پایداری ولتاژ کمک می کند [۴]. از جمله روشهای دیگر کنترل ولتاژ در شبکه- مرتبط با نیروگاه- کنترل ثانویه ولتاژ^۴ است [۵]. در این روش ولتاژ شین های بار معینی از یک ناحیه (که معرف ولتاژ آن ناحیه هستند)، کنترل می شود. در این روش، مقدار ولتاژ مرجع حلقه اتوماتیک کنترل ولتاژ تغییر می کند [۶]. رگولاتور پیشرفته کنترل ولتاژ شین فشار قوی نیروگاه^۵ (HSVC) نیز یکی از تجهیزات جدید کنترل ژنراتور است که نحوه عملکرد این کنترلر در سیستم تک ماشین بررسی شده است [۷].

در این مقاله، از رگولاتور پیشرفته کنترل ولتاژ شین فشار قوی نیروگاه برای بهبود پایداری ولتاژ استفاده شده است. در

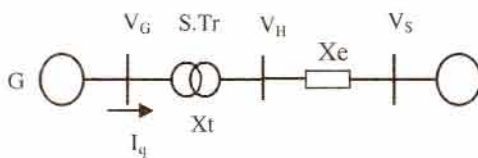
4. Secondary Voltage Control
5. Advanced High Side Voltage Control Regulator

1. Automatic Voltage Regulator (AVR)
2. Line Drop Compensator (LDC)
3. Joint Var Control (JVC)

پارامترها و متغیرهای روابط فوق، بر روی شکلها مشخص شده است.



شکل ۱ ساختار سیستم کنترل رگولاتور کنترل ولتاژ شین فشارقوی



شکل ۲ سیستم تک ماشینه

در این رگولاتور چندین تابع کنترلی گنجانده شده که از آن میان می‌توان به تابع جبران‌سازی جریان راکتیو و کنترل هماهنگ با تپ‌چنجر ترانسفورماتور واحد اشاره کرد. با اعمال این دو تابع کنترلی روابط ۱ و ۲ به صورت زیر تغییر خواهند کرد:

$$V_H = V_{Href} - X_{DR} (I_q - I_{q0}) \quad (3)$$

$$V_G = V_{Href} / n + (X_t - X_{DR} / n) I_q \quad (4)$$

در شکل ۳ مشخصه رگولاتور کنترل ولتاژ شین فشارقوی

همراه با تابع جبران‌سازی جریان راکتیو ترسیم شده است.

با استفاده از تابع جبران‌سازی جریان راکتیو می‌توان ولتاژ شین فشار قوی را در خروجی معینی از جریان راکتیو، در مقدار V_{Href} تنظیم کرد.

این مقاله، ضمن معرفی روشی برای مدلسازی این کنترلر در معادلات پخش بار، با استفاده از الگوریتم ژنتیک، پارامترهای آن به طور مناسب تنظیم شده است. همچنین اثر تنظیم پارامترها با این روش بر مسائل مرتبط با توان راکتیو- از جمله تلفات راکتیو و ذخیره توان راکتیو- مطالعه شده است. برای این منظور، پارامترهای این رگولاتور باید به طور مناسبی تنظیم شوند. از الگوریتم ژنتیک برای تنظیم پارامترها استفاده شده است. تأثیر تنظیم پارامترهای HVSC ها با استفاده از این روش بر کاهش تلفات راکتیو سیستم، توزیع مناسب توان راکتیو تولید شده و ذخیره توان راکتیو بین واحدهای تولید شده و همچنین افزایش توان راکتیو شارژ خطوط، مطالعه شده است.

۲- معرفی رگولاتور کنترل ولتاژ شین فشارقوی

HVSC نوعی رگولاتور برای کنترل ولتاژ شین فشارقوی نیروگاه است. این رگولاتور با اعمال سیگنالی کمکی به سیستم تحریک، می‌تواند باعث بهبود پایداری در شبکه شود. با استفاده از این رگولاتور، ولتاژ شین فشار قوی نیروگاه را می‌توان در مقدار معینی- بیشتر از آنچه سیستم تحریک معمولی می‌تواند تنظیم کند- تنظیم کرد. این رگولاتور احتیاجی به فیدبک از ولتاژ شین فشارقوی ندارد. ساختار سیستم رگولاتور کنترل ولتاژ شین فشارقوی در شکل ۱ نشان داده شده است.

پس از نصب رگولاتور، کنترل ولتاژ شین فشارقوی بر روی واحد تولیدکننده (شکل ۲)، ولتاژ شین فشار قوی و پایانه ژنراتور از روابط زیر پیروی خواهند کرد.

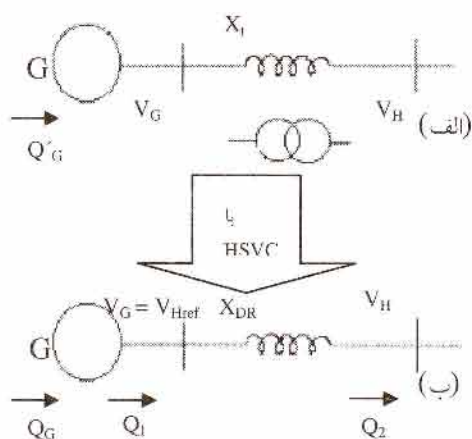
$$V_H = V_{Href} - X_{DR} I_q, \quad I_q = \frac{Q_G}{V_G} \quad (1)$$

$$V_G = V_{Href} + (X_t - X_{DR}) I_q \quad (2)$$

تولیدی واحد به حد بالا یا پایین برسد، شین PV تبدیل به شین PQ خواهد شد.

با نصب رگولاتور کنترل ولتاژ شین فشارقوی بر روی واحد تولیدکننده، شین PV، شین فشار قوی نیروگاه خواهد بود و بر خلاف معمول، ولتاژ در شین فشار قوی نیروگاه، ثابت نخواهد بود و مطابق با رابطه ۱، با افزایش I_q متناسب با شیب $-X_{DR}$ کاهش می‌یابد. بنابراین برخی اصلاحات به شرح زیر لازم است:

امپدانس ترانسفورماتور افزایشده واحد، از مقدار واقعی خود، به مقدار X_{DR} تغییر داده شده و پایانه ژنراتور همچنان به‌عنوان شین PV در نظر گرفته می‌شود، اما مقدار ولتاژ آن برابر V_{Href} در نظر گرفته می‌شود (شکل ۴).



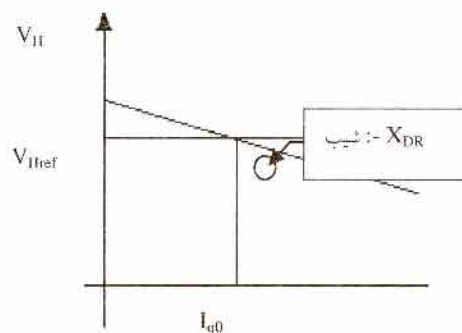
شکل ۴ مدل‌سازی رگولاتور کنترل ولتاژ شین فشارقوی

در پخش بار

نصب رگولاتور کنترل ولتاژ شین فشارقوی بر روی شکل ۴-الف، با X_1 به‌عنوان امپدانس ترانسفورماتور واحد و V_H به‌عنوان ولتاژ تحت کنترل شین فشارقوی، معادل است با جایگزینی شکل ۴-ب به‌جای شکل ۴-الف که در آن امپدانس ترانسفورماتور واحد به X_{DR} تغییر یافته و همچنین $V_G = V_{Href}$ به‌عنوان شین PV در نظر گرفته شده است. مقدار توان راکتیو تولیدی واحد در شکل ۴-ب بر طبق رابطه ۵ بوده و این در حالی است که مقدار واقعی توان راکتیو تولیدی با استفاده از شکل ۴-الف مطابق با رابطه ۶ است.

$$Q_G = Q_1 = Q_2 + X_{DR} I^2 \quad (5)$$

هنگامی که V_H ، توسط رگولاتور کنترل ولتاژ شین فشارقوی کنترل می‌شود، V_G اغلب در مقادیر بالاتری نگاه داشته می‌شود؛ لذا با کنترل هماهنگ با تپ‌چنجر ترانسفورماتور واحد، می‌توان ولتاژ V_G را در حوالی مقادیر نامی حفظ کرد. همچنین به‌علت تغییر شیب مشخصه افقی ناشی از تغییر در تپ و راکتانس ترانسفورماتور واحد، عملکرد واحدهای موازی نیروگاه به‌علت عدم تعادل توان راکتیو تولیدی، ممکن است دچار مشکل شود؛ اما با کنترل هماهنگ رگولاتور کنترل ولتاژ شین فشارقوی و تپ‌چنجر، این مشکل نیز حل می‌شود.



شکل ۳ مشخصه رگولاتور کنترل ولتاژ شین فشارقوی

همراه با تابع جبران‌سازی جریان راکتیو

از دیگر ویژگی‌ها و مزایای این رگولاتور، عملکرد موفق در کنترل و توزیع توان راکتیو بین واحدهای موازی نیروگاه است. همچنین این رگولاتور در افزایش پایداری نوسانی سیستم می‌تواند نقش مثبتی داشته باشد [۷]. در این مقاله، از رگولاتور کنترل ولتاژ شین فشارقوی برای افزایش سطح پایداری ولتاژ، استفاده شده است.

۳- مدل‌سازی رگولاتور کنترل ولتاژ شین فشارقوی در پخش بار

در پخش بار، ولتاژ شین‌های PV تا زمانی که توان راکتیو تولیدی واحد به حد بالا یا پایین نرسیده باشد، در مقدار از پیش تعیین شده حفظ می‌شود و زمانی که توان راکتیو

شود. نکته‌ای که در اینجا ذکر آن حائز اهمیت است این است که بین این دو پارامتر وابستگی وجود دارد و تعیین هر یک از آنها مستقل از دیگری، نتیجه مطلوبی را به دنبال نخواهد داشت؛ لذا در تعیین آنها باید وابستگی بین آنها در نظر گرفته شود. مقدار ولتاژ مبنای شین‌های PV (V_{Href}) بر پروفیل ولتاژ شبکه و توان راکتیو شارژ خطوط و در نتیجه توان راکتیو تولید شده در واحدها مؤثر است. از سوی دیگر، شیب مشخصه افتی، ابزار مناسب تغییر توان راکتیو تولید شده در واحدها و همچنین توزیع مناسب توان راکتیو بین واحدها است.

به‌طور خلاصه، هر دوی این پارامترها بر توان راکتیو تولید شده در واحدها مؤثر هستند؛ در نتیجه تعیین مقدار مناسب این دو پارامتر، باید همزمان و با در نظر گرفتن قیود و محدودیت‌های هر یک انجام شود.

برای یافتن مقدار مناسب این دو پارامتر در رگولاتورهای نصب شده در سیستم، در راستای افزایش پایداری ولتاژ سیستم، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک یک روش ابتکاری قوی در حل مسائل بهینه‌سازی است [۱۱]. تابع هدف، افزایش پایداری ولتاژ و متغیرهای تصمیم‌گیری، V_{Href} و X_{DR} تمام واحدها هستند. براین اساس کروموزوم‌ها عبارت است از:

$$W_i = \begin{bmatrix} X_i & X_i & \dots & X_{ii} & Y_i & Y_i & \dots & Y_{ii} \end{bmatrix}$$

که: W_i : i امین کروموزوم

X_i : X_{DR} i امین رگولاتور کنترل ولتاژ شین فشارقوی و

Y_i : V_{Href} i امین رگولاتور کنترل ولتاژ شین فشارقوی است.

قیود عبارتند از:

$$0 < X_i \leq X_{ii} \quad 0.95 \leq Y_i \leq 1.05 \quad (10)$$

که X_{ii} : امیدانس ترانسفورماتور واحد i ام است.

به تعداد جمعیت اولیه برای V_{Href} ها و X_{DR} ها، مقدارهایی تصادفی اختصاص داده می‌شود. به ازای هر عضو جمعیت، برای تعیین میزان پایداری ولتاژ، پخش بار تداومی اجرا می‌شود.

$$Q'_G = Q_r + X_t I^* \quad (6)$$

با در اختیار داشتن مقادیر Q_1 و Q_2 حاصل از پخش بار، مقدار توان راکتیو واقعی تولید شده در هر واحد (Q'_G)، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q'_G = Q_r + (X_t - X_{DR}) I^* \quad (7)$$

همچنین با استفاده از رابطه ۸، می‌توان Q'_G را از رابطه ۹ نیز حساب کرد. هر گاه توان راکتیو تولید شده، محاسبه شده از رابطه ۷ یا ۹ به Q_{Max} یا Q_{Min} برسد، آن شین از PV به PQ تغییر خواهد کرد.

$$I^* = \frac{Q_1 - Q_r}{X_{DR}} \quad (8)$$

$$Q'_G = Q_r + \frac{(Q_1 - Q_r)}{X_{DR}} (X_t - X_{DR}) \quad (9)$$

۴- الگوریتم پیشنهادی

در این تحقیق، هدف از نصب رگولاتور کنترل ولتاژ شین فشارقوی و تنظیم مناسب آن، افزایش پایداری ولتاژ استاتیکی (افزایش بارپذیری) سیستم است [۸]. هر چه فاصله نقطه کار تا نقطه فروپاشی ولتاژ (نوک منحنی V-Q یا V-P) بیشتر شود، بارپذیری سیستم بیشتر یا پایداری استاتیکی ولتاژ، بیشتر است [۹، ۱۰]. برای تعیین فاصله نقطه کار تا نقطه ناپایداری ولتاژ از پخش بار تداومی^۱ استفاده شده است. بار به صورت یکنواخت با ضریب قدرت ثابت و متناسب با بار پایه هر شین، افزایش می‌یابد.

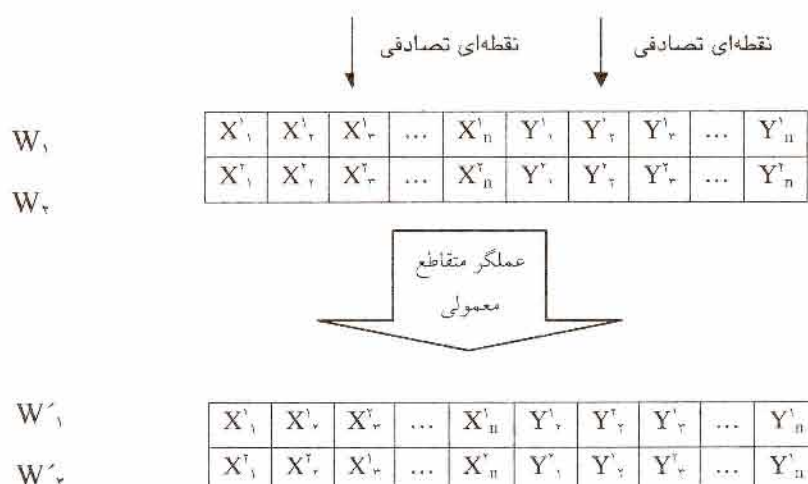
علاوه بر پایداری ولتاژ، رگولاتور کنترل ولتاژ شین فشارقوی بر روی برخی دیگر از پارامترهای سیستم از جمله پروفیل ولتاژ در شبکه، توان راکتیو شارژ خطوط انتقال، توزیع توان راکتیو بین واحدها و ذخیره توان راکتیو تأثیر می‌گذارد. برای هر رگولاتور کنترل ولتاژ شین فشارقوی، مقدار ولتاژ مبنای شین فشار قوی^۲ و شیب مشخصه افتی^۳، دو پارامتری است که باید تعیین

1. Continuation Power Flow

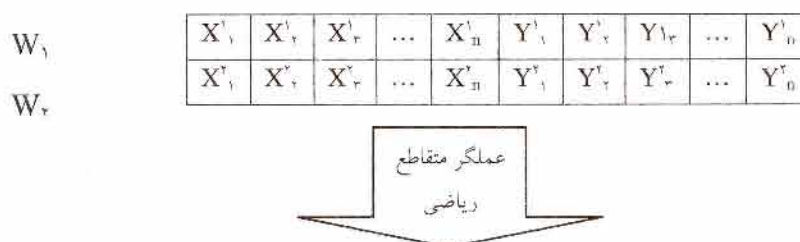
2. V_{Href}

3. X_{DR}

از دو عملگر متقاطع (برای بهبود فرآیند بهینه‌سازی) از دو عملگر جهش نیز برای تولید جمعیت جدید دیگری تحت عناوین عملگر متقاطع معمولی و عملگر متقاطع ریاضی، شکل‌های ۵ و ۶ استفاده شده است.



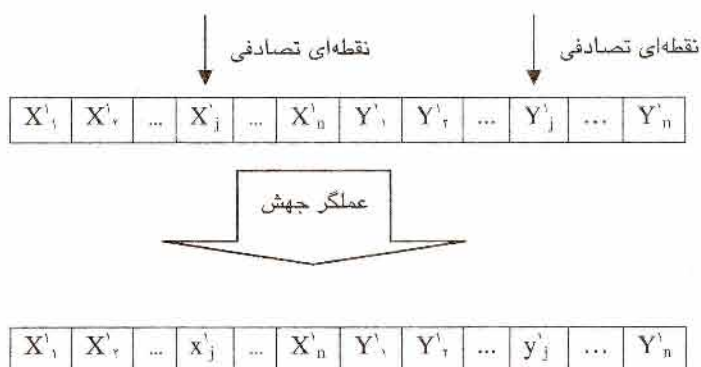
شکل ۵ عملگر متقاطع معمولی



$$W'_1 = \alpha W_1 + (1 - \alpha) W_r, \quad W'_r = (1 - \alpha) W_1 + \alpha W_r$$

α : عددی تصادفی در بازه صفر و یک

شکل ۶ عملگر متقاطع ریاضی



X'_j : عددی تصادفی در محدوده X_{DR} ، y'_j : عددی تصادفی در محدوده V_{Href}

شکل ۷ عملگر جهش

پس از اعمال الگوریتم تشریح شده، مقدار بهینه تعیین شده برای V_{Href} ها و X_{Dr} ها در جدول ۲ آورده شده است. در جدول ۳، نتایج عددی مربوط به چند حالت آزمون، به ازای شرایط جدول ۱ درج شده است.

جدول ۲. مقادیر بهینه تعیین شده برای V_{Href} و X_{Dr}

شماره واحد	X_{tr}^*	X_{Dr}	V_{Href}
۱۰۱	۰/۰۱۸	۰/۰۰۶	۱/۰۵
۱۰۲	۰/۰۱۸	۰/۰۰۶	۱/۰۵
۲۰۱	۰/۰۲۵	۰/۰۲	۱/۰۳
۲۰۶	۰/۰۳	۰/۰۲۱	۰/۹۹

* امیدانس ترانسفورماتور واحد

جدول ۳. نتایج عددی چند حالت آزمون

حالت	۱	۲	۳	۴
X_{DR201}	۰/۰۲	۰/۰۲۵	۰/۰۲	۰/۰۱
X_{DR206}	۰/۰۲۱	۰/۰۳	۰/۰۳۱	۰/۰۲۵
$X_{DR101,102}$	۰/۰۰۶	۰/۰۱۸	۰/۰۰۶	۰/۰۰۷
$V_{Href201}$	۱/۰۳	۱/۰۳	۱/۰۲	۱/۰۳
$V_{Href206}$	۰/۹۹	۱/۰۳	۱/۰۱	۰/۹۹
$V_{Href101,102}$	۱/۰۵	۱/۰۳	۱/۰۲	۱/۰۵
نسبت بار در نقطه شکست ولتاژ به بار پایه حالت ۱ (جدول ۱)	۱/۶۱۲	۱/۴۹	۱/۵	۱/۵۳
$Q_{G201} (MVar)$	-۱/۶	۵۴	۴۶/۵۳	۴۶/۵۳
$Q_{G206} (MVar)$	۸۰/۷	۲۰۵/۸	۲۱۲/۶	۱۵۹/۹
$Q_{G101,102} (MVar)$	۱۹۵/۷	۱۰۲/۶	۱۰۵/۱	۱۲۲/۸
Q_{res201}	۶۰۰	۵۴۶	۵۵۳	۵۴۳
$Q_{res206} (MVar)$	۷۱۹	۵۹۴	۵۸۷	۶۴۰
$Q_{res102,102} (MVar)$	۵۵۴	۶۴۷	۶۴۵	۶۲۷
$Q_{loss} (MVar)$	۵۸۶	۵۹۱	۵۹۶	۵۸۶
$Q_{gen} (MVar)$	۵۵۶	۵۷۱	۵۸۵	۵۶۰
$Q_{charge} + Q_{capacitor} (MVar)$	۱۵۰۹	۱۵۰۰	۱۴۹۱	۱۵۰۶
Q_{res201}	۳۶۲	۲۰۱	۱۶۳	۱۵۴
$Q_{res206} (MVar)$	۲۸۱	۱۱۷	۱۳۶	۲۵۷
$Q_{res102,102} (MVar)$	۲۲۵	۳۱۱	۳۹۴	۳۴۳
$Q_{loss} (MVar)$	۴۳۴۶	۱۵۲۷	۱۳۷۲	۱۳۵۴
$Q_{gen} (MVar)$	۲۱۰۸	۲۴۱۰	۲۱۴۱	۲۱۱۹
$Q_{charge} + Q_{capacitor} (MVar)$	۱۳۱۰	۱۱۸۹	۱۳۰۳	۱۳۰۷

سطح بارگذاری ۱ (جدول ۱)

سطح بارگذاری ۲ (جدول ۲)

باید توجه شود که برای هر انتخاب تصادفی مقادیر تحت تنظیم، ماتریس امیدانس جدیدی باید تشکیل شود. در بخش بار تداومی، بار همه شین‌ها افزایش می‌یابد و افزایش بار به‌طور متناسب بین همه شین‌ها توزیع می‌شود (بارهای هم‌نوا [۱۲]). در این روش، تولید بین تمامی ژنراتورها بر اساس ظرفیت آنها توزیع می‌شود. روند نمای الگوریتم پیشنهادی در شکل ۸ نشان داده شده است.

۵- نتایج عددی

روش معرفی شده، بر روی شبکه ۲۲ شینه آزمون شکل ۹ پیاده‌سازی شده است. اطلاعات شبکه در ضمیمه الف ارائه شده است. در این شبکه، شین شماره ۳۰۰۹، شین مبنا است. رگولاتور کنترل ولتاژ شین فشارقوی، بر روی چهار واحد تولیدکننده بر روی شینهای ۱۰۱، ۱۰۲، ۲۰۰ و ۲۰۶ نصب شده است. بار و تولید پایه در شبکه ۲۲ شینه در جدول ۱ درج شده است. واحدهای نصب شده بر روی شین‌های ۱۰۱ و ۱۰۲ موازی و دارای شین فشارقوی مشترک هستند؛ لذا V_{Href} و X_{DR} آنها یکسان است. حداکثر مقدار برای V_{Href} ، ۱/۰۵ و حداقل مقدار این کمیت برابر ۰/۹۵ در نظر گرفته شده است. مقدار X_{DR} برای هر واحد بین صفر و امیدانس ترانسفورماتور واحد انتخاب می‌شود.

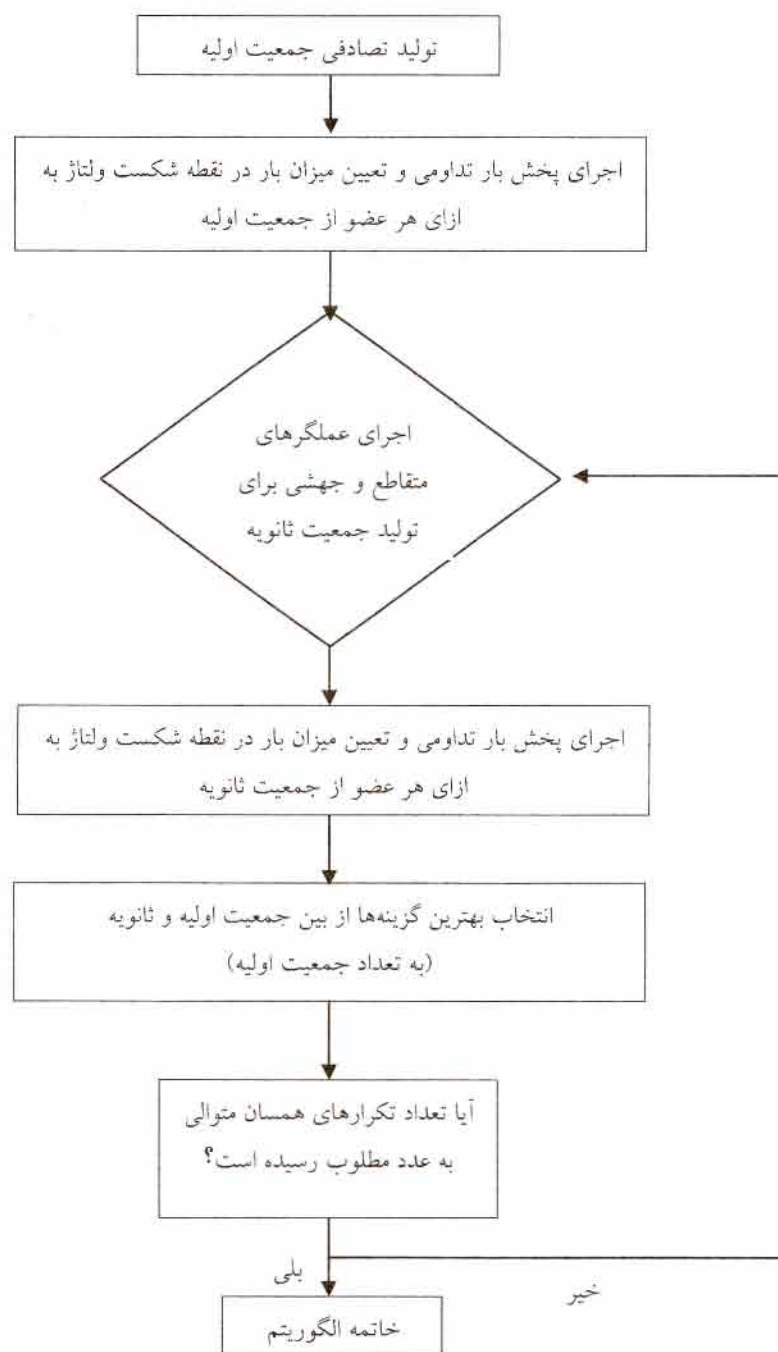
جدول ۱. بار و تولید پایه در شبکه ۲۲ شینه

تولید پایه			بار پایه		
P_G (MW)	Q_{max} (MVar)	شین تولید	Q_L (MVar)	P_L (MW)	شین بار
۶۰۰	۷۵۰	۱۰۱	۳۶۰	۴۸۰	۱۵۳
۶۰۰	۷۵۰	۱۰۲	۲۸۰	۳۲۰	۱۵۴
۴۸۰	۶۰۰	۲۰۱	۱۲۰	۲۴۰	۲۰۳
۶۴۰	۸۰۰	۲۰۶	۵۶۰	۹۶۰	۲۰۵
۱۹۵	۶۰۰	۳۰۰۱	۴۰	۸۰	۳۰۰۵
			۶۰	۱۶۰	۳۰۰۷
			۶۰	۱۶۰	۳۰۰۸

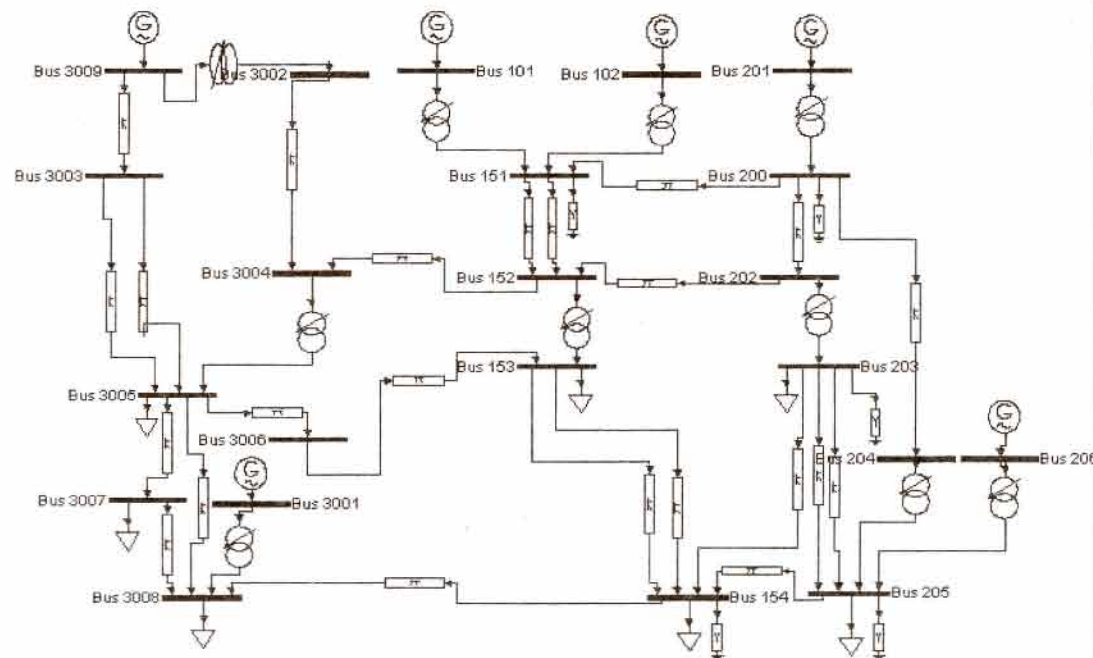
1. Conforming Loads

سیستم (بدون HSVC) است. در حالت‌های ۳ و ۴، HSVCها وجود دارند اما تعدادی یا همه پارامترهای آنها با مقادیر بهینه (مقادیر حالت ۱)، متفاوت است.

همانگونه که از نتایج مشهود است، با تنظیم بهینه پارامترهای رگولاتورهای کنترل ولتاژ شین فشارقوی، بار در نقطه شکست ولتاژ، $61/2\%$ بیشتر از حالت اولیه است. در حالت ۱، HSVCها وجود دارند و با الگوریتم پیشنهادی این مقاله تنظیم شده‌اند، حالت ۲ حالت اولیه



شکل ۸ روند نمای الگوریتم پیشنهادی



شکل ۹ شبکه آزمون ۲۲ شینه

جدول ۴ تولید و بار در حالت ۲

تولید حالت ۲		بار حالت ۲		
P_G (MW)	شین تولید	Q_L (MVar)	P_L (MW)	شین بار
۸۴۰	۱۰۱	۵۰۴	۶۷۲	۱۶۳
۸۴۰	۱۰۲	۳۹۲	۴۴۸	۱۵۴
۶۷۲	۲۰۱	۱۶۸	۳۳۶	۲۰۳
۸۹۶	۲۰۶	۷۸۴	۱۳۴۴	۲۰۵
۲۷۳	۳۰۰۱	۵۶	۱۱۲	۳۰۰۵
		۸۴	۲۲۴	۳۰۰۷
		۸۴	۲۲۴	۳۰۰۸

۲- HSVC های تنظیم شده، در حالتی که سیستم تحت بار بیشتری است در عملکرد بهتر سیستم، نقش مؤثرتری دارند.

۳- تنظیم پارامترهای رگولاتور کنترل ولتاژ شین فشارقوی به منظور افزایش پایداری ولتاژ، باعث کاهش تلفات راکتیو در سیستم، کاهش توان راکتیو تولید شده در واحدها و افزایش توان راکتیو شارژ خطوط و توان راکتیو تولید شده در خازنها می‌شود.

الگوریتم پیشنهادی بر روی شبکه آزمون ۱۱۸ شین IEEE نیز آزمایش شده است. امپدانس ترانسفورماتورهای

در حالت ۳ X_{Dr} ها معادل X_{Dr} های حالت ۱ (حالت تنظیم شده) و V_{Href} ها متفاوت با حالت ۱ است، اما در حالت ۴، X_{Dr} ها متفاوت و V_{Href} ها برابر با حالت تنظیم شده است. این سه حالت برای این منظور انتخاب شده‌اند تا نشانگر این باشند که وجود HSVC در توسعه پایداری استاتیکی ولتاژ مؤثر است و نیز اینکه برای دستیابی به توسعه بیشتر پایداری ولتاژ، تنظیم توام V_{Href} ها و X_{Dr} ها لازم است؛ این نکته در نتایج مشهود است (به بخش ۴ رجوع شود).

در جدول ۳، همچنین چندین پارامتر دیگر (مانند Q_{res} ، Q_{loss} ، Q_{gen} و ...) برای چهار حالت مزبور به ازای دو شرایط متفاوت بارگذاری (جدول ۱ و جدول ۴) درج شده است. از بررسی این جدول نتایج زیر حاصل می‌شود.

۱- HSVC های تنظیم شده، ضمن اصلاح توزیع توان راکتیو، عموماً باعث افزایش توان راکتیو ذخیره سیستم می‌شوند که این موضوع به نوبه خود می‌تواند در بهبود پایداری ولتاژ سیستم مؤثر باشد [۱۳].

واحد‌ها به صورت نوعی، ۱۳٪ (بر حسب پریونیت) در نظر گرفته شده است. علاوه بر بررسی‌های انجام شده بر روی شبکه آزمون ۲۲ شین، تغییرات تلفات توان اکتیو

نیز در اینجا بررسی شده است. اطلاعات شبکه آزمون در جداول ۵ و ۶ ارائه شده است.

جدول ۵ بار اولیه در شبکه آزمون ۱۱۸ شین IEEE

شین بار	P_L (MW)	Q_L (MVar)	شین بار	P_L (MW)	Q_L (MVar)	شین بار	P_L (MW)	Q_L (MVar)
۱	۵۱	۲۷	۲۳	۳۷	۲۳	۴۲	۲۷	۱۰
۲	۲۰	۹	۷	۱۸	۷	۴۳	۹	۷
۳	۳۹	۱۰	۸	۱۶	۸	۴۴	۱۰	۱۵
۴	۳۰	۱۲	۲۲	۵۳	۲۲	۴۵	۱۲	۱۰
۶	۵۲	۲۲	۱۰	۲۸	۱۰	۴۶	۲۲	۱۰
۷	۱۹	۲	۱	۳۴	۱	۴۷	۲	۴۲
۱۱	۷۰	۲۳	۱۱	۲۰	۱۱	۴۸	۲۳	۱۰
۱۲	۴۷	۱۰	۳۰	۸۷	۳۰	۴۹	۱۰	۷
۱۳	۳۴	۱۶	۴	۱۷	۴	۵۰	۱۶	۱۶
۱۴	۱۴	۱	۸	۱۷	۸	۵۱	۱	۳۱
۱۵	۹۰	۳۰	۵	۱۸	۵	۵۲	۳۰	۱۵
۱۶	۲۵	۱۰	۱۱	۲۳	۱۱	۵۳	۱۰	۹
۱۷	۱۱	۳	۳۲	۱۱۳	۳۲	۵۴	۳	۸
۱۸	۶۰	۳۴	۲۲	۶۳	۲۲	۵۵	۳۴	۱۸
۱۹	۴۵	۲۵	۱۸	۸۴	۱۸	۵۶	۲۵	۱۵
۲۰	۱۸	۳	۱۲	۵۷	۱۲	۵۷	۳	۳
۲۱	۱۴	۸	۳	۱۲	۳	۵۸	۸	۱۶
۲۲	۱۰	۵	۱۱۳	۲۷۷	۱۱۳	۵۹	۵	۲۵
۲۳	۷	۳	۳	۷۸	۳	۶۰	۳	۲۶
۲۷	۶۲	۱۳	۱۴	۷۷	۱۴	۶۲	۱۳	۱۶
۲۸	۱۷	۷	۱۸	۳۹	۱۸	۶۶	۷	۱۲
۲۹	۲۴	۴	۷	۳۸	۷	۶۷	۴	۱
۳۱	۴۳	۲۷	۲۰	۶۶	۲۰	۷۰	۲۷	۳
۳۲	۵۹	۲۳	۲۷	۶۸	۲۷	۷۴	۲۳	۳۰
۳۳	۲۳	۹	۱۱	۴۷	۱۱	۷۵	۹	۱۳
۳۴	۵۹	۲۶	۳۶	۶۸	۳۶	۷۶	۲۶	۳
۳۵	۳۳	۹	۲۸	۶۱	۲۸	۷۷	۹	۷
۳۶	۳۱	۱۷	۲۶	۷۱	۲۶	۷۸	۱۷	۸
۳۹	۲۷	۱۱	۳۹	۷۹	۳۹	۷۹	۱۱	۱۵
۴۰	۲۰	۲۳	۲۶	۱۳۰	۲۶	۸۰	۲۳	۱۴۳۸
۴۱	۳۷	۱۰	۲۴	۵۴	۲۴	۸۲	۱۰	

اثر تنظیم مناسب رگولاتورهای کنترل ولتاژ شین فشارقوی بر توان راکتیو تولید شده در واحدها، تلفات توان اکتیو، توان راکتیو تولید شده در خازنها و نهایتاً توان راکتیو شارژ خطوط در جدول ۸ نشان داده شده است. نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که تنظیم مناسب HSVCها، بر بهبود مسائل مرتبط با توان راکتیو، به‌ویژه در حالت بارگذاری سنگین‌تر سیستم، مؤثر است. از سوی دیگر این کار بر کاهش قابل توجه تلفات اکتیو سیستم نیز مؤثر است.

پارامترهای تنظیم شده برای HSVCها با الگوریتم پیشنهادی این مقاله، برای شرایط بهره‌برداری معین است و با تغییر شرایط بهره‌برداری، باید تغییر کند. با توجه به بار پیش‌بینی شده ساعتی در طول شبانه روز، می‌توان تنظیم‌های لازم به ازای هر ساعت را از قبل، با روش پیشنهادی این مقاله به‌دست آورد و سپس در ساعت مربوطه این تنظیم‌ها را اعمال کرد.

نتایج عددی در جدول ۷ نشان داده شده است. مقدار بهینه V_{Href} و X_{Dr} تعیین شده برای هر رگولاتور کنترل ولتاژ شین فشارقوی همراه با نسبت بار در نقطه شکست ولتاژ به بار اولیه، در این جدول ارائه شده است. حالت ۱ نشانگر حالتی است که HSVCها با الگوریتم پیشنهادی این مقاله تنظیم شده‌اند. در حالت‌های ۲ تا ۴، HSVCها وجود دارند اما با پارامترهایی متفاوت با حالت ۱. لازم است توضیح دهیم که نسبت بار در نقطه شکست ولتاژ به بار اولیه در حالتی که HSVCها در شبکه وجود ندارند، برابر ۱/۵۴ است.

همانطور که نشان داده شده، فاصله نقطه کار تا ناپایداری ولتاژ- درحالتی که HSVCها تنظیم شده‌اند- نسبت به حالت اولیه (بدون رگولاتور کنترل ولتاژ شین فشارقوی)، به میزان زیادی افزایش یافته است. همچنین اگر HSVCها درست تنظیم نشوند، تأثیر قابل توجهی بر توسعه پایداری ولتاژ نخواهند داشت.

جدول ۶ تولیدهای اولیه و اطلاعات دیگر

شین تولید	P_G (MW)	Q_{max} (MVar)	ولتاژ منظور شده برای شین فشار قوی در حالت اولیه	X_i
۱۰	۴۵۰	۲۰۰	۱/۰۵	۰/۰۲۶
۱۲	۸۵	۱۲۰	۰/۹۹	۰/۱۳
۲۵	۲۲۰	۱۴۰	۱/۰۵	۰/۰۵۲
۲۶	۳۱۴	۱۰۰۰	۱/۰۱۵	۰/۰۳۷
۴۹	۲۰۴	۲۱۰	۱/۰۲۵	۰/۰۵۶
۵۴	۴۸	۳۰۰	۰/۹۹۵	۰/۲۱۶
۵۹	۱۵۵	۱۸۰	۰/۹۸۵	۰/۰۷۲
۶۱	۱۶۰	۳۰۰	۰/۹۹۵	۰/۰۷۲
۶۵	۳۹۱	۲۰۰	۱/۰۰۵	۰/۰۲۹
۶۶	۳۹۲	۲۰۰	۱/۰۵	۰/۰۲۹
۸۰	۴۴۷	۲۸۰	۱/۰۴	۰/۰۲۴
۸۹	۶۰۷	۳۰۰	۱/۰۰۵	۰/۰۱۹
۱۰۰	۲۵۲	۱۵۵	۱/۰۱۷	۰/۰۴۶
۱۰۳	۴۰	۴۰	۱/۰۱	۰/۲۶
۱۱۱	۳۶	۱۰۰۰	۰/۹۸	۰/۲۲۵

جدول ۷ مقادیر بهینه تعیین شده و سایر اطلاعات

نسبت بار در نقطه شکست ولتاژ به بار اولیه	۱۳۳	۱۳۲	۱۳۱	۱۳۰	۱۲۹	۱۲۸	۱۲۷	۱۲۶	۱۲۵	۱۲۴	۱۲۳	۱۲۲	۱۲۱	۱۲۰	۱۱۹	شین واحد تولیدی
۱/۸۵	۰/۲۷	۰/۰۹	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۵	۰/۰۶۱	۰/۰۳۳	۰/۰۱۷	۰/۰۰۸	۰/۰۸۳	۰/۰۰۶	X_{DR}
	۰/۹۸	۰/۹۹	۱/۰	۱/۰۳	۱/۰	۱/۰۲	۱/۰۱	۱/۰۳	۰/۹۹	۰/۹۹۵	۱/۰۳	۱/۰۱	۰/۹۹۴	۰/۹۷	۱/۰۲۳	V_{Href}
۱/۶۴	۰/۲۸	۰/۲۲	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲۴	۰/۰۰۲	۰/۰۷	۰/۰۴۴	۰/۱۷	۰/۰۲۷	۰/۰۰۶	۰/۰۳۴	۰/۰۶۳	۰/۰۱۶	X_{DR}
	۰/۹۷	۰/۹۵	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۶	۱/۰	۱/۰۳	۱/۰۳	۰/۹۶	۱/۰۲	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹۲	۱/۰۴۵	۰/۹۸۲	V_{Href}
۱/۶۹	۰/۱۱	۰/۲۵	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱۶	۰/۰۱۲	۰/۰۵	۰/۱۶۱	۰/۰۵۵	۰/۰۳۷	۰/۰۱۷	۰/۰۵	۰/۰۰۲	X_{DR}
	۱/۰۴	۱/۰۱	۱/۰۲	۰/۹۶	۱/۰۳	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۹	۱/۰۱	۱/۰۴	۱/۰۳	۰/۹۷	۱/۰۴	۰/۹۸	۱/۰۳	V_{Href}
۱/۳۸	۰/۲۵	۰/۱۳	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۴	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۲۷	۰/۱۵	۰/۰۱۲	۰/۰۰۳	۰/۰۰۲	۰/۰۹۸	۰/۰۰۴	X_{DR}
	۰/۹۹	۱/۰۱	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۵	۱/۰۴	۱/۰۵	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۵	۱/۰	۰/۹۹	۱/۰۰۲	۰/۹۷	۰/۹۷	V_{Href}

جدول ۸ اثر رگولاتور کنترل ولتاژ شین فشارقوی بر چند پارامتر دیگر

شبکه بدون HSVC	حالت ۱	حالت ۳	حالت ۴
$Q_{gen} (MVar)$	۱۴۲۹	۱۴۶۸	۱۵۶۹
$Q_{loss} (MVar)$	۱۳۵۷	۱۳۹۲	۱۴۶۵
$Q_{charge} + Q_{capacitor} (MVar)$	۱۳۶۶	۱۳۶۲	۱۳۳۴
$P_{loss} (MW)$	۱۶۳	۱۶۰	۱۶۹
$Q_{gen} (MVar)$	۴۰۹۴	۴۰۳۴	۴۱۸۱
$Q_{loss} (MVar)$	۳۲۲۶	۳۱۸۴	۳۲۹۲
$Q_{charge} + Q_{capacitor} (MVar)$	۱۲۸۹	۱۳۰۷	۱۲۶۸
$P_{loss} (MW)$	۳۹۲	۳۷۲	۳۹۴

$$P_L = 3668 \text{ (MW)}$$

$$Q_L = 1438 \text{ (MVar)}$$

$$P_L = 5502 \text{ (MW)}$$

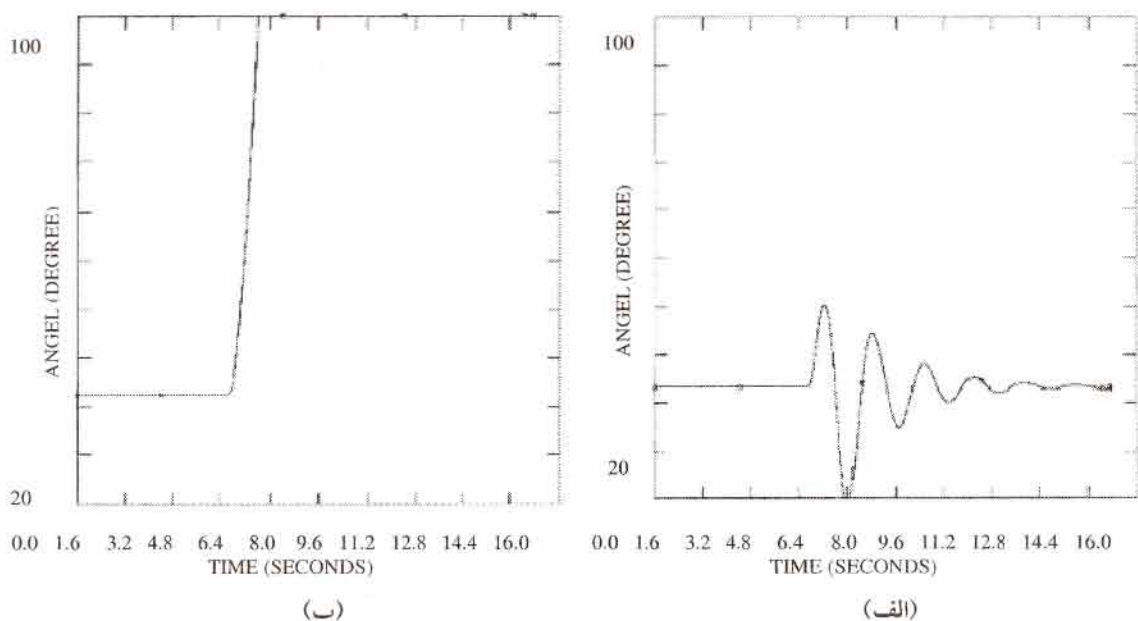
$$Q_L = 2157 \text{ (MVar)}$$

۵/۰۲ از مدار خارج و در ثانیه ۵/۰۲۶ مجدداً به مدار وارد شده است. شبیه‌سازی زمانی، گویای تأثیر مثبت تنظیم مناسب HSVCها بر پایداری زاویه‌ای است.

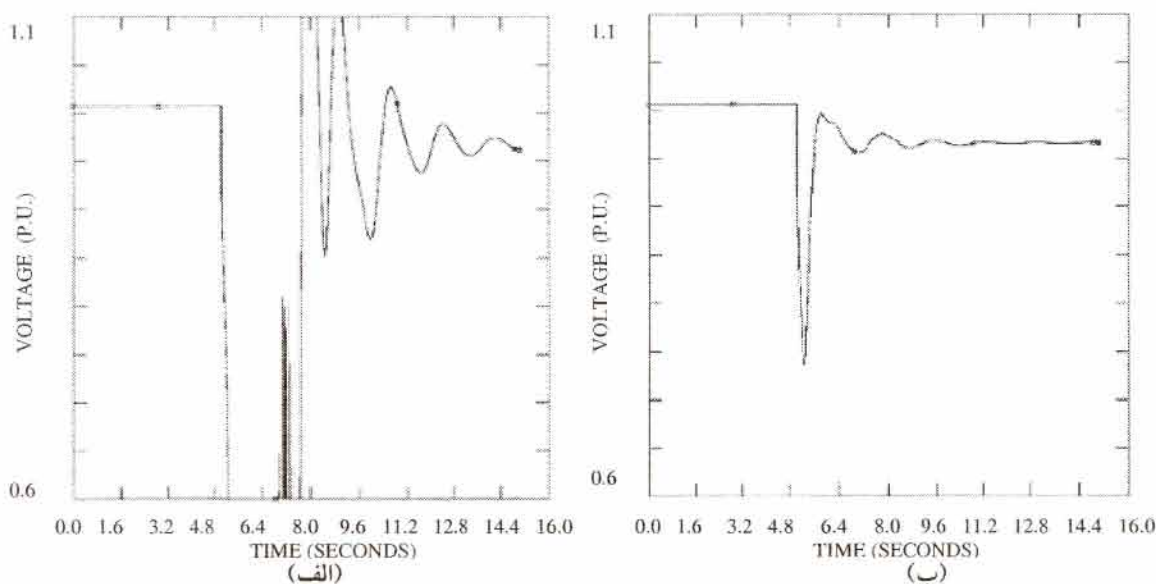
در آزمایش دیگری، بانک خازنی موجود در شین شماره ۲۰۵ و نیمی از خازن موجود در شین ۲۰۶ به‌صورت یک اغتشاش دوگانه از مدار خارج شده است. تغییرات زمانی ولتاژ شین شماره ۲۰۵ در دو حالت، اول شبکه فاقد HSVC و دوم شبکه با وجود HSVCهای تنظیم شده با این روش، در شکل ۱۱ ترسیم شده است. این دو آزمایش نشانگر تأثیر مثبت تنظیم مناسب HSVCها بر پایداری سیستم‌های قدرت است.

تأثیر HSVCهای تنظیم شده با روش پیشنهادی در این مقاله، بر عملکرد دینامیکی سیستم نیز باید بررسی شود. در ادامه، این موضوع با استفاده از شبیه‌سازی در حوزه زمان به‌طور مختصر مطالعه شده است. لازم است توضیح دهیم که بررسیهای جامع‌تر و دقیق‌تر در مقاله بعدی ارائه می‌شود.

در شکل ۱۰ تغییرات زمانی زاویه ژنراتور شین ۲۰۱ در شبکه ۲۲ شین، در دو وضعیت، اول شبکه فاقد HSVC و دوم شبکه با وجود HSVCهای تنظیم شده با این روش - در حالتی که شبکه تحت اغتشاش خروج خط قرار گرفته - ترسیم شده است. در این آزمایش یکی از دو خط بین شین شماره ۱۵۱ و شین شماره ۱۵۲ در ثانیه



شکل ۱۰ تغییرات زمانی زاویه ژنراتور موجود در شین شماره ۲۰۱ در حالت اغتشاش بر روی خط بین شینهای ۱۵۱ و ۱۵۲ در حالت‌های الف- شبکه فاقد HSVC ب- شبکه با وجود HSVC های تنظیم شده با روش پیشنهادی



شکل ۱۱ تغییرات زمانی ولتاژ شین شماره ۲۰۵ در حالتی که بانک خازنی شین ۲۰۵ و نیمی از بانک خازنی شین ۲۰۴ از مدار خارج شده‌اند در حالت‌های الف- شبکه فاقد HSVC ب- شبکه با وجود HSVC های تنظیم شده با روش پیشنهادی

۶- نتیجه

در این تحقیق، روشی برای مدلسازی رگولاتور کنترل ولتاژ شین فشارقوی در معادلات پخش بار ارائه شد.

همچنین با استفاده از الگوریتم ژنتیک، روشی برای تنظیم مناسب دو پارامتر اصلی HSVC (ولتاژ مبنا و شیب مشخصه آفتی) به منظور افزایش پایداری ولتاژ، پیشنهاد شد. با استفاده از نتایج، نشان داده‌ایم که با تنظیم مناسب

۷- ضمیمه

اطلاعات شبکه آزمون ۲۲ شین در جداول الف و ب ارائه شده است.

پارامترهای HSVC های نصب شده در سیستم، سطح پایداری ولتاژ را به نحو مطلوبی می‌توان افزایش داد. همزمان با افزایش سطح پایداری ولتاژ، ذخیره توان راکتیو واحدها، افزایش و تلفات راکتیو سیستم، کاهش می‌یابد که این امر بر بهبود پایداری ولتاژ مؤثر است.

جدول الف اطلاعات خطوط شبکه آزمون ۲۲ شین

شین ابتدا	شین انتها	شماره خط	X (p.u.)	B (p.u.)	شین ابتدا	شین انتها	شماره خط	X (p.u.)	B (p.u.)
۱۵۱	۱۰۱	۱	۰/۰۱۸	۰	۲۰۱	۲۰۴	۱	۰/۰۱۵	۲/۵
۱۵۱	۱۰۲	۱	۰/۰۱۸	۰	۲۰۲	۲۰۳	۱	۰/۰۱	۰
۱۵۱	۱۵۲	۱	۰/۰۴۶	۳/۵	۲۰۳	۲۰۵	۱	۰/۰۴۵	۰/۰۸
۱۵۱	۱۵۲	۲	۰/۰۴۶	۳/۵	۲۰۳	۲۰۵	۲	۰/۰۴۵	۰/۰۸
۱۵۱	۲۰۱	۱	۰/۰۱	۱/۲	۲۰۴	۲۰۵	۱	۰/۰۱	۰
۱۵۲	۱۵۳	۱	۰/۰۰۵	۰	۲۰۵	۲۰۶	۱	۰/۰۳	۰
۱۵۲	۲۰۲	۱	۰/۰۱	۰/۹۵	۳۰۰۱	۳۰۰۲	۱	۰/۰۲۵	۰
۱۵۲	۳۰۰۴	۱	۰/۰۳	۲/۵	۳۰۰۱	۳۰۰۳	۱	۰/۰۰۸	۰
۱۵۳	۱۵۴	۱	۰/۰۴۵	۰/۱	۳۰۰۲	۳۰۰۴	۱	۰/۰۵۴	۰/۰۹
۱۵۳	۱۵۴	۲	۰/۰۵۴	۰/۱۵	۳۰۰۳	۳۰۰۵	۱	۰/۰۵۴	۰/۰۹
۱۵۳	۳۰۰۶	۱	۰/۰۱۲	۰/۰۳	۳۰۰۳	۳۰۰۵	۲	۰/۰۵۴	۰/۰۹
۱۵۴	۲۰۳	۱	۰/۰۴	۰/۱	۳۰۰۴	۳۰۰۵	۱	۰/۰۱	۰
۱۵۴	۲۰۵	۱	۰/۰۰۳	۰/۰۹	۳۰۰۵	۳۰۰۶	۱	۰/۰۳	۰/۰۷
۱۵۴	۳۰۰۸	۱	۰/۰۲۲	۰/۳	۳۰۰۵	۳۰۰۷	۱	۰/۰۲۵	۰/۰۶
۲۰۰	۲۰۱	۱	۰/۰۲۵	۰	۳۰۰۵	۳۰۰۸	۱	۰/۰۵	۰/۱۲
۲۰۱	۲۰۲	۱	۰/۰۱	۲	۳۰۰۷	۳۰۰۸	۱	۰/۰۲۵	۰/۰۶

جدول ب اطلاعات پستها در شبکه آزمون ۲۲ شین

شماره شین	ولتاژ (kV)	خازن (MVar)	راکتور (MVar)	شماره شین	ولتاژ (kV)	خازن (MVar)	راکتور (MVar)
۱۰۱	۲۱/۶	۰	۰	۲۰۵	۲۳۰	۳۰۰	۰
۱۰۲	۲۱/۶	۰	۰	۲۰۶	۱۸	۰	۰
۱۵۱	۵۰۰	۰	۶۰۰	۳۰۰۱	۲۳۰	۰	۰
۱۵۲	۵۰۰	۰	۰	۳۰۰۲	۵۰۰	۰	۰
۱۵۳	۲۳۰	۰	۰	۳۰۰۳	۲۳۰	۰	۰
۱۵۴	۲۳۰	۲۰۰	۰	۳۰۰۴	۵۰۰	۰	۰
۲۰۰	۲۱/۶	۰	۰	۳۰۰۵	۲۳۰	۰	۰
۲۰۱	۵۰۰	۰	۳۰۰	۳۰۰۶	۲۳۰	۰	۰
۲۰۲	۵۰۰	۰	۰	۳۰۰۷	۲۳۰	۰	۰
۲۰۳	۲۳۰	۵۰	۰	۳۰۰۸	۲۳۰	۰	۰
۲۰۴	۵۰۰	۰	۰				

۷- منابع

- [7] H. Kitomura; M. Shimomura and J. Paserba; "Improvement of Voltage Stability by the Advanced High Side Voltage Control Regulator"; *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*; Vol. 1; pp. 278-284; July 2000.
- [8] R.S.Tare; P.R. Bijwe; "Look-Ahead Approach to Power System Loadability Enhancement", *IEE, Proceeding of Generation, Transmission and Distribution*, Vol.144; No. 4; pp. 357-362; July 1997.
- [9] N. Yorino; S. Harada and H. Cheng; "A Method to Approximation a Closest Loadability Limit Using Multiple Load Flow Solutions"; *IEEE Trans on Power Systems*; Vol. 12; No. 1; pp. 424-428; February 1997.
- [10] A. Berizzi; P. Marannino; M. Merlo; M. Pozzi; F. Zanellini; "Steady State and Dynamic Approach for the Evaluation of Loadability Margins in the Presence of Secondary Voltage Regulation", *IEEE, Trans on Power Systems*, Vol. 19; No. 2; pp. 1048-1057; May 2004.
- [11] D.E. Goldberg; *Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning*; Addison-Wesley Publishing Company; 1989.
- [12] A.J. Wood; B.F. Wollenberg; *Power Generation, Operation and Control*; John Wiley & Sons; 1996.
- [13] R. Rioz Zalapa; B.J. Cory; "Reactive Reserve Management"; *IEE Proc-Generation, Transmission and Distribution*; Vol. 142, No. 1; pp. 17-21; January 1995.
- [1] P. Kundur; *Power System Stability; and Control*; McGraw-Hill; 1994.
- [2] D. Kosterev; "Design, Installation and Initial Operation Experience with Line Drop Compensation at John Day Power House"; *IEEE Trans on Power Systems*; No. 2, pp. 261-265; May 2001.
- [3] A. Murdoch, J.J. Sanchez; M.J.O. Antonic; "Excitation Control for High Side Voltage Regulation"; *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*; Vol. 1; pp. 285-289; July 2000.
- [4] J.B. Davis; L.E. Midford; "High Side Voltage Control at Manitoba Hydro"; *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*; Vol. 1; pp. 271-277; July 2000.
- [5] C Guo; M. Crow; B. Chowdhury; L. Acar; "A New Approach to Secondary Voltage Control"; *IEEE PES Summer Meeting*; Chicago; pp. 1605-1609; July 2002.
- [6] H. F. Wang; H. Li; H. Chen; "Coordinated Secondary Voltage Control to Eliminate Voltage Violations in Power System Contingencies"; *IEEE Trans on Power Systems*; Vol. 18, No. 2; pp. 588-595; August 2003.