

ارزیابی پایداری کنترل جبران‌کننده‌های متعدد استاتیکی توزیع مبتنی بر ضرایب بهینه با استفاده از الگوریتم اجتماع سالپ

نوع مطالعه: پژوهشی

سیدمهدی حسینی جلی^۱، دانشجوی دکتری، مهدی بانژاد^۲، دانشیار، علی دستفان^۳، دانشیار، علیرضا الفی^۴، استاد

دانشکده مهندسی برق و رباتیک - دانشگاه صنعتی شاهرود - شاهرود - ایران

^۱sm_hosseini@shahroodut.ac.ir

^۲m.banejad@shahroodut.ac.ir

^۳dastfan@shahroodut.ac.ir

^۴a_alfi@shahroodut.ac.ir

چکیده: به منظور رفع مشکلات افت ولتاژ و عدم تعادل در شبکه‌های توزیع از تزریق توان راکتیو توسط جبران‌کننده‌های متعدد استاتیکی استفاده می‌شود. منابع تولید پراکنده نظیر سیستم‌های فتوولتائیک می‌توانند با تولید توان راکتیو نقش جبران‌کننده استاتیکی را ایفا کنند. در این مقاله از الگوریتم انتگرال روی مشخصه افتی به منظور کنترل توان راکتیو در باسهای بار استفاده شده است. ضریب افتی و بهره انتگرالی پارامترهای مهم در این الگوریتم هستند. مراحل بدست آوردن این ضرایب بصورت یک مسأله بهینه‌سازی غیرخطی و چندهدفه مدل می‌شود. تابع هدف در این مسأله بهینه‌سازی به منظور برقراری مصالحه بین انحراف ولتاژ و شاخص عدم تعادل ولتاژ با در نظر گرفتن شرط پایداری تعریف شده که برای حل آن از الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع سالپ استفاده شده است. مسأله فوق توسط سه الگوریتم بهینه‌سازی دیگر نیز حل شده است که الگوریتم سالپ در مقایسه با آن سه الگوریتم عملکرد بهتری دارد. با اعمال ضرایب بهره بهینه بدست آمده به جبران‌کننده‌ها نه تنها پروفیل ولتاژ بهبود می‌یابد، بلکه شاخص عدم تعادل ولتاژ نیز کاهش می‌یابد. روش پیشنهادی روی فیدر تست IEEE-34 Node، شبیه‌سازی شده است. به منظور ارزیابی پایداری سیستم، از آنالیز مقادیر ویژه استفاده شده است که نتایج، اعتبار روش ارائه شده را در پایداری سیستم نشان می‌دهد.

واژه های کلیدی: کنترل‌کننده انتگرال روی مشخصه افتی، DStatcom، ضریب افتی، بهره انتگرالی، SSA، آنالیز مقادیر ویژه

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۸/۱۰/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۹/۰۶/۲۲

نام نویسنده‌ی مسئول : مهدی بانژاد

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران - شاهرود - دانشگاه صنعتی شاهرود - دانشکده مهندسی برق و رباتیک

۱- مقدمه

سیستم‌های توزیع الکتریکی امروزی، به علت رشد روز افزون بار به حداکثر ظرفیت توان نامی خود رسیده و با افزایش دیماند مصرف انرژی، مشکلاتی از قبیل افت ولتاژ و رگولاسیون ضعیف ولتاژ دارند. یک روش کارآمد برای رفع این مشکلات، تزریق توان راکتیو توسط جبران‌کننده‌های استاتیکی در باس‌های شبکه است. جبران‌کننده استاتیکی توزیع^۱ (DStatcom) از ادوات توان سفارشی^۲ است که قابلیت تزریق و جذب توان راکتیو را دارد. جبران‌کننده‌های DStatcom منابع تولید توان راکتیو با پاسخ سریع مبتنی بر VSC هستند که وظیفه تنظیم ولتاژ و بهبود پروفیل ولتاژ را به عهده دارند یکی از مشخصه‌های عملیاتی DStatcom در سیستم توزیع فشار ضعیف، امکان ثابت نگه‌داشتن جریان راکتیو در خروجی آن است [۱-۳].

در شبکه‌های امروزی به دلایل اقتصادی و جمعیتی، منابع تولید پراکنده نظیر سیستم‌های فتوولتائیک (PV) بطور نمایی رشد کرده‌اند. با کنترل اینورتری PV به منظور تزریق توان راکتیو به باسهای شبکه، می‌توان ظرفیت مبادله توان اکتیو فیدر را افزایش داد. از طرفی با گسترش اینورترهای هوشمند متصل به سیستم‌های تجدیدپذیر، تقسیم انرژی در شبکه بدون تغییر در ساختار سایر قسمت‌های شبکه به طور مطلوبی صورت می‌گیرد [۴، ۵]. با توجه به اینکه سیستم کنترل اینورتر در PV قادر به تولید توان اکتیو و راکتیو است، در هنگام شب و یا در شرایط ابری، چون تولید توان اکتیو قابل توجهی توسط PV صورت نمی‌گیرد و شبکه توان اکتیو بار را تأمین می‌کند، اینورتر PV به همراه باتری و لینک خازنی می‌تواند جریان راکتیو به باس تزریق کند که این امر باعث استفاده حداکثر از ظرفیت PV می‌شود. بنابراین PV در این حالت، به صورت جبران‌کننده عمل کرده و جریان راکتیو به باس مربوطه تزریق می‌کند. از اینرو از ادوات جبران‌کننده مبتنی بر PV جهت کنترل ولتاژ باسها استفاده شده است [۶، ۷].

در مقایسه با کندانسورهای سنکرون و ادوات سوئیچ شونده خازنی و القائی به عنوان منبع تولید و یا جذب توان راکتیو، اینورترهای مدرن در DStatcom توانائی تغییر سریع تر توان راکتیو خروجی را با کیفیت بالا دارند. از طرفی به منظور بهره‌وری بیشتر و افزایش کیفیت عملکرد سیستم توزیع و استفاده بهینه از ظرفیت منابع انرژی تجدیدپذیر برای تولید توان راکتیو در باس‌های شبکه، اینورتر متصل به PV می‌تواند نقش DStatcom را ایفا کند که به PV-DStatcom معروف است [۸-۱۰]. در عمل علاوه بر ساختار PV-Dstatcom سه فاز، از ترکیب سه PV-DStatcom تکفاز در سیستم سه فاز نیز استفاده می‌شود. وجود بارهای تکفاز بدلیل داشتن مشخصه‌های تصادفی ذاتی آنها، افزایش ولتاژ در نیمروز بدلیل وجود تعداد زیادی سلول PV در فیدر، تغییرات ولتاژ بدلیل تأثیر عبور ابرها بر تولید توان PV، باعث ایجاد عدم تعادل در شبکه سه فاز می‌گردد. [۱۱-۱۳].

نمادها و علائم اختصاری

K_p	ضریب بهره تناسبی
V_{ref}	ولتاژ مرجع
V	ولتاژ اندازه‌گیری شده باس
m	ضریب مشخصه افتی
n	شماره باس
k	شمارنده گام تکرار الگوریتم
$Q_{r,n}(k)$	توان راکتیو تزریقی جبران‌کننده
$V_{dr,n}(k)$	ولتاژ مشخصه افتی
$I_{r,n}(k)$	جریان راکتیو تزریقی
$\varphi=abc$	نماد فازهای شبکه
K_i	ضریب بهره انتگرالی
$\theta_{i,n}(k)$	بردار زاویه جریان تزریقی
$\theta_{v,n}(k)$	بردار زاویه ولتاژ اندازه‌گیری شده باس
I_{bus}	ماتریس جریان باس شبکه
I_s	جریان معادل نورتن منبع ورودی
I_r	جریان راکتیو تزریقی هر جبران‌کننده به باس
Y_{bus}	ماتریس ادمیتانس گره شبکه
H_{sys}	ماتریس کل سیستم
VD	انحراف ولتاژ
VUF	شاخص عدم تعادل ولتاژ
\wedge	علامت نرمالیزه کردن
N_{bus}	تعداد کل باس شبکه
V^-	توالی منفی ولتاژ
V^+	توالی مثبت ولتاژ
ψ_{ev}	اختلاف اندازه هر مقدار ویژه از واحد
Z_{ev}	مقدار ویژه سیستم
F	تابع هدف الگوریتم بهینه‌سازی
q	شماره باس متصل به جبران‌کننده
w_1, w_2	وزن جملات تابع هدف
λ_p	ضریب جریمه (پنالتی)
x_j^l	نشاندنده موقعیت سالپ رهبر در بعد j ام
F_j^l	موقعیت منبع غذایی در بعد j ام
ub, lb	کران بالا و کران پایین
c_1, c_2, c_3	اعداد تصادفی
l	تکرار کنونی
L	حداکثر تعداد تکرارها
x_j^i	موقعیت سالپ i ام در بعد j ام
t	زمان
v_0	سرعت اولیه
V_0	اندازه ولتاژ اولیه باسها
θ_v^0	زاویه ولتاژ اولیه باسها

زیاد و در برخی مقالات فوق پایداری سیستم کنترل ارزیابی نشده است.

در مقاله حاضر از الگوریتم انتگرال روی مشخصه افی به منظور کنترل توان راکتیو جبران‌کننده‌ها در باسهای بار استفاده شده است. مراحل بدست آوردن ضرایب افی و بهره انتگرالی در جبران‌کننده‌ها، بصورت یک مسأله بهینه‌سازی غیرخطی و چندهدفه مدل می‌شود. تابع هدف در این مسأله بهینه‌سازی از مجموع وزندار انحراف ولتاژ و شاخص عدم تعادل ولتاژ با در نظر گرفتن شرط پایداری تشکیل شده است. به منظور مقایسه نتایج و انتخاب روش مناسب در حل مسأله بهینه‌سازی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک^۴ (GA)، اجتماع ذرات^۵ (PSO)، ترکیب ژنتیک و اجتماع ذرات^۶ (HGAPSO) [۲۶] و الگوریتم اجتماع سالپ^۷ (SSA) [۲۷] استفاده شده است. ضرایب بهینه بدست آمده با اعمال به جبران‌کننده‌ها روی فیدر تست IEEE-34 Node [۲۸]، شبیه‌سازی شده و به منظور ارزیابی پایداری سیستم، از آنالیز مقادیر ویژه^۸ استفاده شده است. شرط پایداری در الگوریتم‌های بهینه‌سازی طوری اعمال شده است که همواره نقطه کار سیستم در محدوده پایدار قرار داشته باشد. نکات مهم و برجسته در این مقاله عبارتند از:

- توسعه الگوریتم کنترل کننده انتگرال روی مشخصه افی در شبکه سه فاز نامتعادل
- تعمیم روابط ریاضی کنترل جبران‌کننده‌های راکتیو متعدد و بدست آوردن معادلات حالت سیستم و بهینه‌سازی ضرایب کنترل جبران‌کننده‌ها در شبکه سه فاز نامتعادل
- ارزیابی پایداری کنترل جبران‌کننده‌ها و مقایسه انواع روشهای بهینه‌سازی ژنتیک، اجتماع ذرات، ترکیب ژنتیک و اجتماع ذرات و الگوریتم اجتماع سالپ برای یافتن بهترین ضرایب افی و انتگرالی و انتخاب الگوریتم مناسب
- بهبود شاخص عدم تعادل ولتاژ و کاهش انحراف ولتاژ در باسهای بار شبکه و آنالیز مقادیر ویژه سیستم کنترلی IDL در فیدر تست در بخش دوم مقاله مدل‌سازی جبران‌کننده‌های استاتیکی متعدد در شبکه توزیع و طراحی کنترل‌کننده IDL ارائه شده است. در بخش سوم به منظور ارزیابی پایداری سیستم، معادلات فضای حالت سیستم ارائه شد. در بخش چهارم به تشریح الگوریتم محاسبه مقادیر بهینه ضریب افی و بهره انتگرالی با استفاده از روش بهینه‌سازی SSA پرداخته شد. در بخش پنجم بر اساس شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار Matlab، ضرایب بهینه کنترل‌کننده جبران‌کننده‌های متعدد در شبکه تست IEEE-34 Node تعیین شد و نتایج حاصل از اعمال این ضرایب در جبران‌کننده‌ها و آنالیز مقدار ویژه جهت بررسی پایداری سیستم مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. در بخش ششم نتایج حاصل از این پژوهش ارائه گردیده است.

استراتژی کنترل جهت رگولاسیون ولتاژ در شبکه توزیع نامتعادل با استفاده از ساختارهای متفاوت رگولاتور در سیستم PV متصل به شبکه توزیع ارائه شده است. این استراتژی کنترلی علاوه بر کاهش استرس عملیاتی رگولاتورهای ولتاژ، باعث حداقل‌سازی انحراف ولتاژ شده که روی شبکه ۳۴ و ۱۲۳ باسه تست شده است [۱۴]. جبران‌سازی توان راکتیو در شبکه توزیع منجر به پشتیبانی ولتاژ و بهبود پروفیل ولتاژ می‌شود. بررسی عدم تعادل با وجود جبران‌کننده‌های متعدد در باس‌های شبکه توزیع توسط تعدادی از محققین گزارش شده است [۱۵-۱۶]. سیستم کنترل جبران‌کننده‌ها عموماً توسط کنترل‌کننده‌های PI با ضرایب ثابت [۱۷] طراحی می‌شود، که در این صورت عملکرد سیستم، بدلیل ساختار غیرخطی آنها رضایت‌بخش نیست. بطور مثال در کنترل‌کننده انتگرال روی مشخصه افی^۳ (IDL) از ضرایب کنترلی PI ثابت در DStatcom استفاده شد [۱۸]، که نه تنها روشی برای محاسبه ضرایب ثابت کنترلی ارائه نشد بلکه این مدل در سیستم تست سه‌فاز نامتعادل نیز بررسی نشد. از اینرو در [۸] از تکنیک بهینه‌سازی جدید JAYA برای یافتن ضرایب PI بهینه و پارامترهای فیلتر در PV-DStatcom استفاده شده است. روش کنترل تطبیقی با تکنیک ردیابی ماکزیمم نقطه توان در مرجع [۹] قادر به عملکرد در دو حالت PV-DStatcom (هنگام تابش خورشید) و DStatcom (در شرایط ابری و یا هنگام شب) می‌باشد. همچنین در مقاله [۱۹] از کنترل‌کننده مبتنی بر همواری دیفرانسیل بجای کنترل PI با ضرایب ثابت برای عملکرد بهینه جبران‌کننده و بهبود پایداری شبکه استفاده شده است. ضرایب بهینه کنترلی الگوریتم IDL در جبران‌کننده برای یک سیستم توزیع نامتعادل بر اساس الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک در مقاله [۲۰] بدست آمده است.

در میان پژوهش‌های انجام شده می‌توان به روش کنترل مبتنی بر مشخصه افی [۲۱] اشاره کرد که با استفاده از آن، ولتاژ باس‌های فیدر در محدوده مجاز واقع شدند. از الگوریتم کنترل ولتاژ - توان راکتیو در سیستم‌های PV جهت بهبود مشکلات کیفیت توان در شبکه فشار ضعیف استفاده شده است [۲۲]. در [۲۳] سیستم کنترل تحت معیار پایداری لیاپانوفی پیاده‌سازی و بررسی پایداری با همگرا شدن تابع خطای سیستم بطور مجانبی به صفر، پایداری سیستم صورت گرفت. در [۲۴] الگوریتم کنترل تطبیقی چندهدفه برای PV-DStatcom متصل به شبکه جهت دریافت حداکثر انرژی قابل دسترس آرایه PV به منظور کاهش تلفات شبکه توزیع و بهبود کیفیت ولتاژ ارائه شد. طرح کنترلی برای PV-VSC متصل به شبکه، مبتنی بر انتراتور تعمیم یافته مرتبه دوم با حلقه قفل شونده فرکانس در [۲۵] ارائه شد که در متعادل‌سازی جریان شبکه و کاهش هارمونیک بسیار مؤثر بوده و عملکرد سیستم کنترل در شرایط متفاوت عملیاتی PV-DStatcom و DStatcom رضایت‌بخش بوده است. نکته مهم در اینست که روش‌های کنترلی روی یک شبکه تست سه‌فاز نامتعادل با تعداد باس

بدست می‌آید. این معادله مشخصه افتی، کاهش ولتاژ هر باس را به اندازه ضریب افت ولتاژ از ولتاژ مرجع نشان می‌دهد؛

$$V = V_{ref} - m \cdot Q \quad (2)$$

در رابطه (۲)، ضریب افتی (m) کوچکتر منجر به استفاده بیشتر از جبران‌کننده در یک محدوده بارگیری معین می‌گردد و این موضوع باعث همگرایی بهتر پاسخ در حلقه تکرار الگوریتم خواهد شد. بر این اساس، ضریب m در کنترل‌کننده IDL بکار می‌رود و این الگوریتم به تغییرات این ضریب حساس نخواهد بود [۱۸]. معادله خط مشخصه افتی n امین جبران‌کننده نشان داده شده در شکل (۱) بصورت (۳) بیان می‌شود؛

$$V_{dr,n} = V_{ref} - m_n \cdot Q_{r,n} \quad (3)$$

در اینجا استفاده از روش فازور مؤثر است زیرا مقادیر فازور اندازه‌گیری شده در هر سیکل مؤلفه اصلی (هر ۲ میلی‌ثانیه برای سیستم با فرکانس ۵۰ هرتز) به‌هنگام می‌شود. از اینرو رابطه (۳) حوزه زمان گسسته برای گام k ام بازنویسی می‌شود؛

$$V_{dr,n}(k) = V_{ref} - m_n \cdot Q_{r,n}(k) \quad (4)$$

برای ساده‌تر شدن مراحل خطی‌سازی سیستم در مدل ریاضی پایداری، با جایگزینی اندازه جریان راکتیو تزریقی I بجای توان راکتیو Q ، رابطه (۵) بدست می‌آید؛

$$V_{dr,n}(k) = V_{ref} - m_n \cdot |I_{r,n}(k)| \quad (5)$$

که در آن، $|I_{r,n}(k)|$ اندازه جریان راکتیو تزریقی در باس n ام و گام k ام است [۱۸]. ولتاژ مشخصه افتی، رابطه (۵) را می‌توان برای یک سیستم سه فاز بیان کرد [۲۰] و مشخصه افتی حالت ماندگار باس n ام، در گام k ام و فاز دلخواه φ را بصورت زیر نوشت؛

$$V_{dr,n}^{\varphi}(k) = V_{ref}^{\varphi} - \left[m_n^{\varphi} \right] \cdot |I_{r,n}^{\varphi}(k)|, \quad \varphi = a, b, c \quad (6)$$

که در آن ضریب $[m_n^{\varphi}]$ به صورت زیر خواهد بود؛

$$\left[m_n^{\varphi} \right] = \text{diag} \left[m_n^a, m_n^b, m_n^c \right] \quad (7)$$

همچنین بردار خطای ولتاژ باس n ام نسبت به مشخصه افتی حالت ماندگار در گام k ام، از رابطه زیر بدست می‌آید؛

$$\Delta V_{dr,n}^{\varphi}(k) = V_{dr,n}^{\varphi}(k) - V_n^{\varphi}(k) \quad (8)$$

هدف از بکارگیری یک کنترل‌کننده انتگرالی؛ مینیمم‌سازی خطای ولتاژ (۸)، به صفر رساندن آن و انتقال مشخصه افتی لحظه‌ای به مشخصه افتی حالت ماندگار است [۱۸]. بردار اندازه جریان راکتیو مورد نیاز در باس n ام در گام بعدی، طبق رابطه زیر حاصل می‌شود؛

$$\left| I_{r,n}^{\varphi}(k+1) \right| = \left[K_{i,n}^{\varphi} \right] \cdot \sum_{h=1}^k \Delta V_{dr,n}^{\varphi}(h) \quad (9)$$

$$\left[K_{i,n}^{\varphi} \right] = \text{diag} \left[K_{i,n}^a, K_{i,n}^b, K_{i,n}^c \right] \quad (10)$$

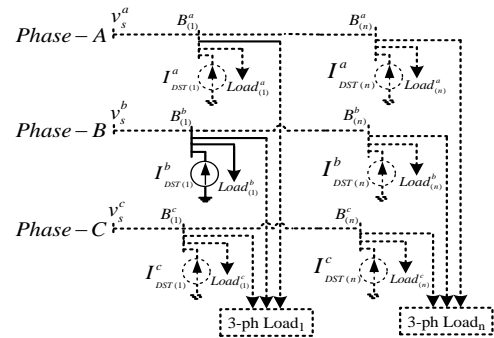
بردار زاویه جریان تزریقی θ_i برای باس n ام در گام $k+1$ ام در هر فاز دلخواه φ ، بصورت زیر تغییر می‌یابد؛

$$\theta_{i,n}^{\varphi}(k+1) = \theta_{v,n}^{\varphi}(k) + \left[-\frac{\pi}{2}, \dots, -\frac{\pi}{2} \right]^T \quad (11)$$

۲- مدل‌سازی جبران‌کننده‌ها در شبکه توزیع

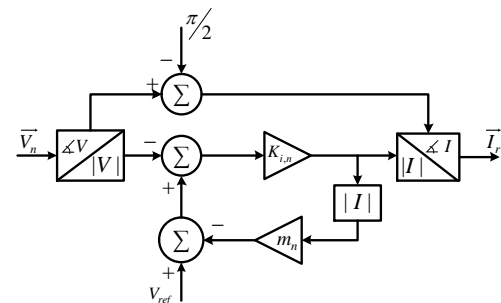
شکل (۱) شبکه نمونه توزیع شعاعی فشار ضعیف سه‌فاز را نشان می‌دهد که در باسهای بار آن DStatcom تکفاز نصب شده است.

در شبکه شعاعی شکل (۱)، n باس بار تکفاز در هر فاز، n جبران‌کننده (I_{DST}) در هر فاز و همچنین در مجموع n باس سه فاز در نظر گرفته شده است. ادوات جبران‌کننده در این شبکه بصورت منبع جریان راکتیو مدل شده‌اند [۲].



شکل (۱): شبکه نمونه توزیع شعاعی فشار ضعیف

جریان نشان داده شده در این مدل، همان جریان خروجی مبدل (جبران‌کننده) بوده که از دینامیک کلیدها در آن صرف‌نظر شده است. این جریان در هر لحظه مطابق بلوک دیاگرام شکل (۲) قابل محاسبه است.



شکل (۲): بلوک دیاگرام کنترل جریان راکتیو جبران‌کننده

جزئیات دیاگرام نشان داده شده در شکل (۲) در روابط و جداول بخش‌های بعدی ارائه شده است. همچنین روابط ریاضی مربوط به سیستم و کنترل‌کننده‌ها براساس شبکه شکل (۱)، در نظر گرفته شده است.

۲-۱- کنترل‌کننده انتگرال روی مشخصه افتی

بر اساس رابطه مشخصه افتی ولتاژ - توان راکتیو، مقدار توان راکتیو Q تولیدی جبران‌کننده از حاصلضرب ضریب بهره تناسبی در خطای ولتاژ، مطابق قانون کنترلی (۱) بدست می‌آید؛

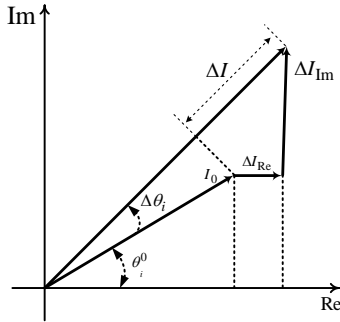
$$Q = K_p \cdot (V_{ref} - |V|) \quad (1)$$

بهره تناسبی K_p بزرگتر، منجر به استفاده بیشتر از توان راکتیو جبران‌کننده در یک محدوده بارگیری معین، می‌گردد. با تغییر متغیر در معادله (۱) و استفاده از مقدار معکوس ضریب K_p به صورت ضریب m ، مشخصه افتی حالت ماندگار برای هر جبران‌کننده از رابطه (۲)

پس از تعیین اندازه و زاویه‌های جریان راکتیو تزریقی جبران‌کننده‌ها در باس n برای هر فاز φ در گام $k+1$ ام، بر اساس روابط (۹) و (۱۱)، بردار فازور جریان تزریقی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\begin{cases} (I_0 + \Delta I) \cdot \cos(\theta_i^0 + \Delta\theta_i) = I_0 \cdot \cos\theta_i^0 + \Delta I_{Re} \\ (I_0 + \Delta I) \cdot \sin(\theta_i^0 + \Delta\theta_i) = I_0 \cdot \sin\theta_i^0 + \Delta I_{Im} \end{cases} \quad (17)$$

اگر $\Delta\theta_i$ خیلی کوچک فرض شود، با صرفنظر از جملات مرتبه دوم و فرض $\sin\Delta\theta_i \approx \Delta\theta_i$ ، $\cos\Delta\theta_i \approx 1$ رابطه (۱۸) بدست می‌آید:



شکل (۳): نمودار تغییرات افزایشی فازور جریان

$$\begin{bmatrix} -I_0 \cdot \sin\theta_i^0 & \cos\theta_i^0 \\ I_0 \cdot \cos\theta_i^0 & \sin\theta_i^0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\theta_i \\ \Delta I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta I_{Re} \\ \Delta I_{Im} \end{bmatrix} \quad (18)$$

همچنین اگر $V_n^0(k) = V^0$ و $\theta_{v,n}^0(k) = \theta_v^0$ به ترتیب اندازه و زاویه ولتاژهای اولیه باسها در هر فاز در گام k ام باشند، مشابه روابط (۱۷) و (۱۸) تغییرات اندازه و زاویه بردار ولتاژ باسها خواهد بود:

$$\begin{bmatrix} -V_0 \cdot \sin\theta_v^0 & \cos\theta_v^0 \\ V_0 \cdot \cos\theta_v^0 & \sin\theta_v^0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\theta_v \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta V_{Re} \\ \Delta V_{Im} \end{bmatrix} \quad (19)$$

از طرفی روابط زیر را می‌توان برای ولتاژ باسها در نظر گرفت:

$$V = Z_{bus} \cdot I \quad (20)$$

$$\Rightarrow V_{Re} + jV_{Im} = (Z_{bus,Re} + j \cdot Z_{bus,Im}) \cdot (I_{Re} + jI_{Im})$$

با فرض ایجاد اغتشاش کوچک در ولتاژ و جریان باسهای ۱ تا n رابطه (۲۰) به صورت ماتریسی زیر تبدیل می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{1,Re} \\ \vdots \\ \Delta V_{n,Re} \\ \Delta V_{1,Im} \\ \vdots \\ \Delta V_{n,Im} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{bus,Re} & -Z_{bus,Im} \\ Z_{bus,Im} & Z_{bus,Re} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta I_{1,Re} \\ \vdots \\ \Delta I_{n,Re} \\ \Delta I_{1,Im} \\ \vdots \\ \Delta I_{n,Im} \end{bmatrix} \quad (21)$$

همچنین با جایگزینی روابط (۱۸) و (۲۰) در رابطه (۱۹)، رابطه نهایی به صورت زیر خواهد شد:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_v \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -V_0 \cdot \sin\theta_v^0 & \cos\theta_v^0 \\ V_0 \cdot \cos\theta_v^0 & \sin\theta_v^0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} Z_{bus,Re} & -Z_{bus,Im} \\ Z_{bus,Im} & Z_{bus,Re} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -I_0 \cdot \sin\theta_i^0 & \cos\theta_i^0 \\ I_0 \cdot \cos\theta_i^0 & \sin\theta_i^0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\theta_i \\ \Delta I \end{bmatrix} \quad (22)$$

که برای گام k ام فرم کلی رابطه (۲۲)، به صورت زیر خواهد بود:

پس از تعیین اندازه و زاویه‌های جریان راکتیو تزریقی جبران‌کننده‌ها در باس n برای هر فاز φ در گام $k+1$ ام، بر اساس روابط (۹) و (۱۱)، بردار فازور جریان تزریقی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$I_{r,n}^\varphi(k+1) = \left| I_{r,n}^\varphi(k+1) \right| \angle \theta_{i,n}^\varphi(k+1) \quad (12)$$

سپس ماتریس جریان باس شبکه با وارد کردن مؤلفه‌های جریان منبع سه فاز ورودی در آن، طبق رابطه زیر تنظیم می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \left(I_{bus}^a(k+1) \right)_{n \times 1} \\ \left(I_{bus}^b(k+1) \right)_{n \times 1} \\ \left(I_{bus}^c(k+1) \right)_{n \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{s,1}^a & I_{r,2}^a & \dots & I_{r,n}^a(k+1) \\ I_{s,1}^b & I_{r,2}^b & \dots & I_{r,n}^b(k+1) \\ I_{s,1}^c & I_{r,2}^c & \dots & I_{r,n}^c(k+1) \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

در نهایت در پایان حلقه تکرار با داشتن ماتریس ادمیتانس گره شبکه (Y_{bus})، مقادیر ولتاژ باسها در گام $(k+1)$ ام توسط رابطه اساسی تحلیل گره شبکه، بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \left(V_n^a(k+1) \right)_{n \times 1} \\ \left(V_n^b(k+1) \right)_{n \times 1} \\ \left(V_n^c(k+1) \right)_{n \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(Y_{bus}^a \right)_{n \times n} & 0 & 0 \\ 0 & \left(Y_{bus}^b \right)_{n \times n} & 0 \\ 0 & 0 & \left(Y_{bus}^c \right)_{n \times n} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \left(I_{bus}^a(k+1) \right)_{n \times 1} \\ \left(I_{bus}^b(k+1) \right)_{n \times 1} \\ \left(I_{bus}^c(k+1) \right)_{n \times 1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

۳- معادلات فضای حالت و ارزیابی پایداری

سیستم

یکی از روشهای بررسی پایداری سیستم‌های گسسته، آنالیز مقادیر ویژه در معادلات فضای حالت زمان گسسته سیستم است. با بدست آوردن مقادیر ویژه ماتریس مشخصه سیستم و بررسی مکان هندسی مقادیر ویژه می‌توان پایداری را ارزیابی نمود.

با توجه به شبکه شکل (۱)، برای هر فاز با n گره، اندازه و زاویه جریان‌های راکتیو تزریقی به هر گره در گام k ام به ترتیب با $I_n^0(k)$ و $\theta_{i,n}^0(k)$ و همچنین اندازه و زاویه ولتاژهای گره در گام k ام به ترتیب با $V_n^0(k)$ و $\theta_{v,n}^0(k)$ تعریف می‌شود. در این صورت مطابق رابطه (۹)، عبارت تفاضلی زیر بدست می‌آید:

$$I_n^\varphi(k+1) - I_n^\varphi(k) = K_{i,n}^\varphi \cdot \Delta V_{dr,n}^\varphi(k) \quad (15)$$

برای نوشتن معادلات فضای حالت سیستم مفروض در این مقاله، جریان راکتیو جبران‌کننده‌ها بعنوان متغیر حالت تعریف شده اند. با استفاده از روابط (۶) و (۸) و با خطی‌سازی جریان‌های راکتیو تزریقی حول نقطه کار، خطای جریان حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} \Delta I_n^\varphi(k+1) &= \left(I - K_{i,n}^\varphi \cdot m_n^\varphi \right) \cdot \Delta I_n^\varphi(k) \\ &\quad - K_{i,n}^\varphi \cdot \Delta V_n^\varphi(k) \end{aligned} \quad (16)$$

که در آن I ماتریس واحد $3n \times 3n$ است. در شکل (۳) نمودار تغییرات افزایشی فازور جریان نشان داده شده است. اگر $I_n^0(k) = I^0$

۴-۱- تعریف مسأله بهینه‌سازی

مسأله بهینه‌سازی در این مقاله با هدف حداقل‌سازی انحراف ولتاژ و شاخص عدم تعادل در باسهای سیستم تعریف خواهد شد بطوریکه پایداری سیستم حفظ شود. انحراف ولتاژ در باس n ام از اختلاف اندازه ولتاژ باس n ام و ولتاژ مرجع V_{ref} در آن باس بدست می‌آید؛

$$VD_n^\phi = \left| V_n^\phi - V_{ref}^\phi \right|, \quad \phi = a, b, c \quad (29)$$

پس از محاسبه ولتاژ باس‌ها از (۱۴)، شاخص عدم تعادل ولتاژهای سه‌فاز در باس n ام طبق تعریف به صورت زیر است؛

$$VUF_n = \frac{\left| V_n^- \right|}{\left| V_n^+ \right|} \quad (30)$$

که در آن $\left| V_n^- \right|$ اندازه توالی منفی ولتاژ باس n ام و $\left| V_n^+ \right|$ اندازه توالی مثبت ولتاژ باس n ام است، که از تبدیل فورسکیو [۲۹] بدست می‌آید. مطابق تعاریف بالا، تابع هدف بصورت مجموع وزندار و نرمالیزه شده شاخص‌های انحراف ولتاژ، عدم تعادل و تابع پایداری تعریف می‌گردد؛

$$\min_{m_q, K_{i,q}} : F = w_1 \cdot \sum_{i=1}^N VD_i^\phi + w_2 \cdot \sum_{i=1}^N VUF_i + \lambda_p \cdot (\Psi_{ev}) \quad (31)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{bus}} VD_i^{\phi, With-DStatcom} \\ \sum_{i=1}^{N_{bus}} VD_i^{\phi, NO-DStatcom} \\ \sum_{i=1}^{N_{bus}} VUF_i^{With-DStatcom} \\ \sum_{i=1}^{N_{bus}} VUF_i^{No-DStatcom}$$

$$\Psi_{ev} = \begin{cases} 1 & \text{if } |Z_{ev}| - 1 \geq 0 \\ 0 & \text{if } |Z_{ev}| - 1 < 0 \end{cases} \quad (32)$$

$$\begin{cases} m_{\min} \leq m_q^\phi \leq m_{\max} \\ K_{i,\min} \leq K_{i,q}^\phi \leq K_{i,\max} \end{cases}, \quad \begin{cases} \forall q=1, \dots, n_q \\ \phi = a, b, c \end{cases}$$

$$\begin{cases} m_{\min} = 0.01, m_{\max} = 0.05 \\ K_{i,\min} = 0.1, K_{i,\max} = 1.0 \end{cases}$$

بررسی شرط پایداری (۳۲) و اعمال ضریب جریمه^۹ در تابع هدف، تضمین می‌کند که فقط آن ضرایب کنترلی از الگوریتم IDL استخراج شود که سیستم را در محدوده پایدار قرار دهد و سایر ضرایب کنترلی که منجر به ناپایداری سیستم می‌شوند، از حلقه تکرار الگوریتم بهینه‌سازی حذف شوند. به عبارت دیگر تضمین شود که مقادیر ویژه سیستم در داخل دایره واحد قرار گرفته باشند. از آنجائیکه مسأله فوق یک مسأله بهینه‌سازی غیرخطی با ابعاد نسبتاً بزرگ است که با روش‌های مرسوم و کلاسیک قابل حل نیست، از این‌رو برای حل آن به الگوریتم‌های بهینه‌سازی محاسباتی نیاز است. در بین الگوریتم‌های فرا ابتکاری از الگوریتم SSA در حل این مسأله استفاده شده است. تحقیقات کاربردی متنوعی روی الگوریتم SSA انجام شده که برتری

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta_v(k) \\ \Delta V(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta_i(k) \\ \Delta I(k) \end{bmatrix} \quad (23)$$

با دیفرانسیل گیری از رابطه (۱۱) ملاحظه می‌شود که تغییرات زاویه ولتاژ و زاویه جریان برابرند، بر این اساس سطر اول رابطه (۲۳)، برای سیستم سه‌فاز به صورت زیر بازنویسی می‌شود؛

$$\Delta \theta_{i,n}^\phi(k+1) = \Delta \theta_{v,n}^\phi(k+1) \\ = A \cdot \Delta \theta_{i,n}^\phi(k) + B \cdot \Delta I_n^\phi(k) \quad (24)$$

از طرفی با جایگزینی سطر دوم رابطه (۲۳) در رابطه (۱۶)، اندازه جریان تزریقی به باس n ام در گام $(k+1)$ ام برای هر فاز دلخواه ϕ به صورت زیر خواهد بود؛

$$\Delta I_n^\phi(k+1) = \left(I - K_{i,n}^\phi \cdot m_n^\phi \right) \cdot \left(\Delta I_n^\phi(k) \right) \\ - K_{i,n}^\phi \cdot \left(C \cdot \Delta \theta_{i,n}^\phi(k) + D \cdot \Delta I_n^\phi(k) \right) \quad (25)$$

بنابراین با توجه به روابط (۲۴) و (۲۵) معادلات فضای حالت گسسته برای جریان تزریقی به باسهای سه فاز بدست می‌آید؛

$$\begin{bmatrix} \Delta I_n^\phi(k+1) \\ \Delta \theta_{i,n}^\phi(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I - K_{i,n}^\phi \cdot m_n^\phi - K_{i,n}^\phi \cdot D & -K_{i,n}^\phi \cdot C \\ B & A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta I_n^\phi(k) \\ \Delta \theta_{i,n}^\phi(k) \end{bmatrix} \quad (26)$$

با توجه به رابطه (۲۶) ماتریس سیستم به صورت زیر برای بدست می‌آید؛

$$H_{sys} = \begin{bmatrix} I - K_{i,n}^\phi \cdot m_n^\phi - K_{i,n}^\phi \cdot D & -K_{i,n}^\phi \cdot C \\ B & A \end{bmatrix}_{6n \times 6n} \quad (27)$$

بر اساس ماتریس کل سیستم طبق رابطه (۲۷)، مقادیر ویژه کل سیستم بدست می‌آید.

$$Z_{ev} = \text{eigen}(H_{sys}) \quad (28)$$

آنالیز مقادیر ویژه برای پیش‌بینی سطح برهم‌کنش بین کنترل‌کننده‌های DStatcom و بررسی پایداری سیستم مناسب است. اگر پس از رسم مکان مقادیر ویژه سیستم در صفحه Z ، مقادیر ویژه در داخل دایره واحد قرار گیرند، سیستم پایدار خواهد بود.

۴- تعیین ضرایب بهینه پایدار به‌روش بهینه‌سازی

در این مقاله برای محاسبه جریان راکتیو تولیدی توسط جبران‌کننده‌ها، ضریب افتی و بهره انتگرالی کنترل‌کننده‌ها طوری بهینه خواهد شد که سیستم پایدار باشد. به‌عبارت دیگر، ضرایب کنترلی فقط در محدوده پایداری سیستم بهینه خواهند شد. در الگوریتم بهینه‌سازی برای اعمال ضریب افتی m_n از رابطه (۶) و برای بهره انتگرالی $K_{i,n}$ از رابطه (۹) استفاده می‌شود، سپس با محاسبه ولتاژ باسها از رابطه (۱۴)، شاخص انحراف ولتاژ و عدم تعادل به همراه شرط پایداری در تابع هدف ارزیابی می‌شود.

منفی باشد و نیاز اندازه گام را مشخص می‌کنند. رابطه زیر که بر اساس قانون حرکت نیوتن می‌باشد جهت بروزرسانی موقعیت پیروان در SSA استفاده می‌شوند؛

$$x_j^i = \frac{1}{2}at^2 + v_0t \quad (35)$$

که در آن x_j^i نشان‌دهنده موقعیت سالپ i ام در بعد j ام، t زمان، v_0 سرعت اولیه است. برای محاسبه شتاب رابطه زیر ارائه شده است؛

$$a = \frac{v_{final}}{v_0}, \quad v = \frac{x - x_0}{t} \quad (36)$$

با روابط (۳۳) تا (۳۶) می‌توان زنجیره سالپ را شبیه‌سازی نمود. یافته‌های مطالعاتی در این الگوریتم نشان می‌دهد که SSA در رسیدن به همگرایی از نظر جستجوی تصادفی، سریع و ناگهانی (جستجوی سراسری یا اکتشاف) و نیز جستجوی تدریجی و دقیق (جستجوی محلی یا استخراج) رفتار مناسب و مطلوب تری نسبت به الگوریتم‌های مشابه دارد [۲۷]. در الگوریتم SSA ابتدا زنجیره (جمعیت) اولیه سالپ تشکیل می‌شود و با توجه به حدود تعریف شده متغیرها، کران بالا و پایین موقعیت سالپها و موقعیت غذا بدست می‌آید، سپس توابع برازندگی سالپها و غذا محاسبه و به ترتیب ذخیره می‌شود. موقعیت سالپهای پیرو نسبت به سالپ رهبر و موقعیت غذا و زنجیره، بروزرسانی شده و زنجیره جدید بر اساس بهترین مقادیر برازندگی موقعیتها بهبود می‌یابد. در الگوریتم کنترل‌کننده IDL مورد بحث در این مقاله، متغیر کنترل ضریب اکتشاف m و بهره انتگرالی K_i بوده که مطابق شکل (۴) یک رشته $2n$ کاراکتری برای آن در نظر گرفته شده است. محدوده این متغیرها در رابطه (۳۲) تعیین شده است.

m_1	m_2	...	m_n	$K_{i,1}$	$K_{i,2}$...	$K_{i,n}$
-------	-------	-----	-------	-----------	-----------	-----	-----------

شکل (۴): نمودار طرح کلی متغیر کنترل در SSA

برای هر یک از متغیرهای کنترل شکل (۴) که همان بردار جواب می‌باشد، با اجرای الگوریتم اجتماع سالپ یک زنجیره سالپ تشکیل می‌شود و در طول مدت حلقه تکرار تا رسیدن به همگرایی جواب نهائی، این زنجیره در حال بروزشدن خواهد بود. مقدار نهائی متغیرهای کنترل پس از همگرایی تابع برازندگی در پایان حلقه تکرار بدست می‌آید. شکل (۵ - الف) فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی است که در آن زیر برنامه A مربوط به الگوریتم IDL است که در شکل (۵ - ب) نشان داده شده است. در هر تکرار حلقه فلوچارت شکل (۵ - الف) بهترین ذره محلی (ضرایب بهره) متناظر با کمترین مقدار تابع هدف، بدست می‌آید. در نهایت پس از پایان الگوریتم، بهترین ضرایب بهره بهینه سراسری حاصل خواهد شد.

مراحل بدست آوردن ضرایب بهینه و اعمال آن به جبران‌کننده‌های موجود در فیدر تست به صورت شکل (۶) می‌باشد، که در گام اول؛ براساس فلوچارت شکل (۵) الگوریتم بهینه‌سازی با زیربرنامه الگوریتم IDL اجرا می‌شود و با هدف حداقل‌سازی تابع هدف مقادیر بهینه با رعایت شرط پایداری بدست می‌آیند.

آن را نسبت به سایر الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت نشان می‌دهد. در این الگوریتم، سرعت جستجوی سراسری (اکتشاف) در کل فضا و عملکرد اتفاقی و سریع آن در فضای سراسری به گونه‌ای است که قادر است جواب‌های اولیه را بطور مؤثری بهبود دهد و با سرعت بیشتری نسبت به سایر روش‌ها به سمت جواب بهینه همگرا کند. روش بهینه‌سازی SSA علاوه بر عملکرد خوب در یافتن نقطه بهینه سراسری، در همگرایی جواب به سمت نقطه بهینه محلی (استخراج) نیز عملکرد خوبی دارد [۲۷].

۴-۲- حل مسئله بهینه‌سازی به روش SSA

الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع سالپ توسط میرجلیلی و همکاران با توجه به رفتار اجتماعی سالپ‌ها ارائه شده است [۲۷]. در مدل‌سازی الگوریتم اجتماع سالپ از رفتار اجتماعی و زنجیروار سالپها برای رسیدن به جواب بهینه استفاده می‌شود. رفتار زنجیره سالپ با استفاده از تغییرات سریع و هماهنگ، جهت تعقیب غذا نشأت می‌گیرد.

۴-۲-۱- مدل ریاضی زنجیره سالپ متحرک

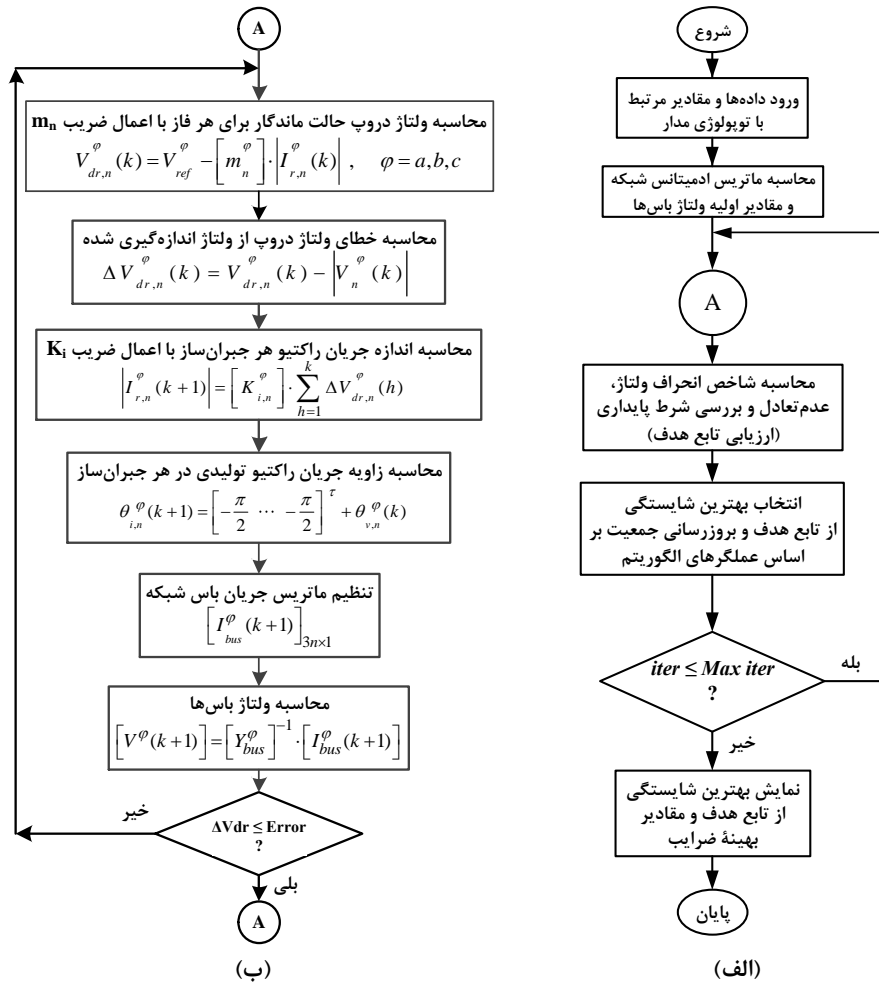
برای مدل‌سازی ریاضی زنجیره‌های سالپ متحرک، ابتدا جمعیت به دو گروه رهبر و پیرو تقسیم می‌شوند. رهبر گروه همان سالپ جلوی زنجیره است و سایر سالپ‌ها به عنوان پیرو در نظر گرفته می‌شوند. موقعیت سالپها در یک فضای جستجوی N بعدی تعریف می‌شود که در آن تعداد متغیرهای یک مسئله مشخص است. بنابراین، موقعیت همه سالپها در یک ماتریس دو بعدی موسوم به x ذخیره می‌شود. همچنین فرض می‌شود که یک منبع غذایی موسوم به F' در فضای جستجو به عنوان هدف جمع وجود دارد. برای بروزرسانی موقعیت رهبر، از روابط زیر استفاده می‌شود؛

$$x_j^l = \begin{cases} F'_j + c_1((ub_j - lb_j)c_2 + lb_j), & c_3 \geq 0 \\ F'_j - c_1((ub_j - lb_j)c_2 + lb_j), & c_3 < 0 \end{cases} \quad (33)$$

که در آن x_j^l نشان‌دهنده موقعیت اولین سالپ (رهبر) در بعد j ام، F'_j موقعیت منبع غذایی در بعد j ام، ub_j و lb_j به ترتیب نشان‌دهنده کران بالا و کران پایین بعد j ام، c_1 ، c_2 و c_3 اعداد تصادفی هستند. رابطه (۳۳) نشان می‌دهد که رهبر فقط موقعیت خود را نسبت به منبع غذایی به‌روزرسانی می‌کند. ضریب c_1 مهم‌ترین پارامتر در الگوریتم SSA است، چون c_1 اکتشاف و استخراج را در هر تکرار متعادل می‌کند؛

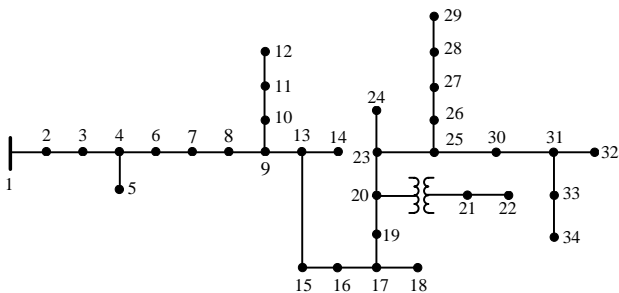
$$c_1 = 2e^{-\left(\frac{4l}{L}\right)^2} \quad (34)$$

که در آن l تکرار کنونی بوده و L حداکثر تعداد تکرارها است. پارامترهای c_2 و c_3 اعداد تصادفی هستند که به صورت یکنواخت در فاصله $[0, 1]$ تولید می‌شوند. در واقع، این دو پارامتر نشان می‌دهند که آیا موقعیت بعدی در بعد j ام باید به سمت بینهایت مثبت یا بینهایت



شکل (۵): فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی برای یافتن ضرایب بهینه
 (الف) - فلوچارت اصلی الگوریتم، شکل (ب) - زیر برنامه الگوریتم

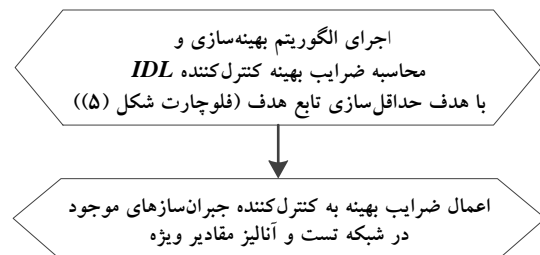
این شبکه روی ۲۰ باس انواع بارهای PQ ثابت به صورت نقطه‌ای و توزیع شده تکفاز و سه فاز ستاره و یا مثلث وجود دارد، جبران‌کننده‌های تکفاز نیز موازی با باس‌های بار متصل می‌شوند.



شکل (۷): شبکه تست اصلاح شده IEEE-34 Node

به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی و مقایسه نتایج آنها با یکدیگر برای انتخاب روش مناسب، از چهار الگوریتم دیگر نیز استفاده شده است. از الگوریتم تکاملی وراثتی (GA)، الگوریتم مبتنی بر جمعیت (PSO و SSA) و الگوریتم ترکیب تکاملی و جمعیت (HGAPSO) در این مقاله استفاده و شبیه‌سازی شده است [۲۶]. از آنجائیکه در شبکه شکل (۷) تعداد ۲۰ باس سه فاز وجود دارد، فرض شده است که در نقاط اتصال بار، جبران‌کننده تکفاز مبتنی بر PV

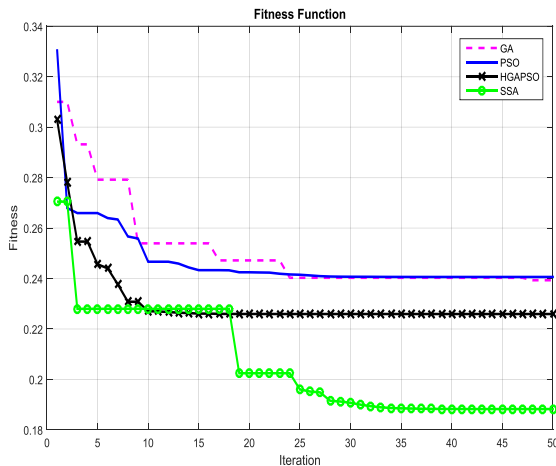
در این مرحله ضرایب کنترل‌کننده جبران‌کننده‌ها در سیستم تست ۳۴ باسه اعمال و پارامترها و مقادیر شبکه بدست خواهد آمد. در گام دوم؛ با توجه به روابط ریاضی معادلات حالت گسسته سیستم، مقادیر ویژه محاسبه خواهد شد.



شکل (۶): مراحل بدست آوردن ضرایب بهینه و اعمال آن به جبران‌کننده‌های موجود در شبکه تست

۵- شبیه‌سازی و تعیین ضرایب بهینه

شبکه تحت مطالعه مطابق شکل (۷) فیدر تست اصلاح شده IEEE-34 Node می‌باشد [۲۸] که در آن دو رگولاتور ولتاژ یکی بین باسهای ۷ و ۸ و دیگری بین باسهای ۱۹ و ۲۰ حذف شده است. در



شکل (۸): نمودار همگرایی تابع هدف الگوریتم‌های بهینه‌سازی

جدول (۳)، مقادیر بهینه ضرایب افقی و بهره انتگرالی را بر اساس الگوریتم SSA در محدوده پایدار سیستم نشان می‌دهد.

جدول (۳): ضرایب بهینه کنترل جبران‌کننده‌ها با الگوریتم SSA

فاز C		فاز B		فاز A		باس
K_i	M	K_i	m	K_i	m	
۰/۹۵۲۳	۰/۰۴۰۲	۰/۹۷۹۰	۰/۰۱۱۱	۰/۷۲۴۱	۰/۰۲۸۴	۳
۰/۸۷۸۱	۰/۰۲۶۴	۰/۸۸۴۸	۰/۰۴۷۹	۰/۴۶۹۷	۰/۰۱۶۷	۵
۰/۵۲۸۶	۰/۰۴۳۱	۰/۸۹۴۲	۰/۰۲۲۴	۰/۴۷۰۳	۰/۰۱۲۳	۱۱
۰/۲۷۳۷	۰/۰۲۰۲	۰/۳۷۰۵	۰/۰۱۳۱	۰/۱۰۰۱	۰/۰۲۵۸	۱۲
۰/۴۳۸۲	۰/۰۲۵۱	۰/۸۷۴۷	۰/۰۲۹۹	۰/۴۱۱۹	۰/۰۱۲۴	۱۳
۰/۴۲۱۳	۰/۰۲۶۳	۰/۴۹۳۳	۰/۰۴۷۴	۰/۱۹۵۸	۰/۰۴۹۶	۱۴
۰/۷۵۷۳	۰/۰۳۸۰	۰/۲۹۳۷	۰/۰۴۷۹	۰/۴۹۹۲	۰/۰۱۴۳	۱۵
۰/۸۶۱۲	۰/۰۴۴۹	۰/۸۹۳۹	۰/۰۳۳۲	۰/۸۴۶۳	۰/۰۲۹۹	۱۶
۰/۲۶۴۰	۰/۰۲۹۲	۰/۴۸۰۸	۰/۰۴۴۵	۰/۳۸۶۴	۰/۰۱۳۴	۱۸
۰/۲۶۸۲	۰/۰۳۵۰	۰/۳۹۰۲	۰/۰۲۷۵	۰/۴۴۵۰	۰/۰۳۸۸	۲۲
۰/۶۳۲۲	۰/۰۴۰۶	۰/۳۰۵۱	۰/۰۳۵۴	۰/۷۶۲۵	۰/۰۳۹۸	۲۳
۰/۶۷۹۳	۰/۰۴۰۳	۰/۴۵۱۵	۰/۰۴۶۷	۰/۱۰۹۴	۰/۰۴۰۷	۲۴
۰/۳۳۰۴	۰/۰۴۱۸	۰/۷۸۶۱	۰/۰۲۰۹	۰/۶۱۶۹	۰/۰۱۹۶	۲۵
۰/۱۷۹۷	۰/۰۲۷۰	۰/۲۴۸۶	۰/۰۱۷۳	۰/۳۴۶۲	۰/۰۱۷۴	۲۷
۰/۶۸۴۵	۰/۰۲۹۲	۰/۴۳۶۷	۰/۰۱۷۰	۰/۷۰۰۷	۰/۰۲۳۷	۲۸
۰/۳۸۸۸	۰/۰۲۳۰	۰/۴۶۷۰	۰/۰۲۵۶	۰/۳۹۳۲	۰/۰۴۱۹	۲۹
۰/۷۸۵۶	۰/۰۴۷۱	۰/۵۲۴۲	۰/۰۲۶۵	۰/۶۰۹۷	۰/۰۳۵۶	۳۰
۰/۶۴۸۵	۰/۰۱۱۳	۰/۵۸۸۸	۰/۰۵۰۰	۰/۹۲۷۱	۰/۰۱۴۵	۳۱
۰/۸۳۵۴	۰/۰۲۰۲	۰/۴۲۷۲	۰/۰۳۵۷	۰/۴۴۹۹	۰/۰۴۱۳	۳۲
۰/۶۱۷۶	۰/۰۱۲۷	۰/۹۰۲۰	۰/۰۲۳۳	۰/۹۱۸۲	۰/۰۴۷۶	۳۴

جدول (۲): مقایسه مقادیر تابع هدف، VUF و انحراف ولتاژ در الگوریتم‌های بهینه‌سازی

$Fitness = \min(V_{div})$		$Fitness = \min(VUF)$		$Fitness = \min(0.6 \times VUF + 0.4 \times V_{div})$			نوع الگوریتم
V_{div}	VUF	V_{div}	VUF	V_{div}	VUF	Fitness	
۰/۱۰۱۱	۰/۳۸۳۸	۰/۱۰۱۲	۰/۳۱۰۶	۰/۰۹۵۹	۰/۴۰۵۳	۰/۲۳۹۳	GA
۰/۰۸۱۲	۰/۴۳۹۴	۰/۱۱۹۲	۰/۲۸۲۹	۰/۱۰۱۵	۰/۳۳۳۴	۰/۲۴۰۶	PSO
۰/۰۹۰۹	۰/۸۹۹۹	۰/۱۱۵۱	۰/۲۶۱۵	۰/۱۱۱۱	۰/۲۹۸۹	۰/۲۲۵۹	HGAPSO
۰/۰۷۱۹	۰/۲۵۶۰	۰/۰۸۳۳	۰/۲۶۰۳	۰/۰۷۵۷	۰/۲۵۰۷	۰/۱۸۸۳	SSA

نصب می‌باشد. شرط توقف الگوریتم IDL رسیدن خطای ولتاژ به کمتر از خطای تعیین شده و شرط توقف الگوریتم بهینه‌سازی، ۵۰ تکرار حلقه در نظر گرفته شده است. جدول (۱) مقادیر پارامترهای مورد استفاده شده در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

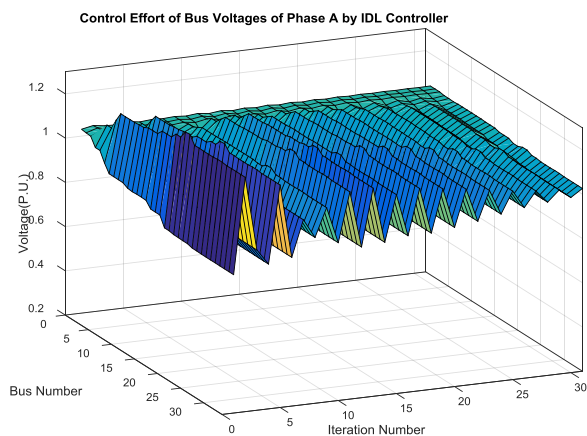
جدول (۱): پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی

متغیر	مقدار (پریونیت)
تعداد متغیر کنترل (بعد هر ذره) (D)	۱۲۰
ضریب وزنی شاخص عدم تعادل (w_1)	۰/۶
ضریب وزنی انحراف ولتاژ (w_2)	۰/۴
ضریب جریمه (λ_p)	۱۰۰
تعداد تکرار الگوریتم (K)	۵۰
تعداد جمعیت در GA, PSO, HGAPSO و SSA (N)	۳۰
حد پائین ضریب افقی (m_{min})	۰/۰۱
حد بالای ضریب افقی (m_{max})	۰/۰۵
حد پائین بهره انتگرالی ($K_{i,min}$)	۰/۱
حد بالای بهره انتگرالی ($K_{i,min}$)	۱/۰

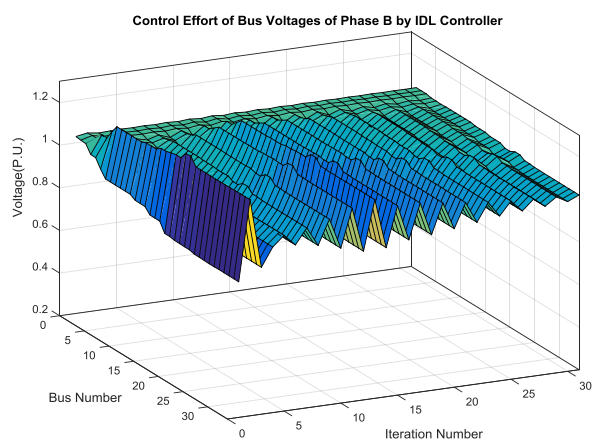
با در نظر گرفتن شرط پایداری و اعمال ضریب جریمه، نقطه کار پایدار سیستم تشخیص داده خواهد شد، بطوریکه ضرایب کنترلی بهینه منحصرأ در محدوده پایدار سیستم بدست خواهد آمد. نمودار همگرایی تابع هدف چهار الگوریتم بهینه‌سازی مطابق شکل (۸) بدست آمده است که در آن روش بهینه‌سازی SSA کمترین مقادیر برازندگی را دارد. مقدار تابع هدف پس از ۵۰ تکرار برای SSA برابر ۰/۱۸۸۳ می‌باشد.

مسأله تعیین ضرایب افقی و بهره انتگرالی بهینه با هدف حداقل‌سازی انحراف ولتاژ و شاخص VUF به‌صورت جداگانه و به‌منظور برقراری مصالحه‌ای بین این دو هدف توسط الگوریتم‌های GA, PSO, HGAPSO و SSA اجرا شده است. مقادیر تابع هدف با اعمال وزنهای مختلف ۰/۴-۰/۶، ۰-۱ و ۱-۰، به شاخص عدم تعادل و انحراف ولتاژ در جدول (۲) ارائه شده است. در هر سه حالت کمترین مقدار مربوط به روش SSA، به‌ترتیب برابر ۰/۱۸۸۳، ۰/۲۶۰۳ و ۰/۰۷۱۹ بدست آمده است. این مقادیر تابع هدف با در نظر گرفتن شرط پایداری برای سیستم بدست آمده است، بطوریکه جمله شرط پایداری، همزمان در تابع هدف لحاظ شده است.

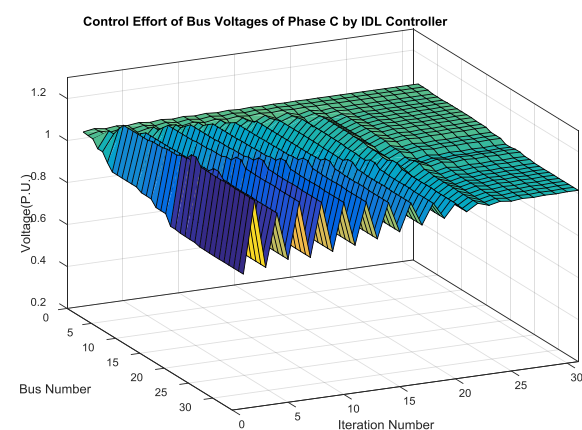
هستند، در طول مدت اجرای الگوریتم IDL، تغییرات چندانی نداشته و ولتاژ باس‌های ۵ تا باس ۳۴، در پایان حلقه تکرار پس از ۳۱ تکرار به محدوده مجاز رسیده‌اند.



(الف)



(ب)



(ج)

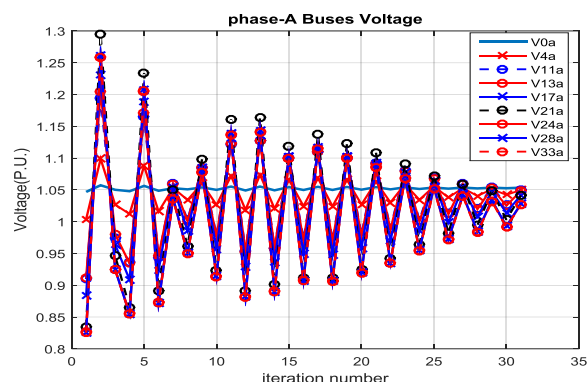
شکل (۱۰): پروفیل ولتاژ باسها برحسب تعداد تکرار الگوریتم

IDL، (الف) - فاز A، (ب) - فاز B، (ج) - فاز C

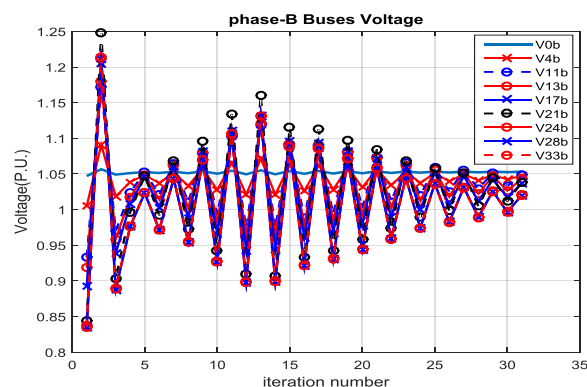
مقدار نهایی ولتاژ باسها پس از تلاش کنترلی و توقف الگوریتم IDL مطابق پروفیل ولتاژ برحسب شماره باس در شکل (۱۱) نشان داده شده است. در این شکل مقادیر ولتاژ که در باسهای انتهایی فیدر، در حالت بدون جبران در حد 0.82 پریونیت بوده‌اند پس از اعمال ضرایب

۵-۱- نتایج اعمال ضرایب بهینه به کنترل‌کننده IDL

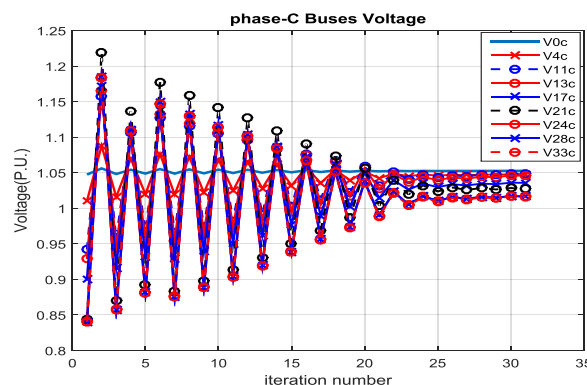
با اعمال ضرایب بهینه روش SSA به جبران‌کننده‌های شبکه ۳۴ باسه و تزریق جریان راکتیو متناظر به هر باس، تلاش کنترلی ولتاژ باس‌های مختلف طبق الگوریتم IDL برای فازهای A، B و C در شکل (۹) نشان داده شده است. شرط توقف الگوریتم IDL، رسیدن به مجموع خطای 0.05 پریونیت برای ولتاژ باس‌ها بوده است. ملاحظه می‌شود، مقادیر ولتاژ باسها به حد مجاز بین 0.95 تا 1.05 پریونیت رسیده‌اند.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۹): تلاش کنترلی ولتاژ باسهای بار بر حسب تعداد تکرار حلقه

کنترلی IDL، (الف) - فاز A، (ب) - فاز B، (ج) - فاز C

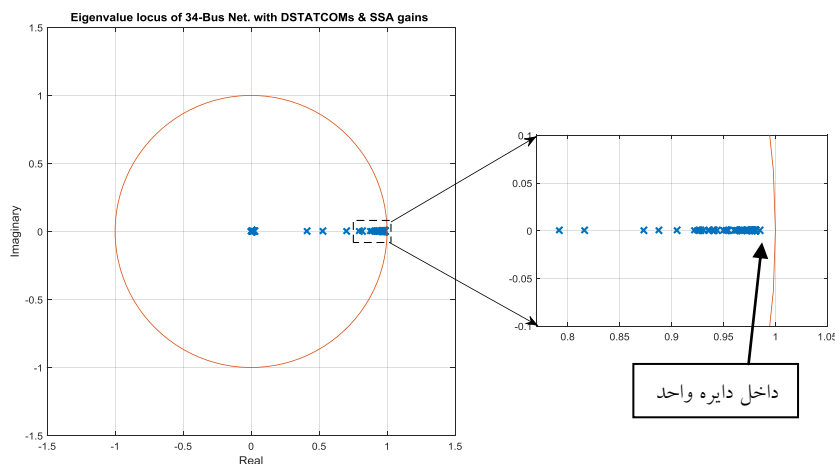
پروفیل ولتاژ برحسب تکرار الگوریتم IDL با اعمال ضرایب بهینه SSA، در شکل (۱۰) برای سه فاز نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در هر سه فاز ولتاژ باس ۱ تا باس ۴ که در ابتدای فیدر

۵-۲- نتیجه بررسی پایداری سیستم

به منظور نمایش نتایج آنالیز مقادیر ویژه و بررسی پایداری سیستم از مکان هندسی مقادیر ویژه استفاده شده است. مکان هندسی مقادیر ویژه سیستم H_{sys} رابطه (۲۷) و (۲۸) در صفحه Z مطابق شکل (۱۳) رسم شده است. این مقادیر ویژه ماتریس سیستم بازای ضرایب بهینه m و K_i برای سیستم سه فاز ۳۴ باسه محاسبه و نشان داده شده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود، تمامی مقادیر ویژه در این سیستم در دایره واحد قرار گرفته‌اند، بنابراین سیستم پایدار است.

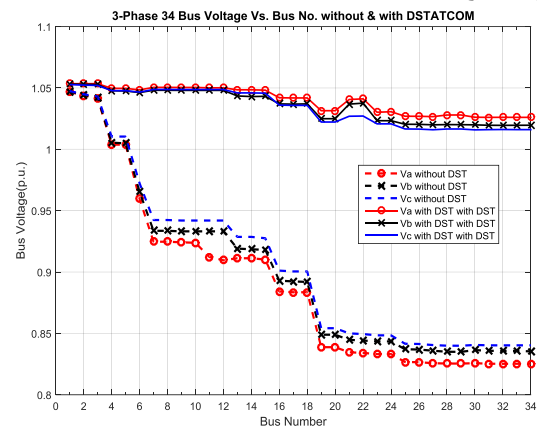
۶- نتیجه

در این مقاله، جبران‌کننده استاتیکی تکفاز مبتنی بر PV در فیدر سه فاز نامتعادل در نظر گرفته شده است. به منظور کنترل این جبران‌کننده‌های متعدد با استفاده از الگوریتم IDL، لازم است که ضرایب بهینه سیستم کنترل بدست آید. بدلیل تمرکز روی شاخص عدم تعادل و انحراف ولتاژ باسها، تابع هدف پیشنهادی مجموع این دو متغیر در هر باس در نظر گرفته شد. با پیاده‌سازی کنترل‌کننده IDL در الگوریتم‌های GA، PSO، HGAPSO و SSA، کمترین مقادیر تابع هدف مربوط به روش SSA بدست می‌آید. محاسبه مقادیر بهینه و شبیه‌سازی سیستم کنترل ادوات PV-DStatcom در شبکه تست IEEE-34 Node توسط نرم‌افزار MATLAB انجام شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با اعمال ضرایب بهینه و تزریق جریان راکتیو مناسب به باسها، علاوه بر کاهش انحراف ولتاژ و بهبود پروفیل ولتاژ، شاخص عدم تعادل ولتاژ نیز کاهش می‌یابد. به‌منظور تحلیل پایداری سیستم کنترل IDL روی جبران‌کننده‌های متعدد DStatcom در شبکه توزیع شعاعی IEEE-34 Node آنالیز مقادیر ویژه انجام شد. از آنجائیکه مقادیر ویژه سیستم گسسته همگی در داخل دایره واحد قرار گرفته‌اند بنابراین روش پیشنهادی در پایداری سیستم کنترل معتبر و مؤثر بوده است.



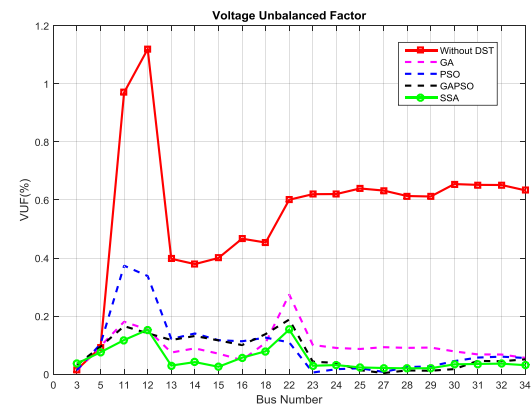
شکل (۱۳): مکان هندسی مقادیر ویژه سیستم ۳۴ باسه در حضور DStatcom های متعدد

بهینه به کنترل‌کننده IDL به محدوده بالاتر از ۱/۰ پریونیت (در حالت جبران‌شده) رسیده‌اند.



شکل (۱۱): پروفیل ولتاژ باس‌ها برای سیستم IEEE-34 Node

شاخص عدم تعادل ولتاژ باس‌ها برای حالت‌های مختلف بدون جبران با جبران در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۲): مقایسه مقادیر شاخص عدم تعادل باسهای بار

شبکه IEEE-34 Node در دو حالت بدون و با جبران‌سازی

ملاحظه می‌شود که مقادیر شاخص عدم تعادل در حالت با جبران‌سازی نسبت به حالت بدون جبران کاهش قابل توجهی یافته است. مطابق این شکل بهبود شاخص عدم تعادل در همه باس‌ها در امتداد فیدر کاملاً مشهود است و کمترین شاخص بطور نسبی متعلق به روش بهینه‌سازی SSA است.

مراجع

- International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 76, pp. 129-135, 2016.
- [۱۸] قائدی، حمید، شاهقلیان، غضنفر، هاشمی، مهنار، "مقایسه اثر دو روش کنترل مبتنی بر همواری برای STATCOM در بهبود پایداری شبکه شامل مزارع بادی مبتنی بر DFIG"، نشریه کیفیت و بهره‌وری صنعت برق ایران، سال: ۸، شماره: ۱۵، ص ۷۲-۸۱، بهار و تابستان ۱۳۹۸.
- [19] Perera, L. B., Ledwich, G., Ghosh, A., "Multiple distribution static synchronous compensators for distribution feeder voltage support", IET generation, transmission & distribution, vol. 6, pp. 285-293, 2012.
- [20] Hosseini, Jebelli, S. M., Banejad, M., Dastfan, A., Alfi, A., "PV-Based Multiple D-Statcoms Control in Unbalanced Distribution Network", Journal of Solar Energy Research, vol. 3, pp. 313-323, 2018.
- [21] Zeraati, M., Golshan, M. E. H., Guerrero, J. M., "Distributed control of battery energy storage systems for voltage regulation in distribution networks with high PV penetration", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, pp. 3582-3593, 2016.
- [22] Palaniappan, R., Hilbrich, D., Bauernschmitt, B., Rehtanz, C., "Coordinated voltage regulation using distributed measurement acquisition devices with a real-time model of the Cigré low-voltage benchmark grid", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 13, pp. 710-716, 2019.
- [23] Beniwal, N., Hussain, I., Singh, B., "A second-order Volterra filter based control of SPV-DSTATCOM system to achieve Lyapunov's stability", IEEE 7th Power India International Conference (PIICON), pp. 1-5, 2016.
- [24] Modi, G., Kumar, S., Singh, B., "Improved Widrow-Hoff Based Adaptive Control of Multi-Objective PV-DSTATCOM System", IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 1-10, (Early Access), 2019.
- [25] Shah, P., Hussain, I., Singh, B., "Single-Stage SECS Interfaced With Grid Using ISOGI-FLL-Based Control Algorithm", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, pp. 701-711, 2018.
- [26] Lee, K. Y., El-Sharkawi, M. A., Modern heuristic optimization techniques: theory and applications to power systems, vol. 39, John Wiley & Sons, 2008.
- [27] Mirjalili, S., Gandomi, A. H., Mirjalili, S. Z., Saremi, S., Faris, H., and Mirjalili, S. M., "Salp Swarm Algorithm: A bio-inspired optimizer for engineering design problems", Advances in Engineering Software, vol. 114, pp. 163-191, 2017.
- [28] Distribution Test Feeder Working Group, IEEE PES Distribution System Analysis Subcommittee, Distribution Test Feeders, April 2004, <https://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/>.
- [29] Saadat H., Power System Analysis, McGraw-Hill Series in Electrical Computer Engineering, 1999.
- [1] Zhong, Q., C., Hornik, T., *Control of power inverters in renewable energy and smart grid integration*, vol. 97, John Wiley & Sons, 2013.
- [2] Ghosh, A., Ledwich, G., Power quality enhancement using custom power devices, Springer Science & Business Media, 2002.
- [3] Mehrouachi, I., Abbes, M., Chebbi, S., "Design of a high power D-STATCOM based on the isolated dual-converter topology", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 106, pp. 401-410, 2019.
- [4] Ustun, T. S., Hashimoto, J., Otani, K., "Impact of Smart Inverters on Feeder Hosting Capacity of Distribution Networks", IEEE Access, vol. 7, pp. 163526-36, 2019.
- [5] Schauder, C., "Advanced inverter technology for high penetration levels of PV generation in distribution systems", No. NREL/SR-5D00-60737, National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2014.
- [6] Li, H., Wen, C., Chao, K. H., Li, L. L., "Research on inverter integrated reactive power control strategy in the grid-connected pv systems", Energies, vol. 10, p. 912, 2017.
- [7] Hsieh, S. C., "Economic evaluation of the hybrid enhancing scheme with DSTATCOM and active power curtailment for PV penetration in Taipower distribution systems", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, pp. 1953-1961, 2014.
- [8] Mishra, S., Ray, P. K., "Power quality improvement using photovoltaic fed DSTATCOM based on JAYA optimization", IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 7, pp. 1672-1680, 2016.
- [9] Singh, B., Kandpal, M., Hussain, I., "Control of grid tied smart PV-DSTATCOM system using an adaptive technique", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 9, pp. 3986-3993, 2016.
- [10] Seuss, J., Harley, R. G., "Determining reactive power levels necessary to provide optimal feeder line voltage regulation", North American Power Symposium (NAPS), pp. 1-6, 2013.
- [11] Mahela, O. P., Shaik, A. G., "A review of distribution static compensator", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 50, pp. 531-546, 2015.
- [12] Latran, M. B., Teke, A., Yoldaş, Y., "Mitigation of power quality problems using distribution static synchronous compensator: a comprehensive review", IET power electronics, vol. 8, pp. 1312-1328, 2015.
- [13] Singh B., Solanki, J., "A comparison of control algorithms for DSTATCOM", IEEE transactions on Industrial Electronics, vol. 56, pp. 2738-2745, 2009.
- [14] Bedawy, A., Yorino, N., Mahmoud, K., Zoka, Y., Sasaki, Y., "Optimal Voltage Control Strategy for Voltage Regulators in Active Unbalanced Distribution Systems Using Multi-Agents", IEEE Transactions on Power Systems pp. 1-12, (Early Access), 2019.
- [15] Vasquez, J. C., Mastromauro, R. A., Guerrero, J. M., Liserre, M., "Voltage support provided by a droop-controlled multifunctional inverter", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, pp. 4510-4519, 2009.
- [16] Majumder, R., "Reactive power compensation in single-phase operation of microgrid", IEEE transactions on industrial electronics, vol. 60, pp. 1403-1416, 2012.
- [17] Amoozegar, D., "DSTATCOM modelling for voltage stability with fuzzy logic PI current controller",

زیر نویس‌ها

- ¹ Distribution Static Compensator
- ² Custom Power Devices
- ³ Integral to Droop Line Controller
- ⁴ Genetic Algorithm
- ⁵ Particle Swarm Optimization
- ⁶ Hybrid GA and PSO
- ⁷ Salp Swarm Optimization
- ⁸ Eigen Value Analysis
- ⁹ Penalty Factor
- ¹⁰ Exploitation
- ¹¹ Exploration