

طراحی کنترلر غیرخطی بهینه برای DSTATCOM در یک ریزشبکه براساس

نظریه خطی سازی فیدبک و ترکیب منطق فازی و الگوریتم زنبورها

افشین لشکرآرا^۱، هاجر باقری طولابی^۲

۱- استادیار گروه مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دزفول ایران

Lashkarara@alumni.iust.ac.ir

۲- مربی گروه مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد خرم آباد، خرم آباد ایران

hajarbagheri1@gmail.com

چکیده: در این مقاله، کنترلر غیرخطی جدید برای DSTATCOM در یک ریزشبکه شامل واحدهای تولید پراکنده (DG) واحد پیشنهاد شده است. روش کنترلی پیشنهادی بر اساس نظریه خطی سازی فیدبک (FLT)، طراحی و از کنترلرهای PID نیز برای تنظیم و ردیابی جریان و ولتاژ مرجع استفاده شده است. همچنین ترکیبی از سیستم های فازی و الگوریتم زنبورها (BA) به منظور بهینه سازی پارامترهای کنترل کننده های PID پیشنهاد شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد ویژگی های پاسخ پله و ولتاژ DSTATCOM کنترلر پیشنهادی شامل زمان خیز، زمان نشست، حداکثر اضافه جهش و خطای حالت پایدار به شکل چشمگیری بهبود یافته است. همچنین روش ترکیبی پیشنهادی برای تنظیم کنترلر طراحی شده به تنظیم بهتر ولتاژ DC خازن موجود در DSTATCOM منجر شده است و نیز عملکرد بهتری در مقایسه با کنترلر کلاسیک PID و یا کنترلر تنظیم شده با الگوریتم ژنتیک (GA) و بهینه سازی ازدحام ذرات (PSO) در هر دو حالت وقوع خطا و پس از برطرف سازی خطا دارد.

واژه های کلیدی: الگوریتم زنبورها (BA)، نظریه خطی سازی فیدبک (FLT)، سیستم توزیع، منطق فازی.

۱- مقدمه

تولید پراکنده (DG)^۱ و سیستم های انتقال AC انعطاف پذیر توزیع شده (DFACTS)^۲ نوآوری های جدیدی هستند که به بهبود و انعطاف پذیری بیشتر شبکه های توزیع منجر شده اند [۱، ۲]. سیستم های فتوولتائیک، نیروگاه های بادی، برق آبی، بیومس، فتوسل و زباله سوز از جمله کاربردهای تولیدات پراکنده هستند. DSTATCOM^۳، UPQC^۴ و DVR^۵ از جمله ادوات شناخته شده DFACTS هستند که به طور گسترده ای در شبکه های توزیع به کار

گرفته می شوند [۳]. برای دستیابی به مزایای DG ها و واحدهای DFACT، طراحی استراتژی کنترلی مناسب بسیار مهم است. کنترلر توان راکتیو واحدهای DG و DFACT چالشی اساسی برای حفظ ولتاژ شین های شبکه توزیع در محدوده مطلوب است [۴]. گائو و ایروانی یک طرح کنترلر ولتاژ برای واحدهای DG در شبکه توزیع ارائه داده اند که از یک مبدل منبع ولتاژ (VSC)^۶ بهره می برد [۵]. استراتژی پیشنهادی آنها، بهره برداری از واحدهای DG را در هر دو حالت های متصل به شبکه^۷ و جزیره ای یا مستقل از شبکه^۸ امکان پذیر می کند، قدرت تأمین جریان VSC را در طول خطا دارد و نیز توانایی انتقال نرم بین حالت های متصل به شبکه و جزیره ای را داراست. کومار و میشران نیز یک الگوریتم برای بهبود عملکرد DSTATCOM در مد کنترلر ولتاژ معرفی کرده اند [۶]. استراتژی پیشنهادی آنها در مقایسه با روش کنترلر کلاسیک ولتاژ چندین مزیت دارد، از جمله

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۹۵/۰۴/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۱۱/۳۰

نام نویسنده مسئول: افشین لشکرآرا

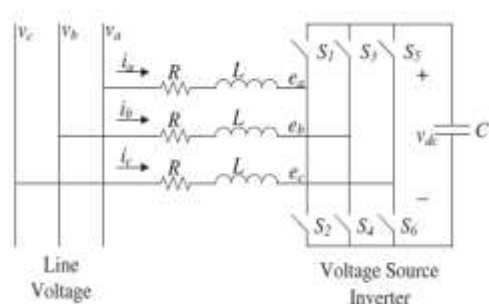
نشانی نویسنده مسئول: ایران - دزفول - دانشگاه آزاد دزفول - دانشکده مهندسی - گروه برق

کنترلر و نیز پروفیل ولتاژ در نقطه کولپینگ مشترک (PCC^۱) بهبود می یابند.

۲- طراحی کنترلر برای DSTATCOM بر اساس نظریه فیدبک خطی ساز

شکل (۱) طرح کلی از DSTATCOM متصل به یک شبکه توزیع را نشان می دهد [۸].

با توجه به توضیحات جامع موجود در [۸]، معادله (۱) (مدل غیرخطی DSTATCOM) در فضای حالت (SS^۱) به شرح زیر استخراج می شود:



شکل (۱): دیاگرام مداری DSTATCOM شش پالسه.

$$x = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ v_{dc} \end{bmatrix}$$

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L}i_d + \omega i_q + \frac{v_d}{L} \\ -\frac{R}{L}i_q - \omega i_d \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{v_d}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{v_d}{L} \\ \frac{i_d}{C} & \frac{i_q}{C} \end{bmatrix} u \quad (1)$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_q \\ v_{dc} \end{bmatrix}$$

که

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m \cos \phi \\ m \sin \phi \end{bmatrix}$$

که در آن x ، $f(x)$ ، $g(x)$ و y به ترتیب عبارتند از: متغیرهای حالت، ماتریس حالت، ماتریس ضرایب ورودی، ماتریس متغیرهای ورودی و ماتریس بردار خروجی.

اینکه با اجرای طرح پیشنهادی، ضمن بهره برداری، مقدار ضریب قدرت در ترمینال بار برابر یک می ماند؛ درحالی که حفظ مقدار واحد برای ضریب قدرت در روش کلاسیک امکان پذیر نیست. همچنین با کمک این روش، DSTATCOM جریان کمتری تزریق می کند و این به کاهش تلفات در مبدل و فیدر مربوطه منجر می شود. با وجود این مزایا، مدل کنترل پیشنهادی خطی بوده است و مدینامیکی را برای DSTATCOM در نظر نمی گیرد. سینگ و همکاران از یک الگوریتم کنترل بهینه شده بر اساس منطق فازی تطبیقی برای تنظیم ولتاژ شین DC در DSTATCOM استفاده کرده اند [۷]. روش ارائه شده ولتاژ شین DC را در VSC کنترل می کند و پاسخ پله DSTATCOM را تنها با کاهش اضافه جهش کنترلر PI^۲ کلاسیک آن بهبود می دهد. به عبارت دیگر، با اجرای روش پیشنهادی، به بهبود ویژگی های دیگر پاسخ پله مانند زمان خیز، زمان نشست یا مقدار خطای حالت ماندگار توجه نشده است. محمود و همکاران، طرح کنترل غیرخطی برای DSTATCOM متصل به یک شبکه توزیع با واحدهای DG پیشنهاد کرده اند [۸]. کنترل کننده مدنظر ولتاژ شین DC را در هر شرایط عملیاتی تنظیم کرده است و عملکرد بسیار بهتری در مقایسه با کنترل کننده PI کلاسیک دارد. در این روش پس از خطی سازی، از دو کنترلر PI برای ردیابی سیگنال مرجع در خروجی استفاده می شود. در روش پیشنهادی، ضرایب انتخاب شده برای کنترلرهای PI رابطه استاتیکی با مقدار مرجع دارند؛ بنابراین هیچ تضمینی برای انتخاب پارامترهای بهینه برای کنترل کننده های PI وجود ندارد.

هدف اصلی این مقاله طراحی یک کنترلر PID^{۱۱}-FLT برای DSTATCOM با در نظر گرفتن مدل غیرخطی DSTATCOM است که با استفاده از نظریه خطی سازی فیدبک، عوامل غیرخطی حذف می شود و پس از خطی سازی با کنترلرهای PID، خطاهای تعقیب ولتاژ و جریان مرجع DSTATCOM کنترل می شود. همچنین پارامترهای کنترلر طراحی شده بر اساس ترکیبی از مجموعه فازی و الگوریتم زنبورها (BA^{۱۲}) انتخاب و تنظیم می شوند و با انتخاب گین مناسب برای کنترلر PID ویژگی های پاسخ

طراحی کنند. برای این منظور در این مقاله، دو کنترل‌کننده PID به شرح زیر پیشنهاد شده است:

$$v_1 = k_{1p}e_1 + k_{1i} \int_0^t e_1 dt + k_{1d} \frac{de_1}{dt} \quad (3)$$

$$v_2 = k_{2p}e_2 + k_{2i} \int_0^t e_2 dt + k_{2d} \frac{de_2}{dt}$$

که در آن e_1 مقدار خطای مشاهده شده در \dot{i}_q و e_2 مقدار خطای مشاهده شده در v_{dc} است.

۳- ترکیب الگوریتم زنبورها و سیستم فازی برای تنظیم بهینه پارامترهای کنترلر DSTATCOM

در این بخش، نحوه عملکرد الگوریتم زنبورها (BA) و ترکیب آن با سیستم فازی و در نهایت روش ترکیبی پیشنهادی Fuzzy-BA-FLT-PID برای کنترل و تنظیم بهینه پارامترهای کنترلی بررسی شده است.

۳-۱- الگوریتم زنبورها (BA)

در طبیعت، مجموعه‌ای از زنبورهای عسل خود را به جاهای دور می‌رسانند و در جهت‌های مختلف و به‌طور هم‌زمان از منابع غذایی استفاده می‌کنند. این مجموعه با فرستادن زنبورهای جست‌وجوگر به سمت منابع مناسب‌تر گسترش می‌یابد. در این فرآیند، گل‌های با شهد بالا میزبان زنبورهای بیشتر و گل‌های با شهد کمتر، شاهد زنبورهای کمتری خواهند بود. زنبورهای بازرس، آغازگر فرآیند جست‌وجو در یک مجموعه هستند. زنبورهای بازرس به‌صورت تصادفی از یک گلزار به سمت گلزار دیگر حرکت می‌کنند و پس از کسب اطلاعات از آنها به کندو برمی‌گردند و شروع به تبادل اطلاعاتی همچون مسیر گلزار و مسافت کندو تا گلزار می‌کنند [۱۰، ۱۲].

الگوریتم زنبورها الگوریتم جست‌وجوی بر مبنای جمعیت است که از رفتار مجموعه زنبورهای عسل در جست‌وجوی غذا الهام گرفته شده است و نوعی جست‌وجوی همسایگی را به‌صورت تصادفی انجام می‌دهد که در مسائل بهینه‌سازی استفاده می‌شود. مراحل یافتن

v_d و i_d : جریان و ولتاژ متناظر با محور d در قاب مرجع dq

i_q : جریان متناظر با محور q در قاب مرجع dq

v_{dc} : ولتاژ خازن؛

L : سلف معادل فیلتر و ترانسفورماتور؛

R : مقاومت اینورتر و ترانسفورماتور؛

$C = \frac{3}{2}C_{dc}$ و C_{dc} ظرفیت خازن؛

ω : سرعت زاویه‌ای بردارهای ولتاژ و جریان و

m : شاخص مدولاسیون و ϕ زاویه آتش مدولاسیون پهنای پالس (PWM) استفاده شده در DSTATCOM است.

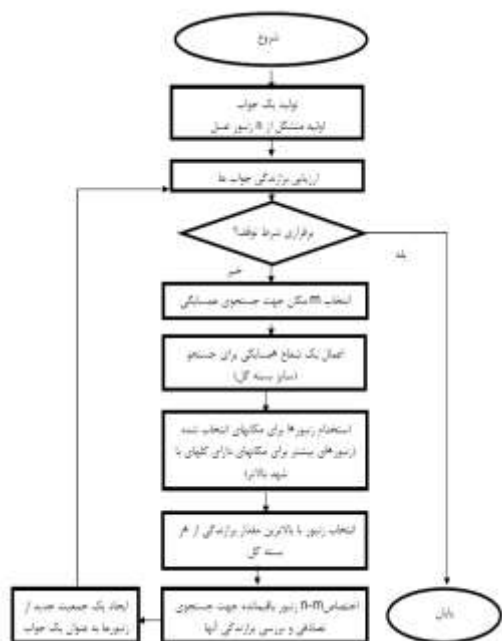
از نظریه خطی سازی فیدبک در کنترل سیستم‌های غیرخطی، بسیار استفاده می‌شود. خطی سازی فیدبک روش کنترل چندمتغیره بر اساس مدل ریاضی سیستم است؛ از این رو، روش کنترلی بر مبنای مدل سیستم محسوب می‌شود. این روش با تغییر متغیرها و نیز انتخاب ورودی کنترل مناسب، سیستم‌های غیرخطی را به سیستم‌های خطی متناظر تبدیل می‌کند.

نظریه خطی سازی فیدبک برای خطی کردن سیستم غیرخطی DSTATCOM (ارائه شده در معادله (۱)) استفاده می‌شود. این رویکرد کنترلی با تبدیل معادله غیرخطی (۱) به دو سیستم خطی جدید (که هر دو نیز دینامیک داخلی پایدار دارند) به حذف همه عوامل غیرخطی از معادله غیرخطی DSTATCOM منجر خواهد شد [۱۰، ۸]. توضیحات جامع درخصوص استفاده از نظریه فیدبک خطی ساز برای خطی کردن معادلات (۱) DSTATCOM در مرجع [۸] اشاره شده است که در نهایت به تعریف یک قانون کنترل فیدبکی بین ورودی‌های کنترلی جدید v_1 و v_2 و ورودی‌های کنترلی قدیم u_1 و u_2 به شرح زیر منجر خواهد شد:

$$u_1 = \frac{-C}{i_d} v_2 + i_q \left[\frac{L}{i_d v_{dc}} v_1 + \frac{L}{v_{dc}} \omega + \frac{R i_q}{i_d v_{dc}} \right] \quad (2)$$

$$u_2 = \frac{L}{v_{dc}} \left[v_1 + \omega i_d + \frac{R}{L} i_q \right]$$

ورودی‌های کنترلی جدید v_1 و v_2 باید دو کنترل‌کننده مناسب برای ردیابی هر دو خروجی مرجع (v_{dc} و \dot{i}_q) را



شکل (۲): فلوجارت الگوریتم زنبورها

۳-۲- تنظیم پارمترهای کنترلر PID FLT- در DSTATCOM با ترکیب الگوریتم زنبورها و

سیستم فازی

گین‌های کنترل‌کننده PID پیشنهادی در بخش قبل با کمک معادله (۳) باید طوری انتخاب شوند که خطاهای e_1 و e_2 به حداقل برسند. همان‌طور که معادله (۳) نشان می‌دهد گین‌های هر دو کنترلر PID به مقدار جریان و ولتاژ مرجع بستگی دارند. مقادیر ولتاژ و جریان مرجع با توجه به تخمین توان راکتیو سیستم برای بهبود پایداری ولتاژ محاسبه می‌شوند. روش تخمین توان راکتیو استفاده شده در این مقاله در [۱۳] به تفصیل بیان شده است. بر اساس مقدار تخمین زده شده، توان راکتیو (Q_r) مقدار محاسبه شده برای جریان مرجع ($i_{q(r)}$) برابر است با:

$$i_{q(r)} = \frac{2Q_r}{3e_d} \quad (4)$$

با توجه به مقدار $i_{q(r)}$ به دست آمده از رابطه (۴)، مقدار ولتاژ DC مرجع ($v_{dc(r)}$) از رابطه زیر به دست می‌آید:

جواب بهینه با الگوریتم زنبور عسل در قالب یک فلوجارت (شکل ۲) به شرح زیر خلاصه شده است

- ایجاد مجموعه جواب اولیه.
- بررسی برازندگی مجموعه جواب‌های اولیه.
- تکرار حلقه زیر تا حصول شرط توقف.
- ایجاد مجموعه جدید همسایگی برای یافتن جواب‌های جدید.
- انتخاب مکان‌ها برای جست‌وجوی همسایگی.
- استخدام زنبورها برای مکان‌های انتخاب شده.
- انتخاب بهترین زنبور (به لحاظ برازندگی) از هر بسته.
- اضافه کردن زنبورهای باقیمانده برای جست‌وجوی تصادفی و بررسی برازندگی آن‌ها و مقایسه جواب‌های قدیم و جدید.
- پایان حلقه.

الگوریتم با وارد کردن n زنبور بازرس به صورت تصادفی در فضای جست‌وجو شروع می‌شود. برازندگی مکان‌های رؤیت شده با n زنبور بازرس بررسی می‌شود. زنبورهایی با بالاترین مقادیر برازندگی، زنبورهای منتخب هستند و مکان‌های مشاهده شده زنبورهای منتخب برای جست‌وجوی همسایگی مشخص می‌شوند. در مراحل بعد، الگوریتم، عملیات جست‌وجو را به همسایگی مکان‌های انتخاب شده هدایت می‌کند. همان‌طور که ذکر شد زنبورها بر اساس میزان برازندگی مکان‌های رؤیت شده آن‌ها انتخاب می‌شوند و الگوریتم از مقادیر برازندگی مربوطه برای بررسی مکان‌های برتر استفاده می‌کند [۱۱، ۱۲]

پارامترهای موجود در این الگوریتم عبارتند از:

n : تعداد زنبورهای بازرس.

m : تعداد مکان‌های منتخب از میان مکان‌های مشاهده شده زنبورهای بازرس.

e : تعداد مکان‌های برتر از میان m مکان منتخب.

nep : تعداد زنبورهای استخدام شده برای e مکان منتخب.

$nspe$: تعداد زنبورهای استخدام شده برای $m-e$ مکان باقیمانده.

ng : اندازه بسته گل (شعاع همسایگی در جست‌وجوی تصادفی).

$$F(X) = \sum_{i=1}^4 a_i \cdot \mu_{f_{ij}}(X) \quad (۸)$$

که در آن a_i ضریب وزنی مؤثر هدف i ام است. فرآیند یافتن پارامترهای بهینه برای کنترلر طراحی شده، در زیر به صورت گام به گام تشریح شده است:

گام ۱: دریافت همه داده‌های لازم شبکه توزیع مدنظر، تنظیم پارامترهای الگوریتم زنبورها و تولید یک حل اولیه تصادفی.

گام ۲: تکرار مراحل زیر برای هر بار اجرای الگوریتم:

الف- تخمین توان راکتیو لازم؛

ب- محاسبه مقادیر جریان و ولتاژ مرجع؛

ج- اجرای برنامه جریان پخش بار [۳]؛

- تولید یک راه حل بهینه بر اساس تخمین‌های الف تا ج؛

د- ارزیابی مقدار توابع هدف؛

و- فازی‌سازی مقدار تابع هدف متناظر و ذخیره بهترین پاسخ مدنظر.

گام ۳: به‌روزرسانی پارامترهای الگوریتم زنبورها به منظور تولید یک پاسخ جدید و اجرای فرآیند محاسباتی ارائه شده در مرحله ۲ (الف تا و) برای پاسخ پیشنهادی جدید.

گام ۴: مقایسه مقدار برازندگی پاسخ جدید و بهترین پاسخ ذخیره شده. اگر مقدار برازندگی پاسخ جدید از بهترین پاسخ ذخیره شده بهتر است، پاسخ جدید جایگزین بهترین پاسخ شود.

گام ۵: بررسی شرط توقف. اگر شرط توقف برقرار است، گام ۶ اجرا شود و در غیر این صورت، دوباره به گام ۳ رفته و پروسه قبل تکرار شود.

گام ۶: دفازی کردن نتایج بهترین پاسخ ذخیره شده و ارائه ضرایب بهینه برای کنترلر.

مرحله ۷: پایان.

۴- نتایج شبیه‌سازی و بحث

عملکرد کنترلر طراحی شده بر روی سیستم توزیع بار ریزشکه اصلاح شده پیشنهادی [۱۵] بررسی شده است. ولتاژ سیستم توزیع مدنظر ۲۵ کیلو ولت و فرکانس آن ۵۰ هرتز در نظر گرفته شده است و ریزشکه آن شامل منابع مختلفی از تولیدات پراکنده (DG) مبتنی بر سوخت

با محاسبه مقادیر جریان مرجع ($i_{q(r)}$) و ولتاژ مرجع ($v_{dc(r)}$)، گین‌های کنترلرها باید طوری انتخاب شوند که خروجی‌ها مقادیر مرجع متناظر را دنبال کنند و خطا به حداقل برسد.

در این مقاله از الگوریتم زنبورها برای تنظیم بهینه گین‌های کنترل کننده PID به صورتی استفاده می‌شود که مشخصات پاسخ پله شامل زمان خیز (t_r)، زمان نشست (t_s)، (بهبود هر دو زمان خیز و زمان نشست با هم به بهبود سرعت پاسخ در هر دو قسمت ابتدا و انتهای موج منجر خواهد شد)، حداکثر فرجهش (Mp) و خطای حالت ماندگار (Ess) بهبود یابند. با توجه به مقاصد ذکر شده، تابع هدف زیر برای حل مسئله تعریف شده است:

$$v_{dc(r)} = v_d + Ri_{q(r)} + \omega Li_{q(r)} \quad (۵)$$

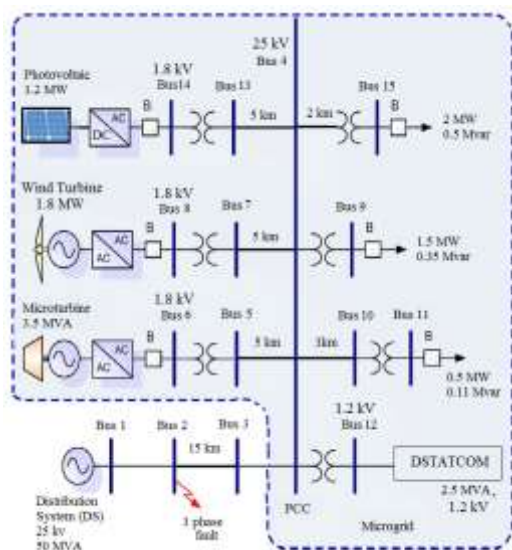
که در آن a_1, a_2, a_3, a_4 ضرایب وزنی توابع هدف هستند. با توجه به اینکه در این پژوهش برای هر چهار هدف ارزش یکسانی در نظر گرفته شده، مقدار ضرایب a_1, a_2, a_3, a_4 برابر ۰٫۲۵ لحاظ شده است. به دلیل اینکه توابع هدف، دیمانسیون‌های برابر ندارند، از سیستم فازی برای همگن کردن همه اهداف استفاده می‌شود [۱۴]. به این صورت که برای هر هدف یک تابع عضویت (μ) به شرح زیر تعریف می‌شود که درجه تأثیرگذاری تابع هدف متناظر را نشان می‌دهد:

$$OF = a_1 M_p + a_2 E_{ss} + a_3 t_r + a_4 t_s \quad (۶)$$

$$\mu_{f_{ij}}(X) = \begin{cases} 1, & f_{ij}(X) \leq f_i^{\min} \\ \frac{f_i^{\max} - f_{ij}(X)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}, & f_i^{\min} < f_{ij}(X) < f_i^{\max} \\ 0, & f_i^{\max} \leq f_{ij}(X) \end{cases} \quad (۷)$$

که در آن f_{ij} مقدار به دست آمده برای i امین تابع هدف در j امین پاسخ، f_i^{\min} بهترین پاسخ بهینه برای تابع هدف i ام و f_i^{\max} بدترین جواب یافته شده برای تابع هدف i ام است.

بر اساس روابط (۶) و (۷)، تابع هدف نهایی به صورت زیر تعریف می‌شود:



شکل (۳): دیاگرام تک خطی شبکه توزیع توسعه یافته به همراه ریزشبهه پیشنهادی

حالت ج) پاسخ پله ولتاژ در شین ۱۲ به تغییر ناگهانی ولتاژ ۲٪ در v_{dc} ، درحالی که DSTATCOM با کنترلر PID-FLT پیشنهادی، همراه با تنظیم بهینه پارامترها با کمک روش ترکیبی فازی - الگوریتم زنبورها کنترل می‌شود.

مشخصات پاسخ پله ولتاژ به دست آمده در سه حالت: الف، ب و ج با هم در جدول ۱ مقایسه شده اند. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود، کمترین (بهترین) مقادیر زمان خیز، زمان نشست، حداکثر فراجهش و خطای حالت ماندگار به ترتیب برابر است با ۰،۰۱۱، ۰،۶۲۱، ۰،۴۰۳ و ۰،۰۰۱۹ که همگی مربوط به حالت ج، یعنی استفاده از کنترلر پیشنهادی همراه با استفاده از متد بهینه سازی ترکیبی هستند. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، پس از حالت ج، حالت ب، یعنی استفاده از کنترلر FLT طراحی شده بدون بهینه‌سازی ضرایب، نسبت به حالت الف برتری دارد که صرفاً استفاده از کنترلر کلاسیک PID برای DSTATCOM است.

مقدار گین‌های کنترلر $(k_{1p}, k_{1i}, k_{1d}, k_{2p}, k_{2d})$ برای دو حالت ب و ج در جدول (۲) مقایسه شده است. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، مقادیر بهینه گین‌ها (حالت ج) نسبت به حالت بدون بهینه‌سازی (حالت ب) مقداری متفاوت است.

فسیلی و انرژی‌های تجدیدپذیر بارهای متنوع است. سیستم آزمون ارائه شده در [۱۵] با اضافه کردن سه شین جدید (۱۳، ۱۴ و ۱۵)، افزودن یک آرایه فتوولتائیک (PV) در شین ۱۴، ۷ کیلومتر خط انتقال بین شین‌های ۱۳ و ۱۵، یک بار اضافی جدید (2MW+0.5Mvar) در شین‌های ۱۲ و ۱۵ توسعه یافته است.

ظرفیت DSTATCOM نیز برابر ۲،۵ مگاوار در نظر گرفته شده است. این سیستم تست در شکل (۳) نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، شین ۴، نقطه اتصال مشترک (PCC) بوده است و در ریزشبهه، سه نوع از واحدهای DG شامل توربین بادی، سیستم فتوولتائیک و میکرو توربین به ترتیب به شین‌های شماره ۸، ۱۴ و ۶ به ترتیب متصل هستند که برای تأمین بار شین‌های شماره ۹، ۱۵ و ۱۱ استفاده شده است و قدرت مازاد آنها به سیستم توزیع (DS) تزریق خواهد شد.

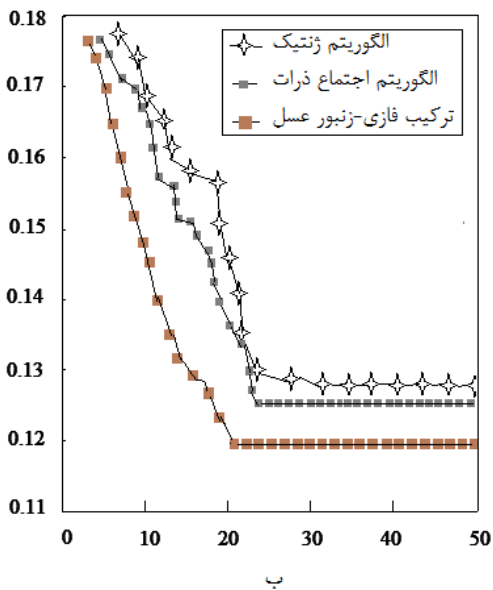
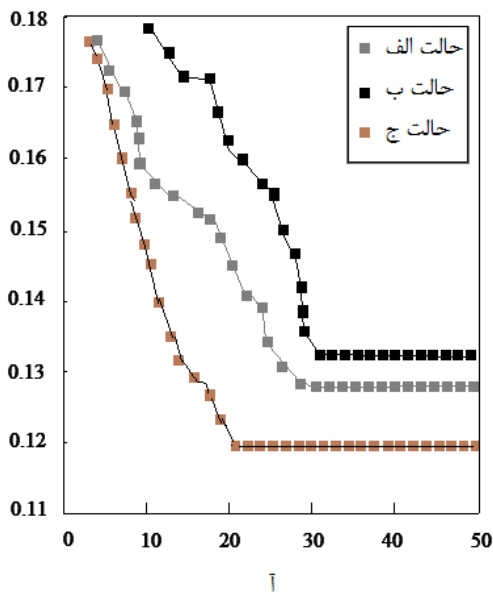
سه حالت مختلف برای آنالیز ویژگی‌های پاسخ پله ولتاژ در شین ۱۲ (PCC) به شرح زیر بررسی می‌شوند: حالت الف): پاسخ ولتاژ در شین ۱۲ به تغییر ناگهانی ولتاژ ۲٪ در v_{dc} ، درحالی که DSTATCOM فقط با کنترلر کلاسیک PID کنترل می‌شود. در این حالت ضرایب کنترل کننده طوری انتخاب می‌شوند که خروجی‌ها، ورودی‌های مرجع را با حداقل خطا تعقیب کنند. در این مقاله از روش پیشنهادی در [۸] برای تعیین ضرایب کنترلر کلاسیک PID به صورت زیر استفاده شده است:

$$k_{1p} = 2iq_r, \quad k_{1i} = iq_r^2, \quad k_{1d} = 2/3iq_r^3$$

$$k_{2p} = 2vdc_r, \quad k_{2i} = vdc_r^2, \quad k_{2d} = 2/3vdc_r^3.$$

حالت ب) پاسخ پله ولتاژ در شین ۱۲ به تغییر ناگهانی ولتاژ ۲٪ در v_{dc} ، درحالی که DSTATCOM با کنترلر PID-FLT پیشنهادی، بدون تنظیم بهینه پارامترها کنترل می‌شود.

تست شده دیگر کارآمدتر است. همچنین فرآیند همگرایی تابع هدف برای سه الگوریتم ژنتیک، بهینه سازی اجتماع ذرات و فازی - زنبورها در شکل (۴ ب) با هم مقایسه شده اند. همان طور که در این شکل دیده می شود، تابع هدف روش پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم ژنتیک با مقدار نهایی همگرایی معادل ۰,۲۷۵ و همچنین، الگوریتم بهینه سازی اجتماع ذرات با مقدار نهایی همگرایی ۰,۱۲۵۰ سرعت همگرایی بالاتری دارد و به مقدار نهایی بهینه تری برابر با ۰,۱۲۰۴ ختم می شود.



شکل (۴): پروسه همگرایی تابع هدف: (آ) برای سه حالت تست الف، ب و ج، (ب) مقایسه متدهای مختلف در حالت ج

جدول (۱): مقایسه مشخصات پاسخ پله ولتاژ در سه حالت

	حالت الف	حالت ب	حالت ج
Mp	۰,۱۹۷	۰,۰۳۸	۰,۰۱۱
tr	۰,۶۵۹	۰,۴۱۲	۰,۴۰۳
ts	۳,۸۲۵	۲,۰۳۱	۰,۶۲۱
Ess	۰,۶۴۴	۰,۲۵۰	۰,۰۰۰۱۹

جدول (۲): مقایسه گین های کنترلر PID برای حالت های

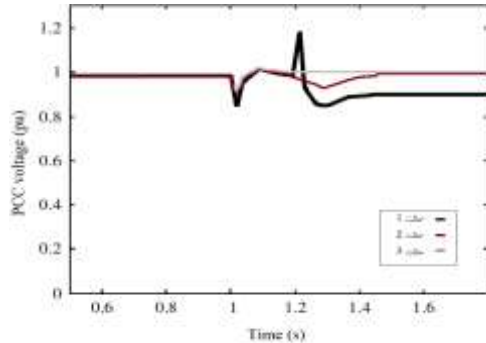
	حالت ب	حالت ج
k_{2p}, k_{1p}	۰,۷۳, ۰,۴۶	۰,۴۵, ۰,۳۴
k_{2i}, k_{1i}	۰,۳۸, ۰,۰۵۱	۰,۱۹, ۰,۱۷
k_{2d}, k_{1d}	۰,۹۶, ۰,۱۹	۰,۲۸, ۰,۴۲

فرآیند همگرایی تابع هدف برای سه حالت الف، ب و ج در شکل (۴ آ) با هم مقایسه شده اند. همان طور که در این شکل دیده می شود، تابع هدف در حالت ج، یعنی استفاده از کنترلر طراحی شده به همراه بهینه سازی پارامترهای آن با روش ترکیبی پیشنهادی، نسبت به دو حالت دیگر، سرعت همگرایی بالاتری دارد و به مقدار نهایی بهینه تری (۰,۱۲۰۴) ختم می شود. سرعت و مقدار نهایی همگرایی در حالت ب (با مقدار نهایی تابع هدف برابر با ۰,۱۲۷۴) نسبت به حالت الف (با مقدار نهایی تابع هدف برابر با ۰,۱۳۱۹) برتری دارد؛ بنابراین نتیجه می گیریم عملکرد کنترلر طراحی شده از عملکرد کنترلر کلاسیک PID موفق تر بوده است و تنظیم پارامترهای آن با الگوریتم ترکیبی پیشنهادی به جواب های بهینه تری منجر خواهد شد.

مقادیر انتخاب شده برای پارامترهای الگوریتم زنبورها با آزمون و خطا به دست آمده اند که عبارتند از: $n=90$, $m=10$, $e=3$, $npe=26$, $nsp=7$, $ng=5$ و تعداد دفعات تکرار = ۱۰۰.

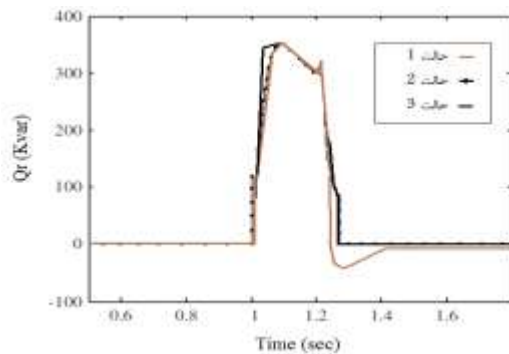
حالت ج با دو الگوریتم ژنتیک و بهینه سازی اجتماع ذرات [۱۶] شبیه سازی شده است تا با نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی مقایسه شود. جدول (۳) نتایج این مقایسه را ارائه می دهد. همان طور که در این جدول دیده می شود، روش پیشنهادی برای تنظیم کنترلر نسبت به دو روش

همان طور که در شکل (5) مشاهده می شود، برای حالت 1 در شین PCC، شبکه قادر به بازگشت به شرایط قبل از خطا پس از زمان پاکسازی خطا نیست.



شکل (5): پروفیل ولتاژ شین PCC برای سه حالت 1، 2 و 3. برای حالت 2، پروفیل ولتاژ در شین PCC نسبت به حالت 1، بهبود یافته و شبکه پس از رفع خطا به به شرایط نرمال قبل بازگشته است؛ اما همان طور که در شکل مشاهده می شود، این پروسه در حدود چند دهم ثانیه طول می کشد. شبکه در مقایسه با حالت های 1 و 2، برای حالت 3 در مدت زمان خطا، پروفیل ولتاژ بهتری را تجربه می کند و تقریباً بدون تأخیر به شرایط قبل از خطا بازمی گردد؛ بنابراین، نتیجه می گیریم که هم در زمان خطا و هم پس از برطرف شدن خطا، کنترلر پیشنهادی FLT-PID تنظیم شده به روش فازی - زنبورها، عملکرد بهتری نسبت به کنترلر کلاسیک PID و یا کنترلر FLT-PID بدون بهینه سازی به روش فازی - زنبورها دارد.

مقدار توان راکتیو تزریقی DSTATCOM برای تنظیم ولتاژ PCC برای سه حالت 1، 2 و 3 در شکل (6) با هم مقایسه شده اند. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، حالت 3، یعنی کنترلر پیشنهادی، تنظیم توان راکتیو بهینه تری نسبت به دو حالت دیگر از خود نشان می دهد.



شکل (6): توان راکتیو تزریقی DSTATCOM برای سه

حالت 1، 2 و 3.

همچنین، روش کنترل پیشنهادی در زمان وقوع خطا در شبکه بررسی شده است. اگر خطا برای مدت طولانی باقی بماند، ممکن است به ناپایداری ولتاژ در شبکه منجر شود. در این شرایط، حفظ پروفیل ولتاژ PCC برای جلوگیری از ناپایداری شبکه بسیار مهم است. این مهم می تواند با تبادل مناسب انرژی بین DSTATCOM و شبکه در زمان نیاز حاصل شود. برای بررسی عملکرد کنترلر پیشنهادی در زمان وقوع خطا در شبکه، فرض می شود یک خطای سه فاز در زمان $t=1$ ثانیه در شین شماره 2 اتفاق افتاده است و در زمان $t=1,2$ ثانیه این خطا برطرف می شود.

جدول (3): مقایسه مشخصات پاسخ پله الگوریتم ژنتیک،

بهینه سازی اجتماع ذرات و فازی - زنبورها برای حالت ج

آیتم	فازی - زنبورها، بهینه سازی اجتماع ذرات، الگوریتم ژنتیک
Mp	0,0259, 0,0179, 0,011
tr	0,41521, 0,4293, 0,403
ts	0,7453, 0,7407, 0,721
Ess	0,00042, 0,00037, 0,00019

برای این وضعیت، پروفیل ولتاژ PCC در شکل (5) نشان داده شده است. همان طور که در این شکل دیده می شود، ولتاژ در PCC از محدوده مجاز تعریف شده برای شبکه توزیع خارج می شود (ارگان جهانی ارائه دهنده خدمات شبکه توزیع (DNSP)¹⁹) نرخ مجاز برای تغییرات ولتاژ را $6\% \pm$ تعریف می کند.

سه حالت متفاوت دیگر، در صورت وقوع خطا در شبکه، عملکرد کنترلر پیشنهادی را به شرح زیر ارزیابی می کند:

حالت (1): استفاده از کنترلر کلاسیک PID برای

کنترل DSTATCOM در زمان وقوع خطا [8]

حالت (2): استفاده از کنترلر طراحی شده پیشنهادی

PID - FLT بدون بهینه سازی پارامترها برای کنترل DSTATCOM در زمان خطا.

حالت (3): استفاده از کنترلر طراحی شده پیشنهادی

PID - FLT همراه با بهینه سازی پارامترها به روش فازی - زنبورها برای کنترل DSTATCOM در زمان خطا.

- and Automation in Power Engineering, Vol. 2, No. 2, pp. 91-102, 2014.
- [2] Tolabi, H. B., Ali, M. H., Ayob, S. B. M., Rizwan, M., "Novel Hybrid Fuzzy-Bees Algorithm for Optimal Feeder Multi-Objective Reconfiguration by Considering Multiple-Distributed Generation", Energy, Vol. 71, pp. 507-515, 2014.
- [3] Tolabi, H. B., Ali, M. H., Rizwan, M., "Simultaneous Reconfiguration, Optimal Placement of DSTATCOM and Photovoltaic Array in a Distribution System Based on Fuzzy-ACO Approach", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 6, No.1 pp. 210-218, 2015.
- [4] Zendeheel, N., "Robust Agent Based Distribution System Restoration with Uncertainty in Loads in Smart Grids", Journal of Operation and Automation in Power Engineering, Vol. 3, Vol. 1, pp. 1-22, 2015.
- [5] Gao, F., Iravani, M., "A control strategy for a distributed generation unit in grid-connected and autonomous modes of operation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 2, pp.850-859, 2008.
- [6] Kumar, C., Mishra, M. K., "A Voltage-Controlled DSTATCOM for Power-Quality Improvement", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 29, No. 3, pp. 1499 – 1507, 2014.
- [7] Singh, B., Dube, S. K., Arya, S. R., "An improved control algorithm of DSTATCOM for power quality improvement", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 64, pp. 493-504, 2015.
- [8] Mahmud, M. A., Pota, H. R., and Hossain, M. J., "Nonlinear DSTATCOM controller design for distribution network with distributed generation to enhance voltage stability", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 53, pp. 974-979, 2013.
- [9] Kumar, D., Jejurikar, N., Chaturvedi, P., "Modeling and Simulation of D-STATCOM for Voltage Regulation Imparting Various Control Strategies", Proceedings of the national conference on Trends & Challenges in Applied Science and Engineering, 2014.
- [10] Isidori, A., "Nonlinear control systems," New York: Springer-Verlag, 1989.
- [11] Pham, D.T., Ghanbarzadeh, A., Koc, E., Otri, S., Rahim, S., Zaidi, M., "The Bees Algorithm, A Novel Tool for Complex Optimisation Problems", in 2nd Int Virtual Conf on Intelligent Production Machines and Systems, pp. 454-459, 2006.
- [12] Bagheri Tolabi, H., Moradi, M. H., Bagheri Tolabi, S., "New technique for Global solar Radiation prediction", Iranian journal of energy, Vol. 16, No. 2, pp. 61-76, 2013.
- [13] Mahmud, M. A., Hossain, M. J., Pota, H. R., Nasiruzzaman, A. B. M. "Voltage control of distribution networks with distributed generation using reactive power compensation" Proceedings of the 37th Annual conference on

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک کنترلر FLT-PID غیرخطی برای DSTATCOM در یک ریزشکه پیشنهاد شده است که پارامترهای آن با ترکیبی از سیستم فازی و الگوریتم زنبورها به صورت بهینه تنظیم می‌شوند. به منظور تحلیل عملکرد کنترلر پیشنهادی، ویژگی‌های پاسخ پله ولتاژ در نقطه PCC و همچنین در زمان وقوع خطا در ریزشکه پیشنهادی نمونه ارزیابی شده است. تجزیه و تحلیل پاسخ پله ولتاژ DSTATCOM نشان می‌دهد کنترلر طراحی شده FLT-PID (که ضرائب آن با استفاده از ترکیب سیستم فازی و الگوریتم زنبورها به صورت بهینه انتخاب شده است) نسبت به حالت بدون بهینه‌سازی ضرائب و نیز حالت استفاده از کنترلر کلاسیک PID به‌طور چشمگیری به بهبود زمان نشست، زمان خیز، حداکثر فرافروش و نیز کاهش خطای حالت ماندگار منجر می‌شود. مقدار تابع هدف با استفاده از کنترلر کلاسیک PID برابر ۰,۱۳۱۹ و با استفاده از کنترلر FLT-PID (بدون تنظیم پارامترهای کنترلر) برابر ۰,۱۲۷۴ است؛ درحالی‌که با تنظیم پارامترهای روش پیشنهادی، این مقدار به رقم ۰,۱۲۰۴ بهبود می‌یابد. همچنین با مقایسه مقدار نهایی تابع هدف بر اساس روش تنظیم‌کننده پیشنهادی (برابر ۰,۱۲۰۴) با مقادیر ۰,۱۲۷۵ و ۰,۱۲۵۲ به ترتیب برای الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی اجتماع ذرات، عملکرد بهتر روش تنظیم‌کننده پیشنهادی نسبت به الگوریتم‌های هوشمند ذکر شده مشخص می‌شود.

علاوه بر این، نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد کنترلر FLT-PID تنظیم‌شده به روش ترکیبی فازی - الگوریتم زنبورها، برای هر دو حالت زمان وقوع خطا و نیز پس از برطرف شدن آن، عملکرد بهتری را در مقایسه با دو کنترلر کلاسیک PID و کنترلر FLT-PID بدون بهینه‌سازی از خود نشان می‌دهد.

مراجع

- [1] Tolabi, H. B., Ali, M. H., Rizwan, M., "Novel Hybrid Fuzzy-Intelligent Water Drops Approach for Optimal Feeder Multi Objective Reconfiguration by Considering Multiple-Distributed Generation", Journal of Operation

- Proceedings of the IEEE energy conversion congress and exposition, pp. 2014–21, 2009.
- [16] Bornapoor, M., Gholipour, E., Esmaceli, M., "Optimal placement of STATCOM for voltage control using partitioning methods and fuzzy adaptive modified particle swarm optimization algorithm", ISEE, Vol. 6, No. 4, pp. 49-62, 2016.
- IEEE industrial electronics society, pp. 985–90, 2011.
- [14] Shafie, A., Mirzaeian Dehkordi, B., Farhangi, S., Kiyumarsi, A., "A Fuzzy Logic Controller for IPMSG used in Wind Energy Conversion System", ISEE, Vol. 7, No. 1, pp. 35-50, 2016.
- [15] Molina, M., Mercado, P. E., "Control of tie-line power flow of microgrid including wind generation by DSTATCOM-SMES controller",

-
- ¹ Distributed Generation
² Distribution Flexible AC transmission systems
³ Distribution Static Compensator
⁴ Unified Power Flow Controller
⁵ Dynamic Voltage Restorer
⁶ Voltage Source Converter
⁷ Grid-connected
⁸ Islanded (autonomous)
⁹ Proportional-Integral
¹⁰ Feedback Linearization Theory
¹¹ Proportional-Integral-Derivative
¹² Bees Algorithm
¹³ Point of Common Coupling
¹⁴ State-Space
¹⁵ Pulse Width Modulation
¹⁶ Distributed Generation
¹⁷ Photovoltaic
¹⁸ Distribution System
¹⁹ Distribution Network Service Provider