

کنترل یکپارچه ژنراتور القایی، محدودکننده جریان خطا و ذخیره‌ساز انرژی در مزارع بادی

مسعود اسماعیلی^{۱*}، مصطفی صدیقی‌زاده^۲ و حسام یارمحمدی^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۱۷	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۲۵	
واژگان کلیدی: ژنراتور القایی دوسوتغذیه، قابلیت ایستادگی در مقابل خطا، پایداری، ابرسانای محدودکننده جریان خطا، ابرسانای ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی.	یکی از مشکلات مهم سیستم‌های قدرت که دارای مزارع بادی با ژنراتورهای القایی دوسوتغذیه هستند، قابلیت ایستادگی در مقابل خطای این ژنراتورها و نوسانات توان خروجی آنهاست. در مواقعی که این ژنراتورها توان قابل توجهی از سیستم قدرت را تأمین می‌کنند، خروج آنها در هنگام خطا، باعث ناپایداری شبکه می‌شود. طبق نیازهای جدید بر اساس کدهای شبکه، در مواقع خطا که ولتاژ در پایانه ژنراتور افت می‌کند، باید به‌منظور حفظ پایداری سیستم، مزارع بادی در شبکه باقی بمانند. برای رفع این مشکل، از ابرسانای محدودکننده جریان خطا برای محدودکردن جریان خطا و همچنین ابرسانای ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی به‌منظور جذب یا تزریق توان در مواقع موردنیاز برای کم کردن نوسانات توان استفاده می‌شود. در این مقاله، روشی برای کنترل هماهنگ ژنراتور القایی دوسوتغذیه، ابرسانای ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی و ابرسانای محدودکننده جریان خطا با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی HBB-BC ارائه شده است. اهداف این بهینه‌سازی شامل حداقل‌سازی ظرفیت هسته موردنیاز ذخیره‌ساز، کاهش انرژی محدودکننده جریان خطا و بهبود ولتاژ شین ژنراتور و کاهش نوسانات توان و سرعت زاویه‌ای ژنراتور است. نتایج شبیه‌سازی‌های صورت‌گرفته بر روی شبکه موردآزمایش، قابلیت این کنترل‌کننده بهینه را در رسیدن به اهداف فوق، نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

امروزه با توجه به رشد سریع انرژی‌های تجدیدپذیر و نفوذ زیاد انرژی بادی در آینده نزدیک، بررسی آثار آنها در شبکه‌های قدرت، امری اجتناب‌ناپذیر است [۱]. کل ظرفیت نصب‌شده تولید انرژی باد در کره زمین در پایان سال ۲۰۱۳، بالغ بر ۳۱۸ گیگاوات بوده است که این مقدار، حدود ۵/۵۵ درصد از انرژی تولیدی در کره زمین را تشکیل می‌دهد [۲]. امروزه در بسیاری از مزارع بادی، به‌دلیل مزایای فراوانی که ژنراتور القایی دوسوتغذیه (DFIG) دارد [۳]، از این نوع ژنراتور استفاده می‌شود که از جمله این

مزایا می‌توان به مواردی چون هزینه نصب مناسب، حجم کم مبدل‌ها و کنترل‌پذیری مناسب توان اکتیو و راکتیو اشاره کرد [۴]. اما این نوع ژنراتورها مشکلاتی هم دارند که از جمله می‌توان قابلیت ایستادگی در مقابل خطای (FRT) پایین آنها و همچنین نوسانات توان خروجی آنها را نام برد. وقوع خطا در شبکه، موجب افت ولتاژ در پایانه ژنراتور القایی و در نتیجه، اضافه جریان در استاتور و روتور ژنراتور آن می‌شود که چنین حالتی می‌تواند باعث صدمه‌زدن به مبدل پشت به پشت به‌کاررفته در DFIG و خود ژنراتور شود. در نتیجه، برای حفاظت ژنراتور القایی و به‌دلیل پایین

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: esmaili.m@wtiau.ir

۱. دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران غرب، گروه مهندسی برق، تهران، ایران
 ۲. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
 ۳. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

انرژی مغناطیسی (SMES) استفاده می‌شود [۲۳-۲۶] تا با استفاده از انرژی ذخیره‌شده، نوسانات توان خروجی باد مهار شود. در روش نرم‌افزاری، سعی می‌شود با کنترل موثرتر DFIG، سطح FRT آن افزایش داده شود که در [۲۷-۳۲] نمونه‌هایی از آن‌ها ارائه شده است. در برخی موارد، از ترکیب دو راه‌حل سخت‌افزاری و نرم‌افزاری برای حل مشکلات DFIG استفاده می‌شود.

در برخی از مراجع نیز با به‌کارگیری SMES، نوسانات توان خروجی DFIG محدود شده. همچنین با به‌کارگیری محدودکننده ابرسانای جریان خطا (SFCL)، مقدار جریان عبوری از DFIG در حالت خطا محدود گردیده است. در [۳۳] روشی ارائه شده است تا با استفاده از کنترل هماهنگ SMES و SFCL، میزان FRT و نوسانات توان بهبود یابد، ولی کنترل‌کننده DFIG در این روش، در بهینه‌سازی وارد نشده است. با توجه به اینکه ظرفیت ایستادگی در برابر خطا و نوسانات توان، مربوط به DFIG بوده و پارامترهای کنترل‌کننده آن نقش مهمی در این مورد ایفا می‌کنند، لازم است کنترل‌کننده DFIG نیز جهت رسیدن به جواب بهینه‌تر در نظر گرفته شود.

در این مقاله، روشی در قالب یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه ارائه شده که در آن، علاوه بر کنترل هماهنگ SMES و SFCL، کنترل‌کننده DFIG نیز در بهبود ظرفیت خطا در نظر گرفته شده است. در روش پیشنهادی، علاوه بر توابع هدف تغییرات توان شین و انرژی SFCL و SMES، توابع هدف تغییرات سرعت زاویه‌ای و ولتاژ پایانه و ولتاژ لینک dc نیز در نظر گرفته شده‌اند. همچنین در کنترل هماهنگ، با توجه به اینکه توابع هدف، وزن یکسانی در بهبود شرایط ندارند، نمی‌توان از جمع آن‌ها استفاده کرد که به این منظور از روش توابع عضویت فازی و میانگین هندسی توابع هدف استفاده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که روش پیشنهادی، علاوه بر بهبود شرایط، کاهش قابل‌توجه انرژی مورد‌استفاده در هسته SMES و میزان مقاومت در SFCL را در پی دارد.

۲- مدل‌سازی دینامیکی سیستم

در شکل (۱)، سیستم نمونه یک ژنراتور القایی دوسوتغذیه متصل به SFCL نشان داده شده است که از طریق یک ترانسفورماتور $0.69kV/35kV$ ، خط انتقال و یک ترانسفورماتور $35kV/220kV$ به شبکه انتقال با سطح ولتاژ $220kV$ متصل شده است. در شین ژنراتور، یک

بودن FRT آن‌ها، سیستم حفاظتی در مواقع خطا آن‌ها را از مدار خارج می‌کند.

در سیستم‌های قدرتی که ضریب نفوذ انرژی باد در آن‌ها بالاست، به هنگام وقوع خطا با خروج DFIG، توان قابل‌توجهی از سیستم خارج می‌شود که این روند می‌تواند موجب ناپایداری شبکه شود. بدین منظور، با توجه به گسترش انرژی باد در شبکه، کدهای جدید شبکه به‌منظور کنترل آثار این نوع ژنراتورها تنظیم شده است [۲]. یکی از مهم‌ترین مواردی که در این کدها گنجانده شده است، افزایش FRT ژنراتورهای DFIG است [۴]. در صورتی که ژنراتور در شبکه باقی بماند، می‌تواند علاوه بر برآورده کردن نیاز کدهای شبکه، بارهای محلی را نیز تأمین کند و از ناپایداری شبکه جلوگیری به عمل آید. برای افزایش FRT و ماندن DFIG در شبکه به هنگام خطا، لازم است جریان خطا توسط روش‌های مناسب کنترل شود.

به همین منظور، روش‌های مختلفی جهت مهار اضافه جریان خطا پیشنهاد شده‌اند [۵]. به‌طورکلی برای رفع مشکلات DFIG، از دو راه‌حل افزودن سخت‌افزار و نرم‌افزار (کنترلی) استفاده می‌شود. در راه‌حل سخت‌افزاری، در مرجع [۶-۹] از کروربار برای رفع این مشکل استفاده شده است که در مواقع خطا، روتور را از مدار خارج کرده، ژنراتور تبدیل به موتور القایی قفس سنجابی می‌شود و توان مصرف می‌کند. یکی دیگر از این روش‌ها، استفاده از مقاومت دینامیکی سری است که به‌طور سری با استاتور یا روتور قرار می‌گیرد [۱۰، ۱۱]. در [۱۲] از چاپر لینک dc و در [۱۳-۱۵] از بازیاب ولتاژ دینامیکی استفاده شده است.

با توجه به رابطه توان راکتیو و افت ولتاژ، یکی دیگر از راه‌های نگه داشتن DFIG در صورت وقوع خطا، اضافه کردن ادواتی مثل جبران‌ساز استاتیکی وار (SVC) و STATCOM و ابرخازن است [۱۶] تا با تزریق توان در شین، از افت ولتاژ شین جلوگیری به عمل آید [۱۷-۱۹]. همچنین در [۲۰-۲۲]، از ابرسانای محدودکننده جریان خطا استفاده شده است که در نوع مقاومتی، هر قدر مقدار مقاومت آن بیشتر باشد، افت ولتاژ کمتر می‌شود؛ اما تلفات بیشتری هم خواهد داشت.

مسئله دیگر DFIG در شبکه‌های قدرت، نوسانات توان خروجی آن به دلیل سرعت متغیر باد است. علی‌رغم کنترل توربین بادی به‌منظور رسیدن به حداکثر توان، باز هم نوسان وجود دارد. برای رفع این مشکل، از ابرسانای ذخیره‌ساز

$$\lambda_{qr} = L_{ls}i_{qr} + L_m(i_{qs} + i_{qr}) = L_m i_{qs} + L_r i_{qr} \quad (8)$$

که در روابط فوق، $L_r = L_{lr} + L_m L_s = L_{ls} + L_m$ ، L_m ، L_{ls} و L_{lr} به ترتیب معرف اندوکتانس نشی استاتور، روتور و اندوکتانس متقابل هستند. همچنین معادله پریونیت گشتاور الکتریکی و معادلات توان اکتیو و راکتیو خروجی استاتور ژنراتور نیز از روابط زیر به دست می آید:

$$\begin{aligned} T_e &= \lambda_{ds}i_{qs} - \lambda_{qs}i_{ds} \\ &= \lambda_{qr}i_{dr} - \lambda_{dr}i_{qr} \\ &= L_m(i_{qs}i_{dr} - i_{ds}i_{qr}) \end{aligned} \quad (9)$$

$$P_s = \frac{3}{2}(v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs}) \quad (10)$$

$$Q_s = \frac{3}{2}(v_{qs}i_{ds} - v_{ds}i_{qs}) \quad (11)$$

۱-۱-۲- کنترل گشتاور ژنراتور

در توربین بادی، توان تولیدشده از باد از رابطه زیر به دست می آید [۳۴]:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho_{Air} \pi R^2 V_{Wind}^3 \quad (12)$$

که P_{wind} توان تحویلی باد، ρ_{Air} چگالی هوا، R شعاع توربین بادی و V_{Wind} سرعت باد است. توان مکانیکی تحویلی توربین بادی نیز به صورت زیر محاسبه می شود:

$$P_{mech} = C_p P_{wind} \quad (13)$$

که C_p ضریب بهره توان است. گشتاور مکانیکی ورودی به مدل دو محوری نیز به صورت زیر است:

$$T_{mech} = \frac{P_{mech}}{\omega_{turb}} \quad (14)$$

که ω_{turb} سرعت چرخشی توربین و خروجی مدل دومحوری، گشتاور ورودی به ژنراتور است. همچنین نسبت سرعت نوک λ از رابطه زیر به دست می آید:

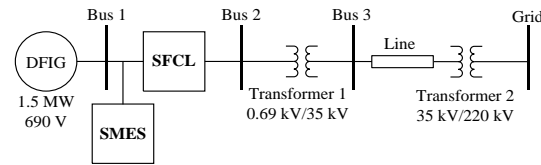
$$\lambda = \frac{\omega_{turb} R}{V_{Wind}} \quad (15)$$

برای محاسبه C_p که به λ و β زاویه گام وابسته است، داریم:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \beta^2 \right) - C_6 e^{-C_7/\lambda_i} \quad (16)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + C_3 \beta} - \frac{C_9}{\beta^3 + 1} \quad (17)$$

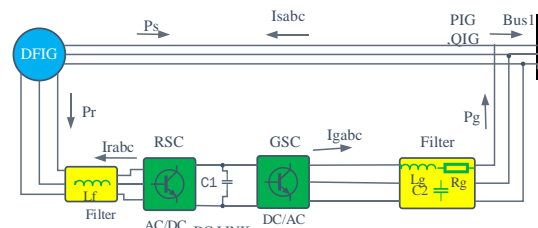
ابرسانای ذخیره ساز انرژی مغناطیسی نیز به منظور مهار نوسانات توان تولیدی DFIG متصل گردیده است [۳۴].



شکل ۱- نمایش تک خطی سیستم نمونه

۱-۲- مدل دینامیکی DFIG

مدل DFIG ارائه شده در این مقاله در شکل (۲) نشان داده شده است [۳۵] که در آن، استاتور به طور مستقیم به شبکه و روتور از طریق یک مبدل پشت به پشت به شبکه متصل می شود. کنترل های DFIG شامل سه قسمت کنترل گشتاور ورودی به ژنراتور، کنترل مبدل سمت روتور و مبدل سمت شبکه است.



شکل ۲- مدل DFIG

معادلات دینامیکی یک ژنراتور سه فاز DFIG را در مرجع سنکرون در چارچوب dq می توان به صورت زیر نوشت:

$$v_{ds} = r_s i_{ds} - s \omega_s \lambda_{qs} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} \quad (1)$$

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + s \omega_s \lambda_{ds} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} \quad (2)$$

$$v_{dr} = r_r i_{dr} - s \omega_s \lambda_{qr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} \quad (3)$$

$$v_{qr} = r_r i_{qr} + s \omega_s \lambda_{dr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} \quad (4)$$

که در این روابط، ω_s سرعت زاویه ای در مرجع سنکرون و $s \omega_s = \omega_s - \omega_r$ فرکانس لغزشی است. روابط شار پیوندی نیز به صورت زیر است:

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (5)$$

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (6)$$

$$\lambda_{dr} = L_{lr} i_{dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) = L_m i_{ds} + L_r i_{dr} \quad (7)$$

$$\rho_s = \tan^{-1}\left(\frac{\lambda_{\beta s}}{\lambda_{\alpha s}}\right) \quad (18)$$

که در آن C_1 تا C_8 به ترتیب برابرند با 0.035 ، 0.08 ، 0.21 ، 0.5 ، 0.4 ، 0.16 ، 0.5 ، در زاویه گام صفر، مقدار بهینه ضریب بهره به دست آمده و توان ماکزیمم از توربین استخراج می‌شود و در صورتی که سرعت باد کمتر از مقدار بهینه گردد، سرعت چرخشی به وسیله کنترل توان اکتیو تنظیم می‌شود تا مقدار حداکثر ضریب بهره توان به دست آید. در صورتی که سرعت باد بیشتر از مقدار نامی شود، با افزایش توان، سرعت روتور نمی‌تواند در محدوده مجاز کنترل شود. در این حالت با کنترل گام، توان استخراجی از توربین کاهش داده می‌شود که نحوه کنترل آن در شکل (۳) آمده است.

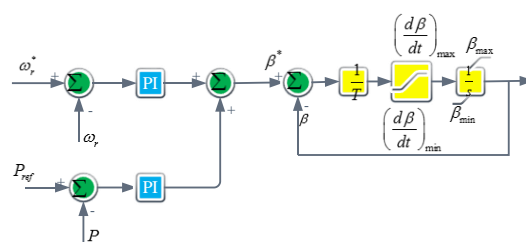
$$V_{dr2} = -s\omega_s \sigma L_r i_{qr} \quad (19)$$

$$V_{qr2} = s\omega_s (\sigma L_r i_{dr} + L_m^2 \frac{i_{ms}}{L_s}) \quad (20)$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (21)$$

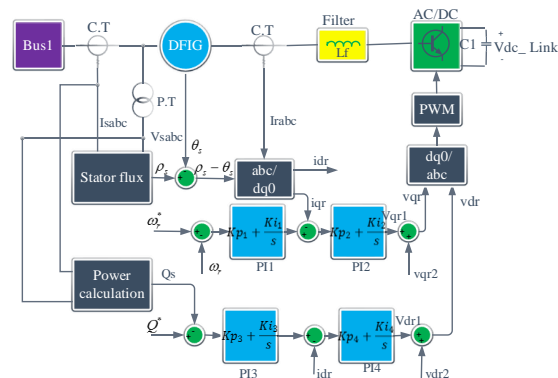
$$i_{ms} = \frac{V_{qs} - r_s i_{qs}}{\omega_s L_m} \quad (22)$$

که در آن C_1 تا C_8 به ترتیب برابرند با 0.035 ، 0.08 ، 0.21 ، 0.5 ، 0.4 ، 0.16 ، 0.5 ، در زاویه گام صفر، مقدار بهینه ضریب بهره به دست آمده و توان ماکزیمم از توربین استخراج می‌شود و در صورتی که سرعت باد کمتر از مقدار بهینه گردد، سرعت چرخشی به وسیله کنترل توان اکتیو تنظیم می‌شود تا مقدار حداکثر ضریب بهره توان به دست آید. در صورتی که سرعت باد بیشتر از مقدار نامی شود، با افزایش توان، سرعت روتور نمی‌تواند در محدوده مجاز کنترل شود. در این حالت با کنترل گام، توان استخراجی از توربین کاهش داده می‌شود که نحوه کنترل آن در شکل (۳) آمده است.



شکل ۳- کنترل زاویه گام

در سیستم کنترلی شکل (۳)، ابتدا سرعت زاویه‌ای روتور با مقدار مرجع خود مقایسه شده، بعد از عبور از یک کنترل‌کننده، با مقداری که از سمت دیگر توان خروجی ژنراتور با مقدار مرجع از کنترل‌کننده عبور داده شده، جمع می‌شود. این مقدار، زاویه گام مرجع را ساخته که با مقدار هر لحظه آن مقایسه و تغییرات زاویه گام به دست می‌آید. این مقدار بعد از عبور از یک انتگرال‌گیر به‌عنوان زاویه گام به دست می‌آید که به‌عنوان ورودی برای محاسبه گشتاور ورودی به ژنراتور مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۴- کنترل‌کننده RSC

۲-۱-۳- کنترل مبدل سمت شبکه

برای رسیدن به اهداف تنظیم سرعت زاویه‌ای ژنراتور در شرایطی که رسیدن به حداکثر توان مدنظر است و همچنین ثابت نگه داشتن فرکانس ولتاژ خروجی استاتور و نیز کنترل توان راکتیو، از کنترل‌کننده سمت روتور (RSC) شکل (۴) استفاده شده است که معمولاً این اهداف با تنظیم جریان روتور بر روی چارچوب شار استاتور انجام می‌شود [۳۶].

در کنترل فوق به منظور انتقال جریان روتور از مرجع abc به dq0 به دلیل اختلاف فاز استاتور و روتور، از اختلاف زاویه شار استاتور با زاویه خروجی استاتور ژنراتور به‌عنوان زاویه انتقال استفاده می‌شود. با استفاده از ولتاژ و جریان استاتور طبق رابطه زیر، زاویه شار استاتور به دست می‌آید:

۲-۱-۲- کنترل مبدل سمت روتور

برای رسیدن به اهداف تنظیم سرعت زاویه‌ای ژنراتور در شرایطی که رسیدن به حداکثر توان مدنظر است و همچنین ثابت نگه داشتن فرکانس ولتاژ خروجی استاتور و نیز کنترل توان راکتیو، از کنترل‌کننده سمت روتور (RSC) شکل (۴) استفاده شده است که معمولاً این اهداف با تنظیم جریان روتور بر روی چارچوب شار استاتور انجام می‌شود [۳۶].

در کنترل فوق به منظور انتقال جریان روتور از مرجع abc به dq0 به دلیل اختلاف فاز استاتور و روتور، از اختلاف زاویه شار استاتور با زاویه خروجی استاتور ژنراتور به‌عنوان زاویه انتقال استفاده می‌شود. با استفاده از ولتاژ و جریان استاتور طبق رابطه زیر، زاویه شار استاتور به دست می‌آید:

از کنترل کننده، با مقادیر جریان مقایسه شده، بعد از کنترل ثانویه به بخش PWM داده می شود تا یک سیگنال ۶ سطحی برای اینورتر بسازد.

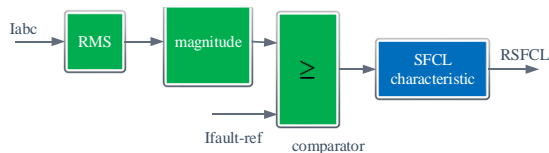
۲-۳- مدل SFCL

ساختار SFCL ارائه شده به این صورت است که به صورت سری به سیستم متصل شده، در شرایط عادی، هیچ مقاومتی بر سر راه جریان وجود ندارد. اما اگر خطایی رخ دهد، با تغییر جریان، مقاومتی وارد مدار می شود که با محدود کردن جریان خطا، مانع از افزایش بیش از حد جریان و کاهش ولتاژ شین ژنراتور خواهد شد [۳۷]. در هنگام خطا، ابتدا در یک دوره زمانی کوتاه، مقاومت افزایش می یابد و سپس به حد عادی می رسد و پس از خطا نیز به همین شکل است. این دوره را دوره عملیات حرارتی گویند. مقدار مقاومت SFCL به شکل زیر محاسبه می شود:

$$R_{SFCL}(t) = \begin{cases} 0 & t < t_0 \\ R_m(1 - e^{-t/\tau_1}) & t_0 \leq t < t_1 \\ R_m & t_1 \leq t < t_2 \\ R_m e^{-t/\tau_2} & t_2 \leq t < t_3 \\ 0 & t \geq t_3 \end{cases} \quad (23)$$

که در آن R_m حداکثر مقاومت SFCL در دوره عملیاتی، t_1 ثابت زمانی دوره اول و τ_2 ثابت زمانی دوره دوم است که با توجه به کوتاه بودن زمان عملکرد، می توان این دو ثابت زمانی را برابر ۱ ms و ۵۰ ms در نظر گرفت. همچنین t_0 زمان شروع خطا، t_1 زمان دوره اول تا رسیدن به مقاومت حداکثر، t_2 زمان رفع خطا و t_3 زمان دوره دوم تا رسیدن مقاومت از مقدار حداکثر به صفر است.

نحوه کنترل SFCL نیز همان طور که در شکل (۷) نشان داده شده، به این صورت است که اندازه لحظه ای جریان به صورت زمان واقعی اندازه گیری شده، با مقدار مرجع مقایسه می شود. در صورتی که اختلافی وجود داشته باشد، مقاومت SFCL طبق رابطه ۲۳ وارد مدار می شود.

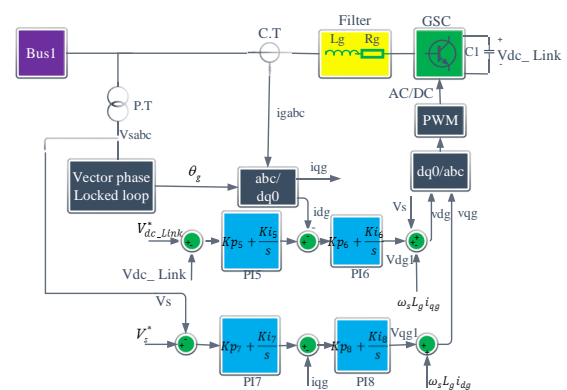


شکل ۷- کنترل SFCL

۳- فرمول بندی مسئله

برای دستیابی به شرایط پایدار در ژنراتور، علاوه بر محدود کردن تغییرات توان، لازم است سرعت زاویه ای، ولتاژ

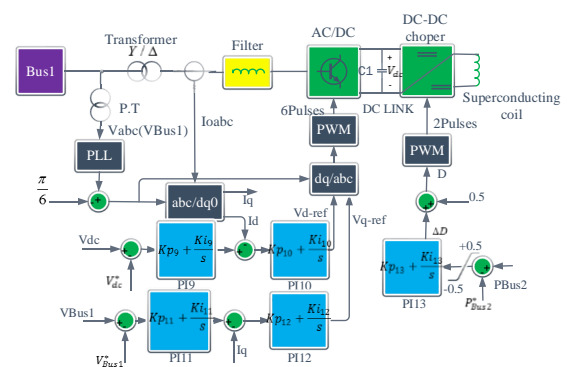
جبران کننده خود که در شکل (۵) نشان داده شده است جمع شده، بعد از تبدیل به PWM، به منظور ساخت سیگنال کنترلی به GSC داده می شوند.



شکل ۵- کنترل کننده GSC

۲-۲- کنترل SMES

در SMES به کاررفته در این مقاله، از سلف ابررسانا، چاپر dc-dc، یک خازن لینک dc، اینورتر، فیلتر و ترانس ایزوله کننده استفاده شده است. برای کنترل ولتاژ لینک dc و همچنین ولتاژ شین SMES از کنترل کننده شکل ۶ استفاده شده است [۳۳]. همچنین برای کنترل تبادل توان بین هسته ابررسانا و لینک dc، از روش کنترلی نشان داده شده به منظور تعیین سیکل کاری چاپر استفاده شده است. با استفاده از این روش کنترلی، می توان نوسانات توان و ولتاژ در شین ژنراتور را تحت شرایط مختلف، از جمله تغییرات سرعت باد و همچنین وقوع خطا کنترل کرد و در نهایت، کیفیت توان را بالا برد.



شکل ۶- کنترل SMES

در این مدل کنترلی، از توان شین ۲ به منظور کنترل مبادله توان بین هسته و خازن برای کنترل چاپر استفاده شده است. همچنین برای تثبیت ولتاژ لینک dc، از روش کنترلی فوق استفاده شده است که در آن، ولتاژ لینک dc و ولتاژ شین متصل به SMES، با مقادیر مرجع خود و پس از عبور

خنک‌کنندگی SFCL بزرگ‌تری دارد که آن هم افزایش هزینه را به دنبال خواهد داشت. علاوه بر آن، با کاهش انرژی تلفاتی، میزان مقاومت SFCL نیز کاهش می‌یابد که اقتصادی‌تر شدن آن را در پی دارد. پس لازم است انرژی تلف‌شده SFCL در حین خطا حداقل شود.

$$E_{SFCL} = \int_{t_f}^{t_c} R_m i^2(t) dt \quad (27)$$

که در آن، t_f و t_c زمان شروع و رفع خطا و $i(t)$ جریان عبوری از SFCL بوده، انرژی برحسب MJ است.

۳-۵- حداقل‌سازی تغییرات توان شین متصل به SFCL

برای کاهش نوسانات توان در شین ژنراتور، از SMES استفاده می‌شود که یکی از اهداف آن، کم‌کردن نوسانات توان است.

$$IAEp = \int_{t_0}^{t_s} |\Delta P_{Bus2}| dt \quad (28)$$

تغییرات توان برحسب pu است.

۳-۶- حداقل‌سازی انرژی SMES

هرچه انرژی SMES بزرگ‌تر باشد، میزان جبران بهتر خواهد بود؛ اما اندازه سیم‌پیچ آن و انرژی آن نیز افزایش می‌یابد که باعث افزایش هزینه نیز خواهد شد. به همین دلیل باید انرژی SMES حداقل شود:

$$E_{SMES} = \frac{1}{2} L_{SMES} I_{SMES}^2 \quad (29)$$

که در آن، L_{SMES} اندوکتانس سیم‌پیچ SMES و I_{SMES} جریان عبوری از آن است. انرژی برحسب MJ است.

۳-۷- قیود مسئله

قیود مسئله به شکل زیر هستند:

$$\begin{aligned} R_{min} &\leq R_m \leq R_{max} \\ L_{SMES_min} &\leq L_{SMES} \leq L_{SMES_max} \\ I_{SMES_min} &\leq I_{SMES} \leq I_{SMES_max} \end{aligned} \quad (30)$$

$$K_{Pi_min} \leq K_{Pi} \leq K_{Pi_max} \quad i = 1 \dots 13$$

$$K_{Ii_min} \leq K_{Ii} \leq K_{Ii_max} \quad i = 1 \dots 13$$

که در آن، R_{min} و R_{max} محدوده مقاومت SFCL، L_{SMES_min} و I_{SMES_max} محدوده اندوکتانس، I_{SMES_min} و I_{SMES_max} محدوده جریان اولیه عبوری از هسته SMES و K_{Pi} و K_{Ii} به ترتیب مقادیر ضرایب

شین و ولتاژ لینک dc نیز تنظیم شود. در اینجا ابتدا به فرمول‌بندی پارامترهای DFIG و سپس به پارامترهای SMES و SFCL می‌پردازیم.

۳-۱- کاهش نوسانات سرعت DFIG

به‌منظور تنظیم پارامترهای ژنراتور در هنگام خطا، باید تغییرات سرعت زاویه‌ای روتور به‌صورت زیر حداقل شود؛ زیرا با افزایش آن، ژنراتور به ناپایداری می‌رود و با کاهش آن، ژنراتور به حالت زیرسنکرون رفته، کاهش توان را به دنبال دارد.

$$IAE\omega = \int_{t_0}^{t_s} |\Delta\omega_r| dt \quad (24)$$

که در آن، t_0 و t_s زمان شروع و پایان شبیه‌سازی و $\Delta\omega_r$ تغییرات سرعت زاویه‌ای روتور ژنراتور برحسب rad/s است.

۳-۲- تثبیت ولتاژ لینک dc در DFIG

برای کنترل توان عبوری از سمت مبدل ژنراتور و تنظیم ولتاژ و جریان استاتور و روتور، باید ولتاژ لینک dc در ژنراتور کمترین تغییرات را داشته باشد:

$$IAEv_{dc_link} = \int_{t_0}^{t_s} |\Delta v_{dc_link}| dt \quad (25)$$

که در آن، Δv_{dc_link} تغییرات ولتاژ لینک dc ژنراتور است. ولتاژ برحسب pu است.

۳-۳- کاهش نوسانات ولتاژ پایانه DFIG

برای رسیدن به ولتاژی پایدار در پایانه‌های ژنراتور و ایستادگی در مقابل افت ولتاژ، باید ولتاژ پایانه‌های ژنراتور دچار کمترین تغییر شوند.

$$IAEv_t = \int_{t_0}^{t_s} |\Delta v_t| dt \quad (26)$$

که در آن، Δv_t تغییرات ولتاژ شین ژنراتور است. تغییرات ولتاژ برحسب pu است.

۳-۴- حداقل‌سازی انرژی SFCL

با توجه به اینکه هرچه مقاومت SFCL افزایش یابد، ژنراتور بهتر می‌تواند در مقابل خطا ایستادگی کند و جریان خطا کمتر می‌شود؛ در نتیجه، SFCL عملکرد بهتری دارد. ولی با افزایش مقاومت SFCL، تلفات انرژی در حین خطا نیز افزایش می‌یابد. در مدت کوتاه خطا، میزان تلفات انرژی قابل توجه نیست، ولی تلفات انرژی بالا، نیاز به سیستم

اجتناب از این مشکل در نظر بگیریم، اما این کار باعث افزایش ارزیابی‌های تابع و نیز هزینه‌های محاسباتی می‌شود. می‌توان از ظرفیت‌های بهینه‌سازی اجتماع ذرات (PSO) برای بهبود توانایی جست‌وجوی الگوریتم BB-BC استفاده کرد. با ترکیب دو الگوریتم فوق، الگوریتمی ترکیبی به نام الگوریتم HBB-BC به وجود خواهد آمد که روشی مؤثر و قدرتمند است که دقت و سرعت هم‌گرایی زیادی دارد [۴۰]. در این الگوریتم، نه‌تنها از مفهوم مرکز جرم استفاده شده است، بلکه از بهترین موقعیت هر کاندیدا و همچنین بهترین موقعیت سراسری برای تولید جواب‌های جدید استفاده می‌شود. در این الگوریتم، به‌روزرسانی موقعیت جدید هر کاندیدا مطابق با رابطه زیر صورت می‌گیرد که خود تابعی از سه پارامتر مرکز جرم، بهترین موقعیت قبلی کاندیدا و بهترین موقعیت سراسری تمامی کاندیداها است:

$$X_i^{(k+1,j)} = \alpha_2 X_i^{C(k)} + (1 - \alpha_2) (\alpha_3 X_i^{gbest(k)} + (1 - \alpha_3) X_i^{lbest(k,j)}) + \frac{r_j \alpha_1 (X_{i \max} - X_{i \min})}{k + 1} \quad (32)$$

در رابطه فوق، α_2 و α_3 به‌ترتیب برای تنظیم تأثیر بهینه‌سراسری و بهینه‌محلی بر روی موقعیت جدید کاندیداها در نظر گرفته شده‌اند. $X_i^{lbest(k,j)}$ بیانگر بهترین موقعیت ذره i تا تکرار k ام و $X_i^{gbest(k)}$ بیانگر بهترین موقعیت بین همه کاندیداها تا تکرار k ام است.

برای حصول اطمینان از اینکه الگوریتم HBB-BC در بهینه‌محلی به دام نیفتد، عملگری به نام عملگر جهش مطابق با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$X_i^{(k+1,j)} = X_{i \min} + \text{rand}() \times (X_{i \max} - X_{i \min}) \quad \text{if } \text{rand}() < P_m \quad (33)$$

در رابطه فوق، P_m احتمال جهش و $\text{rand}()$ یک عدد تصادفی تولیدشده به‌صورت یکنواخت در بازه [۰، ۱] است.

۴-۱- بهینه‌سازی چندهدفه

از آنجایی که توابع هدف، ابعاد مختلفی دارند، برای مقایسه آسان‌تر، روش چندهدفه فازی به کار می‌رود. در قلمرو فازی، هر هدف با یک تابع عضویت مرتبط می‌شود که تابع عضویت، درجه رضایت فازی هدف را مشخص می‌کند. مقدار عضویت هر تابع هدف عددی حقیقی بین ۰ و ۱ است که در اینجا با استفاده از تابع عضویت ذوزنقه‌ای تعیین می‌شود. متغیرهای مسئله نیز همان اهداف بیان شده در

کنترل‌کننده‌های تناسبی-انتگرالی (PI) در چهار کنترل‌کننده سمت روتور و شبکه DFIG و کنترل‌کننده‌های SMES هستند.

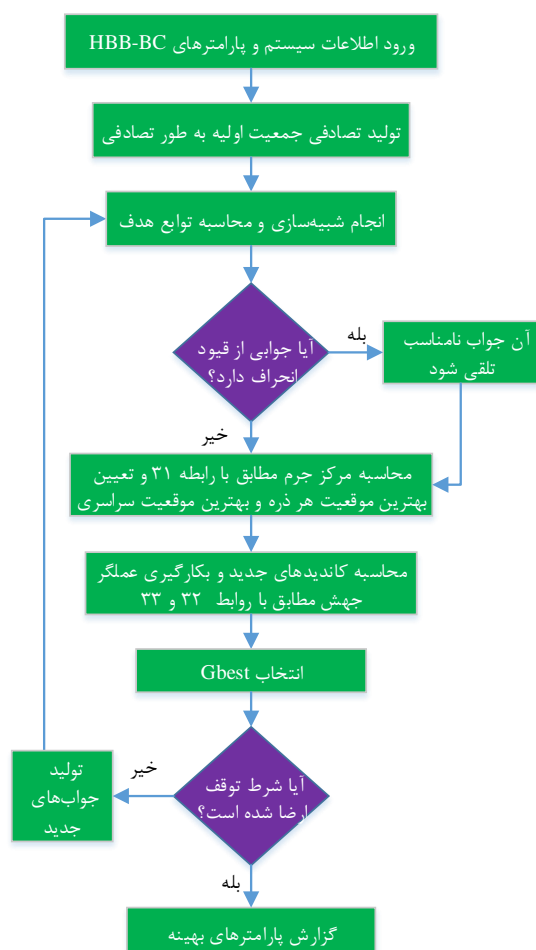
۴- الگوریتم بهینه‌سازی HBB-BC

در این مقاله، از یک الگوریتم در چارچوب فازی به‌منظور دستیابی به اهداف استفاده می‌شود. در این روش بهینه‌سازی، از یکی از تئوری‌های تکاملی جهان به نام تئوری انفجار بزرگ و فروپاشی بزرگ (BB-BC) الهام گرفته شده است. این روش در سال ۲۰۰۶ توسط ارول و اسکین معرفی شد [۳۸] که زمان محاسباتی کم و سرعت هم‌گرایی بالایی دارد. این الگوریتم شامل دو فاز انفجار بزرگ و فروپاشی بزرگ است. در فاز اول که همان فاز انفجار بزرگ است، کاندیداها موجود به شکل تصادفی در سراسر فضای جست‌وجو پراکنده شده که منجر به پوشش کل نواحی جست‌وجو می‌شوند. در این فاز، با توجه به مقادیر به‌دست‌آمده برای تابع هدف، به‌ازای هر جواب یک تابع برازندگی محاسبه می‌شود. فاز انفجار بزرگ توسط فاز فروپاشی بزرگ دنبال می‌شود که در حقیقت یک عملگر هم‌گراکننده است و با در نظر گرفتن مقدار تابع برازندگی و موقعیت فعلی هر جواب، پارامتری به نام مرکز جرم را محاسبه می‌کند. در حقیقت، مرکز جرم ارائه‌کننده متوسط موقعیت جواب‌ها در فضای جست‌وجو است و مطابق رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود [۳۹]:

$$X_i^{C(k)} = \frac{\sum_{j=1}^N \frac{1}{f_j} \cdot X_i^{(k,j)}}{\sum_{j=1}^N \frac{1}{f_j}} \quad i = 1, 2, \dots, D \quad (31)$$

که در رابطه فوق، $X_i^{C(k)}$ مؤلفه نام مرکز جرم در تکرار k ام، $X_i^{(k,j)}$ مؤلفه نام جواب i ام تولیدشده در تکرار k ام، f_j مقدار تابع شایستگی کاندیدای j ام، N و D نیز به‌ترتیب، اندازه جمعیت در فاز انفجار بزرگ و تعداد متغیرهای کنترلی هستند. BB-BC در مرحله جست‌وجو، حول بهینه محلی به‌خوبی عمل می‌کند، ولی در مرحله کاوش سراسری فضای جست‌وجو، با مشکلاتی روبه‌رو است. اگر همه کاندیداها در انفجار بزرگ اولیه در بخش کوچکی از فضای جست‌وجو جمع شوند، روش BB-BC نمی‌تواند راه‌حل بهینه را پیدا کند و با احتمال بالایی در بهینه محلی به دام می‌افتد. یک راه‌حل این است که تعداد زیادی کاندیدا برای

بهینه‌سازی تک‌هدفه، بدترین و بهترین جواب برای هر تابع هدف و همچنین مقادیر تمامی پارامترها که به‌عنوان قیود مسئله هستند، تحت هر تابع هدف به دست می‌آیند.



شکل ۸- فلوجارت اعمال الگوریتم بر مسئله

از بدترین و بهترین جواب هر تابع هدف به‌منظور استفاده در بهینه‌سازی در چارچوب فازی به‌عنوان محدوده‌های بالا و پایین مقدار آن استفاده می‌شود. بعد از نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۴، می‌توان الگوریتم ارائه‌شده را به‌طور چندهدفه و به نحو گفته‌شده در قسمت معرفی الگوریتم، اعمال کرد.

نتایج شبیه‌سازی در سه سناریو ارائه شده است:

- حالتی که فقط DFIG در شبکه وجود دارد.
- حضور DFIG و کنترل هماهنگ SFCL و SMES.
- حالتی که DFIG، SFCL و SMES حضور دارند و الگوریتم بهینه‌سازی به‌منظور کنترل هماهنگ هر سه، اعمال شده است.

نتایج بهینه‌سازی چندهدفه در جدول ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول نیز دیده می‌شود، در شرایطی که فقط DFIG حضور دارد و همچنین DFIG با حضور

قسمت قبلی هستند.

ضابطه تابع عضویت ذوزنقه‌ای به‌منظور محاسبه درجه عضویت متعلق به تابع هدف مربوط، به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_i = \begin{cases} 1 & f_i \leq f_i^{\min} \\ \frac{f_i^{\max} - f_i}{f_i^{\max} - f_i^{\min}} & f_i^{\min} \leq f_i \leq f_i^{\max} \\ 0 & f_i \geq f_i^{\max} \end{cases} \quad (34)$$

که در آن، f_i^{\max} و f_i^{\min} به‌ترتیب، بیانگر محدوده‌های پایین و بالای تابع هدف نام است که از بهینه‌سازی تک‌هدفه حاصل می‌شود. درجه عضویت تابع هدف نام نیز با μ_i نشان داده شده است.

سپس درجه رضایت فازی کلی محاسبه می‌شود که در اینجا با عملگر ماکزیمم متوسط هندسی، درجه رضایت فازی کلی به دست می‌آید:

$$\mu_O = (\mu_{IAE\omega} \times \mu_{IAEv_{dc\text{link}}} \times \mu_{IAEv_t} \times \mu_{ESFCL} \times \mu_{IAEp} \times \mu_{ESMES})^{1/6} \quad (35)$$

با حداکثر درجه رضایت فازی کلی μ_O ، بهترین جواب به دست می‌آید. بنابراین، μ_O به‌عنوان تابع شایستگی برای الگوریتم HBB-BC در نظر گرفته شده، طی فرآیند بهینه‌سازی حداکثر می‌شود. روند نحوه اعمال الگوریتم در شکل (۸) آمده است.

۵- نتایج شبیه‌سازی

پارامترهای به‌کاررفته در شبیه‌سازی DFIG مطابق با سیستم شکل ۱، در جدول ۱ داده شده‌اند. به کمک الگوریتم HBB-BC به‌صورت تک‌هدفه، هرکدام از توابع هدف یادشده در قسمت قبل، تحت شرایطی که یک خطای سه‌فاز با امپدانس 1Ω در شین ۲ در لحظه $0.4s$ به مدت $100ms$ اتفاق افتاده، اجرا می‌شوند تا بهترین و بدترین جواب‌های آن‌ها برای تعیین محدوده‌های موردنظر در بهینه‌سازی، در چارچوب فازی به دست آیند. در جدول ۲ مقادیر اولیه در الگوریتم استفاده شده و تعداد تکرارها و تعداد دفعات انجام آزمایش آورده شده است. در جدول ۳ مقادیر حداقل و حداکثر قیود ذکرشده آمده است. در جدول ۴، نتایج بهترین و بدترین مقادیر توابع هدف آورده شده، به این صورت که در شرایطی که در سیستم شکل ۱، خطای سه‌فازی رخ می‌دهد، با هرکدام از توابع هدف در یک

کاهش یافته که بهینه تر از روش قبلی $1/831MJ$ (۲/۷۲۴MJ) است. شایان ذکر است هزینه تجهیزات ابررسانا، وابسته به اندوکتانس آنها است. در روش پیشنهادی، مقدار اندوکتانس لازم برای SMES برابر $3/2113H$ به دست آمده که نسبت به مقدار روش قبلی $(3/857H)$ بهینه تر است. علاوه بر آن، میزان جریان عبوری از SMES کاهش یافته است ($738kA$ نسبت به $807kA$). با توجه به این نتایج، روش پیشنهادی، دارای نتایج بهینه تری برای SFCL و SMES است که علاوه بر کاهش تلفات در سیستم، باعث صرفه اقتصادی و کاهش حجم تجهیزات نیز می شوند.

اهداف دیگر نیز همان طور که در جدول ۵ آمده اند، دارای مقادیر بهینه تری هستند که تأثیر آنها را در بهبود نتایج شکل موج خروجی پارامترهای مختلف که در ادامه به آن می پردازیم، می توان مشاهده کرد. همچنین مقادیر فازی اهداف بهینه شده در جدول ۵ آمده است.

همان طور که در شکل (۹) دیده می شود، توان در سناریوی اول در زمان خطا به صفر می رسد، در حالی که در سناریوی دوم به صفر نمی رسد و در در سناریوی سوم به عنوان حالت بهینه، علاوه بر کم تر بودن کاهش آن، تغییرات آن نیز کمتر است و سریع تر به محدوده مقدار یک می رسد. در سناریوی اول، توان دارای مقدار پیکی تا حدود ۳ برابر مقدار نامی نیز بوده که در سناریوی پیشنهادی سوم، این مشکل برطرف شده است.

در شکل (۱۰) نیز به طور مشابه با توان اکتیو خروجی ژنراتور، تغییرات توان راکتیو ژنراتور در سناریوی سوم کمتر است. شکل (۱۱) نمودار ولتاژ لینک dc را در ژنراتور نشان می دهد که دارای کمترین تغییرات در سناریوی سوم پیشنهادی در زمان خطا است. افزایش بیش از حد ولتاژ لینک dc، علاوه بر تأثیر نامناسب بر توان خروجی ژنراتور و پایداری ژنراتور، می تواند باعث آسیب رساندن به مبدل های ژنراتور نیز شود. در سناریوی اول، مقدار ولتاژ تا حدود $1/9pu$ نیز می رسد، اما در سناریوی پیشنهادی، فقط تا حدود $1/2pu$ خواهد رسید. شکل های (۱۲) و (۱۳) و (۱۴) نیز به ترتیب، گشتاور الکتریکی خروجی ژنراتور و اندازه ولتاژ پایانه شین ژنراتور و سرعت زاویه ای ژنراتور را نشان می دهند که در سناریوی روش پیشنهادی، شرایط بهتری دارند. در شکل (۱۲)، گشتاور پیک هایی تا حدود ۴- نیز

جدول ۱: مقادیر پارامترهای سیستم شکل ۱

نماد	کمیت	مقدار
ژنراتور		
S	توان ظاهری	۱/۵MW
Vs	ولتاژ استاتور	۶۹۰ volt
fs	فرکانس	۶۰ Hz
Lm	اندوکتانس مغناطیسی	۲/۵pu
Lls, Llr	اندوکتانس نشی استاتور و روتور	۰/۱۱ و ۰/۰۷pu
Rs, Rr	مقاومت استاتور و روتور	۰/۰۳pu
P	تعداد قطبها	۲
Nsr	نسبت تبدیل روتور به استاتور	۳
توربین بادی		
R	شعاع روتور	۳۱/۵m
Vr	سرعت نامی باد	۱۲m/s
ρ	چگالی هوا	۱/۲۹kg/m ³
خط و ترانسفورماتور		
$R_{t1} + jX_{t1}$	امپدانس ترانسفورماتور ۳۵kV/۶۹۰V	۰/۰۰۱۷ + j۰/۰۵pu
S_{t1}	توان ظاهری ترانسفورماتور ۳۵kV/۶۹۰V	۱۲/۵MVA
$R_{t2} + jX_{t2}$	امپدانس ترانسفورماتور ۲۲۰kV/۳۵kV	۰/۰۰۵۳۴ + j۰/۱۶pu
S_{t2}	توان ظاهری ترانسفورماتور ۲۲۰kV/۳۵kV	۵۰MVA
L_{th}	طول خط انتقال	۳۰ km
شبکه		
R_{trs}	مقاومت توالی مثبت و صفر	Ω/km ۰/۴۱۳, ۰/۱۱۵۳
L_{trs}	اندوکتانس توالی مثبت و صفر	۱/۰۵, ۳/۳۲mH/km
C_{trs}	ظرفیت خازنی توالی مثبت و صفر	۱۱/۳۳, ۵/۰۱nF/km
$R_e + jX_e$	امپدانس شبکه	۰/۰۰۰۴ + j۰/۰۰۴pu

SMES و SFCL بهینه شده، می توان توابع هدف را اندازه گیری کرد که مقادیر آن در جدول ۵ آمده است. اما در شرایطی که بهینه سازی چندهدفه اعمال شده، مقادیر توابع هدف و همچنین قیود مسئله، دارای جواب های بهینه تری هستند.

حالت بهینه به 0.953Ω رسیده که دارای مقدار کمتری نسبت به حالت های قبلی است و باعث افت ولتاژ کمتری در سیستم می شود. همچنین مقدار انرژی SFCL به

دارد که در سناریوی پیشنهادی، این مقدار کاهش قابل توجهی داشته است. در شکل (۱۳) در سناریوی سوم، از کاهش شدید افت ولتاژ ترمینال جلوگیری شده و باعث ماندن ولتاژ در محدوده مجاز شده است. این وضعیت باعث می‌شود ژنراتور به دلیل افت ولتاژ از شبکه خارج نشود و همچنان در شبکه باقی مانده، مانع از ناپایداری سیستم شود. این نکته در مواقعی که ضریب نفوذ انرژی بادی بالا است، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در شکل (۱۴) نیز مقدار نوسانات سرعت زاویه‌ای کم شده تا از خروج ژنراتور و

ناپایداری آن جلوگیری شود. نمودار هم‌گرایی تابع چندهدفه با الگوریتم بیان‌شده در شکل (۱۵) نشان داده شده است. تحت شرایط سرعت باد متغیر، همان طور که در شکل (۱۶) نشان داده شده، نوسانات توانی در شکل (۱۷) وجود دارد که با استفاده از روش پیشنهادی، نوسانات آن کاهش یافته، توان در فاصله بسیار نزدیکی به یک پریونیت تحویل داده می‌شود. این مسئله، تأثیر SMES را در مهار کردن نوسانات توان نشان می‌دهد.

جدول ۲- پارامترهای الگوریتم ارائه شده برای سیستم نمونه

سیستم نمونه	اندازه جمعیت	α_1	α_2	α_3	ماکزیمم تکرار	ماکزیمم آزمایش
سیستم شکل ۱ تحت شرایط خطا	۲۰	۱	۰/۱	۰/۹	۶۰	۱۵

جدول ۳- محدوده قیود مسئله

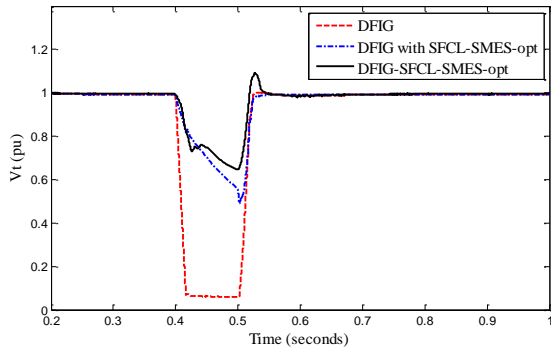
K_{ji}		K_{pi}		$I_{SMES}(KA)$		$L_{SMES}(H)$		$R_m(\Omega)$	
ماکزیمم	مینیمم	ماکزیمم	مینیمم	ماکزیمم	مینیمم	ماکزیمم	مینیمم	ماکزیمم	مینیمم
۱۰	۰/۰۰۰۱	۱۰	۰/۰۰۰۱	۵	۰/۱	۵	۰/۰۰۱	۲	۰/۰۱

جدول ۴- نتایج بهینه‌سازی توابع هدف در سیستم شکل ۱

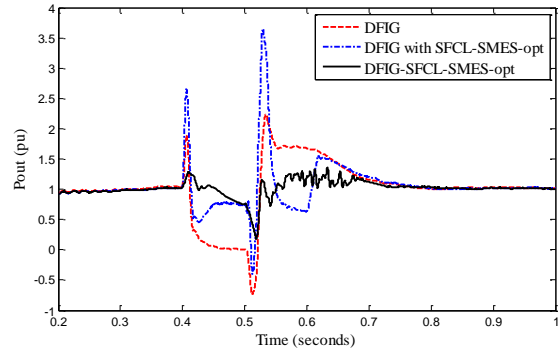
تابع هدف بهینه‌شده	بهترین جواب	بدترین جواب	میانگین	انحراف معیار
$IAE\omega(\frac{rad}{s})$	$1/2239 \times 10^{-3}$	$3/3899 \times 10^{-3}$	$2/3069 \times 10^{-3}$	۱/۰۳۸۲
$IAEv_{dclink}(pu)$	۰/۰۱۷۶	۰/۱۴۲۹	۰/۰۸۰۳	۰/۰۶۷۲
$IAEv_t(pu)$	۰/۰۱۶۶	۰/۱۸۴۳	۰/۱۰۰۵	۰/۰۷۶۸
$E_{SFCL}(MJ)$	۰/۴۲۹	۱/۵۷۴	۹/۵۰۵	۸/۰۷۳
$IAEp(pu)$	۰/۰۷۴۸	۱/۶۲۸۴	۰/۸۵۱۶	۰/۶۶۷۸
$E_{SMES}(MJ)$	۰/۶۷۳۵	۱/۸۹۵۱	۱/۲۸۴۳	۰/۴۸۹۲

جدول ۵- نتایج بهینه‌سازی چندهدفه تحت سناریوهای مختلف

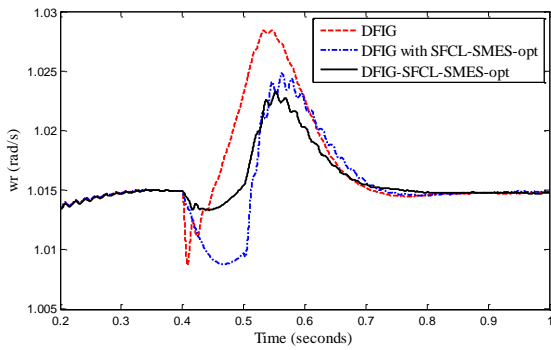
سناریو پارامتر	سیستم فقط شامل DFIG	سیستم شکل ۱ با SMES و SFCL بهینه	سیستم شکل ۱ بهینه‌شده
$IAE\omega(\mu)$	$2/18994 \times 10^{-3}$	$1/8965 \times 10^{-3}$	$1/5521 \times 10^{-3}(0/8485)$
$IAEv_{dclink}(\mu)$	۰/۱۱۲	۰/۰۹۲	۰/۰۴۷(۰/۷۶۵۴)
$IAEv_t(\mu)$	۰/۱۰۶۵	۰/۰۵۰۵	۰/۰۴۰۸(۰/۸۵۵۷)
$E_{SFCL}(\mu)$	-	۲/۷۲۴	۱/۸۳۱(۰/۹۲۴۴)
$IAEp(\mu)$	۰/۲۷۸۴	۰/۱۵۱۸	۰/۱۲۴۲(۰/۹۶)
$E_{SMES}(\mu)$	-	۱/۳۳۲۱	۱/۰۲۶۶۵(۰/۹۶۸۲)
$R_m(\Omega)$	-	۰/۱۱۲۱	۰/۰۹۵۳
$L_{SMES}(H)$	-	۳/۸۵۷	۳/۲۱۱۳
$I_{SMES}(KA)$	-	۸۰۷	۷۸۳
$K_{Pi1,2,...,8}$	۷/۶۹۴,۳/۲۵۴,۶/۳۴,۰/۹۷۶,۰/۸۴۲,۵ ۰/۳۱,۰/۴۶۲,۰/۸۳۵	۶/۴۲۹,۹/۲۳,۱/۱۳۸,۰/۶۲۷,۰/۰۴۹,۰/۴۲۷,۶۴ ۰/۵,۰/۰۹۷	۸/۰۱,۷/۹۱,۱/۴۲۷,۰/۷۴۲,۰/۰۷۵,۰/۳۲۱ ,۰/۲۴۸,۹/۰۷
$K_{I1,2,...,8}$	۰/۴۱۹,۶/۴۹,۰/۳۶۸,۰/۹۱۲۴,۰/۱۶۷,۳۶۱ ۰/۲,۵۶,۶/۳۲	۰/۰۶۵۳,۵/۲۴,۰/۹۸۶,۸/۳۲,۰/۴۳۲,۰/۷۵۹,۵۷ ۱/۳,۹۴	۰/۰۳۳۲,۷/۶۳,۰/۴۵۷,۶/۳۳,۰/۶۳۷,۰/۱۸۲, ۱/۹۹,۴/۶۹۳
$K_{Pi9,...,13}$	-	۱/۹۵۸,۳/۶۲۵,۰/۷۶۳,۰/۴۲۷,۲/۱۸۲۷	۱/۷۲۳,۲/۹۶۷,۰/۵۴۶,۰/۳۲۸,۲/۱۹۴
$K_{I9,...,13}$	-	۴/۲۲۷,۶/۹۵۸,۴/۳۱۹,۴/۶۲۸,۰/۰۲۴	۴/۶۳۹,۴/۸۵۳,۳/۴۶۸,۳/۲۷۱,۰/۵۴۹



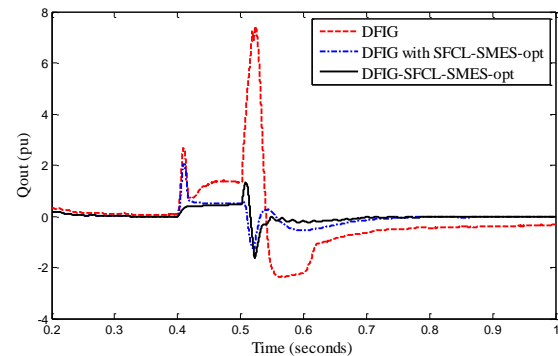
شکل ۱۳- ولتاژ ترمینال ژنراتور



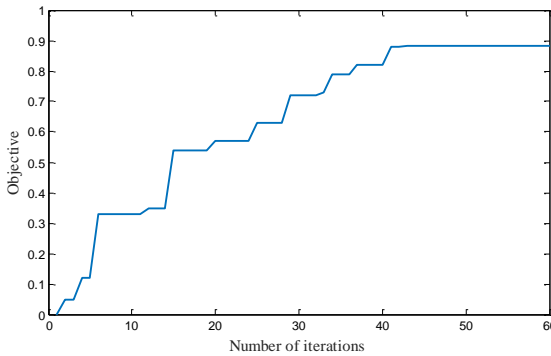
شکل ۹- نمودار توان خروجی ژنراتور



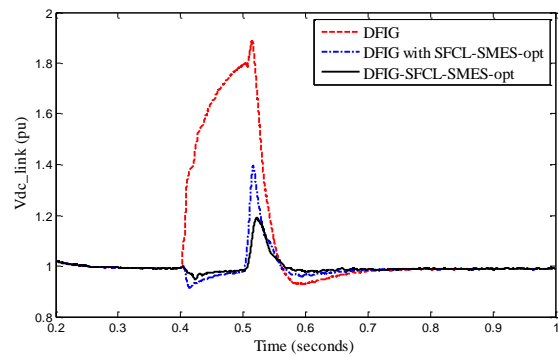
شکل ۱۴- سرعت زاویه‌ای ژنراتور



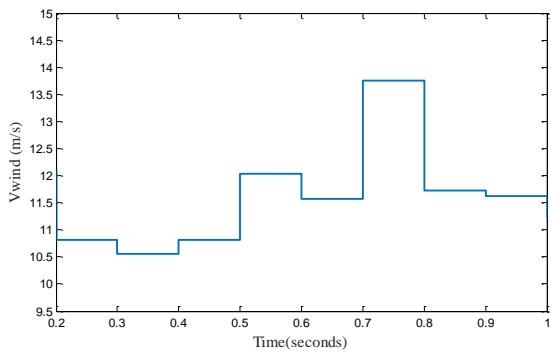
شکل ۱۰- توان راکتیو ژنراتور



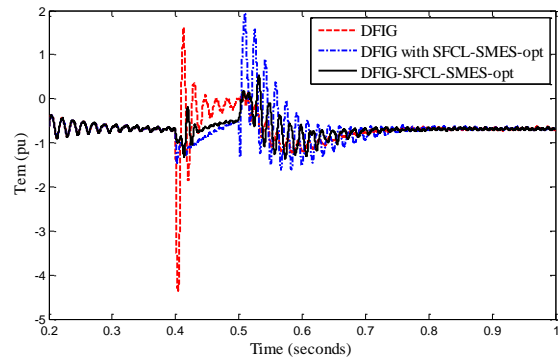
شکل ۱۵- نمودار هم‌گرایی تابع چندهدفه فازی



شکل ۱۱- ولتاژ لینک dc ژنراتور

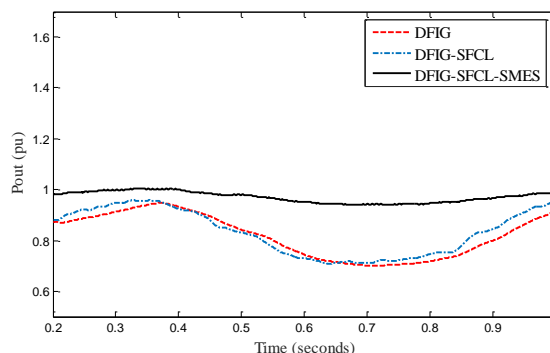


شکل ۱۶- سرعت باد



شکل ۱۲- گشتاور الکتریکی خروجی ژنراتور

با نیروگاه‌های بادی، ظرفیت FRT ژنراتور نیز بالاتر رفته، همچنین کدهای موردنیاز شبکه برآورده شوند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، پارامترهای مختلف از جمله توان و ولتاژ شین ژنراتور به میزان زیادی بهبود یافتند. علاوه بر آن، روش پیشنهادی باعث بهینه‌تر شدن مقادیر SFCL و SMES می‌شود، به طوری که مقدار مقاومت SFCL از 0.1121Ω به 0.0953Ω و مقدار اندوکتانس SMES نیز از $3/857H$ به $3/211H$ کاهش می‌یابد که از منظر اقتصادی، حائز اهمیت است. در ادامه این کار تحقیقاتی، از مدل‌های جامع‌تر SFCL و SMES به‌منظور بررسی رفتار دینامیکی ژنراتورهای بادی مورد استفاده قرار گرفته، نتایج به‌دست‌آمده، با نتایج فعلی مقایسه خواهند شد.



شکل ۱۷- توان خروجی ژنراتور تحت شرایط سرعت متغیر

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی پیشنهاد شد تا با کنترل هماهنگ DFIG، SMES و SFCL، علاوه بر بهبود پایداری شبکه

مراجع

- [1] S. Dehghan and N. Amjady, "Multiyear Non-Deterministic Power System Expansion Planning Considering Wind Farms Using a Hybrid Combination of Stochastic Programming and Minimax Regret Criterion", *Journal of Modeling in Engineering*, Vol. 14, No. 47, 2017, pp. 41-50.
- [2] M. Tsili and S. Papathanassiou, "A review of grid code technical requirements for wind farms", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 3, No. 3, 2009, pp. 308-332.
- [3] M.J. Abbasi and H. Yaghobi, "A new combined method to diagnosis loss of excitation from stable power swing in doubly fed induction generator", *Journal of Modeling in Engineering*, Vol. 15, No. 51, 2017, pp. 159-169.
- [4] W.-T. Liu, Y.-K. Wu, C.-Y. Lee and C.-R. Chen, "Effect of low-voltage-ride-through technologies on the first Taiwan offshore wind farm planning", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 2, No. 1, 2011, pp. 78-86.
- [5] Y. Ling and X. Cai, "Rotor current dynamics of doubly fed induction generators during grid voltage dip and rise", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 44, No. 1, 2013, pp. 17-24.
- [6] J. Morren and S. W. De Haan, "Ridethrough of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 20, No. 2, 2005, pp. 435-441.
- [7] G. Pannell, D. J. Atkinson and B. Zahawi, "Minimum-threshold crowbar for a fault-ride-through grid-code-compliant DFIG wind turbine", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 25, No. 3, 2010, pp. 750-759.
- [8] J. Vidal, G. Abad, J. Arza and S. Aurtenechea, "Single-phase DC crowbar topologies for low voltage ride through fulfillment of high-power doubly fed induction generator-based wind turbines", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 28, No. 3, 2013, pp. 768-781.
- [9] X.-G. Zhang and D.-G. XU, "Research on control of DFIG with active crowbar under symmetry voltage fault condition", *Electric Machines and Control*, Vol. 13, No. 1, 2009, pp. 99-103.
- [10] K.E. Okedu, S. Muyeen, R. Takahashi and J. Tamura, "Wind farms fault ride through using DFIG with new protection scheme", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 3, No. 2, 2012, pp. 242-254.

- [11] J. Yang, J.E. Fletcher and J. O'Reilly, "A series-dynamic-resistor-based converter protection scheme for doubly-fed induction generator during various fault conditions", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 25, No. 2, 2010, pp. 422-432.
- [12] G. Pannell, B. Zahawi, D.J. Atkinson and P. Missailidis, "Evaluation of the performance of a DC-link brake chopper as a DFIG low-voltage fault-ride-through device", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 28, No. 3, 2013, pp. 535-542.
- [13] A.O. Ibrahim, T. H. Nguyen, D.-C. Lee and S.-C. Kim, "A Fault Ride-Through Technique of DFIG Wind Turbine Systems Using Dynamic Voltage Restorers", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 26, No. 3, 2011, pp. 871-882.
- [14] D. Ramirez, S. Martinez, C.A. Platero, F. Blazquez and R.M. de Castro, "Low-voltage ride-through capability for wind generators based on dynamic voltage restorers", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 26, No. 1, 2011, pp. 195-203.
- [15] C. Wessels, F. Gebhardt and F. W. Fuchs, "Fault ride-through of a DFIG wind turbine using a dynamic voltage restorer during symmetrical and asymmetrical grid faults", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 26, No. 3, 2011, pp. 807-815.
- [16] M.G. Fard, N. Amjady and H. Sharifzadeh, "Probabilistic optimal power flow to determine the Locational marginal price considering wind generation", *Journal of Modeling in Engineering*, Vol. 15, No. 48, 2017, pp. 165-182.
- [17] H. Amaris and M. Alonso, "Coordinated reactive power management in power networks with wind turbines and FACTS devices", *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, No. 7, 2011, pp. 2575-2586.
- [18] M. K. Döşoğlu and A. B. Arsoy, "Transient modeling and analysis of a DFIG based wind farm with supercapacitor energy storage", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 78, 2016, pp. 414-421.
- [19] L. Wang and D.-N. Truong, "Stability enhancement of DFIG-based offshore wind farm fed to a multi-machine system using a STATCOM", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 28, No. 3, 2013, pp. 2882-2889.
- [20] W. Guo, L. Xiao and S. Dai, "Fault current limiter-battery energy storage system for the doubly-fed induction generator: analysis and experimental verification", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 10, No. 3, 2016, pp. 653-660.
- [21] Z.-C. Zou, X.-Y. Chen, C.-S. Li, X.-Y. Xiao and Y. Zhang, "Conceptual design and evaluation of a resistive-type SFCL for efficient fault ride through in a DFIG", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 26, No. 1, 2016, pp. 1-9.
- [22] W.-J. Park, B.C. Sung and J.-W. Park, "The effect of SFCL on electric power grid with wind-turbine generation system", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 20, No. 3, 2010, pp. 1177-1181.
- [23] M.H. Ali, B. Wu and R.A. Dougal, "An overview of SMES applications in power and energy systems", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 1, No. 1, 2010, pp. 38-47.
- [24] I. Ngamroo, "Optimization of SMES-FCL for Augmenting FRT Performance and Smoothing Output Power of Grid-Connected DFIG Wind Turbine", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 26, No. 7, 2016, pp. 1-5, Art. No. 3800405.
- [25] I. Ngamroo and S. Vachirasricirikul, "Design of Optimal SMES Controller Considering SOC and Robustness for Microgrid Stabilization", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 26, No. 7, 2016, pp. 1-5, Art. No. 5403005.

- [26] A.S. Yunus, M.A. Masoum and A. Abu-Siada, "Application of SMES to enhance the dynamic performance of DFIG during voltage sag and swell", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 22, No. 4, 2012, Art. No. 5702009.
- [27] A.D. Hansen, G. Michalke, P. Sørensen, T. Lund, and F. Iov, "Coordinated voltage control of DFIG wind turbines in uninterrupted operation during grid faults", Wind Energy, Vol. 10, No. 1, 2007, pp. 51-68.
- [28] D. Xie, Z. Xu, L. Yang, J. Østergaard, Y. Xue and K. P. Wong, "A comprehensive LVRT control strategy for DFIG wind turbines with enhanced reactive power support", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 28, No. 3, 2013, pp. 3302-3310.
- [29] L.P. Kunjumammed, B. C. Pal, C. Oates and K. J. Dyke, "Electrical Oscillations in Wind Farm Systems: Analysis and Insight Based on Detailed Modeling", IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 7, No. 1, 2016, pp. 51-62.
- [30] J. Vieira, M. Nunes, U. Bezerra and A. Do Nascimento, "Designing optimal controllers for doubly fed induction generators using a genetic algorithm", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 3, No. 5, 2009, pp. 472-484.
- [31] F. Wu, X. Zhang, K. Godfrey and P. Ju, "Small signal stability analysis and optimal control of a wind turbine with doubly fed induction generator", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 1, No. 5, 2007, pp. 751-760.
- [32] B. Yang, L. Jiang, L. Wang, W. Yao and Q. Wu, "Nonlinear maximum power point tracking control and modal analysis of DFIG based wind turbine", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 74, 2016, pp. 429-436.
- [33] I. Ngamroo and T. Karaipoom, "Cooperative control of SFCL and SMES for enhancing fault ride through capability and smoothing power fluctuation of DFIG wind farm", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 24, No. 5, Art. No. 5400304, 2014.
- [34] T. Ackermann, Wind power in power systems, Wiley Online Library, 2005.
- [35] W. Qiao, W. Zhou, J. M. Aller and R. G. Harley, "Wind speed estimation based sensorless output maximization control for a wind turbine driving a DFIG", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23, No. 3, 2008, pp. 1156-1169.
- [36] T. A. Lipo, Vector control and dynamics of AC drives, Oxford university press, 1996.
- [37] B. C. Sung, D.K. Park, J.-W. Park and T.K. Ko, "Study on a Series Resistive SFCL to Improve Power System Transient Stability: Modeling, Simulation, and Experimental Verification", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 7, 2009, pp. 2412-2419.
- [38] O.K. Erol and I. Eksin, "A new optimization method: big bang–big crunch", Advances in Engineering Software, Vol. 37, No. 2, 2006, pp. 106-111.
- [39] A. Kaveh and S. Talatahari, "Size optimization of space trusses using Big Bang–Big Crunch algorithm", Computers & structures, Vol. 87, No. 17, 2009, pp. 1129-1140.
- [40] M. Sedighizadeh, M. Esmaili and M. Esmaili, "Application of the hybrid Big Bang-Big Crunch algorithm to optimal reconfiguration and distributed generation power allocation in distribution systems", Energy, Vol. 76, 2014, pp. 920-930.