

## کنترل توزیع شده و مداوم ولتاژ و فرکانس سیستم چندماشینه با قابلیت کنترل هم‌زمان توان اکتیو و راکتیو با بهره‌گیری از باتری ذخیره‌ساز انرژی

ندا عزیزی<sup>۱</sup>، حسن مرادی چشمه‌بیگی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

neda.azizi@razi.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

ha.moradi@razi.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، یک روش جدید برای کنترل هم‌زمان توان اکتیو و راکتیو در سیستم چندماشینه با بهره‌گیری از ذخیره‌ساز انرژی و ساختار کنترلی توزیع شده در کنترل فرکانس و تنظیم ولتاژ معرفی شده است. در روش پیشنهادی، هریک از واحدهای تولیدی به یک واحد ذخیره‌سازی با سیستم کنترلی مجزا مجهز شده‌اند که هر واحد ذخیره‌ساز شامل دو حلقه کنترلی مجزاست. حلقه اول برای کنترل توان اکتیو و حلقه دوم برای کنترل توان راکتیو طراحی شده است. همچنین برای کنترل فرکانس و ولتاژ دو مدار کنترلی مجزا نیز در مبدل‌ها در نظر گرفته شده است. برای بررسی عملکرد ساختار کنترلی پیشنهادی و نمایش پایداری سیستم نتایج شبیه‌سازی برای حالت‌های تعادل و عدم تعادل شبکه بررسی شده است. برای استراتژی کنترلی ارائه شده تمام پارامترهای کنترل‌کننده‌ها هم‌زمان با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی غیرخطی ترکیبی رقابت استعماری و ژنتیک بهینه شده است. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی بیانگر کارایی ساختار کنترلی پیشنهادی در بهره‌گیری از باتری ذخیره‌ساز انرژی برای کنترل هم‌زمان توان اکتیو و راکتیو در یک سیستم مبدل انرژی بادی است و اثربخشی این استراتژی را در شرایط تعادل و عدم تعادل شبکه نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** مبدل سمت روتور، ژنراتور دوسو تغذیه، کنترل توزیع شده توان اکتیو و راکتیو، کنترل فرکانس، کنترل ولتاژ.

## ۱. مقدمه

امروزه با توجه به مشکلات ناشی از تخریب محیط زیست توسط منابع انرژی تجدیدناپذیر و مزایای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر انرژی خورشیدی، باد و...، استفاده از این شکل انرژی با توجه به شرایط محیطی مورد توجه قرار گرفته است [۱]. در این سیستم‌ها همواره ثبات فرکانس برای ثبات عملکرد سیستم قدرت ضروری است [۲-۴] که به منظور کاهش نوسانات فرکانس در شبکه، نیاز به تنظیم‌کننده‌ها برای تنظیم توربین‌های بادی سرعت متغیر رو به افزایش است.

از میان انواع ساختارهای مختلف ژنراتورها تاکنون چندین ساختار از جمله ژنراتور القایی قفس سنجابی، ژنراتور سنکرون با میدان تحریک خارجی و ژنراتور القایی دوسو تغذیه<sup>۱</sup> در سیستم‌های تبدیل انرژی باد<sup>۲</sup> استفاده شده است [۵ و ۶]. بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که تعداد زیادی ژنراتور القایی دوسو تغذیه در سیستم‌های قدرت به عنوان منابع توزیع شده در میکروگرید کار می‌کنند [۷] که این به دلیل مزایای متعدد این نوع ژنراتور نسبت به ساختارهای مشابه در سیستم‌های مبدل انرژی باد است [۸]. از جمله این مزایا عبارت‌اند از: هزینه کمتر مبدل، عملکرد سرعت متغیر ژنراتور القایی دوسو تغذیه و قابلیت‌های کنترل توان اکتیو و توان راکتیو و افزایش توان در مقایسه با توربین بادی با استفاده از ژنراتور سرعت ثابت [۹]، کنترل انعطاف‌پذیر توان اکتیو و راکتیو بر مبنای مبدل بازگشتی و کنترل توان اکتیو بین ماشین القایی و شبکه برق [۱۰] و [۱۱].

با وجود این از جمله مشکلات قابل توجهی که ژنراتور القایی دوسو تغذیه با آن روبه‌روست، افت ولتاژ و توان خروجی ناپایدار است که روش‌های متعددی برای حل این مشکلات در پژوهش‌های پیشین ارائه شده است. در حالت کلی می‌توان این روش‌ها را در دو دسته راه‌حل‌های نرم‌افزاری [۱۲] و راه‌حل‌های سخت‌افزاری [۱۳] طبقه‌بندی کرد. رایج‌ترین روش سخت‌افزاری استفاده از مدار کروب‌بار<sup>۳</sup> است، به این صورت که در هنگام خطا مقاومت کروب‌بار با زمان ورود مناسب می‌تواند زمان رفع خطای بحرانی و سرعت بحرانی را افزایش دهد و در نتیجه به پایداری سیستم قدرت کمک خوبی می‌کند [۱۴] و [۱۵]. همچنین برای حل مشکل ولتاژ و بی‌ثباتی توان خروجی می‌توان از محدودساز جریان خطا استفاده کرد. محدودساز جریان خطا بلافاصله بعد از وقوع خطا در مدار قرار می‌گیرد و توانایی دارد تا تمام جریان‌های اضافی را که بزرگ‌تر از جریان شبکه باشند، با زمان

پاسخ‌گویی حداکثر نیم سیکل محدود کند. یکی از راه‌های بهبود تنظیم فرکانس کنترل هم‌زمان مقادیر است که در مراجع [۱۶ و ۱۷] ذکر شده است.

در مرجع [۱۸] کنترل‌کننده توان اکتیو و راکتیو برای باتری ذخیره‌ساز انرژی<sup>۴</sup> تحت شرایط عدم تعادل شبکه با الگوریتم<sup>۵</sup> بهینه‌سازی فراابتکاری هیبریدی پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۹] پایدارسازهای چندسطحی برای میراسازی نوسانات به کار برده شده است. در مرجع [۲۰] یک روش کنترلی مبتنی بر الگوریتم ورودی-خروجی خطی برای ژنراتور القایی دوسو تغذیه پیشنهاد شده است. برای بهبود کارایی بهتر کنترل‌کننده نیاز به کنترل ولتاژ نامتعادل در سیستم کنترل‌کننده مبدل ژنراتور القایی دوسو تغذیه وجود دارد که برای طراحی آن، یک تابع اضافی به الگوریتم اصلی کنترلی افزوده می‌شود [۲۱]. در مرجع [۶] کنترل‌کننده مجزای فرکانس و ولتاژ برای ژنراتور القایی مجزا از شبکه و متصل به باتری ذخیره‌ساز انرژی پیشنهاد شده است.

این مقاله یک روش کنترلی نوین برای کنترل توان اکتیو و راکتیو مجموعه ژنراتور القایی دوسو تغذیه مجهز به ذخیره‌ساز انرژی به همراه فرکانس و ولتاژ کنترل‌شده ارائه می‌دهد. رهیافت کنترلی پیشنهادی می‌تواند به‌طور هم‌زمان توان اکتیو، توان راکتیو، فرکانس و دامنه ولتاژ را تحت هر دو وضعیت تعادل و عدم تعادل یک شبکه با بهره‌گیری از باتری ذخیره‌ساز انرژی کنترل کند. در این روش، ابتدا مؤلفه‌های توالی مثبت و منفی ولتاژ محاسبه و سپس با استفاده از بلوک کنترلی تناسبی انتگرالی<sup>۶</sup> تحت مقدار مرجع صفر و به‌منظور به حداقل رساندن توالی منفی سیستم، توالی منفی کنترل‌شده و از توالی مثبت برای محاسبه توان به‌عنوان سیگنال ورودی کنترل‌کننده‌های توان اکتیو و راکتیو استفاده می‌شود. سیستم کنترلی به‌گونه‌ای طراحی شده که چنانچه به هر دلیلی ژنراتور القایی دوسو تغذیه نتواند توان مورد نیاز بار را تأمین کند یا در حالت مجزا از شبکه قرار داشته باشد، کمبود توان توسط باتری ذخیره‌ساز انرژی جبران گردد و توان کلی بار در مجموع مطابق برنامه‌ریزی شبکه تأمین شود. از آنجا که مطابق با برخی قراردادهای در بازار برق لازم است مقدار توان اکتیو انتقالی ثابت بماند، ظرفیت خط نباید به‌وسیله توان راکتیو اشغال شود. بنابراین این مقاله، یک استراتژی کنترلی برای کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو مبادله‌ای مجموعه با شبکه پیشنهاد می‌دهد. در حقیقت هدف از به‌کارگیری استراتژی کنترلی پیشنهادی برای کنترل توان اکتیو و راکتیو با

4. Battery Energy Storage System (BESS)  
5. Culture PSO Co Evolutionary CPCE  
6. Proportional Integration (PI)

1. Doubly Fed Induction Generator (DFIG)  
2. Wind Energy Conversion systems (WECSS)  
3. Crowbar

ترکیب کنترل کننده‌ها به این صورت است که حلقه‌های کنترلی فرکانس و ولتاژ روی مبدل سمت روتور مربوط به هریک از ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه و حلقه‌های کنترلی توان روی ذخیره‌سازهای انرژی نصب می‌شوند. در نهایت، سیگنال‌های  $dq$  خروجی برای تولید سیگنال مدولاسیون پهنای پالس متناسب با هر حلقه کنترلی به حوزه  $abc$  منتقل می‌شوند. استراتژی کنترلی پیشنهاد شده برای ثابت نگه داشتن مجموع توان مبادله‌ای از طرف مجموعه ژنراتور القایی دوسو تغذیه و ذخیره‌ساز معرفی و بلوک دیاگرام مربوط به این استراتژی در شکل (۱) نشان داده شده و فرمول‌های مربوط به مدل‌سازی آن در روابط (۱) تا (۳) ذکر شده است [۲۲ و ۲۳]. با توجه به اینکه اگر سیستمی نامتعادل باشد، توالی منفی برخلاف شرایط متعادل مخالف صفر است، با طراحی یک بخش مجزا روی حلقه کنترلی، می‌توان مقدار توالی منفی ولتاژ را به صفر رسانید. با توجه به ضرورت وجود باتری ذخیره‌ساز انرژی برای ذخیره‌سازی و یا تزریق توان اکتیو و راکتیو در مواقع ضروری که ژنراتور القایی دوسو تغذیه قادر به تأمین توان بار نیست، این روش کنترل توان کمک می‌کند درحالی‌که ولتاژ و فرکانس سیستم قابل کنترل است توان مورد نیاز بار از طریق باتری ذخیره‌ساز انرژی تأمین شود. روابط (۴) و (۵) تجزیه بردارهای ولتاژ در محور  $dq$  را نشان می‌دهند. سیگنال‌های ورودی کنترل کننده توان اکتیو و راکتیو نیز از روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌شود.

$$\frac{d\omega_t}{dt} = \frac{1}{2H_t} \left( \frac{P_t}{\omega_t} - K_s \theta_{tw} \right) \quad (1)$$

$$\frac{d\theta_{tw}}{dt} = \omega_b (\omega_t - \omega_r) \quad (2)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H_g} (K_s \theta_{tw} - T_e) \quad (3)$$

$$(f - f_r) \left( K_{P1} + \frac{K_{I1}}{s} \right) = v_d \quad (4)$$

$$(v^- - 0) \left( K_{P1}^* + \frac{K_{I1}^*}{s} \right) + (v^+ - v_r) \left( K_{P2} + \frac{K_{I2}}{s} \right) = v_q \quad (5)$$

$$P = 0.5(v_d^- - 0) \left( K_{P2}^* + \frac{K_{I2}^*}{s} \right) + v_d^+ i_d \quad (6)$$

$$+ ((v_q^- - 0) \left( K_{P3}^* + \frac{K_{I3}^*}{s} \right) + v_q^+) i_q$$

$$Q = -0.5(v_d^- - 0) \left( K_{P2}^* + \frac{K_{I2}^*}{s} \right) + v_d^+ i_d \quad (7)$$

$$+ ((v_q^- - 0) \left( K_{P3}^* + \frac{K_{I3}^*}{s} \right) + v_q^+) i_d$$

بهره‌گیری از ذخیره‌ساز برای تثبیت و ثابت نگه داشتن توان ارسالی از طرف ژنراتور القایی دوسو تغذیه می‌باشد و هدف از ارائه کنترل کننده ولتاژ و فرکانس بهبود عملکرد سیستم تحت اغتشاشات و نامتعادلی است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل کننده قادر است فرکانس، دامنه ولتاژ و توان اکتیو و راکتیو باتری ذخیره‌ساز انرژی را تحت خطاها و اغتشاشات اعمالی به سیستم کنترل کند. در نهایت تمام پارامترهای کنترل کننده‌ها به‌طور هم‌زمان توسط الگوریتم‌های هوشمند بهینه‌سازی تنظیم شده‌اند تا بهینه‌ترین مقادیر برای اعمال به سیستم اتخاذ شود.

## ۲. مدل‌سازی سیستم تحت مطالعه

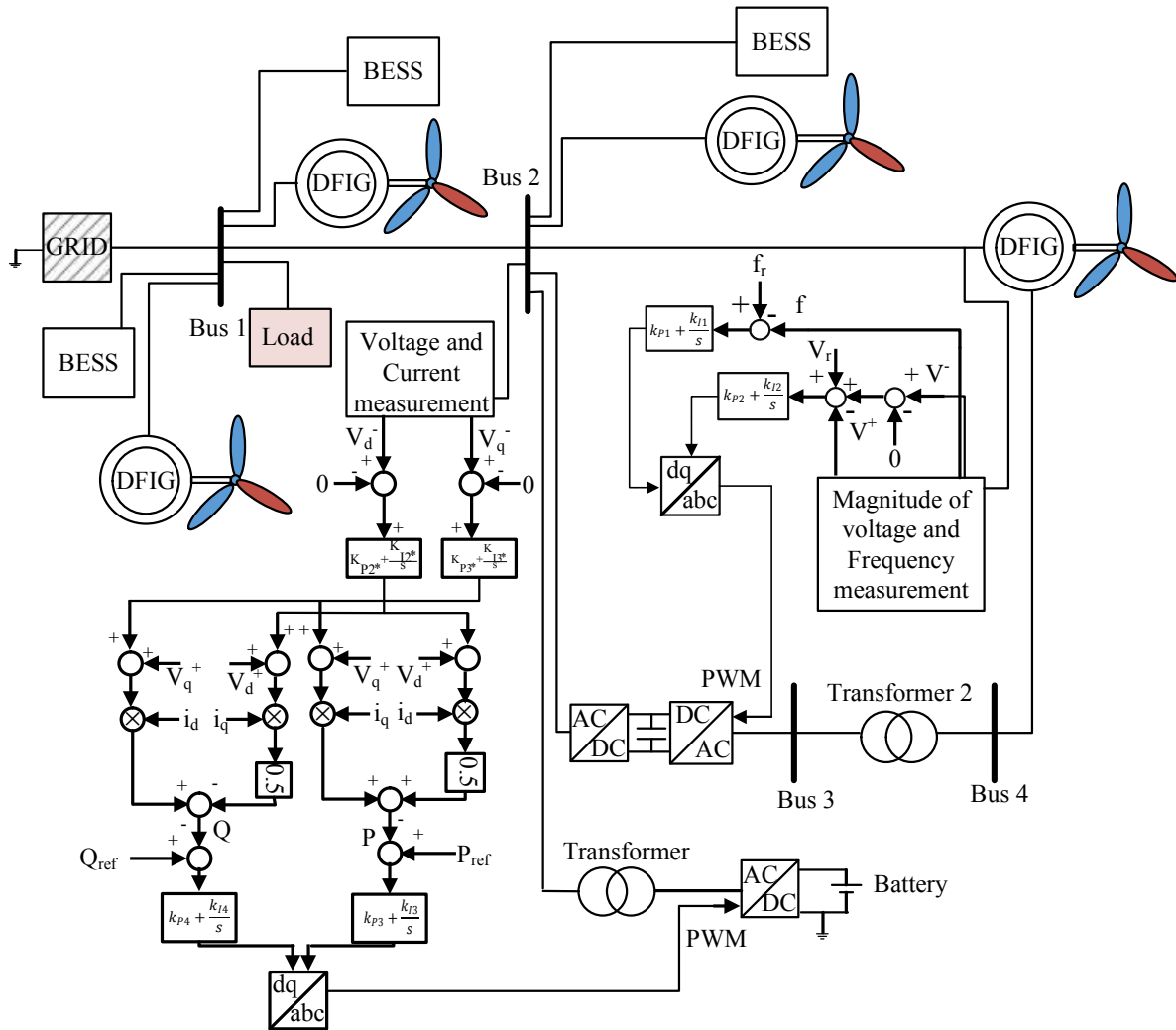
دیاگرام تک‌خطی مربوط به سیستم تحت مطالعه در شکل (۱) نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده، سیستم مورد مطالعه در این مقاله یک سیستم چندماشین به چندین واحد بادی تحت ژنراتور القایی دوسو تغذیه است که در کنار هریک از آن‌ها یک باتری ذخیره‌ساز انرژی قرار دارد که در مواقع جزیره‌ای شدن واحد بادی و یا از کارافتادگی و وجود نقص در آن با کمک مدار کنترلی طراحی شده سیستم را در حالت پایدار نگه داشته و توان مورد نیاز بار محلی را تأمین کند. سیستم تبدیل هر واحد ژنراتور القایی دوسو تغذیه شامل دو مبدل سمت روتور<sup>۱</sup> و سمت شبکه<sup>۲</sup> و یک خازن تثبیت کننده ولتاژ است. مشخصات سیستم در ضمیمه (جدول الف) ذکر شده است.

شایان ذکر است که این سیستم تنها برای بررسی عملکرد کنترل کننده‌ها طراحی شده و سیستم کنترلی می‌تواند روی هر سیستم دیگری با ساختار متفاوت نصب شود.

## ۳. ساختار کنترلی پیشنهادی

همان‌طور که شکل (۱) نشان می‌دهد و با توجه به اینکه کنترل کننده پیشنهادی برای پاسخ‌گویی در شبکه نامتعادل نیز طراحی شده است، برای محاسبه ولتاژ توالی مثبت آن از یک تجزیه کننده توالی استفاده می‌شود. جزئیات تجزیه این توالی‌ها برای یکی از ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه در شکل (۱) نشان داده شده است. در روش پیشنهادی این مقاله، هر چهار مدار کنترلی برای کار در قاب  $dq$  طراحی شده‌اند و هر حلقه کنترلی به یک بلوک تناسبی - انتگرالی مجهز است. از این چهار حلقه کنترلی، دو حلقه مربوط به کنترل فرکانس و ولتاژ و دو حلقه دیگر مربوط به کنترل توان اکتیو و راکتیو ذخیره‌ساز می‌شود.

1. Rotor Side Converter (RSC)
2. Grid Side Converter (GSC)



شکل (۱): ساختار شبکه تحت مطالعه

#### ۴. فرمول‌بندی مسئله

برای کامل کردن روش کنترلی پیشنهادی و مسئله طراحی کنترلی‌کننده‌ها در این بخش از یک روش طراحی بر مبنای الگوریتم‌های هوشمند استفاده می‌شود. برای انجام این کار لازم است در ابتدا تابع هدفی معرفی شود که قادر به یافتن بهینه‌ترین پارامترها بوده و بتواند سرعت پاسخ‌گویی را به حداکثر مقدار ممکن برساند. به این منظور تابع هدف طراحی شده به صورت رابطه (۸) بیان شده است.

$$\sum_{i=1}^4 \left( \alpha_1 \int_0^t t |\Delta f_i| dt + \int_0^t t |\Delta V_i| dt + \alpha_2 \int_0^t t |\Delta P_i| dt + \int_0^t t |\Delta Q_i| dt \right) \quad (8)$$

در این رابطه، مجموع نوسانات زیر سطح منحنی تمامی کنترلی‌کننده‌ها تحت خطای تک‌فاز به زمین محاسبه می‌شود. با توجه به این نکته که نوسانات فرکانس و به تبع آن توان اکتیو تأثیرات مخرب‌تری روی عملکرد سیستم دارند، ضرایب  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  به جهت افزایش اثر

نوسانات فرکانس و توان اکتیو به رابطه اضافه شده‌اند، به طوری که مقادیر هر دو ضریب بیشتر از ۱ و برابر ۱/۲۵ هستند.

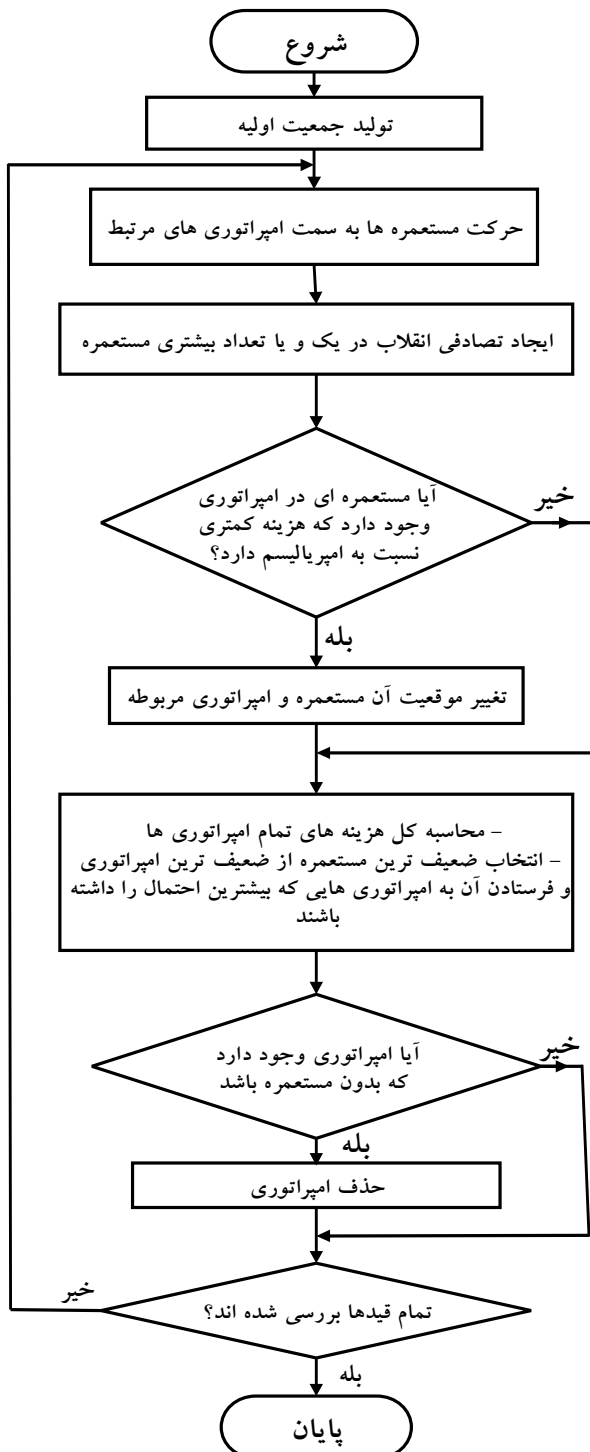
#### ۵. حل با الگوریتم هوشمند

در این مقاله، برای تنظیم کردن ضرایب کنترلی‌کننده‌ها و حل مسئله، از الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. الگوریتم فوق، یک الگوریتم شناخته شده است و به طور وسیعی برای حل مسائل خطی، غیرخطی، ترکیب عدد صحیح و پیوسته به کار رفته است و جزئیات بیشتر آن می‌تواند در مراجع [۲۴] و [۲۵] یافت می‌شود.

مطابق طرح‌واره ارائه شده در شکل (۲) و از آنجا که در بهینه‌سازی، هدف یافتن یک جواب بهینه برحسب متغیرهای مسئله است، ابتدا یک جمعیت اولیه مطابق یک آرایه از متغیرهای مسئله که قبلاً برای بهینه‌سازی ایجاد شده‌اند، برای مسئله تولید می‌شود. در الگوریتم ژنتیک، این آرایه، کروموزوم نامیده می‌شود و در اینجا به عنوان یک کشور

1. Imperialist Competitive Algorithm (ICA)

ضعیف‌ترین است، یک یا چند مورد گزینش شده و برای تصاحب این مستعمرات، رقابتی میان همه امپراتوری‌ها ایجاد می‌شود. مستعمرات مذکور لزوماً توسط قوی‌ترین امپراتوری تصاحب نخواهند شد، بلکه امپراتوری‌های قوی‌تر، احتمال تصاحب بیشتری دارند. در جریان رقابت‌های امپریالیستی، خواه‌ناخواه، امپراتوری‌های ضعیف به تدریج سقوط کرده و مستعمراتشان به دست امپراتوری‌های قوی‌تر می‌افتد. شروط متفاوتی را می‌توان برای سقوط یک امپراتوری در نظر گرفت.



شکل (۲): طرح‌واره حل مسئله با الگوریتم هوشمند

معرفی می‌گردد. برای شروع الگوریتم، تعدادی کشور اولیه ایجاد می‌شود تا از بین این کشورها بهترین اعضای جمعیت (کشورهای دارای کمترین مقدار تابع هزینه) به عنوان امپریالیست انتخاب شوند. کشورهای باقی‌مانده مستعمراتی را تشکیل می‌دهند که هرکدام به یک امپراتوری تعلق دارند. سیاست همگون‌سازی (جذب) با هدف تحلیل فرهنگ و ساختار اجتماعی مستعمرات در فرهنگ حکومت مرکزی انجام می‌پذیرد. در نتیجه کشورهای استعمارگر، برای افزایش نفوذ خود، شروع به ایجاد عمران (ایجاد زیرساخت‌های حمل‌ونقل، تأسیس دانشگاه و...) می‌کنند و با در نظر گرفتن شیوه نمایش یک کشور در حل مسئله بهینه‌سازی، در حقیقت این حکومت مرکزی با اعمال سیاست جذب سعی دارد تا کشور مستعمره را در راستای ابعاد مختلف اجتماعی سیاسی به خود نزدیک کند. این بخش از فرایند استعمار در الگوریتم بهینه‌سازی، به صورت حرکت مستعمرات به سمت کشور امپریالیست، مدل شده است. بروز انقلاب تغییرات ناگهانی را در ویژگی‌های اجتماعی سیاسی یک کشور ایجاد می‌کند. در الگوریتم رقابت استعماری، انقلاب با جابجایی تصادفی یک کشور مستعمره به یک موقعیت تصادفی جدید مدل‌سازی می‌شود. انقلاب از دیدگاه الگوریتمی باعث می‌شود کلیت حرکت تکاملی از گیر کردن در دره‌های محلی بهینگی نجات یابد که در بعضی موارد باعث بهبود موقعیت یک کشور شده و آن را به یک محدوده بهینگی بهتری می‌برد. در حین حرکت مستعمرات به سمت کشور استعمارگر، ممکن بعضی از این مستعمرات به موقعیتی بهتر از امپریالیست برسند (به نقاطی در تابع هزینه برسند که هزینه کمتری را نسبت به مقدار تابع هزینه در موقعیت امپریالیست تولید می‌کنند). در این حالت، کشور استعمارگر و کشور مستعمره، جای خود را با همدیگر عوض کرده و الگوریتم با کشور استعمارگر در موقعیت جدید ادامه یافته و این بار این کشور امپریالیست جدید است که شروع به اعمال سیاست همگون‌سازی بر مستعمرات خود می‌کند. قدرت یک امپراتوری به صورت قدرت کشور استعمارگر، به اضافه درصدی از قدرت کل مستعمرات آن تعریف می‌شود.

هر امپراتوری‌ای که نتواند بر قدرت خود بیفزاید و قدرت رقابت خود را از دست بدهد، در جریان رقابت‌های امپریالیستی، حذف خواهد شد. این حذف شدن به صورت تدریجی صورت می‌پذیرد؛ بدین معنی که به مرور زمان، امپراتوری‌های ضعیف، مستعمرات خود را از دست داده و امپراتوری‌های قوی‌تر، این مستعمرات را تصاحب کرده و بر قدرت خویش می‌افزایند. در الگوریتم رقابت استعماری، امپراتوری در حال حذف، ضعیف‌ترین امپراتوری موجود است. بدین ترتیب، در تکرار الگوریتم، از میان ضعیف‌ترین مستعمرات یک امپراتوری که خود

در الگوریتم پیشنهاد شده، یک امپراتوری زمانی حذف شده تلقی می‌شود که مستعمرات خود را از دست داده باشد. به این ترتیب با بررسی قیدها مسئله بهینه‌سازی پایان می‌یابد. روابط (۹) تا (۱۵) روابط مربوط به این الگوریتم را نشان می‌دهد.

در الگوریتم پیشنهاد شده، یک امپراتوری زمانی حذف شده تلقی می‌شود که مستعمرات خود را از دست داده باشد. به این ترتیب با بررسی قیدها مسئله بهینه‌سازی پایان می‌یابد. روابط (۹) تا (۱۵) روابط مربوط به این الگوریتم را نشان می‌دهد.

$$C_j = f_{cost}^{imp \cdot j} - \max_i (f_{cost}^{imp \cdot j}) \quad (9)$$

$$country = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_N] \quad (10)$$

$$NC_j = Round \left( \frac{C_j}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} C_i} \right) \cdot N_{col} \quad (11)$$

$$C_j = c_j - \max \{c_i\} \quad (12)$$

$$NTC_j = TC_j - \max_i \{TC_i\} \quad (13)$$

$$P_j = \frac{NTC_j}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} NTC_i} \quad (14)$$

$$\{x\}_{new} = \{x\}_{old} + U(0, \beta \times d) \times \{V_1\} \quad (15)$$

جدول (۱): مقادیر بهینه محاسبه شده از الگوریتم رقابت استعماری و ژنتیک

پارامتر	مقدار بهینه الگوریتم رقابت استعماری	مقدار بهینه الگوریتم ژنتیک
$k_{p1}$	۰/۰۰۰۱۹	۰/۰۰۰۱۸۸
$k_{p2}$	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲۱
$k_{p3}$	۰/۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۱۲
$k_{p4}$	۰/۰۰۰۱۵	۰/۰۰۰۱۳
$K_{p1}^*$	۰/۰۰۰۲۸	۰/۰۰۰۲۵
$K_{p2}^*$	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۱
$K_{p3}^*$	۰/۰۰۰۲۸	۰/۰۰۰۲۹
$k_{l1}$	۰/۲	۰/۲
$k_{l2}$	۰/۰۹	۰/۰۸۵
$k_{l3}$	۰/۲۵۸	۰/۲۹۵
$k_{l4}$	۰/۳۳۶	۰/۳۳۵
$K_{l1}^*$	۰/۱۱۴	۰/۱۱۸
$K_{l2}^*$	۰/۱۴۲	۰/۱۵۸
$K_{l3}^*$	۰/۲۲۵	۰/۲۲۸

## ۲.۶. بررسی عملکرد کنترل کننده‌ها

### ۱.۲.۶. بررسی عملکرد سیستم تحت شبکه متعادل

در این بخش عملکرد کنترل کننده‌ها در شبکه متعادل مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی کامل سیستم در این شرایط چندین سناریو به شرح ذیل تعریف می‌شود.

- بررسی عملکرد کنترل کننده‌های ولتاژ و فرکانس با تغییر مرجع؛
- تثبیت توان سیستم مورد مطالعه در حضور باتری ذخیره ساز انرژی؛
- عملکرد ژنراتور القایی دوسو تغذیه در حالت مجزا از شبکه.

### بررسی عملکرد کنترل کننده‌های فرکانس و ولتاژ با تغییر مرجع

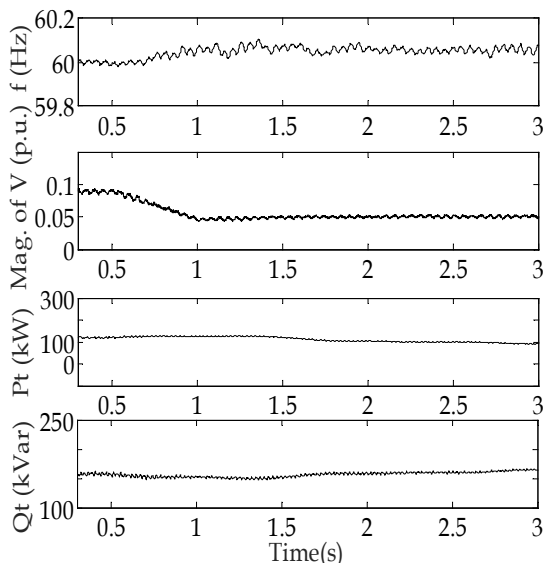
به منظور نمایش توانایی سیستم کنترلی در کنترل مجزای دامنه ولتاژ و فرکانس و تحت شرایط شبکه متعادل، هریک از مقادیر مرجع در دو مرحله تغییر می‌کند به این صورت که مرجع دامنه ولتاژ ابتدا در ۰/۱ سپس روی مقدار ۰/۱۷۵ تنظیم می‌شود. شکل (۳) نشان می‌دهد که در هریک از این تغییرات تنها یکی از مقادیر تغییر کرده و دیگری پس از نوسان کمی روی مرجع قبلی خود ثابت شده است. این شکل نشان

## ۶. نتایج شبیه‌سازی

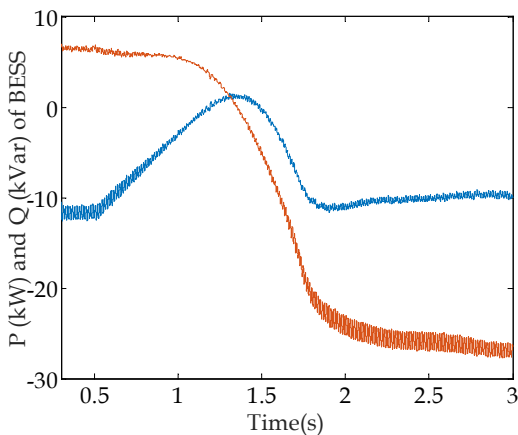
در این بخش، نتایج شبیه‌سازی در دو بخش تنظیم پارامترها و بررسی کنترل کننده‌ها تحت شبکه متعادل و شبکه نامتعادل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. همچنین در هر بخش، چندین سناریو برای ارائه عملکرد کنترل کننده‌های پیشنهادی تحت شرایط مشخص تعریف شده است. برخی از این سناریوها شامل تغییر مرجع فرکانس با وجود دامنه ولتاژ ثابت، تغییر مرجع دامنه ولتاژ با وجود فرکانس ثابت، بررسی عملکرد سیستم با و بدون حضور باتری ذخیره ساز انرژی و در نهایت قرار دادن ژنراتور القایی دوسو تغذیه در حالت جزیره‌ای و بررسی کنترل کننده‌ها تحت این شرایط می‌باشند.

### ۱.۶. تنظیم پارامترهای کنترل کننده‌ها

همه پارامترهای هر چهار کنترل کننده به وسیله الگوریتم رقابت استعماری و ژنتیک تنظیم شده و نتایج آن در جدول (۱) ثبت شده است. شایان ذکر است که این مسئله با تکنیک‌های مختلف بهینه‌سازی حل شده است و پس از مقایسه آن‌ها با یکدیگر، در نهایت با توجه به نتایج الگوریتم رقابت استعماری و ژنتیک راه حل را سریع‌تر از سایر تکنیک‌ها پیدا می‌کند. اما همان گونه که از اعداد ثبت شده در جدول (۱) مشخص است، پاسخ‌های به دست آمده از هر دو الگوریتم بسیار به هم نزدیک‌اند. برای مثال، در مقدار بهینه  $K_{p1}$  اعداد به دست آمده



شکل (۴): فرکانس، دامنه ولتاژ، توان اکتیو و توان راکتیو کل مجموعه ژنراتور القایی دوسو تغذیه و باتری ذخیره‌ساز انرژی در شبکه متعادل

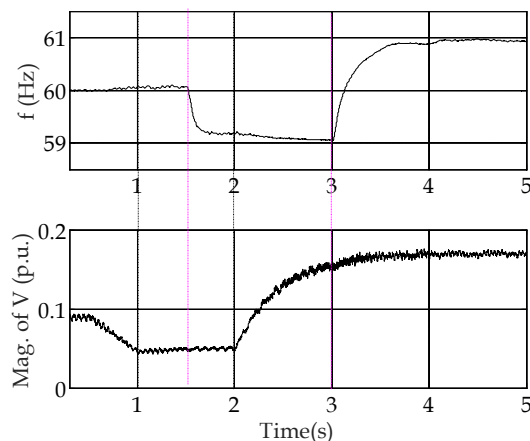


شکل (۵): توان اکتیو و راکتیو تزریقی به بار از طرف ژنراتور القایی دوسو تغذیه

#### عملکرد ژنراتور القایی دوسو تغذیه در حالت مجزا از شبکه

در این بخش از شبیه‌سازی، عملکرد سیستم در شرایطی مورد بحث قرار گرفته که ژنراتور القایی دوسو تغذیه در حالت جدا از شبکه و تحت شرایط متعادل قرار داشته است. در این شرایط باتری ذخیره‌ساز انرژی می‌تواند مورد بار را تأمین کند. باری که در این بخش روی سیستم قرار دارد، باری خازنی با توان اکتیو مصرفی صفر است. شکل (۶) فرکانس، دامنه ولتاژ، توان اکتیو و توان راکتیو واحد ذخیره‌ساز را نشان می‌دهد. همان طور که شکل (۶) نشان می‌دهد، علاوه بر تثبیت دامنه ولتاژ و فرکانس، با توجه به بار راکتیو، توان اکتیو تولیدی صفر شده و بخشی از توان راکتیو مورد نیاز از طرف ذخیره‌ساز تأمین می‌شود.

می‌دهد که ابتدا مرجع ولتاژ در ثانیه ۰/۵ فرمان تغییر گرفته، در ثانیه ۱ روی مقدار جدید ۰/۰۵ ثابت شده، سپس در ثانیه دوم با فرمان تغییر روی عدد ۰/۱۷۵ ثابت می‌شود و در طول تمام این تغییرات فرکانس تقریباً ثابت و بدون تغییر باقی مانده است. برای بررسی عملکرد حلقه کنترل فرکانس نیز، مقدار آن در ثانیه ۱/۵ و ۳ تغییر می‌کند و از عدد ۶۰ هرتز به عدد ۵۹ در ثانیه ۱/۵ و از عدد ۵۹ به عدد ۶۱ در ثانیه ۳ می‌رسد. با در نظر گرفتن شکل (۳)، این نکته مشخص است که مقادیر ولتاژ و فرکانس به خوبی و به شکل غیرمتمرکز و مجزا توانسته‌اند مراجع خود را دنبال کنند.



شکل (۳): فرکانس و دامنه ولتاژ سیستم ژنراتور القایی دوسو تغذیه

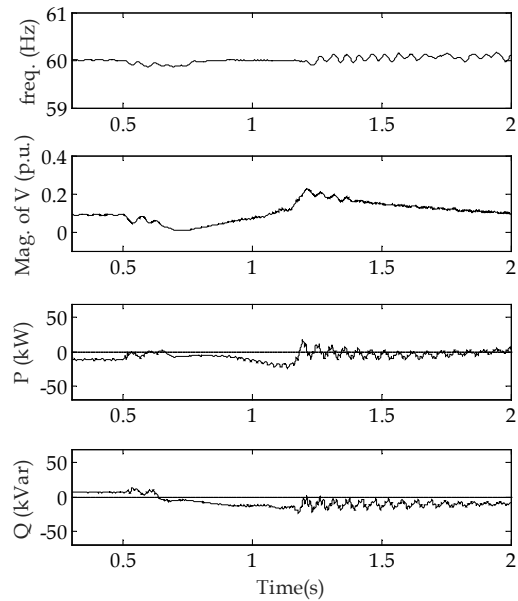
#### تثبیت توان سیستم مورد مطالعه در حضور باتری ذخیره‌ساز انرژی

برای نشان دادن تأثیر وجود باتری ذخیره‌ساز انرژی بر عملکرد سیستم و تثبیت توان کل تزریقی از طرف مجموعه به شبکه، در این بخش همان طور که شکل (۴) نشان می‌دهد، دامنه ولتاژ از مقدار اولیه خود کاهش یافته و این تغییر در دامنه ولتاژ موجب کاهش توان راکتیو به میزان حدوداً ۳۰ کیلووار نیز شده است. شکل (۵) تغییرات توان خروجی ژنراتور القایی دوسو تغذیه را نشان می‌دهد. همان گونه که این شکل نشان می‌دهد، توان اکتیو در طول تغییرات ولتاژ ثابت مانده و تنها توان راکتیو تغییر کرده است. با وجود این، نتایج نشان می‌دهد که حضور باتری ذخیره‌ساز انرژی روی سیستم با طراحی کنترل‌کننده توان موجب تقبل این بخش از توان و در حقیقت، جبران توان توسط باتری ذخیره‌ساز انرژی می‌گردد که در نتیجه آن توان اکتیو و راکتیو مجموعه روی مقدار ثابتی تنظیم می‌شود. شکل (۴) همچنین نشان می‌دهد که در طول این تغییر، فرکانس با نوسان کمی روی مقدار ۶۰ هرتز باقی مانده است.

اغتشاشات سیستمی پیشنهاد می‌دهد. همچنین در کارکرد هم‌زمان این حلقه‌های کنترلی، تفکیک پذیری و هماهنگی مناسبی بین هر چهار حلقه کنترل کننده وجود دارد. گفتنی است که در قسمت ارائه نتایج شبیه‌سازی عملکرد کنترل کننده‌ها تحت انواع اغتشاشات و خطاها در شرایط تعادل و عدم تعادل شبکه مورد بررسی قرار گرفته. همچنین نتایج شبیه‌سازی غیرخطی در حوزه زمان عملکرد ژنراتور القایی دوسو تغذیه و باتری ذخیره‌ساز انرژی در حالت‌های متصل به شبکه و مجزا از آن را در شرایط مختلف نمایش می‌دهد. همچنین در تمام مراحل شبیه‌سازی هماهنگی حلقه‌های کنترلی مورد نظر قرار داشته است. سیستم پیشنهادی و کنترل کننده‌های آن می‌تواند توان تزریقی به شبکه را ثابت نگه‌دارند به این صورت که هر لحظه که ژنراتور القایی دوسو تغذیه توانی مازاد بر توان مرجع تولید کند، اضافه توان در باتری ذخیره‌شده و اگر توان تولیدی کمتر از مقدار مرجع بود، این کمبود توان توسط باتری ذخیره‌ساز انرژی جبران شود. نتایج شبیه‌سازی‌ها همچنین نشان می‌دهد که اگر ژنراتور القایی دوسو تغذیه وارد حالت جزیره‌ای شده و از شبکه مجزا گردد، کنترل کننده‌های ولتاژ و فرکانس قادر به تنظیم این مقادیرند و سیستم می‌تواند به کار خود ادامه دهد. نتایج شبیه‌سازی غیرخطی در حوزه زمان با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، سادگی و پیچیدگی کمتر در عین کارایی کنترل کننده‌های پیشنهادی را ثابت می‌کند.

#### فهرست علائم

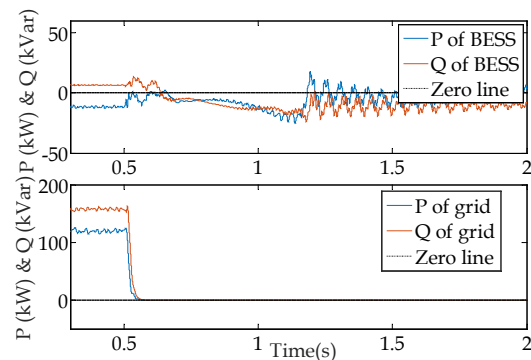
باتری ذخیره‌ساز انرژی	Battery Energy Storage System
DFIG	Doubly Fed Induction Generator
باتری ذخیره‌ساز انرژی-FCL	Fault Current Limiter- Battery Energy Storage
ICA	Imperialist Competitive Algorithm
GA	Genetic Algorithm
$C_j$	هزینه انرژی نرمالیزه شده امپریالیست آم
$D$	فاصله بین مستعمره و امپریالیست مربوط
$F$	فرکانس
$f_r$	مرجع فرکانس
$f_{cost}^{impj}$	هزینه توان تولیدی امپریالیست آم
$H_t$	اینرسی توربین
$H_g$	اینرسی ژنراتور
$k_{p1}, k_{p2}, k_{p1}^*, k_{p2}^*, k_{p3}^*$	بهره تناسبی
$K_{I1}, k_{I2}, K_{I1}^*, k_{I2}^*, k_{I3}^*$	بهره انتگرالی
$N_{col}$	تعداد مکان‌های قبلی هر مستعمره
$N_{imp}$	تعداد مستعمره
$P$	توان اکتیو
$Q$	توان راکتیو
$V$	ولتاژ



شکل (۶): فرکانس، دامنه ولتاژ، توان اکتیو و توان راکتیو باتری ذخیره‌ساز انرژی در حالت جزیره‌ای

#### ۲.۲.۶. بررسی عملکرد سیستم تحت شبکه نامتعادل

برای نمایش عملکرد کنترل کننده‌ها تحت شبکه نامتعادل، شبیه‌سازی زمانی انجام شده است که ژنراتور القایی دوسو تغذیه در حالت جزیره‌ای و با شبکه نامتعادل مورد بهره‌برداری قرار گرفته باشد. همان‌طور که شکل (۷) نشان می‌دهد حتی در شرایط نامتعادلی و نوسانات توانی نیز در حالت جزیره‌ای شدن، توان تزریقی به بار از طرف شبکه صفر می‌شود و کل توان بار از طرف مجموعه ژنراتور القایی دوسو تغذیه و باتری ذخیره‌ساز انرژی تأمین می‌گردد.



شکل (۷): توان اکتیو و توان راکتیو باتری ذخیره‌ساز انرژی و توان اکتیو و راکتیو شبکه در شبکه نامتعادل و جزیره‌ای ژنراتور القایی دوسو تغذیه

#### ۷. نتیجه‌گیری

این مقاله یک استراتژی کنترلی ساده را برای کنترل هم‌زمان فرکانس و ولتاژ در مبدل جانبی روتور و کنترل توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شبکه با کمک باتری ذخیره‌ساز انرژی در حالت تعادل، عدم تعادل، خطا و



		$v_n = 480 \text{ V}$ $f_n = 60 \text{ Hz}$
	توربین بادی ۴	$P_n = 275 \text{ MW}$ $v_n = 480 \text{ V}$ $f_n = 60 \text{ Hz}$
ترانسفورماتور ۱	ترانسفورماتور	$\Delta - \text{Ag}, V_{1(\text{ph-ph})} (V_{\text{rms}}) = 208 \text{ V}$ $R_{1(\text{p.u.})} = 0.02$ $X_{1(\text{p.u.})} = 0.4$ $V_{2(\text{ph-ph})} (V_{\text{rms}}) = 450 \text{ V}$ $R_{2(\text{p.u.})} = 0.02$ $X_{2(\text{p.u.})} = 0.4$
	ترانسفورماتور ۲	$\Delta - \text{Ag}, V_{1(\text{ph-ph})} (V_{\text{rms}}) = 13/8 \text{ kV}$ $R_{1(\text{p.u.})} = 0.027$ $X_{1(\text{p.u.})} = 0.8$ $V_{2(\text{ph-ph})} (V_{\text{rms}}) = 325/269 \text{ V}$ $R_{2(\text{p.u.})} = 0.027$ $X_{2(\text{p.u.})} = 0.8$
ترانسفورماتور ۲	ترانسفورماتور	$\Delta - \text{Ag}, V_{1(\text{ph-ph})} (V_{\text{rms}}) = 208 \text{ V}$ $R_{1(\text{p.u.})} = 0.02$ $X_{1(\text{p.u.})} = 0.4$ $V_{2(\text{ph-ph})} (V_{\text{rms}}) = 450 \text{ V}$ $R_{2(\text{p.u.})} = 0.02$ $X_{2(\text{p.u.})} = 0.4$
	ترانسفورماتور ۲	$\Delta - \text{Ag}, V_{1(\text{ph-ph})} (V_{\text{rms}}) = 13/8 \text{ kV}$ $R_{1(\text{p.u.})} = 0.027$ $X_{1(\text{p.u.})} = 0.8$ $V_{2(\text{ph-ph})} (V_{\text{rms}}) = 325/269 \text{ V}$ $R_{2(\text{p.u.})} = 0.027$ $X_{2(\text{p.u.})} = 0.8$
ترانسفورماتور ۳	ترانسفورماتور	$\Delta - \text{Ag}, V_{1(\text{ph-ph})} (V_{\text{rms}}) = 208 \text{ V}$ $R_{1(\text{p.u.})} = 0.02$ $X_{1(\text{p.u.})} = 0.4$ $V_{2(\text{ph-ph})} (V_{\text{rms}}) = 450 \text{ V}$ $R_{2(\text{p.u.})} = 0.02$ $X_{2(\text{p.u.})} = 0.4$
	ترانسفورماتور ۲	$\Delta - \text{Ag}, V_{1(\text{ph-ph})} (V_{\text{rms}}) = 13/8 \text{ kV}$ $R_{1(\text{p.u.})} = 0.027$ $X_{1(\text{p.u.})} = 0.8$ $V_{2(\text{ph-ph})} (V_{\text{rms}}) = 325/269 \text{ V}$ $R_{2(\text{p.u.})} = 0.027$ $X_{2(\text{p.u.})} = 0.8$
ترانسفورماتور ۴	ترانسفورماتور	$\Delta - \text{Ag}, V_{1(\text{ph-ph})} (V_{\text{rms}}) = 208 \text{ V}$ $R_{1(\text{p.u.})} = 0.02$ $X_{1(\text{p.u.})} = 0.4$ $V_{2(\text{ph-ph})} (V_{\text{rms}}) = 450 \text{ V}$ $R_{2(\text{p.u.})} = 0.02$ $X_{2(\text{p.u.})} = 0.4$
	ترانسفورماتور ۲	$\Delta - \text{Ag}, V_{1(\text{ph-ph})} (V_{\text{rms}}) = 13/8 \text{ kV}$ $R_{1(\text{p.u.})} = 0.027$ $X_{1(\text{p.u.})} = 0.8$ $V_{2(\text{ph-ph})} (V_{\text{rms}}) = 325/269 \text{ V}$ $R_{2(\text{p.u.})} = 0.027$ $X_{2(\text{p.u.})} = 0.8$
$V_{\text{dc}}$		۹۶۰ V

$V_r$	مرجع ولتاژ
$V^+$	توالی مثبت ولتاژ
$V^-$	توالی منفی ولتاژ
$T_e$	گشتاور الکتریکی
$\beta$	پارامتر ثابت بزرگتر از ۱
$\omega_b$	سرعت مبنای توربین
$\omega_t$	سرعت توربین
$\omega_r$	سرعت ترتیبی
$\{x\}_{\text{new}}$	مکان جدید هر مستعمره
$\{x\}_{\text{old}}$	مکان قبلی هر مستعمره

ضمیمه

جدول (الف): اطلاعات سیستم مورد بررسی

ژنراتور	ژنراتور ۱	$P_n = 200 \text{ MW}$ $v_n = 13/8 \text{ kV}$ $K_d = 0$ $R = 0.2215 \text{ pu}$ $X = 0.72 \text{ pu}$ $p_m = 0.721834 \text{ pu}$ $V_f = 1/0.37 \text{ pu}$
	ژنراتور ۲	$P_n = 200 \text{ MW}$ $v_n = 13/8 \text{ kV}$ $K_d = 0$ $R = 0.2215 \text{ pu}$ $X = 0.72 \text{ pu}$ $p_m = 0.721834 \text{ pu}$ $V_f = 1/0.37 \text{ pu}$
	ژنراتور ۳	$P_n = 200 \text{ MW}$ $v_n = 13/8 \text{ kV}$ $K_d = 0$ $R = 0.2215 \text{ pu}$ $X = 0.72 \text{ pu}$ $p_m = 0.721834 \text{ pu}$ $V_f = 1/0.37 \text{ pu}$
	ژنراتور ۴	$P_n = 200 \text{ MW}$ $v_n = 13/8 \text{ kV}$ $K_d = 0$ $R = 0.2215 \text{ pu}$ $X = 0.72 \text{ pu}$ $p_m = 0.721834 \text{ pu}$ $V_f = 1/0.37 \text{ pu}$
توربین بادی ۱	توربین بادی ۱	$P_n = 275 \text{ MW}$ $v_n = 480 \text{ V}$ $f_n = 60 \text{ Hz}$
	توربین بادی ۲	$P_n = 275 \text{ MW}$ $v_n = 480 \text{ V}$ $f_n = 60 \text{ Hz}$
	توربین بادی ۳	$P_n = 275 \text{ MW}$

- [1] Xia, H., Li, Q., Xu, R., Chen, T., Wang, J., Hassan, M.A.S. and Chen, M., "Distributed Control Method for EcoNomic Dispatch in Islanded Microgrids with Renewable Energy Sources", IEEE Access, Vol. 6, pp. 21802–21811, 2018.
- [۲] برایتی، حسن، امین‌زاده، هادی، «کنترل توان و فرکانس بار مبتنی بر روش کنترلی شیب افقی بهبودیافته در سیستم ترکیبی توربین بادی، فتولتائیک و پیل سوختی در ریزشبکه‌های مستقل»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۶، شماره ۱، صفحه ۳۹-۲۸، ۲۰۱۶.
- [3] El-Fergany, A.A. and El-Hameed, M.A. "Efficient Frequency Controllers for Autonomous Two-Area Hybrid Microgrid System Using Social-Spider Optimiser", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 11, No. 3, pp.637-648, 2017.
- [4] Nosrati, K., Mansouri, H.R. and Saboori, H., "Fractional-order PID Controller Design of Frequency Deviation in a Hybrid Renewable Energy Generation and Storage System," CIRED - Open Access Proc. J., Vol. 20, No. 1, pp. 1148–1152, 2017.
- [5] Tahir, K., Belfedal, C., Allaoui, T., Denai, M. and Doumi, M.H., "A New Sliding Mode Control Strategy for Variable-Speed Wind Turbine Power Maximization", Int. Trans. Electr. Energy Syst., Vol. 28, No. 4, pp. e2513, 2018.
- [6] Hemmati, R., Azizi, N., Shafie-Khah, M. and Catalão, J.P., "Decentralized Frequency-Voltage Control and Stability Enhancement of Standalone Wind Turbine-Load-Battery", Int. J. Electr. Power Energy Syst., Vol. 102, pp. 1–10, 2018.
- [7] Roy, K., Mandal, K.K., Mandal, A.C. and Patra, S.N., "Analysis of Energy Management In Micro Grid – A Hybrid BFOA and ANN Approach", Renew. Sustain. Energy Rev., Vol. 82, pp. 4296–4308, 2018.
- [8] Bektache, A., and Boukhezzar, B., "Nonlinear Predictive Control of a DFIG-Based Wind Turbine for Power Capture Optimization", Int. J. Electr. Power Energy Syst., Vol. 101, pp. 92–102, 2018.
- [9] Tohidi, S. and Behnam, M.I., "A Comprehensive Review of Low Voltage Ride through of Doubly Fed Induction Wind Generators", Renew. Sustain. Energy Rev., Vol. 57, pp. 412–419, 2016.
- [10] Mishra, Y., Mishra, S., Li, F., Dong, Z.Y. and Bansal, R.C., "Small-Signal Stability Analysis of a DFIG-Based Wind Power System Under Different Modes of Operation," IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 24, No. 4, pp. 972–982, 2009.
- [11] Rahimi, M., "Drive Train Dynamics Assessment and Speed Controller Design in Variable Speed Wind Turbines", Renew. Energy, Vol. 89, pp. 716–729, 2016.
- [12] Yan, X., Venkataramanan, G., Wang, Y., Dong, Q. and Zhang, B., "Grid-Fault Tolerant Operation of a DFIG Wind Turbine Generator Using a Passive Resistance Network", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 26, No. 10, pp. 2896–2905, 2010.
- [13] Mohammadi, J., Afsharnia, S., Vaez-Zadeh, S. and Farhangi, S., "Improved Fault Ride through Strategy for Doubly Fed Induction Generator Based Wind Turbines Under both Symmetrical and Asymmetrical Grid Faults", IET Renew. Power Gener., Vol. 10, No. 8, pp. 1114–1122, 2016.
- [14] Tohidi, S., Oraee, H., Zolghadri, M.R., Shao, S. and Tavner, P., "Analysis and Enhancement of Low-Voltage Ride-Through Capability of Brushless Doubly Fed Induction Generator", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 60, No. 3, pp. 1146–1155, 2013.
- [15] Vidal, J., Abad, G., Arza, J. and Aurtenechea, S., "Single-Phase DC Crowbar Topologies for Low Voltage Ride Through Fulfillment of High-Power Doubly Fed Induction Generator-Based Wind Turbines", IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 28, No. 3, pp. 768–781, 2013.
- [16] Fazeli, M., Asher, G.M., Klumpner, C., Yao, L. and Bazargan, M., "Novel Integration of Wind Generator-Energy Storage Systems within Microgrids", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 3, No. 2, pp. 728–737, 2012.
- [17] Wang, S., Hu, J., and Yuan, X., "Virtual SynchroNous Control for Grid-Connected DFIG-Based Wind Turbines", IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron., Vol. 3, No. 4, pp. 932–944, 2015.
- [18] Hemmati, R. and Azizi, N., "Optimal Control Strategy on Battery Storage Systems for Decoupled Active-Reactive Power Control and Damping oscillations", J. Energy Storage, Vol. 13, pp. 24–34, 2017.
- [19] Hemmati, R. and Azizi, N., "Nonlinear Modeling and Simulation of Battery Energy Storage Systems Incorporating Multiband Stabilizers Tuned by Meta-Heuristic Algorithm", Simul. Model. Pract. Theory, Vol. 77, pp. 212–227, 2017.
- [20] Liao, K., He, Z., Wang, Y. and Yang, J., "An Input-Output Linearization Algorithm-Based Inter-Area Damping Control Strategy for DFIG", IEEE Trans. Electr. Electron. Eng., Vol. 13, No. 1, pp. 32–37, 2018.
- [21] Moghadam, F.K., Ebrahimi, S., Oraee, A. and Velni, J.M., "Vector Control Optimization of DFIGs under Unbalanced Conditions", Int. Trans. Electr. Energy Syst., p. e2583, 2018.
- [22] Justo, J.J., Mwasilu, F. and Jung, J.W., "Doubly-fed Induction Generator based wind Turbines: A Comprehensive Review of Fault Ride-Through Strategies", Renew. Sustain. Energy Rev., Vol. 45, pp. 447–467, 2015.
- [23] Prajapat, G.P., Senroy, N. and Kar, I.N., "Wind Turbine Structural Modeling Consideration for Dynamic Studies of DFIG Based System", IEEE Trans. Sustain. Energy, Vol. 8, No. 4, pp. 1463–1472, 2017.
- [24] Sardouie, S.H., Albera, L., Shamsollahi, M.B. and Merlet, I., "An Efficient Jacobi-Like Deflationary ICA Algorithm: Application to EEG DeNoising", IEEE Signal Process. Lett., Vol. 22, No. 8, pp. 1198–1202, 2015.
- [۲۵] ابراهیمی، عادل، احمدیان، محمد، شیوایی، مجتبی، قبادی، مهدی، «کنترل زمان حقیقی ولتاژ و توان راکتور در شبکه‌های توزیع متصل به تولید پراکنده با استفاده از الگوریتم رقابت استعماری و تئوری فازی»، نشریه مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۱، شماره ۱، صفحه ۲۷-۱۹، ۲۰۱۱.