

## افزایش اینرسی در ریز شبکه‌های با اینرسی کم

پویا معقولی<sup>۱</sup>، اسماعیل زنگنه<sup>۲</sup>، ناصر خردمند<sup>۳</sup> مهدی انصاری پور<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، دانشگاه شاهد، P.maghoul@shahed.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری، دانشگاه شاهد، esmaeilzangane@ut.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم و فنون مازندران، naser\_kheradmand@ustmb.ac.ir

<sup>۴</sup> کارشناسی ارشد دانشگاه تهران، ansaripour\_m@ut.ac.ir

### چکیده:

در برخی مناطق دورافتاده و بافاصله زیاد از شبکه سراسری برق، یکی از گزینه‌ها برای تأمین انرژی الکتریکی استفاده از شبکه‌های مستقل با تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر انرژی است. ژنراتورهای تولید توان از منابع تجدیدپذیر دارای اینرسی کمی هستند، درحالی‌که برخی منابع تجدیدپذیر (مانند سلول‌های خورشیدی) ذاتاً بدون اینرسی‌اند. لذا این نوع شبکه‌ها، شبکه با اینرسی کم نیز نامیده می‌شود. شبکه با اینرسی کم در برابر خطاهای ناگهانی آسیب‌پذیر بوده و امکان ناپایداری آن‌ها در اثر اختلال‌های فرکانسی معمولی نیز وجود دارد. در صورت اغتشاش در شبکه‌های مستقل برای حفظ پایداری شبکه و کنترل فرکانس معمولاً بار زدایی یا خارج نمودن بخشی از ظرفیت تولید نیاز است. درحالی‌که با تزریق یا جذب توان لحظه‌ای به موقع در شبکه توسط یک ذخیره‌ساز مناسب، می‌توان پایداری شبکه را بدون وقفه در تأمین بار پایداری شبکه را حفظ نمود که این روش ایجاد اینرسی مجازی در شبکه با اینرسی کم نامیده می‌شود. در این مقاله استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار جهت ایجاد اینرسی مجازی در شبکه‌های مستقل با اینرسی کم پیشنهاد می‌گردد. جهت پیاده‌سازی طرح پیشنهادی از شبیه‌ساز سیمولینک متلب استفاده شده و شبکه مورد مطالعه شبکه‌ای کوچک است که برای کاهش اینرسی در آن بیشتر توان از طریق سلول‌های خورشیدی تأمین می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی اثبات می‌کند، عکس‌العمل سریع سیستم ذخیره‌ساز چرخ‌طیار در شبکه با اینرسی کم مورد مطالعه در ایجاد اینرسی مجازی مناسب بوده و می‌تواند باعث بالا رفتن حاشیه پایداری و افزایش اینرسی در شبکه‌های مستقل با اینرسی کم گردد.

کلید واژه- ریز شبکه‌ها، خطاهای فرکانسی، اینرسی مجازی، سیستم ذخیره‌ساز چرخ‌طیار

### ۱- مقدمه

از منبع باد و خورشید انجام شده است [1,2,3,4]. استفاده از منابع تجدیدپذیر به علت نوسانی بودن منبع انرژی آن‌ها با مشکلاتی روبرو است. از این رو برای کاهش نوسانات توان در این نوع شبکه‌ها از مبدل‌های الکترونیک قدرت برای تزریق توان تولیدی به شبکه استفاده می‌گردد. استفاده از مبدل باعث مخفی ماندن اینرسی ژنراتور از دید شبکه خواهد شد [5]. یعنی اینرسی ژنراتور از شبکه جدا خواهد شد درحالی‌که برخی از ژنراتورهای منابع تجدید-پذیر (سلول‌های خورشیدی و سلول‌های سوختی) واقعاً بدون اینرسی‌اند. بنابراین اینرسی کلی نیز کاهش یافته و شبکه به شبکه-ای با اینرسی کم یا بدون اینرسی تبدیل می‌شود [6]. شبکه با اینرسی کم به علت نداشتن انرژی جنبشی چرخشی با مشکل پایداری مواجه خواهد بود. از آنجایی که معمولاً شبکه‌های قدرت در نزدیکی حاشیه پایداری خور مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، با

در برخی مناطق دورافتاده و دور از شبکه سراسری برق استفاده از شبکه مستقل به جای احداث خطوط انتقال توان ترجیح داده می‌شود. اخیراً گرایش به تولید انرژی الکتریکی از منابع تجدیدپذیر انرژی به دلیل محدودیت، گرانی و آلودگی زیست‌محیطی سوخت-های فسیلی در شبکه‌های کوچک مستقل افزایش یافته است. دو منبع انرژی تجدیدپذیر باد و خورشید برای تولید توان در این شبکه‌ها به علت در دسترس بودن و پیشرفت فن‌آوری ژنراتورهای آن‌ها بیشتر مورد توجه قرار دارند، درحالی‌که هر کدام معایب خاص خود را دارند. برای غلبه بر این مشکلات این دو منبع انرژی اغلب از ترکیب این دو منبع انرژی در کنار هم در شبکه‌های مستقل استفاده می‌شود. تحقیقات مختلفی بروی استفاده ترکیبی

مرجع [13] سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار را برای کاهش نوسان فرکانس در کنار مزرعه بادی مورد استفاده قرار داده است. [14] از اینرسی روتور توربین بادی با ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم برای بالا بردن پایداری شبکه استفاده می‌کند. درحالی‌که اینرسی توربین به دلیل ماهیت غیرقابل کنترل بودن و نوسانی بودن باد دارای محدودیت است [15]. همچنین [16] بهبود کنترل فرکانس در شبکه ترکیبی دیزل و سلول خورشیدی را با استفاده از ذخیره‌ساز با پاسخ ابرسانا بهبود بخشیده است. درحالی‌که در این مقاله از شبکه‌ای استفاده شده که بیشتر توان آن از طریق سلول خورشیدی تأمین می‌شود و نیز ژنراتور سنکرونی در شبکه وجود ندارد. بلکه توربین بادی با ژنراتور القایی در کنار سلول خورشیدی استفاده شده است که اینرسی شبکه را به مراتب کاهش داده و کنترل فرکانس را مشکل‌تر می‌سازد. تفاوت شبکه مورد مطالعه با شبکه مورد استفاده در [13] نیز تفاوت اینرسی در شبکه است. از آنجایی که بیشتر توان از طریق سلول خورشیدی تأمین می‌گردد لذا در این کار شبکه، شبکه‌ای با اینرسی کم‌تر و ضعیف‌تر می‌باشد. شبکه مستقل استفاده شده از سلول خورشیدی با توان  $50\text{Kw}$  و توان باد  $15\text{Kw}$  استفاده می‌کند. در این مقاله استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار با توان  $8\text{Kw}$  جهت ایجاد اینرسی مجازی در شبکه با اینرسی کم مذکور استفاده شده است. در ادامه مقاله در بخش دوم شبکه مستقل توضیح داده خواهد شد و مدلسازی سلول خورشیدی و ژنراتور القایی توضیح داده می‌شود، در بخش سوم سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار طراحی شده توضیح داده می‌شود و در بخش چهارم از سیستم ذخیره‌ساز طراحی شده برای بهبود پایداری و کنترل فرکانس شبکه مستقل مورد مطالعه در شرایط مختلف بهره‌برداری استفاده می‌شود و نتایج شبیه‌سازی شرح داده می‌شوند.

## ۲- ریز شبکه

در برخی مناطق دورافتاده و بافاصله زیاد از شبکه سراسری قدرت یکی از گزینه‌ها برای تأمین انرژی الکتریکی استفاده از شبکه‌های

کاهش اینرسی شبکه نوسان‌های کوچک فرکانسی نیز می‌توانند باعث ناپایداری در شبکه بدون اینرسی شوند. با استفاده از ژنراتورهای با اینرسی کم بجای ژنراتورهای سنکرون مرسوم اینرسی شبکه کاهش خواهد یافت. درحالی‌که در اختلال‌های فرکانسی اینرسی جنبشی شبکه نقش مهمی را ایفا می‌کند و آن حفظ پایداری گذرای شبکه می‌باشد. سیستم ذخیره‌ساز انرژی با سرعت پاسخ بالا می‌تواند عملکردی همانند اینرسی در شبکه با اینرسی کم ایفا کند به عبارتی با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز با سرعت پاسخ بالا می‌توان اینرسی را به صورت مجازی در شبکه با اینرسی کم به وجود آورد [7]. این نکته اثبات شده است که استفاده از ذخیره‌سازهای با سرعت پاسخ بالا در کنترل فرکانس عملکرد بهتری نسبت به منابع مرسوم کنترل فرکانس دارند [8]. استفاده از ذخیره‌سازی مثل ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار می‌تواند در هنگام اختلال فرکانسی حتی بهتر از منابع مرسوم موجود [9] با هزینه [10] و آلاینده‌گی [11] کمتر به نوسان فرکانس پاسخ دهد. در این مقاله بهبود کنترل فرکانس و ایجاد اینرسی مجازی در شبکه مستقل با اینرسی کم با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار پیشنهاد می‌شود. سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار از چهار بخش کلی چرخ‌طیار، ماشین الکتریکی، مبدل‌های الکترونیک قدرت پشت به پشت<sup>۱</sup> و یاتاقان‌ها تشکیل شده است [12]. ذخیره‌سازهای انرژی اغلب از مبدل‌های الکترونیک قدرت برای اتصال به شبکه استفا معمولاً و معمولاً به صورت مداوم به شبکه متصل می‌باشند. لذا راندمان بالا و تولید اغتشاشات هارمونیک کم توسط ذخیره‌سازها بسیار پر اهمیت خواهد بود. ماشین الکتریکی وظیفه به چرخش درآوردن چرخ‌طیار را بر عهده دارد و در این مقاله از ماشین سنکرون مغناطیس دائم در طراحی ذخیره‌ساز استفاده شده است. مبدل پشت به پشت این ذخیره‌ساز از دو مبدل مجزای مبدل سمت ماشین و مبدل سمت شبکه تشکیل شده که خروجی DC آن‌ها توسط خازن DC به هم متصل می‌شود.

<sup>۱</sup> Back to back converter

استفاده مبدل در خروجی ژنراتورها باعث می‌شود تا اینرسی آن‌ها از دید شبکه پنهان بماند، بنابراین از نظر اینرسی از شبکه جدا خواهند شد [21]. این نوع ژنراتورها در پاسخ اینرسی شبکه شرکت نمی‌کنند، بنابراین چنین شبکه‌هایی با چالش‌های متفاوتی روبرو هستند [22]:

نفوذ بالای منابع تجدیدپذیر در تولید انرژی با استفاده از مبدل‌های با آرایش‌های گوناگون و ژنراتورهای متفاوت.

استفاده از فن‌آوری‌های گوناگون ذخیره‌سازی انرژی با ثابت زمانی-های مختلف که برخی از آن‌ها از مبدل‌های الکترونیک قدرت جهت اتصال به شبکه استفاده می‌کنند.

یکی از مهم‌ترین مسائل در شبکه‌های مستقل با اینرسی کم که از منابع تجدیدپذیر باد برای تولید انرژی استفاده می‌کنند، حفظ پایداری شبکه وقتی که سرعت وزش باد دارای تغییرات سریع است، می‌باشد. اهمیت این موضوع به این دلیل است که در این نوع شبکه‌های با اینرسی کم، مقدار اندک اینرسی شبکه مربوط به اینرسی توربین‌های بادی می‌باشد که در هنگام تغییرات وزش باد این اینرسی نیز دچار نوسان شده و شبکه بیشتر از هر زمانی آسیب‌پذیر خواهد شد.

در این مقاله دو منبع مرسوم انرژی تجدیدپذیر باد و خورشید برای تولید انرژی الکتریکی مورد مطالعه قرار گرفته است.

سلول خورشیدی

سلول خورشیدی یک عنصر غیرخطی در سیستم‌های الکتریکی است که به صورت یک منبع جریان، همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است مدل می‌گردد. نمودار I-V مرسوم سلول‌های خورشیدی با استفاده از رابطه زیر استخراج می‌گردد [23]

$$I_0 = N_p I_g - N_p I_{sat} \left\{ \exp \frac{qV_0}{AKT_a} \left[ V_0 + \frac{N_s R_s I_0}{N_p} \right] - 1 \right\} - I_{rsh} \quad (1)$$

که در رابطه (۱)  $I_0$  و  $V_0$  جریان و ولتاژ خروجی سلول خورشیدی،  $I_g$  جریان تولیدی،  $I_{sat}$  جریان اشباع معکوس،  $q$  بار یک الکترون،  $K$  ثابت بولتزمن،  $A$  ضریب واقعی سازی،  $T_a$  دمای سلول

مستقل با تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر در دسترس است. در واقع استفاده از این نوع شبکه به جای احداث خطوط انتقال جدید هم از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر خواهد بود و هم با تلفات کمتر در خط نیز همراه خواهد بود. از طرفی با افزایش تقاضای انرژی در سال‌های اخیر رویکرد به استفاده از منابع تجدیدپذیر برای تولید انرژی الکتریکی افزایش پیدا کرده است. باد و خورشید از منابع تجدیدپذیری هستند که فناوری تولید انرژی الکتریکی آن‌ها بیشتر از منابع دیگر مورد توجه قرار است. هر کدام از منابع باد و خورشید دارای معایب مخصوص خود می‌باشند که با استفاده ترکیبی از این دو منبع در شبکه مستقل می‌توان بر برخی محدودیت‌های آن‌ها مانند عدم قطعیت و وقفه در تأمین بار و ... غلبه کرد [17]. به عبارتی این دو منبع انرژی تجدیدپذیر تا حدودی مکمل هم می‌باشند و تقریباً با کاهش یکی از منابع، انرژی منبع دیگر افزایش می‌یابد. به عنوان مثال هنگام ابری شدن هوا وزش باد افزایش خواهد یافت و کاهش تولید توان از انرژی خورشیدی با افزایش تولید از انرژی باد تا حدودی جبران خواهد شد.

در هنگام اغتشاش فرکانسی در شبکه قدرت تعادل بین عرضه و تقاضای توان از بین می‌رود [18] و فرکانس در لحظات اولیه متناسب با اینرسی شبکه تغییر خواهد کرد [19]. اینرسی شبکه، انرژی ذخیره‌شده در قسمت‌های چرخان ژنراتور و موتورهای موجود در شبکه می‌باشد و میزان توانایی شبکه در حفظ پایداری گذرا ه نوسان‌وسان فرکانس را نشان می‌دهد و واحد آن ثانیه است [20]. اساساً اینرسی در ماشین‌های چرخان مقاومت در برابر تغییرات سریع سرعت چرخش است، که در شبکه قدرت به مفهوم مقاومت در برابر تغییرات فرکانس می‌باشد.

با افزایش تمایل به تولید انرژی الکتریکی از منابع تجدیدپذیر به جای تولید انرژی از سوخت فسیلی مرسوم در شبکه‌های مستقل و حتی شبکه‌های قدرت، ژنراتورهای سنکرون مرسوم رفته‌رفته جای خود را به ژنراتورهای انرژی تجدیدپذیر که اغلب از مبدل الکترونیک قدرت برای اتصال به شبکه استفاده می‌کنند، می‌دهند.

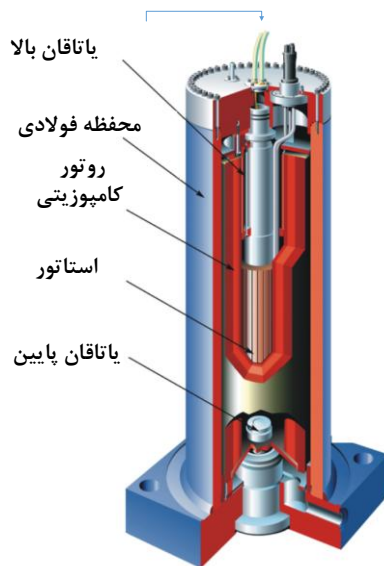
نیز استفاده کرد. یک موتور القایی معمولی نیز بدون نیاز به هیچ‌گونه اصلاحات یا تغییراتی در ساختمان داخلی آن می‌تواند به یک ژنراتور القایی تبدیل شود؛ برای این عمل نیاز است تا یک گرداننده خارجی مانند توربین بادی به صورت مکانیکی روتور موتور القایی را با سرعتی بیش از سرعت سنکرون به حرکت درآورد که در این حالت لغزش ماشین منفی شده و موتور القایی به عنوان یک ژنراتور عمل می‌کند [27]. رابطه معادله لغزش در ماشین القایی را نشان می‌دهد.

$$S = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (5)$$

در رابطه (۵)  $\omega_s$  سرعت سنکرون و  $\omega_r$  سرعت چرخش روتور می‌باشد. با اعمال نیروی خارجی به محور موتور سرعت افزایش‌یافته و لغزش منفی می‌گردد. ژنراتورهای القایی به این دلیل که تقریباً به هیچ تنظیمی نیاز نداشته و کنترل نسبتاً ساده‌ای دارند، به طور معمول در نیروگاه‌های بادی، نیروگاه‌های آبی کوچک و یا سیستم‌های بازیابی گرما و کاهش فشار گاز بالا به فشار پایین به کار گرفته می‌شوند. ژنراتورهای القایی برای تأمین توان باید همواره به یک سیستم قدرت متصل باشند و این توانایی را ندارند تا به صورت مجزا راه‌اندازی شده و شبکه را برق دار کنند.

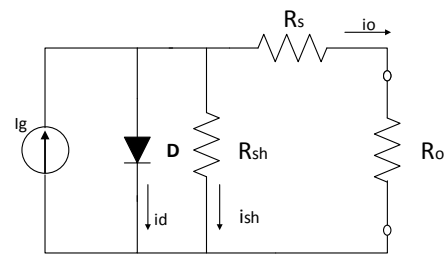
### ۳- سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار

در دهه اخیر، فن‌آوری‌های جدیدی در زمینه‌ی ذخیره‌سازی انرژی به بازار آمده‌اند. این فن‌آوری‌ها انتقال سریع انرژی را فراهم می‌نمایند. سیستم ذخیره‌سازی انرژی چرخ‌طیار یکی از ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی با سرعت پاسخ بالا می‌باشد. شکل (۲) نمای کلی سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار را نشان می‌دهد.



شکل (۲) نمای کلی سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار

خورشیدی،  $N_p$  تعداد آرایه‌های موازی و  $N_s$  تعداد آرایه‌های سری و  $I_{rsh}$  جریان مقاومت موازی داخلی است.



شکل (۱) مدار معادل سلول خورشیدی

جریان اشباع ( $I_{sat}$ ) مطابق با دمای سلول تغییر می‌کند که رابطه (۲) معادله آن را نشان می‌دهد [27].

$$I_{sat} = I_{or} \left[ \frac{T_a}{T_{ref}} \right]^3 \exp \left[ \frac{qE_g}{KT_a} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_a} \right) \right] \quad (2)$$

$$I_g = [I_{sc} + I_t(T_a - T_{ref})] \frac{S_i}{1000} \quad (3)$$

که در رابطه (۲) و رابطه (۳)  $I_{or}$  جریان اشباع در  $T_{ref}$  است و  $E_g$  انرژی فاصله بین باندها،  $I_t$  ضریب دمای مرجع،  $I_{sc}$  جریان اتصال کوتاه،  $I_{sh}$  جریان شاخه موازی مقاومت داخلی نیز از رابطه به دست می‌آید [27].

$$I_{rsh} = \frac{V_o + N_s I_o R_s}{N_s R_{sh}} \quad (4)$$

که در رابطه (۴)  $R_{sh}$  مقاومت داخلی سلول خورشیدی است.

توربین بادی با استفاده از ژنراتور القایی

در تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی فن‌آوری‌های گوناگون ماشین الکتریکی مانند ماشین القایی [24] یا ماشین سنکرون مغناطیس دائم [25] و ... با توجه به مزایا و معایب آن‌ها می‌توان به کاربرد. در تولید برق بادی معمولاً از ژنراتورهای القایی به دلیل مزایایی چون ساختار محکم، نیاز به تعمیرات کمتر و ارزان بودن بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین در مطالعات شبکه‌های مستقل بر پایه تولید انرژی از باد این نوع ژنراتور بیشتر مورد توجه قرار داشته و مورد مطالعه قرار گرفته است [26].

در ماشین القایی یا ماشین سنکرون همواره سرعت چرخش با سرعت سنکرون نابرابر ولی در حدود سرعت سنکرون خواهد بود. در حالت موتور سرعت چرخش روتور کمتر از سرعت سنکرون و در حالت ژنراتوری سرعت چرخش بیشتر سرعت سنکرون خواهد بود. ژنراتور القایی ژنراتور الکتریکی جریان متناوب است که می‌توان با به‌کارگیری اصول موتورهای القایی از آن در تولید برق

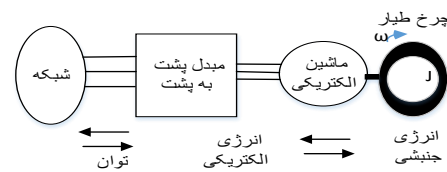
آن  $r$  فاصله هر جزء دیفرانسیلی حجم از محور سیستم است و  $\omega$  سرعت زاویه‌ای است. با توجه به رابطه **Error! Reference source not found.** با استفاده از حجم چرخان در سرعت بالا می‌توان میزان قابل توجهی انرژی را ذخیره نمود که در صورت نیاز با توجه به ساختار چرخش طیار با کاهش سرعت می‌توان انرژی ذخیره‌شده را با چگالی توان بالا بازیافت نمود. با استفاده از این اصل می‌توان ذخیره‌سازی را طراحی نمود که توانایی ارائه سریع انرژی ذخیره‌شده با چگالی بالا را دارد.

در سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار تبدیل انرژی جنبشی به انرژی الکتریکی و بالعکس توسط ماشین الکتریکی صورت می‌گیرد. در ذخیره‌ساز چرخ‌طیار طراحی شده در این مقاله از ماشین سنکرون مغناطیس دائم استفاده شده است. موتورهای سنکرون آهنربای دائم (PM<sup>۲</sup>) تغذیه شده توسط اینورتر، به طور گسترده‌ای در کاربردهای صنعتی استفاده می‌شوند. موتورهای PM دارای چندین مزیت نظیر بازده بالا، ضریب توان بالا، چگالی توان بالا در مقایسه با موتورهای DC و موتورهای القایی هستند [29]. در کاربردهای عملکرد طولانی بدون وقفه مانند خودروهای الکتریکی و محرکه‌های کمپرسور، بازده یکی از کاندیداهای مناسب ماشین الکتریکی می‌باشد. لذا برای کاربرد در شبکه، ذخیره‌ساز چرخ‌طیار با ماشین الکتریکی سنکرون مغناطیس دائم بیشتر مورد توجه قرار دارد [30]. مشخصات ماشین سنکرون مغناطیس دائم مورد استفاده در این مقاله در جدول (۱) داده شده است. ماشین PM مورد استفاده از طریق یک مبدل پشت به پشت به شبکه متصل است. مبدل پشت به پشت از دو مبدل مجزا تشکیل شده است که این مبدل‌ها با قرارگیری مناسب در حالت یکسو سازی و اینورتری امکان تبادل دوطرفه توان را محیا می‌کنند [31]. در کلیدزنی مبدل‌های مورد استفاده از روش PWM سینوسی با حامل موج مثلثی استفاده شده است.

جدول (۱) مشخصات ماشین سنکرون مغناطیس دائم مورد استفاده [32]

$L_d$	۰/۰۰۸۵	$P$	۴
-------	--------	-----	---

اساس کار سیستم ذخیره‌سازی انرژی چرخ‌طیار به این صورت است که در حالت افزایش توان (افزایش فرکانس) در شبکه سرعت چرخ‌طیار<sup>۳</sup> توسط موتور/ژنراتور سیستم افزایش می‌یابد. در این صورت انرژی به صورت جنبشی در بخش چرخان سیستم ذخیره‌شده و در صورت وقوع کمبود توان در شبکه (کاهش فرکانس)، سیستم با کاهش سرعت انرژی جنبشی ذخیره‌شده را توسط موتور/ژنراتور به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. توان تولیدشده توسط مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه تزریق می‌شود.



شکل (۳) عملکرد کلی سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار از چرخش حجمی با سرعت بالا جهت ذخیره انرژی به شکل انرژی جنبشی استفاده می‌کند [28]. در سیستم‌های مکانیکی اصولاً از چرخ‌طیار برای یکنواخت کردن حرکت در سیستم‌های دورانی استفاده می‌گردد. به عبارتی چرخ‌طیار ارتباط توان ورودی و خروجی را با کاهش نوسان در حرکت امکان‌پذیر می‌سازد که علت این امر توانایی یک حجم چرخنده در ذخیره کردن انرژی جنبشی است. مقدار انرژی ذخیره‌شده از رابطه محاسبه می‌شود.

$$E_{fess} = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (۶)$$

$$J = \int r^2 dm \quad (۷)$$

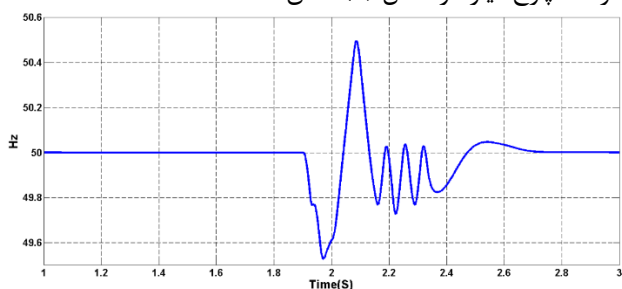
در روابط **Error! Reference source not found.** و **Error! Reference source not found.**  $J$  ممان اینرسی است و از رابطه **Error! Reference source not found.** به دست می‌آید که در

<sup>۴</sup> Permanent Magnet machine

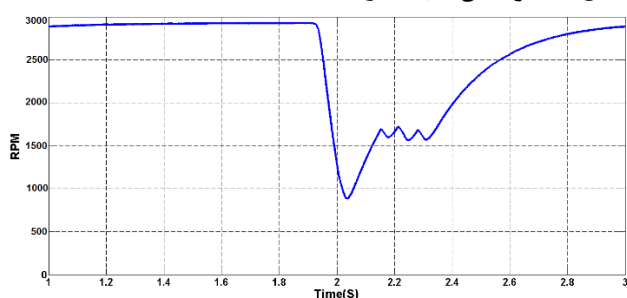
<sup>۳</sup> flywheel

شکل (۴) شمای کلی شبکه مستقل مورد مطالعه

جهت مشاهده عملکرد شبکه مستقل مورد مطالعه در برابر اغتشاشات مختلف فرکانسی مانند تغییرات در تولید و بار، شبکه مستقل مورد مطالعه در سیمولینک متلب شبیه‌سازی شده است. سلول خورشیدی شبیه‌سازی شده دارای توان ۵۰KW و ولتاژ ۳۸۰۷ در بار نامی است و جهت تزریق توان آن به شبکه از مبدل دو سطحی سه‌فاز با روش کلیدزنی PWM سینوسی با حامل موج مثلثی استفاده شده است. در توربین بادی از ژنراتور القایی برای تولید انرژی استفاده شده است، که توان نامی ماشین القایی ۱۵KW و ولتاژ نامی آن در بار نامی ۳۸۰۷ است. شبکه دارای دو بار مجزای ۴۰KW و ۱۰KW است که در حالت معمول که سلول خورشیدی در حال تولید توان است کل بار به شبکه متصل می‌باشد و هنگامی که توان خورشیدی تولید نمی‌شود بار ۴۰KW نیز از شبکه جدا می‌گردد. پایداری گذرای شبکه با اضافه کردن سیستم ذخیره‌ساز شرح داده شده در بخش ۳ توسط ایجاد اینرسی مجازی با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار بهبود داده شده است. جهت بررسی عملکرد سیستم ذخیره‌ساز چرخ‌طیار در افزایش اینرسی در شبکه با اینرسی کم، این ذخیره‌ساز در یک اختلال به وجود آمده در شبکه با اینرسی کم مورد بررسی قرار گرفته است. این اختلال فرکانسی در زمان  $t=1.9$  تا  $t=2$  در شبکه به وجود ایجاد شده و باعث نوسان فرکانس در شبکه شده است. این نوسان فرکانس در شکل (۵) نشان داده شده است. سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار در برابر این نوسان فرکانس در شبکه عکس‌العمل نشان داده و جهت ایجاد اینرسی مجازی، سرعت چرخ‌طیار را متناسب با نوسان فرکانس تغییر می‌دهد. این تغییرات سرعت چرخ‌طیار در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۵) فرکانس شبکه در لحظه خطا



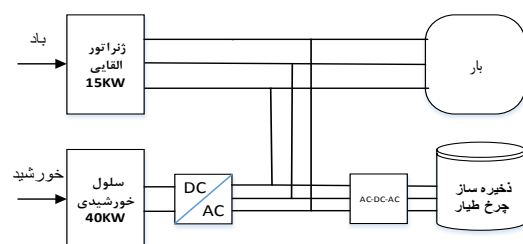
$L_d$	۰/۰۰۸۵	$J$	۰/۰۵۸
$R_c$	۲۰۰	$B$	۰/۰۰۱۸۸۹
$R_a$	۲/۸۷۵	$\lambda_f$	۰/۱۹۲

#### ۴- شبکه مستقل با اینرسی کم مورد مطالعه و بررسی عملکرد سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار طراحی شده در ایجاد اینرسی مجازی در این شبکه

در برخی مناطق مانند مناطق کویری استفاده از انرژی خورشیدی برای تولید انرژی نسبت به تولید انرژی از منابع دیگر دارای برتری است. همچنین در برخی موارد استفاده از پیل سوختی برای تولید انرژی مورد توجه قرار دارد. از آنجایی که ژنراتورهایی مانند پیل سوختی و سلول خورشیدی اساساً بدون اینرسی‌اند لذا در شبکه‌هایی که بخش عمده تولید آن‌ها از این منابع تأمین می‌گردد، شبکه‌هایی با اینرسی کم و در برابر تغییرات فرکانسی ضعیف خواهند شد. هدف این مقاله بررسی ایجاد اینرسی مجازی و افزایش پایداری گذرای شبکه‌های مستقل با اینرسی کم با استفاده از ذخیره‌ساز با سرعت بالا می‌باشد. شبکه مورد مطالعه در این مقاله یک شبکه کوچک با اینرسی کم ۶۵KW است که بخش عمده تولید آن توسط (۵۰KW) توسط ژنراتور بدون اینرسی خورشیدی تأمین می‌گردد و ۱۵KW آن نیز توسط توربین بادی تغذیه خواهد شد. مشخصات ماشین القایی مورد استفاده در جدول (۲) نشان داده شده است. جهت بهبود کنترل فرکانس و افزایش پایداری گذرای شبکه مورد مطالعه یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار با توان ۸KW مورد استفاده قرار گرفته است. شکل (۴) شمای کلی شبکه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول (۲) مشخصات ژنراتور القایی مورد استفاده

$L_s$	۰/۰۰۵۸۳۹	$P$	۲
$L_r$	۰/۰۰۵۸۳۹	$J$	۰/۱
$R_r$	۱/۳۵	$B$	۰/۰۰۲۹۸۵
$R_s$	۱/۴۰۵	$P_n$	۱۵KW



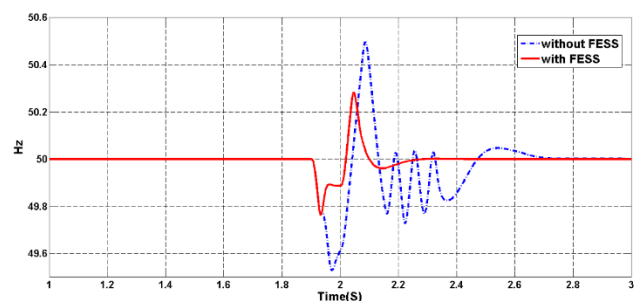
## مراجع

- [1] P. F. Puleston F. Valenciaga, "Supervisor Control for a Stand-Alone Hybrid Generation System Using Wind and Photovoltaic Energy," *IEEE Transactions On Energy Conversion*, vol. 23, no. 3, June 2005.
- [2] M. H. Nehrir, C. Wang, "Power Management of a Stand-Alone Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Energy System," *IEEE Transactions On Energy Conversion*, vol. 23, no. 3, September 2008.
- [3] A. Ahmed. Mahmoud, "Power conditioning unit for small scale hybrid PV-Wind generation system," DURHAM university, PHD Thesis 2010.
- [4] M. Amin, "Efficiency and Power Density Improvement of Grid-Connected Hybrid Renewable Energy Systems utilizing High Frequency-Based Power Converter," Florida International University, PHD Thesis 2012.
- [5] A. and Erlich, I Azmy, "Dynamic Simulation of Fuel Cells and Micro turbines Integrated with a Multi-Machine Network," in *Power Tech Conference Proceedings, IEEE*, Bologna, Italy, 2003, pp. 550- 555.
- [6] M. Benidris and J. Mitra, "Enhancing stability performance of renewable energy generators by utilizing virtual inertia," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA, July 2012, pp. 1 - 6.
- [7] Bruno François, Gilles Malarange Gauthier Delille, "Dynamic Frequency Control Support by Energy Storage to Reduce the Impact of Wind and Solar Generation on Isolated Power System's Inertia," *IEEE trans*, vol. 3, pp. 931-939, OCTOBER 2012.
- [8] G. Delille, B. Francois, and G. Malarange, "Dynamic frequency control support: A virtual inertia provided by distributed energy storage to isolated power systems," in *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), IEEE PES*, Gothenburg, Oct 2010, pp. 1-8.
- [9] Khoi Vu, R. Masiello, and R. Fioravanti, "Benefits of fast-response storage devices for system regulation in ISO markets," in *Power & Energy Society General Meeting, PES '09. IEEE*, Calgary, AB, July 2009, pp. 1-8.
- [10] Johan Enslin Gerard Thijssen, "Cost Comparison for a 20 MW Flywheel-based Frequency Regulation Power Plant," in *KEMA, BPCC.0003.002*, 2007.

شکل (۶) تغییرات سرعت سیستم ذخیره‌ساز انرژی

چرخ‌طیار برای پاسخ به نوسان فرکانس

با عملکرد مناسب سیستم ذخیره‌ساز چرخ‌طیار و تزریق به موقع و مناسب توان به شبکه، شبکه در حضور سیستم ذخیره‌ساز چرخ-طیار در برابر اختلال فرکانسی عملکرد بهتری داشته و افت فرکانس از ۴۹/۶ به حدود ۴۹/۸ رسیده است. همچنین فرکانس شبکه زودتر به حالت پایدار رسیده است. فرکانس شبکه بعد از عملکرد سیستم ذخیره‌ساز چرخ‌طیار در هنگام اختلال فرکانس در شکل (۷) نشان داده شده است. همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، حضور سیستم ذخیره‌ساز چرخ‌طیار در شبکه با اینرسی کم باعث افزایش اینرسی شبکه شده و نوسان فرکانس را کاهش داده است.



شکل (۷) افزایش اینرسی در شبکه توسط سیستم ذخیره ساز انرژی چرخ‌طیار

## ۵- نتیجه‌گیری

اخیراً شبکه مستقل و تولید انرژی الکتریکی با استفاده از منابع تجدیدپذیر در مناطق دورافتاده و دور از شبکه قدرت مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از ژنراتورهای غیر سنکرون ژنراتورهای که اساساً بدون اینرسی‌اند (مانند سلول خورشیدی) در این شبکه‌ها باعث کاهش قابل توجه اینرسی در آنها شده لذا به شبکه با اینرسی کم نیز معروف‌اند. در شبکه‌های مستقل مورد مطالعه بیشتر از انرژی خورشیدی برای تولید انرژی استفاده شده است لذا شبکه‌ای تقریباً بدون اینرسی می‌باشد. در این مقاله بهبود پایداری گذرا و کنترل فرکانس شبکه‌های با اینرسی کم توسط ایجاد اینرسی مجازی با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی چرخ‌طیار پیشنهاد شده است. با طراحی و استفاده از سیستم ذخیره‌ساز چرخ‌طیار در شبکه با اینرسی کم در این کار پایداری گذرای شبکه مستقل بهبود داده شده است و اینرسی شبکه جهت پاسخ به اختلال فرکانسی افزایش پیدا کرده است.

- [22] F. Gonzalez-Longatt, "Impact of Synthetic Inertia from Wind Power on the Protection/Control Schemes of Future Power Systems: Simulation Study," in *presented at the DPSP 2012 - Protecting the Smart Grid. The 11th International Conference on Developments in Power System Protection*, Birmingham, United Kingdom, 2012.
- [23] J. Lin, and C. Shen C. Hua, "Implementation of a DSP controlled photovoltaic system with peak power tracking," *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, vol. 45, no. 1, pp. 99-107, Feb 1998.
- [24] E. Hiraki, M. Nakaoka, and O. Noro T. Ahmed, "Three-phase self-excited induction generator driven by variable speed primemover for clean renewable energy utilizations and its terminal voltage regulation, Characteristics by static VAR compensator," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 2, pp. 693-700, Oct 2003.
- [25] G. Barakat, B. Dakyo, and X. Roboam E. J. R. Sambatra, "Safety operation locations of permanent magnets synchronous machine for stand alone wind energy converter," in *presented at the Eur. Conf. Power ElectApp., EPE'03*, Toulouse, France, Sep. 2003, p. CDROM.
- [26] Djamila Rekioua (ZIANI), Toufik Rekioua, and Abdelmouna im Tounzi Kassa Idjdarene, "Performance of an Isolated Induction Generator Under Unbalanced Loads," *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, vol. 25, no. 2, pp. 303-311, JUNE 2010.
- [27] Mohamed Orabi, Mutsuo Nakaoka Tarek bed, and M. Z. Youssef, "Efficient Performances of Induction Generator for Wind Energy Utilization ," in *The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Busan, Korea , 2004, pp. 1-6.
- [28] C. Chapelsky and A Knight, "Control of a High-Inertia Flywheel as part of a High Capacity," in *IEEE Electrical and Computer Engineering. Canadian IEEE Conference on*, Vancouver, April 2007, pp. 1437 - 1440.
- [29] S. Morimoto, Y. Takeda, and T. Hirasa, "Loss minimization control of permanent magnet synchronous motor drives," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 41, no. 5, pp. 511 - 517, Oct 1994.
- [30] Xiang Rong, Wang Xiaoru, and Tan Jin, "Operation control of flywheel energy storage system with wind farm," in *IEEE Control Conference (CCC), 2011 30th Chinese*, Yantai, July 2011, pp. 6208 - 6212.
- [31] Haifeng Wang Song Xu, "Simulation and analysis of back-to-back PWM converter for flywheel energy storage system," *IEEE CONFERENCE PUBLICATIONS*, pp. 1-5, OCT 2012.
- [32] Xiang Rong, Wang Xiaoru, and Tan Jin, "Operation control of flywheel energy storage system
- [11] "Emissions Comparison for a 20 MW Flywheel based Frequency Regulation Plant," in *KEMA, BPCC.0003.001*, 2007.
- [12] R. Sebastián, J. Quesada, A. Colmenar R. Peña-Alzola, "Review of Flywheel based Energy Storage Systems," *IEEE International Conference*, May 2011.
- [13] Rion Takahashi and Junji Tamura, "Frequency Stabilization of Small Power System with Wind Farm by Using Flywheel Energy Storage System," in *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, IEEE International Symposium on*, Cracow, 2007, pp. 393 - 398.
- [14] G. Mandic and A. Nasiri A. Abedini, "Wind power smoothing using rotor inertia aimed at reducing grid susceptibility," in *Industrial Electronics. IECON. 34th Annual Conference of IEEE*, Orlando, FL, 2008, pp. 1445 - 1451.
- [15] X. Yingcheng and T. Nengling, "Review of contribution to frequency control through variable speed wind turbine," in *Renew. Energy*, 2011, pp. 1671-1677.
- [16] M. Datta, H. Naitoh, and T. Senjyu, "frequency Control Improvement in a PV-Diesel Hybrid Power System with a Virtual Inertia Controller," in *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), IEEE Conference on*, Singapore, July 2012, pp. 1167 - 1172.
- [17] Abderrezzak Bouharchouche, EI Madjid Berkouk, and Tarrak Ghennam, "Control and energy management of a grid connected hybrid energy system PV-wind with battery energy storage for residential applications," in *Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 8th International Conference and Exhibition on*, Monte Carlo, March 2013, pp. 1 - 11.
- [18] I. W. Bialek, and I. R. Bumby J. Machowski, *Power System Dynamics: Stability and Control*, 2nd ed., John Wiley, Ed. Oxford: , 2008.
- [19] F. Gonzalez-Longatt, E. Chikuni, W. Stemmet, and K. Folly, "Effects of the Synthetic Inertia from Wind Power on the Total System Inertia after a," in *IEEE PES PowerAfrica 2012 Conference and Exposition* , Johannesburg, South Africa, July 2012 , pp. 1-7.
- [20] J. Driesen and K. Visscher, "Virtual Synchronous Generators," in *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, IEEE, Pittsburgh, PA, July 2008, pp. 1 - 3.
- [21] F. Gonzalez-Longatt, P. Regulski , H. Novanda , and V. Terzija , "Impact of Shaft Stiffness on Inertial Response of Fixed Speed Wind Turbines," *Automation of Electric Power Systems*, vol. 36, pp. 191-197, 2012.





کنفرانس منطقه‌ای روش‌های محاسبه نرم در مهندسی برق و کامپیوتر  
دانشگاه آزاد اسلامی واحد صفاشهر - ۶ اسفند ۱۳۹۲



with wind farm," in *IEEE Control Conference (CCC)*,  
2011 30th Chinese, Yantai, July 2011, pp. 6208 - 6212.