

کنترل فرکانس شبکه توان هیبریدی مستقل مبتنی بر کنترل کننده های کلاسیک و فازی

دکتر سید جلیل ساداتی ۱، مهندس جواد عزیزآبادی ۲

۱ دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل ، jalil.sadati@gmail.com

۲ دانشگاه آمل ، azizabadij@gmail.com

چکیده - در این مقاله به ارائه یک سیستم کنترلی مناسب جهت مدیریت انرژی در سیستم تولید پراکنده باد-فتوولتائیک با واحد ذخیره کننده ی باتری و چرخ طیار و پیل سوختی پرداخته شده است. ابتدا به مدلسازی دینامیکی مناسب از اجزای این سیستم مبادرت شده و سپس سیستم کنترلی پیشنهاد شده که مبتنی بر روش فازی می باشد ارائه می گردد. این استراتژی پیشنهادی با کنترل کننده کلاسیک مقایسه می گردد. میزان مقاوم بودن استراتژی پیشنهادی در برابر تغییرات بار و همچنین تغییرات پارامتری که ناشی از ماهیت انرژی باد و شرایط محیطی است، بررسی و در محیط نرم افزار متلب شبیه سازی گردیده است و نتایج مرتبط تحلیل شده است. از نتایج شبیه سازی مشخص می گردد که سیستم کنترلی پیشنهادی رفتار مناسب تری در برابر تغییرات بار از خود نشان خواهد داد. تحقیقات این سیستم تحت وضعیت های مختلف اجرا شده است و تحقیقات با استفاده از داده های واقعی آب و هوا صورت گرفته است.

کلید واژه- کنترل کننده کلاسیک، کنترل کننده فازی، باتری، چرخ طیار، پیل سوختی

۱. مقدمه

پیامدهای محیطی، کمبود انرژی و نگرانی های مربوط به پیشینه شدن مصرف سوخت های فسیلی باعث برانگیخته شدن تحقیقاتی راجع به انواع مختلف منابع انرژی جایگزین شده است. انرژی الکتریکی در زندگی روزمره ی ما رایج ترین نوع انرژی است، ولی تولید آن اغلب از طریق سوزاندن سوخت های فسیلی حاصل می آید که این ذخایر سوختی محدودیت های بسیاری دارد [۱-۲]. این محدودیت ها سبب شده تا تمایلات جدید به سمت تکنولوژی های تولید توان تجدیدپذیر و دائمی از قبیل باد، خورشید و... جلب شود. در این میان استفاده از باد یکی از بهترین راه های تولید انرژی است. باد می تواند در مناطق دور دست از سیستم های تامین انرژی متمرکز، به عنوان یک مکمل و یا حتی جایگزین نیروگاه های مرکزی مرسوم مورد استفاده قرار بگیرد [۳]. از آنجایی که توان باد به طور نامنظم تغییر می کند لذا از این رو یک نیاز به ذخیره ی انرژی است. با استفاده از سیستم ذخیره انرژی، یک منبع الکتریکی کم هزینه می تواند به طور موثر پیک تقاضا را تامین نماید [۴-۶]. تاکنون روش های متعددی در زمینه ی کنترل مناسب توان هیبریدی باد با واحد ذخیره ی انرژی جهت بدست آوردن عملکرد دینامیکی مطلوب و استخراج بیشترین بهره روی از انرژی موجود، ارائه شده

است. یک رویکرد متداول استفاده از کنترل های کلاسیک می باشد. در سال های اخیر، کنترل های منطق فازی در مهندسی سیستم های قدرت، مورد توجه بسیار و رو به رشدی قرار گرفته اند. منطق فازی یک سیستم استدلالی برای شکل دهی استدلال تقریبی است [۷-۹]. در بخش اول این تحقیق به پیاده سازی یک مدل دینامیکی از سیستم بادی با واحد باتری و پیل سوختی و چرخ طیار پرداخته شده است، سپس به طراحی کنترلی برای سیستم مذکور پرداخته می شود. اولین استراتژی، استفاده از کنترل کننده کلاسیک می باشد. سپس یک کنترل کننده منطق فازی به دلیل قابلیت خوب آن در مدل کردن عدم قطعیت، استفاده می گردد. در بخش نتایج شبیه سازی نشان داده خواهد شد که کنترل کننده پیشنهاد شده، عملکرد نسبتا مناسبی در برابر تغییرات بار از خود نشان می دهد و نسبت به تغییرات پارامتری مقاوم است.

۲. پیکربندی و توضیح سیستم

ساختار شبکه ی مستقل پیشنهادی در این مقاله متشکل از توربین بادی، فتوولتائیک و واحد ذخیره کننده ی باتری، چرخ طیار و پیل سوختی می باشد که در شکل (۱) نمایش داده شده است. این مدل سازی ها در محیط نرم افزار متلب انجام شده است. در این شبیه سازی سرعت باد نسبتا واقعی در نظر گرفته شده است و شبیه

مقدار پارامتر R_{blade} (شعاع پره) و ω_{blade} (سرعت چرخش پره) در معادله (۲-۳)، به ترتیب برابر با $23/5 m$ و $3/14 rad/s$ در نظر گرفته شده است.

تابع انتقال ژنراتورهای توربین بادی که در شکل (۱) نشان داده شده است، در معادله (۴) بیان می‌شود [۱۲]:

$$G_{WTG}(S) = \frac{K_{WTG}}{sT_{WTG} + 1} \quad (4)$$

۲-۲ مدل فتوولتاییک

یک سیستم فتوولتاییک متشکل از یک یا چندین سلول فتوولتاییک می‌باشد، که به صورت سری و موازی وصل می‌شود تا ولتاژ و جریان مطلوب را تامین کند. سیستم‌های تولید فتوولتاییک در حال حاضر به عنوان یکی از امیدوار کننده ترین منابع انرژی در نظر گرفته می‌شوند. توان خروجی سیستم‌های فتوولتاییک را می‌توان به شکل معادله (۵) زیر شرح داد [۱۲]:

$$P_{PV} = \eta S \Phi (1 - 0.005(T_a + 25)) \quad (5)$$

توان فتوولتاییک استخراج شده از تابش اشعه خورشیدی اساساً بستگی به چهار کمیت دارد، که عبارتند از: بازده تبدیل آرایه فتوولتاییک (η)، مساحت اندازه گیری شده آرایه فتوولتاییک (S)، تابش اشعه خورشیدی (Φ)، دمای محیط (T_a).

تابع انتقال فتوولتاییک در معادله (۶) بیان می‌شود:

$$G_{PV}(S) = \frac{K_{PV}}{T_{PV}S + 1} \quad (6)$$

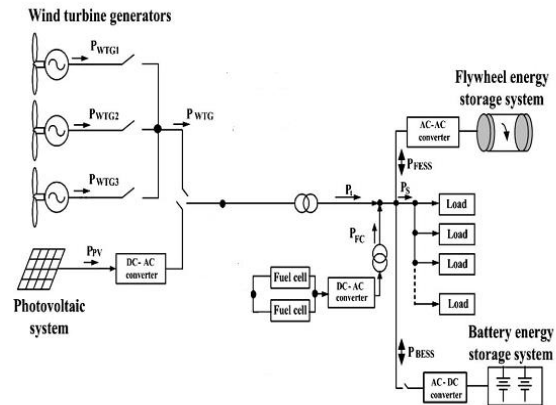
۳-۲ مدل سیستم ذخیره ساز پیل سوختی

پیل های سوختی، دستگاه های تبدیل انرژی استاتیک می باشند که از هیدروژن و اکسیژن برای تبدیل انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی استفاده می کنند. با این حال، اشکال عمده ی پیل سوختی، دینامیک آهسته در سیستم تامین سوخت می‌باشد.

تابع انتقال پیل سوختی که در شکل (۱) نشان داده شده است، در معادله (۷) بیان می‌شود [۱۲]:

$$G_{FC}(S) = \frac{K_{FC}}{T_{FC}S + 1} \quad (7)$$

سازی ها در زمان ۳۰۰ ثانی انجام شده است. شبیه سازی ها به گونه ایی انجام گرفته است که نمایان گر تغییرات تولید و مصرف بار ها در طول ۲۴ ساعت شبانه روز باشد.



شکل ۱: ساختار شبکه ی مستقل پیشنهادی

۲-۱ مدل تولید ژنراتورهای توربین بادی

توان خروجی ژنراتورهای توربین بادی بستگی به سرعت باد دارد. توان مکانیکی توربین بادی به صورت معادله (۱) ارائه می‌شود [۱۰]:

$$P_{Wind} = \frac{1}{2} \rho A_r C_p V_W^3 \quad (1)$$

که ρA_r و C_p ، چگالی هوا، مساحت رفت و برگشت پره ها و ضریب توان می باشد که تابعی از نسبت سرعت نوک پره ها می باشد. مقدار پارامتر ρ و A_r در معادله (۲)، به ترتیب برابر با $1.25 kg/m^3$ و $1735 m^2$ در نظر گرفته شده است.

مقدار پارامتر C_p در معادله (۱) توسط معادله (۲) بدست می آید [۱۱]:

$$C_p = (0/44 - 0/0167 \beta) \sin \left[\frac{\pi(\lambda-4)}{15-0/3\beta} \right] - 0/0184(\lambda - 3)\beta \quad (2)$$

مقدار پارامتر λ در معادله (۲) توسط معادله (۳) بدست می آید:

$$\lambda = \frac{R_{blade} \omega_{blade}}{V_W} \quad (3)$$

۲-۴. مدل سیستم ذخیره کننده باتری

برای برطرف اشکال پیل سوختی، بهترین راه حل استفاده از سیستم ذخیره سازی باتری می باشد.

تابع انتقال سیستم ذخیره ساز باتری که در شکل (۱) نشان داده شده است در معادله (۸) بیان می شود [۱۲]:

$$G_{BESS}(S) = \frac{K_{BESS}}{T_{BESS}S + 1} \quad (8)$$

۲-۵. مدل سیستم های ذخیره ساز چرخ طیار

این سیستم به عنوان یک تجهیز ذخیره ساز انرژی با پاسخ سریع به کار می رود. تابع انتقال سیستم ذخیره ساز چرخ طیار در معادله (۹) بیان می شود [۱۲]:

$$G_{FESS}(S) = \frac{K_{FESS}}{T_{FESS}S + 1} \quad (9)$$

۳. مدل و روش کنترلی پیشنهاد شده

مدل سازی و روش کنترلی در این بخش شرح داده می شود. توان تولیدی شبکه شامل توان سیستم های ژنراتور توربین بادی، پیل سوختی و باتری می باشد که از معادله (۱۰) بدست می آید:

$$P_{Net} = P_{WTG} + P_{pv} + P_{FC} \pm P_{BESS} \pm P_{FESS} \quad (10)$$

روش کنترلی پیشنهاد شده بدین صورت می باشد که اولین استراتژی، استفاده از کنترل کننده کلاسیک می باشد. سپس از کنترل کننده منطق فازی به دلیل قابلیت خوب آن در مدل کردن عدم قطعیت، استفاده می گردد. پارامترهای به کار گرفته شده در مدل سازی شبکه پیشنهادی در جدول (۱) آورده شده است. جدول (۱): مقادیر مورد استفاده در شبکه جدا از هم

| | |
|------------------------|---------------------|
| $T_{WTG} = 1/5$ | $K_{WTG} = 1$ |
| $T_{FC} = 4$ | $K_{FC} = 1/100$ |
| $T_{BESS} = 0/1$ | $K_{BESS} = -1/300$ |
| $T_{FESS} = 0/1$ | $K_{FESS} = -1/100$ |
| $(M = 0/2, D = 0/012)$ | |

۳-۱. طراحی کنترل کننده کلاسیک

منظور از طراحی کنترل کننده کلاسیک برای یک سیستم، تعیین ضرایب K_d, K_i و K_p است. بسته به کاربرد، عملکرد مطلوب خروجی سیستم، می تواند به شیوه های متفاوتی، بیان شود. متداول ترین نوع کنترل کننده کلاسیک کنترل کننده دارای سه بخش تناسبی - مشتقی - انتگرالی یا PID می باشد که دارای فرم کلی به صورت معادله (۱۱) است [۱۳]:

$$G(S) = K_p + \frac{K_i}{S} + K_d S \quad (11)$$

در این حالت ضریب k_p جهت افزایش سرعت پاسخ سیستم، افزایش دقت به کار می رود و اگر ضریب k_p بسیار بزرگ باشد سرعت انحراف بیشتر می شود و ممکن است سیستم به حالت ناپایداری برسد.

۳-۲. طراحی کنترل کننده فازی

کنترل کننده های فازی برخلاف کنترل کننده های کلاسیک، بدون نیاز به مدل ریاضی از سیستم، با استفاده از تجربیات افراد خبره که در قالب قوانین اگر - آنگاه بیان می شوند، به کنترل سیستم می پردازد [۱۴]: در این مقاله سیستم فازی، دارای دو ورودی و یک خروجی است. پایگاه قواعد ورودی و خروجی این سیستم در جدول (۲) نشان داده شده است.

جدول (۲): پایگاه قواعد کنترل کننده فازی

| E* | E | NB | NS | ZR | PS | PB |
|----|----|----|----|----|----|----|
| NB | NB | NB | NB | NB | NS | ZR |
| NS | NS | NB | NB | NS | ZR | PS |
| Z | Z | NB | NS | ZR | PS | PB |
| PS | PS | NS | ZR | PS | PB | PB |
| PB | PB | ZR | PS | PB | PB | PB |

۴. نتایج شبیه سازی

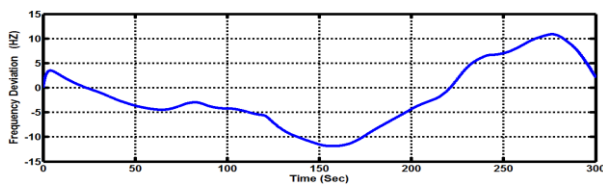
در این قسمت، کنترلرهای طراحی شده، در سیستم شبکه مذکور پیاده سازی خواهد شد. بدین منظور از نرم افزار متلب سیمولینک جهت شبیه سازی استفاده گردیده است.

در این شبیه سازی تغییرات سرعت باد نسبتاً واقعی در نظر گرفته شده است. و شبیه سازی ها در زمان ۳۰۰ ثانیه انجام شده است.

۴-۱. سناریو اول

در این مرحله فرض شده است که علاوه بر منبع اصلی باد، عناصر ذخیره کننده نیز در شبکه حضور دارند، ولی شبکه فاقد هرگونه کنترل کننده می باشد.

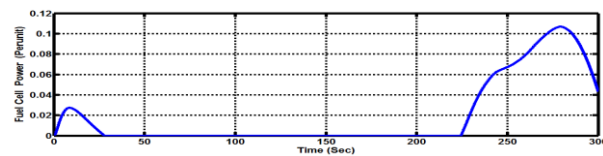
انحراف فرکانس در حالت اول در شکل (۵) آورده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، انحراف فرکانس در شبکه بسیار زیاد می باشد، که دلیل اصلی آن در این آزمایش نبود کنترل کننده در مسیر عناصر ذخیره کننده می باشد. به همین دلیل برای مشخص شدن اهمیت کنترل کننده و تاثیر آن بر شبکه، سناریو دوم را با حضور کنترل کننده مورد بررسی قرار می دهیم.



شکل ۵: انحراف فرکانس در حالت اول

۴-۲. سناریو دوم

در این سناریو فرض شده است که علاوه بر منبع اصلی باد، عناصر ذخیره کننده نیز در شبکه حضور دارند و در این سناریو برای اینکه ما بتوانیم انحراف فرکانس شبکه را کاهش دهیم، کنترل کننده را در مسیر عناصر ذخیره کننده قرار دادیم. توان تولیدی سیستم پیل سوختی در شکل (۶) نمایش داده شده است بر اساس این شکل توان در موقعی که تولید از مصرف بیشتر می باشد کم شده است.



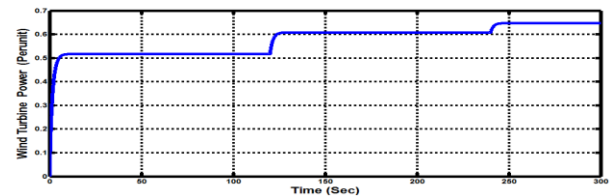
شکل ۶: توان تولیدی سیستم پیل سوختی

در شکل (۷) و شکل (۸) توان خروجی باتری و توان خروجی چرخ طیار، نمایش داده شده است. دلیل استفاده از باتری و چرخ طیار، دینامیک آهسته پیل سوختی، می باشد.

شبه سازی ها به گونه ای انجام گرفته است که نمایان گر تغییرات تولید و مصرف بارها در طول ۲۴ ساعت شبانه روز باشد.

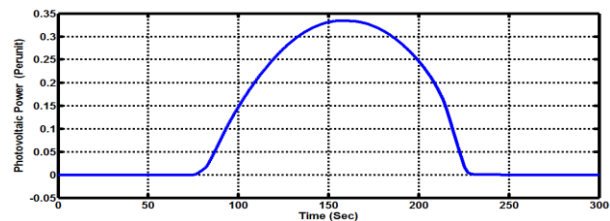
در این مقاله برای مشخص شدن عملکرد سیستم و همچنین تاثیر کنترل کننده، از دو سناریو بهره می گیریم. در سناریو اول شبکه فاقد هرگونه کنترل کننده می باشد و در سناریو دوم تاثیر کنترل کننده در شبکه را بررسی می کنیم.

توان تولیدی توسط توربین بادی در شکل (۲) نمایش داده شده است. افزایش توان توربین بادی نشان تغییرات سرعت باد در ۲۴ ساعت شبانه روز می باشد.



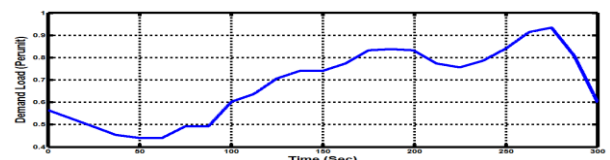
شکل ۲: توان تولیدی توسط توربین بادی

در شکل (۳) توان خروجی سیستم فتوولتائیک نمایش داده شده است. این توان از تابش خورشید تاثیر می پذیرد و در مواقعی که تولید بیشتر از مصرف بوده از این توان تولید کاسته شده است.



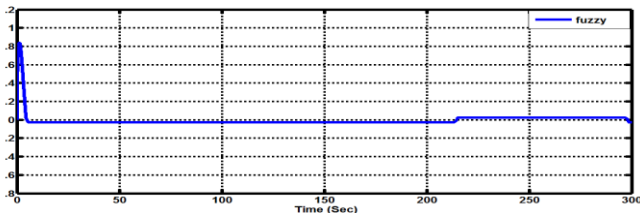
شکل ۳: توان خروجی سیستم فتوولتائیک

تغییرات بار مصرفی در شبکه در شکل (۴) نمایش داده شده است بر اساس این شکل توان مصرفی بین یک مقدار مشخص در حال تغییر می باشد که نشان دهند ی این موضوع می باشد که تغییرات بار زیاد در شبکه می باشد



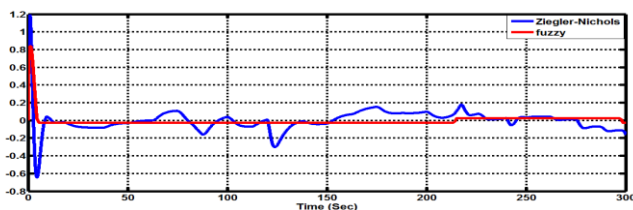
شکل ۴: تغییرات بار مصرفی در شبکه

پیدا کرده است.



شکل ۱۰: انحراف فرکانس در شبکه در حضور کنترل کننده فازی

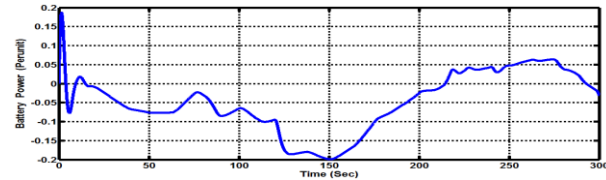
در شکل (۱۱) انحراف فرکانس شبکه در حضور کنترل کلاسیک و فازی نمایش داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده انحراف فرکانس شبکه با روش کنترل کننده فازی دارای تغییرات بسیار کمتری نسبت به کنترل کننده کلاسیک می باشد، و حالت ماندگاری سیستم در حد بسیار مطلوبی قرار گرفته شده است و اعوجاج در شبکه تا حد قابل ملاحظه ای کاهش پیدا کرده است.



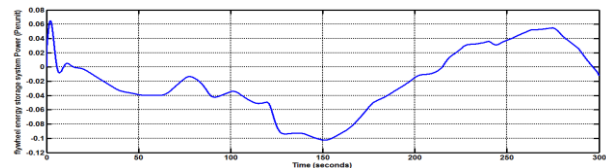
شکل ۱۱: انحراف فرکانس در شبکه در حضور دو کنترل کننده فازی و کلاسیک

۵. نتیجه گیری

با توجه به افزایش تقاضای انرژی و محدودیت های سوخت های فسیلی، استفاده از سیستم های توان هیبرید، بهترین گزینه برای مدیریت تامین تقاضای انرژی است. در این مقاله یک سیستم توان هیبریدی باد-فتوولتائیک با واحد ذخیره ای انرژی باتری و چرخ طیار و پیل سوختی برای عملکرد مستقل به شبکه پیشنهاد شده است. براساس مدل دینامیکی ارائه شده و با توجه به عدم قطعیت موجود در سیستم، اقدام به طراحی کنترلر صورت گرفت. وجود کنترلر باعث مقاوم شدن سیستم بادی، در برابر تغییرات بار و پارامترهای سیستم می شود و به نوعی منجر به مدیریت انرژی در سیستم توان هیبرید می گردد. دو نوع استراتژی کنترلی برای این سیستم، طراحی و در محیط سیمولینک متلب شبیه سازی شده است. در بخش نتایج مشاهده شد که هر دو استراتژی کنترلی دارای عملکرد مناسب و نسبت به عدم قطعیت پارامتری مقاوم بوده است

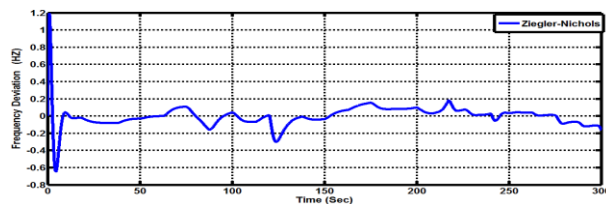


شکل ۷: توان خروجی باتری



شکل ۸: توان خروجی چرخ طیار

در شکل (۹) انحراف فرکانس شبکه در حضور کنترل کننده PID نمایش داده شده است. در این قسمت ما از روش زیگلر نیکولز برای تعیین پارامترهای کنترل کننده PID استفاده می کنیم. که بر اساس نتایج بدست آمده انحراف فرکانس به طور قابل ملاحظه ای کاهش پیدا کرده است. همان طور که از شکل (۴-۱۰) مشاهده می شود، حالت گذرای ابتدایی در شبکه در بازه $[-0.1/0.2]$ هرگز رسیده است و همچنین حالت ماندگار سیستم نیز کاهش داشته است و در یک بازه ی نسبتا مناسبی در بازه ی $[-0.1/0.3]$ هرگز قرار گرفته است.



شکل ۹: انحراف فرکانس در حالت سوم با بهره گیری از روش زیگلر برای

تعیین پارامترهای کنترل کننده PID

در شکل (۱۰) انحراف فرکانس شبکه در حضور کنترل کننده فازی نمایش داده شده است. بر اساس نتایج بدست آمده انحراف فرکانس به طور قابل ملاحظه ای کاهش پیدا کرده است. همان طور که از شکل (۱۰) مشاهده می شود، حالت گذرای ابتدایی در شبکه در بازه $[-0.1/0.3]$ رسیده است، که نسبت به بهترین حالت کنترل کننده کلاسیک، حالتی که بهره آن توسط روش زیگلر نیکولز تنظیم شده است، کاهش پیدا کرده است و همچنین حالت ماندگار سیستم در یک بازه ی نسبتا مناسبی در بازه ی $[-0.1/0.3]$ قرار گرفته است، که نسب به کنترل کننده کلاسیک بهبود و کاهش

Systems Research, vol. 35, no. 1, pp. 39-43, October 1995.2010.

[10] Majid Nayeripour, Mohammad Hoseintabar, Taher Niknam, "Frequency deviation control by coordination control of FC and double-layer capacitor in an autonomous hybrid renewable energy power generation system," *elsevier Renewable Energy*, vol. 36, no. 6, p. 1741e1746, June 2011.

[11] Dong-Jing Lee and Li Wang, "Small-Signal Stability Analysis of an Autonomous Hybrid Renewable Energy Power Generation/Energy Storage System Part I: Time-Domain Simulations," *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, vol. 23, no. 1, pp. 311-320, MARCH 2008.

[12] Dulal Ch Das, A K Roy, N Sinha, Senior Member IEEE, "Genetic Algorithm Based PI Controller for Frequency Control of an Autonomous Hybrid Generation System," *International Association of Engineers, Directory of Open Access Journals*, 2011.

[13] H. Bevrani, Senior Member, IEEE, F. Habibi, P. Babahajyani, M. Watanabe, Member, IEEE, and Y. Mitani, Member, IEEE, "Intelligent Frequency Control in an AC Microgrid: Online PSO-Based Fuzzy Tuning Approach," *SMART GRID*, vol. 3, no. 4, pp. 1935-1944, DECEMBER 2012.

[14] Mousa Marzband, Andreas Sumper, Mircea Chindris, "Frequency Control of Isolated Wind and Diesel Hybrid MicroGrid Power System by Using Fuzzy Logic Controllers and PID Controllers," *Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU)*, pp. 1- 6, 2011.

، همچنین مشاهده گردید که سیستم های کنترلی، قادر به جبران سازی و مدیریت توان در برابر تغییرات ناگهانی بار می باشند و سیستم در تامین تقاضای بار با مشکل مواجه نمی گردد . در این میان، مشاهده گردید که استراتژی پیشنهادی کنترل کننده فازی، دارای عملکرد بهتری نسبت به کنترل کننده کلاسیک می باشد. مطالعات شبیه سازی تحت وضعیت های مختلف با استفاده از داده های واقعی آب و هوا، جهت تحقیق کارایی سیستم انجام شده است.

منابع

[1] Dulal Ch. Das , A.K. Roy, N. Sinha, "GA based frequency controller for solar thermal–diesel–wind hybrid energy generation/energy storage system," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 43, no. 1, pp. 262-279, December, 2012 .

[2] Cuk Supriyadi A.N, Takuhei Hashiguchi, "Control Scheme of Hybrid Wind-Diesel Power Generation System," in *From Turbine to Wind Farms - Technical Requirements and Spin-Off Products*, www.intechopen.com, April 4, 2011, p. Chapter 5.

[3] Prabodh Bajpai, Vaishalee Dash, "Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 5, p. 2926–2939, February 2012 .

[4] Hansang Lee, Byoung Yoon Shin, Sangchul Han, Seyong Jung, Byungjun Park, and, "Compensation for the Power Fluctuation of the Large Scale Wind Farm Using Hybrid Energy Storage Applications," *IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY*, vol. 22, JUNE 2012 .

[5] Meghdad Fazeli, Greg M. Ashe, "Novel Integration of Wind Generator-Energy Storage Systems Within Microgrids," *Smart Grid, IEEE Transactions*, vol. 3, no. 2, pp. 728- 737, JUNE 2012

[6] Toshiaki Kaneko, Akie Uehara , Tomonobu Senjyu, Atsushi Yona, Naomitsu Urasaki, "An integrated control method for a wind farm to reduce frequency deviations in a small power system," *Applied Energy* , vol. 88, no. 4, p. 1049–1058, September 2010 .

[7] Tomonobu Senjyu, Member, IEEE, Toshiaki Nakaji, Katsumi Uezato, and Toshihisa Funabashi, Senior Member, IEEE,, "A Hybrid Power System Using Alternative Energy Facilities in Isolated Island," *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, vol. 20, JUNE 2005 .

[8] Abdul Motin Howlader a, Yuya Izumi , Akie Uehara , Naomitsu Urasaki , Tomonobu Senjyu , , "A minimal order observer based frequency control strategy for an integrated wind-battery-diesel power system," *Energy and Exergy Modelling of Advance Energy Systems*, vol. 46, no. 1, p. 168–178 , August 2012.

[9] Dipti Srinivasan, A.C. Liew, C.S. Chang, "Applications of fuzzy systems in power systems," *Electric Power*