

## کنترل توان و فرکانس بار مبتنی بر روش کنترلی شیب افقی بهبودیافته در سیستم ترکیبی توربین بادی، فتوولتائیک و پیل سوختی در ریزشبکه‌های مستقل

حسن براتی<sup>۱\*</sup>، هادی امینزاده<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

barati216@gmail.com

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

hadi.aminzadeh@gmail.com

چکیده: یکی از چالش‌های مهم در ریزشبکه‌های متصل، مسئله کنترل فرکانس است. در این مقاله روشی برای کنترل فرکانس در یک سیستم ترکیبی مبتنی بر توربین بادی/ فتوولتائیک/ پیل سوختی و ابرخازن مطرح شده است. روش پیشنهادی ترکیبی از کنترل بار-فرکانس و کنترل ولتاژ ابرخازن است. برای مشخص کردن مراجع توان از کنترل کننده PI و کنترل کننده شیب افقی استفاده شده است. عملکرد سیستم براساس اطلاعات سرعت باد، تابش خورشید و منحنی تقاضای بار مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که در کنترل به روش شیب افقی، ناشی از ارسال فرمان کنترلی مناسب‌تر به واحدهای تولیدی جهت ایجاد تعادل در شبکه، در میراسازی انحرافات فرکانس بهتر عمل کرده است. برای شبیه‌سازی کامپیوتری از محیط نرم‌افزاری MATLAB/Simulink استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: ریزشبکه‌های متصل، کنترل بار-فرکانس، کنترل توان، کنترل کننده PI، کنترل شیب افقی بهبودیافته، انحراف فرکانس.

## ۱. مقدمه

افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی، افزایش آلاینده‌ها و افزایش هزینه‌ها در توسعه شبکه، استفاده از انرژی‌های نو را در آینده، به ویژه در مناطق دورافتاده از شبکه سراسری، بسیار امیدبخش کرده است. این انرژی‌ها در کنار مزایایی که دارند می‌توانند به صورت مکمل یکدیگر عمل کنند و از این رو پتانسیل بسیار خوبی برای تأمین بار و تشکیل سیستم‌های ترکیبی دارند [۱]. در کاربردهای مستقل، یکی از مهم‌ترین چالش‌های چنین سیستم‌هایی برقراری تعادل بین توان تولیدی و مصرفی است. در میان انواع انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی باد و خورشید تقریباً در اکثر نقاط جهان در دسترس‌اند و پیشرفت‌های خوبی در زمینه بهره‌برداری از حداکثر پتانسیل آن‌ها صورت گرفته است. از آنجا که توان تولیدی این منابع وابسته به وضعیت آب و هوایی است، نیاز به المان‌های پشتیبان و ذخیره‌کننده انرژی امری اجتناب‌ناپذیر است [۲]. پیل‌های سوختی یکی از منابع امیدبخش برای تولید برق در مقیاس بزرگ هستند. مزیت مهم یک پیل سوختی این است که هیچ‌گونه آلودگی نداشته و تا زمانی که هیدروژن موجود باشد به تولید توان ادامه می‌دهد. اما پاسخ آن‌ها هنگام تغییرات سریع بار، کند است و برای حالت‌های گذرا مناسب نیستند [۳]، به همین دلیل بهتر است با یک سیستم که پاسخ سریعی دارد ترکیب شوند. ابرخازن‌ها با داشتن سرعت شارژ و دشارژ بسیار بالا و همچنین چگالی توان زیاد، گزینه مناسبی برای مقابله با حالت‌های گذرا هستند [۴]. با توجه به مشکلاتی که در زمینه ذخیره انرژی برق وجود دارد، تبدیل انرژی مازاد به هیدروژن یکی از معقول‌ترین روش‌هاست. الکترولایزر با دریافت توان، آب را به اکسیژن و هیدروژن تجزیه می‌کند. هیدروژن تولیدی برای مصارف بعدی در تانک‌های مناسبی ذخیره می‌شود [۵].

عدم تعادل توان تولیدی و مصرفی باعث انحراف و تغییر فرکانس می‌شود و ممکن است به بارهای حساس به فرکانس آسیب جدی وارد آید که این وضع با حضور انرژی‌های تجدیدپذیر بدتر نیز می‌شود. همچنین در یک ریزشبهه مبتنی بر انرژی‌های نو، منابع توسط ادوات الکترونیک قدرت به شبکه متصل می‌شوند. بنابراین رژیم ترانزیستوری حاکم بوده و ممان اینرسی کم منابع فرصت بسیار کمتری برای مقابله با اغتشاشات فراهم می‌کند [۶]. بدین ترتیب یکی از مسائل مهم در ریزشبهه‌های منفصل کنترل توان و فرکانس است.

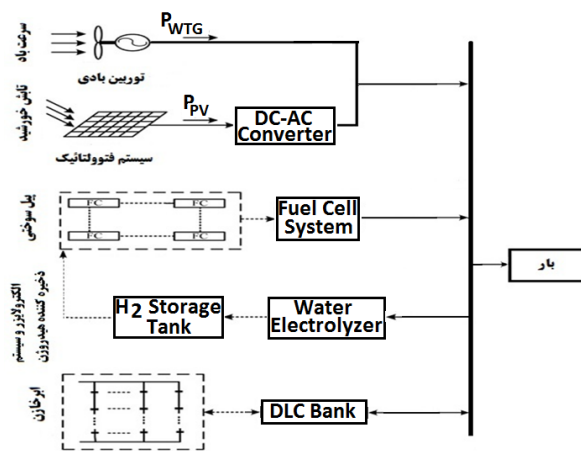
لوپز و همکاران به کنترل یک ریزشبهه منفصل شامل آرایه خورشیدی، میکروتوربین، پیل سوختی و چرخ لنگر پرداخته‌اند و همچنین دو نوع استراتژی اصلی/پیرو<sup>۱</sup> برای کنترل ولتاژ و فرکانس

ریزشبهه ارائه کرده‌اند [۷]. مصطفی و همکاران یک کنترل‌کننده فازی برای توربین‌های بادی سرعت متغیر ارائه کرده‌اند [۸]. اوناو و همکاران یک سیستم ترکیبی شامل فتولتائیک، پیل سوختی و باتری را مدل‌سازی و برای مدیریت توان، یک کنترل‌کننده مرکزی پیشنهاد کرده‌اند [۹]. اساس کنترل هر ریزشبهه، کنترل مبدل‌های الکترونیک قدرت آن است. کارل و همکاران یک روش کنترل ولتاژ و فرکانس برای اینورترهای موازی در ریزشبهه براساس کنترل شیب افقی (دروپ)<sup>۲</sup> با استفاده از ماتریس تبدیل چرخشی خطی ارائه کرده‌اند [۱۰]. کلانترو و موسوی رفتار دینامیکی یک سیستم ترکیبی شامل توربین بادی، میکروتوربین، آرایه خورشیدی و باتری را براساس الگوریتم ژنتیک و کنترل‌کننده فازی مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۱]. گوا و همکاران به صورت تجربی و آزمایشگاهی توپولوژی اکتیوی را در جهت کنترل سیستم ترکیبی دیگری شامل باتری و سلول سوختی معرفی کرده‌اند [۱۲]. شاتر و همکاران یک الکترولایزر را با پیل سوختی و فتولتائیک ترکیب کرده و روش فازی را جهت ردیابی ماکزیمم توان استفاده کرده‌اند [۱۳]. سباستین و کوسادا یک سیستم ترکیبی شامل دیزل ژنراتور و توربین بادی را به سه حالت کاری فقط دیزل ژنراتور، دیزل ژنراتور و توربین بادی و فقط توربین بادی تقسیم کرده و روشی برای کنترل فرکانس را فقط در حالت کارکرد انفرادی توربین بادی مطرح نموده‌اند [۱۴]. بارکلوند و همکاران یک سیستم مدیریت انرژی برای ریزشبهه مستقل که به وسیله روش شیب افقی مبدل کنترل شده است، پیشنهاد کرده‌اند [۱۵]. سربان و مارینسکو به بررسی نقش باتری‌ها به عنوان منابع پشتیبان در ریزشبهه‌ها پرداخته‌اند [۱۶]. نیری‌پور و همکاران روش کنترل فرکانس PI را در یک شبکه محلی ترکیبی فتولتائیک/توربین بادی/سلول سوختی/ابرخازن پیاده‌سازی کرده‌اند. به این صورت که برای هر منبع یک کنترل‌کننده PI در نظر گرفته شده است که با دریافت انحراف فرکانس، توان مرجع تولیدی هر واحد را جهت تثبیت فرکانس تعیین می‌کند [۱۷].

در این مقاله، کنترل فرکانس یک ریزشبهه مستقل مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر، متشکل از توربین بادی و فتولتائیک به عنوان منابع اصلی تولید توان و پیل سوختی و نیز ابرخازن به عنوان ذخیره‌ساز انرژی بررسی شده است. به همین منظور، معادلات حاکم بر اجزای ریزشبهه استخراج و مدل‌سازی شده و بلوک دیاگرام کل سیستم به دست آمده است [۱۷] و در محیط نرم‌افزاری MATLAB/Simulink شبیه‌سازی شده است. در شبیه‌سازی کامپیوتری، روش‌های کنترلی مبتنی بر کنترل‌کننده کلاسیک PI و روش شیب افقی برای برقراری تعادل توان اکتیو و کنترل فرکانس، اعمال شده و عملکرد دینامیکی سیستم ارزیابی و تحلیل شده است.

## ۲. ساختار ریزشبهه مورد مطالعه

ساختار ریزشبهه مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است. در این سیستم، توربین بادی و فتولتائیک منابع اصلی تأمین توان می‌باشند. ابرخازن و ترکیب پیل سوختی و الکترولیزر<sup>۳</sup> نیز به‌عنوان پشتیبان در نظر گرفته شده‌اند. برای حل مشکل اضافه توان، الکترولیزر نیز به سیستم اضافه شده است. همچنین فرض بر این است که بانک ابرخازن ظرفیت کافی برای مقابله با حالت‌های گذرا دارد. اگر توان تولیدی منابع اصلی بیش از توان مورد نیاز بار باشد، ابتدا اضافه توان وارد ابرخازن می‌شود و پس از شارژ کامل آن، مابقی توان برای تولید هیدروژن به الکترولیزر فرستاده می‌شود.



شکل (۱): ساختار ریزشبهه مورد مطالعه

### ۱.۲. سیستم انرژی فتولتائیک

از آنجاکه یک سلول خورشیدی توانی کمتر از ۲ وات در ولتاژ ۰/۵ ولت DC تولید می‌کند، لازم است سلول‌ها برای تولید توان و ولتاژ نامی مطلوب، با هم سری-موازی شوند. رایج‌ترین مدل به‌کاررفته برای یک سلول PV مدار معادل تک دیودی (۲) می‌باشد. رابطه بین ولتاژ خروجی U و جریان بار I به‌صورت زیر بیان می‌شود [۱۸]:

$$I = I_L - I_D = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{U + IR_s}{\alpha}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{nkT}{q}$$

که در آن،  $I_L$  جریان نور و  $I_D$  جریان دیود،  $q$  بار هر الکترون،  $k$  ثابت بولتزمن و  $T$  دمای آرایه PV برحسب درجه کلوین،  $n$  ضریب ایدئال پیوند  $p-n$ ،  $R_s$  مقاومت سری درونی سلول و  $I_0$  جریان اشباع سلول PV است.

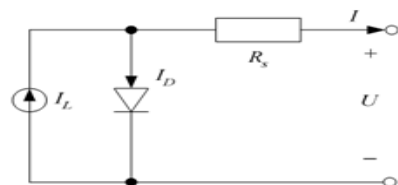
اگرچه هزینه برای نصب یک آرایه PV به‌سبب پیشرفت‌های اخیر تکنولوژی در حال کاهش یافتن است، مبلغ سرمایه‌گذاری اولیه روی

### 3. Electrolyzer

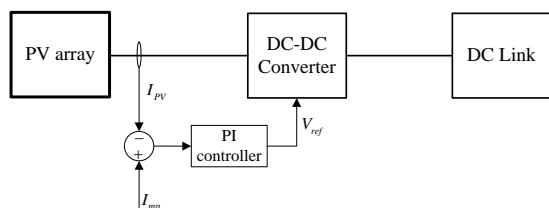
یک سیستم PV همچنان در مقایسه با روش‌های مرسوم تولید برق بسیار بالاست. بنابراین تمایل به جذب حداکثر توان ممکن از آرایه PV نصب‌شده بسیار طبیعی است. ردیابی نقطه ماکزیمم توان یکی از روش‌های به‌دست‌آوردن حداکثر توان یک سیستم PV می‌باشد. روش‌های مختلفی برای ردیابی نقطه ماکزیمم توان پیشنهاد شده است که در این مقاله، روش ردیابی نقطه ماکزیمم توان براساس جریان (MPPT) به‌کار رفته است [۱۹]. رابطه خطی بین جریان اتصال کوتاه و جریان بیشینه توان را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

$$I_{mp} = K_{cmptt} \times I_{sc} \quad (2)$$

که  $K_{cmptt}$  که  $K_{cmptt}$  ضریب جریان بیشینه توان و در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برابر ۰/۹۲۴۵ می‌باشد.



شکل (۲): مدار معادل تک دیودی سلول خورشیدی



شکل (۳): ردیابی نقطه ماکزیمم توان براساس جریان

در شکل (۳)، نمودار بلوکی نحوه استفاده از روش ردیابی نقطه ماکزیمم توان براساس جریان نشان داده شده است. در این روش، جریان خروجی فتولتائیک اندازه‌گیری می‌شود، سپس با جریان بیشینه توان مقایسه شده و جریان خطا وارد کنترل‌کننده PI می‌شود. خروجی کنترل‌کننده، ولتاژ مرجع کانورتر<sup>۴</sup> است و به این ترتیب، بیشینه توان از فتولتائیک استخراج می‌شود.

### ۲.۲. سیستم تبدیل انرژی باد

برای تبدیل انرژی باد به انرژی الکتریکی از توربین بادی استفاده می‌شود. توان مکانیکی توربین بادی به‌صورت رابطه زیر است [۹]:

$$P_m = C_p(\lambda, \theta) \frac{\rho A}{2} v_{wind}^3, A = \pi R^2 \quad (3)$$

که  $\rho$  چگالی هوا،  $C_p$  ضریب توان توربین بادی (تابعی غیرخطی از

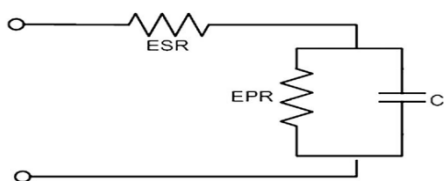
### 4. Converter

### کنترل توان و فرکانس بار مبتنی بر روش کنترلی شیب افقی... ۳۱

یک مقاومت موازی معادل که اثر نشتی را مدل می‌کند و فقط در عملکرد دراز مدت ابرخازن تأثیر می‌گذارد [۵]. انرژی کشیده شده از بانک ابرخازنی با تغییر در ولتاژ ترمینال آن و ظرفیت خازنی رابطه مستقیم دارد:

$$E_{UC} = \frac{1}{2} C (V_i^2 - V_f^2) \quad (5)$$

که C ظرفیت خازن،  $V_i$  ولتاژ اولیه قبل از شروع دشارژ و  $V_f$  ولتاژ نهایی پس از پایان دشارژ است. در عمل مقدار ولتاژ، انرژی یا ظرفیت مورد نیاز سیستم ذخیره‌ساز، با سری و موازی کردن ابرخازن‌ها تأمین می‌شود.



شکل (۴): مدار معادل ابرخازن

### ۵.۲ الکترولایزر

الکترولایزر با دریافت توان، آب را به هیدروژن و اکسیژن تجزیه می‌کند. هیدروژن در تانک‌های مناسبی ذخیره و در مواقع مورد نیاز، سوخت پیل سوختی را تأمین می‌کند. براساس قانون فاراده، نرخ تولید هیدروژن در الکترولایزر با جریان الکتریکی در مدار معادل الکترولایزر رابطه مستقیم دارد و به صورت زیر بیان می‌شود [۲۱]:

$$n_{H_2} = \frac{\eta_F n_C i_e}{2F} \quad (6)$$

که در آن،  $n_C$  تعداد سلول‌های سری در الکترولایزر،  $i_e$  جریان الکترولایزر (A) و F ثابت فارادی (C/mol) می‌باشند.

نسبت بین حداکثر مقدار هیدروژن تولیدی از نظر تئوری و عملی در الکترولایزر به عنوان ضریب فارادی شناخته می‌شود و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\eta_F = 96.5 \exp\left(\frac{0.09}{i_e} - \frac{75.5}{i_e^2}\right) \quad (7)$$

### ۶.۲ روش کنترل ریزش شبکه

یکی از روش‌های کنترل ریزش شبکه‌های مستقل، استفاده از استراتژی نظیر به نظیر (Peer to Peer) است. در استراتژی نظیر به نظیر، هر واحد DG وضعیت مشابهی در ریزش شبکه دارد و ریزش شبکه جدید می‌تواند بدون آنکه تغییری در ساختار فعلی سیستم ایجاد کند، به ریزش شبکه اضافه شوند. در این استراتژی، کنترل‌کننده هر ریزش‌منبع باید قادر باشد تا به طور مؤثری به تغییرات سیستم، بدون نیاز به اطلاع از سایر منابع و مکان‌ها پاسخ دهد. نتیجه این کار افزایش قابلیت اطمینان ریزش شبکه و کاهش هزینه

و  $\theta$ ،  $\lambda$  نسبت سرعت نوک،  $\theta$  زاویه چرخش پره، R شعاع توربین است.  $\lambda$  نقطه کار توربین بادی را برای گرفتن بیشینه توان از رژیم باد مشخص می‌کند، زیرا حداکثر مقدار  $C_p$  در یک  $\lambda$  خاص رخ می‌دهد. روش فعالی که برای کنترل توربین بادی به کار می‌رود، کنترل زاویه پرها است. بدین صورت که ابتدا توان خروجی ژنراتور با توان مورد تقاضا مقایسه می‌شود. سیگنال خطا وارد یک کنترل‌کننده PI می‌شود که خروجی آن زاویه مناسب پرها را مشخص می‌کند. توان تولیدی یک توربین بادی با تغییرات سرعت محدود می‌شود. اگر سرعت باد از مقدار حداقل کمتر باشد، برای اینکه ژنراتور به حالت موتوری نرود، از مدار خارج می‌شود. بین سرعت نامی و مقدار حداقل، توان تولیدی متناسب با سرعت باد تغییر می‌کند. پس از سرعت نامی برای جلوگیری از آسیب به بخش‌های الکتریکی، توان تولیدی به مقدار نامی محدود می‌شود و بالاخره در بادهای شدید برای حفاظت توربین آنرا خاموش می‌کنند.

### ۳.۲ پیل سوختی

یک پیل سوختی با دریافت هیدروژن و اکسیژن، جریان برق و آب تولید می‌کند. به دست آوردن مدل ریاضی پیل سوختی یک کار پیچیده بوده و نیاز به تحقیقات فراوان دارد. اجزای سیستم با یکدیگر به شکل پیچیده‌ای با هم در تعادل هستند به طوری که فرایندهای الکتریکی، شیمیایی و ترمودینامیکی به طور ذاتی، شدیداً غیرخطی می‌باشند. این فرایندها با راندمان بالایی انجام می‌شوند، زیرا پیل سوختی هیچ قطعه متحرکی ندارد. از یک شیوه ریاضی برای مدل‌سازی سلول سوختی استفاده شده و ولتاژ خروجی  $V_r$  با استفاده از معادله نرنست به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۰]:

$$V_r = N_o \left[ e_o + \frac{R_o T_o}{2F_o} \left( \ln \frac{P_{H_2} \sqrt{P_{O_2}}}{P_{H_2O}} \right) \right] - r I_r \quad (4)$$

که  $e_o$  ولتاژ مدار باز،  $N_o$  تعداد سلول‌های پیل سوختی،  $R_o$  ثابت جهانی گاز،  $F_o$  ثابت فارادی،  $(P_{H_2O}, P_{H_2}, P_{O_2})$  فشار جزئی هیدروژن، اکسیژن و آب (برحسب اتمسفر) و  $r.I_r$  افت ولتاژ اهمی ناشی از مقاومت در برابر حرکت الکترون‌ها و یون‌های باشد.

### ۴.۲ ابرخازن

ابرخازن‌ها گونه‌ای از خازن‌های معمولی هستند که با استفاده از روش‌های خاص مانند استفاده از کربن فعال شده، ظرفیت و سرعت شارژ و دشارژ آن‌ها را بسیار بالا برده‌اند. بدین ترتیب گرایش به استفاده از آن‌ها در مقایسه با باتری‌ها روند رو به رشدی پیدا کرده است. رایج‌ترین مدل مداری برای ابرخازن در شکل (۴) نشان داده شده است. ESR مقاومت شارژ و دشارژ بوده و در حد چند میلی اهم استو (EPR)

### ۱.۳. کنترل کننده‌های میراساز انحرافات فرکانس

#### ۱.۱.۳. کنترل کننده کلاسیک PI

شکل (۵) بلوک دیاگرام روش کنترل فرکانس با استفاده از روش کنترلی PI را نشان می‌دهد که در آن متناسب با انحراف فرکانس، هر واحد باید توان تولیدی خود را تغییر دهد تا انحراف فرکانس  $\Delta f$  کمترین مقدار خود را داشته باشد. مشخص کردن توان مرجع هر کدام از تولیدکننده‌ها بر عهده کنترل کننده انتگرال گیر است که براساس ورودی انحراف فرکانس، خروجی آن مشخص می‌شود [۱۷].

#### ۲.۱.۳. کنترل کننده شیب افقی بهبودیافته

از آنجاکه کنترل فرکانس مد نظر است و تعادل توان تولیدی و مصرف در ریزشبهه می‌تواند باعث کاهش تغییرات فرکانس گردد و با توجه به مشخصه افقی هر واحد تولیدی (f-P)، که یک ارتباط خطی با شیب منفی بین فرکانس و توان تولیدی واحد وجود دارد، مرجع توان تولیدی منابع براساس اندازه‌گیری تغییرات فرکانس ریزشبهه صورت می‌گیرد. به منظور بهبود پاسخ گذرا و برای افزایش سرعت میراسازی خطای فرکانس، علاوه بر ضریب خطای فرکانس در روش مرسوم شیب افقی، از مشتق خطای فرکانسی نیز در تعیین مرجع توان اکتیو و تغییر تولید واحدها استفاده شده است و با انتخاب مناسب ضریب مشتقی باعث افزایش پایداری و افزایش سرعت پاسخ در کاهش خطای فرکانسی می‌شود. روش کنترل شیب افقی بهبودیافته را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$P_1 = \frac{1}{m_1} (\Delta f) + k_{d1} \frac{d(\Delta f)}{dt} \quad (11)$$

$$P_2 = \frac{1}{m_2} (\Delta f) + k_{d2} \frac{d(\Delta f)}{dt} \quad (12)$$

$$P_N = \frac{1}{m_N} (\Delta f) + k_{dN} \frac{d(\Delta f)}{dt} \quad (13)$$

در روابط فوق،  $k_{d1}$ ،  $k_{d2}$  و  $k_{dN}$  بهره‌های مشتقی می‌باشند.

شکل (۶)، منحنی توان-فرکانس روش شیب افقی را نشان می‌دهد. در این شکل،  $P_N$  یک بانک خازنی بزرگ در نظر گرفته شده است که می‌تواند توان تولیدی اضافی را جذب کند. در شکل (۷)، بلوک دیاگرام روش کنترل فرکانس شیب افقی بهبودیافته نشان داده شده است.  $T_d$  که ثابت زمانی فیلتر است، باید مقدار کمی در نظر گرفته شود. برای حذف نویز نیز فیلترهای LPF در نظر گرفته می‌شوند و شیب‌های  $1/m_1$ ،  $1/m_2$  و  $1/m_3$  نیز وظیفه تصمیم‌گیری توان مرجع خروجی/ورودی هر کدام از تولیدکننده‌ها را بر عهده خواهند داشت. خروجی‌های انتقالی  $U_{1p}$ ،  $U_{2p}$  و  $U_{Np}$  نیز در جهت بهتر شدن پاسخ گذرای هر کدام از سیستم‌های تولیدکننده توان، ایفای نقش خواهند کرد.

بهره‌برداری است. استراتژی نظیر به نظیر می‌تواند توسط کنترل شیب افقی اجرا شود که لازمه این امر آن است که همه ریزمنابع، مشخصه خارجی متنظری ارائه کنند. به منظور کنترل هماهنگ و بی‌عیب سیستم، دو روش کنترلی بر پایه روش شیب افقی وجود دارد:

۱. کنترل  $f - P/Q - V$ : مرجع توان‌های اکتیو و راکتیو را با اندازه‌گیری فرکانس سیستم و دامنه ولتاژ خروجی واحد DG فراهم می‌کند.

۲. کنترل  $P - f/V - Q$ : با اندازه‌گیری توان‌های اکتیو و راکتیو خروجی، فرکانس و دامنه ولتاژ خروجی واحد DG را کنترل می‌کند.

بنابراین در ریزشبهه‌های مستقل، در صورت عدم وجود شین مرجع (Slack Bus)، تولیدات پراکنده (ریزمنابع) براساس روش کنترل دروپ (شیب افقی) در تغذیه بارها مشارکت خواهند داشت به طوری که فرکانس ریزشبهه در محدوده مجاز خودش نگه داشته شود و منابعی چون توربین بادی، پنل‌های PV، پیل سوختی و ... به صورت منابع توان ثابت (PQ) استفاده خواهند شد [۲۲-۲۴]. در این مقاله، براساس روش شماره ۱، مرجع توان‌های اکتیو تولیدی ریزمنابع با اندازه‌گیری تغییرات فرکانس ریزشبهه تهیه شده‌اند.

### ۳. انحراف توان و تغییر فرکانس

مجموع توان تولیدی  $P_{GEN}$  باید به دقت و براساس نیاز بار طوری کنترل شود که تعادل توان تولیدی و مصرفی برقرار شود. اختلاف توان تولیدی و مصرفی بار را می‌توان به صورت زیر بیان کرد که  $\Delta P$  نامیده می‌شود:

$$\Delta P = P_{GEN} - P_{Load} \quad (8)$$

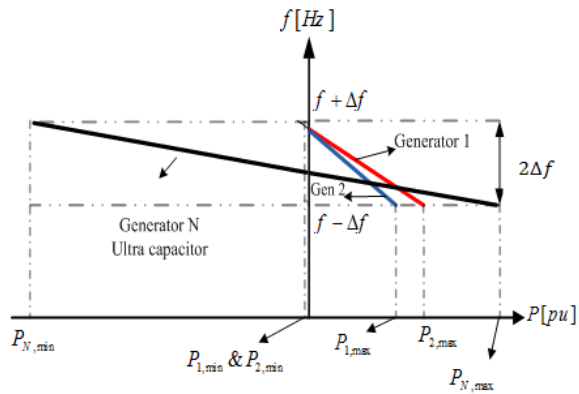
با کنترل  $\Delta P$  و  $\Delta f$ ، سیستم می‌تواند توان با کیفیت مناسبی تحویل بار دهد. تغییرات فرکانس  $\Delta f$ ، از تغییرات توان خالص  $\Delta P$  قابل محاسبه است و در شرایط ایدئال از رابطه (۹) بیان می‌شود:

$$\Delta f = \frac{\Delta P}{K_{sys}} \quad (9)$$

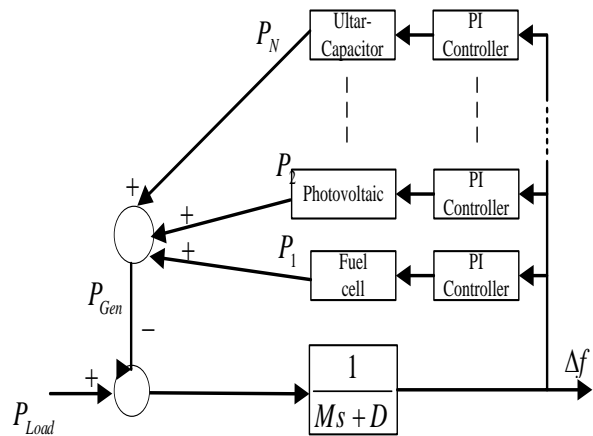
در رابطه فوق  $K_{sys}$  ثابت مشخصه فرکانسی سیستم است. در شرایط واقعی و عملی، یک تأخیر زمانی در مشخصه فرکانسی وجود دارد. تابع تبدیل تغییرات فرکانس سیستم بر حسب تغییرات پریونیت<sup>۵</sup> توان نیز به صورت رابطه (۱۰) بیان می‌شوند [۲۵]:

$$G_{sys} = \frac{\Delta f}{\Delta P} = \frac{1}{K_{sys}(1 + sT_{sys})} = \frac{1}{D + Ms} \quad (10)$$

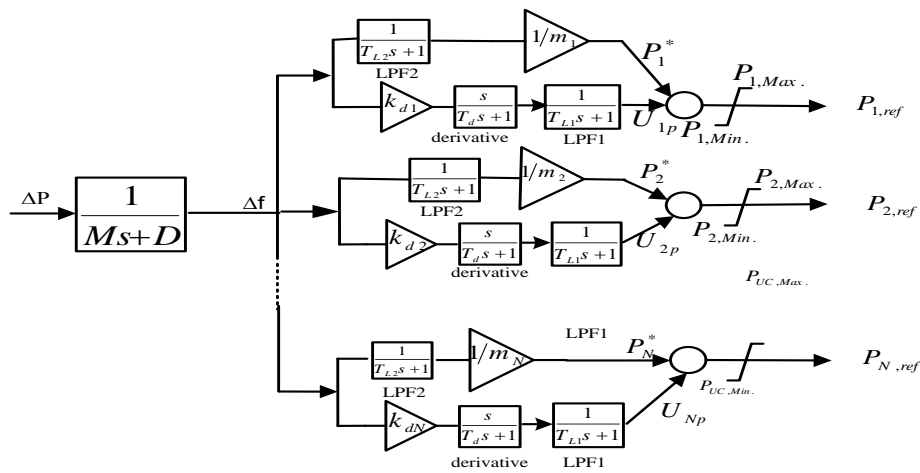
که  $D$  و  $M$  به ترتیب معادل ثابت‌های اینرسی و میرایی سیستم است. در این روش، با استفاده از  $\frac{1}{Ms+D}$  که مشخصه سیستم می‌باشد، انحراف فرکانس تشخیص داده می‌شود.



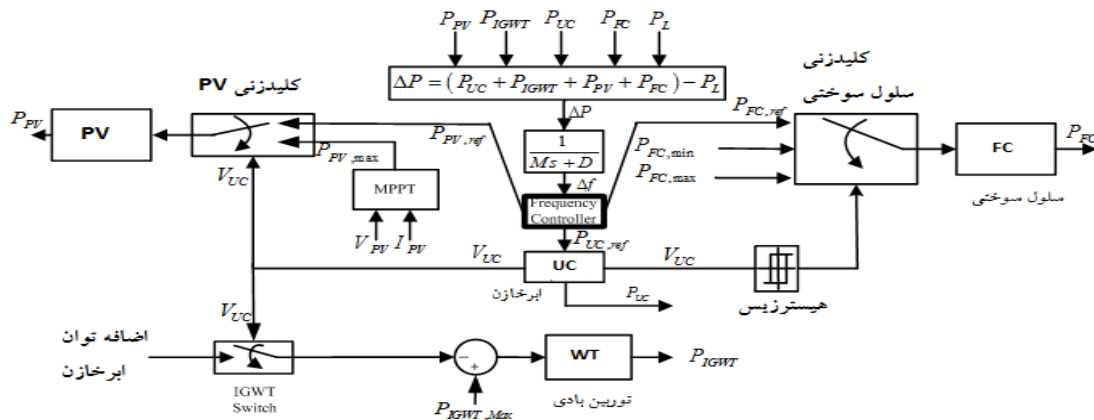
شکل (۶): منحنی فرکانس-توان روش شیب افقی



شکل (۵): روش کنترل فرکانس با استفاده از روش کنترل کننده PI



شکل (۷): بلوک دیاگرام روش کنترل فرکانس Droop بهبودیافته

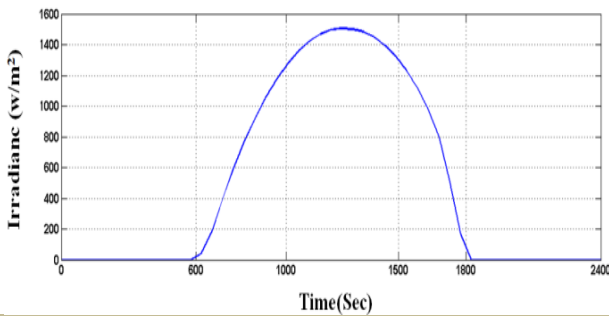


شکل (۸): دیاگرام کلی روش مورد استفاده

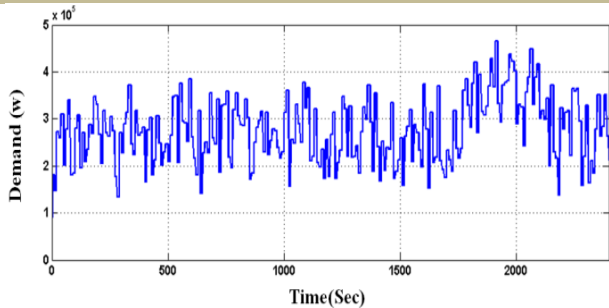
#### ۴. استراتژی کنترل مورد استفاده

الکترولایزر را نشان می‌دهد. ریزشبه‌ک مورد مطالعه، منفصل از سیستم اصلی می‌باشد. از آنجاکه بسته به وضعیت آب و هوایی سعی می‌شود

شکل (۸) دیاگرام کلی روش مورد استفاده و مربوط به حالت بدون



شکل (۱۰): اطلاعات تابش خورشید در طول مدت شبیه‌سازی



شکل (۱۱): منحنی تغییرات بار در طول مدت شبیه‌سازی

#### ۱.۵. با استفاده از کنترل کننده PI و با حضور الکترولایزر

با وجود الکترولایزر دیگر نیازی به کاهش توان تولیدی منابع نداریم، به همین دلیل سعی بر این است که حداکثر توان از سیستم PV و توربین بادی کشیده شود و سیستم PV با روش MPPT برای اخذ ماکزیمم توان کنترل می‌شود. شکل‌های (۱۲) تا (۱۶) به ترتیب توان سیستم PV، توان خروجی توربین بادی، تغییرات ولتاژ ابرخازن، توان تولیدی پیل سوختی، کلیدزنی پیل سوختی با باند هیستریزس را نشان می‌دهند.

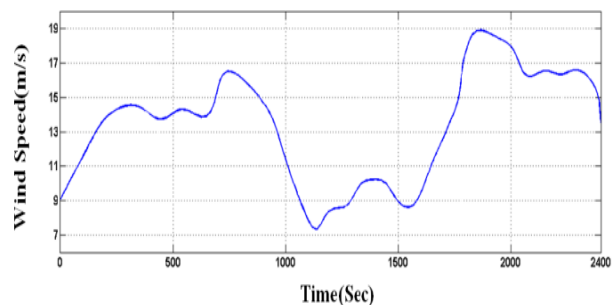
در لحظات ابتدایی، ولتاژ ابرخازن بالای ۴۰۰ ولت است و نوسانات در تولید سلول سوختی ناشی از فرمان‌های ارسال شده از کنترل‌کننده تناسبی می‌باشد. در ثانیه  $t = 78$ ، ولتاژ ابرخازن به ۴۰۰ ولت رسیده و موجب روشن شدن سلول سوختی می‌شود تا اینکه در  $t = 272$  ولتاژ به ۵۰۵ ولت افزایش می‌یابد و سلول سوختی خاموش می‌شود. از لحظه  $t = 520$  تا  $t = 600$  بار افزایش یافته و از آنجا که هنوز خروجی سیستم PV صفر است و توربین بادی نیز حداکثر توان خود را تولید می‌کند، ابرخازن کمبود توان را جبران می‌کند و به همین دلیل ولتاژش تا ۴۰۵ ولت افت می‌نماید. از ثانیه  $t = 600$  با کاهش بار و تولید PV مجدداً ولتاژ ابرخازن بالا می‌رود. افت ولتاژ شدید دیگری از ثانیه  $t = 1050$  رخ داده است. دلیل این امر کاهش سرعت باد و به تبع آن کم شدن تولید توربین بادی و همچنین افزایش جزئی بار است. این کاهش سطح ولتاژ تا ثانیه  $t = 1110$  ادامه دارد. در  $t = 1100$  نیز با رسیدن ولتاژ به ۴۰۰ ولت، سلول سوختی روشن شده است. همان‌طور که از شکل (۱۴) مشخص است، با افزایش بار از لحظه  $t = 1770$

حداکثر استفاده از انرژی بادی و خورشیدی صورت پذیرد، چنانچه ولتاژ ابرخازن بیش از حد مجاز شود، براساس ولتاژ ابرخازن تولید واحدهای بادی و خورشیدی کاهش می‌یابد و لذا می‌توان، توان مرجع آن‌ها را براساس ولتاژ ابرخازن تغییر داد.

به‌منظور بررسی عملکرد روش مورد استفاده جهت کنترل فرکانس، ولتاژ ثابت و برابر یک پریونیت فرض شده است. با توجه به رایگان بودن محرک اولیه توربین بادی و فتوولتائیک، سعی بر آن است که حداکثر توان از آن‌ها کشیده شود. این کار در مورد توربین بادی با کنترل زاویه پره‌ها و در فتوولتائیک از طریق مبدل متصل به آن و روش MPPT انجام می‌شود. کنترل فرکانس نیز بر عهده پیل سوختی و ابرخازن است. البته چون سرعت پاسخ ابرخازن بسیار بیشتر است، در حقیقت نقش اصلی کنترل فرکانس را بانک ابرخازن ایفا می‌کند. کلیدزنی سریع سلول سوختی ممکن است به آن آسیب وارد کند، به همین دلیل اگر ولتاژ خازن در محدوده ولتاژ نامی باشد، بهتر است که سلول سوختی کلیدزنی - نشود. استفاده از روش هیستریزس (Hysteresis) جهت برطرف کردن این مشکل، منطقی به نظر می‌رسد. هنگامی که ولتاژ ابرخازن در محدوده باند هیستریزس است، توان خروجی سلول سوختی تغییری نمی‌کند و کلیدزنی نمی‌شود.

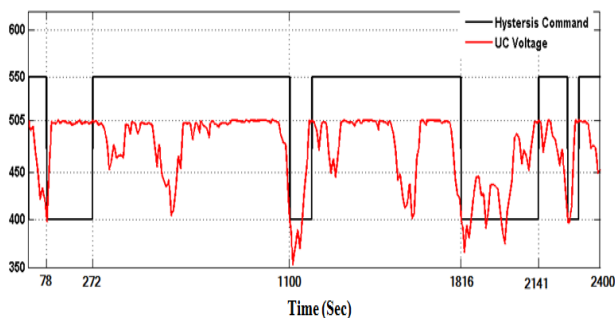
#### ۵. نتایج شبیه‌سازی کامپیوتری و تحلیل آن‌ها

برای ارزیابی عملکرد سیستم، اطلاعات سرعت باد، تابش خورشید و منحنی تقاضای بار به ترتیب در شکل‌های (۹) تا (۱۱) نشان داده شده‌اند [۱۷]. نتایج شبیه‌سازی با حضور الکترولایزر و با دو روش کنترلی PI و شیب افقی ارائه شده‌اند. توان توربین بادی در سرعت‌های بالای ۱۱ متر بر ثانیه برای محافظت قسمت‌های الکتریکی به مقدار نامی ۲۷۳ کیلووات محدود شده است.



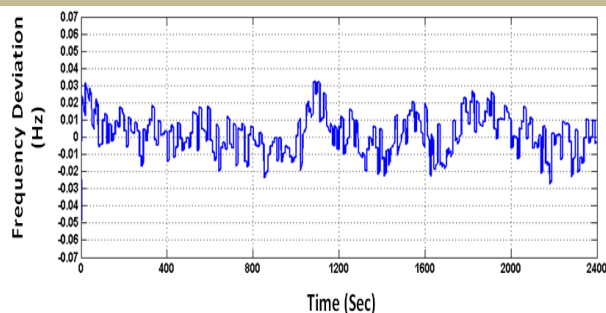
شکل (۹): اطلاعات سرعت باد در طول مدت شبیه‌سازی

کنترل توان و فرکانس بار مبتنی بر روش کنترلی شیب افقی... ۳۵

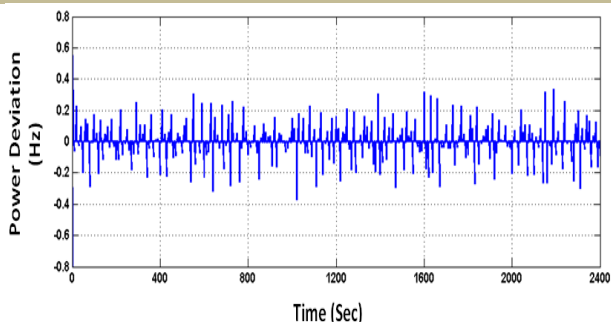


شکل (۱۶): کلیدزنی سلول سوختی با استفاده از باند هیستریزس در روش

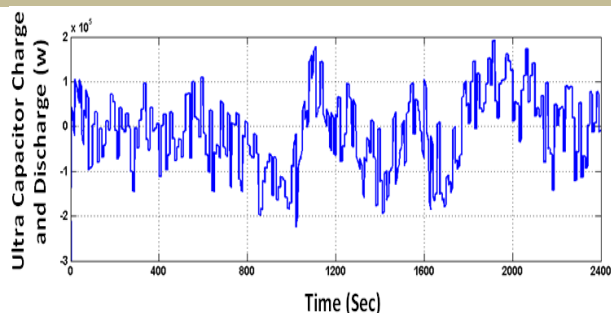
کنترل کننده PI



شکل (۱۷): انحراف فرکانس با استفاده از کنترل کننده PI



شکل (۱۸): تفاوت توان تولیدی و مصرفی با کنترل کننده PI



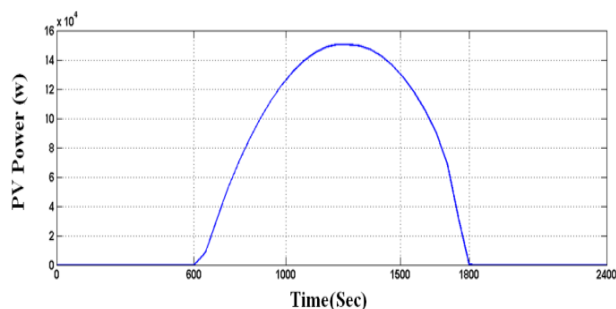
شکل (۱۹): شارژ و دشارژ ابرخازن در روش کنترل کننده PI

۲.۵. با استفاده از روش شیب افقی بهبود یافته

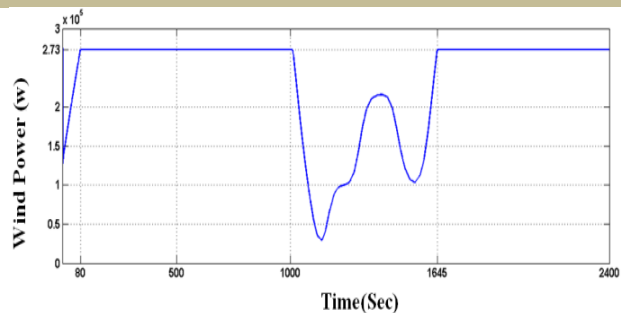
از آنجاکه روی توان‌های تولیدی توربین بادی و PV کنترلی وجود ندارد و در هر لحظه حداکثر توان ممکن از آنها استخراج می‌شود، توان‌های خروجی این منابع همانند شکل‌های (۱۲) و (۱۳) بوده و تغییری نمی‌کنند. اما این موضوع برای ابرخازن و سلول سوختی صادق نیست زیرا توان خروجی این دو منبع در هر لحظه تابع فرامین کنترل‌کننده

مجدداً ولتاژ ابرخازن افت می‌کند. با توجه به اینکه توربین بادی حداکثر توان خود را تولید می‌کند و سیستم PV نیز از ثانیه  $t = 1800$  توانی تولید نمی‌کند ولتاژ ابرخازن دوباره کاهش یافته و در  $t = 1800$  سلول سوختی نیز وارد مدار می‌شود.

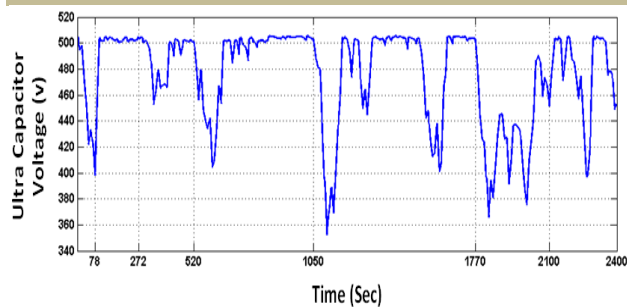
شکل‌های (۱۷) تا (۱۹) به ترتیب میزان انحراف فرکانس، تفاوت توان تولیدی و مصرفی در طول شبیه‌سازی و شارژ و دشارژ ابرخازن را نشان می‌دهند که در آن محدوده تغییرات فرکانس با حضور الکترولایزر و کنترل کننده PI بین  $-0.0273$  تا  $0.0327$  قرار دارد.



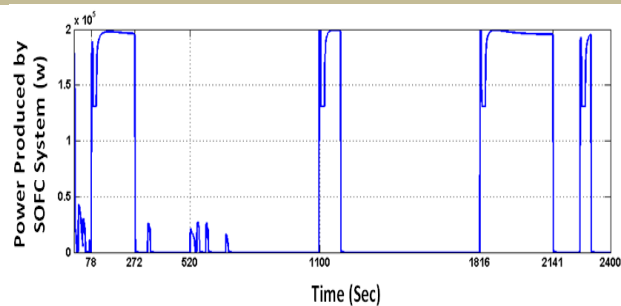
شکل (۲۰): توان سیستم PV در روش با کنترل کننده PI



شکل (۲۱): توان خروجی توربین بادی با کنترل کننده PI

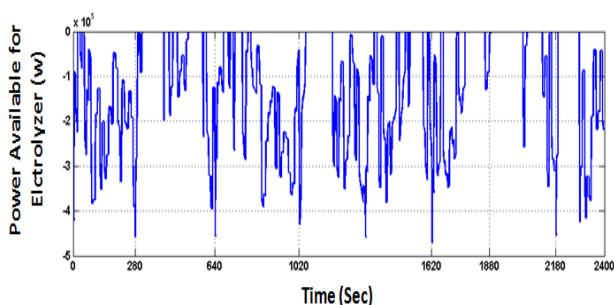


شکل (۲۲): تغییرات ولتاژ ابرخازن با استفاده از کنترل کننده PI

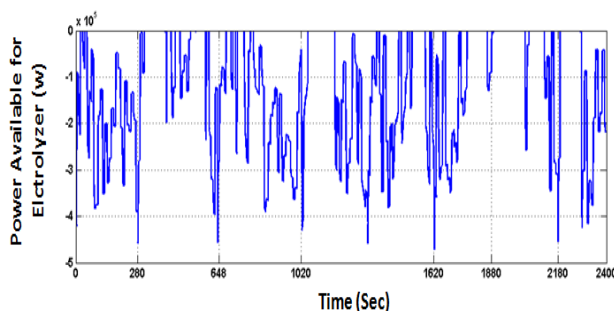


شکل (۲۳): توان تولیدی سلول سوختی با استفاده از کنترل کننده PI

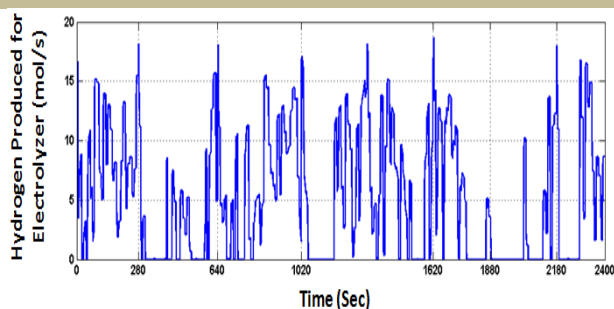




شکل (۲۰): توان ارسالی به الکترولایزر از کنترل‌کننده ولتاژ ابرخازن

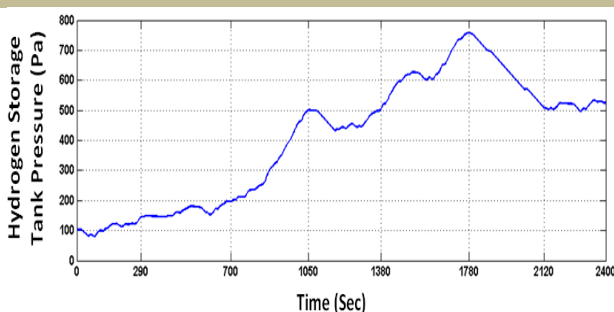


شکل (۲۱): توان دریافتی الکترولایزر در روش شیب افقی بهبود یافته

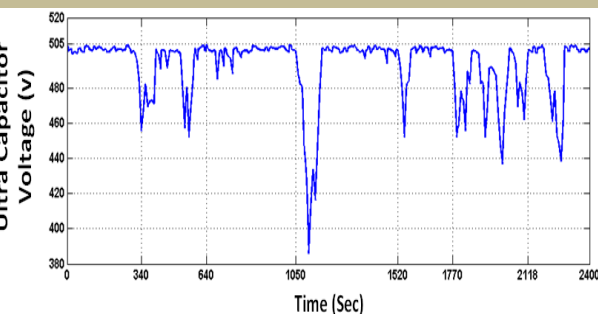


شکل (۲۲): هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر در روش شیب افقی

بهبود یافته



شکل (۲۳): فشار تانک ذخیره هیدروژن در روش شیب افقی

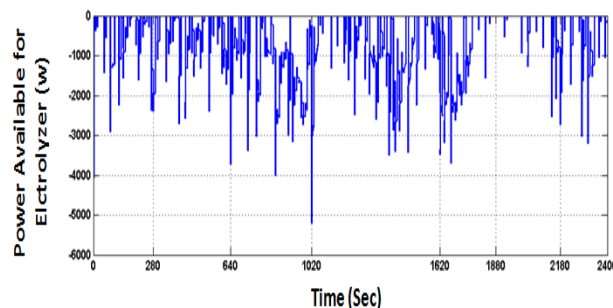


شکل (۲۴): ولتاژ ابرخازن در روش شیب افقی بهبود یافته

است. شکل (۲۰)، توان ارسالی به الکترولایزر از طریق کنترل‌کننده شیب افقی بهبود یافته در مواقع اضافه توان را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۲۱) توان ارسالی به الکترولایزر را در مواقعی که ولتاژ ابرخازن بیش از مقدار نامی (۵۰۰ ولت) است، نمایش می‌دهد. توان دریافتی الکترولایزر در هر لحظه از مقایسه این دو شکل حاصل شده و نتیجه این مقایسه در شکل (۲۲) نشان داده شده است.

با توجه به توان دریافتی که در شکل (۲۲) نشان داده شده است، الکترولایزر شروع به تولید هیدروژن می‌کند. شکل‌های (۲۳) و (۲۴)، به ترتیب هیدروژن تولیدی و فشار تانک ذخیره‌کننده هیدروژن را نمایش می‌دهند. از ثانیه  $t = 1050$  تا  $t = 1170$  توان ارسالی به الکترولایزر صفر است، بنابراین با توجه به اینکه سلول سوختی روشن می‌باشد، فشار تانک مقداری کاهش یافته که مجدداً با خاموش شدن سلول سوختی و در دسترس بودن توان برای الکترولایزر فشار افزایش می‌یابد. بین لحظات  $t = 1780$  تا  $t = 2120$  نیز با روشن بودن سلول سوختی و کاهش توان ارسالی به الکترولایزر، فشار کاهش یافته است. شکل‌های (۲۵) تا (۲۷)، به ترتیب ولتاژ ابرخازن، توان تولیدی سلول سوختی و نحوه کلیدزنی سلول سوختی توسط باند هیستریزس را نشان می‌دهند. افت ولتاژ شدید در لحظه  $t = 1050$  به دلیل کاهش سرعت باد و کم شدن تولید توربین بادی است که مابقی توان را ابرخازن با دشارژ خود تأمین کرده است. مشاهده می‌شود تا لحظه‌ای که ولتاژ ابرخازن به کمتر از ۴۵۰ ولت نرسیده، سلول سوختی خاموش است. پس از رسیدن ولتاژ به ۴۵۵ ولت سلول سوختی روشن شده و تا زمانیکه ولتاژ به ۵۰۵ ولت نرسیده همچنان به تولید توان ادامه می‌دهد.

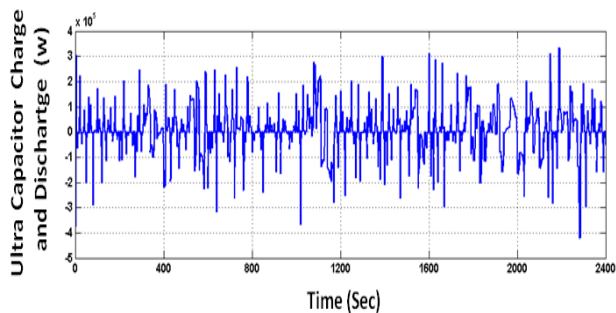
تغییرات فرکانس، تغییرات توان تولیدی و مصرفی و نیز شارژ و دشارژ ابرخازن به ترتیب در شکل‌های (۲۸) تا (۳۰) نشان داده شده است و محدوده تغییرات فرکانس برای این حالت بین  $-0.0193$  تا  $0.0166$  قرار دارد.



شکل (۲۵): ولتاژ ارسالی به الکترولایزر از کنترل‌کننده شیب افقی

بهبود یافته

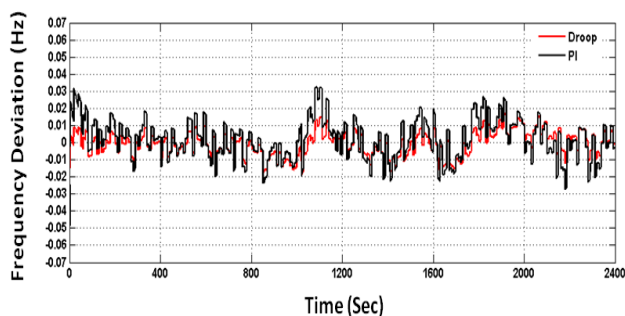
کنترل توان و فرکانس بار مبتنی بر روش کنترلی شیب افقی... ۳۷



شکل (۳۰): شارژ و دشارژ ابرخازن در روش شیب افقی بهبودیافته

۳.۵. مقایسه عملکرد کنترل کننده PI و روش شیب افقی بهبودیافته

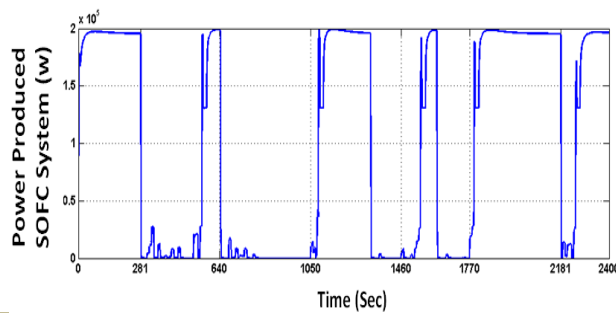
شکل (۳۱) مقایسه تغییرات فرکانس سیستم با دو کنترل کننده PI و شیب افقی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود روش شیب افقی در میرا کردن انحرافات فرکانس بهتر عمل کرده است. که ناشی از ارسال فرمان کنترلی مناسب‌تر به واحدهای تولیدی جهت ایجاد تعادل توان در شبکه است.



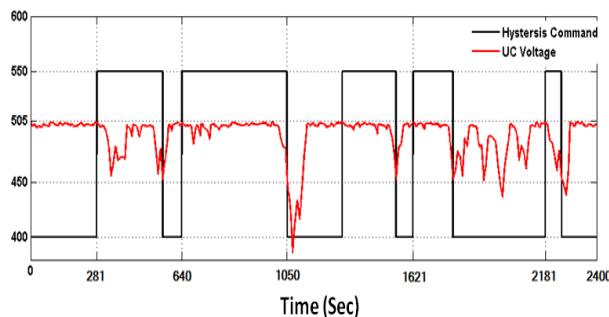
شکل (۳۱): مقایسه انحراف فرکانس با دو روش شیب افقی و کنترل کننده PI با حضور الکترو لایزر

۶. نتیجه گیری

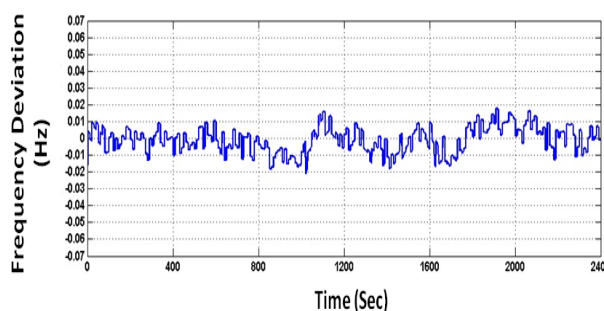
در این مقاله کنترل فرکانس یک سیستم ترکیبی مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر براساس ترکیبی از کنترل بار-فرکانس و کنترل ولتاژ ابرخازن ارائه شده است. در روش پیشنهادی، تغییرات بار توسط ابرخازن جبران شده و پیل سوختی وظیفه کنترل ولتاژ ابرخازن را در محدوده مجاز بر عهده دارد. عملکرد سیستم براساس اطلاعات سرعت باد، تابش خورشید و منحنی تقاضای بار مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای مشخص کردن مراجع توان دو کنترل کننده PI و شیب افقی به کار رفته و با هم مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که کنترل کننده شیب افقی، در مشخص کردن مراجع توان برای واحدها دقیق‌تر عمل کرده و نتیجه آن دامنه تغییرات فرکانس کمتر نسبت به کنترل کننده PI می‌باشد.



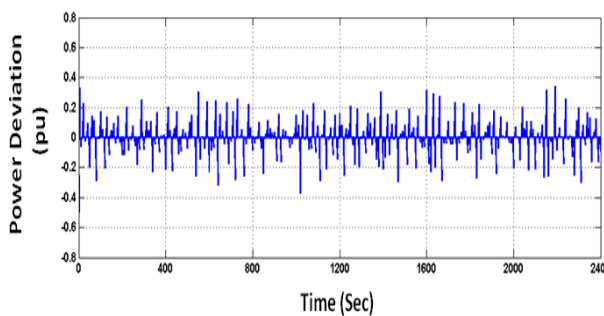
شکل (۳۶): توان سلول سوختی در روش شیب افقی بهبودیافته



شکل (۳۷): کلیدزنی سلول سوختی توسط باند هیستریزس



شکل (۳۸): انحراف فرکانس با استفاده از روش شیب افقی بهبودیافته



شکل (۳۹): تفاوت توان تولیدی و مصرفی در طول مدت شبیه‌سازی

## مراجع

- [1] El-Shatter, Thanaa F., Eskander, Mona N., El-Hagry, Mohsen T., "Energy Flow and Management of A Hybrid Wind/PV/Fuel Cell Generation System", Energy Conversion and Management, Vol. 47, No. 9 pp. 1264–1280, 2006.
- [2] Serban, I., Marinescu, C., "A Look at the Role and Main Topologies of Battery Energy Storage Systems for Integration in Autonomous Micro-grids", in 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, pp. 1186-1191, 2010.
- [3] Sendjaja, A.Y., Kariwala, V., "Decentralized Control of Solid Oxide Fuel Cells", IEEE Transaction on Industrial Informatics, Vol. 7, No. 2, pp. 163-170, 2011.
- [4] Lajnef, W., Vinassa, J. M., Azzopardi, S., Briat, O., Woïrgard E., Zardini C., Aucouturier J. L., "Ultracapacitors Modeling Improvement Using an Experimental Characterization Based on Step and Frequency Responses", in Power Electronics Specialists Conference, IEEE 35<sup>th</sup> Annual, pp. 131-134, 2004.
- [5] Uzunoglua, M., Onara, O.C., Alama, M.S., "Modeling, Control and Simulation of A PV/FC/UC Based Hybrid Power Generation System for Stand-Alone Applications", Renewable Energy, Vol. 34, No. 3, pp. 509-530, 2009.
- [6] Serban, I., Marinescu, C., "Frequency Control Issues in Microgrids with Renewable Energy Sources", 7<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), pp. 1-6, 2011.
- [7] Peças Lopes, J. A., Moreira, C.L., Madureira, A.G., "Defining Control Strategies for MicroGrids Islanded Operation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 21, No. 2, pp. 916-924, 2006.
- [8] Mokadem, M. El, Courtecuisse, V., Saudemont, C., Robyns, B., Deuse, J., "Fuzzy Logic Supervisor-Based Primary Frequency Control Experiments of a Variable-Speed Wind Generator", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 24, No. 1, pp. 407-417, 2009.
- [9] Uzunoglua, M., Onara, O.C., Alama, M.S., "Modeling, Control and Simulation of A PV/FC/UC Based Hybrid Power Generation System for Stand-Alone Applications", Renewable Energy, Vol. 34, No. 3, pp. 509-530, 2009.
- [10] Brabandere, K. De, Bolsens B., Van den Keybus, J., Woyte, A., "A Voltage and Frequency Droop Control Method for Parallel Inverter", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 22, No. 4, pp. 1107-1115, 2007.
- [11] Kalantar, M., Mousavi, S.M., "Dynamic Behavior of A Stand-Alone Hybrid Power Generation System of Wind Turbine, Microturbine, Solar Array and Battery Storage", Applied Energy, Vol. 87, pp. 3051-3064, 2010.
- [12] Gao, L., Jiang, Z., Daugal, R.A., "An Actively Controlled Fuel Cell/Battery Hybrid to Meet Pulsed Power Demands", Power Sources, Vol. 130, No. 1-2, pp. 202-207, 2004.
- [13] El-Shatter, Thanaa F., Eskander, Mona N., El-Hagry, Mohsen T., "Hybrid PV/Fuel Cell System Design and Simulation", Renewable Energy, Vol. 27, No. 3, pp. 479-485, 2002.
- [14] Sebastian, R., Quesada, J., "Distributed Control System for Frequency Control in A Isolated Wind System", Renewable Energy, Vol. 31, No. 3, pp. 285-305, 2006.
- [15] Barklund, E., Pogaku, N., Prodanovic, M., Hernandez-Aramburo, C., Tim C.G., "Energy Management in Autonomous Microgrid Using Stability-Constrained Droop Control of Inverters", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23, No. 5, pp. 2346-2352, 2008.
- [16] Serban, I., Marinescu, C., "A Look at the Role and Main Topologies of Battery Energy Storage Systems for Integration in Autonomous Micro-grids", in 12<sup>th</sup> International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, pp. 1186-1191, 2010.
- [17] Nayeripour, M., Hoseintabar, M., Niknam, T., "Frequency Deviation Control by Coordination Control of FC and Double-Layer Capacitor in an Autonomous Hybrid Renewable Energy Power Generation System", Renewable Energy, Vol. 36, No. 6, pp. 1741-1746, 2011.
- [18] Ulleberg, Ø., Mørner, S.O., "TRNSYS Simulation Models for Solar-Hydrogen Systems", Solar Energy, Vol. 59, No. 4-6, pp. 271-279, 1997.
- [19] Masoum, M.A.S., Dehbonei, H., Fuchs, E.F., "Theoretical and Experimental Analyses of Photovoltaic Systems With Voltage and Current-Based Maximum Power-Point Tracking", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 17, No. 4, pp. 514–522, Dec. 2002.
- [20] Sendjaja, A.Y., Kariwala, C., "Decentralized Control of Solid Oxide Fuel Cells", IEEE Transaction on Industrial Informatics, Vol. 7, No. 2, pp. 163-170, 2011.
- [21] Khan, M.J., Iqbal, M.T., "Dynamic Modeling and Simulation of A Small Wind-Fuel Cell Hybrid Energy System", Renewable Energy, Vol. 46, No. 3, pp. 421–39, 2005.
- [22] Wei Huang, Miao Lu, Li Zhang, "Survey on Microgrid Control Strategie", Energy Procedia, Vol. 12, pp. 206-212, 2011.
- [23] Prakash Kumar, Dheeraj Kumar Palwalia, "Decentralized

*Autonomous Hybrid Renewable Power Generation*", Hindawi Publishing Corporation, Journal of Renewable Energy, Vol. 2015, Article ID 856075, 18 pages.

[24] Abedini, M., Moradi, M.H., Hosseinian, S.M., "Optimal Management of Microgrids Including Renewable Energy Sources Using GPSO-GM Algorithm", Renewable Energy,

Vol. 90, pp. 430-439, 2016.

[25] Senjyu, T., Sakamoto, R., Urasaki N., Higa, H., Uezato, K., Funabashi, T., "A Hybrid Power System Using Alternative Energy Facilities in Isolated Island", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 20, No. 2, 2005.