

## بررسی و ارائه روشی برای کنترل کیفیت فرکانس شبکه با اضافه کردن سیستم های DG

محمد رضا یداللهی (دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون - باشگاه پژوهشگران جوان) mr\_yadollahi@yahoo.com

مسعود قناعت پیشه (دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون - باشگاه پژوهشگران جوان) nixan2004@yahoo.com

### خلاصه

امروزه با گسترش افزایش منابع تولید پراکنده (Distributed Generation) یا DGها در شبکه تولید و انتقال برق مواجه هستیم که این امر منجر به کاهش تعدادی از نیروگاه های متصل به شبکه شده است. البته این نیروگاه ها مسئول کنترل فرکانس شبکه می باشند. اما قادر نیستند تا به خوبی فرکانس را کنترل کنند. همچنین ما می دانیم در حال حاضر واحدهای DG نقشی بر کنترل فرکانس ندارد. به این جهت بر آن شدیم تا از این تکنولوژی نو بهره گرفته و به کنترل توان و فرکانس شبکه بپردازیم. باید توجه داشت که بخش قابل توجهی از واحدهای DG بوسیله یک مبدل برق - قدرت به شبکه متصل می شوند. این مبدل ها برای اجازه دادن به واحد DG در کمک کردن به کنترل فرکانس کارها و تنظیم اضافی را انجام می دهند. در این مقاله چگونگی ایفای نقش کنترل کننده ها، بزرگی سهم آنها و تاثیر انواع مختلف واحدهای DG در کنترل فرکانس مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. به هر حال کیفیت توان تولیدی بسیار مهم است و در بعضی مواقع کمبود کیفیت، باعث خسارات و مشکلات اقتصادی متعدد و جبران ناپذیری می شود که ما برای تنظیم فرکانس 50 Hz روشی را ارائه نموده ایم که بسیار موثر و اقتصادی می باشد.

کلمات کلیدی: کنترل فرکانس - پایداری شبکه - تولیدی نیروی پراکنده یا DG

### I- مقدمه

به سبب برخی پیشرفت ها در سیستم های برق - قدرت مانند: آزاد سازی (liberalization) و از کنترل خارج کردن (deregulation)، تعداد زیادی از ژنراتورهای کوچک به شبکه متصل خواهند شد. اتصال این واحدهای DG، عملکرد سیستم برق قدرت را بطور مؤثری تغییر خواهد داد.

امروزه فرکانس شبکه به وسیله نیروگاه های متصل در شبکه کنترل می شود. هدف از کنترل فرکانس، نگه داشتن عملکرد همزمان ژنراتورهای سنکرون در سیستم و ابقا تعادل توان است.

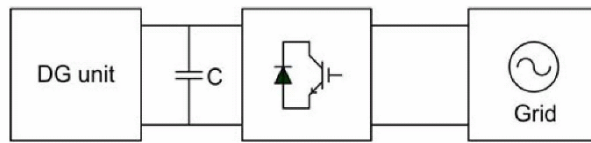
پاسخ ژنراتورهای سنکرون به تغییری در تعادل توان و انحراف فرکانس ناشی از آن می تواند به سه بخش تقسیم شود.

در بخش اول، در پی انحرافی در تعادل توان، روتور ژنراتورهای سنکرون انرژی جنبشی را آزاد یا جذب می کند و در نتیجه فرکانس تغییر خواهد کرد. پاسخ به وسیله حالت پویای سیستم (دینامیک سیستم) مشخص می شود در اینجا «پاسخ لختی» نامیده می شود. در بخش دوم، وقتی انحراف فرکانس از حد خاصی تجاوز کند، کنترل کننده ها برای تغییر توان ورودی محرک های اولیه فعال خواهند شد. وقتی که تعادل توانی برقرار شد، همچنان حالت پایداری یکنواخت از انحراف فرکانس برقرار خواهد بود.

در بخش سوم، کنترل ثانویه فرکانس، مقدار اسمی خود بازگردانده خواهد شد.

همانند آنچه که در شکل شماره ۱ نشان داده شده، بخش عظیمی از واحدهای DG از طریق یک مبدل برق - قدرت به شبکه متصل خواهند شد. و این قابلیت به ژنراتورها می دهد که اساساً با ژنراتورهای عادی در شبکه متفاوت است. برخی از انواع واحدهای DG تأمین کننده جریان DC هستند (سلول های سوخت فسیلی، سلول های خورشیدی) که به وسیله مبدل به AC تبدیل می شود. آنها بدون لختی (inertia-less) هستند و رابطه مستقیمی بین فرکانس و توان ندارند. دیگر انواع واحدهای DG بر اساس ماشین ها، بنیاد نهاده شده اند (توربین های بادی، میکروتوربین ها). اما مبدل، سرعت دورانی (چرخشی) آنها را از فرکانس شبکه برای فراهم کردن امکان عملکرد سرعت متغیر جدا می کند. از این رو آنها رابطه مستقیمی بین اینرسی خود و فرکانس شبکه ندارند.

بنابراین تمام این واحدهای DG در پاسخ لختی سهم نخواهند بود. در بعضی حالات برای «اینرسی مجازی» بخشیدن به این واحدهای DG یک حلقه کنترل می تواند تعبیه شود. [۱]



تصویر 1- مشخصات مختلف افت

تاکنون، واحدهای DG در کنترل اولیه شرکت نکرده اند. با افزایش سطح نفوذپذیری واحدهای DG، باید پذیرفت که آنها یا حداقل قسمتی از آنها جایگزین تولید فعلی شده و کنترل فرکانس سخت تر خواهد شد. بنابراین ممکن است لازم شود که واحدهای DG در کنترل اولیه و ثانویه فرکانس شرکت کنند.

در این مقاله بررسی خواهد شد که اگر واحدهای DG می توانند در کنترل اولیه فرکانس شرکت کنند، مشارکت آنها چقدر می تواند گسترده باشد، و چه کنترل اضافی باید انجام شود. مقاله با مروری کوتاه بر کنترل کلاسیک فرکانس شروع می شود. به دنبال آن تحقیقی در مورد واحدهای مختلف DG با در نظر داشتن قابلیت هایشان برای افزایش توان خود خواهیم داشت. در پژوهشی در پایان مقاله کنترل کننده های اضافی که مورد نیاز می باشند تشریح می شوند و نشان داده می شود که واحدهای DG می توانند در کنترل اولیه فرکانس شرکت کنند.

در این مقاله فقط مشارکت در کنترل اولیه بررسی خواهد شد. مشارکت در پاسخ لختی و کنترل ثانویه فرکانس به حساب آورده نشده اند.

## II- کنترل فعلی فرکانس

در این بخش کنترل فعلی فرکانس بطور مختصر مورد بررسی قرار می گیرد. بعد از افت در فرکانس شبکه، نیروگاه های متصل در شبکه به سرعت با باز کردن دریچه های سد انرژی آزاد می کنند. انرژی ذخیره شده در آن از رابطه زیر بدست می آید:

$$E = \frac{1}{2} J \omega_m^2 \quad (1)$$

که در آن J لختی یا اینرسی ماشین و  $\omega_m$  سرعت زاویه ای ماشین است. در مهندسی برق- قدرت اغلب ثابت لختی (اینرسی) معروف به H استفاده می شود که به صورت زیر تعریف می شود:

$$H = \frac{J \omega_m^2}{2S} \quad (2)$$

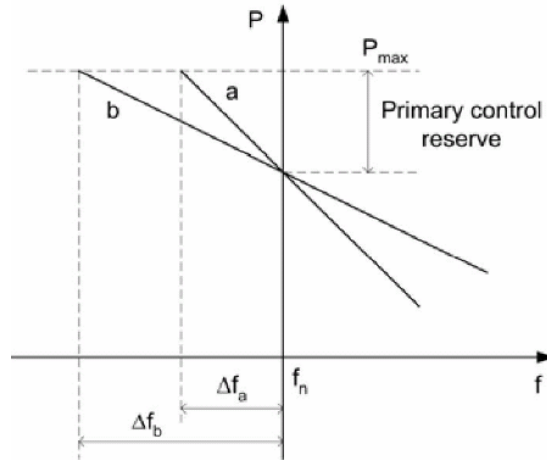
که در آن S توان ظاهری نامی ژنراتور می باشد. ثابت اینرسی دارای بعد زمان است و نشان دهنده مدت زمانی است که ژنراتور می تواند توان نامی را فقط با استفاده از ذخیره انرژی در آب پشت سد تأمین کند. ثابت های واقعی اینرسی برای ژنراتورهای نیروگاه های بزرگ در محدوده ۲-۹۵ هستند، بسته به اینکه در چه نوع نیروگاهی استفاده می شوند و سرعت زاویه ای نامی آنها چقدر است. [۲]

در پریودی که بلافاصله بعد از یک پارازیت است، انحراف فرکانس وابسته به اینرسی سیستم است. وقتی که انحراف فرکانس از یک مقدار اولیه از پیش تعیین شده تجاوز می کند، کنترل کننده های اولیه فرکانس نیروگاه ها واکنش نشان می دهند. انحراف بیشتر فرکانس بستگی به مشخصه افت، نگهداری کنترل کنترل اولیه و زمان گسترش یا (قرارگیری نیرو) deployment time دارد. ثابت افت که با  $K_D$  نشان داده می شود بدون واحد است و معمولاً به صورت درصدی بیان می شود:

$$K_D = \frac{-\Delta f / f_n}{\Delta P_G / P_{Gn}} \times 100\% \quad (3)$$

دو مشخصه مختلف افت، در شکل شماره ۲ نشان داده شده اند. همچنین از این تصویر معنی ذخیره کنترل اولیه را می تواند دریافت کرد و محدوده ای از کار ژنراتور است که از نقطه کار قبلی تارسیدن به توان حداکثر می باشد که در آن ژنراتور کنترل اولیه را تأمین می کند.

ذخیره کنترل اولیه با  $\Delta K$  مشخص می‌شود. زمان گسترش (فرارگیری نیرو) زمانی است که ژنراتور نیاز به افزایش توان خروجی خود دارد.



تصویر ۲- مشخصات مختلف افت ولتاژ

### III- نگهداری کنترل اولیه واحدهای DG

A. به منظور توانایی داشتن در تحلیل تاثیر درصد افزایش DG بر روی کنترل فرکانس، دانستن ویژگی‌های اساسی و قابلیت‌های هر یک از واحدهای DG ضروری است. مهم‌ترین آن عبارتند از: رفتار اصلی در طول انحرافات فرکانس، قابلیت افزایش توان ثابت و دینامیک مربوط به آن. بنابراین، این بخش به تشریح مشخصات انواع مختلف واحد DG می‌پردازد. سه نوع زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد:

- توربین بادی
- میکرو توربین
- سلول سوختی

از آنجا که انواع دیگر واحد DG فاقد مبدل برق- قدرت هستند مورد بررسی قرار نمی‌گیرند، زیرا آنها در مقیاس بسیار محدودی استفاده می‌شوند، یا اینکه اصلاً هیچ امکانی در افزایش توان خروجی خود ندارند.

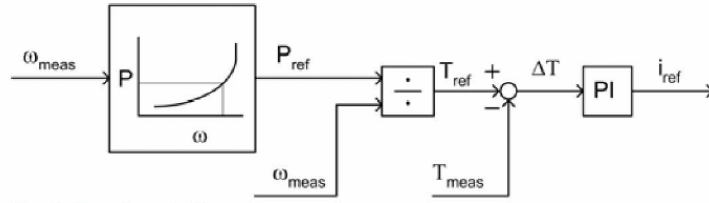
#### B. توربین‌های بادی

##### ۱- معرفی

اولین نوعی از واحد DG که مورد بررسی قرار می‌گیرد توربین بادی سرعت متغیر است. توان تولیدی آن بستگی به باد دارد که قابل کنترل نمی‌باشد. از این رو توربین‌های بادی نمی‌توانند در کنترل اولیه فرکانس نقشی داشته باشند. هر چند که پره‌های بزرگ توربین به این نوع واحد DG اینرسی قابل توجهی می‌دهند. انرژی جنبشی ذخیره شده در این جرم چرخنده می‌تواند برای مدت کوتاهی در کنترل اولیه فرکانس شرکت کند. همان گونه که سرعت دورانی توربین بصورت عادی از شبکه جدا می‌شود یک حلقه کنترل مورد نیاز است.

##### ۲- کنترل کننده

توربین‌های بادی سرعت متغیر دارای یک کنترل کننده سرعت می‌باشند که وظیفه دارد ضریب سرعت بهینه یا  $\lambda$  را در سرعت‌های گوناگون باد حداکثر نگهدارد. این مقدار مرجع از منحنی سرعت- توان از پیش تعیین شده که در شکل شماره ۳ نشان داده شده است بدست می‌آید. برای سرعت‌های پایین باد سرعت ژنراتور در سرعت پایین ثابت نگه داشته می‌شود و برای سرعت‌های باد بالاتر از سرعت مجاز حلقه کنترل سرعت با کم کردن تصاعدی تعداد دور پرها به منظور محدود کردن توان آیرودینامیکی از افزایش بسیار زیاد سرعت روتور یا ژنراتور جلوگیری می‌کند.



تصویر ۳- کنترل کننده سرعت

نیروی گشتاور مرجع از مشخصه استاتیکی  $P - \omega$  بدست می آید. خطای بین نیروی گشتاور حقیقی و مرجع به یک کنترل کننده PI فرستاد می شود که نقطه کاری به کنترل کننده جریان توربین می دهد. در حلقه ای دیگر که در اینجا نشان داده نشده است همچنین زاویه پرتاب توربین قابل کنترل است. خروجی کنترل کننده سرعت، نیروی گشتاور مرجع برای کنترل کننده جریان روتور DFIG است.

### ۳- انرژی جنبشی

انرژی ذخیره شده در جرم چرخنده با رابطه (۱) و ثابت اینرسی متناظر با رابطه (۲) مشخص شده اند. ثابت های واقعی اینرسی برای ژنراتورهای نیروگاه های بزرگ در محدوده ۹S-۲ هستند [۲]. مقادیر واقعی برای توربین های بادی به سختی مقدار یکسانی دارند: حدود ۶S-۲ [۳]. این بدان معناست که معرفی توربین های بادی در شبکه ضرورتاً میزان انرژی جنبشی قابل استفاده را کاهش نمی دهد.

انرژی جنبشی یک توربین بادی شامل انرژی جنبشی ذخیره شده در پره ها و انرژی جنبشی ژنراتور برقی می باشد. اینرسی پره های توربین بسیار بالاتر از مقداری است که در ژنراتور برقی خواهد بود. هر چه بیشتر بگذرد سرعت دورانی بسیار زیادتری خواهد داشت که همچنین منتهی به تولید میزان زیادی از انرژی جنبشی خواهد شد.

تاکنون فرض شده است که توربین بادی با توان حداکثر عمل می کند. انرژی جنبشی ذخیره شده در جرم چرخنده توربین بادی همانند آنچه که از رابطه (۱) دریافت می شود به سرعت دورانی بستگی دارد. با توربین های بادی سرعت متغیر، سرعت دورانی به سرعت باد بستگی دارد و با وجود این همچنین انرژی جنبشی قابل استفاده به سرعت باد بستگی دارد.

### ۴- نگهداری کنترل اولیه

توربین های بادی سرعت متغیر برای گرفتن حداکثر توان ممکن از باد کنترل شده هستند. بنابراین توربین های بادی فاقد نگهداری کنترل اولیه می باشند و به روش کلاسیک قادر به کنترل اولیه فرکانس نیستند. انرژی جنبشی ذخیره شده در اینرسی آنها به توربین ها این امکان را می دهد که برای دوره کوتاهی امکان پشتیبانی کنترل اولیه فرکانس را داشته باشند. یک مزیت خاص توربین های بادی سرعت متغیر این است که بر خلاف نیروگاه های حرارتی، می توانند توان خروجی خود را تقریباً لحظه ای افزایش دهند. این مشخصه مهمی است که بعداً روشن خواهد شد.

### C. میکروتوربین ها

میکروتوربین ها، توربین های گازی کوچکی هستند با سطوح توانی تا چند صد کیلووات. اساساً میکروتوربین ها می توانند به عنوان ورژن های کوچکی از ژنراتورهای گازسوز فعلی تلقی شوند. تفاوت های مهم عبارتند از اینکه آنها با سرعت های بسیار بالاتری کار کنند و با یک کانورتور برق قدرت به شبکه متصل شوند.

میکروتوربین های مورد بررسی واحدهای تک شافتی سرعت بالا هستند و مانند توربین و کمپرسور دارای ژنراتوری برقی روی همان شافت هستند. سرعت توربین غالباً در محدوده ۱۲۰۰۰-۵۰۰۰ rpm است. ژنراتور برقی بیشتر یک ماشین سنکرونه آهن ربای دائم است. یک کانورتور برق قدرت برای اتصال ژنراتور به شبکه مورد نیاز است. ژنراتورها و کانورتورهای استفاده شده کاملاً عادی هستند و بیشتر از این در اینجا تشریح نمی شوند.

به عنوان یک تقریب ساده بیشتر توربین های گازی می توانند به عنوان یک تابع انتقال مرتبه اول مدل شوند.

$$G_{gt}(s) = \frac{k_{mt}}{\tau_{mt}s + 1} \quad (4)$$

مقادیر ثابت زمانی یا که در نوشته‌ها دیده می‌شوند بطور قابل توجهی گوناگون هستند. در مدتی که میکروتوربین با توان کامل کار نمی‌کند، می‌تواند در کنترل اولیه فرکانس شرکت کند. مقداری که توان خروجی می‌تواند افزایش یابد بستگی به نگهداری کنترل اولیه  $\Delta K_{mt}$ ، میکروتوربین دارد، ماکزیمم افزایش ممکن در توان ، در لحظه‌ای خاص، به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\Delta P_{mt} = \Delta k_{mt} P_{mt,nom} \quad (5)$$

که در آن  $P_{mt, nom}$  توان نامی است. سرعتی که با آن توان خروجی افزایش می‌یابد بستگی به برخی ثابت‌های زمانی واقعی توربین گازی دارد. میزان افزایش توان  $dp_{mt}/dt$  به طور ذیل عنوان می‌گردد:

$$\frac{dP_{mt}}{dt} = \frac{P_{mt,nom}}{\tau_{mt}} \quad (6)$$

که در آن ثابت زمانی میکروتوربین است، با توجه به اینکه این معادله فقط تقریب سر دستی را می‌دهد. D. سلول سوختی

سلول‌های سوختی وسایل الکتروشیمیایی هستند، این سیستم‌ها برای کاربرد توان ثابت عموماً شامل سه قسمت اصلی هستند؛ پردازشگر سوخت (بهینه‌ساز) که سوخت‌ها را مانند گاز طبیعی به هیدروژن تبدیل می‌کند، خود سلول سوختی، جایی که فرآیندهای الکتروشیمیایی انجام می‌شوند و توان تولید می‌شود، و حالت دهنده توان که ولتاژ جریان و جریان dc را به ac تبدیل کرده و امکان اتصال به شبکه را فراهم می‌کند.

سلول‌های سوختی شامل یک الکتروود مثبت (آند) و یک الکتروود منفی (کاتد) و الکتروولیت می‌باشد. سوخت به آند می‌رسد، اکسید شده به و به کاتد می‌رود در حالی که اکسید شده الکتروشیمیایی در کاتد کاهش می‌یابد. سوخت بطور الکتروشیمیایی در آند اکسید می‌شود. وقتی که الکترون‌های ناشی شده از عمل اکسید شدن در آند از طریق یک مدار خارجی به سمت کاتد شار می‌کنند و مدار الکتریکی را کامل می‌نمایند، یون‌های تولید شده با واکنش‌های الکتروشیمیایی از طریق الکتروولیت بین آند و کاتد جاری می‌شوند [۴].

مدت پاسخ الکتریکی سلول‌های سوختی عموماً سریع است و این اساساً مربوط به سرعتی است که واکنش شیمیایی قادر است تا شارژی که توسط بار کشیده شده است را تأمین کند. اغلب سلول‌های سوختی یک بهینه‌ساز دارند که هیدروژن لازم برای فرآیندهای الکتروشیمیایی را تأمین می‌کند. اکثراً بهینه‌ساز گاز طبیعی را مورد استفاده قرار می‌دهد. بخاطر مدت زمان لازم برای تغییر پارامترهای واکنش شیمیایی بعد از تغییری در روند واکنش کننده‌ها فرآیندهای درون بهینه‌ساز نسبتاً کند تغییر می‌کند. این سرعتی را که سلول‌های سوختی می‌توانند توان خروجی خود را تغییر دهند محدود می‌سازد. این فرآیند نوعاً ثابت زمانی برابر با ۱۰ ثانیه دارد. فقط زمانی که ذخیره هیدروژنی موجود باشد سلول سوختی می‌تواند توانش را به سرعت افزایش دهد.

قابلیت سلول‌های سوختی در مشارکت در کنترل فرکانس بسته به این است که چقدر زیاد به چه سرعتی می‌توانند توان خروجی‌شان را افزایش دهند. حداکثر افزایش ممکن توان در لحظه‌ای خاص بستگی به نگهداری کنترل اولیه ،  $\Delta K_{fc}$ ، از سلول سوختی در همان لحظه خاص دارد. حداکثر افزایش ممکن توان  $\Delta K_{fc}$  ، در لحظه‌ای خاص به آسانی صورت زیر بیان می‌شود:

$$\Delta P_{fc} = \Delta k_{fc} P_{fc,max} \quad (7)$$

که در آن  $P_{mt,nom}$  توان اسمی می‌باشد.

سرعتی که با آن توان خروجی می‌تواند افزایش یابد بستگی به برخی ثابت‌های زمانی واقعی از سلول سوختی بهینه‌ساز (در صورت وجود) دارد. میزان افزایش توان  $dp_{fc}/dt$  بصورت زیر است:

$$\frac{dP_{fc}}{dt} = \frac{P_{fc,nom}}{\tau_{fc}} \quad (8)$$

که در آن ثابت زمانی سلول سوختی است که ترکیبی از تأخیرهای بهینه‌ساز و خود سلول سوختی است. باید توجه داشت که این معادله فقط تقریبی سردستی می‌دهد.

E. خلاصه: پاسخ‌های مکمل

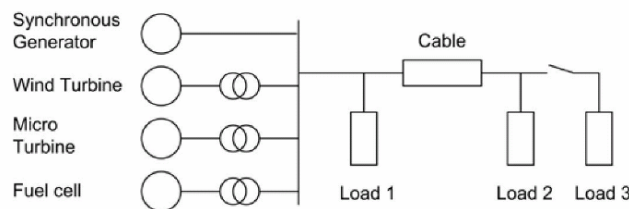
در این قسمت سه واحد مختلف DG تشریح شدند با تأکید بر قابلیت آنها در افزایش توان خروجی‌شان به هنگام ضرورت. برخی پاسخ‌های تکمیلی مورد ملاحظه هستند. از یک طرف سلول‌های سوختی، قادر به افزایش توان خروجی هستند اما سرعت این کار بخاطر بهینه‌ساز محدود شده است. از طرف دیگر توربین‌های بادی، می‌توانند توان اضافی را برای دوره کوتاهی تأمین کنند هر چند که قادر به افزایش سریع توان خروجی خود هستند. از این طریق، سلول‌های سوختی و توربین‌های بادی تکمیل کننده یکدیگر هستند.

IV. پژوهش

پژوهش‌ها برای نشان دادن قابلیت واحدهای DG برای مشارکت در کنترل فرکانس انجام شده است. برخی از نتایج در این جا به نمایش در آمده‌اند.

A- شبیه‌سازی مقدماتی

چند پژوهش بر روی مدل کوچکی از یک شبکه که شامل ژنراتور سنکرون عادی، توربین‌های بادی، سلول‌های سوختی، میکروتوربین‌ها و بار می‌باشد انجام شده است. مدل ساده شده‌ای از شبکه در شکل شماره ۴ نشان داده شده است.



تصویر شماره ۴- پژوهش شبکه

(۱) نیروگاه‌های عادی

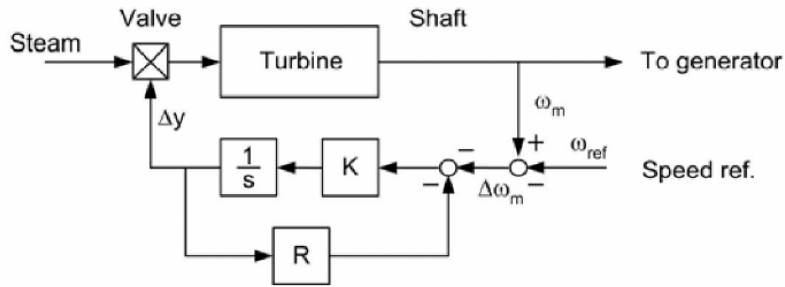
نیروگاه‌های فعلی به عنوان یک ماشین سنکرون که با توربین بخار دوباره گرم شده کار می‌کند مدل شده‌اند. مدل ماشین سنکرون استفاده شده. نمایش سه حلقه‌ای در مختصات  $df$  است سیم‌پیچ‌های میرا کننده به حساب آورده نشده‌اند. ژنراتور معمولی در معادلات ماشین بکار گرفته شده است که در پایین آمده‌اند:

$$\begin{aligned} L_d \frac{di_d}{dt} + L_{mf} \frac{di_{fd}}{dt} &= -u_d - R_s i_d - \omega_s L_q i_q \\ L_{md} \frac{di_d}{dt} + L_f \frac{di_{fd}}{dt} &= u_{fd} - R_{fd} i_{fd} \\ L_q \frac{di_q}{dt} &= -u_q - R_s i_q + \omega_s (L_d i_d + L_{md} i_{fd}) \end{aligned} \quad (9)$$

که در آن  $L_d$ ،  $L_q$ ،  $L_{md}$ ،  $L_{mf}$  و  $L_f$  اندوکتانس‌های ماشین سنکرون و  $R_s$  و  $R_{fd}$  مقاومت مربوط به استاتور و حلقه میدان و  $\omega_s$  فرکانس شبکه است. برای تنظیم کننده ولتاژ و تحرک مدل نوع ۱ معروف از [۵] استفاده شده است.

کنترل اولیه فرکانس بوسیله یک گاورنر که توان مکانیکی ترمین شده توسط توربین را کاهش یا افزایش می‌دهد انجام می‌شود. شکل شماره ۵ شماتیک یک سیستم کنترل سرعت (speed governer) را نشان می‌دهد. سرعت اندازه‌گیری شده روتور  $\omega_m$  با سرعت مرجع  $\omega_{ref}$  مقایسه می‌شود. سیگنال خطا (انحراف سرعت) برای دریافت سیگنال  $\Delta y$  که توربین را کنترل می‌کند تقویت شده و کامل می‌گردد. آن کنترل سوپاپ‌های اصلی تأمین بخار در یک توربین بخار یا گیت‌ها (ورودی‌ها) در توربین هیدرولیک را بر عهده دارد. برای

تقسیم پایدار بار بین واحدهایی که با هم موازی هستند، گاورنرها مشخصه‌ای را می‌گیرند که هنگام افزایش بار سبب افقی در سرعت می‌شوند. مشخصات سرعت می‌تواند با جمع کردن یک حلقه feed back حالت پایدار اضافی بدست آید.



تصویر ۵- گاورنر

محرک اولیه به عنوان یک توربین بخار مدل شده است. آن با تابع انتقال مرتبه دوم که رد [۶] مدل شده است.

$$H_{ST}(s) = \frac{1 + sF_{HP}T_{RH}}{(1 + sT_{CH})(1 + sT_{RH})} \quad (10)$$

که در آن:

ثابت زمانی حجم ورودی اصلی و دیگ بخار = ۰/۳S

ثابت زمانی گرم کن = ۷/۰S

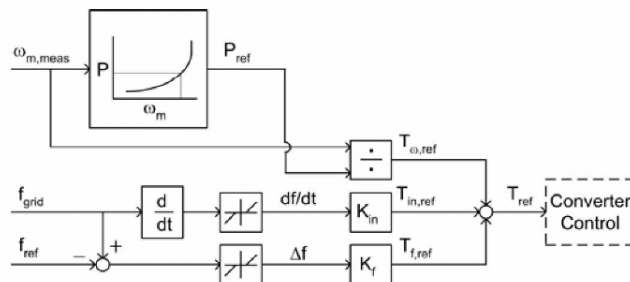
قسمتی از توان تولید شده توربین بوسیله بخش فشار قوی = ۰/۳

۲) توربین‌های بادی

مدل‌های توربین بادی سرعت متغیر ۲/۷۵ مگاواتی با ژنراتور القایی تغذیه مضاعف استفاده شده‌اند. تشریح کامل جزئیات توربین بادی مدل در [۷] یافت می‌شود.

بطور عادی کنترل کننده‌های توربین‌های بادی سرعت متغیر سعی می‌کنند که به منظور تولید توان حداکثر توربین را در سرعت بهینه‌اش نگه دارند. کنترل کننده یک نقطه نیروی گشتاور می‌دهد براساس توان و سرعت اندازه‌گیری شده قرار دارد، شکل شماره ۶. نقطه کار نیروی گشتاور یک ورودی برای کنترل کانورتور است که نیروی گشتاور را با کنترل کردن جریان‌های ژنراتور تحقق می‌بخشد. یک کنترل کننده اضافی تعبیه شده است که می‌تواند نقطه کار نیروی گشتاور را به عنوان تابعی از انحراف فرکانس شبکه یا  $\Delta f$  و میزان تغییر فرکانس شبکه یا تنظیم کند (شکل شماره ۶).

اینرسی برابر، متناسب با ثابت کنترل کننده یا kin است و پشتیبانی کنترل اولیه فرکانس جایی که حلقه (loop) اخیر به هنگامی که فرکانس شبکه از حدود خاصی تجاوز می‌کند فعال می‌شود متناسب با kf است. فقط کنترل کننده متناسب که کار کنترل اولیه فرکانس را انجام می‌دهد استفاده شده است.



تصویر ۶- کنترل کننده توربین بادی: شاخه بالایی: کنترل روتور بادی، شاخه وسطی: برابری اینرسی، شاخه پایینی: پشتیبانی کنترل فرکانس

### ۳) میکروتوربین

سیستم برقی یک میکروتوربین تشکیل شده است از یک ژنراتور آهنربای دائم و یک کانورتور بک-توبک (back-to-back converter) کانورتور (مبدل) سمت ژنراتور جریان ژنراتور را به منظور تنظیم سرعت آن کنترل می کند. مدل های ژنراتورهای آهنربای دائم و کانورتورهای برق-قدرت معروف هستند و در اینجا آورده نشده اند. برای مثال می توانند در [۷] و [۸] یافت شوند. توربین گازی به سادگی با یک تابع انتقال مرتبه اول که در رابطه (۴) توضیح داد، مدل می شود. ثابت زمانی توربین ها بر اساس [۹] قرار دارد. به منظور اجازه دادن به میکروتوربین برای شرکت در کنترل اولیه فرکانس، یک حلقه کنترل اضافی تعیبه شده است. این مشابه چیزی است که در شکل شماره ۶ برای توربین های بادی نمایش داده شده است.

### ۴) سلول سوختی

یک مدل سلول سوختی مدل اکسید جامد (SOFC) استفاده شده است. مدل ۱۰۰ کیلوواتی و پارامترهای آن بر اساس [۹] قرار دارد. سلول سوختی با کانورتور منبع ولتاژ سه فاز به شبکه متصل شده است. یک حلقه کنترل با ثابت افت مشخص در سیستم تعیبه گردیده تا به آن اجازه دهد که در کنترل اولیه فرکانس شرکت کند.

### B. کنترل فرکانس با ترکیب DG

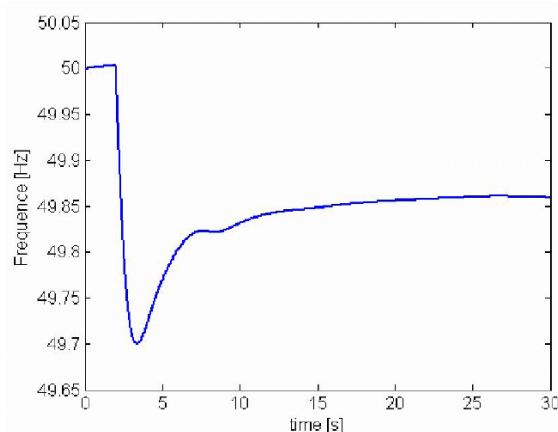
در پژوهش بررسی می شود که چگونه به نوع واحد DG می تواند با یکدیگر برای شرکت در کنترل فرکانس کار کنند. به عنوان یک رخداد، بار شماره ۳ در شکل شماره ۴ وارد مدار می شود. این به معنی افزایش ۱۰ درصدی توان مورد نیاز می باشد. مهمترین پارامترها در جدول شماره یک داده شده اند. می توان دید که توان کل شبکه نسبتاً کم است. آنها این گونه انتخاب شده اند تا بتوانیم سهم عظیم واحدهای DG را بدون ضرورت در مدل سازی و شبیه سازی تعداد زیادی واحدهای DG ببینیم.

Parameter	Value	Parameter	Value
$P_{sm,nom}$	100MW	$P_{load1}$	10MW
$P_{wt,nom}$	11MW	$P_{load2}$	90MW
$P_{mt,nom}$	4.5MW	$P_{load3}$	10MW
$P_{fc,nom}$	4.5MW		

جدول ۱

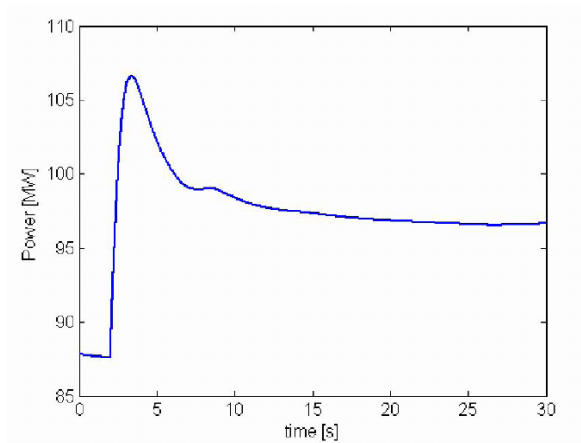
### جدول یک: پارامترهای پژوهش کنترل فرکانس با ترکیب DG

پاسخ فرکانس شبکه در شکل شماره ۷ نشان داده شده است. بعد از افت به ۴۹/۷۷HZ به سبب کنترل اولیه فرکانس، فرکانس کمی احیاء شده و به حدود ۴۹/۸۵HZ می رسد. بخاطر افت فرکانس ژنراتورهای سنکرون و واحدهای DG توان خروجی خود را افزایش خواهند داد. شکل شماره ۸ توان ماشین سنکرون را نشان می دهد. توان ترکیبی همه واحدهای DG با یکدیگر در شکل شماره ۹ به نمایش در آمده است.



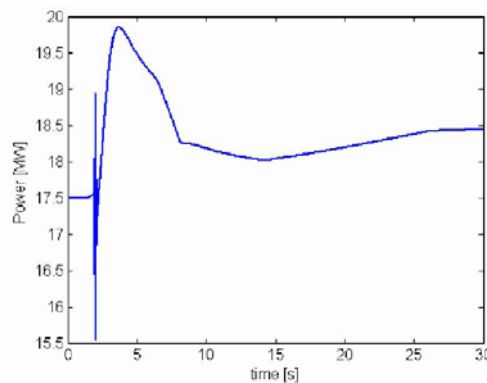


تصویر ۷- فرکانس شبکه پس از احیاء



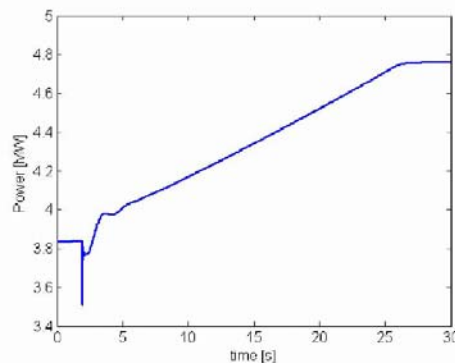
تصویر ۸- توان تامین شده توسط ژنراتور سنکرون (به عنوان نیروگاه‌های عادی متصل در شبکه)

حداکثر افزایش توان خروجی ماشین سنکرون تقریباً ۲۰٪ است و برای ترکیب واحدهای DG مقداری کمتر از ۱۳٪ است. در وضعیت افزایش حالت دائم تقریباً ۶٪ و همچنین کمتر از آن برای ماشین سنکرون است (۹٪~)

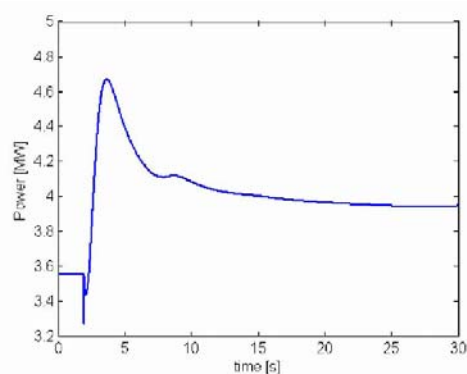


تصویر ۹- توان تامین شده توسط همه واحدهای DG با یکدیگر

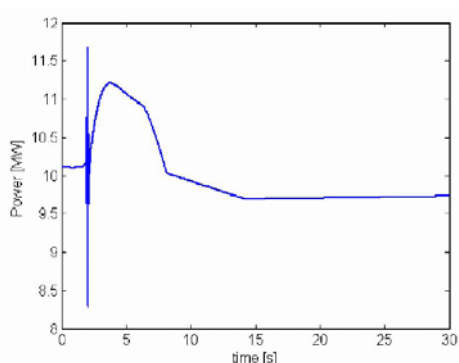
توان خروجی سلول سوختی، میکروتوربین بادی به ترتیب در شکل‌ها ۱۰، ۱۱، ۱۲ نشان داده شده‌اند. این می‌تواند در نظر گرفته شود که پاسخ سلول سوختی نسبتاً کند است و همچنین این موضوع را می‌توان از پاسخ ترکیبی در شکل شماره ۹ نیز دریافت کرد. توان خروجی توربین بادی بعد از اتمام مشارکت در پاسخ لختی و کنترل فرکانس افت خواهد کرد. و این را می‌توان از شکل شماره ۱۲ فهمید. بزرگی افت توسط کنترل کننده مشخص می‌شود. هر چه میزان افت کمتر باشد دوره‌ای که در آن توان کمتر از مقدار عادی‌اش (نرمال) است، طولانی‌تر خواهد بود.



تصویر ۱۰- توان سلول سوختی



تصویر ۱۱- توان میکروتوربین



تصویر ۱۲- توان توربین بادی

#### V. خلاصه و نتیجه

افزایش تعداد واحدهای DG در شبکه کنترل فرکانس را مشکل تر خواهد کرد. برای جلوگیری از انحرافات زیاد فرکانس واحدهای DG باید در کنترل فرکانس شرکت کنند. برای فراهم کردن امکان مشارکت واحدهای DG، باید قادر به افزایش توان خروجی خود باشد. کنترل کننده‌های اضافی که برای اجازه دادن به واحدهای DG به منظور مشارکت در کنترل اولیه فرکانس مورد نیاز هستند تشریح شدند. می‌توان نتیجه‌گیری کرد که امکانات برخی واحدهای DG متمم یکدیگر هستند (سلول سوختی و توربین بادی). بنابراین برای بدست آوردن مشارکت خوبی در کنترل اولیه فرکانس، لازم است که ترکیبی از انواع مختلف واحد DG داشته باشیم. در پژوهش نشان داده شد که چگونه واحدهای DG می‌توانند در کنترل اولیه فرکانس شرکت کنند. سپس بررسی شد که چگونه انواع مختلف واحد DG می‌توانند با یکدیگر کار کنند. در آخر این نتیجه بر خوردیم تا با استفاده از تکنولوژی DG به کنترل و بهبود فرکانس برسیم و راهی برای کیفیت تولید داشته باشیم. به هر حال در هر زمان امکان وجود پارازیت وجود دارد که بنا به گفته‌های قبل بهترین روش برای بهبود، اضافه کردن ۳ واحد یا تعدادی واحد مختلف از DG به شبکه است و این واحدها مکمل کننده یکدیگر هستند.

مراجع:

- [1] J. Morren, J.T.G. Pierik, S.W.H. de Haan, "Inertial response of variable speed wind turbines", submitted to *Electric Power Systems Research*, 2005.
- [2] J.J. Grainger, W.D. Stevenson, *Power System Analysis*, New York: McGraw-Hill, 1994.
- [3] H. Knudsen, J.N. Nielsen, "Introduction to the Modelling of Wind Turbines", in: T. Ackermann (ed.) *Wind Power in Power Systems*, pp. 525 - 585, Chicester: John Wiley, 2005.
- [4] J. Brouwer, "Fuel cells", in: A.-M. Borbely, J.F. Kreider (ed.), *Distributed Generation*, pp. 151 - 184, Boca Raton: CRC Press, 2001.

- [5] P.M. Anderson, A.A. Fouad, *Power System Control and Stability*, Iowa State University Press, Iowa, 1977.
- [6] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, New York: McGraw-Hill, Inc. 1993.
- [7] J.T.G. Pierik, J. Morren, Edwin Wiggelinkhuizen, S.W.H. de Haan, T.G van Engelen, Jan Bozelie, *Electrical and control aspects of offshore wind turbines II (Erao-2), Vol. 1: Dynamic models of wind farms*, Technical report ECN-C- -04-050, ECN, 2004, June 2004.
- [8] J. Morren, J.T.G. Pierik, S.W.H. de Haan, "Voltage dip ride-through of direct-drive wind turbines", in *Proc. 39th International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2004)*, Bristol, UK, 6- 8 September 2004.
- [9] Y. Zhu, K. Tomsovic, "Development of models for analyzing the loadfollowing performance of microturbines and fuel cells", *Electrical Power Systems Research*, Vol. 62, pp. 1 - 11, 2002.