

روش اکتیو جدید جهت تشخیص جزیره‌ای شدن در حضور واحدهای تولید پراکنده سنکرون

محمد رضا احمدی نیا
دانشجوی کارشناسی ارشد برق-قدرت

جواد ساده
استادیار گروه برق

دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران
Mohammadreza_ahmadinia@yahoo.com, Sadeh@um.ac.ir

واژه‌های کلیدی: تولید پراکنده، جزیره‌ای شدن، روش اکتیو، جبران‌ساز

چکیده

بهره‌گیری از واحدهای تولید پراکنده به سرعت در حال افزایش است و بسیاری از این واحدها به سیستم توزیع اتصال یافته‌اند. جزیره‌ای شدن یا قطع شبکه اصلی در صورتی روی می‌دهد که به واسطه برخی دلایل، تامین توان از شبکه اصلی قطع گردد، در حالی که واحد تولید پراکنده همچنان به تغذیه سیستم توزیع ادامه می‌دهد. از آنجا که جزیره‌ای شدن اثرات منفی در حفاظت و عملکرد سیستم توزیع دارد، ایجاد جزیره باید بطور موثری تشخیص داده شده و واحد تولید پراکنده از سیستم توزیع جدا گردد. در صورتی که بعد از شکل‌گیری جزیره نامتعادلی توان (اکتیو یا راکتیو) در جزیره قابل توجه باشد، ایجاد جزیره به آسانی و با اندازه‌گیری پارامترهایی نظیر فرکانس و ولتاژ قابل تشخیص است. اما در صورت کوچک بودن نامتعادلی توان، تشخیص قطع شبکه اصلی با روشهای متعارف دشوار است. در این مقاله یک روش اکتیو جدید جهت استفاده در واحدهای تولید پراکنده سنکرون پیشنهاد شده است. روش پیشنهادی هیچگونه اثر منفی در عملکرد

عادی سیستم در شرایط وصل شبکه نداشته و می‌تواند قطع شبکه اصلی را در شرایطی که نامتعادلی توان‌ها کوچک هستند، بدرستی و در زمان کوتاه تشخیص دهد. نتایج شبیه‌سازی بر روی شبکه نمونه، کارآمدی روش پیشنهادی را نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

بر طبق استاندارد IEEE STD 1547-2003 [۱]، جزیره بخشی از شبکه است که از بقیه سیستم جدا گردیده و تنها توسط واحد تولید پراکنده تغذیه می‌گردد. بر طبق استاندارد فوق ایجاد جزیره باید حداکثر پس از دو ثانیه از شکل‌گیری شناسایی شده و واحد تولید پراکنده از شبکه جدا گردد. در این متن همواره جزیره‌ای شدن ناآگاهانه مدنظر است. جزیره‌ای شدن آگاهانه یا عمدی نیز که به معنی باز کردن بریکر با برنامه‌ریزی قبلی است، می‌تواند باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم شده و در بازیابی مجدد سیستم کمک زیادی کند [۲].

بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

فرکانس قطع شبکه را تشخیص داد [۴]. روش ولتاژی نیز بر نامتعادلی توان راکتیو استوار است، چراکه در صورت بزرگ بودن نامتعادلی توان راکتیو تغییرات ولتاژ باس‌ها پس از قطع شبکه قابل توجه است [۵]. در صورتی که نامتعادلی توان اکتیو کوچک باشد، روش فرکانسی موثر نبوده و می‌توان از نرخ تغییر فرکانس یا ROCOF جهت تشخیص بهره گرفت [۶]. در روش شیفت برداری از تغییر فاز ناگهانی ولتاژ پایانه ژنراتور جهت تشخیص استفاده می‌گردد. تغییر ناگهانی ایجاد شده در جریان خروجی ژنراتور با قطع شبکه، تغییر فاز ناگهانی ولتاژ پایانه ژنراتور را به همراه دارد، چراکه افت ولتاژ در طول راکتانس ژنراتور نیز بطور ناگهانی تغییر می‌کند [۷]. مهمترین روشهای اکتیو پیشنهادی نیز عبارتند از: روش مبتنی بر مانیتورینگ مداوم امپدانس سیستم [۸]، روش مبتنی بر توان راکتیو و روش مبتنی بر توان اکتیو [۹].

روش مبتنی بر مانیتورینگ مداوم امپدانس بر این اصل استوار است که با قطع شبکه، امپدانس دیده شده از دید واحد تولید پراکنده تغییر زیادی خواهد داشت، از این رو با اندازه‌گیری مداوم این امپدانس می‌توان قطع شبکه را تشخیص داد. این روش نسبتاً کارآمد است، اما به دلیل مشکلاتی که در پیاده سازی دارد، چندان مورد توجه قرار نگرفته است.

در روش مبتنی بر توان راکتیو، جبران‌سازی به سیستم تحریک اضافه می‌شود. این جبران‌ساز تمایل دارد که افزایش و یا کاهش ولتاژ را تشدید کند. طبیعی است که جبران‌ساز تنها در زمان ایجاد جزیره قادر به تغییر ولتاژ است و در سایر زمان‌ها ولتاژ توسط شبکه تعیین می‌گردد. با قطع شبکه در صورت کاهش (یا افزایش) جزئی در ولتاژ، کاهش (یا افزایش) ولتاژ توسط جبران‌ساز اضافه شده، تشدید شده و باعث خروج ولتاژ از محدوده مجاز و عملکرد رله کاهش (یا افزایش) ولتاژی می‌گردد.

روش مبتنی بر توان اکتیو نیز مشابه روش مبتنی بر توان راکتیو است با این تفاوت که در آن جبران‌ساز اضافه شده تمایل دارد که افزایش و یا کاهش فرکانس را در زمان قطع شبکه اصلی، تشدید کرده و فرکانس را وادار به خروج از محدوده مجاز سازد.

روشهای بسیاری جهت تشخیص قطع شبکه اصلی پیشنهاد گردیده است. این روشها به دو دسته کلی روشهای محلی و غیر محلی تقسیم شده‌اند [۳].

روشهای محلی نیز در دو دسته روشهای پسیو و روشهای اکتیو قرار می‌گیرند. روشهای محلی از اطلاعات و کمیت‌های موجود در خروجی واحد تولید پراکنده استفاده می‌کنند. روشهای محلی قرار گرفته در نوع پسیو به اندازه گیری برخی از پارامترهای سیستم نظیر ولتاژ و فرکانس بستگی داشته و بنابراین تداخلی در کار عادی سیستم ندارند [۳].

در روش‌های اکتیو نیز تغییراتی به واحد تولید پراکنده اعمال شده و از پاسخ واحد به این تغییرات جهت تشخیص قطع شبکه استفاده می‌شود. این روشها نسبت به روشهای پسیو موثرتر بوده، اما این دقت بیشتر به بهای کاهش کیفیت توان شبکه تمام خواهد شد [۳].

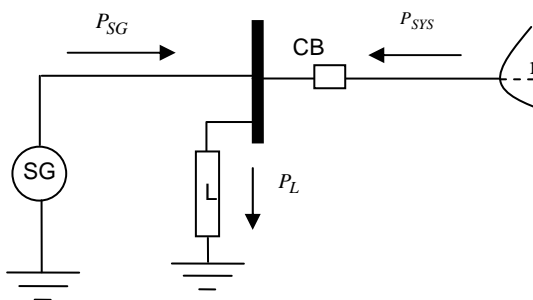
در روشهای غیر محلی، یک ارتباط مخابراتی بین واحد تولید پراکنده و شبکه وجود دارد. این روشها نسبت به روشهای محلی موثرتری هستند. اما در مقابل روشهای هزینه‌بری بوده و از لحاظ اقتصادی چندان به صرفه نیستند [۳]. در تقسیم‌بندی دیگری روشهای تشخیص قطع شبکه اصلی در دو دسته مبتنی بر ژنراتور سنکرون و مبتنی بر اینورتر قرار می‌گیرند [۲]. بدیهی است که روشهای مبتنی بر ژنراتور سنکرون برای واحدهای تولید پراکنده سنکرون و روشهای مبتنی بر اینورتر برای واحدهای تولید پراکنده‌ای که جهت اتصال به شبکه از یک واسط اینورتری بهره می‌گیرند، نظیر واحدهای بادی و فتوولتایی مناسب هستند. از آنجاکه روش پیشنهادی در این مقاله از نوع مبتنی بر سنکرون است، در ادامه مهمترین روشهای پسیو و اکتیو مبتنی بر ژنراتور سنکرون بطور خلاصه بررسی می‌گردند.

مهمترین روشهای پسیو عبارتند از: روش فرکانسی، روش ولتاژی، روش مبتنی بر نرخ تغییر فرکانس یا ROCOF و روش شیفت برداری.

روش فرکانسی بر این اصل استوار است که با قطع شبکه اصلی در صورتی که نامتعادلی توان اکتیو در جزیره زیاد باشد، فرکانس از محدوده مجاز خارج شده و می‌توان با اندازه‌گیری

بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

$$P_{SG} - P_L = \frac{2H}{f_0} \cdot \frac{df}{dt} \quad (2)$$



شکل ۱: واحد تولید پراکنده اتصال یافته به شبکه

در زمان مجاز جهت تشخیص (کمتر از دو ثانیه) به دلیل عملکرد آهسته گاورنر، توان تولیدی توسط ژنراتور تغییر چندانی ندارد [۶]. روش پیشنهادی از وابستگی بارها به ولتاژ استفاده کرده و با تغییر توان مصرفی بارها، در هنگام قطع شبکه بر طبق رابطه ۲ میزان نرخ تغییر فرکانس را تغییر داده و در نتیجه فرکانس را از محدوده مجاز خارج می‌سازد.

اصول کار بدین ترتیب است که با قطع شبکه و تغییر فرکانس، در صورتی که نرخ تغییر فرکانس مثبت باشد، ولتاژ پایانه توسط سیستم کنترل ولتاژ (AVR) کاهش داده می‌شود (AVR تنها در صورت قطع شبکه قادر به تغییر ولتاژ بار است و در سایر شرایط ولتاژ بار توسط شبکه تعیین می‌گردد) که خود این مساله به کاهش توان مصرفی بار و در نتیجه بر طبق رابطه ۲ به افزایش نرخ تغییر فرکانس منجر خواهد شد و بالعکس در صورت کم شدن فرکانس پس از قطع شبکه با افزایش مصرف توان بارهای مصرفی وابسته به ولتاژ این کاهش فرکانس تشدید شده تا جایی که منجر به عملکرد رله-های کاهش فرکانسی گردد.

در این روش فرض گردیده است که رله خاصی با هدف تشخیص قطع شبکه به ژنراتور اضافه نمی‌شود و تنها از رله فرکانسی که بر طبق استانداردهای موجود تمامی واحدهای تولید پراکنده سنکرون به آن مجهز هستند استفاده می‌گردد.

قبل از توضیح چگونگی پیاده‌سازی روش بر روی واحد تولید پراکنده سنکرون ابتدا در بخش ۳ چگونگی مدلسازی ژنراتور

روش مبتنی بر توان راکتیو، روش سریعی بوده و تمامی موارد جزیره‌ای شدن را بدرستی تشخیص می‌دهد، اما در مقابل وابستگی بسیار زیادی به تغییر در امپدانس شبکه داشته و امکان عملکرد نابجای آن نیز در مواردی نظیر سوئیچینگ خازن و ... زیاد است. روش مبتنی بر توان اکتیو وابستگی ناچیزی به تغییر در امپدانس شبکه داشته و امکان عملکرد نابجای آن نیز کم است، اما در مقابل بدلیل وابستگی به عکس‌العمل گاورنر سرعت کمتری داشته و نیز در صورت داشتن سهم بار القائی زیاد قادر به تشخیص قطع شبکه نیست [۹].

در روش پیشنهادی در این مقاله نیز مشابه روش‌های فوق جبران‌سازی به ژنراتور سنکرون اضافه می‌گردد. روش پیشنهادی سرعت قابل قبولی داشته و در حضور سهم زیاد بار القائی نیز قادر به تشخیص قطع شبکه است. همچنین وابستگی آن به تغییر در قدرت اتصال کوتاه شبکه بسیار کم بوده و در شرایط وصل شبکه عملکرد مناسبی داشته و امکان عملکرد نابجا ندارد.

در ادامه اصول اساسی روش پیشنهادی و نحوه پیاده‌سازی آن بر روی ژنراتور سنکرون بیان شده و سپس عملکرد روش در شرایط قطع و وصل شبکه اصلی در حضور بارهای مختلف با شبیه‌سازی شبکه نمونه در نرم‌افزار MATLAB، مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲- اصول اساسی روش پیشنهادی

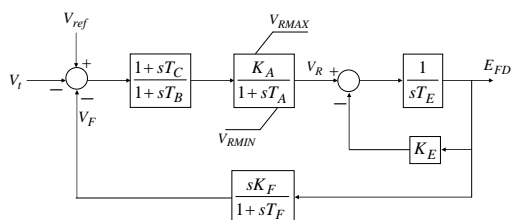
در شکل ۱ یک واحد تولید پراکنده که به صورت موازی با شبکه کار می‌کند نشان داده شده است. در شرایط دائمی بخشی از توان بار، توسط شبکه و بخشی توسط ژنراتور سنکرون تامین می‌گردد. در صورتی که این توازن بهم بخورد، فرکانس سیستم طبق رابطه ۱ دارای گذرانی خواهد بود.

$$P_{SYS} + P_{SG} - P_L = \frac{2H}{f_0} \cdot \frac{df}{dt} \quad (1)$$

با قطع شبکه، رابطه ۱ به رابطه ۲ تبدیل می‌شود. چراکه با قطع شبکه توان تامینی توسط شبکه حذف شده و بار مصرفی تنها توسط ژنراتور تامین می‌گردد.

بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

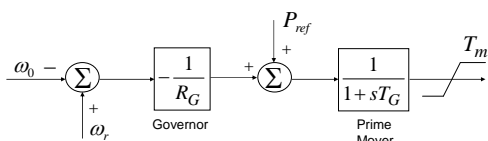
می‌توان در نظر گرفت. در مد کنترل ولتاژ^۱، AVR سعی در حفظ ولتاژ در محدوده مجاز دارد و در مد کنترل توان راکتیو^۲، AVR توان راکتیو تولیدی ژنراتور یا به عبارت بهتر ضریب توان ژنراتور را کنترل می‌کند. در روش پیشنهادی فرض گردیده است که AVR در مد کنترل ولتاژ (حالت رایج‌تر) قرار دارد. در صورتی که AVR در مد کنترل توان راکتیو باشد، باید تغییراتی در روش اعمال گردد که چگونگی اعمال این تغییرات در انتهای بخش ۴ توضیح داده خواهد شد. سیستم تحریک مورد استفاده از نوع DC (IEEE DC1A) بوده و بلوک دیاگرام کنترلی آن در شکل ۲ نشان داده شده است [۴].



شکل ۲: بلوک دیاگرام کنترل سیستم تحریک

۳-۳-۳ مدل‌سازی گاورنر

سیستم کنترل سرعت (یا فرکانس) ژنراتور سنکرون از گاورنر و یک محرک اولیه تشکیل شده است و قدرت مکانیکی لازم جهت ژنراتور را فراهم می‌سازد. گاورنر توسط یک بهره که مقدار آن عکس ثابت دروپ گاورنر است مدل‌سازی شده و محرک اولیه نیز توسط یک تابع مرتبه یک با ثابت زمانی T_G مدل‌سازی می‌گردد. در شکل ۳ بلوک دیاگرام کنترلی گاورنر که در مطالعه روش پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است، نشان داده شده است.



شکل ۳: بلوک دیاگرام کنترلی گاورنر [۹]

سنکرون و سیستم های کنترلی آن شرح داده خواهد شد. همچنین از آنجاکه در بخش‌های بعد ارزیابی روش بر روی شبکه نمونه صورت خواهد گرفت در کنار مدل‌سازی ژنراتور سنکرون مدل‌سازی سایر قسمت‌های شبکه نمونه (بار محلی و شبکه اصلی) نیز در بخش ۳ ارائه می‌گردد.

۳-۳-۳-۱ مدل‌سازی واحد تولید پراکنده سنکرون و سیستم قدرت

در سالهای اخیر به دلیل تجدید ساختار در صنعت برق و پیشرفت‌های تکنولوژیکی استفاده از واحدهای تولید پراکنده مبتنی بر ژنراتور سنکرون افزایش یافته است. یک واحد تولید پراکنده سنکرون در حالت کلی از ژنراتور سنکرون، سیستم تحریک و گاورنر تشکیل شده است.

۳-۳-۱-۱ مدل‌سازی ژنراتور سنکرون

در این مطالعه از مدل کلاسیک ژنراتور سنکرون شامل سه سیم‌پیچ بر روی استاتور و سه سیم‌پیچ بر روی رتور (سیم‌پیچ تحریک و دو سیم‌پیچ دمپر) استفاده می‌گردد. همچنین در مطالعات تشخیص قطع شبکه فرض می‌گردد که بدترین حالت جزیره‌ای شدن زمانی است که نامتعادلی توان در جزیره کوچک باشد و سیستم در حالت ماندگار قرار داشته باشد. فرضیات زیر نیز در مورد ژنراتور سنکرون در نظر گرفته می‌شود.

- توزیع شار در فاصله هوایی به صورت سینوسی است.
- هیستریزس مغناطیسی قابل صرف‌نظر است.
- اشباع مغناطیسی ناچیز است.

با در نظر گرفتن ساده‌سازی‌های فوق و استفاده از تبدیل پارک معادلات ولتاژ، شار مغناطیسی و گشتاور بدست می‌آیند، که در اینجا از نوشتن معادلات صرف‌نظر می‌شود [۹].

۳-۳-۲ مدل‌سازی سیستم تحریک

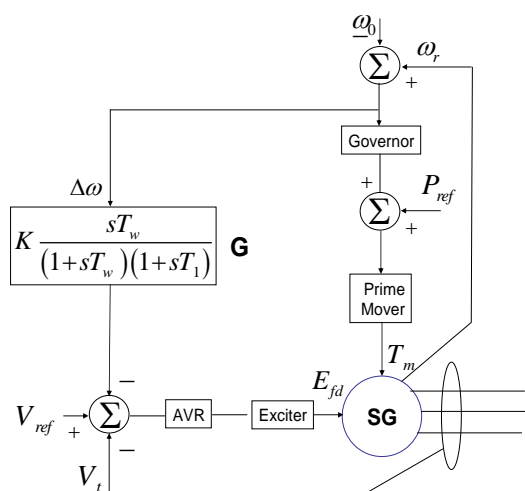
اغلب ژنراتورهای سنکرون به سیستم تحریک مجهز هستند. سیستم تحریک با تغییر مناسب ولتاژ تحریک، ولتاژ پایانه ژنراتور (یا توان راکتیو تولیدی ژنراتور) را در محدوده مشخصی حفظ می‌کند. برای AVR دو مد کنترلی مختلف را

1. V-control mode
2. Q-control mode

بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

۳-۴- مدلسازی بار

طبیعت بار اثر زیادی در رفتار دینامیکی ژنراتور در هنگام ایجاد جزیره دارد. مدلسازی دقیق بار به دلیل اینکه در یک باس بار نمونه انواع مختلفی از بار (هیترها، کمپرسورها، موتورها و ...) وجود دارد، کار بسیار دشواری است [۹]. بر پایه ساده‌سازی‌های بسیار دو نوع بار در اغلب مطالعات مربوط به تشخیص قطع شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرند که این دو نوع بار عبارتند از: بار RLC و بار موتور القایی. بار RLC به طور ساده از اتصال موازی عناصر مقاومت، سلف و خازن تشکیل می‌گردد. همچنین از آنجا که بین ۲۰ تا ۷۰ درصد توان هر فیدر در سیستم‌های توزیع توسط موتورها مصرف می‌گردد [۹]، سهم قابل قبولی از بار القایی (در کنار بار RLC) باید در مطالعات قطع شبکه لحاظ گردد. بار القایی مورد استفاده از نوع موتور القایی با گشتاور ثابت بوده و برای موتور القایی نیز از مدل استاندارد آن یا همان مدل IEEE استفاده می‌گردد.



شکل ۴: چگونگی اعمال روش پیشنهادی بر روی ژنراتور سنکرون

عملکرد حلقه کنترلی اضافه شده بدین صورت است که جبران‌ساز G، تغییرات سرعت ژنراتور (تغییرات فرکانس) را به عنوان ورودی دریافت داشته و خروجی آن از مقدار ولتاژ مبنا کاسته می‌شود. بنابراین با افزایش فرکانس، مقدار ولتاژ مبنا کاهش یافته و بنابراین ولتاژ پایانه در صورت قطع شدن شبکه اصلی، کاهش یافته و در نتیجه آن مقدار بار نیز کاهش یافته و طبق رابطه ۲ فرکانس افزایش خواهد یافت و بالعکس. بدیهی است که مقادیر پارامترهای جبران‌ساز باید به نحوی انتخاب گردند که در حالت وصل شبکه تداخلی در عملکرد ژنراتور ایجاد نگردد.

در بخش ۶ که به طراحی جبران‌ساز مربوط است، درباره دلیل انتخاب پارامترهای T_w ، T_1 و K برای جبران‌ساز و نحوه محاسبه مقدار آنها بحث خواهد شد. اما از آنجا که باید محاسبه مقادیر پارامترها توسط شبیه‌سازی روی سیستم نمونه صورت گیرد ابتدا در بخش ۵ سیستم نمونه مورد بررسی معرفی خواهد شد.

۳-۵- مدلسازی شبکه

در مطالعات تشخیص جزیره‌ای شدن، شبکه قدرت با یک باس بی‌نهایت مدل می‌گردد. اما از آنجا که بی‌نهایت بودن باس نسبی است، در مدلسازی سیستم، شبکه با یک منبع ولتاژ ایده‌آل که در پشت یک امپدانس متغیر قرار گرفته است مدلسازی می‌گردد.

تغییر در قدرت و توپولوژی شبکه نیز با تغییر امپدانس معادل تونن شبکه و یا به عبارتی تغییر قدرت اتصال کوتاه شبکه مدلسازی می‌گردد. بدیهی است شبکه با امپدانس معادل تونن کمتر به باس بی‌نهایت نزدیکتر بوده و شبکه قوی‌تری محسوب می‌گردد و بالعکس.

۴- چگونگی پیاده‌سازی روش بر روی ژنراتور سنکرون

همانگونه که در بخش ۲ بیان گردید، در روش پیشنهادی در این مقاله از وابستگی بارها به ولتاژ بهره گرفته شده است و تغییرات ولتاژ باید به نحوی صورت گیرد که در زمان شکل‌گیری جزیره، افزایش یا کاهش فرکانس تشدید گردد.

بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

قدرت اتصال کوتاه شبکه نیز در شرایط عادی برابر ۱۰۰۰ مگاوات آمپر است. یعنی امپدانس شبکه در شرایط عادی برابر ۱ درصد در نظر گرفته می‌شود.

۶- طراحی جبران‌ساز بر پایه شبیه‌سازی

در این بخش جهت ارائه یک طرح کلی جهت طراحی جبران‌ساز از ایده بهره حلقه‌باز کمک گرفته شده است. همچنین از نرم‌افزار MATLAB جهت انجام شبیه‌سازی‌های لازم استفاده شده است.

بهره حلقه‌باز با باز کردن حلقه اضافه شده توسط جبران‌ساز اندازه‌گیری می‌شود. در شکل ۶ چگونگی باز شدن حلقه نشان داده شده است. T_{in} و T_{out} نقاط باز شده حلقه اکتیو اضافه شده هستند. بهره حلقه‌باز نیز با توجه به تابع تبدیل سیگنال کوچک بر طبق رابطه ۳ تعریف می‌گردد.

$$T(s) = \frac{T_{out}}{T_{in}} \quad (3)$$

برای حلقه اکتیو اضافه شده اصول اساسی مورد نیاز جهت طراحی عبارتند از:

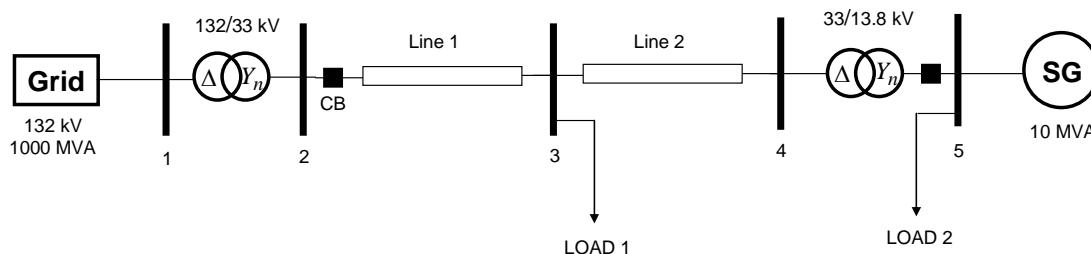
۱- زمانی که شبکه وصل است، بهره حلقه‌باز باید یک سیستم پایدار را نشان دهد. به عبارت دیگر باید مقدار ماکزیمم بهره منفی بوده و زیر 0dB باشد. در اینصورت می‌توان اطمینان حاصل کرد که حلقه اضافه شده در عملکرد عادی سیستم اثری ندارد.

همچنین در صورتی که AVR در مد کنترل توان راکتیو باشد، و ورودی ولتاژ مبنا در سیستم کنترل وجود نداشته باشد (در مد کنترل توان راکتیو نیز معمولاً ورودی ولتاژ مبنا در نظر گرفته می‌شود)، می‌توان خروجی جبران‌ساز را از مقدار مبنای توان راکتیو کم کرد. طبیعی است که در این صورت نیز تغییرات توان راکتیو و در نتیجه تغییرات ولتاژ بنحوی خواهد بود که عملکرد دلخواه حاصل گردد. البته در این حالت نیز باید تابع تبدیل جبران‌ساز و پارامترهای آن به نحو مناسب انتخاب گردند.

۵- شبکه نمونه مورد بررسی

بلوک دیاگرام شبکه مورد مطالعه در این مقاله در شکل ۵ نشان داده شده است. در شبکه نشان داده شده ایجاد جزیره با باز شدن بریکر CB شبیه‌سازی می‌گردد.

ژنراتور سنکرون دارای ظرفیت ۱۰ مگاوات آمپر بوده و در اتصال به شبکه از استاندارد IEEE 1547 تبعیت می‌کند. بارهای ۱ و ۲ نیز در شرایط عادی هر دو از نوع RLC با ضریب کیفیت ۱٫۸ بوده و ضریب قدرت آنها برابر واحد می‌باشد. بار LOAD1 همواره ۷۵ درصد از بار کل جزیره را شامل شده و ۲۵ درصد باقیمانده نیز سهم LOAD2 خواهد بود. در شرایط عادی میزان تولید ژنراتور برابر ۸ مگاوات بوده (ضریب قدرت واحد) و مجموع بارهای ۱ و ۲ نیز همین مقدار در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۵: دیاگرام تک‌خطی شبکه نمونه

کرد که قطع شبکه حتی در شرایطی نامتعادلی توان کوچک است نیز قابل تشخیص است.

۲- زمانی که شبکه قطع می‌گردد، بهره حلقه‌باز باید یک سیستم ناپایدار را نشان دهد. و مقدار ماکزیمم بهره بیشتر از 0dB باشد. با داشتن سیستم ناپایدار می‌توان اطمینان حاصل

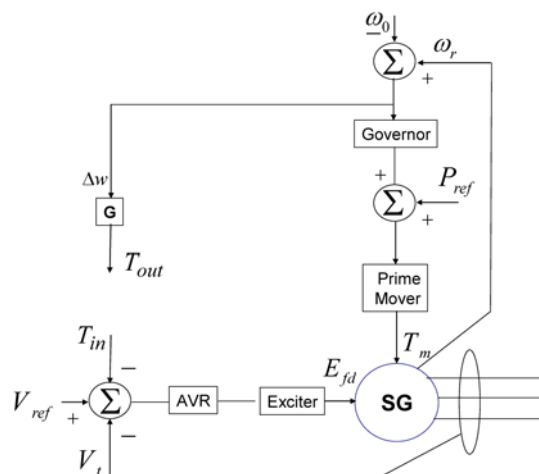
بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

جبران‌ساز G باید داشته باشیم $|H_1 G| < 1$ و بنابراین $|G| < \frac{1}{|H_1|}$. این بدین معنی است که به ازای تمامی فرکانس-ها باید اندازه جبران‌ساز کمتر از عکس اندازه بهره جبران‌ساز شده در زمان وصل شبکه باشد. همچنین بر طبق قاعده ۲ باید داشته باشیم $|H_2 G| > 1$ و در نتیجه $|G| > \frac{1}{|H_2|}$. بنابراین ویژگی‌های جبران‌ساز مطلوب تعیین می‌گردد و می‌توان با آزمون و خطا پارامترهای مناسب را بدست آورد.

شبیه‌سازی‌های اولیه صورت گرفته بر روی سیستم نمونه نشان می‌دهد که از بین عوامل قدرت اتصال کوتاه شبکه، سطح توان خروجی ژنراتور، ضریب کیفیت بار RLC و درصد سهم بار القایی از کل بار، تنها سهم بار القایی عامل مهمی بوده و باید در نظر گرفته شود. نتایج نشان می‌دهد که دیاگرام بُد $\frac{1}{|H_1|}$ در حضور بار القایی بالاتر از دیاگرام بُد در حضور بارهای RLC قرار می‌گیرد و بنابراین طراحی جبران‌ساز باید در حضور بارهای RLC صورت پذیرد. همانگونه که اشاره شد ترسیم دیاگرام‌های بُد بر پایه شبیه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB صورت پذیرفته و با توجه به حدود تعیین شده توسط دیاگرام‌های جبران‌ساز نشده (H_1 و H_2) دیاگرام بُد مطلوب جبران‌ساز و سپس از طریق آزمون و خطا پارامترهای جبران‌ساز محاسبه می‌گردند.

در ادامه و با کمک شبیه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB پارامترهای جبران‌ساز مناسب برای شبکه نمونه معرفی شده به روش بهره حلقه‌باز محاسبه می‌گردد.

در شکل ۷ دیاگرام بُد توابع $\frac{1}{|H_1|}$ و $\frac{1}{|H_2|}$ در محدوده فرکانسهای 0.01-10 Hz رسم شده است. بدلائل اشاره شده دیاگرام مطلوب جبران‌ساز باید بین این دو دیاگرام قرار گیرد. دیاگرام مطلوب و دیاگرام واقعی تقریب زده شده جبران‌ساز نیز در شکل ۷ رسم شده‌اند. پارامترهای جبران‌ساز که با آزمون و خطا بدست آمده‌اند عبارتند از:

$$T_1 = 0.05s \text{ و } T_w = 0.4s, K = 75$$


شکل ۶: شماتیک ماشین سنکرون با حلقه اکتیو باز شده

در شکل ۴ تابع تبدیل جبران‌ساز نیز نشان داده شده است. گام اصلی در طراحی جبران‌ساز تعیین ثوابت زمانی T_1 ، T_w و گین K است. T_w ، فرکانس گوشه فیلتر پاک‌ساز است و تنها به سیگنالهایی با فرکانس بیشتر از $\frac{1}{T_w}$ اجازه عبور می‌دهد. با داشتن چنین فیلتری میزان اثر حلقه اکتیو اضافه شده در شرایط ماندگار به حداقل می‌رسد. فیلتر پایین‌گذر با فرکانس گوشه T_1 جهت کاهش اثرات نویز فرکانس بالا اضافه می‌گردد. مجموعه فیلتر پاک‌ساز و فیلتر پایین‌گذر یک فیلتر میان‌گذر را تشکیل می‌دهند.

جهت تعیین بهره K دو نکته باید رعایت گردد اول اینکه مقدار K باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا تشخیص سریع جزیره، تضمین گردد و دوم اینکه K نباید آنقدر بزرگ انتخاب شود که در شرایط وصل شبکه باعث ایجاد عملکرد نابجا گردد.

از آنجاکه بهره حلقه‌باز در شرایط بهره‌برداری مختلف تغییر می‌کند، طراحی جبران‌ساز کار دشواری بوده و باید در محاسبه مقادیر تنظیمی جبران‌ساز بدبینانه‌ترین حالت را در نظر گرفت و با استفاده از اصول ۱ و ۲ پارامترهای تنظیمی جبران‌ساز را محاسبه کرد.

در صورتی که بهره حلقه جبران‌ساز نشده (بدون حضور جبران‌ساز) در زمان وصل و قطع شبکه به ترتیب با H_1 و H_2 نشان داده شود. بر طبق قاعده ۱ که در بالا بیان گردید برای

بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

۷- ارزیابی روش پیشنهادی در حضور بارهای مختلف

در این بخش هدف ارزیابی کارآمدی روش در حضور بارهای RLC و القائی است. این بخش به دو قسمت تقسیم شده، در قسمت اول روش در حضور بارهای RLC با ضریب کیفیت-های مختلف مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و در قسمت دوم کارآمدی روش در حضور سهم‌های مختلفی از بار القائی (در کنار بار RLC) بررسی می‌گردد. شبکه مورد مطالعه نیز همان شبکه نمونه معرفی شده در بخش ۵ است. قطع شبکه نیز با باز شدن بریکر CB در لحظه $t=10s$ شبیه‌سازی می‌گردد.

جهت ارزیابی روش در حضور بار RLC سه حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. این حالت‌ها به صورت زیر تعریف می‌گردند.

- حالت ۱ (case 1): وضعیت بدون جبران‌ساز

در این حالت فرض می‌گردد که جبران‌ساز به ژنراتور اضافه نشده است. میزان تولید ژنراتور برابر ۸ مگاوات بوده و بار نیز از نوع RLC، با ضریب کیفیت ۱٫۸ و به بزرگی ۸ مگاوات می‌باشد. از آنجاکه مقادیر مصرف و تولید توان تقریباً یکسان هستند، جزیره بدون استفاده از روشهای اکتیو قابل تشخیص نیست، چرا که میزان تغییر در فرکانس و ولتاژ بسیار ناچیز است.

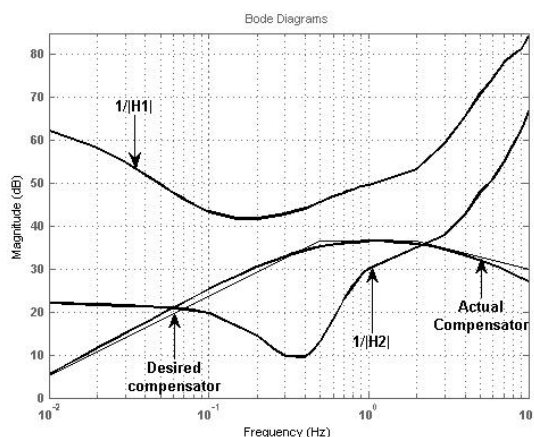
- حالت ۲ (case 2): بار RLC با ضریب کیفیت ۱٫۸ و در حضور جبران‌ساز

وضعیت توان و بار دقیقاً مشابه حالت ۱ فرض می‌گردد با این تفاوت که در این حالت جبران‌ساز پیشنهادی به ژنراتور اضافه گردیده است.

- حالت ۳ (case 3): بار RLC با ضریب کیفیت صفر و در حضور جبران‌ساز

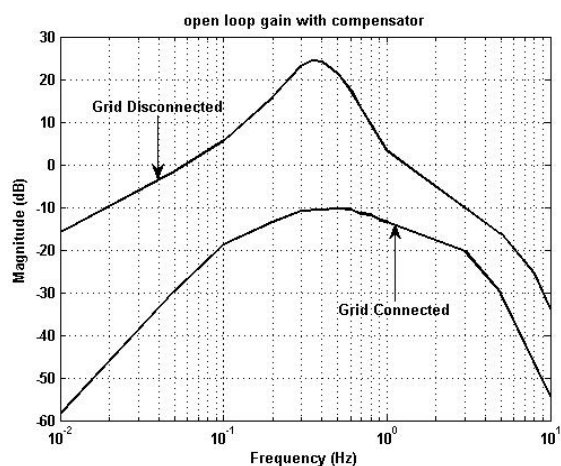
در این حالت نیز وضعیت توان مشابه حالات قبل فرض می‌گردد با این تفاوت که در این حالت ضریب کیفیت بار RLC برابر صفر بوده و جبران‌ساز پیشنهادی به ژنراتور اضافه گردیده است.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی که عبارتند از تغییرات فرکانس و ولتاژ (بر حسب هرتز) و مقدار موثر ولتاژ پایانه ژنراتور(بر



شکل ۷: ویژگی‌های جبران‌ساز مطلوب

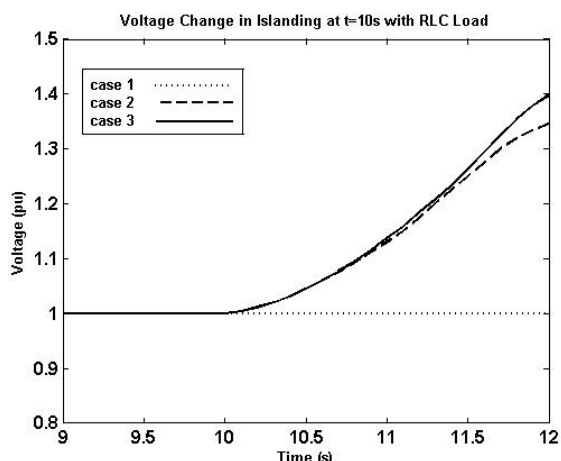
در ادامه جهت اثبات عملکرد حلقه‌باز جبران‌ساز طراحی شده، در حضور جبران‌ساز نیز بهره حلقه باز در دو حالت وصل و قطع شبکه و به ازای فرکانسهای مختلف به کمک شبیه‌سازی محاسبه و در شکل ۸ رسم شده است.



شکل ۸: بهره حلقه‌باز با جبران‌ساز و در دو حالت وصل و قطع شبکه

همانگونه که انتظار می‌رفت بهره حلقه‌باز در حضور جبران‌ساز نیز در تمامی فرکانس‌ها کمتر از 0dB بوده و بنابراین جبران‌ساز اضافه شده در عملکرد طبیعی سیستم اثری نخواهد داشت. همچنین در محدوده فرکانسی دلخواه در زمان قطع شبکه بهره حلقه‌باز در حضور جبران‌ساز بیشتر از 0dB بوده و این مساله نیز می‌تواند تشخیص بموقع قطع شبکه را تضمین نماید.

بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۱۰: چگونگی تغییرات ولتاژ با قطع شبکه در حضور بار RLC

در پایان این قسمت می‌توان اینطور نتیجه‌گیری کرد که در حضور انواع بار RLC، روش پیشنهادی روشی کارآمد بوده و امکان تشخیص درست قطع شبکه را فراهم می‌آورد. به علاوه سرعت تشخیص آن نیز قابل توجه بوده و قادر است در حضور بار RLC قطع شبکه را در زمان کوتاهی تشخیص دهد. در صورت در نظر گرفتن ۵۹ هرتز به عنوان مرز عبور کاهش فرکانسی، زمان خروج فرکانس از محدوده مجاز برای روش پیشنهادی کمتر از ۱ ثانیه است، در صورتی که برای روش مبتنی بر توان اکتیو این زمان بیش از ۱٫۷ ثانیه است. از آنجاکه وجود بار القائی با مقدار قابل توجه می‌تواند اثر نامطلوبی بر روی برخی از الگوریتم‌های اکتیو بگذارد، اثر بار القائی نیز در حالات زیر بررسی می‌گردد.

حالت ۴ (case 4): وضعیت بدون جبران‌ساز

در این حالت فرض می‌گردد که جبران‌ساز به ژنراتور اضافه نشده است. بار نیز از نوع القائی و به اندازه ۸ مگاوات است. همچنین مقادیر توان تولیدی و مصرفی به یکدیگر نزدیک بوده و بنابراین جزیره بدون استفاده از روشهای اکتیو قابل تشخیص نیست، چراکه میزان تغییر در فرکانس و ولتاژ بسیار ناچیز است.

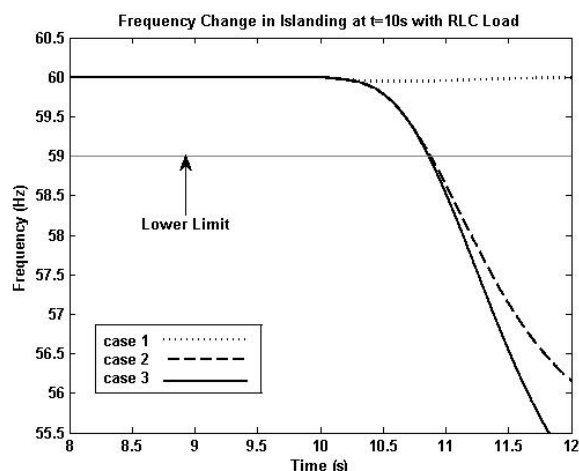
حالت ۵ (case 5): ۳۰٪ از کل بار از نوع القائی و

در حضور جبران‌ساز

در برخی مراجع سهم طبیعی بار القائی از کل بار را ۳۰٪ در نظر می‌گیرند [۱۱] و بنابراین مشابه با این مراجع در این حالت

حسب پیرونی (می‌باشند، به ازای هر سه حالت تعریف شده در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده‌اند.

در شکل ۹، تغییرات فرکانس به ازای حالات تعریف شده نشان داده شده است. همانگونه که در شکل دیده می‌شود، در حالت ۱ تغییرات فرکانس بعد از قطع شبکه چندان قابل توجه و محسوس نیست. اما در مقابل در حالت‌های ۲ و ۳ که جبران‌ساز پیشنهادی به ژنراتور افزوده شده است، تغییرات زیادی در فرکانس بعد از قطع شبکه ایجاد شده و فرکانس از محدوده مجاز خارج شده و رله فرکانسی وادار به عملکرد می‌شود. مشاهده می‌شود که به ازای دو ضریب کیفیت متفاوت در ابتدا که فرکانس از مقدار نامی زیاد فاصله نگرفته است، تغییرات فرکانس مشابه است، اما با کاهش بیشتر فرکانس، سرعت خروج حالت ۳، یعنی ضریب کیفیت کوچکتر افزایش می‌یابد. دلیل این مساله به تغییرات ولتاژ متفاوت در دو حالت یاد شده بر می‌گردد.



شکل ۹: چگونگی تغییرات فرکانس با قطع شبکه در حضور بار RLC

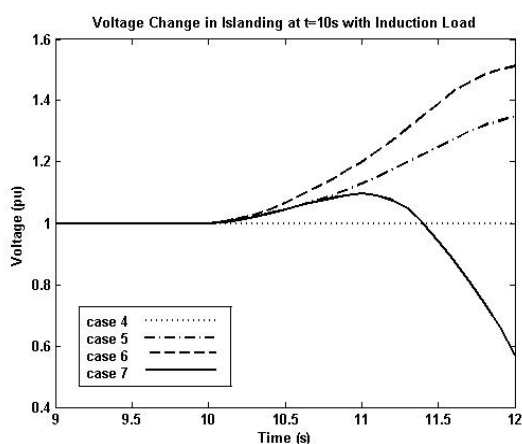
در شکل ۱۰، تغییرات ولتاژ به ازای حالات تعریف شده نشان داده شده است.

همانگونه که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، در حالت ۱ ولتاژ تغییر چندانی نداشته (بدلیل نامتعادلی بسیار کوچک توان راکتیو)، در حالی که در حالات ۲ و ۳ تغییرات ولتاژ زیاد است. در حالت ۲ به این دلیل که با کاهش فرکانس، بار RLC وارد حالت سلفی می‌شود و مقداری توان راکتیو مصرف می‌کند، تغییرات ولتاژ (و در نتیجه فرکانس) کمتر از حالت ۳ است.

بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

همانگونه که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، در حضور سهم کمی از بار القائی مشابه آنچه که در مورد بارهای RLC بیان شد، روش پیشنهادی بسیار کارآمد بوده و در زمان بسیار کم و قابل قبولی فرکانس را از محدوده مجاز خارج می‌سازد. با افزایش سهم بار القائی (حتی در حضور ۱۰۰٪ بار القائی) باز هم روش در تشخیص قطع شبکه در زمان مجاز و موافق با استاندارد IEEE 1547 (کمتر از دو ثانیه) موفق است. با این تفاوت که با افزایش سهم بار القائی زمان تشخیص نیز افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۲، تغییرات ولتاژ به ازای حالات تعریف شده نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۱۲ دیده می‌شود، بجز حالت ۴، در سایر حالات تغییرات ولتاژ قابل توجه است. همچنین به این دلیل که توان اکتیو بار القائی نسبت به بار RLC وابستگی کمتری به ولتاژ دارد، با افزایش سهم بار القائی به تغییر بیشتری در ولتاژ جهت ساختن فرکانس نیاز است.



شکل ۱۲: چگونگی تغییرات ولتاژ با قطع شبکه در حضور بار القائی

در نهایت در خصوص توانمندی روش در حضور بارهای القائی نیز می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که روش پیشنهادی در تشخیص قطع شبکه در حضور هر سهمی از بار القائی کارآمد بوده و در صورت داشتن سهم بار القائی متداول (کمتر از ۵۰٪)، روش پیشنهادی سرعت خوبی نیز خواهد داشت. در این بخش توانمندی روش در حضور بارهای مختلف نشان داده شد. ارزیابی در مورد عملکرد روش در مقادیر مختلف توان خروجی ژنراتور نیز با انجام شبیه‌سازی صورت گرفته است.

فرض می‌شود که ۳۰٪ از کل بار از نوع القائی و مابقی از نوع RLC است. همچنین جبران‌ساز نیز در نظر گرفته می‌شود.

حالت ۶ (case 6): ۷۰٪ از کل بار از نوع القائی و در حضور جبران‌ساز

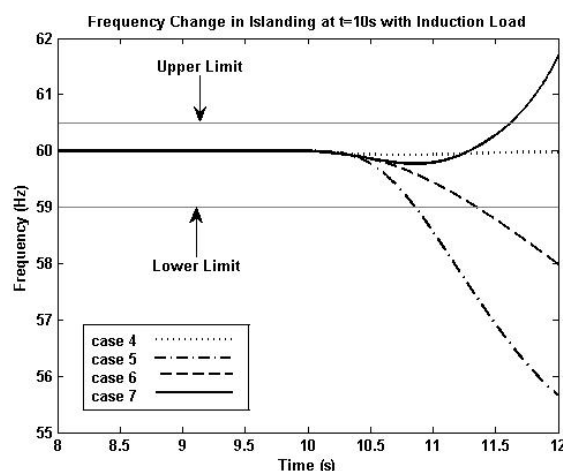
همانگونه که در بخش ۳-۴ بیان گردید، حداکثر ۷۰٪ از بار هر فیدر می‌تواند از نوع القائی باشد و بنابراین در این حالت، کارایی روش در حضور سهم بیشتری از بار القائی (۷۰٪) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

حالت ۷ (case 7): ۱۰۰٪ از کل بار از نوع القائی و در حضور جبران‌ساز

در آخرین حالت مورد بررسی عملکرد روش در حضور ۱۰۰٪ بار القائی و بدینانه‌ترین حالت ممکن (حالتی که در عمل بندرت پیش می‌آید) نشان داده شده است. در این حالت نیز میزان تولید و بار نزدیک به یکدیگر و برابر ۸ مگاوات انتخاب می‌گردند.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی به ازای حالات مختلف در شکل-های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده‌اند.

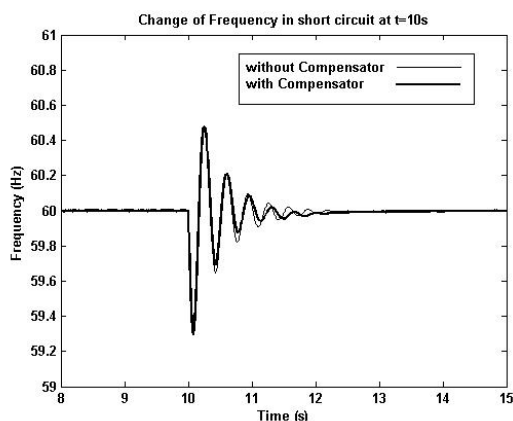
در شکل ۱۱، تغییرات فرکانس به ازای حالات تعریف شده نشان داده شده است. همانگونه که در شکل دیده می‌شود، به جز حالت ۱ که در آن روش اکتیو پیشنهادی اعمال نشده است، در سایر حالات فرکانس از محدوده مجاز خارج می‌گردد و قطع شبکه قابل تشخیص است.



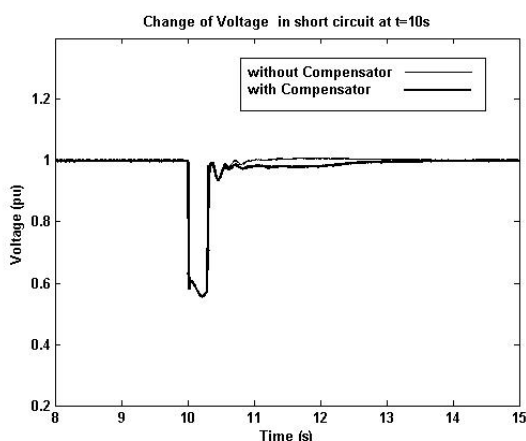
شکل ۱۱: چگونگی تغییرات فرکانس با قطع شبکه در حضور بار القائی

بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

چگونگی تغییرات ولتاژ نیز در شکل ۱۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در حضور جبران‌ساز نیز، ولتاژ پایداری خود را حفظ می‌کند. با این تفاوت که زمان نشست نسبت به حالت بدون جبران‌ساز مقداری افزایش می‌یابد.



شکل ۱۳: چگونگی تغییرات فرکانس در خطای سه‌فاز در باس ۴



شکل ۱۴: چگونگی تغییرات ولتاژ در خطای سه‌فاز در باس ۴

در پایان این بخش میتوان اینطور نتیجه گرفت که روش پیشنهادی در حالت اتصال شبکه، هیچگونه اثر منفی بر عملکرد سیستم ندارد.

۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش اکتیو جدید جهت تشخیص جزیره‌ای شدن در حضور واحدهای تولید پراکنده سنکرون معرفی گردید. نحوه طراحی جبران‌ساز برای ژنراتور سنکرون شبکه

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در مقادیر مختلف تولید ژنراتور نیز کاملاً کارآمد است. نتایج مربوطه در مرجع [۱۰] آورده شده است، در اینجا بدلیل کمبود فضا از آوردن نتایج خودداری می‌گردد.

۸- ارزیابی عملکرد روش در زمان وصل شبکه

در بخش قبل عملکرد روش پیشنهادی در شرایط قطع شبکه و در حضور بارهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. اما یکی دیگر از مسایل مهم در مورد روش‌های تشخیص قطع شبکه چگونگی عملکرد آنها در شرایط وصل شبکه است. روش اکتیو پیشنهادی در شرایط وصل شبکه و حالت کارکرد عادی سیستم بر خلاف برخی از روشهای اکتیو (نظیر روش مبتنی بر توان راکتیو [۹]) هیچگونه اثر منفی در عملکرد سیستم ندارد. روش مبتنی بر توان راکتیو نسبت به تغییرات قدرت اتصال کوتاه شبکه بسیار حساس است. در صورتی که حساسیت روش پیشنهادی به تغییرات امپدانس شبکه بسیار ناچیز است.

علاوه بر داشتن عملکرد مناسب در شرایط طبیعی، روش‌های تشخیص قطع شبکه باید در مقابل رخدادهایی نظیر گذراهای ولتاژ پایین، کلیدزنی بارهای بزرگ، کلیدزنی خازن‌های بزرگ و ... که تغییرات فرکانس و ولتاژ را بهمراه دارند، عملکرد نابجا نداشته باشند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی یک گذرای ولتاژ پایین که تغییرات نسبتاً بزرگی در ولتاژ و فرکانس ایجاد می‌کند در ادامه ارائه می‌گردد.

در رخداد مورد بررسی یک اتصال کوتاه سه‌فاز (با مقاومت خطا) در $t=10s$ به مدت ۰٫۳ ثانیه در باس ۴ رخ می‌دهد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی که عبارتند از: فرکانس و ولتاژ پایانه ژنراتور در شکل‌های ۱۳ و ۱۴، به ازای دو حالت بدون جبران‌ساز و در حضور جبران‌ساز نشان داده شده است.

همانگونه که در شکل ۱۳ دیده می‌شود، اضافه کردن جبران‌ساز نه تنها ایجاد ناپایداری نمی‌کند بلکه زمان نشست نوسانات فرکانس را نیز مقدار کمی کاهش می‌دهد.

بیست و سومین کنفرانس بین‌المللی برق

- [4] J.C.M. Vieira, W. Freitas, W. Xu, and A. Morelato, "Performance of Frequency Relays for Distributed Generation Applications," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 21, No. 3, July 2006
- [5] J.C.M. Vieira, W. Feritas and D. Salles, "Characteristics of Voltage Relays for Embedded Synchronous Generators Protection," IET Generation, Transmission and Distribution, pp. 484-491, May 2007
- [6] C.M. Affonso, W. Freitas, W. Xu and L.C.P. da Silva, "Performance of ROCOF Relays for Embedded Generation Applications," IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 152, No. 1, January 2005
- [7] W. Freitas, W. Xub, Z. Huangc and C. M. Vieira, "Characteristics of Vector Surge Relays for Distributed Synchronous Generator Protection," Electric Power Systems Research, Vol. 77, pp.170-180, 2007
- [8] P.O. Kane and B. Fox, "Loss of Mains Detection for Embedded Generation By System Impedance Monitoring," Development in Power System Protection, March 1997, Conference Publication No. 434, IEE 1997, pp. 95-98
- [9] P. Du, J.K. Nelson and Z. Ye, "Active Anti-Islanding Schemes for Synchronous - Based Distributed Generation," IEE Generation, Transmission and Distribution, Vol. 152, No. 5, Sep. 2005

[۱۰] محمدرضا احمدی‌نیا، "بررسی روش اکتیو جدید جهت تشخیص جزیره‌ای شدن در حضور واحدهای تولید پراکنده سنکرون"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد برق-قدرت، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۷

- [11] A. Rajabi, M. Parniani and M. Fotuhi, "Investigating the Effects of Reactive Power on Islanding Detection," International Conference on Power System Technology, Singapore, Nov. 2004

نمونه نشان داده شده و به کمک شبیه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB، روش در حالات مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج زیر بر اساس شبیه‌سازی‌های انجام شده حاصل شده است:

۱- روش پیشنهادی قادر است تمامی موارد جزیره‌ای

شدن را (بدون توجه به میزان نامتعادلی توان و نوع بار) بدرستی تشخیص دهد.

۲- عملکرد روش پیشنهادی در شرایط وصل شبکه نیز مناسب بوده، بطوریکه در عملکرد عادی سیستم و همچنین در زمان ایجاد اختلالات اثر نامطلوبی در عملکرد سیستم ندارد.

۳- روش پیشنهادی نسبت به سایر روشهای اکتیوی که شاخص فرکانس را تغییر می‌دهند، بسیار سریعتر است.

۴- از آنجا که جهت پیاده‌سازی روش بر روی ژنراتور سنکرون، تنها تغییراتی در سیستم کنترل ژنراتور لازم است، پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی ژنراتور سنکرون کم‌هزینه و آسان بوده و روش کاملاً عملیاتی و اجرایی است.

بطور خلاصه اینطور می‌توان نتیجه‌گیری کرد که روش پیشنهادی، قابلیت اطمینان بالایی داشته و در مقابل اختلالاتی که رفتاری مشابه قطع شبکه اصلی دارند، عملکرد نابجا ندارد.

مراجع

- [1] IEEE 1547 Standard For Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, IEEE Std. 1547, July 2003
- [2] H. Zeineldin, "Distributed Generation Micro-Grid Operation: Control, Protection and Electricity Market Operation," A Thesis of Doctor of Philosophy, Waterloo, Canada, 2006
- [3] J. Yin, L. Chang and C. Diduch, "Recent Developments in Islanding Detection for Distributed Power Generation," in proceedings, 2004 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, July 2004