

فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل

سال، هفتم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، (پیاپی ۲۵): صص ۳۴-۲۳

بهره‌گیری همزمان از عناصر FACTS و ذخیره‌ساز انرژی در حفظ پایداری ولتاژ شبکه‌های توزیع با تولیدات پراکنده در شرایط حساس نظامی

محمد رضا علیزاده پهلوانی^۱، سیاوش تقی پور بروجنی^۲

تاریخ دریافت: ۹۳/۱۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۷/۰۶

چکیده

هدف این پژوهش، بررسی بهره‌گیری همزمان از عناصر FACTS و ذخیره‌ساز انرژی، در سیستم‌های قدرت DG کارآمد در کاربردهای حساس شهری و نظامی است. یکی از مهم‌ترین حوادثی که پس از بمباران خطوط انتقال و نیروگاه‌های کشور رخ می‌دهد، فروپاشی ولتاژ در شبکه سراسری است. به همین منظور استفاده از سیستم‌های DG ترکیبی به منظور تأمین انرژی مناطق حساس شهری پیشنهاد شده است. با توجه به وجود مشکلات منابع انرژی این گونه از شبکه‌های قدرت در شرایط حساس نظامی، تنظیم ولتاژ این نوع از سیستم‌های قدرت مشکل بوده و به عناصر اصلاحی و همچنین یک کنترلر کارآمد نیاز است. تنظیم بودن ولتاژ شبکه DG ترکیبی، کمک بسیار مهمی در بهره‌گیری از آن در کاربردهای نظامی می‌کند. زیرا نیاز به اتصال شبکه سراسری ندارد و حوادث مربوط به شبکه سراسری بر روی آن تأثیرگذار نیست. به همین منظور در این پژوهش با طراحی یک کنترلر چندمتغیره، به بهره‌گیری همزمان از عناصر FACTS و ذخیره‌ساز انرژی، به گونه‌ای پرداخته شده است که اولاً در شرایط کاهش توان تولیدی منابع، انرژی مورد نیاز بار خروجی تأمین شود و همچنین ولتاژ باس‌های مختلف شبکه در شرایط گوناگون در مقدار مد نظر تنظیم باشند. در بخش آخر پژوهش، کارایی سیستم قدرت پیاده شده و همچنین کنترلر طراحی شده در شرایط گوناگون، توسط شبیه‌سازی به اثبات رسیده است.

کلیدواژه‌ها: شبکه توزیع قدرت، عناصر FACTS، ذخیره‌ساز انرژی SMES، کنترلر چندمتغیره

۱- مقدمه

با توجه به نیاز روزافزون به انرژی الکتریکی، توجه به منابع گوناگون، از ضرورت‌های بسیار مهم برای تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز هر کشوری است و تکیه کردن بر تعدادی محدود از منابع انرژی می‌تواند در آینده نیازهای اساسی هر کشوری را در حوزه انرژی با چالش مواجه سازد.

از سوی دیگر، در سال‌های اخیر مزایای فراوان استفاده از سیستم‌های قدرت توزیع پراکنده، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است. به‌طور نمونه، برای بسیاری از مناطق دورافتاده که اتصال آنها به شبکه سراسری از نظر اقتصادی به صرفه نیست و یا در کاربردهای حساس که انرژی الکتریکی با کیفیت مشخص و ضریب اطمینان بالا مورد نیاز است، سیستم قدرت DG می‌تواند بسیار چاره‌ساز باشد. شایان به ذکر است که در کاربردهای نظامی، نظیر سایت‌های پرتاب موشک و مراکز فرستنده سیگنال مخابراتی که معمولاً در نقاط دورافتاده هستند و حساسیت بالایی به ولتاژ و فرکانس انرژی الکتریکی که دریافت می‌کنند دارند، بهره‌گیری از شبکه قدرت DG بسیار کاربردی و منطقی است.

یکی دیگر از مهم‌ترین و سودمندترین کاربردهای شبکه‌های DG، در شرایط بحرانی و جنگی است. بر اساس تجربیات جنگ‌های چند دهه اخیر، اثبات شده است که از کار انداختن شبکه سراسری انتقال برق، از مهم‌ترین اقدامات اولیه دشمن جهت فلج کردن فعالیت کلیه نقاط نظامی و شهری است. ایجاد اختلال در شبکه سراسری به صورت‌های گوناگونی نظیر بمباران نیروگاه‌ها و هم‌چنین خطوط انتقال انجام می‌گیرد. با طولانی شدن عدم دسترسی به انرژی الکتریکی با کیفیت مناسب، کلیه مراکز حساس شهری نظیر بیمارستان‌ها آسیب بسیار زیادی می‌بینند که این امر علاوه بر خسارت مادی بسیار زیاد، تأثیر بسیار نامناسبی بر روحیه مردم دارد. بنابراین اگر بتوان در زمان‌هایی که شبکه سراسری به علل گوناگون دچار اختلال شده است؛ مراکز حساس شهری نظیر بیمارستان‌ها و هم‌چنین نقاط استراتژیک نظامی نظیر مراکز فرستنده و گیرنده مخابراتی را با استفاده از شبکه توزیع پراکنده تغذیه کرد، می‌توان نقش بسیار مهمی در تغییر معادلات و نقشه‌های دشمن ایفا نمود.

یکی از مهم‌ترین منابع جایگزین سوخت‌های فسیلی که می‌تواند در سیستم قدرت DG به کار رود، منبع انرژی خورشیدی است. این امر به آن دلیل است که تقریباً در بیشتر مناطق (به

خصوص در ایران) این انرژی در دسترس است و همچنین روزبه‌روز فناوری تبدیل این منبع به انرژی الکتریکی، ارزان‌تر و پیشرفته‌تر می‌گردد. اما استفاده از این منبع نیز همراه با مشکلاتی است. یکی از مهم‌ترین مشکلات این است که منبع فتوولتائیک در برخی از شرایط نمی‌تواند تولیدکننده انرژی الکتریکی باشد. به‌طور مثال در اثر تغییرات شرایط محیطی نظیر گذر ابرها و ایجاد سایه بر روی سلول‌های خورشیدی، انرژی رسیده به پنل خورشیدی به مقادیر کمی می‌رسد و در نتیجه، توان الکتریکی خروجی آن هم افت قابل توجهی پیدا می‌کند.

برای حل این مشکلات، راه‌کارهای مختلفی پیشنهاد شده است. از جمله جدیدترین این راه‌کارها می‌توان به بهره‌گیری از چند منبع انرژی دیگر در کنار سیستم فتوولتائیک اشاره کرد [۵-۲]. در این پژوهش، از پیل سوختی به عنوان منبع ثانویه استفاده شده است. این استفاده هم‌زمان، کمک شایانی به تأمین توان مورد نیاز شبکه DG در شرایط گوناگون می‌کند.

با وجود این که دو منبع انرژی در سیستم قدرت DG حضور دارند، به دلیل عدم اتصال به شبکه سراسری، نمی‌توان کاملاً به این دو منبع انرژی جهت تأمین نیاز مصرف‌کننده اعتماد کرد. به بیان دیگر، باز هم شرایطی وجود دارد که می‌تواند منجر به نوسانات ولتاژ شبکه DG شود. به‌طور کلی این شرایط را می‌توان به سه دسته تقسیم‌بندی کرد که عبارتند از [۳]:

۱- شرایطی است که مصرف‌کننده به هر دلیلی توانی بیشتر از پیشینه توان قابل تولید منابع انرژی نیاز دارد. نتیجه این امر، کاهش ولتاژ شبکه و یا حتی فروپاشی ولتاژ است.

۲- شرایطی است که منابع انرژی نتوانند توان راکتیو مورد نیاز شبکه را تأمین کنند.

۳- سومین حالتی هم که منجر به کاهش یا فروپاشی ولتاژ در شبکه DG می‌شود مربوط به شرایطی بحرانی است که توان تولیدی منابع را کاهش می‌دهد.

بنابر توضیحات داده شده نتیجه می‌شود که ضریب اطمینان شبکه DG مدنظر کماکان پایین است و از اثرگذاری مناسبی در مواقع خطیر جنگی نظیر بمباران برخوردار نیست. در این پژوهش، به منظور رفع هم‌زمان کمبود توان‌های اکتیو و راکتیو، از ترکیب هم‌زمان دو عنصر سیستم ذخیره‌سازی انرژی SMES و D-STATCOM استفاده شده است. سیستم SMES، تأمین‌کننده

شبکه را تنظیم نماید.

۲- طراحی سیستم قدرت ترکیبی

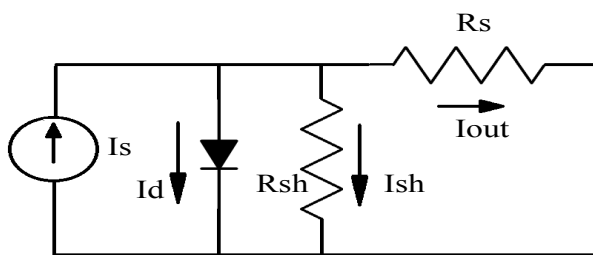
۲-۱- مدل‌سازی سیستم فتوولتائیک

از جمله مزایای مهم انرژی خورشیدی می‌توان به مواردی همچون عدم نیاز به پرداخت هزینه سوخت، عدم تولید آلودگی، هزینه و عملیات بسیار ناچیز برای نگهداری و همچنین عدم تولید سروصدا اشاره کرد. علاوه بر این دسترسی آسان به انرژی خورشیدی موجب شده است که استفاده از این منبع انرژی در شبکه قدرت DG بسیار متداول باشد. بلوک پایه و سازنده کلیه ساختارهای خورشیدی عبارت است از سلول خورشیدی که از لحاظ الکتریکی می‌توان آن را با یک منبع جریان الکتریکی همراه با دو مقاومت سری و موازی معادل دانست. این سیستم در شکل (۱) نمایش داده شده است. مقدار جریان الکتریکی این منبع بر اساس روابط (۳-۱) به صورت زیر تعیین می‌گردد [۶]:

$$I = I_{ph} - I_{os} \left(\exp \left(\frac{q}{AKT} (V + IR_s) - 1 \right) \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$I_{os} = I_{or} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \exp \left[\frac{q E_{go}}{Bk} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2)$$

$$I_{ph} = \left[I_{SRC} + K_I (T - T_r) \right] \frac{\Sigma}{1000} \quad (3)$$



شکل ۱- مدار معادل الکتریکی سلول خورشیدی

در این معادلات، I و V به ترتیب جریان و ولتاژ خروجی سلول خورشیدی هستند. همچنین I_{ph} و I_{os} کمیت‌های متغیری هستند که در معادله اصلی (شماره ۱) برای تعیین ارتباط بین ولتاژ و جریان سلول به کار می‌روند. مقدار این دو کمیت بر اساس معادلات ۲ و ۳ تعیین می‌شود و Σ عبارت است از شدت تابش که واحد آن kw/m^2 است. پارامترهای T و T_r به ترتیب نشان دهنده دمای سلول خورشیدی و دمای مبنا است که T_r برای هر سلول، یک پارامتر ثابت است. مقادیر R_s و R_{sh} هم مربوط به مقاومت‌های سری و موازی معادل الکتریکی سلول هستند. سایر پارامترهای

توان اکتیو مورد نیاز در شرایط ضروری و D-STATCOM تأمین کننده توان راکتیو مورد نیاز شبکه است.

اما استفاده هم‌زمان از دو منبع انرژی و دو عنصر اصلاحی در شبکه DG به کنترلر پیچیده‌تری نیازمند است؛ به گونه‌ای که توان اکتیو خروجی، دو منبع و انرژی ذخیره‌شده در سیستم SMES را به گونه‌ای کنترلر کند که همواره توان مورد نیاز شبکه DG تأمین باشد. از سوی دیگر باید بتواند توان راکتیو خروجی منابع و توان راکتیو تولیدی D-STATCOM را در حالت تعادل بین تولید و مصرف تنظیم کند. روش‌های کنترلی رایج می‌توانند پایداری ولتاژ سیستم قدرت دوگانه فتوولتائیک/پیل سوختی را حفظ کنند [۴]. اما کنترلرهای مذکور با افزوده شدن دو عنصر سیستم SMES و D-STATCOM پیچیدگی گسترده‌ای پیدا می‌کنند و حتی در برخی از شرایط بحرانی نظیر خارج شدن منابع انرژی و قطع خطوط انتقال بر اثر بمباران، عملکردشان ناپایدار می‌شود. بنابراین در این پژوهش علاوه بر استفاده هم‌زمان از دو عنصر اصلاحی، به طراحی یک سیستم کنترلی انعطاف‌پذیر برای سیستم مذکور پرداخته می‌شود. روش کنترلی انتخاب‌شده در این پژوهش، استراتژی کنترلی چند متغیره بوده که از دینامیک و عملکرد مناسبی در تأمین اهداف مدنظر برخوردار است. این اهداف به ترتیب عبارتند از:

الف: تنظیم ولتاژ باس‌های شبکه DG در کلیه شرایط؛

ب: داشتن دینامیک مناسب در تنظیم ولتاژ باس‌های شبکه در زمان شرایط بحرانی شبکه؛

در تحقیق پیش رو، در مرحله اول، قسمت‌های مختلف سیستم قدرت DG فتوولتائیک/پیل سوختی توضیح داده خواهند شد. سپس به شبیه‌سازی هر کدام از این قسمت‌ها پرداخته می‌شود. در گام بعدی، چگونگی افزودن سیستم ذخیره‌سازی انرژی و D-STATCOM به شبکه بررسی می‌گردد. سپس یک کنترلر مناسب برای سیستم مذکور، با رعایت نکاتی که در قسمت مربوط به خودش توضیح داده خواهد شد، طراحی می‌شود. در ادامه، یک شبکه DG استاندارد که دارای سیستم انرژی ترکیبی است، شبیه‌سازی می‌شود. در گام آخر، در چندین آزمون گوناگون به بررسی عملکرد کنترلر پرداخته می‌شود. در این آزمون‌ها تلاش شده است که کلیه شرایط بحرانی که در شرایط خطیر جنگی به‌وجود می‌آیند، در نظر گرفته شوند. در پایان با بررسی نتایج به‌دست آمده نشان داده می‌شود که کنترلر طراحی‌شده در شرایط مختلف با دینامیک مناسبی می‌تواند ولتاژ ولتاژ قسمت‌های مختلف

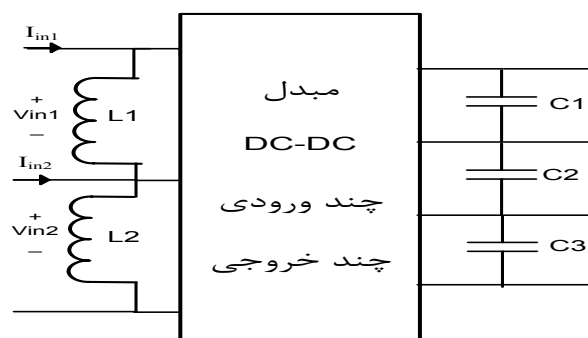
بوست بر سر پیل سوختی استفاده شده است [۲ و ۵]. مقادیر کمی سلول پیل سوختی و مبدل بوست مورد استفاده در این پژوهش، در جدول (۲) ذکر شده‌اند [۷]:

جدول ۲- پارامترهای هر سلول پیل سوختی شبیه‌سازی شده

پارامتر	مقدار
P_{FC}	۱/۴kW
I_{FC}	۴۵A
V_{FC}	۲۸V
L	۲۰mH
C	۱۰mF
F_S	۱/۲kHz

۲-۳- مدل‌سازی سیستم ذخیره‌سازی انرژی

در ابتدای این بخش به معرفی ساختار کلی سیستم SMES پرداخته می‌شود. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده است، سیستم مذکور دارای سه بخش کلی است که عبارتند از؛ اندوکتانس‌های ذخیره انرژی که در ورودی قرار دارند، مبدل DC-DC چند ورودی/چند خروجی و هم‌چنین خازن‌های تثبیت‌کننده ولتاژ که در پایانه‌های خروجی مبدل قرار داده شده‌اند. سه اندوکتانس موجود در سیستم ذخیره‌سازی انرژی در صورت کنترل مناسب، می‌توانند اثر نوسانات جریانی منابع انرژی را در ولتاژ پایانه‌های خروجی از بین ببرند.



شکل ۲- ساختار کلی سیستم SMES

در این پژوهش، از یک مبدل دو ورودی/سه خروجی استفاده شده که ساختمان آن بر اساس قوانین مربوط به ایجاد مبدل‌های چند ورودی/چند خروجی با استفاده از ترکیب مبدل‌های تک ورودی/تک خروجی طراحی شده است [۸]. هم‌چنین تعداد سه خروجی برای مبدل قرار داده شده است که بتوان مبدل را به یک اینورتر هفت سطحی متصل کرد [۹].

مطرح شده در سه فرمول مذکور عبارتند از: Ego پهنای باند ممنوعه سیلیکن، K ثابت بلتزن، A و B ضرایب تناسب سلول، Ios جریان اتصال کوتاه سلول، Ior جریان معکوس دیود و KI ضریب دمایی سلول. به منظور ساده‌سازی محاسبات، در ادامه، مسیر کمیت ($\Sigma/1000$)، با λ معادل‌سازی شده است. ثابت q نیز بیانگر مقدار بار یک الکترون است.

در این پژوهش از سلول خورشیدی پلی کریستالین استفاده شده که پارامترهای مربوط به این سلول در جدول (۱) نشان داده شده و به‌عنوان عنصر پایه سیستم فتوولتائیک در نظر گرفته شده است.

جدول ۱- پارامترهای سلول خورشیدی شبیه‌سازی شده

پارامتر	مقدار
$I_{sc}(A)$	۸/۴۷
$V_0(V)$	۳۰/۱۰
$E_{go}(V)$	۱۰/۰۳
$I_{SRC}(A)$	۸/۴۶۸
$R_S(\Omega)$	۰/۶۶۱
$R_{Sh}(\Omega)$	۴۹۸/۵۸۲
$A=B$	۶۰/۷۵۸
$K_i/(A/K)$	۰/۰۰۱۷
$Tr/(K)$	۲۹۸/۱۵
$I_{or}(A)$	0.2287×10^{-6}

۲-۲- مدل‌سازی پیل سوختی

پیل سوختی یکی از منابع تولید انرژی الکتریکی استاتیک به روش الکتروشیمیایی است و مطالب بسیار زیادی در مورد چگونگی عملکرد و همچنین نحوه مدل‌سازی آن بیان شده است که بیان این مطالب با توجه به هدف اصلی این پژوهش، از حوصله بحث خارج است. شایان ذکر است که در این مقاله جهت مدل‌سازی، از نتیجه پژوهش آقای Wei Wu و همکارانش استفاده شده است [۷]. در این پژوهش نشان داده شده است که ولتاژ خروجی هر سلول پیل سوختی از رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$V_{cell} = E - \Delta V_{act} - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{trans} \quad (4)$$

که در آن، E ولتاژ مدار باز سلول، ΔV_{act} افت ولتاژ ناشی از فعال‌سازی آند و کاتد پیل سوختی، ΔV_{ohm} افت ولتاژ ناشی از مقاومت الکتریکی الکترودها و الکترولیت موجود در پیل سوختی و ΔV_{trans} افت ولتاژ ناشی از کاهش چگالی گاز واکنش‌کننده می‌باشند. هم‌چنین به‌منظور افزایش ولتاژ خروجی از یک مبدل

استفاده شده است.

با بررسی شکل، مشخص می‌شود که کنترلر باید کلیدهای موجود در سیستم SMES و همچنین کلیدهای مبدل منبع ولتاژ موجود در D-STATCOM را به گونه‌ای کنترل کند که ولتاژهای باس‌های مصرف‌کننده در مقدار مدنظر تنظیم شود. در این پژوهش، ولتاژ خروجی مجموعه‌های تولید انرژی در ۲ KV مؤثر و ولتاژ خطوط انتقال در ۲۰ KV تنظیم شده‌اند. با توجه به این که تعداد کلیدها در این مجموعه زیاد است و همچنین ولتاژ هر سه باس مصرفی شبکه باید کنترل شوند، کنترلرهای عادی نمی‌توانند به‌صورت مناسبی عمل کنند و دینامیک مناسبی ندارند. به همین منظور در این پژوهش از استراتژی کنترلی چندمتغیره که دارای عملکرد و دینامیک مناسبی است، استفاده شده است.

اساس کلی این روش به این صورت است که با مدل کردن سیستم قدرت DG به یک سیستم چند ورودی-خروجی، تابع تبدیل حلقه باز سیستم بین اندازه ولتاژهای مصرفی و زمان هدایت کلیدهای موجود در D-STATCOM و همچنین تابع تبدیل حلقه باز سیستم بین توان خروجی مورد نیاز و زمان هدایت کلیدهای موجود در سیستم ذخیره‌سازی انرژی به‌دست آورده می‌شود. سپس تابع تبدیل ایده‌آل مبدل بر اساس دو هدف مستقل بودن ولتاژهای مصرفی و توان‌های خروجی و دینامیک مناسب کنترل به‌دست آورده می‌شود. وظیفه کنترلر، نزدیک کردن این دو تابع تبدیل تا جایی است که اهداف مد نظر تا حد مطلوب فراهم شود. مراحل طراحی این کنترلر به صورت مرحله به مرحله توضیح داده می‌شود.

۳-۱- مدل‌سازی تابع تبدیل اولیه حلقه باز سیستم قدرت

در ابتدای این بخش باید ذکر شود که کلیه روند طراحی کنترلر پیش رو به دو قسمت کاملاً مشابه تقسیم می‌شود که یکی مربوط به کنترل کلیدهای سیستم ذخیره‌سازی انرژی و دیگری مربوط به کنترل کلیدهای عنصر FACTS است.

سیستم قدرت پیاده‌شده در این پژوهش دارای سه باس مصرفی است. بنابراین دو تابع تبدیل حلقه باز سیستم به‌صورت رابطه‌های (۷) و (۸) بیان می‌شود:

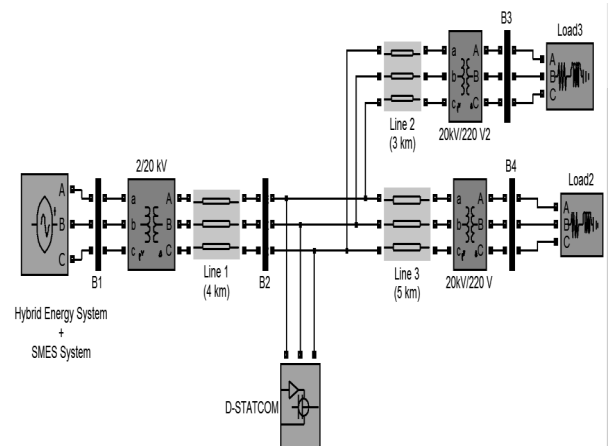
$$\begin{bmatrix} P_{01}(s) \\ P_{02}(s) \\ P_{03}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{i,11}(s) & G_{i,12}(s) & G_{i,13}(s) & G_{i,14}(s) & G_{i,15}(s) & G_{i,16}(s) \\ G_{i,21}(s) & G_{i,22}(s) & G_{i,23}(s) & G_{i,24}(s) & G_{i,25}(s) & G_{i,26}(s) \\ G_{i,31}(s) & G_{i,32}(s) & G_{i,33}(s) & G_{i,34}(s) & G_{i,35}(s) & G_{i,36}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ d_4 \\ d_5 \end{bmatrix} \quad (5)$$

۴-۲- اتصال سیستم SMES به اینورتر هفت سطحی

به منظور اتصال منابع انرژی به شبکه، پایانه‌های خروجی مبدل باید به یک اینورتر متصل شوند که در این پژوهش، به منظور دستیابی به یک ولتاژ سینوسی با دامنه و فرکانس مناسب از یک Cascade H-bridge Inverter هفت سطحی سه‌فاز استفاده شده است. در پایان این بخش با اتصال دو منبع انرژی شبیه‌سازی شده به سیستم ذخیره‌سازی انرژی و اتصال این سیستم به اینورتر سه‌فاز طراحی شده، سیستم قدرت دوگانه حاصل می‌شود.

۳- پیاده‌سازی شبکه قدرت DG

در این قسمت به پیاده‌سازی شبکه DG پرداخته می‌شود. مشخصات این شبکه DG به گونه‌ای انتخاب شده است که بتوان از آن در کاربردهای نظامی حساس و کاربردهای غیرنظامی در زمان‌های بحرانی جنگی استفاده کرد. به‌طور مثال، توان تولیدی توسط منابع انرژی موجود در این شبکه، می‌تواند انرژی مورد نیاز سایت‌های پرتاب موشک، فرستنده‌های مخابراتی و همچنین مناطق حساس شهری نظیر بیمارستان‌ها را در زمان‌های بحرانی جنگی تأمین کند.



شکل ۳- شبکه توزیع پراکنده شبیه‌سازی شده

همان‌طور که شکل (۳)، ساختار شبکه قدرت را نشان می‌دهد، در این شبکه دو باس مصرف‌کننده انرژی وجود دارد که با رنگ نارنجی مشخص شده‌اند. در این شبکه یک مجموعه تولید انرژی ترکیبی همراه با سیستم ذخیره‌سازی انرژی (رنگ آبی) وجود دارد. میزان توان تولید هر کدام از پنل‌های خورشیدی و مجموعه پیل سوختی، در شرایط تابش عادی و شرایط نرمال عملکرد پیل سوختی به ترتیب برابر ۸۰۰ KW و ۹۰۰ KW است. از یک D-STATCOM (رنگ سبز) نیز در مسیر شارش توان به سمت مصرف‌کننده‌ها با قابلیت تولید بیشینه توان راکتیو ۷۴۰ KVAR

تعیین کننده زمان هدایت کلیدهای موجود در سیستم پیاده شده بر حسب اختلاف بین مقادیر ایده آل ولتاژ و توان رسیده به سه پایانه مصرفی و مقادیر واقعی آنها است. به بیان دیگر، با اندازه گیری توان رسیده به سه پایانه مصرفی و مقایسه آن با مقادیر مطلوب زمان های هدایت کلیدهای سیستم ذخیره سازی انرژی و با اندازه گیری ولتاژ سه پایانه مصرفی و مقایسه آن با مقادیر مطلوب زوایای آتش کلیدهای مبدل عنصر FACTS مشخص می شوند. دو ماتریس کلی $K(z)$ و $K'(z)$ هم که مربوط به کلاس کنترلر است در رابطه های (۸) و (۹) نمایش داده شده اند.

$$K(z) = \begin{bmatrix} K_{11}(z) & K_{12}(z) & K_{13}(z) \\ K_{21}(z) & K_{22}(z) & K_{23}(z) \\ K_{31}(z) & K_{32}(z) & K_{33}(z) \\ K_{41}(z) & K_{42}(z) & K_{34}(z) \\ K_{51}(z) & K_{52}(z) & K_{35}(z) \end{bmatrix} \quad (۸)$$

$$K'(z) = \begin{bmatrix} K'_{11}(z) & K'_{12}(z) & K'_{13}(z) \\ K'_{21}(z) & K'_{22}(z) & K'_{23}(z) \\ K'_{31}(z) & K'_{32}(z) & K'_{33}(z) \end{bmatrix} \quad (۹)$$

استراتژی اصلی کنترلر باید به این صورت باشد که برای حصول اهداف تعیین شده، دارای خطای حالت پایدار تا حد مطلوب کوچک باشد. بنابراین عناصر ماتریس نهایی مربوط به کنترلر باید دارای اجزای انتگرال گیر باشند. با توجه به توضیحات داده شده، هر یک از اجزای ماتریس نهایی هر دو کنترلر باید به صورت رابطه (۱۰) باشند [۱۱]؛

$$K_{ij}(z, \rho) = \rho^T_{ij} \phi(z) \quad (۱۰)$$

در روابط بالا، پارامتر n مشخص کننده مرتبه کنترلر است. شایان به ذکر است که به منظور ساده سازی محاسبات نهایی کنترلر، مقدار n برای همه عناصر ماتریس نهایی، ثابت در نظر گرفته می شود. در این پژوهش در تعیین ضرایب $K(z)$ ، n برابر ۳ در نظر گرفته شده است، تا هم دینامیک کنترلر مناسب باشد و هم میزان محاسبات کنترلر افزایش زیادی پیدا نکند؛ اما در تعیین ضرایب $K'(z)$ با توجه به کمتر بودن تعداد پارامترهای تحت کنترل (سه پارامتر θ_1 تا θ_3) مقدار n برابر ۴ در نظر گرفته شده است. بنابراین عناصر دو ماتریس مد نظر به صورت رابطه های (۱۲) و (۱۳) تعیین می گردند:

$$\begin{bmatrix} V_{o1}(s) \\ V_{o2}(s) \\ V_{o3}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{i,11}(s) & H_{i,12}(s) & H_{i,13}(s) \\ H_{i,21}(s) & H_{i,22}(s) & H_{i,23}(s) \\ H_{i,31}(s) & H_{i,32}(s) & H_{i,33}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \quad (۶)$$

که در این عبارت، سمت چپ دو رابطه (۵) و (۶) به ترتیب بیان کننده ولتاژهای خروجی و توان های مصرفی سه باس مد نظر موجود در سیستم هستند. هم چنین پارامترهای d_1 تا d_5 بیان کننده زمان هدایت کلیدهای S_1 تا S_5 موجود در سیستم ذخیره سازی انرژی هستند و پارامترهای θ_1 تا θ_3 بیانگر زوایای آتش کلیدهای درون مبدل منبع ولتاژ عنصر FATCS می باشند.

۳-۲- مشخص کردن مجموعه مدل های غیر پارامتری سیستم

در استراتژی کنترلی چند متغیره، باید تابع تبدیل حلقه باز سیستم در مجموعه ای از حالات ممکن که سیستم با آن مواجه می شود، تعیین شود و سپس ضرایب کنترلر نهایی بر اساس آن حالات مشخص شوند. در این پژوهش، چهار حالت برای مجموعه مذکور در نظر گرفته شده است. این چهار حالت بسیار مهم عبارتند از:

- ۱- کمتر بودن کل توان های اکتیو و راکتیو مورد نیاز در سه باس مصرفی از بیشینه میزان تولید در منابع تولیدی؛
- ۲- کمتر بودن توان اکتیو و بیشتر بودن توان راکتیو مورد نیاز در سه باس مصرفی از بیشینه میزان قابل تولید؛
- ۳- بیشتر بودن توان اکتیو و کمتر بودن توان راکتیو مورد نیاز در سه باس مصرفی از بیشینه میزان قابل تولید؛
- ۴- بیشتر بودن توان اکتیو و راکتیو مورد نیاز از بیشینه میزان قابل تولید.

در بخش نهایی، مقادیر کمی مربوط به حالات مذکور مشخص می شود. مجموعه توابع تبدیل حلقه باز سیستم در چهار حالت مذکور به صورت عبارت (۷) نمایش داده می شود:

$$\Phi = \{G_i(j\omega), H_i(j\omega) \quad i=1, \dots, 4, \omega \in R\} \quad (۷)$$

۳-۳- مشخص سازی کلاس کنترلر

در این قسمت با توجه به پروسه طراحی کنترلر چند متغیره، کلاس کنترلر مدنظر طراحی می شود. به منظور خطی سازی تابع تبدیل نهایی کنترلر، بهتر است که کلاس کنترلر در حوزه Z تعیین کرد [۱۳]. در واقع ضرایب ماتریس مربوط به کلاس کنترلر،

با توجه به نکات مطرح‌شده جهت تعیین ω ، به‌منظور حفظ پایداری سیستم مقدار ω برای LD و LD به ترتیب برابر ۹۵۰۰ و ۱۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است [۱۳].

بخش دیگری که در طراحی کنترلر چندمتغیره انجام می‌شود، تشکیل دادن تابع حساسیت حلقه بسته سیستم و ارزیابی آن به منظور بررسی مناسب بودن عملکرد کنترلر است. تابع حساسیت سیستم تحت کنترل به‌صورت عبارت (۱۶) تشکیل می‌شود. در رابطه (۱۶)، پارامتر W_1 بیان‌کننده ضریب فیلتر وزن تابع حساسیت است که این پارامتر، ضریب اطمینان بررسی تابع حساسیت سیستم را بالا ببرد. در این پژوهش مقدار این پارامتر ثابت و برابر ۰.۸ در نظر گرفته شده است. شرط درست عمل کردن کنترلر این است که رابطه (۱۶) برقرار باشد [۱۴].

$$\left| W_1(j\omega) \left[\frac{1}{1+L_{i,qq}} \right] \right| < 1 \quad \forall \omega \in R \quad (16)$$

بنابراین برای به دست آوردن ضرایب کنترلر باید عبارت‌های (۱۴) و (۱۶) برقرار باشند. اما مشکل بزرگی که در حل مسئله بهینه‌سازی مجموع مربعات اختلافات وجود دارد این است که این مسئله دارای تعداد نامحدودی فرکانس کاری است. به همین منظور، در مسئله بهینه‌سازی، به فرکانس‌های زیرفرکانس ناپیکوئیسیت توجه می‌شود و فرکانس‌های بیشتر از آن در نظر گرفته نمی‌شوند [۱۴].

هم‌چنین برای حل کمی مسئله بهینه‌سازی، طیف فرکانسی مورد مطالعه باید به‌صورت گسسته بررسی شود. مجدداً ذکر می‌شود که کلیه مراحل ذکرشده، به صورت مشابه برای محاسبه اجزای ماتریس L' تکرار و ضرایب pi_g بر همین اساس محاسبه می‌شوند.

۳-۶- محاسبه کمی ضرایب کنترلر طراحی‌شده

در این قسمت، مقادیر کمی ضرایب ماتریس کنترلر حلقه بسته سیستم به دست آورده می‌شوند. اما در ابتدا چهار حالت تعیین‌کننده وضعیت کنترلر که در بخش قبل توضیح داده شدند، به صورت کمی بیان می‌شوند. همان‌طور که در قسمت‌های قبلی توضیح داده شد بیشینه توان اکتیو تولیدی در این مجموعه برابر ۱/۷ MW است. با توجه به مقادیر خازن‌های موجود در مبدل‌های متصل به منابع و ولتاژ خروجی آنها، بیشینه توان راکتیو قابل

$$K_{ij}(z) = \frac{\rho_{ij,0} + \rho_{ij,1}z^{-1} + \rho_{ij,2}z^{-2} + \rho_{ij,3}z^{-3}}{1-z^{-1}} \quad (11)$$

$$K'_{ij}(z) = \frac{\rho'_{ij,0} + \rho'_{ij,1}z^{-1} + \rho'_{ij,2}z^{-2} + \rho'_{ij,3}z^{-3} + \rho'_{ij,4}z^{-4}}{1-z^{-1}} \quad (12)$$

۳-۴- مشخص کردن تابع تبدیل نهایی حلقه باز سیستم

پس از به دست آوردن ماتریس‌های تابع تبدیل اولیه حلقه باز سیستم (G) و (H) و هم‌چنین ماتریس‌های تعیین‌کننده کلاس کنترل (K) و (K')، توابع تبدیل نهایی حلقه باز سیستم بر اساس روابط $L(j\omega) = G(j\omega).K(j\omega)$ و $L'(j\omega) = H(j\omega).K'(j\omega)$ به دست آورده می‌شوند. با توجه به این که در این پژوهش چهار حالت کاری مختلف در نظر گرفته شده است، مجموعه توابع تبدیل حلقه باز سیستم به صورت رابطه (۱۳) مشخص می‌شود:

$$\Lambda = \{L_i(j\omega) \& L'_i(j\omega), i=1, \dots, 4, \omega \in R\} \quad (13)$$

۳-۵- تشکیل دادن حلقه فیدبک کنترلر

تشکیل حلقه فیدبک کنترلر، آخرین مرحله قبل از انجام محاسبات به روش کنترلی چندمتغیره است. ضرایب متغیر pi_g و pi_g در این بخش به دست آورده می‌شوند. شیوه این امر به این صورت است که مجموع مربعات اختلاف بین تک‌تک اجزای متناظر ماتریس‌های تابع تبدیل نهایی حلقه بسته L_i و حالت ایده‌آل همین ماتریس LD باید مینیمم شود. بنابراین، این بخش به یافتن ضرایب pi_g بر اساس رابطه (۱۴) می‌پردازد [۱۲]. همین امر به صورت مشابه برای pi_g انجام می‌شود.

$$\min \sum_{i=1}^4 \|L_i - L_D\|^2 \quad (14)$$

برای به دست آوردن ماتریس ایده‌آل کنترلر باید به اهداف کنترلر توجه شود. با توجه به این که یکی از اهداف کنترلر، مستقل کردن ولتاژ پایانه‌های خروجی مبدل است، بنابراین کلیه عناصر غیر قطری ماتریس L_D باید صفر باشند. از سوی دیگر، به‌منظور حفظ پایداری، عناصر قطری هم باید به شکل انتگرالی باشند. بنابراین، ماتریس مطلوب L_D به صورت رابطه (۱۵) تعیین می‌گردد.

$$L_D(s) = \begin{bmatrix} L_{D1}(s) & 0 & 0 \\ 0 & L_{D2}(s) & 0 \\ 0 & 0 & L_{D3}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\omega_c}{s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\omega_c}{s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\omega_c}{s} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 K'_{11}(z) &= \frac{1.736 - 1.232z^{-1} + 2.104z^{-2} + 0.853z^{-3} - 0.329z^{-4}}{1 - z^{-1}} \\
 K'_{12}(z) &= \frac{3.541 + 2.408z^{-1} - 2.762z^{-2} - 1.643z^{-3} + 0.728z^{-4}}{1 - z^{-1}} \\
 K'_{13}(z) &= \frac{3.481 - 1.297z^{-1} - 3.002z^{-2} - 1.892z^{-3} + 2.119z^{-4}}{1 - z^{-1}} \\
 K'_{21}(z) &= \frac{2.357 + 1.174z^{-1} - 1.229z^{-2} + 3.759z^{-3} + 1.671z^{-4}}{1 - z^{-1}} \\
 K'_{22}(z) &= \frac{1.971 + 1.581z^{-1} + 1.591z^{-2} + 2.781z^{-3} - 1.731z^{-4}}{1 - z^{-1}} \\
 K'_{23}(z) &= \frac{2.371 - 4.766z^{-1} - 2.711z^{-2} - 2.242z^{-3} + 1.528z^{-4}}{1 - z^{-1}} \quad (۱۸) \\
 K'_{31}(z) &= \frac{2.004 + 3.640z^{-1} - 1.042z^{-2} + 2.871z^{-3} - 0.348z^{-4}}{1 - z^{-1}} \\
 K'_{32}(z) &= \frac{1.179 - 1.763z^{-1} - 0.081z^{-2} + 2.561z^{-3} - 3.219z^{-4}}{1 - z^{-1}} \\
 K'_{33}(z) &= \frac{1.561 + 3.729z^{-1} - 1.815z^{-2} + 1.102z^{-3} + 2.728z^{-4}}{1 - z^{-1}}
 \end{aligned}$$

۴- بررسی عملکرد شبکه DG پیاده شده

در این قسمت به بررسی عملکرد شبکه DG شبیه سازی شده در چندین آزمون مختلف پرداخته می شود. در این آزمون ها تلاش شده است که همه شرایط بحرانی که شبکه قدرت DG طراحی شده برای کاربرد نظامی، ممکن است با آن مواجه شود پیش بینی شوند. به بیان دیگر، سعی شده است که شرایطی که بر اثر بمباران های هدفمند دشمن در شبکه DG و هم چنین شرایطی که در سایت های نظامی در لحظات حساس به وجود می آیند، در این آزمون ها لحاظ شوند. توان اکتیو و راکتیو مورد نیاز در باس های مصرفی در هنگام شرایط عادی، در همه این آزمون ها مشابه است؛ به گونه ای که در وضعیت نرمال باس های مصرفی، به $1/2$ MW توان اکتیو و $0/2$ MVAR توان راکتیو نیاز است. ولتاژ مبنای مد نظر برای خروجی سیستم فتوولتائیک/پیل سوختی برابر ۲ KV و ولتاژ خطوط انتقال برابر ۲۰ KV در نظر گرفته شده است.

افزایش موقت توان های اکتیو و راکتیو مورد نیاز، یکی از پدیده های رایج در سایت های پرتاب موشک در لحظات launching می باشد و به همین دلیل تلاش شده است که در دو آزمون اول پیش رو اثر افزایش توان های اکتیو و راکتیو بر روی ولتاژ شبکه DG بررسی شود. در آزمون سوم فرض شده است که بر اثر بمباران، تعدادی از منابع تولیدکننده انرژی از شبکه DG خارج شده اند و نقش عناصر اصلاحی در تنظیم ولتاژ شبکه DG در این شرایط ارزیابی گشته است. در آزمون چهارم به بررسی انعطاف پذیر بودن ولتاژ مبنای شبکه DG پرداخته شده است که این امر کارایی سیستم پیشنهاد شده را در کاربردهای مختلف شهری و نظامی در

تولید در شبکه پیاده شده، نزدیک به $0/5$ MVAR است. با توجه به توضیحات قبلی، میزان توان مصرفی هر باس در ۴ حالت تعیین کننده وضعیت سیستم در جدول (۳) آورده شده اند. میزان مصرف هر سه باس با همدیگر مشابه است.

جدول ۳- مقدار کمی توان های مصرفی در چهار حالت کاری

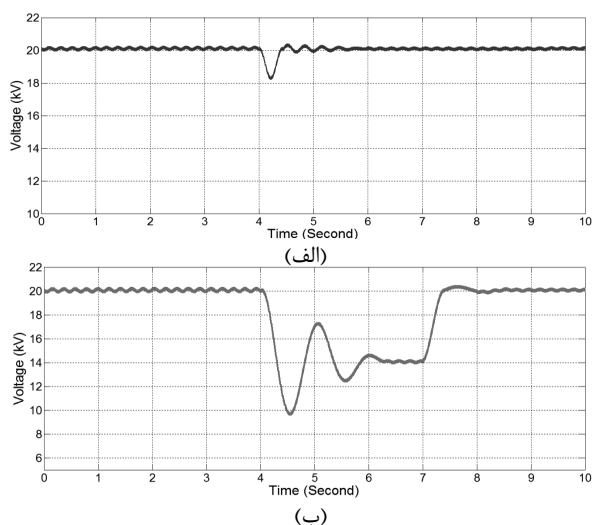
وضعیت	توان اکتیو مصرفی هر باس	توان راکتیو مصرفی هر باس
حالت اول	0.5 MW	0.2 MVAR
حالت دوم	0.5 MW	0.4 MVAR
حالت سوم	1.3 MW	0.2 MVAR
حالت چهارم	1.3 MW	0.7 MVAR

با توجه به چهار وضعیت بیان شده، محاسبات مربوط به تعیین ضرایب کنترلر با پی گیری روش توضیح داده شده انجام می شود. با بررسی این مقادیر مشخص می شود که شرط تابع حساسیت عبارت (۱۷) هم رعایت شده است. پس اطلاعات به دست آمده می توانند به عنوان ضرایب نهایی کنترلر حلقه بسته به کار روند. ضرایب به دست آمده عناصر ماتریس $K(z)$ و $K'(z)$ در عبارات (۱۷ و ۱۸) مطرح شده اند.

$$\begin{aligned}
 K_{11}(z) &= \frac{1.209 + 1.202z^{-1} - 0.231z^{-2} - 1.103z^{-3}}{1 - z^{-1}} \\
 K_{12}(z) &= \frac{2.036 + 2.815z^{-1} + 0.031z^{-2} - 0.039z^{-3}}{1 - z^{-1}} \\
 K_{13}(z) &= \frac{1.031 - 2.070z^{-1} - 1.912z^{-2} + 1.759z^{-3}}{1 - z^{-1}} \\
 K_{21}(z) &= \frac{1.337 - 1.091z^{-1} - 1.649z^{-2} + 1.003z^{-3}}{1 - z^{-1}} \\
 K_{22}(z) &= \frac{1.129 + 2.571z^{-1} - 1.935z^{-2} + 1.514z^{-3}}{1 - z^{-1}} \\
 K_{23}(z) &= \frac{1.619 + 2.381z^{-1} - 1.935z^{-2} + 1.514z^{-3}}{1 - z^{-1}} \quad (۱۷) \\
 K_{31}(z) &= \frac{1.748 - 1.902z^{-1} - 1.389z^{-2} - 2.531z^{-3}}{1 - z^{-1}} \\
 K_{33}(z) &= \frac{2.571 + 1.300z^{-1} + 0.371z^{-2} - 1.792z^{-3}}{1 - z^{-1}} \\
 K_{43}(z) &= \frac{2.745 - 1.252z^{-1} + 1.761z^{-2} - 0.153z^{-3}}{1 - z^{-1}} \\
 K_{51}(z) &= \frac{1.382 - 2.591z^{-1} + 2.671z^{-2} - 1.478z^{-3}}{1 - z^{-1}} \\
 K_{52}(z) &= \frac{1.519 + 2.781z^{-1} - 1.745z^{-2} - 1.678z^{-3}}{1 - z^{-1}} \\
 K_{53}(z) &= \frac{1.452 + 1.176z^{-1} + 1.392z^{-2} - 2.317z^{-3}}{1 - z^{-1}}
 \end{aligned}$$

۴-۲- آزمون دوم: افزایش ناگهانی توان راکتیو مورد نیاز

این آزمون کاملاً مشابه آزمون اول است. با این تفاوت که به جای توان اکتیو، توان راکتیو افزایش پیدا می‌کند. مجدداً ولتاژ باس شماره ۲ اندازه‌گیری شده و در شکل (۶-الف) نمایش داده شده است. این آزمون با همین شرایط و البته در غیاب حضور عنصر FACTS تکرار شده و ولتاژ مذکور در شکل (۶-ب) نمایش داده شده است.



شکل ۶- شکل موج ولتاژ باس شماره ۲ در آزمون دوم، (الف) همراه با D-STATCOM، (ب) بدون STATCOM

با مقایسه دو شکل می‌توان به عملکرد موثر عنصر FACTS و کنترلر آن پی برد که به محض افزایش ناگهانی توان راکتیو مصرفی، عنصر مذکور توانسته است این اضافه توان را تأمین کند و مانع از کاهش ولتاژ پایانه‌های مصرفی شود. هم‌چنین تنظیم ولتاژ شبکه به صورت بسیار مطلوبی انجام شده است که با وجود یک اغتشاش شدید در شبکه قدرت نظامی که تنظیم ولتاژ آن بسیار حساس است، ولتاژ باس‌های مصرفی آن تغییرات ناچیزی داشته و با دینامیک بسیار سریعی به مقدار مینا بازگشته‌اند.

۴-۳- آزمون سوم: توقف ناگهانی عملکرد یکی از منابع انرژی

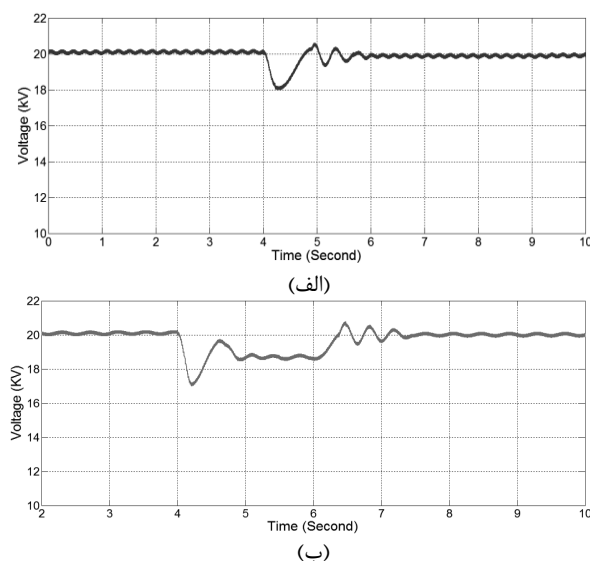
این آزمون به بررسی عملکرد شبکه DG طراحی شده در شرایطی می‌پردازد که یکی از منابع انرژی به هر دلیلی قادر به عملکرد صحیح نیست و نمی‌تواند توان مورد انتظار را تأمین کند. در این آزمون تا قبل از لحظه $T=4s$ ، شرایط عادی بر شبکه DG حکمفرما است. اما در لحظه مذکور، پارامتر بیانگر میزان شدت تابش خورشید سیستم فتوولتائیک به صورت تابع پله از $\lambda = 1$ به $\lambda = 0.2$

مواقع حساس جنگی بسیار بالا می‌برد. در آزمون پنجم هم شبکه DG به شبکه سراسری متصل شده است و فرض شده است که بر اثر بمباران شبکه سراسری دچار اختلال شده است و اثر این امر بر روی ولتاژ شبکه DG ارزیابی شده است.

۴-۱- آزمون اول: افزایش ناگهانی توان اکتیو مورد نیاز

در این آزمون، میزان توان‌های اکتیو و راکتیو مصرفی قبل از لحظه $T=4s$ ، همان مقادیر مربوط به شرایط عادی است. اما در لحظه $T=4s$ به مدت زمان ۲ ثانیه میزان این توان اکتیو مورد نیاز در باس‌های مصرفی شماره سه و چهار، به صورت تابع پله به میزان ۳۰٪ افزایش می‌یابد و در لحظه $T=6s$ مجدداً شرایط عادی بر شبکه حاکم می‌شود.

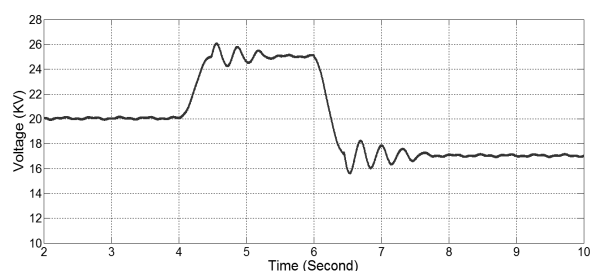
مقدار مؤثر سه فاز ولتاژ باس شماره ۲ که به‌عنوان باس مشترک بارهای مصرفی است در شکل (۵-الف) نمایش داده شده است. هم‌چنین به‌منظور مقایسه بهتر، ولتاژ مذکور در حالت عدم حضور ذخیره‌ساز انرژی در شرایط مشابه در شکل (۵-ب) نشان داده شده است.



شکل ۵- شکل موج ولتاژ باس شماره ۲ در آزمون اول، (الف) همراه با سیستم SMES، (ب) بدون سیستم SMES

با مقایسه این دو شکل به نقش سیستم ذخیره ساز انرژی در تأمین توان اکتیو مورد نیاز شبکه DG در شرایط بحرانی می‌توان پی برد که این امر مانع از فروپاشی ولتاژ به مقادیر ناچیز شده است. به بیان دیگر در صورت عدم حضور سیستم مذکور، افزایش ناگهانی توان مصرفی موجب اختلال در عملکرد صحیح کنترلر می‌شود و نمی‌تواند ولتاژ را در مقدار مینا تنظیم کند.

است ولتاژ مطلوب متفاوت باشد. مثلاً در شرایط بحرانی جنگی که منطقه‌ای از شبکه سراسری جدا شود، برای تأمین انرژی مراکز صنعتی حساس و تأمین مراکز حساس شهری نظیر بیمارستان‌ها به دو ولتاژ متفاوت نیاز است. شبکه DG پیاده شده باید بتواند در صورت نیاز هرکدام از این مراکز، پاسخگو باشد. به همین منظور در این آزمون شرایط دشوارتری در نظر گرفته شده است. در این آزمون بررسی شده است که آیا ولتاژ خطوط انتقال می‌تواند از عملکرد در یک حالت کاری به حالت دیگری برود یا نه. به همین منظور، در لحظه $T=4s$ مقدار ولتاژ باس مشترک از ۲۰ کیلوولت به ۲۵ کیلوولت افزایش داده شده است. مجدداً در لحظه $T=6s$ این پارامتر به ۱۷ کیلوولت کاهش یافته است. همان طور که از روی شکل (۸) (که در آن ولتاژ باس شماره ۶ نشان داده شده) گویا است، شبکه کنترلر طراحی شده نه تنها می‌تواند ولتاژ مینا را تغییر دهد؛ بلکه هم در کاهش و هم در افزایش ولتاژ خروجی، از دینامیک مناسبی برخوردار است و توانسته است ولتاژ را در مدت زمان کوتاهی در مقدار مینا تنظیم کند.



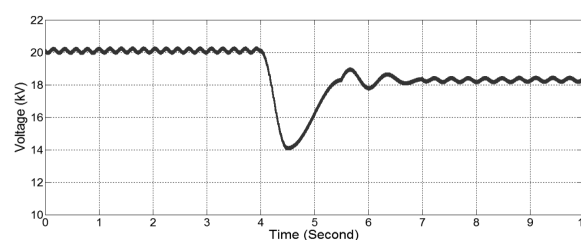
شکل ۸- شکل موج ولتاژ باس شماره ۶ در آزمون چهارم

۴-۵- آزمون پنجم: مختل شدن عملکرد صحیح شبکه

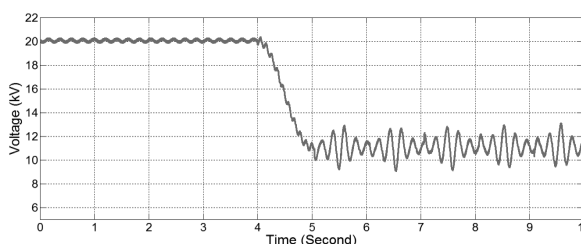
سراسری

در این آزمون فرض شده است که شبکه DG از طریق باس شماره ۲ به شبکه سراسری با ولتاژ ۲۰ کیلوولت متصل شده است. البته یک رله Over Current هم در مسیر اتصال شبکه DG به شبکه سراسری قرار داده شده است. در لحظه $T=4s$ ، در اثر شرایط بحرانی جنگی (مثلاً بمباران)، ولتاژ شبکه سراسری دچار فروپاشی شده است و در مدت زمان کوتاهی، از ۲۰ KV به مقادیر ناچیزی کاهش یافته است. ولتاژ باس شماره ۲ در این آزمون اندازه گرفته شده و در شکل (۹) نمایش داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که به محض این که رله اضافه جریان مختل شدن عملکرد صحیح شبکه سراسری را تشخیص داده است و شبکه DG را از شبکه سراسری قطع کرده است، کنترلر طراحی شده توانسته است به خوبی ولتاژ شبکه DG را بازیابی کند. این نکته یک حسن بسیار مهم شبکه

کاهش می‌یابد. مجدداً ولتاژ باس شماره ۲ اندازه‌گیری شده است و در شکل (۷-الف) نشان داده شده است. همان‌طور که از روی نتیجه مشخص است، ولتاژ شبکه DG به خوبی در مقابل این کاهش توان تولیدی مقاومت کرده است. به بیان دیگر، حضور چندین منبع انرژی و سیستم ذخیره‌ساز انرژی در شبکه DG پیاده شده، قابلیت اطمینان آن را به‌طور مناسبی بالا برده است که حتی در صورت خارج شدن یکی از منابع انرژی، باز هم، سیستم می‌تواند به عملکرد صحیح خود ادامه دهد. اما شکل موج همین ولتاژ که در شرایط بدون حضور سیستم ذخیره‌ساز انرژی در شکل (۷-ب) نمایش داده شده است، بیانگر آن است که بدون حضور سیستم ذخیره‌ساز انرژی، عملکرد کنترلر مختل شده و ولتاژ باس مشترک نه تنها کاهش ناگهانی پیدا کرده، بلکه ناپایدار نیز شده است که این امر، برای یک شبکه قدرت مورد استفاده در کاربردهای حساس بسیار خطرناک است. شایان ذکر است که اگرچه در حالت همراه با سیستم ذخیره‌ساز انرژی، مقدار ولتاژ نهایی اندکی کمتر از مقدار مد نظر است، اما اولاً این پارامتر پایدار است و ثانیاً این اختلاف کم، معمولاً آسیبی به ادوات موجود در سیستم قدرت نمی‌زند.



(الف)



(ب)

شکل ۷- شکل موج ولتاژ باس شماره ۲ در آزمون سوم، همراه با

سیستم SMES، (ب) بدون سیستم SMES

۴-۴- آزمون چهارم: تغییر ولتاژ مینای باس مشترک

با توجه به این که شبکه DG پیاده شده در این پژوهش جهت کاربرد در سیستم نظامی طراحی شده است؛ انعطاف‌پذیر بودن ولتاژ مینای باس مشترک شبکه، از نکات بسیار مهم است. این ویژگی به آن دلیل است که در وضعیت‌های مختلف کاربری شبکه، ممکن

شد. این استفاده هم‌زمان، قابلیت اطمینان سیستم را به‌طور مناسبی بالا برد؛ به گونه‌ای که مشکل کمبود توان اکتیو در شبکه قدرت با انرژی ذخیره‌شده در سیستم ذخیره‌ساز انرژی برطرف شد و همچنین عنصر FACTS با تزریق مناسب توان راکتیو به رفع مشکلات فروپاشی و نوسانات ولتاژ در شرایط مختلف کرد.

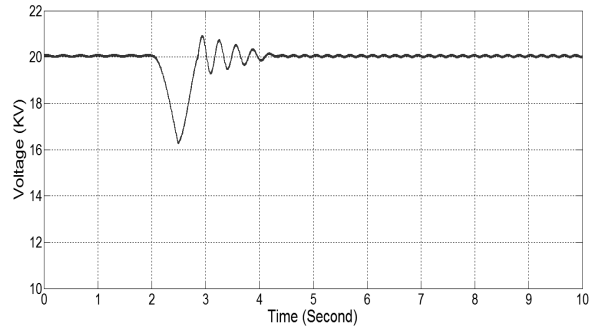
به‌منظور بهره‌گیری مناسب از دو عنصر اصلاحی اضافه‌شده، یک کنترلر کارآمد بر اساس استراتژی کنترلی چندمتغیره طراحی شد. کنترلر مذکور از دو ویژگی مهم برخوردار بود که ویژگی اول، داشتن دینامیک مناسب در تنظیم ولتاژ شبکه DG و ویژگی دوم، داشتن پایداری مناسب در شدیدترین اغتشاشات موجود در شبکه قدرت بود. پس از طراحی کنترلر، سیستم قدرت نهایی پیاده‌سازی شد و در چندین آزمون مختلف، عملکرد آن تحت بررسی قرار گرفت. در این آزمون‌ها سعی شد که بحرانی‌ترین حالاتی که سیستم قدرت DG ممکن است با آنها مواجه شود مورد بررسی قرار گیرند.

در نهایت با تحلیل نتایج به‌دست‌آمده از آزمون‌ها، نشان داده شد که سیستم قدرت از عملکرد مناسبی در شرایط بحرانی برخوردار است و می‌تواند به عنوان یک گزینه مناسب برای کاربردهای شهری و نظامی مورد استفاده قرار گیرد. به بیان بهتر، در این آزمون‌ها نشان داده شد که شبکه پیاده‌شده، از قابلیت اطمینان مناسبی برای عملکرد در شرایط بحرانی نظامی که عملکرد شبکه سراسری دچار اختلال شده است، برخوردار بوده و می‌تواند انرژی مورد نیاز مراکز حساسی نظیر بیمارستان‌ها، سایت‌های پرتاب موشک، کارخانجات صنایع استراتژیک و ... را تأمین نماید که مسلماً این امر از تأثیر بسیار مهمی در خنثی کردن نقشه دشمن در فلج کردن کشور در شرایط خطیر جنگی برخوردار است.

۶- مراجع

۱. عابدی، مهرداد، سیستم‌های قدرت الکتریکی، جلد دوم، انتشارات نهر دانش، تهران، ۱۳۹۰.
2. W. Caisheng and M. H. Nehrir, "Power management of a stand-alone wind photovoltaic fuel cell energy system," Energy Conversion, IEEE Transactions on 23, no. 3, pp. 957-967, 2008.
3. J. Sachin and V. Agarwal, "An integrated hybrid power supply for distributed generation applications fed by nonconventional energy sources," Energy Conversion, IEEE Transactions on 23, no. 2, pp. 622-631, 2008.

پیاده‌شده را از دید پدافند غیرعامل بیان می‌کند. به بیان بهتر، شبکه مذکور در شرایط عادی می‌تواند به شبکه سراسری متصل باشد و از مزایای متصل بودن به شین بی‌نهایت به خوبی استفاده کند و در شرایط بحرانی شبکه سراسری هم می‌تواند از شبکه جدا شده و به عملکرد صحیح خود ادامه دهد.



شکل ۹- شکل موج ولتاژ باس شماره ۶ در آزمون پنجم

در این آزمون‌ها تلاش شد که شدیدترین و خطرناکترین رخدادهایی که برای یک شبکه توزیع در شرایط بحرانی جنگی رخ می‌دهد مد نظر قرار گیرند. نتایج این پنج آزمون در جدول (۴) به تفصیل بیان شده‌اند.

جدول ۴- نتایج آزمون‌های مربوط به شبکه ارائه‌شده

نام آزمون	تنظیم ولتاژ	جلوگیری از فروپاشی ولتاژ	تأمین توان مورد نیاز
افزایش ناگهانی توان اکتیو مورد نیاز	موفق	موفق	موفق
افزایش ناگهانی توان راکتیو مورد نیاز	موفق	موفق	موفق
توقف عملکرد منابع انرژی	نا موفق	موفق	موفق
تغییر ولتاژ مبنای باس مشترک	موفق	موفق	موفق
مختل شدن عملکرد شبکه سراسری	موفق	موفق	موفق

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک شبکه استاندارد قدرت DG ترکیبی طراحی و شبیه‌سازی شد. شبکه مذکور از ویژگی‌های بسیار مناسبی جهت عملکرد در کاربردهای نظامی و همچنین در کاربردهای شهری در زمان‌های بحرانی برخوردار است. در شبکه مذکور به‌طور هم‌زمان از سیستم ذخیره‌ساز انرژی و همچنین از عناصر FACTS استفاده

14. G. Galdos, A. Karimi, and R. Longchamp, "controller design for spectral MIMO models by convex optimization," *J. Process Control*, vol. 20, no. 10, pp. 1175-1182, 2010.
15. A. Pizzutelli and M. Ghioni, "Novel control technique for single inductor multiple output converters operating in ccm with reduced cross regulation," in *Proc. 23rd Annu. IEEE Appl. Power Electron, Conf. Expo.*, pp. 1502-1507, Feb. 2008.
4. B. Prabodh and V. Dash, "Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, no. 5, pp. 2926-2939, 2012.
5. A. A. Nabil, A. K. Al-Othman, and M. R. AlRashidi, "Development of an efficient utility interactive combined wind/photovoltaic/fuel cell power system with MPPT and DC bus voltage regulation," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 5, pp. 1096-1106, 2011.
6. V. M. Gradella and J. R. Gazoli, "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays," *Power Electronics, IEEE Transactions on* 24, no. 5, pp. 1198-1208, 2009.
7. W. Wei, C.-Y. Wang, and J.-J. Hwang, "Scenario-oriented design of an MFC/PV/Battery based hybrid power generation system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 65, pp. 34-40, 2015.
8. A. Nami, F. Zare, A. Ghosh, and F. Blaabjerg, "Multi-output DC-DC converters based on diode-clamped converters configuration: topology and control strategy," *IET power electronics*, vol. 3, no. 2, pp. 197-208, 2010.
9. D. Ma, W. H. Ki, C. Y. Tsui, and P. K. Mok, "Single-inductor multiple-output switching converters with time-multiplexing control in discontinuous conduction mode," *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, vol. 38, no. 1, pp. 89-100, 2003.
10. W. Zhang, F. Li, and L. M. Tolbert, "Optimal allocation of shunt dynamic Var source SVC and STATCOM: A Survey," pp. 507-507, 2006.
11. M. Esmaili, H. A. Shayanfar, and R. Moslemi, "Locating series FACTS devices for multi-objective congestion management improving voltage and transient stability," *European Journal of Operational Research*, vol. 236, no. 2, pp. 763-773, 2014.
12. B. Bahrani, J. D. Dasika, M. Saeedifard, A. Karimi, and A. Rufer, "Multivariable control of Single-Inductor Dual-Output buck converters," In *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE*, pp. 1103-1108, March 2013.
13. K. Y. Lin, C. S. Huang, D. Chen, and K. H. Liu, "Modeling and design of feedback loops for a voltage-mode single-inductor dual-output buck converter," In *Power Electronics Specialists Conference, PESC 2008, IEEE*, pp. 3389-3395, June 2008.

Regulating the Voltage of the Hybrid DG Power Systems Using From SMES System and FACTS Devices

M. R. Alizadeh Pahlavani*, S. Taghipur Broujeni

Abstract

The main objective of this paper is solving the problem of voltage variations of Hybrid Photovoltaic/Fuel cell at different conditions. Because of valuable advantages of hybrid DG power systems, using from these power systems become more and more prevalent. But there are some defects that cause the application of DG power system unacceptable. One of these deficiencies relates to the malfunction of energy sources. For example, during shaded conditions the output power of PV arrays reduces to negligible values or by stopping the correct electrochemical process of fuel cell, it cannot deliver power to the grid. The other problem of Hybrid Photovoltaic/Fuel cell is that there is not enough reactive power for delivering to the load and this cause the voltage reduction of DG power system. To solve mentioned problems, in this survey, it is suggested that by applying SMES system and D-STATCOM, active and reactive power can be provided to the load, respectively. But, adding these elements to the power system at the same time needs to an efficient controller. In this paper, multivariable control strategy as an efficient method which can regulate the voltage of the DG power system busses with an appropriate dynamic is selected to design the controller. Generally, in this paper, after designing one standard Hybrid PV/Fuel cell DG power system, by adding the elements of SMES system and D-STATCOM, the voltage of the proposed system is regulated at different conditions and this fact is approved via simulation tests.

Key Words: *Hybrid DG Power Systems, SMES System, FACTS Devices, Multi-variables Controller*