بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده برق و کامپیوتر

بهبود تسهیم توان راکتیو و پایداری در ریزشبکه‌های جزیره‌ای مبتنی بر مبدل

رساله دکتری مهندسی برق

هادی ثقفی اصفهانی

استاد راهنما

دکتر حمیدرضا کارشناس

۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده برق و کامپیوتر

رساله دکتری رشته مهندسی برق آقای هادی ثقفی اصفهانی
تحت عنوان

بهبود تسهیم توان راکتیو و پایداری در ریزشبکه‌های جزیره‌ای مبتنی بر مبدل

در تاریخ ۱۳۹۳/۲/۳ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای رساله	دکتر حمیدرضا کارشناس
۲- استاد مشاور رساله	دکتر احمدرضا تابش
۳- استاد داور	دکتر محمداسماعیل همدانی گلشن
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر سید محمد علی خسروی فرد

تشکر و قدردانی

خداوند متعال را سپاسگزارم که مجال زیستن و توفیق تحصیل و انجام این رساله را به این بنده کوچک خود عطا فرمود و درود بیکران بر آخرین فرستاده‌اش و خاندان مطهر او می‌فرستم که وجودم وامدار وجودشان است.

به مصداق «من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق» شایسته است مراتب قدردانی و سپاس خود را از استاد راهنمای فرهیخته و گرانقدر جناب آقای دکتر کارشناس که در طول تحصیل و انجام رساله از دریای علم و تجربه ایشان بهره‌مند شدم و راهنمایی‌های ایشان چراغ راهم گردید، ابراز نمایم. همچنین از جناب آقای دکتر تابش که از مشاوره‌های ارزشمند ایشان در انجام رساله استفاده نمودم، صمیمانه سپاسگزارم. از جناب آقای دکتر همدانی گلشن و اساتید بزرگوار دانشکده برق دانشگاه صنعتی شریف آقایان دکتر پرنیانی و دکتر مختاری که زحمت مطالعه و داوری رساله را برعهده گرفتند، کمال تشکر و قدردانی را دارم. همچنین از جناب آقای دکتر خسروی‌فرد سرپرست محترم تحصیلات تکمیلی دانشکده برق و کامپیوتر و کارشناسان محترم تحصیلات تکمیلی سرکار خانم نکویی و سرکار خانم دهقان بخاطر راهنمایی‌هایشان در طول تحصیل و زحماتی که برای این رساله متقبل شده‌اند سپاسگزارم.

در پایان از خانواده عزیزم بخصوص پدر و مادر گرامی خود بخاطر حمایتهای بی‌دریغشان، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

هادی ثقفی اصفهانی

بهار ۹۳

کلیه حقوق مادی مترتب بـر نتـایج مطالعـات، ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این رساله متعلق بـه دانشـگاه صـنعتی اصـفهان است.

تقدیم به آن موعود عدالت‌گستر

که جهانی منتظـر قـدوم اوسـت

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱- تبیین موضوع ۲
۱-۱-۱- تولید پراکنده ۲
۱-۱-۲- منابع انرژی تجدیدپذیر ۴
۱-۱-۳- ریزشبکه ۴
۱-۱-۴- چالش‌های پیش رو ۸
۱-۲- مرور کارهای انجام شده ۱۰
۱-۲-۱- بهبود تسهیم توان راکتیو ۱۰
۱-۲-۲- بهبود حاشیه پایداری ۱۵
۱-۲-۳- کاربرد مبدل سری در ریزشبکه‌ها ۲۱
۱-۳- نوآوری‌های رساله ۲۴
۱-۴- ساختار رساله ۲۴

فصل دوم: منابع پراکنده و ریزشبکه‌ها

۲-۱- مقدمه ۲۶
۲-۲- انواع منابع انرژی پراکنده از نوع مولد ۲۷
۲-۲-۱- انرژی خورشیدی ۲۷
۲-۲-۲- انرژی باد ۲۸
۲-۲-۳- سلول سوختی ۲۹
۲-۲-۴- ریزتوربین ۲۹
۲-۲-۵- سایر منابع ۳۰
۲-۳- ریزشبکه ۳۰
۲-۳-۱- گسترش استفاده از منابع انرژی پراکنده ۳۱
۲-۳-۲- اهمیت ریزشبکه‌ها ۳۲

۲-۴- کنترل در ریزشبکه‌ها ۳۴
۲-۴-۱- کنترل مرکزی ۳۴
۲-۴-۲- شینه مرجع ۳۵
۲-۴-۳- کنترل محلی ۳۵
۲-۵- روش متداول در کنترل محلی ۳۶
۲-۶- مشخصه‌های افتی و افزایشی ۳۸
۲-۶-۱- ماهیت مشخصه‌ها ۳۸
۲-۶-۲- نحوه عملکرد مشخصه‌ها ۴۱

فصل سوم: مدل‌سازی فضای حالت

۳-۱- مقدمه ۴۴
۳-۲- ریزشبکه نمونه ۴۵
۳-۳- مدل‌سازی ریزشبکه نمونه ۴۶
۳-۴- مدل‌سازی ریزمنبع اول ۴۸
۳-۴-۱- کنترل‌کننده توان ۵۰
۳-۴-۲- حلقه کنترل ولتاژ ۵۲
۳-۴-۳- حلقه کنترل جریان ۵۴
۳-۴-۴- فیلتر LCL خروجی ۵۵
۳-۴-۵- ترانسفورماتور ۵۸
۳-۵- مدل‌سازی ریزمنابع دوم و سوم ۶۰
۳-۵-۱- انتقال جریان‌های تزریقی به شبکه از مختصات ریزمنبع به مختصات مرجع ۶۰
۳-۵-۲- انتقال ولتاژهای پایانه ریزمنابع از مختصات مرجع به مختصات ریزمنبع ۶۱
۳-۶- مدل‌سازی شبکه ۶۲
۳-۷- مدل کلی ریزشبکه ۶۷
۳-۸- بررسی صحت مدل‌سازی ۶۸
۳-۹- بررسی مقادیر ویژه ۶۹

فصل چهارم: کاربرد جبران سری در بهبود رفتار ریزشبکه

۴-۱- مقدمه ۷۴

۴-۲- نوسان توان در ریزشبکه ۷۵
۴-۲-۱- نحوه ایجاد نوسانات ۷۵
۴-۲-۲- میرا کردن نوسانات ۷۷
۴-۳- معرفی ساختار پیشنهادی ۷۹
۴-۴- کنترل‌کننده پیشنهادی ۸۰
۴-۵- شبیه سازی ریزشبکه نمونه با جبران سری ۸۱
۴-۶- مدل‌سازی ریزشبکه نمونه با جبران سری ۸۳
۴-۷- اندازه جبرانگر ۸۴
۴-۸- مقاوم بودن کنترل‌کننده ۸۵
۴-۹- روش تزریق توان راکتیو ۸۶
۴-۱۰- ریزشبکه نمونه دوم ۸۸
۴-۱۰-۱- مشخصات ریزشبکه ۸۸
۴-۱۰-۲- شبیه‌سازی سیستم نمونه دوم ۹۱

فصل پنجم: بهبود تسهیم توان راکتیو در ریزشبکه به وسیله جبرانگر سری

۵-۱- مقدمه ۹۶
۵-۲- بهبود تسهیم توان راکتیو با افزایش شیب مشخصه Q-V ۹۷
۵-۳- نحوه پیاده‌سازی مشخصه افتی ولتاژ ۹۹
۵-۴- فاز ولتاژ تزریقی توسط مبدل سری ۱۰۳
۵-۴-۱- روش حداقل توان نامی ۱۰۳
۵-۴-۲- روش عمود بر جریان خروجی یا روش بهبود نسبت X/R ۱۰۴
۵-۵- اندازه مبدل سری ۱۰۵
۵-۵-۱- روش حداقل توان نامی ۱۰۶
۵-۵-۲- روش بهبود نسبت X/R ۱۰۶
۵-۵-۳- اندازه مبدل برای بهبود همزمان پاسخ دینامیکی و حالت دائمی ۱۰۷
۵-۶- حفاظت مبدل سری ۱۰۷
۵-۷- هماهنگی کنترل‌کننده‌های بهبود پایداری و بهبود تسهیم توان راکتیو ۱۰۸
۵-۸- شبیه‌سازی ریزشبکه نمونه اول ۱۰۸
۵-۸-۱- بهبود پاسخ حالت دائمی ۱۰۹
۵-۸-۲- بهبود پاسخ دینامیکی ۱۱۰

۵-۹- شبیه‌سازی ریزشبکه نمونه دوم ۱۱۰

فصل ششم: بهبود تسهیم توان راکتیو با اصلاح مشخصه به روش استفاده از مشخصه ترکیبی

۶-۱- مقدمه ۱۱۶
۶-۲- فرایند اصلاح مشخصه ۱۱۸
۶-۳- انتخاب ضرایب مشخصه ۱۲۲
۶-۴- بررسی پایداری و انتخاب ضرایب کنترل کننده ۱۲۵
۶-۵- استراتژی‌های آغاز فرایند اصلاح مشخصه ۱۲۷
۶-۵-۱- ارسال سیگنال آغاز از کنترل کننده مرکزی ۱۲۹
۶-۵-۲- آغاز فرایند اصلاح براساس تصمیم‌گیری محلی ۱۲۹
۶-۵-۳- ارسال سیگنال آغاز از ریزمنبع مرجع ۱۳۰
۶-۶- نتایج شبیه‌سازی ۱۳۱
۶-۶-۱- ریزشبکه نمونه اول ۱۳۱
۶-۶-۲- ریزشبکه نمونه دوم ۱۴۰
۶-۷- محدودیت‌های تسهیم ایده‌آل ۱۴۱

فصل هفتم: بهبود تسهیم توان راکتیو با اصلاح مشخصه به روش تزریق سیگنال

۷-۱- مقدمه ۱۴۴
۷-۲- ساختار کنترل‌کننده پیشنهادی برای ریزمنابع ۱۴۷
۷-۳- کنترل‌کننده پیشنهادی جهت اصلاح مشخصه Q-V ۱۴۹
۷-۳-۱- آغاز فرایند اصلاح مشخصه و زمان‌سنجی فرایند ۱۴۹
۷-۳-۲- دامنه و فرکانس ولتاژ تزریقی ۱۵۱
۷-۳-۳- محاسبه پارامترهای مشخصه Q-V ۱۵۲
۷-۳-۴- ذخیره مقدار محاسبه شده ۱۵۳
۷-۴- نحوه اصلاح مشخصه ۱۵۴
۷-۵- بررسی پایداری الگوریتم پیشنهادی ۱۵۵
۷-۶- استراتژی‌های آغاز فرایند اصلاح مشخصه ۱۵۸
۷-۷- نتایج شبیه‌سازی ۱۶۱
۷-۷-۱- ریزشبکه نمونه اول ۱۶۱

۷-۷-۲- ریزشبکه نمونه دوم ۱۶۵

فصل هشتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۸-۱- مقدمه ۱۶۸
۸-۲- نتیجه‌گیری ۱۶۸
۸-۳- پیشنهادات برای ادامه کار ۱۷۰

مراجع ۱۷۲

چکیده

این رساله به موضوع بهبود تسهیم توان راکتیو و پایداری دینامیکی در ریزشبکه‌های جزیره‌ای می‌پردازد. افزایش قابلیت اطمینان در تامین انرژی، تلفات کمتر، رقابتی کردن تولید و امکان استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده از منابع انرژی گسترده را در شبکه‌های توزیع امروزی گسترش داده است. مجموعه‌ای از این منابع و بخشی از بارهای نزدیکشان، شبکه کوچکی به نام «ریزشبکه» تشکیل می‌دهند که ویژگی اصلی آن امکان جدا شدن از سیستم قدرت و عملکرد بصورت جزیره‌ای و خودگردان می‌باشد. مطلوب‌ترین و مطمئن‌ترین روش کنترل منابع در حالت جزیره‌ای، روش کنترل محلی است. در این روش، تسهیم توان حقیقی و راکتیو بین منابع معمولا با استفاده از مشخصه‌های افتی توان حقیقی–فرکانس (P-ω) و توان راکتیو–دامنه ولتاژ (Q-V) انجام می‌شود. با توجه به سراسری بودن فرکانس، تسهیم توان حقیقی با این روش بصورت ایده‌آل حاصل می‌گردد. در مقابل به علت عدم تقارن شبکه و تفاوت امپدانس خروجی منابع، دامنه ولتاژ منابع مختلف با هم برابر نبوده و عملا تسهیم توان راکتیو بین منابع به درستی انجام نخواهد شد. حل این مشکل مورد توجه بسیاری از محققین قرار دارد ولیکن راه‌حل‌های ارائه شده عمدتا محدود به ریزشبکه‌های با ساختار خاص بوده و یا نیازمند دانستن اطلاعات وسیع از شبکه می‌باشد. در این رساله سه روش جدید جهت بهبود تسهیم توان راکتیو در ریزشبکه‌های جزیره‌ای با منابع مبتنی بر مبدل استاتیکی و دارای کنترل محلی ارائه می‌گردد. روش‌های ارائه شده قابل استفاده در ریزشبکه با هر ساختار دلخواه بوده و قید خاصی برای شبکه مفروض نخواهد بود. کنترل‌کننده توان در ریزشبکه‌ها ارتباط تنگاتنگی با پایداری سیستم دارد. به همین دلیل در طراحی روش‌های پیشنهادی تلاش می‌شود پایداری ریزشبکه حفظ شده و حتی پاسخ دینامیکی ریزشبکه در شرایط کار مختلف بهبود داده شود تا عدم وابستگی روش‌های پیشنهادی به ساختار و نقطه‌کار شبکه بهبود بیشتری یابد. به منظور مطالعه و بررسی صحت عملکرد روش‌های پیشنهادی دو سیستم نمونه معرفی و مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای سیستم اول علاوه بر شبیه‌سازی حوزه زمان، مدل خطی شده فضای حالت سیستم نیز بدست می‌آید که امکان بررسی دقیق‌تر برخی از دستاوردهای رساله را ایجاد می‌کند. سیستم دوم که درواقع سیستم توزیع استاندارد ۱۵ شینه IEEE می‌باشد امکان بررسی روش‌های پیشنهادی در یک سیستم بزرگتر و واقعی‌تر را فراهم می‌آورد. در اولین روش پیشنهادی یک مبدل سری کوچک به خروجی منابع پراکنده اضافه می‌شود. نشان داده می‌شود که این مبدل می‌تواند میرایی نوسانات توان خروجی منابع را افزایش داده و ضمن ارتقاء کیفیت ولتاژ بار محلی منابع، تسهیم توان راکتیو را بهبود بخشد. در روش دوم نشان داده می‌شود که می‌توان در زمان‌های مورد نیاز با استفاده از یک مشخصه ترکیبی از توان‌های حقیقی و راکتیو، مشخصه Q-V منابع را با هدف حذف کامل خطای تسهیم اصلاح نمود. در آخرین روش پیشنهاد می‌شود در زمان تغییر بار راکتیو منابع، با تزریق یک سیگنال هارمونیکی توسط هر منبع و با بکارگیری مشخصه‌ای برمبنای فرکانس این سیگنال، مشخصه Q-V اصلاح گردد. نشان داده می‌شود با استفاده از این روش خطای تسهیم همزمان با دینامیک تغییر بار جبران شده و در حالت دائمی توان راکتیو همواره دارای تسهیم ایده‌آل خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: ۱- ریزشبکه ۲- تسهیم توان ۳- پایداری ۴- جبرانگر سری ۵- اصلاح مشخصه ۶- تزریق سیگنال

فصل اول
مقدمه

۱-۱- تبیین موضوع

۱-۱-۱- تولید پراکنده

ظهور فناوری‌های نو و لزوم افزایش قابلیت اطمینان در تامین انرژی بارهای حساس، استفاده از منابع انرژی با ابعاد کوچک را در شبکه‌های توزیع امروزی پراهمیت ساخته است. این منابع که به تعداد زیاد در سطح شبکه توزیع پراکنده می‌شوند، بطور معمول منبع انرژی پراکنده[1] نام دارند. همچنین با توجه به ابعاد کوچک این منابع، به آنها ریزمنبع[2] نیز اطلاق می‌گردد. سلول‌های نوری[3]، پیل‌های سوختی[4]، توربین‌های بادی[5]، ریزتوربین‌ها[6] و ژنراتورهای کوچکی که از طریق سوختهای فسیلی تولید الکتریسیته می‌کنند نمونه‌هایی از منابع پراکنده هستند. این منابع می‌توانند در نقاط کلیدی یک شبکه توزیع قرار گرفته و بصورت بالقوه محاسن بسیاری ایجاد نمایند. افزایش قابلیت اطمینان شبکه، تلفات کمتر، رقابتی کردن تولید و امکان

[1] Distributed energy resource (DER)
[2] Microsource
[3] Photovaltaic cells
[4] Fuel cells
[5] Wind turbines
[6] Microturbines

استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر[1] از جمله این محاسن هستند. این منابع در اندازه‌های کوچک ولی به تعداد زیاد در کشورهای پیشرفته در حال گسترش بوده و پایه‌گذار شبکه‌های تولید پراکنده[2] شده‌اند [۱]–[۵].

در صورتی که منبع پراکنده، به شبکه سراسری متصل گردد، علاوه بر تأمین محلی بار مورد نیاز، امکان انتقال و فروش انرژی اضافی تولیدی به شبکه وجود دارد. همچنین به علت اتصال مستقیم بار به شبکه، قابلیت اطمینان سیستم در تأمین انرژی مورد نیاز بار افزایش می‌یابد. با توجه به ابعاد کوچک منابع پراکنده، این منابع معمولا به شبکه توزیع متصل می‌شوند. از جمله مهمترین مزایای استفاده از منابع انرژی پراکنده متصل به شبکه می‌توان موارد زیر را ذکر نمود:

-جبران کمبود تولید و پشتیبانی سیستم در ساعت‌های پیک مصرف

-افزایش ضریب امنیت سیستم و کاهش احتمال بروز مشکل در شبکه به علت کاهش اتکای شبکه به تولید نیروگاه‌ها

-بهبود قابلیت اطمینان شبکه با کاهش احتمال قطعی برق، به علت زیاد شدن تعداد منابع تولید انرژی و نزدیکی آنها به بار که امکان تأمین محلی بار بخصوص برای بارهای حساس در هنگام قطعی شبکه را فراهم می‌کند.

-قابلیت بهبود کیفیت توان در محل یا نزدیکی مصرف

-امکان کنترل و تأمین محلی توان راکتیو که باعث کاهش تلفات می‌گردد. همچنین امکان تنظیم ولتاژ شبکه از طریق کنترل میزان توان راکتیو تزریقی به شبکه از منبع پراکنده

-کاهش تلفات سیستم به علت تأمین محلی بخشی از بار و نیاز کمتر به انتقال انرژی در مسیر طولانی

-افزایش بازده اقتصادی ناشی از کاهش هزینه سرمایه‌گذاری به علت کاهش تلفات سیستم و نیاز کمتر به تجهیزات و پرسنل جهت انتقال انرژی

-کاهش فضا و زمین مورد نیاز برای زیرساخت‌های تولید، انتقال و توزیع

-استفاده از حرارت تلف شده در تولید انرژی الکتریکی جهت گرم کردن محیط و یا استفاده در پروسه‌های صنعتی در قالب سیستم تولید مشترک برق و حرارت[3] به علت نزدیکی واحدهای تولیدی به مصرف کننده و صرفه‌جویی اقتصادی ناشی از آن.

---

[1] Renewable energies
[2] Dispersed generation
[3] Combined heat & power (CHP)

۱-۱-۲- منابع انرژی تجدیدپذیر

بحران انرژی، قیمت بالای سوخت‌های فسیلی و خطر روزافزون افزایش گازهای گلخانه‌ای، منجر به گسترش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر در دنیای امروز شده است. منابع انرژی تجدیدپذیر انواعی از انرژی هستند که به سرعت جایگزین می‌شوند و تقریبا بطور نامحدود در اختیار می‌باشند. انرژی‌های تجدیدپذیر معمولا از جریان طبیعی نور خورشید، باد یا آب به کمک روش‌های خاصی بدست می‌آیند. تا زمانی که نور خورشید، جریان آب و باد ادامه داشته باشند، بشر به این منابع دسترسی خواهد داشت. علاوه بر استفاده مستقیم از انرژی خورشید، منابع دیگر انرژی که بطور غیر مستقیم و ازطریق ذخیره کردن انرژی خورشید به وجود آمده‌اند مانند سوخت‌های زیستی[1]، انرژی زمین‌گرمایی[2] و ... نیز جزء منابع تجدیدپذیر انرژی محسوب می‌شوند. اغلب منابع انرژی تجدیدپذیر، علاوه بر اینکه همواره در دسترس هستند، کاملا پاک بوده و به‌هیچ وجه محیط زیست انسان را آلوده نمی‌کنند.

با توجه به پیشرفت‌های روزافزون تحقیقاتی در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر و وجود مسائلی همچون بحران انرژی در جهان و کاهش منابع سوختهای فسیلی، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر طی سالیان اخیر کانون توجه محققین و دولت‌ها به ویژه در کشورهای صنعتی جهان بوده است. با توجه به نقش مهمی که این منابع در تأمین انرژی مورد نیاز بشر در آینده ایفا می‌کنند، بهبود سیستم‌های مورد نیاز در استحصال انرژی و بهره‌برداری از این منابع مورد توجه محققین بوده و تکنولوژی مربوط به این تجهیزات به سرعت در حال گسترش می‌باشد. ازجمله مهمترین مزایای انرژی‌های تجدیدپذیر در دنیای امروز می‌توان به استفاده از منابع نامحدود و رایگان انرژی، تثبیت قیمت انرژی و حفظ محیط زیست اشاره نمود.

یکی از مزایای مهم شبکه‌های تولید پراکنده امکان بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر در قالب منابع پراکنده می‌باشد. امروزه با توجه به فناوری‌های موجود، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر که انرژی آنها معمولا درسطح زمین گسترده است، درابعاد کوچک و در قالب منابع پراکنده اقتصادی می‌باشد [۱], [۳].

۱-۱-۳- ریزشبکه

در مورد چگونگی اتصال منابع انرژی پراکنده به سیستم قدرت دستورالعمل‌هایی توسط مؤسسات مختلف تدوین شده است. از آن جمله استاندارد IEEE 1547 تحت عنوان «استاندارد برای اتصال منابع پراکنده به شبکه قدرت» می‌باشد. تمرکز این استاندارد بر این مسئله است که منابع پراکنده در هنگام وقوع مشکلی در سیستم قدرت به صورت خودکار از مدار خارج شوند [۶]. به منظور افزایش قابلیت اطمینان در

[1] Bio-fuel
[2] Geothrmal energy

تأمین انرژی مورد نیاز مصرف کنندگان، در سال‌های اخیر راهکار دیگری برای چگونگی رفتار منابع متصل به شبکه قدرت به نام «ریزشبکه[1]» مطرح شده است. ویژگی اصلی ریزشبکه این است که در هنگام بروز مشکل در سیستم قدرت به جای خارج شدن منابع پراکنده از مدار، این منابع و قسمتی از بارهای نزدیکشان از شبکه اصلی جدا شده و به اصطلاح به صورت جزیره‌ای[2] و خودگردان[3] به کار خود ادامه می‌دهند [۱], [۷]. موسسه IEEE نیز اخیرا بخش جدیدی به استاندارد مذکور اضافه کرده که به موضوع ریزشبکه‌های جزیره‌ای می‌پردازد [۸].

قابلیت جزیره شدن ریزشبکه و عملکرد خودگردان آن در حالت جزیره‌ای بسیار جذاب و پراهمیت می‌باشد [۹]–[۱۵]. این قابلیت سبب می‌شود تأمین انرژی بارهای حساس موجود در ریزشبکه در شرایط قطعی شبکه امکان‌پذیر شود که این مسئله باعث بهبود قابلیت اطمینان برای مصرف‌کنندگان داخل ریزشبکه می‌گردد. با این حال جدا شدن ریزشبکه از شبکه سراسری، وظایف و اهداف کنترلی منابع پراکنده موجود در آن را دچار تغییرات اساسی می‌کند. وظایف کلی منابع در یک ریزشبکه جزیره‌ای عبارتند از تأمین بار تمام مصرف‌کنندگان، کنترل ولتاژ، کنترل فرکانس و تقسیم بار[4] بطور مناسب بین تمام منابع پراکنده. وظایف جدید ذکر شده در بسیاری از موارد در حالت متصل به شبکه معنایی ندارد زیرا در این حالت فرکانس سیستم را شبکه قدرت تعیین می‌کند و با توجه به قدرت اتصال کوتاه بسیار بالاتر شینه‌ها در حالت متصل به شبکه نسبت به حالت جزیره‌ای، ولتاژ نیز عموما تابع شبکه قدرت اصلی است. همچنین تحت شرایط اتصال به شبکه، منابع انرژی پراکنده با تولید مقدار معینی از توان حقیقی و راکتیو کار می‌کنند که به آن اصطلاحا حالت عملکرد PQ گفته می‌شود [۱۶]. به عبارت دیگر منابع پراکنده متناسب با تغییر بار عکس‌العملی از خود نشان نداده و این تغییرات عموما توسط شبکه قدرت تامین می‌شود. بنابراین در چنین شرایطی تقسیم بار بین منابع موضوعیت ندارد.

جهت برآورده کردن نیازهای ذکر شده در یک ریزشبکه جزیره‌ای دو روش کنترلی عمده پیشنهاد شده است [۱۷]: روش کنترل متمرکز[5] و روش کنترل غیر متمرکز[6] یا کنترل محلی[7]. در روش کنترل متمرکز یک کنترل‌کننده مرکزی با دریافت اطلاعات مختلف از شبکه، سیگنالهای کنترلی لازم را تولید و به منابع ارسال می‌کند [۱۸]. در این روش هرچند دستیابی به اهداف کنترلی به شکل آسان‌تری فراهم می‌گردد،

[1] Microgrid
[2] Islanded
[3] Autonomous
[4] Load sharing
[5] Centralized control
[6] Decentralized control
[7] Local control

ولیکن به علت نیاز به کانال مخابراتی با پهنای باند وسیع[1]، کنترل منابع و طبعا پایداری آنها مستقیما به برقراری و صحت عملکرد این کانال مخابراتی وابسته خواهد بود. بنابراین هزینه تمام شده سیستم افزایش یافته و قابلیت اطمینان آن تا حدی کاهش می‌یابد.

کنترل‌کننده ریزمنابع دارای لایه‌های مختلفی می‌باشد. در پایین‌ترین لایه که کنترل اولیه نام دارد، مقادیر مرجع برای مبدل ریزمنبع تولید می‌شود. در روش کنترل محلی، هرمنبع دارای کنترل‌کننده اولیه مستقلی است که سیگنال‌های کنترلی مورد نیاز خود را صرفا براساس اندازه‌گیری‌های محلی تولید می‌کند. در این روش از سیگنال‌های مخابراتی با پهنای باند وسیع استفاده نشده و کانال مخابراتی حداکثر به منظور بهینه‌سازی کنترل‌کننده‌ها و یا کاربردهایی نظیر سیستم مدیریت انرژی[2] و درواقع در لایه‌های بالاتر کنترل‌کننده به کار می‌رود که نیاز به پهنای باند وسیع نداشته و قطع شدن آن خللی در روند عادی کنترل منابع و پایداری ریزشبکه ایجاد نمی‌کند [۱۹]. با این حال دستیابی به اهداف کنترلی ریزشبکه جزیره‌ای با استفاده از روش کنترل محلی با توجه به عدم دسترسی به اطلاعات کامل شبکه مشکل‌تر از روش کنترل متمرکز است.

به علت ویژگی‌های منحصر به فرد روش کنترل محلی، حل مشکلات کنترلی و دستیابی به کنترل‌کننده محلی مناسب‌تر موضوع مورد توجه محققین در سال‌های اخیر بوده است [۱۹]–[۲۵]. هدف اصلی در طراحی کنترل محلی، دستیابی به کنترل‌کننده‌ای است که اهداف کنترلی ریزشبکه جزیره‌ای را با کیفیت بهتر و با دانستن اطلاعات کمتری از ریزشبکه محقق سازد. منابعی که دارای چنین کنترل‌کننده‌ای باشند، می‌توانند به راحتی و بدون تغییر یا با حداقل تغییرات به هر ریزشبکه‌ای متصل شده و به کار گرفته شوند. این ویژگی مهم و جذاب اصطلاحا خاصیت اتصال و راه‌اندازی[3] نامیده می‌شود [۱]، [۷].

همان گونه که در ابتدای این بخش ذکر شد، در حالت جزیره‌ای تأمین ولتاژ و فرکانس مناسب در سراسر ریزشبکه وظیفه منابع موجود در ریزشبکه است. علاوه بر این به دلیل عدم ارتباط ریزشبکه با شبکه قدرت، تأمین کل بار و حفظ تعادل بین تولید و مصرف، وظیفه منابع موجود بوده و این منابع بایستی متناسب با کم و زیاد شدن بار، تولید خود را کنترل کنند [۷]. همچنین اگر طراحی ریزشبکه به گونه‌ای باشد که منابع نتوانند بارهای موجود را در حالت جزیره‌ای به طور کامل و در تمامی شرایط تأمین کنند، لازم است منابع ذخیره انرژی در ریزشبکه پیش‌بینی شده و یا بخشی از بارهای ریزشبکه از مدار خارج شده و به اصطلاح

[1] Wide bandwidth communication link
[2] Energy management system (EMS)
[3] Plug and play

بارزدایی[1] انجام شود [۱], [۲۶], [۲۷]. در چنین ریزشبکه‌هایی بارهای غیر حساس یا با حساسیت کمتر را با کلیدی از بارهای حساس جدا می‌کنند. فرمان این کلید با فرمان کلید اصلی ریزشبکه که در نقطه اتصال آن به شبکه قرار دارد یکی بوده و به محض جزیره شدن ریزشبکه این بارها نیز از مدار خارج می‌شوند.

تسهیم مناسب بار بین منابع با توجه به حدود تولید توان در آنها نیز در حالت جزیره‌ای ضرورت دارد تا از رسیدن زود هنگام برخی از منابع به حدود تولید توانشان جلوگیری به عمل آید [۱], [۷], [۲۸], [۲۹]. تسهیم بار بین منابع به معنای آن است که هر یک از منابع با توجه به توان نامی خود سهم یکسانی (برحسب پریونیت) از کل بار مورد نیاز ریزشبکه برعهده گیرد. بدین صورت قابلیت کنترل توان تولیدی منابع (به منظور کنترل ولتاژ و فرکانس و یا پارامترهای دیگر) در گستره وسیعتری فراهم می‌گردد.

تسهیم بار میان منابع مختلف هم در مورد توان حقیقی و هم در مورد توان راکتیو اهمیت دارد. زمانی که امپدانس خطوط ریزشبکه عمدتا سلفی باشد، می‌توان نشان داد که توان حقیقی بیشتر به فرکانس منابع وابسته است در حالی که توان راکتیو عمدتا به وسیله دامنه ولتاژ کنترل می‌شود [۳۰]–[۳۲]. به همین دلیل در روش کنترل محلی برای تسهیم توان حقیقی و در عین حال حفظ تنظیم فرکانس[2] شبکه در محدوده مجاز، استفاده از مشخصه افتی[3] توان حقیقی–فرکانس (P-ω) پیشنهاد شده است. این مشخصه به‌گونه‌ای است که هرچه توان خروجی (بارگذاری) منبع بیشتر باشد، فرکانس ولتاژ خروجی آن کمتر خواهد بود. به همین ترتیب به منظور تسهیم توان راکتیو و در عین حال حفظ تنظیم ولتاژ[4] شبکه در محدوده مجاز، از مشخصه افتی توان راکتیو–دامنه ولتاژ (Q-V) استفاده می‌شود. این مشخصه که دامنه ولتاژ خروجی منبع را مشخص می‌کند، به گونه‌ای عمل می‌کند که هر چه توان راکتیو خروجی منبع بیشتر باشد افت بیشتری در دامنه ولتاژ خروجی آن ایجاد خواهد نمود [۱], [۲۹].

شیب هر دو مشخصه P-ω و Q-V متناسب با معکوس توان نامی هر منبع انتخاب می‌شود. یعنی به عنوان مثال شیب مشخصه‌ها در منبعی که توان نامی دو برابر دارد یک دوم منبعی است که توان نامی نصف دارد. با توجه به اینکه فرکانس یک متغیر سراسری بوده و در حالت دائمی در تمام شبکه مقدار یکسانی دارد، نقطه کار فرکانس در مشخصه P-ω در تمام منابع یکسان خواهد بود. بنابراین با انتخاب شیب مشخصه به صورتی که گفته شد، هر منبع متناسب با توان نامی خود در بار حقیقی شبکه سهیم می‌شود. ولی این موضوع درمورد توان راکتیو صدق نمی‌کند. چون دامنه ولتاژ برخلاف فرکانس یک متغیر محلی است. بنابراین چون

[1] Load shedding
[2] Frequency regulation
[3] Droop characteristic
[4] Voltage regulation

دامنه ولتاژ پایانه منابع مختلف حتی در حالت دائمی با هم برابر نیست، عملا تسهیم مناسب توان راکتیو بین منابع می‌تواند مخدوش شود [۳۳]–[۳۸].

۱-۱-٤- چالش‌های پیش رو

عملکرد ریزشبکه بصورت جزیره‌ای چالش‌های مختلفی را پیش روی محققین قرار داده که از آن جمله می‌توان به مسائل کیفیت توان، بهبود قابلیت اطمینان و امنیت، حداقل کردن هزینه سوخت و مدیریت انرژی، مسائل حفاظتی، جداسازی ریزشبکه از شبکه سراسری و اتصال مجدد آن بصورت امن، بهبود مسائل پایداری، بهبود تسهیم توان، لزوم بکارگیری منبع ذخیره انرژی و طراحی آن اشاره نمود [۹]–[۱۵], [۳۹]–[۴۳].

حل مشکل تسهیم توان راکتیو همواره یکی از موضوعات کلیدی مطرح در زمینه ریزشبکه‌ها بوده و مورد توجه بسیاری از محققین قرار داشته است. ولیکن راه‌حل‌های ارائه شده معدود و از نظر کاربرد عمدتا محدود به ریزشبکه‌های با ساختار خاص بوده و یا نیازمند دانستن اطلاعات وسیع از شبکه می‌باشد. این موضوع عملا خاصیت مهم و جذاب اتصال و راه‌اندازی منابع را زیر سوال می‌برد که در روش کنترل محلی مطلوب نیست.

با توجه به توضیحات فوق موضوع بهبود تسهیم توان راکتیو در ریزشبکه‌های جزیره‌ای با منابع مبتنی بر مبدل استاتیکی و دارای کنترل محلی به عنوان یکی از اهداف رساله انتخاب می‌گردد. بطور خاص و با توجه به محدودیت‌هایی که در ساختار ریزشبکه و منابع پراکنده در اکثر روش‌های پیشنهادی درنظر گرفته می‌شود، هدف این رساله پیشنهاد روش‌هایی است که قابل استفاده در ریزشبکه با هر ساختار دلخواه بوده و قیدی بویژه برای شبکه فرض نخواهد شد.

بطور طبیعی یکی از مسائل مهم دیگر در طراحی کنترل‌کننده‌ها درنظر گرفتن پایداری سیستم می‌باشد [۴۴]–[۴۷]. منظور از پایداری سیستم در این رساله، محدود ماندن پاسخ سیستم در اثر اعمال ورودی با دامنه محدود می‌باشد که اصطلاحا پایداری ورودی محدود – خروجی محدود (BIBO)[1] نامیده می‌شود. نشان داده می‌شود سیستمی با این تعریف پایدار است که قطب‌های تابع تبدیل آن در صفحه s در سمت چپ محور موهومی واقع باشند. هرچه فاصله قطب‌ها از محور موهومی بیشتر باشد احتمال اینکه در اثر تغییر ساختار شبکه یا بروز یک اختلال بزرگ، قطب‌ها به سمت راست محور منتقل شوند کمتر بوده و به عبارت دیگر حاشیه پایداری سیستم بیشتر است [۴۸].

[1] Bounded input – bounded output

در مورد مسئله تسهیم توان با توجه به اینکه قطب‌های غالب سیستم با کنترل‌کننده‌های متداول (مشخصه‌های افتی) بیشترین وابستگی را به متغیر توان تولیدی منابع دارد [۲۸]، لذا در هنگام طراحی یک کنترل‌کننده جدید با هدف بهبود تسهیم توان، لازم است پایداری ریزشبکه نیز مدنظر قرار گیرد. به طور ویژه در مورد کنترل‌کننده توان خروجی منابع، مطلوب است سیستم به گونه‌ای طراحی شود که کنترل توان‌های حقیقی و راکتیو به صورت مستقل از هم انجام شود [۳۵], [۳۶], [۴۹]. با این حال هدف مذکور به ازای تمامی نقاط کار و شرایط عملکرد ریزشبکه و یا تنظیمات مختلف کنترل‌کننده حاصل نخواهد شد. با افزایش تزویج[1] میان توان‌های حقیقی و راکتیو، پایداری ریزشبکه تضعیف شده و پاسخ منابع موجود در آن در مقابل تغییرات بار یا اختلالات شبکه با نوسانات نامطلوبی همراه خواهد بود. به همین دلیل در طراحی روش‌های پیشنهادی برای بهبود تسهیم توان راکتیو در این رساله نه تنها پایداری ریزشبکه بررسی می‌گردد، بلکه تلاش می‌شود در صورت امکان از ظرفیت ایجاد شده جهت بهبود پاسخ دینامیکی کل ریزشبکه در شرایط کار مختلف استفاده گردد. همچنین لازم به ذکر است کلیه روش‌های پیشنهادی در سطح کنترل اولیه منابع مطرح می‌گردد.

روش‌های پیشنهادی در این رساله جهت بهبود تسهیم توان راکتیو مشتمل بر سه روش مختلف می‌باشد. در روش اول اضافه کردن یک مبدل سری کوچک به پایانه خروجی منابع پراکنده پیشنهاد می‌گردد. با استفاده از این مبدل علاوه بر بهبود تسهیم توان راکتیو، تنظیم ولتاژ در شینه محلی منابع بهبود می‌یابد. ضمن اینکه می‌توان با استفاده از این مبدل، پایداری دینامیکی منابع و کل ریزشبکه را بهبود بخشید. مبدل سری پیشنهادی دارای ابعاد کوچکی بوده و می‌تواند بصورت مجتمع[2] با مبدل اصلی منبع پراکنده عرضه گردد. بنابراین اضافه کردن این مبدل هزینه زیادی به سیستم تحمیل نخواهد کرد.

دو روش دیگر مبتنی بر اصلاح مشخصه متداول Q-V با هدف کاهش خطای تسهیم توان راکتیو در ریزشبکه می‌باشد. بدین صورت که در زمان‌های مشخص، فرایندی به نام فرایند اصلاح مشخصه انجام می‌شود که در طی آن اطلاعات مربوط به تولید توان راکتیو در منابع مختلف به طریقی بین منابع مبادله می‌گردد. در حین این تبادل اطلاعات، هر منبع با مکانیزم مشخصی از طریق اصلاح پارامترهای مربوط به مشخصه Q-V خود باعث حذف خطای تسهیم در آن منبع می‌شود. روند اصلاح مشخصه و ویژگی‌های هر روش و استراتژی‌های مختلف برای شروع فرایند اصلاح مشخصه به طور کامل تشریح خواهد شد.

---

[1] Coupling
[2] Integrated