

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه آزاد اسلامی
واحد تهران جنوب
دانشکده فنی و مهندسی

M.Sc پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی رشته - گرایش

عنوان:

مدیریت انرژی ترکیبی برای ریزشبکه های جزیره ای با در نظر گرفتن ذخیره انرژی باتری و انرژی تلف شده

استاد راهنما:

.....

استاد مشاور:

.....

نام و نام خانوادگی دانشجو:

.....

شماره دانشجویی:

.....

آذر 1400



دانشگاه آزاد اسلامی
واحد تهران جنوب
دانشکده فنی و مهندسی

M.Sc پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
مهندسی رشته - گرایش

عنوان:

مدیریت انرژی ترکیبی برای ریزشبکه های جزیره ای با در نظر گرفتن ذخیره انرژی باتری و انرژی تلف شده

پژوهشگر :

.....

امضاء هیات داوران پروژه:

استاد راهنما : دکتر.....

استاد مشاور: دکتر.....

داور 1 : دکتر.....

داور 2 : دکتر.....

مدیر گروه: دکتر.....

تاریخ دفاعیه: 1400 / ... / ...

تقدیم به

سپاسگذاری



معاونت پژوهش و فن آوری

به نام خدا

منشور اخلاق پژوهش

با یاری از خداوند سبحان و اعتقاد به این که عالم محضر خداست و همواره ناظر بر اعمال انسان و به منظور پاس داشت مقام بلند دانش و پژوهش و نظر به اهمیت جایگاه دانشگاه در اعتلای فرهنگ و تمدن بشری، ما دانشجویان و اعضاء هیئت علمی واحدهای دانشگاه آزاد اسلامی متعهد می گردیم اصول زیر را در انجام فعالیت های پژوهشی مد نظر قرار داده و از آن تخطی نکنیم:

- 1- اصل حقیقت جویی: تلاش در راستای پی جویی حقیقت و وفاداری به آن و دوری از هرگونه پنهان سازی حقیقت.
- 2- اصل رعایت حقوق: التزام به رعایت کامل حقوق پژوهشگران و پژوهیدگان (انسن، حیوان و نبات) و سایر صاحبان حق.
- 3- اصل مالکیت مادی و معنوی: تعهد به رعایت کامل حقوق مادی و معنوی دانشگاه و کلیه همکاران پژوهش.
- 4- اصل منافع ملی: تعهد به رعایت مصالح ملی و در نظر داشتن پیشبرد و توسعه کشور در کلیه مراحل پژوهش.
- 5- اصل رعایت انصاف و امانت: تعهد به اجتناب از هرگونه جانب داری غیر علمی و حفاظت از اموال، تجهیزات و منابع در اختیار.
- 6- اصل رازداری: تعهد به صیانت از اسرار و اطلاعات محرمانه افراد، سازمان ها و کشور و کلیه افراد و نهادهای مرتبط با تحقیق.
- 7- اصل احترام: تعهد به رعایت حریم ها و حرمت ها در انجام تحقیقات و رعایت جانب نقد و خودداری از هرگونه حرمت شکنی.
- 8- اصل ترویج: تعهد به رواج دانش و اشاعه نتایج تحقیقات و انتقال آن به همکاران علمی و دانشجویان به غیر از مواردی که منع قانونی دارد.
- 9- اصل برائت: التزام به برائت جویی از هرگونه رفتار غیر حرفه ای و اعلام موضع نسبت به کسانی که حوزه علم و پژوهش را به شائبه های غیر علمی می آلاینند.



معاونت پژوهش و فن آوری

به نام خدا

تعهد اصالت رساله یا پایان نامه تحصیلی

اینجانب دانش آموخته مقطع کارشناسی ارشد در رشته _____ که در تاریخ _____ از پایان نامه خود تحت عنوان " صلاحیت و مشخصات نهادهای شبه قضائی در سازمان ثبت اسناد و املاک

" دفاع نموده ام بدینوسیله متعهد می شوم:

- 1) این پایان نامه حاصل تحقیق و پژوهش انجام شده توسط اینجانب بوده و در مواردی که از دستاوردهای علمی و پژوهشی دیگران (اعم از پایان نامه، کتاب، مقاله و ...) استفاده نموده ام، مطابق ضوابط و رویه موجود، نام منبع مورد استفاده و سایر مشخصات آنرا در فهرست مربوطه ذکر و درج کرده ام.
- 2) این پایان نامه قبلاً برای هیچ مدرک تحصیلی (هم سطح، پایین تر یا بالاتر) در سایر دانشگاه ها و موسسات آموزش عالی ارائه نشده است.
- 3) چنانچه بعد از فراغت از تحصیل، قصد استفاده و هرگونه بهره برداری اعم از چاپ کتاب، ثبت اختراع و ... از پایان نامه داشته باشم، از حوزه معاونت پژوهشی واحد مجوزهای مربوطه را اخذ نمایم.
- 4) چنانچه در هر مقطع زمانی خلاف موارد فوق ثابت شود، عواقب ناشی از آن را می پذیرم و دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت مجاز است با اینجانب مطابق ضوابط و مقررات رفتار نموده و در صورت ابطال مدرک تحصیلی ام هیچگونه ادعایی نخواهم داشت.

نام و نام خانوادگی:

تاریخ و امضاء

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
1	چکیده:
2	فصل اول: مقدمه و کلیات تحقیق
3	1-1-مقدمه
4	1-2-سیستمهای هیبریدی تولید انرژی الکتریکی
5	1-3-اهمیت بررسی استاتیکی سیستمهای هیبریدی
6	1-4-سیستم مدیریت انرژی
10	1-5- بررسی موضوعی استراتژی های مدیریت انرژی
11	1-6-مروری بر تحقیق های پیشین
13	فصل دوم: معرفی ساختار سیستم هیبریدی
14	2-1- مقدمه
16	2-2-1-پیل سوختی پلیمری PEMFC
17	2-3-2-مروری بر منابع مربوطه
17	2-3-1- میکروگریدهای AC
17	2-3-1-1- استراتژی های کنترلی و مدیریت انرژی در میکروگریدهای AC
29	2-3-1-2- بهینه سازی میکروگریدهای AC
32	2-3-1-3- برنامه ریزی میکروگریدهای AC
34	2-3-2- میکروگریدهای DC
34	2-3-2-1- استراتژیهای کنترلی و مدیریت انرژی در میکروگریدهای DC
42	2-4-پیشینه پژوهش
46	فصل سوم روش تحقیق
47	3-1- بیان مسئله
49	3-2- مدل ریاضی
49	3-2-1- پل های فتوولتائیک
49	3-2-2- توربین های بادی
50	3-2-3- ژنراتورهای توزیع شده قابل کنترل (CDG)
50	3-2-4- سیستم های ذخیره انرژی باتری
51	3-2-5- مدل سازی هزینه O&M
51	3-2-6- برنامه های پاسخ به تقاضا
52	3-2-7- مدل های عدم قطعیت های دیگر همراه با سناریوهای تولید و کاهش

54	..... مدل بازار 3-2-8
55	..... مدل عملیاتی دو سطحی پیشنهادی 3-3
55	..... سطح پایین EMS 3-3-1
56	..... سطح بالا EMS 3-3-2
57	..... برنامه ریزی مجدد EMS سطح پایین 3-3-3
60	..... فصل چهارم شبیه سازی
60	..... 4-1- مطالعه موردی
60	..... 4-2- داده ورودی
61	..... 4-3- نتایج و بحث
71	..... فصل پنجم نتیجه گیری
72	..... 5-1- نتیجه گیری و چالشهای تحقیقاتی آینده
72	..... 5-2- پیشنهادات
73	..... منابع

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول (۱-۲) عمل کرد سیستم مدیریت توان در حالات مختلف	20
جدول (۲-۲) استراتژی تبادل توان در سیستم آزاد انرژی	40
جدول (3-2) خلاصه های از حالات عمل کردی و ویژگی های آنها	41
جدول 1-4- پارامترهای MTS در هر ریزشبهه و MGC	61
جدول 2-4- پارامترهای FC در هر ریزشبهه [32].	62
جدول 3-4- پارامترهای BESS در هر ریزشبهه و MGC	62
جدول 4-4- محدودیت‌هایی برای مقدار قابل تنظیم در هر MG از سیستم MGهای	67
جدول 5-4- هزینه های عملیاتی سیستم مورد مطالعه در شرایط مختلف	68

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱ مولفه های یک سیستم مدیریت توان [۱۲]	8
شکل ۱-۲ ساختار و اجزای کلی پیل سوختی PEM	16
شکل ۲-۲ طرح کلی عملکرد پیل سوختی	16
شکل 2-4- میکروگرید مورد مطالعه در مرجع [۱۷] و نحوه ارتباط آن با	19
شکل 2-5- ساختار مبدل پیشنهادی در مرجع [۱۷]	19
شکل 2-6- کنترل کننده زاویه برای VSC1	20
شکل 2-7- ساختار میکروگرید مورد مطالعه در مرجع [۳۰]	22
شکل 2-8- ساختار میکروگرید مورد آزمایش در مرجع (۳۲)	23
شکل 2-9- مدار اصلی ریز منبع خورشیدی مرجع [۳۳]	24
شکل 2-10- ساختار کلی کنترل کننده اینورتر ریز منبع خورشیدی پیشنهادی مرجع [۳۳]	24
شکل 2-11- کنترل کننده V_{dc-min} نشان داده شده در شکل (۲-۱۰)	25
شکل 2-12- ساختار میکروگرید مورد مطالعه در مرجع [۳۴]	26
شکل 2-13- کنترل کننده اینورتر مربوط به منبع پراکنده ام	26
شکل 2-14- دیاگرام ساده شده میکروگرید مورد مطالعه در مرجع [۳۵]	27
شکل 2-15- مبدل مورد مطالعه در مرجع [۳۶] شامل دو پیل خورشیدی و یک باتری	28
شکل 2-16- مبدل چند ورودی خروجی: (الف) سه ورودی خروجی	28
شکل 2-17- الگوریتم بهینه سازی مرجع	31
شکل 2-18- ساختار میکروگرید DC مورد مطالعه در مرجع [۲۲]	34
شکل 2-19- دیاگرام کنترل میکروگرید DC مرجع [۲۲]: (الف) مد کاری اول	35
شکل 2-20- مفهوم میکروگرید DC دوقطبی ولتاژ پایین	37
شکل 2-21- دیاگرام بلوکی کنترل مبدل های موازی با محاسبات Roron ارائه شده در مرجع (۶۱)	38
شکل 2-22- سیستم آزاد تبادل انرژی به عنوان یک میکروگرید DC	40
شکل 2-23- نانوگرید DC مورد مطالعه در مرجع [۴]	41
شکل 2-24- الگوریتم کنترلی برای منحنی دروپ وابسته به حالت ارائه شده در مرجع [۶۲]	42
شکل 2-25- نمای یک MGC	44
شکل 3-1- ساختار ریز شبکه های متصل بهم	49
شکل 3-2- فلوچارت از استراتژی مدیریت انرژی پیشنهادی MG های شبکه ای	58
شکل 4-1- مشخصات روز قیمت برق	61
شکل 4-2- نتایج زمانبندی توان مبادله شده در ریز شبکه های کیس (موارد) 2 و 3	64

- شکل 4-3- نتایج مجموع زمانبندی توان مبادله شده در سه ریزشبکه در موارد 2 و 3 65
- شکل 4-4- نتایج کاهش بار و اتلاف انرژی در موارد 1 تا 3..... 66
- شکل 4-5- (الف) مجموع زمانبندی توان BESS، CDG، و بار قطع‌پذیر در مورد 1 69
- شکل 4-6- وضعیت ذخیره انرژی باتری در مورد 3 70
- شکل 4-7- وضعیت ذخیره انرژی باتری در مورد 3 71

چکیده:

چکیده - نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر در سیستم های توزیع منجر به توسعه سریع ریزشبکه ها شده است. در این مقاله، یک استراتژی مدیریت انرژی دو سطحی برای بهینه سازی هزینه های عملیاتی ریزشبکه های شبکه ای جزیره ای و مدیریت عدم قطعیت ها پیشنهاد شده است. زمان بندی انرژی هیبریدی پیشنهادی، توان های مازاد و کمبود توان را برای تعیین انرژی انتقالی در میان ریزشبکه ها در نظر می گیرد. برای دستیابی به این هدف، مفهوم توان قابل تنظیم (افزایش یا کاهش تولید ژنراتورهای توزیع شده قابل کنترل) را برای ریزشبکه ها تعریف می کنیم تا انرژی انتقالی بهینه را تعیین کنیم. در سطح پایین تر چارچوب بهینه سازی، یک زمان بندی عملیات مستقل برای به حداقل رساندن هزینه کل عملیات هر ریزشبکه انجام می شود. بهینه سازی سراسری در سطح بالایی از بهینه سازی انجام می شود تا کل هزینه های عملیاتی ریزشبکه های بهم متصل¹ به حداقل برسد. مدیریت انرژی اولیه ریزشبکه ها در سطح پایین تر برنامه ریزی می شود تا از بهترین برنامه برای سیستم اطمینان حاصل شود. همچنین، برنامه های مختلف پاسخگویی به تقاضا برای افزایش انعطاف پذیری ریزشبکه ها به مدل اعمال شده اند. مدل پیشنهادی بر روی یک مطالعه موردی استاندارد برای سناریوهای مختلف آزمایش شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که مدل پیشنهادی هزینه عملیاتی سیستم را به میزان 174/75 دلار کاهش می دهد.

واژگان کلیدی:

انرژی هیبریدی ، ریز شبکه جزیره ای ، باتری ، انرژی تلف شده

¹ networked microgrids

فصل اول:

مقدمه و کلیات تحقیق

1-1-1-مقدمه

به عنوان یکی از آثار رشد اقتصادی و اجتماعی، بحران های کنونی در رابطه با محیط زیست، می توان به تلاش - های مهندسين در جهت بهبود شاخص های قابلیت اطمینان و کیفیت توان در کنار ارتقای بازدهی سیستم ها و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر اشاره کرد. آلاینده های حاصل از مصرف منابع سوخت فسیلی، نه تنها بحران انرژی در دهه های اخیر را به ارمغان آورده است بلکه خطرات گسترده ای را به زندگی بشر در حوزه زیست محیطی تحمیل کرده است و علت آن است که سوخت های فسیلی هنوز به عنوان منابع عمده تولید انرژی در نظر گرفته می شوند. مشکلات ایجاد شده ناشی از استفاده ی سوخت های فسیلی از یک سو و هزینه ی نصب، راه اندازی و بهره برداری از خطوط انتقال برای مصارف انرژی برق در مکان های دور از شبکه از سوی دیگر سبب شده است که نگاه ویژه ای به منابع انرژی تجدیدپذیر شود. در این بین، منابع انرژی باد و خورشید بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته اند. زیرا این منابع به سهولت در دسترس بوده و پایان ناپذیر هستند به طوری که هزینه بهره برداری این منابع بسیار اندک می باشد. اما دغدغه اصلی منابع فوق الذکر این است که به شدت تحت تاثیر شرایط اقلیمی بوده و این موضوع مانعی بر سر راه تولید پایدار محسوب می شود. این چالش در سیستم های مستقل از شبکه محسوس تر می باشد. یک راه حل مناسب برای غلبه بر عدم قطعیت دو منبع یادشده می تواند استفاده از سیستم های هیبریدی باشد. این سیستم ها با تولید همزمان چند منبع تولید توان دارای اطمینان بالاتر هستند. این منابع تولید توان در کنار المان های ذخیره ساز انرژی می توانند منبع تولید توان پایداری را بوجود آورند. اما زمانی این سیستم مستقل از شبکه می تواند موفقیت آمیز عمل کند که بین زیر سیستم های آن مدیریت بهینه انرژی با در نظر گرفتن محدودیت های فنی صورت گیرد. که در پایان نامه پیش رو ساختار سیستم هیبریدی معرفی می شود و مدیریت انرژی بهینه به آن اعمال خواهد شد. تحقیقات متعدد اخیر نشان داده است که جایگذاری پیل سوختی در کنار توربین باد و آرایه فتوولتائیک می تواند یک ساختار بهینه ی هیبریدی را به عنوان یک منبع انرژی پایدار تشکیل دهد. این ساختار از قابلیت اطمینان خیلی بالاتری برخوردار است و شرایط اقلیمی نمی تواند بر تولید پایدار آن تاثیر گذار باشد. با این وجود، این شرایط زمانی می تواند به خوبی حاصل شود که بین زیر سیستم های ساختار فوق یک مدیریت بهینه انرژی صورت پذیرد. انتخاب استراتژی مدیریت بهینه انرژی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. در ساختارهای مستقل از شبکه، به ویژه در ساختار پیشنهادی که متشکل از منابع باد و خورشید و در بر گیرنده ی عدم قطعیت است، استراتژی مدیریت بهینه انرژی نقش بسزایی در کارایی سیستم دارد. تحقیق حاضر به ارائه یک متدولوژی مدیریت بهینه انرژی به منظور پاسخگویی مطلوب به تقاضای بار الکتریکی و حرارتی یک ساختمان در قالب یک فرآیند بهینه سازی غیر بلادرنگ مبادرت می کند. به منظور پوشش محدودیت های فنی هر زیر

سیستم مدیریت بهینه انرژی به عنوان یک مساله بهینه سازی غیر خطی مقید فرموله شده است. در این پایان نامه تلاش می شود که از مدل مناسب هر زیر سیستم ضمن مدنظر قرار دادن رفتار دینامیکی آن استفاده شود. یکی از مهمترین محدودیت های ناشی از ماهیت دینامیکی زیر سیستم های دینامیک کند پیل سوختی است که در قالب یک شیوه ابتکاری و ساده در بدنه مساله ی بهینه سازی تعبیه گردیده است.

2-1- سیستمهای هیبریدی تولید انرژی الکتریکی

سیستم های هیبرید تولید انرژی الکتریکی راهکاری مناسب برای استفاده از منابع مختلف انرژی به صورت ترکیبی و مکمل یکدیگر می باشند. از آنجا که این سیستم ها از دو یا چند منبع مختلف انرژی تغذیه می شوند در مقایسه با سیستم هایی که تنها از یک منبع جهت تولید برق بهره می برند، مطمئن تر می باشند. سیستم های هیبرید، امکان استفاده از منابع تجدید پذیر انرژی محلی را فراهم می آورند بطوریکه سرمایه های موجود برای تولید و انتقال انرژی به صورت عمومی را می توان برای سرمایه گذاری در سایر امور زیربنایی صرف کرد. خورشید، باد، دریا و حتی گاز و سوخت های فسیلی عمومی ترین منابع انرژی در این سیستم ها می باشند [۱]. به وسیله این سیستم ها تولید اقتصادی انرژی الکتریکی با استفاده از منابع انرژی تجدید پذیر با بالاترین درصد امکان پذیر می شود. در این سیستم به وسیله تجهیزات کنترل و اندازه گیری بین تقاضای توان و وضعیت منابع ذخیره ساز انرژی مانند باتری ها و نیز منابع تولید کننده انرژی تعادل برقرار می شود. سیستم های هیبرید قدرت می توانند به صورت مستقل و یا متصل به شبکه قدرت در نظر گرفته شوند. در این سیستم ها ظرفیت ذخیره انرژی باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا جوابگوی تغییرات توان بار و کمبود منابع اولیه انرژی باشد. سیستم های متصل به شبکه لزوما در مناطق شهری، حومه شهر و مناطق صنعتی کوچک به کار برده می شود و به زیربنای شبکه ثابت انتقال نیاز دارد. از جمله مزایای استفاده از سیستم های هیبرید تولید انرژی الکتریکی می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- فرهنگ سازی و معرفی الگوهای بهینه سازی مصرف انرژی

- کاهش آلاینده های زیست محیطی در مقایسه با دیگر روش های تولید انرژی الکتریکی.

- تولید و مدیریت انرژی الکتریکی در محل مصرف کننده با هدف کاهش و صرفه جویی در هزینه های انتقال و توزیع توان الکتریکی.

- امکان نصب و راه اندازی در توان های مختلف متناسب با نیازهای مصرف کننده و سهولت در نگهداری و بهره برداری.

- امکان ذخیره سازی انرژی تولید شده جهت مصرف در شرایط نامساعد جوی بدون ایجاد آلودگی صوتی و زیست محیطی

از جمله پرکاربردترین و اصلی ترین منابع انرژی تجدید پذیر، می توان به خورشید و باد اشاره کرد. همچنین پیل سوختی به دلیل مزایای آن از جمله بازده بالا و عدم ایجاد آلودگی محیطی توجه زیادی را به سمت خود جلب کرده است. در این پروژه پیل سوختی، سلول خورشیدی و توربین بادی به عنوان منابع اولیه در نظر گرفته شده اند.

یکی از موضوعات حائز اهمیت در سیستم های تولید پر اکنده، مدیریت انرژی است و تا کنون استراتژی های متفاوتی به منظور مدیریت توان حاصل از سیستم هیبرید به کار گرفته شده است. بر این اساس در این پروژه مدیریت انرژی مبتنی بر سیستم هیبرید مورد نظر و بر طبق میزان تقاضای بار الکتریکی و گرمایی جهت به حداقل رساندن هزینه های عملیاتی سیستم در قالب یک مسئله بهینه سازی به همراه محدودیت های عملیاتی، صورت پذیرفته است. در این راستا به مدل سازی مسئله مدیریت انرژی در قالب یک مسئله بهینه سازی غیر خطی با لحاظ نمودن معادلات دینامیکی اجزاء و قيود مرتبط با شرایط بهره برداری از اجزاء این سیستم مبادرت گردیده است. در ساختار مورد بررسی از ترکیب پیل سوختی، سلول خورشیدی و توربین بادی به عنوان مولدهای انرژی الکتریکی و گرمایی (CHP) استفاده شده و تلاش گردیده با بهره گیری از الگوریتم تابع $fmincon$ در نرم افزار متلب توان بهینه پیل سوختی، الکترو لایزر و باتری به میزان درخواست توان بار در طول یک شبانه روز تعیین و تابع هدف مسئله بهینه سازی نیز کمینه گردد.

3-1- اهمیت بررسی استاتیکی سیستمهای هیبریدی

امروزه پژوهش در زمینه سیستم های هیبرید به صورت های گوناگونی در جریان است. به طور کلی به سیستم هایی سیستم هیبرید گفته می شود که دارای زیر سیستم هایی با خصوصیات زمان پیوسته و زمان گسسته به همراه یک سری فرآیندهای تصمیم گیری می باشند. این زیر سیستم ها متکی بر معادلات دیفرانسیل با مدلهای حالت زمان پیوسته و زمان گسسته می باشند [۱]

مدیریت انرژی یکی از موضوعات حائز اهمیت در سیستم های هیبرید می باشد که عملاً بهره برداری از اجزای سیستم هیبرید را در ناحیه بیشینه قرار می دهد. تا کنون استراتژی های کنترلی متعددی در این خصوص معرفی و مورد ارزیابی قرار گرفته است که از جمله آنها می توان استراتژی های مبتنی بر قوانین تجربی، بهینه سازی استاتیکی و کنترل دینامیکی را نام برد. بسیاری از تحقیقات و کارهای صورت گرفته در شاخه مدیریت انرژی بر اساس مدل سازی استاتیکی سیستم هیبرید و زیر سیستم ها صورت گرفته است و مبتنی بر توابع هدفی است که راهبردهای کنترلی بر مبنای کمینه یا بیشینه نمودن آنها طراحی شده اند [۲۱/۲۲]. در این دسته از استراتژی ها از تکنیک های کنترلی متفاوتی از جمله روش های کنترل هوشمند مانند شبکه های عصبی، خبره، الگوریتم ژنتیک، فازی و ... برای بهینه سازی و اعمال الگوریتم کنترلی استفاده شده است که در قسمت مروری بر تحقیقات گذشته به آنها اشاره

می کنیم. در این پایان نامه از الگوریتم بهینه سازی fmineon که تابعی از بسته کتابخانه ای نرم افزار متلب است استفاده شده است. استراتژی های مختلف عمدتاً در دو مرحله مسئله مدیریت انرژی را حل می نمایند، ابتدا ساختار کنترل کننده را تعیین می کنند و سپس به دنبال انتخاب مناسب و بهینه ای برای پارامترهای سیستم کنترل کننده می گردند تا اجزای سیستم هیبرید در ناحیه بیشینه بازدهی خود قرار بگیرند [۲]

در این پایان نامه حالت پایدار یک سیستم هیبرید با در نظر گرفتن مدیریت بلادرنگ انرژی از منظر استاتیکی بررسی می شود. سیستم هیبرید پیشنهادی در این پژوهش متشکل از پیل سوختی، سلول خورشیدی و توربین بادی جهت تأمین بار الکتریکی و گرمایی یک منزل مسکونی در حالت مستقل از شبکه سراسری برق می باشد. برای بررسی استاتیکی سیستم های هیبرید نیاز به مدل های مناسب اجزاء سیستم وجود دارد که در فصل دوم به این مهم پرداخته شده است. سیستم در بلندمدت نیاز به مدل هایی دقیق تر دارد، از طرفی نمی توان اثر پاسخ کند اجزا نسبت به بعضی تغییرات را در عملکرد طولانی مدت سیستم نادیده گرفت. بنابراین مدل هایی برای اجزاء مختلف سیستم های هیبرید در نظر گرفته شده که بتوانند پاسخ های کند را در عملکرد بلند مدت در نظر بگیرند. همانطور که در بالا ذکر شد با توجه به اهمیت مدیریت انرژی در سیستم های هیبریدی در قسمت های بعدی بطور خلاصه سیستم مدیریت انرژی و بررسی موضوعی استراتژی های مدیریت انرژی بحث خواهد شد.

4-1- سیستم مدیریت انرژی

نظر به پیچیدگی سیستم های انرژی هیبریدی و وجود مدهای عملکردی مختلف آن، نیاز به سیستم مدیریت انرژی پیشرفته ای است که سازگاری، بهره بری بهینه از تمامی ظرفیت های هر یک از زیر سیستم ها و همچنین بهینگی پاسخ نهایی را تضمین نماید تا ضمن در بر گرفتن تمامی مدهای عملیاتی ممکن، تضمین کننده گذر از یک مد عملکردی به سایر مدها باشد. این استراتژی، با در نظر گرفتن اولویت ها و با هدف بیشینه نمودن تابع هدف در قالب مساله بهینه سازی غیر خطی صورت خواهد پذیرفت. تابع هدف این مساله بهینه سازی غیر خطی، تابعی از پارامترهای کیفی عملکردی نظیر میزان مصرف سوخت، به طور مثال مصرف هیدروژن توسط پیل سوختی یا دیزل، مدت زمان پشتیبانی سیستم ذخیره ساز و ... و نیز پارامترهای هزینه ای نظیر هزینه های سرویس و نگهداری، هزینه های مرتبط با تأمین یا فروش انرژی به شبکه، هزینه های مرتبط با جریمه و ... می باشد. قیود مساله مورد بحث مرتبط با پارامترهای کیفی عملکردی، محدودیت های فنی و دینامیکی زیر سیستم ها و رفتار غیرخطی آنها و همچنین معادلات شارش توان می باشد. اگرچه بهینه کردن تابع هدف در مدیریت بهینه انرژی به طراحی، انتخاب مناسب ظرفیت زیر سیستم ها و همچنین انتخاب صحیح ساختار سیستم هیبریدی نیز بستگی دارد و این مهم از حوزه های مدرن مورد مطالعه در پژوهش های مرتبط با مبحث

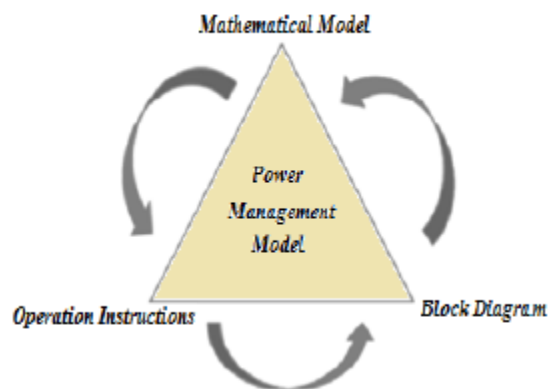
مدیریت انرژی است لیکن ضمن مفروض داشتن موارد یاد شده، با تاکید بیشتر به موضوع مدیریت هوشمند انرژی در این ساختار جامع هیبریدی پرداخته می شود. براین اساس، انتظار می رود که یک سیستم مدیریت بهینه انرژی فرامین مناسب را به صورت زمان حقیقی جهت حالت های مختلف عملکردی سیستم نظیر حالت عملکرد تولید و ذخیره سازی، تزریق و یا تامین توان از شبکه، راه اندازی سیستم های جانبی و ... فراهم آورد. صدور این فرامین با توجه به استراتژی مدیریت توان و بر مبنای مقادیر متغیرهایی نظیر ظرفیت خالی سیستم ذخیره ساز، موقعیت نقطه کار فعلی، دینامیک حاکم بر مجموعه، قیمت سوخت و قیمت لحظه ای انرژی تبادلی با شبکه و .. صورت می پذیرد.

لذا یک سیستم مدیریت انرژی می بایست به تعیین نقاط عملکردی بهینه اجزاء و المانهای سیستم هیبریدی در طول یک سیکل کاری بپردازد. طراحی چنین سیستمی می تواند نظیر پژوهش های صورت گرفته در [۳۵] باشد که با توجه به مدل غیر خطی ساده شده المان ها به ارائه یک سیستم مدیریت هوشمند انرژی با لحاظ نمودن لایه های مختلف ساختار هیبریدی مورد بررسی می پردازد. جهت نیل به این هدف، سیستم مدیریت انرژی باد شده متشکل از سه لایه خواهد بود که در لایه اول آن، مشاهدات و ویژگی های لحظه ای دیمانند و سایر فاکتورهای محیطی قرار می گیرند. در لایه دوم، مد عملیاتی مناسب برای سیستم هیبریدی تعیین می شود و سرانجام لایه سوم که وظیفه ردیابی نقطه کار ارائه شده از سوی لایه دوم را به عهده دارد. مجموع فرآیندهای اشاره شده به قسمی است که مدیریت انرژی را در ساختار هیبریدی تضمین می نماید بدین صورت که با بهره گیری از درجه های آزادی هر یک از زیر سیستم ها، ضمن دستیابی به مقدار بهینه تابع هدف، قیود پخش بار و نیز محدودیت های فنی و دینامیکی المان ها با توجه به مدل کاهش یافته و مرتبه دینامیکی آنها برآورده شوند.

روشن است به منظور دستیابی به هدف یاد شده بایستی به انتخاب مدل مناسب زیرسیستم های ساختار هیبریدی مورد بررسی متناسب با دینامیک پدیده تحت مطالعه مبادرت شود. در برخی پژوهش های انجام شده در حوزه مدیریت انرژی در سیستم های تولید هیبریدی، نتایج و مشاهدات حاصل از مدیریت انرژی به صورت غیربلادرنگ بعد جهت طراحی استراتژی مدیریت انرژی زمان حقیقی مورد استفاده قرار گرفته است که اساس آن انطباق مسیرهای عملکردی با الگوهای متعارف با بهره گیری از تکنیک های شناسایی الگو بوده است [۶۷]. عمدتاً ساختار مساله بهینه سازی در حوزه مدیریت انرژی در سیستم های هیبریدی، یک مساله بهینه سازی محدب از نوع غیر خطی آمیخته با اعداد صحیح و محدودیت دار بوده است که جهت حل آن از روش های کلاسیک و نیز جستجوی هوشمند استفاده شده است [۸-۱۱]

در تکمیل اصول فوق و حصول یک نتیجه اساسی باید اذعان نمود که در یک ساختار هیبریدی، آنچه بیش از هر چیز حائز اهمیت است نحوه تعامل منابع مختلف انرژی در تامین تقاضا است. به دیگر

سخن، علی رغم اینکه ممکن است هر یک از منابع انرژی در یک سیستم هیبریدی ویژگی های منحصر به فردی داشته باشند؛ اما آنچه که کارایی کلی و بهینگی سیستم را در دست دارد، مدل کنترلی یا سیستم مدیریت انرژی است که توانایی آن استفاده بجا از پتانسیل های دینامیکی و قابلیت های هر یک از منابع انرژی است. این مدل در واقع ترکیبی از بلوک ریاضی و مشخصه های فنی است که معرف یک منطق بهره برداری برای سیستم هیبریدی است و یک هماهنگی را بین منابع مختلف توان به گونه ای فراهم می آورد که دیمانده به طور پیوسته تغذیه شود. همانطور که ذکر شد آنچه که مدیریت توان با انرژی را در یک سیستم چندگانه ناگزیر می سازد، متفاوت بودن مشخصه خروجی هر یک از منابع انرژی است. در واقع برای اعمال مدیریت توان بین منابع مختلف نیاز به یک استراتژی کنترلی است که بهترین ابزار جهت دستیابی بدین مهم، استفاده از مدل ریاضی مولفه های سیستم است. مدل هایی که می توانند خطی یا غیر خطی، استاتیکی یا دینامیکی و یا شبه استاتیکی باشند. بنابراین همانطور که در شکل ۱-۱ آمده است مدل ریاضی مورد بحث در یک سیستم مدیریت انرژی، معرف سیستم و متغیرهای آن می باشد. [۷]



شکل ۱-۱ مولفه های یک سیستم مدیریت توان [۱۲]

در یک سیستم هیبریدی، علاوه بر راهبرد مدیریتی و محدودیت های اجزاء مختلف، نحوه اتصال اجزاء نیز تأثیر بسزایی در کارایی سیستم دارد. به طور مثال در یک دسته بندی کلی سیستم رانشی خودروهای هیبریدی می تواند در سه حالت: سری، موازی و سوئیچ شونده همبندی شود.

علاوه بر آنچه در خصوص مدیریت توان عنوان شد، یک سیستم هیبریدی که موظف به تامین انرژی الکتریکی است می تواند در حالت منفصل و یا متصل به شبکه مورد بهره برداری قرار گرفته و سیستم مدیریت انرژی و همچنین ظرفیت هر یک از اجزای سیستم هیبریدی را تحت تأثیر قرار دهد. در حالت عملکرد به صورت مستقل از شبکه، لازم است که سیستم هیبریدی، ظرفیت ذخیره کافی جهت پشتیبانی تغییرات بار را داشته باشد. روشن است که هزینه های سرمایه گذاری چنین سیستمی به مراتب بیشتر است. یک سیستم هیبریدی متصل به شبکه می تواند با شبکه سراسری تبادل انرژی داشته باشد. این

مهم به خصوص زمانی که قیمت برق در ساعات مختلف شبانه روز متفاوت است بسیار مطلوب خواهد بود. یکی دیگر از مزایای ارزنده سیستم هیبریدی متصل به شبکه، توانایی سیستم در تعقیب دینامیک های سریع بار است. به طور مثال در یک سیستم هیبریدی متشکل از باتری و پیل سوختی؛ دینامیک باتری می تواند کند بودن پیل سوختی را در تعقیب بار جبران کند اما این توانایی مستلزم اینست که ظرفیت باتری به اندازه کافی بزرگ باشد. بنابراین در سیستم هیبریدی متصل به شبکه ظرفیت سیستم ذخیره انرژی می تواند کوچکتر انتخاب شود.

بنابر آنچه که در خصوص مدیریت توان در ساختار هیبریدی عنوان شد، می توان ادعا نمود که محورهای تحقیقاتی در این حوزه شامل موارد زیر است:

الف) انتخاب مدل مناسب برای زیر سیستم ها در ساختار هیبریدی به نوعی که ویژگی های موثر در بازه مطالعاتی مورد بحث را پوشش دهد.

ب) مطالعه شرایط تضمین پایداری و تعیین زنجیره سوئیچینگ مناسب بین زیر سیستم ها
ج) وضع مجموعه فرامین و مدهای عملکردی، بقسمی که بتوان با پیشینه نمودن تابع هدف، در یک فرآیند تصمیم گیری غیربلادرنگ یا زمان حقیقی، از تمامی ظرفیت های موجود در زیر سیستم های سیستم هیبرید استفاده نمود.

منظور از وضع مجموعه فرامین و استفاده از تمامی ظرفیت سیستم هیبریدی؛ انتقال نقاط کار هر یک از زیر سیستم ها از ناحیه با راندمان کم به ناحیه با راندمان بالاست. این نگاشت نقاط کار، می تواند در قالب استراتژی های کنترلی مختلف پیاده سازی شود.

در تکمیل مجموعه مطالب ارائه شده باید اضافه نمود که عوامل ذیل در طرح ریزی تئوری مدیریت انرژی نقش اساسی ایفا می کنند که در واقع همان ویژگی های ذاتی و فنی ساختار تحت بررسی هستند.

الف) ویژگی های ذاتی

- وجود برخی المان ها با رفتار غیر خطی و پیچیده
- وجود نامعینی و عدم قطعیت و همچنین تغییرات محیطی گسترده
- تغییرات وسیع تقاضا
- جامعیت ساختار سیستم هیبریدی تحت بررسی نسبت به تحقیقات مورد مطالعه

ب) ویژگی های فنی

- افزایش راندمان سیستم هیبریدی
- شناسایی پتانسیل های ارتقا تکنولوژیکی زیر سیستم ها
- مدیریت بهینه و بلادرنگ انرژی

- بهینه سازی ساختار سیستم های هیبریدی
- نظر به اهم موارد یاد شده در بالا، حداقل الزامات یک سیستم مدیریت بهینه انرژی در یک ساختار تولید انرژی هیبریدی دربرگیرنده موارد زیر می باشد:
- مدیریت بهینه انرژی در قالب ساختار سیستم هیبریدی تحت بررسی
- بهبود مصرف سوخت
- به کار گیری بهینه تمامی ظرفیت های زیر سیستم ها
- دستیابی به شاخص های کیفی عملکردی
- مدل ریاضی استفاده شده برای المان های سیستم
- گذر دینامیکی ترم در عبور از مدهای عملیاتی مختلف با توجه به مدل انتخاب شده برای المانها
- استفاده از روش های جستجوی هوشمند در سیستم مدیریت بهینه انرژی
- کارایی سیستم مدیریت انرژی علی رغم تغییر الگوی مصرف و عادات محیطی و نیز تغییر بلوک دیاگرام سیستم

5-1- بررسی موضوعی استراتژی های مدیریت انرژی

اغلب استراتژی های کنترلی بسط داده شده جهت ساختارهای هیبرید به چهار دسته عمده قابل تقسیم بندی می باشند. نوع اول به استفاده تجربی از نتایج و مشاهدات کاربردی در استراتژی کنترلی سیستم هیبرید می پردازد و از نتایج آزمایشات عملی بدست آمده با استفاده از الگوریتم های ساده کنترلی جهت مدیریت انرژی در این قسم از سیستم ها استفاده می نماید. نوع دوم مبتنی بر روش های بهینه سازی استاتیکی است که در آنها به استراتژی های کنترلی بر پایه تقسیم سهم مشارکت در تامین توان در خواستی بر اساس مدل مرتبه صفر المان های سیستم پرداخته شده است. این الگوریتم ها اغلب بواسطه طبیعت بهینه سازی نسبتا ساده شان به سمت مسائل بهینه سازی خطی سوق داده شده اند. دسته سوم استفاده از تکنیک های کنترلی هوشمند نظیر فازی، خیره، شبکه های عصبی و ... را جهت تخمین و بسط الگوریتم کنترلی پیشنهاد می نماید که بر روی مدل های استاتیکی و یا حتی دینامیکی سیستم های هیبرید اعمال گردیده است. ایده اصلی نوع چهارم مبتنی بر طبیعت دینامیکی سیستم هیبرید است که در آنها سعی گردیده به تجزیه و تحلیل پدیده ها و شرایط گذرا در مدیریت انرژی همزمان با در نظر گرفتن پایداری پرداخته شود.

بسیاری از تحقیقات و کارهای صورت گرفته در شاخه مدیریت انرژی بر اساس مدل سازی استاتیکی سیستم هیبرید و زیر سیستم ها صورت گرفته است و مبتنی بر توابع هدفی است که راهبردهای کنترلی بر مبنای بهینه نمودن آنها طراحی شده اند. در این دسته از استراتژی ها از تکنیک های کنترلی متفاوتی

از جمله روش های کنترل هوشمند مانند شبکه های عصبی، خبره، الگوریتم ژنتیک، فازی و ... برای بهینه سازی و اعمال الگوریتم کنترلی استفاده شده است. استراتژی های یادشده اغلب در دو مرحله بر حل مساله مدیریت انرژی نائل می شوند. ابتدا ساختار کنترل کننده را تعیین می کنند و سپس به انتخاب مناسب و بهینه پارامترهای سیستم کنترل کننده مبادرت می کنند تا اجزای سیستم هیبرید در ناحیه بیشینه بازدهی خود قرار بگیرند.

6-1- مروری بر تحقیق های پیشین

با توجه به اهمیت بررسی مدیریت انرژی در سیستم های هیبریدی، مقالات متعددی به این مبحث اختصاص یافته است [۳، ۱۳، ۱۴]. این مقالات از مدل های مختلفی جهت مطالعات مدیریت انرژی استفاده کرده اند. با توجه به لزوم مطالعات مدیریت انرژی در بلندمدت، در برخی موارد از مدل های بسیار ساده ای استفاده شده است. مبنای بسیاری از استراتژی های کنترلی عملکردی در این حالت، مبتنی بر مشاهدات تجربی و نتایج آزمایشات مختلفی است که بر روی سیستم های هیبرید قدیم انجام گرفته است. این نتایج، اساس بسیاری از استراتژی های کنترلی پیشرفته امروزی را تشکیل می دهند. ترکیب های بسیاری از منابع انرژی تجدید پذیر و تجهیزات ذخیره سازی برای ساختن یک سیستم هیبرید مستقل یا متصل به شبکه در مقالات مختلف پیشنهاد شده است. در زیر تعدادی از ترکیبات ذکر شده است:

۱. سیستم هیبرید باتری و یا خازن بزرگ / پیل سوختی: در این سیستم پیل سوختی نقش اصلی در تأمین توان را بر عهده دارد و باتری به عنوان منبع ثانویه در نقش انباشت گر ظاهر می شود تا در تأمین توان پیک بار و تغییرات ناگهانی بار به طور همزمان با پیل سوختی مورد استفاده قرار گیرد [۱۵]

۲. سیستم هیبرید باتری اپیل سوختی / سلول خورشیدی / مولد باد / خازن: این سیستم شامل سه منبع انرژی اعم از آرایه سلول خورشیدی، مولد باد و پیل سوختی می باشد. انرژی حاصل از توربین های بادی و پنل های سلول خورشیدی منابع اصلی سیستم بوده و از ترکیب پیل سوختی و الکترولایزر به همراه باتری به عنوان سیستم ذخیره سازی استفاده می شود [۱۶].

۳. سیستم هیبرید پیل سوختی / میکرو توربین: با توجه به مزایا و ویژگی های این نوع منابع تولید توان، با استفاده از میکرو توربین ها و پیل های سوختی در کنار یکدیگر به عنوان یک سیستم هیبرید می توان هم از سرعت پاسخگویی سریع میکرو توربین ها و هم از انعطاف پذیری پیل های سوختی بهره جست [۱۷].

۴. سیستم هیبرید پیل سوختی / توربین گازی: این سیستم شامل مجموعه ای از پیل های سوختی، محفظه احتراق، توربین گازی، توربین توان، کمپرسور سوخت و هوا می باشد [۶].

۵. سیستم هیبرید پیل سوختی / سلول خورشیدی : این سیستم همانند سیستم هیبرید شماره دو می باشد اما با این تفاوت که از مولد بادی و باتری استفاده نمی شود. آرایه سلول خورشیدی توان مورد نیاز الکترو لایزر برای تولید و ذخیره سازی هیدروژن مورد نیاز پیل سوختی را فراهم می کند [۱۸]
۶. سیستم هیبرید باتری / پیل سوختی / سلول خورشیدی : همانند سیستم شماره دو می باشد. در این سیستم آرایه سلول خورشیدی و پیل سوختی نقش منبع اصلی تولید توان را به عهده دارد [۸]
۷. سیستم هیبرید دیزل / مولد باد/ باتری: این سیستم شامل مبدل بادی، ژنراتور دیزل کوچک و باتری میباشد که از باتری به منظور ذخیره سازی مازاد انرژی تولید شده توسط مولد بادی استفاده شده است [۱۹]
- ۸- سیستم هیبرید توربین باد سلول خورشیدی اپیل سوختی باتری الکترو لایزر: در این سیستم باد و خورشید به عنوان منابع اصلی توان هستند و پیل سوختی در این سیستم به عنوان منبع پشتیبان می باشد در حالی که باتری و الکترو لایزر نقش ذخیره ساز را دارند که این سیستم به صورت مستقل از شبکه عمل می کند. در این تحقیق به بررسی سه استراتژی مختلف مدیریت انرژی و مقایسه تطبیقی بین آنها پرداخته شده است [۲۰]
۹. سیستم هیبرید توربین باد سلول خورشیدی پیل سوختی الکترو لایزر: این سیستم که متصل به شبکه می باشد به ارائه یک روش نوین مدیریت انرژی اقتصادی می پردازد [۳].
۱۰. سیستم هیبرید توربین باد پیل سوختی: این سیستم نیز به صورت متصل به شبکه می باشد که در آن یک برنامه نویسی تکاملی مبتنی بر ارزیابی اثر ترکیب دو منبع باد و پیل سوختی به عنوان یک سیستم هیبریدی CHP بر هزینه بهره برداری ارائه شده است [۲۱]
۱۱. سیستم هیبرید توربین باد سلول خورشیدی / دیزل ژنراتور در این پژوهش بهره برداری دینامیکی و استراتژی های کنترلی یک سیستم انرژی مستقل از شبکه مورد بررسی قرار گرفته است [۲۲].
۱۲. سیستم هیبرید توربین باد سلول خورشیدی / پیل سوختی: در این پژوهش به طراحی و شبیه سازی سیستم هیبریدی مذکور پرداخته شده است [۴]
۱۳. سیستم هیبرید سلول خورشیدی اپیل سوختی ابرخازن: که در این پژوهش یک الگوریتم کنترل اصلی برای یک سیستم انرژی ترکیبی ارائه شده است [۹].
۱۴. سیستم هیبرید توربین باد / پیل خورشیدی اپیل سوختی: با مطالعه بر روی ادوات الکترونیک قدرت سعی در به دست آوردن حداکثر انرژی از منابع انرژی تجدیدپذیر (باد و خورشید) شده است [۵].
- اکثر سیستم هایی که دارای باتری می باشد از نوع مستقل از شبکه می باشند.

فصل دوم:

معرفی ساختار سیستم هیبریدی

1-2- مقدمه

جهت بررسی انواع مدل های استفاده شده در سیستم هیبریدی متشکل از سلول خورشیدی، توربین بادی و پیل سوختی (به عنوان منابع اصلی تولید انرژی)، باتری و الکترولایزر و انتخاب مدل مناسب، نیاز به آشنایی با ساختار این سیستم ها وجود دارد. در این فصل ساختار سیستم ها توضیح داده شده و همچنین به ارائه مدل های استفاده شده در این پایان نامه برای هر یک از اجزا ارائه می شود. علاوه بر موارد فوق مشخصات فنی زیرسیستم های بکار رفته در سیستم هیبریدی پیشنهادی نیز ارائه می شوند.

2-2- پیل سوختی

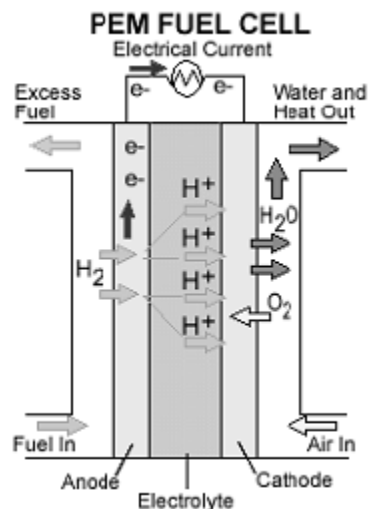
مجموعه ای از عوامل مختلف از جمله محدودیت سوخت های فسیلی، تأثیرات منفی زیست محیطی، بهره گیری از منابع هیدروکربنی و منازعات سیاسی بسیاری از سیاستمداران و متخصصین مباحث انرژی و محیط زیست را به سوی ایجاد ساختاری نوین وادار نموده است. بر این اساس هیدروژن یکی از بهترین گزینه ها جهت ایفای نقش به عنوان حامل انرژی در سیستم های جدید می باشد. پیل های سوختی فناوری جدیدی برای تولید انرژی هستند که بدون ایجاد آلودگی های صوتی و زیست محیطی، از ترکیب مستقیم بین سوخت و اکسید کننده، انرژی الکتریکی با بازدهی بالا تولید می کنند. پیل سوختی اساساً وسیله ای است که سوخت مانند هیدروژن، متانول، گاز طبیعی، بنزین و ... و اکسیدان (مانند هوا و اکسیژن) را به برق، آب و حرارت تبدیل می کند. به عبارت دیگر پیل سوختی شبیه یک باتری بوده ولی بر خلاف باتری نیاز به شارژ ندارد. تا زمانی که سوخت و هوای مورد نیاز پیل تأمین شود، سیستم به کار خود ادامه خواهد داد. پیل های سوختی می توانند سوخت های حاوی هیدروژن را مورد استفاده قرار دهند. به طور کلی در سوخت های هیدروکربونی هیدروژن توسط یک دستگاه مبدل سوخت از آنها جدا شده و بکار گرفته می شود. سیستم پیل سوختی از کارایی نسبتاً بالایی نسبت به موتورهای احتراق درون سوز برخوردار است.

پیل های سوختی ادوات مبدل انرژی استاتیک هستند که انرژی شیمیایی سوخت را مستقیماً به انرژی الکتریکی DC تبدیل می کنند. پیل های سوختی فناوری های شناخته شده ای هستند که از سال ۱۹۶۰ در صنایع مورد استفاده قرار گرفته اند. پیل های سوختی می توانند از انواع مختلف سوخت های هیدروژنی مانند هیدروژن خالص، گاز طبیعی، گازولین، بیوگاز و پروپان استفاده کنند. این سیستم ها در دما و فشارهای متفاوتی کار می کنند و محدوده تغییرات دما از ۲۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد متغیر می باشد. در مقایسه با دیگر نیروگاه های مرسوم، پیل های سوختی مزایای زیادی دارند، از جمله می توان به بازده بالا، ابعاد کوچک،

آلودگی کم (گازهای آلوده کننده) و ساختار مدولار قابل انعطاف آنها اشاره کرد [۳۰]. در کنار این مزایا پیل سوختی از معایبی نیز برخوردار می باشد که مهم ترین آن از نظر الکتریکی این است که با افزایش عمر، امپدانس داخلی پیل افزایش می یابد پس به منظور تنظیم ولتاژ مناسب به ادوات الکترونیک قدرت نیاز است.

از مشخصات سیستم پیل سوختی، مستقل بودن راندمان از ابعاد واحد پیل سوختی است، به این معنا که می توان واحدهای نیروگاهی کوچک را با بازده بالا در کاربردهای غیر متمرکز مورد استفاده قرارداد و لذا از هزینه های مرتبط با ایجاد واحدهای نیروگاهی بزرگ اجتناب نمود. واحدهای نیروگاهی پیل سوختی اولیه با تمرکز بر ظرفیت هایی بین چند صد کیلووات تا زیر یک مگاوات، توسعه داده شده اند. واحدهای نیروگاهی کوچک را می توان در محل مصرف در اختیار مصرف کننده قرار داد و برای تولید چند منظوره، یعنی تولید الکتریسیته و حرارت، از آن استفاده کرد. واحدهای پیل سوختی بزرگ تر (با ظرفیت 1 تا ۱۰ مگاوات) برای تولید الکتریسیته به صورت غیر متمرکز مناسب می باشند. مولدهای غیر متمرکز پیل سوختی دارای فن آوری مطمئن تر، بازده بالاتر، تأثیرات زیست محیطی کمتر و نصب راحت تری نسبت به سیستم های رایج می باشند.

پیل سوختی مجموعه ای از الکترولیت، الکترودها و صفحات دو قطبی می باشد. به طور خلاصه واکنش های انجام شده در یک پیل سوختی را می توان به این صورت توضیح داد که همان طور که شکل ۱-۲ مشاهده می شود هیدروژن از آند و اکسیژن از کاتد وارد می شوند. هیدروژن الکترون خود را در آند از دست داده و به صورت یون مثبت از طریق الکترولیت به سمت کاتد حرکت می کند. الکترون نیز از طریق مدار خارجی به سوی کاتد هدایت می شود. اکسیژن با دریافت الکترون و پروتون به آب تبدیل می شود. حرکت الکترون از آند به کاتد جریان برق را به وجود می آورد که قابل استفاده در وسایل برقی است. آب حاصله در کاتد نیز می تواند مورد استفاده مجدد قرار گیرد.

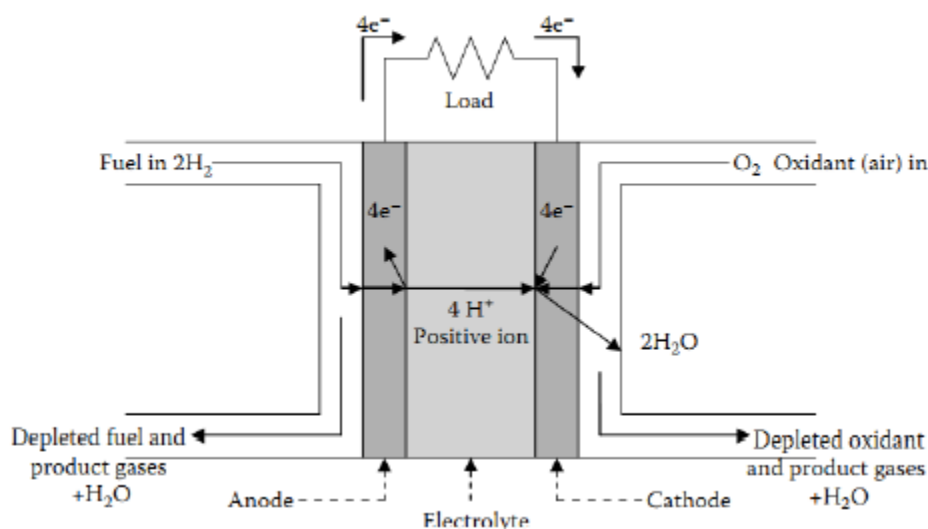


شکل ۱-۲ ساختار و اجزای کلی پیل سوختی PEM

پیل سوختی انواع مختلفی دارد که این انواع مختلف متناسب با الکترولیت موجود در سلول است. از انواع پیل سوختی می توان به پیل سوختی غشاء تبادل پروتون (PEMFC)، پیل سوختی قلیایی (AFC)، پیل سوختی اسید فسفریک (PAFC)، پیل سوختی کربنات مذاب (MCFC) و پیل سوختی اکسید جامد (SOFC) اشاره کرد [۳، ۱۴، ۱۵]. در این پژوهش از پیل سوختی نوع (PEMFC) استفاده شده است.

1-2-2-2 پیل سوختی پلیمری PEMFC

ساختار فیزیکی پیل سوختی از دو الکتروود متخلخل (آند و کاتد) و لایه ای الکترولیت در میان آن دو تشکیل شده است. الکترولیت آن یک غشاء پلیمری جامد و الکترودهای آن از جنس گرافیت و یا فلزی می باشند. نوع و مشخصات شیمیایی الکترولیت استفاده شده، روی مشخصات عملکرد پیل سوختی مانند دمای عملکرد، تأثیر بسزایی دارد. الکترولیت می تواند جامد مانند پیل سوختی غشاء پلیمری با اکسید جامد مانند پیل سوختی اکسید جامد و یا مایع مانند پیل سوختی کربنات مذاب باشد [۲۴]. شکل ۲-۲ دیاگرام شماتیک یک پیل سوختی نمونه را نشان میدهد.



شکل ۲-۲ طرح کلی عملکرد پیل سوختی

در یک پیل سوختی، انرژی شیمیایی مربوط به واکنش هیدروژن با اکسیژن مستقیماً تبدیل به آب، الکتریسیته و حرارت می گردد. این عمل شبیه پیل های الکتریکی است با این تفاوت که در پیل های سوختی هیدروژن مصرف می شود و نیازی به شارژ الکتریکی در آن نیست. به طور خلاصه واکنش های انجام شده در یک پیل سوختی را می توان به این صورت توضیح داد که همان طور که در شکل ۲-۲ مشاهده می شود، سوخت (مانند هیدروژن) در آند تبدیل به یون هیدروژن و الکترون آزاد می

شود. پلاریته یون و جهت حرکت آن می تواند برای پیل های سوختی مختلف فرق کند. اگر یون کار کننده در پیل سوختی مثبت باشد، آنگاه در کاتد آب تولید می شود. اما اگر یون کار کننده منفی باشد در آند آب تولید می شود. در هر دو حالت الکترون ها از مدار خارجی عبور کرده و ایجاد مدار الکتریکی می کنند. یون های موجود از طریق الکترولیت یا غشای مبادله یونی به سمت کاتد حرکت نموده و در آنجا با اکسیژن و الکترونهای آزاد تولید آب و حرارت می نماید. کارایی در پیل های سوختی حدود دو برابر ماشین هایی است که از سیکل کارنو پیروی می کنند بیشینه کارایی در سیکل کارنو حدود ۴۰ درصد است. به علت وجود مقاومت الکتریکی در پیل سوختی مقداری انرژی تلف می شود. اما بیشترین میزان تلفات مربوط به کندی کنش و واکنش کاتدی و همچنین تجمع محصولات (آب و یون) در پیل های سوختی است. در پیل سوختی مورد مطالعه، سوخت به طور پیوسته آند را تغذیه می کند، و اکسیدان به طور پیوسته کاتد را تغذیه می کند، واکنش های الکتروشیمیایی برای تبدیل انرژی شیمیایی به الکتریکی در الکترودها رخ می دهند. توجه شود که کاتد الکترودی است که الکترونها وارد آن می شوند و آند الکترودی است که الکترونها آن را ترک می کنند. عمومی ترین سوخت استفاده شده در پیل های سوختی، هیدروژن است، و اکسیدان (ماده اکسید کننده) معمولاً اکسیژن یا هواست. با این حال، از نظر تئوری هر ماده ای که قابل اکسایش شیمیایی باشد و بتوان به طور پیوسته آن را تأمین کرد (به صورت مایع)، می توان از آن به عنوان سوخت در آند پیل سوختی استفاده کرد .

پیل سوختی انتخاب شده در این مطالعه از نوع PEMFC است. یکی از مزایای این نوع پیل سوختی، چگالی توان بالا و بازده بالاست (۴۰-۵۰٪). دیگر مزیت آن دمای کارکرد پایین (۶۰-۸۰°C) است. پیل سوختی ساختاری ساندویچ مانند دارد. در بین دو الکتروود متخلخل، غشاء نفلون مانندی موجود است که یک هادی عالی برای پروتونها و عایقی برای الکترونهاست [۲۵]. مولکول های هیدروژن با کمک الکتروولایزر در آند به الکترون و پروتون هیدروژن می شکند، پروتونهای هیدروژن از الکترولیت عبور کرده و به کاتد می رسند، و در کاتد با الکترونهایی که از طریق بار خارجی به کاتد رسیده اند ترکیب شده و تولید آب می کنند. حال که نوع PEMFC انتخاب شد باید نحوه ی مدل سازی آن را نیز بدانیم.

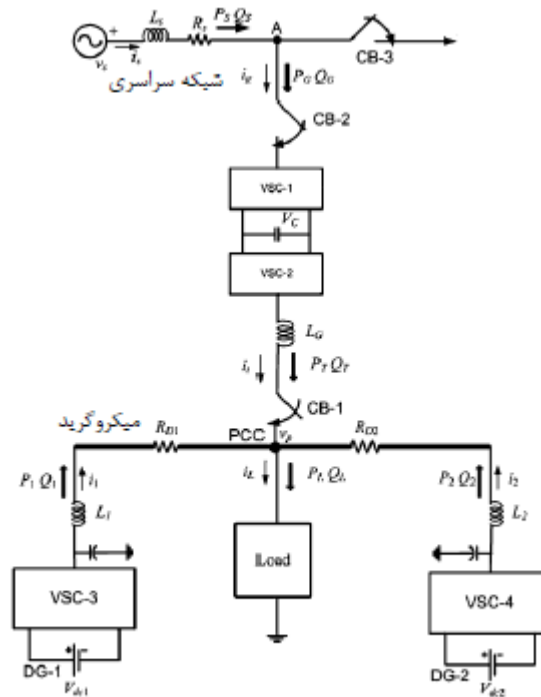
3-2- مروری بر منابع مربوطه

3-2-1- میکروگریدهای AC

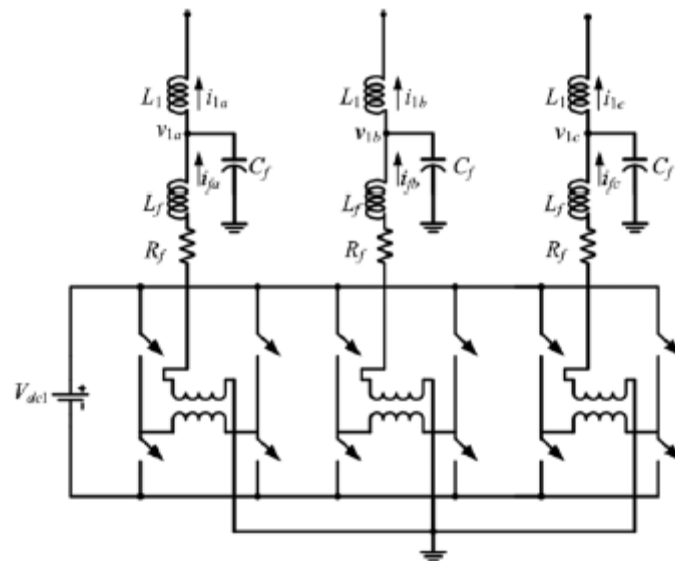
3-2-1-1- استراتژی های کنترلی و مدیریت انرژی در میکروگریدهای AC

مراجع [۱۷]، یک روش مدیریت توان میان شبکه و میکروگرید از طریق یک مبدل پشت به پشت^۱ برای تسهیل توان اکتیو و راکتیو عبوری، معرفی نموده است. در شیوه ارائه شده، دو مد کاری بسته به توان مورد نیاز در میکروگرید، در نظر گرفته شده است. در مد اول، توان اکتیو و راکتیو معینی میان شبکه و میکروگرید مبادله می گردد. مد دوم، هنگامی اتفاق می افتد که توان تولیدی توسط منابع تولید پراکنده در میکروگرید به حداکثر مقدار خود می رسد. در این شرایط بقیه توان مورد نیاز میکروگرید از طریق شبکه سراسری تامین می گردد. شکل (۲-۱) میکروگرید و نحوه ارتباط آن از طریق مبدل پشت به پشت با شبکه سراسری را نمایش می دهد. مبدل پشت به پشت، از دو مبدل منبع ولتاژ $VSC1$ و $VSC2$ ، با یک باس DC مشترک تشکیل یافته است. این مبدل می تواند ایزولاسیون ولتاژ در میکروگرید AC را فراهم سازد. همچنین لینک DC به عنوان میکروگرید DC می تواند بارهای DC را تغذیه نماید. هنگامی که توان مورد نیاز توسط میکروگرید بیشتر از حداکثر توان تولیدی توسط منابع پراکنده باشد، شارش توان از شبکه سراسری به میکروگرید خواهد بود و مبدل در مد کاری دوم عمل خواهد نمود. در صورت کاهش مقدار توان مصرفی مبدل به مد کاری اول باز خواهد گشت. مد کاری اول در واقع یک قرارداد با شبکه و مد کاری دوم تامین توان با قابلیت اطمینان بالا می باشد. شکل (۲-۲) نشان دهنده ساختار مبدل می باشد. $VSC1$ وظیفه کنترل ولتاژ باس DC را بر عهده دارد. سایر منابع تولید پراکنده، از شیوه کنترلی تثبیت توان یا کنترل دروپ استفاده می کنند. دیگرام بلوکی کنترل زاویه برای مبدل $VSC1$ نیز در شکل (۳۲) نشان داده شده است. با استفاده از زاویه مرجع تولید شده توسط این کنترل کننده، میزان شارش توان اکتیو و راکتیو به شبکه تعیین می شود. سه سناریو در استراتژی مدیریت توان در نظر گرفته شده است که شامل تزریق توان ثابت از شبکه سراسری به میکروگرید، تامین توان اضافه درخواستی در میکروگرید از شبکه سراسری و حالت عملکرد جزیره ای در میکروگرید است.

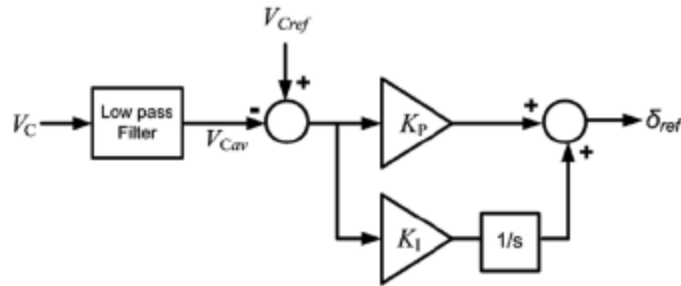
¹ Back-to-back Converter



شکل 2-4- میکروگرید مورد مطالعه در مرجع [۱۷] و نحوه ارتباط آن با شبکه اصلی از طریق مبدل پشت به پشت.



شکل 2-5- ساختار مبدل پیشنهادی در مرجع [۱۷]



شکل 2-6- کنترل کننده زاویه برای VSC1.

مرجع [۳۰] یک سیستم مدیریت توان^۱ مبتنی بر میکروکنترلر، طراحی شده برای بهره برداری آنلاین از میکروگرید ولتاژ پایین، ارائه می کند. میکروگرید مورد مطالعه مجهز به یک سیستم ذخیره سازی انرژی باتری، یک پیل سوختی و یک پنل خورشیدی می باشد. هر یک از این منابع با استفاده از مبدل های الکترونیک قدرت به باس AC وصل می شوند. شکل (۴۲) ساختار این میکروگرید را نشان میدهد. عملکرد این سیستم بر اساس ویژگی های میکروگرید مورد آزمایش، طراحی شده است. این سیستم می بایست در شرایطی که حداکثر توان اخذ شده از پنل خورشیدی کمتر از توان تزریقی به باتری می باشد، عملکرد مطلوبی داشته باشد. هم چنین ضروری است که پیل سوختی تنها هنگام عمل کرد جزیره ای میکروگرید، توان تولید نماید.

کنترل کننده سیستم مدیریت توان بر اساس ساختار ماشین حالت طراحی می شود. حالات اصلی و عملکرد سیستم در جدول (۱-۲) ارائه گردیده است. در هر مرحله جهت مشخص نمودن وضعیت موجود و کنترل پیل سوختی و شارژ باتری، نیاز به محاسبه حالت شارژ باتری میباشد. به عبارت دیگر، وظیفه اصلی سیستم مدیریت توان کنترل میزان شارژ و دشارژ باتری می باشد. بنابراین در بخش بعدی به تخمین حالت شارژ^۲ باتری اشاره شده است. حالت شارژ باتری در حقیقت شاخصی از میزان شارژ موجود در باتری نسبت به شارژ نامی آن می باشد.

در این مرجع سیستم مدیریت توان بر روی یک میکروکنترلر پیاده سازی شده است. اجرای مدیریت توان توسط میکروکنترلر در چهار دوره زمانی اصلی به ترتیب انجام می گردد: (۱) داده کاوی به منظور محاسبه متغیرهای الکتریکی مربوط به میکروگرید (۲) استخراج داده ها جهت تعیین وضعیت پیل سوختی (۳) تخمین وضعیت شارژ باتری (۴) کنترل نقطه کار پیل سوختی.

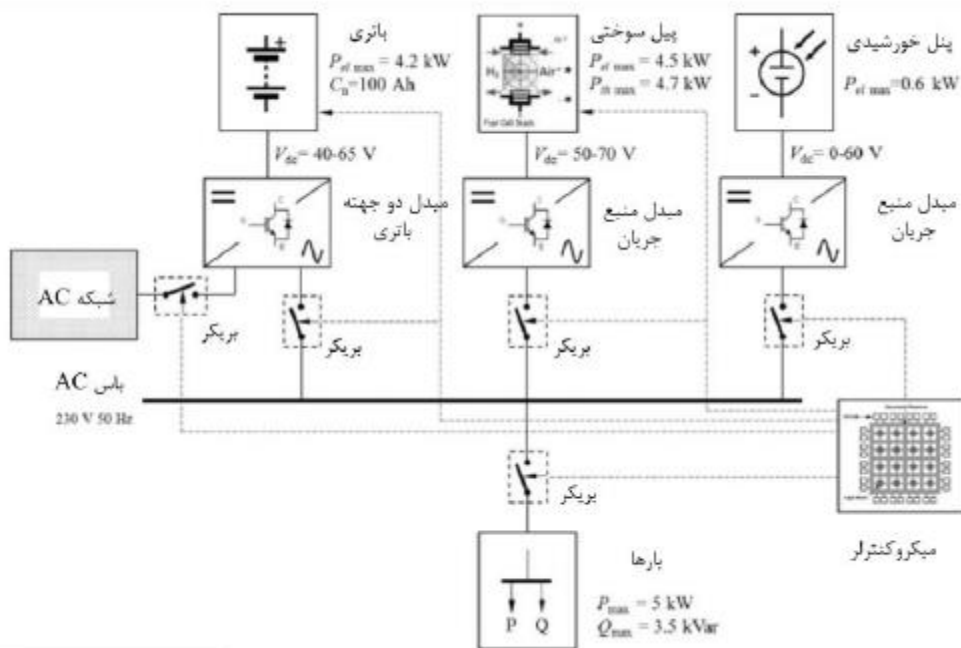
جدول (۱-۲) عمل کرد سیستم مدیریت توان در حالات مختلف

عمل کرد	حالت میکروگرید
عمل کرد متصل به شبکه میکروگرید	

^۱ Power Management System (PMS)

^۲ State of Charge (SOC)

شارژ باتری تا زمان رسیدن به SOC_{Max}	$SOC < SOC_{Max}$
بدون عمل کرد	$SOC = SOC_{Max}$
عمل کرد جزیره ای میکروگرید همراه با تولید توان توسط پیل سوختی	
کاهش P_{FC} نسبت به $P_{Load,PV}$ تا جایی که $SOC = SOC^*$	$SOC > SOC^*, P_{Load,PV} < P_{DC,Max} + P_{batt,Max}$
کاهش P_{FC} نسبت به $P_{Load,PV}$ تا جایی که $SOC = SOC^*$	$SOC < SOC^*, P_{Load,PV} < P_{FC,Max} + P_{batt,Max}$
خاموشی بارها تا جایی که $P_{Load,PV} = P_{FC,Max} + P_{batt,Max}$	$P_{Load,PV} > P_{FC,Max} + P_{batt,Max}$
خاموشی بارها تا زمانی که $P_{Load,PV} < P_{batt,Max}$ و اخذ حداکثر توان از پیل سوختی قبل از خاموشی تا جایی که $SOC < SOC^*$	خاموش کردن پیل سوختی
عمل کرد جزیره ای میکروگرید بدون تولید توان توسط پیل سوختی	
بدون عمل کرد تا جایی که $SOC = SOC_{min}$	$SOC > SOC_{min}, P_{Load,PV} < P_{DC,Max}$
روشن نمودن پیل سوختی	$SOC < SOC_{min}, P_{Load,PV} < P_{DC,Max}$
قطع بارها تا جایی که $P_{Load,PV} > P_{batt,Max}$	$P_{Load,PV} > P_{batt,Max}$
اخذ حداکثر توان از پیل سوختی بعد از روشن شدن تا جایی که	روشن نمودن پیل سوختی



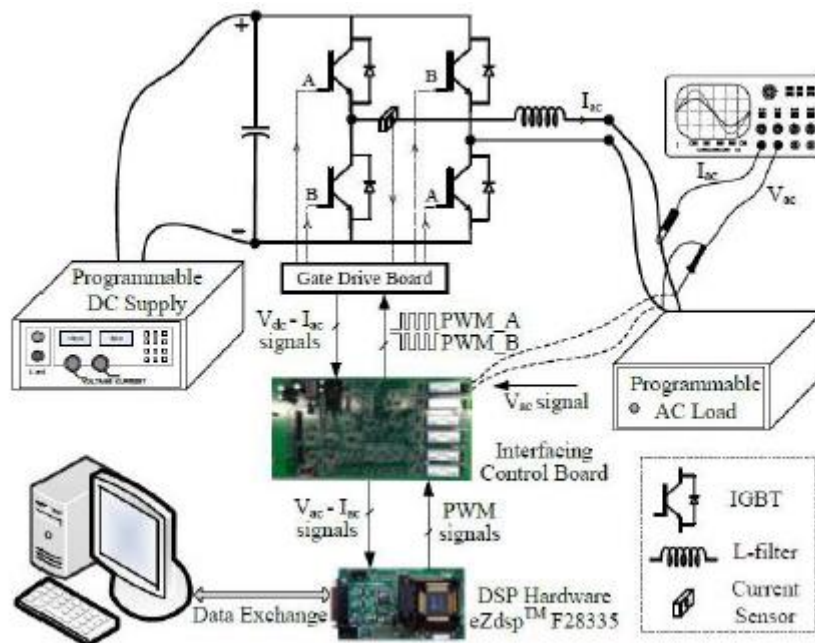
شکل 2-7- ساختار میکروگرید مورد مطالعه در مرجع [۳۰]

در مرجع (۳۱)، یک ساختار توزیع شده برای کنترل توان تولیدی توسط هر دو نوع مولدهای سنکرون و مبتنی بر ادوات الکترونیک قدرت، در میکروگریدهای AC که به صورت جزیره‌های کار می‌کنند، ارائه شده است.

اگر چه میکروگریدها کوچک هستند، اهداف کنترلی تولید توان برای یک میکروگرید جزیره ای شبیه سیستم های قدرت بزرگ می باشد. به طور مثال، بدون نقض محدودیت در توان خروجی ژنراتور، فرکانس باس AC باید تنظیم گردد. شیوه کنترلی ارائه شده در این منبع بر خلاف یک شبکه بزرگ قدرت که به صورت مرکزی انجام می پذیرد، به صورت محلی می باشد. یک مدل جبری دیفرانسیلی غیر خطی برای توصیف حالات دینامیکی لایه فیزیکی در یک میکروگرید AC جزیره ای، استفاده میشود. مدل سازی برای لایه های فیزیکی و نرم افزاری انجام یافته است. توابع کنترلی استفاده شده نیز به طور خلاصه تشریح می شوند. اولین تابع کنترلی، کنترل دروپ می باشد. هدف این تابع کنترلی، تنظیم توان تولیدی و مصرفی در میکروگرید می باشد. با افزایش بار مصرفی، میزان تولید نیز افزایش می یابد و این امر می تواند منجر به تغییرات در فرکانس و در نتیجه آسیب رسانی به تجهیزات شود. در سیستم های قدرت، یک تابع کنترلی تحت عنوان کنترل خودکار تولید^۱، مسئول تثبیت فرکانس می باشد. هدف بعدی کنترل، توزیع بهینه بار می باشد. دو تابع مذکور اهداف فنی را تامین می نمایند، ولی هزینه ها نقشی در آنها ندارند. تابع سوم وظیفه یافتن نحوه عملکرد تولید برق با کمترین هزینه را دارد. عملکرد قابل اعتماد و با هزینه پایین در میکروگریدها اهمیت بسزایی دارد. یک شیوه به منظور بهره برداری بهینه از میکروگرید، تامین حداقل انرژی ذخیره شده بدون هزینه اضافی می باشد تا با تغییرات بار مشکلی برای مشترکین ایجاد نگردد. مقاله [۳۲]، یک روش ارزیابی انرژی ذخیره میکروگریدهای شامل سلول های خورشیدی و پیل های سوختی در کنار تحلیل قابلیت اطمینان همراه با هزینه های سیستم را مورد بررسی قرار داده است. شکل (۵۲) نشان دهنده ساختار میکروگرید مورد آزمایش در این مقاله می باشد. توان تولیدی توسط سلول های خورشیدی به شدت به شرایط جوی و محیطی وابسته است. بنابراین تغییرات ناگهانی در شرایط جوی می تواند باعث اغتشاش در فرکانس و ولتاژ سیستم بشود. بنابراین توصیه می شود که نقطه کار سلول های خورشیدی به غیر از نقطه حداکثر توان آنها باشد تا مقداری ذخیره چرخان در سیستم وجود داشته باشد. از طرفی عملکرد سیستم در نقطه ای به غیر از نقطه حداکثر توان، منجر به افزایش هزینه های سیستم می شود. لذا لازم است تا مصالحه ای بین این دو برقرار گردد. به عبارت دیگر هدف، بهره برداری از میکروگرید در یک سطح قابلیت اطمینان دلخواه همراه به حداقل کردن هزینه ها می باشد. برای یافتن مقدار مناسب ذخیره چرخان نیاز

¹ Automatic Generation Control (AGC)

است تا تغییرات بار پیش بینی گردد. این پیش بینی ها نیز از طریق مدل سازی تغییرات به صورت یک متغیر تصادفی با تابع چگالی احتمالی¹ مشخصی صورت می پذیرد.



شکل 2-8- ساختار میکروگرید مورد آزمایش در مرجع (۳۲).

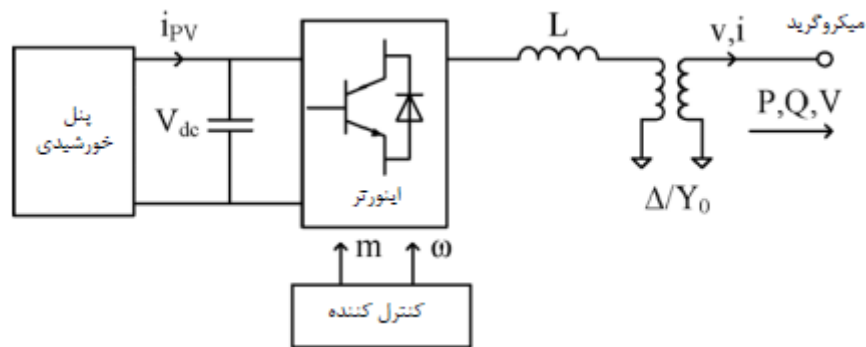
یک روش کنترل اینورترهای متصل به سلول های خورشیدی در مرجع [۳۳] معرفی گردیده است که سلول های خورشیدی را قادر می سازد که به صورت منابع ولتاژ عمل نمایند و در حالات گذرای بار ولتاژ باس DC را تثبیت نمایند.

به منظور پایدارسازی ولتاژ در یک میکروگرید جزیره ای، وجود یک ریز منبع² به عنوان منبع ولتاژ ضروری می باشد. با هدف افزایش قابلیت اطمینان در یک میکروگرید، ضروری است تا منابع پراکنده بیشتری به صورت منابع ولتاژ عمل نمایند. هم چنین ریز منابع وظیفه کنترل فرکانس را نیز بر عهده دارند. مزایای استفاده از سلول های خورشیدی به عنوان منابع ولتاژ، تزریق حداکثر توان به میکروگرید، کاهش توان تزریقی در صورت کاهش بار میکروگرید در وضعیت جزیره ای و همچنین پایدارسازی ولتاژ و فرکانس میکروگرید، می باشد. در طرف مقابل طراحی کنترل کننده برای اینورتر مربوط به سلولهای خورشیدی منبع ولتاژ، با چالش های فراوانی روبروست. چالش اول ناپایداری ولتاژ باس DC در حالت گذرای بارهای بزرگ یا تغییرات ناگهانی شرایط جوی می باشد. در کنار آن اخذ حداکثر توان در مواقع ممکن می باشد. به علاوه تغییرات ولتاژ باس DC در حالات گذرای بار، ممکن است منجر به تغییر ولتاژ باس AC گردد.

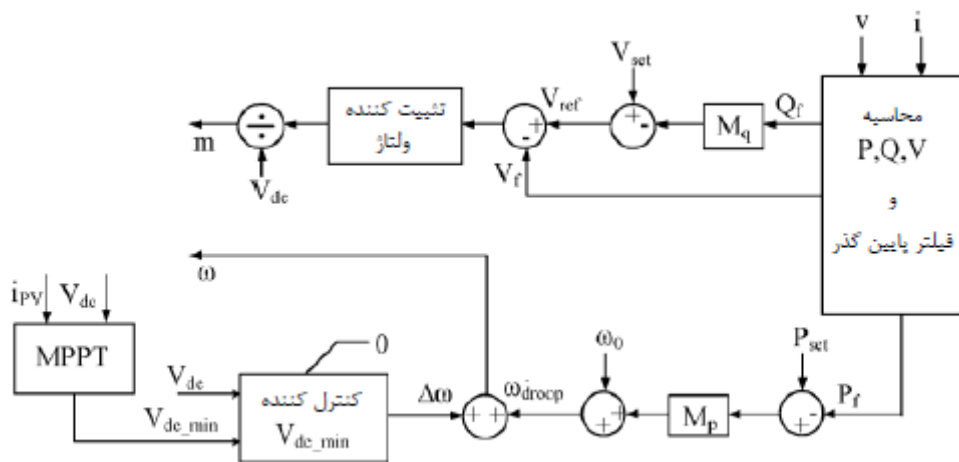
¹ Probability Density Function (pdf)

² Microsource

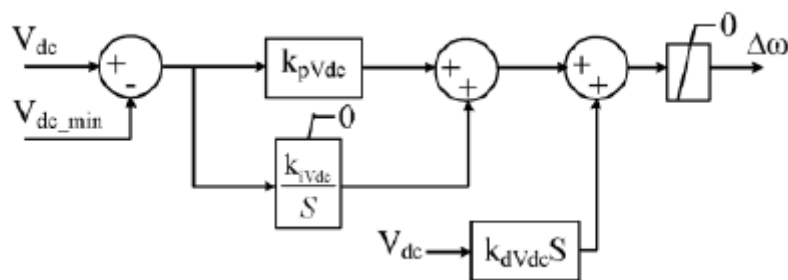
اهداف کنترلی به منظور طراحی کنترل کننده برای اینورتر سلول های خورشیدی عبارتند از: (۱) جلوگیری از ناپایداری ولتاژ باس DC در صورت ورود هرگونه اغتشاش به سیستم (۲) محافظت از پایداری ولتاژ باس AC در صورت تغییرات در ولتاژ باس 3DC) کاهش توان خروجی به صورت مستقل در صورت کاهش بار در حالت عمل کرد جزیره ای میکرو گرید (۴) قابلیت اخذ حداکثر توان از سلول های خورشیدی. شکل (2-6) ساختار کلی ریز منبع خورشیدی را نشان می دهد. شکل های (2-7) و (2-8) نیز نشان دهنده ساختار بلوکی کنترل کننده های ریز منبع می باشند.



شکل 2-9- مدار اصلی ریز منبع خورشیدی مرجع [۳۳]



شکل 2-10- ساختار کلی کنترل کننده اینورتر ریز منبع خورشیدی پیشنهادی مرجع [۳۳]

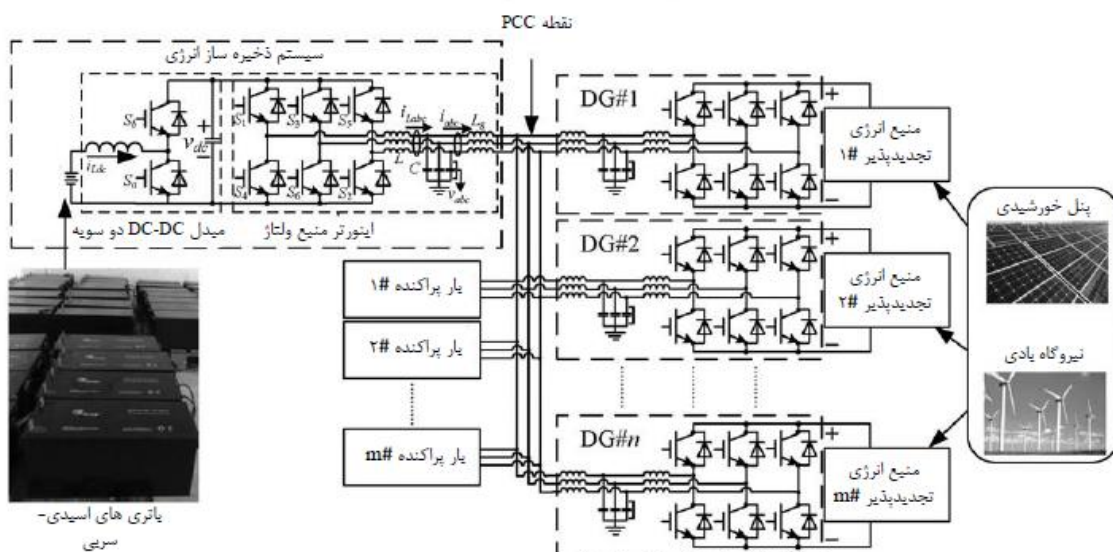


شکل 2-11- کنترل کننده V_{dc-min} نشان داده شده در شکل (۲-۱۰).

یک استراتژی مدیریت انرژی غیرخطی با استفاده از فرکانس نقطه اتصال مشترک به عنوان نماینده ای برای تمام واحدهای تشکیل دهنده، در مرجع [۳۶] ارائه گردیده است. در این استراتژی از هر گونه خطوط ارتباطی میان واحدهای تشکیل دهنده اجتناب شده است. یک شاخص به منظور استراتژی کنترل نیز معرفی گردیده است. شیوه مدیریت انرژی حتی در صورت پر شدن باتری و تولید توان حداکثر توسط منابع تولید پراکنده نیز مؤثر می باشد. میزان جریان شارژ باتری بر اساس فرکانس نقطه اتصال مشترک تعیین می گردد. با افزایش فرکانس، باتری شارژ شده و جریان شارژ افزایش می یابد و با کاهش فرکانس باتری دشارژ می شود.

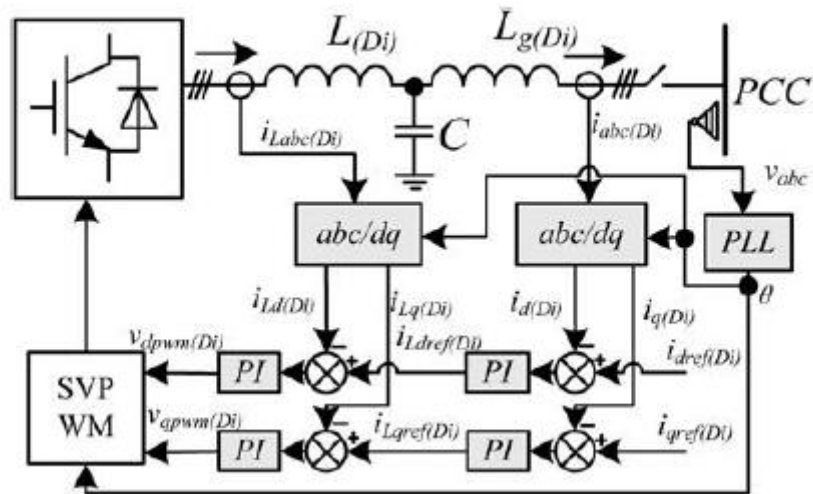
شکل (۲-۹) پیکربندی میکروگرید AC پیشنهادی، شامل منابع تولید پراکنده، بارهای پراکنده و ذخیره ساز انرژی را نشان می دهد. همانطور که از شکل نیز پیداست، مدار واسط بخش ذخیره ساز، از دو مبدل DC-DC

و DC-AC دوسویه تشکیل یافته است. هنگامی که توان اکتیو تولیدی توسط منابع پراکنده بیش از توان مصرفی توسط بارها باشد، مبدل DC-AC به صورت یکسوساز عمل کرده و مبدل DC-DC نیز جهت تثبیت ولتاژ لینک DC شروع به شارژ باتری می نماید. شکل (۲-۱۰) نشان دهنده دیاگرام بلوکی کنترل کننده این مدار می باشد. کنترل کننده مدارهای واسط تولید پراکنده، دارای استراتژی کنترلی یکسانی هستند و بر روی یک قاب هم گام $d-q^1$ پیاده سازی شده اند. فاز نقطه اتصال مشترک توسط یک حلقه قفل شده فاز^۲ تشخیص داده میشود و جریان های خروجی توسط یک کنترل کننده دو حلقه تنظیم می گردد.



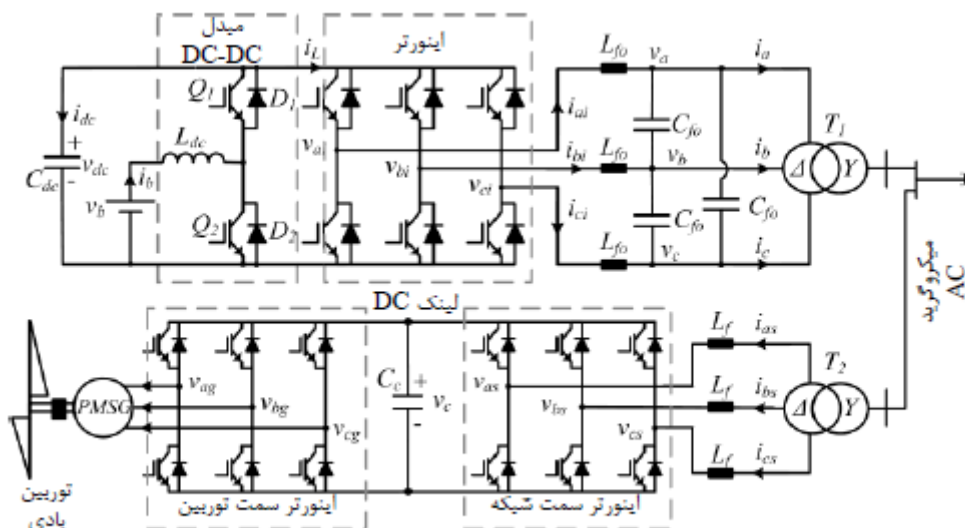
¹ Synchronous d-q Frame
² Phase Lock Loop (PLL)

شکل 2-12- ساختار میکروگرید مورد مطالعه در مرجع [۳۴]



شکل 2-13- کنترل کننده اینورتر مربوط به منبع پراکنده λ ام.

یک استراتژی مدیریت توان تولیدی در میکروگریدهای جزیره ای و مستقل در مرجع [۳۵] ارائه گردیده است. هدف اصلی این استراتژی کنترل وضعیت شارژ باتری با محدود کردن ولتاژ پایانه های آن با کنترل توان تولیدی توسط منابع تولید پراکنده می باشد. در این مقاله نیز همانند مرجع [۳۴] از فرکانس میکروگرید به منظور ایجاد سیگنال کنترلی برای مبدل های الکترونیک قدرت واسط منابع تولید پراکنده استفاده شده است. از آن جایی که در هنگام عمل کرد جزیره ای میکروگرید، توان اضافی تولیدی نمی تواند به شبکه تزریق شود، در هنگام کم بودن بار مصرفی در مقابل میزان تولید، می بایست میزان انرژی تولیدی کاهش یابد. در استراتژی مدیریت انرژی پیشنهادی، ولتاژ باتری جهت بررسی میزان ظرفیت آن بررسی می شود. اگر باتری پر شده باشد، ضروری است که منابع میزان تولید خود را کم نمایند. شکل (۲-۱۱) نشان دهنده ساختار ساده شده میکروگرید AC مورد مطالعه در این مرجع می باشد. سادگی این سیستم برای نشان دادن امکان پذیری استراتژی ارائه شده بسیار پرکاربرد می باشد. مبدل دوسویه DC-DC به منظور تثبیت ولتاژ باس DC استفاده می شود.



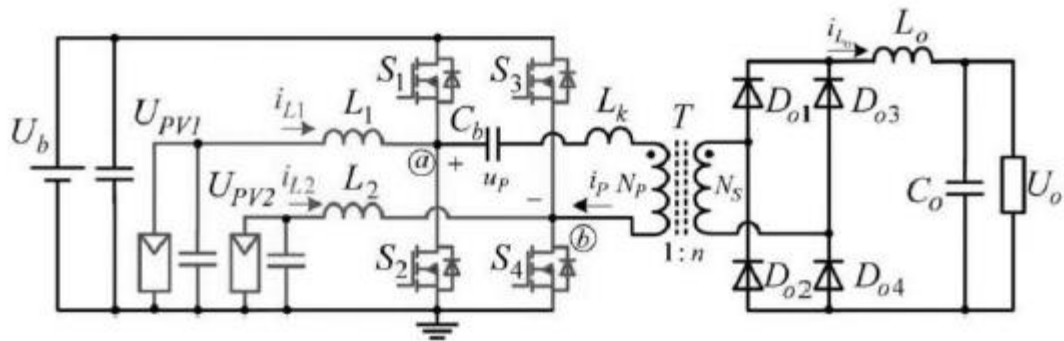
شکل 2-14- دیاگرام ساده شده میکروگرید مورد مطالعه در مرجع [۳۵]

یک مبدل چند ورودی خروجی¹ بر اساس مبدل تمام پل² و مبدل DC-DC دوجهته به منظور استفاده در میکروگریدها با منابع تولید پراکنده با خودروهای برقی در مرجع [۳۶] معرفی شده است. یک مبدل چند ورودی خروجی می تواند منابع تولید پراکنده مختلف از جمله سلول های خورشیدی و توربین های بادی را به صورت همزمان پشتیبانی نماید و از آنها حداکثر توان را اخذ نماید تا حداکثر توان در خروجی سیستم وجود داشته باشد. یک مبدل چهار ورودی خروجی دارای دو پنل خورشیدی و یک باتری در شکل (۲-۱۲) نشان داده شده است. مبدل های سه، چهار و پنج ورودی خروجی در شکل (۱۳-۲) نشان داده شده است. در این مبدل ها خود منابع می توانند با یکدیگر تبادل انرژی داشته باشند. ایراد مدار در آن است که مدار معادل میان ورودی های گوناگون، یک مبدل بوست می باشد و می بایست ولتاژ یک ورودی بیشتر از ورودی دیگر باشد.

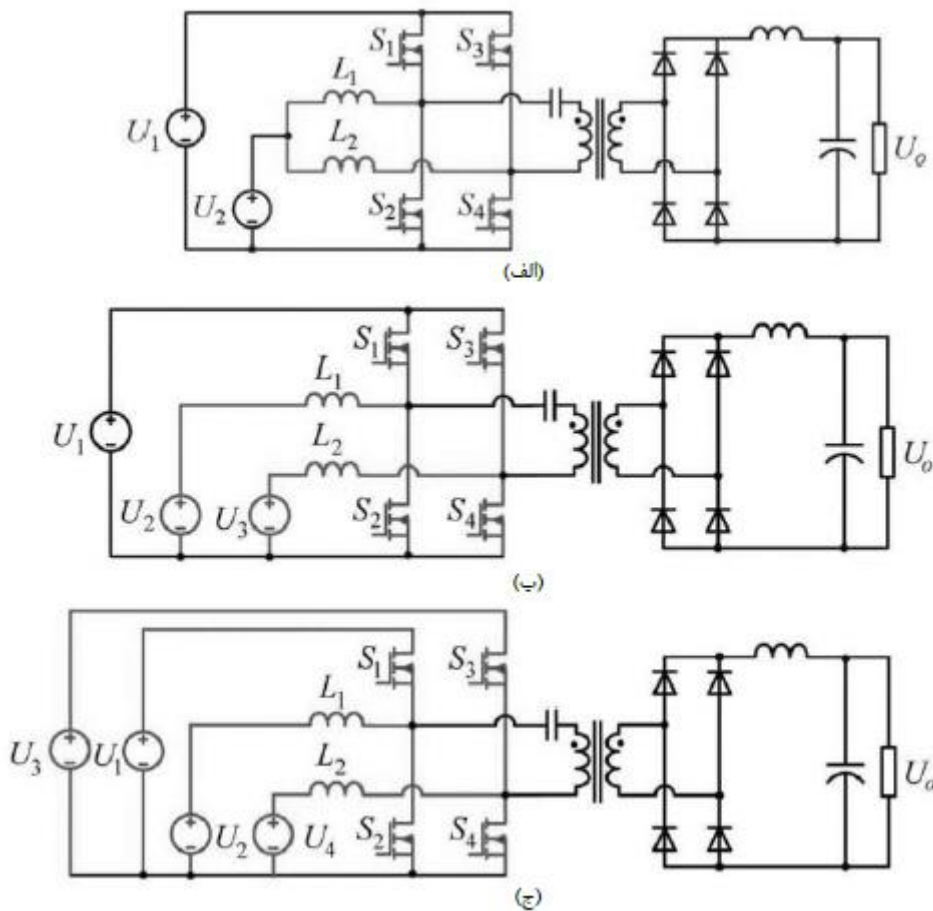
و پنج مد مدیریت توان برای مبدل چهار ورودی خروجی، تعیین شده است. در مد اول، توان تولیدی پنل های خورشیدی صفر می باشد و باتری وظیفه تامین توان خروجی را بر عهده دارد. در مد کاری دوم، توان تولیدی پنل ها کم تر از میزان بار است و بنابراین باتری و پنل ها هم زمان بار را تامین می کنند. در مد سوم، پنل ها توان بیشتری از بار تولید می کند و توان اضافی توسط باتری جذب می شود. در مد چهارم، میزان توان تولیدی پنل ها از توان جذب شده توسط باتری و بار بیشتر است و در نتیجه یکی از پنل ها از نقطه کاری تولید حداکثر توان فاصله می گیرد. در مد پنجم، هر دو پنل از تولید حداکثر توان فاصله می گیرند.

¹ Multiport Converter (MPC)

² Full Bridge Converter (FBC)



شکل 2-15- مبدل مورد مطالعه در مرجع [۳۶] شامل دو پنل خورشیدی و یک باتری.



شکل 2-16- مبدل چند ورودی خروجی: (الف) سه ورودی خروجی (ب) چهار ورودی خروجی (ج) پنج ورودی -

خروجی

توسعه ابزارهای مدیریت انرژی به منظور استفاده در تجهیزات تولید انرژی الکتریکی توسط سلول های خورشیدی، از جمله واحدهای ذخیره ساز انرژی، انعطاف پذیری زیادی برای اپراتورهای سیستم توزیع فراهم می کند. نویسندگان در مرجع [۳۷]، مجموعه ای از این روش های مدیریت انرژی برای استفاده در یک سیستم میکروگرید ارائه داده اند. این مقاله یک سیستم مدیریت انرژی برای یک میکروگرید، شامل پنل خورشیدی با واحد ذخیره سازی و یک میکروتوربین گازی، پیشنهاد نموده است.

این سیستم با توجه به توابع مختلف سازمان یافته و در دو بخش اجرا گردیده است: مدیریت انرژی مرکزی میکروگرید و مدیریت توان محلی. برنامه ریزی تولید توان با توجه به پیش بینی برای تولید برق پنل خورشیدی و پیش بینی بار طراحی شده است. سیستم های مدیریت مرکزی و محلی، از طریق یک شبکه ارتباطی، تبادل اطلاعات دارند.

2-3-1-2 بهینه سازی میکروگریدهای AC

منابع تولید پراکنده، همان طور که اشاره گردید به سرعت در حال توسعه می باشند. دو محدودیت اساسی برای این توسعه وجود دارد که عبارتند از: دسترسی پذیری به انرژی تولیدی و هزینه تجهیزات مورد نیاز. در ادامه به طور اختصار به بررسی مراجعی می پردازیم که به حداقل کردن هزینه بهره برداری و بهینه سازی منابع تولید پراکنده پرداخته اند.

از شیوه های مختلف بهینه سازی جهت تحلیل مسایل مختلف مربوط به منابع تولید پراکنده استفاده می شود. یک شیوه برنامه ریزی برای میکروگرید جهت مکان یابی و تعیین اندازه بهینه منابع تولید پراکنده در [۳۸] استفاده شده است. هزینه های درازمدت در این مسئله شامل هزینه های سرمایه گذاری، بهره برداری و نگهداری¹ و هزینه های مربوط به سوخت و آلودگی هوا می باشد. مسئله مذکور به شکل یک مسئله برنامه ریزی آمیخته با اعداد صحیح²، شکل یافته است که در آن ذات احتمالی منابع تولید پراکنده در نظر گرفته شده است و هدف حداقل کردن هزینه ها و در کنار آن حداکثر نمودن سود می باشد. مدل مذکور به یک مسئله بهینه سازی دو مرحله ای تبدیل شده است. یک چارچوب تولید ستون و محدودیت³، برای حل مسئله استفاده میشود. در مقایسه با روشهای عادی برنامه ریزی میکروگرید، مدل ارائه شده که در آن به طور کامل عدم قطعیت سیستم در نظر گرفته شده است، سیستمی عملی تر میباشد و تنها نیاز به یک مجموعه عدم اطمینان قطعی، به جای یک توزیع احتمال داده نامشخص که به دست آوردن آن دشوار است، دارد.

ماهیت دینامیک شبکه توزیع، ثبات و کنترل میکروگرید در هر دو حالت متصل به شبکه و عمل کرد جزیره ای را به چالش می کشد. در مرجع [۳۹]، مدل های خطی و غیر خطی میکرو گرید در عمل کرد حالت های مختلف ارائه شده است. طراحی بهینه فیلتر LC، پارامترهای کنترل و مقاومت در برابر نوسانات است که در حالت متصل به شبکه انجام شده است. از سوی دیگر، پارامترهای کنترل و ضرایب تقسیم توان در مورد حالت عمل کرد جزیره ای به صورت بهینه یافته شده است. مسئله کنترل به عنوان یک مسئله بهینه سازی مدل سازی شده است و در ادامه از بهینه سازی ازدحام ذرات

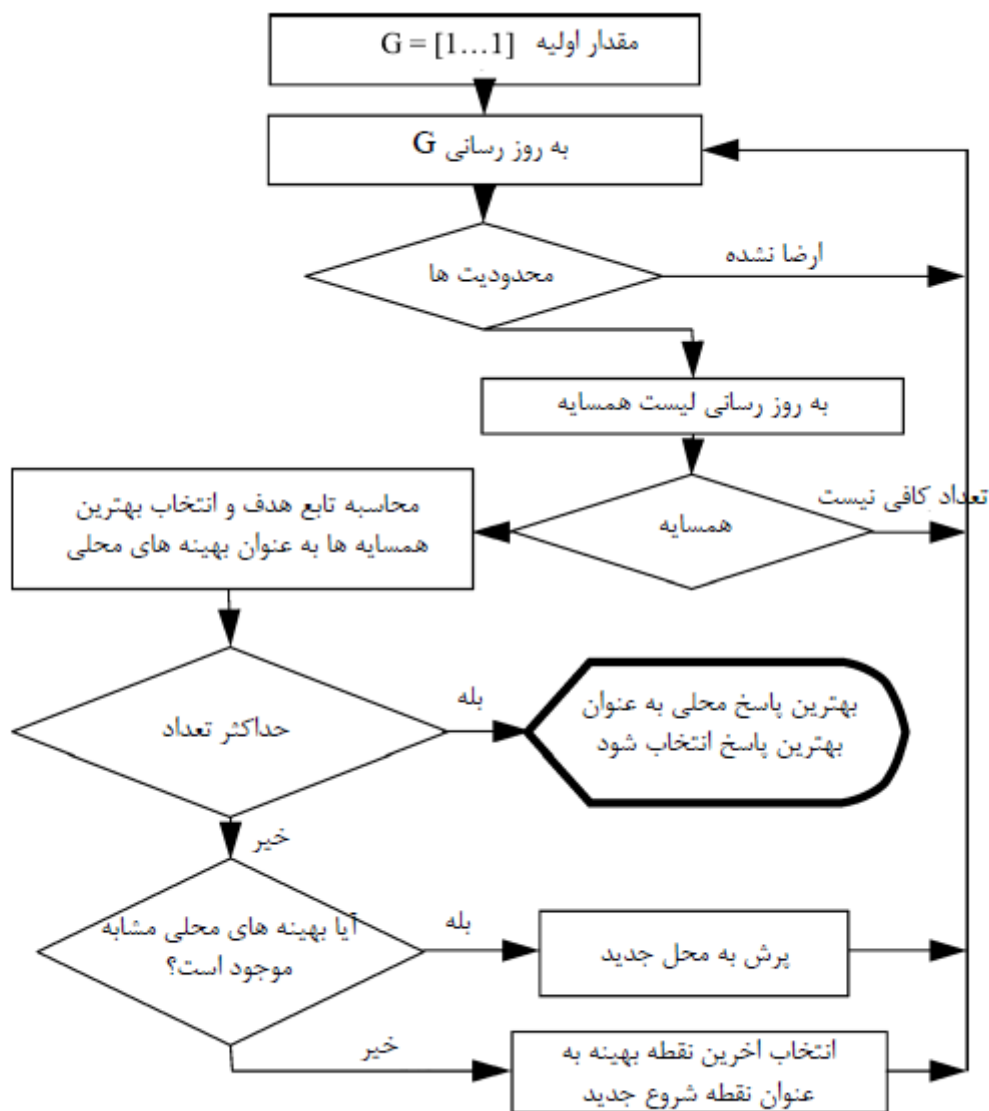
¹ operation and maintenance (O&M)

² mixed-integer programming (MIP)

³ column and constraint generation (CCG)

به منظور یافتن تنظیمات بهینه از پارامتر هامورد نظر، استفاده شده است. علاوه بر آن، توابع غیرخطی در حوزه زمان و همچنین توابع هدف مبتنی بر مقادیر ویژه، جهت به حداقل رساندن خطا در اندازه گیری توان و به منظور افزایش ویژگی های میرایی، ارائه شده است.

همان گونه که در فصل اول نیز گذشت، میکروگرید را می توان به عنوان دسته های منابع انرژی پراکنده که یک گروه از بارهای توزیع شده را در حالت متصل به شبکه و جزیره ای تغذیه می کنند، در نظر گرفت. امروزه، مفهوم میکروگرید تبدیل به یک موضوع کلیدی در مبحث شبکه های هوشمند شده است و نیازمند یک روش سیستماتیک برای طراحی بهینه می باشد. با توجه به استاندارد IEEE1547.4 سیستم های توزیع بزرگ را می توان به تعدادی از میکروگریدها به منظور تسهیل کنترل قدرتمند و زیرساخت عملیات در سیستم های توزیع آینده، دسته بندی نمود. با این حال، دسته بندی سیستم های بزرگ به مجموعه ای از میکروگریدها با قابلیت اطمینان و امنیت بالا در منابع بررسی نشده است. مرجع [۴۰] یک رویکرد سیستماتیک و بهینه سازی برای طراحی میکروگرید با در نظر گرفتن جنبه های قابلیت اطمینان و امنیتی سیستم ارائه داده است. طراحی بهینه، از طریق یک شاخص ترکیبی احتمالاتی، خطاهای گذرا و دائمی، برای قابلیت اطمینان سیستم، و توان اکتیو و راکتیو، برای امنیت سیستم را در نظر گرفته است. شکل (۲-۱۴) نشان دهنده الگوریتم پیشنهادی این مرجع جهت طراحی میکروگرید می باشد.



شکل 2-17- الگوریتم بهینه سازی مرجع

نویسندگان در مرجع [۴۱] به تحلیل میکروگریدهای دارای پنل خورشیدی که به صورت جزیره ای عمل می کنند، پرداخته اند. این تحلیل و شبیه سازی در محیط سیمولینک متلب انجام یافته است. مقدار بهینه اندازه ذخیره ساز انرژی، بر اساس میزان انرژی تابشی خورشیدی موجود محاسبه می شود. مرجع [۴۲] یک روش برای یافتن اندازه هماهنگ ذخیره ساز انرژی و منابع دیزلی در میکروگرید جزیره ای بر اساس تبدیل فوریه گسسته^۱، پیشنهاد می کند. ذخیره ساز انرژی و منابع دیزلی دارای پاسخ هایی با ویژگی های مختلف هستند و می توانند مکمل جبران عدم تعادل تولید و تقاضا در مقیاس های زمانی مختلف باشند. استراتژی توزیع هماهنگ بر اساس تبدیل فوریه گسسته، توان را بین این دو از طریق تبدیل حوزه فرکانس زمان تقسیم می نماید. روش ارائه شده، عمل کرد ذخیره ساز انرژی و

¹ Discrete Fourier Transform (DFT)

منابع دیزلی در کارآمدترین و مناسبترین حالت را تضمین می نماید. منابع دیزلی در تولید توان در سطح بالا و ذخیره ساز انرژی در جبران نوسانات برق کوچک و مکرر، ایفای نقش می کنند. پس از آن، ظرفیت های ذخیره ساز انرژی و منابع دیزلی بر اساس استراتژی یاد شده، تعیین می شود. با استفاده از روش ارائه شده همچنین می توان در برنامه ریزی ذخیره ساز انرژی با سایر منابع تولید پراکنده قابل برنامه ریزی، مانند میکروتوربین و یا سلول های سوختی، استفاده نمود.

3-1-3 برنامه ریزی میکروگریدهای AC

در این بخش از پایان نامه به بررسی مراجعی پرداخته می شود که به برنامه ریزی بهینه در میکروگریدهای AC و حل مسئله بهینه سازی برنامه ریزی تولید توان در میکروگریدها، پرداخته خواهد شد.

در مرجع [۴۳] یک مدل برای مسئله برنامه ریزی میکروگرید با اطلاعات اقتصادی و ساختاری نامشخص، ارائه شده است. مسئله برنامه ریزی میکروگرید بررسی کارایی اقتصادی استقرار میکروگرید و تعیین میزان تولید توان بهینه از منابع انرژی پراکنده به منظور نصب و راه اندازی، می باشد. اندازه گیری خالص، برای تبادل توان با شبکه اصلی و کاهش هزینه های انرژی و سرمایه گذاری منابع انرژی پراکنده سرویس داده نشده، در نظر گرفته می شود. یک روش بهینه سازی برای در نظر گرفتن خطاهای پیش بینی بار، تولید انرژی منابع تجدید پذیر متغیر، و قیمت های بازار مورد استفاده قرار می گیرد. عمل کرد جزیره ای میکروگرید بیشتر به عنوان یک منبع عدم قطعیت در نظر گرفته میشود. مسئله برنامه ریزی میکروگرید به یک مسئله اصلی سرمایه گذاری و یک زیر مسئله عملیاتی تجزیه می شود. تصمیمات برنامه ریزی بهینه به دست آمده در مسئله اصلی، در زیر مسئله به کار گرفته می شوند تا میزان بهینگی مسئله اصلی با محاسبه بدترین حالت مشخص گردد. در هر تکرار این روند ادامه خواهد داشت تا بهترین جواب برای برنامه ریزی میکروگرید حاصل گردد.

نویسندگان در مرجع [۴۴] یک استراتژی کنترل جدید جهت عمل کرد هماهنگ میکروگریدهای متصل به هم در یک سیستم توزیع ارائه کرده اند. اپراتور شبکه توزیع و هر میکروگرید به عنوان یک نهاد مجزا با هدف به حداقل رساندن هزینه های عملیاتی خود در نظر گرفته می شوند. به منظور دستیابی به تعادل در میان تمام منابع موجود و در نظر گرفتن عدم قطعیت در خروج منابع تولید پراکنده، مسئله به عنوان یک مسئله دوسطحی¹ تصادفی با اپراتور شبکه توزیع در سطح بالا و میکروگریدها در سطح پایین تر، در نظر گرفته می شود. هر سطح شامل دو مرحله است. مرحله اول تعیین نقاط کار تولید انرژی منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن تولید پایه بر اساس بار پیش بینی خروجی می باشد و در

¹ Bilevel Problem

مرحله دوم خروجی تولید توان بر اساس سناریوهای تحقق یافته، تنظیم می شود. به منظور بهبود مصالحه میان دقت و صحت راه حل و بار محاسباتی، یک روش کاهش سناریو اعمال می شود. یک سیستم مدیریت انرژی هوشمند، به منظور بهینه سازی بهره برداری از میکروگریدها در [۴۵] ارائه شده است. سیستم مدیریت انرژی هوشمند شامل واحد پیش بینی توان، سیستم ذخیره سازی انرژی، واحد مدیریت و واحد بهینه سازی می باشد. ویژگی های سیستم های تولید انرژی خورشیدی، در شرایط آب و هوایی مختلف مطالعه شده و سپس یک الگوریتم پیش بینی یک روزه توان برای این واحد ارائه شده است. از آن جایی که ذخیره ساز انرژی نیاز به بهینه سازی در مراحل متعدد زمانی و بر اساس تغییرات در قیمت انرژی دارد، شرایط اقتصادی پیچیده ای به خود اختصاص می دهند. بنابراین واحد ذخیره ساز انرژی، برای تعیین استراتژی های عمل کرد بهینه استفاده می شود. مدیریت هوشمند واحد ذخیره ساز انرژی، پخش بار اقتصادی و بهینه سازی بهره برداری از واحدهای تولید پراکنده، به صورت یک مسئله بهینه سازی تک هدفه ساده سازی شده است و از الگوریتم ژنتیک ماتریسی کدگذاری واقعی^۱، جهت حل این مسئله استفاده گردیده است.

مرجع [۴۶] یک سیستم مدیریت انرژی غیر متمرکز برای بهره برداری هماهنگ میکروگریدها در یک سیستم توزیع پیشنهاد داده است. در حالت متصل به شبکه، اپراتور شبکه توزیع و هر میکروگرید به عنوان نهادی مجزا با اهداف فردی برای به حداقل رساندن هزینه های عملیاتی خود، در نظر گرفته شده اند. به منظور هماهنگی بهره برداری از تمام تجهیزات، یک الگوریتم دو سطحی غیر متمرکز برای حل این مسئله اعمال می شود که سطح اول به انجام مذاکرات میان نهادها و سطح دوم برای به روز رسانی جرایم غیر همگرا، اختصاص دارد. در حالت جزیره ای، هدف هر میکروگرید تامین توان با قابلیت اعتماد بالا به مشتریان است. به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت در خروجی منابع تولید پراکنده و مصرف بار، مسئله به عنوان یک مسئله تصادفی در سطحی فرموله شده است. در مرحله اول نقاط کار تولید توان منابع تولید پراکنده بر اساس پیش بینی ها تعیین می شود و در مرحله دوم خروجی توان تولیدی بر اساس سناریوهای واقعی تنظیم می گردد. مطالعات بیشتری در ارتباط با بهینه سازی منابع تولید پراکنده در میکروگریدهای AC [17, 18, 45]، استراتژی کنترل میکروگریدهای AC [47-49]، کنترل ادوات الکترونیک قدرت و استراتژی های حفاظتی در میکروگریدهای متصل به شبکه [50-52]، استراتژیهای کنترلی در میکروگریدها [53, 54] و هم چنین بهره برداری از میکروگریدهای AC [55-58] در مقالات موجود است که اشاره به آنها صورت تفصیلی در این کار مقدور نمی باشد.

¹ Matrix Real-Coded Genetic Algorithm (MRC-GA)

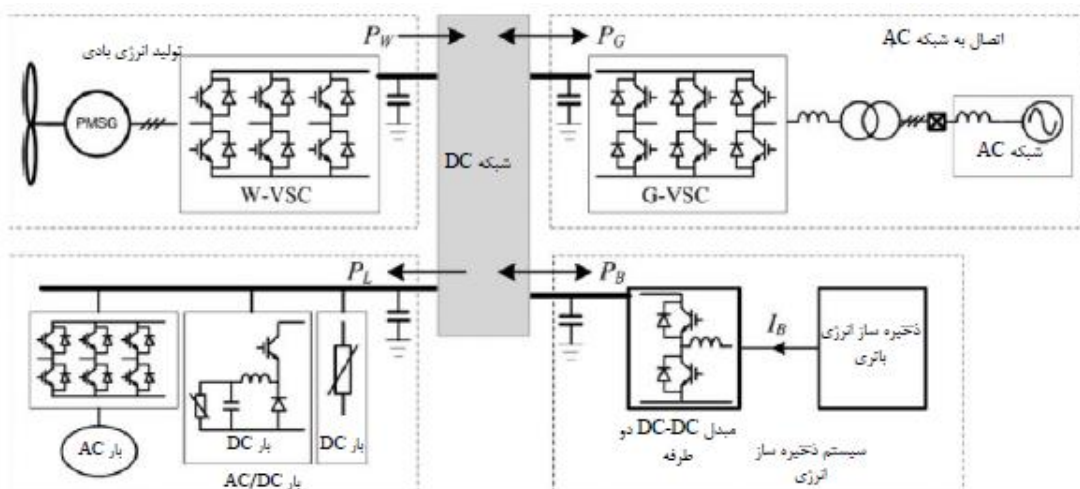
در ادامه به بررسی منابعی که در ارتباط با میکروگریدهای DC می باشند، پرداخته خواهد شد.

2-3-2 میکروگریدهای DC

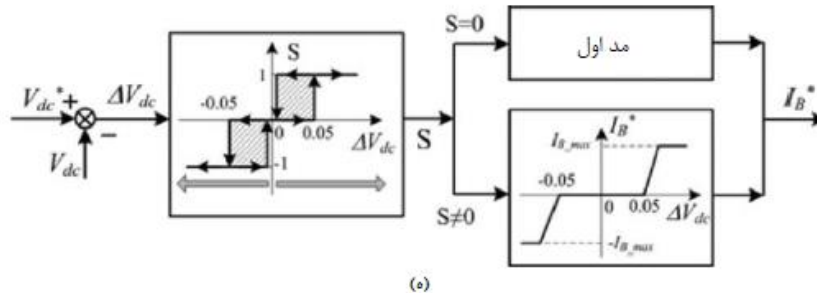
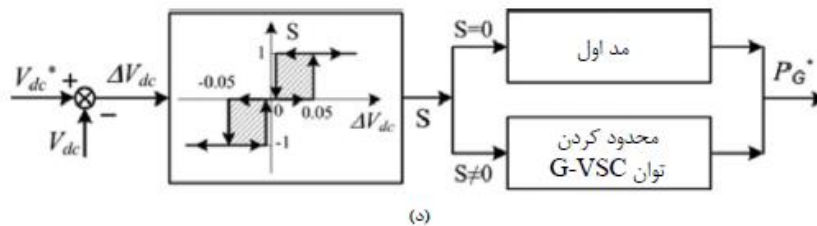
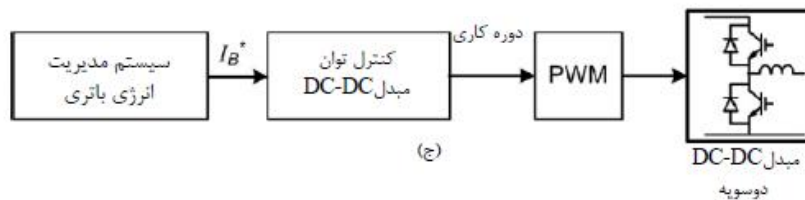
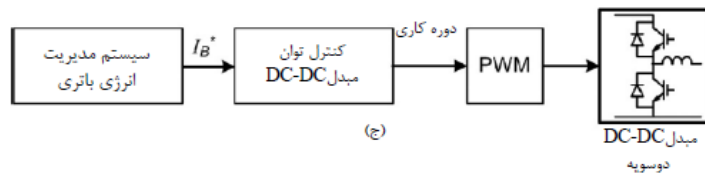
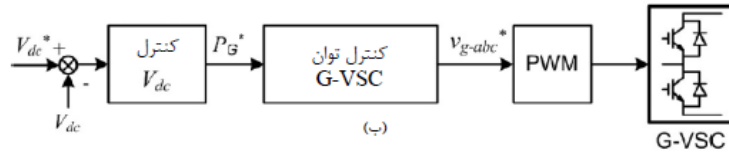
2-3-2-1 استراتژیهای کنترلی و مدیریت انرژی در میکروگریدهای DC

همان طور که قبلا نیز اشاره گردید، در سیستم های سنتی توان الکتریکی به صورت AC از نیروگاه های مرکزی به بارها انتقال داده می شود. با این وجود، سیستم های توان DC نیز به منظور استفاده در زیر ساخت های مخابراتی و اتصال دو شبکه با فرکانس های مختلف به یکدیگر، استفاده می شود. هم چنین با توسعه بارهای مصرفی DC و منابع تولید پراکنده DC موضوع میکروگریدهای DC مطرح می شود. در ادامه به بررسی منابع موجود در ارتباط با میکروگریدهای DC پرداخته خواهد شد.

مقاله [۲۲] یک استراتژی کنترل و بهره برداری از یک میکروگرید DC تشکیل یافته از توربین بادی، ذخیره ساز انرژی، بارهای متغیر و اتصال به شبکه، ارائه کرده است. ساختار میکروگرید DC مورد مطالعه در شکل (۲-۱۵) نشان داده شده است. چندین مد مدیریت انرژی معرفی شده است. در مد اول که در حالت اتصال به شبکه عمل می نماید، توان اضافی تولیدی از طریق اینورتر متصل به شبکه، به شبکه سراسری تزریق می شود. در این مد حداکثر توان از توربین بادی اخذ می شود و باتری می تواند بر اساس نیاز شارژ یا دشارژ شود. در مد دوم، اینورتر متصل به شبکه قادر به تبدیل توان مورد نیاز شبکه DC نمی باشد و باتری و ذخیره ساز انرژی پایدارسازی ولتاژ باس DC را بر عهده می گیرد. در مد کاری سوم، میکروگرید به صورت جزیره ای عمل می کند. در این وضعیت نیز پایدارسازی ولتاژ DC توسط باتری انجام می پذیرد. در این مد کاری هنگامی که بار زیادی به شبکه وصل باشد یا تولید کم باشد، ولتاژ شبکه DC ناپایدار می گردد و نیاز است که تعدادی از بارها قطع شوند. دیاگرام بلوکی کنترل هر یک از این مدها در شکل (۲-۱۶) آورده شده است.



شکل 2-18- ساختار میکروگرید DC مورد مطالعه در مرجع [۲۲]



شکل 2-19- دیاگرام کنترل میکروگرید DC مرجع [۲۲]: (الف) مد کاری اول اینورتر توربین بادی (ب) مد کاری اول اینورتر متصل به شبکه (ج) مد کاری اول مدیریت انرژی باتری (د) مد کاری دوم اینورتر متصل به شبکه (ه) مد کاری دوم مدیریت انرژی باتری

مقاله [۵۹] یک میکروگرید DC دوقطبی ولتاژ پایین^۱ ارائه کرده است که از طریق خطوط سه سیمی توزیع DC، توانی با کیفیت بسیار بالا به بارها می‌رساند. وجود توان با کیفیت بالا برای برخی از

^۱ Low-Voltage Bipolar-Type DC Microgrid

مشتریان که خاموشی صدمات جبران ناپذیری به آنها وارد می‌سازد، از جمله بانکها و بیمارستانهای بسیار اهمیت دارد.

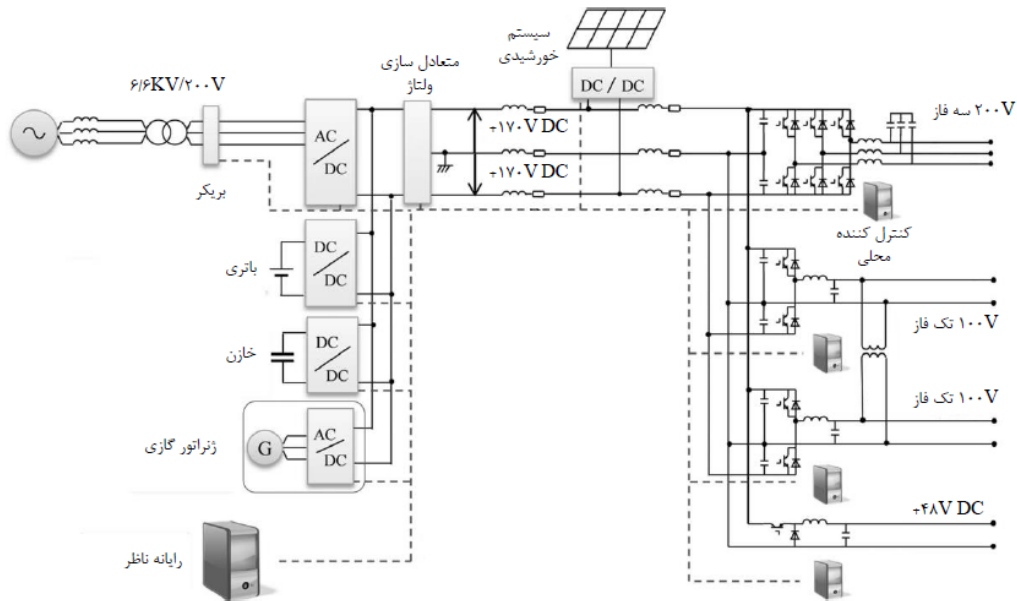
شکل (۲-۱۷) مفهوم میکروگرید DC دو قطبی با ولتاژ پایین را نشان میدهد. ویژگیهای این سیستم عبارتند از: (۱) سیستم سه سیمی DC با ولتاژهای ۱۷۰، ۱۷۰- و ۳۴۰.۲) وجود مبدل در هر یک از باس های بار با هدف افزایش کیفیت و قابلیت اطمینان. (۳) دسترسی شکل های مختلف توان الکتریکی به صورت تک فاز ۱۰۰ ولت، سه فاز ۲۰۰ ولت و ۴۸ ولت (۴DC) مناسب برای منابع تولید پراکنده (۵DC) عمل کرد به صورت جزیره ای در صورت بروز خطا در شبکه اصلی

سیستم مورد مطالعه، یک میکروگرید DC در سمت بارهای مصرفی شامل ۵۰-۱۰۰ منزل مسکونی که هر کدام دارای یک ژنراتور گازی یا پیل سوختی می باشند. این منابع تولید پراکنده به سیستم توزیع DC متصل شده اند. این میکروگرید از طریق مبدل دوطرفه به شبکه سراسری متصل می شود. مدیریت توان در روی خط DC از طریق کنترل تعداد منابع تولید پراکنده متصل به مدار انجام می یابد.

در صورت عمل کرد به صورت متصل به شبکه، کمبود توان توسط شبکه سراسری و در هنگام عمل کرد جزیره ای نیز کمبود توان توسط ذخیره سازهای انرژی، جبران می گردد. در هنگام عمل کرد به صورت متصل به شبکه ذخیره ساز انرژی هیچ عمل شارژ یا دشارژی انجام نمی دهد و تنها در صورتی که ولتاژ باس DC بیشتر از محدوده مجاز یا ۳۶۰ ولت بشود، توان اضافی روی باس DC را در خود ذخیره می نماید.

هنگامی که خطایی در شبکه سراسری رخ دهد، سیستم مبدل واسط میان شبکه و میکروگرید را قطع می نماید. در این شرایط ولتاژ باس DC افت می کند و هنگامی که ولتاژ به کمتر از ۳۲۰ ولت برسد، سیستم ذخیره ساز انرژی با تزریق توان به باس DC ولتاژ باس را به مقدار نامی خود (۳۴۰ ولت) می رساند.

برای اتصال مجدد به شبکه سراسری، پس از برطرف شدن خطا، یک حلقه قفل فاز، فاز شبکه سراسری را تشخیص می دهد و کنترل ولتاژ باس DC دوباره بر عهده مبدل واسط شبکه قرار می گیرد و تنها در صورت اضافه بار، ذخیره ساز انرژی شروع به شارژ شدن مینماید.

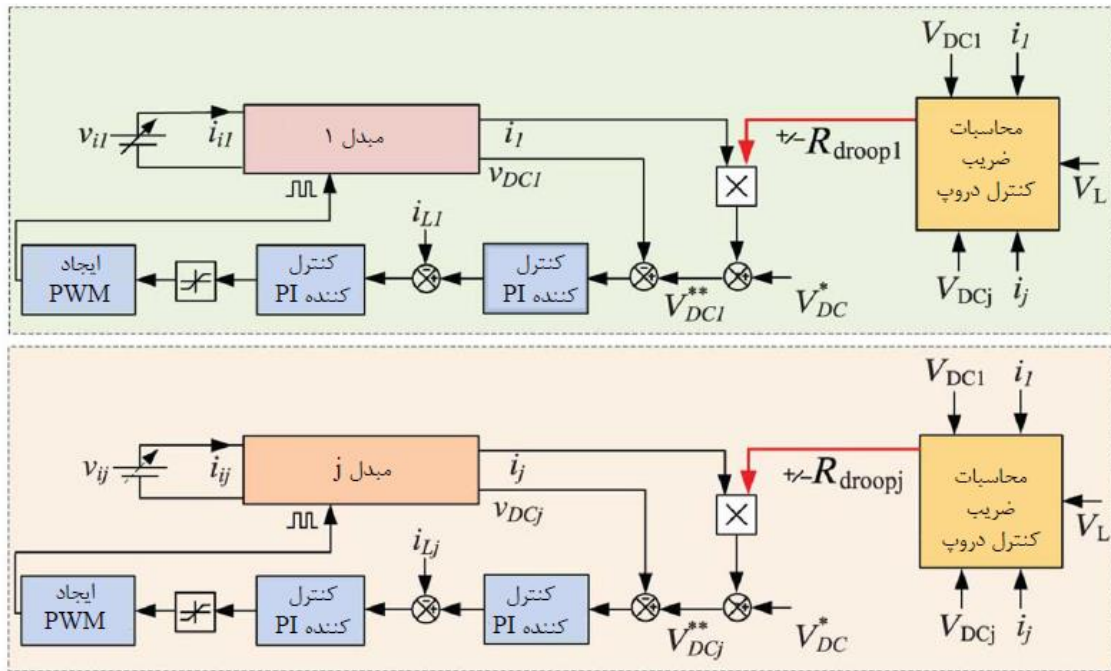


شکل 2-20- مفهوم میکروگرید DC دوقطبی ولتاژ پایین.

میکروگرید DC وسیله ای موثر برای ادغام منابع تولید پراکنده مختلف، واحدهای ذخیره سازی انرژی و بارهای DC فراهم می کند. مرجع (۶۰) یک روش جدید کنترل تطبیقی برای میکرو گریدهای DC ارائه نموده است که مدیریت دقیق جریان و تنظیم ولتاژ قابل قبولی وابسته به شرایط بار دارد. در شرایط بار کم که در آن جریان خروجی از واحدهای تولید پراکنده حداکثر هستند، دقت فرآیند جریان یک مسئله اساسی نمی باشد و با افزایش بار و تحت شرایط بار سنگین این مسئله ضرورت می یابد. این مقاله به بررسی کنترل دروپ جهت استفاده در میکروگرید پیشنهادی پرداخته شده است. مشکلات این کنترل در تنظیم ولتاژ در شرایط بار سنگین، دقت مدیریت جریان، افزوده شدن یک مقاومت مجازی ناشی از کنترل دروپ و کاهش بهره وری سیستم مورد بحث قرار گرفته است. برای کاهش ضریب کنترل دروپ در بارهای سنگین و افزایش بهره وری و حل مشکلات اشاره شده، لازم است نمودار مربوط به کنترل دروپ، به جای یک خط، تبدیل به منحنی شود. مرجع [۶۱] تقسیم بار و جریان گردشی در مبدلهای DC-DC که به صورت موازی به میکروگرید DC ولتاژ پایین متصل شده اند، تحلیل نموده است. معایب اصلی روش کنترل دروپ، مدیریت نسبتاً ضعیف بار میان منابع و افت ولتاژ شبکه در DC است. جریان گردشی نیز بر اثر عدم تطابق در ولتاژ خروجی مبدل ها نیز بوجود می آید.

از تجزیه و تحلیل مربوط به مسائل تقسیم بار و جریان های گردشی میان مبدل ها در میکروگریدهای DC ، می توان مشاهده کرد که به اشتراک گذاری بار توسط ولتاژ خروجی از هر مبدل و مقاومت کابل آن تعیین می شود. از تجزیه و تحلیل موجود در این قسمت، می توان نتیجه گرفت که به تقسیم بار، توسط ولتاژ خروجی هر مبدل و مقاومت کابل آن تعیین می شود.

پارامتری به نام R_{Droop} جهت تقسیم بار میان مبدلها، تشریح شده است و این مقاومت در شیوه کنترلی پیشنهادی به کار رفته است. دیاگرام کنترلی پیشنهادی در شکل (۲-۱۸) نشان داده شده است. با این استراتژی کنترلی، تقسیم بار میان منابع به درستی انجام می پذیرد و جریان گردش گاهش می یابد و ولتاژ بار بهبود پیدا می کند.



شکل 2-21- دیاگرام بلوکی کنترل مبدل های موازی با محاسبات Roron ارائه شده در مرجع (۶۱).

مرجع [۴] یک سیستم آزاد تبادل انرژی را معرفی کرده است که در آن در هر خانه یک نانوگرید DC موجود است و این نانوگریدها از طریق یک میکروگرید با یکدیگر ارتباط دارند. نانوگریدهای هر خانه شامل پنل خورشیدی و باتری است. انرژی مازاد هر نانوگرید از طریق میکروگرید به نانوگریدهای دیگر انتقال می یابد. این مرجع با معرفی ساختاری جدید در صدد بهینه سازی پایداری واحدهای تولید پراکنده که تولید آنها وابسته به شرایط محیطی است، می باشد.

در ابتدا مفهوم سیستم تبادل انرژی آزاد^۱ معرفی شده است. این سیستم در شکل (۲-۱۹) نمایش داده شده است. مفهوم سیستم تبادل انرژی آزاد بر اساس نانوگریدهای موجود در هر خانه و میکروگرید واسط میان آنها تعریف گردیده است.

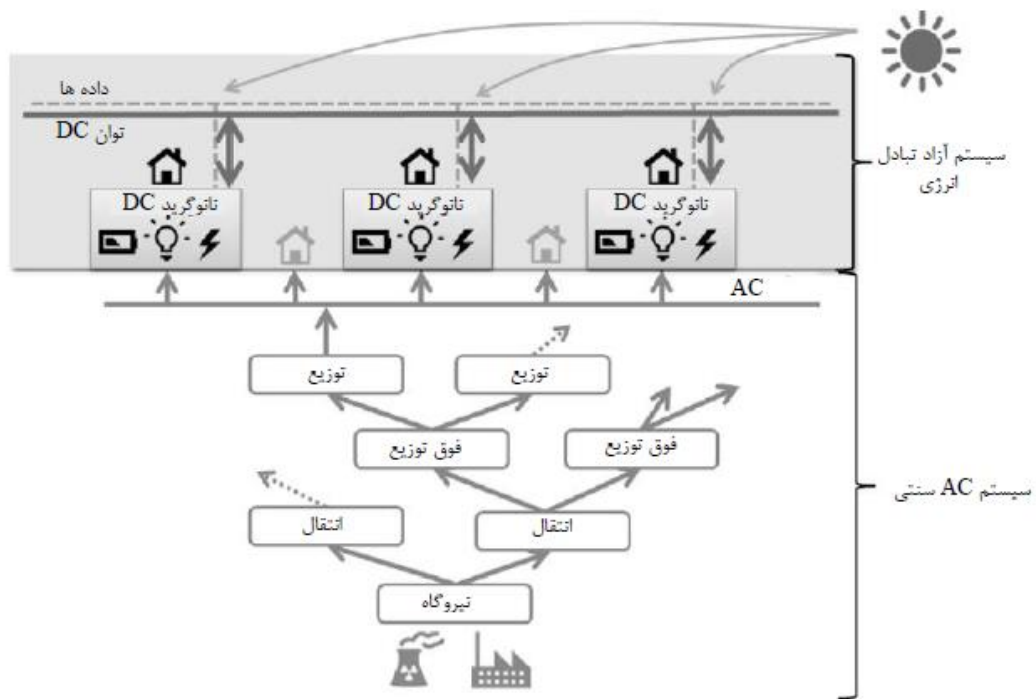
علت انتخاب ولتاژ DC به جای AC، ترکیب آسان تر دو توان به خاطر عدم وجود کنترل فرکانس و فاز، انتقال توان موثرتر و با بهره وری بالا به دلیل عدم وجود راکتانس، اتصال آسان منابع تولید پراکنده با ولتاژ DC و هم چنین افزایش بهره وری فن آوری های تبدیل ولتاژ DC می باشد.

¹ Open Energy System

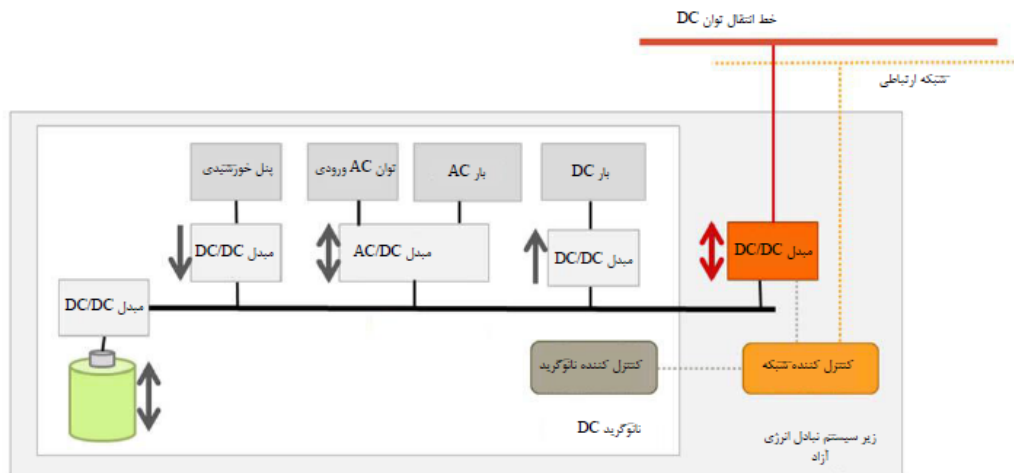
اجزای این سیستم شامل منابع انرژی DC و AC باتری ها، بارهای AC و DC مبدل‌های دوسویه، کنترل کننده های شبکه و خطوط تبادل توان DC می باشد. شکل (۲-۲۰)، نشان دهنده سیستم مورد مطالعه در این مرجع می باشد. این سیستم هم چنین دارای قابلیت توسعه و تعمیم نیز می باشد و با افزایش تعداد نانوگریدها می توان میکروگرید بزرگتری را تحت کنترل در آورد. با استفاده از یک کنترل کننده شبکه، امکان دسترسی و کنترل تمامی اجزا فراهم فراهم می شود. تبادل دوسویه توان در نانوگریدها در این شیوه در نظر گرفته شده است. مدیریت توان بر اساس وضعیت شارژ باتری انجام می گیرد که این استراتژی تبادل در جدول (۲-۲) آورده شده است. بر اساس استراتژی تبادل توان، در ارتباط با پذیرش یا عدم پذیرش معامله توانی، تصمیم گیری می شود.

جدول (۲-۲) استراتژی تبادل توان در سیستم آزاد انرژی

وضعیت باتری	استراتژی اتخاذ شده
شارژ: $SOC < 10\%$	شروع به تبادل توان
دشارژ $SOC > 70\%$	
شارژ: $SOC < 40\%$	توقف تبادل توان
دشارژ $SOC > 30\%$	



شکل 2-22- سیستم آزاد تبادل انرژی به عنوان یک میکروگیرید DC



شکل 2-23-2-نانوگرید DC مورد مطالعه در مرجع [۴].

در مرجع [۶۲] استراتژی کنترل غیر متمرکز حالت انطباقی^۱ برای مدیریت توان یک میکروگرید DC با چند منبع تولید پراکنده تجدیدپذیر و سیستم های ذخیره ساز انرژی ارائه شده است. در راه حل ارائه شده، ولتاژ باس DC نه تنها برای فعال کردن به اشتراک گذاری توان میان منابع مختلف، بلکه به منظور تعیین حالت عمل کرد میکروگرید و تسهیل انتقال از مدی به مد دیگر، استفاده شده است. با این شیوه عملکرد تطبیقی حالت، آزادی کنترل بیشتری در کنترل ولتاژ باس DC در مقایسه با کنترل دروپ معمولی می توان به دست آورد. از همه مهمتر، در این شیوه تنظیم مبدل ها خود به خود و بدون نیاز به مرکز کنترل، انجام می یابد. بنابراین، قابلیت اطمینان و انعطاف پذیری افزایش می یابد. انواع مختلف مبدل ها، از جمله مبدل های DC-DC افزاینده برای پیل های خورشیدی، مبدل های دو سویه برای باتری ها، مبدل های AC-DC برای توربین های بادی و شبکه سراسری، در سطح سیستمی، بررسی شده اند. در واحد تنظیم خروجی و تنظیم باس DC مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته اند. بر اساس دیدگاه این بخش، یک عمل کرد بسیار مهم کنترل غیر متمرکز میکروگرید، اختصاص وظیفه تنظیم باس به منابع مختلف بر اساس شرایط گوناگون، با هدف بهینه سازی پخش توان می باشد. استراتژی کنترل ارائه شده نیز به این صورت است که به منظور افزایش انعطاف پذیری میکروگرید DC، هدف کنترلی هر یک از خروجی ها، لازم است به طور خودکار و بر اساس شرایط، تنظیم شود. استراتژی کنترلی، با استفاده از ولتاژ باس DC حالت عمل کرد میکروگرید را تشخیص می دهد. جدول (2-3) نشان دهنده ویژگی های هر یک از حالات عمل کردی می باشد.

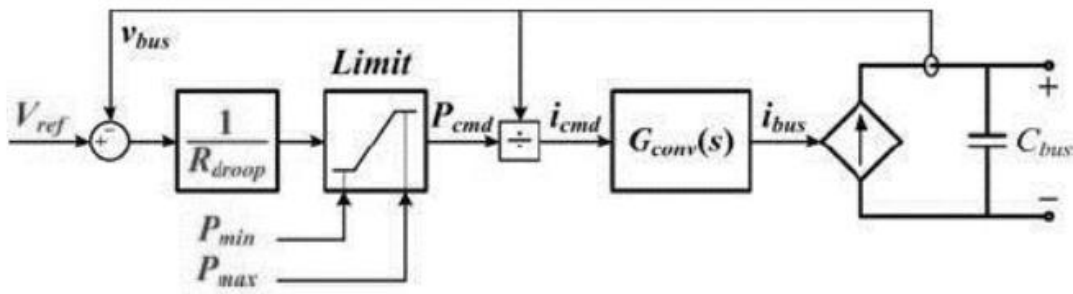
جدول (2-3) خلاصه های از حالات عمل کردی و ویژگی های آنها

حالت عمل کرد	ویژگی های توانی	محدوده ولتاژ	باس تنظیم
تسلط شبکه سراسری اول (مد اول)	$P_{load} + P_{ac} - P_{DG} > P_{ECS_dsc}$	$V_{low} < V_{bus}$	شبکه سراسری
تسلط ذخیره ساز انرژی (مد دوم)	$P_{ESS_ch} < P_{load} + P_{ac} - P_{DG} < P_{ECS_dsc}$	$V_{bus} < V_{high} < V_{low}$	باتری ها
تسلط منابع تولید پراکنده (مد سوم)	$P_{DG} - P_{load} - P_{ac} > P_{ESS_ch}$	$V_{bus} > V_{high}$	منابع تولید پراکنده

یک روش بهبودیافته کنترلی نیز معرفی شده است و از ویژگی ولتاژ توان (P-V) به منظور اهداف کنترلی استفاده شده است. الگوریتم کنترلی برای یافتن رابطه P-V در شکل (۲-۲۱) نشان داده شده

¹ Mode-Adaptive Decentralized Control Strategy

است و بر اساس نتیجه این الگوریتم و پارامترهای کنترلی از جمله R_{droop} ، مکان و شکل منحنی $P.V$ مشخص می گردد.



شکل 2-24- الگوریتم کنترلی برای منحنی دروپ وابسته به حالت ارائه شده در مرجع [۶۲].

در مقاله [۶۳] یک استراتژی کنترل توزیع شده واحد¹ و یکپارچه برای حالت های عمل کرد میکروگرید DC بدون نیاز به علامت ولتاژ باس DC و یا تشخیص حالت عمل کرد که به طور معمول برای استراتژی های کنترل غیر متمرکز مورد نیاز است، پیشنهاد می کند. استراتژی کنترل ارائه شده، بر اساس ادغامی از کنترل توزیع شده برای حفظ تعادل انرژی بین سیستم های ذخیره ساز انرژی میکروگرید DC، با کنترل توزیع شده برای تنظیم ولتاژ باس DC میکروگرید و یک شیوه جدید برای کنترل مبدل متصل به شبکه سراسری، طراحی شده است. تحت استراتژی کنترل پیشنهادی، انتقال حالت بین حالت های عمل کردی میکروگرید، بدون وقفه، حاصل می گردد. این حالات عمل کرد شامل کارکرد به صورت متصل به شبکه با یک سوساز مسئول تعادل بار، کارکرد به صورت متصل به شبکه با یک سوساز مسئول شارژ سیستم های ذخیره انرژی و عمل کرد جزیره ای، می باشد. در تمام حالات عمل کرد، متوسط ولتاژ باس DC میکروگرید بر اساس ولتاژ مرجع تنظیم و سیستمهای ذخیره ساز انرژی به طور مستقل از حالت عمل کرد، کنترل می شود.

دیگرام کنترلی برای سیستم ذخیره ساز انرژی باتری و یکسوساز متصل به شبکه سراسری در شکل (۲۲۲) ارائه گردیده است.

4-2-پیشینه پژوهش

با توجه به افزایش بار الکتریکی در سراسر جهان، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، ترکیب نفوذ تولیدات تجدیدپذیر در مقیاس بزرگ و ترکیب فناوری‌های ارتباطی، سیستم‌های قدرت مدرن به سمت شبکه‌های اکتیو هوشمند می‌روند. ریزشبکه‌ها (MGs) معمولاً بصورت یک گروه غیرمتمرکز از منابع انرژی محلی، تقاضای بار² و سیستم های ذخیره انرژی در نظر گرفته می شوند که منابع انرژی تجدیدپذیر و غیر قابل تجدید را یکپارچه می کنند [1,2]. MG ها انعطاف پذیری، انعطاف پذیری،

¹ Unified Distributed Control Strategy

² load demands

قابلیت اطمینان و کیفیت توان سیستم های قدرت را بهبود می بخشد. همچنین یکی از راه حل های اصلی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه ای هستند [3].

نفوذ بالای منابع انرژی تجدیدپذیر (RESS) در سیستم های توزیع به دلیل نوسانات و تصادفی بودن واحدهای غیرقابل کنترل (مانند توربین های بادی و فتوولتائیک) چالش های جدیدی را ایجاد می کند. برخی از کارهای تحقیقاتی سیستم های ذخیره انرژی باتری (BESSs) را برای بهبود کارایی منابع انرژی تجدیدپذیر در سیستم های توزیع یکپارچه می کنند [4-6]. هماهنگی بهتر و دقیق تر استفاده از منابع انرژی، کاهش هزینه های بهره برداری، کاهش میزان کاهش بار، افزایش قابلیت اطمینان، کاهش اثرات زیست محیطی و پیشرفت های اقتصادی و فنی MG ها باعث اتصال MG ها به یکدیگر شده است. بنابراین، مفهوم MG های شبکه ای معرفی شده بود [7،8].

MG های شبکه ای به عنوان خوشه ای از MG ها تعریف شده اند که در مجاورت مکانی¹ یکدیگر قرار دارند و می توانند انرژی را با هم تبادل کنند [9]. حرکت به سمت مدیریت کارآمد انرژی در MG های شبکه ای منجر به ظهور اجماع ریزشبکه² (MGC) شده است. همانطور که در شکل 1 نشان داده شده است، یک MGC از حداقل دو دستگاه MG و MG در سطح مجموعه (MCLD) تشکیل شده است که مستقیماً به شبکه بالادستی متصل هستند. میکروتوربین مجموعه³ (CMT)، سیستم ذخیره انرژی باتری مجموعه⁴ (CBESS)، منابع انرژی تجدیدپذیر مجموعه، و بارهای الکتریکی مجموعه عناصر اصلی MCLD ها هستند [10].

در مقایسه با شبکه های توزیع، MG های تحت شبکه قابلیت مدیریت انرژی محدودی دارند. تفاوت های اصلی بین MG های بهم متصل و شبکه های توزیع شامل توپولوژی، ساختار کنترل، سیستم مدیریت انرژی، جلوگیری از گسترش خطا از یک قسمت شبکه به قسمت دیگر، مسیریابی بار و افزایش قابلیت اطمینان می باشد. همچنین مقیاس MG های تحت شبکه کمتر از توزیع است. شبکه ها برخلاف شبکه های توزیع، MG های شبکه شده را می توان به صورت جزیره ای کار کرد. لازم به ذکر است که یک شرکت خصوصی می تواند MG های متصل به هم را تشکیل دهد، در حالی که اپراتور سیستم توزیع (DSO) مسئول عملیات شبکه توزیع است [11].

بیشتر کارهای تحقیقاتی بر زمان بندی حالت متصل به شبکه MG های شبکه متمرکز شده اند. نویسندگان در [12] یک استراتژی مدیریت انرژی بهینه مبتنی بر بهینه سازی مقاوم برای عملکرد یک MG با در نظر گرفتن ماهیت نامشخص تولید تجدیدپذیر ارائه کردند. دو و همکاران در [13] یک بازی مشترک برای به حداقل رساندن هزینه عملیات سیستم های چند ریزشبکه در حالت متصل به شبکه پیشنهاد کرد. با این حال، رفتار نامشخص تولید انرژی های تجدیدپذیر و نقش سیستم های ذخیره انرژی باتری نادیده گرفته شده بود. وانگ و همکاران در [14] مدیریت انرژی ترکیبی و غیرمتمرکز MG های شبکه شده را در حالت متصل به شبکه مقایسه کرد. این مقایسه ناعادلانه انجام شده بود زیرا تعداد

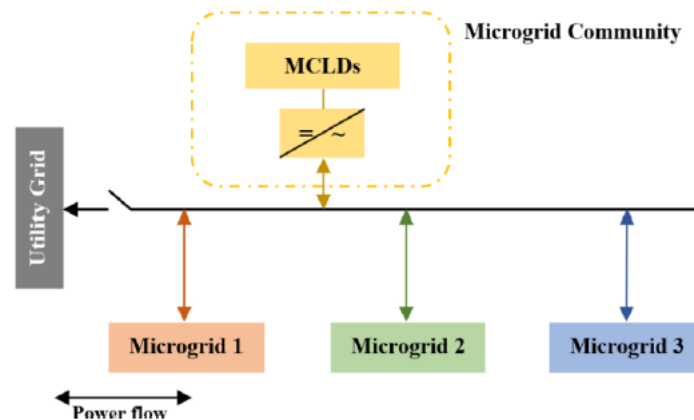
¹ spatial vicinity

² microgrid community

³ community microturbine

⁴ community battery energy storage system

دستگاه های موجود در دو طرح یکسان نبود. بيو و همکاران در [15] مفهوم توان قابل تنظیم را برای بهبود انرژی انتقالی در بین ریزشبكة ها در حالت متصل به شبکه معرفی کرد.



شکل 2-25-نمای یک MGC.

اگرچه نقش سیستم های ذخیره انرژی باتری مورد مطالعه قرار گرفته بود، ماهیت نامشخص تولید انرژی تجدیدپذیر و بارهای تقاضا در نظر گرفته نشد. با این حال، تاثیر برنامه های پاسخ به تقاضا بر ظرفیت بهینه سیستم های ذخیره انرژی باتری و انرژی هدر رفته مورد بررسی قرار نگرفت. در [10]، تیان و همکاران. مدیریت انرژی سلسله مراتبی را برای عملیات اقتصادی یک MGC متصل به شبکه و حالت های مختلف جزیره ای ارائه کرد. در حالت عملیات جزیره ای، MG ها از قطع شدن MGC از شبکه بی اطلاع هستند. MG ها توان های مازاد و کمبود توان را به MGC اطلاع می دهند و انرژی را بین خود و MGC مبادله می کنند.

بنابراین، اگر MGC نتواند انرژی را با شبکه بالادستی در دوره هایی که مازاد توان زیاد است معامله کند، انرژی تلف شده در MGC افزایش می یابد. در نتیجه هزینه های بهره برداری و آلودگی محیط زیست افزایش می یابد [10]. با این وجود، اثرات ماهیت نامشخص RES و برنامه های پاسخ به تقاضا (DRPs) مورد بررسی قرار نگرفت. از سوی دیگر، برخی از کارهای تحقیقاتی بر روی عملکرد ریزشبكة ها در حالت جزیره ای متمرکز شده بود. در [16]، یک مدل توزیع هماهنگ انرژی بهینه برای یک ریزشبكة چند انرژی در حالت های متصل به شبکه و حالت جزیره ای بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت ها پیشنهاد شد. در [17]، نویسندگان یک مدل بهینه سازی مقاوم برای تعیین توزیع بهینه یک ریزشبكة در هر دو حالت متصل به شبکه و حالت جزیره ای ارائه کردند.

با این حال، نقش یک برنامه پاسخ تقاضای مبتنی بر قیمت و سیستم های ذخیره انرژی باتری مورد مطالعه قرار نگرفت. یک چارچوب برنامه ریزی انرژی غیرمتمرکز در [18] برای افزایش قابلیت اطمینان در حالت جزیره ای پیشنهاد شده بود. حسین و همکاران مدیریت انرژی تودرتو با اولویت بندی بارهای الکتریکی برای MG های شبکه شده برای به حداقل رساندن هزینه عملیاتی سیستم در حالت های متصل به شبکه و حالت جزیره ای پیشنهاد شده است [19]. همچنین، در [20]، نویسندگان هزینه عملیات را در حالت های متصل به شبکه و حالت جزیره ای به حداقل رساندند، در حالی که حریم

خصوصی MGs و هزینه انرژی انتقالی¹ محلی نادیده گرفته شده بود. هنگامی که MGs با هم همکاری می کنند، حفظ حریم خصوصی بسیار مهم می شود. در مدیریت متمرکز انرژی، اپراتور به مشخصات بار مصرف کنندگان و ویژگی های واحدهای تولید برق نیاز دارد. اطلاعات مورد نیاز حریم خصوصی ریزشبهه ها را از بین می برد [21].

حسین و همکاران [22] بر تخصیص مقدار کاهش بار در سیستم های چند ریزشبهه ای توسط یک چارچوب پاداش مبتنی بر تلاش² برای تعریف سهم ریزشبهه ها بر اساس ظرفیت آنها متمرکز شد. در مدل پیشنهادی، مدیریت انرژی تکی ریزشبهه ها توسط سیستم مدیریت انرژی محلی (MEMS) انجام شده است. همچنین، سیستم مدیریت انرژی مجموعه (CEMS) مسئول مدیریت اشتراک توان بین ریزشبهه ها است. با این وجود، مدل پیشنهادی فرصت زمان بندی مجدد را برای ریزشبهه برای کاهش هزینه های عملیاتی و مقدار انرژی تلف شده فراهم نمی کند. همچنین کارایی برنامه های پاسخگویی به تقاضا بر روی مدل پیشنهادی مورد مطالعه قرار نگرفت.

در چارچوب های مدیریت انرژی ترکیبی، MG ها می توانند بین یکدیگر و MGC تبادل نیرو کنند. در مدل های سلسله مراتبی [10] و [14]، توان مازاد و کمبود توان به EMS-MGC ارسال شد.

با این حال، MG ها می توانند با استفاده از مفهوم توان قابل تنظیم از تبادل انرژی غیر ضروری با شبکه بالادستی و هدر رفتن انرژی جلوگیری کنند. در حالت جزیره ای، بخشی از انرژی برای ایجاد تعادل در عرضه و تقاضا رها می شود که به آن اتلاف انرژی می گویند. بنابراین لازم است هزینه انحراف انرژی (به دلیل اتلاف انرژی) در تابع هدف در نظر گرفته شود [16].

¹ local transactive energy

² effort-based reward framework

فصل سوم روش تحقیق

1-3 بیان مسئله

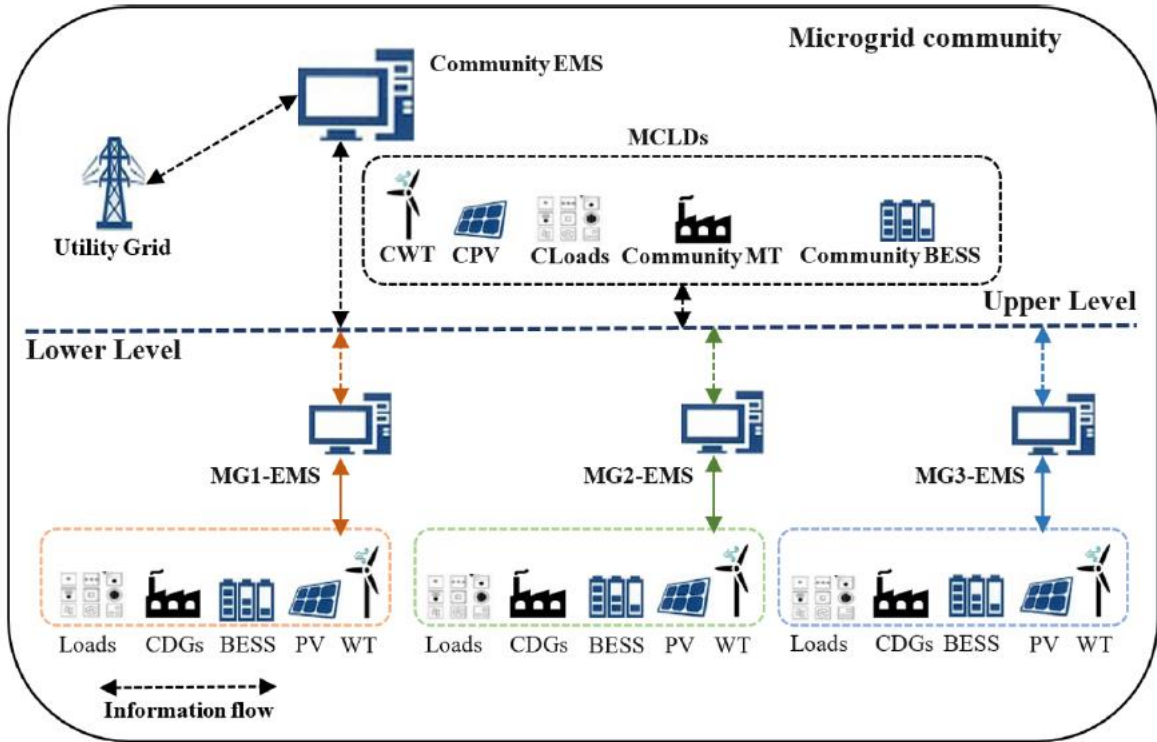
ساختار سیستم ریزش شبکه شبکه، اجزاء و استراتژی زمان بندی انرژی پیشنهادی در این بخش توضیح داده شده است. سیستم مورد مطالعه از چهار MG تشکیل شده است که یکی از آنها به عنوان MGC در نظر گرفته شده است تا مقایسه ای منصفانه با سایر آثار مرتبط ارائه شود. ما منابع مختلف قابل کنترل (مانند میکروتوربین ها و سلول های سوختی)، سیستم های ذخیره انرژی باتری و منابع انرژی تجدیدپذیر (فتوولتائیک و توربین بادی) را برای تامین بار الکتریکی در ریزش شبکه ها یکپارچه می کنیم. همچنین، میکروتوربین مجموعه، سیستم ذخیره انرژی باتری مجموعه، منابع انرژی تجدیدپذیر مجموعه، و بارهای الکتریکی مجموعه در MGC در نظر گرفته شده اند [10].

سیستم های ذخیره انرژی باتری و برنامه های پاسخگویی به تقاضا نقش مهمی در افزایش انعطاف پذیری دارند. سیستم ذخیره انرژی باتری برای افزایش زمان در دسترس بودن RES و ذخیره انرژی مازاد استفاده می شود. همچنین، برنامه های پاسخ به تقاضا (DRP) میزان کاهش بار را کاهش می دهند، فرصت صرفه جویی در هزینه ها و حفظ تعادل در سیستم توزیع را با تغییر بار و کاهش اختیاری فراهم می کنند. کاهش هزینه و حفظ قابلیت اطمینان سیستم در سطوح قابل قبول از اهداف اصلی مدیریت انرژی در حالت جزیره ای است. MG های شبکه ای متشکل از MG هایی هستند که از نظر جغرافیایی به یکدیگر نزدیک هستند و می توانند برای دستیابی به برخی اهداف با یکدیگر همکاری کنند [9]. حفظ ارتباط بین MG ها برای افزایش پایداری سیستم در مقایسه با مدیریت انرژی غیرمتمرکز یکی از مزایای MGC در حالت جزیره ای است. برخلاف مدیریت متمرکز انرژی، مدیریت انرژی ترکیبی دارای یک سطح از حریم خصوصی است. در یک سیستم مدیریت انرژی متمرکز، در صورت تخریب EMS مرکزی (C-EMS)، انعطاف پذیری و قابلیت اطمینان سیستم از بین می رود. با توجه به معایب و کاستی های هر دو استراتژی مدیریت انرژی متمرکز و غیر متمرکز، یک استراتژی مدیریت انرژی ترکیبی پیشنهاد شده است که ترکیبی از هر دو مدیریت انرژی متمرکز-غیرمتمرکز است [19].

مطابق شکل 2، MG ها در MGC با یکدیگر تعامل نزدیک دارند. MG ها صاحبان متفاوتی دارند که ممکن است اهداف متفاوتی برای تعامل داشته باشند. در سیستم مدیریت انرژی هیبریدی، MG ها منابع محلی خود را به صورت موازی (بدون آگاهی از سایر MG ها) بهینه می کنند. در مدیریت انرژی پیشنهادی، سطح بالا و سطح پایین به ترتیب بر مدیریت MCLDs و MGs متمرکز شده اند. انعطاف پذیری و هزینه های عملیاتی استراتژی مدیریت انرژی هیبریدی بهتر از استراتژی های متمرکز و غیرمتمرکز است. مزایای بیشتر MGC را می توان در [10] یافت.

این مقاله برنامه ریزی روز آینده MG های جزیره ای را پوشش می دهد که از دو سطح تشکیل شده است. در سطح پایین تر، یک زمان بندی عملیات مستقل انجام می شود که هر MG هدف خود را بهینه می کند. عدم قطعیت های RES و تقاضای بار الکتریکی در این سطح در نظر گرفته می شود. وضعیت تعهد CDG ها، وضعیت شارژ/دشارژ BESS، مشارکت DR، مقادیر مازاد و کمبود توان، و محدوده توان قابل تنظیم، در این سطح تعریف شده است. مازاد و کمبود انرژی، محدوده توان قابل تنظیم و هزینه نهایی واحدهای CDG پس از بهینه سازی سطح پایین به EMS-MGC ارسال شده است. هنگامی که MGC از شبکه اصلی جدا می شود، MGC به حفظ اتصالات بین MG ها ادامه می دهد.

سطح بالا بر هماهنگی بین MG ها و MCLD ها برای کاهش کل هزینه عملیاتی MG های شبکه شده متمرکز است. مشابه سطح پایین تر، عدم قطعیت های RES و بارهای الکتریکی در این سطح در نظر گرفته شده است. وضعیت تعهد میکروتوربین مجموعه، وضعیت شارژ/دشارژ سیستم ذخیره انرژی باتری مجموعه، میزان ریزش بار، و مقدار بهینه توان های قابل تنظیم توسط MGC در سطح بالایی تعیین شده است. پس از انجام بهینه سازی سراسری در سطح بالایی سطح EMS-MGC اطلاعات را به MCLD ها و هر EMS-MG ارسال می کند. با توجه به نتایج بهینه سازی سراسری، MG ها زمان بندی اولیه خود را اصلاح می کنند، در حالی که MG ها مقدار توان قابل تنظیم را در برنامه ریزی روز آینده در نظر می گیرند. توان های قابل تنظیم، تولید CDG را با توجه به هزینه نهایی منابع قابل ارسال در سایر MG ها و MGC تغییر می دهند.



شکل 3-1- ساختار ریزشبکه های متصل بهم.

3-2- مدل ریاضی

برنامه ریزی انرژی MG های شبکه ای در حالت جزیره ای به عنوان MILP فرموله شده است. هدف مسئله بهینه سازی، به حداقل رساندن هزینه سیستم مورد مطالعه با توجه به محدودیت های فنی است.

3-2-1- پنل های فتوولتائیک

تولید توان PV ها به صورت (1) [23] محاسبه می شود:

$$P_{t,i}^{PV} = N^{PV} \eta_i^{PV} S_i^{PV} \Phi_{t,i} (1 - 0.005(T_{t,i} - 25)) \quad (1)$$

3-2-2- توربین های بادی

توان خروجی توربین های بادی به صورت (2) [24] تعیین می شود:

$$P_{t,i}^{WT} = \begin{cases} 0, & \text{if } v_t \leq v_w^{ci} \text{ or } v_t \geq v_w^f, \\ P_w^r \frac{v_t - v_w^{ci}}{v_w^r - v_w^{ci}}, & \text{if } v_w^{ci} \leq v_t \leq v_w^f, \\ P_w^r, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

3-2-3- ژنراتورهای توزیع شده قابل کنترل (CDG)

میکروتوربین‌ها و پیل‌های سوختی به‌عنوان منابع قابل کنترل در نظر گرفته می‌شوند و هزینه‌های عملیاتی آنها مطابق با (3)-(4) [23] به عنوان تابع خطی فرموله می‌شود:

$$C_{t,i}^{CDG} = a_j^{CDG} \cdot P_{t,j}^{CDG} \quad (3)$$

$$a_j^{CDG} = \frac{C_{ng}}{L_{ng}\eta_j^{CDG}} \quad (4)$$

محدودیت‌های زیر برای عملکرد CDG ها اعمال شده است:

$$\underline{P}^{CDG} \cdot X_{t,j}^{CDG} \leq P_{t,j}^{CDG} \leq \overline{P}^{CDG} \cdot X_{t,j}^{CDG}; X_{t,j}^{CDG} \in \{0,1\} \quad (5)$$

$$X_{t,j}^{SU} + X_{t,j}^{SD} \leq 1; X_{t,j}^{SU}, X_{t,j}^{SD} \in \{0,1\} \quad (6)$$

$$X_{t,j}^{CDG} - X_{t-1,j}^{CDG} = X_{t,j}^{SU} - X_{t,j}^{SD} \quad (7)$$

معادله (5) محدودیت‌های تولید برق را برای CDG ها نشان می‌دهد. معادله (6) نشان می‌دهد که واحد CDG نمی‌تواند به‌طور همزمان راه‌اندازی و خاموش شود. در نهایت، رابطه بین متغیرهای باینری در معادله ارائه شده است. (7).

3-2-4- سیستم‌های ذخیره انرژی باتری

BESS ها انرژی را در دوره‌های خارج از پیک ذخیره می‌کنند تا انرژی ذخیره شده را در دوره‌های اوج به سیستم وارد کنند. هزینه‌های عملیاتی و نگهداری سیستم‌های ذخیره انرژی باتری را می‌توان به صورت تابع خطی به صورت (8) [16,25] فرموله کرد:

$$C_t^{ES} = K_{O\&M}^{ES} \cdot P_t^{ES,Dis} \cdot \Delta t + K_{O\&M}^{ES} \cdot P_t^{ES,Chr} \cdot \Delta t + K_{O\&M}^{ES} \cdot E_t^{ES} \cdot \eta^L \cdot \Delta t \quad (8)$$

با توجه به اینکه هر MG مالک واحدهای تولید محلی و BESS است، هزینه بهره‌برداری از آنها مستقیماً به MGها تحمیل می‌شود. به عبارت دیگر، BESSها واحدهای مستقلی نیستند و نیازی به دریافت پاداش برای صرفه‌جویی در هزینه نیست. سیستم ذخیره انرژی باتری باید محدودیت‌های زیر را برآورده کند:

$$E_{t+1}^{ES} + E_t^{ES} - P_t^{ES,Dis} \cdot \Delta t / \eta^{ES,Dis} + P_t^{ES,Chr} \cdot \Delta t \cdot \eta^{ES,Chr} - E_t^{ES} \cdot \eta^L \cdot \Delta t \quad (9)$$

$$\underline{SOC} \leq SOC_t \leq \overline{SOC} \quad (10)$$

$$SOC_t = E_t^{ES} / E_R^{ES} \quad (11)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_t^{ES,Dis} \leq X_t^{ES,Dis} \cdot \overline{P_{ES,Chr}} \\ 0 \leq P_t^{ES,Chr} \leq X_t^{ES,Chr} \cdot \overline{P_{ES,Chr}} \end{cases} \quad (12)$$

$$X_t^{ED,Dis} + X_t^{ES,Chr} \leq 1; X_t^{ES,Dis}, X_t^{ES,Chr} \in \{0,1\} \quad (13)$$

$$E_t^{ES} = E_{IND}^{IS} \text{ if } t = 1 \quad (14)$$

$$E_t^{ES} \geq E_{IND}^{IS} \text{ if } t = T \quad (15)$$

که در آن، SOC_t وضعیت شارژ BESS است. معادله (۹) وضعیت پویایی شارژ BESS را تعریف می‌کند. محدودیت های وضعیت شارژ BESS در معادلات (۱۰) تا (۱۲) ارایه شده‌اند. معادله (۱۳) از شارژ و تخلیه همزمان BESS ممانعت می‌کند. معادلات (۱۴) و (۱۵) به ترتیب مقدار انرژی اولیه و نهایی BESS را نشان می‌دهند.

3-2-5- مدل سازی هزینه O&M

هزینه O&M هر واحد توسط معادلات (16) تا (19) فرموله شده است [10]:

$$C_t^{O\&M,WT} = K_{O\&M}^{WT} \cdot P_t^{WT} \quad (16)$$

$$C_t^{O\&M,PV} = K_{O\&M}^{PV} \cdot P_t^{PV} \quad (17)$$

$$C_t^{O\&M,CDG} = K_{O\&M}^{CDG} \cdot P_t^{CDG} \quad (18)$$

$$C_t^{Total+O\&M} = C_t^{O\&M,WT} + C_t^{O\&M,PV} + \sum_{j=1}^2 C_t^{O\&M,CDG} \quad (19)$$

که در آن $C_t^{Total-OM}$ هزینه کل O&M واحدها است.

3-2-6- برنامه های پاسخ به تقاضا

بارهای وقفه پذیر¹(ILها): بیشتر برنامه های کاهش بار در حالت عملیات جزیره ای به منظور افزایش پایداری و تغذیه بارهای حیاتی به صورت کاهش داوطلبانه انجام می شوند. پاداش کاهش داوطلبانه و کران های بارهای وقفه پذیر به ترتیب در (۲۰) و (۲۱) نشان داده شده اند.

$$C_t^{LL} = d^{LL} \cdot P_t^{LL} \quad (20)$$

$$0 \leq P_t^{LL} \leq P_t^{Inflex} \quad (21)$$

MG ها قرارداد را با توجه به پروفایل بار خود با مصرف کنندگانی که مایل به شرکت در برنامه بارهای وقفه پذیر هستند، امضا می کنند. حداقل و حداکثر کران، قیمت های تشویقی، و مقدار ساعت مجاز برای بارهای وقفه پذیر در این قرارداد مشخص شده است. اطلاعات بیشتر در مورد انواع برنامه های بار قطع شدنی را می توان در [۲۶] یافت.

- بارهای قابل کنترل²(CLS): MGها می توانند در برنامه های پاسخ به تقاضای مبتنی بر قیمت (PBDRP) شرکت کنند تا بخشی از تقاضاهای خود را به دوره های خارج از پیک منتقل کنند.

فرمول بندی ریاضی DRP های قابل انتقال در (۲۲) تا (۲۵) ارائه شده است:

$$P_t^{Flex} = (1 - DR_t) \cdot P_t^B + Ldr_t \quad (22)$$

$$\sum_{t=1}^T Ldr_t = \sum_{t=1}^T DR_t \cdot P_t^B \quad (23)$$

$$DR^{Min} \leq DR_t \leq DR^{Max} \quad (24)$$

$$P_t^{Load} = P_t^{Flex} + P_t^{Inflex} - P_t^{LL} \quad (25)$$

معادله (۲۲) پروفایل بار را پس از مشارکت در PBDRP نشان می دهد. معادله (۲۳) تضمین می کند که هر MG تنها می تواند بارها را شیفیت دهد. حداقل و حداکثر سطوح DR در (۲۴) ارائه می شوند. در نهایت، پروفایل بار کل MG ها در (۲۵) محاسبه می شود.

7-2-3- مدل های عدم قطعیت های دیگر همراه با سناریوهای تولید و کاهش

¹ Interruptible loads

² Controllable loads

برای افزایش قابلیت اطمینان کار، ما ماهیت نامطمئن RE و باره ای تقاضا را با تکنیک های تولید و کاهش تصادفی مدل سازی می کنیم. سرعت باد، تابش خورشیدی و تقاضای بار از یک تابع توزیع احتمال (PDF) پیروی می کنند که بر اساس داده های تاریخی مربوطه است. [27] اگرچه تکنیک تصادفی قابلیت اطمینان کار را افزایش می دهد، اما هیچ تاثیری بر عملکرد مدل پیشنهادی ندارد. برای توصیف رفتار نامطمئن یک توربین بادی، از تابع توزیع ویبول (۲۶) استفاده می شود:

$$PDF(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (26)$$

$$c = \frac{\mu}{\Gamma(1+\frac{1}{k})} \quad (27)$$

تابع توزیع بتا برای کنترل عدم قطعیت PV ها استفاده شده است. تابع توزیع بتا توسط (۲۸) مدل سازی شده است:

$$PDF(x) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} \quad (28)$$

که در آن α و β با استفاده از مقدار میانگین μ و انحراف معیار δ به صورت (29) و (30) محاسبه می شوند:

$$\beta = (1 - \mu) \times \left(\frac{\mu \times (1 - \mu)}{\delta^2} - 1 \right) \quad (29)$$

$$\alpha = \frac{\mu \times \beta}{1 - \mu} \quad (30)$$

سناریوهای بار الکتریکی با توزیع نرمال (31) مدل سازی می شوند:

$$(31)$$

$$PDF(x) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\delta^2}\right)$$

مجموعه ای از بازه های PDF را برای در نظر گرفتن عدم قطعیت ها انتخاب می کنیم n_x . تعداد بازه های انتخابی را نشان می دهد. احتمال هر سناریو با (۳۲) و (۳۳) محاسبه می شود:

$$\rho_{x,n_x} = \int_{X_{rand,n_x}}^{X_{rand,n_x}} PDF(x) dx, n_x = 1, 2, \dots, N_x \quad (32)$$

$$\chi_{X,n_x} = \frac{1}{\rho_{x,n_x}} \times \left(\int_{X_{rand,n_x}}^{X_{rand,n_x}} PDF(x) dx \right), n_x = 1, 2, \dots, N_x (33)$$

تعداد و احتمال سناریوها با (۳۴) و (۳۵) محاسبه می شود:

$$N^s = \prod_x N_x (34)$$

$$\rho_s = \prod_x \rho_{x,s}, s = 1, 2, \dots, N^s (35)$$

اگر تمام سناریوها در نظر گرفته شوند، مساله پیچیده خواهد شد. در نتیجه، کاهش سناریو برای افزایش سرعت محاسباتی بهینه سازی ضروری است. در این مقاله از یک روش کاهش سناریوی MILP استفاده شده است که در (۳۶) تا (۴۳) نشان داده شده است:

$$\min f = \sum_{n_1=1}^{N_1} \sum_{n_2=1}^{N_2} \sum_{n_3=1}^{N_3} W_{n_1,n_2,n_3} (36)$$

$$s. t \sum_{n_2=1}^{N_2} \sum_{n_3=1}^{N_3} \rho_s(n_1, n_2, n_3) = \rho_{3,n_3}, n_3 = 1, 2, \dots, N_3 (37)$$

$$\sum_{n_1=1}^{N_1} \sum_{n_2=1}^{N_2} \rho_s(n_1, n_2, n_3) = \rho_{2,n_3}, n_3 = 1, 2, \dots, N_3 (39)$$

$$s. t \sum_{n_2=1}^{N_2} \sum_{n_3=1}^{N_3} \rho_s(n_1, n_2, n_3) = \rho_{1,n_1}, n_1 = 1, 2, \dots, N_1 (37)$$

$$\sum_{n_1=1}^{N_1} \sum_{n_2=1}^{N_2} \sum_{n_3=1}^{N_3} \rho_s(n_1, n_2, n_3) = 1, \forall n_1, n_2, n_3 (40)$$

$$\rho_s(n_1, n_2, n_3) \leq W_{n_1,n_2,n_3}, \forall n_1, n_2, n_3 (41)$$

$$0 \leq \rho_s(n_1, n_2, n_3) \leq 1, \forall n_1, n_2, n_3 (42)$$

$$W_{n_1,n_2,n_3} \in \{0,1\} (43)$$

تعداد سناریوها بواسطه معادله (36) حداقل می شود. W_{n_1,n_2,n_3} یک متغیر باینری است که وضعیت انتخاب سناریو n_1, n_2 و n_3 را در صورتی که مقدار آن 1 باشد، نشان می دهد. و همچنین، پارامتر $\rho_s(n_1, n_2, n_3)$ احتمال سناریو n_1, n_2 و n_3 را تعیین می کند [27].

3-2-8- مدل بازار

در زمان بندی حالت جزیره ای MGC، معاملات برق تنها بین MG ها و MGC ها انجام می شود. در این مورد، دو شرکت کننده در بازار وجود دارد: (۱) نماینده MGC و (۲) نماینده MG. مبادلات برق از طریق قراردادهای دوجانبه انجام می شود که روش اصلی تجارت انرژی است [14].

معاملات برق بین MG ها و MCLD ها در MGC انجام می شود. بنابراین، MG می تواند بار خود را از طریق خرید برق از/ به سایر MG ها یا MCLDs تامین کند. در نتیجه، قیمت تبادل انرژی بین MGC و MG ها یک تعرفه زمان - استفاده ثابت است [19]. مراحل دقیق و کامل قراردادهای دوجانبه را می توان در [۱۰] یافت.

3-3- مدل عملیاتی دو سطحی پیشنهادی

در این بخش، ما یک چارچوب کنترل سلسله مراتبی دو سطحی برای زمان بندی ساعتی روزانه سیستم های ریزشبکه های شبکه ای پیشنهاد کردیم. ساختار کنترل از مدیریت مستقل انرژی (MG) در سطح پایین و مدیریت جهانی انرژی در سطح بالا (MGC) تشکیل شده است.

3-3-1 EMS سطح پایین

هدف مدیریت انرژی در این سطح، به حداقل رساندن هزینه MG ها در حالت جزیره ای برای افزایش قابلیت اطمینان MG ها است که باید محدودیت های عملیاتی را ارضا کند. تابع هدف سطح پایین به صورت (۴۴) و (۴۵) فرموله می شود:

(44)

$$CF_i = \sum_{s=1}^{N_s} \rho_s \sum_{t=1}^T \left(\left(\sum_{j=1}^2 C_{s,t,i,j}^{CDG} \cdot SUC_{i,j}^{CDG} + SDG_{i,j}^{CDG} + SDG_{i,j}^{CDG} \cdot C_{s,t,i}^{ES} \right) + C_{s,t,i}^{ES} \right. \\ \left. + C_{s,t,i}^{LL} + C_{s,t,i}^{TotalO\&M} - C_{s,t,i}^M \right)$$

$$C_{s,t,i}^M = \rho_{t,i}^{Buy} P_{s,t,i}^{M_Short} + \rho_{t,i}^{Se} P_{s,t,i}^{M_Surplus} \quad (45)$$

تعداد انرژی برای هر MG در (۴۶) ارائه شده است:

$$\sum_{j=1}^2 (P_{s,t,i,j}^{CDG}) + P_{s,t,i}^{ES_Dis} + P_{s,t,i}^{WWT} + P_{s,t,i}^{PV} - P_{s,t,i}^{ES_Chr} - P_{s,t,i}^{Load} = P_{s,t,i}^{M_Short} + P_{s,t,i}^{M_Surplus} \quad (46)$$

کرانه های انرژی انتقالی در (47) تا (49) تعریف شده است:

$$\underline{P}^{Short} \cdot By_t \leq P_{s,t,i}^{M_Short} \leq \overline{P}^{Short} \cdot By_t \quad (47)$$

$$\underline{P^{Surplus}} \cdot Sl_t \leq P_{s,t,i}^{M_Surplus} \leq \overline{P^{Surplus}} \cdot Sl_t \quad (48)$$

$$By_t + Sl_t = 1 \quad (49)$$

همچنین، محدوده توان قابل تنظیم برای هر MG به صورت (۵۰) فرمول بندی شده است:

$$\text{if } \rho_t^{sell} \leq \alpha_j^{CDG} + K_{O\&M,j}^{CDG} < \rho_t^{Buy} \quad (50)$$

$$| \left(\underline{P_{i,j}^{CDG}} - P_{s,t,i,j}^{CDG} \right) \leq \Delta P_{s,t,i,j}^{adj} \leq \left(\overline{P_{i,j}^{CDG}} - P_{s,t,i,j}^{CDG} \right)$$

$$| \text{endif } \Delta P_{s,t,i,j}^{adj} = 0$$

پس از بهینه سازی محلی، MG ها توان مازاد، دامنه توان قابل تنظیم واحدهای قابل کنترل، و هزینه نهایی منابع محلی خود را به EMS-MGC ارسال می کنند.

2-3-3 EMS سطح بالا

هزینه عملیات MGC هدف سطح بالای چارچوب بهینه سازی است. تابع هزینه سطح بالا به صورت زیر فرمول بندی می شود:

$$(51)$$

$$CF^{MGC} = \sum_{s=1}^{N_s} \rho_s \sum_{t=1}^T \left((C_{s,t}^{CMT} + SUC^{CMT} \cdot X_{s,t}^{SU} + SUC^{CMT} \cdot X_{s,t}^{SD}) + C_{s,t}^{CES} + C_{s,l}^{LL} + C_{s,l}^{TotalO\&M} + C_{s,t}^{CM} + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 (\alpha_j^{CDG} \cdot \Delta P_{s,t,i,j}^{adj}) \right)$$

هزینه توان مبادله شده و محدودیت های تعادل توان به ترتیب در (۵۲) و (۵۳)، فرموله شده اند. همچنین، حد توان قابل تنظیم در (۵۴) نشان داده شده است:

$$C_{s,t}^{CM} + \rho_t^{DS} P_{s,t}^{Buy} + \rho_t^{DE} P_{s,t}^{Sell} \quad (52)$$

$$P_{s,l}^{CMT} + P_{s,t}^{CES,Dis} - P_{s,t}^{CES,Chr} \sum_{i=1}^3 (P_{s,t,i}^{M_Short} + P_{s,t,i}^{M_Surplus}) \quad (53)$$

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 (\Delta P_{s,t,i,j}^{adj}) + P_{s,t}^{WT} + P_{s,t}^{PV} - P_{s,t}^{Load} = P_{s,t}^{Sell} - P_{s,t}^{Buy}$$

$$\underline{\Delta P_{s,t,i,j}^{adj}} \leq \Delta P_{s,t,i,j}^{adj} \leq \overline{\Delta P_{s,t,i,j}^{adj}} \quad (54)$$

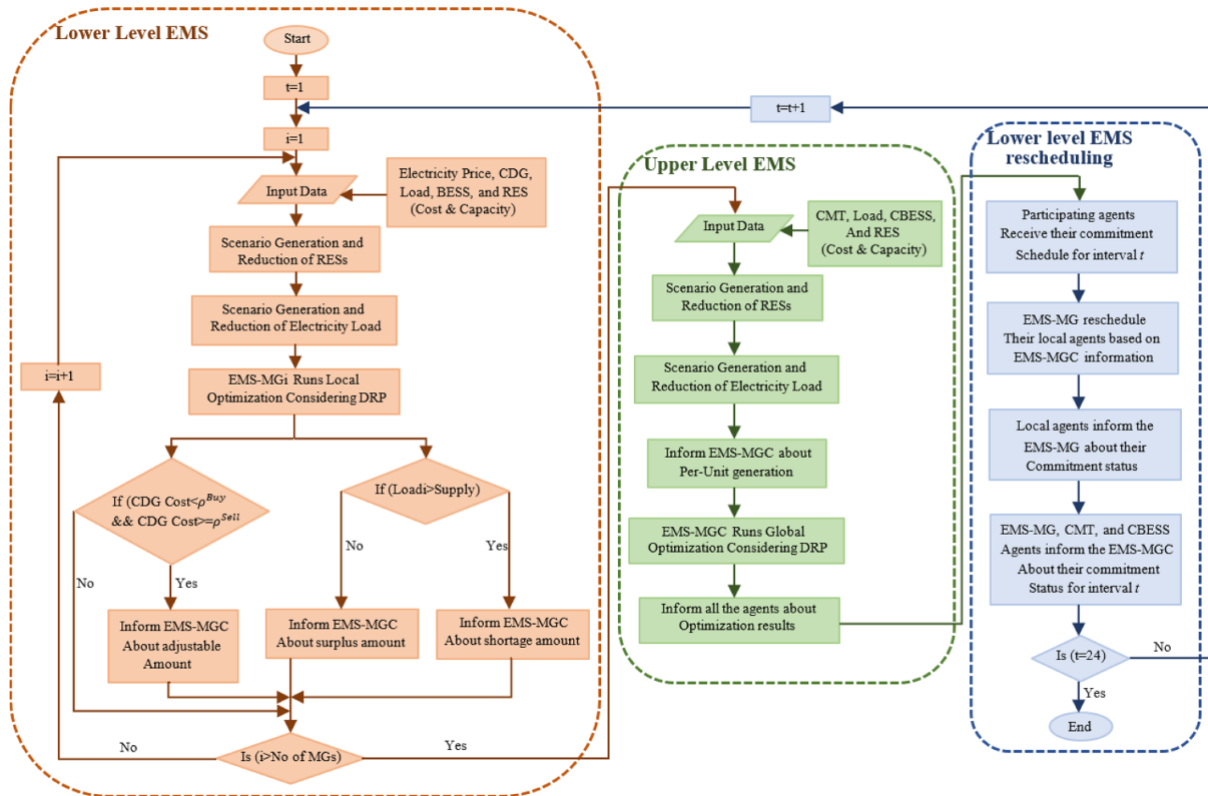
در سطح بالا، MGC بر روی اتصال بین MG ها برای کنترل توان قابل تنظیم و مقدار انرژی قابل انتقال تمرکز می کند. همچنین، MGC می تواند کمبود برق در MG ها را با واحدهای تولیدی در جامعه یا با استفاده از سیستم های ذخیره انرژی که انرژی مازاد MG ها را در طول دوره های خاموشی ذخیره می کنند، تامین کند. پس از بهینه سازی سطح بالا، EMS-MGC اطلاعات را به MG ها ارسال می کند، بنابراین، هر MG توان خروجی CDG ها را با توجه به توان قابل تنظیم اصلاح می کند.

3-3-3 برنامه ریزی مجدد EMS سطح پایین

پس از انجام بهینه سازی جهانی در MGC، هر MG برنامه ریزی اولیه را با انجام بهینه سازی محلی برای تنظیم مقدار توان قابل تنظیم اصلاح می کند. تابع هدف مرحله برنامه ریزی مجدد به صورت زیر فرموله می شود:

(55)

$$CF_i^R = \sum_{t=1}^T \left(\left(\sum_{j=1}^2 C_{s,t,i,j}^{CDG} + ((a_j^{CDG} + K_{O\&M,j}^{CDG}) \cdot \Delta P_{s,t,i,j}^{adj} + SUC_{i,j}^{CDG} + X_{i,j}^{CDG} + SDG_{i,j}^{CDG} \cdot C_{s,t,i}^{ES}) \right) + C_{s,t,i}^{LL} + C_{s,t,i}^{Total-O\&M} + C_{s,t,i}^M - C_{s,t,i}^{R\&S} \right)$$



شکل 3-2- فلوچارت از استراتژی مدیریت انرژی پیشنهادی MG های شبکه ای.

تبادل برق مرحله برنامه ریزی مجدد با (۵۶) نشان داده می شود.

(56)

$$\sum_{j=1}^2 (P_{S,t,i,j}^{CDG} + \Delta P_{S,t,i,j}^{adj}) + P_{S,t,i}^{ED_Dis} + P_{S,t,i}^{WWT} + P_{S,t,i}^{PV} - P_{S,t,i}^{ES,Chr} - P_{S,t,i}^{Load}$$

$$= P_{S,t,i}^{M_Short} + P_{S,t,i}^{M_Surplus} + P_{S,t,i}^{M_Sen} + P_{S,t,i}^{M_Rac}$$

هزینه ارسال و دریافت برق از طریق (۵۷) محاسبه می شود:

(57)

$$C_{S,t,i}^{R\&S} = \rho_{t,i}^{Rec} P_{S,t,i}^{Rec} + \rho_{t,i}^{Sen} P_{S,t,i}^{Sen}$$

فلوچارت مدل پیشنهادی در شکل ۳ نشان داده شده است. چارچوب پیشنهادی به عنوان برنامه نویسی خطی ترکیبی اینتگر (MILP) مدل سازی شده است و تحت نرم افزارهای گمز و متلب بر روی یک پردازنده Core i7، ۳.۵ گیگاهرتز با ۱۲ گیگابایت رم حل شده است.

فصل چهارم

شبیه سازی

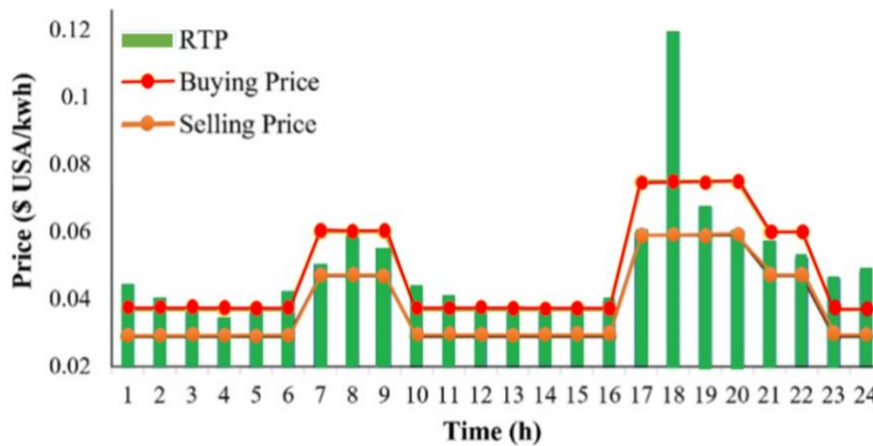
1-4- مطالعه موردی

داده های ورودی و مطالعه موردی در این بخش ارائه شده اند.

2-4- داده ورودی

در این مقاله، مدیریت انرژی MG های شبکه ای جزیره ای برای به حداقل رساندن هزینه عملیاتی سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. روش پیشنهادی مبتنی بر سیستم اصلاح شده MGC است که برای چهار MG به روز می شود [14]. فرض می شود که بخشی از بارهای غیر حیاتی برای حفظ قابلیت اطمینان MG و افزایش پایداری آن قطع می شود. کمینه و بیشینه مقدار DR به ترتیب 20٪ - و 20٪ است. بر طبق [19]، هزینه جریمه (aaIL) بالاتر از هزینه نهایی CDG ها است. حداکثر میزان تبادل برق 1500 کیلووات در نظر گرفته شده است. توربین بادی ساحلی Vestas V 100 IEC IIB مطابق با [28] در نظر گرفته شده است. قیمت برق از اپراتور بازار انرژی استرالیای جنوبی گرفته شده و در شکل 4 نشان داده شده است. همچنین، سرعت باد، تابش خورشید و بار الکتریکی را

می توان در [۲۹ - ۳۱] یافت. ویژگی های میکروتوربین ها، سلول های سوختی، سیستم های ذخیره سازی، و تولید تجدید پذیر به ترتیب در جداول ۲، ۳، ۴، و ۵، نشان داده شده اند.



شکل 4-1- مشخصات روز قیمت برق

4-3- نتایج و بحث

برای ارزیابی کارایی مدل پیشنهادی، سه مورد بررسی می شود:

الف) مورد ۱ (استراتژی عملیات هماهنگ): هر MG یک برنامه ریزی عملیات مستقل انجام می دهد و به صورت جداگانه هزینه های خود را با استفاده از مدیریت انرژی غیر متمرکز به حداقل می رساند. در این حالت، تمام MG ها از شبکه بالادست جدا شده و به صورت جزیره ای عمل می کنند.

ب) مورد ۲ (مدیریت انرژی ترکیبی بدون توان قابل تنظیم): در این مورد، زمان بندی عملیات یک سیستم MG شبکه جزیره ای با استفاده از مدیریت انرژی ترکیبی بدون در نظر گرفتن توان قابل تنظیم مورد بررسی قرار گرفته است. MGC در حالت قطع شده عمل کرده، در حالی که اتصال بین MG ها در MGC برقرار است.

ج) مورد ۳ (مدیریت انرژی ترکیبی با در نظر گرفتن توان قابل تنظیم): در این مورد، ما استراتژی مدیریت انرژی ترکیبی پیشنهادی را ارزیابی می کنیم. ما مفهوم توان قابل تنظیم را برای مطالعه انرژی انتقالی در میان MG ها در نظر می گیریم، همچنین MG ها می توانند برنامه ریزی اولیه خود را در مرحله زمانبندی مجدد اصلاح کنند. نتایج انرژی انتقالی در میان MG ها در شکل ۵ نشان داده شده است. شکل ۵ a و b مقدار انرژی انتقالی در میان MG ها را در سطح پایین با توجه به برنامه PBDR نشان می دهد. همچنین، مقدار انرژی انتقالی در میان MG ها بدون برنامه PBDR در شکل ۵ c و d نشان داده شده است.

مقادیر مثبت توان مازاد را نشان می دهند، در حالی که مقادیر منفی توان کمبود MG ها هستند. لازم به ذکر است که توان مازاد بر کمبود به عنوان توان مولد در MGC در نظر گرفته شده است.

جدول 4-1- پارامترهای MTs در هر ریزشبهه و MGC

Parameters	Microtubine characteristics
------------	-----------------------------

	MT1	MT2	MT3	CMT
$\eta(\%)$	29.5	31.1	28.9	29.5
\underline{P}^{MT} and \overline{P}^{MT} (kW)	0.190	0.320	0.240	0.950
SUC^{MT} .and SDC^{MT} (s)	0.22,0.1	0.2,0.12	0.21, 0.09	0.18, 0.16
$O\&M$ cost(s/kWh)	0.016	0.009	0.011	0.012

جدول 2-4- پارامترهای FC در هر ریزشبهه [32].

Parameters	Fuel cell characteristic	
	FC ₁ (MCFC)	FC _{2&3} (PAFC)
$\eta(\%)$	52.2	38.1
\underline{P}^{MT} and \overline{P}^{MT} (kW)	0.300	0.400
SUC^{MT} .and SDC^{MT} (s)	0.33,0.22	0.32,0.2
$O\&M$ cost(s/kWh)	0.045	0.036

جدول 3-4- پارامترهای BESS در هر ریزشبهه و MGC

Parameters	Lead acid battery energy storage systems			
	BESS ₁	BESS ₂	BESS ₃	BESS ₄
$K_{O\&M}^{ES}$ (s/kWh)	0.002	0.002	0.002	0.002
E_R^{ES} (kWh)	2800	2600	2400	3200
E_{INIT}^{ES} and E_{END}^{ES} (kWh)	570 and 570	530 and 530	490 and 490	640 and 640
$\overline{P}^{ES.Dis}$ and $\overline{P}^{ES.Chr}$ (kW)	700	650	600	800
\underline{SOC} and \overline{SOC} (%)	80 and 20	80 and 20	80 and 20	80 and 20
$\eta^{ES.Dis}$ and $\eta^{ES.Chr}$ (%)	92	92	92	92

مقدار پارامترها (دلار امریکا)

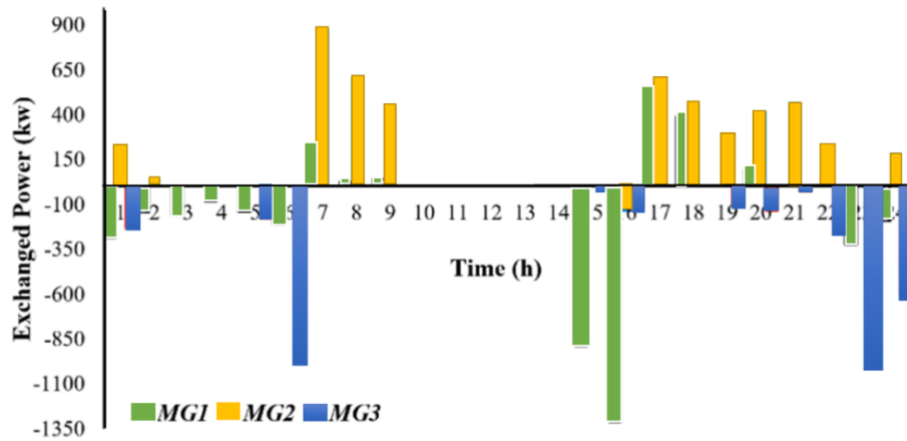
Value	Parameters	Value	Parameters
1.7\$/GJ	C_{ng}	2MW	Rate power of wind turbine
9.78KWh/m ³	L_{ng}	3m/s	Cut-in wind speed

0.12\$/KWh	ρ^{DS}	22m/s	Cut-out wind speed
0.6\$/KWh	ρ^{DE}	12m/s	Rate wind speed
3%permonth	η^L	30%	η^{PV}
0.08\$/KWh	α^{IL}	2.16m ²	S^{PV}
0.016\$/KWh	$K_{O\&M}^{PV}$	0.015\$/KWh	$K_{O\&M}^{WT}$

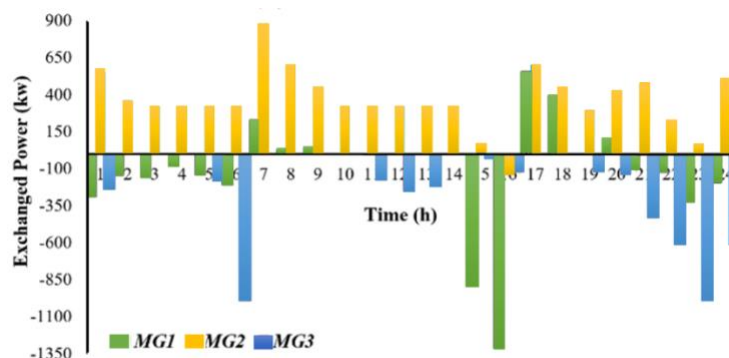
همانطور که می بینیم، مقدار انرژی ترانس اکتیو در مورد 3 به دلیل قابلیت توان قابل تنظیم بیشتر از حالت 2 است. نتایج شکل 5 نشان می دهد که توان قابل تنظیم، توزیع و تحویل توان داخلی را افزایش می دهد. کل انرژی انتقالی در هر ساعت بین MGs و MGC در مطالعات موردی برای شرایط مختلف در شکل 6 ارائه شده است. هنگامی که برنامه PBDR اجرا شد، کل انرژی تبادل یافته روزانه در موارد 2 و 3 به ترتیب 1298- کیلووات ساعت و 1005 کیلووات ساعت است. این مورد نشان دهنده این است که MGها در مورد 2 انرژی را از MGC دریافت می کنند. همچنین، زمانی که MGها نمی توانند در برنامه PBDR شرکت کنند، مقدار کل روزانه انرژی انتقالی در موارد 2 و 3 به ترتیب 2090- کیلووات ساعت و 575 کیلووات ساعت است.

با این حال، نتایج شکل 6 نشان می دهد که با مد نظر قرار دادن برنامه PBDR، مقدار انرژی مازاد MGها افزایش می یابد. برخلاف امجی های 1 و 3، MG2 در بیشتر زمانها توان تولیدی مازاد دارد. بنابراین، امجی های 1 و 3 می توانند از توان مازاد MG2 به عنوان پشتیبان برای تامین انرژی مورد نیاز استفاده کنند. شکل 7 میزان کاهش بار و انرژی تلف شده را برای مطالعات موردی مذکور نشان می دهد.

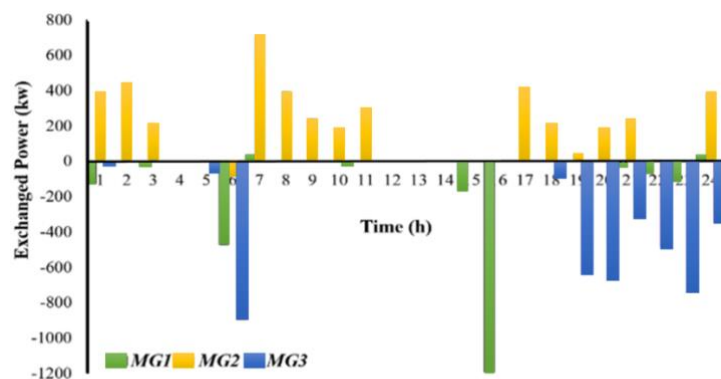
در عملیات ناهماهنگ، MGها قادر به تبادل انرژی با یکدیگر نیستند. بنابراین اگر MGها توان مازاد داشته باشند دچار اتلاف انرژی می شوند [16] و در صورت کمبود توان دچار خروج ناگهانی بار می شوند. هم انرژی تلف شده و هم کاهش بار هزینه برنامه ریزی انرژی را افزایش می دهد. بنابراین، اتصال بین MGها (موارد 2 و 3) هزینه های عملیاتی را در مقایسه با حالت ناهماهنگ کاهش می دهد. نتایج توان قابل تنظیم با در نظر گرفتن برنامه PBDR در جدول 6 ارائه شده است.



(a) Case2-With PBDR



(b) Case3-With PBDR



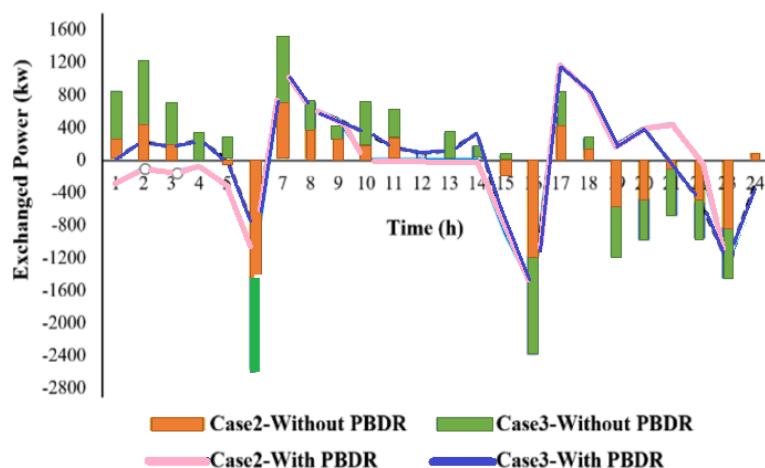
(c) Case2-Without PBDR

شکل 4-2- نتایج زمانبندی توان مبادله شده در ریزشبکه های کیس (موارد) 2 و 3

طبق جدول 6، EMS-MG2 به EMS-MG2 اعلام می دهد تا توان خروجی MT-MG2 را افزایش دهد زیرا تابع هزینه MT-MG2 نسبت به سایر منابع کمتر است و می تواند انرژی بیشتری تولید کند. بنابراین با استفاده از توان قابل تنظیم، EMS-MG2 هزینه کل سیستم را کاهش و کمبود توان را در سایر MGها و MGCها برطرف می کند. برای جلوگیری از اتلاف انرژی در شکاف های زمانی

21 و 22، EMS-MGC سیگنال های فرمان کاهش را به سلول های سوختی در ام جی های 1 و 3 ارسال می کند.

از آنجایی که هزینه های تولید پیل های سوختی بیشتر از CMT و MT است، سیگنال های فرمان کاهش به پیل های سوختی ارسال می شود. هزینه کل سیستم مورد مطالعه در مطالعات موردی مختلف در جدول 7 نشان داده شده است. هنگامی که MGها در برنامه PBDR استفاده می شوند، می توانند تقاضای بار خود را از دوره های اوج به دوره های خارج از پیک تغییر دهند. بنابراین، تولید برق واحدهای با هزینه نهایی بالا کاهش یافته است. همچنین میزان ریزش بار کاهش یافته است. در نتیجه، هزینه کل سیستم توسط برنامه PBDR در مطالعات موردی کاهش می یابد. لازم به ذکر است که هزینه MGها در مدل پیشنهادی کمتر از موارد 1 و 2 است.

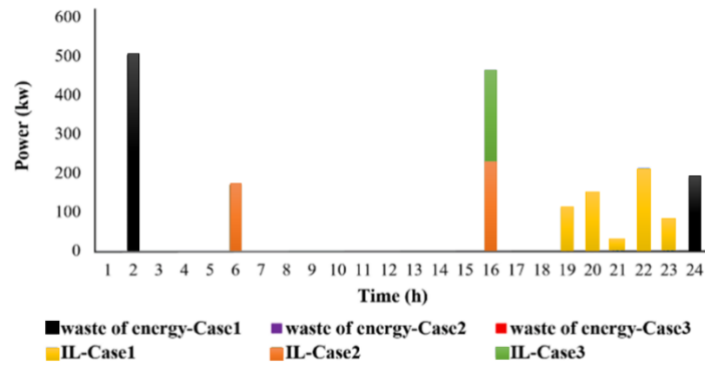


شکل 4-3- نتایج مجموع زمانبندی توان مبادله شده در سه ریزش شبکه در موارد 2 و 3

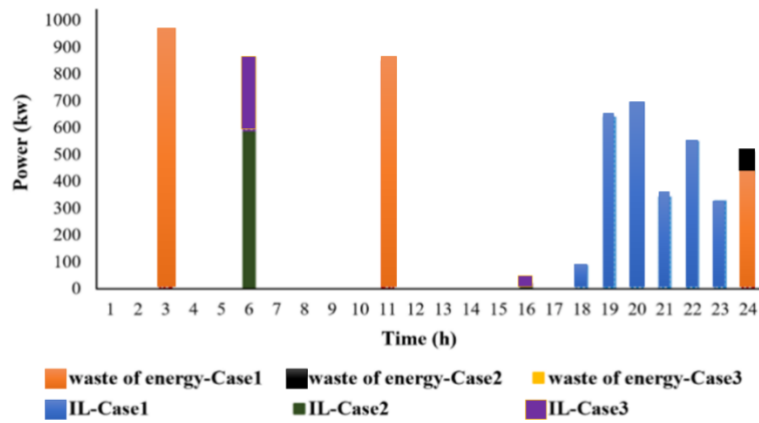
در حالت 1، MGها نمی توانند با هم انرژی مبادله کنند و هر MG باید انرژی مورد نیاز را به صورت محلی توسط منابع در دسترس خود تامین کند. در مورد 3، توان های قابل تنظیم به بهبود انرژی ترانس اکتیو در بین MGها کمک می کند و در مقایسه با مورد 2، هزینه کل سیستم کاهش می یابد. نتایج زمان بندی انرژی BESS، CDG و کاهش بار در مطالعات موردی در شکل 8 نشان داده شده است.

در دوره های خارج از پیک، توان تولید CDGها در مورد 1 بیشتر از موارد 2 و 3 است زیرا MGها نمی توانند انرژی را با هم معامله کنند و هر MG باید انرژی مورد نیاز را توسط منابع محلی خود تامین کند. مجموع تولید CDGها در موارد 1، 2 و 3 به ترتیب 29982 کیلووات ساعت، 29792 کیلووات ساعت و 29923 کیلووات ساعت است. بنابراین، میزان کاهش بار، انتشار گازهای گلخانه ای، انرژی تلف شده و هزینه کل در مورد 1 بیشتر از سایر مطالعات موردی بررسی شده است. همچنین، حداقل کاهش بار متعلق به مورد 3 است. عملکرد سیستم های ذخیره انرژی (باتری) در مدل پیشنهادی برای شرایط مختلف در شکل 9a و b نشان داده شده است. با توجه به شکل های 8 و 9، BESSها توان مازاد را در دوره های خارج از پیک ذخیره می کردند و آن را در دوره های پیک تخلیه می

کردند. همانطور که در شکل 9 نشان داده شده است، برنامه PBDR تاثیر قابل توجهی بر عملکرد CBESS دارد.



(a) With PBDR



(b) Without PBDR

شکل 4-4- نتایج کاهش بار و اتلاف انرژی در موارد 1 تا 3.

جدول 4-4- محدودیت‌هایی برای مقدار قابل تنظیم در هر MG از سیستم MG های شبکه با در نظر گرفتن PBDRP

Time(h)	$\Delta P_{2.1}^{adj} (KWh)$	$\Delta P_{3.1}^{adj} (KWh)$	$\Delta P_{1.2}^{adj} (KWh)$	$\Delta P_{2.2}^{adj} (KWh)$	$\Delta P_{3.2}^{adj} (KWh)$
1	320	0	0	0	0
2	320	0	0	0	0
3	320	0	0	0	0
4	320	0	0	0	0
5	320	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
9	320	0	0	0	0
10	320	0	0	0	0
11	320	-172	0	0	0
12	320	-240	0	0	0
13	320	-212	0	0	0
14	320	0	0	0	0
15	63	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0
21	0	0	-101	0	-400
22	0	0	-125	0	-400
23	52	0	0	0	0
24	320	0	0	0	0

اگر MG ها در برنامه های DR استفاده شوند، MGC می تواند از یک سیستم ذخیره انرژی باتری با ظرفیت کمتر برای کاهش هزینه های سرمایه گذاری استفاده کند. به دلیل عدم اتصال MGC به شبکه بالادست، از CBESS بیشتر برای حفظ پایداری و افزایش قابلیت اطمینان سیستم در حالت جزیره

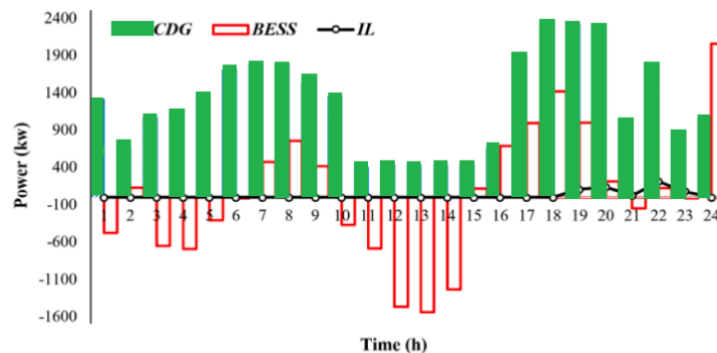
ای و جدا از سایر بخشها استفاده شده است. حداکثر مقدار CBESS-SOC در شکل a 0.5789 است و ظرفیت انرژی CBESS 3200 کیلووات ساعت است.

ظرفیت انرژی ذخیره سازی جدید با دو مرتبه تکرار محاسبات از طریق معادله (58) برابر با 2076.35 کیلووات ساعت با توان شارژ/دشارژ 800 کیلووات و حداقل انرژی اولیه / نهایی 415.27 کیلووات ساعت است. تعداد تکرارها تا زمانی ادامه می یابد که SOC جدید روی حداکثر مقدار (0.8) تنظیم شود. وضعیت شارژ ذخیره انرژی باتری جدید MGC در مورد 3 با برنامه PBDR در شکل 10 نشان داده شده است.

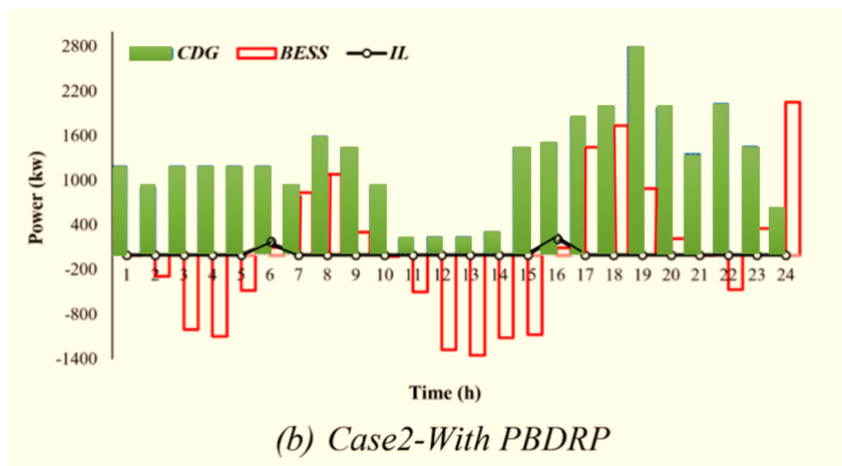
$$\begin{cases} E_{R,New}^{EC} = E^{ES} - \frac{SOC}{SOC_{max,old}} (E_{R,old}^{ES} - E^{ES}) \\ E^{ES} = \left(\frac{SOC_{max,old} E_{R,old}^{ES}}{SOC} \right) \end{cases} \quad (58)$$

جدول 4-5- هزینه های عملیاتی سیستم مورد مطالعه در شرایط مختلف

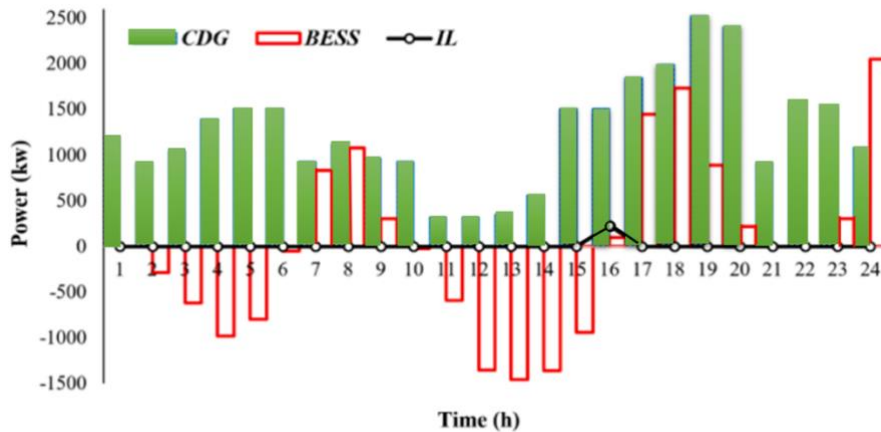
DR status	Case 1	Case 2	Case 3
With PBDRP	2934.26\$	2819.40\$	2759.51\$
Without PBDRP	3209.60\$	3029.40\$	2965.33\$



(a) Case1-With PBDRP



(b) Case2-With PBDRP



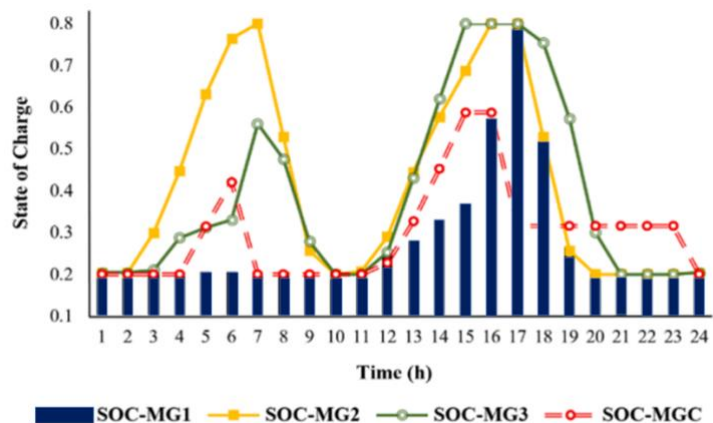
(c) Case3-With PBDRP

شکل 4-5- (الف) مجموع زمان بندی توان BESS، CDG، و بار قطع پذیر در مورد 1 (ب) زمان بندی توان BESS،

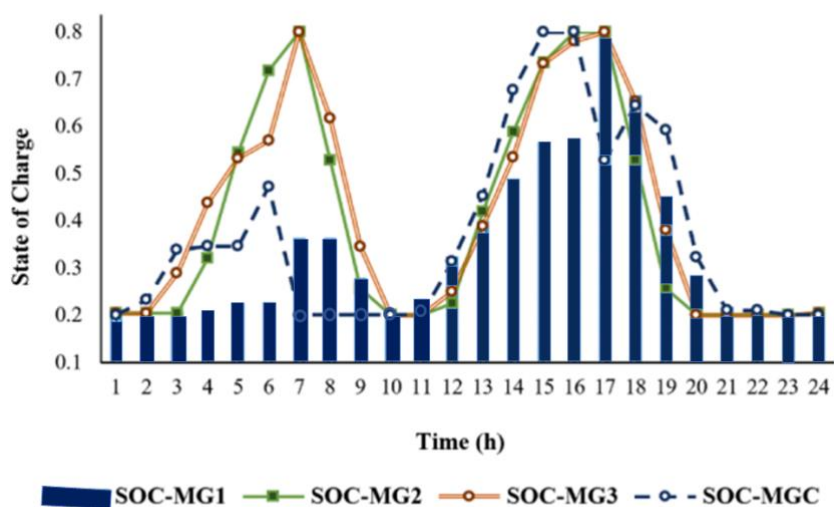
CDG، و بار قطع پذیر در مورد 2 (ج) زمان بندی توان BESS، CDG، و قطع پذیر بار در مورد 3.

همچنین، کنترل و هماهنگی بین توان های مازاد و کمبود یافته از طریق تبادل توان توسط دستگاه های در سطح سیستم و تبادل توان بین MG ها حاصل می شود. با مد نظر قرار دادن مفاهیم توان قابل تنظیم: 1) توان تولید CDG های ارزانتر برای کاهش هزینه کل سیستم افزایش یافته است. 2) توان کمبود MGs و MGC با استفاده از توان مازاد MG ها کاهش یافته است. 3) میزان ریزش ناخواسته بار کاهش یافته است. 4) جلوگیری از اتلاف انرژی در حالت جزیره ای. با توجه به نتایج شبیه سازی، مدل پیشنهادی عملکرد فنی و اقتصادی بهتری دارد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که مدل پیشنهادی میزان انرژی هدر رفته و کاهش بار سیستم را کاهش می دهد. مدل پیشنهادی را می توان در تنظیمات عملی که در آن یک نیروگاه مجازی (VPP) خدمات انرژی را برای یک منطقه جغرافیایی خاص متشکل از چندین MG ارائه می دهد، اعمال کرد [38].

MG ها نیروی کمبود/مازاد خود را به VPP ارسال می کنند. VPP مقادیر توان قابل تنظیم را برای ایجاد انرژی ترانس اکتیو بهتر در بین MG ها تعریف می کند. همچنین، قابل توجه است که مدل پیشنهادی برای سیستم های چند انرژی که در آن شبکه های گرمایش و برق یکپارچه شده اند، قابل استفاده است [39]. در این سیستم ها، MGC باید دو توان الکتریکی و حرارتی قابل تنظیم تعریف کند. کارایی مدل پیشنهادی بر روی سیستم های چند انرژی در کارهای آینده بررسی خواهد شد.

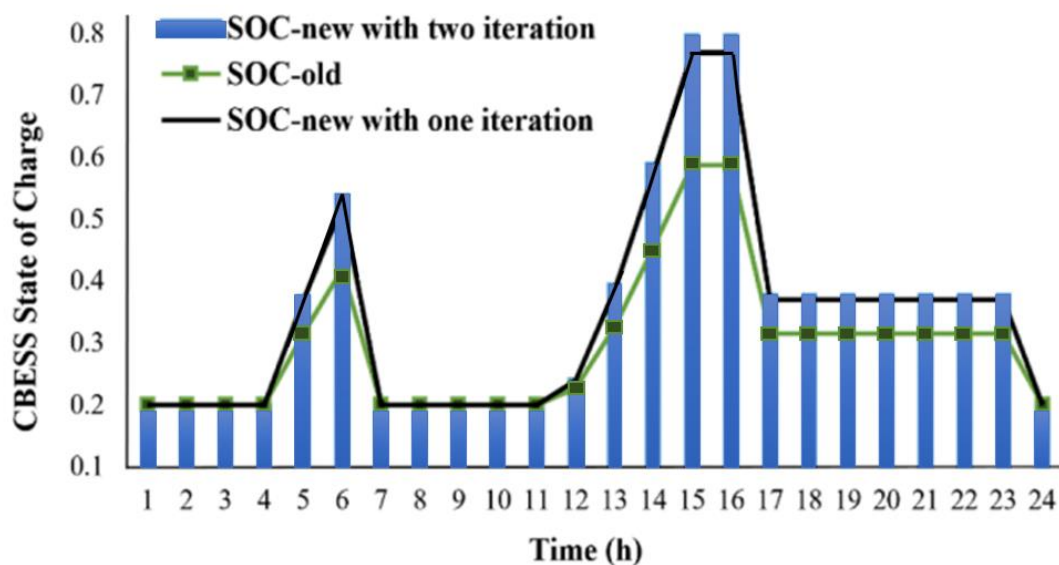


(a) Case3-With PBDRP



(b) Case3-Without PBDRP

شکل 4-6- وضعیت ذخیره انرژی باتری در مورد 3



شکل 4-7- وضعیت ذخیره انرژی باتری در مورد 3

فصل پنجم

نتیجه گیری

5-1- نتیجه گیری و چالشهای تحقیقاتی آینده

این مقاله یک چارچوب بهینه‌سازی دو سطحی را برای برنامه‌ریزی آینده محور ریزش شبکه‌های شبکه‌ای جزیره‌ای با نفوذ زیاد منابع انرژی تجدیدپذیر پیشنهاد می‌کند. برای نشان دادن برتری و کارایی مدل پیشنهادی، سه مورد با یکدیگر مقایسه شده است. در مدل پیشنهادی، از یک سیستم مدیریت انرژی ترکیبی استفاده شده است که شامل بهینه‌سازی محلی، بهینه‌سازی جهانی (جامع) و بهینه‌سازی مجدد محلی است. هدف از مدل پیشنهادی به حداقل رساندن هزینه ام‌جی‌ها و سیستم است. علاوه بر این، محدوده‌های توان قابل تنظیم برای کنترل انرژی اضافی/کمبود ریزش شبکه‌ها توسط MGC و بهبود انرژی انتقالی در سیستم تعریف شده‌اند.

5-2- پیشنهادات

- 1- توسعه تابع هدف مسئله با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان سیستم (LPSP احتمال عدم تامین بار)
- 2- بررسی سیستم هیبریدی پیشنهادی با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تولید توان منابع انرژی تجدیدپذیر
- 3- بررسی سیستم هیبریدی پیشنهادی این پایان نامه در حالت متصل به شبکه

- [1] M.A. Amini, A. Jalilian, M.R.P. Behbahani, A new method for evaluation of harmonic distortion in reconfiguration of distribution network, *Int. Trans. Electr. Energy Syst.* 30 (6) (2020).
- [2] T. Kumrai, K. Ota, M. Dong, K. Sato, J. Kishigami, Optimising operation management for multi-micro-grids control, *IET Cyber-Phys. Syst.: Theory Appl.* 3 (1) (2018) 24–33.
- [3] X. Liu, B. Gao, Z. Zhu, Y. Tang, Non-cooperative and cooperative optimisation of battery energy storage system for energy management in multi-microgrid, *IET Gen. Transm. Distrib.* 12 (10) (2018) 2369–2377.
- [4] L. Barelli, D.-A. Ciupageanu, A. Ottaviano, D. Pelosi, G. Lazaroiu, Stochastic power management strategy for hybrid energy storage systems to enhance large scale wind energy integration, *J. Energy Stor.* 31 (2020), 101650.
- [5] R. Hemmati, H. Mehrjerdi, Stochastic linear programming for optimal planning of battery storage systems under unbalanced-uncertain conditions, *J. Mod. Power Syst. Clean Energy* 8 (5) (2020) 971–980.
- [6] B. Sheykhloei, T. Abedinzadeh, L. Mohammadian, B. Mohammadi-Ivatloo, Optimal co-scheduling of distributed generation resources and natural gas network considering uncertainties, *J. Energy Stor.* 21 (2019) 383–392.
- [7] H. Haddadian, R. Noroozian, Multi-microgrids approach for design and operation of future distribution networks based on novel technical indices, *Appl. Energy* 185 (2017) 650–663.
- [8] H. Afrakhte, P. Bayat, A contingency based energy management strategy for multi-microgrids considering battery energy storage systems and electric vehicles, *J. Energy Stor.* 27 (2020), 101087.
- [9] L. Ren, Y. Qin, Y. Li, P. Zhang, B. Wang, P.B. Luh, S. Han, T. Orekan, T. Gong, Enabling resilient distributed power sharing in networked microgrids through software defined networking, *Appl. Energy* 210 (2018) 1251–1265.

- [10] P. Tian, X. Xiao, K. Wang, R. Ding, A hierarchical energy management system based on hierarchical optimization for microgrid community economic operation, *IEEE Trans. Smart Grid* 7 (5) (2015) 2230–2241.
- [11] I.R.E Series, *Microgrids and Active Distribution Networks*, The Institution of Engineering and Technology, 2009.
- [12] E. Kuznetsova, Y-F. Li, C. Ruiz, E. Zio, An integrated framework of agent-based modelling and robust optimization for microgrid energy management, *Appl. Energy* 129 (2014) 70–88.
- [13] Y. Du, Z. Wang, G. Liu, X. Chen, H. Yuan, Y. Wei, F. Li, A cooperative game approach for coordinating multi-microgrid operation within distribution systems, *Appl. Energy* 222 (2018) 383–395.
- [14] D. Wang, J. Qiu, L. Reedman, K. Meng, L.L. Lai, Two-stage energy management for networked microgrids with high renewable penetration, *Appl. Energy* 226 (2018) 39–48.
- [15] V.-H. Bui, A. Hussain, H.-M. Kim, A multiagent-based hierarchical energy management strategy for multi-microgrids considering adjustable power and demand response, *IEEE Trans. Smart Grid* 9 (2) (2016) 1323–1333.
- [16] Z. Li, Y. Xu, Optimal coordinated energy dispatch of a multi-energy microgrid in grid-connected and islanded modes, *Appl. Energy* 210 (2018) 974–986.
- [17] R.A. Gupta, N.K. Gupta, A robust optimization based approach for microgrid operation in deregulated environment, *Energy Convers. Manage.* 93 (2015) 121–131.
- [18] Z. Wang, B. Chen, J. Wang, Decentralized energy management system for networked microgrids in grid-connected and islanded modes, *IEEE Trans. Smart Grid* 7 (2) (2015) 1097–1105.
- [19] A. Hussain, V.-H. Bui, H.M. Kim, A resilient and privacy-preserving energy management strategy for networked microgrids, *IEEE Trans. Smart Grid* 9 (3) (2016) 2127–2139.

- [20] A. Hussain, V.-H. Bui, H.-M. Kim, Robust optimization-based scheduling of multi-microgrids considering uncertainties, *Energies* 9 (4) (2016) 278.
- [21] Z. Wang, K. Yang, X. Wang, Privacy-preserving energy scheduling in microgrid systems, *IEEE Trans. Smart Grid* 4 (4) (2013) 1810–1820.
- [22] A. Hussain, V.-H. Bui, H.-M. Kim, An effort-based reward approach for allocating load shedding amount in networked microgrids using multiagent system, *IEEE Trans. Ind. Inf.* 16 (4) (2019) 2268–2279.
- [23] H. Karimi, S. Jadid, A. Makui, Stochastic energy scheduling of multi-microgrid systems considering independence performance index and energy storage systems, *J. Energy Stor.* 33 (2021), 102083.
- [24] J. Qiu, J. Zhao, D. Wang, Y. Zheng, Two-stage coordinated operational strategy for distributed energy resources considering wind power curtailment penalty cost, *Energies* 10 (7) (2017) 965.
- [25] L. Luo, S.S. Abdulkareem, A. Rezvani, M.R. Miveh, S. Samad, N. Aljojo, M. Pazhoohesh, Optimal scheduling of a renewable based microgrid considering photovoltaic system and battery energy storage under uncertainty, *J. Energy Stor.* 28 (2020), 101306.
- [26] J.C.S. Sousa, O.R. Saavedra, S.L. Lima, Decision making in emergency operation for power transformers with regard to risks and interruptible load contracts, *IEEE Trans. Power Deliv.* 33 (4) (2017) 1556–1564.
- [27] A. SoltaniNejad, S. Hedayeghparast, M. Mehdinejad, H. Shayanfar, A novel stochastic energy management of a microgrid with various types of distributed energy resources in presence of demand response programs, *Energy* 160 (2018) 257–274.
- [28] <https://www.vestas.com/>.
- [29] <https://www.aemo.com.au/>.
- [30] <https://pvwatts.nrel.gov/>. [31] <http://www.bom.gov.au/>. [32] K. Darrow, R. Tidball, J. Wang, A. Hampson, *Catalog of CHP Technologies*; 2015, US

Environmental Protection Agency and the US Department of Energy, 2017, p. 23.

[33] J. Qiu, K. Meng, Y. Zheng, Z.Y. Dong, Optimal scheduling of distributed energy resources as a virtual power plant in a transactive energy framework, *IET Gen. Transm. Distrib.* 11 (13) (2017) 3417–3427.

[34] K. Mongird, V.V. Viswanathan, P.J. Balducci, MdJE. Alam, V. Fotedar, V. S. Koritarov, B. Hadjerioua, *Energy Storage Technology and Cost Characterization Report*. No. PNNL-28866, Pacific Northwest National Lab. (PNNL), Richland, WA (United States), 2019

[35] C. Mon´e, M. Hand, M. Bolinger, J. Rand, D. Heimiller, J. Ho, *2015 Cost of Wind Energy Review*. No. NREL/TP-6A20-66861, National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2017.

[36] N. Augustine, S. Suresh, P. Moghe, K. Sheikh, Economic dispatch for a microgrid considering renewable energy cost functions, in: *Proceedings of the 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, IEEE, 2012, pp. 1–7.

[37] <https://www.eia.gov/naturalgas/>.

[38] Z. Yi, Y. Xu, W. Gu, W. Wu, A multi-time-scale economic scheduling strategy for virtual power plant based on deferrable loads aggregation and disaggregation, *IEEE Trans. Sustain. Energy* 11 (3) (2019) 1332–1346.

[39] Z. Yi, Y. Xu, J. Hu, M.-Y. Chow, H. Sun, Distributed, neurodynamic-based approach for economic dispatch in an integrated energy system, *IEEE Trans. Ind. Inf.* 16 (4) (2019) 2245–2257.