

مدیریت انرژی چندسطحی ریزشبکه DC با تاکید بر توزیع توان بهینه بین منابع تولید و ذخیره‌سازها

ایمان طالب‌نیا، حامد هاشمی دزکی، مریم‌السادات اخوان حجازی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

دانشگاه کاشان

کاشان، ایران

talebniaiman@yahoo.com, hamed.hashemi@gmail.com, akhavajhejazi@gmail.com

۱. مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از تولیدات پراکنده تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر در شبکه انرژی الکتریکی توسعه یافته است [۱-۳]. از مزایای استفاده از منابع تولید پراکنده می‌توان به کاهش تلفات انتقال انرژی الکتریکی، بهبود شرایط زیست‌محیطی، کاهش حجم گازهای گلخانه‌ای تولیدشده اشاره نمود [۲]. در این میان ساختارهای مختلفی برای تولید انرژی از این منابع و طراحی ریزشبکه‌ها ارائه شده است. ریزشبکه‌های AC و DC با دیدگاه‌های مختلفی بر اساس استفاده گسترده از منابع تولید پراکنده ارائه شده و مورد استفاده قرار گرفته است [۴]. استفاده از ریزشبکه‌های DC بر اساس خروجی جریان مستقیم بسیاری از تولیدکننده‌های تجدیدپذیر مانند مولدهای خورشیدی، بادی و ... و همچنین مصرف جریان مستقیم بخش عمده‌ای از تجهیزات فشار ضعیف در سال‌های گذشته مورد توجه ویژه قرار گرفته است [۵].

از آنجایی که در ریزشبکه DC تغییرات بار، عدم قطعیت تولید منابع تجدیدپذیر و رخدادهای گوناگونی متصور است، کنترل ریزشبکه با قابلیت اطمینان بالا، سرعت پاسخ سریع، کیفیت توان بالا و ... اهمیت بالایی دارد [۵و۶].

در اغلب کارهای انجام شده مانند [۵-۸] در زمینه کنترل ریزشبکه‌های DC، وجوه کنترلی و فنی در الویت قرار داشته‌اند و مسائل بهره‌برداری بهینه و کاهش هزینه‌های عملیاتی مورد توجه قرار نگرفته است. در حالی که بهره‌برداری بهینه، کاهش هزینه‌های سیستم، افزایش طول عمر تجهیزات به‌ویژه ذخیره‌سازها بر اساس ماهیت رفتاری و ساختاری خود در یک ریزشبکه بسیار مهم و حیاتی است.

چکیده — کنترل ریزشبکه‌های DC و برقراری قیود فنی شبکه از قبیل ولتاژ شبکه امری ضروری است. در کنار موضوع کنترل ریزشبکه‌ها، توزیع بهینه توان و مدیریت انرژی ریزشبکه نیز بسیار حائز اهمیت است که در بیشتر کارهای انجام شده قبلی، این موضوع مغفول مانده است. در این مقاله روش نوینی برای مدیریت انرژی چندسطحی به منظور دستیابی به سیستمی با قابلیت اطمینان بالا، دارای دقت کنترل و سرعت پاسخگویی مناسب، کیفیت توان بالا و همچنین هزینه بهره‌برداری بهینه ارائه شده است. ساختار روش ارائه شده دارای سه سطح کنترلی و مدیریت انرژی می‌باشد. در روش پیشنهادی علاوه بر کنترل سطح اول و دوم که در کنترل ریزشبکه‌ها متداول است، توزیع اقتصادی و بهینه توان بین منابع تولید و ذخیره‌سازهای انرژی در سطح سوم اجرا خواهد شد. یکی از مزایای روش پیشنهادی، ارائه سطح سوم در کنترل ریزشبکه است. در نظرگیری توابع هزینه و هزینه حاشیه‌ای منابع تولید تجدیدناپذیر و ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی یکی دیگر از مزایای روش پیشنهادی است. روش پیشنهادی بر روی یک ریزشبکه نمونه دربرگیرنده منابع تولید تجدیدپذیر خورشیدی، بادی، منابع تجدیدناپذیر، ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی پیاده‌سازی گردیده است. نتایج به‌دست آمده دلالت بر کارایی و موثر بودن استفاده از روش پیشنهادی هم در کنترل ریزشبکه و هم در توزیع بهینه توان و کاهش هزینه‌های عملیاتی و بهره‌برداری سیستم دارد.

واژه‌های کلیدی — مدیریت انرژی؛ ریزشبکه DC توزیع بهینه توان؛ کنترل چندسطحی؛ منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر

- سطح اول: کنترل اولیه
- سطح دوم: کنترل ثانویه
- سطح سوم: توزیع بهینه و اقتصادی توان

۱.۲. سطح کنترل اولیه

تنظیم ولتاژ باس DC عموماً تابعی برای تضمین بهره‌برداری پایدار ریزشبه است. شایان ذکر است که منابع تجدیدپذیر انرژی در نقطه حداکثر توان (MPPT) خود کار می‌کنند [۱۲]. در سطح اول، رابطه‌های افی برای کنترل ولتاژ خروجی ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی براساس توان خروجی آن‌ها به صورت رابطه (۱) می‌باشد [۱۳]:

$$V_i = V_o - m_i P_i \quad (1)$$

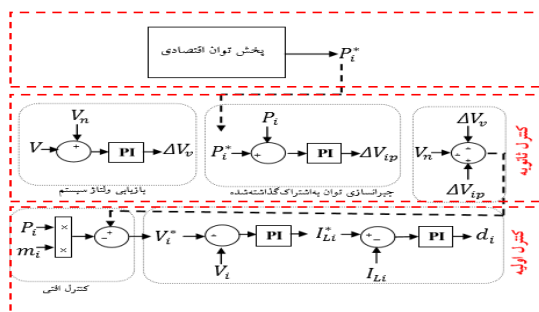
که V_i ، m_i و P_i به ترتیب معرف ولتاژ خروجی، ضریب افی و توان خروجی ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی نام است. V_o نیز معمولاً برابر ولتاژ آستانه در نظر گرفته می‌شود. P_{net} نیز برابر توان مورد نیاز شبکه است که برابر اختلاف مصرف توان مصرفی و توان تولیدی منابع تجدیدپذیر انرژی الکتریکی می‌باشد:

$$P_{net} = P_{loads} - P_{RESS} \quad (2)$$

که P_{loads} و P_{RESS} به ترتیب معرف توان بارها و توان تولیدی منابع تجدیدپذیر انرژی الکتریکی می‌باشند. قابل توجه است که برای جلوگیری از تجاوز ولتاژ از محدوده مجاز خود به علت عدم تعادل توان، توان خروجی ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی باید معادل P_{net} در زمان واقعی باشد. بنابراین ولتاژ باس سیستم در حالت ماندگار برابر خواهد بود با:

$$V = V_n - m_{eq} P_{net} \quad (3)$$

که V برابر ولتاژ باس سیستم است و m_{eq} برابر ضریب افی معادل است [۱۳]. لذا براساس دیاگرام کنترلی نشان داده شده در شکل (۱) انتظار می‌رود که کمترین افت ولتاژ رخ دهد و همچنین عدم تعادل توان در ریزشبه حذف گردد.



شکل ۱: دیاگرام کنترلی ریزشبه

در مراجع معدودی از قبیل [۹-۱۱]، کنترل چندسطحی ریزشبه DC مورد توجه قرار گرفته است. در مراجع [۹ و ۱۰]، محدودیت سطح شارژ باتری به عنوان ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی به عنوان سطح سوم در تکمیل کنترل اولیه و ثانویه لحاظ شده است. همچنین در [۱۱]، مدیریت انرژی در ارتباط با کنترل ریزشبه-های DC ارائه شده است. روش بیان شده در [۱۱] مبتنی بر استفاده حداقلی از منابع تولید پراکنده تجدیدناپذیر است.

از مواردی که در مراجعی مانند [۹-۱۱] به آن پرداخته نشده است، تنوع منابع تولید پراکنده و سیستم هیبریدی بادی-خورشیدی است. در این مراجع تنها منابع تولید پراکنده خورشیدی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. از دیگر فرضیات ساده-کننده‌ای که در کارهای گذشته می‌توان به آن اشاره کرد، ساده‌سازی هزینه‌های باتری و هزینه‌های مولدهای تجدیدناپذیر در سطح سوم کنترل ریزشبه است. در این مقاله، در تکمیل روش‌های ارائه شده چندسطحی مدیریت انرژی ریزشبه‌های DC، یک روش نوین و تکامل یافته ارائه خواهد شد. در روش پیشنهادی از مدل‌های دقیق هزینه باتری و مولدهای تجدیدناپذیر استفاده شده است. یکی از مزایای روش پیشنهادی، کنترل سطح سوم به صورت برخط و بر اساس سطح دشارژ، شرایط باتری و همچنین رابطه هزینه‌ای دقیق مولد تجدیدناپذیر (دیزل ژنراتور) است.

همچنین از آنجایی که عدم قطعیت تولید و خروجی منابع تولید پراکنده بادی نسبت به خورشیدی بسیار زیاد است، در نظرگیری ریزشبه دربرگیرنده مولد بادی می‌تواند عملیاتی شدن روش مدیریت انرژی را کاهش دهد. یکی از مزایای روش پیشنهادی و مورد مطالعه در این مقاله، ارائه روش و پیاده‌سازی آن بر روی یک ریزشبه دربرگیرنده مولدهای بادی-خورشیدی، ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی و منابع تولید پراکنده تجدیدناپذیر است.

روش پیشنهادی بر روی یک ریزشبه دربرگیرنده مولدهای خورشیدی، بادی، دیزل ژنراتور، ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی، شرایط متغیر بار ریزشبه پیاده-سازی می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی بر اساس روش کنترلی متداول (کنترل اولیه و ثانویه) مانند روش‌های ارائه شده در [۵-۸] و روش سه‌سطحی ارائه شده مقایسه خواهند شد. مزایای روش پیشنهادی از قبیل هزینه‌های بهره‌برداری در سناریوهای مختلف کنترل و بهره‌برداری ریزشبه نیز مورد بررسی و تحلیل قرار خواهند گرفت.

۲. روش پیشنهادی مدیریت انرژی چندسطحی

ریزشبه

در روش پیشنهادی برای کنترل ریزشبه، سه سطح زیر وجود دارد که در این بخش به تفصیل تشریح می‌گردد:

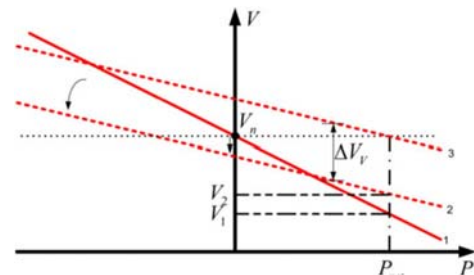
۳.۲. سطح کنترل ثانویه

خطاهای انحراف ولتاژ باس و تعقیب توان در حالت ماندگار ناشی از امپدانس خط از مشکلات اساسی کنترل توزیع شده است. بنابراین، تنظیم ولتاژ باس و جبرانسازی توان به اشتراک گذاشته در کنترل ثانویه انجام می‌شود تا اینکه دقت سیستم افزایش یابد [۱۴].

الف) تنظیم ولتاژ باس: منحنی مشخصه V/P سیستم براساس رابطه (۴) با منحنی ۱ در شکل (۲) نمایش داده شده است. این منحنی در ولتاژ نامی V_n با محور ولتاژ برخورد دارد. همچنین براساس این شکل، در نقطه توان P_{net} ، ولتاژ برابر V_1 است. ولی در واقعیت، وجود امپدانس خط موجب تغییر ضریب افتی و ولتاژ آستانه از مقدار نامی می‌شود. پس در این صورت رابطه بین ولتاژ سیستم و توان شبکه به صورت زیر خواهد بود:

$$V = (V_n + \delta V) - (m_{eq} + \delta m)P_{net} \quad (4)$$

که δV و δm به ترتیب معرف تغییرات ولتاژ آستانه و ضریب افتی هستند [۱۴]. اثر δV معادل با حرکت منحنی مشخصه بر روی محور ولتاژ است. اما δm موجب تغییر شیب منحنی مشخصه می‌شود. منحنی مشخصه سیستم واقعی به صورت منحنی ۲ در شکل (۲) نمایش داده شده است. حال ولتاژ باس در این حالت برای نقطه توان P_{net} برابر V_2 است. توجه شود که در این شرایط تغییرات شیب خط (ضریب افتی) و ولتاژ آستانه به گونه‌ای بوده است که ولتاژ در شرایط جدید نسبت به شرایط قبل افزایش یافته است.



شکل ۲: تغییرات منحنی مشخصه سیستم متناسب با تنظیم ولتاژ باس

در نهایت، ولتاژ باس زمان واقعی (V) با مقدار ولتاژ نامی مقایسه شده و اختلاف این دو ولتاژ توسط کنترل‌کننده PI پردازش شده تا اینکه برای جبرانسازی ولتاژ ΔV_V انجام شود [۱۵-۱۸]:

$$\Delta V_V = G_{BVR} (V - V_n) \quad (5)$$

که G_{BVR} برابر ضریب تقویت‌کننده کنترل‌کننده PI برای تنظیم ولتاژ باس است. باید توجه داشت که جبرانسازی ولتاژ به ولتاژ آستانه همه ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی اضافه می‌شود. در این صورت ولتاژ آستانه به اندازه ΔV_V افزایش می‌یابد. این بدین معنی است که رابطه ولتاژ باس به صورت عمودی

در شکل (۲) جهش پیدا می‌کند. همچنین توجه شود که دامنه و جهت تغییرات وابسته به میزان و علامت ΔV_V است. بنابراین منحنی ۳ در شکل (۲) متناسب با ترمیم ولتاژ باس است. بنابراین ولتاژ باس در مقدار نامی خود حفظ شده و مقدار انحراف ولتاژ در حالت ماندگار صفر است.

ب) جبرانسازی توان مشترک: خطای تعقیب توان ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی به علت اختلاف در اندازه‌گیرهای ولتاژ باس محلی مبدل القاء شده است. از اینرو جبرانسازی توان به اشتراک گذاشته شده برای کمینه‌کردن خطاهای تعقیب توان در کنترل ثانویه اجرا می‌شود. در این حالت، توان خروجی مرجع (P_i^*) با توان خروجی واقعی (P_i) همانند شکل (۲) مقایسه می‌شود. سپس اختلاف این دو توان توسط کنترل‌کننده PI پردازش شده و در نهایت ولتاژ متناسب با توان جبران شده تولید می‌شود:

$$\Delta V_{iP} = G_{PSC} (P_i - P_i^*) \quad (6)$$

که G_{PSC} برابر با گین کنترل‌کننده PI مربوط به جبرانسازی توان به اشتراک گذاشته شده BES_i (ذخیره‌ساز انرژی نام) است. توجه شود که توان مرجع براساس پخش توان بهینه یا کنترل ثالثیه تعیین می‌شود. در نهایت ولتاژ آستانه برای تنظیم ولتاژ و جبرانسازی توان به اشتراک گذاشته شده به صورت زیر خواهد بود:

$$V_{oi} = V_n + \Delta V_V + \Delta V_{iP} \quad (7)$$

در نهایت به هنگام‌سازی V_{oi} برای مبدل الکترونیک قدرت برای تنظیم ولتاژ آستانه همانند شکل (۱) ارسال می‌شود [۱۰].

۳.۳. سطح کنترل ثالثیه (پخش توان اقتصادی)

در این بخش، پخش توان اقتصادی با هدف کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری واحدهای مختلف موجود در ریزشبه ارائه می‌شود، سپس توان‌های مرجع تولیدی واحدهای سیستم با جبرانسازی توان به اشتراک گذاشته شده در کنترل ثانویه تعقیب می‌شوند.

الف) کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری سیستم: هزینه بهره‌برداری شامل هزینه‌های ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی، منابع تجدیدناپذیر انرژی و منابع تجدیدپذیر انرژی از قبیل مولدهای بادی و خورشیدی است:

$$C_T = \sum C_{BESi} + C_{NRES} + \sum C_{RESj} \quad (8)$$

که C_T برابر هزینه بهره‌برداری سیستم است؛ C_{BESi} ، C_{NRES} و C_{RESj} نیز به ترتیب برابر هزینه بهره‌برداری ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی، منابع تجدیدناپذیر و منابع تجدیدپذیر هستند. قیود این مسأله به شرح زیر است:

$$\sum P_{BESi} = P_{Loads} - (P_{RES} + P_{NRES}) \quad (9)$$

$$P_{BESi}^{min} \leq P_{BESi} \leq P_{BESi}^{max} \quad (10)$$

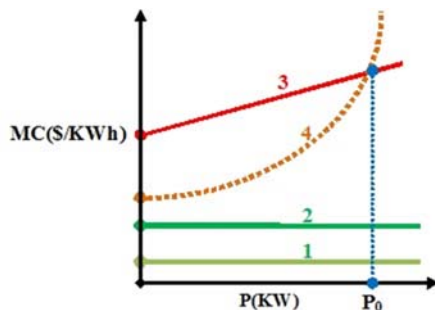
$$DOD_i^{min} \leq DOD_i \leq DOD_i^{max} \quad (11)$$

K می‌باشد که در آن که RC_i برابر هزینه جایگزینی ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی است و V_{ik} نیز برابر ولتاژ ترمینال باتری در K امین تکرار خواهد بود، لذا:

$$K = \frac{RC_i \cdot C_R}{\Gamma_R \cdot V_{ik}} \quad (18)$$

ه) **پایه‌سازی عملیاتی روش پیشنهادی سطح سوم توزیع بهینه توان**

منحنی‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در شکل (۳) به ترتیب معرف هزینه حاشیه‌ای منابع تجدیدپذیر نوع اول و دوم (خورشیدی و بادی)، مولد تجدیدپذیر و ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی می‌باشند. همانگونه که در شکل (۳) نیز نشان داده شده است، هزینه حاشیه‌ای مولدهای فتوولتائیک و بادی پایین است، از اینرو مبدل این مولدها همواره در حالت تولید توان حداکثر باید بهره‌برداری شوند. بنابراین باتری‌ها و منابع تجدیدپذیر مانند دیزل ژنراتورها باید توان خروجی خود را براساس توان خالص مورد نیاز شبکه حاصل از متفاوت بارها و توان تولیدی منابع تجدیدپذیر تنظیم کنند. هزینه حاشیه‌ای ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی در مقادیر کم توان دشارژ، کمتر از هزینه حاشیه‌ای منابع تجدیدپذیر انرژی الکتریکی می‌باشد. با افزایش توان تحویلی باتری در حالت دشارژ، هزینه حاشیه‌ای آن افزایش یافته تا جایی که در یک نقطه با هزینه حاشیه‌ای منابع تجدیدپذیر انرژی الکتریکی برابری می‌کند و در سطوح دشارژ بالاتر از این نقطه، هزینه حاشیه‌ای ذخیره‌سازها از منابع تجدیدپذیر انرژی الکتریکی پیشی می‌گیرد.



شکل ۳: مقایسه هزینه حاشیه‌ای برای منابع ریزشبه مورد مطالعه

هنگامی که توان دشارژ ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی برابر P_0 باشد، باید به عنوان توان آستانه P_{net} برای فعال‌سازی منابع تجدیدپذیر انرژی الکتریکی تنظیم شود. حال هنگامی که P_{net} بیشتر از P_0 است، منابع تجدیدپذیر از حالت منفعلی به وضعیت کنترل توان، تغییر وضعیت می‌دهد. لذا تعیین مقدار P_0 به صورت دقیق در سطح سوم کنترل ریزشبه ضروری است که به صورت گام به گام به شرح زیر خواهد بود:

گام اول: ابتدا باید هزینه حاشیه‌ای ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی را در هر سطح از توان تحویلی آن محاسبه نمود. بدین منظور با استفاده از (۱۹) ظرفیت واقعی باتری در هر لحظه از بهره‌برداری محاسبه خواهد شد [۲۲]:

$$E = E_0 - \left(\frac{KQ}{Q - C_A} \right) + A \exp(-BC_A) \quad (19)$$

$$0 \leq P_{NRES} \leq P_{NRES}^{max} \quad (12)$$

$$0 \leq P_{RESj} \leq P_{RESj}^{max} \quad (13)$$

که DOD_i^{min} و DOD_i^{max} به ترتیب معرف حداقل و حداکثر مقدار حالت دشارژ (DOD) هستند. P_{NRES}^{max} نیز معرف حداکثر مقدار توان تجدیدپذیر انرژی است. همچنین حداکثر مقدار توان منابع تجدیدپذیر به صورت P_{RESj}^{max} نمایش داده شده است.

در روش پیشنهادی برای حل مسأله پخش توان اقتصادی، از روش مقایسه هزینه حاشیه‌ای بر اساس مفاهیم روش لاگرانژ برای حل مسئله بهینه‌سازی توزیع توان [۱۷] استفاده خواهد شد. از مزایای روش مورد استفاده برای توزیع اقتصادی توان به کمک هزینه حاشیه‌ای می‌توان به سادگی و قابلیت اجرای زمان‌واقعی آن در شرایط بهره‌برداری سیستم اشاره کرد.

ب) **محاسبه هزینه حاشیه‌ای منابع تجدیدپذیر انرژی الکتریکی:** هزینه حاشیه‌ای منابع تجدیدپذیر انرژی مانند سیستم فتوولتائیک و بادی بسیار کم است، لذا در طرح پیشنهادی منابع مذکور تا حدی که می‌توانند بار را تغذیه می‌کنند.

ج) **هزینه حاشیه‌ای منابع تجدیدپذیر انرژی:** هزینه تولید توان در منابع تجدیدپذیر انرژی به صورت (۱۴) است. به عبارتی هزینه تولید توان به صورت یک معادله سهمی از توان تولیدی است. در این رابطه، a و b ضرایب ثابت معادله هزینه هستند که وابسته به نوع سوخت و تکنولوژی مولد تجدیدپذیر هستند و با توجه به [۱۹] مقدار آنها قابل محاسبه است. هزینه حاشیه‌ای منابع تجدیدپذیر انرژی به صورت رابطه (۱۵) و هزینه حاشیه‌ای این مولدها به صورت یک معادله خط خواهد بود [۲۰].

$$C(P_{NRES}) = a + bP_{NRES} + cP_{NRES}^2 \quad (14)$$

$$MC_{NRES} = b + 2cP_{NRES} \quad (15)$$

د) **هزینه حاشیه‌ای ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی (باتری):** طول عمر باتری با فرض دشارژ آن (Γ_R) به صورت (۱۶) خواهد بود [۲۱]:

$$\Gamma_R = L_R \cdot D_R \cdot C_R \quad (16)$$

که L_R ، D_R و C_R به ترتیب معرف سیکل عمر نامی، DOD تعیین شده برای سیکل عمر نامی و ظرفیت آمپرساعت ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی هستند. هزینه حاشیه‌ای ذخیره‌ساز در هر لحظه مطابق با (۱۷) خواهد بود:

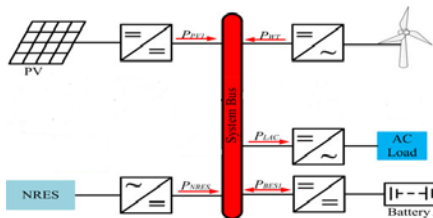
$$MC_{BESi} = \left(\frac{D_{Aik}}{D_R} \right) u_0 \cdot e^{u_1 \left(\frac{D_{Aik}}{D_R} - 1 \right)} \cdot \left(\frac{K}{C_{Aik}} \right) \quad (17)$$

که رابطه فوق D_A برابر DOD واقعی است. همچنین ضرایب u_0 و u_1 متناسب با برازش منحنی با نتایج آزمایشگاهی است، همچنین C_A نیز معرف ظرفیت واقعی ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی می‌باشد و k نیز یک مقدار ثابت در تکرار

$$P_{NRES} = \begin{cases} 0 & P_{net} \leq P_o \\ P_{net} - P_o & P_o < P_{net} \leq P_o + P_{NRES}^{max} \\ P_{NRES}^{max} & P_o + P_{NRES}^{max} < P_{net} \end{cases} \quad (23)$$

۳. پیاده‌سازی روش پیشنهادی و نتایج شبیه‌سازی

در شکل (۴) ساختار کلی ریزشبه مورد مطالعه نشان داده شده است. همانگونه که در شکل (۴) قابل مشاهده است، منبع بادی مورد استفاده با استفاده از ژنراتور PMSG با توان نامی ۹ کیلووات می‌باشد. همچنین منبع فتوولتائیک با توان نامی ۱۰ کیلووات توسط یک مبدل افزایشنده به باس DC وصل شده است. باتری مورد استفاده در شبیه‌سازی از نوع Nickel metal hydrid-137Ah [۲۳] با توان نامی ۹/۵ کیلووات به‌منظور ذخیره‌ساز انرژی استفاده شده است که توسط یک مبدل دوطرفه کاهشنده-افزاینده به باس DC متصل است.



شکل ۴: ساختار کلی ریزشبه مورد مطالعه

نتایج حاصل از شبیه‌سازی (ولتاژ باس DC) در مدت زمان ۱۰ ثانیه برای شرایط تغییرات مختلف بار، سرعت متغیر باد، شدت تابش گوناگون و ... بصورت زیر حاصل گردیده است. همانطور که در شکل زیر نیز مشاهده می‌گردد ولتاژ نامی باس DC، ۶۴۰ ولت در نظر گرفته شده است که در محدوده $\pm 5\%$ درصد ولتاژ نامی نوسان می‌کند. این تغییرات ولتاژ نشان می‌دهد که کنترل اولیه و ثانویه و استراتژی کنترلی پیشنهادی از دیدگاه قیود شبکه و مشخصه‌های کیفیت توان ریزشبه رضایت‌بخش است. همچنین از دیزل ژنراتور با توان نامی ۸ کیلووات به عنوان منبع تجدید ناپذیر انرژی (NRES) استفاده شده است که ابتدا توسط یک مبدل یکسوساز یکسوساز شده و در نهایت توسط یک مبدل افزایشنده به باس DC متصل می‌گردد. بارهای متناوب متغیر با زمان نیز توسط یک اینورتر به باس DC ریزشبه متصل شده‌اند. ضمناً سیستم مورد اشاره در محیط نرم افزار MATLAB/SIMULINK شبیه‌سازی شده است که در شکل (۵)، نمای کلی آن قابل مشاهده است.

با توجه به شکل (۷)، مشاهده می‌گردد هزینه حاشیه‌ای باتری در سطوح پایین دشارژ و تا قبل از رسیدن به لحظه ۳ ثانیه کوچکتر از باتری می‌باشد و در

که در رابطه فوق E برابر ولتاژ ترمینال ذخیره‌ساز انرژی برحسب (V) ، E_0 برابر با ولتاژ نامی آن بر حسب (V) ، K برابر با ثابت دوقطبی بر حسب (V/Ah) ، Q برابر با ظرفیت نامی ذخیره‌ساز بر حسب (Ah) و عموماً برابر با 10.5% ظرفیت نامی آن در نظر گرفته می‌شود. ثابت A نیز نشان دهنده مقدار بخش نمایی رابطه فوق بر حسب (V) و B نشان دهنده معکوس ثابت زمانی در بخش نمایی رابطه فوق بر حسب (Ah^{-1}) می‌باشد. به‌منظور سادگی در محاسبات از جمله سوم رابطه فوق می‌توان صرفنظر نمود و در نهایت رابطه (۲۰) استخراج می‌شود:

$$C_A = \frac{Q(E_0 - E - K)}{E_0 - E} \quad (20)$$

حال با جایگذاری رابطه فوق در رابطه (۱۷)، هزینه حاشیه‌ای باتری به‌صورت تابعی از جریان، ولتاژ و DOD واقعی باتری به‌صورت رابطه (۲۱) به‌دست خواهد آمد. لذا با استفاده از رابطه فوق هزینه حاشیه‌ای باتری در هر لحظه بر حسب $(\$/kWh)$ بدست خواهد آمد.

$$MC_{BES} = f(D_A, i_{BES}, V_{BES}) \quad (21)$$

گام دوم: با استفاده از رابطه (۱۵)، مقدار هزینه حاشیه‌ای منابع تجدیدناپذیر انرژی را می‌توان در هر لحظه بر حسب $(\$/kWh)$ بدست آورد، شایان ذکر است که در هر لحظه توان خروجی ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی به عنوان ورودی برای (۱۵) در نظر گرفته می‌شود.

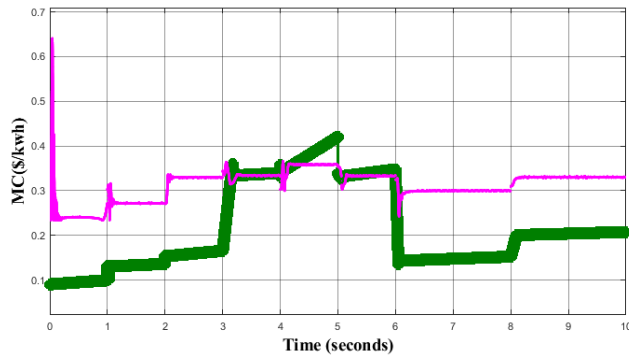
گام سوم: حال با استفاده از روابط (۱۵) و (۲۱)، هزینه‌های حاشیه‌ای ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی و منابع تجدیدناپذیر انرژی الکتریکی مانند دیزل ژنراتور را در هر لحظه مقایسه می‌کنیم و زمانی که مقدار هزینه‌های حاشیه‌ای فوق برابر باشند مقدار P_0 بدست خواهد آمد که این مقدار برابر با آستانه فعال‌سازی برای منبع تجدیدناپذیر لحاظ می‌گردد.

گام چهارم: در نهایت به‌منظور بررسی بهتر سطح سوم کنترلی می‌توان هزینه‌های بهره‌برداری مربوط به ذخیره‌ساز و منابع تجدیدناپذیر را با استفاده از (۲۲) بدست آورد که در آن هزینه مجموع ذخیره‌ساز و منابع تجدیدناپذیر انرژی الکتریکی بر حسب $(\$)$ می‌باشد. همچنین C_{BES} و C_{NRES} به ترتیب برابر با هزینه کل ذخیره‌ساز و منابع تجدیدناپذیر بر حسب $(\$/h)$ می‌باشند. از اینرو، میزان توان تحویلی ذخیره‌ساز و منابع تجدیدناپذیر مطابق روابط (۲۳) و (۲۴) تعیین می‌گردد:

$$C_T = \int_0^T C_{BES} dt + \int_0^T C_{NRES} dt \quad (22)$$

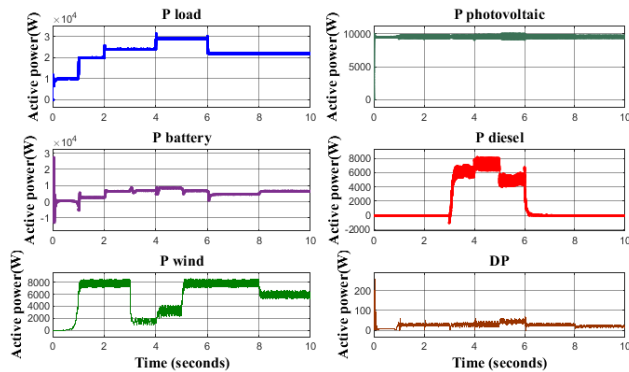
$$P_{BESs} = \begin{cases} P_{net} & P_{net} \leq P_o \\ P_o & P_o < P_{net} \leq P_o + P_{NRES}^{max} \\ P_{net} - P_{NRES}^{max} & P_o + P_{NRES}^{max} < P_{net} \end{cases} \quad (23)$$

باتری) کوچک و کمتر از ۱۰۰ وات می‌باشد. با توجه به (۲۳) و (۲۴)، تا قبل از لحظه ۳ ثانیه $P_{net} \leq P_0$ و مقدار توان باتری برابر با P_{net} می‌باشد. در لحظه ۳ ثانیه، $(P_0 < P_{net} \leq P_0 + P_{NRES}^{max})$ بوده و توان خروجی باتری برابر با P_0 و توان خروجی دیزل برابر با $(P_{net} - P_0)$ خواهد بود. در لحظه ۴ ثانیه $(P_0 + P_{NRES}^{max} < P_{net})$ است، در نتیجه در این حالت اولویت اصلی حفظ ولتاژ باس DC در محدوده مجاز می‌باشد و بحث اقتصادی در اولویت بعدی قرار خواهد گرفت، بنابراین دیزل حداکثر توان خود را به ریزشبه تزریق می‌کند و باتری نیز فارغ از مقدار P_0 توانی معادل با $(P_{net} - P_{NRES}^{max})$ به ریزشبه جهت تامین توان بار، تزریق می‌کند.



شکل ۷: مقایسه هزینه حاشیه‌ای دیزل و باتری در هر لحظه از زمان

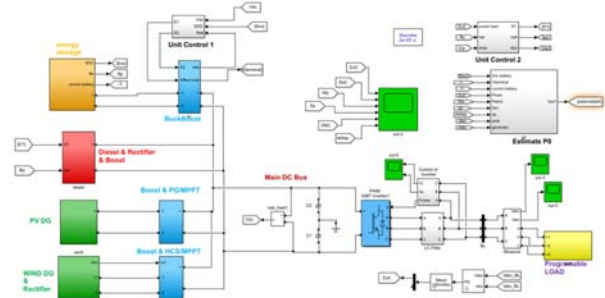
همچنین در جدول (۱) توزیع توان توسط منابع مختلف در لحظات مختلف آورده شده است. در نهایت با استفاده از رابطه (۲۲)، مقدار هزینه کل مربوط به دیزل و باتری طی یک ساعت در شرایط تکرار چرخه‌ای ۱۰ ثانیه شبیه‌سازی مذکور برابر با ۰/۶۲۶۴ دلار بر ساعت خواهد بود.



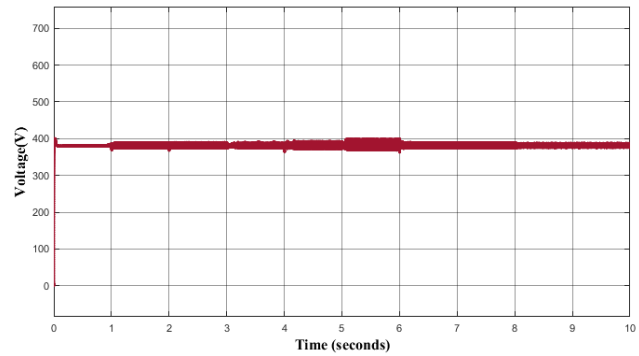
شکل ۸: توان‌های خروجی واحدهای مختلف سیستم

حال چنانچه سیستم را بدون در نظر گرفتن سطح سوم در نظر بگیریم، در لحظه ۳ ثانیه محدودیتی برای سطح دشارژ باتری وجود نداشته و باتری تا مقدار توان نامی خود ابتدا دشارژ شده و سپس دیزل وارد مدار خواهد شد، که هزینه حاشیه‌ای باتری نسبت به دیزل تا لحظه ۶ ثانیه بالاتر می‌باشد. لذا با استفاده از (۲۲) هزینه کل سیستم را در این حالت برابر با ۰/۶۷۳۲ دلار بر

لحظه ۳ ثانیه مقدار هزینه‌های حاشیه باتری و دیزل برابر خواهند بود لذا در این لحظه با حل سطح سوم کنترلی، مقدار P_0 بدست خواهد آمد که برابر با ۶/۹ کیلووات می‌باشد. در لحظه ۴ ثانیه اولویت اصلی ما حفظ پایداری ولتاژ ریزشبه می‌باشد، لذا مشاهده می‌گردد که در سطح دشارژ بالاتر از P_0 هزینه حاشیه‌ای باتری بیشتر از دیزل خواهد بود.



شکل ۵: نمایش ریزشبه در محیط MATLAB/SIMULINK



شکل ۶: نتایج شبیه‌سازی - منحنی ولتاژ باس DC ریزشبه

جدول ۱: مقدار توان‌های تولیدی واحدهای مختلف در مدت زمان شبیه‌سازی

زمان (ثانیه)	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
توان PV (کیلو وات)	۹/۴	۹/۴	۹/۶	۹/۶	۹/۲۵	۹/۲	۹/۲	۹/۳	۹/۵	۹/۵
توان مولد بادی (کیلو وات)	۰	۰	۸	۸	۸	۳	۱/۸	۸	۸	۰
توان باتری شارژ (کیلووات)	۰/۴۵	۶/۶۰	۴/۳۹	۴/۳۹	۶/۹۰	۸/۹۵	۶/۹	۶/۵	۲/۵	۰/۴۵
دیزل ژنراتور (کیلو وات)	۰	۰	۰	۰	۴/۸۵	۷/۸۵	۶	۰	۰	۰
بار (کیلووات)	۲۲	۲۲	۲۲	۲۲	۲۹	۲۹	۲۴	۲۴	۲۰	۱۰

با توجه به شکل (۷)، بدلیل عدم قطعیت شدت تابش خورشید و نیز سرعت باد مشاهده می‌گردد که توان‌های تولیدی منبع فتوولتائیک و نیز بادی در هر لحظه از زمان متغیر می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه خطای تعقیب توان در سطح دوم کنترلی حل شده است در شکل (۸) مشاهده می‌گردد که مقدار DP (اختلاف مقدار حالت تئوری و واقعی توان به اشتراک گذاشته شده توسط

controlled boost converters," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. PP, no. 1, pp. 1-1, 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2776281.

[6] X. Li et al., "Observer-based DC voltage droop and current feed-forward control of a DC microgrid," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. PP, no. 1, pp. 1-1, 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2684178.

[7] M. Cucuzzella, S. Trip, C. De Persis, X. Cheng, A. Ferrara and A. van der Schaft, "A Robust Consensus Algorithm for Current Sharing and Voltage Regulation in DC Microgrids," in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. PP, no. 1, pp. 1-1, 2018, doi: 10.1109/TCST.2018.2834878.

[8] S. Trip, M. Cucuzzella, X. Cheng and J. Scherpen, "Distributed Averaging Control for Voltage Regulation and Current Sharing in DC Microgrids," in *IEEE Control Systems Letters*, vol. PP, no. 1, pp. 1-1, 2018, doi: 10.1109/LCSYS.2018.2857559.

[9] Xiao, Jianfang, Peng Wang, and Leonardy Setyawan. "Multilevel energy management system for hybridization of energy storages in DC microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 7, no. 2, pp. 847-856, 2016.

[10] Xiao, Jianfang, Peng Wang, Leonardy Setyawan, and Qianwen Xu. "Multi-level energy management system for real-time scheduling of DC microgrids with multiple slack terminals," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 1, pp. 392-400, 2016.

[11] Joung, Kwang Woo, Dongmin Kim, DongHee Choi, Jung-Wook Park, Hee-Jin Lee, Seung-Mook Baek, Soo Hyoung Lee, Hak Ju Lee, and Jun Bo Sim. "Energy management system for stable operation of isolated microgrid," *CIREC-Open Access Proceedings Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 1737-1740, 2017.

[12] A. Saidi, and C. Benachaiba, "Simulation and control of solar wind hybrid renewable power system," in *Systems and Control (ICSC), 2017 6th International IEEE Conference*, pp. 51-56, 2017.

[13] S. Li, Shuhui, and K. Bao, "Study of battery modeling using mathematical and circuit oriented approaches," in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, vol. 1, no. 1, pp. 1-8, 2011.

[14] X. Jianfang, W. Peng, J. Chi, and C. F. Hoong, "Multi-level control of 586 grid-tied DC microgrids," in *Proc. IEEE PES Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf.*, vol. 1, no. 1, pp. 1-6, 2011.

[15] P. Wang, J. Xiao, L. Setyawan, C. Jin, and C. F. Hoong, "Hierarchical control of active hybrid energy storage system (HESS) in DC microgrids," in *Proc. IEEE 9th Conf. Ind. Electron. Appl.*, vol. 1, no. 1, pp. 569-574, 2014.

[16] S. Anand, B. G. Fernandes, and M. Guerrero, "Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low voltage DC microgrids," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 4, pp. 1900-1913, Apr. 2013.

[17] L. Xiaonan, J. M. Guerrero, S. Kai, and J. C. Vasquez, "An improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 4, pp. 1800-1812, Apr. 2014.

[18] T. Dragicevic, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, and D. Skrlac, "Supervisory control of an adaptive-droop regulated DC microgrid with battery management capability," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 2, pp. 695-706, Feb. 2014.

[19] L. Xiaonan, J. M. Guerrero, S. Kai, J. C. Vasquez, R. Teodorescu, and H. Lipei, "Hierarchical control of parallel AC-DC converter interfaces for hybrid microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 683-692, Mar. 2014.

[20] I. Yahyaoui, R. Ghraizi and F. Tadeo, "Operational cost optimization for renewable energy microgrids in Mediterranean climate," *2016 7th International Renewable Energy Congress (IREC)*, Hammamet, vol. 1, no. 1, pp. 1-6, 2016.

[21] S. S. Algburi and A. M. Ali, "Effect of diesel generator characteristics on the design optimization of a stand-alone hybrid micro-power system for Baghdad city," *2017 IEEE 3rd International Conference on Engineering Technologies and Social Sciences (ICETSS)*, Bangkok, vol. 1, no. 1, pp. 1-5, 2017.

[22] D. P. Jenkins, J. Fletcher, and D. Kane, "Lifetime prediction and sizing of lead-acid batteries for microgeneration storage applications," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 2, no. 1, pp. 191-200, 2008.

[23] T. Meng, K. Young, J. Koch, T. Ouchi, S. Yasuoka, "Failure mechanisms of nickel/metal hydride batteries with cobalt-substituted superlattice hydrogen-absorbing alloy anodes at 50 °C", *Batteries*, vol. 2, no. 1, pp. 267-279, 2016.

ساعت برآورد می‌گردد. مشاهده می‌گردد هزینه کل سیستم در مدت زمان ۱۰ ثانیه بدون در نظر گرفتن سطح سوم کنترلی، بالاتراز حالتی می‌باشد که سطح سوم کنترلی لحاظ شده است و این اختلاف هزینه در مدت زمان بهره‌برداری سالیانه یا عمر مفید شبکه عدد قابل توجهی خواهد بود. همچنین در شرایط افزایش عمر باتری و افزایش هزینه‌های متغیر آن، این ارقام افزایش چشمگیری خواهند داشت.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله روش جدیدی از مدیریت انرژی چندسطحی ریزشبه ارائه گردید. در روش پیشنهادی، دو سطح کنترل اولیه و ثانویه، ریزشبه را از دیدگاه فنی مورد بررسی قرار داده و به شارژ و دشارژ باتری و حفظ ولتاژ باس DC در محدوده مجاز و همچنین بازیابی ولتاژ و جبران‌سازی توان به اشتراک گذاشته شده توسط باتری می‌پردازند. در سطح سوم نیز توزیع اقتصادی توان واحدهای مختلف ریزشبه، با استفاده از روش مقایسه هزینه‌های حاشیه‌ای با هدف حداقل‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری سیستم ارائه گردید. از مزایای روش پیشنهادی می‌توان به استفاده از مدل دقیق هزینه‌ها، استفاده از روش لاگرانژ به صورت برخط و زمان واقعی در زمان بهره‌برداری و همچنین در نظر گرفتن تمامی منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر اشاره کرد. کارایی روش پیشنهادی بر روی یک ریزشبه دربرگیرنده مولدهای بادی و خورشیدی همراه با عدم قطعیت و تغییرات عمده بار و توان تولیدی منابع تجدیدپذیر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد با پیاده‌سازی روش پیشنهادی می‌توان هزینه‌های بهره‌برداری ریزشبه را در کنار برقراری کلیه قیود فنی کنترل ریزشبه حداقل نمود.

منابع

- [۱] علی کاظمی، "مکان‌یابی منابع انرژی پراکنده به منظور کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ و تبدیل آن به شبکه هوشمند خودترمیم"، سی و دومین کنفرانس بین-المللی برق (PSC2017)، تهران، ایران، ۱۳۹۶.
- [۲] حمید حسن‌زاده‌فرد، علیرضا جلیلیان، "تعیین مکان و اندازه بهینه منابع تولید پراکنده در سیستم توزیع با در نظر گرفتن بارهای الکتریکی و گرمایشی با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند"، سی‌امین کنفرانس بین‌المللی برق (PSC2015)، تهران، ایران، ۱۳۹۴.
- [3] S. Kansal, V. Kumar, B. Tyagi, "Optimal placement of different type of DG sources in distribution networks", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 53, no. 1, pp. 752-760, 2013.
- [4] J. Zhou, H. Zhang, Q. Sun, D. Ma and B. Huang, "Event-based distributed active power sharing control for interconnected AC and DC microgrids," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. PP, no. 1, pp. 1-1, 2018, doi: 10.1109/TSG.2017.2724062.
- [5] M. Mokhtar, M. I. Marei and A. A. El-Sattar, "An adaptive droop control scheme for DC microgrids integrating sliding mode voltage and current