

سامانه تولید انرژی تجدیدپذیر ترکیبی با سیستم کنترل بهبودیافته با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی

علیرضا هاتفی عین الدین^{۱*}، احمد صادقی یزدانخواه^۲، رسول کاظمزاده^۳

^۱ دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

^۱ کارشناس شرکت توزیع نیروی برق تبریز، تبریز، ایران

a_hatifi@sut.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی برق، مرکز تحقیقات انرژی‌های نو، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

sadeghi@sut.ac.ir

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی برق، مرکز تحقیقات انرژی‌های نو، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

r.kazemzadeh@sut.ac.ir

چکیده: در طی سال‌های اخیر، منابع تولید انرژی‌های نو، همچون انرژی بادی و خورشیدی، به دلیل دارا بودن مزایایی از قبیل بهره‌آوری اقتصادی، آلودگی‌های زیست محیطی ناچیز و تجدیدپذیر بودن چرخه تولید، به عنوان جایگزین اصلی منابع سوخت‌های فسیلی مورد توجه قرار گرفته‌اند. با وجود این، قابلیت اطمینان پایین به دلیل ماهیت تولید غیرقطعی و نوسانی منابع تجدیدپذیر، از جمله مهم ترین معایب این منابع به شمار می‌آید. به منظور برطرف ساختن عیب یادشده، در این مقاله یک سامانه تجدیدپذیر ترکیبی متصل به شبکه، با منابع تولید اولیه انرژی بادی و برق خورشیدی و منع پشتیبان پل سوختی معرفی شده است. یک راهکار مدیریت توان با هدف ایجاد تعادل بین مقدار توان تولیدی منابع اولیه و مقدار توان مصرف شده توسط بارهای متصل به سامانه، پیشنهاد شده است. همچنین به منظور افزایش بازده سامانه و بهبود عملکرد سیستم کنترلی، الگوریتم ابتکاری جستجوی هارمونی برای بهبود عملکرد کنترل کننده‌های (PI) proportional-integral مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی سامانه مذکور با الگوریتم مدیریت توان پیشنهادی در نرم افزار MATLAB/SIMULINK، ضمن اثبات کارایی آن، تأثیر استفاده از روش جستجوی هارمونی در بهبود حالات گذرای سیستم و همچنین افزایش بازده کلی سامانه را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: انرژی نو، تولید ترکیبی، باد، برق خورشیدی، پل سوختی، کنترل برداری، جستجوی هارمونی، بهینه‌سازی.

۱. مقدمه

است. در مرجع [۴] یک راهکار مدیریت توان به منظور مدیریت حالات گذرای سامانه با استفاده از منبع ذخیره‌کننده چرخ طیار به کار گرفته شده است. راهکار مدیریت توان پیشنهادی در این مقاله، در لایه کنترل مرکزی مقادیر تولید منابع مختلف و همچنین مقادیر مصرف بارها را تحت نظر گرفته و دستورهای کنترلی لازم را به منظور ایجاد تعادل توان در سامانه، به لایه‌های کنترل محلی ارسال می‌کند. لایه کنترل محلی شامل کنترل کننده‌های مبدل‌های منابع تجدیدپذیر، منبع ذخیره‌کننده و مبدل طرف شبکه است. مبدل طرف شبکه یک اینورتر^۱ منبع ولتاژ متصل به شبکه بوده و وظیفه تأمین عملکرد سنکرون با شبکه، کنترل ضریب توان سامانه، تنظیم ولتاژ لینک DC و حذف نوسانات توان خروجی را بر عهده دارد. در این مقاله، به منظور تحقق اهداف فوق، مبدل طرف شبکه با استفاده از روش کنترل برداری، کنترل شده است.

کنترل کننده‌های PI وظیفه تأمین مقادیر مرجع ایجاد شده توسط سیستم کنترلی را بر عهده دارند. این کنترل کننده‌ها به دلیل ساختار ساده و پایداری بالا، به صورت گسترده در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند [۵]. تنظیم مقدار ضرایب کنترل کننده تنسابی و کنترل کننده انتگرال‌گیر، مهم‌ترین نقش را در عملکرد بهینه این کنترل کننده‌ها ایفا می‌کند. از این‌رو، روش‌های متفاوتی به منظور انتخاب این ضرایب ارائه شده است. روش زیگلر-نیکلز^۲ متداول‌ترین روش ستی در این زمینه است که مبتنی بر پاسخ پله یا پاسخ فرکانسی سیستم می‌باشد. وابستگی این روش به ساختار سیستم و همچنین بار محاسباتی بالا از جمله معایب این روش است. در سال‌های اخیر، با گسترش کاربردهای روش‌های بهینه‌سازی ابتکاری^۳، از این روش‌ها به منظور طراحی بهینه کنترل کننده‌های PI استفاده شده است [۸-۵]. در این مقاله، روش جست‌وجوی هارمونی^۴ [۹] به منظور تعیین ضرایب بهینه کنترل کننده‌های PI به کار گرفته شده است. ایده اصلی HSA^۵ از موسیقی برگرفته شده است. به طور کلی، تلاش برای رسیدن به یک هارمونی یا همنوازی مناسب در اجرای یک موسیقی، همانند تلاش برای پیدا کردن یک ترکیب بهینه است که مقدار بهینه را برای تابع هدف به همراه خواهد داشت. الگوریتم HSA به دلیل مزایایی همچون ساختار ساده، تعداد پارامترهای کم و عدم نیاز به اطلاعات مشتق سیستم، برای حل مسائل مختلف بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته و نتایج قابل قبولی ارائه کرده است [۹]. همچنین به دلیل عدم وجود

مهم‌ترین چالش در زمینه استفاده از ریزشبکه‌های تجدیدپذیر، تولید توان غیرقطعی و احتمالی این منابع به دلیل وابستگی ذاتی تولید آن‌ها به شرایط جوی و محیطی است. این موضوع قابلیت اطمینان سامانه در تأمین بار را به شدت کاهش داده و منجر به عدم تأمین بار در ساعتی از شباهنگ روز می‌شود. استفاده از گونه‌های مختلف منابع تجدیدپذیر به طور هم‌زمان و همچنین استفاده از منابع ذخیره‌کننده با ظرفیت مناسب، از جمله راهکارهای افزایش قابلیت اطمینان ریزشبکه‌هاست. از میان منابع مختلف موجود، انرژی بادی و خورشیدی به دلیل در دسترس بودن هم‌زمان و همچنین به دلیل آنکه منحنی رفتار توان انرژی بادی و خورشیدی در یک بازه روزانه و حتی فصلی، مکمل یکدیگرند، بیش از سایر منابع قابلیت ترکیب شدن را دارند [۱]. استفاده از منابع ذخیره با ظرفیت مناسب در یک ریزشبکه ترکیبی، ضمن تأمین مطمئن بار در ساعات مختلف شباهنگ روز، منجر به استفاده حداکثر از منابع تولید تجدیدپذیر خواهد شد. مطالعات زیادی درباره سامانه‌های ترکیبی با حضور منابع ذخیره کننده‌ای همچون مجموعه باتری‌ها، ابرخازن‌ها، ذخیره کننده‌های هیدروژنی و سایر موارد انجام گرفته است. در سال‌های اخیر، استفاده از هیدروژن به عنوان عامل ذخیره کننده انرژی، به طور چشمگیری در حال افزایش بوده است. از جمله ویژگی‌هایی که هیدروژن را از سایر گزینه‌های مطرح سوختی متمایز می‌کند، می‌توان به فراوانی، انتشار بسیار ناچیز آلاینده‌ها، برگشت پذیر بودن چرخه تولید آن و مهم‌تر از همه، چگالی انرژی بالای آن اشاره کرد. در یک پیل سوختی، هیدروژن مستقیماً از انرژی شیمیایی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود که بازده بالای ۶۰ درصد را برای این نوع سامانه‌ها تأمین می‌کند [۲]. مجموعه موارد اشاره شده سبب شده است تا در سال‌های اخیر، ریزشبکه‌هایی با ترکیب منابع بادی، برق خورشیدی و پیل سوختی مورد مطالعه فراوان قرار گیرد. در این مقاله، یک سامانه ترکیبی تولید انرژی الکتریکی متصل به شبکه، مرکب از سامانه‌های بادی و خورشیدی به عنوان منابع اولیه، و منبع ذخیره کننده هیدروژنی (شامل مجموعه پیل سوختی و تجزیه گر آب)، به عنوان منبع پشتیبان یا ثانویه در نظر گرفته شده است.

عملکرد هماهنگ منابع تجدیدپذیر مختلف و منبع ذخیره کننده، نیازمند وجود یک راهکار مدیریت توان کلی در سامانه است. در مرجع [۲] یک راهکار مدیریت توان برای سامانه شامل باد، برق خورشیدی و پیل سوختی با هدف تولید هیدروژن ارائه شده است. در مرجع [۳] راهکار کنترلی با هدف سرکوب نوسانات توان برای یک ریزشبکه متشکل از منابع باد، برق خورشیدی و پیل سوختی ارائه شده

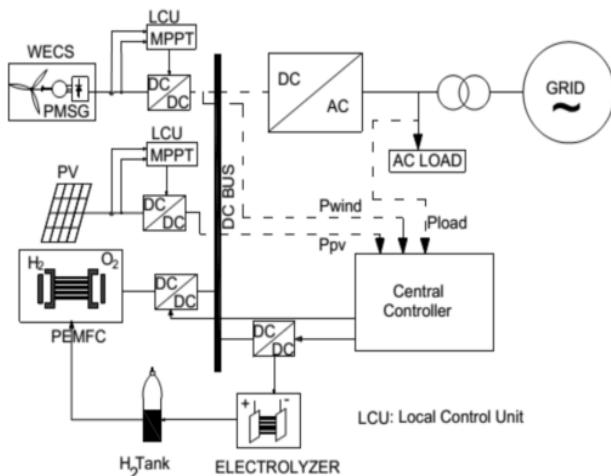
-
1. Inverter
 2. Ziegler-Nichols
 3. Heuristic Methods
 4. Harmony Search Algorithm

ژنراتورهای استفاده شده در ساختار سامانه های بادی سرعت متغیر است [۳]. روابط حاکم بر عملکرد توربین بادی به شرح زیر است:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p (\lambda, \beta) \quad (1)$$

$$TSR = \lambda = \frac{R \cdot \omega}{V} \quad (2)$$

که در آن، P_m توان مکانیکی جذب شده توسط توربین، ρ چگالی هوا، A مساحت سطح جاروب روتور، V سرعت باد، C_p ضریب بازده روتور، β زاویه خم شپرهای روتور است. رابطه ریاضی مربوط شعاع پرهای ω سرعت زاویه ای روتور است. رابطه ریاضی مربوط به C_p ، ساختار آیرو دینامیکی توربین بادی را توصیف می کند و در هر توربین بادی، بهازای یک مقدار منحصر به فرد برای آن، بیشینه توان مکانیکی جذب می شود. در این مقاله، از رابطه ارائه شده در مرجع [۱۱] برای C_p ، با هدف مدل سازی توربین بادی استفاده شده است. همچنین به منظور ریاضی نقطه بیشینه توان^۴، از روش هدایت افزایشی^۵ استفاده شده است.



شکل (۱): ساختار ریز شبکه تجدید پذیر پیشنهادی

۲.۲ سامانه برق خورشیدی

هر سلول برق خورشیدی یک پیوند p-n است که با قرار گرفتن در معرض تابش، به طور مستقیم، انرژی تابشی را به انرژی الکتریکی تبدیل می کند. مقدار توان تولیدی توسط هر سلول وابسته به شرایط محیطی از جمله شدت تابش و دمای محیط است. روابط اساسی لازم برای مدل سازی سلول برق خورشیدی عبارت اند از [۱۲]:

محاسبات پیچیده، زمان اجرای کامل هر تکرار بسیار پایین بوده، لذا استفاده از HSA برای حل مسائل بهینه سازی با دینامیک بالا بسیار مناسب است [۱۰].

در ادامه این مقاله، در بخش دوم، روابط لازم برای مدل سازی واحد های مختلف ریز شبکه ارائه شده است. بخش سوم راهکار پیشنهادی برای مدیریت توان سامانه تجدید پذیر ترکیبی را تشریح می کند. در بخش چهارم، سیستم کنترلی مبتنی بر روش کنترل برداری معرفی شده است و در بخش پنجم، فرایند بهینه کردن این سیستم با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی تشریح شده است. به منظور اثبات کارایی سامانه پیشنهادی، نتایج شبیه سازی های انجام گرفته در محیط نرم افزار MATLAB/SIMULINK در بخش ششم ارائه شده است.

۲. ساختار ریز شبکه و مدل سازی واحد های آن

شکل (۱) ساختار کلی سامانه تجدید پذیر پیشنهادی را نشان می دهد. این ساختار شامل توربین بادی، آرایه خورشیدی، پیل سوختی و DC-DC تجزیه گر آب است. هر یک از منابع تولید توسط مبدل DC-DC افزاینده به طور موازی به شین^۱ مشترک کنترل شده DC متصل شده اند. این ساختار امکان اتصال موازی چندین منبع تولید انرژی متفاوت را بدون نیاز به سنترون سازی به وجود می آورد. دو مبدل DC-DC افزاینده مربوط به زیر سیستم های بادی و خورشیدی، به منظور تنظیم نقطه کار این سامانه ها جهت اخذ بیشینه توان به کار گرفته شده اند. مبدل طرف شبکه یک اینورتر منبع ولتاژ با روش کلیدزنی مدولاسیون پهنه ای پالس سینوسی^۲ است. کنترل ولتاژ لینک DC همچنین تنظیم مقدار توان اکتیو و راکتیو مبادله شده بین سامانه تجدید پذیر و شبکه محلی، توسط مبدل طرف شبکه صورت می پذیرد.

۱.۲ سامانه بادی

در شکل (۱)، ساختار سیستم تبدیل انرژی بادی^۳ (WECS) نشان داده شده است که شامل توربین بادی، ژنراتور سنترون آهن ریای دایم (PMSG) و یک سوساز سه فاز دیودی است. دلیل انتخاب ژنراتور PMSG به عنوان مبدل انرژی مکانیکی به الکتریکی، بازده و قابلیت اطمینان بالای آن در محدوده قدرت پایین و متوسط در مقایسه با سایر

1. Bus

2. Sinusoidal pulse Width Modulation

3. Wind energy Conversion System

4. Permanent Magnet Synchronous Generator

بر حسب اتمسفر و R ثابت گازهای است. همچنین E^0 ولتاژ مدار باز برگشت‌پذیر سلول در فشار استاندارد، F ثابت فارادی و T دما بر حسب کلوین است. در این مدل‌سازی فرض شده است که دبی اکسیژن و هیدروژن ورودی به سلول به نحوی کنترل می‌شود که با وجود تغییر توان خروجی پیل سوختی، مقدار P_{O_2} و P_{H_2} ثابت باقی ماند.

۲.۳.۲. افت ولتاژ فعال‌سازی

تلفات فعال‌سازی، مربوط به مقدار انرژی است که کاتالیست برای شروع واکنش مصرف می‌کند. اثر تلفات فعال‌سازی در ولتاژ سلول را می‌توان به صورت زیر بیان کرد [۱۵]:

$$V_{act} = \eta + a(T - 298) + T b \ln(I) \quad (8)$$

که در آن η ، a و b مقادیر ثابت به ترتیب بر حسب ولت، ولت بر کلوین و ولت بر کلوین آمپر هستند.

۳.۳.۲. تلفات اشباع

تلفات اشباع یا انتقال ماده زمانی بروز می‌کند که هیدروژن و اکسیژن در رسیدن به الکترودها با مشکل مواجه شوند. مقدار تلفات اشباع تابعی از جریان پیل سوختی (I) و کمترین جریان مجاز پیل سوختی (I_{limit}) بوده و به صورت زیر قابل بیان است [۱۵]:

$$V_{conc} = -\frac{RT}{2F} \cdot \ln\left(1 - \frac{1}{I_{limit}}\right) \quad (9)$$

۴.۳.۲. افت ولتاژ اهمی

افت ولتاژ اهمی در نتیجه مقاومت درونی الکتروولیت در برابر عبور حامل‌های انرژی و مقاومت سایر اتصالات داخلی سلول به وجود آمده و مقدار آن تابعی از دما و جریان سلول است [۱۵].

$$R_{ohm} = R_0 + K_{RI} I - K_{RT} T \quad (10)$$

مقادیر R_0 و K_{RI} ثابت‌های تجربی هستند. با توجه به آنکه در معادلات مربوط به افت ولتاژهای بیان شده، به جاگذاری دمای سلول (T) نیاز است، مدل حرارتی ارائه شده در مرجع [۱۵] برای محاسبه دمای داخلی سلول استفاده شده است. با توجه به ماهیت شیمیایی روابط لازم برای مدل‌سازی حرارتی پیل سوختی، از ذکر جزئیات مدل‌سازی آن خودداری شده است.

$$I_{PV} = I_{PH} - I_s \left[\exp\left(\frac{q}{kT_c\rho}(V + RI_{PV})\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I_{PV}}{R_p} \quad (3)$$

$$I_{PH} = \left[I_{SC} + K_I (T_c - T_{ref}) \right] \frac{\lambda}{\lambda_{ref}} \quad (4)$$

$$T_c = T_{Amb} + \left(\frac{T_{NOCT} - 20}{800} \right) \lambda \quad (5)$$

در روابط فوق، I_{SC} و I_{PH} به ترتیب جریان خروجی سلول، جریان تابش، جریان اشباع معکوس دیود و جریان اتصال کوتاه سلول است. همچنین T_{NOCT} ، T_{Amb} ، T_c و T_{ref} به ترتیب مربوط به دمای سلول، دمای مرجع، دمای محیط و دمای سلول در شرایط تست استاندارد است. q بار الکتریکی هر الکترون، k ثابت بولتزمن، R_p ضریب ایدئالی دیود و λ مقدار شدت تابش است. R_s و ρ به ترتیب مقاومت سری و موازی موجود در مدل سلول PV هستند.

۳.۲. پیل سوختی

پیل سوختی یک وسیله تبدیل مستقیم انرژی شیمیایی به الکتریکی است. از میان انواع مختلف پیل‌های سوختی، پیل سوختی با غشاء مبادله‌کننده پروتون^۱ (PEM)، به دلیل مزایایی از قبیل بازده بالا، چگالی انرژی بالا، تطبیق سریع با تغییرات بار، دمای بیشترین کاربرد در درجه سانتی‌گراد) و راهاندازی سریع، دارای بیشترین کاربرد در سامانه‌های تولید پراکنده است [۱۳ و ۱۴]. در این مقاله، از روابط بسط داده شده در مرجع [۱۵]، برای مدل‌سازی پیل سوختی PEM استفاده شده است که در ادامه، به اختصار شرح داده شده است.

۱.۳.۲. ولتاژ خروجی سلول

ولتاژ خروجی سلول مطابق معادله Nernst به صورت زیر است [۱۴]:

$$V_{cell} = E - V_{act} - V_{ohm} - V_{mass} \quad (6)$$

تلفات داخلی پیل سوختی بوده و در ادامه این بخش معرفی شده‌اند. E ولتاژ مدار باز سلول است و از معادله Nernst به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$E = E^0 + \frac{RT}{2F} \cdot \ln\left[P_{H_2} \times P_{O_2}^{0.5}\right] \quad (7)$$

در معادله فوق، P_{O_2} و P_{H_2} به ترتیب فشار اکسیژن و هیدروژن

منابع تولید تجدیدپذیر بادی و برق خورشیدی به عنوان منابع تولید اولیه و سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و شبکه محلی، به عنوان منابع تولید ثانویه، یک راهکار مدیریت توان جامع جهت تحقق عملکرد مطمئن و پایدار سامانه تجدیدپذیر ترکیبی ارائه شده است. روند نمایی مربوط به راهکار مدیریت توان پیشنهادی در شکل (۲) نشان داده شده است. مطابق این شکل، در گام نخست با توجه به مقادیر توان تولیدی سامانه بادی (P_{wind})، توان تولیدی سامانه برق خورشیدی (P_{PV}) و توان مصرفی بار (P_L)، مقدار توان خالص سامانه (P_{net})، مطابق رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$P_{net} = P_{PV} + P_{wind} - P_{Load} \quad (12)$$

در صورتی که مقدار توان تولیدی منابع تجدیدپذیر بیشتر از نیاز بار باشد ($P_{net} > 0$)، ولتاژ لینک DC از مقدار مجاز افزایش یافته و خطر اضافه ولتاژ سیستم را تهدید می‌کند. برای اجتناب از این موضوع، مطابق الگوریتم پیشنهادی سیستم، وارد حالت کاری اضافه توان^۵ (EPM) می‌شود. در این حالت، اولویت اصلی با تولید و ذخیره هیدروژن خواهد بود. بدین منظور ابتدا سطح شارژ تانک هیدروژن بررسی شده و در صورت وجود ظرفیت خالی، تجزیه گر آب راهاندازی می‌شود. در صورت شارژ کامل تانک هیدروژن، به عنوان اولویت دوم مقدار اضافه توان موجود به شبکه منتقل خواهد شد. در هر حالت، مقدار توان مرجع هر زیرسیستم توسط الگوریتم محاسبه شده و به واحد کنترل کننده محلی ارسال می‌شود. برای مثال، زمانی که مقدار توان نامی تجزیه گر آب ($P_{FC-rated}$) بزرگ‌تر از اضافه توان موجود باشد، مقدار P_{net} به عنوان توان مرجع تجزیه گر آب انتخاب شده و در غیر این صورت، توان مرجع تجزیه گر آب برابر $P_{FC-rated}$ خواهد بود و توان اضافی باقی‌مانده به شبکه منتقل خواهد شد. در صورتی که توان تولیدشده توسط تجدیدپذیر کمتر از مقدار مورد نیاز بار باشد، سامانه وارد حالت کاری کمبود توان^۶ (SPM) خواهد شد. در این حالت نیز اولویت اول با تأمین توان مورد نیاز بار با مصرف هیدروژن ذخیره شده است که این کار توسط پیل سوختی انجام خواهد شد.

-
5. Excess Power Mode
 6. Short Power Mode

۴.۲. تجزیه گر آب

اکثر سلول‌های سوختی به یک منبع خارجی برای تولید هیدروژن نیازمندند. روش‌های مختلفی برای تولید هیدروژن وجود دارد که از میان روش‌های موجود، تجزیه آب به عنصر تشکیل‌دهنده خود، یعنی اکسیژن و هیدروژن، با استفاده از تجزیه گر آب دارای کاربرد بیشتری است. از نظر الکتریکی، می‌توان تجزیه گر آب را همانند یک بار الکتریکی DC غیرخطی حساس به ولتاژ در نظر گرفت که رابطه ولتاژ-جریان آن به صورت زیر است [۱۶]:

$$V_{cell-elec} = V_{rev} + \frac{r_{T1} + r_{T2}}{A} + K_{elec} \ln \left(\frac{K_{T1} + K_{T2} + K_{T3} / T^2}{A} I + 1 \right) \quad (11)$$

در رابطه فوق، $V_{elec-cell}$ ولتاژ ترمینال ورودی تجزیه گر آب، V_{rev} ولتاژ برگشت‌پذیر، r_1 و r_2 پارامترهای مربوط به مقاومت اهمی، K_{elec} K_{T2} و K_{T3} پارامترهای مربوط به افت ولتاژ، و A مساحت الکترود است.

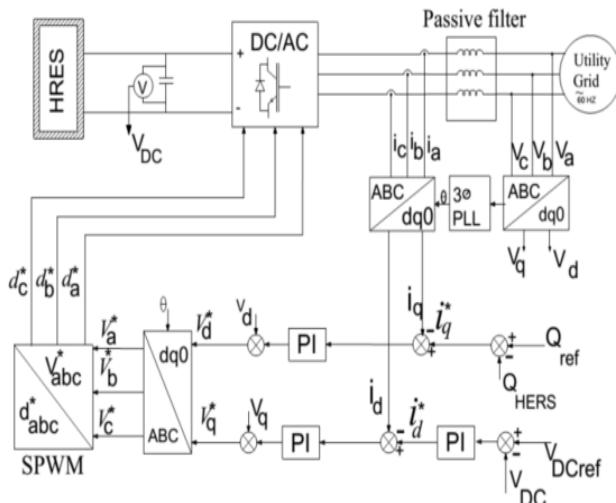
۳. مدیریت توان سامانه تجدیدپذیر ترکیبی

تأمین توان مورد نیاز مصرف کنندگان به صورت بدون نوسان و همچنین ایجاد تعادل بین مقدار توان الکتریکی تولید شده و مصرفی، مهم‌ترین عامل در عملکرد مطمئن یک سامانه تجدیدپذیر ترکیبی است. در عمل به دلیل تولید غیرقطعی منابع تجدیدپذیر و ماهیت نوسانی آنها و همچنین تغییر مقدار بارهای متصل به سامانه، عدم تعادل بین توان تولیدی و مصرفی وجود خواهد داشت. استفاده از روش کاهش بار^۱ به همراه بار هرز^۲ [۱۷]، از جمله ساده‌ترین روش‌های موجود برای ایجاد تعادل در یک سامانه است. با وجود این، به دلیل قابلیت اطمینان پایین و تلفات زیاد، استفاده از این روش‌ها مناسب نیست. سایر روش‌های مدیریت توان ریز شبکه‌های ترکیبی، عمدهاً مبتنی بر یک راهکار کنترل مرکزی است. در این گونه روش‌ها اطلاعات مربوط به مقادیر تولید و مصرف زیرسیستم‌های مختلف سامانه، به یک واحد کنترل اصلی^۳ (MCU) ارسال می‌شود. بدین ترتیب، دستورهای کنترلی لازم در واحد MCU ایجاد و به واحدهای کنترل محلی^۴ (LCU) ارسال می‌شود. در این مقاله، با درنظر گرفتن

-
1. Load Shedding
 2. Dump Load
 3. Main Control Unit
 4. Local Control Unit

۲.۴. کنترل مبدل طرف شبکه

مبدل طرف شبکه یک اینورتر منبع ولتاژ (VSI) است. وظایف اصلی مبدل طرف شبکه عبارت اند از: کنترل اندازه و فرکانس ولتاژ خروجی سامانه به منظور اتصال به شبکه و تغذیه بارها، کنترل ضریب توان سامانه و کنترل مستقل توانهای اکتیو و راکتیو مبادله شده بین سامانه و شبکه. به منظور تحقق اهداف کنترلی فوق، در این مقاله از روش کنترلبرداری^۳ بر مبنای چارچوب مرجع دوار سنکرون، استفاده شده است. مزیت اصلی روش کنترلبرداری، امکان کنترل توان اکتیو و راکتیو به صورت مستقل از هم است که باعث افزایش سرعت پاسخ دینامیکی کنترلکننده می‌شود. همچنین به دلیل استفاده از مرجع دوار سنکرون، تمام کمیت‌های سیستم (ولتاژ و جریان اینورتر) همانند مقادیر DC هستند که این موضوع امکان طراحی کنترلکننده را تسهیل می‌کند [۱۸]. طرح کلی کنترلبرداری اعمال شده به مبدل طرف شبکه، در شکل (۴) نشان داده شده است. در ادامه این بخش، تحلیل مورد نیاز برای پیاده سازی کنترلبرداری شرح داده شده است.



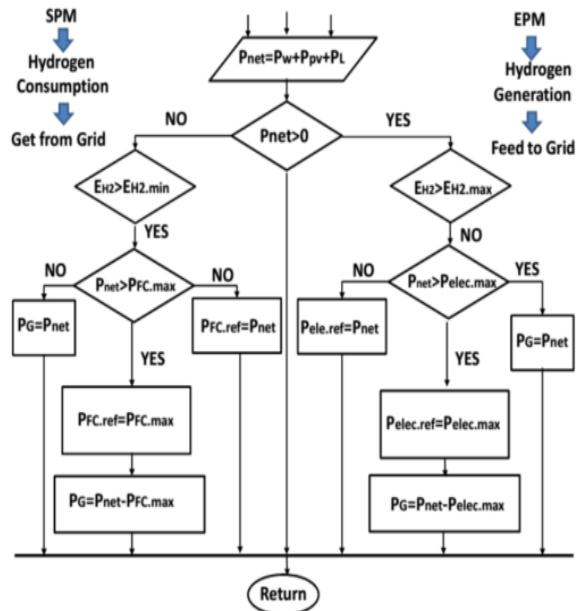
شکل (۴): طرح کلی کنترلبرداری اعمال شده به مبدل طرف شبکه

معادله توان لحظه‌ای در قاب ساکن abc عبارت است از:

$$P(t) = \begin{bmatrix} V_a & V_b & V_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a & i_b & i_c \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

با اعمال تبدیل dq، معادلات توان لحظه‌ای در قاب چرخان به دست می‌آید:

$$P = \frac{3}{2} (V_d i_d + V_q i_q) \quad (14)$$

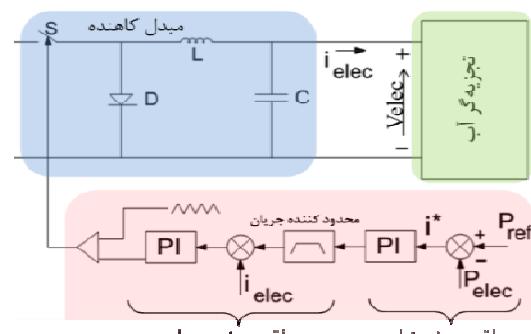


شکل (۲): روندnamای مرتبه به راهکار مدیریت توان پیشنهادی

۴. کنترل سامانه تجدیدپذیر

۴.۱. کنترل مبدل طرف منبع تجدیدپذیر

مبدل‌های استفاده شده در طرف منابع تجدیدپذیر و همچنین پیل سوختی، مبدل DC-DC افزاینده است و مبدل متصل به تجزیه‌گر آب، مبدل DC-DC کاهنده^۱ است. درباره سامانه بادی و برق خورشیدی، وظیفه اصلی این مبدل‌ها پیاده‌سازی الگوریتم MPPT به منظور اخذ بیشینه توان است، درحالی که درباره پیل سوختی و تجزیه‌گر آب، مبدل مذکور وظیفه تأمین مقدار توان مرجع تعیین شده توسط راهکار کنترل را بر عهده دارد. برای نمونه، شکل (۳) ساختار مبدل و مدار کنترل تجزیه‌گر آب را نشان می‌دهد که مشتمل از حلقة بیرونی توان و حلقة داخلی جریان است.



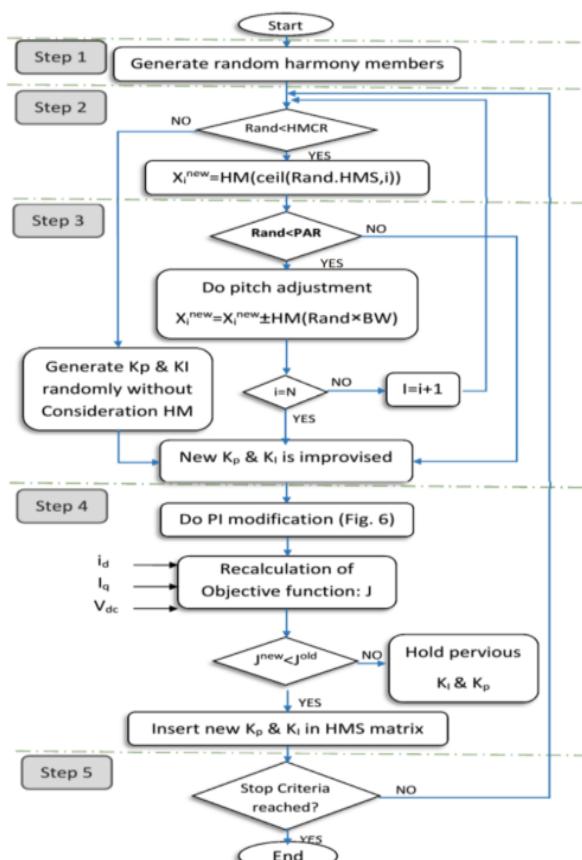
شکل (۳): طرح کلی مبدل و سیستم کنترلی تجزیه‌گر آب

بوده و مقدار آن عددی تصادفی در بازه $0 \leq \text{HMCR} \leq 1$ است. بدین ترتیب، با احتمال HMCR، مقادیر هارمونی جدید از ماتریس HM و با احتمال (1 - HMCR) خارج از ماتریس حافظه انتخاب می‌شوند.

گام سوم (تنظیم گام^۴): در صورتی که در گام دوم، هارمونی جدید از درون فضای HM انتخاب شود، احتمال دارد تغییر کوچکی در مقادیر آن داده شود. این تغییر کوچک معادل فرایند تنظیم گام توسط نوازنده‌گان است و با کمیتی به نام PAR کنترل می‌شود. بدین ترتیب، با احتمال PAR مقدار متغیرها تغییر خواهد کرد و با احتمال (1-PAR) هیچ تغییری در مقادیر آن‌ها ایجاد نمی‌شود.

گام چهارم: در این گام، مقدارتابع هدف ($f(X_{new})$) برای هارمونی جدید به دست آمده (X_{new})، محاسبه شده و در صورتی که به عنوان یک راه حل، بهینه‌تر جایگزین X_{worst} در ماتریس حافظه HM خواهد شد.

گام پنجم: اجرای مراحل ۲ تا ۴، تا رسیدن به معیار توقف. در شکل (۵)، مراحل پنج گانه الگوریتم HSA در قالب یک روند نما نشان داده است.



شکل (۵): مراحل اجرای الگوریتم HSA

$$Q = \frac{3}{2} (V_d i_q + V_q i_d) \quad (15)$$

با اعمال تبدیل پارک به ولتاژ سه فاز متعادل و متقاضن، مقدار V_q برابر صفر و مقدار V_d برابر دامنه ولتاژ ورودی $|V|$ خواهد بود، لذا رابطه اصلاح شده توان اکتیو و راکتیو خروجی به صورت زیر است:

$$P = \frac{3}{2} |V| i_d \quad (16)$$

$$Q = \frac{3}{2} |V| i_q \quad (17)$$

استفاده از جریان محورهای d و q در قاب چرخان، کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو سامانه را ممکن می‌سازد، لذا در این مقاله جریان محور d خروجی اینورتر برای کنترل توان اکتیو و جریان محور q خروجی اینورتر برای کنترل توان راکتیو اختصاص داده شده است.

۵. طراحی کنترل کننده بهبود یافته

در این بخش، نخست الگوریتم HSA به اختصار معرفی می‌شود و سپس نحوه به کارگیری آن در سامانه پیشنهادی، به منظور بهبود قابلیت کنترل سیستم، شرح داده خواهد شد.

۱.۵. روش بهینه‌سازی جست‌وجوی هارمونی

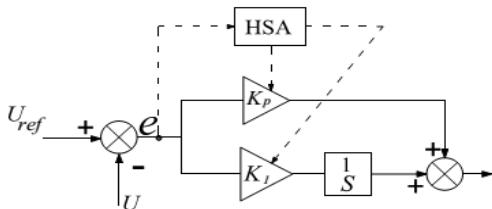
فرایند جست‌وجوی هارمونی در موسیقی، به منظور ایجاد همنوایی کامل بین نوازنده‌گان انجام می‌پذیرد. در طی این فرایند، نوازنده‌گان با تکرار اجراء‌ها، سعی در ایجاد تم‌هایی خوش‌آیند و نزدیک به حالت ایدئال، براساس معیارهای زیبایی‌شناسی و صوتی دارند. بر همین اساس، الگوریتم بهینه‌سازی HSA در هر تکرار، سعی در بهینه‌کردن مقدار تابع هدف با استفاده از فرایند جست‌وجوی هارمونی دارد. توضیحات کامل مربوط به فرایند بهینه‌سازی با استفاده از روش HSA در مرجع [۱۹] آورده شده است. به طور خلاصه، الگوریتم جست‌وجوی هارمونی را می‌توان در پنج گام اصلی پیاده‌سازی کرد:

گام اول: ایجاد بردارهای (هارمونی‌هایی) کاملاً تصادفی و ذخیره آن‌ها در حافظه هارمونی^۱ (HM). تعداد هارمونی‌های تولید شده به سایز سایز HM یا همان^۲ HMS بستگی دارد.

گام دوم: در این مرحله، هارمونی‌های جدید با توجه به معیاری به نام نرخ اهمیت حافظه هارمونی^۳ (HMCR)، تشکیل می‌شوند. این کمیت، ملاک انتخاب یا عدم انتخاب هارمونی‌های جدید از حافظه

1. Harmony Memory
2. Harmony Memory size
3. Harmony Memory Consideration Rate
4. Pitch Adjustment

شکل (۶) ساختار کنترل کننده PI اصلاح شده با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی را نشان می‌دهد.

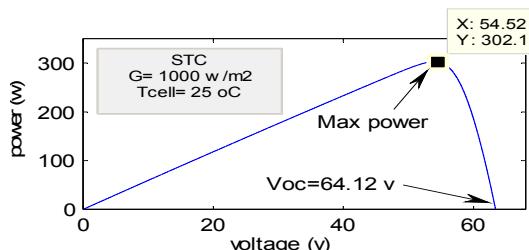


شکل (۶): ساختار کنترل کننده PI اصلاح شده

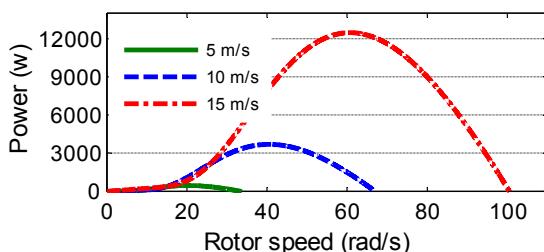
۶. شبیه‌سازی و نتایج

۱.۶. نتایج شبیه‌سازی واحدهای مختلف ریز شبکه

در این بخش، نتایج شبیه‌سازی مربوط به سامانه پیشنهادی و زیر-سیستم‌های مربوط ارائه شده است. شکل (۷) منحنی مشخصه توان-ولتاژ شبیه‌سازی شده برای سلول خورشیدی SUNPOWER305 را نشان می‌دهد. منحنی توان بر حسب سرعت روتور در سرعت‌های مختلف باد، برای توربین بادی شبیه‌سازی شده در شکل (۸) نشان داده شده است. تمام پارامترهای مورد نیاز برای مدل‌سازی توربین بادی از [۱۱] انتخاب شده است. پیل سوختی شبیه‌سازی شده از نوع PEM با نام تجاری مدل SR-12، تولید شرکت Avista Labs است که دارای توان نامی ۵۰۰ وات بوده و منحنی ولتاژ-جریان آن در شکل (۹) نشان داده شده است. شکل (۱۰) منحنی ولتاژ-جریان تجزیه‌گر آب را نشان می‌دهد. تمام پارامترهای مورد نیاز برای مدل‌سازی پیل سوختی و تجزیه‌گر آب از [۱۶] انتخاب شده است.



شکل (۷): منحنی ولتاژ-توان مژول PV



شکل (۸): منحنی توان بر حسب سرعت روتور در سرعت‌های مختلف باد

۲.۵. بیان ریاضی مسئله بهینه‌سازی

شاخص‌های عددی مختلفی برای بهینه‌سازی عملکرد کنترلی یک سیستم حلقه بسته استفاده می‌شود. انتگرال خطای مطلق^۱ (IAE)، انتگرال مربعات خطای^۲ (ISE) و انتگرال حاصل ضرب خطای مطلق در زمان^۳ (ITAE) از جمله این شاخص‌ها هستند. از میان شاخص‌های فوق، معیار ITAE دارای بهترین عملکرد در کمینه کردن خطای مطلق و کاهش زمان خطای مطلق می‌باشد [۲۰ و ۲۱]. در این مقاله، از شاخص‌های ITAE و ISE، برای تشکیل تابع هدف استفاده شده و نتایج نهایی با هم مقایسه شده است. در ارائه نتایج شبیه‌سازی به منظور حفظ سادگی، صرفاً منحنی‌های مربوط به کنترل کننده معمولی و کنترل کننده بهبودیافته با HSA (با شاخص ITAE) رسم شده است. روابط مربوط به شاخص‌های ISE و ITAE به صورت زیر است:

$$e(t) = y_{\text{ref}}(t) - y(t) \quad (18)$$

$$ITAE = \frac{1}{T} \int_0^T t |e(t)| dt \quad (19)$$

$$ISE = \frac{1}{T} \int_0^T |e(t)|^2 dt \quad (20)$$

با درنظر گرفتن مقادیر i_d و V_{dc} به عنوان متغیرهای کنترلی، شکل کلی تابع هدف برای معیار ITAE و ISE خواهد بود:

$$J_{\text{ITAE}} = \frac{1}{T} \int_0^T t \left(|i_d^* - i_d| + |i_q^* - i_q| + |V_{dc}^* - V_{dc}| \right) dt \quad (21)$$

$$J_{\text{ISE}} = \frac{1}{T} \int_0^T \left(|i_d^* - i_d| + |i_q^* - i_q| + |V_{dc}^* - V_{dc}| \right)^2 dt$$

بنابراین مسئله بهینه‌سازی عبارت خواهد بود از به حداقل رساندن

مقدار J با رعایت قیود زیر:

$$\text{Minimize } J(K_p, K_I);$$

$$\text{Subject to :} \begin{cases} K_p^{\min} \leq K_p \leq K_p^{\max} \\ K_I^{\min} \leq K_I \leq K_I^{\max} \end{cases} \quad (22)$$

با توجه به توضیحات بخش‌های پیشین، بردار هارمونی^۴ ($\overrightarrow{X^m}$) و ماتریس HMS برای مسئله بهینه‌سازی فوق، به فرم زیر خواهد بود:

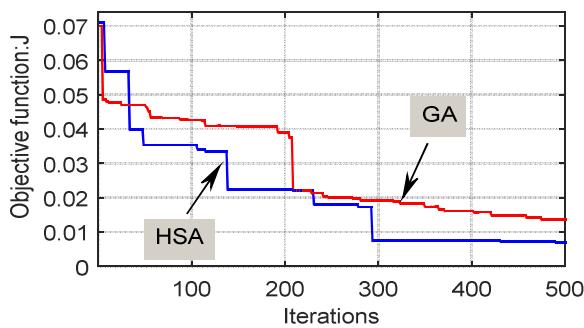
$$(\overrightarrow{X^m}) = [K_p, K_I]; HMS = \begin{bmatrix} K_P^1 & K_I^1 \\ \vdots & \vdots \\ K_P^{hms} & K_I^{hms} \end{bmatrix} \quad (23)$$

1. Integral of Absolute Error
2. Integral of Square Error
3. Integral of Time Multiplied by Absolute Error

سامانه تجدیدپذیر خواهد شد، بلکه پایداری گذراي سیستم را نیز افزایش می دهد.

جدول (۱): مشخصات ابعاد ریز شبکه شبیه سازی شده

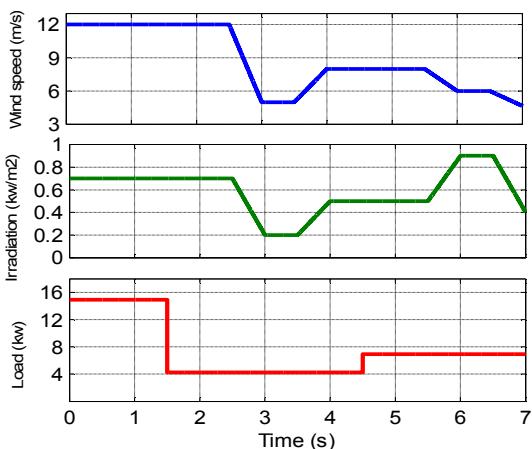
ظرفیت نامی	ابعاد/تعداد	منع
۵/۸ kw@12m/s	۱ دستگاه	بادی
۷/۶۵ kw@STC	۵×۵ سلول با آرایش	برق خورشیدی
۷kw	آرایه	پیل سوختی
۷kw	آرایه	تجزیه گر آب



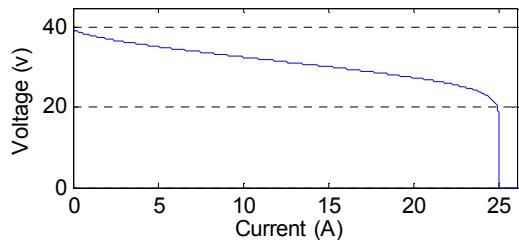
شکل (۱۱): نمودار همگرایی الگوریتم های HSA و GA برای تابع هدف ITAE با شاخص

جدول (۲): مقادیر به دست آمده برای K_p و K_I برای روش های مختلف

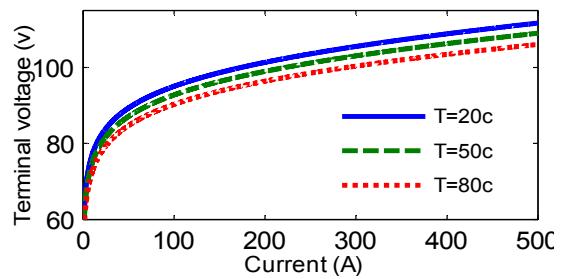
I_q	I_d	V_{dc}	شاخص		روش		
K_p	K_I	K_p	K_I	K_p	K_I		
۰/۷	۱۸	۰/۱۲	۱۰	۳۱	۵۶۳	-	زیگلر-نیکولز
.۸	۱۸	.۹	۱۱	۳۰	۶۷۰	ISE	
.۶	۲۰	.۶	۱۵	۲۴	۷۸۱	ITAE	GA
۰/۷	۱۹	۰/۷	۱۳	۲۶	۷۲۵	ISE	
۰/۴۵	۲۲	۰/۳	۱۷	۲۰	۸۳۳	ITAE	HSA



شکل (۱۲): منحنی رفتار سرعت باد، شدت تابش و بار سامانه



شکل (۹): منحنی ولتاژ-جریان پیل سوختی

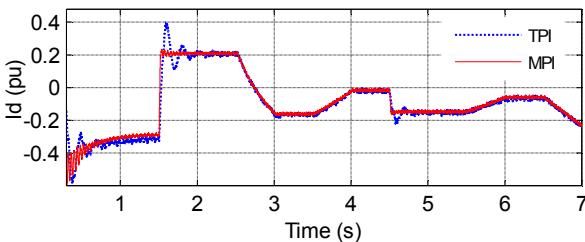


شکل (۱۰): منحنی ولتاژ-جریان سلول تجزیه گر آب

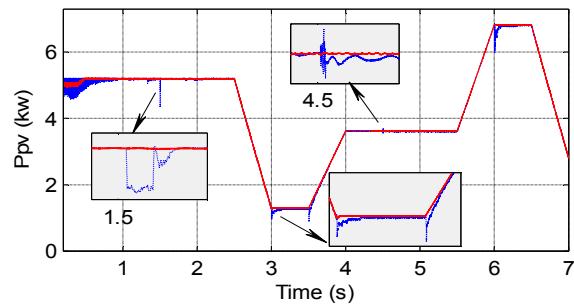
۲.۶ بررسی عملکرد سامانه با کنترل کننده بهبود یافته و کنترل کننده معمولی

مشخصات ریز شبکه شبیه سازی شده با ساختار نشان داده شده در شکل (۱)، در جدول (۱) ارائه شده است. در مطالعات شبیه سازی، علاوه بر الگوریتم HSA، عملکرد سیستم پیشنهادی با استفاده از الگوریتم زتیک [۲۲] نیز مورد مطالعه قرار گرفته است و نتایج نهایی دو روش با هم مقایسه شده است. بدین ترتیب، در شکل (۱۱) نمودار همگرایی تابع هدف بر حسب تعداد تکرار، برای هر دو الگوریتم با شاخص ITAE نشان داده شده است. مقادیر به دست آمده برای ضرایب کنترل کننده ها با استفاده از روش زیگلر-نیکولز، الگوریتم زتیک و الگوریتم HSA، در جدول (۲) ارائه شده است. شایان ذکر است که در ادامه این مقاله، منظور از کنترل کننده بهبود یافته، کنترل کننده با روش HSA و شاخص ITAE است.

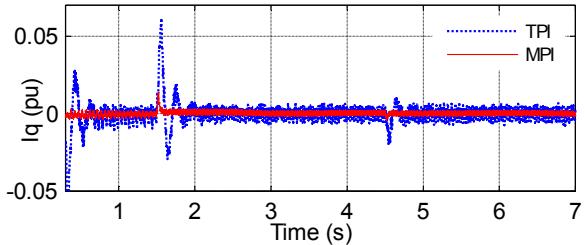
منحنی رفتار سرعت باد، شدت تابش و بار متصل به سامانه، در شکل (۱۲) نشان داده شده است. توان تولیدی سامانه برق خورشیدی و بادی برای سیستم با کنترل کننده معمولی و کنترل کننده بهبود یافته به ترتیب در شکل های (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است. نتایج به دست آمده، عملکرد صحیح کنترل کننده MPPT را نشان می دهد، زیرا با وجود تغییر بار و شرایط محیطی (تغییر نقطه کار سامانه)، هریک از سامانه های بادی و برق خورشیدی پس از طی چند نوسان به نقطه کار بیشینه توان بازگشته اند. نوسان توان خروجی سیستم با کنترل کننده بهبود یافته، کمتر از سیستم با کنترل کننده معمولی است، بنابراین کنترل کننده پیشنهادی نه تنها منجر به افزایش بازده نهایی



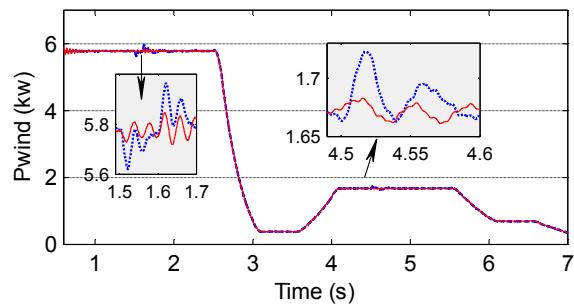
شکل (۱۵): جریان محور d در حضور کنترل کننده معمولی (خط چین) و کنترل کننده بهبودیافته (خط پیوسته)



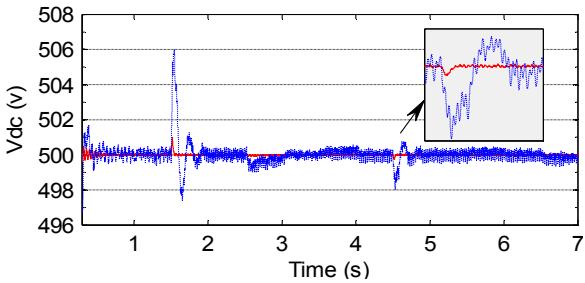
شکل (۱۳): توان تولیدی سامانه برق خورشیدی برای کنترل کننده معمولی (خط چین) و کنترل کننده بهبودیافته (خط پیوسته)



شکل (۱۶): جریان محور q در حضور کنترل کننده معمولی (خط چین) و کنترل کننده بهبودیافته (خط پیوسته)



شکل (۱۴): توان تولیدی سامانه بادی برای کنترل کننده معمولی (خط چین) و کنترل کننده بهبودیافته (خط پیوسته)

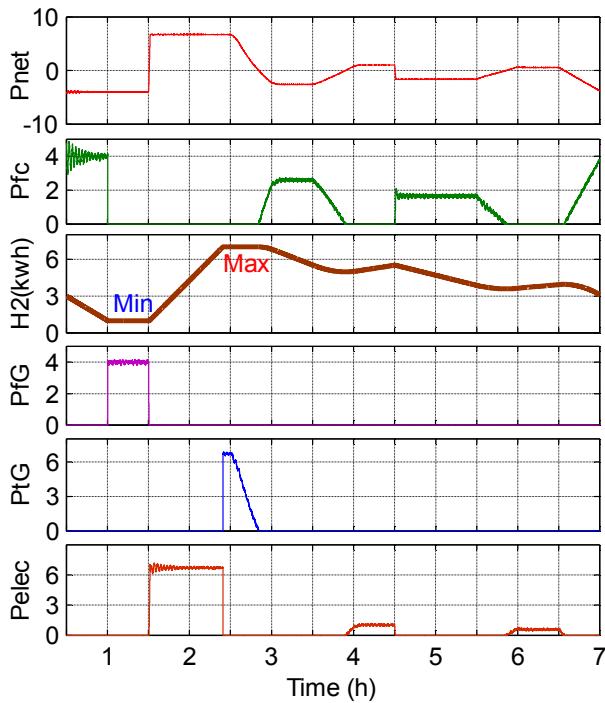


شکل (۱۷): ولتاژ لینک DC در حضور کنترل کننده معمولی (خط چین) و کنترل کننده بهبودیافته (خط پیوسته)

۳.۶. بررسی عملکرد راهکار کنترل پیشنهادی با کنترل کننده معمولی و بهبودیافته

تولید متغیر و غیرقطعی سامانه تجدیدپذیر و منحنی رفتار بار متغیر متصل به آن که در قسمت پیشین ارائه شدند، لزوم وجود یک راهکار مدیریت توان در سامانه را مشخص می‌کند. شکل (۱۸) توان کل تولیدی سامانه تجدیدپذیر، توان مورد نیاز بار و توان خالص سامانه (P_{net}) را نشان می‌دهد. با توجه به مباحث پیشین، مقدار P_{net} به عنوان پارامتر اصلی تصمیم گیری در الگوریتم پیشنهادی است، به طوری که مقدار مثبت P_{net} به معنای وجود اضافه توان در سامانه و مقدار منفی آن به معنی کمبود توان در سامانه است. با توجه به شکل (۱۹)، در لحظه شروع عملکرد سامانه، مقدار P_{net} منفی است، لذا با توجه به اینکه مقدار شارژ اولیه منبع ذخیره کننده ۳ کیلووات-ساعت در نظر گرفته شده است، پیل سوختی به منظور جبران کمبود توان روش

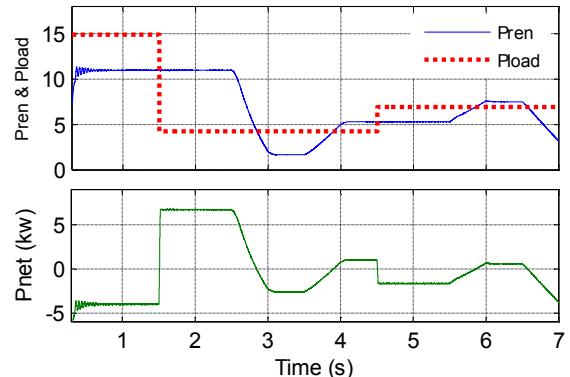
در این قسمت، به مقایسه نتایج به دست آمده برای کمیت‌های کنترل شده (I_q , V_{DC} , I_d) تحت عملکرد کنترل کننده معمولی و بهبودیافته می‌پردازیم. شکل (۱۵) مقدار جریان محور d را برای هر دو کنترل کننده نشان می‌دهد. مطابق شکل، مقدار نوسانات I_d در حضور کنترل کننده بهبودیافته کمتر است. با توجه به اینکه پارامتر I_d به عنوان حلقه داخلی جریان برای کنترل ولتاژ لینک DC و همچنین پارامتر کنترل کننده توان اکتیو سامانه انتخاب شده است، بهبود پایداری و سرعت پاسخ دینامیکی آن، منجر به نوسانات کمتر ولتاژ لینک DC و توان خروجی سامانه خواهد شد. شکل (۱۶) ولتاژ لینک DC سامانه با کنترل کننده معمولی و بهبودیافته را نشان می‌دهد. به وضوح مشاهده می‌شود که حالت گذرای به وجود آمده در نتیجه تغییرات ناگهانی شرایط جوی و بار، تحت کنترل بهبودیافته با مقدار فراجهش و نوسانات کمتری میرا شده است. ریپل کمتر ولتاژ لینک DC به نوبه خود، منجر به کاهش THD ولتاژ AC تولیدی توسط اینورتر و کاهش نوسانات توان خروجی مبدل طرف شبکه خواهد شد. آخرین پارامتر کنترل شده I_q است که مقدار آن در شکل (۱۷) نشان داده شده است. در این مقاله، هدف کنترل ضریب توان سامانه در مقدار یک می‌باشد، لذا مقدار مرجع I_q در صفر تنظیم شده است. با توجه به نتایج به دست آمده کنترل کننده بهبودیافته، با خطای کمتری مقدار مرجع I_q را تأمین کرده است.



شکل (۱۹): نمودار توان مبادله شده توسط اجزای مختلف ریز شبکه در طول زمان شبیه سازی

با توجه به اینکه یکی از اهداف اصلی سامانه، سرکوب نوسانات توان منابع تجدیدپذیر است، در این قسمت، توان تحويل داده شده به بار برای هر دو سیستم کنترلی، مطابق شکل (۲۰) نشان داده شده است. نوسانات شدید سامانه با کنترل کننده معمولی در موقع تغییر بار و همچنین تغییر شدید شرایط محیطی، به وضوح قابل مشاهده است. این تغییرات ضمن افزایش تلفات در سیستم، باعث کاهش کیفیت توان در سامانه می شود. علاوه بر آن، در غیاب تغییرات محیطی و بار، همچنان نوسانات توان سامانه با کنترل کننده معمولی، به مراتب بیشتر از سامانه با کنترل کننده پیشنهادی است. این موضوع در شکل (۲۱) نشان داده شده است، به طوری که در بازه $t=2$ تا $t=4$ میانگین دامنه نوسان برای کنترل کننده معمولی، برابر 20% کیلووات و برای کنترل کننده پیشنهادی، کمتر از 10% کیلووات است. بنابراین کنترل کننده پیشنهادی به طور مؤثرتری نوسانات توان تولیدی سامانه را کاهش داده است.

می شود. مقدار مرجع توان پیل سوختی توسط الگوریتم مدیریت توان مشخص شده و به سامانه سوختی اعمال می گردد. با ادامه شرایط SPM، در $t=1s$ مقدار هیدروژن ذخیره شده به حد پایین خود رسیده و امکان تولید توان توسط پیل سوختی وجود نخواهد داشت. در این حالت، شبکه متصل به سامانه برای جبران کمبود توان شروع به تزریق توان نخواهد کرد. لذا مقدار توان دریافت شده از شبکه^۱ از صفر به 4 کیلووات افزایش پیدا می کند. این وضعیت تا زمانی که علامت P_{net} تغییر نکند، ادامه خواهد یافت. در $t=1.5s$ با کاهش بار، مقدار توان خالص سامانه ثابت می شود، لذا سامانه در وضعیت EPM قرار می گیرد. با توجه به سطح شارژ تانک هیدروژن، الگوریتم دستور روشن شدن تجزیه گر آب را صادر و مقدار مرجع آن را به منظور تولید هیدروژن تعیین می کند. با توجه به شکل (۱۹)، با شروع به کار تجزیه گر آب، مقدار هیدروژن افزایش یافته تا اینکه در $t=2.4s$ سطح هیدروژن ذخیره شده به حداقل مقدار خود می رسد، لذا تجزیه گر آب خاموش می شود. در این لحظه، مقدار توان منتقل شده به شبکه^۲ از صفر به مقدار $1/6$ کیلووات افزایش یافته و در ادامه، مقدار مرجع تعیین شده توسط الگوریتم، کنترل توان را دنبال می کند. در $t=2.8s$ بار دیگر مقدار P_{net} منفی شده و لذا پیل سوختی به منظور جبران کمبود توان در سامانه شروع به کار می کند. به طور مشابه، در ادامه فرایند شبیه سازی، الگوریتم با توجه به مقدار P_{net} توان کل سامانه را مدیریت می کند.



شکل (۱۸): توان تولیدی تجدیدپذیر و توان خالص سامانه

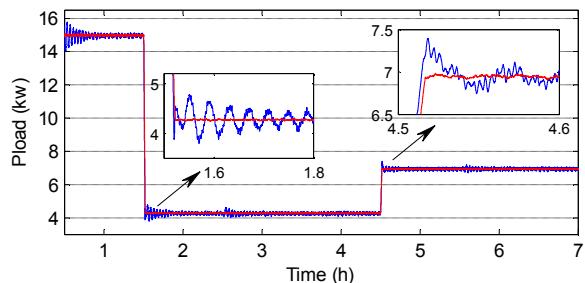
1. Power from Grid: PfG
2. Power to Grid: PtG

جدول (۳): انرژی جذب شده و اعوجاج هارمونیکی کل برای سیستم با کنترل کننده معمولی و کنترل کننده بهبودیافته

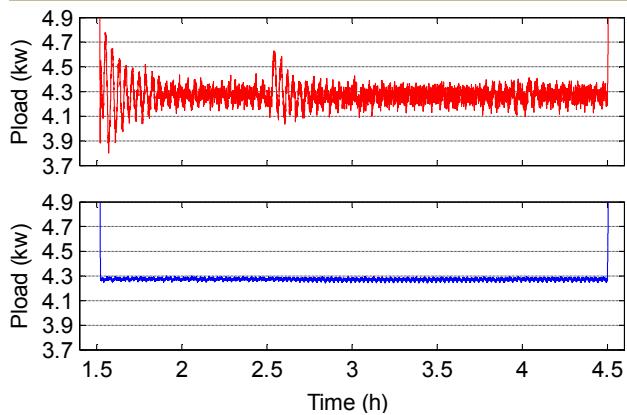
THD	$E_{ren}(\text{kwh})$	شاخص	روش
۸/۳	۴۷/۸۶	-	کنترل کننده معمولی
۶/۳	۴۸/۰۳	ISE	کنترل کننده بهبودیافته با GA
۵/۰۸	۴۸/۲۰	ITAE	
۵/۴۴	۴۸/۱۵	ISE	کنترل کننده بهبودیافته با HSA
۳/۶	۴۸/۰۵	ITAE	

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک سامانه تجدیدپذیر ترکیبی مشکل از منابع تولید بادی و خورشیدی و منبع ذخیره کننده هیدروژنی (شامل پیل سوختی و تجزیه گر آب)، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. با استفاده از راهکار مدیریت توان پیشنهادی، شرایط کمبود توان و اضافه توان به وجود آمده در سامانه، مورد مدیریت قرار گرفت. روش کنترل برداری، بهمنظور کنترل مبدل طرف شبکه برای تحقق اهداف کنترلی، از جمله کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو سامانه، ثابت ولتاژ لینک DC، عملکرد سامانه در ضرب توان یک و عملکرد سنتکرون با شبکه استفاده شد. همچنین اخذ بیشینه توان از منابع تجدیدپذیر با استفاده از کنترل مبدل‌های طرف منابع تجدیدپذیر انجام پذیرفت. بهمنظور بهبود عملکرد سیستم کنترلی، از روش ابتکاری جستجوی هارمونی برای بهینه‌سازی کنترل کننده‌های PI استفاده شد و نتایج نهایی با الگوریتم زننیک مورد مقایسه قرار گرفت. در این راستا از معیارهای عددی ISE و ITAE، برای تشکیل تابع هدف استفاده شده و ثابت‌های تنسی و انتگرال گیر PI، به عنوان متغیرهای تصمیم بهینه سازی اتخاذ شدند. بدین ترتیب، نخست رفتار سیستم تحت تأثیر حالت گذرای ناشی از تغییرات بار و تغییرات محیطی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده حاکی از عملکرد بهتر سیستم کنترل بهبودیافته، از نظر پاسخ دینامیکی سریع‌تر و میراسازی بیشتر نوسانات به وجود آمده است. در ادامه، یک مطالعه شبیه‌سازی با هدف بررسی عملکرد راهکار مدیریت توان پیشنهادی و بررسی تأثیر ترکیب‌های مختلف کنترلی بر بازده و کیفیت توان سیستم انجام شده است. نتایج ارائه شده مربوط به تبادل توان بخش‌های مختلف سامانه، عملکرد دقیق راهکار مدیریت توان پیشنهادی را نشان می‌دهد. از طرف دیگر، مطابق نتایج به دست آمده برای پنج ترکیب کنترلی مختلف، مشاهده می‌شود که عملکرد کنترل کننده اصلاح شده با الگوریتم HSA و شاخص ITAE، چه از نظر جذب انرژی تجدیدپذیر و چه از نظر کاهش THD ولتاژ خروجی، بهتر از سایر ترکیب‌های دیگر است.



شکل (۲۰): توان تحویل داده شده به بار در حضور کنترل کننده معمولی و کنترل کننده بهبودیافته



شکل (۲۱): توان تحویل داده شده به بار در حضور کنترل کننده معمولی و کنترل کننده بهبودیافته در بازه $t=4.5\text{s}$ تا $t=1.5\text{s}$

نتایج ارائه شده در پخش‌های پیشین، تحقق اهداف اصلی کنترلی از جمله اخذ بیشینه توان، ثابت ولتاژ لینک DC، کنترل ضرب توان سامانه و حذف نوسانات توان تولیدی را تأیید می‌کند. استفاده از کنترل کننده اصلاح شده، نه تنها منجر به عملکرد بهتر سامانه در موارد فوق می‌شود، بلکه موجب افزایش توان تجدیدپذیر جذب و همچنین افزایش کیفیت توان سامانه می‌شود. نتایج عددی به دست آمده مربوط به میزان انرژی جذب شده و THD ولتاژ خروجی، برای هر پنج روش کنترلی شبیه‌سازی شده، در جدول (۳) ارائه شده است. مطابق نتایج به دست آمده مشاهده می‌شود با استفاده از کنترل کننده‌های بهبودیافته، به علت کاهش نوسانات در ردیابی نقطه بیشینه توان، میزان کل انرژی جذب شده افزایش می‌یابد. همچنین با کنترل بهینه I_d ، نوسانات ولتاژ لینک DC و درنتیجه ولتاژ ورودی اینورتر به طور چشمگیری کاهش پیدا کرده است، لذا مقدار THD میانگین سامانه کاهش پیدا می‌کند. بررسی نتایج روش‌های پیاده‌شده با استفاده از الگوریتم‌ها و شاخص‌های مختلف، نشان می‌دهد که الگوریتم جستجوی هارمونی با شاخص ITAE، بهترین نتیجه کنترلی برای سیستم را فراهم می‌کند.

مراجع

- [1] Kabalci, E., "Design and analysis of a hybrid renewable energy plant with solar and wind power", Energy Conversion and Management, Vol. 72, pp. 51-59, 2013.
- [2] Ipsakis, D., Voutetakis, S., Seferlis, P., Stergiopoulos, F., Elmasides, C., "Power management strategies for a stand-alone power system using renewable energy sources and hydrogen storage", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, No. 16, pp. 7081-7095, 2009.
- [3] Ahmed, NA., Miyatake, M., Al-Othman, AK., "Power fluctuations suppression of stand-alone hybrid generation combining solar photoVoltaic/wind turbine and fuel cell systems", Energy Conversion and Management, Vol. 49, No. 10, pp. 2711-2719, 2008.
- [4] Boukettaya, G., Krichen, L., "A dynamic power management strategy of a grid connected hybrid generation system using wind, photovoltaic and Flywheel Energy Storage System in residential applications", Energy, Vol. 71, pp. 148-159, 2014.
- [5] Coelho, LD., Pessôa, MW., "A tuning strategy for multivariable PI and PID controllers using differential evolution combined with chaotic Zaslavskii map", Expert Systems with Applications, Vol. 38, No. 11, pp. 13694-13701, 2011.
- [6] Mai Thanh, L., Quy Ngoc, L., Jae Wook, J., "Effective auto-tuning Proportional-Integral controller based on a heuristic algorithm", 6th IEEE International Conference on Industrial Informatics, pp. 1389-1394, 2008.
- [7] Sathya, MR., Thameem Ansari, M., "Load frequency control using Bat inspired algorithm based dual mode gain scheduling of PI controllers for interconnected power system", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 64, pp. 365-374, 2015.
- [8] Vijayakumar, G., Anita, R., "Renewable Energy Interfaced Shunt Active Filter Using A Pi Controller Based Ant Colony And Swarm Optimization Algorithms", Australian Journal of Basic & Applied Sciences, Vol. 7, No. 8, pp. 110, 2013.
- [9] Geem, ZW., Kim, JH., Loganathan, G., "A new heuristic optimization algorithm: harmony search", Simulation, Vol. 76, No. 2, pp. 60-68, 2001.
- [10] Duc Chinh, H., Yadav, P., Kumar, R., Panda, SK., "Real-Time Implementation of a Harmony Search Algorithm-Based Clustering Protocol for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 10, No. 1, pp. 774-783, 2014.
- [11] Abdullah, MA., Yatim, AHM., Tan, CW., Saidur, R., "A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, No. 5, pp. 3220-3227, 2012.
- [12] Tsai, H-L., "Insolation-oriented model of photovoltaic module using Matlab/Simulink", Solar Energy, Vol. 84, No. 7, pp. 1318-1326, 2010.
- [13] Eid, A., "Utility integration of PV-wind-fuel cell hybrid distributed generation systems under variable load demands", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 62, pp. 689-699, 2014.
- [14] Uzunoglu, M., Onar, OC., Alam, MS., "Modeling, control and simulation of a PV/FC/UC based hybrid power generation system for stand-alone applications", Renewable Energy, Vol. 34, No. 3, pp. 509-520, 2009.
- [15] Caisheng, W., Nehrir, MH., Shaw, SR., "Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 2, pp. 442-451, 2005.
- [16] Caisheng, W., Nehrir, MH., "Power Management of a Stand-Alone Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Energy System", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 23, No. 3, pp. 957-967, 2008.
- [17] Hirose, T., Matsuo, H., "Standalone Hybrid Wind-Solar Power Generation System Applying Dump Power Control Without Dump Load", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, No. 2, pp. 988-997, 2012.
- [18] Haque, ME., Negnevitsky, M., Muttaqi, KM., "A Novel Control Strategy for a Variable-Speed Wind Turbine With a Permanent-Magnet Synchronous Generator", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 46, No. 1, pp. 331-339, 2010.
- [19] Hatefi, A., Kazemzadeh, R., "Intelligent tuned harmony search for solving economic dispatch problem with valve-point effects and prohibited operating zones", Journal of Operation and Automation in Power Engineering, Vol. 1, No. 1, 2013.
- [20] Sahu, RK., Panda, S., Padhan, S., "A hybrid firefly algorithm and pattern search technique for automatic generation control of multi area power systems",

- International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 64, pp. 9-23, 2015.
- [21] Dorf, RC., Bishop, RH., *Modern Control Systems*: Pearson Prentice Hall, 2008.
- [22] Walters, DC., Sheble, GB., "Genetic algorithm solution of economic dispatch with valve point loading", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 3, pp. 1325-1332, 1993.