

یک روش کنترلی کارآمد برای اینورترهای متصل بین باطری‌های ذخیره‌ساز انرژی و شبکه

رضا همتی^۱، استادیار؛ ندا عزیزی^۲، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ مهدی احمدی جیردهی^۳، استادیار

۱- گروه مهندسی برق - دانشکده انرژی - دانشگاه صنعتی کرمانشاه - کرمانشاه - ایران - r.hemmati@kut.ac.ir

۲- گروه مهندسی برق - دانشکده انرژی - دانشگاه صنعتی کرمانشاه - کرمانشاه - ایران - n.azizi@smail.kut.ac.ir

۳- گروه مهندسی برق - دانشکده انرژی - دانشگاه صنعتی کرمانشاه - کرمانشاه - ایران - m.ahmadi@kut.ac.ir

چکیده: این مقاله یک روش کنترلی کارآمد برای اینورترهای متصل به شبکه با باطری‌های ذخیره‌ساز انرژی ارائه می‌دهد که شامل کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو و همچنین بهبود پایداری شبکه از طریق میرایی نوسانات می‌باشد. در روش پیشنهادی، دو حلقه کنترلی تفکیک‌شده برای کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو طراحی می‌گردد. علاوه بر کنترل‌کننده‌های مجزای توان اکتیو و راکتیو، دو کنترل‌کننده جانبی دیگر به عنوان کنترل‌کننده‌های پایدارساز بر روی اینورتر طراحی شده است. این دو پایدارساز بر روی حلقه‌های کنترل توان اکتیو و راکتیو قرار می‌گیرند و هدف آن‌ها افزایش پایداری اینورتر و شبکه در برابر خطای اتصال کوتاه می‌باشد. کنترل‌کننده‌ها و پایدارسازها به صورت همزمان توسط الگوریتم‌های هوشمند بهینه‌سازی تنظیم شده‌اند تا بهینه‌ترین رفتار شبکه به دست آید. برای نمایش عملکرد سیستم طراحی شده، انواع اغتشاشات خطی و خطاهای تک فاز و دوفاز و سه فاز در شبکه اعمال شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل‌کننده‌های طراحی شده توانسته‌اند به شکل قابل قبولی توان اکتیو و راکتیو را به صورت جداگانه کنترل نمایند و همچنین نوسانات شبکه را متعاقب انواع خطاها به صورت مناسبی میرا نمایند.

کلمات کلیدی: اینورتر، پایدارساز تکمیلی، پایداری دینامیکی، ذخیره‌ساز انرژی، سیستم قدرت چندماشین، کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو.

An Efficient Control Method for Inverters Connected Between Battery Storage Systems and Network

R. Hemmati¹, Assistant Professor; N. Azizi², MSc Student; M. Ahmadi Jirdehi³, Assistant Professor

1- Department of Electrical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran, Email: r.hemmati@kut.AC.ir

2- Department of Electrical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran, Email: n.azizi@smail.kut.AC.ir

3- Department of Electrical Engineering, Kermanshah University of Technology, Kermanshah, Iran, Email: m.ahmadi@kut.AC.ir

Abstract: This paper addresses an advanced control strategy on battery storage systems for decoupled active and reactive power control as well as stability improvement through damping oscillations. In the proposed approach, two decoupled control loops are designed for active and reactive power control at the same time. Besides, two supplementary stabilizers are added to the control loops for injecting stabilization signal and stability enhancement. The proposed controllers (i.e., active and reactive power controllers) and supplementary stabilizers are optimally tuned by a meta-heuristic optimization technique. Several small-signal disturbances and large-signal faults are applied on the network to demonstrate the dynamic performance of the storage system and network under such disturbances. Nonlinear simulation results demonstrate that the proposed control strategy can successfully control active and reactive power on the desired levels as well as damp out the oscillations following faults and disturbances.

Keywords: Inverter, supplementary stabilizers, dynamic stability, energy storage systems, multi machine electric power system, decoupled active and reactive power control.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۲۵

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۲۶

نام نویسنده مسئول: مهدی احمدی جیردهی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - کرمانشاه - میدان شهدا - دانشگاه صنعتی کرمانشاه - گروه مهندسی برق.

۱- مقدمه

امروزه با توجه به رشد تقاضا برای توان الکتریکی، ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی به‌عنوان یک راه‌حل مناسب برای رفع بسیاری از مشکلات شبکه مطرح شده‌اند. ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی معمولاً انرژی الکتریکی را در ساعت‌های کم مصرف انرژی ذخیره می‌نمایند و سپس در ساعت‌هایی که لازم باشد، انرژی را به شبکه برگشت می‌دهند. لذا یک کنترل مناسب و سریع باید بر روی سیستم ذخیره‌ساز انرژی وجود داشته باشد. به‌طوری‌که بتوان در هر ساعتی توان شارژ و دشارژ سیستم را به‌صورت مناسبی کنترل و بر روی مقادیر دلخواه تثبیت نمود [۱].

در میان روش‌های مختلف ذخیره‌سازی، باتری‌ها هم ظرفیت مناسب و هم سرعت پاسخ‌گویی قابل قبولی دارند. لذا می‌توانند به‌عنوان مناسب‌ترین روش ذخیره‌سازی در شبکه قدرت شناخته شوند که هم در بحث مدیریت انرژی و هم در بحث بهبود کیفیت توان کاربرد دارند. همچنین از آن‌جایی که خروجی الکتریکی باتری به‌صورت ولتاژ DC در اختیار مصرف‌کنندگان قرار می‌گیرد، برای اتصال به شبکه الکتریکی مناسب‌تر می‌باشد. در شبکه قدرت از باتری‌های ذخیره‌ساز برای اهداف مختلفی استفاده می‌شود؛ مانند پیک‌زدایی بار شبکه، بهبود کیفیت توان، بهبود پروفیل ولتاژ، مسطح نمودن بار، بهبود قابلیت اطمینان، کنترل فرکانس و کاهش اثر نامعینی ناشی از منابع انرژی تجدیدپذیر [۲-۶].

البته باتری‌ها دارای معایبی نیز می‌باشند. راندمان باتری‌ها، بسته به ماده شیمیایی و تعداد دفعات شارژ و دشارژ در حدود ۶۰ تا ۸۰ درصد است. بیش‌تر تکنولوژی‌های باتری‌ها فقط از نظر توان یا انرژی بهینه شده‌اند. به‌عبارت‌دیگر، باتری‌های با توان بالا معمولاً ظرفیت کمی دارند و برعکس. باتری‌هایی که برای توان بالا طراحی می‌شوند، نمی‌توانند چرخه شارژ و دشارژ را که در بسیاری از کاربردهای ذخیره‌ساز انرژی لازم است، فراهم کنند. باتری‌ها هزینه بالایی دارند و طول عمر آن‌ها کم می‌باشد. همواره لازم است که مقداری انرژی در باتری باقی بماند و در صورت دشارژ کامل، عمر باتری شدیداً کم می‌شود [۷-۸].

معمولاً باتری‌ها از طریق یک اینورتر به شبکه اصلی متصل می‌شوند. ولتاژ ورودی اینورتر یک ولتاژ DC می‌باشد ولی خروجی آن یک ولتاژ AC با دامنه، فرکانس و زاویه ولتاژ قابل کنترل است. لذا امکان پیاده‌سازی انواع استراتژی‌های کنترلی بر روی اینورتر متصل بین ذخیره‌ساز و شبکه وجود دارد و این امر مزایای زیادی به‌دنبال دارد ازجمله، کنترل‌پذیری راحت، قابلیت کنترل پارامترهای شبکه مانند ولتاژ، جریان یا توان خروجی باتری، کنترل توان اکتیو و راکتیو به‌صورت مجزا و کمک به بهبود پایداری شبکه در برابر اغتشاشات بزرگ و کوچک [۹-۱۱]. یکی از مناسب‌ترین استراتژی‌های کنترلی، کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو می‌باشد [۱۲]. در این روش سعی بر کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو به صورت مناسبی می‌باشد [۱۳-۱۴].

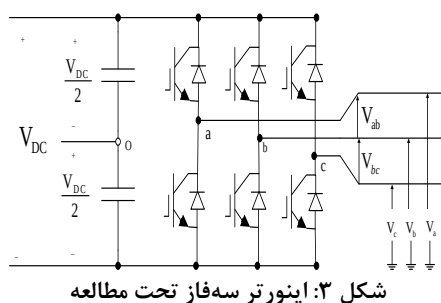
روش پیشنهادی این مقاله برای کنترل مجزای توان‌ها به این شرح است که دو حلقه کنترلی برای کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو طراحی

می‌شود که برای کنترل هر حلقه یک کنترل‌کننده PI وجود دارد. سپس یک کنترل‌کننده مکمل روی هر حلقه نصب می‌گردد که می‌توان آن را به‌عنوان پایدارساز در نظر گرفت. پایدارساز معمولاً از سیگنال سرعت فیدبک گرفته و آن را تبدیل به سیگنال میرایی نموده و به سیستم تحریک ژنراتورها تزریق می‌نماید [۱۵-۱۹]. مطابق ساختار پایدارسازها، کنترل‌کننده‌های مکمل به‌صورت بلوک پس‌فاز-پیش‌فاز می‌باشند. لذا در مجموع چهار کنترل‌کننده در شبکه وجود دارد. پارامترهای این چهار کنترل‌کننده به‌صورت همزمان توسط الگوریتم‌های هوشمند بهینه‌سازی تنظیم می‌گردد. مطالعات بر روی یک شبکه نوعی با چند ماشین سنکرون و متصل به یک شبکه بزرگ (شبکه بی‌نهایت) انجام می‌شود. هدف کنترل توان اکتیو و راکتیو بین باتری و شبکه و بهبود پایداری شبکه در برابر اغتشاشات است. انواع اغتشاشات و خطاهای خطی و غیرخطی بر روی شبکه اعمال می‌شود تا رفتار سیستم تحت مطالعه در برابر آن‌ها مطالعه شود. نتایج شبیه‌سازی غیرخطی نشان می‌دهد که سیستم طراحی‌شده نه تنها می‌تواند توان اکتیو و راکتیو را به‌صورت جداگانه کنترل نماید، بلکه نوسانات را نیز به‌صورت مناسبی میرا می‌نماید.

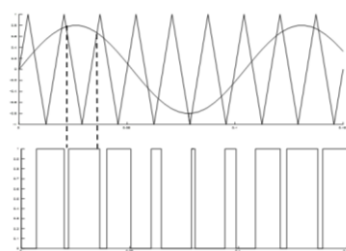
نوآوری‌های این مقاله را به‌صورت زیر لیست می‌گردد:

- ✓ در این مقاله کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو بر روی یک باتری ذخیره‌ساز انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. اگرچه بحث کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو قبلاً نیز مورد مطالعه قرار گرفته است، ولی بیش‌تر مطالعات بر روی اینورترهای یک‌جهته بوده است و بیش‌تر بر روی کنترل توان اکتیو تمرکز شده است. درحالی‌که در این مقاله چون عنصر ذخیره‌ساز انرژی باید قابلیت شارژ و دشارژ توان اکتیو را داشته باشد، کنترل اینورتر در دو جهت تولید و مصرف توان اکتیو انجام شده است.
- ✓ کنترل توان اکتیو به‌صورت کاملاً جدا از توان راکتیو انجام شده است.
- ✓ همان‌طور که قبلاً بیان شد، بیش‌تر بر روی کنترل توان اکتیو تمرکز شده است. درحالی‌که این مقاله قابلیت جذب و تزریق توان راکتیو به‌صورت کاملاً مجزا از توان اکتیو را نیز شبیه‌سازی می‌کند.
- ✓ این مقاله به بحث بهبود رفتار دینامیکی مجموعه باتری-اینورتر در برابر انواع اغتشاشات نیز می‌پردازد و سیستم کنترلی را با دو پایدارساز جانبی تقویت می‌کند.
- ✓ بیش‌تر مطالعات بر روی مبدل‌های الکترونیک قدرت به کنترل توان یا دینامیک داخلی مبدل‌ها می‌پردازند. ولی در این مقاله برای نمایش رفتار دینامیکی شبکه، چندین بار و ژنراتور با مدل دینامیکی کامل در کنار مجموعه ذخیره‌ساز-اینورتر قرار گرفته‌اند.
- ✓ کنترل‌کننده‌ها و پایدارسازها به‌صورت همزمان با الگوریتم‌های هوشمند طراحی می‌شوند که به بهبود عملکرد شبکه منجر می‌شود.
- ✓ شبیه‌سازی‌ها با مدل غیرخطی انجام شده و از مدل‌های خطی استفاده نشده است. این امر بر واقعی بودن نتایج صحت می‌گذارد.
- ✓ انواع اغتشاشات سیگنال بزرگ (مانند اتصال کوتاه) و سیگنال کوچک (مانند تغییر پله‌ای در مرجع توان) شبیه‌سازی شده است.

Serial no. 81



شکل ۳: اینورتر سه فاز تحت مطالعه



شکل ۴: یک نوع PWM مرسوم با خروجی های به دست آمده

ولتاژ خروجی اینورتر معمولاً حاوی هارمونیک های مختلف به صورت رابطه (۵) می باشد. برای حذف هارمونیک های فوق یک فیلتر مناسب در خروجی اینورتر نصب می گردد. در این مقاله، از یک فیلتر پایین گذر برای حذف هارمونیک ها استفاده شده است که در (۶) ارائه شده است.

$$v_{out} = \frac{4}{\pi} [\cos \omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t + \dots] \quad (5)$$

$$H_s = \frac{1}{1 + T_s} \quad (6)$$

۴- استراتژی های کنترلی

۴-۱- کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو

در شبکه قدرت، توان اکتیو و توان راکتیو تبدیلی بین دو باس با روابط (۷) و (۸) مشخص می شوند. طبق این روابط، برای اینکه توان اکتیو در توان راکتیو ثابت، کنترل شود، لازم است عبارت $E \sin \delta$ تغییر کند ولی $E \cos \delta$ ثابت بماند که این موضوع در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین برای اینکه توان راکتیو در توان اکتیو ثابت کنترل شود، باید $E \cos \delta$ تغییر کند، درحالی که $E \sin \delta$ ثابت باشد مانند شکل ۶. لذا با کنترل هماهنگ E و δ می توان استراتژی های کنترلی فوق را پیاده نمود. همان طور که در شکل ها نیز مشخص است، عبارت $E \sin \delta$ متناسب با I_d می باشد و $E \cos \delta$ نیز متناسب با I_q است. لذا با کنترل مناسب I_d و I_q نیز می توان همین استراتژی های کنترلی را پیاده نمود. چون I_d و I_q جریان های شبکه در محورهای متعام هستند، لذا استفاده از تئوری محورهای مرجع گردان، تبدیل پارک می تواند منطبق بر روش فوق باشد [۱۸].

$$P = \frac{EV}{X} \sin \delta \quad (7)$$

$$Q = \frac{EV}{X} \cos \delta - \frac{V^2}{X} \quad (8)$$

۳-۱- مدل سازی ژنراتور سنکرون

هرکدام از ژنراتورهای سنکرون به صورت مدل مرتبه سوم در محورهای مرجع مدل شده اند. سیستم قدرت را در هر نقطه کاری می توان با مجموعه ای از معادلات دیفرانسیل غیرخطی مانند (۱) مدل نمود [۲۵].

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (1)$$

مقادیر $x = [\delta, \omega, E'q]$ و u به ترتیب بردار حالت و بردار ورودی های سیستم می باشند. مدل دینامیکی غیرخطی سیستم به صورت رابطه (۲) نوشته می شود [۲۵].

$$\begin{cases} \dot{w}_i = \frac{(P_m - P_e - Dw)}{M} \\ \dot{d}_i = w_0 (w - 1) \\ \dot{E'_{qi}} = \frac{(-E_q + E_{fd})}{T'_{do}} \\ \dot{E_{fdi}} = \frac{-E_{fd} + K_a (V_{ref} - V_t)}{T_a} \end{cases} \quad (2)$$

۳-۲- مدل سازی اینورتر

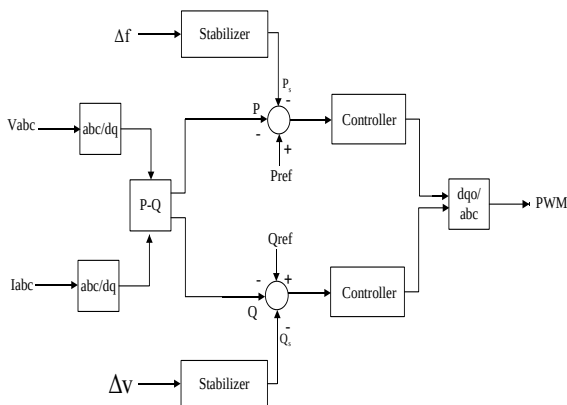
برای تبدیل ولتاژ DC به AC از یک اینورتر سه فاز استفاده شده است که در شکل ۳ نشان داده شده است. عنصر کلیدزنی اینورتر از نوع IGBT انتخاب شده است. برای کنترل اینورتر و کلیدزنی مناسب آن، از روش کلیدزنی PWM استفاده شده است. یک نوع PWM مرسوم در شکل ۴ نشان داده شده است. همان طور که مشخص است، در این روش معمولاً یک سیگنال سینوسی (سیگنال داخلی یا سیگنال مدولاسیون) با یک سیگنال دندان اره ای (سیگنال carrier) مقایسه می شود و از مقایسه این دو سیگنال، پالس های خروجی برای ادوات کلیدزنی مانند IGBT ارسال می شود. در این روش، می توان با کنترل مناسب پارامترهای PWM، ولتاژ AC خروجی را کنترل نمود. نرخ مدولاسیون PWM معمولاً با رابطه (۳) تعریف می شود و می توان با کنترل نرخ مدولاسیون، دامنه ولتاژ AC خروجی را مطابق رابطه (۴) کنترل نمود. دامنه ولتاژ AC خروجی تابعی از نرخ مدولاسیون، دامنه ولتاژ DC و ضریب ثابت k می باشد، که این ضریب ثابت بستگی به ساختار اینورتر دارد. همچنین با کنترل زاویه فاز سیگنال مدولاسیون، زاویه فاز ولتاژ AC خروجی قابل کنترل است و فرکانس ولتاژ AC خروجی نیز از طریق فرکانس سیگنال مدولاسیون قابل کنترل می باشد [۲۶].

قابل ذکر است که در این مقاله سعی شده است تا تمام اجزا با مدل واقعی و غیرخطی مدل شوند. به عنوان مثال، برای مدل سازی IGBT های نصب شده در اینورترها، از مدل واقعی و غیرخطی نرم افزار MATLAB استفاده شده است تا رفتار واقعی جزء نمایش داده شود.

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} \quad (3)$$

$$v_{out} = m_a \times v_{dc} \times k \quad (4)$$

کنترل کننده تناسبی-انتگرالی PI روی آن حلقه نصب می‌گردد. همچنین یک کنترل کننده مکمل بر روی هر حلقه نصب شده تا میرایی نوسانات در شبکه را بهبود بخشد و پایداری شبکه را در برابر خطا افزایش دهد. این کنترل کننده مکمل معمولاً به عنوان میراساز یا پایدارساز نیز شناخته می‌شود. شکل ۷ حلقه‌های کنترلی توان اکتیو و راکتیو را نشان می‌دهد. برای طراحی کنترل کننده مجزای توان اکتیو و راکتیو، ابتدا طبق روابط (۹) و (۱۰) مقادیر سه فاز جریان و ولتاژ خروجی اینورتر از حوزه abc به حوزه dq0 منتقل می‌شوند. سپس همانطور که روابط (۱۱) و (۱۲) نشان می‌دهد، توان‌های محورهای d و q محاسبه می‌شوند که چون این توان‌ها بر هم عمود هستند، طبعاً همان توان‌های اکتیو و راکتیو در فضای abc خواهند بود. پس از آن دو کنترل کننده تناسبی-انتگرالی PI مطابق رابطه‌های (۱۳) و (۱۴) بر روی دو حلقه کنترلی توان اکتیو و توان راکتیو قرار می‌گیرند که توان‌های اکتیو و راکتیو را بر روی مقادیر مرجع تنظیم می‌نمایند. در نهایت خروجی‌های دو حلقه کنترلی که در محورهای d و q هستند، دوباره با استفاده از رابطه (۱۵) به حوزه abc منقل شده و تبدیل به سیگنال‌های مدنظر برای PWM می‌گردند.



شکل ۷: حلقه‌های کنترلی توان اکتیو و راکتیو با پایدارساز

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & -\cos(\omega t) & 0 \\ \cos(\omega t) & \sin(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

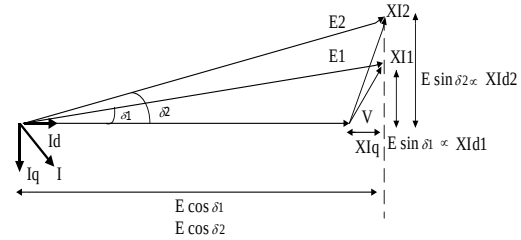
$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & -\cos(\omega t) & 0 \\ \cos(\omega t) & \sin(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$P = \frac{1}{2} V_d I_d + V_q I_q \quad (11)$$

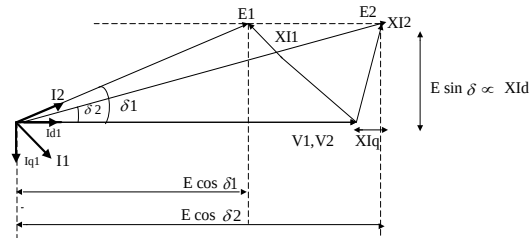
$$Q = -\frac{1}{2} V_d I_q + V_q I_d \quad (12)$$

$$I_d = (P - P_{ref} - P_s) * (K_{P1} + \frac{K_{I1}}{s}) \quad (13)$$

$$I_q = (Q - Q_{ref} - Q_s) * (K_{P2} + \frac{K_{I2}}{s}) \quad (14)$$



شکل ۵: کنترل توان اکتیو در توان راکتیو ثابت



شکل ۶: کنترل توان راکتیو در توان اکتیو ثابت

۴-۲- میرایی نوسانات

در شبکه قدرت می‌توان دو کانال کنترلی توان اکتیو-فرکانس و توان راکتیو-ولتاژ تعریف نمود. چون مجموعه باطری و اینورتر می‌تواند هم توان اکتیو و هم توان راکتیو خروجی را به صورت تولیدی یا مصرفی کنترل کند، لذا دو کانال کنترلی فوق به راحتی توسط مجموعه باطری و اینورتر قابل پیاده‌سازی هستند. هنگامی که در یک شبکه دامنه ولتاژ زیاد شود، می‌توان با دریافت توان راکتیو از شبکه و مصرف آن در اینورتر دامنه ولتاژ را کاهش داد. به عبارت دیگر در این حالت اینورتر به مد کاری سلفی می‌رود که طی این فرایند، توان اکتیو اینورتر ثابت است. همچنین در زمان کاهش دامنه ولتاژ شبکه، اینورتر می‌تواند با تزریق توان راکتیو و عمل در مد خازنی، پروفیل ولتاژ را بالا ببرد. لذا هنگامی که در شبکه نوسان ولتاژ وجود دارد، اگر توان راکتیو خروجی اینورتر متناسب و هم‌فاز با نوسان ولتاژ تغییر کند، می‌تواند در میرایی نوسانات و بهبود پایداری به خوبی به شبکه کمک کند. همچنین در کانال کنترلی توان اکتیو-فرکانس، هنگامی که در شبکه قدرت، توان مکانیکی ورودی ژنراتور از توان الکتریکی خروجی بیش‌تر است، ماشین شروع به سرعت گرفتن می‌نماید و نوسان فرکانس و توان (نوسان زاویه قدرت یا زاویه گشتاور ماشین) در شبکه مشاهده می‌شود. اگر در این حالت، توان الکتریکی را بتوان هم‌فاز و متناسب با توان مکانیکی افزایش داد، نوسانات شبکه سریع‌تر میرا می‌گردند. همچنین در زمانی که توان مکانیکی از توان الکتریکی کم‌تر است، ماشین شروع به کاهش سرعت می‌نماید و در این زمان باید توان الکتریکی را متناسب با توان مکانیکی کاهش داد. لذا اگر شارژ و دشارژ توان اکتیو در باطری متناسب و هم‌فاز با نوسانات توان شبکه باشد، می‌تواند در میرایی نوسانات و بهبود پایداری نقش مؤثری ایفا نماید.

۴-۳- کنترل کننده‌ها و پایدارسازهای تحت مطالعه

در این مقاله، دو حلقه کنترلی برای کنترل توان‌های اکتیو و راکتیو به صورت مجزا در نظر گرفته شده است. برای کنترل هر حلقه، یک

در واقع سطح زیر نوسانات یک سیگنال را اندازه‌گیری می‌نماید. لذا هرچه قدر سطح زیر نوسانات کم‌تر باشد، میرایی نوسانات شبکه کم‌تر بوده و سریع‌تر به حالت ماندگار می‌رسند [۱۹]. بر این اساس، هدف کمینه نمودن پارامتر ITAE در شبکه می‌باشد که به صورت رابطه (۱۶) تعریف می‌شود. این تابع هدف، سطح زیر نوسانات مربوط به منحني توان اکتیو و توان راکتیو را محاسبه می‌نماید.

$$ITAE = \int_0^t t |\Delta P| dt + \int_0^t t |\Delta Q| dt \quad (16)$$

۵-۲- فرمول‌بندی ریاضی مسئله به فرم استاندارد

مسئله طراحی بهینه ضرایب کنترل‌کننده‌ها و پایدارسازها، به شکل یک مسئله استاندارد بهینه‌سازی مقید ارائه می‌گردد. این مسئله به صورت مجموعه روابط زیر می‌باشد:

$$Min(ITAE) \quad (17)$$

s.t.

$$K_{P1}^{min} < K_{P1} < K_{P1}^{max} \quad (18)$$

$$K_{P2}^{min} < K_{P2} < K_{P2}^{max} \quad (19)$$

$$K_{I1}^{min} < K_{I1} < K_{I1}^{max} \quad (20)$$

$$K_{I2}^{min} < K_{I2} < K_{I2}^{max} \quad (21)$$

$$K_{DC1}^{min} < K_{DC1} < K_{DC1}^{max} \quad (22)$$

$$K_{DC2}^{min} < K_{DC2} < K_{DC2}^{max} \quad (23)$$

$$T1^{min} < T1 < T1^{max} \quad (24)$$

$$T2^{min} < T2 < T2^{max} \quad (25)$$

$$T3^{min} < T3 < T3^{max} \quad (26)$$

$$T4^{min} < T4 < T4^{max} \quad (27)$$

$$T5^{min} < T5 < T5^{max} \quad (28)$$

$$T6^{min} < T6 < T6^{max} \quad (29)$$

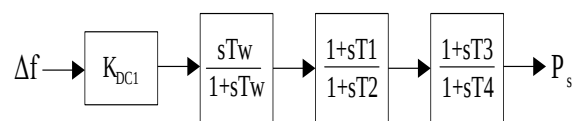
$$T7^{min} < T7 < T7^{max} \quad (30)$$

$$T8^{min} < T8 < T8^{max} \quad (31)$$

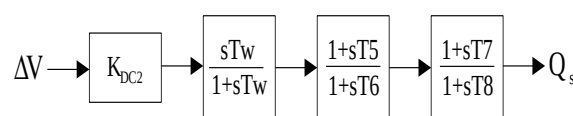
تابع هدف (۱۷) نشان‌دهنده مجموع سطح زیر نوسانات توان اکتیو و توان راکتیو می‌باشد که باید کمینه گردد. تعریف تابع هدف به این صورت نشان‌دهنده این مسئله است که چنانچه خطا یا اغتشاشی در سیستم وجود نداشته باشد مقدار این شاخص برابر صفر است. قیدهای (۱۸) تا (۳۱) بیانگر محدودیت روی پارامترهای کنترل‌کننده‌های داخلی حلقه‌های کنترلی می‌باشد. قیدهای (۲۲) و (۲۳) به ترتیب نشان‌دهنده محدودیت روی ضریب پایدارساز حلقه کنترلی توان اکتیو و راکتیو می‌باشند. همچنین قیدهای (۲۴) تا (۳۱) بیانگر محدودیت بلوک‌های پیش‌فاز-پس‌فاز پایدارساز هستند.

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & 1 \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

ساختار دو پایدارساز موجود در شکل ۷، در شکل‌های ۸ و ۹ نمایش داده شده است. پایدارساز شکل ۸ برای میراسازی نوسانات توان اکتیو به کار می‌رود و سیگنال ورودی آن نوسانات فرکانسی (Δf) است. سیگنال خروجی این پایدارساز هم‌فاز با نوسانات سرعت می‌باشد و می‌تواند در میراسازی نوسانات توان اکتیو به حلقه کنترلی توان اکتیو کمک نماید. همان‌طور که شکل ۷ نشان می‌دهد، خروجی این پایدارساز به حلقه کنترلی توان اکتیو اعمال شده است. همچنین پایدارساز شکل ۹ برای میراسازی نوسانات توان راکتیو طراحی شده است و سیگنال ورودی آن نوسانات ولتاژ (ΔV) می‌باشد. چون نوسانات ولتاژ هم‌فاز با نوسانات توان راکتیو می‌باشد، لذا این پایدارساز می‌تواند در میراسازی نوسانات به حلقه کنترلی توان راکتیو کمک نماید. همان‌طور که شکل ۷ نشان می‌دهد، خروجی این پایدارساز به حلقه کنترلی توان راکتیو اعمال شده است. پایدارساز شامل یک ضریب، یک بلوک به عنوان فیلتر (washout) و دو بلوک جبران‌ساز پس‌فاز-پیش‌فاز (lead-lag) می‌باشد. بلوک فیلتر درواقع یک فیلتر بالاگذر است که فرکانس کار حالت ماندگار مدار (ω_0) یا ۶۰ هرتز را فیلتر نموده و مانع ورود آن به داخل پایدارساز می‌شود. لذا در شرایط کار عادی مدار، سیگنال ورودی جبران‌ساز صفر باشد و فقط در موقع اغتشاش و نوسان وارد مدار شود. معمولاً ضریب ثابت این فیلتر یعنی T_w برابر ۱۰ ثانیه در نظر گرفته می‌شود. همان‌طور که مشخص است، پایدارساز دارای دو بلوک جبران‌ساز پس‌فاز-پیش‌فاز (lead-lag) شامل چهار پارامتر $T1$ - $T4$ و یک ضریب ثابت K_{DC} است. هدف تنظیم بهینه این ۵ پارامتر برای هر پایدارساز می‌باشد.



شکل ۸: ساختار پایدارساز جانبی تحت مطالعه برای توان اکتیو

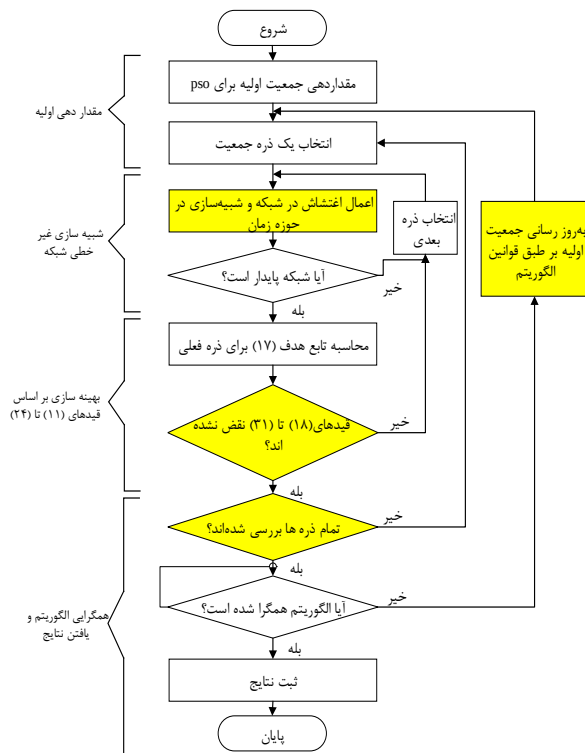


شکل ۹: ساختار پایدارساز جانبی تحت مطالعه برای توان راکتیو

۵- طراحی کنترل‌کننده با الگوریتم هوشمند

۵-۱- تابع هدف بهینه‌سازی

برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده‌ها و پایدارسازها، تابع هدف بهینه‌سازی به صورت رابطه (۱۶) در نظر گرفته می‌شود. این تابع هدف



شکل ۱۰: فلوچارت حل مسئله با الگوریتم هوشمند

۵-۳- حل مسئله بهینه‌سازی

در این مقاله، برای تنظیم نمودن ضرایب کنترل‌کننده‌ها و حل مسئله، از الگوریتم بهینه‌سازی PSO تطبیقی و اصلاح‌شده استفاده می‌گردد. الگوریتم فوق، یک الگوریتم شناخته‌شده می‌باشد و به‌طور وسیعی برای حل مسائل خطی، غیرخطی، ترکیب عدد صحیح و پیوسته به‌کار رفته است و جزئیات بیش‌تر آن می‌تواند در مراجع [۲۷-۲۸] یافت شود. همچنین در این مقاله، ضریب وزنی یا اینرسی الگوریتم به‌صورت تطبیقی متناسب با تعداد تکرار الگوریتم تغییر می‌کند تا منجر به یک الگوریتم تطبیقی گردد و پاسخ‌های بهتری را پیدا نماید. به‌علاوه، از خصوصیات الگوریتم‌های دیگر مانند الگوریتم ژنتیک نیز در الگوریتم استفاده شده است تا الگوریتم اصلاح شده به‌دست آید.

مطابق فلوچارت ارائه‌شده در شکل ۱۰، ابتدا یک جمعیت اولیه برای مسئله تولید می‌شود. جمعیت اولیه یک ماتریس می‌باشد که هر سطر این ماتریس یک ذره نامیده می‌شود. هر ذره یک پاسخ احتمالی برای مسئله تحت مطالعه می‌باشد. هر ذره دارای تعدادی عضو می‌باشد که تعداد اعضا برابر تعداد متغیرهای بهینه‌سازی می‌باشد. به‌عنوان مثال اگر در یک مسئله ۱۰۰ متغیر برای بهینه‌سازی وجود داشته باشد، هر ذره دارای ۱۰۰ عضو خواهد بود. به‌عبارت دیگر، ماتریس جمعیت دارای ۱۰۰ ستون خواهد بود. تعداد سطرهای ماتریس جمعیت هم معمولاً به‌صورت دلخواه توسط طراح انتخاب می‌شود که دو یا سه برابر تعداد متغیرهای بهینه‌سازی می‌باشد. مثلاً اگر تعداد ستون‌ها (یا همان متغیرهای بهینه‌سازی ۱۰۰ باشد)، تعداد سطرهای ماتریس می‌تواند ۳۰۰ انتخاب گردد. در مرحله بعدی فلوچارت، یک ذره (یک پاسخ احتمالی برای مسئله) از جمعیت انتخاب می‌شود. پارامترهای متناسب با این ذره بر روی کنترل‌کننده‌های داخلی و پایدارسازهای شبکه تنظیم می‌شوند. سپس یک اغتشاش به شبکه اعمال می‌گردد و شبکه در حوزه زمان شبیه‌سازی غیرخطی می‌شود. اگر شبکه ناپایدار شود، ذره مذکور به‌عنوان یک پاسخ ناممکن تلقی شده و ذره بعدی انتخاب می‌شود. در غیر این صورت تابع هدف مسئله محاسبه شده و سپس قیدها بررسی می‌گردند. اگر قیدهای مسئله نقض گردند، ذره مذکور به‌عنوان یک پاسخ ناممکن تلقی شده و ذره بعدی انتخاب می‌شود. همین روند برای تمام ذره‌های جمعیت انجام می‌گردد و بهترین ذره با کم‌ترین هزینه به دست می‌آید. سپس شرایط همگرایی الگوریتم بررسی می‌شود که مثلاً می‌تواند مشابه بودن پاسخ‌ها طی چندین تکرار متوالی باشد. اگر طی چندین تکرار متوالی پاسخ مشابهی به‌دست آمد، یعنی پاسخ نهایی به‌دست آمده است و مسئله پاسخ بهینه‌تر ندارد. لذا فرآیند تکراری حل مسئله به پایان می‌رسد. در غیر این صورت جمعیت مطابق قوانین الگوریتم به‌روز شده و فرآیند مذکور تکرار شده تا پاسخ بهینه به دست آید.

۶- اطلاعات شبکه تحت مطالعه

جدول ۲ خلاصه‌ای از پارامترهای شبکه تحت مطالعه شامل پارامترهای ژنراتورهای سنکرون، ترانسفورماتورها و بارها ارائه می‌دهد. محدوده پارامترهای کنترل‌کننده‌ها و پایدارسازها نیز در جدول ۳ ذکر شده است. مقاومت و راکتانس خط به ترتیب برابر ۱۰ اهم و ۰/۰۰۱ هانری و ولتاژ DC باتری ۱۹۴۰ ولت می‌باشد.

جدول ۲: اطلاعات شبکه تحت مطالعه

ژنراتور ۱	$P_n=200\text{ MW}$, $V_n=13/8\text{ kV}$, $K_d=0$, $R=0/2215\text{ pu}$, $X=0/22\text{ pu}$, $p_m=0/721834\text{ pu}$, $V_f=1/037\text{ pu}$
ژنراتور ۲	$P_n=200\text{ MW}$, $V_n=13/8\text{ kV}$, $K_d=0$, $R=0/2215\text{ pu}$, $X=0/22\text{ pu}$, $p_m=0/721834\text{ pu}$, $V_f=1/037\text{ pu}$
ترانسفورماتور ۱	$\Delta-\Delta g$, $V1\text{ ph-ph}$ (V_{rms})= $20/8\text{ V}$, $R1(\text{p.u.})=0/002$, $X1(\text{p.u.})=0/04$, (V_{rms})= $45/0\text{ V}$, $R2(\text{p.u.})=0/002$, $V2\text{ ph-ph}$ (V_{rms})= $45/0\text{ V}$, $X2(\text{p.u.})=0/04$
ترانسفورماتور ۲	$\Delta-\Delta g$, $V1\text{ ph-ph}$ (V_{rms})= $13/8\text{ kV}$, $R1(\text{p.u.})=0/0027$, $X1(\text{p.u.})=0/08$, $V2\text{ ph-ph}$ (V_{rms})= $325/269\text{ V}$, $R2(\text{p.u.})=0/0027$, $X2(\text{p.u.})=0/08$
ترانسفورماتور ۳	$\Delta-\Delta g$, $V1\text{ ph-ph}$ (V_{rms})= $13/8\text{ kV}$, $R1(\text{p.u.})=0/0027$, $X1(\text{p.u.})=0/08$, $V2\text{ ph-ph}$ (V_{rms})= $325/269\text{ V}$, $R2(\text{p.u.})=0/0027$, $X2(\text{p.u.})=0/08$
بار ۱	$P_{load}=1\text{ kW}$, $Q_{load}=0/5\text{ kvar}$
بار ۲	$P_{load}=10\text{ MW}$, $Q_{load}=0$
بار ۳	$P_{load}=10\text{ MW}$, $Q_{load}=0$

جدول ۵: مقایسه تابع هدف با الگوریتم‌های مختلف

	PSO		GA	
	بدون پایدارساز	با اتصال پایدارساز	بدون پایدارساز	با اتصال پایدارساز
خطای تک‌فاز ۱	۸۰/۶۸۸۸	۱۶۶/۳۲۱۵	۹۷/۴۵۹۲	۱۹۸/۰۲۵۰
خطای تک‌فاز ۲	۱۲۸/۵۰۰۵	۲۱۱/۷۸۸۷	۱۷۰/۸۵۵۴	۲۴۰/۵۸۲۱
خطای دو فاز	۱۹۹/۸۹۹۱	۳۷۰/۳۰۲۲	۲۲۱/۵۹۸۶	۴۱۳/۵۸۵
خطای سه‌فاز	۵۹/۶۷۴۱	۸۴/۱۰۹۸	۶۳/۴۰۵۳	۹۹/۶۵۸۴

جدول ۳: اطلاعات کنترل‌کننده‌ها

کنترل‌کننده داخلی برای کنترل توان اکتیو	$K_{P1}^{min}=0.0001, K_{P1}^{max}=0.0005,$ $K_{I1}^{min}=0.01, K_{I1}^{max}=0.04$
کنترل‌کننده داخلی برای کنترل توان راکتیو	$K_{P2}^{min}=0.0001, K_{P2}^{max}=0.0005,$ $K_{I2}^{min}=0.01, K_{I2}^{max}=0.02$
پایدارساز توان اکتیو	$K_{DC1}^{min}=1, K_{DC1}^{max}=3, T1^{min}=0.15,$ $T1^{max}=0.25, T2^{min}=0.01,$ $T2^{max}=0.02, T3^{min}=0.01,$ $T3^{max}=0.05, T4^{min}=0.01,$ $T4^{max}=0.02$
	$K_{DC2}^{min}=3, K_{DC2}^{max}=5, T5^{min}=0.3,$ $T5^{max}=0.5, T6^{min}=0.001,$ $T6^{max}=0.02, T7^{min}=0.01,$ $T7^{max}=0.05, T8^{min}=0.01,$ $T8^{max}=0.02$
پایدارساز توان راکتیو	

۷- نتایج شبیه‌سازی

همان‌طور که بیان شد، مسئله بهینه‌سازی ارائه‌شده برای تنظیم بهینه پارامترهای کنترل‌کننده‌های PI و پایدارسازها، توسط الگوریتم اصلاح‌شده PSO حل می‌گردد. نتایج این بهینه‌سازی در جدول ۴ و ۵ ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشخص است، تمام پارامترها در محدوده مجاز تعریف‌شده می‌باشند و قیدهای مسئله به‌خوبی رعایت شده‌اند. قابل ذکر است که برای دستیابی به پاسخ‌های مناسب و تضمین بهینه بودن جواب‌ها، مسئله چندین بار توسط الگوریتم فوق حل شده است و نتایج با نتایج الگوریتم ژنتیک مقایسه شده تا از صحت پاسخ‌ها اطمینان حاصل شود. همچنین تنظیمات متغیرهای الگوریتم بهینه‌سازی چندین بار تغییر یافته است تا بهترین و بهینه‌ترین پاسخ‌ها به‌دست آیند. برای اطمینان از صحت پاسخ‌ها، مقادیر به‌دست‌آمده متغیرها با استفاده از دو الگوریتم ژنتیک و PSO مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. همان‌طور که مشخص است الگوریتم پیشنهادی PSO پاسخ‌های بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک به‌دست می‌آورد. همچنین سرعت یافتن پاسخ آن کمتر است و در تعداد تکرار کم‌تری پاسخ به‌دست می‌آید.

جدول ۴: مقادیر بهینه پارامترهای کنترل‌کننده‌های PI و پایدارسازها

پارامتر	مقدار بهینه
K_{P1}	۰/۰۰۰۲
K_{P2}	۰/۰۰۰۱
K_{I1}	۰/۰۲۰۰
K_{I2}	۰/۰۱۰۰
بهره‌های کنترلی	K_{DC1} ۱/۰۵۷۹
پایدارسازها	K_{DC2} ۳/۰۴۰۴
ثابت‌های زمانی پایدارسازها	T1 ۰/۲۵۰۰
	T2 ۰/۰۱۰۰
	T3 ۰/۰۰۵۰
	T4 ۰/۰۱۰۰
	T5 ۰/۵۰۰۰
	T6 ۰/۰۱۰۰
	T7 ۰/۰۰۵۰
	T8 ۰/۰۱۰۰

۷-۱- شبیه‌سازی کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو

در این بخش به بررسی توانایی مجموعه باطری-اینورتر در کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو پرداخته می‌شود. دو حالت کنترلی مدنظر به‌صورت کنترل توان اکتیو در توان راکتیو ثابت و کنترل توان راکتیو در توان اکتیو ثابت می‌باشند.

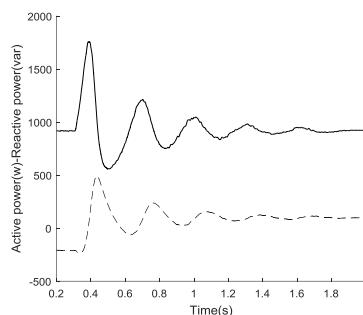
۷-۱-۱- کنترل توان اکتیو در توان راکتیو ثابت

به‌منظور بررسی توانایی سیستم طراحی‌شده در کنترل توان اکتیو و راکتیو، تغییرات مقادیر مرجع توان اکتیو و راکتیو به‌صورت پله‌ای انجام می‌پذیرد. درواقع، با اعمال سیگنال پله به مراجع توان اکتیو و راکتیو، توان مرجع از یک مقدار قبلی بر روی یک مقدار جدید قرار می‌گیرد و انتظار این است که توان‌های واقعی خطوط نیز مطابق این تغییرات سیگنال مرجع، دچار تغییر شده و مقادیر مرجع را ردیابی کنند.

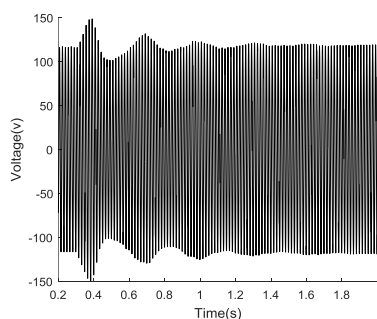
شکل ۱۱ تغییر توان اکتیو از ۷۸۵/۴ وات (تولیدی یا دشارژ) به ۵۰- وات (مصرفی یا شارژ) را تحت شرایط توان راکتیو ثابت نشان می‌دهد. در این شکل، سیگنال پله برای تغییر توان در لحظه ۰/۳ ثانیه اعمال شده است به این منظور که در این زمان مرجع توان اکتیو تغییر داده شده و از مقدار ۷۸۵/۴ به مقدار ۵۰- می‌رسد. همان‌طور که مشخص است، کنترل‌کننده‌ها به‌خوبی توانسته‌اند توان اکتیو را از حالت شارژ به دشارژ تغییر جهت دهند، درحالی‌که توان راکتیو شبکه بر روی مقدار قبلی خود ثابت مانده و تغییر نداشته است. تغییرات دامنه مدولاسیون و زاویه مدولاسیون متناسب با این حالت، در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، سیگنال PWM با تغییر زاویه و فاز سیگنالی کنترلی به‌خوبی توانسته است مد کنترلی توان اکتیو در توان راکتیو ثابت را اجرا نماید. همچنین ولتاژ خروجی و توان‌های ظاهری (ترکیب دو توان اکتیو راکتیو) خروجی اینورتر، به‌ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نمایش داده شده‌اند و به‌خوبی می‌توان تغییرات ایجاد شده در ولتاژ و توان را مشاهده نمود. درواقع در این حالت، کنترل‌کننده با تغییر مناسب دامنه و فاز ولتاژ خروجی اینورتر، کنترل توان اکتیو در توان راکتیو ثابت را پیاده می‌نماید. همچنین تغییرات توان ظاهری بین اینورتر و شبکه که در بردارنده هر دو توان اکتیو و راکتیو است به‌خوبی نشان

۷-۱-۲- کنترل توان راکتیو در توان اکتیو ثابت

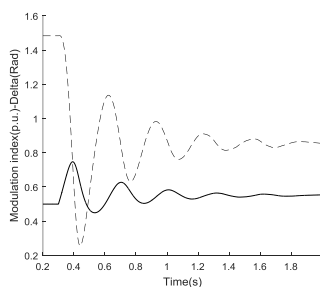
شکل ۱۵ تغییرات توان راکتیو از مقدار ۲۱۰،۸- (تزریقی یا تولیدی) به مقدار ۱۰۰ وار (جذبی یا مصرفی) را نشان می‌دهد درحالیکه توان اکتیو ثابت می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نه تنها می‌توان توان اکتیو و راکتیو را به‌صورت مجزا کنترل نمود، بلکه به‌خوبی می‌توان جهت توان اکتیو و راکتیو را نیز تغییر داد. به‌عبارت‌دیگر توان راکتیو را از حالت تولیدی به حالت مصرفی برد و برعکس. سیگنال کنترلی اینورتر (PWM) در شکل ۱۶ نشان داده شده است و دامنه و زاویه مدولاسیون نیز در شکل ۱۷ نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشخص است، این سیگنال متناسب با تغییرات در توان اکتیو و راکتیو تغییر نموده تا حالت کنترلی مورد نظر را ایجاد نماید. توان ظاهری مبادله شده نیز در شکل ۱۸ نشان داده شده است.



شکل ۱۵: کنترل توان راکتیو در توان اکتیو ثابت
خط تیره: توان اکتیو، خط چین: توان راکتیو

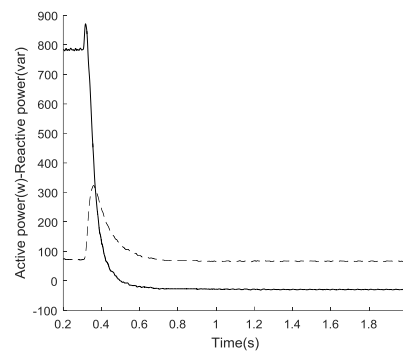


شکل ۱۶: سیگنال PWM برای حالت کنترل توان راکتیو در توان اکتیو ثابت

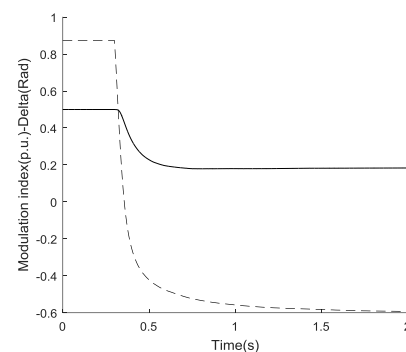


شکل ۱۷: تغییرات دامنه مدولاسیون و زاویه مدولاسیون برای حالت کنترل توان راکتیو در توان اکتیو ثابت
خط تیره: دامنه مدولاسیون، خط چین: زاویه مدولاسیون

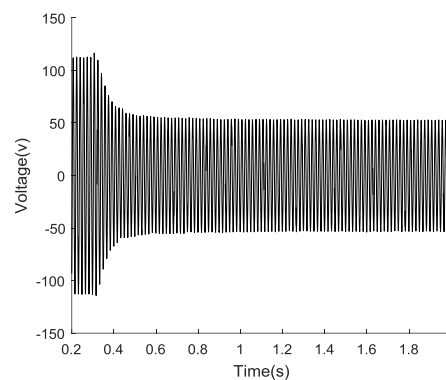
می‌دهد که فقط در لحظه اعمال اغتشاش به شبکه، توان دچار اعوجاج شده است.



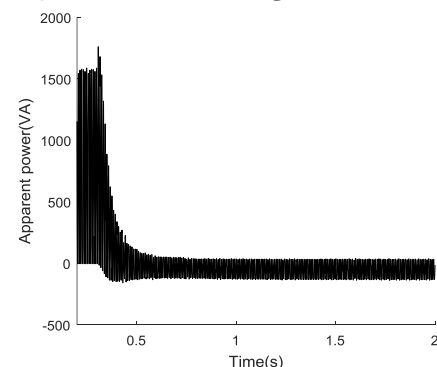
شکل ۱۸: کنترل توان اکتیو در توان راکتیو ثابت
خط تیره: توان اکتیو، خط چین: توان راکتیو



شکل ۱۹: تغییرات دامنه مدولاسیون و زاویه مدولاسیون
خط تیره: دامنه مدولاسیون، خط چین: زاویه مدولاسیون

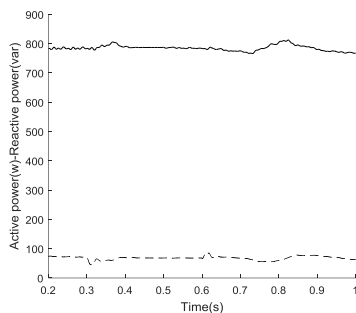


شکل ۲۰: ولتاژ خروجی اینورتر در مد کنترل توان اکتیو



شکل ۲۱: توان ظاهری مبادله شده بین اینورتر و شبکه

مرحله تغییر داده می‌شود. در لحظه $0/3$ ثانیه، بار به مقدار 150 درصد بار نامی افزایش پیدا کرده است. به عبارت دیگر باری با مقدار 50 درصد مقدار نامی به شبکه اضافه شده است. سپس در لحظه $0/6$ ثانیه، بار به مقدار 70 درصد بار نامی کاهش یافته است یعنی 30 درصد بار قطع شده است. شکل ۲۱ نشان می‌دهد که توان‌های اکتیو و راکتیو، بعد از اعمال هر اغتشاشی کمی دچار نوسان می‌گردند، ولی سپس به مقدار نامی خود برگشته و بر روی مقادیر قبل از اغتشاش تثبیت شده‌اند. این امر توانایی سیستم کنترلی را به خوبی نمایش می‌دهد.



شکل ۲۱: توان اکتیو و راکتیو اینورتر به ازای تغییر پله‌ای بار

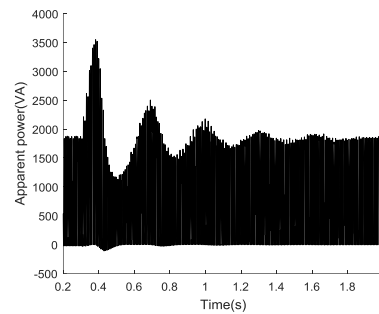
خط تیره: توان اکتیو، خط چین: توان راکتیو

۷-۲- اثر پایدارسازها بر روی پایداری و میرایی نوسانات

برای نشان دادن اثر پایدارسازهای طراحی شده بر روی میرایی نوسانات و رفتار دینامیکی شبکه، چندین خطای مختلف با زمان‌های متفاوت در شبکه اعمال می‌شود تا رفتار شبکه در برابر اغتشاشات بزرگ بررسی گردد. سپس برای مقایسه بهتر و نشان دادن اثر مثبت پایدارسازها بر روی میرایی نوسانات، شبکه با وجود پایدارساز با حالت بدون پایدارساز مقایسه می‌گردد. اغتشاشات لحاظ شده به صورت زیر هستند:

- اتصال کوتاه تک‌فاز به زمین روی شین بار به مدت $0/1$ ثانیه
- اتصال کوتاه تک‌فاز به زمین به روی شین بار به مدت $0/5$ ثانیه
- اتصال کوتاه دوفاز به زمین روی شین ژنراتور ۱ به مدت $0/1$ ثانیه
- اتصال کوتاه سه‌فاز به زمین روی شین بار به مدت $0/1$ ثانیه

شکل‌های ۲۲ و ۲۳ نشان‌دهنده توان اکتیو و راکتیو خروجی مجموعه اینورتر-باتری به سمت شبکه تحت خطای تک فاز مدت $0/1$ ثانیه می‌باشند. همچنین پارامترهای PWM تحت این خطا در شکل‌های ۲۴ و ۲۵ نمایش داده شده‌اند. همان‌طور که مشخص است توان‌های اکتیو و راکتیو در هر دو سیستم با پایدارساز و بدون پایدارساز بعد از رفع خطا بر روی مقادیر قبل از خطا قرار می‌گیرند و این نشان‌دهنده رفتار صحیح سیستم کنترلی طراحی شده می‌باشد. اما نتایج نشان می‌دهند که سیستم با وجود پایدارساز جانبی توانسته است نوسانات را سریع‌تر میرا نموده و دامنه نوسانات نیز به صورت چشم‌گیری کاهش پیدا کرده است. این قضیه هم در توان اکتیو و هم در توان راکتیو خروجی مشاهده می‌شود. لذا نتایج بر تأثیر مثبت پایدارسازها در بهبود رفتار دینامیکی شبکه و افزایش حاشیه پایداری تأکید دارند. همچنین، پارامترهای سیگنال کنترلی PWM نیز نشان می‌دهند که سیگنال کنترلی با وجود

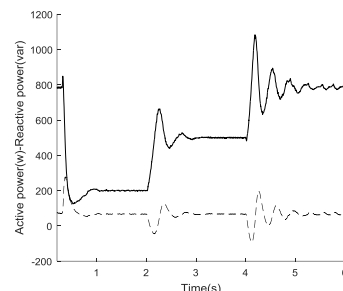


شکل ۱۸: توان ظاهری مبادله شده بین اینورتر و شبکه در مد کنترلی

توان راکتیو در توان اکتیو ثابت

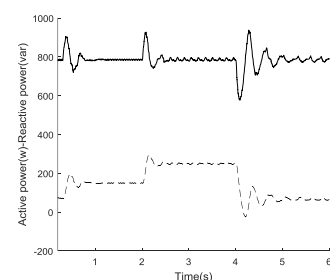
۷-۱-۳- تغییرات پله‌ای در مقادیر مرجع توان‌ها

به منظور نمایش بهتر توانایی کنترل‌کننده‌های طراحی شده در کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو، مقادیر مرجع توان اکتیو و راکتیو طی چند مرحله تغییر داده می‌شوند تا قابلیت سیستم کنترلی طراحی شده بهتر نمایش داده شود. شکل ۱۹ نشان‌دهنده تغییرات پله‌ای توان اکتیو خروجی اینورتر در حالت توان راکتیو ثابت می‌باشد. همان‌طور که مشخص است، متعاقب چندین تغییر متناوب در توان اکتیو، توان راکتیو همچنان ثابت می‌باشد. همچنین شکل ۲۰ نیز نشان‌دهنده ثابت توان اکتیو به ازای تغییرات پله‌ای توان راکتیو می‌باشد. در این حالت نیز توانایی سیستم در کنترل توان راکتیو در توان اکتیو ثابت به خوبی مشخص است.



شکل ۱۹: توان اکتیو و راکتیو اینورتر به ازای تغییر پله‌ای توان اکتیو

خط تیره: توان اکتیو، خط چین: توان راکتیو



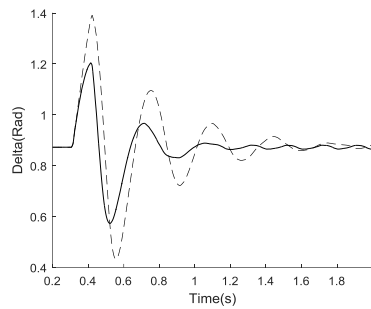
شکل ۲۰: تغییرات توان اکتیو و راکتیو خروجی اینورتر به ازای تغییر

پله‌ای توان راکتیو

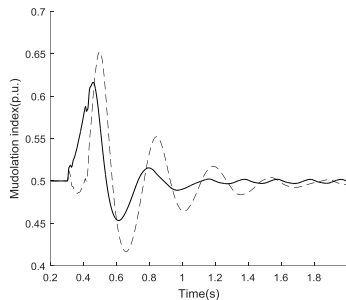
خط تیره: توان اکتیو، خط چین: توان راکتیو

۷-۱-۴- تغییرات پله‌ای در بار شماره ۱

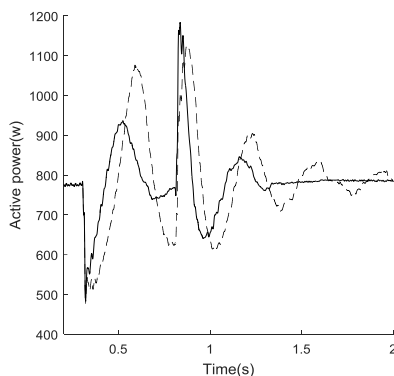
به منظور نمایش توانایی سیستم کنترلی در تثبیت توان اکتیو و راکتیو بین باتری و شبکه، بار شماره ۱ که در شبکه مشخص است، در دو



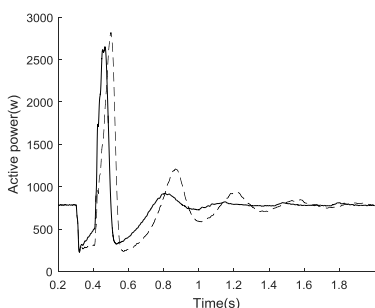
شکل ۲۴: زاویه PWM متعاقب خطای اتصال کوتاه تک فاز
خط تیره: با پایدارساز، خط چین: بدون پایدارساز



شکل ۲۵: دامنه PWM متعاقب خطای اتصال کوتاه تک فاز
خط تیره: با پایدارساز، خط چین: بدون پایدارساز

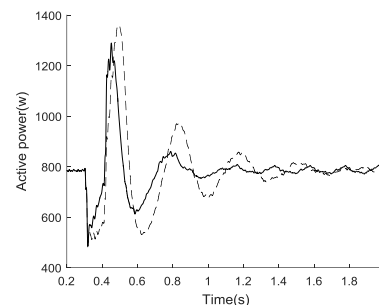


شکل ۲۶: توان اکتیو بین باتری و شبکه متعاقب خطای اتصال کوتاه
تک فاز به زمین به مدت ۰/۵ ثانیه
خط تیره: با پایدارساز، خط چین: بدون پایدارساز



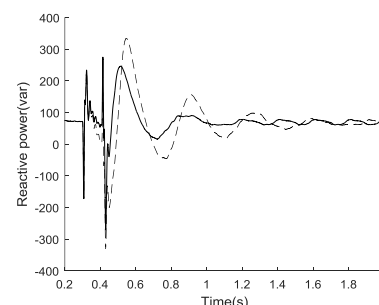
شکل ۲۷: توان اکتیو بین باتری و شبکه تحت خطای دو فاز
خط تیره: با پایدارساز، خط چین: بدون پایدارساز

پایدارساز سریع تر میرا شده است. شکل ۲۶ توان اکتیو عبوری از اینورتر را تحت خطای تک فاز به مدت ۰/۵ ثانیه نمایش می دهد و شکل ۲۷ نشان دهنده توان اکتیو بین باتری و شبکه تحت خطای دو فاز می باشد. همچنین سیگنال کنترلی PWM تحت این خطا در شکل ۲۸ برای دو حالت با پایدارساز و بدون پایدارساز نشان داده شده است. به خوبی مشخص است که پایدارساز توانسته است تأثیر مثبتی بر عملکرد اینورتر و شبکه داشته باشد و نوسانات ناشی از خطا را به خوبی میرا نماید. همچنین توان های اکتیو و راکتیو بعد از رفع خطا بر روی مقدار قبل از خطا قرار می گیرد و بر صحت رفتار سیستم کنترلی تأکید می نماید. نتایج همچنین نشان می دهند که سیگنال کنترلی PWM در شبکه با وجود پایدارساز سریع تر به حالت ماندگار می رسد که منجر به بهبود رفتار سیستم اینورتر و باتری می گردد. در نهایت، نتایج تحت خطای اتصال کوتاه سه فاز در شکل ۲۹ ارائه شده است که بیانگر رفتار مناسب پایدارساز طراحی شده بر عملکرد مجموعه باتری-اینورتر می باشد. همچنین برای مقایسه بهتر و بررسی اثر پایدارساز، معیار ITAE برای حالت های مختلف محاسبه شده و در جدول ۶ ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که شبکه با وجود پایدارساز حاوی نوسانات کمتری است. قابل ذکر است که در این مقاله از مساحت مربوط به سطح زیر نوسانات به عنوان تابع هدف استفاده می شود، لذا معیار فوق در حالت بدون خطا برابر صفر می باشد.



شکل ۲۸: توان اکتیو بین باتری و شبکه متعاقب خطای اتصال کوتاه
تک فاز به زمین

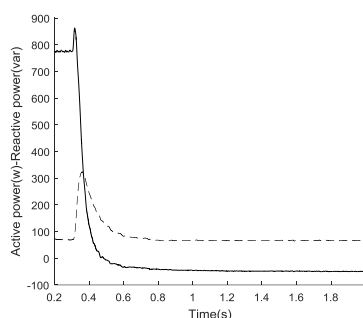
خط تیره: با پایدارساز، خط چین: بدون پایدارساز



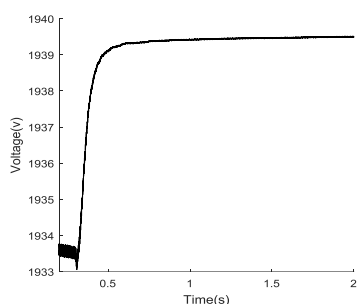
شکل ۲۹: توان راکتیو بین باتری و شبکه متعاقب خطای اتصال کوتاه
تک فاز به زمین

خط تیره: با پایدارساز، خط چین: بدون پایدارساز

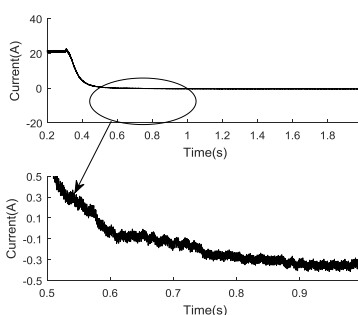
نیز منفی می‌شود. منفی شدن جریان دلالت بر منفی شدن جهت شارش توان از دشارژ به شارژ دارد. همچنین منحنی‌ها نشان‌دهنده تعادل توان در دو بخش AC و DC هستند. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند، در حالتی که مدل واقعی باتری لحاظ گردد؛ دیگر ولتاژ باتری در هنگام شارژ و دشارژ ثابت نمی‌باشد و تغییر می‌کند. ولی نکته قابل ذکر این است که با وجود مدل واقعی باتری نیز، سیستم کنترلی طراحی شده به خوبی عمل می‌نماید و می‌تواند به‌طور مناسبی مد کنترلی توان اکتیو در توان راکتیو ثابت و برعکس را اجرا نماید. قابل ذکر است که مبحث اصلی این مقاله بر روی مدل‌سازی باتری نبوده است، بلکه بر روی کنترل باتری بوده است. لذا در قسمت‌های قبلی از مدل ساده‌شده باتری به‌صورت باتری ایده‌آل با مقاومت داخلی استفاده شده بود. ولی نتایج نشان می‌دهند که با هر دو مدل واقعی و ایده‌آل می‌توان استراتژی کنترلی پیشنهادشده در این مقاله را پیاده‌سازی نمود.



شکل ۳۰: کنترل توان اکتیو در توان راکتیو ثابت
خط تیره: توان اکتیو، خط چین: توان راکتیو



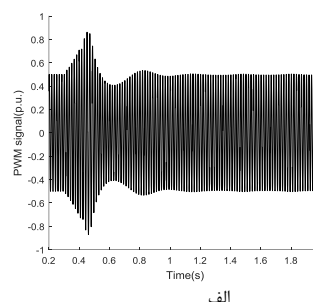
شکل ۳۱: ولتاژ باتری متعاقب کنترل توان اکتیو



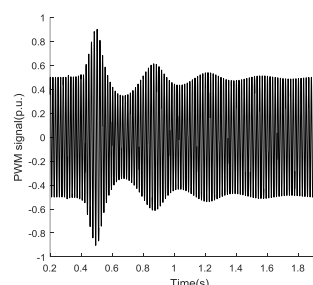
شکل ۳۲: جریان باتری متعاقب کنترل توان اکتیو

جدول ۶: معیار ITAE متعاقب خطاهای مختلف

بدون پایدارساز	با اتصال پایدارساز	
۱۶۶/۳۲۱۵	۸۰/۶۸۸۸	خطای تک‌فاز ۱
۲۱۱/۷۸۸۷	۱۲۸/۵۰۰۵	خطای تک‌فاز ۲
۳۷۰/۳۰۲۲	۱۹۹/۵۹۹۱	خطای دوفاز
۸۴/۱۰۹۸	۵۹/۶۷۴۱	خطای سه‌فاز

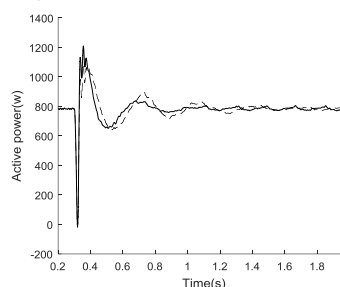


الف



ب

شکل ۲۸: سیگنال PWM متعاقب خطای اتصال کوتاه دوفاز
الف- شبکه با وجود پایدارساز، ب- شبکه بدون پایدارساز



شکل ۲۹: توان اکتیو بین باتری-شبکه تحت خطای سه‌فاز
خط تیره: با پایدارساز، خط چین: بدون پایدارساز

۳-۷- شبیه‌سازی با مدل واقعی باتری Ni-MH

در این قسمت، مدل واقعی و کامل باتری Ni-MH در شبیه‌سازی‌ها استفاده می‌شود. مدل مذکور از نرم‌افزار MATLAB استخراج گردیده است و به‌طور کامل شرایط واقعی باتری را لحاظ می‌کند. به‌منظور شبیه‌سازی، مقدار مرجع توان اکتیو از ۷۸۵/۴ وات به ۵۰ وات تغییر می‌یابد. شکل ۳۰ نشان‌دهنده تغییر توان اکتیو در توان راکتیو ثابت است و به‌خوبی مشخص است که توان اکتیو از ۷۸۵/۴ وات به ۵۰ وات می‌رسد درحالی‌که توان راکتیو ثابت است. شکل‌های ۳۱ و ۳۲ نشان‌دهنده ولتاژ و جریان باتری، متعاقب اعمال پله مورد نظر هستند. مشخص است ولتاژ باتری دچار تغییرات می‌گردد و جریان

کلمات مخفف

BSS	Battery Storage System
CAES	Compressed Air Energy Storage
FBESS	Flow Battery Energy Storage System
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
ITAE	Integral of Time and Absolute Error
MCFC	Molten carbonate fuel cell
PHS	Pumped Hydro Storage
PI	Proportional Integral
PSO	Particle Swarm Optimization
PSS	Power System Stabilizer
PWM	Pulse Width Modulation
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage
TES	Thermal Energy Storage

مراجع

- [1] R. Hemmati and H. Saboori, "Emergence of hybrid energy storage systems in renewable energy and transport applications – A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65, pp. 11-23, 11// 2016.
- [2] B.-h. ZHANG, J. Zeng, C.-x. MAO, Y.-j. JIN, and Y.-l. WANG, "Improvement of Power Quality and Stability of Wind Farms Connected to Power Grid by Battery Energy Storage System [J]," *Power system technology*, vol. 15, pp. 54-58, 2006.
- [3] S. Zhang, Y. Mishra, and M. Shahidehpour, "Fuzzy-Logic Based Frequency Controller for Wind Farms Augmented With Energy Storage Systems," *Power Systems, IEEE TransActions on*, vol. PP, pp. 1-9, 2015.
- [4] O. P. Mahela and A. G. Shaik, "Power quality improvement in distribution network using DSTATCOM with battery energy storage system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 83, pp. 229-240, 12// 2016.
- [5] P. Mercier, R. Cherkaoui, and A. Oudalov, "Optimizing a Battery Energy Storage System for Frequency Control Application in an Isolated Power System," *Power Systems, IEEE TransActions on*, vol. 24, pp. 1469-1477, 2009.
- [6] H. Saboori, R. Hemmati, and M. A. Jirdehi, "Reliability improvement in radial electrical distribution network by optimal planning of energy storage systems," *Energy*, vol. 93, Part 2, pp. 2299-2312, 12/15/ 2015.
- [7] P. J. Hall, B. E. "Energy-storage technologies and electricity generation." *Energy Policy*, 2008.
- [8] Scamman DP, G. W., Roberts EPL. "Numerical modelling of a bromide-polysulphide redox flow battery", *Journal of Power Sources*
- [9] J. W. Jung, N. T. T. Vu, D. Q. Dang, T. D. Do, Y. S. Choi, and H. H. Choi, "A Three-Phase Inverter for a Standalone Distributed Generation System: Adaptive Voltage Control Design and Stability Analysis," *IEEE TransActions on Energy Conversion*, vol. 29, pp. 46-56, 2014.
- [10] J. Yuan, J. Pan, W. Fei, C. Cai, Y. Chen, and B. Chen, "An Immune-Algorithm-Based SpACe-Vector PWM Control Strategy in a Three-Phase Inverter," *IEEE TransActions on Industrial Electronics*, vol. 60, pp. 2084-2093, 2013.
- [11] P. Cortes, J. Rodriguez, C. Silva, and A. Flores, "Delay Compensation in Model Predictive Current Control of a

۸- نتیجه گیری

در این مقاله دو موضوع مهم در ارتباط با کنترل باطری ذخیره‌ساز انرژی مطرح شده است. در مرحله اول کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو، که در اینجا هدف تغییر و کنترل توان اکتیو در حالت توان راکتیو ثابت و برعکس می‌باشد. همچنین، این مقاله علاوه بر کنترل‌کننده‌های مجزای توان اکتیو و راکتیو، دو کنترل‌کننده دیگر به‌عنوان کنترل‌کننده‌های پایدارساز یا میراساز نوسانات به‌صورت کنترل‌کننده جانبی بر روی اینورتر متصل بین شبکه و باطری طراحی نموده است که هدف از قرارگیری آن‌ها بر روی حلقه‌های کنترلی توان بهبود رفتار کنترل‌کننده و افزایش پایداری شبکه در برابر خطا می‌باشد. کنترل‌کننده‌های پایدارساز به‌صورت همزمان توسط الگوریتم هوشمند PSO تنظیم شده‌اند تا بهینه‌ترین رفتار ممکن شبکه به دست آید. برای نمایش عملکرد سیستم طراحی شده، انواع اغتشاشات و خطاهای خطی و غیرخطی در شبکه اعمال شده است. نتایج شبیه‌سازی غیرخطی در حوزه زمان نشان می‌دهد که کنترل‌کننده‌های طراحی شده توانسته‌اند به‌صورت مناسب و قابل‌قبولی توان اکتیو و راکتیو را به‌صورت جداگانه کنترل نمایند و همچنین نوسانات شبکه را متعاقب انواع خطاها به‌صورت مناسبی میرا کنند. نتایج نشان می‌دهد که اعمال دو میراساز جانبی بر روی شبکه، به‌خوبی توانسته است رفتار شبکه را بهبود بخشد.

لیست علائم اختصاری و متغیرها

متغیرها	
E_{fd}	ولتاژ تحریک (p.u.)
E'_q	ولتاژ داخلی سمت p.u., X'_d
K_a	بهره تنظیم‌کننده
K_{P1}	ثابت تناسبی کنترل‌کننده PI توان اکتیو
K_{P2}	ثابت تناسبی کنترل‌کننده PI توان راکتیو
K_{I1}	ثابت انتگرالی کنترل‌کننده PI توان اکتیو
K_{I2}	ثابت انتگرالی کنترل‌کننده PI توان راکتیو
K_{DC1}	گین ثابت پایدارساز توان اکتیو
K_{DC2}	گین ثابت پایدارساز توان راکتیو
M	اینرسی سیستم (MJ/MVA)
P_e	توان الکتریکی خروجی (p.u.)
P_m	توان مکانیکی ورودی
P_s	سیگنال خروجی پایدارساز توان اکتیو
Q_s	سیگنال خروجی پایدارساز توان راکتیو
$T1-T4$	ثابت زمانی پایدارساز توان اکتیو (s)
$T5-T8$	ثابت زمانی پایدارساز توان راکتیو (s)
T_a	ثابت زمانی تحریک‌کننده (s)
T'_{do}	ثابت زمانی تحریک (s)
T_e	گشتاور الکتریکی (p.u.)
T_m	گشتاور مکانیکی (p.u.)
t	زمان شبیه‌سازی
X_d	راکتانس حالت ماندگار d (p.u.)
X'_d	راکتانس گذرای محور d (p.u.)
X_q	راکتانس حالت ماندگار ماندگار محور q (p.u.)
ΔP	تغییرات توان اکتیو
ΔQ	تغییرات توان راکتیو
ω	سرعت رتور ژنراتور (p.u.)
$\Delta\omega$	انحراف فرکانسی

- oscillations," *Int J Electr Power Energy Syst*, vol. 22, no.2, pp. 79-92, 2000.
- [20] C. F. Lu, C. C. Liu and C. J. Wu, "Dynamic modelling of battery energy storage system and application to power system stability," in *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 142, no. 4, pp. 429-435, Jul 1995.
- [21] J. Y. Kim et al., "Cooperative Control Strategy of Energy Storage System and Microsources for Stabilizing the Microgrid during Islanded Operation," in *IEEE TransActions on Power Electronics*, vol. 25, no. 12, pp. 3037-3048, Dec. 2010.
- [22] H. Zhou, T. BhattAcharya, D. Tran, T. S. T. Siew and A. M. Khambadkone, "Composite Energy Storage System Involving Battery and UltrACapACitor With Dynamic Energy Management in Microgrid Applications," in *IEEE TransActions on Power Electronics*, vol. 26, no. 3, pp. 923-930, March 2011.
- [23] ZHANG, Bu-han, et al. "Improvement of Power Quality and Stability of Wind Farms Connected to Power Grid by Battery Energy Storage System [J]", *Power System Technology* 15: 54-58, 2006.
- [24] J. R. Ruggiero and G. T. Heydt, "Making the economic case for bulk energy storage in electric power systems," *2013 North American Power Symposium (NAPS)*, Manhattan, KS, pp. 1-6, 2013.
- [25] A. Khodabakhshian, R. Hemmati, and M. Moazzami, "Multi-band power system stabilizer design by using CPCE algorithm for multi-mACHine power system," *Electric Power Systems Research*, vol. 101, pp. 36-48, 8// 2013.
- [26] D. G. Holmes and T. A. Lipo, *Pulse width modulation for power converters: principles and prActice* vol. 18: John Wiley & Sons, 2003.
- [27] J. Wang, et al. "A Fault Diagnosis Method of Power Systems Based on an Improved Adaptive Fuzzy Spiking Neural P Systems and PSO Algorithms." *Chinese Journal Of Electronics* 25(2): 320-327, 2016.
- [28] Y. Zhou, et al. The application of PSO in the power grid: A review. *Chinese Control Conference (CCC)*, 2016.
- Three-Phase Inverter," *IEEE TransActions on Industrial Electronics*, vol. 59, pp. 1323-1325, 2012.
- [12] L. Liu, H. Li, Y. Xue, and W. Liu, "Decoupled ACtive and ReACtive Power Control for Large-Scale Grid-Connected Photovoltaic Systems Using Cascaded Modular Multilevel Converters," *IEEE TransActions on Power Electronics*, vol. 30, pp. 176-187, 2015.
- [13] Peng Li, Jinfei Tang, Ling Zhang and Chao Lian, "Independent control of active and reactive power of the grid-connected inverter," *2008 International Conference on Electrical Machines and Systems*, Wuhan, pp. 2493-2496, 2008.
- [14] R. Datta and V. T. Ranganathan, "Decoupled control of active and reactive power for a grid-connected doubly-fed wound rotor induction machine without position sensors," *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No.99CH36370)*, Phoenix, AZ, pp. 2623-2630 vol.4, 1999.
- [۱۵] سعید ابادری و صادق قائدی، «بهبود پایداری دینامیکی به روش کنترل فازی در سیستم‌های قدرت چندماشینه با کاربرد TCSC»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۵، شماره ۲، ۱۰-۱، ۱۳۹۴.
- [۱۶] داوود فاتح، علی اکبر مطیع بیرجندی و رضا ابراهیم پور، «افزایش میرایی نوسانات سیستم قدرت با جایابی UPFC بر اساس ضریب مانده و مدهای بحرانی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۴، شماره ۳، صفحه ۳۱-۲۳، ۱۳۹۳.
- [17] J. M. Ramirez, and I. Castillo, "PSS and FDS simultaneous tuning," *Electr Power Syst Res*, vol. 68, no.1, pp. 33-40, 2004.
- [18] N. G. Hingorani, L. Gyugyi, and M. El-Hawary, *Understanding FACTS: Concepts and Technology ofFlexible AC Transmission Systems*, New York, WileyIEEE Press, 2000.
- [19] G. Li, T. Lie, G. Shrestha, and K. Lo, "Implementation of coordinated multiple facts controllers for damping