

بهبود پایداری ریزشبکه ها با استفاده از کنترل کننده مود لغزشی تطبیقی

مهدی متوسل*

گروه مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران
 Mehdi_motevasel@yahoo.com

چکیده: امروزه ریزشبکه ها به عنوان بخش مهمی از شبکه های توزیع هوشمند هستند که شامل انواع منابع تولید انرژی تجدیدپذیر بوده و می تواند به دو صورت متصل/منفصل از شبکه اصلی فعالیت کنند. کنترل کننده های ریزشبکه مهمترین نقش را برای عملکرد رضایت بخش خودکار و کنترل ریزشبکه در حین کار بر عهده دارند. کنترل کننده زیرشبکه با تنظیم توان های تولیدی منابع انرژی پراکنده، ضمن تامین انرژی مورد نیاز خود می تواند در هنگام وقوع خطای اتصال کوتاه، کلیدزنی و سایر اغتشاشات وارده باعث افزایش پایداری ریزشبکه شود. در این مقاله به بررسی پایداری ریزشبکه در حالت متصل به شبکه هنگامی که اغتشاش و هارمونیک های اضافه در اثر قطع و وصل لحظه ای یا هنگامی که تغییر وضعیت از حالت جزیره ای به حالت متصل شبکه اعمال می شود، پرداخته شده است. برای این منظور، یک طرح کنترلی مبتنی بر مود لغزشی تطبیقی پیشنهاد گردیده است. همچنین برای نشان دادن مقاومت و کارایی سیستم کنترلی از روش تحلیل پایداری لیاپانوف استفاده شده است. نتایج شبیه سازی نشان می دهد تداخل ایجاد شده در اثر تداخل در اینورتر ریزشبکه و اثر اغتشاش برطرف شده و ردیابی با دقت بالایی به دست آمده است.

واژه های کلیدی: ریزشبکه، پایداری، کنترل مود لغزشی تطبیقی

Improving stability of microgrids using adaptive sliding mode controller

Mehdi Motevasel

Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran
 Mehdi_motevasel@yahoo.com

Abstract:

Today, microgrids are an important part of smart distribution networks, which include all kinds of renewable energy production sources and can operate either connected or disconnected from the main grid. Microgrid controllers play the most important role for the satisfactory automatic operation and control of the microgrid during operation in grid-connected and islanded mode. By adjusting the production capacities of scattered energy sources, the grid controller can increase the stability of the microgrid in the event of a short circuit error, switching and other disturbances. In this article, the stability of the microgrid in the grid-connected state is investigated when disturbances and additional harmonics are applied as a result of disconnection and connection moment or when the state changes from the island state to the grid-connected state. For this purpose, a control scheme based on adaptive sliding mode has been proposed. Also, to show the resistance and efficiency of the control system, the Lyapunov stability analysis method has been used. The simulation results show that the interference caused by the interference in the microgrid inverter and the disturbance effect have been removed and the tracking has been obtained with high accuracy.

Keywords: Microgrid, stability, adaptive sliding mode control

DOI: 00.00000/0000

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ چاپ مقاله: ۱۴۰۲/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۱۱

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۰۸

* نویسنده مسئول؛ نشانی: ایران - شیراز - دانشگاه آزاد اسلامی شیراز - دانشکده مهندسی - گروه مهندسی برق

۱- مقدمه

یک ریزشبهه می‌تواند به شبکه سراسری توزیع متصل باشد یا نباشد. در صورتی که این ریزشبهه به خطوط سراسری متصل باشد، ریزشبهه تنها نیاز دارد تا در ساعات اوج^۵ مصرف، در صورت لزوم از شبکه سراسری، انرژی تهیه کند. در سایر ساعات شبانه‌روز، ریزشبهه می‌تواند انرژی تولیدی مازاد خود را به شبکه سراسری بفروشد. در صورتی که ریزشبهه، به خطوط سراسری متصل نباشد، این شبکه نمی‌تواند در ساعات اوج مصرف، انرژی از شبکه خریداری کند؛ در این حالت، مدیریت شبکه از اهمیت بیشتری برخوردار خواهد بود [۴].

نیروگاه‌های موجود در یک ریزشبهه می‌توانند منابع AC یا DC باشند. نیروگاه خورشیدی، برق DC تولید می‌کند در حالی که اغلب نیروگاه‌های فسیلی برق AC تولید می‌کنند. بنابراین به طور کلی، یک ریزشبهه شامل هم منابع AC و هم منابع DC است. تبدیل منابع AC به DC و بالعکس با مبدل‌های موجود در شبکه انجام می‌پذیرد. همچنین، در برخی از ریزشبهه‌ها، منابع ذخیره‌ساز انرژی نیز وجود دارند. وظیفه این منابع، ذخیره انرژی مازاد شبکه در ساعات بی‌باری و تامین انرژی مورد نیاز شبکه در ساعات اوج مصرف است. اکثر منابع ذخیره‌ساز انرژی، از نوع منابع DC هستند [۵].

روش‌های کنترل ریزشبهه‌ها می‌توانند به طور محسوس‌تری سیستم‌های قدرت گذشته متفاوت باشند. این تفاوت بستگی به شکل و همچنین عمق نفوذ واحدهای منابع انرژی توزیع شده، مشخصات بار، کیفیت توان و سهم بودن بازار تجارت برق دارد. در نتیجه، روش‌های کنترلی بدیع باید در ابزارهای جدید تعبیه شوند. این ابزارها به ریزشبهه اجازه می‌دهند تا توان اکتیو و راکتیو را تنظیم نمایند و منابع انرژی تجدیدپذیر را نیز کنترل کند [۹]. در دو حالت اتصال به شبکه و حالت جزیره‌ای، ریزشبهه نقش مهمی را در تنظیم انرژی در بازار تجارت ایفا می‌کند. ریزشبهه‌ها می‌توانند طوری عمل کنند که تمامی مشتری‌ها را با استفاده از تولید محلی خود سرویس‌دهی کنند بدون آنکه انرژی را به شبکه توزیع صادر کنند. این استراتژی مزایایی برای اپراتور سیستم توزیع دارد؛ از جمله اینکه در هنگام پیک درخواست، تراکم شبکه را کاهش می‌دهد. بنابراین ریزشبهه‌ها می‌توانند به طور مستقیم در بازار برق و خرید و فروش توان اکتیو و راکتیو شرکت کنند. برای آدرس‌دهی این نیازها، مدیریت ریزشبهه‌ها باید از یک سری توابع مانند برنامه اقتصادی، بار، وضعیت آب و هوایی، کنترل‌کننده‌های دیجیتال شبکه، امنیت و مدیریت درخواست اطمینان حاصل کنند. با توجه به معماری کنترل، می‌توان سه سطح ساختار را گسترش داد:

- سطح توزیع: این سطح برای دیسپاچینگ در سطح توزیع مورد استفاده است.

تامین برق در شبکه‌های سنتی، توسط نیروگاه‌های بزرگ که به صورت متمرکز در نقاط مشخصی قرار گرفته‌اند، انجام می‌شود. انرژی تولید شده باید توسط شبکه‌های انتقال و توزیع به نقاط مصرف انتقال داده شود. سیستم قدرت فوق دارای اشکالات بسیاری است که از آن جمله می‌توان به کاهش قابلیت اطمینان و دسترس‌پذیری در اثر فرسوده شدن زیرساخت‌های سیستم الکتریکی و تحمیل هزینه‌های زیاد تلفات در انتقال انرژی به نقاط بار اشاره کرد. با رشد مصرف الکتریکی و تقاضا برای کیفیت بالاتر برق مصرفی، صنعت برق به سوی استفاده از فناوری‌های جدید سوق یافته است. از سوی دیگر، روند روبه رشد خصوصی‌سازی، رقابتی شدن بازار برق و تبدیل سرمایه‌گذاران بزرگ به سرمایه‌گذاران کوچک، مدیران صنعت برق را بر این می‌دارد تا بیش از پیش به افزایش توان تولیدی و تجهیزات شبکه با حداکثر بازدهی انرژی و حداقل هزینه بهره‌برداری توجه کنند. یکی از روش‌های بهبود کارایی شبکه توزیع قدرت، استفاده از فناوری تولیدات پراکنده برای تولید برق است. ریزشبهه‌ها، شبکه‌های توزیع فعال ولتاژ پایین و یا ولتاژ متوسطی هستند که از مجموعه‌ای متشکل از بارها، منابع تولید پراکنده و ادوات کنترلی تشکیل شده است. طبق تعریف، ظرفیت یک ریزشبهه می‌تواند بین چند ده کیلووات تا چند ده مگاوات باشد. [۱]

با توجه به افزایش نفوذ واحدهای تولید پراکنده^۱ (DG) در شبکه قدرت، منابع انرژی تجدیدپذیر^۲ (RES) شامل توربین‌های بادی، پیل سوختی، سیستم‌های فتوولتاییک و انرژی نیز به طور گسترده در دهه‌های اخیر مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند [۱۰ و ۱۱]. واحدهای DG نقش مهمی را در کاهش آلودگی، کاهش تلفات توان انتقالی و بهبود کیفیت توان بازی می‌کنند که این موضوع در شبکه‌های با مقیاس بزرگ از اهمیت بیشتری برخوردار است. علاوه بر این مزایا، استفاده از واحدهای DG ممکن است در برخی مسائل مانند شارش توان معکوس، انحراف ولتاژ و نوسانات ولتاژ، چالش برانگیز باشد. زمانی که تعداد زیادی واحد DG در مجاور یکدیگر جمع شوند، می‌توانند یک ریزشبهه^۳ (MG) را تشکیل دهند. این ریزشبهه‌ها می‌توانند مسائلی که ناشی از نفوذ زیاد DGها در شبکه می‌باشند را حل کنند [۲]. سیستم‌های فتوولتاییک و ذخیره‌کننده‌ها^۴ (ESS) توسط مبدل‌های AC-DC-AC به شبکه AC متصل می‌گردند. توربین‌های بادی نیز به وسیله یک مبدل AC-DC-AC به شین‌های AC متصل می‌گردند. در حالت بهره‌برداری جزیره‌ای، RESها به طور گسترده بارهای محلی را تامین می‌نمایند. در حالت متصل به شبکه، ریزشبهه به شین اتصال مشترک (PCC^۶) وصل می‌شود. این شین، شارش توان و پخش بار بین ریزشبهه و شبکه بالادست را کنترل می‌نماید. [۳].

⁵ Alternative current

⁶ Point of Common Coupling

⁷ Peak Loads

¹ Distributed Generation

² Renewable Energy Sources

³ Micro Grid

⁴ Energy Storage System



- سطح ریزش‌بکه‌ها: کنترل‌کننده مرکزی شبکه بخش ارتباطی بین ریزش‌بکه و شبکه اصلی است.

- سطح واحدها: کنترل‌کننده‌های محلی؛ در واقع این سطح برای منابع توزیع انرژی و بارهای قابل کنترل توسعه یافته است و می‌توان از آن برای تنظیم ولتاژ و فرکانس استفاده نمود [۶].

۲- نحوه کنترل ریزش‌بکه‌ها

در سیستم‌های کنترل، کنترل حالت جزیره ای (SMC) یک روش کنترلی غیرخطی است که با استفاده از یک سیگنال کنترل ناپیوسته (یا دقیق‌تر، یک سیگنال کنترل تنظیم‌شده دارای ارزش) دینامیک سیستم غیرخطی را تغییر می‌دهد. در طول مقطعی از رفتار عادی سیستم، قانون کنترل بازخورد دولت تابعی از زمان مداوم نیست. در عوض، می‌تواند براساس موقعیت فعلی در فضای دولت، مداوماً از یک ساختار به ساختار دیگر تغییر کند. از این رو، کنترل حالت جزیره‌ای یک روش کنترل ساختار متغیر است. ساختارهای کنترل چندگانه به گونه‌ای طراحی شده‌اند که مسیرها همیشه به سمت یک منطقه مجاور با ساختار کنترل متفاوت حرکت می‌کنند، بنابراین مسیر نهایی به طور کامل در یک ساختار کنترل وجود نخواهد داشت. در عوض، در امتداد مرزهای ساختارهای کنترل کشیده می‌شود. حرکت سیستم به هنگام کشیدن در امتداد این مرزها، حالت جزیره ای نامیده می‌شود و مکان هندسی متشکل از مرزها، سطح جزیره‌ای (هایپر) نام دارد. در چارچوب نظریه کنترل مدرن، هر سیستم ساختار متغیر -مانند یک سیستم تحت کنترل مود لغزشی- ممکن است به عنوان یک مورد خاص از یک سیستم دینامیکی ترکیبی مورد بررسی قرار گیرد، زیرا این سیستم نه تنها از طریق یک فضای حالت مداوم جریان می‌یابد، بلکه از طریق حالت‌های کنترل گسسته مختلف نیز حرکت می‌کند [۷].

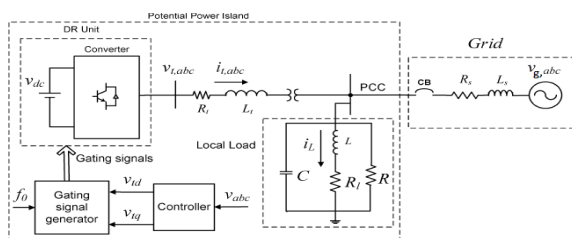
کنترل حالت جزیره‌ای با استفاده از سود تقریباً نامتناهی، مسیرهای یک سیستم پویا را به حرکت در زیر فضای جزیره‌ای محدود می‌کند. مسیرهای این حالت جزیره‌ای مرتب شده دارای خواص مطلوب هستند (به عنوان مثال، سیستم به طور طبیعی در طول آن حرکت می‌کند تا زمانی که در تعادل مورد نظر استراحت کند). قدرت اصلی کنترل حالت جزیره‌ای استحکام آن است. از آنجا که کنترل می‌تواند به سادگی تعویض بین دو حالت باشد (به عنوان مثال، "خاموش" / "خاموش" یا "رو به جلو" / "معکوس")، لازم نیست دقیق باشد و نسبت به تغییرات پارامتری که وارد آن می‌شود حساس نیست. همچنین کانال کنترل می‌تواند حالت جزیره‌ای را در زمان محدود به دست آورد. در شرایط خاص، کنترل بهینه نیاز به استفاده از روش بنگ-بنگ دارد. از این رو، کنترل حالت جزیره‌ای کنترل‌کننده بهینه را برای مجموعه گسترده‌ای از سیستم‌های پویا توصیف می‌کند. یکی از کاربردهای کنترل‌کننده حالت جزیره‌ای، کنترل درایوهای برقی است که با تعویض مبدل‌های برق کار می‌کنند. به دلیل عملکرد

ناپیوسته مبدل‌ها، یک کنترل‌کننده حالت جزیره‌ای ناپیوسته، یک انتخاب عملی نسبت به کنترل‌کننده‌های مداوم است. نیاز به استفاده از مدولاسیون عرض پالس یا تکنیک مشابه برای اعمال سیگنال مداوم بر روی خروجی است که فقط می‌تواند حالت‌های گسسته‌ای داشته باشد. کنترل حالت جزیره‌ای کاربردهای زیادی در رباتیک دارد. به طور خاص، این الگوریتم کنترل برای ردیابی کشتی‌های سطح بدون سرنشین در دریا‌های شبیه‌سازی شده با درجه موفقیت بالا استفاده شده است [۸].

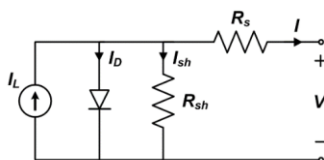
کنترل حالت جزیره‌ای باید با دقت بیشتری نسبت به سایر اشکال کنترل غیرخطی که دارای کنترلی معتدل‌تر هستند، اعمال شود. به ویژه، به دلیل اینکه محرک‌ها دارای تاخیرها و سایر نواقص هستند، عملکرد کنترل حالت جزیره‌ای می‌تواند منجر به اتلاف انرژی و تحریک پویایی‌های اصلاح نشده شود. روش‌های طراحی مداوم کنترل به این صورت نیستند و مستعد ابتلا به این مشکلات بوده و می‌توان از آن به جای کنترل‌کننده‌های حالت جزیره ای استفاده کرد.

در واقع، این شبکه جزیره‌ای است که به صورت تعمدی در یک مجموعه تأسیسات یا در یک سیستم توزیع الکتریکی شکل می‌گیرد و شامل دست کم یک منبع انرژی و بارهای مربوطه می‌باشد. در واقع، شبکه جزیره‌ای را یک سیستم قدرت کوچک می‌دانند که به طور معمول در مقیاس چندین مگاوات یا کمتر که دارای سه مشخصه اصلی است: تولیدات پراکنده، مراکز بار مستقل و قابلیت بهره‌برداری متصل یا منفصل از شبکه الکتریکی بزرگتر. بخش‌های اصلی یک شبکه جزیره‌ای شامل تولید پراکنده، ذخیره پراکنده، کلیدهای اتصال و سیستم‌های کنترل باشد. کلید اتصال، نقطه ارتباط بین اجزای جزیره‌ای و مابقی سیستم توزیع است. تکنولوژی‌های مختلفی برای کارکرد مناسب کلیدزنی مورد نیاز است که شامل اندازه‌گیری، رله‌های حفاظتی، تجهیزات مخابراتی و غیره می‌باشد. هنگامی که کلید باز می‌شود، منابع تولید توان در شبکه جزیره‌ای باید بتوانند بار آن را با فرکانس مناسب و حفظ سطح ولتاژ تغذیه نمایند. بسته به تکنولوژی کلید ممکن است قطع‌های لحظه‌ای در طی انتقال از مود متصل به شبکه به مود جزیره رخ دهد که در این صورت لازم است منابع تولید توان الکتریکی پس از باز شدن کلید، راه‌اندازی مجدد شوند. طراحی اولیه شبکه جزیره‌ای باید به نحوی باشد که در هنگام بهره‌برداری در مود مستقل از شبکه، تعادل میان تولید و مصرف توان برقرار باشد. تحلیل پخش بار نیز برای حالت‌های مختلف طراحی باید انجام پذیرد تا از حفظ تنظیم ولتاژ مناسب و توانایی منابع تولید توان برای مقابله با جریان‌های هجومی ناشی از بارهای بزرگ، اطمینان حاصل گردد. در حالت جزیره، مدیریت تولید و بار امری بسیار مهم است. حاشیه رزرو کافی که تابعی از ضریب بار، مقدار بار، شکل بار، قابلیت اطمینان مورد نیاز و ضریب بار، مقدار بار، شکل بار، قابلیت اطمینان مورد نیاز بار و دسترس‌پذیری منابع تولید توان است و نیز نمایش مناسب برای بهره‌برداری و تشخیص وضعیت شبکه جزیره‌ای باید وجود داشته باشد.

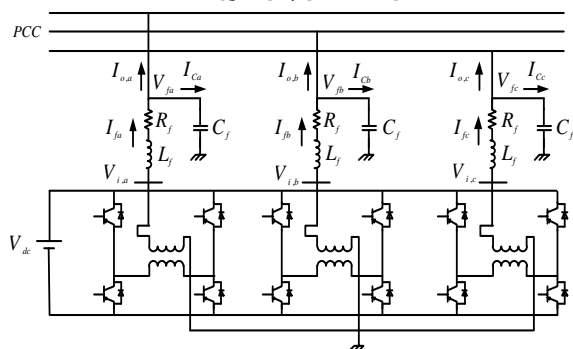




شکل (۱): مدل ریزشبهه



شکل (۲): مدل پنل فتوولتائیک



شکل (۳): شماتیک یک واحد فتوولتائیک سه فاز مبتنی بر اینورتر

۳-۲-۳ مدل اینورتر سه فاز

شکل (۳) یک واحد فتوولتائیک سه فاز مبتنی بر اینورتر با یک فیلتر LC را نشان می‌دهد. ساختار اینورتر منیع ولتاژ شامل سه مبدل H-bridge تک فاز با به کارگیری کلیدهای IGBT می‌باشد که خروجی هر H-bridge به ترانسفورماتورهای تک فاز متصل شده و مقاومت R_f نشان‌دهنده تلفات ترانسفورماتور و کلیدزنی، اندوکتانس L_f نشان‌دهنده راکتانس نشتی ترانسفورماتور می‌باشد. همچنین خازن فیلتر C_f برای حذف هارمونیک‌های کلیدزنی^۱ به خروجی ترانسفورماتورها متصل شده است.

با در نظر گرفتن پارامترها در شرایط نامی و با به کارگیری تبدیل شناخته شده پارک معادلات دینامیکی ولتاژ و جریان در قاب مرجع dq مطابق زیر خواهد بود:

$$V_{L_f} = L_f \frac{dI_{f,dq}}{dt} = V_{i,dq} - R_f I_{f,dq} - V_{f,dq} - j \omega_0 L_f I_{f,dq} \quad (3)$$

$$I_{C_f} = C_f \frac{dV_{f,dq}}{dt} = I_{f,dq} - I_{o,dq} - \omega_0 C_f V_{f,dq} \quad (4)$$

فرض شود $a = \frac{1}{L_f}$ و $b = R_f$ و $c = \frac{1}{C_f}$ مقادیر نامی پارامترها

[۹]. سیستم کنترل جزیره‌ای به منظور کارکرد مطمئن سیستم در مدهای متصل و متصل به شبکه طراحی می‌شود. این سیستم می‌تواند بر پایه یک کنترل کننده مرکزی بوده یا به صورت بخش‌های کنترل کننده در هر ژنراتور تعبیه شود. استفاده از سیستم‌های چندکاره نیز برای کنترل شبکه‌های جزیره‌ای پیشنهاد شده است. هنگامی که اتصال از شبکه قطع می‌شود، سیستم کنترل باید فرکانس و ولتاژ را کنترل کرده و اختلاف توان حقیقی و راکتیو لحظه‌ای بین تولید و مصرف را تأمین نماید. کنترل ولتاژ و فرکانس در سیستم‌های هیبرید باد-دیزل توسط ژنراتور دیزلی انجام می‌گردد. در سیستم هیبریدی بادی-آبی این وظیفه بر عهده ژنراتور آبی خواهد بود [۹ و ۱۰].

۳- مدلسازی ریزشبهه

در شکل (۱) نمودار کلی ریزشبهه نشان داده شده است. تولید پراکنده در اینجا توسط یک منبع فتوولتائیک که توسط مبدل الکترونیک قدرت و یک ترانسفورماتور افزایشدهنده و شبکه سراسری و بار محلی متصل شده، نشان داده شده است. سیستم باید بتواند در هر دو حالت متصل به شبکه و جدا از شبکه بار را تغذیه کند. شبکه مورد بررسی در حالت متصل به شبکه می‌باشد. در این شرایط مبدل میانی به عنوان یک کنترل کننده جریان منبع ولتاژ (کنترل جریان d,q) برای تولید پراکنده عمل می‌کند، در این مقاله هنگامی که کلید بریکر باز شود در حالت جزیره‌ای و هنگامی که کلید بسته شود حالت متصل به شبکه اتفاق می‌افتد. در لحظه باز و بسته شدن یا قطع و وصل مجدد ریزشبهه به شبکه بالادست، یک اغتشاش به ریزشبهه اعمال شده و بسته به مقدار و جهت توان مبادلاتی ریزشبهه با شبکه بالادست ولتاژ و فرکانس شبکه افزایش یا کاهش یابد و سیستم به سمت ناپایداری می‌رود که هدف بهبود پایداری سیستم است.

۳-۱-۳ مدل سیستم فتوولتائیک

مدلی که در این مقاله به کار گرفته شده، مدل تک‌دیودی پنل فتوولتائیک است (شکل (۲)). این مدل از پنل فتوولتائیک عموماً در مقالات به کار برده می‌شود، چرا که علاوه بر قابلیت عملیاتی بودن، دارای مصالحه‌ای بین دقت و سادگی می‌باشد [۱۰]. برای یک ولتاژ داده شده V ، جریان سلول I به وسیله معادله شناخته شده زیر تقریب زده می‌شود:

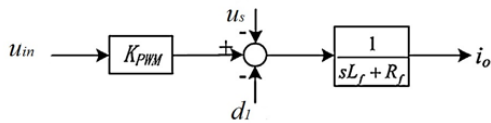
$$I = I_L - I_s \left(\exp \left[\frac{V + R_s I}{V_T} \right] - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1)$$

که در آن جریان فتون I_L ، جریان اشباع معکوس I_s ، ولتاژ ترمینال V_T ، مقاومت سری R_s و مقاومت شنت R_{sh} می‌باشد.

1. Switching



شکل (۴): بلوک دیاگرام طرح کنترل



شکل (۵): بلوک دیاگرام در حوزه لاپلاس حالت متصل به شبکه

۴-۱- معادلات سیستم در حالت اتصال ریزشبه

شکل (۵) معادلات هر فاز اینورتر متصل به شبکه در حوزه لاپلاس را نشان می‌دهد. مدل سازی ریاضی عملکرد یک ریزشبه متصل به شبکه، نیاز به در نظر گرفتن قیود هر یک از تجهیزات داخل ریزشبه دارد و این قیود بایستی تا حد ممکن بهینه انتخاب شوند که مساله بهینه سازی نهایی، ساده و کاربردی باشد. با فرض اینکه همه ابزارآلات سوئیچینگ، ایده آل و بدون تأخیر بوده و ترانسفورمر نیز ایده آل است و همچنین زاویه جابه جایی از هر فاز استفاده، قابل صرف نظر کردن است، دینامیک معادلات هر فاز از سیستم اینورتر متصل به شبکه به شکل زیر نمایش داده می‌شود:

$$\frac{di_o}{dt} = \frac{1}{L_f} (K_{PWM} u_{in} - u_s - i_o R_f - d_1) \quad (7)$$

در (۷)، K_{PWM} پارامتر معادل مدار مدولار اینورتر است، سیگنال ورودی کنترل u_{in} ، ولتاژ خروجی برای کنترل اینورتر $K_{PWM} u_{in}$ را نشان می‌دهد. ولتاژ شبکه u_s و اغتشاش ولتاژ شبکه d_1 را نشان می‌دهد. معادلات بالا به شکل زیر بازنویسی می‌شوند.

$$\frac{di_o}{dt} = \frac{K_{PWM}}{L_f} u_{in} - \frac{1}{L_f} u_s - \frac{R_f}{L_f} i_o - \frac{1}{L_f} d_1 \quad (8)$$

۴-۲- طراحی کنترل کننده مد لغزشی تطبیقی

هدف اصلی طراحی کنترل کننده داخلی برای این سیستم، افزایش مقاومت سیستم در دفع اغتشاش ولتاژ و رسیدن به ردیابی مناسب برای جریان سیستم است. معادلات جریان خروجی هر فاز سیستم در زیر بازنویسی شده است.

$$\begin{aligned} \dot{x}_g(t) &= a_p x_g(t) + b_p u(t) + c_p z(t) + m(t) \quad (9) \\ x_g(t) &= i_o, u(t) = u_{in}(t), z(t) = u_s \\ a_p &= -\frac{R_f}{L_f}, b_p = \frac{K_{PWM}}{L_f}, c_p = -\frac{1}{L_f} \end{aligned}$$

در این معادلات مجموع اغتشاش و عدم قطعیت‌های دیگر سیستم $m(t)$ است که داریم $|m(t)| < \tau$ که در آن τ یک عدد ثابت مثبت است.

برای بهبود کنترل کننده و کاهش نوسانات فرکانس بالا، روش سطح لغزشی برخلاف مقالات دیگر از مشتق سیگنال کنترل به عنوان

هستند. اگر پارامترهای سیستم از مقدار نامی شان انحراف یابند، آنگاه روابط دینامیکی به صورت زیر اصلاح می‌گردد:

$$\begin{aligned} \frac{dI_{f,dq}}{dt} &= a(V_{i,dq} - bI_{f,dq} - V_{f,dq}) - j\omega_0 I_{f,dq} + \zeta_{i,dq} \quad (5) \\ \frac{dV_{f,dq}}{dt} &= c(I_{f,dq} - I_{o,dq}) - j\omega_0 V_{f,dq} + \zeta_{v,dq} \end{aligned}$$

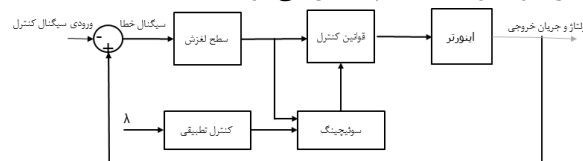
که $\zeta_{v,dq}$ و $\zeta_{i,dq}$ بردارهای عدم قطعیت تجمیع شده هستند و به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\zeta_{v,dq} = \Delta c (I_{f,dq} - I_{o,dq}) + \delta_{v,dq} \quad (6)$$

که Δ نشان دهنده اختلاف بین مقادیر نامی و ترم های $\delta_{v,dq}$ و $\delta_{i,dq}$ می‌باشد و برای محاسبه اغتشاشات دینامیکی سیستم و عدم قطعیت‌های مدل نشده در روابط (۵) و (۶) اضافه شده است. این ترم‌های نامعین^۱ در طی طراحی کنترل کننده غیرخطی از طریق تکنیک برآورد تطبیقی^۲ تخمین زده شده‌اند. به کارگیری این ترم تطبیقی، سیستم را در خطاهای مدل سازی و اندازه گیری قوی تر می‌سازد.

۴- سیستم کنترلی پیشنهادی

در این مقاله، یک سیستم کنترل کننده مقاوم برای سیستم اینورتر ارائه می‌شود. سیستم ریزشبه حالت متصل به شبکه از دو اینورتر با فیلتر، منبع ولتاژ و بار و یک شبکه مشترک بین آن‌ها تشکیل شده است. برای کنترل جریان و ولتاژ سه فاز، اینورتر از روش کنترل مود لغزشی که شامل خطا و تغییرات خطای ردیابی است، استفاده می‌کند. به دلیل سوئیچینگ‌های اینورترهای قدرت، این تجهیزات با کنترل کننده‌های مود لغزشی سازگار می‌باشند. کنترل کننده لغزشی یکی از روش‌های طراحی کنترل مقاوم است که امکان دستیابی به عملکرد مطلوب سیستم را با وجود پارامترهای غیردقیق و تخمین مرتبه پایین تر سیستم در مدل فراهم می‌کند. کنترل لغزشی در واقع مصالحه‌ای بین مدل سازی و عملکرد مناسب با طراحی غیردقیق است. موضوع اصلی کنترل مبدل‌های قدرت، تعریف یک سطح سوئیچینگ مناسب جهت دنبال کردن سیگنال مرجع است. سطح لغزش که بر اساس خطا، انتگرال خطا و تغییرات (شیب) خطا تعریف می‌شود. در این روش قانون کنترل طوری تنظیم می‌شود که در حضور اغتشاش و تداخل، سطح لغزش از یک حالت اولیه غیرصفری در زمان مشخص و کوتاهی به صفر برسد. همچنین برای بهبود سیگنال کنترل و پرهیز از استفاده از دامنه بزرگ برای سیگنال کنترل و تخمین کران بالای اغتشاش و عدم قطعیت، از کنترل تطبیقی استفاده می‌شود؛ و به کمک معیار پایداری لیاپانوف پایداری و مقاومت سیستم تحلیل می‌شود.



². Adaptive Estimation

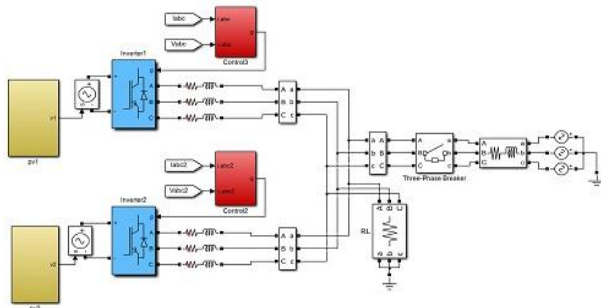
¹. Uncertain Terms



ریزشبهه در نظر گرفته شده است. ولتاژهای DC تولیدی توسط این پنل‌های فتوولتائیک به اینورترهای سه فاز وارد می‌شوند که ولتاژ خروجی هر یک از این پنل‌ها مشابه با یکدیگر هستند. اینورترهای سه فاز با رویکرد کنترلی، ولتاژهای DC دریافتی را به ولتاژهای سه فاز تبدیل کرده و به شبکه قدرت تحویل می‌دهند. در این رویکرد با اعمال یک اغتشاش متغیر با زمان که تابعی از ولتاژهای خروجی اینورتر است، درصد بررسی صحت عملکرد کنترل کننده مود لغزشی در از بین بردن این خطا و همگرایی آن به مقدار صفر هستیم. همچنین در این شرایط می‌باید جریان‌های خروجی اینورتر به خوبی جریان‌های مرجع را دنبال کنند و پایداری ولتاژ و جریان به دست آید.

در این شبیه‌سازی پنل‌های فتوولتائیک توسط دو اینورتر موازی به بار وصل شده و از طرفی توسط یک بریکر به شبکه اصلی متصل می‌شوند. بریکر در زمان مشخصی ریزشبهه را به شبکه اصلی متصل کرده و بعد از چند سیکل آن را جدا می‌سازد. در این حالت کنترل ولتاژ اینورتر با استفاده از کنترل کننده مود لغزشی با اعمال یک اغتشاش به شبکه که تابعی از جریان اینورتر می‌باشد مد نظر است. هدف نهایی بررسی عملکرد کنترل کننده مود لغزشی به گونه ای است که شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر از قابلیت خوبی در دنبال کردن شکل موج ولتاژ سه فاز مرجع برخوردار باشد. در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته بریکر در سیکل چهارم شبیه‌سازی ریز شبکه را به شبکه اصلی متصل می‌سازد و در سیکل دهم آن را جدا می‌سازد. همچنین در شکل (۷) نمودار سطح لغزش هر فاز از جریان اینورتر آورده شده است. سطوح لغزش برای هر دو اینورتر کاملاً یکسان می‌باشد

در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته، بریکر در زمان ۴/۶۰ از شبیه‌سازی ریزشبهه را به شبکه اصلی متصل می‌سازد و در زمان ۱۰/۶۰ آن را جدا می‌سازد. هدف اساسی از به کارگیری کنترل کننده مود لغزشی این است که جریان اینورتر سه فاز بتواند با حضور اغتشاش، جریان مرجع را دنبال کرده و منجر به همگرایی خطا و تغییرات آن گردد. شکل (۸) نمودارهای جریان سه فاز مرجع، جریان سه فاز خروجی اینورتر و اختلاف جریان حاصل از این دو جریان را نشان می‌دهد.



شکل (۶): ریزشبهه در حالت اتصال به شبکه

کنترل کننده استفاده می‌شود و در نهایت سیگنال کنترل با انتگرال-گیری به دست می‌آید. خطای ردیابی جریان به شکل $e_g = i_o - i_r$ تعریف می‌شود و سطح لغزش به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$s_g = k_1 \int e_g(t) + k_2 e_g(t) + \dot{e}_g(t)$$

$$\dot{s}_g(t) = k_1 e_g(t) + k_2 \dot{e}_g(t) + \ddot{e}_g(t)$$

$$\dot{s}_g(t) = k_1 e_g(t) + e_g(t) + k_2 \left(a_p \dot{x}_g(t) + b_p \dot{u}(t) + c_p \dot{z}(t) + \dot{m}(t) - x_r \right)$$

$$x_r = i_r$$

که جریان خروجی i_o و جریان مرجع i_r است و ضرایب k_1 و k_2 مثبت و غیرصفر هستند و $\dot{m}(t)$ کران دار است.

قانون کنترل شامل سه قسمت است: کنترل کننده هم‌ارز مدل (u_{gtr}) که از روی مشتق سطح لغزش به دست می‌آید، کنترل کننده سوئیچینگ و قانون کنترل تطبیقی. کنترل کننده هم‌ارز مدل بر اساس قسمت‌های مشخص و معلوم مدل اینورتر به دست می‌آید، کنترل کننده سوئیچینگ (u_{gsw}) برای تضمین پایداری در حضور عدم قطعیت و اغتشاش نامعلوم که کنترل کننده معادل مدل نمی‌تواند جبران کند، استفاده می‌شود. از کنترل کننده تطبیقی برای رویت کران بالای اغتشاش و کاهش اثر نوسانات فرکانس بالای کنترل کننده سوئیچینگ استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن معادلات سطح لغزش قانون کنترل در حالت متصل به شبکه به شکل زیر در می‌آید:

$$u = u_{gsw} + u_{gtr}$$

$$u_{gtr} = - \left(\frac{1}{b_p} \right) \left(c_p u_s + (a_p + k_2) e_g + k_1 \int e_g + a_p i_r - \dot{i}_r \right)$$

$$u_{gsw} = - \left(\frac{1}{b_p} \right) \int \hat{\tau}(t) \operatorname{sgn}(s_g(t)) dt$$

$$\hat{\tau}(t) = |s_g(t)| / \lambda_g$$

برای اثبات پایداری تابع لیاپانوف زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$V_g(t) = \frac{1}{2} s_g^2(t) + \frac{\lambda_g}{2} \tilde{\tau}^2(t)$$

که در آن $\tilde{\tau} = \tau - \hat{\tau}$ خطای تخمین قانون کنترل تطبیقی است. با محاسبه مشتق تابع لیاپانوف و جای‌گذاری سطح لغزش و معادلات اینورتر داریم:

$$\dot{V}_g(t) = s_g(t) \cdot (b_p \dot{u}_{gsw} + \dot{m}(t)) + \lambda_g (\tau - \hat{\tau}) \dot{\tilde{\tau}}(t)$$

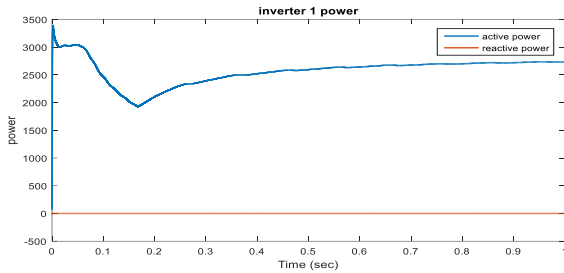
$$= s_g(t) \cdot (\hat{\tau}(t) \operatorname{sgn}(s_g(t)) + \dot{m}(t)) - \lambda_g (\tau - \hat{\tau}) \cdot |s_g(t)| / \lambda_g$$

$$= s_g(t) \cdot (m(t)) - \tau \cdot |s_g(t)| \leq |s_g(t)| \cdot (|m(t)| - \tau) \leq 0$$

۵- شبیه‌سازی ریزشبهه

در شکل (۶) مدل شبیه‌سازی آورده شده است دو منبع تولید توان تحت قالب پنل‌های فتوولتائیک به عنوان منابع تولید پراکنده در این





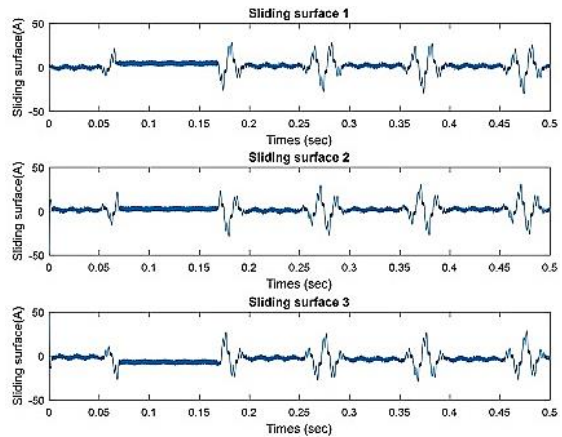
شکل (۱۱): توان‌های اکتیو و راکتیو اینورتر

شکل (۱۰) ولتاژهای سه فاز خروجی اینورتر اول و دوم را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود این دو ولتاژ با توجه به مشابهت مداری کاملاً یکسان هستند. در لحظه $0/067$ که بریکر ریزش‌بکه را به شبکه اصلی وصل می‌کند افت ولتاژ بسیار زیادی خواهیم داشت که در زمان $0/17$ با جداسازی مجدد ریزش‌بکه، ولتاژ به مقدار پیشین خود باز می‌گردد. شکل (۱۱) نشان‌دهنده مقادیر RMS توان‌های اکتیو و راکتیو اینورتر می‌باشد. همان‌طور که دیده می‌شود توان راکتیو به خوبی کنترل شده و در مقدار صفر باقی می‌ماند.

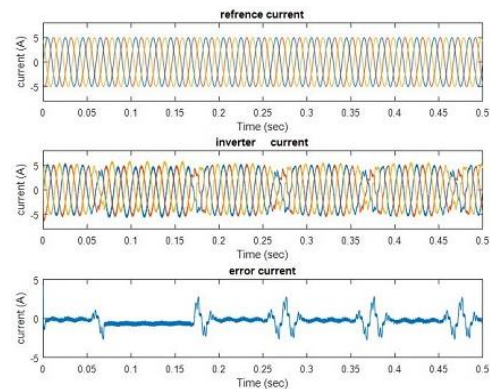
با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان بیان داشت کنترل‌کننده، عملکرد کاملاً مناسبی در ایجاد پایداری سیستم دارد. با وجود اغتشاش ولتاژ اعمال شده به مدار، جریان‌های خروجی اینورتر به خوبی جریان مرجع را دنبال می‌کنند و خطای حاصل از این دو جریان نیز به مقدار صفر همگرا می‌گردد. ولتاژ خروجی اینورتر نیز از پایداری کامل برخوردار بوده است. با توجه به این امر می‌توان بیان داشت کنترل‌کننده پیشنهادی از مقاومت خوبی در برابر اغتشاشات موجود در ریز شبکه برخوردار است.

۶- نتیجه‌گیری

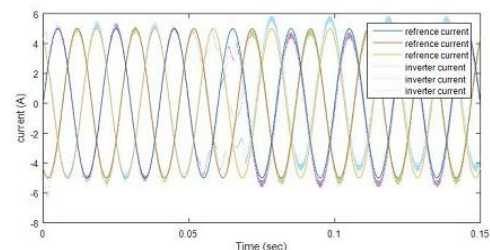
در این مقاله به بررسی پایداری ریزش‌بکه در حالت متصل به شبکه هنگامی که اغتشاش و هارمونیک‌های اضافه در اثر لحظه قطع و وصل یا هنگامی تغییر وضعیت از حالت جزیره‌ای به حالت متصل شبکه اعمال می‌شود، پرداخته شده است. طرح کنترل‌کننده مد لغزشی تطبیقی برای اینورتر سه‌فاز نشان داد که اغتشاش گذار و هارمونیک‌های اضافی به شکل مؤثری توسط روش ارائه‌شده از بین رفته و سیستم سریعاً به حالت پایدار می‌رسد. برای بهبود روش کنترل مود لغزشی و افزایش مقاومت سیستم در برابر اغتشاش و عدم قطعیت‌های مدل، از کنترل تطبیقی استفاده شده است که میزان کران بالای اغتشاش را برای جبران در روش کنترل مود لغزشی تخمین می‌زند. همچنین برای نشان دادن کارایی و اعتبار، از روش تحلیل پایداری لیاپانوف برای نشان دادن تضمین پایداری ردیابی سیستم و مقاومت آن و همچنین تخمین پارامترهای تطبیقی استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد تداخل ایجاد شده در اثر تداخل در اینورتر ریزش‌بکه و اثر اغتشاش برطرف شده و ردیابی با دقت بالایی به‌دست آمده است.



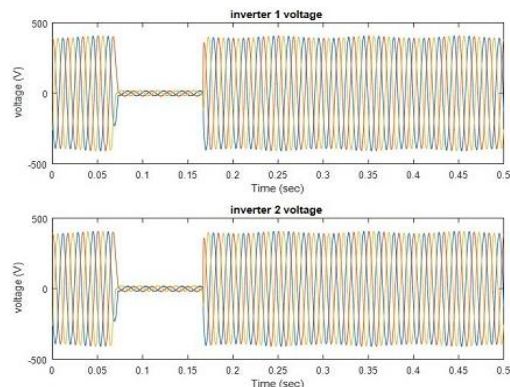
شکل (۷): سطح لغزش



شکل (۸): جریان‌های مرجع، جریان اینورتر اول و جریان خطا



شکل (۹): مقایسه جریان‌های مرجع و جریان‌های اینورتر



شکل (۱۰): ولتاژهای سه فاز خروجی اینورترها

۷- مراجع

- [1] Rey J.M, Jiménez-Vargas I, Vergara P.P, Osma-Pinto G, and Solano J, "Sizing of an autonomous microgrid considering droop control," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 136, 2022 .
- [2] Shafiee-Rad M, Sadabadi M. S, Shafiee Q, and Reza Jahed-Motlagh M, "Modeling and robust structural control design for hybrid AC/DC microgrids with general topology," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 139, no. 4, Jul. 2022.
- [3] Chaspierre G, Panciatici P, and Van Cutsem T, "Control of a battery energy storage system to compensate for ADN equivalents inaccuracies," *Electric Power Systems Research*, vol. 213, no. 6, Dec. 2022.
- [4] Lin F.J, Tan K.-H, , and Tseng T.-Y, "Development of intelligent controlled microgrid for power sharing and load shedding," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 37, no. 7, pp. 7928–7940, 2022.
- [5] Zhang M, Xu Q, Zhang C, Nordstrom L, and Blaabjerg F. "Decentralized coordination and stabilization of hybrid energy storage systems in DC microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 13, no. 3, pp. 1751–1761, May 2022.
- [6] George A, Ravindran A, Mendieta M, and Tabkhi H, "Mez: an adaptive messaging system for latency-sensitive multi-camera machine vision at the IoT edge," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 21457–21473, 2021.
- [7] Huang P, Vorobev P, M. Hosan Vi, Kirtley J. L., and Turitsyn K, "Plug-and-Play Compliant Control for Inverter-Based Microgrids," *IEEE Trans. On Power Sys.*, vol. 34, no. 4, pp. 2901-2913, 2019.
- [8] Nandanoori S. P, Kundu S, Du W, Tuffner F. K., and Schneider K. P, "Distributed Small-Signal Stability Conditions for InverterBased Unbalanced Microgrids," *IEEE Trans. On Power Sys.*, vol. 35, no. 5, pp. 3981-3990, 2020.
- [9] Sharma R. K, Mishra S and Pullaguram D, "A Robust H ∞ Multivariable Stabilizer Design for Droop Based Autonomous AC Microgrid," *IEEE Trans. On Power Sys.*, vol. 35, no. 6, pp. 4369-4382, 2020.
- [10] Tenti P, Caldognetto T, "Master/Slave Power-Based Control of Low-Voltage Microgrids," *Advanced Control Methods and Renewable Energy System Integration*, pp. 101-135, 2018.

