

**Management and Control of Microgrids Connected to Three-Phase Network with the Approach of Activating Current Limitation under Unbalanced Errors Using Fuzzy Intelligent Method with the Presence of Battery, Wind, Photovoltaic and Diesel Sources**

**Mostafa Abbasi, PhD Student, Mehdi Nafar, Assistant Professor, Mohsen Simab, Assistant Professor**

Department of Electrical Engineering- Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran  
[mostafa.abbasi@miau.ac.ir](mailto:mostafa.abbasi@miau.ac.ir), [mnafar@miau.ac.ir](mailto:mnafar@miau.ac.ir), [msimab@miau.ac.ir](mailto:msimab@miau.ac.ir)

**Abstract**

Today, the use of distributed generation resources connected to the network has remarkable growth therefore network-connected to the converters must be able to provide services beyond the injection of power into network, including maintaining network stability. In this paper the control and management of energy for battery wind, photovoltaic and diesel connected to a three-phase network by activating the current limitation under unbalanced fault has been introduced. In this method injected currents are limited to a certain amount along the faults Also, the operation mode without tracking the maximum power point for the converter is included. This state is activated during severe faults, when the converter cannot control Maximum power of the system. Therefore, in a microgrid with, the operation of a fuzzy logic-based controller the transformation operation of DC to DC converter control is performed sparsely by two-way battery and distributed generation resources management. Also proportional resonance controller is used due to its proper performance. In fact, with the use of reference current generation, sinusoidal current with a total harmonic distortion (THD) value of less than 5% is injected. The results show that the control strategy along with energy management with multiple energy generation resources is able to limit and maintain DC link voltage within an acceptable range in addition to The existence of an asymmetric fault. Therefore, the fault crossing operation has been performed correctly without the operation of the protection relays and secondly in comparison with microgrid solely with the presence of one photovoltaic production source the process of injecting active and reactive power in the upstream network is more appropriate.

**Keywords:** energy management, microgrid, supervisory control, voltage fault

**Received:** 3 December 2020

**Revised:** 6 February 2021

**Accepted:** 25 March 2021

**Corresponding Author:** Dr. Mehdi Nafar

**Citation:** M. Abbasi, M. Nafar, M. Simab, "Management and control of microgrids connected to three-phase network with the approach of activating current limitation under unbalanced errors using fuzzy intelligent method with the presence of battery, wind, photovoltaic and diesel sources", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 13, no. 49, pp. 55-66, June 2022 (in Persian).

<https://dorl.net/dor/20.1001.1.23223871.1401.13.49.4.3>

مقاله پژوهشی

## مدیریت و کنترل ریزش‌بکه متصل به شبکه سه فاز با رویکرد فعال کردن محدودیت جریان تحت خطاهای نامتعادل با استفاده از روش هوشمند فازی با حضور منابع باتری، باد، فتوولتائیک و دیزل

مصطفی عباسی، دانشجوی دکتری، مهدی نفر، استادیار، محسن سیماب، استادیار

گروه مهندسی برق - واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران  
mostafa.abbasi@miau.ac.ir, mnafar@miau.ac.ir, msimab@miau.ac.ir

**چکیده:** امروزه استفاده از منابع تولید پراکنده به صورت متصل به شبکه رشد چشم‌گیری دارند، لذا مبدل‌های متصل به شبکه باید قابلیت خدماتی فراتر از تزریق توان به شبکه، از جمله حفظ پایداری شبکه را داشته باشند. در این مقاله استراتژی کنترل و مدیریت انرژی برای باتری، باد، فتوولتائیک و دیزل متصل به شبکه سه فاز با فعال کردن محدودیت جریان تحت خطاهای نامتعادل معرفی شده است. در این روش، جریان‌های تزریق شده به مقدار معین در طول خطاها محدود می‌شود. همچنین حالت عملکرد بدون ردیابی حداکثر نقطه توان (MPPT) برای مبدل نیز لحاظ شده است، این حالت در خطاهای شدید، زمانی که مبدل نمی‌تواند حداکثر توان سیستم را کنترل کند فعال می‌شود. لذا در ریزش‌بکه با وجود یک کنترل‌کننده ناظر مبتنی بر منطق فازی، عمل کنترل مبدل dc به dc دوطرفه باتری و مدیریت منابع تولید پراکنده انجام می‌شود. همچنین از کنترل‌کننده تناسبی رزونانسی به دلیل عملکرد مناسب آن، در این کار استفاده می‌شود. در حقیقت با استفاده از تولید جریان مرجع، جریان سینوسی با مقدار اعوجاج هارمونیک کل (THD) کمتر از ۵ درصد تزریق می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که استراتژی کنترلی همراه با مدیریت انرژی با چندین منبع تولید انرژی، اولاً قادر است که با وجود خطای نامتقارن در شبکه بالادستی، ولتاژ لینک dc را در یک بازه قابل قبول حفظ و جریان خطا را محدود کند لذا عملیات عبور از خطا بدون عملکرد رله‌های حفاظتی به درستی انجام شده است و ثانیاً در مقایسه با ریزش‌بکه با حضور فقط یک منبع تولید فتوولتائیک، روند تزریق توان اکتیو و راکتیو در شبکه بالادستی مطلوب‌تر است.

**کلمات کلیدی:** خطای ولتاژ، ریزش‌بکه، کنترل ناظر، مدیریت انرژی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۹/۱۳

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱/۵

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مهدی نفر

نشانی نویسنده‌ی مسئول: مرودشت - ۳ کیلومتر ۳ بلوار مرودشت - تخت جمشید - دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرودشت.

## ۱- مقدمه

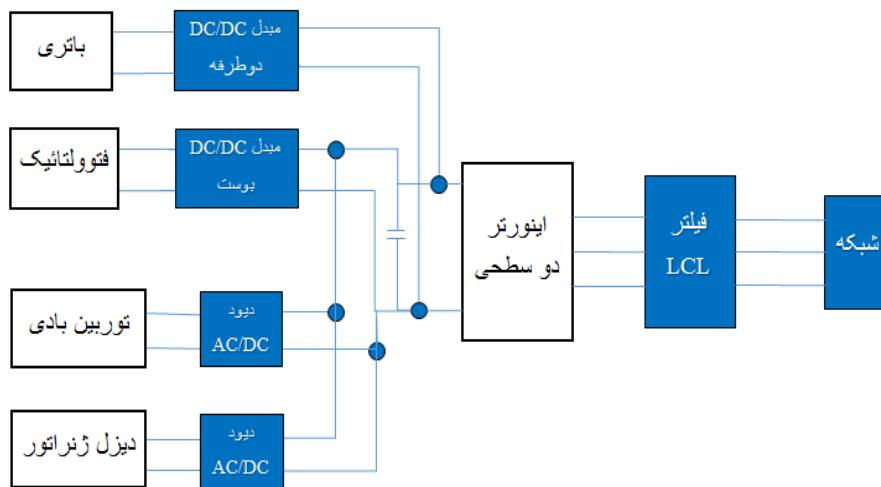
ریزشبکه<sup>۱</sup> معمولاً شامل یک مجموعه از منابع تولید پراکنده، سیستم ذخیره انرژی و بارها است که می‌تواند به صورت اتصال به شبکه و یا عملکرد جزیره‌ای مورد بهره‌برداری قرار گیرد. ریزشبه‌ها، هم برای شرکت‌های تولید برق و هم برای مصرف‌کننده‌ها دارای منافع زیادی هستند [۱،۲]. اخیراً، نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر به شبکه برق، افزایش چشم‌گیری داشته است که سهم انرژی خورشیدی و بادی در این زمینه، قابل توجه است. به‌طور معمول، هنگامی که خطا اتفاق می‌افتد و یک افت ولتاژ در نقطه اتصال بین ریزشبه با شبکه بالادستی به وجود می‌آید، برای محافظت از مبدل‌های برق، نیاز به حذف فوری جریان از شبکه است. با این حال، قطع اتصال ریزشبه از شبکه در هنگام خطا ممکن است منجر به مشکلات پایداری، در بخشی از شبکه شود. علاوه بر این، جداسازی نیروگاه‌ها در شرایط خطا، نیازمند هزینه زیادی برای راه‌اندازی مجدد است. از این رو، بسیاری از کشورها الزامات جدیدی را برای قطع ارتباط میان ریزشبه و شبکه در هنگام خطا در نظر گرفته‌اند که از آن به‌عنوان قابلیت گذر از خطای ولتاژ پایین<sup>۲</sup> (LVRT) نام برده می‌شود [۳].

اخیراً، مقالات بسیاری توانایی LVRT را در ریزشبه متصل به شبکه بررسی کرده‌اند. در مرجع [۴]، کنترل توان راکتیو را با استفاده از کنترل‌کننده PI معمولی در سیستم با حضور فتوولتائیک<sup>۳</sup> (PV) انجام داده است. اگرچه، بر تزریق جریان راکتیو به سیستم تأکید می‌شود، اما این روش در زمان وقوع خطا، به دلیل جریان بیش از حد بالا دچار مشکلاتی می‌شود. در مرجع [۵]، یک استراتژی کنترل تطبیقی، با استفاده از روش مرسوم پی-نرم (P-norm)، جهت افزایش قابلیت LVRT برای اتصال به شبکه PV پیشنهاد شده است. اگرچه این روش دارای محاسبات نسبتاً ساده‌ای است، اما ولتاژ لینک dc به شدت کاهش می‌یابد و از این رو افت بیش از حد توان منجر به ناتوانی در تأمین تقاضای برق می‌شود. در مرجع [۶]، یک مدل کنترل پیش‌بین برای LVRT پیشنهاد شده که با وجود سریع بودن عملکرد آن، دارای محاسبات زیادی است و همچنین عدم در نظرگیری محدودیت جریان تحت خطا، از معایب آن است. در مرجع [۷] یک کنترل‌کننده شبکه عصبی مبتنی بر فازی را برای کنترل توان راکتیو در هنگام بروز خطاهای شبکه پیشنهاد می‌شود. اگرچه این روش به سرعت پاسخ می‌دهد، اما تغییر قابل توجهی در ولتاژ لینک dc و ولتاژ ترمینال، در هنگام خطاهای شبکه ندارد. در مرجع [۸] یک استراتژی کنترلی جدید سیستم PV سه فاز، به صورت دومرحله‌ای و بر اساس کنترل توان اکتیو و راکتیو، برای بهبود LVRT ارائه شده است. استراتژی کنترلی پیشنهادی، قابلیت LVRT سیستم PV را بهبود می‌بخشد و از توان راکتیو نیز پشتیبانی می‌کند ولی به محدودیت در میزان کاهش جریان پرداخته نشده است. در مرجع [۹]، بررسی بر روی تولید جریان مرجع از مبدل PV سه فاز تحت خطای شبکه انجام شده است. در مرجع [۱۰] بر روی تجزیه و تحلیل عملکرد LVRT در توربین بادی، تحت افت ولتاژ شبکه متعادل و نامتعادل تمرکز دارد. با کنترل صحیح مبدل سمت روتور و مبدل سمت شبکه، قابلیت عبور از خطا می‌تواند مطابق با الزامات شبکه انجام شود. تمام روش‌های موجود ارائه شده در مرجع [۱۱]، ثابت می‌کند که اصلاح کنترل مبتنی بر مبدل، مؤثرترین و مقرون به صرفه‌ترین استراتژی در بین تمام روش‌های فعلی، برای بهبود کارایی سیستم در هنگام بروز خطاست. در این مقاله یک استراتژی کنترل پیشرفته یکپارچه طراحی شده است که می‌تواند نیازهای LVRT را همراه با پشتیبانی توان راکتیو، با موفقیت برطرف کند. در مرجع [۱۲]، مشکلات LVRT در موقعیت‌شناسی اینورتر منبع جریان، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و یک روش جدید کنترل LVRT بر اساس یک توپولوژی اصلاحی ارائه داده است. در مرجع [۱۳]، از محدودکننده جریان خطای نوع پل، برای بهبود قابلیت LVRT در ریزشبه متصل به شبکه استفاده شده است. علاوه بر این، یک روش جدید برای کنترل همزمان این دو در داخل ریزشبه پیشنهاد شده است. هنگامی که افت ولتاژ در شبکه توزیع اصلی رخ می‌دهد، هر دو به‌طور همزمان به‌گونه‌ای عمل می‌کنند که علاوه بر تأمین نیازهای LVRT، ولتاژ ریزشبه نیز در یک سطح ثابت حفظ شود. در مقایسه با روش‌های مرسوم، روش پیشنهادی قادر است ولتاژ ریزشبه را بدون اندازه‌گیری ولتاژ نقطه اتصال، بازیابی کند. مرجع [۱۴] یک طرح کنترل قوی برای مبدل‌های PV متصل به شبکه ارائه می‌دهد که آن‌ها را قادر می‌سازد تا تحت افت ولتاژ متعادل یا نامتعادل و اختلالات ناشناخته، عملکرد مؤثری داشته باشند. این سیستم کنترل در مقایسه با برخی از تکنیک‌های موجود استفاده شده برای مقابله با مسئله LVRT، ساختار ساده‌تر و همچنین پیچیدگی کمتری دارد. یک استراتژی کنترل LVRT برای شبکه‌های توزیع ولتاژ پایین در مرجع [۱۵] پیشنهاد شده که با سیستم PV به شبکه متصل شده است. این روش مبتنی بر ولتاژ مبدل کاسکاد و جریان حلقه در فرمت dq است، که از

اجزای توالی مثبت و منفی برای تغییر مرجع ولتاژ لینک dc استفاده می‌شود تا جریان اینورتر را در طول خطاهای شبکه محدود کند. در مرجع [۱۶]، برای حل مشکل LVRT، از یک مبدل چند سطحی مدولار مبتنی بر مدل پیش‌بین، استفاده شده است که از این مدل پیشنهادی برای یک سیستم PV متصل به شبکه، تحت بهره‌برداری نامتقارن استفاده می‌شود. در مقالات مرور شده، معمولاً از یک منبع جهت استراتژی‌های مختلف کنترل LVRT استفاده شده است. در این مقاله از منابع باتری، باد، فتوولتائیک و دیزل استفاده شده که چالش‌های خاص خود را دارد. همچنین از یک کنترل ناظر بر اساس فازی استفاده شده که با مدیریت انرژی و تنظیم مقادیر سیستم هیبرید، به انحراف توان شبکه واکنش نشان می‌دهد و هرگونه عدم انطباق بین توان شبکه و توان برنامه‌ریزی شده را جبران می‌کند. در واقع در این کار از دو سیستم فازی در کنترل ناظر استفاده شده که یکی مدیریت منابع تولید پراکنده و دیگری مدیریت شارژ و دشارژ باتری را انجام می‌دهد و مقادیر مرجع توان را در خروجی مشخص می‌کنند. همچنین این مقاله بعد از تشخیص خطا از طریق مؤلفه‌های متعامد ولتاژ در سمت شبکه، جریان خطا را به میزان معین شده‌ای در طول خطا محدود می‌کند. سایر بخش‌های این مقاله به این صورت ارائه می‌گردد: در بخش دوم ساختار ریز شبکه و دیاگرام مداری سیستم سه فاز مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش سوم بلوک کنترل اصلاح شده با حضور منابع هیبرید به همراه تولید جریان مرجع و کنترل ناظر به صورت کامل تشریح شده است. در بخش چهارم به نتایج شبیه‌سازی و تحلیل مدل اصلاح شده پرداخته و نتایج در دو حالت تک منبعی (فتوولتائیک) و چند منبعی (منابع هیبرید) بررسی و مقایسه خواهد شد و در پایان، نتیجه‌گیری این پژوهش در بخش پنجم بیان شده است.

## ۲- ساختار ریز شبکه و دیاگرام مداری سیستم سه فاز مورد مطالعه

این ریز شبکه شامل سیستم فتوولتائیک، توربین بادی، دیزل ژنراتور و باتری است. اجزاء ذکر شده مطابق شکل (۱) به یک لینک dc متصل و سپس از طریق یک اینورتر دو سطحی به شبکه توزیع بالادست متصل می‌شوند.

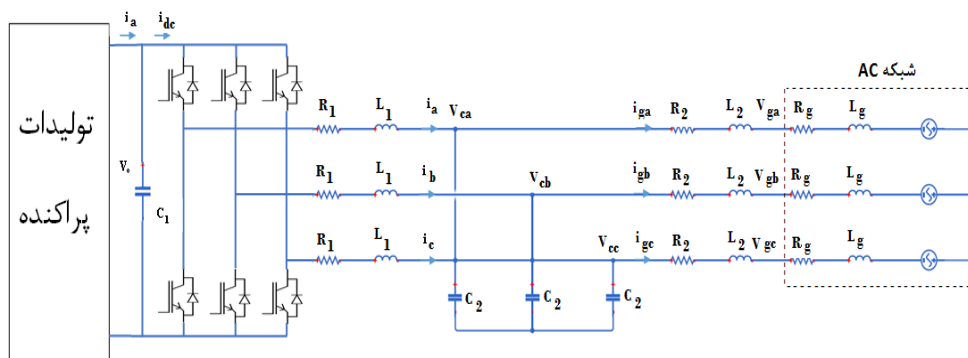


شکل (۱): ساختار ریز شبکه سه فاز تحت مطالعه

Figure (1): The three-phase microgrid structure under study

## ۲-۱- ساختار ریز شبکه مورد مطالعه

شکل (۲) دیاگرام مداری سیستم سه فاز تحت مطالعه متصل به شبکه سه فاز را نشان می‌دهد. معادلات فضای حالت یک سیستم مبدل dc به ac در چارچوب abc از طریق معادلات (۱) ارائه می‌شود که پارامترهای فیلتر LCL و شبکه به این صورت معرفی می‌شوند:  $R_1$  و  $L_1$  به ترتیب مقاومت و اندوکتانس سمت اینورتر،  $R_2$  و  $L_2$  مقاومت و اندوکتانس سمت شبکه،  $C_2$  ظرفیت خازن،  $V_{abc}$  و  $i_{abc}$  به ترتیب ولتاژ و جریان سه فاز در سمت اینورتر،  $V_{cabc}$  ولتاژ سه فاز خازن و  $V_{gabc}$  و  $i_{gabc}$  هم به ترتیب ولتاژ و جریان سمت شبکه هستند.



شکل (۲): دیاگرام مدارای سیستم سه فاز تحت مطالعه متصل به شبکه سه فاز  
Figure (2): Orbital diagram of the three-phase system under study connected to a three-phase network

$$L_1 = \frac{d i_{abc}}{d t}(t) = v_{abc}(t) - v_{c_{abc}}(t) - R_1 i_{abc}(t)$$

$$C_2 = \frac{d v_{C_{abc}}}{d t}(t) = i_{abc}(t) - i_{g_{abc}}(t) \quad (1)$$

$$L_2 = \frac{d i_{g_{abc}}}{d t}(t) = v_{c_{abc}}(t) - R_2 i_{g_{abc}}(t) - v_{g_{abc}}(t)$$

فرموله‌سازی در قاب مرجع ثابت در مرجع [۱۷] نشان داده شده است. از آن جایی که در شرایط عادی، ولتاژ شبکه و بارها متعادل هستند، هیچ اجزای نوسانی در اجزای اکتیو و راکتیو توان وجود نخواهد داشت و همچنین جریان تزریقی کاملاً سینوسی است. با این حال، تحت شرایط نامتعادل، اجزای توالی در هر دو بردار جریان و ولتاژ ظاهر می‌شوند؛ بنابراین، توان ظاهری به صورت زیر است:

$$S = v_{\alpha\beta} \cdot i_{\alpha\beta}^* = (v_{\alpha\beta}^+ + v_{\alpha\beta}^-) \cdot (i_{\alpha\beta}^+ + i_{\alpha\beta}^-) = v_{\alpha\beta}^+ \cdot i_{\alpha\beta}^+ + v_{\alpha\beta}^- \cdot i_{\alpha\beta}^- + v_{\alpha\beta}^+ \cdot i_{\alpha\beta}^- + v_{\alpha\beta}^- \cdot i_{\alpha\beta}^+ \quad (2)$$

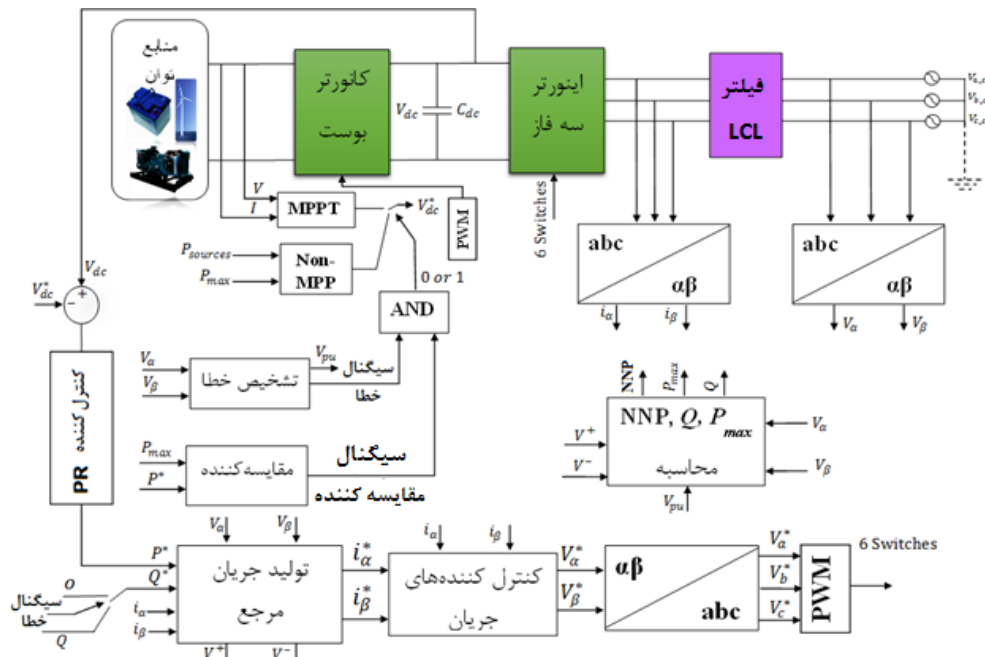
که  $v_{\alpha\beta}$  و  $i_{\alpha\beta}$  به ترتیب ولتاژ و جریان مربوط به قاب مرجع ثابت،  $v_{\alpha\beta}^+$  و  $i_{\alpha\beta}^+$  به ترتیب ولتاژ و جریان مربوط به قاب مرجع ثابت در توالی مثبت و همچنین  $v_{\alpha\beta}^-$  و  $i_{\alpha\beta}^-$  نیز به ترتیب مربوط به ولتاژ و جریان مربوط به قاب مرجع ثابت در توالی منفی هستند. ولتاژهای که  $v_{\alpha\beta}^+$  و  $v_{\alpha\beta}^-$  مشتق شده از:

$$v_{\alpha\beta}^+ = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} v_{\alpha\beta}, v_{\alpha\beta}^- = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & q \\ -q & 1 \end{bmatrix} v_{\alpha\beta} \quad (3)$$

هنگامی که  $q = e^{-j\pi/2}$  هست مقدار ۹۰ درجه برای عملکرد انتقال فاز پس فاز در دامنه زمانی اعمال می‌شود. برای جریان‌های مثبت و منفی نیز مشابه ولتاژها عمل می‌شود.

### ۳- ساختار بلوک کنترلی اعمال شده سیستم

در این بخش، به تفصیل در مورد بلوک کنترلی با حضور منابع باتری، باد، فتوولتائیک و دیزل توضیح داده شده و قسمت‌های مختلف این بلوک شرح داده شده است. در ادامه مد عملکرد سیستم در شرایط نرمال و خطا بیان شده که سیستم در شرایط نرمال، در مد ردیابی حداکثر نقطه توان<sup>۴</sup> (MPPT) قرار دارد و LVRT غیرفعال است. همچنین سیستم در شرایط خطا در مد ردیابی بدون حداکثر نقطه توان<sup>۵</sup> (Non-MPPT) قرار دارد و در صورت کمتر بودن توان اکتیو ماکزیمم از توان اکتیو مرجع، LVRT فعال می‌شود. در ادامه به نحوه تولید جریان مرجع می‌پردازیم. در نهایت نیز از یک کنترل ناظر با دو سیستم فازی استفاده شده که یکی مدیریت منابع تولید پراکنده و دیگری مدیریت شارژ و دشارژ باتری را انجام می‌دهد. در شکل (۳) ساختار سیستم به همراه بلوک کنترل اصلاح شده نشان داده شده است که از مرجع [۱۷] استفاده شده اما با این تفاوت که در بلوک کنترلی زیر از منابع هیبرید استفاده شده است که باید مدیریت انرژی نیز انجام گیرد که در ادامه در مورد کنترل ناظر به صورت مفصل توضیح داده شده است.



شکل (۳): ساختار سیستم به همراه بلوک کنترل اصلاح‌شده [۱۷]

Figure (3): System structure with modified control block [17]

طبق بلوک کنترل اصلاح‌شده، به کمک مؤلفه‌های متعامد ولتاژ در سمت شبکه بالادستی و محاسبه ولتاژ پریونیت، می‌توان افت ولتاژ را تشخیص داد که در ادامه محاسبات و توضیحات مربوطه ارائه می‌شود. به‌منظور جلوگیری از محدودسازی بیش از حد جریان، روش محدود کردن جریان بر اساس مرجع [۱۸] ارائه شده است. توان نامی مبدل پس از افت ولتاژ بروز می‌شود که آن توان نامی جدید<sup>۶</sup> (NNP) نامیده می‌شود [شکل (۳)]. به‌طور معمول در هنگام بروز افت ولتاژ، مقدار توان نامی جدید از توان نامی مبدل کمتر است که بستگی به عمق افت ولتاژ دارد؛ بنابراین، NNP به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$NNP = \frac{\sqrt{V_p} - \sqrt{V_n}}{V_b} \cdot S \quad (۴)$$

که S توان ظاهری یا توان نامی مبدل قدرت،  $V_b$  ولتاژ مبنا و  $V_p$  و  $V_n$  به ترتیب ولتاژهای پیک و نامی هستند. از سوی دیگر، با توجه به عمق افت ولتاژ، توان راکتیو را می‌توان به‌صورت زیر محاسبه کرد:

$$\begin{cases} Q=0 & \text{if } V_{pu} > 0.9 \\ Q=S \times 1.5 \times (0.9 - V_{pu}) & \text{if } 0.2 < V_{pu} < 0.9 \\ Q=1.05 \times S & \text{if } V_{pu} < 0.2 \end{cases} \quad (۵)$$

که ولتاژ پریونیت ( $V_{pu}$ ) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{pu} = \frac{\sqrt{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2}}{V_b} \quad (۶)$$

که  $v_{\alpha}$  و  $v_{\beta}$  ولتاژهای قاب مرجع ثابت هستند و  $v_b$  نیز ولتاژ مبنا می‌باشد. با توجه به NNP و توان راکتیو (Q)، حداکثر توان اکتیو ( $P_{max}$ ) برای اینورتر، جهت تزریق به شبکه، در حالتی که از اضافه جریان اجتناب کند می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود:

$$P_{max} = \sqrt{NNP^2 - Q^2} \quad (۷)$$

اگر توان راکتیو مرجع بالاتر از NNP باشد، مبدل نمی‌تواند این توان راکتیو را به شبکه تزریق کند. از این رو، باید مقدار NNP را برای مرجع توان راکتیو انتخاب کرده و توان DC مصرف شده توسط منابع را رها کند. به‌طور خلاصه، هنگامی که یک افت ولتاژ تشخیص داده می‌شود مقادیر NNP و Q بر اساس رابطه‌های (۴) و (۵) محاسبه می‌شود. سپس، حداکثر توان اکتیو ( $P_{max}$ ) از

جریان بیش از حد جلوگیری می‌کند. جدول (۱) حالت تصمیم‌گیری بر اساس وضعیت شبکه را نشان می‌دهد. تا زمانی که  $V_{pu}$  بیشتر از ۰/۹ است، سیستم در شرایط نرمال و در مد MPPT قرار دارد و LVRT غیرفعال است اما زمانی که  $V_{pu}$  کمتر از ۰/۹ باشد، سیستم آن را خطا تشخیص داده و دو حالت دارد که در حالت اول اگر  $P_{max} > P^*$  باشد سیستم در مد MPPT قرار دارد و LVRT فعال است و در حالت دوم اگر  $P_{max} < P^*$  باشد سیستم در مد Non-MPPT و LVRT فعال است.  $P^{sch}$  توان برنامه‌ریزی شده توسط سیستم مدیریت انرژی است.

Table (1): Decision mode based on network status [17]

جدول (۱): حالت تصمیم‌گیری بر اساس وضعیت شبکه [۱۷]

ولتاژ اندازه‌گیری شده	LVRT		مد عملکرد کنترل کننده
$V_{pu} > 0.9$	غیرفعال		MPPT
$V_{pu} < 0.9$	$P_{max} > P^*$	فعال	MPPT
	$P_{max} < P^*$	فعال	Non-MPPT

توان اکتیو مرجع مرجع

### ۳-۱- تولید مرجع جریان

ایده تولید جریان مرجع از مرجع [۱۸] گرفته شده که با استفاده از توان‌های اکتیو و راکتیو مرجع و ولتاژهای مربوط به قاب ثابت،  $i_{\alpha\beta}^*$  تولید می‌شود. شکل (۴) نحوه تولید جریان مرجع را نشان می‌دهد.



شکل (۴): تولید جریان مرجع برای منابع انرژی تجدیدپذیر [۱۸]

Figure (4): Reference current generation for renewable energy sources [18]

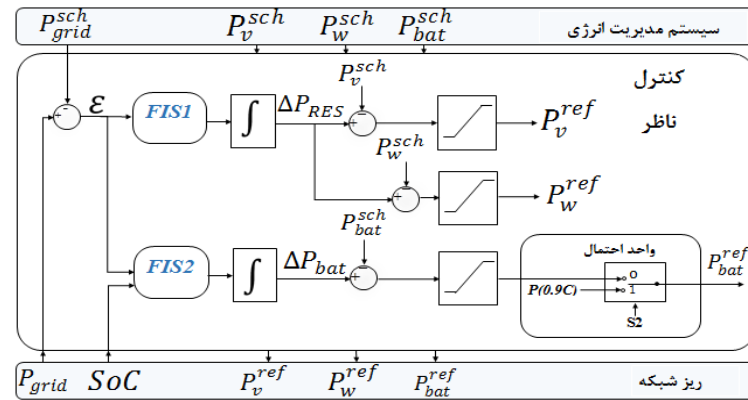
سیگنال مرجع  $i_{\alpha\beta}^*$  (در قاب مرجع  $\alpha$ - $\beta$ ) به‌عنوان تابعی از منابع توان اکتیو و راکتیو  $P^*$  و  $Q^*$  و خروجی ولتاژ  $V_{\alpha\beta}$  در قاب مرجع نتیجه می‌شود:

$$i_{\alpha}^* = \frac{2p^*}{3v_{\alpha}}$$

$$i_{\beta}^* = \frac{2Q^*}{3v_{\alpha}}$$
(۸)

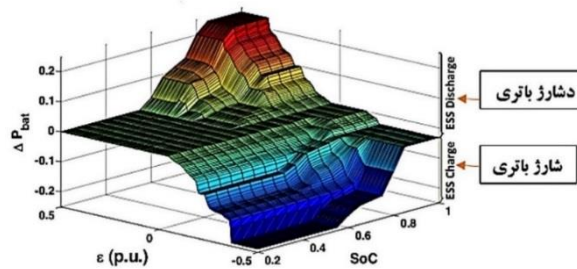
### ۳-۲- کنترل ناظر

کنترل ناظر مورد استفاده شامل سیستم استنتاج فازی<sup>۷</sup> (FIS) با عملگر انتگرالی است که هم مدیریت تولیدات پراکنده (FIS1) و هم مدیریت شارژ و دشارژ باتری (FIS2) را انجام می‌دهد. این کنترل ناظر با تنظیم مقادیر سیستم هیبرید به انحراف توان شبکه واکنش نشان می‌دهد و هرگونه عدم انطباق بین توان شبکه ( $P_{grid}$ ) و مقدار توان برنامه‌ریزی شده<sup>۸</sup> را جبران می‌کند. شکل‌های (۵) و (۶) ساختار کنترل ناظر مورد استفاده بر حسب فازی را نشان می‌دهد [۱۸]. پارامترها در جدول معرفی شده‌اند. حالت شارژ باتری<sup>۹</sup> (SoC) نیز مربوط به حالت شارژ باتری می‌باشد. FIS ها، مقدارهای افزایشی منابع انرژی تجدیدپذیر<sup>۱۰</sup> ( $\Delta P_{RES}$ ) و سیستم ذخیره انرژی ( $\Delta P_{bat}$ ) را تولید می‌کنند که به مقادیر برنامه‌ریزی شده سیستم فتوولتائیک، باد و باتری اضافه شوند. توان دیزل نیز ثابت فرض می‌شود. ورودی FIS1 تفاوت بین  $P_{grid}$  و مقدار برنامه‌ریزی شده شبکه است:



شکل (۵): کنترل ناظر [۱۸]

Figure (5): Observer control [18]



شکل (۶): کنترل ناظر مبدل DC به DC دوطرفه باتری [۱۸]

Figure (6): Supervisor control of DC to DC dual battery converter [18]

Table (2): Parameters of the model

جدول (۲): پارامترهای مدل

پارامتر	سمبل
مقدار توان برنامه‌ریزی شده شبکه	$P_{grid}^{sch}$
توان برنامه‌ریزی شده سیستم فتوولتائیک	$P_v^{sch}$
توان برنامه‌ریزی شده سیستم بادی	$P_w^{sch}$
توان برنامه‌ریزی شده باتری	$P_{bat}^{sch}$
توان مرجع سیستم فتوولتائیک	$P_v^{ref}$
توان مرجع سیستم بادی	$P_w^{ref}$
توان مرجع سیستم باتری	$P_{bat}^{ref}$

$$\varepsilon = P_{grid} - P_{grid}^{sch} \quad (9)$$

مقادیر مثبت  $\varepsilon$  به این معنی است که شبکه انرژی بیشتری را نسبت به انتظار تقاضا می‌کند، بنابراین تولید توان از منابع تولید پراکنده باید افزایش یابد یا در صورت نیاز از باطری استفاده گردد و اگر مقادیر  $\varepsilon$  منفی شود عکس این موضوع اتفاق می‌افتد. از فازی FIS2 جهت کنترل شارژ و دشارژ باطری استفاده می‌شود. این مدل بر روی مبدل dc-dc متصل به باطری عمل می‌کند. سیستم کنترلی مبدل dc به dc دوطرفه باتری بر اساس توان برنامه‌ریزی شده شبکه، توان شبکه ( $P_{grid}$ ) و SoC در نظر گرفته می‌شود.

#### ۴- شبیه‌سازی سیستم



برای بررسی عملکرد LVRT، یک خطای تک فاز در فاز C ایجاد شده تا عملکرد استراتژی کنترل پیشنهادی مورد مطالعه قرار گیرد. آزمون شبیه‌سازی در محیط سیمولینک متلب برای بررسی استراتژی پیشنهادی انجام شده است. ساختار ریزشبه سه فاز مورد استفاده نیز در شکل‌های (۱) و (۳) نشان داده شده است. همچنین جدول (۳) پارامترهای سیستم قدرت را نشان می‌دهد. ولتاژ اتصال لینک dc برابر با ۳۸۰ ولت در نظر گرفته شده است.

Table (3): Power system parameters

جدول (3): پارامترهای سیستم قدرت

پارامترها	مقادیر
توان باتری	۵۰ کیلووات
توان سیستم فتوولتائیک	۲۵۰ کیلووات
توان سیستم باد	۵۰ کیلووات
توان دیزل	۷۵ کیلووات آمپر
ولتاژ خط به خط شبکه (rms)	۳۸۰ ولت به ۲۵ کیلوولت
فرکانس شبکه	۵۰ هرتز
اندوکتانس سمت اینورتر فیلتر LCL	۰/۰۷ میلی هانری
اندوکتانس سمت شبکه فیلتر LCL	۰/۶۵ میلی هانری
خازن فیلتر LCL	۰/۱۲۵ میکرو فاراد
مقاومت فیلتر LCL	۰/۲۳ اهم
ولتاژ لینک dc	۳۸۰ ولت
خازن لینک dc	۰/۲۲ فاراد
فرکانس سوئیچینگ	۱۶۵۰ هرتز

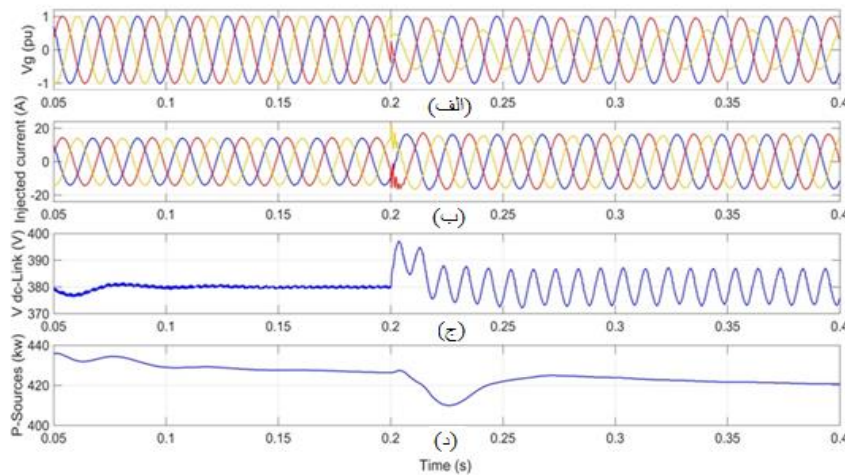
یک سناریو برای تأیید روش پیشنهادی تعریف شده است، که یک خطا در فاز C در زمان ۰/۲ ثانیه ایجاد شده است. در شکل (۷-الف) ولتاژ شبکه سه فاز در حالت نرمال شبکه و بدون خطا نشان داده شده است. هنگامی که خطا رخ می‌دهد، مقدار ولتاژ به ۰/۶۳ پریونیت سقوط می‌کند و عملیات LVRT فعال می‌شود. شکل (۷-ب) جریان‌های تزریقی را در لحظه خطا نشان می‌دهد که با این استراتژی کنترل به‌درستی کنترل می‌شوند. از آنجا که افت ولتاژ نامتعادل است، جریان در فاز c افزایش می‌یابد. با این حال با کنترل پیشنهادی، جریان تزریقی نامتعادل نبوده و کاملاً سینوسی است. همچنین ولتاژ لینک dc و مجموع توان منابع، با تغییر از حالت MPPT به Non-MPPT به ترتیب در شکل‌های (۷-ج) و (۷-د) نشان داده شده است.

در ادامه، شکل‌های (۸-الف) و (۸-ب) به ترتیب توان اکتیو و راکتیو تزریقی را در شرایط خطای شبکه در حضور منابع هیبرید نشان می‌دهد. مطابق شکل‌های نشان داده شده، هنگامی که خطای نامتعادل ولتاژ تشخیص داده می‌شود، توان اکتیو ( $P_{max}$ ) به سرعت به ۳۳۰ کیلووات در لحظه وقوع خطا کاهش می‌یابد تا از وقوع اضافه جریان جلوگیری شود. همچنین به‌طور قابل توجهی، هنگامی که سیگنال خطا برابر با یک باشد. در شکل (۸-ب)، توان راکتیو تزریقی به ۴۰ کیلووات کاهش می‌یابد. همان‌طور که شکل (۸-ج) نشان می‌دهد، در لحظه خطا، ولتاژ اتصال لینک dc افزایش می‌یابد، اما بعد از یک زمان کوتاه، کنترل‌کننده لینک dc، منبع ولتاژ را حول محور مرجع بین ۳۷۵ تا ۳۸۵ ولت تنظیم می‌کند. نوسانات پیک به پیک در لینک dc می‌تواند به علت توان‌های اکتیو و راکتیوی باشد که توسط فیلتر مصرف می‌شود. شکل‌های (۹-الف)، (۹-ب) و (۹-ج) به ترتیب توان اکتیو، توان راکتیو تزریقی و ولتاژ اتصال لینک dc را در شرایط خطای شبکه در حضور منبع فتوولتائیک نشان می‌دهند.

از مقایسه شکل (۸) با حضور منابع هیبرید با شکل (۹) که فقط از منبع فتوولتائیک استفاده شده، نتایج زیر حاصل شده است: ۱- در حالتی که فقط از منبع فتوولتائیک استفاده می‌شود [شکل (۹-الف)] تزریق توان اکتیو به شبکه بعد از خطا روند کاهشی دارد در صورتی که در حالت چند منبعی [شکل (۸-الف)] پس از یک کاهش در لحظه وقوع خطا، توان اکتیو سریع‌تر باز یابی شده و به حالت قبل از خطا برگشته است.

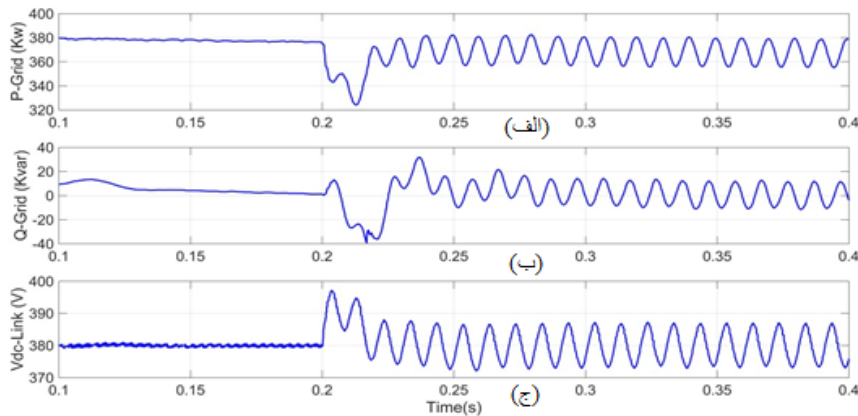
۲- تزریق توان راکتیو به شبکه در حالتی که چند منبعی می‌باشد [شکل (۸-ب)]، بعد از وقوع خطا ناچیز بوده و سریع‌تر به مقدار قبل از خطا برگشته است ولی در حالتی که فقط از منبع فتوولتائیک استفاده شده است [شکل (۹-ب)] میزان تزریق افزایش یافته به حالت قبل از خطا نرسیده است.

۳- ولتاژ لینک dc در حالت چند منبعی [شکل (۸-ج)] بین ۳۷۵ تا ۳۸۵ ولت نوسانی است در حالی که در حالت تک منبع فتوولتائیک [شکل (۹-ج)]، این ولتاژ کمتر از ۳۸۰ ولت (بین ۳۷۰ تا ۳۸۰ ولت) در حال نوسان است.



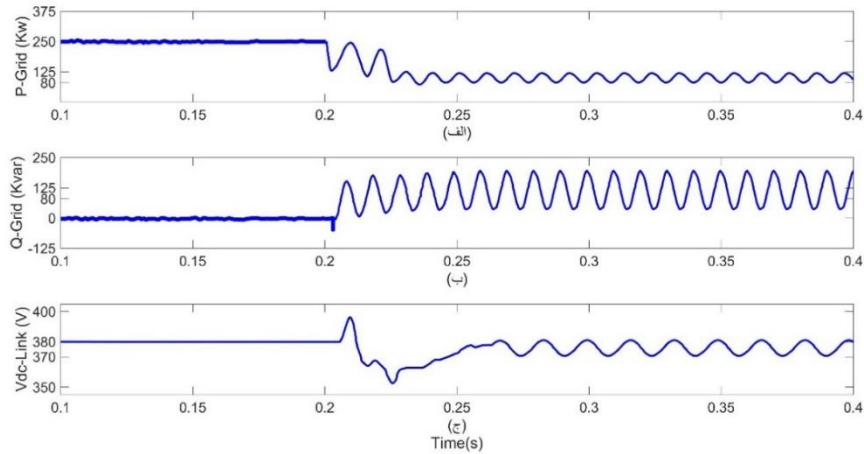
شکل (۷): نتایج شبیه‌سازی سیستم هیبرید (الف) ولتاژ شبکه سه فاز، (ب) جریان سه فاز، (ج) ولتاژ لینک dc و (د) توان منابع در لحظه خطای نامتعادل

Figure (7): Hybrid system simulation results a) three-phase mains voltage, b) three-phase current, c) DC link voltage and d) source power at the moment of unbalanced error

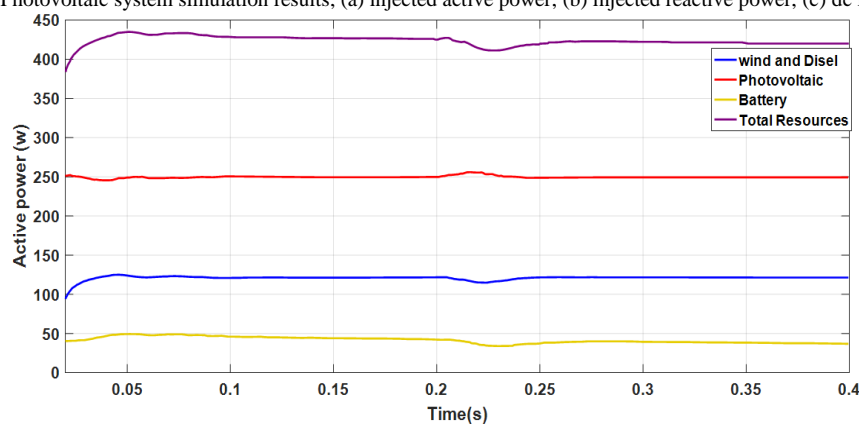


شکل (۸): نتایج شبیه‌سازی سیستم هیبرید (الف) توان اکتیو تزریق شده، (ب) توان راکتیو تزریق شده، (ج) ولتاژ لینک dc

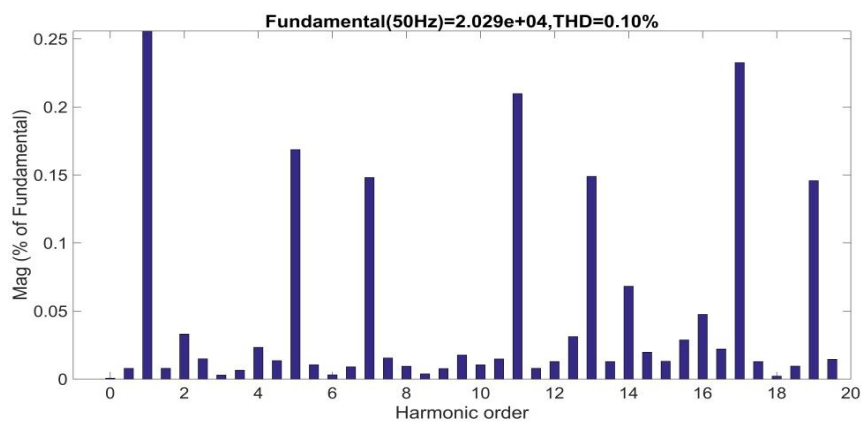
Figure (8): Hybrid system simulation results, (a) injected active power, (b) injected reactive power, (c) dc link voltage



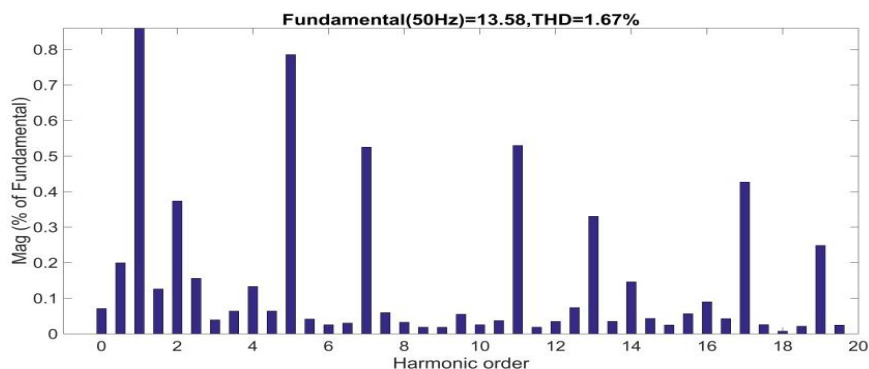
شکل (۹): نتایج شبیه‌سازی سیستم فتوولتائیک (الف) توان اکتیو تزریق شده، (ب) توان راکتیو تزریق شده، (ج) ولتاژ لینک dc  
 Figure (9): Photovoltaic system simulation results, (a) injected active power, (b) injected reactive power, (c) dc link voltage



شکل (۱۰): توان تزریقی تمام منابع  
 Figure (10): Injectable power of all sources

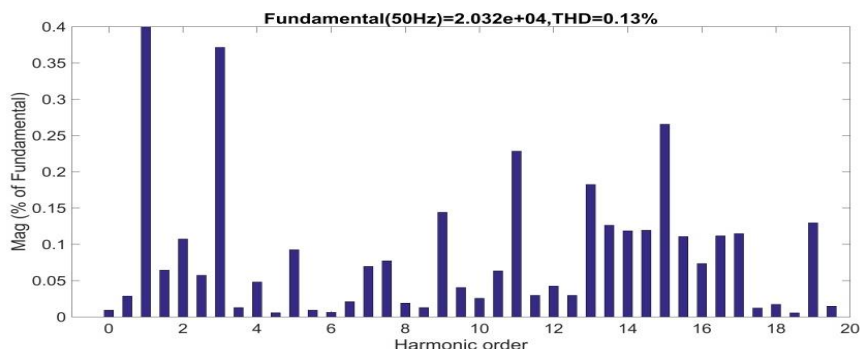


شکل (۱۱): هارمونیک ولتاژ فاز A در شرایط نرمال  
 Figure (11): Harmonic phase voltage A under normal conditions

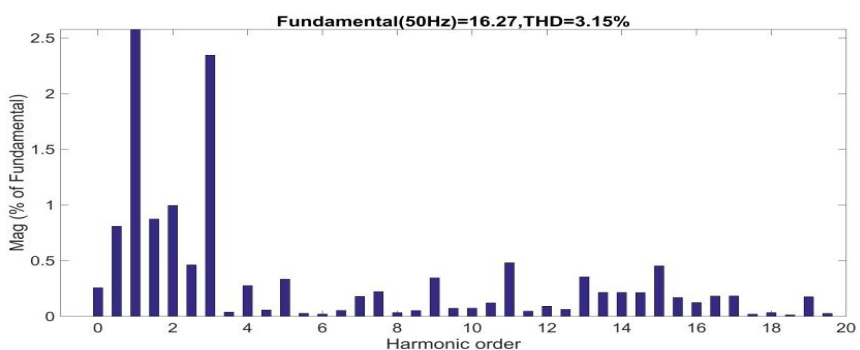


شکل (۱۲): هارمونیک جریان فاز A در شرایط نرمال  
Figure (12): Harmonic current of phase A under normal conditions

در شکل (۱۰) نیز توان تزریقی تمام منابع نشان داده شده است. با سیستم کنترل پیشنهادی در این مقاله، هارمونیک ولتاژ فاز A در شرایط نرمال و در زمان ۰/۱۵ ثانیه، برابر با ۰/۱۱ درصد و هارمونیک جریان فاز A برابر با ۱,۵۸ درصد می‌باشد، همان‌گونه که به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است. همچنین در شرایط بعد از خطا و در زمان ۰/۲۵ ثانیه، هارمونیک ولتاژ فاز A، برابر با ۰/۱۳ درصد می‌باشد و هارمونیک جریان فاز A، برابر با ۳/۱۴ درصد می‌باشد همان‌گونه که به ترتیب در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که هارمونیک تزریقی توسط اینورتر به شبکه، در بازه استاندارد IEEE 519 است.



شکل (۱۳): هارمونیک ولتاژ فاز A پس از خطا  
Figure (13): Harmonic phase voltage A after error



شکل (۱۴): هارمونیک جریان فاز A پس از خطا  
Figure (14): Harmonic current of phase A after error

## ۵- نتیجه‌گیری

این مقاله، یک طرح کنترل برای مبدل سه‌فاز تک مرحله‌ای ولتاژ را در نظر می‌گیرد که بهبود کیفیت توان و محدودیت جریان تحت خطاهای نامتعادل را در شرایط غیرنرمال به دنبال دارد. از جمله مهم‌ترین محاسن روش پیشنهادی، اندازه تغییرات نوسانات

فرکانس شبکه در ولتاژ لینک dc و توان اکتیو تحت خطاهای نامتعادل است. همچنین با در نظر گرفتن یک کنترل ناظر که بر اساس روش فازی و مدیریت انرژی عمل می‌کند، خیلی سریع، خطا توسط این کنترل‌کننده تشخیص داده می‌شود. این کنترل‌کننده، اختلال و انحراف‌های توان در حالت عملگر Non-MPPT را نیز پاسخ می‌دهد و از اضافه جریان و خاموشی برق جلوگیری می‌کند. همچنین نشان داده شد که با استفاده از تولید جریان مرجع در نظر گرفته شده، جریان سینوسی با مقدار اعوجاج هارمونیک کل <sup>11</sup> (THD) کمتر از ۵ درصد به شبکه تزریق می‌شود. مهم‌تر از همه اینکه ساختار کنترل از دو حالت عملگر MPPT و Non-MPPT سود می‌برد که هر دو می‌توانند تحت شرایط غیر نرمال عمل کنند. یکی از مهم‌ترین کارهای این مقاله این بود که حالت عملیاتی Non-MPPT برای حالت خطا به خوبی اجرا می‌شود. همچنین استفاده از منابع هیبرید در این مقاله در مقایسه با فقط منبع فتوولتائیک سبب شد تا مقادیر توان‌های اکتیو و راکتیو بعد از وقوع خطا سریع‌تر بازیابی شده و به مقدار قبل از خطا برگردد و علاوه بر این مقدار ولتاژ لینک dc نیز در حالت چند منبعی در حدود ولتاژ ۳۸۰ ولت نوسان می‌کند ولی در حالت تک منبعی در مقدار کمتر از ۳۸۰ ولت در حال نوسان است.

## References

### مراجع

- [1] F. Nejabatkhah, Y.W. Li, "Overview of power management strategies of hybrid ac/dc microgrid", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 30, no. 12, pp. 7072–7089, Dec. 2015 (doi: 10.1109/TPEL.2014.2384999).
- [2] Q. Jiang, M. Xue, G. Geng, "Energy management of microgrid in grid-connected and stand-alone modes", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 3380–3389, Aug. 2013 (doi: 10.1109/TPWRS.2013.2244-104).
- [3] J.P. Roselyn, C. Pranav Chandran, C. Nithya, D. Devaraj, R. Venkatesan, V. Gopal, S. Madhura, "Design and implementation of fuzzy logic based modified real-reactive power control of inverter for low voltage ride through enhancement in grid connected solar PV system", *Control Engineering Practice*, vol. 101, Article Number: 104494, Aug. 2020 (doi: 10.1016/j.conengprac.2020.104494).
- [4] X. Chen, Y. Cui, X. Wang, S. Li, "Research of low voltage ride through control strategy in photovoltaic grid". *Proceeding of the IEEE/CAC*, pp. 5146-5150, Jinan, China, Oct. 2017 (doi: 10.1109/CAC.2017.8243693).
- [5] H. Hasanien, "An adaptive control strategy for low voltage ride through capability enhancement of grid-connected photovoltaic power plants", *IEEE Trans. on Power systems*, vol. 31, no. 4, pp. 3230–3237, July 2016 (doi: 10.1109/TPWRS.2015.2466618).
- [6] F. Diaz Franco, T. Vu, T. El-Mezyani, "Low voltage ride-through for PV systems using model predictive control approach", In 2016 North American power symposium, proceedings of the symposium, Article Number: 16483535, Nov. 2016 (doi:10.1109/NAPS.2016.7747952).
- [7] F. J. Lin, K. C. Lu, T. H. Ke, B. H. Yang, Y. R. Chang, "Reactive power control of three-phase grid-connected PV system during grid faults using Takagi-Sugeno-Kang probabilistic fuzzy neural network control", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 62, pp. 5516–5528, Sept. 2015 (doi: 10.1109/IECON.2016.7793827).
- [8] F. Yang, T. Zhang, L. H. Yang, X. K. Ma, "Low-voltage ride-through control strategy of PV system based on active and reactive power control", *Proceeding of the IEEE/APSCOM*, pp. 1–6, Hong Kong, Nov. 2015 (doi:10.1049/IC.2015.0253).
- [9] P. Balamurugan, S. Ashok, T. L. Jose, "Optimal operation of biomass/wind/PV hybrid energy system for rural areas", *International Journal of Green Energy*, vol. 6, no. 1, pp. 104–116, Feb. 2009 (doi: ORG/10.1063/1.4-929703).
- [10] T. Thomas, A. Prince, "LVRT capability evaluation of DFIG based wind energy conversion system under type-A and type-C grid voltage sags", *Proceeding of the IEEE/PESGRE*, pp. 1-6, Cochin, India, April 2020 (doi: 10.1002/ENG2.12282).
- [11] E. Gatavi, A. Hellany, M. Nagrial, J. Rizk, "An integrated reactive power control strategy for improving low voltage ride-through capability", *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 5, no. 4, Dec. 2019 (doi: 10.23919/CJEE.2019.000022).
- [12] Y. Geng, K. Yang, Z. Lai, P. Zheng, H. Liu, R. Deng, "A novel low voltage ride through control method for current source grid-connected photovoltaic inverters", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 51735 – 51748, April 2019 (doi: 10.1109/ACCESS.2019.2911477).
- [13] H. Bahramian-Habil, H. Askarian Abyaneh, G.B. Gharehpetian, "Improving LVRT capability of microgrid by using bridge-type fault current Limiter", *Electric Power Systems Research*, vol. 191, Article Number: 106872, Feb. 2021 (doi: 10.1016/j.epsr.2020.106872).

- [14] A. Sabir, S. Ibrir, "A robust control scheme for grid-connected photovoltaic converters with low-voltage ride-through ability without phase-locked loop", *ISA Transactions*, vol. 96, pp. 287-298, Jan. 2020 (doi: 10.1016/J.ISATRA.2019.05.027)
- [15] H. Wen, M. Fazeli, "A low-voltage ride-through strategy using mixed potential function for three-phase grid-connected PV systems", *Electric Power Systems Research*, vol. 73, pp. 271-280, Aug. 2019 (doi: 10.1016/j.epsr.2019.04.039).
- [16] H. Mei, Ch. Jia, J. Fu, X. Luan, "Low voltage ride through control strategy for MMC photovoltaic system based on model predictive control", *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 125, Article Number: 106530, Feb. 2021 (doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106530).
- [17] E. Afshari, B. Farhangi, F. Blaabjerg, "Control strategy for three-phase grid connected pv inverters enabling current limitation under unbalanced faults", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 11, pp. 8908-8919, July 2017 (doi: 10.3390/EN.2.17.11092285).
- [18] A. C. Luna, N. L. Diaz, M. Graells, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, "Mixed-integer-linear-programming-based energy management system for hybrid pv-wind-battery microgrids: modeling, design, and experimental verification", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 32, no. 4, pp. 2769-2783, April 2017 (doi: 10.1109/JE-STPE.2017.2786588).

زیر نویس‌ها

---

1. Microgrid
2. Low voltage ride through
3. Photovoltaics
4. Maximum power point tracing
5. Non-maximum power point tracing
6. New nominal power
7. Fuzzy inference system
8. Grid scheduled power value
9. State of charge
10. Incremental value for renewable energy system
11. Total harmonic distortion