

Investigation of the Effect of Wind Power Plant Control Modes on the Phenomenon of Fault-Induced Delayed Voltage Recovery(FIDVR)

Mohammad Hajzaman¹, Master Student, Farid Karbalaei², Associate Professor

1- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

2- Faculty of Electrical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran

E-mails: mohammadhajzaman@sru.ac.ir; f_karbalaei@sru.ac.ir;

Short Abstract

In areas where the motor load is the predominant load, when the short circuit occurs, the speed of the motors decreases and their power reactive consumption increases, which causes some delays in voltage recovery after fault clearance. This delay can cause operation of protection systems and load shedding. Fault-Induced Delayed Voltage Recovery is a phenomenon in which the voltage level does not reach the pre-fault value immediately after the fault is cleared. If the Voltage recovery delay is significant, the wind power plant will be disconnected from the power system, which causes other problems in the power system. The purpose of this paper is to evaluate the effect of different wind power plant controls on voltage recovery delay. Wind power plant modeling is based on IEC61400-27-1 standard. Also in this paper the effect of location of wind power plant and the ability to Low Voltage Rid Through of wind power plant is considered. All the simulations are performed in DIgSILENT PowerFactory 2021 software.

Keywords

Motor load, Short circuit, Control modes, Wind power plant, Low Voltage Rid Through

1- Short Introduction (4-5 lines)

The increasing use of wind power plant in the power system has caused the power system to face new challenges. One of these challenges is the Low Voltage Rid Through of wind power plant. The purpose of this paper is to investigate the effect of voltage recovery delay on wind power plant and the effect of Low Voltage Rid Through of wind power plant on this phenomenon. The effect of delay in voltage recovery on the wind power plant causes the wind power plant to be disconnected from the system by protection relays and consequently the power system faces more serious problems.

2- Proposed Work and Methodology (including comprision, simulation/experimental results and discusion)

With the increase in wind power plant penetration in the power sysytem, the IEC standard provided guidelines for simulating different types of wind power plant. Simulation of all control blocks of wind power plant has been done according to IEC standard and in DSL environment of DIgSILENT Power Factory software.

3- Conclusion (4-5 lines)

The presence of a wind power plant in power system when its LVRT feature is active has reduced the voltage recovery time. On the other hand, when the LVRT feature of wind power plant is deactivated, the dealy in voltage recovery may cause the protection relays of the wind power plants to operate and these plants to be disconnected. The location of wind power plants in the load centers causes that the voltage recovery time to be reduced compared to the case where the wind power plant is far from load centers.

4- References (2-3 references)

[1] Wind Turbines-part 27-1 Electrical Simulation Modelds-wind Turbines, IEC Standards 61400-27 ed. 1, 2015.

[2] D. Xie, Z. Xu, L. Yang, J. Østergaard, Y. Xue, and K. P. Wong, "A Comperhensive LVRT Control Strategy for DFIG Wind Turbines with Enhanced Reactive Power Support," IEEE Transaction in Power Systems, vol. 28, pp. 3302-3310, August 2013.

بررسی تأثیر مدهای کنترلی نیروگاه بادی بر روی پدیده تأخیر در بازیابی ولتاژ به سبب وقوع خطا

محمد حاج‌زمان

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید رجایی، تهران، ایران

فرید کربلایی

دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید رجایی، تهران، ایران

چکیده

در مناطقی که بار موتوری، بار غالب آن مناطق است در هنگام وقوع اتصال کوتاه به سبب کاهش ولتاژ، سرعت موتورهای کاهش یافته و توان راکتیو مصرفی آنها افزایش می‌یابد، این موضوع باعث می‌شود که پس از رفع اتصال کوتاه بازیابی ولتاژ با تأخیر همراه باشد. این تأخیر می‌تواند سبب عملکرد سیستم‌های حفاظتی و قطع بار شود. تأخیر در بازیابی ولتاژ به سبب وقوع خطا پدیده‌ای است که در آن سطح ولتاژ پس از رفع خطا بلافاصله به مقدار قبل از خطا نرسیده و با تأخیر همراه است. اگر تأخیر در بازیابی ولتاژ مدت‌زمان قابل توجهی طول بکشد نیروگاه بادی از سیستم قدرت جدا شده و همین امر سبب مشکلات دیگری در سیستم قدرت می‌شود. هدف از این مقاله ارزیابی اثر کنترل‌های مختلف نیروگاه بادی بر روی تأخیر در بازیابی ولتاژ است. مدل‌سازی نیروگاه بادی بر اساس استاندارد IEC61400-27-1 صورت گرفته است. در این مقاله همچنین اثر مکان نیروگاه بادی و قابلیت گذر از ولتاژ پایین این نیروگاه نیز در نظر گرفته شده است. تمام شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار دیگسایلنت پاور فکتوری ۲۰۲۱ انجام شده است.

کلمات کلیدی

بارموتوری، اتصال کوتاه، مدهای کنترلی، نیروگاه بادی، قابلیت گذر از ولتاژ پایین.

نام نویسنده مسئول: دکتر فرید کربلایی

ایمیل نویسنده مسئول: f_karbalaee@sru.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۰۱

تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۱/۰۵/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۲۹

۱- مقدمه

بازیابی ولتاژ به این علت است که وقتی خطا در سیستم قدرت رخ می‌دهد به سبب کاهش شدید ولتاژ شین‌های سیستم، سرعت موتورهای کاهش می‌یابد. کاهش سرعت موجب افزایش مصرف توان راکتیو می‌شود. بعد از رفع خطا، سرعت موتورهای به سبب اینرسی آنها بلافاصله به مقدار قبلی بر نمی‌گردد. این موضوع سبب می‌شود که بعد از رفع خطا، توان راکتیو دریافتی موتورهای بیشتر از مقدار قبل از خطا شود. افزایش توان راکتیو مصرفی موتورهای موجب کاهش ولتاژ موتورهای و تأخیر در بازیابی سرعت آنها و به تبع آن تأخیر در بازیابی ولتاژ می‌شود.

افزایش بارهای موتوری در سیستم قدرت سبب شده است که مسئله تأخیر در بازیابی ولتاژ (FIDVR) به یک امر مهم و نگران‌کننده تبدیل شود. امروزه درصد بارهای موتوری در سیستم قدرت به مقدار ۷۰٪ رسیده است در حالی که در گذشته این مقدار ۲۵٪ بوده است [۱]. تأخیر در بازیابی ولتاژ، پدیده‌ای است که در آن پس از وقوع خطا در سیستم قدرت و رفع خطا، بلافاصله ولتاژ به مقدار قبل از خطا نرسیده و بازیابی ولتاژ با تأخیر همراه است. این تأخیر در

محدودیت ولتاژ کمینه می‌شود تا توان راکتیو بهینه مولدهای پراکنده یافته شود. در صورت عدم موفقیت مرحله اول برای تنظیم ولتاژ در محدوده مجاز، در مرحله دوم موقعیت تپ ترانسفورماتور تپ چنجری به‌طور بهینه تغییر می‌کند. راهکار پیشنهادی به‌وسیله تغییرات ناگهانی در وضعیت بار و سطح تولید توان اکتیو مولدهای پراکنده ارزیابی می‌شود. در [۱۲] یک مدل فضای حالت جدید با در نظر گرفتن عدم قطعیت در معادلات حالت برای DFIG ارائه می‌گردد. سپس، یک روش کنترل مستقیم توان اکتیو و راکتیو در نیروگاه‌های بادی مجهز به DFIG به کار گرفته می‌شود. استراتژی کنترل مستقیم توان، یک روش کنترلی مد لغزشی غیرخطی را برای محاسبه مستقیم ولتاژ کنترلی مورد نیاز روتور جهت از بین بردن خطاهای لحظه‌ای توان‌های اکتیو و راکتیو به کار می‌گیرد. بنابراین هیچ حلقه کنترل جریان اضافی مورد نیاز نیست، که این امر باعث تسهیل طراحی و افزایش عملکرد گذرای سیستم می‌شود.

در این مقاله هدف ما بررسی تأثیر مدهای کنترلی نیروگاه‌های بادی بر روی پدیده FIDVR است که در پژوهش‌های انجام شده کمتر به آن پرداخته شده است. وقوع پدیده FIDVR می‌تواند موجب خروج نیروگاه‌های بادی از سیستم قدرت شود، به این منظور بهره‌برداران شبکه ناگزیر به حذف بار هستند تا این نیروگاه‌ها از دست نروند زیرا خروج این نیروگاه‌ها وضعیت را بدتر می‌کند. مدهای کنترلی مختلف نیروگاه‌های بادی علاوه بر اینکه بر روی خروج یا عدم خروج این نیروگاه‌ها در هنگام وقوع پدیده FIDVR تأثیر می‌گذارند می‌توانند بر روی زمان بازیابی ولتاژ نیز مؤثر باشند. همچنین تأثیر مکان نیروگاه‌های بادی بر روی این پدیده نیز بررسی می‌شود. به این منظور یک بار نیروگاه بادی در نزدیکی مراکز بار و بار دیگر دور از مراکز بار قرار داده می‌شود.

بخش‌های مختلف مقاله به‌صورت زیر طبقه‌بندی می‌گردد: در بخش ۲ به مدل‌سازی بارهای موجود در شبکه پرداخته می‌شود. بخش ۳ به مدل‌سازی نیروگاه بادی بر اساس استاندارد IEC می‌پردازد. در این بخش بلوک‌های کنترلی نیروگاه بادی و همچنین خاصیت گذر از ولتاژ پایین توضیح داده می‌شود. در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی بر روی یک شبکه نمونه آورده شده است. این شبکه در نرم‌افزار دیگسایلنت پاورفکتوری ۲۰۲۱ شبیه‌سازی شده است. در بخش ۵ نیز جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه می‌شود. توجه شود تمام شبیه‌سازی بلوک‌های کنترلی در محیط سیمولینک نرم‌افزار پاورفکتوری ۲۰۲۱ (DSL^۲) شبیه‌سازی شده است. در جدول ۱ پژوهش‌های انجام شده در زمینه مطالعه FIDVR به همراه شماره مرجع آورده شده است. در این جدول همچنین به نوآوری‌های انجام شده در این مقاله اشاره شده است. در واقع در پژوهش‌های انجام شده تأثیر نیروگاه بادی بر روی پدیده FIDVR بررسی نشده است لذا در این مقاله سعی شده تأخیر در بازیابی ولتاژ در حضور نیروگاه بادی با قابلیت گذر از ولتاژ پایین این نوع نیروگاه بررسی شود

جدول ۱: مقایسه نوآوری‌ها

شماره مرجع مورد نظر	پژوهش انجام شده
[۴]	مدل‌سازی بار
[۵]	تأثیر کلید بازبست خودکار
[۶] و [۷]	الگوریتم حذف بار
[۸]	پیش‌بینی زمان بازیابی ولتاژ
[۹]	تعیین شدت پدیده FIDVR
بررسی آن در این مقاله انجام شده است.	مطالعه پدیده FIDVR در حضور منابع تجدید پذیر (نیروگاه بادی) با قابلیت گذر از ولتاژ پایین

این تأخیر ناخواسته در بازیابی ولتاژ، سبب عملکرد سیستم‌های حفاظتی و حذف بار گسترده می‌شود [۲]. به‌عنوان مثال در سال ۲۰۰۳ در آریزونا آمریکا وقوع پدیده FIDVR باعث شد ۱۰۰ MW بار از سیستم قطع شود [۳]. در کشور ایران نیز در سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۸ به ترتیب در استان‌های کرمان و سیستان و بلوچستان این پدیده به وقوع پیوست به طوری که در استان کرمان ۷۰ MW بار از سیستم قدرت قطع شد [۴].

در پدیده FIDVR عواملی همچون نوع خطا، (سه فاز، دوفاز و تکفاز)، مکان خطا، زمان رفع خطا و همچنین وجود تجهیزات جبران‌ساز توان راکتیو اثرگذاری قابل توجهی دارند. به‌عنوان مثال هرچه افت ولتاژ ناشی از خطا در سیستم قدرت بیشتر باشد تأخیر در بازیابی ولتاژ بیشتر خواهد بود زیرا احتمال اینکه موتورهای در این حالت کاهش سرعت پیدا کنند بیشتر خواهد بود. هرچه درصد بارهای موتورهای موجود در سیستم بیشتر باشد نیز احتمال وقوع این پدیده بیشتر می‌شود زیرا عامل اصلی رخداد این پدیده وجود بارهای موتورهای زیاد در سیستم قدرت است. طول مدت زمان رفع خطا نیز از عوامل مهمی است که باید به آن توجه شود زیرا هرچه خطا از شبکه دیرتر پاک شود احتمال اینکه این پدیده رخ دهد افزایش می‌یابد. به‌طور خلاصه عوامل مؤثر در پدیده FIDVR را می‌توان به‌صورت زیر جمع‌بندی کرد:

- نوع خطا
- محل وقوع خطا
- مدت زمان رفع خطا
- سهم کل بارهای موتورهای از کل بار شبکه

تاکنون پژوهش‌های مختلفی برای مطالعه پدیده FIDVR انجام شده است، به‌عنوان مثال در [۴] به مدل‌سازی بارهای موتورهای می‌پردازد به طوری که هنگام وقوع رخداد پدیده FIDVR رفتار دقیقی از بارهای موتورهای ارائه کند. مدل‌سازی ارائه‌شده در این مرجع بر اساس نتایج آزمایشگاهی ارائه‌شده است و لذا از دقت قابل قبولی برای مطالعه این پدیده برخوردار است، در [۵] به بررسی تأثیر کلیدهای بازبست خودکار^۲ بر روی پدیده FIDVR می‌پردازد. نشان داده شده که عملکرد این کلیدها می‌تواند زمان بازیابی ولتاژ را افزایش دهد. یکی از روش‌های کاهش زمان بازیابی ولتاژ، اعمال حذف بار است. در [۶-۷] به موضوع افزایش سرعت بازیابی ولتاژ با حداقل حذف بار پرداخته می‌شود. مرجع [۸] به پیش‌بینی زمان بازیابی ولتاژ با استفاده از الگوریتم‌های احتمالاتی می‌پردازد. با تخمین زمان بازیابی ولتاژ می‌توان مواردی که تأخیر زیاد در بازیابی سبب قطع گسترده بارها و احتمالاً مولدها می‌شود را به‌سرعت و قبل از وقوع آن تشخیص داد و اقدامات اصلاح‌کننده مناسب را اعمال کرد. در [۹] به محاسبه شاخص‌های دینامیکی ولتاژ برای تعیین میزان شدت پدیده FIDVR پرداخته می‌شود. محاسبه شاخص‌های دینامیکی در شش مرحله انجام می‌شود و خروجی آن تعیین شین‌هایی است که پدیده FIDVR در آن شین‌ها رخ می‌دهد. گاهی اوقات هنگام وقوع پدیده FIDVR در یک فیدر، رله‌های جریان زیاد فیدرهای سالم نیز به‌اشتباه عملکرد دارند. در مرجع [۱۰] یک روش جدید برای عدم عملکرد رله‌های جریان زیاد در فیدرهای سالم پیشنهاد شده است. در روش ارائه‌شده رله جریان زیاد قابلیت تشخیص پدیده FIDVR را داشته و هنگامی که این پدیده را تشخیص داد رله را قفل می‌کند. در [۱۱] یک راهکار بهینه و هماهنگ برای تنظیم برخط ولتاژ شبکه‌های هوشمند که دارای ترانسفورماتور تپ چنجری و منابع تولید پراکنده انرژی هستند، تبیین شده است. راهکار پیشنهادی نقاط کار توان راکتیو مولدهای پراکنده و همچنین موقعیت تپ ترانسفورماتور تپ چنجری را به‌صورت سلسله مراتبی تعیین می‌کند. در مرحله اول، با اجرای روش زیرگردان توزیع‌شده تابع تلفات توان با توجه به قیود

^۲ DIgSILENT Simulation Language

^۲ AutoRecloser

۲- مدل سازی بار

مدل سازی بار یکی از موارد مهم و دشوار برای مطالعات سیستم قدرت می باشد، چراکه تنوع بارها در سیستم قدرت بسیار زیاد است. در مدل سازی بار قسمت اصلی مسئله تشخیص این نکته است که بار مورد نظر شامل چه نوع مصرف کننده هایی است. معمولاً مدل های بار به دو بخش عمده مدل های استاتیکی و مدل های دینامیکی تقسیم بندی می شوند.

مدل استاتیکی بیانگر مشخصه حالت ماندگار بار است که به وسیله روابط جبری، ارتباط بین توان های اکتیو و راکتیو مصرفی با اندازه ولتاژ و فرکانس را نشان می دهد. این مدل سازی به دو دسته نمایی^۴ و چند جمله ای^۵ تقسیم می شوند. در مدل نمایی، وابستگی توان های اکتیو و راکتیو به ولتاژ به صورت زیر است [۱۳].

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^a \quad (1)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^b$$

در روابط فوق V_0 مقدار ولتاژ در توان های P_0 و Q_0 می باشد. پارامترهای این مدل a و b هستند. اگر این مؤلفه ها به ترتیب صفر، یک و یا دو باشند، مدل نمایش داده شده، به ترتیب نشان دهنده مشخصه های بار توان ثابت، جریان ثابت و امپدانس ثابت خواهد بود. در بارهای ترکیبی، مقادیر آنها به مشخصات اجزای تشکیل دهنده بار بستگی دارد. در [۱۴] خلاصه ای از داده های موجود در خصوص وابستگی بار به ولتاژ که در مقالات و تحقیقات وجود دارد بیان می شود. در [۱۵-۱۶] نتایج اندازه گیری شده درباره وابستگی مشخصه بار به روز، فصل یا دما بیان شده است. در صورتی که هیچ داده ای وجود نداشته باشد معمول ترین روش آن است که بار توان حقیقی به صورت جریان ثابت ($a=1$) و بار توان راکتیو به صورت امپدانس ثابت ($b=2$) مدل شوند [۱].

روش دیگر برای نمایش وابستگی ولتاژ به بار به صورت زیر است

$$P = P_0 \left[P_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + P_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^1 + P_3 \right] \quad (2)$$

$$Q = Q_0 \left[Q_1 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + Q_2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^1 + Q_3 \right]$$

این مدل به ZIP موسوم است زیرا از مؤلفه های امپدانس ثابت (Z)، جریان ثابت (I) و توان ثابت (P) تشکیل شده است. پارامترهای P_1 ، P_2 تا Q_3 سهم هر جزء را نمایش می دهند.

عکس العمل بعضی از بارها نسبت به ولتاژ و فرکانس سریع است و به سرعت به حالت ماندگار می رسند. این موضوع حداقل برای زمانی که دامنه تغییرات و یا فرکانس کم است صحیح می باشد. در چنین حالتی، استفاده از مدل استاتیکی مناسب است. اما در تعدادی از بارها، تغییر حالت ماندگار توان مصرفی به ازای تغییر ولتاژ، پس از طی یک دوره گذرا انجام می شود. موتورهای القایی جزء این دسته از بارها هستند که تحلیل آنها نیازمند مدل سازی دینامیکی و به کارگیری معادلات دیفرانسیلی می باشد. این معادلات بسته به اینکه شار استاتور در نظر گرفته شود یا خیر می توانند مرتبه ۳ یا ۵ باشند [۱۷]. موتورها معمولاً درصد قابل توجهی از انرژی کل سیستم قدرت را مصرف می کنند، در مطالعات سیستم قدرت معمولاً اثر تجمعی موتورهای القایی در نظر گرفته می شود [۱۸].

در سیستم مورد مطالعه در این مقاله، بارهای در نظر گرفته شده شامل بارهای موتوری و امپدانس ثابت است. با توجه به این نکته که عامل اصلی

پدیده FIDVR برهای موتوری می باشد، نسبت تعیین شده برای هریک از این بارها ۷۰٪ بار موتوری و ۳۰٪ بار امپدانس ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین مشخصه بار مکانیکی موتور القایی به صورت گشتاور ثابت فرض شده است که بدترین حالت برای وقوع پدیده FIDVR است.

۳- مدل سازی نیروگاه بادی

انرژی باد یکی از انواع اصلی انرژی تجدید پذیر است که از دیرباز ذهن بشر را به خود معطوف کرده است، به طوری که انسان همواره به فکر استفاده از این انرژی در صنعت برق بوده است. بر اساس پژوهش ها، حدود یک تا دو درصد از انرژی تابشی خورشید زمانی که به زمین می رسد به صورت باد تبدیل به انرژی جنبشی می شود [۱۹]. استفاده از نیروگاه بادی برخلاف نیروگاه فسیلی هیچ گونه انتشار آلاینده ای به همراه ندارد. از طرفی منبع انرژی باد در بسیاری از کشورهای جهان در دسترس بوده و برخلاف منابع نفت و گاز در انحصار چند کشور محدود نیست. در کنار مزیت های فوق استفاده از انرژی باد با چالش هایی نیز مواجه است. مهم ترین چالش استفاده از نیروگاه بادی این است که وزش باد دائمی نیست و در بسیاری از مواقع مورد نیاز، ممکن است انرژی باد در دسترس نباشد. به لحاظ اقتصادی نیز بسته به سرعت باد در یک منطقه، یک مزرعه بادی ممکن است با منبع سوخت فسیلی قابل رقابت نباشد.

در صدر جدول فهرست کشورهای تولیدکننده انرژی الکتریکی از باد، کشورهای چین، آمریکا، آلمان، اسپانیا و هند به ترتیب با ظرفیت نصب شده ۹۸ هزار مگاوات، ۶۲ هزار مگاوات، ۳۶ هزار مگاوات، ۲۳ هزار مگاوات، و ۲۱ هزار مگاوات قرار دارند [۲۰]. در جدول ۱ به ترتیب اسامی کشورها نمایش داده شده است. با توجه به افزایش ضریب نفوذ نیروگاه های بادی در سیستم قدرت، لازم است مطالعات جامعی بر روی تأثیر این نیروگاه ها بر روی سیستم انجام پذیرد.

جدول ۱: بیشترین ظرفیت نصب شده نیروگاه بادی در کشورهای جهان

کشور	ظرفیت نصب شده
چین	۹۸ هزار مگاوات
آمریکا	۶۲ هزار مگاوات
آلمان	۳۶ هزار مگاوات
اسپانیا	۲۳ هزار مگاوات
هند	۲۱ هزار مگاوات

۳-۱- انواع مختلف نیروگاه های بادی

اجزای اصلی تشکیل دهنده نیروگاه بادی شامل روتور، جعبه دنده، مولد و سیستم های کنترلی می باشد. توربین های بادی را می توان به ۴ نوع زیر دسته بندی کرد:

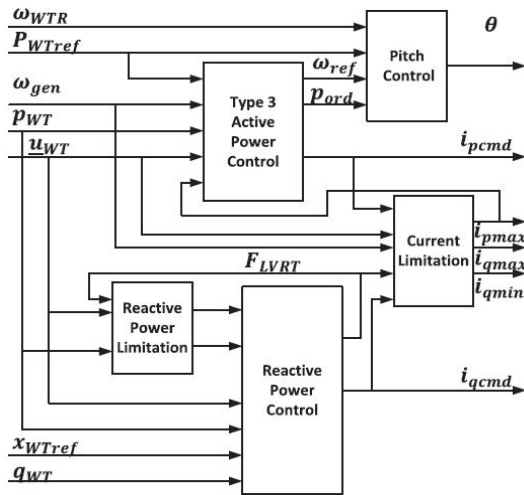
- ۱- توربین بادی نوع ۱: این نوع توربین بادی از مولد آسنکرون تشکیل شده است که مستقیماً به شبکه متصل است و مقاومت روتور آن ثابت است.
- ۲- توربین بادی نوع ۲: این نوع توربین بادی از مولد آسنکرون تشکیل شده است و مستقیماً به شبکه متصل است و مقاومت روتور آن متغیر است.
- ۳- توربین بادی نوع ۳: این نوع توربین بادی از مولد آسنکرون تشکیل شده است و به توربین بادی دو سو تغذیه^۶ شهرت دارد. استاتور این نوع توربین بادی مستقیماً به شبکه متصل است و روتور آن از طریق یک مبدل الکترونیک قدرت به شبکه متصل می شود.
- ۴- توربین بادی نوع ۴: این نوع توربین بادی به طور کامل از طریق مبدل به شبکه متصل است. بنابراین توان مبدل باید برابر توان مولد باشد.

^۶ Doubly-fed Induction Generator

^۴ Exponential

^۵ Polynomial

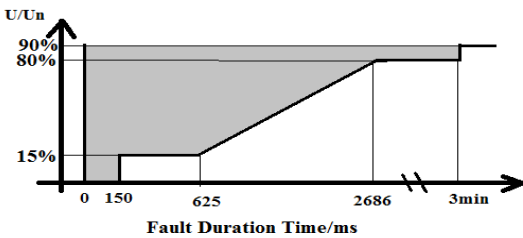
ولتاژ حفاظت می‌کنند.



شکل ۲: بلوک کنترلی نیروگاه بادی نوع سوم [۲۲]

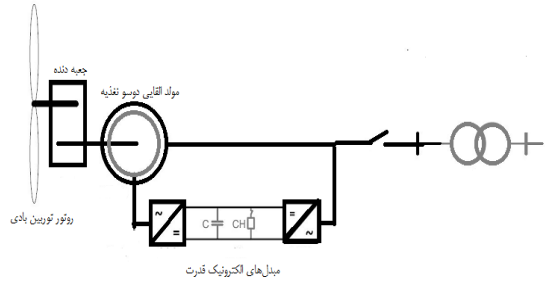
۳-۳- کنترل کننده توان راکتیو

بلوک کنترل کننده توان راکتیو نقشی بسیار کلیدی را در قابلیت گذر از ولتاژ پایین^۷ (LVRT) ایفا می‌کند. گذر از ولتاژ پایین قابلیت است که به وسیله آن نیروگاه بادی در حین افت ولتاژ به سیستم قدرت متصل می‌ماند [۲۳]. قابلیت LVRT برای نیروگاه‌های بادی که دارای ضریب نفوذ بالایی در سیستم قدرت هستند از اهمیت زیادی برخوردار است. زیرا هرگونه قطع این نیروگاه‌ها سبب می‌شود که شبکه با مشکلات جدی‌تری مواجه شود. چگونگی قطع یا وصل نیروگاه بادی در حین خطا بر اساس ضوابط شبکه و توسط بهره‌برداران شبکه مشخص می‌شود. یک نمونه از این ضوابط در شکل ۳ نشان داده شده است. تا وقتی که نقطه کار در ناحیه هاشور خورده قرار دارد، نیروگاه باید در مدار باقی بماند.



شکل ۳: نمودار قابلیت گذر از ولتاژ پایین [۲۳]

استفاده از توربین‌های بادی نوع سوم به سرعت در حال گسترش است به گونه‌ای که بیشترین سهم بازار توربین‌های بادی در سال‌های اخیر را به خود اختصاص داده است [۲۱] لذا با توجه به افزایش استفاده از این نوع توربین بادی، برای شبیه‌سازی نیز توربین بادی نوع سوم در نظر گرفته شده است. شکل ۱ نحوه اتصال این نوع توربین را به شبکه نمایش می‌دهد.



شکل ۱: نحوه اتصال توربین بادی نوع سوم به شبکه

۳-۳-۲- مدل کنترلی پیاده‌سازی شده بر روی نیروگاه بادی بر اساس

استاندارد IEC

با توجه به افزایش ضریب نفوذ نیروگاه‌های بادی در سیستم قدرت، استاندارد IEC61400-27-1 دستورالعملی برای شبیه‌سازی نیروگاه‌های بادی بر اساس نوع نیروگاه بادی (تقسیم‌بندی‌های چهارگانه) تدوین کرده است. مدل ارائه شده برای توربین بادی نوع ۳ در شکل ۲ نشان داده شده است. این مدل شامل کنترل کننده توان‌های اکتیو و راکتیو (کنترل کننده حلقه خارجی) و کنترل کننده‌های مربوط به جریان (کنترل کننده حلقه داخلی) می‌باشد [۲۲]. همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده مجموعه بلوک کنترلی نیروگاه بادی شامل هفت سیگنال ورودی است. این سیگنال‌ها عبارت‌اند از: سرعت روتور توربین بادی (ω_{WTR})، سرعت روتور مولد (ω_{gen})، مقدار مرجع توان اکتیو نیروگاه بادی (P_{WTref})، توان اکتیو تولیدی نیروگاه بادی (P_{WT})، ولتاژ شین متصل به نیروگاه بادی (U_{WT})، توان راکتیو تولیدی نیروگاه بادی (q_{WT})، و مقدار مرجع توان راکتیو نیروگاه بادی (X_{WTref}). هم‌چنین خروجی‌های این مجموعه کنترلی شامل شش سیگنال است که این سیگنال‌ها نیز عبارت‌اند از: کنترل زاویه پره‌های توربین بادی (θ)، جریان اکتیو مرجع مولد (i_{pcmd})، بیشترین جریان اکتیو تولید شده توسط مولد (i_{pmax})، جریان راکتیو مرجع مولد (i_{qcmd}) و بیشترین و کم‌ترین جریان راکتیو تولید شده توسط مولد (i_{qmin} و i_{qmax}). محدودیت‌های مربوط به تولید توان‌های اکتیو و راکتیو در بلوک کنترلی Current Limitation مدل‌سازی شده است. در مطالعه پدیده FIDVR بلوک کنترل توان راکتیو نقشی اساسی را ایفا می‌کند که در قسمت‌های بعدی جزئیات این بلوک کنترلی بیان خواهد شد.

حفاظت الکتریکی از سیستم قدرتی که نیروگاه بادی به آن متصل است شامل دو بخش است. بخش اول، حفاظت از توربین در مقابل ایجاد اتصال کوتاه و تولید بالاتر از حد مجاز که باعث داغ کردن آن می‌شود و هم‌چنین اجتناب از خطاهایی مانند جابه‌جایی سیستم زمین یا خنثی که منجر به اضافه ولتاژهای بالا و خطرناک می‌شود است. بخش دوم حفاظت از شبکه و اجزای آن است به نحوی که سیستم در هر شرایطی کار کند. این جنبه از حفاظت در بعضی از موارد منجر به قطع توربین از مدار می‌گردد تا به مصرف‌کننده‌ها آسیبی نرسد. برای حفاظت نیروگاه بادی در برابر اغتشاشات سیستم قدرت بر اساس توصیه استاندارد IEC از رله‌های ولتاژی و رله‌های فرکانسی استفاده می‌شود. این نوع رله‌ها از نیروگاه بادی در برابر افزایش و یا کاهش فرکانس و افزایش یا کاهش

^۷ Low Voltage Rid Through

موازی با خازن لینک DC متصل می‌شوند و در شرایط غیرعادی نمی‌گذارند که ولتاژ و جریان از محدوده طبیعی فراتر برود.

بلوک دیگرام کنترل توان راکتیو در شکل ۴ نشان داده شده است. این بلوک دیگرام در دو حالت عادی و خطا عملکردی جداگانه ایجاد می‌کند. در حالت عادی پنج مد بهره‌برداری برای نیروگاه بادی در نظر گرفته شده است. این پنج مد عبارتند از: کنترل ولتاژ، کنترل توان راکتیو، کنترل توان راکتیو حلقه باز، کنترل ضریب توان و کنترل ضریب توان حلقه باز است.

هنگامی که خطایی در شبکه رخ می‌دهد بلوک‌های کنترلی نیروگاه بادی خطا را تشخیص داده و حالت LVRT آن فعال می‌شود. در این حالت بر اساس استاندارد IEC61400-27-1 سه مد مختلف برای حالت LVRT در نظر گرفته می‌شود. در مد صفر (LVRT=0)، جریان راکتیو تزریقی تنها وابسته به ولتاژ خروجی است. هرچه ولتاژ پایین‌تر باشد، توان راکتیو بیشتری برای بازیابی ولتاژ تزریق می‌شود. در مد یک (LVRT=1)، جریان راکتیو تزریقی علاوه بر ولتاژ به حالت کنترلی قبل از خطا نیز وابسته است. مد دوم (LVRT=2) نیز مانند مد اول است منتهی علاوه بر آن، امکان تزریق یک توان راکتیو اضافی برای رسیدن به وضعیت موردنظر نیز وجود دارد.

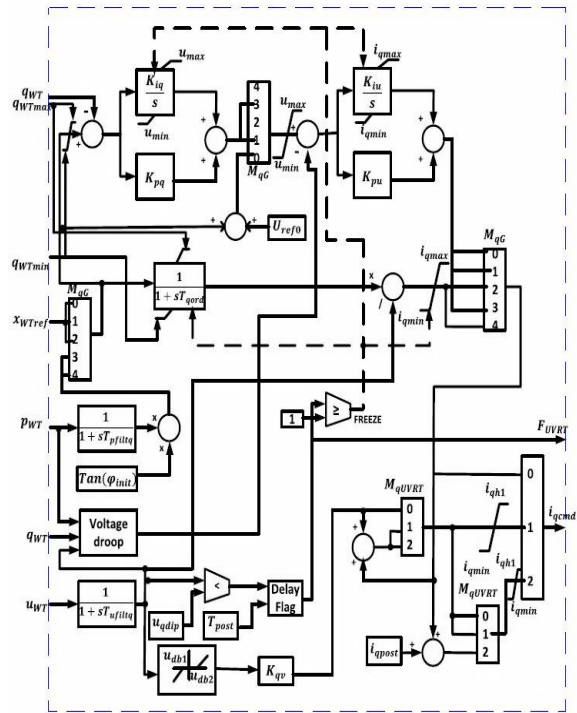
در بلوک کنترلی شکل ۴، ابتدا ولتاژ شین متصل به نیروگاه بادی (U_{WT}) با یک مقدار معلوم و مشخص به نام U_{dip} مقایسه می‌شود، اگر مقدار U_{WT} از U_{dip} کمتر باشد بلوک کنترلی Delay Flag فعال شده و خطا را در سیستم تشخیص می‌دهد. اگر خروجی بلوک کنترلی Delay Flag صفر باشد بدین معنی است که خطایی در سیستم رخ نداده است، یعنی U_{WT} از U_{dip} بیشتر است.

۴- شبیه‌سازی

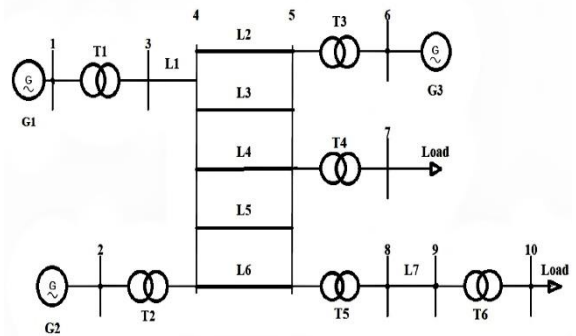
به‌منظور بررسی پدیده FIDVR و تأثیر نیروگاه بادی بر روی آن از شبکه نمونه شکل ۵ استفاده شده است. این شبکه در نرم‌افزار دیگسایلنت پاورفکتوری شبیه‌سازی شده است. همان‌طور که در قسمت‌های قبلی بدان اشاره شده عامل اصلی وقوع رخداد پدیده FIDVR بارهای موتوری هستند لذا بارهای عمده شین‌های ۷ و ۱۰ را به ترتیب بارهای موتوری تشکیل می‌دهند. بار موجود در شین ۷ شامل بارهای موتوری صنعتی است که مقدار ۲۵۰۰ MW با ضریب توان ۰/۸۹ در نظر گرفته شده است. علاوه بر بارهای موتوری، بارهای امپدانس ثابت نیز در این شین وجود دارد که ۳۰٪ از کل بار شین ۷ را شامل می‌شود. بار موجود در شین ۱۰ نیز شامل بارهای تجاری و خانگی است و مقدار این بار نیز ۲۵۰۰ MW با ضریب توان ۰/۸۳ در نظر گرفته شده است. نسبت بار قرار داده شده در این شین ۵۰٪ بار موتوری و ۵۰٪ بار امپدانس ثابت است. توجه شود که بارهای موتوری در شین ۷ نسبت به شین ۱۰ ثابت اینرسی بالاتری دارند.

۴-۱- شبیه‌سازی بدون در نظر گرفتن نیروگاه بادی

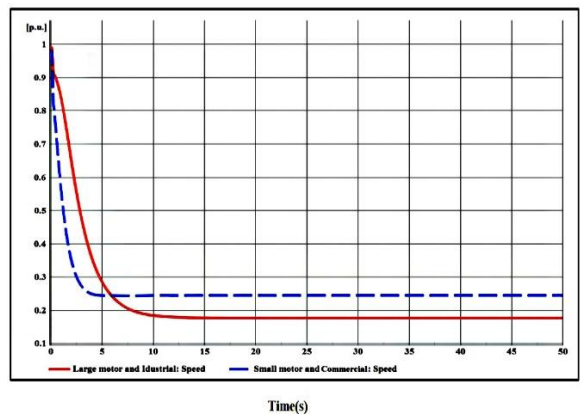
ابتدا در شبکه شبیه‌سازی شده هیچ نیروگاه بادی قرار داده نمی‌شود. یک اتصال کوتاه سه فاز به مدت ۱۰۰ میلی‌ثانیه بر روی شین ۷ قرار داده می‌شود. درصد بارهای موتوری نیز در شین ۷، ۷۰٪ و در شین ۱۰ نیز ۵۰٪ است. وقتی که اتصال کوتاه رخ می‌دهد به سبب کاهش ولتاژ، سرعت موتورهای القایی نیز کاهش می‌یابد که این موضوع در شکل ۶ نشان داده شده است. در این شکل پس از وقوع اتصال کوتاه سرعت موتورها کاهش یافته و پس از رفع اتصال کوتاه سرعت موتورها به حالت قبل از خطا نرسیده همین موضوع سبب شده که ولتاژ شین‌های ۷ و ۱۰ بازیابی نشده و به مقدار قبل از خطا نرسند شکل ۷ ولتاژ شین‌های ۷ و ۱۰ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است ولتاژ شین‌های ۷ و ۱۰ پس از رفع خطا بازیابی نشده است و به مقدار قبل از خطا نرسیده است. برای اینکه تأثیر درصد بارهای موتوری بر روی ولتاژ شین‌های ۷ و ۱۰ نشان داده شود، این بار، بارهای موتوری موجود در شین ۷ به مقدار ۶۰٪ تقلیل می‌یابد و مانند قبل یک اتصال کوتاه سه فاز به مدت ۱۰۰ میلی‌ثانیه بر روی شین ۷ قرار داده شده است. شکل ۸ ولتاژ شین‌های ۷ و ۱۰ را در این



شکل ۴: بلوک کنترل توان راکتیو نیروگاه بادی [۲۲]

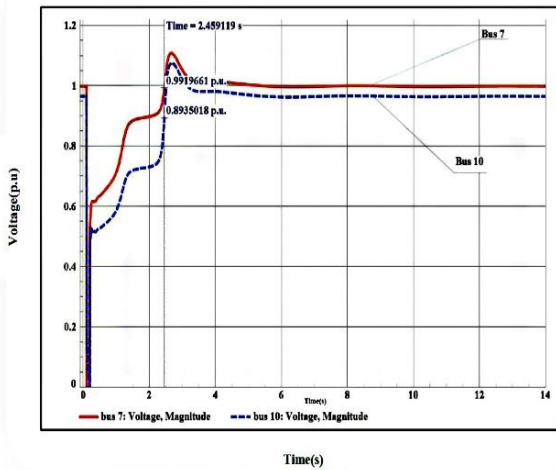


شکل ۵: شبکه مورد مطالعه در نرم‌افزار دیگسایلنت پاورفکتوری

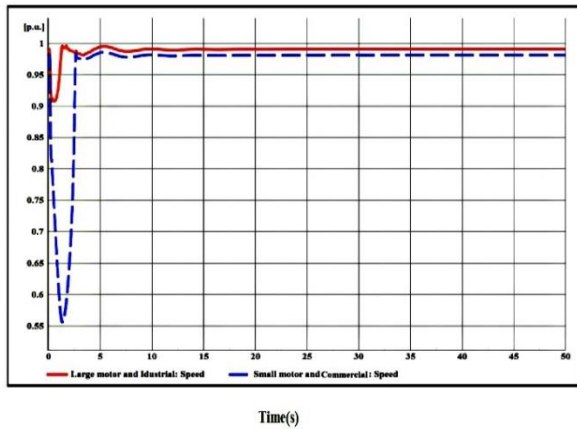


شکل ۶: سرعت موتورهای القایی قرار داده شده در شین‌های ۷ و ۱۰ در حالی که درصد بار موتوری در شین ۷، ۷۰٪ است

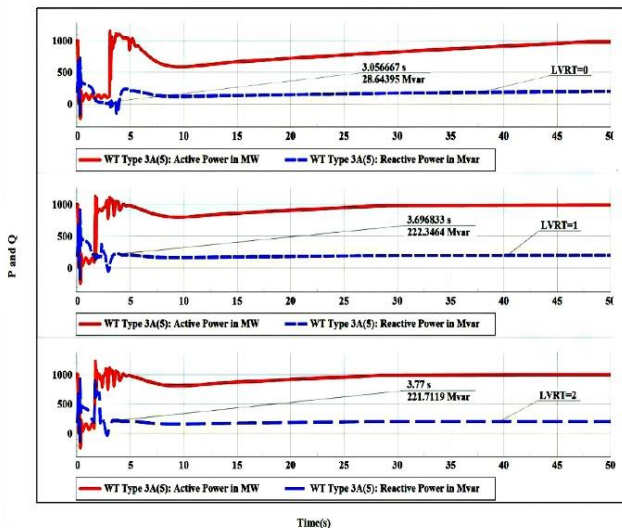
از انواع روش‌های پیاده‌سازی LVRT بر روی نیروگاه بادی می‌توان به روش کربار و چارهای DC اشاره کرد. روش کربار متداول‌ترین روش برای ایجاد قابلیت LVRT در نیروگاه بادی است. در روش کربار در طول افت ولتاژ، مدار روتور از شبکه قطع و مولد دو سو تغذیه مانند یک موتور القایی رفتار می‌کند. در چار DC، که به مقاومت ترمزی شناخته می‌شود، دو چار DC به صورت



شکل ۸: ولتاژ شین‌های ۷ و ۱۰ در حالتی که نیروگاه بادی در شبکه قرار ندارد و درصد بارهای موتوری موجود در شین ۷، ۶۰٪ است.



شکل ۹: سرعت موتورهای القایی وقتی که درصد بارهای موتوری شین ۷، ۶۰٪ است.



شکل ۱۰: توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی نیروگاه بادی در مدهای مختلف LVRT وقتی که نیروگاه بادی به شین ۷ متصل است

حالت و شکل ۹ سرعت موتورهای موجود در شین‌های ۷ و ۱۰ را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۸ پیداست در این حالت زمان بازیابی ولتاژ ۲/۴ ثانیه و سرعت هر یک از موتورها پس از طی یک حالت گذرا به مقادیر نامی خود رسیده‌اند.

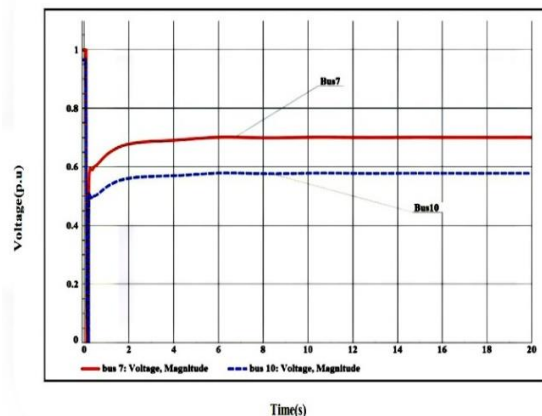
۲-۴- شبیه‌سازی با در نظر گرفتن نیروگاه بادی

در شبکه نمونه شکل ۵ دو مکان مختلف برای قرارگیری نیروگاه بادی انتخاب شده است. ابتدا نیروگاه بادی از طریق یک ترانسفورماتور به شین ۷ (شین نزدیک بار) و بار دیگر از طریق دو ترانسفورماتور سری به شین ۴ (دور از بار) وصل می‌شود. در این شبکه شین‌های ۷ و ۴ دارای سطوح ولتاژی ۱۱۵kV و ۵۰۰kV هستند. در هر دو حالت توان تولیدی نیروگاه بادی ۱۰۰۰ مگاوات است. انواع حالت‌های مختلف LVRT نیز بر روی نیروگاه بادی پیاده‌سازی شده است.

۳-۴- اتصال نیروگاه بادی به شین ۷

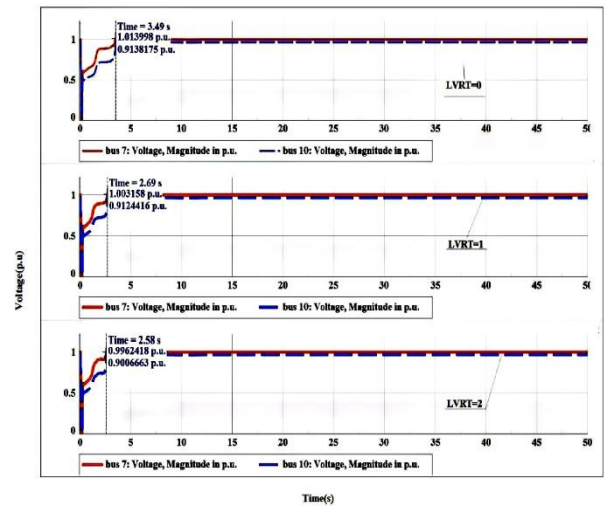
برای بررسی تأثیر نیروگاه بادی بر روی پدیده FIDVR، نیروگاه بادی به شین ۷ متصل شده است. نیروگاه بادی در مد کنترل توان راکتیو (مد PQ)، با توان اکتیو تولیدی ۱۰۰۰ مگاوات و ضریب توان ۰/۹۸ تنظیم شده است. مطابق قبل یک اتصال کوتاه سه فاز به مدت ۱۰۰ میلی‌ثانیه بر روی شین ۷ قرار داده می‌شود. نیروگاه بادی در سه مد LVRT=0، LVRT=1 و LVRT=2 شبیه‌سازی شده است. در حالت LVRT=0 جریان راکتیو تزریقی فقط بر اساس مقدار ولتاژ تزریق می‌شود. در حالت LVRT=1، جریان راکتیو تزریقی علاوه بر مقدار ولتاژ به نحوه کنترل قبل از خطا نیز بستگی دارد. در LVRT=2، علاوه بر مد ۱ (LVRT=1) امکان تزریق توان راکتیو اضافی تا رسیدن به ولتاژ مطلوب وجود دارد. شکل ۱۰ توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی نیروگاه بادی در حالت‌های مختلف LVRT را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ۱۰ مشاهده می‌شود در مدهای ۱ و ۲ توان راکتیو تولیدی بیشتر از مد صفر است. همین توان راکتیو اضافی باعث شده زمان بازیابی ولتاژ در مدهای ۱ و ۲ کوتاه‌تر از مد صفر شود. شکل ۱۱ نیز ولتاژ شین‌های ۷ و ۱۰ را در این حالت نشان می‌دهد.

در حالت بعدی خاصیت LVRT نیروگاه بادی غیرفعال می‌شود و شبیه‌سازی در این حالت انجام می‌شود. در این حالت نیز نیروگاه بادی در مد تولید توان راکتیو قرار دارد. با حذف خاصیت LVRT نیروگاه بادی، زمان بازیابی ولتاژ به سبب کاهش توان راکتیو تولیدی نیروگاه به ۴/۳ ثانیه افزایش می‌یابد. شکل ۱۲ توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی نیروگاه بادی در این حالت و شکل ۱۳ ولتاژ شین‌های ۷ و ۱۰ را نشان می‌دهد.

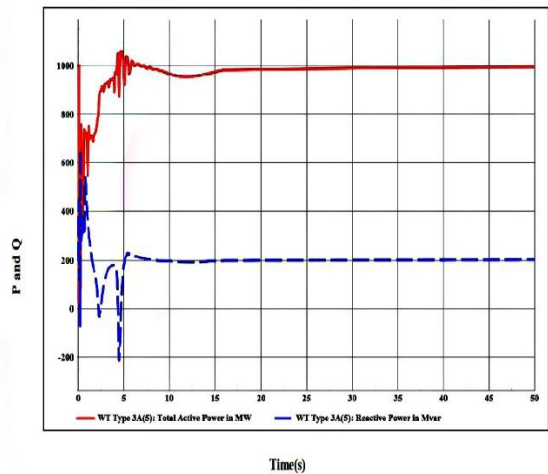
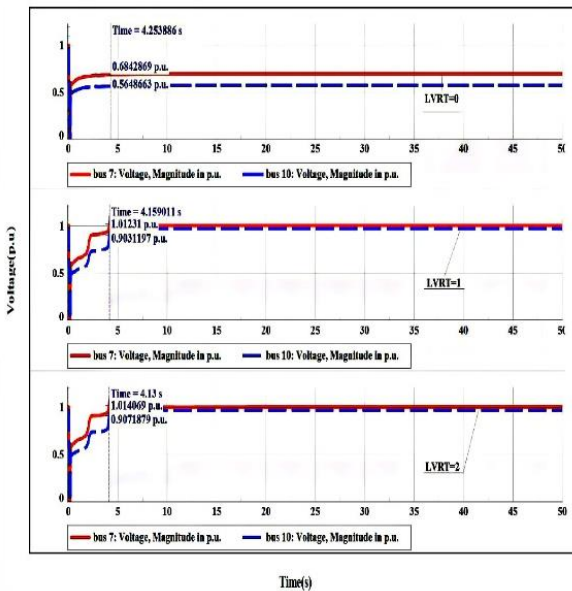


شکل ۱۱: ولتاژ شین‌های ۷ و ۱۰ در حالتی که نیروگاه بادی در شبکه قرار ندارد و درصد بارهای موتوری در شین ۷، ۷۰٪ است

به بارها منتقل می‌شوند. این موضوع سبب می‌شود که بخشی از این توان‌ها توسط امیدانس خطوط مصرف شود ضمن اینکه افت ولتاژ بیشتری بین نیروگاه بادی و موتورها ایجاد می‌شود. این عوامل زمان بازیابی ولتاژ را نسبت به حالتی که نیروگاه بادی در شین ۷ قرار داشت افزایش می‌دهند. شکل ۱۴ ولتاژ شین‌های ۷ و ۱۰ در این حالت را نشان می‌دهد. نکته مهمی که در شکل ۱۴ وجود دارد این است که در مد $LVRT=0$ ، به سبب تأخیر بیشتر در بازیابی سرعت موتورها و دوام بیشتر مصرف توان راکتیو، ولتاژ نیروگاه بادی کاهش می‌یابد که سبب خروج آن توسط رله‌های زیر ولتاژ می‌شود. در این حالت قطع نیروگاه بادی سبب شده که ولتاژ شین‌های ۷ و ۱۰ بازیابی نشوند. در حالت $LVRT=1$ و $LVRT=2$ زمان بازیابی ولتاژ به $4/1$ ثانیه افزایش می‌یابد. توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی نیروگاه بادی در این حالت در شکل ۱۵ نشان داده شده است. بنابراین با قرار دادن نیروگاه بادی در شین ۴ چون نیروگاه بادی از مراکز بار دور است و توان‌های اکتیو و راکتیو از مکان دورتری به بار انتقال می‌یابد بازیابی ولتاژ دیرتر انجام می‌شود، توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی نیروگاه بادی در هر سه مد $LVRT$ در شکل ۱۵ نیز نمایش داده شده است.

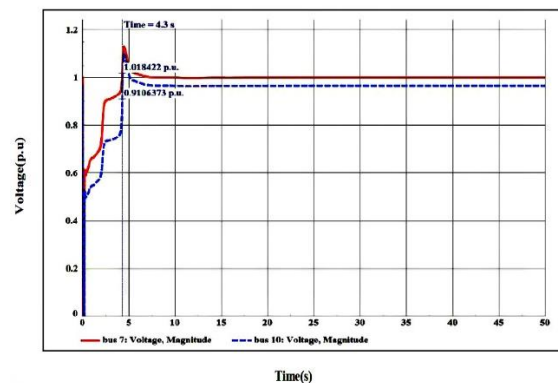
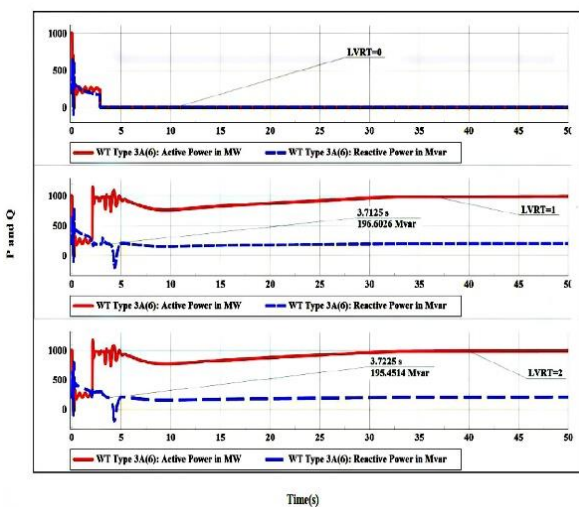


شکل ۱۱: بازیابی ولتاژ شین‌های ۷ و ۱۰ در مدهای مختلف $LVRT$ وقتی نیروگاه بادی به شین ۷ متصل است.



شکل ۱۲: توان‌های اکتیو و راکتیو نیروگاه بادی وقتی که خاصیت $LVRT$ نیروگاه بادی غیرفعال است.

شکل ۱۴: بازیابی ولتاژ شین‌های ۷ و ۱۰ وقتی نیروگاه بادی به شین ۴ متصل است.

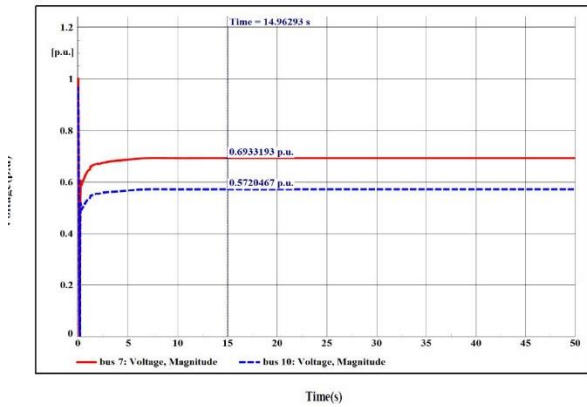


شکل ۱۳: بازیابی ولتاژ شین‌های ۷ و ۱۰ وقتی که خاصیت $LVRT$ نیروگاه بادی غیرفعال است.

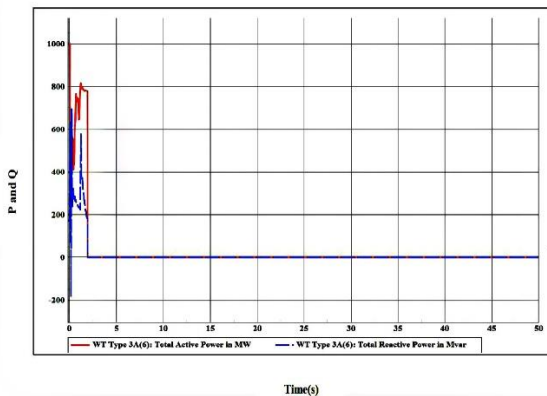
۴-۴ اتصال نیروگاه بادی به شین ۴

شکل ۱۵: توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی نیروگاه بادی وقتی به شین ۴ متصل است.

برای بررسی تأثیر مکان نیروگاه بادی بر روی پدیده FIDVR این بار نیروگاه بادی از طریق دو ترانسفورماتور به شین ۴ متصل می‌شود. هنگامی که نیروگاه بادی به شین ۴ متصل می‌شود توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی از مکان دورتری



شکل ۱۶: ولتاژ شین‌های ۷ و ۱۰ وقتی که نیروگاه بادی در شین ۴ قرار دارد و خاصیت LVRT غیرفعال است.



شکل ۱۷: توان‌های اکتیو و راکتیو نیروگاه بادی زمانی که خاصیت LVRT غیرفعال است.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی پدیده FIDVR در حضور نیروگاه بادی با حالت‌های مختلف LVRT پرداخته شد. تمام شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار دیگسایلنت پاورفکتوری ۲۰۲۱ و با زبان DSL این نرم‌افزار انجام شده است. نیروگاه بادی قرار داده شده در شبیه‌سازی‌ها از نوع سوم می‌باشد و مدل‌سازی آن بر اساس استاندارد IEC61400-27-1 انجام شده است. بر طبق نتایج شبیه‌سازی قرار گرفتن نیروگاه در مراکز نزدیک بار (شین ۷) موجب تسریع در بازیابی ولتاژ شد. هنگامی که نیروگاه بادی دورتر از مراکز بار (شین ۴) قرار گرفت زمان بازیابی ولتاژ افزایش پیدا کرد و حتی در برخی از مدهای LVRT نیز نیروگاه بادی از سیستم قدرت جدا شده و ولتاژ بازیابی نشد. هم‌چنین ملاحظه گردید وجود قابلیت LVRT در نیروگاه بادی به بازیابی سریع‌تر ولتاژ کمک می‌کند. البته فناوری‌های مختلف LVRT نیز در بهبود زمان بازیابی ولتاژ مؤثر است به طوری که ملاحظه شد در حالت LVRT=1 و LVRT=2 زمان بازیابی ولتاژ سریع‌تر از حالت LVRT=0 است.

سیاس‌گذاری

در پایان از پژوهشگاه نیرو و جناب آقای مهندس کامران سلیمی نصر بابت تسهیل در تهیه نرم‌افزار دیگسایلنت پاورفکتوری ۲۰۲۱ کمال تشکر را دارم.

مراجع

[1] W. Wang, M. Diaz-Aguilo, K. B. Mak, F.de Lenon, D. Czarkowski, and R. Uosef, "Time series power flow framework for analysis of FIDVR using linear reresion," IEEE Transaction on Power Delivery, 2018.

جدول ۲: زمان بازیابی ولتاژ وقتی نیروگاه بادی به شین ۷ متصل است.

بدون LVRT	با LVRT	
	مد LVRT	زمان بازیابی (ثانیه)
زمان بازیابی ولتاژ (ثانیه)		
۴/۳	۰	۳/۵
	۱	۲/۷
	۲	۲/۶

جدول ۳: زمان بازیابی ولتاژ وقتی نیروگاه بادی به شین ۴ متصل است.

بدون LVRT	با LVRT	
	مد LVRT	زمان بازیابی ولتاژ (ثانیه)
زمان بازیابی ولتاژ (ثانیه)		
عدم بازیابی ولتاژ	۰	عدم بازیابی ولتاژ
	۱	۴/۱۵
	۲	۴/۱۳

جدول ۴: زمان بازیابی ولتاژ در حضور درصدهای مختلف بارهای موتوری

درصد بارهای موتوری	زمان بازیابی ولتاژ (ثانیه)		
	حضور نیروگاه بادی		عدم حضور نیروگاه بادی
	LVRT=2	بدون LVRT	
۲۰	۰/۰۵	۰/۲	۰/۳
۳۰	۰/۱	۰/۹	۱/۱
۴۰	۰/۷	۱/۴	۱/۷
۵۰	۱	۱/۸	۲
۶۰	۱/۲	۲	۲/۴۶
۷۰	۲/۶	۴/۳	عدم بازیابی ولتاژ

اکنون خاصیت LVRT نیروگاه بادی را غیرفعال می‌کنیم. همان‌طور که انتظار می‌رفت در این حالت به علت تأخیر در بازیابی ولتاژ، نیروگاه بادی از مدار خارج شده و ولتاژ بازیابی نمی‌شود. شکل ۱۶ ولتاژ شین‌های ۷ و ۱۰، و شکل ۱۷ توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی نیروگاه بادی را نشان می‌دهند. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده زمان بازیابی ولتاژ شین‌ها در جداول ۲ و ۳ آورده شده است. جدول ۲ زمان بازیابی ولتاژ را وقتی که نیروگاه بادی به شین ۷ متصل است در دو حالت با و بدون LVRT نشان می‌دهد و جدول ۳ نیز زمان بازیابی ولتاژ را وقتی که نیروگاه بادی به شین ۴ متصل است در دو حالت با و بدون LVRT نشان می‌دهد.

۴-۵- تأثیر درصد بارهای موتوری در پدیده FIDVR

عامل اصلی در پدیده FIDVR وجود بارهای موتوری در شبکه است. در جدول زیر نیروگاه بادی در شین ۷ قرار دارد در یک حالت خاصیت LVRT نیروگاه بادی در نظر گرفته نشده و در حالت دوم ب روی حالت LVRT=2 قرار دارد. درصد بارهای موتوری از ۲۰ درصد تا ۷۰ درصد افزایش یافته و زمان بازیابی ولتاژ در جدول ۴ آورده شده است. در این جدول یک‌بار شبیه‌سازی وقتی نیروگاه بادی در شبکه است انجام شده و بار دیگر زمانی که نیروگاه بادی در شبکه وجود ندارد انجام شده است. به‌صورت کلی هرچه بارهای موتوری در شبکه افزایش پیدا کند زمان بازیابی ولتاژ بیشتر خواهد شد.

- مد لغزشی مقاوم»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۴، صفحات ۱۴۴۰-۱۴۴۱، ۱۳۹۶.
- [۱۳] دکتر پرابها شانکار کندور، «پایداری و کنترل سیستم‌های قدرت»، ترجمه دکتر سیفی، دکتر علی خاکی صدیق، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۹۰.
- [14] C. Concordia, S. Ihara, "Load Reperesentation in Power System Stability," IEEE Transaction on Power Systems, vol. PAS-101, pp. 969-977, 1982.
- [15] K. Srinivasan, C. T. Nguyen, Y. Robichaud, A. St. Jacques, and G.J. Rogers, "Load Response Coefficients Monitoring System: Theory and Field Experience," IEEE Transaction on Power Systems, vol. PAS-100, pp. 3818-3827, 1981.
- [16] T. Ohyama, A. Watanabe, K. Nishimura, and S. Tsuruta, "Voltage Dependence of Composite Load in Power System," IEEE Transaction on Power Systems, vol. PAS-104, pp. 3064-3073, 1985.
- [17] G. Lammert, D. Premm, L. Pabon Ospina, et al, "Control of Photovoltaic Systems for Enhanced Short-Term Voltage Stability and recovery," IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 34, pp. 1-2, March 2019.
- [18] T. VanCustem and C. Vournas, "Voltage Stability of Electric Power Systems." Springer, 2008.
- [۱۹] هرمان جوزف واگنر، جیوتیرمای ماتور، «آشنایی با نیروگاه برق بادی»، ترجمه مجید جمیل، پیام صبایی فرد، نشر کتاب آشنا، ۱۳۹۲.
- [۲۰] قره‌پتین، گئورگ، مهدی علوم بیگی، ایمان نیکوفر، محمد مهدی عربشاهی، مرتضی خاتمی، «تولید پراکنده»، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۹۷
- [۲۱] اکبر ادیب‌فر، نیروگاه بادی، انتشارات پندار پارس، ۱۳۹۴
- [22] Wind Turbines-part 27-1 Electrical Simulation Models-wind Turbines, IEC Standards 61400-27 ed. 1, 2015.
- [23] D. Xie, Z. Xu, L. Yang, J. Østergaard, Y. Xue, and K. P. Wong, "A Comprehensive LVRT Control Strategy for DFIG Wind Turbines with Enhanced Reactive Power Support," IEEE Transaction in Power Systems, vol. 28, pp. 3302-3310, August 2013.
- [2] NERC Transmission Issues Subcommittee and System Protection and Control Subcommitte, "A technical reference paper fault-delayed voltage recovery," June 2009.
- [3] M.Glavic, D. Novosel, E. Heredia, D. Kosterev, A. Salazar, F. Habibi-Ashrafi, and M.Donnely, "See it fast to keep calm: Real-Time voltage control under stressed conditions," IEEE Power and Energy Magazine., vol. 10, pp. 43-55, July 2012.
- [4] E. Hajipour, H. Saber, N. Farzin, et al, "An Improved Aggregated Model of Air Conditioners for FIDVR Studies," IEEE Transaction on Power Systems, vol. 35, pp. 1-2, March 2020.
- [5] J. D. Glidewell and M.Y. Patel, "Effect of high speed reclosing on fault induced delayed voltage recovery," 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1-6, 2012.
- [6] S. M. Halpin, K. A. Harley, R. A. Jones, L. y. Taylor, "Slop-Permissive Under-Voltage Load Shed Relay for Delayed Voltage Recovery Mitigation," IEEE Transaction on Power Systems, vol. 23, pp. 1211-1216, August 2008.
- [7] B. Hua and V. Ajjarapu, "A Novel Online Load Shedding Strategy for Mitigating Fault-Induced Delayed Voltage Recovery," IEEE Transaction on Power Systems, vol. 26, pp. 294-304, February 2011.
- [8] Y. Zhang, Y. Xu, Z. Y. Dong, and P. Zhang, "Real-Time assement of faul-induced delayed voltage recovery: a probabilistic self-addaptive data-driven method," IEEE transaction on Smart Grid, vol. 10, pp. 2485-2494, May 2019.
- [9] J. D. Pinzon, D. G. Colome, "Fault-Induced Delayed Voltage Recovery Assessment based on Dynamic Voltage Indices," 2018 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition-Latin America, pp. 1-5, 2018.
- [10] Reza Bekhradian, Mahdi Davarpanah, Majid Sanaye-Pasand, "Current-based blocking scheme to stabilize distribution network relays against FIDVR," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol132, pp.1-2 November 2021.
- [۱۱] حسین سبحانی، سعید حسنونند، میثم دوستی زاده، «کنترل ولتاژ شبکه هوشمند به روش سلسله مراتبی و توزیع برخط شده»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۵۰، شماره ۴، صفحات ۱۶۱۴-۱۶۱۳، ۱۳۹۹.
- [۱۲] احسان رنجبر، محمد کرم الدینی، مهدی اسدی، «کنترل مستقیم توان‌های اکتیو و راکتیو در نیروگاه بادی مجهز به DFIG با استفاده از کنترل