

# تحلیل نوسانات دینامیکی ولتاژ و فرکانس در سیستم‌های قدرت اینرسی-پایین

محمد رسول جان‌نثار<sup>۱</sup> سجاد صدر<sup>۲</sup> مهدی ثواقبی<sup>۳</sup>

۱- استادیار- گروه مهندسی برق- دانشگاه فنی و حرفه‌ای- تهران- ایران

[mjannesar@tvu.ac.ir](mailto:mjannesar@tvu.ac.ir)

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه تفرش- تفرش- ایران

مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین المللی وزارت علوم

[sadr@tafreshu.ac.ir](mailto:sadr@tafreshu.ac.ir)

3- Associate Prof. Department of Engineering Technology, Technical University of Denmark

DK-2750, Ballerup, Denmark

[medi@dtu.dk](mailto:medi@dtu.dk)

**چکیده:** در این مقاله، تأثیر افزایش ضریب بالای نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر بر شبکه انتقال مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش تعداد منابع مبتنی بر اینورتر، در مجموع اینرسی شبکه کاهش می‌یابد و پایداری شبکه تحت تأثیر قرار می‌گیرد. به منظور بررسی رفتار شبکه اینرسی-پایین، در ابتدا با توجه به نوع نیروگاه‌های سنتی و توربین بادی، مدل‌سازی دینامیکی مناسب انجام شده است. در ادامه با ایجاد خطاهای اتصال کوتاه، تأثیر افزایش ضریب نفوذ توربین‌های بادی بر پایداری ولتاژ و فرکانس مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین تأثیر مدت زمان و محل خطا بر پایداری شبکه بررسی شده است. شبکه مورد مطالعه مبتنی بر سیستم چهار ماشینیه اصلاح یافته Kundur است که در نرم‌افزار PowerFactory مدل‌سازی شده است.

**واژه‌های کلیدی:** پایداری ولتاژ و فرکانس، مدل‌سازی دینامیکی، توربین بادی و سیستم انتقال

**نوع مقاله:** پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.20.2.65

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۲/۱۰

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۴/۶

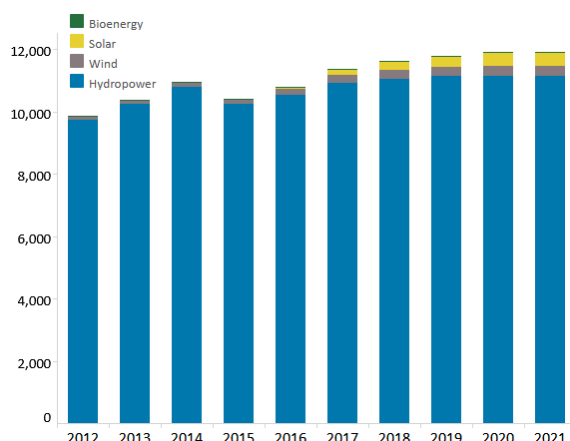
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۵/۳

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمد رسول جان‌نثار

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - میدان ونک - خیابان برزیل شرقی - پلاک ۴ - ساختمان مرکزی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

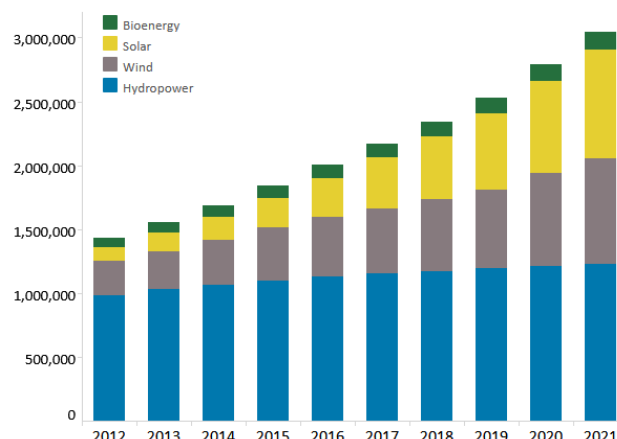
## ۱- مقدمه

با توجه به رشد جوامع بشری از یکسو و الزامات محیط زیستی از دیگر سو، امروزه استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر دیگر نه یک انتخاب که یک ضرورت می‌نماید. اقبال روزافزون به بهره‌مندی از منابع تجدیدپذیر در مراجع مختلفی مانند [۴-۱] مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از آن‌ها حاکی از رشد فزاینده استفاده از این نوع مبدل‌های انرژی است (شکل‌های (۱) و (۲)).



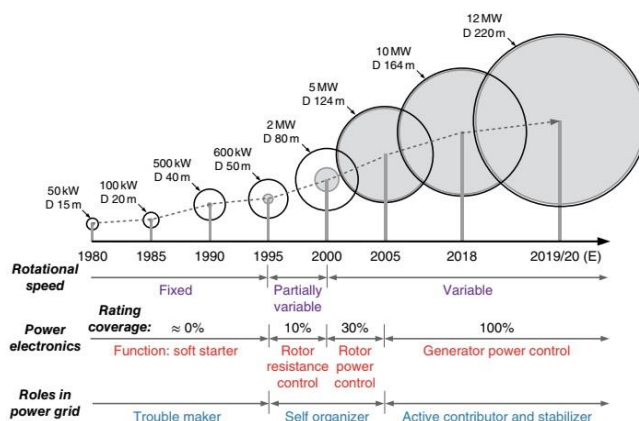
شکل (۲): حجم منابع انرژی تجدیدپذیر نصب شده در ایران (به تفکیک انواع پرکاربردتر بر حسب مگاوات) [۳]

یک تفاوت اساسی منابع تجدیدپذیر با ژنراتورهای سنکرون در عدم وجود ارتباط مستقیم بین مولد و فرکانس شبکه است. ماشین سنکرون به صورت مستقیم با شبکه در ارتباط است در حالی که منابع تجدیدپذیر به طور معمول از طریق اینورتر و با کمک PLL به شبکه متصل شده‌اند که تأثیر آن در [۶، ۷] بیان شده است. در [۸، ۱] آثار مثبت و منفی افزایش بکارگیری منابع تجدیدپذیر (در آن تحقیق؛ خورشیدی) بر سیستم قدرت بیان شده است. میزان بکارگیری منابع تجدیدپذیر و محل نصب آن‌ها از مسائل تأثیرگذار بر سیستم است [۹]. از دو جهت انرژی‌های تجدیدپذیر بر شبکه تأثیرگذار هستند، یکی متوسط انرژی سالانه و دیگری توان لحظه‌ای تبدیلی با سیستم قدرت [۱۰-۱۲]. موضوع اول از چارچوب این نوشتار خارج بوده و صرفاً به آثار توان لحظه‌ای بر شبکه پرداخته خواهد شد. یکی از برجسته‌ترین نکات در استفاده از تجهیزات و تکنولوژی‌های جدید در هر سیستم، آن است که روند کار جاری مجموعه دچار اخلاص نگردیده و این توسعه منجر به افزایش آسیب‌پذیری نگردد. با افزایش درصد توان تولیدی از منابع انرژی تجدیدپذیر، سهم ژنراتورهای سنکرون (این پایدارکننده-های فرکانس) در شبکه کم می‌گردد و دیگر این منابع تجدیدپذیر نمی‌توانند به صورت انبوه در حالت پیرو شبکه<sup>۱</sup> در سیستم قدرت حضور داشته باشند، این چالش در [۱۳] مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل (۱): منابع انرژی تجدیدپذیر نصب شده در سراسر جهان (به تفکیک انواع پرکاربردتر بر حسب مگاوات) [۳]

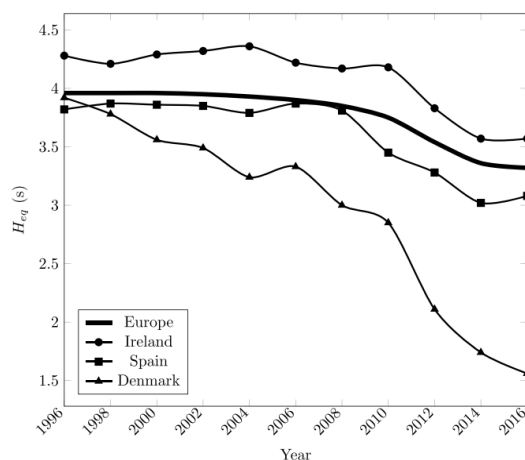
در این سیر رشد در کشور ایران، استفاده از نیروگاه‌های بادی و خورشیدی توسعه چشم‌گیری داشته است (شکل (۳)). این موارد به معنای پررنگ‌تر شدن نقش مبدل‌های انرژی تجدیدپذیر در شبکه قدرت است. از اینرو توجه به مباحث مرتبط با بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر و تأثیر آن بر سیستم‌های موجود اهمیتی غیر قابل انکار دارد. در صورتی که حجم استفاده از منابع تجدیدپذیر در مقابل کل سیستم اندک باشد، عملاً تأثیری جدی بر روی مجموعه نخواهد داشت، تحقیق انجام شده در [۵] که به بررسی تأثیر منابع انرژی خورشیدی بر سیستم قدرت پرداخته مؤید این مطلب است؛ اما واقعیت حکایت از رشد سریع گسترش استفاده از این منابع در قیاس با منابع متداول مرسوم (ژنراتورهای سنکرون) دارد.



شکل (۳): رشد ابعاد و کارکردهای مبدل‌های انرژی بادی [۴]

نوسانات باند گسترده الکترومغناطیسی و ناپایداری اغتشاشات بزرگ جدید دانسته‌اند. در [۱۳] مسائل حوزه کلاسیک به صورت پایداری زاویه روتور، فرکانس و ولتاژ تقسیم گردیده است. در آن پژوهش در اثر افزایش استفاده از منابع متصل با اینورتر به شبکه، مسائل پایداری سیگنال کوچک و سیگنال بزرگ را نیازمند بررسی دانسته‌اند.

با توجه به مطالب مطرح شده، پایداری ولتاژ و فرکانس فصل مشترک نگاه‌های مذکور به موضوع است. از اینرو تمرکز مقاله حاضر، بر این دو محور می‌باشد. منابع تجدیدپذیر به علت اتصال با مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه، دارای ارتباط ضعیفی می‌باشند و از طرف دیگر پاسخ‌گذاری سریع مبدل‌ها می‌تواند باعث ایجاد مشکلات اضافه ولتاژ و یا کمبود ولتاژ در شرایط پس از رفع خطا گردد [۱۷]. به همین علت، می‌بایست لحظه‌ای پایدار شدن ولتاژ پس از خطا نیز، در کنترل‌کننده‌های مبدل‌ها مورد نظر باشد. پر واضح است که اساس فرکانس شبکه قدرت سرعت چرخش محور ژنراتورهای سیستم می‌باشد و برآیند اینرسی‌های آن‌ها، مبین اینرسی سیستم قدرت. اما اتصال منابع تجدیدپذیر به وسیله مبدل‌های الکترونیک قدرت، فاقد قدرت مشارکت مستقیم در افزایش اینرسی مجموعه هستند. به بیان دیگر منابع تجدیدپذیر در افزایش مقدار توان شبکه مشارکت داشته لیکن منجر به افزایش اینرسی شبکه نمی‌گردند که به معنی کاهش اینرسی معادل کل مجموعه است (شکل‌های (۴) و (۵)).



شکل (۴): کاهش اینرسی معادل با منابع متصل با اینورتر [۱۸]

در مجموع برای بهره‌برداران شبکه همیشه ضریب نفوذ بالای منابع تجدیدپذیر یکی از چالش‌هایی است که می‌تواند به محدود شدن استفاده از این منابع و یا کاهش اجباری توان منجر شود [۱۹]. این محدودیت که در بعضی موارد بدون مطالعات کافی و بی‌دلیل وضع می‌شود، ضرورت و اهمیت موضوع مقاله حاضر که تحلیل پایداری شبکه است را نشان می‌دهد.

در شبکه یکی از راهکارهای بهبود پایداری در این سیستم‌ها، به‌روزرسانی و تبعیت از کدهای شبکه (رعایت محدوده نوسانی مجاز ولتاژ و فرکانس در بازه زمانی مجاز) می‌باشد [۱۷]. به بیان دیگر به هنگام خطا، منابع انرژی تجدیدپذیر می‌بایست با رعایت الزامات HVRT<sup>۲</sup> و LVRT<sup>۳</sup> در پایدار نمودن شبکه مشارکت کنند [۹].

از چند منظر می‌توان به بررسی تأثیر افزایش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر بر عملکرد و تداوم بهره‌برداری از سیستم قدرت پرداخت که دو مورد از آنها در ادامه بیان می‌گردد. یک دیدگاه انعطاف‌پذیری سیستم در مقابل نامعینی‌ها و دیگری پایداری آن در مقابل خطاها است. به واقع این دو مفهوم بهم نزدیک و مرتبط هستند. همانگونه که در [۹، ۱۴] شرح داده شده است، تعریف واحدی برای انعطاف‌پذیری وجود ندارد. در پژوهشی که در سال ۲۰۲۰ به چاپ رسیده [۹]، به چالش‌های افزایش نفوذ منابع تجدیدپذیر بر انعطاف‌پذیری سیستم قدرت پرداخته است. در پژوهش فوق، انعطاف‌پذیری به صورت حفظ تعادل بین تولید و مصرف، و تداوم بهره‌برداری با وجود نامعینی‌ها، تعریف شده است. آن پژوهش با استفاده از تقسیم بندی موجود در [۱۵]، به بررسی موارد مورد نیاز سیستم برای انعطاف‌پذیری توان، انرژی، ظرفیت انتقال و ولتاژ پرداخته است. رویکرد انعطاف‌پذیری بیشتر معطوف به حفظ سیستم با وجود نامعینی‌هاست. در حالیکه به صورت کلاسیک، در پایداری سیستم، هدف حفظ تعادل در شرایط عادی، تقابل با اغتشاش‌های رخ داده و یافتن شرایط کاری جدید قابل قبول است [۱۶]. اما بدون شک این دو حوزه انعطاف‌پذیری و پایداری از یکدیگر متأثر هستند. تا به امروز یک سیستم قدرت گسترده که اکثریت تولید توان آن از طریق منابع تجدیدپذیر باشد، در دسترس نیست. از اینرو بدیهی است که با توجه به زوایای دید متفاوت، نتایج پژوهش‌های انجام شده کاملاً منطبق بر یکدیگر نباشد. این مبحث در مورد پایداری سیستم قدرت با لحاظ افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر نیز وجود دارد. بدین معنا که هر یک از محققان مواردی را برای بررسی ارجح دانسته‌اند. این تفاوت‌ها تا به جایی است که حتی بحث استنباط‌های جدید از مسائل پایداری برای سیستم‌های با نسبت بالای منابع تجدیدپذیر، نیز مطرح شده است. مرجع [۹]، برای این گونه سیستم‌ها چهار مورد شامل پایداری ولتاژ، گذرا، سیگنال کوچک و فرکانس را مورد بررسی قرار داده است. با توجه به وجود تفاوت‌هایی در رفتار نیروگاه‌های بادی و خورشیدی، تأثیر آنها بر پایداری سیستم در آن پژوهش به تفکیک بحث شده است. در [۱]، مسائل پایداری با وجود حجم بالای سامانه‌های خورشیدی به پایداری ولتاژ، زاویه روتور (گذرا و سیگنال کوچک) و فرکانس افراز شده است. از دیگر سو بحث گسترش مفاهیم پایداری در سیستم قدرت دارای حجم بالای منابع تجدیدپذیر مطرح شده است که یک نمونه از آن در [۱۷] بحث شده است. منابع مذکور دارای دو خصیصه برجسته نامعینی توان تولیدی (وابستگی آن به شرایط محیطی) و اتصال از طریق اینورتر به شبکه قدرت هستند. تأثیر این خصیصه‌ها بر پایداری سیستم قدرت در [۱۳، ۱۷] مورد بررسی قرار گرفته است. محققان مرجع [۱۷] درباره تأثیر افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر در سیستم قدرت، قائل به دو نگاه به مسئله پایداری هستند. یکی مسائل کلاسیک پایداری شامل؛ زاویه روتور، گذرا، پایداری ولتاژ و فرکانس و دیگری مسائل نوظهور، که این بخش را شامل؛ نوسانات فرکانس پائین مشابه الکترومکانیکی،

منابع تجدیدپذیر مورد بررسی قرار گرفته، در حالیکه تأثیر مدت زمان خطا بر پایداری مورد ارزیابی قرار نگرفته است.

همان‌طور که ملاحظه شد، در مقالات مرور شده، تحلیل جامعی از پایداری ولتاژ و فرکانس شبکه با در نظر گرفتن محل و مدت زمان خطا در حضور توربین‌های بادی انجام نشده است؛ بنابراین در این مقاله، در ابتدا مدل‌سازی و کنترل مناسب برای ژنراتورهای سنکرون و همچنین توربین‌های بادی که دارای قابلیت LVRT هستند، انجام شده و تأثیر این مدل‌سازی در نتایج نشان داده شده است. در ادامه با توجه به افزایش ضریب نفوذ توربین‌های بادی در دو حالت تغییر مدت زمان خطای اتصال کوتاه سه فاز و همچنین تغییر محل این خطا، پایداری ولتاژ و فرکانس شبکه مورد ارزیابی قرار گرفته است.

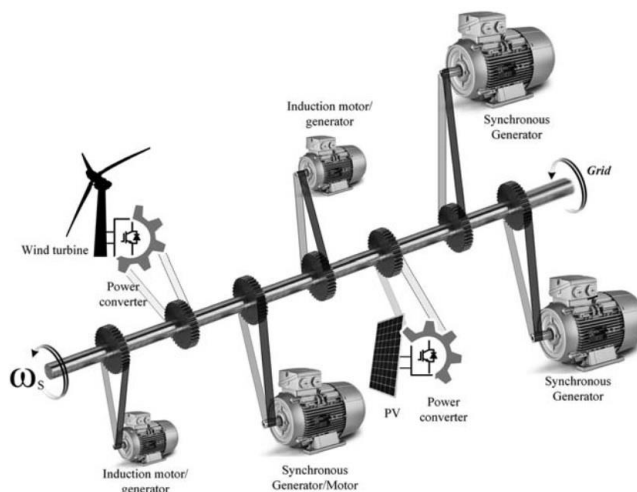
در ادامه و در بخش دوم به بررسی مدل‌سازی و کنترل مولدهای انرژی پرداخته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در بخش سوم ارائه و تحلیل می‌شود. در بخش آخر هم نتیجه‌گیری آورده شده است.

## ۲- مدل‌سازی و کنترل مولدهای انرژی

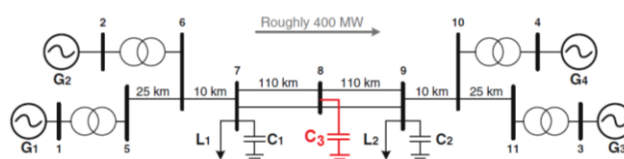
به منظور بررسی تأثیر نیروگاه‌های بادی بر شبکه انتقال، از شبکه چهار ماشینه Kundur استفاده شده است [۲۸]. لازم به ذکر است که با توجه به دستورالعمل بهره‌برداری شرکت مدیریت شبکه ایران، ولتاژ حالت دائم باید در محدوده  $\pm 2\%$  باشد؛ لذا به منظور افزایش ولتاژ باس های شبکه، یک خازن با ظرفیت ۱۰۰ مگاوار ( $C_3$ ) به باس هشتم اضافه شده است. در شکل (۶) شبکه اصلاح یافته چهار ماشینه Kundur نشان داده شده است.

توربین‌های بادی به شدت تحت تأثیر خطاهای اتصال کوتاه قرار می‌گیرند. برای غلبه بر این آثار از طریق قابلیت LVRT، راهبردهای مختلفی در مطالعات گزارش شده است. این قابلیت به دو روش استفاده از ادوات FACTS<sup>۱</sup> [۲۰] و راهبردهای کنترل‌کننده تقسیم می‌شوند. در مجموع، روش دوم (کنترل‌کننده) برای کاهش تأثیر خطا نسبت به ادوات FACTS مؤثرتر و مقرون به صرفه‌تر است [۲۱].

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، موضوع مقاله حاضر معطوف به پایداری ولتاژ و فرکانس در حضور منابع تجدیدپذیر است. در ادامه اهم مقالاتی که به این موضوع پرداخته‌اند بررسی می‌شود تا مشارکت مقاله حاضر تبیین شود. در [۲۲] تأثیر محل خطا بر نوسانات فرکانس و پایداری زاویه روتور در حضور توربین‌های بادی تحلیل شده است. در [۲۳] تأثیر نوسانات بار بر پایداری فرکانس و شاخص RoCoF<sup>۲</sup> با حضور منابع بادی و با توجه به تغییر محل اختلالات مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با تغییر محل و مدت زمان خطا، پایداری فرکانس شبکه با در نظر گرفتن افزایش ضریب نفوذ سامانه‌های فتوولتاییک در [۲۴] مطالعه شده است. در [۲۵] این نتیجه حاصل شده است که پایداری فرکانس و اینرسی شبکه، با افزایش ضریب نفوذ توربین بادی کاهش می‌یابد. در چهار مقاله اخیر پایداری ولتاژ مورد بررسی قرار نگرفته است. در [۲۶] پایداری فرکانس و ولتاژ در حضور منابع تجدیدپذیر و با وجود خطای سه فاز و همچنین کاهش تولید مورد بررسی قرار گرفته است و حداکثر ضریب نفوذ منابع تجدیدپذیر برای حفظ پایداری سیستم مورد ارزیابی قرار گرفته است. در [۲۶] تأثیر محل خطا بر مطالعات تحلیل نشده است. در [۲۷] پایداری ولتاژ و فرکانس با ایجاد خطای اتصال کوتاه و خروج نیروگاه‌ها، در حضور



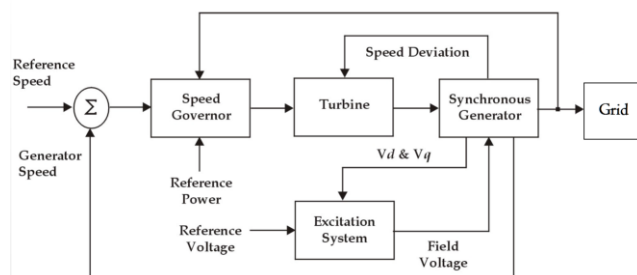
شکل (۵): مشارکت قوی ژنراتورهای دوار در اینرسی شبکه در کنار اتصال ضعیف منابع انرژی تجدیدپذیر به شبکه [۲۹]



شکل (۶): شبکه اصلاح یافته چهار ماشینه Kundur

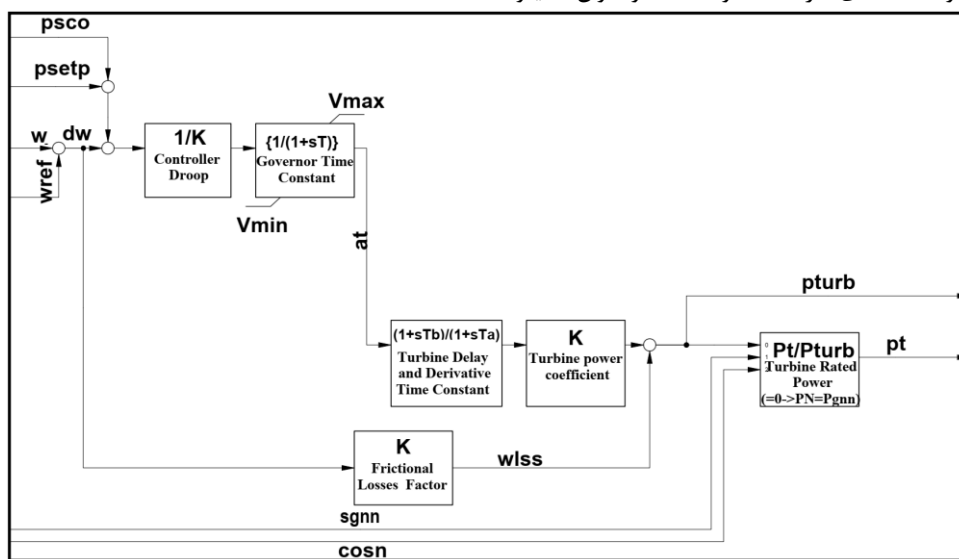
## ۲-۱- مدل سازی و کنترل ژنراتورهای سنکرون

به منظور مدل سازی دینامیکی چهار ژنراتور سنکرون شبکه، از بلوک دیاگرام شکل (۷) استفاده شده است [۳۰].

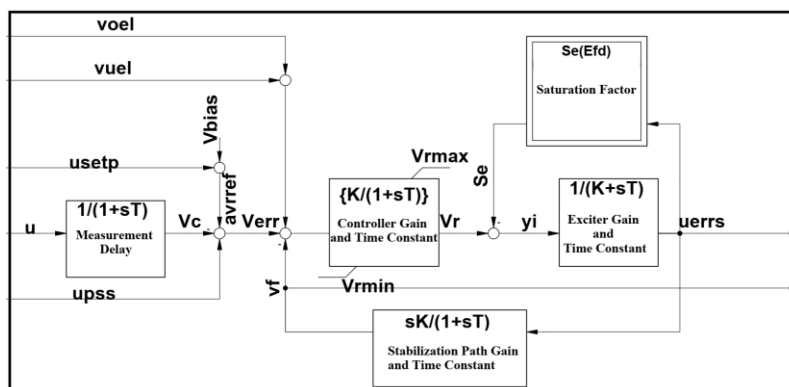


شکل (۷): بلوک دیاگرام کنترلی ژنراتورهای سنکرون [۳۰]

همان طور که مشاهده می شود در ابتدا اختلاف سرعت ژنراتور با سرعت مرجع به گاورنر وارد شده و با توجه به توان مرجع و شبکه، به عنوان سرعت مرجع به توربین داده می شود. توربین و ژنراتور هم دارای یک حلقه بسته تنظیم سرعت هستند. ولتاژ ژنراتور هم با مقایسه با ولتاژ مرجع در سیستم کنترل تحریک ولتاژ تحریک را ایجاد می کند. در شکل (۸) مدل کنترلی گاورنر توربین بخار آورده شده است [۳۱].

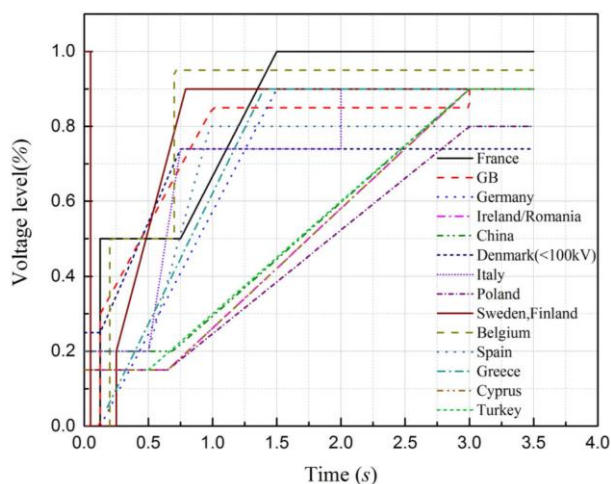


شکل (۸): بلوک دیاگرام کنترلی گاورنر

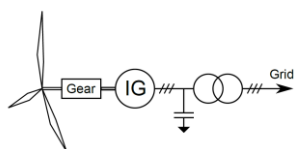


شکل (۹): بلوک دیاگرام کنترلی سیستم اتوماتیک کنترل ولتاژ

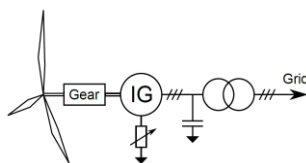
نظر گرفته شده است که برای بهبود ولتاژ شبکه حین خطا، توان اکتیو کاهش یافته و توان راکتیو افزایش می‌یابد.



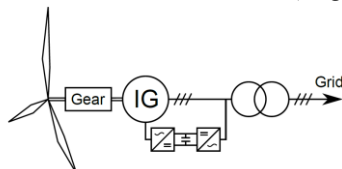
شکل (۱۱): الزامات کد شبکه کشورهای مختلف [۲۱]



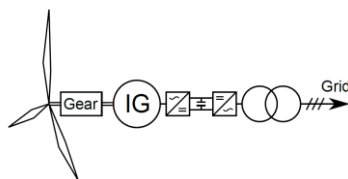
نوع اول ((Fixed speed induction generator (FSIG)))



نوع دوم ((Wound rotor induction generators))

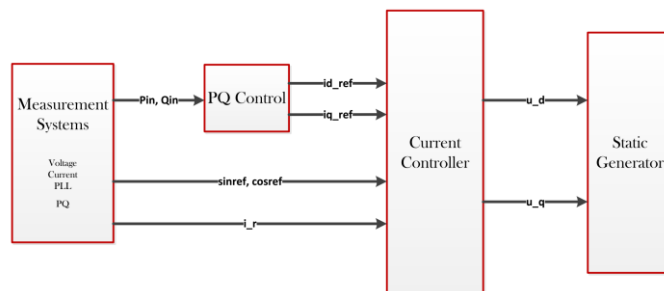


نوع سوم ((Doubly-Fed Induction Generator (DFIG)))



نوع چهارم ((Fully rated converter wind turbine (FRC)))

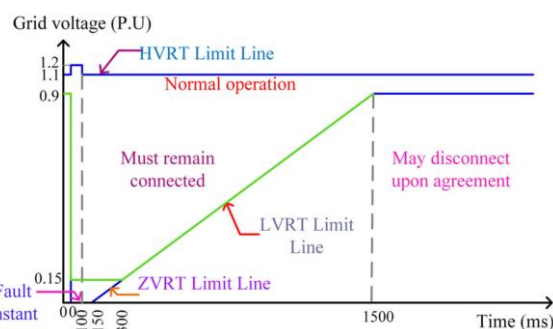
شکل (۱۲): انواع روش‌های مدل‌سازی توربین بادی [۳۲]



شکل (۱۳): بلوک دیاگرام کنترلی توربین بادی [۳۳]

## ۲-۲- مدل‌سازی و کنترل توربین بادی

قابلیت FRT<sup>۶</sup> در نمودار ولتاژ - زمان یا فرکانس - زمان، به نحوه کنترل ولتاژ یا فرکانس در هنگام اختلال واحدهای تولیدی، برای اطمینان از امنیت سیستم اطلاق می‌شود. در گذشته توربین‌های بادی به دلیل اختلالات شبکه قطع می‌شدند که منجر به بروز ناپایداری‌هایی در سیستم قدرت می‌شد. برای غلبه بر این چالش، کدهای شبکه (به عنوان نمونه مقررات FRT) برای غلبه بر این مشکلات توسعه یافته‌اند. در شکل (۱۰) الزامات کد شبکه کشور آلمان ملاحظه می‌شود [۲۱].



شکل (۱۰): الزامات کد شبکه کشور آلمان [۲۱]

الزامات FRT شامل ZVRT<sup>۷</sup>، LVRT و HVRT می‌باشد که به ترتیب ولتاژ صفر، ۱۵ تا ۹۰ درصد و بالاتر از ولتاژ نامی را در هنگام خطاهای شبکه پوشش می‌دهند. این الزامات بیان می‌کند که واحدهای توربین بادی باید به جای خروج در هنگام خطا، در شبکه باقی بمانند و عملکرد FRT باید هر زمان که ولتاژ شبکه به کمتر از ۹۰ درصد مقدار نامی کاهش می‌یابد، شروع شود. با این حال، توربین‌های بادی باید زمانی که ولتاژ شبکه بالاتر از حدود ZVRT و LVRT و زیر حد HVRT است به شبکه متصل بمانند. همچنین توربین‌های بادی در صورتی که ۹۰ درصد ولتاژ نامی پس از زمان بازیابی (۱۵۰۰ میلی‌ثانیه) حفظ نشود، قطع می‌شوند. در شکل (۱۱) چند کد شبکه برای کشورهای مختلف نشان داده شده است [۲۱].

نحوه اتصال توربین‌های بادی به شبکه به چهار نوع تقسیم می‌شود که در شکل (۱۲) نمایش داده شده است [۳۲]. دو نوع اول عملاً منسوخ شده‌اند. در این مقاله از مدل چهارم FRC که در طراحی‌های جدید خصوصاً در توان‌های بالا رایج‌تر است استفاده شده است. برای مدل‌سازی توربین‌های بادی از بلوک دیاگرام کنترلی شکل (۱۳) استفاده شده است [۳۳]. لازم به ذکر است در این مدل‌سازی به منظور عملکرد بهتر توربین‌های بادی در هنگام خطا ملاحظات LVRT در

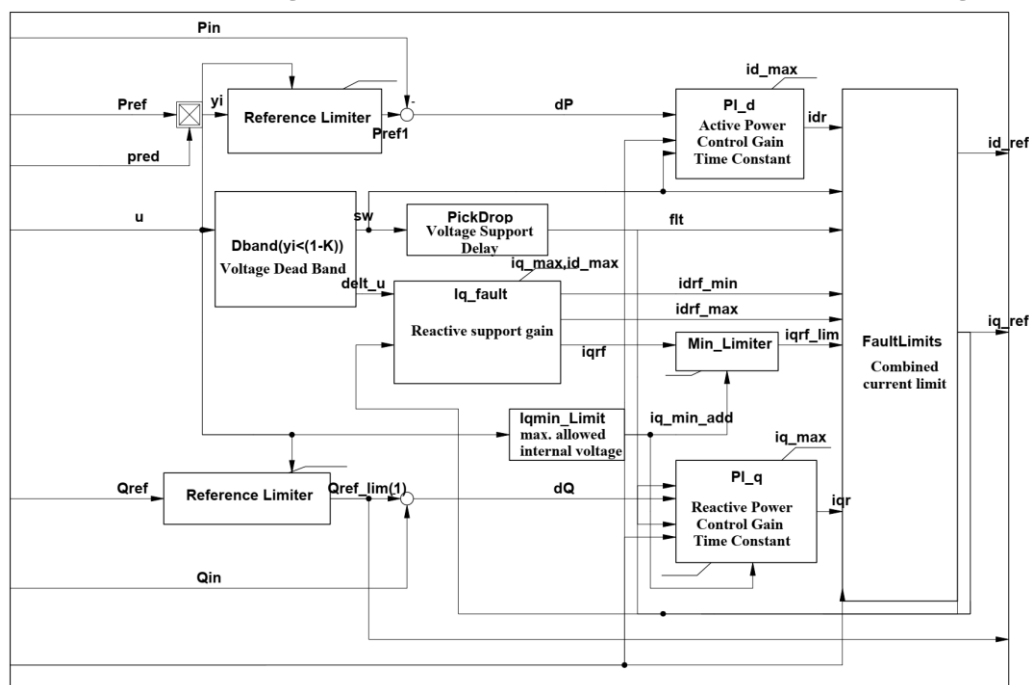


است. همچنین از یک طرف خطای توان اکتیو و راکتیو شبکه با عبور از یک محدودکننده به یک کنترل کننده PID وارد شده و جریان‌های Iqr و Idr ایجاد می‌شود. از طرف دیگر ولتاژ اندازه‌گیری شده (u) به بلوک باند سکوت ولتاژ وارد شده و با عبور از بلوک‌های حمایتی تأخیر ولتاژ و بهره توان راکتیو، جریان‌های idrf و iqrf تولید می‌شود. تمام این جریان‌ها با عبور از بلوک محدودکننده جریان و خطا، جریان‌های مرجع بردارهای متعامد (id\_ref و iq\_ref) را تولید می‌کنند.

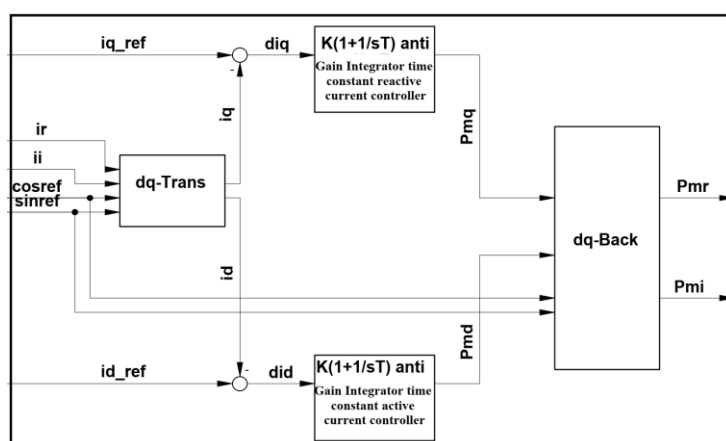
در ادامه جزئیات بلوک دیاگرام کنترلی جریان آورده شده است (شکل ۱۵)). همان‌طور که مشاهده می‌شود جریان‌های حقیقی و موهومی اندازه‌گیری شده (ir و ii) به همراه sinref و cosref در بلوک دیاگرام مبدل قاب dq به مؤلفه‌های متعامد تبدیل می‌شوند و بعد از مقایسه با مقادیر مرجع (id\_ref و iq\_ref) و عبور از یک کنترل کننده PI مقادیر توان‌های (pmd و pmq) را ساخته و در یک مبدل معکوس (dq-Back) توان‌های حقیقی و مجازی (pmr و pmi) تولید می‌شوند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در ابتدا مقادیر ولتاژ، جریان و توان اکتیو و راکتیو توسط وسایل اندازه‌گیری و همچنین sinref و cosref توسط دستگاه اندازه‌گیری فاز (PLL) از باس محل اتصال توربین بادی برداشت می‌شود. مقادیر توان اکتیو و راکتیو اندازه‌گیری شده (Pin و Qin) به بلوک کنترلی (PQ Control) وارد شده و مقادیر جریان‌های مرجع بردارهای متعامد (id\_ref و iq\_ref) را ایجاد می‌کند. این مقادیر متعامد به همراه sinref، cosref و مؤلفه حقیقی جریان (i\_r) با ورود به بلوک کنترلی جریان (current controller) مقادیر ولتاژهای متعامد (u\_d و u\_q) را تولید می‌کنند که به عنوان ورودی بلوک دیاگرام مربوط به ژنراتور توربین بادی هستند.

در شکل (۱۴) بلوک دیاگرام کنترلی توان اکتیو و راکتیو بسط داده شده است. لازم به ذکر است در شرایط اولیه ورودی‌های Pref و Qref به ترتیب برابر توان اکتیو و راکتیو اندازه‌گیری شده (Pin و Qin) در نظر گرفته می‌شود. مقدار توان اکتیو کاهش یافته



شکل (۱۴): بلوک دیاگرام کنترلی توان اکتیو و راکتیو



شکل (۱۵): بلوک دیاگرام کنترلی جریان

## ۳- نتایج شبیه سازی

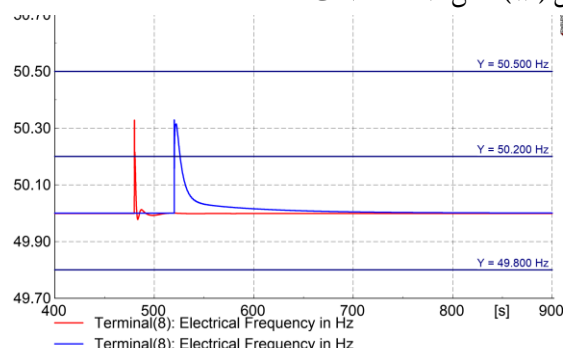
شبیه سازی ها با استفاده از سیستم شکل (۶) انجام شده و به منظور بررسی پایداری، سناریوهای عملکرد در حضور خطا در نظر گرفته شده است. در سناریو اول به منظور نشان دادن تأثیر مدل سازی کنترلی دینامیکی ژنراتورهای سنکرون، عملکرد شبکه در هنگام ایجاد یک اتصال کوتاه به میزان ۰/۱ ثانیه در باس هشتم شکل (۶)، بدون حضور منابع تجدیدپذیر مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه تأثیر جایگزین شدن ژنراتورهای سنکرون با توربین های بادی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در حالت سوم مدت زمان رفع خطا افزایش یافته است. در انتها نیز، تأثیر محل خطا بر پایداری شبکه مورد ارزیابی قرار گرفته است. جدول (۱) سناریوهای شرح داده آمده است.

جدول (۱): سناریوها

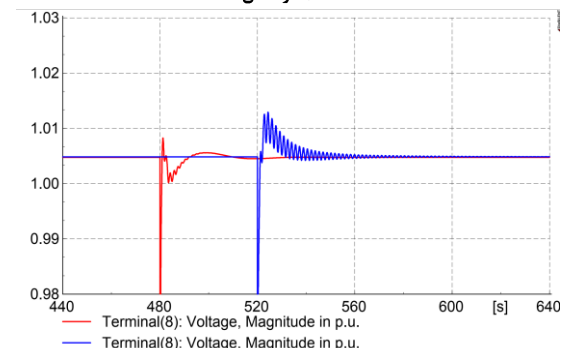
حالت اول	بدون حضور منابع تجدیدپذیر
حالت دوم	افزایش ضریب نفوذ توربین های بادی
حالت سوم	تغییر مدت زمان رفع خطا
حالت چهارم	تغییر محل خطا

## ۳-۱- حالت اول

در این حالت پایداری شبکه در هنگام بروز خطا به مدت ۰/۱ ثانیه در باس هشتم، در دو حالت مدل سازی کنترلی دینامیکی ژنراتورها (بلوک دیاگرام کنترلی شکل (۷)) و بدون آن مورد ارزیابی قرار گرفته و در شکل (۱۶) نشان داده شده است.



الف) فرکانس



ب) ولتاژ

قرمز: با کنترل آبی: بدون کنترل

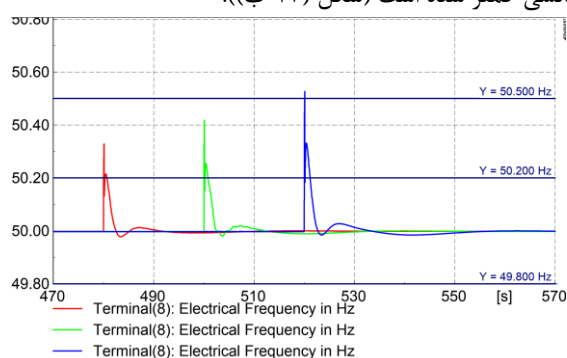
شکل (۱۶): سناریو اول، مدل سازی دینامیکی ژنراتورهای سنکرون

همان طور که مشاهده می شود، استفاده از کنترل دینامیکی در مدل سازی ژنراتورهای سنکرون، منجر به بازیابی سریع تر ولتاژ و فرکانس می شود و همچنین در منحنی ولتاژ نوسانات دینامیکی و دامنه تغییرات را کاهش می دهد. لازم به ذکر است در سناریوهای بعدی، ژنراتورهای سنکرون دارای کنترل دینامیکی هستند.

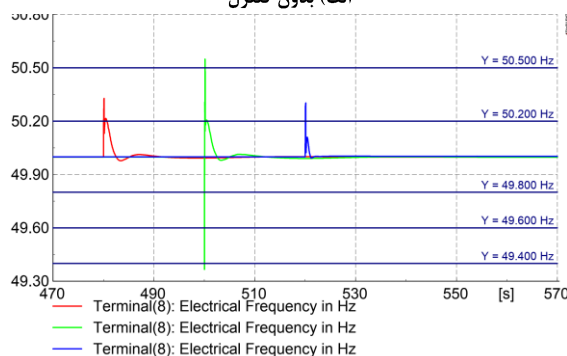
## ۳-۲- حالت دوم

در شکل (۱۷) و (۱۸)، تأثیر اضافه کردن توربین های بادی به ترتیب در دو باس ۳ و ۱ و به جای ژنراتورهای ۳ و ۱ (شکل ۶) را ملاحظه نمایید)، در دو حالت مدل سازی کنترلی دینامیکی توربین های بادی (با استفاده از بلوک دیاگرام شکل (۱۳)) و بدون آن مورد ارزیابی قرار گرفته است.

همان طور که در شکل (۱۷) مشاهده می شود، زمانی که توربین های بادی کنترلی برای عبور از خطا نداشته باشند، اضافه شدن توربین های بادی منجر به نوسان فرکانس با دامنه شدیدتری در شرایط خطا می شود (شکل (۱۷-الف))، اما در حالت با کنترل، نتایج متفاوت است. با اضافه شدن یک توربین بادی نوسانات فرکانس بیشتر شده که با اصلاح ضرایب کنترلی در حالت دو توربین بادی، دامنه نوسانات فرکانسی کمتر شده است (شکل (۱۷-ب)).



الف) بدون کنترل



ب) با کنترل

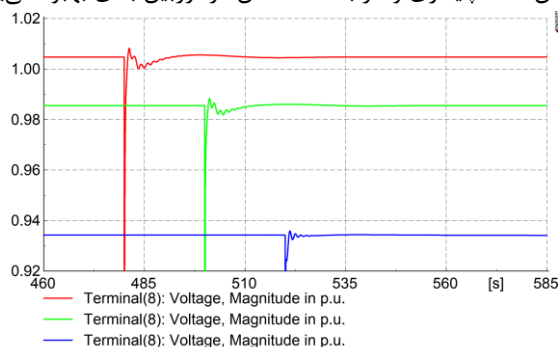
قرمز: ژنراتور سنکرون، سبز: یک توربین بادی، آبی: دو توربین بادی

شکل (۱۷): تأثیر افزایش ضریب نفوذ توربین های بادی بر فرکانس

همان طور که در شکل (۱۸-الف) مشاهده می شود در حالت بدون کنترل، با اضافه شدن یک توربین بادی نوسانات ولتاژ بیشتر شده و با دو توربین بادی (بر خلاف فرکانس) نوسانات ولتاژ کمتر شده است. این نتیجه موید آن است که اضافه شدن ضریب نفوذ توربین بادی در حالت

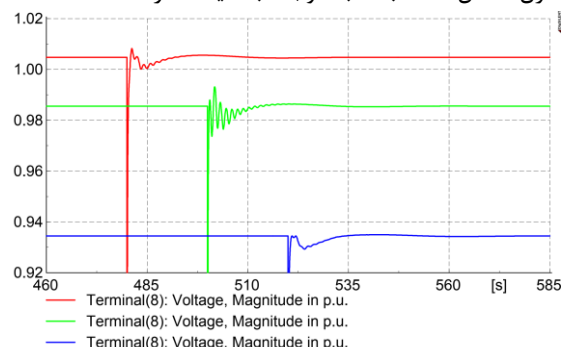


استفاده شده است، مشاهده می شود به دلیل افزایش توان راکتیو در زمان خطا، پایداری ولتاژ با اضافه شدن دو توربین بادی بهبود می یابد.



ب) با کنترل

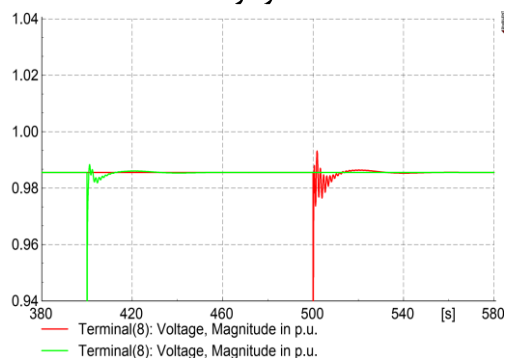
بدون کنترل همیشه منجر به کاهش پایداری ولتاژ نمی شود. در حالت با کنترل (شکل ۱۸-ب)، با توجه به اینکه از ملاحظات LVRT



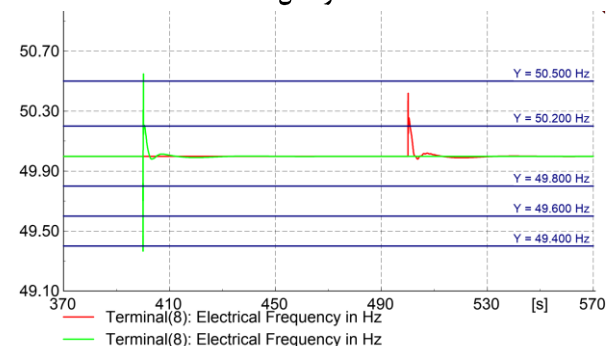
الف) بدون کنترل

قرمز: ژنراتور سنکرون، سبز: یک توربین بادی، آبی: دو توربین بادی  
شکل (۱۸): تأثیر افزایش ضریب نفوذ توربین های بادی بر ولتاژ

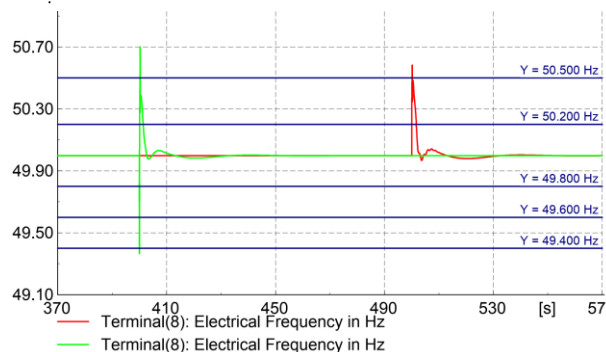
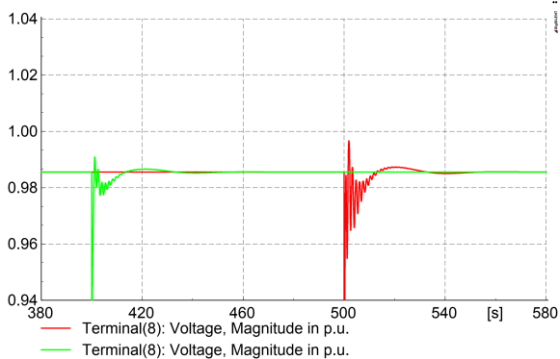
ولتاژ



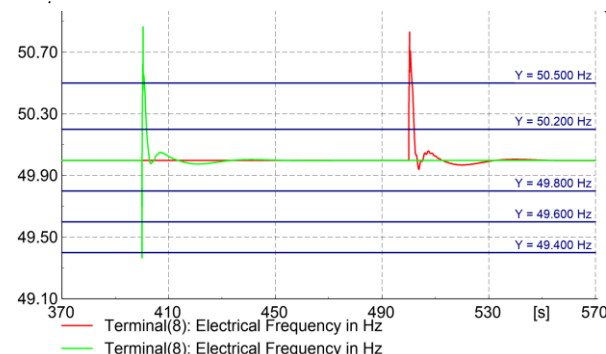
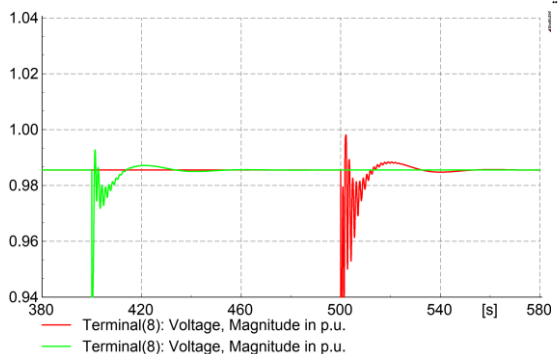
فرکانس



به مدت ۰/۱ ثانیه



به مدت ۰/۲ ثانیه

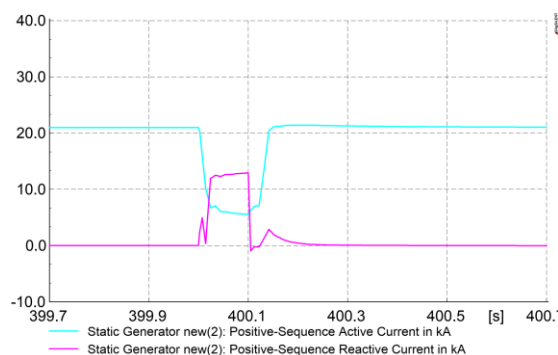


به مدت ۰/۳ ثانیه

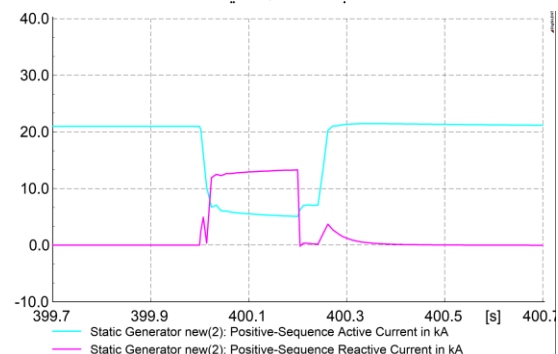
قرمز: بدون کنترل سبز: با کنترل  
شکل (۱۹): تغییر مدت زمان خطا با فرض یک توربین بادی

## ۳-۳- حالت سوم

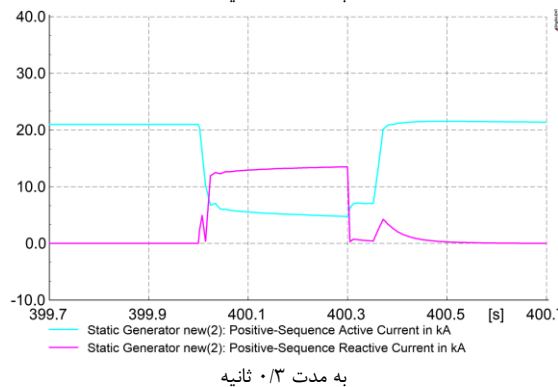
در این حالت، تأثیر تغییر مدت زمان خطا بر پاسخ دینامیکی شبکه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این حالت با فرض اضافه شدن یک توربین بادی به باس سوم انجام شده و نتایج در شکل (۱۹) آورده شده است. با توجه به شکل (۱۹)، از یک سو با افزایش زمان خطا، نوسانات فرکانس و ولتاژ افزایش می‌یابد. از سویی دیگر مشاهده می‌شود استفاده از کنترل دینامیکی برای ژنراتورهای بادی نسبت به حالت بدون کنترل در هر یک از مدت زمان‌های خطا، نوسانات فرکانس بیشتر و ولتاژ کمتری را به همراه دارد. دلیل این موضوع به ملاحظات LVRT مربوط است که در این راهبرد در زمان خطا، توان اکتیو تولیدی توربین بادی کاهش یافته (که منجر به کاهش پایداری فرکانس می‌شود) و توان راکتیو افزایش می‌یابد و منجر به بهبود پایداری ولتاژ می‌شود.



به مدت ۰/۱ ثانیه



به مدت ۰/۲ ثانیه



به مدت ۰/۳ ثانیه

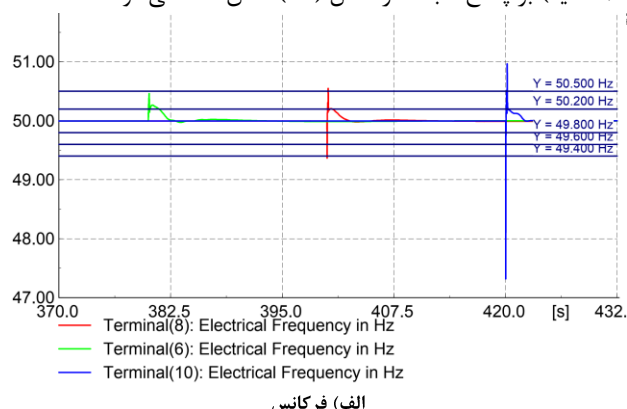
فیروزه‌ای: توان اکتیو بنفش: توان راکتیو

شکل (۲۰): منحنی تغییرات توان اکتیو و راکتیو توربین بادی

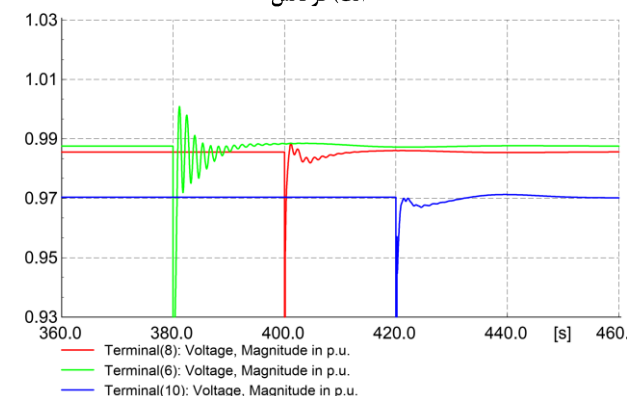
در شکل (۲۰) منحنی تغییرات توان اکتیو و راکتیو توربین بادی به منظور بهبود ولتاژ در شرایط خطا نشان داده شده است که با کاهش توان اکتیو و افزایش توان راکتیو همراه می‌باشد (با توجه به ملاحظات LVRT)

## ۳-۴- حالت چهارم

در این حالت تأثیر محل خطا بر پاسخ دینامیکی شبکه آورده شده است. در این حالت یک توربین بادی به باس سوم متصل شده است و تأثیر تغییر محل خطا (اتصال کوتاه در باس‌های ۶، ۸ و ۱۰ به مدت ۰/۱ ثانیه) بر پاسخ شبکه در شکل (۲۱) نشان داده می‌شود.



الف) فرکانس



ب) ولتاژ

قرمز: اتصال کوتاه در باس ۸ سبز: اتصال کوتاه در باس ۶ آبی: اتصال کوتاه در باس ۱۰

شکل (۲۱): تأثیر محل خطا بر پاسخ شبکه در حضور یک توربین بادی همان‌طور که در شکل (۲۱) مشاهده می‌شود، با توجه به اینکه مدل کنترلی از ملاحظات LVRT استفاده شده است، در زمان خطا توان اکتیو توربین بادی کاهش یافته و توان راکتیو افزایش می‌یابد؛ لذا هرچه محل خطا به توربین بادی نزدیک‌تر باشد، پاسخ فرکانسی شبکه با توجه به کاهش توان اکتیو با نوسانات بیشتری همراه است و پاسخ دینامیکی ولتاژ بهبود می‌یابد.

## ۴- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج مشاهده شد که اگر نیروگاه‌های سنتی دارای کنترل دینامیکی باشند پاسخ دینامیکی آنها سریع‌تر است. همچنین با ایجاد

- [11] R. W. Kenyon, A. Hoke, J. Tan, and B.-M. Hodge, "Grid-Following Inverters and Synchronous Condensers: A Grid-Forming Pair?," presented at the 2020 Clemson University Power Systems Conference (PSC), 2020.
- [12] Y. Lin et al., "Research Roadmap on Grid-Forming Inverters," National Renewable Energy Laboratory, 2020.
- [13] R. W. Kenyon et al., "Stability and control of power systems with high penetrations of inverter-based resources: an accessible review of current knowledge and open questions," *Solar Energy*, vol. 210, pp. 149–16, 2020.
- [14] H. Nosair and F. Bouffard, "Flexibility Envelopes for Power System Operational Planning," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, no. 3, pp. 800 - 809, 2015.
- [15] E. H. (RISE) et al., "Flexibility needs in the future power system," *ISGAN Annex 6 Power T&D Systems*, 2019.
- [16] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill Education, 1994.
- [17] J. Shair, H. Li, J. Hu, and X. Xie, "Power system stability issues, classifications and research prospects in the context of high-penetration of renewables and power electronics," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 145, 2021.
- [18] A. Fernández-Guillamón, E. Gómez-Lázaro, E. Muljadi, and Á. Molina-García, "Power systems with high renewable energy sources: A review of inertia and frequency control strategies over time," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 115, pp. 1-12, 2019.

[۱۹] حضوری، محمدامین، علی، محمود و معین "کمینه‌سازی کاهش اجباری توان تولیدی مزارع بادی با بهره‌گیری از یک راهکار کوتاه‌مدت ابتکاری بر مبنای بازپخش واحدهای فسیلی"، *نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران*، سال ۱۳، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵.

[۲۰] پورحسین، جواد "ارزیابی دینامیکی قابلیت‌های SIPC و بررسی تأثیر آن بر پایداری گذرای سیستم قدرت"، *نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران*، سال ۱۹، شماره ۱، بهار ۱۴۰۱.

- [21] R. Hiremath and T. Moger, "Comprehensive review on low voltage ride through capability of wind turbine generators," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 30, no. 10, pp. 1-39, 2020.
- [22] L. Meegahapola and D. Flynn, "Impact on transient and frequency stability for a power system at very high wind penetration," presented at the IEEE PES General Meeting, 2010.
- [23] J. Đaković, M. Krpan, P. Tomislav, and B. Kuzle, "Impact of wind capacity share, allocation of inertia and grid configuration on transient RoCoF: The case of the Croatian power system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 121, pp. 1-8, 2020.
- [24] J. Rezaei, M. E. Hamedani Golshan, and H. H. Alhelou, "Impacts of integration of very large-scale photovoltaic power plants on rotor angle and frequency stability of power system," *IET Renewable Power Generation*, vol. Early View, pp. 1-18, 2022.
- [25] Ch. Liu, G. Cai "Power-oscillation evaluation in power systems with high penetration of renewable power generation based on network virtual inertia," *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 1, pp. 138-145, 2018.
- [26] E. A. Feilata, S. Azzamb, and A. Al-Salaymehc, "Impact of large PV and wind power plants on voltage and frequency stability of Jordan's national grid," *Sustainable Cities and Society*, vol. 36, pp. 257-271, 2018.
- [27] H. M. Sultan, A. A. Zaki, O. N. Kuznetsov, Z. M. Ali, and O. Abdalla, "Evaluation of the Impact of High

خطا در شبکه، انتخاب یک استراتژی کنترل دینامیکی مناسب برای توربین‌های بادی منجر به تغییرات و نوسانات کمتر ولتاژ و بعضاً بیشتر فرکانس نسبت به حالتی که توربین بادی چنین کنترلی نداشته باشد، می‌شود که با توجه به الزامات LVRT توجیه شد. همچنین افزایش مدت زمان خطا منجر به تغییرات شدیدتری می‌شود. در حالتی دیگر هر چه محل خطا به توربین بادی نزدیک‌تر باشد با توجه به راهبرد LVRT، پاسخ‌های فرکانس و ولتاژ به ترتیب دارای نوسانات بیشتر و کمتری هستند.

## سپاسگزاری

این پروژه با حمایت مالی مرکز مطالعات و همکاری‌های علمی بین‌المللی وزارت علوم تحقیقات و فناوری انجام شده است. نویسندگان مقاله از حمایت مرکز فوق جهت انجام این پژوهش سپاسگزاری می‌نمایند.

## مراجع

- [1] R. Shah, N. Mithulananthan, R. C. Bansal, and V. K. Ramachandaramurthy, "A review of key power system stability challenges for large-scale PV integration," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, pp. 1423–1436, 2015.
- [2] "RENEWABLES 2021 GLOBAL STATUS REPORT," 2021. [Online]. Available: [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf)
- [3] <https://www.irena.org/> (accessed).
- [4] B. K. Bose, *Power Electronics in Renewable Energy Systems and Smart Grid: Technology and Applications* (IEEE Press Series on Power and Energy Systems). John Wiley & Son, 2019.
- [5] B. Tamimi, C. Cañizares, and K. Bhattacharya, "System Stability Impact of Large-Scale and Distributed Solar Photovoltaic Generation: The Case of Ontario, Canada," *IEEE Transactions on Sustainable Energy* vol. 4, no. 3, pp. 680 - 688, 2013.
- [6] Y. Lin, B. Johnson, V. Gevorgian, V. Purba, and S. Dhople, "Stability assessment of a system comprising a single machine and inverter with scalable ratings," presented at the 2017 North American Power Symposium (NAPS), 2017.
- [7] J. M. Y. Qiu, Y. Li, W. Zhang, Z. Song, and J. S. Thorp, "Research on the impact of DFIG virtual inertia control on power system small-signal stability considering the phase-locked loop," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 3, pp. 2094-2105, 2017.
- [8] S. Eftekharijrad, V. Vittal, G. T. Heydt, and B. K. J. Loehr, "Impact of Increased Penetration of Photovoltaic Generation on Power Systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 893-901, 2013.
- [9] S. Impram, S. V. Nese, and B. Oral, "Challenges of renewable energy penetration on power system flexibility: A survey," *Energy Strategy Reviews*, vol. 31, 2020.
- [10] B. Kroposki et al., "Achieving a 100% Renewable Grid: Operating Electric Power Systems with Extremely High Levels of Variable Renewable Energy," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 15, no. 2, pp. 61-73, 2017.

- Penetration Levels of PV Power Plants on the Capacity, Frequency and Voltage Stability of Egypt's Unified Grid," *Energies*, vol. 12, no. 3, pp. 1-22, 2019.
- [28] R. Preece, *Improving the Stability of Meshed Power Networks*. Springer, 2013.
- [29] F. Blaabjerg, *Control of Power Electronic Converters and Systems*. Elsevier Science, 2021.
- [30] F. M. Gonzalez-Longatt and J. L. R. Torres, *Longatt, Modelling and Simulation of Power Electronic Converter Dominated Power Systems in PowerFactory*. Springer, 2021.
- [31] NEPLAN. *Standard Dynamic Turbine-Governor Systems in NEPLAN Power System Analysis Tool* [Online] Available: [www.neplan.ch](http://www.neplan.ch)
- [32] H. Hellebust, "Analysis of frequency stability: How wind power and HVDC connections affect the future power system," Master, Norwegian University of Science and Technology, 2018.
- [33] D. Gusain, "Parameter Identification of Dynamic Equivalents for Active Distribution Systems using Heuristic Optimisation Techniques," Master, Delft University of Technology, 2016.

## زیر نویس ها

<sup>1</sup> Grid-Following

<sup>2</sup> High Voltage Ride Through (HVRT)

<sup>3</sup> Low Voltage Ride Through (LVRT)

<sup>4</sup> Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS)

<sup>5</sup> Rate of Change of Frequency (RoCoF)

<sup>6</sup> Fault Ride Through (FRT)

<sup>7</sup> Zero Voltage Ride Through (ZVRT)

