نشریه انرژی ایران
۸۱ سال ۱۱ شماره ۲۷ خرداد ۱۳۸۷

بهبود پایداری گذرا در نیروگاههای بادی سرعت ثابت با استفاده از مقاومت ترمزی

هادی علی‌آبادی[۱]، رضا قاضی[۲]

تاریخ دریافت مقاله:
۱۹ دی ماه ۸۶
تاریخ پذیرش مقاله:
۸ اسفندماه ۸۶

کلمات کلیدی:
مقاومت ترمزی، ژنراتور القایی ،نیروگاه بادی، پایداری گذرا، جبران سازی توان راکتیو

چکیده:
امروزه در مدار نگهداشتن نیروگاههای بادی در هنگام وقوع اغتشاشات شبکه از اهمیت خاصی برخوردار گشته است. حتی در برخی از کشورها اداره کنندگان شبکه قوانینی را وضع کرده‌اند که به موجب آن می‌بایست مزرعه بادی در هنگام مواجه شدن با اغتشاشات یا افت ولتاژهای ناگهانی، پایداری خود را حفظ نموده و در مدار باقی بماند. در این مقاله استفاده از مقاومت ترمزی موازی برای رسیدن به این مقصود پیشنهاد و مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین ترتیب که ابتدا یک مزرعه بادی متصل به شبکه که خود از چندین ژنراتور القایی تشکیل شده است همراه با سیستمهای آیرودینامیکی، مکانیکی و الکتریکی آن به طور کامل مدلسازی شده و سپس رفتار آن در هنگام ورود و خروج مقاومت ترمزی با در نظر گرفتن تأثیر میزان جبران‌سازی توان راکتیو نیروگاه و همچنین زمان عملکرد کلیدها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتها نیز مقایسه‌ای بین دو روش استفاده از سیگنال سرعت ژنراتور و سیگنال ولتاژ باس نیروگاه در پردازش عملیات کلیدزنی مقاومت ترمزی صورت می‌گیرد.

۱) ایران، شرکت برق منطقه‌ای خراسان
۲) خراسان، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه برق

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-07-27]

مقدمه

یکی از مهمترین مسائل مطرح در نیروگاههای بادی پایداری آنها در هنگام وقوع خطا و اغتشاشات شبکه می‌باشد. نیروگاههای بادی در برابر نوسانات دینامیکی ولتاژ بخصوص اتصال کوتاه و افت ولتاژهای شدید و ناگهانی بسیار ناپایدار هستند که از مهمترین علل آن استفاده از ژنراتور القایی در این نیروگاهها و در نتیجه نیاز به توان راکتیو و بالا بودن جریان مغناطیس کنندگی می‌باشد. در هنگام وقوع خطا و کاهش ولتاژ، از توان تحویلی ژنراتور به شبکه کاسته شده و ژنراتور شروع به شتاب گرفتن می‌کند. چنانچه شتاب گرفتن ژنراتور سریعتر از بازیابی ولتاژ باشد سرعت ژنراتور همچنان افزایش یافته تا آنجا که سرعت به حدی می‌رسد که ژنراتور وارد ناحیه ناپایدار خود می‌شود و کل واحد از مدار خارج می‌گردد. ورود و خروج مکرر واحد علاوه بر کاهش کیفیت برق تولیدی باعث کاهش عمر مفید آن نیز می‌گردد و همچنین در شبکه‌های ایزوله و یا کوچک باعث بر هم خوردن توازن میان تولید و مصرف می‌شود. در سالهای اخیر مطالعات پایداری نیروگاههای بادی از اهمیت خاصی برخوردار گردیده و در این زمینه تحقیقات متعددی صورت گرفته است. به عنوان مثال در مرجع [۱] پایداری گذرا و دینامیکی مزارع بادی به همراه حضور ژنراتورهای سنکرون مورد بررسی قرارگرفته است. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که عموما نیروگاههای بادی در مقایسه با نیروگاههای معمولی حساس‌تر و ناپایدارتر می‌باشند. در مرجع [۲] تاثیر نیروگاههای بادی بر روی نوسانات توان در هنگام وقوع اغتشاش مورد بررسی قرار گرفته و بیان می‌کند که وجود این نیروگاهها در شبکه به افزایش میرایی سیستم کمک می‌کند.

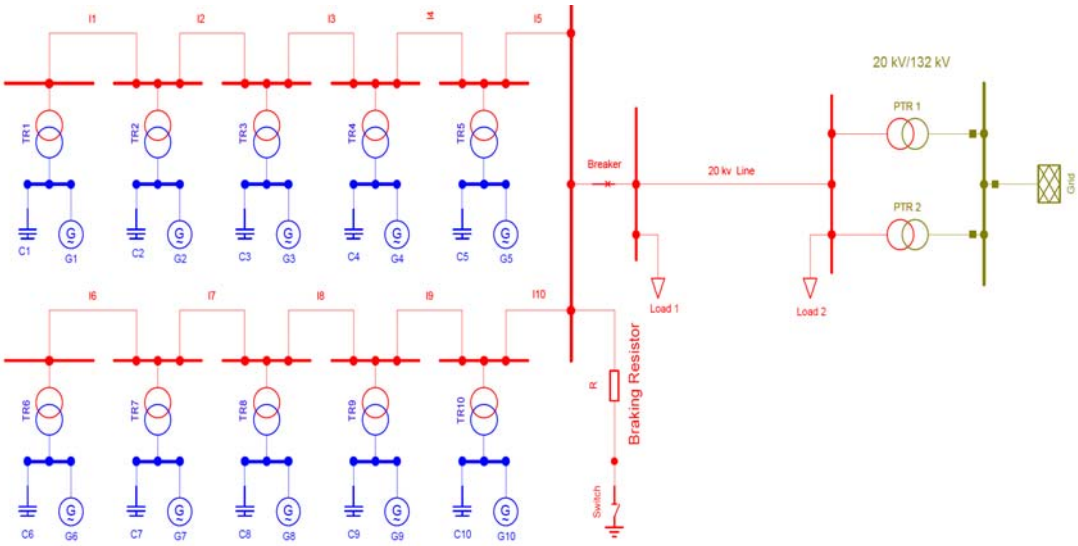
در راستای بهبود پایداری نیز روشهای متعددی ارائه و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به عنوان مثال روش کاهش توان مکانیکی ورودی در هنگام وقوع خطا که با تغییر زاویه پره‌های توربین امکان‌پذیر است توسط مراجع [۳،۴،۵،۶] مورد بحث قرار گرفته و جهت تنظیم زاویه پره‌ها بر روی حلقه کنترلی کار شده است. البته این روش فقط در توربینهایی که قابلیت تغییر زاویه پره در آنها وجود دارد امکان‌پذیر می‌باشد. در مرجع [۵] عنوان می‌شود که این سیستم به علت مکانیکی بودن و تاخیر در عملکرد آن از کارایی چندانی برخوردار نبوده و بیشتر در جلوگیری از شتاب‌گیری ژنراتور بعد از جدا شدن واحد از شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مراجع [۳،۴،۷] استفاده از تجهیز SVC و در [۸] استفاده از تجهیز STATCOM مورد بررسی قرارگرفته است. در [۴،۷] عملکرد بانک خازنی و SVC مورد مقایسه قرار گرفته و بیان شده است که SVC علاوه بر بهبود پایداری قادر به کاهش نوسانات دینامیکی ولتاژ و در نتیجه افزایش کیفیت برق می‌باشد. همچنین در مرجع [۳] نشان داده شده است که برای حفظ پایداری گذرا به کمک SVC احتیاج به مقدار قابل توجهی توان راکتیو می‌باشد. روش افزایش مقاومت روتور که در مرجع [۳،۹] به آن پرداخته است با قرار دادن یک مقاومت خارجی در مدار روتور امکان‌پذیر می‌گردد. این مقاومت در شرایط عادی توسط یک کلید اتصال کوتاه می‌باشد و در لحظه وقوع خطا با باز شدن کلید وارد مدار می‌گردد. این روش تنها در مورد ژنراتورهای روتور سیم پیچی شده که ترمینالهای آن در دسترس می‌باشد قابل پیاده سازی خواهد بود. در مرجع [۱۰] استفاده از مقاومت ترمزی برای حفظ پایداری یک ژنراتور القایی متصل به شبکه بررسی شده است. در مرجع مذکور علاوه بر بررسی تاثیر سرعت قطع کلید در حفظ پایداری، بکارگیری دو سیگنال سرعت و ولتاژ شبکه برای فرمان دادن به کلیدها را نیز مورد مقایسه قرار می‌دهد و عنوان می‌کند که از نظر عملکرد تفاوت خاصی بین این دو روش وجود ندارد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-07-27]

در مقاله حاضر استفاده از مقاومت ترمزی برای یک مزرعه بادی که شامل چندین ژنراتور القایی می‌باشد بررسی می-شود. جهت بررسی لازم است نقش مابقی المانهای الکتریکی شبکه، توربین و همچنین نوسانات مد مکانیکی ناشی از غیر صلب بودن شفت را نیز در مطالعات وارد کنیم. با این مدلسازی دقیق نشان می‌دهیم که سرعت کلیدزنی و همچنین میزان جبران‌سازی توان راکتیو نیروگاه توسط بانکهای خازنی تاثیر مهمی در چگونگی رفتار ژنراتورها در هنگام استفاده از مقاومت ترمزی خواهد داشت. در انتها نیز نشان داده می‌شود که استفاده از سیگنال سرعت ژنراتور به منظور پردازش و تعیین زمان کلیدزنی مقاومت ترمزی روش مناسبی نبوده و بکارگیری آن همواره موفقیت آمیز نخواهد بود.

مدلسازی نیروگاه بادی

شبکه مورد بررسی: شبکه مورد بررسی در این مطالعات در شکل (۱) نشان داده شده است. ظرفیت نیروگاه مزبور ۶/۶ مگاوات می‌باشد که از ده عدد توربین ۶۶۰ کیلوواتی از نوع پره ثابت تشکیل شده است. در هر واحد ولتاژ ۶۹۰ ولت خروجی ژنراتور توسط یک ترانس افزاینده به سطح ولتاژ ۲۰ کیلوولت افزایش داده شده و از آنجا توان تولیدی توسط یک خط دو مداره ۲۰ کیلوولت به پست فشارقوی متصل به شبکه تحویل داده می‌شود. بانکهای خازنی در نظر گرفته شده حدود ۷۰٪ از توان راکتیو مورد نیاز نیروگاه را تامین خواهند کرد. مابقی توان راکتیو مورد نیاز نیز از طریق شبکه اخذ می‌گردد. مشخصات و پارامترهای الکتریکی المانهای شبکه در ضمیمه مقاله آورده شده‌اند. مدلسازیها به صورت سه فاز در محیط نرم افزار DIgSILENT صورت گرفته و در شبیه‌سازی از مد EMT نرم‌افزار استفاده شده است. استفاده از این مد باعث می‌شود تا تاثیرگذاری الکترومغناطیسی بوجود آمده در ژنراتور و شبکه نیز در شبیه‌سازی‌های وارد گردد.



شکل(۱): دیاگرام تک خطی شبکه مورد بررسی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-07-27]

مدل توربین: توربین از نوع سه پره‌ای با محور افقی و پره ثابت فرض شده است. توان خروجی توربین از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$P_{Wind} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \qquad (۱)$$

که در آن V سرعت باد، R شعاع توربین، ρ چگالی هوا و C_P ضریب راندمان آیرودینامیکی توربین می‌باشد. مقدار C_P را می‌توان برای توربینهای سه پره‌ای از روابط زیر بدست آورد [۱۱]:

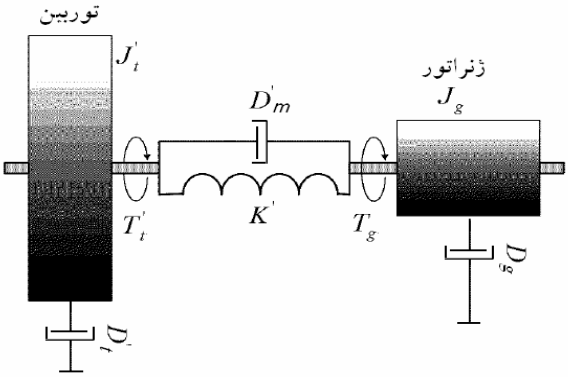
$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \qquad (۲)$$

$$\lambda_i = 1/(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}) \qquad (۳)$$

$$C_P = 0.22\ (\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5)e^{\frac{-12.5}{\lambda_i}} \qquad (۴)$$

ω سرعت چرخش زاویه‌ای توربین و β زاویه پره‌ها می‌باشد که در اینجا به علت ثابت بودن پره‌ها صفر در نظر گرفته می‌شود. تمامی روابط مذکور در یک بلوک و در محیط DSL نرم‌افزار نوشته شده است.

مدل شفت و گیربکس: در مدلسازی مجموعه روتور، شفت وگیربکس که اصطلاحا Drive-Train نامیده می‌شود از مدل دو جرمی استفاده می‌گردد [۱۲]. استفاده از این مدل دقیق بجای مدل تک جرمی باعث می‌شود تا بتوان نقش نوسانات مد مکانیکی را نیز که ناشی از غیرصلب بودن شفت می‌باشد در مطالعات وارد نمود. در این مدل مجموعه توربین و گیربکس به عنوان یک جرم و روتور ژنراتور و ملحقات آن به عنوان به یک جرم مجزای دیگر در نظر گرفته می‌شوند شکل (۲). شفت سرعت بالا نیز به صورت یک جسم غیرصلب که دو جرم مذکور را به یکدیگر متصل می‌کند شبیه‌سازی می‌شود.



شکل(۲): مدل مکانیکی شفت توربین بادی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-07-27]

با توجه به شکل (۲) روابط زیر را می‌توان نوشت [۱۲] :

$$T_t^{'} = J_t^{'}\frac{d\omega_t^{'}}{dt} + D_m^{'}(\omega_t^{'} - \omega_g) + D_t^{'}\omega_t^{'} + K^{'}(\theta_t^{'} - \theta_g) \quad (۵)$$

$$\omega_t^{'} = \frac{d\theta_t^{'}}{dt} \quad (۶)$$

$$-T_g = J_g\frac{d\omega_g}{dt} + D_e^{'}(\omega_g - \omega_t^{'}) + D_g^{'}\omega_g + K^{'}(\theta_g - \theta_t^{'}) \quad (۷)$$

$$\omega_g = \frac{d\theta_g}{dt} \quad (۸)$$

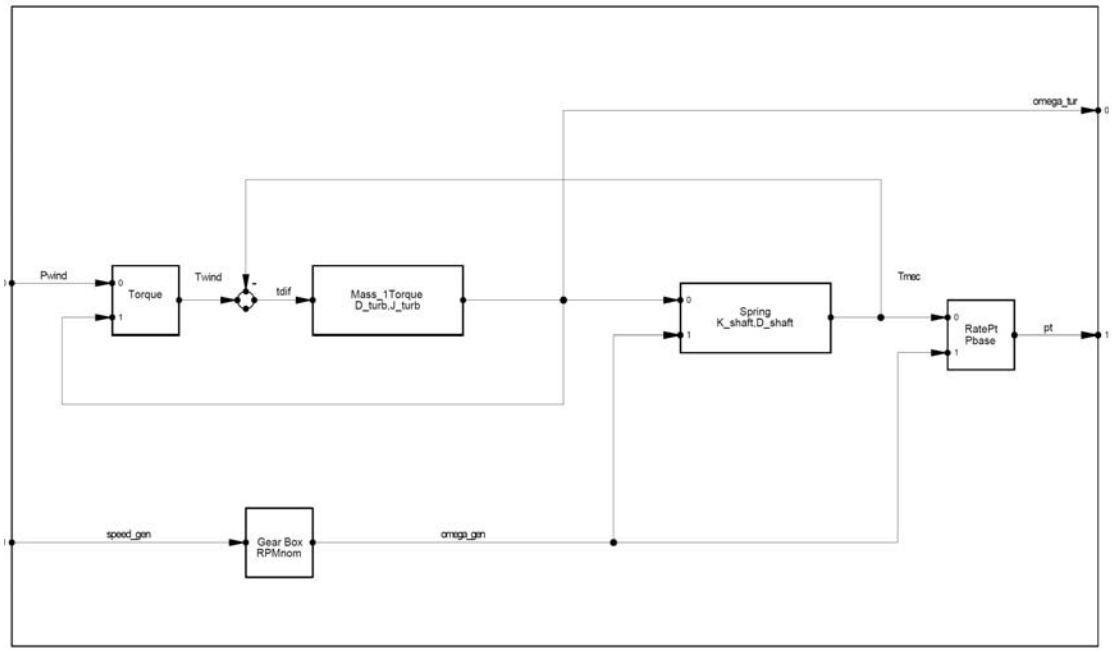
$$J_t^{'} = \frac{1}{n^2}J_t \quad (۹)$$

$$k^{'} = \frac{k_g \times k_t / n^2}{k_g + k_t / n^2} \quad (۱۰)$$

$$D_t^{'} = \frac{1}{n^2}D_t \quad (۱۱)$$

$$D_m^{'} = \frac{1}{n^2}D_m \quad (۱۲)$$

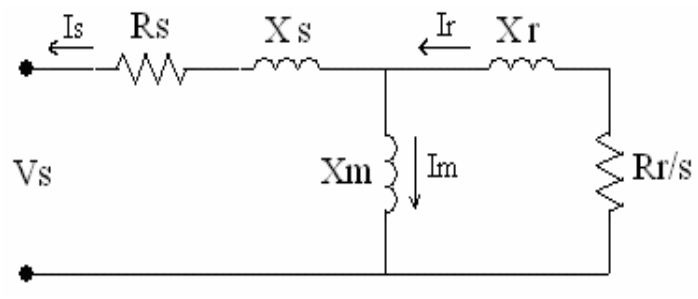
n نسبت تبدیل دور گیربکس می‌باشد. در این روابط کمیات سمت محور سرعت پایین (محور توربین) به سمت محور سرعت بالا (محور ژنراتور) منتقل شده‌اند که برای نشان دادن آنها از علامت " ' " استفاده شده است. با استفاده از روابط ارائه شده بلوک دیاگرام شبیه‌سازی مجموعه شفت و گیربکس در محیط نرم‌افزار DIgSILENT به صورت شکل (۳) در می‌آید.



شکل (۳): پیاده سازی مدل مجموعه شفت و گیربکس

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-07-27]

مدل ژنراتور: برای این منظور از مدل ژنراتور القایی نوع قفس سنجابی موجـود در نـرم‌افـزار DIgSILENT استفاده شده است. در این نرم‌افزار ژنراتور با استفاده از مدار معادل شکل (٤) با در نظر گرفتن گذراهای روتور و استاتور و بصورت سه فاز مدلسازی گردیده است. پارامترهای ژنراتور در ضمیمه آورده شده است.

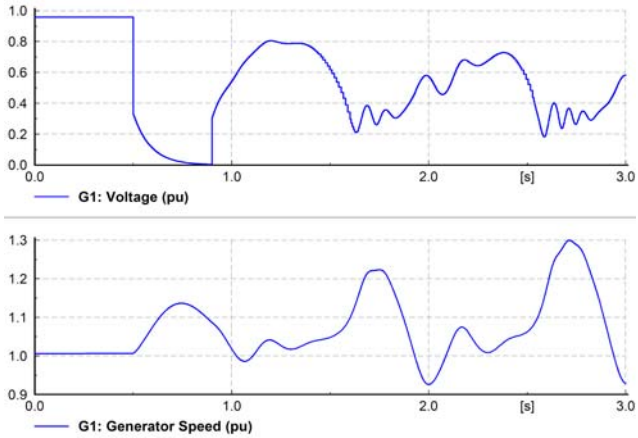


شکل(۴): مدار معادل ژنراتور القایی

مدل شبکه و دیگر تجهیزات: در مدلسازی شبکه و المانهای آن مانند ترانسفورماتورها، خط انتقال، بار و بانک خازنی از مدلهای موجود در نرم افزار استفاده می‌شود. نرم افزار مذکور مدل دقیق و مناسبی از این المانها را در اختیار قرار می‌دهد. برای مشاهده پارامترهای شبکه و تجهیرات آن می‌توان به ضمیمه مقاله مراجعه نمود.

نیروگاه بادی بدون مقاومت ترمزی: ابتدا رفتار نیروگاه را بدون حضور مقاومت ترمزی در هنگام خطا بررسی می‌کنیم. ژنراتورها در توان نامی خود قرار دارند و خطای سه فاز متقارن به مدت ۴۰۰ میلی‌ثانیه و در لحظه t=0.5 s در باس اصلی نیروگاه اتفاق می‌افتد. همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود به ازای چنین خطایی سیستم ناپایدار می‌گردد و سرعت ژنراتور به طور نوسانی افزایش می‌یابد. علت ناپایداری، عدم بازگشت ولتاژ بدلیل ضعف شبکه و بالا بودن توان راکتیو مصرفی نیروگاه پس از رفع خطا می‌باشد. در مدت زمانی که خطا وجود دارد مشاهده می‌شود با اینکه ولتاژ همچنان پایین می‌باشد اما سرعت ژنراتور پس از مدتی کاهش یافته و دوباره به مقدار اولیه خود و حتی کمتر از آن باز می‌گردد. دلیل چنین پدیده‌ای غیر صلب بودن محور توربین است که نوسانات مد پیچشی را در سرعت ژنراتور بوجود می‌آورد. چنانچه در این مطالعات محور را به صورت صلب در نظر می‌گرفتیم سرعت ژنراتور در مدت زمان حضور خطا بطور خطی افزایش می‌یافت.

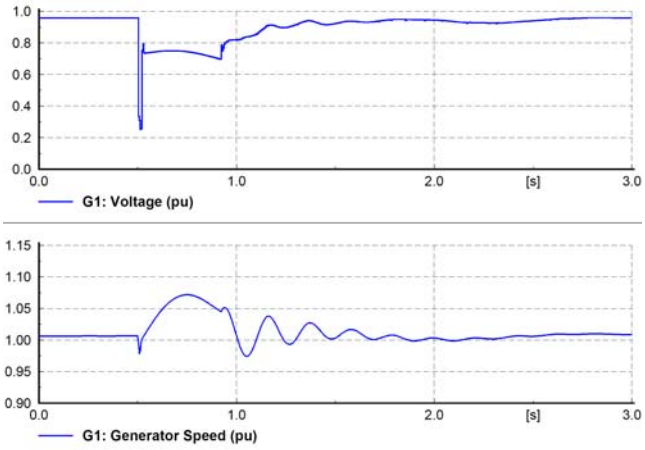
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-07-27]



شکل(۵): رفتار ناپایدار ژنراتور واحد شماره ۱ در هنگام وقوع خطا

نیروگاه بادی همراه با مقاومت ترمزی:

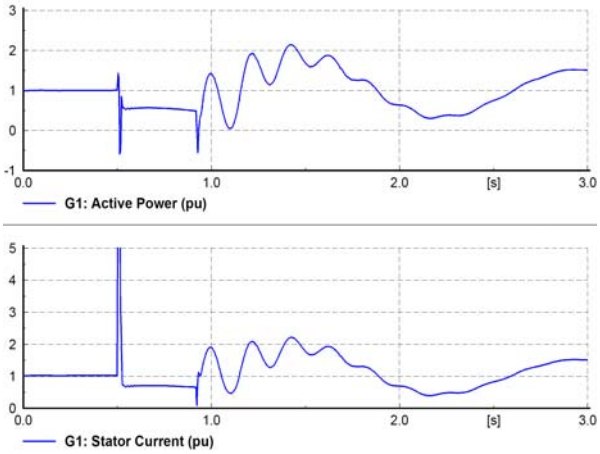
حال با استفاده از یک مقاومت ترمزی که در باس اصلی نیروگاه قرار دارد سعی می‌کنیم ژنراتورها را پایدار نگه داریم. بدین ترتیب که به محض وقوع خطا کلید اصلی نیروگاه عمل کرده و نیروگاه از شبکه جدا می‌گردد. سپس با ارسال فرمان وصل به کلید مقاومت ترمزی، مقاومت وارد مدار شده و با مصرف کردن توان تولیدی نیروگاه از شتاب‌گیری ژنراتورها جلوگیری می‌کند. پس از برطرف شدن خطا مقاومت از مدار خارج شده و نیروگاه مجددا به شبکه متصل می‌گردد. توان مقاومت برابر با توان نامی نیروگاه می‌باشد و میزان تاخیر در عملکرد کلید اصلی نیروگاه ۲۰ میلی‌ثانیه در نظر گرفته می‌شود. شکلهای (۶) و (۷) چگونگی تغییرات ولتاژ، سرعت، توان اکتیو و جریان یکی از ژنراتورها را برای چنین حالتی نشان می‌دهد. ژنراتور پایداری خود را حفظ می‌کند اما نکته قابل توجه اینجاست در مدتی که نیروگاه از شبکه جدا می‌باشد (t=0.52 s تا t=0.92 s) ولتاژ آن کمتر از مقدار نامی بوده و به آرامی نیز کاهش می‌یابد.



شکل(۶): حفظ پایداری ژنراتور با استفاده از مقاومت ترمزی، زمان قطع کلید ۲۰ میلی ثانیه و جبرانسازی ۷۰ درصد

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-07-27]

در مدت ایزوله بودن نیروگاه از شبکه توان اکتیو و جریان ژنراتور نیز کمتر از مقدار نامی خود می‌باشند و وجود همین اختلافات باعث می‌گردد تا در هنگام وصل مجدد واحدها به شبکه شاهد وقوع گذراهایی در جریان و توان خروجی باشیم. شکل (۷).

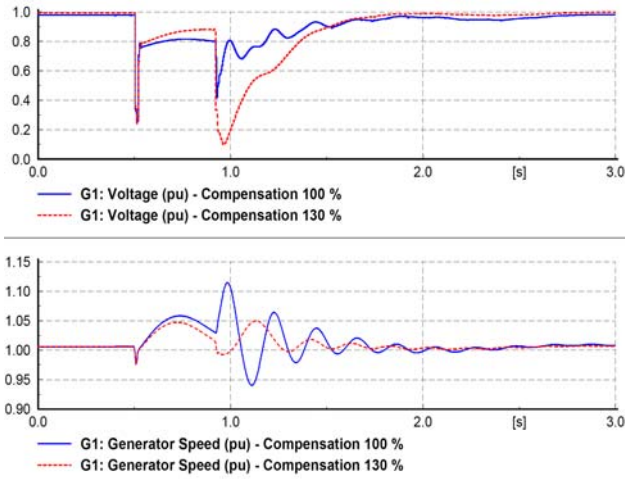


شکل(۷): تغییرات توان اکتیو و جریان ژنراتور در حالت استفاده از مقاومت ترمزی، زمان قطع کلید ۲۰ میلی ثانیه و جبران‌سازی ۷۰ درصد

علت وجود اختلاف بین ولتاژ شبکه و ولتاژ نیروگاه تغییر نقطه کار سیستم در مدت ایزوله بودن نیروگاه از شبکه می‌باشد. در ژنراتورهای القایی بر خلاف ژنراتورهای سنکرون تحریک مورد نیاز از طریق مدار استاتور تامین می‌شود و ولتاژ خروجی بستگی به توان راکتیو تحویلی به ماشین دارد. هر گونه تغییر در ولتاژ استاتور، تحریک ماشین و جریانهای روتور را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. به طوری که اگر ولتاژ استاتور صفر گردد جریان مدار روتور نیز پس از مدت زمانی به صفر میل می‌کند. در لحظاتی که هنوز کلید اصلی عمل قطع را انجام نداده است (t=0.5 s تا t=0.52 s) ولتاژ استاتور به علت وجود خطا بشدت کاهش می‌یابد و در جریانهای داخلی ماشین بخصوص جریان روتور تغییرات شدیدی رخ می‌دهد. بنابراین در لحظه‌ای که نیروگاه از شبکه جدا می‌گردد (t=0.52 s) نقطه کار سیستم کاملا تغییر نموده است و ولتاژ تولیدی برابر با مقداری می‌گردد که بستگی به جریانهای داخلی ماشین در آن لحظه دارد. هر چقدر زمان عملکرد کلید بیشتر باشد ولتاژ تولید شده در لحظات اولیه قطع کلید کمتر است. این نقطه کار گذرا می‌باشد که به تدریج و با سرعت کمی به سمت یک نقطه کار پایدار پیش می‌رود. نقطه کار پایدار بستگی به میزان بار و همچنین میزان جبران‌سازی توان راکتیو مورد نیاز ژنراتور دارد. ولتاژ و فرکانس نهایی ممکن است با ولتاژ و فرکانس شبکه برابر نباشد اما بدلیل اینرسی بالای سیستم، انحراف فرکانسی در مدت ایزوله بودن نیروگاه کوچک خواهد بود. عمده تغییرات بیشتر در ولتاژ تولیدی اتفاق می‌افتد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-07-27]

در شکل (۶) مشاهده می‌شود که در مدت جدا بودن ژنراتور از شبکه، ولتاژ خروجی به تدریج کاهش می‌یابد. علت این امر کمبود توان راکتیو است. در حالت عادی بخشی از توان راکتیو مورد نیاز توسط شبکه تامین می‌گشته اما حال بدلیل جدا شدن شبکه تنها بانکهای خازنی این وظیفه را بر عهده خواهند داشت. چنانچه ظرفیت بانکهای خازنی کمتر از مقدار مورد نیاز باشد ولتاژ کاهش می‌یابد و چنانچه بیشتر از میزان لازم باشد ولتاژ شروع به افزایش می‌کند. برای روشن شدن موضوع در شکل (۸) رفتار ژنراتور برای حالتهای جبرانسازی توان راکتیو ۱۰۰ درصد و ۱۳۰ درصد آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود برای حالت جبران‌سازی ۱۳۰ درصد، ولتاژ بتدریج افزایش می‌یابد در حالی که برای جبران سازی ۱۰۰ درصد ولتاژ تقریبا ثابت مانده است.

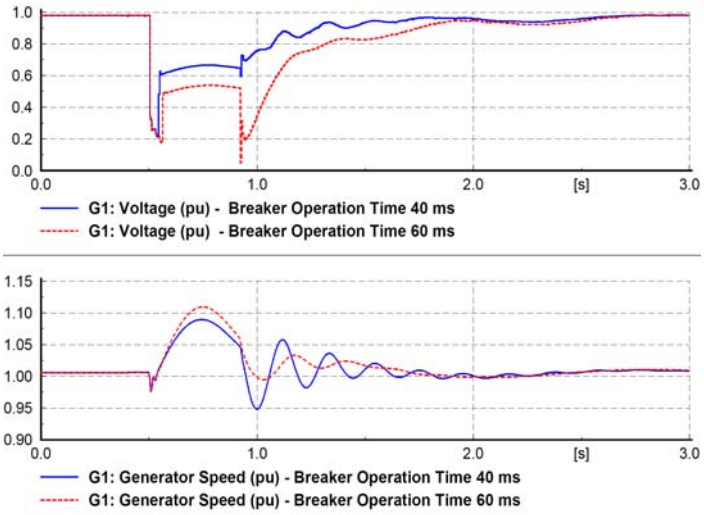


شکل(۸): نمودارهای ولتاژ و سرعت ژنراتور برای دوحالت جبران‌سازی توان راکتیو ۱۰۰ درصد و ۱۳۰ درصد و زمان عملکرد کلید ۲۰ میلی‌ثانیه

نقش سرعت قطع کلید در هنگام استفاده از مقاومت ترمزی

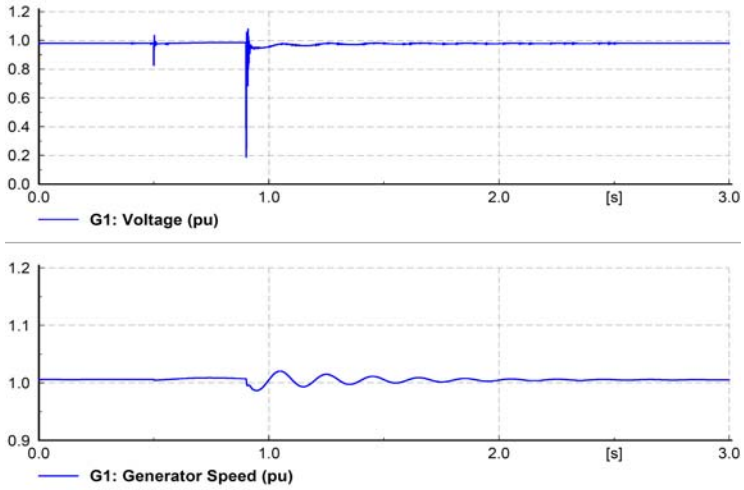
همانطور که گفته شد هر چقدر زمان عملکرد کلید اصلی بیشتر باشد ولتاژ تولیدی در لحظات اولیه جدا شدن از شبکه کمتر خواهد بود. از نظر تئوری اگر زمان مذکور به بی نهایت میل کند ولتاژ بدست آمده صفر خواهد بود. اما در عمل بدلیل پس‌ماند مغناطیسی موجود در هسته ولتاژ کوچکی را در خروجی خواهیم داشت. این قضیه را می‌توان مشابه با راه‌اندازی یک ژنراتور القایی به صورت خود تحریک دانست. برای مشخص شدن تاثیر زمان عملکرد کلید، در شکل (۹) نتایج شبیه‌سازی برای دو حالت ۴۰ میلی‌ثانیه و ۶۰ میلی‌ثانیه تاخیر در کلیدزنی آورده شده است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-07-27]



شکل(۹): نمودارهای ولتاژ و سرعت ژنراتور برای دو حالت ۴۰ میلی‌ثانیه و ۶۰ میلی‌ثانیه تاخیر در عملکرد کلید و جبرانسازی ۱۰۰ درصد

مشاهده می‌گردد که در مدت ایزوله بودن نیروگاه ولتاژ خروجی برای تاخیر ۴۰ میلی‌ثانیه بیشتر از ولتاژ بدست آمده برای تاخیر ۶۰ میلی‌ثانیه است. چنانچه نیروگاه همچنان ایزوله باقی بماند نهایتا مقادیر ولتاژ پس از طی مدت زمانی هر دو به یک عدد خواهند رسید. مدت زمان مذکور در مقایسه با زمان جدا بودن نیروگاه از شبکه بسیار زیاد می‌باشد که در اینجا مشاهده نمی‌گردد. یک نمونه شبیه‌سازی نیز با فرض آنی بودن عمل قطع کلید و جبرانسازی ۱۰۰ درصد در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود ولتاژ نیروگاه در مدت جدا بودن از شبکه برابر با ولتاژ نامی است و در همان مقدار نیز ثابت خواهد ماند.

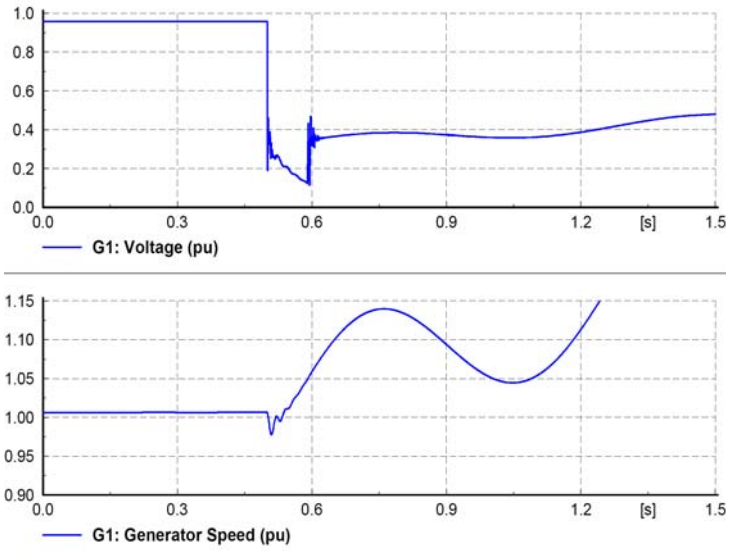


شکل(۱۰): تغییرات ولتاژ و سرعت ژنراتور با فرض عملکرد آنی کلید و جبرانسازی ۱۰۰ درصد

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-07-27]

استفاده از سیگنال سرعت در ارسال فرمان قطع کلید

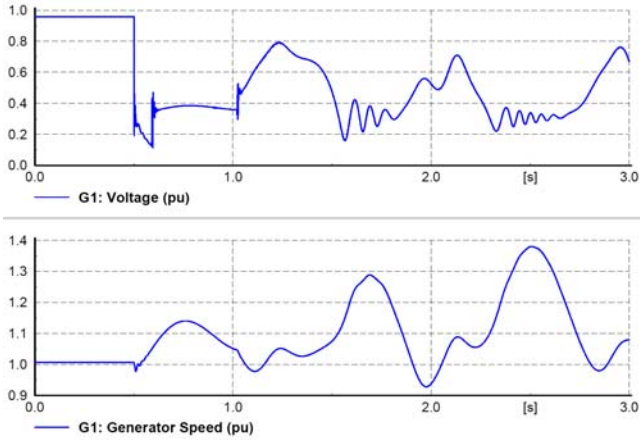
در اینجا بررسی می‌کنیم که آیا می‌توان بجای سیگنال ولتاژ از سرعت ژنراتور برای پردازش فرمانهای قطع و وصل استفاده نمود یا خیر. این موضوع در [۸] مورد بررسی قرار گرفته است و عنوان می‌کند که از نظر کارایی تفاوتی بین این دو روش وجود ندارد ولی استفاده از روش سیگنال ولتاژ را به دلیل سادگی آن به روش دیگر ترجیح می‌دهد. در اینجا نشان می‌دهیم که استفاده از سیگنال سرعت ژنراتور در ارسال فرمان به کلید همواره جوابگوی طرح نخواهد بود. در استفاده از سیگنال سرعت روش کار بدین صورت است که با افزایش سرعت ژنراتور از یک حد مشخص فرمان قطع به کلید اصلی نیروگاه و فرمان وصل به کلید مقاومت ترمزی صادر می‌شود و پس از مدتی با نزدیک شدن سرعت ژنراتور به مقدار اولیه خود، با ارسال فرمان قطع به کلید مقاومت ترمزی و فرمان وصل به کلید اصلی، نیروگاه مجددا به شبکه متصل می‌گردد. به دو دلیل استفاده از این روش توصیه نمی‌گردد. اول اینکه بدلیل اینرسی روتور، جهت رسیدن سرعت ژنراتور به حد مورد نیاز برای ارسال فرمان قطع قدری زمان لازم می‌باشد که به زمان تاخیر در عملکرد کلید افزوده می‌شود. دوم اینکه بسته به میزان جبران سازی امکان دارد مدت زمان زیادی بطول بیانجامد تا دوباره سرعت ژنراتور به مقدار اولیه خود نزدیک شود و یا اینکه ممکن است هیچگاه چنین اتفاقی نیافتد که در اینصورت از نظر صدور فرمان وصل به کلید اصلی نیروگاه با مشکل مواجه می‌شویم. در شکل (۱۱) این مشکل یعنی ناپایداری ژنراتور به علت وجود تاخیر زیاد در عملیات کلیدزنی نشان داده شده است.



شکل(۱۱): ولتاژ و سرعت ژنراتور در هنگام عملیات کلیدزنی با استفاده از سیگنال سرعت

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-07-27]

در اینجا فرمان قطع به کلید اصلی نیروگاه و فرمان وصل به کلید مقاومت ترمزی داده می‌شود و اینکار وقتی انجام می‌گردد که سرعت از pu ۱/۰۳ فراتر رود. ۲۰ میلی‌ثانیه تاخیر نیز برای عملکرد کلید در نظر گرفته می‌شود و میزان جبران سازی توان راکتیو۷۰ درصد می‌باشد. ملاحظه می‌گردد که به علت تاخیر زیاد در انجام عمل قطع، ولتاژ خروجی مقدار کمی خواهد داشت و از این رو هیچگاه سرعت ژنراتور به مقدار اولیه خود باز نمی‌گردد. به همین خاطر ناچاریم فرمان وصل را وقتی صادر کنیم که سرعت از ۱/۰۵ پریونیت پایینتر بیاید. با این وجود همانطور که در شکل (۱۲) دیده می‌شود این طرح ناموفق بوده و بدلیل تاخیرهای زیادی که در سیستم وجود دارد امکان حفظ پایداری ژنراتور میسر نمی‌گردد.



شکل(۱۲): نمودارهای ولتاژ و سرعت ژنراتور در هنگام عملکرد قطع کلید با استفاده از سیگنال سرعت

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در مقاله حاضر امکان استفاده از مقاومت ترمزی را برای نیروگاههای بادی مورد بررسی قرار دادیم. نتایج بدست آمده را می‌توان در قالب سه نتیجه گیری کلی به صورت زیر بیان نمود:

۱- استفاده از مقاومت ترمزی در نیروگاههای بادی از پیچیدگی و محدودیتهای بیشتری در مقایسه با نیروگاههای معمولی برخوردار است. وجود ژنراتور القایی در ساختمان این نیروگاهها و متعاقبا نیاز به جبران‌سازی توان راکتیو عامل اصلی پیدایش چنین مشکلاتی می‌باشد.

۲- در طول دوره حفظ پایداری و ایزوله بودن نیروگاه از شبکه دو فاکتور زمان عملکرد کلیدها و میزان جبران‌سازی توان راکتیو بیشترین تاثیر را در رفتار نیروگاه خواهند داشت. نکته قابل توجه دیگر گذراها و اضافه جریانهایی است که در

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-07-27]

هنگام وصل مجدد واحدها به شبکه بوجود می‌آید. با انتخاب مناسب میزان جبران‌سازی و افزایش سرعت کلیدزنی می‌توان گذراهای مذکور را تا حد زیادی کاهش داد.

۳- در دو روش استفاده از سیگنال سرعت و سیگنال ولتاژ برای تعیین زمان کلیدزنی، روش استفاده از سیگنال سرعت بدلیل وجود تاخیرهای زیاد موجود در آن توصیه نمی‌گردد.

منابع

[1] A.R.Katančević, "Transient and Dynamic Stability on Wind Farms", Helsinki University of Technology, March, 2003.

[2] J.G Slootweg, W.L. Kling، "The Impact of Large Scale Wind Power Generation on Power System Oscillations", Electrical Power System Research 67 (2003) 9-20.

[3] V.Akhmatov, H.Knudsen, A.H.Nielsen, J.K.Pedesen, "Modeling and Transient Stability of Large Wind Farms", Electrical Power Energy System 25 (2003) 123-144.

[4] T.Sun, Z.Chen, "Voltage Recovery of Grid-Connected Wind Turbine after a Short-Circuit Fault", IEEE 2003.

[5] K.rajambal, B.Umamaheswari, C.Chellamuthu, "Electrical Braking of Large Wind Turbines", Renewable Energy 30 (2005) 2235-2245

[6] M.G.Kanabar, S.A.Khaparde, "Rotor Speed Stability Analysis of Constant Speed Wind Turbine Generators" , IEEE 2006

[7] C.Chompoo-inwai,C.Yingvivatanapong, K.Methaprayoon, W.J.Lee, "Reactive Compensation Techniques to Improve the Ride-Through Capability of Wind Turbine During Disturbance", IEEE Transaction on Industry Application, Vol. 41, No. 3, May/June 2005.

[8] A.Arulampalam, M.Barnes, N.Jenkins, J.B. Ekanayake, "Power quality and stability improvement of a wind farm using STATCOM supported with hybrid battery energy storage", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib, Vol. 153, No.6, November 2006.

[۹] علی‌آبادی، ر. قاضی، " بررسی و شبیه‌سازی روشهای پیشنهادی بهبود پایداری دینامیکی نیروگاههای بادی سرعت ثابت با استفاده از نرم‌افزار PSCAD/EMTDC"، بیست و یکمین کنفرانس بین‌المللی برق، ۱۳۸۵.

[10] W.Freitas, A.Morelato, W.Xu, "Improvement of Induction Generator Stability Using Braking Resistors" IEEE Transactions on Power Systems, VOL. 19,NO.2, MAY 2004.

[11] .Sun, Z.Chen, "Voltage Recovery of Gride-Connected Wind Turbine after a Short-Circuit Fault", IEEE 2003.

[12] F.Iov, A.D.Hansen, P.Sorensen, F.Blaabjerg "Wind Turbine Blockset in Matlab/Simulink", Aalborg University, March 2004.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-07-27]

ضمیمه: پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی

ژنراتور:	بانک خازنی (۷۰٪) :
P=660 kW	250 kVAr
PF= 0.91	
V=690 V	ترانسفورماتور 0.69/20 kV :
Rs=0.0064 pu	S= 800 kVA
Xs=0.049 pu	X=0.04 pu
Rr=0.006 pu	ترانسفورماتور 20/132 kV :
Xr=0.0589 pu	S= 30 MVA
Xm=2.88 pu	X=12 pu
Jg=29 kgm^2	خط انتقال:
Hg= 0.5 s	V=20 kV
توربین:	Shor Lines:
R=23.5 m	R=0.08 Ω ، X=0.1 Ω
ρ =1.225 kg/m^3	Long Line:
Dt=100 Nms/rad	R=5.4 Ω ، X=6.9 Ω
Jt=22000 kgm^2	بار:
Ht= 1.5 s	Load 1=5 MW, 2 MVAr
محور وگیربکس:	Load 2=30 MW, 10 MVAr
Dm=1000 Nms/rad	شبکه:
Ks=4330000 Nms/rad	V=132 kV
n=52.6	Ssc= 450 MVA

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-07-27]

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-07-27]