

## بهبود جبران‌سازی راه‌اندازی توربین انبساطی توسط DVR بهبودیافته و STATCOM در نیروگاه نکا تحت شرایط خطا

محمدعلی نوروزی<sup>۱</sup>، جواد علمایی<sup>۲\*</sup>، گئورگ قره‌پتیان<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

alinorozy664@yahoo.com

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

j\_olamaei@azad.ac.ir

<sup>۳</sup> استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

grptian@aut.ac.ir

چکیده: به منظور جلوگیری از اتلاف انرژی توسط شیر فشارشکن در ایستگاه تقلیل فشار گاز نیروگاه حرارتی نکا، توربین انبساطی به ظرفیت ۹/۸ مگاوات برای این نیروگاه تهیه و نصب شد. راه‌اندازی توربین انبساطی به علت جذب ۶۳ مگاوار توان راکتیو موجب افت ولتاژ شدیدی در شبکه مصرف داخلی نیروگاه می‌شود. در این مقاله، ضمن آسیب‌شناسی تأثیر خطا بر عملکرد توربین‌های انبساطی به بهبود عملکرد آن‌ها هنگام وقوع خطا در شبکه توسط بازباننده دینامیک ولتاژ (DVR) بهبودیافته و جبران‌ساز سنکرون استاتیک (STATCOM) پرداخته خواهد شد. جهت بهبود عملکرد DVR انواع توپولوژی‌ها و استراتژی‌های کنترلی جبران‌ساز DVR مورد بررسی و توپولوژی بهبودیافته ارائه شده است. در ادامه برای عملکرد بهینه جبران‌سازها، نقاط ممکن حضور آن‌ها در شبکه مصرف داخلی نیروگاه نکا در سناریوهای گوناگون تحت شرایط وقوع شدیدترین اغتشاش، همزمانی راه‌اندازی و وقوع خطا مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار PSCAD/EMTDC نشان می‌دهد در صورت استفاده از DVR با توپولوژی بهبودیافته و استراتژی تزریق حداقل توان اکتیو، شدیدترین کمبود ولتاژها در سناریوهای مختلف جبران‌سازی شده و می‌توان کل انرژی شبکه مصرف داخلی این نیروگاه را به جای استفاده از توان تولیدی نیروگاه از طریق توربین انبساطی تأمین کرد.

واژه‌های کلیدی: توربین انبساطی، راه‌اندازی، شرایط خطا، توپولوژی بازباننده دینامیک ولتاژ، جبران‌ساز.

## ۱. مقدمه

فاصله بسیار زیاد نیروگاه ها و شهرها از مراکز استخراج گاز، منجر به کاهش شدید فشار گاز در طول مسیر می شود لذا جهت جبران این افت فشار و جلوگیری از افزایش قطر لوله های انتقال گاز، فشار گاز در ایستگاه مبدأ افزایش داده می شود. به علت نیاز مصرف کنندگان در مبادی ورودی شهرها، صنایع و نیروگاه ها به فشار پایین تر، لازم است فشار گاز تا حد مورد نیاز کاهش یابد. راه حل سستی کاهش فشار، استفاده از شیرهای مکانیکی فشار شکن است که در این روش انرژی ذخیره شده در گاز تلف می شود اما با بهره برداری از توربین های انبساطی، ضمن کاهش فشار گاز می توان این تغییر فشار را به انرژی الکتریکی تبدیل کرد [۱]. این مسئله زمانی اهمیت و جایگاه ویژه خود را نشان می دهد که بدانیم هم اکنون در ایران میزان مصرف روزانه گاز طبیعی به طور متوسط در حدود ۳۷۷ میلیون مترمکعب است و با استفاده از این منابع تولیدات پراکنده می توان انرژی الکتریکی قابل توجهی را از این تغییر فشار گاز به دست آورد. این سیستم هیچ گونه آلودگی زیست محیطی نداشته و به عنوان یکی از منابع انرژی پاک محسوب می شود [۲]. کاهش فشار گاز توسط توربین های انبساطی و شیرهای فشار شکن منجر به کاهش دمای گاز می شود که استفاده از توربین انبساطی منجر به کاهش بیشتر دما شده و از این کاهش دما می توان برای خنک کاری تجهیزات نیروگاه استفاده نمود [۸ و ۹]. اگرچه هزینه اولیه، تعمیرات و نگهداری این سیستم بیشتر از شیرهای فشار شکن است، هزینه تولید یک کیلووات ساعت انرژی از طریق توربین های انبساطی بسیار کمتر از نیروگاه های حرارتی می باشد. با مقایسه ارقام مربوط به میزان مصرف داخلی نیروگاه ها می توان به میزان بالای مصرف داخلی نیروگاه های حرارتی به ویژه نیروگاه های بخار نسبت به سایر نیروگاه ها پی برد. روش های متنوع زیادی برای کاهش مصرف داخلی نیروگاه در حین طراحی نیروگاه و بعد از بهره برداری از آن ها توسط متخصصین ارائه شده است [۳-۶]. تأثیر ناچیز روش های ارائه شده از یک طرف و از طرف دیگر ظهور مباحثی مانند خصوصی سازی نیروگاه ها در ایران و تلاش در جهت افزایش راندمان و کاهش میزان سهم شبکه داخلی نیروگاه از توان تولیدی، اهمیت استفاده از توربین های انبساطی را چند برابر می کند [۷].

در مقابل مزایای ذکر شده توربین انبساطی، به علت نوسانات در فشار و دبی جرمی گاز ورودی به توربین انبساطی ناشی از تغییرات دمای محیطی و مصرف گاز، توان تولیدی آلوده به فلیکر<sup>۱</sup> ولتاژ است. برای رفع این مشکل در [۱۰]، توربین انبساطی نیروگاه حرارتی تبریز مورد مطالعه قرار گرفته است و با قراردادن یک سیستم ذخیره توان مانند باتری،

نوسانات توان تولیدی توسط ژنراتور سنکرون به وسیله شارژ و دشارژ باتری جبران و باعث می شود توان تولیدی در هر لحظه با توان بار برابر باشد. با بررسی شکل موج جریان بار مشخص شد که اعوجاج هارمونیک آن در حد مطلوبی قرار گرفته و استفاده عملی از آن امکان پذیر است. در انتها با بررسی پارامترهای اقتصادی مشخص شد که استفاده از این توربین با توجه به هزینه اولیه تجهیزات شامل توربین، ژنراتور، باتری و گرماساز برای مصرف داخلی نیروگاه سود قابل توجهی خواهد داشت. علاوه بر موارد فوق، تحقیقات دیگری برای افزایش راندمان بازیابی انرژی به وسیله این توربین انجام شده است [۱۱-۱۴]. در [۱۵ و ۱۶] به منظور غلبه بر فلیکر و افت ولتاژ خطای آزمایشی، استفاده از جبران ساز سنکرون استاتیک و ژنراتور سنکرون پیشنهاد شده است. مشکل دیگر، وقوع افت ولتاژ در پایانه ژنراتور متصل به توربین به دلیل افت شدید دبی گاز ورودی و وقوع خطا در شبکه است. در تمامی مطالعات انجام شده راه حلی برای جبران راه اندازی زیاد، پایداری گذرا و کاهش ناگهانی دبی جرمی گاز ورودی به توربین ارائه نشده است.

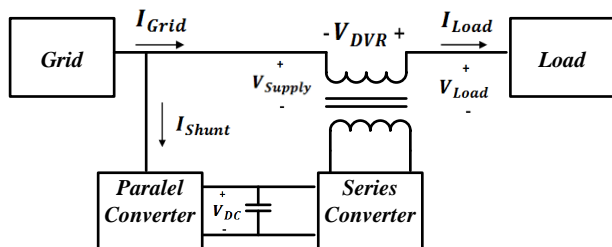
ژنراتور متصل به توربین انبساطی در نیروگاه نکا از نوع القایی بوده و توسط ترانسفورماتور به باس ۲۰ کیلوولت نیروگاه متصل می شود. در لحظه راه اندازی توربین انبساطی، ژنراتور القایی به دلیل تقاضای ۶۳ مگاوار توان راکتیو به مدت چند سیکل از شبکه منجر به افت ولتاژ شدید در شبکه مصرف داخلی نیروگاه تا رسیدن به حالت ماندگار عملکرد ژنراتور می شود. علاوه بر این مشکلاتی نظیر افت دبی جرمی گاز ورودی به توربین و وقوع خطا در شبکه منجر به کمبود ولتاژ در ترمینال ژنراتور و شبکه می شوند. افت ولتاژ ایجاد شده در شبکه مصرف داخلی منجر به فعال شدن سیستم حفاظت نیروگاه و خروج تجهیزات شبکه مصرف داخلی مانند پمپ ها، فن ها و سایر تجهیزات حساس به سطح ولتاژ می شود. به علت مشکلات پیش آمده در لحظه راه اندازی این توربین انبساطی با وجود هزینه اولیه بسیار زیاد و مزایای فراوان ذکر شده، امکان بهره برداری از آن ها در شرایط عادی وجود ندارد [۱۷]. برای برطرف شدن مشکل راه اندازی، استفاده از یک جبران ساز موازی مانند جبران ساز سنکرون استاتیک<sup>۲</sup> پیشنهاد و عملکرد آن در یک شبکه نمونه آزمایش شد [۱۸]. همچنین برای جبران افت ولتاژ ناشی از راه اندازی و کاهش ناگهانی دبی جرمی گاز ورودی توربین انبساطی بازیابنده دینامیک ولتاژ<sup>۳</sup> به عنوان یک جبران ساز سری با استراتژی کنترلی تزریق حداقل توان بهبود یافته پیشنهاد، و عملکرد آن در شبکه نیروگاه نکا با جبران ساز سنکرون استاتیک در یک نقطه خاص مورد بررسی قرار گرفت [۱۹]. در نهایت، ارزیابی اقتصادی و فنی حضور توربین انبساطی و جبران ساز

2. Static Synchronous Compensator (STATCOM)  
3. Dynamic Voltage Restorer (DVR)

1. Flicker

## الف. توپولوژی‌های بدون منبع ذخیره انرژی

۱. توپولوژی مبدل موازی متصل شده به سمت منبع: همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است انرژی تزریقی در این حالت به جای یک منبع ذخیره، توسط یک مبدل پسیو<sup>۲</sup> موازی از سمت منبع تأمین می‌شود. مبدل موازی مانند یک ولتاژ لینک DC کنترل نشده<sup>۳</sup>، خازن لینک<sup>۴</sup> DC را شارژ می‌کند.



شکل (۱): DVR با توپولوژی مبدل موازی متصل شده به سمت منبع

ولتاژ لینک DC برابر با مقدار پیک فاز به فاز ولتاژ منبع است، بنابراین هنگام کمبود ولتاژ متناسب با کمبود ولتاژ رخ داده، ولتاژ لینک DC مطابق رابطه (۱) کاهش می‌یابد.

$$V_{DC} \approx |V_{Supply}| \approx |a| \quad (1)$$

که  $V_{DC}$  و  $|V_{Supply}|$  ولتاژ لینک DC و ولتاژ منبع تغذیه برحسب پریونیت در این رابطه‌اند. حداکثر جریان و توان‌های تحویلی توسط مبدل موازی و سری از روابط (۲-۵) به دست می‌آید.

$$|i_{shunt}| = (1-a)/a, \quad |i_{series}| = 1 \quad (2)$$

$$|v_{shunt}| = 1, \quad |v_{series}| = (1-a) \quad (3)$$

$$S_{shunt} = |v_{shunt}| |i_{shunt}| = (1-a)/a \quad (4)$$

$$S_{series} = |v_{series}| |i_{series}| = 1-a \quad (5)$$

با توجه به روابط محاسبه شده مشخص است که نرخ توان مبدل سری و موازی یکسان نیست و توان تحویلی توسط مبدل سری نسبت مستقیم با کمبود ولتاژ دارد، در صورتی که در مبدل موازی ماکزیمم بارگذاری جریان و ولتاژ همزمان اتفاق نمی‌افتد، زیرا جریان کشیده شده هنگام افت ولتاژ شدید افزایش ناگهانی زیادی دارد اما ولتاژ ورودی کاهش می‌یابد.

برای مثال اگر ولتاژ منبع به  $0/3$  پریونیت در بار نامی کاهش یابد، جریان مبدل سری ۱ پریونیت خواهد ماند اما دامنه جریان مبدل موازی  $2/33$  پریونیت می‌رسد. لذا توانایی جبران افت ولتاژهای شدید به علت کاهش ولتاژ لینک DC به مقدار ولتاژ خط کاهش می‌یابد و این یک

در شبکه مصرف داخلی نیروگاه نکا ارائه شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها قابلیت ممتاز دینامیکی بازبانده دینامیک ولتاژ را در جبران کمبود ولتاژ و فلیکر نسبت به جبران‌ساز سنکرون استاتیک اثبات کرد. ارزیابی اقتصادی انجام شده نیز نشان داد در صورت استفاده از بازبانده دینامیک ولتاژ با استراتژی کنترلی تزریق حداقل توان اکتیو، زمان بازگشت سرمایه به نصف کاهش می‌یابد.

وقوع خطا در شبکه نیز یکی از مشکلات مؤثر بر عملکرد این توربین انبساطی است. در این مقاله به بررسی تأثیر نامطلوب خطا بر روی عملکرد توربین انبساطی پرداخته می‌شود. ابتدا به آسیب‌شناسی توپولوژی‌های موجود بازبانده دینامیک ولتاژ و ارائه توپولوژی بهبود یافته پرداخته، سپس استراتژی‌های کنترلی مختلف شبیه‌سازی و مورد مقایسه قرار می‌گیرند. در ادامه برای بررسی عملکرد جبران‌سازها، نقاط مختلف و ممکن حضور آن‌ها در شبکه مصرف داخلی نیروگاه، در سناریوهای مختلف تحت شرایط خطا مورد آزمایش قرار گرفته است.

ساختار مطالب ارائه شده در ادامه مقاله عبارت است از:

در بخش دوم، انواع توپولوژی‌های و استراتژی‌های کنترلی بازبانده دینامیک ولتاژ ارائه و توپولوژی بهبود یافته تشریح شده است. در بخش سوم، شبکه مصرف داخلی نیروگاه نکا معرفی شده است. بخش چهارم به شبیه‌سازی و تحلیل نتایج می‌پردازد و در نهایت، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری در بخش پنجم ارائه شده است.

## ۲. جبران‌ساز بازبانده دینامیک ولتاژ

راهکار ادوات Custom Power برای حفاظت از بارهای حساس در برابر نوسانات ولتاژ استفاده از عناصر جبران‌ساز سری به‌ویژه بازبانده دینامیک ولتاژ است. مهم‌ترین مزیت این جبران‌ساز این است که دارای توان نامی کمتر از بار نامی می‌باشد در صورتی که سایر ادوات برای بار نامی طراحی می‌شوند [۲۰]. این ویژگی از مهم‌ترین علل اقتصادی بودن بازبانده دینامیک ولتاژ است. به سبب قابلیت‌های دینامیکی ممتاز، این جبران‌ساز یک وسیله مناسب برای حفاظت بارهای حساس در مقابل نوسانات ولتاژ، فلیکر و سایر پارامترهای کیفیت توان است. وجود استراتژی‌های متنوع کنترلی جهت کنترل توان اکتیو و راکتیو و توپولوژی‌های متفاوت برخلاف سایر ادوات جبران‌ساز از دیگر مزایای این جبران‌ساز است [۱۹].

## ۱.۲. انواع توپولوژی‌های بازبانده دینامیک ولتاژ

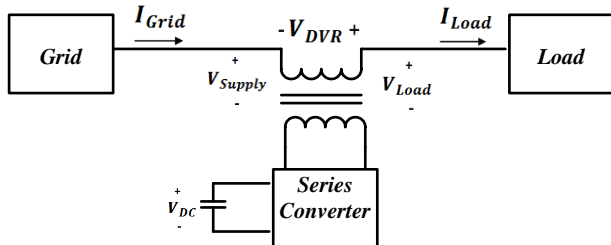
در اینجا به بررسی انواع توپولوژی‌های رایج بازبانده دینامیک ولتاژ [۲۱]، مزایا و معایب هر کدام از آن‌ها و ارائه راهکار برای بهینه‌سازی و استفاده در مطالعه موردی انجام شده می‌پردازیم.

1. Supply-Side-Connected Shunt Converter
2. Passive Converter
3. Uncontrollable DC-Link Voltage
4. DC-Link Capacitor

بهبود جبران سازی راه اندازی توربین انبساطی توسط DVR بهبود یافته و... ۵

شکل (۳) در خازن لینک DC ذخیره و مبدل موازی از آن حذف شده است. انرژی ذخیره شده در منبع انرژی این آرایش ساده با مربع ولتاژ نامی لینک<sup>۳</sup> DC متناسب بوده و از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$E_{storage} \approx 0.5 C_{DC} V_{DC, rated}^2 \quad (9)$$



شکل (۳): DVR با توپولوژی ولتاژ لینک DC متغیر

در زمان وقوع کمبود ولتاژ، ولتاژ لینک DC به صورت نمایی کاهش می یابد و در پی آن قابلیت DVR برای جبران سازی کاهش می یابد. بنابراین DVR با این توپولوژی جهت عدم بروز مشکل در حین جبران سازی باید پایین تر از سطح ولتاژ معینی به کار گرفته شود. انرژی ذخیره شده در منبع جبران ساز از رابطه زیر به دست می آید:

$$\Delta E \approx 0.5 C_{DC} (V_{DC, begin}^2 - V_{DC, end}^2) \quad (10)$$

که  $U_{DC, begin}$  ولتاژ اولیه لینک DC و  $U_{DC, end}$  حداقل ولتاژ لینک DC می باشد. همچنین توان نامی مبدل سری از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$S_{series} = 1 - a S_{load} \quad (11)$$

که  $S_{series}$  و  $S_{load}$  در رابطه (۱۱) بر حسب پریونیت می باشند. ولتاژ لینک DC در این آرایش ساده می تواند توسط مبدل سری یا یک مبدل کمکی سایز کوچک در شرایط عادی شارژ شود. در این توپولوژی هنگام وقوع افت ولتاژ شدید مقدار قابل توجهی از انرژی ذخیره شده به علت عملکرد سریع مبدل جهت تزریق ولتاژ زیاد به شبکه، غیر قابل استفاده می شوند و از منبع ذخیره استفاده بهینه نمی شود.

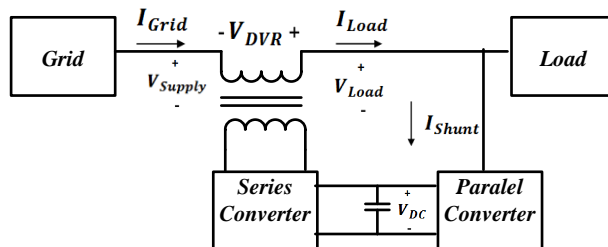
۲. توپولوژی ولتاژ لینک DC ثابت: در این ترکیب یک منبع ذخیره مجزا مانند باتری، ابر خازن و ذخیره ساز مغناطیسی ابرسانا<sup>۵</sup> به اضافه یک مبدل توان بالا، مطابق شکل (۴) اضافه شده است. انرژی از طریق مبدل اضافه شده به خازن لینک DC منتقل شده و سپس به سیستم تزریق می شود، لذا ولتاژ لینک DC در طول وقوع کمبود ولتاژ ثابت باقی می ماند. توان مبدل اضافه شده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$S_{power-converter} = S_{series} = |1-a| \quad (12)$$

در مقایسه با توپولوژی ولتاژ لینک DC متغیر، عملکرد DVR بهبود یافته اما به علت اضافه شدن منبع ذخیره مجزا و مبدل هزینه افزایش

محدودیت ولتاژ برای جبران سازی است.

۲. توپولوژی مبدل موازی متصل شده به سمت بار: مبدل موازی و خازن لینک DC در این حالت مطابق شکل (۲) به سمت بار منتقل می شوند. انرژی مورد نیاز DVR در این حالت توسط مبدل موازی از سمت بار تأمین می شود.



شکل (۲): DVR با توپولوژی مبدل موازی متصل شده به سمت بار

ولتاژ لینک DC به علت تغذیه از سمت بار جبران شده ثابت می ماند در نتیجه:

$$V_{DC} \approx |V_{load}| \approx a + V_{DVR} \quad (5)$$

همچنین حداکثر ولتاژ و جریان های مبدل موازی و سری از روابط زیر به دست می آیند.

$$|i_{shunt}| \approx (1-a)/a, |i_{series}| = 1/a \quad (6)$$

$$|V_{shunt}| \approx 1, |V_{series}| = 1-a \quad (7)$$

$$S_{shunt} = S_{series} = (1-a)/a \quad (8)$$

طبق روابط محاسبه شده برای این توپولوژی جریان مبدل سری به علت تأمین جریان بار و مبدل موازی افزایش یافته و در نتیجه، توان مبدل سری با توان مبدل موازی در حالت قبل یکسان می شود.

از معایب این آرایش می توان جریان زیاد تزریقی توسط مبدل سری اشاره کرد، برای مثال اگر ولتاژ سمت منبع به  $0/3$  پریونیت کاهش یابد، جریان مبدل سری در بار نامی به  $3/33$  پریونیت افزایش و جریان مبدل موازی همان  $2/33$  پریونیت ثابت می ماند. علاوه بر این، به علت جریان غیرخطی کشیده شده توسط مبدل موازی از سمت بار، ولتاژ سمت بار آلوده به اغتشاشات ولتاژی می شود.

از مزایای این آرایش می توان به ولتاژ ثابت لینک DC به علت تغذیه از سمت ولتاژ اصلاح شده بار اشاره کرد.

ب. توپولوژی های شامل منبع ذخیره انرژی

با وجود هزینه بالای منبع ذخیره انرژی، در این حالت عملکرد DVR در جبران سازی بهبود یافته و همچنین از فشار بر روی شبکه در زمان جبران سازی کاسته می شود.

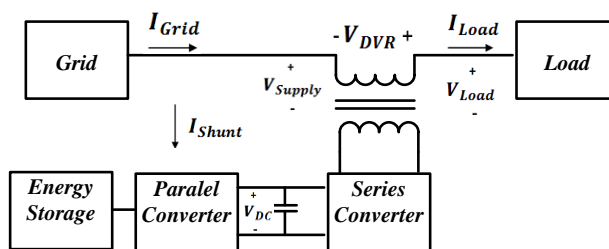
۱. توپولوژی ولتاژ لینک DC متغیر: در این توپولوژی انرژی مطابق

3. Rated DC-Link Voltage  
4. Constant DC-Link Voltage  
5. Super Magnetic Energy Storage (SMES)

1. Load-Side-Connected Shunt Converter  
2. Variable DC-Link Voltage

یافته است.

در جدول (۱) به طور خلاصه به مقایسه توپولوژی های DVR براساس پارامترهای گوناگون و امتیازدهی پرداخته شده است. شایان ذکر است امتیاز خیلی خوب با (++), خوب (+), ضعیف (-) و خیلی ضعیف با (--) نمایش داده شده است.



شکل (۴): DVR با توپولوژی ولتاژ لینک DC ثابت

جدول (۱): مقایسه توپولوژی های DVR

با ذخیره انرژی		بدون ذخیره انرژی		
ولتاژ لینک DC ثابت	ولتاژ DC لینک متغیر	مبدل موازی متصل به بار	مبدل موازی متصل به منبع	
-	--	++	++	افت ولتاژ طولانی مدت
++	-	+	--	افت ولتاژ عمیق
++	++	+	--	افت ولتاژ غیرمتقارن
++	-	+	--	کنترل ولتاژ لینک DC
++	+			سایز منبع ذخیره انرژی
+	+	-	--	تأثیر روی شبکه
--	+	-	--	سایز مبدل/موازی
+	+	--	+	سایز مبدل سری
-	++	+	+	پیچیدگی سیستم
--	-	+	+	هزینه تخمینی
-	-	+	++	پیچیدگی کنترلی
۱۰	۸	۸	۷	مجموع (+)
۷	۶	۴	۱۰	مجموع (-)
۳	۲	۴	-۳	مجموع (کل)

عملکردی ضعیف در جبران سازی کمبود ولتاژهای عمیق و طولانی<sup>۱</sup> دارد؛ اما در مقابل معایب مذکور دارای مزایایی همچون تکنولوژی ساده و مبدل توان پایین است.

ضعیف ترین توپولوژی، توپولوژی مبدل موازی متصل شده به سمت منبع است؛ ولتاژ لینک DC کنترل نشده، توانایی ضعیف در جبران سازی کمبود ولتاژ نامتقارن و تمایل DVR به کشیدن جریان نامتقارن از شبکه در این موارد، از معایب عمده این توپولوژی است.

در توپولوژی مبدل موازی متصل شده به سمت بار انرژی مورد نیاز برای جبران سازی از شبکه (سمت بار) توسط مبدل موازی فراهم می شود. جریان های غیرخطی کشیده شده توسط این مبدل در زمان جبران سازی، باعث ایجاد اغتشاش در سمت بار جبران سازی شده

## ۲.۲. توپولوژی بهبود یافته بازبندۀ دینامیک ولتاژ

با جمع بندی امتیازات مشخص شد که توپولوژی مبدل موازی متصل شده به بار دارای بیشترین امتیاز و پایین ترین هزینه و پیچیدگی نسبی، به عنوان بهترین توپولوژی انتخاب شد. اگرچه این ترکیب دارای بدترین اثرات کیفیت توانی بر روی شبکه و مبدل سری توان بالاست. توپولوژی چهارم با توجه به توانایی جبران سازی افت ولتاژهای شدید به عنوان دومین توپولوژی انتخاب شد. اما این توپولوژی دارای معایبی همچون پیچیدگی سیستم کنترل و هزینه بالا به دلیل وجود مبدل توان بالا و منبع ذخیره انرژی است. سومین رتبه مربوط به توپولوژی ولتاژ لینک DC متغیر بوده که

1. Deep and Long Duration

### ۲.۳. استراتژی کنترل همفاز<sup>۴</sup>

در استراتژی همفاز، ولتاژ تزریقی DVR همفاز با ولتاژ بعد از اختلال بوده و دامنه ولتاژ تزریقی در این استراتژی نسبت به استراتژی حفظ ولتاژ در مقدار قبل از اختلال به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. در این استراتژی حلقه قفل‌کننده فاز در زمان جبران‌سازی، سنکرون با ولتاژ شبکه پس از وقوع کمبود ولتاژ است. تغییر فاز ولتاژ بار پس از جبران‌سازی در این استراتژی منجر به ایجاد اغتشاش و خروج بارهای حساس به زاویه ولتاژ مانند درایوها می‌شود.

### ۳.۳. استراتژی کنترل تزریق حداقل توان اکتیو<sup>۵</sup>

در استراتژی تزریق حداقل انرژی سعی می‌شود با توجه به شدت افت ولتاژ و محدودیتی که بر روی انرژی ذخیره‌شده در DVR وجود دارد، توان اکتیو تحویلی توسط DVR حداقل و حتی در صورت امکان صفر شود. به این ترتیب برای مدت زمان بیشتری می‌توان از انرژی ذخیره‌شده در منبع ذخیره انرژی<sup>۶</sup> استفاده کرد.

در این استراتژی زاویه خروجی PLL در مقدار قبل از اختلال قفل شده و با تعیین مقادیر صحیح ولتاژهای مرجع  $V_{dref}$  و  $V_{qref}$  مقدار توان اکتیو تحویلی توسط DVR در مدت زمان اختلال حداقل می‌شود. تمامی روش‌های کنترلی جهت سنکرونیزاسیون ولتاژهای تزریقی DVR و ولتاژهای شبکه از SPLL مطابق شکل (۵) استفاده می‌کنند. در این ساختار ولتاژهای شبکه طبق روابط (۱۳-۱۴) از مختصات  $abc$  به  $\alpha\beta$  و سپس  $dq$  تبدیل شده و با ولتاژهای مرجع مقایسه می‌شوند.

$V_{error}$  و  $V_{derror}$  معادل ولتاژهایی هستند که باید توسط DVR تزریق شوند، این ولتاژها با استفاده از زاویه  $(\theta_1 - 30^\circ)$  به مختصات  $\alpha\beta$  منتقل می‌شوند. در نهایت با تقسیم بر  $\sqrt{3n}$  که نسبت تبدیل ترانسفورماتور تزریق DVR می‌باشد، به بلوک مدولاسیون پهنای پالس بردار فضایی<sup>۷</sup> جهت تولید پالس‌های کلیدزنی اینورتر اعمال می‌شوند.

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (14)$$

نحوه محاسبه ولتاژهای  $V_{dref}$  و  $V_{qref}$  و استراتژی کنترلی تزریق حداقل توان اکتیو در [۱۹] تشریح شده است.

می‌شود. به‌علاوه این توپولوژی با وجود تأکید و ارائه پیشنهادهای جانبی توسط مقالات دیگر [۲۲ و ۲۳]، برای استفاده در این شبکه به‌دلیل مذکور و سایر مشکلات اساسی ذکر شده در جدول (۱) مناسب نیست. لذا از توپولوژی ولتاژ لینک DC ثابت (توپولوژی چهارم) استفاده شده و برای معایب آن راهکارهای زیر ارائه می‌شود:

۱. برای برطرف کردن مشکل توانایی ضعیف جبران‌سازی کمبود ولتاژهای طولانی از استراتژی کنترلی تزریق حداقل توان اکتیو بهبودیافته در [۱۹] می‌توان استفاده کرد.

۲. با استفاده از منبع ولتاژ DC و خازن به‌جای مبدل توان بالا و منبع ذخیره مطابق شکل (۶)، می‌توان مشکل مبدل توان بالا که برای منبع ذخیره/ انرژی در [۲۱-۲۵] استفاده شده، این مسئله را حل نمود.

۳. با حذف مبدل قدرت استفاده شده و جایگزینی بانک خازنی به‌جای استفاده از سایر منابع ذخیره، مشکل هزینه تخمینی بالا برای این ترکیب برطرف می‌شود.

۴. با استفاده از سیستم کنترلی ساده بهبودیافته که در [۱۹] به تشریح آن پرداخته شد، مشکل پیچیدگی کنترلی این توپولوژی برطرف خواهد شد.

### ۳. استراتژی‌های کنترلی بازباننده دینامیک ولتاژ

به‌منظور جلوگیری از خروج تجهیزات حساس به سطح ولتاژ لازم است دامنه ولتاژ به مقدار اولیه بازیابی شود. بر این اساس می‌توان با کنترل دامنه و فاز ولتاژ تزریقی بازباننده دینامیک ولتاژ ( $V_{inj}$ ) توان حقیقی و راکتیو تزریقی توسط DVR را کنترل و استراتژی‌های کنترلی متنوعی را پیاده‌سازی کرد. انواع استراتژی‌های کنترلی از نظر دامنه و فاز ولتاژ تزریقی، توان اکتیو و راکتیو تزریقی عبارت‌اند از:

#### ۱.۳. استراتژی کنترلی حفظ ولتاژ در مقدار قبل از اختلال<sup>۲</sup>

در استراتژی حفظ ولتاژ در مقدار قبل از اختلال ولتاژ بار به مقدار و فاز قبل از وقوع کمبود ولتاژ مطابق شکل (۶) بازیابی می‌شود. در این استراتژی، حلقه قفل‌کننده فاز<sup>۳</sup> با قفل شدن در فاز قبل از خطا مقدار فاز ولتاژ را به مقدار قبل از خطا بازیابی می‌کند. این استراتژی به‌علت حفظ فاز و دامنه ولتاژ در مقدار قبل از اختلال کمترین اغتشاش در سمت بار را به همراه دارد.

4. In-phase

5. Minimum Injection Active Power (MIAP)

6. DC-Link Stored Energy

7. Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM)

1. Minimum Power Injection Control Strategy

2. Pre-sag

3. Phase Locked-Loop (PLL)

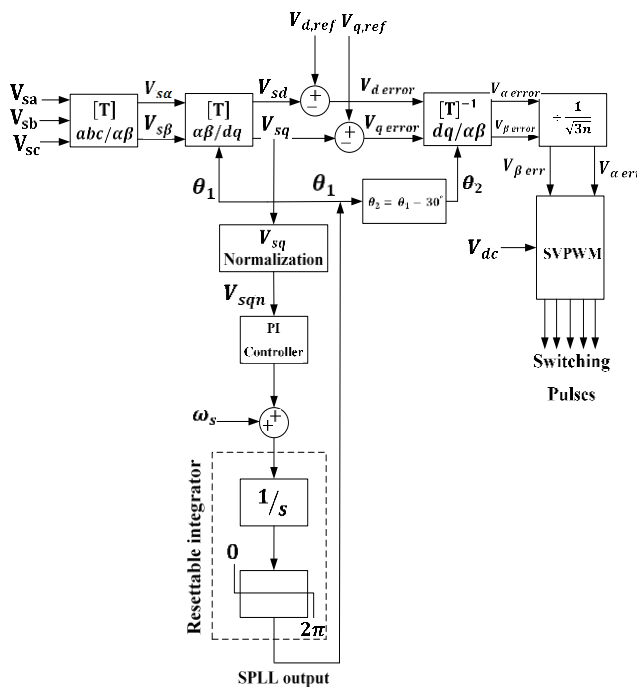


### ۴. شبکه مصرف داخلی نیروگاه نکا

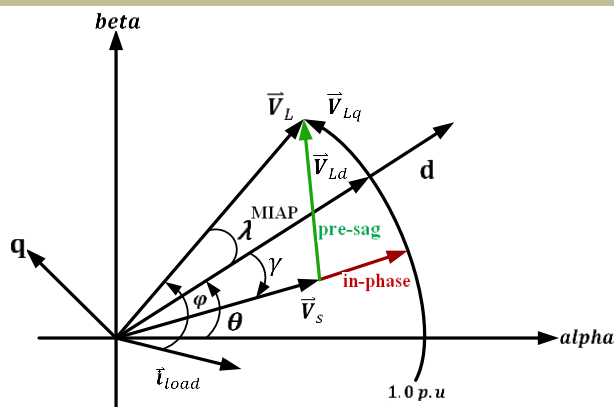
نیروگاه شهید سلیمی (نکا)، از چهار واحد بخاری به قدرت هر واحد ۴۴۰ مگاوات با پمپ تغذیه توربینی و خنک‌کن مستقیم از آب دریا (بدون برج خنک‌کن) تشکیل شده است. درصد مصرفی داخلی واحدها در حالت استفاده از پمپ تغذیه توربینی چیزی برابر ۳/۴ درصد است که این مقدار در حالت استفاده از پمپ تغذیه الکتریکی افزایش خواهد یافت. همه ترانسفورماتورهای مصرف داخلی مجهز به تپ چنجر از نوع غیرقابل قطع زیر بار بوده و این مسئله، تغییر تپ ترانسفورماتورهای مصرف داخلی به منظور بهینه‌ساختن مصرف در هنگام بهره‌برداری را غیرممکن می‌سازد.

شبکه مصرف داخلی شکل (۷) با پارامترهای ذکر شده در جدول (۲)، از دو سطح ولتاژ پایین (۴۰۰ ولت) و ولتاژ متوسط (۶/۳ کیلوولت) تشکیل شده است. همه موتورهای با رنج قدرت بالا، متصل به باس‌ها با سطح ولتاژ متوسط بوده که این روش تأثیر قابل توجهی در امر راه‌اندازی و کاهش تلفات خواهد داشت.

در طراحی نیروگاه شهید سلیمی برای هر چهار واحد بخار، از دو باس مشترک برای تغذیه واحد استفاده شده که در زمان راه‌اندازی نیروگاه، این دو باس‌ها از ترانسفورماتور شبکه (SST) استفاده خواهند کرد. زمانی که تولید واحد به بار ۵۰ مگاوات برسد، ارتباط قطع شده و شبکه مصرف داخلی به صورت مستقل از ترانسفورماتور واحد (UAT) تغذیه خواهد شد. همچنین برای بالا بردن قابلیت اطمینان و پایین آوردن سطح اتصال کوتاه، طراحی به صورت کاملاً متقارن (به صورت نیم باس‌ها) صورت گرفته است. ترانسفورماتورهای قابلیت این را دارند که در صورت بروز خطا، کل بار دو نیم باس را تحمل کنند [۴-۶].



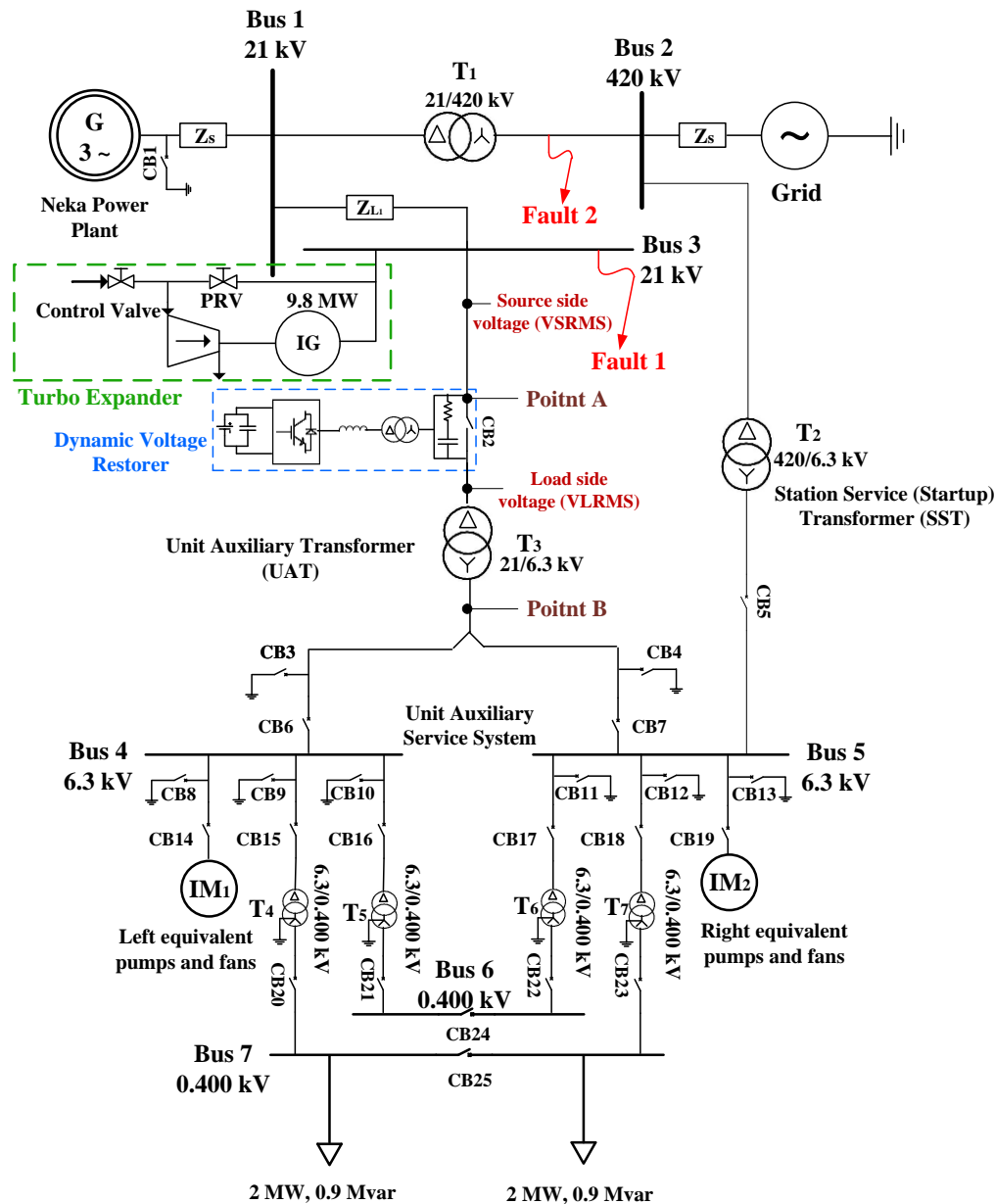
شکل (۵): بلوک دیاگرام کنترلی DVR با استفاده از SVPWM و SPL



شکل (۶): دیاگرام برداری استراتژی‌های کنترلی حفظ ولتاژ در مقدار قبل از اختلال، همفاز و تزریق حداقل توان اکتیو، DVR

جدول (۲): پارامترهای نامی نیروگاه نکا و شبکه مصرف داخلی آن

Equipment	Name	Parameters
Equivalent left pump	Forced draught fan (F.D.FAN)	P = 4850 kW, PF = 0.9
	Condense boost main pump	P = 1600 kW, PF = 0.89
	Boiler feed pump	P = 9000 kW, PF = 0.88
	Circulating water pump (C.W.PUMP)	P = 1275 kW, PF = 0.9
	Startup condensate pump	P = 460 kW, PF = 0.87
Equivalent right pump	Forced draught fan (F.D.FAN)	P = 4850 kW, PF = 0.86
	Condense boost main pump	P = 1600 kW, PF = 0.89
	Boiler feed pump	P = 9000 kW, PF = 0.88
	Circulating water pump (C.W.PUMP)	P = 1275 kW, PF = 0.9
	Compressor	P = 200 kW, PF = 0.85
Generator	Steam power plant generator (unit1)	S = 517.647 MVA, number of poles = 2, P = 440 MW, V = 21 kV, f = 50Hz, X <sub>d</sub> = 229.6 % unsaturated, X' <sub>d</sub> = 30.8 % unsaturated, X'' <sub>d</sub> = 21.7 % saturated
Transformer	T1	S = 520 MVA, 21/420 kV
	T2	S = 60 MVA, 420/6.3 kV
	T3	S = 40/20/20 MVA, 21/6.3 kV
	T4, T5, T6, T7	S = 1250 kVA, 6.3/0.400 kV
Lightning, cable losses and other load	L1, L2	2 MW, 0.9 Mvar



شکل (۷): دیاگرام تک خطی شبکه مصرف داخلی نیروگاه نکا، توربین انبساطی و DVR

طولانی، زمان راه اندازی توربین انبساطی همزمان با وقوع خطا در شبکه مصرف داخلی نیروگاه (۲۱ کیلوولت) یا خطا در شبکه انتقال (۴۲۰ کیلوولت) فرض و شبیه سازی ها در ۲۰ سناریوی مجزا مانند جدول (۳) انجام گرفت.

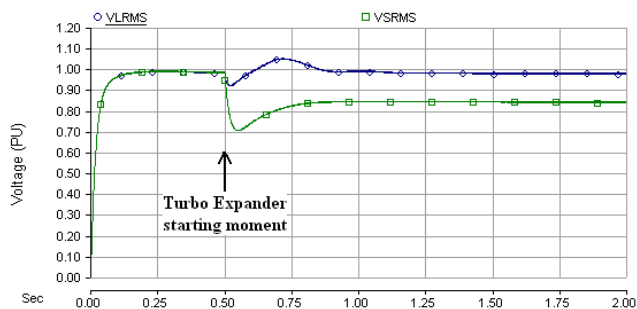
در سناریوهای پایه (۱-۴) راه اندازی همزمان با وقوع خطاهای متقارن و نامتقارن در سطوح ولتاژ ۲۱ و ۴۲۰ کیلوولت، به عنوان یک حالت محتمل در نیروگاه فرض شد. سناریوهای ۵-۸ و ۹-۱۲ به بررسی سناریوهای پایه با جبران ساز بازبندیده دینامیک ولتاژ در نقاط A و B به ترتیب می پردازند. همچنین در سناریوهای ۱۳-۱۶ و ۱۷-۲۰ به جبران سازی سناریوهای پایه با جبران ساز سنکرون استاتیک در باس های ۲ و ۳ پرداخته می شود.

## ۵. شبیه سازی و تحلیل نتایج

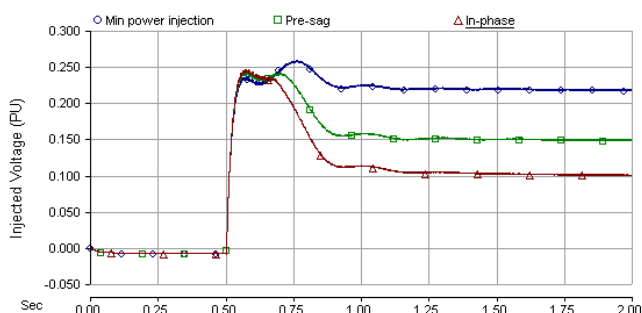
به منظور بررسی و تأیید عملکرد بازبندیده دینامیک ولتاژ با توپولوژی بهبود یافته توربین انبساطی و شبکه مصرف داخلی نیروگاه نکا مطابق شکل (۷) در نرم افزار PSCAD/EMTDC مدل سازی گردید.

ژنراتور توربین انبساطی گشتاور ورودی مطابق شکل (۸) از توربین انبساطی دریافت نموده در لحظه  $t = 0/5$  ثانیه راه اندازی و توان راکتیو ۶۳ مگاوار از باس ۳ مطابق شکل (۹) دریافت می کند. این امر باعث پدید آمدن افت ولتاژ شدید در شبکه مصرف داخلی نیروگاه با دامنه  $0/3$  پریونیت می شود همان طوری که شکل (۱۰) نشان می دهد. برای بررسی سنجش توانایی توپولوژی بهبود یافته در کمبود ولتاژهای شدید و





شکل (۱۰): ولتاژ شبکه و بار با جبران‌ساز DVR، راه‌اندازی توربین انبساطی در لحظه ۰/۵ ثانیه



شکل (۱۱): مقایسه دامنه ولتاژ تزریقی DVR در استراتژی‌های کنترلی تزریق حداقل توان اکتیو، حفظ ولتاژ در مقدار قبل از اختلال و همفاز

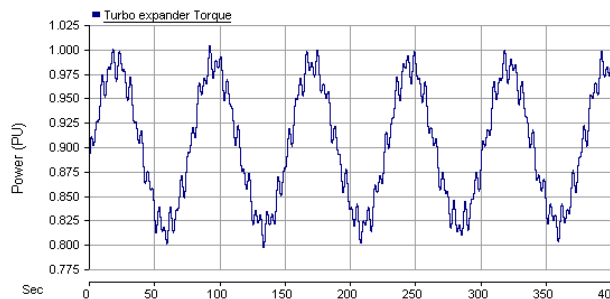
همان‌طور که در شکل (۱۱) مشاهده می‌شود دامنه ولتاژ تزریقی در روش تزریق حداقل توان بزرگ‌ترین مقدار و در روش همفاز کمترین مقدار را دارد.

به‌علت تناسب مقدار توان راکتیو تزریقی با دامنه ولتاژ در استراتژی تزریق حداقل توان اکتیو بازبندنده دینامیک ولتاژ بیشترین مقدار توان راکتیو تزریقی را در بین سایر استراتژی‌ها کنترلی بدون افزایش اندازه منبع ذخیره DVR را دارد.

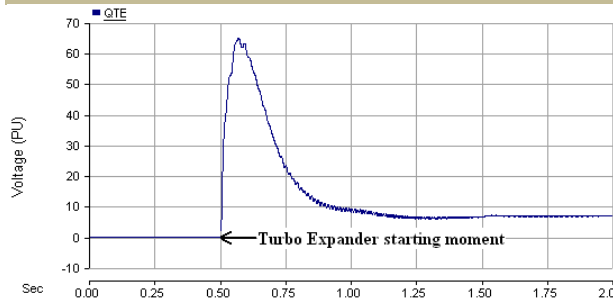
مطابق تعریف استانداردهای IEEE، کمبود ولتاژ<sup>۱</sup> به کاهش ولتاژ مؤثر<sup>۲</sup> به کمتر از ۰/۹ پریونیت (از ۰/۱ تا ۰/۹۰٪ ولتاژ نامی) برای کمتر از یک دقیقه کمبود ولتاژ آنی یا لحظه‌ای و به افزایش ولتاژ به مقدار بیش از ۱/۱ پریونیت<sup>۳</sup> بیش‌بود ولتاژ<sup>۳</sup> گفته می‌شود [۲۶]. در سناریوهای جبران‌سازی DVR در نقطه A همه کمبود ولتاژهای پیش‌آمده در ولتاژ سمت شبکه (VSRMS) مطابق شکل (۱۲) که به ترتیب ۰/۲۸، ۰/۳۳ و ۰/۱۹٪ ولتاژ نامی با تداوم ۱ ثانیه برای سناریوهای ۱ تا ۴ می‌باشند، برای ولتاژ سمت بار (VLRMS) بدون وقوع هیچ‌گونه کمبود ولتاژی جبران‌سازی شده‌اند.

جدول (۳): سناریوهای شبیه‌سازی

Case	Compensator	Location of compensation	Fault level
1	---	---	420KV/balance
2	---	---	420KV/unbalance
3	---	---	21KV/balance
4	---	---	21KV/unbalance
5	DVR	Point A	420KV/balance
6		Point A	420KV/unbalance
7		Point A	21KV/balance
8		Point A	21KV/unbalance
9		Point B	420KV/balance
10		Point B	420KV/unbalance
11	STATCOM	Point B	21KV/balance
12		Point B	21KV/unbalance
13		Bus 3	420KV/balance
14		Bus 3	420KV/unbalance
15	STATCOM	Bus 3	21KV/balance
16		Bus 3	21KV/unbalance
17		Bus 2	420KV/balance
18		Bus 2	420KV/unbalance
19		Bus 2	21KV/balance
20		Bus 2	21KV/unbalance



شکل (۸): گشتاور تحویلی توربین انبساطی به ژنراتور القایی



شکل (۹): توان راکتیو کشیده شده توسط توربین انبساطی

### ۱.۵. نتایج بازبندنده دینامیک ولتاژ

پس از حضور بازبندنده دینامیک ولتاژ با پارامترهای مندرج در جدول (۴)، جبران‌سازی توان راکتیو در شبکه نیروگاه صورت گرفته و ولتاژ کاهش یافته سمت شبکه (VSRMS) در سمت بار (VLRMS) به مقدار اولیه ۱ پریونیت مطابق شکل (۱۰) باز می‌گردد.

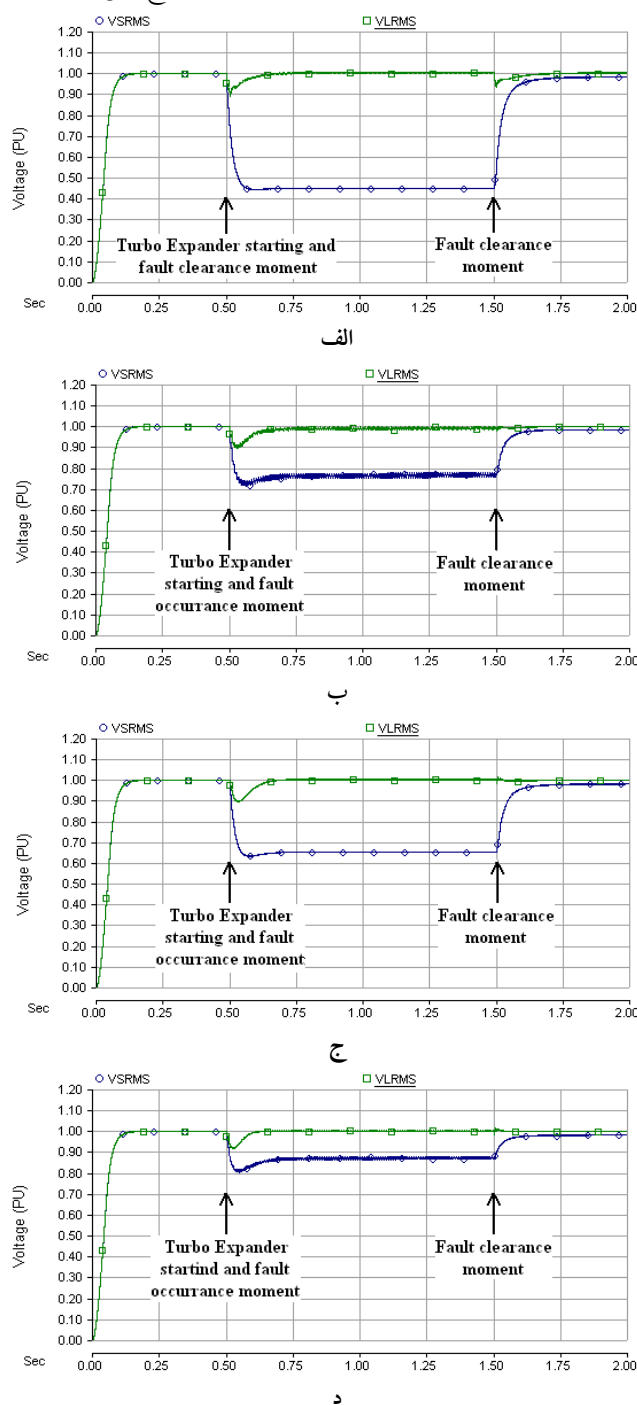
جدول (۴): پارامترهای DVR

Filter	$R_f = 1\Omega, C_f = 130\mu F$
DC-link capacitance	$C = 270\mu F$
Injection Transformer	$S = 15.5MVA, f = 50Hz, L_t = 0.01p.u.$
Dependent Source	$V_b = 21kV, f = 50Hz, R_s = 0.05\Omega, L = 0.01H$

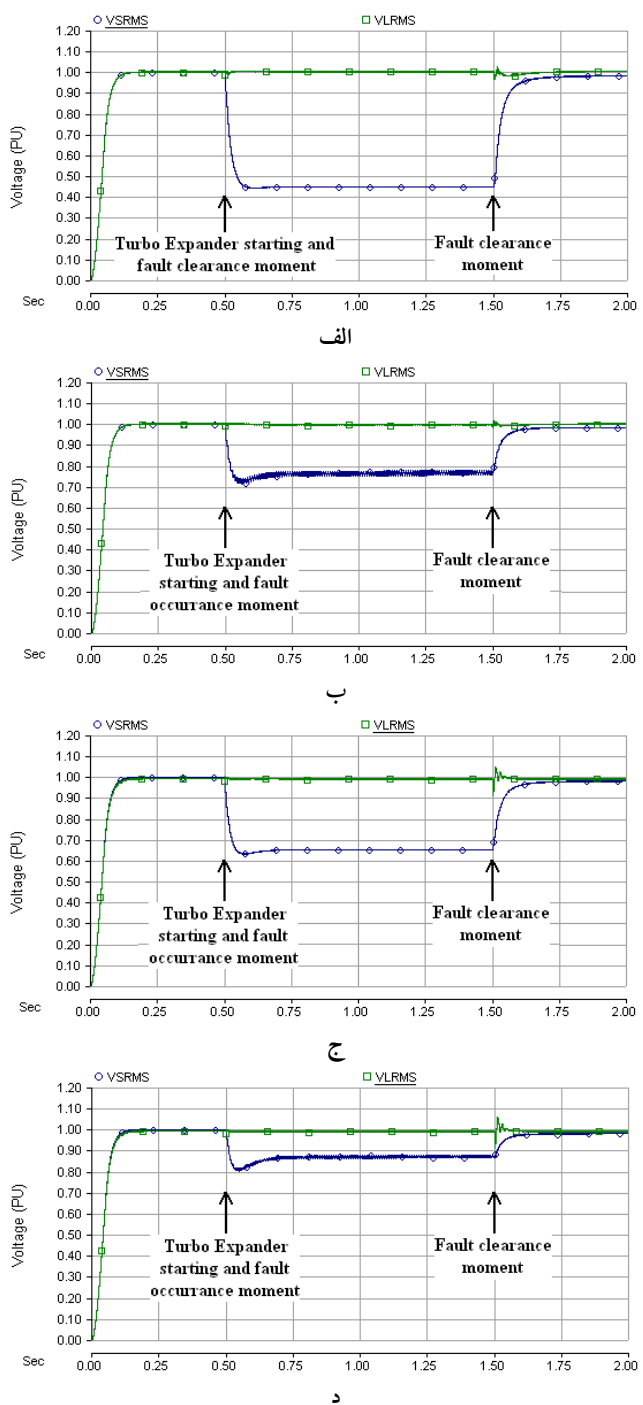
1. Voltage Sag
2. Root Mean Square (RMS)
3. Voltage Swell

بهبود جبران‌سازی راه‌اندازی توربین انبساطی توسط DVR بهبودیافته ... ۱۱

جدید DVR نیز به صورت کامل برطرف می‌شوند. همان‌طور که شکل (۱۳) نشان می‌دهد در لحظه وقوع خطا و راه‌اندازی (۰/۵ ثانیه) کمبود و در لحظه برطرف شدن خطا (۱/۵ ثانیه) بیشبود ولتاژی رخ نمی‌دهد.



شکل (۱۳): شکل موج ولتاژ سمت شبکه (VSRMS) و بار (VLRMS) با جبران‌سازی DVR در نقطه B، راه‌اندازی همزمان توربین انبساطی با وقوع خطا در لحظه ۰/۵ ثانیه و ۱ ثانیه تداوم خطا  
 الف. سناریو ۹، وقوع خطای متقارن (سه‌فاز به زمین در ۴۲۰ کیلوولت)  
 ب. سناریو ۱۰، وقوع خطای نامتقارن (تک‌فاز به زمین در ۴۲۰ کیلوولت)  
 ج. سناریو ۱۱، وقوع خطای متقارن (سه‌فاز به زمین در ۲۱ کیلوولت)  
 د. سناریو ۱۲، وقوع خطای نامتقارن (تک‌فاز به زمین در ۲۱ کیلوولت)



شکل (۱۲): شکل موج ولتاژ سمت شبکه (VSRMS) و بار (VLRMS) با جبران‌سازی DVR در نقطه A، راه‌اندازی همزمان توربین انبساطی با وقوع خطا در لحظه ۰/۵ ثانیه و ۱ ثانیه تداوم خطا  
 الف. سناریو ۵، وقوع خطای متقارن (سه‌فاز به زمین در ۴۲۰ کیلوولت)  
 ب. سناریو ۶، وقوع خطای نامتقارن (تک‌فاز به زمین در ۴۲۰ کیلوولت)  
 ج. سناریو ۷، وقوع خطای متقارن (سه‌فاز به زمین در ۲۱ کیلوولت)  
 د. سناریو ۸، وقوع خطای نامتقارن (تک‌فاز به زمین در ۲۱ کیلوولت)

با جابجایی DVR از نقطه A به نقطه B و اعمال تغییرات لازم در توپولوژی آن، کمبود ولتاژهای رخ داده در سناریوهای ۱-۴ در این مکان

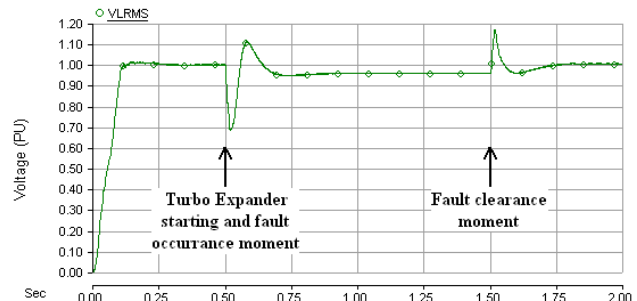
برخلاف استراتژی بهبودیافته حداقل توان در [۲۷] که ولتاژ بار در طول بازه زمانی وقوع خطا و جبران‌سازی آن توسط DVR در حالت‌های ۱ و ۲ به ترتیب به ۳٪ و ۵٪ ولتاژ نامی می‌رسد و ولتاژ جبران‌سازی شده آلوده به اغتشاشات هارمونیک می‌باشد، با استراتژی کنترلی و توپولوژی بهبودیافته هیچ‌گونه کمبود و بیشبود ولتاژ در شبکه رخ نمی‌دهد.

### ۲.۵. نتایج جبران‌ساز سنکرون استاتیک

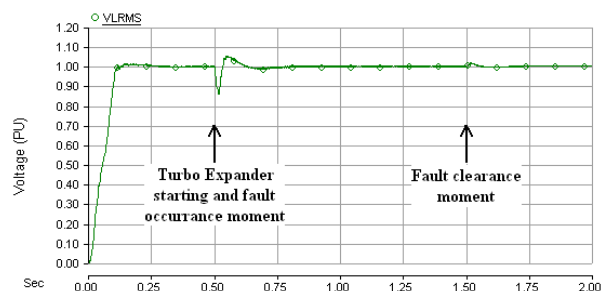
با توجه به توانایی STATCOM در جبران‌سازی پایین‌دست و بالادست خود [۲۸]، سناریوها و مکان‌های متفاوتی جهت تعیین بهترین مکان برای جبران‌سازی در نظر گرفته شده است. STATCOM به‌عنوان یک جبران‌ساز موازی در سناریوهای ۱۳-۱۶ به باس ۳ (۲۱ کیلوولت) و در سناریوهای ۱۷-۲۰ به باس ۲ (۴۲۰ کیلوولت) متصل شده است. شرایط وقوع خطا در این ۸ سناریو، مشابه سناریوهای جبران‌سازی با DVR می‌باشد. پارامترهای STATCOM شبیه‌سازی شده در جدول (۵) ذکر شده است.

جدول (۵): پارامترهای STATCOM

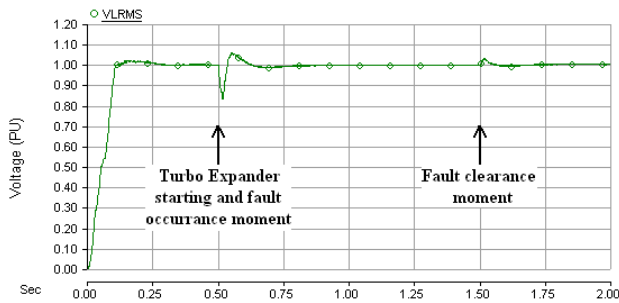
Storage	$C = 270 \mu\text{F}$
PLL	$G_p = 50, G_i = 50, V = 300 \text{ V}$
is voltage	V
Lead Lag	$k = 1, T_{\text{Lead}} = 0.007 \text{ s}, T_{\text{Lag}} = 0.0001 \text{ s}$
PI controller	$T_i = 0.1, k_i = 1.14$



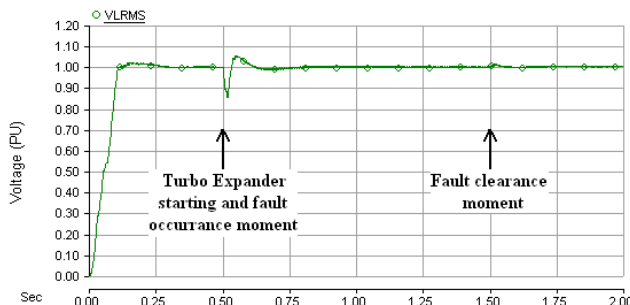
الف



ب



ج



د

شکل (۱۴): شکل موج ولتاژ بار (VLRMS) با جبران‌ساز STATCOM

در باس ۳، راه‌اندازی همزمان توربین انبساطی با وقوع خطا در لحظه ۰/۵ ثانیه و ۱ ثانیه تداوم خطا

الف. سناریو ۱۳، وقوع خطای نامتقارن (سه‌فاز به زمین در ۴۲۰ کیلوولت)

ب. سناریو ۱۴، وقوع خطای نامتقارن (تک‌فاز به زمین در ۴۲۰ کیلوولت)

ج. سناریو ۱۵، وقوع خطای نامتقارن (سه‌فاز به زمین در ۲۱ کیلوولت)

د. سناریو ۱۶، وقوع خطای نامتقارن (تک‌فاز به زمین در ۲۱ کیلوولت)

در شکل (۱۴) در حالت الف، شدیدترین کمبود ولتاژ در حضور STATCOM، به‌علت همزمانی راه‌اندازی و وقوع خطای متعادل سه‌فاز به زمین به وقوع می‌پیوندد. در لحظه ۰/۵ ثانیه کمبود ولتاژ با دامنه ۳۲٪ و تداوم ۳۲/۵ میلی‌ثانیه و در لحظه ۱/۵ ثانیه بیشبود ولتاژی با دامنه ۱۶/۴٪ و تداوم ۱۸/۶ میلی‌ثانیه اتفاق می‌افتد. در حالت ب، با توجه به تغییر خطای متعادل به خطای نامتقارن تک‌فاز به زمین مقدار کمبود ولتاژ به ۱۵٪ و ۷/۳ میلی‌ثانیه تداوم می‌رسد، بیشبود ولتاژی هم در این حالت رخ نمی‌دهد.

با تغییر مکان خطا از ۴۲۰ کیلوولت به ۲۱ کیلوولت، دامنه و تداوم کمبود ولتاژ نسبت به سناریوی ۱۳ کاهش و به ۱۸٪ و ۲۳/۳ میلی‌ثانیه تداوم برای سناریوی ۱۵ و ۱۵٪ و ۱۸/۶ میلی‌ثانیه تداوم برای سناریوی ۱۶ می‌رسد.

### بهبود جبران سازی راه اندازی توربین انبساطی توسط DVR بهبود یافته و... ۱۳

برای ارزیابی عملکرد STATCOM در سایر مکان های دیگر در شبکه، مکان جبران ساز از ۴۲۰ کیلوولت به ۲۱ کیلوولت تغییر داده شد. در شکل (۱۵) مشاهده می شود در سناریوهای ۱۷-۲۰ تغییرات قابل توجهی در مقادیر دامنه و تداوم کمبود و بیشبود ولتاژ بار حساس رخ می دهد. در سناریوی ۱۷ مقادیر دامنه و تداوم کمبود ولتاژ از ۳۲٪ و ۳۲/۵ میلی ثانیه به ۲۲٪ و ۱۴/۸ میلی ثانیه کاهش می یابد و بیشبود ولتاژ هم در این سناریو برخلاف سناریوی ۱۳ وجود ندارد.

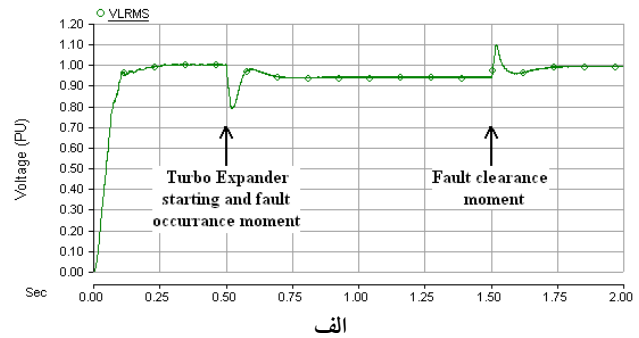
در حالت خطای نامتعادل ۴۲۰ کیلوولت (سناریوی ۱۸) نیز کمبود ولتاژ به دامنه ۱۴٪ و تداوم ۱۴/۸ میلی ثانیه تغییر یافته و بیشبود ولتاژ نیز وجود ندارد. در سناریوهای ۱۹ و ۲۰ هم کمبود ولتاژی برخلاف سناریوهای ۱۵ و ۱۶ رخ نمی دهد، لذا می توان نتیجه گرفت STATCOM در باس شماره ۲، عملکرد بهتری در جبران سازی کمبود و بیشبود ولتاژ دارد.

مقایسه نتایج جدول (۶) نشان می دهد DVR با توپولوژی بهبود یافته و استراتژی کنترلی حداقل توان اکتیو، پاسخی بسیار سریع تر از STATCOM هنگام کمبود و بیشبود ولتاژ در شبکه می دهد. همچنین با مقایسه شکل های (۱۲) و (۱۳) می توان نتیجه گرفت که در نقطه A گذراهای پاسخ DVR در لحظات ۰/۵ و ۱/۵ ثانیه نسبت به نقطه B بسیار کمتر بوده و از نظر اقتصادی نیز نقطه A به دلیل سطح ولتاژ پایین تر نسبت به نقطه B با توجه به کاهش هزینه DVR (خصوصاً ترانس تزریق) مناسب تر است.

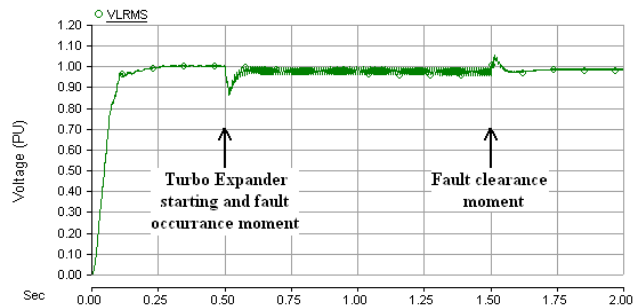
اندازه گیری ها نشان می دهد توان ظاهری تزریق شده توسط DVR به دلیل جبران سازی پایین دست در مقایسه با STATCOM که پایین و بالادست خود را جبران می کند، کمتر و نصف می باشد. با توجه به قابلیت دینامیکی ممتاز DVR، گذراهای ولتاژ بار در زمان وقوع کمبود و برطرف شدن خطا در شبکه بسیار کمتر از جبران سازی با STATCOM می باشد.

در آخر، می توان نتیجه گرفت که بهترین مکان برای STATCOM باس شماره ۲ و برای DVR نقطه A، و بهترین جبران ساز برای برطرف کردن این مشکل DVR می باشد.

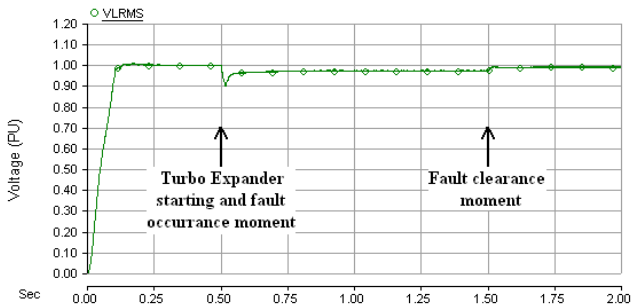
حضور جبران سازها در شبکه مصرف داخلی نیروگاه علاوه بر جبران سازی راه اندازی توربین انبساطی در شرایط خطا و بهره مندی از توان تولیدی آن، به دلیل جبران سازی محلی توان راکتیو و افزایش سطح ولتاژ منجر به بهبود شرایط راه اندازی موتورهای القایی، کاهش تلفات  $RI^2$  و در نتیجه مصرف داخلی، افزایش قابلیت اطمینان نیروگاه و حفظ ولتاژ شینه های شبکه مصرف داخلی در محدوده مجاز می شود.



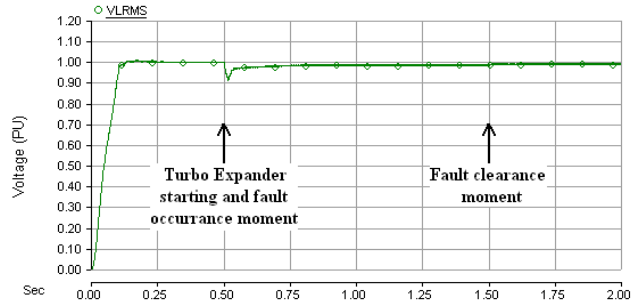
الف



ب



ج



د

شکل (۱۵): شکل موج ولتاژ بار (VLRMS) با جبران ساز STATCOM در باس ۲، راه اندازی همزمان توربین انبساطی با وقوع خطا در لحظه ۰/۵ ثانیه و ۱ ثانیه تداوم خطا

- الف. سناریو ۱۷، وقوع خطای متقارن (سه فاز به زمین در ۴۲۰ کیلوولت)
- ب. سناریو ۱۸، وقوع خطای نامتقارن (تک فاز به زمین در ۴۲۰ کیلوولت)
- ج. سناریو ۱۹، وقوع خطای متقارن (سه فاز به زمین در ۲۱ کیلوولت)
- د. سناریو ۲۰، وقوع خطای نامتقارن (تک فاز به زمین در ۲۱ کیلوولت)

جدول (۶): مقایسه نتایج عملکرد STATCOM و DVR

Case	Compensator	Location of compensation	Fault level	Sag		Swell	
				Amplitude (%)	Duration	Amplitude (%)	Duration
1	Base case	---	420KV/balance	55	1s	0.0	0.0
2		---	420KV/unbalance	28	1s	0.0	0.0
3		---	21KV/balance	33	1s	0.0	0.0
4		---	21KV/unbalance	19	1s	0.0	0.0
5	DVR	Point A	420KV/balance	0.0	0.0	0.0	0.0
6		Point A	420KV/unbalance	0.0	0.0	0.0	0.0
7		Point A	21KV/balance	0.0	0.0	0.0	0.0
8		Point A	21KV/unbalance	0.0	0.0	0.0	0.0
9		Point B	420KV/balance	0.0	0.0	0.0	0.0
10		Point B	420KV/unbalance	0.0	0.0	0.0	0.0
11		Point B	21KV/balance	0.0	0.0	0.0	0.0
12		Point B	21KV/unbalance	0.0	0.0	0.0	0.0
13	STATCOM	Bus 3	420KV/balance	32	32.5ms	6.4	18.6ms
14		Bus 3	420KV/unbalance	15	7.3ms	0.0	0.0
15		Bus 3	21KV/balance	18	23.3ms	0.0	0.0
16		Bus 3	21KV/unbalance	15	18.6ms	0.0	0.0
17		Bus 2	420KV/balance	22	46.5ms	0.0	0.0
18		Bus 2	420KV/unbalance	14	14.8ms	0.0	0.0
19		Bus 2	21KV/balance	0.0	0.0	0.0	0.0
20		Bus 2	21KV/unbalance	0.0	0.0	0.0	0.0

خطا در شبکه) مورد ارزیابی قرار گرفت.

شبه‌سازی‌های انجام شده بر روی شبکه مصرف داخلی نیروگاه نکا نشان می‌دهد استراتژی کنترلی تزریق حداقل توان اکتیو و توپولوژی بهبود یافته بازیابنده دینامیک ولتاژ در شدیدترین کمبود ولتاژها و تمامی سناریوها قادر به جبران کمبود ولتاژ بوده و بهترین مکان حضور بازیابنده دینامیک ولتاژ از نظر اقتصادی (به دلیل کاهش هزینه ترانس تزریق) و میزان گذرهای ولتاژ جبران شده، نقطه A و برای جبران‌ساز سنکرون استاتیک باس ۳ می‌باشد. بازیابنده دینامیک ولتاژ قابلیت جبران‌سازی و پاسخ‌دهی مناسب‌تری به اغتشاشات نسبت به جبران‌ساز سنکرون استاتیک دارد به گونه‌ای که عملکرد جبران‌ساز سنکرون استاتیک در اکثر سناریوها منجر به کمبود ولتاژ گردید.

## ۶. نتیجه‌گیری

به منظور بهره‌برداری از ۹/۸ مگاوات توان تولیدی توربین انبساطی نیروگاه نکا و جبران‌سازی راه‌اندازی آن تحت شرایط خطا برای شبکه مصرف داخلی نیروگاه از بازیابنده دینامیک ولتاژ به صورت سری و جبران‌ساز سنکرون استاتیک به صورت موازی با شبکه مصرف داخلی استفاده شد. در ادامه به بررسی معایب توپولوژی‌های موجود بازیابنده دینامیک ولتاژ، ارائه توپولوژی بهبود یافته و بررسی انواع استراتژی‌های کنترلی پرداخته شد.

برای تعیین مکان بهینه حضور جبران‌سازها و بهبود جبران‌سازی شرایط راه‌اندازی، در ۲۰ سناریو متمایز عملکرد بازیابنده دینامیک ولتاژ با توپولوژی بهبود یافته و جبران‌ساز سنکرون استاتیک در بدترین حالت وقوع اغتشاشات در شبکه (همزمانی لحظه راه‌اندازی توربین با وقوع

## مراجع

- [1] Jaroslav, P., "Use of Expansion Turbines in Natural Gas Pressure Reduction Stations", Acta Montanistica Slovackia., Vol. 9, No. 3, pp. 258-260, 2004.
- [2] Daneshi, H. Khorashadi Zade, H. Lotfjou Choobari, A., "Turbo-Expander as a Distributed Generators", PES. IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, pp. 1-7, 2008.
- [3] سروشیان سامان، درمیناسیان آرتین، انصاری مهر پویا، بطحایی سید محمدتقی، قره‌پتیان گئورگ، «مروری بر روش‌های تجزیه و تحلیل شبکه مصرف داخلی نیروگاه‌های بخار و بررسی امکان اعمال روش‌های بهینه‌سازی مصرف»، چهاردهمین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، ۱۳۷۸.
- [4] قره‌پتیان گئورگ، حاجی میرآقا امیرحسین، صادقیان سرخابی الهام، براتی رضا، «تعیین مدل ملی و بهینه‌سازی شبکه مصرف داخلی نیروگاه از نقطه نظر تولید انرژی الکتریکی»، پروژه تحقیقاتی، وزارت نیرو، پژوهشگاه نیرو، مردادماه ۱۳۸۱.
- [5] قره‌پتیان گئورگ، و همکاران، «بررسی و مقایسه روش‌های کاهش مصرف داخلی نیروگاه‌های بخار»، پروژه تحقیقاتی، وزارت نیرو، پژوهشگاه نیرو، اردیبهشت‌ماه ۱۳۷۹.
- [6] براتی رضا، «کاهش مصرف داخلی انرژی الکتریکی در نیروگاه بیستون»، پروژه تحقیقاتی، وزارت نیرو، پژوهشگاه نیرو، شهریورماه ۱۳۸۲.

- [7] Miragha, A. H. Barati, R. Gharehpetian, G. B., "Optimal Tp Setting and VAR Compensation Effect on Energy Consumption of Electrical Auxiliary System of Steam Power Plants", TENCON. IEEE 10 Region Conf., pp. 1791-1796, 2002.
- [8] قاسم پور مهدی، بعنونی سالم، «تحلیل و شبیه سازی تولید توان و تبرید از ایستگاه های تقلیل فشار گاز»، هفتمین همایش ملی انرژی، تهران، دی ماه ۱۳۸۸.
- [9] Babaei Turkemani, M. Rastegar, H., "Modular Modeling of Turbo-Expander Driven Generators for Power System Studies", IEEJ Trans. Electrical and electronic engineering, Vol. 4, pp. 645-653, 2009.
- [۱۰] فردوسی فرزاد، صادقی یزدانخواه احمد، مدرس سیدمجتبی، «یک روش عملی مناسب برای استفاده از برق تولیدی سامانه توربین انبساطی جهت نصب در نیروگاه های حرارتی»، چهارمین کنفرانس نیروگاه های برق، تهران، ۱۳۹۰.
- [۱۱] فرزانه گرد محمود، دیمی دشت بیاض مهدی، «بررسی تأثیرات پیش گرم کردن و راندمان توربین های انبساطی بر افزایش برق قابل حصول در پروسه تقلیل فشار گاز مصرفی پالایشگاه گاز خانگیران»، اولین کنفرانس نیروگاه های برق، قزوین، اسفندماه ۱۳۸۷.
- [۱۲] تقدیریان حمیدرضا، عزیزی جمال الدین، جمشیدی بابک، «بررسی تولید انرژی الکتریکی در ایستگاه های تقلیل فشار گاز نیروگاه سیکل ترکیبی یزد»، بیست و پنجمین کنفرانس بین المللی برق، تهران، ۱۳۸۹.
- [۱۳] صفریان بنا سحر، ارزیابی بازیابی انرژی با استفاده از توسعه مدل سیستم انتقال گاز طبیعی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی انرژی، ۱۰-۵، شهریورماه ۱۳۹۰.
- [۱۴] فرزانه گرد محمود، خطیب محسن، شاه مردان محمدمحسن، دیمی دشت بیاض مهدی، اخلاقی کوروش، «طراحی سیستم بازیافت انرژی در ایستگاه های تقلیل فشار و با استفاده از توربوآکسپندر و سیستم CHP با محرک اولیه موتور احتراق داخلی»، بیست و هفتمین همایش سالانه بین المللی مهندسی مکانیک ایران، شیراز، اردیبهشت ماه ۱۳۹۱.
- [15] Taleshian, M., Rastegar, H., Askarian Abyaneh, H., "Modeling and Power Quality Improvement of Turbo-Expander Driving an Induction Generator", 19th Iranian conference on Electrical engineering (ICEE), pp. 1-6, 2011.
- [16] Taleshian, M., Rastegar, H., Askarian Abyaneh, H., "Modeling and Power Quality Improvement of Grid Connected Induction Generators Driven by Turbo-Expanders", International Journal of Energy Engineering, Vol, 2, No. 4, pp. 131-137, 2012.
- [۱۷] مصطفی نژاد سیدرضا، «مطالعه موردی تولید انرژی الکتریکی با استفاده از توربین های انبساطی در ایستگاه تقلیل فشار گاز نیروگاه نکا»، بیست و ششمین کنفرانس بین المللی برق، تهران، ۱۳۹۰.
- [18] Norouzi, M. A., Olamaei, J., Norouzi, M. J., "Improving Voltage Sag of Turbo-Expander Starting in Neka Power Plant by STATCOM", International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT), Vol. 2, No. 10, pp.1721-1725, 2013.
- [19] Norouzi, M. A., Olamaei, J., Gharehpatian, G. B., "Compensation of Voltage Sag and Flicker During Thermal Power Plant Turbo-Expander Operation by Dynamic Voltage Restorer", International Transaction on Electrical and Energy Systems, In Press, 2015.
- [20] Changjiang, Z., Ramachandaramurthy, V.K., Arulampalam, A., Fitzer, C., Kromlidis, S., Bames, M., Jenkins, N., "Dynamic Voltage Restorer Based on Voltage Space Vector PWM Control", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 37, No. 6, pp.1855-1863, 2001.
- [21] Godsk Nielsen, J., Blaabjerg, F., "A Detailed Comparison of System Topologies for Dynamic Voltage Restorers", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 41, No. 5, pp.1272-1280, 2005.
- [22] Jimichi, T., Fujita, H., Akagi, H., "Design and Experimentation of a Dynamic Voltage Restorer Capable of Significantly Reducing an Energy-Storage Element", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 44, No. 3, pp.817-82, 2008.
- [23] Jowder, F. A. L., "Design and Analysis of Dynamic Voltage Restorer for Deep Voltage Sag and Harmonic Compensation", IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 3, No. 6, pp. 547-560, 2009.
- [24] Naidu, S.R., Fernandes, D.A., "Dynamic Voltage Restorer Based on Four-Leg Voltage Source Converter", IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 3, No. 5, pp. 437-447, 2009.
- [25] Badrkhani Ajaei, F., Afsharnia, S., Kahrobaeian, A., and Farhangi, S., "A Fast and Effective Control Scheme for the Dynamic Voltage Restorer", IEEE Trans. Power Deliv., Vol. 26, No. 4, pp. 2398-2406, 2011.
- [26] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, "Electrical Power Systems Quality", (McGraw-Hill Press, 2nd. edn.), pp. 11-42, 2004.
- [27] Li, G. J., Zhang, X. P., Choi, S. H., Lie, T. T., and Sun, Y. Z., "Control Strategy for Dynamic Voltage Restorers to Achieve Minimum Power Injection without Introducing Sudden Phase Shift", IET Gener. Transm. Distrib., Vol. 1, No. 5, pp. 847-853, 2007.
- [28] Chong, H., Huang, A.Q., Baran, M.E., Bhattacharya, S., Litzenger, W., Anderson, L., Johnson, A.L., Edris, A.A., "STATCOM Impact Study on the Integration of a Large Wind Farm into a Weak Loop Power System", IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 23, No. 1, pp. 226-233, 2008.