



# یک روش جدید تشخیص مکان خطای روتور ارت فالت برای ژنراتور سنکرون مستقل از تغییرات توان راکتیو

مجید علیزاده مقدم<sup>۱</sup>، محمد بابائی فر<sup>۲</sup>، فرشید کاکاوند<sup>۳</sup>

شرکت مدیریت تولید برق - نیروگاه شهید رجایی

قزوین، ایران

[m.alizadehmoghadam@yahoo.com](mailto:m.alizadehmoghadam@yahoo.com), [mohamadbabaeefar@gmail.com](mailto:mohamadbabaeefar@gmail.com), [kakavan\\_farshid@yahoo.com](mailto:kakavan_farshid@yahoo.com)

## ۱. مقدمه

سیستم‌های نیروگاهی شامل ژنراتور، ترانسفورماتور، الکتروموتور و خطوط انتقال می‌باشند، که این تجهیزات نیازمند سیستم حفاظت امن، جهت جلوگیری از ایجاد خطاهای شدید و همچنین گسترش آن در سیستم می‌باشند. تمامی خطاهای اتصال کوتاه، اضافه بار و حتی شرایط کاری نامتعادل برای یک سیستم قدرت مطلوب نبوده و باید سریعاً این وضعیت تشخیص داده شده و رفع عیب گردد. به طور کلی یک سیستم حفاظت نیروگاهی باید تضمین بهره برداری در شرایط کاملاً ایمن برای تجهیزات نیروگاه را ایجاد کند. بسیاری از خطاهای سیستم‌های نیروگاهی در قسمت ماشین‌های دوار، بخصوص ژنراتورها رخ می‌دهند. خطاهای احتمالی در ژنراتورهای سنکرون شامل خطاهای قسمت استاتور [1]-[3] روتور [4],[5] و قسمت مکانیکی [6]-[8] می‌باشند. خطا در سیستم تحریک یکی از خطاهای قسمت روتور ژنراتورها می‌باشد [9],[10]. سیستم حفاظت تحریک ژنراتورهای سنکرون نیازمند روش‌هایی برای تشخیص خطا در قسمت سیم‌پیچ و همچنین قسمت یکسوساز می‌باشد [11]. به طور کلی خطاهای اتصال زمین منفرد در سیستم تحریک ژنراتورهای سنکرون آسیبی به ماشین وارد نخواهند کرد. سیم‌پیچ تحریک توسط ولتاژ DC تغذیه شده و اولین اتصال به زمین یا اتصال به بدنه مشکلی ایجاد نخواهد کرد، زیرا مسیر جریان از طریق زمین بسته نخواهد شد. هر چند باقی ماندن ژنراتور در این وضعیت امکان رخداد خطای دوم را افزایش خواهد داد، زیرا این وضعیت باعث افزایش شدت میدان در نقاط دیگر ژنراتور خواهد شد. اگر اتصال زمین دیگری رخ دهد، مسیر بسته خواهد شد و جریان خطا برقرار می‌شود. این

چکیده — هدف این مقاله ارائه یک روش جدید به منظور تشخیص خطای روتور ارت فالت در ژنراتورهای سنکرون با سیستم تحریک استاتیکی می‌باشد، که مستقل از تغییرات توان راکتیو توانایی تشخیص محل خطای رتور ارت فالت را دارد. روش پیشنهاد شده در این مقاله برای ژنراتورهای سنکرون با سیستم تحریک استاتیکی مناسب می‌باشد، که از طریق یک یکسوساز و یک ترانسفورماتور تحریک تغذیه می‌گردند. برخلاف روش‌های فعلی تشخیص خطای رتور ارت فالت که نیازمند تزریق یک سیگنال به سیستم تحریک و دریافت پاسخ آن می‌باشند، روش پیشنهادی در این مقاله بدون نیاز به تزریق سیگنال به سیستم تحریک خطا را تشخیص خواهد داد. برتری دیگر این روش امکان تشخیص خطا در هر دو سمت سیستم تغذیه تحریک AC,DC می‌باشد. همچنین مزیت مهم دیگر این روش، عملکرد مستقل از تغییرات توان راکتیو می‌باشد. روش پیشنهادی بر مبنای تحلیل فرکانسی فوریه سیگنال ولتاژ دوسر مقاومت زمین نقطه صفر ترانسفورماتور تحریک، نوع خطا و محل آن را تشخیص خواهد داد. روش پیشنهادی در این مقاله در محیط سیمولینک متلب شبیه‌سازی و نتایج آن ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی — ژنراتور سنکرون؛ رتور ارت فالت؛ سیستم

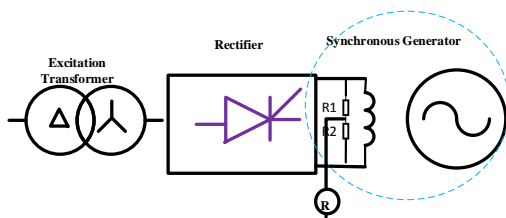
تحریک

## ۲. خطای رتور ارت فالت

روش‌های متفاوتی برای تشخیص خطای اتصال زمین سیستم تحریک در [8],[15],[16] برای ژنراتورهای سنکرون ارائه شده است. در تمامی این روش‌ها لزوم استفاده از یک منبع ولتاژ AC یا DC و یا استفاده از یک منبع تزریق سیگنال فرکانس پایین وجود دارد. در ادامه این روش‌ها تشریح می‌شوند.

### ۲.۱. حفاظت مستقیم

در این روش مقاومتی با سیم‌پیچ تحریک به صورت موازی اتصال داده می‌شود و مرکز آن از طریق یک رله به زمین متصل می‌گردد. زمانی که هیچ اتصالی وجود ندارد، از رله حساس هیچ جریانی عبور نخواهد کرد، اما در صورت بروز اتصالی به زمین، ولتاژی در دو سر رله ایجاد می‌شود. اشکال این روش آن است که اگر خطا در مرکز سیم‌پیچ تحریک رخ دهد ولتاژی روی رله قرار نمی‌گیرد، یعنی حفاظت یاد شده، این نوع خطا را نمی‌تواند تشخیص دهد. این شرایط برای این حفاظت یک نقطه کور حفاظتی را ایجاد می‌کند. در برخی نیروگاه‌ها برای غلبه بر این عیب از یک کلید استفاده می‌شود تا در فواصل زمانی مشخص محل اتصال از مرکز به نقطه‌ای دیگر جابجا گردد، تا نقطه کور نیز جابجا گردد و در نتیجه احتمال تشخیص خطا توسط رله را بالاتر می‌برد. شکل ۱ حفاظت مستقیم رتور ارت فالت را برای یک ژنراتور نمایش می‌دهد. [17]



شکل ۱- حفاظت مستقیم رتور ارت فالت

### ۲.۲. حفاظت تزریق جریان متناوب

در این روش یک سمت سیم‌پیچ میدان تحریک از طریق خازن و ترانسفورماتور کمکی و رله حساس به زمین وصل می‌گردد. مدار میدان تحریک به طور دائم در معرض ولتاژ متناوب که سطح آن در تمام طول سیم‌پیچ میدان مساوی است، قرار می‌گیرد. اگر اتصال زمین یا اتصال بدنه ای در سیم‌پیچ میدان تحریک رخ دهد، مدار جریان AC از طریق زمین بسته خواهد شد و در نهایت رله E/F عمل خواهد کرد. این رله در واحدهای گازی نیروگاه سیکل ترکیبی شهید رجایی ساخت شرکت GEC و از نوع

موضوع باعث از بین رفتن تقارن EMF و در نتیجه شار مغناطیسی ماشین خواهد شد، لرزش‌های مکانیکی افزایش خواهد یافت و ولتاژ استاتور هم نامتعادل خواهد شد که ممکن است باعث صدمات شدیدی به ژنراتور گردد. در نتیجه خطای اتصال زمین اول باید سریعاً تشخیص داده شده و از وقوع شرایط بحرانی‌تر پیشگیری شود.

اتصال زمین رتور از دو نقطه از طریق تحلیل و پردازش پارامترهایی مانند، ولتاژ بی‌باری ژنراتور [12],[13]، یا شار فاصله هوایی [14] تشخیص داده می‌شود. ولی خطای اتصال زمین از یک نقطه با پارامترهای مذکور قابل تشخیص نخواهد بود، زیرا در این شرایط همانطور که پیش‌تر بیان گردید هیچ تغییر محسوس در پارامترهای ژنراتور ایجاد نمی‌شود. روش‌های موجود تشخیص خطای رتور ارت فالت بر مبنای تزریق سیگنال AC,DC یا تقسیم ولتاژ رتور این وضعیت را تشخیص می‌دهند. به اختصار این روش‌ها در بخش دوم این مقاله تشریح خواهند شد.

این مقاله یک روش جدید تشخیص خطای رتور ارت فالت برای ژنراتورهای سنکرون با سیستم تحریک استاتیک را ارائه می‌کند. در این نوع از ژنراتورها سیم‌پیچ‌های تحریک از طریق یک یکسوساز و ترانسفورماتور تحریک تغذیه می‌گردند. برتری این روش نسبت به روش‌های به صورت زیر می‌باشد:

- تفکیک محل خطای اتصال زمین رخ داده شده، بین قسمت DC تحریک و قسمت AC تحریک.
- عدم نیاز به تزریق سیگنال خارجی به سیستم تحریک.
- عدم وجود نقطه کور در تشخیص خطای اتصال زمین.

مزایای روش پیشنهادی قابلیت سیستم حفاظت را بهبود خواهد داد، به طوری که سیستم حفاظت توانایی تشخیص و تفکیک خطا در بخش AC و DC سیستم تحریک را خواهد داشت و در نتیجه سرعت تشخیص محل خطا و افزایش قدرت مانور برای گروه‌های بهره‌برداری و بخصوص تعمیراتی در یک نیروگاه را به دنبال خواهد داشت. با توجه به اینکه یکی از مشکلات روش‌های حفاظت فعلی سیم‌پیچ تحریک ژنراتورها، عملکرد کاذب آن‌ها در پی عملکرد سیستم AVR در پاسخ به تغییرات توان راکتیو شبکه می‌باشد، مزیت دیگر این روش عملکرد مستقل آن نسبت به تغییرات توان راکتیو ژنراتور در شرایط عملکرد سیستم AVR می‌باشد.

در این مقاله در بخش دوم، روش‌های موجود تشخیص خطای رتور ارت فالت به اختصار تشریح خواهند شد. در بخش سوم، جزئیات روش پیشنهادی ارائه خواهند شد. در بخش چهارم، مدلسازی نرم افزاری و تحلیل نتایج ارائه خواهد شد.

### ۳. روش پیشنهادی

#### ۳.۱. تعیین محل خطا

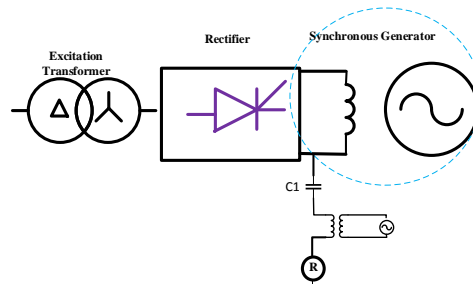
روش پیشنهادی نیازمند نصب یک مقاومت با مقدار بالا در سمت فشار ضعیف ترانسفورماتور سیستم تحریک می‌باشد. مقدار این امپدانس باید به منظور محدود کردن جریان اتصال کوتاه مقدار بالایی محاسبه گردد. مطابق شکل ۴ این روش پیشنهادی نیازمند تجهیزات ذکر شده در ادامه می‌باشد:

- مدار اندازه‌گیری ولتاژ یا جریان دو سر مقاومت زمین.
- مدار پردازش هارمونیک‌های ولتاژ و جریان مقاومت زمین.

در صورت وقوع خطای اتصال زمین جریانی از طریق سیستم تحریک به سمت زمین برقرار خواهد شد، که با نمونه برداری از این ولتاژ یا جریان در دو سر امپدانس زمین می‌توان نوع خطا و محل آن را تشخیص داد. در سیستم تحریک معمولاً از یک ترانسفورماتور به منظور تأمین ولتاژ سیستم تحریک با اتصال ستاره/مثلث استفاده می‌شود. در نتیجه می‌توان از نقطه صفر ترانسفورماتور برای اتصال امپدانس استفاده کرد. برای سیستم تحریکی که دارای ترانسفورماتور با اتصال مثلث در ثانویه می‌باشد، باید از سیم‌پیچ سوم با اتصال زیگزگ استفاده کرد، در این صورت نقطه صفر مجازی خواهیم داشت و می‌توان از آن برای اتصال امپدانس استفاده کرد. با توجه به مشخصه استخراجی از شکل موج ولتاژ یا جریان نقطه صفر می‌توان نوع و محل خطا را به صورت زیر تعیین کرد:

- خطا در سمت AC سیستم تحریک: در این وضعیت خطا وابسته به دامنه و فرکانس سیگنال نمونه برداری شده از امپدانس نقطه صفر می‌باشد. اگر دامنه مولفه هارمونیک اول این سیگنال از مقدار مشخص بیشتر باشد، خطا از نوع تک‌فاز و در سمت AC سیستم تحریک خواهد بود.
- خطا در سمت DC سیستم تحریک: در این حالت نیز خطا وابسته به دامنه و فرکانس سیگنال نمونه برداری شده از امپدانس نقطه صفر می‌باشد. اگر دامنه مولفه هارمونیک سوم این سیگنال از مقدار مشخص بیشتر باشد، خطا از نوع تک‌فاز و در سمت DC سیستم تحریک خواهد بود.
- خطا در سمت AC, DC سیستم تحریک: در نهایت اگر دامنه مولفه هارمونیک اول و دامنه مولفه هارمونیک سوم سیگنال نمونه برداری شده از مقدار مشخص بیشتر باشند، خطا از نوع تک‌فاز و در هر دو سمت AC و DC سیستم تحریک خواهد بود.

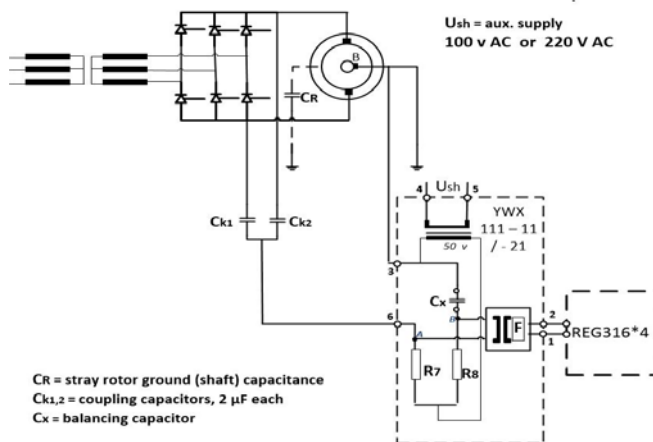
MRSU 01 می‌باشد [18]. وجود خازن در مدار الکتریکی این رله ضمن محدود کردن مقدار جریان متناوب، ولتاژ مستقیم میدان تحریک را مسدود کرده و از تخلیه جریان مستقیم DC از طریق ترانسفورماتور جلوگیری می‌کند. شکل ۲ حفاظت تزریق جریان متناوب را برای یک ژنراتور نمایش می‌دهد.



شکل ۲- حفاظت تزریق جریان متناوب

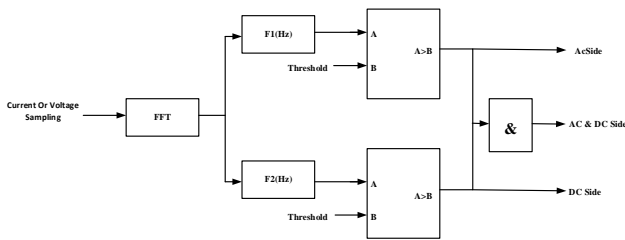
#### ۲.۳. حفاظت تزریق جریان متناوب و مدار پل و تستون

این نوع حفاظت از طریق یک مدار پل و تستون، میزان انحراف مقاومت عایقی و ظرفیت خازنی بین سیم‌پیچ و محور روتور را با شرایط تعادل مقایسه می‌کند. این نوع از حفاظت در واحدهای بخار نیروگاه سیکل ترکیبی شهید رجایی ساخت شرکت ABB و از نوع REG316\*4 می‌باشد [19]، که یکی از توابع حفاظتی آن، حفاظت روتور ارت فالت از نوع تزریق جریان و مدار پل و تستون می‌باشد.



شکل ۳- function حفاظتی روتور ارت فالت - C1 و C2: خازن های

خارجی کوپلینگ



شکل ۵- پردازش سیگنال و تعیین مولفه های هارمونیک

### ۳,۳. تحلیل فوریه

در ارتباط با مسائل سیستم قدرت، واژه هارمونیک به وفور بکار برده می‌شود. به طور کلی هر موج متناوبی می‌تواند به وسیله مجموعه ای از موج‌های سینوسی توصیف گردد، که این مجموعه به سری فوریه، ریاضی دان فرانسوی معروف است. معادله (۱) رابطه اصلی سری فوریه برای یک موج ولتاژ را نشان می‌دهد:

$$V_t = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (V_a \sin(n\omega_0 t) + V_b \cos(n\omega_0 t)) \quad (1)$$

به ترتیب معادلات (۲) و (۳) و (۴) مولفه‌های صفر، مولفه‌های فرد و زوج موج اصلی را نمایش می‌دهند:

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^T V_t dt \quad (2)$$

$$V_a = \frac{2}{T} \int_0^T V_t \cdot \sin(n\omega_0 t) \cdot dt \quad (3)$$

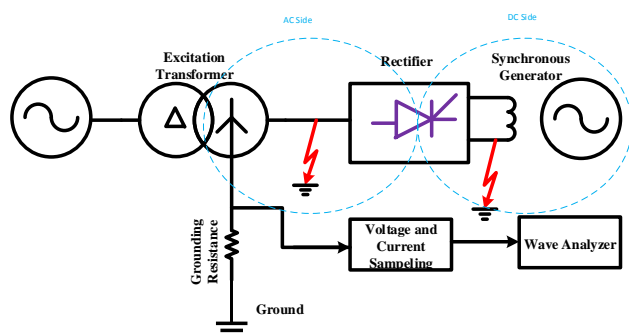
$$V_b = \frac{2}{T} \int_0^T V_t \cdot \cos(n\omega_0 t) \cdot dt \quad (4)$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} \quad (5)$$

در این روابط  $n$  مرتبه  $n$  ام هارمونیک و  $T$  زمان اصلی پریود می‌باشد. فرکانس هر یک از موج‌های سینوسی این مجموعه ضریب صحیحی از فرکانس موج تناوبی اولیه یا پایه می‌باشد. هر جمله این سری به عنوان یک هارمونیک فرکانس پایه تعریف می‌گردد. جمله‌ای که فرکانس آن همان فرکانس پایه است هارمونیک اول نامیده می‌شود و جمله‌ای که فرکانس آن دو برابر فرکانس اصلی است، هارمونیک دوم و هارمونیک‌های دیگر نیز، به همین صورت نام گذاری می‌گردند.

### ۴. شبیه سازی و نتایج

روش پیشنهادی تشخیص خطای روتور ارت فالت در محیط سیمولینک متلب شبیه‌سازی و نتایج آن ارائه شده است. مدل پیشنهادی در شکل ۴ و پارامترهای جدول ۱ برای مدلسازی در محیط نرم افزار در نظر گرفته شده



شکل ۴- روش پیشنهادی حفاظت روتور رات فالت

### ۳,۲. بررسی عملکرد روش پیشنهادی در شرایط تغییر

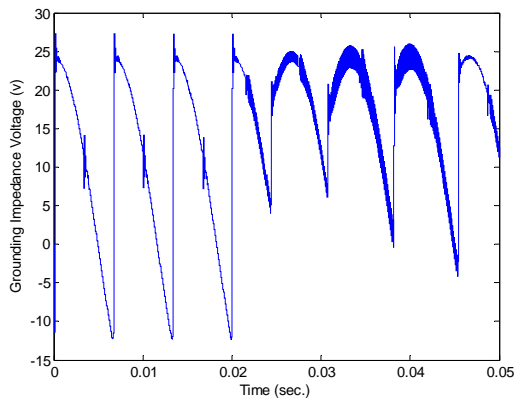
#### توان راکتیو

یکی از معایب روش های قبلی تشخیص خطای روتور ارت فالت در ژنراتورهای سنکرون، حساسیت سیستم حفاظت به تغییرات توان راکتیو شبکه و عملکرد تپ چنجر ترانسفورماتور نیروگاهی و در نهایت پاسخ سیستم AVR می باشد، که باعث تولید مولفه‌های هارمونیک با فرکانس هایی می‌گردد که از طریق خازن نشتی باعث عملکرد سیستم حفاظت می‌شود. به منظور پیشگیری از عملکردهای کاذب نیازمند تنظیمات خاصی خواهد بود، که نتیجه آن کاهش قابلیت سیستم حفاظت مذکور می‌شود. در حالی که روش پیشنهادی با بررسی مولفه های هارمونیک در شرایط مذکور این عیب را پوشش می‌دهد و باعث بهره‌برداری مطلوب از سیستم حفاظت می‌گردد. در نتیجه با پردازش فرکانس هارمونیک‌های سیگنال ولتاژ یا جریان امپدانس نقطه صفر می‌توان محل خطا را تعیین نمود. شکل ۵ مدار پردازش سیگنال و تعیین محل خطا را نمایش می‌دهد. در این مدار سیگنال نمونه برداری شده از طریق تحلیل فوریه پردازش و مولفه‌های هارمونیک آن تجزیه خواهند شد. با تفکیک مولفه‌های هارمونیک موج و مقایسه آن‌ها با یک مقدار مشخص محل خطا مشخص خواهد شد. مطابق این مدار اگر مولفه اول فرکانسی موج اصلی  $f_1$  از مقدار آستانه بیشتر باشد، خطا در سمت AC سیستم تحریک رخ داده است، همچنین اگر مولفه سوم فرکانسی موج اصلی  $f_3$  از مقدار آستانه بیشتر باشد، خطا در سمت DC سیستم تحریک رخ داده است و در نهایت اگر مولفه اول فرکانسی موج اصلی  $f_1$  و مولفه سوم فرکانسی موج اصلی  $f_3$  از مقدار آستانه بیشتر باشند، خطا در سمت DC و AC سیستم تحریک رخ داده است.

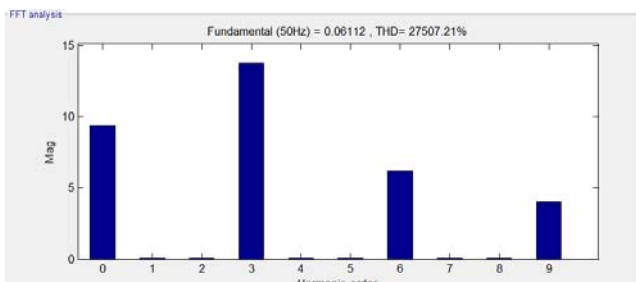
مولفه‌های هارمونیک آن می‌توان در مورد نوع خطا بحث کرد. شکل ۷ نتیجه پردازش فوریه سیگنال و مولفه‌های اصلی هارمونیک این موج را نمایش می‌دهد. همانطور که از شکل قابل برداشت است، مولفه هارمونیک اول  $f_1$  غالب است و دارای مقدار بیشتری از حد آستانه می‌باشد و بیان کننده خطا در بخش AC سیستم تحریک می‌باشد.

#### ۴.۲. خطا در قسمت DC

به منظور بررسی روش پیشنهادی در تشخیص خطا در بخش DC سیستم تحریک، خطای اتصال زمین در سمت DC سیستم تحریک مدل و سیگنال ولتاژ آن در شکل ۸ نمایش داده شده است. هارمونیک‌های موجود در سیگنال نمونه برداری شده از دو سر امپدانس نقطه صفر تعیین کننده محل خطا خواهند بود. با ارسال این سیگنال به مدار پردازش سیگنال مولفه‌های هارمونیک اصلی این سیگنال مطابق شکل ۹ خواهند بود. با توجه به این شکل، هارمونیک سوم  $f_3$  غالب و مقدار آن از حد آستانه مشخص شده، بیشتر می‌باشد و بیان کننده محل وقوع خطا در قسمت DC سیستم تحریک می‌باشد.

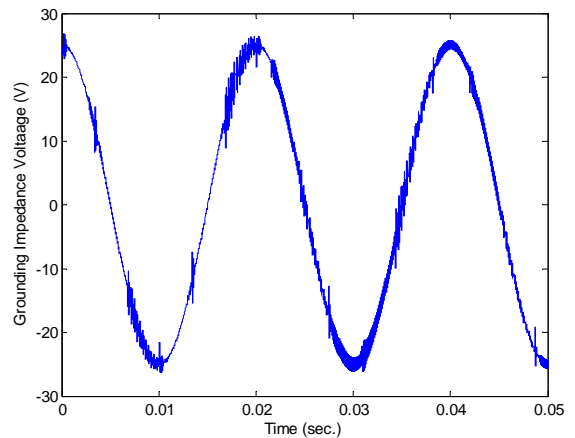


شکل ۸ ولتاژ دو سر امپدانس زمین در شرایط وقوع خطا در قسمت DC سیستم تحریک

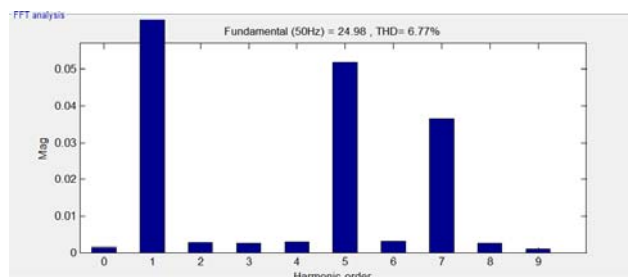


شکل ۹- مولفه های هارمونیک سیگنال ولتاژ دو سر امپدانس زمین در شرایط وقوع خطا در قسمت DC سیستم تحریک

است. به منظور مدل‌سازی نرم افزاری نقطه صفر ترانسفورماتور از طریق امپدانس زمین شده است. مدار پیشنهادی برای پردازش فوریه سیگنال در شکل ۵ ارائه شده است. همچنین برای پردازش سیگنال فوریه از ولتاژ دو سر امپدانس زمین نمونه برداری شده است. با توجه به اینکه روش پیشنهادی بر اساس پردازش سیگنال می‌باشد، می‌توان از جریان نیز برای این منظور نمونه برداری کرد. جهت بررسی عملکرد روش پیشنهادی، خطای اتصال زمین در هر دو قسمت AC و DC سیستم تحریک مدل‌سازی و نتایج آن برای سه حالت خطا مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۶ ولتاژ دو سر امپدانس زمین در شرایط وقوع خطا در قسمت AC سیستم تحریک

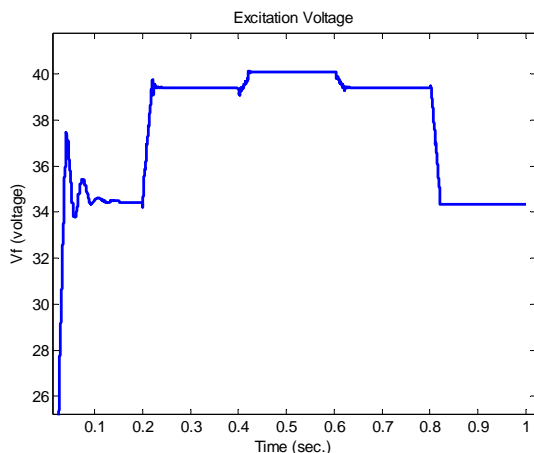


شکل ۷- مولفه های هارمونیک سیگنال ولتاژ دو سر امپدانس زمین در شرایط وقوع خطا در قسمت AC سیستم تحریک

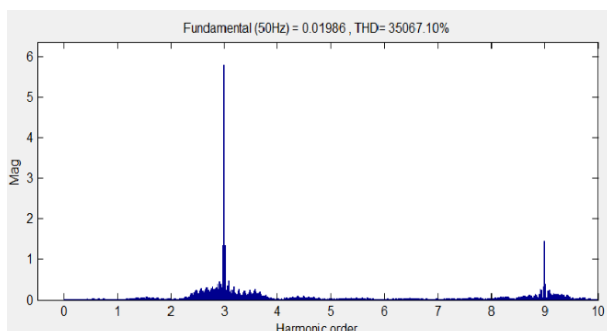
#### ۴.۱. خطا در قسمت AC

شکل ۶ ولتاژ دو سر امپدانس زمین را در وضعیتی که خطا در قسمت AC سیستم تحریک رخ داده است نمایش می‌دهد. اعوجاج و هارمونیک‌های موجود در این شکل موج به دلیل حضور خطا در قسمت AC سیستم تحریک است. با ارسال این سیگنال به مدار پردازش سیگنال و استخراج

است. مولفه هارمونیک سوم و اول بسیار کوچک‌تر از مقدار مرجع بوده و باعث عملکرد حفاظت نخواهد شد.



شکل ۱۱- تغییرات ولتاژ تحریک در پاسخ به تغییرات توان راکتیو



شکل ۱۲- مولفه های هارمونیک سیگنال ولتاژ دو سر امپدانس زمین در شرایط تغییر توان راکتیو

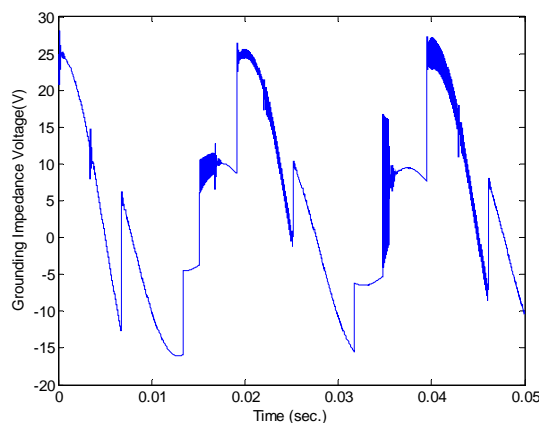
## ۵. نتیجه

در این مقاله یک روش جدید تشخیص خطای روتور ارت فالت برای ژنراتورهای سنکرون نیروگاهی مجهز به سیستم تحریک استاتیکی ارائه شد. روش پیشنهادی بر اساس پردازش سیگنال و تحلیل فوریه سیگنال ولتاژ یا جریان امپدانس زمین ترانسفورماتور سیستم تحریک ارائه شد. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی می‌توان برتری این روش نسبت به سایر روش‌ها را به صورت زیر بیان کرد:

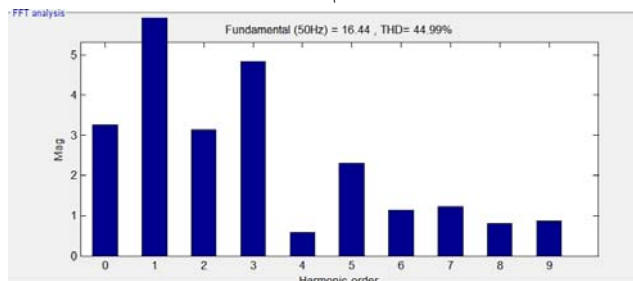
- تفکیک محل خطای اتصال زمین رخ داده شده، بین قسمت DC تحریک و قسمت AC تحریک.
- عدم نیاز به تزریق سیگنال خارجی به سیستم تحریک.
- عدم وجود نقطه کور در تشخیص خطا.

## ۴.۳. خطا در قسمت AC, DC

به منظور بررسی دقیق روش پیشنهادی خطای اتصال زمین به طور همزمان در هر دو سمت AC و DC مدل شده است. با وقوع همزمان خطا در هر دو قسمت AC, DC سیگنال ولتاژی مطابق شکل ۱۰ در دو سر امپدانس زمین ایجاد خواهد شد. با تجزیه و پردازش این سیگنال در مدار پردازش سیگنال می‌توان مولفه‌های هارمونیک اصلی این سیگنال را مطابق شکل ۱۱ بدست آورد. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل فوریه سیگنال و تفکیک مولفه‌های هارمونیک اول و سوم موج و مقایسه آن‌ها با مقدار آستانه می‌توان نتیجه گرفت که خطا در هر دو سمت AC, DC رخ داده است.



شکل ۱۰- ولتاژ دو سر امپدانس زمین در شرایط وقوع خطا در قسمت AC, DC سیستم تحریک



شکل ۱۱- مولفه های هارمونیک سیگنال ولتاژ دو سر امپدانس زمین در شرایط وقوع خطا در قسمت AC, DC سیستم تحریک

## ۴.۴. تغییرات توان راکتیو

در نهایت به منظور بررسی استقلال این روش از تغییرات توان راکتیو، مطابق شکل ۱۲ دو پله تغییرات به ترتیب در ۰/۲ ثانیه و ۰/۴ ثانیه اعمال شده است. پاسخ سیستم تحریک به این تغییرات در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. مولفه‌های هارمونیک در شرایط تغییرات توان راکتیو مطابق شکل ۱۳

- [9] D. S. Vilchis-Rodriguez and E. Acha, "A synchronous generator internal fault model based on the voltage-behind-reactance representation," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 24, no. 1, pp. 184-194, Mar. 2009.
- [10] Y. Gao, X. Lin, Q. Tian, and P. Liu, "Novel identification method of stator single phase-to-ground fault for cable-wound generators," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 23, no. 2, pp. 349-357, Jun. 2008.
- [11] M. G. McArdle and D. J. Morrow, "Noninvasive detection of brushless exciter rotating diode failure," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 19, no. 2, pp. 378-383, Jun. 2004.
- [12] M. Kiani, W.-J. Lee, R. Kenarangui, and B. Fahimi, "Detection of rotor faults in synchronous generators. Diagnosis for electrical machines," in Proc. IEEE Int. Symp. power Electron. Drives (SDEMPED 2007), pp. 266-271.
- [13] M. Kiani, W.-J. Lee, R. Kenarangui, and B. Fahimi, "Frequency domain methods for detection of rotors faults in synchronous machines under no-load condition," in Proc. 39th North Amer. Power Symp. (NAPS 2007), pp. 31-36.
- [14] R. L. Stoll and A. Hennache, "Method of detecting and modelling presence of shorted turns in dc field winding of cylindrical rotor synchronous machines using two airgap search coils," IEEE Proc. Electric Power Appl., vol. 135, no. 6, pp. 281-294, Nov. 1988.
- [15] R. H. Regan and K. Wakeley, "Rotor monitoring and protection for large generators," in Proc. IEEE Conf. Publication no. 412 Electr. Mach. Drivers, 1995, pp. 203-207.
- [16] P. Neti, A. B. Dehkordi, and A. M. Gole, "A new robust method to detect rotor faults in salient-pole synchronous machines using structural asymmetries," presented at the IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meeting (IAS 2008), Edmonton, Alberta, Canada.
- [17] Earth-fault detection system for rotor winding of machine, International Patent G01R-031/34, H02H-003/17, Jun. 22, 1983.
- [18] حفاظت ژنراتور، ویژه آموزش‌های گازی نیروگاه سیکل ترکیبی شهید رجایی، بخش الکترونیک، مهندس نبیل طوسی زاده، خرداد ۱۳۷۳.
- [19] Numerical Generator Protection REG316\*4, 6<sup>th</sup> ed, ABB Switzerland Ltd, Baden, 1996.

- عملکرد مستقل آن نسبت به تغییرات توان راکتیو ژنراتور در شرایط عملکرد سیستم AVR.
- مزایای روش پیشنهادی قابلیت سیستم حفاظت را بهبود خواهد داد، به طوری که سیستم حفاظت توانایی تشخیص و تفکیک خطا در بخش AC و DC سیستم تحریک را خواهد داشت. با توجه به اینکه در زمان وقوع چنین خطایی به دلیل خروج واحد از شبکه سرعت عمل در تشخیص و رفع عیب بسیار حائز اهمیت است، لذا یکی از عوامل کندی روند تحلیل چنین خطاهایی تشخیص محدوده خطا در سیستم تحریک می‌باشد. چنانچه محدوده خطا مشخص گردد، سرعت عیب‌یابی و رفع عیب را افزایش چشمگیری خواهد داد. در نتیجه سرعت تشخیص محل خطا و افزایش قدرت مانور برای گروه‌های بهره‌برداری و بخصوص تعمیراتی در یک نیروگاه را به دنبال خواهد داشت.

## ضمیمه

جدول ۱- پارامترهای مدل‌سازی

Excitation Transformer	Unite
Winding Connection	Dyn
Ration	400V/25 <sup>V</sup>
Rated Power	200 <sup>V</sup> A
Grounding Resistor	5k $\Omega$
Thyristor bridge	5 <sup>KVA</sup>
Operation Mode	Full Controlled
Maximum Output Voltage	33 <sup>V</sup>

## مراجع

- [1] R. Bayindir, I. Sefa, I. Colak, and A. Bektas, "Fault detection and protection of induction motors using sensors," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 23, no. 3, pp. 734-741, Sep. 2008.
- [2] M. A. S. K. Khan, T. S. Radwan, and M. A. Rahman, "Real-time implementation of wavelet packet transform based diagnosis and protection of three-phase induction motors," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 22, no. 3, pp. 647-655, Sep. 2007.
- [3] S. M. A. Cruz and A. J. M. Cardoso, "Multiple reference frames theory: A new method for the diagnosis of stator faults in three-phase induction motors," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 20, no. 3, pp. 611-619, Sep. 2005.
- [4] B. Ayhan, M.-Y. Chow, and M.-H. Song, "Multiple signature processing based fault detection schemes for broken rotor bar in induction motors," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 20, no. 2, pp. 336-343, Jun. 2005.
- [5] H. Douglas, P. Pillay, and A. K. Ziarani, "Broken rotor bar detection in induction machines with transient operating speeds," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 20, no. 1, pp. 135-141, Mar. 2005.
- [6] A. M. Knight and S. P. Bertani, "Mechanical fault detection in a medium-sized induction motor using stator current monitoring," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 20, no. 4, pp. 753-760, Dec. 2005.
- [7] S. Nandi, H. A. Toliyat, and X. Li, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 20, no. 4, pp. 719-729, Dec. 2005.

[۸] بررسی اتصال زمین روتور ژنراتور واحد بخار نیروگاه بندر عباس، احسان بهرامی، بیست و سومین کنفرانس برق، ۱۳۸۷