



## تبیین ساختار و عملکرد ژنراتورهای اتصال کوتاه

سهراب امینی ولاشانی  
فرهاد فلاحي  
samini@nri.ac.ir  
پژوهشگاه نیرو - پژوهشکده برق  
ایران - تهران

کلمات کلیدی: ژنراتور اتصال کوتاه، رژیم کاری، ساختار، منحنی جریان اتصال کوتاه

### چکیده

هسته مرکزی آزمایشگاههای توان بالا ژنراتورهای اتصال کوتاه می باشد که وظیفه آنها ایجاد الگوهای جریانی خاص جهت آزمایش جریان تحمل و قطع کلیدها می باشد. رژیم کاری ویژه و لذا پیچیدگی این ادوات منجر به بالا بودن هزینه ساخت و نصب گردیده بطوریکه تعداد آنها در سطح بین المللی نادر بوده و کشور ما فاقد حتی یک نمونه می باشد و بدین جهت در راستای تجهیز آزمایشگاههای توان بالا از طریق خرید و یا ساخت، لازم است بررسی هایی صورت گیرد، در این مقاله پس از ارائه رژیم های کاری استاندارد مورد نیاز، روش های مختلف تولید الگوی جریان مورد نظر اشاره شده و پس از تاکید بر استفاده از ژنراتورهای اتصال کوتاه بعنوان منابع مناسب، ساختار و عملکرد آنها تبیین شده است. در انتها نیز نتایج حاصل از شبیه سازی عملکرد سه نمونه ژنراتور در رژیم کاری مورد نظر، مورد بررسی و تفسیر قرار گرفته و پیشنهادهای جهت توسعه و تعمیق نتایج ارائه شده است.

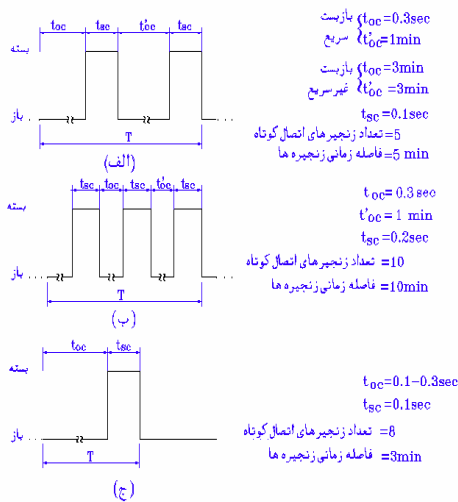
### ۱- مقدمه

ژنراتورهای اتصال کوتاه مولدهایی می باشند که وظیفه آنها تولید جریان زیاد برای آزمایش کلیدها می باشد، آزمایش مزبور در جهت تایید طرح و روند طراحی و ساخت صورت می گیرد و بنابراین از حیث دسته بندی از مقوله نوعی و یا نمونه ای<sup>۱</sup> در نظر گرفته می شود [۱]. کلیدهای مورد نظر بویژه از نوع قدرت، سازندگان محدودی داشته و لذا آزمایشگاههای فشارقوی دارنده ژنراتورهای اتصال کوتاه محدود می باشند، از سوی دیگر ساختمان و تجهیزات جانبی ژنراتورهای اتصال کوتاه بسیار پیچیده بوده و لذا هزینه سرمایه گذاری جهت خرید و یا طراحی، ساخت و پیاده سازی آنها شدیداً افزایش می یابد.

در عین حال تعدد آزمایشگاههای فشارقوی (ولتاژ بالا) در کشور و فقدان ژنراتور اتصال کوتاه در این آزمایشگاهها موجبات وابستگی به آزمایشگاههای خارجی را فراهم نموده و گاهاً منجر به تضعیف نظارت بر کیفیت کلیدهای ساخت

<sup>1</sup> - Type and/or Sample Test

(۵۰ هرتز) و همچنین آلودگی هارمونیکی آن بترتیب از ۱۰ و ۵ درصد تجاوز ننماید.<sup>۱</sup>



شکل (۱): تعدادی از رژیم‌های کاری مورد نیاز برای آزمایش کلیدهای قدرت

مطابق شکل (۱) در صورت تبعیت از الگوی قطع و وصل (الف)، لازم است این الگو با فواصل زمانی ۵ دقیقه‌ای به تعداد ۵ مرتبه تکرار گردد که برای الگوی (ب) فواصل زمانی بین الگوها معادل ۱۰ دقیقه و تعداد آنها ۱۰ مرتبه می‌باشد. در الگوی (ج) نیز فواصل زمانی برابر ۳ دقیقه و تعداد الگوها ۸ مرتبه می‌باشد. ضمناً لازم است که زنجیره اتصال کوتاه بعدی حداقل به مدت دو ساعت بعد از آخرین زنجیره اتصال کوتاه پیاده گردد.

## ۲-۲- راهکارهای تولید جریان اتصال کوتاه [1]

تولید جریان اتصال کوتاه از طریق شبکه سراسری، ترانسفورماتور و یا استفاده از مدارهای سلفی - خازنی میسر می‌باشد، لیکن با توجه به الگوهای قطع و وصل خاص کلید و تکرار عملیات اتصال کوتاه و دامنه زیاد جریان، استفاده از شبکه سراسری بواسطه ملاحظات پایداری عملاً ممکن نمی‌باشد. استفاده از ترانسفورماتور نیز مستلزم بررسی بوده

داخلی شده است و لذا با توجه به توسعه کمی و کیفی سازندگان ادوات فشارقوی و اهمیت تضمین کیفیت محصولات آنها لازم است مطالعاتی راجع به ساختار و نحوه عملکرد این تجهیزات صورت گیرد، علی‌الخصوص اینکه بواسطه قلت این ادوات منابع و مراجع کافی راجع به آنها شدیداً محدود بوده و هر گونه بررسی مستلزم ایده‌پردازی و سپس تایید آن می‌باشد. مقاله مزبور که شامل چکیده فعالیت با هدف استخراج ساختار و تبیین نحوه عملکرد ژنراتورهای اتصال کوتاه می‌باشد در پنج قسمت تنظیم و نگارش یافته است. در قسمت دوم به انواع رژیم‌های کاری مورد نیاز جهت آزمایش کلیدها ارائه شده و سپس روش‌های تولید جریان بالا تشریح و نقد می‌گردد. در ادامه با تاکید بر ضرورت استفاده از ژنراتورهای اتصال کوتاه به اهم قیود و ملاحظاتی که به این ژنراتورها با سطح رژیم کاری خاص تحمیل می‌گردد، اشاره می‌شود. در قسمت سوم پس از مشخص نمودن تجهیزات جانبی مورد نیاز ترکیب‌بندی پیشنهادی برای تولید جریان اتصال کوتاه و رژیم کاری مورد نظر ارائه شده و نحوه عملکرد اجزاء و ترتیب و توالی قطع و وصل آنها تشریح می‌شود، سپس در قسمت چهارم نتایج حاصل از شبیه‌سازی ترکیب‌بندی مزبور برای ژنراتور اتصال کوتاه شرکت زیمنس، نیروگاه نکا و یک نمونه ۱۵۰۰ کیلوولت آمپری ارائه شده و در انتها در ارتباط با مطالب ارائه شده جمع‌بندی صورت می‌گیرد.

## ۲- رژیم‌های کاری و جوانب آن

### ۲-۱- رژیم‌های کاری

در شکل (۱) تعدادی از رژیم‌های کاری مورد نیاز برای آزمایش کلیدهای قدرت ارائه شده است [۲]. براساس استاندارد، جریان نامی اتصال کوتاه کلید تابعی از ولتاژ نامی آن بوده و وظیفه مولد جریان اتصال کوتاه، تامین جریانی با دامنه مزبور و در مدت زمان پنج سیکل (۱۰۰ میلی‌ثانیه) می‌باشد که این دامنه حتی‌المقدور باید ثابت بوده و انحراف فرکانس جریان اتصال کوتاه سینوسی نسبت به فرکانس نامی

<sup>۱</sup>- لازم به ذکر است که استاندارد فوق‌الذکر مربوط به ادوات فشارقوی

می‌باشد و موارد فشارضعیف استاندارد مجزایی دارند [۳].

حداقل مقدار ممکن باشد و بدین منظور ارتفاع شیارهای استاتور کاهش یافته و قطر میله‌های دمپر افزایش می‌یابد، بدین طریق مقدار مقاومت دمپرها نیز کاهش یافته که منجر به افزایش ثوابت زمانی ماشین می‌گردد.

سیستم تحریک با ولتاژ و جریان سقف بسیار بالا از نیازمندیهای اصلی بوده که باید دارای سرعت پاسخ زیادی نیز باشد تا امکان تولید و کنترل جریانهای اتصال کوتاه با دامنه مورد نظر و در زمان مقتضی میسر گردد. همچنین جریانهای اتصال کوتاه مورد نظر موجب تولید نیروها و گشتاورهای ضربه‌ای با دامنه بسیار زیاد می‌گردد که در این راستا لازم است بخش‌های حساس نظیر انتهای کلافها و گوه‌ها تقویت گردیده و برای کاهش انتقال لرزش به فونداسیون، هسته بصورت ارتجاعی در داخل بدنه قرار گیرد و در نهایت فونداسیون قابلیت تحمل و دفع ارتعاشات پیاپی را نیز داشته باشد [۱ و ۴ و ۵ و ۶].

### ۳- عملکرد

با توجه با نیازمندیها و محدودیت‌ها، سیستم ژنراتور اتصال کوتاه پیشنهادی از یک واحد ژنراتور اتصال کوتاه، یک واحد موتور راه‌انداز، یک واحد اینورتر ۱۲ پالسه، یک واحد ژنراتور سنکرون، یک واحد موتور القایی و سیستم کنترل و مونیتورینگ تشکیل می‌گردد که البته برای تکمیل سیستم و تحقق عملکرد آن به تجهیزات جانبی دیگری نیز نیاز می‌باشد [۱ و ۴]. در شکل (۲) دیاگرام شماتیک پیشنهادی ارائه شده است. برای انجام آزمایش در ابتدا موتور راه‌انداز ژنراتور اتصال کوتاه راه‌اندازی شده و سرعت ژنراتور را به سرعت نامی می‌رساند، به موازات آن موتور راه‌انداز متصل به ژنراتور تغذیه کننده تحریک راه‌اندازی شده و ژنراتور را به سرعت نامی می‌رساند، سپس ولتاژ تحریک ژنراتور اخیر اعمال گردیده بطوریکه در ترمینال آن ولتاژ نامی تولید گردد. در ادامه زاویه آتش کلیدهای نیمه‌هادی اینورتر ۱۲ پالسه بگونه‌ای تنظیم می‌گردد که ولتاژ ترمینال ژنراتور اتصال کوتاه در شرایط مدار باز برابر ولتاژ نامی گردد. اکنون سیستم در حال آماده باش برای شروع آزمایش‌های اتصال کوتاه می‌باشد. در حدود

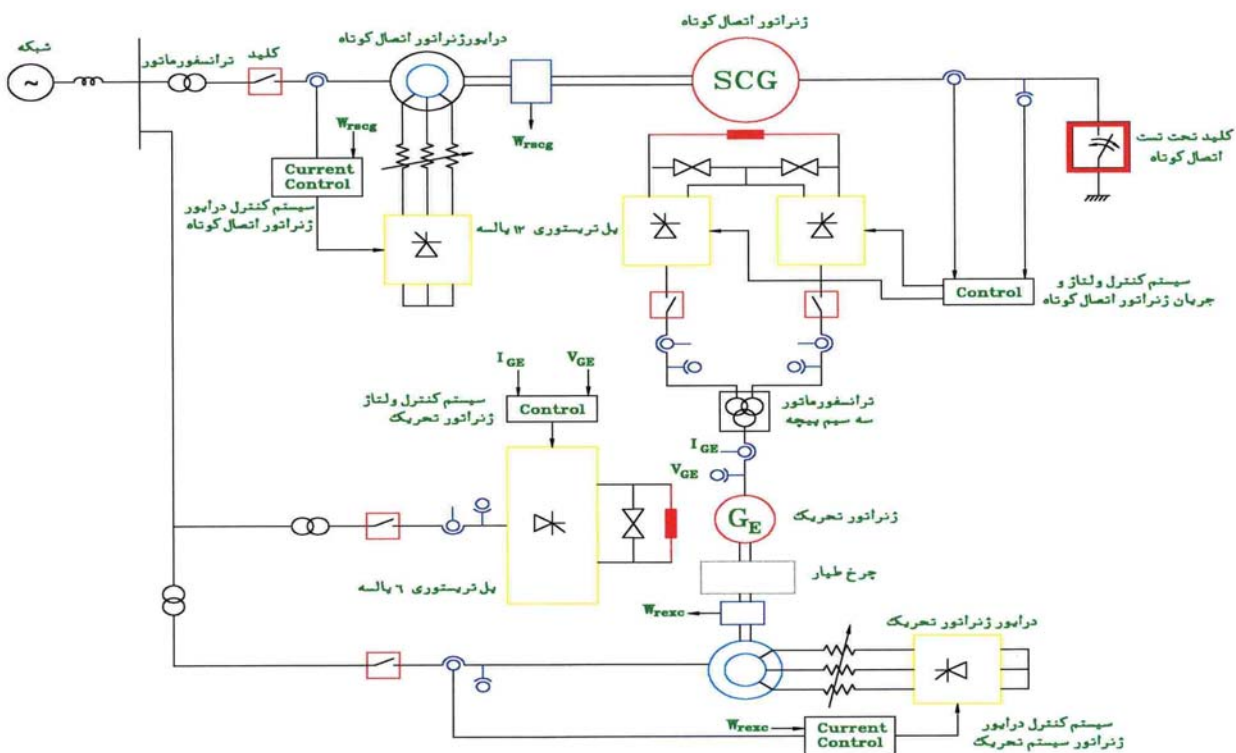
لیکن با توجه به اتصال مستقیم آن به شبکه در حین اتصال کوتاه‌های مکرر، بکارگیری آن محل تردید می‌باشد. ذخیره و مصرف انرژی الکتریکی از طریق سلف و خازن امکان‌پذیر بوده لیکن تولید جریان اتصال کوتاهی با دامنه چندین کیلو آمپر نیاز به خازنهای با ظرفیت بسیار بالا داشته بطوریکه ذخیره انرژی برای یک دوره اتصال کوتاه (۱۰۰ میلی ثانیه) به سختی میسر بوده و لذا پیاده‌سازی الگوهای قطع و وصل شکل (۱) مستلزم کلیدزنی مکرر بانک خازنی و سلفی جهت شارژ از طریق شبکه و دشارژ در کلید مورد نظر جهت آزمایش بوده، که خود منجر به ایجاد حالات گذرا و غیرعادی<sup>۱</sup> و متاثر نمودن شبکه می‌گردد.

بنابراین با توجه به محدودیت‌های شبکه و ترانسفورماتور و بانک سلفی - خازنی، و لازمه عدم تاثیرگذاری بر شبکه در حین پیاده‌سازی رژیم‌های کاری سنگین که مستلزم اتصال کوتاه‌های مکرر می‌باشد، استفاده از سیستم‌هایی که انرژی مورد نیاز شرایط اتصال کوتاه را حتی‌المقدور ذخیره نموده و در حین شرایط اتصال کوتاه ارتباط مستقیمی با شبکه برق نداشته باشد، ضروری بنظر می‌رسد. استفاده از سیستم موتور - ژنراتور کوپل شده در همین چهارچوب ارزیابی گردیده، لیکن این مجموعه باید دارای ویژگی‌های خاصی باشد که در قسمت بعد به آن اشاره می‌شود.

### ۳-۲- قیود و ملاحظات مهم ژنراتور اتصال کوتاه

بر مبنای محدودیت‌های تحمیل شده مربوط به الگوی قطع - وصل کلید و دامنه جریانهای اتصال کوتاه، مجموعه موتور - ژنراتور باید امکان ذخیره انرژی را حداقل برای چند رژیم اتصال کوتاه دارا باشد، بطوریکه تغییرات سرعت ناشی از تلفات از ده درصد تجاوز ننماید و بنابراین ساختار ژنراتور معمولاً از نوع قطب برجسته انتخاب شده و یا از چرخ لنگر استفاده می‌شود تا میزان انرژی جنبشی ذخیره شده در روی روتور افزایش یابد. از سوی دیگر برای تولید جریان اتصال کوتاه با دامنه مورد نظر مقادیر راکتانس‌های نشتی سیستم باید

<sup>۱</sup> - Abnormal



شکل (۲): دیاگرام شماتیک ترکیب بندی اجزاء مهم سیستم ژنراتور اتصال کوتاه

#### ۴- نتایج

برای تایید ترکیب بندی پیشنهادی در قسمت قبل، کلیه اجزاء در محیط سیمولینگ مطلب با آخرین درجه دقت مدل سازی شده و ترکیب بندی مزبور پیاده سازی گردید. که در ادامه به تشریح نتایج حاصله پرداخته شده است.

#### ۴-۱- عملکرد ژنراتور اتصال کوتاه شرکت زیمنس

در شکل (۳) نتایج حاصل از شبیه سازی عملکرد ژنراتور شرکت زیمنس ارائه شده است [۷]، ژنراتور مزبور که دارای توان نامی ۲۵۰ مگاوات آمپر، ولتاژ نامی ۲۰ کیلوولت و سرعت نامی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه می باشد (پیوست)، اختصاصاً برای مقاصد آزمایشگاه توان بالا طراحی شده و مشخصات الکتریکی، مغناطیسی و مکانیکی آن بگونه ای است که شرایط مورد نیاز را برآورده نماید. این ژنراتور که بتوسط یک موتور القایی با توان نامی ۳ مگاوات و ولتاژ نامی ۶ کیلوولت راه اندازی می گردد، توسط یک تحریک ۱۲ پالسی از نوع ضربه ای تحریک شده که تغذیه تحریک مزبور نیز در جهت کاهش تاثیر گذاری روی شبکه، با استفاده از یک مجموعه موتور - ژنراتور دیگر انجام می شود. همانگونه که از شکل

چند میلی ثانیه قبل از صدور فرمان اتصال کوتاه کلید تحت آزمایش، فرمان آتش کلیدهای نیمه هادی اینورتر ۱۲ پالسی صادر می گردد بطوریکه ولتاژ خروجی تحریک را به حداکثر مقدار افزایش دهد (ضربه تحریک)، سپس کلید تحت آزمایش اتصال کوتاه شده و پس از گذشت ۱۰ نیم سیکل فرمان قطع آن صادر می گردد و تماماً و یا حتی چند میلی ثانیه قبل از صدور فرمان قطع، زاویه آتش کلیدهای نیمه هادی به مقدار متناظر با ولتاژ بی باری نامی و یا ولتاژ منفی کاهش می یابد. در حین اتصال کوتاه بواسطه تلفات ژنراتور سرعت محور کاهش می یابد و در صورتیکه کاهش سرعت از ده درصد تجاوز نماید به چرخ لنگر نیاز است و در این حال لازم است بعد از هر بار اتصال کوتاه (و یا چند بار اتصال کوتاه بسته به میزان افت سرعت) در فرصت زمانی مابین اتصال کوتاه ها، موتور راه انداز به شبکه متصل شده و افت سرعت را جبران نماید. در ارتباط با سیستم تغذیه تحریک نیز همین نکته وجود داشته و لازم است که افت زیاد در سرعت موتور ژنراتور تغذیه تحریک جبران گردد.

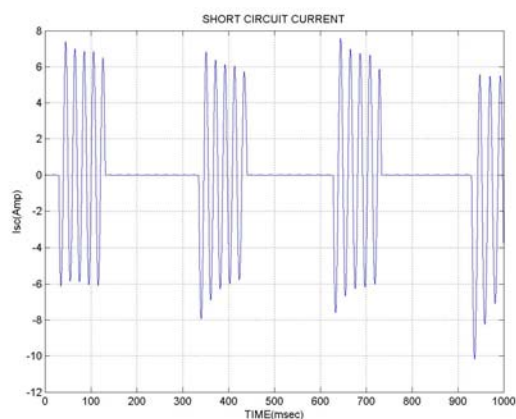
در شکل (۵) منحنی‌های مربوط به زاویه آتش کلیدهای نیمه‌هادی مبدل ۱۲ پالسی سیستم تحریک، شکل موج ولتاژ و جریان میدان و سرعت محور ژنراتور اتصال کوتاه ارائه شده است. با توجه به شکل‌های مزبور مشاهده می‌شود که دامنه ولتاژ تحریک تا بالاتر از ۳۵ پریونیت افزایش یافته و لزوم کنترل سریع ولتاژ مزبور، القاء کننده استفاده از مبدل ۱۲ پالسی بجای ۶ پالسی مرسوم می‌گردد.

همچنین دامنه جریان تحریک در شرایط اتصال کوتاه از ۱۰ پریونیت تجاوز نموده که از لحاظ فیزیکی اولاً ژنراتور باید قابلیت تحمل این جریان را دارا بوده و ثانیاً مقدار ثابت زمانی آن حتی‌المقدور کوچک باشد، تا امکان دسترسی سریع به سطح جریان مورد نظر در زمان مقتضی فراهم گردد. منحنی شکل (۵-ج) نیز حاکی از افت سرعت محور ژنراتور در زمانهای اتصال کوتاه می‌باشد که علل اصلی آن تلفات مس بسیار زیاد در هادی‌های آرمیچر و همچنین تلفات هسته می‌باشد. از شکل مزبور مشاهده می‌گردد که امکان برقراری سه اتصال کوتاه پیاپی تا رسیدن به افت سرعت مجاز (۱۰ درصد) میسر می‌باشد که علت آن طراحی خاص ژنراتور در جهت افزایش حتی‌المقدور ممان اینرسی روتور می‌باشد، بگونه‌ای که ممان اینرسی آن به‌مراه ممان اینرسی موتور راه‌انداز در حدود ۶۶/۵ تن مترمربع بوده که در حدود ۲۰ درصد از ممان اینرسی ژنراتورهای بزرگترین نیروگاه بخاری کشور (نکا) بالاتر می‌باشد. لازم بذکر است که در شرایط عملکرد واقعی موتور راه‌انداز ژنراتور در زمانهای مابین اتصال کوتاه به شبکه متصل شده و افت سرعت ناشی از تلفات را جبران می‌نماید و در اینجا صرفاً جهت نمایش کاهش دامنه سرعت در شرایط اتصال کوتاه مزبور ارائه شده است.

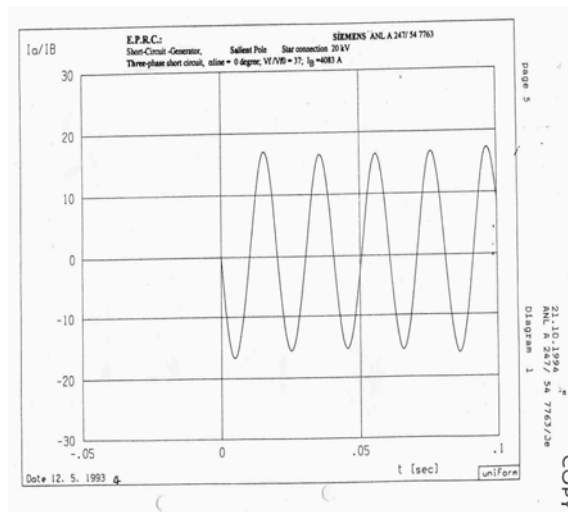
#### ۴-۲- عملکرد ژنراتور نیروگاه نکا

در شکل (۶) منحنی‌های حاصل از شبیه‌سازی عملکرد ژنراتورهای بخار نیروگاه نکا که بتوسط شرکت BBC ساخته شده، ارائه گردیده است (پیوست) [V]. ژنراتورهای مزبور دارای توان نامی ۵۰۰ مگاوات آمپر و ولتاژ نامی ۲۱ کیلوولت می‌باشند. در شکل (۶-الف) منحنی جریان اتصال کوتاه این ژنراتور ارائه شده است، با توجه به شکل مشاهده می‌شود که

مشاهده می‌گردد، با این ترکیب‌بندی و کنترل سریع و صحیح زاویه آتش کلیدهای نیمه هادی، امکان تهیه الگوی جریانی مورد نیاز وجود دارد. در این شکل مقدار جریان اتصال کوتاه برحسب پریونیت ارائه شده که مقدار هر پریونیت آن برابر ۱۲/۵ کیلوآمپر می‌باشد. همچنین برای کاهش زمان شبیه‌سازی که مستلزم حجم بسیار زیادی از عملیات متفاوت ریاضی می‌باشد، زمان‌های مابین دو رژیم اتصال کوتاه کمتر از مقادیر ارائه شده بتوسط استاندارد در نظر گرفته شده است. برای داشتن امکان مقایسه بهتر، منحنی جریان اتصال کوتاه ارائه شده بتوسط شرکت زیمنس در شکل (۴) ارائه شده است. با مقایسه شکل‌های (۳) و (۴) مشاهده می‌شود که سیستم پیشنهادی امکان تولید شکل موج‌های جریانی مورد نظر را دارا می‌باشد...

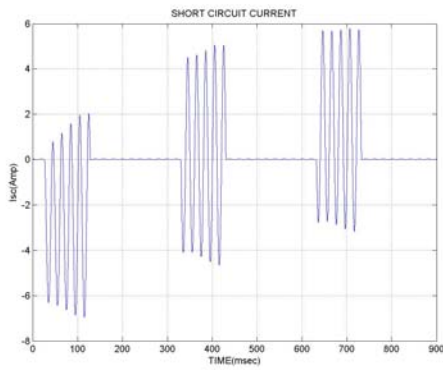


شکل (۳): منحنی شکل موج جریان اتصال کوتاه حاصل از شبیه‌سازی عملکرد ژنراتور شرکت زیمنس

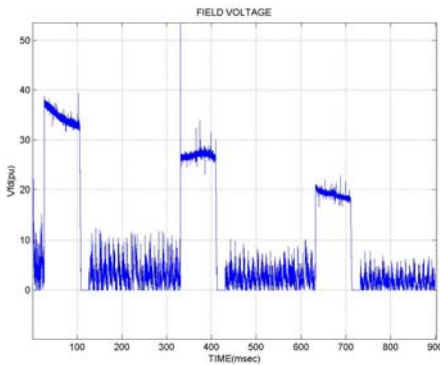


شکل (۴): منحنی شکل موج جریان اتصال کوتاه ارائه شده توسط شرکت زیمنس

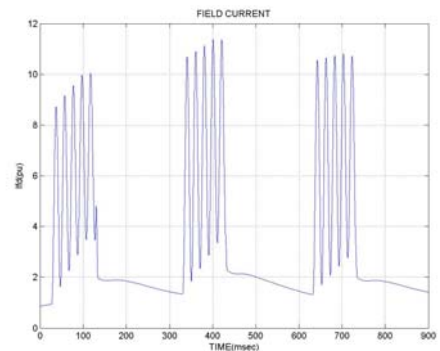
امکان ایجاد جریانهایی با دامنه بزرگتر از ۴ پریونیت فراهم بوده (تقریباً معادل ۲۴۴۰ مگاوات آمپر مؤثر) که قابل توجه می باشد. از سوی دیگر رژیم اتصال کوتاه اول در حداکثر مؤلفه DC ایجاد شده که دلیل آن صدور فرمان آتش کلید اتصال کوتاه در لحظه گذر از صفر موج ولتاژ ترمینال می باشد. قطع این جریان پس از پنج سیکل حاکی از قدرت و سرعت سیستم تحریک کننده می باشد. لازم بذکر است که تعیین زمان



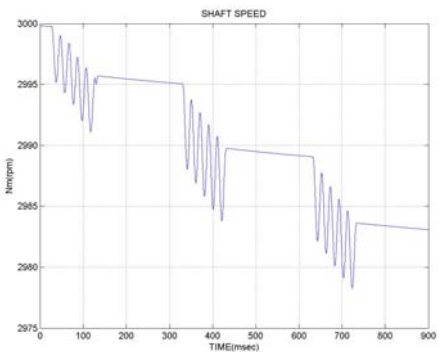
(الف): منحنی شکل موج جریان اتصال کوتاه



(ب): منحنی شکل موج ولتاژ میدان

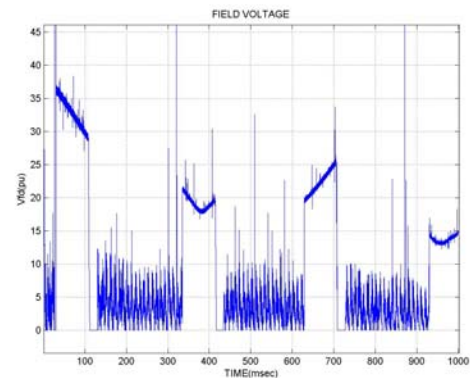


(ج): منحنی شکل موج جریان میدان

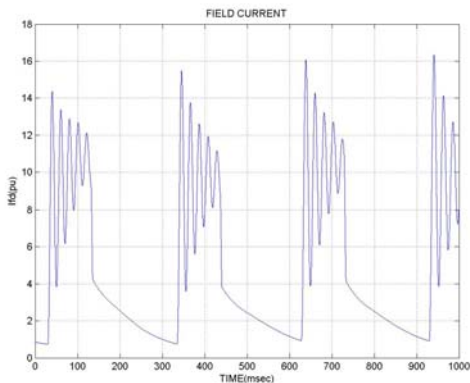


(د): منحنی دامنه سرعت محور ژنراتور

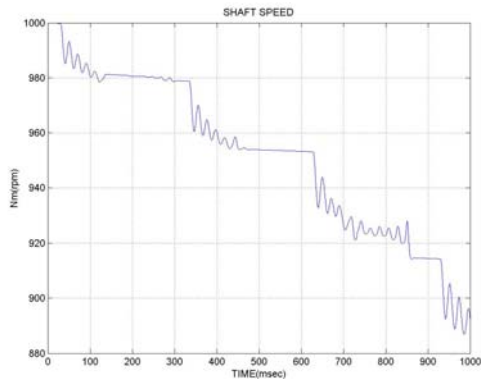
شکل (۶): منحنی های حاصل از شبیه سازی عملکرد ژنراتور واحد بخار نیروگاه نکا



(الف): منحنی شکل موج ولتاژ میدان



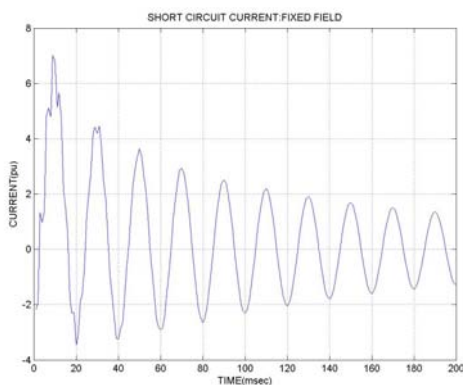
(ب): منحنی شکل موج جریان میدان



(ج): منحنی دامنه سرعت محور ژنراتور اتصال کوتاه

شکل (۵): منحنی های حاصل از شبیه سازی عملکرد ژنراتور شرکت زیمنس

شکل مزبور مشاهده می‌شود که عدم استفاده از تحریک ضربه منجر به کاهش سریع دامنه جریان شده که انجام آزمایش را با مشکلات اساسی همراه می‌نماید، صرفنظر از اینکه مقدار جریان در حداکثر دامنه خود نیز در چهارچوب دامنه جریانی مورد نظر برای انجام آزمایش استاندارد نمی‌باشد.



شکل (۷): منحنی شکل موج جریان اتصال کوتاه حاصل از شبیه‌سازی عملکرد یک واحد ژنراتور ۱/۵ مگاوات آمپر در ولتاژ تحریک ثابت

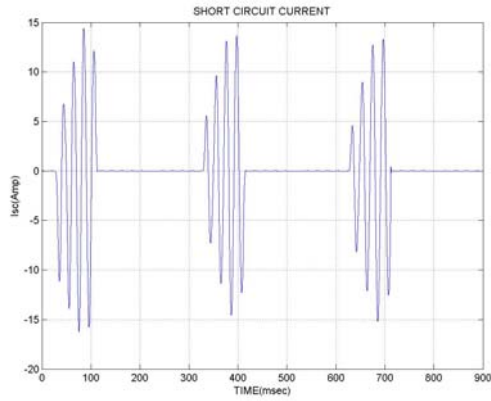
در شکل (۸) منحنی زمانی شکل موج‌های جریان اتصال کوتاه و ولتاژ میدان و سرعت محور نمایش داده شده است. براساس نتایج ارائه شده امکان تولید جریان اتصال کوتاه با دامنه فراتر از مقدار مورد انتظار فراهم بوده لیکن مستلزم بکارگیری سیستم تحریک ضربه با قابلیت تولید ولتاژ سقفی در حدود ۲۸ پریونیت است. از سوی دیگر با مشاهده منحنی سرعت می‌توان نتیجه گرفت که در رژیم اتصال کوتاه اول سرعت محور در حدود ۳۰ درصد افت می‌نماید که از مقدار مجاز ارائه شده توسط استاندارد (پنج درصد) به میزان زیادی تجاوز نموده بطوریکه در فاصله زمانی اتصال کوتاه دوم کل انرژی جنبشی سیستم استحاله می‌گردد، علت این امر کوچک بودن ممان اینرسی ژنراتور و موتور راه‌انداز می‌باشد که با توجه به طرح استخراج شده در حدود ۴۴ کیلوگرم مترمربع برآورده شده است. با محاسبه میزان تلفات هسته و اتصال کوتاه چرخ لنگری با ممان تقریباً ۱۶۰ کیلوگرم مترمربع جهت ذخیره انرژی جنبشی مناسب می‌باشد، نتایج حاصل از شبیه‌سازی مؤید محاسبات فوق‌الذکر می‌باشد. در شکل (۹)

آتش کلید اتصال کوتاه و زاویه آتش کلیدهای نیمه هادی مستلزم داشتن سیستم کنترل و مونیتورینگ مرکزی قوی است. در شکل‌های دیگر شکل موج‌های ولتاژ و جریان میدان و سرعت محور نمایش داده شده است، مجدداً با توجه به شکل (۶-د) مشاهده می‌شود که امکان انجام سه اتصال کوتاه پیاپی بدون تجاوز از حداقل سرعت مجاز فراهم بوده که دلیل اصلی آن انرژی جنبشی ذخیره شده در روتور ژنراتور و محرک آن می‌باشد. چرا که این انرژی با مربع سرعت متناسب می‌باشد، در حالیکه سرعت نامی محور ژنراتور مزبور ۳۰۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد و لذا علی‌رغم بالاتر بودن ممان اینرسی ژنراتور شرکت زیمنس (به میزان ۲۰ درصد)، انرژی جنبشی ذخیره شده در ژنراتور نیروگاه نکا ۷/۵ برابر مقدار متناظر از ژنراتور زیمنس بوده، لیکن بهینه نبودن این ژنراتور برای مقاصد اتصال کوتاه، افت سرعت زیادی در محور ایجاد می‌نماید. ضمناً لازم بذکر است که تبدیل ژنراتور مورد نظر به ژنراتور اتصال کوتاه مستلزم ایجاد تغییرات ساختاری زیادی در آن می‌باشد که از آن جمله استحکام هادی‌های انتهای کلاف‌ها، استحکام گوه‌های شیارهای استاتور، افزایش خاصیت ارتجاعی نصب هسته در بدنه، بهبود یاتاقانها، تقویت عایق‌های میدان و ... را علاوه بر بکارگیری تجهیزات جانبی دیگری نظیر سیستم تحریک استاتیک ضربه، تغذیه تحریک، راه‌انداز ژنراتور و سیستم کنترل و مونیتورینگ مرکزی می‌توان برشمرد.

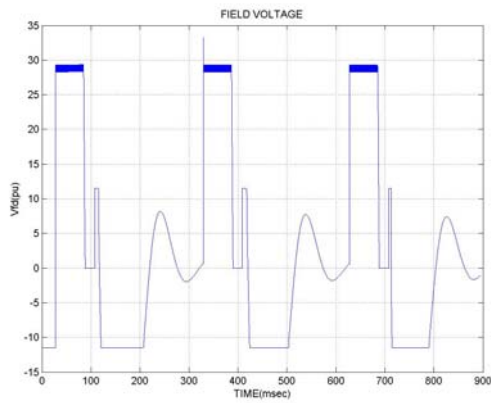
#### ۳-۴- عملکرد ژنراتور ۱/۵ مگاوات آمپری

آزمایش جریان قطع و تحمل کلیدهای مینیاتوری مستلزم ایجاد الگوهای جریانی خاص مطابق [۳] و با دامنه چند کیلوآمپر (تا سقف ۲۵ کیلوآمپر معادل ۱۶,۵ مگا ولت آمپر مؤثر) و در ولتاژ نامی ۳۸۰ ولت می‌باشد (پیوست). در این راستا و با هدف تجهیز آزمایشگاه توان بالای کلید مینیاتوری، ژنراتوری چهار قطبی با توان نامی ۱/۵ مگاوات آمپر و ولتاژ ۳۸۰ ولت طراحی و سایر ابعاد آن استخراج شده است. در شکل (۷) منحنی حاصل از اتصال کوتاه ناگهانی ترمینال‌های ژنراتور مزبور و با تحریک ثابت (نامی) نمایش داده شده است، از

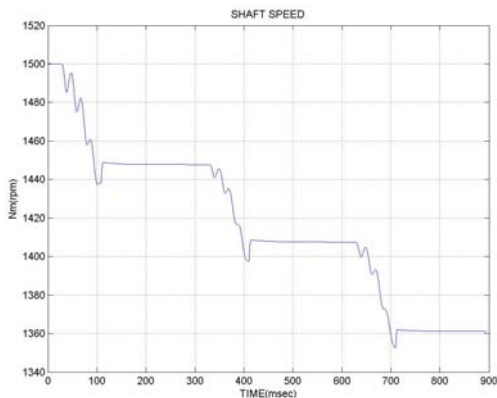
می‌باشد. دامنه سرعت نیز در رژیم اتصال کوتاه اول در حدود پنج درصد افت نموده که مطابق با استاندارد می‌باشد و لذا استفاده از چرخ لنگر برای سیستم مزبور ضروری است.



(الف): منحنی شکل موج جریان اتصال کوتاه

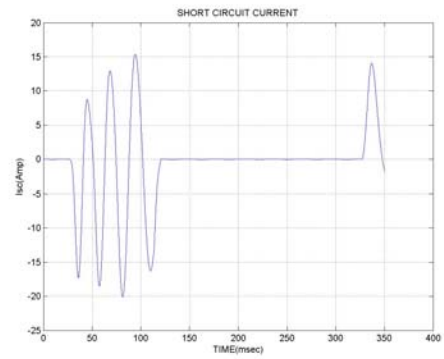


(ب): منحنی شکل موج ولتاژ میدان

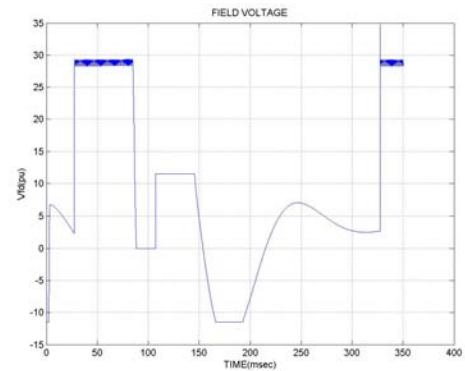


(ج): منحنی دامنه سرعت محور

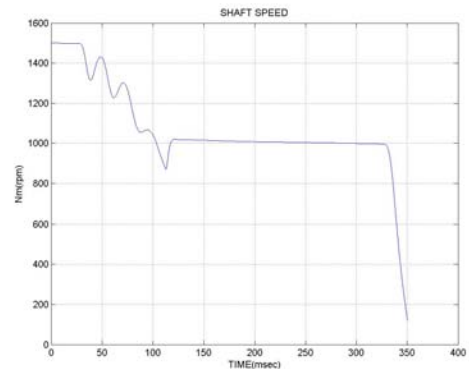
شکل (۹): منحنی‌های حاصل از شبیه‌سازی عملکرد ژنراتور ۱/۵ مگاوات آمپری (با چرخ لنگر)



(الف): منحنی شکل موج جریان اتصال کوتاه



(ب): منحنی شکل موج میدان



(ج): منحنی دامنه سرعت محور

شکل (۸): منحنی‌های حاصل از شبیه‌سازی عملکرد ژنراتور ۱/۵ مگاوات آمپری (بدون چرخ لنگر)

منحنی شکل موج‌های جریان اتصال کوتاه، ولتاژ میدان و دامنه سرعت محور مجموعه در شرایط جدید نمایش داده شده است. در شکل‌های مزبور روند افزایشی جریان اتصال کوتاه ناشی از بالا بودن ولتاژ میدان و نیز عدم کنترل سریع دامنه آن می‌باشد که با پیاده‌سازی الگوریتم‌های کنترلی قوی‌تر قابل رفع



## ۵- نتیجه گیری، جمع بندی و ارایه پیشنهاد

ژنراتورهای اتصال کوتاه هسته مرکزی آزمایشگاههای توان بالا بوده که آزمایشهای مربوط به جریان قطع و تحمل کلیدها بتوسط آنها انجام می گردد. این ادوات دارای رژیم کاری خاصی بوده که منجر به پیچیدگی سیستم آنها شده است بطوریکه تعداد ژنراتورهای اتصال کوتاه در سطح بین المللی بسیار محدود بوده و کشور ما فاقد این تجهیزات می باشد، لذا در جهت انجام مطالعات اولیه و امکان سنجی ساخت آنها لازم است بررسی های بیشتری صورت گیرد، در این مقاله که با هدف فوق الذکر نگارش یافته است، پس از ارائه رژیم های کاری استاندارد مورد نیاز و با توجه به محدودیت روش های مرسوم تولید جریان زیاد، بکارگیری ژنراتورهای سنکرون پیشنهاد و با توجه به محدودیت های تحمیلی از سوی رژیم کاری خاص، ساختار و عملکرد آنها تبیین گردید و در انتها بر مبنای ترکیب بندی پیشنهادی عملکرد سه نمونه ژنراتور در شرایط اتصال کوتاه مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. لازم بذکر است که ترکیب بندی پیشنهادی الزاماً بهینه نبوده و امکان ارتقاء آن وجود دارد، بعنوان مثال و با بررسی بیشتر در صورت امکان، حذف موتور راه انداز ژنراتور اتصال کوتاه و جایگزینی آن با یک اینورتر پیشنهاد می گردد. در همین راستا حذف موتور راه انداز ژنراتور تغذیه کننده سیستم تحریک نیز می تواند مورد بررسی قرار گیرد. استفاده از فرجه استاندارد و ذخیره حتی المقدور انرژی جنبشی راه کار دیگر می باشد بعبارت دیگر با استفاده از امکان انجام آزمایش در ده درصد بالاتر از فرکانس نامی می توان ذخیره انرژی جنبشی را دو برابر نموده و لذا تعداد رژیم های اتصال کوتاه افزایش یافته و یا مقادیر نامی ژنراتور اتصال کوتاه به همراه راه انداز آن کوچکتر خواهد گردید. در جهت امکان سنجی ساخت نیز بررسی وضعیت ژنراتورهای مستعمل موجود و استفاده از آنها پس از اعمال اصلاحات ساختاری مورد نیاز پیشنهاد می گردد.

در انتها لازم بذکر است که انجام برخی از آزمایش های فیزیک هسته ای با ایجاد میدان های مغناطیسی بسیار قوی و با الگوهای زمانی خاص میسر می باشد که حصول آنها مستلزم تولید الگوهای جریانی با دامنه بسیار بالا در زمانهای مشخص

می باشد [۸]. بطوریکه مولدهای جریانی مزبور که تحت عنوان ژنراتورهای ضربه 1 نام برده می شوند، ساختار نسبتاً مشابهی با ساختار ژنراتور اتصال کوتاه دارند و لذا با دسترسی به تکنولوژی طراحی و ساخت ژنراتورهای اتصال کوتاه، زمینه مناسبی برای طراحی و پیاده سازی برخی از ادوات مهم آزمایشگاههای فیزیک هسته ای پدید می آید.

## تشکر و قدردانی

مقاله حاضر چکیده ای از پروژه "تحقیق در زمینه ساختمان و عملکرد ژنراتورهای اتصال کوتاه" بوده که کارفرمایی آنرا گروه فشارقوی از پژوهشکده انتقال و توزیع نیرو بر عهده داشته است و بدینوسیله از مسئولین محترم آن پژوهشکده و گروه تشکر و قدردانی می گردد.

## مراجع

- [1] گزارش "ساختمان و عملکرد ژنراتورهای اتصال کوتاه"، پژوهشگاه نیرو، پژوهشکده برق، خرداد ماه ۱۳۸۲.
- [2] IEC 60056, "High-Voltage Alternating – Current Circuit – Breakers", Forth Edition, 1997.
- [3] IEC 60898, "Circuit – Breakers for Household and Similar Installations ", Second Edition, 1995.
- [4] کاتالوگ های مربوط به ژنراتور اتصال کوتاه شرکت زمینس
- [5] کاتالوگ های مربوط به ژنراتور اتصال کوتاه شرکت هیتاچی
- [6] Hiro Yoha, Masafumi Fujita, Eisaku Nakamura, "The World's Largest Class 8,880 MVA Short Circuit Generator" Proceeding IEEE International Symposium On Industrial Electronics, Toshiba Corporation Poration Tokohoma Japan, 2002, pp. 688-692.
- [7] گزارش "مدل سازی و شبیه سازی عملکرد ژنراتورهای اتصال کوتاه در محیط سیمولینک مطلب"، پژوهشگاه نیرو پژوهشکده برق، تیر ماه ۱۳۸۲.
- [8] H. J. Boenig, J. B. Schillig, J. D. Rogers, S. W. Huddleston, H, E, Konkels; "Design of the Los Alamos Generator in Installation", 13 th IEEE Syposium on Fusion Engineering, 1989 IEEE, pp. 428-432.

<sup>1</sup> - Impulse Generators

پيوست

مشخصات ژنراتورهای شرکت زیمنس، نیروگاه نکا و نمونه ۱۵۰۰ کیلوولت آمپری\*

ژنراتور	پارامتر	واحد	نمونه ۱۵۰۰ کیلوولت آمپری	نیروگاه نکا	شرکت زیمنس
	$V_L$	kV	۰/۳۸	۲۱	۲۰
	$N_m$	rpm	۱۵۰۰	۳۰۰۰	۱۰۰۰
	S	MVA	۱/۵	۴۴۵	۲۵۰
	$X_l$	p.u.	۰/۱۱۰	۰/۱۹۴	۰/۰۰۹
	$X''_d$	p.u.	۰/۱۱۷	۰/۲۷۸	۰/۱۲۵
	$X'_d$	p.u.	۰/۱۱۸	۰/۳۱۳	۰/۱۹۹
	$X_d$	p.u.	۰/۹۹۷	۱/۶۶	۱/۹۵۳
	$X''_q$	p.u.	۰/۱۱۰	۰/۲۷۸	۰/۱۱۸
	$X'_q$	p.u.	-	۱/۶۴	-
	$X_q$	p.u.	۰/۴۷۱	۱/۶۴	۱/۰۳
	$T''_d$	Sec	۰/۰۰۰۱	-	۰/۰۴۲
	$T'_d$	Sec	۰/۰۱۱	-	۰/۶
	$T''_{do}$	Sec	-	۰/۰۱۷	-
	$T'_{do}$	Sec	-	۶/۶۹	۴/۴۹
	$T''_q$	Sec	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۳۱	۰/۰۳
	$T'_q$	Sec	-	۱/۰۹	-
	$r_s$	p.u.	۰/۰۱	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۷
	H	Sec	۱/۶۴۵	۰/۸	۱/۴۵۹

\* شبیه‌سازی عملکرد ژنراتور صرفاً بر مبنای داده‌های موجود در جدول و با بالاترین درجه ممکن صورت گرفته است.