دانشگاه زنجان

دانشکده مهندسی

گروه برق

پایان‌نامه کارشناسی

عنوان:

عکس‌العمل ژنراتور سنکرون در برابر راه‌اندازی ترانسفورماتور

استاد راهنما:

دکتر کاظم مظلومی

نگارنده:

گیسو فتحی

پاییز ۱۳۹۶

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

چکیده ۱

۱ فصل اول: آشنایی کلی با ژنراتور و ترانسفورماتور

۱-۱ ساختمان ژنراتور سنکرون ۳
۱-۲ سرعت چرخش ژنراتور سنکرون ۵
۱-۲-۱ ولتاژ داخلی تولیدشده در ژنراتور سنکرون ۵
۱-۳ مدار معادل ژنراتور سنکرون ۵
۱-۴ انواع ژنراتور سنکرون ۱۲
۱-۴-۱ قطب برجسته ۱۲
۱-۴-۲ قطب صاف یا استوانه ای ۱۲
۱-۵ رابطه توان ژنراتور سنکرون ۱۴
۱-۶ توربو ژنراتور ۱۷
۱-۷ ترانسفورماتور چیست؟ ۱۷
۱-۷-۱ ترانسفورماتور، ترانسفورمر یا ترانس؟ ۱۸
۱-۸ مدار معادل ترانسفورماتور ۱۸
۱-۹ نحوه عملکرد ترانسفورماتور ۱۹
۱-۱۰ ساختار ترانسفورماتور ۲۱
۱-۱۱ انواع ترانسفورماتور ۲۳
۱-۱۱-۱ انواع ترانسفورماتور بر اساس فرکانس ۲۳
۱-۱۱-۲ انواع ترانسفورماتور بر اساس توان ۲۴
۱-۱۱-۳ انواع ترانسفورماتور بر اساس ساختار هسته و سیم‌پیچی ۲۴
۱-۱۱-۴ انواع ترانسفورماتور بر اساس جنس عایق ۲۵
۱-۱۱-۵ انواع ترانسفورماتور بر اساس کاربرد ۲۶
۱-۱۱-۶ انواع ترانسفورماتور بر اساس تعداد فاز ۲۶

۱-۱۱-۷ انواع ترانسفورماتور بر اساس افزاینده یا کاهنده ۲۷
۱-۱۱-۸ انواع ترانسفورماتور بر اساس سطح ولتاژ ۲۷
۱-۱۱-۹ انواع ترانسفورماتور بر اساس نوع خنک‌کنندگی ۲۷
۲ فصل دوم: جریان هجومی ترانسفورماتور
۲-۱ تعریفی از جریان هجومی ۲۹
۲-۲ پارامترهای مؤثر بر جریان هجومی ۲۹
۲-۳ ترانسفورماتورها ۲۹
۲-۴ علت عملکرد غلط رله دیفرانسیل ۳۰
۳ فصل سوم: رفتار ژنراتور سنکرون هنگام راه‌اندازی ترانسفورماتور
۳-۱ مقدمه ۳۳
۳-۲ طرح توزیع الکتریکی یک کارخانه صنعتی ۳۳
۳-۲-۱ مدل‌سازی ۳۵
۳-۲-۲ معرفی المان‌های مورداستفاده در این شبیه‌سازی ۳۵
۳-۳ بررسی چگونگی عملکرد ۳۸
۳-۳-۱ ارزیابی تقریبی مقدار انرژی معادل برای جریان جاری ۳۹
۳-۴ نتایج شبیه‌سازی ۴۱
۳-۴-۱ اعمال خطا و مشاهده‌ی شکل موج‌ها و ساخت رله‌ی مربوطه ۴۳
۳-۴-۲ بررسی باقی پارامترها به‌صورت تشریحی ۴۸
۳-۵ نتیجه‌گیری ۴۹
منابع ۵۱

چکیده:

در نیروگاه‌های نفتی و گازی ترانسفورماتورهای توزیع برق بزرگ اغلب به شکل مستقیم با سطح ولتاژ مشابهی به توربو ژنراتورها متصل شده که تقریباً سرعت مشابهی با اندازه ترانسفورماتور دارد: ازاین‌رو ژنراتور می‌تواند هم در طی استارت سیاه نیروگاه و هم در طی شرایط عملکرد عادی، چندین بار در معرض جریان هجومی ترانسفورماتور قرار گیرد.

در این پروژه، یک توزیع الکتریکی معمولی از نیروگاه صنعتی مورد ملاحظه قرارگرفته است: پدیده جریان هجومی ترانسفورماتور در یک ژنراتور سنکرون توربین گازی موردبررسی قرارگرفته و تأکید خاصی بر رفتار گذرای مقادیر ژنراتور شده است، ازجمله:

ولتاژ استاتور کمینه و بیشینه، ولتاژ / جریان میدانی، گشتاور الکترومغناطیسی، فرکانس ژنراتور.

یک روش تحلیلی ساده برای ارزیابی، شروع محاسبه شکل موج جریان جاری مغناطیسی کردن ترانسفورماتور، تنش گرمایی سیم‌پیچ استاتور معادل برای مقایسه با توانایی ژنراتور در برابر شکل موج جریان غیرخطی و نامتعادل (مقاومت$I_2{}^2$ *t) چنانکه با استانداردهای IEC و ANSI پیش‌بینی‌شده ارائه‌شده است.

در ادامه شبیه‌سازی‌ها به‌وسیله برنامه MATLAB انجام‌شده است:

تجهیزات اصلی (ماشین سنکرون، رله، ترانسفورماتور) با استفاده از پارامترهایی از کارخانه‌های مربوطه مدل‌سازی شده‌اند.

داده‌های طراحی از کارخانه ژنراتور، مقاومت در برابر جریان هجومی ترانسفورماتور را موردتوجه قرار می‌دهد و نتایج مفیدی برحسب انتخاب بهترین تنظیمات برای رله‌های فرکانس و محافظت ولتاژ برای جلوگیری از تریپ بی‌مورد ژنراتورها هنگام راه‌اندازی ترانسفورماتور استخراج‌شده‌اند.

کلمات کلیدی: مغناطیسی کردن جریان جاری، جریان هجومی ترانسفورماتور، AVR، سیستم تحریک، ژنراتور سنکرون، جریان توالی منفی، ضعیف شدن / متورم شدن ولتاژ.

فصل اول

آشنایی کلی با ژنراتور و ترانسفورماتور

۱-۱- ساختمان ژنراتور سنکرون

در ژنراتور سنکرون، یک جریان dc به سیم‌پیچی روتور اعمال می‌شود که میدان مغناطیسی روتور را تولید می‌کند. روتور ژنراتور نیز توسط یک محرک اولیه به گردش درمی‌آید و به‌این‌ترتیب یک میدان مغناطیسی دوار درون ماشین ایجاد می‌شود. این میدان مغناطیسی دوار در سیم‌پیچی‌های استاتور ژنراتور یک مجموعه ولتاژ سه فاز القا می‌کند چون استاتور به‌صورت سه فاز سیم‌پیچی شده ولتاژ القاشده در آن نیز سه فاز می‌باشد.

سیم‌پیچی میدان و سیم‌پیچی آرمیچر دو اصطلاح متداولی هستند که برای توصیف سیم‌پیچی‌های ماشین به کار می‌رود. به‌طورکلی، اصطلاح " سیم‌پیچی میدان " به سیم‌پیچی‌هایی اطلاق می‌شود که میدان مغناطیسی اصلی ماشین را تولید می‌کند و اصطلاح " سیم‌پیچی آرمیچر " به سیم‌پیچی‌هایی اطلاق می‌شود که ولتاژ اصلی در آن القا می‌شود. در ماشین‌های سنکرون، سیم‌پیچی‌های میدان روی روتور قرار دارند; پس عبارت‌های " سیم‌پیچی روتور " و " سیم‌پیچی میدان " را می‌توان به‌جای هم به کاربرد. عبارت‌های " سیم‌پیچی استاتور " و " سیم‌پیچی آرمیچر " نیز وضعیت مشابهی دارند.

روتور ژنراتور سنکرون اساساً یک الکترومغناطیس بزرگ است. قطب‌های مغناطیسی روتور می‌توانند ساختمان برجسته‌یا صاف داشته باشند. قطب برجسته قطب مغناطیسی‌ای است که نسبت به سطح روتور پیش‌آمدگی دارد. از سوی دیگر، قطب صاف قطب مغناطیسی‌ای است که با سطح روتور هم‌سطح باشد. روتورهای قطب – صاف معمولاً برای ماشین‌های دو یا چهار قطبی یا بیشتر به کار می‌روند. چون روتور در معرض میدان‌های مغناطیسی متغییر قرار دارد، آن را از لایه‌های نازک می‌سازند تا تلفات جریان گردابی کاهش یابد.

یک جریان dc باید به مدار روتور اعمال شود تا میدان مغناطیسی رتور شکل بگیرد. چون روتور در حال دوران است، برای دادن توان dc به سیم‌پیچی‌های میدان آن آرایش خاصی لازم است. برای فراهم کردن این توان dc دو روش متداول وجود دارد:

- فراهم کردن توان dc خارجی با استفاده از حلقه‌ای لغزان و جاروبک ها.
- فراهم کردن توان dc از یک منبع تغذیه dc خاص که مستقیماً بر روی محور ژنراتور سنکرون نصب‌شده است.

حلقه‌های لغزان حلقه‌های فلزی هستند که محور ماشین را کاملاً احاطه کرده‌اند اما نسبت به آن عایق شده‌اند. هرکدام از سرهای سیم‌پیچی روتور به یکی از دو حلقه لغزان روی محور ماشین سنکرون متصل می‌شود و بر روی هر حلقه‌ی لغزان یک جاروبک سوار است. اگر سر مثبت یک منبع ولتاژ dc به یک جاروبک و سر منفی آن به جاروبک دیگر متصل شود، آن ولتاژ dc در همه‌ی زمان‌ها به سیم‌پیچی میدان اعمال می‌شود و مقدار آن به موقعیت زاویه‌ای و سرعت روتور ربطی ندارد.

هنگامی‌که برای تأمین توان dc سیم‌پیچی میدان ماشین سنکرون حلقه‌های لغزان و جاروبک ها به کار می‌روند، چند مشکل ایجاد می‌شود.مراقبت و نگهداری ماشین باید بیش‌ازپیش صورت گیرد، زیرا جاروبک ها را باید ازنظر فرسودگی به‌طور منظم کنترل کرد. به‌علاوه در ماشین‌هایی که جریان میدان بزرگ‌تری دارند، افت ولتاژ جاروبک ها می‌تواند یک عامل مهم افت توان باشد. باوجوداین مسائل، حلقه‌های لغزان و جاروبک ها در تمام ماشین‌های سنکرون کوچک به کار می‌روند، چون هیچ روش ارزان‌قیمت دیگری برای تأمین جریان dc میدان وجود ندارد.

در ژنراتور و موتورهای بزرگ‌تر، برای تأمین جریان dc میدان ماشین، تحریک‌های بدون جاروبک به کار می‌روند. تحریک بدون جاروبک یک ژنراتور ac کوچک است که مدار میدان آن در استاتور و مدار آرمیچر آن بر محور موتورسوار شده است. خروجی سه – فاز ژنراتور تحریک توسط یک مدار یک‌سو کننده‌ی سه فاز که آن نیز روی محور ژنراتور سوار شده است، یکسو شده، به مدار میدان اصلی داده می‌شود(که روی رتور قرار دارد). با کنترل جریان کوچک dc میدان ژنراتور تحریک (که در استاتور قرار دارد) می‌توان جریان میدان اصلی ماشین را بدون استفاده از حلقه‌های لغزان و جاروبک ها تنظیم کرد.

چون بین روتور و استاتور هیچ اتصال مکانیکی وجود ندارد، تحریک بدون جاروبک در مقایسه با حلقه‌های اصطکاکی و جاروبکها نگهداری بسیار کمتری لازم دارد.

برای این‌که تحریک ژنراتور کاملاً مستقل از منبع تغذیه خارجی باشد، معمولاً یک تحریک راهنما به سیستم اضافه می‌کنند. تحریک راهنما یک ژنراتور ac کوچک با مغناطیس دائم است. مغناطیس دائم روی محور روتور و سیم‌پیچی سه فاز در استاتور قرار دارد. این ژنراتور توان مدار میدان ماشین اصلی را کنترل می‌کند. اگر یک تحریک راهنما روی محور ژنراتور وجود داشته باشد، برای به کار انداختن ژنراتور منبع الکتریکی خارجی لازم نیست.

در بسیاری از ژنراتورهای سنکرون دارای تحریک بدون جاروبک، حلقه‌های لغزان و جاروبک ها نیز تعبیه‌شده‌اند تا در مواقع اضطراری یک منبع جریان dc کمکی برای میدان در دسترس باشد. استاتور ژنراتور سنکرون معمولاً از پیچک‌های پیش‌ساخته تشکیل می‌شود که به‌صورت دوطبقه دراستاتور قرار می‌گیرند. خود سیم‌پیچی توزیع‌شده است و گام کوتاه دارد تا دامنه هارمونیکهای ولتاژها و جریان‌های خروجی کم باشند.

۱–۲– سرعت چرخش ژنراتور سنکرون

ژنراتورهای سنکرون طبق تعریف، سنکرون یا هم‌زمان‌اند، به این معنی که فرکانس الکتریکی تولیدشده با سرعت چرخش مکانیکی ژنراتور هم‌زمان است. روتور ژنراتور سنکرون یک الکترومغناطیس است که به آن جریان dc اعمال می‌شود. میدان مغناطیسی روتور همراه با چرخش روتور می‌چرخد. پس بین سرعت چرخش میدان مغناطیسی ماشین و فرکانس الکتریکی استاتور رابطه‌ی زیر برقرار است:

$$fe = N_m \ P/120 \qquad (۱-۱)$$

fe: فرکانس الکتریکی برحسب هرتز

N_m: سرعت مکانیکی میدان مغناطیسی برحسب r/ min (سرعت روتور ماشین سنکرون)

P: تعداد قطب‌ها

چون روتور با همان سرعت میدان مغناطیسی می‌چرخد، این معادله سرعت چرخش روتور را به فرکانس الکتریکی حاصل مربوط می‌کند. توان الکتریکی در فرکانس ۵۰ یا ۶۰ هرتز تولید می‌شود، پس ژنراتور باید با سرعت ثابتی که به تعداد قطب‌های ماشین بستگی دارد بچرخد. به‌عنوان‌مثال، برای تولید توان ۶۰ هرتز در یک ماشین دو – قطبی، روتور باید با سرعت ۳۶۰۰ r/min بچرخد. برای تولید ۵۰ HZ در یک ماشین چهار قطبی، روتور باید با سرعت ۱۵۰۰ r/min بچرخد. سرعت چرخش لازم برای یک فرکانس معین را همیشه می‌توان با استفاده از معادله بالا حساب کرد.

۱–۲–۱– ولتاژ داخلی تولیدشده در ژنراتور سنکرون

اندازه ولتاژ القاشده در یک فاز معین استاتور از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$E_A = k.N_C.\ Ø.\ F \qquad (۲-۱)$$

این ولتاژ به شار ماشین Ø فرکانس یا سرعت چرخش و ساختمان ماشین بستگی دارد. برای حل مسائل مربوط به ماشین‌های سنکرون گاهی این معادله را به شکل ساده‌تری می‌نویسند. در این معادله کمیتی که در هنگام کار ماشین تغییر می‌کند واضح‌تر دیده می‌شود.این شکل ساده به‌صورت زیر است:

$$E_A = K.Ø.W \qquad (۳-۱)$$

۱–۳– مدار معادل ژنراتور سنکرون

در شرایطی که سیم‌پیچ‌های آرمیچر حاوی جریان هستند به دلایل زیر بین ولتاژ دو سر هر سیم‌پیچ و ولتاژ داخلی القاشده در آن اختلاف پدید می‌آید:

۱- اثر عکس‌العمل آرمیچر

تولید مؤلفه‌ی میدان دوار توسط جریان‌های سه فاز متعادل آرمیچر و تأثیر گذاشتن آن بر میدان رتور را عکس‌العمل آرمیچر می‌گویند. به دلیل عکس‌العمل آرمیچر میدان برآیند داخل ماشین تغییر کرده و باعث تغییر ولتاژ القایی در سیم‌پیچ‌های آرمیچر می‌شود.

۲- اندوکتانس کلاف‌های آرمیچر

اندوکتانس سیم‌پیچ‌های آرمیچر باعث افت ولتاژ در مسیر منبع تغذیه تا سرپایانه‌ها می‌شود به نحویکه اندازه این افت ولتاژ با اندازه جریان این مسیر متناسب بوده و نسبت به همین جریان ۹۰ درجه پس فاز است.با سری کردن راکتانس سیم‌پیچ‌های استاتور می‌توان اثر آن‌هارا در مدار و در تعیین ولتاژ دو سرپایانه‌ها اعمال نمود.

۳- مقاومت اهمی سیم‌پیچ‌های آرمیچر

این مقاومت نیز باعث افت ولتاژ در مسیر منبع تغذیه تا سرپایانه‌ها می‌شود. به نحویکه اندازه آن متناسب با اندازه جریان این مسیر و به لحاظ زاویه فاز هم‌فاز با این جریان است.

۴- اثر شکل برجسته‌ی قطب‌های رتور

ولتاژ القایی در سیم‌پیچ: $d\lambda/dt$ $(\lambda = li)$

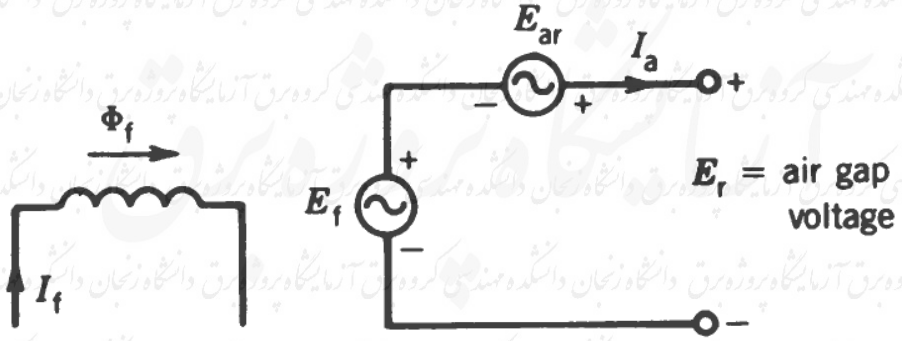
$$\frac{d\lambda}{dt} = l * \frac{di}{dt} + i * \frac{dl}{dt} \qquad (۴-۱)$$

$i * \frac{dl}{dt}$: مؤفه ولتاژ القایی ناشی از برجستگی قطب‌های رتور

شار آرمیچر را می‌توان به‌صورت زیر در نظر گرفت:

$$\varphi_a = \varphi_{ar} + \varphi_{al} \qquad (۵-۱)$$

که φ_{ar} شار عکس‌العمل آرمیچر و φ_{al} شار نشتی آرمیچر است. بنابراین می‌توان مدار زیر را در نظر گرفت:



شکل (۱-۱): مدار ماشین سنکرون

دانشجویان محترم:

جهت دسترسی به متن کامل پایان نامه‌ها به کتابخانه دانشکده مهندسی و یا آزمایشگاه پروژه گروه برق مراجعه فرمایید.

۳-۵-نتیجه‌گیری

در این پروژه یک سیستم صنعتی معمولی موردتوجه قرارگرفته است و اثرات راه‌اندازی ترانسفورماتور در یک ژنراتور آنالیز می‌شود.

برای پیکربندی نیروگاه که در آن ژنراتور به شکل مستقیم به دنده سوئیچ توزیع متصل شده است، این به‌احتمال کم برای راه‌اندازی تدریجی از طریق یک ولتاژ نرم در برابر میرایی فرکانس در هر ترانسفورماتور توزیع در طی راه‌اندازی ژنراتور – توربین و راه‌اندازی تحریک ژنراتور نتیجه شده است، این معمولاً برای ترانسفورماتور پیشرفته ژنراتور در نیروگاه برق اتفاق می‌افتد، اما راه‌اندازی ترانسفورماتور زمانی که ژنراتور از قبل آنلاین است و در شرایط بدون بارکار می‌کند رخ می‌دهد.

به‌عنوان قاعده انگشت شست برای احتمال و شرط ضروری برای راه‌اندازی ترانسفورماتور، این همیشه قابل‌ذکر است که بزرگ‌ترین ترانسفورماتور که باید تغذیه شود دارای نیروی مجاز کمتر از نیروی مجاز ژنراتور است.

در طی عبور جریان هجومی، ولتاژ استاتور در پایانه‌های ژنراتور در ابتدا ضعیف شدن ولتاژ را به دلیل توان راکتیو مصرف‌شده تجربه می‌کند، پس‌ازآن ولتاژ به علت اثر متقابل بین پاسخ سریع رگولاتور ولتاژ اتوماتیک (AVR) و جریان مغناطیسی جاری ترانسفورماتور افزایش می‌یابد: سپس AVR همیشه برای این نوع مطالعات مدل‌سازی می‌شود.افت ولتاژ اولیه‌ی استاتور ناشی از جریان هجومی ترانسفورماتور مانع عرضه مستقیم موتورهای در حال کار و موتورهای درایو سرعت متغیر توسط ژنراتور در طی راه‌اندازی می‌شود. درواقع کنتاکتور های ولتاژ پایین با استارتر های موتور مستقر در خط مستقیم مستعد رسیدن به کمترین ولتاژ هستند. همچنین درایوهای سرعت متغیر خیلی حساس به ولتاژ بیش‌ازاندازه‌ی زیر حتی در طی چند صد میلی‌ثانیه هستند.

برای ارزیابی تأثیر راه‌اندازی ترانسفورماتور بر ژنراتور، این ضروری است که نه‌تنها تنش در سیم‌پیچ استاتور، اساساً برحسب قابلیت تحمل در برابر جریان‌های نامتعادل تحلیل شود، بلکه همچنین رفتار گذرای جریان میدان روتور و ولتاژ میدانی و نوسانات گشتاور الکترومغناطیس گذرای توسعه‌یافته در شفت ژنراتور – توربین نیز تحلیل شود: بنابراین این همیشه برای به دست آوردن همه داده‌های ضروری از کارخانه سازنده توربین – ژنراتور مهم است.رله‌های حفاظت ژنراتور ولتاژ و فرکانس بالا / پایین معمولاً با توجه به اتصال کوتاه و مطالعات پایداری گذرا تنظیم می‌شوند: در این زمینه تنظیمات آن‌ها باید بدون ایجاد تریپ‌های نامناسب از جریان هجومی گذرای ترانسفورماتور محافظت کند زیرا این پدیده می‌تواند راه‌اندازی واحد توربو ژنراتور و عملیات استارت سیاه ماشین را به خطر بیندازد.ازآنجایی‌که جریان هجومی به‌طور عمده یک

پدیده‌ی قدرت واکنشی است، بین مقادیر ولتاژ و فرکانس، ولتاژ استاتور بیش‌ترین آسیب را به خود می‌گیرد و به‌ویژه باید توجه و بررسی شود بالا زدگی موقت مربوطه در طی راه‌اندازی از محدودیت طراحی پیش‌بینی‌شده توسط سازنده ژنراتور تجاوز نکند.

منابع

[1] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, S. D. Umans, Electric Machinery, McGraw-Hill, 1990.

[2] Central Station Engineers of the Westinghouse Electric Corporation, Electrical Transmission and Distribution Reference Book, Westinghouse Electric Corporation, 1964, pp. 456-464.

[3] K. S. Smith, L. Ran, B. Leyman, "Analysis of transformer inrush transients in offshore electrical systems," IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 146, No. 1, Jan. 1999, pp. 89-95.

[4] I. Hassan, H. V. Nguyen, R. Jamison, "Analysis of energizing a large transformer from a limited capacity engine generator," IEEE PES2000, pp. 446-451.

[5] K. S. Smith, L. Ran, J. Docherty, "Analysis of AVR Transients induced by Transformer Inrush Currents," in Proc. IPST 1999 – International Conference on Power Systems Transients in Budapest, Hungary.

[6] P. Nunes, A. Morched, M. T. Correia de Barros, "Analysis of Generator Tripping Incidents on Energizing Nearby Transformers," in Proc. IPST 2003 – International Conference on Power Systems Transients in New Orleans, USA.

[7] N. Chiesa, H. K. Hoidalen, M. Lambert, M. Martinez Duro', "Calculation of Inrush Currents – Benchmarking of Transformer Models," in Proc. IPST 2011 – International Conference on Power Systems Transients in Delft, The Netherlands.

[8] S. E. Zirka, Y. I. Moroz, C. M. Arturi, N. Chiesa, H. K. Hoidalen, "Topology-Correct Reversible Transformer Model," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 27, No. 4, 0ctober 2012, pp. 2037-2045.

[9] N. Chiesa, "Power Transformer – Modeling for Inrush Current Calculation," Ph.D. dissertation, Dept. Electric Power Eng., Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2010.

[10] CIGRE Working Group C4.307, "Transformer Energization in Power Systems: A Study Guide," Cigre' Tech. Brochure No. 568, Feb. 2014.

[11] J. Hu, B. Bisewski, "Simulations for Validation of a Black Start Restoration Plan using PSCAD," in Proc. IPST 2013 – International Conference on Power Systems Transients in Vancouver, Canada.

[12] H. W. Dommel, EMTP Theory Book, Microtran Power System Analysis Corporation, Vancouver, Canada, 1992.

[13] Synchronous Generator Withstand against Transformer Energization P. Marini