

بررسی ژنراتورهای کابلی (Powerformer™) و پتانسیل استفاده از آنها در شبکه برق ایران

مجید سیاهرنگ^۱ - الهام خسروشاهلی^۲ - علیمحمد رنجبر^۱ - عماد شریفی قزوینی^۲
۱. دانشگاه صنعتی شریف
۲. پژوهشگاه نیرو
تهران - ایران

واژگان کلیدی: ژنراتورهای کابلی، کابل‌های قدرت XLPE، احیای نیروگاه‌های آبی، Powerformer™

چکیده:

تلفیق فناوری ماشینهای الکتریکی و کابل‌های قدرت در سالهای پایانی قرن بیستم منجر به پیدایش نوع جدیدی از این ماشینها با قابلیت‌های منحصر به فردی شد. در سال ۱۹۹۸ اولین نمونه از ژنراتورهای کابلی^۱ با نام تجاری Powerformer™ توسط کمپانی ABB ساخته شد. مزیت اصلی ژنراتورهای کابلی نسبت به ژنراتورهای معمولی در سطح ولتاژ پایانه‌های آن می‌باشد. این ژنراتورها قادر به تولید توان در سطح ولتاژ شبکه‌های قدرت هستند و این به منزله حذف ترانسفورماتور افزایشدهنده از ساختار نیروگاه‌ها است. مزایای ژنراتورهای کابلی به حدی است که از این پس استفاده از آنها به عنوان گزینه‌های قابل‌تامل در ساخت واحدهای جدید و احیای واحدهای فرسوده باید مورد توجه قرارگیرد. در این مقاله ضمن بررسی اجمالی ساختار و برشماری مزایا و معایب ژنراتورهای کابلی، پتانسیل بکارگیری از آنها در شبکه برق ایران مورد بررسی قرار گرفته است.

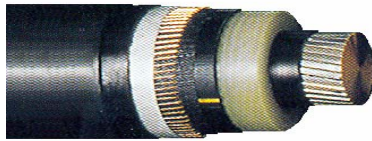
۱- مقدمه

با توجه به عدم امکان دسترسی به سطوح ولتاژ بالا (در حد ولتاژ خطوط انتقال) به دلیل محدودیت مواد عایقی در ژنراتورها، در طی دوران تحول ماشین‌های الکتریکی سازندگان برای بالا بردن توان تولیدی مجبور به افزایش سطح جریان استاتور شدند و این امر به منزله استفاده از هادی‌هایی با سطح مقطع بزرگتر بود. لذا نیاز به داشتن یک ضریب پرشدگی بالا منجر به استفاده از هادی‌هایی با سطح مقطع چهار گوش شد. استفاده از این هادی‌ها همانگونه که در شکل (۱) نشان داده شده است باعث عدم یکنواختی میدان الکتریکی اطراف آنها و بالا رفتن گرادیان ولتاژ به خصوص در گوشه‌های هادی می‌شود و این باعث ایجاد تنش غیریکنواخت در عایق و عدم مهار کامل میدان الکتریکی در فضای ماشین می‌گردد.

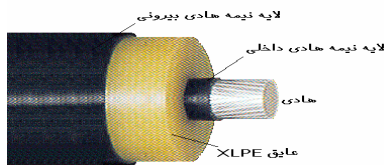
جهت محدود کردن میدان در فضای عایقی در ژنراتورهای امروزی از یک لایه رنگ مخصوص (با رسانایی معین) که بر روی عایق هادی‌ها کشیده می‌شود، استفاده می‌کنند. اما این

¹ Cable wound Generators

آلومینیومی لایه اکسید آلومینیوم تشکیل شده روی سطح بیرونی رشته ها، به منزله عایق بین آنها عمل می کند.



شکل ۲-الف ساختار چند لایه مورد استفاده در کابلهای قدرت



شکل ۲-ب ساختار چهار لایه مورد استفاده در ماشین های کابلی

۴ لایه تشکیل دهنده کابل های استفاده شده در ماشین های

کابلی عبارتند از:

۱- هسته هادی (معمولا از جنس مس)

۲- لایه نیمه رسانای داخلی

۳- عایق XLPE^۱

۴- لایه نیمه رسانای بیرونی

دلیل استفاده از عایق XLPE خصوصیات مناسب

الکتریکی و حرارتی این عایق می باشد.

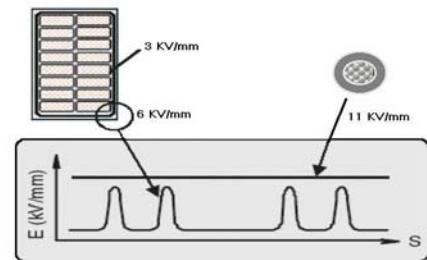
در ساختار کابل ها قدرت لایه های نیمه رسانا جهت یکنواخت کردن میدان الکتریکی در فضای عایقی استفاده می شوند. در ساختار ۴ لایه استفاده شده در ماشین های کابلی علاوه بر وظیفه فوق با زمین کردن لایه نیمه رسانای بیرونی میدان الکتریکی به فضای عایقی محدود می گردد.

۳- ساختار ژنراتورهای کابلی

ژنراتورهای کابلی (Powerformer) در حقیقت همان ژنراتورهای سنکرون سه فاز هستند که روتوری همانند روتور طرح های متداول دارند. تنها تفاوت آنها با ژنراتورهای معمولی در استاتور آنها می باشد. در سیم پیچی استاتور این ژنراتورها از کابلهای قدرت XLPE با مشخصات ذکر شده در بخش ۲ استفاده شده است.

روش نمی تواند میدان الکتریکی را در سیم پیچ های انتهایی محدود کند و مشکل کنترل ولتاژ در آن ناحیه هنوز باقی می ماند. علت این است که در ناحیه انتهایی سیم پیچی که هادیها شیار استاتور را جهت ورود به شیار بعدی ترک می کنند یک انحنای ۱۸۰ درجه ای دارند که باعث بوجود آمدن لبه های تیز و در نتیجه افزایش گرادیان میدان الکتریکی می شود. [۱]

استفاده از کابلهای قدرت با سطح مقطع مدور و استحکام عایقی بالا، مطابق شکل (۱) موجب یکنواختی میدان الکتریکی و امکان بالا بردن سطح ولتاژ پایانه ها در ژنراتورهای کابلی می شود.



شکل ۱ مقایسه بین میدان الکتریکی تولیدی توسط هادی های ژنراتورهای معمولی و کابلی

۲- تکنولوژی کابل ژنراتورهای کابلی

تکنولوژی کابل های مورد استفاده در ژنراتورهای کابلی، همان تکنولوژی مورد استفاده در ساخت کابلهای مورد استفاده در سیستم های قدرت است و دقیقا از همان مواد در این کابلها استفاده می شود. با این وجود دو تفاوت اساسی بین آنها وجود دارد:

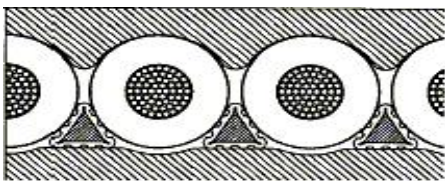
۱- کابل های قدرت بسته به نوع و کاربردشان مطابق شکل (۲-الف) از ۶ تا ۹ لایه تشکیل می شوند، در صورتی که کابل های به کار رفته در ژنراتورهای کابلی فقط دارای ۴ لایه اول که در شکل ۲ نشان داده شده است می باشند.

۲- به دلیل اینکه این کابلها در معرض میدانهای مغناطیسی قوی تری قرار دارند رشته های تشکیل دهنده هادی اصلی در این کابلها به منظور کاهش تلفات ناشی از جریان فوکو از یکدیگر عایق شده اند. البته این موضوع فقط در مورد کابل های با هسته مسی انجام می گیرد زیرا در کابل های با هسته

¹ - Cross-linked polyethylene.

۳-۲- سیم‌بندی استاتور

همانگونه که قبلا ذکر شد از کابل‌های قدرت در سیم‌بندی استاتور این ماشین‌ها استفاده شده است. جهت محدود کردن میدان الکتریکی در فضای عایقی لایه بیرونی یا پوشش نیمه هادی عایق کابل را باید در پتانسیل صفر قرار داد. به منظور زمین کردن لایه بیرونی و همچنین برای جلوگیری از لرزش کابل در داخل شیار (و در نتیجه آسیب دیدن لایه بیرونی کابل) از یک لایه لاستیکسیلیکونی^۲ با سطح مقطع مثالی مطابق شکل ۴ که بین دیواره شیار و کابل قرار می‌گیرد استفاده می‌شود [۲].



شکل ۴- محکم کردن کابل در شیار بوسیله لایه لاستیک سیلیکونی

نیروی اعمالی توسط این لایه باید در محدوده معینی باشد، به این ترتیب که بیشترین نیرو باید تا سطح آستانه تغییر شکل ویسکوالاستیک^۳ سطح مقطع کابل محدود شود و کمترین نیرو هم باید در دماهای کم جهت اتصال الکتریکی کابل و دیواره شیار استاتور (که در پتانسیل صفر قرار دارد) کافی باشد. [۳]
مطابق با معادلات ماکسول ولتاژ در جهت دورهای انتهایی سیم‌پیچی استاتور تا سطح ولتاژ نامی ماشین افزایش می‌یابد. در نتیجه دورهای نزدیک به پتانسیل صفر نیاز به عایق کمتری نسبت به دورهای پایانی دارند. پس با توجه به این نکته که میدان الکتریکی در ژنراتور به فضای عایقی محدود شده است می‌توان ضخامت عایق را در چند مرحله افزایش داد. به این روش، روش عایق‌بندی پله‌ای^۴ گفته می‌شود. مزیت این روش نسبت به حالت عایق‌بندی یکنواخت کاهش حجم شیار و در نتیجه استفاده بهتر از آهن هسته و کاهش تلفات مغناطیسی است [۴]. مطابق شکل ۵ با نزدیک شدن به دروه‌های پایانی ضخامت عایق افزایش می‌یابد ولی سطح مقطع هادی ثابت باقی می‌ماند.

تعیین‌کننده سطح ولتاژ در ژنراتورهای کابلی سطح ولتاژ کابل بکار رفته در آنهاست و با توجه به وجود کابل‌های قدرت XLPE تا سطح ۴۰۰ کیلوولت این ژنراتورها می‌توانند تا این سطح ولتاژ ساخته شوند. اما محدودیت عمده در افزایش سطح توان و سطح ولتاژ ژنراتورهای کابلی مربوط به تلفات مغناطیسی می‌باشد. با افزایش سطح ولتاژ، ضخامت عایق XLPE و با افزایش سطح توان (به ازای ولتاژ معین) سطح مقطع هادی‌ها باید افزایش یابد این به معنی عمق بیشتر شیار استاتور و در نتیجه افزایش تلفات مغناطیسی و بزرگتر شدن ماشین می‌باشد. پس عملاً محدود کننده سطح ولتاژ و توان ژنراتورهای کابلی کاهش راندمان است.

۳-۱- هسته استاتور

جنس هسته استاتور در این ماشین‌ها با جنس استاتور ژنراتورهای معمولی تفاوتی ندارد. تفاوت هسته استاتور این ژنراتورها با ژنراتورهای متداول همانگونه که در شکل ۳ دیده می‌شود در شکل شیار آنها است.



شکل ۳- شکل شیار استاتور ژنراتور کابلی

بسته به تعداد کابل به ازای هر شیار و سطح ولتاژ ماشین عمق شیارها در ژنراتورهای کابلی عمیق‌تر از ژنراتورهای متداول است. [۲] این موضوع سبب افزایش تلفات مغناطیسی در این ژنراتورها می‌شود. همچنین جهت کاهش اثرات ناشی از لرزش دندانه‌ها^۱ به دلیل عمق بیشتر شیارها هسته استاتور این ژنراتورها در قسمت دندانه دارای ساختار محکمتری است.

2 - Silicon rubber

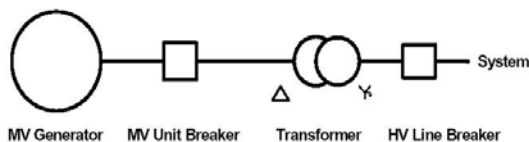
3 - Visco elastic

4 - Graded insulation / stepwise insulation

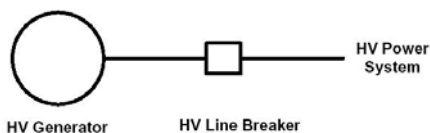
1 - Tooth vibration

۴- مقایسه ژنراتورهای کابلی و معمولی

مهمترین تفاوت ژنراتورهای کابلی با ژنراتورهای معمولی در سطح ولتاژ ترمینال آنها است. در مورد ژنراتورهای معمولی حد بالای این سطح حدود ۳۰ کیلوولت است. اما این سطح ولتاژ در ژنراتورهای کابلی ساخته شده تاکنون (۲۰۰۴) به ۱۵۵ کیلوولت هم رسیده است و طبق ادعای سازنده تا ۴۰۰ کیلوولت نیز می‌تواند افزایش یابد و این به معنی اتصال بدون واسطه ژنراتورهای کابلی به شبکه قدرت و عدم نیاز به ترانسفورماتورهای افزایشده می‌باشد (شکل ۷). با توجه به اینکه ژنراتورهای کابلی وظیفه ژنراتور و ترانسفورماتور واحد را در سیستم‌های متداول انجام می‌دهند، هرگونه مقایسه باید بین ژنراتورهای کابلی از یک سو و ژنراتورهای معمولی و ترانسفورماتورهای افزایشده از سوی دیگر، انجام گیرد.



شکل ۷-الف اتصال ژنراتور به شبکه در ساختار متداول



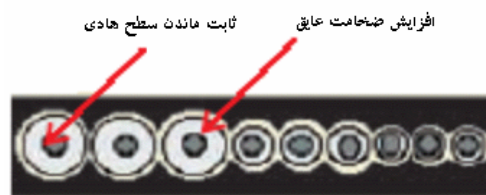
شکل ۷-ب اتصال ژنراتور کابلی به شبکه

۴-۱- مزایای ژنراتورهای کابلی

به دلیل ساختار ویژه این ژنراتورها و همچنین حذف ترانسفورماتور از ساختار نیروگاه مزایای زیادی برای آنها شمرده می‌شود که در بخش‌های بعدی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۴-۱-۱- راندمان و کارایی

بطور کلی یک نیروگاه با ژنراتور کابلی ۰/۵ تا ۱/۵ درصد راندمان و کارایی بهتری نسبت به همان نیروگاه با ژنراتور و ترانسفورماتور معمولی دارد. [۵] پس به ازای مقدار معین توان ورودی، نیروگاه به دلیل تلفات کمتر، تولید بیشتری داشته و در نتیجه شاخصه‌های اقتصادی کل نیروگاه افزایش خواهد یافت.



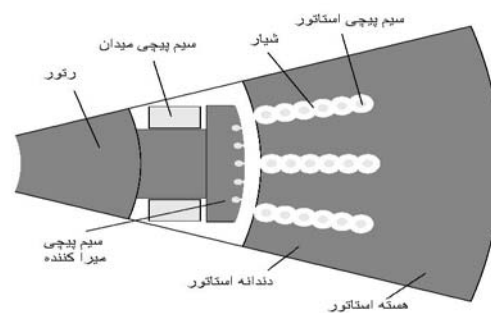
شکل ۵- عایق بندی پله‌ای در شیارهای استاتور

۳-۴- سیستم خنک‌کننده

در ژنراتورهای کابلی به دلیل پایین آمدن سطح جریان و در نتیجه کاهش تلفات اهمی و همچنین به سبب افزایش تلفات هسته در نتیجه شیارهای عمیق استاتور، حرارت ناشی از تلفات هسته بیش از حرارت ناشی از تلفات اهمی سیم‌پیچی‌ها است. پس برای خنک کردن هسته از یک روش غیر مستقیم، که هسته را بوسیله لوله‌های حاوی آب خنک می‌کند استفاده می‌شود. این لوله‌ها که بصورت محوری در استاتور توزیع شده‌اند از جنس XLPE هستند. دلیل استفاده از لوله‌های XLPE کاهش احتمال اتصال کوتاه بین سیستم خنک‌کننده و هسته و همچنین نداشتن تلفات مغناطیسی در لوله‌ها و اتصالات آن است. از آنجا که هسته در پتانسیل صفر قرار دارد و میدان الکتریکی هم در فضای عایقی محدوده شده است، برخلاف ژنراتورهای آب خنک معمولی نیازی به دیونیزه کردن آب نمی‌باشد. [۵]

۳-۵- روتور

روتور این ژنراتورها هیچ تفاوتی با ژنراتورهای معمولی ندارد و می‌توان از تنوع و ساختارهای مورد استفاده در تحریک ژنراتورهای معمولی در ژنراتورهای کابلی نیز استفاده کرد. طرح شماتیک مقطع یک ژنراتور کابلی سنکرون در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- سطح مقطع یک ژنراتور کابلی

۴-۱-۴- قابلیت اطمینان

نیروگاههایی که از ژنراتورهای کابلی استفاده می‌کنند به دلیل حذف ترانسفورماتور افزایشدهنده و کلیدهای قدرت فشار متوسط^۱، اجزا کمتری نسبت به نیروگاههایی که از ژنراتور و ترانسفورماتورهای متداول استفاده می‌کنند دارند. اجزا کمتر به معنی کاهش منابع و پتانسیل خطا در سیستم می‌باشد و این به نوبه خود به معنی افزایش قابلیت اطمینان کل سیستم است.

با توجه به حذف ترانسفورماتور افزایشدهنده، دامنه جریانهای اتصال کوتاهی که ژنراتور کابلی می‌بیند نسبت به مقداری که ژنراتورهای معمولی می‌بینند کاهش می‌یابد. همچنین در ژنراتورهای متداول و مرسوم کنونی اتصال کوتاه سه فاز از همه خطرناک‌تر است، در حالیکه در ژنراتورهای کابلی احتمال خطای سه فاز و دو فاز بسیار کمتر است که دلیل آن قابلیت اطمینان بالای کابل‌های XLPE بکار رفته در سیم‌بندی آنها می‌باشد. [۷]

بعلاوه به دلیل محدود بودن میدان الکتریکی در فضای عایقی تجهیزات بکار رفته در ساختار ژنراتور تحت تنش و استرس کمتری نسبت به ژنراتورهای معمولی قرار می‌گیرند. همه این عوامل باعث بهبود قابلیت اطمینان این سیستم‌ها می‌شوند.

۴-۱-۵- قابلیت اضافه بار

به دلیل سنگین‌تر بودن استاتور، ژنراتورهای کابلی دارای ثابت زمانی دمایی بیشتری نسبت به ژنراتورهای معمولی هستند. در نتیجه ژنراتورهای کابلی دارای قابلیت اضافه بار بهتری نسبت به ژنراتورهای متداول می‌باشند [۵]

۴-۱-۶- بهبود پایداری سیستم قدرت

عامل اصلی محدودکننده ظرفیت خطوط انتقال، برخلاف سطوح پایین‌تر که محدودیت حرارتی است محدودیت ناشی از حد پایداری گذرا^۲ می‌باشد. این محدودیت متأثر از راکتانس معادل بین تولیدکننده و مصرف‌کننده می‌باشد و با کاهش این راکتانس حد پایداری افزایش می‌یابد. [۸]

همچنین با حذف ترانسفورماتور افزایشدهنده که یکی از مصرف‌کنندگان توان راکتیو در شبکه است، توان مصرفی آن نیز از شبکه حذف شده، در نتیجه توان راکتیو مصرفی توسط ترانسفورماتور در نقطه دیگری از شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۴-۱-۲- جنبه‌های زیست محیطی

ژنراتورهای کابلی برخلاف سیستم‌های موجود که نیاز به ترانسفورماتورهای افزایشدهنده (حاوی چندین تن روغن) دارند، بسیار تمیز و مطمئن هستند و خطرات ناشی از نشت روغن و احتراق این ترانسفورماتورها از کل سیستم نیروگاه حذف گردیده است. همچنین در ژنراتورهای کابلی به دلیل اطمینان بیشتر سیستم عایقی و عاری بودن بسیاری از قسمت‌ها از میدان الکتریکی، احتمال وقوع تخلیه جزئی و به طبع آن تولید ازن کاهش می‌یابد و این مورد نیز یکی دیگر از جنبه‌های سازگاری بیشتر ژنراتورهای کابلی با محیط زیست است. همچنین مواد قابل بازیافت بیشتری در ژنراتورهای کابلی در قیاس با ژنراتورهای و ترانسفورماتورهای متداول وجود دارد و در نهایت اینکه به دلیل راندمان بیشتر سیستم مصرف سوخت و آلودگی‌های ناشی از آن نیز کاهش می‌یابد. [۵]

۴-۱-۳- نیروهای مکانیکی

در ژنراتورهای کابلی به دلیل کاهش میزان جریان عادی و اتصال کوتاه، نیروهای مکانیکی ناشی از عبور جریان در هادی‌های استاتور در مقایسه با ژنراتورهای معمولی کمتر است. این موضوع موجب سادگی چفت و بست کابل‌ها، بخصوص در ناحیه سیم‌پیچی‌های انتهایی می‌گردد. [۲]

شکل ۸ نمایی از سیم‌پیچ انتهایی یک ژنراتور کابلی را نشان می‌دهد.



شکل ۸ - سیم پیچی های انتهایی در ژنراتورهای کابلی

¹ Gen Breaker

² - Transient Stability

استفاده از کابل‌ها بجای هادی‌های استاتور به معنی اشغال حجم بیشتری از استاتور توسط سیم‌بندی است و این به معنی پایین آمدن ضریب پرشدگی در این ماشین‌ها می‌باشد. همچنین حجم و وزن این ماشین‌ها و حجم هسته آنها که قسمت گران قیمت ماشین‌های الکتریکی است زیاد می‌شود و بعلاوه به دلیل جدید بودن فناوری ساخت آنها و نبود تولید و تقاضای فراگیر و گسترده برای ژنراتورهای کابلی در حال حاضر، قیمت این ژنراتورها از ژنراتورهای معمولی گرانتر است. [۱]

۵- نمونه‌های عملی نصب شده

اولین ژنراتور کابلی در سال ۱۹۹۸ در نیروگاه آبی Porjus واقع در شمال سوئد نصب گردید. پس از آن تاکنون ۴ واحد دیگر از آنها در سوئد و ۱ واحد در ژاپن مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. مشخصات واحدهای نصب شده در جدول (۱) آورده شده است. کلیه این واحدها به غیر از واحد Eskilstuna که حرارتی است و شکل ۹ نمایی از آنرا نشان می‌دهد، از نوع نیروگاه‌های آبی می‌باشند. به دلیل عدم سابقه کارکرد زیاد ژنراتورهای کابلی هنوز عیب‌های عملی آنها تجربه نشده‌اند. ولی واحد Porjus بعنوان اولین واحد نصب شده بدون هیچ‌گونه اختلالی در عملکرد خود بمدت ۱۳۷۰۰ ساعت در مدار بوده است. [۹]



شکل ۹ - نمایی از ژنراتور کابلی نصب شده در واحد Eskilstuna

از آنجا که حذف ترانسفورماتور به معنی حذف راکتانس از آن مدار است و همچنین با توجه به کوچکتر بودن راکتانس گذرای ژنراتورهای کابلی نسبت به ژنراتورهای معمولی [۶] و بعلاوه بزرگتر بودن ثابت اینرسی روتور این ژنراتورها استفاده از آنها در یک سیستم تک ماشینی منجر به بهبود پایداری گذرای سیستم می‌گردد. ولی در یک سیستم چند ماشینی بسته به ساختار شبکه و محل قرارگیری ژنراتورها و پارامترهای آنها، تاثیر ژنراتورهای کابلی در پایداری شبکه باید مورد بررسی قرار گیرد.

۴-۲- معایب استفاده از ژنراتورهای کابلی

عیب استفاده از ژنراتورهای کابلی نیز همانند محاسن آن به حذف ترانسفورماتور از ساختار نیروگاه باز می‌گردد. تولید توان در سطح ولتاژ بالا و در نتیجه حذف ترانسفورماتور افزایشده علاوه بر مزایای ذکر شده دارای معایبی نیز هست. اتصال ترانسفورماتورهای افزایشده بعد از ژنراتورها معمولا بصورت $\Delta-Y$ می‌باشد. این اتصال موجب جلوگیری از ورود مولفه هارمونیک سوم از طرف ژنراتور به شبکه می‌گردد. در ساختار نیروگاههای مرسوم که ترانسفورماتور بعنوان یک فیلتر توالی صفر عمل می‌کند می‌توان نقطه خنثی سیم‌بندی استاتور را با امپدانس کم زمین نمود. در صورتیکه این ترانسفورماتور از ساختار سیستم نیروگاههایی که از ژنراتورهای کابلی استفاده می‌شود حذف گردیده است.

همچنین کلید قدرت ولتاژ متوسط که بین ژنراتور و ترانسفورماتور افزایشده قرار دارد (مطابق شکل ۷) به دفعات هنگام راه‌اندازی و سنکرون شدن با شبکه و موارد تعمیر و خروج واحد از مدار و ... باز و بسته می‌شود. با حذف این کلید قدرت وظیفه کلیدزنی‌های متعدد آن به کلیدفشارقوی محول می‌شود و این نیاز به کلیدهای ولتاژ بالای مناسب برای این کار دارد. عیب دیگر ژنراتورهای کابلی این است که کل نیروگاه در ولتاژ شبکه قرار می‌گیرد و به سیستم‌های حفاظتی و دستگاههای اندازه‌گیری در ولتاژ بالا نیاز خواهد بود.

نظر گرفت. بررسی اجمالی شبکه برق ایران جهت درک اهمیت اقتصادی استفاده از این فناوری نشان دهنده صرفه جویی قابل قبولی در میزان مصرف انرژی است.

تا پایان سال ۱۳۸۱ کل ظرفیت نامی نیروگاههای ایران که در محدوده ولتاژ ۲۰ تا ۱۳۲ کیلوولت به شبکه وصل می شوند برابر با ۳۵۸۷/۰۸ مگاوات بود [۱۰]

به دلیل افزایش راندمان (۵٪ تا ۱/۵ درصد) در صورت استفاده از ژنراتورهای کابلی در این نیروگاهها بین ۱۸ تا ۵۰ مگاوات به ظرفیت تولید (با همان مصرف سوخت) اضافه می گردید.

با توجه به بازدهی حرارتی این نیروگاهها و احتساب مقدار متوسط ۱٪ افزایش راندمان در صورت استفاده از ژنراتورهای کابلی، نتایج حاصل از صرفه جویی در مصرف انرژی مطابق با جدول شماره (۲) بدست می آید. این نتایج نشان دهنده این نکته هستند که اگر واحدهای نصب شده با تکنولوژی موجود ژنراتورهای کابلی ساخته شده بودند سالیانه بیش از ۴۰۰ Gbtu مصرف انرژی صرفه جویی می گردید.

جدول ۱ فهرست نمونه های نصب شده ژنراتورهای کابلی در سطح جهان

نام نیروگاه	ظرفیت [MVA]	ولتاژ [KV]	سرعت [rpm]	مکان	تاریخ بهره برداری
Porjus u9	۱۱	۴۵	۶۰۰	سوئد	۱۹۹۸
Eskilstuna	۴۲	۱۳۶	۳۰۰۰	سوئد	۲۰۰۰
Porsi	۷۵	۱۵۵	۱۲۵	سوئد	۲۰۰۱
Holjebro	۲۵	۷۸	۱۱۵/۴	سوئد	۲۰۰۱
Miller Cree	۳۲/۸	۲۵	۷۲۰	سوئد	۲۰۰۱
Katsuratuwa	۹	۶۹	۴۲۸	ژاپن	۲۰۰۱

۶- بررسی استفاده از ژنراتورهای کابلی در شبکه برق ایران

همانگونه که اشاره شد استفاده از ژنراتورهای کابلی دارای مزایای زیادی است. از میان این مزایا افزایش راندمان و کاهش هزینه های تعمیر و نگهداری و همچنین قابلیت اطمینان بالاتر ژنراتورهای کابلی نسبت به مجموعه ژنراتور و ترانسفورماتورهای مرسوم دارای اهمیت قابل توجهی است. این اهمیت به اندازه ای است که از این پس باید استفاده از ژنراتورهای کابلی را بعنوان یک گزینه قابل تامل در نصب واحدهای جدید و بازسازی و احیای واحدهای قدیمی در

جدول (۲): جدول صرفه جویی مصرف انرژی در نیروگاههای حرارتی ایران در صورت استفاده از ژنراتورهای کابلی

نام نیروگاه	قدرت عملی [MW]	نرخ حرارتی [Btu/KW]	درصد بهره برداری	مقدار صرفه جویی [Mbtu]
شهید زینب یزد	۷۲	۴۲۴۵	۶/۴۲	۱۷۱۸/۸۹
یزد	۸۳	۳۵۸۶	۸/۴۱	۲۱۹۲/۷۴
سمنان	۱۵/۵	۵۴۸۶	۱۸/۷۲	۱۳۹۴/۴۳
فرگ داراب	۲/۷	۸۲۴۷	۰/۳۲	۶/۴۲
طرشت	۴۲/۵	۳۴۰۴	۶۴/۵۶	۸۱۸۱/۷۵
بعثت	۱۹۵	۲۸۶۸	۷۱/۳۰	۳۴۹۳۰/۷۰
اسلام آباد اصفهان	۱۹۵	۲۳۶۰	۷۵/۶۹	۳۰۵۱۳/۳۰
زرند	۴۷/۵	۳۵۱۷	۷۴/۴۳	۱۰۸۹۲/۲۶
مشهد	۱۲۰	۲۷۳۸	۷۷/۶۵	۲۲۳۴۹/۱۱
طوس	۶۰۰	۲۳۵۸	۷۴	۹۱۷۱۲/۹۹
شیراز	۱۳۴/۸	۳۸۹۵	۷۲/۹۷	۳۳۵۶۱/۸۴
مشهد (رضایی)	۱۶۰/۸	۳۳۸۱	۵۵/۳۷	۲۶۳۶۹/۹۸
بوشهر	۵۱	۴۶۶۲	۱۷/۳۲	۳۶۰۷/۴۶
چابهار (کنارک)	۹۴/۴	۴۶۸۸	۵۷/۳۵	۲۲۳۳۲/۹۵
شیروان	۱۲۰	۳۵۵۳	۴۵/۹۶	۱۷۱۶۵/۶۶
شریعتی	۱۷۸/۵	۳۶۹۵	۴۳/۰۶	۲۴۸۷۸/۸۷
صوفیان	۷۴/۵	۳۸۹۶	۴۰/۰۵	۱۰۱۸۳/۱۴
زاهدان	۸۵	۳۹۸۶	۶۴/۳۱	۱۹۰۸۷/۰۵
قائن	۵۴/۸	۳۷۹۳	۱۱/۷۹	۲۱۴۶/۷۵
هسا	۶۳/۸	۳۲۳۳	۹/۶۱	۱۷۳۶/۴۱
شهید سلیمی	۲۶۳/۳	۲۷۸۳	۵۷/۶۱	۳۶۹۷۳/۵

جدول شماره (۴): نیروگاه‌های در دست احداث مناسب جهت استفاده

از ژنراتورهای کابل

ولتاژ شبکه [KV]	قدرت عملی [MW]	نام نیروگاه
۴۰۰-۱۳۲	۱۰۰	سیکل ترکیبی نیشابور
۶۶	۱۶۰	سیمره
۶۳	۲/۵	منج

از بین این واحدها نیروگاه آبی سیمره از لحاظ سطح ولتاژ و سطح توان برای بکارگیری ژنراتور کابلی بسیار مناسب می‌باشد. با یک محاسبه ساده، با توجه به افزایش راندمان استفاده از ژنراتور کابلی در نیروگاه سیمره علاوه بر بهبود شاخصه‌های سیستم منجر به اضافه تولیدی برابر با تولید نیروگاه منج در شبکه می‌گردد.

۷- نتیجه‌گیری

با توجه به قابلیت‌ها و مزایای فراوان ژنراتورهای کابلی در آینده‌ای نزدیک شاهد استفاده گسترده‌ای از آنها در تولید انرژی الکتریکی خواهیم بود. مزایای فنی اقتصادی و جنبه‌های زیست محیطی ژنراتورهای کابلی به اندازه‌ای است که علاوه بر سوئد (بعنوان کشور سازنده) دو کشور بزرگ صنعتی جهان یعنی ژاپن و امریکا نیز استفاده از این فناوری را در ساختار سیستم قدرت خود آغاز نموده‌اند.

با توجه به نیاز کشور به ساخت نیروگاه‌های جدید و افزایش ظرفیت تولید برق و نیاز به بررسی همه راه‌کارهای ممکن، ژنراتورهای کابلی باید در طرح ساخت نیروگاه‌های جدید و احیای نیروگاه‌های فرسوده در ایران نیز مورد توجه قرار گیرند

۶-۱- بررسی احیای نیروگاه‌های آبی ایران با ژنراتورهای کابلی

با توجه به ظرفیت و سطح ولتاژ نامی، ژنراتورهای کابلی جهت استفاده در واحدهای برق آبی بسیار مناسب می‌باشند. نیروگاه‌های آبی چه در مرحله ساخت و چه در مرحله احیا و بازسازی دارای پتانسیل خوبی برای بکارگیری ژنراتورهای کابلی هستند. با توجه به متوسط عمر مفید ۳۰ سال برای ژنراتورهای الکتریکی می‌توان از ژنراتورهای کابلی در احیای واحدهای برق آبی ایران که در جدول (۳) فهرست شده‌اند استفاده نمود.

بعنوان مثالی از این بازسازی‌ها می‌توان به طرح احیای نیروگاه Porsî در کشور سوئد بوسیله ژنراتورهای کابلی اشاره کرد همچنین در ایالات متحده طی یک برنامه مدون چندین واحد برق آبی قدیمی توسط ژنراتورهای کابلی در حال احیا می‌باشند [۱۱]

جدول شماره (۳): نیروگاه‌های آبی قدیمی مناسب جهت احیا توسط

ژنراتورهای کابلی

نام نیروگاه	سال بهره‌برداری	ولتاژ شبکه [kv]	قدرت نامی [MW]
امیرکبیر	۱۳۴۰	۱۳۲	۹۱
سفیدرود	۱۳۴۳	۱۳۲	۸۷/۵
لتیان	۱۳۴۸	۶۳	۲۲/۵
زاینده‌رود	۱۳۴۹	۶۳	۵۵/۵
ارس	۱۳۵۰	۱۳۲	۲۲

۶-۲- استفاده از ژنراتورهای کابلی در واحدهای در دست احداث

همانگونه که ذکر شد استفاده از ژنراتورهای کابلی به جای مجموعه ژنراتور-ترانسفورماتور متداول به دلیل مزایای قابل توجه آن باید مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به سطح توان و ولتاژ ژنراتورهای کابلی و فناوری فعلی ساخت آنها، در مورد پتانسیل مناسب استفاده از ژنراتورهای کابلی در ساخت نیروگاه‌های جدید در ایران می‌توان به واحدهای در دست احداث جدول (۴) اشاره نمود.

۸-مراجع

- [1] Dettmer Roger, "The heart of a new machine", IEE REVIEW, November 1998, pp. 255-258
- [2] Alfredson S, Hernnas B, Bergstrom H, "Assembly of generators with rated voltage higher than 100KV", IEEE, 2000, pp. 189-193
- [3] Leijon M, et all, "Experinces from the application of extruded solid dielectric cables in the stator winding of rotating machines", IEEE, 2000, pp. 736-744.
- [4] Leijon M, et all, "A recent development in the electrical insulation system of generators and transformers", IEEE Electrical Insulation Magazine, 2001, pp. 10-13
- [5] Leijon M, et all, "Powerformer™ The prototype and beyond", IEEE, 2000, pp. 139-144
- [6] Al-Halabieh Sami, "Powerformer™", Electrical power engineering seminar, Lappeeranta University of technology, 1999.
- [7] Leijon M, et all, "Breaking Convention in Electrical Power Plants", CIGRE, Session 1998, 11/37-03
- [8] Kundur. P, "Power system stability and control", McGrow-hill, 1994.
- [9] G.johansson Stefan, Bertil Larsson, "Short-Circuit Test on a High-Voltage, cable-Wound Hydropower Generator", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol 19, No. 1, March 2004, page 28
- [۱۰] آمار تفضیلی صنعت برق ایران سال ۱۳۸۱، شرکت مادر تخصصی توانیر، مرداد سال ۸۲.
- [11] U.S Department of the interior, "High-Voltage Generatin", Research Project No.FI02.05