خطی سازی ویژگی آونگی (swing) برق ژنراتور با کنترل خروجی برق SMES برای افزایش پایداری سیستم تغذیه

**چکیده –** مقاله جاری , طرح کنترلی برای دستیابی به تثبیت قوی سیستم برق بوسیله SMES (مخزن ذخیره انرژی مغناطیسی ابررسانا) پیشنهاد می کند. کنترل اعمال شده در این مقاله, شامل خطی سازی ویژگی آونگی برق با کنترل فعال تغذیه SMES می باشد. این کنترل از این نظر قوی بشمار می رود که تحت تاثیر تغییرات پیکربندی سیستم برق, شرایط عملیاتی و غیره نمی باشد. در نتیجه, پایداری سیستم برق در وضعیت گذار و وضعیت پایدار بمیزان شاخصی بهبود می یابد. برخی تحقیقات عددی نشان دهنده اثر متمایز SMES با استفاده از طرح کنترلی پیشنهادی در پایدارسازی سیستم برق در مقایسه با SMES و استفاده از کنترل فیدبک مرسوم انحراف سرعت ژنراتور می باشد.

**I مقدمه**

توسعه روشهای موثر برای بکارگیری سیستم های انتقال تا ظرفیتهای گرمایی ماکزیمم , توجه زیادی از مهندسین برق را در سالهای اخیر بخود جلب کرده است. انتظار می رود SMES (مخزن انرژی مغناطیسی ابررسانا) یکی از ابزار موثر در پیشبرد پایداری سیستم برق باشد, زیرا SMES قادر به فراهم کردن برق کنشی و واکنشی بطور همزمان و سریعا برای سیستم تغذیه می باشد. در بیشتر طرحهای کنترلی , کنترل فیدبک سرعت ژنراتور , یا انحراف فرکانس برای میرا کردن (damp) آونگ (swing) ژنراتور مورد استفاده قرار می گیرد که کنترلر با استفاده از مدل سیستم برق خطی شده حول نقطه عملیاتی طراحی می شود. با اینحال, مشکلی بوجود آمده آنست که اثر کنترلر با تغییرات پیکربندی سیستم برق , شرایط عملیاتی و غیره کاهش می یابد[4و5]. تن و همکاران, کنترل انطباقی را توسعه داده اند که درآن غیر خطی بودن سیستم برق در نظر گرفته شده است و بر اساس نظریه کنترل غیر خطی کار می کند.

در این مقاله, استراتژی سرراست تری با قدرتمندی با استفاده از توانایی کنترل برق واکنشی و واقعی SMES ها توسعه داده شده است. بخوبی مشخص است که SMES قادر به کنترل جریان برق فعال در سیستم های برقی می باشند. با جایگزینی هدف کنترلی , انتظار می رود که برق ژنراتور مستقیما کنترل شده تا از سیگنال مرجع مشخصی پیروی کند. بر اساس این سناریو, ویژگی آونگی برق ژنراتور بوسیله سیگنال مرجع خطی شده تا به استقلال خطی کامل وضعیت سیستم برق دستیابی پیدا شود. در نتیجه, کنترلر از دیدگاه انتسابی مقدار ویژه طراحی شده است. ابتدا ظرفیت کنترل برق مستقیم ژنراتور بوسیله SMES بصورت عددی با ارائه مرجع سینوسی تایید شده است. کنترل برق مستقیم به خطی سازی ویژگی آونگی ژنراتور اعمال شده است. پس تثبیت سیستم کنترل برق بر اساس انتساب مقدار ویژه طراحی شده است. برخی از تحقیقات عددی نشان دهنده اثر شاخص SMES با طرح کنترل پیشنهادی در تثبیت سیستم برق می باشد (در مقایسه با SMES و کنترل فیدبک انحراف سرعت ژنراتور[3]).

**II. مطالعه عملی بودن طرح کنترلر**

شکل نشان دهنده پیکربندی نمونه SMES می باشد که مرکب از 12 تریستور پل پالس و یک مگنت ابررسانا می باشد. با کنترل مناسب زاویه firing (تحریک, اشتعال) , می توان خروجی برق واکنشی و کنشی را بطور همزمان تنظیم کرد. کاربرد ابزار با تغییر جریان خودکار مانند GTO , بازه وسیع کنترل برق کنشی (فعال) و واکنشی تضمین می شود. توسعه کنترل PWM با معکوس گر خودکار باعث کنترل همزمان برق فعال و واکنشی با سطوح MVA بالا و هارمونی کم می شود. در این مقاله, فرض شده است که SMES قادر به کنترل برق فعال و واکنشی بطور جدا از هم می باشد.



شکل 1: پیکربندی نمونه SMES

سیستم تک ماشین, باس نا متناهی را با SMES قرار داده شده در ترمینال ژنراتور شکل 2 را در نظر بگیرید. معادله آونگ ژنرانور بصورت 1و2و3 می باشد که بخاطر اختصار , از مقاومت چشم پوشی شده است. دقت کنید که غیرخطی بودن ناشی از تابع مثلثاتی فقط در رابطه 3 دیده می شود.



شکل 2 کنترل برق ژنراتور بوسیله SMES

پایداری گذرای سیستم برق غالبا در منحنی زاویه برق مورد بحث قرار گرفته می شود. در اینجا, اثر اکنترلی SMES در منحنی زاویه برق ارزیابی شده است. شکل 3 نشان دهنده مثالی از منحنی زاویه برق شیفت داده شده با Psm برق فعال SMES در محدوده قابل کنترل  می باشد. از آنجایی که سرعت کنترل برق بوسیله SMES سریعتر از حرکت روتر ژنراتور Ω در آونگ تغذیه (power swing) می باشد, برق خروجی ژنراتور Pe , برای هر Ω بوسیله SMES در منطقه حاشور زده شکل 3 قابل تنظیم می باشد. پس انتظار می رود که برق ژنراتور مستقیما در زمان آونگ پس از مقدار اختلال کنترل شود.



شکل 3: منحنی زاویه برق شیفت داده شده بوسیله برق فعال SMES .

III**. طرح کنترلی خطی سازی آونگ برق**

معادله آونگ 1 با برق پرسرعت Pa بازنویسی شده که نشان دهنده Pm-Pe می باشد.



غیر خطی بودن سیستم برق فقط در Pa لحاظ شده است. فرض کنید Pa در 4 مستقیما بوسیله SMES کنترل شده و سیگنال مرجع Pa\* برای Pa بصورت زیر بدست آید:



که Ω0 در نقطه عملیاتی Ω می باشد.

با چشم پوشی از تاخیر زمانی بین Pa و Pa\* که می گوید: Pa=Pa\* , رابطه 4 بصورت زیر خطی می شود:



بهره های کنترل b1 و b2 را می توان بر اساس روش انتساب مقدار ویژه بر حسب معادله دیفرانسیلی درجه 2 (6) نوشت.

در اینجا, دو موضوع مهم حل نشده باقی مانده است. 1) سیگنال Pa را چگونه مشاهده کنیم که شامل نمونه های مختلف برق مکانیکی Pm , برخی از بایاسهای DC ناشی از تغییر وضعیت عملیاتی و برخی پویایی های غیرقطعی پاسخ الکتریکی چرخش آرمیچر , سیم پیچ کاهنده و غیره باشد؟ 2) چگونه کنترلر برق مستقیم Pa را گونه دریافت کنیم که از Pa\* در زمان وضعیت گذار سیستم برق پس از اختلال پیروی کند؟ موضوع اول را می توان با استفاده از فیلتر میانگذر برای بدست آوردن سیگنال آونگی برق حل نمود که فرکانس آن حول 1hz است زیرا پویایی های Pm که بوسیله سیستم هدایت گر کنترل می شوند, کندتر بوده و نوسانات ناشی از پاسخ سیم پیچ آرمییچر و سیم پیچ کاهنده دارای فرکانس بیشتری از آونگ برق می باشند. در نتیجه شی کنترلی کنترل برق مستقیم بصورت زیر تولید می شود:



موضوع دوم بوسیله کنترل فیدبک متناسب فهمیده می شود:



چونکه بطور کمی توصیف شده که برق ژنرانور Pe با جذب و تغذیه برق SMES Psm افزایش و کاهش داده می شود(شکل 3).



شکل 4: تصویر شماتیک کنترل خطی سازی شده در منحنی زاویه بر ق

اثر کنترل تناسبی را می توان بصورت شماتیکی در منحنی زاویه برق شکل 4 نشان داد. برق ژنراتور اساسا طوری کنترل شده تا از خط Pe-Ω (Pe\*) پیروی کند. سیستم برق دارای میرایی کافی مشخص شده با b1 و b2 در رابطه 6 پس از کاربرد کنترل پیشنهادی کی باشد. در نتیجه, محل منحنی زاویه برق بصورت مارپیچ در جهت عقربه های ساعت حول Pe\* می باشد و نهایتا در نقطه سکون با پویایی پایدار مشخص شده با مقدار ویژه همگرا می شود. از آنجایی که برق ژنرانور طوری تنظیم شده که از خط (خطی) Pe\* پیروی کند که شیب آن بزرگتر از Pe در نقطه عملیاتی است, سیستم برق مقدار بزرگی از انرژی کند شده را بدست می آورد (فقط بعد از اختلال بزرگی که برای پیشبرد پایداری گذرا موثر است). پس کنترل تناسبی باید برای پایداری گذرا و پایداری حالت پایداری موثر باشد.

در کنترل SMES , برق واکنشی (انفعالی) باز هم در دسترس می باشد. در اینجا برق واکنشی , Qsm به کنترل ولتاژ ثابت بر اساس طرح کنترلی زیر اعمال شده است:





جدول 1: ثابتهای سیستم

**IV . نتایج شبیه سازی**

پیکربندی سیستم انتقال برق بکار رفته در شکل 5 نشان داده شده است. جزئیات طرح نیز در شکل 5 دیده می شوند. نیروگاه برق با 5 ژنراتور مشابه 1,170 MVA , بصورت ماشین تکی 5,850 MVA با یک AVR نشان داده شده است. مدل پارک شامل سیم پیچهای آرمیچر , کاهنده در محورهای d و q , سیم پیچ میدانی و مجموعه ای از معادلات آونگی برای توصیف پویایی بکار رفته اند. ژنراتور بوسیله خط انتقال مدار دوبل 500kv و 100km به سیستم تغذیه متصل شده است. ثابتهای سیستم در جدول I نشان داده شده اند.

واحد SMES در ترمینال ژنراتور قرار داده شده وبصورت منابع فعال و انفعالی با تاخیر نمایش داده شده با تاخیر زمانی درجه 1 زیر ظاهر شده اند:



که Psm0 و Qsm0 در حقیقت برق انفعالی و فعال کنترل شده می باشند.

اولا, ظرفیت کنترل مستقیم برق ژنراتور با SMES تایید شده است. تناوب سینوسی بصورت مرجع کنترل برق Pa\* مشخص شده است یعنی:



که دارای فرکانس متناظر با آونگ برق می باشد. نتیجه کنترل در شکل 6 نشان داده شده است و Kpl=3.0 و بهره Kv کنترل ولتاژ با کنترل برق واکنشی 2.0 است. برق ژنراتور بطور موثر طوری کنترل شده که از شکل موج سینوسی مشخص شده پیروی کند.



شکل 5: سیستم انتقال برق فاصله طولانی با SMES



شکل 6: نتیجه کنترل برق با SMES

رابطه  بوسیله این تحقیق تایید شده و آماده اجرای کنترل خطی سازی با جایگزینی سیگنال سینوسی با رابطه 5 بعنوان مرجع Pa\* می باشد که  در رابطه 5 با رابطه زیر جایگزین شده است:



تا مولفه بایاس DC حذف شده و  بطور تقریبی از  بدست آید. در نتیجه Pa\* ارائه شده در این مقاله بصورت زیر نمایش داده می شود:



بهره های کنترل b1 و b2 بصورتی حذف شده اند که مقادیر ویژه در 6 در   تخصیص داده شوند. بخش موهومی طوری مشخص شده که بهبود دهنده گشتاور همگام سازی باشد. در نتیجه, بهره های کنترلی b1 و b2 بصورت -40.5 و -2.0 محاسبه شده اند. افت ولتاژ از 1.0[pu] به .8[pu] در 4 سیکل در باس نامتناهی بعنوان اغتشاش سیستم در نظر گرفته شده است. کنترل دقیقا پس از خطا (کمبود , عیب) فعال شده است. در شکل 7, P`a و Pa\* مقایسه شده اند و هر دو سیگنال با یکدیگر همخوانی دارند. شکل 8 نشان دهنده کارایی روش کنترل پیشنهادی می باشد. طرح کنترل با کنترل فیدبک مرسوم بصورت زیر می باشد:



که برای مقایسه مورد استفاده قرارگرفته شده است.

طرح کنترل پیشنهادی , آونگ برق را بطور موثر تثبیت می کند, همانند نتیجه ای که از مشخصه های مقدار ویژه انتظار می رفت. از آنجایی که گشتاور همگام سازی و میرایی سیستم در مورد سیستم پیشنهادی مشخص شده اند, مقدار پیک Ω در گذار اولیه بمیزان شاخص تری از کنترل فیدبک مرسوم کاهش یافته است. SMES با کنترل تناسبی سریعا , برق فعال را جذب کرده تا سریعا پس از مشاهده عیب از Pe\* خطی پیروی کند(شکل 4) که بطور موثر در پایداری گذرا کار می کند. نوسان ولتاژ ترمینال ژنراتور بطور موثر با برق واکنشی مستقل از برق فعال از بین می رود.



شکل 7: برق تنظیم شده ژنراتور



شکل 8: پاسخ های پویای (دینامیک) سیستم



شکل 9: پاسخ های دینامیک (پویای) در حالت جریان برق سنگین

در شبیه سازی های بعدی, راکتانس و مقاومت خطی 50% در وضعیت عملیاتی جدید افزایش یافته اند تا قدرتمندی طرح کنترلی مشاهده شود. این عملیات با موردی متناظر می باشد که یک مدار دوبل در بخش خاصی از خط انتقال باز شده باشد. اغتشاش سیستم , افت ولتاژ مشابهی در باس نامتناهی می باشد. نتایج در شکل 9 نشان داده شده اند. ژنراتور همگامی خود را پس از اغتشاش بدون SMES از دست می دهد. دوره آونگ برق بیشتر می شود وقتی SMES نصب نباشد که بیانگر کاهش گشتاور همگام سازی است. SMES با کنترل فیدبک مرسوم , گشتاور میرایی بیشتری را بدست می آورد که این امر در مورد گشتاور همگام سازی درست نیست. SMES با طرح کنترل پیشنهادی با میرایی و گشتاور همگام سازی مشخص شده , کارایی بالایی دارد.

**V. نتیجه گیری**

در این مقاله , طرح کنترل سیستم برق قدرتمندی بوسیله SMES پیشنهاد شده است. از آنجایی که ویژگی آونگی برق تقریبا بطور کامل بوسیله کنترل مستقیم جریان برق با برق فعال SMES خطی شده است, مشخصه های کنترلی بصورت انتساب مقدار ویژه بیان شده اند که مستقل از وضعیت سیستم برق می باشد. نتایج عددی نشان می دهد که طرح پیشنهادی دارای تنظیم مجدد نیست حتی اگر وضعیت عملیاتی دارای تغییرات بیشتری باشد. تایید شده که پایداری گذرا و پایداری وضعیت پایدار بطور شاخصی با SMES طرح پیشنهادی بهبود یافته اند.