

سیستمهای ابررسانای ذخیره ساز انرژی مغناطیسی: کنترل و کاربردهای مختلف آن در سیستمهای قدرت

ابوالفضل حلوائی نیاسر

Halvai@iust.ac.ir

دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی برق

چکیده: سیستمهای ابررسانای ذخیره کننده مغناطیسی انرژی (SMES)¹ در دو دهه اخیر بطور وسیع در زمینه های مختلف شبکه های قدرت مورد استفاده قرار گرفته اند. از SMES ها در زمینه های مختلف، نظیر کیفیت توان شامل جبران سازی اثر فلیکر، تسطیح بار و منابع تغذیه بدون وقفه و مطالعه پایداری شبکه های قدرت استفاده می شود. با امید به آنکه کارهای تحقیقاتی بیشتری در این زمینه در ایران شروع شود. این مقاله، پس از مروری مختصر بر SMES ها، به کاربردهای مختلف آن در شبکه های قدرت و روشهای کنترل مربوطه، پرداخته است. در ادامه، کاربرد سیستمهای ابررسانای مغناطیسی دمای بالا در قطارهای مغناطیسی خطی و همچنین استفاده از تکنولوژی ابررسانایی در تهیه تجهیزات قدرت ابررسانا و مزایای آنها، بررسی شده اند.

واژگان کلیدی: ابررسانای ذخیره ساز انرژی مغناطیسی، کیفیت توان، تسطیح بار، پایداری شبکه قدرت.

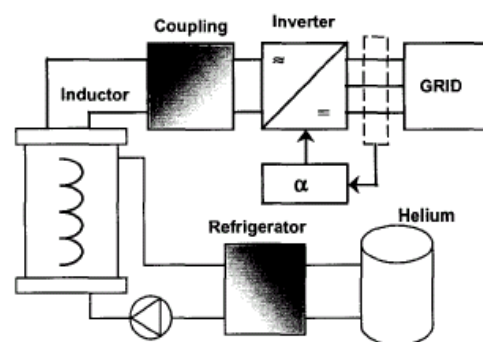
۱- مقدمه

ابررسانای ذخیره ساز انرژی مغناطیسی، اولین بار بعنوان ادوات تسطیح کننده بار مورد استفاده قرار گرفت، بطوریکه می توانست انرژی را در خود ذخیره نموده و در مواقع لزوم و پیک بار، آنرا به شبکه باز گرداند، لذا از لحاظ عملکردی، SMES ماهیتی همانند دیگر عناصر ذخیره ساز انرژی نظیر هیدرو پمپها، باتریها، سیستمهای هوای فشرده و اخیراً ابرخازنها دارد. بدلیل عدم تبدیل نوع انرژی در SMES ها، این ادوات از راندمان بسیار بالا، عمر طولانی، نگهداری کم و البته تکنولوژی کنترلی پیشرفته برخوردار هستند. علاوه بر آن، SMES از سرعت بسیار بالایی در جذب یا تحویل توان اکتیو یا راکتیو به شبکه متصل به آن برخوردار بوده و محدودیتهای آن فقط به سرعت پاسخ حلقه های کنترل و ادوات سوئیچینگ آن وابسته می باشد. سرعت بالای این ادوات سبب شده است تا در مطالعات پایداری شبکه و بالا بردن قابلیت اطمینان و همچنین در مسائل کیفیت توان بطور گسترده مورد استفاده قرار گیرند. در این مقاله پس از مروری مختصر بر ساختمان یک واحد ابررسانا، به بررسی جنبه های مختلف کاربرد این ادوات در شبکه های قدرت پرداخته می شود.

۲- ساختمان SMES

ابر رساناها، در سال ۱۹۱۱ برای اولین بار در آزمایشگاه تهیه هلیوم، مورد بررسی قرار گرفتند [1,2]. مشخصه ویژه ابر رساناها، توانایی عبور جریان بالا از آنها به دلیل مقاومت بسیار کمشان می باشد. ابر رساناهایی که در حال حاضر در بازار کاربرد دارند، آلیاژی از نیوبیوم - تیتانیوم (Nb-Ti) هستند که در سیستم ذخیره سازی انرژی یا نیروگاه (از نوع ابر رسانا) کاربرد دارند. ابر رساناها در دمای 4.4° کلوین، قابلیت عبور جریان با چگالی 2000 A/mm^2 را دارا می باشند که حدود 100 برابر بیشتر از چگالی جریان در مس است [3]. قلب سیستم SMES، یک سیم پیچ ابر رساناست و ابعاد سیم پیچ با توجه به ظرفیت انرژی آن می باشد [4]. جریان الکتریکی در سیم پیچ ابر رسانا به دهها هزار آمپر می رسد که هیچ سیستم قدرت AC متداول، توانایی عملکرد با این سطح جریان را ندارد. به دلیل بالا بردن استحکام مکانیکی سیم پیچ SMES، ابر رسانا را با درصدی از مس بصورت آلیاژ (Nb-Ti,Cu) می سازند. در شکل ۱، بلوک دیاگرام کلی یک سیستم SMES نمایش داده شده است. این سیستم، دارای المانهای اصلی مطابق با ذیل می باشد:

- قسمت مبدل قدرت
- سیم پیچ ابر رسانا
- سیستم خنک کننده هلیومی
- قسمت حفاظت سیستم و اتصال به شبکه



شکل ۱: اجزای اساسی یک سیستم SMES

در بخشهای بعد به مرور و تحلیل کاربرد سیستمهای ابر رسانا در کاربردهای کیفیت توان نظیر جبران سازی فلیکر، منابع تغذیه بدون وقفه پرداخته و همچنین پایدار سازی شبکه قدرت، با استفاده از SMES مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

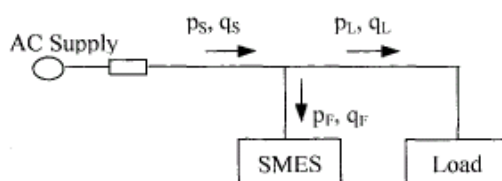
۳- بهبود کیفیت توان با استفاده از SMES

در شبکه های توزیع انرژی الکتریکی، بواسطه وجود بارهای غیرخطی و تغییر پذیر، نوسانات (فلیکرهای) ولتاژ بوجود می آید. اگر سطح فلیکرهای بوجود آمده قابل ملاحظه باشد بر دیگر مصرف کنندگان همان منبع نیز تاثیرگذار خواهد بود. فلیکرهای ولتاژ با قویتر نمودن منبع انرژی یا با استفاده از جبران سازها، می توانند کاهش یابند. قویتر نمودن منبع، معمولاً اقتصادی نمی باشد اما با در نظر گرفتن طرحهای توسعه، این امر توجیه پیدا می کند. تجهیزات جبران ساز می توانند در صورت ناکارآمد بودن روشهای دیگر، بکار گرفته شوند. جبران سازهای رایج شامل جبران سازهای توان راکتیو نظیر راکتورهای اشباع شده یا جبران سازهای راکتیو کنترل شده تر استوری می باشند [5,6,7].

جبران‌ساز لحظه ایی راکتیو بنام فیلتر توان اکتیو نیز شناخته می شود که برای حذف اغتشاشات ناشی از بار بکار می رود. جبران‌ساز با تزریق تمام مولفه های جریان بار به استثنای مولفه اصلی، سبب ایجاد توان با مولفه اصلی از منبع به بار می گردد. جبران‌ساز نه تنها باعث افزایش ضریب توان تا حدود واحد می گردد، بلکه می تواند سبب حذف هارمونیکهای ایجاد شده توسط بار از روی شبکه توزیع گردد. عیب اصلی فیلترهای توان اکتیو، بالا بودن فرکانس نسبتا بالای سوئیچ زنی آن می باشد که پیاده سازی آنرا در توانهای بالا، محدود نموده است. بنابراین استفاده از فیلترهای توان اکتیو فقط در محدوده های توان پائین و حذف هارمونیکها جذاب می باشد.

SMES ها می توانند بطور مستقیم انرژی الکتریکی را ذخیره نموده و بدون هیچگونه تلفاتی آنرا آزاد نموده و به شبکه تحویل دهند. بر خلاف دیگر جبران‌سازهای توان راکتیو، SMES ها با کنترل مناسب، قادر به تحویل توان با قسمتهای اکتیو و راکتیو مستقل به شبکه AC می باشند. این خصیصه، SMES را بعنوان یک انتخاب مناسب بعنوان جبران‌ساز، مطرح نموده است. اخیرا از SMES ها بعنوان ادوات FACTS نیز در سیستمهای قدرت نیز استفاده می شود. SMES های در مقیاس کوچک (Micro SMES)، در مسائل فلیکر ولتاژ به خوبی شناخته شده اند و در این کاربرد از پتانسیل کاری بالایی برخوردار می باشند. همچنین Micro SMES ها از لحاظ اقتصادی و پیاده سازی، بصره تر می باشند. در این بخش به کاربردهای SMES در حذف فلیکر و استفاده از SMES به عنوان UPS می پردازیم.

برای تشریح عملکرد سیستم SMES بعنوان جبران‌ساز فلیکر و UPS، الگوریتمهای کنترلی، برای مدل اتصال موازی شکل ۲ بدست خواهند آمد. در این شکل، p_S, p_L, p_F به ترتیب توانهای اکتیو SMES، بار و منبع AC بوده و به همین ترتیب نیز q_S, q_L, q_F توانهای راکتیو SMES، بار و منبع AC می باشند.



شکل ۲: اتصال بار و SMES به منبع تغذیه AC

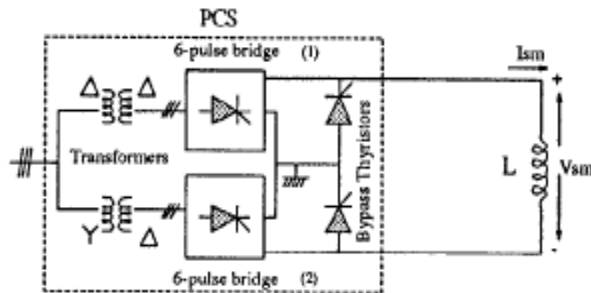
۳-۱- SMES به عنوان جبران‌ساز فلیکر بار

در شکل ۳، توپولوژی یک سیستم SMES از نقطه نظر توان الکتریکی، ترسیم شده است. با بکارگیری استراتژی بهینه کلید زنی برای سوئیچهای قدرت، توان اکتیو و توان راکتیو (p_F, q_F) جاری از منبع تغذیه AC به سیستم SMES شکل ۲ بصورت ذیل قابل نمایش است:

$$\begin{aligned} p_F &= 1.5 M V_{\max} I_{sm} \cos \alpha \\ q_F &= 1.5 M V_{\max} I_{sm} \sin \alpha \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن، M اندیس مدولاسیون سیستم PWM، V_{\max} پیک ولتاژ AC هر فاز، I_{sm} جریان DC در سیم پیچ SMES، α زاویه آتش فاز سوئیچهای قدرت می باشند. مطابق با معادله (۱)، سیستم SMES با تنظیم اندیس مدولاسیون M و زاویه آتش سوئیچها α قابل کنترل می باشد. در نتیجه کنترل مستقل توانهای اکتیو و راکتیو انجام خواهد بود. هدف اصلی از جبران‌سازی، کاهش اغتشاشات ولتاژ بار و یا کاهش فلیکر می باشد. برای جبران‌سازهای توان راکتیو، جبران‌سازی با تزریق توان راکتیو بنحویکه فلیکرهای ولتاژ کاهش یابد انجام می گردد. برای سیستم SMES که دارای دو

خروجی کنترل شده توان اکتیو و توان راکتیو می باشد، جبرانسازی با انعطاف بیشتری همراه می باشد. بسته به استراتژی کنترل توان در SMES، سیستم SMES می تواند شبیه یک جبرانساز توان اکتیو یا راکتیو و یا ترکیبی از این دو نوع توان باشد. در هر صورت با جبرانسازی، جریان ثابتی از توان در جهت منبع به بار برقرار خواهد بود. در حالت کلی توان اکتیو ثابت منبع AC، p_s^* برابر با توان اکتیو متوسط بار و تلفات توان SMES می باشد، در حالیکه توان راکتیو کشیده شده از منبع AC، q_s^* برای استحصال ضریب توان واحد منبع، برابر با صفر قرار داده می شود.



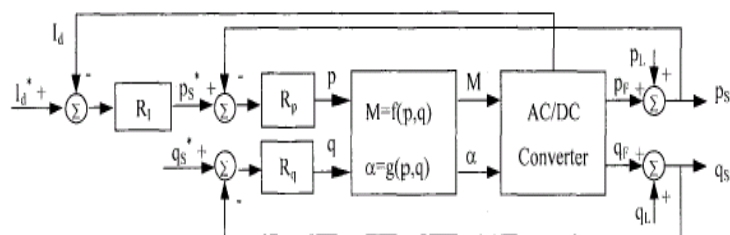
شکل ۳: شماتیک یک سیستم SMES

بلوک دیاگرام الگوریتم کنترل برای جبران اثر فلیکر در شکل ۴ آورده شده است. در این شکل، I_d^* مقدار مرجع جریان I_d بوده و R_l, R_p, R_q نیز تنظیم کننده های حلقه های کنترل می باشند. با بکارگیری معادلات (۱)، عبارات ذیل برای اندیس مدولاسیون M و زاویه آتش α بدست می آید:

$$M = f(p, q) = \frac{\sqrt{p^2 + q^2}}{1.5 V_{\max} I_d} \quad (2)$$

$$\alpha = g(p, q) = \text{Arctg} \frac{q}{p} \quad (3)$$

در شکل ۴، یک حلقه اضافی برای جریان DC، SMES طراحی شده است تا جریان آن همواره در مقدار نامی قرار داشته و بیشترین راندمان از SMES بدست آید.

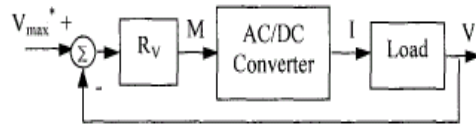


شکل ۴: دیاگرام کلی جهت جبرانسازی اثر فلیکر بار با سیستم SMES

۳-۲- SMES به عنوان منبع تغذیه بدون وقفه (UPS)

هنگامیکه SMES بصورت UPS کار می کند، توان اکتیو و راکتیو مورد نیاز بار را برای مواقع بحرانی که توان منبع قطع می گردد را بمنظور ثابت نگه داشتن ولتاژ بار تامین می کند. در این حالت بخاطر حذف سیگنال سنکرون منبع تغذیه AC، فقط اندیس مدولاسیون M متغیر کنترل پذیر خواهد بود. شکل ۵ حلقه کنترل در حالت عملکردی UPS سیستم SMES را

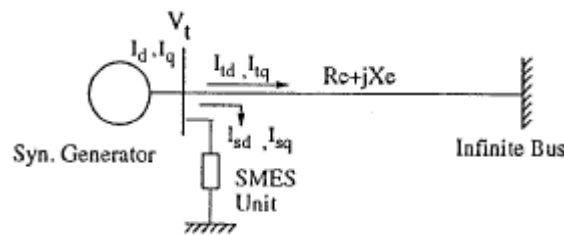
نمایش می دهد. در این شکل، V_{max}^* پیک ولتاژ نامی هر فاز، R_V کنترل کننده PI، I پیک جریان بار و V پیک ولتاژ هر فاز بار می باشند. بازیابی سریع ولتاژ بار با حلقه کنترل شکل ۵، قابل انجام می باشد.



شکل ۵: حلقه کنترل برای کاربرد از نوع UPS

۴- کاربرد SMES در پایدارسازی سیستمهای قدرت

از علل نوسانات در شبکه های قدرت می توان به خطاهای اتصال کوتاه در شینه های قدرت و بارهای موجود در شبکه اشاره نمود. اگر سیستم میرایی مناسب را نداشته باشد، این خطاها ممکن است سبب ناپایداری شبکه قدرت گردند. از راههای افزایش میرایی شبکه قدرت می توان به استفاده از انواع سیستمهای ذخیره ساز انرژی نظیر سیستم باتری، هوای فشرده، انرژی مکانیکی و سیستم ذخیره انرژی ابرسانایی (SMES) در شبکه قدرت اشاره نمود. سیکل کاری محدود در باتریها و ظرفیت محدود جرمهای دوار در سیستمهای Fly Wheel، عملکرد این سیستمها را در عمل با محدودیت مواجه نموده است [8,9,10]. SMES دارای پرپود زمانی سرویس طولانی مدت بوده و بعلت عدم وجود هیچ جز متحرک دارای قابلیت اطمینان بالا می باشد. توان نامی یک واحد SMES مطابق با اندازه توان ژنراتور و انواع اغتشاشات موجود در شبکه قدرت انتخاب می گردد. شکل ۶، ارتباط سیستم SMES با شبکه قدرت را نمایش می دهد. واحد SMES در باس ژنراتور سنکرون قرار داشته و بوسیله یک خط انتقال با امپدانس $R_e + jX_e$ به باس بی نهایت متصل می باشد. واحد SMES می تواند برحسب نیازهای شبکه، توانهای اکتیو و راکتیو از شبکه جذب (مود شارژ) یا به شبکه تحویل نماید (مود دشارژ). SMES ها، می توانند به سیستمهای قدرت نظیر کنترل کننده های بار - فرکانس و پایدارسازی خطوط انتقال اعمال گردند.



شکل ۶: سیستم قدرت و واحد SMES متصل به آن

مطابق با شکل ۳، با کنترل زوایای آتش تریستورها (α_1, α_2) با وجودیکه ولتاژ سلف (V_{sm}) می تواند در محدوده وسیع از مقادیر مثبت و منفی تغییر بنماید، جریان سلف (I_{sm}) در یک جهت جاری می باشد. مطابق با تئوری مبدلها، ولتاژ V_{sm} در قسمت DC مبدل از رابطه

$$V_{sm} = V_{sm0} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) \quad (۴)$$

تعیین می شود که در آن ولتاژ DC ماکزیمم حالت بی باری پلهای ۶ پالسه می باشد. جریان سلف نیز بطریق

$$I_{sm} = \frac{1}{L_{SM}} \int_{t_0}^t V_{sm} d\tau + I_{sm0} \quad (۵)$$

بدست می آید که I_{sm0} جریان اولیه سلف می باشد. در هر زمان توانهای اکتیو و راکتیو تحویل داده شده یا جذب شده توسط SMES از روابط ذیل بدست می آیند:

$$P_{sm} = V_{sm0} I_{sm} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2) \quad (6)$$

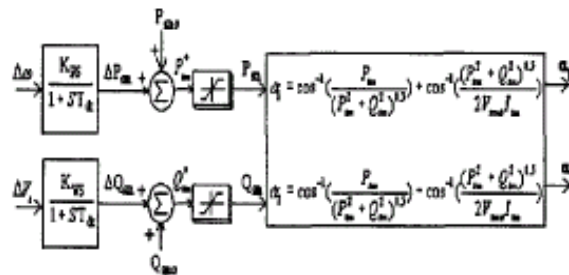
$$Q_{sm} = V_{sm0} I_{sm} (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2) \quad (7)$$

با بکارگیری معادلات (6) و (7)، زوایای آتش مبدل در عملکرد چهار ربعی از روابط

$$\alpha_1 = \cos^{-1} \left(\frac{P_{sm}}{\sqrt{P_{sm}^2 + Q_{sm}^2}} \right) + \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{P_{sm}^2 + Q_{sm}^2}}{2 V_{sm0} I_{sm}} \right) \quad (8)$$

$$\alpha_2 = \cos^{-1} \left(\frac{P_{sm}}{\sqrt{P_{sm}^2 + Q_{sm}^2}} \right) - \cos^{-1} \left(\frac{\sqrt{P_{sm}^2 + Q_{sm}^2}}{2 V_{sm0} I_{sm}} \right) \quad (9)$$

در استفاده از SMES بعنوان پایدار ساز، با توجه به تغییرات سرعت اندازه گیری شده در روتور ژنراتور، توان اکتیو منتقل شده در مبدل (P_{sm})، بصورت پیوسته کنترل می گردد. همچنین بسته به تغییرات ولتاژ ترمینالهای ژنراتور، توان راکتیو انتقالی (Q_{sm}) نیز کنترل می گردد. شکل 7، دیاگرام کنترل همزمان $P - Q$ را با توجه به معادلات (8) و (9) نمایش می دهد. در این شکل انحراف سرعت محور ژنراتور $\Delta\omega$ برای تولید انحراف توان اکتیو ΔP_{sm} و انحراف ولتاژ ترمینال ژنراتور ΔV_t برای تولید انحراف توان راکتیو بکار می روند. توان مرجع ارجاعی به واحد SMES بایستی با در نظر گرفتن توان ظاهری SMES محدود گردد.



شکل 7: کنترل همزمان $P - Q$ در واحد SMES

5- کاربرد ابرساناها در قطارهای مغناطیسی Maglev²

در دهه های اخیر، با توجه به گرانی و مشکلات مربوط به حمل و نقل هوایی، نیاز به یک سیستم سریع حمل و نقل با قابلیت اطمینان بال بیپ از پیش احساس می گردد. از حدود سال ۱۹۷۰ با پیشرفتهایی که در زمینه ابرساناهای دمای پائین و در پی آن ابرساناهای دمای بالا ایجاد شد و همچنین با استفاده از تکنولوژی موتورهای الکتریکی خطی، قطارهایی با سرعت بالا ساخته شد که اصطلاحاً به آنها قطار مغناطیسی یا Maglev گفته شد. این قطار توسط نیروهای الکترومغناطیسی معلق شده

و با سرعت‌های بسیار بالا و قابلیت اطمینان مطلوب می‌تواند حرکت کند. در این قطارها برای تولید نیروهای پیشران، معلق کننده و هدایت کننده از چند سیم پیچ ابررسانا که قابلیت ایجاد آمپر دور بسیار بالا را دارند و با هسته هوا بکار برده می‌شود. [16,17].

۶- کاربرد ابررساناها در ساخت تجهیزات قدرت

توان الکتریکی، توسط ژنراتورها تولید شده و سپس توسط ترانسفورماتورهای قدرت به سطح ولتاژ و جریان مورد نظر تبدیل می‌گردد. این توان توسط خطوط انتقال به فواصل بسیار طولانی صدها کیلومتری منتقل می‌گردد. سپس پس از کاهش ولتاژ به سطح ولتاژ توزیع در مقصد، توسط شبکه توزیع به طیف متنوعی از مصرف کننده‌ها تحویل داده می‌شود [11]. هر یک از عناصر متعارف سیستم قدرت بالقوه می‌تواند با معادل ابررسانای آن جایگزین گردد. علاوه بر کاهش فوق العاده تلفات، ابررساناها می‌توانند وظایف خطیر دیگری نیز انجام دهند که در سیستمهای قدرت معمولی، در مواردی ممکن است مشکل ساز باشد. مثلاً محدود کننده‌های ابررسانا می‌توانند وظیفه مدارشکنهای سرعت بالای شبکه‌های قدرت را با سرعت بیشتر انجام دهند البته نه با قطع جریان بلکه با محدود نمودن آن.

پیشرفت در زمینه کابل‌های ابررسانا، با پیدایش ابررساناهای دمای محیط، حاصل گردیده است. این کابلها در ولتاژهای بالا قابلیت حمل جریانهای چند کیلو ولتی را دارند. کاربرد بیشتر این کابلها در خطوط ولتاژ بالای DC می‌باشد [12]. مطالعه بر روی موتورهای از نوع ابررسانا از سالهای ۱۹۷۰ شروع شده بود. پیشرفت شگرف در این زمینه با ظهور ابررساناهای دما بالا^۳ (HTS) از سال ۱۹۸۶ بوجود آمده است. موتورهای HTS از لحاظ اندازه بسیار کوچک بوده و راندمان بسیار بالایی دارند. این مزایا بواسطه امکان ایجاد میدان مغناطیسی قویتر در موتور می‌باشد. تحقیقات در این زمینه ادامه دارد [13]. همچنین در مورد ژنراتورها، راتورهای ابررسانای اولیه ساخته شده، توانی در حدود 1250 MVA داشتند. با استفاده از تکنولوژی HTS، مسیر بطرف ساخت ژنراتورهای 250 MVA می‌باشد. کشور ژاپن در این زمینه صاحب تکنولوژی بوده و چندین طرح در حال مطالعه دارد [11].

در مورد محدود کننده‌های جریان خطا (FCL)، اولین FCL در حدود ۵۰ سال پیش ساخته شد. بیشترین خطاها، خطاهای یک یا چند فاز به زمین و یا ناشی از اصابت صاعقه می‌باشد. FCL های ولتاژ پائین متنوعی به بازار عرضه شده است. یک FCL ایده ال می‌بایست سریعاً جریان خطا را به سطح دلخواه کاهش داده، قابلیت عملکرد در برابر خطاهای پشت سرهم را داشته باشد و بازیابی جریان سریعی داشته باشد. FCL های HTS واجد تمام این شرایط می‌باشند [14]. همچنین ترانسفورماتورهای HTS دارای مزایا و سودمندیهای زیادی برای سیستم قدرت می‌باشند که عبارتند از: قابلیت اضافه بار شدن با حفظ عمر مفید عایقی، کاهش حجم و وزن و سهولت نصب در سایت. مقدار توان تلفاتی بهترین ترانسفورماتورهای معمولی امروزه % 0.25-0.40 می‌باشد که ترانسفورماتورهای HTS دارای تلفاتی بمراتب کمتر، علاوه بر مزایای ذکر شده می‌باشند. امروزه ترانسهای HTS دارای توانی در حدود 30 MVA می‌باشند [15]. در زمینه ساخت پستهای ابررسانا نیز فعالیتهایی ثبت شده است. اولین مرحله در ایجاد یک پست ابررسانا، ایجاد ترانس قدرت HTS می‌باشد. همچنین کابل‌های HTS سه فاز نیز می‌بایست در نظر گرفته شود. پستهای ابررسانا، ظرفیت توانی بمراتب بیشتر از پستهای معمولی دارند در حالیکه اندازه حجمی آنها، % 50 پستهای معمولی است [11].

³ High Temperature Superconductivity

۷- نتیجه گیری

سیستمهای SMES قابلیت ذخیره و آزادسازی مقادیر بسیار زیاد انرژی الکتریکی را داشته که می توان انرژی ذخیره شده در آنها را برای کاربردهای کیفیت توان و پایدارسازی شبکه های قدرت با راندمان بالا، مورد استفاده قرار داد. قابلیت اطمینان و عمر طولانی بدون هزینه تعمیر و نگهداری زیاد، این سیستمها را به عنوان یک انتخاب مناسب در کاربردهای قدرت معرفی نموده است. توسعه ابرساناهای با درجه حرارت کاری محیط، در افزایش راندمان سیستم SMES مزید بر علت می باشند. مشکلات پیش روی طراحان سیستمهای SMES، شامل ایجاد میدانهای قویتر و یکنواخت تر بوده، بطوریکه بر روی محیط پیرامون خود کمترین تاثیر را بگذارد. همچنین توسعه سیستمهای SMES در محدوده توان پائین که اقتصادی نیز باشد. پیشرفت در تکنولوژی ابرسانایی، به پیاده سازی و ساخت تجهیزات قدرت ابررسانا منجر خواهد گردید که نتیجه آن بهبود قابل ملاحظه عملکرد سیستم قدرت افزایش راندمان کلی آن خواهد بود. تحقیقات جدی تر و وسیع تر در این زمینه و رفع چالشهای موجود در سیستمهای SMES فعلی بخصوص در کشور ما ایران، می تواند استفاده از ابررساناها و کاربرد آنها در صنعت برق را فراگیرتر نماید.

۸- مراجع

- [1]. Stephen D. Feak, " Superconducting Magentic Energy Storage (SMES), Utility Application Studies ", IEEE, Trans. On Power System, 1997.
- [2]. Cesar A. Luongo, " Superconducting Storage Systems: An Overview ", IEEE, Trans. On Magentic, Vol. 32, No. 4, July 1996.
- [3]. K. Juengst, R. Gehring, " 25 MW SMES-Based Power Modulator", IEEE, Trans. On Applied Superconductivity, Vol. 12, No. 1, March 2002.
- [4]. T. sels, C. Dragu, " New Energy Storage Devices for an Improved Load Managing on Distribution Level", IEEE, Porto Power Tech. Conf. Sep. 2001.
- [5]. X. Jiang, Xu Chu, " SMES System for Study on Utility and Customer Power Applicaions", IEEE, Trans. On Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, March 2001.
- [6]. H.C. Tay, M.F. Conlon, " Development of SMES system as a fluctuating load compensator", IEE, Proceedings online no. 19982370, 1998.
- [7]. Xu. Chu, X. Jiang, " SMES Control Algoritms for Improving Customer Power Quality", IEEE, Trans. On Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, March 2001.
- [8]. A. Abu-Siada, W.W.L.Keerthipala, " Application of a Superconducting Magnetic energy Storage Unit to improve the Stability Performance of Power systems", IEEE, Proceedings of 2002 IEEE Canadian Conference, 2002.
- [9]. Y. Shirai, T. Nitta, " On-Line Evaluation of Power System Stability by use of SMES", IEEE, 2002.
- [10]. Y. Ohsawa, Y. Maruoka, H. Takeno, " Determination of Installation Location of SMES for Power system stabilizayion", IEEE, International Symp. on Circuit and Systems, May 28-31, 2000, Switzerland.
- [11]. Hassenzahl, W.V.; "Superconductivity, an enabling technology for 21st century power systems?", Applied Superconductivity, IEEE Transactions on , Volume: 11 Issue: 1 , Mar 2001, Page(s): 1447 -1453.
- [12]. J.O. Willis, "Superconducting Power Transmission Cables", IEEE Power Engineering Review, Vol. 20, no. 8, august 2000, pp 10-14 R.
- [13]. D. Driscoll, V. Dombrovski, "Development Status of superconducting Motors", ibid. pp 12-15.
- [14]. E.M. Leung,"Superconducting fault current limiters", IEEE Power engineering Review, Vol. 20, no. 8, August 2000, pp 15-18.
- [15]. B.W. McConnel, s. Mehta," HTS Transformers", IEEE Power Engineering Review, Vol.20, no. 6, June 2000, pp. 7-11.
- [16]. S. Kalsi; " THE APPLICATION OF HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTORS TO MAGLEV MAGNETS', Applied Superconductivity Magazine, Vol. 3, No. 1-3, pp. 163-168, 1995.

[۱۷]. حسن مقبلی، رامین فرنیاء، " آشنایی با موتورهای خطی و قطارهای معلق مغناطیسی ". ماهنامه فولاد، شماره ۳۵، بهمن ۱۳۷۶.