بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم ابررسانای ذخیره‌ساز انرژی به‌عنوان منبع تولید پراکنده

نگارش

محمد دوائی

استاد راهنما: دکتر پیمان نادری

استاد مشاور: دکتر رضا قندهاری

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی برق– قدرت

مهرماه ۱۳۹۲

باسمه تعالی

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب متعهد می‌شوم کـــه مطالب منـــدرج در ایـن پایان‌نامه/رساله حاصل کار پژوهشی اینجانب است و دستـاوردهای پژوهشی دیگـران که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است، مطابق مقـررات، ارجاع و در فهرست منـابع و مآخذ ذکر گردیده است. این پایان‌نامه/رساله قبلاً برای احراز هیچ مـدرک هم سطـح یا بالاتر ارایه نشده است. در صورت اثبات تخلف (در هر زمان) مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از اعتبار ساقط خواهد شد.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی است.

نام و نام خانوادگی دانشجو

امضاء

چکیده

در سال‌های اخیر، به‌تدریج سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی هم‌چون سیستم ابررسانای ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی (SMES)، به‌عنوان یک گزینه‌ی پیشرفته در کاربردهای تولید پراکنده و توان بالا، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این رساله مدلی تفصیلی برای سیستم SMES به‌عنوان منبع تولید پراکنده ارائه شده است. این مدل براساس SMES مبتنی‌بر VSI بوده و شامل چاپر سه سطحی دو طرفه، لینک DC، اینورتر سه سطحی NPC، فیلتر هارمونیکی LCL و ترانسفورماتور کوپلاژ به شبکه قدرت می‌باشد. این مدل با ارائه مدارهای الکتریکی، استراتژی‌های کلیدزنی و کنترلی هر جزء، مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین در این رساله یک الگوریتم نوین برای کلیدزنی و کنترل چاپر سه سطحی دو طرفه، جهت تغذیه یک اینورتر منبع ولتاژ سه سطحی در سیستم SMES ارائه شده است. کنترل همزمان و مستقل ولتاژ خازن‌های لینک DC، سرعت بالا و محدودسازی فرکانس کلیدزنی از مهم‌ترین ویژگی‌های الگوریتم کلیدزنی پیشنهادی می‌باشد. سیستم SMES در دو وضعیت جدا از شبکه و متصل به شبکه قدرت، به‌ترتیب جهت تغذیه بار محلی و تبادل توان‌های اکتیو و راکتیو با شبکه، به‌کار گرفته شده است. در وضعیت جدا از شبکه، کنترل‌کننده ولتاژ و در وضعیت متصل به شبکه، کنترل‌کننده توان، سیستم SMES را کنترل می‌کنند. دو ساختار، یکی با کنترل‌کننده PI مرسوم و دیگری کنترل در قاب مرجع $d-q$ برای کنترل‌کننده توان پیشنهاد شده است. مدل و الگوریتم‌های کنترلی پیشنهاد شده از طریق شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب/سیمولینک ارزیابی شده است. مطالعات صورت گرفته برروی نتایج حاصله از شبیه‌سازی نشان‌دهنده‌ی اعتبار مدل‌سازی و اثربخشی رویکردهای کنترلی پیشنهاد شده می‌باشد. به‌طوری که، سیستم SMES پیشنهادی همراه با کنترل‌کننده‌های طراحی شده می‌تواند ولتاژ بار محلی در وضعیت جدا از شبکه، و تبادل مستقل و همزمان توان‌های اکتیو و راکتیو در وضعیت متصل به شبکه را کنترل کند.

کلید واژه‌ها : ابررسانای ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی، چاپر سه سطحی دو طرفه، کنترل توان تزریقی

فهرست مطالب

فصل اول : کلیات و مقدمات ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- تاریخچه ۴

۱-۳- کاربردها ۷

۱-۴- مقدمه‌ای بر تولیدات پراکنده ۱۱

۱-۵- اهداف پایان‌نامه ۱۱

۱-۶- مروری بر مطالب فصل‌ها ۱۲

فصل دوم : ساختار پیشنهادی سیستم SMES ۱

۲-۱- مقدمه ۱۴

۲-۲- سیم‌پیچ ابررسانا ۱۸

۲-۳- چاپر سه سطحی دو طرفه ۲۳

۲-۳-۱- ساختار چاپر سه سطحی دو طرفه در سیستم SMES ۲۴

۲-۳-۲- مدهای عملکرد چاپر سه سطحی دو طرفه ۲۶

۲-۳-۳- الگوریتم نوین کنترلی چاپر سه سطحی دو طرفه ۲۹

۲-۳-۳-۱- الگوریتم کلیدزنی چاپر در شرایط اتصال به بار ۳۰

۲-۳-۳-۲- الگوریتم کلیدزنی چاپر در شرایط شارژ از طریق شبکه DC ۳۳

۲-۴- اینورتر سه سطحی منبع ولتاژ ۳۷

۲-۵- فیلتر هارمونیکی LCL ۴۳

۲-۵-۱- طراحی فیلتر LCL ۴۴

۲-۶- کنترل‌کننده ۴۹

۲-۶-۱- کنترل‌کننده ولتاژ ۵۰

۲-۶-۲- کنترل‌کننده توان ۵۲
۲-۶-۲-۱- کنترل‌کننده توان-PI ۵۳
۲-۶-۲-۲- کنترل‌کننده توان-DQ ۵۴
فصل سوم : شبیه‌سازی ۵۷
۳-۱- مقدمه ۵۸
۳-۲- ارزیابی الگوریتم کنترلی پیشنهادی چاپر سه سطحی دو طرفه ۵۹
۳-۲-۱- شروع به تغذیه بار، با ولتاژهای اولیه متفاوت خازن‌ها ۵۹
۳-۲-۲- عملکرد چاپر برای ولتاژهای مرجع متفاوت ۶۱
۳-۲-۳- شارژ عنصر ذخیره‌ساز ۶۲
۳-۳- ارزیابی اینورتر سه سطحی NPC و فیلتر هارمونیکی LCL ۶۳
۳-۴- ارزیابی کنترل‌کننده ولتاژ در وضعیت جدا از شبکه قدرت ۶۷
۳-۵- ارزیابی کنترل‌کننده توان در وضعیت متصل به شبکه قدرت ۶۷
۳-۵-۱- ارزیابی کنترل‌کننده توان-PI ۷۰
۳-۵-۲- ارزیابی کنترل‌کننده توان-DQ ۷۵
۳-۶- لزوم استفاده از کلیدهای ابررسانا در سیستم SMES ۷۸
فصل چهارم : نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۸۲
پیوست‌ها ۸۵

فهرست جداول

جدول ۱-۱ : نمونه‌هایی از کاربردهای عملیاتی سیستم‌های SMES ۱۰

جدول ۲-۱ : مقدار ولتاژ خروجی چاپر سه سطحی دو طرفه در مدهای مختلف و وضعیت کلیدهای متناظر با هر مد ۲۷

جدول ۲-۲ : ویژگی مدهای عملکردی چاپر سه سطحی دو طرفه ۳۱

جدول ۲-۳ : مقایسه توپولوژی‌های اینورتر n سطحی براساس تعداد اجزاء مورد نیاز برای هر ساق ... ۳۸

جدول ۲-۴ : مقدار ولتاژ خروجی هر ترمینال اینورتر NPC با توجه به تغییر موقعیت کلیدهای ۴۰

جدول ۲-۵ : پارامترهای در نظر گرفته شده شبکه و اینورتر جهت طراحی فیلتر LCL ۴۵

جدول پ-۱ : پارامترهای سیستم قدرت آزمون ۸۵

جدول پ-۲ : پارامترهای سیستم SMES ۸۶

جدول پ-۳ : پارامترهای سیستم‌های کنترلی ۸۷

فهرست اشکال

شکل ۲-۱ : ساختار کلی سیستم SMES پیشنهادی ۱۵

شکل ۲-۲ : ساختار تفصیلی سیستم SMES پیشنهادی ۱۷

شکل ۲-۳ : تصویری از سیم‌پیچ ابررسانا، درون محفظه عایق حرارتی همراه با سرماسنج ۱۸

شکل ۲-۴ : سیم‌پیچ SMES از نوع HTS با مشخصات ۱ MVA / ۱ kWh (KEPCO.) ۲۰

شکل ۲-۵ : دو نمونه از پیکربندی سیم‌پیچ ابررسانا ۲۱

شکل ۲-۶ : سیم‌پیچ SMES و مدل چند بخشی آن (مدل حالت گذرا) ۲۲

شکل ۲-۷ : ساختار چاپر سه سطحی دو طرفه، متصل بین سیم‌پیچ ابررسانا و لینک DC ۲۵

شکل ۲-۸ : مدهای عملکردی چاپر سه سطحی دو طرفه و وضعیت کلیدهای متناظر با هر مد ۲۸

شکل ۲-۹ : وضعیت کلیدها و مسیر عبور جریان در مد ۴ چاپر سه سطحی ۲۹

شکل ۲-۱۰ : فلوچارت برنامه اول کنترل‌کننده سیستم کلیدزنی چاپر در شرایط دشارژ ۳۲

شکل ۲-۱۱ : فلوچارت برنامه دوم کنترل‌کننده سیستم کلیدزنی چاپر در شرایط دشارژ ۳۴

شکل ۲-۱۲ : فلوچارت برنامه کنترل‌کننده سیستم کلیدزنی چاپر در شرایط شارژ ۳۶

شکل ۲-۱۳ : پیکربندی اینورتر سه سطحی منبع ولتاژ NPC، متصل به لینک DC ۳۹

شکل ۲-۱۴ : معادل کلیدی هر ساق اینورتر سه سطحی منبع ولتاژ NPC ۴۰

شکل ۲-۱۵ : طرح کنترلی PWM برای یکی از ساق‌های اینورتر سه سطحی NPC ۴۱

شکل ۲-۱۶ : استراتژی تولید الگوی کلیدزنی یک ساق اینورتر NPC براساس تکنیک PWM ۴۲

شکل ۲-۱۷ : شکل موج‌های ولتاژ (فاز و خط به خط) خروجی اینورتر سه سطحی NPC ۴۳

شکل ۲-۱۸ : مدار معادل تکفاز فیلتر LCL ۴۵

شکل ۲-۱۹ : رابطه بین ضریب میرایی اعوجاج جریان و نسبت اندوکتانس‌های فیلتر ۴۷

شکل ۲-۲۰ : دیاگرام بود تابع انتقال فیلتر LCL برای مقاومت‌های میرایی (R_f) متفاوت ۴۸

شکل ۲-۲۱ : حالات مختلف کنترل‌کننده سیستم SMES و پارامترهای کنترلی در هر حالت ۵۰

فهرست اشکال

شکل ۲-۲۲ : دیاگرام بلوکی سیستم SMES و کنترل‌کننده ولتاژ در وضعیت جدا از شبکه ۵۱

شکل ۲-۲۳ : دیاگرام بلوکی ساختار کنترل‌کننده ولتاژ در سیستم SMES..... ۵۱

شکل ۲-۲۴ : دیاگرام بلوکی سیستم SMES و کنترل‌کننده توان در وضعیت متصل به شبکه ۵۳

شکل ۲-۲۵ : دیاگرام بلوکی ساختار کنترل‌کننده توان-PI پیشنهادی در سیستم SMES..... ۵۴

شکل ۲-۲۶ : بردارهای ولتاژ و جریان باس PCC در قاب مرجع $d-q$ چرخان..... ۵۵

شکل ۲-۲۷ : دیاگرام بلوکی ساختار کنترل‌کننده توان-DQ پیشنهادی در سیستم SMES ۵۶

شکل ۳-۱ : ولتاژ خازن‌ها و ولتاژ لینک DC با $V_{C1\,ref} = V_{C2\,ref} = V_{dc}/2$..... ۶۰

شکل ۳-۲ : تغییرات جریان سیم‌پیچ SMES و بخشی از تغییرات مد چاپر ۶۰

شکل ۳-۳ : ولتاژ خازن‌ها و ولتاژ لینک DC با $V_{C1\,ref} = 800\,V,\ V_{C2\,ref} = 1200\,V$..... ۶۱

شکل ۳-۴ : ولتاژ خازن‌ها و ولتاژ لینک DC با درنظر گرفتن مقادیر تصادفی برای لینک DC..... ۶۲

شکل ۳-۵ : تغییرات جریان سیم‌پیچ SMES..... ۶۲

شکل ۳-۶ : جریان و ولتاژ سیم‌پیچ SMES به هنگام شارژ از طریق منبع DC..... ۶۳

شکل ۳-۷ : شکل موج‌های ولتاژ خط به خط و جریان فاز a، قبل و بعد از فیلتر LCL..... ۶۵

شکل ۳-۸ : طیف هارمونیکی شکل موج‌های ولتاژ و جریان، قبل و بعد از فیلتر LCL..... ۶۵

شکل ۳-۹ : شکل موج‌های ولتاژ و جریان فاز a و طیف هارمونیکی جریان در باس PCC..... ۶۶

شکل ۳-۱۰ : مجموعه ولتاژها و جریان‌های سه‌فازه در باس PCC..... ۶۶

شکل ۳-۱۱ : اندازه ولتاژ فاز a و توان‌های اکتیو و راکتیو خروجی از باس PCC..... ۶۸

شکل ۳-۱۲ : تغییرات ولتاژ لینک DC و دامنه ولتاژ و جریان بار محلی متصل به SMES..... ۶۸

شکل ۳-۱۳ : دیاگرام تک‌خطی سیستم قدرت آزمون همراه با سیستم SMES..... ۶۹

فهرست اشکال

شکل ۳-۱۴ : میزان توان‌های اکتیو و راکتیو انتقالی بین سیستم SMES و شبکه قدرت، بخشی از ولتاژ باس PCC و جریان تزریقی به سیستم قدرت از طریق این باس، تغییرات اندازه ولتاژ باس PCC و تغییرات جریان سیم‌پیچ SMES ۷۱

شکل ۳-۱۵ : میزان توان‌های اکتیو و راکتیو انتقالی بین سیستم SMES و شبکه قدرت، بخشی از ولتاژ باس PCC و جریان تزریقی به سیستم قدرت از طریق این باس، تغییرات اندازه ولتاژ باس PCC و تغییرات جریان سیم‌پیچ SMES ۷۳

شکل ۳-۱۶ : تبادل توان‌های اکتیو و راکتیو بین SMES و شبکه به‌صورت همزمان و مستقل ۷۴

شکل ۳-۱۷ : تغییرات ولتاژ لینک DC، فاز ولتاژ خروجی اینورتر و جریان سیم‌پیچ SMES ۷۵

شکل ۳-۱۸ : تبادل توان‌های اکتیو و راکتیو بین SMES و شبکه با کنترل‌کننده توان-DQ ۷۶

شکل ۳-۱۹ : تغییرات مولفه‌های I_d و I_q جریان تزریقی از باس PCC ۷۷

شکل ۳-۲۰ : تغییرات مولفه‌های V_d و V_q ولتاژ باس PCC ۷۷

شکل ۳-۲۱ : تغییرات ولتاژ لینک DC، فاز ولتاژ خروجی اینورتر ۷۸

شکل ۳-۲۲ : میزان توان‌های اکتیو و راکتیو انتقالی بین سیستم SMES و شبکه قدرت و میزان انرژی الکتریکی تزریقی سیستم SMES به شبکه قدرت از طریق باس PCC ۸۰

شکل ۳-۲۳ : میزان انرژی الکتریکی جذب شده از سیم‌پیچ SMES در دو حالت غیرابررسانایی و ابررسانایی کلیدهای قدرت در شرایط عملکردی سیستم SMES ۸۱

فصل اول

کلیات و مقدمات

۱-۱- مقدمه

مفهوم ابررسانای ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی[۱] (SMES) در اوایل دهه ۱۹۷۰، با ساخت اولین سیستم براساس فن‌آوری ابررسانایی معرفی گردید. گردش جریان DC در یک سیم‌پیچ ابررسانا و ذخیره انرژی در میدان مغناطیسی آن براساس تلفات صفر، مفهوم ابررسانای ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی می‌باشد. با این حال ثابت شده است که پیاده‌سازی این مفهوم به‌صورت موثر و اقتصادی با چالش‌های زیادی همراه است. استفاده گسترده و پذیرش SMES به‌شدت به توسعه فن‌آوری‌هایی چون مواد و تکنیک‌های تولید ابررسانا، سیستم‌های برودتی و تجهیزات الکترونیک قدرت وابسته است.

به‌طورکلی، سیستم SMES، انرژی را در میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط جریان DC، جاری در سیم‌پیچی از جنس مواد ابررسانا که توسط یک سیستم برودتی در دمای ابررسانایی نگه داشته شده است، ذخیره می‌کند. اجزای اصلی یک سیستم SMES، یک سیم‌پیچ ابررسانا، سیستم بهبوددهنده توان[۲] (PCS) و سیستم برودتی همراه با سرماسنج جهت نگه داشتن سیم‌پیچ در دمای پایین برای حفظ خاصیت ابررسانا در سیم‌پیچ، می‌باشد. توسعه مواد ابررسانا، بزرگترین تأثیر را بر روی SMES خواهد داشت. این امر می‌تواند در تقاضا توان الکترونیک و الزامات خنک‌کننده کاهش قابل توجهی ایجاد کند. با این حال، توسعه در این زمینه کاری دشوار است و نیاز به یک سرمایه‌گذاری وسیعی دارد. اخیراً پیشرفت‌هایی در توسعه سیستم‌های برودتی با قابلیت اطمینان بالا و ارزان قیمت حاصل شده است، که نگرانی خنک‌کردن واحد SMES را به شکل قابل توجهی کاهش داده است.

۱- Superconducting Magnetic Energy Storage

۲- Power Conditioning System

PCS در سیستم‌های SMES واحدی است، که انتقال توان بین سیم‌پیچ ابررسانا و سیستم متناوب را مدیریت می‌کند. براساس پیکربندی‌های مختلف، PCSها در دو گروه طبقه‌بندی می‌شوند: اینورتر منبع ولتاژ[1] (VSI) و اینورتر منبع جریان[2] (CSI). PCSهای مبتنی‌بر VSI و CSI می‌توانند هم توان اکتیو و هم توان راکتیو را به‌طور مستقل و به‌طور همزمان کنترل کنند. مدیریت توان راکتیو با جریان بسیار کم و یا حتی صفر سیم‌پیچ، تنها با VSI ممکن است. از سوی دیگر، CSI قادر به تزریق جریان‌های راکتیو بالایی می‌باشد. علاوه‌بر این، با توجه به حضور یک چاپر در VSI، کنترل VSI معمولاً پیچیده‌تر از CSI می‌باشد [1]. اما VSI دارای مزایای بسیاری در مقایسه با CSI می‌باشد. برای مثال، نرخ توانی تجهیزات الکترونیک قدرت که در اینورتر VSI استفاده می‌شود، بسیار کم‌تر از CSI می‌باشد. در نتیجه تلفات توان و کلیدزنی کاهش می‌یابد. همچنین، زمانی که چاپر سیستم VSI خارج از سرویس باشد، می‌توان از این سیستم به‌عنوان جبران‌کننده‌های همزمان استاتیک[3] (استتکام) استفاده کرد. برای شرایط مشابه، می‌تواند انرژی بیشتری را در SMES مبتنی‌بر VSI نسبت به CSI ذخیره‌سازی کرد [2].

الکترونیک قدرت برای سیستم SMES می‌تواند پیچیده، غیرقابل اطمینان و هزینه‌بر باشد. با توجه به مطالعه تکمیل شده توسط آزمایشگاه‌های ملی ساندیا [3]، مهم‌ترین پیشرفت‌ها برای سیستم SMES از توسعه الکترونیک قدرت منحصراً مناسب برای SMES بدست می‌آید. این مطلب به‌عنوان*'' اولویت اصلی پژوهش و توسعه برای سیستم‌های SMES ''* تلقی می‌شود. بنابراین مزایای زیادی در تحقیق و توسعه PCS برای سیستم SMES وجود دارد. زیرا که PCS نقش کلیدی در عملکرد سیستم SMES ایفا می‌کند. کارایی PCS بستگی به عوامل مختلفی از جمله ساختار و تجهیزات آن دارد. ساختار مناسب و کارآمد PSC، که شامل عواملی چون هزینه پایین، سرعت بالا، تلفات انرژی کم و متناسب با زمینه‌ی کاربرد سیستم SMES می‌باشد، باعث بهبود عملکرد سیستم SMES و گسترش زمینه‌های

---

۱ - Voltage Source Inverters

۲ - Current Source Inverters

۳ - STATic synchronous COMpensators

کاربردی آن می‌شود. بنابراین، ساختار PCS در سیستم SMES یکی از مهم‌ترین عوامل در سودمندی یک سیستم SMES می‌باشد. در نتیجه، ضرورت ارائه‌ی مدلی از سیستم SMES، همراه با ساختاری مناسب برای PCS احساس می‌شود. از این رو، در این رساله سیستم SMES با ساختاری پیشنهادی، مدل‌سازی شده است. این مدل براساس SMES مبتنی‌بر VSI بوده و شامل چاپر سه سطحی دو طرفه، لینک DC، اینورتر سه سطحی NPC[1]، فیلتر هارمونیکی LCL و ترانسفورماتور کوپلاژ به شبکه قدرت می‌باشد. همچنین در این رساله یک الگوریتم نوین برای کلیدزنی و کنترل چاپر سه سطحی دو طرفه، جهت تغذیه اینورتر منبع ولتاژ سه سطحی در سیستم SMES ارائه شده است. با استفاده از الگوریتم کلیدزنی پیشنهادی، می‌توان ولتاژ هر یک از خازن‌های اینورتر را به‌صورت مستقل کنترل کرد. درنهایت، با ارائه نتایج شبیه‌سازی مدل پیشنهادی سیستم SMES، میزان کارایی ساختار PCS و روش‌های کنترلی پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفته است.

۱-۲- تاریخچه

از زمانی که خاصیت ابررسانایی در سال ۱۹۱۱ کشف شد، توجهات بسیاری به‌سبب تأثیر عظیم آن بر زندگی انسان، به این ویژگی جلب گردید. این توجه منجربه پیش‌بینی انواع کاربردی‌های سودمند و بسیاری از امکانات برای استفاده از خاصیت ابررسانایی در زمینه‌های مختلف در آینده شده است. از آنجا که خاصیت ابررسانایی ایجادکننده مقاومت صفر در عناصر است، طبیعی است که این ویژگی در تعدادی از فن‌آوری‌ها در زمینه برق به‌کار گرفته شود. یکی از امیدوارکننده‌ترین کاربردی‌ها در این زمینه، یک نوع از ذخیره‌ساز انرژی تحت عنوان ابررسانای ذخیره‌ساز انرژی مغناطیسی می‌باشد. ایده SMES در صنعت برق از دورانی آغاز شد که برای آینده، از سویی تولید برق هسته ای و از سوی دیگر از رده خارج شدن سوخت‌های فسیلی تصور می‌شد. SMES یک سلف است، که می‌تواند مقدار زیادی از انرژی الکتریکی را در میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط جریان DC که در سیم‌پیچ آن جاری

---

۱ - Neutral Point Clamped

است، بدون تلفات ذخیره کند. سیستم SMES را می‌توان به‌عنوان یک جایگزین برای تولید انرژی الکتریکی استفاده کرد. به‌طوری‌که انرژی مازاد الکتریکی در طی ساعات غیر پیک در SMES ذخیره شده و در طی ساعات پیک دوباره به سیستم تغذیه‌کننده بازگردانده می‌شود. این مسئله به‌طور مستقیم بهبود کارایی نیروگاه‌های موجود در سیستم قدرت را در پی‌دارد. به‌طور مشابه، سیستم SMES برای پایدارسازی سیستم قدرت بسیار مفید است. یک مثال خوب در این زمینه، شبکه قدرت در آلاسکا می‌باشد. که در آن بار به‌طور ناگهانی تغییر می‌کند، اما از شبکه قدرت ایالات متحده جدا است. برای ایجاد پایداری در شبکه قدرت آلاسکا، این شبکه باید به اندازه کافی نیروگاه‌های قدرت آماده به‌کار برای تغییرات بار داشته باشد. با این حال، این روش برای حل این مشکل بسیار هزینه‌بر است. با استفاده از سیستم SMES، نیروگاه آماده به‌کار می‌تواند درطی ساعات کم باری شبکه استراحت کند، و سیستم SMES برای جبران تغییرات بار در وضعیت آماده به‌کار باشد. در هنگام تغییرات بار، سیستم SMES بلافاصله بر تغییرات بار غلبه می‌کند، تا زمانی که نیروگاه راه‌اندازی شده و بتواند بار را تأمین کند. سیستم SMES با انجام این کار، نه تنها می‌تواند شبکه قدرت را بدون تنزل عملکرد پایدار کند، بلکه می‌تواند در هزینه‌های عملیاتی صرفه‌جویی کند.

۷۵ سال بعد از کشف اولیه خاصیت ابررسانایی، این ویژگی به مرحله جدیدی وارد شد. در اواخر سال ۱۹۸۶، مرکز تحقیقات IBM در سوئیس دومین نسل از خاصیت ابررسانایی، که تحت عنوان ابررسانایی نوع دوم شناخته می‌شود، را معرفی کرد. ابررسانایی نوع دوم می‌تواند خواص خود را تا دما ۷۷ درجه کلوین حفظ کند. در نتیجه صرفه‌جویی فوق‌العاده‌ای در هزینه‌های سیستم برودتی حاصل می‌شود. از این رو، ابررسانایی نوع دوم به‌عنوان ابررسانای دما بالا نامگذاری شد، در حالی که ابررسانایی نوع اول تحت عنوان ابررسانای دما پایین شناخته می‌شود. جالب است که ابررسانای دما بالا در دمای اتاق هادی نیست، بلکه یک عایق است. هنگامی که آن تا زیر دمای بحرانی (T_c) سرد می‌شود، ناگهان به یک ابررسانا تبدیل می‌گردد. هنگامی که این کشف اعلام شد، صنایع وسیعی در سراسر جهان به سرعت پتانسیل عظیم این فن‌آوری جدید را به رسمیت شناختند. محققان در سراسر

جهان نیز شروع به توسعه و به چالش کشیدن این فن‌آوری کردند. اخیراً، ابررسانایی از جنس منیزیم دی بورید (MgB_2)، با دمای بحرانی ۳۹ درجه کلوین، که یک ابررسانای دما متوسط می‌باشد، در سال ۲۰۰۱ کشف شده است [4]. امروزه موادی ساخته شده‌اند که قادر هستند در دمای فریزرهای معمولی خانگی خاصیت ابررسانایی داشته باشند. اما این ابررساناهای جدید توسط نظریه‌پردازان قابل توضیح نیستند. پس بدون داشتن شناخت کامل از مواد، پژوهشگران به‌جای استفاده از دانش علمی خود، بیشتر بر شانس تکیه می‌کنند. اخیراً در آزمایشگاهی در ژاپن جشنی گرفته شد. آنان در پایان جشن، مواد ابررسانای خود را با نوشیدنی‌های خودشان آغشته کردند. و در کمال تعجب، متوجه شدند که نوشیدنی‌های قرمز به‌طور چشم‌گیری عملکرد ابررسانا را بهبود می‌بخشند [5].

پس از ظهور اولیه خاصیت ابررسانایی در سال ۱۹۱۱، اولین تحقیقات فعال و پویا بر روی سیستم‌های SMES در اوایل دهه ۱۹۷۰ توسط وزارت انرژی آغاز شد. نتیجه‌ی این پژوهش به آزمایش یک سیم‌پیچ ۳۰MJ SMES با مبدل توان ۱۰MW، در سازمان نیروی بونیویل (BPA) در تیکومای واشنگتن منجر شد. در این پژوهش یک سیستم SMES برای تعدیل نوسانات توان در ناحیه اقیانوس آرام طراحی و آزمایش گردید [6]. عملکرد این واحد SMES برای یک سال مورد بررسی قرار گرفت. در طول این مدت، بیش از یک میلیون چرخه شارژ/دشارژ صورت گرفت و با موفقیت توانایی این واحد برای ایجاد پایداری در شبکه ۵۰۰kV نشان داده شد. مرحله دوم پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه سیستم‌های SMES توسط وزارت دفاع آمریکا در سال ۱۹۸۷ شروع شد. وزارت دفاع، SMES را به‌عنوان یک نامزد بالقوه برای یک منبع توان جهت ارائه توان ضربه‌ای، مورد نیاز برای سیستم‌های دفاع زمینی، انتخاب کرد و برنامه‌ای برای توسعه این فن‌آوری طرح‌ریزی نمود. اولین هدف این برنامه، به نام برنامه مدل آزمایشی مهندسی[۱]، به‌منظور توسعه یک سیستم SMES انجام گرفت تا بتواند ۴۰۰MW توان ضربه‌ای، به مدت ۱۰۰ ثانیه با زمان خیز و نزول یک ثانیه را فراهم کند. همچنین این سیستم باید قادر به تأمین ۵۰MW توان به مدت دو تا سه ساعت برای تسطیح بار باشد. هدف نهایی

۱ - Engineering Test Model

این پژوهش، توسعه یک سیستم SMES که در محدوده‌ی ۱۰۰۰MWh تا ۵۵۰۰MWh، با قابلیت دشارژ ۱۰۰۰MW بود. متاسفانه، این برنامه در سال ۱۹۹۲ به‌دلیل کاهش بودجه‌ی کنگره متوقف شد. وزارت دفاع امریکا یک برنامه تحقیقاتی جدید، که به بررسی مزایای استفاده از سیستم SMES در ناوهای هواپیمابر می‌پردازد، را آغاز کرد. این برنامه توسط دفتر تحقیقات نیروی دریایی، در مرکز سیستم‌های الکترونیک قدرت در سال ۱۹۹۵ آغاز شد. اخیراً نیز یک برنامه پژوهشی SMES با تمرکز بر استفاده تجاری، برای ایجاد پایداری در خطوط انتقال سیستم قدرت آلاسکا آغاز شده است [2].

یک بار دیگر، موقعیتی پیش آمده است تا تحقیقات در زمینه‌ی الکتریسیته دنیای ما را متحول کند. البته اگر موادی کشف بشوند که در دمای عادی خاصیت ابررسانایی داشته باشند. ما هر روز بیش از پیش به الکتریسیته وابسته می‌شویم. زمانی که بتوانیم از ابررساناها استفاده کنیم، به دنیای جدیدی از الکتریسیته قدم خواهیم گذاشت. و این دوران قطعاً یکی از جذاب‌ترین دوران‌های اکتشافات و اختراعات انسانی خواهد بود. نسل جدیدی از تجهیزات، وسایل و تکنولورژی شکل خواهد گرفت و بار دیگر دنیای ما را متحول خواهد کرد.

۱-۳- کاربردها

چندین کاربرد مختلف برای SMES در صنعت برق، براساس دو سطح مختلف وجود دارد. در یکی از سطح‌ها، SMES را می‌توان برای پایداری انتقال، جبران افت ولتاژ، جبران‌کننده توان راکتیو، منبع توان ضربه‌ای و منبع تغذیه بدون وقفه[۱] استفاده نمود. در سطح دیگر، SMESها برای کاربردهای سطح سیستم تولید، شامل کنترل فرکانس، ذخیره چرخان، راه‌اندازهای سریع[۲]، پایداری دینامیک و تسطیح بار[۳]، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

SMESها می‌توانند برای ذخیره انرژی در ساعات خارج از اوج تقاضا و تأمین توان در طول ساعات اوج

۱ - Uninterruptable Power Supply
۲ - Black Starters
۳ - Load Leveling

تقاضا سیستم، مورد استفاده قرار گیرند. در نتیجه، نیاز به سوخت‌های فسیلی گران قیمت برای تأمین توان تکمیلی در زمان‌های اوج تقاضا کاهش می‌یابد [7]. اغلب نیروگاه‌های برق برای تأمین توان مورد نیاز در طول زمان اوج تقاضا در ظرفیت کامل کار می‌کنند. و به دلایل اقتصادی، حتی در طول دوره کم باری سیستم، کار در ظرفیت کامل خود را ادامه می‌دهند. در این رابطه، SMES را می‌توان بجای دیگر سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، از جمله سیستم‌های باتری، آب پمپ شده[۱] و یا هوای فشرده[۲]، مورد استفاده قرار داد. مقایسه‌ای تفصیلی بین فرم‌های دیگر ذخیره انرژی و SMES در مطالعات موسسه تحقیقات برق (EPRI) در سال ۱۹۷۶ انجام گرفته است [8]. علاوه‌بر این، تجزیه و تحلیل‌های صورت گرفته برای وزارت انرژی توسط گروه بکتل در [9]، پیشنهاد کرده است که SMES می‌تواند تقریباً ۱۵٪ از ظرفیت پایه بار تحت استفاده را بازیابی کند.

در سال‌های اخیر، به‌تدریج سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی هم‌چون SMES به‌عنوان یک گزینه پیشرفته، در کاربردهای توان بالا مورد علاقه قابل توجهی قرار گرفته‌اند. با پیشرفت‌های سریع در تکنولوژی ابررسانا، طراحی، ساخت و راه‌اندازی با موفقیت سیستم‌های SMES در ابعاد معقول فراهم شده است. می‌توان از ویژگی‌های اصلی سیم‌پیچ SMES از جمله پاسخ سریع در محدود چند میلی‌ثانیه، قدرت بالا در حدود صدها مگاوات و بازده بالا، به‌منظور ذخیره انرژی اضافی سیستم برای جایگزینی و یا تولید رزرو در طول مدت پیک سیستم به‌طور موثری استفاده کرد. به‌وسیله ترکیب تکنولوژی ابررسانا با انواع تجهیزات مدرن الکترونیک قدرت مانند مبدل‌های قدرت مبتنی‌بر کنترل[۳] (فکتس)، سیستم قدرت می‌تواند از مزایای انعطاف‌پذیر SMES و کنترل‌پذیری بالا ادوات الکترونیک قدرت با هدف کنترل و بهینه‌سازی عملکرد سیستم الکتریکی، بهره بگیرد. مطالعه قبلی بر روی عملکرد دینامیکی مبدل‌های قدرت مبتنی‌بر ادوات فکتس توأم با سیستم SMES، استفاده از استتکام به‌عنوان مناسب‌ترین کاربرد جهت کنترل فرکانس اولیه[۴] پیشنهاد کرده‌اند [10]. SMES به‌عنوان یک

---

۱ - Pumped-Hydro

۲ - Compressed-Air

۳ - Flexible Alternating Current Transmission Systems

۴ - Primary Frequency Control

دستگاه فکتس، چندین سال است که در سایت‌های صنعتی در سراسر ایالات متحده آمریکا، ژاپن، اروپا و آفریقا جنوبی، جهت پشتیبانی از ولتاژ انتقال و تأمین کیفیت توان قابل قبول برای مشتریانی که نسبت به نوسانات کیفیت توان آسیب‌پذیر هستند، مورد استفاده قرار گرفته است.

برای سال‌های متمادی، تلاش‌های زیادی برای یک ناو هواپیمابر تمام الکتریکی جدید صورت گرفت. این کشتی تمام الکتریکی می‌تواند سیستم هسته‌ای را حذف کرده و ناو هواپیمابر را کوچک‌تر، سبک‌تر، سریع‌تر و ارزان‌تر سازد. همچنین ویژگی‌هایی چون کنترل‌های پیشرفته‌تر و بهره‌برداری مناسب از تجهیزات ناوبری و کیفیت توان بالاتر حاصل می‌شود. این کشتی تمام الکتریکی نیازمند ویژگی‌هایی چون کنترل پیچیده، پشتیبانی از توان ضربه‌ای، ارائه‌ی توان متناوب با کیفیت توان قابل قبول، قابل اطمینان بالا و کنترل بارهای مهم و حیاتی می‌باشد. توسعه یک SMES به‌صورت چند وظیفه‌ای، گزینه‌ی مناسبی برای رسیدگی به همه این نیازها می‌باشد. از این رو، وزارت دفاع امریکا یک برنامه تحقیقاتی جدید را آغاز کرده است، که به بررسی مزایای استفاده از سیستم SMES در ناوهای هواپیمابر می‌پردازد. این برنامه توسط دفتر تحقیقات نیروی دریایی، در مرکز سیستم‌های الکترونیک قدرت در سال ۱۹۹۵ آغاز شده است [11].

در صنایعی مانند نساجی و خودرو، بهره‌برداری مستمر از سیستم تولید بسیار مهم است. لحظات قطع برق یا کیفیت ضعیف توان می‌تواند باعث خاموشی موقت و در نتیجه ایجاد هزینه‌های میلیونی شود. مطالعه موسسه تحقیقات برق حاکی از این است که، هزینه‌های ناشی از قطعی کوتاه مدت برق و مسائل کیفیت توان در صنعت ایالات متحده حدود ۲۹ میلیارد دلار در سال است. SMES یک مکانیزم ذخیره‌سازی انرژی، برای ارائه پشتیبانی مستمر در این صنایع حیاتی است و هم‌اکنون در حال استفاده در برخی از نقاط می‌باشد. به‌عنوان مثال، شرکت ابررسانای آمریکا دارای یک محصول معمولی است، که می‌تواند ۱MW را برای ۱ ثانیه ارائه دهد. زمان پاسخ‌دهی این سیستم ظرف مدت ۵ میلی‌ثانیه می‌باشد. در حال حاضر ۹ واحد از این سیستم در سراسر جهان نصب شده است [11].

در سال ۲۰۰۰، شرکت خدمات عمومی ویسکانسین[۱] (WPS) شش واحد ابررسانای D-SMES را برای برطرف کردن اختلالات ولتاژی در سیستم حلقه شمالی WPS نصب کرد.

در [11]، امکان استفاده از SMES همراه با مخزن برودتی برای ذخیره و بازیافت انرژی ترمز در خودروهای هیبریدی[۲] بررسی شده است. و عملکرد خودروهای هیبریدی و الکتریکی همراه با یک SMES بررسی شده است. در این پژوهش، سناریوهایی مبتنی‌بر استفاده از مایع ذخیره شده در سیستم برودتی به‌عنوان سوخت گازی، برای ایجاد نیروی مضاعف تحت شرایط مورد نیاز در کنار سیستم SMES، مورد بحث قرار گرفته است. در جدول ۱-۱ نمونه‌هایی از کاربردهای عملیاتی سیستم‌های SMES در نقاط مختلف جهان آورده شده است.

جدول ۱-۱ : نمونه‌هایی از کاربردهای عملیاتی سیستم‌های SMES

Industry Operational Dates	Customer/ Load / Location	Power Supplied
March 1993 – Present	CYANCO / Ammonia Production Furnace / Winnemucca, NV	730 kVA, 1.0MJ
March 1995 – Present	Brookhaven National Laboratory / Accelerator / Upton, NY	1.4 MVA, 2.4MJ
March 1995 – Present	McClellan U.S. Air Force Base / Computer-Controlled Semiconductor Test Apparatus / Sacramento, CA	750 kVA, 2.4MJ
July 1996 – Present June 1997 – Present	Tinker U.S. Air Force Base / Computer Data Center / Tinker, OK	4 of 2.4 MJ each
Oct. 1996 – Jan. 1998	ESKOM Utility / South Africa	1.4 MVA
April 1997 – Present	SAPPI – Stanger Paper Mill / Paper Machine / Stanger, South Africa	750 kVA, 2.4MJ
May 1997 – June 1999 April 1998 – June 1999	Amerimark, Owens Corning Plastics / Plastic Film Extruder / Fairbluff, NC	750 kVA, 2.4MJ 1400 kVA, 4MJ
May 1999	STEWEAG Utility / Substation Equipment / Gliesdorf, Austria (Relocated from ESKOM)	1.4 MVA
June 1999	CP&L Solution Center / Demonstration Test Stand / North Carolina	1.4 MVA

۱ - Wisconsin Public Service Corporation

۲ - Hybrid vehicles