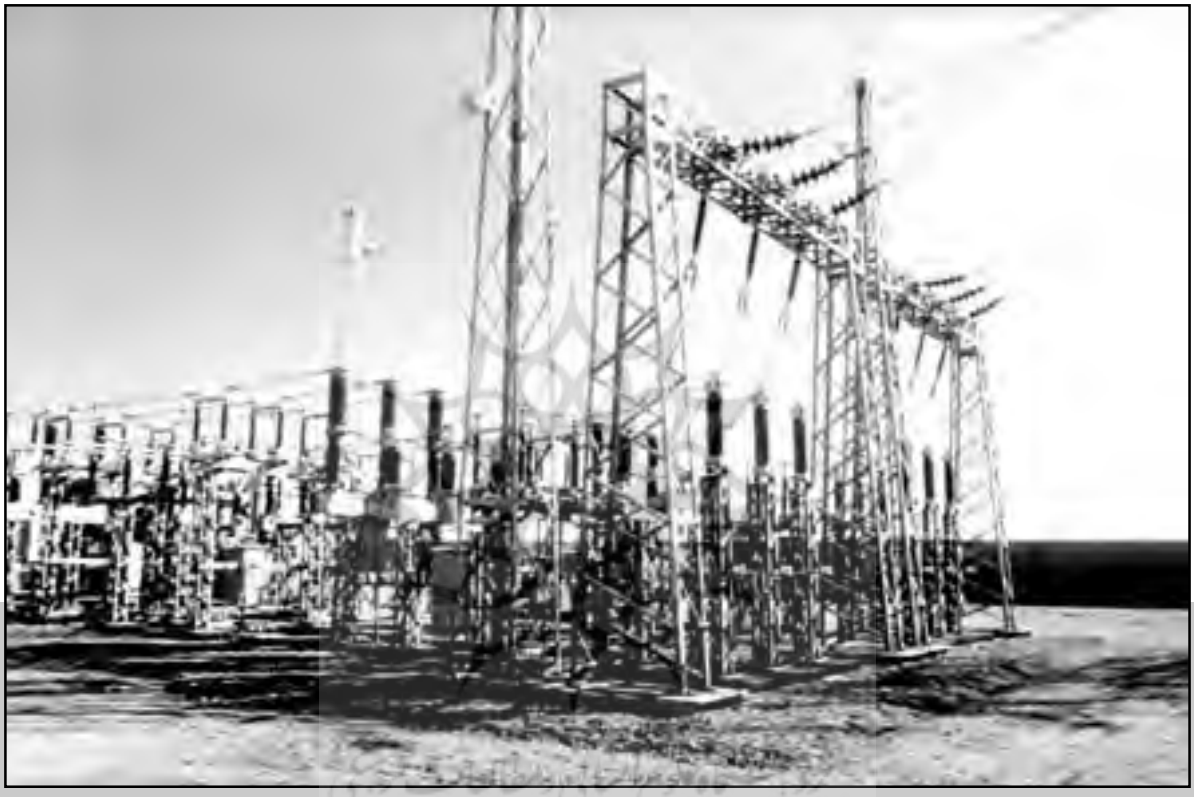
ابررسانایی، پایان اتلاف انرژی الکتریکی

حسین حیدری -رضا شریفی
مرکز تحقیقات فشارقوی و مواد مغناطیسی دانشگاه علم و صنعت ایران



چکیده:
امروزه صرفه‌جویی در مصرف انرژی، یکی از مهم‌ترین نیازهای کشورهای صنعتی است. بودجه‌های زیادی صرف تحقیقات در زمینه کشف راه‌های تازه و موثرتر برای یافتن انرژی‌های ارزان و با ریسک کمتر می‌شود. ابررسانایی به وضعیتی از فلزات، آلیاژها و برخی سرامیکها گفته می‌شود که در دماهای پائین اتفاق می‌افتد. برپایهٔ یکی از خصوصیتهای ابررسانایی، بارهای الکتریکی می‌توانند بدون تلفات گرمایی از یک رسانا عبور کنند و با توجه به مقاومت تقریبا صفر، ابررساناها درشبکه‌های توزیع و انتقال و همچنین ماشینهای الکتریکی قابل استفاده هستند. در سالهای اخیر بیش از ده هزار پژوهشگر با صرف هزینه‌های زیاد، تحقیقات خود را روی موضوع ابررسانایی و کاربردهای آن در علوم مختلف متمرکز ساخته‌اند. ابررسانایی با نقشی که می‌تواند در زمینه صرفه جویی در تولید و انتقال انرژی الکتریکی بازی کند، در آینده بشر نقشی اساسی خواهد داشت و به همین دلیل برخی قرن ۲۱ را قرن انقلاب ابررسانایی دانسته‌اند که منجر به بروز تحولات بزرگی در عرصه علم و تکنولوژی خواهد شد. البته در کشور ما هنوز فعالیتهای پژوهشی در حوزه ابررسانایی بسیار محدود و منحصر به فعالیتهای صرفاً دانشگاهی است که امید است با توسعه کاربردهای جدید سرمایه‌گذاریهای قابل توجهی در حوزه ابررسانایی کاربردی در زمینه مهندسی برق، مهندسی الکترونیک، مهندسی پزشکی، مهندسی مواد، تکنولوژی هسته‌ای و علوم دیگر صورت پذیرد. در این مقاله شرح مختصری از خصوصیتهای مواد ابررسانا ارائه می‌شود. سپس با بررسی مهمترین خواص الکتریکی و مغناطیسی ابررساناها، کاربرد مواد ابررسانا در سیستمهای انرژی الکتریکی مورد بحث قرار گرفته و نتایج حاصل از توسعه ساخت تجهیزات ابررسانا در مصرف انرژی ارائه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: مواد ابررسانا، تلفات انرژی الکتریکی، کاربردهای ابررسانایی در مهندسی برق

۱. مقدمه:

در سال ۱۹۰۸ هایک کمرلینگ اونز هلندی در دانشگاه لیدن موفق به تولید هلیوم مایع گردید و با استفاده از آن توانست به درجه حرارت حدود یک درجه کلوین (۲۷۲- درجه سانتیگراد) برسد. یکی از اولین بررسی‌هایی که اونز با دسترسی به این درجه حرارت پایین انجام داد، مطالعه تغییرات مقاومت الکتریکی فلزات بر حسب درجه حرارت بود. وی که با پلاتینیوم کار می‌کرد متوجه شد که سرد شدن نمونه پلاتینیوم با اندکی کاهش در مقاومت الکتریکی آن همراه است که متناسب با خلوص نمونه متغیر بود. در آن زمان خالص‌ترین فلز قابل دسترس جیوه بود و اونز در تلاش برای به دست آوردن رفتار فلز خیلی خالص، مقاومت جیوه خالص را در دماهای مختلف اندازه گرفت. اونز دریافت که اگر جیوه در هلیم مایع یعنی حدود ٤/٢ درجه کلوین قرار گیرد، مقاومت الکتریکی آن از بین می‌رود. همچنین این گذار ناگهانی به حالت بی‌مقاومتی، فقط مربوط به خواص فلزات نمی‌شد و حتی در جیوه ناخالص نیز اتفاق می‌افتاد. اونز به این نتیجه رسید که پایین تر از ٤ درجه کلوین، جیوه به حالت دیگری از خواص الکتریکی که کاملا با حالتهای شناخته شده قبلی متفاوت بود رسیده است. این حالت تازه ابررسانایی (Superconductivity) نام گرفت. البته رساناهایی مانند طلا، نقره و مس نیز هستند که مقاومت ویژه‌شان حتی در دمای صفر درجه کلوین نیز به صفر نمی‌رسد. اونز سپس یک حلقه سربی را در دمای ۷ درجه کلوین ابررسانا نمود و قوانین فارادی را بر روی آن آزمایش کرد و مشاهده نمود وقتی با تغییر شار در حلقه جریان القایی تولید شود، حلقه سربی بر عکس رساناهای دیگر رفتار می‌نماید. یعنی بعد از قطع میدان تا زمانی‌که در حالت ابررسانایی قرار دارد، جریان الکتریکی را تا مدت بسیار زیادی یعنی حدود ۱۰۲۳ سال حفظ می‌کند. به عبارت دیگر بعد از به وجود آمدن جریان الکتریکی ناشی از میدان مغناطیسی در یک سیم ابررسانا، سیم حتی بدون میدان خارجی یا مولد الکتریکی نیز می‌تواند حامل جریان باشد. یافته اونز منجر به اعطای جایزه نوبل فیزیک در سال ۱۹۱۳ به وی شد.

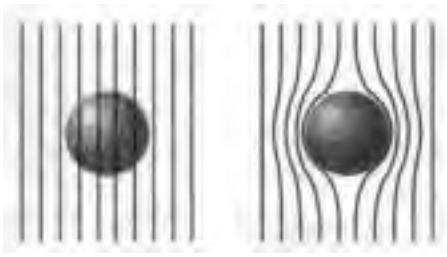
حدود ۷۰ سال پیشرفتهای انجام شده برای افزایش دمای بحرانی به کندی انجام گرفت. از سال ۱۹۱۱ تا سال ۱۹۷۳ یعنی حدود ٦٢ سال دانشمندان تنها توانستند دمای بحرانی را از ٤ درجه به ۲۳/۳ درجه کلوین که کمی بیشتر ۲۰/۳ کلوین یعنی دمای ئیدروژن مایع است برسانند اما کار با ئیدروژن مایع نیز پرهزینه، مشکل‌آفرین و خطرساز بود و کاربردهای ابررسانا را محدود می‌ساخت. سرانجام در ۲۷ ژانویه سال ۱۹۸٦ جرج بدنورز و آلکس مولر در یک مؤسسه تحقیقاتی در سوئیس موفق به کشف پدیدهٔ ابررسانایی در سرامیکی از نوع اکسید مس و شامل لانتانوم و باریوم شدند. دمای بحرانی نمونه ساخته شده، حدود ۳۵ درجه کلوین بود و آنها نیز به خاطر کشف ابررساناهای دمابالا (HTS) موفق به دریافت جایزهٔ نوبل در سال ۱۹۸۷ شدند. طی مدت زمان کوتاهی پس از کشف ابررسانایی دما بالا، دسترسی به دماهای بحرانی بالاتر به سرعت توسعه یافت. اندکی بعد از کشف اکسید مس حاوی باریوم و لانتانوم، در نتیجه همکاری پاول چو از دانشگاه هوستون و مانگ کنگ وو از دانشگاه آلاباما، عضو جدیدی از خانواده مواد ابررساناهای دما بالا با جایگزینی ایتریوم به جای لانتانوم کشف شد. این ماده سرامیکی (که دمای بحرانی آن به ۹۲ درجه کلوین می‌رسید)، به YBCO معروف شد. با توجه به نقطه جوش نیتروژن که ۷۷ درجه کلوین در فشار یک اتمسفر است، برای سرد شدن این ابررسانا تا دمای بحرانی استفاده از نیتروژن مایع هم امکانپذیر بود که بسیار ارزان‌تر و بی‌خطرتر از ئیدروژن و هلیم مایع بود. بنابراین فقط در طی یک سال از کشف اصلی، دمای انتقال به حالت ابررسانایی افزایش سه برابر داشت و واضح بود که انقلاب ابررساناها شروع شده است.

در طول شش سال بعد، چند خانواده دیگر از ابررساناها کشف شدند که شامل ترکیبات شامل تولیوم (Tl) و جیوه (Hg) بوده و به ترتیب دارای حداکثر دمای بحرانی حدود ۱۲۰ و ۱٦۰ درجه کلوین می‌باشند. به صورت تجربی معلوم شده است اگر ماده ابررسانا به صورت مکانیکی تحت فشار قرار گیرد، دمای بحرانی ابررسانا کمی تغییر می‌کند. تحقیقات صورت گرفته تا سال ۲۰۰۵ منجر به ساخت ابررساناهایی شده است که در فشار بالا و دمای حدود ۱٦۵ درجه کلوین (۱۰۸- درجه سانتیگراد) ابررسانا می‌شوند با توجه به کاربردهای مختلف ابررساناها، بسیاری از تلاشها بر افزایش دمای عملکرد ابررساناها تا دستیابی به دمای اتاق (Room Temperature) متمرکز شده است. بر اساس تحقیقات انجام شده، اخیراً سعید سلطانیان به همراه یک گروه علمی در استرالیا ابررسانایی ساخته‌اند که بالاترین رکورد را در میان ابررسانا دارد. این ابررسانا به شکل سیم یا نواری از جنس دی برید منیزیم (با پوششی از آهن است و امکان انعطاف برای ساخت تجهیزات مختلف الکتریکی را داراست.)

۲. خصوصیات مهم ابررساناها

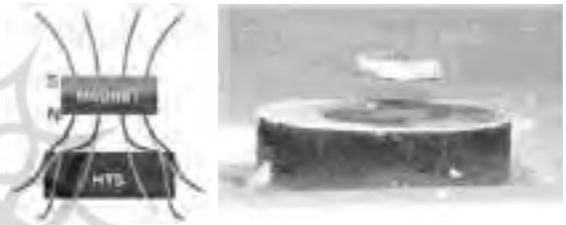
۱. خصوصیات الکتریکی: امروزه صرفه‌جویی در مصرف انرژی، یکی از مهم‌ترین نیازهای کشورهای صنعتی است. بودجه‌های زیادی صرف تحقیقات در زمینه کشف راه‌های تازه و موثرتر برای یافتن انرژی‌های ارزان و با ریسک کمتر می‌شود. برپایهٔ این پدیده، بارهای الکتریکی می‌توانند بدون تلفات گرمایی از یک رسانا عبور کنند. بنابراین ابررسانایی با نقشی که می‌تواند در زمینه صرفه جویی در تولید و انتقال انرژی الکتریکی بازی کند، در آینده بشر نقشی اساسی خواهد داشت و به همین دلیل در سالهای اخیر بیش از ده هزار پژوهشگر با صرف هزینه‌های زیاد، تحقیقات خود را روی موضوع ابررسانایی و کاربردهای آن در علوم مختلف متمرکز ساخته‌اند. با توجه به مقاومت تقریباً صفر، ابررساناها درشبکه‌های توزیع و انتقال و همچنین ماشینهای الکتریکی قابل استفاده هستند. این خاصیت باعث می‌شود که اگر جریانی در یک ابررسانا ایجاد شود، بدون کاهش قابل توجهی برای مدت طولانی برقرار بماند. همینطور شدت جریان عبوری از ابررسانا نیز به علت فقدان افت اهمی بسیار بالاست. برای مثال آلیاژ نیوبیوم و تیتانیوم که در درجه حرارت ٤/٤ کلوین به حالت ابررسانایی می‌رسد قادر به عبور جریان ۲۰۰۰ آمپر بر میلیمتر مربع در شدت میدان ۵ تسلا است. این چگالی صد بار بیشتر از چگالی جریان در سیمهای مسی معمولی است. البته در صورت افزایش چگالی جریان از حد معینی، ابررسانا در وضعیت مقاومتی قرار می‌گیرد و خصوصیت ابررسانایی را از دست خواهد داد. جریان یا چگالی جریانی که ابررسانا می‌تواند از خود عبور دهد و خاصیت ابررسانایی را از دست ندهد به جریان بحرانی یا چگالی جریان بحرانی معروف است.

۲. خصوصیات مغناطیسی: خواص ابررسانایی در مواد، علاوه بر دمای محیط و شدت جریان عبوری، به میدان مغناطیسی هم بستگی دارد. یعنی حتی اگر جسم در دمایی پایین‌تر از حد ابررسانایی باشد، وقتی میدان مغناطیسی از میزان مشخصی بیشتر باشد، خاصیت ابررسانایی از بین خواهد رفت. شدت این میدانها برای آلیاژ نیوبیوم و تیتانیوم (NbTi) به حدود ۱۰ تسلا نیز می‌رسد. شدت میدان مغناطیسی در جهت از بین بردن خاصیت ابررسانایی عمل می‌کند. میدان بحرانی به شدت میدانی اشاره دارد که ابررسانا خاصیت خود را در آن شدت میدان از دست می‌دهد. بعد از کشف ابررساناها، تا چند سال تصور می‌شد رفتار مغناطیسی ابررسانا مانند رساناهای کامل است. اما در سال ۱۹۳۳ مایسنر و اوشنفلد دریافتند اگر ماده مورد آزمایش قبل از ابررسانا شدن در میدان مغناطیسی باشد، شار از آن عبور می‌کند ولی وقتی در حضور میدان به دمای بحرانی برسد و ابررسانا گردد دیگر هیچ‌گونه شار مغناطیسی از آن عبور نخواهد کرد و تبدیل به یک دیامغناطیس کامل می‌شود که شدت میدان (B) درون آن صفر خواهد بود.



شکل ۱. اثر مایسنر و تفاوت میدانهای مغناطیسی برای ماده ابررسانا در T<Tc (راست) و T>Tc (چپ)

در اثر پدیده مایســنر اگر یک آهنربا روی ماده ابررســانا قرار گیرد، روی آن شــناور می‌ماند. در شکل شماره ۲ یک آهنربای استوانه‌ای روی یک قطعه ابررســانا که توسط نیتروژن خنک شده شــناور است. علت شناور ماندن، اثر مایسنر است که براساس آن خطوط میدان مغناطیسی امکان عبور از ابررسانا را نیافته و چنانکه مشــاهده می‌شود، ابررسانا قرص مغناطیسی را شناور نگه می‌دارد.



شکل ۲. شناوری مغناطیسی در اثر پدیده مایسنر

۳. علت پدیده ابررسانایی

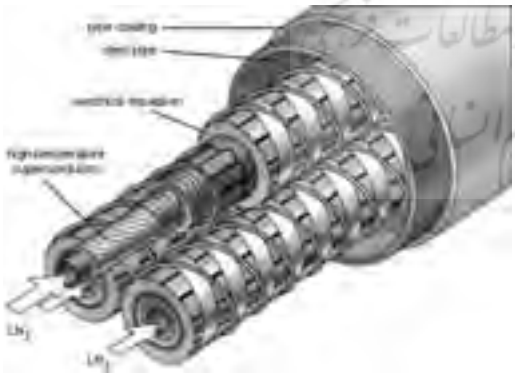
با وجود این که پدیده ابررســانایی در دهه اول قرن بیســتم کشــف شد، هنوز هم تحقیقات زیــادی هم از لحاظ نظری، برای یافتن نظریه جامعی که همه جنبه های ابررســانایی را در بر داشــته باشد و هم از لحاظ تجربی برای یافتن موادی که در دماهای بالاتر خاصیت ابررسانایی داشته باشند، ادامه دارد. تاکنون هیچ نظریه فیزیکی جامعی نتوانسته است به بیان دقیق علت خاصیت ابررسانایی سرامیکها بپردازد. اما درمورد ابررساناهای معمولی، در دهه ۱۹۵۰ سه فیزیکدان آمریکایی به نامهای جان باردین، لئون نیل کوپر و جان رابرت شریفر نظریه‌ای دادند که با نام آنها به نظریه BCS معروف شد. براساس این نظریه در ابررساناهای معمولی، الکترونهایی که در رسانایی جریان نقش دارند، جفت‌هایی تشــکیل می‌دهند و متقابلاً با عواملی که باعث مقاومت الکتریکی می‌شــوند، مقابله می‌کنند. ابداع تئوری BCS نیز برای سه دانشمند آمریکایی جایزه نوبل ۱۹۷۲ را به ارمغان آورد.در سال ۱۹۶۲ جوزفسون انگلیسی در ۲۲ سالگی آزمایشاتی روی جفت الکترونهای کوپر انجام داد که منجر به مشاهده و اعلام پدیده‌ای شد که خاصیت تونل‌زنی یا اثر جوزفسون نام گرفت. بر اساس اثر جوزفســون، درصورتیکه دو قطعه ابررســانا توسط یک عایق بسیار نازک (حدود یک نانومتر) به یکدیگر متصل شوند، جفت الکترونهای کوپر می‌توانند از عایق عبور نمایند. مقدار جریان الکتریکی ایجاد شده به ولتاژ اتصال و میدان مغناطیسی وابسته است. ارائه تئوری مزبور برای جوزفسون و دو دانشمند دیگر یعنی لئو ایزاکی و ایوار گیاور که فعالیتهای مشابهی در بررسی پدیده تونل زنی داشتند جایزه نوبل ۱۹۷۳ را به ارمغان آورد.

در ســال ۲۰۰۳ آلکســی آبریکوزوف و ویتالی گینزبورگ به خاطر بسط تئوری ابررســانایی همراه با آنتونی لگت برنده جایزه نوبل فیزیک شدند. به تازگی هم پژوهشــگران فرانســوی خاصیت جدیدی را در ابررســاناها پیدا کرده‌اند که قبلاً در هیچ نظریه‌ای پیش‌بینی نشده بود. محققان فرانسوی بلوری ســاخته بودند که در دمای ۰/۰۴ درجه کلوین ابررسانا می‌شد و وقتی شدت میدان مغناطیســی به بیشتر از ۲ تسلا می‌رسید، این خاصیت از بین می‌رفت. یکی از پژوهشگران این گروه، از روی کنجکاوی، شدت میدان مغناطیسی را باز هم بیشتر کرد. وقتی شدت میدان به ۱۲ تسلا رسید، بلور دوباره ابررسانا شــد. وقتی میدان باز هم بالاتر رفت، این خاصیــت دوباره از بین رفت. این گزارش توجه بســیاری از فیزیکدانان حالت جامد را برانگیخته است چرا که هیــچ توضیح خاصی برای ایــن پدیده وجود ندارد. با توجــه به موارد گفته شده، به نظر می‌رسد که میدان مغناطیسی متغیر باعث ایجاد رفتارهای جالب پیش‌بینی نشده در ابررساناها می‌شود. البته باید توجه داشت که ابررسانایی یک خاصیت کاملاً کوانتمی است و به سادگی نمی‌توان وضعیت پیش آمده در این آزمایش را توصیف کرد.

۴. کاربردهای مختلف ابررساناها

با توجه به خصوصیتهای الکتریکی و مغناطیســی ابررساناها، تجهیزات مختلفی ســاخته شــده و پروژه‌های متعدد تحقیقاتی نیز برای توسعه کاربرد آنها در زمینه‌های گوناگون در دســت انجام است. در این بخش به مهمترین کاربردهای ابررسانا پرداخته می‌شود.

۱. سیمها و کابلهای ابررسانا: کشف متحول کننده ابررساناهای دما بالا در ســال ۱۹۸۶ منجر به تحول و تولید نوع جدیدی از کابلها در سیســتمهای قدرت شــد. نخســتین کابل ابررســانا به طول یک متر در سال ۱۹۹۲ ساخته شد. در سال ۲۰۰۰ از یک قطعه ۱۲۰ متری کابل ابررسانا برای انتقال توان در میشیگان استفاده شد. امروزه در ایالات متحده، اروپا و ژاپن رقابت سختی بر روی تجارت تولید آینده کابلهای ابررسانائی وجود دارد. قابلیت هدایت جریان برق در کابلهای HTS بالغ بر ۱۰۰ بار بیشتر از هادیهای آلومینیومی و مسی متداول می‌باشــد و بنابراین اتلاف انرژی در اثر مقاومت که درحدود ۸ تا ۱۰ درصد کل انرژی تولیدی است، تقریباً به صفر می‌رسد. اندازه، وزن و مقاومت این نوع کابلها از کابلهای معمولی بهتر بوده و امروزه تولیدکنندگان تجهیزات الکتریکی در سراســر دنیا سعی دارند با اســتفاده از تکنولوژی HTS باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش ظرفیت و قابلیت اطمینان سیستمهای قدرت شوند.



شکل ۳. کابلهای ابررسانا

۲. ترانســفورماتورهای ابررسانا: تلفات ترانســفورماتورها شامل دو بخش تلفات مســی در ســیم‌پیچها و تلفات آهنی در هسته است. استفاده از مواد ابررســانا در ســیم‌بندی ترانســفورماتورها باعث حذف تلفات مسی و ۵۰٪ کاهش در تلفات کل، وزن و ابعاد ترانسفورماتور نسبت به انواع متداول ترانســفورماتورهای روغنی شده و به علاوه تأثیر قابل توجهی نیز در افزایش بــازده، کاهش افت ولتــاژ و افزایش ظرفیت اضافه بار ترانســفورماتور دارد. اســتفاده از ترانسفورماتورهای ابررســانا با توجه به حجم کم و عدم استفاده

از روغن برای خنک‌سازی، نقش قابل ملاحظه‌ای در بهبود فضای شهری و کاهش هزینه‌های زیست محیطی خواهد داشت. از سال ۱۹۹۹ و با تولید یک ترانسفورماتور یک مگاولت آمپر که به ساخت نمونه ۵ مگاولت آمپر ۲۶/۴ به ۴/۲ کیلوولتی منجر شد، توجه بیشتری به ساخت ترانسفورماتورهای ابررسانا شده و امروزه مؤسسات زیادی در زمینه ساخت ترانسفورماتورهای ابررسانا فعال هستند.

شکل ٤. ترانسفورماتور ابررسانا

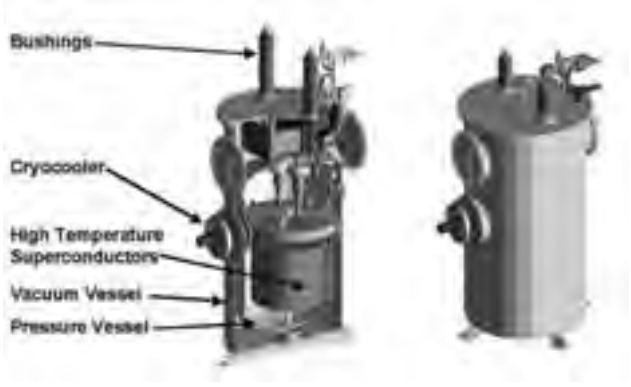
۳. موتورها و ژنراتورهای ابررسانا: درصورت استفاده از سیمهای ابررسانا به جای سیمهای مسی در روتور ماشینهای القایی، تلفات، حجم، وزن و قیمت آنها کاهش قابل ملاحظه‌ای خواهد داشت و با افزایش بازده، صرفه‌جویی قابل توجهی در انرژی الکتریکی صورت می‌گیرد. کویل ژنراتورهای سنکرون نیز با مواد ابررسانای سرامیکی قابل ساخت می‌باشد که منجر به افزایش قابل توجهی در بازده ژنراتور خواهد شد. به علاوه تکنولوژی ابررسانا امروزه در ساخت کندانسورهای سنکرون نیز کاربرد دارد. کندانسورهای ابررسانا دارای بازده بیشتر، هزینه نگهداری کمتر و قابلیت انعطاف بهتری هستند. اولین موتور جریان مستقیم ابررسانایی در سال ۱۹۹۰ ساخته شد. ٦ سال بعد از ابررسانا برای ساخت یک موتور ۲۰۰ اسب بخار استفاده شد و در سال ۲۰۰۰ نیز موتور ۷۵۰ کیلووات آزمایش گردید. گفته شده است کابلهای ابررسانا تا سال ۲۰۱۳، ترانسفورماتورهای ابررسانا تا سال ۲۰۱۵، موتورهای ابررسانا تا سال ۲۰۱۸ و ژنراتورهای ابررسانایی تا سال ۲۰۱۹ حدود ۵۰٪ بازار برق را در به تصرف درآورند.

شکل ۵. کویل ژنراتور ابررسانا و موتور ۵۰۰۰ اسب بخار

٤. ذخیره‌سازهای مغناطیسی انرژی (SMES): در سیستم قدرت بین قدرتهای الکتریکی تولیدی و مصرفی تعادل لحظه‌ای برقرار است و هیچگونه ذخیره انرژی در آن صورت نمی‌گیرد. بنابراین تولید شبکه ناچار به تبعیت از منحنی مصرف است که غیر اقتصادی می‌باشد. ابررسانای ذخیره کننده انرژی مغناطیسی وسیله‌ای است که برای ذخیره کردن انرژی، بهبود پایداری سیستم قدرت و کم کردن نوسانات قابل استفاده است. این انرژی توسط میدان مغناطیسی که توسط جریان مستقیم ایجاد می‌شود ذخیره می‌شود. ویژگی ابررسانایی سیم پیچ نیز موجب می‌شود که راندمان رفت و برگشت فرایند ذخیره انرژی بسیار بالا و در حدود ۹۵٪ باشد. معمولاً واحدهای ابررسانایی ذخیره انرژی را در دو مقیاس ظرفیت بالا یعنی حدود ۱۸۰۰ مگ اژول برای تراز منحنی مصرف، و ظرفیت پایین (چندین مگا ژول) به منظور افزایش میرایی نوسانات و بهبود پایداری سیستم می‌سازند. مهم ترین قابلیت SMESجداسازی و استقلال تولید از مصرف است که این امر مزایای متعددی از قبیل بهره برداری اقتصادی، بهبود عملکرد دینامیکی و کاهش آلودگی را به دنبال دارد.

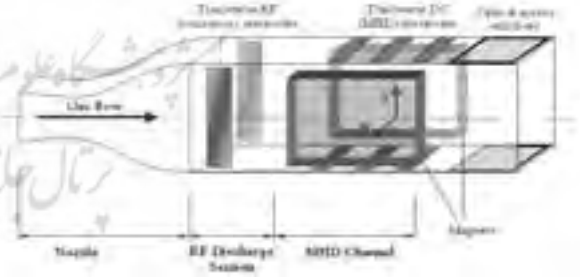
شکل ٦. تصویر یک ذخیره‌ساز ابررسانایی ۲ مگاژول

۵. محدودسازهای جریان خطا (FCL): علاوه بر موارد گفته شده، محدودسازهای ابررسانائی جریان خطا نیز رده تازه‌ای از وسایل حفاظتی سیستم قدرت را ارائه می‌کنند که قادرند شبکه را از اضافه جریانهای خطرناکی که باعث قطعی پر هزینه برق و خسارت به قطعات حساس سیستم می‌شوند حفاظت نمایند. با رشد و گسترش شبکه‌های برق، به قدرت اتصال کوتاه شبکه نیز افزوده می‌شود. تولید جریانهای خطای بزرگتر، ازدیاد گرمای حاصله ناشی از عبور جریان القائی زیاد در ژنراتورها، ترانسفورماتورها و سایر تجهیزات و همچنین کاهش قابلیت اطمینان شبکه را در پی دارد. اما اگر به روشی بتوان پس از آشکارسازی خطا، جریان را محدود نمود، از نظر فنی و اقتصادی صرفه‌جویی قابل توجهی صورت می‌گیرد. محدودکننده‌های جریان اتصال کوتاه در حالت عادی، مقاومت کمی در برابر عبور جریان از خود نشان می‌دهند ولی پس از وقوع اتصال کوتاه و در لحظات اولیه شروع جریان، مقاومت آنها یکباره بزرگ شده و از بالا رفتن جریان اتصال کوتاه جلوگیری می‌کنند. محدودکننده‌های ابررسانا در شرایط بهره‌برداری عادی سیستم یک سیم‌پیچ با خاصیت ابررسانایی بوده ولی به محض وقوع اتصال کوتاه و افزایش جریان از یک حد معینی (جریان بحرانی) سیم‌پیچ مربوط مقاومت بالایی از خود نشان می‌دهد و به همین دلیل جریان خطا کاهش می‌یابد. عمل فوق در زمان کوتاهی انجام می‌پذیرد و نیاز به سیستم کشف خطا نمی‌باشد. برآورد اولیه بخش ابر رسانائی مؤسسه تحقیقات قدرت الکتریکی (EPRI) نشان می‌دهد که استفاده از محدودسازهای ابررسانائی جریان یک بازار فروش با درآمد حدود ۳ تا ۷ میلیارد دلار در ۱۵ سال آینده به وجود خواهد آورد.



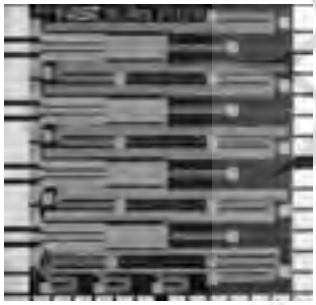
شکل ۷. محدودسازهای ابررسانایی جریان خطا

٦. ژنراتورهای هیدرودینامیک مغناطیسی: اصول کلی ژنراتورهای هیدرودینامیک مغناطیسی (MHD) که از سال ۱۹۵۹ پژوهشهایی برای تولید برق به وسیله آنها شروع شده و هنوز ادامه دارد، بر این اساس است که جریان گاز پلاسما (بسیار داغ) یا فلز مذاب از میان میدان مغناطیسی قوی عبور داده می‌شود. با عبور گاز داغ یا فلز مذاب، در اثر میدان مغناطیسی بسیار قوی موجود، یونهای مثبت و منفی به سمت الکترودهایی که در بالا و پایین جریان گاز پلاسما یا فاز مذاب قرار دارند، جذب می‌شوند و مانند یک ژنراتور جریان مستقیم، تولید الکتریسیته را باعث می‌شوند. قدرت الکتریکی این ژنراتور جریان مستقیم با اینورترهای الکترونیک قدرت، به برق جریان متناوب تبدیل و به شبکه متصل می‌شود. سیم‌پیچهای بزرگ ابررسانا که از مواد ابررسانای متعارف مانند آلیاژ نیوبیوم تیتانیوم ساخته شده‌اند برای تولید میدانهای مغناطیسی بسیار قوی مناسب و قابل استفاده است. اگر فاصله دو الکترود ۰/۱ متر، سرعت یونها ٤۰۰ متر بر ثانیه و میدان مغناطیسی ۵ تسلا باشد، ولتاژ خروجی ۲۰۰ ولت خواهد بود و در طول کانال ٦ متری و با قطر یک متر، ٤۰ مگاوات انرژی قابل تولید است. مزیت اصلی ژنرتورهای MHD وزن نسبتاً کم آنها در مقایسه با ژنراتورهای متعارف است که استقبال از کاربرد آنها را در صنایع هوایی و دریایی موجب شده است.



شکل۸. اصول عملکرد و یک نمونه ساخته شده از ژنراتورهای هیدرودینامیک‌مغناطیسی

۷. سوئیچهای ابررسانا: با تغییر در شدت میدان مغناطیسی، امکان تغییر در وضعیت جسم ابررسانا از ابررسانایی به مقاومتی و برعکس امکانپذیر است. بنابراین از مواد ابررسانا جهت انجام سوئیچینگ یا کلیدزنی نیز می‌توان بهره گرفت. تحقیقات اولیه در این زمینه از اواخر دهه ۱۹۵۰ میلادی آغاز شد و کوششهایی برای استفاده از سوئیچهای ابررسانا در مدارها و حافظه کامپیوترهای بزرگ صورت گرفت. باک در سال ۱۹۵٦ مداری با نام کرایوترون شامل یک سیم‌پیچ نیوبیوم با دمای بحرانی ۹/۳ درجه کلوین و هسته‌ای از سیم تانتالوم با دمای بحرانی ٤/٤ درجه کلوین معرفی نمود که با توجه دمای ٤/۲ درجه کلوین هلیوم مایع، امکان تغییر وضعیت سیم تانتالوم در اثر ایجاد جریان الکتریکی و درنتیجه میدان مغناطیسی در سیم‌پیچ نیبیوم وجود داشت. با توسعه دانش نیمه‌هادی، توجه به سوئیچهای ابررسانا کاهش یافت اما حجم و تلفات کمتر، و سرعت بالاتر تراشه‌های ابررسانا نسبت به تراشه‌های نیمه‌هادی، استفاده از سلولهای کرایوترونی و جایگزینی ابررسانا به جای مدارهای مسی را برای ساخت ابرکامپیوترهای بسیار سریع و کم تلفات، حتی با وجود پیشرفتهای صنعت نیمه‌هادی توجیه‌پذیر می‌سازد. علاوه بر سلولهای کرایوترونی که با سرعت ۰/۱ میکروثانیه در ساخت حافظه و تراشه‌های الکترونیک قابل استفاده است، از اتصالات جوزفسون که مبنای عملکرد آنها، اثر تونل‌زنی است نیز برای ساخت سوئیچهای بسیار سریع و با سرعت ۰/۱ نانوثانیه (فرکانس ۱۰ گیگاهرتز) استفاده شده اما درمورد تکنولوژی ساخت آنها به تعداد زیاد، پژوهشها ادامه دارد.



شکل۹. یک تراشه ابررسانا با ابعاد ۱×۱ سانتیمتر و سرعت ۱۸/۵ گیگاهرتز که حاوی ٦٤٤۰۷ اتصال جوزفسون است

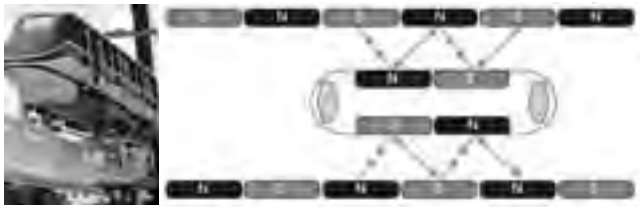
۸. کاربرد ابررساناها در سیستمهای اندازه‌گیری: با توجه به خصوصیتهای الکتریکی و مغناطیسی ابررساناها از جمله تلفات ناچیز و دقت بالا، به استفاده از ابررساناها در ابزارهای اندازه‌گیری نیز توجه زیادی شده است. به دلیل مقاومت الکتریکی بسیار کم، حساسیت گالوانومترهای ابررسانایی در حدود ۱۰ پیکوولت است. با ساخت اسلاگ (SLUG) که شامل یک سیم نیوبیوم با پوشش آلیاژ ابررسانای قلع+ سرب است گالوانومترهایی برای سنجش جریان با حساسیت ۰/۱ میکروولت نیز ساخته شده است و به علاوه با استفاده از تکنولوژی اسکواید (SQUID) نیز که شامل دو نیم استوانه ابررسانا با اتصال ضعیف است، دستگاههایی برای سنجش شدت میدان مغناطیسی ساخته شده‌اند که ٤ برابر دقیق‌تر از دستگاههای متداول هستند. از مدارهای کرایوترون برای تقویت سیگنالهای بسیار کوچک و اندازه‌گیری آنها می‌توان کمک گرفت. ساخت بولومترهای بسیار حساس برای اندازه‌گیری شدت تابش نور با توجه به وابستگی قابل ملاحظه افزایش مقاومت نسبت به دما در گذر از فاز ابررسانایی امکانپذیر شده است. حساسیت یک بولومتر ابررسانا به ابعاد ۲×۳ میلیمتر که می‌تواند شدت تابش را اندازه بگیرد، حدود یک پیکووات است که برای آشکارسازهای پرتوهایی مانند مناسب می‌باشد. از افزایش قابل توجه

(تا ۵ هزار برابر) ضریب رسانایی حرارتی فلزات در وضعیت ابررسانایی، می‌توان برای ساخت شیرهای حرارتی کمک گرفت. با توجه به فرکانس کاری بسیار بالا، شتاب‌دهنده‌های ابررسانایی برای پژوهشهای هسته‌ای نیز ساخته شده‌اند. ساخت مغناطیسهای تحقیقاتی ابررسانایی برای تشخیص ساختار مولکولها در مواد شیمیایی آلی و وضعیت کوانتومی الکترونها در پژوهشهای فیزیک حالت جامد نیز مفید است.

شکل ۱۰. دستگاه اندازه‌گیری طیف مغناطیسی

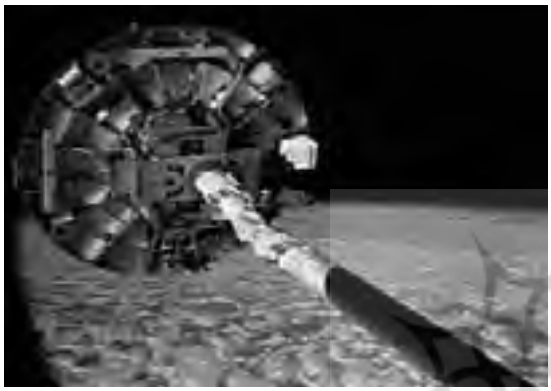
۹. کاربرد ابررسانا در مخابرات: اتصالات جوزفسون برای ساخت گیرنده‌ها و فرستنده‌های فونونی با فرکانسهای بسیار بالا نیز قابل استفاده هستند. فرکانس کار تجهیزات مخابراتی ابررسانا می‌تواند تا صدها گیگاهرتز و با حداقل تلفات برسد که قابل مقایسه با فرستنده‌ها و گیرنده‌های متداول نیست. علاوه بر فرستنده‌ها و گیرنده‌های فونونی، آشکارسازهای میکروویو نیز با ابررساناها ساخته شده‌اند که قادرند ۰/۳ پیکووات را با فرکانس ۷۰ گیگاهرتز تشخیص دهند.

۱۰. قطارهای شناور مغناطیسی: چنانکه گفته شد بر اثر پدیده مایسنر، ابررسانا میدان مغناطیسی را عبور نمی‌دهد و یک عنصر مغناطیسی می‌تواند روی ابررسانا معلق بماند. از این خاصیت در ساخت قطارهای شناور مغناطیسی موسوم به MAGLEV استفاده شده است. چنانکه در شکل مشاهده می‌شود، کویل ابررسانا در داخل قطار قرار می‌گیرد و ریلهای دو طرف قطار به تناوب مغناطیسی و دارای قطبهای مخالف می‌باشند. قطار با توجه به خاصیت شناوری، بدون هرگونه اصطکاک و برخورد با ریل، در اثر تقابل قطبهای آهنربایی با سرعت زیادی به حرکت درمی‌آید. قطار سریع‌السیری که ژاپنی‌ها در سال ۲۰۰۰ میلادی ساختند با سرعت ۵۸۱ کیلومتر بر ساعت حرکت می‌کرد و به جای استفاده از چرخ در آن از میدان مغناطیسی استفاده شده بود. با توجه به عدم وجود اصطکاک و سرعت بالا، استفاده از قطارهای شناور مغناطیسی تأثیر قابل توجهی در کاهش مصرف انرژی در صنعت حمل و نقل خواهد داشت.



شکل ۱۱. یک نمونه ساخته شده قطارهای شناور مغناطیسی و اصول عملکرد آنها

۱۱. کاربرد ابررساناها در علوم فضایی: با توجه به دمای بسیار پائین در فضا، ابررسانایی در موارد مختلفی قابل استفاده است. اگر به جای سیم‌های مسی از ابر رسانا استفاده شود، موتور فضاپیماها تا ٦ برابر نسبت به موتورهای فعلی سبک‌تر خواهند شد و باعث می‌شود وزن فضاپیما کاهش زیادی داشته باشد. ساخت ابرکامپیوترهای بسیار کوچک و کم‌مصرف تحول بزرگی در سیستمهای کنترلی و ارتباطی ماهواره‌ها و فضاپیماها خواهد داشت و باعث خواهد شد که مدار ماهواره‌هایی که به دور زمین می‌چرخند، با دقت بسیار بالایی کنترل شوند. استفاده از آهنرباهای ابررسانا نیز در ساختمان ژیروسکوپ برای هدایت فضا پیما و در تلسکوپهای فضایی برای عکسبرداری دقیق بسیار مفید است.



شکل ۱۲. استفاده از ابررسانا در بازوی کنترل یک ماهواره

۵. برای مطالعه بیشتر

[۱] محمد اخوان، زهرا سادات یمنی، "پیشرفتهای ابررساناهای دمای بالا"، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۳

[۲] حسن مقبلی، رامین فرنیا، "ذخیره‌کننده‌های مغناطیسی انرژی با استفاده از ابررساناها (SMES) و کاربرد آنها برای تعدیل منحنی پیک‌بار و پایداری شبکه در سیستم‌های قدرت"، ماهنامه علمی تخصصی صنعت برق، سال دهم، شماره ۱۱۱، شهریور ماه ۱۳۸٤

[3] National Renewable Energy Laboratory. "U.S. Climate Change Technology Program, Technology Options: For the Near and Long Term," DOE/PI-0002. November 2003.

[4] http://www.superconductors.org

[5] http://www.amsuper.com

[6] http://www.otm.uiuc.edu

[7] http://www.newton.mec.edu/Brown/TE/MAGLEV/RTRI/maglev_principle_E.html

[8] http://www.nobelprize.org/index.html

[9] http://khayam.persianblog.com

[10] http://hts.blogfa.com