

## فصل اول

### معرفی فناوری در حد شناخت کلی

www.ControlMakers.ir

#### 1-1- مقدمه

شناخت ترانسفورماتورهای HTS مستلزم درک مفهوم ابررسانایی است. بدین منظور در این فصل ابتدا برای آشنایی با ابررسانایی، به اختصار مطالبی راجع به ابررسانایی، خواص آن و سیم های ابررسانا آورده می شود.

در ادامه انواع سیم‌های ابررسانا و متعلقات تجهیزات HTS بیان شده و در پایان نکات فنی ترانسفورماتورهای قدرت و وضعیت فناوری ترانسفورماتورهای HTS در جهان پرداخته می‌شود.

## 1-2- ابررسانایی

ابررسانایی<sup>1</sup> پدیده‌ای است که در بعضی از مواد در دمای بسیار پایین اتفاق می‌افتد. در این حالت مقاومت الکتریکی و میدان مغناطیسی در این مواد به صفر می‌رسد.

مقاومت الکتریکی هادی‌های فلزی معمول، مثل مس و نقره، نیز با کاهش دما کم می‌شود، با این حال در اثر وجود ناخالصی در این هادی‌ها، حتی در دمای صفر مطلق نیز، مقاومت الکتریکی آنها صفر نخواهد بود. اما مقاومت الکتریکی یک ابررسانا، با کاهش دمای آن به زیر دمای مشخصی، که دمای بحرانی ( $T_c$ ) نامیده می‌شود، به صفر خواهد رسید [1].

خاصیت ابررسانایی در مواد مختلفی، شامل عناصر ساده همانند آلومینیوم و قلع، آلیاژهای فلزی مختلف و بعضی از نیمه هادی‌ها که به شدت به آنها ناخالصی افزوده شده است، رخ می‌دهد. لیکن این خاصیت در فلزات نجیب، مثل طلا و نقره، و در فلزات فرومغناطیسی اتفاق نمی‌افتد.

بعضی از خواص فیزیکی مواد ابررساناها با یکدیگر متفاوت است. از جمله‌ی این خواص، ظرفیت گرمایی و دمای بحرانی است که در آن خاصیت ابررسانایی از دست می‌رود. از طرفی خواص دیگری نیز وجود دارد که مستقل از نوع ماده به کار رفته می‌باشد. برای مثال همه‌ی ابررساناها در نبود میدان مغناطیسی، دقیقاً دارای مقاومت الکتریکی صفر هستند.

### 1-2-1- مهمترین خواص ابررساناها

در مورد مهمترین خواص ابررساناها می‌توان به موارد ذیل اشاره داشت:

- مقاومت ناچیز در مقابل عبور جریان مستقیم و توانایی عبور چگالی جریان بالا
- توانایی تولید میدانهای مغناطیسی قوی
- خاصیت تونل‌زنی

در ادامه توضیحات مختصری در ارتباط با هر یک از این خواص آورده می‌شود.

## مقاومت ناچیز در مقابل عبور جریان مستقیم و توانایی عبور چگالی جریان بالا

امروزه صرفه جویی در مصرف انرژی، یکی از مهم ترین نیازهای کشورهای صنعتی است. بودجه های زیادی صرف تحقیقات در زمینه کشف راههای تازه و موثرتر برای یافتن انرژیهای ارزان و با ریسک کمتر می شود. ابررسانایی با نقشی که می تواند 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 هزینه های زیاد، تحقیقات خود را روی موضوع ابررسانایی و کاربردهای آن در علوم مختلف متمرکز ساخته اند. با توجه به مقاومت تقریباً صفر، ابررساناها در شبکه های توزیع و انتقال (ترانسفورماتورها و کابل ها و ...) و همچنین ماشینهای الکتریکی قابل استفاده هستند.

### توانایی تولید میدانهای مغناطیسی قوی

پدیده ابررسانایی در فناوری های جدید از توانایی های گسترده ای برخوردار است. خواص ابررسانایی در مواد، علاوه بر دمای محیط و شدت جریان عبوری، به میدان مغناطیسی هم بستگی دارد. یعنی حتی اگر جسم در دمایی پایین تر از حد ابررسانایی باشد، وقتی میدان مغناطیسی از میزان مشخصی بیشتر باشد، خاصیت ابررسانایی از بین خواهد رفت. از این میدانها می توان در قطارهای مغناطیسی استفاده کرد. شدت این میدانها برای آلیاژ نیوبیوم و تیتانیوم (NbTi) به حدود 10 تسلا نیز می رسد. شدت میدان مغناطیسی در جهت از بین بردن خاصیت ابررسانایی عمل می کند. میدان بحرانی به شدت میدانی اشاره دارد که ابررسانا خاصیت خود را در آن شدت میدان از دست می دهد.

### خاصیت تونل زنی

این مشخصه به این معنی است که اگر دو ابررسانا را خیلی به هم نزدیک کنیم، مقداری از جریان یکی به دیگری نشت می کند. در دو سر این پیوندگاه یا تونل هیچ ولتاژی وجود ندارد. یعنی میزان جریان نشتی به ولتاژ بستگی ندارد ولی حتی به مقادیر خیلی کوچک میدان و شار مغناطیسی بشدت وابسته است. یک مدار ابررسانا قادر به حفظ جریان الکتریکی بدون وجود منبع تغذیه است. از این خاصیت در آهنربای الکتریکی که در MRI<sup>1</sup> به کار برده می شود، استفاده می گردد. آزمایش های تجربی نشان می دهد که طول

عمر جریان در چنین مداراتی حداقل برابر با صد هزار سال است. البته از لحاظ تئوری این طول عمر بیش از طول عمر جهان تخمین زده می شود.

### 1-2-2- تئوری عبور جریان

در یک هادی معمولی، جریان به صورت حرکت الکترون ها در شبکه یونی هادی تعریف می شود. الکترون ها در طول این حرکت به یون های موجود در شبکه یونی برخورد کرده و مقداری از انرژی خود را به یون ها می دهند. این انرژی تلف شده، در شبکه یونی تبدیل به گرما می شود. این پدیده، مقاومت الکتریکی نامیده می شود [1].

اما در ابررساناها، وضعیت متفاوت است. در یک ابررسانا جریان الکتریکی ناشی از جفت های الکترونی (Cooper Pairs) است. این جفت الکترون ها در اثر نیروی جاذبه ی بین الکترون ها، که ناشی از تبادل فونون<sup>1</sup> ها بین آنها است، به وجود می آیند. وجود اختلاف سطح انرژی ( $\Delta E$ ) در طیف انرژی این جفت الکترون ها حاکی از آن است که برای تحریک کردن آنها حداقل به انرژی  $\Delta E$  نیاز است. حال اگر انرژی گرمایی شبکه یونی  $KT$  (که در آن  $T$  دما و  $K$  ثابت بولتزمن است) کمتر از  $\Delta E$  باشد، آنگاه جفت های الکترونی دچار پراکندگی و تلفات انرژی نمی شوند و در نتیجه مقاومت الکتریکی صفر خواهد بود. در نزدیکی دمای بحرانی، مواد HTS در برابر عبور جریان الکتریکی و به واسطه وجود میدان مغناطیسی ناشی از جریان الکتریکی، از خود مقاومت نشان می دهند. دلیل این امر وجود جریانات گردابی است که باعث اتلاف انرژی جفت الکترون ها می شود. در صورتی که دما به اندازه ی کافی کاهش یابد، این گرداب ها منجمد شده و مقاومت کاملاً صفر می شود.

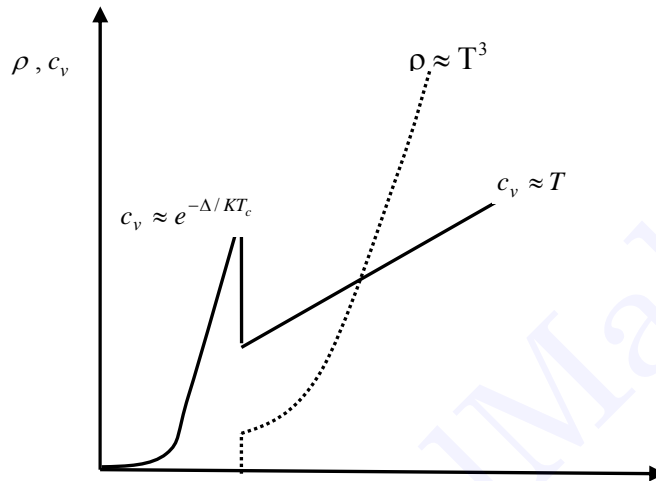
### 1-2-3- تغییر فاز در ابررسانا

مشخصات ابررسانایی هنگامی ظاهر می شود که دمای آن کمتر از دمای بحرانی  $T_c$  شود. مقدار این دما در مواد مختلف متفاوت است. برای مثال این دما در جیوه جامد  $4/2$  کلوین، در دی بوراید منیزیم ( $MgB_2$ ) 39 کلوین و در ابررسانای  $YBa_2Cu_3O_7$ ، که به اختصار YBCO نوشته می شود، 92 کلوین است. تئوری جفت

1- معادل فوتون در الکترومغناطیس بوده و مشخص کننده سطح انرژی آکوستیکی است.

الکترون در اثر تبادل فونون ها که در ابررساناهای معمولی صادق است، دیگر در ابررساناهای با  $T_C$  بسیار بالا صدق نمی کند.

با شروع خاصیت ابررسانایی تغییرات ناگهانی در مشخصه های فیزیکی ماده به وجود می آید که حاکی از تغییر فاز در ماده است. برای مثال ظرفیت گرمایی ماده در رژیم عادی متناسب با دما است و در دمای بحرانی دچار ناپیوستگی شده و با کاهش دما تغییرات آن نمایی خواهد بود که نشانه وجود اختلاف انرژی است. تغییرات ظرفیت گرمایی ( $c_v$ ) و مقاومت یک ابررسانا ( $\rho$ ) در شکل (1-1) نشان داده شده است.



شکل (1-1): تغییرات ظرفیت گرمایی ( $c_v$ ) و مقاومت یک ابررسانا ( $\rho$ ) به ازای تغییرات دما

### 3-1- ابررساناهای با دمای بحرانی بالا یا HTS

قبل از کشف ابررساناهای با دمای بحرانی بالا یا HTS در سال 1986، مواد  $LTS^1$  (ابررسانای با دمای بحرانی پایین) مورد استفاده قرار می گرفت. دمای بحرانی در ابررساناهای LTS معمولاً زیر 20 کلوین می باشد. برای نمونه می توان به هادیهای  $Nb_3Sn^2$  و  $Nb_3Al^3$  اشاره کرد. دمای مورد نیاز در این هادی ها 4 کلوین می باشد که عموماً توسط هلیوم مایع تامین می شود.

از سویی این دما در هادی های HTS در حدود 77 کلوین، دمای نیتروژن مایع، است. تعداد مواد HTS که تا به حال شناخته شده اند چندان زیاد نیست و از این تعداد تنها دو گروه به لحاظ اقتصادی مورد استفاده

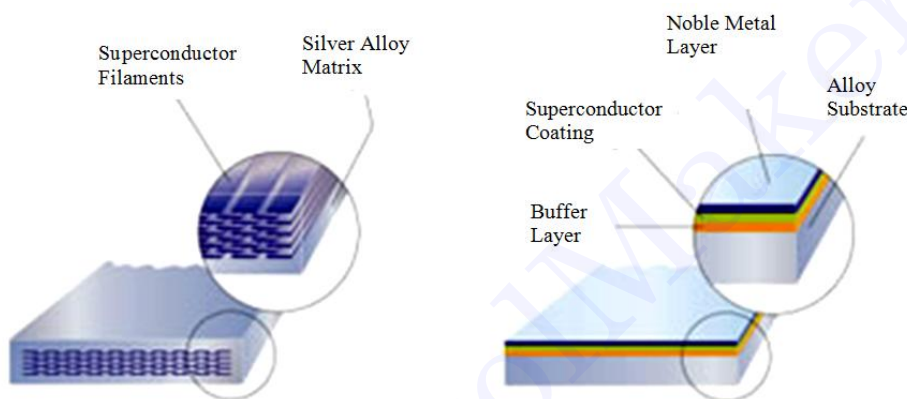
1- Low Temperature Superconductor

2- Niobium-Stannum

3- Niobium-Aluminum

قرار گرفته اند. این دو گروه شامل  $BSCCO^1$  (یا هادی نسل اول) و  $YBCO^2$  (یا هادی نسل دوم) می باشد که نام آنها نمایانگر ترکیب شیمیایی آنهاست. هر دو گروه از نوعی سرامیک ساخته می شوند که به دلیل شکنندگی، مانند هادی های فلزی قابلیت شکل بندی خوبی ندارند. علاوه بر این ترتیب قرارگیری کریستال-های موجود در سرامیک، باید در راستای طول هادی باشد و وجود هر گونه آلودگی در آن باعث افزایش مقاومت می شود. بنابراین ساخت یک کابل ابررسانا بلند چندان ساده نیست.

در شکل (2-1) دو گروه اصلی این سیم ها نشان داده شده است. هر یک از این سیم ها، چگالی توان بالا و مقاومت الکتریکی کمی دارند، اما تفاوت آنها در نوع ماده ابررسانا، تکنولوژی ساخت و کاربرد آنهاست.

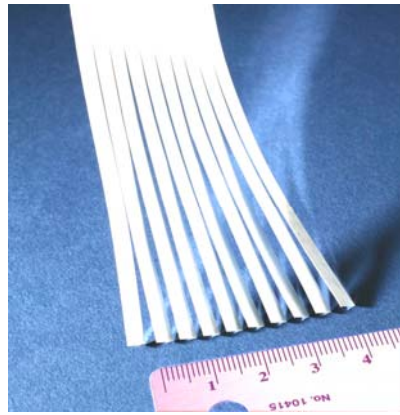


شکل (2-1): دو گروه اصلی این سیم های HTS محصول شرکت AMSC

در نمای نزدیک شکل سمت چپ ساختار داخلی سیم HTS، که ترکیبی از چند رشته (نسل اول یا 1G) است نمایش داده شده است. این سیم محصول شرکت AMSC است و حدود 20 کشور در سطح دنیا در کاربردهای مختلف از آن استفاده می کنند. شکل سمت راست نیز ساختار نسل دوم (2G) سیم های ابررسانای شرکت AMSC که دارای 344 یا 348 هادی ابررسانا است، نشان می دهد. این محصول از سال 2005 به بازار معرفی شد و دارای 100 متر طول و عرض 4 سانتیمتر مطابق شکل (1-3) می باشد (طبق گفته شرکت AMSC، در یکی دو سال آینده محصولاتی با طول 1000 نیز به بازار عرضه خواهد شد).

1- Bismuth- strontium-Calcium-Copper-Oxide

2- Yttrium-Barium-Copper-Oxide



شکل (3-1): سیم های HTS نسل دوم شرکت AMSC

این سیم ها همان طور که قبلاً اشاره شد در مقایسه با سیم های سنتی مسی، چگالی توان بالایی دارند و کاربردهای بسیاری در وسایلی مانند ترانسفورماتورها، موتور کشتی ها، کابل های انتقال برق، موتورهای الکتریکی، ژنراتورهای سنکرون و محدود کننده های جریان خط دارند.

خوشبختانه کریستال های موجود در ابررسانای BSCCO با استفاده از فشار مکانیکی مناسب، در وضعیت مطلوب قرار می گیرند ولی به دلیل استفاده از نقره در ساختار این ابررسانا، قیمت تمام شده آن نسبت به مس خیلی بیشتر می باشد. هادیهای YBCO نسبت به BSCCO ارزاتر هستند و در آینده نزدیک می توانند تبدیل به رقیبی برای هادیهای مسی شوند. یک ابررسانای HTS حدوداً قادر به حمل جریان تا 140 برابر یک هادی مسی معمولی است. در شکل (4-1) مقدار سیم مسی و نوار HTS لازم برای انتقال توان یکسان مقایسه شده است.



شکل (4-1): سیم های مسی در برابر نوارهای HTS

یکی از خواص مهم ابررساناها، مقاومت الکتریکی بالا به ازای دمای بیشتر از دمای بحرانی یا در اثر افزایش بیش از حد میدان مغناطیسی اطراف آن می باشد. در صورتی که بتوان دمای یک ابررسانا را کاهش داد، این حد میدان مغناطیسی قابل تحمل افزایش می یابد.

همچنین نوسانات موجود در میدان مغناطیسی باعث کاهش هدایت در ابررسانا می شود. پس می توان گفت ابررساناها در برابر جریان AC (جریان متناوب) از خود مقاومت نشان می دهند. بنابراین در کاربردهای جریان متناوب HTS (ترانسفورماتور، کابل انتقال انرژی الکتریکی و ...) نیاز به طراحی دقیقتر و دمای عملکرد پایین تری است.

به دلیل داشتن چگالی جریان بیشتر و مقاومت کمتر، هادی های HTS می توانند جایگزین مس (و دیگر هادیهای فلزی) در کابل های برق و کاربردهایی که در آنها از میدان های مغناطیسی قوی استفاده می شود (برای مثال آهنرباهای الکتریکی، ترانسفورماتور، ژنراتور و موتورهای الکتریکی) شوند. با وجود این مزایا و همچنین قیمت رو به کاهش ابررساناها، قیمت بسیار بالای تجهیزات مورد نیاز برای تبرید ابررسانا (شامل قسمت های خنک کننده)، به لحاظ اقتصادی قابل توجه است. می توان نتیجه گرفت که زمانی استفاده از ابررسانا مقرون به صرفه است که سود استفاده از مزایای آنها بیشتر از هزینه سیستم تبرید باشد. مخصوصاً در مواردی که به جز ابررسانا، تجهیزات دیگری نیز به دمای بسیار پایین نیاز داشته باشند [2].

طراحی و توسعه تجهیزات ابررسانا به هیچ وجه ساده نیست، در دمای عملکرد آنها بسیاری از گازها جامد شده و فرضیات طراحی تجهیزات عادی، دیگر صادق نیستند.

### 1-3-1- اصطلاحات فنی سیم های HTS

برخی از مهمترین اصطلاحات رایج و فنی در به کار بردن سیم های HTS به شرح زیر است:

- **Back Tension** : مقدار نیرویی که در راستای طولی به سیم وارد می شود.
- **قطر خمش (Bend Diameter)**: قطر خمش، مقدار خمیدگی است که هنگام سیم پیچی یا قرار گرفتن سیم به دور قرقره در سیم ایجاد می شود. مقدار خمش بحرانی مربوط به حالتی است که سیم بدون آسیب دیدگی خم می شود.
- **BSCCO 2223** : برای نام گذاری مواد به کار برده شده در HTS های نسل اول که ترکیبی به صورت  $\text{Bi}_{(2-x)}\text{Pb}_x\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$  دارند، استفاده می شود. این مواد در HTS های ترکیبی چند رشته ای استفاده شده و به طور نوعی دمای تغییر حالت 110 درجه کلون دارند.



- دمای بحرانی یا  $T_C$  : مقدار دمایی است که اگر دمای سیم کمتر از آن باشد خاصیت ابررسانایی حفظ می شود.
- جریان بحرانی (Critical Current) یا  $I_C$  : به جریانی اطلاق می گردد که افت ولتاژ آن در سیم بیش از یک مقدار از پیش تعریف شده، گردد. این مقدار با توجه به نوع مواد سیم های مختلف، متفاوت است. این مقدار برای سیم های HTS معمولاً  $1 \text{ microvolt/cm}$  می باشد.
- چگالی جریان بحرانی یا  $J_C$  : چگالی جریان برابر مقدار جریان بحرانی تقسیم بر سطح مقطع عرضی سیم می باشد و معمولاً برای سنجش کیفیت مواد سیم HTS به کار می رود.
- منحنی  $I-V$  : این منحنی در واقع افت ولتاژ در سیم ابر رسانا را برحسب تابعی از جریان عبوری آن نشان می دهد و برای بدست آوردن پارامترهای فیزیکی سیم مانند جریان بحرانی به کار می رود.
- اندوکتانس سیم پیچی: وقتی سیم به صورت یک سیم پیچ استفاده می شود (مانند ترانسفورماتور و ژنراتور)، عبور جریان از آن باعث ایجاد یک میدان مغناطیسی و ذخیره انرژی در آن میدان می شود. از این رو می توان برای این سیم پیچ یک اندوکتانس مغناطیسی تعریف نمود.

### 1-3-2- متعلقات تجهیزات HTS

معمولاً هر دستگاه HTS دارای تجهیزات زیر می باشد:

- نوار و سیم پیچ های ابررسانا
- سیستم تبرید
- منبع تغذیه و قسمت های کنترلی
- مدارات مغناطیسی

در ادامه به اختصار به شرح هر یک از موارد فوق پرداخته می شود [3].

#### نوار و سیم پیچ های ابررسانا

نوارهای HTS همان نقش هادی های الکتریکی معمول را به عهده دارند. اولین مرحله در ساخت هر دستگاه HTS، اطمینان از عدم وجود عیب و نقص در نوار یا هادی ابررسانا است. در صورت وجود، پس از رفع آن می توان آن را برای استفاده در کابل به هم تابانید یا به صورت سیم پیچ در آورد تا در کاربردهایی مثل ترانسفورماتور، آهنربا، ژنراتور و موتور استفاده شود. همچنین این هادی ها باید دارای روکش عایق باشند.

جنس عایق باید به نحوی انتخاب شود که مانع از نفوذ میدان مغناطیسی نگردد. برای مثال این عایق می-تواند از جنس کاغذ سرامیکی باشد. سیم پیچی ابررسانا باید به گونه ای انجام شود که از آسیب های احتمالی آن جلوگیری به عمل آید.

طراحی ابررسانا و مواد مورد استفاده در آن باید به نحوی باشند که در برابر نیروهای مغناطیسی، تنش گرمایی و تنش های فیزیکی موجود در موتورها و ژنراتورها مقاومت کنند. در پایان برای اطمینان از عملکرد درست، ابررسانا مورد آزمایش قرار می گیرد.

### سیستم تبرید

یکی از مهمترین قسمت های تجهیزات HTS، سیستم تبرید است که شامل قسمت های خنک کننده و مخزن نگه دارنده سرما است. نگهدارنده سرما<sup>۱</sup>، همانند یک عایق سرما عمل می کند و معمولاً از فولاد ضد زنگ ساخته می شود و باید قادر به تحمل تنش های دمایی باشد. در کاربرهایی که نیازمند قابلیت اطمینان بالاتری هستند، از نگه دارنده سرمای خلا استفاده می شود.

نوع سیستم خنک کننده بستگی به کاربرد دستگاه HTS دارد، یک خنک کننده در ساده ترین شکل، شامل یک ماده سرمازا<sup>۲</sup> است که می توان این ماده سرمازا را، که در حین کار گرم شده، مجدداً سرد کرده و به سیستم تزریق کرد (به صورت چرخشی) و یا اینکه از یک مخزن خارجی ماده سرمازای جدیدی برای سرد کردن به سیستم وارد کرد.

### منبع تغذیه و قسمت های کنترلی

در اثر صفر بودن مقاومت، جریان الکتریکی در ابررساناها نسبت به ادوات الکتریکی دیگر بسیار زیاد است. به همین دلیل در این تجهیزات نیاز به استفاده از منبع تغذیه مخصوص و ادوات الکترونیک قدرت می باشد. یکی از قسمت های مهم کنترل توان، سیستم محافظت در برابر از دست رفتن خاصیت ابررسانایی است که به آن حفاظت Quench گفته می شود. اگر خاصیت ابررسانایی به هر دلیلی از بین برود (مثلاً افزایش دما) آنگاه افزایش مقاومت در برابر جریان بسیار بالا، باعث صدمه دیدن ابررسانا می گردد. همچنین از تجهیزات کنترلی دیگری برای کنترل توان، میدان مغناطیسی و دما در سیستم های HTS استفاده می شود.

1- Cryostat

2- Cryogen

به علت قیمت بالای نوارهای HTS، می توان برای تقویت میدان مغناطیسی از هسته آهنی استفاده کرد. اما در مواردی که محدودیت های وزنی و حجمی وجود دارد، این قسمت نیز از مواد HTS ساخته می شود.

#### 1-4- ترانسفورماتورهای HTS

هدف از به کار بردن ترانسفورماتورها در شبکه برق تغییر سطح ولتاژ انتقال است. ترانسفورماتورها را با توجه به کاربرد و خصوصیات آنها به سه دسته کوچک، متوسط و بزرگ دسته بندی می کنند. ساخت ترانسفورماتورهای بزرگ و متوسط به دلیل مسائل حفاظتی و عایق بندی و امکانات موجود، کار ساده ای نیست ولی ساخت ترانسفورماتورهای کوچک چندان مشکل نیست.

ترانسفورماتورها به طور کلی دارای اجزای زیر می باشند:

- هسته: هسته ترانسفورماتور متشکل از ورقه های نازک است که سطح آنها با توجه به قدرت ترانسفورماتور ها محاسبه می شود. برای کم کردن تلفات آهنی، هسته ترانسفورماتور از ورقه های نازک فلزی که نسبت به یکدیگر عایق اند، ساخته می شود. جنس این ورقه ها از آهن بدون پسماند با آلیاژی از سیلیسیم (حداکثر 4/5 درصد)، با قابلیت هدایت الکتریکی و قابلیت هدایت مغناطیسی زیاد، است.

- سیم پیچ ها: معمولاً برای سیم پیچ اولیه و ثانویه ترانسفورماتور از هادی های مسی با عایق (روپوش) لاکه استفاده می کنند. این سیم پیچ ها با سطح مقطع گرد و اندازه های استاندارد وجود دارند و با قطر مشخص می شوند. در ترانسفورماتورهای پر قدرت از هادی های مسی که به صورت تسمه هستند استفاده می شوند و ابعاد این گونه هادی ها نیز استاندارد است.

- مواد عایقی: عایق بندی ترانسفورماتورهای معمولی به وسیله مواد عایقی مانند کاغذ عایق و مقوای عایق و فیبر عایق برای ترانس های توزیع و روغن نیز برای ترانس های فشار قوی صورت می گیرد. روغن های ترانسفورماتور عمدتاً ترکیبات پیچیده ای از هیدروکربن های مشتق نفت خام می باشند و به جهت دارا بودن خواص مناسب، عمدتاً از این روغن ها در ترانسفورماتورها استفاده می شود.

- انشعابات سیم پیچ و قابلیت تنظیم ولتاژ: تغییرات جزئی ولتاژ شبکه را می توان با تغییر نقاط اتصال سیم پیچ فشار قوی بر طرف نمود، به نحوی که ولتاژ مورد نیاز مصرف کننده ثابت بماند. تغییر دادن

نقاط اتصال و استفاده از انشعابات سیم پیچ فشار قوی در حالت "بدون بار" توسط کلید تنظیم ولتاژ صورت می گیرد.

- مخزن: ترانسفورماتورها با توجه به قدرت و گرمای حاصله، دارای مخازنی برای نگه داشتن روغن جهت عایق کاری و خنک سازی هستند.
- مقره های فشار قوی و فشار ضعیف: ترانسفورماتورها مجهز به مقره های فشار قوی و فشار ضعیف برای ورود و خروج هادی ها به ترانس می باشند.
- تجهیزات حفاظتی نصب شده روی ترانسفورماتور: در همه ترانسفورماتورهای شبکه برق تجهیزاتی برای حفاظت ترانس موجود می باشد. این تجهیزات شامل انواع رله ها (رله های اضافه جریان) برای جلوگیری از آسیب دیدن سیم پیچ ها و انفجار (رله بوخهلتس و ...)، ترمومترها برای اندازه گیری دمای ترانس، رطوبت گیر، روغن نما و ... می باشند.

ساخت ترانسفورماتور فشار قوی فاقد روغن در طول عمر یکصد ساله ترانسفورماتورها، یک انقلاب محسوب می شود. هدف اصلی از به کار گیری ابررسانا در ترانسفورماتورهای سیستم قدرت، کاهش تلفات گرمایی سیم پیچ ها و هسته است. در دوره 25 ساله 1961 تا 1986 فعالیت های چشمگیری در راستای توسعه ی هادی های انتقال انرژی الکتریکی (هادی های فلزی معمولی و LTS یا ابررساناهای با دمای پایین) انجام شد. اگرچه ملاحظات اقتصادی عامل مهمی در به کارگیری ابررساناها در سیستمهای قدرت بوده است، اما امروزه عوامل دیگری نیز از قبیل مسائل زیست محیطی، ایمنی و خصوصی سازی مورد توجه قرار گرفته اند. با وجود تلاش های گسترده برای توسعه ی استفاده از ابررساناهای دمای پایین در ترانسفورماتورها، عواملی مانند هزینه بالای سیستم برودتی لازم برای عملکرد هلیوم مایع در دمای 4/7 کلوین، نیاز به قابلیت اطمینان بالا و توسعه ابررسانای AC (جریان متناوب) با تلفات کم مانع از به کارگیری وسیع آنها در شبکه الکتریکی شد. اکتشاف ابررسانای با دمای بالا (HTS) باعث جلب توجه دوباره به ابررساناها در بخش های تولید تا مصرف شبکه الکتریکی شد. دمای کارکرد 77 کلوینی مواد HTS (دمای نیتروژن مایع)، بسیار بیشتر از دمای 4/7 کلوینی مواد LTS (دمای هلیوم مایع) است که از آنها در دهه 80 و 90 میلادی استفاده می شد. با افزایش دمای کاری نه تنها هزینه های تبرید کمتر می شود بلکه قابلیت اطمینان سیستم افزایش می یابد.

## 1-4-1- ترانسفورماتورهای ابرسانا

ترانسفورماتور یکی از اصلی ترین عناصر شبکه انتقال و توزیع الکتریکی می باشد. از بخش تولید، که در آن برای تزریق توان به شبکه نیاز به سطح ولتاژ بالایی می باشد، تا بخش مصرف، که در آن از ولتاژهای فشار ضعیف استفاده می شود، به طور وسیعی از ترانسفورماتور برای تبدیل ولتاژ استفاده می شود. در هر مرحله از تبدیل ولتاژ توسط ترانس، مقداری از انرژی عمدتاً به صورت گرما در سیم پیچ، هسته و بدنه ترانس تلف می شود. تحقیقات 50 سال گذشته منجر به کاهش این تلفات با ضریب یک سوم شده است در حالی که هزینه هسته ترانس دو برابر شده است. اخیراً با استفاده از سیلیسیوم در هسته ترانس های توزیع (توان ظاهری زیر 100 KVA) این تلفات بیشتر کاهش یافته است ولی تا به حال از این ماده در ترانسفورماتورهای قدرت (توان ظاهری بالای 500KVA) استفاده نشده است. با تحت بار قرار گرفتن ترانسفورماتور، تلفات مقاومتی نیز به تلفات بی باری اضافه می شود. با وجود اینکه تلفات ترانس های امروزی حدود یک درصد کل توان ترانس می باشد، اگر بتوان این مقدار تلفات را به هر میزانی کاهش داد آنگاه در دوره عمر ترانس مقدار زیادی انرژی صرفه جویی می شود. با وجود کاهش تلفات در صورت استفاده از ابرسانا، محدودیت موجود در استفاده از ترانسفورماتورهای LTS هزینه بالای تبرید است. لیکن در ترانس های HTS این هزینه کمتر بوده و مضرات زیست محیطی استفاده از ترانس های روغنی، حذف می شود [4].

در یک ترانس متعارف 80 درصد از کل تلفات را تلفات بار تشکیل می دهد. پس به طور کلی 80 درصد مربوط به تلفات مقاومتی و 20 درصد مربوط به تلفات جریان گردابی<sup>1</sup> و هیستریزیس<sup>2</sup> می باشد (مجموع این دو تلفات، تلفات هسته نام دارد). تا به حال بیشتر تلاش ها برای کاهش تلفات بر روی تلفات گردابی و هیستریزیس متمرکز بوده است. بر خلاف آلومینیوم و مس، در ابرساناها به خاطر صفر بودن مقاومت در جریان DC (جریان مستقیم)، تلفات مقاومتی صفر می باشد، بنابراین تلفات کل به شدت کم می شود. در حالت جریان متناوب در ترانسفورماتور HTS نوعی تلفات گردابی به وجود می آید که اگر چه مقدار گرمای ناشی از آن در مقایسه با ترانس های معمول خیلی کمتر است، ولی این گرما باید توسط خنک سازی از بین برود. حتی با وجود هزینه اضافی سیستم خنک سازی، ترانسفورماتورهای HTS با توان 10MVA و بالاتر نسبت به یک ترانس معمولی معادل آن از لحاظ هزینه و راندمان به صرفه تر می باشند.

1- Eddy Current Loss

2- Hysteresis Loss

انگیزه توسعه ترانسفورماتورهای HTS تنها به علت ملاحظات اقتصادی (کاهش هزینه سرمایه گذاری اولیه و هزینه تلفات در دوره ی عمر ترانس) نیست. تامین مصرف برق رو به رشد سالیانه مستلزم توسعه شبکه الکتریکی می باشد، از طرفی در مناطق شهری محدودیت فضا و مکان وجود دارد، بسیاری از پست ها یا در ساختمان ساخته شده اند یا نزدیک ساختمان های مسکونی هستند، که این خود استفاده از ترانس های معمولی، که در آنها از روغن استفاده می شود را محدود می کند. در صورت استفاده از ترانس های HTS (شکل 1-5) تبعات ناشی از روغن ترانس (آتش سوزی و آلودگی محیط زیست) حذف می شود.



شکل(1-5): ترانسفورماتور قدرت HTS

#### 1-4-2- آزمایش موفقیت آمیز ترانسفورماتورهای ابررسانای HTS

یک تیم تحقیقاتی صنعتی در آمریکا زیر نظر شرکت Waukesha Electric Systems، با انجام آزمایش موفقیت آمیز بر روی نوع جدیدی از ترانسفورماتورهای قدرت، در سال 1999 خبر تحول مهمی را در صنعت برق اعلام نمودند. ترانسفورماتورهای ابررسانایی جدید در مقایسه با ترانسفورماتورهای رایج، کوچک و سبکتر و دارای طول عمر بیشتری هستند. در این نوع ترانسفورماتورها از نیتروژن به جای روغن استفاده می شود و دیگر نیازی به هزاران گالن روغن جهت عایقی و خنک سازی نبوده و در نتیجه خطر ایجاد حریق و مسائل زیست محیطی را نخواهد داشت [5].

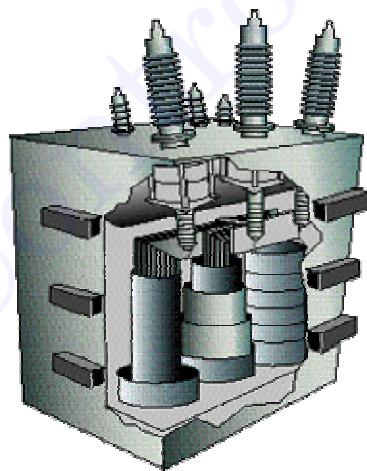
به عنوان مثال یکی از مزایای این ترانسفورماتورها کاهش وزن می باشد بطوریکه تخمین زده می شود برای یک ترانسفورماتور 30MVA وزن آن از 48 تن به 24 تن برسد.

دو تغییر مهم در طراحی ترانسفورماتور که منجر به طراحی و ساخت این نوع ترانسفورماتورهای جدید شده است، عبارتند از:

- استفاده از مواد ابررسانایی دمای بالا (HTS) بجای سیم پیچ های رایج مسی
- بکارگیری از یک سیستم کوچک خنک سازی بجای سیستم خنک کننده رایج ترانسفورماتورهای معمولی.

ترانسفورماتور HTS ، 30MVA حدوداً به 100 کیلوگرم ابررسانا نیاز خواهد داشت که تقریباً مقاومت الکتریکی ندارد و بنابراین هیچگونه حرارتی تولید نخواهد کرد، درحالیکه در ترانسفورماتورهای رایج، سیم پیچ های مسی که هزاران کیلوگرم وزن دارند منبع اصلی تولید گرما و ایجاد تلفات می باشند. برای به کار بردن فناوری ترانسفورماتور HTS، از یک سیستم خنک کننده حلقه بسته جهت خنک نگه داشتن سیم پیچ های ترانسفورماتور استفاده می شود. به طور مثال این سیستم خنک کننده قادر است که دمای سیم پیچ را تا 382 - درجه فارنهایت (حدود 78 درجه کلونین) برساند.

ترانسفورماتور HTS آزمایشی 1MVA به عنوان یک بستر آزمایشی مناسب برای ارزیابی نوآوری های تازه ساخته شد. شکل (1-6) یک نمونه از این نوع ترانسفورماتور را نشان می دهد.



شکل (1-6): ترانس HTS آزمایشی 1MVA

پروژه ترانسفورماتور HTS در ایالت متحده آمریکا توسط چندین شرکت و سازمان دنبال می گردد. شرکت WES<sup>1</sup> رهبری ساخت اینگونه ترانسفورماتورها را در آمریکا به عهده دارد. این شرکت مسئولیت طراحی و ساخت هسته و تانک و همچنین مونتاژ و آزمایش ترانسفورماتور HTS با قدرت 1MVA را به عهده داشته

است. شرکت IGC<sup>1</sup> در آمریکا، که سازنده هادی ها و کابل های ابررسانا می باشد، در این پروژه مسئول طراحی و ساخت هادی های ابررسانا، سیم پیچ های ترانسفورماتور و طراحی بخشی از سیستم سرمایشی بوده است. مؤسسه تحقیقاتی ORNL<sup>2</sup> آمریکا نیز، مسئول طراحی و ساخت ساپورت سیم پیچ ها و زیرسیستم های سرمایشی بوده است.

شرکت برق RG&E<sup>3</sup> حمایت های مالی و اقتصادی این پروژه را به عهده داشته و مشاوره این طرح توسط مشاوران بین المللی Electric Power Engineering Department انجام شد.

دکتر Christine Platt از دپارتمان انرژی آمریکا بر اهمیت این پروژه اذعان می نماید و می گوید که در آمریکا تلفات انرژی الکتریکی تولید شده در حدود 8 درصد می باشد که ترانسفورماتورها نیمی از این تلفات را تولید می کنند و با استفاده از مواد ابررسانا و تولیدات آن این رقم نصف و در نتیجه منجر به صرفه جویی صدها میلیون دلار در سال خواهد شد.

#### 1-4-3- فناوری ترانسفورماتورهای HTS در جهان

از سال 1980 توسعه ترانس های LTS عمدتاً توسط شرکت های ABB و GEC-Alsthom در اروپا و توسط شرکت های برق و دانشگاهها در ژاپن صورت گرفته است. پیشرفت در تولید هادی های طویل چند رشته ای از جنس Nb-Ti<sup>4</sup> و مواد با ساختار ماتریسی از جنس Cu-Ni<sup>5</sup> باعث کاهش تلفات AC شده است. کاهش وزن و افزایش راندمان در ترانس های با توان زیر 100 KVA انجام شده است. برای نمونه می توان به ترانسفورماتورهای تک فاز 80 KVA (Alsthom)، 30 KA (Toshiba) و سه فاز 40 KVA (Osaka University) اشاره کرد. واحدهای بزرگتر نیز ساخته شده و آزمایش های انجام شده روی آنها موفقیت آمیز بوده است. برای مثال می توان به ترانس تک فاز 330 KVA ساخته شده توسط شرکت ABB که مجهز به تجهیزات حفاظتی و محدودساز جریان خطا می باشد، اشاره کرد. شرکت Kansai Electric Power موفق به ساخت یک ترانسفورماتور LTS با استفاده از هادی Nb<sub>3</sub>Sn شد. یک فاز از این ترانس سه فاز 2000 KVA، با توان 1379 KVA بدون تلفات گرمایی مورد استفاده قرار گرفت [6].

1- Intermagnetics General Corporation

2- Oak Ridge National Laboratory

3- Rochester Gas and Electric Corporation

1- Niobium-Titanium

2- Copper-Nickel



پس از کشف مواد HTS در سال 1986، تحقیقات جهت امکان عملی ساختن ترانسفورماتورهای HTS شروع شد. طبق برآورد های اولیه، در صورت استفاده از این ترانسفورماتورها، بیش از 35٪ نسبت به ترانسفورماتورهای معمولی، صرفه جویی می شد. اما با توجه به مشخصات ناشناخته تلفات AC، این مقدار بطور دقیق قابل محاسبه نبود. در تحقیقاتی که در سال 1993 در آمریکا انجام شد، مشخص گردید که هزینه های بهره برداری و تعمیرات لازم در طول عمر مفید ترانسفورماتور HTS بطور متوسط، نصف هزینه ترانسفورماتور معمولی است. بدین ترتیب در صورت استفاده از این نوع ترانسفورماتورها در ایالات متحده تا سال 2030 مبلغ 25 میلیارد دلار صرفه جویی خواهد شد. تحقیقات در سال 1994 نشان داد در صورت استفاده از ترانسفورماتورهای HTS در محدوده قدرت 30 MVA تا 1500 MVA، صرفه جویی در هزینه 70٪ (نسبت به ترانسفورماتورهای معمولی) و کاهش وزن آنها 40٪ خواهد بود. از فواید دیگر ترانسفورماتورهای HTS، که مخصوصاً مربوط به ژاپن و بدلیل تراکم بالای جمعیت آن است، کاهش قابل ملاحظه وزن و حجم آنهاست. همانطوریکه کابل های HTS امکان انتقال بیشتر توان را از طریق کانال های موجود فراهم می کنند، ترانسفورماتورهای HTS نیز می توانند در فضای موجود، قدرت بیشتری نسبت به ترانسفورماتورهای معمولی تامین کنند. به همین دلیل در ژاپن مزیت کوچک شدن فضای اشغال شده و وزن ترانسفورماتورها به عنوان مهمترین مزیت این نوع ترانسفورماتورها مطرح است. در اروپا، استفاده از ترانسفورماتورهای کوچک HTS در قطارهای سریع السیر، رو به افزایش است.

پتانسیل و کشش بازار جهانی برای ترانسفورماتورهای ابررسانا بیش از 1 میلیارد دلار می باشد. بررسی آمارهای موجود نشان می دهد که در ایالات متحده بیش از 90٪ ترانسفورماتورها، قدرتی در محدوده 10 تا 100 MVA داشته (جدول 1-1) که قیمت مجموع آنها، برابر با 70٪ قیمت کل ترانس های فروخته شده در آمریکا می باشد. در حال حاضر سه پروژه در ارتباط با ترانسفورماتور HTS در ایالات متحده، اروپا و ژاپن در حال انجام است. جدول (1-2) ترکیب تیم های تحقیقاتی، ظرفیت ترانسفورماتورهای تحت توسعه و مواد HTS مورد استفاده توسط هر یک از گروه ها را نشان می دهد [6].

جدول ( 1-1 ) - بازار ترانسفورماتورهای قدرت در سالهای 1995 و 1996

United States	10-100 MVA	Over 100 MVA
Units	874	78
MVA	33000	26000
\$	260 million	109 million
World	3.4 times larger 2X growth rate	3.4 times larger 2X growth rate

جدول (1-2): پروژه های ترانسفورماتور HTS در جهان

United States	Waukesha Electric –IGC -1MVA prototype, 30MVA design, Bi-2212
Europe	ABB (ASC) -630KVA prototype, 100MVA design, Bi-2223
Japan	Fuji Electric – (Sumitomo) -500KVA prototype, Bi-2223

در ایالات متحده این تحقیقات توسط شرکت IGC و با همکاری لابراتور ملی Oak Ridge انجام می شود. IGC با حمایت های مالی Waukesha Electric و Rochester Gas & Electric، طرح یک ترانسفورماتور HTS 1000KVA، ارائه کرده و در حال ساخت آن است. در این ترانسفورماتور از نوارهای نقره با پوشش HTS استفاده شده است. استفاده از سیستم BSCCO-2212 عملکرد پایدار سیستم را تا دمای 30 درجه کلین عملی می سازد. در صورت استفاده از هادی های BSCCO-2223، می توان دمای عملکرد ترانسفورماتور را به 77 کلین رساند. در این وضعیت هزینه تبرید به خاطر بالاتر بودن دما کاهش می یابد ولی از سویی قیمت کابل (BSCCO-2223) بالاتر و عملکرد ترانسفورماتور (بعلت بالا رفتن دما) ضعیف تر می شوند. گرچه نمونه اولیه ترانسفورماتور مذکور برای قدرت 1MVA ارائه گردید، اما هدف نهائی مؤسسه IGC و Waukesha ساخت یک ترانسفورماتور 30MVA، 138KV/13.8 KV، 60Hz و امیدانس 10% با اتصال مثلث-ستاره است.

از طرف دیگر شرکت ABB با همکاری Electricite de France، با استفاده از نوارهای چند رشته ای BSCCO-2223 ساخت ASC<sup>1</sup>، یک ترانسفورماتور 630KVA، 13.72 KV / 0.42 KV، 50HZ و امیدانس 4.6% با اتصال مثلث-ستاره ساخته است.

در ژاپن نیز پس از طراحی و ساخت یک ترانسفورماتور LTS، 220 KVA، توسط شرکت Alstom و عملکرد موفق آن تحت بار 70KW، به منظور بررسی رفتار ترانسفورماتورهای LTS، ترانس های کوچکتر با قدرتهای 10 KVA تا 100 KVA فراوانی ساخته شد. پس از آن ترانس های با قدرت بیشتر توسط دانشگاه Nagoya با همکاری Takaoka (100KVA)، kansai Electric با همکاری Mitsubishi (2000KVA) با استفاده از (Nb<sub>3</sub>Sn)، دانشگاه Osaka با همکاری Toshiba (40 KVA) و دانشگاه Kyushu با همکاری Toshiba (1000KVA) ساخته و تحت آزمایش قرار گرفت.

در ایالات متحده و اروپا شرکتهای برق سهم بزرگی در توسعه برنامه های ترانسفورماتورهای ابررسانا بر عهده دارند اما در ژاپن، قسمت عمده کار بر عهده مراکز صنعتی و دانشگاهی بوده و حمایت آشکاری از سوی شرکت های برق دیده نمی شود. ژاپنی ها که در زمینه ساخت ترانسفورماتورهای LTS فعالیت گسترده ای داشته اند، گزارش چندانی در مورد ترانسفورماتورهای HTS ارائه نکرده اند. در سال 1996 در ژاپن جزئیاتی از برنامه ساخت ترانسفورماتور HTS، 500 KVA تحت حمایت شرکتهای Fuji Electric و SEC<sup>1</sup> ارائه گردید. احتمالاً تامین نوارهای HTS بر عهده Sumitomo و طراحی و ساخت ترانسفورماتور به عهده Fuji Electric و دانشگاه Kyushu است. در جدول (3-1) مشخصات نوارهای HTS و توالی های سیم پیچی آمده است [6].

جدول (3-1): مشخصات نوارهای HTS و توالیهای سیم پیچی در ترانسفورماتور HTS ساخت SEC- Fuji و دانشگاه Kyushu

Strand (Without Insulation)	
Superconductor	Bi2223
Matrix	Pure silver
Cross-section	0.22x3.5mm
Number of filaments	61
Silver ratio	2.5
Twist pitch	infinite
Critical Current	35A at a self-field (Criterion $10^{-13}\Omega m$ )
Primary Winding	
Type	Three-parallel
Number of layer	2
Number of turns	50/layer
Number of transpositions	5/layer
Secondary Winding	
Type	Six-parallel
Number of layer	2
Number of turns	50/layer
Number of transpositions	5/layer

پارامترهای طراحی این ترانسفورماتور 500 KVA (شکل 1-7) در جدول (1-4) آمده است. در این جدول برای قطر سیم پیچ دو مقدار داده شده است که این دو مقدار مربوط به لایه های دوگانه سیم پیچ اند. علت لایه-لایه سازی سیم پیچ ها کاهش اثر میدان خودی هادی می باشد.

تلفات با استفاده از روش کالریمتری، 115 W تخمین زده شده است و شامل تلفات AC سیم پیچ ها و حرارت ناشی از Cryostat (که وظیفه پایین نگه داشتن دما را در حد مطلوب بر عهده دارد) و هادی های جریانی می باشد. اهداف بعدی تیم SEC-Fuji و دانشگاه Kyushu تغییر سیستم سرمایش از حمام نیتروژن مایع به سیستم جریان دائم نیتروژن سرد شده می باشد. هدف از این تغییرات، افزایش ظرفیت انتقال جریان سیم پیچ ها و استقامت عایقی سیستم عایق است.



شکل (1-7) ترانسفورماتور HTS ساخت SEC - Fuji و دانشگاه Kyushu

جدول (1-4): پارامترهای طراحی ترانسفورماتور (Fuji)

Capacity	500 KVA
Frequency	60Hz
Voltage (primary/secondary)	6600V/3300V
Current (primary/secondary)	76A/152A
Core	Silicon steel plate
High/width	1580mm/1110mm
Cross-sectional area	986 cm <sup>2</sup>
Magnetic induction	1.7 T <sup>1</sup>
Cryostat	GFRP

Height Diameter	1210mm 785mm/337mm
Winding Diameter (primary/secondary)	465.553/509.597 mm
Winding Height	748 mm

در پایان جداول (5-1) و (6-1)، که نشان دهنده مشخصات نامی تعدادی از ترانسفورماتورهای به کار رفته در شبکه ایران [7] و ترانس های HTS که تا به حال ساخته شده است، برای مقایسه آورده شده اند. البته لازم به ذکر است که تمامی ترانسفورماتورهای HTS که تاکنون ساخته شده اند به صورت آزمایشی بوده و ساخت نمونه های صنعتی با توان و ولتاژ بالاتر، در دست مطالعه می باشد.

جدول (5-1): مشخصات برخی از ترانس های مورد استفاده در کشور

تعداد سیم پیچ	سطح ولتاژ (KV)	قدرت نامی (MVA)	نوع ترانس
سه سیم پیچه	400 / 132 / 20	200	قدرت
سه سیم پیچه	230 / 132 / 20	160	قدرت
دو سیم پیچه	400 / 230	300	قدرت
دو سیم پیچه	230 / 63	250	قدرت
دو سیم پیچه	410 / 15.75	190	قدرت
دو سیم پیچه	132 / 20	30	فوق توزیع
دو سیم پیچه	20 / 0.4	0.167	توزیع
دو سیم پیچه	20 / 0.4	0.5	توزیع
دو سیم پیچه	20 / 0.4	0.63	توزیع
دو سیم پیچه	20 / 0.4	1	توزیع
دو سیم پیچه	20 / 0.4	2	توزیع
دو سیم پیچه	20 / 0.4	5	توزیع
دو سیم پیچه	20 / 0.4	8	توزیع

جدول (6-1): مشخصات برخی از ترانس های HTS که در جهان به صورت آزمایشی ساخته شده اند

تعداد سیم پیچ	سطح ولتاژ (KV)	قدرت نامی (MVA)
دو سیم پیچه	138 / 13.8	30
دو سیم پیچه	24.9 / 4.2	5
دو سیم پیچه	13.8 / 6.9	1

دو سیم پیچه	18.7 / 0.42	0.63
دو سیم پیچه	13.72 / 0.42	0.63
دو سیم پیچه	10 / 0.4	0.63
دو سیم پیچه	6.6 / 3.3	0.5

### 1-5- نتیجه گیری

در این بخش سعی شد مطالب مربوط به شناخت کلی فناوری های ابررسانا (HTS و LTS) و ترانسفورماتورهای HTS آورده شود. در واقع برای ساخت ترانسفورماتور HTS در یک کشور، ابتدا باید به فناوری ابررساناهای HTS دست یافت، در این بخش نیز موارد فنی ابررسانا بررسی شد. پس اگر در کشوری تکنولوژی HTS رایج شد، کاربردهای مختلف آن از جمله ترانس HTS نیز دور از انتظار نیست. نکته مهم دیگر برای سازندگان ترانسفورماتور که علاقه مند به این فناوری هستند، موارد فنی مربوط به سیستم تبرید ترانس HTS است (که از مراحل مشکل ساخت ترانس است). برای سازندگانی که موارد فنی فوق قابل حل باشد به کارگیری این تکنولوژی بسیار مفید خواهد بود. برای کشورهایی که قصد واردات این تکنولوژی را نیز دارند با توجه به صرفه جویی هزینه در بلند مدت سودمند خواهد بود.

### مراجع

- [1] A P Malozemoff, et al, "Progress in HTS Coated Conductors and Their Applications", American Superconductor Corp. , March 2007.
- [2] William Parks, et al, "Superconductivity for Electric Systems", Department of Energy, January 2005.
- [3] R.A Hawsey ,et al, "ORNL Superconducting Technology Program For Electric Power Systems" Oak Ridge Natinal Laboratory, April 2000.
- [4] Sam P. Mehta, et al, "Transforming Transformers", IEEE Spectrum, July 1997.
- [5] Chandra T. Reis, et al, "Development of High Temperature Superconducting Power Transformers", Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE Volume 2, Page(s): 432 – 437, 2001.
- [6] <http://itri.loyola.edu>
- [7] [www.iran-transfo.com](http://www.iran-transfo.com)



[www.ControlMakers.ir](http://www.ControlMakers.ir)