

# ENERJİ VERİMLİLİĞİ ve SÜPERİLETKEN MALZEMELER

<sup>1</sup> Rifki TERZİOĞLU, <sup>2</sup>Türker Fedai ÇAVUŞ  
<sup>1,2</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği  
<sup>1</sup>[rterzioglu@sakarya.edu.tr](mailto:rterzioglu@sakarya.edu.tr) <sup>2</sup>[tcavus@sakarya.edu.tr](mailto:tcavus@sakarya.edu.tr)

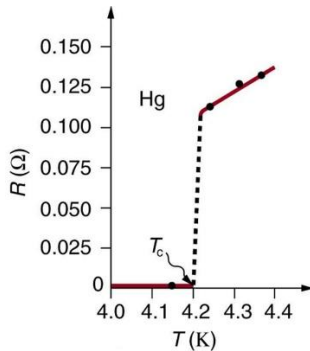
## ÖZET

Bu çalışmada dünyada birçok akademik çalışma ve uygulaması bulunan süperiletken malzemeler hakkında genel bir anlatım yapılmış, ülkemizde mühendislik alanında çok uygulaması bulunmayan süperiletken malzemelerin temel özelliklerinden bahsederek konuya ilgi çekmek amaçlanmaktadır. İlk keşfedildiği günden günümüze gelene kadar gösterdiği gelişim ve bu gelişim sonucunda kendisine bulduğu geniş uygulama alanları anlatılmıştır. Süperiletken malzemelerin kullanılmasıyla temiz enerjiye katkısı ve güç sistemlerinde kullanıldıklarında sağladıkları avantajlardan bahsedilmiştir. SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) ve FCL (Fault Current Limiter) gibi geleneksel güç sistemlerinde karşılığı bulunmayan özel elemanlar tanıtılmıştır. Süperiletken iletim hatları, jeneratör ve transformatörlerin kullanılması enerji verimliliğini arttırmaktadır. Son olarak süperiletken malzemelerin yaygınlaşması için hangi konularda gelişim sağlaması gerektiği ve çalışmalarda önem gösterilmesi gereken noktalara değinilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Enerji Verimliliği, Süperiletken güç sistemi, Süper iletken jeneratör.

## 1. GİRİŞ

İlk süperiletken malzeme 8 Nisan 1911 yılında Lieden’de Hollandalı fizikçi Heike Kamerlingh Onnes ve çalışma grubu tarafından keşfedilmiştir [1]. Onnes yaptığı çalışmaların sonucunda cıva elementinin sıvı helyum kullanarak 4,2 kelvine kadar soğutulduğunda elektriksel direncinin sıfıra ( $<10^{-27}\Omega m$ ) yaklaştığını görmüştür. Onnes yaptığı bu buluşla 1913 yılında Nobel ödülü kazanmıştır.



Şekil 1. Cıvanın sıcaklık-direnç grafiği [2].

Cıvadan sonra birçok elementin süperiletken olduğu deneysel olarak kanıtlanmıştır. Tablo 1’de süperiletken olan bazı elementler ve süperiletken oldukları sıcaklıklar gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Süperiletken bazı elementler/alaşımalar ve kritik sıcaklıkları.

Element	$T_c(K)$
In	3.40
Hg	4.015
$Nb_3Al$	17.5
NbTi	10.0

Süperiletkenliğin keşfinden sonra 1933 yılında Meissner ve Ochsenfeld Meissner etkisini, 1957 yılında Bardeen, Cooper ve Schrieffer BCS teorisini yayınlamaları süperiletkenlerin temel özelliklerini bilimsel olarak açıklamışlardır [3], [4].

Bu gelişmelerden sonra süperiletken malzemeler kendilerine uygulama alanı bulmuş fakat soğutmanın helyumla yapılmasından ve süperiletkenliğin bozulduğu kritik akım değerlerinin yeterince yüksek olmamasından dolayı beklenen ve istenen derecede yaygınlaşamamıştır.

1986 yılında Bednorz ve Müller tarafından Zürih’te IBM Laboratuvarlarında Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri (YSS) olarak adlandırılan yeni bir süperiletken sınıfı bulunmuştur [5]. En önemli YSS’ler YBCO (itriyum baryum bakır oksit) ve BSCCO (bizmut stronsiyum kalsiyum bakır oksit)’dir. YSS’lerin keşfinden sonra soğutma işlemi sıvı azotla gerçekleştirilmeye başlanmış ve kritik akım değerleri istenilen büyüklüklere yükselmiş böylelikle uygulama alanları daha da artmıştır. 1986’dan günümüze bu alanda 50 000’den fazla makale yayınlanmıştır. Süperiletkenler eşsiz özelliklerinden dolayı elektrik güç sistemleri, medikal, ulaşım ve bilim gibi birçok alanı mevcuttur [6], [7].

## 2. SÜPERİLETKENLERİN TEMEL ÖZELLİKLERİ

Süperiletkenlik en temel anlamda; belirli malzemelerin karakteristik kritik sıcaklıkları altına soğultulduklarında elektriksel direncilerinin sıfır

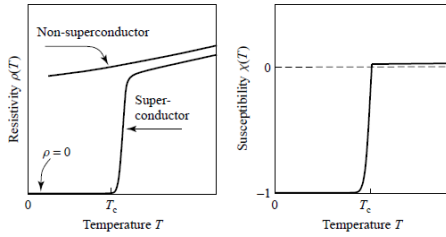
olması ve üzerlerine uygulanan manyetik alanı tamamen dışlaması olarak açıklanabilir.

Her süperiletken malzemenin kendisine ait bir kritik sıcaklığı, kritik manyetik alanı ve kritik akım yoğunluğu vardır. Eğer malzeme o kritik sıcaklık, kritik manyetik alan ve kritik akım yoğunluğu değerlerinden herhangi birinde fazlasına maruz kalırsa malzeme normal faza geçer ve süperiletkenlik bozulur. Kritik manyetik alan süperiletken malzemenin sıcaklığına bağlıdır. Yüksek akım değerleri süperiletken özelliklerin yok olmasına sebebiyet vermektedir. Çok yüksek basınçta, kritik sıcaklık ( $T_c$ ) basınç ile doğru orantılıdır.

Süperiletkenlerin en önemli iki temel özelliği mevcuttur:

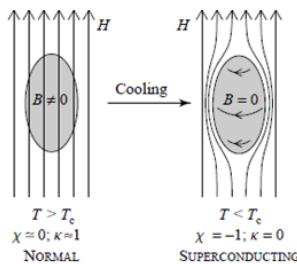
-Doğru akımda sıfır direnç özelliğine sahiptirler (alternatif akımda durum farklıdır). Alternatif akımda Alternatif akımları adı verilen kayıplar mevcuttur [8],[9],[10],[11].

-Mükemmel diamanyetik özelliğe sahiptirler.



Şekil 2. R-T ve Manyetik alınganlık-T grafiği [12].

Şekil 2'de R-T ve Manyetik alınganlık-T grafiği gösterilmiştir. Sıcaklık düşürüldükçe malzemenin öz direnci azalmakta ve  $T_c$  değerine gelindiğinde öz direnç ( $\rho = 0$ ) sıfır olmaktadır. Bu durumda manyetik alınganlık ( $\chi = -1$ ) değerinde -1 olmaktadır. Manyetik alınganlık değerinin -1 olması malzemenin mükemmel diamanyetik özellikte olduğunu göstermektedir. Malzeme üzerine uygulanan bütün manyetik alanı dışlamaktadır. Manyetik alanın dışlanması olayına Meissner etkisi denmektedir.

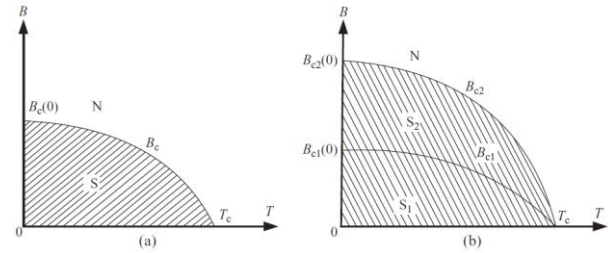


Şekil 3. Meissner etkisi [12].

Süperiletken malzemeler maruz kaldıkları dış (harici) manyetik alana göre normal durum veya süperiletken durumunda bulunabilme yeteneğine sahiptirler. Manyetik alan belirli bir kritik değere ( $H_c$  veya  $H_{c1}$ ) ulaştığında Meissner etkisi yok olur ve malzemenin içine akı nüfuz eder. Manyetik alanın artmasıyla malzemenin verdiği tepkiye göre süperiletkenler iki kategoriye ayrılmaktadır:

**I. Tip Süperiletkenler:** Malzeme belirli bir manyetik alandan sonra Meissner etkisinden kurtulup normal duruma geçerek içerisine manyetik akının tamamen nüfuz etmesine izin vermektedir. Genellikle kritik manyetik alanları küçüktür.

**II. Tip Süperiletkenler:** Bu tip malzemelerde  $H_{c1}$  olarak adlandırılan alt kritik manyetik alan değerine kadar malzeme I. Tip ile aynıdır. Akı bünyesine nüfuz etmez. Bu değerden  $H_{c2}$  değerine kadar ise kısmi akı nüfuzu söz konusudur. Fakat süperiletkenlik devam etmektedir.  $H_{c2}$  değerinden sonra ise malzeme normal faza geçiş yaparak süperiletkenliğini kaybetmektedir. Şekil 4'de I. Tip ve II. Tip süperiletkenlerin uygulanan manyetik alana göre buldukları fazlar gösterilmiştir.



Şekil 4. Süperiletkenlerin faz diyagramları (a) I. Tip; (b) II. Tip Süperiletkenler [13]

### 3. SÜPERİLETKENLERİN UYGULAMA ALANLARI

Süperiletken malzemeler YSS'lerin keşfiyle kendilerine birçok uygulama alanı bulmuşlardır. Bunlardan en önemlisi güç sistemleridir. Güç sistemleri sürekli olarak kısa devre (fault current), aşırı yüklenme (overload), gerilim çökmesi (voltage collapse), yeni iletim hatları için yeterli alanın bulunmaması ve yüksek kayıplar gibi birçok sorunla karşı karşıya kalmaktadır. Yüksek sıcaklık süperiletkenleri (YSS) sahip oldukları sıfır direnç ve mükemmel diamanyetik özellikleriyle elektrik güç sistemlerindeki bu sorunları en aza indirmek üzere birçok alanda kendine uygulama alanı bulmuştur.

### Süperiletken kablolar:

Doğru akımda kayıpsız, alternatif akımda ise çok düşük kayıpları nedeniyle az enerji kaybını sağlarlar. Aynı boyuttaki süperiletken iletkenler normal iletkenlere göre 2 ila 10 kat arasında akım taşıyabilmektedirler. Kablolar soğutma işlemine tabii tutulacağından yer altındadır. Kaybın olmaması CO<sub>2</sub> salınımını azaltarak bu kabloların çevreye olumsuz etkilememesini sağlamaktadır. Isınmanın olmaması iletilen enerjideki verimin artmasına sebep olmaktadır.

### FCL (Fault Current Limiter):

Güç sistemlerinde oluşabilecek yüksek kısa devre akımlarını süperiletken malzemelerin kendi karakteristikleri (normal ve süperiletken durumu) kullanılarak kısa sürede sınırlandırmaya yarayan süperiletken cihazlardır [14], [15]. Rezistif ve endüktif gibi birçok çeşidi mevcuttur. Bu cihazların kullanılması kısa devre durumunda devrede kesiciler açılana kadar kısa devre akımını belirli bir seviyede tutulmasını sağlamaktadır. Arıza durumu kalktıktan sonra insan müdahalesi gerektirmeden eski durumlarına dönebilmektedirler.

### SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage):

Doğru Akım (DA) kullanarak enerjiyi depolayan bir sistemdir. İçerisinde akımı kayıpsız olarak depolayabilen süperiletken tellerden sarılmış bir bobin vardır. Bir çeşit FACTS (Flexible AC Transmission Systems) cihazıdır. Sisteme paralel bağlanır. Sistemde oluşan fazla enerjiyi depolayan ve gerektiğinde sisteme geri enjekte ederek tüketiciye kesintisiz ve sabit frekansta gerilim sağlarlar. Bu konuda güç sistemlerinde akıllı şebekeleride kapsayan çalışmalar mevcuttur [16],[17],[18].

### Süperiletken Jeneratörler:

Süperiletken malzemelerden üretilen iletkenlerin normal iletkenlere oranla daha fazla akım taşıyabilme özelliklerinden dolayı süperiletken malzemelerden üretilen motor ve jeneratörler boyut olarak küçülmektedir. Ayrıca kayıplar azaldığından verimlerinde yüksektir [19].

### Süperiletken Trafolar:

Normal trafolarla göre daha küçük boyutta ve ağırlıktadırlar. Soğutma işlemi yağ yerine sıvı azotla yapıldığından çevreye zarar verilmemektedir.

Bunların dışında ulaşım sektöründe Maglev trenleri mevcuttur. Maglev kelimesi Magnetic Levitation kelimelerinin kısaltmasıdır. Maglev trenlerin altında güçlü süperiletken mıknatıslar bulunmaktadır. Bu

mıknatıslar sayesinde tren havada askıda kalmakta böylece ses ve sürtünme en aza indirilmektedir. Aynı zamanda Maglev trenleri çevre dostudur.

Süperiletken mıknatıs ve bobinlerin sağladığı yüksek manyetik alanlardan yararlandığı NMR ve MRI gibi medikal uygulamalarda da kullanılmaktadır. Ayrıca Biyomedikal Mühendisliğinde, kanser tedavisinde ve nanoparçacıklarda da süperiletken malzemeler kullanılmaktadır. Bilimde ise yüksek enerji fiziği, RF (Radyo Frekans) mıknatısları, hassas manyetik ölçümleri (SQUID) vb. birçok alanda kullanılmaktadır. Ayrıca uluslararası bir anlaşma olan Kyoto Protokolünün ana amacı, atmosferdeki sera gazı yoğunluğunun, iklime tehlikeli etki yapmayacak seviyelerde dengede kalmasını sağlamaktır. Protokol, sera gazı emisyonunu azaltma amacı doğrultusunda sanayileşmiş ülkelere bir dizi bağlayıcı hedefler öngörmüştür. Süperiletken malzemelerin kullanımı ile ısıya dönüşen kayıplar azaltılacağı ve soğutma işlemlerinde yağ yerine sıvı azot kullanılacağından sera gazı emisyonu azalacaktır. Süperiletken malzemeler bu yönlüyle temiz enerji kavramına katkıda bulunmaktadır.

Bu uygulama alanlarıyla açıkça görülmektedir ki süperiletken malzemeler; Malzeme, Elektrik-Elektronik, Biyomedikal, Makine ve Bilgisayar Mühendisliği gibi birçok mühendislik alanında kullanılabilir.

## **4. SONUÇLAR**

Süperiletken malzemelerin kullanılmasının birçok avantajları mevcuttur; ısı kaybı olmadan büyük miktarlarda enerji taşınabilir, normal iletkenlere oranla iletkenin kesitinde küçülme olduğu için; ya aynı kesitte daha fazla güç iletilir ya da aynı gücü daha ince kesitte taşınabilir. Oluşabilecek hatalardan sonra hızlı bir şekilde kendilerini düzeltebilmektedirler.

Süperiletken malzemelerin kullanılmasıyla üretilen jeneratörlerde birkaç MVA'ya kadar 30-40% ve 100MVA üzerindeki güçlerde 40-50% oranında kayıplarda azalma, 30-50% oranında ise boyut ve ağırlığında azalma mevcuttur. Transformatörlerde 50% oranında kayıplarda ve 30-50% oranında ise boyut ve ağırlıkta azalma görülmektedir.

YSS güç kabloları normal kabloların 2 ila 10 katında akım taşıyabilirler. Kablonun izlediği yol genellikle yeraltındadır. Bunun sebebi sıcaklığın kontrolü yeraltında daha kolaydır. Telekomünikasyon, gaz ve su hatları yanında yerleştirilebilir. Süper iletkenler,

akıllı şebekelerde kullanılacak bilgisayar işlemcilerinde hızı artırır.

Dezavantajları ise; Süperiletken malzemeler sadece belirli bir sıcaklığın altında akımı kayıpsız olarak taşıyabilmektedirler (Sıcaklık kontrolü gerektiriyor), maliyeti normal bakır ve alüminyum kablolarına göre daha yüksektir. Süperiletkenler günümüz koşullarında yaygın değildirler.

Süperiletken cihaz ve elemanların geleneksel ekipmanlar yerine kullanılabilmesi için;

- Daha fazla akım taşıyabilen süperiletken kablolar geliştirilmeli,
- Var olan süperiletken kablolarında maliyeti azaltılmalı,
- Soğutma sistemleri ucuz hale getirilebilir,
- Yüksek sıcaklıklarda süperiletken olabilen yeni malzemeler araştırılabilir.

Dünyada süperiletken malzemelerin mühendislik alanında kullanıldığını gösteren birçok uygulama ve akademik çalışmalar mevcuttur [20], [21].

## KAYNAKLAR

[1] HK Onnes, The superconductivity of mercury, Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden, 1911.

[2] İnternet sitesi:

<https://www.boundless.com/physics/textbooks/boundless-physics-textbook/electric-current-and-resistance-19/resistance-and-resistors-146/dependence-of-resistance-on-temperature-523-5640>. Erişim Tarihi: 01.04.2015.

[3] Meissner, W.; R. Ochsenfeld, Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit, Naturwissenschaften 21 (44): 787–788, 1933.

[4] Bardeen, J.; Cooper, L. N.; Schrieffer, J. R., Microscopic Theory of Superconductivity, Physical Review 106 (1): 162–164, April 1957.

[5] J. G. Bednorz, K. A. Müller Possible high  $T_c$  superconductivity in the Ba–La–Cu–O system, Zeitschrift für Physik B Condensed Matter 1986, Volume 64, Issue 2, pp 189-193.

[6] Teemu Hartikainen, Jorma Lehtonen, Risto Mikkonen, “Reduction of greenhouse-gas emissions by utilization of superconductivity in electric-power generation”, Applied Energy, Volume 78, Issue 2, June 2004, Pages 151–158.

[7] Md Multan Biswas, Md Shafiul Azim, Tonmoy Kumar Saha, Umama Zobayer, Monalisa Chowdhury Urmi, Towards Implementation of Smart Grid: An Updated Review on Electrical Energy Storage Systems, Smart Grid and Renewable Energy, 2013, 4, 122-132. doi:10.4236/sgre.2013.41015 Published Online February 2013 (http://www.scirp.org/journal/sgre).

[8] Carr, W. J., AC Loss and Macroscopic Theory of Superconductors. 2 ed. New York: Taylor and Francis, 2001.

[9] Safran, S., MgB<sub>2</sub> süperiletken tellerde alternatif akım kaybı ve akı perçinleme mekanizmaları. Ankara, Türkiye: Ankara Üniversitesi (Doktora Tezi), 2010.

[10] Friedman, A., Wolfus, Y., Kopansky, F., & Yeshurun, Y., AC losses in HTS multi-pancake coils made of BSCCO-tape. Journal of Physics: Conference Series(234, 032014), 2010.

[11] Martinez, J. C., Analysis of ac losses in superconducting electrical components for application in the design of electrical systems. İspanya: PhD Thesis University of Extremadura, 2010.

[12] Kristian Fosshem and Asle Sudbø, “Superconductivity Physics and Applications”, John Wiley and Sons, Ltd, 2004.

[13] Yinshun Wang, “Fundamental Elements of Applied Superconductivity in Electrical Engineering” Wiley, 2013.

[14] Yasuyuki Shirai , Sho Noda, Kenta Yamabe , Keisuke Hattori , Jumpei Baba, Shinichi Kobayashi, Kenichi Sato, Current limiting performance test of 3-phase tri-axial transformer-type SFCL with re-wound structure at 3-line-to-ground fault in lab-scale transmission system, Physica C 484 (2013) 248–252.

[15] Noe, M., & Steurer, M., High-temperature superconductor fault current limiters: concepts, applications, and development status. Supercond. Sci. Technol.(20), R15–R29, 2007.

[16] A-Rong Kim, Gyeong-Hun Kim, Serim Heo, Minwon Park, In-Keun Yu, Hak-Man Ki, SMES application for frequency control during islanded microgrid operation, Physica C 484 (2013) 282–286.

[17] Uttam Bhunia, Subimal Saha, Alok Chakrabarti, Design optimization of superconducting magnetic energy storage coil, Physica C 500 (2014) 25–32.

[18] Jiakun Fang, Wei Yao, Jinyu Wen, Shijie Cheng, Yuejin Tang, Zhuo Cheng, Probabilistic assessment of power system transient stability incorporating SMES, Physica C 484 (2013) 276–281.

[19] Swarn Singh Kalsi, Applications of High Temperature Superconductors to Electric Power Equipment, A John Wiley and Sons INC., 2011.

[20] Ali, M., Wu, B., & Dougal, R., An Overview of SMES Applications in Power and Energy Systems. IEEE Transaction on Sustainable Energy, 1(1), April 2010.

[21] Fang, J., Wen, J., Wang, S., Shi, J., Ren, L., Tang, Y., . . . Chen, Z. Laboratory and Field Tests of Movable Conduction-Cooled High-Temperature SMES for Power System Stability Enhancement.

IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED  
SUPERCONDUCTIVITY, 23(4), AUGUST 2013.