

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Elekt. Ulaş. Sİst. Mod. Tek. Kul.

Yüksek Lisans Tezi

Nuran Canbulat

1989

R 152
126

T. C.
YILDIZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ULAŞIM
SİSTEMLERİNDE MODERN
TEKNOLOJİLERİN KULLANIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elk. Müh. Nuran CANBULAT

İSTANBUL - 1989

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
KÜTÜPHANE DOKÜMANTASYON
DAİRE BAŞKANLIĞI

Kot : R 152
126

Alındığı Yer : FEN BİL. ENS.

Tarih : ...16.04.1992...

Fatura : - - - - -

Fiyatı : ...20.000. TL.

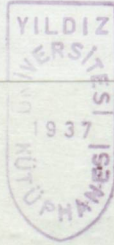
Ayniyat No : ...1/2

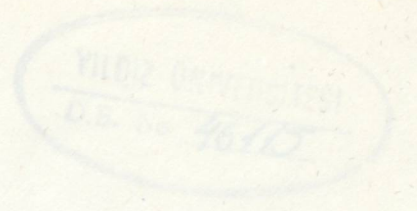
Kayıt No : ...48337

UDC : ...621.3 378.242

Ek :

2

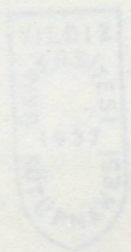




T.C.
YILDIZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ULUSLARARASI ULUSLARARASI SİSTEMLERİNİN KURULUŞU VE GELİŞİMİ
KURULUŞU VE GELİŞİMİ

Yüksek Lisans Tezi
Çok. Prof. Nuran ÇARŞILAT



İstanbul, 1989



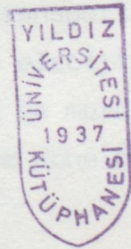
T.C.
YILDIZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİKLİ ULAŞIM SİSTEMLERİNDE MODERN TEKNOLOJİLERİN
KULLANIMI

ABSTRACT

In my thesis, I have tried to explain superconductivity
which is a new technology in conductivity in which investigation
has been developed. Also, some temperature has been the

Yüksek Lisans Tezi
Elek. Müh. Nuran CANBULAT



İstanbul, 1989

ÖZET

Tezimde, yeni bir tekholoji olan ve hızla gelişmeye devam eden, sıcaklığı her geçen gün yükseltelen süperiletkenliği kısaca anlatmaya çalıştım. Enerji iletimi üzerine olan çalışmamda, AC ve DC süperiletken kabloları avantajları ve dezavantajları ile inceledim. Buna ek olarak, süperiletkenliğin elektrik makinalarında, transformatörlerde, manyetik enerji depolanmasında, elektronikte ve tıpta uygulama şekillerini açıkladım,

Bu buluşun, ulaşımdaki uygulamasını ve bir elektrikli ulaşım sisteminde taşıyıcı iletkenin süperiletken olması durumunu araştırdım.

Dileğim, bu konudaki çalışmaların çoğalması ve daha iyi araştırmaların yapılmasıdır.

ABSTRACT

In my thesis, I have tried to explain superconductivity which is a new technology in conductivity on which investigation have been developed, made and whose temperature has been increased day by day,

In my study of energy conducting, I have investigated superconducting cables their advantages and disadvantages. In addition to this, I have tried to explain, the use of superconductivity in electrical machines, transformers, magnetic energy storing, electronic and medicine.

I have investigated the application of this unique invention of this century in transportation and the carrier line's being superconductive in an electrical transportation system.

I wish there would be more investigations and that they would be better than those done nowadays.

İÇİNDEKİLER

ÖZET

1.	GİRİŞ	1
2.	SÜPERİLETKENLİĞİN TANITIMI	1
2.1.	Yüksek alan, yüksek akım süperiletkenleri	7
2.2.	Bozulma ve Kararlılık	10
2.3.	AC Süperiletkenlerin A.C Çalışması	15
2.4.	Süperiletkenlerin Olağandışı Davranışları ve Josephson Etkisi	16
3.	SÜPERİLETKEN MADDELERİN TARİHİ GELİŞİMİ	19
4.	EN MODERN SÜPERİLETKEN BİLEŞİMİNİN TANITILMASI	22
5.	SÜPERİLETKENLERİN SOĞUTULMASI	25
5.1.	Düşük Isı Çevresi Sorunları	25
5.2.	Çevreyi Sınırlama	27
5.3.	Yeni Bir Süperiletken Soğutucu Arayışı ve Helyum Soğutucu ile Karşılaştırılması	29
6.	SÜPERİLETKENLİĞİN UYGULAMA ALANLARI	30
6.1.	Süperiletken Kablolar	30
6.1.1.	Süperiletken Kablolara örnekler A.C ve D.C Süperiletken Kabloları	30
6.1.2.	Süperiletkenli D.C Enerji İletim Hatlarındaki Gelişmelerin İncelenmesi	35
6.1.2.1.	Kayıp Ölçmeleri	36
6.1.2.2.	Kritik Akım Ölçmeleri	40
6.1.3.	D.C Bir Süperiletken Güç İletim Hattının Elektriki, Cryojenik Sistemler Planı	45
6.1.3.1.	Giriş	45
6.1.3.2.	Kablo Kavramları	46
6.1.3.3.	Sert Boru Biçiminde Yapılar	46
6.1.3.4.	Sarılmış Şeritler	46
6.1.3.5.	Sistem Koşulları	46
6.1.3.5.1.	Gigawatt İletim Hatları için Uygulamalar	46
6.1.3.5.2.	Akım ve Gerilim Değerlendirmesi	46

6.1.3.5.3.	Çevirme İstasyonları, Arızalar ve Dalgalanma	50
6.1.3.5.4.	Enerji Kayıpları	54
6.1.3.6.	Maliyet Tahminleri	54
6.1.4.	1000 MVA'lık Süperiletken Bir Güç İletim Sisteminin İşletim Karakteristikleri	57
6.1.4.2.	Zayıflatılmış Çalışma	60
6.1.4.3.	Sonuçlar (Terminations)	61
6.1.4.4.	Crojenik Kavramlar (Cryogenic Bushings)	62
6.1.4.5.	Crojenik Ekleme Yeri	63
6.1.4.6.	Sonuçlar	63
6.2.	Elektrik Makinaları	64
6.2.1.	D.C Makinaları	65
6.2.2.	A.C Makinaları	66
6.3.	Süperiletken Transformatörler	67
6.4.	Süperiletkenin Manyetik Enerji Depolaması	69
6.5.	Süperiletkenliğin Elektronikteki Uygulamaları	69
6.6.	Süperiletkenliğin Elektrikli Ulaşım Sistemlerindeki Uygulamaları	70
6.6.1.	Maglev Sisteminin Özellikleri	70
6.6.2.	Transrapid Maglev Sistemi	72
6.6.3.	MLU 001 Maglev Treni	73
7.	BİR ELEKTRİKLİ ULAŞIM SİSTEMİNDE, SEYR İLETKENİN SÜPERİLETKEN OLMASI DURUMUNUN İNCELENMESİ	74
8.	DEĞERLENDİRMELER	77
9.	TEŞEKKÜR	80
10.	ÖZGEÇMİŞ	81
11.	YARARLANILAN KAYNAKLAR	82

1- GİRİŞ

Son yıllarda teknolojide yeni gelişmeler, yeni ufuklar doğmuştur. Bütün dünya ülkelerinin üzerinde araştırmalarını yoğunlaştırdığı, konulardan birisi de süper iletkenliktir. Bugün elektrik güç mühendisliğinin çeşitli alanlarında süper iletkenlik uygulamaları hakkında birçok makaleler, araştırmalar, çalışmalar üretilmektedir.

Bakır ve alüminyum, neredeyse evrensel boyutlarda gerek dönen makinalarda, gerekse hava nakil hattı olarak, ya da bir elektromanyetikte iletken olarak kullanılmaktadır. Elektromanyetik elektrikle karşı karşıya olan araçlarda, örneğin; bir makina ya da transformatörde demir ikinci bir etkin malzeme olarak öngörülmektedir ve maliyet etkinlik çözümü için iletken ağırlığı artı demirin ağırlığına bağlı olmaktadır.

Metalik iletkenlerin elektrik direncinin sıfıra doğru düşürüldükçe düştüğü öteden beri bilinmektedir. Bu yüzden verilen bir akım yüküne karşı bir iletkendeki direnç kaybı yeterince aza indirgenebilir. Direnç kayıpları elektrikle çalışan her türlü araç için oldukça önemlidir.

İşte süperiletkenler direnç nedeniyle enerji kaybına neden olmadan elektriği iletebilirler.

2. SÜPER İLETKENLİĞİN TANITIMI

Süper iletkenliğin iki belirleyici özelliği vardır. Maddenin içinde elektrik akışının sembolik ifadesi olan akımın ilerleyişi, o maddenin oylumunu oluşturan iyon örgüleriyle çarpışması sonucu engellenir. Bunun kuramsal düzlemde tanımı maddelerin "direnci" dir. Böyle bir iletken maddede, süperiletken duruma geldiğinde, bu direnç çarpıcı biçimde sıfıra iner. Bu konumda maddenin örgüsü, elektronları engellemek yerine onların birlikte hareketine destek olur. İşte bunun uygulamadaki anlamı süperiletken bir devrede elektrik akımının ilke olarak kayıpsız akacağıdır.

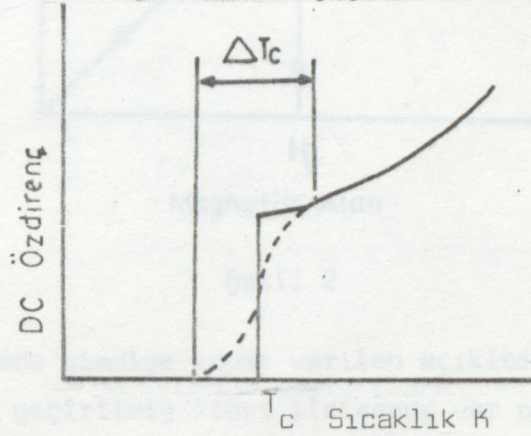
Süperiletkenlerin "sıfır direnç" göstermelerinin yanı sıra, yakınlarında bulunan herhangi bir manyetik alanı dışlamaları da ayırdedici bir özellikleridir. Örneğin bir mıknatıs, kritik sıcaklığın (süperiletkenliğe geçiş sıcaklığının) altında bulunan bir süperiletkeni sanki ters kutuplu

mıknatısmış gibi iter. Ancak kritik sıcaklığının üstünde, aynı süper iletken madde herhangi (mıknatıs olmayan) bir iletken gibi davranır. Yani mıknatısın süperiletken üzerinde bir etkisi gözlenmez.

Güç kabloları, yongalar gibi elektrik iletimiyle ilgili tüm uygulamalar için idealdirler. Süperiletkenler, elektrik akımını sadece kayıpsız iletmekle kalmayıp büyük miktarda akımı da taşıyabilirler. Küçük süperiletken bobinli mıknatıslar çok fazla enerji tüketmeden güçlü manyetik alanlar yaratabilirler. Bu gibi mıknatıslar, manyetik alan sayesinde havada giden trenlerin yapımını sağlayabilir, hızlandırıcı tünellerde ve nükleer manyetik rezonans tarayıcılarında parçacık saptırıcısı olarak kullanabilirler.

Süperiletkenlik ilk olarak 1911 yılında Hollandalı fizikçi H. Onnes tarafından cıvanın mutlak sıfır (0°K) sıcaklığı civarında soğutulduğunda elektrik akımına direnç göstermediğini gözlemesiyle keşfedilmişti. Sadece 4°K 'in ($0^{\circ}\text{K}=-273^{\circ}\text{C}$) altındaki sıcaklıklarda varolabilen sıvı helyum mutlak sıfır sıcaklığı dolayındaki soğutmalar için oldukça uygundu. Deneysel olarak gerçekliği 1911'de kanıtlanan süperiletkenlerin kuramsal temellerinin tam olarak atılabilmesi için 1957'e kadar beklendi. 1957'de Bardeen Cooper ve Schrieffer tarafından "BCS kuramı" adı verilen teori ortaya atılmıştır. BCS kuramı daha sonra birçok düzenlemelere maruz kalmıştır. Fakat başlıca bir uç iletken geçiş ısısının, T_c , altında iletken elektronlar "Cooper çiftlerini" oluşturmak için bir araya gelerek yeni bir düzenek durumunu alırlar. Bu çiftlerin oluşumu, iletken elektronlarla onların örgü içinde hareketlerinden doğan titreşimler arasındaki uyuma bağlıdır. Düşük ısılarda (T_c altında) bu uyumlu titreşimler uyumsuz ısı titreşimlerini denetim altına alırlar ve eğer karşı devinim elektronları bilinen örgü titreşiminde çiftleşmişlerse, metalin serbest enerjisi düşer. Örgü, salınan elektronları bağlayan bir yay gibi görünebilir ve mekanik devinimin değiş tokuşu için bir ortam görevi görür. Cooper çiftinin etkin çapı (bu "uyum uzunluğu" diye bilinir) 10^{-7} m düzenidir. (tipik interatomik mesafeler için bu 10^{-10} m dir); Merkezi yığılma ısıya bağlıdır ve bütün iletken elektronlar salt sıfırda çiftlenir. Bir taşınan akım bir uç iletkenle geçiriliyorsa, bu durum aynı hızda hareket eden büyük sayıdaki Cooper çiftleriyle korunur. Kolektif olarak bunlar bir

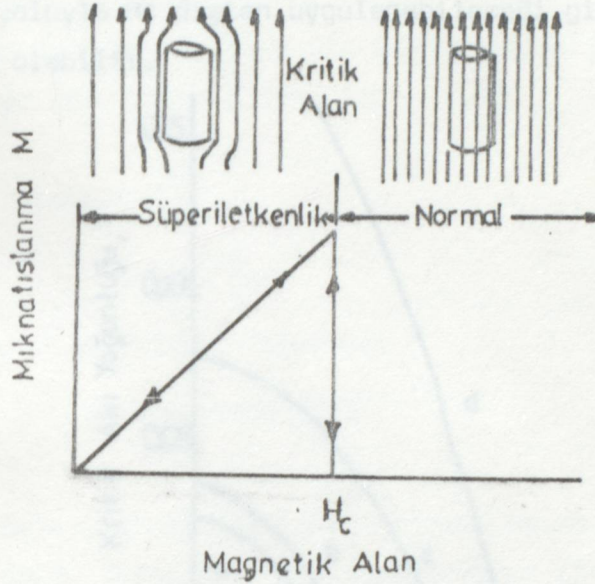
tek Broglie dalgasını temsil ederler. Cooper çiftlerinin yoğunluğu fazla ve akış hızı buna karşın oldukça düşüktür, sonuç olarak eşit dalga uzunluğu, örgü kusuru boyutlarıyla karşılaştırılınca, oldukça fazladır. Bu koşullar altında saçılım olgularına oldukça seyrek rastlanır ve uç iletkenin elektrik direnci kaybolur. Özellik şekil (1) deki eğimle ifade edilmiştir. Uç iletken saf metaller için geçişim ısı T_c , 0-01-9.15 K'dır; uç iletken alaşımlar intermetalik bileşimler için T_c 20K'nın üzerine kadar uzanan bir değişkenlik gösterir. Üzerinde normalden uç iletkene dek geçişimin yer aldığı ΔT_c ısı aralığı 10^{-3} K düzeninde ya da gene maddenin durumuna bağlı olarak çeşitli derecelerde olabilir..



Şekil 1.

Bir "yumuşak" yada "Tip-1" süperiletken; örneğin kurşun yada teneke gibi, aslında bu katışıksız mıknatıs iten özelliği gösterir. Yüzey yada perdeleme akımları, giderek dış manyetik alan "girginlik derinliği" denen yüzey döşemede bozulur. İleri iletken içindeki yerel manyetik alan ile yerel akım yoğunluğu arasındaki ilişki ilkten "London olgusal kuramında" ileri sürülmüştür. A-1 boyutsal çözümlemesi $H_x = H_0 \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right)$ li getirir. Burada x , yüzeyden olan uzaklığı ve x girginlik derinliğini gösterir, bu durum 10^{-8} m dir.

Tip-1 süperiletkenlerin hareketi şekil (2) de gösterilmiştir. Biz ani gelişimi niteliksel olarak "kritik olan" H_c 'ye göre biliriz, çünkü manyetik alan ile ileri iletken elektronları arasındaki etkileşim "Cooper çiftleri" arasındaki bükümü kırabilecek yeterliliktedir.



Şekil 2

Bu durumda şimdiye kadar verilen açıklamalardan çıkararak T_c içinde soğutulmuş geçirilmiş iletkenlerde var olan manyetik alanın sürekli kalacağını bekleyebiliriz. Meissner ve Ochsenfeld'in önemli deneyleri varsayımın doğru olmadığını göstermiştir ancak manyetik alan soğutma ve manyetik alan uygulamasının sonucu ne olursa olsun, tip-1 yığından atılmaktadır. Eğer manyetik alan (Şekilde gösterildiği gibi boylalamasına değil) enlemesine uygulanmışsa, alan dağılımının asimetresi örnekteki hacimde, dirençliliğin giderek iyileşmesine yönelir. Silindirik örnekte geçişim $H_c/2$ dolayında başlayacak H_c 'de bitecektir. Geçişim noktaları H_c ve T_c bağımsız değildirler ve yaklaşık olarak parabolik bir tanımla ilişkilendirilebilirler.

$$H_c = H_0 \left(1 - \frac{T^2}{T_c^2}\right)$$

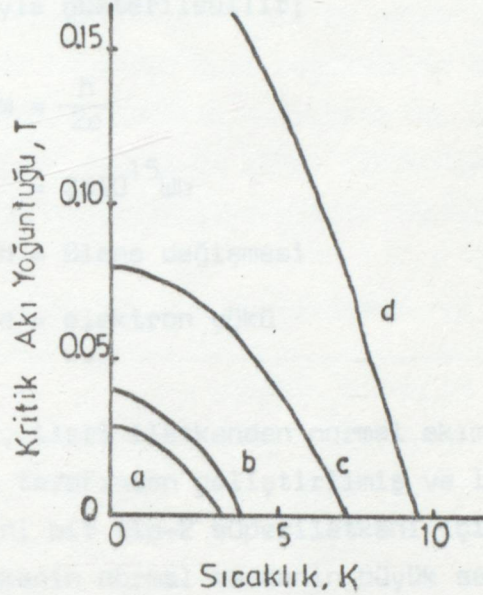
Burada,

H_0 = Kritik manyetik alan OK'dedir.

H_c = Kritik manyetik alan TK'dedir.

T_c = Kritik ısı sıfır-manyetik alandır. (İleri iletkenlik için en yüksek ısı olanaklıdır).

Süperiletken ve normal durumlar arasındaki bu sınır şekil(3)te gösterilmiştir. Bütün tip-1 iletkenler için $H_c 10^{-1}T$ 'nin altındadır. Süper iletken yoluyla H_c dıştan uygulanabileceği gibi iletken içinden akım geçişiyle de olabilir.



Şekil 3

Tip-1 süperiletkenlerinde akım yoğunluğu çok yüksek ($10^{12}A/m^2$) olabilir. Fakat sığ giriş derinliği toplam akımı sınırlar ve böylelikle bu tür ileri iletkenliğin yararı ortaya çıkar. Bu pozisyona herhangi bir direnç kaybına uğramaksızın, onların 100 MHz'e kadar olan frekanslardaki çalışma yetileriyle erişilebilir.

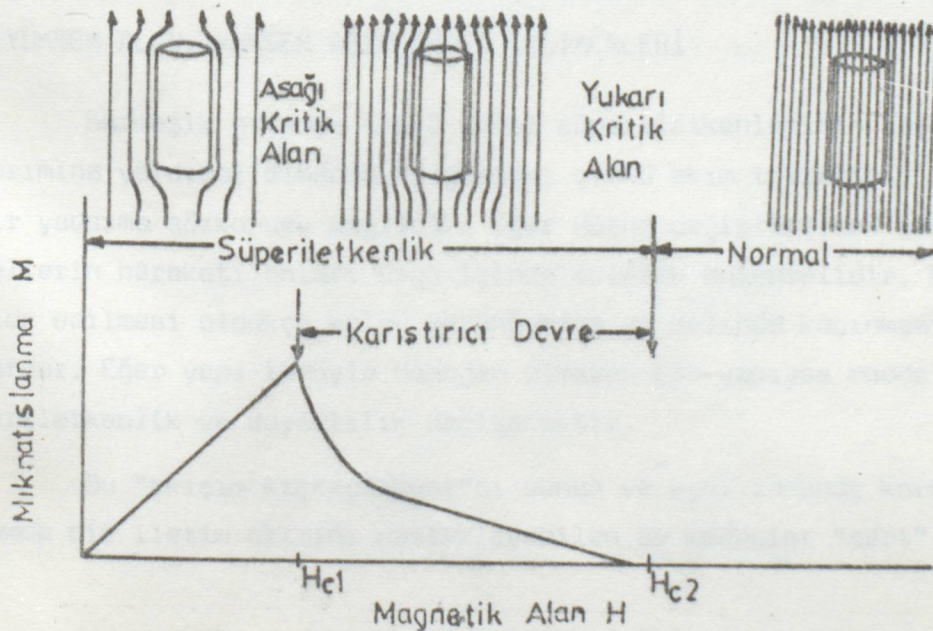
Tip-2 olarak bilinen ikinci süperiletken malzeme manyetik alanda farklı etkinlik gösterir. Bunun özellikleri şek (4) teki manyetikleme eğimiyle belirlenmektedir. H_{c1} 'in altında (düşük kritik nokta)hareketi Tip-1 dekinin aynıdır. H_{c1} 'in üstünde normal duruma geçiş ani olmaz; fakat yavaş yavaş bir arayla H_{c2} kadarlık bir alan gücünde oluşur. (üst kritik nokta) normal aşamaya geçişin tamamlanmış olması gerekir. "Karmaşık durum"la yayılan manyetik alan erimi diyelimki niobium alaşımı için 0-01 T düşük kritik alanından, 20 T Yüksek kritik alanına kadar olabilir. Tip-2 süperiletkenlerine verilen mühendislik önem, onların bu geçişte süperiletkenliği koruyabilmelerinden gelmektedir. 1950 yılında, Niels

Bühr tarafından kapalı bir süperiletken halka çevresindeki atomik elektronları toplama uygulaması olan nicel kuralların aynısını uygulayan London tarafından resimlenmiştir. Empoze edilen koşullar, halkadaki dönen akımın toplam manyetik akışıyla bağlantılı olmasını gerektirmektedir. Bu akışık nicem şöyle gösterilebilir;

$$\begin{aligned} \text{Akışık nicem} &= \frac{h}{2e} \\ &= 2 \times 10^{15} \text{ Wb} \end{aligned}$$

Burada; h = Plank değışmesi
 e = elektron yükü

Bu görüşler, ileri iletken normal akıma geçişı açıklamak için Ginsburg ve Landau tarafından geliştirilmiş ve 1957 Abrikosov Ginsburg Landau eşitliklerini bir tip-2 süperiletkeni için çözmüştür. O, karmaşık durumda, süperiletkenin normal maddenin büyük sayıdaki telleriyle bağlandığını ve bunların herbirinin uygulanan alana paralel akışa bir kuantum taşıdığını varsaymıştır. Her tel bir süperiletken burgacıyla sarılmış olup diğer bir komşu teli reddedici konumdadır. Tam sistem kendini bir örgü düzeninde ortaya koyar ve dış bir manyetik alanla bir arada tutulur. Akışık nicemin karmaşık durumda ilk gözlenmesi 1966 yılında Essman ve Trauble tarafından gerçekleştirilmiştir.



Şekil (4)

Mühendislik uygulamaları koşullarında ise şimdiye kadar gelişti-
regeldiğimiz durumlar pek ilginç değildir. Görüldüğü gibi hem tip-1,
hemde ideal tip-2 süperiletkenlerin iletilen akımın büyüklüğünü sınır-
lama özelliğine sahiptirler. Bu sınırlama ileri iletkenlik durumunda
tolere edilebilen manyetik alan için de geçerlidir. Durum tablo (1) de
gösterilmiştir. Her ne kadar bazı uygulamalar bu materyalleri yararlı
bir biçimde kullanmayı olanaklı kılıyorsa da, bizim tartışacağımız güç
uygulamalarının büyük çoğunluğu süper iletkenlerin en az enerji sarfiya-
tıyla manyetik alan oluşturabilmeleriyle ilgilidir.

Tip-1 ve İdeal Tip-2 süperiletkenlerin özellikleri

MADDE	KRİTİK SICAKLIK		KRİTİK ALAN
	T _c		B _c (H _c)
	K		T
Alüminyum (tip-1)	1,2		0.01
İndiyum (tip-1)	3.4		0.03
Kalay (tip-1)	3.7		0.03
Civa (tip-1)	4.4		0.04
Kurşun (tip-1)	7.2		0.08
Niobium (tip-2-İdeal)	9.3	Aşağı Yukarı	0.12 0.16 } 4.2K'de

Tablo (1)

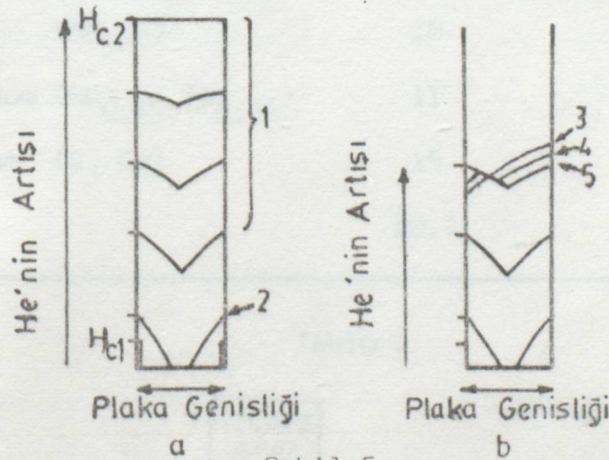
2.1 YÜKSEK ALAN, YÜKSEK AKIM SÜPER İLETKENLERİ

Karmaşık ortamda tip-2 ideal süperiletkenlerinin yararlı akım ak-
tarımına yardımcı olmadığını gördük, çünkü akım tellerinin hareketinde
bir yadsıma sözkonusu değildir. Eğer durum değiştirilmek isteniyorsa,
tellerin hareketi onları örgü içinde tutarak önlenmelidir. Bu koşulun
elde edilmesi oldukça kolay görünüyorsa da aslında kaçınması oldukça
zordur. Eğer yapı tümüyle homojen olmayan bir yapıysa madde içindeki sü-
periletkenlik ve duyarlılık değişecektir.

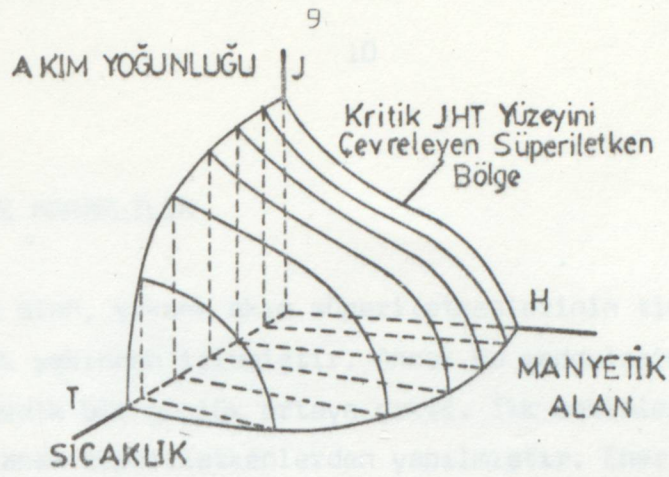
Bu "akışım kışkırtılması"nın sunan ve aynı zamanda karmaşık bir du-
rumda bir iletim akımını destekleyebilen bu maddeler "sert" ya da "yük-

sek alan" süperiletkenleri olarak bilinmektedirler. Tip-2 süperiletkenlerinin içinde akış girişinin önemi büyüktür. H_{c1} altında H_e dış alanı, yüzey perdeleme akımları nedeniyle tümünden dışlanmıştır. H_{c1} 'in üstünde akış süperiletken filament biçiminde giriş yapar. Akışın iletken içindeki hareketi koruganlama akımları denen akımlar oluşturur ve koruganlama akımları ile burgaçları arasında üretilen Lorentz gücüne iğneleme merkezi vasıtasıyla direnç verilmiştir. Bu iğneleme merkezlerinin gücü olması (kritik) akım yoğunluğunu sınırlamaktadır ve böyle akış girişinin derecesini saptamaktadır. Koruganlama akımları maddenin içine akım kritik yoğunluğu J_c eşdeğer bir akım yoğunluğu ile girerler. Artaduran H_e için söz konusu olaylar dizisi, süperiletken bir plaka için şekil (5) da gösterilmiştir. Şekilde verilen durumda yerel koruganlama akım eşit fakat plakanın diğer yüzeyinde karşı gösterge vermektedir; net iletilen akım sıfırdır. İletim akım JT 'nin etkisi şekil (5b) de gösterilmiştir. Plakada akım yoğunluğunda herhangi bir değişiklik yoktur.

Bu iğneleme gücüyle sınırlanmıştır. İletim akımı sözkonusudur. Çünkü o plakanın her iki yanı arasındaki dış alan içinde farklı sonuca varmak için bir yandaki koruganlama akım geçişinin yönünü değiştirir. Sınırdırda, bir yandaki akım geçişinin tümü değiştirildiğinde ortaya çıkan duruma doyum akımı denir. Hernekadar çok gerekli değilse de doyum akımı belli bir güç alanı içindeki sürede iletkenin kritik akımı olarak görülmelidir. Kritik akım yoğunluğu bu tip süperiletken içinde var olan süperiletkenlik durumunun üçüncü koşulu değişkenliğini temsil etmektedir. Isı, manyetik alan ve akım yoğunluğu arasındaki ilişki şekil (6) de diagram olarak verilmiştir.



Şekil 5



Şekil 6

Potansiyel olarak yararlı kritik alanlar ve akım yoğunlukları içeren tip-2 maddelerinin bulunuşu geçen on yıl içinde uygulamaların geliştirilmesini hızlandırmıştır. Bu yol 1961 yılında Kunzler metallar arası bileşimi niobium tenekenin yüksek bir manyetik alan (8.8 T) altında süperiletken 4.2 K de, ve yüksek (10^5 A/cm) akım yoğunluğunda kalabildiğini belirtilmesiyle açıklanmıştır. Sonuçta Niobium-Zirkonium (NbZr) ve niobium-titanum (NbTi) alaşımları benzer yararlı özellikler göstermişlerdir.

Tablo 2 bu maddelerin ve son zamanlarda ilgili toplayan birçok diğer maddenin özelliklerini göstermektedir.

Sert Tip-2 Süper iletkenlerin Özellikleri

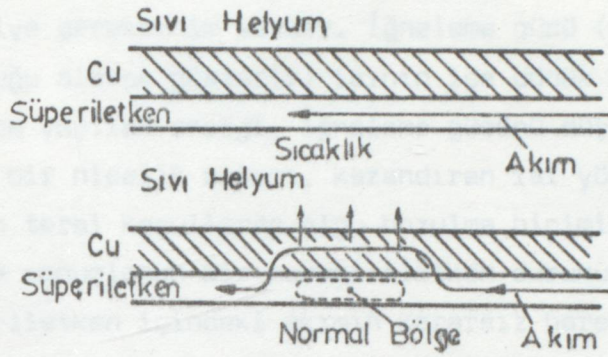
	KRİTİK SICAKLIK		KRİTİK ALAN
	Tc	K	$B_{c2}(H_{c2})$ T
Niobium-Titanyum ($Nb_{0.44} Tc_{0.56}$)	10	10	12
Niobium-Kalay (Nb_3Sn)	18	18	22
Niobium-Zirkonyum ($Nb_{0.75} Tc_{0.25}$)	11	11	8
Vanadium-Gallium ($V_3 Ga$)	15	15	25
$Nb_3(A_{0.8} Ge_{0.2})$	20.7	20.7	40

Tablo 2



2.2 BOZULMA VE KARARLILIK

Yüksek alan, yüksek akım süperiletkenlerinin ticari gelişimi, temel buluşu çok yakından izlemiştir. Ancak bu maddelerin sargıları üretince beklenmedik bir güçlük ortaya çıktı. İlk bobinler organik bir yalıtkanla kaplanan süperiletkenlerden yapılmıştır. Enerji verildiğinde bunların aynı telin kısa örnekleri üzerinde testlerle ortaya çıkan akım değerinin %25-50'inde normaldirenç durumuna geçtiği görülmüştür. Bu "bozulmanın" ileri durumunda bobin boyutu verilen akım yoğunluğuyla değişmiştir. Bozulmanın nedeni bir elektro termal kararsızlık biçimi olarak görülmüş ancak o sıralarda (1962) tam anlaşılamamıştır. Etki, süperiletken bir kabloda küçük normal bir görünüm yani direncil olarak karakterize edilmektedir. Bu bölgede akım gelişimi ohm ısılanmaya neden olurki buda kablonun ısısını yükseltir ve normal bölgede yeniden bir yayılma oluşumuna neden olabilir. Bir bobin içinde yayılma tek bir telle sınırlı değildir. Ve derhal tüm bobinin normal direnç durumuna geçmesi gerekir. Normal direnç durumuna geçme sırasında var olan geçici koşullar elektrik yalıtımını bazan voltajları harekete geçirebilir. Bu voltajları sınırlamak için ilk niobium-zirkonyum süperiletkenleri bakır kaplanmıştır. Böylelikle süperiletken bobinlerin bozulma etkilerine karşı "stabilize" etmek için ilk etkin önlem alınmıştır. Şimdilerde "statik yada Cryostatik" olarak bilinen ilke özünde oldukça basittir. Süper iletken kompozit bir yapı olarak imal edilmektedir. Bu işlemde süper iletken teller yüksek elektrik ve ısı iletkenliği olan maddeler içine gömülmektedir. Şekil(7) bu tip bir süperiletkenin çizimini vermektedir. Süperiletken işlem altında bakır kalıp için hiç bir iletim akım geçmez. Süper iletkende küçük bir dirençli bölge görülürse kalıp madde (şimdi ileri iletken den daha küçük dirençli) bir akım koşutu sağlar. (Şekil 7 alt çizim)



Şekil 7

Kararsızlıktan kaynaklanan ısı enerjisi kalıp içinden hızla iletilerek sıvı-helyum bir yüzeyde bırakılır. Elektrotermal koşullar belli bir sınır içinde olduğu sürece süper iletkenlik durumu yeniden oluşturulacak ve rahatsızlık ortadan kaldırılacaktır. Cryostatik kararlılık, bilinen Stekly eşitliği ile

$$wP \gg \frac{I^2 P}{A}$$

Burada w = iletken yüzeyinden ısı aktarım oranı, w/m^2

P = Soğutulan iletken perimetre uzunluğu, m.

Bu kriterce doğrudan açıklanan diğer üç etkide gözönünde bulundurulmalıdır.

(a) Kaynayan ısı transferlerinin sıvı helyum katsayısı ısı değişiminin sürekli bir olgusudur.

(b) Tip-2 sert süperiletkenlerin ısı aktarımı çok düşüktür. Bu durum etkin olarak stabilize edilebilecek ileri iletken telinin çapraz bölgesel boyutunu sınırlar.

(c) Buna bağlı olarak süperiletken ile kalıp madde arasında arayüzeyin ısı iletkenliği ısı transferine kritik limit uygulanmamalıdır.

Akımın sert tip-2 süperiletken içindeki hareketi, akım burgaçlarını iğneleme merkezleri boyunca harekete geçirmede yaygınlaştırılabilir enerjiye gereksinim vardır. İğneleme gücü (ki kendisini kritik akım yoğunluğu olarak gösterir) ısının içe dönük bir işlevidir. Akım burgaçlarınca yayılan enerji, iğneleme gücünü düşüren, ve akım hareketinde fazla bir nicelik artımı, kazandıran ısı yükselmesi olarak ortaya çıkar. Bunun tersi koşullarda olgu bozulma biçiminde ortaya çıkabilir ve felaketle sonuçlanan bir normal iletken durumuna geçmeye neden olabilir. Süperiletken içindeki akımın kararsız hareketleri ve buna bağlı oluşmalara "akım sıçramaları" denir. Bir bobinin yüklenmesindeki akım hareketi belirgin bir şekilde açıklanan bu olaylara bağlıdır. Bununla beraber koşullar bile bile kontrol edilmektedir. Bir süperiletken mıknatısta, cryostatik ya da enerji üretim sisteminde, her biri bir akım sıçramayla sonuçlanabilecek, rastgele elektrik, mekanik, manyetik ve termal bozulmalar sözkonusudur. Ayrıca, bazı uygulamalarda süperiletkenlerden beklenen işlemsel olgular, manyetik alan değişiminin, belli oranlarda dönmesini gerekli kılmaktadır.

Bu geliştirilmiş akım-sıçrama olgu anlayışı stabilitenin diğer iki yaklaşımını getirmiştir. Her iki ölçütte öylesine kurulmuşki akım sıçramaları artık küçük karışıklıkların sonucu olarak ortaya çıkmayacaktır. Bu özellikleri gösteren iletkenlere "iç istikrarı" olan iletken denilmektedir. Bu durum, akım sıçramalarını kabul eden ve onların sonuçlarına kısıtıcı önlemler koyan cryostatik kararlılıkla karşılaştırılmalıdır. Bu aşamada, termal ve manyetik yayınımla ilgili kolay sonuçlar çıkarmak yararlı olacaktır. Bunlar tablo (3) te saf ve alaşım metaller için gösterilmiştir. (normal süperiletkenler). Aşağıdaki genellemeler heran geçerlidir.

(a) Saf metallerde ısı manyetik akımlara oranla daha hızlı hareket eder.

(b) Alaşımlarda manyetik akım ısıdan daha hızlı hareket eder.

Saf Metaller ve Metal Alaşımlarının Özellikleri

	Sıcaklık kapasitesi S J/cm	Isı iletkenliği K w.cm k	Özdirenç L Ω cm	Termik Genleşme m ² /s	Manyetik Genleşme m ² /s
Saf Metaller (HC Bakır)	$\sim 10^{-3}$	$\sim 1-10$	$\sim 10^{-8}$	$\sim 10^3-10^4$	~ 1
Metal Alaşımları (normal süper- iletken)	$\sim 10^{-3}-10^{-2}$	10^3-10^{-2}	$\sim 10^{-5}-10^{-4}$	~ 1	$\sim 10^3-10^4$

Tablo (3)

"Isı almaz-kararlılık ölçütü" çözümlenmesi küçük kaçaklar esnasında süperiletken içinde enerji birikimi olmayacağı varsayımı üzerine kurulmuştur. ($D_h \ll D_m$). Nitel tanımlamayla ısıdaki bir küçük ek katkı ΔT , kritik akımda ΔJ_c 'ye düşmeyi ve iç alanın yeniden düzenlenmesini getirir. Yeniden düzenlenmeye ısının bir ΔQ miktarı bırakılmaktadır. Ve ısı almaz koşullarda ileri bir ısı yükselmesi ΔT_z oluşur. Eğer $\Delta T_z < \Delta T$, olursa sistem istikrarlı bir konuma dönüşecektir. Isı almaz kararlılığı ölçütü aşağıda formda uygunla belirlenebilir.

$$d < \frac{(10^9 \pi S T_0)}{J_c} \quad 1/2$$

d = ileri iletken - tel kesiti

$$T_0 = \frac{J_c}{(-\frac{dJ_c}{dT})}$$

Bu kriter, ileri derecede saf bakır kalıp içine gömülmüş ince tellerden oluşmuş (~ 0.005 cm kesit) süperiletkenler yapı pratikte uygulanmaktadır.

İstikrara giden ikinci yol "dinamik istikrar" diye bilinmektedir. Bu yüksek iletken normal madde kalıbını ($D_{III} \ll D_n$) kullanarak akım geçişini öyle bir dereceye indirirki süperiletken içinde üretilen her ısı kalıbın

içine akıp dışa aktarılabilsin. Ölçüt birkaç yazarca geliştirilmiştir.

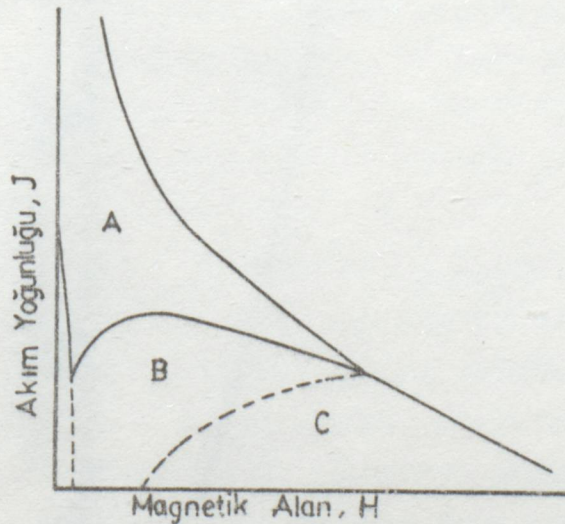
$$d \left\langle \frac{8 T_0 K S}{e} \frac{1 - \lambda S}{\lambda S} \frac{1}{Jc^2} \right.$$

λs = süperiletkenin bileşimindeki oranı.

oldukça büyük oranda süperiletkenler için ısı almaz-kriterli olanlarda verilenlere benzer kesintilerde (>0.5) teller öngörülmüştür. Daha düşük λs değerleri için, buna denk olarak daha büyük kesitli filamentler elverişli görünmekle beraber ısı almaz ya da cryostatik stabilite ölçüsünün hangi kesit ölçüsünde tatmin edici olabileceği henüz bilinmemektedir. Isı almaz kriteriyası belirgin bir şekilde iyimser bir yaklaşım olarak görülmektedir, ve belkide iç istikrarlı iletken dizaynı için en güvenli olanıdır.

İncelememizi tamamlamak için diğer iki stabilizasyon yüzlemine dayanmak gerekir.

Birincisi "kısmı stabilizasyondur." Temelden Hancox'tan kaynaklanan bu kuram, yeterli bir bobin çalışması için akım sıçramasının düşmeden ortadan kaldırılması yetmemektedir. "Kısmı stabilize" ortamında çalıştırılan bir iletkende akım sıçramaları ortaya çıkabilir. Bunu izleyen değişiklikler, akım girişini tutmakta yetersizdir ve dinginglik tamamlanmadan istikrarlı çalışma düzenlenmiştir. Şekil (B) kısmi istikrar bölgesini göstermektedir.

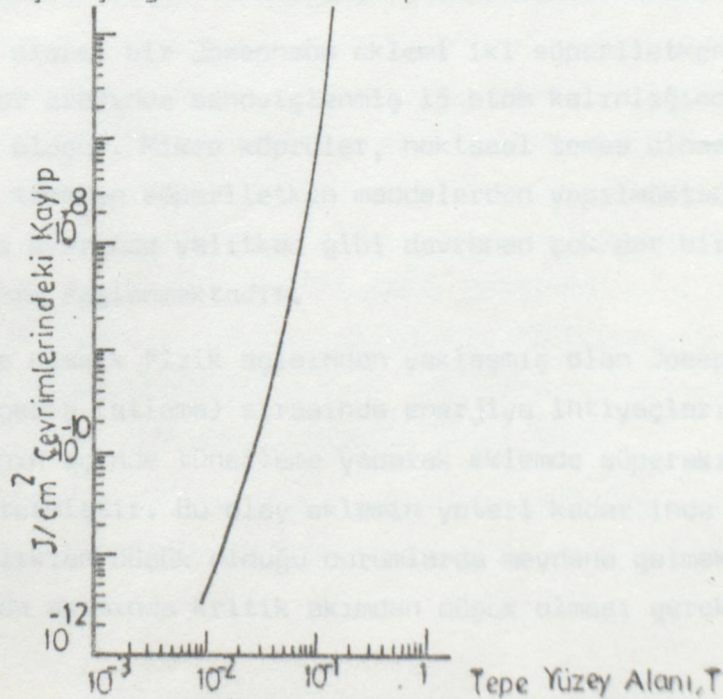


Şekil (B)

2.3. AC SÜPER İLETKENLERİN A.C ÇALIŞMASI

A.C koşullarında çalıştırılan süperiletkenlerdeki kayıplar mıknatıslanmaya bağlı sonuçlardan çıkmaktadır.

Tip-1, ya da H_c altında çalışan tip-2 süperiletkenleri (yani meissner konumu) için mıknatıslanma eğimi ideal bir biçimde tersyüz edilebilir ve kuramsal olarak 100 MHz ya da daha fazla çalışma olasıdır. Pratikte her iletkenin yüzeyi mikroskobik oranda sert olmalıdır. Sertlik uç durumu manyetik alan artışını getirirki, bu ya aynı maddeyi sürer (tip-1) ya da akım girişine (tip-2) neden olur. Her iki durumda da a.c kaybı vardır. Dikkatli hazırlık bu sorunu azaltır, ancak ortadan kaldırmaz. Ayrıca süperiletken içinde küçük normal (süperiletken olmayan) akım taşıyıcı bölgelerin olmadığından emin olmak gerekir. Bu bölgeler eğer manyetik alanlarının varlığında geçiş ısıyı soğutulursa süperiletken içinde tutulabilirler, yada bunlar yüzey alanı yerel değerlerinden kaynaklanabilirler. Bir kısım süperiletken elementin özellikle niobium (bkz. tablo (1)) H_c (yada H_{c1}) değerleri vardır. Bu değerler sayesinde bunlar alan gücünün sınırlı olduğu, yani güç geçişimi ve lineer hızlandırıcılarla ilgili uygulamalarda olanaklı değer görünümündedirler. Şekil (9) saf niobium için uç yüzey alanının bir fonksiyonu olarak a.c manyetiğinin kayıplarını göstermektedir. Tek eğim birçok örnekler için eğimlerin süperpozisyonu içinden geçen yaklaşık çizgidir. Ve ilk Wipf tarafından derlenmiştir.



Şekil (9)

A.C güç kayıpları lineer olarak frekans ve filament kesitine bağlıdır. A.C kayıplarında azalma, etkin bir şekilde bağlaşımlarının bozulması gereken küçük filamentlerin gereksinimindeki istikrarlı ölçütle bağlantılıdır. Eğer yalnızca filamentlerin basit bükülmesi kullanılıyorsa (ters pozisyon değil), kendi-alan mıknatıslama olumlarından kayba bir katılım olacaktır. Bunları birim filamentleri izler ve böylelikle bükülerek bağlaşımları bozulmaz.

Düşük frekanslarda (~ 1 Hz), yüksek a.c kayıplarını (bkz geleneksel bakır iletkenlerinde yaygın olarak uygulanan 10^7 A/m²) tutmaksızın 5-6 T'de 3×10^8 A/m²'nin fazlalığına çepeçevre akım yoğunluklarına varmak mümkün olacaktır.

Eğer üretim tekniklerindeki gelişme korunursa, düşük filament kesiti kullanılmaya hiç olmasa düşük kayıp elde etmede en az bir yol olanaklı olur.

2.4. SÜPER İLETKENLERİN OLAĞANDIŞI DAVRANIŞLARI VE JOSEPHSON ETKİSİ

Süperiletkenlerden yapılan temel elektronik aygıt Josephson tünel eklemleridir. Bu aygıt ismini 1962'de çalışmasının dayandığı fiziksel etkileri belirleyen Cambridge fizikçisi Josephson'dan alınmıştır. Bu eklemlerden oluşturulacak gruplarla bilgisayarlar için mantık devreleri, bellek hücreleri ve bir takım duyaçlar yapılabilir.

Genel olarak bir Josephson eklemi iki süperiletken elektrot ile bu elektrotlar arasında sandviçlenmiş 15 atom kalınlığındaki yalıtkan bir oksitten oluşur. Mikro köprüler, noktasal temas cihazları gibi bazı eklemler ise tamamen süperiletken maddelerden yapılmaktadır. Bu cihazlarda malzeme üzerinde yalıtkan gibi davranan çok dar bir geçit oluşturarak tünelleme sağlanmaktadır.

Konuya klasik fizik açısından yaklaşmış olan Josephson, elektron çiftlerinin geçiş (atlama) sırasında enerjiye ihtiyaçları olmasına rağmen, yalıtkanın içinde tünelleme yaparak eklemde süperakımlar yaratabileceğini göstermiştir. Bu olay eklemde yeteri kadar ince ve sıcaklığın kritik sıcaklıktan düşük olduğu durumlarda meydana gelmektedir. Tünelleme sırasında akımında kritik akımdan düşük olması gerekmektedir.

Süperiletkenlikte yer alan elektronlar normal şekilde davranmazlar. Copper çiftleri olarak bilinen durumda eşleşen elektronlar ayrı ayrı taneciklerden çok aynı fazdaki iki dalga olarak düşünülebilirler. Elektron dalgaları yalıtkan içinde de devam etmekte ve belli bir yere kadar yalıtkan maddelerin içine sokulabilmektedir.

Josephson, eklemlerine "zayıf bağlantılar" (Weak links) adını vermiştir. Çünkü bu eklemlerdeki süperakımı değiştirmek veya durdurmak aynı işlemi süperiletken maddelerde yapmaktan daha kolaydır. Örneğin bir manyetik alan, eklemlerdeki elektron akışını kolayca engelleyebilmektedir. Bu da Josephson eklemlerinin can alıcı noktasını oluşturur. Eklemden geçmekte olan elektron dalgaları dış manyetik alanlardan konumlarına göre değişik şekillerde etkilenmektedir. Herhangi bir manyetik alanın etkisinde kalan eklem bazı noktalarında akım ters dönmekte, bazısında durmakta bazı bölümlerde ise akışına devam etmektedir. Bu değişik etkileşimler sinüzoidal bir şekil oluşturmaktadır. Eklemden akım geçip geçmeyeceğini bu değişik hareketlerin toplamı belirlemektedir. Uygulanan manyetik alan güçlendikçe oluşan sinüs eğrisinin frekansı artmaktadır. Bu sinüs eğrisi eklem üzerinde tek sayıda döngü yaparsa akım oluşmakta, çift sayıda döngü durumunda akım durmaktadır. Manyetik alan artırılınca frekans yükselmekte ve eklem (akım geçirip, geçirmeyerek) açılıp kapanmaktadır.

Josephson ekleminden yapılan "anahtar"da manyetik alan bir kontrol hattı tarafından sağlanır. Bu hat, eklemi mantıksal devre elemanı haline getirmek için gerekli anahtarlamayı yapar. Eklem yarısı, bir ucu akım kaynağına diğer ucu da bir çeşit çıkışa bağlı olan bir hattan oluşmaktadır. Bir mantık devresinde bir eklem çıkışı diğer bir eklem kontrol hattı olabilir. Eklem diğer yarısı da toprakla bağlantılıdır. Manyetik alanın yokluğunda, yani kontrol hattından akım geçmediğinde eklemde de akım geçmez ve gelen akım toprağa iletilir. Kontrol hattından akım geçtiğinde oluşan manyetik alan, anahtarın açılmasına ve akımın eklem üzerinden çıkış cihazına geçmesine neden olur.

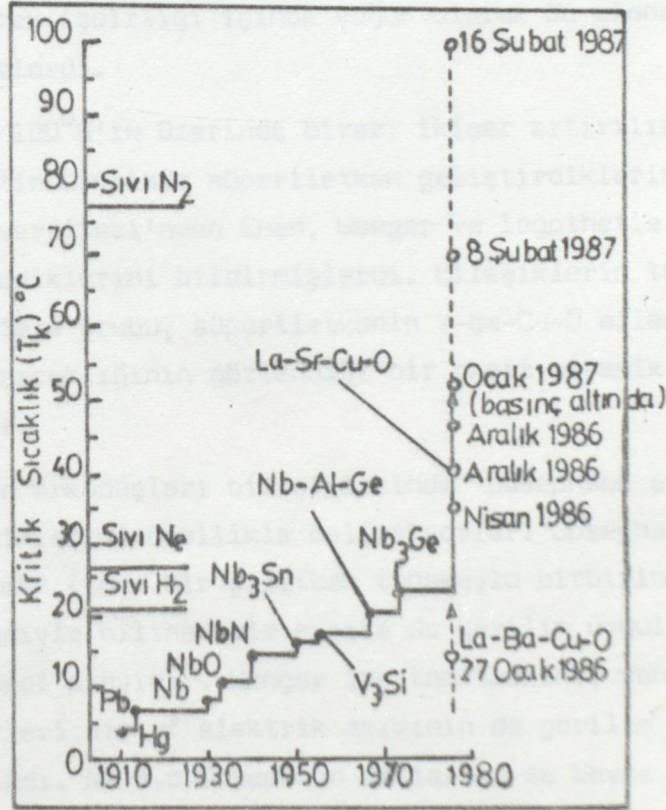
Gerilim de Josephson eklemindeki akımı etkiler. Eklem, süperiletken durumda iken üzerinde gerilim oluşmaz. Fakat akım kritik düzeyi aştı-

ğında veya bir manyetik alanın etkisiyle süperiletkenlik ortadan kalktı-
ğında bir gerilim gözlenir. Elektrik alanı da manyetik alan gibi süper-
akımı etkiler. Ancak elektrik alanı uygulandığından eklemdeki akım konu-
ma değil zamana bağlı olarak değişmektedir. Gerilimsiz ortamda akım nor-
mal olarak akmakta, sınırlı bir gerilim (elektrik alanı) uygulandığında
ise akım yüksek frekansta yön değiştirmektedir. (yüksek frekanslı değiş-
ken akım, ac oluşmaktadır.) 1mV 'luk gerilimler bile 500 GHz gibi yüksek
frekanslara neden olmaktadır. Eklem gerilime karşı tepkisi o kadar kes-
kin ve hassastır ki uluslararası gerilim standartları Josephson eklemle-
ri kullanılarak belirlenmektedir.

3. SÜPER İLETKEN MADDELERİN TARİHİ GELİŞİMİ

Süperiletkenlik ilk kez 1911 yılında keşfedildiği, halde günümüze kadar birçok kimyasal element ve yüzlerce bileşiğin mutlak sıfır sıcaklığı civarında süperiletken oldukları bulunmuştur.

1960'lı yıllarda süperiletkenlik, Niobium-Titanium ve Niobium-tin yüksek alan süperiletkenleri ile ilk olarak teknik önemini kazandı. Bu maddelerin geçiş sıcaklıkları henüz 20 K'in tam altındadır. 87 Ekiminin 14'ünde J.C Bednorz ve K.A.Müller süperiletkenlik konusundaki yönlendirici çalışmaları ile Nobel Fizik ödülünü aldılar. 1987 yılına kadar olan süperiletkenliğin max. kritik sıcaklıklarının değişimi aşağıda bir tablo halinde verilmiştir.



Tablo (4)
1987'ye kadar süperiletkenlik

Bednorz ve Müller yaklaşık 40 K'lik geçiş sıcaklığına sahip bir madde ile başarılarını kazandılar.

1987 başında birçok büyük araştırma laboratuvarında araştırmacılar süperiletkenlikleri biraz daha "ısıtabilmek" için bir yarışa girmişlerdi. 16 Şubat'ta ABD'de Houston Üniversitesi'nden Chu ve ekibiyle Alabana Üniversitesinden öğrencisi Wu ve arkadaşları 93°K 'de süperiletkenliğe geçiş yapan bir bileşik bulduklarını duyuruyorlardı. Zürih'teki grubun bileşiğindeki Lantanın yerine yitrium kullanmışlardı. (Y-Ba-Cu-O) Aynı bileşik kullanılarak kritik sıcaklık 100°K sınırını aşmıştı. AT&T Bell Laboratuvarları'ndaki grup da gelişmeleri yakından izliyordu. ABD den Çin'e, Kanada'dan Hindistan'a tüm resmi ve özel laboratuvarlarda süperiletkenlik deneyleri için özel birimler oluşturulup fonlar yaratılırken, uluslararası tekel olan elektrik ve elektronik şirketlerinin araştırma/geliştirme birimleri de bağımsız ya da Üniversitelerdeki araştırmaları destekleyerek işbirliği içinde yoğun olarak bu alana giriyor ve çalışmalar yapıyorlardı.

Sıcaklık 100°K 'in üzerinde birer, ikişer artırılırken ABD'de iki ayrı grup 200°K 'in üzerinde süperiletken geliştirdiklerini açıkladılar. Wayne State Üniversitesi'nden Chen, Wenger ve logothetis 240°K 'de süperiletkenlik gözlediklerini bildirmişlerdi. Bileşiklerin tam olarak açıklamayan Wayne State grubu, süperiletkenin Y-Ba-Cu-O ailesinden, daha önce 90°K kritik sıcaklığının gözlendiği bir oksit-seramik olduğunu belirtmekle yetindiler.

Wenger ve arkadaşları bileşiklerinde "Josephson etkisi" nin tersi bir olgu gözlediklerini özellikle belirtiyorlar. Josephson etkisi kabaca, "Josephson eklemi" (ince bir yalıtkan tabakayla birbirinden ayrılan iki süperiletken) adıyla bilinen bir aygıtta dc gerilim uygulanması sonucu a.c akım elde edilmesi olayıdır. Wenger ise tam tersini, yani kendi örneklerinden geçirdikleri bir rf elektrik akımının dc gerilim üretmesini gözlediklerini açıkladı. Ne a.c Josephson etkisi ne de Wayne State grubunun gözlediği tersi olgu bir süperiletkenden başka birşey de gözlenemeyeceğine göre, sıfır direnç özelliği gözlenmemiş olsa bile, bileşiğin süperiletken olduğu iddia edilebilirdi.

Öte yandan, Houston'da 93°K 'le ilk yüksek-sıcaklık bileşiğini bulan Chu ve ekibi ikinci bombasını patlatıyor ve 225°K 'de süperiletkenliğe geçen yeni bir bileşik geliştirdiklerini açıklıyordu. 225°K (-49°C) henüz

oda sıcaklığına çok uzaktı, ancak dünya üzerinde kaydedilen en düşük sıcaklıktan da oldukça yüksekti. Tokyo Üniversitesi'ndeki grubun lideri Tanaka yitriyum yerine erbiyum ya da holmiyum gibi toprak elementlerinin kullanılmasıyla daha yüksek kritik akımlara sahip seramiklerin elde edilebileceği görüşünde idi.

Toshiba firması Mart ay'ında yaptığı açıklamada ilk süperiletken kablo" yu ürettiğini duyurdu. Y-Ba-Cu-O bileşiğinden geliştirilen kablo 94⁰K'de sıfır dirence ulaşıyordu. 0,6 mm. çaplı çubuklar halinde üretilenlerin kritik sıcaklığı ise 87⁰K'di. ABD'de Argonne Ulusal Laboratuvarları da 0,2 mm çaplı teller üretmişti. Bu tellerin yüksek alan mıknatısları için uygulama olanağı vardı, ancak süperiletkenliğin kaybolduğu düşük akımlarda oldukça kullanışsızdı. Akım yoğunluğu sınırı Toshiba için 6A/cm², Argonne'de üretilen içinse 5A/cm² idi, bu yoğunluk pratik kullanım için standartların çok altındaydı. Yüksek hızda mikrodeoreler içinse ince süperiletken filmler, tel ve şeritlerden daha uygundu. Bu arada Yorktown'daki IBM Laboratuvarı Y-Ba-Cu-O bileşiği kullanılarak 400 nanometre kalınlığında süperiletken film ürettiğini duyuruyordu. Japon Matsushita firmasına ait Merkezi Araştırma Laboratuvarı ise büyük ölçüde baskılı devre (LSI) uygulamalarında kullanılmak üzere bir lantan-strontiyum-bakır bileşiğinden üretilen süperiletken monokristal seramik film ürettiğini açıklıyordu.

"Isı"'sı her geçen gün yükselen bu yeni buluş hakkında çalışmalar hızla sürmektedir. Japon Elektronik Teknolojisi Genel Araştırma Enstitüsü, 300⁰K (veya-27⁰C) de süperiletkenliğe ulaştığını iddia ediyor. Sumitomo Elektrik, Houston Üniv. ve Yeni Delhi Ulusal fizik Laboratuvarlarının üçü de, 0⁰C'nin üzerinde süperiletkenliğe ulaştıklarını söylüyorlar.

Yukarıda açıkladığımız gibi süperiletkenlik konusunda birçok maddeler denenmekte ve süperiletkenliğinin sıcaklığı oda sıcaklığına kadar yükseltilmeye çalışılmaktadır.

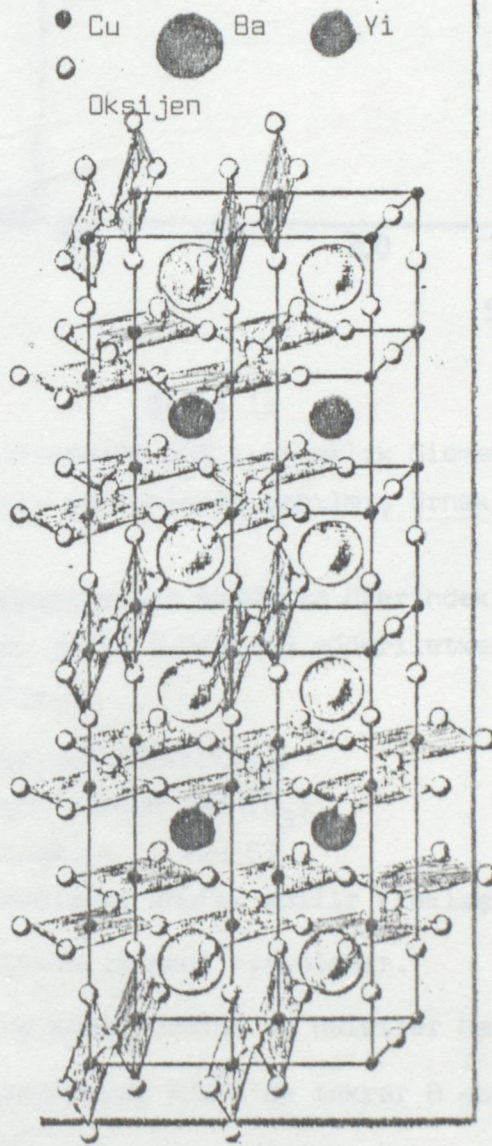
4. EN MODERN SÜPER İLETKEN BİLEŞİĞİNİN TANITILMASI

Geleneksel süperiletkenler metaldirler. Bununla beraber, yeni yüksek sıcaklık süperiletkenleri dışardan gelen seramiklerdir. Bunlardan biri olan $Y-Ba_2Cu_3O_7$ 'nin yapısını daha ayrıntılı inceleyelim.

Yüksek sıcaklık, süperiletkenleri gerçekte bir sandaviçe benzeyen kiristal yapıları ile metal oksit seramiklerdir. Örneğin $Y Ba_2 Cu_3 O_7$ $90^{\circ}K$ civarında kritik bir geçiş sıcaklığına sahiptir. Yitriyum ile diğer üç değerli nadir yeryüzü metallerinin yer değiştirmesinin, geçiş sıcaklığı üzerinde büyük etkisi yoktur. Gerçi, bakırın bir kısmının diğer metallerle yer değiştirmesi, süperiletkenlik üzerinde önemli bir etki gösterir. $155 K^{\circ}$ geçiş sıcaklığına sahip bir fazlı madde, oksijen ile florinin kısmi yer değiştirmesiyle üretilmektedir. Bununla beraber bu fazın parça hacmi, toplam maddenin %'inden çok daha azdır. Bu faz ne zamana göre kararlılık gösteriyor, ne de kolayca üretilebiliyor. $Y Ba_2 Cu_3 O_7$ 'nin elektromanyetik özellikleri (kritik akım yoğunluğu ve manyetik alanlar) farklı anizotropik yapı ile karakterize edilmiştir. Yaklaşık bir akım yoğunluğu $77 K^{\circ}$ de ve sıfır alanda $5 \times 10^6 A/cm^2$, $Y Ba_2 Cu_3 O_7$ henüz üzerinde ölçülen en yüksek değerdir. Bu değerler epitaksiyel ince filmlerle elde edildi. $77 K^{\circ}$ 'de ki kritik alanların üzerinde, yüksek alan uygulamalar için yeter derecede olabildiği görünür. $Y Ba_2 Cu_3 O_7$ 'in bazı mahsurları vardır. Bu madde özellikle ince bir film gibi, kirlenmeye ve nemliliğe karşı oldukça duyarlıdır. Yüksek sıcaklıklarda havadaki oksijen kaybı, buna ek olarak süperiletken maddenin özelliklerinde bir azalma gösterir. Seramik olunca, çok kolay kırılabilir, düşük bir gerilme kabul edebilir. Alternatif alanlarda histeresiz kayıpları halen yaygınca bilinmeyen bir mesafe oluşturur.

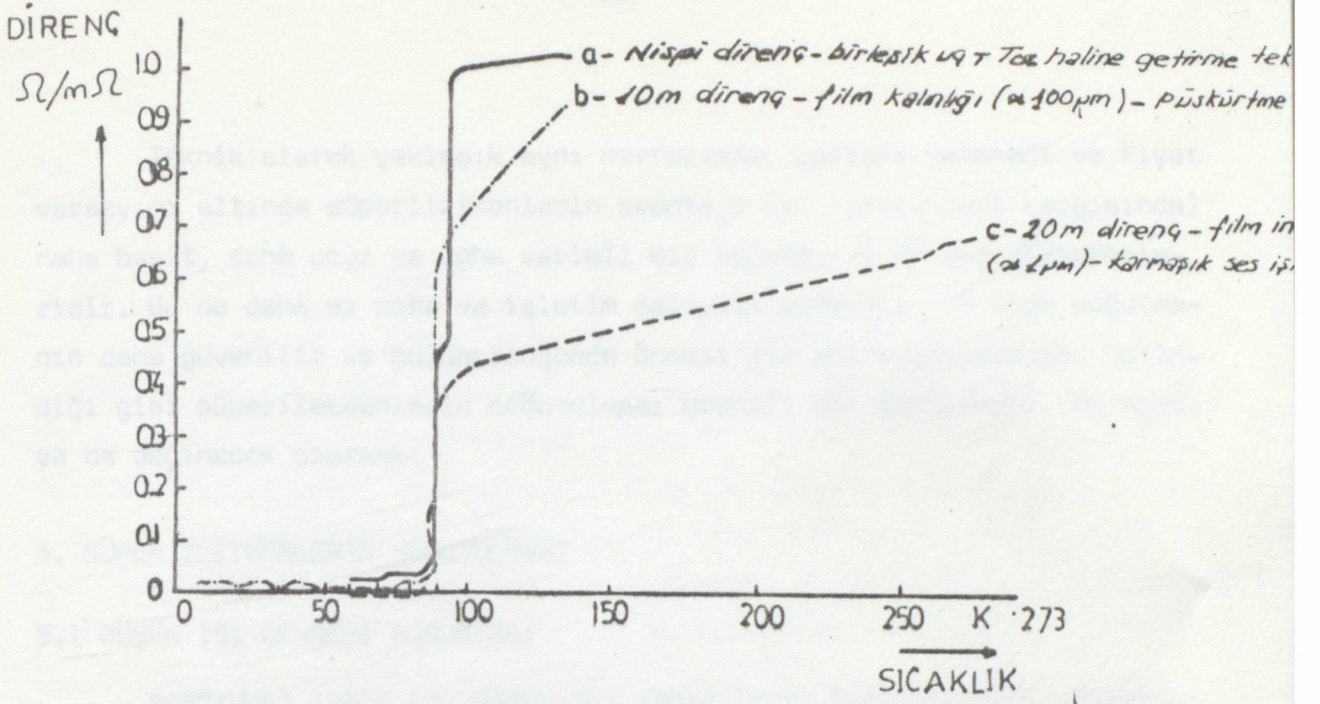
İnce epitaksiyel filmler hala en iyi süperiletkenlik karakteristiği göstermeleri, üretim için onları en iyi adaylar yapıyor. Ve bu teorik olarak mikroelektronik uygulamaları için uygundur. Fakat, süperiletken madde yapma sanatı hala, doğal olarak birçok potansiyel uygulamadan hariç son bir yüksek sıcaklık işlemini içine alıyor. (Yaklaşık $900^{\circ}C$ 'de 2 saat) Şimdiye kadar sıfır alanda ulaşılan maksimum akım yoğunluğu $10^3 A/cm^2$ iken; yüksek magnetik alanlarda $10^5 A/cm^2$ gereklidir. $4K^{\circ}$ süperiletkenleri

şu anda ticari kullanımdadır. Yeni maddelerde normal iletme geçiş sırasında dengeli ya da korummuş olmak zorundadır. Bu neticeye göre, yarı iletken paralel bağlamalı gümüş gibi, yüksek iletimli metale ya da gümüş-bakır bileşimine ($YBa_2Cu_3O_7$ için) metalurjik olarak sıkı bağlamalı duruma getirilmelidir, çünkü saf Cu ve Al bu madde ile birlikte etkiler.



Şekil 10

90 K'de Süperiletken Olan Maddenin Kristal Yapısı



Şekil 11

Y Ba₂Cu₃O₇'nin direncine bağlı sıcaklık Siemens'te üretilen farklı yöntemlerle yapılmış örnekler

Her geçen gün süperiletken maddeler üzerindeki incelemeler, yeni aşamalar kaydetmektedir. Hatta Y-Ba-Cu-O süperiletken seramiği için basit bir reçete hazırlanmıştır.

- (a) 1,2 gr. Yitriyumoksi(t)(Y₂O₃)
 4,0 gr. Baryum karbon (Ba CO₃)
 2,4 gr. Bakıroksit (Cu O)

kariştirilip havanda dövülerek unufak edilir (Yaklaşık 1 mm)

(b) 900°C sıcaklıkta 12 saat fırınlanır.

(c) Soğutulur, havanda dövülür ve paletler halinde preslenir.

(d) Oksijenli atmosferde 900°C'de tekrar 8 saat fırınlanır.

(e) Saatte 100°C lik bir hızla (oldukça yavaş) soğutulur. Soğutma hızı ve ortamda su bulunmaması önemlidir.

Süperiletken seramik zamanla oksijen kaybına uğrayacağından belli bir süre sonra oksijenli fırında 400°C'ye kadar ısıtılır ve oksijen "solması" sağlanır. Bu işlem her defasında yinelenerek seramiğin süperiletken olarak tekrar kullanılması sağlanır.

Teknik olarak yaklaşık aynı performans, çalışma yeteneği ve fiyat varsayımı altında süperiletkenlerin avantajı (4K iletkenleri karşısında) daha basit, daha ucuz ve daha verimli bir soğuma (77 K⁰ de) göstermektedir. Bu da daha az para ve işletim maliyeti demektir. 77 K'de soğutmanın daha güvenilir ve bulunurluğunda önemli bir rol oynamaktadır. Bilindiği gibi süperiletkenlerin soğutulması önemli bir problemdir. Bu konuya da değinecek olursak;

5. SÜPER İLETKENLERİN SOĞUTULMASI

5.1 DÜŞÜK ISI ÇEVRESİ SORUNLARI

Aşağıdaki Tablo (5) düşük-ısı yapıcılarının özelliklerini vermektedir. (cryogenler).

Düşük Sıcaklık Soğutucularının Özellikleri

Gaz	Kaynama Noktası (K)	(kg/m ³) Yoğunluk	KJ/kg Ergitme	KJ/l Isısı
Helyum	4,2	125	23	2,6
Hidrojen	20,4	71	446	31,8
Neon	27.1	1204	90	110
Nitrojen	22.8	804	200	160

Tablo(5)

Sadece bu tablo helyum gereksinmelere hitap etmektedir. Diğer tüm maddeler 12 K'nin altındaki ısılarda katıdır. Gazların sıvılaştırılabilmesi için soğutma fabrikaları yıllardan beri vardır, ve helyumun sıvılaştırılması için gerekli olanda daha düşük dereceler (örneğin He³/He⁴ seyretme soğutucuları 0,1 K'e ulaşılabilirler) için teknoloji gelişmiştir. Ancak helyumun sıvılaştırma aygıtı daha çok laboratuvar çevresinde düzenli çalışmalar için küçük boyutlarda yapılmıştır.

Helyum soğutma bir süperiletken gerece uygulanabilir. Şöyleki; ya

(a) Dış bir kaynaktan sıvı alarak (Bağlı ya da bir dış verici olabilir.)

(b) Ya da bir kapalı devre soğutma sistemi kullanarak

Kaynağa bağlı olarak helyumun litresinin değiştiği düşünülürse, helyum yalnızca 1W %50 iş kapasiteli soğutma işinin yıllık maliyeti oldukça pahalıdır. Kapalı devre helyum soğutmalarının bundan daha yüksek bir mali külfeti vardır. Yılda sadece birkaç gün sürekli çalışması söz konusu olan bir tek süperiletken aygıtındaki birkaç watlık soğutma yükü için kapalı devre soğutmanın teknoekonomik seçimine kuşkuyla bakılmalıdır. Birçok deneyi ve aygıtı olan bir laboratuvarda merkezi bir soğutma ve elverişli bir iyileştirme sistemi herhalde en iyi olanıdır. Ticari olarak mevcut olan cryogonik soğutucuların en elverişli verim kılavuzu 1970 yılında rawford tarafından verilmiştir.

Kuramsal olarak ısı-gömük bir derece T_h 'li (genellikle ~ 300 K) T derecesinde 1W soğutma gerektiren enerji girdisi $(T_h - T)/T$ yeni 4K'de 70 Kw'dır. Yüksek ısı çalışması açıkça belirlenmiştir. Çünkü bu 20 K'de 13W'a düşecektir. Uygulamada daha yüksek dereceler gerekmektedir. 4K'de 350-2000 W ve 20 K 80-200 W.

Pek çok ticari helyum soğutucuları Claude devresi denilen sistemle çalışmaktadır.

Gaz mümkün olduğu kadar izotermal olarak sıkıştırılmaktadır (bu da daha az enerji girdisi gerektirmektedir) Sonra ısı değiştirgenleri içindeki bobin kanallarından dönen soğuk gaz ile soğutulurlar. Soğutma, gazın genleştirilmesi ile elde edilmektedir, böylelikle çıkan enerji küçük gibi görünmektedir. Uzun kullanım ve güvenlik için daha iyi sonuç veren makinalarda turbo soğutucular tercih edilmektedir. Genellikle iki turbo kullanılmaktadır. Her biri gazın bir fraksiyonu üzerinde çalışmakta ve tipik olarak 10 K ve 40 K değerinde dönüş akışı içine üfleemektedir. Kalan gaz bir Joule-Thomson vanası içinden geçirilebilir. Burada gazın bir kısmı sıvılaşır, ya da o doğrudan doğruya bir soğutucu olarak kullanılabilir. Düşük ısıli bölgelerden bütün kirleri temizlemek gerekir, çünkü bunlar donup katılaşabilirler. Saf helyum içinde dönen parçaların bakım ve yağlanması büyük bir önem taşımaktadır. Deneyim büyük sistemlerle sürekli ve

uzun vadeli çalışmayı getirmektedir, (planlanmış bakımlar arasında 2 yıl) ve daha ağır ortamlarda bu süre sınırlıdır. Gaz taşıyıcı turbo genişleticileri olan soğutucularda, sistemin en güvensiz yeri helyum kompresördür. Burada soğutmaya enerji sağlamak için helyum gazı üzerinde mekanik işlem yapılmaktadır.

5.2. ÇEVREYİ SINIRLAMA

İleri iletken gerecinin düşük ısı bölgesini çevreleyen ve destekleyen yapı için elverişli termal-yalıtım tekniklerinin uygulanması gereklidir. Soğutma gücü yalnızca içten çıkan kayıpları yok etmek için değil aynı zamanda termal yalıtım içinden içe doğru ısı sızmalarını önlemek ve yalıtımı köprüleyen bir tür elektrik ve mekanik donanımı korumak için sağlanmalıdır.

Vakum, sıvı nitrojenli termal korganlar, yansıtıcı metal bobinin boşaltılmış çok tabakalı ya da metalleşmiş plastik film ya da tozlar vasıtasıyla yüksek verimde ısı yalıtımı gereklidir.

Tablo (6) da bazı yalıtım maddelerinin ortalama termal iletkenliklerini vermektedir. En iyi yalıtım için yüzeyden $0.5-5/m^2$ ısı akımını kabul etmeliyiz. $280^{\circ}C$ değişkenliğinde bir ısıya karşı 1cm kalınlığında yalıtım kullanılmalıdır. Eğer 77 K'de bir nitrojen soğutmalı korgan ısı iç sızmasına karşı kullanılıyorsa, y,z, K'ya akan ısı $0.1 W/m^2$ 'ye kadar düşürülebilir. Yalıtım içinden yapılan mekanik köprülemeler yığının düşük-ısı ağırlığını, bitişik sarmalların hareketinden kaynaklanan her tür manyetik gücünü örneğin dönen bir makina içindeki döngü aygıtının reaksiyonu gibi desteklemelidir.

Tablo (7) birtakım yapı materyallerinin mekanik ve termik özellikleri verilmiştir. İlk sütun 300-4K ısı eriminde ortalama ısı iletkenliğini vermektedir. İkinci sütun aynı ısı eriminde ortalama mekanik gücü vermektedir. Üçüncü sütun, $10^4 N$ 'yi desteklemek için gerekli olan bölümün $1 cm^2$ 'lik örneği boyunca ısı akımını göstermektedir. Isı farklılaşması 280 K'dir. Süper yalıtım, termal olarak süper olmasına rağmen iyi bir destekleme aracı değildir. Tablo (3)'e göre 280 K ısı erimli bakırın $1 cm^3$ ünün içinden geçen ısı akımı 750 W olacaktır ki bu oldukça ürkütücü bir

rakamdır. Elektrik direncini en aza indirmek için kurşun bir krossek-siyon gerektirmektedir. Mıknatıs kurşunlar çoklukla dışa yönelik helyum buharı yoluyla, soğutucular tüpsü iletkenler biçimindedirler. Bazı ku-ramsal varsayımlar 1.0 mW/A değerinde kurşun kaybını olanaklı göstermek-tedir. Uygulamada 1-3mW/A beklenebilir.

Bazı izolasyon Malzemelerinin Isı İletkenliği Ortalaması

Malzeme	λ m (μ W/cm K)	Sıcaklık oranı (K)
Aeorogel toz	6.1-12.1, $e \sim 0.02$ 9.5-27.1, $e < 0.8$	300-76
Katı plastikler	260-360	300-77
Süper Yalıtkan Alüminyum tabaka	0.20-1.7	300-20
Alüminyumlaşma süper yalıtkan polyester film	0.28-1.8	300-20

Tablo (6)

Yapı Materyallerinin Mekanik ve Termik Özellikleri

Maddeler	λ m 4-300K'de	σ	σ / m	σ 'da 10N taşıyıcı 10 ⁻² m boyunca akı ısırsı. 280 K sıcaklık değişimi
	W/mK	kg/m ² x10 ⁻⁶	kg K/Wmx10 ⁻⁶	W
Bakır	266	8.5	3.2	0.88
Alüminyum	46	38.5	84	0.34x10 ⁻¹
Paslanmaz çelik	5.1	105	2060	0.136x10 ⁻²
Teflon	0.135	1.4	1040	0.27x10 ⁻²
Mylar	0.085	7	8250	0.35x10 ⁻³
Cam elyaf ile naylon	0.2	40	20000	0.14x10 ⁻³
Sönmüş süperyalıt- kan ile cam elyaf	0.0005	0.01	2000	0.14x10 ⁻²

Tablo (7)

5.3. YENİ BİR SÜPER İLETKEN SOĞUTUCU ARAYIŞI VE HELYUM SOĞUTUCU İLE KARŞILAŞTIRILMASI

Görüldüğü gibi soğutucu olarak kullanılan helyum, çok nadir bulunan ve sıvılaştırılması oldukça pahalı bir elementtir. Ve uygulamaların birçoğunda sıvı helyumun maliyeti, süperiletken teknolojinin getirdiklerinden daha fazla tutmaktadır. Bundan ötürü, bilim adamları uzun süreden beri daha yüksek sıcaklıklarda süperiletken olacak bir bileşik arayışı içindeydiler. Özellikle 77°C civarında süperiletken bir bileşik birçok sorunu birden çözecekti. Çünkü bu sıcaklık, doğada bol miktarda var olan azotun sıvılaştığı sıcaklıktı. Böylece sıvı helyum kullanma sorunluluğunun getirdiği dezavantajlar da ortadan kalkacaktı. Var olan süperiletken uygulamalarının, sıvı helyum soğutmasından (5 Kelvin) sıvı azot soğutmasına (77 kelvin) geçme işleminden çok yararlanacağı açıktır, çünkü sıvı helyumun litresi 3 pound (6000 TL) iken sıvı azotun litresi sadece birkaç peniye (100 TL) mal olmaktadır. Fiyattaki bu azalma süperiletken mıknatıslarla çalışan bir tıp tarayıcı örneğinde yılda 17000 paund kazanç sağlayacaktır. Şu sıralarda kullanılan nükleer rezonans tarayıcılarında giderlerin büyük kısmı soğutma sistemi için harcanmaktadır.

Olayın boyutunu daha iyi kavramak için burada bir parantez açalım ve süperiletken mıknatıs elde etmek için sıvı helyum banyosu kullanan, ABD'deki fermi laboratuvarlarında bulunan ve "Tevatron" adıyla bilinen dünyanın en güçlü hızlandırıcısına biraz daha yakından bakalım: Bu Tevatron'da 1000 den fazla süperiletken mıknatıs kullanılmaktadır ve bunların yıllık maliyeti 5 milyon 'dolardır. Nevar ki mıknatısların verimliliği fermi laboratuvarları'nın yıllık elektrik enerjisi harcamalarında yaklaşık 195 milyon dolar tasarruf sağlamaktadır. Öte yanda ABD eski devlet başkanı Reagan, çevresi 64 km (yarıçapı 14 km)'lik dev bir hızlandırıcı olan "süperiletken süper-çarpıştırıcı"nın (süper-collider) 1990'larda tamamlanması için maliyeti 4-6 milyar dolar arasında olan projeyi imzalamıştır. Yaklaşık 10.000 süperiletken mıknatısın kullanılacağı bu proje sayesinde 600 milyon dolar tasarruf edilmesi planlanmaktadır.

Süperiletkenliğin birçok uygulamaları, onların çok pahalı ve kullanışsız hale getiren soğutma soruları nedeniyle düşünülmez hale gelmiştir. Fakat ilerleyen teknolojiyle bu sorunlara hızla yeni çözümler getirilecektir.

6. SÜPER İLETKENLİĞİN UYGULAMA ALANLARI

6.1. SÜPER İLETKEN KABLOLARI

6.1.1. SÜPER İLETKEN KABLOLARA ÖRNEKLER A.C VE D.C SÜPER İLETKEN KABLOLARI

Süper iletkenliğin elektrik güç endüstrisinde potansiyel uygulamaları bilim adamları ve mühendislerce son derece enteresan bulunmaktadır. Halbuki süperiletkenliğin kullanımı, karışım halindeki süperiletken materyaldeki histeresiz, kayıplarından dolayı sınırlanmıştır. Böyle kayıplar herhangi bir pratik cihazdaki toplam kayıpları etkili biçimde artırır. Bu tür değerlendirmeler akımın harmonik bileşen (ripple) ihtiva ettiği D.C iletim hatları içinde doğrudur. Bilhassa harmonik spekturum daha da genişlediği tranzient şartlarda akımdaki dalgacıkların yol açtığı kayıplar daha da önem kazanmaktadır. Son zamanlarda çok sayıda deney, bu kayıpların son derece düşük olması nedeniyle süperiletkenliğin elektrik enerji iletiminde kullanımını ekonomik açıdan çekici hale getirmiştir.

Yeraltı enerji hatlarının yüksek maliyeti, havai hatlarla karşılaştırıldığında, bunların ancak gerekli oldukları zaman kullanıldıklarını göstermektedir. Tablo 8'de yer altı kabloları ile havai hatların karşılaştırılması kış oranlamaları ve maliyet fiyatlarıyla verilmiştir.

İngiltere'de bütün yüksek voltaj hava hatları yağlı kağıtla yalıtılmaktaydı. Bu 400 KV'a kadar olan voltajlar için uygunluk göstermiş ancak yukarıdaki tabloda (Tablo 8) gösterilenden daha yüksek güç ve voltajlar için çok az bir gelişme söz konusudur. Bu kabloların bakır iletkenlerinin kullanılmasındaki gelişmeler, borular içinde dıştan su soğutma ile ya da iletkenlerin yağla içten soğutulmasıyla oluşur.

Voltaj	Havai hattın bakır eşdeğeri alanı	İki devre için kış şartlarındaki oranlar	Havai hattın iki devresi için mil başına tahmini ortalama maliyet	Kablo Tesisatının kapasite bedeli
kV	cm ² (in ²)	MVA	£	£
132	(1x0.175)	267	12	120
132	(1x0.4)	430	16	185
132	(2x0.175)	535	19	225
275	(2x0.175)	1110	21	370
275	(2x0.4)	1800	44	565
400	(2x0.4)	2620	53	690
400	(4x0.4)	5240	72	1030

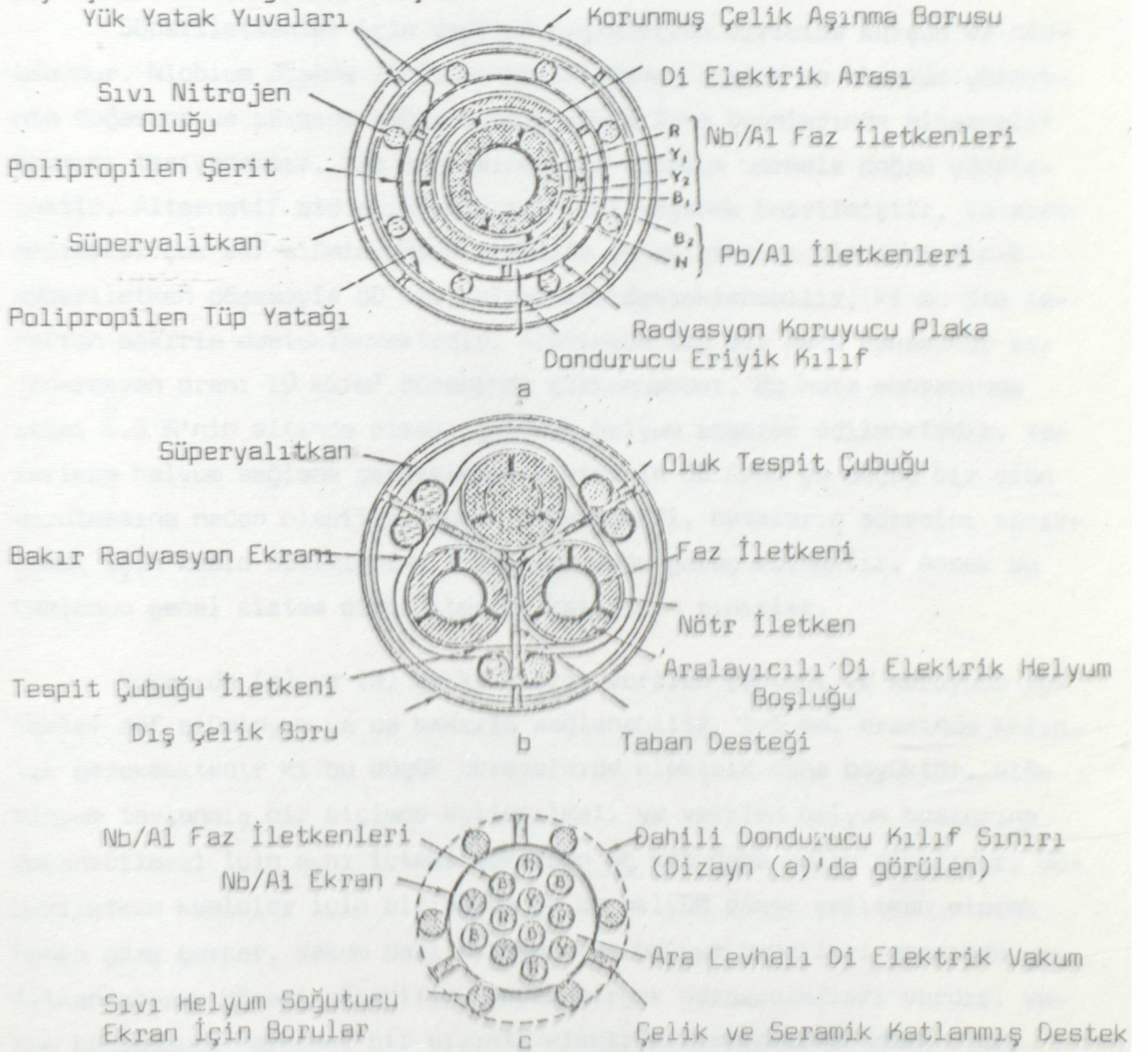
Tablo (8)

İlk bakışta bir kablo süperiletken için zor bir uygulamadır. Doğası gereği kablonun hacim olarak büyük bir dış alan oranı olacak bu anlamda ısı yalıtımı ve soğutma maliyetleri de yüksek olacaktır. Bu nedenle kablo toprakta başlı başına iş görmeli A.c ve d.c süperiletken kablolar üzerinde önemli çalışmalar yapılmıştır. Tersleme ve doğrultma gereçlerinin maliyetinin fazla belirgin olmadığı uzun hatlarda (>50 km) d.c kablolar daha ucuza gelir. Bunlar ayrıca daha ileri enterkonnekte sistemlerde link olarak kullanılabilirler. Bu tür linklerin yararı, onlara girilen enerjiler a.c/d.c terminallerinde olumlu bir şekilde denetlenebilir ve reaktif güç taşıyamamaları nedeniyle sistemdeki reaktif salınımlarını sınırlar. Ancak terminal maliyetleri fazladır ve a.c hatlarıyla çalışan normal koşullarda terminallere doğru beslenen reaktif güçlere bağlı sorunlar vardır.

Bir a.c kablosunda alternatif manyetik alanlar bir sarmaldan ötekine enerji geçirmezler, bu yüzden de makinalardakinin tersine manyetik alan genellikle düşüktür. Bu nedenle tip-1 süperiletkeni ya da yumuşak tip-2 süperiletken niobium kullanılabilir. Her zaman olduğu gibi süperiletken bir kompozit oluşturması için bakır ya da alüminyum kaplanmalıdır. Akım ısınmasını önlemek için süperiletken bir ince yüzey döşemesi

gibi uygulanmalıdır. İletken arasında ileri voltajlara dayanabilecek bir yalıtkan olmalı ve iletkenler ayrıca bir helyum soğutucu akışkanlığıyla temasta olmalıdır. Helyum birkaç bar basınçta ve kesinlikle 2,2'lik kritik basıncın üzerinde olmalıdır. Yalıtkan ve helyum cryojenik bir örtüyle kaplanmalıdır. Bu ısı yalıtımını sağlayacaktır, Cryojenik çevreleme orta ısıda tutulan bir radyasyon perdesi içermelidir. Bu ısı sıvı nitrojen ya da ilave helyum akışı ile sağlanır.

İletken kurgusu için birçok dizayn önerilmiştir. Yaygın olan dizayn Şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil (12)

(a) Sıradan çalışma akımını $0,1 \text{ W/m}^2$ daha az bir güç kaybıyla taşıması.

(b) Yanlış akımları taşıması.

(c) Maruz kaldığı yapısal ve elektromanyetik stresleri desteklemesi ve helyum soğutucuyu ihtiva etmesi.

(d) Süperiletkenin yerel ve geçici olarak normale gitmesi durumunda akıma yol açması gerekmektedir.

Süperiletkenler için yapılan seçimlerden biriside kurşun ve niobiumdur. Niobium düşeme 10-25 mm kalınlığında olacak ve niobium yüzeyinin doğasına ve ısısına bağlı olarak 40-50 A/mm oranlarında alternatif akımını taşıyacaktır. Bir hata sırasında niobium normale doğru yönelecektir. Alternatif bir akım yolu için iki seçenek önerilmiştir. Ya sırt malzemesi çok saf alüminyumdan olabilir ya da niobium bir sert tip-2 süperiletken düşemeyle 80 mm. kalınlıkta desteklenebilir, ki bu öte taraftan bakırla desteklenmektedir. Alüminyum ile bir hata esnasında ısı jenerasyon oranı 10 kW/m^2 düzeninde sözkonusudur. Bu hata sonrasında ısı 6.5 K 'nin altında olması gereken helyum absorbe edilmektedir. Yeterince helyum sağlama gereksinimi iletkenin 30 A/mm'ye doğru bir oran bozulmasına neden olabilir. Bunun alternatifi, hataların süresini sınırlamak için kablo bitimlerine ilave koruyucu gereç koymaktır. Ancak bu kablonun genel sistem stabilitesine katılımın sınırlar.

Yukarıda (c) ve (d) şıkkı olarak verilen yapısal ve koruyucu işlevler saf alüminyum ya da bakırla sağlanabilir. 1-5 mm. arasında kalınlık gerekmektedir ki bu düşük derecelerde elektrik daha büyüktür. Alüminyum tavlanmış bir biçimde kullanılmalı ve verilen helyum basıncına dayanabilmesi için aynı içteki bakırdan üç kat daha kalın olmalıdır. Süperiletken kablolar için bir vakum ya da helyum olası yalıtkan olarak hemen göze çarpar. Vakum bazı dizaynlarda helyum buharları arasında yalıtkan olarak görevi görebilir, ancak birçok dezavantajları vardır. Vakum boşluğunda herhangi bir sızıntı elektrik kesilmesine neden olur. Vakum ya da helyumda en zayıf nokta iç iletkeni destekleyen pullarda ve özellikle de pul ile iletkenin birleşim yerindedir. Bir vakumda pulun

metal kağıtlarla derecelenmesi belki gereklidir. Bu yönde nitrojen soğutmalı cryokablo için bazı çalışmalar yapılmıştır. Pullu helyumla ilgili veri yoktur. Dizayn çalışmalarında, vakum ya da pullu helyumla gerilim gücünün genellikle 10-20 kV/mm olduğu varsayılmaktadır.

Katı yalıtımla daha yüksek güçler elde edilebilir. Ne varki hiçbir katının yeterli yalıtım kaybının olmayacağı biliniyordu. 10^{-5} ten daha az bir kayıp açısı tanjant δ gerekmektedir. Cryojenik zarftan iletken kurgusuna giren ısı, yüzey alanı içersinde zarfın 0.1 W/m^2 'si olacaktır. Helyum kendi akışında kaynaklanan titreşimsel ısıyı, yalıtım kaybını ve a.c kaybını ve ısı iç sızmasını dışa taşımalıdır. Soğutucular büyüdükçe watt başına soğutma daha ucuz olur ve bunlar mümkün olduğunca uzakta ve ayrı konulmalıdır. Ne kadar çok uzak mesafede olursa, helyum akışı o denli hızlı olur ve boru titreşimi daha fazla olur. Böylece, değişik dizaynlar için 5 ve 30 km arasında değişen çeşitli uzaklıklar söz konusudur. Helyum soğutucuların güvenilirliği günümüzde düşüktür. Helyumun kendisi de bilindiği gibi pahalıdır.

En uygun soğutma düzeni, iletken kurgusu içinde farklı yönlerde akan iki helyum akıntısıyla verilir. Eğer ısı sızmaları istenmiyorsa bu iki akım birbirinden izole edilmelidir. Eğer tek yönlü akış kullanılıyorsa, polietilen izoleli kablolarda olduğu gibi, helyum cryojenik zarf içine orta bir ısıyla döndürülebilir. O burada sıvı nitrojen akıntısının yerini alacaktır.

Süperiletkenler, soğuma sırasında oluşan % 0.33-0.42 oranındaki kısılmayı karşılayacak şekilde dizayn edilmelidir. Birçok olasılık vardır; kaydırak eklentiler, kıvrık iletken yüzeyleri, boru iletkenlerinin 20 m gibi uzunluklarda bir araya getirilerek ve boru hattı döşenir gibi kaynak yapılması gerekmektedir. Çevrelenmiş polimer kablo tel iletkenli olarak davul üzerine örülecek, aynı zamanda ısıdan kısıalma sorunun üstesinden gelecektir.

Süperiletken kablonun, bir avantajı şudur; Geleneksel alanlara göre daha düşük voltaj'da çalışabilmesidir, ki bu bazı durumlarda transformator gereksinimini bile ortadan kaldıracaktır.

Süperiletken kabloların birçok dizaynları yapılmıştır. Union Carbide tarafından yapılanlar, ayrıca Alman endüstrisinin desteği ile Dr. Klaudy tarafından ve BICC işbirliğiyle CEGB merkezi Elektrik Araştırma Laboratuvarları tarafından yapılanlar, bir de Siemens ile Fransa'daki CGE'de bu konuya ilgi göstermiştir.

Teknik tartışmaların çoğu, birçok bakımdan dizaynları kolay olan d.c süperiletken kabloları için geçerlidir. A.C ve yalıtım kayıpları yoktur ve yanlış akım ve gerilim voltaj düzeyleri oldukça düşünülmüştür. Bir d.c kablosu sert tip-2 süperiletkenini kullanabilir. Hatta bunlar, cryostatik olarak istikrarlı a.c'ye göre iletken boyutları düşüktür ve eğer yalıtım stabilizasyonu uygunluk gösterirse boyutta daha çok bir düşürme mümkündür. Her durumda, oldukça büyük güç oranları hesaba katılabilir.

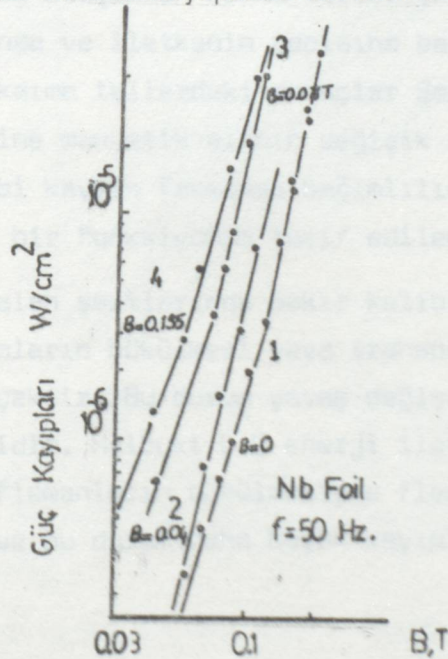
6.1.2. SÜPER İLETKENLİ D.C ENERJİ İLETİM HATLARINDAKİ GELİŞMELERİN İNCELENMESİ

Daha önce bahsedilen a.c süperiletken kablolar gibi, değişik süperiletken maddeler karakterize edilmiş ve dc süperiletken kabloların da çok sayıda modelleri çıkarılmış ve test edilmiştir.

Bilindiği gibi Nb alazımları ve bileşenleri arasında düşük kayıplarda yüksek akım taşıma özelliği gösteren süperiletken materyaller bulunmuştur. Bu tür alaşımların mıknatıslanma eğrilerinin analizi için iki değişik yaklaşım önerilmiştir. Bunlardan biri, karışımın etkisinin ve yapısının incelenmesi ve ayrıca kritik eğri H_{c1} 'den daha düşük değerde ısıl işleyişinin incelenmesi. Bu değer artırılabilirse süperiletkenler H_c 'ye kadar olan bölgelerde yani Meissner bölgesine kadar kullanılabilir. Meissner bölgesinde mıknatıslanma eğrisi yön değiştirebilir (ters dönebilir) ve burada histeresiz kayıpları mevcut değildir. Diğer ise, düşük kritik alanlara sahip alaşımları incelemektir ki, onların bilhassa, mıknatıslama histeresiz çevrim alanı küçüktür. Bu materyaller H_c 'den daha büyük alanlarda işlediklerinde avantajlı olabilirler.

6.1.2.1. KAYIP ÖLÇMELERİ

Saf Nb'nin bilinen en yüksek H_{c1} 'e sahip olması nedeniyle ticari Nb foil (folye) materyali kullanılarak, ilk model DC süperiletken iletim hatları için iletken kablosu imal edildi. İlk önce, foil (folye) materyali içindeki a.c kayıplar 50 Hz ve 4.2 K'de kalorimetrik olarak ölçüldü. Kayıp değerindeki D.C manyetik alan bileşeninin tesiri dahi incelendi. Şekil (13) de saf Nb içersindeki a.c kayıplarının genliğinin, manyetik alanın altıncı kuvvetiyle orantılı olduğu görülebilir. (eğri 1) Meissner bölgesindeki kayıpların varlığı ($\mu_0 H_c = 0.1$ T) foil yüzeyindeki pürüzlerden kaynaklanmaktadır. (Yüzeylerin mekanik ve kimyasal cilalanması bu düşük alan bölgesinde kayıpları azalttı.) D.C alanın üzerine konulması (süperimpose) a.c kayıpların değerinde önemli ölçüde artışa yol açtı. (eğriler 2,3,4) Halbuki, model iletim hattının normal işletme koşulları altında, Nb iletkenindeki kayıplarının ihmal edilebileceği görülmektedir.

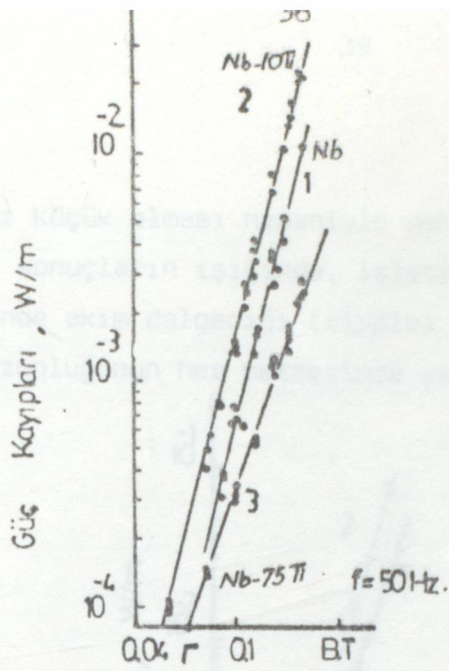


Şekil (13): Uygulanan alanın fonksiyonu olarak, 4 K'lik Nb'de a.c kayıplarının ölçümü (d.c alan uygulaması ile ve dc. alan uygulaması olmadan)

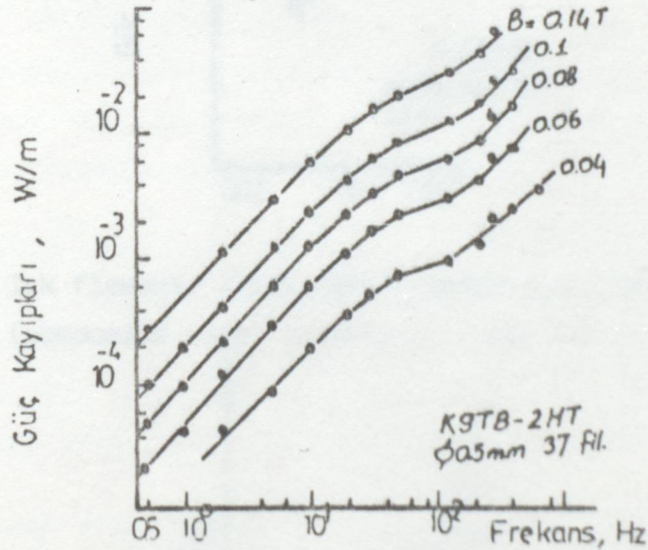
İkinci yaklaşım takip edilerek, ikinci model iletim hattı için iletken kablo imalatında kullanılmak üzere Nb-Ti alaşımı materyal seçilmiştir. Alaşımın optimum terkiibini seçmek için üç değişik Nb-Ti alaşımındaki karma (karışık) tellerde a.c kayıplar ölçüldü: 100 % Nb, Nb-10% Ti

ve Nb-75⁰% Ti (Atomik %) Karma tel oksijensiz bakır matrisi içersinde $\rho_{295/\rho} 4,2 K=30$ direnci ile çapı $40 \div 70 \mu m$ olan 7 süperiletken filamanı ihtiva etmektedir. Süperiletkenin bakıra oranı yaklaşık $\sim 0,3$ idi. Enine manyetik alanlardaki kayıp ölçmelerinin sonuçları Şekil (14)'de gösterilmiştir. Burada 1,2 ve 3 no.lu eğriler sırasıyla saf Nb-10% Ti ve Nb-75 % Ti alaşımlarına karşılık gelmektedir. Saf Nb'ye göre Ti miktarının artırılması önce kayıpları artırır daha sonra maksimum değere ulaştırır ve daha sonra kayıplar önemli derecede azalır. 0,18 T mertebesindeki bir alanda, Nb - 75 % Ti karışımı teldeki kayıplar, Nb-10 % Ti karışımındaki kayıplardan bir mertebe daha azdır. 2 eğrisinin eğimi, 3 eğrisinin eğiminden daha büyük olduğundan, büyük alanlarda bu fark daha büyük olmaktadır. Bu ölçmeler esas alınarak iletim hattı iletkeninin imalinde spesifik Nb alaşımı HT-50 (62 atomik % Ti) seçilmiştir. Bakır matrisi içersindeki 37 filaman ihtiva eden ve toplam çapları 0,5 mm ve 0,7 mm arasında değişen bu alaşımdan karma teller (composite wire) imal edilmiştir. Kaybın frekansa ve iletkenin yapısına bağımlılığı incelenmiştir. 0,5 mm çapındaki karma tellerdeki sonuçlar Şekil (15)'de gösterilmiştir. Burada eğriler enine manyetik alanın değişik değerlerine tekabül etmektedir. Görüldüğü gibi kaybın frekansa bağımlılığı oldukça karışıklık arz etmektedir ve basit bir fonksiyonla tarif edilemez.

Tranzient alan şartlarında bakır kalıbı (matris) içersindeki süperiletken filamanların bükülmesi veya transpoze edilmesinin kayıpları düşürdüğü bir gerçektir. Bu durum yavaş değişen yüksek manyetik alan sistemlerinde geçerlidir. Halbuki D.C enerji iletim hatları benzeri manyetik alan şartlarında flemanların bükülmesiyle flemanlar arasındaki manyetik etkileşim azalır ve bu durum daha büyük kayıplara yol açabilir.



Şekil (14) Enine uygulamalı alanın fonksiyonu olarak 4K'lik Nb alaşımlarında a.c. kayıp ölçümleri.

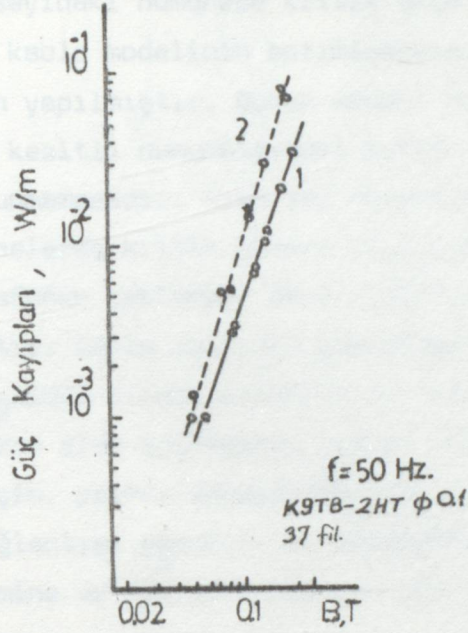


Şekil (15) Enine alanın değişik değerleri için bir frekans fonksiyonu olarak 4K'de Nb-62 Ti çok f'lemanlı bir telin 4K'deki kayıp ölçümleri.

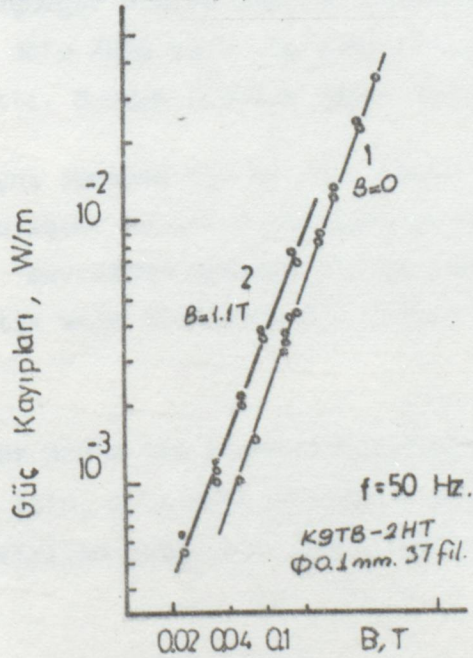
Bunun nedeni karma telin birim uzunluğunda f'lemanların yüzey alanının bükülmüş f'lemanlarda, düz f'lemanlara göre daha büyük olmasındandır. Şekil (16) 0,7 mm çaplı karma telde (eğri 1) ve bakır matrisi kimyasal yolla oyma ile elde edilmiş, tek f'lemanda (eğri 2) kayıp ölçmelerinin sonuçlarını göstermektedir. Bu eğrilerden ayrı tek bir f'lemandaki kayıpların karma teldeki (composite wire) toplam kayıpları geçtiği görülmektedir. (İlk telin birim uzunluğunda)

Şekil (17) 0,7 mm çapındaki karma telde D.C alan bindirilmesinin kayıplara etkisini göstermektedir. Kayıplar önemli derecede artar, fakat

eğimin biraz küçük olması nedeniyle daha yüksek alanların etkisi daha az olur. Bu sonuçların ışığında, işletme şartlarında D.C süperiletken iletim telinde akım dalgalığı (ripple) nedeniyle oluşan kayıpların karmaşık tel uzunluğunun her metresinde yaklaşık 10^{-3} W olacağı yargısına varılır.



Şekil (16) Tek flemanlı iletkendeki yüksek kayıpların karma teldeki (composite wire) kayıplarla karşılaştırılması



Şekil (17) Süperempose bir DC alanın, çok flemanlı bir Nb-62 Ti telindeki kayıp üzerindeki etkisi.

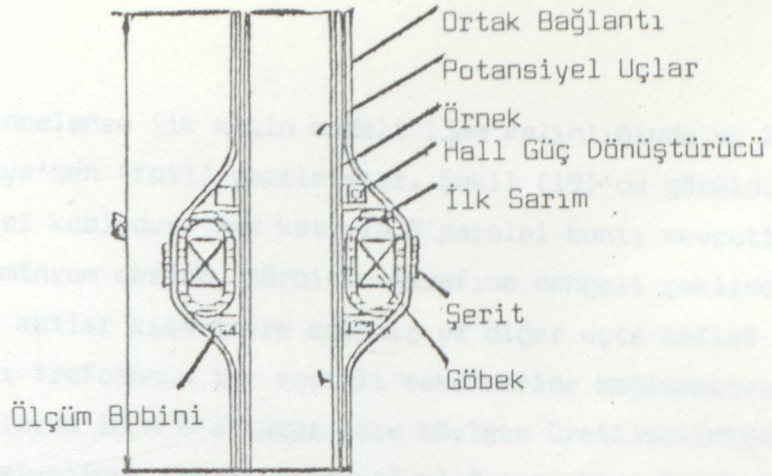
6.1.2.2. KRİTİK AKIM ÖLÇMELERİ

Aktif eleman uzunlukları 100, 150 mm arasında değişen ve kısa diye nitelenen çok sayıdaki numunede kritik akım ölçülmüştür. Bu ölçmeler uzun süperiletken kablo modelinin optimizasyonu ve alan kritik akım değerinin tahmini için yapılmıştır. Bunun nedeni nispeten küçük manyetik alanlardaki büyük kesitli numunelerdeki kritik akım değeri hakkında yeterli yayının bulunmamasıdır. Kısa tel numunelerinde ve büyük kesitli akım taşıyan numunelerde kritik akımın ölçülmesi için bir D.C akı trafosu kullanıldı. Trafonun çekirdeği Şekil (18)'de görüldüğü gibi elektro çelikten yapılmıştır. Sarım oranının yüksekliği nedeniyle cihazın kuplaj katsayısının $N_1/N_2=1000$ olması primerde 10 veya 100 A'ye tekabül eden 10 KA ve 100 KA akım elde edilmesine olanak sağlar. Sıvı helyum tüketiminin azaltılması için, primer süperiletkenden sarılır. Tek sarımlı sekonder iki kontak bağlantısı gerektirir. Sekonderdeki akım numune etrafındaki Rogowski çevrimine ve H_{II}^a etki probuna göre tayin edilir.

Ölçmeler 18 mm. genişliğinde ve 13 μ m ve 150 μ m kalınlığında saf Nb folye (foil) numunelerinde gerçekleştirilmiştir. En ince folyede 150 A/cm lineer yüke eşdeğer olarak ölçülen kritik akım yoğunluğu $J=1,17 \cdot 10^5$ A/cm² dir. Beş defa daha kalın folyede (foilde) ölçülen kritik akım, ancak 3,5 katı arttı. Burada ölçülen değer $3,33 \cdot 10^4$ A/cm² ve 500 A/cm idi.

Ölçmeler aynı zamanda 1,5 mm çapındaki HT-50 Nb-Ti alaşımından yapılmış karma (karışım) tellerde yapıldı. 68 adet böyle tel, bakır stabilizasyon borusu çevresine aksel olarak lehimlendi. Bu numunede ölçülen en yüksek kritik akım 67kA bulundu. Burada zaman sabiti yaklaşık 11sn. idi.

6 m'ye kadar proto tip iletken kabloların uzunluklarında dış ölçümler yapabilmek için, sıvı azot soğutmalı plakalar ve yüksek vakum izolasyonu ile birleştirilen yatay bir uzun cryostat imal edilmiştir.



Şekil (18) Kısa örnek kritik akımların ölçümü için şematik dc. akı transformatörü.

Cryostat 220 mm uzunluğuna dış çaptan, 5.35 m. uzunluğunda orta kesimden ve 275 mm çapında taşınabilir iki uç bölümden oluşur. Numuneleri içine alan merkezi cryojenik kanal, dış çapı 100 mm ve et kalınlığı 2 mm olan paslanmaz çelik borudan oluşmuştur. Merkezi (orta) kanalın her iki ucuna 350 mm uzunluğunda ve 150 mm çapında paslanmaz çelikten yapılmış silindirlere lehim flanslarıyla bağlanmıştır. Cryojenik kanal çeşitli alüminyum Mylar tabakaları tarafından ve sıvı N_2 ile soğutulmuş ince bakır ekran tarafından muhafaza edilir, ki o dış kısma lehimlenmiş soğutma boruları içinde dolaştırılır. Plakaların ortasında ve uçlarındaki cam takviyeli yapraklı çubuklar, cryojenik kanalın plaka içersine eksenel biçimde yerleştirilmesine yarar. İkinci çubuk grubu, vakum kılıf içindeki plakayı destekler He cryojen ve sıvı N_2 gazı sağlayan borular, her cryostatın sonundaki uç plakaları ile desteklenir. Sıcaklık daralmaları borulara bağlanan yastıklarda kompanze edilmiştir. Çalışma esnasında cryostat 10^{-6} torluk bir basınca kadar boşaltılır. Helyum cryojen, soğutma kapasitesi 4,5 K'de 150 W ve sıvılaştırma kapasitesi 40 l/saat soğutucu ve sıvılaştırıcı ile temin edilir. 80 kg kütleli bir kablo şeklinin soğutma zamanı 5 saattir. Burada deney için gereken sürede çalışma sıcaklığı muhafaza edilir. Cryojen kanala ısı sızıntısı, hesaplanan 3,5 W değerinden biraz fazla 5 W civarında olmaktadır.

Cryostatda incelenen ilk kablo modeli $13\mu\text{m}$ kalınlığında ve 20 mm. genişliğinde Nb folye'den (foil) yapılmıştır. Şekil (19)'da görüldüğü gibi, o bir koaksiyel kablodur. Her katının 8 paralel bantı mevcuttur. 50 mm çapındaki alüminyum destek, türbinin etrafına dengeli şekilde sarılmıştır. Bir uçta katlar kısa devre edilmiş ve diğer uçta katlar 1000 sarım oranlı D.C akı trafosunun tek sarımlı sekonderine bağlanmıştır. Süperiletken katmanlarda 10 K A'e kadar akım böylece üretilebilmiştir. Nb folye (foil) materyalinde kritik akım yoğunluğunun, kısa örnek ölçmelere uygun olarak kablo modelinin kritik akımı 2.35 K A ölçülecektir. Örnek normal durumuna getirildiğinde cryojenin sıcaklığında ve basıncında ani bir değişim kaydedilmedi ve soğutucunun çalışmasında bir değişiklik görülmedi. Böylece çok düşük miktarda güç üretildi. (D.C akı trafosunun kendi kendine sönmümlü olması itibarıyla)

300 Hz'de %3 A.C akım dalgacık kompenentinin üzerine konulması durumunda kablo modelindeki kayıplar, cryojenik kanala olan ısı sızıntısıyla karşılaştırıldığında önemsiz kalmaktadır. Bu Nb folye (foil) maddesinde yapılan A.C kayıp ölçmelerinin sonuçlarıyla uyuşmaktadır.

Kritik akım aynı zamanda akım kademe oranının fonksiyonu olarak ölçüldü. Şekil (20)'de görüldüğü gibi 12,5 kA/sn'nin üzerinde kritik akım kademe oranlarında derecelere ayrılmamıştır. Fakat kademe oranı 30 kA/sn ye yaklaştığında önemli miktarda düşünülür.

Bu ilk ölçmeler pratik olarak cryojenik sistemin ve elektronik test teçhizatının elektriksel ve termal performansının analizi, derecelendirilmesi, öncelikle ölçme tekniğinin sağlanmasına yaramaktadır. Böylece daha yüksek akım kapasiteli iletken modellerinde deneysel güvenle ölçmeler yapılabilir. Süperiletken materyallerindeki araştırmaların sonuçları hatırdaki tutularak HT-50 Nb-ti karma tellerinden 1,5 mm çapında yeni bir iletken modeli imal edilmiştir. Şekil (19b) de görüleceği üzere onun da koaksiyel yapısı vardır. İç iletken 6 m. uzunluğunda 68 telden yapılmıştır. Bu iletken I_n ile bakır stabilizasyon borusuna lehimlenmiştir. Bu borunun $295/4,2 \text{ K} = 42$ artırcı direnci vardır. Dış kat üç eşit bölüme ayrılan 75 telden teşekkül etmiştir. Her bölümün telleri I_n ile birbirine lehimlenmiştir ve 2m çapında 20 adet bakır tel ihtiva eden bir kat lehim-

lenmesi suretiyle stabilize edilmiştir. İletken modelinin her biri 26 cm uzunluğunda 3 adet lehimli kontak bağlantısı ihtiva eder. Birisi iç ve dış katların kısa devre edilmesi için bir uçta, diğer ikisi de iletkeni d.c akı trafosunun sekonderine bağlamak için kullanılır. 2780 sanm ve 0,33 mm çapında süperiletkenden müteşekkil bu cihazın primer devresi MGX elektriksel dereceli çelik toroid çekirdek üzerine sarılmıştır. Sekonder devrenin L endüktansı $\sim 10^{-7}$ H olarak ve bağlantıların toplamı R temas direnci $\sim 1,5 \cdot 10^{-10} \Omega$ olarak hesap edilmiştir. Cihazın hesap edilen zaman sabiti böylece $\tau = L/R = 700$ sn olur. Deneysel olarak ölçülen zaman sabiti sadece $\tau = 240$ sn. bulundu.

Böylece toplam temas direnci sadece gerilim terminallerinden ölçülmüş ve $4,7 \cdot 10^{-10} \Omega$ bulunmuştur. Bu değer hesaplanan L değeriyle uyum içersindedir. İletken modelinin kritik akımının ölçülen en yüksek değeri 59.3 kA idi. Bu değer, iç iletken konfigürasyonunda kısa örnek ölçmelerindeki değerlerle oldukça uyum içindedir. Bu kritik akım civarındaki bağlantılardaki Joule ısı kaybı 3,5 W'a ulaştı. Bu değer biraz daha büyük R'e tekabül etmektedir.

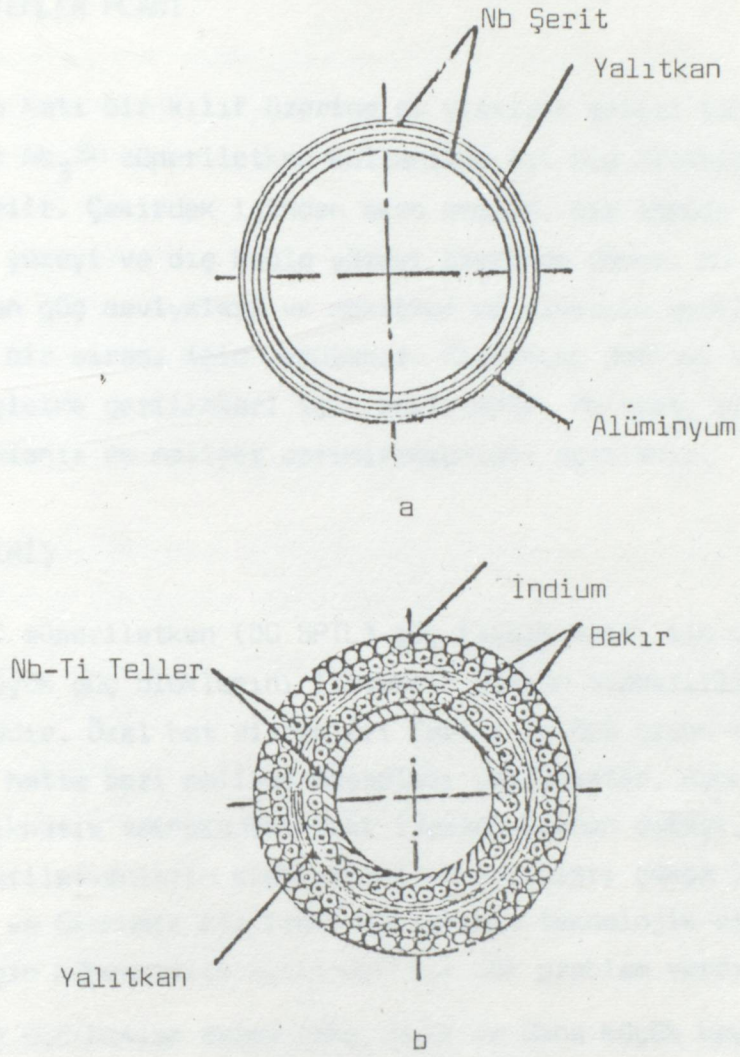
Hesaplamalar 300 Hz'de ve %3 akım dalgalanmasında, bu akım değerinde süperiletken tellerinde a.c kayıplarının 0,86 W olacağını göstermiştir. Stabilize bakırda da aynı mertebede kayıplar olacağı beklenmektedir. Netice olarak kablo modelindeki toplam elektrik kaybının $\sim 0,3$ W/m olacağı tahmin edilmektedir.

Yakın gelecekte a.c kayıpların deneysel ölçmelerinin yapılmasına teşebbüs edilecektir. Daha ileri derecedeki araştırma programları aşağıdaki hususları kapsar.

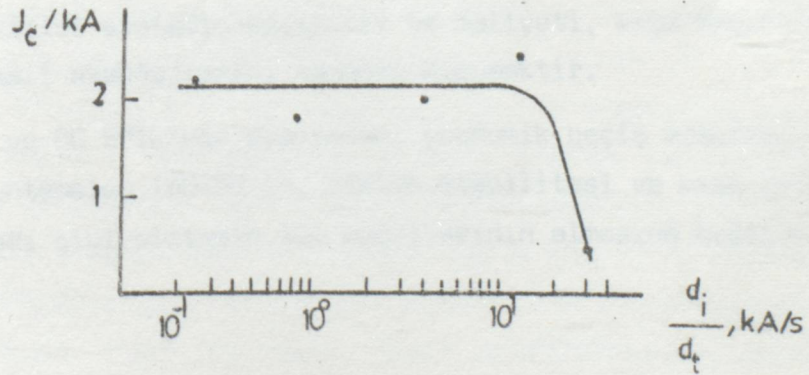
a- Geliştirilen mevcut bulgular ışığında değişik kablo maddelerinin elektriksel mukavemetinin ve kritik akımının tayini mevcut bulgu olarak prototip süperiletken güç kablosunda akım kablosunun optimum geometrisinin tayini gösterebilir.

b- Manevra transientleri sırasında iletken modellerindeki araştırmalar.

c- Süper-kritik helyum devirdaiminde iletken modelinin davranışı ve soğutucunun çalışması hususunda araştırmalar.



Şekil (19) Test edilen iki süperiletken koaksiyel kablounun şeması.



Şekil (20) Şarj akımının fonksiyonu olarak çok katlı (multi-tape) koaksiyel Nb iletkeninde kritik akım.

6.1.3 DC BİR SÜPER İLETKEN GÜÇ İLETİM HATTININ ELEKTRİKİ, CRYOJENİK SİSTEMLER PLANI

Hat katı bir kılıf üzerine di elektrik şeriti sarılmış çok filaman veya şerit Nb_3Sn süperiletken kullanılan içi boş fleksible bir kablodan meydana gelir. Çekirdek içinden akan crojen, bir türbin içinde yayılır ve dış kablo yüzeyi ve dış kablo yüzeyi üzerinde döner. Bu durum, 1GW'tan 10GW'a olan güç seviyeleri ve maksimum di elektrik gerilmeleri ve hat geriliminin bir sırası için uygulanır. Sistemler nominal kapasite değeri ve optimum işletme gerilimleri için belirlenir. Maliyet, bileşenlerin değeri için hesaplanır ve maliyet optimizasyonları açıklanır.

6.1.3.1 GİRİŞ

D.C süperiletken (DC SPTL) güç iletim hattı ile uzun mesafeler üzerindeki büyük güç bloklarını iletmenin mümkün olabilirdiği 10 yıldır tartışılmaktadır. Özel hat dizaynları Carter ve AEG grubu tarafından önerilmiştir ve hatta bazı maliyet hesapları yapılmıştır. Aynı zamanda, süperiletken mıknatıs teknolojisindeki ilerlemelerden dolayı, dc koşullar altında süperiletkenlerin stabilitesi ve kayıpları çokça iyileştirilmiştir. Güvenilir ve Ekonomik bir kablo sisteminin teknolojik olarak mümkün olabilmesi için mühendislik açısından bir çok problem vardır.

(a) D.C hatlar daima daha düşük ve daha küçük kayıplara sahiptir ve bundan dolayı a.c hatlardan daha az pahalıdır.

(b) Çevirici sistemin kayıpları ve maliyeti, kısa mesafeler için d.c hatların asıl avantajlarını tamamen korumaktır.

(c) AC ve DC SPTL'nin arasındaki ekonomik geçiş mesafesi, güç seviyesine ve muhtemelen 150+50 km. sistem stabilitesi ve kısa devre sınırı ve hata akımları gibi sistemin tüm koşullarının almasına bağlıdır.

6.1.3.2 KABLO KAVRAMLARI

Herhangi, bir süperiletken iletim sistemi, kullanılabilir bir süperiletkeni, paralel cryoiletkeni ve cryojen akışı için geçişler ile bir cryojerik kılıf içindeki di elektriği içermek zorundadır. Son 5 yıl için 18 K de bir T ile Nb_3Sn , bir DC SPTL için en iyi materyal seçimini gösterir. Daha uzun mesafelerde, 21 K'in üzerinde bir Tc ile NB_3Ge nin dikkate alınması gerekir. Kablo elementlerinin sıvalamasının mümkün olan değerleri, üç grup içinde sınıflandırılabilir.

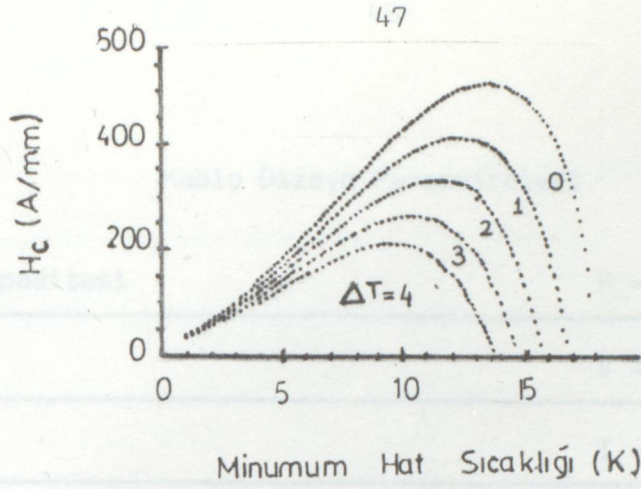
6.1.3.3. SERT BORU BİÇİMİNDE YAPILAR

Boru biçimindeki montajlarda, alüminyum veya bakır sert bir stabilize borunun yüzeyinde süperiletken kullanılır.

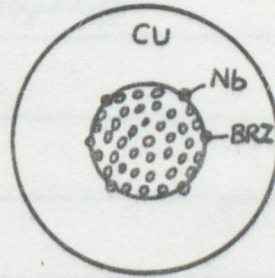
Süperiletkenliği elde etmede ve alan kurmada, ya da en azından termal uzamaya maruz kalan bir montaj içindeki eklem yerlerinde, sürekli yüksek iletkenlik sağlamanın zor problemleri vardır. Herhangi bir di elektriğin sürekliliği özellikle koaksiyel düzenlemelerde gaz dahi bir problemdir.

6.1.3.4. SARILMIŞ ŞERİTLER

Sarılmış ya da sarılmamış şeritlerin termal uzama problemleri çözülmeli ve bir ispata dayandırılmalıdır. AEG çalışmalarında, Nb_3Sn iletken şeritinin ticari olarak elde edilebilirliği görülmüştür. Mevcut olan akı atlamalarının değişkenliği ile dik manyetik alanlardan kaçınmak için, uçlarda (terminations) ve dirseklerde özel bakıma gereksinme duyulur. Çok damarlı iletkenin, damarlarındaki efektif iletim, hem boru şeklindeki filmler hem de şeritler için zordur. (self alanlarına karşı) Bu yüzden, çevre akımı yoğunluklarının değişmez ısı stabilize limitleri Şekil (21) de görüldüğü gibi hat çalışma sıcaklığına ve derecesine bağlıdır. Bu koşullarda, düşük güçlerdeki çekme işleminin çoğunu süperiletken şeritler yapar.



Şekil (21) Minimum işletme sıcaklığı (t_1) ve maximum fark (ΔT)'nin bir fonksiyonu olarak, ticari kullanımdaki Nb_3Sn elementinin Maximum sıcaklığı değişmeyen sabit çevre akımı yoğunluğu. T_1 maximum film kalınlığını tayin eder ki o da sabittir. (10 K'de 15 μ m yada 8 K'de 9 μ m) Ve böylece, maximum işletme sıcaklığında taşınabilen max akım sınırlanır ($t_1 + \Delta T$)



Şekil (22) DC SPTL için, çok filamanlı Nb_3Sn iletkeni önerilmiştir. Nb_3Sn filamanları, 14 K'de 1000 A/mm^2 bir akım yoğunluğuna sahiptir ve orijinal Nb ve tunça aittir. Düşük termal iletkenlik ve yüksek elektriki direnç bölgelerindeki ısı değişmezlik stabilitesi için çapın uzunluğu 8 K'de 35 μ m yada 10 K'de 55 μ m'den daha düşük olmak zorundadır.

Kablo Dizayn Parametreleri

Max. Güç Kapasitesi	$P = 1 - 10 \text{ Gw}$
Hat voltajı	$V = 100 - 1000 \text{ kV}$
Hat akımı	$I = P/V$
Süperiletkenlik kritik akımı	$I_c = \alpha I$
Süperiletkenlik emniyet faktörü	$\alpha = 1,25$
Süperiletkenlik kritik akım yoğunluğu (1,4 K'de ve 0,5 T)	
Standart Nb ₃ Sn filmleri	$J_c = 15000 \text{ A/mm}^2$
Nb ₃ Sn (tüm) yayılmış tunç	$J_c = 1000 \text{ A/mm}^2$
Cryostabilize içinde $\rho = 10^{-10} \Omega.m$ de de uygun görülen max. akım yoğunluğu	$J_X = 100 \text{ A/mm}^2$
Bakır içi süperiletken oranı	$R_m = J_c/J_X \cdot \alpha$
Kablolar için yüzey faktörü	$g = 1,33$
Max.di elektrik gerilme	$E_1 = 10 - 30 \text{ kV/mm}$
Corana koruyucu plakaları aralığı	0,1 mm.
Tunç zırh aralığı	1 mm
Zırh içindeki olukların derinliği	3 mm

Tablo (9)

Koaksiyel D.C SPTL'nin Temsilcisi

	A	C	D
P(GW)	5.0	7.5	7.5
V(kV)	100	250	400
I(kA)	50	30	18.75
E_1 (kV/mm)	10	20	20
do(mm)	38	60	50
S.C Malzeme	MF Tel	MF Tel	Şerit
İ.d of Diel(mm) (Dielektrik)	49.3	64.9	52.3
o.d of Diel (mm)(Dielektrik)	60.4	95.4	112.4
o.d of Cable (mm) (kablo)	76.2	106.6	121.5
i.d of Encl.(mm) (Muhafaza)	93.1	135.1	141.4
Soğutucu aralama (km)	6	10	8

Teknolojik Eleman Maliyetleri

Kablo (₺/m)	297	212	140
Muhafaza (₺/m)	227	269	276
Soğutucu (₺/m)	90	77	83
Yekün (₺/m)	614	558	499

Tablo 10

6.1.3.5 SİSTEM KOŞULLARI

6.1.3.5.1. GİGAWATT İLETİM HATLARI İÇİN UYGULAMALAR

Gelecek 15 yılda, çoğunlukla 5 GW'den 10 GW'a kadar kapasitesi olan iletim sistemlerinin ihtiyacı, büyük üretim merkezleri (yani güç istasyonları gibi) ve şehir yük merkezleri arasında olacaktır. İletim mesafeleri muhtemelen 100 ile 500 km. arasında olacaktır. Bu gibi servis- lere yüklenen emniyet koşulları şu olacaktır. İletim kapasitesi, önemli bir kopma veya bozulma (i. olasılık) sonucu olarak kaybolmayacaktır. Ve % 50'den %70'e nominal iletim kapasitesi çift bir kopma veya ikinci ih-

timal olduğu takdirde bile en azından 4 saat için hala elde edilebilir durumda olacaktır.

Bu řu demektir ki, iletim sistemi en azından her biri ikinci olası gücün tümünü iletebilecek olan, üç bağımsız paralel üniteden meydana gelmek zorundadır. (veya her biri ikinci olası gücün yarısını iletebilecek 4 hattan oluşmalıdır.) Geçiş hakkı ve çevresel sınırlamalardan dolayı iletimin bir parçasında veya tümünde yeraltı kabloları kullanılmak zorundadır.

6.1.3.5.2. AKIM VE GERİLİM DEĞERLENDİRMESİ

(Doğru akım) Bir DC SPTL'de enerji kayıpları olmadığı için, bu direkt olarak akımın seviyesiyle, ilgili olabilir. (alışılmış iletkenlerdeki güç I^2R harcamasında olduğu gibi) Tek bir hat içinde akan akan akımın büyüklüğünde fiziksel bir sınırlama yoktur. Diğer taraftan kısa devre (veya 4 saat) aşırı yük değerlendirilmesi yoktur. Bu yüzden, her hat için güç dizaynını belirleyen sistemin olasılık değerlendirmeleri olacaktır. Normal ya da anormal durumlardaki 3 hatlı bir sistem için, her hat, oranı %44 ya da %66 olabilen sistem gücünün sadece 1/3'ünü taşıyacaktır.

Sistem voltajı eninde sonunda, teknik ve ekonomik koşulların göz önünde bulundurulmasıyla düzenlenir. Bununla beraber, daha düşük oranlardaki işletim voltajlarının seçiminin ilk olarak istenildiği görülür. řu anda yeraltı iletiminde, örneğin 100 kV ile 250 kV seviyesinde kullanılmaktadır.

6.1.3.5.3. ÇEVİRME İSTASYONLARI, ARIZALAR VE DALGALANMA

Üç üniteli bir D.C iletim sistemi için bir tek hat diyagramı şekil (23) de gösterilmiştir. Eş tristör ya da plazma valf elementleri elektronik olarak ac'yi dc'ye sonradan da yine ac'ye çevirmek için her hattın sonunda bulunan çevirici ünitelerinde kullanılır.

Her iletim saykılının sonunda meydana gelebilecek ani sönmelerden valfleri korumak için kullanılan L_1 bobinleri, inverterdeki yay boyunca akan akımları sınırlandırmada ve hat dalgacığını azaltmada kullanılır.

Süperiletken indikatörde kullanılan tipik bir bobin ölçüsü 0,1H ile 0,5 H arasındadır. Çevirici ünitelerinin 6 ya da 12 pulse'lık işletimi mümkündür, fakat sonraki daha düşük toplam dalgacık gerilimini verir. (720 Hz'den daha yüksek frekanslarda) 11'de verilen maximum dalgacık akımları 4 tipik sistem için hesaplamaları gösterir. Şekil (22)'de gösterilen tam olarak yeri değiştirilmiş ve kısmi olarak yalıtılmış teller ile akımın çoğu bakır üzerinde akacaktır. (süperiletken filemanlar, tel yüzeyi boyunca yaklaşık bir deri kalınlığı kadar ise) Bu koşullar altında $I_{AC}^2 R_{AC}$, indüklenen girdap şeklindeki akım kayıplarından daha büyük ise, direkt olarak kayıplar meydana gelir.

Sabit bir güçte, daha yüksek voltajlı sistemler için, dalgacık akımları daha büyük olacaktır ve aynı ölçüdeki reaktörlerde lineer olarak artacaktır. Hat uzunluğunun her bir birimindeki dalgacık kayıplarını V^3 olarak tanımlayabiliriz. (fakat cryoiletkenin hacim ünitesi başına V^4 gibi) 400 kV'un altındaki tüm örnekler için, bu kayıplar diğer ısı yükleriyle karşılaştırıldığında ihmal edilebilir.

Arızalar, birçok şekilde olabilir. Tablo (11)'de tanımlanmış 4 hatta taşınan herhangi bir akıma, Tablo (12) deki fazla miktardaki akımların ilavesiyle, A noktasındaki (Şekil 23) kısa devre hattı deşarj akımı en fazla 1,1 ms'lik sürede hareketli dikdörtgen dalgalar üretir. Gösterilen ısı girişleri ve sıcaklık artışları, tüm akımın süperiletkenden bakıra doğru akışına neden olduğu "en kötü durum" olarak varsayılır. Kısa devreden sonra, doğrultucu çeviricilerin ateşlemesinin durdurulması için bir komut verilinceye kadar, bir ilave sinüsoydal devamlı bir akım oluşacaktır. Kötü bir varsayımla bütün akımların cryostabilizer'de taşınacağı göz önünde bulundurulursa ısıtma tekrardan hesaplanır.

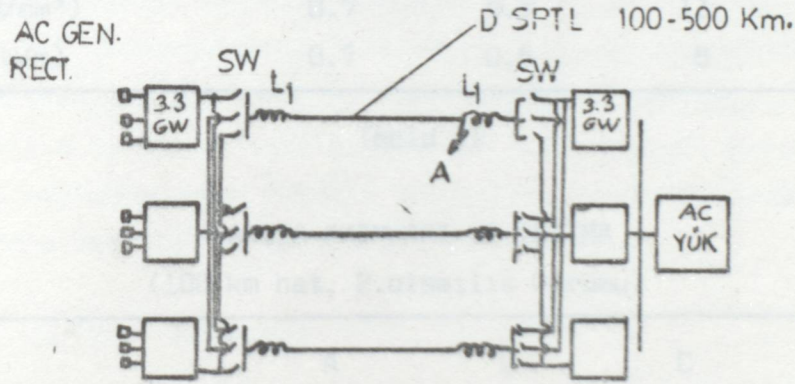
2 kelvinlik ısı güvenliği toleransının yapıldığı durumlar için, birçok miktarda çare olabilecek ölçümler mevcuttur.

Anahtarlanan dalgalar, (Switching Surges) konvertör üniteleri arasında bir noktadan diğer noktaya olan iletim sistemi içinde önlenemez. Fakat, bunlar daha kompleks d.c devre kesicili bir sistemde önemli olabilmektedir. Çevirici ünitelerdeki paralel hatlar arasındaki transfer için, hızlı mekanik izolasyonlu anahtarlar ile sıfır akım seviyelerinde-

ki devre bağlantılarında değişmelere müsaade edilmektedir.

Ani büyük dalgalar (yıldırım gibi) ve birleştirilmiş gerilimler bütün yer altı sisteminde bir problem oluşturmaktadır. Fakat bu, uzun bir hava hattına bağlantısı olan bir yer altı hattı için ciddi bir problem oluşturabilir. Bu gibi bir arızayla yüklenmiş detaylı ihtiyaçlar, henüz analiz edilmemiştir. Benzer olarak, temel yalıtım seviyesi (BIL), veya DC SPTL sisteminin aşırı voltaj oranı, tanımlanmış olarak kalmıştır.

Normal HVDC iletim sistemleri, genellikle bipolar modda işletilebilir, yani toprağa göre ters polariteli fakat aynı voltajlı paralel hatlı mod. Dengeli koşullar altında hiç bir toprak akımı akmaz. DC SPTL nin içerdiği akımların, herhangi bir toprak akımına izin verecek şekilde büyük olduğu açıkça bellidir.



Şekil (23) Üç paralel 5GW'lık iletim hattından oluşan 100 6W'lık güç iletim sistemi için bir hat şeması.

DALGACIK (RIPPLE) AKIMLARI VE ISITMA

(100-km hat, 6 faz çevirici, Her Terminal için 0,5 H)

	A	B	C	D
P(GW)	5	7.5	7.5	7.5
V(kV)	100	100	250	400
E_1 (kV/mm)	10	20	20	20
d_0 (mm)	38	50	60	50
Ind. (min)(H/m)	8.1×10^{-8}	3.2×10^{-8}	7.7×10^{-8}	1.5×10^{-7}
Cap.(F/m)	3.4×10^{-10}	8.8×10^{-10}	3.6×10^{-10}	1.9×10^{-10}
Z_0 (Ω)	15.4	6.0	14.6	28.3
MAX. I_{ac} (Arms)	36	36	90	144
Kayıp ($\mu W/cm^3$)	0.7	0.3	13	83
Kayıp (m.W/m)	0.7	0.5	8	31

Tablo 11

ARIZA AKIMLARI VE ISITMA

(100 km hat, 2.olasılık Durumu)

	A	B	C	D
Uzun Dalga Dizisi, 1.1 ms. maximum süre:				
Aşırı Akım (kA)	6.5	16.7	17.1	14.3
Isı Girişi (J/m)	0.70	1.23	0.81	0.6
Bakır ΔT (k)	0.11	0.13	0.20	0.2
Helyum ΔT (k)	0.13	0.13	0.06	0.0
Yarı sinüs Dalgası, 22.3 ms. süre-6 faz çevirici 0.5 H.kısıcı bobin				
Tepe Akımı (kA)	1.94	1.94	4.86	7.7
Isı Girişi (J/m)	6.0	8.8	4.5	4.2
Bakır ΔT (k)	0.85	0.83	1.04	1.2
Helyum ΔT (k)	1.11	0.93	0.33	0.2

Tablo 12

6.1.3.5.4 ENERJİ KAYIPLARI

Bir iletim hattının enerji kayıpları, genellikle iletilen gücün bir yüzdesi olarak verilir. Şüphesiz ki o, çevirici sistem içindeki bir dc hat kayıplarını da içermektedir. Malesef, bu güçten oldukça bağımsız olan, ısı kaçaklarını gösteren kayıpların bir parçası, yanıtıcı olmaktadır. 0,5 W/m ya da 75 W/m'lik düşük yük ısısı sıcaklığının genişliği kadar, 150 kerelik (times) bir güç kompresörüne ihtiyaç vardır. 5 GW'lık 100 km'lik bir hat için, bu boş bir kompresör gücünün 7,5 Mw ya da enerji kaybının %0.15 olduğu anlamına gelmektedir. Hat, normal olarak sadece tam gücün %55'inde çalıştırılırsa, bunların kayıplarının yüzdesi %0.34'e düşürülür.

Bir çevirici içindeki kayıplar yalnız çeviricinin dizaynına bağlıdır ve hat uzunluğundan bağımsızdır. Çevirici transformatördeki kayıplardan alınan başlıca sonuçlar, kayıplara valfleri geçen ileri gerilim düzmelerinin sebebiyet verdiğidir. Bir tristör valf, birçok tek tristörün seri bağlanmasından meydana gelmiştir. Bu yüzden tristörlerin numaraları daha büyüktür ve güç kaybı daha yüksektir.

6.1.3.6. MALİYET TAHMİNLERİ

Tablo (13) de verilen kablo bileşenlerinin maliyet değerleri kabul edilmiştir. \$ 22/kg'da imal edilen süperiletken teller, yaklaşık %10 olarak gösterilen az miktarda bir maliyet değerindedir.

Crojenik muhafazanın maliyeti, CE iki bileşen içinde ayrılabilir. Biri d_7 iç çapı ile ve diğeri ısı kaçağı ile düzenlenir.

$$Q \text{ (in W/m)}$$

$$CE = 1.02 \cdot d_7 + 100 \cdot Q^{-0.3} \text{ (\$/m)}$$

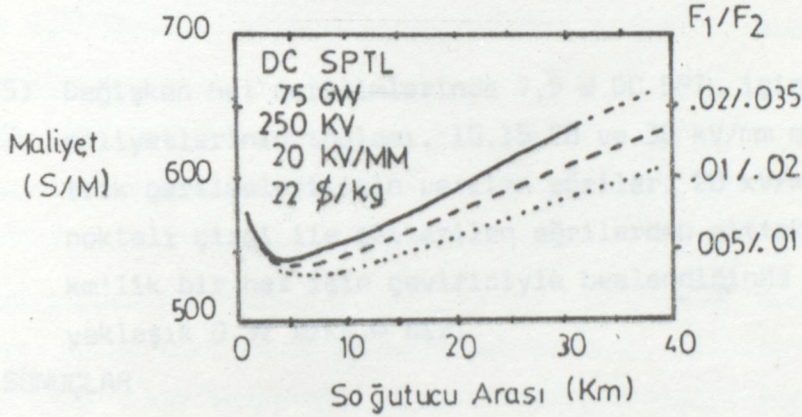
Şekil (24), soğutucunun soğutucu boşluğunun bir fonksiyonu olarak maliyetini verir. Burada akışkan faktörleri belirli bir etkiye sahiptirler fakat geniş soğutucu alanlarından bir tanesi çok önemlidir.

Kablo Bileşenlerinin Maliyeti

Çok flamanlı Nb ₃ Sn (%89 Cu)	₺ 22.00/kg
14 K*'de Nb ₃ Sn şerit	1.20/ kA-m
Kağıt Kraft şerit	1.60/kg
Tunç zırh	5.00/kg
Kablo üretimi	50.00/m

*10mm Nb₃Sn ve 1,2mm'lik OFHC bakırın arasında 6,67 mm. genişlik vardır.

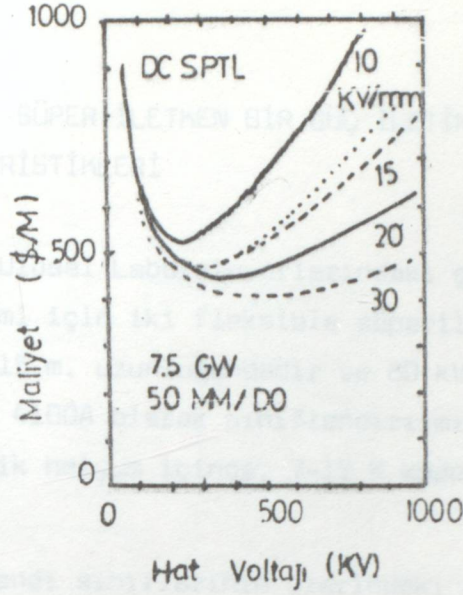
Tablo (13)



Şekil (24) Soğutucu boşluğunun bir fonksiyonu olarak 7 Gw 250 kv DC SPTL nin maliyet değişimi. Bu maliyetler, akışkan faktörlerinin etkilerini göstermede ve soğutucunun maliyetini ispatlamayı içerir.

Bu dönüştürücü birim maliyetleri 24 \$/kW, 400 kv'da %4/100 kv eğiminde 7,5 Gw. (nominal %44 yüklemde) yaklaşık olarak 200 km uzunluğuna karşılık gelir. 100 km'lik bir iletim mesafesinde 0,32 \$/kW-m maliyet eğiminde ve optimum işletim voltajlarında Şekil (25)'deki eğriyle tanımlanan iki faktörle maliyeti belirlenir.

Çap-bağımlı maliyet çoğaltıcısının basit bir kullanımı, daha fazla detaylı analizler gerektirir. Aktüel maliyet mukayeseleri belirli tanımlamalarla ele alınmalı ve özellikle yerel ve gerçek maliyetler için yapılmalıdır.



Şekil (25) Değişken hat gerilimlerinde 7,5 W DC SPTL için bileşenlerin maliyetlerinin toplamı. 10,15,20 ve 30 kV/mm maximum di elektrik gerilmeleri için verilen eğriler. 20 kV/mm değeri için noktalı çizgi ile gösterilen eğrilerden alttaki ve üsteki 100 km'lik bir hat için çeviriciyle beslendiğinde birim fiyatı yaklaşık 0,32 \$/kV.m dir.

6.1.3.7 SONUÇLAR

- (1) DC süperiletken güç iletim hatları (5-7,5 Gw. aralığındaki) şu anda birim başına 500 ve 600 \$/m maliyetinde gerçekleştirilebilir.
- (2) %15'lik bir tasarrufla 10 kV/mm'den daha büyük di elektrik gerilmeler kullanılabilirse mümkün hale getirilir.
- (3) Akışkan sürtünme faktörlerinin uygun hat dizaynıyla azaltılması %5 maliyeti düşürür.
- (4) Dönüştürücü birimlerinin maliyetlerindeki azalmalar özellikle kısa iletim mesafelerinde DC SPTL'nin durumunda çok önemli etkilere neden olur.
- (5) İleri süperiletkenlerin üretim geliştirmelerinde teknolojik nedenler ulaşılan birimlerin her ikisinde de önemlidir ve geniş miktar maliyeti de 22 \$/kg'dır. Eğer bu maliyetlere ulaşırsa bunlar 100 kV'luk hattın %50'sini 200 kV'luk hattında %25'ini temsil eder.

6.1.4 1000 MVA'lık SÜPER İLETKEN BİR GÜÇ İLETİM SİSTEMİNİN İŞLETİM KARAKTERİSTİKLERİ

Brookhaven Ulusal Laboratuvarlarındaki güç iletim projesinde a.c elektrik güç iletimi için iki fleksible süperiletken kablo test edilmiştir. Bu kablolar 115 m. uzunluğundadır ve 80 kV'da 333 MVA 'lık bir güç oranı için tek faz 4100A olarak sınıflandırılmışlardır. Onlar, 14-15 atmosferde süperkritik helyum içinde, 7-12 K kademesi üzerinde işletilmektedirler.

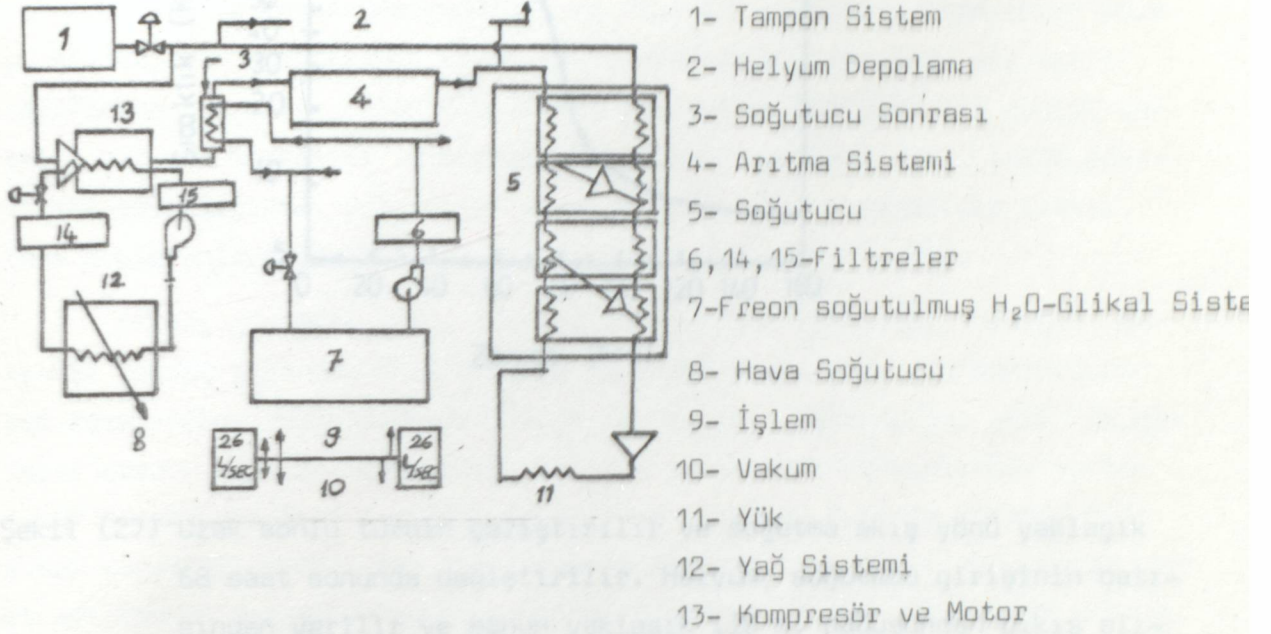
Kablolar, kendi sınırlarının üzerindeki akım ve gerilimlerde test edilmişlerdir ve kablo performansındaki soğutma kayıplarının etkilerini incelemek için soğutma akışı olmaksızın dahi çalıştırılmışlardır.

Süperiletken güç iletim projesinin amacı, elektrik gücünü çok büyük kısımlar halinde aktarabilmek için bir yer altı iletim sistemini geliştirmektir, ki bu sistem, diğer iletim sistemleri ile hem ekonomik açıdan hem de teknik açıdan rekabet edebilir.

Kabloların elektriksel ve cryojenik performansı araştırılmıştır. Bu testler, 60 Hz'deki kararlı durum çalışmasını, gerilim dayanım testlerini ve 6000 A'lık tehlikeli güç oranındaki testleri içermektedir. (kablo başına 500 MVA)

Ayrıca, kablolar soğutma kapatıldıktan sonra 2,5 saat üzerinde tam akım altında çalıştırılmışlardır. Süperiletken güç iletim hattı testi, tam ölçüde prototip kablo yapımına imkan veren test istasyonu dışında mümkündür. Böylece yüksek yetenek, basit koruma ve otomatik çalışma gibi özellikler, üstün özellikler olmaktadır. İlave olarak kabloları soğutmak için 700 W süperkritik helyum soğutucuya, ve onları uyarmak için 60 Hz akım ve gerilim beslemesine bir çok sayıda yardımcı cihaza da ihtiyaç vardır. Bunları kontrol valfleri, mekanik pompalar, vakum sistemleri, sıcaklık püskürtmeleri, bir yağ işletim sistemi, hava kompresörleri, hava kurutucuları, bir su soğutucusu, helyum depolama tankları, filtreler, cyclone (siklon) ayırıcılar, aktarıcılar, emici kömür yatakları, su pompaları, laser aerosol detektörleri, ölçüm aletleri, gösterici kontrolörleri, diğer bilgisayar çevre birimleri ve basınç sıcaklık ve akış dönüş-

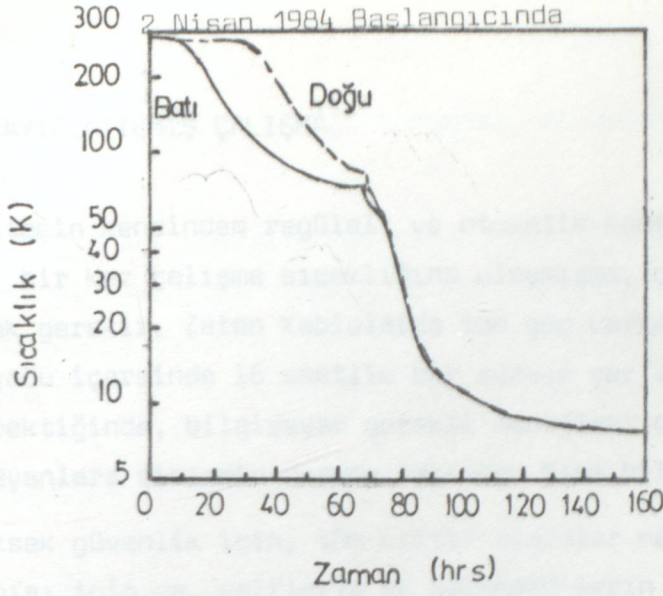
türücüleri oluşturur. Şekil (26)'da soğutma sisteminin birçok elemanını göstermektedir.



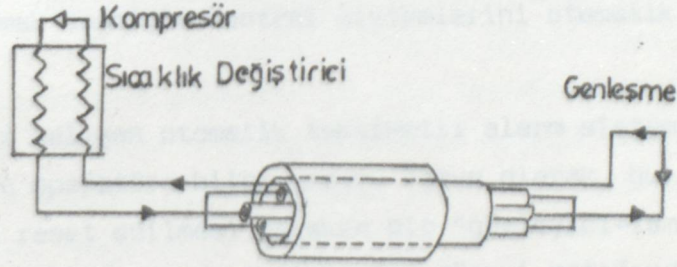
Şekil (26) Soğutucu sistem, bir yağ işletim sistemini ve kompresör pervanesi için soğutucu sistemi, helyum depolama tanklarını ve bir helyum arıtma sistemini, bir su/glycol soğutucuyu, ve vakum pompalarını ve boruları ihtiva eder.

6.1.4.1. COOL-DOWN (DİNLENME ZAMANI) TIME

Sisteme soğutma yapılmaksızın yaklaşık 120 saat yeterli akım ve gerilim uygulanmaktadır. Şekil(27) Bununla beraber "dinlenme süresi" aşağı yukarı kabloların efektif uzunluklarının küpü ile orantılıdır. Çalışma sıcaklıklarında kullanılmakta olan akış sayıcısı, Şekil (28) aynı zamanda 80 K civarında "dinlenme süresini" hızlandıracak biçimde değiştirilmiştir. Bu metod ayrı bir dönüş, hat ısısı ister. Ve yalıtım içinde ekonomik değildir. Kablo uçlarının her ikisinde ortaya çıkan helyum akıntılarını soğutmak için LN₂ banyoları düşünülmüştür. Dinlenme zamanı, 19 km'lik bir uzunluk için 13 gün olarak kabul edilir.



Şekil (27) Uzak sonlu türbin çalıştırılır ve soğutma akış yönü yaklaşık 68 saat sonunda değiştirilir. Helyum, soğutucu girişinin batısından verilir ve bunun yaklaşık 110 m. doğusundan çıkış alınır.



Şekil (28) 14 atmosferlik yüksek basınçta kablo üzerinden helyum akar. Ve uzak sonda (far-end) türbini soğutur. Ve daha sonra kablo-yu saran boru boyunca 7 atmosferde geri döner.

6.1.4.2: ZAYIFLATILMIŞ ÇALIŞMA

Sistemin kendinden regüleli ve otomatik kontrollu olmasından dolayı sistem, bir kez çalışma sıcaklığına ulaşmışsa, çalışmayı bir miktar zayıflatmak gerekir. Zaten kablolarda tam güç varken bile bir günlük çalışma periyodu içerisinde 16 saatlik bir süreye yer verilemez. İnsan müdahalesi gerektiğinde, bilgisayar gerekli mesajları operatörlere iletir. Yeni başlayanlara sistemin durumu hakkında özet bilgi verir.

Yüksek güvenlik için, tüm kritik alarmlar mevcuttur. Örneğin, güvenlik yapısı için de, valflerin ve selenoid'lerin doğrudan kontrolünün yapılması için, dönüştürücüden gelen işaretlerin dedeksiyonu gibi. Bilgisayar sadece bu alarm işaretlerinin olup olmadığını kontrol eder ve tektikde durarak bu özel durumlar için liste çıkarır. Bununla beraber bazı alarm durumları vardır ki; bilgisayar aracılığı ile önceki sonuçlarla karşılaştırma ve hesaplama yaparak ortaya çıkmaktadır. Bu durumlarda, koruma amacıyla sistemi kendiliğinden susturur. Şüphesiz bu gibi güvenlik amaçlı ani kapanmalarda, elektriksel güç kaybı ortaya çıkar. Bilgisayar, güçteki bu durumu karşılamak amacıyla kontrol sistemlerini otomatik olarak tekrar çalıştırır.

Batarya ile çalışan otomatik taksimatlı alarm sistem, elektriksel güç kaybı hakkında operatöre bilgi verir. İlave olarak, bu sistem bilgisayar ile sürekli reset edilmesi gereken bir "gözleyici-zamanlayıcı" kontrol eder. Eğer reset yoksa; zamanlayıcı süreyi açtığı anda sistem, bilgisayarın fonksiyon dışı kaldığını operatöre haber verir.

Bu özellikler faydalı olmaları amacıyla kolaylıkla kopye edilebilirler. Bundan başka hata-toleranslı hesaplayıcı sistemler, halihazırda endüstriyel otomasyon, proses kontrol ve denetim için kullanılmaktadırlar. Bilgisayar cihazlarının, dönüştürücülerin ve depolama çevre birimlerinin kayıpları sistemin toplam kayıplarına göre ihmal edilebilir. Buna rağmen bu cihazlar güvenliği büyük ölçüde arttırırlar.

Alarm devreleri, standart bir "merdiven diyagramı" bağlantısı şeklinde, bilinen A,C röle topluluğunun çalışması üzerinden fonksiyonlarını yerine getirirler. Deneyler şunu göstermiştir ki; Gerilim düşmelerine mü-

sait olan kontrol gücünün olduğu yerlerde, ac rölelerinin kullanılması uygun olmamaktadır.

Bir ya da iki devirlik çok kısa süreli güç kesintileri, bir rölenin tüm sistemi kapatmasına ve durdurmasına sebep olabilir. Bununla beraber, tasarlanmış bulunan güç iletim sistemi, tüm harici soğutma kaybından sonra bile sürekli olarak gücün tamamını taşıyabilecek güçtedir.

6.1.4.3. SONUÇLAR (TERMINATIONS)

Üç fazlı bir süperiletken güç hattında, altı uca gerek duyulmaktadır. Crojenik kavramanın içindeki ve dışındaki iletkenler, 4100A'lık akım taşıyabilir. Crojenik olay iç ve dış iletkenlerinde 4100A taşımaktadır, I^2R bağıntısıyla verilen ısı yükseltimi dışarıya iletir ve bu iki iletken birbirinden izole edilirler ve 290 K sıcaklık farkıyla tanımlanan mekaniksel gerilmeler oluşur. Bu tanımlamalar süperiletken kabloların kendilerinin geliştirilmesine eşdeğer bir teknik zorlukla belirlenirler.

Kavramanın (bushing) daha soğuk kısmındaki sıcaklık derecesi, içteki ve dıştaki iletkenler üzerinde, helezonik olarak sarılmış borular içinden akan az miktardaki soğuk helyum gazı tarafından sağlanır. Eğer sıcaklık istenilen kademedeki tutulmıyorsa, bu durumda otomatik akış kontrolörleri, kavrama boyunca sıcaklığı arzu edilen noktalarda tutabilmeli ve alarm sinyalleri vermelidir.

Kablolar, tüm soğutma akış kaybından sonra bile tam güç altında çalışabilirler. İşletim sıcaklıklarında sistemde çok büyük miktarda soğuk helyum gazı bulunmaktadır. Yüksek basınç ve yüksek yoğunluklu gazda var olan büyük ısı kapasitesi, bir ısı volanı tarafından sağlanır. Yapılan incelemelerde, bu kablolarla soğutucudan gelen soğuk gaz akışı durduktan sonra, 2,5 saat üzerinde, 4100 A'lık tam akım altında çalışılmıştır. Buna rağmen, sistemlerde uygulanmakta olan gerilimin uzun bir süre devam edip etmeyeceği açıkça belli değildir. Çünkü gazın maksimum basınç oluşturmasına izin verilmektedir. Ürneğin, işletmede helyum gazı %93'lük yüksek basınca sahiptir. Diğer taraftan tesisat kolaylığı açısından çok uzun kabloların kullanılmasında, kablolardaki helyum yüzdesi artacaktır.

Dolayısıyla gazın yoğunluğu da bu durumda azalacaktır. Sistem terminal-lerindeki ısı girişlerinin bir çoğundan dolayı, soğutucu kavrama borula-rında var olan helyumun müsadeseyle, crojenik kavrama içinden gelen ısı-nın çoğunu önlemek mümkündür. Isı, aynı zamanda crojenik kavramaların (bus-hings) soğuk uçlarına bağlanan yüksek basınç boruları içinden, radyasyon ve iletim yoluyla girmektedir. Bu boruların her birinin alanı $4,17 \text{ m}^2$ 'dir. Normal çalışma sırasında, ilk soğutucudan gelen soğuk gaz, sisteme girme-den önce boru üzerine sipiral şeklinde sarılmış bir sıcaklık değiştirici içinden akmaktadır. Fakat soğutucu kapatıldığı zaman, ısı değiştiricileri valf gibi çalışmasını kesecektir. Sistemin kullanılabilirliği açısından, ısı değiştiricide helyum oluşumuna izin veren bir subaplanmaya sahip ve aynı zamanda ortaya çıkan bu ısıyı engelleyici bir düzenlemenin yapılması uygun olacaktır.

6.1.4.4. CROJENİK KAVRAMALARIN (CRYOGENIC BUSHINGS) SOĞUTULMASI

Onların soğuk uçlarındaki yüksek gerilim, yüksek akım kavramaları iç ve dış iletkenleri boyunca olan ısı değiştiricileri içerisinden küçük miktarda helyum gazının akıtılmasıyla soğutulmaktadır. Tam güç uygulama-sıyla, helyumun yaklaşık $1,6 \text{ g/s}$ 'lik bir toplamı, soğutucu sistem vasi-tasıyla kabloların içinde dolaştırılan 72 g/s değerinden uzaklaştırmakta-dır.

Normal olarak, yüke doğru giden helyumun eş ısı, bu durumda, süperiletken kablolar, transfer hatları, ve (terminations) uçlar yükten dönen soğuk helyumun eş bir akıntısı ile, bir ısı değişikliği tarafından soğutucunun ters akıntı içindeki sıcaklık değişimlerini taşımaktadır. Ge-ri dönen soğuk helyumun akıntısı, yüke doğru akan akıntıdan daha küçük olduğu zaman, tasarlanan sıcaklıkta soğutma kapasitesinde bir kayıp vardır. Soğutma kapasitesindeki tipik bir kayıp değeri helyum g/s başına 80 W 'tır. Ki o kompresöre sıcak gaz olarak geri dönmektedir. Gerçek ölçümler soğu-tucudaki ısı dönüştürücüde dengesiz bir akış için, sistemde oldukça bü-yük bir duyarlılığın olduğunu göstermektedir. Ölçümlerle elde edilen du-yarlılık $130 \text{ W}/(\text{g/s})$ dir. ($1,3 \%$ sıcak gazı tekrar alabilecek şekilde)

Üstelik sistem, ters yöndeki bir dengesizliğe karşı da duyarlıdır. Yüksek bir ısı açığına çıkması durumunda, helyum gazının genişmesi sonucunda, soğutucudan gelen az miktardaki helyum işe yaramaktadır. Fakat geri dönen akıntı azalmaz. Sonuç olarak, yüke doğru olan helyum akıntısı aşırı soğuyabilir. Bu, gaz yataklı (gas-bearing) türbinlerin işletiminde problemlere sebep olabilir.

Bu etkileri karşılamak için çeşitli önlemler alınabilir. Bunlardan birincisi, yük için olan akıntı, geri dönen akıntıyı aştığında, ısıtıcı sisteme destek olması için, ısı dönüştürücü civarında geri dönen helyumun yönünü çeviren soğutucuda subaplama sisteminin kullanılmasıdır. Bu valflerin çalışması, soğutucunun ısı dönüştürücüsünde bir noktadaki sıcaklığa bağımlı olmaktadır.

Oldukça düşük miktardaki dönüş akışını sağlamak için; pratik olarak gerek duyulan sıcak gazı elde edebilecek bir soğutucu tasarlamak gerekmektedir. Aynı zamanda, geçici fakat dönüş akıntısına göre nispeten büyük düşüşlerin üstesinden gelmek için, uygun bir dönüş basıncında ilave helyum gazı dönüş akıntısına eklenmelidir.

6.1.4.5. CROJENİK EKLEM YERİ

Fleksible süperiletken kablonun iki parçasının bağlanmasını gerektirebilecek ne bir deney, ne de bir yapım gerçekleştirilmemiştir. Uygun bir iletim için max. kablo uzunluğu 138 kV kablo için yaklaşık 900 m. civarındadır.

6.1.4.6. SONUÇLAR

Fleksible süperiletken kablolar, kullanılan 1000 MVA'lık güç iletim sisteminin yapımı için gerekli olan elemanların çalışmasında, yapılan deneylerden şu sonuçlar çıkarılmıştır.

- (1) Uzun tesisatların, ısıtılmasının ve soğutulmasının hızlandırılması için yardımcı sistemlere ihtiyaç vardır.

- (2) Çalışma, güvenlik alarmına sahip ve yüksek otomatizeli olmak zorundadır.
- (3) Alarm sistemleri ve tüm elektrik kontroller ve ekipmanlar, sistemin erken kapanmasını önmeyecek biçimde, kısa gerilim düşmelerini veya diğer kontrol gücündeki düzensizlikleri karşılayacak şekilde olmak zorundadır.
- (4) Crojenik kavrama (cryogenic bushings); ısı, mekanik ve elektriksel durumlarla karşılaşır. Bu yüzden, performans ve güvenilirliği artırıcı çalışma tarzı ve tasarım değişiklikleri için bir takım zayıflamalar verilebilir.
- (5) Sistemin termal zaman sabiti çok uzundur. Böylece sistem, harici soğutucu sıvı akışının toplam kaybindan sonra bile birkaç saat için uzun süre çalışmasını sürdürebilir. Uçlarda, giren ısının yolunu çevirmek için sistemi terkeden helyum gazının kullanılmasıyla, volan değişimleri bu süreyi uzatabilir.
- (6) Soğutma sistemi, "crojenik kavramının" akım uçlarının soğutulmak için gerekli sıcak gazı tekrar elde edebilecek şekilde tasarlanmış olmalı ve bu miktardaki değişimlere duyarsız olabilmelidir.

Brookhaven laboratuvarındaki süperiletken güç iletim sisteminin çalışması, 1000 MVA'lık yer altı süperiletken kablo sisteminin teknik olarak yapılabileceğini göstermektedir.

6.2. ELEKTRİK MAKİNALARI

Süperiletkenler, akım yoğunluğunu artırma ve elektrik kayıplarını tümüyle düşürme özelliklerinden dolayı elektrik makinalarında da uygulama alanı bulmuştur. Süperiletkenli elektrik makinalarının, geleneksel makinalardan daha küçük, daha hafif ve daha verimli olacakları umulmaktadır. Avantajlar, teknik anlamda olduğu gibi ekonomik anlamda da değerlendirilmelidir. Soğutma masrafları ve cryojenik çevrelemeler belli açıkları gündeme getirir.

Süperiletken makinanın enerji üretim elemanında (armatürde) yüksek akım yoğunluğuna izin verilirse, belirgin yararlar ortaya çıkacaktır. Süperiletken armatürlü bir-iki küçük makina yapılmış fakat bunlar yalnızca özel amaçlı olmuştur. (örneğin Jiroskoplar)

Armatür reaksiyon etkileri ve uyardaki kontrollü değişimler, d.c sarmal alanları ve sinkronik a.c makinaları durgun durum koşullarında çalışır ve süperiletkenlerin elverişli koşullarda çalışmasını temin ederler. Güç uygulamaları için genelleştirilmiş süperiletken makina bu anlamda çevre ısı armatürü ve süperiletken alan sarmalı ise uyumludur.

Geleneksel makinaların maliyeti yüksektir. Ve teknolojiye bir takım sınırlamalar söz konusudur.

6.2.1. D.C MAKİNALARI

Makinanın iki başlıca tipi vardır; disk ve davul özellikle basit bobin şekillerine ve alan sarmallaması üstündeki armatür reaksiyon gücünün yokluğuna, dikkat etmek gerekmektedir. Bobinlerarası güçler olmadığı için disk biçimlerine yönelik bir tercih sözkonusudur. Davul tipi yüksek hız durumları için uygundur. Temel sorunlar vardır: düşük terminal voltajı ve bitişik kayma, yüksek akımına olan gereksinim.

Bu sorunlara farklı çözümler getiren bir dizi deneysel ön örnek makina yapılmıştır. Küçük Fransız ve Japon motorları seri halinde birçok disk kullanmaktadırlar. Fransız makinalarında diskler alan profilini izler ve sıvı metal (Hg-Jn) fırçaları akım toplamak için kullanılırlar. İngilterede international Research Development Co tarafından plaka karbon fiber fırçaları geliştirilirken, Japon gelişmesi gümüş-grafit fırçaları kullanmaktadır.

IRD tarafından geliştirilen bir makinada daha iyi bir segmanlı rotor yaklaşımı sağlanmıştır. Bu makinanın 3250 HP'lik bir gücü vardır ve bugüne kadar yapılan en büyük süperiletken makinadır. Diskin iç ve dışındaki çok sayıda fırçalar segmanlar arasında statik gibi seri-paralel bağlantılar arasında etki yaparlar. Çift kenarlı diskın 430 V'lık terminal voltajı aynı ölçüdeki bir tek diskın 21.5 V'sine denktir. Her paralel yol

için tam yük akımı 1450 A'dır (bu makinada geleneksel bakır-grafit fırçalar kullanılmıştır). Bu motor Fawley enerji istasyonunda dönen su pompasını çalıştırarak başarılı bir şekilde tam güç işletmeye konmuştur. Testler sadece soğutucu kompresörle sınırlandırılmıştır.

6.2.2. A.C MAKİNALARI

1960 başlarında bir dizi küçük deney makinası yapılmıştır. Bunlar gelecekteki gelişmeler açısından değerli kanıtlar ortaya çıkarmış ancak ticari anlamda uygulamaya konmamışlardır. 1964 için verilen geleneksel makinaların (soğutma dahil) ağırlıklarının toplam % 50'si olmakla beraber, günümüzdeki gelişmeler bu boşluğun doğrudan yağ sipyeyi soğutmasıyla kapatıldığını göstermektedir. Bu alandaki gelişmeler açısından helyum soğutucuların ağırlığında yapılacak bir düşürme yapmak gereklidir. Teroidal sarmallama kaçak alanlarını yok eder, ve çalışma bölgesinde iyi bir ortam sağlar; iletken-burğa-akım kayıpları da orada yok edilir. Alan sarmallaması oldukça basit bir yapıdır ve benzer iş hacimlerinde ve akım yoğunluklarında teroidal sarmal için gerekli süperiletkenliğin yalnızca yaklaşık %20 sini gerektirmektedir. Verilen bir voltajda, daha az sayıda dış bağlantılara gereksinim vardır.

Geleneksel silindirik şekillerle ilgili bir dizi dizayn çalışması rapor edilmiştir. Dönen süperiletken alanlı 87 kVA jeneratörleri başarılı bir şekilde çalıştırılmıştır. Armatür 5.5 kw endüksiyon motorundan yapılmıştır. A2MVA makinası yapım aşamasındadır ve 1000-10.000 MVA oranlarındaki makinalar için dizayn çalışmaları tamamlanmıştır. Dönen alanın dış kesiti mekanik nedenlerle sınırlandırılmış, ve shaft kesiti güçle artarak radyal çalışma halkasını düşürür. Armatürler ve alan sarmallamaları radyal düzeyde yerleştiği için 100 MVA üzerinde makinanın oran ve ölçüleri pratik olmaktan çıkar. Maliyet analizlerinde incelenen özellikler soğutma aygıtı ve ileri iletken malzemedir. Yaklaşık 50 MVA altında (belkide özel bir yeri olan uçak jeneratörleri de dahil) bu iki birim benzeri bir geleneksel makinadan daha çok pahalıya malolur. Göstergeler ileri iletken makinaların yaklaşık 600 MVA altında temel maliyet fiyatlarında avantaj sağlamadığı yönündedir. Eğer ileri alan sarmalındaki değer yatı-

rımları hesaba katılacaksa (2Mw bir 600 MVA makina için) düşme düzeyi 200 MVA gibi bir düşük düzey olacaktır. İleri iletken alan sarmalları 2000 yada 3000 MVA ünitelerin yapılmasına engel teşkil eden olguları ortadan kaldırmak için gerekli teknolojileri sağlamalıdır. Çözüm bekleyen birçok sorun vardır: Optimum akış yoğunluğu nedir? Enerji hatlarıyla güvenli istikrarlı entegrasyon özellikleri elde edilebilir mi? Optimum çalışma ısısı nedir? Tahmin edilen teknik ve mali avantajlar elde edilecek mi? 3000 MVA üniteleri için alternatif teknolojik yollar var mıdır? Bu tip üniteler 2000'li yıllarda gerekecek mi? Bu sorular ancak daha da büyük deneysel makinaların bulunmasıyla yanıtlanabilecektir.

6.3. SÜPER İLETKEN TRANSFORMATÖRLER

Süperiletkenler için bir uygulama olarak bir transformatör kabloyla karşılaştırıldığında iki önemli avantaj sağlar. Birincisi transformatöre temas halinde olduğu için ısı yalıtımı kolay olur. İkincisi, transformatör %99 dan fazla yarar sağladığı halde $I^2 R$ kayıplarının maliyeti transformatör fiyatının yaklaşık yarısıdır. Kablolardarda bu kayıplar sadece maliyetin %15'ini alır. Bir transformatör manyetik alanların bir sarmaldan ötekine güç ilettiği bir a.c aygıtıdır. Geleneksel bir transformatör demir çekirdeğindeki akım yoğunluğu 1.6 T'dir, ve sarmal başına r.m.s voltajı doğrudan doğruya çekirdek akımı, θ ve bir dizi sarmal döngüyle orantılıdır. Kablolarda olduğu gibi en iyi süper iletken niobium olacaktır. Kablolara göre oldukça yüksek bir a.c kaybı, böylece akım yoğunluğu niobiumda görülebilecek, ve akım yoğunluğu iletken perimetresinin 60-75 A/mm si olacaktır. Bu iletkendeki boşlukta 0.075-0.94 T alanıyla uyumludur. Eğer süper iletken transformatörün her zaman onun geleneksel benzeriyle aynı ölçüde olmayacağı düşünülürse demiri alıkoymak gerektiği açıkça ortaya çıkar. Böylece demirdeki kayıplar ısı yoluyla hızla düşmediği için demir normal ısısında olmalıdır, ki buda cryojenik dizaynı bozar. Kablolarda olduğu gibi, MVA orantıları arttıkça süperiletken transformatör daha da ilgi çekecektir.

Süperiletken transformatör üzerinde detaylı bir inceleme Lorch tarafından yapılmıştır. O, süperiletken olarak Nb_3Sn 'yi seçmiş ve 0-5 W/m²

kayıplarla 115 A/mm akım yoğunluğu varsaymıştır. Bu varsayım oldukça iyimserdir ve 1 W/m^2 den daha az kayıplarda Nb_3Sn 'nin, niobiumun tek başına verdiği akım yoğunluklarından daha büyükleri verip vermediği konusunda kuşkuludur. Ancak Lorch'un 115 A/mm değeri ilginçtir, öyleki 0.600 MVA oranlarında 400/22 kV ünitesi için bir geleneksel transformatör eşit olan bir çekirdek ölçüsü vermektedir. Elektrik yalıtım cryostatik vakumla sağlanır ve iletken bir dikey yüzeyde süperiletkenle boş dikdörtgen bir bölümdedir. 5K ve 4barda helyum iletkenlerinin içinden akar. Lorch'un dizaynı veri olarak kullanan Harrowell süperiletkenin 57.5 yada 77 A/mm ve 0.1 W/m^2 kayıplı niobium olduğunu varsayarak birçok dizaynın değişkenliklerini hesaplamıştır. Sızıntı tepkisini veriye eşit tutmaya dikkat etmiştir; sızma tepkimesi kısa devre koşullarında koruma sağladığı için önemlidir.

Toplam maliyet artı işletme maliyetleri tahmini soğutma maliyetlerine oldukça yakındır. Harrowell'in en iyi türü Lorch dizaynına göre 27.000.-paund daha karlı çıkmış buna karşılık 97 ton daha ağır olmuştur. Lorch dizaynınının optimuma yakın olduğu gösterilmiş ancak onun kendisinin bile geleneksel bir üniteyle karşılaştırıldığında 35.000.-paundluk bir dezavantajı olduğu görülmüştür. Harrowell 77 A/mm de hiç a.c kaybı olmasa bile geleneksel bir ünite de toplam tutarın ancak 25.000.-paund olduğu gösterilmiştir. Sorun süperiletkenlerin a.c yoğunluğunda artışa meydan vermesindedir. Lorch'un 7.5X25 mm boyutlarındaki dikdörtgen iletkeni 188 mm² nin kross-seksiyonu için 86/A taşımıştır. Diğer taraftan geleneksel bir transformatörde sızım alanı süperiletken sarımda maksimum 0.094 T'ye karşılık, 0.18 T dir. Transformatörler temel hatalı akımlara dayanıklı olmalıdırlar.

Maksimum

akım 7-75 oranlıdır. Hatalı akım niobium süperiletkenince alınmaz. Lorch akımın süperiletkeni destekleyen dörtgen bakır tüpünün içinden geçmesini önermektedir. Bu tüp, yukarıdaki ölçüleriyle, özellikle süper iletken Nb_3Sn ise, yüksek T_c 'siyle biraz koruma sağlayabilir. Hatalı akımları alması için yardımcı sarımların sağlanması alternatif olarak, sözkonusudur. Harrowell bu tür bir projenin, yardımcı sarımlarda, hata sırasında kapanan direnç serileri olmadıkça işe yaramadığını göstermiştir. O zaman yardımcı sarımlar sızma bölümüne yerleştirilebilir. Böylece tatmin edici bir çalışmaya ulaşılabilecektir. Ne varki bunlar transformatörde bir ilave karışık-

yük kullanılmaktadır. 0.5 T'dan 2 T'ye sıralanan manyetik alanların her biriyi meydana getirirler. Kabloda olduğu gibi, akımlar bir sert tip-2 ortada döşeme süperiletkenle taşınabilir ve bu durum en iyi çözümü sağlayacaktır.

Horrowell'in belirttiği gibi düşük-kayıplı süperiletkenler geliştirildiği zaman ekonomik durumlar daha iyi olacaktır; akan a.c kayıplarının 110 A/mm akım yoğunluğunda 0.1 W/m²'den daha büyük olması gerekmektedir. Tercih edilen 800 A/mm'de 500 W/m²'den düşük kayıplardır.

Süperiletken transformatörler baştan kablolarla aynı zamanda önerilmelerine ve başta benzer ilgiyi toplamalarına rağmen artık aynı biçimde ele alınmıyorlar.

6.4. SÜPER İLETKENLERİN MANYETİK ENERJİ DEPOLAMASI (SMES)

Süperiletken telle sarılan bir bobin birikmiş alan manyetik enerjiyi ($\frac{1}{2} L \cdot I^2$) dağıtamaz. 1972'de teklif edilen çok büyük süperiletkenler, güç sistemlerinde enerji tamponları olarak kullanılmıştır. Hidro istasyonlarında pompalama işlemi için, enerji tamponu görevinde düşünülmüştür. Bu demektir ki, şebekedeki güç gereksinimi az olduğundan, güç istasyonları maksimum güçte çalışmayı koruyarak tampon istasyonla artık gücü verirler. SMES sistemleri 1000 Mw ve 10.000 Mw saatlik birimlerde, eğer yalnızca geniş güç seviyeleri ve depolanmış enerji tasarlanıyorsa pompalanan hidroistasyonları daha ucuz olarak düşünülür.

0.01-1Hz. frekans aralığında yük osilasyonları için, güç sistemini stabilize bir küçük SMES kullanılabilir. 10 Mw gücündeki bir alet ve 10 kWh'lık depolanmış enerji güç sistemine bağlanır. Hatta daha küçük bir zaman skalasında aynı prensip reaktif güç kompanzatorü veya bir SAVAR oluşturulmasında kullanılabilir. Elde bulunan güç şebekesiyle enerji değişimi, diğer her bir SMES'de olduğu gibi bir elektronik kontrollü tristör köprüsüyle yönlendirilir.

6.5. SÜPER İLETKENLİĞİN ELEKTRONİKTEKİ UYGULAMALARI

Şu anda süperiletkenliğin iki büyük ilgi alanlarından biri elektronik ve medikal mühendisliğidir. Medikal teknoloji, magnetik rezonans tomografi için yüksek homojen DC manyetik alanlar şeklinde süperiletkenliğin en bü-

yük kullanımıdır. 0.5 T'dan 2 T'ya sıralanan mıknatıslar ile hemen hemen 1500 sistem, şimdiden dünyada yaygın işletim içindedir. Siemens laboratuvarları tarafından 4T'lık bir mıknatıs yapılmış ve geliştirilmiştir. Bu mıknatıs, magnetik rezonans tomografisindeki ileri araştırmalar için kullanıldı. Tomografide kullanılan 77K'lik bir süperiletken, standart 1T'lık mıknatısın giderlerini % 15 civarında düşürecek ve 5 yıllık bir periyot üzerindeki soğutucunun giderlerinde aşağı yukarı 250.000 DM lik tasarruf sağlayacaktır.

Elektronikte, Josephson bağıntısı süperiletkenlik uygulaması için temel araçtır. Josephson elementinin çok düşük kayıp seviyeleri ve kısa anahtarlama sürelerinden dolayı, Amerika'da ve Japonya'daki şirketler, süper hızlı Josephson computerlerinin lojik devrelerinin gelişimi için yüksek bağlamalı bir yoğunluk ile büyük kapasiteler yaptılar.

6.6. SÜPERİLETKENLİĞİN ELEKTRİKLİ ULAŞIM SİSTEMLERİNDEKİ UYGULAMALARI

Raylı ulaşım sistemlerinde çok hızlı gelişmeler günümüzde de devam etmektedir. Son yıllara kadar yapılan çalışmalarda çelik-ray-tekerlek sistemi (Tredaitonal tracks) konusunda hızlı gelişme yarışı süregelmiştir. Günümüzde ise sürtünmenin olmadığı ve yüksek hızlara ulaşabilmek ümidi ve hedefiyle magnetik sistemler yarışı başlamış durumdadır. Ve süperiletken mıknatısları bu sistemlerde kullanılmaktadır.

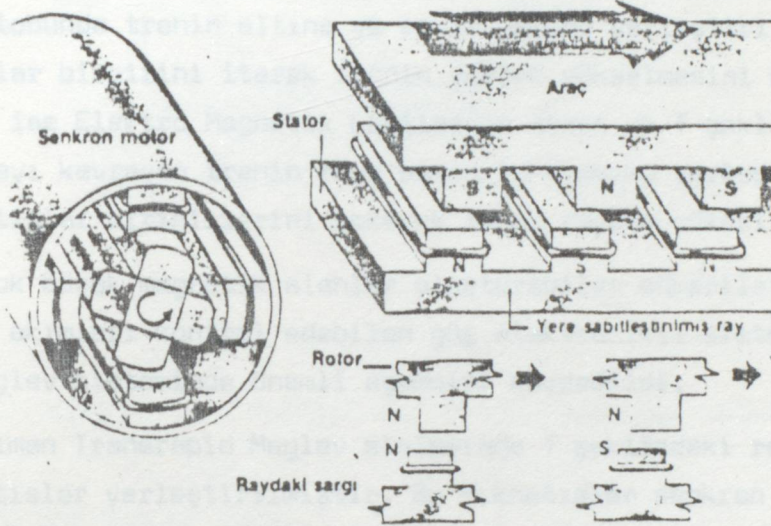
6.6.1. MAGLEV SİSTEMİNİN ÖZELLİKLERİ

Tüm maglev sistemleri temel özellik olan, yerçekiminin magnetik kuvvetlerle yok edilmesi kuralıyla çalışırlar. Bu yerçekimini yenecek olan kuvvetler üç ayrı metodla elde edilebilir.

- I- Sürekli mıknatıslar,
- II- Elektro mıknatıslar,
- III- Elektrodinamik metodlar.

Genel olarak maglev sisteminin bugünkü uygulamalarında sürekli mıknatıslar kullanılmaktadır. Maglev'in anlamı; magnetik kaldırmadır (Magnetic Levitation). Taşıtı ileriye doğru yine magnetik kuvvetler iterler. Tüm

maglev sistemleri lineer elektrik motoru ile hareket ettirilir. Frenlemeler de yine bu motorla yapılır. Frenlemede ray-tekerlek etkileşimi olmaksızın magnetik olarak gerçekleşir. Şekil(29)'da görülen maglev sistemlerinde iki temel lineer motor tipi kullanılmaktadır.



Şekil (29) Lineer Motorların Yapısı

Birçok maglev sistemi,

- sınırlandırılmış hız (güvenlik, gürültü)
- enerji tüketimi
- tekerlek ve rayların yıpranması

gibi tekerlek-ray'lı konvansiyonel sistemlerde bulunan sınırlı faktörleri aşmak amacıyla geliştirilmektedirler. Bu maglev sistemleri konvansiyonel trenlerin hız sınırı üzerinde, yani 300 km/h hızın üstünde, bir hız oranı için dizayn edilmişlerdir.

Günümüzde uygulamada olan olan sistemlerin başında Almanların Transpapid ve Japonların MLU maglev sistemleri gelmektedir.

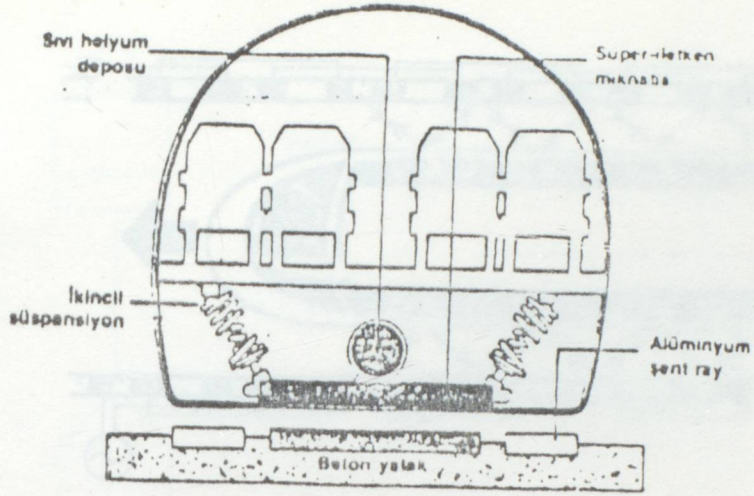
6.6.2. TRANSRAPİD MAGLEV SİSTEMİ

Genel olarak maglev sistemlerinde kaldırma işi (magnetic levitation) iki ayrı metodla yapılır. Bunlardan biri yol hattına yerleştirilen mıknatıslar yardımıyla aynı kutupların birbirini itmesi ve zıt kutupların birbirini çekmesi sonucunda gerçekleşir. Elektrodinamik levitasyon (EDL) metodunda trenin altına ve rayın üstüne yerleştirilen aynı kutuplu mıknatıslar birbirini iterek trenin yerden yükselmesini sağlarlar. İkinci metod ise Elektro Magnetik Levitasyon denen ve T şeklindeki rayın altı ile rayı kavrayan trenin raya bakan iç kısmına yerleştirilen zıt kutuplu mıknatıslar birbirlerini çekerek treni raydan yükseltirler.

Çok büyük magnetik alanlar oluşturabilen süperiletken mıknatıslar ve büyük akımları kontrol edebilen güç elektronikli sistemlerin gelişmesiyle maglev sisteminde önemli aşamalar kaydedildi.

Alman Transrapid Maglev sisteminde T şeklindeki rayın altına elektromıknatıslar yerleştirilmiştir. Bu mıknatıslar senkron lineer motorun statorunu oluşturmaktadırlar. Bunu kavrayan taşıtın raya bakan kısmına ise sürekli mıknatıslar yerleştirilir. Etkileşim sonucu taşıt hem yükselir ve hem de harekete geçer.

Şekil (30)'dan görüldüğü gibi süperiletken mıknatıslar soğutularak daha da iyi sonuç alınır. Bir iletken, sıcaklığı birkaç K^0 'nın altına inecek şekilde soğutulursa süperiletken haline gelir ve elektrik akımı herhangi bir dirençle karşılaşmadan kolaylıkla akar. Yani direnç sıfır olur. Akımın kayıplar doğurmadan akması sonucunda ısınma olmaz. Mıknatıslar sıvı helyum içinde tutularak süperiletken kalması sağlanır. Özel yapıdaki mıknatısların bu şekilde kullanılmasıyla maglev sistemlerinde 30 cm lik ray-tren aralığı elde edilmiştir. Böylece rayda bozulma tehlikesi ortadan kalkmaktadır.

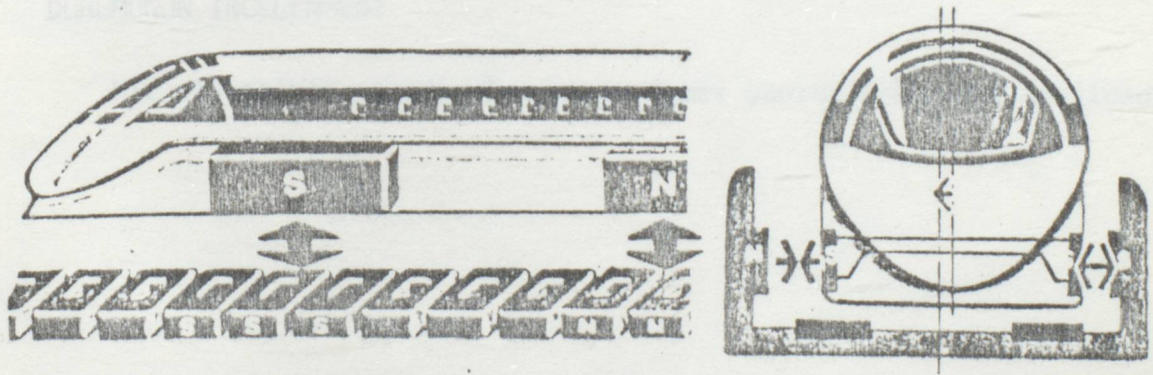


Şekil (30) Süperiletken Mıknatısların sıvı helyumla soğutulması

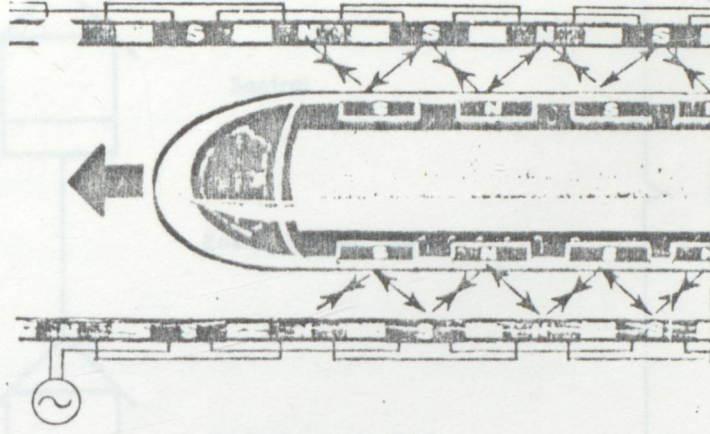
6.6.3. MLU 001 MAGLEV TRENİ

Japon ulusal demiryolları tarafından geliştirilen maglev sistemi U biçimindeki bir yol hattında çalışmaktadır.

Şekil(31)ve Şekil(32) de prensibi görülen sistemde yanlarda bulunan mıknatıslar trenin hareketini, alt kısımda bulunan mıknatıslar ise trenin kaldırılmasını sağlamaktadırlar.



Şekil (31) Maglev treninin kaldırılması ve yön değişimini sağlayan mıknatısların genel konumu.



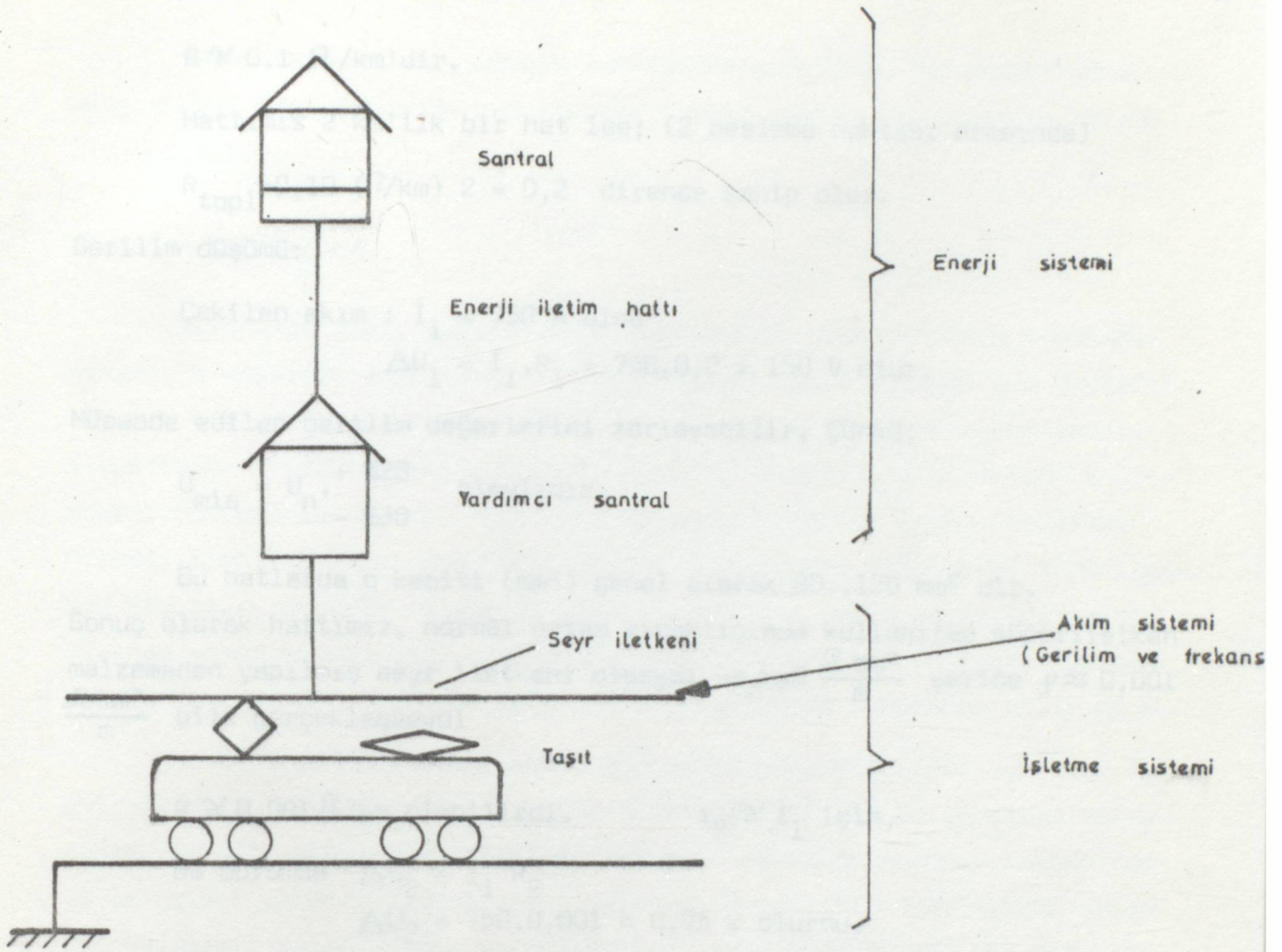
Şekil (32) Maglev sistemlerinde ileri hareketi sağlayan mıknatıslar

Maglev prensibiyle çalışan ilk araç Ford Modon Company tarafından 1974'de Los Angeles yakınlarında denendi. 1,6 km uzunluğunda alüminyum klavuz rayın üzerinde 30 cm aralıkla 480 km/h hız yapıyordu.

Günümüzde Japon demiryollarınınin ML-100, ML-500, MLU 001, MLU 002 maglev taşıtları, 1960'dan beri yapılan çalışmalar sonucu kara taşımacılığında rekor hız sayılan 500 km/h hıza 1979 yılında ulaştı. Helyum soğutmalı sistemde bu hız 517 km/h sınırındadır.

7. BİR ELEKTRİKLİ ULAŞIM SİSTEMİNDE, SEYR İLETKENİN SÜPER İLETKEN OLMASI DURUMUNUN İNCELENMESİ

Bir elektrikli ulaşım sisteminin temel yapısı aşağıdaki şekildedir



Şekil (33) Bir elektrikli ulaşım sistemenin temel yapısı

Burada, seyriletkeni bölümünün süperiletken olması durumunu bir örnekle inceleyelim:

Böyle bir hattın direnci; $R = \rho \cdot \frac{l}{s}$..(.) bağıntısıyla bulunur.

Burada;

$R (\Omega)$: hattın direnci

$\rho (\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}})$: öz iletkenlik

$l (\text{m})$: hattın uzunluğu

$s (\text{mm}^2)$: hattın kesiti'dirler.

Genelde böyle bir hattın direnci km başına verilir;

$R \cong 0.1 \Omega/\text{km}$ 'dir.

Hattımız 2 km'lik bir hat ise; (2 besleme noktası arasında)

$R_{\text{topl}} = 0,10 (\Omega/\text{km}) \cdot 2 = 0,2$ dirence sahip olur.

Gerilim düşümü:

Çekilen akım : $I_1 = 750$ A olsa

$$\Delta U_1 = I_1 \cdot R_1 = 750 \cdot 0,2 = 150 \text{ V olur.}$$

Müsaade edilen gerilim değerlerini zorlayabilir. Çünkü;

$$U_{\text{mis}} = U_n \cdot \begin{matrix} + \%20 \\ - \%30 \end{matrix} \text{ olmalıdır.}$$

Bu hatlarda q kesiti (mm^2) genel olarak 80..120 mm^2 dir.

Sonuç olarak hattımız, normal ortam sıcaklığında kullanılan süperiletken malzemeden yapılmış seyr iletkeni olsaydı ve $\rho \approx 0 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$ yerine $\rho \approx 0,001 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}}$ bile gerçekleşseydi

$R \cong 0,001 \Omega/\text{km}$ olabilirdi. $i_2 \cong I_1$ için,

Bu durumda $\Delta U_2 = I_1 R_2$

$$\Delta U_2 = 750 \cdot 0,001 = 0,75 \text{ V olurdu.}$$

Aynı hesapları kayıplar için yapsaydık

$$I_1 \cdot R_1 = 750 \cdot 0,1 = 75 \text{ A}^2 \cdot \Omega/\text{km} = 75 \text{ W/km}$$

$$I_2 \cdot R_2 = 750 \cdot 0,001 = 0,75 \text{ A}^2 \cdot \Omega/\text{km olurdu} = 0,75 \text{ W/km}$$

Bu rakamlar bize süperiletken malzemeden yapılmış seyr iletkenlerinin büyük teknolojik üstünlüğünü kanıtlamaktadır.

Sonuç:

Bu çalışmada süperiletkenlerin genel olarak kullanım alanları bu güne dek yapılan çalışmalarla ortaya konulduktan sonra özellikle Kuvvetli Akım Elektrik Mühendisliğindeki Elektrikli Ulaşım alanındaki uygulanabilirlik ihtimali olan Seyr iletkenlerin "süperiletken" olmaları durumu incelenmiş ve değerlendirilmiştir.

Süperiletkenlerin, tahrik tekniğinde yarattığı teknolojik devrimin, enerji iletiminde de olabileceği ilerki pratik çalışmalarda da kanıtlanacaktır.

8. DEĞERLENDİRMELER

Bilindiği gibi, süperiletken malzemeler, dirençlerinin olmaması nedeniyle elektrik enerjisini veya sinyalleri kayıp olmadan iletmektedirler. Bu nokta, helyumla soğutulmuş yeraltı kablolarını deneyen elektrik şirketlerinin gözünden kaçırmamıştır. İletilen elektrik enerjisinin % 10'u enerji hatlarının direnci nedeniyle kaybedilmektedir. Leatherhead'daki Merkezi Elektrik Araştırma Laboratuvarı (CERL) daha 1970'lerde süperiletken kabloları denemiş ve süperiletkenlerin ancak bugün normal hatlarda taşınan yükün birkaç katı olan 8000 M Watt yük taşımak ve bakır kabloların 20 katına mal olmak şartıyla kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Kanal açıp soğutulmuş kablo döşemenin yüksek maliyeti yanında dalgalı akım (ac) taşıyan kablolardaki doğal güçlüklerle de uğraşmak zorundadır. Dalgalı akım, her iletkende koruyucu yalıtkan maddeyi ısıtan radyo dalgaları vardır. Dalgalı akım taşıyan süperiletken kablolarda oluşacak kayıpları telafi etmek için sıcaklığı daha da düşürmek zorunda kalacaklardır. Sadece doğru akım (dc) kayıpsız olarak iletilmektedir. ABD'deki Brookhaven Ulusal Laboratuvarında helyum soğutmalı süperiletkenlerden yapılan 100 m.'lik enerji hattı üzerindeki araştırmalar, Merkez Elektrik Kurumu'nun (CEGB) geleneksel teknikler hakkındaki değerlendirmesini desteklemektedir. Buna karşılık Amerika'lılar azot soğutmalı kabloların (enerji hatlarının) 50 güç merkezini kapattırarak kadar kazanç sağlayacağına inanmaktadırlar.

Elektriksel direnç, sinyal kalitesinde düşüslere neden olmakta ve düşüsler haberleşme ağlarında her 3-4 km de bir tekrarlayıcıların kurulmasını gerektirmektedir. Süperiletken kablolar bu kaybı önleyebilirler. Direncin olmaması bu sinyal kayıplarının neden olduğu gürültüleri önleyerek çok zayıf sinyallerin gönderilmesini mümkün kılacaktır. STC Teknoloji'den Colin Goodman'a göre süperiletken kabloların, fiberoptik bilgi iletiminin büyük kısmını kapladığı veri iletişimi alanında ne kadar ba

şarılı olacağı süperiletken eş eksenli kabloların rekabet gücünün ne olacağı, şüphelidir.

Süperiletkenler, insan konuşmaları için iyi bir iletici olmalarına rağmen elektronik devrelerde meydana gelen sinir bozucu karışıklıklara son verebilirler. Elektriksel ve manyetik alanlar süperiletkenlerin içine girememektedirler. Böylece elektronik devreleri yakın elektrik ve manyetik alanların etkilerinden koruyabilirler. Aynı şekilde özellikle askeri uygulamalarda, süperiletken kalkanlar elektronik devreleri herhangi bir nükleer patlama sırasında yayılan elektromanyetik alanlardan koruyabilirler. Bilgisayarları, telefon şebekelerini ve diğer elektronik cihazları nükleer bombaların bu ek zararlarından korumak için günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır.

Süperiletkenlik, tek parça halinde bulunan süperiletken malzemelerde bile bölümden bölüme değişiklik göstermekte, bazen süperiletkenlik özelliği göstermeyen kısımlar da olabilmektedir. Seramik maddeler kristal yapıdadırlar ve bu yüksek sıcaklık süperiletkenleri, kristal yapıları nedeniyle aralarında boşluklar olan tanecikleroluşturma eğilimindedirler. Elektrik akımı sadece bu taneciklerin (grain) birbirine temas ettikleri bölümlerde akabilmektedir. Bu nedenle dış ortamlarda, laboratuvarda tek kristal kullanılarak alınan sonuçlara ulaşılamamaktadır.

Bileşiklerin atomik yapılarındaki oksijen miktarı ve dağılımı da süperiletkenliği etkilemektedir. Yüksek sıcaklık süperiletkenlerine bu özelliklerini kazandıran yapılarındaki bakıroksittir. Oksijenin bileşik içinde bakıra oranı yaklaşık 7:3'tür. Oksijen miktarı 7'nin altına düşünce süperiletkenlik azalmaktadır. Buradaki problem oksijen dağılımının düzenli olduğu büyük hacimli malzemeler üretebilmektir. Bu iş, yüksek sıcaklıkta süperiletken olan malzemelerde oksijenin her yönde çok hareketli olması nedeniyle, son üründe ne kadar oksijen bulunduğunun tam bilinmemesiyle daha da karmaşık bir probleme dönüşmektedir.

Son süperiletkenlerin dış manyetik alanlara karşı çok duyarlıdır. Dışarıdan uygulanan manyetik alanlar bu malzemelere girip kritik sıcaklıklarını değiştirebilir. Araştırmacıların raporlarına göre yüksek akım yoğunluğu taşıyan malzemelerde 100 Gauss kadar küçük manyetik alanlar

bile, ince süperiletken filmlerin kritik sıcaklıklarını büyük miktarda etkilemektedir. Elektronik endüstrisinde silikon tabakalarının hazırlanması ve bunların tasarımlara uygun şekilde biçimlendirilmesi için kullanılan metodların çoğunu süperiletken malzemelere uygulamaktadırlar.

Araştırmacıların yeni seramiği kullanılır hale getirdikleri söylenebilir, ancak bu malzemenin kesilip biçimlendirilerek yeni cihazların üretimine uygulanması daha zor bir konudur. Yarı iletken malzemelerin yüzeyini kazımak için kullanılan kimyasal yöntemler işe yaramamaktadır, çünkü bu işlem sırasında kullanılan asitler tüm seramiği tahrip etmektedir. Bu nedenle yonga üreticileri tasarımlarını seramik üzerine yerleştirmek için elektron ışınlarını veya elektrik yüklü gazları kullanmak zorunda kalacaklardır. Elektronikte yaygın olarak kullanılan maddelerle, seramikler arasında meydana gelen tepkimeler yeni bir sorun yaratacaktır. Süperiletkenlerin yapılarının başka maddelerin varlığı halinde değiştiği görülmüştür.

Seramiğin kırılabilirliği de problem yaratmaktadır. Özellikle kablo yapımında önemli bir sorundur. Ancak ABD'deki Argonne Laboratuvarı polimer bağlayıcılı (kaplı) bir kablo üreterek seramiği bir arada tutmayı başarmıştır.

Yüksek sıcaklık süperiletken mıknatısın üstünlüğü şu sıralarda sadece ekonomiktir. Fakat araştırmacılar bu yeni malzemelerin önceki niyobyum alaşımlarına göre daha kuvvetli manyetik alanlar üretebileceklerini ümit etmektedirler. Yeni malzemelerle 50 Tesla'ya kadar manyetik alan üretilmesi düşünülüyor. Geleneksel süperiletkenlerde üretilen manyetik alanlar süperiletkenliğe geçiş sıcaklığını düşürmektedir. Bu durum süperiletken bir mıknatısın yaratabileceği manyetik alanı sınırlamaktadır. Yeni seramik malzemelerde geçiş sıcaklığının çevredeki manyetik alanlardan daha az etkilendiği görülmüştür.

İncelemelerimizden de anlaşıldığı gibi sıcaklığı her geçen gün yükselen bu yeni buluşun yaşamın her alanına girmesi, oda sıcaklığında (yaklaşık 300° K) süperiletkenlerin geliştirilmesine bağlıdır. Malzeme bilimcileri, yeni bileşikler bulmuşlar ve akım taşıma kapasitelerini artırmışlardır. 1990'lı yıllarda çağımızın-elektriğin bulunuşu kadar önemli olabilecek, bilimsel ve teknolojik devrimlerinden birinin gerçekleşmesinin hiç de şüphesiz olmayacağıdır.

TEŞEKKÜR

Çağın teknolojisi olan süperiletkenlik konusunda çalışabilmem için beni yönlendiren ve çalışmalarımda yardımını esirgemeyen sayın hocam Prof.Dr. Atıf URAL'a saygılarımla teşekkür ederim.

Ö Z G E Ç M İ Ş

(1) Günther Bogner "Some Electrifying Developments in Superconductivity"
"Research and Development" Siemens Review 1988-89

(2) I.M.Borinik, V.I. Karginov, V.I. Lashin, S.L. Lashin, V.I. Lashin

1964 yılında Düzce'de doğdum. İlkokulu, ortaokulu ve lise'yi Adapazarı'nda okudum. 1980 - 1981 öğretim yılı Yıldız Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği bölümünü kazandım. 1984-1985 öğretim yılında Fakülteden mezun oldum. Ve aynı yıl Yıldız Üniversitesi Kocaeli Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü Elektrik Makinaları Ana Bilim dalına Araştırma Görevlisi olarak girdim. Halen aynı Fakültede Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktayım.

(3) K. Borinik, V.I. Karginov, V.I. Lashin, S.L. Lashin, V.I. Lashin
"Some Electrifying Developments in Superconductivity"
"Research and Development" Siemens Review 1988-89

(4) Prof. Dr. I.M. Van de Walle, "The use of superconductors
in power transformers" "Proceedings of the IEEE" 1987

Saygılarımla

Nuran CANBULAT

(5) Prof. Dr. I.M. Van de Walle, "The use of superconductors
in power transformers" "Proceedings of the IEEE" 1987

(6) "Elektrik Mühendisliği" Dergi, Sayı 10, 1987

(7) "Elektrik Mühendisliği" Dergi, Sayı 10, 1987

(8) "Elektrik Mühendisliği" Dergi, Sayı 10, 1987

YARARLANILAN KAYNAKLAR

- (1) Günther Bogner "Some Electrifying Developments in Superconductivity"
"Research and Development" Siemens Review 1/88 p(34)
- (2) I.M Bortnik, V.L. Karapazuk, V.V. Laurova, S.I. Lun'e, Yu.V.Petrovsky,
L.M Fisher
"Inverstigations on the Development of Super conducting DC Power
Transmission Lines" IEEE Transactions on Magnetics, Vol.MAG-13 No.1
January 1977.
- (3) H.L.Laquer, J.W.Dean and P.Chowdhuri
"Electrical, Cryogenic and Systems Design of a DC Superconducting
Power Transmission Line" IEEE Transactions on Magnetics, Vol.MAG-13
No.1 January 1977.
- (4) Richard A. Thomas "Operational characteristics of 1000 MVA Supercon-
ducting Power Transmission System" IEEE Transactions on Magnetics,
Vol. MAG-21 N.2, March 1985
- (5) Prof.Dr.L.J.M Van DE Klundert "On the Application of Superconductors
in power transformers" Proefschrift 2 November 1986
- (6) Proc. IEE, IEE Reviews, Vol. 119 No.8R August 1972.
- (7) Bilim ve Teknik Dergisi Sayı No: 180-237-241.1987.
- (8) Elektrik Mühendisliği Aylık Dergisi Sayın No: 343-344-348-354. 1987.
- (9) ABUT,N.Y.Doç.Dr., URAL,A. Prof.Dr. "Raylı Elektrikli Ulaşım Sistemle-
rindeki Gelişmeler ve Maglev Teknolojisiyle Hızlı Ulaşım Sistemleri"
Raytaş 89 Sakarya.



