

47017

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SÜPERİLETKENLİK VE ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİNDEKİ UYGULANMALARI

Elek. Müh. Gülçin ERDEN

F.B.E. Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. İbrahim ŞENOL

YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
ORTAMANTASYON MERKEZİ

İSTANBUL 1995

İÇİNDEKİLER

SEMBOL LİSTESİ.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
TÜRKÇE ÖZET	ix
YABANCI DİLDE ÖZET	x
BÖLÜM 1. SÜPERİLETKENLİK.....	1
1.1. Süperiletkenliğin Tanımı.....	1
1.2. Süperiletkenliğin Tarihsel Gelişimi.....	2
BÖLÜM 2. SÜPERİLETKENLER	
2.1. Süperiletkenlerin Temel Özellikleri	7
2.2. Süperiletkenlerin Sınıflandırılması.....	16
2.2.1. Tip - 1 Süperiletkenlerin Özellikleri (Yumuşak Tip)	16
2.2.2. Tip - 2 Süperiletkenlerin Özellikleri (Sert Tip)	18
2.2.3. Yüzey Süperiletkenliği.....	21
2.3. Süperiletkenlerde Bozulma ve Kararlılık	22
2.4. Süperiletkenleri AC Çalışmaları	25
2.5. Josephson Etkisi	27
2.6. $YBa_2Cu_3O_7$ Süperiletken Bileşiğinin Tanıtılması.....	28
2.7. Süperiletkenleri Soğutulması	32
2.7.1. Düşük Isı Çevresi Sorunları.....	32
2.7.2. Çevreyi Sınırlama	34
BÖLÜM 3. SÜPERİLETKENLİĞİN UYGULAMA ALANLARI	
3.1. Süperiletken Manyetik Enerji Depolama Sistemleri (SMES)	37
3.2. Süperiletken Redresörler	39
3.3. Süperiletkenliğin Kablolarda Uygulanması	39
3.3.1. AC ve DC Süperiletken Kablo Uygulamaları.....	40
3.3.2. AC ve DC Süperiletken Kabloların Karşılaştırılması	41
3.3.3. Süperiletken Kablo Modelleri.....	41
3.3.3.1. Nb-Ti Materyaline Ait Kritik Akım Ölçmeleri	42

3.4. Akım Sınırlayıcılar	45
3.5. Süperiletkenliğin Elektronikteki Uygulamaları	47
3.6. Süperiletken Güç Transformatörleri	48
3.6.1. Süperiletken Bir Transformatörün Genel Özellikleri	50
3.6.1.1. Boyutlar	50
3.6.1.2. Sargılar	50
3.6.1.3. Cryogenic Sistem	51
3.6.1.4. Dielektrik Kayıplar	52
3.6.1.5. Akım Uçları.....	53
3.6.2. Süperiletken Transformatörlerin Avantajları ve Dezavantajları	53
3.6.2.1. Ağırlıktaki Azalmaya Karşı AC Kayıplar	54
3.6.2.2. AC Kayıplara Karşı Aşırı Yüklenme Kapasitesi.....	58
3.6.3. Deneysel Transformatör.....	64
3.7. Süperiletken DC Makinalar	70
3.7.1. Genel Tanım ve Tipleri	70
3.7.2. Alan ve Rotor Konfigürasyonları	71
3.7.3. Cryogenic Tasarım ve İzolasyon	72
3.7.4. Akım Toplama.....	73
3.7.5. Tasarım Düşünceleri ve Uygulamaları	74
3.8. Süperiletken AC Makinalar	74
3.8.1. Genel Tanım ve Tipleri	74
3.8.2. Siper, Alan ve Rotor Konfigürasyonları	76
3.8.2.1. Siperler	76
3.8.2.2. Alan Sargıları	78
3.8.2.3. Rotor Sargıları.....	79
3.8.3. Cryogenic Tasarım ve İzolasyon	82
3.8.4. Elektromekanik Tasarım ve Performans.....	86
3.8.5. Konfigürasyon Tasarımı.....	87
3.8.6. Detay Tasarımı	95
3.8.7. Sonuç.....	108
3.9. Süperiletkenliğin Elektrikli Ulaşım Sistemlerinde Uygulamaları.....	110
3.9.1. Maglev Sisteminin Tanım	110
3.9.2. Maglev Sisteminin Tarihsel Gelişimi.....	111
3.9.2.1. Dünyadaki Maglev Sistemi Gelişimi.....	111
3.9.2.2. Japonya'daki Maglev Sistemi Gelişimi.....	112

3.9.3. Lineer Motor Tahrikli Maglev Sistemi	114
3.9.4. İtme Prensibi ile Elektrodinamik Tahrikli Maglev Sistemi	115
3.9.5. Maglev Sistemindeki Süperiletken Mıknatıslar	117
3.9.5.1. Mıknatısın Yapısı.....	117
3.9.5.2. Süperiletken Bobinin Stabilesi	119
3.9.5.3. Elektromanyetik Hasarların Etkisi.....	120
3.9.5.4. Soğutma Sistemi.....	121
3.9.6. Maglev Sisteminde Kullanılan Yüksek T_c Oksit Telli Süperiletken Mıknatıs	123
 4. BÖLÜM SONUÇ	 129
KAYNAKLAR	133
ÖZGEÇMİŞ	



SEMBOL LİSTESİ

T_c	: Kritik Sıcaklık
T	: Sıcaklık
R_s	: Süper İletkenlik Durumu Direnci
R_n	: Normal Durum Direnci
Φ	: Magnetik Akı
λ_0	: Mutlak Sıfır Sıcaklığındaki Sızma Derinliği
λ_L	: London Sızma Derinliği
E	: Enerji Yoğunluğu
E_n	: Normal Durumdaki Enerji Yoğunluğu
ξ	: Bağlantı Uzunluğu
H_{uyg}	: Uygulanan Magnetik Alan Şiddeti
H_c	: Kritik Magnetik Alan Şiddeti
H_{c1}	: Alt Kritik Magnetik Alan Şiddeti
H_{c2}	: Üst Kritik Magnetik Alan Şiddeti
W	: İletken Yüzeyindeki Isı Aktarım Oranı
P	: Soğutulan İletken Perimetre Uzunluğu
α	: Süperiletkenlik Emniyet Faktörü
g	: Kablolar İçin Yüzey Faktörü
P_r	: Min. Mekanik Güç
P_d	: Birim Hacimdeki Dielektrik Kaybı
ϵ_0	: Dielektrik Sabiti
δ	: Kayıp Açısı
S_n	: Nominal Görünen Güç
I_n	: Nominal Akım
A_y	: Nüvenin Kesit Alanı
B	: Manyetik Akı Yoğunluğu
B_y	: Nüve İçindeki Manyetik Akı Yoğunluğu
h_c	: Nüve Penceresinin Yüksekliği
ρ_{eff}	: İletkenin Özgül Direnci
A	: İletkenin Kesit Alanı
r_c	: Bobinin Ortalama Yarıçapı
J_f	: Alan Sargısı Akım Yoğunluğu
J_a	: Rotor Sargısı Akım Yoğunluğu

K : Termik İletkenlik
 T_s : Akım Kesme Sıcaklığı
 τ : Spesifik Isı



TEŞEKKÜR

Çağın teknolojisi olan süperiletkenlik konusunda çalışabilmem için beni yönlendiren ve tezi geliştirmemde yardımlarını esirgemeyen rahmetle andığım Doç. Dr. Mebrure ŞANAL'a ve daha sonra tezi bitirmemde aynı özveriyi gösteren Yrd. Doç. Dr. İbrahim ŞENOL 'a saygılarımla teşekkür ederim.



ÖZET

Üretim, iletim ve denetim açılarından bakıldığında bütün enerji çeşitleri arasında en uygun enerjinin elektrik enerjisi olduğu bilinmektedir. İnsanlığın daima ileriye dönük istemleri ve giderek artan nüfus, giderek artan bir elektrik enerjisi gereksinimini ortaya çıkarmıştır. Dolayısıyla üretilen, iletilen, kullanılan enerjinin veriminin artırılması, kararlılığının bozulmaması, kayıplarının en aza indirilmesi gerekmektedir.

Bu gereksinimlere cevap vermek için bütün dünya ülkeleri araştırmalarını yoğunlaştırmış ve oluşan yeni gelişmeler, yeni ufuklar doğurmuştur. Bütün dünya ülkelerinin üzerinde araştırmalarını yoğunlaştırdığı konulardan birisi de süperiletkenliktir.

Elektrik güç mühendisliğinin çeşitli alanlarında süperiletkenlik uygulamaları hakkında birçok araştırma ve çalışmalar yapılmaktadır. Süperiletkenler özellikleri nedeniyle sıradan iletkenlerle yapılmış cihazların sınırlarında önemli bir gelişme sağlamışlardır. Süperiletkenlerle yapılan uygulamalar performans ve verimi artırırken sıradan cihazlara kıyasla boyutlarda da önemli küçülmelere yol açmıştır. Çünkü bütün bunlar endüstriyel uygulamalardır ve güvenilirlik, fiyat / performans oranları yalnızca süperiletken materyal için değil aynı zamanda bütün sistem için çok önemlidir.

Günümüzde AC , DC makinalar, enerji iletim hatları, transformatörler gibi bir çok makina ve cihazda uygulama çalışmaları yapılmaktadır. Bunun yanında DC polarizasyon gerilim akım sınırlayıcılar ve süperiletken manyetik enerji depolama sistemleri (SMES) gibi yeni uygulama alanları süperiletken prensiplerden yola çıkılarak ortaya atılmış yeni çalışmalardır.

Bugüne kadar işletme emniyeti, kullanılabilirlik ve devamlılık ile ilgili olarak ortaya çıkan sorunlara fazla önem verilmemiştir. Çünkü süperiletkenlik çok yeni ve hızlı gelişen bir teknolojidir. Dolayısı ile bu konudaki nicel bilgilerimiz çok azdır. Ancak süperiletkenlik mevcut sistemler için bir alternatif olarak kabul edilmeden önce bu gibi soruların cevaplandırılması için çalışma ve araştırmalar devam ettirilmektedir.

Bu çalışmada süperiletkenlik, süperiletkenler ve uygulama alanları hakkında bilgiler ve sonuçlar ortaya konmuştur.

SUMMARY

It is known that the electrical energy is the most proper among other energies from standpoint generation, transmission, and control. Increasing population has been arisen increasing electric requirements. For this reason, it is required that generated, transmitted, used energy is increased their efficiency, not destroyed the stability, reduced at least of losses.

In order to ensure these requirements all the world countries have been enhanced their research on them. Resulting new developments causes new solutions. Today, as a matter of discussion is also superconductivity which has the potential for especially energy-efficient power transmission and other subjects.

Many research and study is being made about superconductivity applications in various power engineering field. Due to specifications superconductors are ensured a great deal of development in limitations of ordinary apparatus. Performance and efficiency, with super conductors, is improved and also size of apparatus is made considerably smaller. In industrial applications, these properties is not only important for superconductor material, but also the whole system is.

Recently, such as AC and DC machines, power transmission lines, transformers, in a variety of machines and apparatus applications of superconductivity is present. Besides, such as DC polarization voltage current limiters and superconductual magnetic energy storage systems (SMES) new application fields are arisen.

In connection with operation safety, usable and continuity the resulting problems is up to now omitted, since superconductivity is a technology. That is very new and fast, our knowledges has lower in the subject. But today superconductivity is not an alternative for available apparatus and systems because of some problems to be answered.

In this study superconductivity, superconductors and its application fields are investigated and about them results are presented.

BÖLÜM 1 SÜPERİLETKENLİK

1.1 Süperiletkenliğin Tanımı

Sıcaklığın belirli bir değerin altına düşürüldüğü zaman doğru akım ile elektriksel dirençleri sıfır olan malzemelere "SÜPERİLETKEN" adı verilir. Süperiletkenlik elektriki direnç yokluğudur.

Yüzlerce malzemenin çok düşük sıcaklıklarda süperiletkene dönüştüğü bilinmektedir. Hepsi metal olan 27 kimyasal element, atmosfer basıncında, kendi normal kristalgrafik formlarında süperiletkenlerdir. Bunlar arasında yaygın olarak bilinenler Aliminyum, Kalay, Kurşun, Civa, Renyum, Lantan ve Proktantinyum yer alır. Bunlara ilave olarak metal, yarıiletken olan 11 kimyasal element düşük ısı ve yüksek basınç altında süperiletkendir. Uranyum, Seryum, Silikon ve Selenyum bunlar arasında sayabiliriz. Bizmut kendi kristal-grafik formunda süperiletken olmamasına rağmen, çok düşük sıcaklıklarda düzenli duruma geçerek süperiletken haline gelebilir. Krom, Manganez, Demir, Kobalt ve Nikel gibi magnetik elementlerin hiçbirinde süperiletkenlik görülmez.

Bilinen süperiletkenlerin birçoğu alaşım veya bileşiktir. Kendisini oluşturan kimyasal elementler süperiletken olmasa bile bir bileşiğin süperiletken olması mümkündür. Örnek olarak gümüş-florid (Ag_2F) ve bir karbon-potasyum bileşiği (CaK) verilebilir. Kalay-Tellrid ($SnTe$) gibi bazı yarı iletken bileşikler uygun bir şekilde yabancı atomlarla yüklenirse süperiletken olabilirler.

Süperiletkenliğin iki belirleyici özelliği vardır. Maddenin içindeki elektrik akışı, maddenin yapısını oluşturan iyon örgüleriyle çarpışması sonucu engellenir. Buna maddenin direnci adı verilir. Böyle bir madde süperiletken duruma geldiğinde, bu direnç sıfıra iner. Süperiletken durumda maddenin örgüsü, elektronları engellemek yerine, onların hareketine destek olur. Bunun uygulamadaki anlamı süperiletken bir devrede elektrik akımının ilke olarak kayıpsız akacağıdır.

Süperiletkenlerin "Sıfır direnç" göstermelerinin yanı sıra yakınlarında bulunan herhangi bir manyetik alanı dışmaları da ayıredici bir özellikleridir. Örneğin bir mıknatıs kritik sıcaklığın (süperiletkenliğe geçiş sıcaklığı) altında bulunan bir süperiletkeni sanki ters kutuplu bir mıknatıs gibi iter. Ancak kritik sıcaklığının üstünde aynı süperiletken madde herhangi (mıknatıs olmayan) bir iletken gibi davranır. Yani mıknatısın süperiletken üzerinde bir etkisi gözükmez.

Elektrik iletimiyle ilgili tüm uygulamalar için idealdirler. Bunun yanı sıra süperiletkenler büyük miktarda akımda taşıyabilirler. Küçük süperiletken bobinli mıknatıslar çok fazla enerji tüketmeden güçlü manyetik alanlar yaratabilirler. Bu gibi mıknatıslar, manyetik alan sayesinde havada giden trenlerin yapımını sağlayabilirler, hızlandırıcı tünellerde ve nükleer manyetik rezonans tarayıcılarında parçacık saptırıcısı olarak kullanılabilirler. Ayrıca elektrik üretiminde kullanılan senkron jeneratörlerde kullanımıyla üretimde verimin artmasına, boyutların küçülmesine neden olurlar.

1.2 Süperiletkenliğin Tarihsel Gelişimi

Süperiletkenlik ilk olarak 1911 yılında Hollandalı fizikçi H.Onnes tarafından, civayı mutlak sıfır (0°K) civarında soğutduğu zaman elektrik akımına direnç göstermediğini gözlemesiyle keşfedilmiştir. Onnes 0°K sıcaklığına ulaşmak için, civa çubuğunu sıvılaştırılmış helyum içine sokmuş ve $4,2^{\circ}\text{K}$ ($-268,8^{\circ}\text{C}$) de civanın süperiletken duruma geçtiğini gözlemiştir.

Helyum mutlak sıfır civarında sıvılaştığından, bu araştırmalar için çok uygundu. Sakıncaları ise çok pahalı olması ve iyi yalıtılmış bir kaptaki sıkıca kapatılmadığı takdirde hızlı ısınması ve buharlaşmasıdır. Ayrıca helyumun sıvılaştırılması pahalı ve büyük miktarda enerji gerektiren bir işlemdir. Bütün bu sakıncalar süperiletkenlik konusundaki çalışmaları sınırlamıştır, çünkü başlangıçta süperiletkenliğe ulaşmak için tek yol önce belirli metalleri ve daha sonra belirli bazı metal alaşımlarını sıvı helyum banyosuna sokmak idi. Bunun sonucu olarak süperiletkenliğin pratikte kullanımı, uzun yıllar boyunca, bilinen süperiletkenler ile yapılan elektromıknatıslar ve bunların yarattığı şiddetli magnetik alanlarla çalışan bir kaç cihaz ile sınırlı kalmıştır.

Süperiletkenlik olayı pratikte defalarca gözlenmesine rağmen teorisinin geliştirilmesi hep geri kalmıştır. İlk olarak 1935'de London kardeşler, 1950 WL.

Ginsburg ve LD. Landan tarafından süperiletkenlik için başarılı modellemeler yapılmış olmasına rağmen ilk esaslı teori 1957 yılında John Bardeen, Leon Cooper ve J. Robert Schrieffer tarafından önerilmiştir ve kurucularının soyadlarının başharflerinin biraraya getirilmesi ile BCS kuramı olarak anılmaktadır. Bu kuramları ile 1972 Nobel Fizik ödülünü almışlardır.

BCS kuramının esası, süperiletkenlerde yük taşıyıcılarının Cooper çiftleri olarak bilinen zıt momentumlu elektron çiftleri oluşturmaya dayanmaktadır.

Normal iletkenlerin atomik yapıları incelendiğinde bunların dış kabuklarında belli sayıda delik ve elektronların bulunduğu görülür, öyleki dış kabuktaki elektronların kabuğa bağlılığı iç kabuktakiler kadar sıkı değildir. Bu nedenle, iletken bir gerilim uygulandığında, dış kabuktaki elektronlar, diğer atomlardaki boş deliklere doğru hareket eder. İşte bu hareket esnasında, bazı elektronlar diğer elektronlarla çarpışarak enerjilerini ısıya dönüştürürler. Bilindiği gibi bu olay "elektriksel direnç" olarak adlandırılır. Süperiletkenler gözönüne alındığında, bunlarda hareketli elektronlar tek tek hareket etmezler, elektron kendisine bir ortak, yani ikinci bir elektron arar. Böyle bir ortağın arandığı, metalin yapısını oluşturan kafesin titreşimleri aracılığı ile iletilir. Bu sayede aynı yerde olmasalar bile, her zaman birbirine uyan iki elektron bulunabilir. Çünkü fizikçilerin "foton" diye adlandırdıkları kafes titreşimleri bilgiyi bir elektrondan diğerine iletmektedir. Oluşan Cooper çiftinin elektronları arasındaki bağlantı, birbirinden uzakta olsalar bile, o kadar sağlamdır ki, tek başlarına kafes atomlarına çarpmaya yeterli bir enerjileri kalmaz ve elektron çiftleri çarpmadan kafesten sızarlar. Ayrıca herhangi bir elektron çifti bozulsa bile, bunlar hemen birleşerek eski konumlarına dönebilmektedirler. Bir süperiletkenin akıma karşı direnç göstermemesinin sebebi budur.

Ancak sıcaklık oda sıcaklığına yükseldiğinde elektronlar arası çekim kuvvetinin çok küçük değerlere düşmesi nedeniyle, normal iletkenlerde elektron çiftleri oluşamamaktadır. Bu kuram mutlak sıfır civarındaki süperiletkenliği açıklamada oldukça başarılı olmuştur ki, Bardeen'e göre yaklaşık 40° K'e kadar olan sıcaklıklardaki süper iletkenlik durumlarını da açıklayabilmektedir.

Süperiletkenlik konusundaki çalışmalar hızla devam ederken ortaya çıkan bir özellik çalışmaların bir süre aksamasına yol açmıştır. Bu özellik, ilk metal üstüniletkenlerden olan kurşun, kalay, civa gibi metallerin, büyük magnetik alanlar

üretmek amacıyla içlerinden gerekli akımlar geçirildiğinde süperiletkenliklerini kaybetmeleri ve normal iletken durumuna geçmeleridir. Bu engeli aşmak için bilim adamları alaşımlara yönelmiştir ve bu çalışmaların sonucu olarak 1950'lerde yüksek magnetik alanlarda süperiletkenlik özelliğini yitirmeyen Niobyum-kalay (Nb_3Sn) ve niobyum - Titanyum ($NbTi$) gibi alaşımlar bulunmuştur. Özellikle J. Künzler 1960'larda Nb_3Sn alaşımının tel haline getirebileceğini bularak, elektrik makinalarında süperiletkenliğin kullanılmasına öncülük etmiştir. Bu alaşım 20.10^5 Gauss'luk magnetik alanlarda süperiletkenliğini sürdürebilmektedir. Alaşımlar içinde kritik sıcaklığı en yüksek olanı 1973'de bulunan Nb_3Ge (Niobyum-Germanyum) alaşımıdır ve bu alaşım $T_c=23^{\circ}K$ de süperiletken hale geçebilmektedir.

1983'de IBM'ın Zurih Araştırma Labarotuarı fizikçilerinden Karl Alex Müller metal alaşımlarını bir yana bırakıp, seramikler olarak bilinen metal oksitleri incelemeye başlamıştır. K.A. Müller ve arkadaşı Johannes George Bednorz, üç yıl boyunca içindeki elementlerin çeşitlerini ve miktarlarını değiştirerek bir çok metalin oksitlerini inceledi, ancak kritik sıcaklığa yükseltemediler. Sonunda 1985'de Baryum-Lantan-Bakır-Oksijen ($Ba-La-Cu-O$) bileşiğinde $35^{\circ}K$ de süperiletkenlik gözlediler. Daha sonra Bell Labaratuvarlarından Bertam Batlogg ve Robert Cava $38^{\circ}K$ de süperiletken olan benzer bir bileşik elde ettiler. Bu arada Houston Laboratuvarı araştırma grubu başkanı olan Plaul C.W. Chu ve grubu malzemeleri yüksek basınç altında denemeyi düşünmüşlerdi. Bu yolla normal atmosfer basıncının 10.000 katından 12.000 katına çıktığında $52^{\circ}K$ 'e kadar süperilekten olan benzer bir bileşik buldular. Daha sonra Chu ve grubu IBM bileşiğinin nadir toprak elementi olarak Lantan'ı incelediler. Chu'nun eski öğrencisi olan Maw-Kuen lantanı, diğer bir nadir toprak elementi olan yitrium ile değiştirdi. Bunun sonucunda da Wu ve arkadaşları ($Y-La-Cu-O$) bileşiğinin $93^{\circ}K$ de süperiletken olduğunu gözlediler. Kısa bir süre sonra tekrarlanan deneyde $98^{\circ}K$ de süperiletken olduğunu gözlediler. Kısa bir süre sonra tekrarlanan deneyde $98^{\circ}K$ 'de süperiletken hale geldiğini gözlemlediler.

Elde edilen bu sıcaklıkların oda sıcaklığına henüz çok uzak olmasına rağmen, bu sıcaklıklara ulaşmanın sağladığı en önemli üstünlük, bu düşük sıcaklıkları elde etmek için sıvı helyum yerine sıva azot kullanılabilmesidir. Sıvı azotun üstünlüğü $77^{\circ}K$ de elde edilmesi ve hem çok ucuz, hem de adi termos şişesinde saklanabileek kadar uzun ömürlü olmasıdır.

Sıcaklık 100°K'nin üzerinde birer, ikişer artırılırken ABD'de iki ayrı grup 200°K'nin üzerinde süperiletken geliştirdiklerini açıkladılar. Wayne State Üniversitesinden Chen, Wenger ve Logothetis 240°K de süperiletken gözlediklerini bildirmişlerdir. Bileşiklerini tam olarak açıklamayan Wayne State grubu, süperiletkenin Y-Ba-Cu-O ailesinden, daha önce 90°K kritik sıcaklığının gözlemlendiği bir oksit seramik olduğunu belirtmekle yetindiler.

Öte yandan, Houston'da 93°K'le ilk yüksek-sıcaklık bileşiğini bulan Chu ve ekibi 225°K de süperiletkenliğe geçen yeni bir bileşik geliştirdiklerini açıkladılar. 225 °K (-49 °C) henüz oda sıcaklığına çok uzaktı, ancak dünya üzerinde kaydedilen en düşük sıcaklıktan da oldukça yüksekti. Tokyo Üniversitesindeki grubun lideri Tonaka Yitriyum yerine erbiyum yada holmiyum gibi toprak elementlerinin kullanılmasıyla daha yüksek kritik akımlara sahip seramiklerin elde edileceği görüşünde idi.

Buraya kadar yapılan incelemelerde, metal oksitlerin (seramiklerin) süperiletken olabildiklerinin anlaşılması ile araştırmaların çok hızlandığı görülmektedir. Çünkü böylelikle sıvı azotun kullanım olasılığı sağlanmış ve buda büyük kolaylık sağlamıştır. Seramiklerin diğer bir üstünlüğü, şiddetli magnetik alanlara dayanabilmeleridir.

Seramiklerin bu üstünlüklerin yanında iki önemli sakıncası

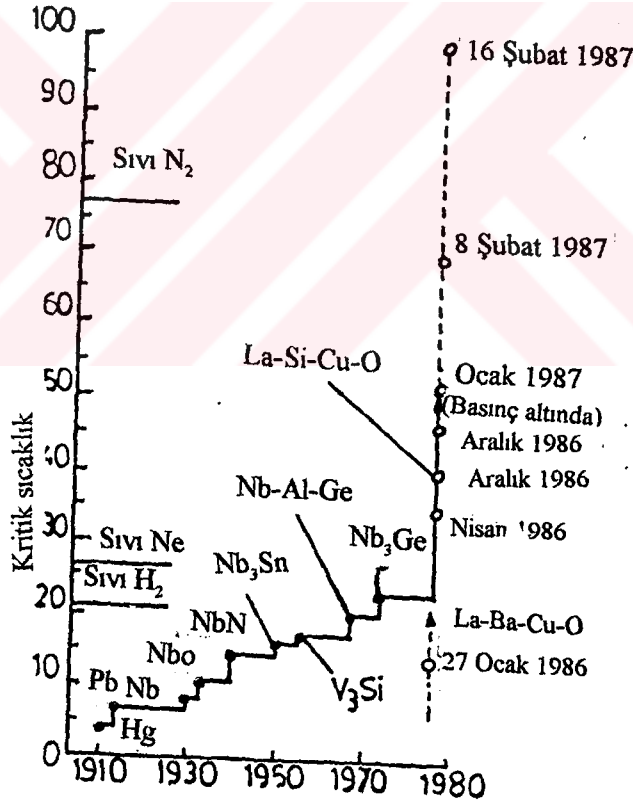
- 1) Akım taşıma kapasitelerinin çok düşük olması
- 2) Kırılgan olmalarıdır,

Bilim adamları bu sakıncaları gidermek için çeşitli yöntemler geliştirmektedirler; Iowa'da, Ames Laboratuvarındaki araştırmacılar, yeni süperiletken bileşiklerden birini bakır ve diğer iletken malzemelerle karıştırdılar ve tel şekline soktular. Toshiba firması bu arada ilk kabloyu ürettiğini duyurdu. Y-Ba-Cu-O bileşiğinden geliştirilen kablo 94°K'de sıfır dirence ulaşıyordu. 0,6 mm çaplı çubuklar şeklinde üretilenlerin kritik sıcaklığı 87°K'di. ABD'de Argonne Ulusal Laboratuvarında 0,2 mm çaplı teller üretmiştir. Bu tellerin yüksek alan mıknatısları için uygulama olanağı vardı, ancak süperiletkenliğin kaybolduğu düşük akımlarda oldukça kullanışsızdı. Akım yoğunluğu sınırı, Toshiba firması için 6A/cm², Argonne'de üretilen içinse 5A/cm² idi, bu yoğunluk pratik kullanım için yeterli değildi. Yüksek hızda mikrodoreler içinse ince süperiletken filmler, tel ve şeritlerden daha uygundu. Bu arada Yorktown'daki IBM laboratuvarı, Y-Ba-Cu-O bileşiği kullanarak 400 nonometre kalınlığında süperiletken film ürettiğini duyurdu. Bu yüksek

akım taşıma kapasiteli tek kristalli ince - filmlerin anizotropi (akımın kristal içinde belli bir yönde diğer yönlerdekinden daha iyi taşınması) özelliğine sahip olduğunun anlaşılması ile bilim adamları bu filmleri sıvıazot sıcaklığına kadar soğutarak 100.000 A/cm^2 lik akım yoğunluğuna ulaştılar. Bu süperiletken filmler, sıvı helyum sıcaklığına kadar soğutulduğu zaman 5 milyon A/cm^2 akımı ilettiler. Japon Elektronik Teknolojisi Genel Araştırma Enstitüsü, 300°K (-27°C)de süperiletkenliğe ulaştığını bildiriyor, ayrıca Sumitomo Elektrik, Houston Üniversitesi ve Yeni Delhi Ulusal Fizik Laboratuvarının üçü'nde, 0°C 'nin üzerinde süperiletkenliğe ulaştıklarını iddia ediyorlar.

Çalışmalar hızla sürerek, oda sıcaklığında süperiletken elde edilmeye çalışılmaktadır.

Tablo 1.1 1987 'ye Kadar Süperiletkenlik

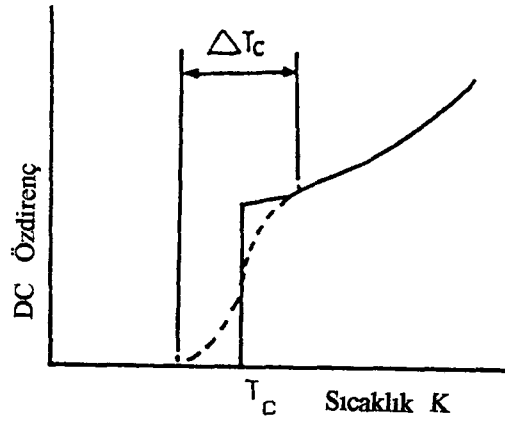


BÖLÜM 2 SÜPERİLETKENLER

2.1 Süperiletkenlerin Temel Özellikleri

Süperiletkenliğin en belirleyici özellikleri T_c ile gösterilen kritik sıcaklığın altındaki sıcaklıklarda, doğru akımdaki elektriksel dirençlerinin sıfır olması ve diamagnetizma göstermeleri, başka bir deyişle magnetik alanı dışlamalarıdır.

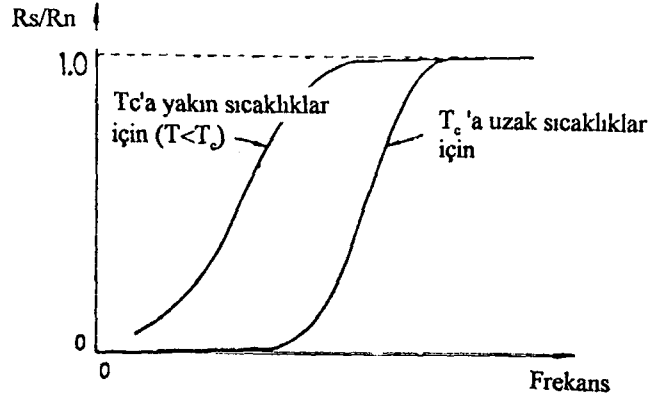
Kritik sıcaklık, hiçbir magnetik alan yok iken, malzemenin süperiletkenlik durumuna geçtiği sıcaklıktır. 1957 yılında Bardeen, Cooper ve Schrieffer tarafından "BCS kuramı" adı verilen teori ortaya atılmıştır. Buna göre bir uç iletken geçiş ısısının, T_c altında iletken elektronlar "Cooper Çiftlerini" oluşturmak için biraraya gelerek, yeni bir düzenek durumunu alırlar. Bu çiftlerin oluşumu, iletken elektronlarla onların örgü içinde hareketlerinden doğan titreşimleri 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 ("uyum uzunluğu") 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. Kollektif olarak bunlar bir tek Broglie dalgasını temsil ederler. Cooper çiftlerinin yoğunluğu fazla ve akış hızı buna karşı 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 2.1'deki eğimle ifade edilmiştir. Uç iletken alaşımlar yarıiletkenli bileşimler için T_c 20°K'nin üzerine kadar uzanan bir değişkenlik gösterir. Üzerinde normalden uç iletkenine dek geçişimin yer aldığı ΔT_c ısı aralığı 10^{-3} °K düzeninde yada gene maddenin durumuna bağlı olarak çeşitli derecelerde olabilir.



Şekil 2.1

Genel olarak metalik süperiletkenlerin kritik sıcaklık değerleri süperiletken alaşım ve bileşiklerin kritik sıcaklık değerlerine göre daha düşüktür. Bunlar "Düşük Sıcaklık Süperiletkenleri" olarak bilinirler. Metalik süperiletkenlere katkı maddesi eklenmesi kritik sıcaklık değerine etki eden önemli bir faktördür. Bu etki, sözkonusu olan katkı maddesinin magnetik olup olmamasına ve içerdiği taşıyıcı yoğunluğuna bağlı olarak değişir. Sıvı azot sıcaklığında süperiletken hale geçen metaloksitler gibi malzemeler de "Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri" olarak bilinirler. Bu gruba giren süperiletkenlerin düşük sıcaklık süperiletkenlerine olan üstünlükleri soğutma masrafının daha az olması, soğutma için harcanan güç daha az olduğu için verimin daha yüksek olması, yalıtımın daha kolay olması nedeniyle daha güvenilir ve daha kullanışlı olmalarıdır.

Yukarıda belirtildiği gibi, kritik sıcaklığın altındaki sıcaklıklarda, ancak doğru akımdaki direnç aniden sıfıra düşer. Alternatif akımda ise, normal durumundakine göre çok küçük olmakla beraber, bir direnç sözkonusudur. Bu direncin değeri, uygulanan alternatif akımın frekansına ve numunenin sıcaklığına bağlıdır. (Şekil 2.2.)



Şekil 2.2 (R_s/R_n) (Süperiletkenlik durumu direnci / Normal durum direnci) oranının frekansa göre değişimi

Şekildende görüldüğü gibi, yeterince yüksek frekanslarda süperiletkenlik durumundaki direnç normal durumdaki dirence eşit olmaktadır. Süperiletkenlerin diğer önemli özelliği diamanetizma göstermeleridir. Diamanetik bir cisme düzgün olmayan bir magnetik alan uygulandığında, bu magnetik alanda cisime etki eden kuvvetler "Endüklenen mıknatıslama akımları" ile gösterilebilir. Mıknatıslama akımı çizgileri daima kapalı olup, bu mıknatıslama akımlarının cismin içine yada dışına bir elektrik yükü getirmediğini gösterir. Mıknatıslama akımlarının en önemli özelliklerinden biri "endüklenen magnetik alan" olarak bilinen bir magnetik alan üretmeleridir. Bu durumda, toplam magnetik akı,

$$\Phi_{\text{top}} = \Phi_{\text{uyg}} + \Phi_{\text{end}} \quad (2.1)$$

olarak ifade edilebilir, burada Φ_{uyg} uygulanan magnetik alanın akısı ve Φ_{end} endüklenen magnetik alanın akısıdır. Endüklenen magnetik alanının etkisini gösteren en iyi deney Arkadiev'in yüzen mıknatıs deneyidir. Bunun için süperiletken malzemeden yapılmış, ancak normal durumda bulunan bir çanağın dibine bir çubuk mıknatıs konur. Çanak süperiletken hale getirilince, endüklenen magnetik alan mıknatısa bir itici kuvvet uygular. Sonuç olarak, mıknatıs, süperiletken çanağın uyguladığı kuvvet mıknatısını ağırlığı ile dengeleninceye kadar yükselir ve görünür hiç bir destek olmaksızın o yükseklikte asılı kalır. Süperiletkenin direnci sıfır olduğu içine endüklenen mıknatıslama akımları

sönmeyip, sürekli akarlar ve dolayısıyla dış mağnetik alan uygulandığı müddetçe mıknatıs havada asılı kalacaktır. Bu deney, bir malzemenin süperiletken olduğunu göstermenin en kolay yoludur ve çeşitli şekillerde sık sık uygulanır.

Yüzen mıknatıs deneyi, endüklenen mağnetik alanın uygulanan mağnetik alana ters olduğunu göstermektedir. Bunun sonucu olarak, toplam mağnetik akı çizgilerinin hem hemen tüm numuneden çıkarılır, yani mağnetik alan cisimden dışlanmış olur. Bu süperiletkenlik durumunun karakteristik özelliği olup, numunenin daha önceki sıcaklık ya da mağnetik geçmişinden bağımsızdır.

Numunenin içine sızabilen az sayıdaki akı çizgileri sadece yüzeyin yakınında nispeten dar bir bölgede sınırlanırlar. Süperiletkenlik durumunda akı çizgilerinin numunenin içine sızabildiği bu mesafeye "sızma derinliği" denir. Bu mesafe numune içinde mağnetik akı yoğunluğunun sıfıra düştüğü derinlik olup, ilk defa London Kardeşler tarafından tanımlandığı için London sızma derinliği olarak bilinir ve λ_L ile gösterilir. Sızma derinliği numunenin boyutlarına ya da şekline bağlı olmayıp, sadece sıcaklığa ve numunenin yapıldığı malzemeye bağlıdır. Sızma derinliğinin sıcaklığa bağımlılığı bütün malzemeler için aşağı yukarı aynıdır ve

$$\lambda_L = \lambda_0 / \sqrt{(1 - T^4 / T_c^4)} \quad (2.2)$$

bağıntısı ile verilir, burada λ_0 mutlak sıfır sıcaklığındaki sızma derinliği (10^{-5} mm. mertebesinde) ve T_c malzemeye ilişkin kritik sıcaklık değeridir. Bu bağıntı, sızma derinliğinin sıcaklıkla arttığını ve $T=T_c$ yani kritik sıcaklık için sonsuza gittiğini göstermektedir.

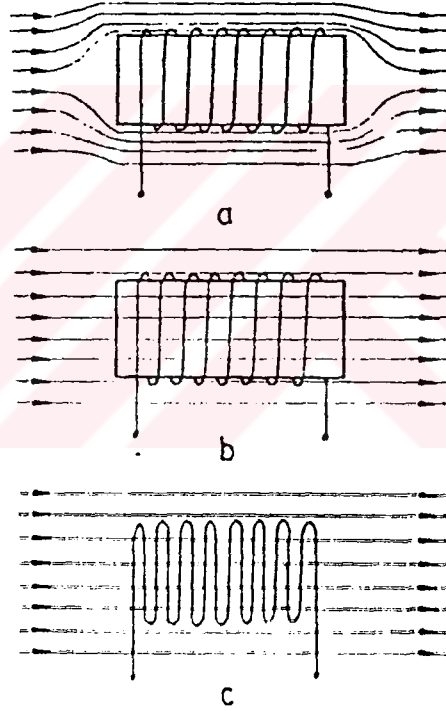
Sızma derinliği tanımından hareketle numuneleri iki gruba ayırmak mümkündür. Boyutları sızma derinliğinden büyük olan numuneler "büyük (kalın) numuneler" ve en az bir boyutu sızma derinliği mertebesinde veya daha küçük olan numuneler "ince numuneler" olarak isimlendirilir.

Büyük numunelerde süperiletkenlik durumunda mağnetik alanın hemen hemen tamamen dışlanması ilk olarak 1993 yılında Meissner ve Ochsenfeld tarafından keşfedilmiştir ve "Meissner etkisi" olarak bilinir. Meissner etkisini gözlemek için en basit yöntem, etrafına normal durumda bulunan sıradan bir bobin sarılmış olan uzun, kalın bir

silindir numune kullanmaktır. Silindire paralel olarak bir statik mağnetik alan uygulandığında üç olası durum söz konusudur ve bu üç durum için akı çizgilerinin dağılımı Şekil 2.3.'de gösterilmiştir.

Meissner etkisi nedeniyle, büyük numunelerin içinde mağnetik akı yoğunluğu sabittir ve sıfıra eşittir. Numunenin dışındaki mağnetik akı yoğunluğu ise, numunenin şekline göre değerler alır.

Tanımdan da anlaşıldığı gibi, bir süperiletken numuneye hiç bir dış mağnetik alan uygulanmaz iken, eğer sıcaklık kritik sıcaklık değerinden küçük ($T < T_c$) ise, numune tamamen süperiletkenlik durumunda ve eğer sıcaklık kritik sıcaklık değerinden büyük ($T > T_c$) ise, numune tamamen normal durumda bulunur.



Şekil 2.3. Meissner etkisinin deneysel olarak gözlenmesi

- a) Silindir süperiletkenlik durumunda iken,
- b) Silindir normal durumda iken,
- c) Silindirin aniden kaldırılması halinde mağnetik akı çizgilerinin dağılımı

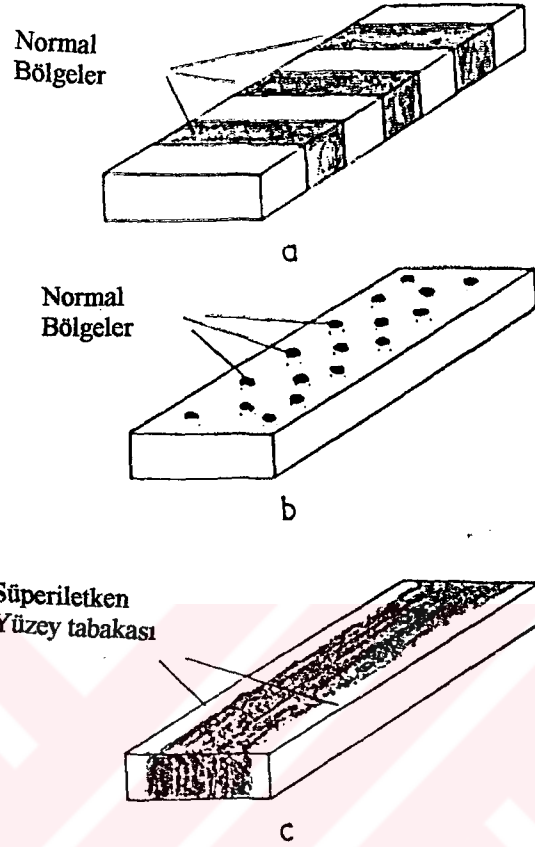
Bir dış mağnetik alan uygulanması durumunda, uygulanan alanın belirli değerleri için numunenin bazı kısımlarının normal, bazı kısımlarının ise süperiletken olması olasıdır, yani numune normal bölgelere ve süperiletken bölgelere ayrılır. Bu olayın gerçekleştiği üç olası durum vardır. Ara durum, karma durum ve yüzey süperiletkenliği. Uygulanan mağnetik alana paralel, düzlemsel levha şeklindeki bir numune için bu üç durum incelenirse, ara durumda normal bölgelerin oldukça kalın, paralel levhalar şeklinde ve karma durumda çok sayıda son derecede ince ve birbirine çok yakın tüp biçiminde flamanlar şeklinde olduğu görülür. Yüzey süperiletkenliği durumunda ise, süperiletkenlik durumunda olan ince bir yüzey tabakası dışında numune tamamen normaldir. şekil 2.4.'de sözü edilen üç durum için normal bölgelerin ve süperiletken bölgelerin düzenlenişi görölmektedir.

1961 yılından beri yapılan araştırmalarla, ara durum gösteren numunelerin asla karma durum göstermedikleri ve karma durum gösteren numunelerin de asla ara durum göstermedikleri anlaşılmıştır. Buna göre, süperiletken malzemeler Tip-1 süperiletkenler ve Tip-2 süperiletkenler olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Tip-1 süperiletkenler ara durum gösteren malzemeler olup, kurşun, civa gibi metallerdir. Tip-2 süperiletkenler ise karma durum gösteren malzemeler olup, daha çok süperiletken alaşımlar ve bileşikler bu gruba girerler.

Gerek Tip-1 ve gerekse Tip-2 süperiletkenler yüzey süperiletkenliği gösterebilirler. Bunun için koşul, süperiletkenlerin bir yalıtkanla kaplanmış olmasıdır. Eğer numune normal bir metalle kaplanmışsa, yüzey süperiletkenliği asla oluşmaz. Tip-2 malzemelerin tümü yüzey süperiletkenliği gösterirler, fakat Tip-1 malzemelerin ancak bazıları bu özelliğe sahiptir ve bunların çoğu ne ile kaplanmış olurlarsa olsunlar yüzey süperiletkenliği göstermezler. Bu nedenle, Tip-1 malzemelerin genel olarak yüzey süperiletkenliği göstermedikleri kabul edilebilir.

Tip-1 ve Tip-2 süperiletkenler arasındaki temel fark, ara ya da karma durumda ortaya çıkan sınır enerjilerindedir. Mekanikten bilindiği üzere, herhangi bir mekanik sistem mekaniksel dengede olduğu zaman, enerjisinin en düşük değerine sahiptir. Bu teorem ısı dengede olan bir sistem için genelleştirildiğinde, mutlak sıfır sıcaklığına (0°K 'e) indirgenmiş olur ve sonuç olarak, herhangi bir sistem 0°K 'de toplam enerjisinin en küçük pozitif değerine sahip olmalıdır. Buna göre, bir dış mağnetik alanın varlığında ve 0°K sıcaklıkta, bir süperiletken iletken numunenin içinde bulunabileceği üç durumun

enerjilerinin uygulanan mağnetik alanın şiddetine bağlı olarak değişimi şekil 2.5. de gösterilmiştir.



şekil.2.4. Bir süperiletken numunenin süperiletken bölgelere ve normal bölgelere bölündüğü uç farklı durum:

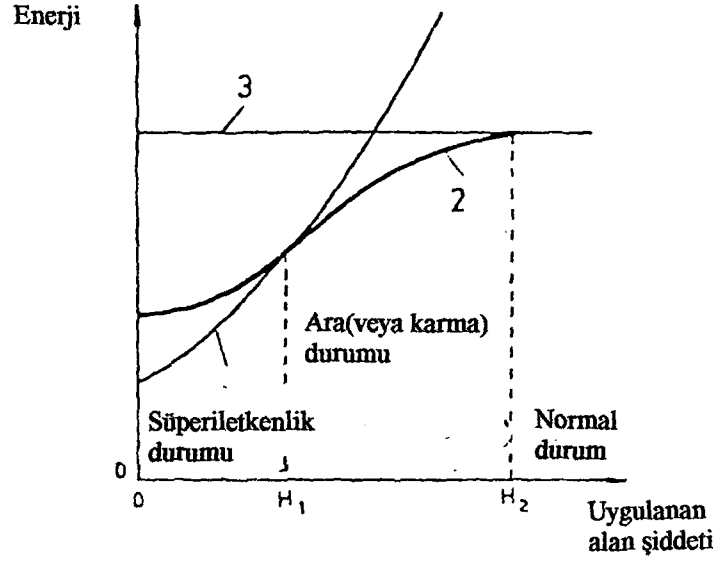
- a) Ara durum
- b) Karma durum
- c) Yüzey süperiletkenliği

Uygulanan mağnetik alanın şiddeti değiştirildikçe, numunenin yukarıda açıklanan teoreme uygun olarak bir durumdan diğerine geçtiği şekilden açıkça görülmektedir.

Normal durumda, toplam enerji uygulanan mağnetik alan şiddetine bağı olmayıp,

$$E_{nTOP} = V \cdot E_n \quad (2.3)$$

olarak ifade edilebilir; burada V numunenin hacmi ve E_n normal durumdaki enerji yoğunluğudur.



Şekil 2.5. Süperiletkenlik durumu, ara (veya karma) durum ve normal durum enerjilerinin uygulanan alan şiddetine göre değişimi.

- 1) Süperiletkenlik durumu enerjisi
- 2) Ara (veya karma) durum enerjisi
- 3) Normal durum enerjisi

Diğer taraftan, süperiletkenlik durumunda, toplam enerjiye manyetik katılım söz konusu olur. Bu katılım,

$$E_{sTop} = V(E_s + E_{smag}) \quad (2.4)$$

dir. Burada E_s bir dış manyetik uygulanmazken süperiletkenlik durumunun enerji yoğunluğu olup, toplam enerji yoğunluğunun manyetik olmayan kısmını oluşturur. $E_{s,mağ}$ ise süperiletkenlik durumunda Meissner etkisinden kaynaklanan enerji yoğunluğu olup, toplam enerji yoğunluğunun manyetik kısmını oluşturur.

Ara (veya karma) durumunda ise, numune normal bölgelere ve süperiletken bölgelere ayrılmış olduğu için, toplam enerjiye üç katılım söz konusu olur. Bunlar; normal bölge enerjisi, süperiletken bölge enerjisi normal ve süperiletken bölgeler arasındaki sınırdan kaynaklanan sınır enerjisidir. Normal bölgelerdeki ve süperiletken

bölgelerdeki enerji yoğunlukları aynı olacağına göre, sınır enerjisi yoğunluğu her iki yandaki enerji yoğunluğundan ya daha büyük veya daha küçük olabilir. İlk durumda "pozitif sınır enerjisi" olduğu ve ikinci durumda ise "negatif sınır enerjisi" olduğu söylenir. Sınır sayısı artıkça, sınır enerjisi pozitif ise toplam enerji artar ve sınır enerjisi negatif ise toplam enerji azalır. Buna göre, en düşük toplam enerjiyi elde etmek için, sınır enerjisi pozitif ise mümkün olduğu kadar az sayıda sınıra ve sınır enerjisi negatif ise mümkün olduğu kadar çok sayıda sınıra gerek vardır. Ara durumda daha büyük ve daha az sayıda normal bölge oluştuğunu, buna karşılık karma durumda daha küçük ve daha çok sayıda normal bölge oluştuğunu yukarıda belirtmiştik. O halde, bu iki bilgi karşılaştırıldığında Tip-1 malzemelerin pozitif sınır enerjisine ve Tip-2 malzemelerinin ise negatif sınır enerjisine sahip malzemeler oldukları sonucu elde edilir.

Sınır enerjisinin pozitif veya negatif olması, bu bölgede manyetik ve manyetik olma.yan enerji yoğunluklarının şekil 2.6. de verilen değişimlerini inceleyerek açıklanabilir. Burada λ_L London sızma derinliği olup, manyetik enerji yoğunluğunun sıfırdan üstüniletkenlik durumu değerine yükseldiği mesafeyi göstermektedir. ξ ise manyetik olmayan enerji yoğunluğunun normal durum değerinden süperiletkenlik durumu değerine düştüğü mesafedir ve "bağlantı uzunluğu" olarak isimlendirilir.

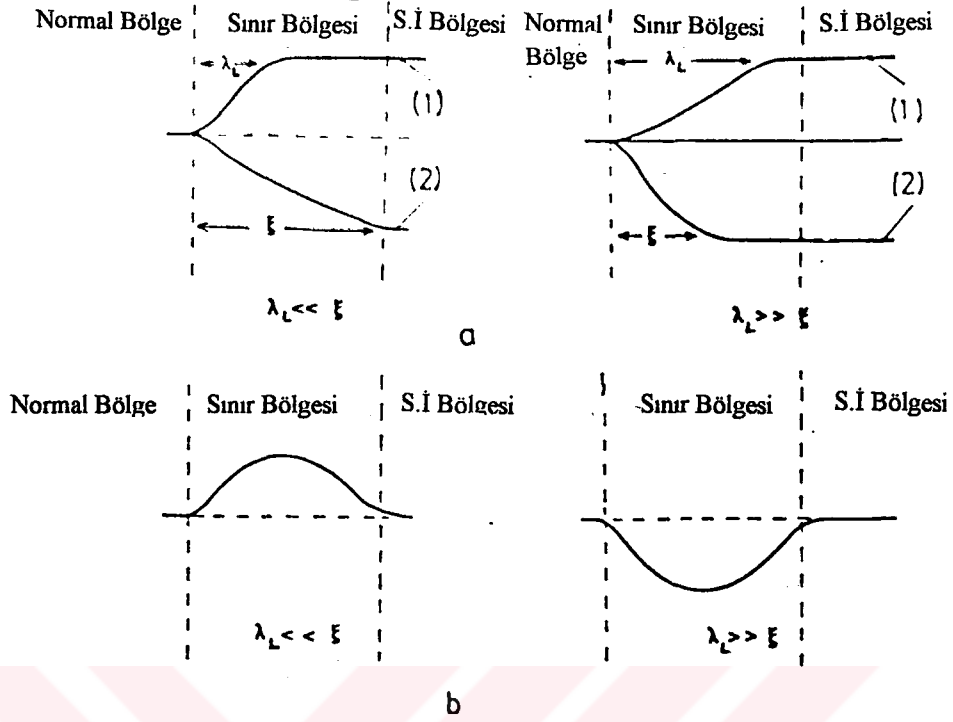
Eğer $\lambda_L \ll \xi$ ise, sınır bölgesinde toplam enerji yoğunluğu artar ve eğer $\lambda_L \gg \xi$ ise, toplam enerji yoğunluğu azalır. Buna göre, eğer $\lambda_L \ll \xi$ ise, sınır enerjisi pozitif ve dolayısıyla malzeme Tip-1 süperiletken olur, eğer $\lambda_L \gg \xi$ ise, sınır enerjisi negatif dolayısıyla malzeme Tip-2 süperiletken olur. Buradan hareketle, Tip-1 ve Tip-2 süperiletkenler arasındaki kesin ayırım.

$$\lambda_L / \xi < 0.71 \text{ ise Tip-1 süperiletken} \quad (2.5a)$$

$$\lambda_L / \xi > 0.71 \text{ ise Tip-2 süperiletken} \quad (2.5b)$$

olarak verilmiştir. Saf metallerde $\xi \approx 10^{-6}$ m.dir ve bunlar Tip-1 sınıfına girerler. Alaşımlarda ve bileşiklerde ξ azalır ve bunlar Tip-2 sınıfına girerler.

Yüzey süperiletkenliğinin oluşması için koşul $\lambda_L / \xi > 0.42$ olmasıdır. Buna göre, tüm Tip-2 malzemelerde ve Tip-1 malzemelerin ancak $0.42 < \lambda_L / \xi < 0.71$ olanlarında bu özellik görülür.



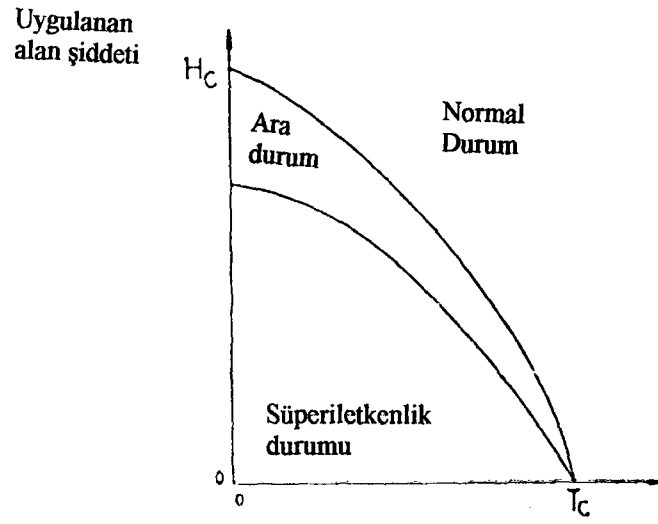
Şekil. 2.6. Sınır bölgesinde

- a) (1) Mağnetik enerji yoğunluğunun
- (2) Mağnetik olmayan enerji yoğunluğunun
- b) Toplam enerji yoğunluğunun değişimi

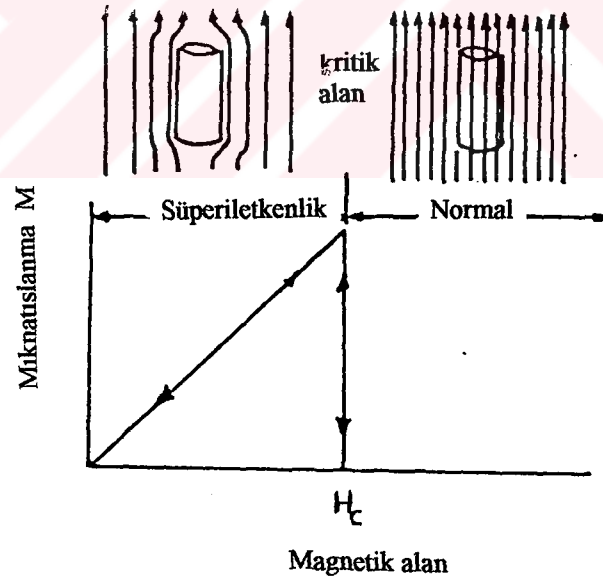
2.2 Süperiletkenlerin Sınıflandırılması

2.2.1. Tip-1 Süperiletkenlerin Özellikleri (Yumuşak Tip)

Tip-1 malzemeden yapılmış bir numune, uygulanan alan şiddetinin değerine ve sıcaklığına bağlı olarak ya normal durumda ya süperiletkenlik durumunda veya ara durumda bulunabilir. Bunun grafik olarak ifadesi 2.7.'da görülmektedir.



Şekil 2.7. Tip-1 numunenin içinde bulunduğu durumun uygulanan alan şiddeti ve sıcaklığa göre değişimi.



Şekil 2.8

Şekil 2.7'den elde edilebilecek önemli bir sonuç, sıfır manyetik alanda ara durum olmadığı ve süperiletkenlik durumu ile normal durum arasında ani ve doğrudan bir geçiş olduğudur.

Şekil 2.7. H_c ile gösterilen alan şiddeti "kritik manyetik alan şiddeti" olup, numunenin ara durumdan normal duruma geçtiği uygulanan alan şiddeti değeridir. H_c malzemenin temel bir karakteristiğidir ve bütün Tip-1 iletkenler için H_c 10^{-1} T'nin altındadır. Süperiletken yoluyla H_c dıştan uygulanabileceği gibi iletken içinden akım geçişiyle alabilir. Bir çok malzeme için kritik manyetik alan şiddeti ile sıcaklık arasındaki bağıntı

$$H_c(T) = H_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (2.6)$$

olarak yazılır. Burada T_c malzemenin kritik sıcaklık değeri ve $H_c(0)$ 0°K'deki kritik alan şiddeti değeridir. Kritik alan şiddeti iki sebepten dolayı önemlidir.

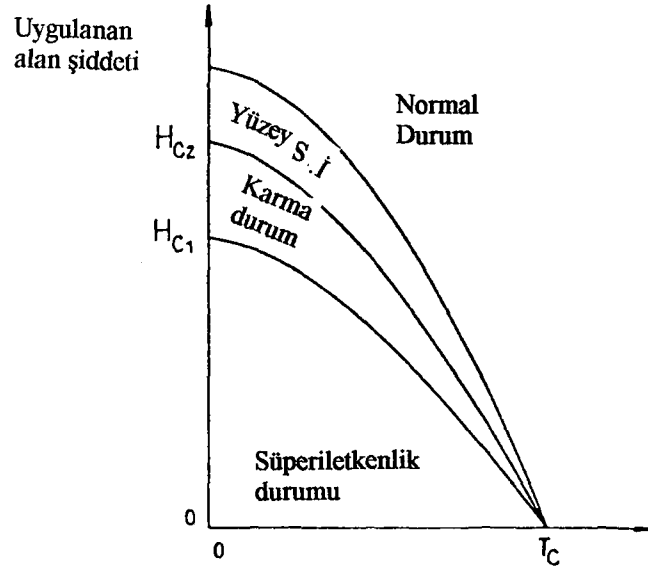
1. Tip-1 numune, yüzeyindeki herhangi bir noktada alan şiddeti kritik alan şiddetine eşit olur olmaz, süperiletkenlik durumundan ara duruma geçer. Bu geçiş esnasında uygulanan alan şiddetinin değeri numunenin şekline bağlıdır.

2. Ara durum ile normal durum arasındaki geçiş, uygulanan alan şiddeti kritik alan şiddetine eşit olduğunda gerçekleşir.

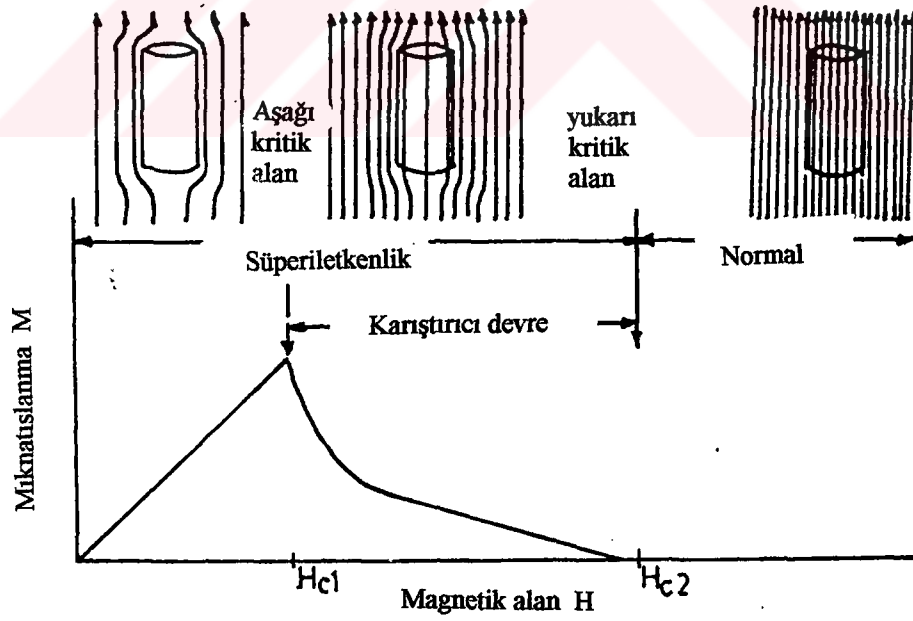
Tip-1 Süperiletkenlerinde akım yoğunluğu çok yüksek (10^{12} A/m²) olabilir.

2.2.2. Tip-2 Süperiletkenlerin Özellikleri (Sert Tip)

Tip-2 malzemeden yapılmış bir numunenin, uygulanan alan şiddetinin değerine ve sıcaklığa bağlı olarak hangi durumda bulunduğu grafik olarak incelendiğinde, iki kritik alan şiddeti değerinin söz konusu olduğu görülür. (şekil 2.9) H_{c1} "alt kritik manyetik alan şiddeti" süperiletkenlik durumundan karma duruma geçişin ve H_{c2} "üst kritik manyetik alan şiddeti" ise karma durumundan yüzey üstüniletkenliğine ya da normal duruma geçişin gerçekleştiği uygulanan alan şiddeti değeridir.



Şekil 2.9. Tip-2 numunenin içinde bulunduğu durumun uygulanan alan şiddeti ve sıcaklığa göre değişimi.



Şekil 2.10.

Tip-1 malzemelerin kritik alan şiddeti ve kritik sıcaklık değerleri Tip-2 malzemelerin üst kritik alan şiddeti ve kritik sıcaklık değerlerinden daha düşüktür. (Tablo. 2.1) 'de çeşitli Tip-1 ve Tip-2 malzemeler için kritik alan şiddeti ve kritik sıcaklık değerleri verilmiştir. (4)

Tablo 2.1. Bazı Tip-1 ve Tip-2 üstüniletkenlerin kritik ve üst kritik magnetik alan değerleri ile kritik sıcaklık değerleri.

	Üstüniletken	Kritik Sıcaklık	Kritik Alan şid.
Tip-1	Pb	7.2	0.08
	Ta	4.5	0.08
Tip-2	Nb	9.3	0.15
	Nb-%48 Ti	9.5	12.0
	Nb-%25 Zr	10.8	7.0
	V ₃ Ga	14.8	19.5
	V ₃ Si	17.0	22.5
	Nb ₃ S _n	18.0	22.5
	Nb ₃ Al	18.8	29.5
	Nb ₃ Ga	20.3	33.5
	Nb ₃ Ge	23.0	37.0

NOT: Tip-1 malzemelere ilişkin H_c değerleri 0 °K'deki ve Tip-2 malzemelere ilişkin H_{c2} değerleri 4,2 °K'deki değerlerdir.

Daha önce de belirttiğimiz gibi, karma durumdaki normal bölgeler uygulanan magnetik alana paralel olarak sıralanmış, çok ince filamanlar şeklinde bulunurlar. Malzemenin geri kalan kısmı süperiletkendir. Normal filamanların her biri, numune içinde, sıfır olmayan bir magnetik akı yoğunluğu yaratan akı çizgileri taşırlar. Bu akı yoğunluğunun küçük bir kısmı normal filamandan onu çevreleyen süperiletken bölgeye sızma derinliği λ_L kadar bir mesafede sızabilir. Buna göre, normal filamanlar arasındaki mesafede λ_L 'den büyük olursa, her bir filamana ilişkin magnetik akı diğerininkine karışmaz ve dolayısıyla filamanlar birbirlerine etki etmezler.

Numune $H_{uyg} = H_{c1}$ 'de karma duruma girdiğinde normal filamanlar yaklaşık λ_L kadar aralıklıdır. Uygulanan alan şiddeti arttırıldıkça, filamanların kalınlıkları değil, sayısı

artar. Böylece, hem toplam akı yoğunluğu artar ve hem de filamanlar arasındaki mesafe azalır. Bunun sonucu olarak, $H_{uyg} = H_{c2}$ olduğunda normal filamanlar tam hacmi doldururlar, akı yoğunluğu normal durumdaki değerine ulaşır, eğer numune yüzey süperiletkenliği göstermiyorsa normal duruma geçer.

Karma durumda ortaya çıkan normal filamanlar numuneye bir iletim akımı verilerek hareket ettirilebilirler. Bu hareketi iletim akımının manyetik alanı tarafından her bir filamana uygulanan kuvvetten dolayıdır ve aynı zamanda, sürekli bir akı hareketini gösterir. Eğer numune kristal yapısında bazı kusurlar ya da düzensizlikler içeriyorsa, normal filamanlar bu kusurlara ya da düzensizliklere yakalanabilirler. bu olay "akı bağlanması" olarak adlandırılır ve alternatif akım kayıpları olarak bilinen, ısı şeklinde ortaya çıkan manyetik histeresizlere yol açar.

2.2.3. Yüzey Süperiletkenliği

Yukarıda da belirtildiği gibi, yüzey süperiletkenliği sadece süperiletken ile yalıtkan arasındaki geçiş yüzeyinde oluşur, süperiletkenler ile normal metal arasında oluşmaz. Bu nedenle süperiletken malzemeyi normal metal ile kaplayarak yüzey süperiletkenliğinin oluşması kolayca önlenabilir.

Tip-1 malzemelerde, yüzey süperiletkenliği H_c den büyük uygulanan alan şiddeti değerlerinde gerçekleşir. Bu durumda, numune $H_{uyg} = H_c$ olduğunda ara durumdan normal duruma değil, yüzey süperiletkenliği durumuna geçer.

Tip-2 malzemelerde ise, yüzey süperiletkenliği H_{c2} den büyük uygulanan alan şiddeti değerlerinde gerçekleşir. $H_{uyg} = H_{c2}$ olduğunda numune karma durumdan normal duruma değil, yüzey süperiletkenliği durumuna geçer.

Yüzey süperiletkenliği ilk olarak 1963'de St. James ile de Gennis tarafından teorik olarak öngörülmüştür. Daha sonraları bu durumun temel özelliklerini belirlemek ve bunlardan faydalanabilmek için bir çok deneyler yapılmıştır.

2.3. Süperiletkenlerde Bozulma ve Kararlılık

Süperiletken bir numuneye dış manyetik alan uygulaması durumunda, uygulanan alanın belirli değerleri için numunenin bazı kısımlarında normal iletken bölgelerin ortaya çıkabildiği yukarıda belirtilmiştir. Bu durum, elektriksel yalıtımda bozulmaya neden olan büyük gerilim düşümlerine yol açabilir.

Özellikle süperiletken bobinlerde, sargılar arasındaki yalıtım çok zayıf olduğu için, bu olay çok önemlidir. Uygulamada, akımdaki bir değişme ya da sargıların hareketi süperiletkende normal bölgelerin oluşmasına yol açar. Bir bobindeki sargılar büyük manyetik kuvvetlere maruz kalırlar. Böylece manyetik alana bağlı olarak zayıf mekanik hareket oluşabilir. Bu durum, hızlı akı hareketine eşdeğerdir.

Süperiletken sargılarda yukarıda açıklanan nedenlerle normal iletken bölgelerin ortaya çıkması, giderek sargının tamamen normal duruma geçmesine yol açabilir. Bu nedenle, süperiletkenlerde normal bölgelerin oluşmasını önlemek ya da normal bölgeler oluştuğunda, bu bölgelerin en kısa sürede yeniden süperiletken olmasını sağlamak gerekir. Bu, süperiletkenin kararlılaştırılması olarak bilinir. Süperiletkenlerin kararlılaştırılması için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Bunlar;

- I. Cryostatic kararlılaştırma
- II. Entalpi kararlılaştırılması
- III. Dinamik kararlılaştırılma
- IV. Gerçek kararlılaştırma olarak sıralanabilir.

Cryostatic olarak bilinen ilke özünde oldukça basittir. Süperiletken kompozit bir yapı olarak imal edilmektedir. Bu işlemde süper iletken teller yüksek elektrik ve ısı iletkenliği olan maddeler içine gömülmektedir. Şekil (2.11) bu tip bir süperiletkenin çizimini vermektedir. Süperiletken işlem altında, bakır kalıp içinde hiç bir iletim akımı geçmez. Süperiletkende küçük bir dirençli bölge görülürse kalıp madde (şimdi süperiletkenden daha küçük dirençli) bir akım koşutu sağlar. (Şekil 2.11 alt çizim)

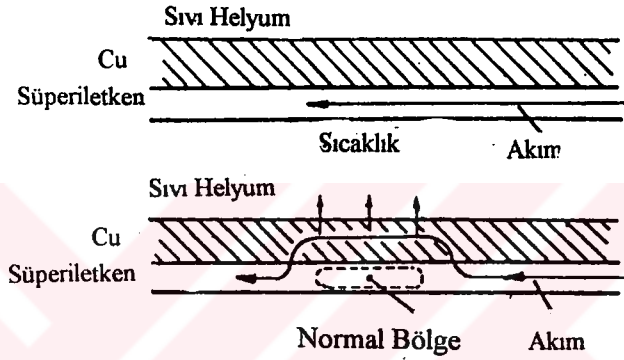
Kararsızlıktan kaynaklanan ısı enerjisi kalıp içinden hızla iletilerek sıvı-helyum bir yüzeyde bırakılır. Elektrotermal koşullar belli bir sınır içinde olduğu sürece süper

iletkenlik yeniden oluşturulacak ve rahatsızlık ortadan kaldırılacaktır. Cryostatic kararlılık, bilinen Stekly eşitliği ile

$$WP \geq \frac{I^2 P}{A} \quad (2.7.)$$

Burada W = İletken yüzeyinden ısı aktarım oranı W/m^2

P = Soğutulan iletken perimetre uzunluğu, m.



Şekil 2.11.

Bu kriterce doğrudan açıklanan diğer üç etkide gözönünde bulundurulmalıdır.

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

(b) Tip-2 sert süperiletkenlerin ısı aktarımı çok düşüktür. Bu durum etkin olarak stabilize edilebilecek süperiletken 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 yaygınlaştırılabilecek enerjiye gereksinim vardır.

Kritik akım yoğunluğu ısının içe dönük bir işlevidir. Akım burgaçlarınca yayılan enerji, Kritik akım yoğunluğunu 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. Bir süperiletken mıknatısta, cryostatic ya da enerji üretim sisteminde, her biri bir akım sıçramayla sonuçlanabilecek, rastgele elektrik, mekanik, manyetik ve termal bozulmalar söz konusudur. Ayrıca, bazı uygulamalarda süperiletkenlerden beklenen işlemsel olgular, manyetik alan değişiminin, belli oranlarda olmasını gerekli kılmaktadır.

Bu geliştirilmiş akım-sıçrama olgu anlayışı stabilitenin diğer iki yaklaşımını getirmiştir. Akım sıçramaları her iki ölçütte öylesine kurulmuştur ki, 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 etkili önlemler koyan cryostatic kararlılıkla karşılaştırılmalıdır. Bu aşamada, termal ve manyetik yayınımla ilgili kolay sonuçlar çıkarmak yararlı olacaktır. Bunlar tablo (2.2.)'te saf ve alaşım metaller için gösterilmiştir. (normal süperiletkenler). Aşağıdaki genellemeler her an geçerlidir.

- (a) Saf metallerde ısı manyetik akımlara oranla daha hızlı hareket eder.
- (b) Alaşımlarda manyetik akım ısıdan daha hızlı hareket eder.

Tablo 2.2 Saf Metaller ve Metal Alaşımlarının Özellikler

	Sıcaklık Kapasitesi S J/cm	Isı İletkenliği K ω.cm k	Özdirenç L Ω.cm	Termik Genleşme m ² /s	Manyetik Genleşme m ² /s
Saf Metaller (HC Bakır)	~10 ⁻³	~1-10	~10 ⁻⁸	~10 ³ - 10 ⁴	~1
Metal Alaşımları (normal süperiletken)	~10 ⁻³ -10 ⁻²	10 ³ -10 ⁻²	~10 ⁻⁵ -10 ⁴	~1	~10 ³ -10 ⁴

Entalpi kararlaştırılmasında, bakırın yukarıda sayılan sakıncalarını gidirmek için, kurşun gibi daha yüksek ısıl kapasiteli bir malzeme sistemi eklenir. Böylece, büyük sıcaklık artışları önlenir ve süperiletken için düzeltilmiş kararlılık elde edilir.

Dinamik kararlaştırma magnetik akının söndürülmesi ile sağlanır. Süperiletkenin bakır ile kaplanması durumunda, süperiletkendeki magnetik akıda oluşacak bir değişme, bakırda sözkonusu akı değişimine karşı Foucalt akımlarının oluşmasına neden olur. Bu akımlar bakırın dirençli yapısı nedeniyle giderek küçülmekle birlikte, magnetik enerjinin serbest kalışını yavaşlatabilirler; öyleki ısı üretildiğinden daha hızlı bir şekilde sıvı helyuma iletilir ve bunun sonucunda süperiletkenin normal duruma dönmesi önlenir.

Gerçek kararlaştırma, magnetik akının aniden düşmesi esnasında ortaya çıkan enerjinin, süperiletkenin normal iletken durumuna dönmesine sebep olmayacak kadar küçük olması esasına dayanır. Bu amaçla, süperiletkenin çapı küçültülür. (50mm veya daha küçük çaplar seçilir.)Bu kadar küçük çaplı iletkenleri üretmek ve işlemek güç olduğundan, bunlar süperiletken olmayan metal bir kalıba gömülür. Metal kalıp kullanılması daha büyük ısıl kapasite sağlar. Ancak bu kalıbın süperiletken filamanları elektriksel olarak birbirine bağlaması gibi bir sakınca da sözkonusudur.

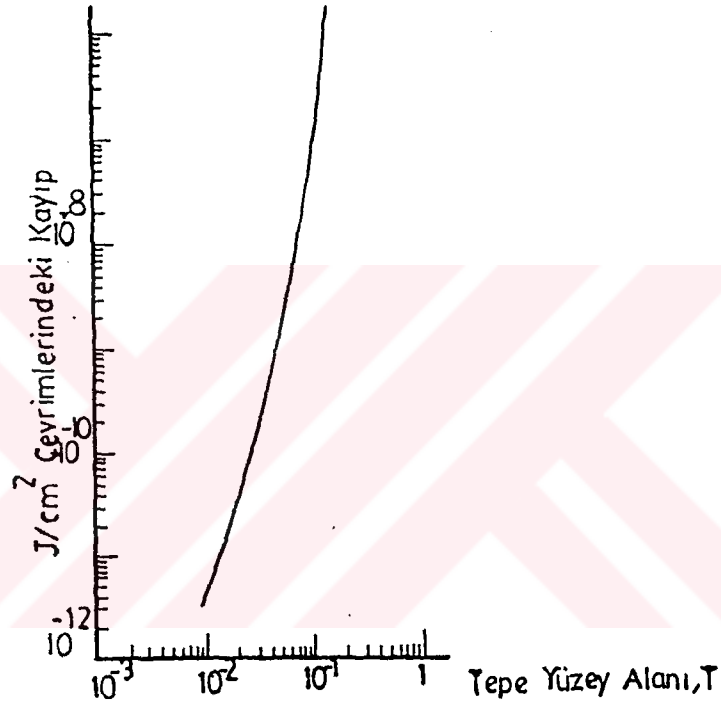
Kararlaştırılmış süperiletkenler uygulamada daha iyi sonuçlar elde edilmesi açısından tercih edilir.

2.4. Süperiletkenlerin AC çalışması

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

Tip-1, ya da tip-2 süperiletkenleri (yani meisser konumu) için mıknatıslanma eğimi ideal bir biçimde tersyüz edilebilir ve kuramsal olarak 100MHz yada 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 AC 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 ısısı soğutulursa süperiletken içinde

tutulabilirler, yada bunlar yüzey alanı yerel değerlerinden kaynaklanabilirler. Bir kısım süperiletken elementin özellikle niobium (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 (2.13) saf niobium için uç yüzey alanının bir fonksiyonu olarak AC manyetiğinin kayıplarını göstermektedir. Tek eğim birçok örnekler için eğimlerin süperpozisyonu içinden geçen yaklaşık çizgidir. Ve ilk Wipf tarafından derlenmiştir.



Şekil 2.12

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 bağlaşımlarını bozulmaz.

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

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

2.5. Josephson Etkisi

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 tünelmeme 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 eklemin 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 eşlenen 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 anahtarlama 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 yarısında 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.

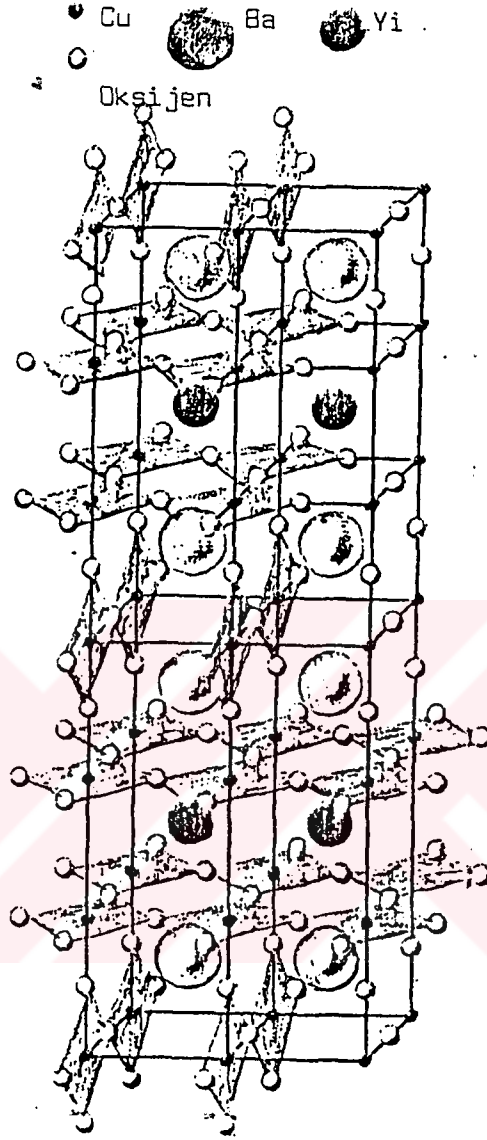
Gerilim de Josephson eklemindeki akımı etkiler. Eklem, süperiletken durumda iken üzerinde gerilim oluşmaz. Fakat akım kritik düzeyi açtığında veya bir manyetik alanın etkisiyle süperiletkenlik ortadan kalktığında bir gerilim gözlenir. Elektrik alanı da manyetik alan gibi süperakımı etkiler. Ancak elektrik alanı uygulandığından eklemdeki akım konuma değil zamana bağlı olarak değişmektedir. Gerilimsiz ortamda akım normal olarak akmakta, sınırlı bir gerilim (elektrik alanı) uygulandığında ise akım yüksek frekansda yön değiştirmektedir. (yüksek frekanslı değişken akım, AC oluşmaktadır.) 1mV'luk gerilimler bile 500 GHz gibi yüksek frekanslara neden olmaktadır. Eklem gerilme karşı tepkisi o kadar keskin ve hassastır ki uluslararası gerilim standartları Josephson ekimleri kullanılarak belirlenmektedir.

2.6. Y Ba₂ Cu₃ O₇ Süperiletken Bileşiğinin Tanıtılması

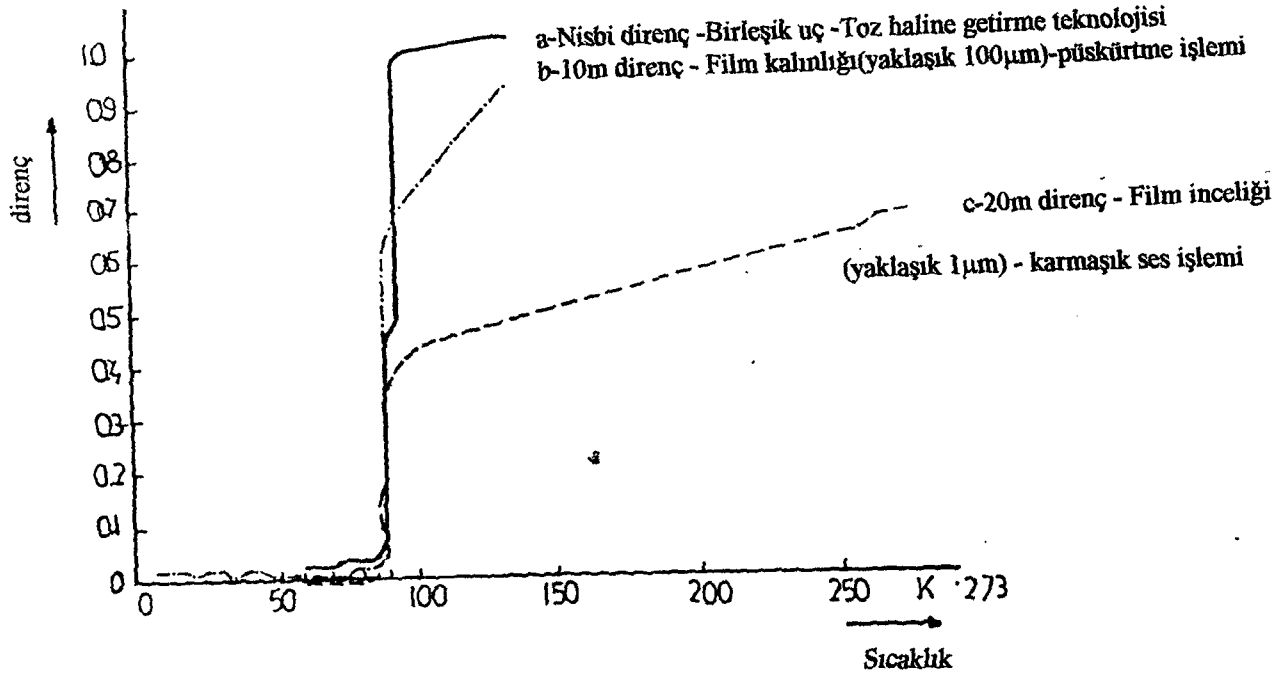
Geleneksel süperiletkenler metaldir. Bununla beraber, yeni yüksek sıcaklık süperiletkenleri seramiklerdir. Bunlardan biri olan YBa₂Cu₃O₇'nin yapısını ayrıntılı inceleyelim.

Yüksek sıcaklık, süperiletkenleri gerçekte bir sandaviçe benzeyen kristal yapıları ile metal oksit seramiklerdir. Örneğin $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 90°K civarında kritik bir geçiş sıcaklığına sahiptir. Yitrium 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 geçiş sıcaklığına sahip bir fazlı madde, oksijen ile florinin kısmi yerdeğiştirmesiyle üretilmektedir. Bununla beraber bu fazın parça hacmi, toplam maddenin % 1'inden çok daha azdır. Bu faz ne zamana göre kararlılık gösteriyor, ne de kolayca üretilabiliyor. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 'nin elektromanyetik özellikleri (kritik akım yoğunluğu ve manyetik alanlar) farklı anizotropik yapı ile karakterize edilmiştir. Yaklaşık bir akım yoğunluğu 77 °K de ve sıfır alanda $5 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ henüz üzerinde ölçülen en yüksek değerdir. bu değerler epitaksiyel ince filmlerle elde edildi. 77 °K'de ki kritik alanların üzerinde, yüksek alan uygulamalar için yeterli derecede olduğu görünür. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ '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. Alternatif alanlarda histeresiz kayıpları halen bilinmeyen bir mesafede oluşur.

İnce epitaksiyel filmler hala en iyi süperiletkenlik karakteristiği göstermeleri, üretim için onları en iyi adaylar yapmaktadır. 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 almaktadır. (Yaklaşık 900°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. 4°K süperiletkenleri şu anda ticari kullanımdadır. Yeni maddelerde normal iletme geçiş sırasında dengeli ya da korunmuş olmak zorundadır. Bu neticeye göre, yarı iletken paralel bağlamalı gümüş gibi, yüksek iletimli metale ya da gümüş-bakır bileşimine ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ için) metalürjik olarak sıkı bağlamalı duruma getirilmelidir, çünkü saf Cu ve Al bu madde ile birlikte etkirler.



Şekil 2.13 90 °K'de Süperiletken Olan Maddenin Kristal Yapısı



Şekil 2.14 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ '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. Yitriyumoksit (Y_2O_3)
4,0 gr. Baryum karbon (Ba CO_3)
2,4 gr. Bakıroksit (Cu O)
karıştırılıp havanda dövülerek unufak edilir. (yaklaşık 1 mm)
- (b) 900°C sıcaklıkta 12 saat fırınlanır.
- (c) Soğutulur, havanda dövülür ve faletler 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 soluması 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 (4°K iletkenleri karşısında) daha basit, daha ucuz ve daha verimli bir soğuma (77°K de) göstermeleridir. 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.

2.7. Süperiletkenlerin Soğutulması

2.7.1. Düşük Isı Çevresi Sorunları

Aşağıdaki Tablo (2.3) düşük - ısı yapıcıların özelliklerini vermektedir. (cryogenler).

Tablo 2.3 Düşük Sıcaklık Soğutucularının Özellikleri

Gaz	Kaynama Noktası (K)	(kg/m^3) Yoğunluk	KJ/kg Ergitme	KJ/1 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

Sadece bu tablo helyum gereksinimlere 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 He^3/He^4 seyretme soğutucuları $0,1^{\circ}\text{K}$ 'e ulaşılabilirler) için teknoloji gelişmiştir. Ancak helyumun sıvılaştırma aygıtı daha çok laboratuvar çevresinde düzensiz çalışmalar için küçük boyutlarda yapılmıştır.

Helyum soğutma bir süperiletken gerece uygulanabilir. Şöyleki;

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

(b) Ya da bir kapalı devre soğutma sistemi kullanarak

Kaynağa bağılı 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 laboratuvarında merkezi bir soğutma ve elverişli bir iyileştirme sistemi herhalde en iyi olanıdır. Ticari olarak mevcut olan cryogenic soğutucuların en elverişli verim kılavuzu 1970 yılında Crawford tarafından verilmiştir.

Kuramsal olarak ısı - gümrük bir derece T_H 'lı (genellikle $\sim 300^\circ\text{K}$) T derecesinde 1W soğutma gerektiren enerji girdisi $(T_H - T)/T$ yeni 4°K 'de 70 kW'dır. Yüksek ısı çalışması açıkça belirlenmiştir. Çünkü bu 20°K 'de 13 W'a düşecektir. Uygulamada daha yüksek dereceler gerekmektedir. 4°K '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 edilmelidir. Genellikle iki turbo kullanılmaktadır. Her biri gazın bir fraksiyonu üzerinde çalışmakta ve tipik olarak 10°K ve 40°K değerinde dönüş akışı içine üflemeaktadır. Kalan gaz bir Joule-Thomson vanası içinden geçirilebilir. Burada gazın bir kısmı sıvılaşır, ya da o doğrudan doğruya bir soğutucu olarak kullanılabilir. düşük ısı 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 genleştiricileri olan soğutucularda, sistemin en güvensiz yeri helyum kompresörüdür. burada soğutmaya enerji sağlamak için helyum gazı üzerinde mekanik işlem yapılmaktadır.

2.7.2. Çevreyi Sınırlama

Süperiletken 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 köprülüyken 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(2.4.)'de 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 1 cm kalınlığında yalıtım kullanılmalıdır. Eğer $77^\circ K$ 'da bir nitrojen soğutmalı korgan ısı iç sızmasına karşı kullanılıyorsa, y,z, K'ya akan ısı $0.1 W/m^2$ 'ye kadar düşürülebilir. Yalıtma içinden yapılan mekanik köprülemeler yığının düşük - ısı ağırlığını, bitişik sarmalların hareketinden kaynaklanan her tür manyetik gücünü örneğin dönen bir makine içindeki döngü aygıtının reaksiyonu gibi desteklemelidir.

Tablo (2.5) birtakım yapı materyallerinin mekanik ve termik özellikleri verilmiştir. İlk sütun $300-4^\circ K$ 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 $280^\circ K$ 'dır. Süper yalıtım, termal olarak süper olmasına rağmen iyi bir destekleme aracı değildir. $280^\circ K$ ısı erimli bakırın $1cm^3$ ürün içinden geçen ısı akımı 750 W olacaktır ki bu oldukça ürkütücü bir rakamdır. Elektrik direncini en aza indirmek için kurşun bir krosseksiyon gerektirmektedir. Mıknatıs kurşunlar çoklukla dışa yönelik helyum buharı yoluyla, soğutucular tüpsü iletkenler biçimindedirler. Bazı kuramsal varsayımlar $1.0 mW/A$ değerinde kurşun kaybını olanaklı göstermektedir. Uygulamada $1-3 mW/A$ beklenebilir.

Tablo 2.4 Bazı izolasyon Malzemelerinin Isı İletkenliği Ortalaması

Malzeme	λ_m ($\mu\text{W/cm K}$)	Sıcaklık oranı (K)
Aerogel 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 2.5 Yapı Metaryallerinin Mekanik ve Termik Özellikleri

Maddeler	λ_m 4-300°K'de	σ	σ / m	σ 'da 10N taşıyıcı 10 ⁻² m boyunca akı ısısı. 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 süperyalıtkan ile cam elyaf	0.0005	0.01	2000	0.14x10 ⁻²

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°K civarında süperiletken bir bileşik birçok sorunu birden çözecekti. Çünkü bu sıcaklık, doğada bol miktarda var olan azotun sıvılaştığı sıcaklıkta.

Böylece sıvı helyum kullanma sorunluluğunun getirdiği dezavantajlarda ortadan kalkacaktı. Var olan süperiletken uygulamalarının, sıvı helyum soğutmasından (5°K) sıvı azot soğutmasına (77°K) geçme işleminden çok yararlanacağı açıktır, çünkü sıvı helyumun litresi 3 pound iken sıvı azotun litresi sadece birkaç peniye 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. Ne var 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.

BÖLÜM 3 SÜPERİLETKENLİĞİN UYGULAMA ALANLARI

Süperiletkenler, özellikleri nedeniyle sıradan iletkenlerle yapılmış cihazların sınırlarında önemli bir gelişme sağlamışlardır. Süperiletkenlerle yapılan uygulama performans ve verimi artırırken, sıradan cihazlara kıyasla boyutlardada önemli küçülmelere yol açmıştır. Çünkü bütün bunlar endüstriyel uygulamalardır ve güvenilirlik, fiyat / performans oranları yalnızca süperiletken materyal için değil aynı zamanda bütün sistem için çok önemlidir.

3.1 Süperiletken Manyetik Enerji Depolama Sistemleri (SMES)

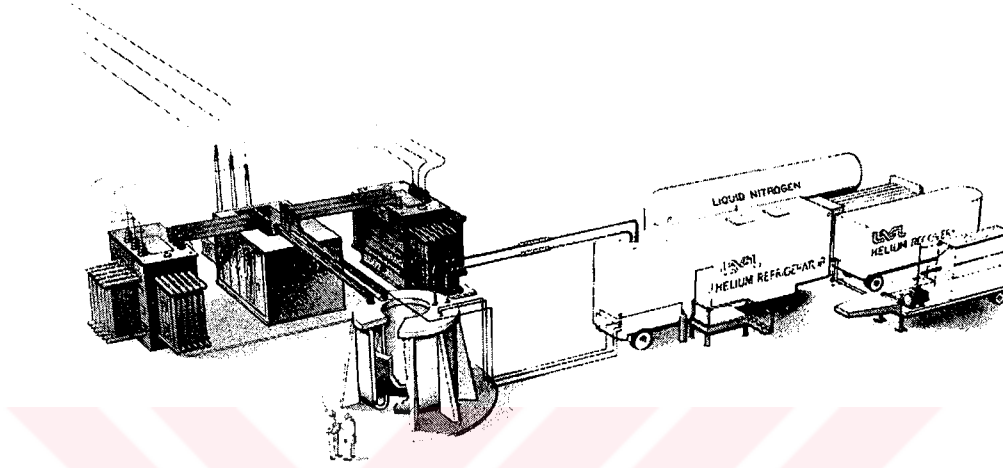
Süperiletken telle sarılan bir bobin , birikmiş olan manyetik enerjiyi $\left(\frac{1}{2} LI^2 \right)$ dağıtamaz. 1972 'de teklif edilen çok büyük süperiletkenler, güç sistemlerinde enerji tamponları olarak kullanılmıştır. Böyle bir enerji tamponunun, günümüzde kullanılan pompalı hidrolik santrallerle aynı işleri gerçekleştirmesi gerektiği düşünülüyordu. Bu, şebekede güç talebi düştüğü zaman, santrali maksimum güçte çalıştırmaya devam ederek ihtiyaç fazlası enerjiyi tampon istasyona ulaştırmak anlamına gelir. Daha sonra, güç talebi günlük sınır değerine ulaştığında bu devre depolanan enerjiyi ızgara devresine iletir; böylece gün içerisinde yalnızca birkaç saat süreyle düşük verimle çalışan santrallara olan ihtiyaç da ortadan kaldırılmış olur.

Güç kapasitesi ve depolanan enerji miktarı yaklaşık olarak 1000 MW'a , 10.000 MWh olarak kabul edilirse; SMES sistemlerinin pompalı hidrolik santrallerinden daha ucuz olması beklenir. SMES sistemlerinin, pompalı hidrolik santrallara göre başlıca avantajları; yüksek bir genel verime sahip olmaları ve hızlı cevap vermeleridir.

Bu son özellik bize, (0.01 - 1) Hz frekans aralığındaki yük osilasyonlarına karşı bir güç sistemini dengede tutmak için küçük bir SMES kullanılması imkanını sağlar. 1000 MW gücünde, 10 kWh enerji depolayabilen böyle bir cihaz pratikte gerçekleştirilerek, güç sistemine bağlanmıştır. Buna ilişkin şema Şekil 3.1'de verilmiştir.

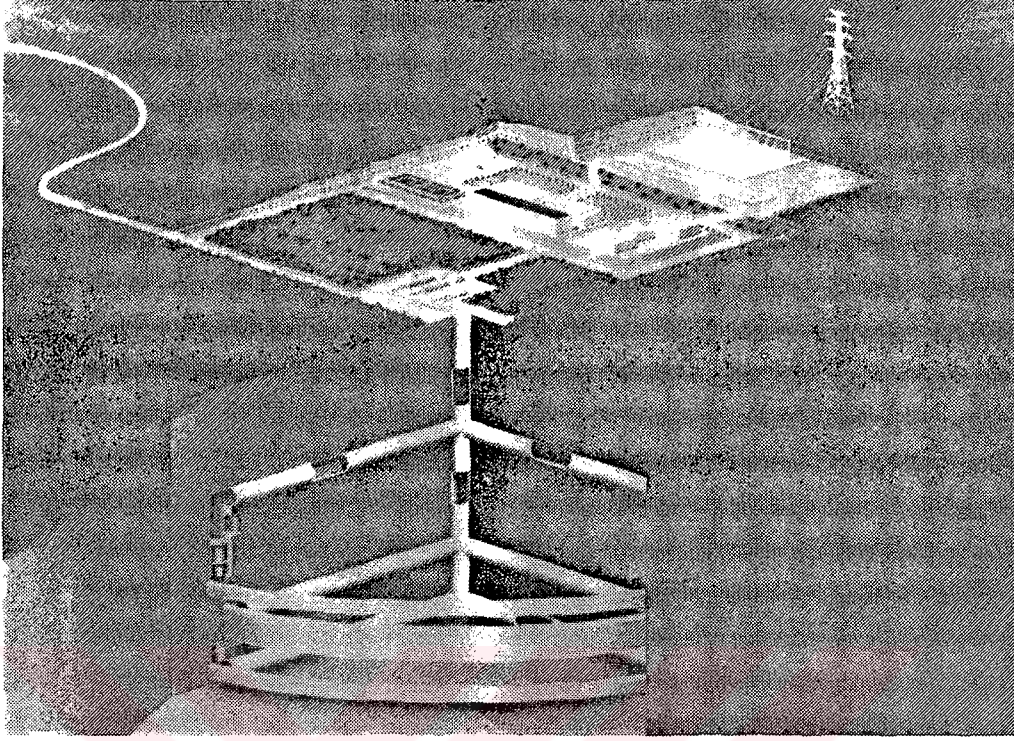
Daha küçük frekans aralıklarında bile, aynı prensip reaktif güç kompensatörlerini gerçekleştirmede kullanılabilir. Bu durumda, süperiletken bobin neredeyse sabit bir akım

Daha küçük frekans aralıklarında bile, aynı prensip reaktif güç kompensatörlerini gerçekleştirmede kullanılabilir. Bu durumda, süperiletken bobin neredeyse sabit bir akım kaynağı gibi davranır. Güç şebekelerinde enerji değişimi ise diğer SMES sistemlerinde olduğu gibi elektronik olarak kontrol edilen tristör köprüleri tarafından düzenlenir.



Şekil 3.1 Güç sistemlerini dengede tutmak için pratikte gerçekleştirilen bir SMES sistemi
Courtesy of R.I. Schermer, Los Alamos National Laboratory , USA.

Şekil 3.2 'dekine benzer büyük SMES sistemleri üzerindeki çalışmaları ise Amerika Birleşik Devletleri ve Japonyada hala devam etmektedir. Ancak bugüne kadar elektriksel kullanıma ilişkin kesin bir sonuç elde edilemediğinden, milyarlarca dolarlık böyle bir proje için her geçen gün yeni fonlar oluşturulmaktadır.



Şekil 3.2 Enerji depolama kapasitesi 5 GWh olan bir SMES sisteminin şematik gösterilişi

3.2 Süperiletken Redresörler

Süperiletken redresör; dondurucu eriyik sistemi dışına yerleştirilmiş yüksek gerilim-alçak akım güç kaynağıyla, yüksek akımlı süperiletken mıknatıs arasında enerji değişimine olanak sağlar. Eğer bu redresör, oda sıcaklığından cryogenic ortama ulaşıncaya kadar yüksek akım besleme kaynağı olarak çalışır ve sisteme yüksek akımla enerji temini işlevini üstlenirse, bazı uygulamalarda hatırı sayılır ölçüde enerji tasarrufu sağlanır. Süperiletken redresörler, SMES sistemleri için oldukça ilgi çekici bir seçenek ancak şimdiye kadar, sadece küçük manyetik sistemler için üretilmişlerdir.

3.3 Süperiletkenliğin Kablolarda Uygulanması

Bilindiği gibi , süperiletken malzemeler dirençlerinin olmaması nedeniyle elektrik enerjisini ve sinyalleri kayıp olmadan iletmektedirler. Bu nokta, helyumla soğutulmuş

yeraltı kablolarını deneyen elektrik şirketlerinin gözünden kaçmamıştır. İletilen elektrik enerjisinin %10'u enerji hatlarının direnci nedeniyle kaybedilmektedir. 1970'li yıllarda süperiletken kablolar denenmiş ve süperiletkenlerin ancak bugün normal hatlarda taşınan yükün birkaç katı olan 8000 MWatt yük taşımak ve bakır kabloların 20 katına mal olmak şartıyla kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

ABD'de Brookhaven Ulusal Laboratuvarında helyum soğutmalı süperiletkenden yapılan 10 m'lik enerji hattı üzerinde araştırmalar desteklenmektedir. Buna karşılık Amerikalılar azot soğutmalı kabloların 50 güç merkezini kapattıracak kadar kazanç sağlayacağına inanmaktadırlar.

3.3.1 AC ve DC Süperiletken Kablo Uygulamaları

İlk bakışta kablo süperiletken için zor bir uygulamadır. Doğası gereği kablonun hacim olarak büyük bir dış alan oranı olacak ve bu anlamda ısı yalıtımı ve soğutma maliyetleri de yüksek olacaktır. AC ve DC süperiletken kablolar üzerinde önemli çalışmalar yapılmıştır. Maliyetin fazla belirgin olmadığı uzun hatlarda (>50 km.) DC kablolar daha ucuza gelmektedir. DC süperiletken güç iletim hattı ile uzun mesafeler üzerindeki büyük güç bloklarını iletmenin mümkün olabilirdiği uzun yıllardır tartışılmaktadır. Özel hat dizaynları Carter ve AEG grubu tarafından önerilmiş ve hatta bazı maliyet hesapları yapılmıştır. Aynı zamanda süperiletken mıknatıs teknolojisindeki ilerlemelerden dolayı, DC koşullar altında süperiletkenlerin stabilitesi ve kayıpları çokca iyileştirilmiştir.

Bu kablolar, ayrıca daha ileri enterkonnekte sistemlerde link olarak kullanılabilirler. Bu tür linklerin yararı şudur; onlara girilen enerjiler AC / DC terminallerinde olumlu bir şekilde denetlenebilir ve reaktif güç taşıyamamaları nedeniyle sistemdeki reaktif salınımları sınırlar. Ancak terminal maliyetleri fazladır ve AC hatlarıyla çalışan normal koşullarda terminallere doğru beslenen reaktif güçlere bağlı sorunlar vardır. Süperiletken kablonun bir başka avantajı da şudur; geleneksel alanlara göre daha düşük voltajda çalışabilmesidir ki bu bazı durumlarda transformatör gereksinimini bile ortadan kaldıracaktır.

3.3.2 AC ve DC Süperiletken Kabloların Karşılaştırılması

Güvenilir ve ekonomik bir kablo sisteminin mümkün olabilmesi için bir çok problem vardır. Bu nedenle ;

a- DC hatlar daima daha düşük ve daha küçük kayıplara sahiptir. Bundan dolayı AC hatlardan daha az pahalıdır.

b- Çevirici sistemin kayıpları ve maliyeti kısa mesafeler için DC hatların asıl avantajlarını tamamen korumaktadır.

c- AC ve DC arasındaki ekonomik geçiş mesafesi, güç seviyesine muhtemelen 150+50 km sistem stabilitesi, kısa devre sınırı ve hata akımları gibi sistemin tüm koşullarının olmasına bağlıdır.

Görüldüğü gibi teknik tartışmaların çoğu, bir çok bakımdan dizaynları kolay olan DC süperiletken kablolar için geçerlidir. AC ve yalıtım kayıpları yoktur ve hatalı akım, gerilim voltaj düzeyleri oldukça düşürülmüştür. DC kabloların AC'ye göre iletken boyutları düşüktür ve eğer yalıtkan stabilizasyonu uygunluk gösterirse boyutta daha çok bir küçülme mümkündür. Her durumda oldukça büyük güç oranları hesaba katılabilir.

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

3.3.3 Süperiletken Kablo Modelleri

Bir AC kablosunda alternatif manyetik alanlar bir sarmaldan ötekine enerji geçirmezler, bu yüzden makinalardakinin tersine manyetik alan genellikle düşüktür. Bu nedenle Tip -1 ya da yumuşak Tip - 2 süperiletken olan niobium kablo yapımında kullanılmıştır. Süperiletken bakır yada Alüminyumla kaplanmış, akım ısınmasını önlemek için de süperiletken ince bir yüzey döşemesi gibi uygulanmıştır. İletken arasında ileri voltajlara dayanabilecek bir yalıtkan oluşturulmuş ve iletkenler ayrıca bir helyum soğutucu akışkanlığıyla temasta bulundurulmuştur. Helyum bir kaç bar basınçta ve

kesinlikle 2.2°K'lik kritik basıncın üzerinde olmalıdır. Yalıtkan ve helyum cryogenic bir örtüyle kaplanmıştır. Bu ısı yalıtımını sağlayacaktır. Cryogenic çevreleme orta ısıda tutulan bir radyasyon perdesi içermektedir ve bu ısı sıvı nitrojen yada ilave helyum akışıyla sağlanmaktadır.

Yukarıda da bahsedildiği gibi, süperiletken kablolar için bir çok değişik süperiletken maddeler karakterize edilip, DC süperiletken kabloların bir çok modeli üretilip test edilmiştir. Nb alaşımları ve bileşenleri arasında düşük kayıplarda yüksek akım taşıma özelliği gösteren materyaller bulunmuş ve süperiletken kablolarda denenmiştir. Nb folye (foil) materyali kullanılarak iletim hatları için d.c süperiletken kabloların ilk modeli imal edilmiştir. Materyal içindeki ac kayıplar, 50 Hz ve 4.2°K'de kalorimetrik olarak ölçülmüştür. İletim hattı için süperiletken kablo imalatında ikinci model olarak Nb-Ti alaşımı materyal seçilmiştir.

3.3.3.1 Nb-Ti Materyallerine Ait Kritik Akım Ölçmeleri

Aktif eleman uzunlukları 100,150 mm. arasında kısa diye nitelendirilen bir çok numunede kritik akım ölçülmüştür. Bu ölçmeler uzun süperiletken kablo modelinin optimizasyonu ve alan kritik akımı değerinin tahmini için yapılmıştır. Kısa tel numunelerinde ve büyük kesitli akım taşıyan numunelerde kritik akımın ölçülmesi için bir d.c akım trafosu kullanılmıştır. Trafonun çekirdeği elektro çelikten yapılmıştır. Sarım oranını yüksekliği nedeniyle cihazın kublaj katsayısının $N_1 / N_2 = 1000$ olması primerde 10 veya 100 A'e tekabül eden 10 kA veya 100 kA akım elde edilmesine olanak sağlar. Sıvı helyum tüketiminin azaltılabilmesi için, primer sargıları süperiletken malzemeden yapılır. Tel sarımlı sekonder, iki kontak bağlantısını gerektirir.

Ölçmeler 18 mm. genişliğinde 13 μ m. ve 150 μ m. kalınlığında saf Nb numunelerinde gerçekleştirilmiştir. 150 A/cm lineer yüke eşdeğer olarak ölçülen kritik akım yoğunluğu, $J=1.17 \times 10^5$ A/cm² dir. Beş defa daha kalın folyede (foil) ölçülen kritik akım, ancak 3.5 kat artmıştır. Burada ölçülen değer 3.33×10^4 A/cm² ve 500 A/cm² dir.

Ölçmeler aynı zamanda 1.5 mm. çapındaki NbTi alaşımından yapılmış karma tellerde de yapılmıştır. 68 adet böyle tel, bakır stabilizasyon borusu çevresine eksenel olarak lehimlenmiştir. Numunede ölçülen en yüksek kritik akım 67 kA olarak ölçülmüş ve zaman sabiti yaklaşık 11 sn tespit edilmiştir.

6 m. 'ye kadar prototip iletken kabloların uzunluğunda dış ölçümler yapabilmek için sıvı azot soğutmalı plakalar ve yüksek vakum izolasyonu ile birleştirilen yatay uzun bir cryostat imal edilmiştir. Cryostat 220 mm. uzunlukta dış çaptan, 5.35 metre uzunluğunda orta kesimden ve 275 mm. çapında taşınabilir iki uç bölümden oluşur. Çalışma esnasında, cryostat 10^{-6} tonluk bir basınca kadar boşaltılır. Helyum cryojen, soğutma kapasitesi 4.5 K'de 150 W ve sıvılaştırma kapasitesi 40 l/h soğutucu ve sıvılaştırıcı ile temin edilebilir. 80 kg. kütleli bir kablo şeklinin soğuma süresi yaklaşık 5 saatir. Cryostat 'ta incelen ilk kablo modeli 13 μ m. kalınlığında ve 20 mm. genişliğinde Nb materyalinden yapılmış bir koaksiyel kablodur. Her katının sekiz paralel bandı mevcuttur. 50 mm. çapındaki alüminyum destek, türbinin tarafına dengeli bir şekilde sarılmıştır. Bu uçta katlar kısa devre edilmiş ve diğer uçta katlar 1000 sarım oranlı DC akım trafosunun tek sarımlı sekonderine bağlanmıştır. Süperiletken katmanlarda 10 kA'e kadar akım böylece üretilmiştir.

Hesaplamalar, 300 Hz'de ve %3 akım dalgalanmasında, bu akım değerinde süperiletken tellerinde AC kayıplarının 0.86 W olacağını göstermiştir. Stabilize bakırda da aynı mertebede kayıplar olabilir. Netice olarak, kablo modelindeki toplam elektrik kaybının yaklaşık 0.3 W/m olacağı tahmin edilmektedir.

Yakın gelecekte, AC kayıpların deneysel ölçmelerinin yapılmasına başlanacaktır. Geliştirilen mevcut bulgular ışığında, değişik kablo maddelerine ait elektriksel mukavemetlerin ve kritik akımların tayini mevcut bulgular olarak prototip süperiletken güç kablosunda, akım kablosunun optimum geometrisini tayin etmektedir.

D.C süperiletken olarak, iletim hatları için uygulanan maddelerden birisi de Nb_3Sn materyalidir. Daha uzun mesafelerde Nb_3Ge materyeli 'de denenmiştir. Nb_3Sn 14°K'de 1000 A/mm²lik bir akım yoğunluğuna sahiptir. Düşük termal iletkenlik ve yüksek elektriki direnç bölgesindeki ısı değişmezlik stabilitesi için çapın uzunluğu 8°K'de 35/ μ m. veya 10°K'de 55 / μ m.'den daha düşük olmak zorundadır.

Süperiletkenliğin elde edilmesinde ve kullanılmasında yada en azından termal uzamaya maruz kalmış bir montaj içerisindeki eklem yerlerinde, sürekli yüksek iletkenlik sağlamanın problemleri çoktur. Özellikle koaksiyel düzenlemelerde, herhangi bir dielektriğin sürekliliğinde gazlar bile sorun yaratabilir. AEG çalışmalarında, Nb_3Sn iletken şeritinin ticari olarak elde edilebileceği görülmüştür.

Aşağıdaki tabloda bir kablo için dizayn parametreleri verilmiştir.

Tablo 3.1 Kablo Dizayn Parametreleri

Hat 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	$J_c = 15000 \text{ A / mm}^2$
Tunç Katılmış Nb ₃ Sn	$J_c = 1000 \text{ A / mm}^2$
Cyrostabilize içinde $\rho = 10^{-10} \Omega \cdot \text{m}$ de	$J_x = 100 \text{ A / mm}^2$
Uygun Görülen Max. Akım Yoğunluğu	
Bakır için Süperiletken Oranı	$RM = J_c / J_x \times \alpha$
Kablolar için Yüzey Faktörü	$g = 1.33$
Max. Dielektrik Gerilme	$E = 10 / 30 \text{ kV/mm}$
Corana Koruyucu Plaka Kalınlığı	0.1 mm
Tunç Zırh Kalınlığı	1 mm
Zırh içindeki Oluk Derinliği	3 mm

Bir DC sistemde enerji kayıpları olmadığı için, bu direk olarak akımın seviyesiyle ilgilidir. Tek bir hat içinde akan akımın büyüklüğünde fiziksel bir sınırlama ve kısa devre aşırı yük değerlendirmesi yoktur. Bu yüzden, her hat için güç dizaynını belirleyen sistemin olasılık değerlendirmeleri olacaktır. 3 hatlı bir sistem için, her hat oranı %44 yada %66 olabilen sistem gücünün sadece 1/3'ünü taşıyacaktır. Sistem voltajı, teknik ve ekonomik koşulların gözönünde bulundurulmasıyla düzenlenir.

Süperiletkenlik, tek parça halinde bulunan süperiletken malzemelerde bile bölümden bölüme değişiklik göstermekte, bazen süperiletkenlik özelliği göstermeyen kısımlar da olabilmektedir. Seramik maddeler kristal yapıdadırlar ve yüksek sıcaklıklarda süperiletkenler, kristal yapıları nedeniyle aralarında boşluklar olan tanecikler oluşturma eğilimindedirler. Elektrik akımı sadece bu taneciklerin birbirine temas ettiği bölümlerde akabilmektedir.

Araştırmacılar, bu yeni seramiği kullanılır hale getirdiklerinde, seramiğin kırılabirliği problem yaratmaktadır. Özellikle kablo yapımında bu önemli bir sorun olmaktadır. Ancak ABD'deki Argonne Laboratuvarı, polimer bağlayıcı bir kablo geliştirerek seramiği bir arada tutmayı başarmıştır.

Süperiletkenlerin soğutulmasında, helyum gazı kullanılmaktadır. Fakat helyum, çok nadir bulunan ve sıvılaştırılması oldukça pahalı bir elementtir ve uygulamaların birçoğunda sıvı helyumun maliyeti, süperiletken teknolojisinin getirdiklerinden daha fazla tutmaktadır. 77°K civarında sıvılaştıran azot gazının bulunması bu soruna bir çözüm getirmiştir. Var olan süperiletken uygulamalarının, sıvı helyum soğutmasından (15°K) sıvı azot soğutmasına (77°K) geçme işleminden çok yaralanacağı açıktır. Çünkü sıvı helyumun litresi 3 paund iken sıvı azotun litresi sadece bir kaç peniye mal olmaktadır. Soğutmadaki maliyetin bu şekilde düşürülmesi süperiletkenliğin kullanımını avantajlı hale getirmiştir.

Son yıllarda, Toshiba firması tarafından ilk süperiletken kablo üretilmiştir. Y-Ba-Cu-O bileşiğinden geliştirilen kablo 94°K'de sıfır dirence ulaşıyordu. 0.6 mm. çaplı çubuklar halinde üretilenlerin sıcaklığı ise 87°K civarındadır. ABD'de Argonne Ulusal Laboratuvarlarında 0.2 mm. çaplı teller üretilmiştir. Bu tellerin yüksek olan mıknatısları için uygulama olanağı vardı, ancak süperiletkenliğin kaybolduğu düşük akımlarda oldukça kullanışsızdı. Akım yoğunluğu sınırı Toshiba için 6 A/cm², Argonne'de üretilen için ise 5 A/cm² idi. bu yoğunluk pratik kullanım için standartların çok altındaydı.

İncelemelerden de anlaşılacağı gibi, sıcaklığı her geçen gün yükselen bu yeni buluşun, yaşamın her alanına girmesi, oda sıcaklığında (yaklaşık 300°K'de) süperiletkenlerin geliştirilmesine bağlıdır. Malzeme bilimcileri, yeni bileşikler elde ederek akım taşıma kapasitelerini arttırmışlardır.

Dileğimiz, oda sıcaklığında süperiletkenlere ulaşılması ve daha yüksek akım yoğunluklarına sahip güç kablolarının iletim hatlarında kullanılmasıdır.

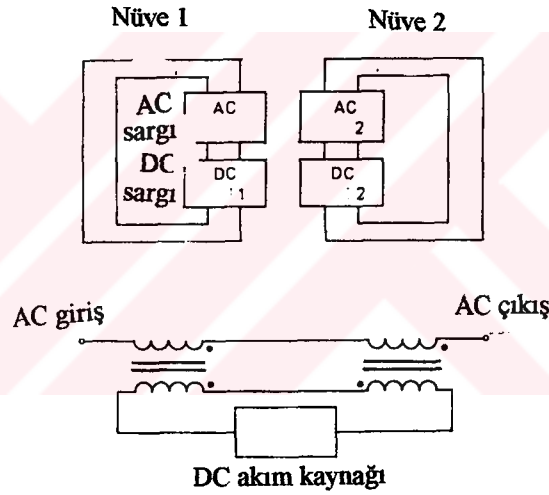
3.4 Akım Sınırlayıcılar

Güç şebekelerindeki akım sınırlayıcı cihazların en önemli fanksiyonu, yüksek gerilim bağlantılarında doğrusal olmayan seri bir empedans temin etmektedir. Belirli bir

kritik seviyenin altındaki akımlar için, empedans küçüktür. Fakat bu seviyenin üstündeki akım değerleri için önemli ölçüde artmaktadır. Böyle bir cihaz özellikle yüksek gerilim seviyelerinde çok daha emniyetlidir ve akım kesicili bir koruma sisteminden daha hızlı cevap verme özelliğine sahiptir.

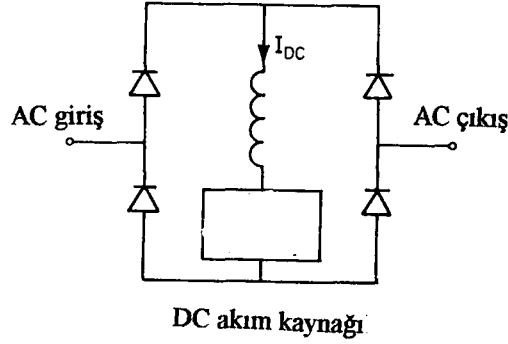
Süperiletkenlerin anahtarlama özelliği, akım sınırlayıcıların yapısında kullanılabilir. Bununla birlikte, eğer süperiletken dirençli hale getirilirse, alternatif bir akım taşır ve sonuçta çok miktarda enerji kaybı ortaya çıkar.

Burada diğer bir seçenek; akım yönüne bağlı olarak bir DC polarizasyon gerilimi tarafından karşılıklı olarak beslenen, ferromanyetik nüveler üzerine yerleştirilmiş non-lineer reaktanslı iki sarım kullanılmaktadır. (şekil 3.3) DC polarizasyon sargısı süperiletken olduğu için, bu devrede işletme kayıpları da çok düşük olacaktır.



Şekil 3.3 Doymuş endüktanslı hatalı akım kesici

En son olarak, DC polarizasyonlu bir redresör köprüsünün non-lineer davranışı, akım kesicilerde kullanılarak Şekil 3.4'de görülen devre modeli ortaya konmuştur. Bu devrede DC polarizasyon gerilimi süperiletken sargılara seri bağlı olan bir akım kaynağı tarafından sağlanmaktadır.



Şekil 3.4 Redresör köprülü hatalı akım kesici

Her ne kadar bu iki devre konvansiyonel akım kesicilere rakip olarak gösteriliyorsa da, şimdiye kadar hiçbiri uygulamada kullanılır hale getirilememiştir. Zaten, konvansiyonel akım kesicilerin güç şebekelerine montajı da ancak şu sıralarda gerçekleştirilebilmiştir. Bununla birlikte, güç şebekelerindeki non-lineer empedansların istenmeyen yan etkilere yol açtığı da bilinmektedir.

3.5. Süperiletkenliğin Elektronikteki Uygulamaları

Şu anda süperiletkenliğin iki büyük ilgi alanlarından biri elektronik ve medikal mühendisliğidir. Medikal teknoloji, magnetik rezonans tomografi için yüksek homojen DC mıknatıslar şeklinde süperiletkenliğin en büyük kullanımınıdır. 0.5 T 'dan 2 T 'ya sıralanan mıknatıslar ile hemen hemen 1500 sistem, şimdiden dünyada yaygın işletim içindedir. Siemens laboratuvarları tarafından 4 T 'lık bir mıknatıs yapılmış ve geliştirilmiştir. Bu mıknatıs, magnetik rezonans tomografisindeki ileri araştırmalar için kullanıldı. Tomografide kullanılan 77°K'lık bir süperiletken, standart 1 T 'lık mıknatısın giderlerini % 15 civarında düşürecek ve 5 yıllık bir periyot üzerindeki soğutucunun giderlerinde aşağı yukarı 250.000 DM'lık 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 kompütörlerinin lojik devrelerinin gelişimi için yüksek bağlamalı bir yoğunluk ile büyük kapasiteler yaptılar.

Uygulanmaya konmalarıyla bilgisayarlar daha küçük ve daha hızlı şekilde üretilebileceklerdir.

3.6. Süperiletken Güç Transformatörleri

Süperiletken güç transformatörleri teknik olarak çok tartışılan yeni uygulamalardan biridir. Süperiletkenlerdeki AC kayıplar bu transformatörlerde kompleks bir dizayn ve yüksek teknoloji ürünü elemanlar kullanılmasını zorunlu kılar.

Güç transformatörlerinde süperiletken sargıların kullanılması fikrini ilk ortaya atan R. McFee'dir. McFee'nin süperiletken güç transformatörleriyle ilgili olarak yaptığı araştırma hakkında kısaca şunlar söylenebilir: Böyle bir transformatörde manyetik nüve normal sıcaklıklarda işletilmelidir; böylece nüvede meydana gelen kayıplar soğutucuya yüklenmeyecektir. Cryostat içindeki sıcaklık eğer 4.2°K seviyesinde tutulursa, mükemmel bir Carnot çevrimine sahip soğutucuda bile, 1 W soğutma gücü elde etmek için, yaklaşık 70 W'lık giriş gücüne ihtiyaç duyulur.

1960'lı yılların başında nominal gücü birkaç kVA olan deneysel amaçlı transformatörler yapıldı. Ancak bu deneysel çalışmalarda yer alan işçiler her nedense, süperiletken transformatörlerin teorik analizi ve ekonomik değerlendirmesi üzerinde çalışmalarını yoğunlaştıran araştırmacılar tarafından tartışılan, süperiletken transformatörlerin uygulanabilirliği konusunda olumsuz tavır aldılar. Ekonomik değerlendirmelerin sonucunda süperiletkenlerin; ne transformatör sargıları tarafından oluşturulan manyetik alanların, ne de sargılarda meydana gelen çok büyük kayıpların üstesinden gelebileceği anlaşıldı. Süperiletken transformatörlerin imal edilebilmesi için bu manyetik alanlar küçük değerlerde olmalıdır; böylece bu transformatörler diğerlerine oranla daha büyük ve ağır olacaktır. Buna ilaveten, uygun boyutlarda dizayn edilmiş böyle bir transformatör, aşırı yük akımlarını kontrol edemeyecektir.

K.J.R. Wilkinson'un bu konudaki araştırmaları, o yıllarda yapılan en mükemmel çalışma olarak kabul edilmektedir. Zamanın teknik normlarından tamamen farklı özelliklere sahip süperiletkenlerin hipotetik bir uygulaması olan Wilkinson'un projesiyle, bu tarihten 15 yıl sonra yapılan çalışmalar arasında olağanüstü bir benzerlik vardır. Fakat, henüz mevcut olmayan bir materyalin kullanılması halinde bile, ekonomik kar ile ilgili şüpheler sözkonusuydu.

1960'lı yılların ikinci yarısında, İngiliz Sanayi Kuruluşları tarafından oluşturulan bir araştırma grubu, süperiletken transformatörlerin uygulanabilirliğini araştırmak üzere başlatılan ortak çalışma programının sorumluluğunu üstlendi. Daha sonraki günlerde, bu grupta yer alan bazı araştırmacılar, çalışmalarını sonucunda ulaştıkları noktayı, yayınladıkları bir makale ile bilim çevrelerine duyurdular. Bu araştırmalar sonucunda geliştirilen 600 MVA'lık bir generatör transformatör, aynı nominal güce sahip konvansiyonel bir transformatörden çok daha büyük ve ağırdı. Üstelik maliyetide diğerlerine göre çok yüksekti . Aşırı yük taşıma kapasitesi de, en iyi süperiletkenlerin bile akım taşıma kapasitesine ilişkin standartları ve sargılardaki kayıpları azaltmayı aynı anda sağlayamayacağı sonucuna varan R. V. Harrowell tarafından incelenmiştir.

Süperiletken enerji hatları ve genaratörler üzerindeki araştırmalar devam ederken, süperiletken transformatörler hemen hemen ortadan kayboldu. 1976 yılında, teknolojik gelişmeler dikkate alınarak Wilkinson'un araştırmaları yeniden gözden geçirildi. Bu son çalışma bilim adamlarını ve sanayi kuruluşlarını harekete geçirerek; büyük ölçekli güç transformatörlerinde süperiletkenlerin kullanımına ilişkin araştırmaları yeniden gündeme getirdi.

* Nedensellik prensibi bu çalışmalarda işlevini kaybetmişti. Fakat bir kaç yıl sonra, Westinghouse ABD Enerji Dairesi için bir araştırma programı başlattığını açıkladı. Bu program, elektriksel, mekanik ve ekonomik olarak değerlendirilen 1000 MVA'lık yükseltici bir transformatörün tasarımını içeriyordu. Söz konusu transformatörde süperiletkenlerin dışında kalan metaryallerin kullanılması düşünülüyordu. Çok filamanlı iletkenler ise laboratuvar bazındaki uygulamalarda kullanılıyordu ve bir kaç yıl içinde bu iletkenlerin imalatçılar tarafından standart olarak kabul edilmesi bekleniyordu.

Bu araştırmalar sırasında transformatör sargılarıyla ilgili olarak iki önemli problem ortaya çıktı. Bunlardan ilki, süperiletkenlerdeki AC kayıpların azaltılıp azaltılamayacağı sorunu; ikincisi de süperiletken sargıların aşırı yük korumasıydı. Kısa bir süre sonra, J.E. Jones ve R. V. Harrowell tarafından ortaklaşa gerçekleştirilen bir çalışmayla, fazladan bir bobin takımı içeren yeni bir sistemin patenti alındı. Transformatör sargılarının güvenilirliği ve elektriksel dayanımı ile ilgili bir çok sorun Westinghouse'da yapılan deneysel çalışmalarla çözüme ulaştırılmıştır.

* Nedensellik : Nedensiz hiçbir şeyin meydana gelmeyeceği kuralı.

Konuyu kısaca özetleyecek olursak; süperiletken güç transformatörlerinde derinlemesine incelenmesi gereken iki konu vardır: AC kayıplar ve aşırı yük koruması. Bu amaçla yapılan araştırmalardan elde edilen sonuçlar aşağıdaki bölümlerde sunulmaktadır.

3.6.1 Süperiletken Bir Transformatörün Genel Özellikleri

Transformatör sarımında süperiletkenlerin kullanımı, onu bilinen tarzda ve bakır kullanılarak oluşturulan transformatörlerden farklı kılar. Hatta bazı araştırmacılar sheel-tipi yeni transformatörler veya demir içerikli madde kullanılmadan transformatör oluşturulması gibi yeni kavramlar üzerinde çalışılması gerektiğini ileri sürmektedirler. Ancak bunlardan hiç birinin bilinen nüve tipi ile yapılanlardan; maliyet, çalışma karakteristiği elektriksel özellikler ve boyutlar açısından daha iyi olduğu kanıtlanamamıştır.

3.6.1.1 Boyutlar

Süperiletken sarımlı bir transformatör ile bakır sarımlı bir transformatör cryostat ve soğutma sistemi dışında hemen hemen aynı boyutlardadır. Süperiletken sarımlı bir transformatörde aşağı yukarı üç bobin seti yer kaplayacak kadar bir manyetik nüve vardır. Farklılık ise maliyette, kullanılan malzemede ve kayıpların miktarı gibi parametrelerde ortaya çıkmaktadır. Yüksek akım yoğunluklu transformatörler bile, boyut olarak bilinen transformatörlerden daha küçük boyutlardadır. Bu da yapımda kullanılan malzemelerden kaynaklanmaktadır.

3.6.1.2 Sargılar

Sargıların 10°K 'den daha düşük sıcaklıkta çalışma zorunluluğu olduğundan, sargılar bir cryostat içine alınmıştır. Dolayısıyla oda sıcaklığında olduğu kadar, çok düşük çalışma sıcaklığında dahi (cryogenic ısı) aynı kayıpları veren demir nüve oda sıcaklığında tutulur. Her bir bobin seti, nüve ayakları etrafına yerleştirilebilen, ayrı bir dairesel cryostat içine konmak suretiyle çok itinalı bir şekilde dizayn edilmiştir. Böylece aşırı akım çekilmesi durumunda bunun bilinen tarzdaki trafolarla olan zorlayıcı etkileri her bir bobin setine dağıtılmış olur; dolayısıyla aşırı akımlarda diğer trafolardan daha rahat bir çalışma elde edilmiş olur. Ancak çok ince süperiletken sarım kulanamının sebebi bu

değildir. Süperiletken sarım yapısı gerekli olan mekanik sertlik ve sağlamlığı sağlayacak şekilde dizayn edilmiştir. Kriostatlar ise fuko akım kayıplarını karşılaması amacıyla sarımların, alternatif manyetik alanı içine yerleştirilmiştir. ve non-metalik olma zorundadırlar.

Tam olarak açıklarsak; primer ve sekonder sargıların süperiletken olma zorunluluğu yoktur. J. E. Jones tarafından oda sıcaklığında işletilen, yüksek gerilim sargıları bakır, alçak gerilim sargıları ise süperiletken olan diğer bir transformatör dizaynında düşünülmektedir.

3.6.1.3 Cryogenic Sistem

Sarımların soğutulması için değişik teknikler düşünülmüştür. Bazı araştırmacılar helyum içeren sıvı soğutmayı tercih ederken, bazıları da basınçlı hava ile soğutmayı tercih ederler. Bu düşünceden hareketle T_o ısı düzeyinden, T_1 ısı düzeyine bir saniyedeki ısı transferi (P_o , Joule/saniye) için gereken minimum mekanik güç P_r aşağıdaki formül ile bulunur:

$$P_r = \frac{T_1 - T_o}{T_o} P_t \quad (3.1)$$

Helyum gazı veya sıvılaştırılmış helyum kullanılarak oluşturulan soğutucu kullanıldığında 5 °K civarında % 30 verim alınıyorsa sonuç çok iyi kabul edilir. Burada soğutma için gereken verim, cihazın gerçek güç harcaması ile hesaplanan güç P_r arasındaki fark olarak düşünülmüştür. Yakın gelecekte bu şeklin geliştirileceğine dairde herhangi bir görüş bulunmamaktadır. Ancak verilen bir P_t yük ısısında, 4.2 °K 'den daha yüksek bir T_o sıcaklığında cryogenic sistemle çalışmak soğutucunun giriş gücünü düşürecek önemli bir kolaylıktır. Bu sebepten dolayı Feldman elektriksel yalıtım için gerekli olan çalışma sıcaklığını $T_o = 6$ °K olarak kabul etmiştir; hatta bu ısı 20 °K 'e kadar yükselebilir. Westinghouse dizaynında, 5.2 °K ile 10 °K arasındaki ısılarda, hatta oluşabilecek daha yüksek sıcaklıklarda 6 Bar'lık süperkritik helyumu kullanmaktadır.

NbTi 'un kritik sıcaklığı 9.4 °K ve Nb₃Sn 'nin ki ise 18 °K olduğundan her iki araştırmacıda iletken materyal olarak Nb₃Sn 'yi tercih ederler. Fakat bunlardan biri fikir

ayrılığına düşerek, 4.2 °K 'den daha yüksek sıcaklıkta NbTi 'den oluşan süperiletken transformatörle çalışmayı tercih etmiştir.

Cryostat duvarlarından ısı kaçaklarını minimuma indirmek amacıyla vakumlu iç ve dış duvar arasında, tercihan sıvı nitrojen ile soğutulan bir yansım ekranı bulunur. Feldman ve Lorch'un projesinde ise cryostatda iç duvar bulunmamalıdır, dahası tümüyle boş olmalıdır. Lorch, demir nüveyi etrafında yağ ile soğutulan bir yansım yüzeyi bulunan bir cryostat içine yerleştirmiştir. Böylece üç ayrı cryostat arasında non-metalik bir metal kullanmaya gerek kalmamaktadır.

3.6.1.4 Dielektrik Kayıplar

İzolasyon malzemelerinin elektriki polarizasyonu ve histerezis etkilerinden dolayı oluşan kayıplar, direlektrik kayıplardır. Bu kayıplar manyetik materyallerde oluşan manyetik histerezis ile karşılaştırılabilirler; ve

$$P_d = \omega \epsilon_0 \epsilon_r E^2 \tan \delta \quad (3.2)$$

formülü ile hesaplanırlar. Bu formüle göre P_d , birim hacimdeki dielektrik kaybı, elektrik alanın tepe değeridir; dielektrik sabiti ise $\epsilon_0 = 8.9 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ ile bulunur. ϵ_r ise 2 ile 4 aralığında kullanılan en pratik dielektrik materyalin bağıl izolasyonunu belirtir. δ 'da materyalin kayıp açısını verir. $\tan \delta$ ise 10^{-4} ile 10^{-3} arasında değişen bir değer olup, cryogenic sıcaklıkta ve oda sıcaklığında sonuç verir. Buna rağmen çıkan değer oldukça düşüktür.

E^2 'de izolasyon kapasitesinin ortalama bir değeri olmalıdır. Açıkça görülmektedir ki; aşırı elektrik yüklemesinden kaçınmak sadece güvenli bir izolasyon için önemli olmakla kalmayıp, P_d 'yi en düşük düzeyde tutmanın da bir yöntemidir. Feldman'ın 570MVA kavramsal bir transformatör için hesapladığı dielektrik kaybı her bobin seti için 262W, toplam olarak 786W 'dır. Wilkinson ise daha düşük kayıp açısı ve dielektrik sabiti kullanarak 54W civarında bir kayıp hesaplamıştır. Bu kayıplar konvansiyonel transformatörlerde de aynı miktardadır. Bu Feldman'ın dizayn ettiği transformatörlerdeki 0.81 MW 'lık nüve kaybı ile karşılaştırıldığında oldukça önemsizdir. (Dielektrik kayıpları ile nüve kayıpları arasında bir karşılaştırma yapılmaktadır, çünkü her ikisi de gerilime bağlıdır ve bunlar boşta çalışma kayıplarının bir parçası olarak kabul edilirler)

Som izolasyon malzemesi kullanımından kaçınmak için tercih edilen değişik bir yaklaşım ise; ya 6 Bar'lık basınçta süperkritik helyum kullanmak ki bu aynı zamanda soğutucu olarak çalışır veya cryogenic ortam ile oda sıcaklığı arasında bir termal sınır olarak her an ihtiyaç duyulan vakum yöntemini kullanmaktır. Birinci yaklaşımda, kullanılan materyallerin yapısından dolayı tahmin edilen dielektrik kaybı 264 W 'dır; ki bu gözardı edilemeyecek bir değerdir. İkincisinde ise bu kayıp 10 W seviyesine çekilmiştir. İzolasyon konusundaki bu çalışmalar oldukça ümit vericidir. Buna rağmen her iki çalışma üzerinde de, daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

3.6.1.5 Akım Uçları

Akım beslemesi ile ilgili birbirleriyle çelişen iki görüş mevcuttur; bunlardan biri yüksek gerilim izolasyonu diğeri ise iletkenlerin ısı kaçakları ile cryostat içine sızan çalışma sıcaklığının dengelenmesidir. Normal bir akım ucunda 4.2°K 'deki ısı yükü hesaplanabilir; termal izolasyonlu bir akım ucunda bu değer 45 W/kA 'dır, buna karşın buharlaştırılmış helyum gazının akışıyla mükemmel soğutulan bir akım ucunda bu değer 0.64 W/kA'dir. Westinghouse raporlarında cryogenic cihazlar için çok değişik tipte yüksek gerilim kovanları geliştirildiği de bildirilmiştir.

Transformatör dizaynı sırasında 4.2°K 'deki ısı yükünü Wilkinson 470W olarak tahmin etmiştir. Feldman bu değeri 40W 'a çekmiştir. (muhtemelen faktör hatası yapmış gibi görünüyor) Westinghouse grubu ise bu değeri 88W olarak bulmuştur. Lorch giriş uçlarının soğutma ihtiyacı için gereken toplam giriş gücünü 107kW olarak hesaplamıştır. Bu değer onun 4.2°K 'deki 140W 'lık soğutucu hesaplamaları ile uyushmaktadır. Bütün bu araştırmacılar kabaca primer ve sekonder gerilim seviyeleri olan 500 ile 1000MVA 'lık bir transformatör üzerinde çalışmışlardır. Sonuçlar arasındaki fark ise esas olarak soğutma tekniğinden kaynaklanmaktadır. Bunun yanında orta ısı seviyelerindeki ısı yüklerinin soğutma durumu ve örneğin; sıvı nitrojenin etkileri gibi konular tam açık ve net olarak verilmemiştir.

3.6.2 Süperiletken Transformatörlerin Avantajları ve Dezavantajları

Süperiletken güç transformatörleri ile ilgili olarak başlatılan ilk çalışmalardan biri "süperiletkenliğin ana faydalarının daha etkili hale getirilmesi" fikri ile açıldı. Bu fikir ortaya atıldığında, Tip-2 süperiletkenlerinin AC davranışları konusunda çok az bilgi mevcuttu ve bu süperiletkenler mükemmel olarak biliniyordu.

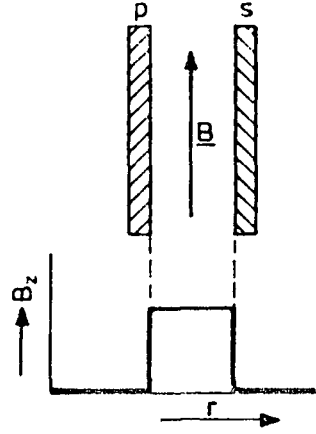
Bu bilgiler ve dökümanlar artmaya başladıkça süperiletkenler hakkındaki bu görüş çabucak yavaşladı; ve yüksek güçlü cihazlarda Tip-2 süperiletkenlerinin kullanılmasının daha uygun olabileceği düşünüldü. Ancak bunun yüksek güçlü AC cihazları içinde pek uygun olmadığına karar verildi. Bu konu üzerinde yapılan araştırmalarda düşük AC kaybı elde edilmesi hala önemli bir amaç olarak geçerliliğini korumaktadır. Feldman kayıpların düşük olmasının çok önemli olduğunu açıkça ifade etmiştir. Bununla birlikte diğer avantajları gözönüne alındığında süperiletken transformatörlerin geliştirilmesi doğrultusundaki çalışmaların sürdürülmesini etkilemektedir. Süperiletkenlerin diğer avantajları ise; boyut ve ağırlıktaki küçülme, kendi içerisinde bir akım sınırlayıcı olarak çalışmaları ile değişken ve çok amaçlı özellikler olarak kendini göstermektedir. Bu görüşler, birbirine bağlı olmakla birlikte aşağıda açıklanacak bazı fikirlerede aykırı düşmektedir.

3.6.2.1 Ağırlıktaki Azalmaya Karşı AC Kayıplar

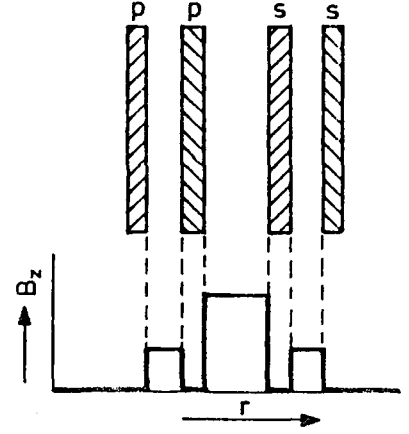
Son 5,10 yıldaki AC uygulamalara bakıldığında çok filamanlı iletkenlerin bu çalışmalar için daha uygun olduğu görülmektedir. Ancak Feldman ve ondan öncekiler Tip-1 süperiletken şerit sargıları kullanmak zorunda kalmışlardır. Manyetik endüktansı B_{c1} 'den daha yüksek olan Tip-2 süperiletkenlerin kullanılması ise, son derece yüksek AC kayıpları ortaya çıkarmıştır. P. A. Klaudy kadar A. Mailfert ve G. Fournet'in çalışmalarıda dikkate değer bir istisnadır. Çünkü bu araştırmacılar düşük manyetik alanda tek kutuplu süperiletken kablo kullanmışlardır.

Tip-1 süperiletkenin olumsuz yönü, iletken içindeki manyetik alan sıfır olduğundan, sadece tek katlı bir bobinden oluşur. Şekil 3.5 (a)'da iki tek tabakalı sarım arasındaki manyetik alan ve karşı akımlar görülmektedir. Şekil 3.5 (b)'de ise ikinci tabakada, süperiletkende gereksiz bir yük oluşturmaktan başka bir işe yaramayan demanyetize bir akım akmaktadır. Bu, transformatörün en azından normal çalışma koşulları ile bağlantılıdır. Süperiletkenlerin yüzey manyetik alanı, Tip-1 süperiletkenleri için B_c , Tip-2 süperiletkenleri için ise B_{c1} 'i aşmamalıdır. Klasik tip transformatörlerde nominal akım için kaçak manyetik alanın tepe değeri $B_L=0.3T$ olmasına karşın, süperiletken transformatörlerde bu değer militeslanın bir kaç onluk değeri ile sınırlıdır. B_L üzerindeki sınırlamaların dışında, süperiletkenin diamanyetik davranışları bobin uçlarında akım yığılmasını önlemek amacıyla bobin bitiminde özel ölçümleri gerektirir. B_L 'deki

değişmelerin önemini kavrayabilmek için P.H. Borchers bazı temel kuralları formül haline getirmiştir.



Şekil 3.5(a) Tip-1 Süperiletkenin iki tek tabakalı bobin arasındaki alan profili.



Şekil 3.5(b) Tip-1 Süperiletkenin iki çift tabakalı bobin arasındaki alan profili.

$$\omega L_{\sigma} I_N = u_z U_N \quad (3.3a)$$

$$\omega L_{\sigma} I_N^2 = u_z S_N \quad (3.3b)$$

Burada S_N değeri transformatörün nominal görünür gücüdür. (Bütün hesaplamalar tek fazlı transformatörler içindir) I_N , nominal akımın tepe değeri ile $1/\sqrt{2}$ 'nin çarpımı sonucu bulunan RMS (efektif) değeri, $u_z \cdot S_N$ ise kaçak aralığındaki manyetik enerji miktarı ile orantılıdır.

$$U_z \cdot S_N = \frac{\omega}{2\mu_0} \iiint |\mathbf{B}|^2 dV \quad (3.4)$$

Sarımlar arasındaki manyetik alanı ele alalım, bu Denklem (3.4)'de verilen integralin homojen ve B_L 'ye eşit olan esas değerini verir.

$$u_z \cdot S_N = \frac{\omega}{2\mu_0} B_L^2 V_L \quad (3.5a)$$

$$V_L = \frac{2\mu_o S_N}{\omega B_L^2} u_z \quad (3.5b)$$

Burada V_L , bobinler arasındaki kaçak aralığın hacmidir. Bunun yanında,

$$B_L = \frac{\mu_o n \sqrt{2} I_N}{\ell} \quad (3.6a)$$

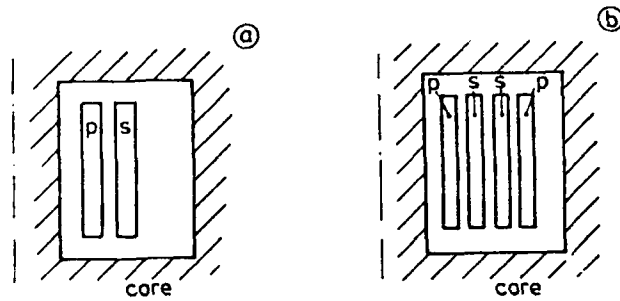
eğer bobinler m kadar koaksiyonal çifte bölünürse (Şekil 3-6)

$$B_L = \frac{\mu_o \cdot n \cdot \sqrt{2} I_N}{m \cdot \ell} \quad (3.6b)$$

Bunlara ilaveten:

$$U_N = \frac{n}{\sqrt{2}} \omega A_y B_y \quad (3.7)$$

şeklinde bulunacaktır. Burada A_y nüvenin kesit alanı, B_y ise nüve içindeki manyetik akı yoğunluğunun tepe değeridir. Bu, denklem (3.6) ve (3.7)'nin birleştirilmesiyle elde edilen formül ile bulunur.



Şekil 3.6 (a)'daki tek primer ve tek sekonder sarımın, m sayıda çift primer ve sekonder sarımlı bir bobin setine dönüşümü.

$$\ell A_y = \frac{2\mu_o S_N}{m\omega B_y B_L}. \quad (3.8)$$

Eğer $\ell = h_c$ nüve pencerelerinden birinin yüksekliği olarak kabul edilirse, nüve ayaklarından birinin hacmi V_c nüve hacmi dikkate alınarak şöyle bulunacaktır;

$$V_c = \frac{2\mu_o S_n}{m\omega B_y B_L}. \quad (3.9)$$

Denklem (3.5) ve (3.9)'da bulunan yaklaşık formüller Borcherd'in çalışmalarında çok az farkla bulunmuştur.

Bobin setinin yarıçapı $\sqrt{(A_y / \pi)}$ olarak kabul edilirse, kaçak aralığının hacmi şöyle bulunur:

$$V_L = m \cdot \ell \cdot d_i \cdot \sqrt{(A_y / \pi)} = \frac{m V_c d_i}{\sqrt{(\pi A_y)}} \quad (3.10)$$

Burada d_i primer ve sekonder sargılar arasındaki ortalama izolasyon aralığıdır.

Denklem (3.5) ve (3.10), denklem (3.9) ile birleştirildiğinde çıkan sonuç;

$$u_z = \frac{B_L d_i}{B_y \sqrt{(\pi A_y)}} \quad (3.11)$$

Bu süperiletken bir transformatörün, ω ve B_y değerleri sabit, S_N , U_N ve I_N değerleri aynı olan konvansiyonel bir transformatörle değiştirilmesi anlamına gelir. Burada eğer B_L değeri q faktörünün etkisiyle azalıyorsa, u_z değerinde aynı faktörün etkisiyle

yükseleceği kabul edilmek zorundadır; veya d_i ve A_y boyutlarından biri uygun hale getirilmelidir. Burada A_y 'nin arttırılması iyi bir seçim değildir, çünkü bunun anlamı transformatör spir sayısının denklem (3.7)'ye göre q^2 oranında artması demektir. (Hatta q^3 ile m artacak olsa bile) Burada mümkün olan daha büyük bir d_i değerinin kullanılmasıdır. Fakat hata transformatör ölçülerinde ve ağırlığında hata olarak karşımıza çıkar. Bunu denklem (3.6b)'ye ilave edersek, her durumda $m \cdot \ell$ çarpımı bir q faktörü kadar artacaktır; ve transformatörde en az bir q faktörü kadar daha ağır hale gelecektir.

Sonuç olarak aynı ölçülerde veya daha küçük bir transformatörün elde edilmesi için B_L 'nin aynı değerinde veya daha yüksek seçilmesi gerekir. Tip-1 süperiletken uygulamaları bizim şu andaki konumuz dışındadır.

Boyutların düşük tutulması konusu, güç yoğunluğuna bağlıdır. Burada belirtilen transformatörün nominal gücü, $A_y \cdot A_{cu}$ çarpımıyla bağlıdır. Oranlamanın sabitliği, sargılardaki akım yoğunluğu ve nüvedeki manyetik akı yoğunluğu B_y 'yi kapsamına alır. Süperiletkenlerdeki akım yoğunluğunun, bakırdan daha yüksek olması ve sabitin yükselmesi, transformatör boyutlarında küçülmeye yol açar. Ancak şu anda bizi ilgilendiren konu, 380 kV hatta 500 kV seviyesinde bir yüksek gerilimde çalışacak, tek sarımlı yüksek gerilim transformatörüdür. Böyle bir transformatörde hatta bakır sarımlılarda bobin setleri arasında izolasyon malzemeleri bulunur. Böylece iletkenlerden geçecek akım yoğunluğu daha fazla olabilecektir. Ancak bunu sağlamak için yeni parametreler kullanılarak transformatör boyutlarını belirlemek, sonuçta sadece boyut ve ağırlıkta çok küçük değişiklikler meydana getirir.

Wilkinson'un $u_z = \% 16$ ile en iyi dizaynı elde ettiği 570 MVA (3 faz)'lık bir transformatör, ağırlık olarak klasik tipteki bir transformatörün $\% 39$ 'u kadardır. Westinghouse'un bu konudaki çalışması ise $u_z = \% 12$ ile 100-1000 MVA aralığında, normalin $\% 64$ 'ü ağırlıkta olan bir transformatör eldesiyle sonuçlanmıştır.

3.6.2.2 AC Kayıplara Karşı Aşırı Yüklenme Kapasitesi

AC kayıpları minimuma indirmek için gerekli olan koşullar, kullanılan süperiletken materyalinde minimuma indirilmesi gerektiğini göstermektedir. Zira kayıplar direk olarak süperiletkenin miktarına bağlıdır. AC kayıpların oranı ve akım taşıma kapasitesi, manyetik

alanın genliği, frekansı ve filaman çapının çarpımının, güvenlik faktörüne bölünmesine eşittir.

$$P_{1s} \approx \frac{\sqrt{2}}{\gamma} dB_L f \quad (3.12)$$

Burada P_{1s} 'e esas etkinin manyetizasyon kayıplarından olduğu kabul edilir. Sarımda q faktörünün etkisiyle meydana gelen fiziki boyut artışı γ 'da azalma anlamındadır, bu da aynı faktörle birlikte buna bağlı kayıpları arttırır.

Klasik tipteki transformatörlerin iletkenleri kısa devre durumundaki aşırı akım ve enerji sarfiyatını yüklenebilecek kapasitededir. Çünkü bunların ısı kapasitesi enerji kaybı için gerekli olan süre, bir güç sistemindeki devre kesicilerin anahtarlama ve cevap süresine eşit olacağından, yeterince büyüktür. Eğer devre kesiciler normal çalışıyorsa bu süre saniyenin bir kaç ondalığını geçmez. İki saniyeyi geçen bir devre kesici için, arıza durumunda, elektriki olarak birinciden daha ağır çalışan devre kesiciler devreye girerler. Eğer sadece belirli bir akım ve bununla birlikte % 50 ile %100 güvenilirlik payı veren, AC kayıpları sınırlanan bir transformatör tasarlanıp; süperiletken sarım ölçüleride ona göre belirlenirse, böyle bir transformatör kısa devreye karşı korumalı değildir. Süperiletken ise kendisinin zaten yüksek olan iç direnci sebebiyle, aşırı akım çekildiği durumlarda çok yüksek miktardaki enerjiyi kendi üstünde sönmölendirebilir.

Tamamiyle sönmölendirilmiş bir bobinde normal direnç, transformatörün çalıştığı akımdan biraz daha düşük olan akımı sınırlayacak kadar yüksektir. Bu ise, McFee tarafından ortaya atılan gerçek sınırlama özelliğidir. Ancak bu biraz sonra hesaplanacak olan ortalama yayılma için çok yüksektir. Bu hesaplama sadece örnek olarak verilmiştir.

Sekonder kısa devresi halinde, eğer direnç ωL_g 'dan büyük ise karşı yöndeki gerilim yaklaşık olarak primer gerilimine eşit olacaktır. Eğer bobin normal durumda ise

$$R = \frac{2\pi\rho_{\text{eff}}r_c \cdot n}{A} \quad (3.13)$$

ρ_{eff} iletkenin özgül direnci, A iletkeninin kesit alanı ve r_c 'de bobinin ortalama yarıçapıdır. RMS primer gerilimi;

$$U_p = \frac{n\omega A_y B_y}{\sqrt{2}} \quad (3.14)$$

RMS akım yoğunluğu;

$$J_n = \frac{U_p}{R \cdot A} = \frac{\omega A_y B_y}{2\sqrt{2} \pi r_c \rho_{\text{eff}}} \quad (3.15)$$

Birim hacimdeki ortalama yayılma ise ;

$$P_q / V = \rho_{\text{eff}} J_n^2 = \frac{(\omega A_y B_y)^2}{8\pi^2 r_c^2 \rho_{\text{eff}}} \quad (3.16)$$

şeklinde bulunacaktır.

Adiyabatik ısı artışı ise;

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_{\text{eff}}} \cdot P_q / V \quad (3.17)$$

olacaktır.

Burada C_{eff} iletkenin birim hacmindeki özgül efektif ısıdır.

T_o 'dan T_1 'e ısı artışı için;

$$\int_{T_o}^{T_1} C_{\text{eff}}(T) dT = \int_{t(T_o)}^{t(T_1)} P_q / V dt = (t(T_1) - t(T_o)) \cdot P_q / V \quad (3.18)$$

Burada $T_1 = 100 \text{ }^\circ\text{K}$ alınmıştır. $T_0 = 4.2 \text{ }^\circ\text{K}$ için denklem (3.18)'in sol integrali 10^8 J/m^3 olur. Denklem (3.16)'nın sayısal değerini hesaplamak içinse, Westinghouse'un referans dizaynının bazı parametreleri kullanılacaktır. Bunlar $A_y = 1.2 \text{ m}^2$, $B_y = 1.75 \text{ T}$ ve $r_c = 0.9 \text{ m}$. 'dir.

$\rho_{\text{eff}} = 3.10^{-7} \Omega\text{m}$ olarak alınırsa, $P_q / = 2.10^{10} \text{ W/m}^3$ olacaktır. Eğer primer ve sekonder bobinlerinin her ikisinde normal durumda ise, elde edilecek değer yukarıda bulunan değer yarısı kadar olur. Böylece $(t(T_1) - t(T_0))$ değeri ise, birkaç milisaniye olarak bulunur ki, bu harici bir koruma sistemi ihtiyacı gösteren değerden daha düşüktür. Isının iletken soğutucu sistemine transferi için gereken zaman sabiti ise bu değerden daha düşük olmalıdır. Bu da çok kısa bir zaman aralığında mümkündür. Fevrier en son geliştirilen düşük kayıplı çok filamanlı iletkenlerin ρ_{eff} değerinin daha önce yapılan hesaplamalarda çıkan değerle hemen hemen aynı olduğunu ileri sürmektedir. Bu da iletkenlerin aşırı akım sınırlayıcısı olarak güvenle kullanılabileceğini ortaya çıkarmaktadır. Bu bizim sonuçlarımıza göre çok iyimser bir bakış açısıdır.

Tablo 3.2 Süperiletken Güç Transformatörleri Üzerinde Yapılan Dizayn ve Fizibilite Çalışmaları

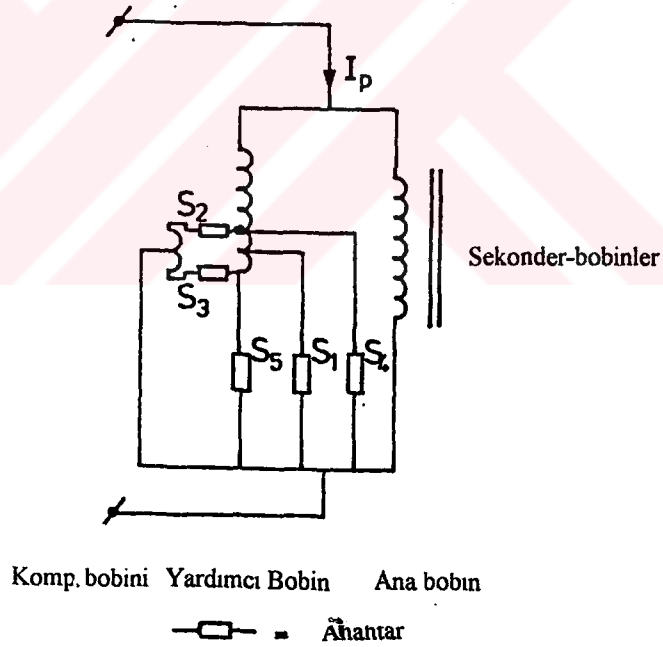
Araştırmacı ve Tarih	Wilkinson (1963)	Lorch (1969)	Harrowell (1970)	Feldman (1977)	Riemersma (1979 / 1981)
Üzerinde çalışılan konular					
İletken tipi	0	0	0	0	0
İletken kayıpları	0			0	0
Akım beslemesi		0			0
Aşırı akım taşıma	0	0	0	0	0
Yardımcı sargıların kullanılması			0		0
Manyetik kuvvetler	0		0		0
Bobin ayırıcı	0	0		0	
İzolasyon	0	0		0	0
Isı kaçakları	0	0		0	0
Kriostat dizaynı					0
Soğutucu maliyeti ve verim				0	0
Boyut			0		0
Enerji ekonomisi				0	0
Genel ekonomi	0	0	0	0	0
İletkenin soğutulması		0			0
Nominal değer, boyutlar ve yorumlar	570 MVA 400/22 kV sıradan bir transformatörün %39'u kadar ağırlık	600 MVA 400/22 kV taşıma ağırlığı 220 Ton	600 MVA 400/22 kV hava göbekli toroid sanım ihtimali	570 MVA 400/22 kV 118 Ton (sıradan bir transformatörün % 64 'ü	1000 MVA 500/22 kV Sıradan bir transformatörün % 64'ü

Tablo 3.3 Süperiletken Güç Transformatörleri Üzerindeki Deneysel Çalışmaların Özeti

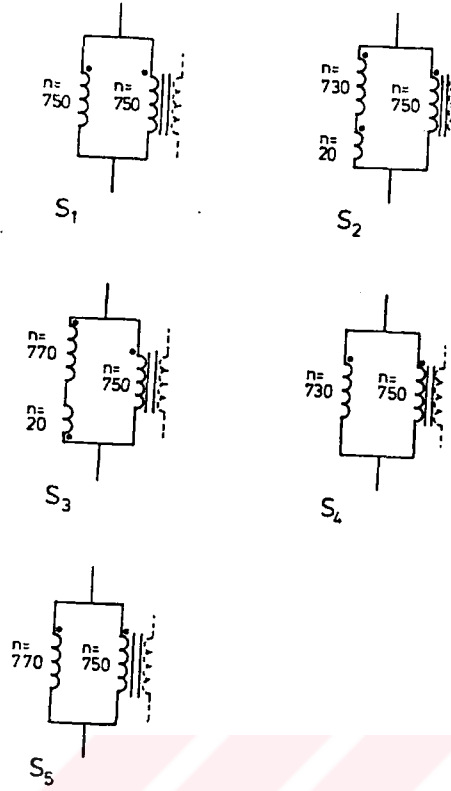
Araştırmacı ve Tarihi	Mc Fee (1962)	Mailfert, Fournet (1964)	Klaudy (1964)	Murphy (1982)	Van Overbeeke (1985)	Fevrier (1986)
Nominal değer ve yorum	15 kW Ayrılmış bobinler	2.75 kVA 220 V / 12.5 A Ayrılmış bobinler; sıvı N ₂ içindeki manyetik nüve	< 10 VA (Hava göbekli transformatör) Yaklaşık 30 VA (Hava göbekli solenoidal transformatör)	4 kVA 180/310 V Yardımcı sargıları korumalı	3 kVA 'lık Bir kaç model (Bu çalışmada açıklanan)	200kVA Oda sıcaklığındaki nüve (yapım halinde)
İletken	Tahminen Tip-1 süperiletken	NbZr iletken (%15 Zr)	Nb iletken	Çok filamanlı NbTi	Çok filamanlı NbTi	Çok ince NbTi
Üzerinde çalışılan yada ölçülen değerler	Açıklanmadı	*Maksimum akım *AC kayıplar *Kaçak endüktans *Kriostat'ın ısı kaçağı	*Kısa devre ve boşta çalışma deneyleri *Maksimum akım *Endüktanslar *Manyetik koruma testleri (2. Transformatör)	*Kısa devre ve boşta çalışma deneyleri *Maksimum akım *Yardımcı sargılara akım transferi	*AC kayıplar *Maksimum akım *Bobin sisteminde akım dağılımı *Yardımcı sargılara akım transferi *İletkenin anahtar lama karakteristiği *Ana bobinin toparlanması	*İletkenin anahtarlama karakteristiği

3.6.3 Deneysel Transformatör

Bir transformatördeki akım dağılımı, deneysel bir transformatör üzerinde araştırılmaktadır. Bu transformatör hem kompanzasyon sargılı, hemde kompanzasyon sargısız olarak çeşitli şekillerde denenmiştir. Buna ilişkin prensip şeması Şekil 3.7'de görülmektedir. Primer ve sekonder sarımların yanında birde yardımcı sargı bulunmaktadır. Devreye her defasında biri iletime geçecek şekilde termik olarak harekete geçen bir süperiletken anahtar eklenmesiyle yardımcı sargıların veya kompanzasyon sargılarının sayısını değiştirmekte mümkündür. Beş anahtarın her biri iletime geçtiği anda oluşan etkiler, Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Bu sarım sayısına bağlı olmaksızın transformatörün primer ve sekonder kısmına eşit olarak uygulanır.



Şekil 3.7 Transformatör prensip şeması



Şekil 3.8 Beş değişik primer sargı şekli (benzer şekilde sekonder sargılar)

Tablo 3.4 Deneysel Transformatörün Mekanik Bilgileri

Yarıçap (mm)	
$r_1 = 28.3$	$r_6 = 38.2$
$r_2 = 29.4$	$r_7 = 38.7$
$r_3 = 33.8$	$r_8 = 40.8$
$r_4 = 35.7$	$r_9 = 41.4$
$r_5 = 36.3$	$r_{10} = 41.8$
Bobin setinin aksenal uzunluğu : 86 mm. Primer spir sayısı : 2 tabaka 750 adet yardımcı : 730 / 750 / 770, altı tabaka Kompanzasyon : 20 / 0 / -20 Sekonder spir sayısı : ana : 1 tabakada 135 yardımcı : 1 tabakada 131 / 135 / 139 Kompanzasyon: 4 / 0 / -4	

Tablo 3.5 Deneysel Transformatörün Malzeme Bilgileri

<u>İletkenler</u>	MCA 114 filaman.
Primer ana sarımı	NbTi : CuNi = 1:1.35 İletken çapı = 0.13
Primer yardımcı ve kompanzasyon sargıları	60 filaman , NbTi : Cu = 1:1.4 İletken çapı = 0.6 mm
Sekonder ana sarım	0.2 mm. çapında nikrom iletken etrafında bükülmüş primer ana sarımın altı katı
Sekonder yardımcı ve kompanzasyon sargıları	IMI 2035 filemanlı karışık matris. NbTi : CuNi : Cu = 1 : 0.2 : 1.6 İletken çapı : 0.6 mm.
<u>Transformatör nüvesi</u>	Haddelenmiş S3U / 02 yüksek manyetik geçirgen bir nüve, Kesit alanı 33.7 x 35.4 mm ² , Pencere alanı : 106 x 34 mm ²

Daha öncede açıklandığı gibi bu transformatörün fiziksel özellikleri Tablo 3.4'de, malzeme bilgileri ise Tablo 3.5'de verilmiştir. Sarımlar cam elyafı ile güçlendirilmiş epoksi silindirler üzerine beraberce sarılır. Daha sonra bu sarımlar arasında ısı dirençleri olarak kullanılan ince bakır iletkenlerden bir tabaka oluşturulur, bu tabaka aynı zamanda sarımlar arasında boşluklarda meydana getirecektir. Araya konulan bu bakır tabaka ile transformatör sarımları arasındaki boşluklar transformatörün ısınması halinde transformatörün sönmelenmesini sağlamak içindir. Daha sonra bütün bobin sistemi Stycost FT2850 reçinesi ile emprenye edilir. Şekil 3.9'da transformatörün bu işlemin ardından şekli gösterilmektedir.



Şekil 3.9 Transformatörün bobinleri arasına reçine emprenye edildikten sonraki görünümü.

Süperiletken anahtarlar, devreye fazladan çok ufak bir endüktans sağlamak amacıyla çok ince ve düzgün şekilde sarılırlar. Birkaç tane paralel çok uçlu süperiletken ile birlikte, yüksek dirençli matrisin ısıtıcı bir iletkenle yalıtkan bir silindir üzerine sarılmasından meydana gelirler. Sarım işleminin tamamlanmasından sonra Şekil 3.10'da görüldüğü gibi Stycast ile emprenye edilirler. Anahtarın normal durum için direnci; primerde 0.1 A, sekonderde 0.55 A'den daha az bir akımı anahtarlayacak şekilde dizayn edilir. Şekil 3.8'de görülen anahtarların tümü normal durumda iken S_4 veya S_5 uçlarında aşağıdaki formüle göre en yüksek gerilim değerinin olduğu kabul edilir.

Primer için;

$$U_{s4}, U_{s5} = 2q_1 U_p \quad (3.19a)$$

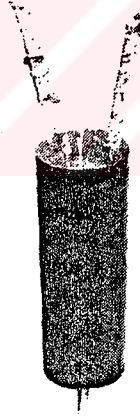
Sekonder içinse;

$$U_{s4}, U_{s5} = 2q_2 U_s \quad (3.19b)$$

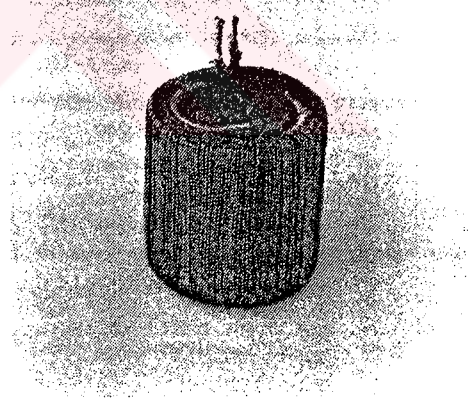
bağıntıları bulunur. Burada q_1 ve q_2 ana bobin sarım sayısına göre yardımcı bobin sarım sayısındaki artışı ifade eder. Primer gerilimini 200V (RMS) olarak kabul edersek; normal

durumda primerdeki anahtarların direnci 110Ω , sekonderdekilerinki ise 4Ω 'dur. Kolaylık açısından primer ve sekonder'de kullanılan anahtarlar birbirine eşit yapılırlar.

Her bir bobinin üzerinden geçen akım cryostat dışında ya da cryogenic ortamdaki bir direnç bağlantısı yardımıyla ölçülemiyordu; çünkü ana ve yardımcı sargıların tamamen süperiletken devrelerden imal edilmesi planlanmıştı. Bu nedenle bobinlerin akımı, bir Rogowski bobini ve bir elektronik integratörün kullanıldığı endüktif metodla ölçülebilir. Burada kullanılan Rogowski bobini (şekil 3.11) çok hassas bir şekilde sarılmış toroidal bir bobindir. Bu bobin söz konusu akımlarda sifıra eşit olmayacak bir karşıt endüktansa sahiptir. Buradaki endükleme olayı toroidin içinden geçen telin tam olarak konumuna bağlıdır. Oluşacak endükleme aynı zamanda toroidin orta boşluğundanda geçebilir. Elektronik integratör ise 0.01Hz ile 100kHz 'den daha büyük sinyallerin ölçülebildiği ve çok küçük değer sapması olan özel bir yükselteçtir. Rogowski bobinli bu integratörün ayarı ise üzerinden, cryostat dışında ölçülebilecek bir akımın geçtiği ayrı bir iletkenin, bunlar içinden geçirilmesi ile yapılabilir.



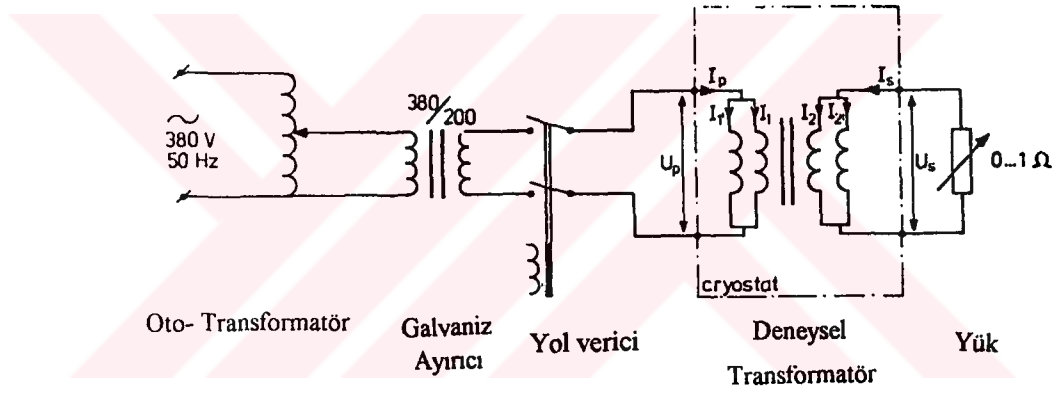
Şekil 3.10 Transformátörde kullanılan bir süperiletken anahtarın görünümü



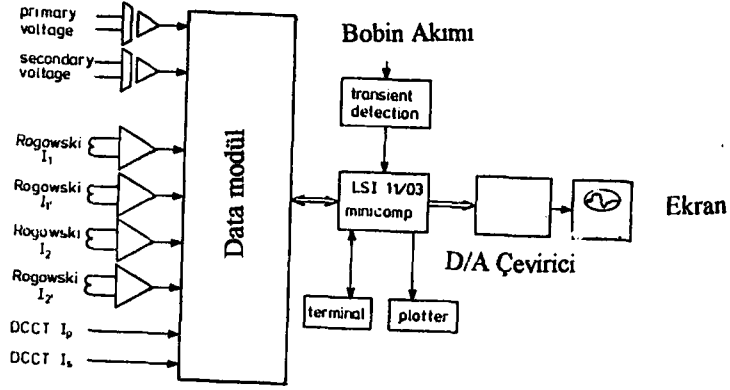
Şekil 3.11 Rogowski bobinin görünümü

Bu denemelerin şematik olarak gösterimi Şekil 3.12 ve Şekil 3.13 'de verilmiştir. Şekil 3.12 güç bağlantılarını göstermektedir. Transformátör, bir izolasyon transformátörü

ile bir ototransformatörden oluşan 50Hz 'lik bir güç kaynağına bağlıdır. Buna ek olarak 0'dan 1Ω 'a kadar kademe kademe değişebilen ayarlı bir dirençte kullanılmıştır. Boşta çalışma testleri ise sekonder devresi açıkken gerçekleştirilmektedir. Sinyal bağlantıları Şekil 3.13'de verilmiştir. Rogowski bobini tarafından gerçekleştirilen akım ölçümü dışında, toplam primer ve sekonder akımlarının ölçümü içinde 20kHz bant genişliği olan bir DC Transformatör kullanılmıştır. Sinyaller ise temelinde bilgisayar olan bir bilgi toplama sistemi ile ölçülmüştür.



Şekil 3.12 Deneysel transformatörün güç bağlantısı



Şekil 3.13 Deneysel transformatör sinyal bağlantıları

3.7 Süperiletken DC Makinalar

3.7.1 Genel Tanım ve Tipleri

Elektrik makinalarında süperiletkenliğin uygulanması, DC makinalarının hem homopolar hem de heteropolar tiplerinin önemini arttırmıştır. Ancak uygulamalar homopolar makinalar üzerinde yoğunlaşarak heteropolar makinaları saf dışı bırakılmıştır. Klasik DC makinalarında, manyetik demir, alan sargısının manyetomotor kuvvetinin yüksek akım yoğunluğu üretimine yardım için yüksek manyetik geçirgenliği olan bir yol sağlar.

Ancak bu akım yoğunluğu, manyetik materyellerin doyma noktası ile sınırlıdır. Süperiletkenliğin en büyük avantajı bu sınırı yükseltmesidir, böylece hiç bir şey kayba uğramadan verimlilikte bir artışla daha yüksek akım ve güç yoğunlukları elde edilebilmektedir.

Günümüzde süperiletkenler DC ve AC makinalarda sadece direk akım taşıyan sargılara, yani alan sargılarına uygulanır. Bu süperiletken, komütatör tipte heteropolar bir makinanın rotorunun oda ısısında klasik iletken şeklinde olması gerektiğini açıklar. Bu yaklaşımın avantajları daha yüksek akım yoğunluklarının yol açtığı artmış güç yoğunluğu ve süperiletken alan bobininin sağladığı azaltılmış uyarım kaybı ile sınırlı olacaktır. Komütasyonu arttıracak olan hava aralığı rotor bobinindeki endüktans azalmasını yarar sağlayacaktır. Bu yaklaşımın dezavantajları ise alan sargısının cryogenic sistemine duyulan

ihtiyaç, bunun için dengeleyici bobinler kullanılır ve bir ametalik armatür destek yapısının dinamiği düşünülebilir. Bu tasarımın çıkış gücü yine komütatör ile sınırlı olacaktır, Kısmen baralar arasındaki yalıtmadan geçmesine izin verilen gerilim şeklinde olacaktır. Armatürün, komütatör ve destek halkaları ve şaft sistemi gibi iletken kalması gereken parçalarındaki kayıpları önlemek için, yüksek şiddetteki manyetik alanı dağılımının çok dikkatli şekillendirilmesi gerekmektedir. Bu özelliklerinin bileşimi ekonomik olarak çekici olmamıştır. Muhtemel bir seçenek ise dönen süperiletken ikiz kutuplu bir alanın, sabit konumdaki bir redresöre bağlı AC armatürünü ikaz etmesidir ki bu gerçekte bir AC makinadır. AC jeneratörleri için süperiletken alan sargılarının kullanımını doğrulayan ekonomik sıfır noktası birkaç yüz megawattın civarında olarak gösterilmiştir ki bu DC makinaları için olağan aralığın çok üstündedir.

Homopolar makinalarda bu gibi sorunlarla karşılaşılmaz, fakat yüksek akımların toplanması gibi bir problem ortaya çıkar. Homopolar süperiletken makinaların alanında çalışmaların çoğu uygun kollektör tesisatının geliştirilmesi üzerine yapılmıştır ve problem henüz tamamıyla çözülmemiştir. Disk tipi ve drum tipi makinalar, homopolar makinalarda kullanılan iki temel donanımdır. Bunlar, rotorla ilgili alan mıknatıslarının, konumlarındaki değişikliklere şaft tesisatlarında ve akım toplama adına, uygundur. Alan sargısı için süperiletkenlerin kullanımı, makinanın bir parçasının cryogenic izolasyonu ihtiyacını gerektirir. Cryogenic kabı makinanın dış muhafazasına koymak yararlı gibi görünse de, alan mıknatısları çarkın iç boşluğunda olduğu bazı tasarımlar yapılmıştır.

3.7.2. Alan ve Rotor Konfigürasyonları

Homopolar bir DC makinanın alan sargısının geometrisi, pratikte rastlanan süperiletken sargı tipleri arasında en düzenlisidir. Esasen selenoidal ve düzenli boyutlardadır.

Bu tür bir alan sargısını tasarlanmasının nedeni; alan sargısının termal ve mekanik olduğu, kadar elektriksel olarak da istikrarlı bir performans göstermesini garanti etme ihtiyacı ve bu bobin için gerekli desteği minimum bir kayıpla sağlamaktır. Cryogenic sistemin tasarımı, kullanımdaki yatay dışındaki davranışlar gibi uygulama spesifikasyonları ile karmaşık olabilir.

Homopolar süperiletken makinaların rotor konfigürasyonları için klasik tasarımdaki ilkeler temel alınmıştır. Ancak bu alandaki yeni gelişmeler, süperiletken alan sargıları

tarafından önerilen daha yüksek güç yoğunluklarının avantajlarından istifade eden yenilikçi düşüncülerin ortaya çıkarmıştır. Rotorların temel tipleri hala disk ve drum'dır. Ancak, verilmiş bir akım için uygun terminal voltajı arttırmak için drum'ların uygun kayma bileziği tesisatından seriler halinde bağlandığı makinalar tasarlanmıştır. Aynı fikir disk armatürlerine de uygulanabilir.

Seri yada seri-paralel yollar şeklinde ayarlanan fırçalar ile disk armatürleri bölünebilir ki, kutup geriliminde bitişik kısımların arasındaki izolasyonun kapasitesi ile sınır değerleri arasında artar.

3.7.3. Cryogenic Tasarım ve İzolasyon

Homopolar makinanın temel yapısının süperiletken bobini tork reaksiyonlarından uzak tutması ve bu bobinin sabit olması nedeniyle, uygun bir cryogenic tasarım diğer süperiletken cihazlara kıyasla fazla talep edilen bir olay değildir. Bu genellikle cryogenic olarak güçlü, kolay imal edilebilen, sıvı helyumlu bir materyal, örneğin paslanmaz çelikten oluşur. Lokal alanlar dışında dış tank; cryogenic sıvılara maruz kalmadıkları halde söndürmeyle oluşan gerilme sonucu meydana gelebilecek dahili kırılmaların olası sonuçlarından etkilenmemelidir. Yüksek güç aynı zamanda geçici gerilmelere dayanmak için de gereklidir, örneğin soğutma sırasında.

Dış tank ve alan bobinleri arasındaki sargı destekleri iyi bir termal izolatörden, örneğin fiberglas-destekli sentetik reçine yapılabilir ve ısı geçirgenliği için yolun uzunluğuna oranla ince olmalıdır. Dağılan ısı siperleri (bir veya daha fazla) termal radyasyonu oda ısısı kuşatmasından korumak için kullanılır. Bunlar alan bobin soğutma sisteminin şekline bağlı olarak akıtma ile soğutma veya kaynamış helyum ile gaz soğutmasıdır. Bu siperler ortalama 100 °K 'lık bir ısıda verimli çalışabilmeleri için termal olarak belirlenmelidirler.

Süperiletken soğutması için seçenekler arasında tazyikli akıntı soğutması ve doğal dolaşma sayılabilir.

3.7.4. Akım Toplama

Homopolar makinelerin tipik düşük rotor gerilimleri ve yüksek yük akımları verildiğinde, akım toplama önemli bir tasarım çabası meydana getirmektedir. Bu konuya hitaben iki seçenek şöyledir:

- Katı fırçalar
- Sıvı metal toplama

Tercih edilen seçenek ve buna bağlı tasarım, (1) kontakt bileziği hızı, fırça düşmesi, ve kontakt mukavemeti, bu verimliliğe tesir eder ve (2) fırça ısısı, fırça aşınması ve yer değiştirme, bu da maliyetleri, fırça tozu dağılımını etkiler. Atmosfer (gaz tipi, nem, vs.) fırça aşınması üzerinde önemli bir rol oynar. Örneğin, hem düşük nem hem de silikon reçinelerin yakınlığının fırça performansının azalmasına neden olduğu tespit edilmiştir.

Katı fırçalar, aşağı yukarı 100.000 A/m^2 ve bu değerin on katına kadar ki akım yoğunluğu aralığında, türbin jeneratörü (turbojeneratör) toplama halkaları gibi olağan fırçalar için uygulanabilir. Yüksek yoğunluğa erişebilmek için, özel bir metal kaplama karbon lifli fırça geliştirilmiştir.

Sıvı metaller, katı fırçaların istenmeyen özelliklerini azaltma olasılığını getirirler. Gerçekte sıvı metal teçhizatlar hem süperiletken hem de daha klasik makinalara uygulanmıştır. Bunlar oldukça az fırça düşmesinde çalışabilecekleri gibi düşük sürtünmede de çalışabilirler. Güvenli çalıştırma için de başka sorunlar çıkarabilirler, ancak bu alkali metalleri de içeren, (örneğin sodyum, potasyum ve onların düşük eriyik karması NaK, galyum, galyum indiyumu, cıva) kullanılabilir metallerin temel özelliklerinin sonucudur. Bunların hiçbiri kullanıcı dostu değildir. Örneğin alkali metaller reaktiftir ve hareketsiz bir atmosferde bulundurulmaları gerekir. Cıva ağırdır ve aşınmaya neden olma eğilimindedir ve buharı zehirlidir. Sadece cıva sıfırın altındaki (-38.9°C) derecelerde sıvı kalır, bu nedenle diğer seçenekler için ısıtıcı veya kapatmalar sırasında düşük ısı koruması gerekir.

3.7.5 Tasarım Düşünceleri ve Uygulamaları

Geçtiğimiz iki on yıllık dönemde, yüksek akım, seyirme, geniş hız alanı, ve diğer özel gereksinimleri süperiletkenlerin uygunluğu ile birleştirip içeren DC makinaları uygulamalarına duyulan ihtiyaç bu tür makinalara ilginin yeniden canlanmasına neden olmuştur. Yeni düşünceler makinanın ısı üreten kısımlarında sıvı soğutma kullanımına ve sıvı metal akım toplanmasına önem verir.

Rotor elemanları konik şekildedir ve uygun noktalarda içeride akan sıvı metalle bağlantılıdır. Alan mıknatısı, şaftın eksenine etrafında ortalanmış toroid birimli cryostat içine yerleştirilmiştir. Bunun üzerine konik armatür elemanları ortalanmıştır.

Homopolar makinalar için ilginç bir uygulama aralığı, yüksek akım eğilimini meydana çıkarmaktır. Füzyon reaktörü araştırması örneğin, eğilimli enerji sistemlerini gerektirmektedir. Bu tür uygulamalar için, çok kısa rotor zaman sabitleri ve rotorun dönen kütlesinde hareketsiz olarak enerji depolayabilme özellikleri sebebiyle homopolar makinalar çok uygundur.

3.8 Süperiletken AC makinaları

3.8.1 Genel Tanım ve Tipleri

Süperiletken AC makinalarının geliştirilmesinde önem, büyük türbin jeneratörlerini ve özel uygulamalara yönelik diğer tipleri içeren, yüksek hızlı jeneratörlere verilmiştir.

Süperiletken AC makinalarının geliştirilmesi 1960'ların ortalarında AVCO'da yapılan ilk çalışmalar ve MIT'in önemli katkıları ile başlamıştır. İlk Laboratuvar demonstrasyon cihazı, sabit bir süperiletken alan bobini ve normal iletkenler kullanan dönen bir rotor bobini olan senkron bir makinaydı. Bundan sonraki makinalar aynı şekilde dönen süperiletken alan bobinleri ile yapılmışlardır.

Süperiletken alan bobinini stator yerine rotor üzerine yerleştirmek düşüncesi önceden kimsenin aklına gelmemiştir. Konun sürekli ve verimli bir araştırmacı, Smith tarafından hatırlatıldığı gibi, daha önce optimum özellikleri tanımlayabilmek için süperiletken AC makinalarının analizinde önemli emekler verilmişti. Smith bir

süperiletken AC makinanın optimum konfigürasyonunun şu özelliklere sahip olarak tanımlanabileceği sonucunu çıkarmıştır:

1. Merkez rotor süperiletken bir alan bobini içerir ve şunlara sahiptir:

- a. Harici uyarı akım kaynağına bağlantı,
- b. Normal iletken indüksiyon akımı siperlerini kullanan bir siper sistemi
- c. Sirkülasyon için tedarikli sıvı helyum soğutucusu,
- d. Yüksek vakumlu cryogenic izolasyon.

2. Çevreleyen stator şunları içerir:

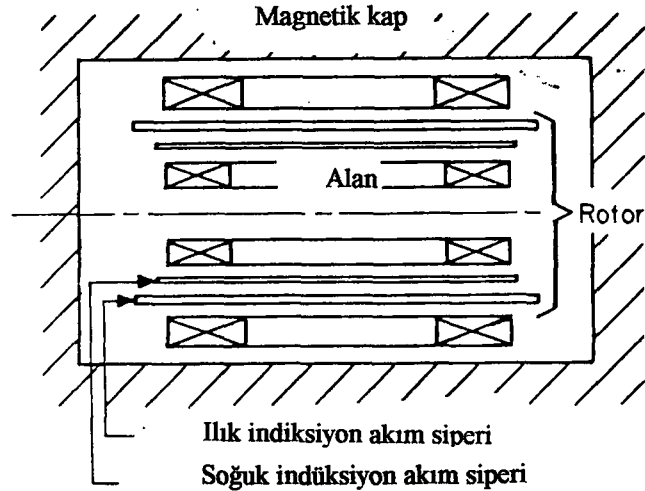
- a. Çevre sıcaklığı soğutucusu ile çalışan hava aralığı tipi normal iletken armatür bobini,
- b. Armatür bobinini çevreleyen lamine edilmiş akı siperi.

Helyum soğutucu-eritici sistemine ilave olarak, süperiletken AC jeneratörünün bir uyarı sistemi de dahil, olağan yardımcılara ihtiyacı vardır.

Sabit durum uyarı kayıpları iletken ve fırça düşüşü kayıpları, ile sınırlı olduğundan, uyarı sisteminin güç gereksinimleri azdır ve statik bir uyarı sistemi ile kolayca sağlanabilir. Ancak bu oldukça düşük bir voltajda (5 V civarında) düzenli olarak çalışabilecek şekilde tasarlanmalıdır. Uyarı sistemi için daha zorlu bir ihtiyaç ise, çıkış geriliminin de harmonik yapısının oldukça düşük olması gerektiğidir, böylece süperiletkendeki ve cryogenic alanının kalanındaki ac kayıpları kabul edilebilir sınırlar içinde kalabilir. Bu ihtiyaç, uyarı gerilimine bir üst sınır getirir. Alan gücü süperiletken jeneratörler için belirleyici bir değer değildir, alan ve damper zaman sabitleri büyük olduğundan en düşük bir değeri kabul edilebilir. Tipik bir olayda, halen sabit durum tam yüklenmiş uyarı geriliminin 20-30 katıdır.

3.8.2. Siper, Alan ve Rotor Konfigürasyonları

Süperiletken AC jeneratörünün basit bir şeması Şekil 3.14'de gösterilmiştir.



Şekil 3.14 Süperiletken genaratörün şematik kesiti

Gösterildiği gibi, manyetik materyaller çevresel siper ve dış şekile göre sınırlanmıştır ve rotor ve stator bobinleri tarafından doldurulan bütün alan manyetik maddelerden mahrumdur. Hem alan bobinleri hem de rotor bobinleri hava aralığı bobinleridir ve boşlukta elektrotermal koruyucu şartlarıyla ayrılırlar ki bunlar normalde hem elektromanyetik hem radyant ısı koruyucularını birleştirirler. Bir siperler alan bobini ile aynı dönen yapı üzerine kurulmuşlardır ve normalde temel akı dalgası ile senkronize hareket ederler.

3.8.2.1 Siperler

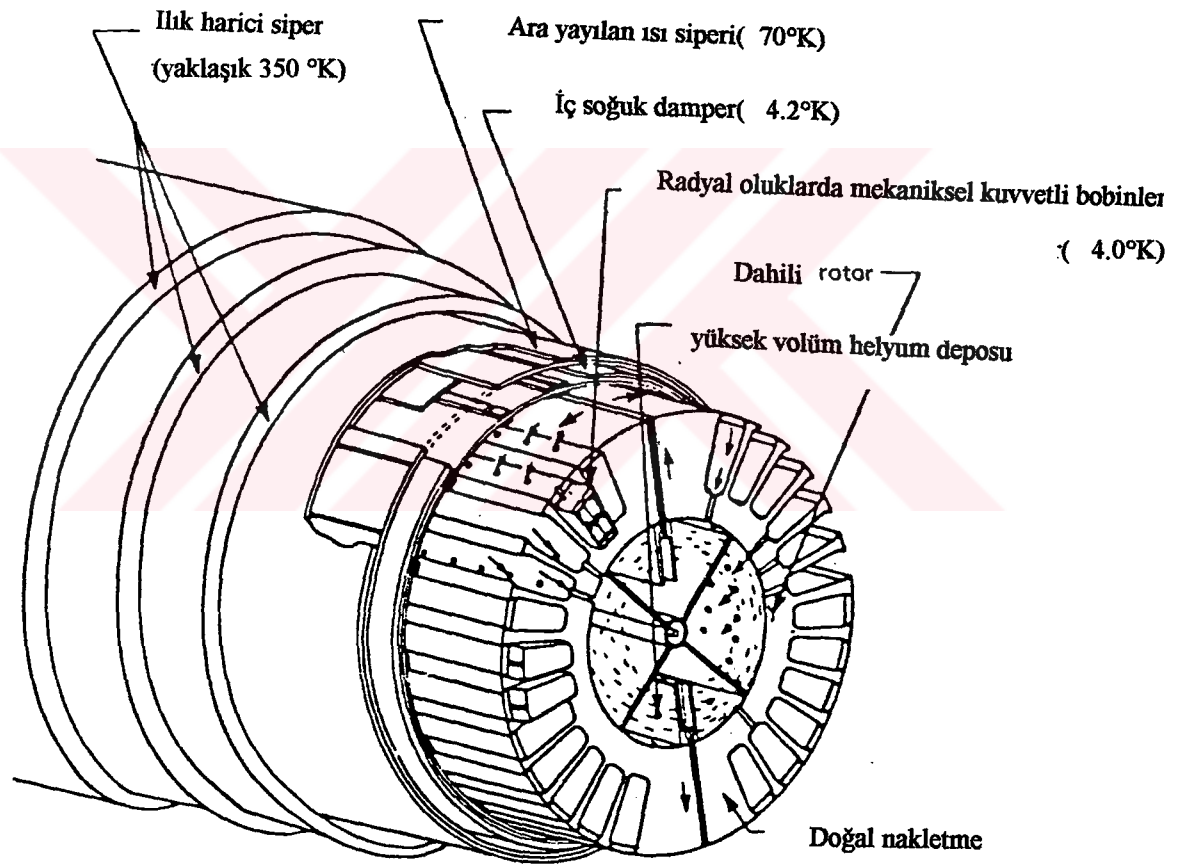
Sonuç olarak elektrotermal siper tasarımı, bütün tasarım üzerinde her yönden önemli etkiler yapmaktadır, çünkü alan bobininin dıştan gelen ve söndürmeye yol açarak makinayı bozacak problemlere karşı izole olma derecesini belirler. Aynı zamanda, siperin boyutları ve fiziksel özelliklerinin makinanın reaktansı ve rotor titreşimlerinin sönümü üzerinde önemli etkileri vardır ki bunlar makinanın bağlı olduğu güç sistemi üzerinde önemli rol oynarlar. Bu siperlerin tasarımına değişik yaklaşımlar şunları içerir:

- 1. Değişik yapılarla hizmet eden elektrokromanyetik ve termal koruma:**

- a. Oda sıcaklığında elektromanyetik siper.
- b. Cryogenik ısıda elektromanyetik siper.

2. Aynı yapıda birleşmiş elektromanyetik ve termal koruma. Literatürde tarif edilen siper konfigürasyonları şunları içerir:

a. Dış rotor destek yapısı; iç ve dış rotorlar arasındaki vakum boşluğunda ya taşıma soğutmalı veya gaz soğutmalı siper ile oda ısısında karma *elektromanyetik kalkan integrali. Şekil 3.15 'de bu tip bir konfigürasyon ve diğer çanak parçalarının genel düzeni gösterilmektedir.



Şekil 3.15 Rotor kesiti

* Yüksek iletkenli koruma ve yüksek kuvvette yapısal materyalin ortak merkezi (veya "sandvich") kabuk yapısı.

b. Oda ısısında yekpare elektromanyetik siper, diğer yönlerden (2a) ile aynı. Bu tür bir siper için manyetik materyalin kullanımının da önerildiğini belirtmek gerekir. Ancak içinde çalıştığı yüksek manyetik alanlara bağlı olarak, fazlasıyla doymuş ve geçirgenliği fazlasıyla azalmıştır.

c. Birleşik siper, hem (2a) nın oda ısısı siperini hem de alan bobininin hemen dışındaki içi rotorda bulunan bir orta seviyedeki soğuk elektromanyetik siperi içerir.

d. Bu tür siperler, ancak rotor uçlarındaki taşıyıcı yüzlerle yükseldiklerinde dönmek için serbest olurlar. Bu tip ataletli siperler katı olarak yükselmiş siperlerden değişik olarak dinamik özelliklere sahiptirler ve rotor elemanları üzerindeki kısa devre torklarını azaltmada kullanılabilirler. Şimdiye kadar bu yaklaşım bir makinada uygulanmamıştır.

e. Rotor üzerinde yükselmiş bir veya daha fazla ortak merkezli koruyucu kabuktan oluşan, cryogenic ısıda elektromanyetik koruma. Kabuklar katı meteryalden veya soğuk rotordaki ısınmayı azaltmak için farklı iletkenlerden oluşmuş olabilir. Sonraki durumda, uç bağlantıları rotor titreşimlerini söndürmek için gerekli olan enerjiyi toplayabilecek ve böylece dinamik performansı arttıracak harici bir rezistöre yapılıp.

Cryogenic ısı siperleri eğer saf bakırdan olursa nispeten ince yapılabilirler. Tam sıfıra yakın derecelerde bakırın mukavemeti, oda sıcaklığında ebatların üç sıra aşağısına kadar olabilir ancak bu, büyük ölçüde materyalin kimyasal saflığına ve daha az ölçüde stres düzeyine bağlıdır. Gerekli saflığı kabul edilebilir bir artık stres getirmeden öneren kalın bakır elektrolakaların uygulamasında büyük ilerleme kaydedilmiştir.

3.8.2.2 Alan sargıları

Alan bobinlerinin konfigürasyonu için seçenekler, temel şekil ve iletken tesisatı ve destek koşullarını içerir. Sargı şekli için alternatifler geleneksel paralel ve radyal-yarık bobinlerine uygundur. Süperiletken alanlarda kullanılan hava aralığı bobinleri için, paralel aralık tesisatı, "racetrack" (veya "pancake") bobinlerinden bir küme olarak yerine getirilmiştir. Bunlar ayrı ayrı oluşturulmuş ve bütün bir bobin yapmak için üstüste kümelenmişlerdir. Bu tür bobinler, sabit süperiletken mıknatıslar için geliştirilmiş

teknoloji kullanılarak yapılabilirler ve küçük makinalarda iyi çalışmışlardır. Bu tip alan bobinine sahip olduğu bilinen en büyük makina bir 20-MVA ünitesidir.

Tasarımcılar, daha yeni, genelde daha büyük, süperiletken türbin jenaratörü prototiplerinin çoğu için iletkenlerin rotor çevresinin arkları üzerinde dağılmış olduğu bobinleri seçmişlerdir. Bu değişik tasarımlarda kullanılan radyal aralığı tesisatları esas olarak iletkenleri desteklemek için kullanılan araçlarla değişiklik gösterirler. Herhangi bir süperiletken bobinin tasarımı soğutma ve destek arasındaki hassas ilişkiyi gösterir. Dönen makina tasarımında, süperiletkenleri kullanmadaki önemli bir motivasyon güç yoğunluğundaki artıştır. Bunu elde etmek için gerekli olan bobindeki yüksek manyetik akı yoğunluğu, merkez dışı güç yüklenmesinininkine benzer bir ebatta yüksek derecede manyetik güç ile oluşur. Buna ilave olarak iletkenler, lokal kayıpları yol açacak ve bir söndürme olasılığını arttıracak iletken hareketini önlemek için, bunlara karşı desteklenmelidirler.

3.8.2.3. Rotor Sargıları

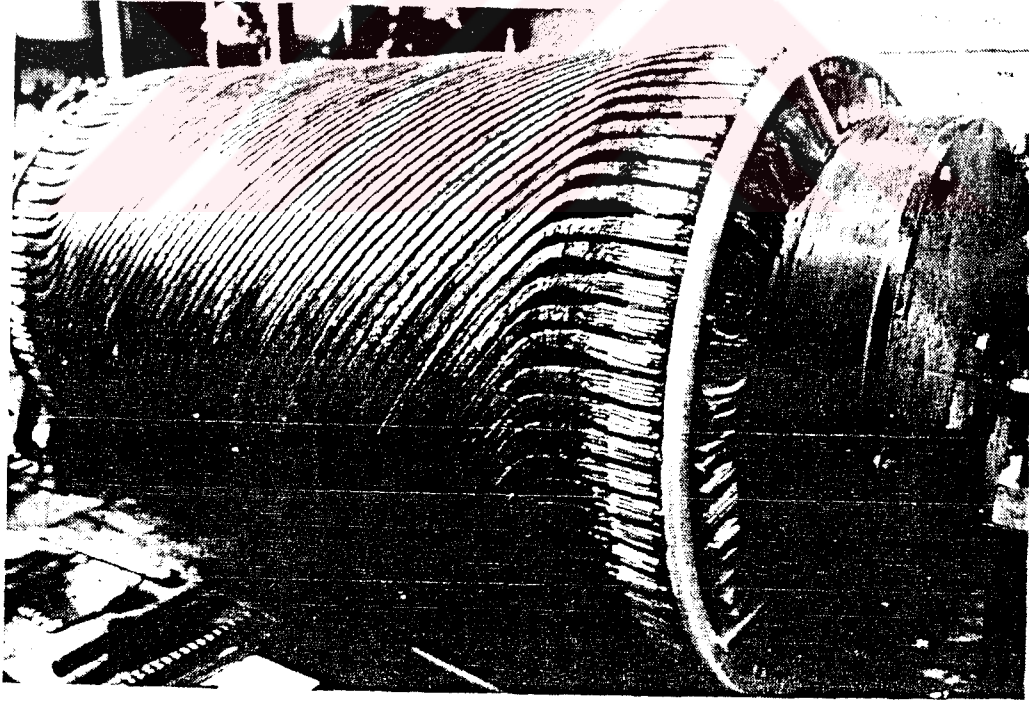
Süperiletken generatörler için armatür bobinleri, hava aralığı bobinleridir. Oldukça fazla sayıda hava aralığı bobin tipleri önerilmiştir. Bazı tasarımcılar geleneksel generatörlerde kullanılan aynı tip ve şekildek bobinleri kullanırken (örneğin drum bobinleri, konik, içeri kıvrık uçları ile) oldukça fazla sayıdakiler, yeni tesisatları düzenlemek için sabit bobin dişlisinin çıkarılmasıyla oluşan tasarım özgürlüğünden istifade etmişlerdir. Bu ehemmiyetle şunları içerir:

- Helezon bobin
- Spiral pancake bobini

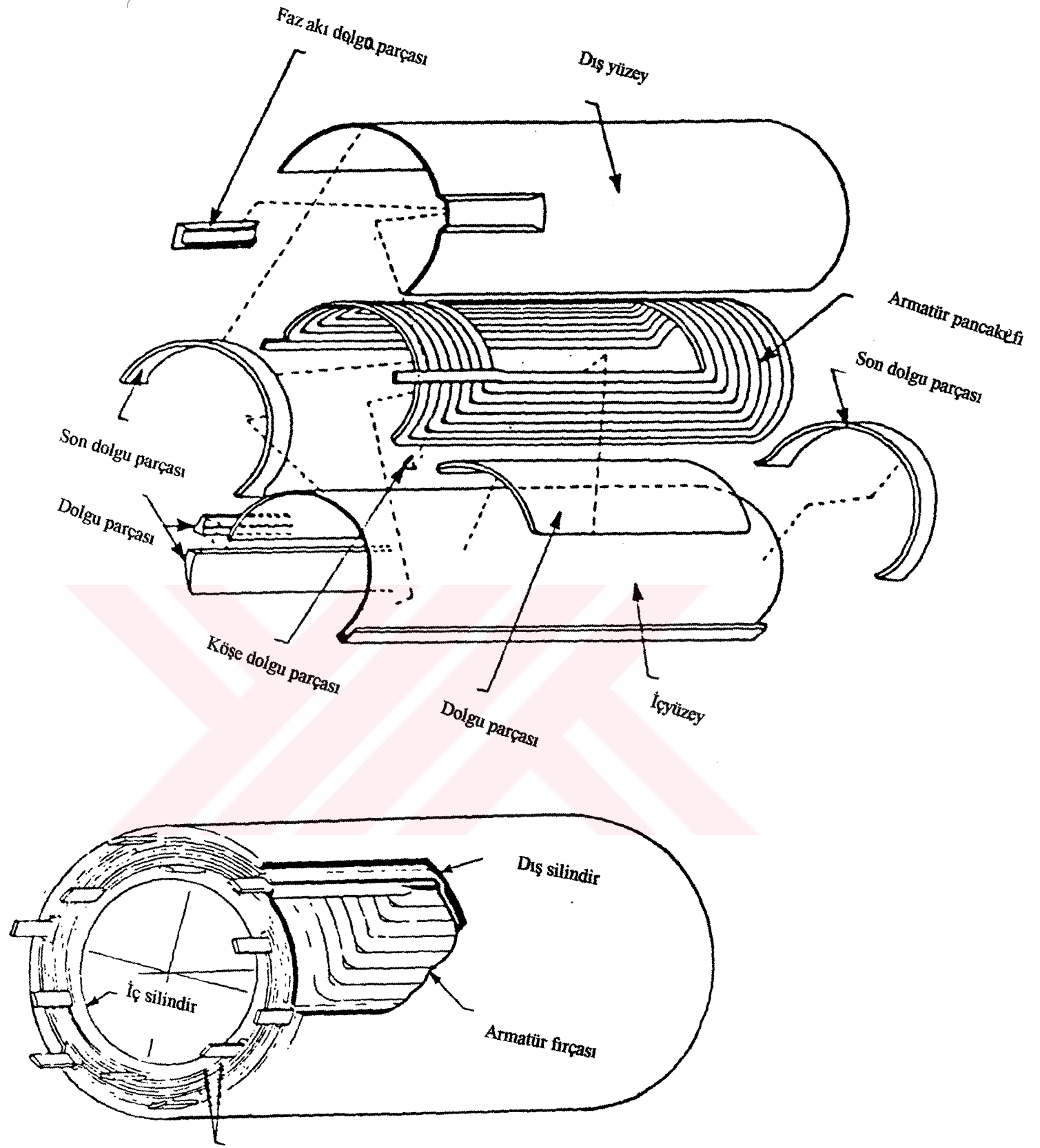
Armatür bobinleri için yapılan yeni tasarımların amacı yüksek güç, yoğunluğu elde etmek ve armatürü direk olarak transmisyon çizgisi gerilimi düzeyinde çalıştırabilmektir. Sabit bobin dişlisinin eliminasyonu sadece iletkenlere yer kazandırmak ve izolasyon için değil, Bobin "proper"ının dışındaki zemin potansiyel sathını hareket ettirir. İletkenler ve izolasyon maksimum avantaja göre yeniden dağıtılabilir. Spiral "pancake" bobini, yüksek voltajlı izolasyonun bütünlüğü için yapılmıştır ve transmisyon çizgisi voltaj armatürlerinin nihai gelişimine olası bir yarar olarak önerilmiştir. Halezonik bobinin de gelişimi sonuç olarak bu amacı taşıyordu.

Helozonik bobin Şekil 3.16'de gösterilmiştir. Bu düz merkezi kısmı çıkarılmış silindirik içe kıvrık uçların kullanıldığı geleneksel bobinlerin bir sonucu olarak düşünülebilir. Bu tip bir bobinde, geleneksel bobinlerdeki düz parçadan sonra geçişlerin zorladığı sargı yönündeki ve destek şartlarındaki değişiklikler elimine edilmiştir.

Üç fazlı rotor için spirial "pancake" bobini şekil 3.17'de gösterilmiştir. İçiçe sarılmış dönüşleri olan altı eş pancake bobinden oluşmuş. Her bobin, verilen bir iletkenin bütün parçalarının aynı yarı çapta olması için bir spiral şeklinde oluşturulmuştur, ancak komşu iletkenler değişik yarı çaplarda yerleştirilmişlerdir, bunlar başlangıç dönüşünden itibaren iletkenin açısı ile artarlar. Bütün bobin, bu bobinleri bir temel daire etrafına eşit aralıklarla boşluklara yerleştirmek ve sonra yakın kontakta bulunmaları için radyal olarak içeri getirilerek oluşturulur. Şekil 3.17'de bobin dizaynı hem iletkenler hem de izolasyon için kullanıldığı, ancak bütün fazla gerilim test mukavemeti için her iletkeni birbirinden izole eden geleneksel anlamda olmadığı gösterilmiştir. Bunun yerine, altı bobinin her birine bütün olarak zemin izolasyonu uygulanmıştır. Faz iletkeni hariç her bobinin içinde "turn-to-turn" izolasyonu uygulanmıştır. İzolasyon zarları ardarda iletkenler için yapısal destek sağlamak için hizmet ederler.



Şekil 3.16 Helezon armatür bobinin dış görüntüsü



Şekil 3.17 Spiral pancake rotor bobinlerinin yapısı

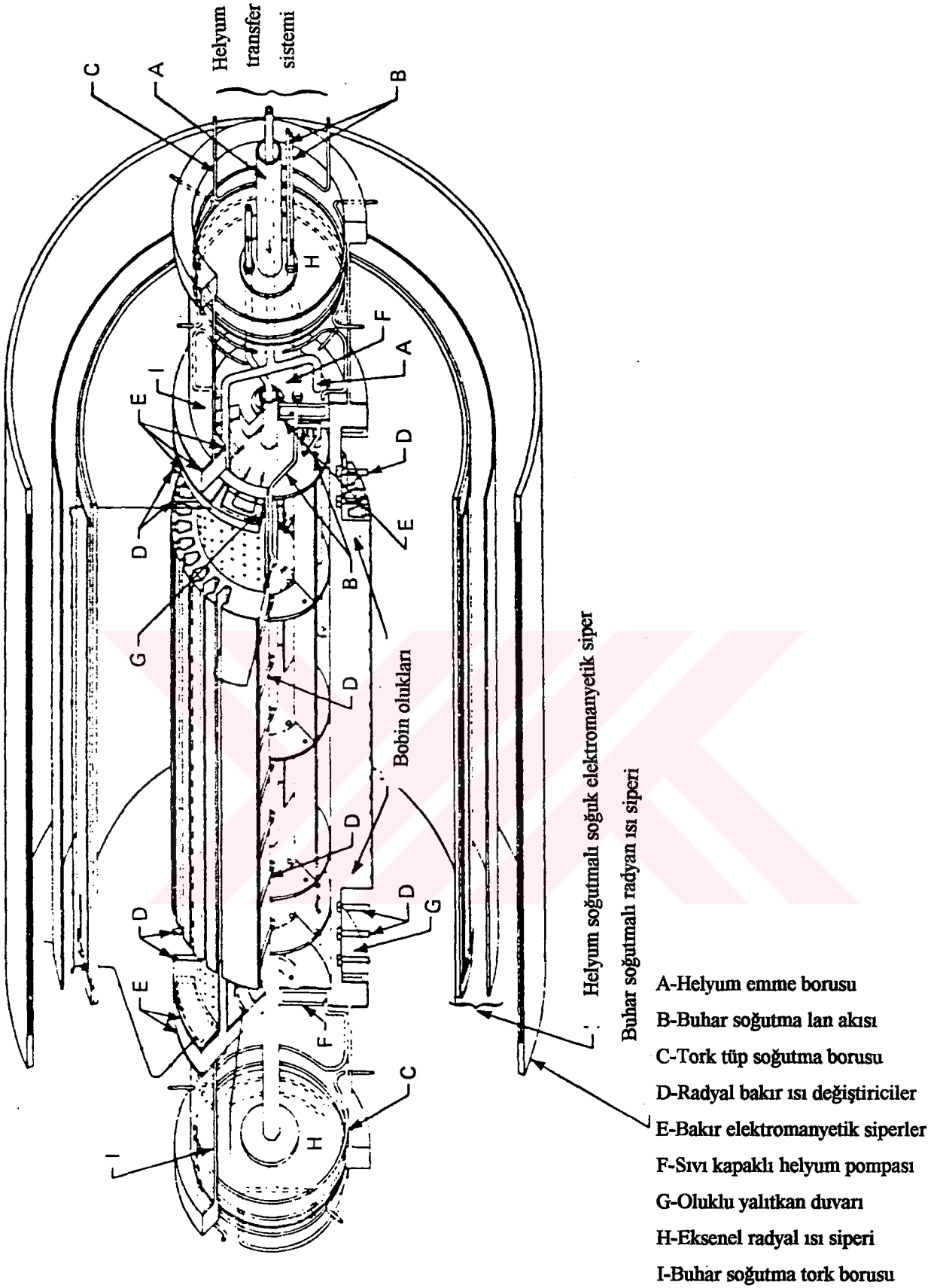
3.8.3. Cryogenic Tasarım ve İzolasyon:

AC senkron makinaların (örn: türbin jeneratörleri), alan bobinleri için süperiletkenlerden faydalanmak, rotor iç kısımlarının helyumun atmosferik basınç kaynama noktasında (4.2°K) veya yakınında çalışmasını sağlayacak cryogenic bir çevre yaratmayı gerektirir. Roturun dış kısımları veya en azından uçları oda sıcaklığında veya daha yüksek ısıda çalışır. bu nedenle iç ve dış yapılar arasındaki büyük ısı farklarını uzlaştırmak için uygun önlemler alınmalıdır. Bu hem bütün elemanların mekanik birleşikliğini ve helyum sıklığını korumak hem de gerekli yüksek hızda düzenli çalışmayı garantilemek için yapılmalıdır. Tasarım aynı zamanda, operasyona, soğutmaya ve ısıtmaya olduğu gibi anormal çalışmaya (örn: dengeli veya dengesiz terminal hatalar) tesadüf eden termal stresleri de uzlaştırmalıdır.

İç çanağın termal izolasyonu genelde (1) iç ve dış silindirik yapı arasındaki halka biçimindeki boşlukta vakum izolasyonu ve (2) bir veya her iki uçtaki termal aralık parçalarının birleşmesinden elde edilir. Termal aralık parçaları iç ve dış çanaklar arasında bir tork taşımali ve böylece tork tüpleri olarak adlandırılmalıdırlar. Bu tedbirler, daire şeklindeki boşluktaki ve uçlardaki uygun yerlerdeki radyan ısı siperleri ile ve tork tüpleri için kaynamış helyumla gaz soğutması ile çoğaltılabilir. Her iki metod da daha verimli bir izolasyon elde edebilmek ve rotorun dıştan iç bölümlerine termal enerjinin ısı kaçağı veya akısını azaltmak için kullanılır.

Belirli bir makine için tasarlanmış termal izolasyon sisteminin bir örneği Şekil 3.18'de gösterilmiştir.

Helyum akışı, şaft oturtulmuş transfer bağlantısı ve rotasyon ile olan iç basınç ile helyum arzıyla uygulanan dışbasınç arasındaki dengeyi sağlayarak kendinden regüleli akı kontrolü olarak rol alan teslim tüpü arasını birleştirir. Rotor deliği içeri gelen helyumu kabul eder ve halka biçimli bir tabakada saklar. Merkezkaç kuvveti süperkritik helyumu dış çembere doğru taşır ve helyum buharından ayrılmasını sağlar. Bütün bobin, buharlaşmanın oluşmadığı süper kritik sıvı içine batırılmıştır. bobindeki sıvı boşlukları, yeterli lokal sıvının geçici ısıtma etkilerini emmesini sağlar. Isınmış sıvı daha az yoğundur, böylece taşıma halkaları oluşur ve bunlar ısıyı içeri taşırlar. Daha sıcak sıvı süper kritik havuzun yüzeyinde buharlaşır ve soğuk sıvı tarafından tekrar doldurulur.



Şekil 3.18 Helyum kullanılan rotor cryogenic soğutma sisteminin diyagramı

Buharlaşmış helyum, pompa tipi hücrelere girer, buradan tork tüplerindeki soğutma bobinlerinin arasından sirküle edilir ve radyan ısı siperlerindeki geçitlerden akar. Düzenli durum çalışmasına uygun normal bir akı hızı, termal strese nispetle tasarım ile optimize edilmiş tork tüpü ısı dağılımlarını elde eder. Aynı zamanda radyan ısı siperinin derecesini de belirler ki dış rotordan gelen radyan ısıyı da durdurur ve soğutucuya mantıklı bir verimlilikle geri gönderir. Sistem hataları gibi elektriksel geçiciler buharlaşmış helyumun akışında geçici artışlar, aynı zamanda ısısında azalmalar ortaya çıkarır ve tork tüplerindeki ısı dağılımını değiştirmeye meyillidirler. Radyan ısı siperi genellikle gerekli kütleye sahip olacaktır, böylece ısısı fazla etkilenmeyecektir.

Buharlaşmış helyum, çanağı transfer bağlantısında terk eder ve sıvılaşma derecesine kadar soğumak için soğutucuya döner.

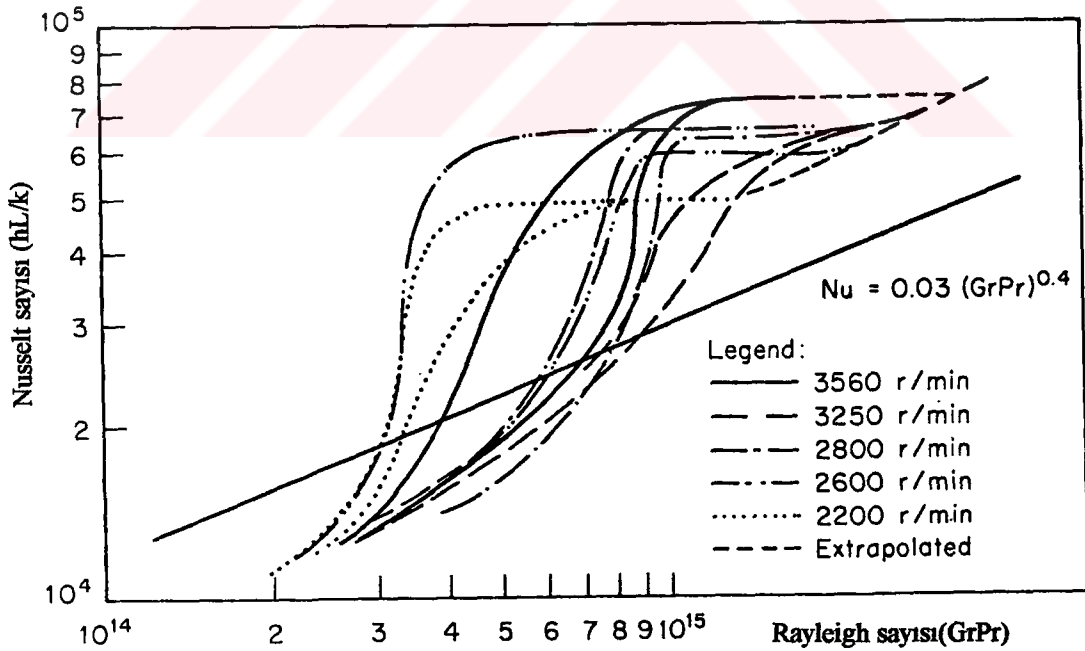
Dış rotor yapısı oda sıcaklığında veya üzerinde olduğu zaman, iç ve dış yapılarıdaki büyük ısı farklılıkları diferansiyel bir çekilme ile sonuçlanır, ki bu ya bir kaynama elemanı veya bu elemanlar arasına hareket eden bir ek sağlayarak uzlaştırılmalıdır. İki yaklaşım da uygulanmıştır, ancak geçerli tasarımlarda birincisinin kullanımı daha yaygındır. Ancak çift yönde birleştirilmiş hareket eden bir ekin kullanımı uzun rotorlar için fazla olabilir.

Cryogenic sistemin tasarımı, soğutucu ile alakalı olan bütün parçalarda kayıplar ve serbest kalmış ısı için sadece normal çalışma sırasında değil, özellikle hata durumunda dikkatli olunmalıdır. Önemli bir sistem hatası sırası ve sonrasında düzenli çalışabilen bir tasarımı garantilemek için kayıpların çok kesin olarak belirlenmesi gerekmektedir. Yukarıda belirtildiği gibi, stabiliteyi arttırmak süperiletken türbin jeneratörlerinin geliştirilmesi ve takip eden uygulaması için önemli motivasyondur. Endüstriyel ihtiyaçlar, daha uzun kritik hata düzeltme zamanları açısından ve bu nedenle hata durumları için daha fazla tolerans ile tanımlanmışlardır. Bu tip hatalar süresince, ısı depolaması rotor içinden oluşur. Katı materyallerin (örn, süperiletkenler dahil metaller) spesifik sıcaklıkları cryogenic ısıdan çok küçüktürler, bu nedenle çok küçük miktarlarda ısı depolaması bile bir söndürme veya normalizasyon için potansiyel risk haline gelebilir. Soğutma sistemi bunu önleyecek şekilde tasarlanmalıdır, ayrıca aşırı termal stresi önlemek için birleşmiş yapısal parçaların ısılarında önemli değişiklikler yapmadan normalizasyonu önlemelidir. Şekil 3.18 süperiletken stabilitesini yüksek bir derecede sağlamak ve termal streslerin kontrol ve soğutma kapasitelerinin meydana getirdiği diğer sınırlamaları tahmin etmek için tasarlanmış bir sistemin örneğini göstermektedir.

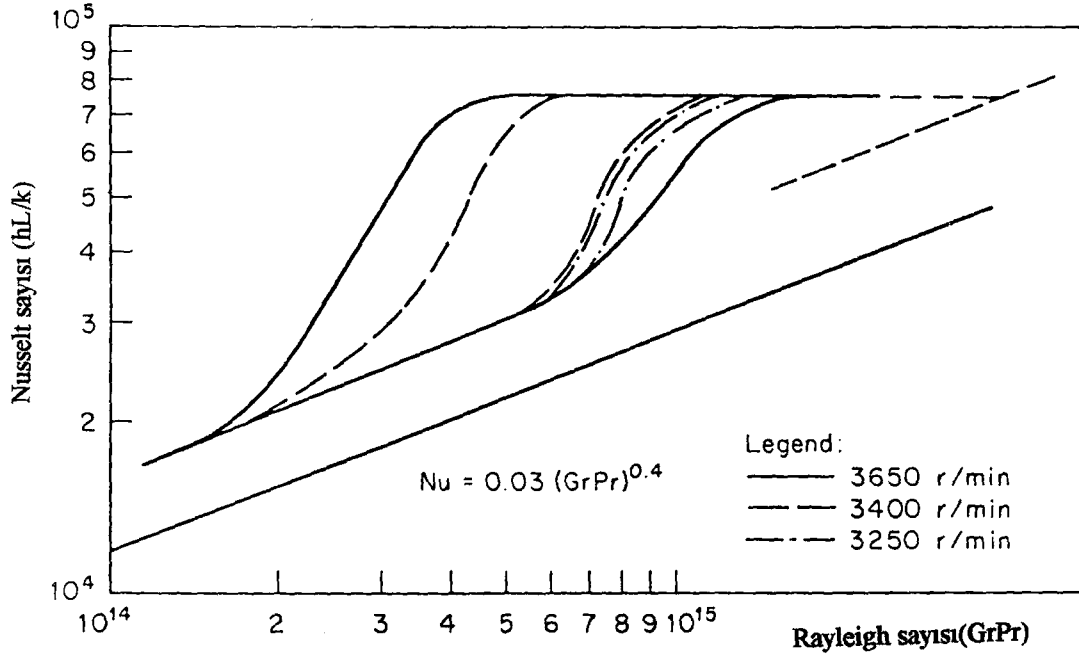
Bu sistemin tasarımı için yapılan hesaplamalar önemli performans ve özelliklerinin modelleşmesi için bir dizi deney ile doğrulamaya maruz kalmıştır. Özellikle, süperiletken uygulamasının cryostabilitesi, gerçek çalışma sırasındaki aynı çerçe hızıyla dönen bir çerçevedeki ısı transfer emsallerinin ölçümüyle doğrulanmıştır. Şekil 3.20 ve 3.21'deki gösterilen deneysel sonuçlar, yüksek hızlanma alanlarındaki doğal taşıma hakkında yeni önemli bilgiler kazandırılmışlardır. Bilginin makinanın alan bobinine uyulanması hem düz merkezi kısımda hem de kıvrılmış uç dönüşlerindeki cryostabilitesini göstermiştir.

Sürekli çalışan süperiletken genaratörlerin pratik uygulamaları için, helyum soğutucusu, soğutucu-sıvılaştırıcıdan cryogenic kapanışa rotorun üstünden tekrar geriye sirküle edilmelidir. Sıvı helyum aşağı yukarı 4°K'da elde edilir ve tork tüplerini soğutmada kullanıldıktan sonra yaklaşık olarak oda sıcaklığında geri döndürülür. Bu fonksiyonu gösteren transfer bağlantısı, mantıklı bir verimlilikte çalışmak için hem vakum izolasyonuna hem de yakın temizlemelere ihtiyaç duyar. Helyum akıntısı için termal salınımları yaşamak olasıdır, rotorun üzerinden kaynak düzensizlikleri yaparlar.

Süperiletken jeneratörlerin geçici çalışma şartları soğutucu ihtiyaçlarını belirlemede hesaba katılmalıdır.



Şekil 3.19 Bobin düz kısmında ısı transfer koalisyonu



Şekil 3.20 Bobin ucundaki ısı transfer koalisyonu

3.8.4 Elektromekanik Tasarım ve performans

Süperiletken bir AC makinanın elektromekanik tasarımı zincirleme ve belirli bir sırada oluşan bir prosestir.

Proses bir spesifikasyonla başlar. Örneğin bir türbin jeneratörü için normal durum spesifikasyonunda, dereceleme ve normal çalışma kapasiteleri tanımlanacaktır, geçici performans parametrelerinin de bazıları belirlenebilir. Özel bir spesifikasyonun ana görüşleri Tablo 3.6'da özetlenmiştir. Buna ek olarak, bu spesifikasyonun bilirlenen vahimlikte bir hata için kritik hata temizleme zamanının minimum değerine ihtiyacı vardır.

Tablo 3.6 300 MVA'lık Süperiletken Genaratörün Özellikleri

Hat Gerilimi	24 kV
Frekans	60 Hz
Hız	3600 r/min
Güç Faktörü	0.90
Negatif Kapasite	$I_2 \geq 0.1 \dagger$ $I_2^2 t \geq 15 \dagger$
Reaktans	$X_d \leq 50 \% \ddagger$ $X'_2 \leq 35 \% \ddagger$ $X''_2 \leq 20 \% \ddagger$
Verim	99.4 %

$\dagger$ Oranlanmış akımın her bir ünitesindeki I_2

$\ddagger$ MVA Bazında oranlanmış per - unit I

3.8.5 Konfigrasyon Tasarımı

Bu konfigrasyonlar seçildikten sonra, ana boyutların başlangıç belirlemeleri yüklenilebilir. Final tasarım amaçları için uygun olmasa da, makinanın orta kısmı için başlangıç ebatlandırma iki boyutlu alan analizine dayanılarak yapılabilir. Bu amaçla, uç kısım etkileri, farazi bir düzeltme faktörü ile hesaba katılmıştır. İki kutuplu bir generatöre uygulanabilir denklemler Tablo 3.7 ve 3.8 'de verilmiştir, bu tablolar önemli bölgelerindeki alanlar için başlangıç tahminlerini ve indüktans için hesaplamaları gösterir.

Derecelenmiş voltamperler için tabirleri değerlendirmek te uygundur

$$P_r = 3V_t I_a \quad (3.20)$$

Her bir senkron reaktans için

$$x_s = \frac{x_a I_a}{V_t} \text{ dır.} \quad (3.21)$$

aynı zamanda transient ve subtransient reaktanslar, Tablo 3.8 'deki formülleri kullanarak bulunur.

Bunu yapmak için, V_t 'yi dahili makina gerilimi cinsinden değerlendirmek gerekir.

$$E_f = \frac{wMI_f}{\sqrt{2}} \quad (3.22)$$

Makina gerilimi ve akımları arasındaki ilişkiden ve kosinüs kanunundan

$$\frac{V_t}{E_f} = \sqrt{1 - x_a^2 \cos^2 \Psi} - x_a \sin \Psi \quad \text{formülü yazılabilir.} \quad (3.23)$$

Burada $\cos \Psi$ güç faktörüdür ve

$$x_a = \frac{x_a I_a}{E_f} \quad (3.24)$$

ise dahili gerilim E_f baz alınarak hesaplanan birim başına senkronize reaktans'dır. Kutup gerilimi baz alınarak her bir senkronize reaktans için

$$x_s = \frac{I_a x_a}{V_t} = x_a \frac{E_f}{V_t} \quad \text{dır ve} \quad (3.25)$$

$$x_a = \frac{\omega (L_a - L_{ab}) I_a}{E_f} \quad \text{olur.} \quad (3.26)$$

Subtransient reaktans, elektrotermal siper tarafından bağlanan akının sabit olduğu farzedilerek hesaplanır. Eşdeğer kabuğun kapak bobinleri, alan bobinlerinin transient reaktansdaki ile aynı rolü oynarlar. Daha da ileri, bu kabuk simetrik olduğundan, direk ve enine eksen subtransient reaktansları aynıdır:

$$x_d'' = x_q'' = x_s \left[1 - \frac{3}{2} \frac{L_a^2 a d l}{(L_a - L_{ab}) L_{d1}} \right] \quad (3.27)$$

Çok uzun geçici zaman sabitleri nedeniyle subtransient reaktans aynı zamanda stabilize çalışmalarında geleneksel makinaların transient reaktansı rolünü de oynar.

Alan bobini, armatür bobini, ve siper veya siperlere tesadüf eden elektromanyetik orjinli güçler için ilk değerlendirmeler bu temele göre yapılabilir. Özellikle, rotor siperindeki ovalize eden güçler (bu amaç için rotorun dış yüzeyinde ve dikkate alınmayacak kalınlıkta olduğu varsayılır) Furuyama'nın çalışmaları genişletilerek hesaplanabilir.

Rotor bobini üzerindeki kısa devre güçlerinin ve elektromanyetik torkların ön hesaplamaları aynı zemine oturtulabilir. Değişik tiplerdeki kısa devreler süresince rotor tarafından denenen torklar için kapalı şekilde ifadeler mevcuttur, bunlar shaft kısımlarının ve iç bağlantıların (örn, termal çekilmeyi uzaklaştırmak için kullanılan esneme desteği) ilk ebatlandırılmaları için oldukça doğrudur. Armatürün en azından düz kısımlarındaki elektromanyetik güçler de $J \times B$ vektör ürününü oluşturarak kapalı şekilde ifadelerden bulunabilir.

Tablo 3.7 ve 3.8 'deki tasarım denklemlerinin kullanımı, girdi elemanı olarak alan ve rotor bobinlerinin akım yoğunluklarının J_f ve J_a olmasını gerektirir. Geleneksel tasarım pratiğinde, bu yoğunluklar genellikle aynı veya benzer soğutma metodlarını baz alan daha önceki tasarımlardan tahmin edilebilir. Süperiletken jeneratörler için, soğutma önemli bir kriter olarak kalır ancak, süperiletkenin kritik akımı gibi diğer kriterler de hesaba katılmalıdır. Ayrıca dikkat edilmelidir ki, J_f ve J_a yoğunluklarının bobinler tarafından doldurulan dairesel kısımlar üzerinden ortaları alınmıştır. Bu boşluklar sadece aktif iletkenleri değil, yapısal destek için gerekli olan materyalleri de içerir. Böylece ortalama ulaşılabilir yoğunluklar, iletken materyallerdeki yoğunlukların oldukça altındadır.

Jeneratör hacminden ekonomik olarak yararlanabilmek ve aktif iletken alanı ve destek materyali arasında verimli bir paylaşma elde etmek için, tasarımcı tasarım optimizasyonuna gidebilir. Optimizasyonun klasik metodlarının kullanımı için birtakım

engeller, örn: en dik meyil, bazılarının sürekli olmaktan çok farklı olduğu oldukça fazla sayıda değişkenler de dahil, sayılabilir. Ayrılabilir tasarım özelliklerinin, örn: alan bobini, altoptimizasyonu böylece daha verimli bir yaklaşım olabilir. Multiparametrik analiz ile optimizasyonun da kullanışlı olduğu anlaşılmıştır. Bu tür bir analiz, armatür akım yoğunluğunu, tasarım kavramının teknik ve ekonomik yaşama kabiliyeti için dallanmaları olan önemli bir değer şekli olarak tanımlamıştır. Makinanın bütün kısımları için ön soğutma çalışmaları da aşağı yukarı bu zamanda başlatılmalıdır. Eğer J_J ve J_a için değerler tahmin edilmişse, bu tahminlerin bazı doğrulamaları gerekmektedir.



Tablo 3.7 İki Kutupta Generatör İçin Manyetik Alan

A fazı rotor sargıları alanı

$$r < R_{ai}$$

$$H_{ra} = - \sum_{n_{odd}} \frac{2J_a \sin(n\theta_{wae}/2) \sin np\theta}{n\pi(2-np)} r \left(\frac{r}{R_{ao}} \right)^{np-2} \left[-1 - x^{2-np} \right. \\ \left. \pm \left(\frac{2-np}{2+np} \right) \left(\frac{R_{ao}}{R_s} \right)^{2np} (1 - x^{2+np}) - \right]$$

$$H_{\theta a} = \sum_{n_{odd}} \frac{2J_a \sin(n\theta_{wae}/2) \cos np\theta}{n\pi(2-np)} r \left(\frac{r}{R_{ao}} \right)^{np-2} \left[1 - x^{2-np} \right. \\ \left. \pm \left(\frac{2-np}{2+np} \right) \left(\frac{R_{ao}}{R_s} \right)^{2np} (1 - x^{2+np}) - \right]$$

$$R_{ai} < r < R_{ao}$$

$$H_{ra} = - \sum_{n_{odd}} \frac{2J_a \sin(n\theta_{wae}/2) \sin np\theta}{n\pi(4-n^2p^2)} r \left[-2np - (2-np) \left(\frac{R_{ai}}{r} \right)^{np+2} \right. \\ \left. + (2+np) \left(\frac{r}{R_{ao}} \right)^{np-2} \pm (2-np) \left(\frac{r}{R_s} \right)^{np-2} \left(\frac{R_{ao}}{R_s} \right)^{np+2} (1 - x^{np+2}) - \right]$$

$$H_{\theta a} = - \sum_{n_{odd}} \frac{2J_a \sin(n\theta_{wae}/2) \cos np\theta}{n\pi(4-n^2p^2)} r \left[-4 + (2-np) \left(\frac{R_{ai}}{r} \right)^{np+2} \right. \\ \left. + (2+np) \left(\frac{r}{R_{ao}} \right)^{np-2} \pm (2-np) \left(\frac{r}{R_s} \right)^{np-2} \left(\frac{R_{ao}}{R_s} \right)^{np+2} (1 - x^{np+2}) - \right]$$

$$R_{ao} < r < R_s$$

$$H_{ra} = - \sum_{n \text{ odd}} \frac{2J_a \sin(n\theta_{wac}/2) \sin np\theta}{n\pi(2+np)} r \left(\frac{R_{ao}}{r} \right)^{np+2} (1-x^{np+2}) \left[1 \pm \left(\frac{r}{R_s} \right)^{2np} \right]$$

$$H_{\theta a} = - \sum_{n \text{ odd}} \frac{2J_a \sin(n\theta_{wac}/2) \cos np\theta}{n\pi(2+np)} r \left(\frac{R_{ao}}{r} \right)^{np+2} (1-x^{np+2}) \left[1 \pm \left(\frac{r}{R_s} \right)^{2np} \right]$$

($\pm$ veya $\mp$) işaretlerinden yukarıdaki kullanıldığında ferromanyetik ortak perdeleme olayını ifade eder.

Tablo 3.8 İki Kutuplu generatör İçin İndüktans

$$L_f = \sum_{n \text{ odd}} \frac{16\ell_f \mu_0 N_{fn}^2 \sin^2(n\theta_{wfe}/2)}{n^3 p \pi \theta_{wfe}^2 (n^2 p^2 - 4)(1-y^2)^2} \left[(np-2) + 4y^{np+2} - \right. \\ \left. (np+2)y^4 \pm 2 \left(\frac{np-2}{np+2} \right) (1-y^{np+2})^2 \left(\frac{R_{fo}}{R_s} \right)^{2np} - \right]$$

$$L_a = \sum_{n \text{ odd}} \frac{16\ell_a \mu_o N_{at}^2 \sin^2(n\theta_{wae}/2)}{n^3 p \pi \theta_{wae}^2 (n^2 p^2 - 4)(1-x^2)^2} \left[(np-2) - + 4x^{np+2} \right. \\ \left. - (np+2)x^4 \pm 2 \left(\frac{np-2}{np+2} \right) (1-x^{np+2})^2 \left(\frac{R_{ao}}{R_s} \right)^{2np} - \right]$$

$$L_{ab} = \sum_{n \text{ odd}} \frac{16\ell_a \mu_o N_{at}^2 \sin^2(n\theta_{wae}/2) \cos(2n\pi/3)}{n^3 p \pi \theta_{wae}^2 (n^2 p^2 - 4)(1-x^2)^2} \left[(np-2) - \right. \\ \left. + 4x^{np+2} - (np+2)x^4 \pm 2 \left(\frac{np-2}{np+2} \right) (1-x^{np+2})^2 \left(\frac{R_{ao}}{R_s} \right)^{2np} - \right]$$

$$L_a - L_{ab} = \frac{16\ell_a \mu_o N_{at}^2}{p \pi \theta_{wae}^2 (1-x^2)^2} C_{sx}$$

$$C_{sx} = \sum_{n_{\text{odd}}} \frac{\sin^2(n\theta_{\text{wac}}/2)[1 - \cos(2n\pi/3)]}{n^3(n^2p^2 - 4)} \left[(np - 2) - + 4x^{np+2} \right. \\ \left. - (np + 2)x^4 \pm 2\left(\frac{np - 2}{np + 2}\right)(1 - x^{np+2})^2 \left(\frac{R_{ao}}{R_s}\right)^{2np} - \right]$$

$$M_a = \sum_{n_{\text{odd}}} \frac{32l_m \mu_o N_{ft} N_{at} C_{mn} \cos np\theta}{p\pi\theta_{\text{wfe}}\theta_{\text{wae}}(1 - y^2)(1 - x^2)} \left(\frac{R_{fo}}{R_{ao}}\right)^{np}$$

$$C_{mn} = \frac{\sin(n\theta_{\text{wae}}/2)\sin(n\theta_{\text{wfe}}/2)(1 - y^{np+2})}{n^3(4 - n^2p^2)} \left[1 - x^{2-np} \right. \\ \left. \pm \frac{2 - np}{2 + np}(1 - x^{2+np}) \left(\frac{R_{ao}}{R_s}\right)^{2np} - \right]$$

$$L_{dn} = \frac{\mu_o l_d \pi N_{np}^2}{8np} \left[1 \pm \left(\frac{R_t}{R_s}\right)^{2np} \right]$$

$$L_{adn} = \frac{2\mu_o \ell_{ad} N_{at} N_{np} \sin(n\theta_{\text{wac}}/2) \cos np\theta}{n^2 p \theta_{\text{wac}} (1 - x^2)(2 - np)} \left(\frac{R_t}{R_{ao}}\right)^{np} \left[1 - x^{2-np} \right. \\ \left. \pm \frac{2 - np}{2 + np}(1 - x^{2+np}) \left(\frac{R_{ao}}{R_s}\right)^{2np} - \right]$$

$$L_{fdn} = \frac{2\mu_o \ell_{fd} N_{ft} N_{np} \sin(n\theta_{\text{wfe}}/2)}{\theta_{\text{wfe}}(1 - y^2)n^2 p} \left(\frac{R_{fo}}{R_t}\right)^{np} \left(\frac{1 - y^{np+2}}{np + 2}\right) \left[1 \pm \left(\frac{R_t}{R_s}\right)^{2np} \right]$$

Tablo 3.9 İki Kutuplu Generatör İçin Manyetik Alan

Alan - Sargı Alanları

$$r < R_{fi}$$

$$H_{rf} = - \sum_{n_{\text{odd}}} \frac{2J_f \sin(n\theta_{wfe}/2) \sin np(\theta - \phi)}{n\pi(2 - np)} r \left(\frac{r}{R_{fo}} \right)^{np-2} \left[1 - y^{2-np} \right. \\ \left. \pm \left(\frac{2 - np}{2 + np} \right) \left(\frac{R_{fo}}{R_s} \right)^{2np} (1 - y^{2+np}) - \right]$$

$$H_{\theta f} = - \sum_{n_{\text{odd}}} \frac{2J_f \sin(n\theta_{wfe}/2) \cos np(\theta - \phi)}{n\pi(2 - np)} r \left(\frac{r}{R_{fo}} \right)^{np-2} \left[1 - y^{2-np} \right. \\ \left. \pm \left(\frac{2 - np}{2 + np} \right) \left(\frac{R_{fo}}{R_s} \right)^{2np} (1 - y^{2+np}) - \right]$$

$$R_{fi} < r < R_{fo}$$

$$H_{rf} = - \sum_{n_{\text{odd}}} \frac{2J_f \sin(n\theta_{wfe}/2) \sin np(\theta - \phi)}{n\pi(4 - n^2 p^2)} r \left[-2np - (2 - np) \left(\frac{R_{fi}}{r} \right)^{np+2} \right. \\ \left. + (2 + np) \left(\frac{r}{R_{fo}} \right)^{np-2} \pm (2 - np) \left(\frac{r}{R_s} \right)^{np-2} \left(\frac{R_{fo}}{R_s} \right)^{np+2} (1 - y^{np+2}) - \right]$$

$$H_{\theta f} = - \sum_{n_{\text{odd}}} \frac{2J_f \sin(n\theta_{wfe}/2) \cos np(\theta - \phi)}{n\pi(4 - n^2 p^2)} r \left[-4 + (2 - np) \left(\frac{R_{fi}}{r} \right)^{np+2} \right. \\ \left. + (2 + np) \left(\frac{r}{R_{fo}} \right)^{np-2} \pm (2 - np) \left(\frac{r}{R_s} \right)^{np-2} \left(\frac{R_{fo}}{R_s} \right)^{np+2} (1 - y^{np+2}) - \right]$$

$$R_{fo} < r < R_s$$

$$H_{rf} = - \sum_{n_{odd}} \frac{2J_f \sin(n\theta_{wfe} / 2) \sin np(\theta - \phi)}{n\pi(2 + np)} r \left(\frac{R_{fo}}{r} \right)^{np+2} (1 - y^{np+2})$$

$$\left[1 \pm \left(\frac{r}{R_s} \right)^{2np} \right]$$

$$H_{\theta f} = - \sum_{n_{odd}} \frac{2J_f \sin(n\theta_{wfc} / 2) \cos np(\theta - \phi)}{n\pi(2 + np)} r \left(\frac{R_{fo}}{r} \right)^{np+2} (1 - y^{np+2})$$

$$\left[1 \pm \left(\frac{r}{R_s} \right)^{2np} \right]$$

3.8.6 Detay tasarımı

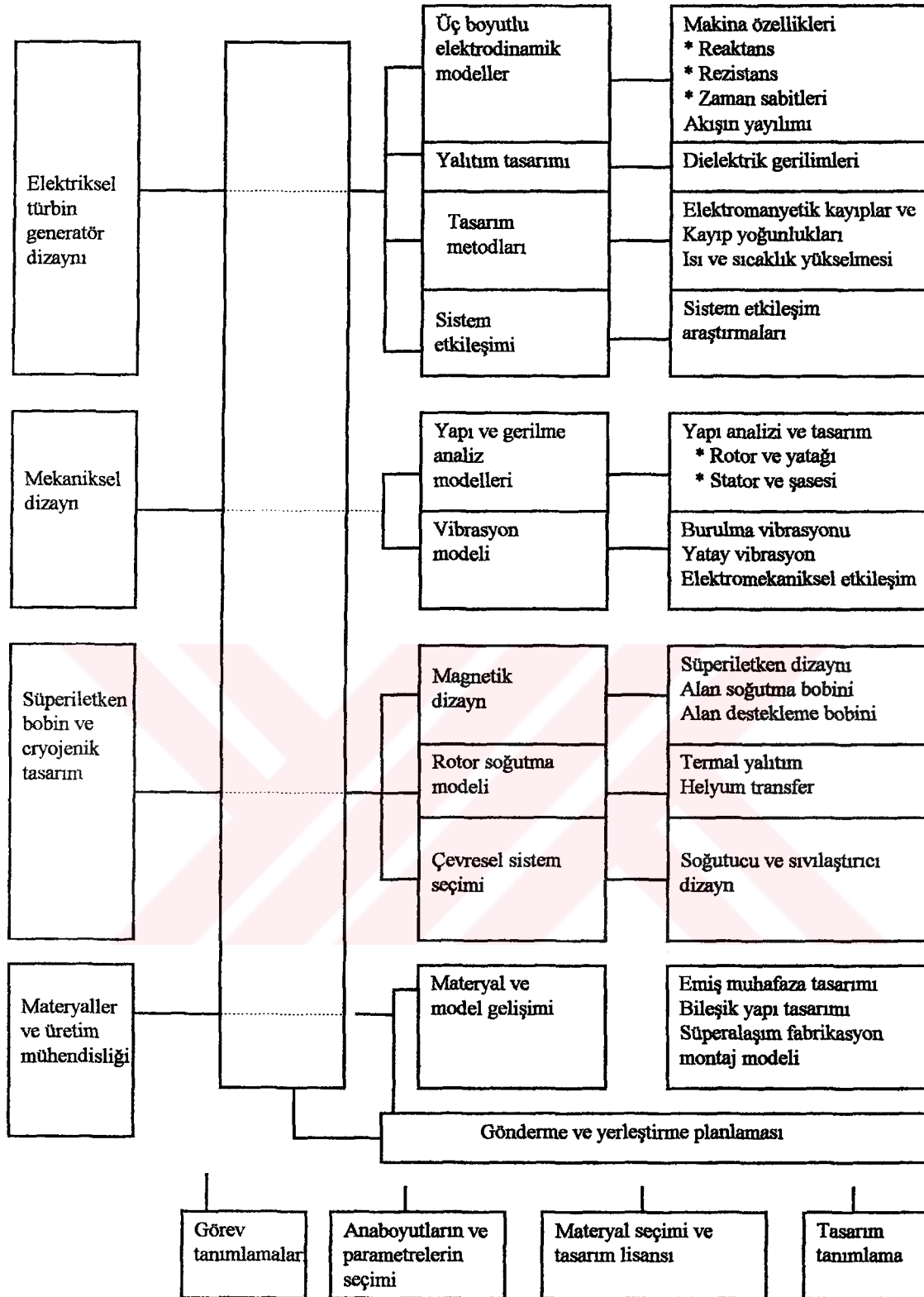
Helyum yönetimi tasarımı ve bobin tasarımı bağımsız çabalar değildirler, aksine mükerrer bir alt halka teşkil ederler. Bu ancak helyum temin etme sisteminin soğutma kapasitesi ve bobinin soğutma gereksinimleri arasında uygun bir uyum elde edildiğinde uygulanabilir. Ve sadece düzenli durum sırasında değil, bir söndürmenin dibe çökmesini engellemek üzere hata durumlarında yeterli toleransı sağlamak için de elde edilmelidir.

Detay tasarım sürecine genel bir bakış Tablo 3.10'da gösterilmiştir, burada basitlik ve açıklık için sadece en yüksek derece vazifeleri gösterilmiştir. Dikkat edilmelidir ki, neredeyse bütün diğer analiz ve tasarımlarına temel olacak bir anahtar vazife, makinanın içindeki manyetik alanın üç boyutlu dağılımının sadece düzenli durum şartlarında değil özellikle ilgili bütün geçici şartlarda kesin olarak belirlenmesidir. Bu kesinleşme için olan ihtiyaç, çoğunlukla süperiletken alan bobinin birleşik elektrotermal koruma sisteminin zayıflatmasından sonra bile önemli bir boyutta kalan elektromanyetik rahatsızlıklara karşı olan hassasiyetinden doğmaktadır. Bir süperiletken AC generatörünün içinde manyetik materyalin yokluğu, demir çekirdekli makinalar için kullanılan tasarım yaklaşımını geçersiz kılar ve makinanın matematiksel modelini gerektirir. Buna ilaveten model,

iletken siperler tarafından maruz bırakılan difüzyon problemini yeterli doğrulukta hesaba katabilecek ve alan bobinindeki manyetik alan rahatsızlıklarını güvenilir şekilde değerlendirebilecek şekilde yapılmalıdır. Küçük alan değişiklikleri bile önemli enerji serbestliğine yol açacağından, oldukça kesin rakamsal sonuçlara gerek vardır. Ovalize eden güçler, iletken siperlerin, hata yüklemesinin sarsıntısı altında deforme olmalarına neden olur. Bu da süperiletkenlerde kayıp oluşumu için başka bir mekanizma oluşmasıyla sonuçlanır. Daha ayrıntılı modeller de bu etkiyi hesaba katarlar.

Detay tasarımı için, üç boyutlu analiz metodu geçici sistem tesirlerini, süperiletken kayıplarını, ve ısı artışını olduğu kadar güç sistemi-cryogenic sistemi stabilitesi konusuna genel etkisini de tahmin etmede kullanılır. Spesifik bir durum için bazı sonuçlar aşağıda gösterilmiştir. bu performans hesaplamaları için yapılan tasarım Tablo 3.11'de gösterilmiştir.





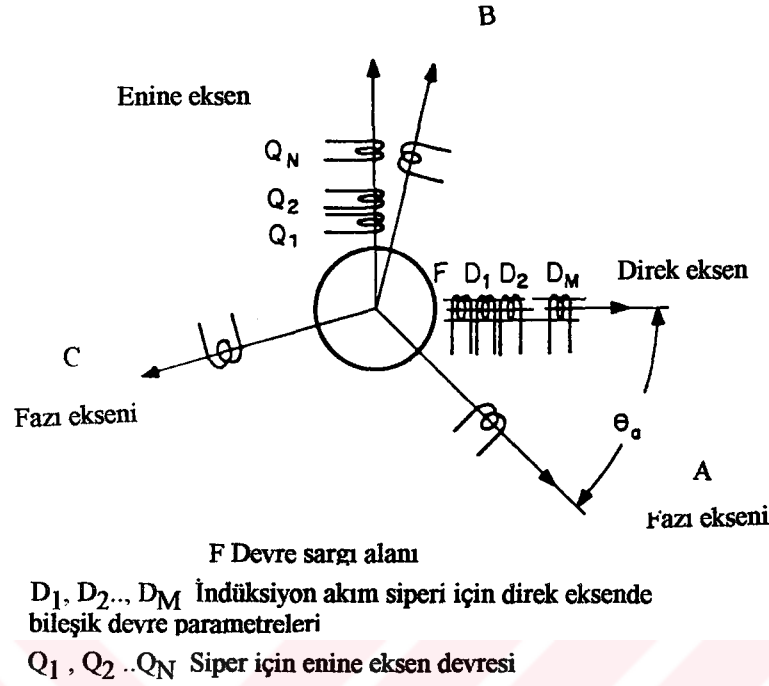
Tablo 3.10 Çalışma Dizaynı

Tasarım Örneği

Şekil 3.14 analizin uygulandığı konfigürasyonları gösterir. İdeal bir manyetik konteyner ve silindirik yüzeylerde geliştirilen bobinler varsayılır. Katı siperden geçen manyetik difüzyon, kalın siperi, indüksiyon açısından çiftler ancak mukavemet açısından izole edilmiş, bir set halinde ince ortak merkezli alt kabuklar ile değiştirilerek modelleştirilir.

Lineerlik ve süperpozisyonun geçerli olduğu varsayılır. Senkronize makinanın Park d-q analizinin bir uzantısını kullanan çift-devre yaklaşımı, göze çarpan bobinleri ve iletken siperleri fiziksel bobinlerdeki gerçek akımları andıran akımlar taşıyan çift devre serilerine bölerek incelemede ve geçici değerlerini hesaplamada kullanılır.

Bu model yapma sürecinin sonuçları önceden hem bütün makinanın eşdeğer-devre modelinin hem de genişletilmiş Park denklemlerinin, Şekil 3.21'te önerildiği gibi, alakalı bir grubunun elde edileceği şeklinde yorumlanabilir, sonuç olarak bu model, senkron makinada uygulamalarının sistem performans özellikleri, örn. stabilize ve hata analizler, çalışmalarında standard hale gelen geçici tesir analizleri tiplerine uygundur. Bu kadar karmaşık bir model için temel motivasyon, makinanın içindeki akımını ve akımın doğru temsil edilmesi olsa da, hesaplama doğruluğuna da dikkat edilmelidir. Ve model birçok makinanın ardarda modellenmesini gerektiren sistem sunuşlarına dahil olmaya henüz uygun değildir. Bu amaçlar için model, Tablo 3.11'de gösterilen olağan stabilite çalışmaları sabitlerini elde edebilmek için adapte edilmiştir. Bu değerleri elde etmek için, model değişik frekanslardaki akımlarla uyarılmış ve standart sabitler "frequency-domain" operasyonel zahiri dirençlerin eğri uydurulması ile elde edilmişlerdir. Makinanın kabul edilebilir bir doğrulukla tam temsili, belirli ebatlardaki ($\approx 200 \times 200$) matrislerin manipülasyonu ile olur. Bunlar yüksek rakamsal doğrulukla tersine çevrilmelidirler. Kabul edilebilir doğrulukta ve hesaplama maliyetinde sonuçlar elde edebilmek için verimli metodlar geliştirilmiştir. Aşağıdaki rakamlar, bu makinanın çeşitli önemli performans özelliklerini göstermektedir.



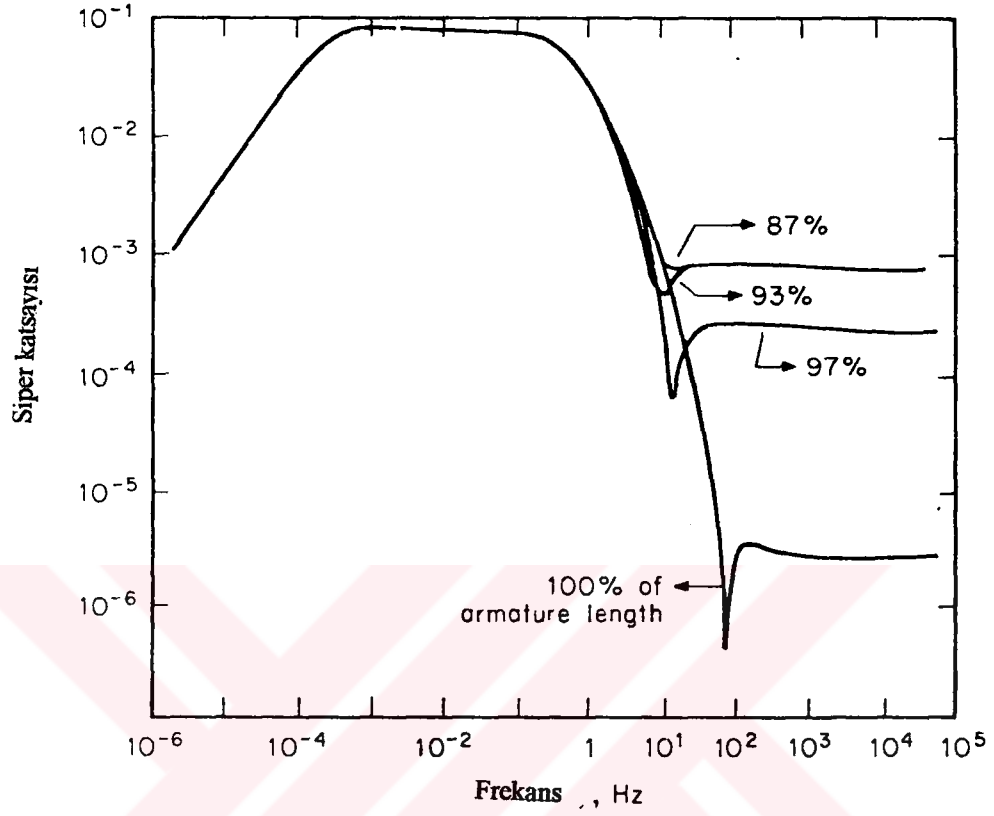
Şekil 3.11 Üç fazlı süperiletken genaratörün şematik gösterimi

Performans Özellikleri

Bu rakamlar bütün dönen makina teorilerinde temel olan kavramları gösterse de, daha geleneksel yapıdaki makinalardan dikkat çekecek kadar farklı olan süperiletken jeneratör özellikleri gösterirler. Bu farklılıklara yol açan temel faktör, alan bobininin rotor ve onun elektromanyetik reaksiyonundan etkili izolasyonu ve korunmasıdır. Artan sayıda eksenel harmonikler yapılan koruma hesaplamalarının harmonik sırasına oldukça hızlı yaklaştıkları ve altı harmoniğin iyi sonuçlar almak için yeterli olduğu bulunmuştur. Şekil 8.9 siper uçları etrafındaki akının bütün sızmalarını engellemek için soğuk siperin armatür bobininin en uçlarına kadar uzatılması gerektiğini gösterir.

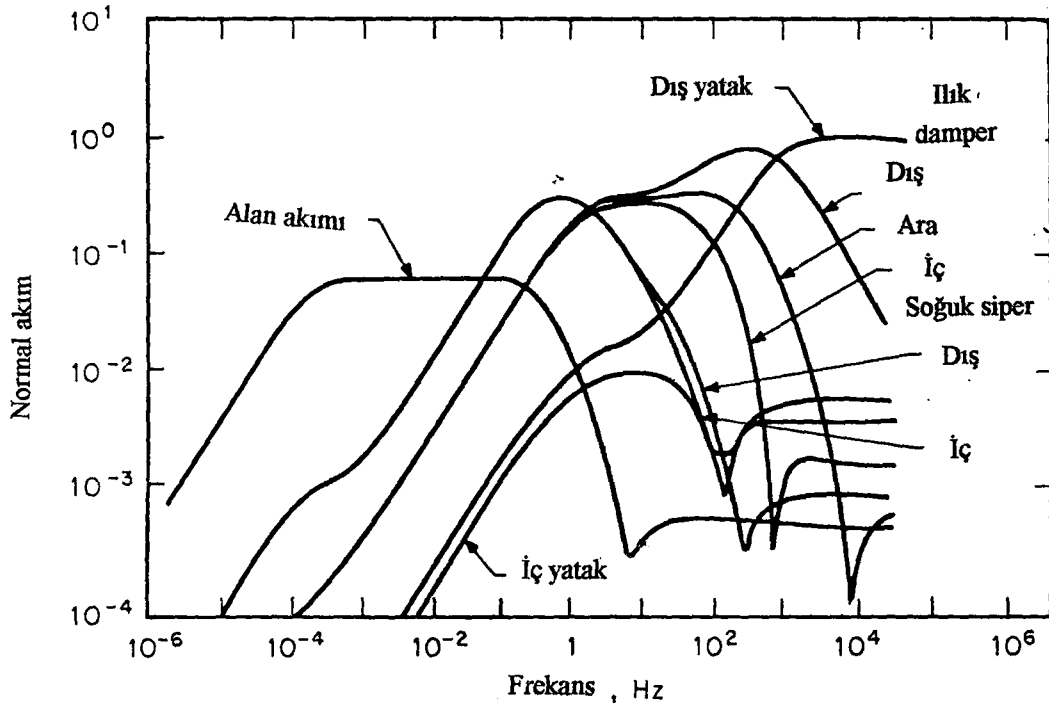
Şekil 3.23'den koruma akımlarının müteakkip rotor kabukları arasında dağılımı frekansın bir fonksiyonu olarak gösterilmektedir. Dikkat edilmelidir ki, 1-2 Hz 'den daha yüksek frekanslar ile olan problemler için, alan bobini rotordan esasen ayrılmıştır. Bu

ayrılmanın sonucu olarak, alan zorlaması süperiletken jeneratörlerin stabilite arttırımı için verimli değildir.

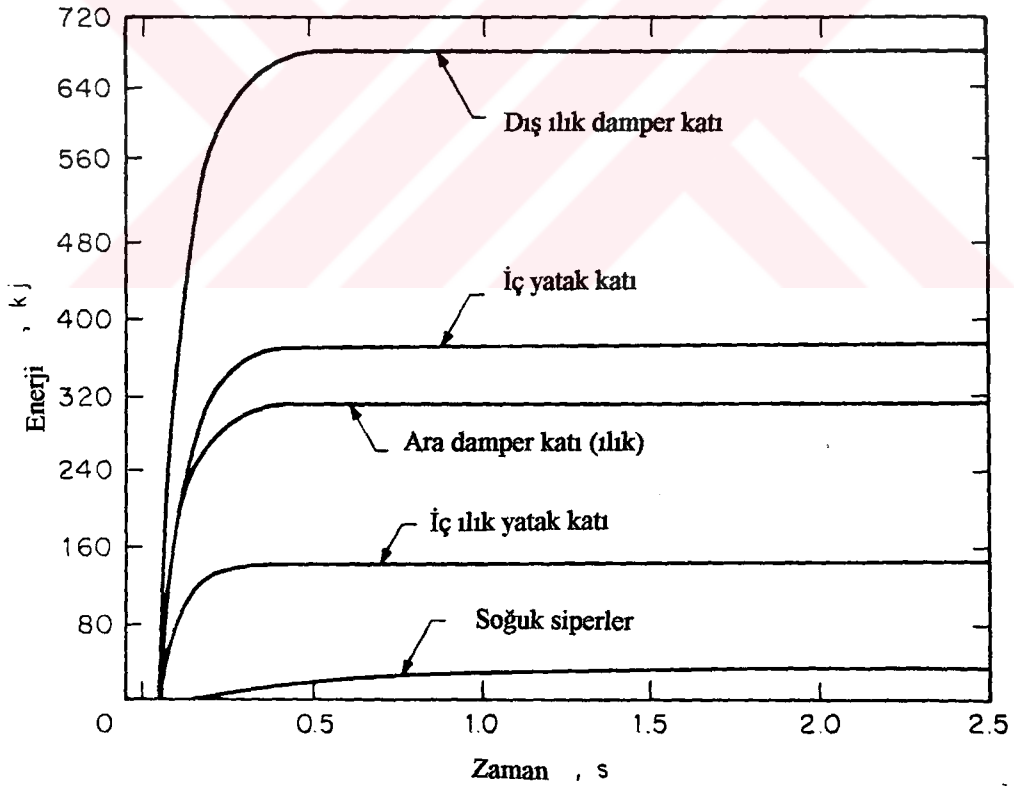


Şekil 3.22 Soğuk siperin farklı uzunluğu için siper katsayısı

Koruma akımları tarafından oluşturulan kayıplar Şekil 3.24'de gösterilmiştir. (üç faz hatası)

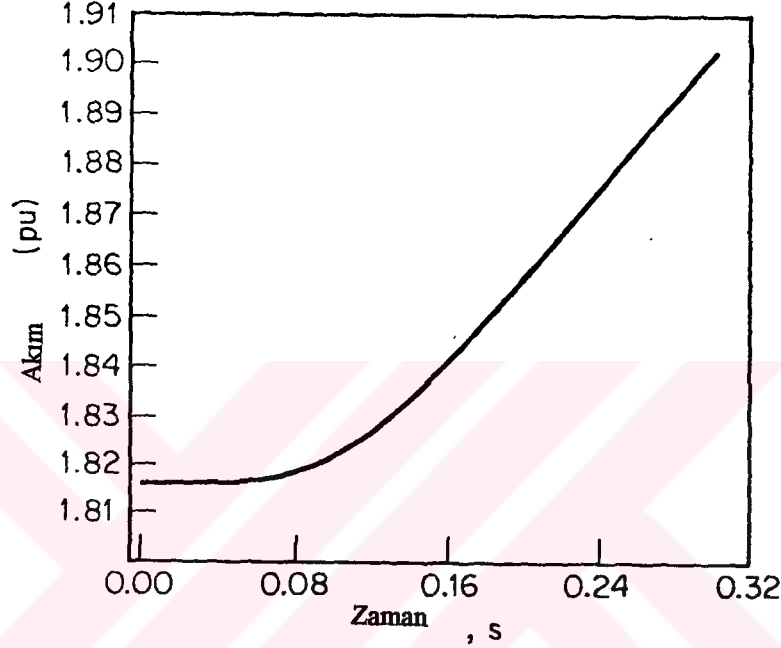


Şekil 3.23 Rotor uyarım frekansının siper destek tabaka akım dağılımı ve alan akımına göre durumu



Şekil 3.24 Üç faz hatası esnasında siper ve siper destek tabakasındaki enerji kaybı

Beklenilebileceği gibi, hemen hemen ılık yapıdaki bütün enerji, hatanın kısa başlangıç periyodunda ortaya çıkar. Soğuk siperdeki enerji kaybı, difüzyon etkileri ile geciktirilmiştir. Şekil 3.25'de gösterildiği gibi, alan bobininin birden fazla korunması (beraber hareket eden soğuk ve sıcak siperler) diğer bütün daha yüksek frekanstaki problemlerin hemen hemen tamamen zayıflatılmasına neden olur.

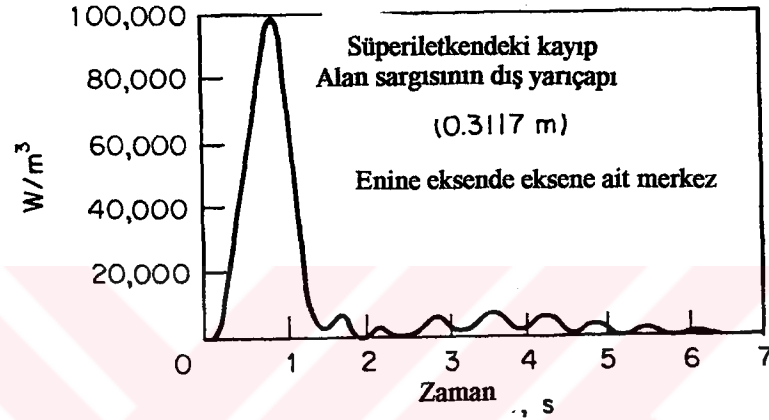


Şekil 3.25 Üç faz hatası boyunca alan akımı

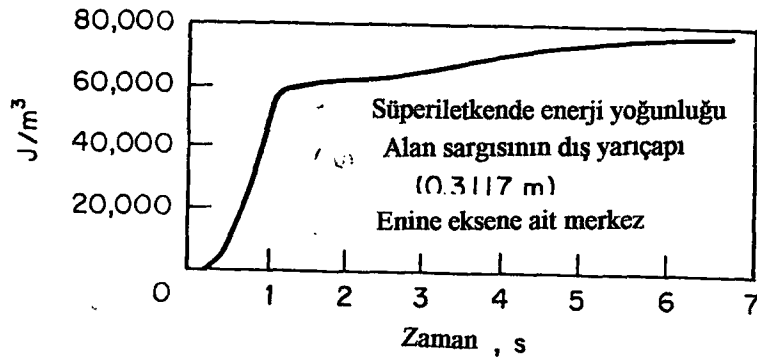
Gösterilen zaman tepkisi, arttırılmış armatür reaksiyonunun senkronize parçasına karşı koymak için gerekli olan alan akımının kademeli artışıdır. Bu düzgün ve kademeli tepki, geleneksel bir jeneratördeki alan tepkisine zıt gelebilir. Bunlarda verimli bir amortisör kafesi ile bile dikkate değer bir temel frekans elemanı gözlemlenebilir.

Bu mükemmel izolasyona rağmen, hatalar sırasında rotorun cryogenic bölgesindeki enerji israfı, özellikle yeni bir düzenli safhaya geçişte yaşanan yavaş rotor salınımları sırasında önemli olacaktır. Kritik hata düzeltme zamanında ısrar eden hata vakaları, 300 MVA'lık bir makina için çok detaylı çalışılmıştır, aynı zamanda kritik hata düzeltme zamanını arttırmak da çalışmaların bir amacıdır. Sonuçlar şekil 3.26, 3.27, ve 3.28'de

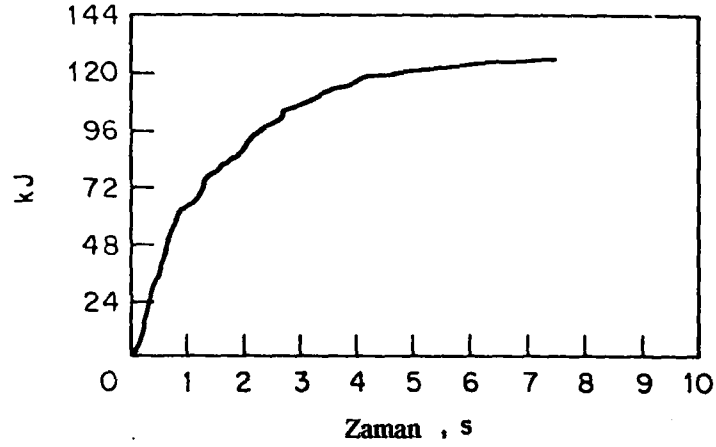
gösterilmiştir ve bu sırayla, süperiletkende sebep olunan kayıpları, aynısındaki enerji israfının yoğunluğunu ve soğuk siper kaybını gösterirler. Bu kayıplar sonra helyum soğutucusuna yayılırlar. Bu dönen kısımların yüksek yerçekim (g) hızlanması ile oluşan fazla verimli ısı transferinin bir sonucu olarak, soğutucuya enerji bırakılması saniyelerle tamamlanır.



Şekil 3.26 Üç faz 15 devir hatası için süperiletken kaybı

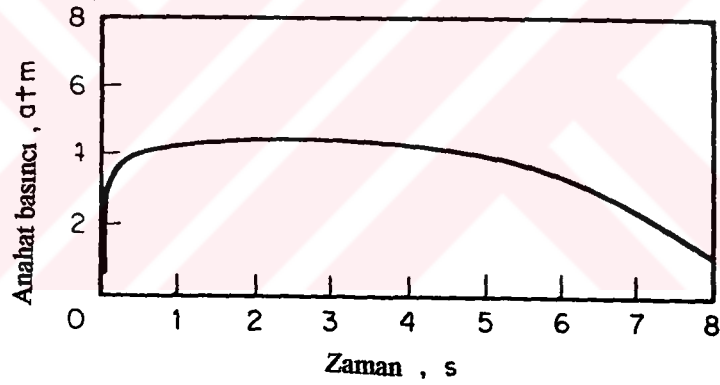


Şekil 3.27 15 devir üç faz hatası için süperiletken enerji yoğunluğu



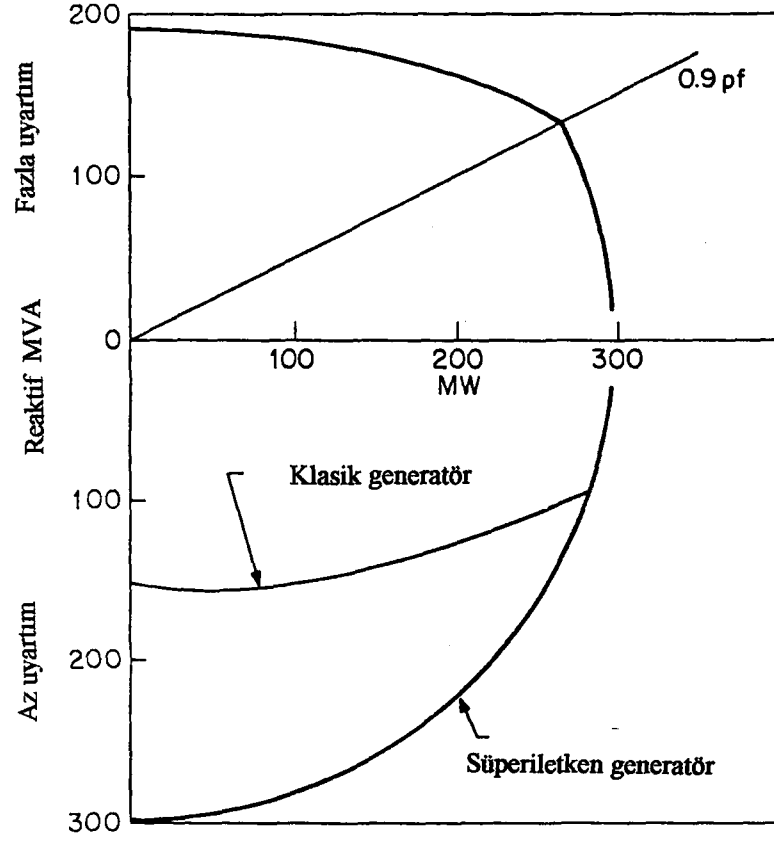
Şekil 3.28 Üç faz 15 devir hatası için soğuk siper kaybı

Ancak, yüksek hızda enerji serbest bırakılması, helyum sisteminde dikkati çekecek bir basınç artışı oluşturur, ve buna rotor bölümlerinin mekanik kısımlarının tasarımında dikkatli olunmalıdır, basınç artışı şekil 3.29'da gösterilmiştir.



Şekil 3.29 Üç faz 15 devir hatası için helyum sistemi basınç yükselmesi

Son olarak, şekil 3.30'da gerekli hata tolerans derecesini sağlamak için rotorun merkez çukurunda depolanmış helyum hacminin azaltılmasını gösterir. Bu depolanmış helyumun büyük bir kısmı uzun süreli hatalarda tüketildiğinden, tam hata toleransı elde etmek için gerekli zaman, helyumun transfer mekanizması içinden tekrar dolduğu hızla belirlenir.



Şekil 3.31 Sabit durum kapasitesinde ilerleme

Tablo 3.11 300 MVA Süperiletken Generatör İçin Tasarım Parametreleri

Alan bobini iç yarıçapı	242	İletken Yarıçapı	589
Alan bobini dış yarıçapı	312	İletken dış yarıçapı	848
Soğuk-süper dış yarıçapı	367	Akı siperi iç yarıçapı	925
Soğuk-Siper kalınlığı	5-1	Akı siperi dış yarıçapı	1372
Ilık - damper dış yarıçapı	448	Tek dönüş genişliği	897
Ilık- damper kalınlığı	25-4	Tek pancake kalınlığı	63
Dış yarıçap	476	Dönüşün ana uzunluğu	9449
Aktif boy	1981	Aktif uzunluk	1981
Toplam oluk sayısı	24	İletim	3 faz
Toplam dönüş sayısı	2556	Her faz için dönüş serileri	20
Süperiletken ölçüsü	2,03x3,84	Yalıtılmamış iletken	37,8x70,2
Bakır/Süperiletken Oranı	2,5:1	Bakır kesiti	1051
Nb Ti flaman çapı	50	İç faz büküm genişliği	69°
Flaman burulma aralığı	40	Dış faz büküm genişliği	56°
5 T, 4,2 K deki kritik akımı	3300 A	Bobin aralığı	210°

Rotor Oluk ve Devir Dağıtıcısı				Alan bobini elektromagnetik gücü			
No	Devir	Açı, kutup CL Oluk CL Derece	Maksimum Açı Yoğunluğu	Normal Güç MN/M		Radyal Güç MN/M	
				Oluk	Sonunda	Oluk	Sonunda
1	198	28,0	6,4	1,54	1,77	0,05	0,11
2	216	39,7	5,9	1,10	1,62	0,10	0,18
3	216	51,4	5,3	0,89	1,41	0,13	0,23
4	216	62,9	5,1	0,60	1,16	0,15	0,25
5	216	74,1	4,7	0,44	0,77	0,17	0,24
6	216	84,7	4,8	0,16	0,37	0,19	0,22

Standart Generator Yoğunluk Sabiti

300 MVa basınç reaktans		Zaman Sabitleri	
Direk Uyarım		Açık devre geçişi	T'_{do} 4040
Senkron	X_d 0,335	Açık devre alt geçişi	T''_{do} 0,30
Transient	X'_d 0,161	Kısa devre geçişi	T'_d 3270
Subtransient	X''_d 0,175	Kısa devre alt geçişi	T''_d 0,20
Quadrature Uyarım		Açık devre geçişi	T'_{ao} 3,70
Senkron	X_a 0,335	Açık devre altgeçişi	T''_{ao} 0,07
Transient	X'_a 0,224	Kısa devre geçişi	T'_a 2,47
Subtransient	X''_a 0,175	Kısa devre alt geçişi	T''_a 0,06
Negatif Sequence	X_2 0,174	Rotor	T_a 0,23
Sıfır Sequence	X_0 0,044	Generatör Eylemsizlik Sabiti	H 0,62

Mekanik tasarım düşünceleri

Tablo 3.11'de not edildiği gibi, geleneksel tasarımlardan önemli derecede fazla güç yoğunlukları elde edebilirler, ancak aynı zamanda daha fazla elektrodinamik güç seviyeleri ortaya çıkarırlar. Bir kural olarak, güçlerdeki artış, akım yoğunluğunun karesine orantılı olarak alınabilir. Mekanik tasarım, daha yüksek yükler kadar rotorun

içindeki cryogenic ısı bölgesini devam ettirme gerekliliğinin getirdiği sınırlamaları da uzlaştırmalıdır. Geleneksel rotorlarda kullanılan yüksek güçte çelikler bu ısı derecelerine maruz bırakılamazlar. Paslanmaz çeliklerin bazıları ve nikel temelli süperalaşımlar seçenekler arasındadır. Hem oda ısısında (genelde hızlı çalışma bunda oluşur) hem de cryogenic ısıda istenen güç seviyeleri seçimi belirleyecektir. Süperiletkenliğin getirdiği avantajlardan feragat etmek istenmediğinden tasarım marjinleri ince tutulmalıdır, bütün yüksek gerilme kısımları için detaylı gerilme hesaplamaları gerekmektedir.

Hava aralığı sabit gövde bobinleri analiz sırasında talep eden bir tasarım elemanıdır. Bu tür bir bobinde, armatür iletkenleri bütün ana akıl alanına maruz kalırlar, ve sonuç olarak çıkan elektromanyetik güçler, ametalik materyaller içinden destekleyen yapıya iletilmelidirler. Böylece kabul edilebilir sınırlarda hareket ve vibrasyon kadar izole eden ve destekleyen materyallerin güçlerinde de kontrol edilebilir. Armatür ve destek yapısı tasarımları çalışmaları birkaç yazar tarafından rapor edilmiştir.

Yüksek hız makina tasarımının önemli bir yönü şaft sisteminin hem enine hem de burma salınımlarına kıyasla vibrasyon analizidir. Analiz amaçları için, rotor yapısı kitlelerin bir toplamı ve sıçramaları olarak sunulur. Sindirme etkilerini temsil etmek üzere amortisörler kullanılabilir. Süperiletken jeneratörler için vibrasyon analizleri, rotorun sıkı olmak yerine birçok ortak merkezli kabuktan oluştuğunu hesaba katmalıdır.

3.8.7 Sonuç

Süperiletkenli genaratörün analizinde ilk çalışmalar, makina, için yapısal düzenlemenin araştırılmasına yönelik incelemelerdi. Bu yönde birbirinden bağımsız olarak yapılan çalışmalar hep aynı sonuca varmıştır. Süperiletkenli genaratör için optimum yapı, normal iletken yapılmış stator sargıları içinde dönen süperiletken uyarma sargıları biçimindedir. Bu durumda, uyarma sargısındaki omik kayıplar ortadan kalkar, çünkü süperiletkenlerin doğru akımda elektriksel direnci sıfırdır. Böylece verim ve dolayısıyla nominal güç artar. Ancak, hızla dönen sargıların süperiletkenlik için gerekli olan düşük sıcaklıklara kadar soğutulması ve iyi bir ısı yalıtımının sağlanması gibi sorunlar söz konusu olmaktadır. Neyse ki, bu sorunlar aşılamaz değildir ve dönen süperiletken uyarma sargılı genaratörler konusunda yapılan muhtelif çalışmalar ile giderilmeye çalışılmıştır.

Süperiletkenli generatörler üzerine yapılan çalışmalarda ikinci adım; dönen uyarma sargılarının yarattığı sorunları ortadan kaldırmak amacıyla, rotorda bulunan süperiletken uyarma sargılarının durduğu (sabit olduğu) ve statorun döndüğü tasarımların denenmesi olmuştur. Ancak, bu tip konstrüksiyonun sadece 100 kVA'ya kadar olan küçük güçlerde mümkün olduğu ve daha büyük güçlerde pratik olmadığı anlaşılmıştır.

Bundan sonraki adım, çeşitli küçük makinaların tasarım ve yapımı olmuştur.

İlk dönen süperiletken uyarma sargılı generatör 1970'de M.I.T.'de yapılan 80 kVA'lık genaratördür. Bu çalışma dönen uyarma sargısının yararlılığını göstermiş ve daha sonraki yıllarda yapılacak olan daha büyük güçlü generatöre öncülük etmiştir.

1973'de, M.I.T. ekibi Edison Elektrik Enstitüsü'nün mali desteği ile, ilk büyük güçlü generatör sayılabilecek olan 2 MVA'lık süperiletkenli generatörü geliştirmiştir.

Bundan sonra, çeşitli araştırma grupları tarafından giderek artan güçlerde süperiletkenli generatörler yapılmıştır. A.B.D'de M.I.T. Ekibinin 3 MVA'lık generatörü, General Electric Şirketinin 20 MVA'lık generatörü, Westinghouse Superconducting Electric Machinery grubunun 5MVA, 60 ve 400 Hz.'lik generatörleri, S.S.C.B.'de Polytechic Institue of Leningrad tarafından yapılan 1 MVA'lık generatör, Japonya'da Fuji Eelctric ve Mitshubishi Electric tarafından yapılan 6 MVA'lık model generatör örnek olarak verilebilir. Daha büyük güçlü (300 MVA-3000 MVA) generatörler üzerinde çeşitli araştırma grupları tarafından yapılan çalışmalar günümüzde de devam etmektedir.

Süperiletkenlerin generatörlerde kullanımında diğer bir olasılık olarak, stator sargılarının süperiletken yapılması da denenmiştir. Bu durumda, stator iletkenlerindeki Foucoult akımı kayıpları alışlagelmişden daha yüksek olur ve aynı zamanda süperiletken sargıdaki yüksek akım yoğunluğu nedeniyle statordan demirin çıkartılması gerekir. Bunun sonucu olarak, rotorda üretilen manyetik alanlar artık makina içinde sınırlanamadığı gibi, makinanın dışındaki manyetik cisimler de rotora etki ederek kararlılığını bozarlar. Bu sakıncalar giderilmeye çalışılmakta ve tamamen süperiletkenli (hem rotor hem de statorda süperiletken sargı kullanılan) makinaların geliştirilmesi için çalışmalar devam etmektedir.

Ancak bugün için, yapılan çalışmalar sonucu generatörlerde süperiletkenlerin en uygun kullanım şeklinin dönen uyarma sargısı biçiminde olduğu ortaya çıkmıştır. Bunun başlıca üstünlükleri, daha yüksek verim, daha büyük çıkış gücü, belirli bir verim ve güç değeri için daha küçük boyutlar ve ağırlıkta azalma, daha yüksek uç gerilimi ve sistem kararlılığında düzelme sağlamalarıdır. Bu üstünlüklere bağlı olarak, masraflarda da bir azalma sözkonusu olmaktadır.

Elektrik enerjisine olan gereksinimin arttığı günümüzde özellikle daha büyük çıkış güçlerinin elde edilebilmesi, süperiletkenli generatörlerin önemini arttırmaktadır. Sonuç olarak, elektrik enerjisi üretiminde süperiletkenli generatörlerinin kullanıma girmesi ile bugünkü güç sınırı olan 2000 MW'dan daha yüksek güçler elde edilebilecektir. Ancak, bu kadar büyük güçlü generatörlerin kullanılmasının sistemin güvenilirliğine olan etkilerinin incelenmesi gerekir.

3.9 Süperiletkenliğin Elektrikli Ulaşım Sistemlerindeki Uygulamaları

Konvansiyonel sistemler, bugünkü trafik problemlerinin çözümünde yeterli olmamaktadır. Bu nedenle sürtünmenin olmadığı, yüksek hızlı, otomatik işletilebilecek magnetik sistemler yarışı başlamıştır. Süperiletkenliğin buradaki kullanımı süperiletken mıknatıslardır. Bu bölümde süperiletken mıknatısların ilerinin hızlı ulaşım sistemi olan MAGLEV SİSTEMİ 'indeki kullanımı anlatılacaktır.

3.9.1 Maglev Sisteminin Tanımı

Magnetik kaldırma ve tahrikli sistemler olarak bilenen (Magnetic Levitation and Propulsion Systems) bu tür sistemlere MAGLEV Sistemleri denmektedir. Birçok maglev sistemi,

- Sınırlandırılmış hız (güvenlik, gürültü)
- Enerji Tüketimi
- Tekerlek ve rayların yıpranması

gibi tekerlek - raylı konvansiyonel sistemlerde bulunan sınırlı faktörleri aşmak amacıyla geliştirilmektedir.

Maglev sistemi üzerinde Japonya'da süperiletken mıknatıslar kullanılarak yapılan çalışmalar son 23 yıldan beri sürmektedir. Hızlı ulaşım sistemlerinde en önemli olan şey güvenlik, konfor ve çevreye verilen zararın en aza indirilmesidir. Bu nedenle geleceğin hızlı ulaşım taşımacılığı için, maglev sisteminin geliştirilmesine karar verilmiştir. Bu sistemde tekerlekler yerden 100 mm yukarıya kaldırılıp ve yerle hiçbir bağlantı olmaksızın ileriye doğru itilmektedir. Bu EDS (Elektro Dinamik Süspansiyon) sistem. Dr Powel ve Dr. Danby tarafından 1966 yılında ortaya atılmış, Japon Ulusal Trenyolu'ndan Mr Kyoran'ın desteğiyle geliştirilmesi sağlanmıştır.

Laboratuvarlarda kurulan kısa deneme kısa deneme standlarından birkaç yıl sonra, yüksek hızda çalışma karakteristiklerini teyid etmek için 1977 yılında 7 km uzunluğunda test standı oluşturuldu ve 1979 yılında ilk test aracı ML500 517 km/h'lık hızla en yüksek hız rekorunu elde etti. 1990 yılında Japonya'da Maglev sistemindeki gelişmeler, National-Funded'in (özel çalışmalar için para ayıran ulusal araştırma kurumu) desteklemesini sağladı ve çalışmalar için özel imkanlar sağlandı. Devlet 42.8 km.lik Yamanashi test yolu yapılması için izin verdi ve çeşitli enstitü ve şirketlerden proje grupları oluşturuldu.

3.9.2 Maglev Sisteminin Tarihsel Gelişimi

3.9.2.1 Dünyadaki Maglev Sistemi Gelişimi

Tablo 3.12 Maglev sisteminin 1966 yılındaki öneriden sonraki tarihsel gelişiminin kısa bir özeti görülmektedir.

Tablo 3.12

COUNTRY	'65	'70	'80	'90
JAPAN			*MIYAZAKI TEST TRACK (517 km/h)	*YAMANASHI TEST LINE
U. S. A.	1966 PROPOSAL	MIT MODEL TEST		NMI 4 PROPOSALS
GERMANY		*ERLANGEN TEST TRACK		
CANADA			F. S.	
RUSSIA				F. S.
F. S. : FEASIBILITY STUDY				

Bu EDS sistem önerisinin ortaya atılmasından birkaç yıl sonra Amerika, Almanya, Kanada ve Japonya'da çalışmalar başlatıldı. Bunların arasında sadece Almanya ve Japonya örnek model yaparak tüm karakteristikleri test etti. Almanya'da hem EDS, hemde EMS (Elektro Magnetik Suspansiyon) birbiriyle karşılaştırıldı ve 1978 yılında EMS sistem üzerinde çalışmaya karar verildi.

3.9.2.2 Japonya'daki Maglev Sistemi Gelişimi

Tablo 3.13'de maglev sisteminin Japonya'daki gelişmelerin kısa bir özeti verilmiştir.

Tablo 3.13

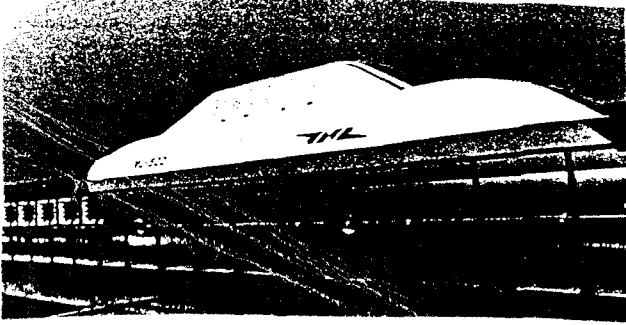
1972	Gelişmenin başlangıcı
1977	Miyazaki test yolunun denenmesi
	ML500 517 km / h (1979)
	MLU001 (1981 -1987)
	MLU002 (1987 - 1991)
	MLU002N (1993 -
1990	Yamanashi test yolunun yapılmasına karar verilmesi

İlk test çalışmaları sadece kaldırma gücünü görmek için yapıldı. Bu çalışma da süperilekten mıknatısların ağırlığı yaklaşık olarak 2 kg 'dı, oysaki kaldırma gücü yaklaşık olarak 200 kg 'dı. 1979 yılında ML500 hedeflenen hızdan daha iyi dan 517 km/h'lık maksimum hıza ulaştı. Bu deneme yüksek hızda çalışmanın olurluğunu gösterdi. Bundan sonra, araçtaki yolcu kabinlerinin emniyetini sağlamak için, T şeklindeki kılavuz yatak U şekline dönüştürüldü.

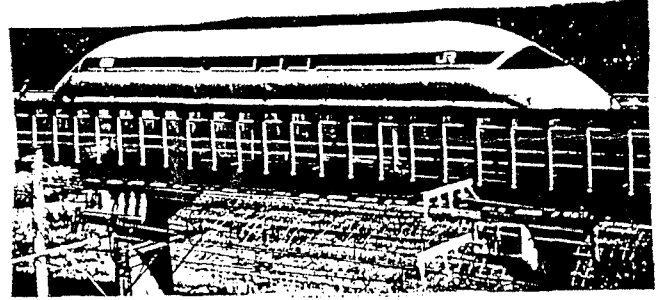
Bu dönüşümden sonra, MLU001 adı verilen taşıt 1987 yılında 400,8 km/h lık hıza ulaştı.

Diğer test aracı MLU002 aynı yıl içerisinde yapıldı. Fakat 1991 yılındaki yangından zarar gördüğünden MLU002N 1993 yılının Ocak ayında tamamlandı. 420km/h'lık hıza ulaşmak için birçok test yapılmaktadır. Bu test sonuçlarından, Yamanashi test yolu için yapılacak yeni test aracının en uygun dizaynını elde etmek için faydalanılacaktır.

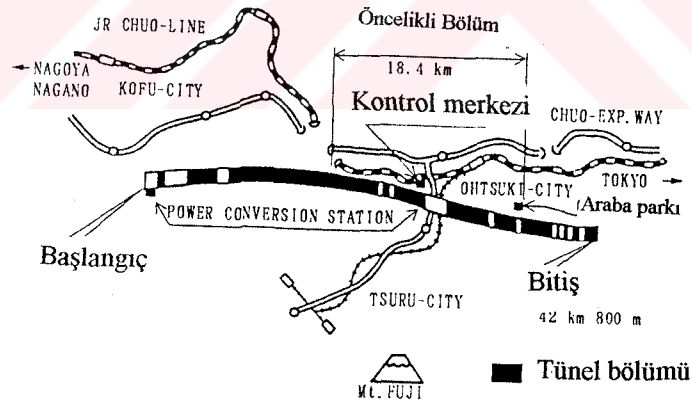
42,8 km.lık Yamanashi test yolunun % 80'i tünellerden oluşmakta ve 9 bölüm tünel içermektedir. Bunun için 3-5 vagonlu trenler dizayn edilmiş olup; yakın zamanda yapımına başlanacaktır. Yaklaşık olarak 550 km/h'lık test hızı elde edileceği tahmin edilmektedir.



Şekil 3.32 Test aracı ML500



Şekil 3.33 Test aracı MLU002N

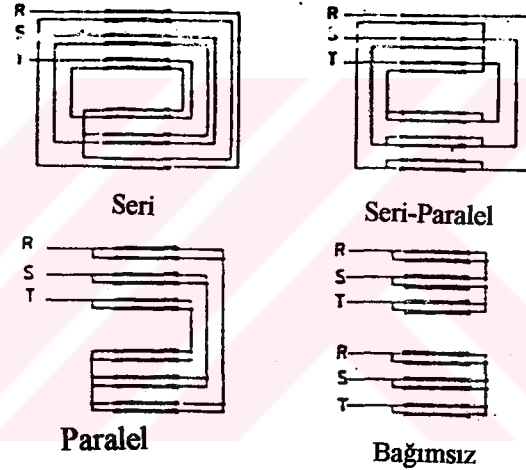


Şekil 3.34 Yeni Yamanashi test yolu

3.9.3 Linceer Motor Tahrikli Maglev Sistemi

Önceleri maglev sistemlerinde sürekli mıknatıslar kullanılmaktaydı. Fakat 300 km/h hızın çok daha üstüne çıkmak gelişmiş ülkelerin hedefi olduğunda, bu sistem süperiletken mıknatıslar kullanılarak geliştirilmektedir. Dolayısıyla verim ve hız o oranda artmıştır.

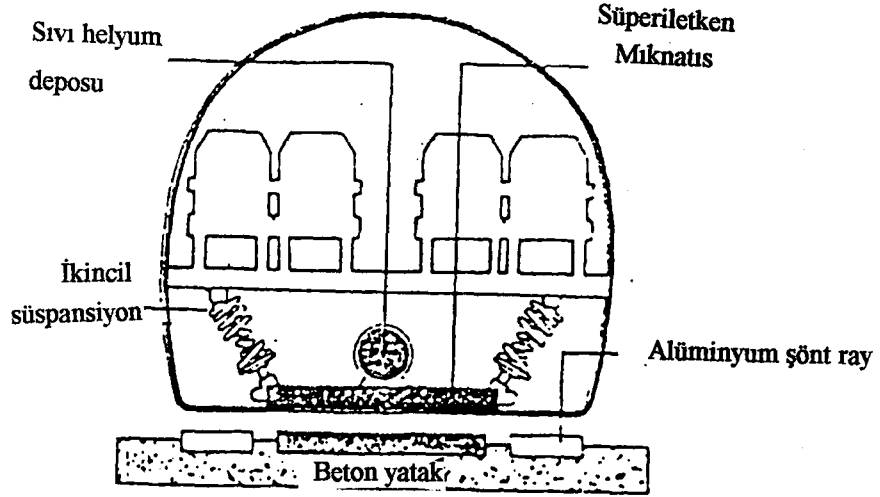
Motor aktif parçası olarak taşıt içine yerleştirilmiş süperiletken mıknatıslar kullanılmaktadır. Stator ise raylara yerleştirilen sargılardan oluşmaktadır. Sargılar, sabit yolda montajlı olduklarından tahrik enerjisi taşıt ile bağımsız olarak yola verilmiş olur. Şekil 3.35'de gösterildiği gibi, yol paralel iki sargıdan oluşabilir. Bunlardan istenen alan şiddetine göre paralel, seri, seri-paralel veya her iki sargıda bağımsız bağlantı olarak ayrı ayrı beslenebilir.



Şekil 3.35 Maglev sisteminde yol sargıları

Bu sargılar üç fazlı bir AC şebekeden beslendiklerinde bir döner alan oluştururlar. Yarıçapı sonsuz olan statordaki döner alan taşıtta ve bu sargıların altında bulunan süperiletken mıknatısları çekerek yukarı kaldırır. Kaldırılan mıknatıslar taşıtı kaldırmış olur. Hareket sağlayan yine sargılardaki döner alan ve süperiletken mıknatısların senkron motor gibi özellik göstermesi sonucu gerçekleşen lineer motor özelliğidir.

Süperiletken mıknatıslar bu tip sistemlerde hem kaldırma, hem hareket ettirmede görev yaparlar. Taşıt içinde kullanılan süperiletken mıknatıslar Şekil 3.36'da görüldüğü gibi taşıtın içinde helyum deposundaki sıvı helyum ile soğutulularak ideal süperiletken mıknatıs özelliği elde edilir.



Şekil 3.36 Süperiletken mıknatısların sıvı helyumla soğutulması

Güç elektronikli elementler aracılığıyla bilgisayar denetimli tam otomatik kontrollü Maglev sistem 517 km/h deneme hızına ulaşmıştır. Yol sargıları sürekli enerjili olmayıp birçok parçalara ayrılmıştır. Taşıt hareket halindeyken bu bölümlerden sadece biri enerjilenmektedir. Taşıt bu parçayı terkettiği anda bu parçanın enerjisi kesilmekte, taşıtın gittiği yönde bir sonraki yol parçası enerjilenmektedir. Böylece kalın sargılardan oluşmuş stator sargılarında hat boyunca aşırı kayıplar olmamaktadır.

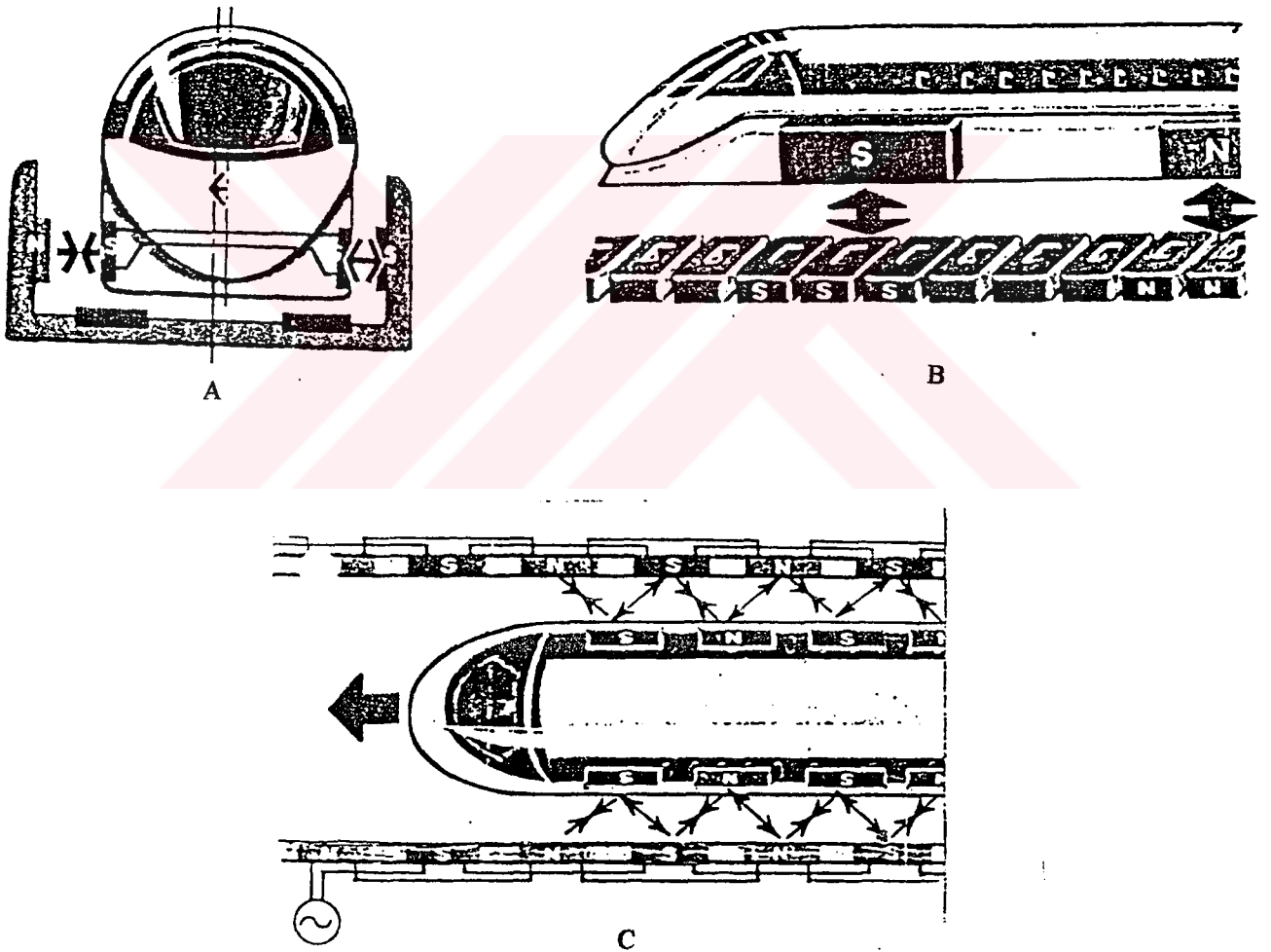
3.9.4 İtme Prensibi ile Elektrodinamik Tahrikli Maglev Sistemi

Bu prensipde çalışan sistem, taşıtın hem kaldırılmasına hem de hareketine gerekli kuvveti elektrodinamik yöntemlerle sağlar. Bilindiği gibi üst üste duran iki sargı bobininden birisinden geçen akım, diğerinde zıt ernek endükler. Bunun sonucunda aralarında bir etkileme ve kuvvet oluşur.

Bu prensiplerden yararlanılarak yapılan Maglev sistemi taşıtta bir dizi bobin halkaları ve taşıt altındaki yolda yine bir dizi şeklinde bobin halkaları yerleştirilerek bir elektrodinamik askı sistemi oluşturulmuştur. Hız arttıkça, hareketli bobinler sabit bobinler üzerinden daha çabuk geçerler. Aerodinamik sürtünme hızla artarken, elektrodinamik kuvvet de sürtünmeyi yenerek taşıtı havaya kaldırır. Elektrodinamik kuvvet prensibiyle çalışan bu tip sistem "U" şeklinde bir yola sahiptir. Alt kısımda kaldırma sargıları ve taşıt

mıknatısları bulunuyor. Yanlarda da Şekil 3.37 'de gösterildiği gibi taşıtı harekete geçiren kutuplar bulunmaktadır. Yolun yan duvarlarına sargılardan oluşmuş kutuplar (döner olan 3 fazlı sistem) taşıtın yanlarına ise süperiletken mıknatıslar yerleştirilmiştir.

Bunların etkisi ile taşıt hareketi sağlandığı gibi, taşıtın altındaki sargılara temasını da önler. Taşıt da bulunan mıknatıslar -187°C kadar soğutularak süperiletken özellik gösterirler. Fakat yan soğutmalar hala önemli bir sorundur. Bu da karmaşık aşırı-soğutma düzenekleri gerektirir. Japon mühendisler, aşırı-soğutma düzeneklerini küçültme yolunda ilerlemeler kaydetmişler, son olarak da trenlere mıknatısları aşırı-soğutma kasetleri içine yerleştirmeyi denemektedirler.



Şekil 3.37 Maglev treninin kaldırılması ve yön değişimini sağlayan mıknatısların genel konumu a- Önden görünüş, b- Yandan görünüş, c- Üstten görünüş

3.9.5 Maglev Sistemindeki Süperiletken Mıknatıslar

Süperiletken mıknatıslar maglev sisteminin en önemli bölümünü oluşturmaktadır. Son zamanlarda süperiletken mıknatısların birçok uygulamaları yapılmaktadır. Örnek olarak MRI, enerji depolamak (SMES), elektrik motorları ve jeneratörler verilebilir.

Diğer uygulamalarından farklı çevre şartlarında kullanıldığı için, maglev sistemindeki süperiletken mıknatıslar diğerlerinden farklıdır. Bu nedenle güç çevre şartlarında işlevini görebilecek şekilde dizayn edilmeli ve aşağıdaki özellikleri sağlamalıdır.

1. Mıknatısın toplam ağırlığı mümkün olabildiği kadar küçük olmalıdır.
2. Kuvvetli akım modunda kullanabilir olmalıdır.
3. Cryogenic sıcaklık bölgesi için ısı sızıntısının mümkün olduğu kadar az olması gerekmektedir.
4. Tüm ileri sürme, kaldırma ve yatak güçleri süperiletken sargıların etkisindedir. Tüm bu güçlerin oda sıcaklığında olması zorunludur. Yeteri uzunlukta ve en düşük ısı kaybındaki Supportların sıvı helyum sıcaklık bölgesine kadar soğutulması gerekmektedir.
5. Süperiletken mıknatıslar dış şartlardan etkilenebilmektedirler. Başlıca zarar gördükleri şeyler manyetik olan değişikliği ve mekanik titreşimlerdir.
6. Uzun bir period boyunca devamlı olarak çalışabilmelidirler.

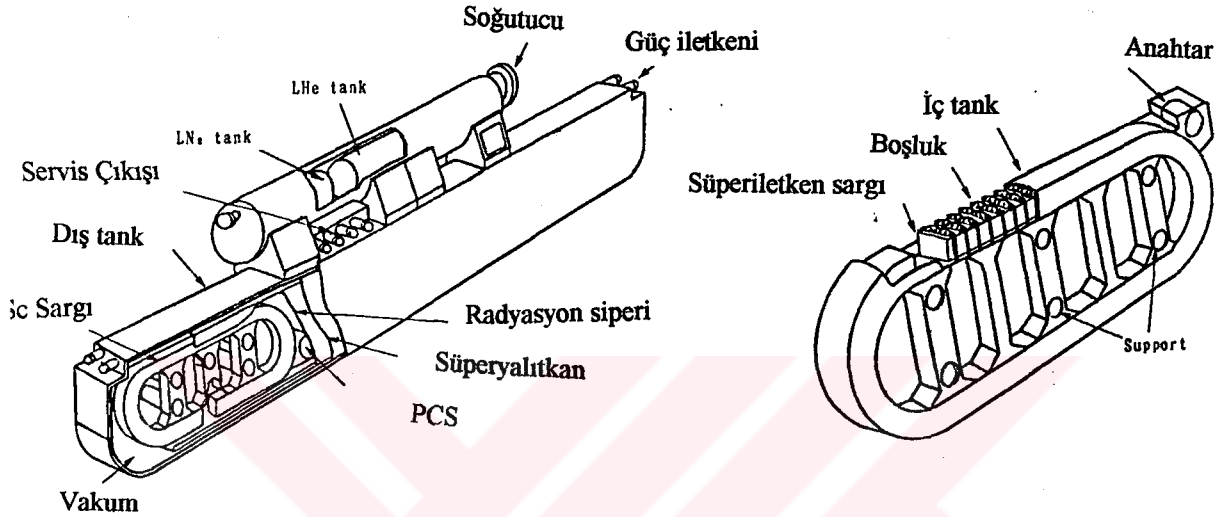
3.9.5.1 Mıknatısın Yapısı

Şekil 3.38 süperiletken mıknatıs ve süperiletken sargıların şekilleri görülmektedir. Tablo 3.14'de Yamanashi test aracı için yapılmış olan bir süperiletken mıknatıs modelinin karakteristik özellikleri verilmiştir.

Bir süperiletken bobin için yaklaşık olarak 4 km uzunluğunda süperiletken tel kullanılmıştır.

Süperiletken teldeki çok küçük hareketleri önlemek için sarımlanmış bobine epoksid reçine emdirilir.Emdirilmiş süperiletken bobin, paslanmaz çelik iç tank için uygun hale getirilmiş olur.Bu iç tank ile süperiletken bobin arasında aralıklar vardır. Sargıların sıcaklığını 4,3-4,4°K arasında tutmak için bu aralıklarda sıvı helyum dolaştırılır.

Soğutma sistemi LHe tank üstüne monte edilmektedir. Süperiletken mıknatısın termik radyasyon koruyucusu olan sıvı nitrojen LN₂ tankında depo edilmektedir.



Şekil 3.38 Süperiletken mıknatıs ve sargının yapısı

Tablo 3.14 Süperiletken Mıknatısın Karakteristikleri

Bileşimi	Soğutma üniteleri, LHe & LN ₂ tankları
Süperiletken mıknatısın boyutları	5.32 x 1.17 m.
Süperiletken mıknatısın ağırlığı	1200 kg.
LHe Tankın hacmi	60 lt.
LN ₂ Tankın hacmi	44 lt.
Süperiletken sargı	
Magnetomotor gücü	700 kA
Süperiletken bobin şekli	Racetrack
Süperiletken tel boyutu	1.16 x 2.06 mm.
İç tanktaki ısı kaybı	3 W
Her mıknatıs için kaldırma gücü	98. kN
Soğutma kapasitesi	4.4 °K'de 5 W'dan büyük

3.9.5.2 Süperiletken Bobinin Stabilitesi

Maglev sisteminden süperiletken sargıların karakteristik özelliklerini görmek için çeşitli testler yapıldı. 700 kA mıknatıssal yükde kullanılan süperiletken sargılarda 800 kA'e kadar herhangi bir sönüm görülmedi. Test araçları ML500 ve MLU001 de kullanılan süperiletken sargılar çalışma hızının geniş bir aralığında iyi bir otobilitate gösterdiler. Test aracı MLU002, Yamanashi test aracı için, sistemi test etmek amacıyla yapıldı. ve önceki süperiletken mıknatıslardan daha büyük kaldırma gücü elde edilmesi düşünülmektedir.

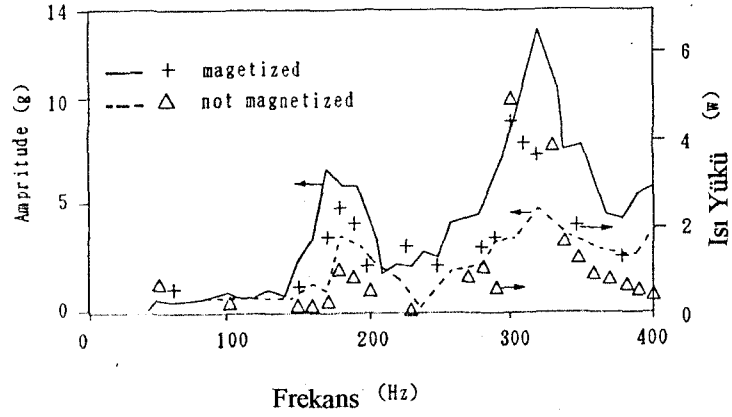
Bu nedenle, MLU001 için 650 kA olan süperiletken mıknatısların 700 kA kadar mıknatıssal yükü yükseltildi. Ayrıca daha küçük sargı kesitiyle bu mıknatıssal yükü kazanmak amacıyla akım yoğunluğu (toplam akım / toplam kesit) 173 A/mm^2 den 219 A/mm^2 'ye yükseltildi. MLU002 test aracı için sargının geliştirilmesine 1985 yılında başlandı, birçok gelişim ve deneyden sonra istenilen karakteristik özellikler tamamlandı. Bu süperiletken sargılar, MLU002 monte edildiği zaman, birçok sönüm oluşmasına neden oldu. Bunu daha açıklamak gerekirse bu sönüm problemleri, süperiletken sargılardaki titreşimlerle ilgilidir. Süperiletken sargıdaki sönüm problemi iki katogariye ayrılabilir. Birinci oluşum sebebi, mıknatıslanmadan önce besleme akımının artırılması, diğer sebepten dış, etkilerdir. Buna mekanik titreşimler örnek olarak verilebilir. Süperiletken sargılar üzerindeki mekanik titreşimlerin tesirine daha iyi açıklamak için mekanik titreşim testi yapıldı.

Mekanik Titreşim Testi

Şekil 3.39 'da test sonuçları görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, sıcaklık bazı rezonans frekanslarında yükseltmektedir. Bu da bize, mekanik titreşim genliği arttığında, süperiletken sargının söndürülüğünü anlatmaktadır. Bu söndürmenin başlıca sebebinin epoksi reçin emdirilmiş sargı yüzeyi ile aralıklar arasındaki ısınmadan dolayı sıcaklık oluşması zannedilmektedir. Bu noktada hareketle sargı stabilitesini geliştirilmesinin ana yolu aşağıdaki gibidir.

- a) Sargı ile aralık arasındaki hareketi bastırmak
- b) Sargı yüzeyindeki yeterli sıcaklık marjını sağlamak
- c) Süperiletken sargı toplam akım yoğunluğunu azaltmak

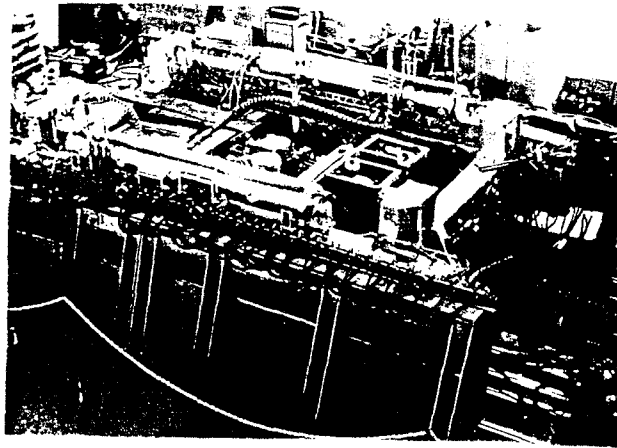
Son zamanlarda görülmektedir ki, FRP aralıkları yerine süperiletken sargılarda kullanılan alüminyum alaşımla aralıklar stabilitesi geliştirmiştir. Bunun anlamı alüminyum alaşımlı aralıkların sıcaklık iletkenliklerinin artması, aralıklarla sargı yüzeyi arasında doğan sıcaklığı devre dışı bırakmasıdır.



Şekil 3.39 Mekanik titreşim test sonuçları

3.9.5.3 Elektromanyetik Hasarların Etkisi

Süperiletken mıknatıslar için ana etki magnetik alan değişikliğidir. Magnetik alan değişikliğinin frekansı aracın hızına bağlı olarak 0-309 Hz arasında değişir. Şekil 3.40'da görüldüğü gibi süperiletken mıknatıs üzerinde manyetik alan değişikliğini etkilerini tahmin etmek için benzeri oluşturuldu.



Şekil 3.40 Benzeri süperiletken mıknatısın dış görünüşü

Yer sargıları süperiletken mıknatısların karşısına kuruldu. VVVF (Değişken Gerilim ve Değişken Frekans) enversör bu sargılarla birleştirildi ve magnetik değişkenlerle çalışma şartlarında karşılaştırıldı. Buharlaşmış helyum gazının derecesinin ölçülmesiyle etkisi tahmin edilebildi.

Bazı süperiletken mıknatısların üzerindeki bu testin sonuçları, rezonans frekanslarda ısı yükünün çok fazla arttığını göstermektedir. Bu ısı yükünün artma sebebinin aşağıdaki nedenlerden olduğu düşünülmektedir.

1. Magnetik alan değişikliği dış tankın içinde indüksiyon akımlarını ve termik radyasyon plakasını oluşturur. Süperiletken sargılardaki güçlü magnetik olan yüzünden, bu indüksiyon akımı dış tankda termik radyasyon koruyucu tabakada ve süperiletken sargının kendisinde mekanik titreşimler yaratır.

2. Bu titreşimler süperiletken sargı ve radyasyon koruyucu tabakası arasında harekete sebep olurlar. Bu nedenle süperiletken sargının, bobinin iç tankında magnetik olan değişikliklerine ve indüksiyon akım kayıplarına neden olur.

3. Süperiletken sargının titreşimi, sargılarda deformasyona sebep olur ve bölgesel ısınmalara neden olur.

3.9.5.4 Soğutma Sistemi

Süperiletken mıknatıs soğutma sisteminde,

1. Süperiletken mıknatıslar helyum gazında herhangi bir kayıp olmaksızın devamlı olarak cryogenic sıcaklıkta tutulmalıdır.

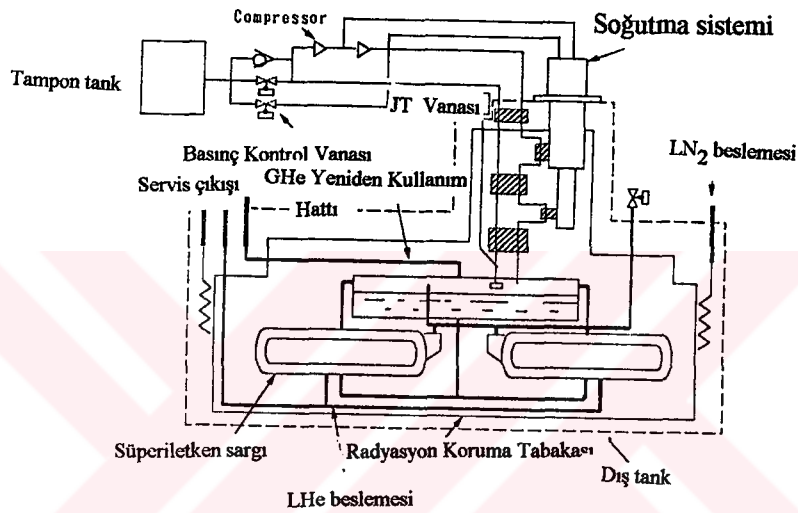
2. Yer cryogenic sistem üzerine bağlılık küçük olmalıdır.

3. Her gün mıknatıs enerjilensin, enerjilenmesin helyum gaz sistemi kapalı tutulmalıdır.

4. Soğutucu, sistemi emniyetli olmak zorundadır. Ticari sistemde, uzun periyotlarda devamlı olarak çalışabilmelidir.

5. İşletme tekniği gereksinimleri basit olmalıdır.

Soğutucu sistemi için, enerjilenmiş veya enerjilenmemiş mıknatıs en büyük ısı yük etkisidir. Kısa sürede üretilmiş ısı yükü soğutucunun soğutma kapasitesinden daha büyüktür. Süperiletken mıknatısı enerji verildiğinde soğutucu kompresörü, geçici bir depolama için LHe rezarvuarındaki buharlaşmış aşırı gazı tampon tanka yollar. Birkaç saat sonra depolanan helyum gazını soğutucu yeniden kullanabilecektir. Aşağıdaki şekilde süperilekten mıknatısın cryogenic sisteme ait bir diyagram gösterilmiştir.



Şekil 3.41 Cryogenic sistem akış diyagramı

Üç çeşit soğutucu çevrimi vardır, bunlar Claude çevrim soğutucu, Stirling çevrim soğutucusu ve Gifford McMahon (GM) çevrim soğutucusu Stirling çevrim soğutucusu diğerleriyle karşılaştırıldığında en yüksek verimi göstermektedir. Fakat bujiler üzerindeki tesisat düzünlemede bazı zorluklar karşılaşılmaktadır.

Claude çevrim soğutucusu için, yeni dalga mekanizması ve ısı değiştiricisi üzerine gelişmeler oluşturuldu. Fakat istenilen verimlilikte, güvenilirlikte sonuç elde edilemedi. GM çevrim soğutucu en düşük verimli çevrim soğutucu olarak düşünülüyordu.

Ancak, son birkaç yıl içinde Maglev sisteminin gereksinimleri GM soğutucusunun geliştirilmesini sağladı. Rejeneratörde kullanılan yeni materyallerle (örneğin Er_2Ni) daha yüksek verimlilik ve daha yüksek kapasite sonucu elde edildi ve GM soğutucudaki

gelişmeler, daha yüksek verimlilik ve 8 W'da fazla geniş soğutma kapasitesi gösterdi. Claude çevrim soğutucu ile kıyaslanırsa daha iyi olduğu görülmektedir.

Bilindiği gibi, GM çevrim soğutucu çok büyük avantajlara sahiptir. Çünkü mekanizması oldukça basittir. Bu nedenle, Yamanashi test aracı için GM çevrim ve stirling çevrim soğutucu üzerinde çalışmalar yapılması planlanmıştır.

3.9.6. Maglev Sisteminde Kullanılan Yüksek T_c Oksit Telli Süperiletken Mıknatıs

Maglev Sisteminde kullanılan gümüş kaplı yüksek T_c Oksit süperiletken mıknatısların tasarımı incelenecektir.

Süperiletken mıknatıs, 20°K 'da sürekli akımla işletilir. Zira, soğutucunun verimi güvenilirliği, 20°K'da oldukça iyidir. İletken için 5T 'de kritik akım yoğunluğu $6 \cdot 10^4$ A/cm² olarak alınır.

Bobin bozulmalara karşı stabildir, çünkü minimum enerji sönümü büyüktür. Diğer taraftan bobinin yayılma hızı düşüktür. Bu sebeple bobin, aktif korunmaya ihtiyaç duyar.

MAGLEV'deki süperiletken mıknatıs, NbTi/Cu telden yapılmıştır ve sıvı helyum sıcaklığında çalıştırılır. Oksitli süperiletken 1986'da keşfetildi. Yüksek T_c oksitli süperiletkenin kritik sıcaklığı (T_c) sıvı nitrojen sıcaklığını aşar. Yüksek T_c süperiletkenin kullanıldığı bobin, sıvı helyum gerektirmez. Kritik akım yoğunluğu, iyileştirilmiş ve pratik seviyeye yakın bir duruma getirilmiştir. MAGLEV sisteminde yüksek T_c oksitli süperiletken tel kullanan süperiletken mıknatısın işletim sıcaklığı, soğutma sistemi, akım yoğunluğu, kararlılık ve koruma düzeni incelenmiştir.

İşletme Sıcaklığı : Şekil 3.42 $(BiPb)_2 Sr_2Ca_2Cu_3O_y$ gümüş kaplı şerit için normalize edilmiş kritik akım yoğunluğunun (J_c) sıcaklığa bağımlılığını gösterir. J_c , 4.2°K'da J_c ile normalize edilir. 4.2°K'daki J_c ile 20°K'daki J_c arasındaki fark küçüktür. 20°K'daki soğutucunun verimi teorik olarak sıvı helyum sıcaklığına göre 4 kat daha fazladır. Gifford - MacMahon (GM) soğutucusu, 10.000 saatten fazla çalışma performansına ve yüksek güvenilirliğe sahiptir. Bu yüzden maglev'deki süperiletken mıknatıs 20°K'da GM soğutucusuyla işletilen mıknatıs olacaktır.

Mıknatısın Şematik Yapısı :Şekil 3.9.12 GM soğutucusu kullanan maglev 'deki yüksek T_c süperiletken mıknatısın şematik yapısını gösterir. Bobinin dış şekli, MLU002 ile aynıdır. İletken, 0,2x2 mm. Bi gümüş kaplı şeritli beş tabakadan (levhadan) oluşur. İki katlı GM soğutucunun spesifikasyonu, Tablo 3.15 'de gösterilmiştir. Birinci tabakadaki 80°K siper levhasını soğutmak için tasarım yapılır. Bu iş için sıvı nitrojen gereksizdir.

Tablo 3.16 bobinin ağırlığını ve bobinin ortalama akım yoğunluğu için gerekli J_c 'yi gösterir. 700 KAT'lık bir magnetomotor kuvvet varsayılmıştır. Bobin kesit alanı, MLU002 ile aynı alınmıştır. İletkenin yalıtım kalınlığı 0,08 mm 'dir. Bu durumda, yüksek T_c süperiletken için 6×10^4 A/cm²'nin üzerinde J_c gereklidir. J_c 6×10^4 A/cm² 'den daha düşük örneğin 3×10^4 A/cm² ise bobinin ağırlığı, MLU002'den 250 kg daha ağır olacaktır.

Maglev bobini, sürekli akım modunda işletilir. Maglev sisteminde magnetik alan azalmasının kesin bir limiti, henüz açık bir şekilde belli olmadığından, maksimum akım azalmasını 0,5 %saat (%10/gün) olarak varsayılır. Bu nedenle $10^{-13}\Omega \cdot \text{cm}$ 'lik süper iletkenlik kriteri gereklidir. Ayrıca, işletim sıcaklığı, 20°K 'deki kadar yüksek olduğundan akı sızıntısı sebebiyle magnetik alan azalması da düşünülmesi gereken bir konudur.

Bobinin Kararlılığı: Şekil 3.44'de bobin kesitinin magnetik alan dağılımını gösterir. Bu çalışmada bobin kesit alanı, 45x71 m² (olarak) varsayılmıştır. Şerite paralel uygulanan maksimum magnetik alan 5T, dikey olarak uygulanan ise 3T'dir. Şekil3.42'den bilindiği gibi normalize edilmiş J_c her iki durumda da 0,2'dir. Bu yüzden süperiletkenli söndürme her zaman telin anizotropisinden dolayı yüksek T_c süperiletken kullanan bobinde maksimum magnetik alan yönünde oluşmayabilir.

Tablo 3.17, çeşitli işletme noktalarında minimum yayılma bölgesini (MPZ) ve kritik enerji (QMPZ)'yi gösterir. MPZ, iletken kesit alanından yeterince büyük olduğundan iletkendeki sıcaklık, eş dağılımlı kalır ve $V_{MPZ} = (MPZ) \times [\text{iletken kesit alanı}]$ 'nda oluşur. Örneğin süperiletkenin S_c 'si $6,7 \times 10^4$ A/cm² ise süperiletken bobinin işletim noktası 0,9'dur. Ve bu anda Q_{MPZ} , 20 ml.dir. Bu değer, Cu/NbTi bobine göre yeterli derecede büyüktür. Ve yüksek T_c süperiletken kullanan bobinin kararlılığı, son derece yüksektir.

Bobin Koruma : Şekil 3.45 'de, bobinin sönmümlü olması durumunda sıcaklık artış profilini gösterir. A durumu, sadece bir telin sönmümlendiği sıradan bir durumdur. Bu

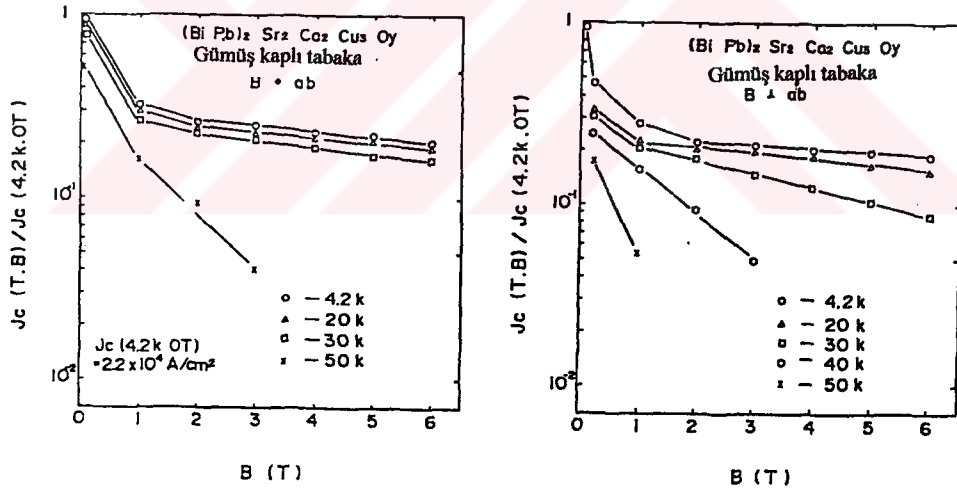
şekilden anlaşılırki, sönümleme anında koruma yapılmazsa tel yanar. Sönümün yayılma hızı, aşağıdaki formülde verilmiştir.

$$V = J / \tau \times (\rho k / T_s - T_0)^{1/2}$$

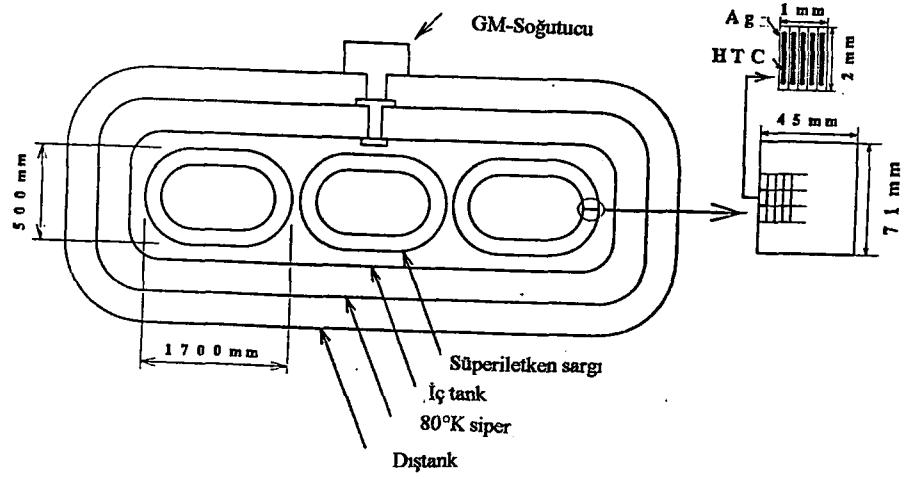
Burada J, telin akım yoğunluğu; τ , spesifikısı; ρ , iletkenlik; K, termik iletkenlik; T_s , akım kesme ve süperiletken kritik sıcaklığının ara sıcaklığıdır.

Böylece yüksek süperiletken bobin durumunda, sönüm yayılma hızı, 0,5m/sec olarak tahmin edilir. Bu değer NbTi için 1/40'dır. B durumu, bobin yüzeyinde dört yöndeki zorlanmış sönümün sonucunu gösterir. Tüm bobinin sönümü, D durumunda gösterilmiştir. Bu sonuçlardan, bobinin sönüm anında korunabileceği bulunur.

Sonuç maglev sisteminde 20°K.da yüksek T_c oksit süperiletken mıknatısta bobinin kararlılığı ve soğutucunun güvenilirliği, son derece iyileştirilmiştir.



Şekil 3.42 $(BiPb)_2Sr_2Co_2Cu_3O_y$ şerit için normalize edilmiş kritik akım yoğunluğuna bağlı sıcaklık ve alan



Şekil 3.43 HT_c süperiletken mıknatısın şematik gösterimi

Tablo 3.15 Soğutma sistemi parametreleri

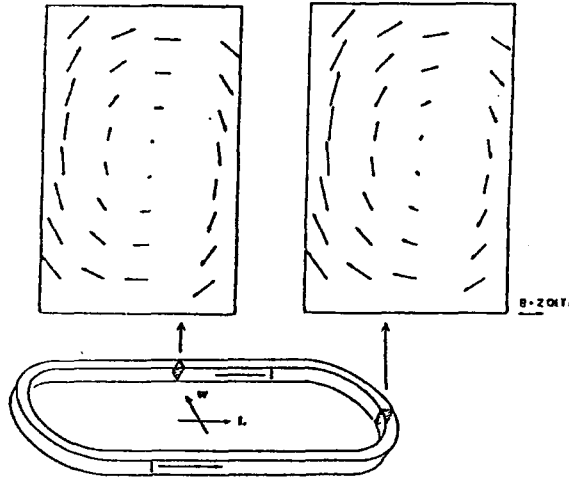
Devir	2 Stage GM
Devir hızı	144 rpm
Kompresör	
Tahliye basıncı	30 atm
Emme basıncı	15 atm
Ağırlık	120 kg
Giriş gücü	8 kW
Boyutlar	
Soğutma kapasitesi	80°K'de 200W 20°K'de 5W
Silindir çapı	65 mm / 25 mm
Çarpma	30 mm
Ağırlık	30 kg

Tablo 3.16 Bazı akım yoğunluklarına göre HT_c süperiletken sargının ağırlığı ve kritik akım yoğunluğu

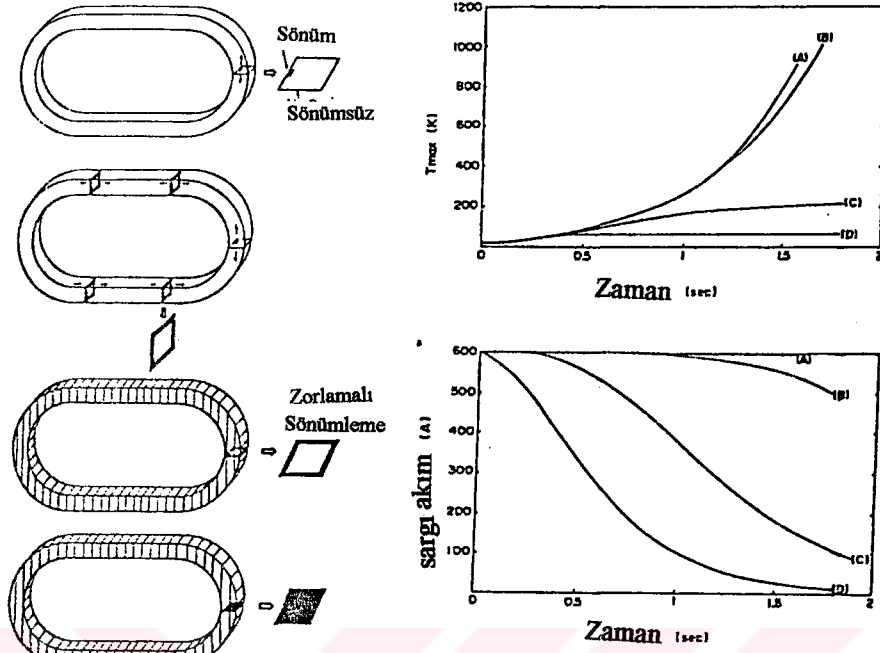
İletken	Scoil mm ²	Jcoil A/mm ²	J _c A/cm ²	Ağırlık kg
	45x71	219	6x10 ⁴	255
Ag / HT _c				
	63x99	110	3x10 ⁴	510
Cu / NbTi	45x71	219	≈2x10 ⁵	231

Tablo 3.17 Kritik Enerjis

İletken	J _c A/cm ²	J _{on} /J _c	Sıcaklık K	MPZ mm	V _{mnz} mm ²	Q _{mnz} mJ
	1.2x10 ⁵	0.5	40	182	364	1270
Ag / HT _c	6.17x10 ⁴	0.9	8	81	162	20
	6.1x10 ⁴	0.99	0.8	25	50	0.37
Cu/NbTi	2x10 ⁵	0.25	2	4.3	8.6	0.017



Şekil 3.44 Sargı kesitinin manyetik alan dağılımı



Şekil 3.45 HT_c Süperiletken sargının sönümü

Sonuç olarak mıknatıs bobinlerindeki akım nedeniyle (taşıt hareket etmese bile) ısı kayıpları oluşur. Elektriksel direncin sıfır olması nedeniyle süperiletken mıknatıslarda enerji kaybı söz konusu olmamakta ve çok büyük magnetik alan şiddetleri (15T gibi) elde edilmektedir. Dolayısıyla motor verimi ve hız artmaktadır.

Maglev sistemlerinin süperiletken mıknatısların kullanılmasıyla 2000'li yılların çok hızlı ulaşım araçları olmaya namzet oldukları görülmektedir.

BÖLÜM 4 SONUÇ

İncelemelerimizden de anlaşıldığı gibi sıcaklığı her geçen gün yükselen bu yeni buluşun yaşamın her alanına girmesi oda sıcaklığında süperiletkenlerin geliştirilmesine bağlıdır. Malzeme bilimcileri, yeni bileşikler bulmuş ve akım taşıma kapasitelerini arttırmışlardır.

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 tanecikler oluşturma eğilimindedirler. Elektrik akımı sadece bu taneciklerin birbirine temas ettikleri bölümlerde akabilmektedir. Bu nedenle dış ortamlarda, laboratuvarlarda 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 süperiletkenler 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 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 bağlayıcı (kaplı) bir kablo üreterek seramiği bir arada tutmayı başarmıştır.

Yüksek sıcaklık süperiletken mıknatısın üstünlüğü şu sıralarda sadece ekonomiktir. Fakat araştırmacılar bu yeni malzemelerin önceki niyobiyum 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. Seramik malzemelerde geçiş sıcaklığının çevredeki manyetik alanlardan daha az etkilendiği görülmüştür.

Süperiletkenlerle yapılan uygulamalar performans ve verimi artırırken, sıradan cihazlara kıyasla boyutlarda da önemli küçülmelere yol açmıştır.

Süperiletkenlerin AC ve DC makinalarda kullanılması alışlagelmiş makinalarda ortaya çıkan problemleri ortadan kaldırmaktadır. Çünkü süperiletkenli makinaların başlıca üstünlükleri daha büyük verim (% 0.5 daha fazla) ve dolayısıyla daha büyük güç sağlamaları ya da verim ve dolayısıyla güç sabit tutulduğunda makinanın boyutlarının ve ağırlığının azalması, daha yüksek uç gerilimi elde edilmesi ve sistem kararlılığında düzelme sağlamalarıdır. Ayrıca, hem sermaye masrafı kazancı ve hem daha iyi çalışma özellikleri ile elde edilen sermayeye çevrilebilir kazançlar söz konusudur. Elektrik enerjisi üretiminde süperiletkenli jeneratörlerin kullanıma girmesi ile bugünkü güç sınırı olan 2000 MW'dan daha yüksek güçler elde edilebilecektir. Ancak bu kadar güçlü

generatörlerin kullanılmasının sistemin güvenilirliğine olan etkilerinin incelenmesi gerekir.

İletilen elektrik enerjisinin % 10'u enerji hatlarının direnci nedeniyle kaybedilmekte ve elektriksel drenç sinyal kalitesinde düşüslere neden olmaktadır. Süperiletken kablolarla bu kayıplar önlenabilmektedir. Fakat alternatif akım taşıyan kablolarda kayıplar sözkonusudur. Alternatif akım taşıyan bu süperiletken lobilerde oluşan kayıpları telafi etmek için sıcaklık daha da düşürölmek zorunda kalınmış, bu da soğutma problemlerini getirmiştir. Bu problemleri ortadan kaldırmak için çalışmalar, yeni malzeme arayışları halen devam etmektedir. Sadece doğru akım, kayıpsız olarak akımı iletilebilmektedir. Diğer önemli bir sorun, akım taşıma kapasitelerinin, iletimde gereken kapasitenin çok altında olmasıdır. Süperiletken seramiklerin geliştirilmesiyle daha yüksek akım yoğunlukları elde edilmiştir, fakat seramiklerin kırılğan olması büyük bir sorun teşkil etmektedir.

Süperiletkenler, elektronik devrelerde meydana gelen sinir bozucu karışıklıklara son verebilirler. Elektriksel ve manyetik alanlar süperiletkenlerin içine girmemektedirler. 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 birçok çalışmalar yapılmaktadır.

Elektrik enerjisi iletiminde süperiletkenlerin diğer bir uygulama alanı transformatörlerdir. Ancak, alışlagelmiş transformatörlerin verimlerinin zaten yüksek olması ve alternatif akım kullanılıyor olması (bu durumda süperiletkende de kayıplar sözkonusudur) süperiletkenli transformatörlerin önündeki engellerdir. 1987'de düşük sıcaklıklı süperiletken bir malzeme ile 80 kVA'lık bir transformatör imal edilmiş ve denenmiştir. Yapılan incelemeler ancak 1 MVA'dan büyük güçler için süperiletkenli transformatörün daha verimli olduğunu ortaya çıkarmıştır.

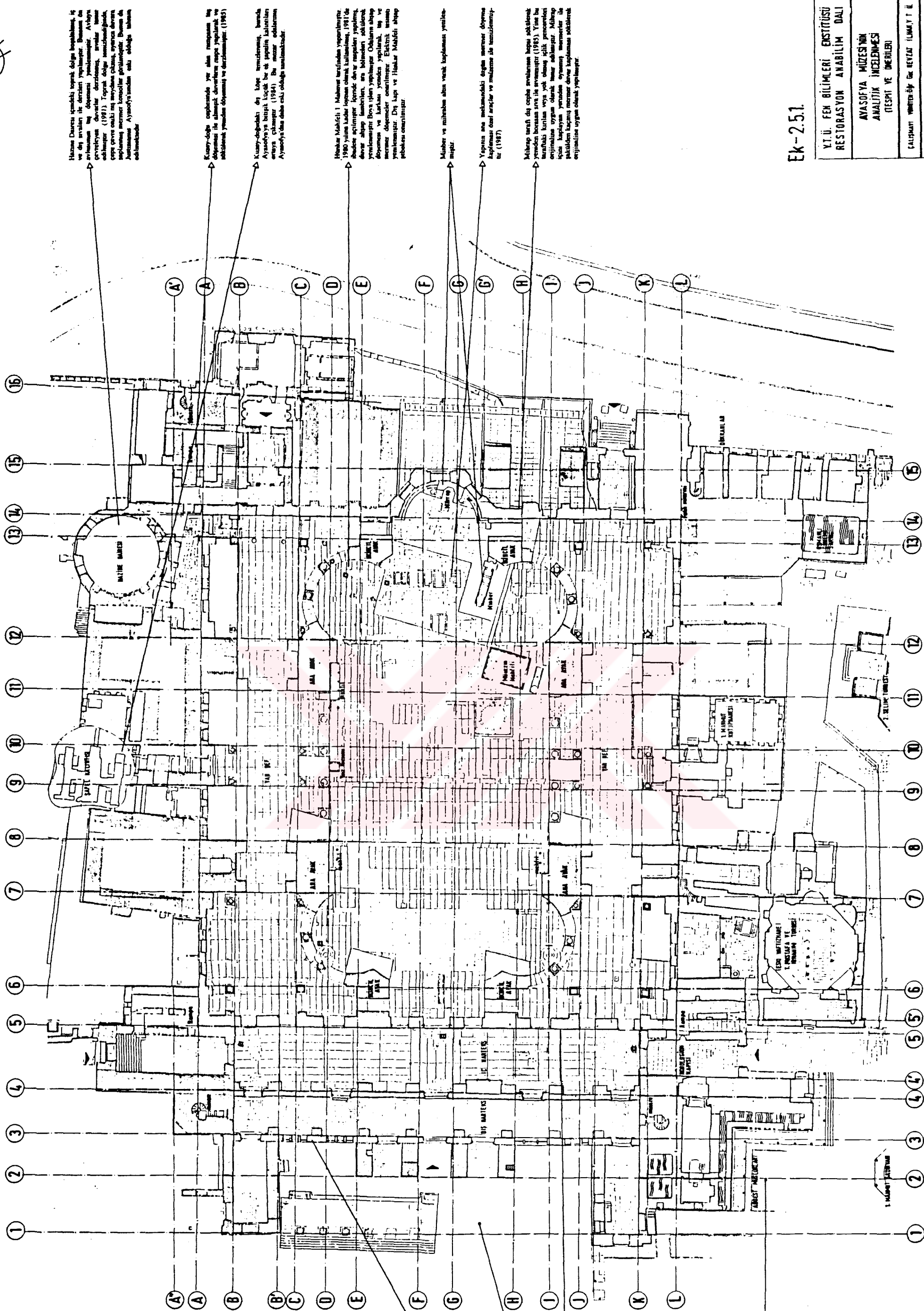
Maglev sistemi gürültü seviyesi, konforu, haberleşme sistemi, besleme ve kumanda kolaylıkları, süperiletken mıknatısların kullanımıyla daha yüksek motor verimi ve yüksek hızla, konvansiyonel sistemlerin yerini olacağı gibi, geleneksel ray-tekerlek metro sistemlerine bir alternatif olmaya devam edecektir.

Bütün bu çalışmalar ve uygulamalar, ortam sıcaklığında süperiletken olabilen malzemeler bulunduğunda, çok önemli bir bilimsel ve teknolojik devrimin gerçekleşeceğini göstermektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Flick , C. Handbook of Electric Machines
- [2] Gunther Bogner "Some Electrifying Developments in Superconductivity"
"Reserch and Development" Simens Review
- [3] ABUT, Yrd.Doç.Dr.N. "Süperiletken Mıknatısların Elektrik Makinalarında Kullanımı" Elektrik Mühendisliği III Ulusal Kongresi 1989
- [4] Proc. IEEE Transactions on Magnetic "The Supercoducting Magnet for the Maglev Transport System" Vol 30, No. 4 July 1994
- [5] Tuncay, R.N. "Süperiletkenlik ve Elektrik Mühendisliği Uygulamaları" Elektrik Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi
- [6] URAL, Prof. Dr. A. "Süperiletkenliğin Kablolarda Uygulanması" Elektrik Mühendisliği 3. Ulusal Kongresi
- [7] Bilim ve Teknik Dergisi Sayı No: 180 - 237 - 241, 1987
- [8] ABUT, Yrd. Doç. Dr. N. , URAL, Prof. Dr.A. " Raylı Elektrikli Ulaşım Sistemlerindeki Gelişmeler ve Maglev Teknolojisiyle Hızlı Ulaşım Sistemleri" Raytaş 1989, Sakarya
- [9] ABUT, Yrd. Dr. N."The Magnetic Levitation Systems and Its Applications" Research Report Magnetbahn and AEG, Berlin, West Germany 1988
- [10] ABUT, Yrd. Doç. Dr. N., URAL, Prof. Dr. A. ve URAL, B. "Demiryolu Taşımacılığında Teknolojik Gelişmeler" Toplu Taşımada Elektrifikasyon Sempozyumu, 15.6.1989, İstanbul
- [11] CANBULUT, N. "Elektrikli Ulaşım Sistemlerinde Modern Teknolojinin Kullanımı" Y.Ü. Yüksek Lisans Tezi, 1989



Abdest müstahları ona döğmesu tas kaptanmıştır
(1987)

[illegible]

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi : 27 Mart 1971

Doğum Yeri : İstanbul

Orta Öğretim : Ataköy Lisesi 1987

**Yüksekokul : Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik
Mühendisliği Bölümü 1992**

