

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SÜPERİLETKEN SENKRON GENERATÖRÜN UÇLARINDA ÜÇ FAZLI
SİMETRİK KISA DEVRE ARIZASI SİMÜLASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hüseyin Özhan BOZDAĞ**

Anabilim Dalı : Elektrik Mühendisliği

Programı : Elektrik Mühendisliği

OCAK 2011

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SÜPERİLETKEN SENKRON GENERATÖRÜN UÇLARINDA ÜÇ FAZLI
SİMETRİK KISA DEVRE ARIZASI SİMÜLASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hüseyin Özhan BOZDAĞ
504071024**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Aralık 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Ocak 2011

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Lale ZEYNELGİL (İTÜ)
Diğer Juri Üyeleri : Prof. Dr. Emin TACER (Bahçeşehir Ü.)
Prof. Dr. Serhat ŞEKER (İTÜ)**

OCAK 2011

Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim süresince çalışmalarında ve tezimin yazım aşamasında bilgilerinden yararlandığım ve beni yönlendiren danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. H. Lale ZEYNELGİL'e

Çalışmalarında daimi moral ve motivasyonumu yüksek tutmamı sağlayan, beni bugünlere getiren, maddi ve manevi desteklerini aldığım değerli aileme,

En içten saygı ve sevgilerimle sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ocak 2011

H. Özhan BOZDAĞ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	2
1.2. Literatür Özeti	2
1.3. Tezin İçeriği	3
2. SÜPERİLETKENLİK VE SÜPERİLETKEN MALZEMELER.....	5
2.1. Giriş	5
2.2. Süperiletkenlerin Tarihi.....	6
2.3. Süperiletkenlerin Özellikleri	8
2.4. Süperiletkenlerin Çeşitleri	9
2.4.1. Tip-I süperiletkenler	10
2.4.2. Tip-II süperiletkenler.....	10
2.5. Süperiletkenlerin Üstünlükleri ve Sakıncaları.....	11
2.6. Süperiletkenlerin Elektrik Enerjisi Uygulamaları	12
3. MATEMATİKSEL MODEL	15
3.1. Süperiletken Senkron Makinenin Yapısı ve Özellikleri.....	15
3.2. Tek Rotor Ekranına Sahip Süperiletken Senkron Generatörün Matematiksel Modeli	17
3.2.1. Eşit ortak temel değer	19
3.2.2. Simülasyon modelinin ifadesi	23
4. SÜPERİLETKEN SENKRON MAKİNEİNİN SİMÜLASYONU	25
4.1. Senkron Makinenin Uçlarında Kısa Devre Durumu	25
4.2. Süperiletken Senkron Makinenin Uçlarında Üç Fazlı Simetrik Kısa Devre Arızasının Simülasyonu	25
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	37
KAYNAKLAR	39
EKLER.....	43
EK 1.Akış Diyagramı.....	44
EK 2. Simülasyon Programı.....	45
ÖZGEÇMİŞ.....	49

KISALTMALAR

a.a.	: Alternatif akım
DSS	: Düşük sıcaklık süperiletken
YSS	: Yüksek sıcaklık süperiletken
Super-GM	: Superconductive Generation Equipment and Materials
SQUID	: Superconducting Quantum Interference Device
NbTi	: Niyobyum-Titanyum
BSC	: Bardeen, Scieffer ve Cooper
MR	: Magnetic resonans
AAS	: Arıza akımı sınırlayıcı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Süperiletken Senkron Makine Parametreleri.....	26
Çizelge 4.2 : Süperiletken senkron makine için sürekli hal çalışma koşulları	27
Çizelge 4.3 : Alışıl gelmiş senkron Makine Parametreleri.	31
Çizelge 4.4 : Alışıl gelmiş senkron makine için sürekli hal çalışma koşulları.	32

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Kamerlingh Onnes'ın cıva üzerinde süperiletkenliği açıkladığı elektiriksel direncin sıcaklığa bağlı değişimi	6
Şekil 2.2 : Çeşitli süperiletkenlerin keşfediliş tarihine göre kritik sıcaklıkları (T_c)	7
Şekil 2.3 : Tip-I süperiletken	10
Şekil 2.4 : Tip-II süperiletken	11
Şekil 3.1 : Sıvı yada gaz helyum soğutucu kullanılan bir süperiletken generatörün yapısı	15
Şekil 4.1 : Simetrik arıza akımı	28
Şekil 4.2 : Moment	29
Şekil 4.3 : Açısal hız	29
Şekil 4.4 : Uyarma akımı	30
Şekil 4.5 : a fazındaki arıza akımı	30
Şekil 4.6 : Simetrik arıza akımı	33
Şekil 4.7 : Moment	33
Şekil 4.8 : Açısal hız	34
Şekil 4.9 : Uyarma akımı	34
Şekil 4.10 : a fazındaki arıza akımı	35

SEMBOL LİSTESİ

T_c	: Kritik sıcaklık
H	: Enerji zaman sabiti
$\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$	: Stator a, b, c fazı akıları
L_a	: Stator sargısı endüktansı
L_{ab}	: Stator faz sargıları arasında ortak endüktans
M	: Uyarma ve fiktif ekran sargıları ile stator sargıları arasındaki ortak endüktans
L_f	: Uyarma sargısı endüktansı
L_s	: d ve q eksen fiktif ekran sargısı endüktansı
L_{fs}	: Uyarma ile d eksen fiktif ekran sargısı arasındaki ortak endüktans
i_a, i_b, i_c	: Stator a, b, c fazı akımları
i_f	: Uyarma akımı
i_{sd}	: d eksen fiktif ekran sargısı akımı
i_{sq}	: q eksen fiktif ekran sargısı akımı
i_d, i_q	: d ve q eksen stator akımları
T_e	: Makinede endüklenen moment
T_m	: Mekanik döndürme momenti
δ	: Rotor açısı
ω_0	: Senkron açısal hız
ω	: Açısal hız
x_d	: d eksen stator reaktansı (senkron reaktans)
x_q	: q eksen reaktans
x_{aq}	: q eksen ortak reaktans
x_{ad}	: d eksen ortak reaktans
x_f	: Uyarma sargısı reaktansı
r_a	: Stator direnci
x'_d	: d eksen stator geçici reaktansı
x''_d	: d eksen stator alt geçici reaktansı
x''_q	: q eksen stator alt geçici reaktansı

x_{al}	: Stator kaçak reaktansı
T'_{d0}	: Uyarma sargısı zaman sabiti
T''_{d0}	: d eksenli alt geçici zaman sabiti
T''_{q0}	: q eksenli alt geçici zaman sabiti
x_{fl}	: uyarma sargısı kaçak reaktansı:
x_{kdl}	: d eksenli stator reaktansı ile sönüm sargısı arasındaki kaçak reaktans
x_{kql}	: q eksenli stator reaktansı ile sönüm sargısı arasındaki kaçak reaktans
r_f	: Uyarma sargısı direnci
r_{kd}	: d eksenli sönüm direnci
r_{kq}	: q eksenli sönüm direnci
T_a	: Stator zaman sabiti
V_t	: Makine uç gerilimi
I_t	: Makineden çekilen akım
V_d	: Stator gerilimi d eksen bileşeni
V_q	: Stator gerilimi q eksen bileşeni
E_f	: Makinede endüklenen gerilim
e'_q	: q eksenli geçici reaktans gerisindeki gerilim
e''_q	: q eksenli alt geçici reaktans gerisindeki gerilim
e''_d	: d eksenli alt geçici reaktans gerisindeki gerilim

SÜPERİLETKEN SENKRON GENERATÖRÜN UÇLARINDA ÜÇ FAZLI SİMETRİK KISA DEVRE ARIZASI SİMÜLASYONU

ÖZET

Bu çalışmada tek rotor ekranına sahip süperiletken senkron makinenin uçlarında üç fazlı simetrik kısa devre arızası durumu için analiz yapılmıştır.

Senkron makinenin uçlarındaki yükün ani olarak büyük ölçüde değişmesi sonucunda, makinenin stator sargılarından yüksek miktarda geçici hal akımı yada kısa devre akımı geçer. Bu durum hatalı anahtarlama yada başka bir arıza sonucu oluşabilir. Bu gibi durumlarda, geçici hal akımı makinenin nominal çalışma akımından çok daha fazladır,

Faz değişkenlerine göre türetilen matematiksel model, d-q koordinat sistemine çevrilerek MATLAB ortamında simülasyon için hazır hale getirildi. MATLAB’da ise makineye ilişkin parametrelerden simülasyon için gerekli olan parametreler türetildi, sistemin sürekli hal çalışma koşulları hesaplandı ve bunlar simülasyonun başlangıç koşulları olarak kabul edildi.

Tezin birinci bölümünde, süperiletkenlerin kullanım alanları ve enerji sistemleri ile ilgili uygulamaları açıklanmıştır ve daha sonra süperiletken makineler ile ilgili çalışmalar açıklanmıştır.

Tezin ikinci bölümünde, süperiletken malzemelerin özellikleri açıklanmış, sınıflandırılması yapılmış, üstünlük ve sakıncaları açıklanmıştır. Elektrik enerjisi uygulamaları irdelenip bu alandaki yenilikler vurgulanmıştır.

Tezin üçüncü bölümünde, hava çekirdekli süperiletken senkron generatörün matematiksel modeli türetilmiş daha sonra d-q koordinat sistemine çevrilerek MATLAB ortamında simülasyonda kullanılmak için uygun hale getirilmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde, süperiletken senkron makinenin uçlarındaki üç fazlı kısa devre durumunda davranışına ilişkin bilgi verilmiş ve önce üçüncü bölümde oluşturulan süperiletken senkron makine modeli için ve daha sonra karşılaştırma amacı ile alışlagelmiş makine için simülasyon yapılmıştır.

Tezin beşinci bölümünde, oluşturulan matematiksel modele ilişkin gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarının değerlendirmesi yapılmış ve konu ile ilgili olarak yapılabilecekler yer verilmiştir.

SIMULATION OF THREE PHASE TERMINAL SHORT CIRCUIT ON A SUPERCONDUCTING SYNCHRONOUS GENERATOR

SUMMARY

In this thesis, analysis of three-phase short circuit at the terminals of one rotor screened superconducting synchronous generator is made.

When there is a high load change occurs suddenly at the terminals of synchronous generator, there will be high amount of transient current or short circuit current passes through the stator windings of the machine, in such cases, the transient current of the machine will be much higher than the nominal current of the machine.

Phase variable model of superconducting synchronous generator is converted to the d-q coordinate system for use in MATLAB simulations. In MATLAB, simulation parameters derived from given machine parameters. The steady-state parameters are calculated and they considered as initial conditions of the simulation.

In first chapter, the usage fields and power applications of superconductors are introduced, also literature works on superconducting machines are explained.

In chapter two, properties and classification of superconductor materials are explained and their advantages and disadvantages are explained. Electric power applications are explained in detail and innovations in this field are emphasized.

In chapter three, mathematical model of an air cored superconducting generator is derived and then it is converted to d-q coordinate system for its use in MATLAB to make simulations.

In chapter four, behavior of superconducting synchronous machine when there is a three-phase short circuit at its terminals are explained and simulation is made for the model derived at chapter three and for conventional generator model for comparison.

In chapter five, simulation results are summarized the conclusions drawn for the study and the scope for future work are given.

1. GİRİŞ

Enerji günümüzde insan hayatında önemli bir yere sahiptir ve elektrik enerjisi tüketim bakımından enerjinin en büyük kısmını oluşturur. Elektrik enerjisinin dönüşümünün faydası, uzak mesafelere iletim kolaylığı ve esnek şekilde son kullanıcıya ulaşmasıdır.

Bilinen generatör tiplerine göre süperiletken generatörlerin üç potansiyel üstünlüğü vardır. Birincisi, demir çekirdek kullanmadan, yüksek manyetik alanlarda (5-6 T kadar) çalışabilirler, dolayısıyla % 50 daha az ağırlığa ve hacme sahiptirler [1]. Bu, malzeme ihtiyacını ve üretim sermayesini düşürür; ayrıca üretimin çevre üzerindeki etkisini azaltır. İkincisi, süperiletken generatörler şebekedeki frekans ve yük değişimine karşı yüksek sistem kararlılığı sağlarlar. Küçük boyutlarından dolayı daha küçük senkron reaktansa sahiptirler. Bu sayede arıza durumundan sonraki kritik arıza temizleme zamanı uzar. Son olarak, verimleri yüksek olduğundan kWh başına daha az CO₂ emisyonu oluşur [2].

Elektrik endüstrisi ile ilgili olarak, süperiletken senkron generatör büyük ölçekli süperiletken uygulamalarda en büyük potansiyele sahiptir. Bu tip makineler mekanik enerjiyi elektrik enerjisine daha yüksek verimle dönüştürmeli ve diğer makine çeşitlerine göre ağırlıkları ve hacimleri daha az olmalıdır. Bu üstünlükler 1200 MVA ve üzerinde çıkış gücünde, iletim hattı geriliminde eklenmiş potansiyel çalışması ile gerçekleşir ve daha yüksek sistem kararlılığı sunar [3].

Süperiletken senkron generatörlerin davranışındaki en önemli faktörler geçici durumu etkileyen faktörlerdir. Süperiletken makine düşük p.u. senkron reaktansı, yüksek takip frekansı ve düşük sönümlenmesiyle karakterize edilmiştir. Son iki karakteristiğin geçici hal davranışında bazı negatif etkiler üretmesi beklenmektedir ancak düşük reaktans kararlılık sınırını artırma eğilimindedir [3].

Süperiletken senkron generatörün rotoru tek ekranlı yada iki ekranlı olarak iki farklı şekilde üretilebilir. İki ekranlı süperiletken senkron generatörün iç ekranı, nispeten daha uzun zaman sabitine sahiptir ve süperiletken uyarma sargılarını zamanla değişen dış manyetik alanların etkilerine karşı zırh görevi görerek korur. Dış ekran,

sönümleme görevi yapar ve iç ekran zaman sabitinden oldukça kısa zaman sabitine sahiptir [3].

1.1 Tezin Amacı

Bir generatörün karşılaşılabileceği en kuvvetli bozucu etkilerden biri olarak kabul edilen generatörün uçlarında oluşacak üç fazlı simetrik kısa devre arızasına karşı süperiletken senkron makinenin davranışını gözlemlemek ve aynı güçteki alışlagelmiş senkron makinenin aynı durum için davranışını karşılaştırmaktır.

1.2 Literatür Özeti

1961’de ilk süperiletken mıknatısların üretilmesinden kısa bir süre sonra elektrik makinelerinde süperiletken teknolojisinin kullanılmasına ilişkin kavramlar ortaya atılmıştır. 60’lı yılların ortasında süperiletken alternatif akım makinelerine ilgi ABD’de özellikle askeri alanda yoğunlaşmıştır.

Süperiletken senkron generatörler ile ilgili ilk çalışmalardan biri 1964 - 1966 yılları arasında ABD’de Sykulski ve Goddard, tarafından geliştirilen sabit süperiletken uyarma sargıları bulunan ve bilezikli döner normal endüviden oluşan bir alternatördür [4]. Birkaç yıl içinde süperiletken senkron makineler için benzer çalışmalar çeşitli ülkelerde yürütölmeye başlanmıştır.

1973 yılında Kirtley ve Edeskuty, büyük üretim tesisleri için süperiletkenlerin döner alan sargılarında uygulanmasına dair fizibilite ve potansiyelleri üzerine çalışmalar yapmıştır. 1977 yılında Westinghouse ve General Electric 1200 MVA gücündeki süperiletken generatörü üretti [5].

1997 yılında, sıvı helyum ile soğutulan NbTi (niyobyum-titanyum) düşük sıcaklık süperiletken kullanılan, rotoru yüksek kararlılık, yüksek kritik akım yoğunluğu için tasarlanmış düşük a.a. kayıplı 3 tane 70 MW gücünde süperiletken generatör üretildi ve test edildi [6]. DeMello ve Concordia, uyarma kontrolünün makine kararlılığının iyileştirmesine olan etkisini araştırdı [7].

Kirtley, süperiletken generatörün büyük sistem etkileşimi karakteristiklerini belirledi ve süperiletken generatörler ile alışlagelmiş generatörler arasındaki farkları vurguladı [8]. 1994 yılında General Electric 100 MVA yüksek sıcaklık süperiletken generatör tasarlama çalışmalarına başladı [9]. Ueda ve Shiobara, 70 MW gücündeki

süperiletken generatör parametreleri ölçümünü ve analizini gerçekleştirdi [10]. Üç boyutlu sonlu elemanlar metodu ile hesaplanan değerler ile test sonuçlarındaki değerler karşılaştırıldı. 2003 yılında, Avustralya ve Yeni Zelanda 2 MW gücünde 20 d/dak.lık düşük hız ve yüksek momente sahip yüksek sıcaklık süperiletken (YSS) türbin generatörünü üretti [11].

Alyan ve Rahim, süperiletken turbogeneratörün geçici hal kararlılığında frekans kontrolünün rolü üzerine çalışmalar yaptı [12]. Minseok, süperiletken senkron motor tasarladı ve dinamik performansını inceledi [13].

Japonya'da 1988-1999 yılları arasında 70 MW gücündeki süperiletken generatörün tasarımı, üretimi ve testleri birinci faz olarak gerçekleşti. İkinci faz ise 2000-2003 yılları arasında Super-GM (Superconductive Generation Equipment and Materials) projesi adıyla daha yüksek güçte ve küçük boyutlarda makine üretimi için gerçekleşti. Bu süperiletken generatör 1500 saatlik kesintisiz çalışma ve 79 MW çıkış gücüyle bu alanlarda bugüne kadar ulaşılmış en iyi sonuçları elde etti [14].

1.3 Tezin İçeriği

Giriş bölümünde, süperiletkenlerin kullanım alanları ve enerji sistemleri ile ilgili uygulamaları açıklandı ve daha sonra konu ile ilgili literatür çalışmaları açıklandı.

İkinci bölümde, süperiletken malzemelerin özellikleri açıklandı, sınıflandırılması yapıldı, üstünlükleri ve sakıncaları açıklandı. Elektrik enerjisi uygulamaları irdelendi.

Üçüncü bölümde, hava çekirdekli süperiletken senkron generatörün matematiksel modeli türetilip daha sonra d-q koordinat sistemine çevrilerek MATLAB ortamında simülasyonda kullanılmak üzere uygun hale getirildi.

Dördüncü bölümde, süperiletken senkron makinenin uçlarındaki üç fazlı kısa devre durumunda davranışına ilişkin bilgi verildi ve önce üçüncü bölümde oluşturulan süperiletken makine modeli için ve daha sonra, alışlagelmiş senkron makine modeli için simülasyon yapıldı.

Beşinci bölümde, oluşturulan matematiksel modele ilişkin gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesi yapılmış ve konu ile ilgili olarak yapılabilecekler yer verildi.

2. SÜPERİLETKENLİK VE SÜPER İLETKEN MALZEMELER

2.1 Giriş

Süperiletkenlik bazı malzemelerin elektrik direncinin sıfır olabilme özelliğidir, bu nedenle süperiletkenler elektrik akımını enerji kaybı olmadan taşıma yeteneğine sahiptirler.

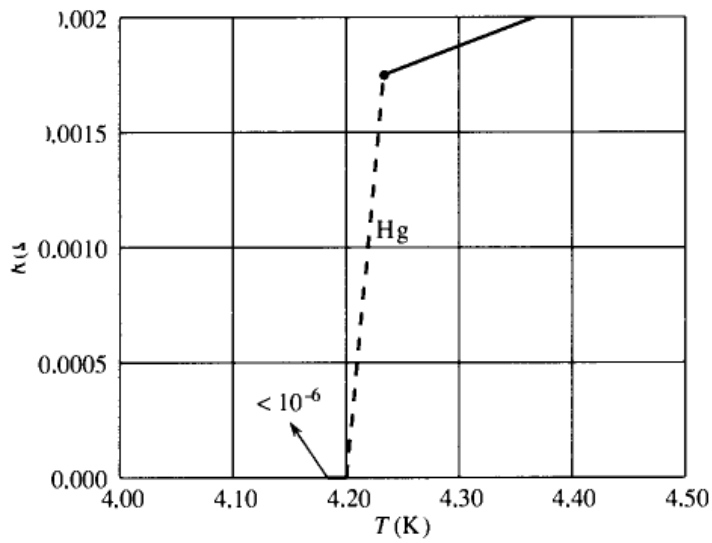
Bilinen ilk süperiletkenler mutlak sıfıra çok yakın sıcaklıkta (-273.15°C) çalışırlar. Yapılan çalışmalar sonucunda 1980'lerde -196°C ve 1990'ların sonunda -109°C sıcaklığına çıkıldı. Niyobyum ile oluşturulan alaşım süperiletkenler parçacık hızlandırıcılarda ve tıbbi görüntüleme cihazlarında güçlü mıknatıslar olarak kullanılmaktadır. Süperiletken malzemeler düşük güç kaybı, yüksek hızda çalışabilme ve yüksek hassasiyet gibi özelliklere sahiptirler [15]. Dışarıdaki magnetik alanı mükemmel bir diamanyetiklik özelliği göstererek dışarı itebilme yeteneğine sahiptirler. Günümüzde süperiletkenler; tıbbi görüntüleme, magnetik enerji depolama sistemleri, motorlar, generatörler, transformatörler, bilgisayar bileşenleri ve hassas magnetik alan ölçüm aletlerinde kullanılmaktadır. Süperiletkenlik çeşitli malzemelerde bulunur; bunlar kalay ve alüminyum gibi elementler, çeşitli metal alaşımlar ve yüksek oranda katkılanmış yarı iletkenler de olabilir.

1986'da keşfedilen ve yüksek sıcaklık süperiletkenleri olarak bilinen cuprat-peroksit gibi seramik malzemeler -183°C (90 K) kritik sıcaklığını aştığından süperiletkenlik ile ilgili araştırmaları ve süperiletkenlere olan ilgiyi artırdı. Bu malzemeler mevcut teori ile açıklanamayan yeni bir olgu ile ifade edildi [16]. Süperiletken halin sıvı azotun kaynama noktası olan 77 K gibi yönetilebilir sıcaklıklara kadar devam etmesi ve özellikle daha yüksek kritik sıcaklıklara sahip malzemelerin bulunmasıyla daha fazla ticari uygulamanın gerçekleştirilmesini mümkün kıldı. Sıcaklığa ek olarak, süperiletkenliğin bağlı olduğu iki önemli değişken daha vardır: magnetik alan ve akım. Süperiletkenler magnetik alanlarda işler, ancak alan şiddeti belirli bir değeri aştığında süperiletkenlik kaybolur. Bu değer, kritik magnetik alan olarak bilinir. Bir süperiletkenin taşıyabileceği maksimum akım kritik akım olarak adlandırılır.

Eğer sıcaklık, magnetik alan şiddeti yada akım miktarı kritik değerin üzerine çıkarsa süperiletkenlik özelliği kaybolur.

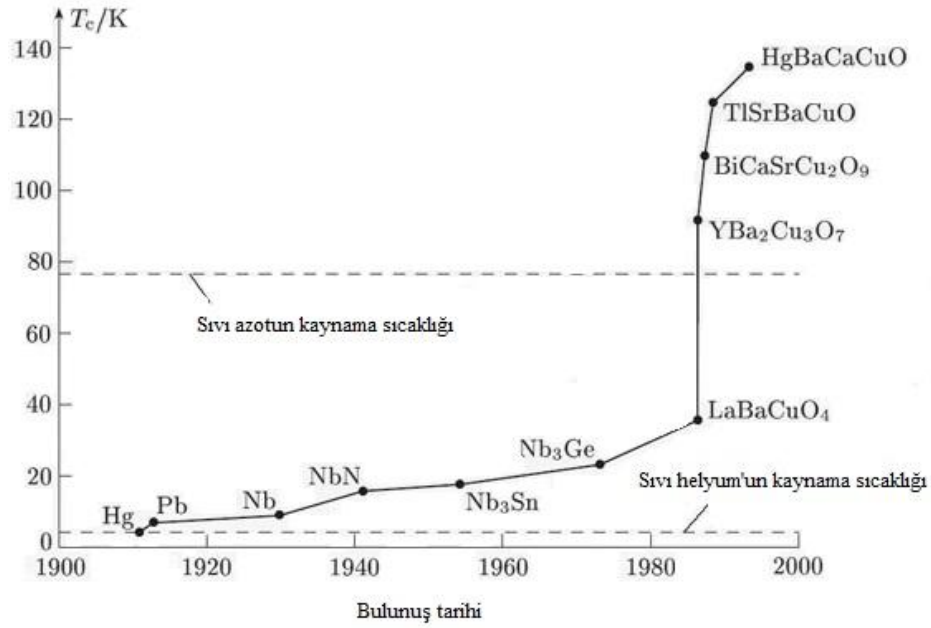
2.2 Süperiletkenlerin Tarihi

Süperiletkenlik 1911 yılında Heike Kamerlingh Onnes tarafından, katı haldeki cıvayı sıvı helyum yardımı ile soğutulduğunda 4.2 K sıcaklığında elektrik direncinin kaybolduğunu gözlemlemesi ile keşfedilmiştir. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi, sıcaklık 4.2 K’e düşürüldüğünde elektrik direncinin aniden kaybolduğu görülmüştür.



Şekil 2.1 : Kamerlingh Onnes’in cıva üzerinde süperiletkenliği açıkladığı elektriksel direncin sıcaklığa bağlı değişimi [17].

Malzemenin süperiletken hale geçtiği sıcaklık kritik sıcaklık (T_c) olarak adlandırılır ve malzemeye göre farklılık gösterir [17,18]. 1913 yılında, kurşunun 7 K sıcaklığında süperiletken olduğu ve 1941 yılında niyobyum-nitrür 16 K sıcaklığında süperiletken olduğu keşfedildi. Sonraki yıllarda, belirli sıcaklıkta ve basınçta farklı süperiletken malzemeler bulundu [18]. En bilinen süperiletken malzemelerin kritik sıcaklıkları şekil 2.2’te verilmiştir.



Şekil 2.2 Çeşitli süperiletkenlerin keşfediliş tarihine göre kritik sıcaklıkları (T_c) [19].

Süperiletkenliğin anlaşılması açısından en önemli olaylardan biri 1933 yılında gerçekleşti, Meissner ve Ochsenfeld süperiletkenlerin uygulanan magnetik alanları tamamen dışladığını gözlemledi ve bu olgu Meissner etkisi olarak bilinir. 1950 yılında Landau ve Ginzbur tarafından Landau'nun ikinci dereceden faz geçişleri teorisi ve Schröndinger dalga denklemleri ile oluşturduğu Ginzburg-Landau teorisi ile süperiletkenlerin makroskopik özellikleri açıklandı. Abriskosov, Ginzburg-Landau teorisinin süperiletkenleri Tip-1 ve Tip-2 olarak iki farklı gruba ayırdığını gösterdi [20].

1957'de Bardeen, Scribeffer ve Cooper tarafından BSC teorisi olarak adlandırılan en kapsamlı teori önerilmiştir. BSC teorisinin esası, süperiletkenlerde yük taşıyıcıların Cooper çiftleri olarak bilinen zıt momentumlu elektron çiftleri olmasına dayanmaktadır [21].

1962'de Westinghouse tarafından, ilk kullanışlı süperiletken mıknatıs yapımına olanak sağlayan niyobyum-titanyum alaşımından yapılan süperiletken kablo üretildi. Aynı yıl Josephson iki süperiletken elektrot arasına yerleştirilmiş ince bir yalıtkan oksit tabakasından oluşan "Josephson eklemi" olarak adlandırılan anahtarı keşfetti ve bu anahtarlar SQUID'lerde (superconducting quantum interference device (süperiletken kuantum girişim aygıtı)) uygulandı [22].

2008’de Vinokur ve Baturina, süperiletkenliğin ürettiği aynı mekanizmayı neredeyse sonsuz elektrik direnci sağlayan süperyalıtkan haline geçen bazı malzemeler için üretti [23].

2.3 Süperiletkenlerin Özellikleri

Süperiletkenlerin fiziksel özelliklerinin çoğu kullanılan malzemeye göre değişir, örneğin ısı kapasitesi ve kritik sıcaklık, kritik alan ve kritik akım yoğunluğu aşıldığında süperiletkenlik yok olur. Diğer taraftan bazı özellikler kullanılan süperiletken malzemeden bağımsızdır. Örneğin, magnetik alanın olmadığı ve düşük akım uygulandığında süperiletkenler tamamen sıfır elektriksel dirence sahiptir. Bu özellikler süperiletkenliğin termodinamik bir faz olduğunu işaret eder [20]. Süperiletken malzemelerin çeşitli özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Enerji aralığı
- Sıfır elektrik direnci
- Süperiletken mıknatıslar
- Yüksek sıcaklık süperiletkenleri

Enerji Aralığı

Süperiletkenlerin çoğu termodinamik özelliği bir boşluğun varlığını sıcaklık ile belirten veya enerji spektrumundaki izin verilmeyen özenerjilerin bulunduğu enerji aralığının $e^{-\Delta E/kBT}$ ile değiştiği bulunmuştur; burada, ΔE enerjideki değişimi, k Boltzman sabitini ve T sıcaklığı belirtir. Süperiletkenlerin fiziksel özelliklerinin çoğu malzemeden malzemeye değişir, örneğin süperiletkenliğin yok olduğu; ısı kapasitesi ve kritik sıcaklık, kritik alan ve kritik akım yoğunluğu malzemeden malzeme farklılık gösterir [20].

Sıfır Elektrik Direnci

Bütün süperiletkenler magnetik alan olmadığı ve düşük akım uygulandığında tamamen sıfır elektrik dirence sahiptir. Bu bütünsel özelliklerin varlığı süperiletkenliğin bir termodinamik bir faz olduğunu gösterir, dolayısıyla süperiletkenler mikroskobik detayların bağımsız olduğu belli ayırt edici özelliklere sahiptir. Örneğin direnci ohm yasasıyla açıklarsak, eğer süperiletken madde

kullanılarak yapılan malzemeden akım geçtiğinde gerilim sıfır oluyorsa bu durum malzemenin süperiletken halde olduğu ve direncinin sıfır olduğunu gösterir [20].

Süperiletken Elektromıknatıslar

Süperiletkenler akımlarını herhangi bir gerilim uygulanmadan sürdürebilirler, magnetik rezonans (MR) görüntüleme cihazlarında süperiletken elektromıknatısların bu özelliğinden faydalanılmaktadır. Deneyler süperiletken bobinlerdeki akımın yıllarca hiçbir ölçülebilir değişim olmadan sürdürülebilir olduğunu göstermiştir [20].

Yüksek Sıcaklık Süperiletkenleri

Süperiletken malzemelerde, süperiletkenlik özellikleri T_c sıcaklığının kritik T_c sıcaklığının altına düşüldüğünde gözlenir. Bu kritik sıcaklığın değeri malzemeden malzemeye değişir. Alışlagelmiş süperiletkenlerde genellikle kritik sıcaklık aralığı 20 K ile 1 K aralındadır. Örneğin, katı cıvanın kritik sıcaklığı 4.2 K'dir. Alışlagelmiş bir süperiletken için bulunan en yüksek kritik sıcaklık magnezyum dibor için (MgB_2) 39 K'dir [24,25]. Cuprate yada yüksek sıcaklık süperiletkenleri daha yüksek kritik sıcaklıklara sahip olabilirler. Keşfedilen ilk cuprate süperiletkenlerden biri olan $YBa_2Cu_3O_7$ 92 K'lık kritik sıcaklığa sahiptir ve cıva temelli cupratların 130 K'i aşan kritik sıcaklıkları olduğu bulunmuştur. Bunların yüksek kritik sıcaklıklarına ilişkin açıklama mevcut teori ile hala yapılamamaktadır. Phonon değişimiyle ilgili elektron eşleşmeleri geleneksel süperiletkenlerdeki süperiletkenlik tanımıyla açıklanır. Fakat yüksek kritik sıcaklığa sahip olan yeni süperiletkenlerdeki süperiletkenlik tanımı ile açıklanamamaktadır [26].

2.4 Süperiletken Çeşitleri

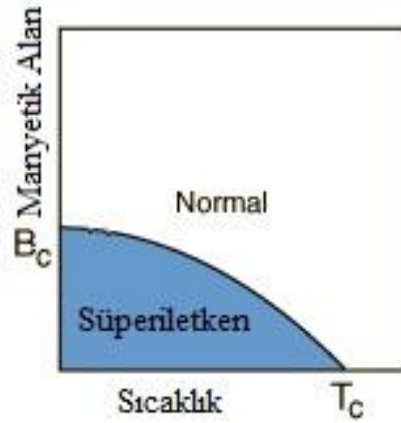
Süperiletken malzemeler Tip-I ve Tip-II olarak sınıflandırılmıştır. Niyobyum, vanadyum ve teknesyum hariç tüm saf elemental süperiletkenler Tip-I süperiletkenlerdir. Süperiletken alaşımlar ve yüksek kritik sıcaklığa sahip seramikler ise Tip-II süperiletkenler olup pratikte en çok kullanılan süperiletkenlerdir [20].

- Tip-I süperiletkenler
- Tip-II süperiletkenler

2.4.1 Tip-I süperiletkenler

Süperiletkenlerin Tip-I kategorisi kısaca oda sıcaklığında iletken olan bazı metal ve yarı metallerden oluşur. BCS teorisine göre, bu malzemelerde elektron akımını kolaylaştırmak için moleküllerin titreşimlerini yeterli derecede yavaşlatmak gerekir ki bunun için metallerin olağanüstü soğuk olması gerekir. BCS teorisi “cooper çifti” gibi elektron takımları gerektirir ki moleküler engelleri aşabilsinler.

Tip-I süperiletkenler “yumuşak” süperiletkenler olarak tanımlanmış olup, süperiletken duruma geçişte en düşük sıcaklığa ihtiyaç duyan ve ilk keşfedilen süperiletkenlerdir. Şekil 2.3’te gösterildiği gibi süperiletken malzemeler normal halden süperiletken hale keskin geçiş sergilerler ve mükemmel diamagnetizma özelliği gösterirler.

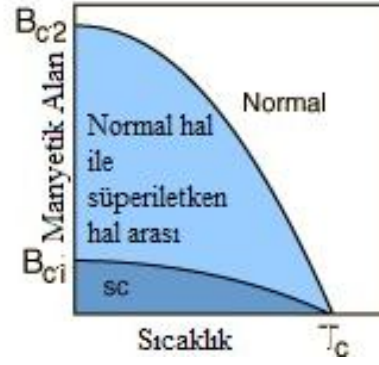


Şekil 2.3 : Tip-I süperiletken [27]

Birçok element uygulanan yüksek basınçla bir süperiletken faz içerisine geçer. Örneğin fosforun en yüksek T_c değerine sahip Tip-I element olduğu görülür, ancak, fosfor 14-22 K kritik sıcaklığına ulaşmak için 2,5 Mbar basıncına ihtiyaç duyar [20,27].

2.4.2 Tip-II süperiletkenler

Bütün yüksek sıcaklık süperiletkenleri Tip-II süperiletkenlerdir ve bu elementler “karışık” magnetik hal sergilerler. Niyobyum, vanadyum ve teknetyum elementleri hariç, Tip-II süperiletken grubu metalik bileşiklerden ve alaşımlardan oluşur. En son keşfedilen süperiletken “perovskitler” Tip-II grubuna dahildirler. Bunlar henüz tamamen bilinmeyen bir işleyişle Tip-I süperiletkenlerden daha yüksek T_c değerine sahiptirler. Şekil 2.4 Tip-II süperiletkenlerin özelliklerini göstermektedir.



Şekil 2.4 : Tip-II süperiletken [27]

Tip-II süperiletkenler aynı zamanda “sert” süperiletkenler olarak bilinirler. Normal halden süperiletken hale geçişleriyle Tip-I süperiletkenlerinden ayrılırlar, normal fazdan süperiletken faza geçerken karışık faz davranışına sahip bir bölgeden yavaş yavaş geçerler [20,27]

2.5 Süperiletkenlerin Üstünlükleri ve Sakıncaları

Süperiletkenlerin bilinen iletkenlere göre üstünlükleri;

- Süperiletken malzeme çok daha fazla akım taşıyabilir, çok daha büyük magnetik alan oluşturabilir ve elektrik akımını dirence bağlı enerji kaybı olmadan taşıyabilir.
- Süperiletken kablolar, aynı ölçülerdeki diğer kablolarla göre çok daha fazla akım taşıyabilir.
- Yüksek sıcaklık süperiletkenlerin kullanıldığı süperiletken motor, transformatör gibi uygulamalarda, bilinen cihazlara göre aynı güç için boyutlar ve enerji kaybı yarı yarıya azalır.

Süperiletkenlerin sakıncaları;

- Süperiletkenler manyetizmaya olduğu gibi yüksek akımlara karşı da çok duyarlıdır, yüksek akımlarda süperiletkenlik kaybolabilir ve magnetik alanlar süperiletkeni kolaylıkla normal iletken haline çevirebilir.
- Günümüzde, süperiletkenlik hâlâ oda sıcaklığından çok uzakta olan çok soğuk ortamlarda mümkündür. Bu gereksinim birçok durumda pratik değildir.

2.6 Süperiletkenlerin Elektrik Enerjisi Uygulamaları

Süperiletkenler için çeşitli elektrik enerjisi uygulamaları tasarlanmıştır ya da geliştirilmektedir. Süperiletken teknolojisi kullanılarak geliştirilen elektrik enerjisi cihazları ve bileşenleri bilinen alternatiflerine göre daha verimli çalışmakta ve daha az maliyetli olmaktadır. Süperiletken teknolojinin potansiyeli gelecek için ümit vericidir, enerji santrallerinde daha az yakıt ile daha az emisyon üretilmiş olur, elektrik motorları daha küçük ve çok daha güçlü olabilir, elektrik kabloları 3 ila 5 kat daha fazla enerji taşıyabilir ve enerji çok daha verimli olarak depolanabilir. Süperiletkenlik 20 yıldan daha uzun bir süredir, MRI, magnetik ayırıcılar, parçacık hızlandırıcılar gibi yüksek enerjili fizik cihazları ve gökbilimciler tarafından kullanılan parçacık detektörlerinde kullanılmaktadır.

- **İletim Hatları**

YSS teknolojisi elektrik iletimi için çok ümit verici olup, bunun en önemli nedeni YSS kabloların bilinen bakır yeraltı kablolarına göre üç ila beş kat daha fazla akım taşıma kapasitesi olmasıdır [28]. Bazı YSS kablolar mevcut bakır kablolar için kullanılan yeraltı borularına göre tasarlanmış olup, bu sistemlerde, YSS kablo sıvı soğutucu içeren boru etrafına sarılıdır. YSS kablolar birkaç katman elektriksel ve ısı yalıtkan ile korunurlar.

Süperiletken elektrik kabloları mevcut iletim hatlarında kullanılan kablolardan yaklaşık 10 kat daha pahalıdır, bu da yerleşim yerlerindeki uygulamayı kısıtlayan en önemli faktördür. 1970'lerde yapılan sıvı He soğutmalı Düşük Sıcaklık Süperiletken (DSS) kablolar üzerine yapılan deneyler teknik olarak başarılı olmuştur [29], ancak bu tip kablolar 5-10 GVA üzeri güç iletimleri için ekonomik açıdan uygulanabilir değildir. Sıvı N₂ soğutmalı YSS kablolarında ise kritik değer 300-500 MVA civarındadır [30]. Mevcut sıvı N₂ soğutmalı Bi-2223/Ag süperiletken şeritler yaklaşık 0.1 T'lık düşük alan sınırları içindedir. Danimarka'da, 30 metre uzunluğunda 3-fazlı, 30 kV, 104 MVA'lık YSS kablo Kopenhag elektrik santralinde kurulmuştur ve test edilmiştir [31]. Japonya'da 100 metre uzunluğunda 66 kV/1 kA/ 114 MVA'lık 3-fazlı kablo 1 yıl boyunca test edildi [32,33].

- **Generatörler ve Motorlar**

Alışlagelmiş generatör ve motorlarda magnetik alan bakır ya da alüminyum iletkenlerden oluşan bobinler ile üretilmektedir, dolayısıyla süperiletkenler çok daha fazla elektrik akımı taşıyabileceği için oldukça küçük ve güçlü sistemler üretilebilir. Örneğin süperiletken motor aynı güçteki alışlagelmiş benzerine göre % 50 daha küçük olabilir. Süperiletken kullanılarak üretilecek olan generatör ve motorlar sırasıyla % 99.5 ve % 98 verimle çalışabilir, oysa bugün kullanılan alışlagelmiş generatörlerin verimi % 97-98 ve motorların ise % 90-96 arasındadır [20,29].

- **Transformatörler**

Transformatörler, motorlar ve generatörlere göre daha basit cihazlardır. Amaçları daha verimli enerji iletimini sağlamak için sistem gerilimini azaltmak ya da artırmaktır. Gerilim, bir bobinin diğer bobine akım (ve gerilim) indüklemesi ile artar ya da azalır. Elektrik son kullanıcıya ulaşmadan en az üç transformatörden geçer ve iletilen enerjinin % 3-7 si transformatörde kaybolur. Süperiletken transformatörde, bobinler bakır yerine süperiletken iletkenlerden üretilir ve bu sayede kayıplar yarı yarıya azalır, boyutları % 50 kadar küçük olur ve yanıcı olan soğutucu yağ kullanmadığı için yangın riski oluşturmaz.

YSS transformatörler, alışlagelmiş transformatörlere göre daha az hacim ve ağırlığa sahip olarak üretilebilirler [34]. Yangın riski ve çevresel faktörler göz önüne alındığında soğutucu olarak yağ yerine sıvı N₂ kullanmak uygun olacaktır. Süperiletken transformatörün en büyük avantajı birkaç saatlik period boyunca anma gücünün % 100'e kadar üzerinde çalışabilme potansiyelidir. Bu olağanüstü çalışma şekli yalnızca biraz daha fazla soğutma gücüne ihtiyaç duyar [33].

- **Arıza Akımı Sınırlayıcıları (AAS)**

Akım sınırlamasında süperiletkenlerde, süperiletkenlik özelliğinin kaybolup ani elektriksel direnç artışına neden olacak kritik akım miktarını esas alınır.

Çözülmesi gereken malzeme problemi ısıl difüzyon uzunluğu skalasında bölgesel kritik akım yoğunluğunun uzaysal homojenliğidir, çünkü bu homojenlik sağlanmazsa güç homojen olarak ısıl dağılmaz ve sıcak noktalara yönelerek malzemeyi tahrip eder. Bu homojenlik şu ana kadar sadece Bi-2212, Bi-2223 şeritleri ve YBCO şeritleri ve YBCO ince filmleriyle elde edilmiştir [33].

- **Magnetik Enerji Depolama**

Dünyanın birçok teknoloji laboratuvarlarında yüksek sıcaklık süperiletkenlerinin enerji depolama cihazlarının manyetik taşıyıcı sistemlerine uyarlanması üzerinde çalışılmaktadır [35]. Araştırma gruplarını bu alana zorlayan birçok sebep vardır. Günümüzde enerji depolanması endüstriyel verimin ve devamlılığın artırılması açısından önem arz etmektedir. Örneğin bir fabrikada elektrik kesintisi söz konusu olduğunda enerji depolayıcılar devreye sokularak üretim durmaksızın devam edebilir. Hidroelektrik santrallerindeki gece ve gündüz sınırlı kapasitede çalışmanın yaratmış olduğu sorunları başka bir örnek olarak verebiliriz. Eğer herhangi bir zaman zarfında enerji tüketimi fazla değil ise, üretilmiş olan fazlalık enerji depolanarak ihtiyaç olduğu zaman kullanılabilir. Yine, çok yüksek güç gerektiren birçok kontrol mekanizmaları kesintisiz enerji kaynaklarına ihtiyaç duymaktadır. Bir kaç saniyelik enerji kesintisi bile hem güvenlik ve hem de verimlilik açısından problem oluşturmaktadır [36].

Süperiletken makineler alışlagelmiş makinelerden ciddi anlamda daha küçük boyutlu olmalarından dolayı daha küçük atalet sabitine (H) sahiplerdir. Bu da kritik arıza temizleme süresini kısaltır ve geçici hal kararlılığı performansı olumsuz yönde etkilenir. Diğer yandan manyetik devrede demir kullanılmaması sonucunda makine çok düşük senkron reaktansa sahiptir (0.3 – 0.5 pu) ve bu sayede makine daha yüksek dinamik kararlılık sınırına sahip olur. Ayrıca küçük salınımlarda üstün sönüm sağlar ve bu salınımları sönümleyen uyarma gücüne ihtiyaç duymaz. Genellikle süperiletken makineler kısa devre arızaları gibi geçici sistem arızaları sırasında alışlagelmiş senkron makinelere oranla daha stabildir, diğer yandan, geçici ve alt geçici reaktanslar alışlagelmiş senkron makinedeki gibidir. Düşük senkron reaktans bu tip makinelerin alışlagelmiş makinelerdekinden daha küçük yük açısıyla çalışmalarına olanak sağlar.

Süperiletken makinelerde uyarma ile stator arasında uyarma ile dönen bir yada daha fazla silindirik iletken ekran bulunur. Bu ekranlar “elektrotermal ekran”, “elektromanyetik ekran” yada “sönüm ekranı” olarak adlandırılır. Bu ekranların iki temel işlevi vardır; süperiletken uyarma sargılarını faz dengesizlikleri ve uzay harmoniklerinden oluşan manyetik alan değişimlerinden korumak ve rotorun mekanik hareketine karşı sönüm sargısı görevi yapmaktır. Bu iki işlevin gerekliliğinde çelişki vardır. En ideal elektromanyetik ekran çok uzun zaman sabitine sahiptir ancak verimli sönümlenme için ekran zaman sabitinin çok büyük olmaması gerekir, sönümlenme için en iyi zaman sabiti makinenin salınım frekansı seviyesindedir.

Ekranın bir diğer işlevi de makinenin uçlarında oluşabilecek kısa devre durumunda ortaya çıkan çok güçlü bozucu yükleri ve moment yükünü sönümlemektir. Bu yüzden güçlü olması gerekir; bu nedenle malzeme seçimi ve yapılışı kısıtlayıcı bir etkidir [39].

Hem rotor hem de stator sargıları minimum ölçüde harmonik üretirler. Uyarma sargısı stator sargısındaki 5. harmoniği yüzde iki oranında üretir diğer harmonikler göz ardı edilecek oranda küçüktür [37].

Süperiletken makinenin diğer üstünlükleri aşağıdaki gibidir.

- Hem aşırı uyarma ve hem de yetersiz uyarma durumunda daha fazla reaktif güç (VAR)

- Küçük ve hafif olması
- Uç gerilimde hemen hemen hiç harmonik olmaması
- Uyarma sargılarındaki akım değişiklikleri sonucunda oluşan ısı değişimlerin yok edilmesiyle daha uzun rotor ömrünün mümkün olması
- Tam yük altında olmadan dahi yüksek verim sağlaması
- Yapıya bağlı titreşimlerin ve gürültünün alışılagelmiş makinedekinden az olması.

3.2 Tek Rotor Ekranına Sahip Süperiletken Senkron Generatörün

Matematiksel Modeli

Tek rotor ekranlı hava-çekirdekli süperiletken makine için temele akı-akım bağıntısı aşağıdaki gibidir. Bu bağıntıda, L_a stator faz sargısı öz endükleme, L_{ab} stator faz sargıları arasındaki öz endüktansları, M ise rotor ile stator sargıları arasındaki ortak endüktansın maksimum değerini gösterir [40,41].

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \\ \lambda_f \\ \lambda_{sd} \\ \lambda_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ab} & M \cos \phi & M_s \cos \phi & M_s \sin \phi \\ L_{ab} & L_a & L_{ab} & M \cos(\phi - \frac{2\pi}{3}) & M_s \cos(\phi - \frac{2\pi}{3}) & M_s \cos(\phi - \frac{2\pi}{3}) \\ L_{ab} & L_{ab} & L_a & M \cos(\phi + \frac{2\pi}{3}) & M_s \cos(\phi + \frac{2\pi}{3}) & M_s \cos(\phi + \frac{2\pi}{3}) \\ M \cos \phi & M \cos(\phi - \frac{2\pi}{3}) & M \cos(\phi + \frac{2\pi}{3}) & L_f & L_{fs} & 0 \\ M_s \cos \phi & M_s \cos(\phi - \frac{2\pi}{3}) & M_s \cos(\phi + \frac{2\pi}{3}) & L_{fs} & L_s & 0 \\ M_s \sin \phi & M_s \sin(\phi - \frac{2\pi}{3}) & M_s \sin(\phi + \frac{2\pi}{3}) & 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_f \\ i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Faz büyüklüklerine göre verilmiş olan (3.1) denkleminin (d-q-0) dönüşümü uygulamak için aşağıdaki dönüşüm bağıntısından yararlanılır.

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \phi & \cos(\phi - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\phi + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \phi & \sin(\phi - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\phi + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Eşitlik (3.2) ve (3.2)'nin tersini eşitlik (3.1) ve (3.1)'in türevinde kullanılarak Park dönüşümü yapılır. d ve q eksenli bağıntıları aşağıdaki gibi olur,

$$\begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_{sd} \\ \lambda_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a - L_{ab} & M_s & M \\ \frac{3}{2} M_s & L_s & L_{fd} \\ \frac{3}{2} M & L_{fd} & L_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_{sd} \\ i_f \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_q \\ \lambda_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a - L_{ab} & -M_s \\ -\frac{3}{2} M_s & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\lambda_0 = (L_a + 2L_{ab})i_0 \quad (3.5)$$

Gerilimler ise,

$$v_d = \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega\lambda_q + r_a i_d \quad (3.6)$$

$$v_q = \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega\lambda_d + r_a i_q \quad (3.7)$$

$$v_0 = \frac{d\lambda_0}{dt} + r_a i_0 \quad (3.8)$$

$$v_f = \frac{d\lambda_f}{dt} + r_f i_f \quad (3.9)$$

$$v_{sd} = \frac{d\lambda_{sd}}{dt} + r_s i_{sd} = 0 \quad (3.10)$$

$$v_{sq} = \frac{d\lambda_{sq}}{dt} + r_s i_{sq} = 0 \quad (3.11)$$

$$\text{Elektriksel moment : } T^e = \frac{3}{2}(\lambda_q i_d - \lambda_d i_q) \quad (3.12)$$

$$\text{Rotor hareketinin dinamik eşitliği : } J \frac{d^2\delta}{dt^2} = T^m - T^e \quad (3.13)$$

Burada T^m rotora uygulanan mekaniksel moment, J rotor ataleti ve δ is rotorun açısal konumudur.

Bir sonraki adım bu ifadeleri birime indirgenmiş büyüklükler cinsinden ifade etmektir. eşitlikler (3.3)-(3.11) eşitliklerini birime indirgemek için, bir takım temel değerler belirlenmelidir. Birime indirgenmiş değer ise ilgili değer belirlenen temel değere bölünmesiyle bulunur. Aşağıda d ve q eksenleri için akı-akım bağıntıları birime indirgenmiş olarak verilmiştir, bu bağıntıdaki hiçbir elemanın birimi yoktur, yani birime indirgenmişlerdir.

$$\begin{bmatrix} \frac{\omega_0 \lambda_d}{v_{db}} \\ \frac{\omega_0 \lambda_{sd}}{v_{sb}} \\ \frac{\omega_0 \lambda_f}{v_{fb}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (L_a - L_{ab}) \frac{\omega_0 i_{db}}{v_{db}} & M_s \frac{\omega_0 i_{sb}}{v_{db}} & M \frac{\omega_0 i_{fb}}{v_{db}} \\ \frac{3}{2} M_s \frac{\omega_0 i_{db}}{v_{sb}} & L_s \frac{\omega_0 i_{sb}}{v_{sb}} & L_{fs} \frac{\omega_0 i_{fb}}{v_{sb}} \\ \frac{3}{2} M \frac{\omega_0 i_{db}}{v_{fb}} & L_{fs} \frac{\omega_0 i_{sb}}{v_{fb}} & L_f \frac{\omega_0 i_{fb}}{v_{fb}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{i_d}{i_{db}} \\ \frac{i_{sd}}{i_{sb}} \\ \frac{i_f}{i_{fb}} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\omega_0 \lambda_q}{v_{qb}} \\ \frac{\omega_0 \lambda_{sq}}{v_{sb}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (L_a - L_{ab}) \frac{\omega_0 i_{qb}}{v_{qb}} & -M_s \frac{\omega_0 i_{sb}}{v_{qb}} \\ -\frac{3}{2} M_s \frac{\omega_0 i_{qb}}{v_{sb}} & L_s \frac{\omega_0 i_{sb}}{v_{sb}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{i_q}{i_{qb}} \\ \frac{i_{sq}}{i_{sb}} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Temel değerler “b” alt indisi ile gösterilmiştir. Eşitlik (3.14) ve (3.15) no.lu eşitlikleri düzenlersek,

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_{sd} \\ \psi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_d & x_{ds} & x_{df} \\ x_{sd} & x_s & x_{sf} \\ x_{fd} & x_{fs} & x_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_{sd} \\ i_f \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_q \\ \psi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_q & x_{qs} \\ x_{sq} & x_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

elde edilir.

3.2.1 Eşit ortak temel değer

Kullanılacak model için diferansiyel denklemleri birime indirgerken farklı temel değerler kullanılmıştı. Örneğin, d-ekseni için akı-akım bağıntıları eşitlik (3.14), de birime indirgenirken altı temel değer vardı: $V_{db}, I_{db}, V_{sb}, I_{sb}, V_{fb}$ ve I_{sb} . Bu altı değişken için eşitlik (3.14)’de karşılık uygulanarak iki sınırlama elde edilir. Muhtemelen stator temel değerleri makine gücü ile sabittir. Bu da temel değerlerin seçiminde fazladan iki serbestlik derecesi sağlar. Burada temel değerlerin seçiminin eşitlik (3.14)’deki reaktans matrisini etkileyeceği unutulmamalıdır [8,40,41].

İki serbestlik derecesi uyarma ve sönüm temel empedanslarını belirlemek için kullanılır ve eşitlik (3.14)’deki altı ortak endüktans birbirine eşit olur;

$$x_{df} = x_{ds} = x_{fd} = x_{fs} = x_{sd} = x_{ad} \quad (3.18)$$

Bu durumda d-ekseni akı-akım bağıntıları aşağıdaki gibi olur;

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_{kd} \\ \psi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_d & x_{ad} & x_{ad} \\ x_{ad} & x_{kd} & x_{kd} \\ x_{ad} & x_{ad} & x_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_{kq} \\ I_f \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_q \\ \psi_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_q & x_{aq} \\ x_{aq} & x_{kq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_q \\ I_{kq} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

burada ψ , birime indirgenmiş akıları, I birime indirgenmiş akımları ifade eder.

Birime indirgenmiş akı-gerilim denklemleri;

$$V_d = \frac{1}{\omega_0} \frac{d\psi_d}{dt} - \frac{\omega}{\omega_0} \psi_q - R_a I_d \quad (3.21)$$

$$V_q = \frac{1}{\omega_0} \frac{d\psi_q}{dt} - \frac{\omega}{\omega_0} \psi_d - R_a I_q \quad (3.22)$$

$$V_f = \frac{1}{\omega_0} \frac{d\psi_f}{dt} - R_f I_f \quad (3.23)$$

$$0 = \frac{1}{\omega_0} \frac{d\psi_{kd}}{dt} - R_{kd} I_{kd} \quad (3.24)$$

$$0 = \frac{1}{\omega_0} \frac{d\psi_{kq}}{dt} - R_{kq} I_{kq} \quad (3.25)$$

Burada V, birime indirgenmiş gerilim, R, birime indirgenmiş direnç ve ω_0 temel frekanstır.

Rotor hareket denklemi,

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} = T^m + \psi_q I_d - \psi_d I_q \quad (3.26)$$

Burada H, atalet sabiti;

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_0^2}{P_b} \text{ (saniye)} \quad (3.27)$$

Temel güç:

$$P_b = \frac{3}{2} V_b I_b \quad (3.28)$$

Burada V_b ve I_b stator gerilim ve akımı temel değerleridir.

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \quad (3.29)$$

Daha fazla ilerlemeden önce, geçici reaktans, alt geçici reaktans ve bunların gerisindeki gerilimler ile zaman sabitlerini tanımlayalım,

Geçici reaktans gerisindeki gerilim:

$$e'_q = \frac{x_{ad}}{x_f} \psi_f \quad (3.30)$$

Alt geçici reaktans gerisindeki gerilimleri:

$$e''_q = \frac{x_{ad}}{x_{kd}} \psi_{kd} \quad (3.31)$$

$$e''_d = -\frac{x_{aq}}{x_{kq}} \psi_{kq} \quad (3.32)$$

Geçici reaktans:

$$x'_d = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f} \quad (3.33)$$

Alt geçici reaktanslar :

$$x_d'' = x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_{kd}} \quad (3.34)$$

$$x_q'' = x_q - \frac{x_{aq}^2}{x_{kq}} \quad (3.35)$$

$$\alpha = \frac{1}{1 - \frac{x_{kd}}{x_f}} = \frac{x_d - x_d''}{x_d' - x_d''} \quad (3.36)$$

Geçici zaman sabiti :

$$T_{d0}' = \frac{x_f}{\omega_0 R_f} \quad (3.37)$$

Alt geçici zaman sabitleri :

$$T_{d0}'' = \frac{x_{kd}}{\alpha \omega_0 R_{kd}} \quad (3.38)$$

$$T_{q0}'' = \frac{x_{kq}}{\omega_0 R_{kq}} \quad (3.39)$$

Stator zaman sabiti :

$$T_a = \frac{x_d''}{\omega_0 R_a} \quad (3.40)$$

akımların akılar cinsinden ifade etmek için izlenecek yol eşitlik (3.19) ve (3.20) denklemlerini, eşitlik (3.21)-(3.25)'teki gerilim denklemlerinde yerine koyarak akılardaki değişimi hesaplamaktır. Uygun yerlerde eşitlik (3.31) ve (3.32) ifadeleri kullanılacaktır.

eşitlik (3.19)'da ikinci ve üçüncü satırların farkını alırsak,

$$\psi_f - \psi_{kd} = (x_f - x_{kd}) I_f \quad (3.41)$$

ve

$$\frac{1}{\omega_0} \frac{d\psi_f}{dt} + R_f \frac{\psi_f - \psi_{kf}}{\psi_f - \psi_{kd}} = V_f \quad (3.42)$$

eşitlik (3.42)'de, eşitlikler (3.30), (3.31), (3.36) ve (3.37) kullanarak,

$$\frac{de_q'}{dt} + \frac{\alpha e_q'}{T_{d0}'} - \frac{\alpha - 1}{T_{d0}''} e_q'' = \omega_0 \frac{x_{ad}}{x_f} V_f \quad (3.43)$$

elde edilir ve bu on durum denkleminde bir tanesidir.

Eşitlik (3.41) için kullandığımız ifadeleri kullanarak, I_f 'yi ortadan kaldırarak,

$$\frac{x_{kd}}{x_f} \psi_f - \psi_{kd} = -x_{ad} \left(\frac{x_{kd}}{x_f} - 1 \right) I_d + \left(\frac{x_{kd}^2}{x_f} - x_{kd} \right) I_{kd} \quad (3.44)$$

elde edilir. Bu ifadeyi I_{kd} için çözüp, eşitlik (3.31) ve (3.34) ifadelerinin yardımıyla düzenleyip, sonucu eşitlik (3.19)'un birinci satırı,

$$\psi_d = -x_d'' I_d - e_q'' \quad (3.45)$$

halini alır.

Artık e_q'' , d-ekseni alt geçici reaktansı gerisindeki gerilim olarak yorumlanabilir.

Eşitlik (3.24)'te (3.31), (3.33), (3.30), (3.37), (3.38) ve (3.36) eşitliklerinden faydalanarak ve eşitlik (3.45)'i kullanarak,

$$\frac{de_q''}{dt} + \frac{x_d'}{x_d''} \frac{e_q''}{T_{d0}} - \frac{e_q'}{T_{d0}} - \frac{x_d' - x_d''}{x_d'' T_{d0}} \psi_d = 0 \quad (3.46)$$

bulunur. Benzer şekilde aynı işlem q-ekseni için yapıldığında,

$$\frac{de_d''}{dt} + \frac{x_q}{x_q''} \frac{e_d''}{T_{q0}} + \frac{x_q - x_q''}{x_q'' T_{q0}} \psi_d = 0 \quad (3.47)$$

eşitlik (3.19)'un ilk iki satırını eşitlik (3.21), (3.31) ve (3.40) ile birleştirdiğimizde,

$$\frac{d\psi_d}{dt} + \frac{\psi_d}{T_a} - \frac{e_q''}{T_a} - \omega \psi_q = \omega_0 V_d \quad (3.48)$$

Benzer işlem q-ekseni için yapıldığında,

$$\frac{d\psi_q}{dt} + \frac{\psi_q}{T_a} - \frac{e_d''}{T_a} - \omega \psi_d = \omega_0 V_q \quad (3.49)$$

Son olarak, eşitlik (3.26),

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_0}{2H} T^p + \frac{\omega_0}{2H} \left[\frac{\psi_d e_d''}{x_d''} + \frac{\psi_q e_q''}{x_q''} + \psi_d \psi_q \left(\frac{1}{x_q''} - \frac{1}{x_d''} \right) \right] \quad (3.50)$$

halini alır.

Sonuç olarak durum değişkenleri, 10 tane birinci dereceden diferansiyel denklem ile ifade edilir;

$$\frac{d\psi_d}{dt} = -\frac{\psi_d}{T_a} + \omega \psi_q + \frac{e_q''}{T_a} + \omega_0 V_\infty \sin \delta \quad (3.51)$$

$$\frac{d\psi_{kd}}{dt} = -\omega_0 R_{kd} I_{kd} \quad (3.52)$$

$$\frac{d\psi_f}{dt} = \omega_0 v_f - \omega_0 R_{kd} I_{kd} \quad (3.53)$$

$$\frac{d\psi_q}{dt} = -\omega\psi_d - \frac{\psi_q}{T_a} + \frac{e_d''}{T_a} + \omega_0 V_\infty \cos \delta \quad (3.54)$$

$$\frac{d\psi_{kq}}{dt} = -\omega_0 R_{kq} I_{kq} \quad (3.55)$$

$$\frac{de_d''}{dt} = -\frac{x_d' - x_d''}{x_d''} \frac{\psi_q}{T_{q0}} - \frac{x_d'}{x_d''} \frac{e_d''}{T_{q0}} \quad (3.56)$$

$$\frac{de_q''}{dt} = -\frac{x_d' - x_d''}{x_d''} \frac{\psi_q}{T_{d0}} - \frac{x_d'}{x_d''} \frac{e_q''}{T_{d0}} + \frac{e_q'}{T_{d0}} \quad (3.57)$$

$$\frac{de_q'}{dt} = (\alpha - 1) - \frac{e_q''}{T_{d0}} - \frac{\alpha e_q'}{T_{d0}} + \frac{e_f}{T_{d0}} \quad (3.58)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \quad (3.59)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_0}{2H} \left[T_m + \frac{\psi_d e_d''}{x_q} + \frac{\psi_q e_q''}{x_d} + \psi_d \psi_q \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \right] \quad (3.60)$$

3.2.2 Simülasyon Modelinin İfadesi

Bilgisayar benzetimlerinde kullanılmak üzere birden fazla model türetilabilir, çünkü makine ya gerilimler veya akımlar ile kontrol edilir. Buna göre, ilk model uç büyüklüklerinin gerilimlerle sınırlandırıldığı modeldir [8,41]

Durum değişkenleri; stator akıları ψ_d ve ψ_q , “sönüm” akıları ψ_{kd} ve ψ_{kq} , uyarma akısı ψ_f , alt geçici reaktans gerisindeki gerilimler e_q'' ve e_d'' , geçici reaktans gerisindeki gerilim e_q' , rotor açısı δ ve rotor hızı ω 'dır.

Modelin oluşturulmasında en kolay yöntem akımları yardımcı değişkenler olarak kullanmaktır [40,41]. Buna göre,

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_{kd} \\ i_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_d & x_{ad} & x_{ad} \\ x_{ad} & x_{kd} & x_{ad} \\ x_{ad} & x_{ad} & x_f \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_{kd} \\ \psi_f \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

$$\begin{bmatrix} i_q \\ i_{kq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_q & x_{aq} \\ x_{aq} & x_{kq} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \psi_q \\ \psi_{kq} \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

olup, durum denklemleri (3.51)-(3.60) eşitliklerinin düzenlenmiş halindedir:

$$\frac{d\psi_d}{dt} = -\frac{\psi_d}{T_a} + \omega\psi_q + \frac{e_q''}{T_a} \quad (3.63)$$

$$\frac{d\psi_{kd}}{dt} = -\omega_0 R_{kd} I_{kd} \quad (3.64)$$

$$\frac{d\psi_f}{dt} = \omega_0 v_f - \omega_0 R_{kd} I_{kd} \quad (3.65)$$

$$\frac{d\psi_q}{dt} = -\omega \psi_d - \frac{\psi_q}{T_a} + \frac{e_d''}{T_a} \quad (3.66)$$

$$\frac{d\psi_{kq}}{dt} = -\omega_0 R_{kq} I_{kq} \quad (3.67)$$

$$\frac{de_d''}{dt} = -\frac{e_d''}{T_{q0}''} - \frac{x_q - x_q''}{T_{q0}''} I_q \quad (3.68)$$

$$\frac{de_q''}{dt} = -\frac{e_q''}{T_{d0}''} + \frac{e_q'}{T_{d0}''} + \frac{x_d' - x_d''}{T_{d0}''} I_d \quad (3.69)$$

$$\frac{de_q'}{dt} = -\alpha \frac{e_q'}{T_{d0}'} + (\alpha - 1) \frac{e_q''}{T_{d0}'} + \frac{e_f}{T_{d0}'} \quad (3.70)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_0 \quad (3.71)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_0}{2H} [T_m + e_q'' i_q - e_d'' i_d] \quad (3.72)$$

Makine uçlarında üç fazlı kısa devre sırasında a fazındaki kısa devre akımı:

$$i_a \approx \frac{1}{x_d''} e^{-\frac{t}{T_a}} - \left\{ \frac{1}{x_d} + \left(\frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) e^{\frac{t}{T_d'}} + \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) e^{\frac{t}{T_d''}} \right\} \cos(\omega t) \quad (3.73)$$

olarak ifade edilir.

4. SÜPERİLETKEN SENKRON MAKİNEİNİN SİMÜLASYONU

4.1 Senkron Makinenin Uçlarında Kısa Devre Durumu

Üç fazlı kısa devre arızası bir generatörün dayanması gereken en kuvvetli arızalardan biri olarak kabul edilir. Eğer arıza generatörün kendisinde meydana geldiyse, generatör bağlantısını kesip durdurmaktan başka bir seçenek yoktur. Ancak, arıza şebekede meydana geldiyse koruma sistemi devreye girip, generatör çalışmaya devam ederken, arızayı temizlemeye çalışır.

Sargıların, doğal karakteristiği olan akı yollarını koruma eğiliminde olması nedeniyle kısa devre sırasında yüksek akımlar üretilir, bu durumda stator sargılarının tepkisi generatör akılarını sıfıra doğru yaklaştırma eğilimindedir [42].

Özellikle senkron makinenin uçlarındaki gerilimin ani olarak büyük ölçüde değişmesi sonucunda, makinenin stator sargılarından yüksek miktarda geçici hal akımı yada kısa devre akımı geçer. Bu durum hatalı anahtarlama yada başka bir arıza sonucu oluşabilir. Bu gibi durumlarda, geçici hal akımı makinenin nominal çalışma akımından çok daha fazladır, generatörün alt geçici reaktansının küçük olması nedeniyle kısa devre akımının a.a. bileşeninin başlangıç büyüklüğü generatörün anma akımının yaklaşık 9-10 katıdır. Büyük güçlü makineler böyle durumlarda şebekedeki ekipmanlar için tehlikeli olabilecek miktarda enerji boşaltırlar [42,43].

4.2 Süperiletken Senkron Makinenin Uçlarında Üç Fazlı Simetrik Kısa Devre Arızasının Simülasyonu

Bu bölümde, tek rotor ekranına sahip süperiletken senkron makinenin önceki bölümde elde edilen matematiksel modeli ile alışlagelmiş senkron makinenin matematiksel modeli kullanılarak, makinenin uçlarında üç fazlı kısa devre arızası simülasyonu yapılarak makinenin davranışı karşılıklı olarak analiz edilmiştir. Süperiletken makineye ilişkin parametreler, çizelge 4.1’de, sürekli hal çalışma koşulları ise çizelge 4.2’te, alışlagelmiş senkron makine parametreleri çizelge 4.3’te ve sürekli hal çalışma koşulları da çizelge 4.4’te verilmiştir.

Yukarıda verilen makinelere ilişkin analiz, sayısal simülasyon yöntemi ile yapılmıştır. Simülasyon yöntemi gereği, gerçek sistem davranışını yansıtacak şekilde oluşturulan matematiksel modeller kullanılmıştır. Simülasyon işleminde, her bir makinenin önce sürekli halde çalıştığı, belirli bir t_0 anında makinin uçlarında üç fazlı kısa devre arızası olduğu varsayılmıştır. Bu amaçla, Matlab'ta iki program hazırlanmıştır. Bu iki programın farklılığı sadece makinelerin fiziksel özellikleri nedeniyle matematiksel özelliklerden oluşan farklılıklardır. Simülasyon işlemine ilişkin programın akış diyagramı Ek 1'de ve program Ek 2'de verilmiştir. Simülasyon için hazırlanmış olan programlar temelde bir ana program ile üç adet alt programdan oluşmaktadır. Bu alt programlar “parametreler”, “baslangic_kosullari” ve “denklemler” dir.

“parametreler” alt programında incelenen makineye ilişkin parametre değerleri ve çalışma koşulları verilip, kullanılan matematiksel modelde gerekli olan büyüklükler hesaplanmaktadır.

“baslangic_kosullari” alt programında kullanılan makine parametrelerine bağlı olarak sürekli hal durumunda başlangıç koşulları hesaplanmaktadır.

“denklemler” alt programında dördüncü dereceden Runge-Kutta nümerik integrasyon yöntemi ile sisteme ait diferansiyel denklemler çözülmektedir.

Çizelge 4.1 : Süperiletken Senkron Makine Parametreleri

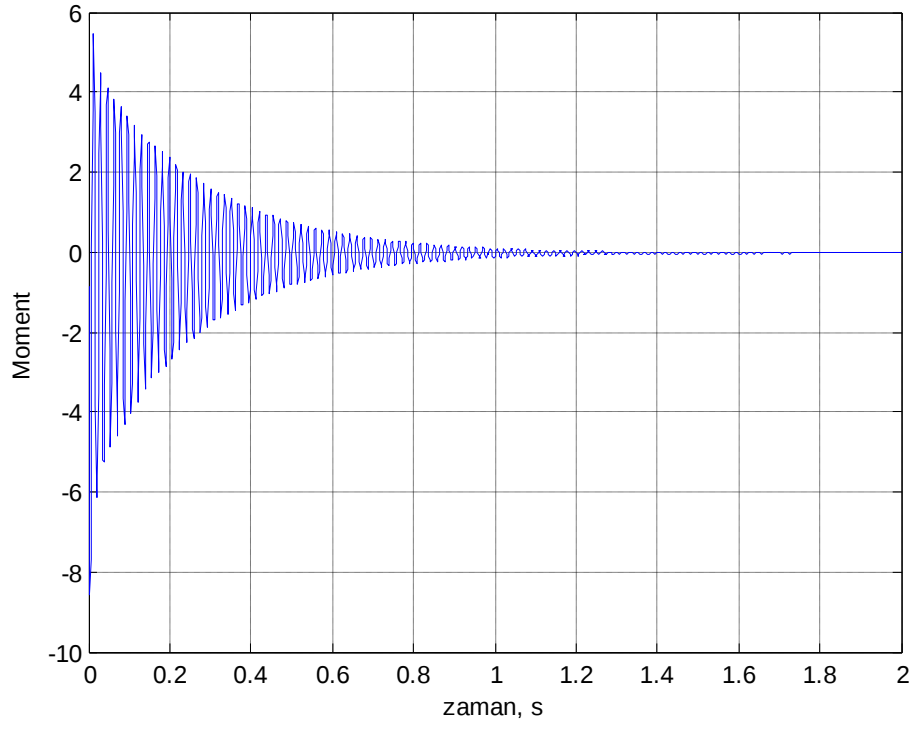
Makine gücü (MVA)	907
Makine gerilimi (kV)	26
Stator direnci r_a (p.u)	0.0019
d Ekseni Stator Reaktansı x_d (p.u)	0.297
q Ekseni Stator Reaktansı x_q (p.u)	0.297
d Ekseni Stator Geçici Reaktansı x_d' (p.u)	0.209
d Ekseni Stator Alt Geçici Reaktansı x_d'' (p.u)	0.116
q Ekseni Stator Alt Geçici Reaktansı x_q'' (p.u)	0.116
Stator Kaçak Reaktansı x_{al} (p.u)	0.1
Enerji Zaman Sabiti, H	2.456
Uyarma Sargısı Zaman Sabiti T_{d0} (s)	1487
d-ekseni alt geçici zaman sabiti, T_{d0}''	0.798

Çizelge 4.1 (devam) : Süperiletken Senkron Makine Parametreleri

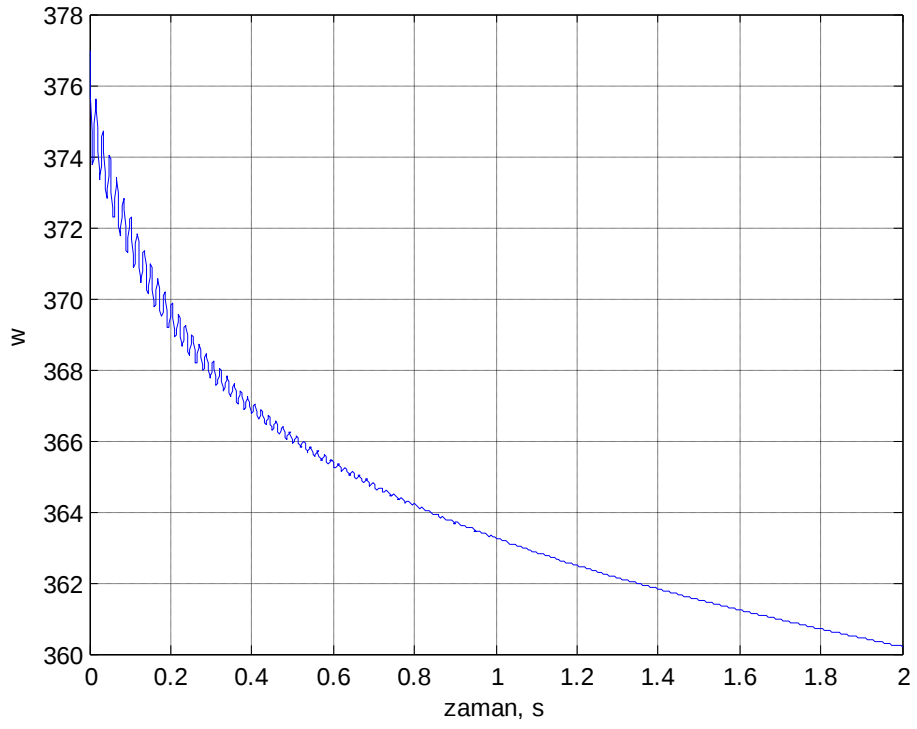
q-ekseni alt geçici zaman sabiti, T_{q0}''	1.557
d-ekseni ortak reaktansı, x_{ad}	0.197
q-ekseni ortak reaktansı, x_{aq}	0.197
Uyarma sargısı kaçak reaktansı, x_{fl}	0.244
d-ekseni stator reaktansı ile ekran arasındaki kaçak reaktans, x_{kdl}	0.0188
q-ekseni stator reaktansı ile ekran arasındaki kaçak reaktans, x_{kql}	0.0174
Uyarma sargısı direnci, r_f	7.867e-7
d-ekseni sönüm ve ekran direnci, r_{kd}	4.2465e-4
d-ekseni sönüm ve ekran direnci, r_{kq}	0.0037
Rotor d-ekseni reaktansı, x_{kd}	0.2158
Uyarma sargısı reaktansı, x_f	0.441
Rotor q-ekseni reaktansı, x_{kq}	0.2144
Stator zaman sabiti, T_a	0.1619
Geçici reaktans gerisindeki gerilim, e_{q0}'	1.1239
q-ekseni alt geçici reaktans gerisindeki gerilim, e_{q0}''	0.9568
d-ekseni alt geçici reaktans gerisindeki gerilim, e_{d0}''	0.1301

Çizelge 4.2 : Süperiletken senkron makine için sürekli hal çalışma koşulları

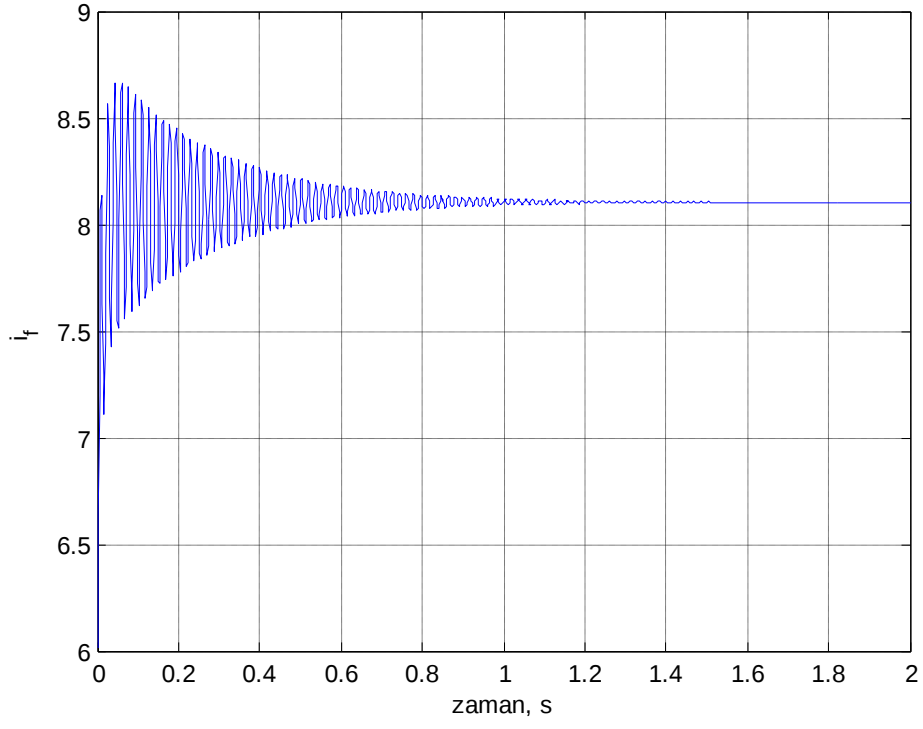
Makine uç gerilimi V_t (p.u)	1
Makineden Çekilen Akım I_t (p.u)	1
Stator Gerilimi d-Eksen Bileşeni V_d (p.u)	0.213505
Stator Gerilimi q-Eksen Bileşeni V_q (p.u)	0.978596
Uyarma Akımı i_f (p.u)	6.0155
Makinede Endüklenen İç Gerilim E_f (p.u)	1.18505
Rotor Açısı δ	12.2504
d-Eksen Alt Geçici Reaktans Gerisindeki Akım, e_d'' (p.u)	-0.130124
q-Eksen Geçici Reaktans Gerisindeki Gerilim, e_q' (p.u)	1.12388
q-Eksen Alt Geçici Reaktans Gerisindeki Gerilim, e_q'' (p.u)	0.956801
ψ_{d0}	0.978596
ψ_{q0}	-0.213505



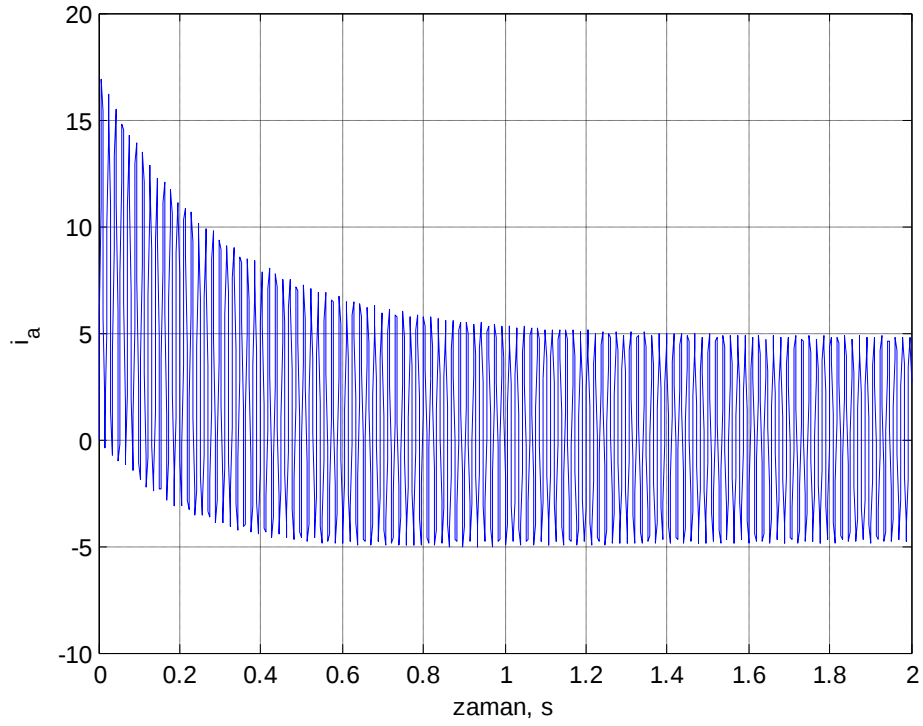
Şekil 4.2 : Moment



Şekil 4.3 : Açısal hız



Şekil 4.4 : Uyarma akımı



Şekil 4.5 : a fazındaki akım

Alışıl gelmiş senkron makineye ilişkin parametreler [8] çizelge 4.3’de ve sürekli hal çalışma koşulları çizelge 4.4’te verilmiştir..

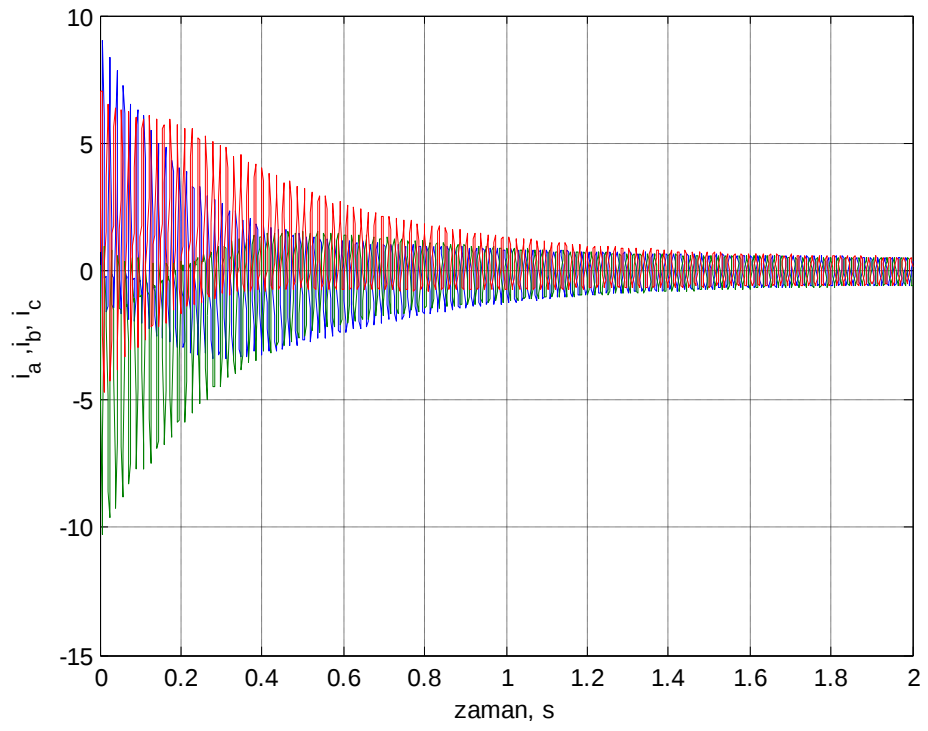
Çizelge 4.3 : Alışıl gelmiş senkron Makine Parametreleri.

Makine gücü (MVA)	907
Makine gerilimi (kV)	26
Stator direnci r_a (p.u)	0.0038
d Ekseni Stator Reaktansı x_d (p.u)	2.22
q Ekseni Stator Reaktansı x_q (p.u)	2.09
d Ekseni Stator Geçici Reaktansı x_d' (p.u)	0.235
d Ekseni Stator Alt Geçici Reaktansı x_d'' (p.u)	0.175
q Ekseni Stator Alt Geçici Reaktansı x_q'' (p.u)	0.175
Stator Kaçak Reaktansı, x_{al}	0.1
Enerji Zaman Sabiti, H	3.134
Uyarma Sargısı Zaman Sabiti T_{d0}' (s)	5.2
d-ekseni alt geçici zaman sabiti, T_{d0}''	0.03
q-ekseni alt geçici zaman sabiti, T_{q0}''	0.014
d-ekseni ortak reaktansı, x_{ad}	2.12
q-ekseni ortak reaktansı, x_{aq}	1.99
Uyarma sargısı kaçak reaktansı, x_{fl}	0.1442
d-ekseni stator reakt. - sönüm sargısı arasındaki kaçak reakt, x_{kdl}	0.1687
q-ekseni stator reakt. - sönüm sargısı arasındaki kaçak reakt, x_{kql}	0.0779
Uyarma sargısı direnci, r_f	0.0012
d-ekseni sönüm direnci, r_{kd}	0.0269
d-ekseni sönüm direnci, r_{kq}	0.3918
Rotor d-ekseni reaktansı, x_{kd}	2.2887
Uyarma sargısı reaktansı, x_f	2.2642
Rotor q-ekseni reaktansı, x_{kq}	2.0679
Stator zaman sabiti, T_a	0.122

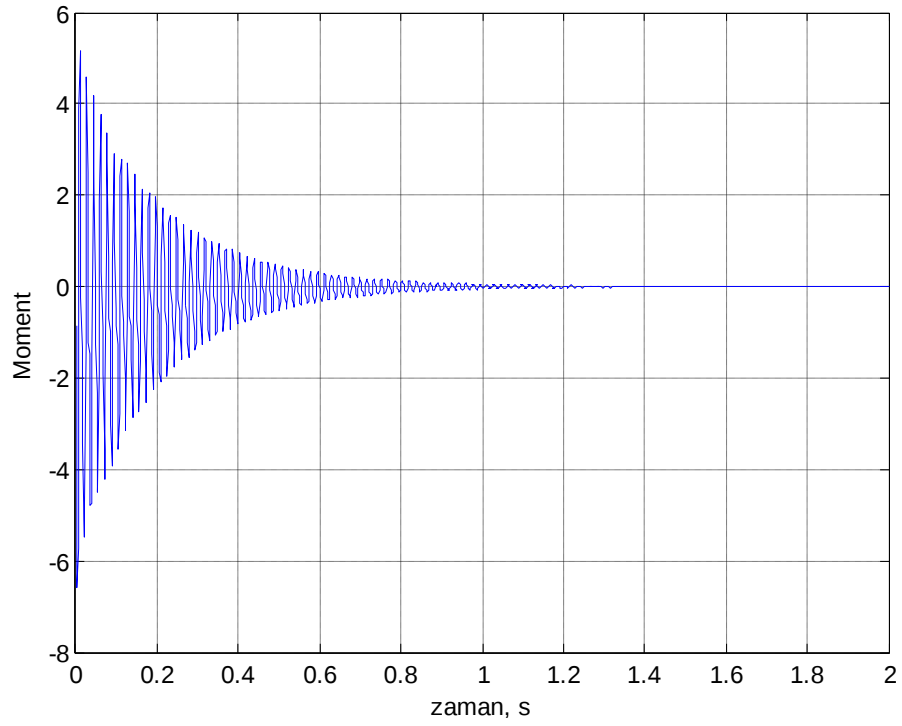
Çizelge 4.4 : Alışlagelmiş senkron makine için sürekli hal çalışma koşulları.

Makine uç gerilimi V_t (p.u)	1
Makineden Çekilen Akım I_t (p.u)	1
Stator Gerilimi d-Eksen Bileşeni V_d (p.u)	0.648356
Stator Gerilimi q-Eksen Bileşeni V_q (p.u)	0.765589
Uyarma Akımı i_f (p.u)	1.35668
Makinede Endüklenen İç Gerilim E_f (p.u)	2.87617
Rotor Açısı δ	40.1393
d-Ekseni Alt Geçici Reaktans Gerisindeki Akım, e_d'' (p.u)	-0.595454
q-Ekseni Geçici Reaktans Gerisindeki Gerilim, e_q' (p.u)	0.989111
q-Ekseni Alt Geçici Reaktans Gerisindeki Gerilim, e_q'' (p.u)	0.79731
ψ_{d0}	0.765689
ψ_{q0}	-0.648356
ψ_{kd0}	0.860756
ψ_{kq0}	-0.617324
ψ_{f0}	1.05639

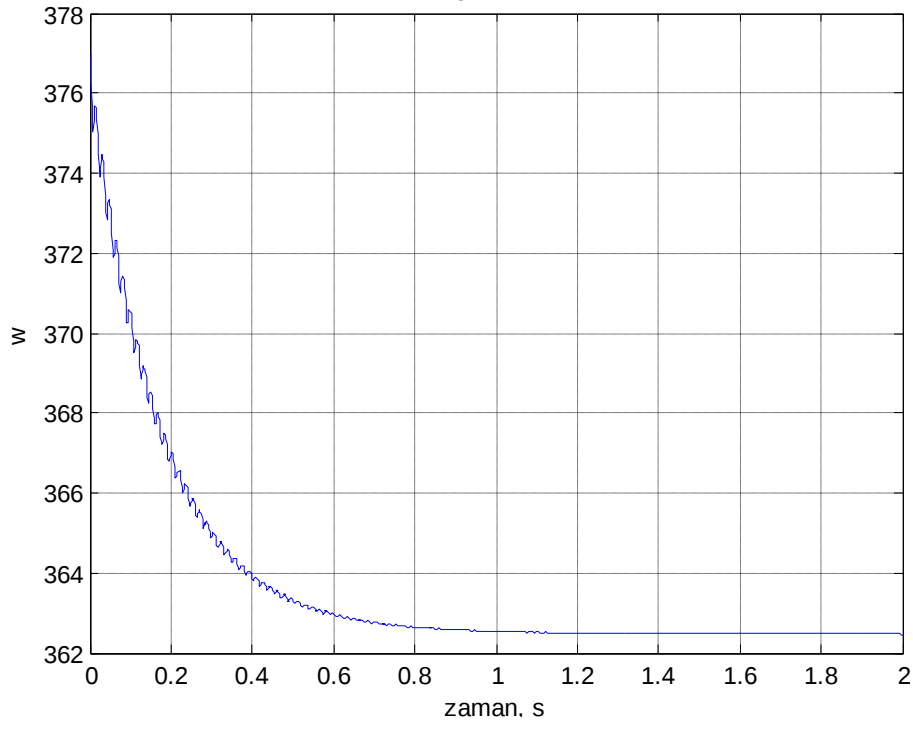
Yapılan üç fazlı kısa devre simülasyonu sonucunda, alışlagelmiş senkron makine için a, b, c fazlarındaki simetrik kısa devre akımı şekil 4.6'de, moment değişimi şekil 4.7'de, açısal hız değişimi şekil 4.8'te, uyarma akımındaki değişim şekil 4.9'te ve a fazındaki akım değişimi şekil 4.10'te verilmiştir.



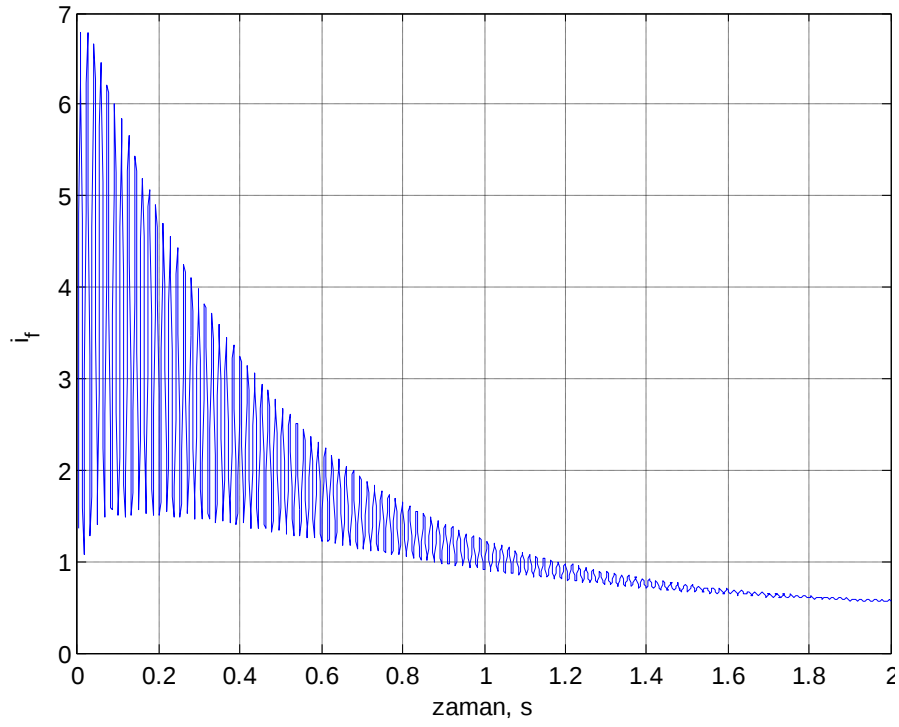
Şekil 4.6 : Simetrik arıza akımları



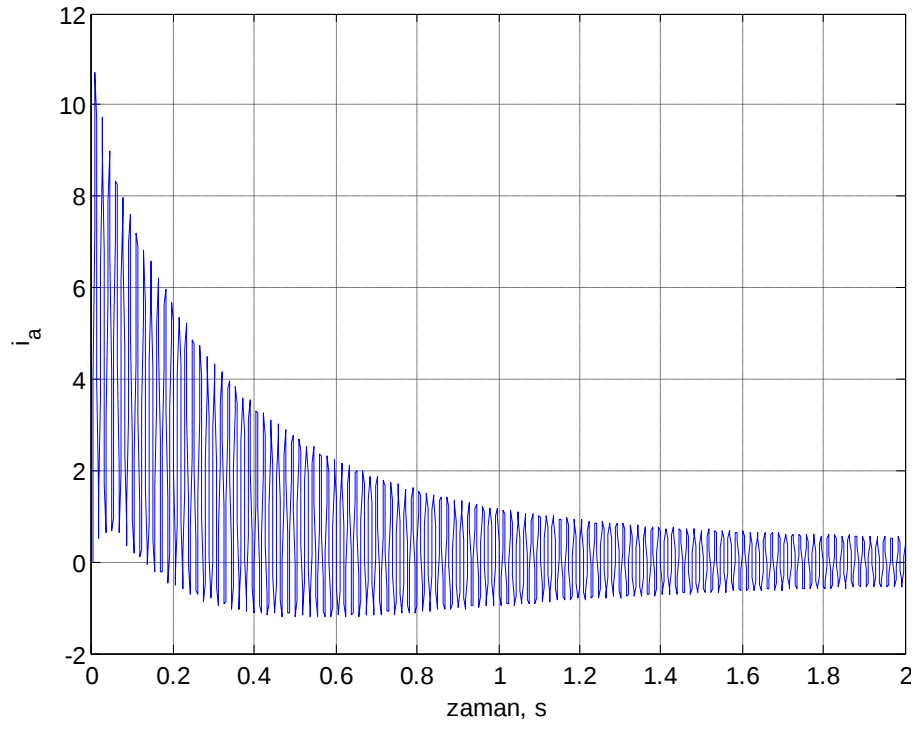
Şekil 4.7 : Moment



Şekil 4.8 : Açısal hız



Şekil 4.9 : Uyarma akımı



Şekil 4.10 : a fazındaki akım

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi süperiletken senkron makinenin alışlagelmiş senkron makinelere göre boyut ve ağırlıklarının daha küçük olması, aynı boyutlar için nominal değerlerinin daha büyük ve daha verimli ve daha düşük maliyetli olması gibi üstünlükleri vardır.

Süperiletken senkron makinenin düşük senkron reaktansı nedeniyle geçici hal süresi alışlagelmiş makineninkinden daha uzundur.

Tezin dördüncü bölümü olan simülasyon bölümünde elde edilen şekil 4.1 ve şekil 4.6'de verilen $i_a, i_b, i_c = f(t)$, şekil 4.2 ve şekil 4.7'de verilen $T_e = f(t)$, şekil 4.3 ve şekil 4.8'de verilen $w = f(t)$, şekil 4.4 ve şekil 4.9'da verilen $i_f = f(t)$ ve şekil 4.5 ve şekil 4.10'da verilen $i_a = f(t)$ değişimleri birbirleri ile karşılaştırıldığında, İncelenen makinenin süperiletken makine olması durumunda, i_a akımı 14.9606 p.u. değerine ulaşmakta ve ardından azalarak sönümlenmektedir ve 5,-5 aralığında sabit kalmaktadır. Uyarma akımı ise arıza öncesi 6.0155 p.u. değerinden, arıza başladıktan yaklaşık 0.1 saniye sonra 8.6621 p.u.'lık maksimum değerine yükselmekte ve 8.101 seviyesine düştükten sonra sabit kalmaktadır. Açısal hız ise kısa devre anından hemen sonra 377 den 360'e hızla düşmektedir. Elektriksel moment ise arıza başladığı anda 5.48 p.u. seviyesine çıkmakta ve bir saniye için tamamen sönümlenmektedir

İncelenen makine alışlagelmiş makine olması durumunda, i_a akımı 9.02 p.u. değerine ulaşmakta, ardından azalarak sönümlenmektedir ve 2,-2 arasında sabit kalmaktadır, bu değerin süperiletken makinedekinden daha küçük çıkmasının nedeni, süperiletken makinede senkron reaktansın alışlagelmiş makineye göre daha küçük olmasıdır. Uyarma akımı ise arıza öncesi 1.35668 p.u. değerinden, arıza başladığı gibi 6.7926 p.u. değerine yükselmekte ve yaklaşık 0.9 saniye sonra başlangıç değerine ulaşmaktadır. Açısal hız ise kısa devre anından hemen sonra 377'den 363'e hızla düşmekte ve bu seviyede sabit kalmaktadır. Elektriksel moment ise arıza başladığı anda 5.17 p.u. seviyesine çıkmakta ve bir saniye içinde tamamen sönümlenmektedir.

Konu ile ilgili olarak ileride yapılabilir çalışmlar YSS makineler için benzer durumun göz önüne alınması, birden fazla ekranlı makineler için benzer simülasyonun yapılması, şebekeye bağlı model için eşit alan kriteri ve kritik arıza temizleme sürelerinin araştırılması ve bir veya daha fazla alışılagelmiş makineden oluşan şebekeye bağlanarak arıza durumunda sistem kararlılığının değişimini gözlemleme gibi araştırma alanları sylenabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **OTA-E-440**, 1990, US congress Office of Technology Assessments, High temperature superconductivity in perspective.
- [2] **Köfler, H.**, 1998, Generators with superconductivity vol 2, p,1497-1547, IOP Publishing.
- [3] **Rabinowitz, M.**, 2000, Superconducting Power Generation, IEEE Power Engineering Review 20.No.5, p.8-11.
- [4] **Sykulski, J. K., Goddard, K. F.**, 2006, Modelling and evaluations of eddy-current loss in high temperature superconducting synchronous generator, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 2, p. 370-373.
- [5] **Kirtley, J. L., Edeskuty, F. J.**, 1989, Application of superconductors to motors,generators and transmission lines, IEEE Transactions on Power System, Vol. 77, No. 8, pp. 143-1 154.
- [6] **Blaugher, Richard D.**, 1997, WTEC Panel Report on Power Applications Of Superconductivity In Japan and Germany, p15.
- [7] **DeMello, F., Concordia, C.**, 1969, Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control, IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. 88, No. 4, p. 316-330.
- [8] **Kirtley J. L.**, 1993, Large system interaction of superconducting generators, IEEE Proceeding on Power System, Vol. 81, No.3, p.449-461.
- [9] **Kiruba, S., Xianrui, H., David, R., Konrad, W., Jim, W. B.**, 2005, Ac losses in a high temperture superconducting generator, IEEE Trans Appl Superconduct., Vol. 15,p. 2162-2165.
- [10] **Ueda, K., Shiobara R.**, 1987, Measurement and analysis of 70 MW superconducting generator constants, IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol. 9, No.2, p. 1193-1196.
- [11] **Fee, M., Staines, M. P., Buckley, R. G., Watterson, P. A., Zhu, J. G.**, 2003, Calculation of Ac loss in an HTS wind turbine generator, *IEEE Trans. Appl.Superconduct.*, Vol. 13, p. 2193-2196.

- [12] **Alyan, M. A. A. S., Rahim, Y. H.**, 1998, The role of governor control in transient stability of superconducting turbogenerator, *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 2, No. 1, p. 38-47.
- [13] **Minseok, J.**, 1986, Dynamic performance and design of a high temperature superconducting synchronous motor, *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, Vol. 9, No. 2, p.1245-1249.
- [14] **Oishi, I., Nishijama, K.**, 2002, Summary of developnet of 70 MW class model superconducting generator – research and development of superconducting dor electric power application, *Cryogenics* 42, p 157-167, Elsevier.
- [15] **Evetts, J.**, 2005, The characteristics of superconducting material-conflicts and correlations, *IEEE transaction on Magnetics*, Vol. 19, No. 3, p. 1109-1119.
- [16] **Bednorz, J. G., Müller, K. A.**, 1986, Possible high T_c superconductivity in the Ba–La–Cu–O system. *Z. Physik, B* 64, p 189–193.
- [17] **Ouboter, R. De Bruyn**, 1987, Superconductivity: Discoveries during the Early Years of Low Tempreture Research at Leiden, 1908-1914, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 23.
- [18] **Ashworth, S.P., Glowacki, B.A.**, 2003, Connectivity between filaments in BSCCO-2223 multi-filamentary tapes, *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, Vol. 7, No. 2, pp. 1662-1666.
- [19] **Url-1** <http://openlearn.open.ac.uk/mod/oucontent/view.php?id=398540§ion=1.1#back_thumbnail_id397002084311>, alındığı tarih 01.12.2010.
- [20] **Url-2** <www.physicsdaily.com/physics/superconductivity>, alındığı tarih 01.12.2010.
- [21] **Bardeen, J., Cooper, L. N., Schrieffer, J. R.**, 1957, Theory of Superconductivity, *Phys. Rev.* 108, 1175–1204.
- [22] **Josephson, B. D.**, 1962, Possible new effects in superconductive tunnelling . *Phys. Lett.* 1 (7): 251–253.
- [23] **Vinokur, Valerii, Baturina, Tatyana**, 2008, Newly discovered fundamental state of matter, a superinsulator, has been created. *Science Daily*.

- [24] **Nagamatsu, J., Nakagawa N., Muranaka T., Zenitani Y., Akimitsu, A.,** 2001, Superconductivity at 39 K in magnesium diboride. *Nature* 410(6824): 63.
- [25] **Preuss, P.,** 2002, A most unusual superconductor and how it works: first-principles calculation explains the strange behavior of magnesium diboride. *Research News* (Lawrence Berkeley National Laboratory), 2002.
- [26] **Wu, M. K., Ashburn, J. R., Torng, C. J., Hor, P. H., Meng, R. L., Gao, L., Huang, Z. J., Wang, Y. Q., Chu, C. W.,** 1987, Superconductivity at 93 K in a New Mixed-Phase Y-Ba-Cu-O Compound System at Ambient Pressure. *Physical Review Letters* 58 (9): 908–910.
- [27] **Url-3** <http://www.gitam.edu/eresource/Engg_Phys/semester_2/supercon/type_1_2.htm> , alındığı tarih 01.12.2010.
- [28] **Rose, C.,** 1999, A sielectric-free superconducting coaxial cable, *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 38, No. 2, pp. 166-178.
- [29] **Grant, P. M.,** 1997, Superconductivity and electric power: promises, promises ... past, present and future *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol. 7 Issue:2, p.112-113.
- [30] **Rahman, M. M., Nassi, M.,** 1997, High capacity cable's role in once and future grids, *IEEE Spectrum*, Volume: 34 , Issue: 7, p.31-35.
- [31] **Willén, D., Hansen, F., Däumling, M., Rasmussen, C. N., Østergaard, J., Træholt, C., Veje, E., Tønnesen, O., Jensen, K. H., Krüger Olsen, S., Rasmussen, C., Hansen, E., Schuppach, O., Visler, T., Kvorning, S., Schuzster, J., Mortensen, J., Christiansen, J., Mikkelsen, S. D.,** 2002, First operation experiences from a 30 kV, 104 MVA HTS power cable installed in a utility substation, *Physica C*, vol.372-376, part 3, p.1571-1579.
- [32] **Watanabe, M., Masuda, T., Ashibe, Y., Hirose, M., Isojima, S., Honjo, S., Uchiyama, T., Shimodate, M., Takahashi, Y., Suzuki, H.,** 2003, Thermo-mechanical properties of a 66 kV superconducting power cable system, *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*, Vol.13, Issue:2 , p.1956 - 1959.
- [33] **Narlikar, A. V.,** 2004, High Temperature Superconductivity: Engineering applications, Springer.

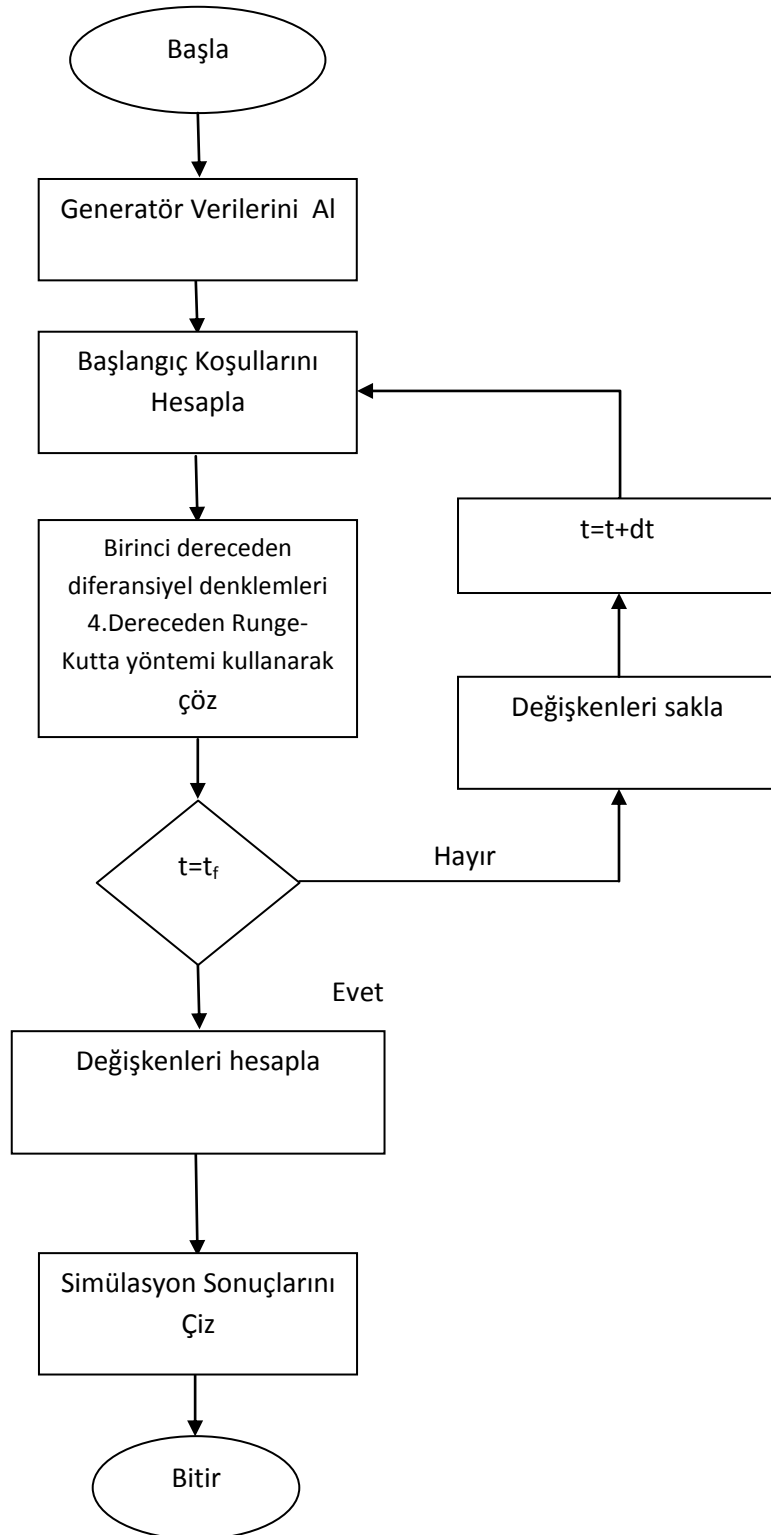
- [34] **Mehta, S. P., Aversa, N., Walker, M. S.**, 1997, Transforming Transformers (Superconducting windings), IEEE Spectrum, p.43-49.
- [35] **Hull, J. R.**, 1999, Superconducting Levitation, Encyclopedia Of Electrical And Electronics Engineering, John Willey and Sons, Vol 20, pp 729.
- [36] **Cansız, A., Erentürk, K.**, 2003, Süperiletkenlerin enerji depolama sisteminde pasif stabilite elemanı olarak uyarlanması, Elektrik – Elektronik – Bilgisayar Mühendisliği 10.Ulusal Kongresi, 240-242.
- [37] **Kalsi, Swarn S.**, 2002, Development status of Superconducting rotating machines, IEEE Pes meeting.
- [38] **Goddard, K. F., Kukasik, B., Sykulski, J. K.**, 2009, Alternative designs of High-Temperature Superconducting Synchronous Generator, IEEE Applied Superconductivity, Vol. 19 No.6, p3805-3811.
- [39] **Furuyama, M., Kirtley, J. L.**, 1975, Transient stability of superconducting alternators, IEEE PAS-94. p.320-328.
- [40] **Kirtley J. L.**, 1972, Per unit reactances of superconducting synchronous machinery, IEEE, p1316.
- [41] **Kirtley J. L.**, 1981, Armature motion damping of superconducting generators, IEEE, p2870.
- [42] **Umans, S. D.**, 2009, Transient performance of a High-Temperature-Superconducting Generator, Electric Machines and Drives Conference, p.451-457, IEEE.
- [43] **Shenkman, Arie L.**, 2009, Transient analysis of Electric power Circuits Handbook, Springer.
- [44] **Recanati, M. A.**, 1994, Design of an Air Gap Armature for MIT Superconducting Generator, Doktora tezi, Massachusetts Institute Of Technology.
- [45] **Kirtley J. L.**, 1998, Electric motor handbook, McGraw Hill.

EKLER

EK A : Akış diyagramı

EK B : Simülasyon programı

EK A



EK B

"ana program"

```
clear all
close all
clc

global ymd ymq rf rkd rkq w0 ra vf H Ta Td0pp Tq0pp Td0p eqpp edpp eqp ...
    xdp xdpp xq xqpp alfa xad xf xkd xaq xkq eaf

parametreler
baslangic_kosullari

alfa=(xd-xdpp)/(xdp-xdpp);

durum0 = [psid0 psikd0 psif0 psiq0 psikq0 w0 delta0 deqpp dedpp deqp];

% simulasyon süresi 2sn
t0 = 0;
tf = 2;
dt = (tf-t0)/1200;
zaman = t0:dt:tf;

[t, durum] = ode45('denklemler', zaman, durum0);

psid = durum(:, 1);
psikd = durum(:, 2);
psif = durum(:, 3);
psiq = durum(:, 4);
psikq = durum(:, 5);
w = durum(:, 6);
delta = durum(:, 7);
eqpp = durum(:,8);
edpp= durum(:,9);
eqp=durum(:,10);

id = psid .* ymd(1, 1) + psikd .* ymd(1, 2) + psif .* ymd(1, 3);
iq = psiq .* ymq(1, 1) + psikq .* ymq(1, 2);

Te = psid .* iq - psiq .* id;

a = 2*pi/3;
ia = id .* cos (w.*t) - iq .* sin (w.*t);
ib = id .* cos (w.*t - a) - iq .* sin (w.*t - a);
ic = id .* cos (w.*t + a) - iq .* sin (w.*t + a);
iff = ymd(1,3).*psid + ymd(2,3).*psikd + ymd(3,3).*psif;

Tdp = Td0p*xdp/xd;
Tdpp = Td0pp*xdpp/xdp;

figure(1)
plot(t,ia,t,ib,t,ic)
grid on
title('simetrik kısa devre akımı');
xlabel('zaman, s');
ylabel('i_a ,i_b, i_c');

figure(2)
plot(t, Te)
grid on
title('Elektriksel Moment, T_e');
xlabel('zaman, s');
ylabel('Moment');
```

```

figure(3)
plot(t,w)
grid on
title('açısal hız');
xlabel('zaman, s');
ylabel('w');

figure(5)
plot(t,iff)
grid on
title('uyarma akımı');
ylabel('i_f');
xlabel('zaman, s');

iaa = 1/xdpp*exp(-t/Ta) - (1/xd + (1/xdp-1/xd)*exp(-t/Tdp) + ...
    + (1/xdpp-1/xdp)*exp(-t/Tdpp)).*cos(w.*t);

figure(6)
plot(t,iaa)
grid on
xlabel('zaman, s');
ylabel('i_a');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
"parametreler"
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
H=2.456;
w0 = 2*pi*60;
xal = 0.1;
xad = 0.197;
xaq = 0.197;
xkdl = 0.0188;
xkql = 0.0174;
xfl = 0.244;
rkd = 4.0153e-4;
rkq = 3.625e-4;
rf = 7.867e-7;
ra = 0.0019;

xd = xad + xal;
xq = xaq + xal;
xkd = xad + xkdl;
xkq = xad + xkql;

xf = xad + xfl;
xmd = [xd xad xad; xad xkd xad; xad xad xf];
ymd = inv(xmd);
xmql = [xq xaq; xaq xkql];
ymql = inv(xmql);

vf = rf/xad;

xdp = 0.209;
xdpp = 0.116;
xqpp = 0.116;
Pb = 907e6;
Vb = 26e3;

Td0p = 1487;
Td0pp = 0.798;
Tq0pp = 1.557;
Ta = 0.2619;
eaf=xad*vf/rf;

```

%%%

“başlangıç koşulları”

%%%

parametreler

```
vt= 1.0;  
it= 1.0;  
pf= 0.85;
```

```
ia= it*(pf-j*sqrt(1-pf^2));  
e1= vt+ia*ra+j*xq*ia;  
va= vt+ia*ra;  
tha= angle(va);  
delta= angle(e1);  
psi= angle(ia);  
idg= it*sin(delta-psi);  
iqg= it*cos(delta-psi);  
i_d= idg*exp(j*(delta-pi/2));  
i_q= iqg*exp(j*delta);  
ea= abs(e1)+(xd-xq)*idg;  
e_a= ea*exp(j*delta);  
vq= abs(va)*cos(delta -tha);  
vd= abs(va)*sin(delta -tha);  
v_q= vq*exp(j*delta);  
v_d= vd*exp(j*(delta-pi/2));  
psid= vq;  
psiq= -vd;  
psiad= psid + xal*idg;  
psiaq= psiq + xal*iqg;  
i_f= ea/xad;  
psif= psiad + xfl*i_f;
```

```
psid0=psid;  
psiq0=psiq;  
psikd0=psiad;  
psikq0=psiaq;  
psif0=psif;  
delta0=0;  
deqp= (xad/xf)*psif0;  
deqpp= (xad/xkd)*psikd0;  
dedpp= (xad/xkq)*psikq0;
```

```
fprintf('Uç Gerilimi= %g\n', vt);  
fprintf('Uç Akımı= %g + j %g\n',real(ia), imag(ia));  
fprintf('Uç Akımı Büyüklüğü= %g \n', abs(ia));  
fprintf('Uç Akımı Açısı= %g rad = %g deg \n', psi, 180*psi/pi);  
fprintf('Moment Açısı= %g rad = %g deg\n', delta, 180*delta/pi);  
fprintf('Moment Açısı= %g PF Açısı = %g\n',delta, psi);  
fprintf('Senkron Reaktans Gerisindeki Gerilim eq = %g\n',ea);  
fprintf('Direnç Gerisindeki Gerilim = %g + j %g\n',real(va), imag(va));  
fprintf('D-Eksen Gerilimi= %g Q-Eksen Gerilimi= %g\n',vd, vq);  
fprintf('Uç Akısı psid = %g psiq = %g\n',psid, psiq);  
fprintf('Hava Aralığı Akıları psiad = %g psiaq = %g\n',psiad, psiaq);  
fprintf('Uyarma Akımı if = %g Uyarma Akısı psif = %g\n',i_f, psif);  
fprintf('eqp_0 = %g\n',deqp);  
fprintf('eqpp_0 = %g\n', deqpp);  
fprintf('edpp_0 = %g\n', dedpp);
```

%%

“denklemler”

%%

```
function dpsi = denklemler(t, psi);
```

```
global ymd ymq rf rkd rkq w0 ra vf H Ta Td0pp Tq0pp Td0p eqpp edpp eqp xdp  
xdpp xq xqpp alfa xad xf xkd xaq xkq eaf
```

```
psid = psi(1);  
psikd = psi(2);  
psif = psi(3);  
psiq = psi(4);  
psikq = psi(5);  
w = psi(6);  
delta = psi(7);  
eqpp=psi(8);  
edpp=psi(9);  
eqp=psi(10);
```

```
Id = ymd * [psid psikd psif]';  
Iq = ymq * [psiq psikq]';  
id = Id(1);  
ikd = Id(2);  
i_f = Id(3);  
iq = Iq(1);  
ikq = Iq(2);
```

```
eqp=xad*psif/xf;  
eqpp=xad*psikd/xkd;  
edpp=-xaq*psikq/xkq;
```

```
dpsid= -psid/Ta + eqpp/Ta + w*psiq;  
dpsikd = -w0*rkd*ikd;  
dpsif = w0*vf - w0*rf*i_f;  
dpsiq=-w*psid-psiq/Ta-edpp/Ta;  
dpsikq = -w0*rkq*ikq;  
dw= (w0/(2*H)).*(eqpp*iq+edpp*id);  
ddelta = w-w0;  
deqpp= -eqpp/Td0pp+eqp/Td0pp+(xdp-xdpp)*id/Td0pp;  
dedpp= -edpp/Tq0pp-(xq-xqpp)*iq/Tq0pp;  
deqp= -alfa*eqp/Td0p + (alfa-1)*eqpp/Td0p+eaf/Td0p;
```

```
dpsi = [dpsid dpsikd dpsif dpsiq dpsikq dw ddelta deqpp dedpp deqp]';
```

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Hüseyin Özhan BOZDAĞ

Doğum Yeri ve Tarihi: Edremit, 1984

Lisans Üniversitesi: Yakındoğu Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği