

39681

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÜSTÜNİLETKENLİ SENKRON MAKİNALARDA
KARARLILIK ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. H. Lale ZEYNELGİL

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 Temmuz 1994

Tezin Savunulduğu Tarih : 29 Eylül 1994

Tez Danışmanı : Prof. Dr. M. Emin TACER

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. H. Nusret YÜKSELER

: Prof. Basri ÇETİN

**V.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

EYLÜL 1994

ÖNSÖZ

Bu çalışmayı yapabilmem için bana olanak sağlayan ve beni yönlendiren kıymetli hocam Prof.Dr. M. Emin TACER'e teşekkür ederim. Ayrıca, bu çalışma süresince bana yardımcı olan herkese teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Tezin yazımını gerçekleştiren TESLA Ltd. elemanlarına da teşekkür ederim.

İstanbul, 1994

H. Lâle ZEYNELGİL

İÇİNDEKİLER

NOTASYON LİSTESİ	v
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
1.1. Üstüniletkenliğin Gelişimi	3
1.2. Üstüniletkenliğin Uygulama Alanları	9
1.3. Tezin İçeriği	16
BÖLÜM 2. ÜSTÜNİLETKENLİK VE ÜSTÜNİLETKENLER	19
2.1. Üstüniletkenlerin Temel Özellikleri ve Sınıflandırılması	19
2.2. Tip-1 Üstüniletkenlerin Özellikleri	29
2.3. Tip-2 Üstüniletkenlerin Özellikleri	30
2.4. Yüzey Üstüniletkenliği	32
2.5. Üstüniletkenlerin Kararlılaştırılması	33
BÖLÜM 3. ÜSTÜNİLETKENLİ SENKRON MAKİNALAR	36
3.1. Üstüniletkenli Senkron Makinanın Yapısı ve Özellikleri	36
3.2. Üstüniletkenli Senkron Makinanın Matematiksel Modeli	43
3.2.1. Tek Rotor Ekranına Sahip Üstüniletkenli Senkron Makinanın Matematiksel Modeli	43
3.2.2. Çift Rotor Ekranına Sahip Üstüniletkenli Senkron Makinanın Matematiksel Modeli	60
3.2.3. Merdiven Tipi Eşdeğer Devre Modeli	66
BÖLÜM 4. ÜSTÜNİLETKENLİ SENKRON MAKİNANIN SİMÜLASYONU	84

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	111
KAYNAKLAR	116
EK.A	120
ÖZGEÇMİŞ	129



NOTASYON LİSTESİ

S	: Generatör çıkış gücü
J_a	: Çevresel akım yoğunluğu
B	: Mağnetik akı yoğunluğu
D	: Stator iç çapı
λ	: Stator uzunluğu
n	: Makinanın dönme hızı
x	: Durum değişkenleri
u	: Giriş büyüklükleri
t	: Zaman
$f(.)$	: Fonksiyon
T_c	: Kritik sıcaklık
T	: Sıcaklık
R_s	: Üstüniletkenlik durumu direnci
R_n	: Normal durum direnci
Φ	: Mağnetik akı
λ_o	: Mutlak sıfır sıcaklığındaki sızma derinliği
λ_L	: London sızma derinliği
E	: Enerji yoğunluğu
V	: Üstüniletken numunenin hacmi
ξ	: Bağlantı uzunluğu
H_{uyg}	: Uygulanan mağnetik alan şiddeti
H_c	: Kritik mağnetik alan şiddeti
H_{c1}	: Alt kritik mağnetik alan şiddeti
H_{c2}	: Üst kritik mağnetik alan şiddeti

T_{sd}	: Ekran zaman sabiti
T_{sd1}	: İç ekran zaman sabiti
T_{sd2}	: Dış ekran zaman sabiti
r_B	: Rotor gövdesi yarıçapı
r_f	: Uyarma sargısı yarıçapı
r_{sd}	: Ekran yarıçapı
r_a	: Stator sargısı yarıçapı
r_{s1}, r_{s2}	: Çevresel zırhın iç ve dış yarıçapları
R_h	: Enerji iletim hattının ohmik direnci
X_h	: Enerji iletim hattının reaktansı
L_a	: Stator sargısı endüktansı
L_{ab}	: Stator faz sargıları arasındaki ortak endüktans
M	: Uyarma ve fiktif ekran sargıları ile stator sargıları arasındaki ortak endüktans
L_f	: Uyarma sargısı endüktansı
L_{sd}, L_{sq}	: d ve q eksenli fiktif ekran sargısı endüktansları
$L_{f, sd}$	: Uyarma ile d eksenli fiktif ekran sargısı arasındaki ortak endüktans
θ	: Stator sargısı a fazı ile rotor d eksenli arasındaki açı
N	: Stator sargısının faz başına sarım sayısı
Λ	: Rotor ve stator arasındaki manyetik geçirgenlik
$[v]$	: Gerilim vektörü
$[i]$	: Akım vektörü
$[\psi]$	: Akı vektörü
$[R]$	: Direnç matrisi
$[L]$	: Endüktans matrisi
v_a, v_b, v_c	: Stator a, b, c fazı çıkış gerilimleri

v_f	: Uyarma gerilimi
$v_{sd}, v_{sq}=0$	: d ve q ekseni fiktif ekran sargısı gerilimleri
i_a, i_b, i_c	: Stator a, b, c fazı akımları
i_f	: Uyarma akımı
i_{sd}, i_{sq}	: d ve q ekseni fiktif ekran sargısı akımları
Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c	: Stator a, b, c fazı akıları
Ψ_f	: Uyarma akısı
Ψ_{sd}, Ψ_{sq}	: d ve q ekseni fiktif ekran sargısı akıları
R_a	: Stator sargısının direnci
R_f	: Uyarma sargısının direnci
R_{sd}, R_{sq}	: d ve q ekseni fiktif ekran sargısı dirençleri
v_d, v_q	: d ve q ekseni stator çıkış gerilimi
i_d, i_q	: d ve q ekseni stator akımları
Ψ_d, Ψ_q	: d ve q ekseni stator çıkış akıları
p	: Türev elemanı
M_d	: Mekanik döndürme momenti
M_e	: Makinada endüklenen moment
p_k	: Çift kutup sayısı
J	: Eylemsizlik sabiti
δ	: Sonsuz büyük güçlü şebeke referansna göre rotor açısı
ω_o	: Senkron açısal hız
ω	: Açısal hız
s	: Kayma
t	: Elektriksel büyüklüklerin temel değerlerini gösteren alt indis
n	: Elektriksel büyüklüklerin nominal değerlerini gösteren alt indis

f_n	: Nominal frekans
Z	: Empedans
N_f	: Uyarma sargısının sarım sayısı
N_s	: Fiktif ekran sargısının sarım sayısı
$()$	: Birim değerler cinsinden elektriksel büyüklükleri gösteren sembol
H	: Enerji zaman sabiti
x_d	: d eksenli stator reaktansı (senkron reaktans)
x_q	: q eksenli stator reaktansı
x_{ad}	: d eksenli ortak reaktansı
$x_{d,f}$	: Stator d eksenli sargısı ile uyarma sargısı arasındaki ortak reaktans
$x_{d,sd}$	: Stator d eksenli sargısı ile d eksenli fiktif ekran sargısı arasındaki ortak reaktans
x_{aq}	: q eksenli ortak reaktansı
$x_{q,sq}$	: Stator q eksenli sargısı ile q eksenli fiktif ekran sargısı arasındaki ortak reaktans
R_{tr}	: Transformatörün ohmik direnci
x_{tr}	: Transformatörün reaktansı
R_{he}	: Paralel bağlı iki iletim hattının eşdeğer ohmik direnci
x_{he}	: Paralel bağlı iki iletim hattının eşdeğer reaktansı
X	: Durum değişkenleri vektörü
V_b	: Bara geriliminin genliği
$sd2, sq2$	: Dış rotor ekranına ilişkin d ve q eksenli büyüklüklerini gösteren alt indisler
$sd1, sq1$	: İç rotor ekranına ilişkin d ve q eksenli büyüklüklerini gösteren alt indisler

$x_{d, sd2}$	: d ekseninde stator sargısı ile dış rotor ekranına ilişkin fiktif sargı arasındaki ortak reaktans
$x_{d, sd1}$	: d ekseninde stator sargısı ile iç rotor ekranına ilişkin fiktif sargı arasındaki ortak reaktans
$x_{q, sq2}$	: q ekseninde stator sargısı ile dış rotor ekranına ilişkin fiktif sargı arasındaki ortak reaktans
$x_{q, sq1}$	: q ekseninde stator sargısı ile iç rotor ekranına ilişkin fiktif sargı arasındaki ortak reaktans
$x_{sd1,2}$	: d ekseninde dış ve iç rotor ekranları arasındaki ortak reaktans
$x_{sq1,2}$	: q ekseninde dış ve iç rotor ekranları arasındaki ortak reaktans
$\alpha, \beta, \gamma, \eta, \nu$	: Sarım oranları
Z_i	: Merdiven tipi eşdeğer devrenin kol empedansları ($i= 1, \dots, 8$)
V_1	: Dönmenin etkisi gözönüne alınmadığında stator sargısının uçlarındaki gerilim.
Z	: Empedans matrisi
Z'	: Dönüştürülmüş empedans matrisi
x_{mn}	: m ve n sargıları arasındaki ortak reaktans
M_{mn}	: m ve n sargıları arasındaki ortak endüktans
k_{mn}	: m ve n sargıları arasındaki kuplaj katsayısı
r_m	: m sargısının yarıçapı
r_n	: n sargısının yarıçapı
L_n	: n sargısının endüktansı
R_n	: n sargısının ohmik direnci
T_n	: n sargısına ilişkin zaman sabiti

L_d	: d eksenli stator endüktansı
L_q	: q eksenli stator endüktansı
t_o	: Bozucu etkinin oluştuğu an
t_1	: Bozucu etkinin temizlendiği an
t_2	: Bozucu etki öncesi koşullara dönüldüğü an
V_t	: Makina uç gerilimi
I_t	: Makinadan çekilen akım
P_b	: Baradan çekilen aktif güç
Q_b	: Baradan çekilen reaktif güç
E_f	: Makinada endüklenen iç gerilim
δ_t	: Uç geriliminin açısı
φ	: Yük açısı
$X(I,J)$	: Değişimleri incelenecek büyüklüklerin saklandığı matris
ITOT	: Toplam iterasyon sayısı
XCOUNT	: $X(I,J)$ matrisi için sayıcı
ITER	: İterasyon sayıcısı
H_i	: İterasyon adımı
N	: Durum değişkeni sayısı
$Y(I)$	: Durum değişkenleri dizisi ($I=1,...,N$)
$Z(I)$	: RK4 alt programında kullanılan durum değişkenleri dizisi
K_1, K_2, K_3, K_4	: RK4 alt programında her adımdaki durum değişkenlerinin türevleri dizisi
R_h	: Bir enerji iletim hattının direnci
X_h	: Bir enerji iletim hattının reaktansı

ÖZET

Bu çalışmada, üstüniletkenli senkron generatörlerinin kararlılık analizi, makinanın tek ve çift rotor ekranı olması durumu için yapılmıştır.

Günümüzde, elektrik enerjisine olan gereksinimin gün geçtikçe artması, güç sistemlerinde, üretim birimlerinin (generatörlerin) güçlerinin gittikçe büyütülmesine, iletim ve dağıtım şebekelerinin gittikçe karmaşılaşmasına yol açmaktadır. Bunun sonucu olarak, gittikçe büyüyen güç sistemlerinde kararlılık sorunu daha da önem kazanmaktadır. Diğer taraftan, artan elektrik gereksinimini karşılamak için, gittikçe daha büyük güçlü senkron generatörler gerekmektedir. Bu sorunların gelecekte de önemini koruyacağı görüşü ile bu çalışmada, son yıllarda üzerinde yoğun çalışmalar yapılan üstüniletkenli senkron makinanın kararlılık açısından simülasyonu yapılmıştır.

Tezin birinci bölümünde, önce güç sistemlerinde artan üretim gücü ve kararlılık sorunu hakkında bilgi verilmiş ve üstüniletkenli generatörlerin üstünlükleri belirtilmiştir. Daha sonra, üstüniletkenliğin tanımı yapılmış ve üstüniletkenler konusunda yapılmış olan çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Son olarak, üstüniletkenlerin uygulama alanları, özellikle güç sistemlerindeki uygulamaları konusunda yapılmış olan çalışmalar anlatılmıştır.

Tezin ikinci bölümünde, üstüniletkenlerin temel özellikleri anlatılmış, sınıflandırılması yapılmış, Tip-1 ve Tip-2 üstüniletkenlerin özellikleri incelenmiştir. Daha sonra, üstüniletkenlerin kararlılığı açıklanmıştır.

Tezin üçüncü bölümünde, üstüniletkenli senkron makinaların yapısal özellikleri tanıtılmış, alışlagelmiş senkron makinalardan olan farklılıkları verilmiştir. Sonra, tek ve çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için matematiksel modeller elde edilmiştir. Son olarak, düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devre kullanılarak, çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için bir matematiksel model oluşturulmuştur.

Tezin dördüncü bölümünde, tezde yapılmış olan simülasyon çalışması açıklanmış ve elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Son bölümde ise, sonuçlar değerlendirilmiş ve gelecekte bu konuda yapılabilecekler ile ilgili önerilerde bulunulmuştur.

SUMMARY

In this thesis, it is investigated stability of the superconducting synchronous machines.

Requirement of electrical energy increases more and more, therefore, in the power systems, ratings of generating units must increased and distribution networks must become relatively complex. Consequently, the stability problem of the power systems which are increased more and more is very important.

Stability of power system is defined as ability of synchronously operating of the generators in the system when any small or big perturbation occurs. On the other hand, to provide the increasing requirement of electrical energy, it is necessary to increase ratings of generating units. However, ratings of generators can not increase because of technological constraints as electrical, mechanical and transportation problems. Therefore, it is seem that maximum rating value for synchronous generators is 2000 MW in today. Development of superconducting synchronous machines is very important to overcome the maximum rating problem for synchronous generator.

It must be given some knowledge about superconductor before superconductor synchronous machines are investigated.

Superconductors are metals or alloys which exhibit the phenomenon of zero electrical resistance with direct current below a certain temperature, known as the transition temperature or the critical temperature.

Superconductivity was first discovered by Heike Kammerlingh Onnes, the Dutch physicist, in 1911. He had observed that mercury was not have resistivity to electric current when it was cooled about absolute zero temperature . For cooling mercury to absolute zero, he had bathed the mercury bar in liquid helium and then, he has observed that mercury had been superconductive at temperature of 4.2 Kelvin.

The critical temperature at which the transition between the superconductive state and the normal state occurs is, in the absence of a

magnetic field, independent of the shape or size the specimen. It is a characteristic of the material.

The zero resistance of the superconductive state is only strictly true for direct currents of constant value. If the current is changing then a non-zero resistance does exist although it may be still much less than that in the normal state. For AC currents of a given frequency this resistance depends upon both frequency and the specimen temperature.

When a specimen enters the superconductive state it is magnetic properties undergo a radical change. The magnetic properties of a superconductive specimen are quite distinct from those of a normal specimen. Indeed, the magnetic properties of the superconductive state are basic to the understanding of the superconductive state.

An important magnetic property of the superconductive state is diamagnetism. The forces which a diamagnetic body experience in a non-uniform magnetic field can be pictured in terms of "induced magnetization currents". The lines of magnetization currents are closed. This means that magnetization currents do not bring electric charge into or out of the body. Although these magnetization currents are certainly real we can not measure them directly. These magnetization currents produces a magnetic field. These magnetic field is known as the "induced magnetic field". This induced magnetic field has opposite direction that of the applied magnetic field. Therefore, nearly all of the total magnetic flux lines is excluded from the specimen. The exclusion of magnetic flux from a specimen in the superconductive state was first discovered in 1933 by Meissner and Ochsenfeld and is known as the "Meissner effect".

Although Onnes' discovery of the first superconductive material, mercury, occurred over seventy years ago, studies on superconductivity is constraint because to obtain the temperatures which is required for superconductivity it was used liquid helium. Liquification of helium is expensive and requires considerable energy. Furthermore, unless the liquid helium is tightly sealed in a heavily insulated container, it quickly warms and vaporises away.

In 1987, physicists have stumbled on an unusual class of the ceramic compounds that change everything. They too must be cooled to become superconductors, but only to a temperature of 98 K. Firstly, Paul C. W. Chu and et al was discovered that the compounds Y-Ba-Cu-O has become superconductor at 98 Kelvin. This development brought superconductivity into the range of the practical; liquid helium can be replaced as a coolant by liquid nitrogen, which makes the transition from a gas at the easily produced temperature of 77 Kelvin. Moreover, liquid nitrogen is cheaper than liquid

helium and so long - lasting that scientists carry it around in ordinary thermos bottles. Also, the ceramics may be able to generate even more intense magnetic fields than metallic superconductors.

However, the goal of superconductivity researchers is to push the phenomenon of superconductivity into a practical temperature range and researches are continued.

The application of superconductors to rotating electric machines was proposed as soon as it was feasible to make practical solenoids. The first experiments with homopolar machines were successful because the duty imposed on the superconductor wasn't different from that for a simple DC solenoid. On the other hand, the first experiments with AC machines experiences several problems. But, many groups of researches around the world have developed several superconducting synchronous generator solving these problems.

At the present time, the optimal configuration of superconducting synchronous machines is the superconducting field windings rotating inside a stationary armature windings which are normal conductor. These machines have following advantages:

- A reduction in size and weight
- The potential for higher ratings
- Higher efficiency compared with conventional machines
- Elevation of terminal voltage
- A reduction in capital plant cost
- A reduction in capitalised cost of losses
- An improvement in power system stability

Both of field winding and armature winding include no magnetic iron. Iron is used only as a magnetic shield to minimize to alternating magnetic fields external to the machines. Therefore, even with a laminated iron environmental magnetic shield, the machine is essentially air-cored. Because of its air-cored nature, it is necessary one or more cylindrical, conducting shells in the annular space between the field and armature windings, rotating with the field windings. These shells are also named as screens.

The rotor screening system must perform several functions, some of them in apparent conflict:

- It must provide thermal isolation to the superconducting field winding
- It must provide a high degree of isolation for the rotor from rapidly time varying magnetic fields components due to space harmonics of armature fields, the harmonics on the system, system imbalance resulting in negative sequence currents, and faults.
- It must provide minimum rotor flux leakage.
- It must serve as an amortisseur winding, providing machine and system damping.
- The screening system must be able to withstand the strong mechanical loads imposed by faults.

Because of the conflicting requirements, it is used two or more screens in superconducting synchronous machines. The double-screen machine has two screens having the following properties:

- Low-temperature, lightweight inner screen having a long diffusion time constant to give good electromagnetic and thermal shielding.
- Strong outer screen, able to withstand short-circuit forces and having a shorter diffusion time constant to provide good damping.

Basic configuration of the superconducting synchronous machine which has two rotor screens is shown in Figure 1.

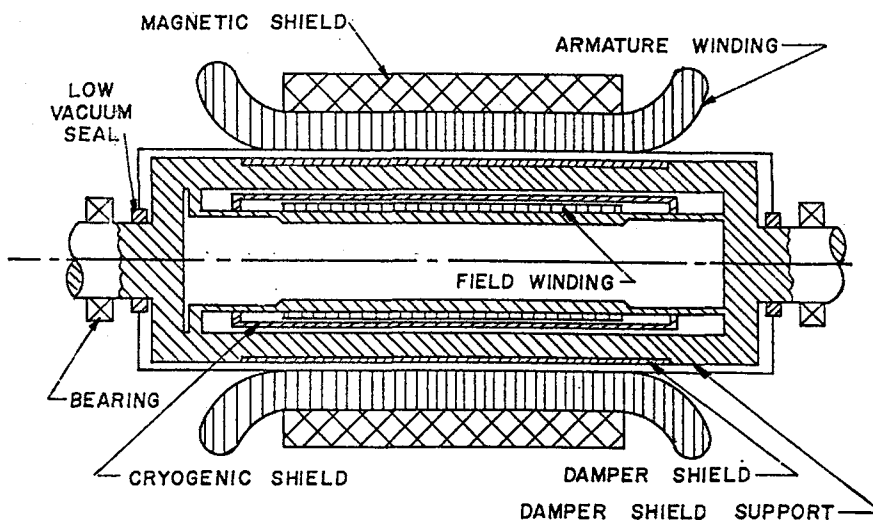


Figure 1: Basic configuration of double-screen machine.

In the first chapter, it is first explained the requirement of increasing ratings of generators and stability problem in the power systems. Then, the advantages of superconducting synchronous machines are pointed out. Definition of superconductivity is given and investigations on superconductors are explained. Finally, the application of superconductors to several areas, especially to power systems, described and investigations on this subject are explained.

In the second chapter, the important properties of superconductors are described in detail. Classification of superconductors explained. Characteristics of Type-1 and Type-2 superconductors are described. Then stability of superconductors and stabilisation methods are explained.

In the third chapter, superconducting synchronous machines are described in detail. Firstly, configuration of superconducting synchronous machines are explained. After, mathematical models for superconducting synchronous machines are obtained considering it as a electromechanical system which has multi-input, multi-output. Firstly, a mathematical model for single screen superconducting synchronous machine is obtained and it is explained how the base values of the superconducting synchronous machine are obtained. After these, the machine model in the per unit system, which is in the form of $f(x,u,t)$ is obtained. Secondly, the mathematical model for double screen superconducting synchronous machine is obtained in the per unit system. Finally, a mathematical model using modified ladder-type equivalent circuit for double-screen superconducting synchronous machine is obtained. In all of the models, it is assumed that the machine which is considered is connected to an infinitive system through a transformer and two equivalent transmission lines in parallel.

In the fourth chapter, it is described the simulation studies and given the results which are obtained.

In the last chapter, it is commented on the results and proposed new research areas in this subject.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Üretim, iletim ve denetim açılarından bakıldığında, bütün enerji çeşitleri arasında en uygun enerjinin elektrik enerjisi olduğu bilinmektedir. Elektrik enerjisinin bu özellikleri, yaşam seviyesinin daima yükselmesine yol açmıştır. İnsanlığın daima ileriye dönük istemleri ve giderek artan nüfus giderek artan bir elektrik enerjisi gereksinimini ortaya çıkarmıştır. Üretilen elektrik enerjisinin sadece miktar olarak artırılması yeterli değildir. Aynı zamanda, kaliteli ve güvenilir elektrik enerjisi üretimi, iletimi ve dağıtımı gerekmektedir. Bununla beraber, enerji üretim, iletim ve dağıtım sistemlerinin boyutlarının ve kapasitelerinin giderek büyümesi ve karmaşıklaşması bir takım sorunları da birlikte getirmiştir. Bu sorunların en önemlisi bu sistemlerin kararlı çalışmasının sağlanmasıdır.

Elektrik enerjisi üretiminde büyük bir çoğunlukla senkron generatörler kullanılmaktadır. Artan elektrik enerjisi gereksinimini karşılamak için, giderek daha büyük güçlü senkron generatörler yapılmakta olup, bugün için senkron generatörlerde ulaşılabilecek sınır güç 2000 MW olarak görülmektedir. Elektrik enerjisi üretiminde diğer bir problem tüketicilerin elektrik enerjisi gereksinimlerinin günün saatlerine göre değişmesidir. Elektrik enerjisini depolamak mümkün olmadığından, talebin her zaman karşılanabilmesi için, talep aniden arttığında devreye sokmak üzere belirli sayıda generatörün yedek olarak bulundurulması gerekir, fakat bu yöntem elektrik enerjisinin maliyetini artırır. Büyük güçlü generatörlerin kullanılmasının bir yararı da maliyeti düşürmesidir.

Senkron generatörlerde çıkış gücü (görünen güç) $S \cong 0,12 J_a \cdot B \cdot D^2 \cdot \lambda \cdot n$ bağıntısı ile hesaplanabilir [1], [2]; burada, J_a [kA / m]: Çevresel akım yoğunluğu, B [T]: Hava aralığı akı yoğunluğu, D [m]: Stator iç çapı, λ [m]: Stator uzunluğu ve n [d / d]: Makinanın hızıdır. Bu bağıntı uyarınca, senkron makinanın çıkış gücünü arttırmak için ya makinanın boyutlarının ve hızının veya çevresel akım yoğunluğu ve hava aralığı akı yoğunluğunun artırılması gerekmektedir. Ancak elektriksel, mekaniksel ve taşıma ile ilgili problemler bu yolla senkron generatörlerin çıkış gücünün artırılmasını sınırlar. Öte yandan, büyük güçlü senkron generatörlerde geçici kararlılığı sağlamak için, hava aralığını büyütürerek makinanın reaktansı küçük tutulmaya çalışılır. Bunu sağlamak için uyarma sargısında daha büyük magnetomotor kuvvet, dolayısıyla daha büyük uyarıcı gücü gerekir, ki bu da verimin düşmesine yol açar.

Üstüniletkenlerin senkron makinalarda kullanılması ile alışlagelmiş senkron makinalarda ortaya çıkan bu problemler ortadan kalkmaktadır, çünkü üstüniletkenli senkron generatörlerin 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 [1], [2], [3].

Senkron generatörlerde kullanımı ile böylesine önemli yararlar sağlayan üstüniletkenler aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

Sıcaklıkları belirli bir değerin altına düşürüldüğü zaman, doğru akım ile elektriksel dirençleri sıfır olan malzemelere "üstüniletken" adı verilir [4], [5]. Üstüniletkenlik durumunun ortaya çıktığı sıcaklık değeri "kritik sıcaklık" olarak bilinir ve T_c ile gösterilir.

1.1. Üstüniletkenliğin Gelişimi

Üstüniletkenlik, ilk olarak 1911 yılında Hollanda'lı fizikçi Heike Kammerlingh Onnes tarafından, civayı mutlak sıfır (0°K) civarına soğuttuğu zaman elektrik akımına direnç göstermediğini gözlemesiyle keşfedilmiştir [5], [6], [7]. Onnes 0°K sıcaklığına ulaşmak amacıyla civa çubuğunu sıvılaştırılmış helyum içine sokmuş ve $4.2^{\circ}\text{K}(-268,8^{\circ}\text{C})$ 'de civanın üstüniletkenlik durumuna geçtiğini gözlemiştir [7]. Helyum mutlak sıfır civarında sıvılaştığından, bu araştırmalar için çok uygundur. Sakıncaları ise, çok pahalı olması ve iyi yalıtılmış bir kaptaki sıkıca kapatılmadığı takdirde hızla ısınması ve buharlaşmasıdır. Ayrıca, helyumun sıvılaştırılması pahalı ve büyük miktarda enerji gerektiren bir işlemdir. Bütün bu sakıncalar üstüniletkenlik konusundaki çalışmaları sınırlamıştır, çünkü başlangıçta üstüniletkenliğe ulaşmak için tek yol önce belirli metalleri ve daha sonra belirli bazı metal alaşımlarını sıvı helyum banyosuna sokmak idi. Bunun sonucu olarak, üstüniletkenlerin pratikte kullanımı, uzun yıllar boyunca, bilinen üstüniletkenler ile yapılan elektromıknatıslar ve bunların yarattığı şiddetli manyetik alanlarla çalışan bir kaç cihaz ile sınırlı kalmıştır: Japonların geliştirmiş olduğu ve deneysel amaçlı manyetik olarak havalandıran tren (maglev: magnetically levitated trains), dev parçacık ivmelendiricisi, tıbbi manyetik-rezonans görüntü cihazı (MRI: magnetic resonance -imaging machines) gibi.

Üstüniletkenlik olayı pratik olarak defalarca gözlenmesine rağmen, bu olayın teorisinin geliştirilmesi hep geri kalmıştır. İlk olarak 1935'de London kardeşler, sonra 1950'de W.L. Ginsburg ve L.D. Landau tarafından üstüniletkenlik için başarılı modellemeler yapılmış olmasına rağmen, ilk esaslı teori 1957'de John Bardeen, Leon Cooper ve J. Robert Schrieffer tarafından önerilmiştir ve kurucularının soyadlarının baş harflerinin bir araya getirilmesi ile BCS kuramı olarak anılmaktadır. Bardeen, Cooper ve Schrieffer bu kuramları ile 1972 Nobel Fizik Ödülü'nü almışlardır [5], [6], [7].

BCS kuramının esası, üstüniletkenlerde yük taşıyıcıların Cooper çiftleri olarak bilinen zıt momentumlu elektron çiftleri olmasına dayanmaktadır [5], [6], [7], [8].

Normal iletkenlerin atomik yapıları incelendiğinde, bunların dış kabuklarında belli sayıda delik ve elektronların bulunduğu görülür; öyle ki 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 elektronlar ile çarpışarak enerjilerini ısıya dönüştürürler. Bilindiği gibi, bu olay elektriksel direnç olarak adlandırılır. Üstüniletkenler gözönüne alındığında, bunlarda hareketli elektronlar tek tek hareket etmezler ve yukarıda da belirtildiği gibi zıt momentumlu elektron çiftleri, başka bir deyişle Cooper çiftleri oluşturarak hareket ederler [8]. Üstüniletken bir gerilim uygulandığında oluşan elektron hareketi esnasında çarpışmalar sonucu bir elektron çifti bozulsaydı, bunlar hemen tekrar birleşerek eski konumlarına dönebilmektedir. Bunun sonucu, normal iletkenlerdeki gibi bir direnç oluşmamaktadır. Gene burada hemen şunu açıklamakta yarar vardır: Üstüniletkenlerde hareketli elektronlar arasında büyük çekici kuvvetler vardır. Ancak, sıcaklık oda sıcaklığına yükseldiğinde bu kuvvetlerin çok küçük değerlere düşmesi nedeniyle, normal iletkenlerde elektron çiftleri oluşmamaktadır. Bu kuram, mutlak sıfır civarındaki üstüniletkenliği açıklamada oldukça başarılı olmuştur, öyle ki bu, Bardeen'e göre yaklaşık 40°K 'e kadar olan sıcaklıklardaki üstüniletkenlik durumlarını da açıklayabilmektedir.

Üstüniletkenlik 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 manyetik alanlar üretmek amacıyla içlerinden gerekli akımlar geçirildiğinde, üstüniletkenliklerini kaybetmeleri ve normal iletken durumuna geçmeleridir. Bu engeli aşmak için, bilim adamları alaşımlara yönelmiştir ve bu

çalışmaların sonucu olarak 1950'lerde yüksek magnetik alanlarda üstüniletkenlik özelliğini yitirmeyen niobyum-kalay (Nb_3Sn) ve niobyum-titanyum ($NbTi$) gibi alaşımlar bulunmuştur [7]. Özellikle, J. Kunzler 1960'larda Nb_3Sn alaşımının tel üstüniletken haline getirilebileceğini bularak, elektrik makinalarında üstüniletkenliğin kullanılmasına öncülük etmiştir. Bu alaşım 20.10^5 Gauss's'luk magnetik alanlarda üstüniletkenliğini 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 üstüniletken hale geçmektedir [5].

1983'de IBM' in Zürih Araştırma Lâboratuvarı fizikçilerinden olan Karl Alex Müller metal alaşımlarını bir yana bırakıp, seramikler olarak bilinen metal oksitleri incelemeye başlamıştır. Seramikler aslında oda sıcaklığında zayıf iletken olarak bilinirler ve bir çok alanda yalıtkan olarak kullanılırlar. Ancak teorik çalışan bazı bilim adamları, Müller'den önce seramiklerin muhtemel üstüniletkenler olabileceklerini öne sürmüşlerdi. K.A. Müller ve arkadaşı Johannes George Bednorz, üç yıl boyunca içindeki elementlerin çeşitlerini ve miktarlarını değiştirerek bir çok metalin oksitlerini incelediler, ancak kritik sıcaklığı yükseltemediler. Sonunda, Aralık 1985'de baryum-lantan- bakır- oksijen ($Ba-La-Cu-O$) bileşiğini test ettiklerinde bu bileşiğin $35^\circ K$ 'de üstüniletkenlik gösterdiğini gözlediler [5], [6], [7]. Ancak, bu inanılmaz sonucun doğruluğunu sağlamak için deneyi defalarca tekrarlayıp, sonra Nisan 1986'da, "Zeitschrift für Physik" isimli bir Alman dergisinde elde ettikleri sonucu içeren bir makale yayınladılar. Bu makale, diğer araştırmacılar tarafından tereddütle karşılanmıştır, çünkü üstüniletkenliği kesin olarak kanıtlayan Meissner etkisini [6], [7], [8], [9], bunu gösterecek hassas bir cihazlarının olmaması nedeniyle gösterememişlerdi. Bununla beraber, ilk olarak Japonya'dan, yıl sonunda ise Çin'den ve A.B.D.'den onay gelmiştir. (Meissner etkisi, kısaca, bir üstüniletken malzemenin civarındaki magnetik alanı dışlama özelliği olup, ilk kez bu durumu gözleyen bilim adamının adıyla anılmaktadır.)

Daha sonra Bell Lâboratuvarlarından Bertram Batlogg ve Robert Cava 38°K'de üstüniletken olan benzer bir bileşik ürettiler. Bu arada, Houston Laboratuvarı araştırma grubunun başkanı olan ve 1965'den beri üstüniletkenlik konusunda çalışmakta olan Paul C.W. Chu ve grubu malzemeleri yüksek basınç altında denemeyi düşünmüşlerdi. Bu yolla normal atmosfer basıncının 10.000 katından 12.000 katına çıkıldığında 52°K'e kadar üstüniletken olarak kalan benzer bir bileşik buldular. Daha yüksek basınca zorlamak iyi bir sonuç vermeyince, Chu, molekülleri farklı bir yolla (içeriden) sıkıştırmaya karar vermiş ve bu amaçla baryum yerine, benzer kimyasal yapıda fakat daha küçük atomik yapısı olan, stronsyum kullanmıştır. Böylece, sıcaklık 52°K'e yükseldi ve sonra durdu. Stronsyum yerine daha da küçük atomik yapısı olan kalsiyum kullanıldığında sıcaklık tekrar düştü. Sonuç olarak, bunun ölü bir çalışma olduğu anlaşılmış oldu [7].

Bunun üzerine, Chu ve grubu IBM bileşiğinin nadir toprak elementi olarak Lantan'ı incelediler. Alabama grubunun başkanı ve Chu'nun eski bir öğrencisi olan Maw-Kuen Wu, Lantan'ı diğer bir nadir toprak elementi olan Yitrium ile değiştirdi. Bunun sonucunda, Wu ve arkadaşları (Y-Ba-Cu-O) bileşiğinin 93°K'de üstüniletken olduğunu gözlediler [5], [6], [7], ancak bu öyle iyi bir sonuç idi ki, bir hata yapmış olduklarından şüphelendiler. Kısa bir süre sonra Wu ve Chu birlikte aynı deneyi 5°K daha iyi bir sonuçla tekrarladılar. Bunun üzerine 98°K'de üstüniletken olan bir bileşik bulduklarını duyurdular, ama bileşiğin yapısını daha sonra 2 Mart 1987 tarihli Physical Review Letters' de yayınlanan resmi raporlarında açıkladılar.

Daha sonra, Berkeley, California University'den Marvin Cohen (on yıl öncesinde oksitlerdeki üstüniletkenlik özelliğini farkedenden teorik fizikçilerden) 98°K rekorunu tekrar elde etmiştir [5], [7].

Elde edilen bu sıcaklıklar oda sıcaklığına henüz çok uzak olmasına rağmen, bu sıcaklıklara ulaşmanın sağladığı en önemli üstünlük, bu düşük

sıcaklıkları elde etmek için sıvı helyum yerine sıvı azot kullanılabilmesidir. Sıvı azotun üstünlüğü 77°K'de elde edilmesi ve hem çok ucuz, hem de adi termos şişesinde saklanabilecek kadar uzun ömürlü olmasıdır [5], [6], [7].

Sıvı azotun kullanımı sayesinde, üstüniletkenlik konusundaki araştırmalar çok hızlı gelişmeye başlamış, 100°K'in üzerinde kritik sıcaklık değerlerine ulaşılmış ve hatta A.B.D.'nde iki ayrı grup 200°K'in üzerinde kritik sıcaklık değerlerine sahip üstüniletkenler geliştirdiklerini açıklamışlardır [6], [10].

Mart 1987 sonunda, Wayne State University'den Chen, Wengir ve Logothetis 240°K'de üstüniletkenlik gözlediklerini bildirdiler. Bu grup bileşiklerini tam olarak açıklamayıp, sadece Y-Ba-Cu-O ailesinden, daha önce $T_c = 90^\circ\text{K}$ olduğu gözlenmiş bir seramik olduğunu belirtiyorlardı.

Mayıs 1987 ortasında ise, Houston University'den Chu ve grubu 225°K'de üstüniletkenlik durumuna geçen yeni bir bileşik bulduklarını bildirdiler, ancak bu bileşiğin formülünü açıklamadılar.

Aynı grup, başka bir maddenin oda sıcaklığında direncini kaybetmeye başladığı şeklinde deneysel belirtiler gözlediklerini de bildirdi. Ayrıca, Berkeley'deki California University bilim adamları oda sıcaklığından da yüksek sıcaklıkta dirençte sıfıra düşmeyi ölçtüklerini söylediler (New York Times, 23.5.1987) [10]. Bu son gözlemlerde bazı şüpheler olmasına rağmen, şüpheleri gidermek ve daha iyi sonuçlara ulaşmak için çalışmalar hızla sürdürülmektedir.

Buraya kadar yapılan tarihsel inceleme, metal oksitlerin (seramiklerin) üstüniletken olabildiklerinin anlaşılması ile araştırmaların çok hızlandığını göstermektedir. Çünkü, seramikleri üstüniletkenlik durumuna geçirmek için gereken düşük sıcaklıklar sıvı helyum yerine sıvı azot kullanılarak elde

edilebilmekte ve bu da büyük kolaylık sağlamaktadır (sıvı azot hem daha ucuz, hem de kullanışlı olduğu için). Seramiklerin diğer bir üstünlüğü, şiddetli manyetik alanlara dayanabilmeleridir.

Seramiklerin bu üstünlüklerinin yanında iki önemli sakıncası vardır [5], [6], [7]: Akım taşıma kapasitelerinin çok düşük olması ve kırılkan olmaları. Seramiklerin akım taşıma kapasitesi, daha önce bulunmuş olan üstüniletkenlerin akım taşıma kapasitelerinin sadece yüzde biri kadardır. Bu düşük akım yoğunluğu pratikteki uygulamalar için gerekenin çok altında olduğu için, seramik üstüniletkenlerin kullanışlılığını sınırlamıştır. Kırılkanlık ise seramiklerin en önemli sakıncası olup, mıknatıslar, motorlar, enerji iletimi gibi uygulama alanlarında kullanılabilecek üstüniletken tellerin yapılmasında karşılaşılan en büyük sorun olmuştur.

Bilim adamları bu sakıncaları gidermek için çeşitli yöntemler geliştirmektedirler: Iowa'da, Ames Laboratuvarı'ndaki araştırmacılar yeni üstüniletken bileşiklerden birini bakır ve diğer iletken malzemelerle karıştırdılar ve tel şekline soktular. Bu telin incelenmesi ile elde edilen ilk sonuçlar, telin saf bileşik gibi davrandığını göstermiştir [7]. Mart 1987 sonlarında, IBM, Bell Laboratuvarları, Toshiba Corp, Argonne Ulusal Laboratuvarı ve daha birçok yerdeki bilim adamları tel inceliğinde, seramik çubuklar geliştirdiklerini duyuruyorlardı [1], [3], [7]. Ancak bu tellerde elde edilen akım yoğunlukları çok düşüktü. Örneğin, Toshiba'da üretilen teller için 6 A/cm^2 , Argonne'da üretilen teller için 5 A/cm^2 idi.

Daha sonra, Nisan 1987'de Stanford'dan ve IBM'den bilim adamları yeni üstüniletken malzemelerden ince filmler oluşturduklarını duyurdular [7], [10]. Bir hafta sonra, yine IBM'den bilim adamları plâsma püskürtme olarak bilinen ve pahalı olmayan bir teknik ile yeni üstüniletken bileşikleri önceden şekillendirilmiş teller, düz yada şekilli yüzeyler veya tüpler üzerine kaplayabildiklerini bildirdiler [7], [9], [10]. Mayıs'ın ortalarında, IBM, bu

tekniki daha yüksek akım taşıma kapasitesi olan tek-kristalli ince-film üstüniletkenleri üretmek üzere geliştirdiğini duyurdu. Bu filmlerin anizotropi (akımın kristal içinde belli bir yönde diğer ynlerdekinden daha iyi taşınması) zelliğine sahip olduğunun anlaşılması ile bilim adamları bu filmleri sıvı azot sıcaklığına soğutarak 100.000 A/cm^2 'lik akım yoğunluğuna ulaştılar [10], [11]. Bu, yeni malzemelerden birinde daha önce elde edilmiş olan en iyi değerin 100 katı idi. Bu stniletken filmler sıvı helyum sıcaklığına kadar soğutulduğu zaman, 5 milyon A/cm^2 'lik akımı (yani en iyi metalik üstüniletkenin akımını) ilettiler.

IBM'in elde ettiği bu değerler, muhtemel uygulamalar için yeterli olan akım yoğunluğu değerlerinin yaklaşık 1000 katıdır. Elde edilen bu sonuçlar gelecek için, özellikle ince filmlerin kullanım alanı olan bilgisayar ve elektronik alanında çok mit vericidir.

Seramik stniletkenler konusunda yapılan çalışmalar günümüzde de hızla devam etmekte ve çeşitli araştırmacılar daha yüksek kritik sıcaklığa sahip yeni üstüniletkenler geliştirmektedirler [12], [13]. GEC ve BICC araştırma grupları tarafından geliştirilmiş olan ve Cd, Pb ve Cu oksitlerine dayanan üstüniletkenler son örneklerden olup, bunlar 92°K 'lik kritik sıcaklığına sahiptirler [12].

1.2. Uygulama Alanları

Literatür taraması yapıldığında, üstüniletkenlik ile ilgili ilk çalışmaların küçük ölçekli uygulamalara yönelik olduğu görülmektedir. Bunun nedeni, bilinen ilk malzemelerin kritik sıcaklık ve kritik alan şiddeti değerleri ile akım taşıma kapasitelerinin küçük olmasıdır. Hem zamanla geliştirilen yeni teknikler (ince filmlerin yapılması, plsma püskürtme tekniği gibi) ve hem de bulunan yeni üstüniletken malzemeler uygulama alanlarının giderek genişlemesine yol açmıştır.

Üstüniletkenliğin ilk ve en yaygın uygulama alanı üstüniletken elektromıknatıslardır. Elektriksel direncin sıfır olması nedeniyle üstüniletken elektromıknatıslarda enerji kaybı söz konusu olmamakta ve çok büyük mağnetik alan şiddetleri (15 T. gibi) elde edilebilmektedir. Seramiklerin bulunması ile sıvı helyum yerine sıvı azot kullanılabilmesi ekonomik üstünlük sağlamıştır. Ancak seramiklerden bükülebilir iletkenler yapılamaması ve kuvvetli mağnetik alanların basıncına karşı yeterli dayanaklılığın sağlanamaması gibi sorunlarla karşılaşmıştır [5]... [9], [11].

Üstüniletken mıknatısların önemli bir kullanım alanı da tıpta MRI (magnetic resonance - imaging (mağnetik rezonans - görüntü)) cihazlarıdır. Bu cihazlar sayesinde, deneme cerrahisi olmaksızın elde edilemeyecek ayrıntılı görüntülerle dokuların yapıları incelenebilmektedir [6], [7], [11].

Önemli bir diğer uygulama alanı, bilgisayar devrelerinde üstüniletkenlerin kullanılmasıdır. Bilgisayar tasarımında, daima daha küçük ve daha hızlı bilgisayarların üretilmesi amaçlanır. Ancak, ısınma problemi bu çalışmaları sınırlar. Üstüniletkenlerin kullanılması, bilgisayar boyutlarının küçültülmesinde çok etkili olacaktır [7], [8]. Diğer taraftan, bilindiği gibi, bilgisayar hızını sınırlayan bir etken anahtarlama hızıdır. Anahtarlama hızını arttırmak için, üstüniletken malzeme kullanılarak elektronik anahtarlar yapılmıştır. "Josephson eklemi" olarak adlandırılan bu anahtarlar, iki üstüniletken elektrot arasına yerleştirilmiş ince bir yalıtkan oksit tabakasından oluşur [5], [9], [10]. (Dayandığı prensibi keşfeden İngiliz fizikçi Nobel Laureate Brian Josephson'ın ismiyle anılmaktadır.) Josephson ekleminin bir uygulaması da SQUID (superconducting quantum interference device (üstüniletken kuantum girişim aygıtı)) lerdir. Paralel bağlanmış iki Josephson ekleminin kullanıldığı bu aygıtlar bilgisayarlarda ve tıpta uygulama alanı bulmaktadır [5], [9], [10].

Üstüniletkenliğin elektronik alanındaki diğer bir kullanım yeri mikrodalga filtrelerdir. Seramik üstüniletkenlerin geliştirilmesiyle, bu alandaki çalışmalar da hızlanmıştır [13].

Üstüniletkenliğin en önemli ve büyük ölçekli uygulama alanlarından biri elektrik enerjisi üretimi ve iletimidir. Başka bir deyişle, üstüniletkenlerin elektrik makinalarında, transformatörlerde ve iletim hatlarında kullanılmasıdır. Üstüniletkenlerin elektrik makinalarına uygulanması, ikinci bölümde özellikleri açıklanacak olan Tip-2 üstüniletkenler ile pratik solenoidlerin yapılması mümkün olur olmaz önerilmiştir. Bu konudaki ilk denemeler homopolar makinalar üzerinde yapılmıştır. Bu denemelerde, üstüniletken solenoide yüklenen görev basit doğru akım solenoidkinden farklı değildi ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir [4], [14]. Oysa ki, üstüniletkenlerin alternatif akım makinalarına uygulanması ile ilgili ilk denemeler sorunlarla dolu olmuştur. Bu sorunlar, o esnada Tip-2 üstüniletkenlerin soğutulması ile ilgili güçlüklerden kaynaklanıyordu [14].

Üstüniletkenli senkron makinaların analizinde ilk çalışmalar, makina için yapısal düzenlemenin araştırılmasına yönelik incelemelerdi. Bu yönde birbirinden bağımsız olarak yapılan çalışmalar hep aynı sonuca varmıştır: Üstüniletkenli senkron makina için optimum yapı, normal iletkenden yapılmış stator sargıları içinde dönen üstüniletken uyarma sargıları biçimindedir [1], [14], [15]. Bu durumda, uyarma sargısındaki ohmik kayıplar ortadan kalkar, çünkü üstüniletkenlerin doğru akımda elektriksel direnci sıfırdır. Böylece verim ve dolayısıyla nominal güç artar. Ancak, hızla dönen sargıların üstüniletkenlik için gerekli olan düşük sıcaklıklara kadar soğutulması ve iyi bir ısı yalıtımının sağlanması gibi sorunlar sözkonusu olmaktaydı. Neyse ki, bu sorunlar aşılamaz değildir ve dönen üstüniletken uyarma sargılı senkron makinalar konusunda yapılan muhtelif çalışmalar ile giderilmeye çalışılmıştır.

Üstüniletkenli senkron makinalar üzerine yapılan çalışmalarda ikinci adım; dönen uyarma sargılarının yarattığı sorunları ortadan kaldırmak

amacıyla, rotorda bulunan üstüniletken 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 [4], [14], [16].

Bundan sonraki adım, çeşitli küçük makinaların tasarımı ve yapımı olmuştur [14].

İlk dönen üstüniletken uyarma sargılı senkron generatör 1970'de M.I.T.'de yapılan 80 kVA'lık genaratördür [4], [15]. 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 üstüniletkenli senkron generatörü geliştirmiştir [14], [15].

Bundan sonra, çeşitli araştırma grupları tarafından giderek artan güçlerde üstüniletkenli senkron 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 Electric ve Mitshubishi Electric tarafından yapılan 6 MVA'lık model generatör örnek olarak verilebilir [1], [5], [14], [15], [16]. Daha büyük güçlü (300 MVA - 3000 MVA) senkron generatörler üzerinde çeşitli araştırma grupları tarafından yapılan çalışmalar günümüzde de devam etmektedir [2], [16].

Üstüniletkenlerin senkron makinalarda kullanımında diğer bir olasılık olarak, stator sargılarının üstüniletken yapılması da denenmiştir [4]. Bu durumda, stator iletkenlerindeki Foucoult akımı kayıpları alışıl gelmiş

senkron makinadakinden daha yüksek olur ve aynı zamanda, üstüniletken sargıdaki yüksek akım yoğunluğu nedeniyle statordan demirin çıkartılması gerekir. Bunun sonucu olarak, rotorda üretilen mağnetik alanlar artık makina içinde sınırlanamadığı gibi, makinanın dışındaki mağnetik cisimler de rotora etki ederek kararlılığını bozarlar. Bu sakıncalar giderilmeye çalışılmakta ve tamamen üstüniletkenli (hem rotor ve hem de statorda üstüniletken sargı kullanılan) makinaların geliştirilmesi için çalışmalar devam etmektedir [2], [16].

Ancak, bugün için, yapılan çalışmalar sonucu senkron makinalarda üstüniletkenlerin 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 [12], [18], [19].

Elektrik enerjisine olan gereksinimin arttığı günümüzde, özellikle daha büyük çıkış güçlerinin elde edilebilmesi, üstüniletkenli senkron makinaların önemini arttırmaktadır. Sonuç olarak, elektrik enerjisi üretiminde üstüniletkenli senkron 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.

Üretilen güç arttırıldıkça, iletim şebekesinin güç kapasitesinin de buna paralel olarak arttırılması gerekir. Ayrıca, santraller yakıt kaynaklarına yakın olması için ya da güvenlik sebebiyle (örneğin nükleer santraller) genel olarak tüketici merkezlerinden uzak yerlere kurulurlar. Dolayısıyla, iletim sistemlerin katettikleri mesafeler de giderek artmaktadır. Bu nedenle, daha uzak mesafelere daha büyük güçleri iletebilmek için giderek daha yüksek gerilimler kullanılmaktadır ve böylece Britanya'da 400 kV. ve Kuzey

Amerika'da 765 kV. mertebelerine ulaşılmıştır. Elektrik enerjisi gereksiniminin hızla artışı, daha yüksek gerilim kademelerinin (1000 -1500 kV gibi) incelenmesine yol açmıştır. Ancak bu kadar yüksek gerilimli hava hatlarının yapılmasında çeşitli güçlükler ortaya çıkmaktadır: Bu hatlarda kullanılacak taşıyıcı direklerin boyutları ve dolayısıyla işgal ettikleri alan büyür, gerekli direk açıklıklarının korunmasında güçlükler çıkar, ayrıca radyo ve televizyon yayınlarını etkileyen elektriksel bozucular oluşur. Öte yandan, yüksek gerilim hava hatlarında iletilen gücün %10-20'si iletken direnci nedeniyle ısı şeklinde kaybolmaktadır ve dolayısıyla iletilen güç büyüdükçe bu kayıp güç de büyüyecektir. Hava hatlarının kullanılmasının mümkün olmadığı yerlerde yeraltı yüksek-gerilim kablolarının kullanılması düşünülebilir, fakat yeraltı kablolarının tesisinin pahalıya malolması (hafriyat masrafları nedeniyle) ve iletkenin direnci nedeniyle oluşan ısıнын yayılması gibi sorunlar sözkonusudur.

Elektrik enerjisi iletiminde üstüniletkenlerin kullanılması durumunda, iletken direnci nedeniyle oluşan kayıplar çok küçük bir değere ya da doğru akım kullanılırsa sıfıra düşürülebilecek, böylece elektrik şirketleri ve belki tüketiciler de büyük tasarruf yapabileceklerdir [1], [20]. Üstüniletken enerji iletim hatları hem alternatif akım ve hemde doğru akım için önerilmiştir [2], [20]. Bir alternatif akım üstüniletken iletim hattında oluşacak kayıplar üç grupta toplanabilir:

- Alternatif akıma bağlı kayıplar (üstüniletken içindeki akı hareketi nedeniyle oluşur)
- Gerilime bağlı kayıplar (kablo yalıtkanının dielektrik özelliklerine dayanır)
- Soğutucunun çalışması için gerekli enerji

Bu kayıpların hepsi de hattın uzunluğuna bağlıdır. Doğru akım üstüniletken iletim hattında ise alternatif akıma ve gerilime bağlı kayıplar sözkonusu değildir. Ancak, burada da hattın her iki ucundaki evirici/çevirici istasyonların getireceği ilâve masraflar ve verimsizlik sözkonusudur. Bu masraflar ve kayıplar hattın uzunluğuna bağlı olmadığından, doğru akım üstüniletken iletim hatları ancak çok uzun mesafeler için uygun olabilir [20].

Üstüniletkenlerin elektrik enerjisi iletiminde kullanılması açısından en büyük sorun, bilinen ilk üstüniletkenlerin akım taşıma kapasitelerinin enerji iletiminde gereken kapasitenin çok altında olmasıdır (yaklaşık 1 A/mm^2). Üstüniletken seramiklerin geliştirilmesi ile daha yüksek akım yoğunlukları elde edilmektedir, fakat seramiklerin kırılkan olması sorun yaratmaktadır. Bununla beraber, Toshiba firması Mart 1987'de ilk üstüniletken kabloyu ürettiğini duyurdu. Bu kabloda Y-Ba-Cu-O bileşiminde olan bir üstüniletken kullanılmış olup, kritik sıcaklığı 94°K idi [6].

Elektrik enerjisi iletiminde üstüniletkenlerin diğer bir uygulama alanı transformatörlerdir. Ancak, alışılmış gelmiş transformatörlerin verimlerinin zaten yüksek olması ve alternatif akım kullanılıyor olması (bu durumda üstüniletken de kayıplar sözkonusudur) üstüniletkenli transformatörlerin önündeki engellerdir. 1987'de düşük sıcaklıklı üstüniletken bir malzeme ile 80 kVA'lık bir transformatör imal edilmiş ve denenmiştir. Yapılan incelemeler sonucu, ancak 1 MVA'dan büyük güçler için üstüniletkenli transformatörün daha verimli olduğu anlaşılmıştır [20].

Sonuç olarak, üstüniletkenliğin enerji üretimi ve iletiminde kullanılmasının büyük yarar sağlayacağı, ancak bunun için hâlâ çözülmesi gereken birçok problemler olduğu görülmektedir [4], [6], [7].

Yukarıda saydığımız belli başlı uygulama alanlarının yanısıra, üstüniletken elektromıknatısların kullanıldığı maglev: manyetik olarak havlandırılan trenler, magship: manyetik olarak ilerleyen gemiler ve elektrikli

arabalar gibi henüz deneme aşamasında olan uygulamalar da vardır. Bunların güncel hayata sokulması ulaşım sektörünün petrole bağımlılığını büyük ölçüde azaltacaktır [7], [8], [9]. Füzyon enerjisi generatörleri, dev parçacık ivmelendiricileri, üstüniletkenlikle mağnetik enerji depolaması (SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage) uygulamaları da geliştirilmektedir [6], [7], [10], [2], [20]. Ayrıca, üstüniletkenlerin üstüniletken olan ve olmayan durumlar arasında hızla anahtarlama yapabilme özellikleri nedeniyle, güç elektroniği, güç anahtarlama, akım sınırlandırıcılar gibi potansiyel uygulama alanları da sözkonusudur. Bunlar henüz tasarım ve deneme aşamalarında olup, çalışmalar sürdürülmektedir [20]. Bütün bu uygulamalar, ortam sıcaklığında üstüniletken olabilen malzemeler bulunduğu, çok önemli bir bilimsel ve teknolojik devrimin gerçekleşeceğini göstermektedir.

1.3. Tezin içeriği

Üretim, iletim ve denetim açısından bütün enerji çeşitleri içinde en uygun enerjinin elektrik enerjisi olması, yaşam seviyesinin daima yükselmesine yol açmıştır. Bunun sonucu olarak, günümüzde elektrik enerjisine olan gereksinim hızla artmaktadır. Bu nedenle yapılan çalışmalar enerjinin artırılmasının yanı sıra, kaliteli ve güvenilir enerji üretimi, iletimi ve dağıtımı üzerinde toplanmıştır. Bununla beraber, enerji üretim, iletim ve dağıtım sistemlerinin giderek büyümesi ve karmaşıklaşması birtakım sorunları da birlikte getirmiştir. Bu sorunların en önemlisi sistemin kararlılığı ile ilgilidir; öyle ki, bu sorunun geçmişte olduğu gibi, gelecekte de önemini koruyacağı kaçınılmaz olarak görülmektedir.

Üstüniletkenli senkron makinaların alışlagelmiş senkron makinalara göre, anma değerlerinin daha büyük olması, verimlerinin daha yüksek olması ve buna bağlı olarak maliyetlerinin daha düşük olması gibi üstünlüklere sahip oldukları son yıllarda yapılan çalışmalarda ortaya çıkmıştır. Bu üstünlükler üstüniletkenli senkron makinanın tez konusu olarak seçilmesine

yol açmıştır. Tezde üstüniletkenli senkron makinanın kararlılık analizi yapılmıştır.

Tezin birinci bölümünde, önce kararlılık sorunu kısaca açıklanmış, üstüniletkenli senkron makinaların alışlagelmiş senkron makinalara göre üstünlükleri belirtilmiştir. Daha sonra üstüniletkenlerin uygulama alanları açıklanarak, senkron makinalardaki kullanımları hakkında bilgi verilmiş ve konu ile ilgili olarak literatürde yer alan çalışmalar açıklanmıştır.

Tezin ikinci bölümünde, üstüniletken malzemelerin önemli özellikleri açıklanmış, sınıflandırılması yapılmış, Tip-1 ve Tip-2 olarak adlandırılan türlerin özellikleri verilmiştir. Gene bu bölümde, üstüniletken malzemelerin kararlılığı açıklanmıştır.

Tezin üçüncü bölümünde, önce üstüniletkenli senkron makinaların yapısal özellikleri tanıtılmış, alışlagelmiş makinalardan olan farklılıkları verilmiştir. Sonra, tez konusu olarak üstüniletkenli makinanın kararlılık açısından analizi seçildiğinden ve bu açıdan literatür taraması yapıldığında, elektromekanik sistemlerin analizinde kullanılan $f(x, u, t)$ biçiminde bir matematiksel modeli bulunmadığı görüşünden hareketle, üstüniletkenli senkron makina çok girişli ve çok çıkışlı bir elektromekanik sistem olarak incelemeye alınmış ve matematiksel modeli elde edilmiştir. Bunun yanısıra, gene literatür taraması yapıldığında, birime indirgenmiş büyüklükler cinsinden matematiksel modelin elde edilişinde bir sistem bakış açısının olmadığı gözlenmiştir. Bu eksikliği kapatmak amacıyla, stator ve rotor için aynı temel güç kullanımı ile üstüniletkenli senkron makinanın stator ve rotor yanına ilişkin elektrik ve mekanik büyüklüklerin temel değerleri sistematik bir yolla belirlenmiş, sonra bu değerler kullanılarak ve makinanın bir trasformatör ve birbirine eşdeğer, paralel bağlı iki enerji iletim hattı üzerinden sonsuz büyük güçlü şebekeye bağlı olduğu varsayılarak $f(x, u, t)$ biçimindeki matematiksel modeli kurulmuştur. Bu bölümün sonraki ayrıntılarında, yukarıda belirtilen görüşlerden hareketle, çift rotor ekranına

sahip üstüniletkenli senkron makinanın birime indirgenmiş sistemde durum uzayı modeli kurulmuş, sonra da istenirse tek bir model ile ekran ilâvesini mümkün kılan düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devrenin kullanımıyla çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makinanın gene $f(x, u, t)$ biçiminde matematiksel modeli kurulmuştur.

Tezin dördüncü bölümünde, üçüncü bölümde elde edilmiş olan matematiksel modeller kullanılarak, üstüniletkenli senkron makinanın sayısal simülasyonu yapılmıştır. Bu amaçla, her bir model için Fortran IV dilinde yazılmış bilgisayar programları hazırlanmıştır. Simülasyon işlemi önce aynı güçte seçilen alışlagelmiş senkron makina için yapılmıştır. Böylece kararlılık açısından üstüniletkenli senkron makinayı alışlagelmiş senkron makina ile karşılaştırma olanağı elde edilmiştir.

Tezin son bölümünde, simülasyon sonuçlarının değerlendirilmesi yapılmış ve konu ile ilgili olarak yapılabilecekler verilmiştir.

BÖLÜM 2

ÜSTÜNİLETKENLİK VE ÜSTÜNİLETKENLER

Üstüniletkenliğin senkron makinalarda kullanılışını ve üstüniletken senkron makinaların gerek yapısal ve gerekse elektriksel özelliklerini incelemeden önce, üstüniletkenlik ve üstüniletken malzemelerin özellikleri ve sınıflandırılması gerekir. Bu nedenle, tezin bu bölümünde üstüniletkenlik ve üstüniletkenlerin özellikleri geniş olarak incelenecektir.

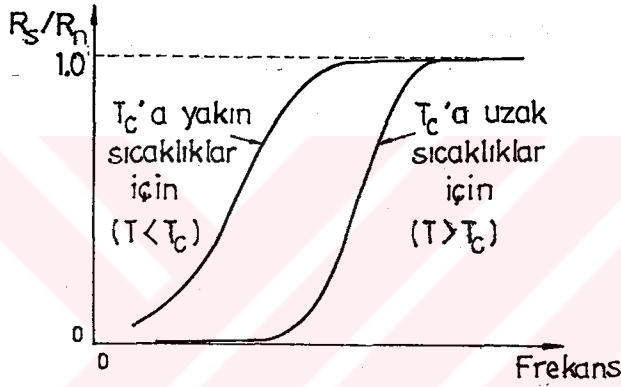
2.1. Üstüniletkenlerin Temel Özellikleri ve Sınıflandırılması

Üstüniletkenlerin en belirleyici özellikleri T_c ile gösterilen kritik sıcaklığın altındaki sıcaklıklarda, doğru akımdaki elektriksel dirençlerin sıfır olması ve diamağnetizma göstermeleri, başka bir deyişle mağnetik alanı dışlamalarıdır [4]...[8], [29], [30].

Kritik sıcaklık, hiç bir dış mağnetik alan yok iken malzemenin üstüniletkenlik durumuna geçtiği sıcaklıktır. Bu, karakteristik bir değer olup, incelenen numunenin şeklinden ve boyutlarından bağımsızdır. Genel olarak, metalik üstüniletkenlerin kritik sıcaklık değerleri üstüniletken alaşım ve bileşiklerin kritik sıcaklık değerlerine göre daha düşüktür. Bunlar “düşük sıcaklık üstüniletkenleri (Low Temperature Superconductors :LTSC)” olarak bilinirler. Metalik üstüniletkenlere katkı maddelerinin eklenmesi kritik sıcaklık değerine etki eden önemli bir faktördür. Bu etki, sözkonusu olan katkı maddesinin mağnetik olup olmamasına ve içerdği taşıyıcı yoğunluğuna bağlı olarak değişir [29]. Sıvı azot sıcaklığında üstüniletken hale geçen metal oksitler gibi malzemeler de “yüksek sıcaklık üstüniletkenleri (High Temperature Superconductors: HTSC)” olarak bilinirler. Bu gruba giren

Üstüniletkenlerin düşük sıcaklık üstüniletkenlerine 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 [20].

Yukarıda da belirtildiği gibi, kritik sıcaklığın altındaki sıcaklıklarda, ancak doğru akımdaki direnç aniden sıfıra düşer. Alternatif akımda ise, normal durumdakine göre çok küçük olmakla beraber, bir direnç söz konusudur. Bu direncin değeri, uygulanan alternatif akımın frekansına ve numunenin sıcaklığına bağlıdır (Şekil 2.1.).



Şekil 2.1. R_s/R_n (Üstüniletkenlik durumu direnci/normal durum direnci) oranının frekansa göre değişimi.

Şekilden de görüldüğü gibi, yeterince yüksek frekanslarda üstüniletkenlik durumundaki direnç normal durumdaki dirence eşit olmaktadır.

Üstüniletkenlerin diğer bir önemli özelliği diamağnetizma göstermeleridir. Diamağnetik bir cisme düzgün olmayan bir manyetik alan uygulandığında, bu manyetik alanda cisme etki eden kuvvetler "endüklenen mıknatıslama akımları" ile gösterilebilir. Mıknatıslama akımı çizgileri daima kapalı olup, bu, mıknatıslama akımlarının cismin içine ya da dışına bir elektrik yükü getirmediklerini gösterir. Mıknatıslama akımlarının en önemli

özelliklerinden biri “endüklenen mağnetik alan” olarak bilinen bir mağnetik alan üretmeleridir. Bu durumda, toplam mağnetik akı,

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

olarak ifade edilebilir; burada Φ_{uyg} uygulanan mağnetik alanın akısı ve Φ_{end} endüklenen mağnetik alanın akısıdır. Endüklenen mağnetik alanın etkisini gösteren en iyi deney Arkadiev’in yüzen mıknatıs deneyidir. Bunun için üstüniletken malzemedan yapılmış, ancak normal durumda bulunan bir çanağın dibine bir çubuk mıknatıs konur. Çanak üstüniletken hale getirilince, endüklenen mağnetik alan mıknatısa bir itici kuvvet uygular. Sonuç olarak, mıknatıs, üstüniletken çanağın uyguladığı kuvvet mıknatısın ağırlığı ile dengeleninceye kadar yükselir ve görünür hiç bir destek olmaksızın o yükseklikte asılı kalır. Üstüniletkenin direnci sıfır olduğu için, endüklenen mıknatıslama akımları sönmeyip, sürekli akarlar ve dolayısıyla diş mağnetik alan uygulandığı müddetçe mıknatıs havada asılı kalacaktır. Bu deney, bir malzemenin üstüniletken 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 hemen hemen tümü numuneden çıkarılır, yani mağnetik alan cisimden dışlanmış olur. Bu üstüniletkenlik 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. Üstüniletkenlik durumunda akı çizgilerinin numunenin içine sızabildiği bu mesafeye “sızma derinliği” denir [4], [29]. Bu mesafe numune içinde mağnetik akı yoğunluğunun sıfıra düştüğu derinlik olup, ilk defa London Kardeşler tarafından tanımlandığı için

London sızma derinliği olarak bilinir ve λ_L ile gösterilir. Sızma derinliği numunenin boyutlarına yada şekline bağlı olmayıp, sadece sıcaklığa ve numunenin yapıldığı malzemeye bağlıdır. Sızma derinliğinin sıcaklığa bağımlılığı bütün malzemeler için aşağı yukarı aynıdır ve

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

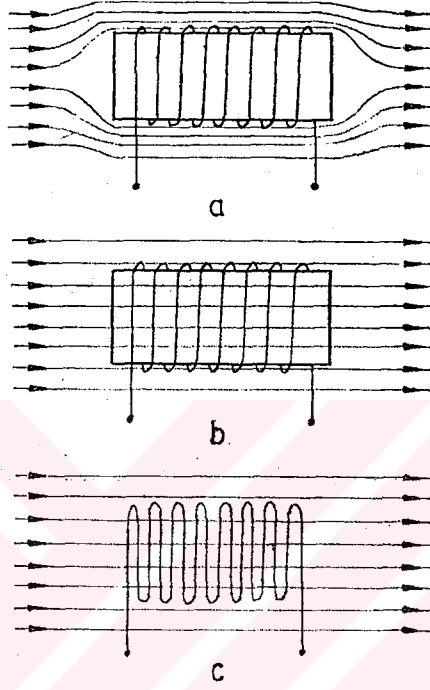
bağıntısı ile verilir; burada λ_o mutlak sıfır sıcaklığındaki sızma derinliği (10^{-5} mm. mertebesindedir) ve T_c malzemeye ilişkin kritik sıcaklık değeridir. Bu bağıntı, sızma derinliğinin sıcaklıkla arttığını ve $T=T_c$ yani kritik sıcaklık için sonsuza gittiğini göstermektedir.

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 üstüniletkenlik durumunda manyetik alanın hemen hemen tamamen dışlanması ilk olarak 1933 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 manyetik alan uygulandığında üç olası durum söz konusudur ve bu üç durum için akı çizgilerinin dağılımı Şekil 2.2’de gösterilmiştir.

Meissner etkisi nedeniyle, büyük numunelerin içinde manyetik akı yoğunluğu sabittir ve sıfıra eşittir. Numunenin dışındaki manyetik akı yoğunluğu ise, numunenin şekline göre değerler alır [29].

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

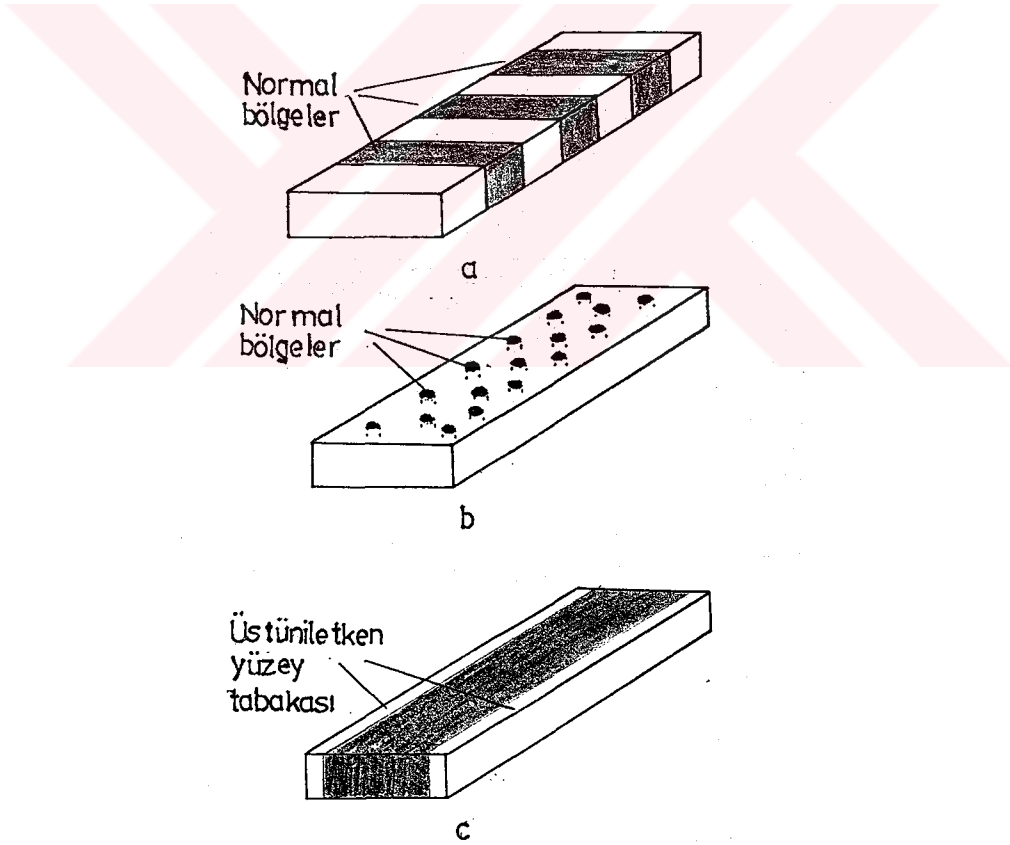


Şekil 2.2. Meissner etkisinin deneysel olarak gözlenmesi
a) Silindir üstüniletkenlik durumunda iken,
b) Silindir normal durumda iken,
c) Silindirin aniden kaldırılması halinde magnetik alan çizgilerinin dağılımı

Bir dış magnetik alan uygulanması durumunda, uygulanan alanın belirli değerleri için numunenin bazı kısımlarının normal, bazı kısımlarının ise üstüniletken olması olasıdır; yani numune normal bölgelere ve üstüniletken bölgelere ayrılır [4]. Bu olayın gerçekleştiği üç olası durum vardır: Ara durum, karma durum ve yüzey üstüniletkenliği. Uygulanan magnetik 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 üstüniletkenliği durumunda ise, üstüniletkenlik durumunda olan ince bir yüzey tabakası dışında numune tamamen normaldir. Şekil 2.3'de sözü edilen üç durum için normal bölgelerin ve üstüniletken bölgelerin düzenlenişi görülmektedir.

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, üstüniletken malzemeler Tip-1 üstüniletkenler ve Tip-2 üstüniletkenler olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır [4], [5], [29], [30]. Tip-1 üstüniletkenler ara durum gösteren malzemeler olup, kurşun, civa gibi metallerdir. Tip-2 üstüniletkenler ise karma durum gösteren malzemeler olup, daha çok üstüniletken alaşımlar ve bileşikler bu gruba girerler.



Şekil 2.3. Bir üstüniletken numunenin üstüniletken bölgelere ve normal bölgelere bölündüğü üç farklı durum:
a) Ara durum
b) Karma durum
c) Yüzey üstüniletkenliği

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

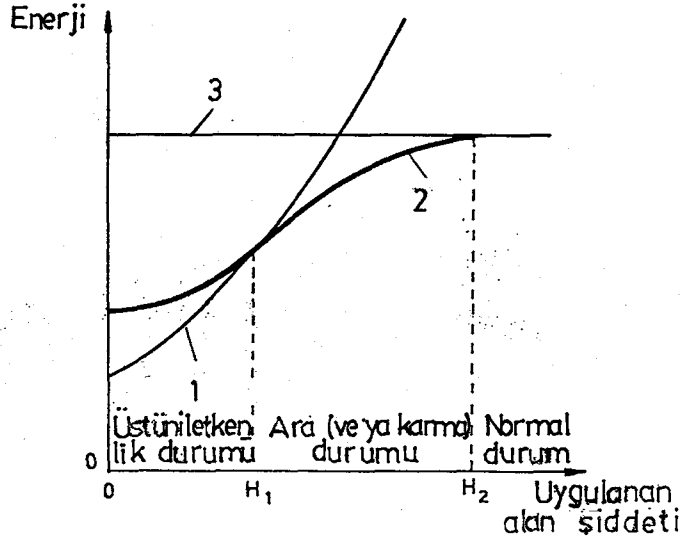
Tip-1 ve Tip-2 üstüniletkenler arasındaki temel fark, ara ya da karma durumda ortaya çıkan sınır enerjilerindedir [25]. Mekanikten bilindiği üzere, herhangi bir mekanik sistem mekaniksel dengede olduğu zaman, enerjisinin en düşük değerine sahiptir. Bu teorem ısı dengede olan bir sistem için genelleştirildiğinde, 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 manyetik alanın varlığında ve 0°K sıcaklıkta, bir üstüniletken numunenin içinde bulunabileceği üç durumun enerjilerinin uygulanan manyetik alanın şiddetine bağlı olarak değişimi Şekil 2.4'de gösterilmiştir.

Uygulanan manyetik alanın şiddeti değiştirildikçe, numunenin yukarıda açıklanan teoreme uygun olarak bir durumdan diğerine geçtiği şekilden açıkça görülmektedir [5], [26].

Normal durumda, toplam enerji uygulanan manyetik alan şiddetine bağlı olmayıp,

$$E_{n_{\text{Top}}} = V \cdot E_n \quad (2.3)$$

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



Şekil 2.4. Üstüniletkenlik durumu, ara (veya karma) durum ve normal durum enerjilerinin uygulanan alan şiddetine göre değişimi.

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

Diğer taraftan, üstüniletkenlik durumunda, toplam enerjiye magnetik katılım söz konusu olur. Bu katılım,

$$E_{s_{Top}} = V(E_s + E_{s,mağ}) \quad (2.4)$$

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

Ara (veya karma) durumda ise, numune normal bölgelere ve üstüniletken bölgelere ayrılmış olduğu için, toplam enerjiye üç katılım söz konusu olur. Bunlar; normal bölge enerjisi, üstüniletken bölge enerjisi, normal ve üstüniletken bölgeler arasındaki sınırdan kaynaklanan sınır enerjisidir. Normal bölgelerdeki ve üstüniletken 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 negatiif 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 mağnetik ve mağnetik olmayan enerji yoğunluklarının şekil 2.5’de verilen değişimlerini inceleyerek açıklanabilir. Burada λ_L London sızma derinliği olup, mağnetik enerji yoğunluğunun sıfırdan üstüniletkenlik durumu değerine yükseldiği mesafeyi göstermektedir. ξ ise mağnetik olmayan enerji yoğunluğunun normal durum değerinden üstüniletkenlik 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 üstüniletken olur, eğer $\lambda_L \gg \xi$ ise, sınır enerjisi negatif dolayısıyla malzeme Tip-2

üstüniletken olur. Buradan hareketle, Tip-1 ve Tip-2 üstüniletkenler arasındaki kesin ayırım:

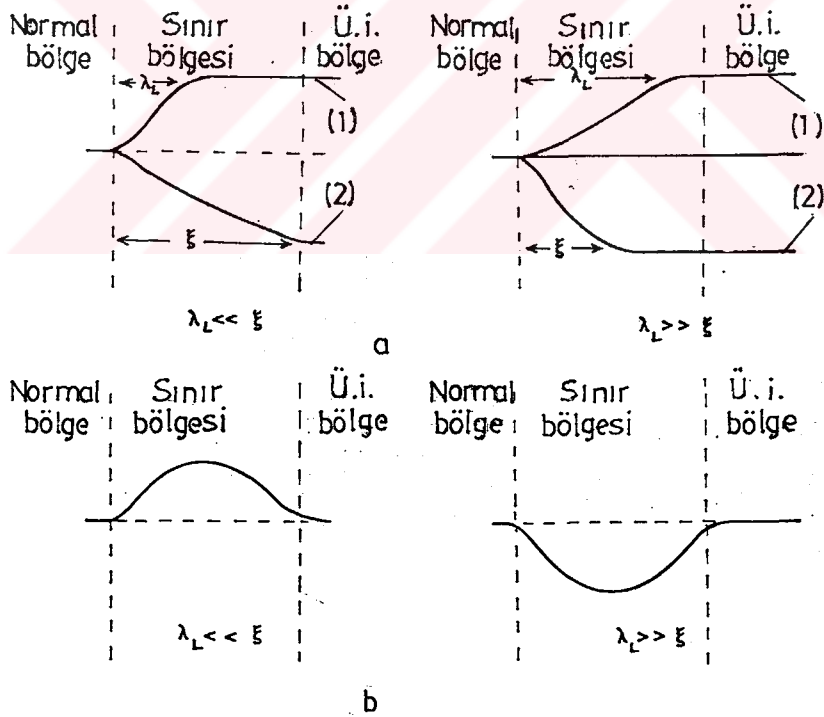
$$\lambda_L / \xi < 0.71 \text{ ise Tip-1 üstüniletken}$$

(2.5)

$$\lambda_L / \xi > 0.71 \text{ ise Tip-2 üstüniletken}$$

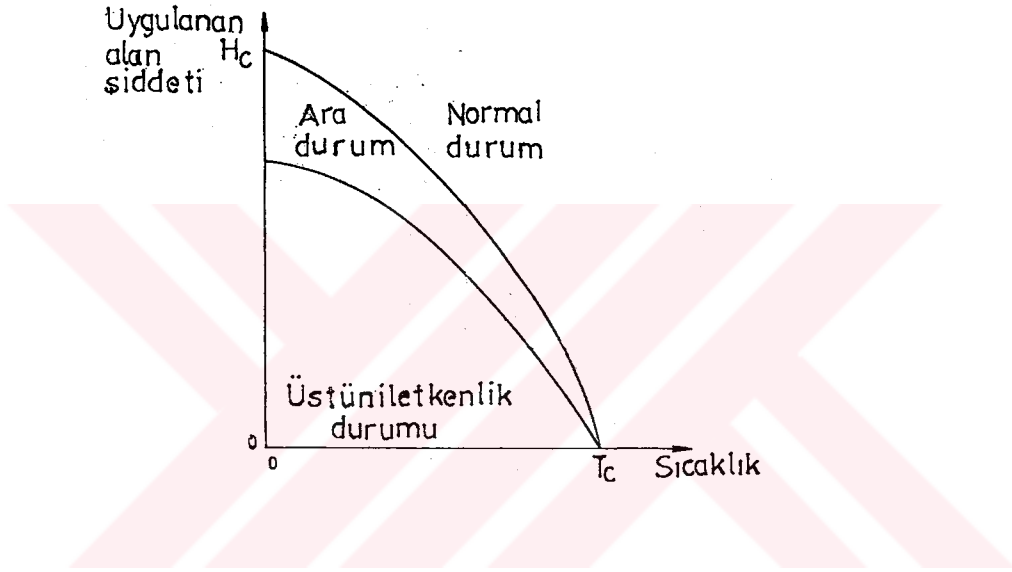
olarak verilmiştir. Saf metallerde $\xi \approx 10^{-6} \text{m.}$ ve $\lambda_L \approx 10^{-8} \text{m.}$ dir ve bunlar Tip-1 sınıfına girerler. Alaşımlarda ve bileşiklerde ξ azalır ve bunlar Tip-2 sınıfına girerler.

Yüzey üstüniletkenliğinin oluşması için koşul $\lambda_L / \xi \gg 0,42$ olmasıdır. Buna göre, tüm Tip-2 malzemelerde ve Tip-1 malzemelerin ancak $0.42 < \lambda_L / \xi < 0.71$ olanlarında bu özellik görülür.



2.2. Tip-1 Üstüniletkenlerin Özellikleri

Tip-1 malzemeden yapılmış bir numune, uygulanan alan şiddetinin değerine ve sıcaklığına bağlı olarak ya normal durumda ya üstüniletkenlik durumunda veya ara durumda bulunabilir. Bunun grafik olarak ifadesi Şekil 2.6'da görülmektedir [29].



Şekil 2.6. Tip-1 numunenin içinde bulunduğu durumun uygulanan alan şiddeti ve sıcaklığa göre değişimi.

Şekil 2.6'dan elde edilebilecek önemli bir sonuç, sıfır manyetik alanda ara durum olmadığı ve üstüniletkenlik durumu ile normal durum arasında ani ve doğrudan bir geçiş olduğudur.

Şekil 2.6'da 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

numunenin şekline bağlı olmayıp, sıcaklığa bağlıdır. Bir çok malzeme için bu bağıntı ;

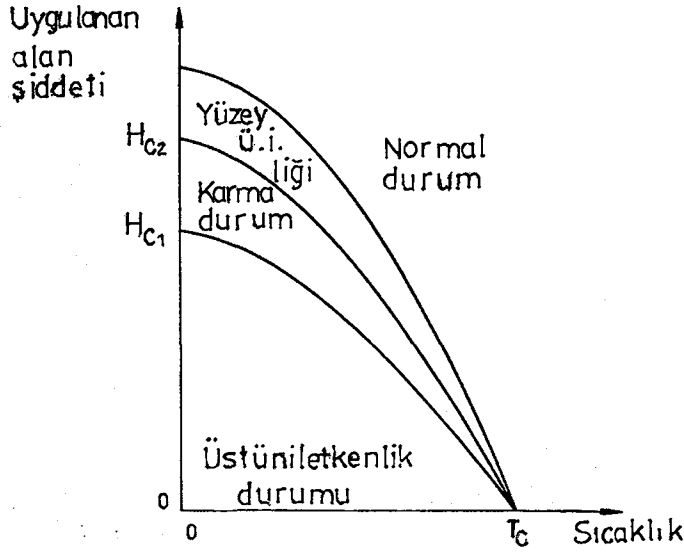
$$H_c(T) = H_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (2.6)$$

olarak yazılır. Burada, T_c malzemenin kritik sıcaklık değeri ve $H_c(0)$ 0°K'deki kritik alan şiddeti değeridir [4], [29]. Kritik alan şiddeti iki sebepten dolayı önemlidir:

- I. Tip-1 numune, yüzeyindeki herhangi bir noktada alan şiddeti kritik alan şiddetine eşit olur olmaz, üstüniletkenlik durumundan ara duruma geçer. Bu geçiş esnasında uygulanan alan şiddetinin değeri numunenin şekline bağlıdır.
- II. Ara durum ile normal durum arasındaki geçiş, uygulanan alan şiddeti kritik alan şiddetine eşit olduğunda gerçekleşir.

2.3. Tip-2 Üstüniletkenlerin Özellikleri

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 2.7) [4], [29], [30]: H_{c1} "alt kritik manyetik alan şiddeti" üstüniletkenlik durumundan karma duruma geçişin ve H_{c2} "üst kritik manyetik alan şiddeti" ise karma durumdan yüzey üstüniletkenliğine ya da normal duruma geçişin gerçekleştiği uygulanan alan şiddeti değeridir.



Şekil 2.7. Tip-2 numunenin içinde bulunduğu durumun uygulanan alan şiddeti ve sıcaklığa göre değişimi.

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 (T_c) [K]	Kritik alan şid. [Wb/m ²]
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 durumda normal bölgeler uygulanan manyetik alana paralel olarak sıralanmış, çok ince flamanlar şeklinde bulunurlar. Malzemenin geri kalan kısmı üstüniletkendir. Normal flamanların her biri, numune içinde, sıfır olmayan bir manyetik akı yoğunluğu yaratan akı çizgileri taşırlar. Bu akı yoğunluğunun küçük bir kısmı normal flamandan onu çevreleyen üstüniletken bölgeye sızma derinliği λ_L kadar bir mesafede sızabilir. Buna göre, normal flamanlar arasındaki mesafe λ_L 'den büyük olursa, her bir flamana ilişkin manyetik akı diğerinkine karışmaz ve dolayısıyla flamanlar birbirlerine etki etmezler.

Numune $H_{uyg} = H_{c1}$ 'de karma duruma girdiğinde normal flamanlar yaklaşık λ_L kadar aralıklıdır. Uygulanan alan şiddeti arttırıldıkça, flamanların kalınlıkları değil, sayısı artar. Böylece, hem toplam akı yoğunluğu artar ve hem de flamanlar arasındaki mesafe azalır. Bunun sonucu olarak, $H_{uyg} = H_{c2}$ olduğunda normal flamanlar tam hacmi doldururlar, akı yoğunluğu normal durumdaki değerine ulaşır ve numune normal duruma geçer (yüzey üstüniletkenliği göstermiyorsa).

Karma durumda ortaya çıkan normal flamanlar numuneye bir iletim akımı verilerek hareket ettirilebilirler [4]. Bu hareket iletim akımının manyetik alanı tarafından her bir flamana uygulanan kuvvetten dolayıdır ve aynı zamanda, sürekli bir akı hareketini gösterir. Eğer numune kristal yapısında bazı kusurlar ya da düzensizlikler içeriyorsa, normal flamanlar bu kusurlara ya da düzensizliklere yakalanabilirler. Bu olay “akı bağlanması” olarak adlandırılır ve alternatif akım kayıpları olarak bilinen, ısı şeklinde ortaya çıkan manyetik histerezislere yol açar [4], [6].

2.4. Yüzey Üstüniletkenliği

Yukarıda da belirtildiği gibi, yüzey üstüniletkenliği sadece üstüniletken ile yalıtkan arasındaki geçiş yüzeyinde oluşur, üstüniletken ile normal metal

arasında oluşmaz. Bu nedenle, üstüniletken malzemeyi normal metal ile kaplayarak yüzey üstüniletkenliğinin oluşması kolayca önlenabilir.

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

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

Yüzey üstüniletkenliği ilk olarak 1963'de St. James ile de Gennis tarafından teorik olarak öngörülmüştür [26]. Daha sonraları bu durumun temel özelliklerini belirlemek ve bunlardan faydalanabilmek için bir çok deneyler yapılmıştır.

2.5. Üstüniletkenlerin Kararlılaştırılması

Üstüniletken bir numuneye dış manyetik alan uygulaması durumunda, uygulanan alanın belirli değerleri için numunenin bazı kısımlarında normal iletken bölgelerin ortaya çıkabildiği yukarıda belirtilmişti. [4], [29]. Bu durum, elektriksel yalıtımda bozulmaya neden olan büyük gerilim düşümlerine yol açabilir.

Özellikle üstüniletken bobinlerde, sarımlar arasındaki yalıtım çok zayıf olduğu için, bu olay çok önemlidir. Uygulamada, akımdaki bir değişme ya da sargıların hareketi üstüniletkende normal bölgelerin oluşmasına yol açar. Bir bobindeki sarımlar büyük manyetik kuvvetlere maruz kalırlar. Böylece

mağnetik alana bağlı olarak zayıf mekanik hareket oluşabilir. Bu durum, hızlı akı hareketine eşdeğerdir.

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

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

olarak sıralanabilir [4].

Cryostatic kararlılaştırma, üstüniletkenin yüksek elektriksel iletkenliğe sahip ve üstüniletkenin normale dönmesine yol açacak aşırı ohmik kayıplara engel olmak için yeterli kesiti olan bir malzemeye gömülmesinden ibarettir. Kullanılacak malzeme yüksek ısı iletkenliğe sahip olmalıdır. Böylece kararsızlığın ortaya çıkardığı aşırı ısı enerjisinin üstüniletkenden sıvı helyum soğutucuya iletilebilmesi sağlanır. Bu gereksinimleri karşılamak için, saflık derecesi yüksek olan bakır kullanılır. Bunun yanında, bakırın kesiti ısı iletimi engellemeyecek şekilde seçilmelidir. Bu yöntemin sakıncası, üstüniletken hacminin yaklaşık on katı büyüklüğünde bakır hacmi gerektirmesidir. Daha büyük çap ve uygun soğutma kanalları gereksiniminin sonucu olarak, cryostatic kararlılaştırma uygulanan üstüniletkende akım yoğunluğu çok düşük olur [4].

Entalpi kararlılaştırılmasında, bakırın yukarıda sayılan sakıncalarını gidermek için, kurşun gibi daha yüksek ısıl kapasiteli bir malzeme sisteme eklenir. Böylece, büyük sıcaklık artışları önlenir ve üstüniletken için düzeltilmiş kararlılık elde edilir.

Dinamik kararlılaştırma mağnetik akının söndürölmesi ile sağlanır. Üstüniletkenin bakır ile kaplanması durumunda, üstüniletkendeki mağnetik akıda oluşacak bir değişme, bakırda sözkonusu akı değişimine karşı Foucoult akımlarının oluşmasına neden olur. Bu akımlar bakırın dirençli yapısı nedeniyle giderek küçölmele birlikte, mağnetik enerjinin serbest kalışını yavaşlatabilirler; öyle ki, ısı üretildiğinden daha hızlı bir şekilde sıvı helyuma iletilir ve bunun sonucunda üstüniletkenin normal duruma dönmesi önlenir.

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

Kararlılaştırılmış üstüniletkenler, uygulamada daha iyi sonuçlar elde edilmesi açısından tercih edilir.

BÖLÜM 3

ÜSTÜNİLETKENLİ SENKRON MAKİNALAR

Bu bölümde, önce üstüniletkenli senkron makinanın yapısal özellikleri incelenecektir. Daha sonra, kararlılık analizinde kullanılmak üzere, üstüniletkenli senkron makina için matematiksel modeller oluşturulacaktır.

3.1. Üstüniletkenli Senkron Makinanın Yapısı ve Özellikleri

Üstüniletkenli senkron makinalar üzerine yapılan çalışmalarda, esas amaç, tamamen üstüniletken senkron makinayı gerçekleştirmektir. Bununla beraber, bugün için, üstüniletkenli senkron makina için en iyi düzenleme, normal malzemeden yapılmış stator sargıları ve bunların içinde dönen üstüniletken uyarma sargıları biçimindedir [1], [14], [15], [19].

Üstüniletkenli senkron makinanın rotorundaki akım yoğunluğu oldukça büyüktür. Bunun anlamı rotordaki üstüniletken sargının büyük bir ampersarım meydana getirmesidir. Bunun yanısıra üstüniletken sargı büyük bir manyetik alan oluşturur. Sonuç olarak, üstüniletkenli senkron makinada hem rotor ve hem de statorda manyetik malzeme olarak demir kullanılmamaktadır. [1], [2], [4], [15], [19]. Bu yapının sağladığı iki önemli özellik vardır: Hem daha yüksek akı yoğunluğu ve hem de daha yüksek akım yoğunluğu elde edilir. Bu iki özelliğin sonucu olarak, birim ağırlık başına üretilen güç artar. Bunun yanısıra, üstüniletken uyarma sargısında ohmik kayıplar ortadan kalktığı için, daha yüksek verimlere ulaşabilir. Bu üstünlükler ile beraber, rotor ve statorda demir kullanılmamasının yarattığı bazı sorunlar da vardır:

Rotorda demir kullanılmaması, rotor yapısının alışlagelmiş senkron makinadakinden farklı olmasına yol açar. Genel olarak, üstüniletkenli senkron makinada, rotor içi boş silindirik yapıya sahiptir ve uyarma sargıları bu silindirin üzerine sarılmıştır. Burada önemli olan, rotorun hem dönme ile oluşacak merkezkaç kuvvetlere (kendisinin ve sargının ağırlığının yanısıra) ve hem de üstüniletkenlik için gerekli olan düşük sıcaklıklara dayanmasının gerekliliğidir. Ayrıca, rotor mili de hem düşük ısı iletkenlikli olacak ve hem de rotorun ağırlığına dayanabilecek ve makina momentini iletebilecek şekilde tasarlanmalıdır. Bu gereksinimleri karşılamak amacıyla, içi boş silindirik rotor için çeşitli tasarımlar geliştirilmiştir [1]. Uyarma sargısının oluksuz, içi boş silindirik rotor üzerine tespit edilmesi için gereken destekleyici yapı için de çeşitli sistemler geliştirilmiştir [1], [14], [18]. Uyarma sargısı için kullanılacak destekleyici yapı, kullanılan üstüniletkenin kararlılığına, soğutma sistemine ve montaj yöntemlerine bağlıdır. Dolayısıyla, üstüniletken uyarma sargısının soğutulması önemli bir sorundur. Üstüniletken uyarma sargısında oluşan kayıplar, toplam kayıpların sadece küçük bir yüzdesidir. Ancak, üstüniletkenliğin kalıcı olması için, uyarma sargısının sürekli olarak sıvı helyum ile beslenmesi gerekir. Durağan soğutucu ile dönen He sistemine He beslemesi arasındaki uyumun sağlanması bir sorun olmuştur. Ayrıca, sistem için en uygun soğutma devresinin de oluşturulması gerekir. Yapılan çalışmalar sonucu, en uygun soğutucu sisteminin boş rotor silindirinin içine yerleştirilen farklı sıcaklıklardaki ve farklı safhalardaki He akışlarına sahip bir soğutucu olduğu anlaşılmıştır. Önemli diğer bir nokta da, soğutma işleminin minimum kayıplar ve minimum He kaçağı ile gerçekleştirilmesidir. Bütün bu gereksinimleri karşılamak için, çeşitli dönen soğutma sistemleri geliştirilmiştir [1], [2], [15].

Üstüniletkenli senkron makinanın statorunda demir kullanılmaması sonucu, stator sargıları dönen uyarma sargısının bütün akısına maruz kalır. Oysa ki, alışlagelmiş senkron makinalarda akının çoğu demirden geçer. Bu durumda, ince bükülmüş iletkenler kullanılarak, stator sargısı iletkenlerindeki Eddy akımı ve sirkülasyon akımı kayıplarının azaltılması gerekir. Bunun

yanısıra, statorda demir kullanılmadığı için artık bir hava-aralığı sargısı (air-gap winding) olan stator sargısında, hem fazlar arasında ve hem de toprağa (gövdeye) göre ince yalıtım gerekir. Böylece, ince bükülmüş iletkenler nedeniyle azalan sargı uzay faktörü, gövde yalıtımının azalması ile arttırılır. Sargı faktörünün artması ise çıkış gücüne olumlu yönde etki eder. Statorda demir kullanılmamasının diğer bir sonucu, mekanik dayanımı yüksek bir yalıtım sistemi gereksinimidir. Bunun nedeni, alışlagelmiş senkron makinalarda endüvi reaksiyonu momentinin çoğu stator dişlerinde tutulduğu halde, üstüniletkenli makinada stator sargısının kendisinde toplanmasıdır. Sargıda toplanan bu momentlerin ve dolayısıyla kuvvetlerin elektriksel yalıtımın içinde yayılarak gövdeye geçmesi gerekir. İşte bu sebeple, sargının ve elektriksel yalıtımın bu kuvvetlere ve sonuçta oluşan titreşimlere uzun yıllar mekaniksel sorunlar oluşturmada dayanması gerekir. Özellikle, büyük güçlü makinalarda bu önemli bir sorundur [1], [3], [14], [15].

Üstüniletkenli senkron makinanın statorunda demir kullanılmaması, aynı zamanda, üstüniletken uyarma sargısı tarafından üretilen yüksek manyetik alanların makina içinde sınırlanamaması anlamına gelir. Bunun yanısıra, makinanın dışında bulunan manyetik cisimlerin rotor üzerine, kararsızlığa sebep olabilecek titreşimli kuvvetler uygulaması da söz konusudur. Bu sakıncaları ortadan kaldırmak için statorun bir çevresel zırh ile kuşatılması gerekir. Üstüniletkenli senkron makinada, tabakalı demir zırh ve bakır ya da alüminyum gibi yüksek iletkenlikli malzemeden yapılmış Foucoult akımı zırhı (iletken zırhı) olmak üzere iki çeşit çevresel zırh kullanılması mümkündür. Tabakalı demir zırh büyük ve pahalıdır, fakat makinanın manyetik akı yolu relüktansını azaltır, uyarma ve stator sargıları arasındaki kuplajı iyileştirir ve minimum aktif rotor uzunluğuna izin verir. Böylece, belirli bir uyarma sargısı manyetomotor kuvveti için faydalı akı artar ve Eddy kayıpları azalır. İletken Foucoult akımı zırhı kullanılması durumunda ise, uyarma ve stator sargıları arasındaki kuplaj daha zayıf olduğu için daha büyük aktif rotor uzunluğu ve kayıpların daha küçük olması için daha büyük çap gerekir. Böylece, daha büyük hacim söz konusu olur ve

bu da verimi olumsuz yönde etkiler. İletken Foucoult akımı ekranının bu sakıncaları nedeniyle, üstüniletkenli senkron makinada çevresel zırh olarak tabakalı demir zırh tercih edilir [1], [4], [15], [29].

Sonuç olarak, üstüniletkenli senkron makinada manyetik malzeme (demir) sadece akı kütlesi taşımayan ve kalınlığı az olan, tabakalı çevresel zırh olarak kullanılmaktadır [19], [31], [32], [33].

Demir çevresel zırh kullanılmasına rağmen, rotor ve stator çekirdekleri manyetik olmayan malzemeden yapıldıkları için, üstüniletkenli senkron makina esas olarak hava çekirdekli (air-cored) makinadır. Diğer bir deyişle, hem rotor ve hem de stator oluksuz yapıya sahiptir ve hem üstüniletken uyarma sargısı ve hem de stator sargısı hava aralığı sargılarıdır. Bu sargıların tespit edilmesi için muhtelif yöntemler geliştirilmiştir [14], [18].

Üstüniletkenli senkron makinanın hava-çekirdekli yapısı ile birlikte ortaya çıkan diğer bir özellik; üstüniletken uyarma sargısı ile stator sargısı arasına, bir veya daha çok sayıda olabilen ve rotor ile eş eksenli silindirik ekran (screen) yerleştirilmesi gerekliliğidir. Bu ekranın temel işlevleri; üstüniletken uyarma sargısını stator sargısı tarafından üretilen geçici alternatif alanlardan korumak, bir bozucu sonrasında senkron hız civarında oluşan rotor salınımlarını söndürmek, uyarma ve stator sargıları arasında minimum akı kaçağı sağlamak ve soğuk uyarma sargısı için iyi bir ısı yalıtım sağlamaktır [1], [4], [14], [15], [22], [23], [31], [34]. Sistemdeki yük değişimleri, dengesiz yüklenmeler ve geçici olaylar (kısa devre gibi) stator sargılarında hızla değişen manyetik alanlar oluşmasına yol açar. Bu manyetik alanlar üstüniletken uyarma sargısında kabul edilemeyecek kadar büyük a.a. kayıpları oluştururlar. Bunu önlemek için, üstüniletken uyarma sargısının sözkonusu alanlardan korunması gerekir. Yine, yukarıda saydığımız olaylar sonucu oluşan rotor salınımlarının söndürülmesi gerekir. Bu nedenle, ekranın aynı zamanda bir amortisör sargısı gibi davranması ve bu esnada maruz kalacağı şiddetli mekanik yüklere dayanması gerekir.

Rotor ekranının diğer bir işlevi iyi bir ısı yalıtım sağlamaktır. Rotora sıcak kısımlardan ısı iletimini önlemek ve dolayısıyla daha iyi bir ısı yalıtım sağlamak için, rotor bir yüksek vakum hücresi içinde asılı konumdadır ve rotor ekranının destek yapısı aynı zamanda vakum hücresi görevi yapar [1], [2], [35]. Rotor ekranının, bu işlevlerin yanısıra, geçici olaylar esnasında akıyı tutması gerekir. Böylece, makina iç gerilimi korunur ve geçici kararlılık arttırılır.

Yukarıda açıklanan işlevlerin birbiriyle çelişen özellikler gerektirmeleri nedeniyle, tek bir rotor ekranı yeterli olmamaktadır. Yeterince iyi sönüm sağlanması için, ekran dağılma zaman sabitinin makinanın elektromekanik salınımlarının periyodu ile aynı mertebede olması gerekir. Başka bir deyişle, iyi sönüm için ekran dağılma zaman sabiti kısa olmalıdır. Bunu sağlamak için, ekran direncinin büyütülmesi gerekir, ki bu da elektromagnetik ekranlamayı (magnetik alanların söndürülmesini) bozar. Aynı zamanda, söz konusu değişken magnetik alanlar ekran üzerinde büyük elektriksel kayıplar oluştururlar. Bunun yanısıra, ekran dağılma zaman sabitinin kısa olması kaçak akının tutulması açısından da istenmez. Bir başka sorun, ekranın ortam sıcaklığında mı, yoksa düşük sıcaklıklarda mı çalışacağı konusudur. İyi sönüm sağlanması için, ekranın ortam sıcaklığında çalışması uygundur, çünkü ekranın düşük sıcaklıkta çalışması durumunda, büyük ekran direnci nedeniyle oluşan kayıpların ortadan kaldırılması sorunu ortaya çıkmaktadır. Ancak, magnetik alanların ekranlanması açısından ekranın düşük sıcaklıklarda çalışması istenir. İşte, tek rotor ekranı kullanılması durumunda ortaya çıkan bu sorunlar nedeniyle, üstüniletkenli senkron makinalarda çift rotor ekranı kullanılması düşünülmüştür [1], [3], [4], [15], [19], [23], [31], [35].

Yukarıda açıklanmış olan çelişkili gereksinimleri karşılayabilmek için, üstüniletkenli senkron makinada aşağıdaki özelliklere sahip olan iki ekran kullanılır:

I. Düşük sıcaklıklı, hafif ve dağılma zaman sabiti uzun olan iç ekran,

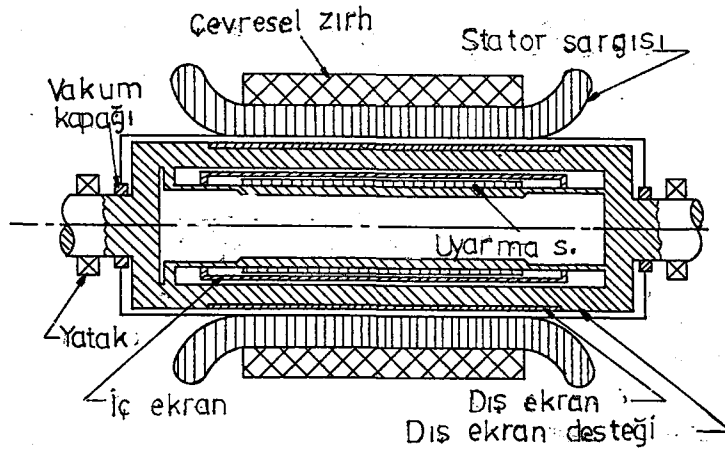
II. Ortam sıcaklığında, dayanıklı malzemeden yapılmış ve dağılma zaman sabiti kısa olan dış ekran.

İç ekran 20°K ilâ 30°K gibi düşük sıcaklıklarda çalışır ve esas görevi yük değişimleri, dengesiz yüklenmeler ve geçici olaylar esnasında oluşan değişken manyetik alanların ekranlanmasıdır. Bunun yanı sıra, uyarma sargısı için ısı yalıtım sağlamak da yine iç ekranın görevleri arasındadır. Bu nedenle iç ekrana elektromanyetik zırh, elektrotermal zırh veya “cryogenic” zırh gibi isimler de verilmektedir [1], [23], [35]. İyi ekranlama için dağılma zaman sabiti uzun seçilmiş ve etkin ısı yalıtım için de sıcaklığı düşük tutulmuştur. İç ekranın zaman sabitinin uzun olması, aynı zamanda, kaçak akının tutulması açısından da uygundur ve geçici karalılığın artırılmasına yardım eder. Bu nedenle, iç ekran için bakır ve alüminyum gibi yüksek iletkenlikli malzemeler kullanılmaktadır. Böylece, hem dağılma zaman sabitinin uzun olması ve hem de kayıpların azaltılması sağlanmış olur.

Ortam sıcaklığında çalışan dış ekranın esas görevi, yukarıda bahsedilmiş olan olaylar sonucu oluşan rotor salınımlarının söndürülmesidir. Başka bir deyişle, dış ekran bir elektromekanik amortisör olarak çalışmalıdır. Bu nedenle, dış ekran amortisör zırhı (damper shield) olarak da isimlendirilir [1], [23], [35]. Dış ekran rotor salınımlarını söndürürken, aynı zamanda, oluşan büyük mekanik yüklere karşı dayanıklı olmalı ve bu yüklerin büyük kısmını soğurmalıdır. Ortam sıcaklığında çalıştığı için, dış ekranın soğuk rotor bölümleri tarafından desteklenmesi de söz konusu değildir. Bu nedenle, dış ekranın kendisinin dayanıklı malzemeden yapılması gerekir. İyi bir çözüm olarak, dış kısmında gerçek amortisör ekranını taşıyan, paslanmaz çelik gibi yüksek dayanımlı malzemeden yapılmış çevresel silindir yapısı geliştirilmiştir [1], [35].

Üstüniletkenli senkron makinada rotor ekran(lar)ının temel işlevlerinden ekranlama uyarma akımı cevabından ve sönüm de rotor açısı cevabından hareketle incelenir [29], [30], [35], [36]. Hem ekranlama ve hem de sönüme etki eden en önemli parametreler ekran(lar)ın zaman sabit(ler)i ve yarıçap(lar)ıdır. Bununla beraber, makinanın ve onun bağlı olduğu güç sisteminin parametreleri de sönüm üzerine etki ederler. Çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makinada, iç rotor ekranının dış rotor ekranı üzerine olan etkisi çok önemlidir. İç rotor ekranının yarıçapı büyüdükçe ekranlama iyileşir, fakat sönüm kötüleşir. Tersine olarak iç rotor ekranının yarıçapı küçüldükçe ekranlama kötüleşir, fakat sönüm iyileşir. Bu sakıncaları gidermek için iki çözüm söz konusudur. Bunlardan biri iç rotor ekranının yarıçapını ve zaman sabitini uygun seçmek, diğeri ise d ve q eksenlerinde farklı zaman sabitlerine sahip olan bir iç ekran (non-uniform or heteropervious screen) tasarlamaktır [31].

Buraya kadar yapılmış olan açıklamaların ışığı altında, çift rotor ekranına sahip olan üstüniletkenli senkron makinanın basit şeması Şekil 3.1.'deki gibidir.



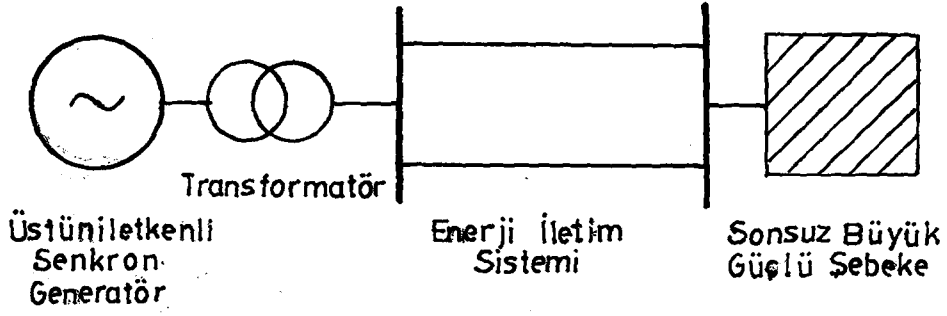
Şekil 3.1. Çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makinanın boyuna kesiti

3.2. Üstüniletkenli Senkron Makinanın Matematiksel Modeli

Giriş bölümünde de belirtildiği gibi, bu tezin konusu üstüniletkenli senkron makinaların kararlılık simülasyonudur. Burada hemen şunu açıklamakta yarar vardır: Bu ve bundan sonraki kısımlarda kararlılık daha önce ikinci bölümde kullanılan üstüniletken kararlılığından farklı bir anlamdadır; öyle ki, kararlılık, üstüniletkenli senkron makinayı içeren sistemin bir bozucu etkiye maruz kalması ve bozucu etki kaldırıldıktan sonra da başlangıçtaki çalışma koşullarına dönme yeteneği anlamında alınacaktır. Bu anlamda bakıldığında, üstüniletkenli bir senkron makinayı içeren sistemin tüm matematiksel modelinin oluşturulması gerekmektedir. Bu gereklilik ışığı altında, önce üstüniletkenli senkron makinanın değişik matematiksel modelleri verilecek, sonra da sistemin diğer öğelerine ilişkin matematiksel modeller verilecektir.

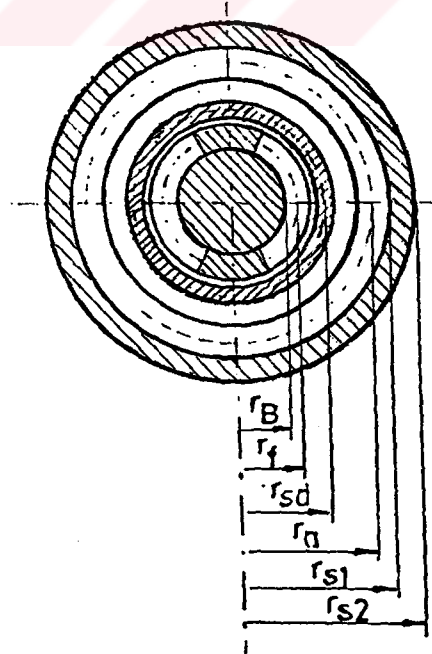
3.2.1. Tek Rotor Ekranına Sahip Üstüniletkenli Senkron Makinanın Matematiksel Modeli

Üstüniletkenli senkron makinanın hava çekirdekli yapısı ile ortaya çıkan en önemli özellik, uyarma sargısı ile stator sargısı arasına bir veya çok sayıda olabilen ve rotor ile eşeksenli silindirik ekran yerleştirilmesinin gerekliliğidir. Önceki bölümde belirtildiği gibi, üstüniletkenli senkron makinada ekranın temel işlevleri; üstüniletken uyarma sargısını stator sargısında oluşan geçici alternatif alanlardan korumak, geçici olay esnasında oluşan rotor salınımlarını söndürmek, stator ve rotor sargıları arasında minimum akı kaçağı sağlamak ve iyi bir ısı yalıtım sağlamaktır. Bu özellikleri sağlamak için, bir veya iki ekran kullanılmaktadır. Bu ayrıtta, sistemin kararlılığı açısından yapılacak analiz için gerekli olan, tek ekrana sahip üstüniletkenli senkron makinanın matematiksel modeli elde edilecektir. Matematiksel modeli oluşturulacak sistemin şematik gösterimi Şekil 3.2.'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Sonsuz büyük güçlü şebekeye bir transformatör ve paralel bağlı iki enerji iletim hattı üzerinden bağlanmış olan tek rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makinanın oluşturduğu sistem.

İncelemeye alınan tek ekrana sahip üstüniletkenli senkron makinanın enine kesiti şematik olarak Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Tek rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makinanın enine kesiti

Şekilde, r_B rotor gövdesi yarıçapını, r_f uyarma sargısı yarıçapını, r_{sd} ekran yarıçapını, r_a stator sargısı yarıçapını, r_{s1} çevresel zırhın iç yarıçapını ve r_{s2} çevresel zırhın dış yarıçapını göstermektedir. Bu şekilden de görüldüğü gibi, stator ve rotor sargıları alışlagelmiş senkron makinalara benzer bir düzenlemeye sahip ve doğru akım taşıyan uyarma sargıları rotordadır. Bu makinada, alışlagelmiş senkron makinalarda olduğu gibi tanımlanabilecek bir hava aralığı yoktur [32], [33].

Üstüniletkenli senkron makinanın matematiksel modelini oluştururken, bu makinanın alışlagelmiş senkron makinadan olan farklılıklarını da gözönüne almak gerekir. Alışlagelmiş senkron makinalarda, manyetik akı, devresini stator boyunduruğu, stator oluk dişleri, hava aralığı, rotor oluk dişleri, rotor çekirdeği rotor oluk dişleri, hava aralığı ve stator oluk dişleri üzerinden tamamlar. Bu akı faydalı akı ya da mıknatıslanma akısı olarak adlandırılırken, bir kısım akı da hava aralığı ve sargının kendisi üzerinden manyetik devresini tamamlar; bu da kaçak akı olarak adlandırılır. Üstüniletkenli senkron makinada iyi tanımlanmış bir hava aralığının bulunmaması ve hem rotor, hem de stator da demir çekirdek olmaması nedeniyle, manyetik akının ortak ve kaçak bileşenleri söz konusu değildir. Bunun yerine, fiziksel olarak anlamlı olan öz (self) ve ortak akılar söz konusu olur. [32], [33]. Bu nedenle, alışlagelmiş senkron makinada en önemli boyutlar olukların ve hava aralığının boyutları iken, üstüniletkenli senkron makinada sargıların ve diğer yüzeylerin (rotor ve stator gövdeleri ile ekranın) yarıçapları olmaktadır.

Yukarıda belirtilen ekran işlevi gözönüne alındığında, bunun alışlagelmiş senkron makinadaki amortisör sargısının işlevi ile aynı olduğunu söylenebilir. Bu nedenle, matematiksel modelde ekranın etkisini, biri d ekseninde ve diğeri q ekseninde bulunan, kısa devre edilmiş iki eşdeğer bobin ile göstermek mümkündür.

Matematiksel modelin elde edilmesinde yapılan varsayımlar;

1. Rotorun saat ibrelerinin dönüş yönüne ters yönde döndüğü,
2. Herhangi bir t anı için rotor konumunun, stator a fazı eksenini ile rotor boyuna d eksenini arasındaki θ açısı ile belirlendiği,
3. Akımlar için pozitif işaretin motor çalışma durumunda geçerli olduğu,
4. Stator faz sargılarının stator çevresi boyunca sinüsoidal olarak yayıldığı,
5. Doyma etkilerinin ihmal edildiği

şeklindedir.

Yukarıda yapılan açıklamaların ve gene yukarıda verilen varsayımların ışığı altında, üstüniletkenli senkron makinanın tek rotor ekranına sahip olması durumunda, akı-akım bağıntısı yazılırsa, eşitlik (3.1)'deki bağıntılar elde edilir. Bu eşitlikte, L_a stator faz sargısı özendüklemini, L_{ab} stator faz sargıları arasındaki ortak endüktansları, M ise rotor ile stator sargıları arasındaki ortak endüktansın maksimum değerini göstermektedir.

Bunların rotor ve stator arasındaki manyetik geçirgenlik Λ cinsinden ifadeleri gözönüne alındığında, N stator sargısının faz başına sarım sayısı ve λ sabit bir katsayı olmak üzere,

$$L_a = \lambda \cdot N^2 \cdot \Lambda$$

$$L_{ab} = \frac{\lambda \cdot N^2 \cdot \Lambda}{2}$$
(3.2)

elde edilir

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \\ \Psi_f \\ \Psi_{sd} \\ \Psi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ab} & M\cos\Theta & M\cos\Theta & -M\sin\Theta \\ L_{ab} & L_a & L_{ab} & M\cos\left(\Theta - \frac{2\Pi}{3}\right) & M\cos\left(\Theta - \frac{2\Pi}{3}\right) & -M\sin\left(\Theta - \frac{2\Pi}{3}\right) \\ L_{ab} & L_{ab} & L_a & M\cos\left(\Theta + \frac{2\Pi}{3}\right) & M\cos\left(\Theta + \frac{2\Pi}{3}\right) & -M\sin\left(\Theta + \frac{2\Pi}{3}\right) \\ M\cos\Theta & M\cos\left(\Theta - \frac{2\Pi}{3}\right) & M\cos\left(\Theta + \frac{2\Pi}{3}\right) & L_f & L_{f, sd} & 0 \\ M\cos\Theta & M\cos\left(\Theta - \frac{2\Pi}{3}\right) & M\cos\left(\Theta + \frac{2\Pi}{3}\right) & L_{f, sd} & L_{sd} & 0 \\ -M\sin\Theta & -M\sin\left(\Theta - \frac{2\Pi}{3}\right) & -M\sin\left(\Theta + \frac{2\Pi}{3}\right) & 0 & 0 & L_{sq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \\ i_f \\ i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix}$$

(3.1)

Makinanın elektriksel yanına ilişkin gerilim denklemi matrisel biçimde yazılırsa,

$$[v]_{sr} = [R]_{sr} \cdot [i]_{sr} + \frac{d[\Psi]_{sr}}{dt} \quad (3.3)$$

olur. Burada,

$$[v]_{sr}^T = \begin{bmatrix} v_a & v_b & v_c & v_f & v_{sd}=0 & v_{sq}=0 \end{bmatrix}$$

$$[R]_{sr} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{sd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{sq} \end{bmatrix}$$

(3.4)

$$[i]_{sr}^T = \begin{bmatrix} i_a & i_b & i_c & i_f & i_{sd} & i_{sq} \end{bmatrix}$$

$$[\Psi]_{sr}^T = \begin{bmatrix} \Psi_a & \Psi_b & \Psi_c & \Psi_f & \Psi_{sd} & \Psi_{sq} \end{bmatrix}$$

dir.

Faz büyüklüklerine göre yazılmış olan (3.3) no.lu gerilim denklemi zamanla değişen katsayıdır. Bunlara Simetrik Park Dönüşümü'nün [21], [38] uygulanmasıyla, tek rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makinanın (d, q, o) dönen bileşenlerindeki denklemleri;

$$\begin{aligned}
 v_d &= -R_a i_d + p \Psi_d - \omega \Psi_q \\
 v_q &= -R_a i_q + p \Psi_q + \omega \Psi_d \\
 v_o &= -R_a i_o + p \Psi_o \\
 v_f &= R_f i_f + p \Psi_f \\
 v_{sd} &= R_{sd} i_{sd} + p \Psi_{sd} = 0 \\
 v_{sq} &= R_{sq} i_{sq} + p \Psi_{sq} = 0
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

biçimine dönüşür. $p = \frac{\Delta}{dt}$ olarak alınan (3.5) denklemlerinde, akılar alışıl gelmiş senkron makinadakilerden farklıdır, öyle ki;

$$\begin{aligned}
 \Psi_d &= - (L_a - L_{ab}) i_d + \sqrt{\frac{3}{2}} M_{if} + \sqrt{\frac{3}{2}} M_{isd} \\
 \Psi_q &= - (L_a - L_{ab}) i_q + \sqrt{\frac{3}{2}} M_{isq} \\
 \Psi_f &= -\sqrt{\frac{3}{2}} M_{id} + L_f i_f + L_{f, sd} i_{sd} \\
 \Psi_{sd} &= -\sqrt{\frac{3}{2}} M_{id} + L_{f, sd} i_f + L_{sd} i_{sd} \\
 \Psi_{sq} &= -\sqrt{\frac{3}{2}} M_{id} + L_{sq} i_{sq}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

olur.

Makinanın mekanik yanına ilişkin hareket denklemi ise, alışıl gelmiş senkron makinadaki ile aynı yapıda olup;

$$M_d = \frac{J}{p_k} \cdot p^2 \delta + M_e$$

biçimindedir. Bu bağıntıda kullanılan büyüklüklerin anlamları:

M_d : Mekanik döndürme momenti

p_k : Çift kutup sayısı (üstüniletkenli senkron makinada

$p_k = 1$ dir)

J : Eylemsizlik sabiti

M_e : Makinada endüklenen moment

δ : Sonsuz büyük güçlü şebeke referansına göre rotor açısı

Rotorun konumunu belirleyen δ açısı, Θ açısı cinsinden,

$$\Theta = \omega_o \cdot t + \delta - \frac{\pi}{2} \quad (3.8)$$

olarak alınırsa, bu bağıntının birinci dereceden türevi olan

$$p\Theta = -\omega_o + p\delta \quad (3.9)$$

bağıntısında, $p\Theta$ yerine ω açısal hızı yazıldığında, $p\delta$ ve kayma için,

$$p\delta = \omega - \omega_o, \quad s = \frac{\omega - \omega_o}{\omega_o} = \frac{p\delta}{\omega_o} \quad (3.10)$$

eşitlikleri elde edilir [21]. Böylece, eşitlik (3.7) ile verilen hareket denklemi,

$$M_d = \frac{J}{p_k} \omega_o \cdot p_s + M_e \quad (3.11)$$

biçimine dönüşür. Doymanın ihmal edildiği elektromekanik sistemlerde [21], [38] endüklenen moment;

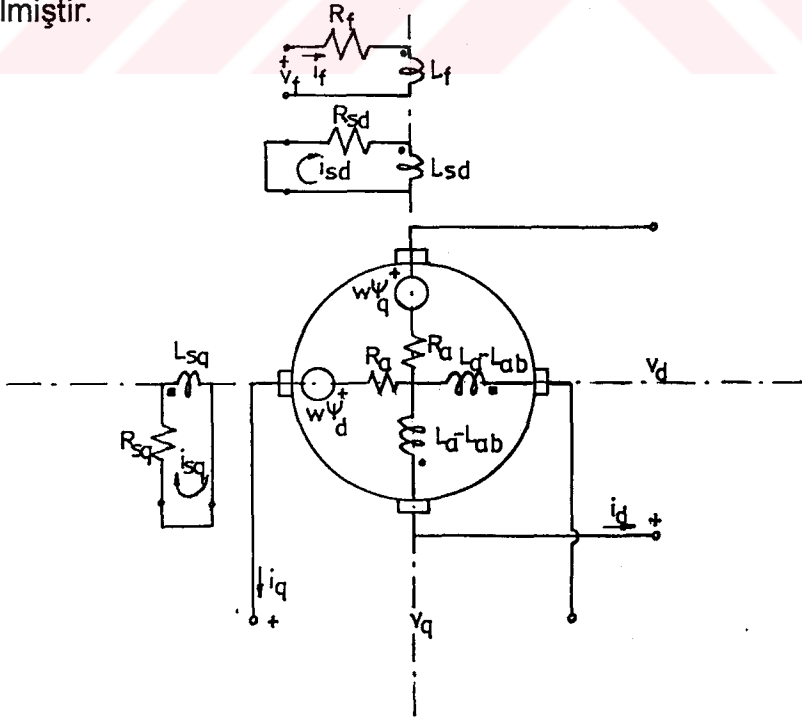
$$M_e = -\frac{1}{2} [i]_{sr}^T \cdot \left\{ \frac{\partial [L]_{sr}}{\partial \Theta} \right\} \cdot [i]_{sr} \quad (3.12)$$

olarak tanımlanır. Bu bağıntı tek rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için uygulanırsa,

$$M_e = p_k (\Psi_d \cdot i_q - \Psi_q \cdot i_d) \quad (3.13)$$

elde edilir.

Bütün bu tanımlamalardan sonra, tek rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makinanın (d, q) dönen bileşenlerdeki gösterimi Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.4. Tek rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makinanın (d, q) dönen bileşenlerindeki gösterimi

Alışıl gelmiş senkron makinalarda olduğu gibi, tek rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makinanın matematiksel modelinin birime indirgenmiş büyüklükler cinsinden yazılması gerekir. [21] no.lu kaynakta verilen yol izlendiğinde, stator için temel değerler;

$$v_{st} = \sqrt{2} \cdot V_{sn}, \quad i_{st} = \sqrt{2} \cdot I_{sn}, \quad S_{st} = S_{sn} = \frac{3}{2} \cdot v_{st} \cdot i_{st}$$

$$Z_{st} = \frac{v_{st}}{i_{st}} = \frac{V_{sn}}{I_{sn}}, \quad L_{st} = \frac{V_{sn}}{I_{sn} \cdot \omega_o}, \quad \Psi_{st} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_{sn}}{\omega_o} \quad (3.14)$$

$$J_t = \frac{3 \cdot v_{st} \cdot i_{st}}{2 \cdot \omega_o} \cdot p_k$$

dır. Bu eşitliklerde, sn alt indisi statora ilişkin nominal değerleri göstermektedir.

Rotora ilişkin temel değerlerin belirlenmesinde, alışıl gelmiş senkron makinalarda olduğu gibi, aşağıdaki varsayımlar kullanılabilir:

- I. Rotor gerilimlerinin temel değerlerinin seçiminde, stator ve rotor için aynı temel güç kullanılmalı,
- II. Aynı eksen üzerindeki sargıların oluşturdukları faydalı akılar birbirine eşit alınmalı.

Bu varsayımlara göre, stator d eksenini fiktif sargısının halkaladığı toplam akı mağnetik geçirgenlik cinsinden yazılırsa;

$$\Psi_{ad} = \frac{3}{2} \cdot N^2 \cdot \Lambda \cdot i_d + \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot N \cdot N_f \cdot \Lambda \cdot i_f + \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot N \cdot N_s \cdot \Lambda \cdot i_{sd} \quad (3.15)$$

olur. Bu denklemde, statora ilişkin temel değerler kullanıldığında,

$$\Psi_{ad} = \bar{\Psi}_{ad} \cdot \Psi_{dt} , \quad i_d = \sqrt{2} \cdot I_{sn} \cdot \bar{i}_d \quad (3.16)$$

yazılar ve rotor akımları için, tanım uyarınca;

$$i_f = \bar{i}_f \cdot i_{ft}, \quad i_{sd} = \bar{i}_{sd} \cdot i_{sdt} \quad (3.17)$$

eşitlikleri kullanılırsa, Ψ_{ad} 'nın birime indirgenmiş değeri,

$$\bar{\Psi}_{ad} = \frac{\omega_o}{\sqrt{2}V_{sn}} \left[\frac{3}{2} \cdot N^2 \cdot \Lambda \cdot \sqrt{2} \cdot I_{sn} \cdot \bar{i}_d + \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot N \cdot N_f \cdot \Lambda \cdot \bar{i}_f \cdot i_{ft} \right. \\ \left. + \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot N \cdot N_s \cdot \Lambda \cdot \bar{i}_{sd} \cdot i_{sdt} \right] \quad (3.18)$$

olur. Yukarıda verilen (II) varsayımı kullanılırsa,

$$\frac{3}{2} \cdot \frac{N^2 \cdot \Lambda}{\sqrt{2} \cdot V_{sn}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{sn} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot N \cdot N_f \cdot \Lambda \cdot \frac{\omega_o}{\sqrt{2} \cdot V_{sn}} \cdot i_{ft} \\ = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot N \cdot N_s \cdot \Lambda \cdot \frac{\omega_o}{\sqrt{2} \cdot V_{sn}} \cdot i_{sdt} \quad (3.19)$$

elde edilir. Bu eşitliklerde reaktans tanımları kullanılırsa,

$$X_{ad} = \frac{3}{2} \cdot N^2 \cdot \Lambda \cdot \omega_o \\ X_{d,f} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot N \cdot N_f \cdot \Lambda \cdot \omega_o \\ X_{d,sd} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot N \cdot N_s \cdot \Lambda \cdot \omega_o$$

olacağından,

$$X_{ad} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{sn} = X_{d,f} \cdot i_{ft} = X_{d,sd} \cdot i_{sdt} \quad (3.20)$$

elde edilir.

Benzer işlemler q eksenindeki sargılar için de yapılırsa;

$$\begin{aligned} i_{ft} &= \frac{X_{ad}}{X_{d,f}} \cdot i_{st} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{N}{N_f} i_{st} \\ i_{sdt} &= \frac{X_{ad}}{X_{d,sd}} \cdot i_{st} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{N}{N_s} i_{st} \\ i_{sqt} &= \frac{X_{aq}}{X_{q,sq}} \cdot i_{st} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \frac{N}{N_s} i_{st} \\ \Psi_{ft} &= \frac{X_{d,f}}{\omega_o \cdot X_{ad}} \cdot v_{st} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{N_f}{N \cdot \omega_o} \cdot v_{st} \\ \Psi_{sdt} &= \frac{X_{d,sd}}{\omega_o \cdot X_{ad}} \cdot v_{st} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{N_s}{N \cdot \omega_o} \cdot v_{st} \\ \Psi_{sqt} &= \frac{X_{q,sq}}{\omega_o \cdot X_{aq}} \cdot v_{st} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{N_s}{N \cdot \omega_o} \cdot v_{st} \quad (3.21) \\ v_{ft} &= \frac{X_{d,f}}{X_{ad}} \cdot v_{st} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{N_f}{N} \cdot v_{st} \\ R_{ft} &= \left(\frac{X_{d,f}}{X_{ad}} \right)^2 \cdot Z_{st} = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{N_f}{N} \right)^2 \cdot Z_{st} \\ R_{sdt} &= \left(\frac{X_{d,sd}}{X_{ad}} \right)^2 \cdot Z_{st} = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{N_s}{N} \right)^2 \cdot Z_{st} \\ R_{sqt} &= \left(\frac{X_{q,sq}}{X_{aq}} \right)^2 \cdot Z_{st} = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{N_s}{N} \right)^2 \cdot Z_{st} \end{aligned}$$

olur.

Stator ve rotora ilişkin temel değerlerin yanısıra, zaman için temel değer;

$$t_t = \frac{1}{\omega_o} \quad (3.22)$$

olarak alınır. Açısal hız ve döndürme momenti için de temel değerler,

$$\omega_t = \omega_o = 2 \cdot \Pi \cdot f_n, \quad M_{dt} = \frac{S_{sn}}{\omega_o} \quad (3.23)$$

olur [39].

Bu tanımlardan sonra, tek rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makinanın (d, q, o) dönen bileşenlerinde, birime indirgenmiş büyüklükler cinsinden matematiksel modeli, zaman ve açısal hız da birime indirgenmiş olmak üzere,

$$\begin{aligned} \bar{v}_d &= -\bar{R}_a \cdot \bar{i}_d + \frac{d\bar{\Psi}_d}{dt} - \bar{\omega} \cdot \bar{\Psi}_q \\ \bar{v}_q &= -\bar{R}_a \cdot \bar{i}_q + \frac{d\bar{\Psi}_q}{dt} + \bar{\omega} \cdot \bar{\Psi}_d \\ \bar{v}_f &= \bar{R}_f \cdot \bar{i}_f + \frac{d\bar{\Psi}_f}{dt} \\ 0 &= \bar{R}_{sd} \cdot \bar{i}_{sd} + \frac{d\bar{\Psi}_{sd}}{dt} \\ 0 &= \bar{R}_{sq} \cdot \bar{i}_{sq} + \frac{d\bar{\Psi}_{sq}}{dt} \\ \bar{M}_d &= \bar{J} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} + \bar{M}_e \end{aligned} \quad (3.24)$$

olur; burada, H enerji zaman sabiti olmak üzere,

$$\bar{J} = \frac{2 \cdot H \cdot \omega_o}{p_k}$$

dır.

Artık (d, q, o) dönen bileşenlerinde birime indirgenmiş büyüklükler cinsinden modellenen tek rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makinanın elektriksel eşdeğer devresini verme aşamasına gelinmiştir. Bu eşdeğer devrede, frekans için nominal frekans temel değer olarak alındığında $\bar{X} = \bar{L}$ olduğundan [21],

$$\bar{\Psi}_d = -\bar{X}_d \cdot \bar{i}_d + \bar{X}_{d,f} \cdot \bar{i}_f + \bar{X}_{d,sd} \cdot \bar{i}_{sd}$$

$$\bar{\Psi}_q = -\bar{X}_q \cdot \bar{i}_q + \bar{X}_{q,sq} \cdot \bar{i}_{sq}$$

$$\bar{\Psi}_f = -\bar{X}_{d,f} \cdot \bar{i}_d + \bar{X}_f \cdot \bar{i}_f + \bar{X}_{f,sd} \cdot \bar{i}_{sd} \quad (3.25)$$

$$\bar{\Psi}_{sd} = -\bar{X}_{d,sd} \cdot \bar{i}_d + \bar{X}_{f,sd} \cdot \bar{i}_f + \bar{X}_{sd} \cdot \bar{i}_{sd}$$

$$\bar{\Psi}_{sq} = -\bar{X}_{q,sq} \cdot \bar{i}_q + \bar{X}_{sq} \cdot \bar{i}_{sq}$$

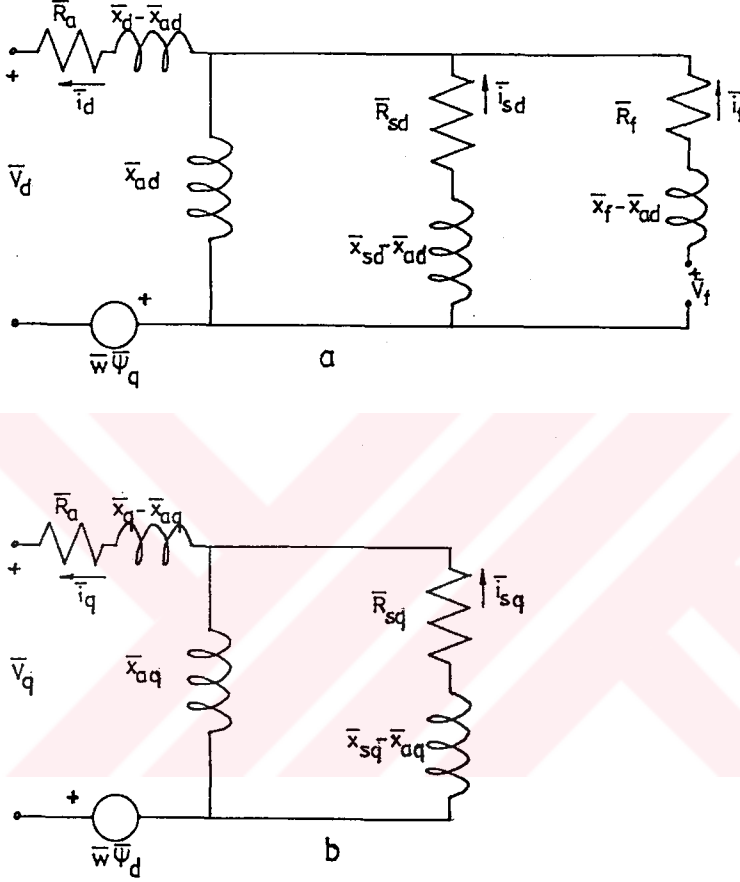
olacaktır. Burada; $\bar{X}_{df} = \bar{X}_{d,sd} = \bar{X}_{f,sd} \triangleq \bar{X}_{ad}$ ve $\bar{X}_{q,sq} \triangleq \bar{X}_{aq}$ olduğuna göre, eşdeğer devreler Şekil 3.5'deki gibi elde edilir.

Yukarıda da belirtildiği gibi, sayısal simülasyon için makinanın bir transformatör ve birbirine eşdeğer, paralel bağlı iki enerji iletim hattı üzerinden sonsuz büyük güçlü şebekeye bağlı olduğu varsayılmıştır. Bu nedenle, enerji iletim sisteminin de matematiksel modelinin oluşturulması gerekmektedir. Bilindiği gibi, enerji iletim sistemlerinin modellenmesi [38],

$$\bar{v}_d = (\bar{R}_{tr} + \bar{R}_{he}) \cdot \bar{i}_d + (\bar{X}_{tr} + \bar{X}_{he}) \cdot p\bar{i}_d - \bar{\omega} \cdot (\bar{X}_{tr} + \bar{X}_{he}) \cdot \bar{i}_q \quad (3.26)$$

$$\bar{v}_q = (\bar{R}_{tr} + \bar{R}_{he}) \cdot \bar{i}_q + (\bar{X}_{tr} + \bar{X}_{he}) \cdot p\bar{i}_q + \bar{\omega} \cdot (\bar{X}_{tr} + \bar{X}_{he}) \cdot \bar{i}_d$$

şeklindedir. Burada, $\bar{R}_{tr}$ ve $\bar{X}_{tr}$ sırasıyla transformatörün (ohmik) direnci ve reaktansı, $\bar{R}_{he}$ ve $\bar{X}_{he}$ sırasıyla paralel bağlı iletim hatlarına ilişkin eşdeğer direnç ve reaktans değerleridir.



Şekil 3.5. Tek rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makinaya ilişkin
 a) d eksenli eşdeğer devresi
 b) q eksenli eşdeğer devresi

Bu tanımlardan sonra, durum değişkenleri

$$\mathbf{x}^T = \begin{bmatrix} \bar{\Psi}_d & \bar{\Psi}_q & \bar{\Psi}_f & \bar{\Psi}_{sd} & \bar{\Psi}_{sq} & \delta & \bar{s} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

olarak alındığında, tüm sistemin matematiksel modelini eşitlik (3.28) ile verilen biçimde oluşturmak mümkündür:

$$\begin{bmatrix} \bar{\Psi}_d \\ \bar{\Psi}_q \\ \bar{\Psi}_f \\ \bar{\Psi}_{sd} \\ \bar{\Psi}_{sq} \\ \delta \\ \bar{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\bar{R}_T a_1 / p_1 & (\bar{X}_T b_1 + 1) / p_1 & \bar{R}_T a_2 / p_1 & \bar{R}_T a_3 / p_1 & \bar{X}_T b_2 / p_1 & 0 & 0 \\ -(\bar{X}_T a_1 + 1) / p_2 & \bar{R}_T b_1 / p_2 & \bar{X}_T a_2 / p_2 & \bar{X}_T a_3 / p_2 & \bar{R}_T b_2 / p_2 & 0 & 0 \\ \bar{R}_f a_2 & 0 & -\bar{R}_f a_4 & \bar{R}_f a_5 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{R}_{sd} a_3 & 0 & \bar{R}_{sd} a_5 & -\bar{R}_{sd} a_6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{R}_{sq} b_2 & 0 & 0 & -\bar{R}_{sq} b_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\Psi}_d \\ \bar{\Psi}_q \\ \bar{\Psi}_f \\ \bar{\Psi}_{sd} \\ \bar{\Psi}_{sq} \\ \delta \\ \bar{s} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{J} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{X}_T \frac{a_2}{p_1} p \bar{\Psi}_f + \bar{X}_T \frac{a_3}{p_1} p \bar{\Psi}_{sd} + \frac{\bar{V}_b}{p_1} \sin \delta + \bar{X}_T \frac{b_1}{p_1} \bar{s} \bar{\Psi}_q - \bar{X}_T \frac{b_2}{p_1} \bar{s} \bar{\Psi}_{sq} \\ \bar{X}_T \frac{b_2}{p_2} p \bar{\Psi}_{sq} + \frac{\bar{V}_b}{p_2} \cos \delta - \bar{X}_T \frac{a_1}{p_2} \bar{s} \bar{\Psi}_d + \bar{X}_T \frac{a_2}{p_2} \bar{s} \bar{\Psi}_f + \bar{X}_T \frac{a_3}{p_2} \bar{s} \bar{\Psi}_{sd} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{b_1 - a_1}{J} \bar{\Psi}_d \bar{\Psi}_q - \frac{b_2}{J} \bar{\Psi}_d \bar{\Psi}_{sq} + \frac{a_2}{J} \bar{\Psi}_q \bar{\Psi}_f + \frac{a_3}{J} \bar{\Psi}_q \bar{\Psi}_{sd} \end{bmatrix}$$

(3.28)

Burada,

$$\bar{R}_T \triangleq \bar{R}_a + \bar{R}_{tr} + \bar{R}_{he}, \quad \bar{X}_T \triangleq \bar{x}_{tr} + \bar{x}_{he} \quad (3.29)$$

$$F_1 \triangleq \frac{1}{\frac{1}{\bar{x}_{ad}} + \frac{1}{\bar{x}_d - \bar{x}_{ad}} + \frac{1}{\bar{x}_f - \bar{x}_{ad}} + \frac{1}{\bar{x}_{sd} - \bar{x}_{ad}}} \quad (3.30)$$

$$F_2 \triangleq \frac{1}{\frac{1}{\bar{x}_{aq}} + \frac{1}{\bar{x}_q - \bar{x}_{aq}} + \frac{1}{\bar{x}_{sq} - \bar{x}_{aq}}}$$

$$\begin{aligned} a_1 &\triangleq -\frac{1}{\bar{x}_d - \bar{x}_{ad}} \left[\frac{F_1}{\bar{x}_d - \bar{x}_{ad}} - 1 \right] \\ a_2 &\triangleq \frac{F_1}{(\bar{x}_d - \bar{x}_{ad}) \cdot (\bar{x}_f - \bar{x}_{ad})} \\ a_3 &\triangleq \frac{F_1}{(\bar{x}_d - \bar{x}_{ad}) \cdot (\bar{x}_{sd} - \bar{x}_{ad})} \\ a_4 &\triangleq -\frac{1}{\bar{x}_f - \bar{x}_{ad}} \left[\frac{F_1}{\bar{x}_f - \bar{x}_{ad}} - 1 \right] \\ a_5 &\triangleq \frac{F_1}{(\bar{x}_f - \bar{x}_{ad}) \cdot (\bar{x}_{sd} - \bar{x}_{ad})} \\ a_6 &\triangleq -\frac{1}{\bar{x}_{sd} - \bar{x}_{ad}} \left[\frac{F_1}{\bar{x}_{sd} - \bar{x}_{ad}} - 1 \right] \\ b_1 &\triangleq -\frac{1}{\bar{x}_q - \bar{x}_{aq}} \left[\frac{F_2}{\bar{x}_q - \bar{x}_{aq}} - 1 \right] \\ b_2 &\triangleq \frac{F_2}{(\bar{x}_q - \bar{x}_{aq}) \cdot (\bar{x}_{sq} - \bar{x}_{aq})} \\ b_3 &\triangleq -\frac{1}{\bar{x}_{sq} - \bar{x}_{aq}} \left[\frac{F_2}{\bar{x}_{sq} - \bar{x}_{aq}} - 1 \right] \end{aligned} \quad (3.31)$$

$$\begin{aligned} p_1 &\triangleq 1 + (\bar{x}_{tr} + \bar{x}_{he}) \cdot a_1 \\ p_2 &\triangleq 1 + (\bar{x}_{tr} + \bar{x}_{he}) \cdot b_1 \end{aligned} \quad (3.32)$$

olarak tanımlanmıştır.

3.2.2. Çift Rotor Ekranına Sahip Üstüniletkenli Senkron Makinanın Matematiksel Modeli

Ayrıt 3.1’de belirtildiği gibi, tek rotor ekranı kullanılması durumunda ortaya çıkan bir takım sorunların yok edilmesi için, üstüniletkenli senkron makinalarda çift rotor ekranı kullanılmasının gerekliliği ortaya çıkmıştır [1], [3], [4], [15], [19], [23], [31], [32]. Bu gerekliliğin kararlılık açısından sistemin davranışına olan etkisini görebilmek amacıyla, bu ayrıtta, gene yukarıda olduğu gibi, üstüniletkenli senkron makinanın bir transformatör ve birbirine eşdeğer, paralel bağlı iki enerji iletim hattı üzerinden sonsuz büyük güçlü şebekeye bağlı olduğu varsayılarak bir matematiksel model elde edilecektir.

Makinanın ikinci bir ekranı içermesi, matematiksel modelde sanki ikinci bir armatör sargısı varmış gibi bir sonuç doğurmaktadır. Bu görüşle bakıldığında, yukarıdaki ayrıtta izlenen yolla, birime indirgenmiş büyüklükler (zaman ve açısal hız dahil) cinsinden üstüniletkenli senkron makinaya ilişkin uç denklemleri:

$$\begin{aligned}
 \bar{v}_d &= -\bar{R}_a \cdot \bar{i}_d + p\bar{\Psi}_d - \bar{\omega} \cdot \bar{\Psi}_q \\
 \bar{v}_q &= -\bar{R}_a \cdot \bar{i}_q + p\bar{\Psi}_q + \bar{\omega} \cdot \bar{\Psi}_d \\
 \bar{v}_f &= \bar{R}_f \cdot \bar{i}_f + p\bar{\Psi}_f \\
 \bar{v}_{sd_2} &= 0 = \bar{R}_{sd_2} \cdot \bar{i}_{sd_2} + p\bar{\Psi}_{sd_2} \\
 \bar{v}_{sq_2} &= 0 = \bar{R}_{sq_2} \cdot \bar{i}_{sq_2} + p\bar{\Psi}_{sq_2} \\
 \bar{v}_{sd_1} &= 0 = \bar{R}_{sd_1} \cdot \bar{i}_{sd_1} + p\bar{\Psi}_{sd_1} \\
 \bar{v}_{sq_1} &= 0 = \bar{R}_{sq_1} \cdot \bar{i}_{sq_1} + p\bar{\Psi}_{sq_1} \\
 \bar{M}_d &= \frac{\bar{J}}{p_k} \cdot p\bar{s} + \bar{M}_e
 \end{aligned} \tag{3.33}$$

ve akı-akım bağıntıları:

$$\begin{aligned}
 \bar{\Psi}_d &= -\bar{X}_d \cdot \bar{i}_d + \bar{X}_{d,f} \cdot \bar{i}_f + \bar{X}_{d,sd_2} \bar{i}_{sd_2} + \bar{X}_{d,sd_1} \bar{i}_{sd_1} \\
 \bar{\Psi}_q &= -\bar{X}_q \cdot \bar{i}_q + \bar{X}_{q,sq_2} \bar{i}_{sq_2} + \bar{X}_{q,sq_1} \bar{i}_{sq_1} \\
 \bar{\Psi}_f &= -\bar{X}_{d,f} \cdot \bar{i}_d + \bar{X}_f \cdot \bar{i}_f + \bar{X}_{f,sd_2} \bar{i}_{sd_2} + \bar{X}_{f,sd_1} \bar{i}_{sd_1} \\
 \bar{\Psi}_{sd_2} &= -\bar{X}_{d,sd_2} \cdot \bar{i}_d + \bar{X}_{f,sd_2} \cdot \bar{i}_f + \bar{X}_{sd_2} \bar{i}_{sd_2} + \bar{X}_{sd_{1,2}} \bar{i}_{sd_1} \\
 \bar{\Psi}_{sq_2} &= -\bar{X}_{q,sq_2} \cdot \bar{i}_q + \bar{X}_{sq_2} \bar{i}_{sq_2} + \bar{X}_{sq_{1,2}} \bar{i}_{sq_1} \\
 \bar{\Psi}_{sd_1} &= -\bar{X}_{d,sd_1} \cdot \bar{i}_d + \bar{X}_{f,sd_1} \cdot \bar{i}_f + \bar{X}_{sd_{1,2}} \bar{i}_{sd_2} + \bar{X}_{sd_1} \bar{i}_{sd_1} \\
 \bar{\Psi}_{sq_1} &= -\bar{X}_{q,sq_1} \cdot \bar{i}_q + \bar{X}_{sq_{1,2}} \cdot \bar{i}_{sq_2} + \bar{X}_{sq_1} \bar{i}_{sq_1}
 \end{aligned} \tag{3.34}$$

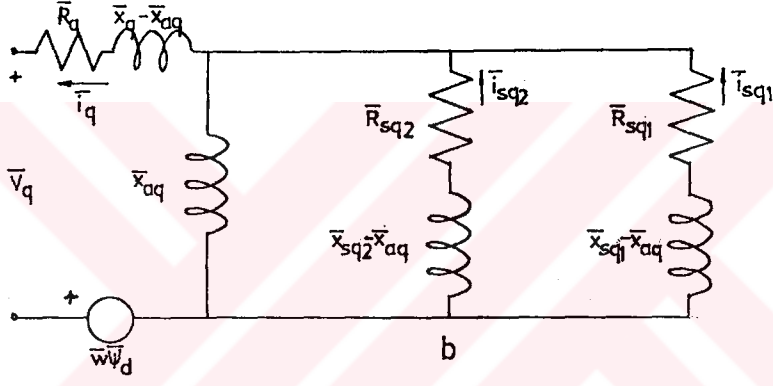
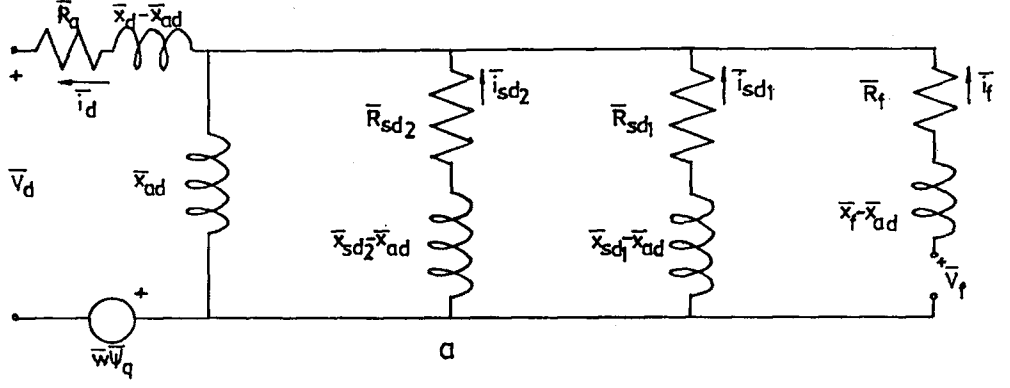
olmak üzere, sistemin matematiksel modeli (3.35) no.lu eşitlikte verilmiştir. Burada ikinci ekran da, biri d eksenini üzerinde ve diğeri de q eksenini üzerinde olan ve sd_1 , sq_1 alt indisleri ile gösterilen eşdeğer iki sargı ile modellenmiştir. Çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makinanın eşdeğer devresi ise Şekil 3.6'da verilmiştir.

Şekilde,

$$\bar{X}_{d,f} = \bar{X}_{d,sd_2} = \bar{X}_{d,sd_1} = \bar{X}_{f,sd_2} = \bar{X}_{f,sd_1} = \bar{X}_{sd_{1,2}} \triangleq \bar{X}_{ad}$$

$$\text{ve} \quad \bar{X}_{q,sq_1} = \bar{X}_{q,sq_2} = \bar{X}_{sq_{1,2}} \triangleq \bar{X}_{aq}$$

olarak tanımlanmıştır



Şekil 3.6. Çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makinaya ilişkin

a) d eksenli eşdeğer devresi

b) q eksenli eşdeğer devresi

$$\begin{bmatrix} \bar{\Psi}_d \\ \bar{\Psi}_q \\ \bar{\Psi}_f \\ \bar{\Psi}_{sd2} \\ \bar{\Psi}_{sq2} \\ \bar{\Psi}_{sd1} \\ \bar{\Psi}_{sq1} \\ \delta \\ \bar{s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\bar{R}_T \cdot a_1 / p_1 & (\bar{X}_T \cdot b_1 + 1) / p_1 & \bar{R}_T \cdot a_2 / p_1 & \bar{R}_T \cdot a_3 / p_1 & -\bar{X}_T \cdot b_2 / p_1 & \bar{R}_T \cdot a_4 / p_1 & -\bar{X}_T \cdot b_3 / p_1 & 0 & 0 \\ -(\bar{X}_T \cdot a_1 + 1) / p_2 & -\bar{R}_T \cdot b_1 / p_2 & \bar{X}_T \cdot a_2 / p_2 & \bar{X}_T \cdot a_3 / p_2 & \bar{R}_T \cdot b_2 / p_2 & \bar{X}_T \cdot a_4 / p_2 & \bar{R}_T \cdot b_3 / p_2 & 0 & 0 \\ \bar{R}_f \cdot a_2 & 0 & -\bar{R}_f \cdot a_5 & \bar{R}_f \cdot a_6 & 0 & \bar{R}_f \cdot a_7 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{R}_{sd2} \cdot a_3 & 0 & \bar{R}_{sd2} \cdot a_6 & -\bar{R}_{sd2} \cdot a_8 & 0 & \bar{R}_{sd2} \cdot a_9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{R}_{sq2} \cdot b_2 & 0 & 0 & -\bar{R}_{sq2} \cdot b_4 & 0 & \bar{R}_{sq2} \cdot b_5 & 0 & 0 \\ \bar{R}_{sd1} \cdot a_4 & 0 & \bar{R}_{sd1} \cdot a_7 & \bar{R}_{sd1} \cdot a_9 & 0 & -\bar{R}_{sd1} \cdot a_{10} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{R}_{sq1} \cdot b_3 & 0 & 0 & \bar{R}_{sq1} \cdot b_5 & 0 & -\bar{R}_{sq1} \cdot b_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\Psi}_d \\ \bar{\Psi}_q \\ \bar{\Psi}_f \\ \bar{\Psi}_{sd2} \\ \bar{\Psi}_{sq2} \\ \bar{\Psi}_{sd1} \\ \bar{\Psi}_{sq1} \\ \delta \\ \bar{s} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
& + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_f \\ \bar{M}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{X}_T \cdot \frac{a_2}{p_1} \cdot p \bar{\Psi}_f + \bar{X}_T \cdot \frac{a_3}{p_1} \cdot p \bar{\Psi}_{sq2} + \bar{X}_T \cdot \frac{a_4}{p_1} \cdot p \bar{\Psi}_{sd1} + \frac{V_b}{p_1} \cdot \sin \delta + \bar{X}_T \cdot \frac{b_1}{p_1} \cdot \bar{s} \cdot \bar{\Psi}_q - \bar{X}_T \cdot \frac{b_2}{p_1} \cdot \bar{s} \cdot \bar{\Psi}_{sq2} - \bar{X}_T \cdot \frac{b_3}{p_1} \cdot \bar{s} \cdot \bar{\Psi}_{sq1} \\ \bar{X}_T \cdot \frac{b_2}{p_2} \cdot p \bar{\Psi}_{sq2} + \bar{X}_T \cdot \frac{b_3}{p_2} \cdot p \bar{\Psi}_{sq1} + \frac{V_b}{p_2} \cdot \cos \delta - \bar{X}_T \cdot \frac{a_1}{p_2} \cdot \bar{s} \cdot \bar{\Psi}_d + \bar{X}_T \cdot \frac{a_2}{p_2} \cdot \bar{s} \cdot \bar{\Psi}_f + \bar{X}_T \cdot \frac{a_3}{p_2} \cdot \bar{s} \cdot \bar{\Psi}_{sd2} - \bar{X}_T \cdot \frac{a_4}{p_2} \cdot \bar{s} \cdot \bar{\Psi}_{sd1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{b_1 - a_1}{J} \cdot \bar{\Psi}_d \cdot \bar{\Psi}_q - \frac{b_2}{J} \cdot \bar{\Psi}_d \cdot \bar{\Psi}_{sq2} - \frac{b_3}{J} \cdot \bar{\Psi}_d \cdot \bar{\Psi}_{sq1} + \frac{a_2}{J} \cdot \bar{\Psi}_q \cdot \bar{\Psi}_f + \frac{a_3}{J} \cdot \bar{\Psi}_q \cdot \bar{\Psi}_{sd2} + \frac{a_4}{J} \cdot \bar{\Psi}_q \cdot \bar{\Psi}_{sd1} \end{bmatrix} \\
& \quad \quad \quad (3.35)
\end{aligned}$$

Burada,

$$\bar{R}_T \triangleq \bar{R}_a + \bar{R}_{tr} + \bar{R}_{he} \quad , \quad \bar{X}_T \triangleq \bar{X}_{tr} + \bar{X}_{he} \quad (3.36)$$

$$F_1 \triangleq \frac{1}{\frac{1}{\bar{x}_{ad}} + \frac{1}{\bar{x}_d - \bar{x}_{ad}} + \frac{1}{\bar{x}_f - \bar{x}_{ad}} + \frac{1}{\bar{x}_{sd2} - \bar{x}_{ad}} + \frac{1}{\bar{x}_{sd1} - \bar{x}_{ad}}} \quad (3.37)$$

$$F_2 \triangleq \frac{1}{\frac{1}{\bar{x}_{aq}} + \frac{1}{\bar{x}_q - \bar{x}_{aq}} + \frac{1}{\bar{x}_{sq2} - \bar{x}_{aq}} + \frac{1}{\bar{x}_{sq1} - \bar{x}_{aq}}}$$

olmak üzere,

$$\begin{aligned} a_1 &\triangleq -\frac{1}{\bar{x}_d - \bar{x}_{ad}} \left[\frac{F_1}{\bar{x}_d - \bar{x}_{ad}} - 1 \right] & a_9 &\triangleq \frac{F_1}{(\bar{x}_{sd2} - \bar{x}_{ad}) \cdot (\bar{x}_{sd1} - \bar{x}_{ad})} \\ a_2 &\triangleq \frac{F_1}{(\bar{x}_d - \bar{x}_{ad}) \cdot (\bar{x}_f - \bar{x}_{ad})} & a_{10} &\triangleq -\frac{1}{\bar{x}_{sd1} - \bar{x}_{ad}} \left[\frac{F_1}{\bar{x}_{sd1} - \bar{x}_{ad}} - 1 \right] \\ a_3 &\triangleq \frac{F_1}{(\bar{x}_d - \bar{x}_{ad}) \cdot (\bar{x}_{sd2} - \bar{x}_{ad})} & b_1 &\triangleq -\frac{1}{\bar{x}_q - \bar{x}_{aq}} \left[\frac{F_2}{\bar{x}_q - \bar{x}_{aq}} - 1 \right] \\ a_4 &\triangleq \frac{F_1}{(\bar{x}_d - \bar{x}_{ad}) \cdot (\bar{x}_{sd1} - \bar{x}_{ad})} & b_2 &\triangleq \frac{F_2}{(\bar{x}_q - \bar{x}_{aq}) \cdot (\bar{x}_{sq2} - \bar{x}_{aq})} \\ a_5 &\triangleq -\frac{1}{\bar{x}_f - \bar{x}_{ad}} \left[\frac{F_1}{\bar{x}_f - \bar{x}_{ad}} - 1 \right] & b_3 &\triangleq \frac{F_2}{(\bar{x}_q - \bar{x}_{aq}) \cdot (\bar{x}_{sq1} - \bar{x}_{aq})} \\ a_6 &\triangleq \frac{F_1}{(\bar{x}_f - \bar{x}_{ad}) \cdot (\bar{x}_{sd2} - \bar{x}_{ad})} & b_4 &\triangleq -\frac{1}{\bar{x}_{sq2} - \bar{x}_{aq}} \left[\frac{F_2}{\bar{x}_{sq2} - \bar{x}_{aq}} - 1 \right] \\ a_7 &\triangleq \frac{F_1}{(\bar{x}_f - \bar{x}_{ad}) \cdot (\bar{x}_{sd1} - \bar{x}_{ad})} & b_5 &\triangleq \frac{F_2}{(\bar{x}_{sq2} - \bar{x}_{aq}) \cdot (\bar{x}_{sq1} - \bar{x}_{aq})} \\ a_8 &\triangleq -\frac{1}{\bar{x}_{sd2} - \bar{x}_{ad}} \left[\frac{F_1}{\bar{x}_{sd2} - \bar{x}_{ad}} - 1 \right] & b_6 &\triangleq -\frac{1}{\bar{x}_{sq1} - \bar{x}_{aq}} \left[\frac{F_2}{\bar{x}_{sq1} - \bar{x}_{aq}} - 1 \right] \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$p_1 \triangleq 1 + \bar{X}_T \cdot a_1, \quad p_2 \triangleq 1 + \bar{X}_T \cdot b \quad (3.39)$$

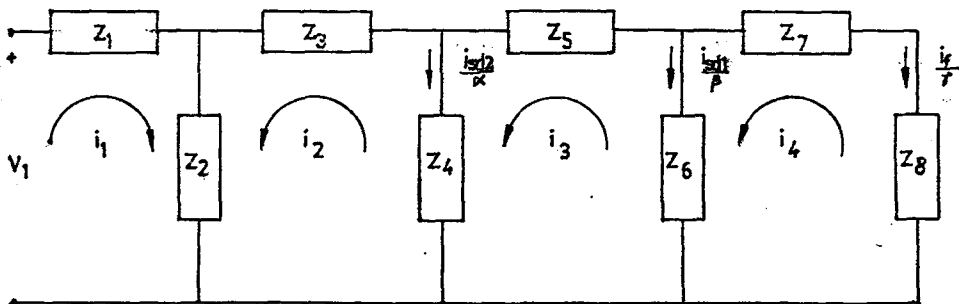
3.2.3. Merdiven Tipi Eşdeğer Devre Modeli

Üstüniletkenli senkron makinalar için, makinanın özelliği nedeniyle muhtelif eşdeğer devreler geliştirilmiştir [22],..., [28]. Bu eşdeğer devrelerden biri de merdiven tipi eşdeğer devredir. Bu tür bir modelin geliştirilmesindeki amaç, üstüniletkenli senkron makinanın fiziksel özelliklerine daha uyumlu bir matematiksel model elde etmektir; öyle ki, bu model ile, yukarıda ayrı ayrı ayrıtlarda verildiği şekilde bir ve iki rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makinaların ayrı ayrı modellenmesi yerine, tek bir model ile bütün bunları kapsama alabilmek ya da ilâve bir takım ekranları incelemeye katmak mümkün olmaktadır. Simülasyon işleminde, merdiven tipi eşdeğer devrenin de kararlılık açısından etkinliğini görmek amacıyla bu ayrıttaki çalışma yapılmıştır. Bu modelde de, gene ayrıt 3.2.1’de genel olarak verilen temel değerler kullanılarak, üstüniletkenli senkron makinanın birime indirgenmiş büyüklükler cinsinden matematiksel modeli verilecektir. Bu nedenle, bundan sonra yapılacak incelemede birime indirgenmiş büyüklükler için () sembolü kullanılmayacaktır.

Merdiven Tipi Eşdeğer Devrenin Oluşturulması

Burada, önce çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için merdiven tipi eşdeğer devre oluşturulacak, sonra bu eşdeğer devrenin genişletilmiş biçimi verilecek ve sonra da düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devre için matematiksel model oluşturulacaktır.

Çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makinanın d eksenine eşdeğer devresi Şekil 3.7’de verilen merdiven tipi devre biçimine indirgenebilir [25].



Şekil 3.7. Genel dört gözlü eşdeğer devre

Üstüniletkenli senkron makinanın d ekseninde dört sargı bulunması durumundaki gerilim eşitlikleri, Ayrıt 3.2.2'de verilmiş olan akı-akım bağıntılarından hareketle,

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_d & X_{d, sd2} & X_{d, sd1} & X_{d, f} \\ X_{d, sd2} & Z_{sd2} & X_{sd1, 2} & X_{f, sd2} \\ X_{d, sd1} & X_{sd1, 2} & Z_{sd1} & X_{f, sd1} \\ X_{df} & X_{f, sd2} & X_{f, sd1} & Z_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_{sd2} \\ i_{sd1} \\ i_f \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

olarak yazılabilir. Burada, uyarma sargısının ekranlama üzerindeki azaltıcı etkisinin daha belirgin olduğu, kısa devre edilmiş uyarma sargısı durumu gözönüne alınmıştır. V_1 stator sargısının uçlarındaki gerilim olup, dönmenin stator gerilimindeki etkisi gözönüne alınarak, $V_d = V_1 - \omega \cdot \Psi_q$ bağıntısı uyarınca stator d-ekseni çıkış gerilimi elde edilir; burada, ω : açısal hız ve Ψ_q : stator q eksenı akısıdır. Eşitlik (3.40) aşağıdaki biçimde yeniden yazılırsa, matematiksel olarak değişmez:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_d & \alpha \cdot X_{d, sd2} & \beta \cdot X_{d, sd1} & \gamma \cdot X_{d, f} \\ \alpha \cdot X_{d, sd2} & \alpha^2 \cdot Z_{sd2} & \alpha \cdot \beta \cdot X_{sd1, 2} & \alpha \cdot \gamma \cdot X_{f, sd2} \\ \beta \cdot X_{d, sd1} & \alpha \cdot \beta \cdot X_{sd1, 2} & \beta^2 \cdot Z_{sd1} & \beta \cdot \gamma \cdot X_{f, sd1} \\ \gamma \cdot X_{df} & \alpha \cdot \gamma \cdot X_{f, sd2} & \beta \cdot \gamma \cdot X_{f, sd1} & \gamma^2 \cdot Z_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_{sd2} / \alpha \\ i_{sd1} / \beta \\ i_f / \gamma \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Burada; α , β ve γ sarım oranlarıdır. Böylece, bütün empedanslar (Z_d hariç), endüktanslar ve akımlar (i_d hariç) stator referans alınarak yazılmış olmaktadır. Şekil 3.7'deki genel merdiven tipi devrede, göz akımları cinsinden gerilim bağıntısı,

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 + Z_2 & Z_2 & 0 & 0 \\ Z_2 & Z_2 + Z_3 + Z_4 & -Z_4 & 0 \\ 0 & -Z_4 & Z_4 + Z_5 + Z_6 & -Z_6 \\ 0 & 0 & -Z_6 & Z_6 + Z_7 + Z_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

şeklindedir. Göz akımları sargı akımları cinsinden yazılırsa,

$$\begin{aligned} i_1 &= i_d \\ i_2 &= \frac{i_{sd2}}{\alpha} + \frac{i_{sd1}}{\beta} + \frac{i_f}{\gamma} \\ i_3 &= \frac{i_{sd1}}{\beta} + \frac{i_f}{\gamma} \\ i_4 &= \frac{i_f}{\gamma} \end{aligned} \quad (3.43)$$

elde edilir. Buna göre, bağlantı matrisi,

$$C = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 1 & 1 & 1 \\ & & 1 & 1 \\ & & & 1 \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

olup, dönüştürülmüş empedans matrisi, gücün değişmezliği ilkesinden hareketle,

$$Z' = C^T \cdot Z \cdot C$$

ve sonuç olarak,

$$Z' = \begin{bmatrix} Z_1 + Z_2 & Z_2 & Z_2 & Z_2 \\ Z_2 & Z_2 + Z_3 + Z_4 & Z_2 + Z_3 & Z_2 + Z_3 \\ Z_2 & Z_2 + Z_3 & Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_6 & Z_2 + Z_3 + Z_5 \\ Z_2 & Z_2 + Z_3 & Z_2 + Z_3 + Z_5 & Z_2 + Z_3 + Z_5 + Z_7 + Z_8 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

olarak bulunur. (3.41) ve (3.45) eşitliklerinde köşegen olmayan elemanlar karşılaştırılırsa, aşağıdaki ifadeler elde edilir:

$$\begin{aligned} Z_2 &= \alpha \cdot X_{d, sd2} = \beta \cdot X_{d, sd1} = \gamma \cdot X_{d, f} \\ Z_2 + Z_3 &= \alpha \cdot \beta \cdot X_{sd1, 2} = \alpha \cdot \gamma \cdot X_{f, sd2} \\ Z_2 + Z_3 + Z_5 &= \beta \cdot \gamma \cdot X_{f, sd1} \end{aligned} \quad (3.46)$$

Bu eşitliklerden α , β ve γ 'nın kesin çözümlerini elde etmek mümkün değildir, çünkü bilinmeyen sayısı eşitlik sayısından büyüktür. Bu sorunu çözmek için, Z_2 dışındaki kol empedanslarından birini sıfıra eşit kılmak düşünülebilir.

Böylece, $Z_3 = 0$ alınarak, eşitlik (3.46)'dan α , β ve γ çözülür. Reaktanslar, endüktanslar, kuplaj katsayıları ve zaman sabitleri için geçerli olan,

$$X_{mn} = j\omega \cdot M_{mn}$$

$$M_{mn} = k_{mn} \sqrt{L_m \cdot L_n}$$

$$k_{mn} = \frac{r_m}{r_n} \left[\frac{\left(1 + r_n / r_{s1}\right)^2}{\left(1 + r_m / r_{s1}\right)^2} \right]^{1/2} \quad (3.47)$$

$$k_{1n} = k_{12} \cdot k_{2n} = k_{13} \cdot k_{3n}$$

$$T_n = \frac{L_n}{R_n}$$

bağıntıları yardımıyla, eşdeğer devredeki kol empedanslarının generatör sargılarına ilişkin büyüklükler cinsinden ifadeleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$Z_1 = R_a + j\omega \cdot L_d (1 - k_{ds2}^2)$$

$$Z_2 = j\omega \cdot L_d \cdot k_{ds2}^2$$

$$Z_4 = \frac{L_d \cdot k_{ds2}^2}{T_{sd2}}$$

$$Z_5 = j\omega \cdot L_d \cdot k_{ds2}^2 \left[\frac{1}{k_{sd12}^2} - 1 \right]$$

(3.48)

$$Z_6 = \frac{L_d \cdot k_{ds2}^2}{T_{sd1} \cdot k_{sd12}^2}$$

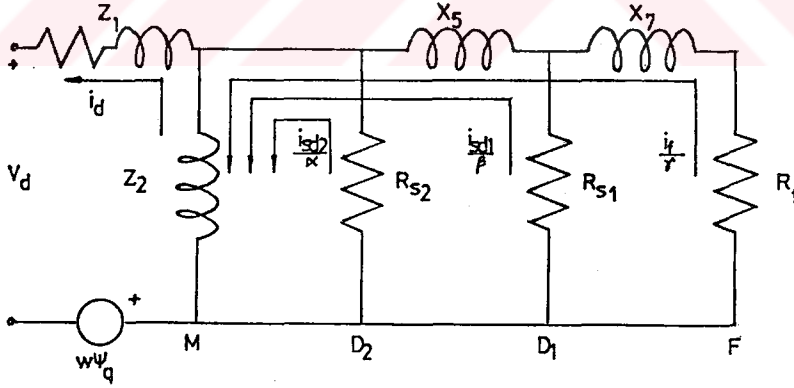
$$Z_7 = j\omega \cdot L_d \cdot k_{ds2}^2 \left[\frac{1}{k_{s2f}^2} - \frac{1}{k_{sd12}^2} \right]$$

$$Z_8 = \frac{L_d \cdot k_{ds2}^2}{T_f \cdot k_{s2f}^2}$$

Kol empedansları bu şekilde belirlendikten sonra (3.41) ve (3.45) eşitliklerinde köşegen üzerindeki elemanların karşılaştırılması ile dış ekran, iç ekran ve uyarma sargılarının empedansları (stator referans alındığında) aşağıdaki gibi elde edilir [25]:

$$\begin{aligned} \alpha^2 \cdot Z_{sd2} &= \frac{L_d \cdot k_{ds2}^2}{T_{sd2}} + j\omega L_d \cdot k_{ds2}^2 \\ \beta^2 \cdot Z_{sd1} &= \frac{L_d \cdot k_{ds2}^2}{T_{sd1} \cdot k_{sd12}^2} + j\omega \cdot \frac{L_d \cdot k_{ds2}^2}{k_{sd12}^2} \\ \gamma^2 \cdot Z_f &= \frac{L_d \cdot k_{ds2}^2}{T_f \cdot k_{s2f}^2} + j\omega \cdot \frac{L_d \cdot k_{ds2}^2}{k_{s2f}^2} \end{aligned} \quad (3.49)$$

Böylece, çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makinanın d eksenini eşdeğer devresi Şekil 3.8'deki gibi olmaktadır:

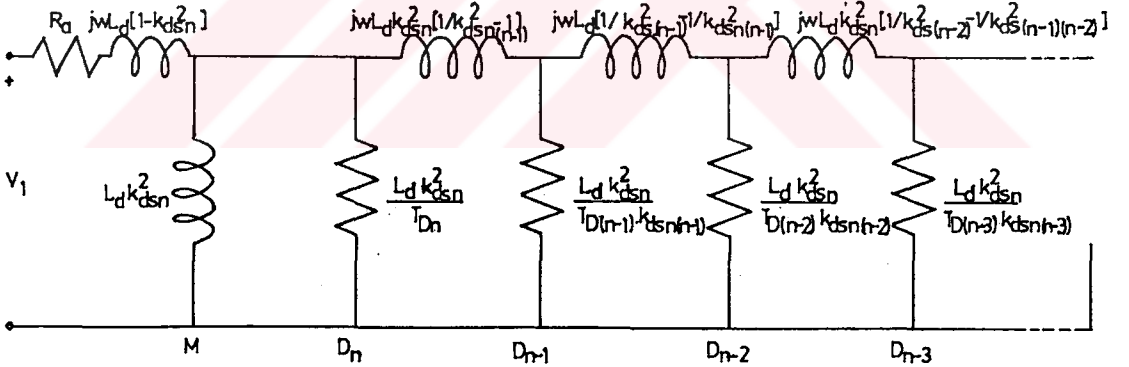


Şekil 3.8. d eksenini için merdiven tipi eşdeğer devre

Genişletilmiş Merdiven Tipi Eşdeğer Devre

Yukarıda da belirtildiği gibi, merdiven tipi eşdeğer devrenin belki de en belirgin üstünlüğü, herhangi bir sayıda gerekli gözü içermek üzere genişletilebilir olmasıdır [25].

Eğer, ekranlardan herhangi birinin her bir ekseninde birden fazla sargı ile gösterilmesi gerekiyorsa, merdiven tipi eşdeğer devreyi söz konusu sargıların herbiri bir göz ile gösterilmek üzere genişletmek mümkündür. Bu durum, genellikle, ekranlardan herhangi biri elektriksel olarak kalın ise, başka bir deyişle, enine kalınlık ilgilenilen frekanstaki deri kalınlığından büyük ise ya da ekranlar farklı malzemelerden çok katlı tabakalar kullanılarak yapılmış ise ortaya çıkar. stniletkenli senkron makinanın şekil 3.9'de görülen genişletilmiş d ekseni eşdeğer devresi şekil 3.8'den hareketle kolayca elde edilir:



şekil 3.9. d ekseni için genişletilmiş merdiven tipi eşdeğer devre

Düzeltilmiş Merdiven Tipi Eşdeğer Devre

şekil 3.8'deki merdiven tipi eşdeğer devre, doğal olarak, makina devrelerini ifade etmek için kullanılan eşitliklerden kaynaklanmaktadır. Ancak, merdiven tipi eşdeğer devre için tek olası biçim bu değildir ve

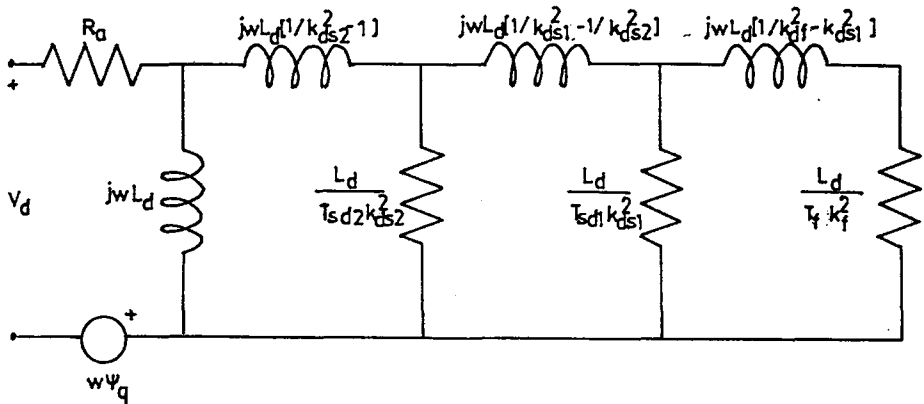
makinanın incelenmesinde basitleştirmeler sağlayabilecek bir düzeltilmiş eşdeğer devre oluşturulabilir. Şekil 3.10'daki merdiven tipi eşdeğer devre, daha kullanışlı bir merdiven tipi eşdeğer devre elde etmek amacıyla $j\omega L_d[1-k_{ds2}^2]$ terimini, bu terim $j\omega L_d[k_{ds2}^2-1]$ biçimini aldığı zaman birinci gözden ikinci göze aktararak düzeltilebilir. Bu durumda, dış ekran, iç ekran ve uyarma sargılarının empedansları da aşağıdaki gibi değişir [25]:

$$\alpha^2 \cdot Z_{sd2} = \frac{L_d}{T_{sd2} \cdot k_{ds2}^2} + j\omega \cdot \frac{L_d}{k_{ds2}^2}$$

$$\beta^2 \cdot Z_{sd1} = \frac{L_d}{T_{sd1} \cdot k_{ds1}^2} + j\omega \cdot \frac{L_d}{k_{ds1}^2} \quad (3.50)$$

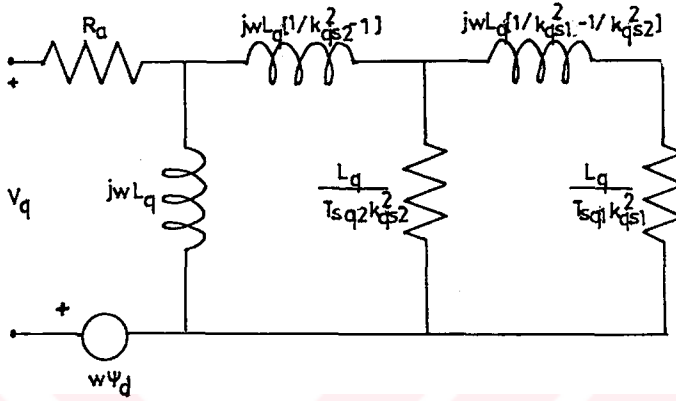
$$\gamma^2 \cdot Z_f = \frac{L_d}{T_f \cdot k_{df}^2} + j\omega \cdot \frac{L_d}{k_{df}^2}$$

Buna göre, çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makinanın, düzeltilmiş d ekseni eşdeğer devresi Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. d ekseni için düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devre

Simetri nedeniyle, q eksenini için düzeltilmiş merdiven tipi devre, uyarma sargısı terimleri (en sağdaki göz) ihmal edilmek suretiyle, d eksenini için geliştirilmiş olan devreye eşdeğerdir ve Şekil 3.11'de verilmiştir.

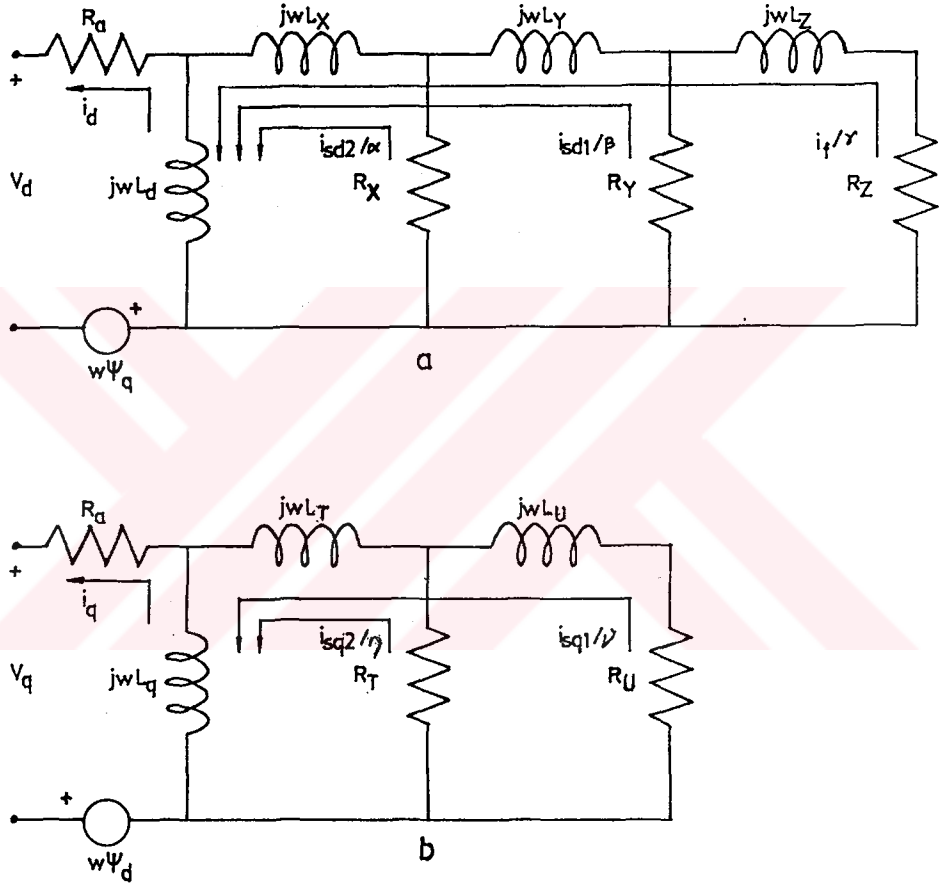


Şekil 3.11. q eksenini için düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devre

Düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devrenin en önemli üstünlüğü, üstüniletkenli senkron makinanın matematiksel modelini basitleştirmesidir. Bunun yanı sıra, düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devrede bütün parametreler direkt olarak statora bağımlı olup, dış ekrana ilişkin terimler içermezler. Bunun anlamı, dış ekranın konumunun diğer ekran ve uyarma sargısına ilişkin parametreleri değiştirmeksizin ayarlanabileceğidir.

Düzeltilmiş Merdiven Tipi Eşdeğer Devre için Üstüniletkenli Senkron Makinanın Matematiksel Modeli

Dördüncü bölümde Şekil 3.10 ve Şekil 3.11 ile verilen üstüniletkenli senkron makinanın d ve q eksenine ilişkin düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devreleri aşağıdaki gibi yeniden çizebiliriz:



Şekil 3.12 . Üstüniletkenli senkron makinaya ilişkin düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devreler
a) d ekseni için
b) q ekseni için

Bu eşdeğer devrelerdeki reaktans ve dirençler aşağıdaki bağıntılar ile tanımlanır:

$$\begin{aligned}
 L_X &= L_d \cdot \left[\frac{1}{k_{ds2}^2} - 1 \right] \\
 L_Y &= L_d \cdot \left[\frac{1}{k_{ds1}^2} - \frac{1}{k_{ds2}^2} \right] \\
 L_Z &= L_d \cdot \left[\frac{1}{k_{df}^2} - \frac{1}{k_{ds1}^2} \right] \\
 L_T &= L_q \cdot \left[\frac{1}{k_{qs2}^2} - 1 \right] \\
 L_U &= L_q \cdot \left[\frac{1}{k_{qs1}^2} - \frac{1}{k_{qs2}^2} \right] \\
 R_X &= \frac{L_d}{T_{sd2} \cdot k_{ds2}^2} \\
 R_Y &= \frac{L_d}{T_{sd1} \cdot k_{ds1}^2} \\
 R_Z &= \frac{L_d}{T_f \cdot k_{df}^2} \\
 R_T &= \frac{L_q}{T_{sq2} \cdot k_{qs2}^2} \\
 R_U &= \frac{L_q}{T_{sq1} \cdot k_{qs1}^2}
 \end{aligned} \tag{3.51}$$

Burada, f uyarma sargısını, s1 iç ekranı, s2 dış ekranı, k_{ij} i ve j sargıları arasındaki kuplaj katsayısını, T_i i sargısına ilişkin zaman sabitini, L_d ve L_q ise d ve q eksenli stator sargısı reaktanslarını göstermektedir.

Simetri nedeniyle, akı-akım bağıntılarını önce d eksenini eşdeğer devresi için elde etmek ve sonra q eksenini için benzer şekilde yazmak mümkündür. Önceki ayrıtta merdiven tipi eşdeğer devre oluşturulurken izlenen yöntem uyarınca, d eksenini için düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devreye ilişkin uç denklemleri matrisel biçimde yazılırsa,

$$\begin{bmatrix} V_d + \omega \Psi_q \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + jX_d & \alpha X_{d, sd2} & \beta X_{d, sd1} & \gamma X_{d, f} \\ \alpha X_{d, sd2} & \alpha^2 (R_{sd2} + jX_{sd2}) & \alpha \beta X_{sd1, 2} & \alpha \gamma X_{f, sd2} \\ \beta X_{d, sd1} & \alpha \beta X_{sd1, 2} & \beta^2 (R_{sd1} + jX_{sd1}) & \beta \gamma X_{f, sd1} \\ \gamma X_{d, f} & \alpha \gamma X_{f, sd2} & \beta \gamma X_{f, sd1} & \gamma^2 (R_f + jX_f) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ i_{sd2} / \alpha \\ i_{sd1} / \beta \\ i_f / \gamma \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} R_a + j\omega L_d & j\omega L_d & j\omega L_d & j\omega L_d \\ j\omega L_d & R_X + j\omega (L_d + L_X) & j\omega (L_d + L_X) & j\omega (L_d + L_X) \\ j\omega L_d & j\omega (L_d + L_X) & R_Y + j\omega (L_d + L_X + L_Y) & j\omega (L_d + L_X + L_Y) \\ j\omega L_d & j\omega (L_d + L_X) & j\omega (L_d + L_X + L_Y) & R_Z + j\omega (L_d + L_X + L_Y + L_Z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ i_{sd2} / \alpha \\ i_{sd1} / \beta \\ i_f / \gamma \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

elde edilir. Buradan sarım katsayıları için aşağıdaki ifadeler elde edilir:

$$\begin{aligned} \alpha^2 &= \frac{R_X}{R_{sd2}} \\ \beta^2 &= \frac{R_Y}{R_{sd1}} \\ \gamma^2 &= \frac{R_Z}{R_f} \end{aligned} \quad (3.53)$$

Eşitlik (3.51)'de, stator sargısı dışındaki sargılara ilişkin satırlar o sargıya ilişkin sarım oranları ile çarpılarak yazılmıştır. Buna göre, d eksenini akı-akım bağıntıları yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \alpha \cdot \Psi_{sd2} \\ \beta \cdot \Psi_{sd1} \\ \gamma \cdot \Psi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & L_d & L_d & L_d \\ L_d & L_d + L_x & L_d + L_x & L_d + L_x \\ L_d & L_d + L_x & L_d + L_x + L_y & L_d + L_x + L_y \\ L_d & L_d + L_x & L_d + L_x + L_y & L_d + L_x + L_y + L_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ i_{sd2/\alpha} \\ i_{sd1/\beta} \\ i_{f/\gamma} \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

veya,

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_{sd2} \\ \Psi_{sd1} \\ \Psi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & L_d & L_d & L_d \\ L_d / \alpha & (L_d + L_x) / \alpha^2 & (L_d + L_x) / \alpha\beta & (L_d + L_x) / \alpha\beta \\ L_d / \beta & (L_d + L_x) / \alpha\beta & (L_d + L_x + L_y) / \beta^2 & (L_d + L_x + L_y) / \beta\gamma \\ L_d / \gamma & (L_d + L_x) / \alpha\gamma & (L_d + L_x + L_y) / \beta\gamma & (L_d + L_x + L_y + L_z) / \gamma^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ i_{sd2} \\ i_{sd1} \\ i_f \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

bulunur.

Benzer şekilde, q ekseni akı-akım bağıntıları, q ekseni için dış ve iç ekrana ilişkin sarım oranları sırasıyla η ve ν olduğuna göre aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$\begin{bmatrix} \Psi_q \\ \Psi_{sq2} \\ \Psi_{sq1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_q & L_q & L_q \\ L_q / \eta & (L_q + L_T) / \eta^2 & (L_q + L_T) / \eta\nu \\ L_q / \nu & (L_q + L_T) / \eta \cdot \nu & (L_q + L_T + L_U) / \nu^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_q \\ i_{sq2} \\ i_{sq1} \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

Üstüniletkenli senkron makinada elektrik ve mekanik yana ilişkin uç denklemleri generatör çalışma durumu için ve bütün büyüklükler (zaman dahil) birim değerler ile verildiğine göre, aşağıdaki gibi yazılır:

$$\begin{aligned}
 v_d &= -R_a \cdot i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega \Psi_q \\
 v_q &= -R_a \cdot i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} + \omega \Psi_d \\
 v_f &= 0 = R_f \cdot i_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \\
 0 &= R_{sd2} \cdot i_{sd2} + \frac{d\Psi_{sd2}}{dt} \\
 0 &= R_{sq2} \cdot i_{sq2} + \frac{d\Psi_{sq2}}{dt} \\
 0 &= R_{sd1} \cdot i_{sd1} + \frac{d\Psi_{sd1}}{dt} \\
 0 &= R_{sq1} \cdot i_{sq1} + \frac{d\Psi_{sq1}}{dt} \\
 M_d &= \frac{1}{2 \cdot H \cdot \omega_o} \cdot \frac{ds}{dt} + M_e
 \end{aligned} \tag{3.57}$$

Burada, ω_o (rad/s.) senkron açısal hızı, ω (p.u.) açısal hızı göstermektedir.

Bundan sonraki adım, üstüniletkenli senkron makinanın merdiven tipi eşdeğer devre için durum uzayı modelini oluşturmaktır. Bu nedenle durum değişkenleri aşağıdaki gibidir:

$$\underline{X}^T = \begin{bmatrix} \Psi_d & \Psi_q & \Psi_f & \Psi_{sd2} & \Psi_{sq2} & \Psi_{sd1} & \Psi_{sq1} & \delta & s \end{bmatrix} \tag{3.58}$$

Eşitlik (3.55) ve (3.56) ile verilen akı-akım bağıntılarından hareketle, sargı akımlarının akılar cinsinden ifadeleri;

$$\begin{aligned}
 i_d &= (a_1 + a_2) \cdot \Psi_d - a_2 \cdot \alpha \cdot \Psi_{sd2} \\
 i_{sd2} &= a_2 \alpha \cdot \Psi_d - (a_2 + a_3) \cdot \alpha^2 \cdot \Psi_{sd2} + a_3 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \Psi_{sd1} \\
 i_{sd1} &= a_3 \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \Psi_{sd2} - (a_3 + a_4) \cdot \beta^2 \cdot \Psi_{sd1} + a_4 \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \Psi_f \\
 i_f &= a_4 \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \Psi_{sd1} - a_4 \cdot \gamma^2 \cdot \Psi_f \\
 i_q &= (b_1 + b_2) \cdot \Psi_q - b_2 \cdot \eta \cdot \Psi_{sq2} \\
 i_{sq2} &= b_2 \cdot \eta \cdot \Psi_q - (b_2 + b_3) \cdot \eta^2 \cdot \Psi_{sq2} + b_3 \cdot \eta \cdot \nu \cdot \Psi_{sq1} \\
 i_{sq1} &= b_3 \cdot \eta \cdot \nu \cdot \Psi_{sq2} - b_3 \cdot \nu^2 \cdot \Psi_{sq1}
 \end{aligned} \tag{3.59}$$

şeklinde elde edilir; burada,

$$\begin{aligned}
 a_1 &\triangleq \frac{1}{L_d}, \quad a_2 \triangleq \frac{1}{L_X}, \quad a_3 \triangleq \frac{1}{L_Y}, \quad a_4 \triangleq \frac{1}{L_Z} \\
 b_1 &\triangleq \frac{1}{L_q}, \quad b_2 \triangleq \frac{1}{L_T}, \quad b_3 \triangleq \frac{1}{L_U}
 \end{aligned} \tag{3.60}$$

olarak tanımlanmıştır.

Daha önceki bölümde belirtildiği gibi, kararlılık analizi için bir transformatör ve birbirine eşdeğer, paralel bağlı iki enerji iletim hattı üzerinden sonsuz güçlü şebekeye bağlı bir üstüniletkenli senkron generatörden oluşan sistem ele alınmıştır.

Eşitlik (3.57) ile verilen uç denklemleri, durum uzayı modeli biçiminde ifade edilir ve iletim sistemi modeli bu eşitliklerde kullanılır. Sonuç olarak, durum değişkenleri eşitlik (3.58)'de verildiği gibi olmak üzere, üstüniletkenli senkron makinanın düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devre için durum uzayı modeli eşitlik (3.61)'deki gibi elde edilir. Burada $p \Delta \frac{d}{dt}$ türev operatörü olup :

$$\begin{aligned} R_T &\triangleq R_a + R_{tr} + R_{he} \\ X_T &\triangleq X_{tr} + X_{he} \end{aligned} \quad (3.62)$$

ve,

$$\begin{aligned} p_1 \Delta &\triangleq 1 - X_T(a_1 + a_2) \\ p_2 \Delta &\triangleq 1 - X_T(b_1 + b_2) \end{aligned} \quad (3.63)$$

olarak tanımlanmıştır.

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_f \\ \psi_{sd2} \\ p \psi_{sq2} \\ \psi_{sd1} \\ \psi_{sq1} \\ \delta \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_T(a_1+a_2)/p_1 & -[x_T(b_1+b_2)-1]/p_1 & 0 & -R_T a_2 \alpha / p_1 & x_T b_2 \eta / p_1 & 0 & 0 & 0 \\ [x_T(a_1+a_2)-1]/p_2 & R_T(b_1+b_2)/p_2 & 0 & -x_T a_2 \alpha / p_2 & -R_T b_2 \eta / p_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_f a_4 \gamma^2 & 0 & 0 & -R_f a_4 \beta \gamma & 0 & 0 \\ -R_{sd2} a_2 \alpha^2 & 0 & 0 & -R_{sd2}(a_2+a_3)\alpha^2 & 0 & -R_{sd2} a_3 \alpha \beta & 0 & 0 \\ 0 & -R_{sq2} b_2 \eta & 0 & 0 & R_{sq2}(b_2+b_3)\eta^2 & 0 & -R_{sq2} b_3 \eta \nu & 0 \\ 0 & 0 & -R_{sd1} a_4 \beta \gamma & -R_{sd1} a_3 \alpha \beta & 0 & R_{sd1}(a_3+a_4)\beta^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -R_{sq1} b_3 \eta \nu & 0 & R_{sq1} b_3 \nu^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_f \\ \psi_{sd2} \\ \psi_{sq2} \\ \psi_{sd1} \\ \psi_{sq1} \\ \delta \\ s \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{2H\omega_0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [V_b \sin \delta - x_T a_2 \alpha p^\Psi_{sd2} - x_T (b_1 + b_2) s^\Psi_q + x_T b_2 \eta s^\Psi_{sq2} + s^\Psi_q] / p_1 \\ [V_b \cos \delta - x_T b_2 \eta p^\Psi_{sq2} + x_T (a_1 + a_2) s^\Psi_d - x_T a_2 \alpha s^\Psi_{sd2} - s^\Psi_d] / p_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ [(a_1 + a_2 - b_1 - b_2) \Psi_d^\Psi q - a_2 \alpha \Psi_q s_{d2} + b_2 \eta \Psi_d s_{sq2}] / 2H\omega_0 \end{bmatrix}$$

(3.61)

BÖLÜM 4

ÜSTÜNİLETKENLİ SENKRON MAKİNANIN SİMÜLASYONU

Bu bölümde, önceki bölümde elde edilen tek rotor ekranına ve çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina matematiksel modelleri ile üstüniletkenli senkron makinanın düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devre için elde edilen matematiksel modeli kullanılarak, makinanın kararlılık açısından analizi yapılmıştır.

Yukarıda verilen bütün makinalara ilişkin analiz, sayısal simülasyon yöntemi ile yapılmıştır. Simülasyon yöntemi gereği, gerçek sistem davranışını yansıtacak şekilde oluşturulan matematiksel modeller kullanılırken, her makinanın bir transformatör ve birbirine eşdeğer, paralel bağlı iki enerji iletim hattı üzerinden sonsuz büyük güçlü şebekeye bağlı olduğu varsayılmıştır. Simülasyon işleminde, her bir sistemin önce sürekli halde çalıştığı, belli bir t_0 anında bozucu bir etkiye maruz kaldığı, gene belli bir t_1 anında bu bozucu etkinin kaldırıldığı ve belli bir t_2 anında da tekrar bozucu etki öncesi çalışma durumuna geçildiği varsayılmıştır. Bu amaçla Fortran IV dilinde yazılmış üç değişik bilgisayar programı hazırlanmıştır. Bu üç bilgisayar programının birbirinden farklılığı sadece gözönüne alınan makinaların fiziksel özellikleri nedeniyle matematiksel özelliklerde oluşan farklılıktır. Simülasyon işlemine ilişkin programların akış diyagramları Ek-A da verilmiştir. Hazırlanan bilgisayar programları PC, 486DX-40 bilgisayarında oluşturulmuş, sonuç eğrilerinin çiziminde ise Harvard Graphic 2 çizim programı kullanılmıştır. Simülasyon için hazırlanmış olan programlar temelde bir ana program ile sekiz adet alt programdan oluşmaktadır. Bu alt programlar DATA, PARAMT, LDFLOW, ZAMAN, STOREX, SIMUL1, RK4 ve FUNCT' dır.

DATA alt programında, incelenen makinarya ve sisteme ilişkin parametre değerleri ile çalışma koşulları verilmektedir.

PARAMT alt programında, kullanılan matematiksel modelde gerekli olan büyüklükler hesaplanmaktadır.

LDFLOW alt programında, sürekli hal çalışma koşulları belirlenmekte ve böylece durum değişkenleri için ilk değerler elde edilmektedir.

ZAMAN alt programında, yukarıda açıklanan arıza koşulları programa verilir ve integrasyon adımı belirlenir.

SIMUL1 alt programında, zamanın ilerletilmesi için simülasyon işlemi gerçekleştirilir. İncelenen sisteme ilişkin diferansiyel denklemlerin çözümü için RK4 alt programı, her iterasyon adımıda elde edilen değerlerin saklanması için de STOREX alt programı çağrılır.

STOREX alt programında, her iterasyon adımıda, değişimleri çizilecek olan büyüklüklerin değerleri saklanır.

RK4 alt programında, Runge - Kutta 4 nümerik integrasyon yöntemi yardımıyla, incelenen sisteme ilişkin diferansiyel denklemler çözülmektedir. Bunun için FUNCT alt programından faydalanılmaktadır. Nümerik integrasyon adımı 0.0005 saniye olarak alınmıştır.

FUNCT alt programında ise, değişen çalışma koşullarına bağlı olarak sisteme ilişkin durum değişkenlerinin türevleri hesaplanmaktadır.

Simülasyon çalışmasında, önce yukarıda belirtildiği şekilde sonsuz büyük güçlü şebekeye bağlanmış olan alışlagelmiş senkron makina için kararlılık incelemesi yapılmıştır. Amaç, alışlagelmiş senkron makina ile

üstüniletkenli senkron makinayı kararlılık açısından karşılaştırmaktır. Alışlagelmiş senkron makinanın matematiksel modeli için 21 no.lu kaynak referans alınmıştır. Aynı zamanda bu makinanın regülatörsüz çalıştığı varsayılmıştır. Enerji iletim sistemine ilişkin parametreler bütün makinalar için aynı olup, Tablo 4.1'de verilmiştir. Alışlagelmiş senkron makinaya ilişkin parametreler [40] Tablo 4.2' de, sürekli hal çalışma koşulları ise Tablo 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Enerji iletim sistemi parametreleri

Transformatör direnci	$R_{tr} \text{ (p.u.)}$	0.003
Transformatör reaktansı	$X_{tr} \text{ (p.u.)}$	0.15
İletim hattı direnci	$R_h \text{ (p.u.)}$	0.01
İletim hattı reaktansı	$R_h \text{ (p.u.)}$	0.1
Bara Gerilimi	$V_b \text{ (p.u.)}$	1.0

Tablo 4.2. Alışlagelmiş senkron makina parametreleri

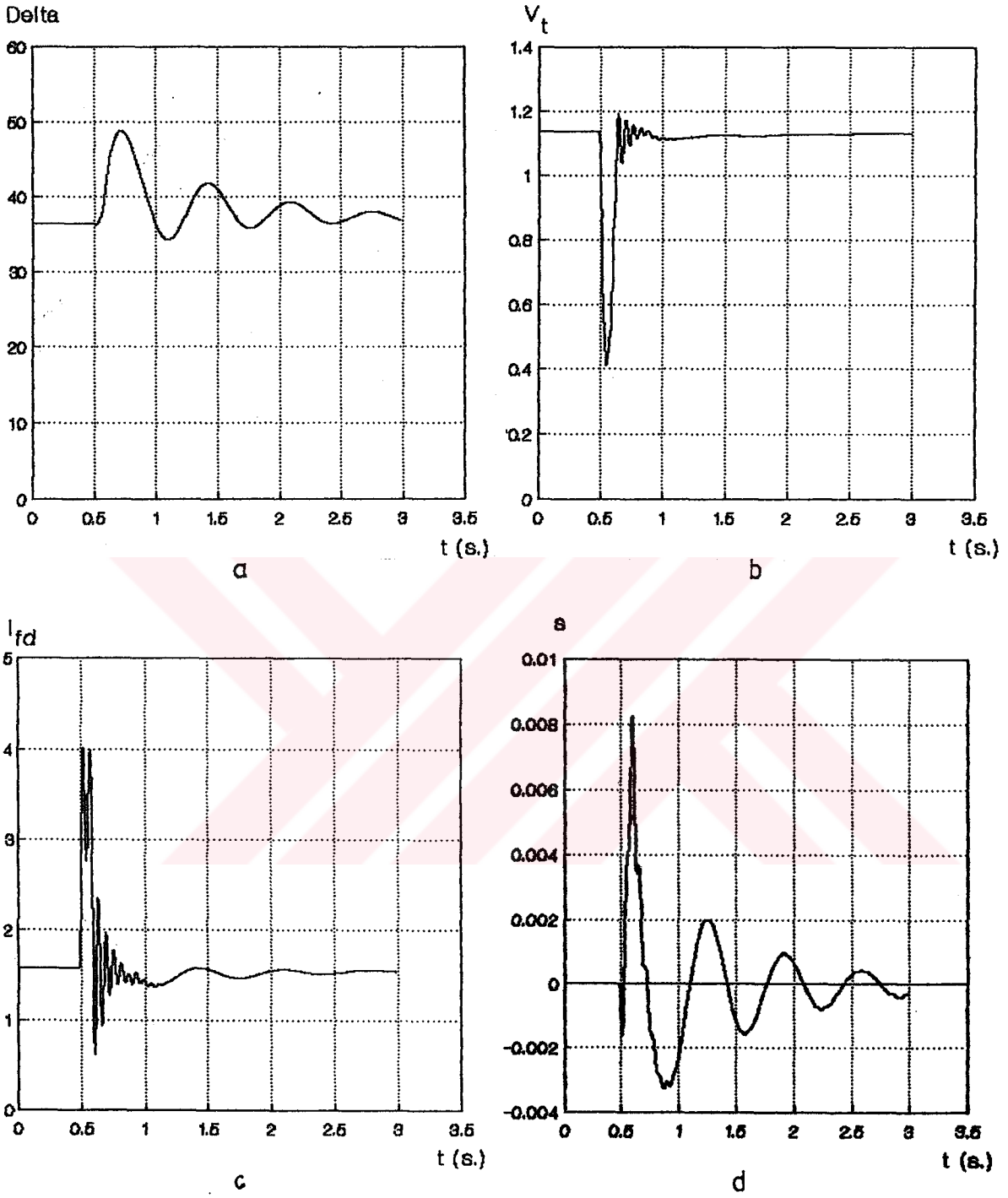
Makina gücü (MVA)	2000
Stator Direnci $R_a \text{ (p.u.)}$	0.005
Boyuna Eksen Mıknatıslanma Reaktansı $X_{ad} \text{ (p.u.)}$	1.86
Enine Eksen Mıknatıslanma Reaktansı $X_{aq} \text{ (p.u.)}$	1.77
Stator Kaçak Reaktansı $X_{a\sigma} \text{ (p.u.)}$	0.14
Uyarma Direnci $R_f \text{ (p.u.)}$	0.0015
Uyarma Kaçak Reaktansı $X_{f\sigma} \text{ (p.u.)}$	0.11
Amortisör Sargısı Boyuna Eksen Direnci $R_{kd} \text{ (p.u.)}$	0.038
Amortisör Sargısı Enine Eksen Direnci $R_{kq} \text{ (p.u.)}$	0.038
Amortisör Sargısı Boyuna Eksen Kaçak Reaktansı $X_{kd\sigma} \text{ (p.u.)}$	0.08
Amortisör Sargısı Enine Eksen Kaçak Reaktansı $X_{kq\sigma} \text{ (p.u.)}$	0.19
Enerji Zaman Sabiti $H \text{ (s.)}$	3.25

Tablo 4.3. Değişik yükleme koşullarında, alışlagelmiş senkron makina için sürekli hal çalışma koşulları

Aktif Güç P_b (p.u.)	0.8	0.6	0.8	0.6
Reaktif Güç Q_b (p.u.)	0.6	0.8	-0.6	-0.8
Rotor açısı δ	36°.43	24°.97	98°.57	118°.5
Uç gerilimi açısı δ_t	28°.59	19°.4	88°.04	109°.54
Yük açısı φ	44°.71	58°.7	-26°.34	-44°.62
Makina Uç gerilimi V_t (p.u.)	1.14	1.17	0.9	0.85
Makinadan Çekilen Akım I_t (p.u.)	1.	1.	1.	1.
Stator Gerilimi Boyuna Eksen Bileşeni v_d (p.u.)	0.54	0.39	0.9	0.8
Stator Gerilimi Enine Eksen Bileşeni v_q (p.u.)	1.0	1.1	0.031	-0.29
Stator Akımı Boyuna Eksen Bileşeni i_d (p.u.)	0.96	0.98	0.88	0.91
Stator Akımı Enine Eksen Bileşeni i_q (p.u.)	0.29	0.21	0.47	0.42
Uyarma Akımı i_f (p.u.)	1.6	1.6	0.96	0.82
Makinada Endüklenen İç Gerilim E_f (p.u.)	2.9	3.1	1.8	1.5

Simülasyonda yukarıda belirtilen bütün makinalar için, Tablo-4.3'de görülen değişik yükleme durumlarına ilişkin sistem cevabı, rotor açısı $\delta = f(t)$, makina uç gerilimi $V_t = f(t)$, uyarma akımı $i_f = f(t)$ ve kayma $s = f(t)$ değişimleri ile incelenmiştir. Söz konusu değişik yükleme durumlarına ilişkin olarak alışlagelmiş makina için elde edilen sonuçlar Şekil 4.1 ilâ Şekil 4.4'de verilmiştir.

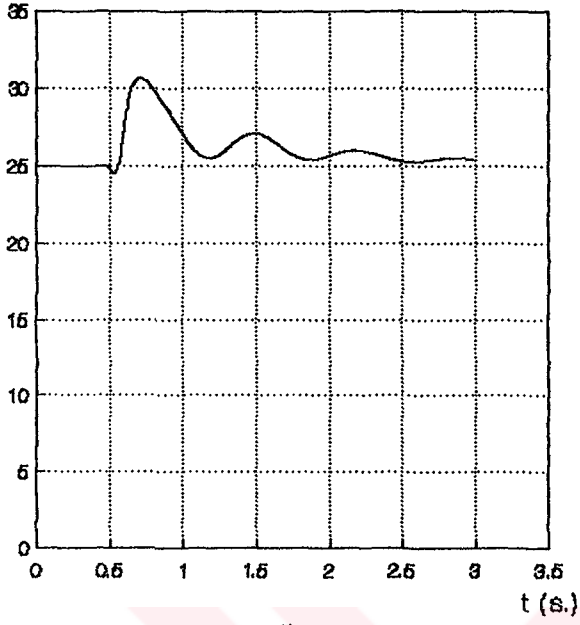
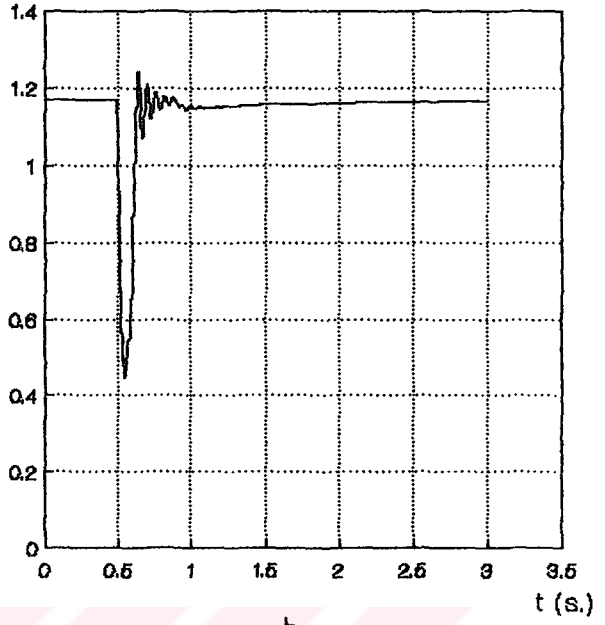
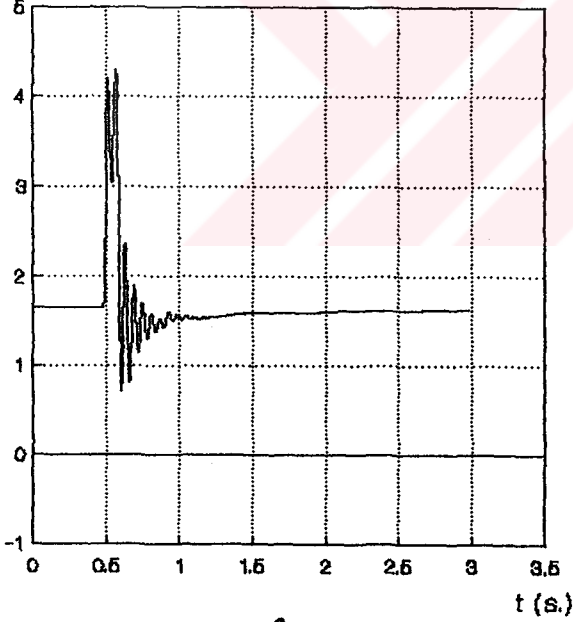
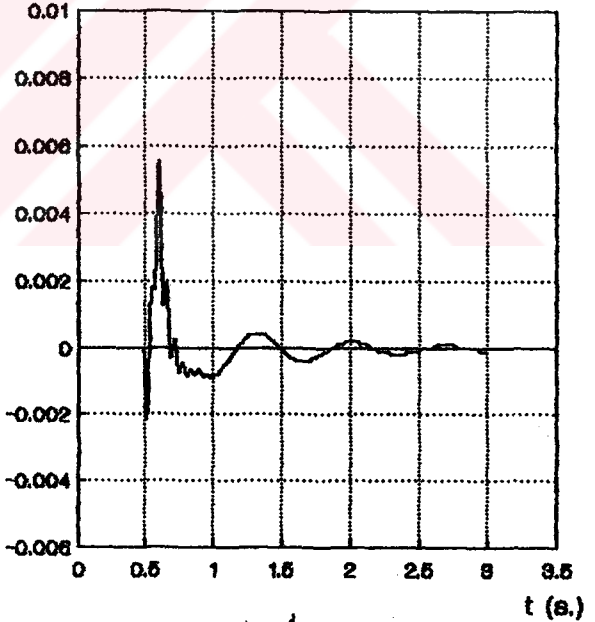
Benzer şekilde çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makinaya ilişkin parametreler [21] Tablo 4.4'de ve bu makina için yukarıda belirtilen değişik yükleme koşulları için sürekli hal çalışma koşulları Tablo 4.5'de verilmiştir. Tek rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için kararlılık incelemesi yapılırken, iç rotor ekranının olmadığı varsayımı ile aynı parametreler geçerlidir.



Şekil 4.1. $P_b = 0.8$ p.u. ve $Q_b = 0.6$ p.u. olması durumunda alışılagelmiş senkron makina için sistem cevabı

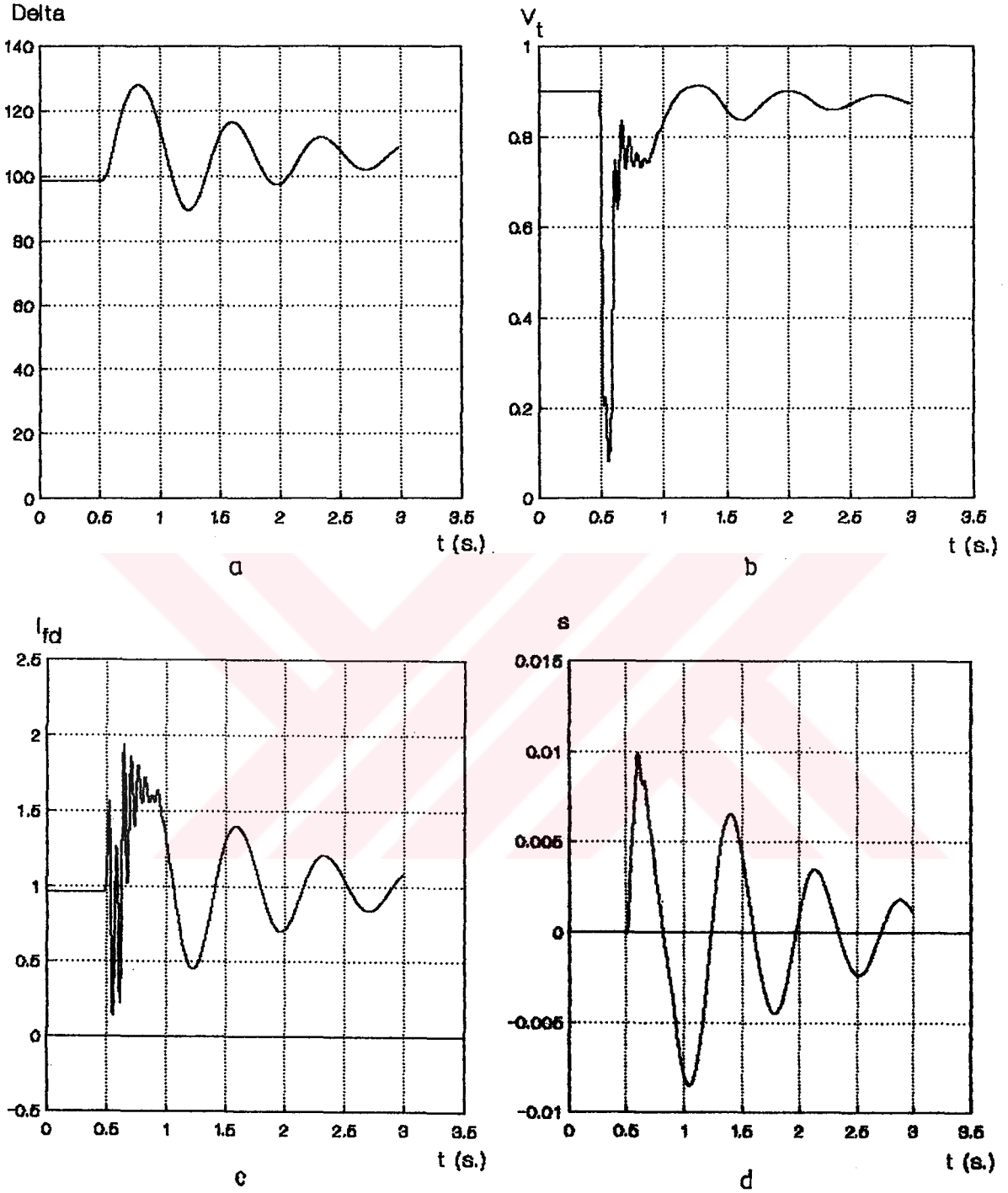
- Rotor açısının değişimi
- Makina uç geriliminin değişimi
- Uyarma akımının değişimi
- Kaymanın değişimi

Delta

 V_t  I_{fd}  δ 

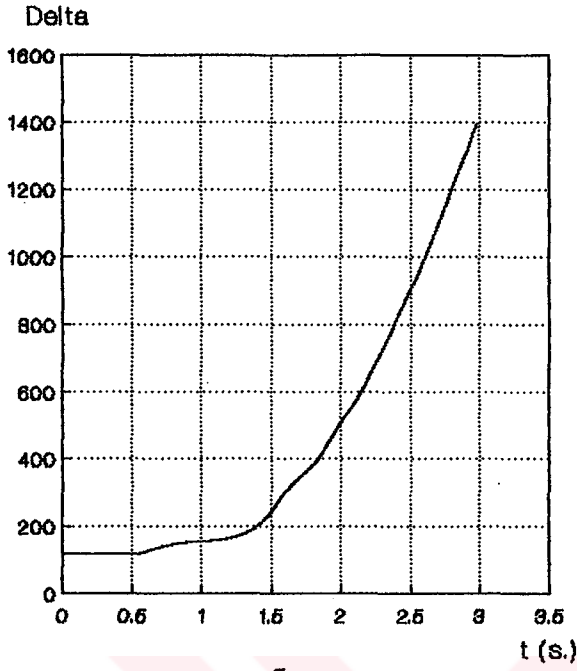
Şekil 4.2. $P_b = 0.6$ p.u. ve $Q_b = 0.8$ p.u. olması durumunda alışılagelmiş senkron makina için sistem cevabı

- a) Rotor açısının değişimi
- b) Makina uç geriliminin değişimi
- c) Uyarma akımının değişimi
- d) Kaymanın değişimi

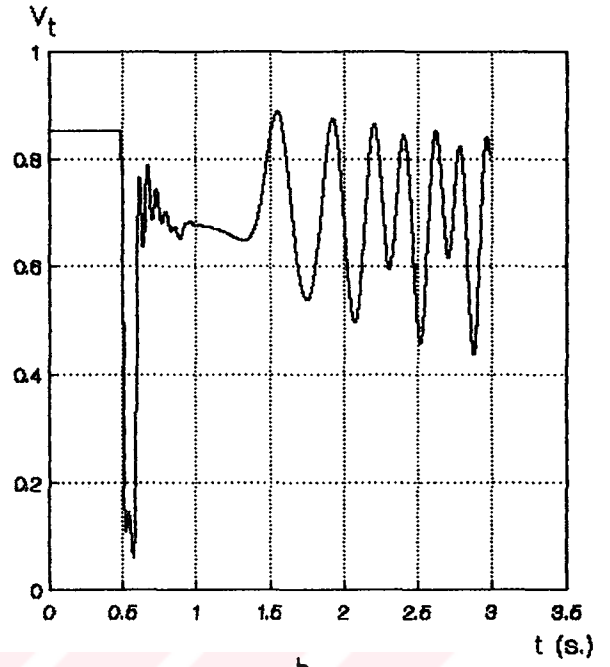


Şekil 4.3. $P_b = 0.8$ p.u. ve $Q_b = -0.6$ p.u. olması durumunda alışılagelmiş senkron makina için sistem cevabı

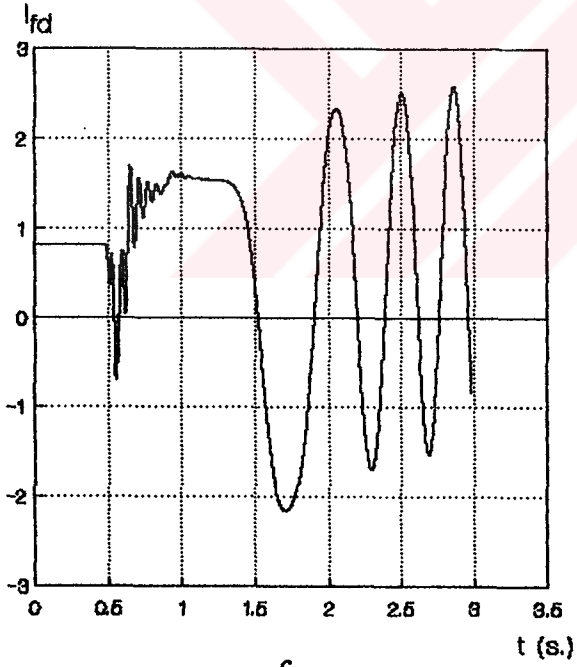
- a) Rotor açısının değişimi
- b) Makina uç geriliminin değişimi
- c) Uyarma akımının değişimi
- d) Kaymanın değişimi



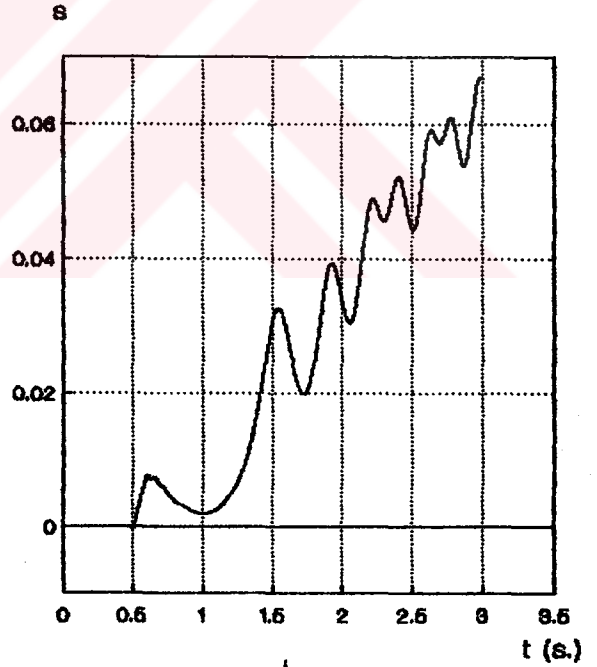
a



b



c



d

Şekil 4.4. $P_b = 0.6$ p.u. ve $Q_b = -0.8$ p.u. olması durumunda alışılagelmiş senkron makina için sistem cevabı

- Rotor açısının değişimi
- Makina uç geriliminin değişimi
- Uyarma akımının değişimi
- Kaymanın değişimi

Tablo 4.4. Çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina parametreleri

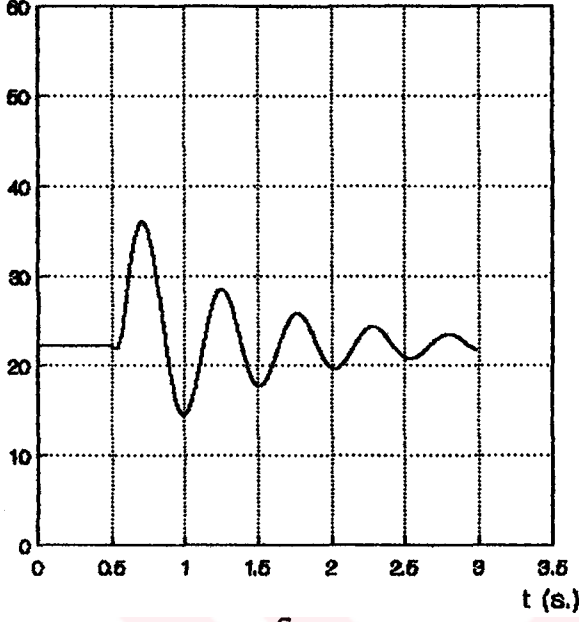
Makina Gücü (MVA)	2.000
Çevresel Zırhın Dış Yarıçapı $r_{s2}(m.)$	1.802
Çevresel Zırhın İç Yarıçapı $r_{s1}(m.)$	1.0
Stator Sargısı Yarıçapı $r_a(m.)$	0.7
Dış Ekran Yarıçapı $r_{sd2}(m.)$	0.5675
İç Ekran Yarıçapı $r_{sd1}(m.)$	0.405
Uyarma Sargısı Yarıçapı $r_f(m.)$	0.345
Stator Direnci $R_a(p.u.)$	$0.149 \cdot 10^{-2}$
Stator Boyuna Eksen Reaktansı $X_d(p.u.)$	0.56066
Stator Enine Eksen Reaktansı $X_q(p.u.)$	0.56066
Stator Sargısı ile Diğer Sargılar Arasındaki Ortak Reaktans $X_{ad} = X_{aq}(p.u.)$	0.56066
Uyarma Sargısı Direnci $R_f(p.u.)$	$0.1566 \cdot 10^{-4}$
Uyarma Sargısı Reaktansı $X_f(p.u.)$	1.21633
Dış Rotor Ekranı Boyuna Eksen Direnci $R_{sd2}(p.u.)$	0.02757
Dış Rotor Ekranı Enine Eksen Direnci $R_{sq2}(p.u.)$	0.02752
Dış Rotor Ekranı Boyuna Eksen Reaktansı $X_{sd2}(p.u.)$	0.75767
Dış Rotor Ekranı Enine Eksen Reaktansı $X_{sq2}(p.u.)$	0.75740
İç Rotor Ekranı Boyuna Eksen Direnci $R_{sd1}(p.u.)$	0.00969
İç Rotor Ekranı Enine Eksen Direnci $R_{sq1}(p.u.)$	0.00208
İç Rotor Ekranı Boyuna Eksen Reaktansı $X_{sd1}(p.u.)$	1.85717
İç Rotor Ekranı Enine Eksen Reaktansı $X_{sq1}(p.u.)$	1.19106
Uyarma Sargısı Zaman Sabiti $T_f(s.)$	0.08745
Dış Rotor Ekranı Boyuna Eksen Zaman Sabiti $T_{sd2}(s.)$	0.0876
Dış Rotor Ekranı Enine Eksen Zaman Sabiti $T_{sq2}(s.)$	0.61007
İç Rotor Ekranı Boyuna Eksen Zaman Sabiti $T_{sd1}(s.)$	1.823
İç Rotor Ekranı Enine Eksen Zaman Sabiti $T_{sq1}(s.)$	361.2
Enerji Zaman Sabiti $H(s.)$	3.0

Tablo 4.5. Değişik yükleme koşullarında üstüniletkenli senkron makina için sürekli hal çalışma koşulları

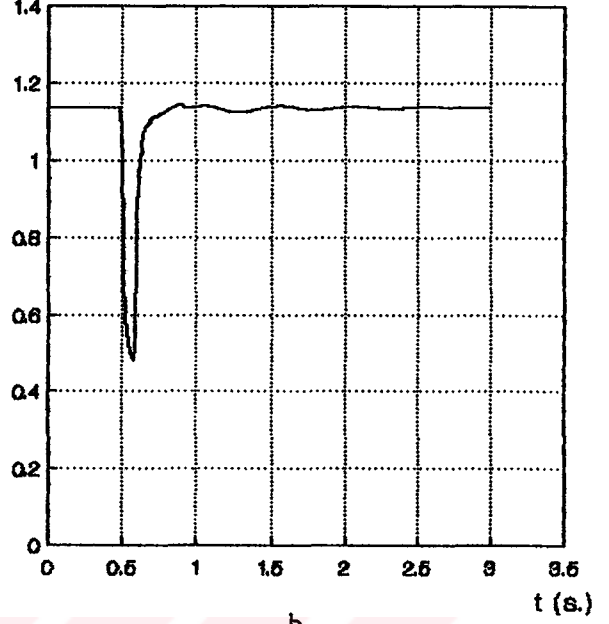
Aktif Güç P_b (p.u.)	0.8	0.6	0.8	0.6
Reaktif Güç Q_b (p.u.)	0.6	0.8	-0.6	-0.8
Rotor açısı δ	22°.38	15°.54	48°.1	49°.44
Uç gerilimi açısı δ_t	14°.4	9°.97	37°.56	40°.93
Yük açısı φ	44°.71	58°.7	-26°.34	-44°.62
Makina Uç gerilimi V_t (p.u.)	1.14	1.17	0.9	0.85
Makinadan Çekilen Akım I_t (p.u.)	1.	1.	1.	1.
Stator Gerilimi Boyuna Eksen Bileşeni v_d (p.u.)	0.29	0.2	0.55	0.56
Stator Gerilimi Enine Eksen Bileşeni v_q (p.u.)	1.1	1.2	0.71	0.65
Stator Akımı Boyuna Eksen Bileşeni i_d (p.u.)	0.86	0.93	0.19	-0.064
Stator Akımı Enine Eksen Bileşeni i_q (p.u.)	0.51	0.36	0.98	1.0
Uyarma Akımı i_f (p.u.)	2.8	3.	1.5	1.1
Makinada Endüklenen İç Gerilim E_f (p.u.)	1.6	1.7	0.83	0.61

Çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için Tablo 4.5'de verilen değişik yük durumlarına ilişkin olarak elde edilen sonuçlar Şekil 4.5 ilâ Şekil 4.8'de verilmiştir. Aynı yük durumlarına ilişkin olarak tek rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için elde edilen sonuçlar ise Şekil 4.9 ilâ Şekil 4.12'de verilmiştir.

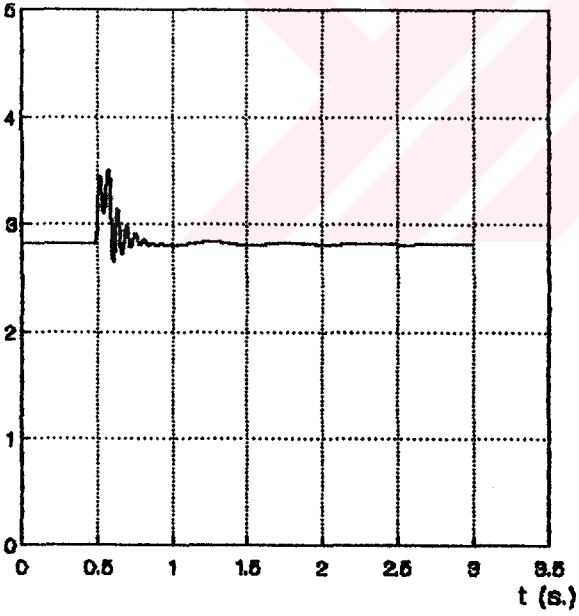
Delta



a

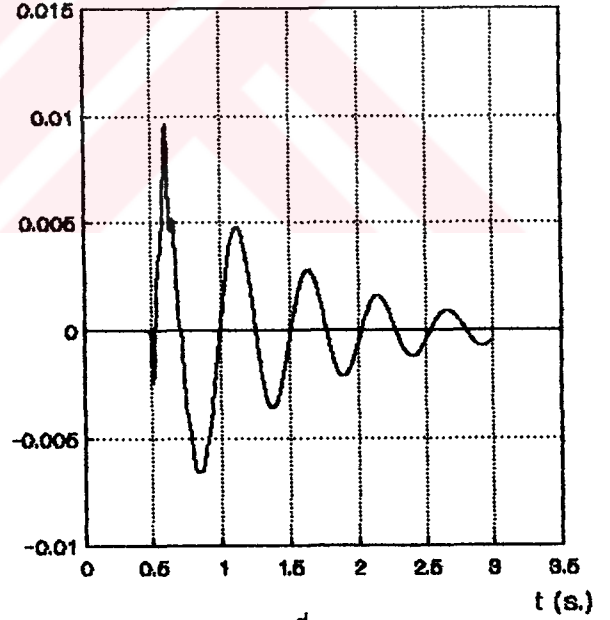
 V_t 

b

 I_f 

c

s

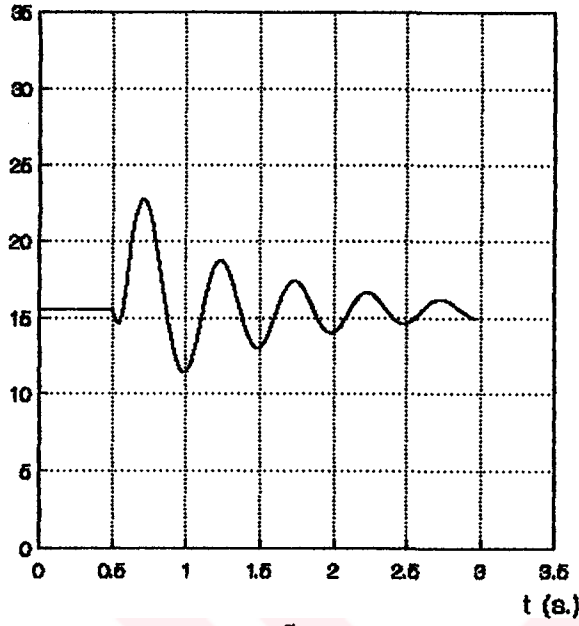


d

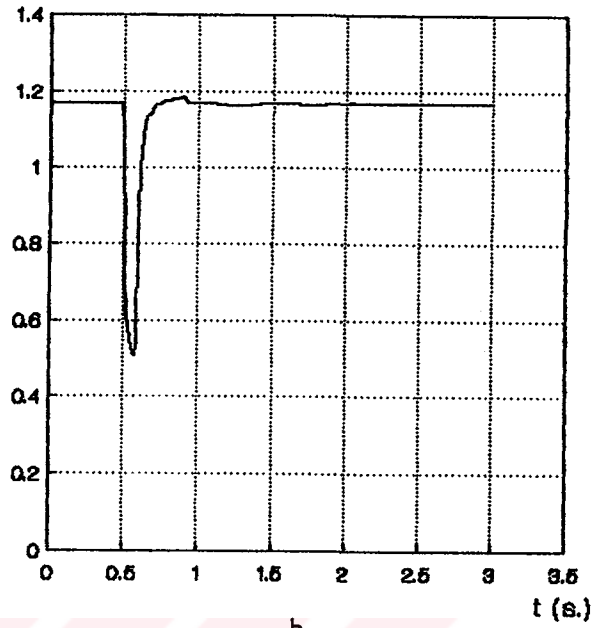
Şekil 4.5. $P_b = 0.8$ p.u. ve $Q_b = 0.6$ p.u. olması durumunda çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için sistem cevabı

- a) Rotor açısının değişimi
- b) Makina uç geriliminin değişimi
- c) Uyarma akımının değişimi
- d) Kaymanın değişimi

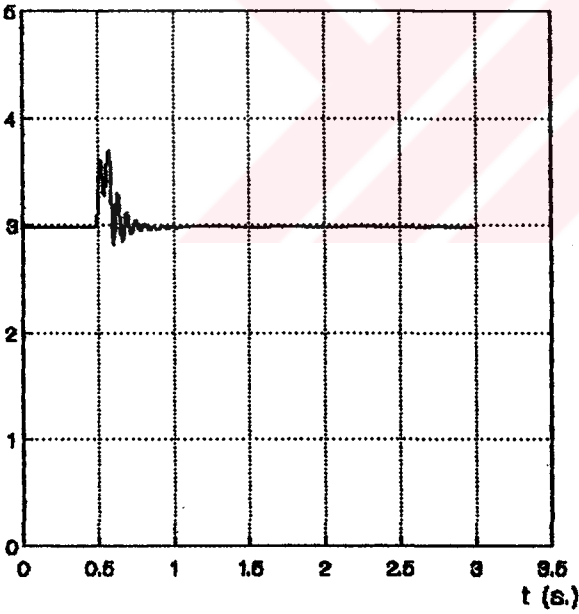
Delta



a

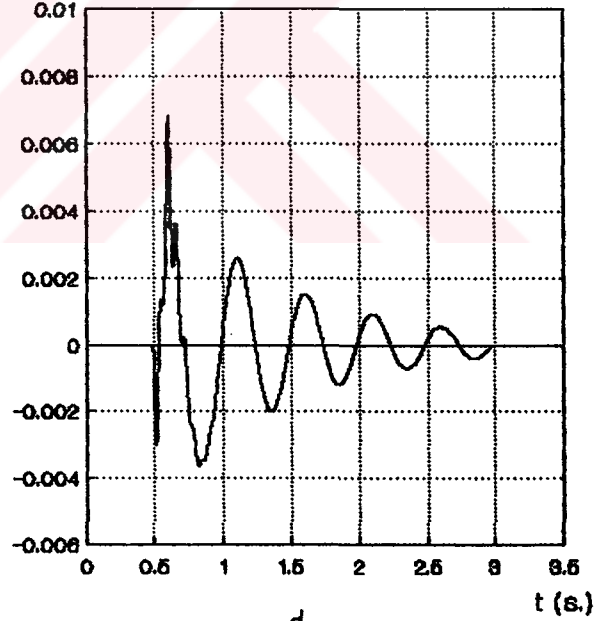
 V_t 

b

 I_f 

c

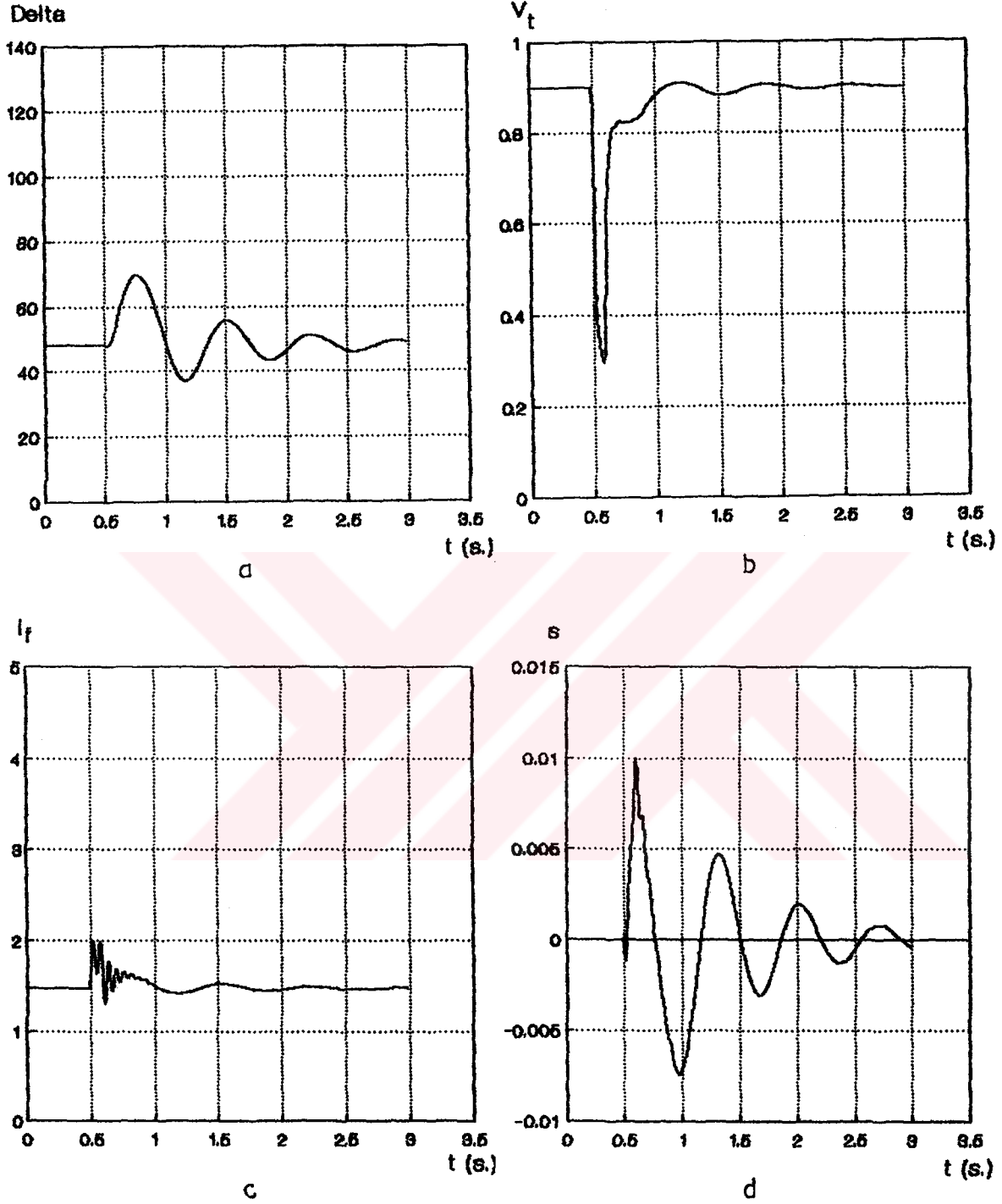
s



d

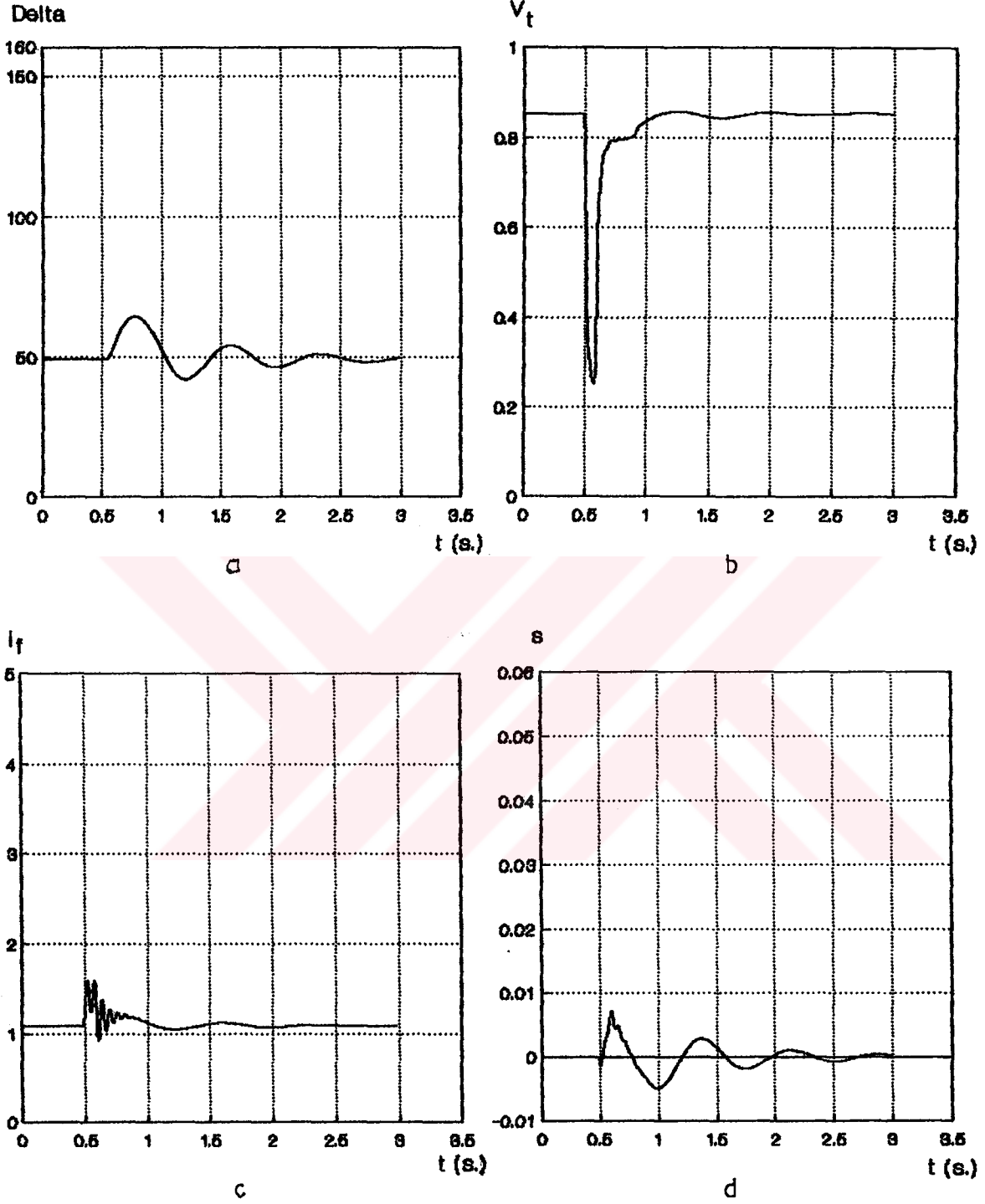
Şekil 4.6. $P_b = 0.6$ p.u. ve $Q_b = 0.8$ p.u. olması durumunda çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için sistem cevabı

- a) Rotor açısının değişimi
- b) Makina uç geriliminin değişimi
- c) Uyarma akımının değişimi
- d) Kaymanın değişimi



Şekil 4.7. $P_b = 0.8$ p.u. ve $Q_b = -0.6$ p.u. olması durumunda çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için sistem cevabı

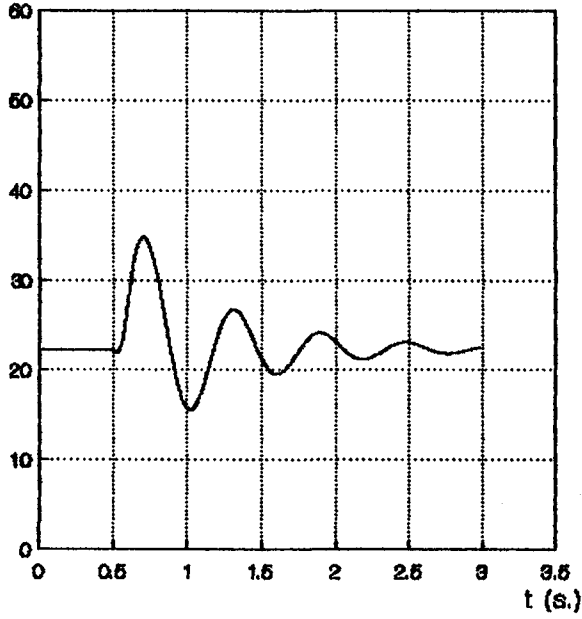
- a) Rotor açısının değişimi
- b) Makina uç geriliminin değişimi
- c) Uyarma akımının değişimi
- d) Kaymanın değişimi



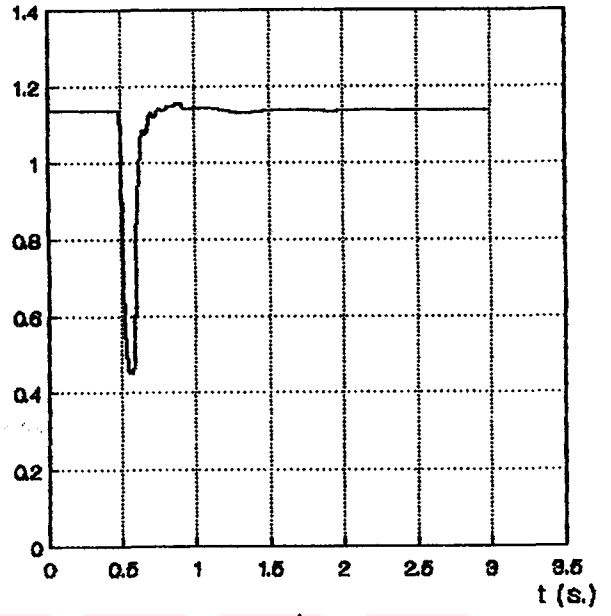
Şekil 4.8. $P_b = 0.6$ p.u. ve $Q_b = -0.8$ p.u. olması durumunda çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için sistem cevabı

- a) Rotor açısının değişimi
- b) Makina uç geriliminin değişimi
- c) Uyarma akımının değişimi
- d) Kaymanın değişimi

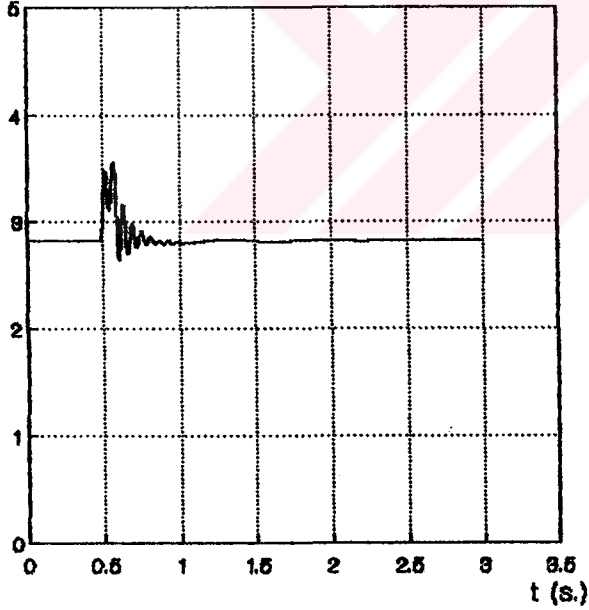
Delta



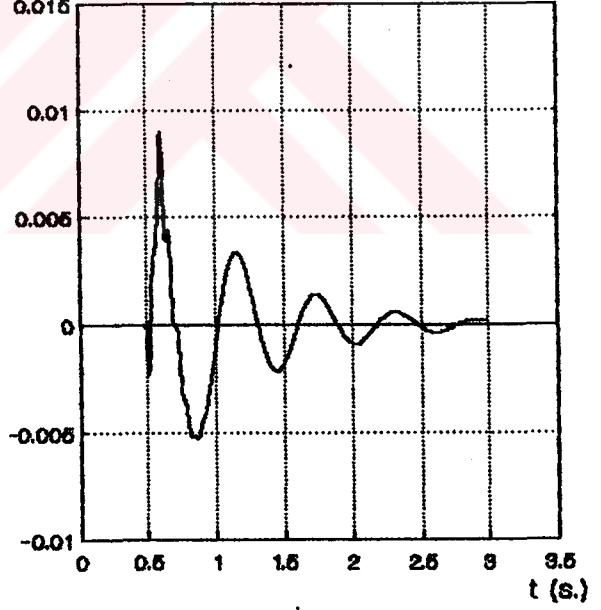
a

 V_t 

b

 I_f 

c

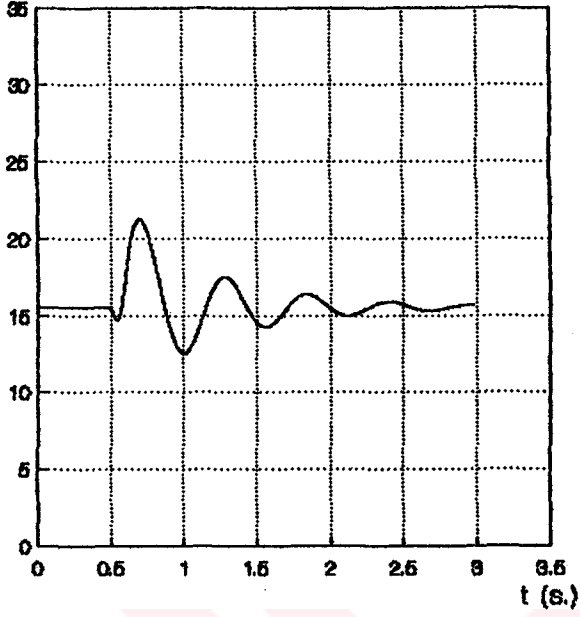
 δ 

d

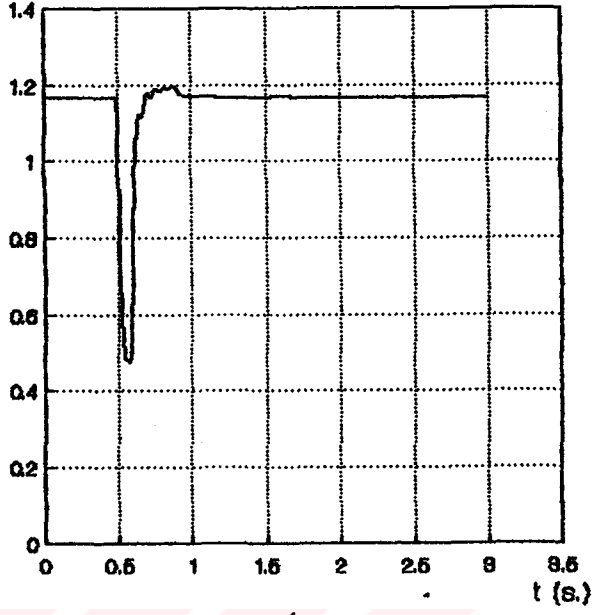
Şekil 4.9. $P_b = 0.8$ p.u. ve $Q_b = 0.6$ p.u. olması durumunda tek rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için sistem cevabı

- a) Rotor açısının değişimi
- b) Makina uç geriliminin değişimi
- c) Uyarma akımının değişimi
- d) Kaymanın değişimi

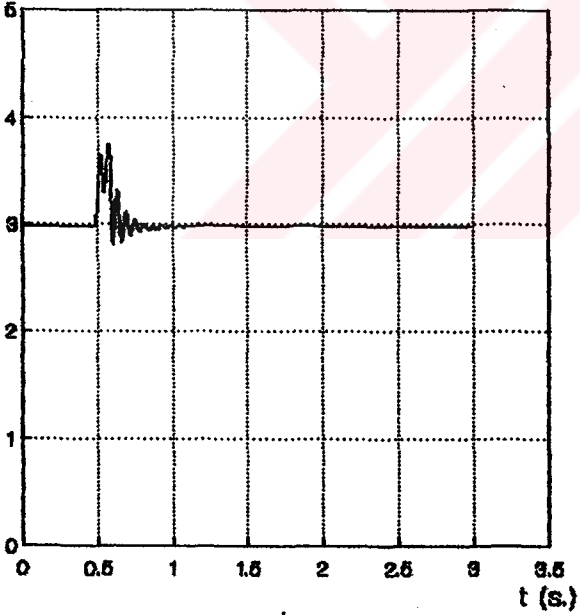
Delta



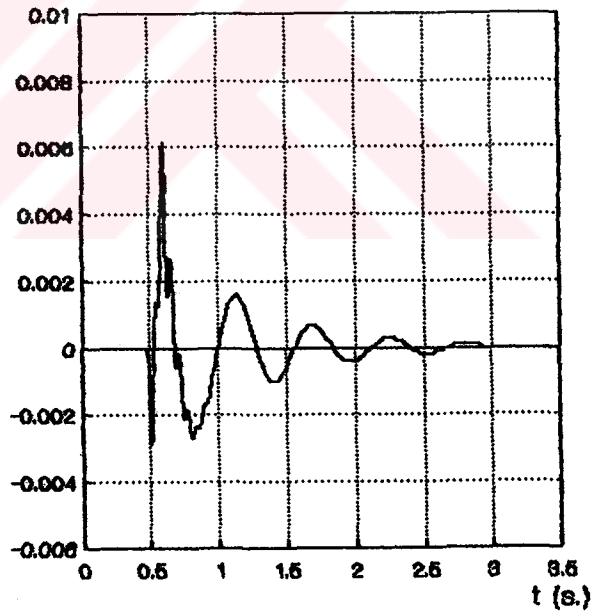
a

 V_t 

b

 I_f 

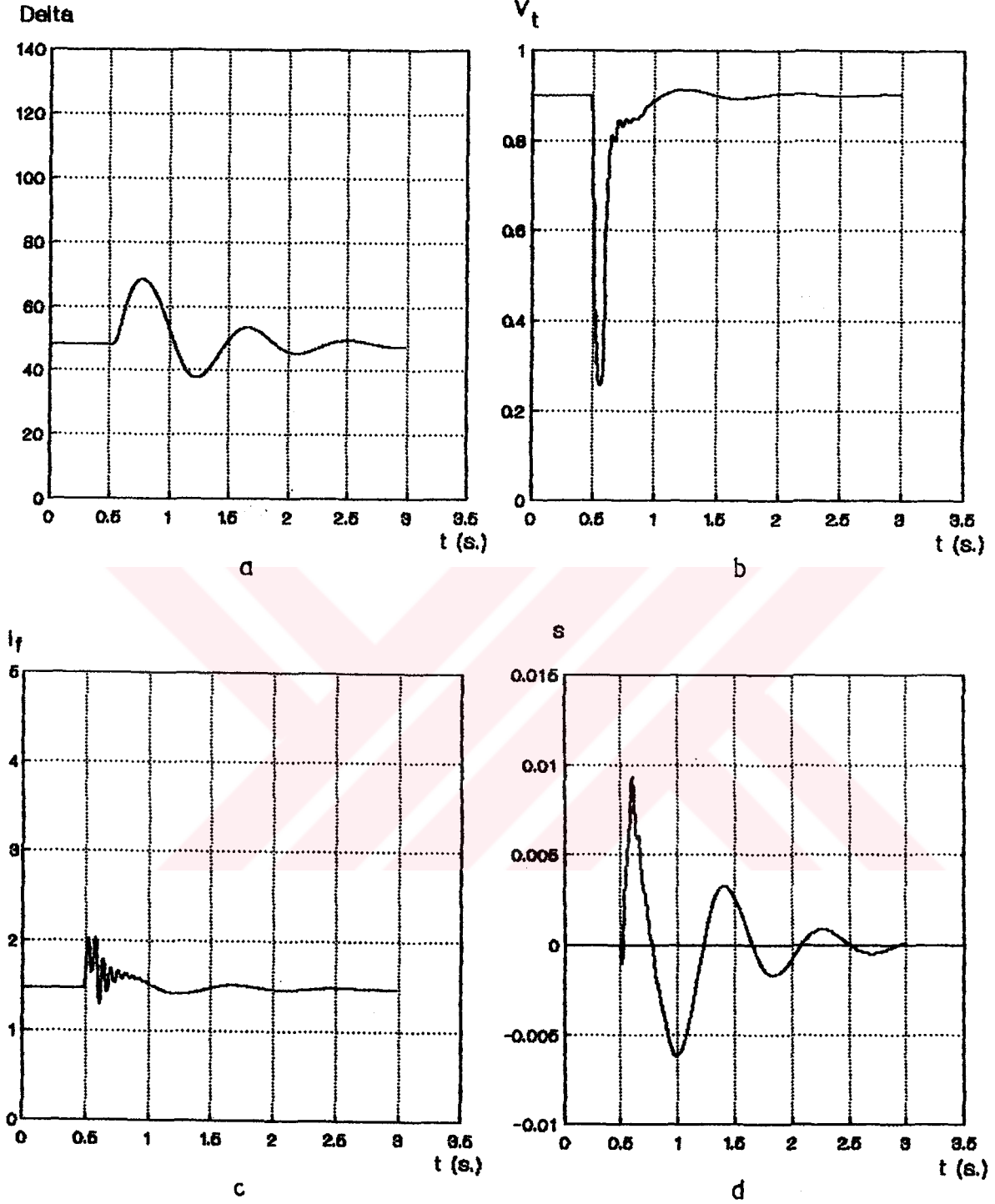
d

 s 

c

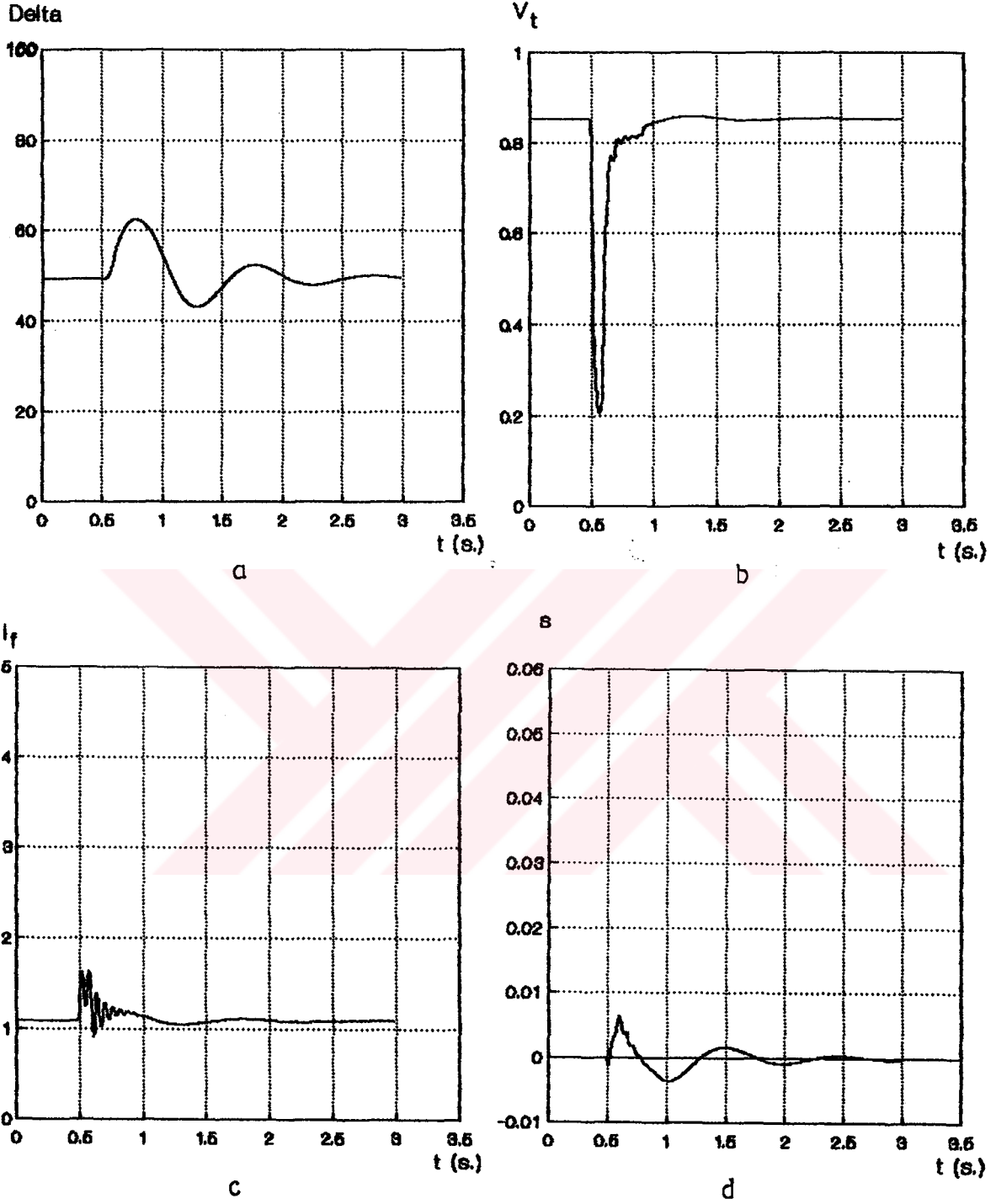
Şekil 4.10. $P_b = 0.6$ p.u. ve $Q_b = 0.8$ p.u. olması durumunda tek rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için sistem cevabı

- a) Rotor açısının değişimi
- b) Makina uç geriliminin değişimi
- c) Uyarma akımının değişimi
- d) Kaymanın değişimi



Şekil 4.11. $P_b = 0.8$ p.u. ve $Q_b = -0.6$ p.u. olması durumunda tek rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için sistem cevabı

- a) Rotor açısının değişimi
- b) Makina uç geriliminin değişimi
- c) Uyarma akımının değişimi
- d) Kaymanın değişimi



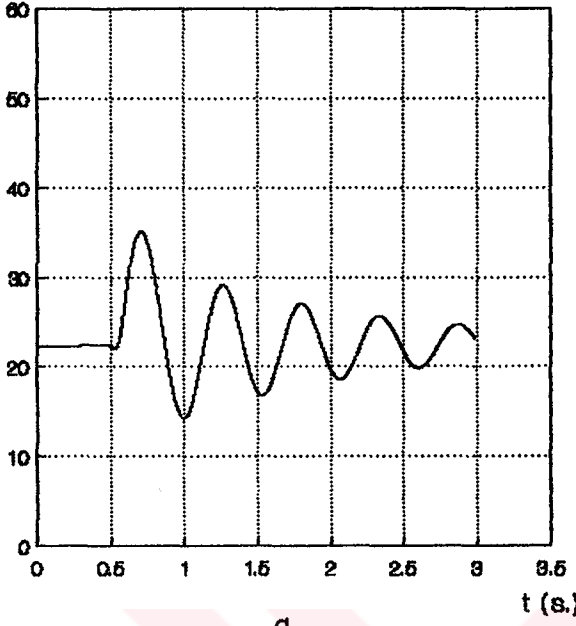
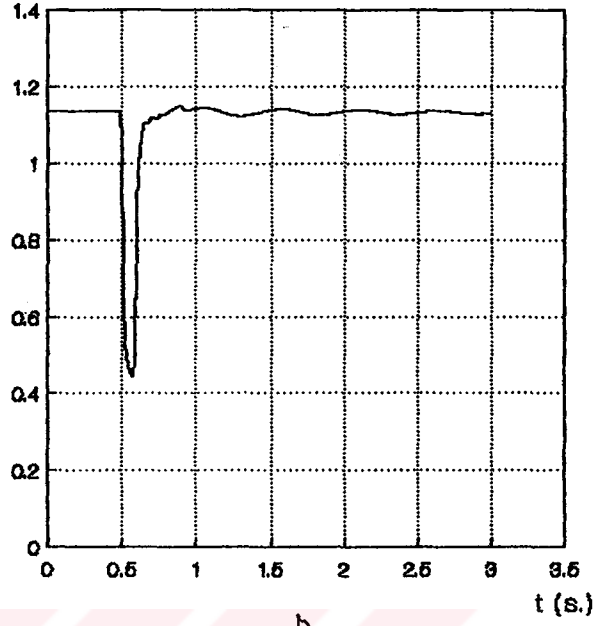
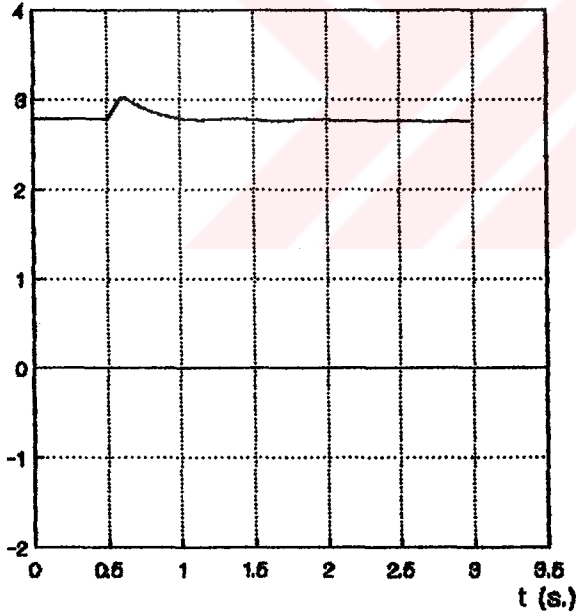
Şekil 4.12. $P_b = 0.6$ p.u. ve $Q_b = -0.8$ p.u. olması durumunda tek rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için sistem cevabı

- a) Rotor açısının değişimi
- b) Makina uç geriliminin değişimi
- c) Uyarma akımının değişimi
- d) Kaymanın değişimi

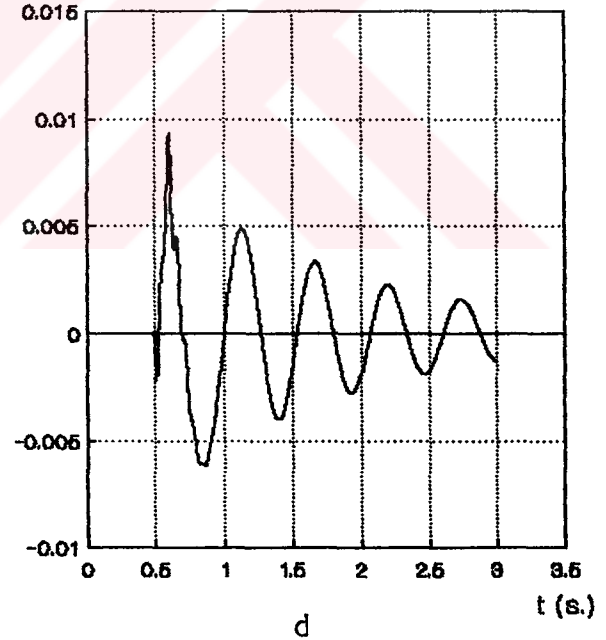
Simülasyon çalışmasının son aşaması, düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devreyi kullanarak üstüniletkenli senkron makinanın kararlılığının incelenmesidir. Düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devre üstüniletkenli senkron makinalar için geliştirilmiş bir eşdeğer devre olup, daha önce bu tezdeki gibi karşılaştırmalı bir kararlılık incelemesi amacıyla kullanılmamıştır. Bu amaçla, gene parametreleri Tablo 4.4'de verilen üstüniletkenli makina ve Tablo 4.5'de verilen değişik yükleme durumları gözönüne alınmıştır. Buna göre, çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devre kullanılarak yapılan simülasyon ile elde edilen sonuçlar Şekil 4.13 ilâ Şekil 4.16'da verilmiştir. Gene merdiven tipi eşdeğer devre kullanılarak, tek rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için elde edilen sonuçlar Şekil 4.17 ilâ Şekil 4.20'de verilmiştir.



Delta

 V_t  I_f 

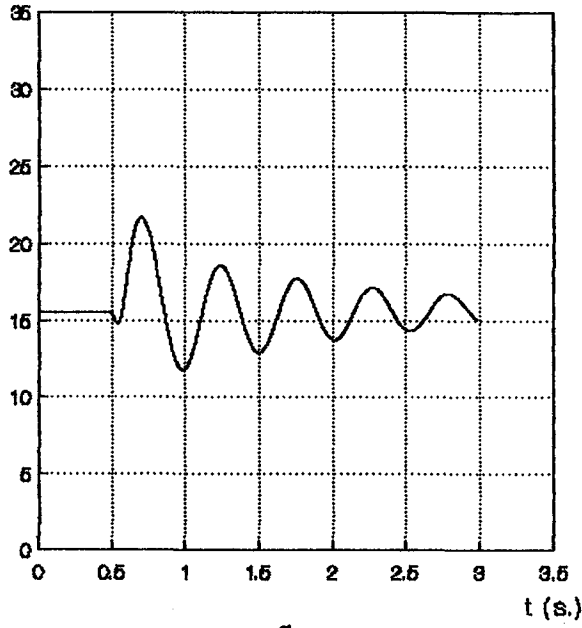
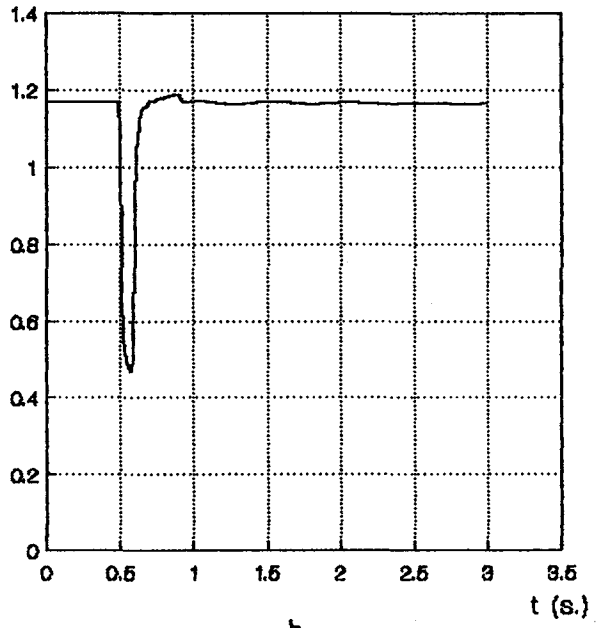
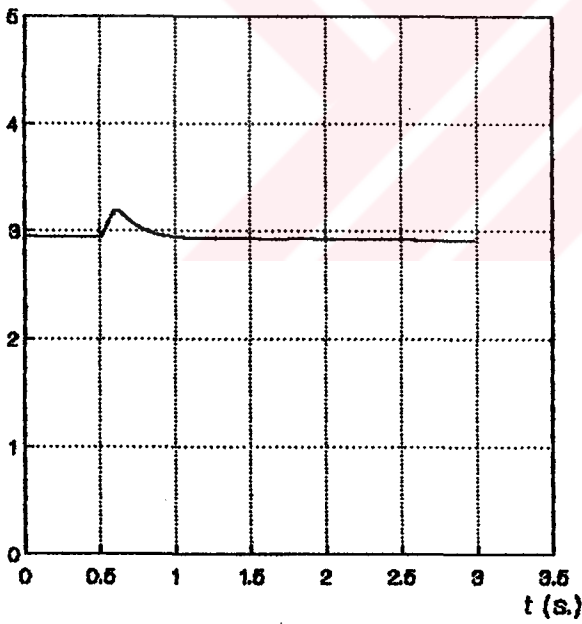
s



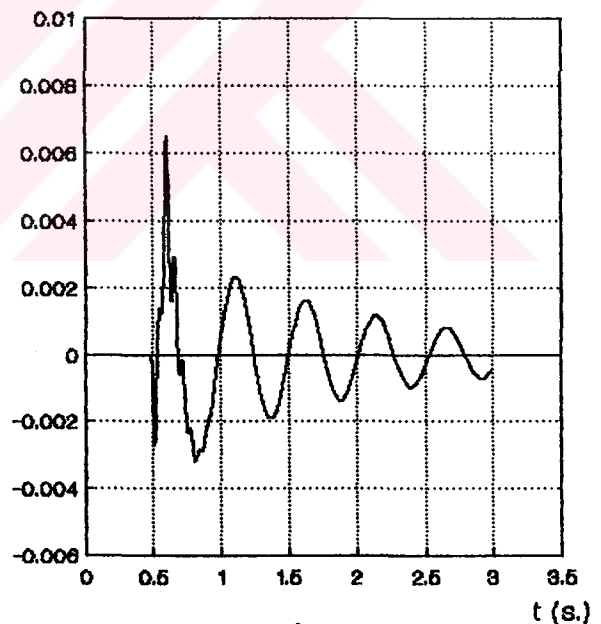
Şekil 4.13. $P_b = 0.8$ p.u. ve $Q_b = 0.6$ p.u. olması durumunda düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devre kullanıldığında, çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için sistem cevabı

- Rotor açısının değişimi
- Makina uç geriliminin değişimi
- Uyarma akımının değişimi
- Kaymanın değişimi

Delta

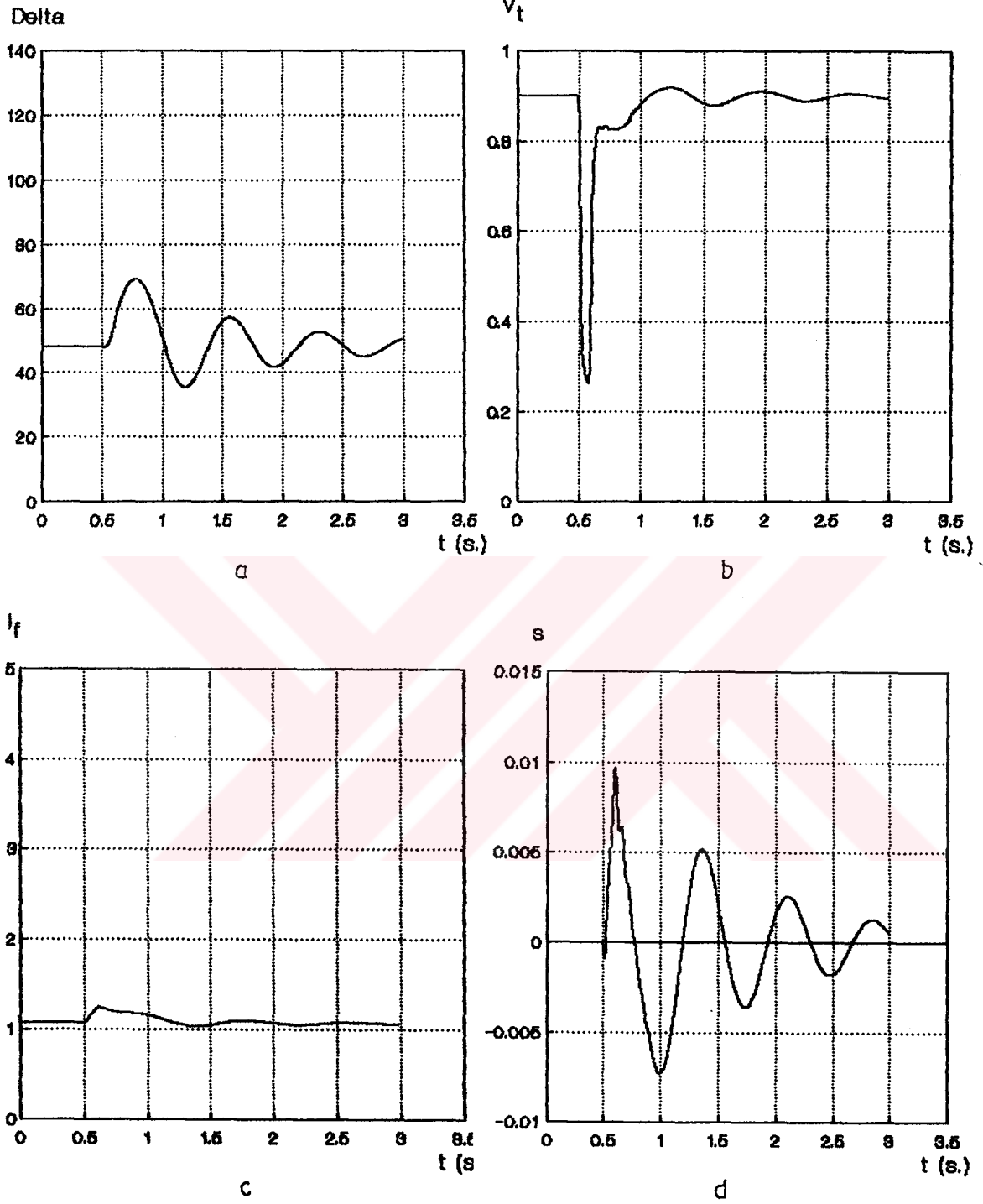
 V_t  I_f 

s



Şekil 4.14. $P_b = 0.6$ p.u. ve $Q_b = 0.8$ p.u. olması durumunda düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devre kullanıldığında, çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için sistem cevabı

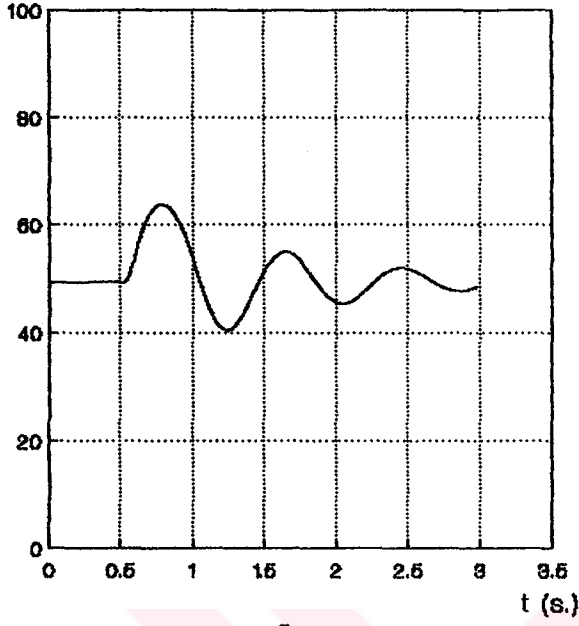
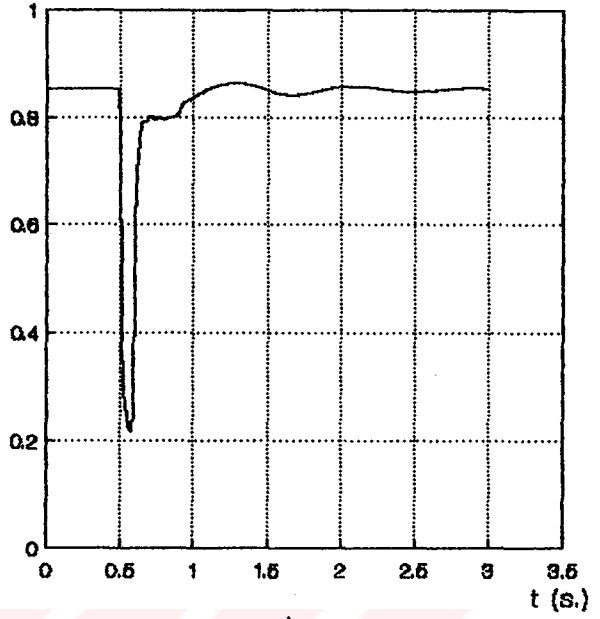
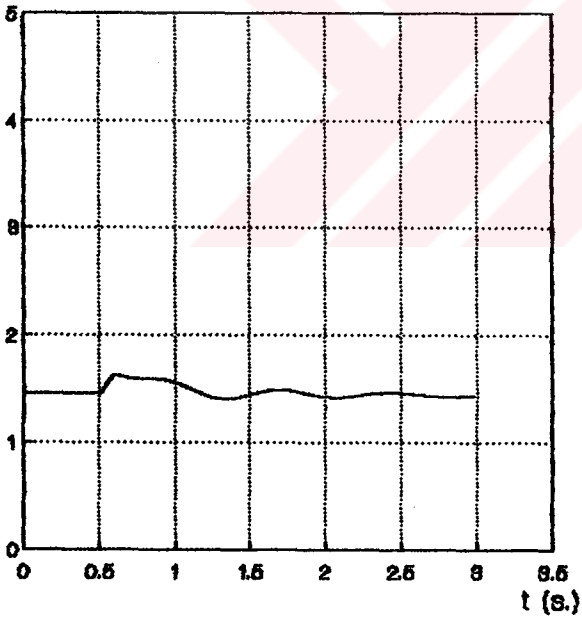
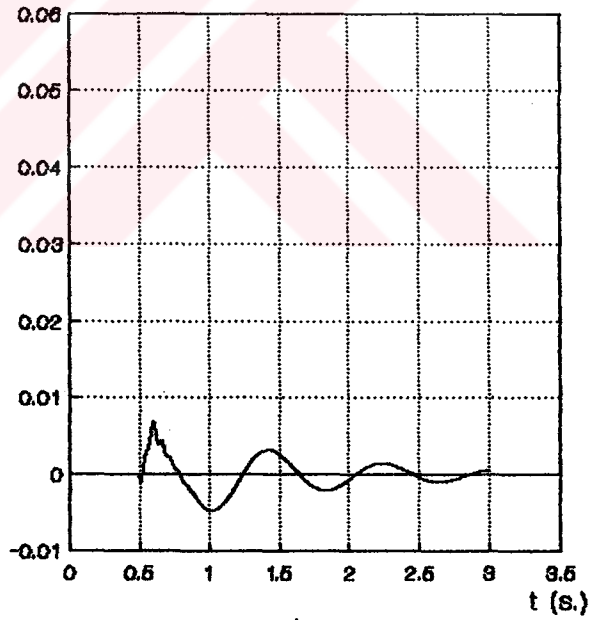
- a) Rotor açısının değişimi
- b) Makina uç geriliminin değişimi
- c) Uyarma akımının değişimi
- d) Kaymanın değişimi



Şekil 4.15. $P_b = 0.8$ p.u. ve $Q_b = -0.6$ p.u. olması durumunda düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devre kullanıldığında, çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için sistem cevabı

- a) Rotor açısının değişimi
- b) Makina uç geriliminin değişimi
- c) Uyarma akımının değişimi
- d) Kaymanın değişimi

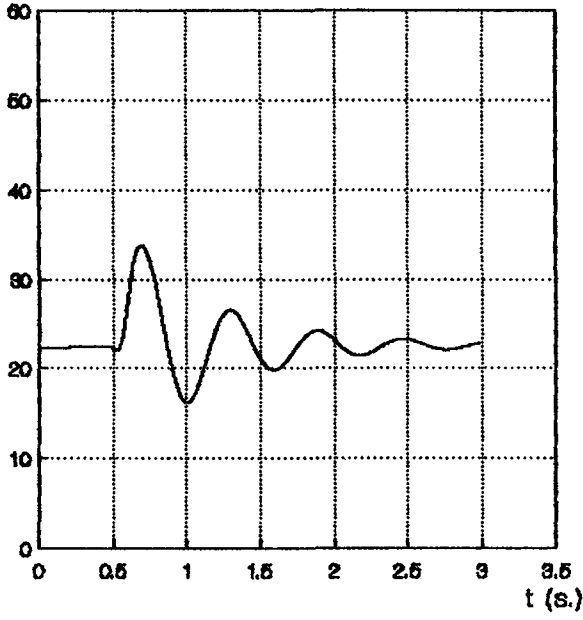
Delta

 V_t  I_f  s 

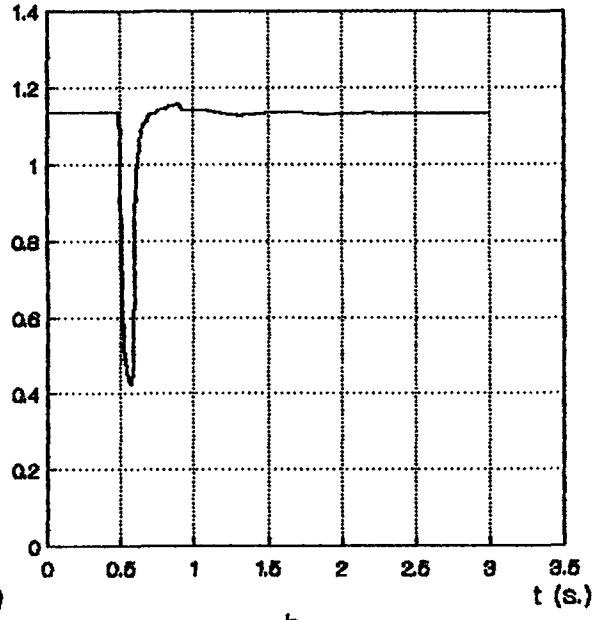
Şekil 4.16. $P_b = 0.6$ p.u. ve $Q_b = -0.8$ p.u. olması durumunda düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devre kullanıldığında, çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için sistem cevabı

- a) Rotor açısının değişimi
- b) Makina uç geriliminin değişimi
- c) Uyarma akımının değişimi
- d) Kaymanın değişimi

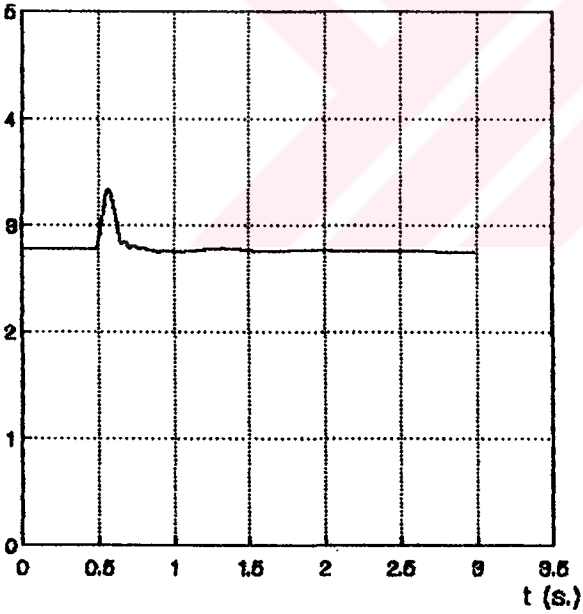
Delta



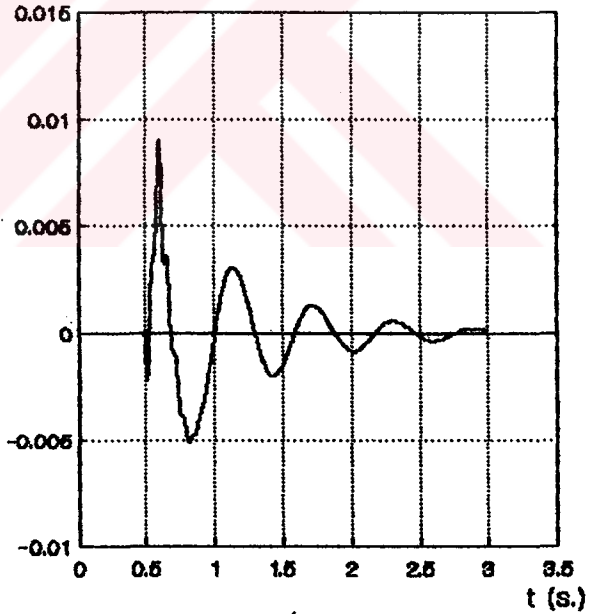
a

 V_t 

b

 I_f 

c

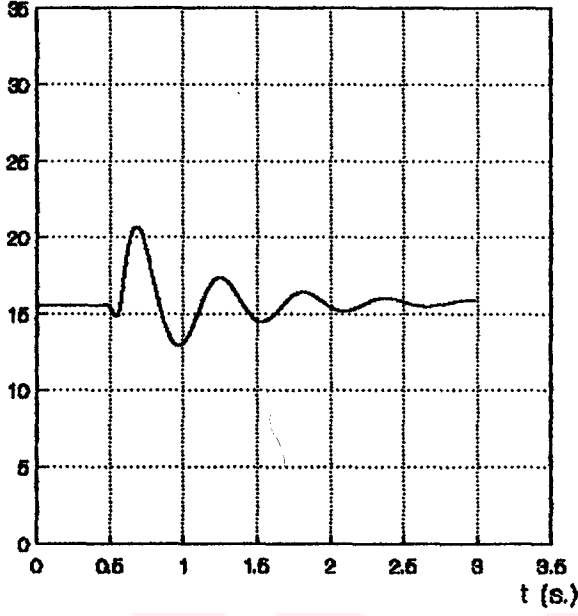
 s 

d

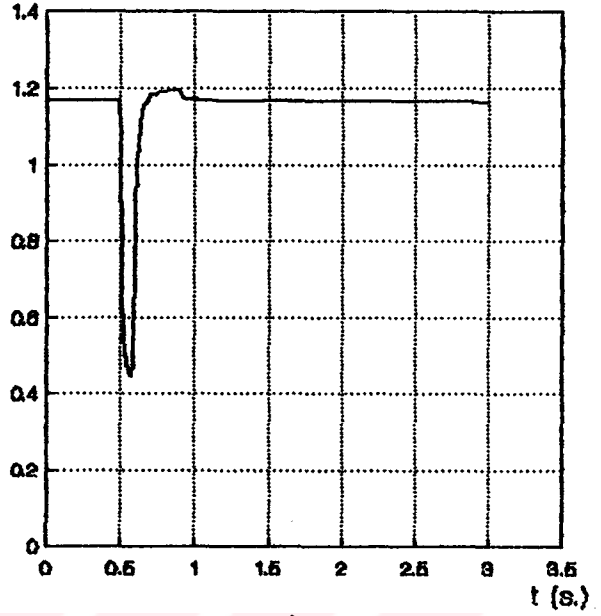
Şekil 4.17. $P_b = 0.8$ p.u. ve $Q_b = 0.6$ p.u. olması durumunda düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devre kullanıldığında, tek rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için sistem cevabı

- a) Rotor açısının değişimi
- b) Makina uç geriliminin değişimi
- c) Uyarma akımının değişimi
- d) Kaymanın değişimi

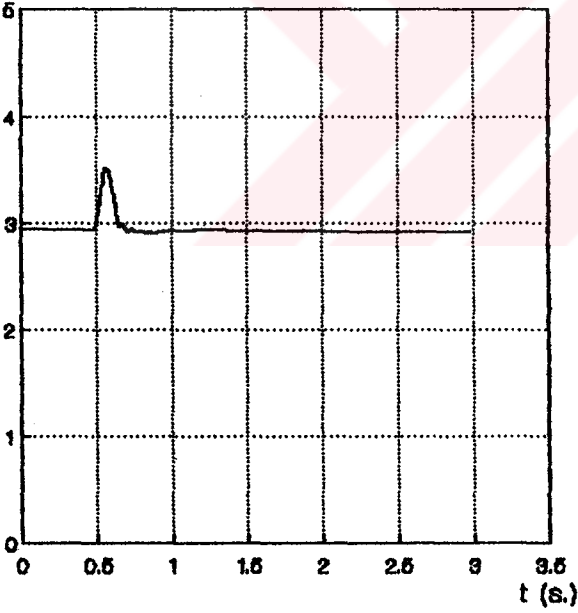
Delta



a

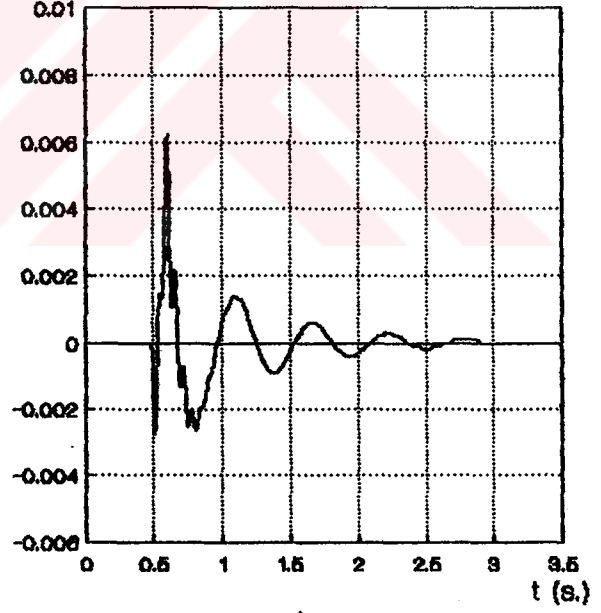
 V_t 

b

 I_f 

c

s

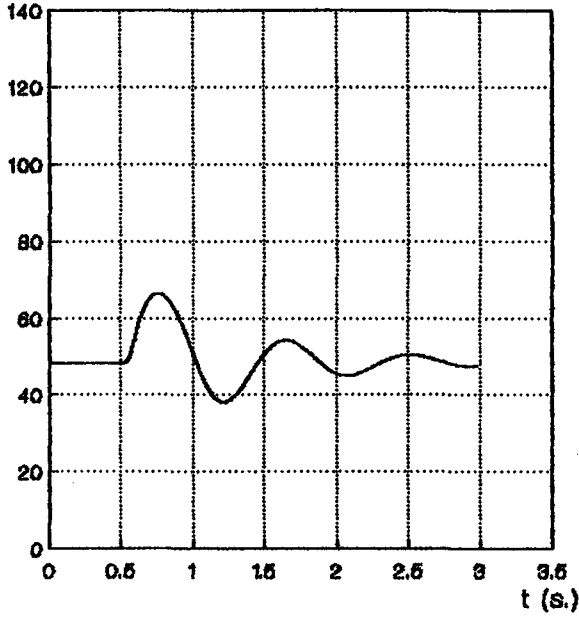
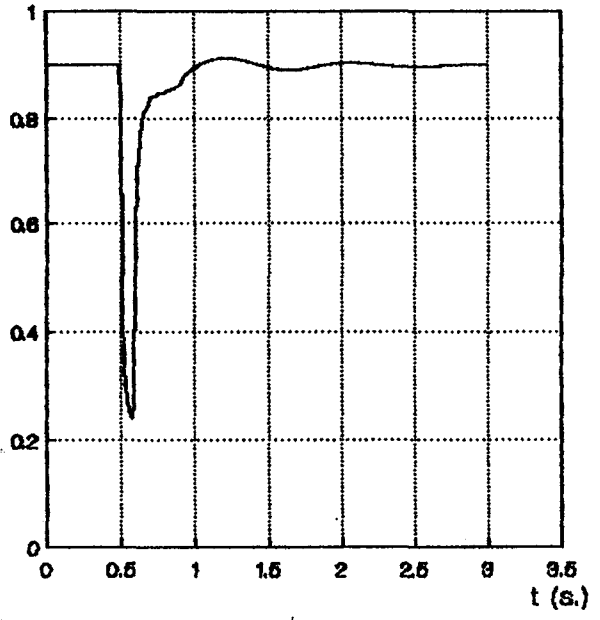
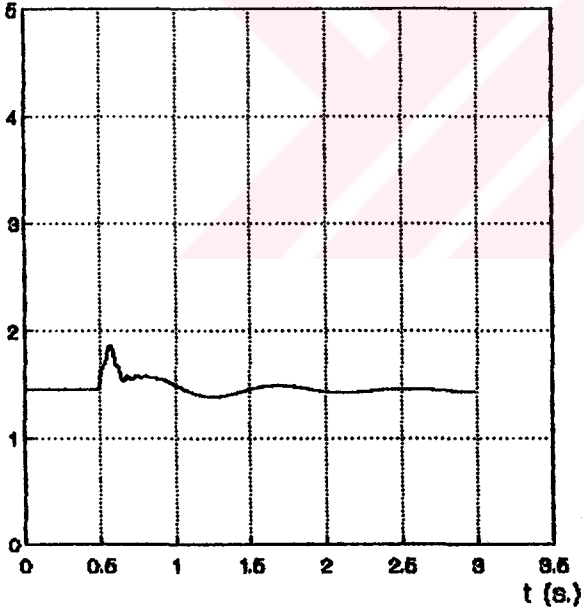


d

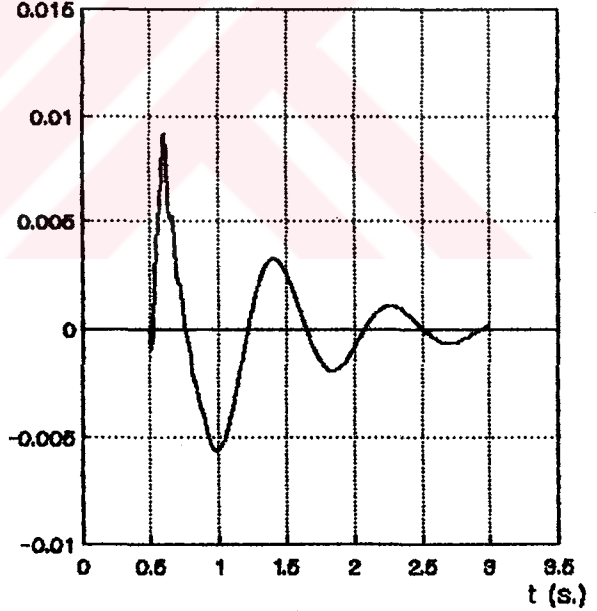
Şekil 4.18. $P_b = 0.6$ p.u. ve $Q_b = 0.8$ p.u. olması durumunda düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devre kullanıldığında, tek rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için sistem cevabı

- a) Rotor açısının değişimi
- b) Makina uç geriliminin değişimi
- c) Uyarma akımının değişimi
- d) Kaymanın değişimi

Delta

 V_t  I_f 

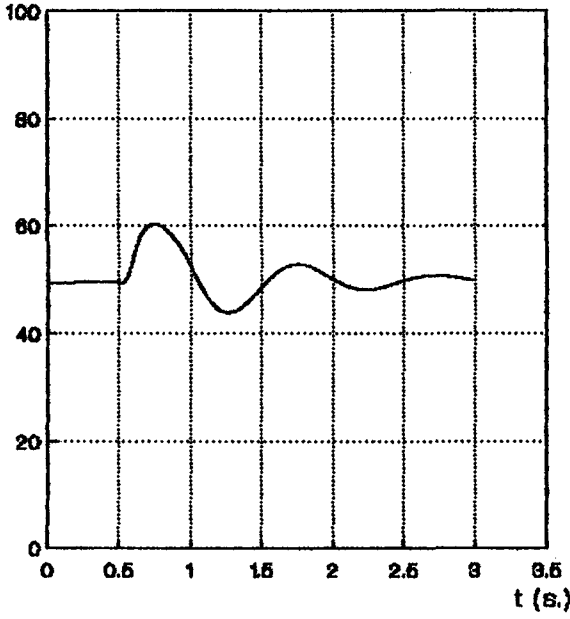
s



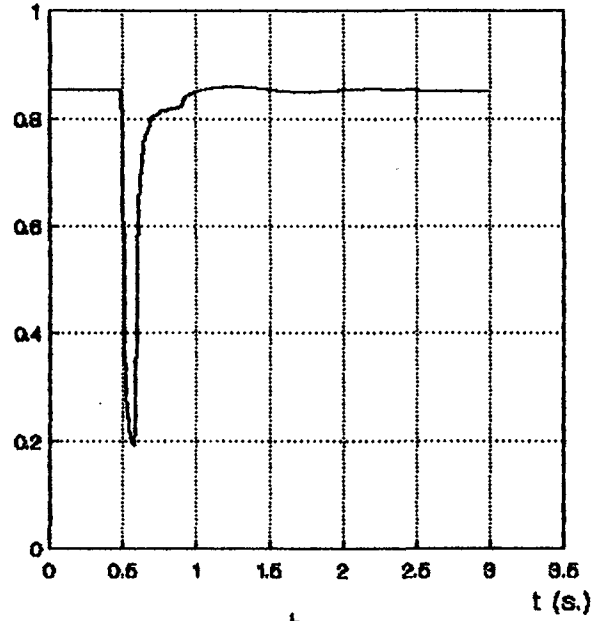
Şekil 4.19. $P_b = 0.8$ p.u. ve $Q_b = -0.6$ p.u. olması durumunda düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devre kullanıldığında, tek rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için sistem cevabı

- a) Rotor açısının değişimi
- b) Makina uç geriliminin değişimi
- c) Uyarma akımının değişimi
- d) Kaymanın değişimi

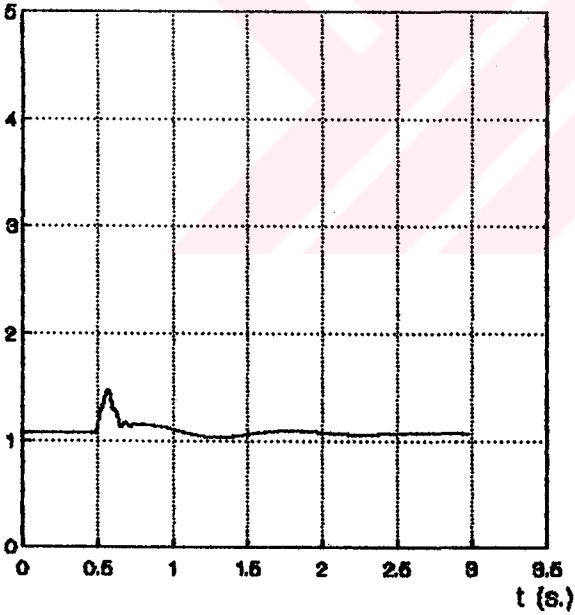
Delta



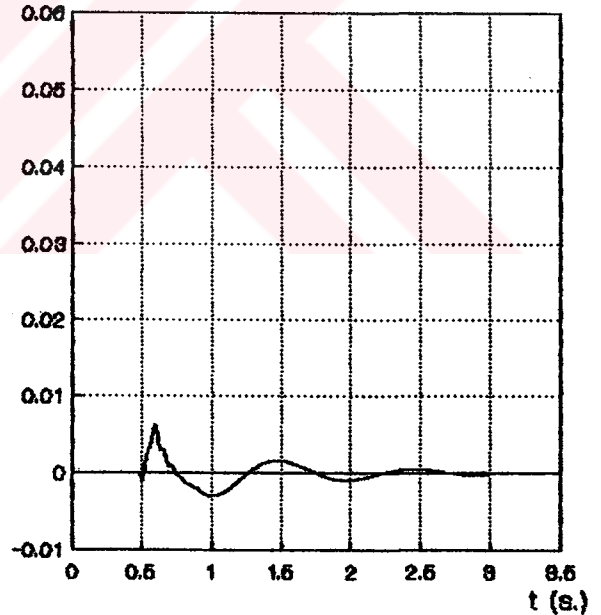
a

 V_t 

b

 I_f 

c

 s 

d

Şekil 4.20. $P_b = 0.6$ p.u. ve $Q_b = -0.8$ p.u. olması durumunda düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devre kullanıldığında, tek rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için sistem cevabı

- a) Rotor açısının değişimi
- b) Makina uç geriliminin değişimi
- c) Uyarma akımının değişimi
- d) Kaymanın değişimi

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Önceki ayrıtlarda belirtildiği gibi, üstüniletkenli senkron makinaların alışagelmış senkron makinalara göre boyut ve ağırlıklarının daha küçük olması, aynı boyutlar için anma değerlerinin daha büyük, verimlerinin daha yüksek ve maliyetlerinin daha düşük olması gibi üstünlükleri vardır. Bu üstünlüklerinin yanında, üstüniletkenli senkron makinanın kararlılık açısından analizi bu tezin esasını oluşturmaktadır. İşte bu nedenle, gene daha önceki ayrıtlarda belirtildiği gibi, üstüniletkenli senkron makinanın fiziksel özelliğine bağlı olarak değişik matematiksel modellerin oluşturulması amaç edinilmiştir. Bu amaçla, tezin önceki bölümünde açıklanan çalışmalar yapılmıştır.

Tezin dördüncü bölümü olan simülasyon bölümünde elde edilen ve Şekil 4.1 ilâ Şekil 4.20'de verilen, $\delta = f(t)$, $v_t = f(t)$, $i_f = f(t)$, ve $s = f(t)$ değişimleri birbirleri ile karşılaştırıldığında, incelenen makinanın alışlagelmış senkron makina olması durumunda, 0.8 p.u.'lik aktif güç, 0.6 p.u.'lik reaktif güç değerleri için, rotor açısının arızanın oluşması ile birlikte $36^{\circ}.43'$ den $48^{\circ}.73'$ lik bir ilk salınım değerine yükseldiği ve sonra da sistemde regülatör olmadığından salınımlı olarak kararlılığını sürdürdüğü görülmektedir. Buna karşılık, uyarma akımı arızanın oluşması ile 1.6 p.u.'den 4 p.u.'lik bir değere yükselmekte ve oldukça salınımlı bir şekilde kararlılığını sürdürmektedir. Uç gerilimi ise, 1.137 p.u.'den ani olarak 0.389 p.u. değerine düşmekte ve birinci saniyeden itibaren de başlangıç değerine dönmektedir (Şekil 4.1).

Aktif güç 0.6 p.u., reaktif güç 0.8 p.u. değerini aldığı anda ise, rotor açısının arıza sonrası $24^{\circ}.97$ 'den $30^{\circ}.72$ 'lik bir tepe değerine yükseldiği ve uç geriliminin ise, yukarıda incelenen yükleme durumundaki ile aynı değişimi gösterdiği, ancak makinanın kayma değişiminin daha az salınımlı olduğu görülmektedir. Bu, kendisini rotor açısındaki değişimle de ortaya koymaktadır (Şekil 4.2).

Alışlagelmiş senkron makinanın aynı yükleme koşullarında kapasitif olarak yüklenmesi durumunda ise (Şekil 4.3 ve Şekil 4.4), ilk yük durumunda sistemin çok salınımlı olarak kararlılığını koruyabildiği ve ikinci yük durumunda ise, kararsız duruma girdiği $\delta = f(t)$, $v_t = f(t)$, $i_f = f(t)$, ve $s = f(t)$ eğrilerinden görülmektedir. Böylece, bu eğrilerden alışlagelmiş senkron makinanın yukarıda verilen çalışma koşullarında, endüktif yükleme durumları dışında kalan kapasitif yükleme durumlarında iyi bir davranış göstermediği görülmüştür. Simülasyon bölümünde de vurgulandığı gibi, alışlagelmiş senkron makinanın bu çalışma koşullarının incelenmesinin nedeni, aynı çalışma koşullarında üstüniletkenli senkron makinanın davranışının nasıl olacağını belirlemek ve alışlagelmiş senkron makina ile üstüniletkenli senkron makinayı kararlılık açısından karşılaştırmaktır.

Aynı çalışma koşullarında incelenen makinanın üstüniletkenli olması ve çift rotor ekranı içermesi durumundaki analiz sonuçları Şekil 4.5 ilâ Şekil 4.8'de verilmişti. Bu eğrilerden de görüldüğü gibi, aktif gücün 0.8 p.u., reaktif gücün 0.6 p.u. olması durumunda, rotor açısı arızanın oluşması ile $22^{\circ}.38$ 'den $36^{\circ}.14$ 'lik değerine yükselmekte ve sonra dalgalı bir şekilde kararlılığını korumaktadır. Uyarma akımı i_f 2,8 p.u.'den 3,4 p.u.'lik bir değere çıkmakta ve sonra salınımlı bir şekilde kararlılığını sürdürmektedir. Uç gerilimi v_t ise, 1.17 p.u.'lik ilk değerden arızanın oluşması ile 0.5 p.u. değerine düşmekte ve sonra hemen hemen salınımsız olarak başlangıç değerine dönmektedir (Şekil 4.5). Aktif güç 0.6 p.u., reaktif güç 0.8 p.u. değerlerini aldığı anda ise, rotor açısı arıza oluşması ile $5^{\circ}.54$ 'den $22^{\circ}.8$ 'lik

bir değere yükselmekte ve sonra salınımlı bir değişimle kararlılığını korumaktadır. Uyarma akımı, 3.0 p.u. den 3.6 p.u.'lik bir değere çıkmakta ve sonra ilk yük durumundakine benzer bir değişimle başlangıç değerine oturmaktadır. Uç gerilimi ise, ilk yük durumundakine benzer bir değişim göstermektedir (Şekil 4.6). Bu sonuçları alışlagelmiş makina durumunda elde edilmiş olan sonuçlarla karşılaştırdığımızda, üstüniletkenli senkron makina durumunda rotor açısının daha salınımlı bir değişim gösterdiği, buna karşılık uyarma açısının ve özellikle uç geriliminin değişimlerinin çok iyi olduğu görülmektedir. Rotor açısının salınımlı olmasının nedeni, iç rotor ekranının dış rotor ekranı üzerindeki olumsuz etkisidir.

Çift rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makinanın aynı yükleme koşullarında kapasitif yüklenmesi durumunda elde edilen sonuçlar (Şekil 4.7 ve Şekil 4.8) aynı çalışma koşullarında alışlagelmiş senkron makina için elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında, üstüniletkenli senkron makinanın kararlılık açısından oldukça iyi bir davranış gösterdiği görülmektedir.

Tek rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makina için gene alışlagelmiş senkron makina durumundaki çalışma koşulları için elde edilen sonuçlar Şekil 4.9 ilâ Şekil 4.12'de verilmişti. Bu eğrilerden de görüldüğü gibi 0.8 p.u.'lik aktif güç, 0.6 p.u.'lik reaktif güç değerleri için rotor açısı arızanın oluşması ile $22^{\circ}.38'$ den $34^{\circ}.9'$ lik bir tepe değere ulaşmakta ve sonra oldukça iyi bir değişimle kararlılığını korumaktadır. Uyarma akımı, gene 2.8 p.u.'den bu defa 3.6 p.u.'lik bir değere çıkmakta ve sonra çift rotor ekranı olması durumundakine benzer bir değişimle kararlılığını korumaktadır. Uç gerilimi ise, gene 1.137 p.u.'den, bu defa ani olarak 0.433 p.u. değerine düşmekte ve sonra hemen hemen salınımsız olarak başlangıçtaki değerine dönmektedir.

Aktif güç 0.6 p.u. reaktif güç 0.8 p.u. değerlerini aldığıında, tek rotor ekranı olması durumunda elde edilen sonuçlara göre, rotor açısı, arızanın

oluşması ile $15^{\circ}.538$ 'den $21^{\circ}.3$ 'lük bir tepe değere ulaşmakta, sonra oldukça iyi bir değişimle kararlılığını korumaktadır. Uyarma akımı, gene 3.0 p.u'den 3.7 p.u.'lık değere çıkmakta ve ilk yük durumundakine benzer bir değişimle kararlılığını sürdürmektedir. Uç gerilimi, gene 1.17 p.u.'den ani olarak 0.45 p.u. değerine düşmekte ve sonra hemen hemen salınımsız olarak başlangıçtaki değerine dönmektedir.

Bu sonuçlar, çift rotor ekranı olması durumunda elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında, tek rotor ekranı olması durumunda rotor açısı salınımlarının daha iyileştiği, uyarma akımının değişimlerinin bozulduğu görülmektedir. İç rotor ekranının dış rotor ekranı üzerindeki olumsuz etkisi ortadan kalktığı için sönüm iyileşmiş, ancak gene iç ekran olmadığı için ekranlama ve uyarma akımının değişimi bozulmuştur.

Tek rotor ekranına sahip olan üstüniletkenli senkron makinanın, yukarıda verilen yükleme koşullarında kapasitif olarak yüklenmesi durumunda elde edilen sonuçlar Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de verilmişti. Bu sonuçlar ile çift rotor ekranına sahip makina için aynı yükleme durumlarında elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, gene endüktif yükleme durumunda olduğu gibi, rotor açısı salınımlarının iyileştiği görülmektedir. Uyarma akımı ve uç geriliminin değişimleri ise çift rotor ekranına sahip makina için elde edilen değişimlere oldukça benzerdir.

Düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devre gözönüne alındığında, bu eşdeğer devrenin getirdiği en büyük üstünlük, makinanın gerçek davranışına daha uyumlu bir matematiksel model sağlamasıdır. Üstüniletkenli senkron makinanın iki rotor ekranı içermesi yanında, istenirse bunların etkinliğini daha iyi analiz etme olanağını, başka bir deyişle ilâve ekran eşdeğerleri koyma olanağını getirmektedir. Düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devre kullanılarak yapılan simülasyon sonuçları Şekil 4.13 ilâ Şekil 4. 20'de verilmişti. Bu sonuçlar incelendiğinde ve çift ve tek rotor ekranına sahip üstüniletkenli senkron makinalar için daha önce elde edilmiş olan sonuçlarla

karşılaştırıldığında, hemen hemen aynı sonuçların elde edildiği görülmektedir. Bu eşdeğer devrenin üstünlüğü yukarıda da belirtildiği gibi, kullanım kolaylığı sağlamasıdır. Düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devre kullanıldığında, tek rotor ekranı olması durumundan çift rotor ekranı olması durumuna veya ters yönde geçiş kolayca sağlanmaktadır.

Bütün bu çalışmalar sonucunda, üstüniletkenli senkron makinanın, yukarıda anılan üstünlüklerinin yanısıra, kararlılık açısından da alışlagelmiş senkron makinaya göre üstün olduğu gözlenmiştir. Konu ile ilgili olarak ileride yapılabilecek çalışmalar için ekranlar kalınlıklarının ve yarıçaplarının, makina ve enerji iletim sistemi parametrelerinin; açma-kapama anlarının etkilerinin ve her ne kadar yapılan tez çalışmasında reaktif güce yüklenebilirlik açısından bir çalışma yapılmışsa da, bunun sınırlarının arttırılarak etkilerinin görülmesi ve kararlı çalışma sınırlarının belirlenmesi gibi araştırma alanları söylenebilir.

KAYNAKLAR

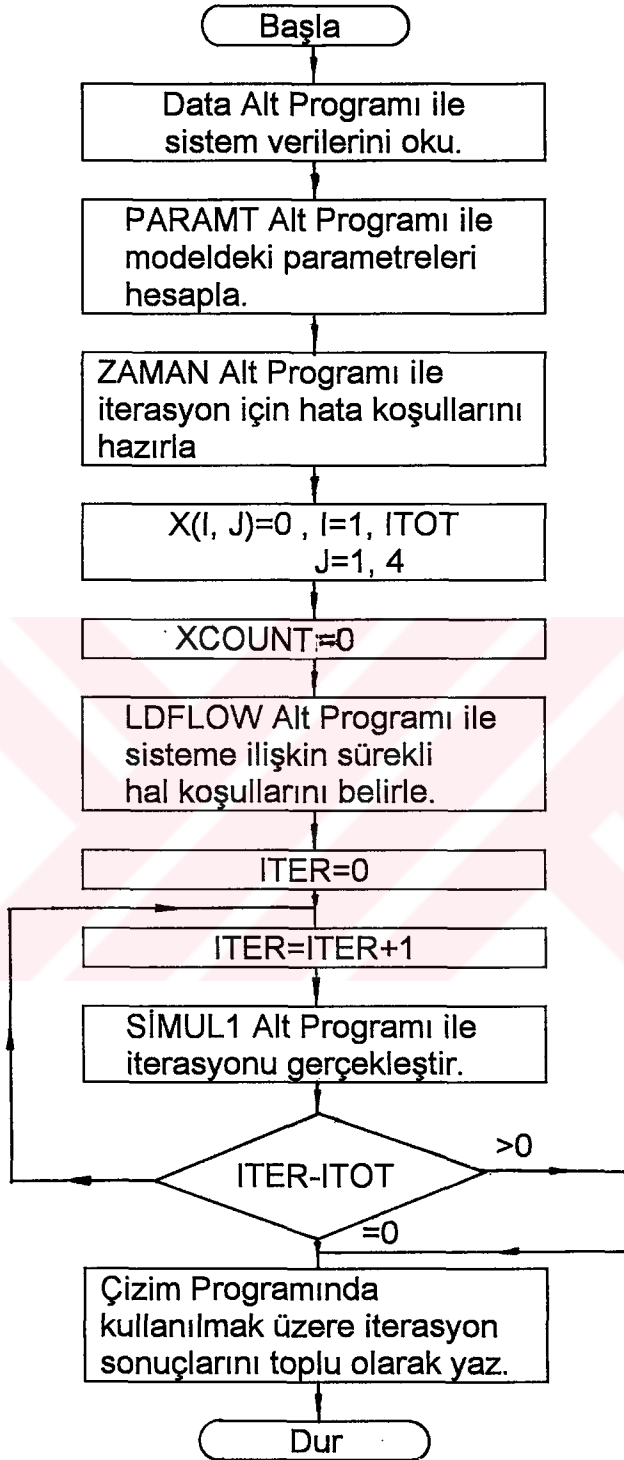
- [1] SCHWARTZ, B.B., FONER, S., Superconductor Applications, SQUIDS and Machines, Plenum Press, New York, 1977
- [2] TUNÇAY, R.N., Süperiletkenlik ve Elektrik Mühendisliği Uygulamaları, Elektrik Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi, İzmir. 1991
- [3] KUMAGAI, M., TANAKA, T., ITO, K., WATANABE, Y., SATO, K., GOCHO, Y., Development of Superconducting AC Generators, IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. EC-1, No.4, December, 1986
- [4] RECHOWICZ, M., Electric Power at Low Temperatures, Clarendon Press, Oxford, 1975
- [5] DURGUT, M., Oda Sıcaklığı Süperiletkenliğine Doğru, Elektrik Mühendisliği, Sayı 343, Mayıs. 1987
- [6] ÖZYAR, M.S., Süperiletkenler: "Isındıkça ısıyorlar" Elektrik Mühendisliği, Sayı 344, Haziran, 1987
- [7] LEMONICK, M.D., Superconductors, Time-Wiring The Future, May 11, 1987
- [8] AKTAŞ, G., Üstüniletkenlik: Dünya Bir Devrimin Eşiğinde, Cumhuriyet, Bilim Teknik, 22 Ağustos 1987
- [9] DEĞERTEKİN, L., Endüstri Süperiletkenliğe Isınıyor. Elektrik Mühendisliği, Sayı: 354, Nisan 1988
- [10] Business Interferential Seanning, Update: Superconductivity,, Inferential Focus, IF 817, June 8, 1987
- [11] FULLER, J., U. S. Researchers Report More Superconductor Breakthroughs
- [12] Research News, GEC and BICC Scientists Discover New Superconductors, GEC Journal of Research, Vol.9, No.3. 1992
- [13] CRACKNELL, D.J., The Application of High Temperature Superconductors to Microwave Filters, GEC Journal of Research, Vol.9, No.3, 1992

- [14] SMITH, J.L., Jr., Overview of The Development of Superconducting Synchronous Generators, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-19, No.3, May, 1983
- [15] MOLE, C.J., BRENNER, W.C., HALLER, H.E., III, Superconducting Electrical Machinery, Proceedings of The IEEE, Vol. 61, No. 1, January, 1973
- [16] SINGH, S.K., MOLE, C.J., Future Developments of Large Superconducting Generators, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-25, No. 2. March, 1989
- [17] BRUNET, Y., TIXADOR, P., Design of A Full Superconducting Synchronous Generator, International Conference on Electrical Machines, München, 1986
- [18] SPOONER, E., Fully Slotless Turbogenerators, Proceedings of IEE, Vol. 120, No. 12, December, 1973
- [19] ULA, A. H. M. S., STEPHENSON, J.M., LAWRENSON, P.J., The Effect of Design Parameters on The Dynamic Behaviour of The Superconducting Alternators, IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. EC-3, No.1, March, 1988
- [20] GIESE, R.F., SHEAHEN, T.P., WOLSKY, A.M., SHARMA, D.K., High Temperature Superconductors; Their Potential for Utility Applications, IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 7, No.3, September, 1992
- [21] TACER, M.E., Enerji Sistemlerinde Kararlılık, İ.T.Ü., 1990
- [22] KIRTLEY, J.L., Jr., Per-Unit Reactances of Superconducting Synchronous Machinery, IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-92, July/August, 1973
- [23] FURUYAMA, M., KIRTLEY, J.L., Transient Stability of Superconducting Alternators, IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, March/April, 1975
- [24] MUTA, I., MUKA, E., Equivalent Circuit Modeling and Simulation Study of A Superconducting Alternator with Double Rotor Shield, International Conference on Electrical Machines, LG1/4, Athens, 1980
- [25] PRIOR, D.L., ALYAN, M.A.A.S., Anyaeji, A.A., Equivalent Circuit Representation of A Superconducting Alternator, Proceedings of IEE, Part C, Vol. 129, No. 6, November, 1982

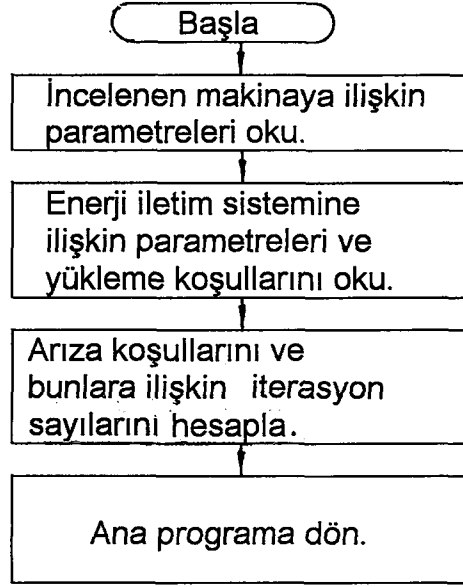
- [26] LIESE, M., KULIG, T.S., LAMBRECHT, D., Superconducting Generator Modeling by Iterative T-network Equivalent Circuits for Investigation of Transient Performance, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, July, 1984
- [27] KULIG, T. S., LAMBRECHT, D., LIESE, M., Investigation of The Transient Performance of Superconducting Generators with An Advanced Network-Torsion-Machine Program, IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, July, 1984
- [28] KÖFLER, H., ZEROBIN, F., Experiments on The Equivalent Circuit Parameters of Superconducting AC Machines, International Conference on Electrical Machines, München, 1986
- [29] TAYLOR, A.W.B., Superconductivity, Wykeham Publications Ltd., London, 1970
- [30] SCANLAN, R.M., Superconductor Materials, Annual Review of Materials Science, Vol. 10, 1980
- [31] LAWRENSON, P.J., MILLER, T.J.E., STEPHENSON, J.M., ULA, A.H.M.S., Damping and Screening in The Synchronous Superconducting Generator, Proceedings of IEE, Vol.123, No. 8, August, 1976
- [32] HUGHES, A., MILLER, T.J. E., Analysis of Fields and Inductances in Air-Cored and Iron-Cored Synchronous Machines, Proceedings of IEE, Vol. 124, No.2, February, 1977
- [33] MILLER, T.J.E., HUGHES, A., Comparative Design and Performance Analysis of Air-Cored and Iron-Cored Synchronous Machines, Proceedings of IEE, Vol. 124, No. 2, February, 1977
- [34] ASHKIN, M., BALDWIN, M.S., ECKELS, P.W., EDMONS, J.S., FLICK, C., SCHWENK, H.R., Stability Criteria for Superconducting Generators-Electrical System and Cryostability Considerations, IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No.12, December, 1982
- [35] KIRTLEY, J.L., Jr., FURUYAMA, M., A Design Concept For Large Superconducting Alternators, IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, No. 4, July/August, 1975

- [36] MILLER. T.J.E., LAWRENSON, P.J., Penetration of Transient Magnetic Fields Through Conducting Cylindrical Structures with Particular Reference to Superconducting AC Machines, Proceedings of IEE, Vol. 123, No. 5, May, 1976
- [37] BRATOLJIC, T., FÜRSICH H, LORENZEN, H.W., Transient and Small Perturbation Behaviour of Superconducting Turbogenerators, IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, No.4, July/August, 1977
- [38] TACER, M.E., Rotoru Bölmelenmiş Uyarma Sargılı Senkron Makinanın Sayısal Simülasyonu, Doçentlik Tezi, İ.T.Ü., Maçka Elektrik Fakültesi, İstanbul, 1981
- [39] SARIOĞLU, M.K., Elektrik Makinalarının Temelleri II, Senkron Makinalar, 3. Baskı., İ.T.Ü., 1987
- [40] OSHEBA, S.M., ALYAN, M.A.A.S., RAHİM, Y.H.A., Comparison of Transient Performans of Superconducting and Conventional Generators in a Multimachine System, Proceeding of IEE, Part C, Vol.135, No. 5, September, 1988

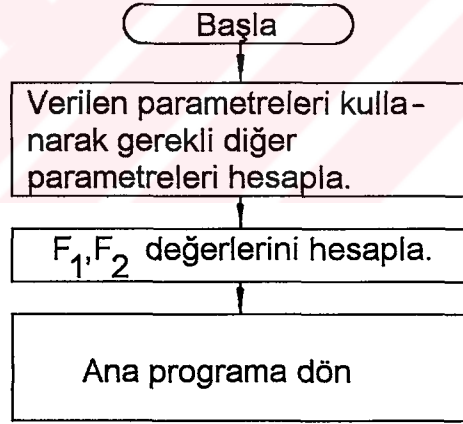
Ek-A:



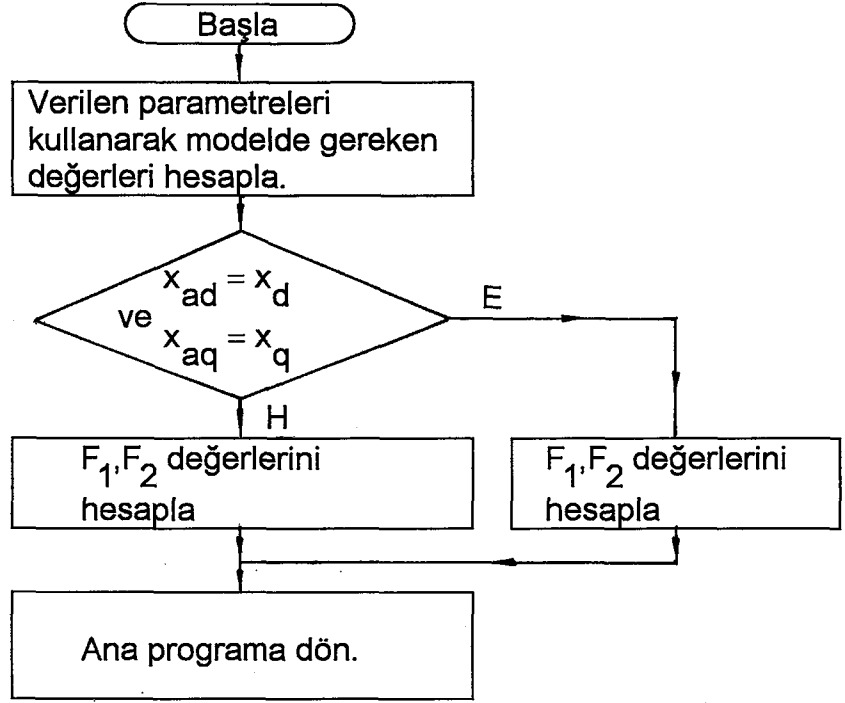
Şekil A.1.: Ana programa ilişkin akış diyagramı



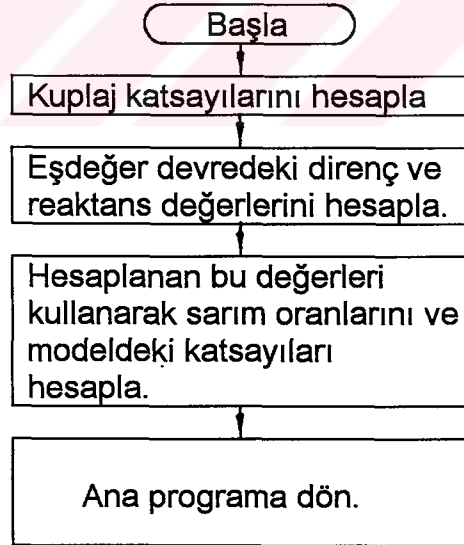
Şekil A.2. DATA alt programına ilişkin akış diyagramı



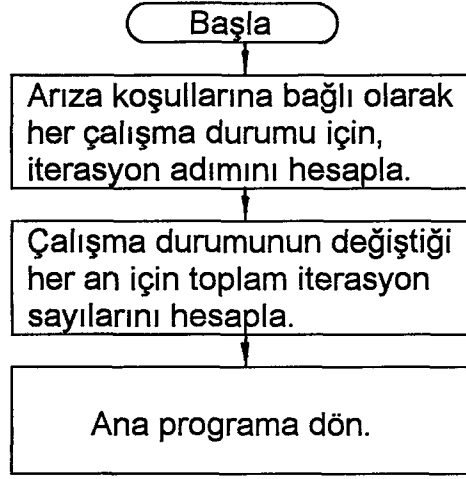
Şekil A.3. Alışılacak senkron makina için PARAMT alt programına ilişkin akış diyagramı



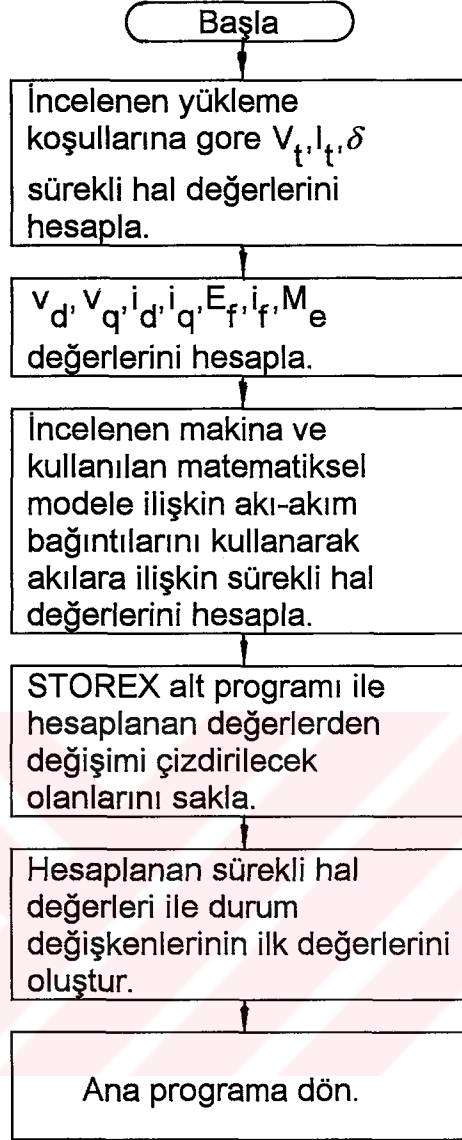
Şekil A.4. Üstüniletkenli senkron makina için PARAMT alt programına ilişkin akış diyagramı



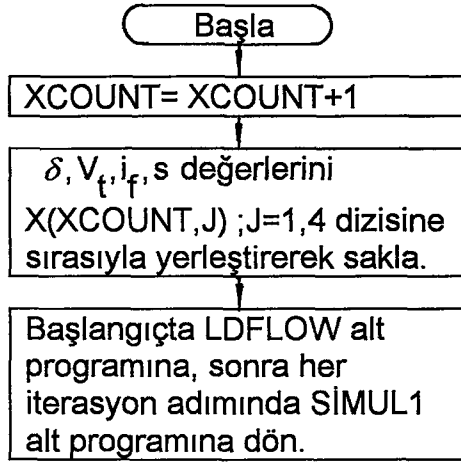
Şekil A.5. Üstüniletkenli senkron makina için düzeltilmiş merdiven tipi eşdeğer devre kullanılması durumunda PARAMT alt programına ilişkin akış diyagramı



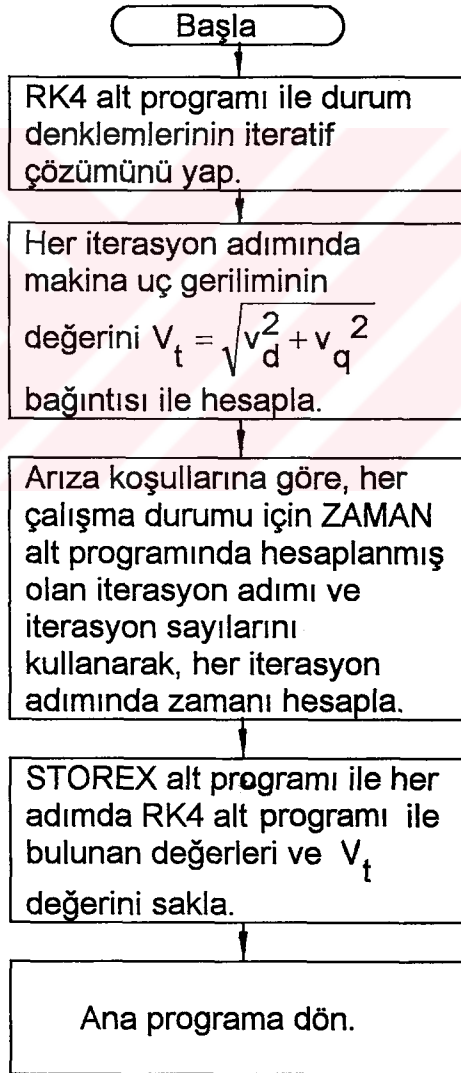
Şekil A.6: ZAMAN alt programına ilişkin akış diyagramı



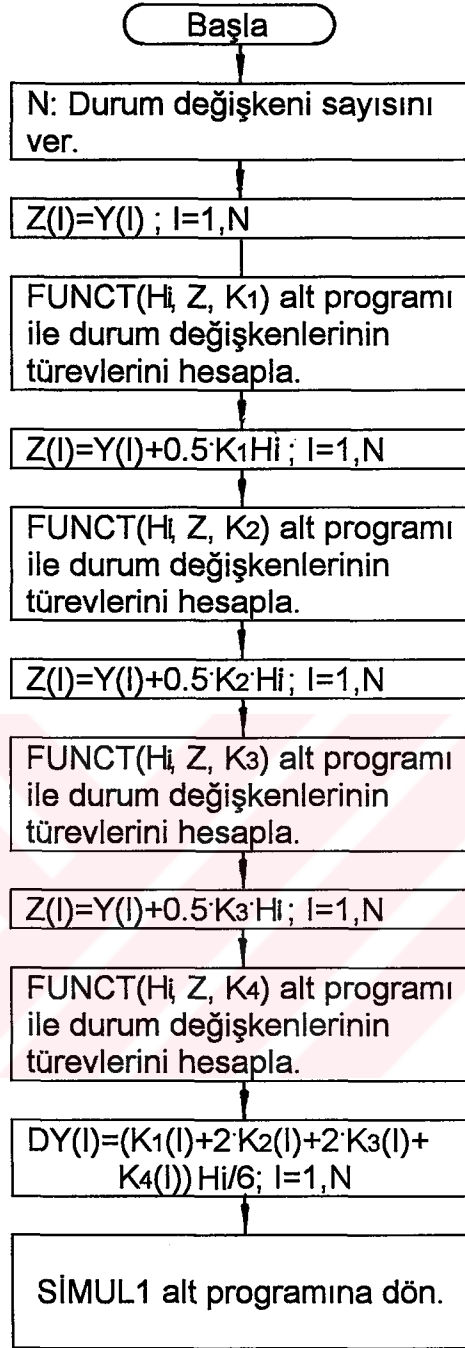
Şekil A.7. LDFLOW alt programına ilişkin akış diyagramı



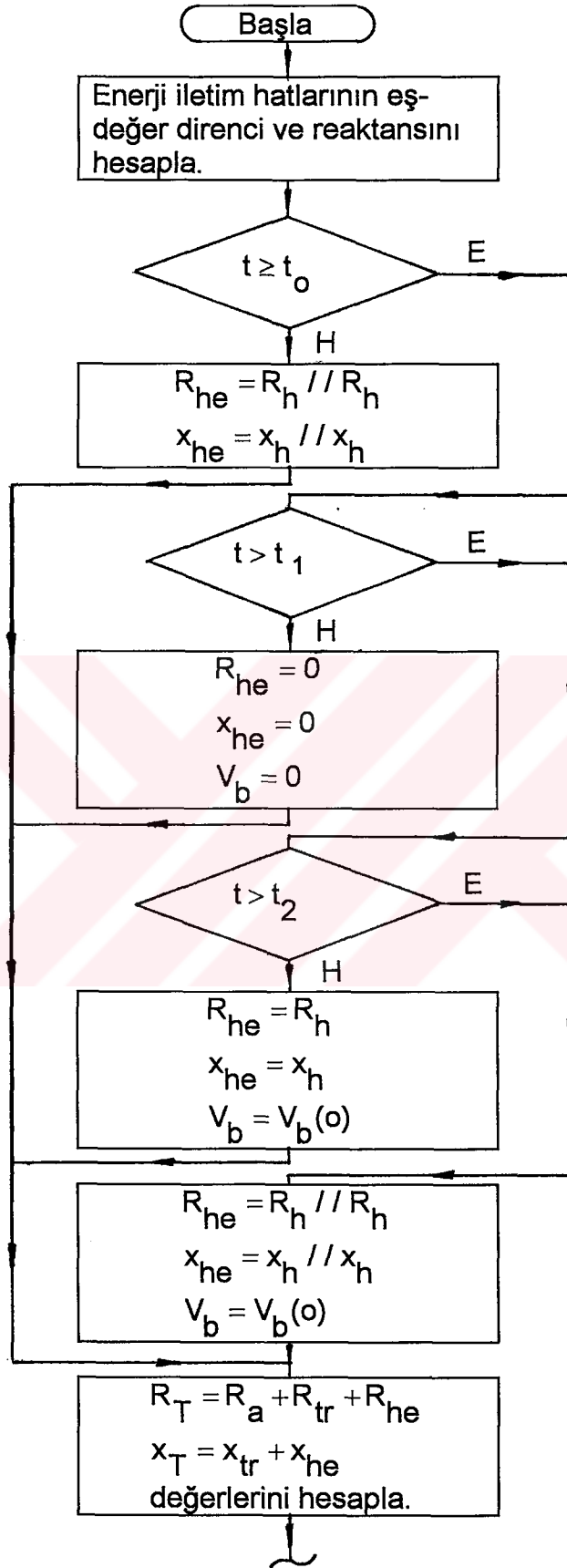
Şekil A.8. STOREX alt programına ilişkin akış diyagramı

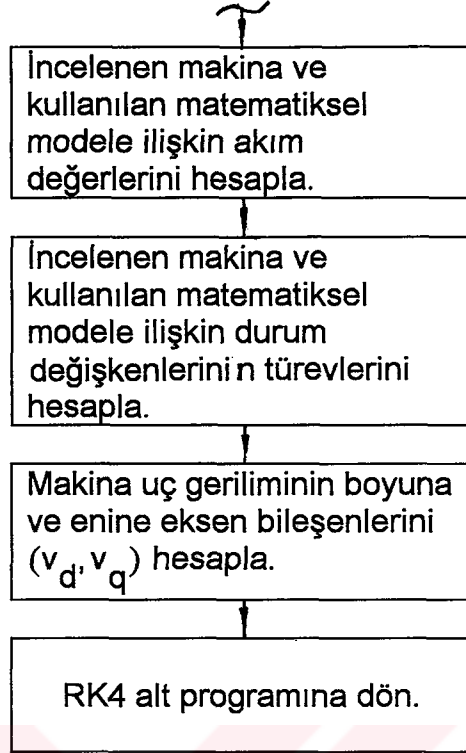


Şekil A.9. SİMUL1 alt programına ilişkin akış diyagramı



Şekil A.10. RK4 alt programına ilişkin akış diyagramı





Şekil A.11. FUNCT alt programına ilişkin akış diyagramı

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

ÖZGEÇMİŞ

H. Lâle Zeynelgil 1959'da Isparta'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini İstanbul'da, Koca Ragıp Paşa İlkokulu ve İstanbul Kız Lisesi'nde tamamladı. 1976 yılında İ.T.Ü. Elektrik Fakültesi'ne girdi ve 1982 yılında Enerji kolundan mezun oldu. 1982-1985 yıllarında İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Bölümünde Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 1983 yılında İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Tesisleri Ana Bilim Dalı'na Araştırma Görevlisi olarak giren H. Lâle Zeynelgil, halen bu görevini sürdürmektedir.

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**