

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ\*FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SENKRON GENERATÖRLERİN UYARTIM SİSTEMLERİNİN YARI  
İLETKENLİ DEVRELERLE DENETİMİ**

**YÜKSEK LİSANS**

**Elektrik Müh. Sunay ARDA**

**Anabilim Dalı: Elektrik Mühendisliği**

**Danışman: Prof.Dr.Nurettin ABUT**

**KOCAELİ, 2006**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ\*FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SENKRON GENERATÖRLERİN UYARTIM SİSTEMLERİNİN  
YARI İLETKENLİ DEVRELERLE DENETİMİ**

**YÜKSEK LİSANS**

**Elektrik Müh. Sunay ARDA**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 14 Haziran 2006**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 1 Eylül 2006**

**Tez Danışmanı  
Prof.Dr.Nurettin  
ABUT**

  
(.....)

**Üye  
Doç.Dr.Nurettin  
UMURKAN**

  
(.....)

**Üye  
Yrd.Doç.Dr.Ayşen BASA  
ARSOY**

  
(.....)

**KOCAELİ, 2006**

## ÖNSÖZ

Senkron Generatörler'in denetiminde Statik Uyartım son yıllarda en çok kullanılan uyartım tipi olmuştur. Yapılan çalışmada IEEE'nin uyartım sistem modellerinden ST1A Tipi Statik Uyartım sistem modeli Matlab'da dizayn edilerek simüle edilmiş ve generatör parametreleri ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları Dinamik Uyartım sistem parametreleri ile karşılaştırılmıştır.

Ayrıca Statik Uyartım'ın sistem performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Yapılan çalışmalar sırasında sürekli desteğini gördüğüm danışmanım Sn.Prof.Dr.Nurettin ABUT'a, KOÜ'den Arş.Gör. Hasan Basri ÇETİNKAYA'ya ve sevgili eşim Ajda Yalçın ARDA'ya teşekkürlerimi sunarım

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ .....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	ix
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR.....	x
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 1. SENKRON MAKİNALARIN YAPILARI VE ÇEŞİTLERİ.....	3
1.1. Senkron makinaların yapısı.....	13
1.2. Senkron makinalarda döner alan hızı.....	17
1.3. Senkron generatörlerde üretilen gerilim.....	17
1.4. Senkron generatörlerde adım ve dağıtım katsayıları.....	20
1.4.1. Adım katsayısı.....	20
1.4.2. Dağıtım katsayısı.....	22
1.5. Senkron makinaların eşdeğer devreleri.....	24
1.5.1. Silindrik kutuplu senkron makinaların bir faz eşdeğer devresi.....	24
1.5.2. Çıkık kutuplu senkron makinaların bir faz eşdeğer devresi.....	30
1.6. Senkron generatörün eşdeğer devre parametrelerinin ölçülmesi.....	35
1.6.1. Senkron makinalarda DA deneyi.....	35
1.7. Senkron makinaların fazör diyagramları.....	36
1.7.1. Senkron makinaların fazör diyagramlarının çizimi.....	37
1.7.2. Silindrik kutuplu senkron makinanın fazör diyagramları.....	37
1.7.3. Çıkık kutuplu senkron makinanın fazör diyagramları.....	41

1.8. Yükün senkron makinaya etkisi.....	43
1.8.1. Yük değişiminin senkron generatöre etkisi.....	43
1.8.2. Generatörlerin Frekans-Aktif Güç ve Gerilim-Reaktif Güç ilişkileri.....	45
<b>BÖLÜM 2. UYARTIM SİSTEMLERİNE GENEL BAKIŞ.....</b>	<b>48</b>
2.1. Generatör uyarım sistem çeşitleri.....	48
2.2. Statik uyarım sisteminin bileşenleri.....	49
2.2.1. Uyarım trafosu.....	50
2.2.2. Otomatik gerilim regülatörü.....	50
2.2.3. Tristörlü AA/DA Dönüştürücüsü.....	52
2.2.4. DA Kesici.....	54
2.2.5. Deşarj devresi.....	54
<b>BÖLÜM 3. UYARTIM SİSTEMİ MODELLERİ.....</b>	<b>55</b>
3.1. DA tipi uyarım sistemi modelleri.....	58
3.1.1. DA1A uyarım sistem modeli.....	58
3.1.2. DA2A uyarım sistem modeli.....	59
3.1.3. DA3A uyarım sistem modeli.....	60
3.2. AA tipi uyarım sistem modelleri.....	62
3.2.1. AA1A uyarım sistem modeli.....	62
3.2.2. AA2A uyarım sistem modeli.....	63
3.2.3. AA3A uyarım sistem modeli.....	64
3.2.4. AA4A uyarım sistem modeli.....	66
3.2.5. AA5A uyarım sistem modeli.....	67
3.2.6. AA6A uyarım sistem modeli.....	67
3.3. ST tipi uyarım sistem modelleri.....	68
3.3.1. ST1A uyarım sistem modeli.....	69
3.3.2. ST2A uyarım sistem modeli.....	70
3.3.3. ST3A uyarım sistem modeli.....	71
3.4. Güç sistem dengeleyicisi modeli.....	72

BÖLÜM 4. ST1A STATİK UYARTIM SİSTEMİNİN MATLAB-SİMULİNK'TE MODELLENMESİ VE DİNAMİK UYARTIM SİSTEMİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI.....	73
4.1. Uyarım sisteminin modellenmesi.....	74
4.2. ST1A Statik Uyarım'lı Hidrolik Türbün-Generatör modelinde kullanılan diğer bloklar.....	79
4.3. Simulasyon sonuçları.....	82
4.3.1. Faz-toprak kısa devre durumu.....	83
4.3.2. Üç faz kısa devre durumu.....	89
4.3.3. Hat kopması durumu.....	98
4.3.4. Yük değişimi durumu.....	103
BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	108
KAYNAKLAR.....	110
EKLER.....	113
ÖZGEÇMİŞ.....	119

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.Doğru akım makinası(a) ile kutupları dışta olan üç fazlı senkron makina(b)'nın şeması.....	3
Şekil 1.2.Muhtelif tabakalardaki saç segmanların durumunu gösteren stator parçası(a) ile doldurulmuş bir stator oluşu(b).....	6
Şekil 1.3.Kutup çekirdeğinin rotor gövdesine vidalanarak(a) kırılmalı kuyruğu(b) ve çekiç başı konstruksyonu(c) ile bağlanması.....	8
Şekil 1.4.Çıkık kutuplu senkron makinalarda dinamo saçlarından yapılmış bir kutup kesiti.....	9
Şekil 1.5.225000kVA ve 68.2d/d'lık şemsiye tipi generatörün taşıyıcı yatak yükünün manyetik olarak azaltılması.....	11
Şekil 1.6.Silindirik ve çıkık kutuplu rotor yapısı.....	14
Şekil 1.7.Bir fazlı senkron makinanın elektrik devresi.....	15
Şekil 1.8.İki fazlı senkron makina.....	16
Şekil 1.9.Üç fazlı senkron makina.....	16
Şekil 1.10.Tam adımlı bobin ve endüklenen gerilim.....	20
Şekil 1.11.Kısaltılmış adımlı bobin ve endüklenen gerilim.....	21
Şekil 1.12.Dağıtılmış sarımlı bobin ve endüklenen gerilim.....	23
Şekil 1.13.Bir fazlı stator eşdeğer devresi(a) ve bir faz stator ve manyetik devresi(b).....	26
Şekil 1.14.Uyartım devresi akım ve bileşenleri.....	26
Şekil 1.15.Senkron makinanın komple bir faz eşdeğer devresi.....	26
Şekil 1.16.Silindirik kutuplu bir senkron motorun rotor devresi statora aktarılmış komple bir faz eşdeğer devresi.....	27
Şekil 1.17.Silindirik kutuplu senkron motorun basitleştirilmiş bir faz eşdeğer devresi.....	28
Şekil 1.18.Silindirik kutuplu senkron motorun reaktansları birleştirilmiş bir faz eşdeğer devresi.....	29
Şekil 1.19.Silindirik kutuplu senkron motorun reaktansları birleştirilmiş bir faz eşdeğer devresi.....	29
Şekil 1.20.Çıkık kutuplu senkron makinanın yapısı.....	30
Şekil 1.21.Çıkık kutuplu bir senkron generatörün bir faz eşdeğer devresi.....	31
Şekil 1.22.Endüktif yüklü çıkık kutuplu senkron generatörün vektör diyagramı.....	32
Şekil 1.23.Stator direnci ihmal edilmiş, endüktif yüklü çıkık kutuplu senkron generatörün vektör diyagramı.....	33
Şekil 1.24.Çıkık kutuplu bir senkron generatörün eşitlikler 36 ve 37'ye göre çizilmiş bir faz eşdeğer devresi.....	33
Şekil 1.25.Çıkık kutuplu bir senkron generatörün basitleştirilmiş bir faz eşdeğer devresi.....	34
Şekil 1.26.Çıkık kutuplu bir senkron generatörün basit bir faz eşdeğer devresi.....	34
Şekil 1.27.DA deneyi yapılan senkron makinanın üç faz eşdeğer devresi.....	35
Şekil 1.28.Değişik yükler için senkron makinanın motor ve generatör çalışma durumlarına göre akım ve gerilim vektör diyagramları.....	38
Şekil 1.29.Değişik yükler için silindirik kutuplu senkron makinanın motor olarak çalışma durumuna göre vektör diyagramları.....	39

Şekil 1.30.Değişik yükler için silindirik kutuplu senkron makinanın generatör çalışma durumuna göre vektör diyagramları.....	40
Şekil 1.31.Değişik yükler için çıkık kutuplu senkron makinanın motor çalışma durumuna göre vektör diyagramları.....	41
Şekil 1.32.Değişik yükler için çıkık kutuplu senkron makinanın generatör çalışma durumuna göre vektör diyagramları.....	42
Şekil 1.33.Çeşitli yük durumlarına göre generatörde meydana gelen gerilim düşümleri.....	43
Şekil 1.34.Generatörün hız-aktif güç eğrisi(a), generatörün frekans-aktif güç eğrisi.....	46
Şekil 1.35.Generatörün gerilim-reaktif güç eğrisi.....	46
Şekil 2.1.Dinamik uyartım sistemi blok şeması(a), Statik uyartım sistemi blok şeması(b).....	49
Şekil 2.2.Statik uyartım sisteminin blok diyagramı.....	49
Şekil 2.3.Uyartım trafosunun görünümü.....	50
Şekil 2.4.Otomatik gerilim regülatörünün(AVR) blok şeması.....	51
Şekil 2.5.Sınırlayıcılar ile ilgili güç grafiği.....	52
Şekil 2.6.Tristörlü AA/DA dönüştürücüsü.....	53
Şekil 2.7.Tristörlü AA/DA dönüştürücüsünün dalga şekilleri.....	53
Şekil 3.1.Senkron makina uyartım sistemi genel blok diyagramı.....	55
Şekil 3.2.Uç gerilim dönüştürücüsü ve yük kompanzasyon elemanları.....	57
Şekil 3.3.DA1A tipi uyartım sistemi blok diyagramı.....	59
Şekil 3.4.DA2A tipi uyartım sistemi blok diyagramı.....	60
Şekil 3.5.DA3A tipi kesintili çalışan regülatörlü uyartım sistemi blok diyagramı.....	61
Şekil 3.6.AA1A tipi kontrolsüz doğrultucu alternatör-doğrultucu uyartım sistemi blok diyagramı.....	62
Şekil 3.7.AA2A tipi uyartım sistemi blok diyagramı.....	64
Şekil 3.8.AA3A tipi uyartım sistemi blok diyagramı.....	65
Şekil 3.9.AA4A tipi uyartım sistemi blok diyagramı.....	66
Şekil 3.10.AA5A tipi uyartım sistemi blok diyagramı.....	67
Şekil 3.11.AA6A tipi uyartım sistemi blok diyagramı.....	67
Şekil 3.12.ST1A tipi uyartım sistemi blok diyagramı.....	69
Şekil 3.13.ST2A tipi uyartım sistemi blok diyagramı.....	70
Şekil 3.14.ST3A tipi uyartım sistemi blok diyagramı.....	71
Şekil 3.15.Güç sistemi dengeleyicisi blok diyagramı.....	72
Şekil 4.1.ST1A statik uyartım'lı hidrolik türbin-generatör modeli.....	73
Şekil 4.2.IEEE'nin ST1A statik uyartım modeli.....	74
Şekil 4.3.Örnek bir model.....	75
Şekil 4.4.Geçici kazanç azaltma bloğunun Simulink'teki modeli.....	76
Şekil 4.5.Regülatör bloğunun Simulink'teki modeli.....	76
Şekil 4.6.Uyartım sistemi stabilizörü bloğunun Simulink'teki modeli.....	77
Şekil 4.7.Uyartım akımı sınırlaması blokları.....	77
Şekil 4.8.ST1A statik uyartım sisteminin Simulink modeli.....	78
Şekil 4.9.Simulink'te senkron makina(generator) modeli.....	79
Şekil 4.10.Simulink'te hidrolik türbin ve governor modeli.....	79
Şekil 4.11.Simulink'te generatör uyartım modeli.....	80
Şekil 4.12.Simulink'te üç fazlı transformator modeli.....	80
Şekil 4.13.Simulink'te üç faz kısa devre modeli.....	81
Şekil 4.14.Simulink'te üç faz güç kaynağı modeli.....	81
Şekil 4.15.Simulink'te üç faz seri(a) ve paralel(b) RLC yükü bloğu.....	81



Şekil 4.16.Faz-toprak kısa devre durumunda $V_a$ .....	84
Şekil 4.17.Faz-toprak kısa devre durumunda $\dot{I}_{abc}$ .....	85
Şekil 4.18.Faz-toprak kısa devre durumunda $V_f$ .....	86
Şekil 4.19.Faz-toprak kısa devre durumunda $\dot{I}_f$ .....	87
Şekil 4.20.Faz-toprak kısa devre durumunda generatör hızı.....	88
Şekil 4.21.Üç faz kısa devre durumunda $V_a$ .....	89
Şekil 4.22. $t=10s$ 'de meydana gelen üç faz kısa devre durumunda $V_a$ .....	90
Şekil 4.23.Üç faz kısa devre durumunda $\dot{I}_{abc}$ .....	91
Şekil 4.24. $t=10s$ 'de meydana gelen üç faz kısa devre durumunda $\dot{I}_{abc}$ .....	92
Şekil 4.25.Üç faz kısa devre durumunda $V_f$ .....	93
Şekil 4.26.Üç faz kısa devre durumunda $\dot{I}_f$ .....	94
Şekil 4.27. $t=10s$ 'de meydana gelen üç faz kısa devre durumunda $\dot{I}_f$ .....	95
Şekil 4.28.Üç faz kısa devre durumunda generatör hızı.....	96
Şekil 4.29. $t=10s$ 'de meydana gelen üç faz kısa devre durumunda generatör hızı.....	97
Şekil 4.30. Hat kopması durumunda $V_a$ .....	98
Şekil 4.31.Hat kopması durumunda $\dot{I}_{abc}$ .....	99
Şekil 4.32.Hat kopması durumunda $V_f$ .....	100
Şekil 4.33.Hat kopması durumunda $\dot{I}_f$ .....	101
Şekil 4.34.Hat kopması durumunda generatör hızı.....	102
Şekil 4.35.Yük değişimi durumunda $V_a$ .....	103
Şekil 4.36.Yük değişimi durumunda $\dot{I}_{abc}$ .....	104
Şekil 4.37.Yük değişimi durumunda $V_f$ .....	105
Şekil 4.38.Yük değişimi durumunda $\dot{I}_f$ .....	106
Şekil 4.39.Yük değişimi durumunda generatör hızı.....	107

## TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Muhtelif güçteki turbo-generatör uyarım gücü ve akımları.....	12
Tablo 4.1. IEEE'nin ST1A parametreleri ve açıklamaları.....	75

## SİMGELELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

$\delta$	: Hava aralığı, (mm)
$n_{kr}$	: Kritik devir sayısı(d/d)
$I_S$	: Stator akımı(A)
$R_S$	: Stator direnci( $\Omega$ )
$X_{sl}$	: Endüvi kaçak reaktansı( $\Omega$ )
$E_S$	: Endüvi sargısında endüklenen gerilim(V)
$R_V$	: Uyarım akımı ayar direnci( $\Omega$ )
$R_f$	: Uyarım devresi direnci( $\Omega$ )
$E_f$	: Uyarım devresine uygulanan gerilim(V)
$I_f$	: Uyarım devresi akımı(A)
$I_{sa}$	: A fazının endüvi akımı vektörü(A)
$I_{sb}$	: B fazının endüvi akımı vektörü(A)
$R_{sa}$	: A fazının endüvi direnci( $\Omega$ )
$R_{sb}$	: B fazının endüvi direnci( $\Omega$ )
$X_{sla}$	: A fazının endüvi kaçak reaktansı( $\Omega$ )
$X_{slb}$	: B fazının endüvi kaçak reaktansı( $\Omega$ )
$E_{sa}$	: A fazının endüvi sargısında endüklenen gerilim(V)
$E_{sb}$	: B fazının endüvi sargısında endüklenen gerilim(V)
$I_{sc}$	: C fazının endüvi akımı(A)
$R_{sc}$	: C fazının endüvi direnci( $\Omega$ )
$X_{slc}$	: C fazının endüvi kaçak reaktansı( $\Omega$ )
$E_{sc}$	: C fazının endüvi sargısında endüklenen gerilim(V)
$f_e$	: Elektriki frekansı(Hz)
$n_m$	: Manyetik alanın mekanik hızı(d/d)
$p$	: Toplam kutup sayısı
$e$	: Bobinde endüklenen gerilim(V)
$N$	: Bobinin spir sayısı
$\phi$	: Bobin sargısını kesen akı miktarı(Wb)
$\phi_{max}$	: Bobin akısının maksimum değeri(Wb)
$\omega$	: Açısal hız(rad/sn)
$f$	: Frekans(Hz)
$k_p$	: Adım katsayısı
$k_d$	: Dağıtım katsayısı
$c$	: Bir kutup altındaki bir faza ait oluk sayısı
$m$	: Faz sayısı
$x$	: Toplam oluk sayısı
$Y_x$	: Bir kutup altındaki oluk sayısı
$\alpha$	: Oluklar arasındaki açı
$L_{sl}$	: Stator kaçak endüktansı(H)
$a$	: Dönüştürme oranı
$\cos\phi$	: Endüvi akımı ve gerilimi arasındaki açının kosinüs değeri
$V_R$	: Gerilim regülasyonu
$V_{nl}$	: Yüksüz durumda generatörün terminal gerilimi(V)

$V_{fl}$	: Yüklü durumda generatörün terminal gerilimi(V)
SD	: Hızdaki değişme(%)
$P_{\phi}$	: Generatör çıkış aktif gücü(W)
$Q_{\phi}$	: Generatör çıkış reaktif gücü(VAR)
$K_A$	: Regulator kazancı
$K_F$	: Stabilizör kazancı
$I_{LR}$	: Uyarım akım sınırlayıcısının set değeri(pu)
$T_A$	: Regulator zaman sabiti(sn)
$T_F$	: Stabilizör zaman sabiti(sn)
$V_{Rmin}$	: Regulator minimum çıkış değeri(pu)
$V_{Rmax}$	: Regulator maksimum çıkış gerilimi(pu)
$T_c$	: Denetçinin birinci zaman sabiti(sn)
$K_c$	: Denetçinin gerilim oranı
$T_B$	: Denetçinin ikinci zaman sabiti(sn)
$K_{LR}$	: Sınırlayıcının kazanç değeri
$E_{fdo}$	: Uyarım gerilimi başlangıç değeri(pu)
$T_{gro}$	: Generatör zaman sabiti başlangıç değeri(sn)
$V_{stab}$	: Güç sistem stabilizörü gerilimi(pu)
AVR	: Automatic Voltage Regulator(Otomatik Gerilim Regulatorü)
MATLAB	: Matrix Laboratory
IEEE	: The Institute of Electrical and Electronics Engineers
PSS	: Power System Stabilizer(Güç Sistem Dengeleyicisi)

# SENKRON GENERATÖRLERİN UYARTIM SİSTEMLERİNİN YARI İLETKENLİ DEVRELERLE DENETİMİ

Sunay ARDA

**Anahtar Kelimeler:** Sistem Modelleme, Uyartım, Matlab-Simulink, Senkron Generatör, ST1A Statik Uyartım Sistem Modeli, Senkron Generatör Uyartım Kontrolü

**Özet:** Bu çalışmada enerji üretim kontrol sistemlerinden senkron generatörlerin uyartım sistemleri hakkında bilgi verilmiştir. IEEE'nin uyartım sistem modelleri incelenmiş, bunlardan ST1A statik uyartım sistemi Matlab-Simulink'te dizayn edilmiştir. ST1A statik uyartımın simülasyonu yapılmış ve dinamik uyartım sistemi ile karşılaştırılmıştır. Sistem parametreleri olarak IEEE'nin ST1A statik uyartım sistemi için vermiş olduğu parametreler kullanılmıştır. Simülasyonda uyartım akımı, uyartım gerilimi, generatör çıkış voltajı, üç faz stator akımı ve generatörün hızı gibi parametreler ölçülmüştür. Bu parametrelerin eğrileri generatör çıkışındaki yük'e göre değişkenlik göstermiştir.

Son olarak sonuçların değerlendirilmesi yapılmış ve ST1A statik uyartım sistem performansının dinamik uyartım'a göre yüksek olduğunu görülmüştür.

# **CONTROL OF SYNCHRONOUS GENERATOR'S EXCITATION SYSTEMS USING SEMICONDUCTOR CIRCUITS**

**Sunay ARDA**

**Keywords:** System Modelling, Excitation, Matlab-Simulink, Synchronous Generator, ST1A Static Excitation System Model, Synchronous Generator Excitation Control.

**Abstract:** In this thesis, it was given an information about the excitation systems of synchronous generators. The IEEE excitation system models were examined, the ST1A static excitation was designed in Matlab-Simulink. The ST1A static excitation was simulated and it was compared with indirect excitation system. The IEEE ST1A static excitation system parameters were used in the simulation. The excitation current, excitation voltage, generator voltage, three phase stator current and generator speed were measured. This parameters were changed according to the system load.

Lastly, the discussion of the results were made and it was understood that the performance of the ST1A static excitation is higher than the indirect excitation system.

## GİRİŞ

Güç sistemlerinde gerilim kalitesi çok önemlidir. Uyarım kontrolünün ana amacı ise normal işletme koşullarında senkron generatör çıkış gerilimindeki kararlılığın devamını sağlamak ve herhangi bir arıza durumu sonrasında regüle ederek gerilimin hata öncesi kararlı hal değerine çabuk ve etkili bir şekilde gelmesini sağlamaktır. Son yıllarda, güç sistem stabilitesinin artırılması üzerine hatırı sayılır çalışmalar yapılmıştır.

Senkron generatörlerde uyarım kontrolü, güç sistem stabilitesi ve elektrik gücü kalitesinin sağlanmasında çok önemlidir. Senkron generatör gerilim regülatörleri, senkron generatör alan akımını ayarlayarak generatör çıkış gerilimini kontrol ederler. Uyarım sistemleri normalde, yüksek kazanç ve küçük zaman sabitine sahip sistemlerdir. Yani sistem işletme koşullarında çabuk kompanzasyon yapabilecek kapasiteye sahiptir.

Yüksek performanslı uyarım regülasyonu sağlamak için birçok kontrol sistemi dizayn edilmiştir. Son yıllarda Statik Uyarım, göze çarpan yüksek performansıyla çeşitli güç sistem uygulamalarında kullanılmaya başlamıştır.

İlk IEEE'nin komite raporu 1968 yılında yayınlanmıştır. Buna göre uyarım sistemleri uyarım gücü kaynağına göre değil, keyfi olarak sınıflandırılmıştır. Daha sonra komitenin 1981 yılı raporunda uyarım sistemlerindeki gelişmeler yansıtılmış, birçok iyileştirilmiş model bu raporda yayınlanmıştır. Raporda uyarım sistemleri Doğru Akım(DA), Alternatif Akım(AA) ve Statik Uyarım(ST) olmak üzere üç temel grupta sınıflandırılmıştır.

Bu çalışmada enerji üretim kontrol sistemlerinden senkron generatörlerin uyarım sistemleri hakkında bilgi verilerek büyük ölçekli sistem kararlılığı çalışması için kullanılan IEEE'nin Tip ST1A Statik Uyarım kontrol sistemi Matlab'da dizayn edilerek simulasyon yapılmış ve Dinamik Uyarım kontrol sistemi ile karşılaştırılmıştır.

Statik Uyarım kontrolü'nün sistem performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sistemde IEEE'nin ST1A Statik Uyarım parametreleri kullanılmıştır. Yapılan simulasyon sonuçları,

Statik Uyarım performansı'nın geleneksel uyarım(Dinamik Uyarım)'dan yüksek olduğunu göstermiştir. Çalışmanın diğer bölümlerinde, ele alınan konular aşağıda belirtilmiştir.

Bölüm 1'de, senkron makineler incelenmiştir. Senkron makinelerin yapıları, çeşitleri, eşdeğer devreleri, fazör diyagramları, senkron generatörde üretilen gerilim ve yük değişiminin senkron generatöre etkisi anlatılmıştır.

Bölüm 2'te Uyarım Sistemleri hakkında bilgi verilmiştir. Uyarım çeşitleri, Statik Uyarım'ın yapısı, parçaları ve işlevleri yer almaktadır.

Bölüm 3'te Uyarım Sistem Modelleri anlatılmıştır. DA, AA ve ST tipi uyarım sistem çeşitlerine yer verilmiştir.

Bölüm 4'te ST1A tipi Statik Uyarım sistemi'nin Matlab-Simulink'te modellenmesi, simülasyonu ve Dinamik Uyarım ile karşılaştırılması yapılmıştır.

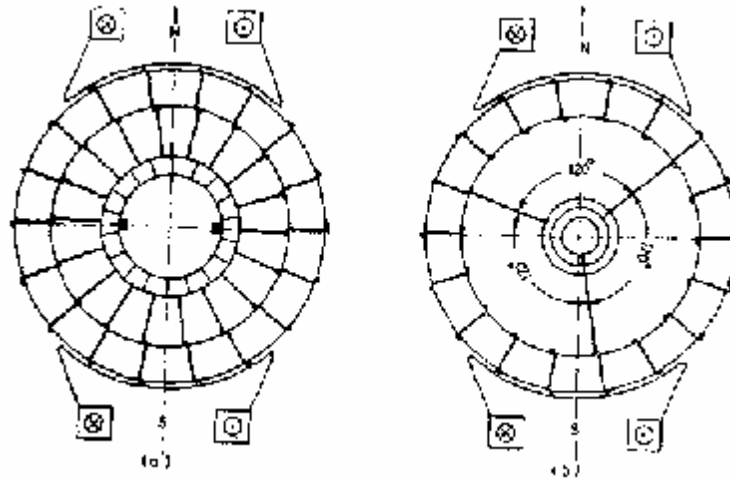
Bölüm 5'da tez konusu ile ilgili varılan sonuçlar ve öneriler yer almaktadır.



## BÖLÜM 1. SENKRON MAKİNALARIN YAPILARI VE ÇEŞİTLERİ

Senkron makina, elektromıknatıslı veya küçük güçlerde olduğu gibi, mıknatıslı bir endüktör(rotor) ile bir veya çok fazlı alternatif akım sargılı endüvisi(statoru) bulunan, sabit bir senkron hızla dönen, motor veya generatör olarak çalışabilen bir alternatif akım makinasıdır.

Senkron makinalar yapılış bakımından doğru akım makinalarına benzerler. Şekil 1.1 'de, bu iki makina arasındaki benzerliği göstermek amacı ile, iki kutuplu, halka sargılı bir doğru akım makinası ile iki kutuplu üç fazlı bir senkron makina şematik olarak çizilmiştir. [1]



Şekil 1.1: Doğru Akım Makinası (a) ile Kutupları Dışta Olan Üç Fazlı Senkron Makina (b)'nin Şeması

Birbirine çok benzeyen bu iki makina arasındaki fark, endüvi bobinlerinde endüklenen alternatif gerilimlerin doğru akım makinasında kollektör yardımı ile doğrultulmuş olarak dışarıya alınırken senkron makinada endüvi bobinlerinde endüklenen alternatif gerilimlerin bilezikler yardımı ile dışarıya alınmasıdır. Denebilir ki, doğru akım makinası endüvisinde endüklenen alternatif gerilimleri doğrultulan bir senkron makinadır. Burada da doğru akım makinasında olduğu gibi, endüvi dinamo saçlarından ve kutuplar masif veya dinamo saçlarından yapılabilir. Doğru akım makinalarına benzeyen, kutupları dışta ve endüvisi dönen

kısımda olan senkron makinalar olduğu gibi, genellikle kutupları dönen kısımda (buna kutup tekerleği denir) ve endüvi sargısı statorda (yani duran kısımda) olan senkron makinalar imal olunur.

Kutupları dışta olan ve yapılış bakımından doğru akım makinalarına benzeyen tipte olan senkron makinalar küçük güçlerde kullanılır. Küçük güçlerde endüvi akımının küçük oluşu dolayısıyla akımın fırçalar yardımı ile endüvi sargısından dışarı çekilmesinde bir sakınca yoktur. Küçük güçlerde sargı gerilimi de küçük olduğundan, hareket eden kısımda bulunan endüvi sargısının yalıtılması da bir problem teşkil etmez. Fakat güç büyüdükçe sargı geriliminin de büyük seçilmesi gerekecektir. Özellikle santrallerde şebekelerin beslenmesinde kullanılan senkron generatörlerin gerilimi, generatörün gücüne bağlı olarak 6, 10 ve 15 kV olur. Çok büyük generatörlerde 20 kV ve bunun üstünde uç gerilimi kullanılmaktadır. Bugün 1000 MVA'nın üstündeki turbogeneratörlerde uç gerilimi 27 kV'a çıkarılmıştır. Böyle yüksek gerilim altında çalışan bir makinanın çok iyi yalıtılması gerekir. Bu bakımdan çok iyi yalıtılması gereken alternatif akım sargısının dönen kısımda bulunması sakıncalıdır. Bu bakımdan çok önceleri tamamen doğru akım makinalarına benzeyen senkron makinalar kullanırken, sonraları orta ve büyük güçlerde bunlardan tamamen yaz geçilerek, kutupları rotor üzerinde ve alternatif akım sargıları da statordaki oluklara yerleştirilmiş senkron makinalar kullanılmaya başlanmıştır. Bu tip senkron makinalarda dönen kısma kutup tekerleği ve duran kısma da endüvi (stator) denir. [1]

Alçak devirli senkron makinalarda kutup tekerleği, çıkık kutuplu olarak ve yüksek devirli senkron makinalarda da kutup tekerleği, dolu kutuplu veya silindrik kutuplu olarak yapılır. Silindrik kutuplu senkron generatöre turbogeneratör de denir. Alçak devirli senkron makinalarda kutup sayısı çok ve kutup tekerleği çapı büyüktür. Su santralı generatörleri ve dizel veya pistonlu buhar makinaları ile tahrik edilen senkron generatörler çıkık kutupludurlar. Silindrik kutuplu senkron makinalarda kutup sayısı ekseriya 2 ve 4 ve seyrek olarak 6 olup, kutup tekerleği çapı küçük ve fakat rotor boyu uzundur.

Çok büyük güçteki çıkık ve silindrik kutuplu senkron makinaların boyutları hakkında aşağıdaki değerler bir fikir verebilir. 25 yıl öncesine kadar su santralleri generatörleri için sınır güçleri olarak aşağıdaki değerler mümkün görölmekte idi.

Kaplan türbini ile tahrik olunan şemsiye tipi dik eksenli senkron generatörler için sınır gücü olarak 260 MVA, devir sayısı 83 dev/dak. ve rotor çapı 14 m mümkün görülmekte idi. Böyle bir generatörün ambalman devir sayısı, yani ani olarak üzerindeki nominal yükün kalkması halinde grubun çıkacağı en büyük devir sayısı nominal devir sayısının % 250 dir. [6]

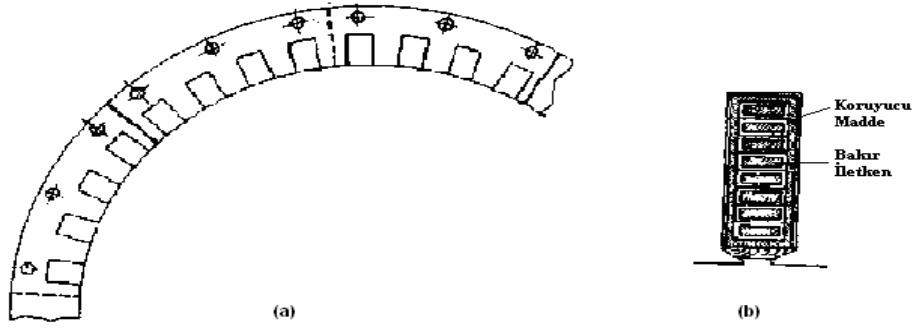
Francis türbini ile tahrik edilen dikey eksenli senkron generatörler için sınır gücü olarak 400 MVA, devir sayısı 107 dev/dak ve rotor çapı 14 m mümkün görülmekte idi ve böyle bir generatörde ambalman devir sayısı % 180 dir. Bugün 590 MVA gücünde, devir sayısı 93,8 dev/dak ve rotor çapı 16,1 m olan şemsiye tipi su santralı generatörü imal edilmiş durumdadır. [6]

Pelton türbini ile tahrik olunan yatay eksenli senkron generatörler için sınır gücü olarak 120 MVA, devir sayısı 500 dev/dak. ve rotor çapı 3 m mümkün görülmekte idi ve böyle bir generatörün ambalman devir sayısı % 180 dir. Yuvarlak rotorlu senkron generatörlerin sınır güçlerinde çok süratli gelişmeler olmuş ve bugün 1500 MVA lık turbo generatörler imal edilmektedir. Muhtelif teknik nedenlerden ve daha etkili bir soğutma elde etmek amacı ile günümüzde hidrojen yerine su ile direkt soğutma tercih edilmektedir. [6]

Çıkık ve silindirik kutuplu senkron generatörlere ait değerlerden makinaların boyutlarının çok büyük olduğu görülmektedir. Bunları işleyecek tezgahların çok büyük ve hassas olmaları gerekmektedir. Kullanılacak malzeme çok üstün zorlanmalara dayanacak nitelikte olmalıdır. Turbo - generatörlerde tam yükün ani olarak kalkmasında devir sayısı nominal devir sayısının 1,25 katma çıkar. [1]

Büyük çıkık kutuplu makinalarda çevre hızı 80 m/san ye kadar değerler alır. Turbo - generatörlerde ise normal olarak rotorun çevre hızı 150 m/san ye kadar olmakla beraber, bugünkü teknolojik olanaklarla sınır hız olarak 200 m/san. ye kadar çıkılabilmektedir.[1]

Senkron makinaların statorları 0,5 mm'lik demir kayıpları düşük yüksek kaliteli saçlardan yapılır. Büyük makinalarda (saç dış çapının 1100 mm'den büyük olması durumunda) stator, tabakalarda kaydırmalar yapılarak üst üste istiflenen saç segmanlardan oluşur. Stator olukları bu saç segmanların otomatik makinalarda zımbalanması sureti ile hazırlanır. Şekil 1.2.a 'da stator saç paketini oluşturan saç segmanların bir birini izleyen tabakalardaki durumlarını belirleyen stator parçası, Şekil 1.2.b'de ise iletken ve yalıtkan maddelerle doldurulmuş stator oluşu görülmektedir.



Şekil 1.2: Muhtelif Tabaklardaki Saç Segmanların Durumunu Gösteren Stator Parçası ile (a) Doldurulmuş bir Stator Oluğu (b)

Statoru oluşturan saç segmanların bir yüzü yalıtılmış ve diğer yüzü çıplaktır. Bir saç segmanın yalıtılmış yüzü diğer segmanın yalıtılmamış yüzüne gelmek ve saç levhaların her bir tabaka değişmesinde (genel olarak yarı boyda) kaydırılması suretiyle stator saç paketi imal olunur. Büyük makinalarda, yani makinanın aktif uzunluğunun büyük olması durumunda, stator saç paketinin soğumasını sağlamak amacı ile stator saç paketi 5- 6 cm boyunda bir çok kısımlara bölünür ve bu kısımlar arasında birer santimetrelilik hava aralıkları bırakılır. Çok büyük güçlerde hava ile soğutma kafi gelmediğinden hidrojen ve su ile soğutma metotları uygulanır. Statorda açılmış bulunan oluklara makinanın faz sayısına göre alternatif akım sargıları yerleştirilir. [1]

Makinanın karkası önceleri dökme demirden yapılmışken bugün hemen hemen yalnız çelik levhalardan kaynak konstrüksiyonu olarak yapılmaktadır. Senkron makinalarda hava aralığı diğer elektrik makinalarına oranla büyüktür. Hava aralığının büyük olması, oluklardan dolayı meydana gelecek yüksek harmonikleri azaltacağı gibi makinanın daha iyi soğumasını sağlar. Silindirik kutuplu makinalarda hava aralığı bütün stator çevresi boyunca sabittir. Çıkık kutupluda ise, kutupların yapılışına göre kutup tabanının bir kısmında sabit ve kutup ayağı uçlarına doğru büyümekte veya tam kutup ortasında en küçük değerde olmak üzere kutup ayağı uçlarına doğru sinüs formunda artmaktadır. Çıkık kutuplu senkron makinalarda iki kutbun tam ortasında (senkron makinanın enine eksenini buradan geçer) hava aralığı en büyük değerini alır.

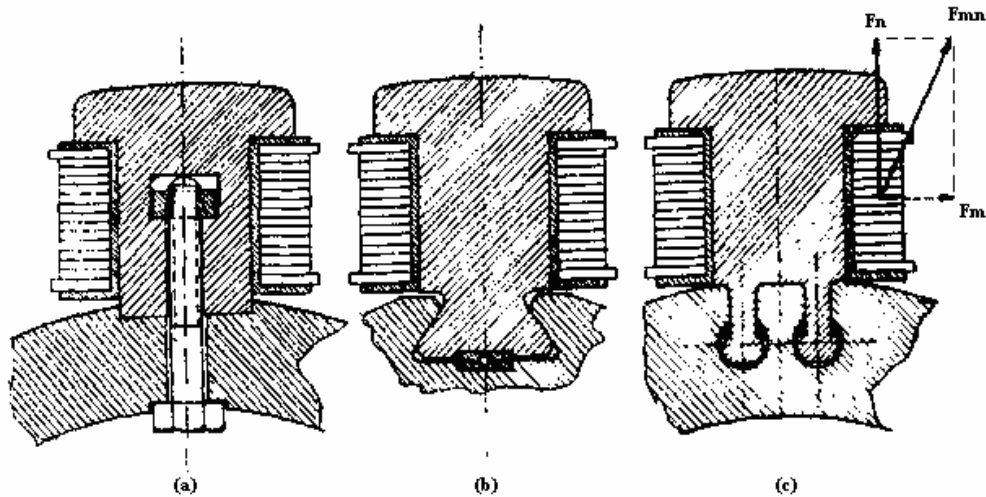
Çıkık kutuplu makinalarda kutup altındaki hava aralığı kutup taksimatının  $1/50$ 'si ile  $1/60$ 'ı kadar olup, endüvi uzunluğu kutup taksimatının 1,2 katı kadardır. Silindirik kutuplu senkron makinalarda hava aralığı çıkık kutupludan daha büyüktür ve burada  $\delta \approx 1 / 40 \tau_p$  dir. [6]

Kutup tekerleği, silindrik kutuplu makinalarda ya içi oyuk milli olarak dökme çelikten veya dövme demirden yapılır ve olukların altına soğutma kanalları yerleştirilir. Uyarım sargısının yerleştirileceği oluklar rotorun göbek kısmına açılan oluklara yerleştirilir. Kutup taksimatının 2/3 üne açılan oluklara uyarım sargısına ait bobinler bir fazlı alternatif akım sargılarında olduğu gibi yerleştirilir. Özellikle büyük güçteki turbo - generatörlerde, çok yüksek çevre hızlarına çıkıldığından, kutup tekerleğinin işlenmesinde çok temiz ve hassas işçiliğe ihtiyaç vardır. Aşağıdaki örnek belirtmiş olduğumuz hususun ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

40000 kVA'lık bir silindrik kutuplu senkron generatörde rotor oluşunda 1/10 mm'lik hassasiyetsizlik 280 gramlık bir statik dengesizliğe sebep olur ki, bu da nominal devir sayısında yaklaşık olarak 1000 kg'lık bir merkez kaç kuvvete tekabül eder. Hazır bir turbo - rotorda müsaade edilen dengesizlik ise, bu değer 1/10 una eşittir.

Modern turbo rotorlarda diş başları Şekil 1.3'de olduğu gibi, kırlangıç kuyruğu ve çekiç başı şeklinde yapılır ve oluk ağzına sürülen bronz kamalar uyarım sargısı iletkenlerinin merkez kaç kuvvet etkisi ile dışarıya fırlamalarını önler.

Makinanın gücüne bağlı olmak üzere, değişik firmaların konstrüksiyonları bir birinden farklıdır.



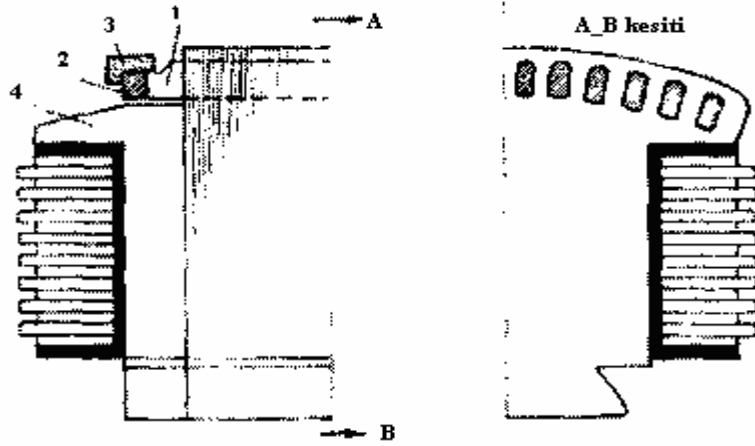
Şekil 1.3: Kutup Çekirdeğinin Rotor Gövdesine Vidalanarak (a), Kırlangıç Kuyruğu (b) ve Çekiç Başı Konstrüksiyonu (c) ile Bağlanması

Şekil 1.3.c'den görüleceği üzere, uyarım sargısının  $F_{mn}$  merkez kaç kuvveti  $F_m$  ve  $F_n$  bileşenlerinden meydana gelir. Bu kuvvetin sargı iletkeninde deformasyona sebebiyet vermemesi için, küçük çaptaki kutup tekerleklerinde bobinlerin uzunlamasına olan taraflarında kutuplar arasına iletkenlerin dayanabileceği sıkıştırma parçaları yerleştirilir. Ayrıca uyarım sargılarında oldukça küçük gerilim ve büyük akım şiddetleri seçilmek suretiyle, mekanik etkilere dayanıklı iletken kesitleri elde olunur. Şekilden görüleceği üzere, kutup çekirdeklerine büyük makaralara sarılmış ve dört köşe olan kutup ayaklarına dayanmış uyarım bobinleri takozlar yardımı ile sıkıştırılır. [1]

Özellikle çevre hızı çok büyük olan sınır güç makinalarında kutupların merkez kaç kuvvetleri çok büyük olur ve buralarda özel konstrüksiyonların kullanılması gerekir. Örneğin Avusturya'da Kaprún Santrali için ELİN firması tarafından 1951 yılında inşa edilmiş olan ve zamanın sınır güç generatörü olan 70000 kVA ve 500 d/d'lık çıkık kutuplu senkron generatorün ambalman devir sayısında bir kutbuna etki yapan merkezkaç kuvvet 5700 tondur.

Bu kadar büyük bir kuvvetle rotordan uzaklaştırılmaya çalışılan kutbun rotora bağlanması çok önemli konstrüksiyon problemleri ortaya çıkarmıştır. Söz konusu makinada kutupların rotor göbeğine bağlanması, kutup tekerleği göbeğinde radyal yönde tarak şeklinde açılmış oluklara kutup çekirdeklerinin yerleştirilip, aksiyel yönde açılmış bulunan deliklere özel çelikten yapılmış uzun sapmalarla tutturulması ile sağlanmıştır.

Çıkık kutuplu senkron makinalarda kutup çekirdeği dinamo saç paketlerinden de yapılmakta ve kutup tabanına açılmış olan oluklara üzerlerine yalıtkan kılıflar geçirilmiş amortisör çubukları yerleştirilmektedir. Her iki tarafından halkalarla kısa devre edilen bu çubuklar kutup tekerleği çevresinde bir kısa devre kafesi oluştururlar(Şekil 1.4).



Şekil 1.4: Çıkık kutuplu Senkron makinalarda çekirdeği dinamo saçlarından yapılmış bir kutup kesiti

1. Amortisör çubuğu.
2. Kısa devre edici halka.
3. Koruyucu çelik halka.
4. Kutup sonu levhası.

Bu amortisör kısa devre kafesi şebeke frekansı ile aynı hızda dönmeyen, dolayısıyla genliği değişen alanların söndürülmesini sağlar.

Çok büyük güçteki makinaların millerinin boyutlandırılmasında aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir:

Milin bükülme zorlanması  $600 \text{ kg/m}^2$ ,

Burulma zorlanması  $300 \text{ kg/m}^2$

Kombine zorlanması  $400 \text{ kg/m}^2$

olmalıdır.

Bu zorlanmaların yanı başında büyük güçteki makinalarda kritik devir sayısına çok önem verilmesi gerekir. Kritik devir sayısının işletme devir sayısından yeterli derecede büyük olmasına dikkat edilmelidir. Bu, rotorun natürel frekansına tekabül eden devir sayısı olup, bu devir sayısında küçük merkezkaç kuvvetler rezonans olayının meydana gelmesine sebep olarak milin kırılmasına kadar götürebilirler. Kritik devir sayısı aşağıdaki basit formüle göre hesap edilir:

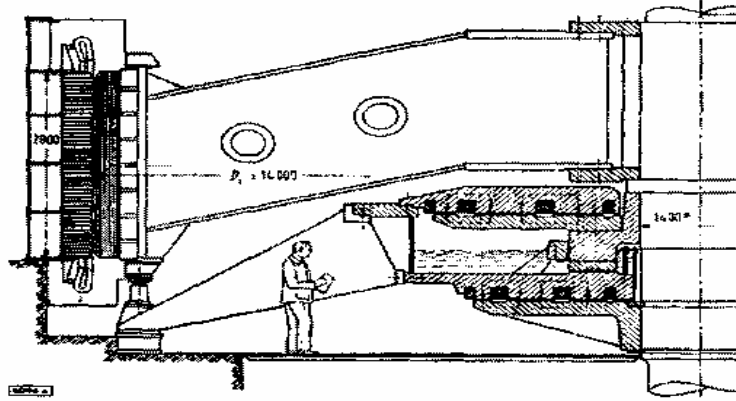
$$n_{kr} = 300 / \sqrt{f_{\max}} \quad (1.1)$$

Burada  $f_{\max}$  cm olarak milin en büyük bel verme miktarıdır. Uyarılmış makinada magnetik alan tarafından çekilme dolayısıyla kritik devir sayısı bel vermeden hesap edilen miktardan % 5. . .10 kadar küçüktür.

Alçak veya orta su düşüş yüksekliklerinde su türbinleri ile tahrik olunan generatörlerde dik milli tertipler tercih olunur. Böyle bir tertipte milin üst kısmına yerleştirilmiş olan bir taşıyıcı yatak bütün grup ağırlığı ile birlikte su basıncını da üzerine almak zorunluluğundadır. Generatörün bundan başka iki adet boyuna, yani aksiyal yatağı bulunur. Bu yataklar milin hareket ekseninde dönmesini Sağlar ve bu yataklar radyal yüklere maruzdur. Taşıyıcı yatağa aynı zamanda enine yatak da denir. Taşıyıcı yatağa yerleştirilmiş bulunan segmanlar üzerine bütün ağırlık biner. Dönüş esnasında yataktaki yağ dönen taşıyıcı halka ile eğik yüzeyli segmanlar arasına çakılırcasına girer ve bu suretle milin yukarıya doğru itilmesi sonucunda yataktaki sürtünme azaltılır. Yataktaki yağ, soğutucu sisteminde su ile soğutulur. Çok büyük güçlerde taşıyıcı yatak üzerindeki yükü magnetik olarak azaltmak mümkündür. Bunun için milin üst kısmına çekici elektromagnet yerleştirilir. Bu suretle taşıyıcı yatağın yükü çok azalır.[1]

Örneğin 88 kutuplu 225000 kVA lık bir sınır güç generatöründe taşıyıcı generatörün toplam yükü 3500 tondur. Bunun 920 tonu rotor ağırlığı ve geri kalan 2580 tonu da suyun itme kuvvetidir. Yatağın üst ve alt kısmına yerleştirilen bobinler yardımı ile 3000 tonluk bir çekme kuvveti sağlanır ve böylece yatak üzerindeki toplam yükün 500 tona indirilmesi mümkün olur(Şekil 1.5). Bunda kaldırıcı elektromagnetin ihtiyacı olan güç ancak 90 kW dır. Yatağın çekici mıkmatıssız sürtünme kayıpları ise 400 kW dır. [1]





Şekil 1.5: 225000 kVA ve 68,2 d/d'lık Şemsiye Tipi Generatörün Taşıyıcı Yatak Yükünün Manyetik Olarak Azaltılması

Son yıllarda, özellikle çok büyük turbo generatörlerde fırçasız uyarım uygulanmaya başlanmıştır. Bunun nedeni turbo generatörlerin güçleri ile birlikte uyarım gücünün de artmasıdır. Uyarım geriliminin genel olarak 1000 voltun altında tutulması dolayısıyla uyarım akımı çok büyümektedir. Turbo generatörlerde 750 MVA'e kadar uyarım gerilimi olarak 500 V ve bunun üstündeki güçlerde de 700 V kullanılmaktadır.

Aşağıda muhtelif güçteki turbo - generatörler için yaklaşık olarak gerekli uyarım gücü ve uyarım akımı verilmiştir.

Tablo 1.1: Muhtelif güçteki turbo-generatör uyarım gücü ve akımları

Generatör gücü(MVA)	Uyarım Gücü(kW)	Uyarım Akımı(A)
400	1250	2500
750	2300	4600
1200	3640	5200
1500	7500	10000

Böyle büyük akım şiddetlerinin fırçalar yardımı ile iletilmesi hem doğru akım generatörünün fırça ve kollektöründe ve hem de generatörün uyarım sargısına giden fırça ve bileziklerinde bazı sakıncalar meydana getirdiği gibi, doğru akım generatöründe de konstrüksiyon problemleri ortaya çıkarmaktadır. Bu sebepten dolayı bir süredir bazı firmalar uyarım generatörünü üç fazlı generatör olarak seçip, redresörlerle doğrultulan gerilimi generatöre uygulama yönüne gitmekte idiler. Son zamanlarda redresörleri de rotorla birlikte döndürerek kutup tekerleğindeki bilezikleri ortadan kaldırma yönüne gidilmektedir. Uzun bir zamandan

beri bu hususun bilinmesine rağmen silisyum diyotlarının mekanik bakımdan hassas olmamaları ve yüksek yükleme kabiliyetleri dolayısıyla, tamamen fırçasız uyarım düzenlerine gitmek ancak son yıllarda mümkün olmuştur.

### **1.1. Senkron Makinaların Yapısı**

Senkron makinalar, bir, iki veya çok fazlı olarak üretilirler. Senkron makinalar senkron hızda dönerler. Ancak direkt olarak şebekeye bağlandığında çalışmazlar, özel yol verme yöntemleriyle çalıştırılırlar. Stator sargısı alternatif akım (AA) kaynağına, rotor sargısı ise doğru akım (DA) kaynağına bağlanır. Dolayısıyla bu makina çift uyarımlı makinalar sınıfına girer. Endüktör devresinde harcanan güç, endüvi devresi gücünün %3'ne kadar çıkabilmektedir. 1000 kVA'lık bir senkron makinanın uyarım devresi gücü 25 kW olabilmekte iken, 500 MW için uyarım gücü 2.5 MW olabilmektedir. Senkron makina mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmek için kullanılıyorsa senkron generatör, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürmek için kullanılıyorsa senkron motor olarak adlandırılır. Senkron makinalar endüvi yapısına göre ikiye ayrılır:

- Duran endüvili, dönen endüktörlü
- Duran endüktörlü, dönen endüvili

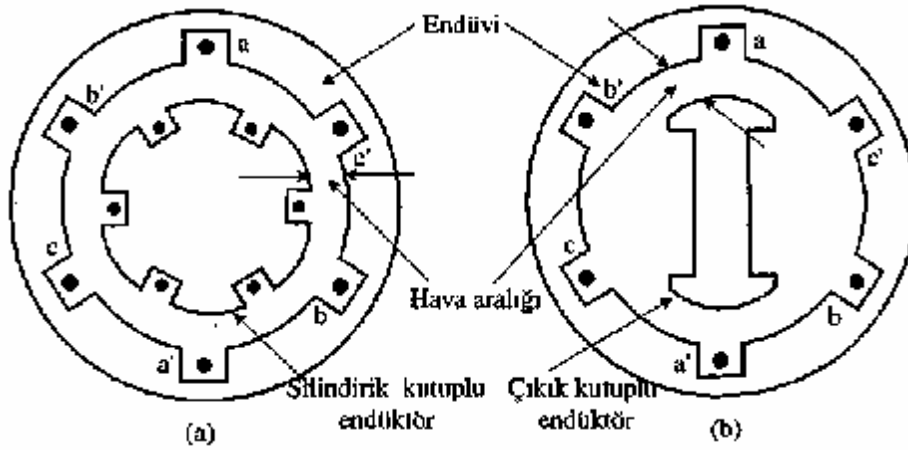
Duran endüvili senkron makinaların endüktörü hareketli olacağından, endüktörde bulunan uyarım sargıları için gerekli bir kaç yüz voltluk DA gerilim fırça ve bilezikler yardımıyla DA kaynaktan sargılara aktarılır. Bu aktarma sırasında gerilimin düşük olması nedeniyle herhangi bir yalıtma problemi olmaz. Ancak duran endüktörlü senkron makinanın endüvisi hareketli olduğundan birtakım problemler meydana gelir. Endüvi 13200 Volt veya 25000 Volt gibi yüksek gerilim üreten alternatif akım sargılarını taşıdığından, bu yüksek gerilimi sargılardan dış terminallere taşımak için gerekli fırça, bilezik ve yalıtım tertibatı ekonomik yönden çok pahalı olacaktır. Bundan dolayı, mümkün olduğunca senkron makinaların endüvisi sabit, endüktörü hareketli yapılır. Senkron makinalar kutup yapısına göre iki kısma ayrılır:

- Silindirik kutuplu

- Çıkık kutuplu

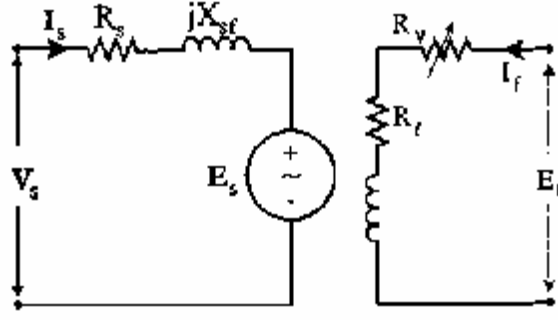
Silindirik kutuplu senkron makinaların endüktörlerinin boyları uzun (bir kaç metre) ve çapları küçük (1.2 m kadar) olup, mili yere paralel olarak kullanılır. Bunlar yüksek hızlarda döndürülüp genellikle az kutup sayılarında (2 veya 4 kutuplu) yapılırlar. Endüvi ve endüktör arasındaki hava aralığı Şekil 1.6.a'da görüldüğü gibi sabittir. [3]

Çıkık kutuplu senkron makinalar ise çok kutuplu olup boyları kısa (bir kaç metre), güçleri bir kaç yüz MW, çapları 1.2 m'den büyük ve mili yere dik olarak kullanılır. Endüvi ve endüktör arasındaki hava aralığı Şekil 1.6.b'de görüldüğü gibi çıkık kutuptan dolayı değişkendir. Bu makinalar çok kutuplu olup düşük hızlarda çalıştırılırlar. Kutupların toplu sarılmasından dolayı yüksek hızlarda santrafüj etkisiyle uyartım sargılarında şekil bozuklukları meydana gelebilir. [3]



Şekil 1.6: Silindirik ve çıkık kutuplu rotor yapısı

Bir fazlı silindirik kutuplu senkron makinanın elektriki eşdeğer devresi Şekil 1.7'de verilmiştir. Burada senkron makina, motor olarak gösterilmiştir. Generatör durumunda  $I_s$  akımının yönü ters olacaktır. Uyartım devresindeki  $R_v$  direnci değişken olup uyartım akımını kontrol etmek için bağlanmıştır. Çıkık kutuplu bir fazlı senkron makinalarda da durum aynıdır. Ancak stator kaçak reaktansı enine ve boyuna iki bileşene ayrılacaktır. [3]



Şekil 1.7: Bir fazlı senkron makinanın elektrik devresi

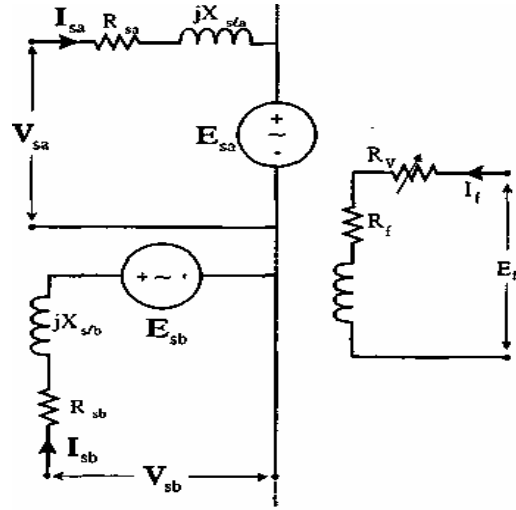
Şekil 1.7'de:

- $I_s$  = Endüvi (stator) akım vektörü (A)
- $R_s$  = Endüvi direnci ( $\Omega$ )
- $X_{sf}$  = Endüvi kaçak reaktansı ( $\Omega$ )
- $E_s$  = Endüvi sargısında endüklenen gerilim vektörü (V)
- $R_v$  = Uyarım akım ayar direnci ( $\Omega$ )
- $R_f$  = Uyarım devresi direnci ( $\Omega$ )
- $E_f$  = Uyarım devresine uygulanan gerilimi (V)
- $I_f$  = Uyarım devresi akımı (A)'dır.

İki fazlı senkron makinanın eşdeğer devresi Şekil 1.8'de verilmiştir.

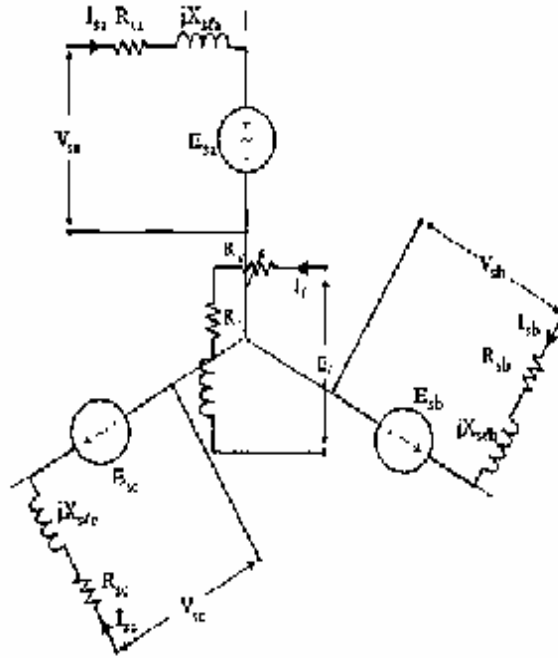
Burada:

- $I_{sa}$  = A fazının endüvi akımı vektörü (A)
- $I_{sb}$  = B fazının endüvi akım vektörü (A)
- $R_{sa}$  = A fazının endüvi direnci ( $\Omega$ )
- $R_{sb}$  = B fazının endüvi direnci ( $\Omega$ )
- $X_{sla}$  = A fazının endüvi kaçak reaktansı ( $\Omega$ )
- $X_{slb}$  = B fazının endüvi kaçak reaktansı ( $\Omega$ )
- $E_{sa}$  = A fazının endüvi sargısında endüklenen gerilim vektörü (V)
- $E_{sb}$  = B fazının endüvi sargısında endüklenen gerilim vektörü (V)'dür.



Şekil 1.8: İki fazlı senkron makina

Üç fazlı silindirik kutuplu senkron motorun yapısı Şekil 1.9'de gösterilmiştir. Burada her bir faza ait elektrik eşdeğer devreler aralarında  $120^\circ$  elektriki açı olacak şekilde yerleştirilmiştir. Üç fazlı senkron motorun statoru duruma göre ya üçgen, ya da yıldız bağlanabilir.[1]



Şekil 1.9: Üç fazlı senkron makina

Şekil 1.9'da:

$I_{sc}$  = C fazının endüvi akım vektörü (A)

$R_{sc}$  = C fazının endüvi direnci ( $\Omega$ )

$X_{slc}$  = C fazının endüvi kaçak reaktansı ( $\Omega$ )

$E_{sc}$  = C fazının endüvi sargısında endüklenen gerilim vektörü (V)'dür.

Şekil 1.7'de verilmiş olan uyartım devresine ait parametreler Şekil 1.8 ve Şekil 1.9'de tekrar verilmemiştir. Şekil 1.8'de A ve B fazlarına ait parametreler de Şekil 1.9'de tekrar verilmemiştir.

Şekil 1.7, Şekil 1.8 ve Şekil 1.9'da verilen senkron makinalar endüvileri dönen, endüktörleri duran veya endüvileri duran endüktörleri dönen tipte olabilirler.

## 1.2. Senkron Makinalarda Döner Alan Hızı

Senkron makinalarda döner alan hızı makinanın dönüş hızı ile senkronize olarak aynı değeri alır. Dolayısıyla stator döner alan hızı ile stator frekansı arasında eşitlik 1.2'de verildiği gibi bir ilişki mevcuttur:

$$f_e = \frac{n_m p}{120} \quad (1.2)$$

Burada:

$f_e$  = elektriki frekans (Hz)

$n_m$  = manyetik alanın mekanik hızı (d/d)

p = toplam kutup sayısı'dır.

## 1.3. Senkron Generatörlerde Üretilen Gerilim

Generatörlerde ya uyartım (kutup) sargılarını taşıyan rotor, ya da alternatif akım sargılarını taşıyan stator hareket edebilir. Kutuplar DA gerilimle uyartıldığında, rotor dönüyorsa, kutupların oluşturduğu bir döner alan sabit olan statordaki sargıları keser. Veya rotor sabit ve DA gerilimle uyartıldıysa, dönen stator sargıları kutup sargılarının oluşturduğu manyetik alan tarafından kesilir. Bundan dolayı döner alan içerisinde kalan bir bobinde veya sabit alan

içerisinde dönen bir bobinde Faraday kanununa göre eşitlik 1.3'deki gibi gerilim endüklenir.

[3]

$$e = \frac{df}{dt} = N \frac{dj}{dt} \quad (1.3)$$

Burada:

$e$  = bobinde endüklenen gerilimi (V)

$N$  = bobinin spir sayısı

$f$  = bobin sargılarını kesen akı miktarı (Wb) 'dır.

Nüve akısı  $f(t)$ 'nin sinüsoidal değiştiği kabul edilerek, eşitlik 1.4'yi yazmak mümkündür:

$$f(t) = f_{max} \sin(\omega t) \quad (1.4)$$

Burada:

$f_{max}$  = nüve akısının maksimum değeri (Wb)

$\omega$  = açısal frekansı =  $2\pi f$  (rad/s)

$f$  = frekansı (Hz) 'dır.

Eşitlik 1.4, eşitlik 1.3 'de yerine konulursa,  $N$  spirli sargıda endüklenen gerilim eşitlik 1.5'deki gibi bulunur.

$$e(t) = \omega N f_{max} \cos(\omega t) = E_{max} \cos(\omega t) \quad (1.5)$$

Burada:

$$E_{max} = \omega N f_{max} = 2\pi f N f_{max} \quad (1.6)$$

olarak hesaplanır.

AA kararlı çalışma durumunda, gerilimin ani veya maksimum değeri yerine etkin (rms) değeri kullanılır. Sinüsoidal bir dalganın etkin değeri, maksimum değerinin  $\sqrt{2}$ 'ye bölümüdür. Dolayısıyla endüklenen gerilimin rms değeri eşitlik 1.7 ile ifade edilir:

$$E_{rms} = \frac{2p}{\sqrt{2}} fNf_{max} \quad (1.7)$$

Generatörlerin sargılarında endüklenen gerilimin sinüsoidale daha yakın olmasını sağlamak için kutup adımı ve sarım şeklinde yapılan değişiklikler endüklenen gerilim denkleminde sabit çarpan olarak eklenirse eşitlik 1.8 elde edilir:

$$E_{rms} = 4.44Nk_p k_d f f_{max} \quad (1.8)$$

Burada:

$k_p$  = adım katsayısı

$k_d$  = dağıtım katsayısı'dır.

Denklemin 1.8'de frekans ve manyetik akının dışındaki değerler sabit olduğundan, bu denklem eşitlik 1.9'deki gibi yeniden düzenlenebilir:

$$E_{rms} = 4.44Nk_p k_d f f_{max} = K f f_{max} \quad (1.9)$$

Burada:

$$K = 4.44Nk_p k_d \quad (1.10)$$

değerine eşittir.



## 1.4. Senkron Generatörlerde Adım ve Dağıtım Katsayıları

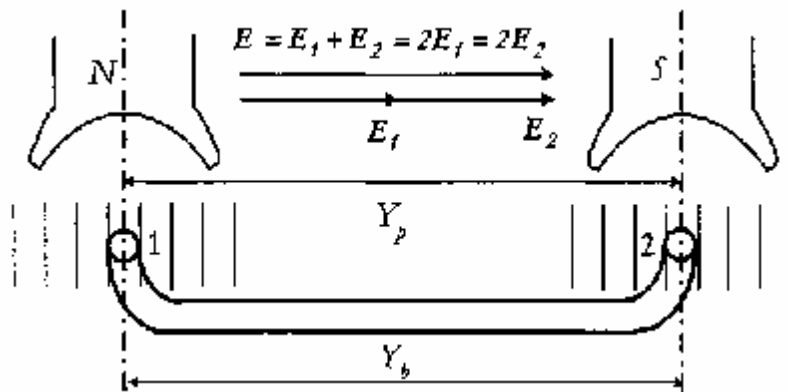
Generatörlerin endüvi sargılarında üretilen gerilimin sinüsoidale yakın olmasını sağlamak için, endüvi sargılarının dağıtılması ve kutup adımlarının tam adım yerine kesirli adım yapılması gerekmektedir.

### 1.4.1 Adım katsayısı

Generatörün bir fazına ait endüvi sargısının bir kenarının endüktörde bulunan kutuplardan birinin altına, aynı faza ait sargının diğer kenarının da diğer kutup altında bulunmasına tam adımlı sarım denir.

Şekil 1.10'de tam adımlı bir sarım görülmektedir. Burada bir faza ait bobinin bir kenarı  $N$  kutbunun merkezine gelecek şekilde, aynı bobinin diğer kenarı da  $S$  kutbunun merkezine gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Kutup adımı  $Y_p$  ile, bobin adımı da  $Y_b$  ile gösterilmiştir.

$N$  kutbu altındaki bobinin 1. kenarında endüklenen gerilim  $E_1$  ve  $S$  kutbu altındaki 2. kenarda endüklenen gerilim  $E_2$ 'dir.  $N$  ve  $S$  kutupları arasında  $180^\circ$  elektriki faz farkı bulunduğu için, bu kutuplar altında endüklenen gerilimler arasındaki açı farkı da  $180^\circ$  elektrikedir. Şekil 1.10'da görüldüğü gibi, bu bobinin kenarlarında endüklenen gerilimlerin toplamı, bobinde endüklenen toplam  $E$  gerilimi verir.[3]



Şekil 1.10: Tam adımlı bobin ve endüklenen gerilim

Bir kutup çifti altındaki aynı faza ait bobin kenarından 1. kenar  $N$  kutubunun tam merkezinde iken, diğer 2. kenar  $S$  kutubundan  $b$  açısı kadar geride olacak şekilde yerleştirilirse, bu tür sarıma kısaltılmış adımlı sarım denir.

Kısaltılmış adımlı sarımda bobin adımı  $k_b$ , kutup adımı  $k_p$ 'den kısadır. Bu durumda, bobin kenarlarında endüklenen gerilimler arasındaki açı da tam adımlı sarıma göre farklıdır. Bobindeki sarım sayısı her iki kenarda da aynı olduğundan,  $E_1$ , ve  $E_2$ 'nin büyüklükleri aynıdır. Kısaltılmış adımlı sarım ve endüklenen gerilimlerin vektörel toplamları Şekil 1.11.'de verilmiştir.[3]

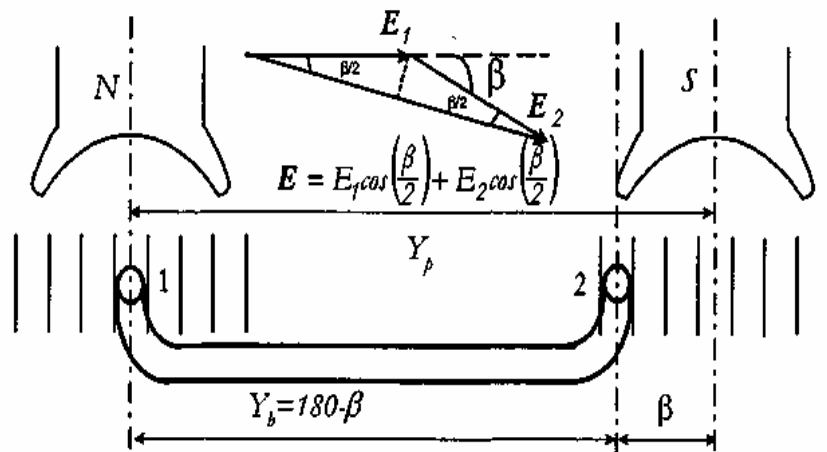
Bobinin yerleştirildiği oluklar arasındaki elektriki açı biliniyorsa, kısaltılmış sarımda  $b$  değeri aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$b = (\text{oluklar arasındaki elektriki açı}) \times (\text{kısaltılan oluk sayısı}) \quad (1.11)$$

Oluklar arasındaki açı  $\alpha$  ise:

$$\alpha = 180 / (\text{kutuplar arasındaki oluk sayısı}) \quad (1.12)$$

olarak tanımlanır.



Şekil 1.11: Kısaltılmış adımlı bobin ve endüklenen gerilim

Kısaltılmış adımlı bobinde endüklenen gerilimin tam adımlı bobinde endüklenen gerilime oranı l'den küçük bir değer olup adım katsayısı ( $k_p$ ) olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$k_p = \text{Kısaltılmış adımlı bobin gerilimi} / \text{Tam adımlı bobin gerilimi} \quad (1.13)$$

ve ya daha açık bir formda eşitlik 1.14'de olduğu gibi yazmak mümkündür:

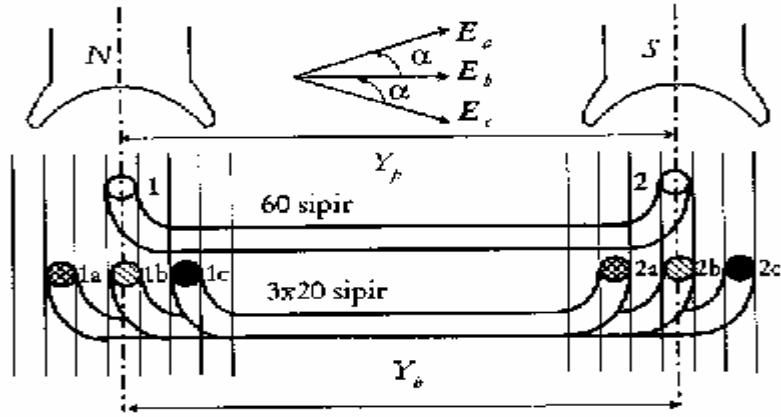
$$\left. \begin{aligned} k_p &= \frac{E_1 \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) + E_2 \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}{2E_1} \\ k_p &= \frac{2E_1 \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)}{2E_1} = \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) = \sin\left(\frac{180 - \beta}{2}\right) \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

#### 1.4.2 Dağıtım katsayısı

Generatörlerde üretilen gerilimin sinüsoidale yaklaşması için yapılan diğer bir husus da, bir kutup altındaki bir faza ait bobini tek oluğa yerleştirme yerine, bu bobinin birden fazla oluğa yerleştirilmesidir. Zaten bir kutup altında aynı faza düşen birden fazla oluk var ise, bobin dağıtılarak her oluğa eşit miktarda sarım yerleştirilir. [3]

Şekil 1.12'de bir faza ait 60 spirli tek bobin 20'şer spirli üç eşit parçaya ayrılarak, üç ayrı oluk içerisine yerleştirilmiştir. Oluklar arasındaki açı farkı kadar olduğundan, bobinde endüklenen toplam gerilimin denklemi eşitlik 1.15'deki gibidir:

$$\left. \begin{aligned} E &= E_a \cos(\alpha) + E_b + E_c \cos(\alpha) \\ E &= E_b + 2E_b \cos(\alpha) \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$



Şekil 1.12: Dağıtılmış sarımlı bobin ve endüklenen gerilim

Eğer bir faza ait bobin dağıtılmıyorsa veya dağıtılmış bobin grupları arasında faz açısı farkı oluşturulmuyorsa tüm bobinler aynı oluğa yerleştirilselerdi, endüklenen gerilim eşitlik 1.16'daki gibi olurdu:

$$\left. \begin{aligned} E &= E_a + E_b + E_c \\ E &= 3E_a = 3E_b = 3E_c \end{aligned} \right\} \quad (1.16)$$

Dağıtılmış bobinlerde endüklenen toplam gerilimin, dağıtılmamış bobinlerde endüklenen toplam gerilime oranı dağıtım katsayısı  $k_d$  olarak adlandırılır, ve eşitlik 1.17 ile tanımlanır:

$$k_d = \frac{E_b + 2E_b \cos(\alpha)}{3E_b} \quad (1.17)$$

Bulunan bu dağıtım katsayısı ifadesi, bir bobinin üç eşit parçaya bölünerek farklı oluklara yerleştirildiği durum için geçerlidir. Eğer aynı bobin iki eşit parçaya bölünüp yine aralarında  $\alpha$ , açısı bulunacak şekilde yerleştirilselerdi, bu durumda dağıtım katsayısı eşitlik 1.18'de verildiği gibi olurdu:

$$k_d = 2E_a \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (1.18)$$

Eşitlikler 1.17 ve 1.18'den görüldüğü gibi bir bobinin üç veya iki eşit parçaya bölünerek yerleştirilmesi durumunda, dağıtım katsayısı için farklı ifadeler çıkmaktadır. Buna göre dağıtım katsayısı için genel bir ifade çıkartılırsa, bobin kaç guruba bölünürse bölünsün aynı ifade geçerli olur. Dolayısıyla, 1.19'den 1.22'e kadar olan eşitlikleri yazmak mümkündür:

$$k_d = \frac{\sin c \frac{\alpha}{2}}{c \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (1.19)$$

$$c = \frac{x}{(p)(m)} \quad (1.20)$$

$$Y_x = \frac{x}{p} \quad (1.21)$$

$$\alpha = \frac{180}{Y_x} \quad (1.22)$$

Bu eşitliklerde:

$k_d$  = dağıtım katsayısı

$c$  = bir kutup altındaki bir faza ait oluk sayısı

$p$  = toplam kutup sayısı

$m$  = faz sayısı

$x$  = toplam oluk sayısı

$Y_x$  = bir kutup altındaki oluk sayısı

$\alpha$  = oluklar arası açı'dır.

## 1.5. Senkron Makinaların Eşdeğer Devreleri

Senkron makinalarda eşdeğer devreler Silindirik Kutuplu ve Çıkık Kutuplu olmak üzere ayrı ayrı incelenir.

### 1.5.1. Silindirik kutuplu senkron makinaların bir faz eşdeğer devresi

Silindirik kutuplu bir senkron makinanın statoruna ait bir faz eşdeğer devresi asenkron motorun bir faz eşdeğer devresine benzemektedir. Çünkü her iki makinanın da statorları alternatif akım sargılarından oluşmuştur. Makinanın statoruna alternatif gerilim uygulandığında stator sargılarından akım geçer. Stator akımı, nüve üzerine sarılmış olan stator sargıların etrafında zamana bağlı olarak değişen manyetik akı oluşturur. Bu manyetik akının çok az bir kısmı havadan kaçak olarak devresini tamamlarken, geriye kalan miktarı da stator ve rotor demir nüveleri ile stator rotor arasındaki hava boşluğundan devresini tamamlar. [3]

Havadan devresini tamamlayan kaçak akılardan dolayı statorda kaçak endüktans  $L_{sl}$  ve dolayısıyla kaçak reaktans  $X_{sl}$  oluşur. Ayrıca stator sargılarının iç direnci  $R_s$  de, stator devresinde, stator reaktansına seri bağlanır. Statora uygulanan gerilimin frekansı  $f_s$  ise, stator kaçak endüktansı ve reaktansı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$L_{sl} = \frac{N_s^2}{\mathfrak{R}_{AG}} = \frac{\lambda_{sl}}{I_s} \Rightarrow X_{sl} = 2\pi f_s L_{sl} \quad (1.23)$$

Burada:

- $L_{sl}$  = stator kaçak endüktansı (H)
- $\mathfrak{R}_{AG}$  = havanın relüktansı (ATur/Wb)
- $\lambda_{sl}$  = stator toplam kaçak akısı (Wb)
- $N_s$  = stator spir sayısı (Tur)
- $I_s$  = stator akım vektörü (A)
- $f_s$  = statora uygulanan gerilimin frekansı (Hz)
- $X_{sl}$  = stator kaçak reaktansı (Q<sub>s</sub>)

olarak tanımlanır.

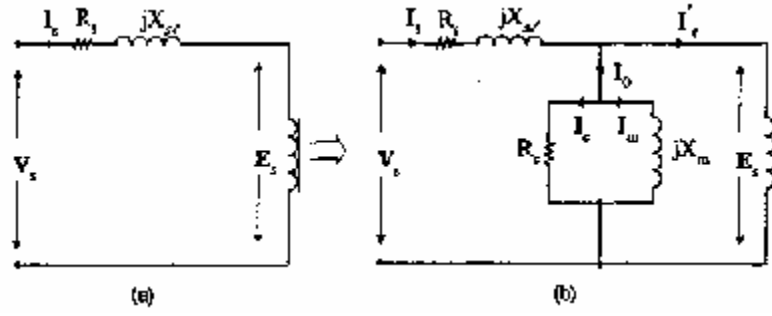
Stator sargılarında endüklenen  $E_s$  gerilimi, statora uygulanan  $V_s$  gerilimi ile stator direnç ve kaçak reaktansında düşen gerilimlerin farkına eşittir.

Buna göre:

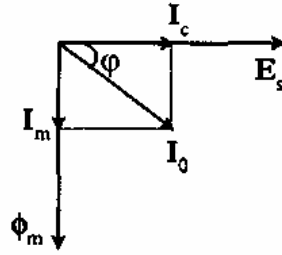
$$E_s = V_s - I_s (R_s + X_{sl}) \quad (1.24)$$

olarak tanımlanır.

Dolayısıyla stator devresi Şekil 1.13(a)'daki gibi çizilir. Ancak statordan çekilen  $I_s$  akımı, uyartım devresinden geçen akımı karşılamaktadır.

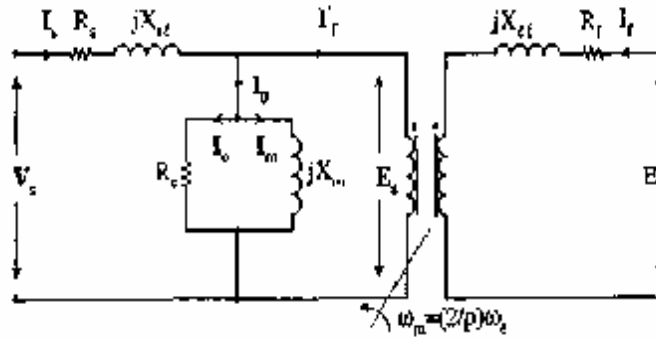


Şekil 1.13: a. Bir faz stator eşdeğer devresi, b. Bir faz stator ve manyetik devresi



Şekil 1.14: Uyarım devresi akımı ve bileşenleri

Uyarım devresinden geçen akım statorda endüklenen gerilimle doyma noktasına kadar lineer olarak değişir. Bundan dolayı uyarım akımı  $I_0$ ,  $E_s$  gerilimine paralel bir koldan geçen akım olarak gösterilir. Uyarım devresi akımının Fourier analizi yapıldığında, sinüsoidal değişen temel bileşen ve harmoniklerden meydana geldiği görülür. Temel bileşen yaklaşık olarak manyetik devreyi besleyen akıma eşit alınır, Şekil 1.14'te verildiği gibi, bu akımın endüklenen  $E_s$  stator geriliminden  $\phi$  acısı kadar geride olduğu görülür. [3]



Şekil 1.15: Senkron makinanın komple bir faz eşdeğer devresi

Senkron makinanın rotor devresi ise kutup sargılarını bulundurmaktadır. Kutup sargıları DA gerilim  $E_f$  ile uyarılır. Şekil 1.15'teki rotor devresi analiz edilirse, rotor kaçak reaktansı veya uyarım devresi reaktansı  $X_{lf}$  ve direnç  $R_f$ 'den meydana geldiği görülür. Rotor kaçak reaktansı  $X_{lf}$  değeri kararlı çalışma durumunda sıfırdır. Yani  $E_f$  gerilimi ve  $I_f$  akımı sabit ise uyarım

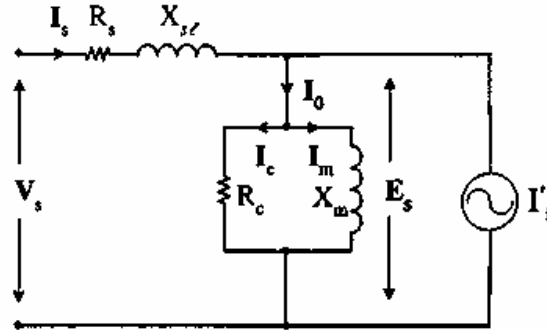
devresindeki endüktans değeri sıfır olur ve devrede sadece  $R_f$  direnci kalır. Rotor kaçak reaktansının etkisi ancak geçici durumlarda görülür.

Şekil 1.15'te:

- $X_{lf}$  = rotor kaçak reaktansı ( $\Omega$ )
- $R_f$  = rotor direnci ( $\Omega$ )
- $\omega_m$  = mekanik açısal hız (rad/s)
- $\omega_e$  = elektrik! açısal hız (rad/s)
- $L_f$  = uyarım devresi akımı (A)
- $E_f$  = uyarım devresi gerilimi (V)

olarak tanımlanır.

Eşdeğer devrenin basitleştirilmesi bakımından rotor devresi  $\omega_s$  açısal frekansına sahip akım kaynağı şeklinde statorunda gösterilir. Buna göre Şekil 1.16'da eşdeğer devre elde edilir.



Şekil 1.16: Silindirik kutuplu bir senkron motorunun rotor devresi statorunda aktarılmış komple bir faz eşdeğer devresi

Uyarım akımı  $I_f$  ve akım kaynağı  $I_f'$  arasındaki bağıntı eşitlik 1.25'de verilmiştir.

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{N_1}{N_2}; & n &= \frac{1}{a}; & I_f' &= nI_f \end{aligned} \right\} \quad (1.25)$$

Burada:

$I_f' = \omega_c$  frekansındaki akım kaynağı



a = dönüştürme oranı

n = sabit

olarak tanımlanır.

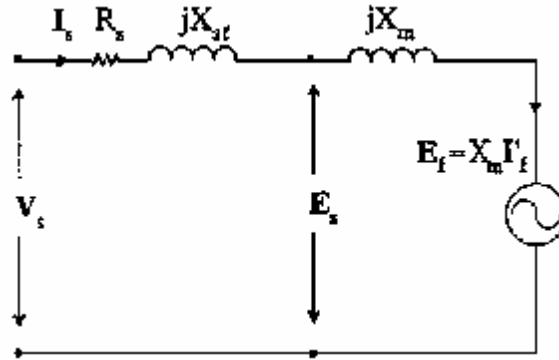
Nüve kayıpları direnci  $R_c$  ihmal edilerek, Thevenin teoremine göre senkron motorun eşdeğer devresi Şekil 1.17'deki gibi çizilebilir.

Burada:

$$X_m = \omega_c L_m \text{ (Thevenin reaktansı veya mıknatıslanma reaktansı)} \quad (1.26)$$

olarak tanımlanır.

Thevenin gerilimi  $E_f$  uyarım gerilimi olarak tanımlanmış olup, uyarım akımı  $I_f$  ile direkt ilişkilidir.



Şekil 1.17: Silindirik kutuplu senkron motorun basitleştirilmiş bir faz eşdeğer devresi

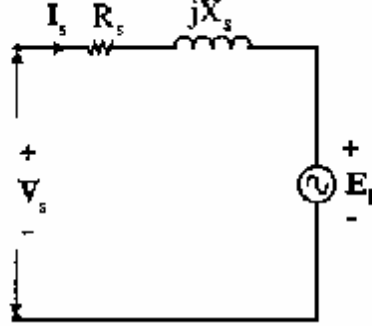
Thevenin reaktansı ve stator kaçak reaktansı toplanarak senkron reaktans eşitlik 1.27'deki gibi bulunur.

$$\left. \begin{aligned} X_s &= X_{st} + X_m = \omega_e L_{st} + \omega_e L_m \\ X_s &= \omega_e L_s \end{aligned} \right\} \quad (1.27)$$

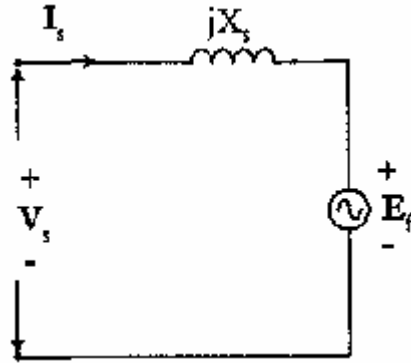
Toplam empedans ise eşitlik 1.28'deki gibi bulunur.

$$Z_s = R_s + jX_s \quad (1.28)$$

Bu empedansa senkron empedans da denir. Senkron empedans makinanın boş ve kısa devre deneylerinden hesaplanır. Senkron reaktans kullanılarak elde edilen bir faz eşdeğer devre senkron makina'yı Şekil 1.18'deki basit hale getirmiştir.



Şekil 1.18: Silindirik kutuplu senkron motorun reaktansları birleştirilmiş bir faz eşdeğer devresi  
Büyük güçlü senkron makinalarda stator direnci  $R_f$  reaktansla karşılaştırıldığında çok küçük olduğundan, çoğu zaman ihmal edilir. Neticede senkron makinayı sadece senkron reaktans ve endüklenen gerilim  $E_f$  ile Şekil 1.19'daki gibi göstermek mümkündür. [3]

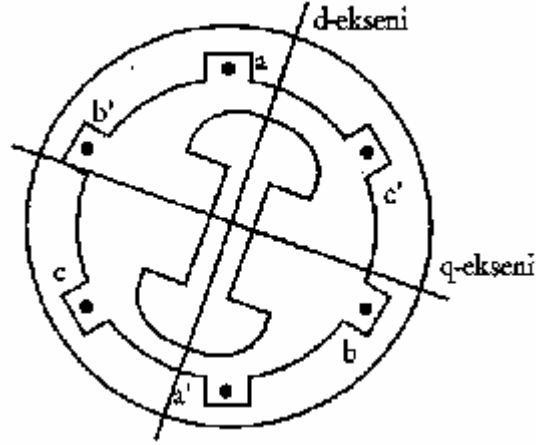


Şekil 1.19: Silindirik kutuplu senkron motorun reaktansları birleştirilmiş bir faz eşdeğer devresi  
Şekil 1.18 ve Şekil 1.19'deki eşdeğer devrelerde,  $I_s$  akım yönü ters çizilirse, senkron generatörün (generatörün) eşdeğer devreleri elde edilir.

### 1.5.2. Çıkık kutuplu senkron makinaların bir faz eşdeğer devresi

Çıkık kutuplu senkron makinanın rotoru ve statoru arasındaki hava aralığı, Şekil 1.20'de verildiği gibi, kutup ile stator arasında az, kutuplararası ile stator arasında fazladır. Diğer bir ifadeyle, çıkık kutuplu senkron makinalarda stator ile rotor arasındaki relüktans her noktada aynı olmayıp değişkendir. Bu değişken relüktansın etkisini gösterebilmek için makinanın senkron reaktansı ikiye ayrılır.

Senkron reaktansın bileşenlerinden birisi d-ekseni doğrultusunda boyuna bileşen  $X_d$  olarak gösterilir, diğeri ise q-ekseni doğrultusunda enine bileşen  $X_q$  olarak gösterilir. Stator akımı  $I_s$  ise,  $I_d$  ve  $I_q$  olarak ikiye ayrılır. [9]



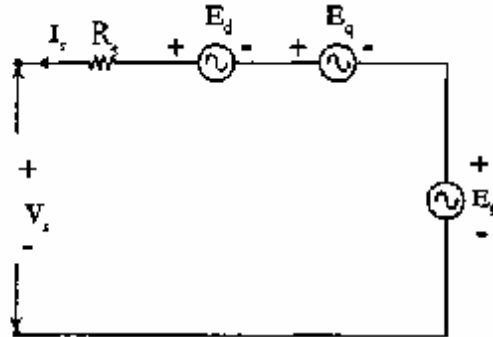
Şekil 1.20: Çıkık kutuplu senkron makinanın yapısı

Stator akımının  $I_d$  bileşeni  $E_f$  geriliminden  $90^\circ$  geride bir akı oluştururken,  $I_q$  bileşeni de  $E_f$  ile aynı fazda bir akı oluşturur. Eğer  $E_f$  çıkık kutuplu senkron makinanın statorunda kutup akısı tarafından endüklenen faz gerilimi ise,  $E_d$  ve  $E_q$  stator sargılarında  $I_d$  ve  $I_q$  akımları tarafından endüklenen gerilimlerdir.

Bu ifadelerden makinanın terminal gerilimini eşitlik 1.28'deki gibi yazmak mümkündür.

$$V_s = E_f + E_d + E_q - I_s R_s \quad (1.28)$$

Eşitlik 1.28'e göre, çıkık kutuplu senkron generatörün bir faz eşdeğer devresini Şekil 1.21'deki gibi çizmek mümkündür.



Şekil 1.21: Çıkık kutuplu bir senkron generatörün bir faz eşdeğer devresi

Eşitlik 1.28'de verilen  $E_d$  ve  $E_q$  gerilim değerleri denklemler 1.29 ve 1.30'daki gibi yazılabilir.

$$E_d = -jI_d X_d \quad (1.29)$$

$$E_q = -jI_q X_q \quad (1.30)$$

Eşitlikler 1.29 ve 1.30 denklem 1.28'de yerine konulursa,  $E_f$  değeri Eşitlik 1.31'de verildiği gibi bulunur.

$$E_f = V_s + I_s R_s + jI_d X_d + jI_q X_q \quad (1.31)$$

Bu ifadede, generatörün terminal gerilimi, stator akımı, stator direnci, stator reaktansları ve güç katsayısı biliniyorsa, endüklenen gerilim  $E_f$  ile terminal gerilimi  $V_s$  arasındaki  $\delta$  açısı bulunabilir.

d-eksenindeki reaktans üzerinde düşen gerilim ifadesini eşitlik 1.32'deki gibi yazmak mümkündür.

$$jI_d X_d = jI_d X_q + jI_d (X_d - X_q) \quad (1.32)$$

Eşitlik 1.32'yi kullanılarak, eşitlik 1.31'i eşitlik 1.33'deki gibi tekrar yazmak mümkündür.

$$\left. \begin{aligned} E_f &= V_s + I_s R_s + jI_d X_q + jI_q X_q + jI_d (X_d - X_q) \\ E_f &= V_s + I_s R_s + jI_d X_q + jI_q X_q + jI_d (X_d - X_q) \\ E_f &= E'_f + jI_d (X_d - X_q) \end{aligned} \right\} \quad (1.33)$$

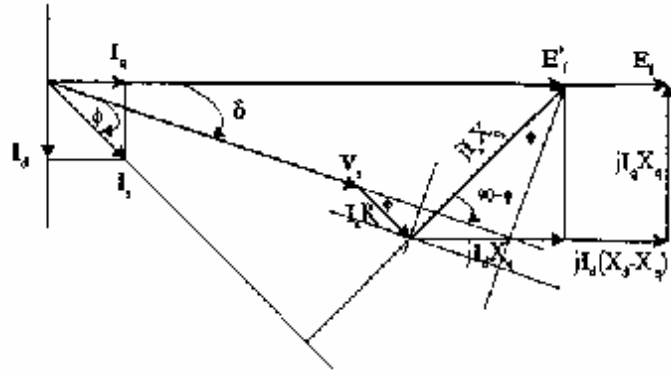
Burada:

$$E'_f = V_s + I_s R_s + jI_s X_q \quad (1.34)$$

$$I_s = I_d + I_q \quad (1.35)$$

değerlerine eşittirler.

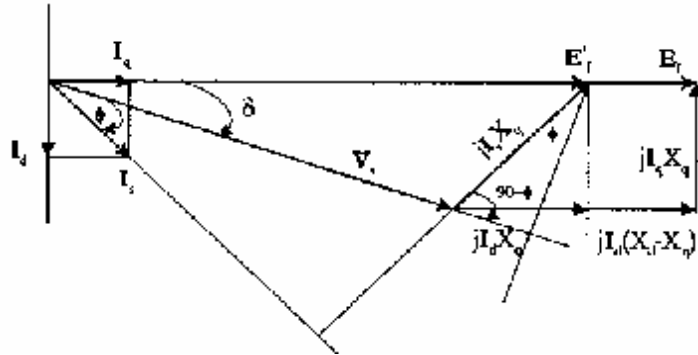
Şekil 1.22'de çıkık kutuplu senkron generatörün endüktif yüklü durumu için vektör diyagramı verilmiştir.



Şekil 1.22: Endüktif yüklü çıkık kutuplu senkron generatörün vektör diyagramı

Şekil 1.22'de verilen vektör diyagramından,  $E_f$  ile  $V_s$  arasındaki  $\delta$  açısı eşitlik 1.36'da verildiği gibi hesaplanır.

$$\tan \delta = \frac{I_s (X_q \cos \varphi - R_s \sin \varphi)}{V_s \pm I_s (X_q \sin \varphi + R_s \cos \varphi)} \quad (1.36)$$



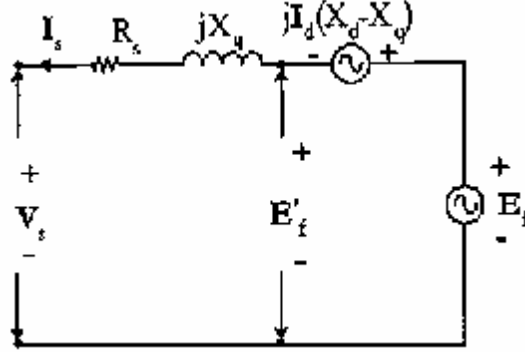
Şekil 1.23: Stator direnci ihmal edilmiş, endüktif yüklü çıkık kutuplu senkron generatörün vektör diyagramı

Eşitlik 1.36'in paydasındaki (+) işaret generatör durumu için, (-) işaret ise motor durumu için'dir.

Eğer çıkık kutuplu senkron generatörün stator direnci ihmal edilirse, vektör diyagramı Şekil 1.23'de gösterildiği gibi olur. Şekil 1.23'e göre  $E_f$  ile  $V_s$  arasındaki  $\delta$  açısı eşitlik 1.37'da verildiği gibi hesaplanır.

$$\tan \delta = \frac{I_s X_q \cos \phi}{V_s \pm I_s X_q \sin \phi} \quad (1.37)$$

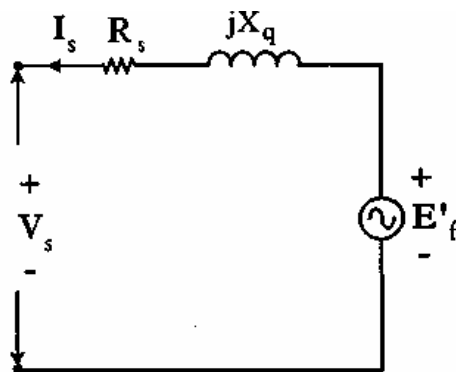
Eşitlikler 1.36 ve 1.37'ye göre çıkık kutuplu senkron generatörün bir faz eşdeğer devresi Şekil 1.24'deki gibi çizilebilir.



Şekil 1.24: Çıkık kutuplu bir senkron generatörün eşitlikler 2.36 ve 2.37'ye göre çizilmiş bir faz eşdeğer devresi

Çıkık kutuplu senkron generatörde üretilen etkin gerilim değeri  $E'_f$  olarak kabul edilir ise, generatörün bir faz eşdeğer devresi Şekil 1.25'de verildiği gibi çizilebilir.

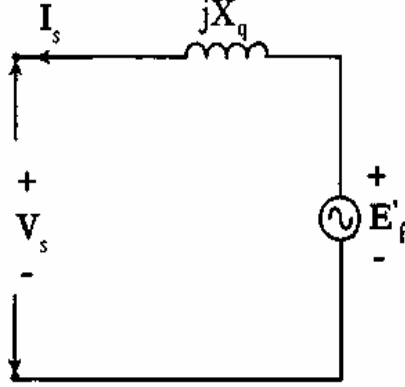
Şekil 1.25'de verilen çıkık kutuplu senkron generatörün bir faz eşdeğer devresi, Şekil 1.18'de verilen silindirik kutuplu senkron generatörün bir faz eşdeğer devresine benzemektedir. Aralarındaki fark sadece  $X_s$  senkron reaktans yerine senkron reaktansın enine bileşeni  $X'_q$ 'nin gelmesi ve  $E_f$  yerine  $E'_f$  değerinin gelmesidir. [3]



Şekil 1.25: Çıkık kutuplu bir senkron generatörün basitleştirilmiş bir faz eşdeğer devresi

Bu devrede  $X_q > R_s$  ise, eşdeğer devreyi Şekil 1.26'deki gibi daha basit bir hale getirmek mümkündür.

Şekiller 1.25 ve 1.26'da çıkık kutuplu senkron generatör için elde edilen eşdeğer devrelerde  $I_s$  akım yönü ters çevrilirse, çıkık kutuplu senkron motorun eşdeğer devresi elde edilir.



Şekil 1.26: Çıkık kutuplu bir senkron generatörün basit bir faz eşdeğer devresi

## 1.6. Senkron Generatörün Eşdeğer Devre Parametrelerinin Ölçülmesi

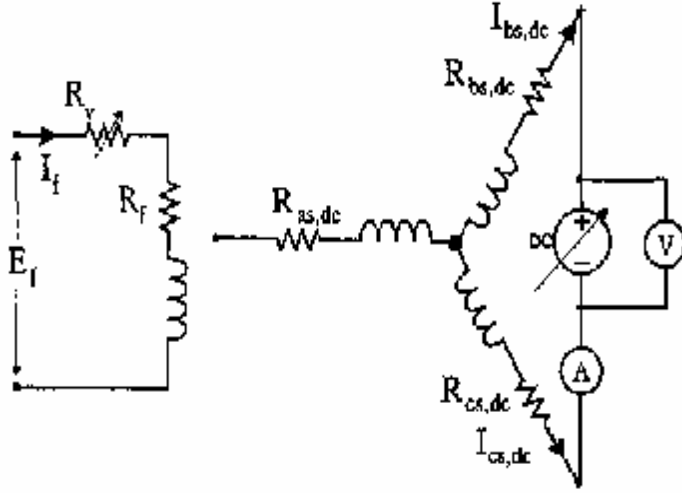
Gerçek bir senkron makinanın davranışlarını tamamen tanıyabilmek için makinanın eşdeğer devresindeki üç değer bilinmesi gerekmektedir:

- Uyarım akımı
- Senkron reaktans
- Endüvi direnci

Senkron makinanın endüvi direncini ve senkron reaktansını hesaplayabilmek için, DA deneyi yapılır.

### 1.6.1. Senkron makinalarda DA deneyi

DA deneyi yapılacak olan bir senkron makinanın üç faz eşdeğer devresi Şekil 1.27'de verilmiştir. Burada, ayarlı bir DA kaynaktan alınan DA gerilim, senkron makinanın B-C terminal uçlarına bağlanmıştır. Senkron makinanın A terminal ucu ise boş bırakılır, uyarım devresine ise herhangi bir gerilim uygulanmaz.



Şekil 1.27: DA deneyi yapılan senkron makinanın üç faz eşdeğer devresi

Şekil 1.27'de:

$E_f$  = uyartım devresi gerilimi (V)

$I_f$  = uyartım devresi akımı (A)

$R_v$  = uyartım devresi akım akım ayar direnci ( $\Omega$ )

$I_{as,da}$  = stator devresi A fazının DA akımı (A)

$I_{bs,da}$  = stator devresi B fazının DA akımı (A)

$I_{cs,da}$  = stator devresi C fazının DA akımı (A)

$R_{as,da}$  = stator devresi A fazının DA direnci ( $\Omega$ )

$R_{bs,da}$  = stator devresi B fazının DA direnci ( $\Omega$ )

$R_{cs,da}$  = stator devresi C fazının DA direnci ( $\Omega$ )

olarak ifade edilmektedir.

DA kaynak ayarlanarak DA gerilim yavaş yavaş artırılır. Sargıdan geçen DA akım senkron makinanın anma akım değerine gelince gerilimdeki artış durdurulur. Sonra sargılardan geçen DA akım ve sargılara uygulanan DA gerilim ölçülür. Senkron makina yıldız bağlı olduğundan, her iki sargının DA dirençleri birbirlerine seri bağlanmışlardır. Buna göre ölçülen DA gerilimin DA akıma bölümü her iki sargının toplam DA direncini verir. Bulunan bu DA direnç değeri ikiye bölünerek, tek sargının DA direnci bulunur. Sonuçta, senkron



makinanın DA direnç değerini bulabilmek için, DA direnç değeri 1.11 veya 1.5 gibi bir katsayı ile çarpılır.

$$\left. \begin{aligned} R_{dc} &= \frac{V_{dc}}{I_{dc}} = R_{br,dc} + R_{sr,dc} \Rightarrow R_{br,dc} = R_{sr,dc} = \frac{R_{dc}}{2} \\ R_{br,dc} &= R_{sr,dc} = k R_{dc} \Rightarrow k = 1.11 - 1.5 \end{aligned} \right\} \quad (1.38)$$

## 1.7. Senkron Makinalarda Fazör Diyagramları

Senkron makinalarda fazör diyagramlarının çiziminde makinanın bir faz eşdeğer devresinden yararlanılır.

### 1.7.1. Senkron makinaların fazör diyagramlarının çizimi

Senkron makinaların fazör diyagramlarında eşdeğer devreye ilişkin bilinen bazı değerler yardımıyla, diğer bilinmeyen değerler bulunur.

Genellikle, makinanın bilinen değerleri şunlardır;  $V_s$ ,  $I_s$ , güç katsayısı ( $\cos \varphi$ ),  $R_s$  ve  $X_s$ . Bulunacak değer ise  $E_f$  dir.

Burada:

$V_s$  = Endüvi veya stator gerilimi (V)

$I_s$  = Endüvi veya stator akımı (A)

$R_s$  = Endüvi veya stator sargısının iç direnci ( $\Omega$ )

$X_s$  = Endüvi veya stator kaçak reaktansı ( $\Omega$ )

$\cos \varphi$  = Endüvi akımı ve gerilimi arasındaki açının kosinüs değeri (güç katsayısı)

olarak tanımlanmıştır.

Fazör diyagramları makinanın yük durumuna göre üç değişik durumda çizilir.

Motor olarak çalışma durumuna göre güç katsayısı açısının aldığı değerler her bir yük için aşağıdaki gibidir:

$$\left. \begin{array}{l} -\frac{\pi}{2} < \varphi < 0 \quad \text{endüktif} \\ \varphi = 0 \quad \text{omik} \\ 0 < \varphi < \frac{\pi}{2} \quad \text{kapasitif} \end{array} \right\} \quad (1.39)$$

Generatör çalışma durumunda akımların fazları, motor akım fazlarına  $\pi$  derece eklenerek bulunur.

### 1.7.2. Silindirik kutuplu senkron makinanın fazör diyagramları

Silindirik kutuplu bir senkron makinanın bir fazına ilişkin gerilim eşitliği 1.40'da verilmiştir:

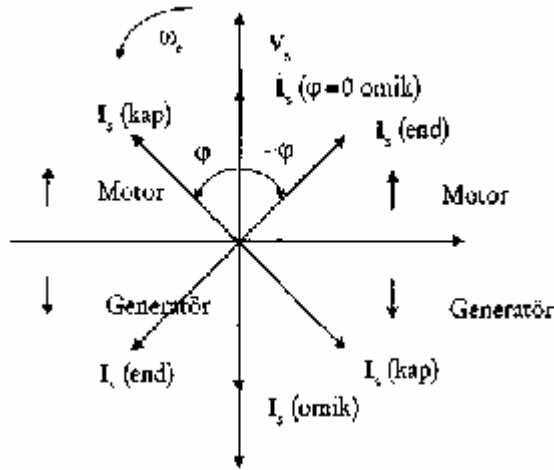
$$V_s = I_s R_s + j I_s X_s + E_f \quad (1.40)$$

Bu eşitlikte eşdeğeri bilinmediği için, 1.41 ifadesi kullanılarak bulunur:

$$E_f = K \omega_e I_f = n L_m \omega_e I_f \quad (1.41)$$

Şekil 1.28'de motor ve generatörlerde  $V_s$  ve  $I_s$  fazörlerinin birbirlerine göre durumları endüktif, omik ve kapasitif yükler için gösterilmiştir. Şekil 1.28'de yatay eksenin üst kısmı senkron makinanın motor olarak çalışmasına ait vektör diyagramını gösterirken, yatay eksenin alt kısmı senkron makinanın generatör olarak çalışmasına ait vektör diyagramını gösterir.

Senkron makinanın motor olarak çalışması durumunda, motor omik, endüktif veya kapasitif özellik gösterebilmektedir. Senkron makinanın generatör olarak çalışması durumunda da, generatöre bağlı olan yükün durumuna göre generatörün omik, endüktif veya kapasitif özellikte çalışması mümkündür.

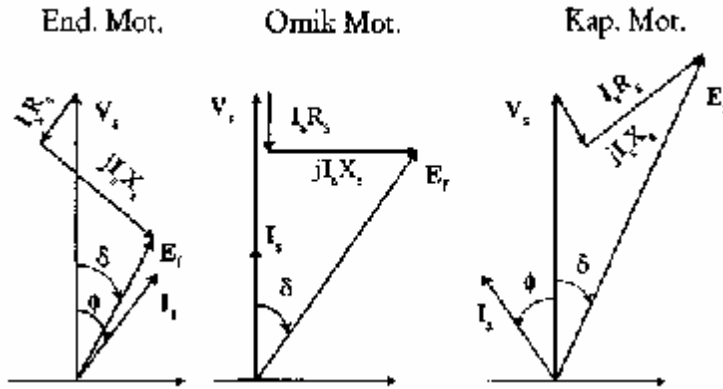


Şekil 1.28: Değişik yükler için senkron makinanın motor ve generatör çalışma durumuna göre akım ve gerilim vektör diyagramı

Fazör diyagramlarının çiziminde, bilinen değerler kullanılarak aşağıdaki sıra izlenir:

- $V_s$  fazörü gelişigüzel bir doğrultuda alınır.
- Belirli  $\varphi$  açısı yardımıyla  $I_s$  fazörü çizilir.
- $I_s R_s$  ve  $jI_s X_s$  çizilir ve 1.41 nolu gerilim eşitliği kullanılarak vektörel toplam yapılır.

Yukarıda verilen üç maddeye göre, senkron makinanın motor olarak çalışması durumundaki değişik yükler için vektör diyagramları Şekil 1.29'da verilmiştir.

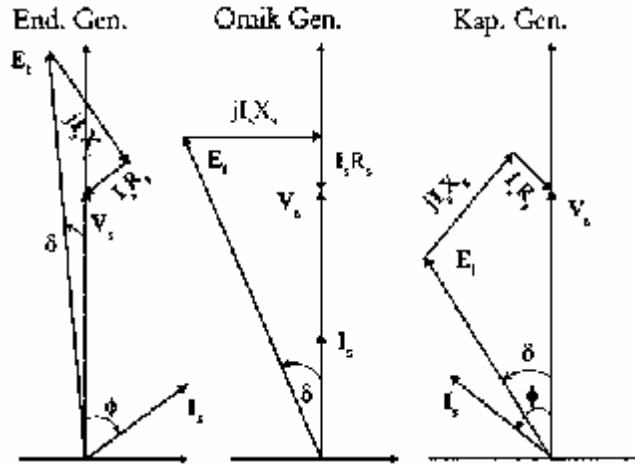


Şekil 1.29: Değişik yükler için silindirik kutuplu senkron makinanın motor olarak çalışma durumuna göre vektör diyagramları

Omik, endüktif ve kapasitif yük durumları için vektör diyagramları çizilirken, motor terminaline uygulanan  $V_s$  gerilim vektörü düşey doğrultuda alınmıştır. Bu gerilimden  $\delta$  açısı kadar geride, aynı fazda veya ileride olacak şekilde  $I_s$  endüvi akım vektörü çizilmiştir.

Senkron motorun eşdeğer devresinde verilen devre parametreleri üzerinde meydana gelen gerilim düşüm vektörleri,  $I_s R_s$  ve  $jI_s X_s$  uygulanan  $V_s$  gerilim vektöründen çıkartılarak motorda endüklenen  $E_f$  gerilim vektörü elde edilmiştir. [3]

Endüktif özellikte çalışan senkron motorun  $jI_s X_s$  gerilim düşümü vektörü, omik çalışma durumundan daha fazladır. Dolayısıyla motorda endüklenen  $E_f$  gerilim vektörü omik durumda endüktif çalışma durumuna göre daha büyüktür. Diğer bir ifadeyle, endüvi reaksiyonunun kutup alanını azaltıcı etkisi motorun endüktif çalışması durumunda daha fazla etkili olurken, omik çalışma durumunda daha az etkili olmaktadır. Yani, endüvi reaksiyonundan dolayı, motorun endüktif çalışması durumunda  $E_f$  daha fazla azalırken, omik çalışma durumunda daha az azalır. Senkron motorun kapasitif çalışma durumunda ise, endüvi reaksiyonundan dolayı,  $I_s X_s$  gerilim düşümü vektörü destekleyici özellik göstererek endüklenen gerilim  $E_f$ 'nin artmasına sebep olur. Neticede motorda endüklenen  $E_f$  gerilim vektörü motora uygulanan gerilim vektörü  $V_s$ 'den büyük olur. Senkron makinanın generatör olarak çalışması durumunda da, vektör diyagramının çizimi için benzer yol izlenmiştir. Generatör olarak çalışan bir senkron makinanın endüktif, omik ve kapasitif yük durumlarına göre çizilen vektör diyagramları Şekil 1.30'da verilmiştir. [9]



Şekil 1.30: Değişik yükler için silindirik kutuplu senkron makinanın generatör çalışma durumuna göre vektör diyagramları

Bu vektör diyagramları çizilirken yine generatörün terminal gerilim vektörü  $V_s$  düşey doğrultuda alınmıştır. Endüvi akım vektörü  $I_s$  değeri ise yine  $j$  açısı göz önünde bulundurularak terminal gerilimi  $V_s$  den ileride, aynı fazda veya geride olacak şekilde çizilmiştir. Ancak senkron makinanın motor çalışma durumunda gösterilmiş olan  $I_s$  endüvi akım vektörünün yönü, generatör çalışma durumunda tam  $180^\circ$  ters çizilebildiği gibi, motorla

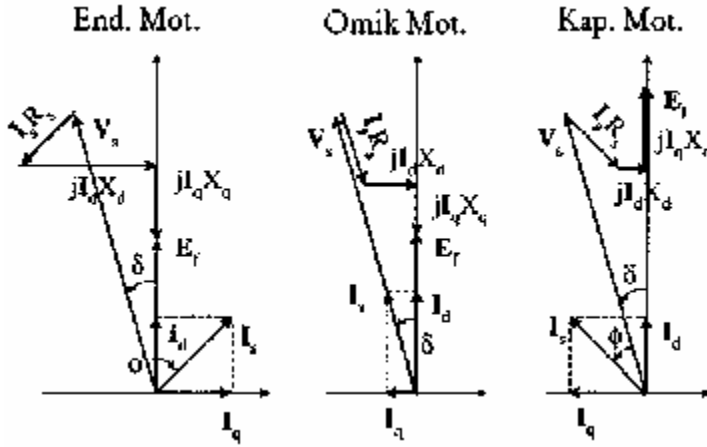
aynı yönde de çizilebilir. Ters çizilmesinin sebebi ise, senkron makinanın motor olarak çalışması durumunda,  $I_s$  akımı kaynaktan motora doğru giderken, generatör olarak çalışırken  $I_s$  akımı generatörden yüke doğru gitmektedir. Senkron makinanın motor ve generatör çalışması durumlarında  $I_s$  akım yönü aynı alınmıştır. [9]

Senkron makina generatör olarak çalışırken, endüktif yüklü durumda senkron reaktans üzerinde düşen gerilim vektörü  $jI_s X_s$  değeri, endüvi reaksiyonunun artırıcı etkisinden dolayı generatörde endüklenen  $E_f$  gerilim vektörünü artırır. Generatörün kapasitif yüklü durumunda ise, senkron reaktans üzerinde düşen gerilim vektörü  $jI_s X_s$  değeri, endüvi reaksiyonunun azaltıcı etkisinden dolayı generatörde endüklenen  $E_f$  gerilim vektörünü azaltır. Generatörün omik yüklü durumunda da, senkron reaktans üzerinde düşen gerilim vektörü  $jI_s X_s$  değeri, endüvi reaksiyonunun azaltıcı etkisinden dolayı generatörde endüklenen  $E_f$  gerilim vektörünü azaltır, ancak kapasitif yüklü durumdaki kadar fazla bir gerilim düşümü olmaz. [3]

### 1.7.3. Çıkık kutuplu senkron makinanın fazör diyagramları

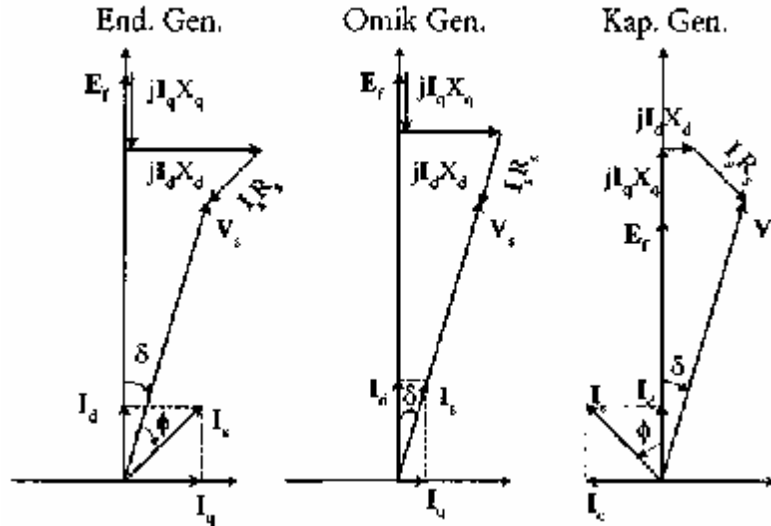
Çıkık kutuplu senkron makinalarda vektör diyagramları çizilirken yine silindirik kutuplu senkron makinalarda izlenen yol takip edilmiştir. Ancak çıkık kutuplu senkron makinaların eşdeğer devrelerinde de gösterildiği gibi, Şekil 1.30'da, hava aralığının her yerde aynı olmayıp değişken olması nedeniyle, senkron reaktans  $X_s$  değeri enine bileşen  $X_q$  ve boyuna bileşen  $X_d$  olmak üzere iki bileşene ayrılmıştır. [3]

Çıkık kutuplu senkron makinanın motor olarak çalışması durumunda, değişik yüklere göre çizilmiş vektör diyagramları Şekil 1.31'de verilmiştir. Bu diyagramlar çizilirken  $V_s$  terminal gerilim vektörü tüm yük durumlarına göre aynı büyüklük ve doğrultuda alınmıştır. Endüvi akımı vektörü  $I_s$  ise, terminal geriliminden  $\delta$  açısı kadar geride, aynı fazda ve ileride olacak şekilde çizilmiş olup, yatay (enine) bileşen  $I_q$  ve düşey (boyuna) bileşen  $I_d$  olarak ikiye ayrılmıştır. [3]



Şekil 1.31: Değişik yükler için çıkık kutuplu senkron makinanın motor çalışma durumuna göre vektör diyagramları

Senkron reaktansın bileşenleri üzerinde düşen gerilim vektörleri  $jI_d K_d$  değeri  $I_d$ 'ye dik,  $jI_q K_q$  değeri ise  $I_q$ 'ya dik çizilmiştir. Omik gerilim düşümü vektörü  $I_s R_s$  ise  $I_s$  akımına ters yönde çizilmiştir. Senkron reaktansın boyuna bileşeni  $X_d$  üzerindeki gerilim düşümü, endüvi reaksiyonunun azaltıcı etkisinden dolayı, senkron motorun endüktif çalışması durumunda daha fazla, omik çalışması durumunda daha az gerilim düşümüne neden olarak motorda endüklenen  $E_f$  gerilim vektörünün azalmasına sebep olmuştur. Çıkık kutuplu senkron motorun kapasitif çalışması durumunda bu etki endüvi reaksiyonunun artırıcı özelliği dolayısıyla  $E_f$  gerilim vektörünü artırmıştır. [3]



Şekil 1.32: Değişik yükler için çıkık kutuplu senkron makinanın jeneratör çalışma durumuna göre vektör diyagramları

Çıkık kutuplu senkron makinanın generatör olarak çalışması durumunda, değişik yüklere göre çizilmiş vektör diyagramları Şekil 1.32'de verilmiştir. Bu diyagramlar çizilirken  $V_s$  terminal gerilim vektörü tüm yük durumlarına göre aynı büyüklük ve doğrultuda alınmıştır. Endüvi akımı vektörü  $I_s$  ise, terminal geriliminden  $f$  açısı kadar geride, aynı fazda ve ileride olacak şekilde çizilmiş olup, yatay bileşen  $I_q$  ve düşey bileşen  $I_d$  olarak ikiye ayrılmıştır. [9]

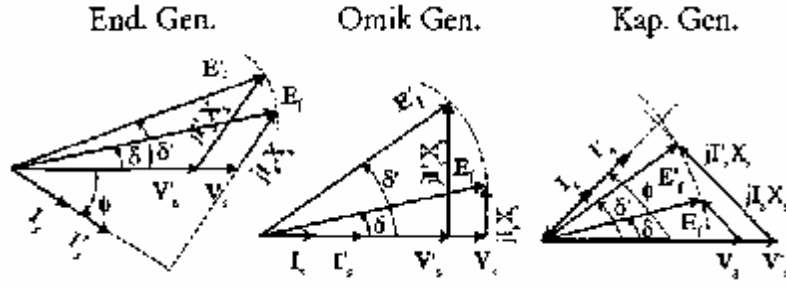
Senkron reaktansın bileşenleri üzerinde düşen gerilim vektörleri  $jI_dK_d$  değeri  $I_d$  doğrultusuna dik,  $jI_qK_q$  değeri ise  $I_q$  doğrultusuna dik çizilmiştir. Omik gerilim düşümü vektörü  $I_sR_s$  ise  $I_s$  akımına aynı yönde çizilmiştir. Senkron reaktansın boyuna bileşeni  $X_d$  üzerindeki gerilim düşümü, endüvi reaksiyonunun azaltıcı etkisinden dolayı, senkron motorun kapasitif çalışması durumunda daha fazla, omik çalışması durumunda daha az gerilim düşümüne neden olarak motorda endüklenen  $E_f$  gerilim vektörünün azalmasına sebep olmuştur. Çıkık kutuplu senkron generatörün endüktif çalışması durumunda bu etki endüvi reaksiyonunun artırıcı özelliği dolayısıyla  $E_f$  gerilim vektörünü artırmıştır. [9]

## 1.8. Yükün Senkron Makinaya Etkisi

Yükün senkron makinaya etkisi, makinanın omik, endüktif ve kapasitif yük durumlardaki gerilim düşümleri incelenerek görülür.

### 1.8.1. Yük değişiminin senkron generatöre etkisi

Generatörün yükü artınca, generatörden çekilen  $I_s$  akımı artar. Uyarım direnci değişmediği için, uyarım akımı sabittir. Dolayısıyla  $f$  akısı sabittir. Tahrik makinası generatörü sabit hızda döndürdüğünden, endüvi sargılarında endüklenen  $E_f$  gerilimi de sabittir ( $E_f = K(f)w$ ). Bu neticelere göre, yük değişiminin generatör üzerindeki etkisini görmek için, makinanın fazör diyagramını incelemek gerekir. [3]



Şekil 1.33: Çeşitli yük durumlarına göre generatörlerde meydana gelen gerilim düşümleri

Önce, generatörün geri güç katsayılı çalıştığı durumu inceleyelim:

Generatördeki  $R_s$  direncinin çok küçük olması nedeniyle, bu dirençten dolayı oluşan gerilim düşümü ( $I_s R_s$ ) de küçük olacağından,  $R_s$  direnci ihmal edilerek Şekil 1.33'deki vektör diyagramları çizilmiştir.

Omik çalışma durumunda:

Generatör omik bir yükle yüklendiğinde, endüviden çekilen akım artar, ancak açısı sabit olup terminal gerilimi ile aynı fazdadır. Buna bağlı olarak endüvi reaksiyon gerilim düşümü  $jX_s I_s$  değeri de bir miktar artış göstererek, terminal gerilimi  $V_s$ 'nin azalmasına neden olur. Generatörün endüvisinde endüklenen  $E_f$  gerilim değeri  $E_f'$  değerine yükselir.  $E_f$  değerindeki değişim yine bir dairenin yarıçapı şeklindedir.

Kapasitif çalışma durumunda:

Generatör kapasitif bir yükle yüklendiğinde, endüviden çekilen akım geriliminden  $j$  ( $f$ ) açısı kadar ileride olup, endüvi reaksiyonundan dolayı oluşan  $jK_s I_s$  gerilim düşümü generatörün terminal gerilimini  $V_s$  değerinden  $V_s'$  değerine artırır. Generatörün endüvi sargılarından endüklenen  $E_f$  gerilimide  $E_f'$  değerine alır, fakat büyüklüğü sabit kalarak sadece  $E'$  ile  $V_s$  arasındaki  $d$  açısı artarak  $d'$  değerine çıkar.

Bu incelemelerden çıkartılan sonuçlar özetlenecek olursa:

- Eğer generatör endüktif bir yükle yüklenecek olursa, terminal geriliminde önemli miktarda azalma olur.
- Eğer generatör omik yükle yüklenirse, terminal gerilimi bir miktar azalır.
- Eğer generatör kapasitif yükle yüklenirse, terminal gerilimi bir miktar artar.



Generatörün terminal gerilimindeki bu değişmeyi ifade etmenin en iyi yolu, generatörün gerilim regülasyonunun belirlenmesidir. Gerilim regülasyonu aşağıdaki formülle ifade edilir:

$$VR = \frac{V_{nl} - V_{fl}}{V_{fl}} \times 100 \quad (1.42)$$

Burada:

$VR$  = Gerilim regülasyonu

$V_{nl}$  = Yüksüz durumda generatörün terminal gerilimi

$V_{fl}$  = Yüklü durumda generatörün terminal gerilimi'dir.

Generatör endüktif yükte çalışırken gerilim regülasyonu daha fazla pozitif omik yükte az pozitif, kapasitif yükte ise negatiftir. Generatörün yüke sağladığı terminal geriliminin ( $V_s$ ) sabit olmasını sağlamak için generatörde endüklenen ( $E_f = K(f)w$ ) geriliminin değiştirilmesi gerekir. Burada endüklenen gerilime etki eden  $K$  sabitinin dışında  $f$  ve  $w$  değişkenleri bulunmaktadır. Generatörün ürettiği gerilimin ve dolayısıyla terminal geriliminin frekansı sabit olacağından,  $w$  açısal hızının da sabit kalması gerekir. O halde endüklenen gerilimin artırılabilmesi için tek değişken  $f$  akısı kalmaktadır. [3]

Generatörlerde akının değişmesi ise uyarım devresinden geçen akıma bağlıdır. Uyarım devresinin direnci  $R_f$  azaltılır ise, uyarım akımı  $I_f$  artar ve akıyı artırır. Artan akıdan dolayı endüklenen  $E_f$  gerilimi de artarak generatörün terminal gerilimindeki azalma kompanze edilmiş olur. [3]

### 1.8.2. Generatörlerin frekans-aktif güç ve gerilim-reaktif güç ilişkileri

Generatörlerin mekanik güç girişini sağlayan sistemler, dizel motorlar, su türbinleri, gaz türbinleri veya rüzgâr türbinleri olabilir. Bu sistemlerden herhangi birisi ile çalıştırılan generatör yüklendikçe, generatörün devir sayısı (hızı) bu yüke bağlı olarak azalacaktır. Hız ile yük arasındaki bu ilişki lineer değildir. Ancak türbin ile generatör mili arasına yerleştirilen özel mekanizma ile bu bağıntı lineer yapılabilmektedir. Generatörün hızında meydana gelen azalma yüzde olarak aşağıdaki gibi ifade edilir. [3]

$$SD = \frac{n_{nl} - n_{fl}}{n_{fl}} \times 100 = \frac{f_{nl} - f_{fl}}{f_{fl}} \times 100 \quad (1.43)$$

Burada:

$SD$  = Yüzde olarak hızdaki düşme

$n_{nl}$  = Generatörün boştaki hızı (d/d)

$n_{fl}$  = Generatörün tam yüklü durumdaki hızı (d/d)

$f_{nl}$  = Generatörün boştaki frekansı (Hz)

$f_{fl}$  = Generatörün tam yüklü durumdaki frekansı (Hz)'dir.

Generatörün hızı ile frekansı arasındaki bağıntı aşağıda verildiği gibidir.

$$n_m = \frac{120 f_e}{p} \quad (1.44)$$

Burada:

$n_m$  = milin mekanik hızı (d/d)

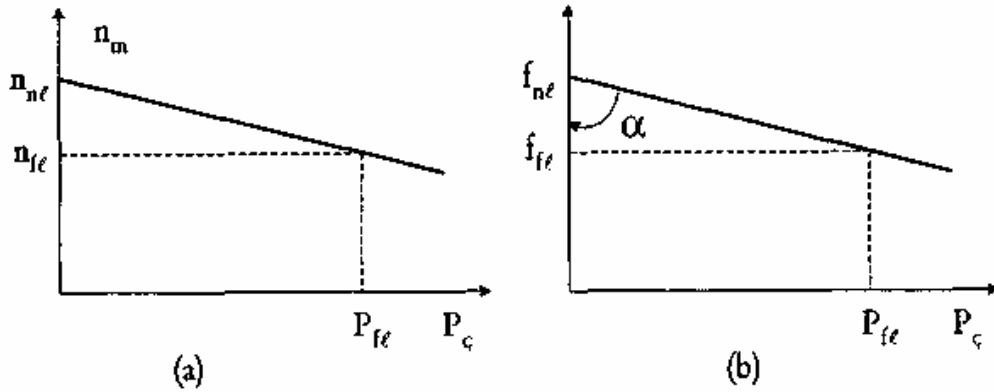
$f_e$  = elektrik frekansı (Hz)

$p$  = generatörün kutup sayısı'dır.

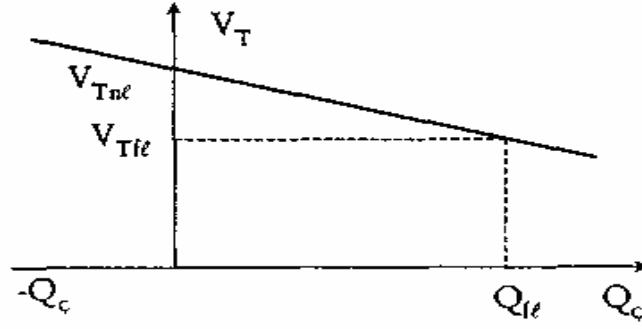
Eşitlik 1.34'e göre, hızdaki azalma direkt olarak üretilen gerilimin frekansını etkileyecektir.

Generatörün hız-güç eğrisi Şekil 1.34.a'da, frekans-güç eğrisi de Şekil 1.34.b'de verilmiştir.

$$tga = \frac{P}{f_{nl} - f_{fl}} \quad (1.45)$$



Şekil 1.34: Generatörün (a) hız-aktif güç ve (b) frekans-aktif güç eğrisi



Şekil 1.35: Generatörün gerilim-reaktif güç eğrisi

Generatörün aktif çıkış gücü eşitlik 1.46'da ve reaktif çıkış gücü ise eşitlik 1.47'de verilmiştir:

$$P_{\zeta} = s_p (f_{nl} - f_{fl}) \quad (1.46)$$

$$Q_{\zeta} = s_p (V_{Tnl} - V_{Tfl}) \quad (1.47)$$

Burada:

$P_{\zeta}$  = Generatörün çıkış gücü (W)

$Q_{\zeta}$  = Generatörün çıkış gücü (VAR)

$f_{nl}$  = Generatörün boştaki frekansı (Hz)

$f_{fl}$  = Generatörün tam yüklü durumdaki frekansı (Hz)

$V_{Tnl}$  = Generatörün boştaki terminal gerilimi (V)

$V_{Tfl}$  = Generatörün yüklü durumdaki terminal gerilimi (V)'dir.

Generatörün reaktif gücü ise terminal gerilimi ile lineer değişim göstermektedir.(Şekil 1.35). Terminal gerilimi çekilen reaktif güce karşılık düşüş göstermektedir. Senkron makina generatör olarak çalıştırılmakta ise, çekilen güç ( + ) işaretlidir. Eğer senkron makina senkron motor olarak çalıştırılıyorsa, çekilen güç ( - ) işaretlidir. Generatörden çekilen çıkış gücü daima yükün çektiği güce eşittir. Generatörün çalışma frekansı ise, generatörü döndüren sistemin devir sayısına bağlıdır. Generatörün terminal gerilimi de, generatörün uyarım akımı ile kontrol edilir. [3]

## **BÖLÜM 2. UYARTIM SİSTEMLERİNE GENEL BAKIŞ**

Uyartım sisteminin fonksiyonu, generatör rotor sargıları veya alan sargıları için doğru akım üretmektir. Buna ek olarak generatör uyartım sistemi makinanın gerilimini ve reaktif güç akışını kontrol eder, güç sisteminin kararlılığının yükselmesine yardımcı olur ve önemli koruma fonksiyonları sağlar. Uyartım sistemi her zaman uygun alan(uyartım) akımını sağlamak zorundadır. [6]

### **2.1. Generatör Uyartım Sistemi Çeşitleri**

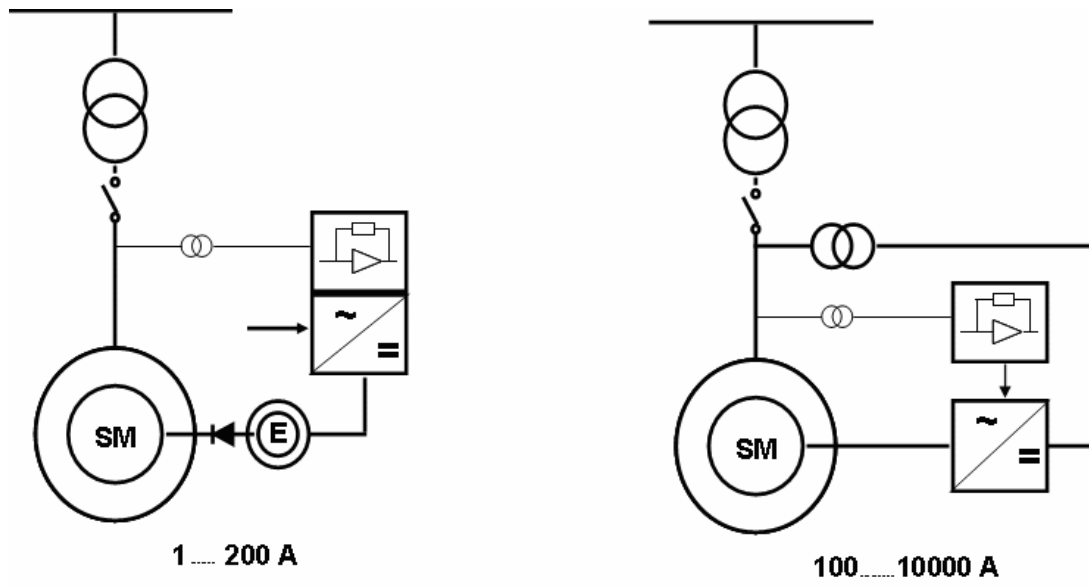
Senkron Generatör'de Uyartım Sistemlerini iki anabölüm altında sınıflandırabiliriz. Bunlardan birincisi Dinamik Uyartım Sistemi(Şekil 2.1.a), ikincisi ise Statik Uyartım Sistemi'dir.(Şekil 2.1.b).

Dinamik Uyartımda AA/DA dönüştürücüsünün çıkışında bir döner makina vardır ve generatör, uyartım devresini bu makina üzerinden tamamlar. Statik Uyartımda ise tristörlü konverter çıkışı, direkt olarak generatörün uyartım sargısına bağlıdır.

Dinamik Uyartım genelde düşük uyartım akımlarında(1-200A arası) kullanılan bir sistemdir. Statik Uyartım ise daha büyük uyartım akımlarında(100-10000A arası) dolayısıyla daha büyük güçlerde kullanılır.

Generatör dizaynında, uyartım akımı, uyartım gerilimi dolayısıyla makinanın uyartım gününün belirlenmesi gerekir.

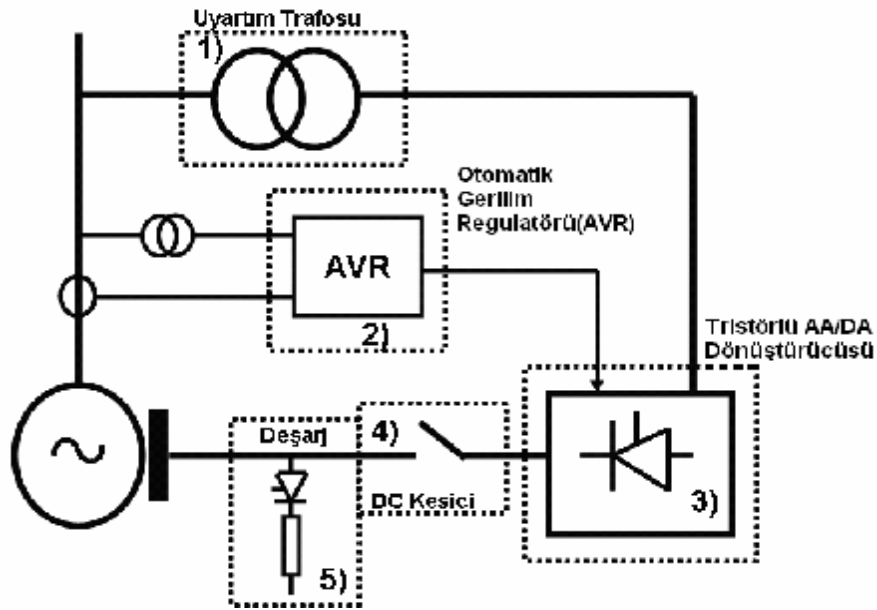
Generatörlerde, makina için gerekli uyartım sisteminin gücü, makinanın güç faktörüne, gerilimine ve kısa devre oranına göre değişimler gösterebilir. Generatör dizaynında daha iyi ve daha verimli malzeme kullanılmasına gidildikçe uyartım sisteminin güç ihtacı da artar. Yine de bu artış kVA olarak generatör gücünün %0,5'ni aşmaz. [6]



Şekil 2.1: Dinamik Uyartım Sistemi(a) ve Statik Uyartım Sistemi(b) blok şeması

## 2.2.Statik Uyartım Sisteminin Bileşenleri

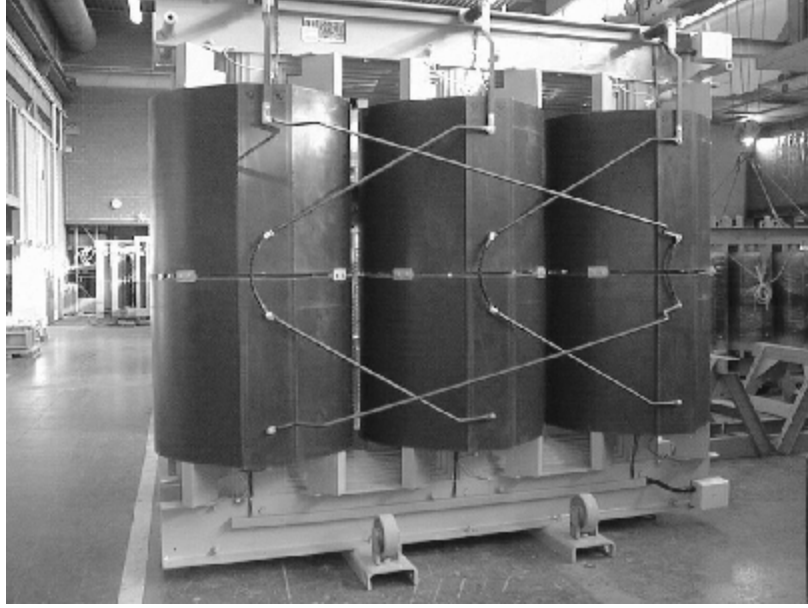
Statik Uyartım Sisteminde AA generatör çıkış gerilimi, DA uyartım akımının direkt olarak kontrol edilmesiyle sabit tutulur. Statik Uyartım Sisteminin blok şeması Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Sistem, Uyartım Trafosu, Otomatik Gerilim Regülatörü(AVR), Tristorlü AA/DA Dönüştürücüsü, DA Kesici ve Deşarj devresinden oluşur. [7]



Şekil 2.2: Statik Uyartım Sisteminin Blok Diyagramı

### 2.2.1.Uyartım trafosu

Uyartım trafosu(Şekil 2.3), generatör çıkış gerilimini Statik Uyartım için gerekli olan gerilime dönüştürür. Küçük güçler için kuru tip, büyük güçler için yağlı tip trafo kullanılır. Trafonun sekonderi, konverterde oluşabilecek maksimum gerilimi karşılayabilecek şekilde dizayn edilmiştir. Ayrıca uyartım trafosu DA kısa devreleri sınırlar.



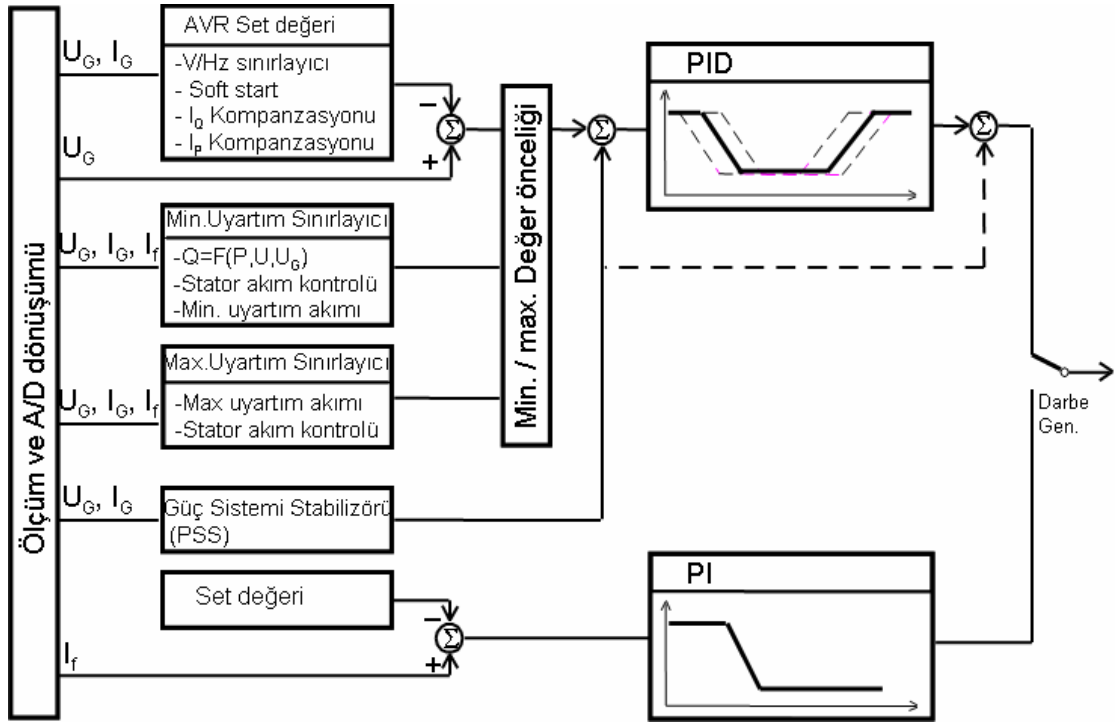
Şekil 2.3: Uyartım trafosunun görünümü

### **2.2.2.Otomatik gerilim regülatörü(AVR)**

Otomatik Gerilim Regülatörü'nün(AVR) temel fonksiyonu senkron makinanın çıkış geriliminin ve reaktif güç veya güç faktörünün düzgün bir şekilde kontrol edilmesidir.

AVR'nin bir gerilim set değeri olur ve bu değeri sürekli olarak generatör çıkışından gelen gerilim değeriyle karşılaştırır ve tristörlü konverter ünitesini kontrol eder.

AVR, tamamen dijital mikroişlemci teknolojisine dayalı olarak çalışan bir ünedir.



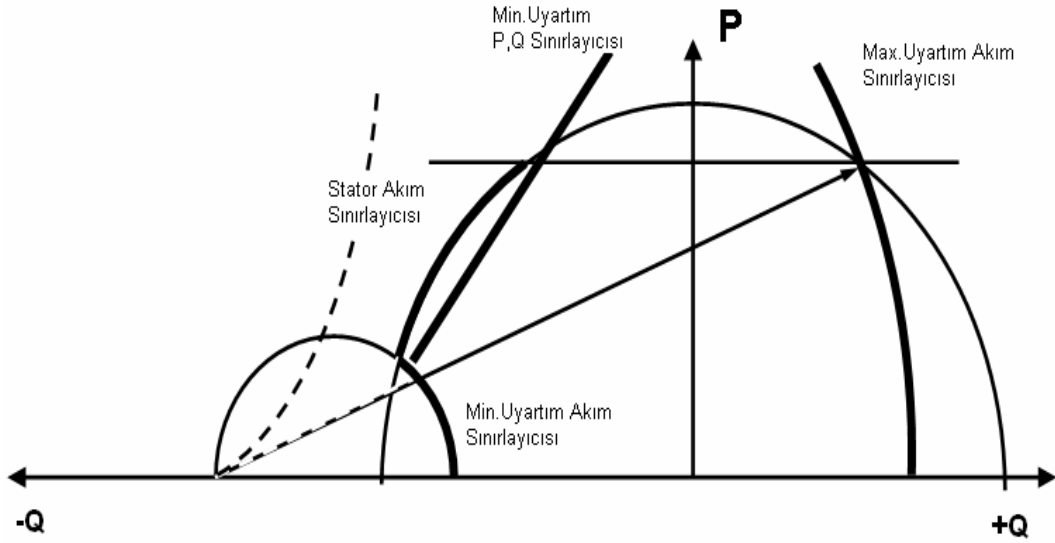
Şekil 2.4: Otomatik Gerilim Regülatörü(AVR)'nin blok şeması

Generatör çıkış gerilimi ve akımı gibi analog sinyaller, Analog/Dijital Dönüştürücü ile dijital sinyallere dönüştürülür(Şekil 2.4). Set değeri, koruma değerleri(sınırlayıcılar) ve bütün kontrol parametreleri dijital haldedir.

AVR, set noktası değeri ile aktif(P) veya Reaktif(Q) güç arasındaki orana göre ilave kontrol sinyalleri oluşturur. Ayrıca AVR, aktif veya reaktif gücün neden olduğu ünite trafosu veya nakil hattı üzerindeki gerilim düşümünü dengeler. Genelde AVR, yumuşak yolverici(softstart) fonksiyonuna da sahiptir. Değerlendirme süresi çok küçük olup yaklaşık 5 ms civarındadır. [7]

AVR'deki sınırlayıcılar, uyarım sistemini koruma amaçlı kullanılmıştır. Minimum Uyarım Sınırlayıcısı, generatör gerilim ve akımına göre uyarım akımını denetler, uyarım akımının minimum set değerinin altına inmesi durumunda sistemi korumaya alır. [7]

Maksimum Uyarım Sınırlayıcısı, generatör gerilim ve akımına göre uyarım akımının maksimum set değerinin aşılması durumunda sistemi korumaya alır. Sınırlayıcılar ile ilgili güç grafiği Şekil 2.5'te gösterilmiştir. [7]



Şekil 2.5: Sınırlayıcılar ile ilgili güç grafiği

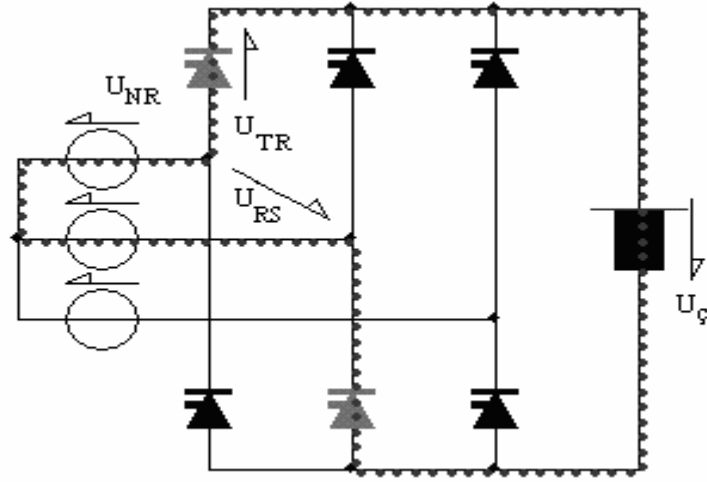
Şekilde de görüldüğü gibi, grafiğin x eksenini Reaktif Gücü(Q), y eksenini ise Aktif Gücü(P) gösterir. Minimum uyarım sınırlayıcısı, maksimum uyarım sınırlayıcısı, stator akım sınırlayıcısı ve minimum P,Q sınırlayıcısı arasında kalan bölge AVR'nin aktif çalışma bölgesidir.

### 2.2.3. Tristörlü AA/DA dönüştürücüsü

Tristörlü AA/DA dönüştürücüsü, 3 fazlı tam dalga tristör(SCR) köprüsünden meydana gelir. Burada kullanılan yarıiletkenler, çok hızlı cevap verme süresine sahiptir.

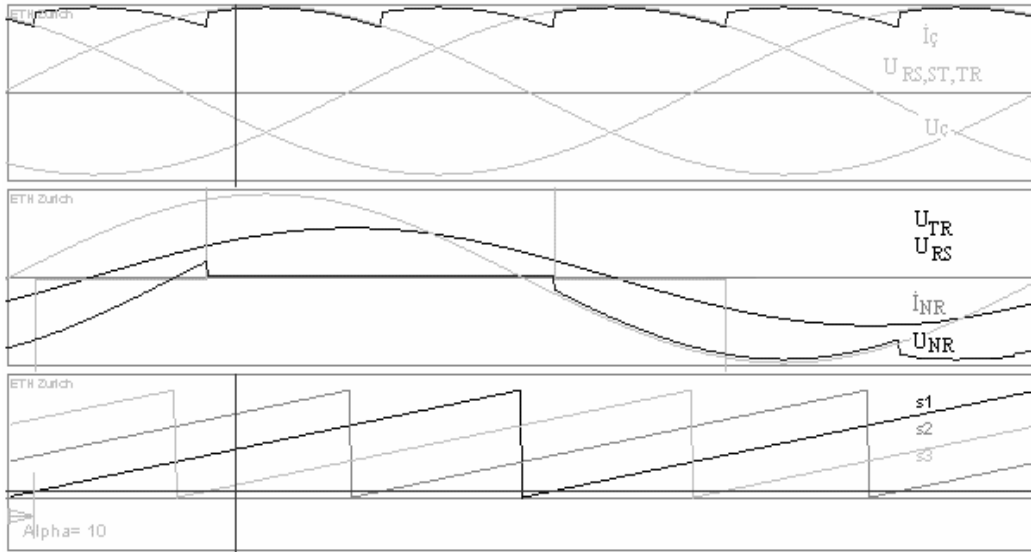
Tristörlü AA/DA dönüştürücüsü, uyarım trafosundan gelen AA gerilimi DA'ye çevirerek uyarım akımını kontrol eder. Burada kullanılan yarıiletkenler 10000A DA'ye kadar akım kapasitesine sahiptir. Tristörlü AA/DA dönüştürücüsünün şeması Şekil 2.6'da gösterilmiştir.





Şekil 2.6: Tristörlü AA/DA Dönüştürücüsü

Şekilde görüldüğü gibi, uyarım trafosundan gelen üç faz AA gerilimi, SCR(tristör)'ler ikişer gruplar halinde devreye girerek çıkışta düzgün bir DA gerilime dönüşür. Dönüştürücünün giriş ve çıkışındaki akım ve gerilim grafikleri Şekil 2.7'de görünmektedir. [7]



Şekil 2.7: Tristörlü AA/DA Dönüştürücüsünün Dalga Şekilleri

Tristörlü AA/DA dönüştürücüsü, nominal çalışma koşulları altında senkron makinanın uyarım akımının en az %110'u kapasitesinde seçilir. Maksimum uyarım gerilimi, nominal değer 1,6 katı, maksimum uyarım akımı ise 10 sn süreyle nominal uyarım akımının 1,6 katı akımı taşıyabilecek kapasitede olması gerekir. Kullanılan tristörlerin AA gerilim koruma faktörü uyarım trafosu sekonder geriliminin 2,7 katından az olmamalıdır.

#### **2.2.4.DA kesici**

Uyartım sisteminde tristörlü AA/DA dönüştürücüsü ile uyartım sargısı arasına konulan DA kesicinin temel görevi, arıza durumlarında uyartım devresini açarak korumaya almaktır.

Aşırı uyartım akımı, aşırı uyartım gerilimi gibi durumlarda DA Kesicisi hemen açarak sistemin zarar görmesini önler.

#### **2.2.5.Deşarj devresi**

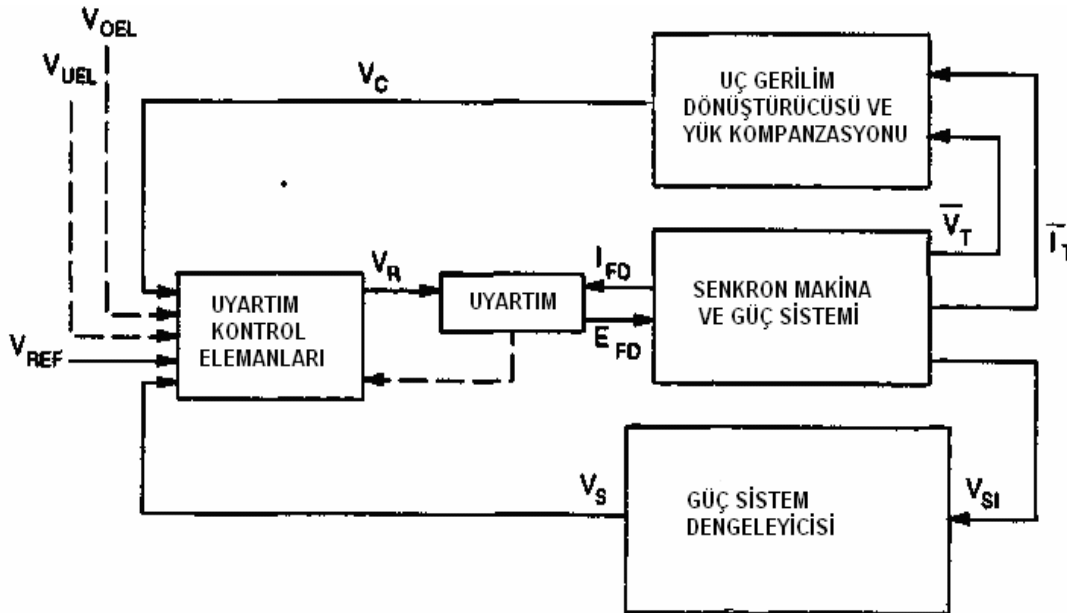
Bir tristör ve bir dirençten oluşan deşarj devresi, enerjinin kesilmesi durumunda uyartım devresinde kalan enerjiyi absorbe etmek için kullanılır. Ayrıca uyartım devresinde oluşabilecek aşırı gerilimlerin uyartım devresine zarar vermesini engeller.

### BÖLÜM 3. UYARTIM SİSTEMİ MODELLERİ

Güç sistemlerinin stabilitesi ile ilgili senkron makina simulasyon çalışmaları başladığında, uyartım sistemlerinin de modellenmesinin gerekliliği anlaşılmıştır. İlk olarak 1968 yılında IEEE komite raporunda değişik uyartım sistemi modelleri yer almıştır. Raporda uyartım sistemlerinin matematiksel modelleri ve bu modeller için hesaplanmış sistem parametreleri sunulmuştur. [8]

1981 yılı raporunda bu çalışmalar geliştirilerek daha yeni uyartım sistemleri için matematiksel modeller yer almıştır. Bu bölümde yer alan uyartım sistemi modelleri 1981 yılı IEEE raporundan alınmış modelleridir.

Değişik senkron makina uyartım sistemleri için genel bir blok diyagram Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Senkron Makina Uyartım Sistemi Genel Blok Diyagramı

Diyagramdaki her bir bloğun fonksiyonu aşağıda belirtilmiştir:

Uyartım Kontrol Elemanları(Regülatör): Uyartım Kontrol Elemanları(Regülatör) giriş kontrol sinyallerini uyartım devresine uygun şekilde işler ve yükseltir. Ayrıca ayar ve uyartım sistemi stabilite fonksiyonları ihtiva eder. [9]

Uyartım Devresi: Uyartım sisteminin güç kısmını oluşturur ve senkron makinanın uyartım sargıları için DA güç üretir. [9]

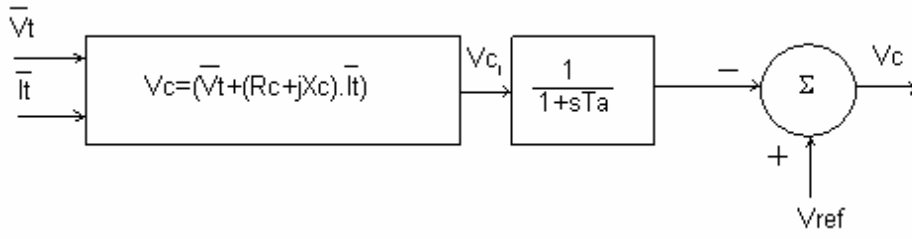
Uç Gerilim Dönüştürücüsü ve Yük Kompanzasyonu: Generatör uç gerilimini algılar, DA gerilime dönüştürüp filtre eder ve referans gerilimi ile karşılaştırır. Sonuç olarak yük kompanzasyonu sağlanmış olur. [9]

Güç Sistem Dengeleyicisi: Bu devre, regülatör için ek giriş sinyalleri üreterek şebekeden gelen osilasyonları azaltır.

Uyartım Akım Sınırlayıcıları, büyük sistem çalışmalarında gösterilmemekle beraber statik sistemlerde önemli rol oynamaktadır. Uç gerilim ve uç V/Hz sınırlayıcıları da normal olarak uyartım sistem modellerinde gösterilmemektedir. [9]

Uyartım sistemlerinin modellerine geçmeden önce, bu sistemlerde kullanılan uç gerilim dönüştürücü ve yük kompanzasyonundan bahsedeceğiz. Uç gerilim dönüştürücüsünün ve yük kompanzasyonunun bir blok diyagramı Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Bu model elemanları tarif edeceğimiz bütün uyartım sistemi modelleri için geçerlidir. [8]

Yük kompanzasyonu kullanılmadığı zaman ( $R_c=X_c=0$ ) blok diyagramı bir basit algılama devresi ve karşılaştırıcı (Komparatör) 'ya indirgenir. Generatör uç gerilimi ölçülerek genellikle bir DA büyüklüğe indirgenir. Gerilim dönüştürücü de filtreleme yapılması karmaşıklığa yol açabilir, bu durumda modellemede tek zaman sabiti gösterimine gidilebilir. Birçok sistem için bu zaman sabiti çok küçüktür ve bu değerın sifıra ayar edilmesi sağlanmalıdır. [8]



Şekil 3.2: Uç Gerilim dönüştürücüsü ve yük kompanzasyonu elemanları

Uç gerilimi dönüştürücüsünün çıkışı, istenen uç gerilimine karşılık düşen bir referans değeri ile karşılaştırılır. Eşdeğer gerilim regülatörü referans sinyali  $V_{REF}$  ilk çalışma şartlarını sağlayacak şekilde hesaplanır. Bu değer, generatörün çalışılmakta olan yük şartına bağlı bir değer olacaktır. Oluşan hata sinyali, kararlı hal çevrim eşitliklerini gerçekleştirecek şekilde uyarım ve istenen uç gerilimini sağlamak için kuvvetlendirilir. Yük kompanzasyonu olmaksızın uyarım sistemi, regülasyon karakteristikleri dahilinde, referans sinyali ile belirlenmiş uç gerilimini sağlamaya çalışır. [10]

Yük kompanzasyonu istenirse  $R_c$  ve  $X_c$ 'nin uygun değerleri seçilir. Giriş değişkenleri olan generatör akım ve gerilim değerleri kompanzator işlemi için fazör formunda olmalıdır.

Kompanzasyonun bu tipi aşağıdaki iki yoldan biri şeklinde kullanılır:

1. Generatörler aralarında empedans olmadan paralel bağlandığında, bir suni kuplaj empedansı meydana getirmek için kompanzator kullanılır. Bu durumda generatörler uygun reaktif güç paylaşımı yaparlar ve  $R_c$ ,  $X_c$ 'nin değerleri pozitifdir. [8]
2. Tek bir generatör bir empedans üzerinden veya iki ve daha fazla generatör bir transformatör üzerinden sisteme bağlandığında, makina terminali üzerinde bir noktada regülasyon gerilimi arzu edilebilir. Örnek olarak, transformatör empedansının bir kısmı ve yol verme transformatörü üzerinden bir noktada etkin, regülasyon gerilimi için kompanzasyon gerekebilir. Bu durumda ise  $R_c$  ve  $X_c$  negatif değerlidir. [8]

Genellikle  $R_c$  bileşeni ihmal edilir ve sadece  $X_c$  hesaba katılır. Bazı kompanzatör devreleri, generatör akımının aktif ve reaktif bileşenleri yerine aktif ve reaktif gücün bir fonksiyonu olarak uç gerilimini şekillendirecek şekilde çalışırlar.

### 3.1 DA Tipi Uyarım Sistem Modelleri

Bu tip modelde uyarım sistemi güç kaynağı olarak komutatörlü DA generatör kullanılmaktadır. Bu sistemler günümüzde artık yerini AA ve Statik sistemlere terketmiştir.

#### 3.1.1. DA1A tipi uyarım sistem modeli

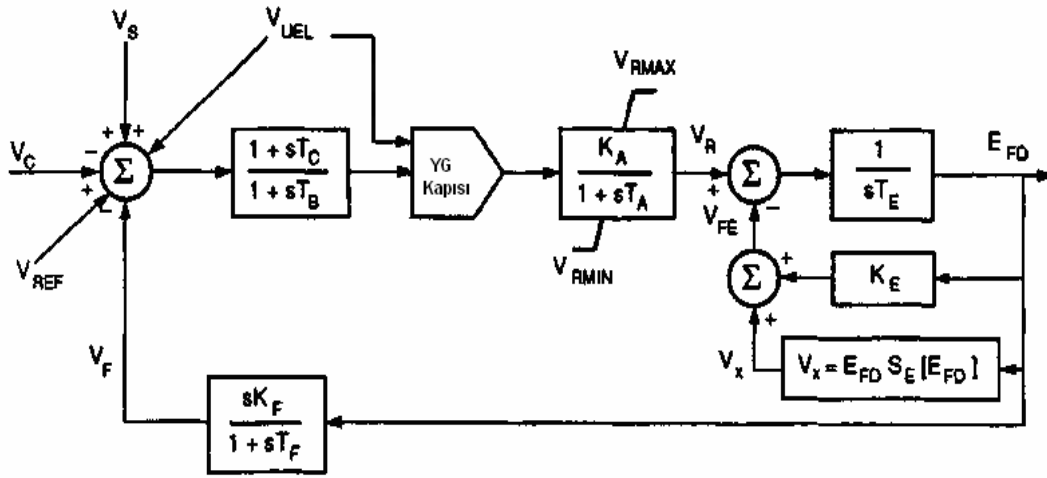
Şekil 3.3'de gösterilen blok diyagramı ile tanımlanan bu model kesintisiz çalışan gerilim regülatörü, alan kontrollü DA makina ihtiva eden sistemleri tanımlar. Uyarım elemanı alan kontrollü bir doğru akım makinesidir ve regülatörler magnetik, döner veya reostatik şekilde olabilir.

Bu modelin girişi, yukarıda tanımlandığı gibi yük kompanzatör modelinden ve uç gerilimi dönüştürücüsünden alınan  $V_c$  uç gerilimi hata sinyalidir. Toplayıcı noktada ise  $V_{ref}$ ,  $V_S$  ve  $V_{UEL}$  toplanır,  $V_F$  dengeleme geribesleme gerilimi ve  $V_c$  bu toplamdan çıkartılır. Kararlı halde  $V_S$  ve  $V_F$  işaretleri sıfırlanır. Dolayısıyla sadece uç gerilimi hata işareti kalır. Oluşan sinyal regülatörde kuvvetlendirilir. Gerilim regülatörü ile ilgili  $K_A$  kazancı  $T_A$  zaman sabiti, doyma uç değersiz tipik limitleri ile veya amplifikatör güç kaynağı sınırlamaları ile birlikte gösterilir.

Bu gerilim regülatörleri, generatör veya yardımcı baradaki kısa geçici olaylardan etkilenmeyecek güç kaynaklarından beslenmelidir.  $T_B$  ve  $T_C$  zaman sabitleri gerilim regülatörünün tabiatındaki eşdeğer zaman sabitlerini modellemede kullanılabilir, fakat bu sabitleri ihmal edebilecek kadar küçüktür. [8]

Gerilim regülatörünün çıkışı  $V_R$ , serbest veya kendinden uyarımlı doğru akım generatörünü kontrol etmek için kullanılır. Kendi kendini uyaran şönt generatör kullanılması halinde  $K_E$  şönt sargı ayar reostasına ait terim olur. [8]

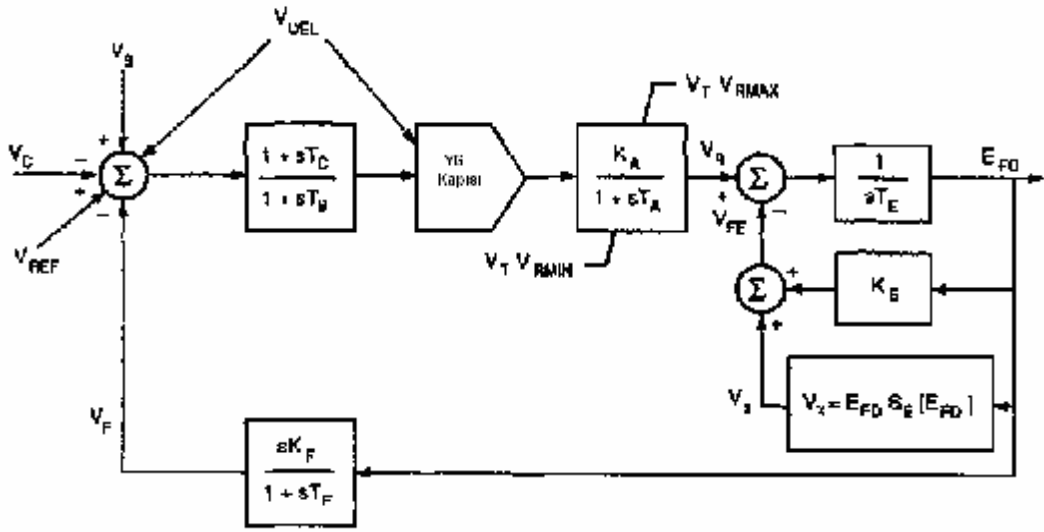
Bu sistemlerin çoğunda kendinden uyarımlı şönt generatör kullanılır ve bu sistemler "buck-boost" olarak tanımlanır. Gerilim regülatörü operatör tarafından periyodik olarak reosta ile çıkışını sıfır yapacak şekilde kontrol edilir. Bu,  $K_E$  değerinin uygun seçimiyle simüle edilebilir. Yani  $V_R$ 'nin sıfır yapılmasıyla ilk şartlar yerine getirilir.  $S_E$  terimi uyarım elamanının doymasını gösterir ve bu değer uyarım elamanı çıkış gerilimi  $E_{FD}$ 'nin bir fonksiyonudur.  $E_{FD}$ 'den elde edilen  $V_F$  sinyali uyarım sisteminin kararlılığını sağlamak için kullanılır. [8]



Şekil 3.3: DA1A tipi uyarım sistemi blok diyagramı

### 3.1.2.DA2A tipi uyarım sistem modeli

Şekil 3.4.'te gösterilen bu model, kesintisiz çalışan gerilim regülatörlü alan kontrollü doğru akım makinası ihtiva eder. Ancak burada regülatöre generatörden veya baradan besleme vardır. Tip DA1A'dan farkı, gerilim regülatörü çıkış sınırları burada generatör uç gerilimi  $V_T$  ile orantılıdır. [10]



Şekil 3.4: DA2A tipi uyartım sistemi blok diyagramı

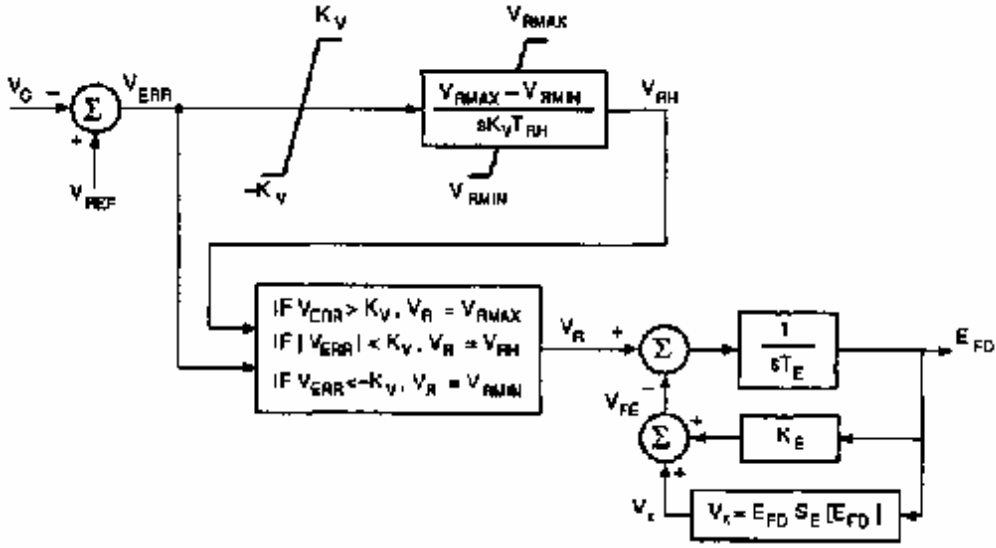
Bu model, eski mekaniksel ve döner amplifikatör teçhizatın değişik formlarıyla yer değiştiren kontrollü katı hal doğrultucuları temsil etmektedir.

### 3.1.3.DA3A tipi uyartım sistem modeli

Bundan önce tanıtılmaya çalışılan sistemler, ilk üretilen yüksek kazançlı hızlı etkili uyartım kaynaklarını temsil etmektedirler. DA3A tipi sistem daha eski sistemleri temsil etmektedir. Burada da uyartım elemanı bir doğru akım generatörüdür ve regülatör kesintili çalışmaktadır.

Bu sistemler, gerilim hatasının büyüklüğüne bağlı olarak, temeli iki farklı orana cevap verirler. Hatanın küçük değerleri için ayarlama işaret ile motor kumandalı reostaya periyodik olarak yapılır. Daha büyük hata değerleri hızlı şekilde devreye direnç alır veya çıkartır ve uyartım elemanına şiddet etkili sinyaller uygular. Motor kumandalı reostanın sürekli hareketi bir kontaktör ile bypass edilse bile büyük hatalar meydana getirmektedir. Şekil 3.5 bu sistemin blok diyagramını göstermektedir. [8]





Şekil 3.5: DA3A tipi kesintili çalışan regülatörlü uyarım sistemi diyagramı

Uyarım sistemi blok diyagramları şimdiye kadar açıklanan sistemlere benzerdir. Ancak Şekil 3.5'te uyarım sistem dengeleyicisi ( $V_F$  sinyali) gösterilmemiştir.  $V_{ERR}$  hata geriliminin büyüklüğüne bağlı olarak, değişik regülatörler kullanılır. Hata gerilimi azaltma/arttırma kontak teçhizat değeri  $K_V$  den büyük olduğunda, uyarım elemanına  $V_{Rmin}$  veya  $V_{Rmax}$  değerleri uygulanır. Hata geriliminin bir mutlak değeri  $K_V$  değerinden küçük olduğunda uyarım elemanının girişi  $V_{RH}$  değerine eşit olur. Reosta ayarlaması hata işaretine bağlı olarak aşağı veya yukarı adeta çentiklenir. Yani reosta kademeli olarak motor ile devreye alınır veya çıkartılır. Reosta tahrik motorunun sürekli hareketini gösteren hareket zamanı  $T_{RH}$ 'dir. [8]

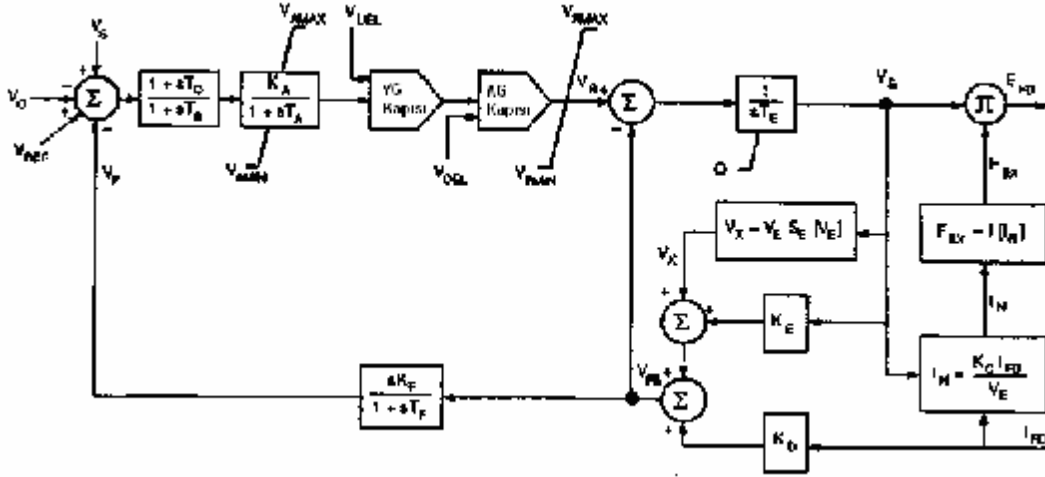
Bir uç değersiz sınırlayıcı, reostanın sınır değerlere ulaşması durumunda bu etkiyi belirtmek üzere blok diyagramında gösterilmiştir. Giriş sinyali değiştiğinde bu sınırlayıcı derhal sınır değere geçer.

Bu model, reosta sınırları ile aynı olan hızlı arttırma/azaltma sınırlarını kabul eder. Yine bu model, alan direncinin değişmesinin sebep olduğu uyarım elemanı alanı zaman sabiti değişmelerinden etkilenmez. Uyarım direnci reosta hareketiyle ve hızlı etkili kontaktların çalışmasıyla değişir.

### 3.2. AA Tipi Uyarım Sistem Modelleri

Bu uyarım sistemlerinde bir AA alternatör ve generatör alanı için gerekli doğru akım üretmek için sabit veya döner doğrultucular kullanılır. Bu gibi uyarım sistemlerinde yüklenme etkileri önemlidir ve generatör uyarım akımının bu sistemlere giriş olarak kullanılması bu etkilerin tam olarak görülmesine imkan verir. Bu sistemlerden bazıları (AA4A tipi) negatif alan kuvveti sağlayabilirken birçoğu negatif alan akımı sağlayamazlar. [11]

#### 3.2.1. AA1A tipi uyarım sistem modeli



Sekil 3.6: AA1A tipi kontrolsüz doğrultuculu alternatör-doğrultucu uyarım sistemi blok diyagramı

Şekil 3.6'da gösterilen bu sistem alan kontrollü alternatör-doğrultucu uyarım sistemlerini temsil etmektedir. Bu uyarım sistemi alternatör ana uyarım elemanı ve kontrolsüz doğrultucu ihtiva eder. Uyarım elemanı kendinden uyarmalı değildir ve gerilim regülatörü için gerekli güç, harici geçici olaylardan etkilenmeyen bir kaynaktan sağlanır. Uyarım çıkışındaki diyot karakteristiği uyarım elemanı çıkış gerilimi üzerinde bir sıfır alt sınırlaması yapar. [8]

Büyük güç sistemlerinin kararlılık çalışmaları için, uyarım elemanı olarak kullanılan alternatör (senkron makina) burada en basit modellenmesiyle gösterilebilir. Uyarım elemanı olan alternatörün çıkış gerilimi  $V_E$ 'nin dinamik davranışına olan yük akımı  $I_{FD}$  nin miktatışlığı

yoketme etkisini geri-besleme yolu üzerindeki  $K_D$  sabiti kontrol eder. Bu sabit, uyarım elemanı alternatörün senkron ve geçici reaktanslarının bir fonksiyonudur. [8]

Doğrultucu regülasyona bağlı alternatör çıkışındaki gerilim düşümü, komütasyon reaktansının bir fonksiyonu olan  $K_D$  sabiti ve doğrultucu regülasyon eğrisi  $F_{EX}$ 'e yapılacak bir yaklaşımla simüle edilebilir.

Bu modelde, uyarım elemanı alan akımı ile orantılı bir  $V_{FE}$  sinyali elde edilir. Bu işlem için önce alternatör çıkış gerilimi  $V_E$  ile  $K_E+S_E$  terimi ( $S_E$  doymayı tanımlar) çarpılır, daha sonra  $I_{FD}$ , akımı mıknatıslığı yoketme terimi  $K_D$  ile çarpılır. Elde edilen son iki işaret toplanarak  $V_{FE}$  işareti elde edilir. Bu sinyal uyarım elemanı alan akım sinyalidir. AA1A tipi modelde bu sinyal uyarım sistem dengeleyicisine giriş olarak kullanılır. [12]

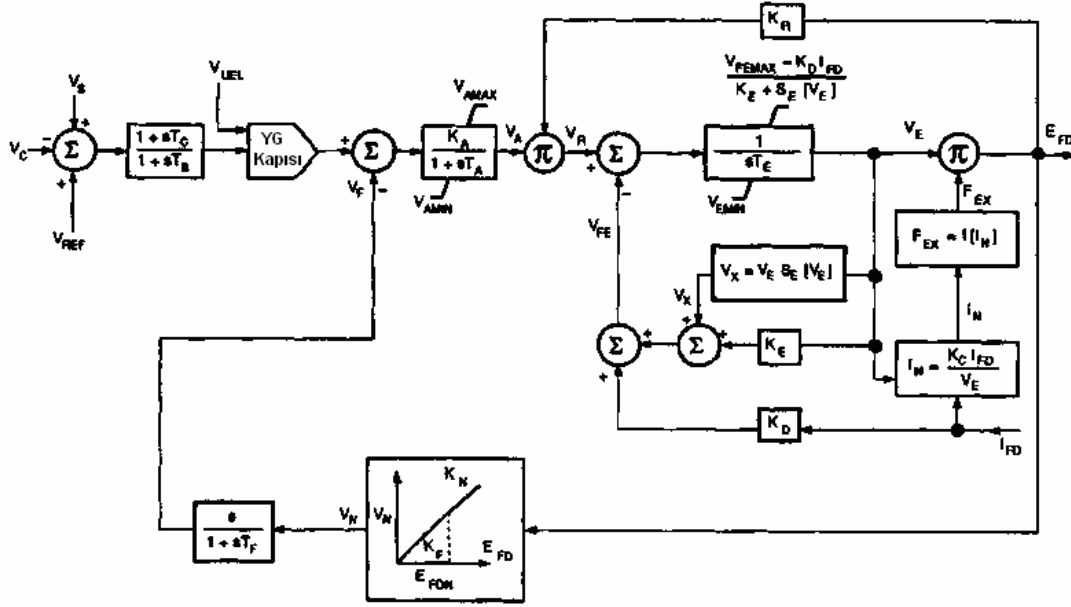
### 3.2.2. AA2A tipi uyarım sistem modeli

Şekil 3.7'de AA2A tipi olarak gösterilen bu sistem, hızlı başlangıç cevaplı, alan kontrollü alternatör-doğrultucu uyarım sistemlerini temsil eder. Ana uyarım elemanı olan alternatörle birlikte kontrolsüz doğrultucular kullanılır. Bu tip AA1A tipi ile benzerdir. Bu sistemde ek olarak iki alan akımı geri besleme çevrimi, zaman sabiti kompanzasyonu ve uyarım elemanı alan akım sınırlayıcıları kullanılır. [13]

Uyarım elemanı zaman sabiti kompanzasyonunda  $V_H$  işareti, direkt negatif geribeslemede kullanılır. Böylece uyarım elemanının alan zaman sabitinin efektif değeri azaltılır, buna karşılık sistemin küçük işaret cevap band genişliği artırılır. Zaman sabiti, kompanzasyon çevrimindeki  $K_B$  ve  $K_H$  kazancı ile orantılı olarak azaltılır. [14]



Alternatör çıkış gerilimi  $V_E$ 'nin dinamik davranışına olan yük akımı (Uyartım akımı)  $I_{FD}$ 'nin mıknatıslığı yok etme etkisini geri besleme yolu üzerindeki  $K_D$  sabiti kontrol eder. Bu sabit, uyartım elemanı alternatörün senkron ve geçici reaktanslarının fonksiyonudur. [17]

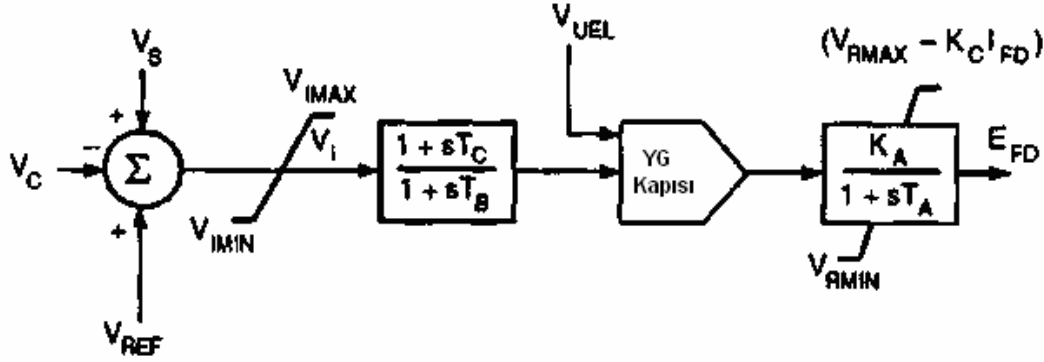


Şekil 3.8: AA3A tipi uyartım sistemi blok diyagramı

Bu modelde de AA1A tipte olduğu gibi bir  $V_{FE}$  sinyali elde edilir. Uyartım sistemi dengeleyicisi nonlinear karakteristiğe sahiptir. Kazanç, uyartım elemanı çıkış gerilimi,  $E_{FND}$  değerinden az olduğundan  $K_F$ 'dir. Gerilim  $E_{FND}$  değerini aşarsa kazanç değeri  $K_N$  olur. [18]

### 3.2.4. AA4A tipi uyarım sistem modeli

Bu tip, alternatör beslemeli kontrollü doğrultuculu uyarım sistemi olarak adlandırılır. Bu tip, diğer tip AA modellerden oldukça farklıdır. Sistem Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



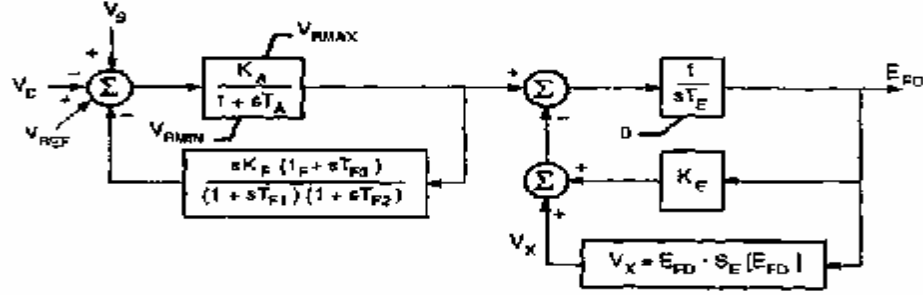
Şekil 3.9: AA4A tipi uyarım sistemi blok diyagramı

Bu yüksek başlangıç cevaplı uyarım sisteminde uyarım elemanı çıkış devresinde tam dalga tristör köprüsü kullanılır. Gerilim regülatörü tristörlerin tetikleme açısını kontrol eder. Alternatör, çıkış gerilimini sabit bir değere kontrol etmek üzere bağımsız bir gerilim regülatörü kullanır. Bunun etkileri yukarıdaki modelmemede gösterilmemiştir, bununla beraber alternatör üzerindeki geçici yüklemeye etkileri gözönüne alınmıştır. [8]

Yüklenme etkisi, uyarım sınırlarını tesbit etmek için kullanılan uyarıcı makinanın yük akımı ve komütasyon reaktansı kullanılarak hesaplanabilir.  $T_B$  ve  $T_C$  zaman sabitlere kontrol fonksiyonlarını simüle etmede kullanılabilir. Regülatör ve/veya tristörlerin tetiklenmesi ile ilgili eşdeğer kazanç ve zaman sabitleri  $K_A$  ve  $T_A$  ile simüle edilebilir. [19]

### 3.2.5. AA5A tipi uyarım sistem modeli

Bu model fırçasız uyarım sisteminin basitleştirilmiş halidir. Modelin şeması Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

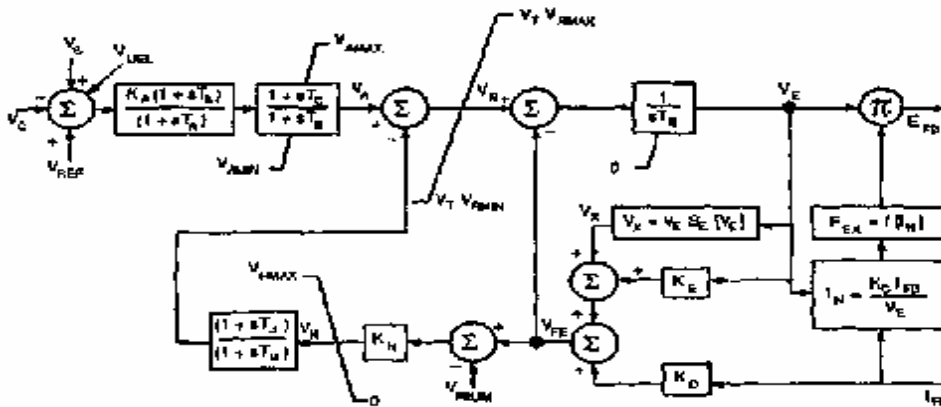


Şekil 3.10: AA5A tipi uyarım sistemi blok diyagramı

Küçük uyarım sistemlerinde kullanılan bu model, detaylı bilgi olmadığı durumlarda veya basitleştirilmiş model taleplerinde diğer uyarım sistemlerin yerine kullanılabilir. [20]

### 3.2.6. AA6A tipi uyarım sistem modeli

Bu model elektronik gerilim regülatörlü alan kontrollü alternatör-converter uyarım sistemlerinde kullanılır. Modelin diyagramı Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



Şekil 3.11: AA6A tipi uyarım sistemi blok diyagramı

Regülatörün maksimum çıkışı  $V_R$ ,  $V_T$  geriliminin bir fonksiyonudur ve bu model uyarım alan akım sınırlayıcısı ihtiva eder.

### 3.3. ST Tipi Uyartım Sistem Modelleri

Burada senkron makina, uyartım için gereken gücü bir uyartım trafosu ve tristörlü AA/DA dönüştürücüsü üzerinden alır.

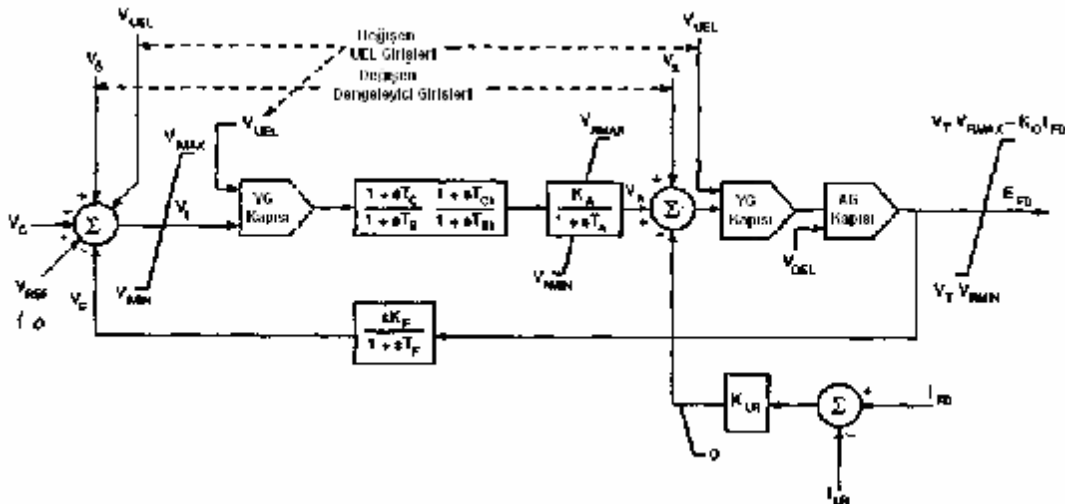
Gerilimi (bileşik sistemlerde aynı zamanda akımı), uygun bir değere dönüştürmek için bir transformatör kullanır. Doğrultucular generatör alanı için gerekli doğru akımı sağlamak üzere kontrollü veya kontrolsüz olabilirler.

Bu sistemlerin çoğundan negatif alan gerilimi elde edilebilir, buna karşılık negatif alan akımı elde edilemez. Bunun için daha detaylı modeller gerekmektedir.

Statik sistemlerin çoğunda uyartım gerilimi çok yüksek değerlere çıkabilir. Bu yüzden uyartım sistemini ve generatör rotor sargılarını korumak için ilave alan akım sınırlama devreleri kullanılır. Bu gibi ek devreler blok diyagramlarında gösterilmemiştir. [21]

#### 3.3.1. ST1A tipi uyartım sistem modeli

ST1A tipi, gerilim kaynaklı-kontrollü doğrultuculu uyartım sisteminin modeli Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Bu gösterim, uyartım gücü genarator terminalinden veya yardımcı baradan beslenen bir transformatörden sağlanan bütün sistemler için geçerlidir. Bu sistemlerde elde edilebilecek maksimum uyartım gerilimi direkt olarak generatör uç gerilimiyle ilgilidir. [22]



Şekil 3.12: ST1A tipi uyartım sistemi blok diyagramı



Bu tip sistemlerde, zaman sabitleri çok küçüktür dolayısıyla uyartım sistemi için stabilizasyon gerekmez. Diğer taraftan, başka sebepler için geçici kazanç azaltılması işlenebilir. Verilen modeller, ileri besleme yolundaki  $T_B$  ve  $T_C$ 'nin her ikisiyle veya geribesleme yolundaki  $K_F$  ve  $T_F$ 'nin uygun seçilmiş değerleriyle yerine getirilmiş Geçici Kazanç Azaltma gösterimi için yeterince çok yönlüdür. Gerilim regülatörü kazanç ve uyartım sistemi zaman sabitleri  $K_A$  ve  $T_A$  ile gösterilir. [23]

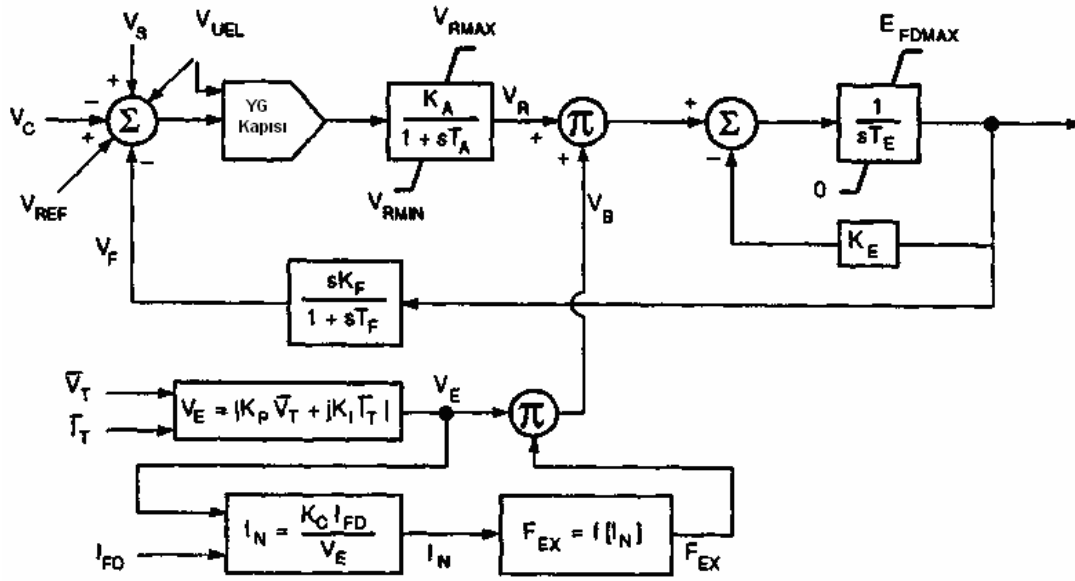
Uç geriliminin (uyartım sisteminin yardımcı bir baradan beslenmesi durumu hariç) ve generatör uyartım akımının fonksiyonları olan uyartım gerilimi sınır değerleri modellenmelidir. Generatör alan akımının lineer fonksiyonu olarak uyartım gerilimi sınırlarının gösterimi mümkündür. Çünkü bu sistemlerde doğrultucu köprünün çalışması model bölgesinde sınırlandırılmıştır. Ek olarak, transformatörden beslenen birçok sistemlerde  $K_C$  terimi çalışmalar için ihmal edilebilecek kadar küçüktür. [24]

Bu uyartım sistemlerinin çoğunda tam kontrollü doğrultucu köprüler kullanılırken, negatif tepe geriliminin sifıra ayar edileceği durumlarda yarı kontrollü köprüler de kullanılabilir. [23]

Uygulamadaki birçok sistemlerde, tristör tetikleme açısının köprü çıkışına karşılık gelen kosinüs karakteristiği, regülatör çıkışı ile tetikleme açısı arasındaki bir ters-kosinüs fonksiyonu ile kompanze edilir. Bu sistemlerde  $K_A$  bir sabittir ve uyartım elemanın kaynak geriliminden bağımsızdır. Bazı sistemlerde, ters-kosinüs kompanzasyonu kullanılmaz ve bu durumda  $K_A$  kaynak gerilimine bağlı bir kosinüs fonksiyonu olup ST1A tip model, bazı tip çalışmalar için bu sistemlere yaklaşım olarak kullanılabilir fakat diğer tipler için daha doğru gösterimler gerekecektir. [25]

### 3.3.2. ST2A tipi uyarım sistem modeli

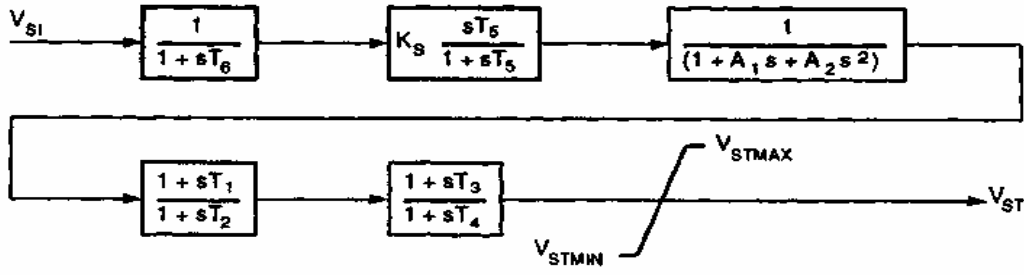
Bazı statik sistemler hem gerilim hem de akım (generator uç büyüklükleri) kaynakları kullanır ve bu kaynakları karşılaştırır. Bu sistemler, bileşik kaynaklı, doğrultuculu uyarım sistemleri olarak adlandırılır. ST2A tipi olarak tanımlanmış sistemin blok diyagramı Şekil 3.13'de gösterilmiştir. Generator uç gerilimi  $V_T$  ve akımı  $I_T$ 'nin fazör büyüklükleri, uyarım güç kaynağı modeli şekillendirmek için gereklidir. [26]



Şekil 3.13: ST2A tipi uyarım sistemi blok diyagramı

Doğrultucu yükleme ve komütasyon etkisi  $E_{FD \max}$  magnetik cihazların doymasına bağlı uyarım elemanının gerilim sınırını gösterir. Regülatör uyarım elemanının çıkışını güç transformatörünün doymasına bağlı olarak kontrol eder.  $T_E$  terimi kontrol sargılarının endüktansıyla ilişkili integrasyon oranını gösterir.[27]



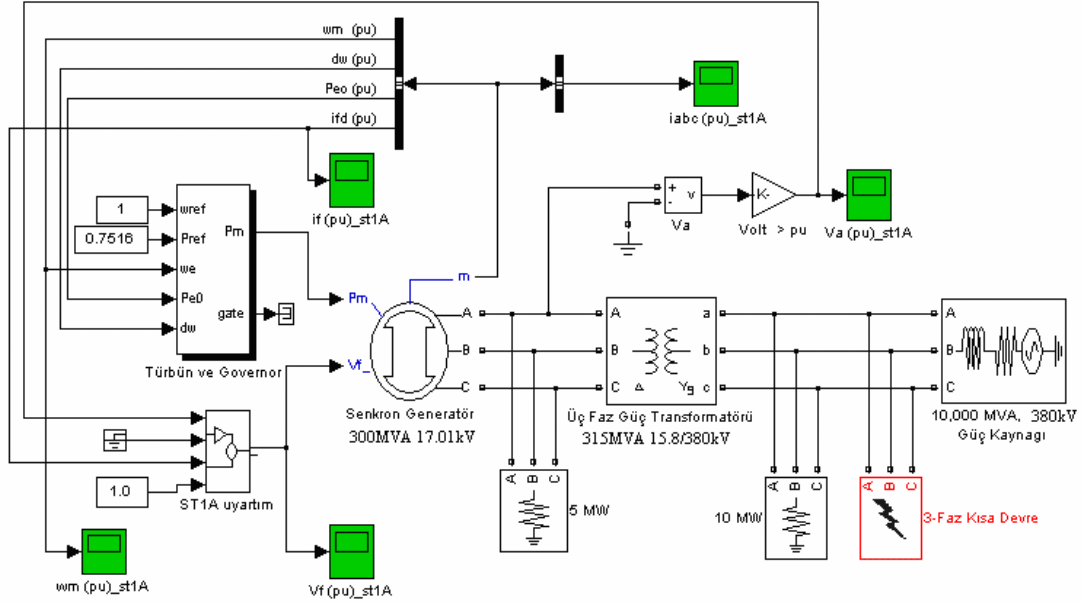


Şekil 3.15: Güç sistem dengeleyicisi diyagramı

Yüksek frekans filtresini takip eden iki blok, endüktif-kapasitif kompanzasyon katlarını göstermektedir. Dengeleyicinin kazancı  $K_S$  terimi ile ayar edilir.

## BÖLÜM 4. ST1A TİPİ STATİK UYARTIM SİSTEMİNİN MATLAB SİMULINK'TE MODELLENMESİ VE DİNAMİK UYARTIM SİSTEMİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

ST1A statik uyartımın performansı üzerinde çalışmak ve dinamik uyartım sistemi ile karşılaştırmak için Şekil 4.1'deki Simulink simulasyon modeli kurulmuştur. Burada IEEE'nin ST1A statik uyartım modeli Simulink'te dizayn edilmiştir.

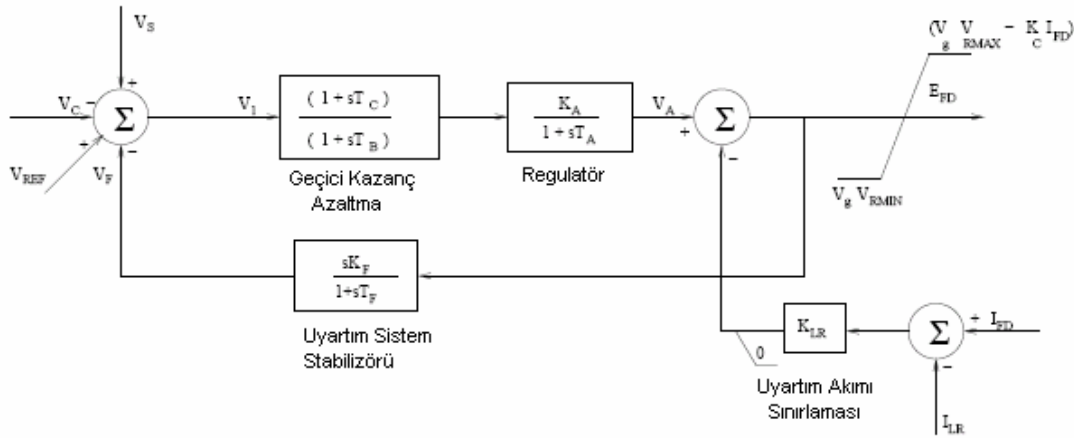


Şekil 4.1: ST1A Statik Uyartım'lı Hidrolik Türbün-Generatör Modeli

Şekil 4.1'deki sistemde senkron generatör için gerekli mekanik gücü( $P_m$ ) bir hidrolik türbün ve governor sağlar. Generatör,  $V_f$  uyartım gerilimini ST1A statik uyartım sisteminden alır. Generatörün üç faz çıkışına bir yükseltici güç transformatörü bağlanmıştır. Transformatörün primerinde 5MW, sekonderine ise 10MW'lık omik yük vardır. Ölçülen bütün değerler pu(per unit) değer cinsinden'dir.

#### 4.1. Uyartım Sisteminin Modellenmesi

Şekil 4.1'deki uyartım sistemi Simulink'te oluşturulurken, IEEE'nin ST1A statik uyartım modeli baz alınmıştır [9]. Şekil 4.2'deki Geçici Kazanç Azaltma, Regülatör, Uyartım Sistem Dengeleyicisi ve Uyartım Akım Sınırlaması blokları ayrı ayrı Simulink'in kütüphanesi kullanılarak dizayn edilmiştir. [14]



Şekil 4.2: IEEE'nin ST1A Statik Uyartım Modeli

Şekil 4.2'deki sistemde uyartım için gereken güç, generatör çıkışından bir uyartım trafosu üzerinden sağlanır ve bir ayarlı tristörlü AA/DA dönüştürücüsü ile kontrol edilir. Bundan dolayı uyartım tavan gerilimi, generatör çıkış gerilimi ile doğru orantılıdır.  $K_{LR}$  ve  $I_{LR}$ , uyartım akım sınırlamasını gösteren parametreler'dir. Bu parametreler uyartım sistemini korumak için kullanılır.  $K_c$ , denetçinin gerilim oranını gösterir, değeri çok küçük olduğu için ihmal edilebilir. Böylece sistemin çıkışındaki sınırlama  $V_{Rmin}$  ile  $V_{Rmax}$  arasında kalır. [15]

ST1A uyartım sisteminde kullanılan parametrelerin değerleri ve açıklamaları Tablo 4.1'de gösterilmiştir. Buna göre zaman sabitleri sn(saniye) cinsinden, kazanç sabitleri de p.u(per unit) değer cinsinden verilmiştir. [14]

Tablo 4.1: IEEE'nin ST1A parametreleri ve açıklamaları

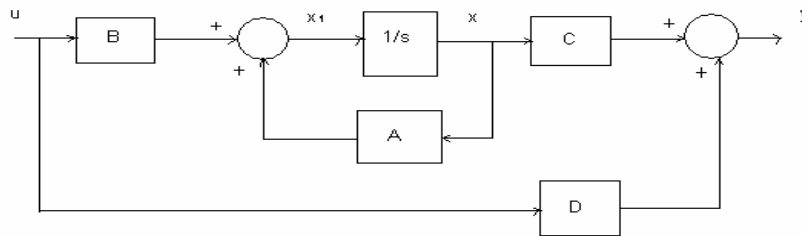
Parametre	Değeri	Açıklaması
$K_A$	200	Regulatör kazancı
$K_F$	0	Dengeleyici kazancı
$I_{LR}$	5 p.u	Uyartım akım sınırlayıcısını set değeri
$T_A$	0.02 sn	Regulatör zaman sabiti
$T_F$	1 sn	Dengeleyici zaman sabiti
$V_{Rmax}$	7 p.u	Regulatör maksimum çıkış gerilimi
$V_{Rmin}$	-6.4 p.u	Regulatör minimum çıkış gerilimi
$T_c$	1 sn	Denetçinin birinci zaman sabiti
$K_c$	0.04	Denetçinin gerilim oranı
$T_B$	1 sn	Denetçinin ikinci zaman sabiti
$K_{LR}$	4.54	Sınrlayıcının kazanç değeri
$E_{fdo}$	0 p.u	Uyartım gerilimi başlangıç değeri
$T_{gro}$	0 sn	Generatör zaman sabiti başlangıç değeri

Modelleme Örneği: Matlab Simulink'te ST1A'nın blokları oluşturulurken Şekil 4.3'teki modelleme örneği kullanılmıştır. Burada  $x_1$ 'in ifadesini yazacak olursak:

$$x_1 = Ax + Bu \text{ dur.} \quad (4.1)$$

Sistem çıkışı  $y$ 'nin ifadesi ise aşağıdaki gibi olacaktır:

$$y = Cx + Du \text{ dur.} \quad (4.2)$$

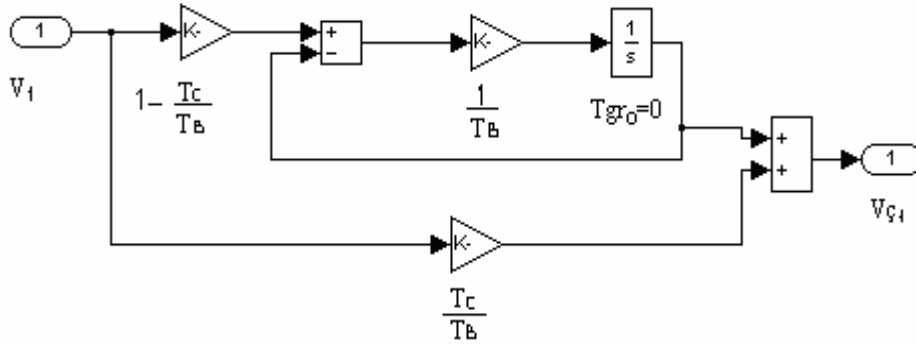


Şekil 4.3: Örnek bir model

Geçici Kazanç Azaltma Bloğu: IEEE'nin ST1A uyartım sistem modelindeki Geçici Kazanç Azaltma Bloğu'nun Simulink'teki bloğun ifadesini yazacak olursak:

$$V_{\zeta 1} = \frac{1 + sT_C}{1 + sT_B} \cdot V_1 \text{ 'dir.}$$

Standart kazanç ve integratör bloklarını kullanarak (4.3)'deki ifadenin Matlab Simulink'teki modeli Şekil 4.4'teki gibi olacaktır.



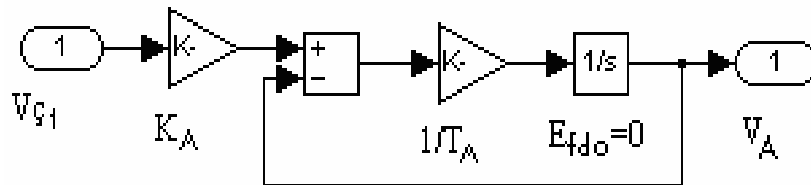
Şekil 4.4: Geçici Kazanç Azaltma Bloğunun Simulink'teki Modeli

Bu blok'taki parametrelerin değerleri  $T_B=1$ ,  $T_C=1$  ve  $T_{gro}=0$ 'dır.

Regulatör Bloğu: IEEE'nin ST1A uyartım sistem modelinde regulatör bloğunun ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$V_A = \frac{K_A}{1 + sT_A} \cdot V_{\zeta 1} \quad (4.4)$$

Burada  $K_A=200$ ,  $T_A=0.02$  ve  $E_{fd0}=0$ 'dır.

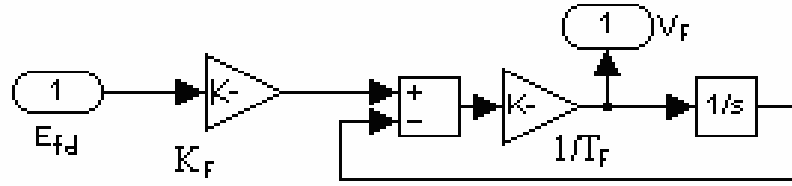


Şekil 4.5: Regulatör Bloğunun Simulink'teki Modeli

Uyartım Sistem Dengeleyicisi(USS) Bloğu: Burada  $K_F$  dengeleyici kazancı,  $T_F$  ise dengeleyicinin zaman sabitidir. IEEE'deki Uyartım Sistem Dengeleyicisinin Simulink bloğundaki ifadesi aşağıdaki gibidir:



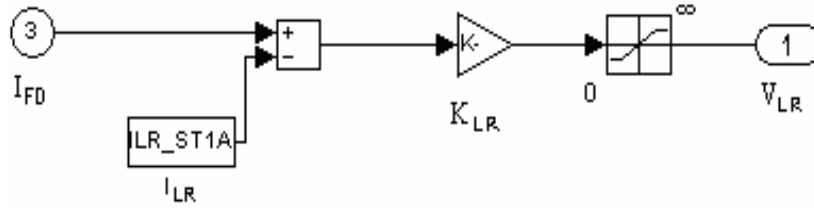
$$V_F = \frac{sK_F}{1 + sT_F} \cdot E_{fd} \quad (4.5)$$



Şekil 4.6: Uyartım Sistem Dengeleyici bloğunun Simulink'teki modeli

Burada  $K_F=0$  ve  $T_F=1$ 'dir.

Uyartım Akım Sınırlaması Blokları: ST1A statik uyartım sisteminde Uyartım Akım Sınırlaması'nın Simulink bloğu Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Burada  $I_{LR}=5$  set değeri ile generatörden gelen  $I_{FD}$  uyartım akımını toplanarak bir  $K_{LR}=4.54$  kazanç bloğu üzerinden 0 ile  $\infty$  arasında sınırlandırılır ve böylece  $V_{LR}$  çıkışı elde edilir.



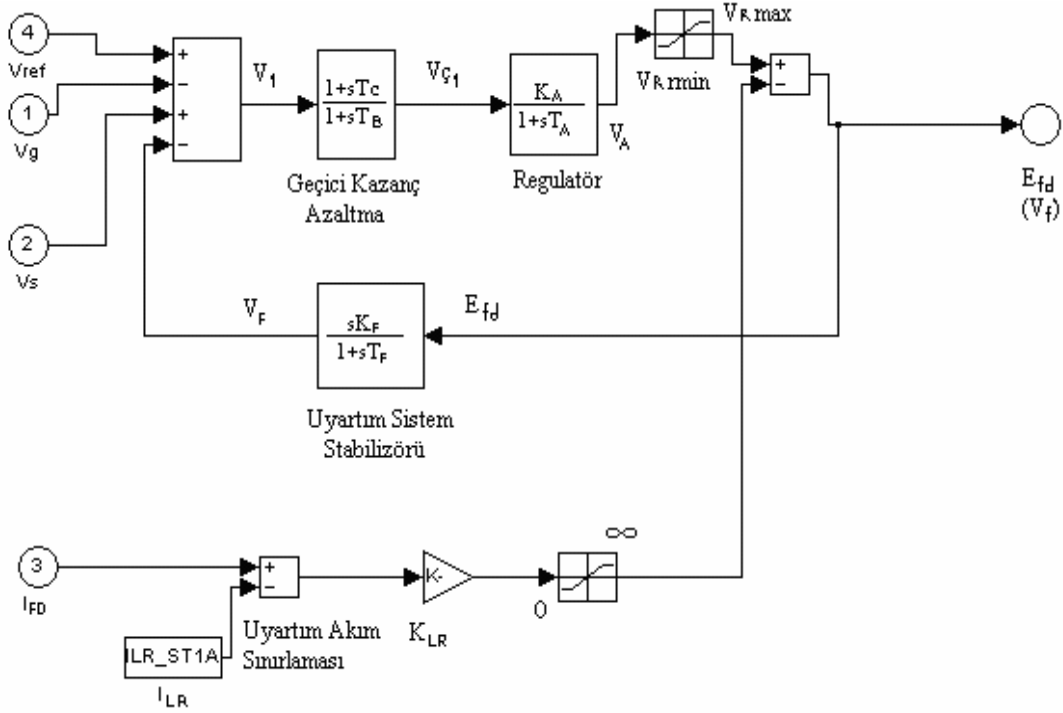
Şekil 4.7: Uyartım Akım Sınırlaması Blokları

Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'deki bloklar birleştirildikten sonra Şekil 4.8'deki ST1A statik uyartım sisteminin Simulink modeli meydana getirilmiştir. ST1A uyartım sisteminin girişleri sırasıyla  $V_g$ ,  $V_s$ ,  $I_{FD}$  ve  $V_{ref}$ 'tir.  $V_g$ , generatör çıkış gerilimidir ve sistemdeki karşılığı  $V_a$ (generatör faz-nötr gerilimi)'dir.  $V_s$ , güç sistem dengeleyicisinden(PSS) gelen sinyaldir. Mevcut sistemde PSS kullanılmadığı için uyartım sisteminin bu çıkışı topraklanmıştır.  $I_{FD}$ , generatör uyartım akımıdır.  $V_{ref}$  ise uyartım sisteminin referans gerilimidir. Mevcut sistemde  $V_{ref}=1$  olarak alınmıştır.

Şekil 4.8'deki sisteme baktığımız zaman girişteki  $V_{ref}$ ,  $V_g$ ,  $V_s$  ve  $I_{fd}$  toplanarak çıkışında bir hata sinyali  $V_1$  oluşur. Bu hata sinyali Geçici Kazanç Azaltma bloğunun giriş sinyalidir. Çıkıştaki  $V_{c1}$  sinyali Regulator girişine uygulanır.  $V_A$  Regulator çıkışıdır ve  $V_{Rmin}$ ,  $V_{Rmax}$

arasında sınırlandırılmıştır. Regulator transfer fonksiyonu  $T_A$  zaman sabitine ve pozitif  $K_A$  kazancına sahiptir.

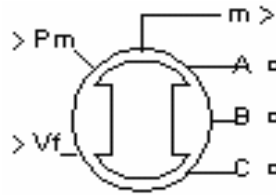
Bir çeşit geri beslemeli kontrol sistemi olan Statik Uyarım, sıklıkla türev geri beslemeye veya ilerlemeli/gecikmeli kompanzasyona ihtiyaç duyar. Uyarım sistem dengeleyicisi(USS), uyarım sistemlerinin kararlı çalışma bölgesinin artırılması ve yüksek regulator kazançlarının mümkün kılınmasını sağlar. USS, güç sistem dengeleyicisi(PSS) ile karıştırılmamalıdır. USS, kısa devre koşullarında etkili gerilim regülasyonu sağlamak için dizayn edilir. PSS ise geçici bozucu etkilerin oluşturduğu rotor osilasyonlarının sönümlenmesi amacıyla kullanılır. USS'in çıkışı  $V_F$ , PSS'in çıkışı ise  $V_S$ 'dir ve her iki sinyal hata sinyaline ilave edilir.



Şekil 4.8: ST1A Statik Uyarım Sisteminin Simulink Modeli

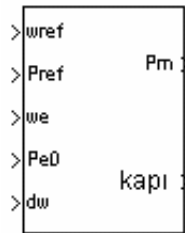
## 4.2 ST1A Statik Uyartım'lı Hidrolik Türbün-Generatör Modelinde Kullanılan Diğer Bloklar

Senkron Makina(Generatör) bloğu: Senkron generatör, mekanik enerjii elektrik enerjisine dönüştürür. Şekil 4.9'da, Simulink kütüphanesinde yer alan 3 fazlı senkron makina(generator) bloğu görünmektedir. Burada 3 faz stator sargı çıkışları A, B ve C olarak gösterilmiştir.  $V_f$ , generatörün uyartım gerilimi girişidir.  $P_m$ , generatörün mekanik gücüdür, m ise generatörün p.u(per unit) çıkış değerleridir(stator gerilimi, rotor hızı, uyartım akımı v.b.).



Şekil 4.9: Simulink'te senkron makina(generator) modeli

Hidrolik Türbün ve Governor bloğu: Senkron generatör için gerekli olan mekanik gücü hidrolik türbün ve governor sağlar. Şekil 4.10'daki modelde  $w_{ref}$  istenilen hızı,  $P_{ref}$  istenilen elektrikselsel gücü,  $w_e$  senkron generatör hızının gerçek değerini,  $P_{e0}$  senkron generatörün elektrikselsel gücünün gerçek değeri,  $d_w$  generatörün gerçek hızının nominal hızına oranını ifade eder.  $P_m$  senkron generatöre uygulanacak mekanikselsel güc çıkışı,  $kapı$  ise sınırlayıcı çıkışıdır.



Şekil 4.10: Simulink'te hidrolik türbün ve governor modeli

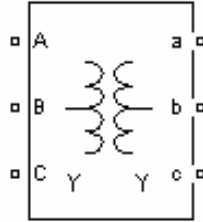
Generatör Uyartım Bloğu: Uyartımın ana amacı normal işletme koşullarında senkron generatör çıkış gerilimindeki kararlılığın devamını sağlamak ve herhangi bir arıza durumu sonrasında regüle ederek gerilimin hata öncesi kararlı hal değerine çabuk ve etkili bir şekilde

gelmesini sağlamaktır. Şekil 4.11’de generatör uyartımının Simulink bloğu görünmektedir. Burada  $V_{ref}$  istenilen stator gerilimi,  $V_d$  stator geriliminin d bileşeni,  $V_q$  stator geriliminin q bileşeni,  $V_{den}$  sistem dengeleyicisinden gelen gerilim değeri’dir. Bloğun çıkışında ise  $V_f$  generatörün uyartım sargısına uygulanacak gerilimdir.



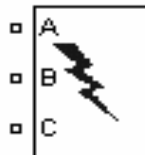
Şekil 4.11: Simulink’te generatör uyartım modeli

Üç Fazlı Transformatör Bloğu: Generatör çıkış gerilimini yükseltmek için kullanılan üç fazlı güç transformatörünün Simulink modeli Şekil 4.12’deki gibidir. Transformatör primer üç faz girişleri sırasıyla A, B ve C’dir. Sekonder çıkışları ise a, b ve c olarak gösterilmiştir.



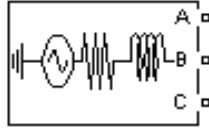
Şekil 4.12: Simulink’te üç fazlı transformatör modeli

Üç Faz Kısa Devre Bloğu: Şekil 4.13’teki üç faz kısa devre modeli, sistemin A, B ve C fazlarını belirtilen süre içinde topraklayarak kısa devre etmiş olur. Bu süre içinde sistemin tepkisi ölçülür ve değerlendirilir.



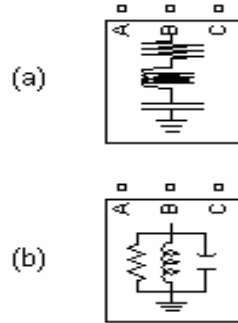
Şekil 4.13: Simulink'te üç faz kısa devre modeli

Üç faz Güç Kaynağı: Şekil 4.14'da üç faz sabit güç kaynağının Simulink'te modeli görünmektedir. Burada akım ve gerilim sabittir. A, B ve C üç faz kaynak çıkışlarıdır.



Şekil 4.14: Simulink'te üç fazlı güç kaynağı modeli

Üç Faz RLC Yüğü: Sistemde yükler seri ve paralel RLC olarak iki çeşittir. Üç faz yük çıkışları A, B ve C olarak Şekil 4.15'de belirtilmiştir. Şekil (a)'da bir R direnci, bir L bobini ve bir C kondansatörü seri bağlanarak seri RLC yükü oluşturulmuştur. Şekil (b)'de ise elemanlar paralel bağlanarak paralel RLC yükü teşkil eder.



Şekil 4.15: Simulink'te üç fazlı seri(a) ve paralel(b) RLC yükü bloğu

### 4.3 Simulasyon Sonuçları

Senkron generatörün dinamik davranışı ve önerilen ST1A uyarım sisteminin performansı üzerinde çalışmak için Simulink simulasyon modeli kurulmuştur. Simulasyonda kullanılan Türbün ve Governor, Generatör, Uyarım ve Trafo parametreleri bir hidroelektrik santralin kullandığı standart parametreler'dir.

Türbün ve Governor parametreleri:

Servo Motor Kazancı ve Zaman Sabiti:  $K_a=10/3$ ,  $T_a=0.07$  sn

Kapı Açma Limitleri:  $g_{min}=0.01pu$ ,  $g_{max}=0.97516pu$ ,  $V_{gmin}=-0.1pu$ ,  $V_{gmax}=0.1pu$

Regülör Parametreleri:  $R_p=0.05pu$ ,  $K_p=1.163$ ,  $K_i=0.105$ ,  $K_d=0$ ,  $T_d=0.01sn$

Hidrolik Türbün:  $\beta=0$ ,  $T_w=2.67sn$

Güç hatası=0

Mekanik gücün başlangıç değeri:  $P_{mo}=1pu$

Generatör parametreleri:

Nominal Güç, Faz Arası Gerilim ve Frekans:  $P_n=300MVA$ ,  $V_{faz}=17.01kV$ ,  $f=50Hz$

Reaktanslar:  $X_d=1.305pu$ ,  $X_d'=0.296pu$ ,  $X_d''=0.252pu$ ,  $X_q=0.474pu$ ,  $X_q'=0.243pu$ ,  $X_q''=0.180$

Zaman Sabitleri:  $T_d'=1.01pu$ ,  $T_d''=0.053pu$ ,  $T_{qo}''=0.1pu$

Stator Direnci:  $R_s=0.0028544pu$

Atalet Sabiti, Sürtünme Faktörü ve Kutup Çifti:  $H=3.2sn$ ,  $F=0pu$ ,  $p=32$

Başlangıç Değerleri:  $d_w=0\%$ ,  $th=0der$ ,  $i_a=0pu$ ,  $i_b=0pu$ ,  $i_c=0pu$ ,  $ph_a=0der$ ,  $ph_b=0der$ ,  $ph_c=0der$ ,  $V_{fo}=1pu$

Transformatör parametreleri:

Nominal Güç ve Frekans:  $P_n=315MVA$ ,  $f=50Hz$

Primer:  $V_1=15.8kV$ ,  $R_1=0.0027pu$ ,  $L_1=0.08pu$ , bağlantı tipi D1

Sekonder:  $V_2=380kV$ ,  $R_2=0.0027pu$ ,  $L_2=0.08pu$ , bağlantı tipi Yg

Mıknatıslanma Direnci:  $R_m=500pu$

Mıknatıslanma Reaktansı:  $L_m=500pu$

Statik Uyarım(ST1A) parametreleri:

$K_A=200$ ,  $T_A=0.02\text{sn}$ ,  $T_C=1.0\text{sn}$ ,  $T_B=1.0\text{sn}$ ,  $K_F=0$ ,  $T_F=1.0\text{sn}$ ,  $K_{LR}=4.54$ ,  $I_{LR}=5\text{pu}$ ,  $V_{Rmax}=7.0\text{pu}$ ,  
 $V_{Rmin}=-6.4\text{pu}$ ,  $E_{fdo}=0$ ,  $T_{gro}=0$ .

Dinamik Uyarım(AA1A) parametreleri:

Alçak Geçirgen Filtre:  $T_r=0.020\text{sn}$

Regülör Kazanç ve Zaman Sabiti:  $K_a=300$ ,  $T_a=0.001\text{sn}$

Uyarım Kazancı ve Zaman Sabiti:  $K_e=1$ ,  $T_e=0\text{sn}$

Geçici Kazanç Azalma:  $T_b=0\text{sn}$ ,  $T_c=0\text{sn}$

Geri Besleme Kazanç ve Zaman Sabiti:  $K_f=0.001$ ,  $T_f=0.1\text{sn}$

Regülör Çıkış Limitleri:  $E_{fmax}=11.5$ ,  $E_{fmin}=-11.5$

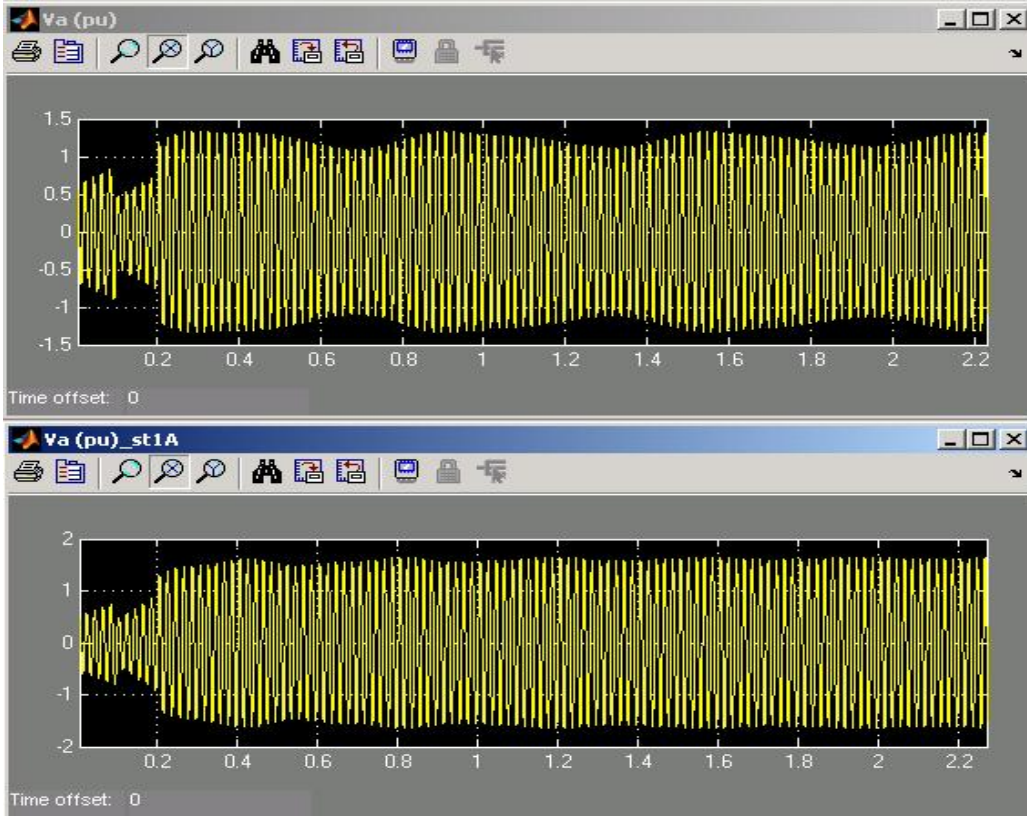
Başlangıç Değerleri:  $V_{to}=1\text{pu}$ ,  $V_{fo}=1.0\text{pu}$

Yukarıdaki parametreler Şekil 4.1'deki sisteme Simulink'te girilmiştir. Sistem'deki Uyarım bloğu çıkartılarak yerine dizayn edilen ST1A Statik Uyarım bloğu(Şekil 4.8) ilave edilmiştir. Öncelikle Statik Uyarım ile daha sonra Dinamik Uyarım ile simulasyon yapılmış ve her iki sistemde aynı bozucu etkiler uygulanmıştır.

Sistem, pratikte en çok görünen bozucu etkilerden Faz-Toprak Kısa Devre, Üç Faz Kısa Devre, Hat Kopması ve Yük Değişimi durumları için simule edilmiştir. Simulasyonda uyarım gerilimi( $V_f$ ), uyarım akımı( $i_f$ ), generatör çıkış gerilimi( $V_a$ ), generatör üç faz stator akımı( $i_{abc}$ ) ve generatör hızı( $w$ ) ölçülmüştür.

#### **4.3.1 Faz-toprak kısa devre durumu**

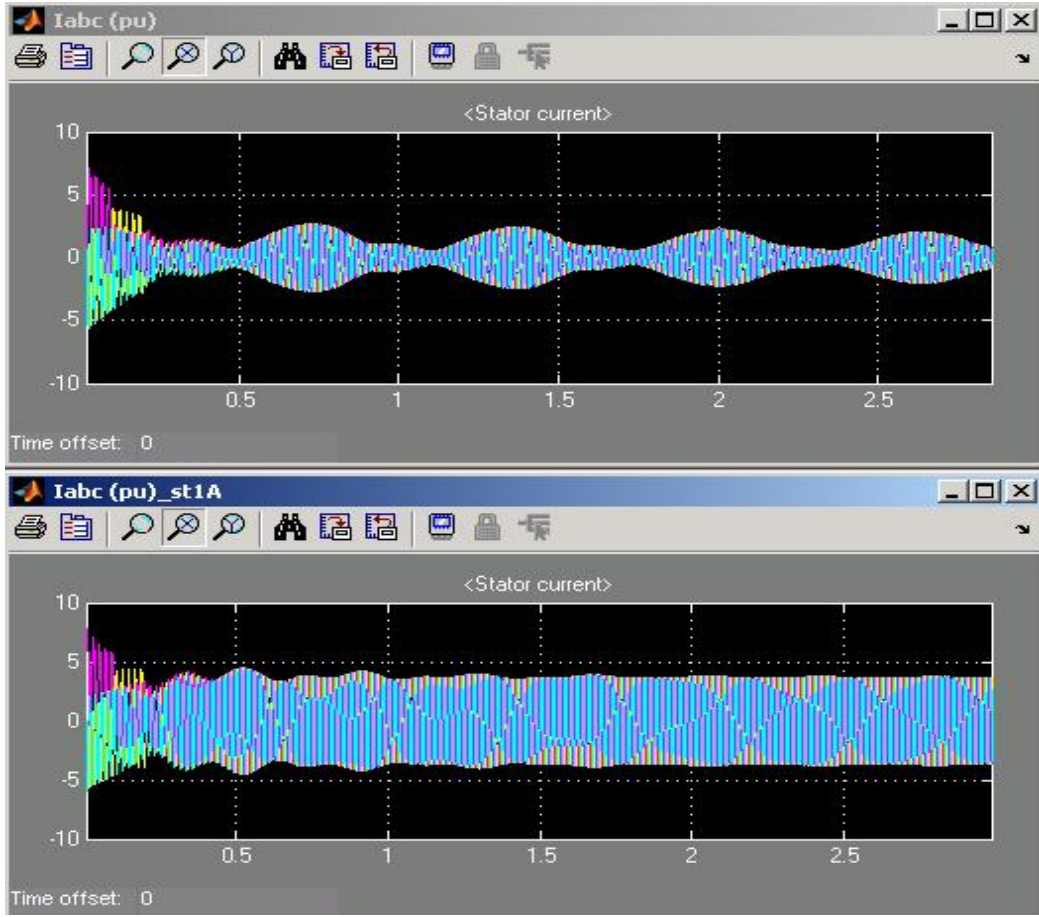
Generatörün çıkışında bulunan transformatörün sekonderine bağlı iletim hattının birine  $t=0.1\text{sn}$  ile  $t=0.2\text{sn}$  arasında faz-toprak kısa devre uygulanmıştır. Simulasyon  $t=0\text{sn}$ 'den  $t=6\text{sn}$  kadar yapılarak generatörün tepkisi ölçülmüştür.



Şekil 4.16: Faz-toprak kısa devre durumunda  $V_a$

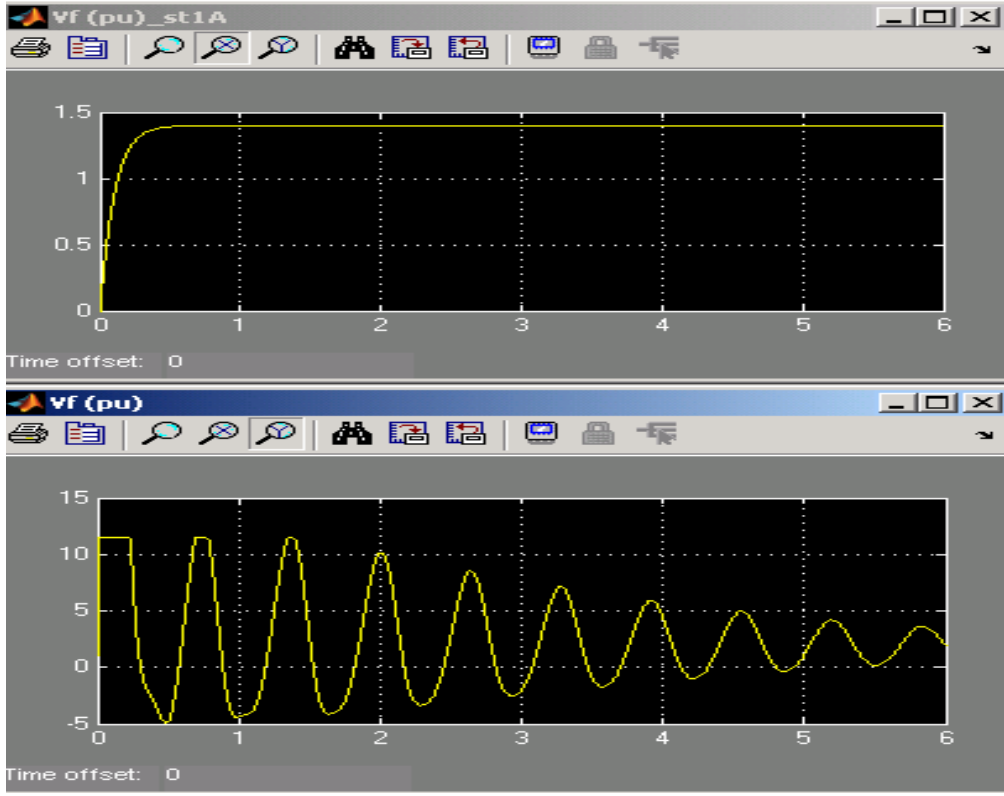
Şekil 4.16’da birinci dalga şekli Dinamik Uyartımlı sisteme, ikinci dalga şekli ise Statik Uyartımlı sisteme aittir. Şekilde de görüldüğü gibi gerek Statik Uyartım’lı sistemde, gerek ise Dinamik Uyartım’lı sistemde  $V_a$  generatör çıkış geriliminde ciddi bozulmalar meydana gelmiştir. Özellikle kısa devre anında  $t=0.1$ sn. ile  $t=0.2$ sn.arasında  $V_a$ ’da önemli miktarda azalma gözlenmiştir.  $t=0.2$ sn sonra  $V_a$  kararlı bir hal almaya başlamıştır. Fakat Statik Uyartım’lı sistem çok daha kısa sürede sistem kararlı hale gelmiştir.





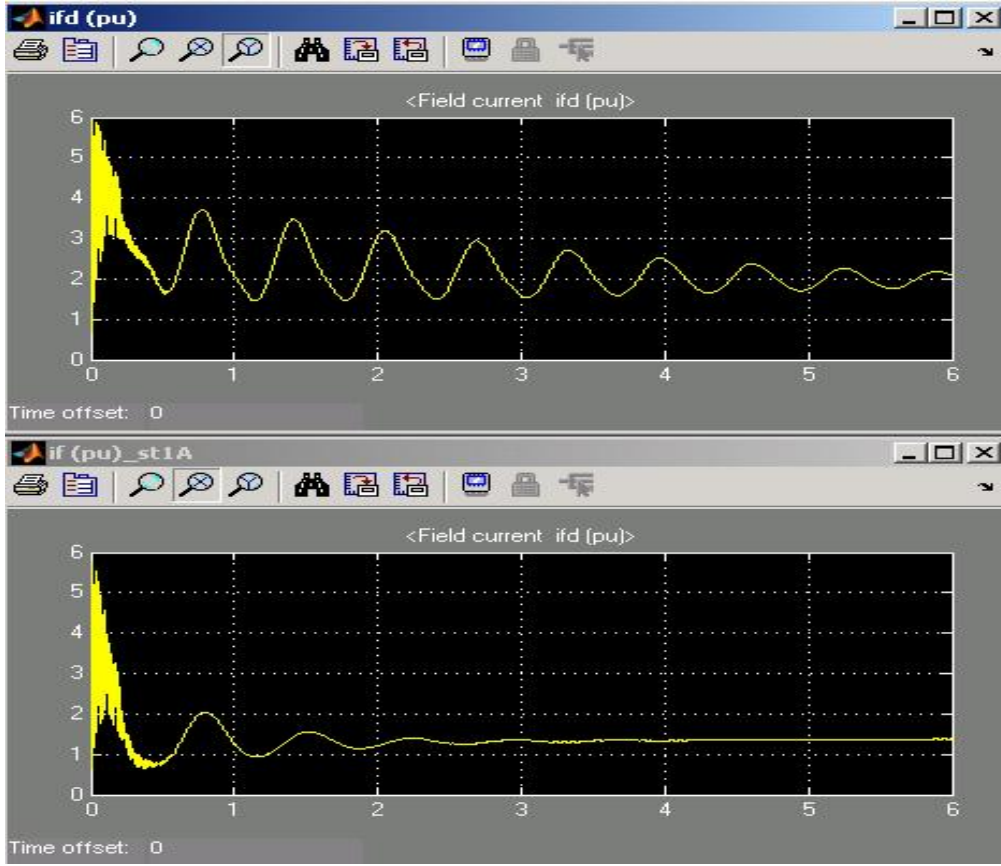
Şekil 4.17: Faz-toprak kısa devre durumunda  $i_{abc}$

Şekil 4.17’de birinci dalga şekli Dinamik Uyartımlı sisteme, ikinci dalga şekli ise Statik Uyartımlı sisteme aittir. Kısa devre anında her iki sistemde yüksek akımlar söz konusudur. Gerek Statik Uyartım’lı sistemde, gerek ise Dinamik Uyartım’lı sistemde stator akımında ciddi bozulmalar meydana gelmiştir.  $t=1.6sn$ ’de Statik Uyartımlı sistemdeki  $i_{abc}$  kararlı bir hal alırken, Dinamik Uyartım’lı sistemdeki stator akımında hala ciddi salınımlar meydana gelmektedir.



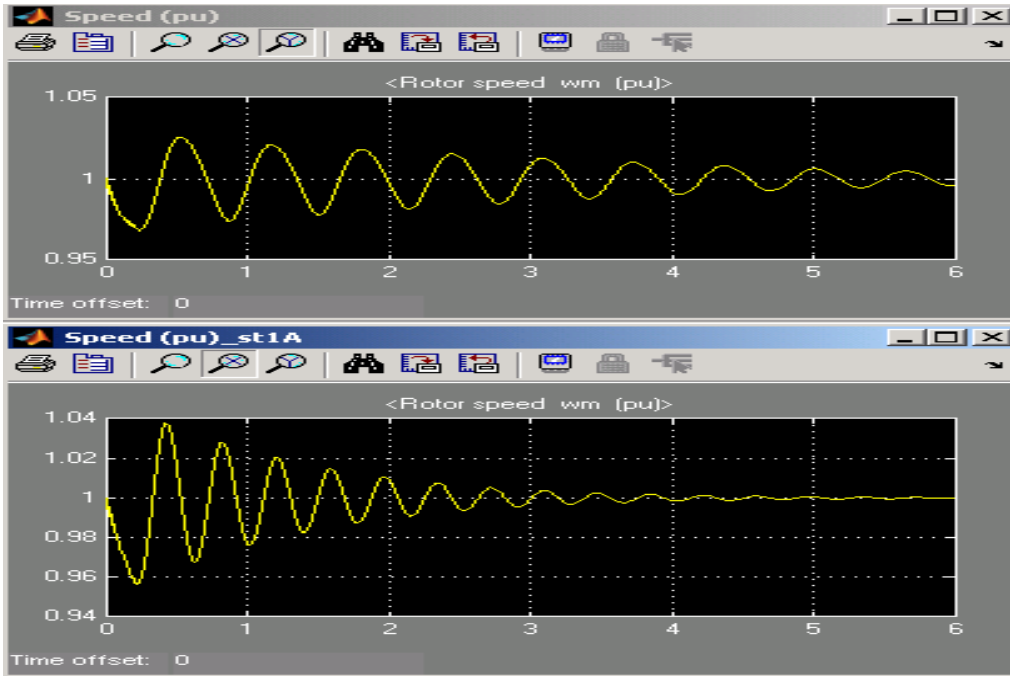
Şekil 4.18: Faz-toprak kısa devre durumunda  $V_f$

Şekil 4.18’de birinci dalga şekli Statik Uyarımlı sisteme, ikinci dalga şekli ise Dinamik Uyarımlı sisteme aittir. Kısa devre sonucunda Dinamik Uyarımlı sistemde ciddi salınımlar söz konusudur, Statik Uyarımlı sistemde ise uyarım gerilimi kısa sürede(msn değerinde) kararlı bir hal alır.  $t=6sn$ ’de Dinamik Uyarımlı sistemin  $V_f$  gerilimindeki salınımlar kısa devre anından daha düşük genlikte de olsa hala devam etmektedir.



Şekil 4.19: Faz-toprak kısa devre durumunda  $i_f$

Şekil 4.19'da birinci dalga şekli Dinamik Uyarımlı sisteme, ikinci dalga şekli ise Statik Uyarımlı sisteme aittir. Kısa devre anında her iki sistemde de yüksek uyarım akımları söz konusudur.  $t=0.2$ sn sonraki uyarım akımı  $i_f$  'yi incelediğimizde Statik Uyarım'da  $t=4$ sn sonunda bozulmalar tamamen sönümlenmiştir, Dinamik Uyarım'da ise devam etmektedir.

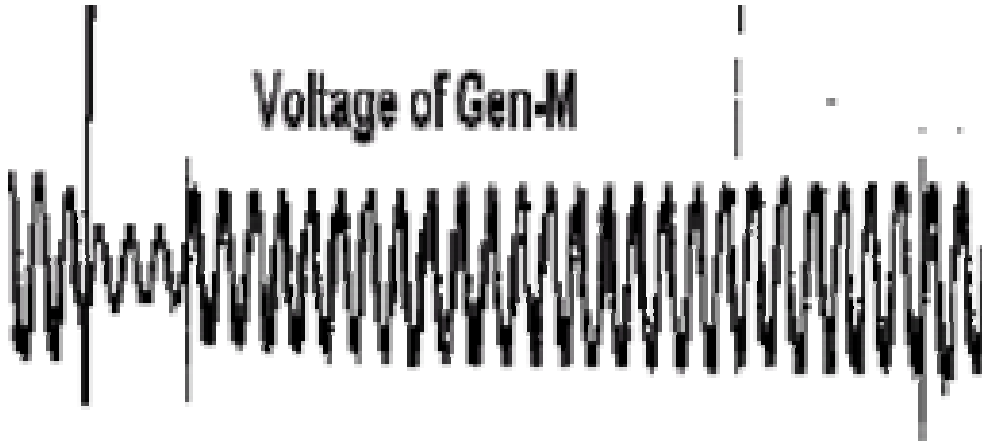
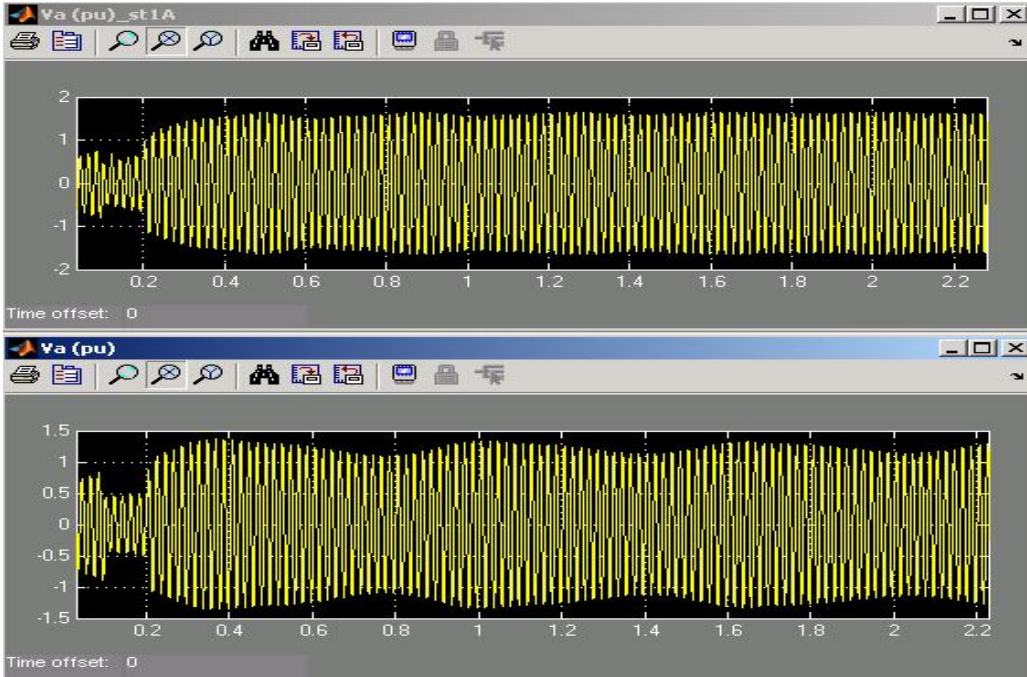


Şekil 4.20: Faz-toprak kısa devre durumunda generatör hızı

Şekil 4.20’de birinci dalga şekli Dinamik Uyarımlı sisteme, ikinci dalga şekli ise Statik Uyarımlı sisteme aittir. Statik Uyarımlı sistemde  $t=4\text{sn}$  ile  $t=5\text{sn}$  aralığında hız sabit 1 p.u. değerini almıştır, Dinamik Uyarımlı sistemde ise az da olsa salınım devam etmektedir.

### 4.3.2 Üç faz kısa devre durumu

Generatörün çıkışında bulunan transformatörün sekonderindeki iletim hattına  $t=0.1\text{sn}$  ile  $t=0.2\text{sn}$  arasında üç faz kısa devre uygulanmıştır. Simulasyon  $t=0\text{sn}$ ’den  $t=6\text{sn}$  kadar yapılarak generatörün tepkisi ölçülmüştür.

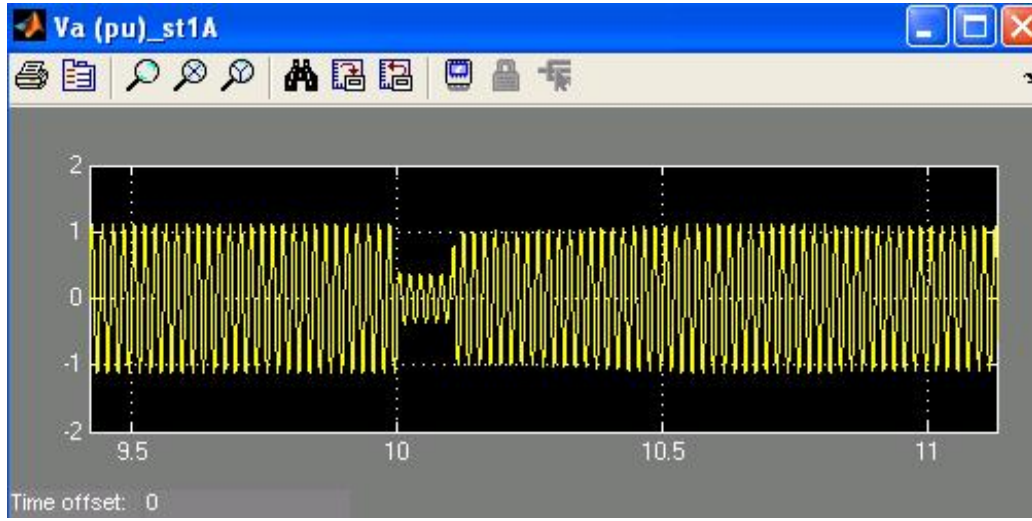


Şekil 4.21: Üç faz kısa devre durumunda  $V_a$

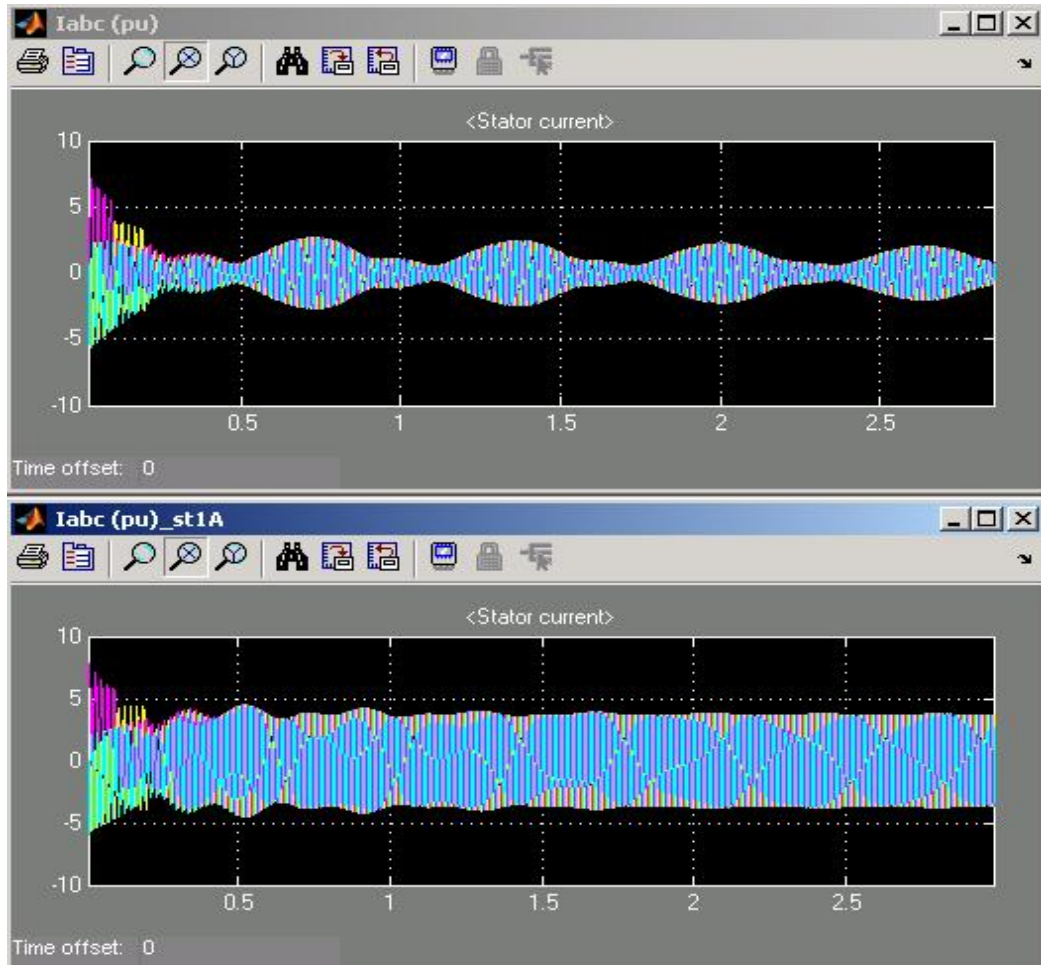
Şekil 4.21’de birinci dalga şekli Statik Uyartımlı sisteme, ikinci dalga şekli ise Dinamik Uyartımlı sisteme aittir. Üçüncü dalga şekli deneysel sonuçlardan alınmıştır[33]. Şekilde de görüldüğü gibi gerek Statik Uyartım’lı sistemde, gerek ise Dinamik Uyartım’lı sistemde  $V_a$  generatör çıkış geriliminde ciddi bozulmalar meydana gelmiştir. Özellikle kısa devre anında  $t=0.1$ sn. ile  $t=0.2$ sn. arasında  $V_a$ ’da önemli miktarda azalma gözlenmiştir.  $t=0.2$ sn sonra  $V_a$  kararlı bir hal almaya başlamıştır. Fakat Statik Uyartım’lı sistem çok daha kısa sürede sistem kararlı hale gelmiştir.

Statik Uyarım için elde ettiğimiz simülasyon sonucu ile deneysel sonuçlardan 0.1sn'de oluşan Üç Faz Kısa Devre durumundaki  $V_a$ 'yi kıyasladığımızda, her iki şekilde de gerilim azalmıştır. Kısa devre sona erdikten sonra her iki sistem de kararlı hale gelmiştir.

Eğer Üç Faz Kısa Devre deneyi  $t=10s$  ile  $t=10.1s$  arasında uygulanırsa simülasyon sonucu aşağıdaki gibi olur.



Şekil 4.22:  $t=10$  s'de meydana gelen üç faz kısa devre durumunda  $V_a$



### Current of Gen-M



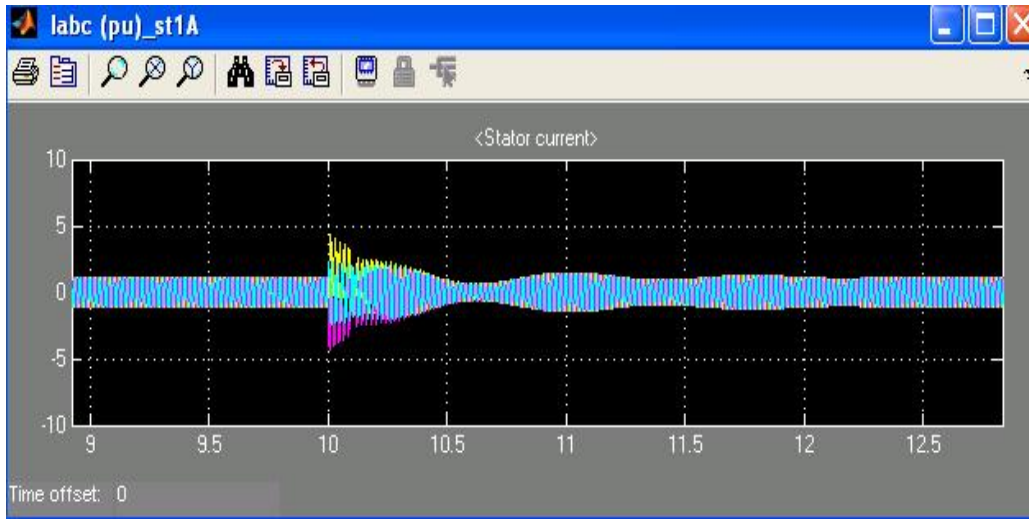
Şekil 4.23: Üç faz kısa devre durumunda  $i_{abc}$

Şekil 4.23'de birinci dalga şekli Dinamik Uyarımlı sisteme, ikinci dalga şekli ise Statik Uyarımlı sisteme aittir. Üçüncü dalga şekli deneysel sonuçlardan alınmıştır[33]. Kısa devre anında( $t=0.1sn$ 'de) her iki sistemde yüksek akımlar söz konusudur.  $t=1.6sn$ 'de Statik Uyarımlı sistemdeki  $i_{abc}$  kararlı bir hal alırken, Dinamik Uyarım'lı sistemdeki stator akımında hala ciddi salınımlar meydana gelmektedir.



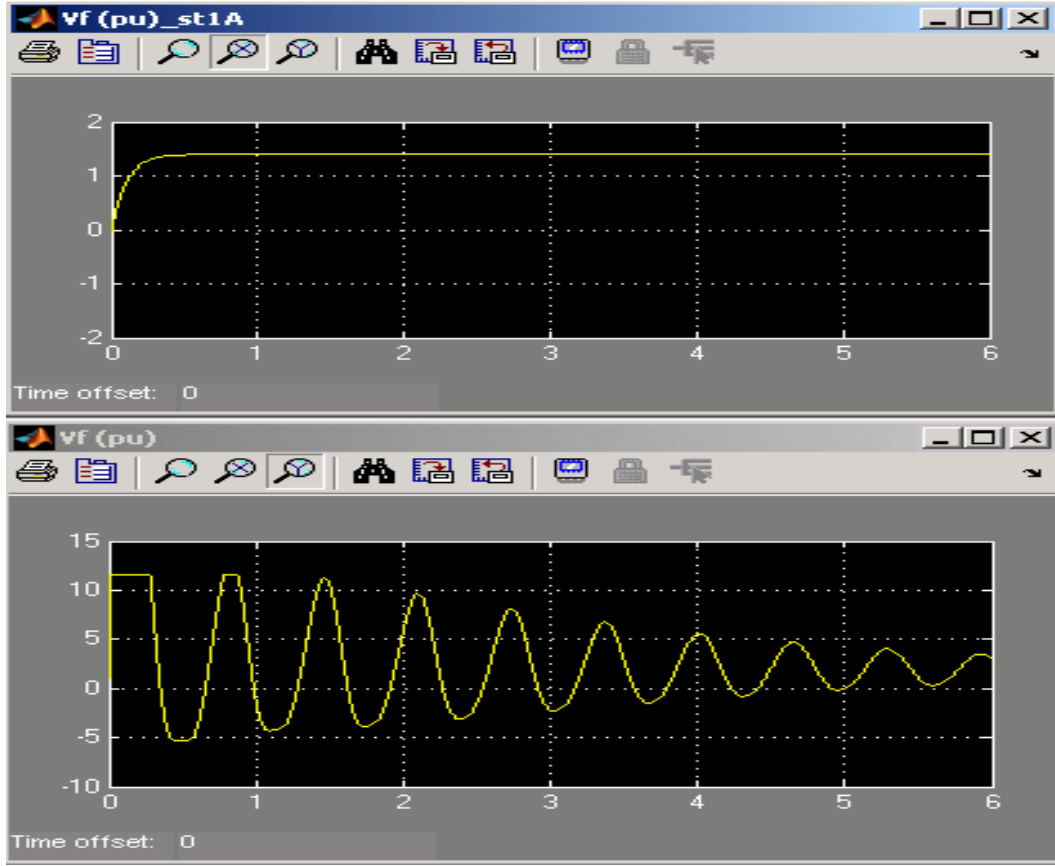
Statik Uyarım için elde ettiğimiz yukarıdaki simülasyon sonucu ile deneysel sonuçlardan 0.1sn'de oluşan Üç Faz Kısa Devre durumundaki  $i_{abc}$  stator akımını kıyasladığımızda, her iki şekilde de akım artmıştır. Deneysel sonuçta salınım daha büyük genliktedir.

Eğer Üç Faz Kısa Devre deneyi  $t=10s$  ile  $t=10.1s$  arasında uygulanırsa simülasyon sonucu aşağıdaki gibi olur.



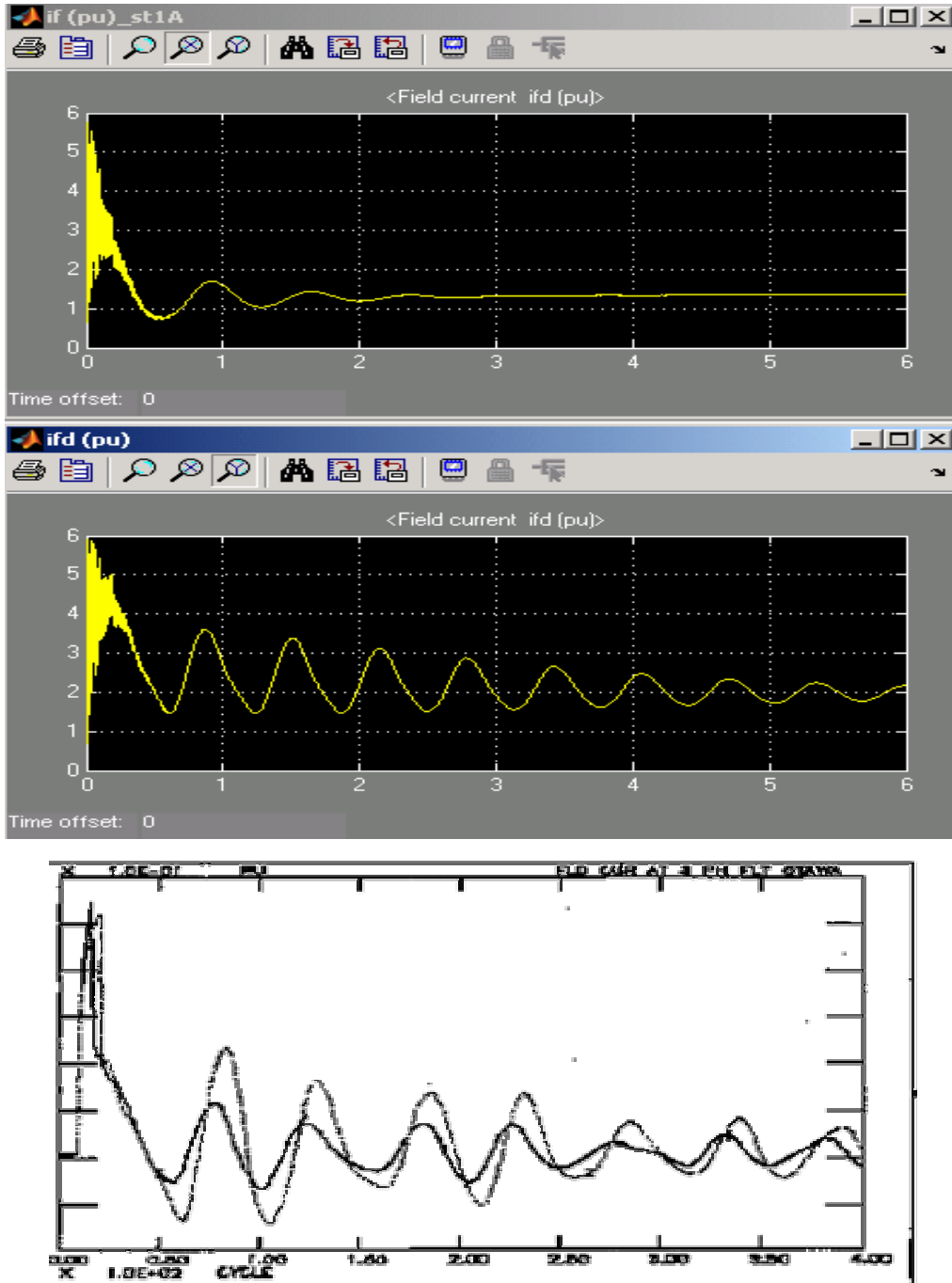
Şekil 4.24:  $t=10$  s'de meydana gelen üç faz kısa devre durumunda  $i_{abc}$





Şekil 4.25: Üç faz kısa devre durumunda  $V_f$

Şekil 4.25’de birinci dalga şekli Statik Uyarımlı sisteme, ikinci dalga şekli ise Dinamik Uyarımlı sisteme aittir. Kısa devre sonucunda Dinamik Uyarımlı sistemde ciddi salınımlar söz konusudur, Statik Uyarımlı sistemde ise uyarım gerilimi kısa sürede(msn değerinde) kararlı bir hal alır.  $t=6sn$ ’de Dinamik Uyarımlı sistemin  $V_f$  gerilimindeki salınımlar kısa devre anından daha düşük genlikte de olsa hala devam etmektedir.



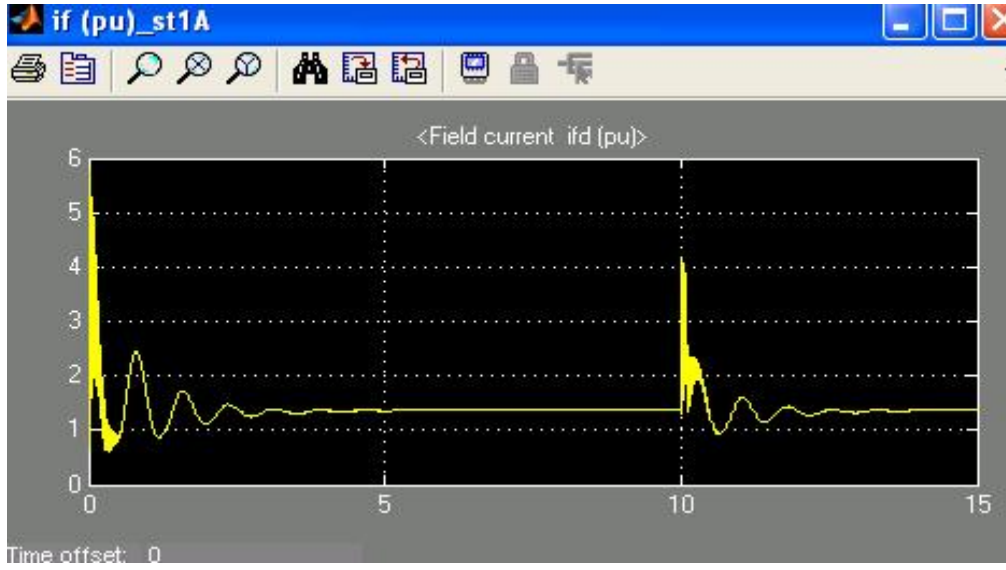
Şekil 4.26: Üç faz kısa devre durumunda  $i_f$

Şekil 4.26’da birinci dalga şekli Statik Uyarımlı sisteme, ikinci dalga şekli ise Dinamik Uyarımlı sisteme aittir. Üçüncü dalga şekli deneysel sonuçlardan alınmıştır[32]. Kısa devre anında her iki sistemde de yüksek uyarım akımları söz konusudur.  $t=0.2\text{sn}$  sonraki uyarım akımı  $i_f$  ’yi incelediğimizde Statik Uyarım’da  $t=4\text{sn}$  sonunda bozulmalar tamamen sönümlenmiştir, Dinamik Uyarım’da ise devam etmektedir.

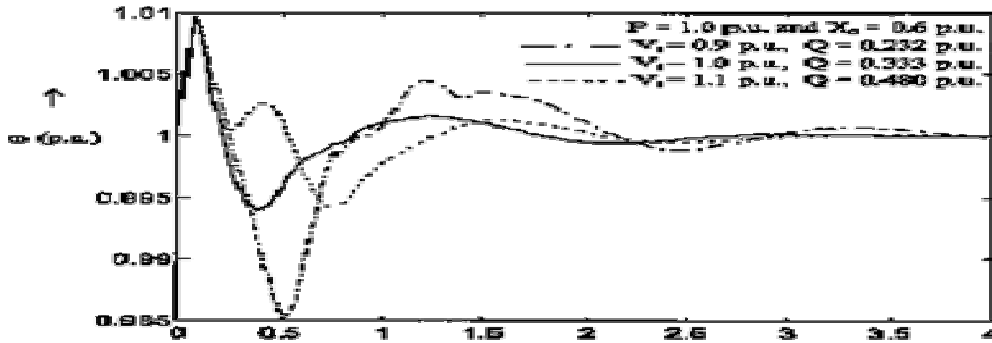
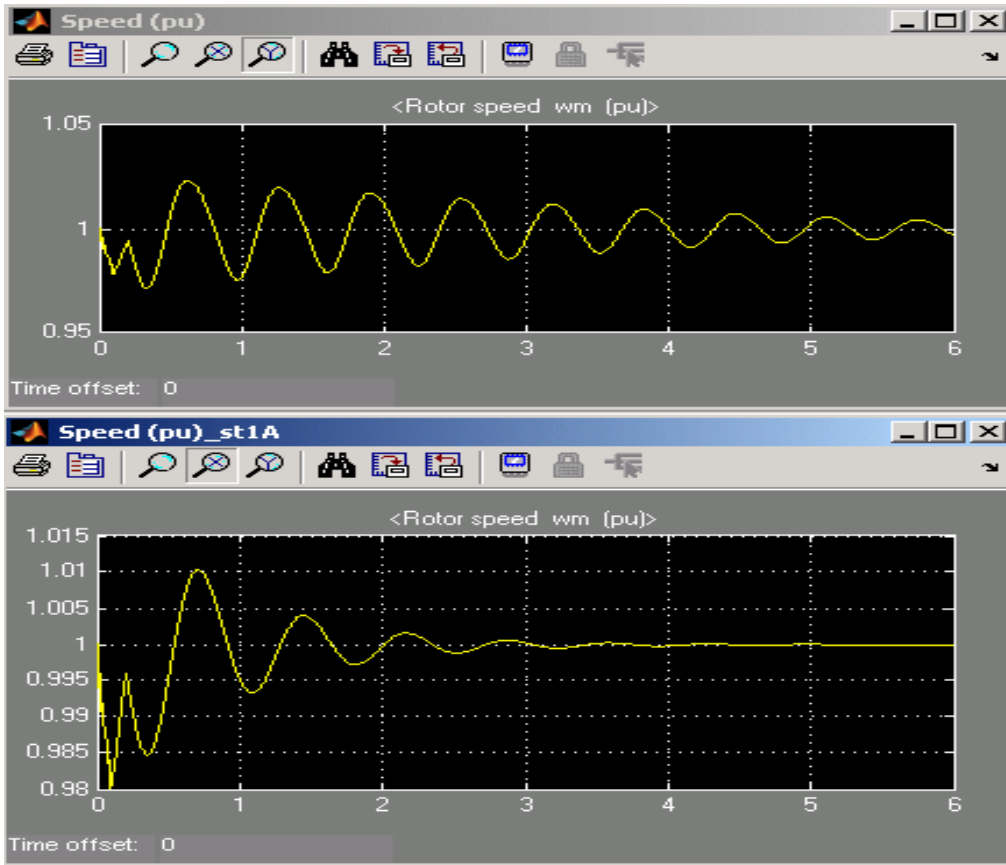
Statik Uyarım için elde ettiğimiz simulasyon sonucu ile deneysel sonuçlardan  $0.1\text{sn}$ ’de oluşan Üç Faz Kısa Devre durumundaki  $i_f$  ’yi kıyasladığımızda, her iki durumda da benzer

şekilde salınımlar söz konusudur. Yapılan simülasyonda sistemin kararlı hale gelmesi daha kısa sürmüştür( $t=4\text{sn}$ 'de), deneysel sonuçta ise  $t=4\text{sn}$  sonunda hala düşük genlikte salınımlar meydana gelmektedir.

Eğer Üç Faz Kısa Devre deneyi  $t=10\text{s}$  ile  $t=10.1\text{s}$  arasında uygulanırsa simülasyon sonucu aşağıdaki gibi olur.



Şekil 4.27:  $t=10\text{ s}$ 'de meydana gelen üç faz kısa devre durumunda  $i_f$



Şekil 4.28: Üç faz kısa devre durumunda generatör hızı

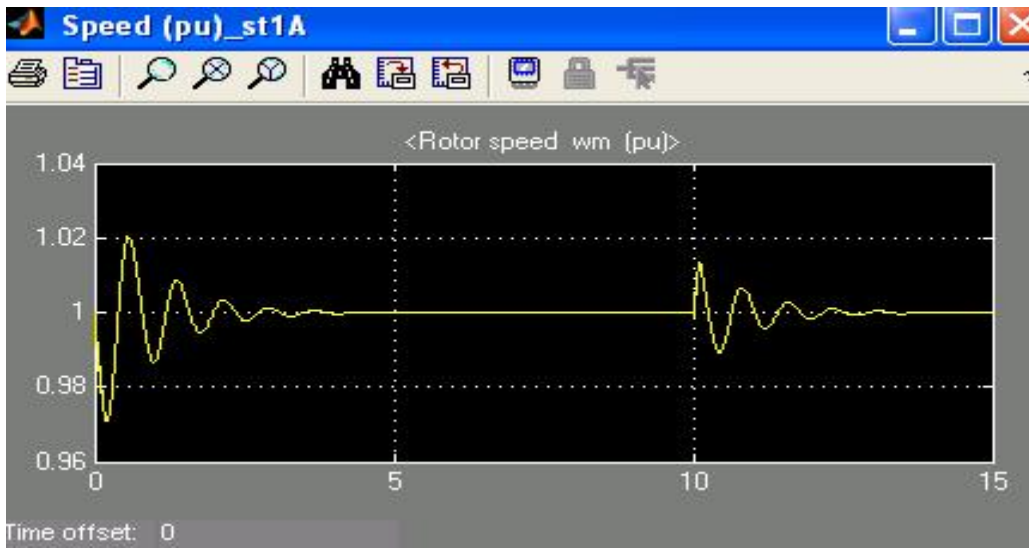
Şekil 4.28’de birinci dalga şekli Dinamik Uyarımlı sisteme, ikinci dalga şekli ise Statik Uyarımlı sisteme aittir. Üçüncü dalga şekli deneysel sonuçlardan alınmıştır[31]. Statik Uyarım’lı sistemde t=3sn ile t=4sn aralığında hız sabit 1 p.u. değerini almıştır, Dinamik Uyarım’lı sistemde ise az da olsa salınım devam etmektedir.

Statik Uyarım için elde ettiğimiz simulasyon sonucu ile deneysel sonuçlardan 0.1sn’de oluşan Üç Faz Kısa Devre durumundaki generatör hızını kıyasladığımızda, her iki durumda da kısa devre anında oluşan salınımlar söz konusudur. Simulasyonda genlik olarak 0.980 p.u ile

1.01 p.u arasında değişim söz konusu iken, deneysel sonuçta bu değerler 0.995 p.u ile 1.01 p.u arasındadır. Bu durumda iki sonuç arasında yaklaşık %1'lik bir fark söz konusudur.

Yapılan simulyasyonda ve deneysel sonuçta da sistem yaklaşık olarak aynı sürede (t=3sn ile t=4sn aralığında) kararlı hale gelmiştir.

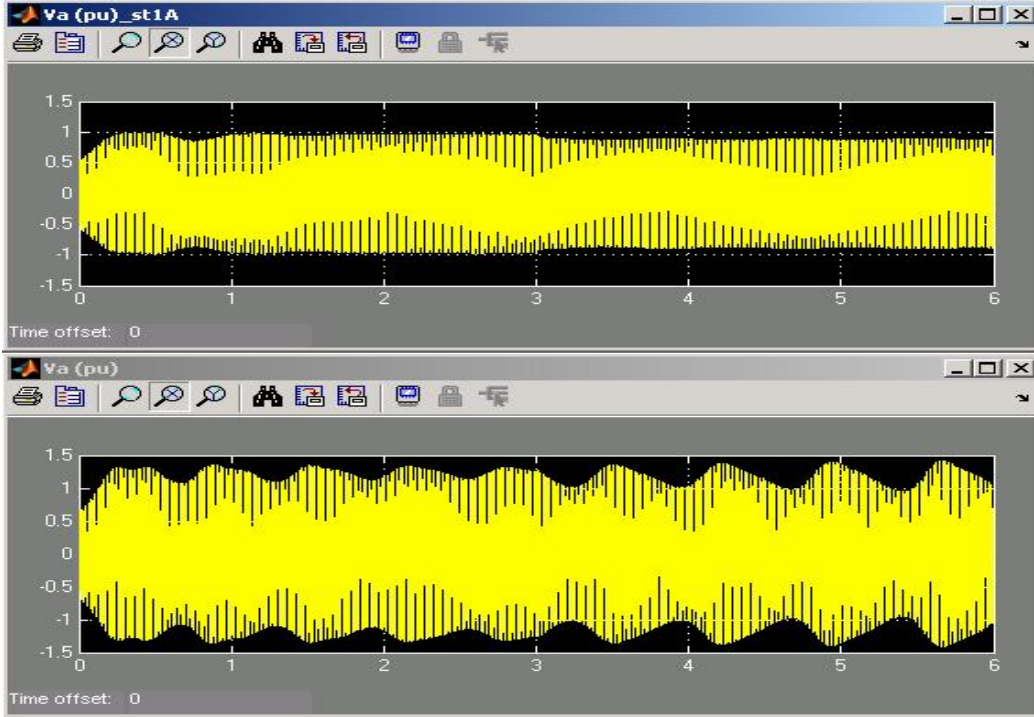
Eğer Üç Faz Kısa Devre deneyi t=10s ile t=10.1s arasında uygulanırsa simulyasyon sonucu aşığıdaki gibi olur.



Şekil 4.29: t=10 s'de meydana gelen üç faz kısa devre durumunda generatör hızı

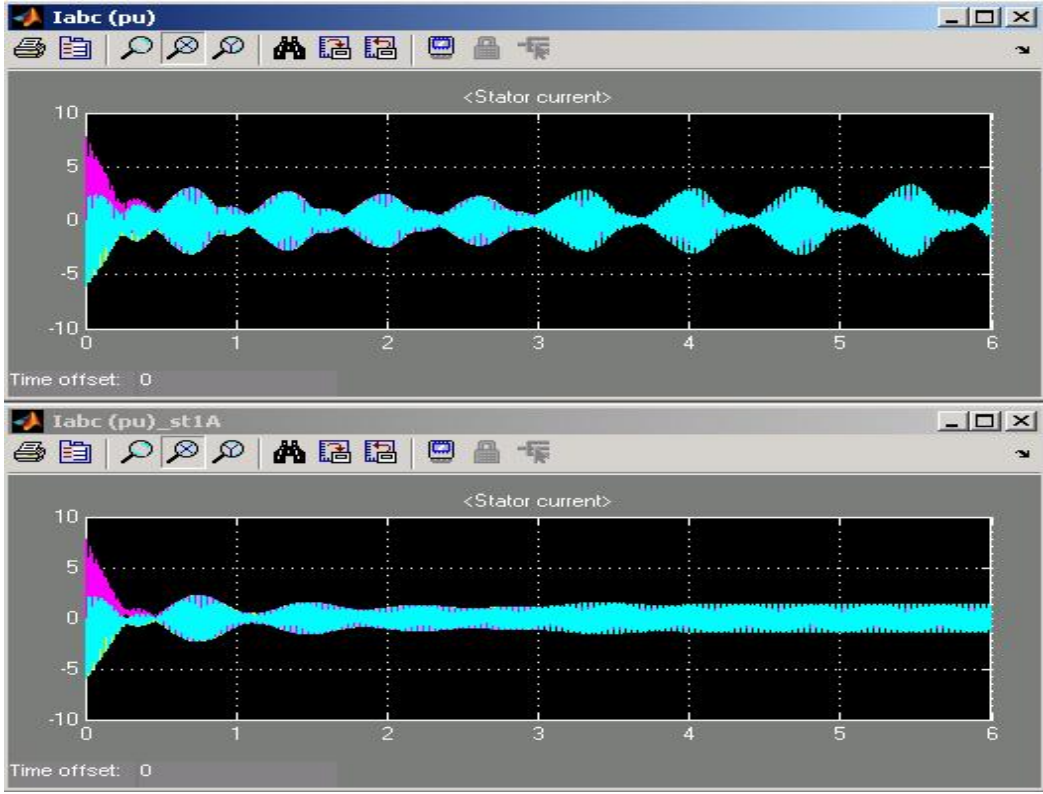
### 4.3.3 Hat kopması durumu

Yükte çalışırken  $t=3$  sn'de iletim hatlarından birinin aniden kopması durumunda generatörün tepkisi ölçülmüştür.



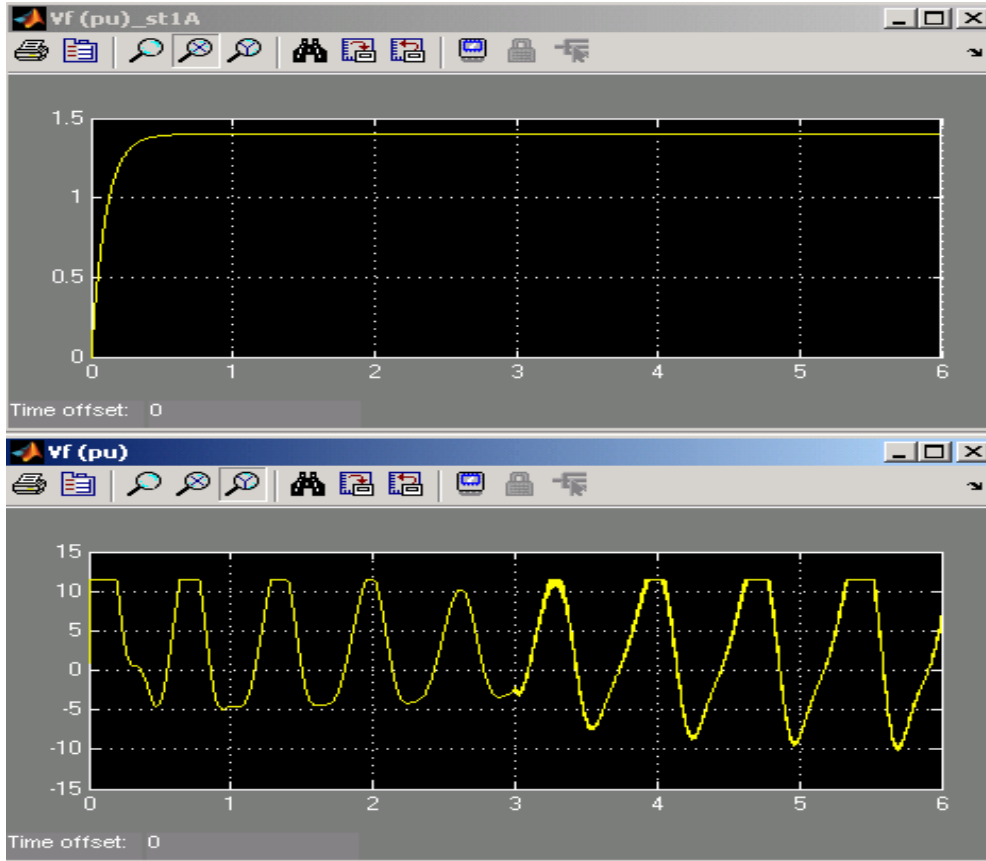
Şekil 4.30: Hat kopması durumunda  $V_a$

Diğer bir bozucu etki Hat Kopması durumudur. Şekil 4.30'da birinci dalga şekli Statik Uyarımlı sisteme, ikinci dalga şekli ise Dinamik Uyarımlı sisteme aittir. Yapılan simulasyonda  $t=3$ sn'de iletim hatlarından birinin kopması sonucu generatör iki faza kalmıştır. Bu durumda, Statik Uyarımlı sistemin  $V_a$  generatör çıkış geriliminde bir miktar azalma olmuştur ve bu azalmadan sonra çok kısa sürede kararlı bir hal alırken, Dinamik Uyarım'lı sistemde gerilim dalgalanmaları devam etmektedir.



Şekil 4.31: Hat kopması durumunda  $i_{abc}$

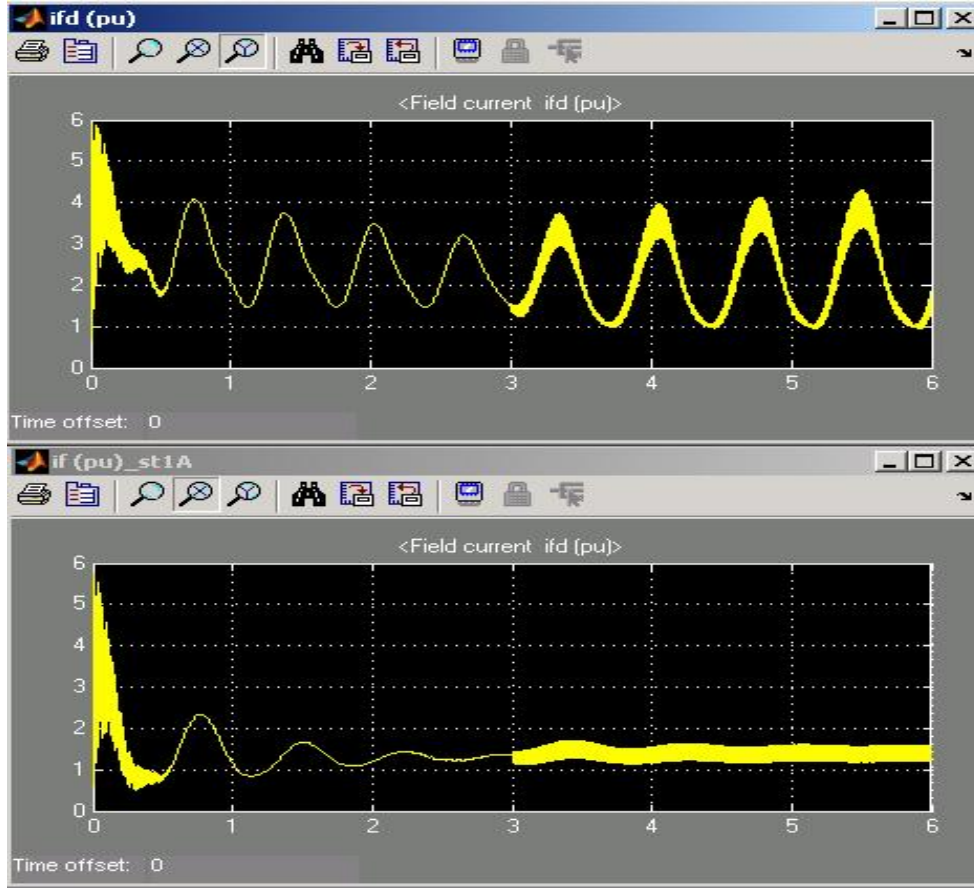
Şekil 4.31’de birinci dalga şekli Dinamik Uyarımlı sisteme, ikinci dalga şekli ise Statik Uyarımlı sisteme aittir.  $i_{abc}$ ’yi gözlemlediğimizde Statik Uyarımlı sistemde  $t=3$ sn sonunda stator akımının değeri bir miktar artış olmuş ve sistem kısa sürede kararlı hale geçmiştir. Dinamik Uyarım’lı sistemin stator akımındaki ise salınımlar  $t=3$ sn sonra büyüyerek devam etmektedir.



Şekil 4.32: Hat kopması durumunda  $V_f$

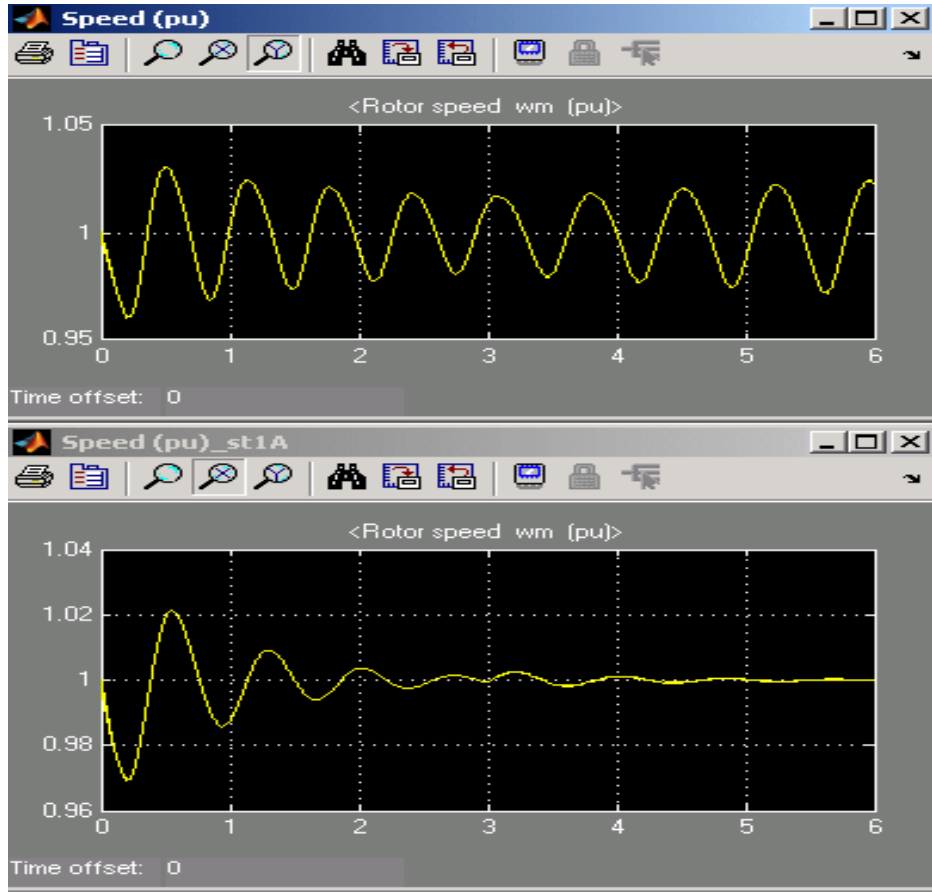
Şekil 4.32’de birinci dalga şekli Statik Uyarımlı sisteme, ikinci dalga şekli ise Dinamik Uyarımlı sisteme aittir. Dinamik Uyarımlı sistemde  $t=3sn$ ’deki Hat Kopması  $V_f$  geriliminde ciddi salınımlar meydana getirir ve bu salınımların genliği giderek artar, Statik Uyarımlı sistemde ise  $V_f$  gerilimindeki kararlı hal devam etmektedir.





Şekil 4.33: Hat kopması durumunda  $i_f$

Şekil 4.33’de birinci dalga şekli Dinamik Uyarımlı sisteme, ikinci dalga şekli ise Statik Uyarımlı sisteme aittir. Sistemin iki faza kalması her iki(Statik ve Dinamik) uyarım akımında da salınımlar meydana getirir. Dinamik Uyarımlı sistemde  $i_f$  ’de meydana gelen salınımlar büyüyerek devam eder, Statik Uyarımlı sistemde ise düşük genlikte ve sabit değerdedir.

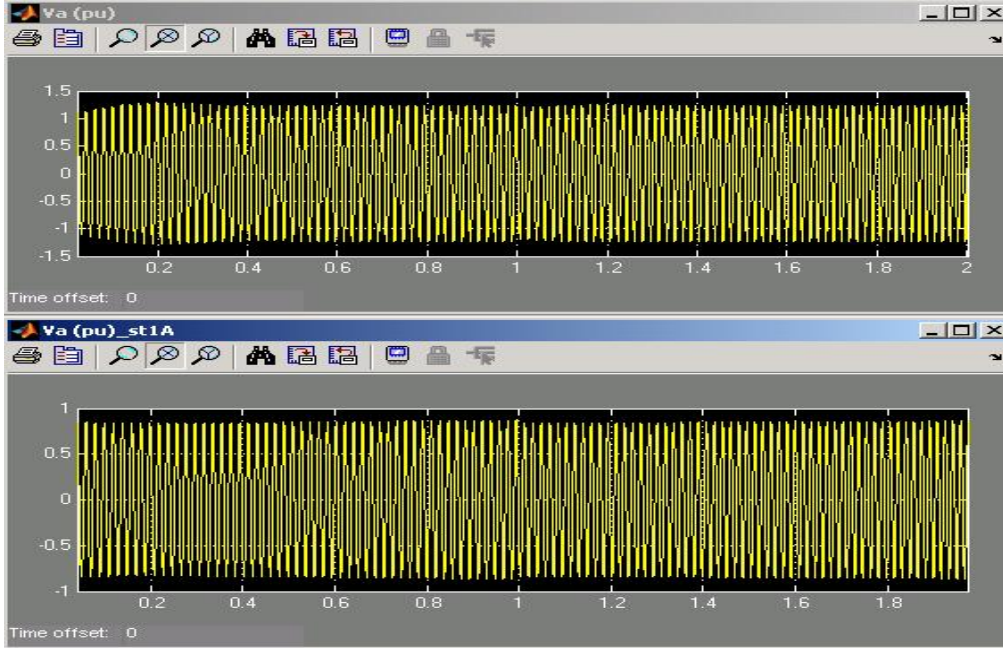


Şekil 4.34: Hat kopması durumunda generatör hızı

Şekil 4.34'te birinci dalga şekli Dinamik Uyarımlı sisteme, ikinci dalga şekli ise Statik Uyarımlı sisteme aittir. Dinamik Uyarımlı sistemdeki generatör hızında ciddi salınımlar gözlenmektedir. Bu salınımlar sistemin iki faza kalmasından sonra artarak devam etmektedir. Buna karşılık Statik Uyarımlı sistem generatör hızındaki bozucu etkiyi 3-4sn içinde giderir ve sistem kararlı hal alır.

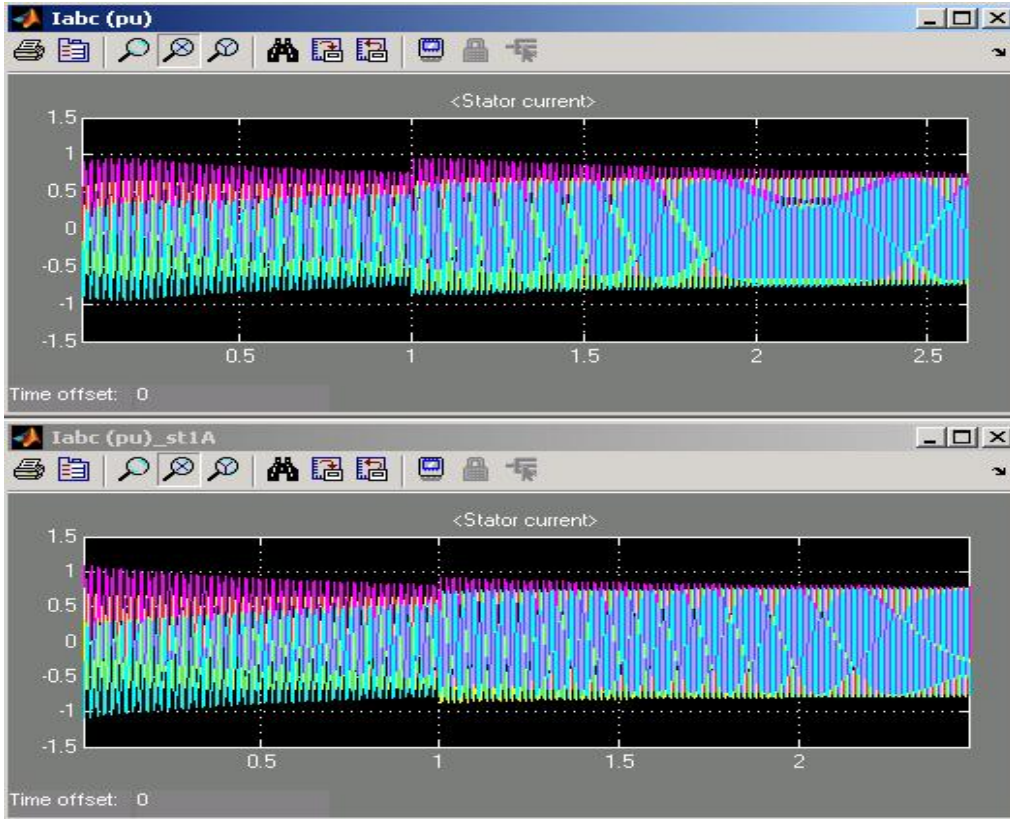
#### 4.3.4 Yük değişimi durumu

Generatör ıkışında 120MVA'lık bir yük var iken  $t=1\text{sn}$ 'de üç faz kesici yardımıyla 30MVA'lık bir R-L(omik-endüktif) yük devreye alınmıştır. Bu durumdaki generatörün tepkisi llmştir.



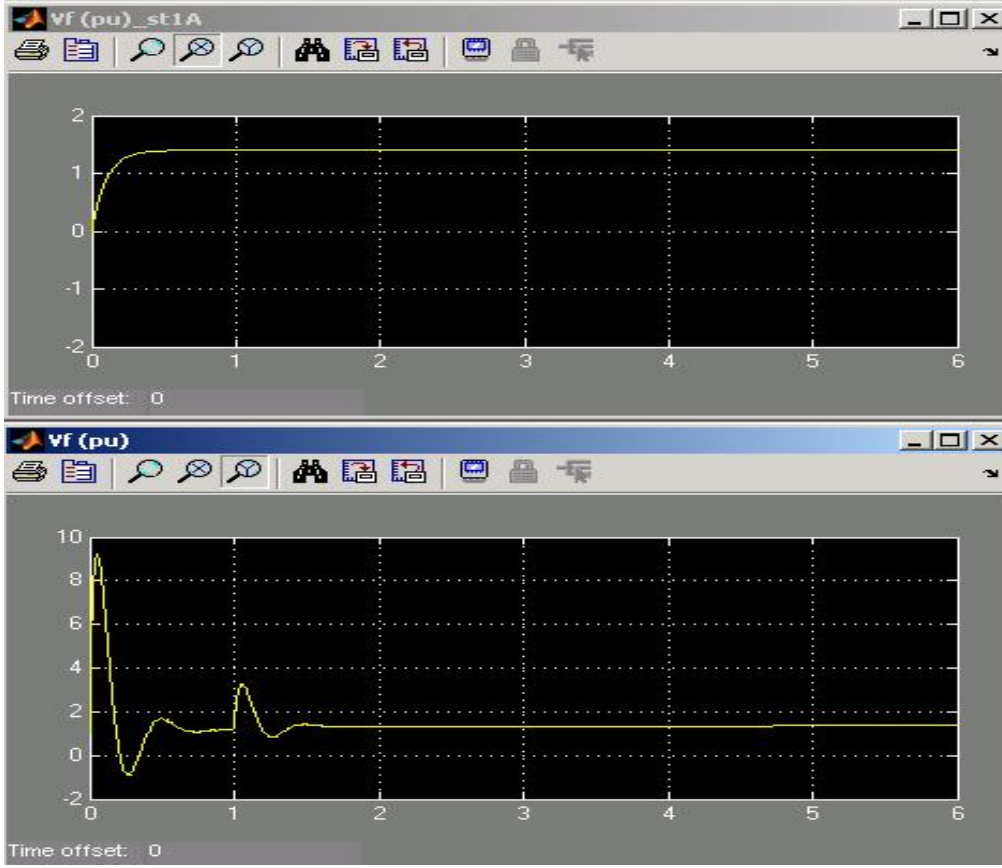
şekil 4.35: Yük değişimi durumunda  $V_a$

şekil 4.35'de birinci dalga şekli Dinamik Uyarımlı sisteme, ikinci dalga şekli ise Statik Uyarımlı sisteme aittir. Yükte alışan generatörde  $t=1\text{sn}$  sonunda %10'luk(30MVA) R-L yükün alınması durumunda her iki sistemde(Statik ve Dinamik)  $V_a$ 'da küçük bir azalma meydana gelir. Fakat bu gerilim düşümü çok küçüktür ve sistem kısa süre içinde kararlı halini alır.



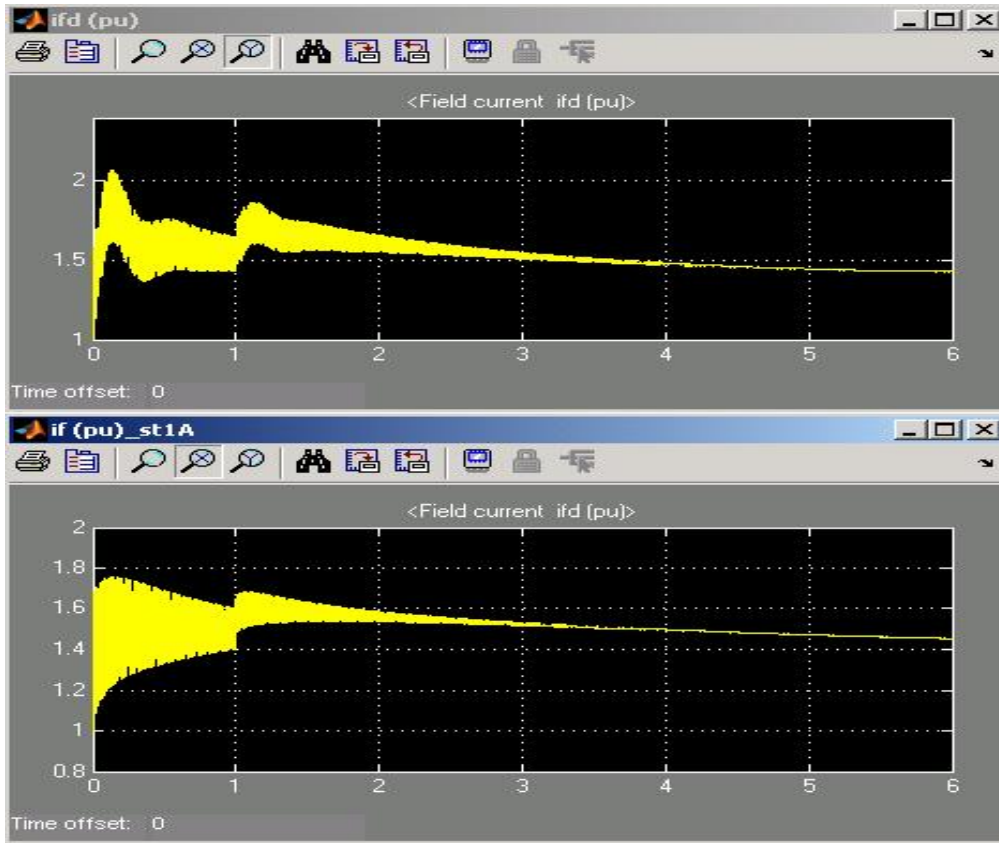
Şekil 4.36: Yük değişimi durumunda  $i_{abc}$

Şekil 4.36’da birinci dalga şekli Dinamik Uyartımlı sisteme, ikinci dalga şekli ise Statik Uyartımlı sisteme aittir. Yükte çalışan generatörde  $t=1$ sn sonunda %10’luk(30MVA) R-L yükün alınması durumunda her iki sistemde(Statik ve Dinamik) stator akımı bir miktar artış gösterir. Statik Uyartımlı sistemde  $t=2$ sn’de  $i_{abc}$  akım değeri kararlı hal almışken, Dinamik Uyartımlı sistemde hala düşük genlikte salınımlar söz konusudur.



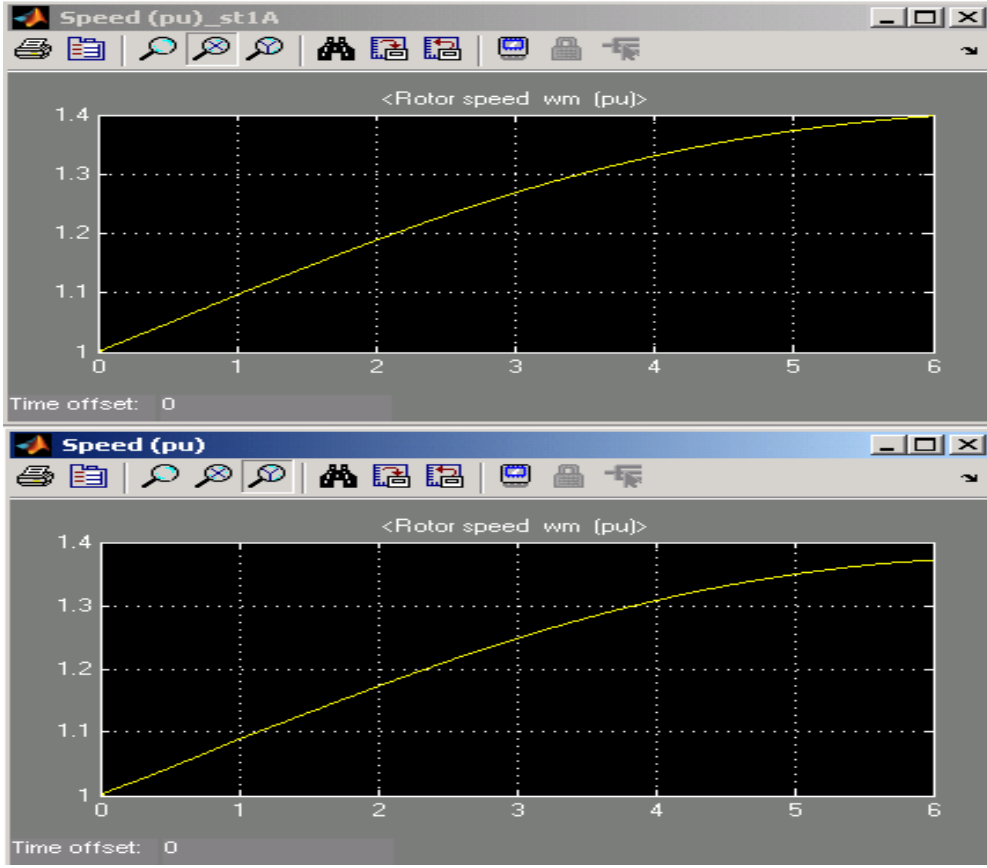
Şekil 4.37: Yük değişimi durumunda  $V_f$

Şekil 4.37’de birinci dalga şekli Statik Uyarımlı sisteme, ikinci dalga şekli ise Dinamik Uyarımlı sisteme aittir. Yükte çalışan generatörde  $t=1$ sn sonunda %10’luk(30MVA) R-L yükün alınması durumunda Dinamik Uyarımlı sistemin uyarım geriliminde düşük genlikte bir salınıma yol açar. Statik Uyarımlı sistemde ise yük alımı anında uyarım geriliminde herhangi bir salınım gözlenmemektedir.



Şekil 4.38: Yük değişimi durumunda  $i_f$

Şekil 4.38’de birinci dalga şekli Dinamik Uyarımlı sisteme, ikinci dalga şekli ise Statik Uyarımlı sisteme aittir. Yükte çalışan generatörde  $t=1$ sn sonunda %10’luk(30MVA) R-L yükün alınması durumunda her iki sistemin(Statik ve Dinamik) uyarım akımında salınımına yol açar. Dinamik Uyarımlı sistemdeki salınımların genliği daha büyüktür(1 p.u ile 2.1 p.u arasında). Statik Uyarımlı sistemde salınımların sönümlenmesi daha kısa sürer ve sistem daha kısa sürede kararlı halini alır.



Şekil 4.39: Yük değişimi durumunda generatör hızı

Şekil 4.39’da birinci dalga şekli Statik Uyartımlı sisteme, ikinci dalga şekli ise Dinamik Uyartımlı sisteme aittir. Yükte çalışan generatörde  $t=1$ sn sonunda %10’luk(30MVA) R-L yükün alınması durumunda her iki sistemin(Statik ve Dinamik) generatör hızında artış gözlenir. Statik Uyartımlı sistemde generatör daha kısa sürede istenilen hıza ulaşır. Örneğin  $t=6$ sn sonunda Statik Uyartımlı sistemdeki generatör hızı 1.4 p.u değerine ulaşmışken, Dinamik Uyartımlı sistemdeki hız hala artmaktadır.



## BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, senkron generatör uyarım sistemlerinden Statik Uyarım sistemi incelenmiştir. ST1A Statik Uyarım sistemi Matlab-Simulink'te dizayn edilmiş, değişik yük durumlarında simulasyon yapılarak senkron generatörün tepkisi ölçülmüştür. Aynı zamanda Statik Uyarım ile Matlab'ta hazır bulunan Dinamik Uyarım sisteminin performansları karşılaştırılmıştır.

İlk olarak, pratikte sıkça raslanan bozucu etkilerden Faz-Toprak Kısa Devre durumu için simulasyon yapılmıştır. Bu durumda gerek Statik Uyarım'lı sistemde, gerek ise Dinamik Uyarım'lı sistemde  $V_a$  generatör çıkış geriliminde ciddi bozulmalar meydana gelmiştir(Şekil 4.16). Özellikle  $t=0.1sn$  ile  $t=0.2sn$  arasındaki kısa devre süresi içinde  $V_a$ 'da önemli miktarda azalma gözlenmiştir.  $t=0.2sn$  sonra  $V_a$  kararlı bir hal almaya başlamıştır. Fakat Statik Uyarım'lı sistem çok daha kısa sürede sistem kararlı hale gelmiştir. Endüvi akımı  $i_{abc}$ 'yi incelediğimizde yine önemli bozulmaların olduğu gözlenmiştir(Şekil 4.17).  $t=1.6sn$ 'de Statik Uyarımlı sistemdeki  $i_{abc}$  kararlı bir hal alırken, Dinamik Uyarım'lı sistemdeki endüvi akımında hala ciddi salınımlar meydana gelmektedir. Uyarım gerilimi  $V_f$ , Statik Uyarımlı sistemde çok kısa sürede(msn değerinde) kararlı hale gelirken, Dinamik Uyarımlı sistemde salınımlar söz konusudur(Şekil 4.18). Uyarım akımı  $i_f$ 'yi incelediğimizde Statik Uyarım'da  $t=4sn$  sonunda bozulmalar tamamen sönümlenmiştir, Dinamik Uyarım'da ise devam etmektedir(Şekil 4.19). Başlangıçta generatör hızında da ciddi salınımlar gözlenmektedir. Statik Uyarım'lı sistemde  $t=4sn$  ile  $t=5sn$  aralığında hız sabit 1 p.u. değerini almıştır, Dinamik Uyarım'lı sistemde ise az da olsa salınım devam etmektedir(Şekil 4.20).

İkinci bozucu etki Üç Faz Kısa Devre durumudur. Bu simulasyonda Faz-Toprak Kısa Devre durumuna benzer sonuçlar elde edilmiştir. Statik Uyarımlı sistem çok daha kısa sürede kararlı hal alırken, Dinamik Uyarımlı sistemin tepki süresinin daha uzun olduğu gözlenmiştir.

Hat Kopması durumunda ise  $t=3sn$ 'de iletim hatlarından birinin kopması sonucu generatör iki faza kalmıştır. Bu durumda Statik Uyarımlı sistemde  $V_a$  generatör çıkış geriliminde bir miktar azalma olmuştur, fakat sistem kısa sürede kararlı hale gelmiştir(Şekil 4.30). Dinamik Uyarım'lı sistemde ise gerilim dalgalanmaları devam etmektedir.  $i_{abc}$ 'yi gözlemlediğimizde



$t=3\text{sn}$  sonunda stator akımının değeri bir miktar artmış ve kararlı hale gelmiştir. Dinamik Uyarım'lı sisteme ise salınımlar büyüyerek devam eder(Şekil 4.31).  $t=3\text{sn}$ 'deki Hat Kopması anında Dinamik Uyarımlı sistemin  $V_f$  geriliminde salınım meydana gelirken, Statik Uyarım'lı sistemin kararlı hali devam etmektedir(Şekil 4.32).  $i_f$  'ye baktığımızda her iki sistemde(Statik ve Dinamik) salınımlar söz konusudur, fakat Dinamik Uyarım'lı sistemdeki salınımın genliği daha büyüktür(Şekil 4.33). Hat kopması generatör hızında da salınıma yol açar. Statik Uyarım, bozucu etkiyi 3-4sn içinde giderirken Dinamik Uyarım'lı sistemdeki dalgalanma devam etmektedir(Şekil 4.34).

Yükte çalışan generatörde  $t=1\text{sn}$ 'de % 10'luk bir ek R-L(omik-endüktif) yük devreye alınırken  $V_a$ 'da geçici bir azalma gözlenmektedir(Şekil 4.35).  $i_{abc}$ 'de bir miktar artış meydana gelir ve her iki sistem kararlı bir hal alır(Şekil 4.36). Statik Uyarımlı sistemde bozucu etki  $V_f$ 'yi etkilemezken, Dinamik Uyarımlı sistemde düşük genlikte bir salınıma yol açar(Şekil 4.37).  $t=1\text{sn}$ 'deki yük değişimi durumunda  $i_f$  'de salınım meydana gelir. Statik Uyarımlı sistemde salınımların sönümlenmesi daha kısa sürer ve sistem daha kısa sürede kararlı halini alır(Şekil 4.38). Generatör, Statik Uyarımlı sistemde daha kısa sürede istenilen hıza ulaşır(Örneğin Şekil 4.39'da  $t=6\text{sn}$  sonunda 1.4 p.u değerine ulaşır), Dinamik Uyarımlı sistemde ise hız  $t=6\text{sn}$  sonunda hala artış eğiliminde ve 1.4 p.u'ın altındadır.

Yapılan simülasyonlarda Statik Uyarım, sahip olduğu hızlı cevap verme süresi sayesinde daha yüksek performans göstermiştir. Böylece sistemin kararlı hale gelmesi çok daha kısa sürede olmuştur. Özellikle Kısa Devre ve Hat Kopması gibi bozucu etkisi büyük olan durumlarda iki sistem arasındaki performans farkı daha belirgin ortaya çıkmıştır.

ST1A Statik Uyarım'lı sisteminden daha iyi performans alabilmek için Güç Sistem Dengeleyicisi(PSS) ile beraber kullanılması tavsiye edilmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Boduroğlu, T., ‘‘Elektrik Makinaları Dersleri’’, Üçüncü Baskı, *Beta Basım Yayın Dağıtım A.Ş.*, 4-41, (1988).
- [2] Ong Chee-Man, ‘‘Dynamic simulation of electric machinery’’, *Prentice Hall PTR*, N.Jersey, (1998).
- [3] Çolak, İ., ‘‘Senkron Makinalar’’, Birinci Baskı, *Seçkin Yayıncılık*, 18-119, (2003).
- [4] Sarıoğlu, M. K., ‘‘Elektrik Makinalarının Temelleri’’, Genişletilmiş İkinci Baskı, *İTÜ Matbaası*, 61-139, (1980).
- [5] Schaefer, R.C., ‘‘Applying static excitation systems’’, *IEEE Industry Applications Magazine*, (1998).
- [6] Margetta, R.D., ‘‘Static exciter system for large turbo-generators’’, *South of Scotland Electricity Board*, UK, (1986).
- [7] ABB Switzerland Ltd., ‘‘Excitation basic theory seminar’’, *ABB Turgi Switzerland*, (2005).
- [8] Energy Development and Power Generating Committee of the Power Engineering Society, ‘‘IEEE recommended practice for excitation system models for power system stability studies’’, *The Institute of Electrical and Electronics Engineering Inc.*, New York, USA, 1-19, (1992).
- [9] IEEE Report, ‘‘Specification and characteristics of synchronous generator exciters’’, *IEEE Technical Report* No:536121, (1995).
- [10] IEEE Standards, ‘‘IEEE recommended practice for excitation systems model for power system stability studies’’, *IEEE Standard 421.5*,(1992).
- [11] Shubhanga K.N., ‘‘Transient stability-constrained generation rescheduling and compensation placement using energy margin and trajectory sensitivities’’, Ph.D.Thesis, *Submitted to IIT Bombay*, (2003).
- [12] Law, B.E., ‘‘Simulation of the transient response of synchronous machines’’, Honours Thesis, *The University of Queensland*, (2001).
- [13] Rhew, H.W., Sul, S.K., ‘‘A new generator static excitation system using boost-buck chopper’’, *Seul National University*, Korea, (1996).

- [14] Kim, C.K., Rhew, H.W., Kim, Y.H., "Stability performance of new static excitation system with boost-buck converter", *Korea Electric Power Research Institute*, Korea, (1998).
- [15] Schaefer, R.C., "Application of static excitation systems for rotary exciter replacement", *Basler Electric Company*, (1997).
- [16] Shubhanga, K.N., "Manual for a multi-machine transient stability programme", *National Institute of Technology Karnataka*, Surathkal, India, 24-35, (2003).
- [17] Matlab, Version 7.1, Release 11, *The Math Works Inc.*
- [18] Simulink, Version 7.1, Release 11, *The Math Works Inc.*
- [19] IEEE Committee Report, "Dynamic models for steam and hydro turbines in power system studies", *IEEE Inc.*, Vol.PAS-92, p.p.1904-1915, (1973).
- [20] Kundur, P., "Power system stability and control", *Mc Graw-Hill Inc.*, New York, (1994).
- [21] Padiyar, K.R., "Power system dynamics, stability and control", *Interline Publishing Ltd.*, Bangalore, India, (1996).
- [22] Filho, E.R., Nunes, L.N., "Synchronous machine field current calculation taking into account the magnetic saturation", *Computer and Electrical Engineering School, Campinas University*, Brasil, (2002).
- [23] Mahmoud, M.S., Ismail, A., "Control of electric power systems", *UAE University, Unated Arab Emirates*, 1655-1662, (2000).
- [24] Andersson, G., "Dynamics and control of electric power systems", *Power System Laboratory*, Zurich, Switzerland, 75-81, (2003).
- [25] Mun, J.H.K., "Implementation of controls to a synchronous machine", *The University of Queensland*, 34-65, (2003).
- [26] Weber, H., Prilliwitz, F., "Simulation models of the hydro power plants in Macedonia and Jugoslavia", *2003 IEEE Bologna Power Tech*, (2003).
- [27] Kodsi, S.K.M., Canizares, C.A., "Modelling and simulation of IEEE 14 bus system with facts controllers", *Technical Report 2003-3*, (2003).
- [28] Preliminary Assessment Report, Independent Electricity Market Operator(IMO), "Connection assessment&approval process", *CAA ID 2001-047*, (2002).
- [29] Katancevic, A.R., "Transient and dynamic stability on wind farms", Master Thesis, *The University of Helsinki*, Finland, (2003).
- [30] Mitsubishi Electric, "Thyristor tipe static excitation systems for synchronous machines", *Mitsubishi Electric Corporation*, Japan, (1998).

[31] Hong-Woo, R., Seung-Ki, S., "A new generator static excitation system using boost-buck chopper", Electrical Engineering, *Seul National University*, Seoul, Korea, (1996).

[32] Sedaghati, A., "A systematic approach for designing a self-tuning power system stabilizer based on artificial neural network ", Faculty of Electrical Engineering and Robotics, *Shahrood University*, Korea, (2005).

[33] ETAP Transient Stability, "Validation cases and comparison results", *ETAP TS V&V*, Case Nr:TCS-TS-295, (2005).

## EK-A. MATLAB VE SIMULINK

### MATLAB Hakkında Genel Bilgi

MATLAB, teknik hesaplamalar ve matematiksel problemlerin çözümü ve analizi için tasarlanmış bir yazılım geliştirme aracıdır. "MATRIX LABORATORY" kelimesinin kısaltması olan MATLAB, adında da anlaşılacağı üzere matrisler (matrix) yani diğer bir deyişle diziler (array) ile çalışır. Özellikle mühendislik alanındaki sistemlerin analizinde kullanılan MATLAB, görüntü işleme (image processing), yapay sinir ağları (artificial neural networks), sayısal işaret işleme (signal processing), optimizasyon (optimization), veri elde etme (data acquisition), veritabanı (database), süzgeç tasarımı (filter design), bulanık mantık (fuzzy logic), sistem kimliklendirme (system identification), dalgacıklar (wavelets) gibi araçları ile sizlere mükemmel bir ortam sunar.

MATLAB'ın nasıl bir yazılım olduğunu anlamak için onu çok gelişmiş özellikleri olan, programlanabilen bir bilimsel hesap makinesine benzetebiliriz. MATLAB'da yazılan programlar, MATLAB'in kendine özgü dili kullanılarak yazılır ve MATLAB içinden çalıştırılır. Ayrıca yazdığınız programları DLL ve EXE olarak oluşturabildiğiniz gibi C/C++ kodlarına da çevirebilirsiniz.

MATLAB'ın şu an için Windows ve Linux ortamlarında çalışan versiyonları mevcuttur. Bugün için geliştirilen en son sürüm Version 7.1'dir.

MATLAB ile :

- Veri elde etme
- Veri analizi ve inceleme
- Görsellik ve görüntü işleme
- Algoritma prototipi oluşturma ve geliştirme
- Modelleme ve simülasyon

- Programlama ve uygulama geliştirme yapabiliriz.

Bugün 500.000 den fazla akademisyen, araştırmacı, bilim adamı ve öğrenci tarafından kullanılan MATLAB, içinde gömülü pek çok ara yüzü ile bilgisayar dünyasının en gelişmiş teknik ve bilimsel problem çözme ve uygulama geliştirme aracıdır.

## **Verileri Kaydetmek ve Tekrar Kullanmak**

MATLAB'da oluşturduğunuz matrisleri kaydetmek için save komutu kullanılır, save calisma yazıp <enter> tuşuna basarsanız, o an için çalışma ortamında tanımlı tüm matrisler MATLAB'in kendine özel bir formatında, diske calisma.mat olarak kaydedilir. Daha sonra bu dosyayı tekrar çağırmak için load calisma yazmak yeterli olacaktır. Sadece bir matrisi kaydetmek için save dosya\_ismi degisken\_ismi şeklinde bir komut kullanmak uygun olacaktır.

Eğer kaydedilen verilere harici programlardan erişilecekse ASCII formatında ve diziler arasına TAB atılarak kaydetme yapılabilir. Bunun için save calisma.txt xToplam -ascii -tabs komutu kullanılabilir. xToplam ismindeki matris, diske calisma.txt dosyası olarak kaydedilmiştir. Ancak MATLAB, bu dosyayı kendi formatında değil, düz yazı (TEXT) biçiminde kaydeder. Matrisin elemanları arasına TAB karakteri basarak Excel gibi diğer programlardan erişimi kolaylaştırır.

## **Grafikler**

MATLAB'da veriler ile çalışırken bu verileri görüntülemek gerekebilir. Analizde çok önemli olan grafiklerin oluşturulması için plot komutu ve surf komutu kullanılabilir.

Plot komutu ile 1xN tipindeki vektör biçimindeki bir veya daha fazla veri için grafik oluşturulabilir.

Örneğin:

```
>>t=pi:0,1:pi;
```

```
>>y=sin(t);
```

```
>>plot(y)
```

komutlarını yazarak -3.14 den +3.14 e kadar 0.1 aralıklarla artan bir vektör tanımlayalım. Sin fonksiyonu ile bu vektörün tüm değerlerinin sinüslerini hesaplayarak plot komutu ile ekrana çizdirelim, (pi ön tanımlı bir değişken olup değerini atamanıza gerek yoktur).

İki vektörü aynı pencere içinde üst üste görüntülemek istersek 1xN vektörleri Nx1 tipine çevirmek ve bunları yan yana sütun şeklinde yerleştirmek gerekir. Örneğin yukardaki örnekte t ve y'yi aynı anda görmek için plot(['t' y']) komutu kullanılmalıdır.

Plot komutu ile ilgili daha fazla bilgi elde etmek için MATLAB konsolda help plot yazabilirsiniz.

MATLAB'de MxN tipindeki matrislerin 3 boyutlu topografik grafiklerini incelemek için surf veya mesh komutları kullanılır.

```
>>a=randn(20);
```

```
>>surf(a);
```

Yukarda anlatılan bilgiler ışığında, MATLAB ile neler yapabileceği konusunda bir miktar bilgi verilmiş oldu. MATLAB' m içindeki pek çok yazılım aracı ile (toolbox) özel uygulamaları için hazır yazılmış onlarca fonksiyon bulunabilir. Ayrıca pek çok mühendislik problemlerinin çözümünde MATLAB' in avantajları kullanılabilir.

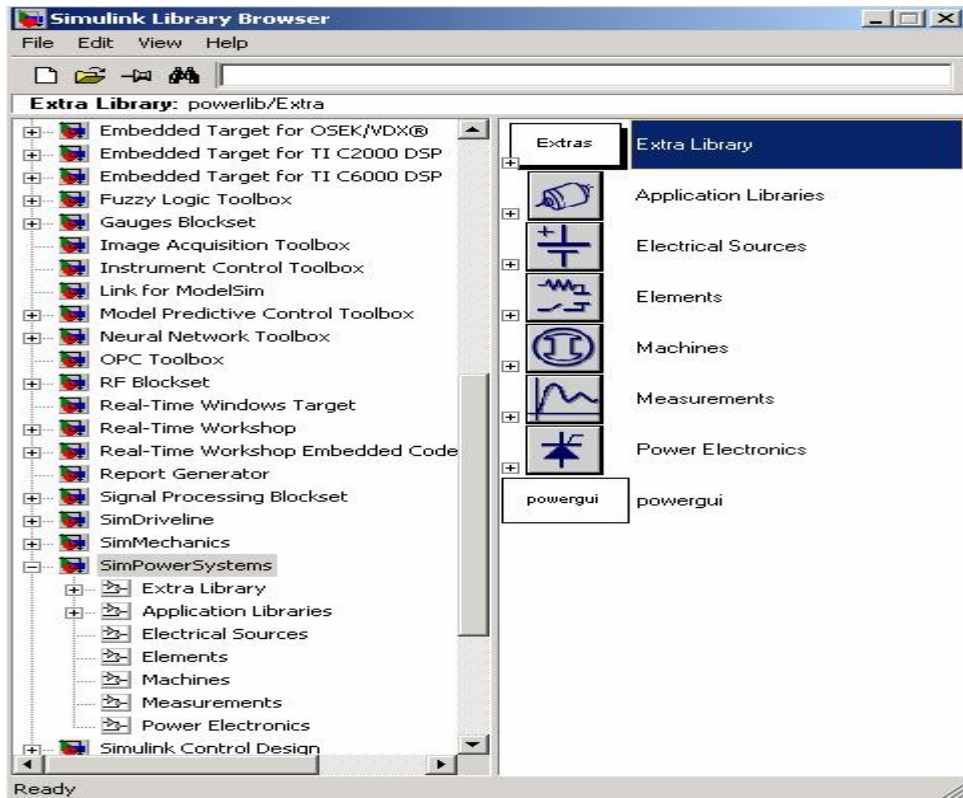
## **SIMULINK Hakkında Genel Bilgi**

SIMULINK, Matlab programının genişletilmiş halidir. Matlab programında istenilen devreleri oluşturmak için SIMULINK blokları kullanılır. SIMULINK'in kullandığı bloklar kendi içlerinde cebirsel ifadeleri gerçekleştirebilir. Blokların çalışması için diğer Matlab dosyalarına ihtiyaç vardır ve bu dosyalara kullanacağı bloğun kodları yerleştirilir. Yani Matlab programı birbirinin tamamlayıcısı olarak çalışan dosyalardan oluşur ve bize simülasyon kolaylığını sağlar.

SIMULINK devresini oluşturan blokların ayrı ayrı görevleri vardır. Bu bloklar birbirleriyle bağlantılı olarak çalışırlar.

### Statik Uyarım'lı Senkron Generatör Sisteminde Kullanılan Temel Bloklar

SUMULINK'te Senkron Generatör Sistemi dizayn edilirken "Simulink Library Browser"ın altındaki "SimPowerSystems" kütüphanesinden faydalanılır.

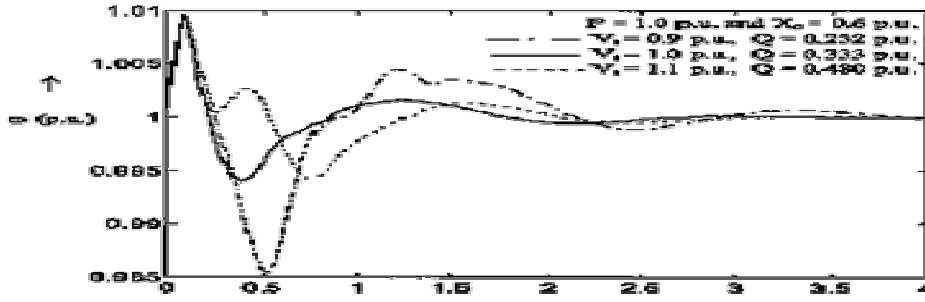
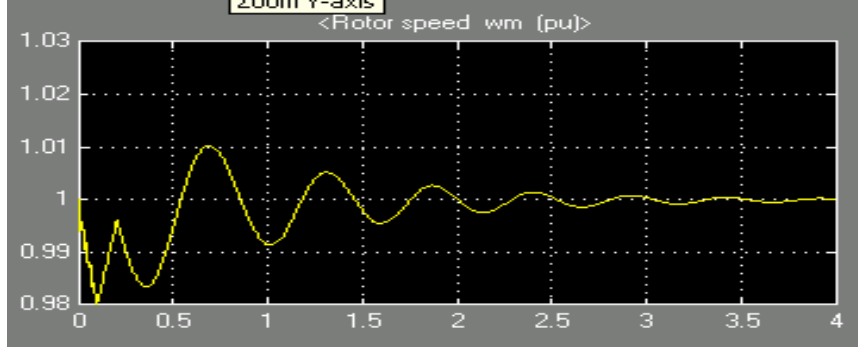


SIMULINK kütüphanesi

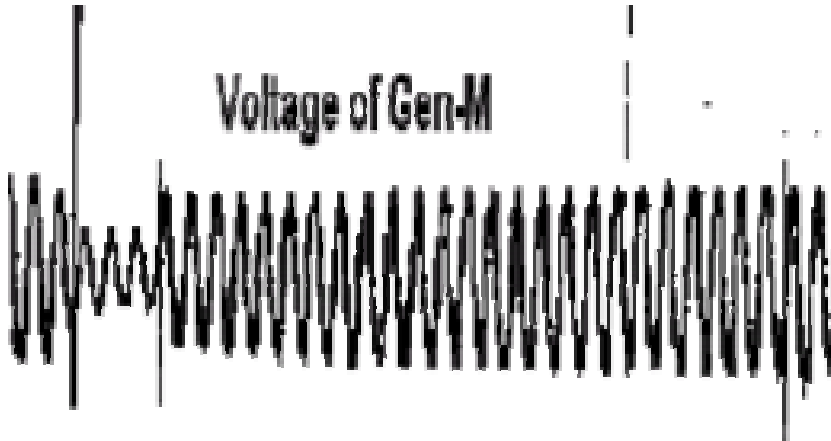
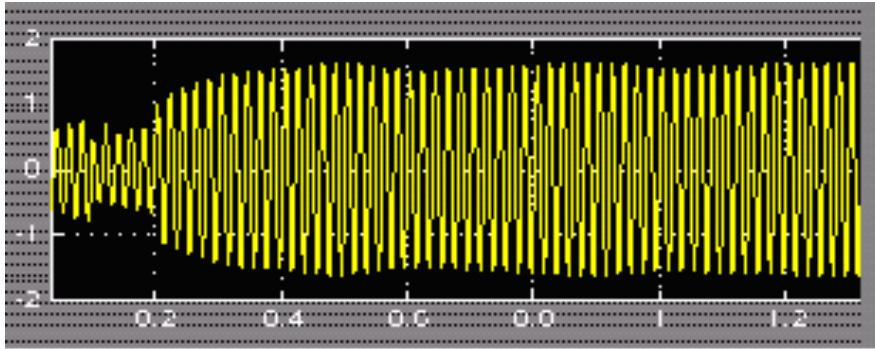
"SimPowerSystems" in altında, Statik Uyarım'lı Senkron Generatör Sistem dizaynı'nda Senkron Makina, Hidrolik Türbün ve Governor, Üç Fazlı Transformatör, Üç Faz Kısa Devre, Üç Faz Güç Kaynağı ve Üç Faz RLC Yük blokları kullanılır.



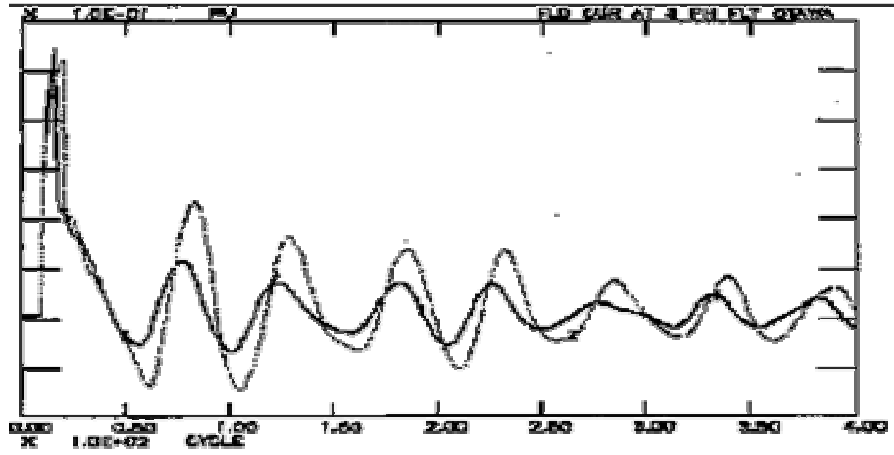
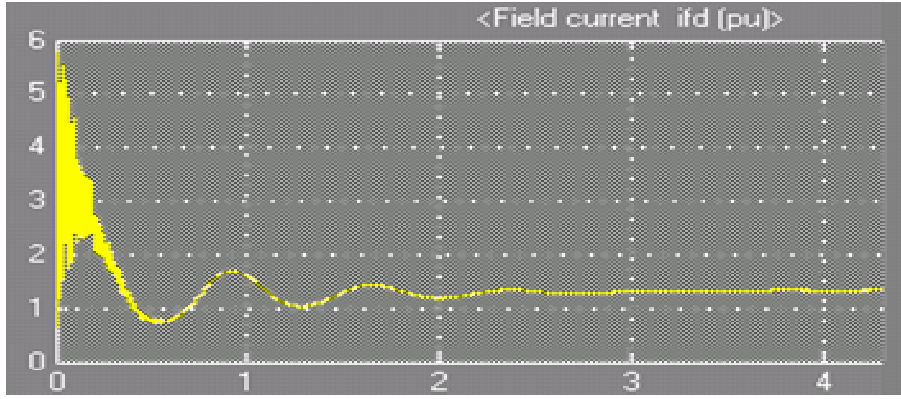
## EK-B. DENEYSEL SONUÇLAR İLE KARŞILAŞTIRMA



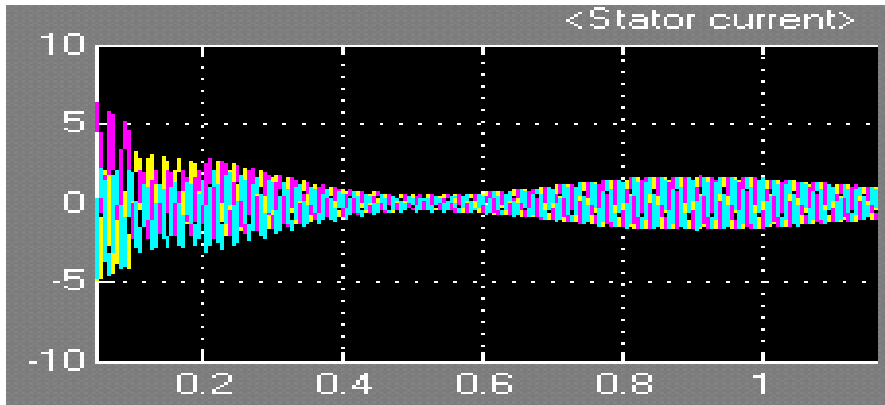
0.1sn'de oluşan Üç Faz Kısa Devre durumundaki generatör hızı [31]



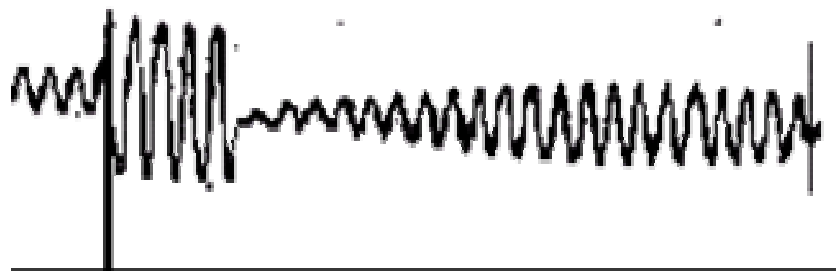
0.1sn'de oluşan Üç Faz Kısa Devre durumundaki  $V_a$  generatör çıkış gerilimi [33]



0.1sn'de oluşan Üç Faz Kısa Devre durumundaki  $i_f$  uyarım akımı [32]



Current of Gen-M



0.1sn'de oluşan Üç Faz Kısa Devre durumunda  $i_{abc}$  stator akımı [33]

## ÖZGEÇMİŞ

1973 yılında Bulgaristan'ın Kırçali şehrinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kırçali ESPU Mitko Palauzov ilk öğretim okulunda tamamladı. Lise öğrenimini Kocaeli Teknik Lisesi Elektronik Bölümünde yaptı.

1993 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi'nde bir yıl İngilizce hazırlık programı okuduktan sonra Elektrik Mühendisliği bölümünden 1998 yılında mezun oldu.

Philips, Grundfos gibi uluslararası şirketlerde görev yaptı. 2002 yılında ABB Elektrik Sanayi A.Ş. firmasına girdi. Halen burada Satış Mühendisi olarak görev yapmaktadır.

Evli ve bir çocuk babasıdır.

