

**T.C.  
TUNCELI ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SENKRON GENERATÖR STATİK İKAZ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE  
ŞEBEKE KARARLILIĞINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ferit TUFAN**

**Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği**

**DANIŞMAN  
Yrd. Doç. Dr. Zeki OMAÇ**

**EYLÜL- 2013**

**T.C.  
TUNCELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SENKRON GENERATÖR STATİK İKAZ SİSTEMİNİN  
MODELLENMESİ VE ŞEBEKE KARARLILIĞINA ETKİLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Ferit TUFAN**

**1021031014**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 Ağustos 2013  
Tezin Savunulduğu Tarih : 24 Eylül 2013**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Zeki OMAÇ (T.Ü)**

**Diğer Jüri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Eyyüp ÖKSÜZTEPE (T.Ü)**

**Yrd. Doç. Dr. Ömer ÇELİK (T.Ü)**

**EYLÜL-2013**

Ferit TUFAN tarafından hazırlanan SENKRON GENERATÖR STATİK İKAZ SİSTEMİNİN MODELLENMESİ VE ŞEBEKE KARARLILIĞINA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Zeki OMAÇ  
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. Bu tez, Tunceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Eyyüp ÖKSÜZTEPE (T.Ü)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Zeki OMAÇ (T.Ü)

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ömer ÇELİK (T.Ü)

Tarih : 24 Eylül 2013

## ÖNSÖZ

Enterkonnekte sistemlerin kararlılığını ve sürekliliğini sağlamak hem zor hem de olmazsa olmaz bir durumdur. Bunu sağlayabilmek adına bu güne kadar pek çok çalışma yapılmış ve halen yapılmaktadır. Çalışmalar genellikle, ikaz sistemleri, senkron kompanzatorler, hız regülatörleri veya statik VAr kompanzatorleri gibi ekipmanların geliştirilmesi ile yapılmaktadır. Bu çalışmada da, AVR (otomatik gerilim regülatörü) kontrolörlü yarı iletken teknolojisi ile geliştirilmiş bir ikaz sisteminin enterkonnekte sistem kararlılığındaki etkileri incelenmiştir. Uygulama çalışmalarında bir hidroelektrik santralının senkron generatör ikaz sisteminin Matlab/Simulink'te benzetim modeli tasarlanmış ve, çeşitli arıza durumları simüle edilmiştir. Simülasyon sonuçları ve gerçek zamanlı arıza durumları birbiri ile karşılaştırılarak analizleri yapılmıştır.

Yapılan çalışmalarda sürekli desteğini gördüğüm sevgili hocam Sn.Yrd.Doç. Dr. Zeki OMAÇ'a ve diğer hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Hocalarım dışında, bütün mesai arkadaşlarıma, çalışmalarımda desteğini esirgemeyen Andritz firması ikaz sistemleri departmanı sorumlusu sevgili Tomas DUHLY'e, sevgili hocam ve meslektaşım Sn.Yrd. Doç.Dr. Fevzi HANSU'ya, aile büyüklerime ve sevgili eşime desteklerinden dolayı şükranlarımı sunarım.

**Ferit TUFAN**  
**Tunceli - 2013**

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>I</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>II</b>
<b>ÖZET</b> .....	<b>VI</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>VII</b>
<b>ŞEKİLLER LİSTESİ</b> .....	<b>VIII</b>
<b>TABLolar LİSTESİ</b> .....	<b>XII</b>
<b>SEMBOLLER LİSTESİ</b> .....	<b>XIII</b>
<b>KISALTMALAR LİSTESİ</b> .....	<b>XVI</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNE GENEL BAKIŞ</b> .....	<b>4</b>
2.1. Elektrik Güç Sistemlerinin Tarihi Gelişim Süreci.....	4
2.2. Elektrik Güç Sistemlerinin Temel Yapısı.....	5
2.3. Elektrik Güç Sistemlerinin Kontrolü ve Kararlılığı .....	11
<b>3. SENKRON MAKİNELERİN GENEL YAPISI, ÇALIŞMA İLKESİ VE TEMEL PARAMETRELERİ</b> .....	<b>14</b>
3.1. Senkron Makinelerin Yapısı.....	14
3.1.1. Senkron Generatörde Stator Yapısı .....	15
3.1.2. Senkron Generatörde Rotor Yapısı.....	17
3.1.2.1. Yuvarlak Rotor .....	18
3.1.2.2. Çıkık Kutuplu Rotor .....	19
3.1.2.3. Kutup Ayakları .....	21
3.1.2.4. Kutup Sargısı .....	22
3.1.2.5. Amortisör Sargısı.....	24
3.2. Senkron Generatörün Çalışma İlkesi .....	25
3.3. Senkron Generatörün Endüvi Reaksiyonu .....	27
3.4. Senkron Generatörün Temel Parametreleri .....	30
3.5. Senkron Generatörün EMK Bağıntısı.....	32
3.6. Senkron Generatörün Vektör Diyagramı.....	33

3.7. Senkron Generatörün Eşdeğer Şeması .....	35
3.8. Senkron Makinelerde Döner Alan ve Döner Endüktörün Senkron Hız İlişkisi....	37
3.9. Senkron Generatörlerde Üretilen Gerilim .....	37
<b>4. İKAZ SİSTEMLERİNİN GENEL YAPISI, ÇEŞİTLERİ VE</b>	
<b>MODELLERİNE GÖRE SINIFLANDIRILMASI.....</b>	<b>40</b>
4.1. İkaz Sistemlerine Genel Bakış.....	40
4.2. DC İkaz Sistemleri .....	40
4.3. AC İkaz Sistemleri .....	43
4.3.1. Durgun Doğrultuculu AC İkaz Sistemleri .....	43
4.3.2. Döner Doğrultuculu AC İkaz Sistemleri .....	45
4.4. Statik İkaz Sistemleri.....	46
4.4.1. Potansiyel Kaynaklı Kontrollü Doğrultuculu Statik İkaz Sistemi.....	47
4.4.2. Birleşik Kaynaklı Doğrultuculu Statik İkaz Sistemi .....	48
4.4.3. Birleşik Kaynaklı Kontrollü Doğrultuculu Statik İkaz Sistemi.....	49
4.5. İkaz Sistemlerinin Modellerine Göre Sınıflandırılması.....	50
4.5.1. DC Tipi İkaz Sistemi Modelleri .....	51
4.5.1.1. DC1A İkaz Sistemi Modeli .....	51
4.5.1.2. DC2A İkaz Sistemi Modeli .....	53
4.5.1.3. DC3A İkaz Sistemi Modeli .....	53
4.5.1.4. DC4B İkaz Sistemi Modeli.....	54
4.5.2. AC Tipi İkaz Sistemi Modelleri .....	55
4.5.2.1. AC1A İkaz Sistemi Modeli .....	56
4.5.2.2. AC2A İkaz Sistemi Modeli .....	57
4.5.2.3. AC3A İkaz Sistemi Modeli .....	58
4.5.2.4. AC4A İkaz Sistemi Modeli .....	59
4.5.2.5. AC5A İkaz Sistemi Modeli .....	59
4.5.2.6. AC6A İkaz Sistemi Modeli .....	60
4.5.2.7. AC7B İkaz Sistemi Modeli.....	61
4.5.2.8. AC8B İkaz Sistemi Modeli.....	62
4.5.3. ST Tipi İkaz Sistemi Modelleri .....	62
4.5.3.1. ST1A İkaz Sistemi Modeli .....	63
4.5.3.2. ST2A İkaz Sistemi Modeli .....	64
4.5.3.3. ST3A İkaz Sistemi Modeli .....	65

4.5.3.4. ST4B İkaz Sistemi Modeli .....	66
4.5.3.5. ST5B İkaz Sistemi Modeli .....	67
4.5.3.6. ST6B İkaz Sistemi Modeli .....	68
4.5.3.7. ST7B İkaz Sistemi Modeli .....	68
4.6. Güç Sistem Kararlaştırıcı .....	69
<b>5. GELİŞMİŞ BİR İKAZ SİSTEMİ MODELİNİN GENEL YAPISI VE</b>	
<b>ÇALIŞMA PRENSİBİ .....</b>	<b>71</b>
5.1. İkaz Sisteminin Genel Yapısı ve Teknik Özellikleri .....	71
5.1.1. Tristör Köprü Doğrultucuları .....	75
5.1.2. Alan Devre Kesicisi .....	78
5.1.3. Alan Deşarj Direnci .....	79
5.1.4. Alternatif Akım Elektrik Dağıtım Hattı Aşırı Gerilim Korum Birimi .....	81
5.1.5. Doğru Akım Elektrik Dağıtım Hattı Aşırı Gerilim Koruma Birimi .....	82
5.1.6. İkaz Trafosu .....	84
5.1.6.1. İkaz Trafosu İçin Gerekli Parametrelerin Hesaplanması .....	85
5.1.7. Regülatör ve Dijital İşlem Sıralayıcı .....	86
5.1.7.1. Regülatörün Teknik Özellikleri .....	88
5.2. İlk İkazlama .....	90
5.3. Otomatik Gerilim Regülasyonu .....	91
5.4. El İle Kontrol .....	91
5.5. Otomatik-Reaktif Güç Düzenlemesi .....	91
<b>6. BİR HİDROELEKTRİK SANTRALİNDE SENKRON GENERATÖR</b>	
<b>İKAZ SİSTEMİNİN ŞEBEKE KARARLILIĞINA ETKİLERİNİN</b>	
<b>MODELLENMESİ VE ANALİZİ .....</b>	<b>92</b>
6.1. Giriş .....	92
6.2. Modelleme ve Simülasyon Analizleri .....	93
6.2.1. Benzetim Modelinde Kullanılan Parametreler ve Referans Değerleri .....	96
6.2.2. Simulink Modelinde Geçici Rejim Etkilerinin Analizi .....	101
6.2.2.1. 154 kV Şebeke Gerilimi ve 13,8 kV Generatör Çıkış Gerilimleri .....	101
6.2.2.2. Generatör Çıkış Akımları .....	104
6.2.2.3. Generatör Aktif ve Reaktif Güçleri .....	106
6.2.2.4. Generatör Yük Açılıőı .....	108
6.2.2.5. Rotor Hız Sapmaları .....	110

6.2.2.6. Generatör İkaz Gerilimleri.....	112
6.3. Gerçek Zamanlı Analizler .....	115
6.3.1. Geçici Rejim Etkilerinin Gerçek Zamanlı Analizleri .....	117
6.3.1.1. 154 kV Şebeke Gerilimi ve 13,8 kV Generatör Çıkış Gerilimleri .....	117
6.3.1.2. Generatör Çıkış Akımları .....	119
6.3.1.3. Generatör Aktif ve Reaktif Güçleri .....	120
6.3.1.4. Generatör Güç Faktörleri.....	121
6.3.1.5. Rotor Hız Sapmaları .....	122
6.3.1.6. Generatör İkaz Gerilimleri.....	123
<b>7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>125</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>127</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>131</b>





## ÖZET

Elektrik güç sistemlerinin kalitesi, güvenilirliği ve sürekliliği açısından güç sistemlerinin kararlılığı çok önemli bir unsurdur. Üretim santralleri enterkonnekte sistemde kararlılığın sağlanmasında en büyük faktörü oluşturmaktadır. Bu nedenle elektrik üretim santrallerinin, enterkonnekte sistemin çökmesine neden olabilen geçici rejim salınımlarına karşı tepki gösterebilecek nitelikte donanımlara sahip olması da gerekmektedir. Bu donanımların başında senkron generatörlerdeki gelişmiş ikaz sistemleri ve hız regülatörleri yer almaktadır. Bu çalışmada, ikaz sistemlerinin enterkonnekte sistem üzerinde kararlaştırıcı etkileri incelenmiştir.

Tez çalışmasında, öncelikle senkron makinalar ve ikaz sistemlerinin genel yapıları, çalışma prensipleri ve IEEE standartlarına göre ikaz sistemi modelleri araştırılmıştır. Daha sonra, ikaz sisteminin elektrik güç sistemi kararlılığı üzerine etkisini incelemek üzere Alkumru Hidroelektrik Santralinde kullanılan ve Andritz Hydro firmasının ürünü olan senkron generatör ikaz sistemi bilgisayar ortamında modellenmiştir.

Ayrıca, Alkumru Hidroelektrik Santralinin iki ünitesi ve bağlı olduğu iletim sisteminin Matlab/Simulink programında benzetim modeli oluşturulmuştur. Bu modelde, enterkonnekte sistemde meydana gelen, faz toprak kısa devre arızası ve yük değişimleri analiz edilmiştir. Bu analizler güç sistemi kararlaştırıcının (power system stabilizer (PSS)) arızalar sırasında, aktif ve pasif olma durumlarında yapılmıştır. Ardından gerçek zamanlı deneysel sonuçların analizleri yapılmıştır.

Sonuç olarak, benzetim sonuçları ve gerçek zamanlı deneysel sonuçlar karşılaştırılarak incelendiğinde, PSS desteği ile gelişmiş ikaz sistemlerinin enterkonnekte sistemdeki arıza durumlarında, sisteme kararlaştırıcı yönde etki ettiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Güç sistem kararlılığı, İkaz Sistemi, Güç Sistemi Kararlaştırıcı (PSS), Senkron Generatör, Matlab/Simulinkte Modelleme.

## SUMMARY

The power system stability is a considerable element for interconnection systems safety and stability. Electric power generating stations are major stability subject for this systems. Therefore, the power stations should include some hardwares which have ability to get stady state conditions following transient disturbance effects on the power system. These hardwares are improved excitation systems and speed governors. In this study, the steady state impacts of an excitation system on the interconnection systems has been researched with experiments.

In disquisition studis, the fundamental structure of synchronous machines and excitation systems, classification of excitation models according to the IEEE models are investigated. Afterwards, the synchronous generators excitation system of Alkumru Hydro Power Plant has been modeled in computer environment.

In addition, two units of Alkumru Hydro Power Plant and their power transmission system has been modeled in Matlab/Simulink. In the model, a single line to ground short circuit fault and sudden large load changes was simulated. The simulations of faults have been done with excitation system model supported by PSS (power system stabilizer) situation and without PSS situation.

At the result, it has been confirmed that the excitation systems with high technology which supported by PSS, increases the stability of interconnected system.

**Keywords:** Power System Stability, Excitation Systems, PSS (Power System Stablizer), Syhcrohonus Generators, Designing Model in the Matlab/Simulink.

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 Rus bilim adamı Michael Osipovich Dolivo Dobrovolsky'nin tasarladığı 3 fazlı generatör .....	5
Şekil 2.2 Atatürk HES 380 kV açık şalt sahası .....	7
Şekil 2.3 Alkumru HES 154 kV açık şalt sahası .....	8
Şekil 2.4 Batman 2 TM 380 kV açık şalt sahası 380/34,5 kV indirici transformatör .	9
Şekil 2.5 Bir güç sisteminin temel unsurlarını içeren sadeleştirilmiş tek hat şeması ...	10
Şekil 2.6 Bir güç sisteminin alt birimleri ve birleştirilmiş kontrol sistemlerinin prensip şeması .....	12
Şekil 3.1 Generatörlerin genel prensip şemaları, a) senkron generatör, b) doğru akım generatörü .....	14
Şekil 3.2 Alkumru HES 97 MVA gücündeki senkron generatörün statoru .....	16
Şekil 3.3 Alkumru HES 97 MVA gücündeki senkron generatörün rotor karkası ve sac montajı.....	17
Şekil 3.4 Montaj aşamasındaki yuvarlak rotor .....	19
Şekil 3.5 Andritz yapımı 87 MVA gücündeki bir senkron generatörün çıkık kutuplu rotoru. ....	20
Şekil 3.6 Kutup ayaklarının şeklinin değişik olması nedeni ile oluşan manyetik alan dağılım şekilleri; a) dikdörtgen kesitli, b) sinüzoidal kesit .....	22
Şekil 3.7 Çıkık kutuplu senkron makina rotor kutbunun; a) kesit görünüşü, b) perspektif görünüşü .....	24
Şekil 3.8 Senkron generatörün çalışma ilkesini açıklayan sade model. ....	26
Şekil 3.9 Senkron generatörde; a) kutup alanı, b) endüvi alanı dağılımı .....	27
Şekil 3.10 Sadece omik yükte endüvi reaksiyonu .....	28
Şekil 3.11 Sadece endüktif yükte endüvi reaksiyonu .....	28
Şekil 3.12 Sadece kapasitif yükte endüvi reaksiyonu.....	29
Şekil 3.13 Omik-endüktif yükte endüvi reaksiyonu .....	29
Şekil 3.14 Omik-kapasitif yükte endüvi reaksiyonu .....	30
Şekil 3.15 $\Phi_a$ vektörünün bileşenleri .....	31
Şekil 3.16 Senkron generatörün basit fiziksel modeli; a) boyuna eksen yönünde, b) enine eksen yönünde .....	32

Şekil 3.17 Çıkık kutuplu senkron generatörün omik-endüktif yük için fazör diyagramı .....	34
Şekil 3.18 Yuvarlak rotorlu senkron generatörün aktif endüktif yük için fazör diyagramı .....	35
Şekil 3.19 Yuvarlak rotorlu senkron generatörün basitleştirilmiş eşdeğer şeması; a) tek hatlı şema, b) sadeleştirilmiş şema .....	35
Şekil 3.20 Senkron generatörün basitleştirilmiş fazör diyagramı.....	36
Şekil 3.21 $E_q$ belli olduğunda $U_1$ 'in belirlenmesi.....	37
Şekil 4.1 DC tip ikaz sistemi modeli örneği.....	41
Şekil 4.2 Botan HES senkron generatörleri; a) 600 kVA gücünde, b) 780 kVA gücünde pilot ikazlı .....	42
Şekil 4.3 Diyot doğrultuculu ALTERREX AC tip ikaz sistemi.....	44
Şekil 4.4 Tristör doğrultuculu ve kontrollü ALTERREX AC tip ikaz sistemi .....	45
Şekil 4.5 Fırçasız ikaz sistemi modeli .....	46
Şekil 4.6 Potansiyel kaynaklı kontrollü doğrultuculu statik ikaz sistemi modeli.....	47
Şekil 4.7 Birleşik kaynaklı doğrultuculu ST tip ikaz sistemi modeli. ....	48
Şekil 4.8 Generrex birleşik kaynaklı kontrollü doğrultuculu ST tip ikaz sistemi modeli .....	49
Şekil 4.9 Generatör terminal voltajı (uç gerilimi) transdüser ve yük kompanzatör modeli .....	50
Şekil 4.10 İkaz kontrol sistemlerinin fonksiyonel blok diyagramı.....	51
Şekil 4.11 IEEE'nin DC1A ikaz sistemi modeli. ....	52
Şekil 4.12 IEEE'nin DC2A ikaz sistemi modeli .....	53
Şekil 4.13 IEEE'nin DC3A ikaz sistemi modeli. ....	54
Şekil 4.14 IEEE'nin DC4B ikaz sistemi modeli.....	55
Şekil 4.15 IEEE'nin AC1A ikaz sistemi modeli. ....	56
Şekil 4.16 IEEE'nin AC2A ikaz sistemi modeli. ....	57
Şekil 4.17 IEEE'nin AC3A ikaz sistemi modeli. ....	58
Şekil 4.18 IEEE'nin AC4A ikaz sistemi modeli. ....	59
Şekil 4.19 IEEE'nin AC5A ikaz sistemi modeli .....	60
Şekil 4.20 IEEE'nin AC6A ikaz sistemi modeli. ....	60
Şekil 4.21 IEEE'nin AC7B ikaz sistemi modeli.....	61
Şekil 4.22 IEEE'nin AC8B ikaz sistemi modeli.....	62

Şekil 4.23 IEEE'nin ST1A ikaz sistemi modeli .....	63
Şekil 4.24 IEEE'nin ST2A ikaz sistemi modeli .....	65
Şekil 4.25 IEEE'nin ST3A ikaz sistemi modeli .....	66
Şekil 4.26 IEEE'nin ST4B ikaz sistemi modeli. ....	66
Şekil 4.27 IEEE'nin ST5B ikaz sistemi modeli. ....	67
Şekil 4.28 IEEE'nin ST6B ikaz sistemi modeli. ....	68
Şekil 4.29 IEEE'nin ST7B ikaz sistemi modeli. ....	69
Şekil 4.30 IEEE'nin PSS1A güç sistem kararlaştırıcı modeli. ....	70
Şekil 4.31 IEEE'nin PSS2B güç sistem kararlaştırıcı modeli. ....	70
Şekil 5.1 Generatöre şöntlenmiş statik ikaz sisteminin blok diyagramı.....	71
Şekil 5.2 İkaz sisteminin kontrol panoları .....	75
Şekil 5.3 İkaz sisteminin paralel tristör köprüleri. ....	76
Şekil 5.4 Tristör köprülerinin koruma ve kontrol üniteleri. ....	77
Şekil 5.5 İkaz sisteminin alan devre kesicisi ve deşarj direnci.....	79
Şekil 5.6 Metrosil nonlinear deşarj direncinin karakteristiği. ....	80
Şekil 5.7 AC aşırı gerilim koruması .....	81
Şekil 5.8 AC gerilim dalgalanmasını önleme devresi .....	82
Şekil 5.9 DC aşırı gerilim koruması (rotor aşırı gerilim koruması) .....	83
Şekil 5.10 İkaz trafosu .....	85
Şekil 5.11 Otomatik gerilim regülatörünün blok şeması .....	86
Şekil 5.12 Generatör düşük ikazlı yüklenme eğrisi.....	87
Şekil 5.13 Generatör aşırı ikazlı yüklenme eğrisi.....	88
Şekil 5.14 GMR3 AVR (Otomatik gerilim regülatörü).....	89
Şekil 5.15 İlk ikaz ekipmanı.....	90
Şekil 6.1 Matlab/Simulink'te tasarlanan, iki ünitenin ve bağlı oldukları iletim sisteminin benzetim modeli .....	94
Şekil 6.2 IEEE'nin tip-1 ikaz sistemi blok diyagramı .....	95
Şekil 6.3 Ana güç trafosunun; a)simulink modeli, b) parametre dialog kutusu .....	97
Şekil 6.4 IEEE'nin tip-1 ikaz sistemi; a) simulink modeli, b) parametre ve dialog kutusu .....	98
Şekil 6.5 Senkron generatörün; a)simulink modeli, b) parametre dialog kutusu .....	99
Şekil 6.6 Hız regülatörü; a) simulink modeli, b) parametre dialog kutusu .....	100
Şekil 6.7 154 kV enterkonnekte şebeke gerilimi (pu) .....	102

Şekil 6.8 Ünite-1 13,8 kV bara gerilimi (pu).....	103
Şekil 6.9 Ünite-2 13,8 kV bara gerilimi (pu).....	103
Şekil 6.10 Ünite-1 generatör çıkış akımları (pu). ....	105
Şekil 6.11 Ünite-2 generatör çıkış akımları (pu) .....	105
Şekil 6.12 Ünite-1 generatör aktif ve reaktif güçleri (pu) .....	107
Şekil 6.13 Ünite-2 generatör aktif ve reaktif güçleri (pu). ....	107
Şekil 6.14 Ünite-1 generatör yük açısı .....	109
Şekil 6.15 Ünite-2 generatör yük açısı .....	109
Şekil 6.16 Ünite-1 rotor hızı (pu) .....	111
Şekil 6.17 Ünite-2 rotor hızı (pu) .....	112
Şekil 6.18 Ünite-1 generatör ikaz gerilimi (pu).....	114
Şekil 6.19 Ünite-2 generatör ikaz gerilimi (pu).....	114
Şekil 6.20 ST4B ikaz sistemi modeli .....	116
Şekil 6.21 Enterkonnekte şebeke fazlar arası gerilimleri .....	118
Şekil 6.22 Ünite-1 ve Ünite-2 13,8 kV generatör çıkış barası fazlar arası gerilimleri .....	118
Şekil 6.23 Ünite-1 ve Ünite-2 generatör çıkış akımları.....	119
Şekil 6.24 Ünite-1 ve Ünite-2 generatör aktif ve reaktif güçleri .....	120
Şekil 6.25 Ünite-1 ve Ünite-2 generatör güç faktörleri .....	122
Şekil 6.26 Ünite-1 ve Ünite-2 rotor hızları.....	123
Şekil 6.27 Ünite-1 ve Ünite-2 generatör ikaz gerilimleri .....	124

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 5.1 Generatörün nominal değerleri.....	72
Tablo 5.2 İkaz sistemi ve AVR'nin teknik özellikleri.....	72
Tablo 5.3 Tristör köprü doğrultucuların teknik özellikleri.....	75
Tablo 5.4 Alan devre kesicisinin teknik özellikleri.....	78
Tablo 5.5 Alan deşarj direncinin teknik özellikleri.....	80
Tablo 5.6 AC dağıtım hattı aşırı gerilim koruma sisteminin özellikleri.....	81
Tablo 5.7 DC dağıtım hattı aşırı gerilim koruma sisteminin özellikleri.....	82
Tablo 5.8 İkaz trafosunun teknik özellikleri.....	84
Tablo 6.1 Transformator parametreleri. ....	97
Tablo 6.2 IEEE'nin tip-1 ikaz sistemi parametreleri.....	98
Tablo 6.3 Senkron generatör parametreleri.....	99
Tablo 6.4 Hız regülatörü parametreleri. ....	100



## SEMBOLLER LİSTESİ

- E** : Endüvi sargısında endüklenen gerilim
- e<sub>A</sub>** : Statorun A fazında oluşan emk
- E<sub>ad</sub>** : Endüvi reaksiyonu boyuna bileşen emk'sı
- E<sub>aq</sub>** : Endüvi reaksiyonu enine bileşen emk'sı
- e<sub>B</sub>** : Statorun B fazında oluşan emk
- e<sub>C</sub>** : Statorun C fazında oluşan emk
- E<sub>fd</sub>** : İkaz çıkış gerilimi
- E<sub>q</sub>** :  $\Phi_d$  akısının stator sargılarında oluşturduğu emk
- E <sub>$\sigma$</sub>**  : Stator sargıları kaçak emk'sı
- f** : İkaz sargısı
- F<sub>ad</sub>** : Endüvi reaksiyon mmk'sı boyuna bileşeni
- F<sub>aq</sub>** : Endüvi reaksiyon mmk'sı enine bileşeni
- F<sub>b</sub>** : Manyetik çekim kuvvetinin boyuna bileşeni
- F<sub>e</sub>** : Manyetik çekim kuvvetinin enine bileşeni
- F<sub>f</sub>** : İkaz sargısının mmk'sı
- F<sub>m</sub>** : Manyetik çekim kuvveti
- I<sub>1</sub>** : Stator sargı akımı
- I<sub>a</sub>** : Stator akımının aktif bileşeni
- I<sub>A</sub>** : Statorun A fazından geçen akım
- I<sub>B</sub>** : Statorun B fazından geçen akım
- I<sub>C</sub>** : Statorun C fazından geçen akım
- I<sub>d</sub>** : Stator sargı akımının boyuna bileşeni
- I<sub>f</sub>** : İkaz akımı
- I<sub>fd</sub>** : İkaz çıkış akımı
- I<sub>q</sub>** : Stator sargı akımının enine bileşeni
- I<sub>r</sub>** : Stator akımının reaktif bileşeni
- I<sub>T</sub>** : Generatör terminal akımı
- K<sub>A</sub>, T<sub>A</sub>** : Tristör tetikleme amplifikatör kazancı ve zaman sabiti
- K<sub>D</sub>** : Alternatör mıknatıssızlaştırma etkisi sabiti
- k<sub>d</sub>** : Dağıtım katsayısı

- $K_{DR}$**  : Türevsel kazanç
- $K_E$**  : Reosta ayar kazancı
- $K_F, T_F$**  : Kararlılaştırıcı kazancı ve zaman sabiti
- $K_{IR}$**  : İntegral kazancı
- $k_p$**  : Adım katsayısı
- $K_{PR}$**  : Oransal kazanç
- $n$**  : Manyetik sistemin hızı
- $N_{ph}$**  : Endüvi sargısı sarım sayısı
- $N_s$**  : Döner manyetik alan ve dönen endüktör senkron hızı (d/d)
- $P$**  : Aktif güç
- $P$**  : Kutup sayısı
- $Q$**  : Reaktif güç
- $r_1$**  : Stator sargı direnci
- $r_{ms}$**  : Etkin değer
- $R_{pm}$**  : Dakikadaki devir sayısı
- $S_E$**  : Doyum sabiti
- $T_C, T_B$**  : Faz kaydırıcı zaman sabitleri
- $U_a$**  : Stator faz sargılarında oluşan gerilim
- $U_{nom}$**  : Nominal gerilim
- $V_c$**  : Generatör terminal gerilimi transdüser çıkış işareti
- $V_F$**  : Kararlılaştırıcı geribesleme işareti
- $V_{max}$**  : Maksimum gerilim
- $V_{OEL}$**  : Aşırı ikaz sınır işareti
- $V_{ref}$**  : Referans gerilimi
- $V_{rms}$**  : Gerilimin etkin değeri
- $V_S$**  : PSS kontrol çıkış işareti
- $V_T$**  : Generatör terminal gerilimi
- $V_{UEL}$**  : Düşük ikaz sınır işareti
- $X_{ad}$**  :  $\Phi_{ad}$  akısının kapanma yoluna ilişkin senkro reaktansı ( boyuna endüvi reaksiyon reaktansı)
- $X_{aq}$**  :  $\Phi_{aq}$  akısının kapanma yoluna ilişkin senkron reaktansı ( enine endüvi reaksiyon reaktansı)
- $X_d$**  : Stator faz sargıları boyuna senkron reaktansı

- $X_q$  : Stator faz sargıları enine senkron reaktansı
- $X_\sigma$  :  $\Phi_\sigma$  akısının kapanma yoluna ilişkin stator sargısı kaçak reaktansı
- $\delta$  : Manyetik sistemler arasındaki açı ( $F_b$  ve  $F_e$  vektörleri arasındaki açı)
- $\Phi$  : Endüvi bobinini kesen akı miktarı
- $\Phi_a$  : Statorun A, B, C fazlarından akım geçtiğinde oluşan toplam akı
- $\Phi_A$  : Stator sargılarında akım aktığında A fazında oluşan manyetik akı
- $\Phi_{ad}$  : Aktif-kapasitif yükte statorunda oluşan manyetik akı
- $\Phi_{aq}$  : Aktif-indüktif yükte statorunda oluşan manyetik akı
- $\Phi_B$  : Stator sargılarında akım aktığında B fazında oluşan manyetik akı
- $\Phi_C$  : Stator sargılarında akım aktığında C fazında oluşan manyetik akı
- $\Phi_d$  :  $I_f$  rotor manyetik akısı
- $\Phi_f$  : Alan sargısının oluşturduğu manyetik akı
- $\Phi_m$  : Sinüzoidal yasayla değişen  $\Phi_a$  akısının en büyük değeri
- $\Phi_\sigma$  : Stator sargılarında akım aktığında, stator sargıları arasında kaybolan kaçak akı
- $\Phi_{\sigma f}$  : Rotor sargısı etrafında kaybolan kaçak akı
- $\Psi$  : Endüvi sargılarında oluşan  $E_q$  emk vektörü ve akım vektörleri arasındaki faz açısı
- $\omega$  : Açısal hız
- $\varphi$  : Faz açısı

## KISALTMALAR LİSTESİ

- AC** : Alternatif akım  
**AVR** : Otomatik gerilim regülatörü  
**CT** : Akım trafosu  
**DC** : Doğru akım  
**EMK** : Elektromotor kuvveti  
**HES** : Hidroelektrik santral  
**IEEE** : Elektrik ve elektronik mühendisleri enstitüsü  
**IPB** : İzole edilmiş bara  
**LAN** : Yerel alan haberleşme ağı  
**M** : Moment  
**MMK** : Magnetomotor kuvveti  
**MVA** : Mega volt amper  
**MVar** : Mega volt amper reaktif  
**MW** : Mega watt  
**PID** : Oransal-İntegral-Türevsel kontrol  
**PLC** : Programlanabilir lojik kontrol  
**PSS** : Güç sistem kararlılaştırıcı  
**ST** : Statik ikaz sistemi  
**VT** : Gerilim trafosu

## 1. GİRİŞ

Günümüzde hızla artan nüfusa paralel olarak, yerleşim yerlerinin büyümesi, endüstriyel ve teknolojik faaliyetlerin önemli derecede artması gibi nedenler, elektrik enerjisine olan gereksinimi her geçen gün arttırmaktadır. Bu gelişmelere paralel olarak enterkonnekte sistemlere bağlı üretici kaynakları da gün geçtikçe artmaktadır. Bunun sonucunda iletim ve dağıtım şebekelerinde pek çok sayıda üretici veya büyük güçlü tüketiciler ihtiyaca, şebekenin kapasitesine veya arıza durumlarına göre devreye girmekte veya devredışı olmaktadır. Bu sistemlerin devreye bağlanmaları veya devreden çıkmaları, şebekeler üzerinde çok sayıda ve farklı frekanslarda akım, gerilim ve bunların sonucunda güç osilasyonları meydana getirmektedir. Bununla beraber güç sisteminde çoğu zaman meydana gelen asimetrik veya simetrik kısa devre arızaları da sistemde geçici rejimlere (transient) yol açarak çok büyük osilasyonlar oluşturmaktadır. Bu osilasyonlar sonucunda şebekede kararsızlıklar meydana gelmekte, hatta bazı durumlarda enterkonnekte sistemin çökmesi ile sonuçlanabilmektedir. Bu istenmeyen salınımların (osilasyonların) ortadan kaldırılabilmesi için santrallerde üretilen gerilimin sistemi toparlayabilecek kalitede olması çok önemlidir.

Enterkonnekte şebekede gerilimin kaliteli hale getirilmesi ile güç salınımları azaltılarak daha kararlı bir sistem elde edilir. Bu durum, şebeke ile senkronize çalışan generatörlerin mekaniksel enerji kaynaklarının kararlı olması ve ikaz sistemlerinin kontrollü olması ile sağlanır. İkaz kontrolünün asıl amacı, normal işletme koşullarında senkron generatörün çıkış gerilimindeki kararlılığın devamını sağlamak ve herhangi bir arıza durumunda gerilimi regüle ederek hata öncesi kararlı hal değerine çabuk ve etkili bir şekilde gelmesini sağlamaktır. Senkron generatörlerde gelişmiş ikaz sistemlerinin kullanılması ve ikaz kontrol sisteminde güç sistem kararlılaştırıcının olması, enterkonnekte şebekenin sürekliliği ve güvenilirliği açısından çok önemlidir. Gelişmiş ikaz sistemlerinde senkron generatörlerin alan akımı, hem el ile hem de PLC ile kontrol edilen gerilim regülatörleri sayesinde otomatik olarak kontrol edilebilmektedir. Böylece generatörün ilk devreye alınması sırasında senkrona girmek amacıyla gerilimin otomatik olarak ayarlanması veya senkron sonrası referans değerlere göre ayarlanması kolaylıkla gerçekleştirilir. Bu özellikler sayesinde hem şebekenin ihtiyacı olan reaktif güç üretilir hemde generatör çıkış gerilimi istenilen değerde sabitlenebilir. İkaz sistemleri normal koşullarda, yüksek kazanç

ve küçük zaman sabitine sahip sistemlerdir. Aynı zamanda sistem, işletme koşullarında hızlı kompanzasyon yapabilme özelliğine de sahiptirler. Özellikle statik ikaz sistemlerinde bu özellikler daha fazla geliştirilmiştir. Elektrik ve elektronik mühendisleri enstitüsü (IEEE)'nün ikaz sistemi ile ilgili ilk komite raporu 1968 yılında yayınlanmıştır. Bu raporda ikaz gücü, kaynağına göre değil, keyfi olarak sınıflandırılmıştır. 1981 yılında ikaz sistemi ile ilgili gelişmeler rapor olarak yayınlanmış ve ikaz sistemi Doğru Akım, Alternatif Akım ve Statik İkaz sistemi olmak üzere 3 temel grupta sınıflandırılmıştır. IEEE tarafından yapılmış olan çalışmalarda, statik ikaz sistem performansının diğer gruplara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Dolayısıyla son zamanlarda üretilen senkron generatörlerin büyük çoğunluğunda statik ikaz sistemi kullanılmakta veya eski tip ikazlar bu sisteme dönüştürülmektedir.

Bu çalışmada, gelişmiş ikaz sistemlerinin şebeke kararlılığındaki performansları çeşitli gözlem ve deneyler ile araştırılmıştır. İlk aşamada Matlab/Simulink programında örnek bir hidroelektrik santralin benzetim modeli dizayn edilmiştir. Tasarlanan modelde, enterkonnekte şebekede en fazla meydana gelen arızalar simüle edilerek sonuçların analiz ve değerlendirmeleri yapılmıştır. Simulink modeli, 154 kV enterkonnekte şebekeye paralel bağlı, bir hidroelektrik santrale benzetilerek tasarlanmıştır. Modeldeki, senkron generatör ikaz sistemi ve hız regülatörü tasarımlarında gerçek santraldeki teçhizatların parametreleri kullanılmıştır. Toplam üç ünitesi olan hidroelektrik santralin her bir ünitesinde Andritz hydro yapımı 97 MVA kurulu gücünde çıkık kutuplu senkron generatör kullanılmıştır. Generatörler ST4B modeli statik ikaz sistemi ile ikazlanmaktadır. Bütün ünitelerdeki generatör ikaz sistemlerinin ve hız regülatörlerinin donanımsal ve yazılımsal özellikleri aynıdır. Model dizaynı, simülasyon analizleri ve gerçek zamanlı analizler santralin iki ünitesi baz alınarak yapılmıştır. Araştırma kapsamında, enterkonnekte şebekede meydana gelen faz-toprak kısa devre arızası ve yük değişiminden kaynaklanan salınımlar incelenmiştir. Söz konusu deneylere başlamadan evvel her iki ünite de bulunan güç sistem kararlılaştırıcıdan (PSS) biri aktif diğeri ise devre dışı bırakılmıştır. Bu şekilde PSS'in kararlılıktaki rolü de gözlemlenmiştir. Simülasyon ve gerçek zamanlı deneyler sonucu elde edilen bütün verilerin analizleri karşılaştırılarak yapılmıştır. İncelemelerde, arıza sırasında ve sonrasında generatörlerde meydana gelen etkiler ve ikaz sistemlerinin tepkileri ile gelinen durumlar gözlemlenmiştir.

Tez çalışması, genel olarak 6 ana bölümde incelenmiş olup bu bölümler aşağıdaki şekildedir;

- Elektrik güç sistemlerinin genel yapısı incelenmiştir,
- Senkron makinaların genel yapısı, çalışma ilkesi ve temel parametreleri incelenmiştir,
- İkaz sistemlerinin genel yapısı, çeşitleri ve modellerine göre sınıflandırılması incelenmiştir,
- Gelişmiş bir ikaz sistemi modelinin genel yapısı ve çalışma prensibi incelenmiştir,
- Gelişmiş ikaz sistemlerinin şebeke kararlılığındaki etkilerinin Matlab/Simülink programında tasarlanmış simülink benzetiminde ve gerçek zamanlı deneylerde elde edilen sonuçların analizi yapılmıştır,
- Sonuçlar değerlendirilerek öneriler yapılmıştır.

## 2. ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNE GENEL BAKIŞ

### 2.1. Elektrik Güç Sistemlerinin Tarihi Gelişim Süreci

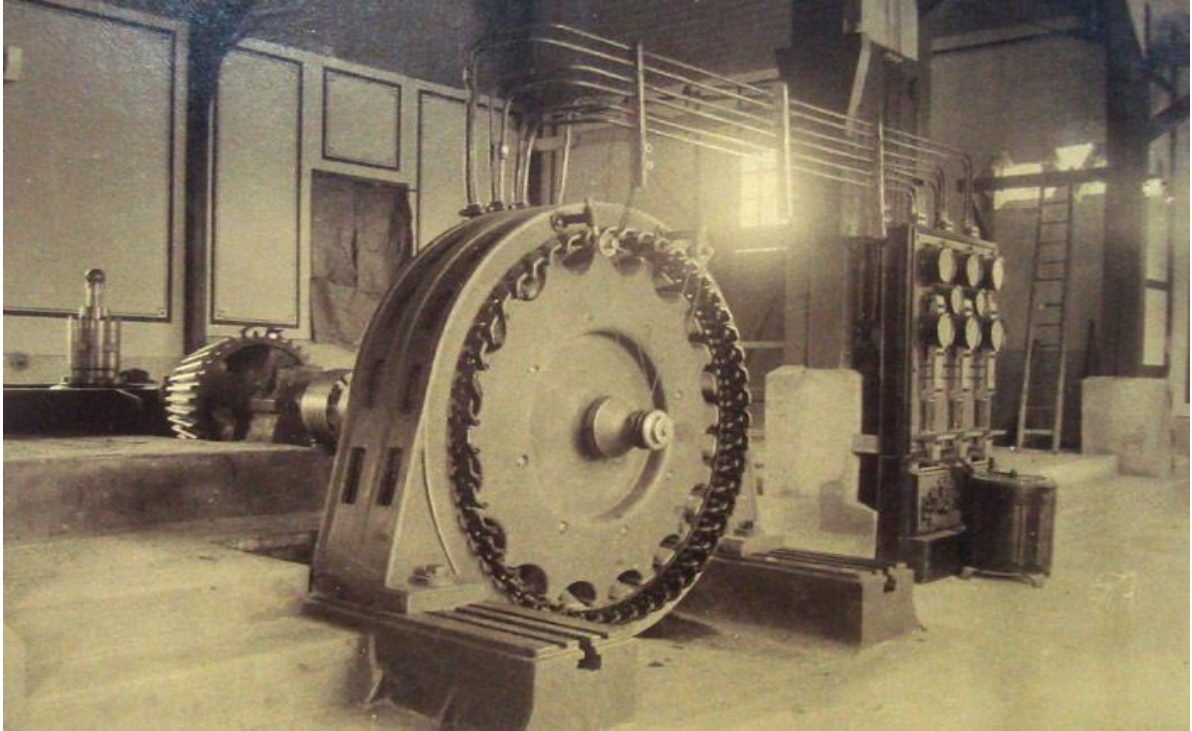
Michael Faraday ve Joseph Henry geliştirdikleri elektromanyetik indüksiyon teorisini 1820 yıllarında belgelendirerek generatörün Avrupa ve Kuzey Amerikadaki gelişim sürecini başlattılar. Hippolyte Pixii 1832 yılında Fransada ilk dinamoyu yaparak elde ettiği alternatif akımı komütatör kullanarak DC (doğru akım)'a çevirmek için çabalarken kazara ilk alternatörü yaptığından habersizdi. 1860 yılında Antonio Pacinotti kesintisiz DC kaynağın sağlandığı bir dinamo yaptı. 1867 tarihinde Werner Von Siemens ve Charles Wheatstone sürekli mıknatıslı bir stator kullanarak daha güçlü ve daha kullanışlı bir dinamo elde ettiler. Zenobe Gramme 1871 yılında manyetik alanın elektro mıknatıslar sayesinde manyetik akıyı oluşturacağını ve bu sayede daha güçlü dinamolar elde edilebileceği tezini ortaya sunarak elektiriğin ticari devrimini başlattı. 1876 yılında Charles F. Brush daha verimli ve güvenilir bir dinamo yaparak ilk telgraf üretim şirketinin kurulmasına neden oldu. Budapeştedeki Ganz şirketi 1878 tarihinde AC (alternatif akım) generatörlerin küçük ticari kuruluşlarına başladı.

1880-1886 Alternatif Akım sistemleri Siemens, Sabastian Ferranti, Lucien Gaulard vb. ile Avrupa'da gelişir. Amerikan pazarına ise DC dinamolar ve DC sistemler hakim olduğundan AC generatörlerin kabul edilmesi biraz zaman almıştı. 1886 yılında Kuzey Amerikada William Stanley, George Westinghouse, Nikola Tesla ve Elihu Thomson gibi mucitler kendi AC sistem ve generatörlerini dizayn etmeye başladılar. Siemens ve Ferranti generatörlerini baz alarak kendi generatörlerini yaptılar. 1886-1891 yılları arasında çok fazlı AC generatörler, CS Bradly (ABD), August Haselwander (Almanya), Mikhail Dolivo-Dobrovsky (Almanya / Rusya), Galileo Ferraris (İtalya) gibi mucitler tarafından geliştirilmiştir.

Bu yıllarda AEG şirketinin yöneticilerinden Oskar Von Miller Frankurt Elektro Teknik sunum merkezinin kuruculuğunu yaparak pek çok mucidin proje geliştirip sunmasına imkan tanımıştı. Bu mucitlerden biri olan Michael Osipovich Dolivo-Dobrovolsky ilk 3 fazlı modern generatör tasarımı ile dünyada bir devrimi gerçekleştirdi. Alternatif akımının uzak mesafelere iletimi ilk olarak 24 Ağustos 1891 tarihinde Michael Osipovich Dolivo-Dobrovolsky tarafından yapıldı. Bu tarih için alternatör (senkron generatör)'ün ticari



doğum tarihi olduğu da söylenebilir. 200 kVA kurulu gücünde 55 V, 40 Hz AC çıkışa sahip olan ve şekil 2.1’de görünen generatörde üretilen elektrik enerjisi, 20 kV-40 Hz AC ile aralarında 109 km mesafe olan Almanya’nın Lauffen şehrinden Frankfurt’a iletildi. Bu olay Frankfurt için uluslararası bir elektrik gösterisi oldu. Bu gösteri alternatif akımın uzak mesafelere iletilebilmesi konusunda çok ikna edici bir fizibilite olduğundan Frankfurt kentinde elektrik santralının yapılmasının herkes tarafından benimsenmesini sağladı (Edison Teach Center, 2012).



**Şekil 2.1** Rus bilim adamı Michael Osipovich Dolivo Dobrovolsky’nin tasarladığı 3 fazlı generatör

## **2.2. Elektrik Güç Sistemlerinin Temel Yapısı**

Elektrik enerjisi üretim ve iletim sistemlerinin yapısal bileşenleri güç sistemlerinin büyüklüğüne göre farklılık göstermektedir. Fakat genel itibari ile aynı karakteristik özelliklere sahiptirler.

- Üretim ve iletim tesislerinde genel olarak 3 fazlı AC sistemleri ve ekipmanları kullanılmaktadır.
- 3 fazlı alternatif akım sistemleri, eşit gerilim, frekans ve faz açılarındaki güç bileşenlerinden oluşan kaynakların direkt birleşimleri ile meydana gelen sistemlerin

bütünüdür. Farklı sistemler ile birleştirilmek istendiğinde ise gerilimler, frekans ve faz açıları senkronize hale getirilerek birleştirme gerçekleştirilir.

- 3 fazlı sistemler genel itibariyle endüstriyel yükler için kullanılmaktadır. Tek fazlı sistemler ise konut vb. küçük yükler için kullanılmaktadır. Tek fazlı yüklerdeki yük dağılımı, 3 faz dengesini bozmadan gerekli yük dağılım hesaplamalarına göre yapılmaktadır.
- Elektrik enerjisinin üretimi için, santrallerde genel olarak Senkron Generatörler kullanılmaktadır. Senkron generatörlerin enerji üretebilmesi için hareket tahrik edici enerjinin olması gerekmektedir. Bu mekanik tahrik enerjisinin kaynağı olarak (hidrolik, termik, fosil, nükleer vb.) kaynaklar kullanılmaktadır. Bu kaynaklar sayesinde elde edilen mekanik enerji generatörler üzerinden elektrik enerjisine dönüştürülmektedir.
- Geniş bir alana yayılmış tüketiciler için güç aktarımının minimum kayıplar ile yapılabilmesi güç sisteminin kapasitesi açısından çok önemli bir faktördür. Bunun için iletim sistemindeki güç iletimi çeşitli yüksek gerilim seviyelerine yükseltilerek yapılmaktadır. Güç dağıtımını ise, yüksek gerilim seviyeleri tüketiciye yaklaştıkça daha alçak seviyelere indirilerek yapılmaktadır (Kundur, 1994).

Elektrik enerjisi, elektrik üretim santrallerinde üretilmektedir. Üretilen elektrik gücü, transformatörler, anahtarlama elemanları, iletim ve dağıtım hatları gibi birbirinden farklı özelliklerdeki kompleks şebeke bileşenleri sayesinde iletilmektedir. Üretim santrallerinin bağlı olduğu iletim sistemleri ile bağlantıları ağırlıklı olarak kurulu güçleri ile alakalıdır. Büyük güçteki üretim santrallerinin bağlantıları ve yük transferleri ana iletim sistemi ile yapılmaktadır. Buna kıyasla santrallerin güç kapasiteleri küçüldükçe, bağlantılar ve enerji transferleri üretilen enerjinin büyüklüğüne göre, öncelikli olarak iletim sistemi ardından dağıtım sistemi üzerinden sağlanmaktadır.

Enterkonnekte sistem genel olarak ana iletim sistemi, iletim sistemi ve dağıtım sistemi olarak aşağıdaki şekilde sınıflandırılmaktadır;

1. Ana İletim Sistemi
2. İletim Sistemi
3. Dağıtım Sistemi



Şekil 2.2 Atatürk HES 380 kV açık şalt sahası

1. Ana İletim Sistemi: Başlıca büyük üretim tesisleri ve ana yük merkezlerini kapsamaktadır. Bu sistem, şekil 2.2'de de görünen 380 kV veya 220 kV gibi çok yüksek gerilimlerdeki iletimlerin entegrasyonunda bel kemiğini oluşturmaktadır. Bu sistemdeki generatör gerilimleri daha farklı olabilmekle beraber genellikle 11 kV ile 35 kV arasında değişmektedir. Generatör çıkış gerilimleri iletim sistemlerine aktarılmadan önce yükseltici transformatörler ile yükseltilmektedir. İletim şebekelerinden Alt iletim şebekelerine bağlantılarda ise gerilim, ölçü, koruma ve devre kesici gibi teçhizatların bulunduğu iletim şebekesi bağlantı tesislerindeki (trafo merkezi) düşürücü transformatörler ile düşürülerek daha düşük gerilim seviyelerinde iletim sürdürülmektedir.
2. İletim Sistemi: Genellikle ana iletim sisteminin toplayıcı sistemi şeklinde nitelendirilir. İletim sistemlerindeki bağlantı tesisleri ile dağıtım sistemlerindeki bağlantı tesisleri arasında köprü vaziyetinde olup, 154 kV gibi gerilim seviyelerinde iletim yapılmaktadır. Alt iletim sistemine bağlı generatör gerilim seviyeleri iletim sistemindeki gibi daha farklı olabilmekle beraber genellikle 11 kV ile 35 kV arasında



değişmektedir. Büyük endüstriyel tüketiciler alt iletim sistemine direk bağlanabilmektedirler. Örneğin Siirt ili sınırlarında bulunan Alkumru Hidroelektrik Santralinde mevcut bir senkron generatörün çıkış gerilimi 13,8 kV olup, trafo ile 154 kV' seviyesine yükseltilmektedir. 154 kV gerilim seviyesindeki elektrik enerjisinin iletimi şekil 2.3'te görünen açık şalt sahasında mevcut iki hat fideri üzerinden sağlanmaktadır.



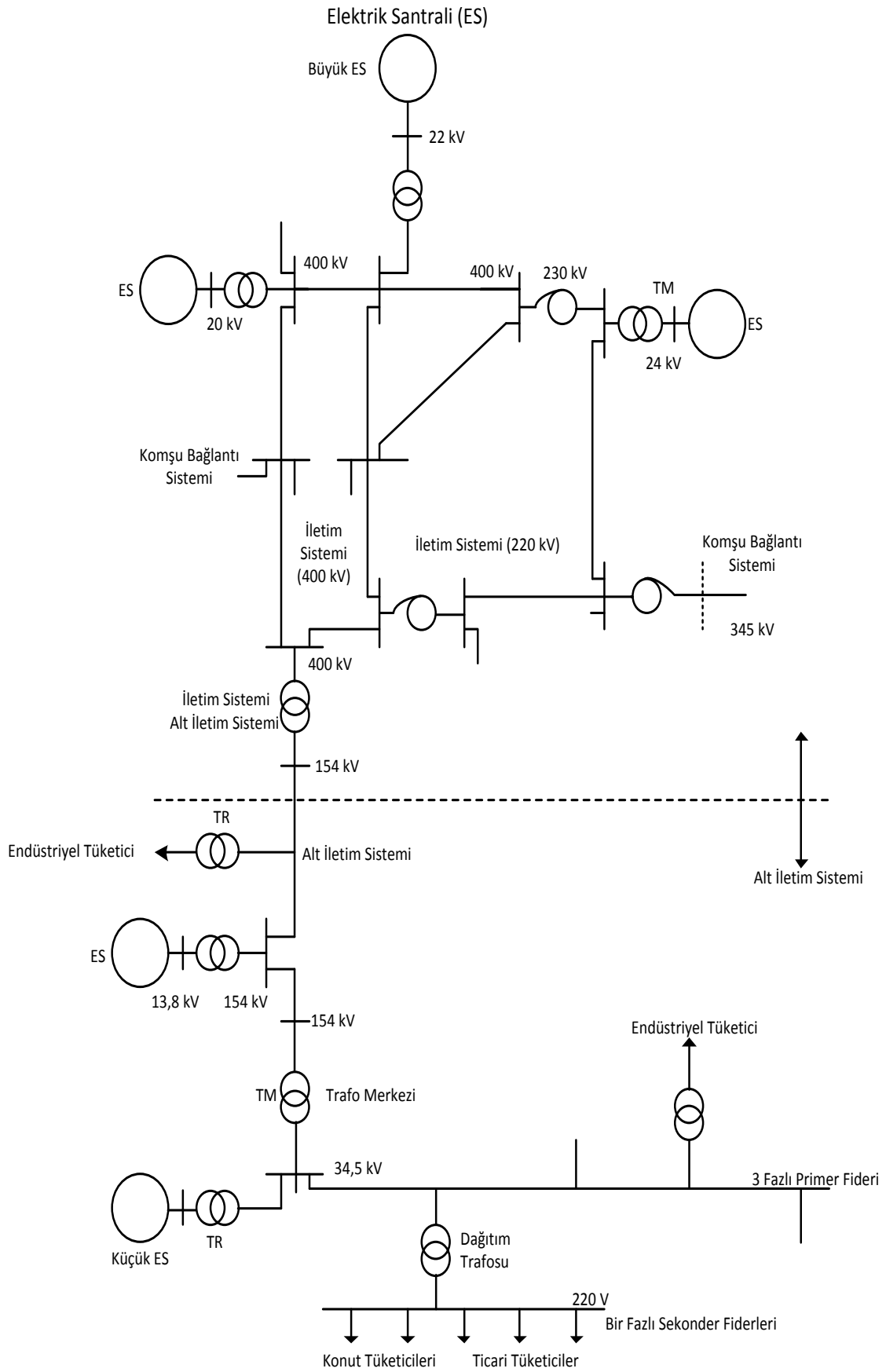
**Şekil 2.3** Alkumru HES 154 kV açık şalt sahası

3. Dağıtım Sistemi: Dağıtım sistemi, elektrik enerjisinin özel tüketicilere taşınmasında son aşamadır. İletim sistemlerindeki yüksek gerilim seviyeleri İletim veya alt iletim hatlarının bağlantı noktaları olan indirici trafo merkezlerindeki (İTM) gerilim düşürücü transformatörler sayesinde düşürülmektedir.



**Şekil 2.4** Batman 2 İTM 380 kV açık şalt sahası 380/34,5 kV indirici trafo

Türkiyede dağıtım hatlarındaki enerji dağıtımını genellikle 33 veya 34,5 kV gibi gerilim seviyelerinde yapılmaktadır. İndirici transformatörlerin alçak gerilim (AG) kısmındaki çıkış fiderleri, içerisinde ölçü ve koruma sistemleri bulunan dağıtım merkezlerine (DM) bağlanmaktadır. Dağıtım merkezlerine bağlanan fiderler kesicili hücreler sayesinde tekrar fiderler halinde dallandırılarak tüketiciye en yakın mesafelere taşınmaktadır. Dengeli bir şekilde dağıtılan fiderlere her tüketim bölgesinde indirici transformatörler bağlanarak gerilim tüketicinin kullanımına uygun hale getirilmektedir. Faz-nötr arası gerilim 220 V gibi seviyelere indirilen elektrik enerjisi bu şekilde tüketicilere sunulmaktadır.



Şekil 2.5 Bir güç sisteminin temel unsurlarını içeren sadeleştirilmiş tek hat şeması (Kundur, 1994).

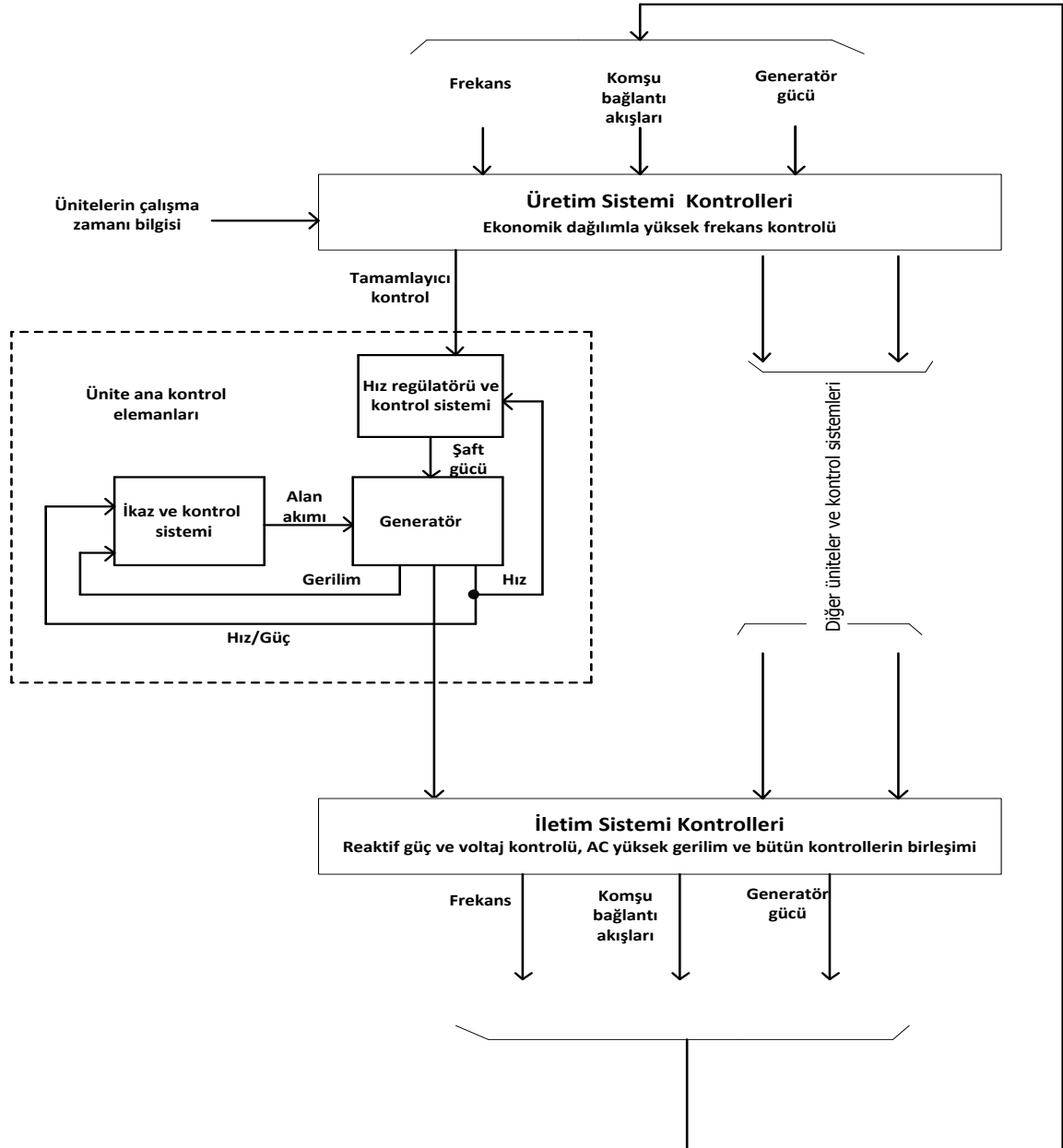
Şekil 2.5’de Enterkonnekte sistemin temel unsurlarını içeren örnek bir bağlantı şeması verilmiştir. Bu şema iletim sistemi, alt iletim sistemi ve dağıtım sistemini içermektedir. Bununla birlikte, şemada komşu bağlantılar için de çeşitli örnekler gösterilmiştir. Bütün bu bağlantılardaki üretim veya tüketim birimlerinin kararlılığı enterkonnekte sistemin kararlılığı için önemli bir yere sahiptir. Günümüzde kararlılığı iyi bir düzeyde sağlayabilen ülkeler arasında da komşu bağlantılar yapılmaktadır. Bu bağlantılar gün geçtikçe artmaktadır. Komşu bağlantıların yapılabilmesi için ülkeler arasında bağlantı anlaşmaları yapılmakta, bu anlaşmalarda güç sistem kararlılığının sağlanması şartı uygulanmaktadır. Bu nedenle ülkemizdeki eski üretim santrallerin çoğu yeni sistemlere adapte edilmektedir (Körpınar, 2008; Kundur,1994).

### **2.3. Elektrik Güç Sistemlerinin Kontrolü ve Kararlılığı**

Elektrik güç sistemleri genel itibari ile mevcut bir doğal enerji formunun elektrik enerjisi formuna dönüştürülmesi işleminden, tüketicinin kullanımına taşıma işlemine kadar varan uygulamaların bütünüdür. Taşınan enerjinin küçük bir kısmı elektrik enerjisi olarak kullanılmakta, daha çok ısı, ışık veya mekanik enerji gibi formlara dönüştürülerek tüketilmektedir. Enerjinin elektrik enerjisi formunda taşınmasının nedeni, diğer enerji formlarına kıyasla daha emniyetli, daha hızlı, yüksek derecede kazançlı ve daha kolay olması gibi avantajlara sahip olmasıdır. Enerjinin taşınmasında kararlılık çok büyük bir öneme sahiptir. Bu nedenle kararlı bir güç sistemi dizaynı için aşağıdaki gereksinimlerin yerine getirilmesi gerekmektedir.

- Güç sistemi, aktif ve reaktif güç taleplerinin sürekli değişimlerine cevap verebilecek nitelikte olmalıdır. Elektrik enerjisi diğer enerjilerin aksine yeterli miktarlarda depolanamamaktadır. Bu nedenle güç sisteminin temel unsurları olan aktif ve reaktif güç rezervlerinin anlık olarak gözlenmesi gerekmektedir. Gözlem sonucu sistemde dengesizlik meydana gelmişse dengesizliğin güç sistemine bağlı güç kaynakları sayesinde hızlı bir şekilde giderilmesi gerekmektedir.
- Güç sistemindeki enerji üretiminde, maliyetlerin minimum seviyelerde olması ve ekolojik dengeye zararın en aza indirgenmesi gerekmektedir.
- Güç kaynakları frekans sabitliğini, gerilim sabitliğini ve yüksek emniyet seviyesini karşılayabilecek niteliklerde olmalıdır.

Yukarıdaki şartları yerine getirebilmek için çeşitli seviyelerde karmaşık bir dizi kontrol birimi kullanılmaktadır. Şekil 2.6'da gösterilen bu birimler bir güç sisteminin çeşitli alt sistemleri ve kontrol sistemlerinin birleşimi ile oluşmaktadır. Bu bilgilerin ışığında, güç sisteminin işletmesinde kullanılan birimlerin kontrollerinin, birbirinden bağımsız kontrol sistemleri tarafından gerçekleştirildiği anlaşılmaktadır (Kundur, 1994).



Şekil 2.6 Bir güç sisteminin alt birimleri ve kontrol sistemlerinin prensip şeması (Kundur, 1994).

Elektrik üretim santrallerindeki ünitelerin en önemli ana teçhizatları elbetteki generatör ve türbindir. Türbinin kontrolünü sağlayan en önemli kontrol birimi hız kontrol sistemi



(hız regülatörü), generatörün ise ikaz sistemidir. Hız regülatörü, isminden de anlaşılacağı gibi sisteme mekanik enerjiyi (buhar basıncı, su akışı vb.) sağlayan kaynakların hızının kontrolünü ile sağlayan sistemdir. İkaz sisteminin fonksiyonu ise generatör çıkış geriliminin regülasyonu, reaktif gücün regülasyonu ve şebekede meydana gelen kararsızlık durumlarında oluşan güç salınımlarının sönümlenmesinde damper görevi gören güç sistem kararlılaştırıcı gibi aktif görevlere sahip bir sistemdir. Üretim kontrol sistemi birimlerinin birinci amacı üretim sisteminin toplam yük dengesini sağlamaktır. Yine kontrol sisteminin, komşu bağlantıların yük alış verişleri ile beraber istenilen frekans değişim aralığını muhafaza edebilecek nitelikte olması gerekmektedir.

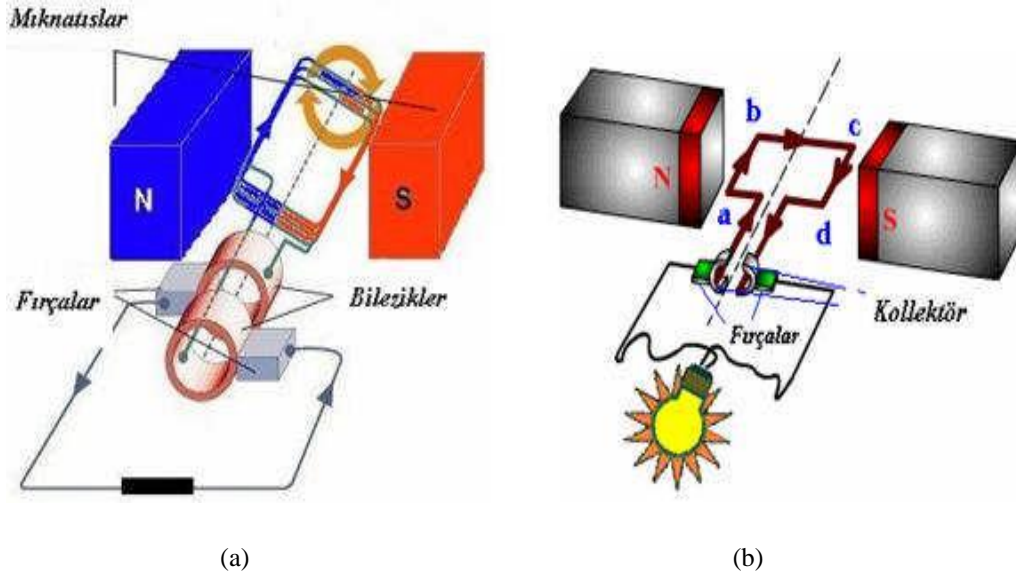
Günümüzde endüstrinin hızla büyümesi ve komşu bağlantıların artmasına paralel artan yük talebi ile güç sisteminde meydana gelen gerilim kararsızlığı sistemin sürekliliğine engel teşkil eden çok önemli bir unsur haline gelmiştir. Gerilim kararsızlığına etki eden pek çok faktör vardır. Güç sistemindeki reaktif güç dengesi bu faktörler arasında çok önemli bir yere sahiptir. Reaktif güç, tüketicilerin kullandığı cihaz türlerine göre indüktif ve kapasitif olarak değişmektedir. Şayet tüketicilerin indüktif reaktif güç talebi fazla ise güç sisteminde gerilim düşümü meydana gelmektedir. Ters durumda ise aşırı gerilim oluşmaktadır. Güç sistemlerinde reaktif gücün veya gerilimin kararlı tutulabilmesi için çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bu sistemlerde kullanılan dinamik faz kaydırıcılar (ikaz akımının artırılıp azaltılması ile endüktif veya kapasitif karakterli çalışabilen senkron makinalar), statik faz kaydırıcılar (kapasitör ve reaktör), transformatör kademe değiştirici vb. yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir.

Güç sistemlerinde meydana gelen kısa devreler, yük değişimleri vb. dinamik bozucu etkilere karşı reaktif güç kontrolünün önemi ihmal edilemez. Nominal gerilim seviyelerini korumak ve sistem kararlılığını sağlamak amacıyla güç sisteminin bu değerlere hızla ulaşabilmesi için reaktif güç kontrolünün yeterli hızda cevap verebilecek niteliklerde olması gerekmektedir. Günümüzde gelişen yarı iletken teknolojisi ile reaktif güç kontrolleri tristör gibi hızlı anahtarlama elemanları sayesinde iyi bir seviyeye ulaşmıştır. Senkron generatörlerde kullanılan otomatik kontrollü statik ikaz sistemlerinde tristör kullanımı güç sisteminin gerilim kararlılığı için çok büyük öneme sahiptir. İkaz sistemi sonraki bölümlerde detaylı olarak ele alınmıştır (Kundur, 1994; Akkaya ve Gök, 2013).

### 3. SENKRON MAKİNALARIN GENEL YAPISI, ÇALIŞMA İLKESİ VE TEMEL PARAMETRELERİ

#### 3.1. Senkron Makinaların Yapısı

Senkron kelimesi, eş zamanlı anlamına gelmektedir. Bu kelime, ilk kez elektrik makinaları üzerinde araştırmalar yapan fizikçi Steinmetz tarafından kullanılmıştır. Senkron makinalar yapıları itibarıyla en büyük elektrik makinalarıdır. Senkron makinalar elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek motor veya mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirerek generatör olarak kullanılırlar. Genellikle elektrik enerjisinin üretiminde kullanılıp güçleri kVA (kilovolt amper) veya MVA (megavolt amper) olarak verilir. Senkron generatörler Şekil 3.1'deki gibi yapısal olarak DC (doğru akım) makinasına benzetilebilirler. Senkron makinalar endüvi yapılarına göre; dönen endüvili ve duran endüvili olmak üzere iki farklı türde üretilirler. Dönen endüvi özellikli senkron makinalar, komütasyon sorunu nedeniyle küçük güçlerde üretilmektedirler.



Şekil 3.1 Generatörlerin genel prensip şemaları; a) senkron generatör, b) doğru akım generatörü

Senkron makinalar yapısal olarak iki ana bölümden oluşur. Bunlar stator ve rotordur. Duran endüvili generatörlerde stator genellikle hareketsiz ve yere sabitlenmiş kısım, rotor ise genellikle hareketli ve yataklanmış olduğu eksen etrafında dönen kısımdır. Statora

yerleştirilen sargıya endüvi sargısı, rotora yerleştirilen sargıya ise kutup veya alan sargısı adı verilir. Rotor sargılarına harici bir kaynak vasıtası ile fırça-bilezik sistemi üzerinden DC akım tabii tutularak elektromıknatısiyet elde edilebileceği gibi, rotorunda sargı kullanılmayan, kendinden mıknatıslı diğer adıyla sabit mıknatıslı özellikte generatörler de mevcuttur. Senkron generatörlerde mekanik enerji; su, fuel oil, doğal gaz vb. gibi tahrik kaynaklarının türbin çarkında oluşturduğu döndürme momentinin sağlanması ile elde edilmektedir. Çarkın dönmesi ile çarka bağlı mil (şaft) ve şafta bağlanmış olan rotorun dönmesi sağlanmış olur. Rotorun kutuplarındaki alan sargıları, dönme hareketi ile birlikte döner manyetik alan oluşturarak stator sargılarında gerilim indükler. Senkron makinalarda stator sargılarında indüklenen gerilimin frekansı rotor hızı ile eşzamanlıdır (Mergen ve Zorlu, 2005; MEB, 2011).

### **3.1.1. Senkron Generatörde Stator Yapısı**

Stator, alternatif akım taşıyan endüvi sargısının yerleştirildiği kısımdır. Manyetik direncinin küçük olması için ferro-manyetik malzemeden yapılır. Sargılarda akan akımların meydana getirdiği alternatif manyetik alanlardan dolayı, demir malzemede Histerizis ve Fuko (Foucault) kayıpları meydana gelir. Bunların küçültülmesi için demir gövde sac plakalardan imal edilir. Saclar silisyum katkılı olduklarından, malzeme manyetik doymaya girmeden, yüksek manyetik alan yoğunluklarının oluşmasına imkan verirler. Kalınlıkları 0,5-2,0 mm veya daha kalın olarak seçilir ve bir tarafları yalıtılır. Böylece sacların içinde akan fuko akımları küçültülerek, bunların neden oldukları fuko kayıpları da azaltılır. Senkron makinalarda gücün büyük olması stator çapının da büyük olmasını ve dolayısıyla kullanılan demir malzemenin ağırlığının artmasına yol açar. Fuko ve histerizis kayıplarının demir ağırlığı ile doğru orantılı olduğu bilindiğine göre, senkron makinada oluşan demir kayıpları, diğer makinalardaki demir kayıplarına göre, çok daha büyük değerlerde olur.

Sacların hazırlanma işlemi statorun iç ve dış çapına bağlıdır. Stator, sargıların yerleştirildiği oluklara ev sahipliği yaptığından, iki ayrı kısımda incelenir. Bunlardan birincisi olukların olmadığı dış çapa yakın olan taraftır. Bu kısma “stator boyunduruğu” adı verilir. Manyetik akının makina çevresinde akması için manyetik direnci küçük olan bir yol sağlar. Bu kısımda rotorda üretilen manyetik akı dişlerin içinden geçer ve stator boyunduruğuna ulaşır. Stator boyunduruğunun manyetik olarak doymasını engellemek için, boyunduruk yüksekliği hesaplanır. Açılan oluk derinlikleri ile boyunduruk

yüksekliğinin toplamı statorun kalınlığı verir. Bu kalınlık statorun dış çapı ile iç çapı arasındaki farka eşittir.

İkinci kısım hava aralığına yakın olan, olukları ve dişleri kapsayan kısımdır. Dişler, rotor akısının statora girdiği manyetik direnci küçük olan yerler olmasından dolayı, manyetik dirençleri, oluk içinde kullanılan bakır iletkenlerden ve izolasyon malzemelerinden dolayı çok büyüktür. Bu nedenle dişlerin doymasını engellemek amacıyla dişlerin geniş yapılması gerekir. Bu işlem stator çapının değerine etkiyen diğer bir faktördür. Çünkü yeteri kadar diş ve oluk yapmak için stator çapının büyütülmesi gerekir.



**Şekil 3.2** Alkumru hidroelektrik santralinde 97 MVA gücündeki bir senkron generatörün statoru

Stator genel itibari ile şekil 3.2’de görüldüğü gibi “karkas” içerisine yerleştirilir. Bu sayede hem sac paketleri korunur. Stator karkası aynı zamanda soğutma yüzeyini de genişlettiği için, soğutucu görevini de üstlenir. Fakat karkasa radyatör biçiminde yüzey şekli vermek, çok küçük makinalar dışında uygun olmaz. Sadece maliyet artışına ve ekonomik olmayan yer kaybına neden olur. Özellikle enerji santrallerinde kullanılan çok büyük güçlü makinalarda kesinlikle uygulanmaz. Senkron makinalarda ölçülerin çok

büyük olmasından dolayı, kullanılan karkas sade ve düz kalın sacdan imal edilir. Çelik evsafı olan bu malzeme, makinanın stator sac paketinin korunmasını, daire yayı biçiminde kesilen sac parçaların bir düzen içinde bulundurulmasını sağlar. Ayrıca herhangi bir hatalı işletme durumunda, oluşabilecek kısa devrede, meydana gelme ihtimali olan çok büyük kuvvetlerin stator sac paketini dağıtmasına engel olmak için kullanılır (Boduroğlu, 1988; Mergen ve Zorlu, 2005; Çolak, 2003).

### 3.1.2. Senkron Generatörde Rotor Yapısı

Kutup sargılarının sarıldığı kısımdır. Silisli sacların paketlenmesi ve üzerine sargıların sarılması ile meydana gelir. Senkron makinalarda rotor konstrüksiyonu rotorun hızına bağlıdır. Bunu tespit eden dönme hızı ve rotorun çapıdır. Çünkü bu iki bileşen çevresel hızı verir. Dönen kısımda kütlelere etkileyen merkezkaç kuvvetlerinin mukavemet hesapları, rotor sargılarının yerleştirilme düzenini belirler. Kutup sargılarının merkezkaç kuvvetlerden etkilenmemesi gerekir. Aksi halde sargılar yerlerinden oynar dağılır, izolasyonları zedelenir ve olası bir kısa devre olayına neden olurlar.



Şekil 3.3 Alkumru HES’de 97 MVA gücündeki bir senkron generatörün rotor karkası ve sac montajı

Kutup sargılarını sorunsuz olarak yerine muhafaza etmek için, iki değişik konstrüksiyon geliştirilmiştir. Bunlardan birincisi en yüksek hızda kullanılan “yuvarlak rotor” veya “turbo rotor” dur. Diğeri ise daha küçük hızlarda kullanılan “çıkık kutuplu rotor” dur. Bu iki konstrüksiyon arasında hız ve rotor çapı açısından kesin bir sınır yoktur. Sınırı saptayan merkezkaç kuvvetlerine mukavemet edebilecek malzemelerin, uygun şekillerde, mühendislik formasyonları ile kullanılmasıdır. Ancak günümüzde rotor devir sayısının 3000 devir/dakika (d/d) ve rotor çapının küçük olduğu bazı küçük güçlü uygulamalarda “yuvarlak rotor” veya “turbo rotor” kullanılmaktadır. Hızının 1500 (d/d)’ya düşmesine rağmen, rotor çapının büyümesi, merkezkaç kuvveti ve buna karşı direnç gösteren yapısal elemanlarda mukavemetin sağlanamaması halinde “yuvarlak (turbo) rotor” konstrüksiyonu kullanımına devam edilir. Bu, mühendislikte mekanik, mukavemet ve malzeme ile ilgili bir konudur. Diğeri taraftan 1500 d/d hızı, “yuvarlak rotor” konstrüksiyonundan, “çıkık kutuplu rotor” konstrüksiyonuna geçiş olarak kullanılan kesin bir sınır olarak gösterilemez. Bahsi geçen bu gerçeğin, tamamen malzeme ve mukavemet hesaplarının altında gizli kaldığını bilmek gerekir. (Mergen ve Zorlu, 2005).

### **3.1.2.1. Yuvarlak Rotor**

Rotor kesiti dairesel olarak imal edilir. Böylece stator ile rotor arasında bulunan hava aralığı, çevre boyunca her yerde sabit tutulur. Kutup sargıları rotorda hava aralığına yakın olan yüzeyde açılan olukların içine yerleştirilir. Ardışık oluklar arasında kalan demir kısma diş denir. Kutup sargılarından akan akım doğru akım olduğundan, rotor çevresinin 2/3’ü oluklarla kaplıdır. Rotor çevresinin geri kalan 1/3’lük kısmında ise oluk yoktur. Oluk derinliğinin bittiği yerde rotor boyunduruğu başlar ve milin dış çapına kadar devam eder. Bu tip rotolarda rotorun kütlesi çevreye homojen olarak yayılmamıştır. Bu kütle dengesizliği d ve q eksenlerinde rotor sehimini farklı kılar. Aksiyel eksene göre oluklu ve oluksuz kısım arasında atalet momentleri farklı olur. Bu nedenle, rotorun yüksek hızda dönmesi sırasında balans bozuklukları ve devir hızında salınımlar meydana gelir. Kutup eksenini civarında derin yarıklar açmak suretiyle bu salınımlara engel olmak mümkündür. Kutup ortasının oluksuz olması, kutuplarda üretilen amper-sarım dağılımının sinüs formundan uzaklaşmasına ve harmonik içermesine neden olur.





Şekil 3.4 Montaj aşamasındaki yuvarlak rotor

Büyük turbo rotorlu makinalarda şekil 3.4’te görüldüğü gibi milin ve rotorun tamamı yekpare olarak dövme ve alaşımlı çelikten imal edilir. Çelikten meydana gelen çok büyük bir kütle oluşturur. Oluklar bunun üzerinde verilen ölçülerde açılırlar. Küçük makinalarda rotor, daire şeklinde kesilmiş sacların istiflenmesi ile yapılır. Rotor sargısından geçen akım doğru akım olduğundan rotorda, rotor dışları haricindeki kısımlarda histerizis ve fuko kayıpları oluşmaz (Mergen ve Zorlu, 2005; Çolak, 2003; MEB, 2011).

### 3.1.2.2. Çıkık Kutuplu Rotor

Çıkık kutuplu senkron makinalar çok kutuplu olup, bir kaç metre gibi kısa boylardadırlar. Düşük hızlı uygulamalarda kullanılırlar. Rotor merkezine yerleştirilen, mile sıkı geçen kama ile mile bağlanan rotor göbeği, aynı zamanda kutupların tespit edilmesini sağlayan dairesel kesitli bir yapı oluşturur. Malzeme olarak yekpare çelikten veya makinanın gücü ve büyüklüğüne göre dökme demirden yapılır. Çapın büyük olması halinde, ağırlığın azaltılması amacıyla rotor göbeği çok sayıda ayakları olan, birbirlerinden eşit açı ile ayrılan, şekil 3.3’te görüldüğü gibi bir konstrüksiyona dönüştürülür. Buna rotor

göbeği yıldızı denir. Malzemesi dökme çeliktir. Kutup gövdeleri de rotor göbeği gibi yekpare olarak dökme çelik veya dökme demirden imal edilir. Görevi kutup sargılarını taşımaktır (Mergen ve Zorlu, 2005; Çolak, 2003).

Kutup sargıları kutup gövdesinin genişliği ve izolasyon kalınlığı dikkate alınarak, silindir şeklinde, ölçülerine göre sarıldıktan sonra şekil 3.5'te görüldüğü gibi kutup gövdesinin üzerine geçirilerek oturtulur. Bunu takip eden işlem, kutup sargıları tarafından üretilen manyetik akının statora geçmesini sağlayan kutup ayaklarının yerleştirilmesidir. Kutup ayakları stator sargılarının ürettiği manyetik alanlara çok yakın oldukları için, Histerizis ve Fuko kayıplarının oluşumlarından kendilerini kurtaramazlar. Büyük güçlü makinalarda, bu bölgede oluşan demir kayıpları büyük olur. Kutup ayaklarını oluşturan demirin ve kutup sargılarının ilaveten ısınarak sıcaklığının artmasına yol açar. Bu nedenle kutup ayaklarının bir tarafının yalıtılmış saclardan yapılması, bu bölgede demir kayıplarının azaltılmasını ve kutup sargılarının daha az ısınmalarını sağlar (Mergen ve Zorlu, 2005).



Şekil 3.5 Andritz yapımı 87 MVA gücündeki bir senkron generatörün çıkık kutuplu rotoru

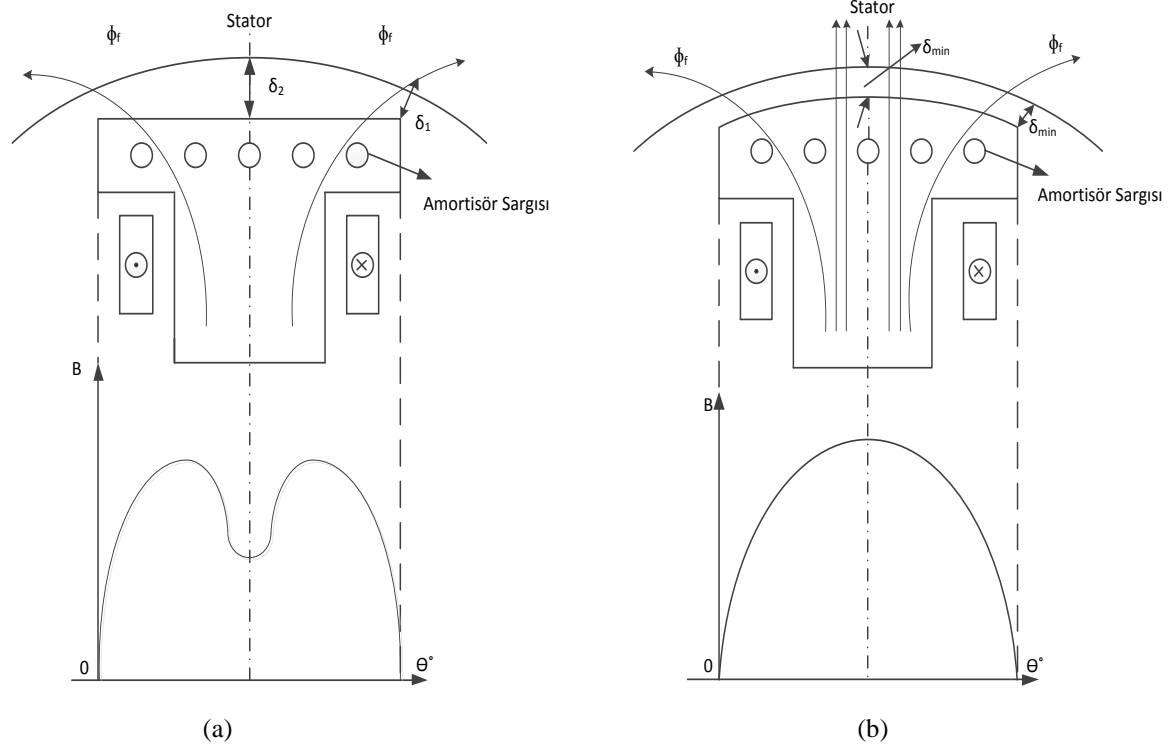


### 3.1.2.3. Kutup Ayakları

Senkron makinanın generatör olarak kullanılması durumunda kutup ayaklarının yapısal şekli, üretilmesi beklenen gerilimin şekli açısından son derece önemlidir. Kutup ayakları statora en yakın olan demir malzeme olduğundan makina yüklü durumdayken, endüvi sargısında meydana gelen büyük manyetik alanlardan şiddetle etkilenir. Bunun sonucunda kutup ayaklarının yüzeylerinde Fuko ve Histerizis kayıpları meydana gelir. Bunun küçültülmesi için yapısında silisyumlu sac kullanılır. Sacların uygun ölçülerde kesilip, ardışık olarak rotor boyu ölçüsünde dizilmesinden sonra kutup ayakları kutup gövdesine monte edilecek duruma gelir. Kutup sargıları kutup gövdesine yerleştirildikten sonra kutup ayağı montajı yapılır.

Kutup ayağı genişliğinin hava aralığına yakın olan yay uzunluğu, yaklaşık bir kutup adımı kadar olmak durumundadır ve bu nedenle geniş bir yer işgal eder. Kutup ayağının yüksekliği ise kullanılan malzemenin B-H eğrisinden yararlanarak hesaplanır. Yüksekliğin büyük seçilmesi kutup gövdesinin üzerine büyük bir kütlenin monte edilmesi anlamına geleceğinden makinanın dönmesi sırasında merkezkaç kuvvetinden aşırı derecede etkilenmesine neden olur. Bu kuvvetler kutup ayağını gövdeden koparmaya, kesmeye çalışır. Bu durum, çıkık kutuplu rotorlarda karşılaşılan mekanik problemlerin en önemlilerinden biridir. Burada kullanılan yöntemler kırlangıç kuyruğu tasarımı, saplama veya tarak konstrüksiyonudur.

Kutup ayakları, kutup gövdesinde akan manyetik akının statorun manyetik devresine ulaştırılmasını ve dağılmasını sağlar. Akı, ayağı terk ettiği anda hava aralığına girer ve manyetik direnci büyük olan ortamı geçerek statora erişir. Kutup ayağı yayına ait yarıçapın, stator iç çapı ile eşit olması durumunda, hava aralığının uzunluğu ayak yayının genişliği boyunca sabit kalır. Bu durumda, akı çizgilerinin gerek kutup ayağı demirlerinde gerekse hava aralığında gittikleri yolların uzunlukları ve bunların manyetik dirençleri dikkate alınacak olursa, manyetik direncin yaklaşık olarak değişmediği gözlenir. Çünkü birim uzunluk için demirin manyetik direnci havanınkinden binlerce defa daha küçüktür. Böylece ayaktan hava aralığına geçen akı, ayağın genişliği boyunca, homojen olarak yayılır ve burada homojen bir manyetik alan yoğunluğu meydana getirir. Bu alan yoğunluğunun dağılımı endüvi sargısında Faraday yasasına göre endüklenen gerilimin şeklini belirler (Mergen ve Zorlu, 2005).



**Şekil 3.6** Kutup ayaklarının şeklinin değişik olması nedeni ile oluşan manyetik alan dağılım şekilleri; a) dikdörtgen kesitli, b) sinüzoidal kesit (Mergen ve Zorlu, 2005).

Şekil 3.6 (a)'da kutup ayağının dikdörtgen olması ile elde edilen manyetik alan yoğunluğunun hava aralığına dağılımı görülmektedir. Burada kutup eksenindeki hava aralığının köşelere göre büyük olmasından dolayı, manyetik dirençteki artışın, alan yoğunluğunda meydana getirdiği çökme görülmektedir. Gerilim dalgasında harmoniklerin varlığını tamamen yok etmek gerekirse kutup ayağının yayına şekil 3.6 (b)'de görüldüğü gibi sinüzoidal şekil verilmelidir. Günümüz teknolojisi ile bunu başarmak mümkün olsa bile, bu işlem maliyeti arttıran bir işlemdir. (Mergen ve Zorlu, 2005).

#### 3.1.2.4. Kutup Sargısı

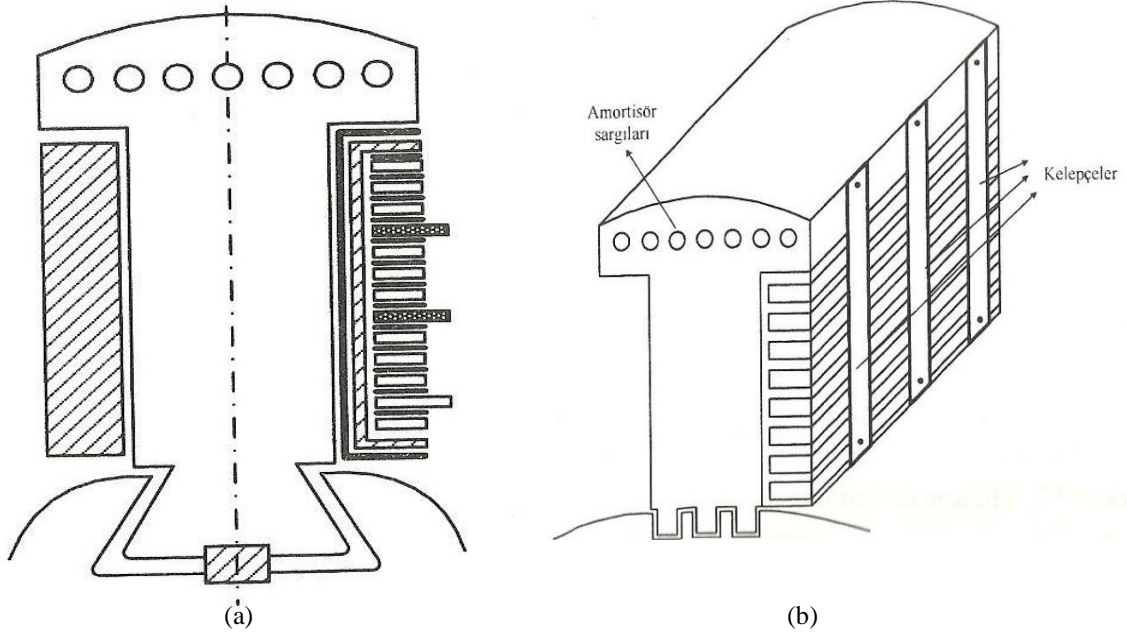
Makinanın N-S kutuplarına yerleştirilen sargılar birbirleriyle seri bağlanırlar. Kutup sargılarının düzlemleri kutup eksenine dik olacak şekilde kutup gövdesine yerleştirilirler. Uyarma sargısında kullanılan gerilim alçak gerilimdir (0-1200 V). Bu nedenle, uyarımda kullanılan güç dikkate alındığında, uyarma sargılarından akacak akımın da büyük olduğu anlaşılır. Fakat bu akım endüvi akımı yanında daha küçüktür. Endüvi sargı gerilimi 10 kV'ye kadar olan makinalarda uyarma amper-sarımını sağlamak amacıyla, endüvi

sargısında kullanılan iletkenler yuvarlak, küçük kesitli ve çok sayıda iletkenden oluşturulur. Çıkık kutuplu konstrüksiyonda, yüksek çevresel hızlarda bu tür sargının merkezkaç kuvvetlerine mukavemet göstermesi zordur, dağılma eğilimi gösterirler. Bunu engellemek için düşey eksen boyunca belirli aralıklarla kelepçeler ile desteklenirler. Endüvi akımı verilen sınırı aşması halinde, uyarma sargısının iletkenleri dikkörtgen kesitten yapılıır. Kesitin kalınlığı küçük, genişliği ise büyüktür.

Sargı iletkenleri kendi aralarında ve demir gövdeye karşı, değişik malzemeler ile izole edilir. Sarım sayısının büyük olması durumunda, kutup ekseninde yerleştirilen birinci iletken grubuna ek olarak ikinci veya üçüncü gruplar ilave edilebilir. Bunlara “tabaka” denir. Bu tür sargı kullanılması durumunda tabakalar arasında yalıtkan kullanılır. Tabakayı oluşturan ve kutup eksenini boyunca yukarıdan aşağıya doğru yerleştirilen iletkenlerin arasına ise mika veya eşdeğer bir yalıtkan koyulur. Bu tür sargılarda iletken grubunun soğumasını kolaylaştırmak amacıyla bazı sarımlara, sargının bittiği eksenini taşıarak çıkıntı yaptırılır ve böylece soğumaya daha fazla katkı yapması sağlanır.

Sarımı atölyede tamamlanan bobin merkezkaç kuvvetine eşit olan basınçta preslenir ve yalıtkan banyosundan sonra pişirilir. Hazırlanan silindirik uyarma bobini kutup gövdesine kutup ayağı yerleştirilmeden önce monte edilir. Kutup sargısının meydana getirdiği büyük bakır kütle, rotorun hareketi esnasında, büyük merkezkaç kuvvetleri tarafından zorlanır. Bunun için sargıda bulunan iletkenlerin hareket etmemelerinin sağlanması gerekir.

Yuvarlak rotorlarda iletkenler oluklara yerleştirilir ve dönme hareketi sırasında oluşan merkezkaç kuvvetlerinden etkilenip, hava aralığına taşmalarını engellemek amacıyla, oluk ağızlarına aksiyal eksen boyunca çelik veya sarı (pirinç alaşım) malzemedен yapılmış takozlar yerleştirilir. İletkenler birbirleriyle seri bağlı oldukları için, oluklara yerleştirme işlemi, bobin yanlarının tek tek oluklara yerleştirilmesi ile yorucu ve zaman alıcı bir işçilikle gerçekleştirilir. Bütün oluklar yerleştirildikten sonra kalan iki adet uç, uyarma sargısını besleyen doğru akım kaynağının pozitif ve negatif uçlarına bağlanır.



Şekil 3.7 Çıkık kutuplu senkron makina rotor kutbunun; a) kesit görünüşü, b) perspektif görünüşü (Mergen ve Zorlu, 2005).

### 3.1.2.5. Amortisör Sargısı

Kutup ayaklarında açılan oluklara veya daire kesitli deliklere yerleştirilen bu sargılar, tek parça ve kalın bakır iletken yapılmıştır. Aksiyal ekseninde kutup ayağının boyunca devam eder. Kutup ayaklarının başlangıç ve bittiği yerlerde bütün iletkenler, kesiti daha kalın birer iletkenle kısa devre edilirler ve bir kısa devre kafesi meydana getirirler. Bu sargının tamamına amortisör sargısı denir. Bu sargı, senkron makinanın motor işletmesinde asenkron olarak yol almasını sağlamaktadır. Boyutlandırılması için yol alma koşullarının ve yol alma momentinin bilinmesi gereklidir (Mergen ve Zorlu, 2005).

Amortisör sargısı, generatör işletmesinde moment salınımlarının ve dengesiz yüklenme sırasında negatif bileşenin söndürülmesinde kullanılır. Periyodik olarak değişen küçük genlikli bir moment, makinanın sürekli rejimde dönmekte olduğu hıza katkıda bulunarak, onun periyodik olarak hızlanmasına ve yavaşlamasına neden olur. Bu olay, kutup eksenini ile rotor eksenini arasında var olan ve yük açısı ( $\delta$ ) olarak bilinen, açının toplamı, teorik olarak,  $90^\circ$ 'yi aşarsa, generatör senkron olarak çalışamaz. Stabilitesini, yani dengeli çalışmasını kaybeder. Paralel çalışma esnasında, paralel çalışma koşulunu yitirir ve senkron çalışmadan ayrılır. Bu tip salınımlar makinanın içinde  $f_s$ , salınım frekansını endüklerler ve amortisör iletkenlerinde emk ve akım endükleyerek, joule kayıplarına neden olurlar. Salınımlardan ortaya çıkan fazla kinetik enerji, ısı enerjisi olarak söndürüm sargısında tüketilir. Bu nedenle, bu sargı gerek yol verme ve gerekse salınımlardan kaynaklanan

büyük akımların üretebileceği yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmalıdır. Çubuk iletkenlerin kısa devre iletkenleri ile bağlantısında kaynak kullanılır. Kutupların önünde ve arkasında bulunan kısa-devre iletkenleri merkezkaç kuvvetine ve yüksek sıcaklık derecelerinde perçin veya cıvata konsrüksiyonu ile emniyetli şekilde bağlanırlar.

Amortisör sargısı eğer kutup ayaklarında açılan oluklara yerleştirilirse, iki oluk arasındaki oluk adımı, endüvi oluk adımına eşit yapılır. Böylece manyetik alan harmoniklerinin, kalın bakırdan imal edilmiş, söndürüm sargısı iletkenlerinde büyük değerlerde fuko kaybı meydana getirmesi engellenmiş olur. Ayrıca olukların ağzı yarı-açık imal edilerek, iletkenlerden akan büyük akımlarda, oluk çevresinde meydana gelen büyük kaçak akımların oluşması engellenir (Mergen ve Zorlu, 2005).

### 3.2. Senkron Generatörün Çalışma İlkesi

Senkron generatörün çalışma ilkesini açıklamak için şekil 3.8’de verilmiş sade modeli ele alacağız.

Şekil 3.8’de verilen modelde de görüldüğü gibi iç manyetik sistemi hareketsiz olduğu durumda, dış manyetik sistem de hareketsizdir ve manyetik çekme kuvveti  $F_m$  kutupların manyetik eksenine yönelmiştir ( $\delta=0$ ).

Eğer manyetik sistemi küçük bir  $n_1$  hızıyla döndürecek olursak, ilk anda manyetik sistemler arasında  $\delta \neq 0$  açısı oluşacaktır.

Bu durumda manyetik çekim kuvveti  $F_m$  iç manyetik sistem eksenine göre dönmüş olacaktır ve onu iki bileşene ayırmak mümkündür.

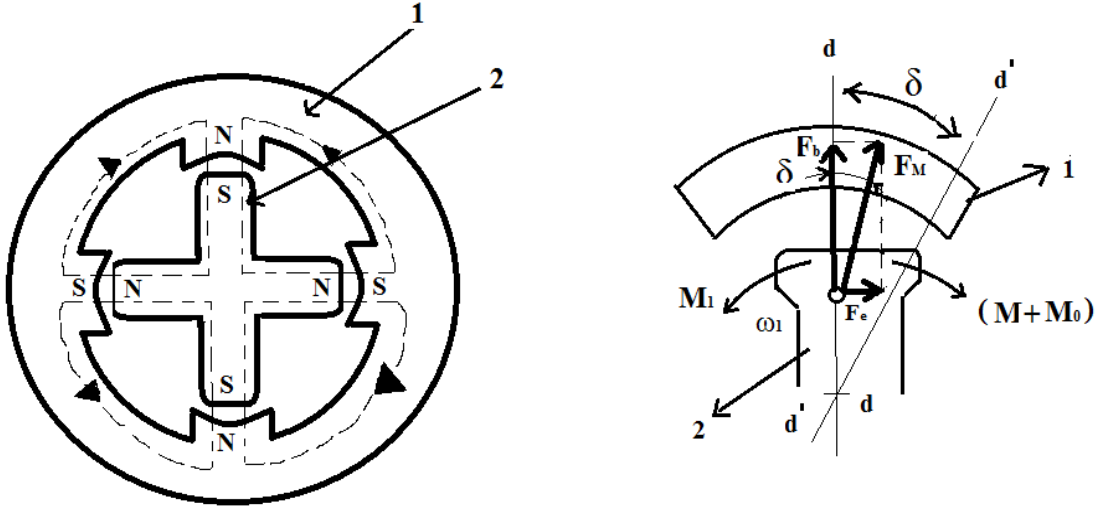
$$F_m = F_b + F_e \quad (3.1)$$

$F_b$  = Manyetik çekim kuvvetinin boyuna bileşeni,

$F_e$  = Manyetik çekim kuvvetinin enine bileşenidir.

Diğer kutuplara da etki eden  $F_e$  kuvvetlerinin toplamı, iç manyetik sisteme (rotora) frenleyici etki yapan M momentin oluşmasına neden olacaktır.

Senkron generatörlerde, iç manyetik sistem rotor kutupları üzerindeki ikaz sargısının oluşturduğu elektromıknatıs, dış manyetik sistem ise stator üç fazlı sargılarında oluşan dönen manyetik kutuplardır.



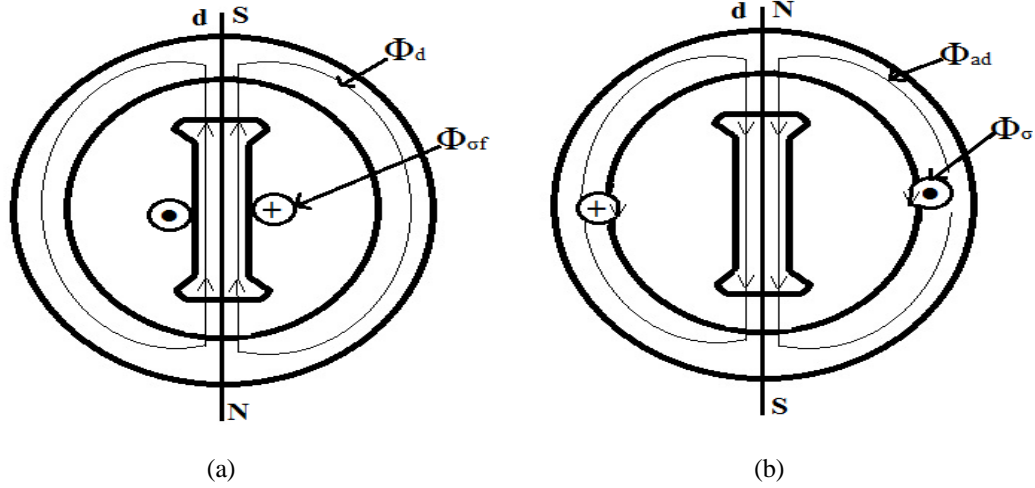
Şekil 3.8 Senkron generatörün çalışma ilkesini açıklayan sade model (Şerifoğlu, 2007).

Rotorun ikaz sargısına, ikaz sisteminden  $I_f$  ikaz akımı uygulanır. Bu akım doğru akım olduğu için onun oluşturduğu  $\Phi_f$  manyetik akısı da doğru akıdır ve sabit değerlidir. Bu akının esas bölümü statorun çelik çekirdeğinden geçerek kapanır ( $\Phi_d$ ), küçük bir kısmı ise ikaz sargısı etrafında kaybolur ( $\Phi_{\sigma f}$ ). Bu durumda  $\Phi_d$  akısı statorda bulunan A,B,C faz sargılarını keser. Rotor, tahrik makinası (türbin) yardımıyla döndürüldüğünde stator sargılarında periyodik olarak değişen ( $e_A$ ), ( $e_B$ ), ( $e_C$ ) emk'ları oluşur.

Stator sargılarının uçlarına yük bağlandığı durumda bu sargılardan  $i_A$ ,  $i_B$ ,  $i_C$  alternatif akımları geçer. Bu akımlar faz sargılarında alternatif  $\Phi_A$ ,  $\Phi_B$ ,  $\Phi_C$  manyetik akımlarını oluştururlar. Bu akıların küçük bir kısmı sargılar etrafında kaçak olarak kaybolurlar ( $\Phi_{\sigma}$ ), esas kısmı ise rotorun çelik çekirdeğinden kapanır ( $\Phi_a$ ).

Stator oluklarına yerleştirilmiş A, B, C faz sargıları birbirinden  $2\pi/3$  radyan açısı kadar kaydırılmış oldukları için sargıların emk'ları, akımları ve akıları da birbirinden  $2\pi/3.t_1$  saniye kadar farklı olacaktır. Bu durumda rotordan kapanan  $\Phi_A$ ,  $\Phi_B$ ,  $\Phi_C$  akılarının toplam değeri sabit olan, " $\Phi_a = 1,5 \cdot \Phi_m \sin\omega t$ " sabit akısını oluştururlar. Burada  $\Phi_m$  sinüzoidal yasayla değişen akının en büyük değeridir. Bu toplam akı ( $\Phi_a$ ) rotorla aynı yönde ve aynı senkron hızla döner. Böylece kararlı çalışma durumunda SG'de sabit değerli ve senkron hızla dönen iki temel manyetik akı vardır. Bunlardan birincisi  $I_f$  ikaz akımının oluşturduğu  $\Phi_d$  akısı, ikincisi stator sargılarından geçen akımların oluşturduğu  $\Phi_a$  manyetik akısıdır. Bununla beraber  $\Phi_a$  akısı, endüvi reaksiyonunu oluşturur.

Şekil 3.8’de gösterilmiş olan bu iki akımın karşıt ilişkisinden oluşan elektromanyetik moment rotora frenleyici etki yapar. Türbinin döndürücü momentinin ( $M_f$ ) elektromanyetik frenleyici momente ( $M$ ) eşit olduğu durumda senkron generatör senkron hızla döner. Sonuç olarak mekanik enerji elektrik enerjisine dönüşür (Şerifoğlu, 2007).



Şekil 3.9 Senkron generatörde; a) kutup alanı, b) endüvi alanı dağılımı (Şerifoğlu, 2007).

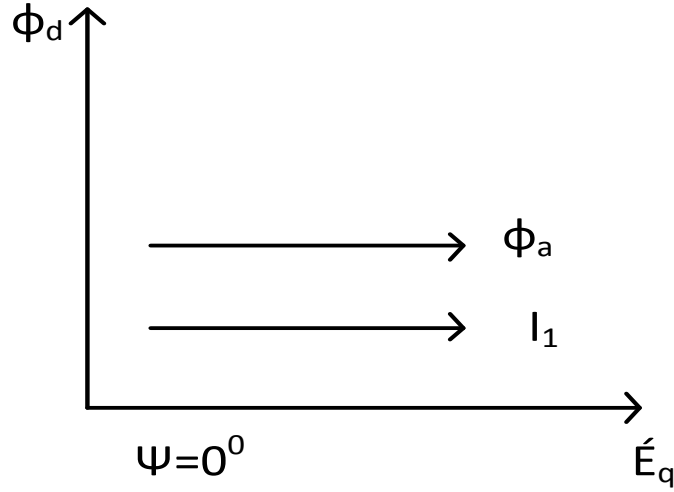
### 3.3. Senkron Generatörün Endüvi Reaksiyonu

Senkron generatör yüklü çalıştığı durumda,  $F_f$  alan sargısının mmk (magnetomotor kuvveti)’sı, ve  $F_a$  stator (endüvi) sargısı mmk’sı birbirine etki etmektedir. Stator mmk’sı rotor mmk’sına güçlendirici ve zayıflatıcı şekilde etki edebilir ve onun formunu değiştirebilir. Stator sargısı mmk’sının alan sargısı mmk’sına etkisine endüvi reaksiyonu denir. Endüvi reaksiyonu, senkron generatörün yüküne ve yükün niteliğine bağlı olup generatörün çalışma karakteristiklerini etkilemektedir. Manyetik alanın değişmesi stator sargılarında oluşan emk’ların ve buna bağlı parametrelerin değişmesine neden olmaktadır.

Senkron generatörler omik, endüktif veya kapasitif gibi değişik yüklerde çalışmaktadır. Generatörlerde oluşan emk ve akım vektörleri arasındaki faz açısı farklı konumlarda olabilirler. İkaz sargısının oluşturduğu  $\Phi_f$  manyetik akısının statordan geçen bölümü  $\Phi_d$  rotor d eksenindedir.  $\Phi_d$  akısının stator sargılarında oluşturduğu  $E_q$  emk’sı ise  $90^\circ$  geride, dolayısıyla q eksenindedir. Stator sargılarından geçen  $I_1$  akımı vektörü ise yükün karakterine bağlı olarak  $E_q$  vektörüne göre farklı konumlarda olabilir.

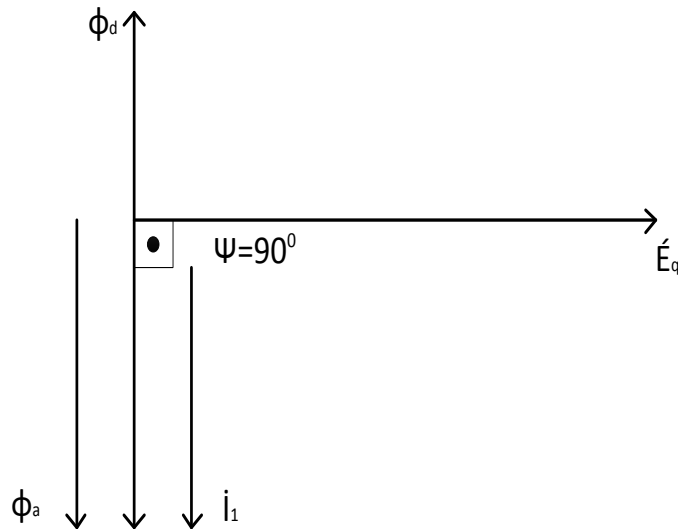
Şimdi senkron generatörün sadece omik, sadece endüktif, sadece kapasitif, omik-endüktif ve omik kapasitif yüklerde endüvi reaksiyonlarını fazör diyagramları üzerinde inceleyelim;

Sadece omik yükte  $E_q$  ve  $\dot{I}_1$  vektörleri arasındaki faz açısı sıfıra eşittir ( $\psi=0$ ), dolayısıyla şekil 3.10'da görüldüğü gibi aynı yöndedirler.



Şekil 3.10 Sadece omik yükte endüvi reaksiyonu

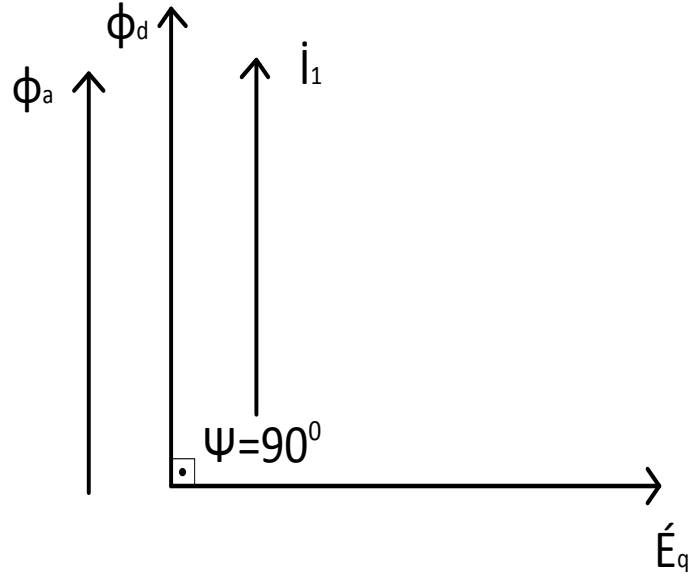
Sadece endüktif yükte şekil 3.11'de görüldüğü gibi  $\dot{I}_1$  akım vektörü  $E_q$  vektöründen  $90^\circ$  geridedir ( $\psi=90^\circ$ ). Dolayısıyla rotor  $90^\circ$  ileri (sol) döndükten sonra  $\dot{I}_1$  akımı maximum değerine ulaşır. Endüktif yükte stator manyetik akısı rotor manyetik akısına ters yöndedir, dolayısıyla stator manyetik akısı şekil 3.11'de görüldüğü gibi boyuna eksen yönünde rotora mıknatıslayıcı etki yapmaktadır.



Şekil 3.11 Sadece endüktif yükte endüvi reaksiyonu



Sadece kapasitif yükte  $\dot{I}_1$  akımı vektörü  $E_q$  vektöründen  $90^\circ$  ileridedir ( $\psi = -90^\circ$ ).

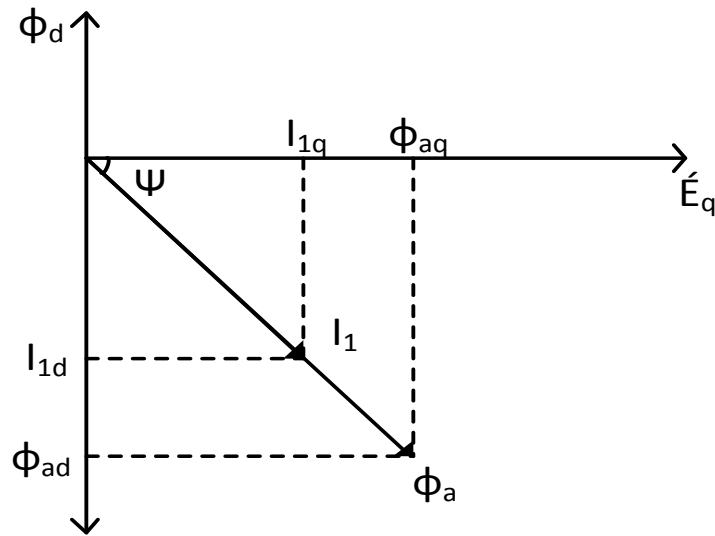


Şekil 3.12 Sadece kapasitif yükte endüvi reaksiyonu

Kapasitif yükte stator manyetik akısı ile rotor manyetik akısı aynı yöndedirler, dolayısıyla stator manyetik akısı Şekil 3.12’de görüldüğü gibi boyuna eksen yönünde rotora mıknatıslayıcı etki yapmaktadır.

Karmaşık yükte  $\dot{I}_1$  ve  $E_q$  vektörleri arasındaki faz açısı  $0 < \psi = \pm 90^\circ$  civarında değişebilir.

Omik-endüktif yükte  $0 < \psi < 90^\circ$  civarında değişebilir.



Şekil 3.13 Omik-endüktif yükte endüvi reaksiyonu

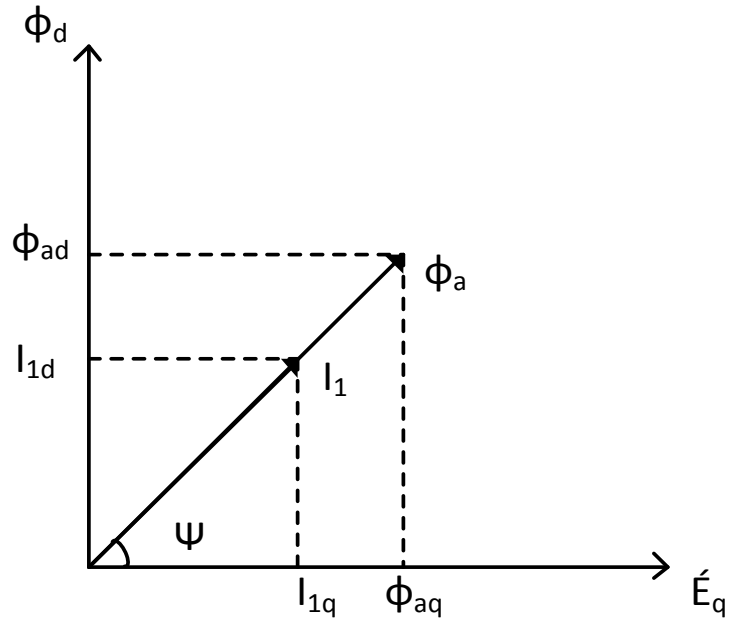
Stator manyetik akısı iki bileşene ayrılabilir:

$$\Phi_{aq} = \Phi_a \cos \psi - \text{enine bileşen}$$

$$\Phi_{ad} = \Phi_a \sin \psi - \text{boyuna bileşen}$$

Omik-endüktif yükte endüvi reaksiyonunun boyuna bileşeni şekil 3.13’de görüldüğü gibi mıknatıslayıcı etki yapmakta, enine bileşeni ise rotor manyetik akısının simetrikliğini bozmaktadır.

Omik-kapasitif yükte  $0 < \psi < -90^\circ$  civarında değişebilir.



Şekil 3.14 Omik-kapasitif yükte endüvi reaksiyonu.

Omik-kapasitif yükte endüvi reaksiyonunun boyuna bileşeni Şekil 3.14’de görüldüğü gibi mıknatıslayıcı etki yapmakta, enine bileşeni ise rotor manyetik akısının simetrikliğini bozmaktadır (Şerifoğlu, 2007).

### 3.4. Senkron Generatörün Temel Parametreleri

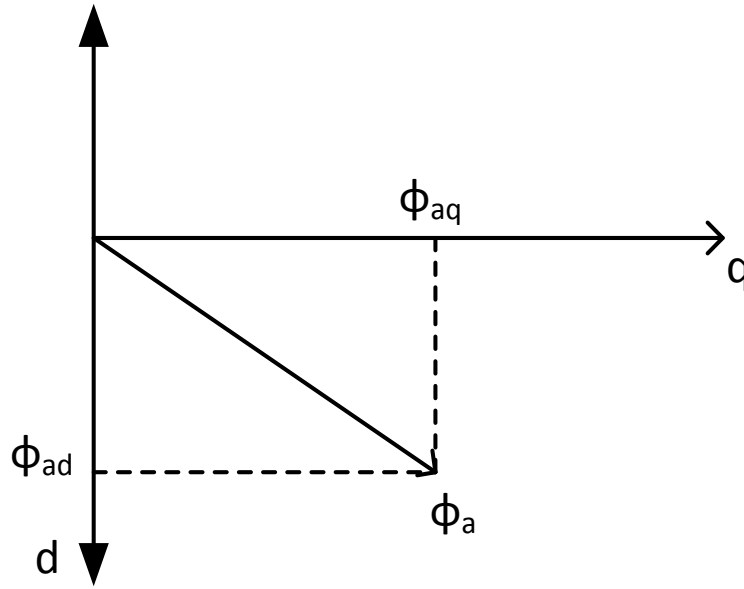
Sürekli çalışma durumunda senkron generatörün temel parametreleri, generatörün senkron reaktansları ve senkron emk’sıdır. Reaktansları ve emk’yi belirlemek için senkron generatörde oluşan manyetik akıların kapanma yollarını izlemek gerekir.

İkaz sargısı d eksenini yönünde yerleştirilmiş olduğu için  $\Phi_d$  manyetik akısı her zaman d eksenini yönünde olur.

$\Phi_a$  vektörünün yönü ise senkron generatörün yükünün karakteri ile belirlenir. Öyle ki, aktif yük (P+JQ) olduğunda aralık bir yönde olur.

Yükün karakteri değişince  $\Phi_a$  vektörünün yönü de değişir ve bu nedenle senkron generatörün elektromanyetik analizi zorlaşır. Problemi kolaylaştırmak için  $\Phi_a$  vektörünü iki bileşene ayırmak mümkündür ( $\Phi_{ad}$ ,  $\Phi_{aq}$ ).

Bu durumda yükün karakterinde, değişken bileşenlerin yalnız değerleri değişir, yönleri değişmez aynen kalır.  $\Phi_{ad}$ ,  $\Phi_{aq}$  endüvi reaksiyon akısının boyuna ve enine bileşenleridir. Stator sargılarının emk'sını senkron hızla dönen birim vektör gibi gösterirsek, elektromanyetik endüksiyon yasasına ( $e = d\Phi / dt$ ) göre emk vektörü  $\Phi_d$  vektöründen  $90^\circ$  kadar geride kalır ve q eksen yönünde olur.  $E_q$  senkron generatörün senkron emk'sı adını alır.



Şekil 3.15  $\Phi_a$  vektörünün bileşenleri

Sürekli çalışma durumunda senkron generatörün reaktansları şekil 3.15'te olduğu gibi  $\Phi_{ad}$ ,  $\Phi_{aq}$ ,  $\Phi_\sigma$  akılarının kapanma yollarının manyetik dirençleri (relüktansları) ile belirlenir.  $\Phi_{ad}$  akısının kapanma yoluna ilişkin reaktansı  $X_{ad}$ ,  $\Phi_{aq}$  akısının kapanma yoluna ilişkin reaktansı  $X_{aq}$ ,  $\Phi_\sigma$  akısının kapanma yoluna ilişkin reaktansı  $X_\sigma$  ile işaretlersek:

$$X_d = X_\sigma + X_{ad} \quad (3.2)$$

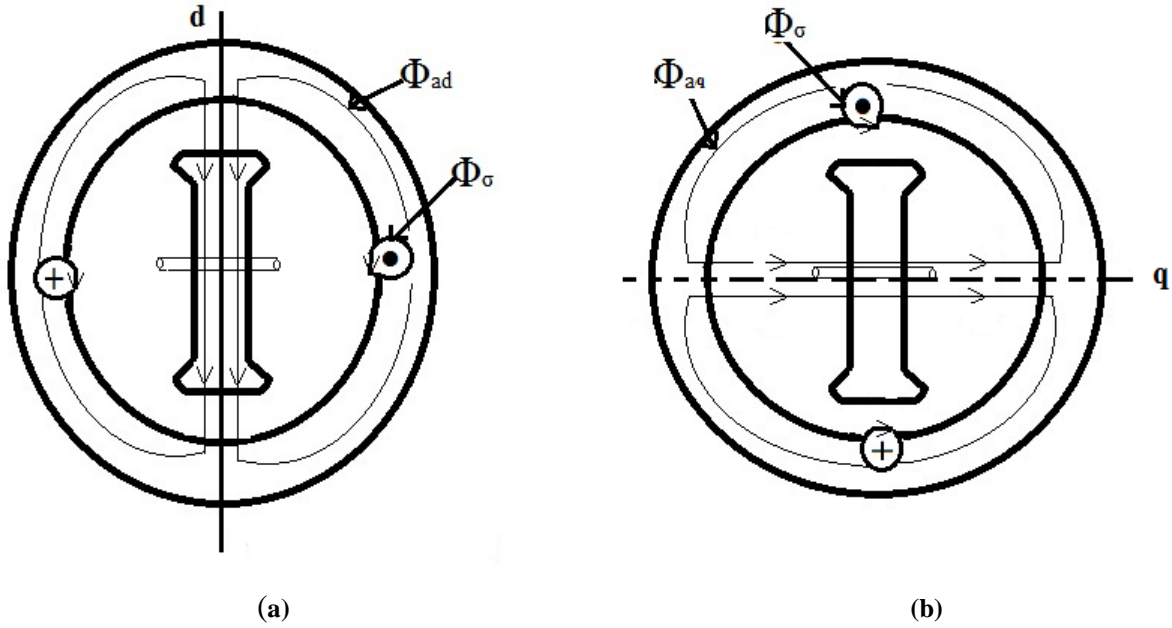
$$X_q = X_\sigma + X_{aq} \quad (3.3)$$

yazılabilir.

$X_d$ ,  $X_q$  stator faz sargıları boyuna ve enine eksen yönünde senkron reaktansları adını taşırlar.

$X_{ad}$ ,  $X_{aq}$  boyuna ve enine endüvi reaksiyon reaktansları,  $X_{\sigma}$  stator sargısının kaçak reaktansdır.

Çıkık kutuplu SG'de  $X_{aq} < X_{ad}$ ,  $X_q < X_d$  (genelde  $X_q \approx 0,6 \cdot X_d$ ). Yuvarlak rotorlu senkron generatörlerde de ise  $X_{aq} = X_{ad}$ ,  $X_q = X_d$  olur. Reaktansların farklı olması nedeniyle bu iki çeşit makinanın eşdeğer devreleri ve fazör diyagramları birbirinden farklıdır (Şerifoğlu, 2007).



Şekil 3.16 Senkron generatörün basit fiziksel modeli; a) boyuna eksen yönünde, b) enine eksen yönünde

### 3.5. Senkron Generatörün EMK Bağıntısı

Yüklü çalışma durumunda SG'ün uç gerilimi boşa çalışma durumundan farklı olacaktır. Endüvi reaksiyonu, kaçak reaktans, stator sargıları direncinde oluşan gerilim düşümü bu farkı oluşturan etkenlerdir. Yüklü çalışan SG' de birkaç MMK oluşuyor ve onların karşıt etkisinden toplam manyetik akı oluşuyor. Kolaylık olsun diye çıkık kutuplu SG'ün uç gerilimine etki eden etkenleri araştırmak için her bir MMK'nın kendi manyetik akısını oluşturduğu varsayılırsa:

1. İkaz sargısının mmk'sı olan  $F_f$ , ikaz manyetik akısı  $\Phi_f$ 'i oluşturur.  $\Phi_f$  manyetik akısının esas bölümünü ( $\Phi_d$ ) stator sargılarında  $E_q$  EMK'sını oluşturur.

2. Endüvi reaksiyonu mmk'sının boyuna bileşeni olan  $F_{ad}$ ,  $\Phi_{ad}$  boyuna bileşen manyetik akısını oluşturur.  $\Phi_{ad}$  akısı stator sargılarında endüvi reaksiyonu boyuna bileşen emk'sı olan  $E_{ad}$ 'i oluşturur.

$E_{ad}$  emk'sı senkron generatör endüvi reaksiyonunun boyuna eksen reaktansı ile orantılıdır.

$$E_{ad} = -j \dot{I}_1 \cdot X_{ad} \quad (3.4)$$

$X_{ad}$  manyetik sistemin doyumuna bağlı olarak değişebilir.

**3.** Endüvi reaksiyonu mmk'sının enine bileşeni  $F_{aq}$ , enine bileşen  $\Phi_{aq}$  manyetik akısını oluşturur.  $\Phi_{aq}$  akısı stator sargılarında endüvi reaksiyonun enine bileşen emk'sı olan  $E_{aq}$ 'u oluşturmaktadır.

$E_{aq}$  EMK'sı senkron generatör endüvi reaksiyonunun enine eksen reaktansı ile orantılıdır.

$$E_{aq} = -j \dot{I}_1 \cdot X_{aq} \quad (3.5)$$

Çıkık kutuplu SG'lerde  $\Phi_{aq}$  akısı hava aralığının büyük olduğu bölümden geçtiği için  $X_{aq}$  manyetik sistemin doyumuna bağlı değildir.

**4.** Stator sargıları kaçak manyetik akısı  $\Phi_{\sigma}$  stator kaçak emk'sı  $E_{\sigma}$  oluşturuyor.

$$E_{\sigma} = -j \dot{I}_1 \cdot X_{\sigma} \quad (3.6)$$

Burada  $X_{\sigma}$  stator sargıları kaçak reaktansıdır.

**5.** Stator sargılarından geçen  $I_1$  akımı faz sargılarının direncinde gerilim düşümü oluşturur.

$$\Delta U_a = \dot{I}_1 \cdot r_1 \quad (3.7)$$

Senkron generatör uç gerilimi yukarıda sıralanan parametrelerin geometrik toplamına eşittir.

$$U_1 = \Sigma E - \dot{I}_1 \cdot r_1 = E_q + E_{ad} + E_{aq} + E_{\sigma} - \dot{I}_1 \cdot r_1 \quad (3.8)$$

$r_1$  değeri küçüktür ve buna göre tam yükte çalışan senkron generatörün gerilim düşümü  $0,01 \cdot U_{nom}$ 'in altındaki değerlerde olabilir.

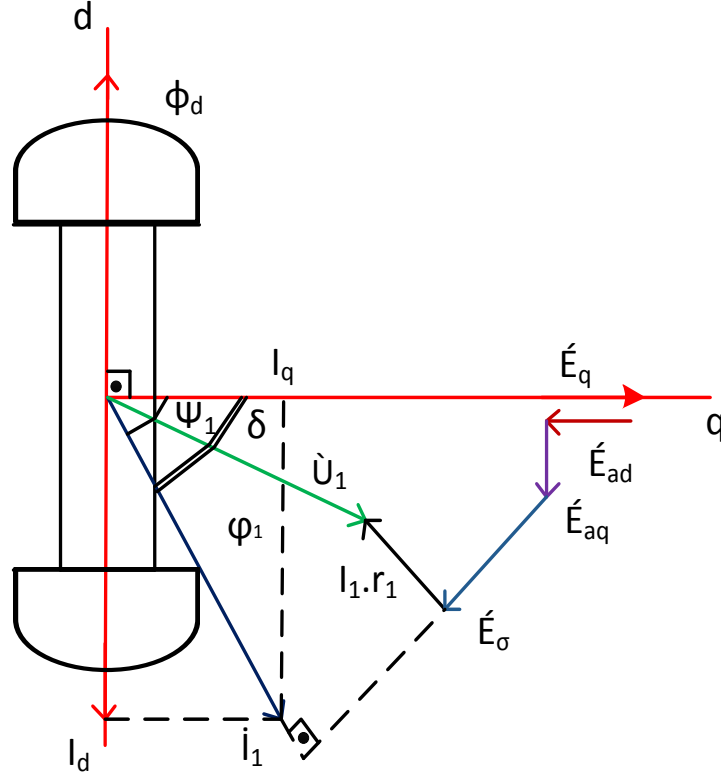
$\dot{I}_1 \cdot r_1 \approx 0$  olarak kabul edilirse, emk ikaz sargısı mmk'sı olan  $F_f$ , boyuna eksen  $F_{ad}$  ve enine eksen  $F_{aq}$  endüvi reaksiyon mmk'larının ve kaçak mmk'nın oluşturduğu emk'ların geometrik toplamına eşit olur (Şerifoğlu, 2007).

$$\Sigma E = E_q + E_{ad} + E_{aq} + E_{\sigma} \approx U_1 \quad (3.9)$$

### 3.6. Senkron Generatörün Vektör Diyagramı

Omik-endüktif yüklü çıkık kutuplu senkron generatörün vektör diyagramı (3.9) bağıntısına göre kurulabilir. Şekil 3.17'de ikaz sargısı rotorun boyuna eksenini olan d eksenine yönünde olduğu için ikaz manyetik akısının statorun kapanan esas bölümü ( $\Phi_d$ ) de d eksenine yönünde olacaktır. Esas manyetik akının stator sargılarında boşta çalışma

durumunda oluşturduğu EMK ise  $90^\circ$  geride, dolayısıyla enine eksen olan q eksenini yönünde olacaktır.



Şekil 3.17 Çıkık kutuplu senkron generatörün omik-endüktif yük için fazör diyagramı

Stator akımı  $\hat{I}_1$  ve  $E_q$  arasındaki faz açısı  $\psi_1$ 'dir.

$I_q = \hat{I}_1 \cos \psi_1$  – akımın enine bileşeni  $I_d = \hat{I}_1 \sin \psi_1$  – akımın boyuna bileşenidir.

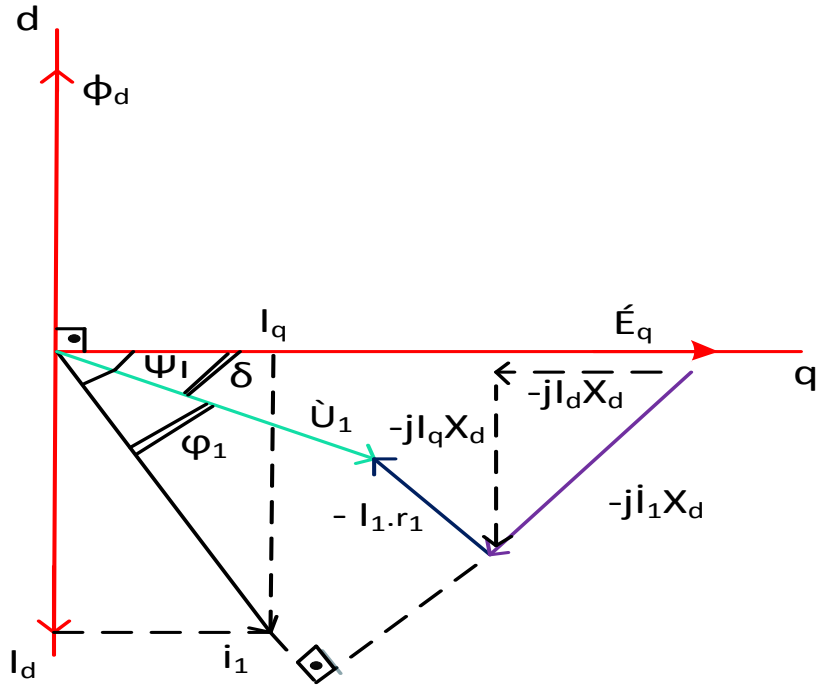
Endüvi reaksiyonunun boyuna bileşen emk'si  $E_{ad} = -j \hat{I}_1 X_{ad}$   $E_q$ 'ye ters yönde, enine bileşen emk'si  $E_{aq} = -j \hat{I}_1 X_{aq}$  ise  $E_q$ 'ye dik yöndedir.

Stator sargılarındaki kaçak emk  $\hat{I}_1$  akımına dik yönde,  $E_\sigma = -j \hat{I}_1 X_\sigma$ .

Stator sargılarındaki aktif gerilim düşümü ise,  $\Delta U_a = \hat{I}_1 r_1$ ,  $\hat{I}_1$  akımına paralel yöndedir.

$\hat{U}_1$  gerilim vektörüyle  $E_q$  emk vektörü arasındaki faz açısı  $\delta$ 'dir.

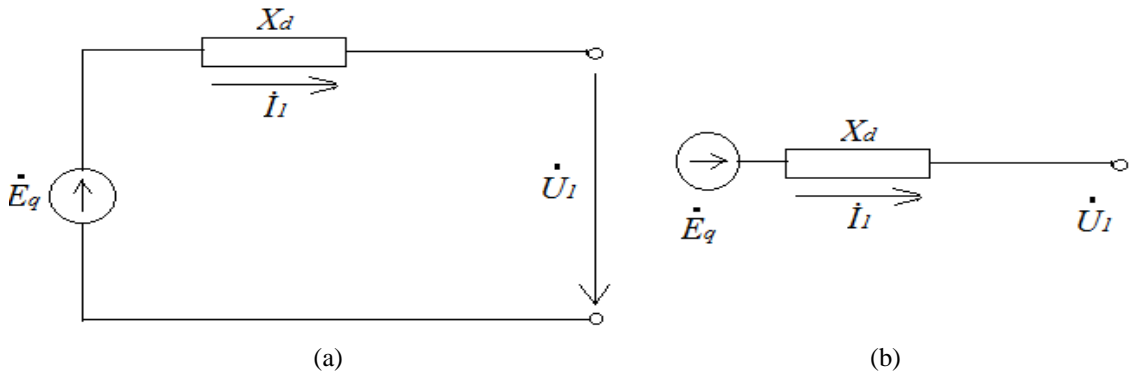
Yuvarlak rotorlu senkron generatörde  $X_{aq} = X_{ad}$ ,  $X_q = X_d = X_{\sigma 1} + X_{ad}$  şekil 3.18'de verildiği gibi, vektör diyagramı çıkık kutuplu senkron generatörün vektör diyagramından farklıdır (Şerifoğlu, 2007).



Şekil 3.18 Yuvarlak rotorlu senkron generatörün aktif endüktif yük için fazör diyagramı

### 3.7. Senkron Generatörün Eşdeğer Şeması

Stator sargılarının direnci göz ardı edildiğinde ( $r_1 \approx 0$ ) yuvarlak rotorlu senkron generatör sürekli hal (steady state) çalışma durumundaki eşdeğer devresi Şekil 3.19'daki gibidir. Çıkık kutuplu bir fazlı senkron makinalarda da durum aynıdır. Ancak stator kaçak reaktansı enine ve boyuna iki bileşene ayrılmaktadır.

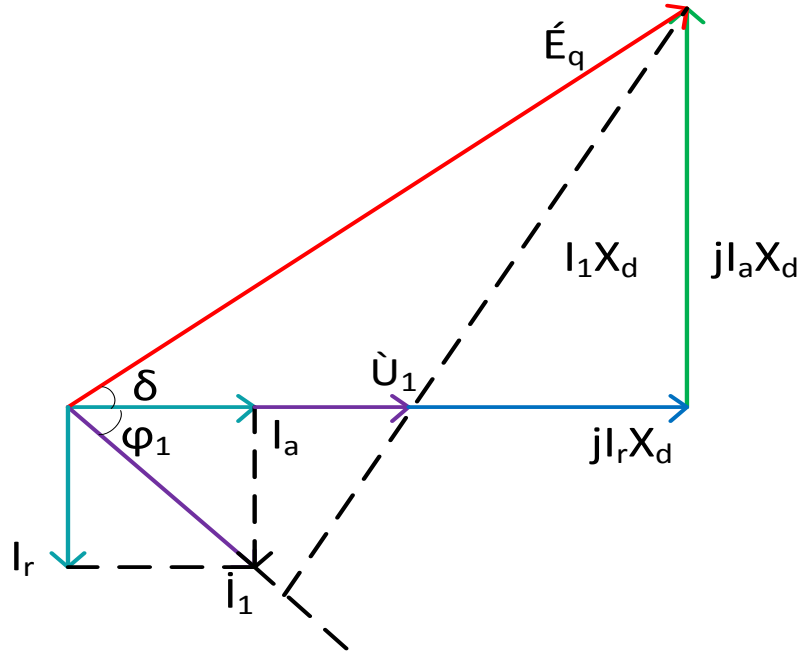


Şekil 3.19 Yuvarlak rotorlu senkron generatörün basitleştirilmiş eşdeğer şeması; a) tek hatlı şema, b) sadeleştirilmiş şema

Omik-endüktif yükte =  $E_q + E_{ad} + E_{aq} + E_\sigma \approx U_1$  belli ise  $E_q$  (3.10) denklemi ile hesaplanır

$$E_q = U_1 + jI X_d \quad (3.10)$$

Bu denkleme ilişkin birleştirilmiş vektör diyagramı şekil 3.20'deki gibi çizilir. Şekilde verilen  $I_a$  ve  $I_r$  sırasıyla stator akımının aktif ve reaktif bileşenleridir.



Şekil 3.20 Senkron generatörün basitleştirilmiş fazör diyagramı

Senkron generatör emk'sı 3.11, 3.12 ve 3.13 denklemlerinde verildiği gibi hesaplanır.

$$E_q = \sqrt{(U_1 + I_r X_d)^2 + (I_a X_d)^2} \cdot e^{j\delta} \quad (3.11)$$

Burada;

$$\delta = \arctg (I_a X_d) / (U_1 + I_r X_d) \quad (3.12)$$

Senkron generatörün  $\dot{U}_1$  ve  $E_q$  vektörleri arasındaki faz açısıdır.

$E_q$  emk'sı  $\dot{I}_f$  ikaz akımına orantılıdır ve boşa çalışma karakteristiğinden belirlenebilir.

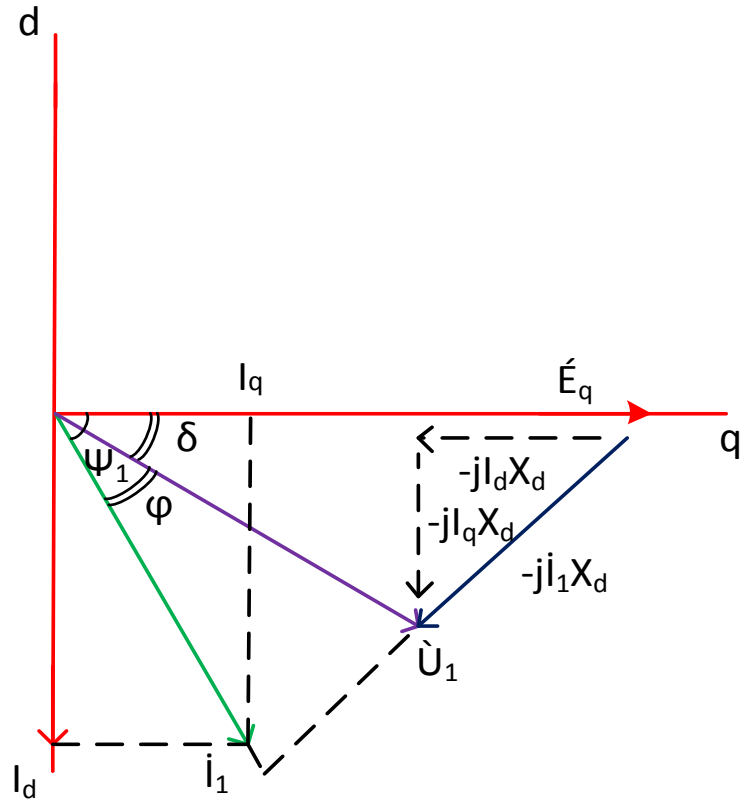
Birim genliklerde  $E_q = \dot{I}_f$ .

$E_q$  emk'sı belli olduğunda senkron generatörün uç gerilimini hesaplamak mümkündür.

$$U_1 = E_q - j\dot{I} X_d \quad (3.13)$$

Bu durumda vektör diyagramı şekil 3.21'deki gibidir. Şekilde  $I_d$  akımın boyuna bileşeni,  $I_q$  ise akımın enine bileşenidir (Şerifoğlu, 2007).





Şekil 3.21  $E_q$  belli olduğunda  $U_1$ 'in belirlenmesi

### 3.8. Senkron Makinalarda Döner Alan ve Dönen Endüktörün Senkron Hız İlişkisi

Senkron makinalarda döner alan hızı makinanın dönüş hızı ile senkronize olarak aynı değeri alır. Dolayısıyla stator döner alan hızı ile stator frekansı arasında eşitlik (3.14)' de verildiği gibi bir ilişki mevcuttur.

$$n_s = \frac{120 \times f}{2p} \quad (3.14)$$

$f$  = Endüvi çıkış akım frekansı (Hz),

$n_s$  = Döner manyetik alan ve döner endüktörün senkron hızı (d/dak),

$2p$  = Kutup sayısı.

### 3.9. Senkron Generatörlerde Üretilen Gerilim

Generatörlerde ya uyarım (kutup) sargılarını taşıyan rotor, ya da alternatif akım sargılarını taşıyan stator hareket edebilir. Kutuplar DA gerilimle uyarıldığında, rotor dönüyorsa, kutupların oluşturduğu bir döner alan sabit olan statordaki sargıları keser. Veya rotor sabit ve DA gerilimle uyarıldıysa, döner 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 gerilim endüklenmesi (3.15)'de verilen denklemde olduğu gibi hesaplanır (Margetta, 1986).

$$E = \frac{d\Phi}{dt} = N_{ph} \cdot (d\phi \cdot dt) \quad (3.15)$$

$E$  = Endüvi sargısında endüklenen gerilim (V)

$N_{ph}$  = Endüvi sargı sarım sayısı

$\Phi$  = Endüvi bobinini kesen akı miktarı (Wb)

Gerilimin sinüs dalga formu ;

$V_{max} \cdot \sin(\omega t)$  şeklinde ise, nüvede oluşan manyetik akıyı sinüs dalgası olarak düşünülürse;

$$\Phi(t) = \Phi_{max} \cdot \sin(\omega t) \quad (3.16)$$

$$\omega = 2\pi f \text{ (rad/s)}$$

$f$  = Endüvide oluşan elektrik dalgasının frekansı(Hz),

$\Phi_{max}$  = Nüve akısının maksimum değeri (Wb).

Sonuç olarak  $N_{ph}$  sarımlı bir endüvide endüklenen gerilimin denklemi;

$$E(t) = \omega \cdot N_{ph} \cdot \Phi_{max} \cdot \cos(\omega t) = V_{max} \cdot \cos(\omega t)$$

buna bağlı olarak;

$$V_{max} = \omega \cdot N_{ph} \cdot \Phi_{max} = 2\pi f \cdot N_{ph} \cdot \Phi_{max} \quad (3.17)$$

olarak hesaplanır.

Endüvide endüklenen gerilimin kararlı olması durumunda, gerilimin ani veya maksimum değeri yerine etkin (rms) değeri kullanılır. Sinüsoidal bir dalganın etkin değeri, maksimum değerinin  $\sqrt{2}$ 'ye bölümüdür. Endüklenen gerilimin rms değeri eşitlik (3.18) ile ifade edilir.

$$V_{rms} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot N_{ph} \cdot \Phi_{max} \quad (3.18)$$

Generatörlerin sargılarında endüklenen gerilimin sinüzoidale daha yakın olmasını sağlamak için kutup adımı ve sarım şeklinde yapılan değişiklikler endüklenen gerilim denkleminde sabit çarpan olarak eklenirse eşitlik (3.19) elde edilir.

$$V_{rms} = 4,44 \cdot N_{ph} \cdot k_p \cdot k_d \cdot f \cdot \Phi_{max} \quad (3.19)$$

$k_p$  = adım katsayısı,

$k_d$  = dağıtım katsayısıdır.

Denklem (3.19)'da frekans ve manyetik akının dışındaki değerler sabit olduğundan, bu denklem (3.20)'deki gibi yeniden düzenlenebilir.

$$V_{rms} = 4,44 N_{ph} \cdot k_p \cdot k_d \cdot f \cdot \Phi_{max} = K \cdot f \cdot \Phi_{max} \quad (3.20)$$

Sonuç olarak K denklem (3.21)'de verilmiştir.

$$K = 4,44 N_{ph} \cdot k_p \cdot k_d$$

(3.21)

## **4. İKAZ SİSTEMLERİNİN GENEL YAPISI, ÇEŞİTLERİ VE MODELLERİNE GÖRE SINIFLANDIRILMASI**

### **4.1. İkaz Sistemlerine Genel Bakış**

Senkron makinalarda kutup sargılarını doğru akım ile besleyerek kutuplarda mıknatıslanma oluşturan sisteme ikaz sistemi denir. Alan sargısından geçen akıma, ikaz akımı adı verilir. İkaz akımı senkron makinaya, makinanın dışında bulunan bir doğru akım kaynağından sağlanır. İkaz akımı ile ikaz geriliminin çarpımı ikaz gücünü verir. Bu güç senkron generatör gücünün yaklaşık olarak % 0,3 – 0,52 mertebelerindedir. Generatörün gücü arttıkça, ikazlama işlemi için gereken güç de artmaktadır (Mergen ve Zorlu, 2005; Margetta, 1986).

Senkron generatörlerde Statik İkaz Sistemleri ve Dinamik (generatör kaynaklı ikaz) İkaz Sistemleri olarak iki farklı ikazlama yöntemi mevcuttur. 1960'lı yıllardan önce yarı-iletken teknolojisinin henüz gelişmemiş olmasından dolayı, senkron generatörlerde dinamik ikaz sistemleri DC (doğru akım) generatörlü ikaz tekniği kullanılırdı. Fakat gelişen teknoloji ile bu sistemler ortadan kaldırılarak, onların yerine yarı-iletken teknolojisi ile oluşturulmuş sistemler kullanılmaya başlandı. Daha sonra gelişen bu ikazlama yöntemine AC (alternatif akım) generatörlü ikaz sistemleri adı verilir. En son gelinen noktada ise ileri teknolojinin ürünü olan statik ikaz sistemleri (ST) geliştirildi. Bu sistem sayesinde hem güç sisteminin daha kontrollü olması hem de daha hızlı sonuç elde edebilme gibi avantajlar sağlandı. Bunun sonucunda, günümüz teknolojisinde halen kullanılmakta olan dinamik ikaz sistemleri, gün geçtikçe yerini statik ikaz sistemlerine bırakmaktadır (IEEE Committee Report, 1981; IEEE Power Engineering Society, 2006).

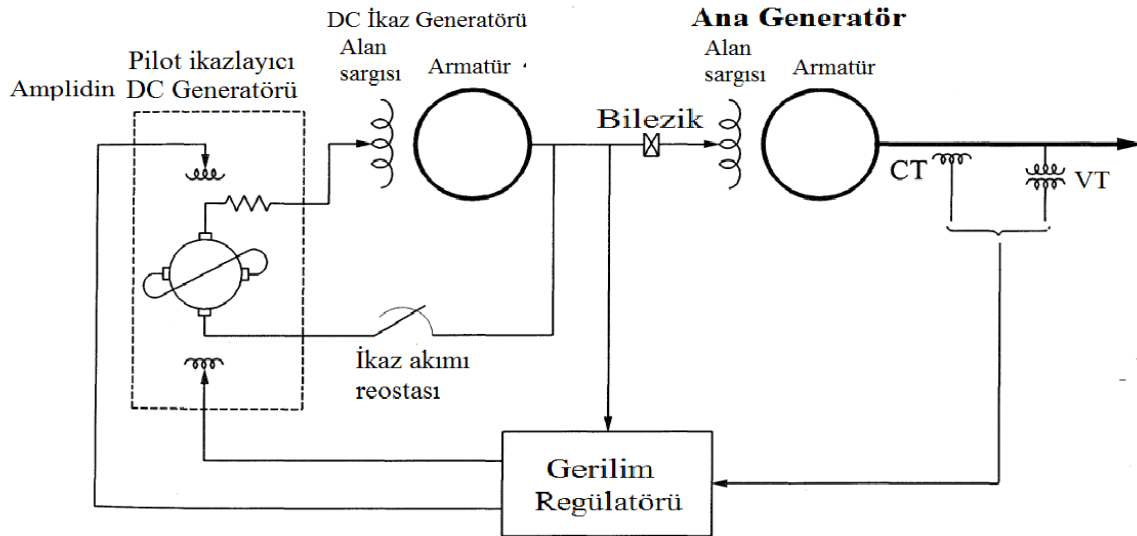
### **4.2. DC İkaz Sistemleri**

1960'lı yıllardan önce kullanılan senkron generatörlerin ikaz sistemleridir. Ana generatörün ikaz gücü, yine ana generatörün bağlı olduğu shaft üzerinde bulunan ve ana generatör ile senkron hızda dönen bir doğru akım generatöründe üretilip kutup sargılarına aktarılmaktadır. Doğru akım generatörünün statorunda oluşturulan elektromıknatısiyet sayesinde rotor sargılarında üretilen doğru akım, komütatör ve fırçalar üzerinden kablolar

aracılığıyla ana generatördeki fırça ve bilezik düzeneği ile ana generatörün kutup sargılarına iletilmektedir.

İkaz generatörünün doğru akım generatörü olması nedeni ile endüktör beslemesi, yani statordaki elektromıknatıslanmayı oluşturacak ikaz beslemesi DC güç olmak zorundadır. Ana ikaz kaynağı olan DC ikaz generatörün ikazlanması için farklı yöntemler uygulanmaktadır. Sabit mıknatıslı generatör kullanarak ikazlama yöntemi, generatörden bağımsız bir kaynak kullanarak endüktör (stator) sargılarını ikazlama yöntemi, generatörün armatür (endüvi) sargılarına şöntlenmiş endüktör kullanarak kendinden ikazlama yöntemi ve birleşik (compound) ikazlama yöntemi gibi farklı yöntemlerde DC ikaz generatörünün ikazlanması sağlanmaktadır.

DC sistemlerde en yaygın ikaz sistemi kendinden ikazlı DC generatörlerin kullanıldığı ikaz sistemleridir. Bu sayede senkron generatör dış kaynağa ihtiyaç duymadan enerji üretimini gerçekleştirebilmektedir. Bu tip ikaz sistemlerinde DC generatördeki artık mıknatıslanma yetersiz kalabilmektedir. Bu durumda DC ana ikaz generatörü bağımsız bir kaynaktan ikazlanarak DC generatörün toparlanması sağlanır. Bunun önüne geçmek için ana generatör ile aynı şaftta bağlı olan sabit mıknatıslı bir generatör (pilot ikaz generatörü) kullanılarak ikazlama yapılır. DC ikaz sistemlerinin kullanıldığı senkron generatörler küçük güçlerde olduklarından pilot ikaz generatörünün büyük güçlü olmasına da gerek duyulmamaktadır. Bu nedenle sabit mıknatıslı küçük bir generatör pilot ikazlama işlemi için yeterli olmaktadır (East Pittsburgh, 1964; Kimbark, 1956; Fitzgerald ve Kingsley, 1961).



Şekil 4.1 DC tip ikaz sistemi modeli örneği (Kundur, 1994).

Şekil 4.1’de DC bir ikaz sistemin model örneği verilmiştir. Bu örnekteki ikazlama yönteminde ana ikaz akımı reosta ile ayarlanmaktadır. İkaz generatörünün ikazlanması ise ana generatör çıkış terminalindeki gerilime göre ikazlanan bir pilot ikaz generatöründen sağlanmaktadır.

DC ikaz sistemi fırçalı ikaz olarak da nitelendirilir. Sistemin DC veya fırçalı ikaz sistemi olarak adlandırılması doğru akım makinaları ve fırçalarından kaynaklanmaktadır. Doğru akım makinasında kullanılan hassas yapılı kollektörün arıza yapma olasılığı yüksektir. Komütasyon sorunlarından dolayı kollektörün arıza yapma olasılığı yüksek olmakla birlikte fırça kömürlerinin zaman içinde aşınması nedeniyle sıklıkla bakıma alınmaları gerekmektedir. Bu nedenle DC ikaz sistemlerinde bakım ve onarım maliyetleri yüksektir (Mergen ve Zorlu, 2005).

DC ikaz sisteminde ardı ardına doğru akım generatörleri kullanılmaktadır. Doğru akım generatörlerin yapıları gereği, verimi en düşük elektrik makinaları olması nedeniyle, birden fazla generatörün kullanıldığı durumda, bütün sistemin toplam verimi, en küçük verimli makinanın veriminden de küçük olur (Mergen ve Zorlu, 2005). Ülkemizdeki bazı santrallerde halen DC ikaz sistemleri kullanılmaktadır. Örneğin Botan hidroelektrik santralinde üç adet senkron generatör DC ikaz sistemi ile ikazlanmaktadır. Şekil 4.2’de gösterilen generatörler Siemens yapımıdır. Generatörlerin ikisi 1953 yapımı olup kurulu gücü 600 kVA’dır. Üçüncü generatör, tesise 1967 tarihinde eklenmiş olup kurulu gücü 780 kVA’dır.



(a)



(b)

Şekil 4.2 Botan HES senkron generatörleri; a) 600 kVA gücünde, b) 780 kVA gücünde pilot ikazlı

1953 yapımı generatörlerin ikaz sistemleri DC ikaz sistemidir. Ana generatör ile aynı şaft üzerinde bulunan DC generatör kendinden ikazlıdır. 1967 yapımı senkron genaratörde ise durum diğerlerinden farklıdır. DC generatörün ikazı için, ortak şaft üzerine yerleştirilmiş üç fazlı ve fazlar arası 380 VAC olan sabit mıknatıslı bir generatör kullanılmaktadır. Sabit mıknatıslı pilot ikaz generatöründen elde edilen üç fazlı AC güç dışarıdan doğrultma işlemi ile doğrultulduktan sonra DC generatörün endüktörüne iletilmektedir. Her üç ünite de DC ikaz generatör çıkışları armatür sargılarından kollektörlere, oradan fırçalara daha sonra reosta üzerinden ana generatörün fırçalarına aktarılmaktadır.

### **4.3. AC İkaz Sistemleri**

AC ikaz sistemlerinde ana generatörün ikazlanması için DC generatörler yerine genellikle ortak şaft üzerine tesis edilmiş AC generatör olan senkron generatör kullanılmaktadır. AC generatör çıkış gücü, kontrollü veya kontrolsüz doğrultucular tarafından doğrultularak ana generatörün kutuplarına DC güç olarak aktarılmaktadır.

İlk zamanlarda regülatör yerine döner ve manyetik amplifikatör (yüksekteç) gibi kombine sistemler kullanılırdı. Daha sonra güç elektroniğinin gelişimi ile elektronik regülatörler kullanılmaya başlandı (Kimbark, 1956; Dillman, Skooglund, South ve Raczkowski, 1971; Rustebakke, 1983).

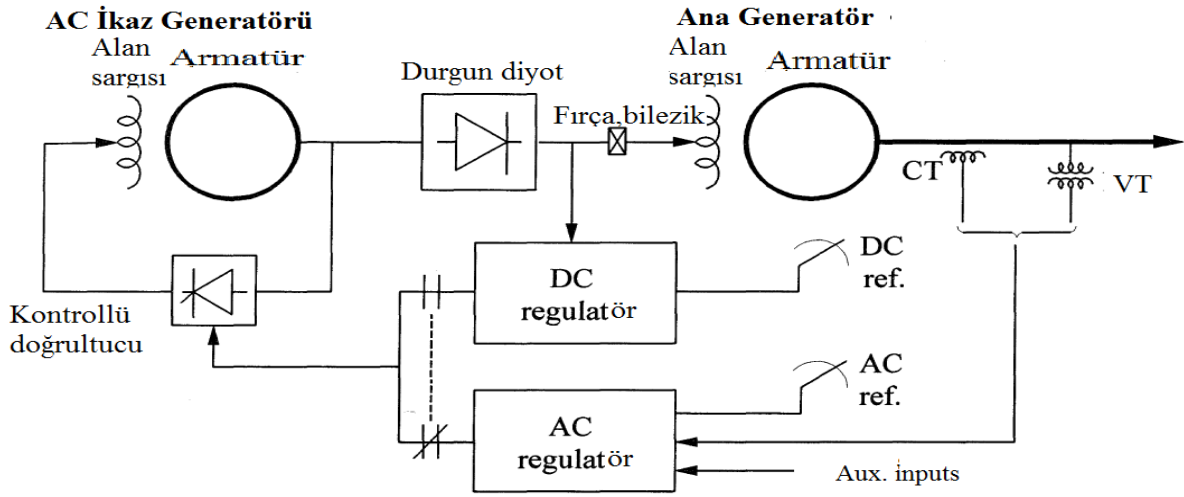
AC ikaz sistemlerinin doğrultucu formları, ikaz generatör çıkış kontrolü ve ikaz generatör besleme kaynağına göre pek çok farklı formlarda ele alınabilir. Bu formları, durgun doğrultuculu ve döner doğrultuculu ikaz başlıkları altında inceleyeceğiz.

#### **4.3.1. Durgun Doğrultuculu AC İkaz Sistemleri**

Durgun doğrultuculu ikaz sistemlerinde DC ikaz gücü, doğrudan ana generatörün fırçalarına aktarılmaktadır. Eğer bu sistemde kontrolsüz doğrultuculu bir ikaz devresi kullanılıyorsa bu devrenin regülasyonu AC ikaz generatörünün alan sargısından yapılır. Bu sargının kaynağı ise yine AC ikaz generatörünün armatür çıkışındaki gerilimi doğrultan durgun doğrultucu devrenin çıkış akımıdır.

Şekil 4.3'de General Elektrik firmasının ürettiği, AC tip ALTERREX ikaz sistemi modeli örneği verilmiştir. Bu model, ikaz generatörü kontrollü doğrultucu devresi ile kontrol edilebilen ama ana generatör alan besleme gücü kontrolsüz doğrultucu tarafından

elde edilen bir ikaz sistemi örneğidir. Bu modelde AC ikaz alternatörünün ikazı ana generatörün çıkış referansına göre sürülmektedir. AC ikaz generatörü kendinden ikazlıdır. İkaz generatör terminal çıkışına tristörlü doğrultucu devre sayesinde doğrultulan güç tekrar AC generatörün fırça ve bileziklerine aktarılıp generatörün kendini ikazlaması sağlanmaktadır. Bu devreye pilot ikaz devresi de denebilir. Tristör tetikleme kontrolü, ana generatörün çıkışındaki CT (akım trafosu) ve VT (gerilim trafosundan) alınan referansların bağlı olduğu bir AC regülatör aracılığıyla sağlanır. Bu regülatörde sorun olduğu zaman veya isteğe bağlı olarak, ikaz generatörünün çıkışındaki diyot doğrultucu devrenin çıkışına bağlı DC regülatör ile de tristör tetikleme sağlanabilir. Bu kontrol, manuel (el ile kontrol) kontrol metodudur.

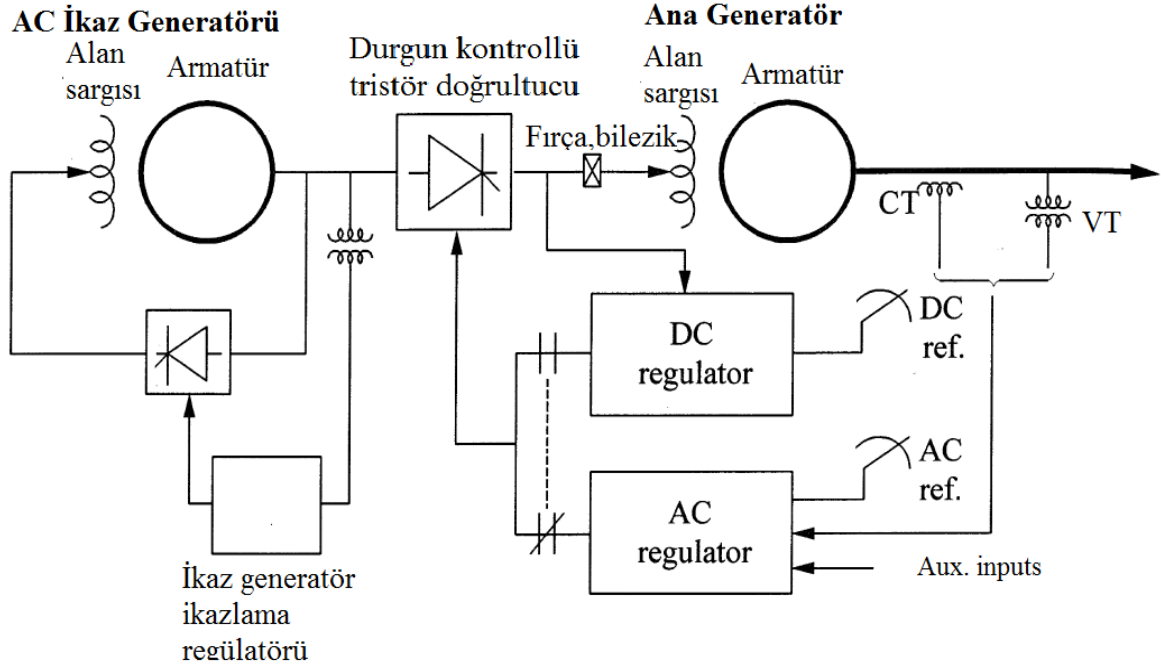


Şekil 4.3 Diyot doğrultuculu ALTERREX AC tip ikaz sistemi (Kundur, 1994).

Şekil 4.4'e ALTERREX ikaz sisteminin şekil 4.3'e göre farklı bir model örneği daha verilmiştir. Bu örnek modelin daha önceki örnek modele göre en belirgin farkı, ikaz generatörünün çıkış terminallerinde kontrollü ve durgun tristör köprü doğrultucu devresi mevcuttur. Bu tristör köprü doğrultucu devresi sayesinde ana generatörün alan ikaz gücü kontrol edilebilir. İkaz gücünün ayarlanması tristör tetikleme açlarına bağlıdır. Tristör tetikleme kontrolü, ana generatör çıkış terminalindeki referanslar sayesinde AC regülatör ile yapılmaktadır. Bununla beraber, ana generatörün alan sargılarına DC ikaz gücünü sağlayan tristör köprü doğrultucu devresinin çıkış hattına bağlı bir DC regülatör ile manuel kontrol yapılabilmektedir. Kendinden ikazlı olan ikaz generatörünün çıkışına bağlı tristör köprü doğrultucu devresi ile ikaz generatörünün ikazlanması sağlanmaktadır. Bu tristörün tetikleme kontrolü yine ikaz generatör çıkış terminaline bağlı bir gerilim dönüştürücüden



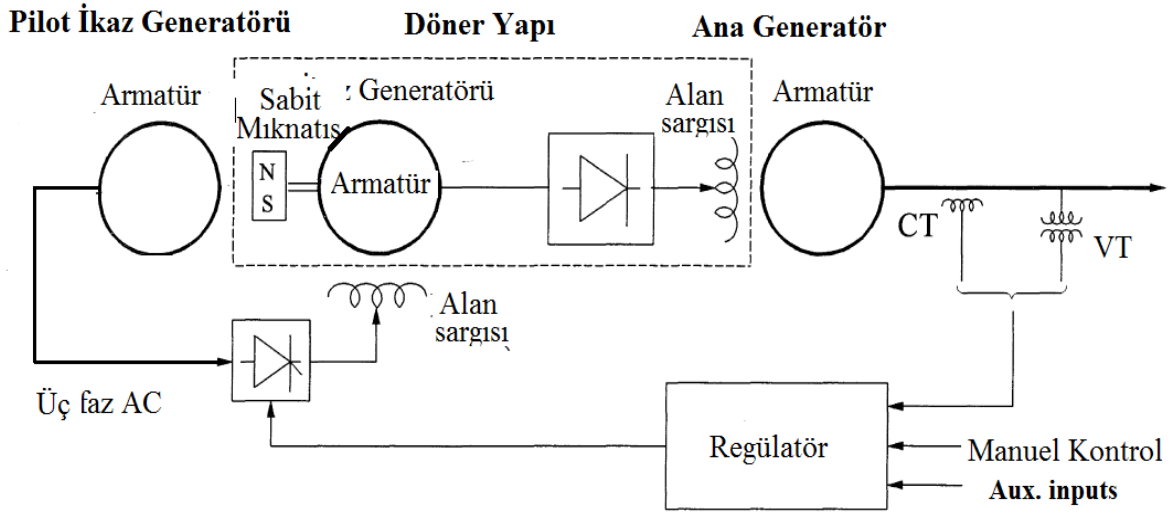
alınan referans işarete bağlı yapılmaktadır (Kundur, 1994; Bishop, Miller ve Shartrand, 1974; Rustebakke, 1983).



Şekil 4.4 Tristör doğrultuculu ve kontrollü ALTERREX AC tip ikaz sistemi (Kundur, 1994).

#### 4.3.2. Döner Doğrultuculu AC İkaz Sistemleri

Fırçasız ikaz olarak bilinen döner doğrultuculu ikaz sisteminde ortak şaft üzerine akuple edilmiş döner doğrultuculu diyot devresi mevcuttur. Şekil 4.5.'te görüldüğü gibi, döner diyot doğrultucu sayesinde doğrultulan ikaz gücü, hiçbir fırça ve bilezik düzeneği kullanılmadan direk olarak ana generatörün alan sargılarına aktarılmaktadır. Şekil 4.5.'te olduğu gibi ana generatörün alan sargısı, ikaz generatörünün armatürü ve döner diyot devresi aynı şaft üzerinde akuple edildiğinden eş zamanlı olarak dönmektedirler. Bu sistemdeki ana ikaz generatörü dönen endüvili bir generatör olup ikaz alan sargısı generatörün sabit kısmında yer almaktadır. Ana ikaz generatörünün ikazlanması için sabit mıknatıslı bir AC generatör kullanılmaktadır. Sabit mıknatıslı generatörün çıkış gücü durgun tristör devresinde DC güce dönüştürülerek ana ikaz generatörünün durgun olan alan sargılarının ikazlanması sağlanmaktadır. Tristör tetiklenmesi, ana generatörün çıkışına bağlı CT ve VT sekonderlerinden alınan referans ölçüm değerlerine göre manuel olarak kontrol edilebilen bir regülatör ile yapılmaktadır (Kundur, 1994; Dillman, Skooglund, South ve Raczkowski, 1971).



Şekil 4.5 Fırçasız ikaz sistemi modeli (Kundur, 1994).

#### 4.4. Statik İkaz Sistemleri

İkaz sistemlerinin temel işlevi generatörün rotor alan sargılarını doğru akım ile besleyerek edüvide gerilim endüklenmesini sağlayacak mıknatıslanmayı oluşturmaktır. İkaz sistemleri generatörün gerilimini ve reaktif güç akışını kontrol eder, güç sisteminin kararlılığının yükselmesine yardımcı olur ve generatöre önemli koruma fonksiyonları sağlar. Generatör üretim yaptığı süre boyunca, ikaz sistemi uygun alan akımını sağlamak zorundadır. Genellikle şebeke ile paralel çalışan senkron generatörlerin şebekede meydana gelen geçici rejimler (transient), reaktif güç dengelemeleri vb. durumlarda hızlı ve kararlı cevap verebilecek nitelikte olabilmesi şebeke kararlılığı için önemli bir durumdur. Günümüzde bu özelliklerde imal edilen en uygun ikaz sistemleri ileri kontrollü statik ikaz sistemleridir.

ST (statik ikaz) sistemlerindeki tüm bileşenler sabit ve hareketsiz ekipmanlardan oluşmaktadır. Yapı itibari ile küçük zaman sabitine sahiptirler. Bu sistemlerdeki AC-DC doğrultucu devre, kontrollü veya kontrolsüz olabilir. Ama statik ikaz sistemlerinde genel olan, doğrultucu devre çıkışındaki DC ikaz gücünün, fırça ve bilezik sistemi üzerinden ana generatörün alan sargılarına iletilmesidir.

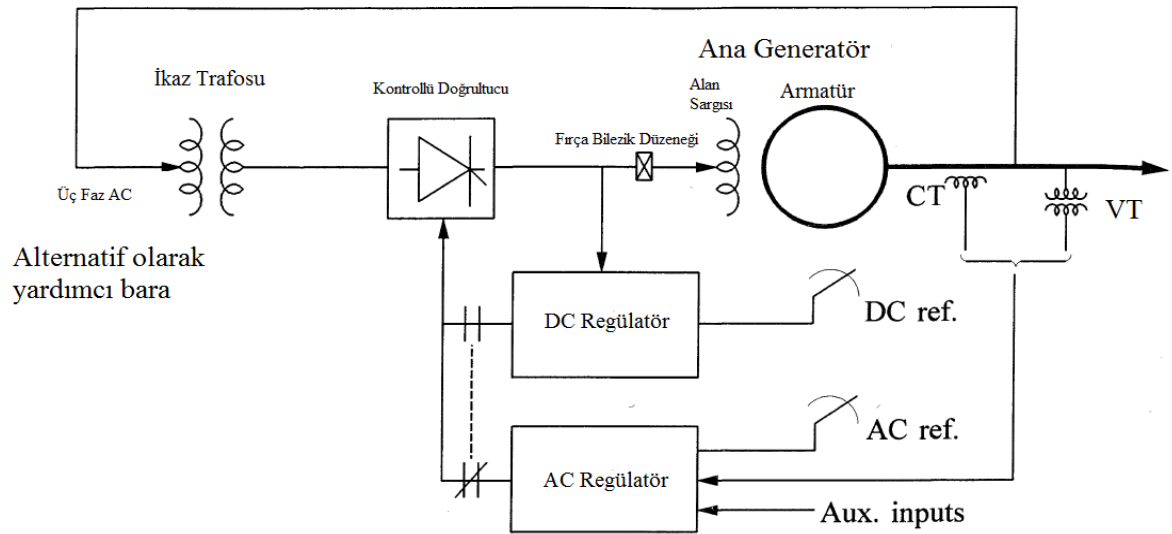
Statik ikaz sistemlerinde doğrultucu devrenin besleme gücü üç yöntem ile sağlanmaktadır. Birinci yöntemde, ana generatör çıkış terminallerine bağlı ve ana generatörü ikazlamaya uygun gerilim çıkışına göre dizayn edilmiş bir gerilim transformatörü kullanılarak doğrultucu devreye aktarılmaktadır. İkinci yöntemde istasyonun dağıtım şebekesinden veya diğer adıyla yardımcı baradan doğrultucu devreye

aktarılmaktadır. Üçüncü yöntemde şayet ana generatör endüvi sargılarına yardımcı sargı dizayn edilmiş ise bu sargıların çıkış terminalinden sağlanabilmektedir. Doğrultucu besleme şekli statik ikaz sisteminin modeline göre değişebilmektedir. Bu konuda statik ikaz sistemlerinin yaygın olarak kullanıldığı üç farklı modeli ele alacağız (Kundur, 1994).

#### 4.4.1. Potansiyel Kaynaklı Kontrollü Doğrultuculu Statik İkaz Sistemi

Bu sistemin ikaz gücü Şekil 4.6' da verildiği gibi generatör çıkış terminallerine bağlı bir ikaz transformatöründen beslenen kontrollü (tristörlü) bir doğrultucu devre sayesinde sağlanmaktadır. Generatör çıkış terminallerinin haricinde istasyonun dağıtım barasından da beslenebilecek şekilde dizayn edilen bir ikaz sistemidir. Statik ikaz sistemlerinin bu modeli bara beslemeli veya transformatör beslemeli statik ikaz sistemi olarak da nitelendirilmektedir.

Bu modelde ikaz giriş gerilimi generatör çıkış terminaline bağlı olarak tasarlanmış ise ikaz sisteminin çıkış geriliminin maksimum değeri AC giriş gerilimine bağlı olarak değişecektir. Bundan dolayı, sistemde meydana gelebilecek arızalardan ötürü oluşan ani gerilim düşümlerinde ikaz çıkışının maksimum gerilimi de azalma eğilimine geçecektir. Bu ikaz sistemi modelinin kullanıldığı bir generatör, böyle bir arıza sonrası oluşacak etkiye ani cevap verebilecek nitelikte olur. İkaz sisteminin girişini etkileyen generatör çıkışındaki bu bağlantı sayesinde, generatörde meydana gelebilecek zorlanmalar limitlendirilerek geniş ölçüde azalması sağlanmaktadır.

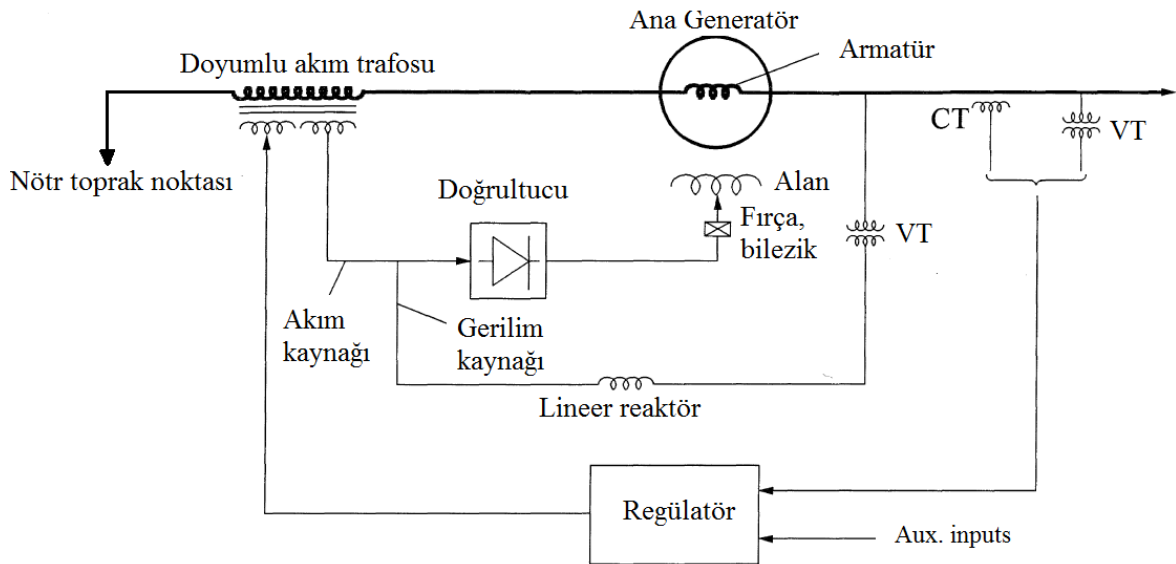


Şekil 4.6 Potansiyel kaynaklı kontrollü doğrultuculu statik ikaz sistemi modeli (Kundur, 1994).

Potansiyel kaynaklı kontrollü tristör doğrultuculu ST model ikaz sisteminin montajı kolay ve ucuz olması nedeniyle avantajlı bir sistemdir. Bu tip ikaz sistemlerinin bağlı olduğu generatörlerin, geniş enterkonnekte şebekelere bağlanması durumunda tatmin edici sonuçlar elde edilmiştir (Kundur, 1994; Peneder ve Bertschi, 1985; Lee ve Kundur, 1986).

#### 4.4.2. Birleşik Kaynaklı Doğrultuculu Statik İkaz Sistemi

Statik ikaz sisteminin bu modelinde generatörün ikazlanması, şekil 4.7’de verildiği gibi ana generatörün armatürünün nötr terminaline bağlanmış doyumlu akım trafosu ve armatürün çıkış terminaline bağlı bir gerilim transformatörü sayesinde elde edilir. CT (akım trafosu) ve VT (gerilim trafosu) çıkışları aynı baraya bağlantılı olup sözkonusu ikaz gücü, aynı bara üzerindeki diyot köprü doğrultucu üzerinden doğrultularak fırça ve bilezik düzeneğine aktarılır. Buna ilave olarak gerilim ve akım trafolarının iç içe olduğu, doyumlu akım gerilim trafosu olarak nitelendirilen bir transformatör de kullanılabilir. İkaz çıkış gücü bir regülatör ile kontrol edilmektedir. Bu regülatör, ana generatörün çıkış terminalinden aldığı referansa göre beslediği doyumlu akım trafosunun doyumu sayesinde kontrol edilmektedir.

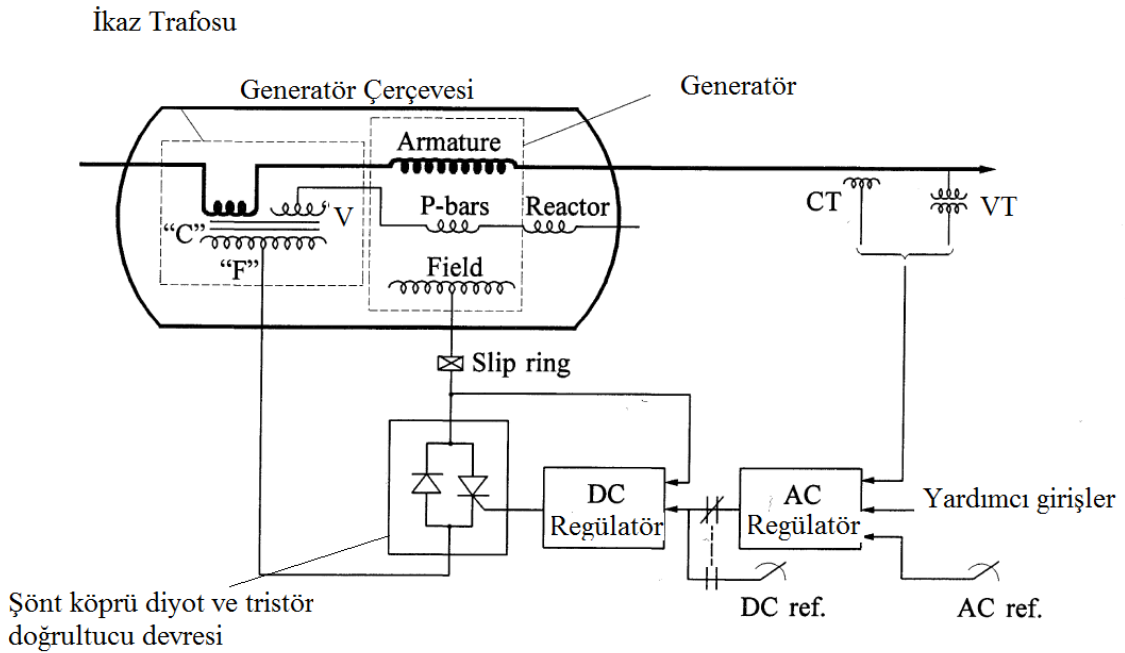


Şekil 4.7 Birleşik kaynaklı doğrultuculu ST tip ikaz sistemi modeli (Kundur, 1994).

Şayet generatör yüksüz durumda ise, armatür akımı sıfır olur ve ikaz gücü potansiyel kaynak VT tarafından sağlanır. Generatörün yüklü olduğu durumda ise ikaz gücü generatör armatür akımından elde edilir (Kundur, 1994).

#### 4.4.3. Birleşik Kaynaklı Kontrollü Doğrultuculu Statik İkaz Sistemi

Statik ikaz sisteminin bu modelinde ikaz besleme devresinin çıkışında kontrollü doğrultucu devresi kullanılmaktadır. Şekil 4.8’de General Elektrik şirketinin üretimi olan Generrex birleşik kaynaklı kontrollü statik ikaz sistem örneği verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi ikaz besleme devresi, akım ve gerilim kaynaklarının birleşiminden oluşmaktadır. Akım kaynağı olarak generatör armatürünün nötr terminaline bağlı bir transformatörün primer sargısı bulunmaktadır. Gerilim kaynağı olarak ise, generatör sargıları ile aynı nüve yapısı üzerinde bulunan ama armatür sargularından bağımsız sargılardan oluşan bir kaynak kullanılmaktadır. Gerilim kaynağı sargısı ve lineer bir reaktör generatördeki yardımcı sargıya seri olarak bağlanmaktadır. Reaktör, ikaz sistemi için arıza akımlarının azalmasında büyük role sahiptir. Bu iki kaynağın birleşiminden ikaz trafosunun primer sargısı meydana gelmektedir.



Şekil 4.8 Generrex birleşik kaynaklı kontrollü doğrultuculu ST tip ikaz sistemi modeli (Kundur, 1994).

İkaz trafosunun sekonder çıkış terminalinde kontrollü bir doğrultucu devre bulunmaktadır. Doğrultucu devre şönt diyot ve tristör köprüsünden oluşmaktadır. Generatörün ikaz gücü, generatör çıkış terminaline bağlı VT ve CT sekonderler uçlarından alınan referans sinyallere göre kontrol yapan regülatörün tristörü tetiklemesi ile

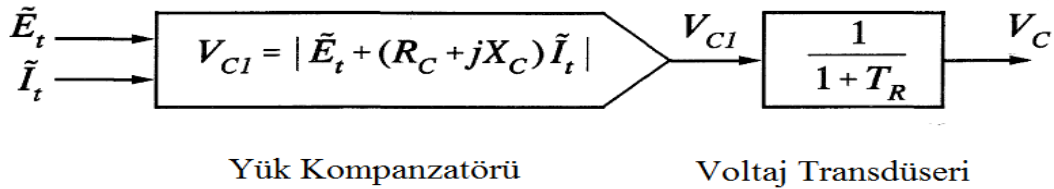
ayarlanmaktadır (Kundur, 1994; Gerlitz, Gorman ve Temoshok, 1975; Beagles, Carlsen, Crenshaw ve Temoshok, 1976).

#### 4.5. İkaz Sistemlerinin Modellerine Göre Sınıflandırılması

Senkron generatörlerin ikaz sisteminin belirlenmesi ve çalışmalarının incelenmesi için matematiksel modeller geliştirilmiştir. Bu modeller sayesinde senkron generatörlerin güç sistemi kararlılığını nasıl etkileyebileceği incelenmektedir. İkaz sistemlerinde değişik modellerin oluşturulması ile pek çok farklı türde sistem modelleri kullanılmaya başlanmıştır. İkaz sistemlerindeki bu farklılıklardan doğan karmaşayı ortadan kaldırmak için çeşitli kriterlerde sınıflandırmalar yapılmıştır. IEEE, 2005 yılında yayınladığı bildiri ile ikaz sistemlerini sınıflandırmıştır.

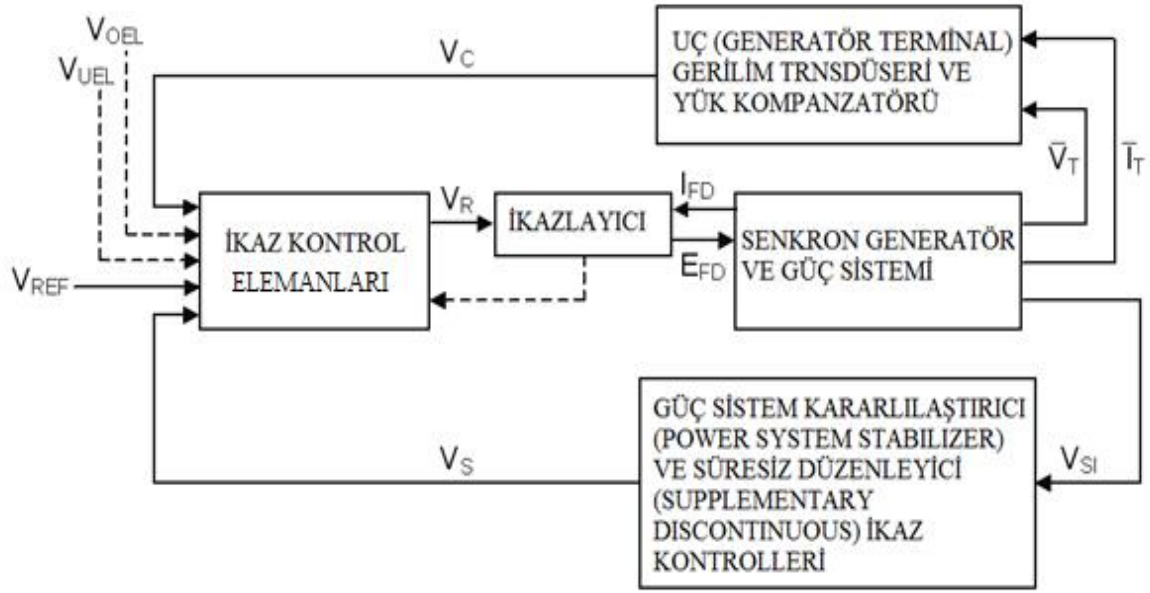
İkaz sistemleri üç bölüm olarak sınıflandırılmıştır. Üç bölüm başlığı altında toplam ondokuz model oluşturulmuştur. Ana bölümler, Doğru Akım Komütatör İkaz Sistemi (DC tip), Alternatör Kaynaklı Doğrultuculu İkaz Sistemi (AC tip) ve Statik İkaz Sistemi (ST tip) olarak ele alınmıştır (Vedrana, Kresimir and Zeljko, 2013).

İkaz sistem modellemelerinde giriş,  $V_c$  hata işareti olarak tanımlanmıştır. Şekil 4.9’da verilmiş olan  $V_c$ , generatör çıkış terminaline bağlı transdüser çıkış sinyalidir.  $T_R$ , senkron generatör çıkış terminal voltajının doğrultma ve filtreleme zaman sabitidir.



Şekil 4.9 Generatör terminal voltajı (uç gerilimi) transdüser ve yük kompanzator modeli (Kundur, 1994).

Şekil 4.9’ da verildiği gibi  $V_{C1}$  yük kompanzator çıkış işaretidir. Eğer sistemde yük kompanzatoru kullanılmamış ise  $V_C = E_t$  olur. Şekil 4.10’da ikaz sistemlerinin genel model yapısı verilmiştir. Bu şekildeki  $V_{ref}$ , regülatör referans voltajıdır. Eğer sistemde, PSS (güç sistem kararlılaştırıcı) kontrolü varsa,  $V_s$  işareti PSS’in kontrol çıkış işaretidir ve şekilde diğer sinyaller olarak tanımlanan toplam giriş işaretlerinden biri olabilir. İkaz çıkış gerilimi  $E_{fd}$  olarak tanımlanmaktadır.  $V_T$  ve  $I_T$ , generatör terminal gerilimi ve terminal akımıdır.  $V_{OEL}$  işareti aşırı ikaz limitlemeyi,  $V_{UEL}$  işareti ise düşük ikaz sınırlayıcı işaretlerini temsil etmektedir (Kundur, 1994; IEEE Power Engineering Society, 2005).



Şekil 4.10 İkaz kontrol sistemlerinin fonksiyonel blok diyagramı (Power Engineering Society, 2005).

#### 4.5.1. DC Tipi İkaz Sistemi Modelleri

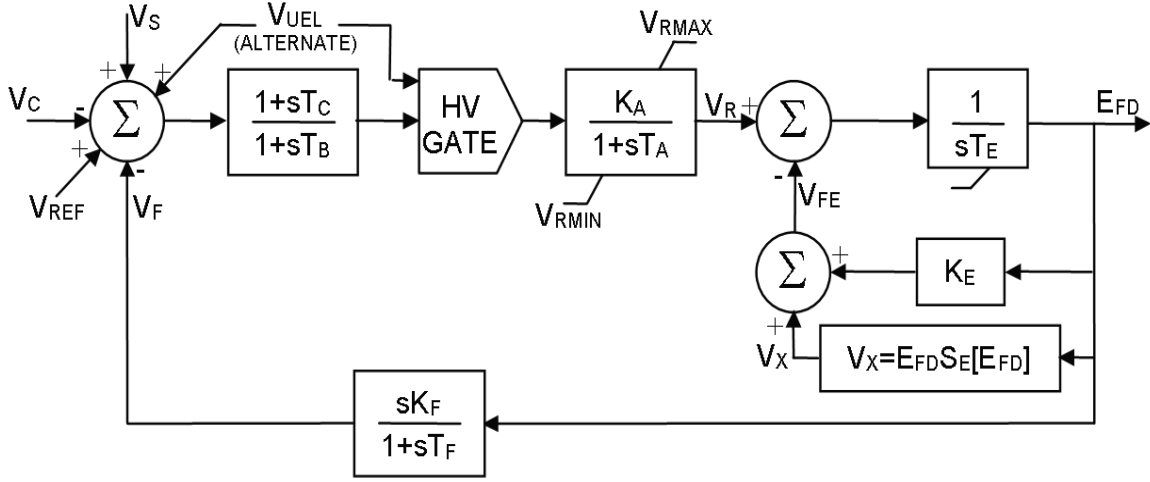
DC tip ikaz sistemleri dört farklı modelden oluşmaktadır. Bunlar, DC1A, DC2A, DC3A, DC4B olarak adlandırılmıştır.

##### 4.5.1.1. DC1A İkaz Sistemi Modeli

DC1A modeli şekil 4.11'de verilmiştir. Bu model, sürekli etkin olan gerilim regülatörleri (özellikle doğrudan devreye giren reostatik, döner yükselteçli ve manyetik yükselteçli tiplerde) ile DC komütatör üzerinden alan kontrolü yapılan bir ikaz modelidir.

DC1A modelinin giriş işareti daha önce de kompanzatör modelinde açıklandığı gibi generatör uç geriliminin transdüser çıkış sinyali olan  $V_C$  işaretidir.  $V_{REF}$  işareti gerilim regülatörünün ayar değerinin (set point) referansını temsil etmektedir.  $V_C$  transdüser çıkış işareti toplam bloğunda  $V_{REF}$  işaretinden çıkartılmaktadır.  $V_F$ , kararlı kılıcı geribesleme işareti çıkartılmakta,  $V_S$  güç sistem kararlılaştırıcı işareti ise hata olarak toplam noktasına eklenerek toplam bloğundaki tüm işlemlerden sonra hata işareti elde edilmektedir. Kararlı durumda (steady state), PSS devredışı olacağından  $V_F$  ve  $V_S$  işaretleri sıfır olur. Toplam bloğundaki sonuç olan hata işareti regülatördeki yükselteç (amplifikatör) bloğunda yükseltilmektedir. Ana zaman sabiti  $T_A$  ve kazanç (gain)  $K_A$ , regülatör ile birleştirilerek girişi çıkışa ( $V_R$ ) göre (alt ve üst sınır değerler ile) sınırlandırılan amplifikatör bloğunda

gösterilmiştir.  $T_B$  ve  $T_C$  zaman sabitleri regülâtörün kendi yapısında bulunmakta ve ihmal edilecek kadar küçük olduğundan sıfır olarak kullanılabilir.



**Şekil 4.11** IEEE'nin DC1A ikaz sistemi modeli (Power Engineering Society, 2005).

Gerilim regülâtörünün çıkış işareti olan  $V_R$ , harici kaynaklı veya kendinden ikazlı sistemlerin ikazlayıcı kontrolünü sağlamaktadır. Kendinden ikazlı şönt generatör kullanılması halinde  $K_E$ , şönt sargı ayar reostasına ait kazanç terimi  $T_E$  zaman sabiti olur. Gerilim regülâtörü, operatör tarafından periyodik olarak reostayı ayarlaması sayesinde çıkışının düzenlenmesi ile kontrol edilir. Bu düzenleme  $K_E$  değerinin operatör tarafından ayarlanması ile sağlanır. Başlangıç durumunda  $V_R$  işareti sıfır olduğundan  $K_E$  bu şartlara göre seçilerek ilk şartlar yerine getirilir. Harici kaynaklı ikazlamada  $K_E=1$  olur.

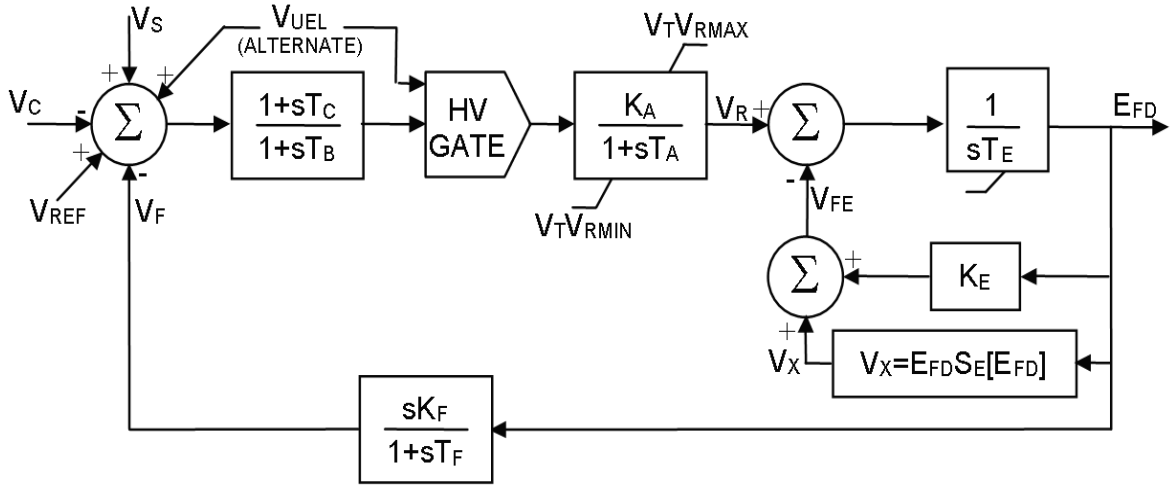
$S_E[E_{FD}]$  fonksiyonu doğrusal olmayan (nonlinear) bir fonksiyon olup, iki veya daha fazla seçenekle tanımlanmış  $E_{FD}$  değerini temsil eder.  $S_E$  terimi ikaz elamanının doymasını gösterir ve bu değer ikaz elamanının çıkış gerilimi olan  $E_{FD}$ 'nin bir fonksiyonudur. Doyum bloğunun çıkış işareti  $V_x$ , giriş işareti ise  $E_{FD}$ 'dir.  $S_E[E_{FD}]$  doğrusal olmayan fonksiyonu ise doyum bloğunun ikazlayıcı gerilimini temsil eder.

$V_F$  işareti daha öncede belirtildiği gibi ikaz sistem kararlılaştırıcı işlevinin geri besleme sinyalidir. Bu sinyal,  $E_{FD}$ 'nin giriş olduğu,  $K_F$  kazanç değeri ve  $T_F$  zaman sabitini içeren ikaz kararlılaştırıcı bloğu üzerinden elde edilir (Kundur, 1994; Arda, 2006; IEEE Power Engineering Society, 2005).



#### 4.5.1.2. DC2A İkaz Sistemi Modeli

Şekil 4.12.'de gösterilen bu model, kesintisiz çalışan gerilim regülatörlü alan kontrollü DC generatör ihtiva eder. Ancak bu modeldeki regülatör, generatörden veya baradan beslenir. Bu modelin DA1A'dan farkı, gerilim regülatörü çıkış sınırları generatör uç gerilimi  $V_T$  ile orantılıdır.

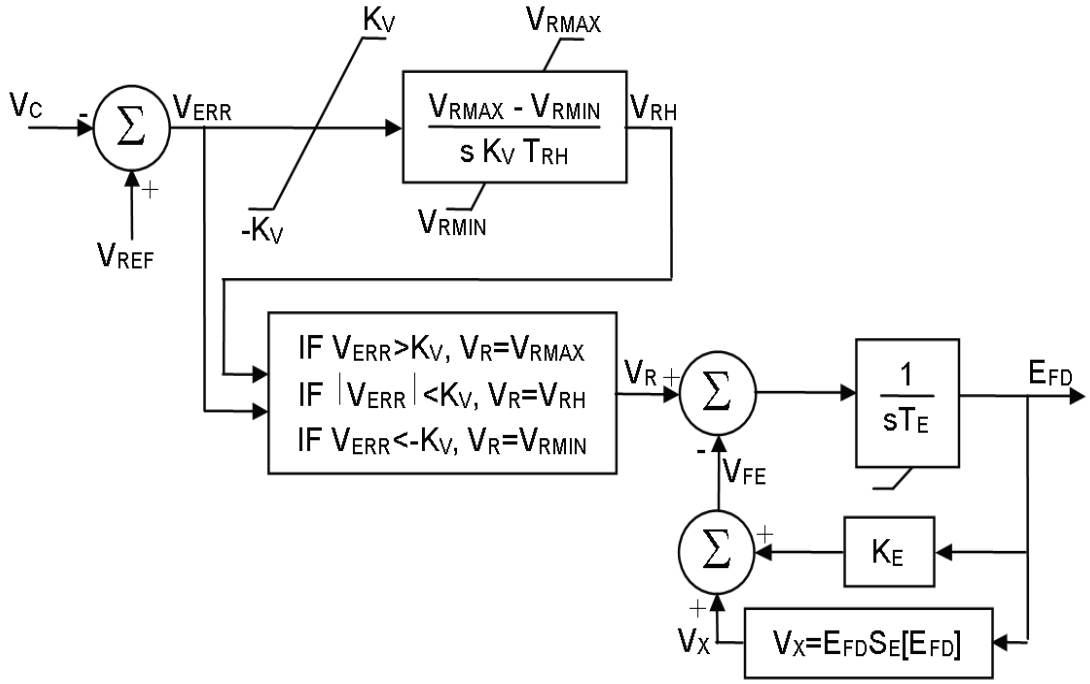


Şekil 4.12 IEEE'nin DC2A ikaz sistemi modeli (Power Engineering Society, 2005).

#### 4.5.1.3. DC3A İkaz Sistemi Modeli

Bundan önce tanıtılmaya çalışılan sistemler, ilk üretilen yüksek kazançlı hızlı etkili ikaz kaynaklarını temsil etmektedirler. DA3A modeli eski ikaz sistemlerini temsil etmekle beraber, sürekli etkin (continuously acting) DC generatörlü ikaz sistemlerinin gelişiminden önce diğer ikaz tipleri ile ortak özellik olan sürekli etkin olmayan (non-continuously acting) yani kesintili çalışan regülatör kullanılmaktadır.

Bu sistemler, iki farklı oranda gerilim hatasına, hatanın büyüklüğüne bağlı olarak cevap verirler. Küçük hata değerleri, motor kontrollü reostanın motorunun reostayı istenen direnç değerine ayarlaması ile biraz uzun bir sürede cevap vermesi ile düzeltilir. Daha büyük hata değerlerinin düzeltilmesi sistemin kararlılığı açısından hızlı bir cevap gerektirmektedir. Bu nedenle motora kontaktör üzerinden by-pass edilmiş dirençler kullanılarak kontaktörün devreye girmesi ile cevap vermektedir.



Şekil 4.13 IEEE'nin DC3A ikaz sistemi modeli (Power Engineering Society, 2005).

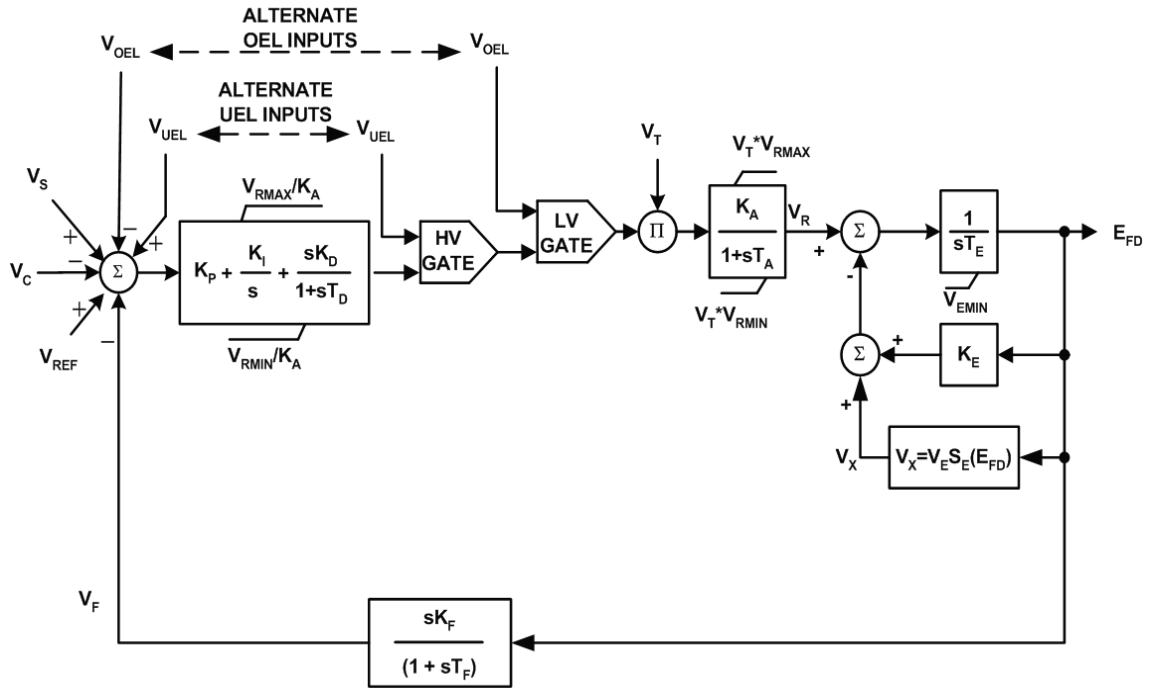
İkaz sistemi modellemesi daha önce açıklanan DC tip modellere benzerdir. Ancak şekil 4.13'te ikaz sistem dengeleyicisi ( $V_F$  işareti) gösterilmemiştir. Regülatör,  $V_{REF} - V_C$  hata geriliminin ( $V_{ERR}$ ) büyüklüğüne göre değişik modlarda devreye girmektedir. Hata gerilimini hızlı (arttırma / azaltma) kontak değeri  $K_V$ 'den (% 5 gibi) büyük olduğunda,  $V_{Rmin}$  veya  $V_{Rmax}$  değerleri hata işaretinin durumuna göre devreye girer. Şayet bir hata geriliminin mutlak değeri  $K_V$  değerinden küçük ise ikaz elemanının girişi  $V_{RH}$  değerine eşit olur. Reosta ayarlaması hata işaretine bağlı olarak aşağı veya yukarı sürekli devam eder. Yani reosta kademeli olarak motor ile devreye alınır veya çıkartılır. Reosta tahrik motorunun sürekli hareketini gösteren hareket zamanı  $T_{RH}$ 'tir.

Bir sınırlayıcı fonksiyonu, reosta'nın 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. İkaz direnci reosta hareketiyle ve hızlı etkili kontaktların çalışmasıyla değişir (IEEE Power Engineering Society, 2005).

#### 4.5.1.4. DC4B İkaz Sistemi Modeli

Bu ikaz modeli DC generatörlü olmakla beraber generatörden veya yardımcı baradan beslenen ve sürekli etkin olan bir gerilim regülatörü ile kontrol edilmektedir. İkazlayıcı

kontrol metodu bu modelde diğer DC modellere göre daha fazla geliştirilmiştir. Bu modele ait blok diyagram şekil 4.14’te verilmiştir. Bu ikaz modelinde PID (oransal, integral ve türevsel) kontrolörü içeren, AVR (otomatik gerilim regülatörü) mevcuttur. Şayet AVR türevsel terim içermiyorsa kararlılık için alternatif bir geribesleme döngüsü ( $K_F, T_F$ ) kullanılmaktadır. Eğer bu modelde PSS kullanılırsa buna uygun olan PSS2B modelidir (Kundur, 1994; Vedrala, Kresimir ve Zeljko, 2013; IEEE Power Engineering Society, 2005).



Şekil 4.14 IEEE'nin DC4B ikaz sistemi modeli (Power Engineering Society, 2005).

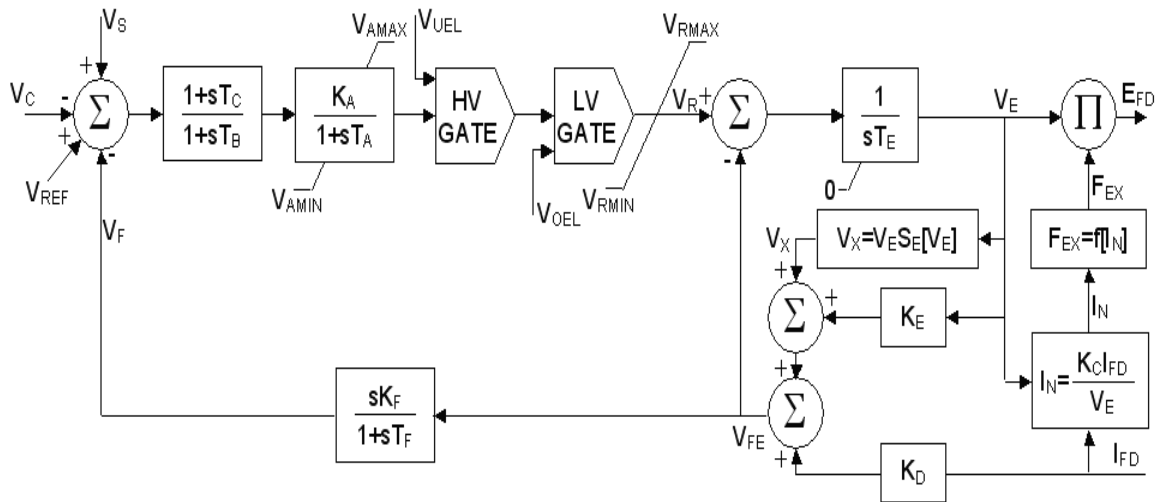
#### 4.5.2. AC Tipi İkaz Sistemi Modelleri

AC tip ikaz sistemlerinde ikaz gücü AC ikaz generatörlerinden sağlanmaktadır. AC ikaz generatörlerinin çıkış gücü, döner doğrultucu ile veya sabit doğrultucu devrelerde DC güce dönüştürülüp ana generatörün alan sargılarına aktarılmaktadır. AC tip ikaz sistemleri DC ve ST tip ikaz sistemlerine kıyasla en geniş grup olup sekiz farklı modeli içermektedir. Bunlar modeller, AC1A, AC2A, AC3A, AC4A, AC5A, AC6A, AC7B, AC8B olarak isimlendirilmiştir.

#### 4.5.2.1. AC1A İkaz Sistemi Modeli

AC1A modelinde ikaz generatörünün ikazlanması kontrollü olarak yapılmaktadır. İkaz generatöründen elde edilen AC gücü DC güce dönüştürmek için ise kontrolsüz doğrultucu yani köprü diyot devresi kullanılmaktadır. Bu nedenle bu modelde ana generatörün ikaz akımı direkt olarak kontrol edilememekte, ikaz generatörünün ikaz akımından kontrol edilmektedir. Şekil 4.5'de prensip şeması gösterilen bu sistem alan kontrollü alternatör-doğrultucu ikaz sistemlerini temsil etmektedir. İkaz alternatörü kendinden ikazlı değildir ve gerilim regülatörü için gerekli güç harici olup, geçici rejimlerden etkilenmeyen bir kaynaktan sağlanır. Bu kaynak sürekli mıknatıslı bir pilot ikaz generatörüdür.

Büyük güç sistemlerinin kararlılık çalışmaları için, ikaz alternatörü (senkron generatör) burada en basit modellenmesiyle gösterilebilir. Şekil 4.15'te modeli verilmiş olan AC1A ikaz sisteminde alternatörün çıkış gerilimi  $V_E$ 'dir. İkaz alternatörünün alan akımı olan  $I_{FD}$ 'nin mıknatıslığı yok etme etkisini geri besleme yolu üzerindeki  $K_D$  sabiti kontrol eder. Bu sabit, ikaz generatörünün senkron ve geçici reaktanslarının bir fonksiyonudur. Doğrultucu regülasyona bağlı ikaz generatörü çıkışındaki gerilim düşümü, komütasyon reaktansının bir fonksiyonu olan  $K_D$  sabiti ve doğrultucu regülasyon eğrisi  $F_{EX}$ 'e yapılacak bir yaklaşımla simüle edilebilir.



Şekil 4.15 IEEE'nin AC1A ikaz sistemi modeli (Power Engineering Society, 2005).

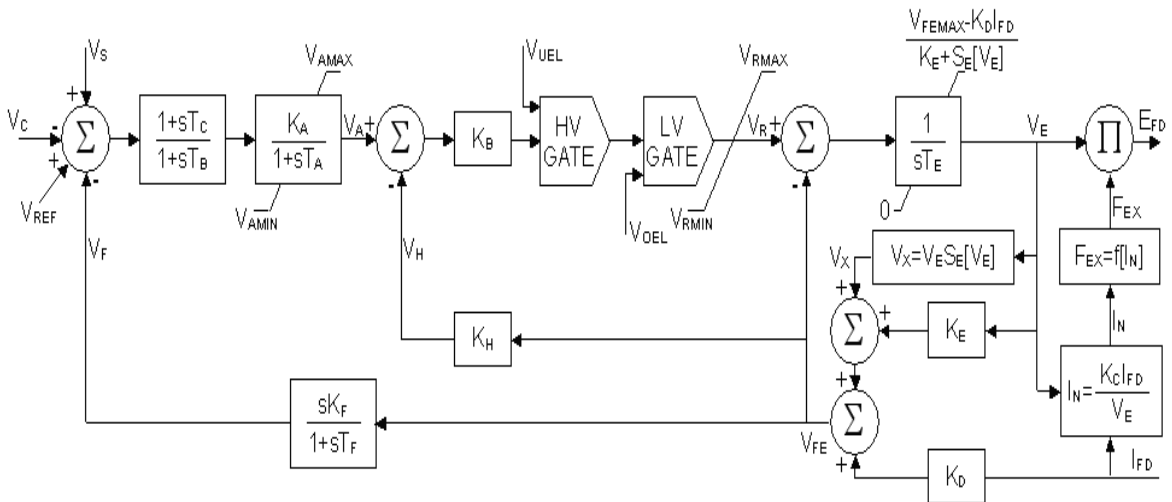
Bu modelde, ikaz generatörünün elemanı alan akımı ile orantılı bir  $V_{FE}$  sinyali elde edilir. Bu işlem için önce alternatör çıkış gerilimi  $V_E$  ile  $K_E + S_E$  terimi ( $S_E$  doymayı tanımlar) çarpılır, daha sonra  $I_{FD}$ , akımı mıknatıslığı yoketme terimi  $K_D$  ile çarpılır. Elde

edilen son iki işaret toplanarak  $V_{FE}$  işareti elde edilir. Bu sinyal ikaz elemanı alan akım sinyalıdır. AC1A tipi modelde bu sinyal ikaz sistem dengeleyicisine giriş sinyali olarak kullanılır (IEEE Power Engineering Society, 2005).

#### 4.5.2.2. AC2A İkaz Sistemi Modeli

Şekil 4.16'da gösterilen bu model, başlangıç tepkisi hızlı olan alternatörlü ve doğrultuculu ikaz sistemlerini temsil etmektedir. Ana ikaz elemanı olan alternatörle beraber kontrolsüz doğrultucu kullanılmaktadır. AC2A ikaz modeli AC1A modeline benzer tasarlanmış olup, ek olarak ikaz elemanı zaman sabiti kompanzasyonu ve ikaz elemanı alan akım sınırlayıcıları kullanılmaktadır.

İkazlayıcı (ikaz alternatörü) zaman sabiti kompanzasyonunda  $V_H$  işareti, direkt negatif geri beslemede kullanılır. Böylece ikazlayıcının alan zaman sabitinin efektif değeri azaltılır. Efektif değer azalması ile sistemin küçük işaret cevap band genişliği artar. Zaman sabiti, kompanzasyon döngüsündeki  $K_B$  ve  $K_H$  kazançları ile orantılı olarak azaltılır.



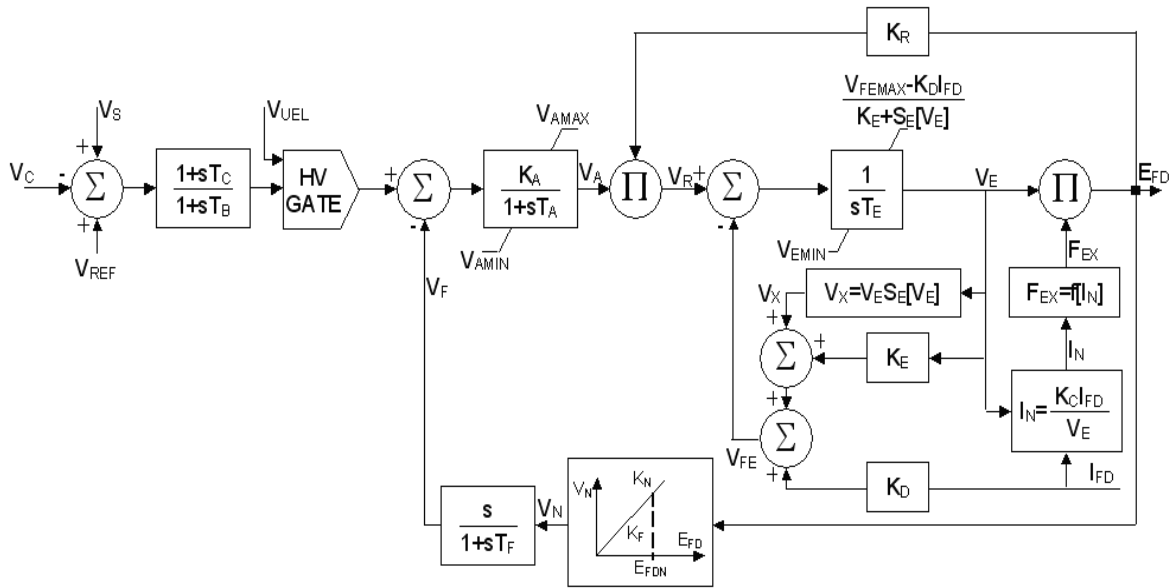
Şekil 4.16 IEEE'nin AC2A ikaz sistemi modeli (Power Engineering Society, 2005).

Bu sistemde yüksek başlangıç tepkisi elde etmek için ikaz alternatörünün alan sargılarına çok yüksek bir zorlama gerilimi ( $V_{RMAX}$ ) uygulanır. Sınırlayıcı ikaz alan akımını algılar, yüksek zorlamaya izin verir fakat akımı da sınırlar. Alan akımının sınırlanmasıyla çıkış gerilimi  $V_E$ , seçilen bir değerde sınırlandırılır. Bu sınır değeri sistem için genellikle belirlenen nominal tepki değeridir. Gerilim regülatörünün çıkış gerilimi  $V_A$  ve zaman sabiti kompanzasyon işareti, ikazın bir sınır noktasında regülatör kontrolünden

sınırlama kontrolüne düzgün geçişi sağlamak için kontrol lojik devresinde, sınırlayıcıdan alınan çıkış sinyali ile karşılaştırılır (IEEE Power Engineering Society, 2005).

#### 4.5.2.3. AC3A İkaz Sistemi Modeli

Şekil 4.17’de verilen AC3A modeli alan kontrollü alternatörlü ve kontrolsüz doğrultuculu ikaz sistemidir. Bu modelde ikazlayıcı alternatördür ve alternatörün çıkış gücü kontrolsüz doğrultucudan ana generatör alan sargılarına aktarılır. Alternatör kendinden ikazlı küçük bir generatörden beslenir ve gerilim regülatörü için gerekli güç ikaz alternatörünün çıkış geriliminden sağlanır. Bu yüzden sistemde ek bir doğrusalsızlık durumu oluşur. Bu durum şekil 4.17’de görüldüğü gibi simule edilmiş bir çarpım bloğu kullanılarak oluşmaktadır. Çarpım bloğunun giriş işaretleri olarak gerilim regülatörü kumanda sinyali  $V_A$  ve ikaz alternatörü çıkış gerilimi  $E_{FD}$ ’nin  $K_R$  ile çarpımından elde edilen işaret kullanılır (IEEE Power Engineering Society, 2005).

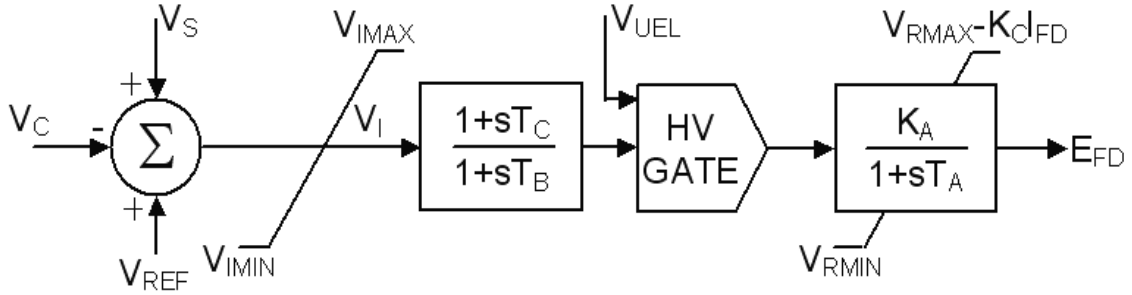


Şekil 4.17 IEEE'nin AC3A ikaz sistemi modeli (Power Engineering Society, 2005).

Alternatör ikaz akımının mıknatıssızlaştırma etkisi alternatör çıkış gerilimi  $V_E$ 'nin dinamik davranışını etkiler ve mıknatıssızlaştırma etkisi  $K_D$  sabiti kontrol edilir. Bu sabit, ikaz alternatörünün senkron ve transient reaktanslarının bir fonksiyonudur.

#### 4.5.2.4. AC4A İkaz Sistemi Modeli

Bu model diğer AC modellerden farklı olup alternatör beslemeli tam dalga kontrollü doğrultuculu ikaz sistemi olarak adlandırılmaktadır. Şekil 4.18'de verilmiş yüksek bir başlangıç yanıtı olan bu modelin ikazlayıcı çıkış devresinde tam dalga doğrultucu tristör köprüsü kullanılmaktadır.

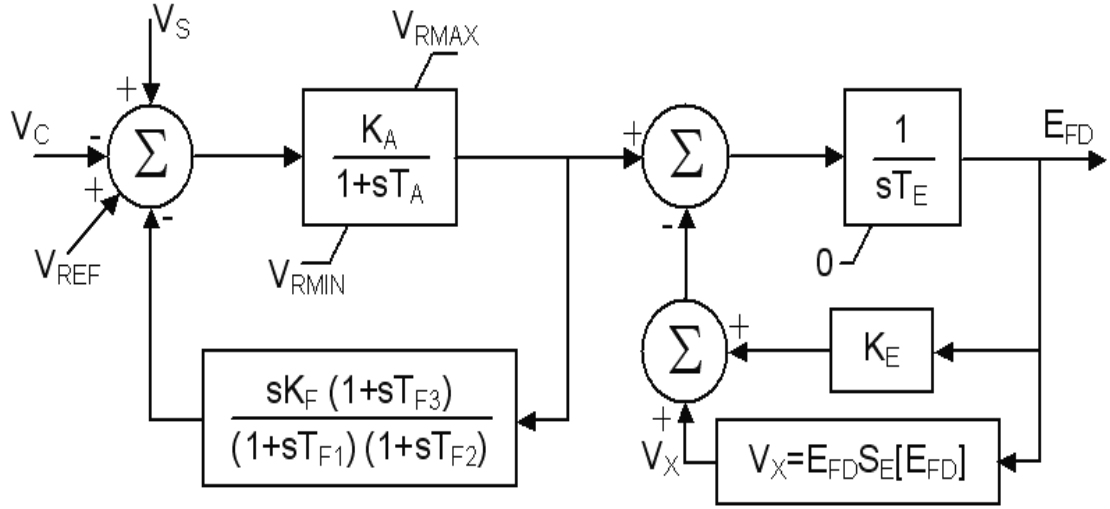


Şekil 4.18 IEEE'nin AC4A ikaz sistemi modeli (Power Engineering Society, 2005).

Bu modelde gerilim regülatörü tristörlerin tetikleme açısını kontrol eder. İkazlayıcı alternatörün, çıkış gerilimini sabit bir değerde tutmak için kontrol etmek üzere bağımsız bir gerilim regülatörü kullanılmaktadır. İkaz sistem kararlılığı kontrol fonsiyonu, seri bir endüktif ve kapasitif şebekede tristörler sayesinde sıklıkla devreye girebilmektedir. Bu kontrol fonksiyonunun simule edilmesi  $T_B$  ve  $T_C$  zaman sabitleri sayesinde gerçekleştirilir. Genel eşdeğer kazanç ve zaman sabiti regülatör ve/veya tristörlerin tetikleme açıları ile ilişkilendirilerek  $K_A$  ve  $T_A$  olarak simule edilmektedir. AC ikaz sistemlerinin en büyük dezavantajı negatif alan dönüşünün olmamasıdır. AC4A modelinde generatör alan deşarjı (de-excitation) özelliği mevcuttur (IEEE Power Engineering Society, 2005).

#### 4.5.2.5. AC5A İkaz Sistemi Modeli

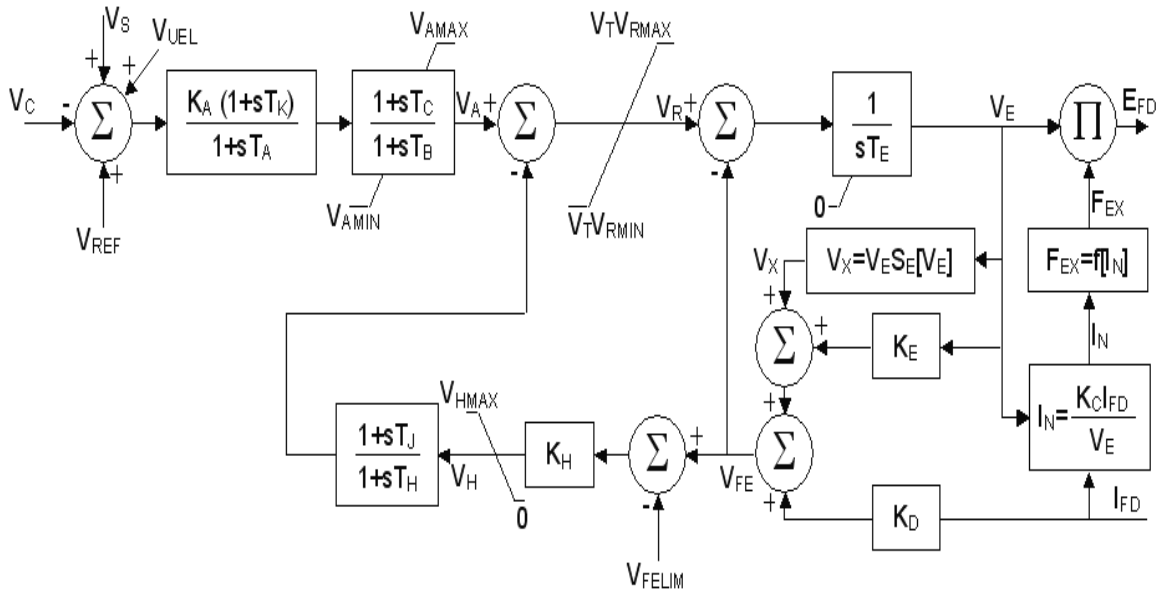
Şekil 4.19'da gösterilen bu sistem fırçasız ikaz sistemlerinin basitleştirilmiş modelidir. Sistemde meydana gelebilecek bozulmalara karşı regülatör, sürekli mıknatıslı bir generatörden beslenmektedir. Bu model sanayide yaygın olarak kullanılmaktadır. Çünkü diğer ikaz tipleri hakkında detaylı veri olmadığına veya basitleştirilmiş model taleplerinde bu ikaz modeli diğer sistemleri temsil edebilmektedir (IEEE Power Engineering Society, 2005).



Şekil 4.19 IEEE'nin AC5A ikaz sistemi modeli (Power Engineering Society, 2005).

#### 4.5.2.6. AC6A İkaz Sistemi Modeli

Şekil 4.20'de gösterilen bu model, alan kontrollü alternatörlü olup, alternatör çıkışındaki doğrultucu devre kontrolsüzdür. Bu ikazlayıcı sistemi elektronik gerilim regülatörleri ile kullanılmaktadır.



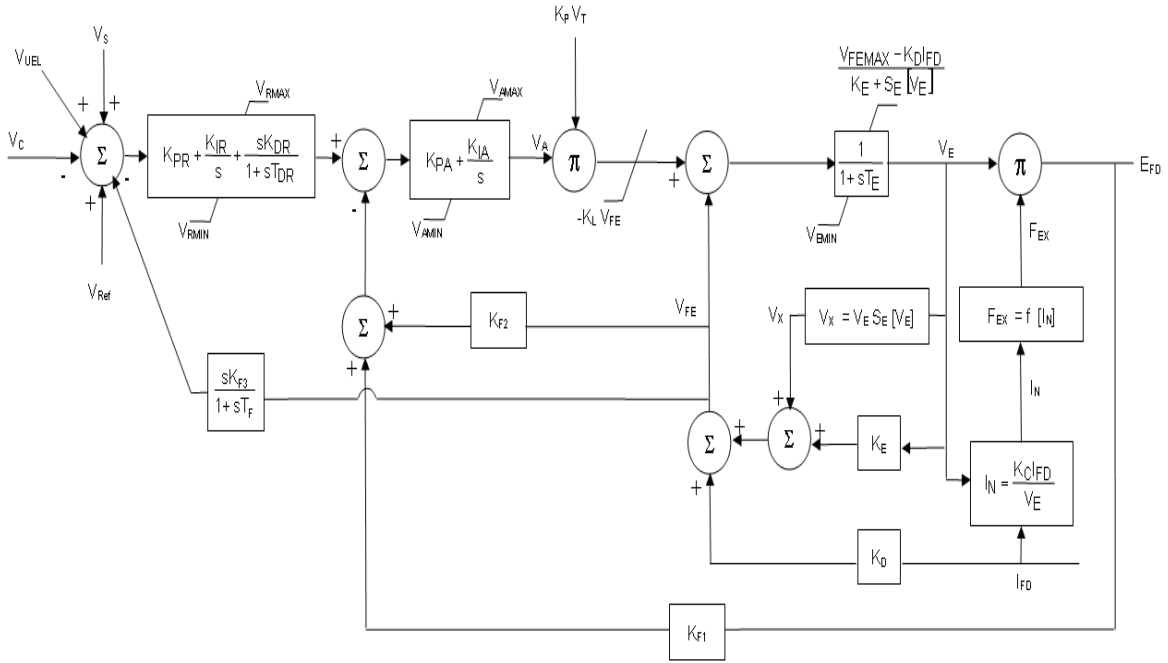
Şekil 4.20 IEEE'nin AC6A ikaz sistemi modeli (Power Engineering Society, 2005).

Gerilim regülatörünün maksimum çıkışı olan  $V_R$ , ikaz alternatörünün uç gerilimi olan  $V_T$ 'nin bir fonksiyonudur. AC6A modeli alan akım sınırlayıcıları da içermektedir (IEEE Power Engineering Society, 2005).



#### 4.5.2.7. AC7B İkaz Sistemi Modeli

Bu ikaz sisteminin diğerlerinden farkı PID kontrolörü içermesidir. Alternatör çıkışında döner veya sabit doğrultucu devre sayesinde ana generatörün alan sargısının ihtiyacı olan DC gücü sağlamaktadır.

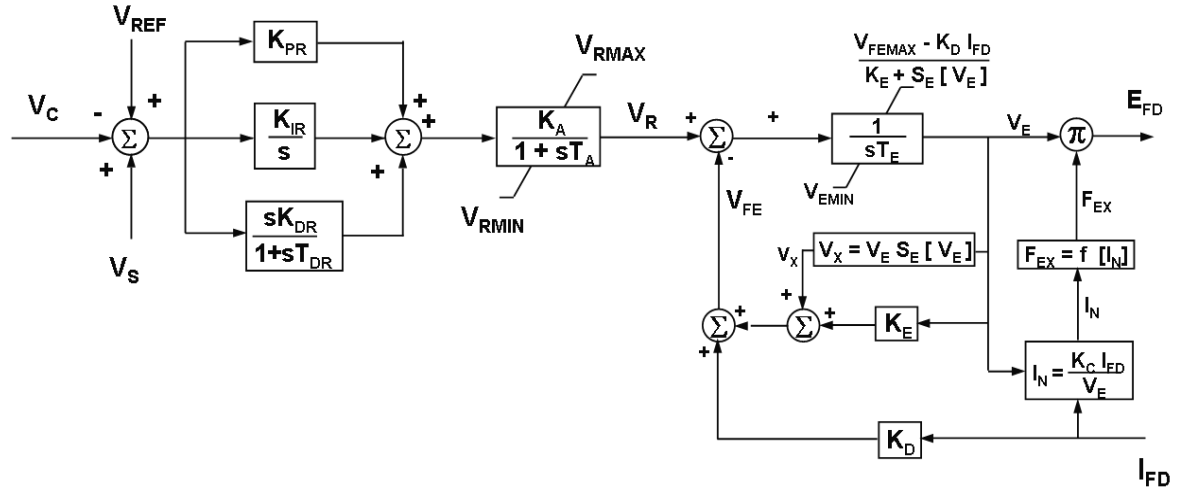


Şekil 4.21 IEEE'nin AC7B ikaz sistemi modeli (Power Engineering Society, 2005).

Şekil 4.21'de verilen ikaz sistemi modeli son zamanlarda geliştirilerek yüksek band genişliğine sahip dahili döngüsü olan regülatörler kullanılmaya başlanmıştır. Bu regülatör sayesinde generatör alan geriliminin veya ikazlayıcı akımının ( $K_{F2}$ ,  $K_{F1}$ ) hızlı regülasyonu, hızlı bir ikaz generatörü akım sınırlaması  $V_{FEMAX}$ , ile alternatörün alan akımının korumalı olması ve hızlı bir PID kontrolörlü AVR sistemi içeren bir sistem oluşmuştur. Eğer AVR kontrolü sadece PI kontrolü yapıyorsa, güç sistem kararlılığı için alternatif olarak oransal geribesleme döngüsü ( $K_F$ ,  $T_F$ ) kullanılarak kararlılık sağlanmaktadır. Bu sistemde PSS kullanılacak ise PSS2B veya PSS3B gibi modeller uygundur (IEEE Power Engineering Society, 2005).

#### 4.5.2.8. AC8B İkaz Sistemi Modeli

Blok diyagramı şekil 4.22’de gösterilmiş olan AC8B ikaz modelinin AC7B ikaz modelinden farkı, regülatör kontrol birimi olan AVR kontrolü birbirinden bağımsız, oransal ( $K_{PR}$ ), integral ( $K_{IR}$ ) ve türevsel ( $K_{DR}$ ) kazançlarını içermesidir. Diğer bir tanım ile PID kontrolörü ayrık sabitlerde tanımlanmıştır.



Şekil 4.22 IEEE’nin AC8B ikaz sistemi modeli (Power Engineering Society, 2005).

Bu modelin fırçasız ikazlayıcı birimi ( $T_E$ ,  $K_E$ ,  $S_E$ ,  $K_C$ ,  $K_D$ ) AC2A modeline benzetilebilir.  $K_C$  ve  $K_D$  parametrelerinin sifıra ayarlanması ile dijital temelli gerilim regülatörü ikazlayıcı döner DC generatöre de uyum sağlayabilmektedir. Tristör güç katmanı generatör terminal gücünden beslenmektedir.  $V_{RMAX}$  ve  $V_{RMIN}$ , generatör terminal geriliminin ( $V_T.V_{RMAX}$  ve  $V_T.V_{RMIN}$ ) şeklinde bir fonksiyonu olmalıdır (Kundur, 1994; Vedrana, Kresimir ve Zeljko, 2013; IEEE Power Engineering Society, 2005).

#### 4.5.3. ST Tipi İkaz Sistemi Modelleri

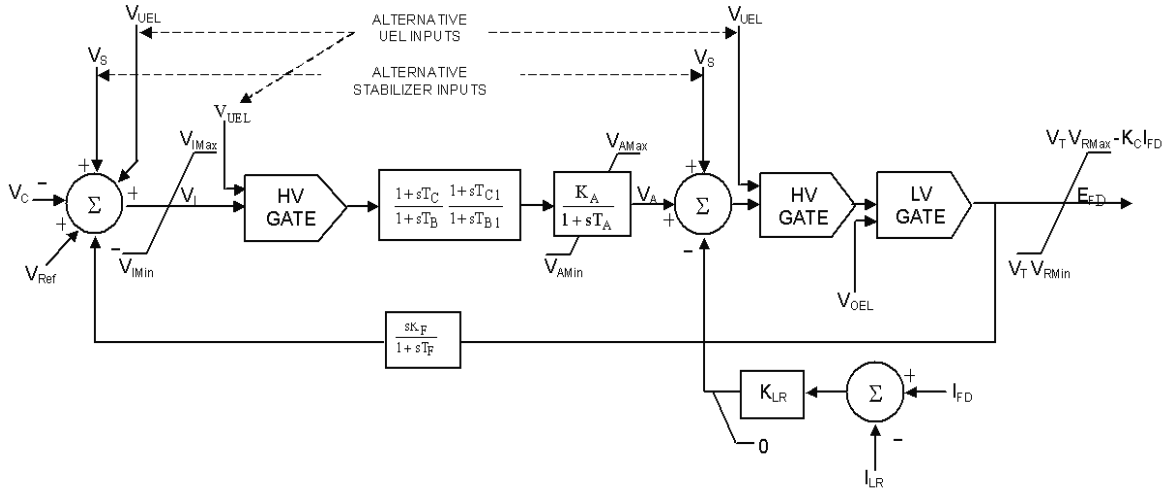
ST (Statik İkaz Sistemi) tip ikaz sistemleri yedi ayrı modeli içermektedir. Bu sistemlerde DC ve AC sistemlerde olduğu gibi mil üzerinde ayrıca bir ikaz generatörü bulunmamaktadır. Kaynak gücü genellikle generatör terminallerine bağlı veya bağımsız bir baraya bağlı bir transformatör tarafından sağlanmaktadır. Generatör alan sargılarının AC kaynak güçleri, kontrollü veya kontrolsüz doğrultucular tarafından DC güce dönüştürülerek alan sargılarına aktarılmaktadır. Pek çok statik ikaz sistemi modeli negatif gerilime izin verir ama sadece bunlardan bazıları negatif ikaz akımını sağlayabilir. Negatif

ikaz akımının sağlanabilmesi kaydadeğer bir önem arz etmektedir. Çünkü ikaz sisteminin hızlı deşarjı sayesinde generatörde meydana gelebilecek dahili arızalar önlenmektedir.

Statik ikaz sistem modellerinin çoğunda ikazlayıcı tepe gerilimi çok yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Bu tip sistemlerde ikazlayıcı ve generatör rotor sargılarını korumak için alan akım sınırlayıcı devresi kullanılmaktadır. Bu sistemlerde ani ve gecikmeli sınırlayıcı devreleri kullanılmaktadır. ST1A ve ST6A modellerinde ani sınırlayıcı devreleri kullanılmaktadır (Vedrana, Kresimir ve Zeljko, 2013; IEEE Power Engineering Society, 2005).

#### 4.5.3.1. ST1A İkaz Sistemi Modeli

Şekil 4.23'de verilen ST1A ikaz sistemi modeli, gerilim kaynaklı, kontrollü doğrultuculu ikaz sistemi olarak bilinmektedir. Şekil 4.23'de gösterilen bu model, ikaz gücü, generatör terminaline bağlı bir transformatörden veya ünite yardımcı barasından sağlanan tüm modelleri temsil etmektedir. Bu kaynaklardan sağlanan ikaz gücü kontrollü bir doğrultucu devresi ile ayarlanmaktadır. Kaynağın tepe gerilimi generatör terminal gerilimi ile alakalıdır.



Şekil 4.23 IEEE'nin ST1A ikaz sistemi modeli (Power Engineering Society, 2005).

Bu tip ikaz sistemlerinde, ikazlayıcının zati (içsel) zaman sabitleri çok küçük olduğundan, genellikle ikazlayıcı için kararlılaştırıcı gerekmemektedir. Diğer bir taraftan, başka sebeplerden dolayı geçici kazançların azaltılması daha makul olabilmektedir. Şekil 4.23'de verilen modelde, ileri besleme yolundaki  $T_B$  ve  $T_C$  ( $K_F$  parametresinin sıfıra ayarlanması ile) veya geribesleme yolundaki uygun seçilmiş  $K_F$  ve  $T_F$  parametreleri ile

geçici kazanç azaltma uygulaması yeterince kolay yönlenebilmektedir. Gerilim regülatör kazancı ve içsel herhangi bir zaman sabiti  $K_A$  ve  $T_A$  olarak tanımlanmaktadır.

ST1A modeli  $T_{B1}$  ve  $T_{C1}$  zaman sabitleri sayesinde geçici kazanç artma olasılığını sağlayabilmektedir. Ancak bu durum  $T_{C1}$ 'in  $T_{B1}$ 'den daha büyük olduğu durumda gerçekleşmektedir. Köprü doğrultucu tristörlerin tetikleme açıları, giriş çıkış ilişkilerinin etkilerinden türetilmektedir. Bu etkiler şekil 4.23'de verilen modelde doğrusal olarak kabul edilen ve kolay seçilen  $K_A$  kazancı olarak temsil edilmektedir. Pek çok durumda  $V_I$  sinyalinin dahili sınırlamaları ihmal edilmektedir. Alan geriliminin sınırlama değerleri, senkron generatörün uç gerilimi ve ikaz akımının fonksiyonu olarak modellenmektedir.

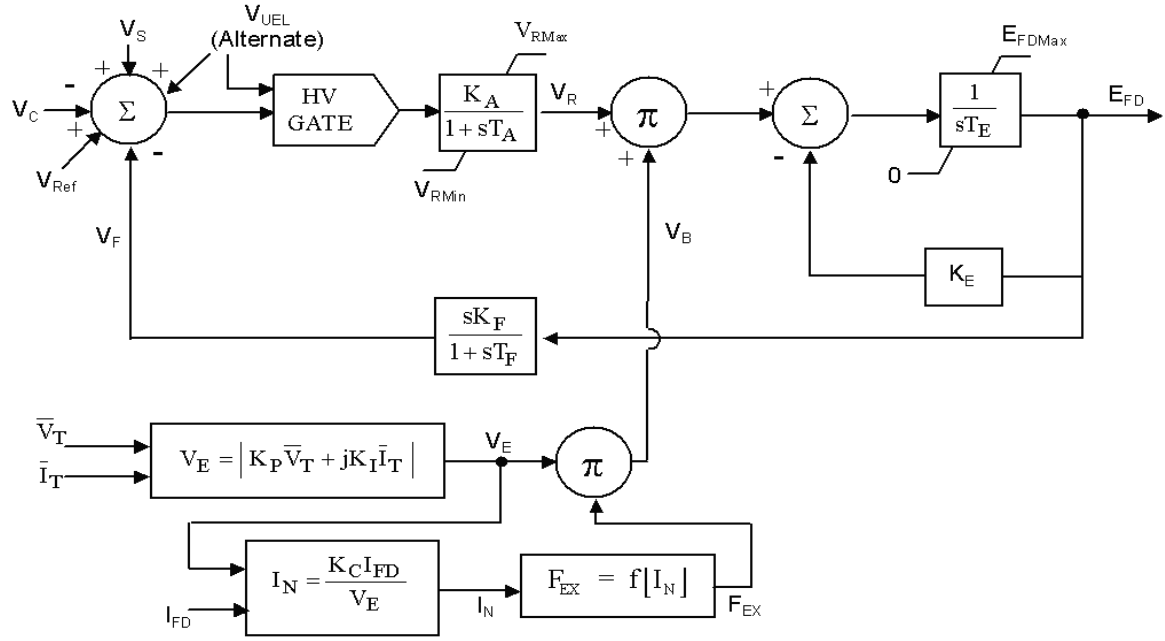
Sonuç olarak, çok yüksek yüklenebilme kapasitesine sahip bu sistemlerde alan akım sınırlaması, generatörü ve ikaz sistemini korumak için faydalı olmaktadır. Şekil 4.23'de verilen modelde görüldüğü gibi alan akım sınırlaması  $I_{LR}$ , kazanç ise  $K_{LR}$  olarak tanımlanmıştır.  $K_{LR}$  kazanç parametresinin sıfır değerine ayarlanması ile bu sınırlamanın ihmal edilmesi sağlanmaktadır. Bu ikaz sistemleri çoğunlukla tam kontrollü tristör doğrultucu devresi ihtiva etmektedir. Bununla beraber negatif alan gerilim sınırlama fonksiyonunun ( $V_{RMIN}$ ) sıfıra ayarlanması doğrultusunda yarım dalga tristör doğrultucu devresi de kullanılabilmektedir (Kundur, 1994; Arda, 2006; IEEE Power Engineering Society, 2005).

#### 4.5.3.2. ST2A İkaz Sistemi Modeli

Bazı statik ikaz sistemlerinde, güç kaynağı olarak senkron generatörün uç büyüklükleri olan gerilim ve akım kaynakları kullanılmaktadır. Bu sistemler birleşik kaynaklı, doğrultuculu ikaz sistemleri olarak adlandırılmaktadır. ST2A modeli olarak tanımlanmış ikaz sistemi modeli şekil 4.24'de verilmiştir.

İkaz sisteminin güç kaynağı olarak kullanılan senkron generatörün uç gerilimi  $V_T$  ve uç akımı  $I_T$ 'nin fazör kombinasyonları şekil 4.24'de verilen ST2A statik ikaz modelinin oluşturulması için gereklidir.

Manyetik bileşenlerin doyumu sayesinde ikaz sisteminin gerilimi ( $E_{FDMAX}$ ) sınırlandırılmaktadır. İkaz sisteminin gerilim regülatörü, ikazlayıcı çıkışını güç transformatörünün bileşenlerinin doyumuna bağlı olarak kontrol eder.  $T_E$  sabit değeri kontrol sargılarının endüktansı ile ilişkili zaman sabitidir (IEEE Power Engineering Society, 2005).



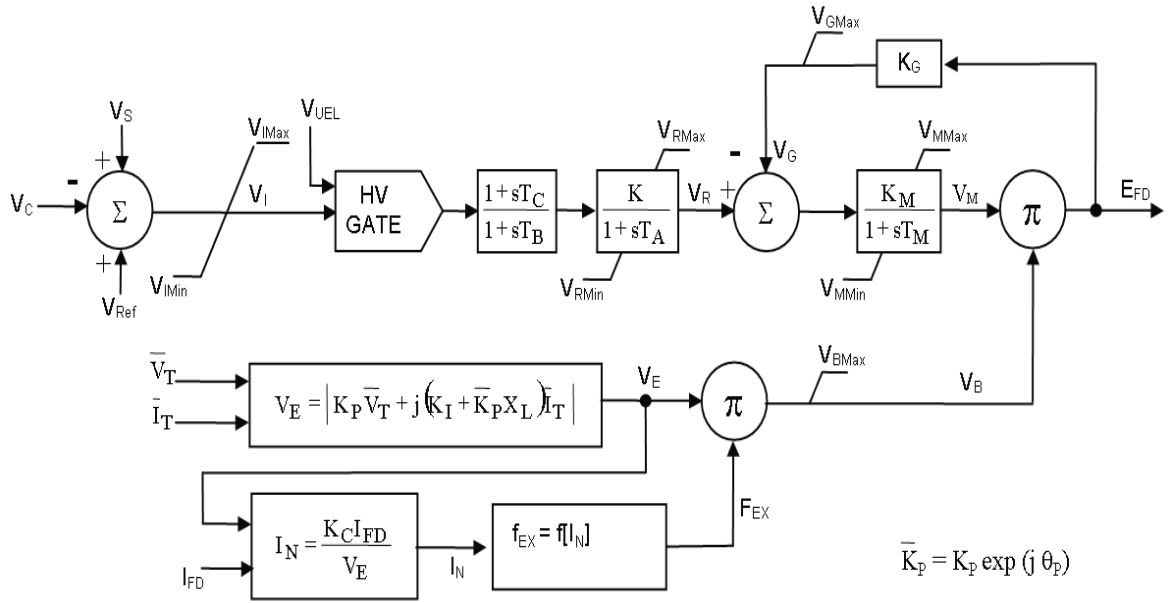
Şekil 4.24 IEEE'nin ST2A ikaz sistemi modeli (Power Engineering Society, 2005).

#### 4.5.3.3. ST3A İkaz Sistemi Modeli

Şekil 4.25'de verildiği gibi bazı statik ikaz sistemlerinin ikazlayıcı (exciter) kontrol karakteristiklerini doğrusallaştırmak için alan voltaj kontrol döngüsü kullanılmaktadır. Bu şekilde çıkış işaretinin, besleme kaynağının sınır değerlerine ulaşınca kadar, besleme kaynağından bağımsız olmasına neden olmaktadır.

ST3A modelinde birbirinden farklı kontrollü doğrultucu tasarımları kullanılmaktadır. Tam doğrultucu tristör köprüleri veya hibrit köprüler seri veya şönt olabilmektedirler. İkaz sisteminin besleme kaynağı generatör uç geriliminden veya generatör dahili sargılardan sağlanabilmektedir. Bazı tasarımlarda şekil 4.25'te olduğu gibi birleşik kaynaklı sistemler kullanılarak generatör terminalinden akım ve gerilim kaynağı sağlanmaktadır.

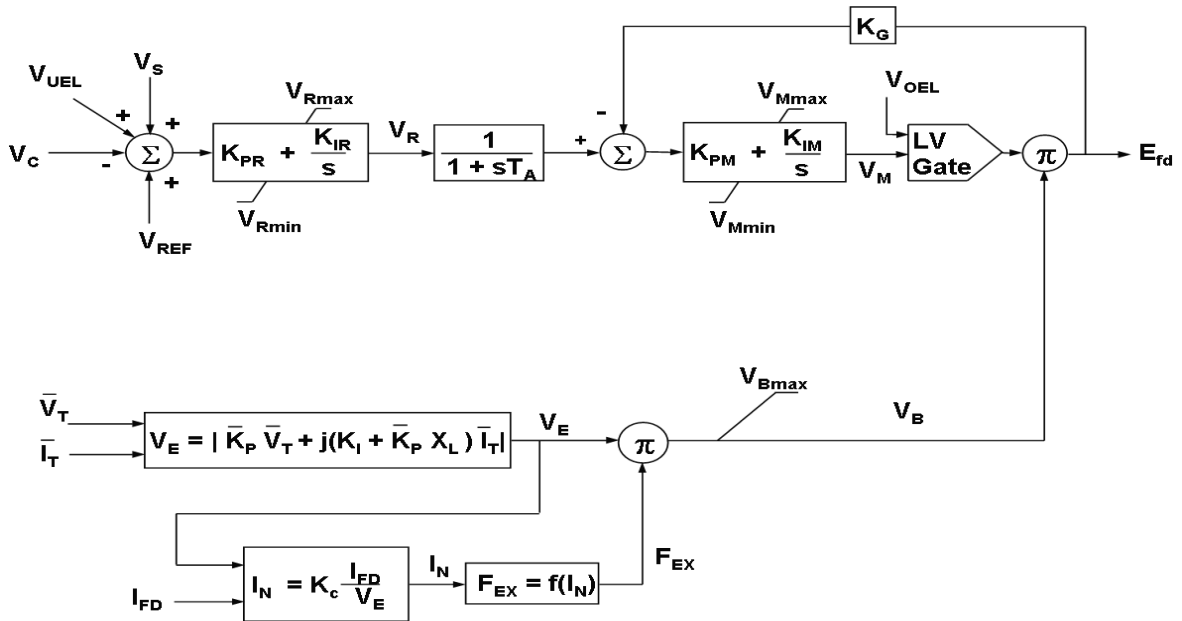
Bu ikaz sistemlerindeki gerilim regülöründe bulunan ve zaman sabitleri  $T_C$  ve  $T_B$  olarak temsil edilen faz ilerletici-geciktirici (lead-lag) diğer adıyla faz kaydırıcı elemanlar sayesinde ikaz sistem kararlılaştırıcı işlemi sağlanmaktadır. Gerilim regülörünün dahili döngüsü,  $K_M$  ve  $K_G$  kazançlarını içermekle beraber,  $T_M$  zaman sabitini de kapsamaktadır. Bu döngü, pratikte tercih edilen ve yüksek frekans değerleri 3 Hz olan modeller ile karşılaştırıldığında geniş bir bant aralığına sahip olduğu görünmektedir.  $V_{BMAX}$  sınırlayıcı değeri güç bileşenlerinin doyum seviyesini temsil etmektedir (IEEE Power Engineering Society, 2005).



Şekil 4.25 IEEE'nin ST3A ikaz sistemi modeli (Power Engineering Society, 2005).

#### 4.5.3.4. ST4B İkaz Sistemi Modeli

Bu model, ST3A modelinin bir varyasyonudur. ST3A modelinin regülatör bloğunda faz ilerletici-geciktirici karakteristiği kullanılırken, bu modelde PI (oransal-integral) kontrol yöntemi kullanılmaktadır. Şekil 4.26'da potansiyel ve birleşik kaynaklı doğrultuculu ST4B ikaz sistemi modeli verilmiştir.

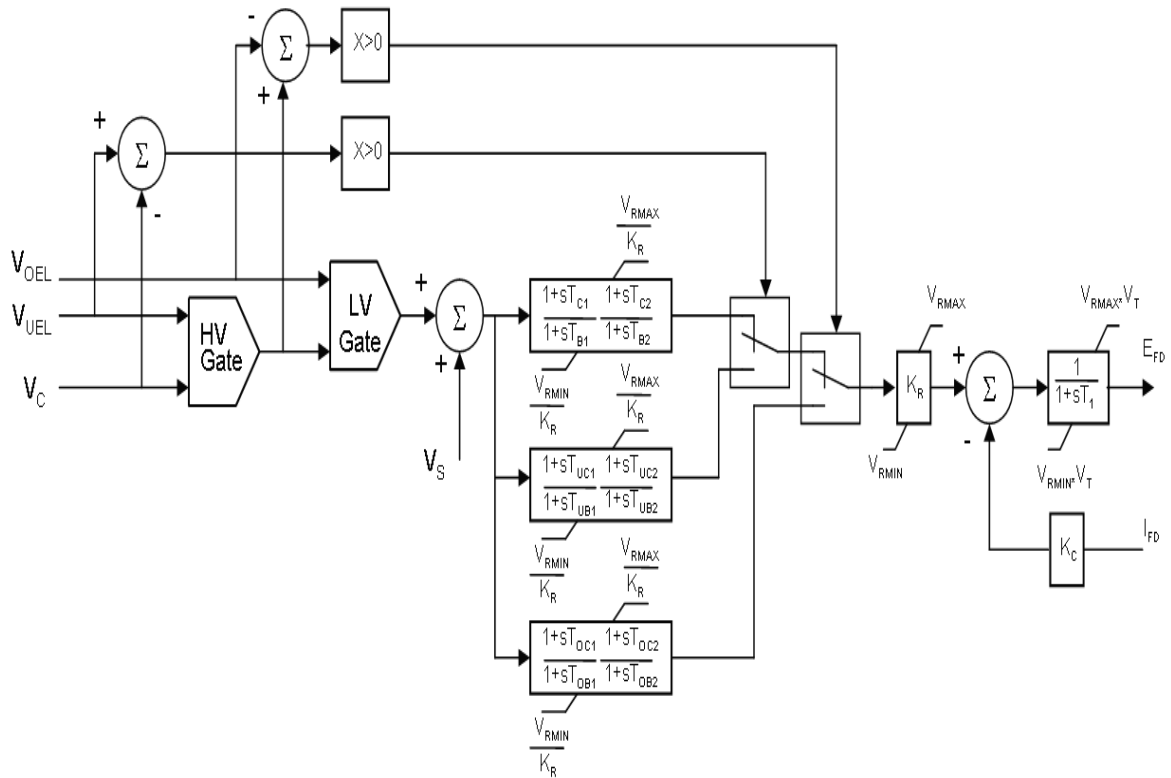


Şekil 4.26 IEEE'nin ST4B ikaz sistemi modeli (Power Engineering Society, 2005).

Regülatöre ait diğer özelliklerden biri de, düşük bir kapı değerine sahip OEL (aşırı ikaz sınırlama fonksiyonu), UEL (düşük ikaz sınırlama fonksiyonu) ve V/Hz kontrolünün regülatör girişinde toplanmaktadır. Bu durumda, PSS kontrol içeren bir ünite eğer ünite UEL sınırlama kontrolü devreye girerse PSS aktif hale gelir. Bu sistemde bulunan güç elemanlarının modellenmesinde bazı esneklikler vardır. Eğer bara beslemeli bir ikaz sistemi ise  $K_I$  ve  $X_L$  değerleri sıfıra eşittir. Eğer birleşik beslemeli statik bir ikaz sistemi ise  $X_L$  değeri sıfıra eşit olur. Eğer potansiyel ve birleşik kaynaklı bir sistem ise  $X_L$  sıfır olmaz. ST4B statik ikaz sistemi modeli için en uygun güç sistem kararlılaştırıcı modeli PSS2B modelidir (IEEE Power Engineering Society, 2005).

#### 4.5.3.5. ST5B İkaz Sistemi Modeli

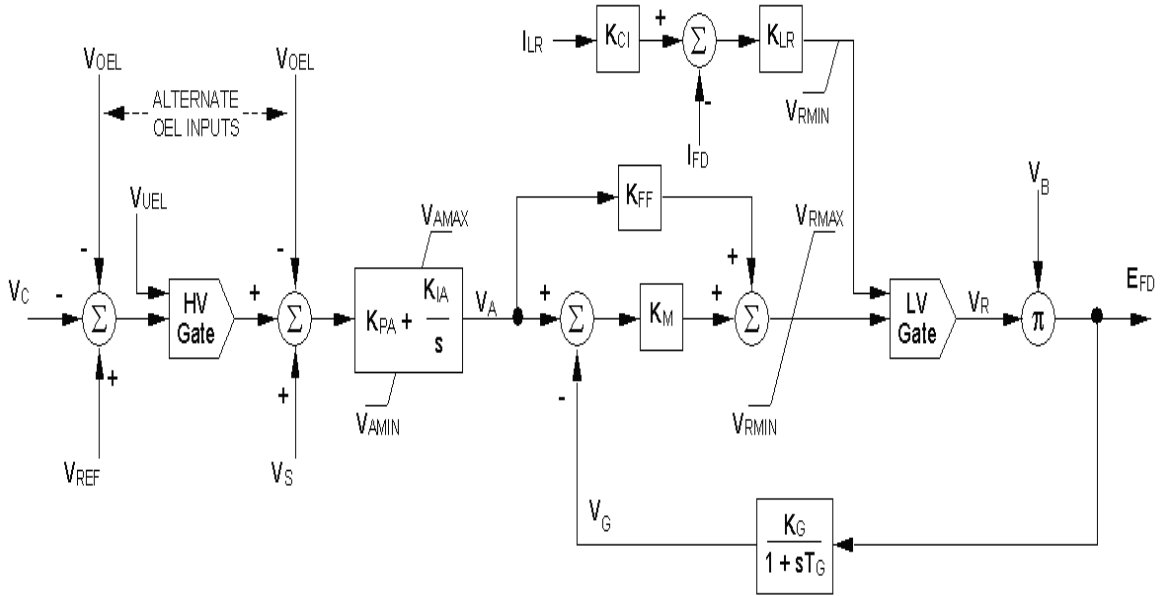
Şekil 4.27’de verilmiş olan ST5B statik ikaz sistemi modeli ST1A statik ikaz sistemi modelinin bir varyasyonudur. Bu modelde alternatif olarak aşırı ikaz giriş işareti, düşük ikaz giriş işareti ve ilave sınırlamalar mevcuttur. PSS2B, PSS3B ve PSS4B güç kararlılaştırıcı modelleri ST5B statik ikaz sistemi modeline uygun modellerdir.



Şekil 4.27 IEEE'nin ST5B ikaz sistemi modeli (Power Engineering Society, 2005).

#### 4.5.3.6. ST6B İkaz Sistemi Modeli

Şekil 4.28’de verilmiş olan ST6B statik ikaz sistemi modelinde bulunan AVR, PI kontrollü bir dahili döngüsü olan ve ön kontrollü bir alan gerilim regülatörü içermektedir. Alan gerilim regülatöründe oransal bir kontrol uygulanmaktadır. Geri besleme devresindeki ön kontrol ve gecikme, dinamik tepkiyi arttırmaktadır. Şayet alan gerilim regülatörü uygulanmaz ise  $K_{FF}$  ve  $K_G$  parametreleri sıfıra ayarlanır,  $V_R$  doğrultucu gücünün sınırlama değerlerini temsil eder. Bu modelde alan akım tepe değeri  $I_{FD}$  için sınırlama mevcuttur. Doğrultucu devresi için kullanılan güç  $V_B$ , generatör terminallerinden veya bağımsız bir kaynaktan sağlanmaktadır. Aşırı ikaz ( $V_{OEL}$ ), düşük ikaz ( $V_{UEL}$ ) ve PSS, ( $V_S$ ) girişleri harici modeller olarak sağlanmaktadır (IEEE Power Engineering Society, 2005).

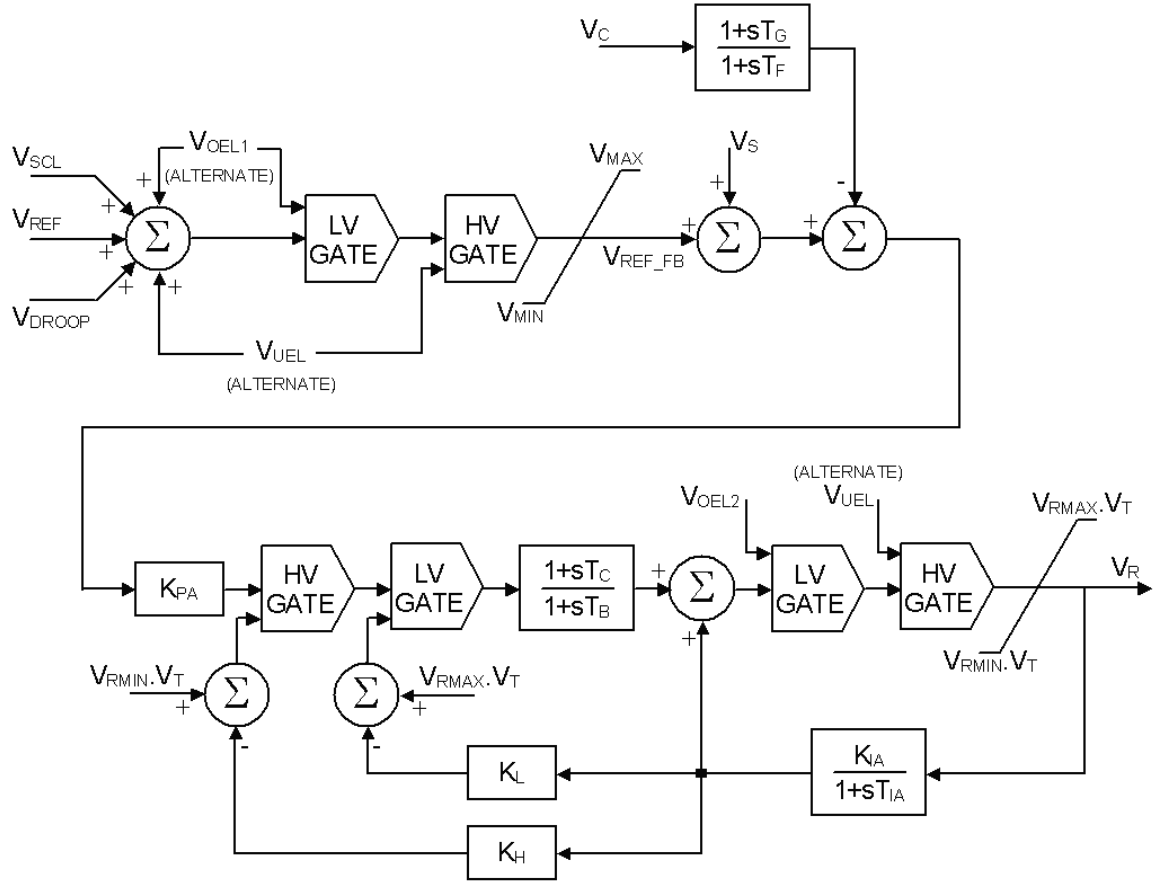


Şekil 4.28 IEEE'nin ST6B ikaz sistemi modeli (Power Engineering Society, 2005).

#### 4.5.3.7. ST7B İkaz Sistemi Modeli

Şekil 4.29’da verilmiş ST7B modeli statik potansiyel kaynaklı ikaz sistemlerini temsil etmektedir. Bu sistemdeki AVR, PI kontrollü gerilim regülatörü içermektedir. Bu modelde de, fırçasız ikaz sistemlerinde tipik olarak kullanılan ve türevsel bir fonksiyon olan seri bağlı faz ilerletici-geciktirici filtre, giriş olarak kullanılmaktadır. Bu yolla regülatör PID kontrol yapmış olur.





Şekil 4.29 IEEE'nin ST7B ikaz sistemi modeli (Power Engineering Society, 2005).

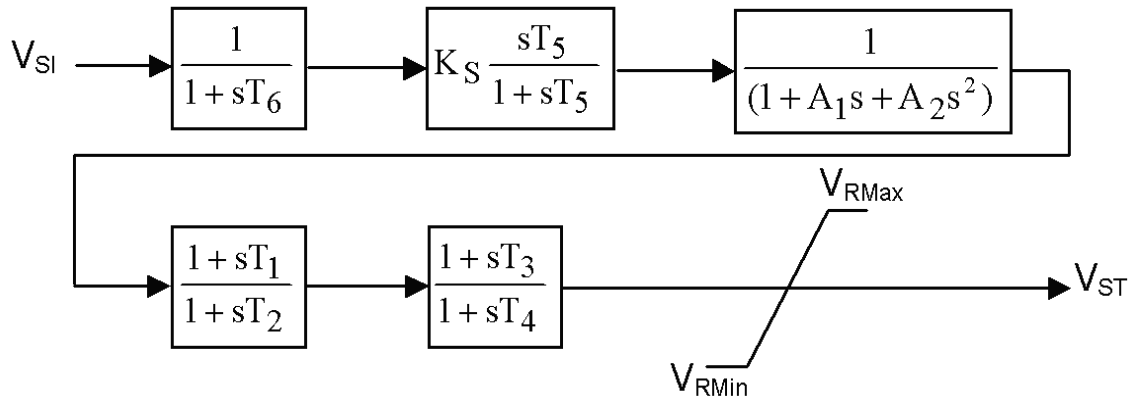
Otomatik gerilim regülatörü (AVR), OEL1, UEL, SCL (stator akım sınırlayıcı) ve DROOP (akım kompanzatorü) girişleri için uygun referans girişlerini içermektedir. Bütün bu sınırlamalar gerilim referans seviyelerinde devrede iken, PSS (PSS1A, PSS2A ve PSS2B)'den alınan  $V_S$  sinyali aktif durumda olur (IEEE Power Engineering Society, 2005).

#### 4.6. Güç Sistem Kararlılaştırıcı

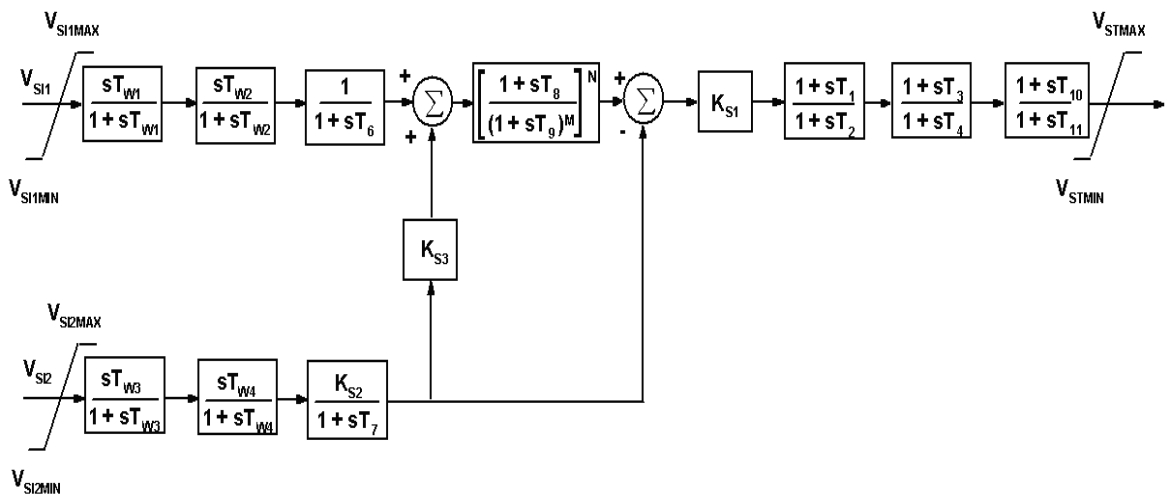
Güç sistem kararlılaştırıcı (PSS) kontrolü ikaz sistemlerine has bir kontrol yöntemidir. Bu yöntem, güç sistem osilasyonlarının sönmülendirilmesinde tampon görevi görüp, kararlılık için büyük bir katkı sağlamaktadır. Bu kontrol yönteminde kullanılan giriş işaretleri genel olarak, generatör şaft hızı, generatör terminal frekansı ve generatör gücü büyüklüklerinden oluşmaktadır. Generatör terminal frekansı giriş işareti olarak kullanılmakla birlikte bazı durumlarda generatör reaktansının (pek çok çalışmada şaft hızına eşdeğer) simüle frekansı da kullanılmaktadır.

Güç sistem kararlılaştırıcılar, PSS1A, PSS2B, PSS3B, PSS4B gibi farklı tip modellerden oluşmaktadır. Kararlılaştırıcı modellerinde kullanılan giriş sinyallerinin ve kararlılaştırıcı parametrenin birbirlerine uyumlu olması gerekmektedir. Kararlılaştırıcı parametreleri, farklı giriş sinyalleri kullanılarak birbirine benzer çok değişik sönümlenme karakteristikleri elde edilebilir.

Güç sistem kararlılaştırıcılar senkron makinanın, senkron kompanzator (synchronous condensers) veya normal senkron generatör şeklinde çalışmasına bağlı olarak farklı modlarda kurulabilir. Bu durumda kararlılaştırıcı, senkron makinanın çalışma moduna bağlı olarak farklı parametre ayar değerlerinde belirli bir zamanda geçiş yapma yeteneğine sahip olmalıdır. Şekil 4.30 ve 4.31’de bazı PSS modellerinin blok diyagramları verilmiştir. Bu modellerdeki  $V_{S1}$  giriş işareti, güç, frekans ve şaft hızını temsil etmektedir (IEEE Power Engineering Society, 2005).



Şekil 4.30 IEEE'nin PSS1A güç sistem kararlılaştırıcı modeli (Power Engineering Society, 2005).

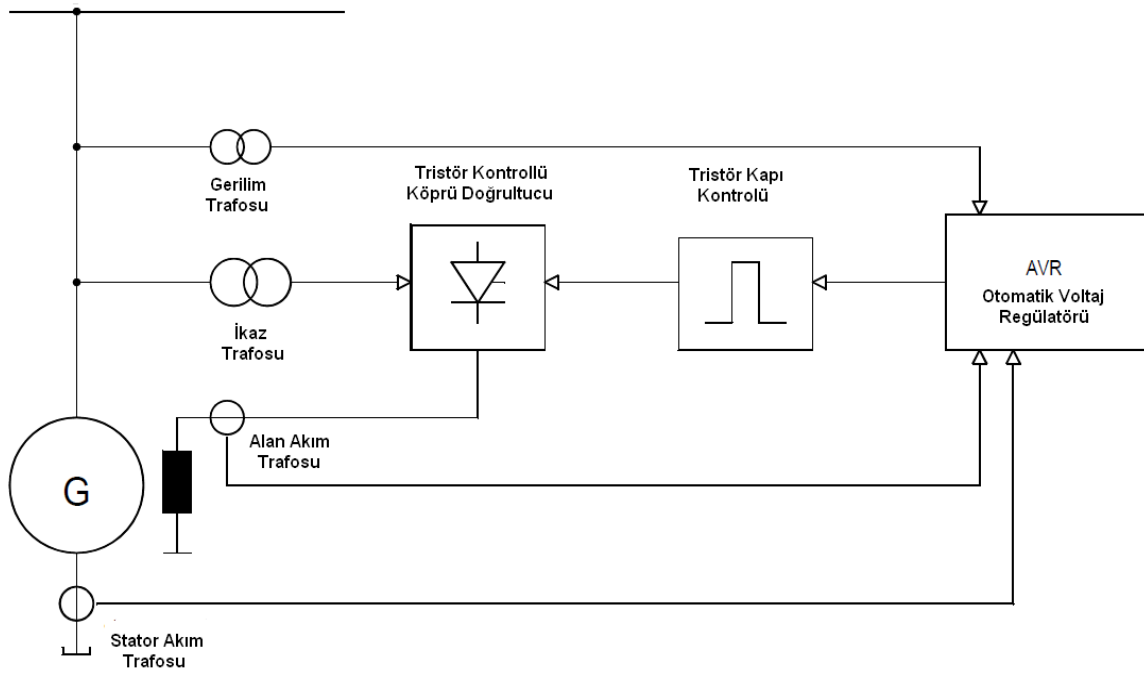


Şekil 4.31 IEEE'nin PSS2B güç sistem kararlılaştırıcı modeli (Power Engineering Society, 2005).

## 5. GELİŞMİŞ BİR İKAZ SİSTEMİ MODELİNİN GENEL YAPISI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

### 5.1. İkaz Sisteminin Genel Yapısı ve Teknik Özellikleri

İncelenen ikaz sistemi, Avusturya Andritz (ELIN) firması tarafından üretilmiş, Siirt ilinde Botan çayı üzerine kurulmuş olan Alkumru Barajı ve Hidroelektrik Santralinde bulunan 97 MVA gücündeki bir Senkron Generatöre uygun tasarlanmış bir statik ikaz sistem modelidir. İkaz sistemi, yine aynı firmanın üretimi olan GMR3 isiminde bir regülatör ile kontrol edilmektedir. Regülatör, kontrol sistemi bünyesinde yapılandırılmış ST4B lojik mantığı ile regülasyon yapmaktadır.



Şekil 5.1 Generatöre şöntlenmiş statik ikaz sisteminin blok diyagramı

Şekil 5.2’de verilmiş blok diyagram, senkron generatöre şöntlenmiş ikaz sisteminin temel yapısını göstermektedir. İkaz sisteminin besleme gücü, generatör çıkış barasına bağlı üç fazlı İkaz trafosundan sağlanmaktadır. İkaz trafosunun sekonder sargısından ikaz kontrol panolarına iletilen AC güç, ikaz sistemindeki tam dalga tristör köprü doğrultucu sayesinde doğrultularak rotor sargılarına aktarılmaktadır. Söz konusu ikaz sistemi, tüm teçhizatları ile yedekli olarak tasarlanmış olup, bu sayede sistemin daha uzun ömürlü

olması ve herhangi bir arıza durumunda durmayı gerektirmeyecek bir çalışma sürekliliğine sahip olması sağlanmıştır.

Alkumru Hidroelektrik Santralinde bulunan senkron generatör ve ikaz sisteminin bazı teknik bilgileri aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

**Tablo 5.1** Generatörün nominal değerleri (Andritz Hydro, 2010).

No	Generatör Büyüklükleri	Birim	Değer
1	Nominal güç kapasitesi	MVA	97
2	Güç faktörü (Cos $\phi$ )		0,9
3	Nominal çıkış geilimi	kV	13,8
4	Nominal frekansı	Hz	50
5	Hızı	rpm	250
6	Yüksüz durumda alan akım değeri	A	584,9
7	Yüksüz durumda alan gerilim değeri	V	109
8	Nominal yüklü durumda alan akım değeri	A	1015,5
9	Nominal yüklü durumda alan gerilim değeri	V	189,5

**Tablo 5.2** İkaz sistemi ve AVR'nin teknik özellikleri (Andritz Hydro, 2010).

İkaz Sistemi Standartları			EN 50178
			IEC 6014
			IEC 60726
			IEEE 421
			IEC 61000-4
No	İkaz Sistemi ve AVR Büyüklükleri	Birim	Değer
1.	Maksimum ikaz gerilimi	V	$\approx$ 400
2.	Maksimum ikaz akımı	A	$\approx$ 1250 (cont.)
3.	<b>Nominal İkaz Gerilimi :</b>		
3.a	Cos $\phi$ = 0,9 endüktifse	V	$\approx$ 189,5

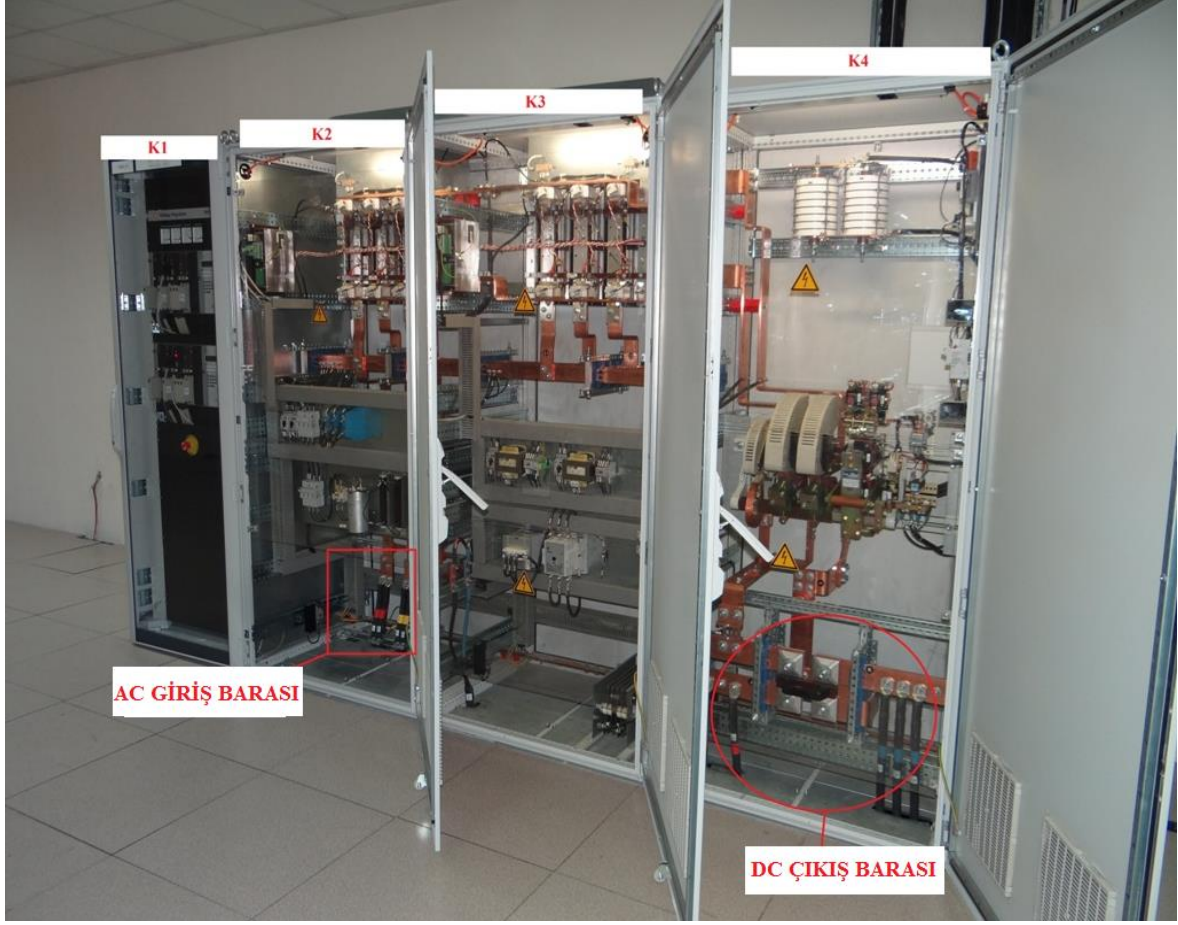
<b>3.b</b>	Cos $\varphi = 1$ ise	V	$\approx 153$
<b>4</b>	<b>Nominal İkaz Akımı :</b>		
<b>4.a</b>	Cos $\varphi = 0,9$ endüktifse	A	$\approx 1015,5$
<b>4.b</b>	Cos $\varphi = 1$	A	$\approx 820,6$
<b>5</b>	Generatör geriliminin manuel kullanımdaki regülasyon aralığı	%	25 – 110
<b>6</b>	<b>İkaz Geriliminin Otomatik Kullanımdaki Regülasyon Aralığı :</b>		
<b>6.a</b>	Maksimum ikaz gerilimi	V	$\approx 400$
<b>6.b</b>	Minimum ikaz gerilimi	V	$\approx -346$
<b>7</b>	Gerilim düşümü kompanzasyonu için regülasyon aralığı	%	$\pm 20$
<b>8</b>	Statik şart için regülasyon aralığı	%	$\pm 20$
<b>9</b>	İkaz kontrol sisteminin doğruluk yüzdesi	%	$\pm 0.5'$ den daha iyi.
<b>10</b>	İkaz sisteminin cevap süresi	ms	$< 20$
<b>11</b>	İkaz geriliminin yükseklik sınırı	V u.r.	$\approx 400$ 2
<b>12</b>	İkaz geriliminin yanıt hızı	V/ms	$\approx 4$
<b>13</b>	Hızlı ikaz deşarjı için maksimum süre ( $I_{fn}$ :Nominal alan akımı)	s	2.0, 100% $I_{fn}$ den 5% $I_{fn}$ kadar.
<b>14</b>	<b>Tristörlü Köprü Doğrultucuların Referans Verileri :</b>		
<b>14.a</b>	Tristör bağlantı standardı		B6
<b>14.b</b>	Ters tepe gerilimi	V	1600
<b>14.c</b>	Blokaaj gerilimi	V	1600
<b>14.d</b>	20 Saniyede oluşan maksimum akım	A	$\approx 2500$
<b>14.e</b>	Radyatör yüzeyindeki bir termometre ile ölçülen, 40° hava soğutulmasında ölçülen maksimum tristör sıcaklığı	°C	85
<b>15</b>	<b>Tristör Köprüsü :</b>		
<b>15.a</b>	Toplam tristör sayısı	Adet	6
<b>15.b</b>	Paralel köprü sayısı	Adet	2
<b>15.c</b>	Her köprünün paralel ayaklarının sayısı	Adet	1

<b>15.d</b>	Soğutma sistemi		Basınçlı Hava
<b>15.e</b>	Tristör $U_{dm}$ 'sinin tepe blokaj sistemi	V	1600
<b>15.f</b>	Her işletimde tristör köprülerinin bir önceki işletimde devrede iken bir sonrakinde beklemede kalarak yedekli ve sıralı çalışması	%	100 (n+1 dizayn)
<b>16</b>	<b>Nominal Güç Faktörü Aşırı Yüklemede İkaz Sisteminin Maksimum Aşırı Yüklenme Süresi (Nominal İkaz Akımına Bağlı Olarak) :</b>		
<b>16.a</b>	10%	dk.	Long-term
<b>16.b</b>	25%	dk.	60

İkaz sistemindeki ekipmanlar, analizlerin daha kolay olması açısından çeşitli kodlamalar yapılarak incelenmiştir. Yapılan kodlamalar ekipmanları gösteren resimlerde belirtilmiştir.

Şekil 5.2'de verilmiş olan ikaz sisteminin kontrol panoları dört kabinden oluşmaktadır. Tüm kontrol ekipmanları bu kabinlerde (K1, K2, K3, K4) birleştirilmiştir. İlk kabin (K1), regülatör yazılımını, donanımını, lojik kontrolü ve yardımcı kontrol elemanlarını içermektedir. İkinci kabin (K2), tam dalga doğrultucu tristör köprüsü ve yardımcı elemanları içerir. Üçüncü kabin (K3), tam dalga doğrultucu tristör köprüsü, yardımcı elemanları ve alan ilk ikaz ekipmanlarını içerir. Dördüncü kabin (K4), alan ikaz devre kesicisi ve alan deşarj devresiyle birlikte rotor yüksek voltaj korumasını içerir.

İkaz trafosunun sekonder sargı uçlarından çıkan kablolar, şekil 5.2'de görüldüğü gibi AC giriş barası olarak nitelendirilmiş ve ikaz sistemine K2 kabininden giriş yapmıştır. Generatör rotor kutup sargılarına giden kablolar ise DC veya rotor kutup çıkış barası olarak nitelendirilmiş ve alan sargılarına K4 kabininden çıkış yapılarak bağlanmıştır.

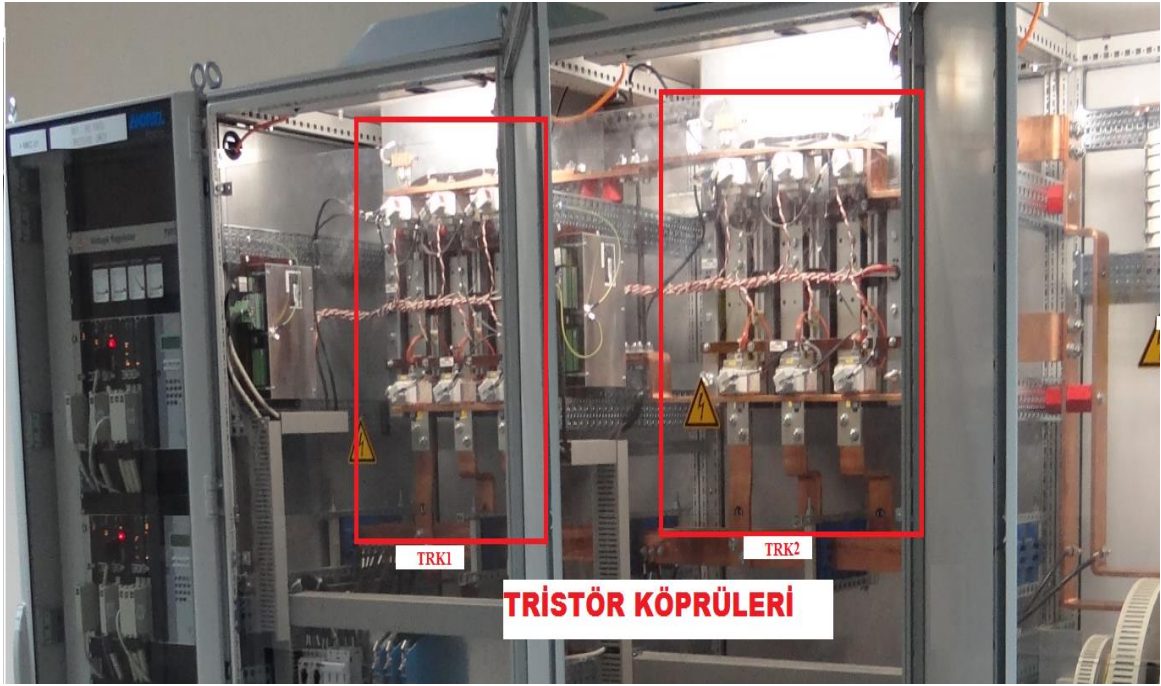


Şekil 5.2 İkaz sisteminin kontrol panoları

### 5.1.1. Tristör Köprü Doğrultucuları

Tablo 5.3 Tristör köprü doğrultucuların teknik özellikleri (Andritz Hydro, 2010)

Doğrultucu tipi	Tam kontrollü tam dalga köprüdoğrultucu
Paralel köprülerin sayısı	2 Adet
Dizayn	(n+1)
URM tristörlerinin ters tepe gerilimi	160 V
40°C ortamda güvenli sürekli akım	1250 A her köprü için
40°C ortamda 20 saniyede güvenli tavan akımı	2500 A her köprüde
Soğutma Sistemi	2 Adet fan, 1 tanesi yedek



Şekil 5.3 İkaz sisteminin paralel tristör köprüleri

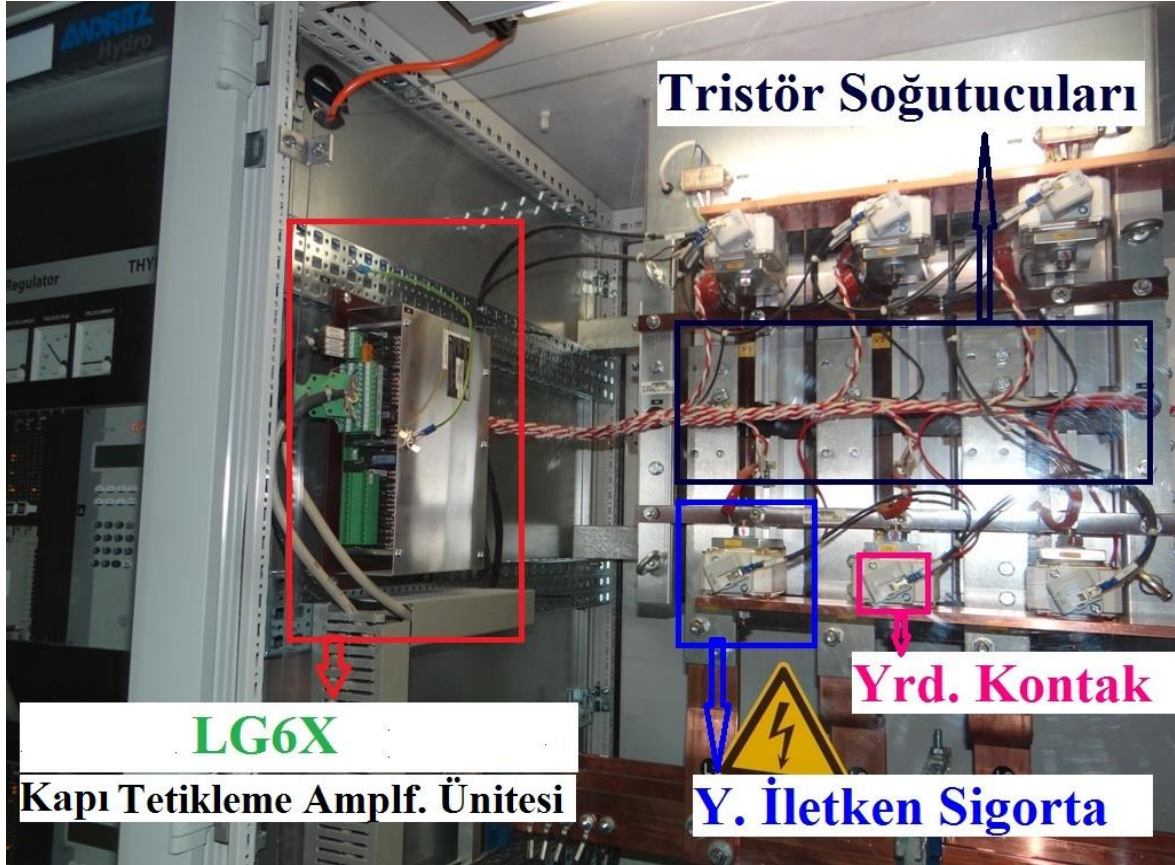
Şekil 5.3'te görüldüğü gibi sistemde birbirine paralel iki adet tristör köprüsü mevcuttur. Her tristör köprüsü üç fazlıdır. Tristör köprüleri, tam kontrollü 6 darbe ateşlemeli tam dalga doğrultucu özelliğine sahip birer SCR (silicon controlled rectifier) köprüsüdür. Burada kullanılan tristörler, çok hızlı cevap verme özelliği olan, 55°C ila 60 °C arası sıcaklıklarda 20 saniye boyunca 2500 A'e kadar kapasiteye sahip yarı iletkenlerdir.

İkaz trafosundan gelen üç fazlı bara her iki tristör köprüsüne de paralel bağlanmıştır. Sistem çalıştığı zaman tristörler ikişer gruplar halinde devreye girerek çıkışta düzgün bir DC gerilim elde edilir. Her üç fazda da oluşan pozitif ve negatif alternansların tamamı tristör köprüleri sayesinde doğrultulmaktadır. Kapı gerilimi ile tristörün (0-180°) arasında istenilen gecikme açısı ile tetiklenmesi sağlanarak, kontrollü tam dalga doğru akım elde edilmektedir.

Tristörlü köprü doğrultucu, nominal çalışma koşulları altında senkron makinanın ikaz akımının en az %110'u kapasitesinde seçilmektedir. Maksimum ikaz gerilimi, nominal değer 1,6 katı, maksimum ikaz akımı ise 10 saniye süre ile nominal ikaz akımının 1,6 katı akım taşıyabilecek kapasitede olması gerekir. Kullanılan tristörlerin AC gerilim koruma faktörü ikaz trafosu sekonder geriliminin 2,7 katından az olmamalıdır (ABB Switzerland Ltd, 2005; Arda, 2006; Andritz Hydro, 2010).



Sistemde, şekil 5.3’de verildiği gibi (TRK1, TRK2) olarak adlandırılmış iki adet tristör köprüsü mevcuttur. Tristör köprüleri tüm ekipmanları ile yedekli olarak dizayn edilmiştir. Her tristör köprüsü altı adet disk tipi tristör içerir ve bu tristörler soğutucuları ile birbirine bağlı bir küme halinde şekil 5.4’de verildiği gibi monte edilmiştir. Tristörler yarı iletken sigortalar ile korunmaktadır (Andritz Hydro, 2010).



Şekil 5.4 Tristör köprülerinin koruma ve kontrol üniteleri

Her tristör, bir snubber (söndürücü) filtre devresine paraleldir. Tristörlerin tetikleme kontrolü, şekil 5.4’de verilen darbe kontrol birimindeki kapı (gate) tetikleme amplifikatörü (LG6X) aracılığıyla sağlanır. Sistem devrede veya beklemede iken, birincil (master) konumdaki tristör köprüsünde bir arıza meydana gelirse otomatik bir anahtarlama elemanı sayesinde bekleme (standby) konumdaki tristör köprüsü devreye girerek sistemin çalışma sürekliliğini sağlamaktadır. Şayet her iki tristör köprüsünde de arıza oluşursa, tristör kapı tetikleme amplifikatör ünitesi, yazılım tarafından devredışı olup tristörlerin yalıtıma geçmesi sağlanır böylece sistemde hata işareti meydana gelerek sistem bloke olur (Andritz Hydro, 2010).

Her tristör köprüsünde soğutucu amaçlı iki adet fan vardır. Bunlar tristör köprüsünün tepesine yerleştirilmiştir. Fanların tasarımı yedeklidir. Eğer fanlardan biri arızalanırsa devrede kalan fan, tristör köprüsünün tam yükte çalışmasında yeterli soğutmaya sağlayacak kapasitededir. Normalde iki fan paralel olarak çalışır. Ancak iki fan da bozulursa, yazılım sisteme hata işareti oluşturur.

Sistem devredeyken, aktif tristör köprüsündeki tristörlerde akım kayıpları ve kapı tetiklemelerinin denetimleri yapılır. Bu denetleme ile bir tristörden akım akıp akmadığı denetlenir. Tristör köprülerinde, sigorta hatası, fan hatası, soğutucu sıcaklık hatası vb. denetlenmeler ikaz sisteminin kontrol ekipmanları tarafından yapılır. Hatalar ELTERM kontrol cihazlarının LCD (liquid crystal display) ekranlarında gösterilir (Andritz Hydro, 2010).

### 5.1.2. Alan Devre Kesicisi

**Tablo 5.4** Alan devre kesicisinin teknik özellikleri (Andritz Hydro, 2010).

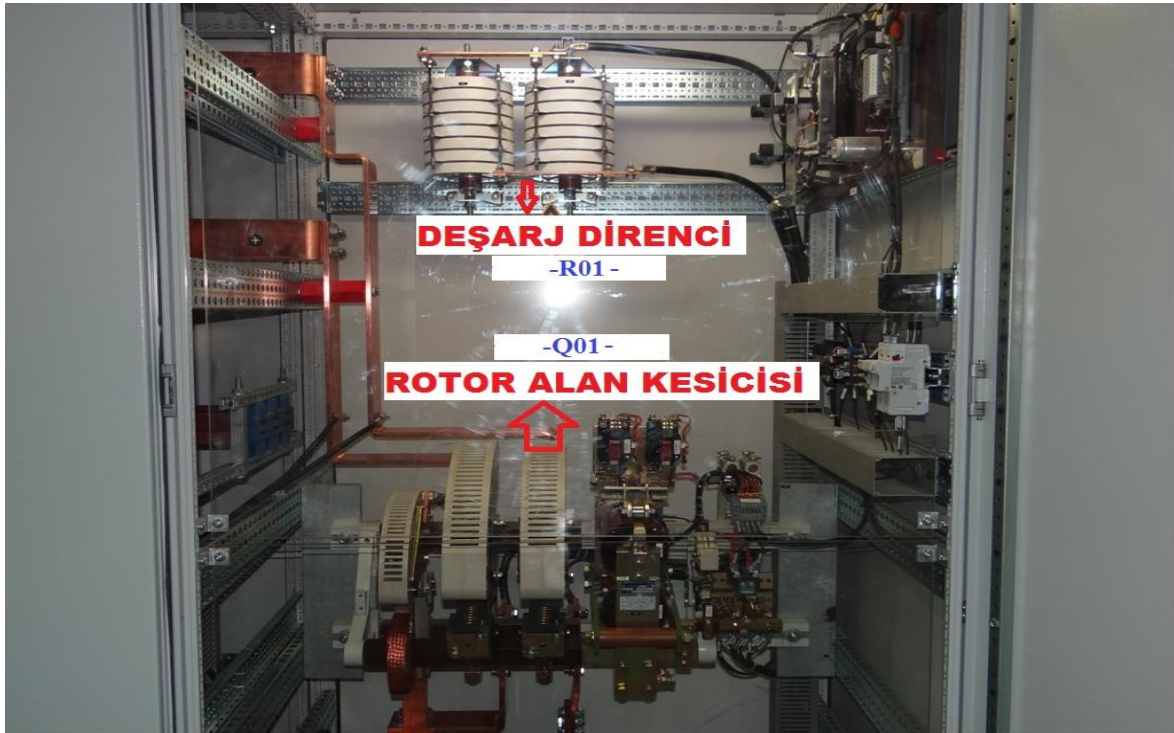
Gerilim kesintisi esnasında açma yapılabilecek maksimum akım kapasitesi	1000V'ta 23000 A
Nominal akım	1250 A
Nominal gerilim	600 V
Kapama bobini	110 VDC
Açma(Kilit çözme,serbest bıraktırma) bobini	2 Bobin, her biri 110 VDC

Generatör alan kesicisi şekil 5.5'de verildiği gibi Q01olarak isimlendirilmiştir. Q01'de iki ana kontak ve bir deşarj kontağı mevcuttur. Ana kontaklar tristör köprü doğrultucuların DC çıkış barasını generatör rotoruna bağlar/bağlantısını keser. Deşarj kontağı ise generatör alanının (+) ve (-) kutuplarını deşarj direnci (R01) üzerinden bağlar/bağlantısını keser. Deşarj kontağı, ana kontaklar açtığı anda kapanır ve deşarj direncinin alan devresine kesintisiz olarak bağlanması sağlanır. Bu şekilde alan sargılarında depolanmış enerji, deşarj direnci üzerinden sıfırlanır.

Kesicinin kapanması esnasında kapama bobini enerjilenir. Bu bobinin enerjilenmesi ile oluşan mıknatıslanma sayesinde kontakların hareketini sağlayan mekanizmanın kolunu

kendine doğru çekerek ana kontakların yüzeyinin bara ile temas etmesi deşarj direncine ait kontağın ise bara ile irtibatının kesilmesi sağlanmış olur.

Kesicinin açması esnasında kapama bobininin (on coil) enerjisi kesilerek açma bobininin (off coil) yani kilit çözme bobininin enerjilenmesi sağlanır. Bu sayede kilitli mekanizma engelden kurtulup düşerek ana kontağın baradan kopması sağlanır. Bu olayın oluş zamanının tamamlanması ile mekaniksel olarak ters çalışan deşarj kontağının baraya binmesi sağlanmış olur (Andritz Hydro, 2010).



Şekil 5.5 İkaz sisteminin alan devre kesicisi ve deşarj direnci

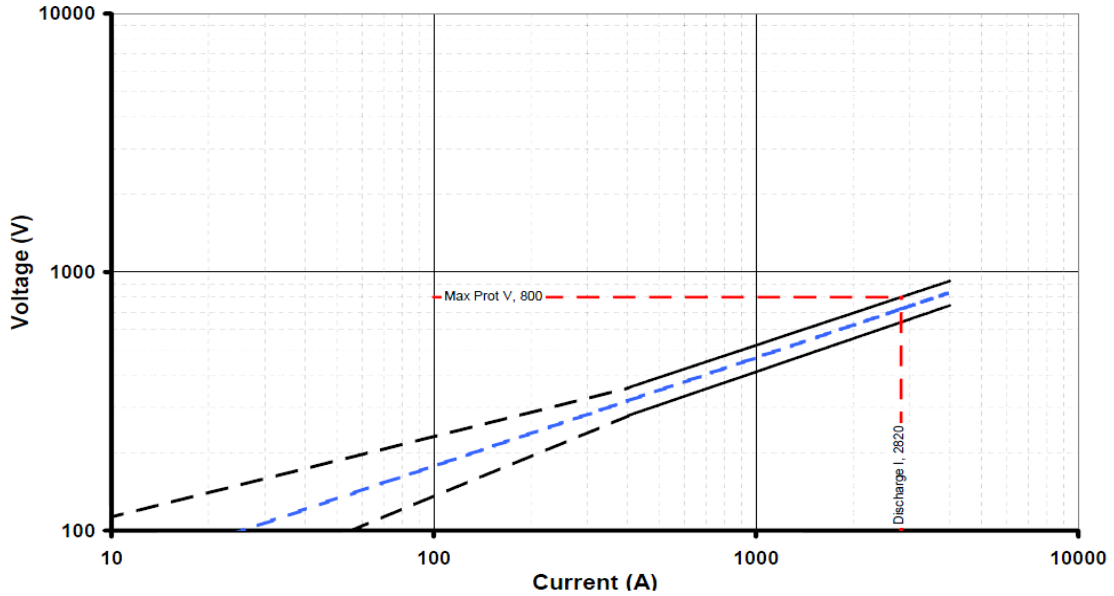
### 5.1.3. Alan Deşarj Direnci

Alan deşarj aygıtı K4 kabinine şekil 5.5’de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Bu aygıt, alan devre kesicisi (Q01) üzerindeki deşarj kontağı ve alan deşarj direnci (R01)’den oluşmaktadır. Rotor deşarj direnci doğrusal olmayan (non linear) bir karektere sahip olup, pek çok diskin birleştirilmesi ile yapılmıştır. Tablo 5.5’de R01’e ait teknik özellikler verilmiştir.

Tablo 5.5 Alan deşarj direncinin teknik özellikleri (Andritz Hydro, 2010).

Karakteristiği	nonlinear (doğrusal olmayan)
Kapasite	1130 kJ
Maksimum kısa devre akımı	2820 A
Maksimum akımda gerilim dűşümü	800 V

Sistem durduğunda, alanda birikmiş enerjiyi deşarj etme esnasında, rotor bobininde oluşacak zıt EMK ile gerilimin nominal gerilimin çok daha üzerinde bir gerilim darbesi oluşturmasını önlemek amacıyla liner olmayan özellikte bir direnç modeli (metrosil varistör) kullanılmıştır. şekil 5.6'da Andritz firmasının 2009 yılında metrosil varistör üzerinde yaptığı test sonucunda elde edilen direnç karakteristiği verilmiştir.



şekil 5.6 MetroSil nonlinear deşarj direncinin karakteristiği

Alan deşarjı ile ilgili iki yöntem uygulanmaktadır. Birinci yöntem, üniteye operator tarafından verilen normal durdurma komutuyla sistem generatör gücü tristörlerin akım dűřürme işlemi ile dűřürölür. Bir süre sonra generatör gücü sıfır mertebelerine indiğinde kesici yüksüz olarak açılır. Bu şekilde yapılan uygulama ile kontakların yaşam süresi uzatılır ve panoda kontakların yüklü durumda açması ile oluşabilecek arkların zarar olasılıklarını minimum seviyeye indirilmiş olur. İkinci yöntem ünitenin acil durdurma ile veya korumadan hata işaretinin gelmesi durumunda kesici ani açma yapar. Buna müteakip alan sargılarında biriken enerji deşarj direnci üzerine çabucak boşaltılır. Sistem bu durumlara dayanmaya elverişlidir ama bu tür durumlar hem kontak vb. ekipmanların ömrünü azaltır hemde risk olasılığı taşır (Andritz Hydro, 2010).

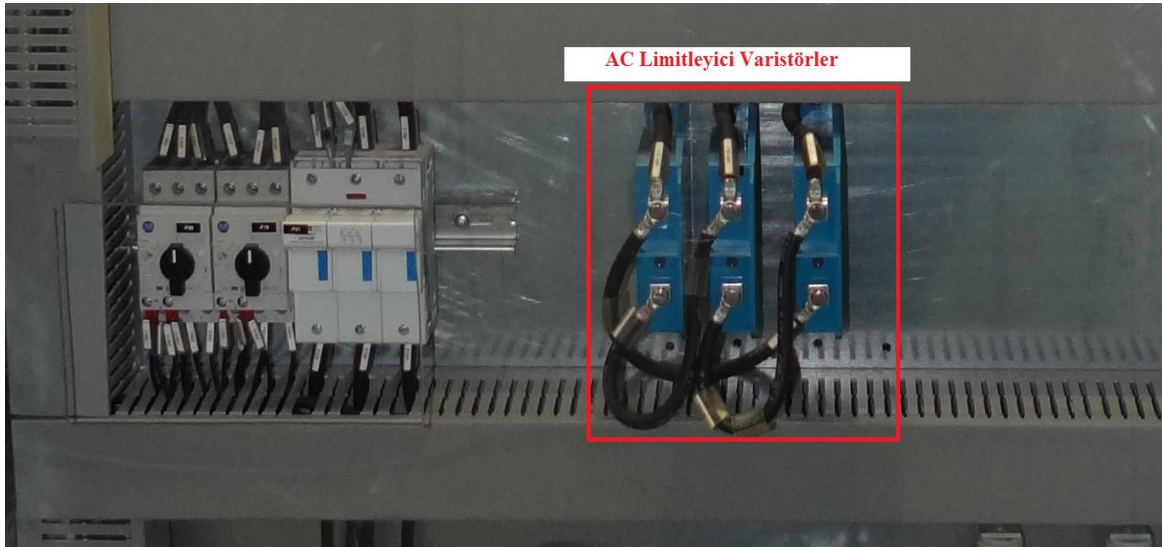
#### 5.1.4. Alternatif Akım Elektrik Dağıtım Hattı Aşırı Gerilim Koruma Birimi

İkaz sistemi AC (alternatif akım) barasında sık sık gerilim yükselmeleri meydana gelmektedir. Bu durumun önüne geçebilmek için, K2 panosuna yerleştirilmiş ve baraya paralel bağlanmış bir sınırlandırma varistörü (V01) kullanılarak sistemin zarar görmesi engellenir.

**Tablo 5.6** AC dağıtım hattı aşırı gerilim koruma sisteminin özellikleri (Andritz Hydro, 2010).

Aşırı gerilim absorbe edici Varistör	MOV Tipi
Nominal gerilim	430 VAC
Aşamalı gerilim	1200 V
Dalgalı akım	2820 A

Şekil 5.7’de gösterilmiş olan bu aşırı gerilim sınırlandırma diskleri AC barasına yardımcı kontaklı bir koruma sigortası üzerinden bağlanmıştır. Sigortada meydana gelecek riskli bir aşırı gerilim etkisi ile sigorta iletimi kesilir, sigortadaki mikro anahtarın pozisyonu değişir ve kontrol sistemine hata bilgisi verir.

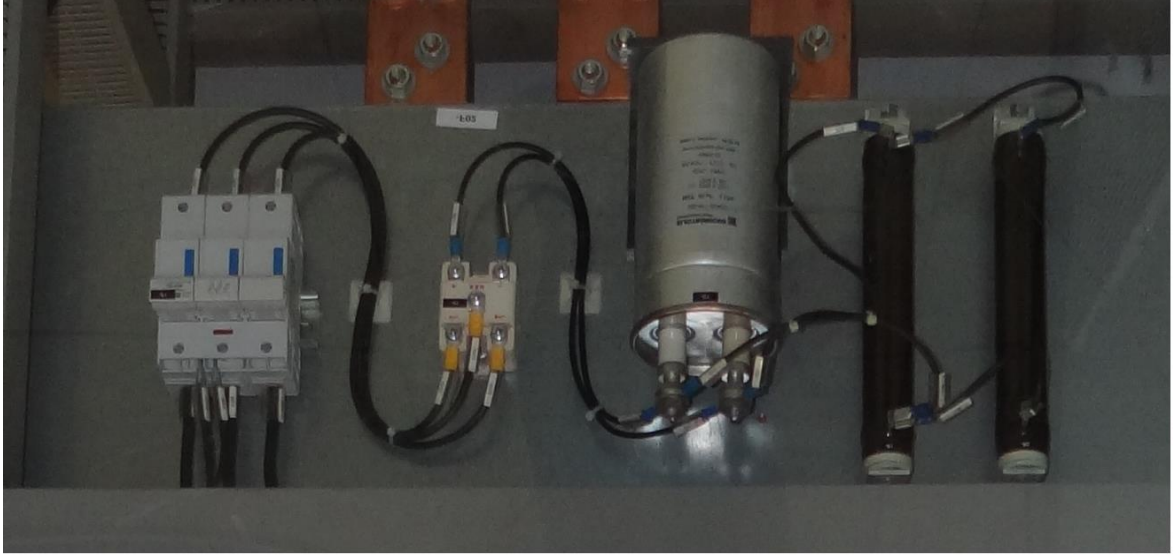


**Şekil 5.7** AC aşırı gerilim koruması

Ani gerilim dalgalanmalarının azaltılması için AC ana hattına paralel, diyot doğrultuculu bir AC-RC devresi bağlanmıştır . Şekil 5.8’de verilmiş olan bu devrede bulunan koruma



elemanları sayesinde, arıza durumunda kontrol sistemine hata işareti gitmektedir (Andritz Hydro, 2010).



Şekil 5.8 AC gerilim dalgalanmasını önleme devresi

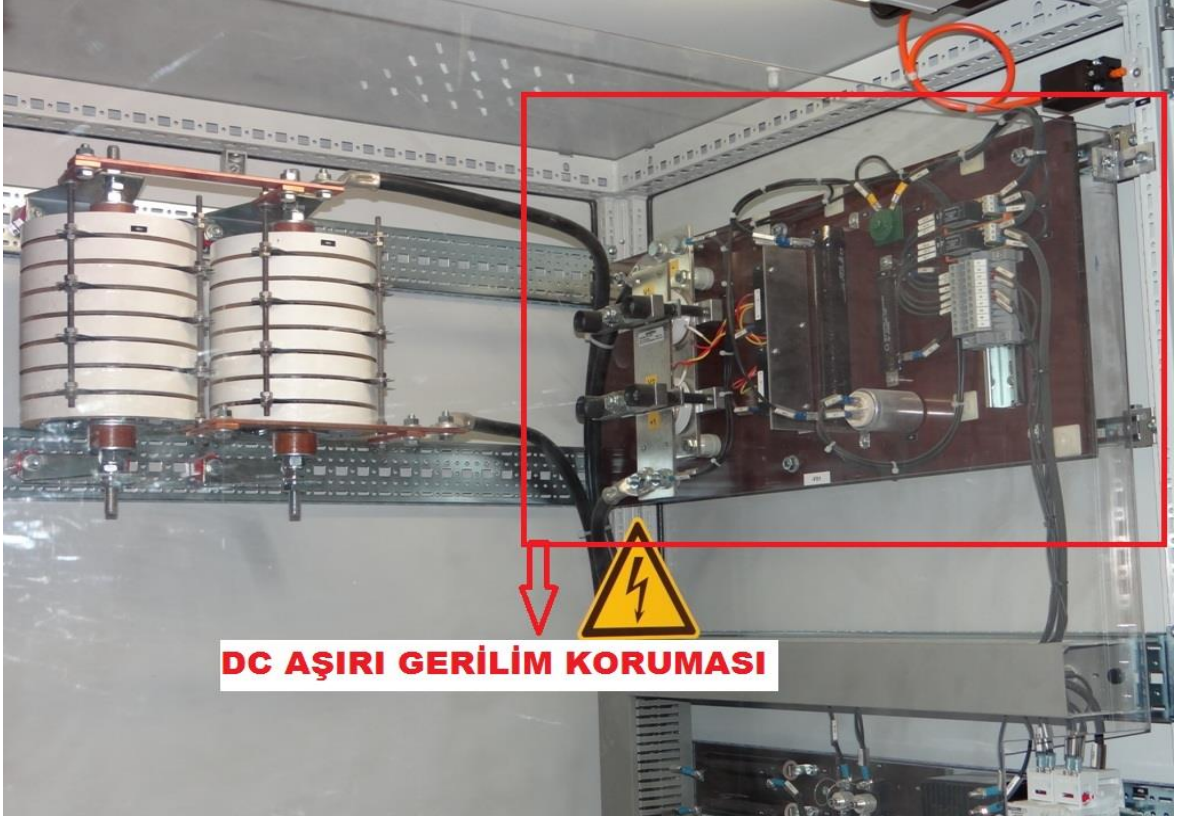
### 5.1.5. Doğru Akım Elektrik Dağıtım Hattı Aşırı Gerilim Koruma Birimi

Rotor aşırı gerilim koruma devresi, K4 panosunda F01 olarak adlandırılmıştır. F01, şekil 5.9'da verilmiş olan ve kırmızı kareye alınmış bölümün tamamından oluşmaktadır. F01'de birbirine zıt yönlü paralel iki tristörden, bu tristörlerin tetikleme modüllerinden, tetikleme anahtarlama elemanlarından ve aşırı gerilim dedektör röle devrelerinin birleştirilmesinden oluşturulmuş bir birimdir. Tablo 5.7'de F01 koruma birimi ile ilgili bazı teknik bilgiler verilmiştir.

Tablo 5.7 DC dağıtım hattı aşırı gerilim koruma sisteminin özellikleri (Andritz Hydro, 2010).

Aşırı gerilim tetikleme modülü	UST, 2 Adet
Tetikleme gerilimi	1000 V
Sürekli tristör kapasitesi	1200 A
Akım sınırlama direnci	deşarj direnci ile aynı özellikte ama doğrusal

F01 koruma birimi, aşırı gerilimlere karşı tristör doğrultucuların ve generatör alan sargısının koruma sistemi olarak görev yapmaktadır (örneğin güç sistemlerinden kaynaklı meydana gelebilen negatif yönlü alan akımları hatalarında olduğu gibi). UST3 modüllerinin tetikleme seviyeleri, bu ikaz sisteminde generatörden alınacak gerilim bilgisine göre 1000 V mertebelerindedir.



Şekil 5.9 DC aşırı gerilim koruması (rotor aşırı gerilim koruması)

F01 biriminde bulunan tristörlerin tetikleme modülleri DC bara geriliminden referans almaktadır. Şayet DC barada aşırı gerilim oluşursa, tristör tetikleme modüllerden birinin sınır seviyesi aşıldığı anda bağlantılı olduğu tristörü tetikleyerek iletme geçmesini sağlar. Bu durum hangi polaritede (+ veya -) aşırı gerilim mevcut ise o polariteye göre bağlanmış olan tristör için geçerlidir. İletime geçen tristör yoluyla DC dağıtım hattının eksi (-) ve artı (+) kutupları, deşarj direnci (R01) üzerinden birbirine bağlanmış olur. Bu direncin üzerine gerilim düşüncü F01 biriminde bulunan dedektör röle devresi sayesinde algılanarak gerilim ikaz kontrol ünitesine hata işareti gönderir. Sonuç olarak hata işaretinin kontrol ünitesine gitmesi ile sistem devredışı olarak korunmuş olur (Andritz Hydro, 2010).

### 5.1.6 İkaz Trafosu

Tablo 5.8’de de verildiği gibi 600 kVA gücünde üç fazlı kuru tip transformatör kullanılmıştır. İkaz trafosu, doğal soğutmalı tasarlanmıştır. İkaz kontrol panolarına yakın mesafede monte edilmiştir. Trafo etrafı, şekil 5.10’da görüldüğü gibi sac muhafaza ile çevrilmiştir. Generatörlerin stator sargı uç terminalleri ve ana transformatörler arasındaki 13,8 kV’luk bara bağlantısı için, izole edilmiş faz dağıtım baraları (IPB) kullanılmıştır. Bu nedenle, trafonun yüksek gerilim bölümü olan primer kısmı bu baraya yine IPB şeklinde paralel olarak bağlanmıştır. Trafonun alçak gerilim bölümü olan sekonder kısmı ise ikaz sistemine kablolar ile bağlanmıştır.

**Tablo 5.8** İkaz trafosunun teknik özellikleri (Andritz Hydro, 2010).

Tip	Kuru tip trafo
Nominal güç değeri	600 kVA
Gerilim dönüşümü	13,8 / 0,33 kV, 50 Hz
Vektör grubu	Yd5
Empedans voltajı	6 %
Soğutma	AN (doğal soğuma)
Sıcaklık denetleme	3 PTC alarm sensörü (Her sekonder sargıda)
	3 PTC kit sensörü (Her sekonder sargıda)
	1 PTC hata işareti sensörü (çekirdek)

Trafonun ısı denetimi yapmak için toplamda 7 adet termistör kullanılmıştır. İkaz sistemine, bu termistörlere bağlı bir alarm işaret rölesi ve sistemi devre dışı bırakacak hata işaret rölesi yerleştirilmiştir. Sekonderdeki ısı denetiminin alarm işareti ve sistemi devreden çıkaracak hata işareti vermesi için, her faz sargısında sıcaklıkla direnci artan PTC (Positive Temperature Coefficient) termistörleri kullanılmıştır. Bununla beraber nüvede de bir adet PTC kullanılarak sistemi devreden çıkaracak hata işareti verebilmesi sağlanmıştır. Böylece sistemi ikaz trafo sıcaklığı nedeni ile devreden çıkaracak dört adet hata işareti sensörü bulunmaktadır.





Şekil 5.10 İkaz trafosu

Bu trafo için kullanılan termistörlerin alarm ve hata sinyal değerleri H izolasyon sınıfına göre seçilmiş olup aşağıdaki değerlere göre ayarlanmıştır.

Sargı Sıcaklığı Alarm:170°C,

Sargı Sıcaklığı hata sinyali:180°C,

Çekirdek ısısı hata sinyali:170°C dir (Andritz Hydro, 2010).

#### 5.1.6.1. İkaz Trafosu İçin Gerekli Parametrelerin Hesaplanması

Nominal rotor gerilimi ve nominal rotor akımının esas değerleri generatör dizaynının parçasıdır ve generatöre göre hesaplanır (Andritz Hydro, 2010).

- **Trafonun sekonder gerilimi en az şöyle olmalıdır:**

Nominal rotor gerilimi tavan faktörü ile (2) çarpılır ve doğrultma faktörüne (1,35) bölünür.

$$\frac{189,5V \times 2,0}{1,35} = 281V \quad (5.1)$$

Dizayn: 330 V (Toleranslı olarak dizayn edilmiş)

- **Trafonun sekonder akımı en az şöyle olmalıdır:**

Nominal rotor akımı (güç faktörü 0,9 ve indüktif ise) doğrultma faktörü (0,82) ile çarpılır.

$$1015,4A \times 0,82 = 833A \quad (5.2)$$

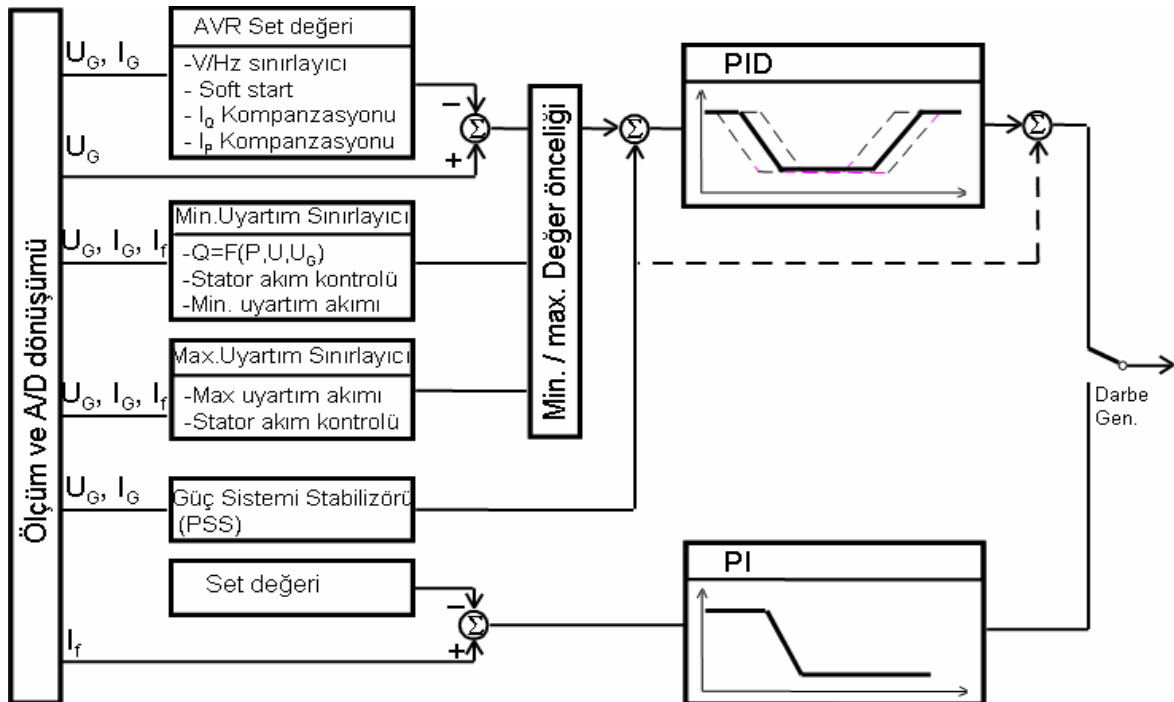
Dizayn: 1050A (Toleranslı olarak dizayn edilmiş)

- **Trafonun nominal gücü:**

$$3 \times 330V \times \frac{1050A}{\sqrt{3}} = 600kVA \quad (5.3)$$

### 5.1.7. Regülatör ve Dijital İşlem Sıralayıcı

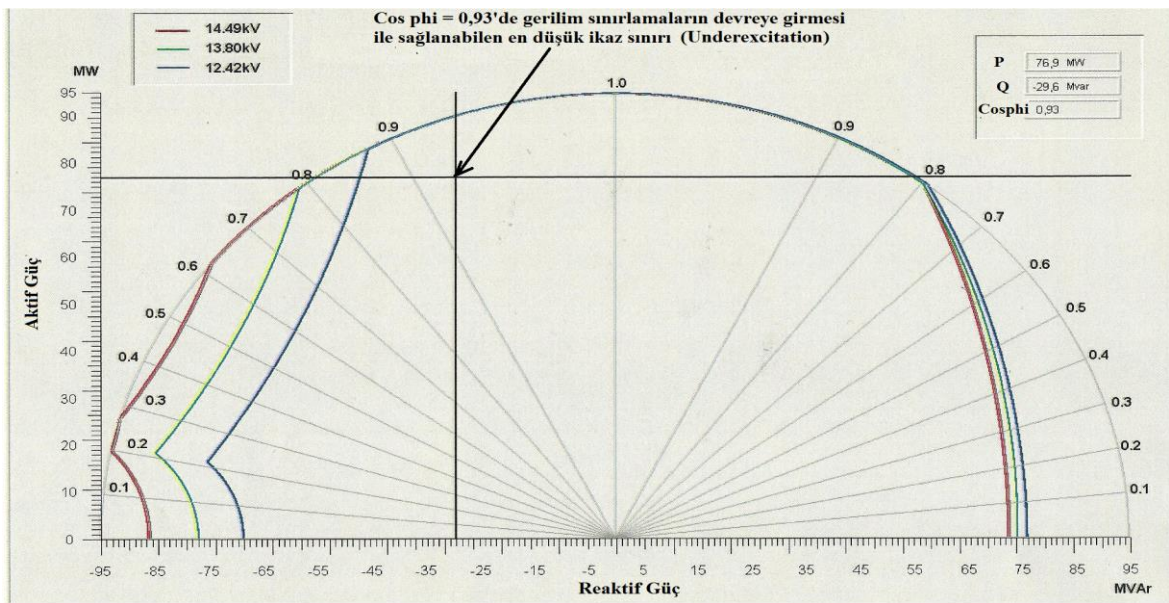
Otomatik Gerilim Regülatörünün (AVR) temel fonksiyonu, senkron makinanın uç geriliminin ve reaktif güç veya güç faktörünün sağlıklı bir şekilde kontrol edilmesidir. Şekil 3.11’de AVR’nin blok şeması verilmiştir. AVR’ye bir gerilim ayar (set) değerinin girilmesi ile AVR’nin dijital kontrol birimi sürekli olarak generatör çıkış terminalinden aldığı gerilim değerini set değer bilgisi sayesinde karşılaştırma işlemi yaparak tristörlü tam dalga doğrultucu ünitesini bu sonuca göre kontrol etmektedir. Bunun neticesi olarak generatör terminal geriliminin sınırlamalar dahilinde set değerinde kalması sağlanır.



Şekil 5.11 Otomatik gerilim regülatörünün blok şeması

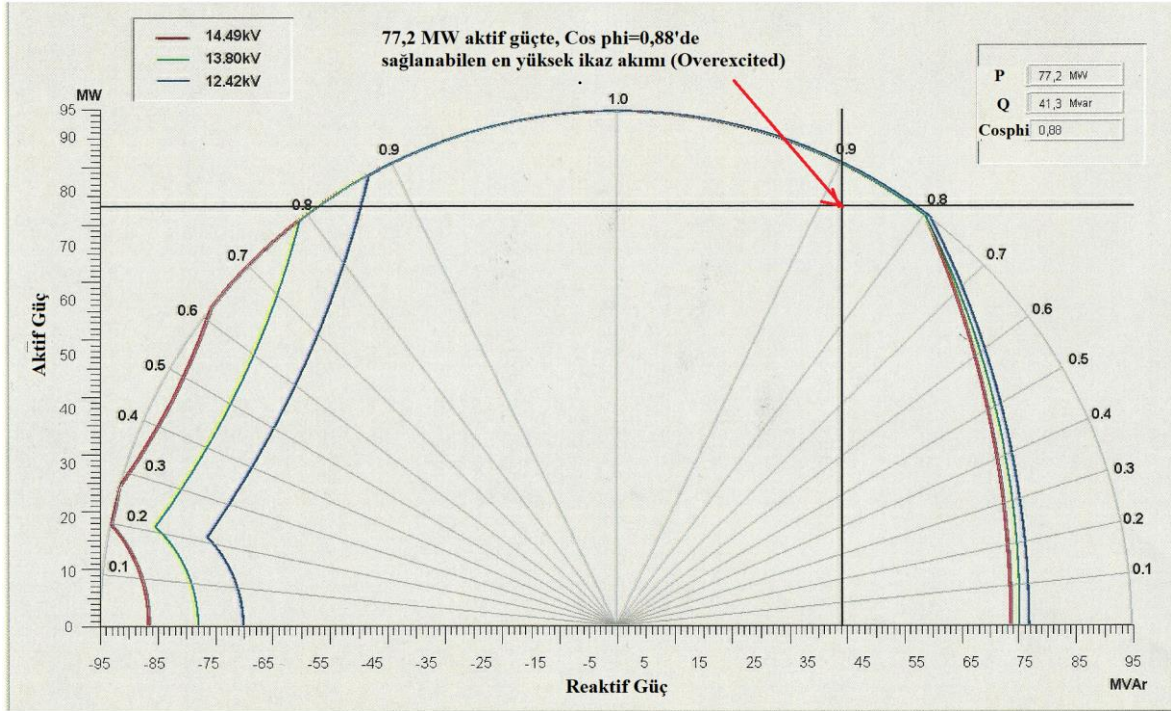
AVR kontrol biriminde, generatör çıkış gerilimi ve çıkış akımı gibi analog değerlerin değerlendirilebilmesi için analog sinyali dijital sinyale dönüştüren konvertörler kullanılmaktadır. Set değerleri, sınırlama değerleri ve bütün kontrol parametreleri dijital veri halinde kullanılmaktadır. AVR, set değeri ile aktif (P) veya Reaktif (Q) güç arasındaki orana göre ilave kontrol sinyalleri oluşturur. Bu sinyallere göre ünite trafosu veya nakil hattı üzerindeki gerilim düşümünü dengeler. AVR genelde yumuşak yolverici (soft start) fonksiyonuna da sahiptir. Değerlendirme süresi çok küçük olup yaklaşık 5 milisaniye civarındadır.

AVR'deki sınırlayıcı fonksiyonlar, ikaz sisteminin korunması amacıyla kullanılır. Düşük ikaz sınırlayıcısı, generatör çıkış terminalinin akım ve gerilim değerlerine göre ikaz akımını denetler. Generatör çıkışı için girilen ayar değeri ikaz akımının minimum set değerinin altında bir değer ise düşük ikaz sınırlayıcı devreye girerek ikaz akımının minimum set değerinde kalmasını sağlar. Bu şekilde sistem korunmuş olur. Şekil 5.12'de incelenen generatör örneğinin yüklenme eğrisi verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi aktif güç 77 MW'a ayarlanmış, reaktif güç -40 Mvar' ayarlanmış ama generatör en fazla -29,6 Mvar sağlayabilmektedir. Bunun nedeni, generatörün karakteristik özelliği de baz alınarak hesaplanan sınır değerlerinde generatör çıkış geriliminde sınır değerleri mevcuttur. Bu sınır değerlerde şebeke gerilimi ve ana güç trafosunun kademesi de önemlidir. Bu nedenle düşük ikaz sınırlama devreye girmeden minimum gerilim sınırlama devreye girerek gerilimin sabit kalması sağlanmıştır.



Şekil 5.12 Generatör düşük ikazlı yüklenme eğrisi

Aşırı ikaz sınırlayıcı fonksiyonunda da düşük ikaz sınırlayıcıda olduğu gibi ikaz akımı alabileceği maksimum değeri geçtiği zaman, maksimum değerde kalmasını sağlar. Şekil 5.13’de generatör aşırı ikazlı yüklenme eğrisi verilmiştir. Aktif güç set değeri 77,2 MW’a ayarlanmış, reaktif güç değeri de 50 Mvar’a ayarlanmıştır. Şekil 5.13’de görüldüğü gibi reaktif güç 41,3 Mvar’ı sağlayabilmiştir.



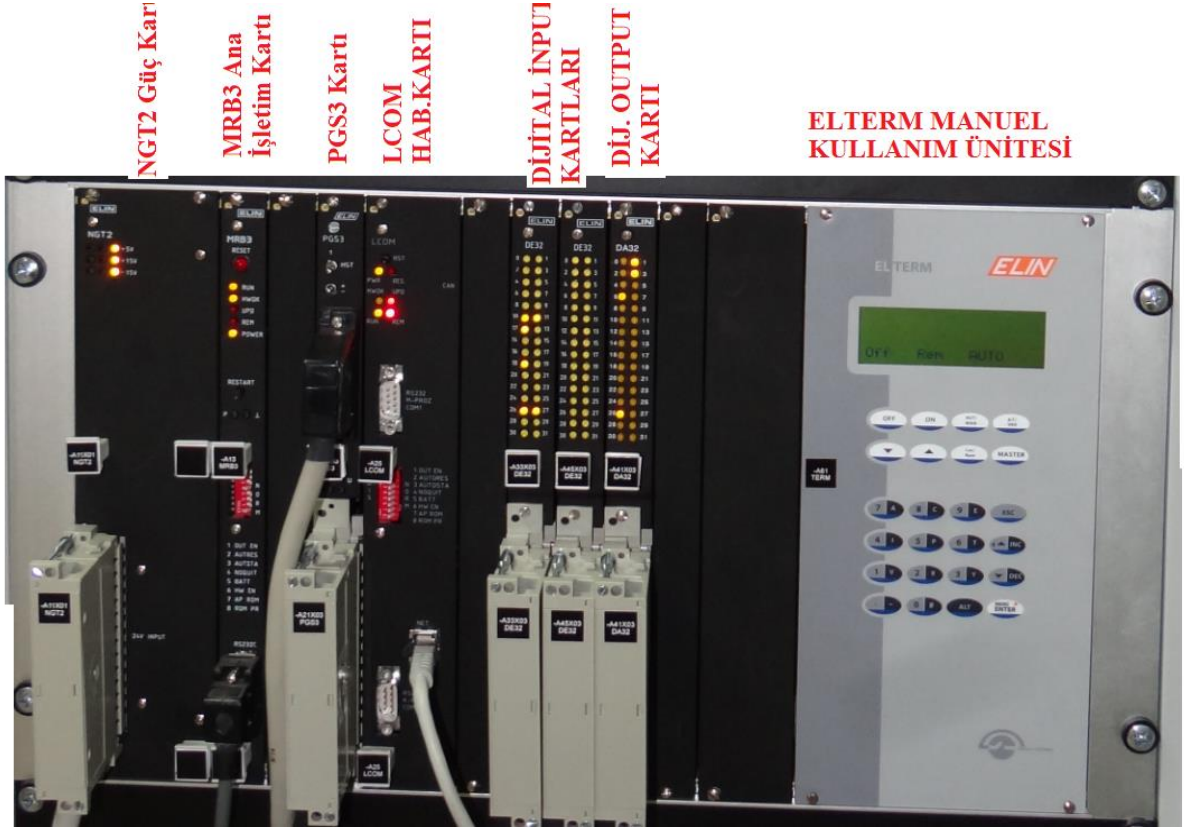
Şekil 5.13 Generatör aşırı ikazlı yüklenme eğrisi

### 5.1.7.1. Regülatörün Teknik Özellikleri

Regülasyon ve kontrol için şekil 5.14’de gösterilen, GMR3 tipi bir dijital regülatör kullanılmıştır. GMR3 cihazı, otomatik gerilim regülasyon modu ve rotor akım regülasyon modu için bir şebeke kontrol aygıtı ve yazılımın bir parçası olan dijital sıralayıcı içerir.

GMR3 cihazı dijital PI(D) otomatik gerilim regülasyonu yapmakla beraber el ile (manuel) kullanılması durumunda devreye girebilen P(I) kontrollü rotor akım regülasyonu da yapar. AVR ve manuel rotor akım regülatörleri arasında otomatik izleme mevcuttur. İki kontrol birimi de regülatör içerisinde, aynı donanımda yer almaktadır.





Şekil 5.14 GMR3 AVR (otomatik gerilim regülatörü)

GMR3 regülatörünü genel olarak tanımlarsak; NGT2 kartı, güç kaynağı görevini görür. Ana işlem birimi MRB3 kartıdır. Bu kart programı ve lojigi içermekle birlikte RS232 seri port bağlantısı da bu kart üzerinden sağlanmaktadır. RS232 ile manuel kontrol yani ELTERM'e veya harici bir bilgisayara bağlanarak çeşitli test veya kontroller yapılabilir. ELTERM ünitesi sayesinde lokal olarak el ile kontrol işlemleri yapılmaktadır.

Darbe (tetikleme) üretici ve sinyal işletim kartı (Pulse Generation and Signal Processing Card (PGS3)) yardımcı işlem birimidir. Şekil 5.14'de gösterilmiş bu karta gelen generatör çıkış bilgileri ile işlemler yapılarak, tristör tetikleme sinyalleri amplifikatöre bu kart ile gönderilir. Senkronizasyon işlemine uyumlu tristör tetiklemeleri de bu kart üzerinden yapılır.

Dijital girişler (input) için iki adet DE32 kartı kullanılmıştır. Dijital çıkışlar (output) için bir adet DA32 kartı kullanılmıştır. GMR3 haberleşmesi için donanım üzerinde LCOM kartı mevcuttur. Haberleşme LAN (lokal area network) ile yapılmaktadır.

## 5.2. İlk İkazlama

Ünite devreye girdikten belli bir süre sonra rotor nominal hıza ulaşır. Rotor 250 d/dk hızda dönerken ikaz sistemi devreye girmeden evvel generatörde bir önceki ikazlı çalışmadan sonra depolanması gereken remenans gerilimi, bu sistemde ikaz deşarj direnci üzerine deşarj edildiğinden ayrıca bir ikazlama gerekecektir. Bu ikaz gücü istasyonun DC barasından sağlanmaktadır.

Şayet ikaz sistemde alan deşarj direnci kullanılmıyaydı, generatörün uzun bir süre çalışmaması ve büyük olması nedeniyle artık mıknatısiyet sayesinde statorda oluşacak gerilim, generatörün kendini toparlamasına yetersiz kalacaktı. Bununla birlikte, generatör çıkışına bağlı olan ikaz trafosunun da ikazlama öncesindeki besleme gerilimi, trafo çevirme oranındaki en düşük gerilim seviyesinin altında olabileceğinden alan sargılarına yeterli akımı uygulayamayacağı da muhtemeldir. Bütün bu sebeplerden ötürü generatör alan sargılarına, generatörün kendini toparlamasına yetecek seviyeye kadar veya ikaz trafosunun yeterli çıkışı verebileceği ana kadar istasyon barasından DC başlangıç akımı uygulanmaktadır.



Şekil 5.15 İlk ikaz ekipmanı

İkaz sisteminin başlama (ON) komutuyla birlikte alan kesicisi kapanır ve regülatör AC geriliminin esas değerini kontrol eder. Eğer bu ayarlanabilir bir değer altındaysa (ünite

çıkış voltajının %2 i.) ilk ikaz gücü istasyon bataryasından sağlanır. İlk ikazlamada, bataryadan sağlanan DC güç, K3 kabininde bulunan şekil 5.15’de görünen ilk ikaz kontraktörü (K02) kapanarak akım sınırlama direnci (R01) ve diyot doğrultucu (V01) üzerinden alan sargılarına aktarılır. İkaz sistemi için uygun AC besleme gerilimi olan generatör çıkış voltajı daha önce belirttiğimiz ayarlanabilir değeri (13,8 kV un. %2) aştığında ilk ikaz kontaktörü açılır. İlk ikaz kontaktörü açıldığı anda AC hattındaki ana doğrultucu tristörler regülatör kontrol sistemi tarafından ilettime geçilerek gerilimin nominal değere kadar yükselmesini sağlar (Andritz Hydro, 2010).

### **5.3. Otomatik Gerilim Regülasyonu**

Bu sistemde stator geriliminin regülasyonu generatör çıkış terminal voltajının geri besleme bilgisi olarak kontrolü yoluyla sağlanmaktadır. Bu kontrol alan akım kontrol birimi ile desteklenmektedir. Otomatik gerilim regülasyon modunda generatör çıkış gerilimi, ayarlanabilir bir generatör set değerine göre düzenlenir. Gerilim düzenleme aralığı, yüksüz durundaki nominal voltajın % 95-105’i arasındadır.

### **5.4. El İle Kontrol**

Bu ikaz sisteminin manuel (el ile kontrol) operasyonda kontrol edilebilmesi için GMR3 cihazının lokal kontrol konumunda olması gerekmektedir. Manuel operasyonun uzaktan kumanda edilmesi mümkün değildir. Bu işletim modunda rotor akımı ayarlanabilir bir rotor akım set değerine göre düzenlenir. Manuel operasyonda regülatör, kendini stator çıkış geriliminin değişimine göre düzenleyemez. Rotor akım ayar aralığı nominal rotor akımının %25-110’ u arasındadır.

### **5.5. Otomatik-Reaktif Güç Düzenlemesi**

Otomatik reaktif güç düzenlemesi kontrolünde destekleyici kontrol olarak generatör gerilim kontrol birimi ve yardımcı destek kontrol olarak rotor akım kontrolü kullanılarak reaktif güç düzenleme işlemi yapılır. Bu işletim modunda regülatör, generatör reaktif gücünü ayarlanabilir bir reaktif güç set değerine göre düzenler. Reaktif güç kontrolü ayar aralığı, generatör gücünün % -50 den +50’e kadardır (Andritz Hydro, 2010).

## **6. BİR HİDROELEKTRİK SANTRALİNDE SENKRON GENERATÖR İKAZ SİSTEMİNİN ŞEBEKE KARARLILIĞINA ETKİLERİNİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

### **6.1. Giriş**

Enterkonnekte sistemin kararlılığı güç sisteminin sürekliliğini sağlamak açısından olması gereken önemli unsurdur. Kararlılığın sağlanmasında pek çok etken vardır. Bu etkenlerin başında, üretim santrallerindeki generatörlerin tahrik güçlerinin kararlı olması, yük ile dengeli bir bağlantı sisteminin oluşturulması veya arıza ve yük dengesizlik durumunda sistemin çökmeden toparlanmasını sağlayacak donanımların oluşturulması gibi etkenler gelmektedir. Sistemi kararsızlığa neden olan en büyük unsur ise arızalardır. Bu arızalara sebep olabilecek pek çok neden vardır. Örneğin rüzgarın etkisi ile sallanan iletkenlerin birbirine veya toprağa temas etmesi veya fazlaca yaklaşması, iletken üzerine yıldırım düşmesi veya bir kuşun faz toprak arasında uçarak elektriğe köprü vazifesi görmesi gibi pek çok neden sayılabilir. Arızalar genel olarak asimetric ve simetric olarak iki ana başlıkta incelenir. Faz-toprak, faz-faz, faz-faz toprak arızaları asimetric arızalar olup yükte dengesizlik meydana getirir. Simetric arızalar ise üç faz kısa devre ve üç faz toprak kısa devre durumlarıdır. Simetric arızalarda her üç fazda da faz açıları değişmeden aynı oranda akım ve gerilim değişimleri meydana gelir. Asimetric ve simetric arızalar konusunun çok kapsamlı olması nedeniyle bu bölümde yapılan analizlerde sadece faz toprak kısa devre arızası ve yük dengesizliği sonucu güç bileşenlerinde meydana gelen salınımlar incelenmiştir.

Enterkonnekte şebekelerde kısa devre arızaları kadar, yüksek tüketim gücüne sahip tüketici devrelerinin açması veya devreye bağlanması, reaktif güç değişimleri gibi anlık yük değişimlerinin güç bileşenlerinde oluşturduğu salınımlar da sistemde kararsızlıklara neden olmaktadır. Nominal gerilim seviyesi 154 kV'luk enterkonnekte şebekede bazı durumlarda gerilimin 140 kV seviyelerine kadar düştüğü veya 168 kV seviyelerine kadar çıktığı görülmektedir. Sistemde oluşacak gerilim veya akım değişimleri hem sistem kalitesini düşürmekte hem de tüketici açısından pek çok arıza risklerini de beraberinde getirmektedir.

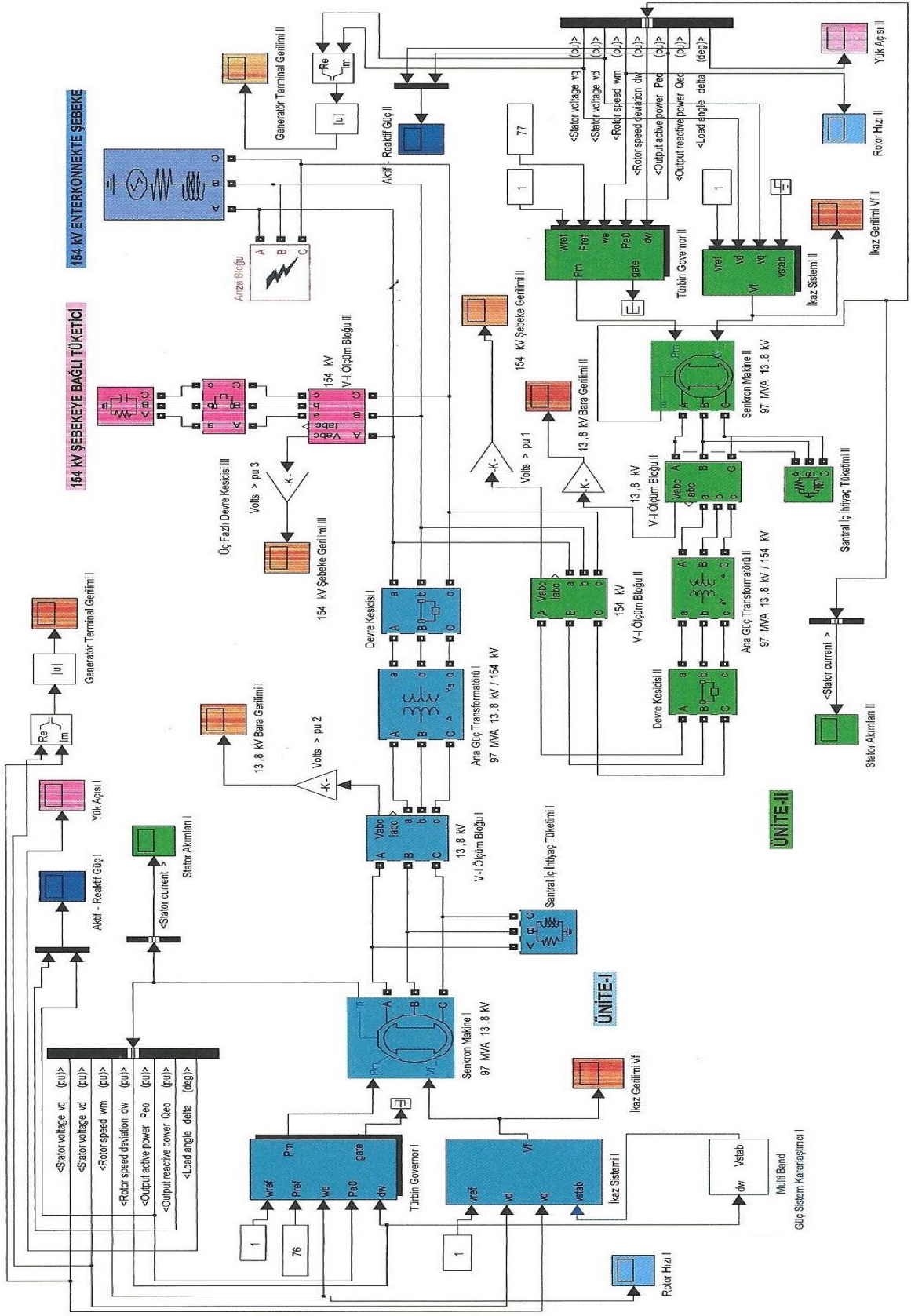


Bu bölümde, bir senkron generatör ikaz sisteminin, enterkonnekte şebekede kararsızlığa yol açan bazı arıza durumlarındaki tepkileri ve kararlılık yönündeki etkilerinin simülasyon ve gerçek zamanlı deneyler ile analizi yapılmıştır. Bu deneylerde, günümüzde imal edilen gelişmiş ikaz kontrol birimlerine eklenen ve *geçici rejimlerde* (transient) devreye giren *güç sistem kararlılaştırıcı* (PSS)'nin oluşturduğu farklılıklar da incelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar birbiri ile karşılaştırılarak gözlemlenmiştir. Çalışmalar, Siirt ilinde işletmede olan ve toplamda 261 MW kurulu gücündeki, Alkumru Hidroelektrik Santralinde (HES) yapılmıştır. Santralde, her biri maksimum 87 MW kurulu gücünde, tüm özellikleri ile birbirine benzeyen üç ünite bulunmaktadır. Deneysel çalışmalar bu ünitelerin ikisinde yapılmıştır. PSS'in oluşturduğu farkı gözlemleyebilmek için, hem simülasyon hem de gerçek zamanlı deneylerde, ünitelerden birinde PSS aktif hale getirilmiş diğer ünite ise pasif durumda bırakılmıştır.

## 6.2. Modelleme ve Simülasyon Analizleri

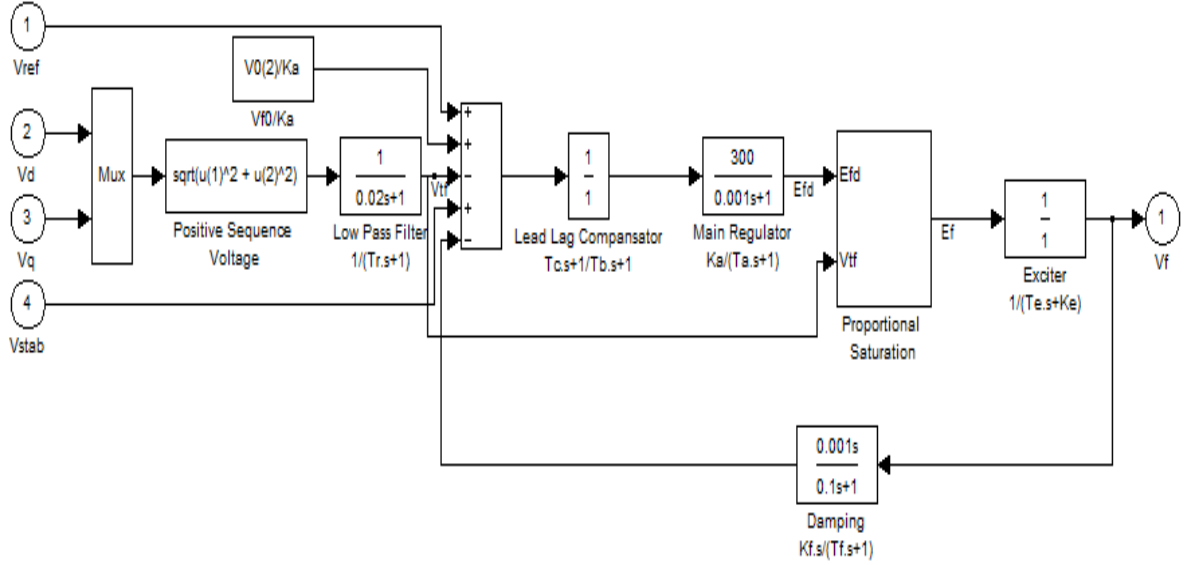
Simülasyon benzetimi, Matlab/Simulink programında Şekil 6.1'de görüldüğü gibi dizayn edilmiştir. Benzetilmiş modelde hız regülatörü, senkron generatör, ikaz sistemi, transformatör ve kesici gibi ünite ekipmanları her iki ünite için ayrı olarak dizayn edilmiştir. Ünite çıkış baraları bir kesici üzerinden 154 kV'luk enterkonnekte şebekeye bağlanmıştır. Benzetilmiş model bloklarında Alkumru HES ekipmanları ile benzer parametreler kullanılmıştır. İkaz sisteminin şebekede kararsızlığındaki tepkilerinin gözlemlenmesi amacı ile benzetilmiş şebeke modelinde faz toprak kısa devre arızası ve gerilim dalgalanması simüle edilmiş, elde edilen deneysel sonuçların analizleri, birbiri ile karşılaştırılarak yapılmıştır. Yapılan analizlerde, hem ikaz sisteminin arıza durumlarındaki tepkileri, hemde PSS kontrolün bu tepkilerde sağladığı kararlılıklar incelenmiştir.

Bir iletim şebekesine pek çok üretim santrali bağlanabilmektedir. Bu santrallerin aynı şebekeye bağlanabilmesi için generatör gerilim bileşenlerinin (gerilim seviyesi, frekans ve faz açısı) şebeke gerilim bileşenleri ile senkronize yani eşzamanlı olması gerekmektedir. Şekil 6.1'de Alkumru HES'de olduğu gibi aynı şebekeye bağlı, birbirine benzer teçhizatlarla donatılmış iki ünite ve tüketici yüklerden oluşturulmuş simulink şebeke modeli verilmiştir. Bu modeldeki üniteler aynı iletim sistemine senkron bağlanmaktadır. Benzetimdeki, mavi renkli bloklar Ünite-1, yeşil renkli bloklarda Ünite-2 teçhizatlarının benzetilmiş modelleridir. Magenta renkli bloklar 154 kV şebekeye bağlı tüketici modelidir.



Şekil 6.1 Matlab/Simulink'te tasarlanan, iki ünitenin ve bağlı oldukları iletim sisteminin benzetim modeli

Benzetim modelindeki ikaz sistem modelleri, simulink'te mevcut olan IEEE'nin tip-1 ikaz sistem modelidir. Her iki santralde de ikaz sistemlerinin parametreleri aynı seçilmiş olup birbirinden farklı olarak, Ünite-1'de güç sistem kararlaştırıcı kullanılmıştır. Modelde kullanılan parametrelerin çoğu birim değerlerde (pu) tanıtılmıştır. Şekil 6.2'de tip-1 ikaz sisteminin blok diyagramı verilmiştir.



Şekil 6.2 IEEE'nin tip-1 ikaz sistemi blok diyagramı

Şekil 6.2'de verilen blok diyagramda dört giriş işareti ve bir çıkış işareti mevcuttur. Birinci giriş işareti olan  $V_{ref}$  girişi, operatör tarafından sisteme girilen gerilim ayar değeridir. Regülatör gerilimi, referans değere göre ayarlamaktadır. İkinci giriş değeri  $V_d$ , senkron generatör geriliminin d eksenindeki gerilim bileşenidir. Üçüncü giriş işareti olan  $V_q$  yine senkron generatör geriliminin q eksenindeki gerilim bileşenidir. İkaz regülatörü, kontrol sistemine girilen  $V_{ref}$  ayar değeri ile  $V_d$  ve  $V_q$  geriliminden regülatöre gelen kompleks gerilim bileşeninin durumuna göre ikaz çıkışını ayarlayarak referans gerilimine ulaşmaya çalışmaktadır.  $V_{stab}$  işareti PSS giriş işaretidir. Bu işaret geçici bozucu etkilerden kaynaklanan rotor osilasyonlarını önlemek amacı ile kullanılmaktadır. Güç sistem kararlılaştırıcı haricinde bir de ikaz sistem dengeleyicisi olan  $V_f$  işareti mevcuttur.  $V_f$  işareti genellikle kısa devre durumlarında regülasyon kararlılığının sağlanmasında önemli bir role sahiptir.

### 6.2.1. Benzetim Modelinde Kullanılan Parametreler ve Referans Değerleri

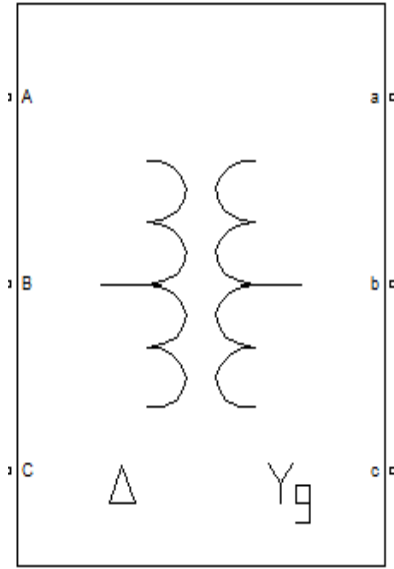
Matlab/Simulink'te oluşturulmuş güç sistem modelindeki senkron generatörler, ikaz sistemleri, türbinler ve transformatörler genel itibariyle Alkumru HES teçhizatlarına benzetilmiştir. Dolayısıyla teçhizat modellerinde benzer parametreler ve ayar değerleri kullanılmıştır. Örneğin tablo 6.1'deki Alkumru HES senkron generatör parametreleri şekil 6.3b'de verilen benzetilmiş modelin dialog kutusunda da görülmektedir. Bu ayarlamalar diğer ana teçhizat modellerinde de yapılmıştır. İkaz geriliminin ayar değeri ( $V_{ref}$ ) her iki ünite modeli için 1 olarak ayarlanmıştır. Ünite-1 ikaz sisteminde PSS kontrolü için multi-band güç sistem kararlılaştırıcı kullanılmış ve şekil 6.1'de görüldüğü gibi ikaz bloğundaki  $V_s$  girişine bağlanmıştır. Ünite-2 ikaz sisteminde ise  $V_s$  sinyal girişi topraklanmıştır. Bu nedenle her iki ünitenin özelliklerinin benzer olmasına rağmen kararlılıklarında farklılıklar oluşacaktır. Analizlerde bu farklılıklar ile ilgili açıklamalara da yer verilmiştir.

Benzetilmiş modelde, 154 kV'luk enterkonnekte şebekeye bağlı her iki ünitenin üretebildiği elektrik gücü, hız regülatörü modelindeki mekanik güç olarak tanımlı  $P_m$  gücünden elde edilmektedir.  $P_m$  gücü,  $P_{ref}$  ayar değerine bağlı olarak kapasite dahilinde istenilen güç değerine ulaşmaktadır. Hidroelektrik santrallerde  $P_m$  gücünün kapasitesi cebri boru su basıncına göre su basıncı ise rezervuar suyunun seviyesine bağlı değişmektedir. Maksimum su rezervuarında her bir ünitenin nominal aktif gücü 87,3 MW/h'tır. Simülasyon ve gerçek zamanlı deneyler aşamasında, Alkumru HES rezervuar su seviyesi maksimum seviyenin altında olduğu için ünitelerin nominal  $P_m$  kapasitesi 68 MW civarlarındadır. Buna bağlı olarak benzetilmiş modeldeki deneylerde nominal kapasiteye yakın referans değerler kullanılmıştır.  $P_{ref}$  ayar değeri Ünite-1 için nominal  $P_m$  gücünün % 76'ı olarak ayarlanmış ve bu değer 66,3 MW aktif güce denk gelmektedir. Ünite-2 için ise nominal  $P_m$  gücünün % 77'i olarak ayarlanmış güç, 67,2 MW aktif güce denk gelmektedir. Benzetimde, 154 kV'luk şebekeye 120 MW aktif güç, 15 MVar reaktif kapasitif güç tüketimine ayarlanmış bir yük bağlanmıştır. Ünite tüketimleri her iki ünite için eşit olup, 5 MW aktif güç ve 0,3 MVar reaktif endüktif güç tüketimine ayarlanmıştır. Şebekedeki toplam tüketim 130 MW aktif, 15 MVar reaktif kapasitif, 0,6 MVar reaktif endüktif güç olarak ayarlanmıştır. Bu güç her iki ünitenin toplam üretimine yakın bir değerdedir olduğundan şebeke gerilimi 154 kV seviyelerinde kararlı kalmaktadır.

Simulink programında tasarlanmış güç sistem modelinde kullanılan ekipmanların parametreleri, model blokları ve parametre dialog kutusu aşağıda verilmiştir:

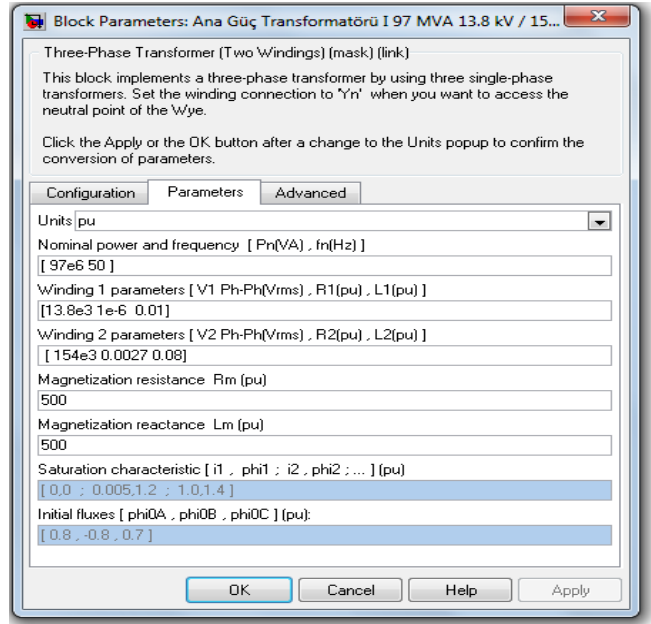
**Tablo 6.1** Transformatör parametreleri

Parametre	Parametre tanımı	Parametre değeri
$P_n$	Nominal güç	97 MVA
$f_n$	Nominal frekans	50 Hz
$V_1(P_h-P_h(V_{rms}))$	Birinci sargı fazlar arası gerilim	13800 $V_{rms}$
$R_1$	Birinci sargı direnci	1e-6 pu
$L_1$	Birinci sargı kaçak endüktansı	0.01 pu
$V_2(P_h-P_h(V_{rms}))$	İkinci sargı fazlar arası gerilim	13800 $V_{rms}$
$R_2$	İkinci sargı direnci	0.0027 pu
$L_2$	İkinci sargı kaçak endüktansı	0.08 pu
$R_m$	Mıknatıslama direnci	500 pu



Ana Güç Transformatörü I  
97 MVA 13.8 kV / 154 kV

(a)

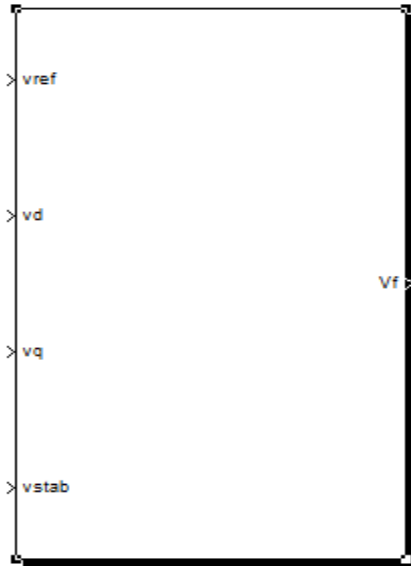


(b)

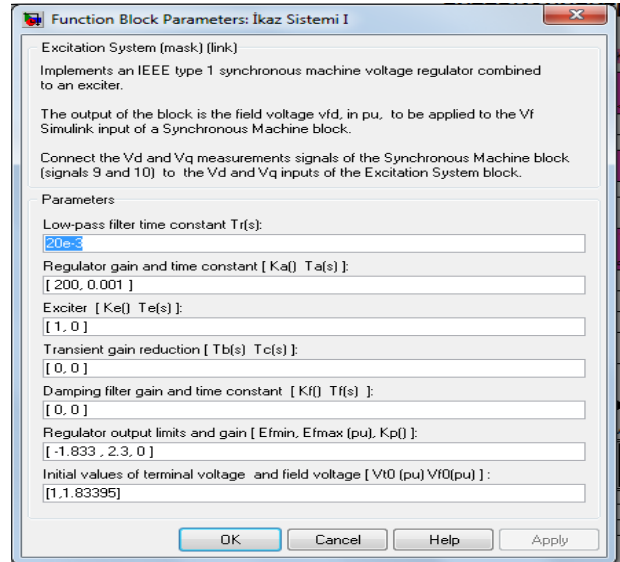
**Şekil 6.3** Ana güç trafosunun; a)simulink modeli, b) parametre dialog kutusu

**Tablo 6.2** IEEE'nin tip-1 ikaz sisteminin parametreleri

Parametre	Parametre tanımı	Parametre değeri
$E_{fmax}$	Regülatör maksimum çıkış gerilim sınırı	0 pu
$E_{fmin}$	Regülatör minimum çıkış gerilim sınırı	2.3 pu
$K_a$	Regülatör kazancı	300
$K_e$	İkazlayıcı kazancı	1
$K_f$	Dengeleyici filtre kazancı	0.001
$T_b$	Geçici rejim kazanç düşürücü birinci derece zaman sabiti	0 s
$T_c$	Geçici rejim kazanç düşürücü ikinci derece zaman sabiti	0 s
$T_e$	İkazlayıcı zaman sabiti	0 s
$T_f$	Dengeleyici filtre zaman sabiti	1 s
$T_r$	Alçak geçiren filtre zaman sabiti	0.02 s
$V_{fo}$	İkaz gerilimi başlangıç değeri	1 pu
$V_{to}$	Generatör terminal gerilimi başlangıç değeri	1 pu



(a)

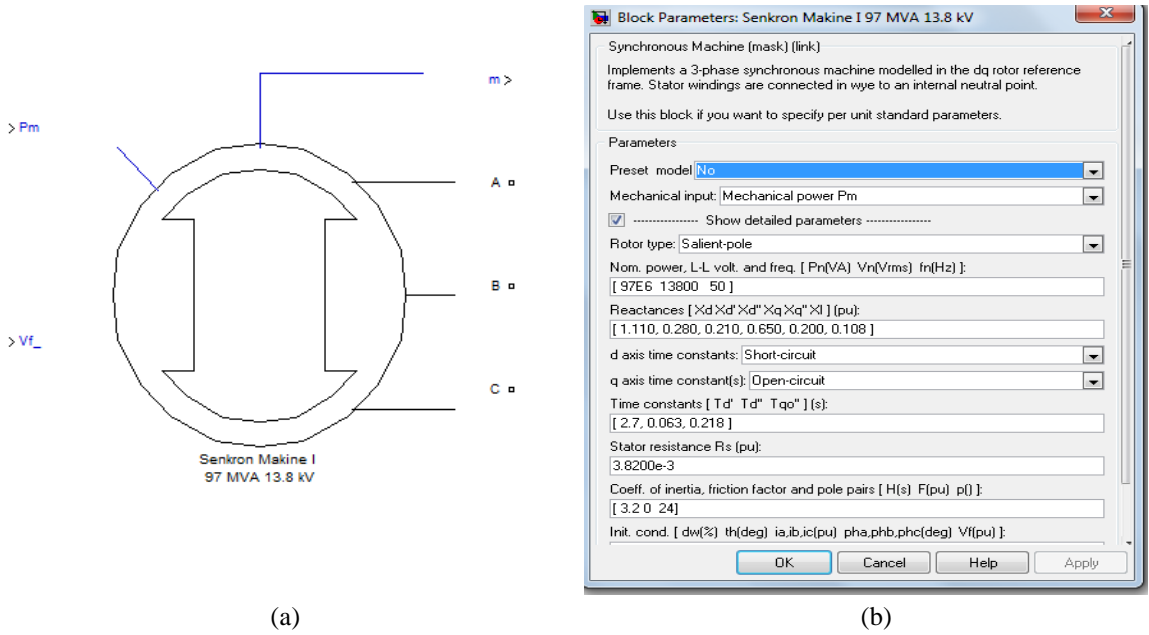


(b)

**Şekil 6.4** IEEE'nin tip-1 ikaz sistemi; a) simulink modeli, b) parametre dialog kutusu

**Tablo 6.3** Senkron generatör parametreleri

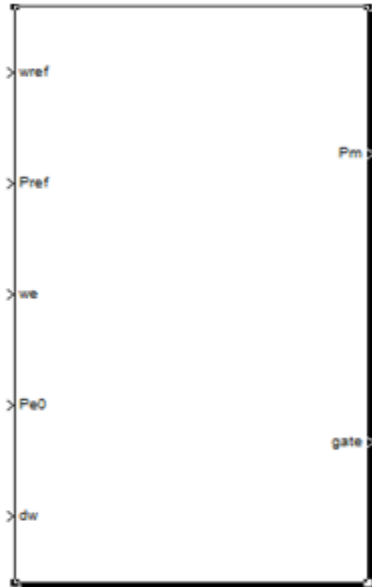
Parametre	Parametre tanımı	Parametre değeri
$P_n$	Generatör nominal çıkış gücü	97 MVA
$V_n$	Generatör çıkışı fazlar arası gerilimi	13800 Vrms
$f_n$	Generatör çıkış frekansı	50 Hz
$X_d$	Senkron reaktans (d-ekseni doğrultusunda boyuna bileşen)	1.110 pu
$X_{d'}$	$X_d$ bileşeninin geçici reaktansı	0.280 pu
$X_{d''}$	$X_d$ bileşeninin yardımcı geçici reaktansı	0.210 pu
$X_q$	Senkron reaktans (q-ekseni doğrultusunda enine bileşen)	0.650 pu
$X_{q''}$	$X_q$ bileşeninin yardımcı geçici reaktansı	0.250 pu
$T_{d'}$	d-ekseni geçici kısa devre zaman sabiti	2.7 s
$T_{d''}$	d-ekseni yardımcı geçici kısa devre zaman sabiti	0.063 s
$T_{qo''}$	q-ekseni yardımcı geçici kısa devre zaman sabiti	0.218 s
$R_s$	Stator sargı direnci	0,00382 pu



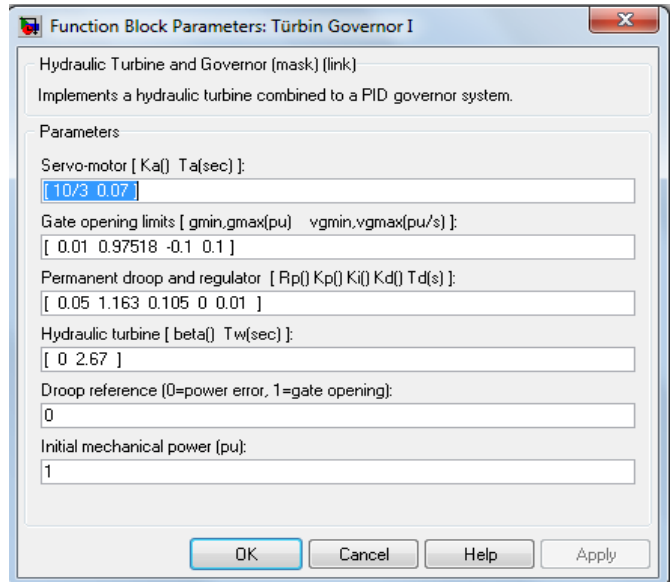
**Şekil 6.5** Senkron generatörün; a)simulink modeli, b) parametre dialog kutusu

**Tablo 6.4** Hız regülatörü parametreleri

Parametre	Parametre tanımı	Parametre değeri
$K_a$	Servomotor kazancı	10/3
$T_a$	1. Dereceden servomotor zaman sabiti	0.07 s
$g_{min}$	Ayar kanatları minimum açıklık sınırı	0.01 pu
$g_{max}$	Ayar kanatları maksimum açıklık sınırı	0.97518 pu
$v_{gmin}$	Ayar kanatları minimum açma hızı	-0.1 pu/s
$v_{gmax}$	Ayar kanatları maksimum açma hızı	0.1 pu/s
$R_p$	Sürekli düşme kazancı	0.05
$K_p$	Oransal kazanç	1.163
$K_i$	İntegral kazancı	0.105
$K_d$	Türevsel kazanç	0
$T_d$	1. Dereceden alçak geçiren filtre zaman sabiti	0.01 s
$\beta$	Hız sapması sönümlendirme katsayısı	0
$T_w$	Su başlangıç zamanı zaman sabiti	2.67 s



(a)



(b)

**Şekil 6.6** Hız regülatörü; a)simulink modeli, b) parametre dialog kutusu



Simülasyon modelindeki bütün tasarımlar ve ayarlamalar tamamlandıktan sonra 154 kV bir güç sistem modeli deney çalışması için hazır hale getirilmiştir. Deney çalışması 8 saniye olarak ayarlanmış ve bu zaman süresinde ard arda iki farklı arıza simüle edilmiştir. Bu arızalar enterkonnekte şebekelerde en çok karşılaşılan arıza türleridir. Bunlar faz toprak kısa devre arızası ve gerilim dalgalanma arızasıdır. Her iki arızanın da ciddi bir seviyenin üzerinde devam etmesi durumunda koruma sistemleri devreye girerek şebekeye bağlı devre kesicilerinin açmasına ve ünitelerin devredışı olmasına neden olmaktadır. Bu deneyde kısa süreli ve küçük darbeler gözlemlenmiştir. Birinci arıza simülasyonunda, 154 kV' şebekeye bağlanmış arıza bloğu sayesinde faz toprak arası kısa devre simülasyonu istenilen zaman aralığında yapılmıştır. Söz konusu arıza 4-4.1 saniyeleri arasında yapılmış 100 ms sürmüştür. İkinci arıza simülasyonunda 154 kV şebeke gerilim kaynağı bloğundaki gerilim seviyesi 5,3-6,3 saniyeleri arasında 154 kV nominal gerilim seviyesinden 142 kV mertebelerine düşürülerek bir saniye sonra tekrar nominal seviyelere çıkarılmıştır.

Deney çalışmalarından elde edilen sonuçlar ölçüm bloklarından incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda; şebeke gerilimleri, generatör çıkış gerilimleri, generatör çıkış akımları, generatörlere uygulanan ikaz gerilimleri, generatörlerde üretilen aktif ve reaktif güçler, yük açıları ve rotor hızlarına ait analizler yapılmıştır. Bu analizlerde yük açıları haricindeki tüm ölçümler birim ünite (per unit) olarak elde edilmiştir.

## **6.2.2. Simulink Modelinde Geçici Rejim Etkilerinin Analizi**

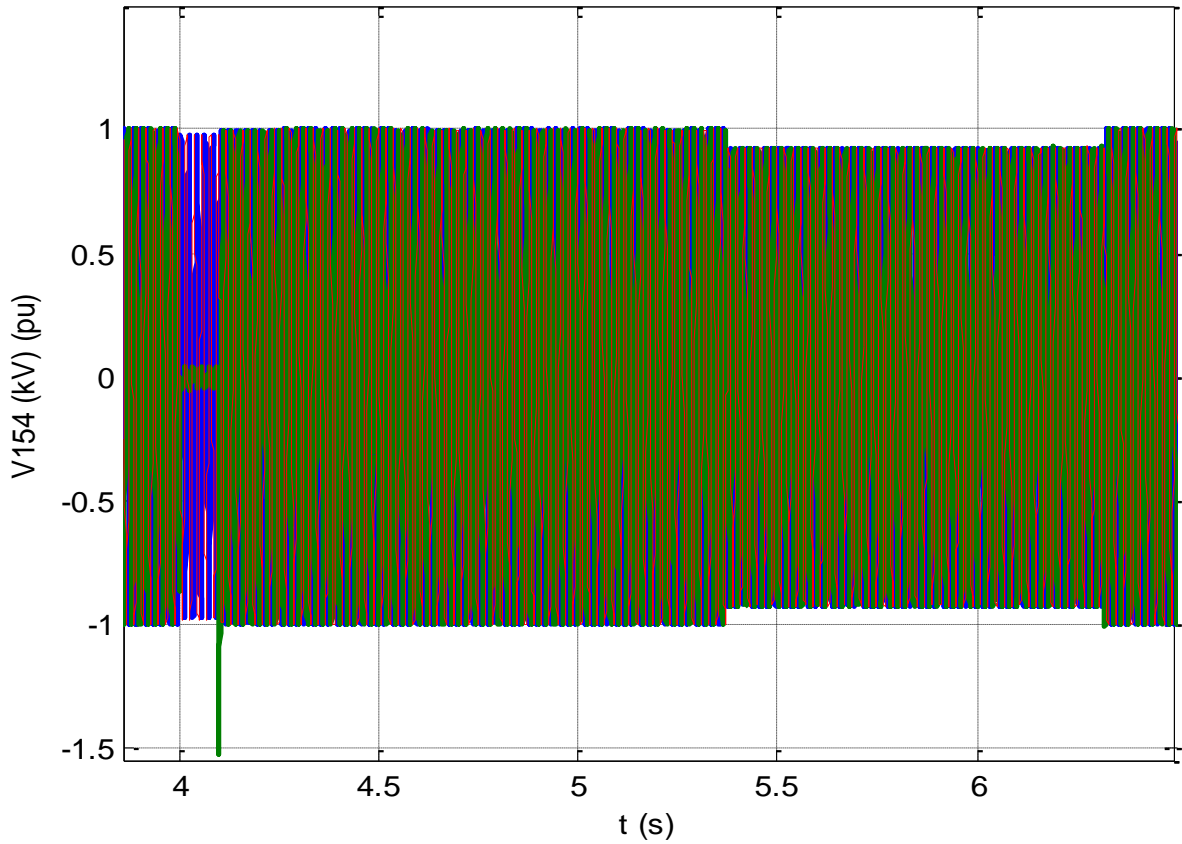
### **6.2.2.1. 154 kV Şebeke Gerilimi ve 13,8 kV Generatör Çıkış Gerilimleri**

Şekil 6.7'de 154 kV enterkonnekte şebekenin fazlar arası gerilimleri, şekil 6.8 ve 6.9'da ise sırası ile Ünite-1 ve Ünite-2'nin 13,8 kV fazlar arası bara gerilimleri birim değer olarak verilmiştir. Kırmızı çerçeve içerisine alınmış bölüm B fazı ile toprak arasında meydana gelen faz toprak kısa devre arızasını göstermekte, mavi çerçeve içerisine alınmış bölüm ise yük değişimi ve benzer durumlar nedeniyle meydana gelen gerilim düşümü arızasını göstermektedir .

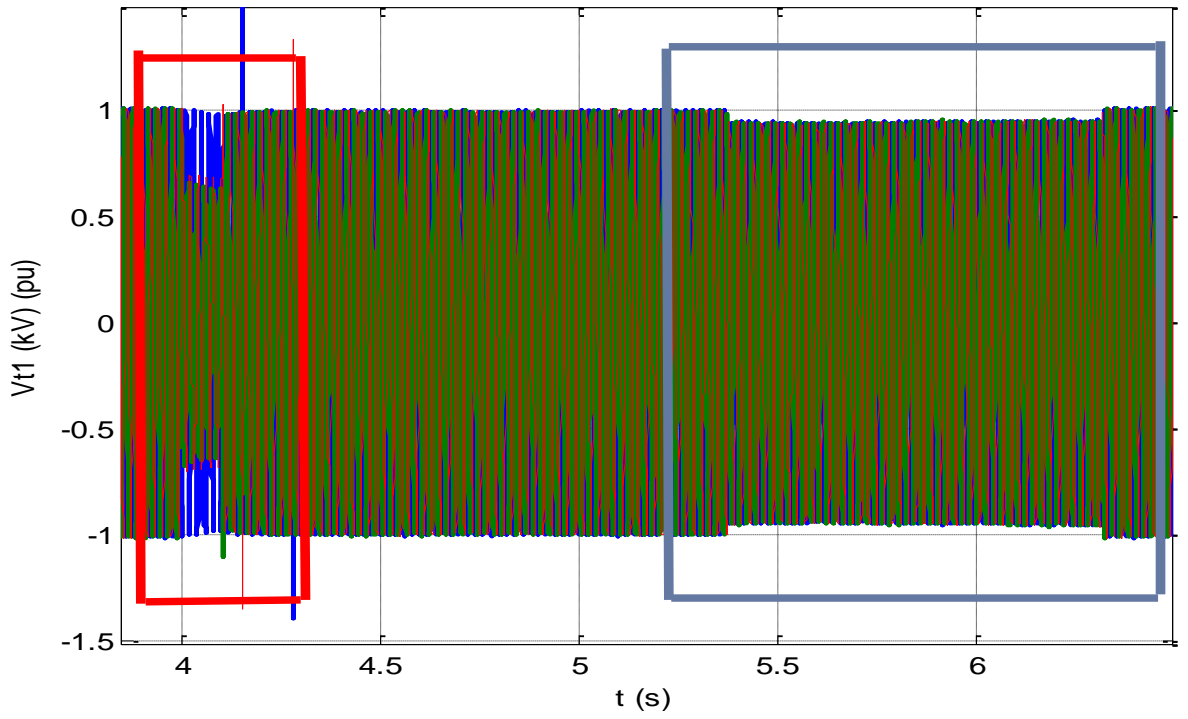
Kısa devre anında B fazı ile toprak arasındaki fiziki temas veya arada iletim oluşturan başka bir etki nedeniyle faz toprak gerilimi yaklaşık olarak sıfır mertebelerine düşmüştür. Diğer iki fazın toprak ile aralarındaki potansiyel fark ise pek değişmemiştir. Analizlerimizde fazlar arası gerilim ölçümleri yapıldığından kısa devre arızası sırasında

AB fazı ve BC fazlar arası gerilimlerde yakın oranda düşüş görülmektedir. AC fazı ise bu durumdan pek etkilenmemiştir. Bu durum hem şebeke geriliminde hem de generatör çıkış gerilimlerinde benzer şekilde meydana gelmiş, Ünite-1’de Ünite-2’e göre daha hızlı bir toparlanma görülmüştür.

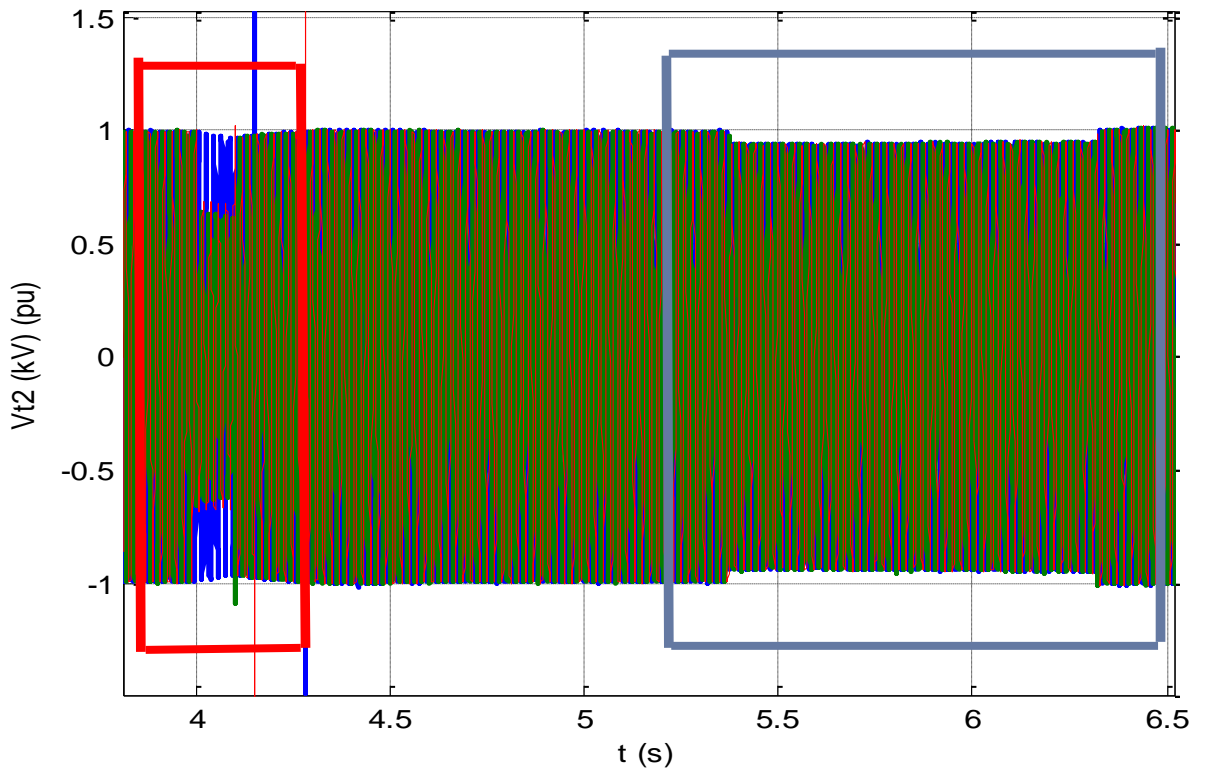
Mavi çerçeve içerisinde alınmış bölümde şebekeye bağlı yüklerdeki değişimler veya şebekeye paralel bağlı generatörlerin devreden çıkması gibi durumlarda meydana gelen akım ve gerilim salınımlarında, generatörlerin şebekeye senkron olması nedeniyle, hem şebeke hemde generatör gerilimlerinde birbirine paralel bir düşüş yaşanmıştır. Generatörler bu durumu düzeltmek için gerilimi artırıcı yönde tepki göstermeye çalışsa bile, sonsuz şebekeye senkron olduğundan bu durumu hızlı bir geçiş ile değil, çok yavaş bir şekilde belli bir seviyeye kadar artışa doğru ilerleyerek düzeltmeye çalıştığı görülmüştür. Her iki arıza durumunda da generatör uç gerilimleri incelendiğinde Ünite-1’deki salınımların Ünite-2’e göre daha az olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni; Ünite-1 generatör ikaz kontrol sistemindeki PSS’in aktif olması, Ünite-2’de ise devredışı olmasıdır.



Şekil 6.7 154 kV enterkonnekte şebeke gerilimi (pu)



Şekil 6.8 Ünite-1 13,8 kV bara gerilimi (pu)



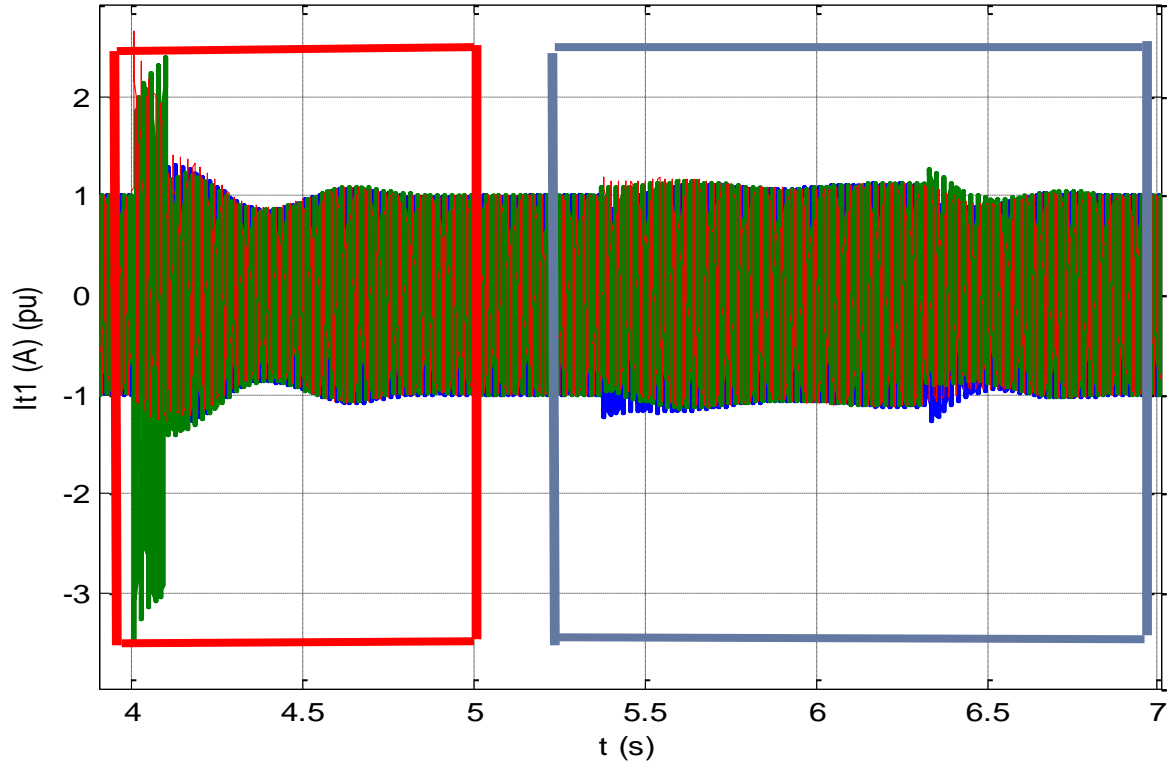
Şekil 6.9 Ünite-2 13,8 kV bara gerilimi (pu)

### 6.2.2.2. Generatör Çıkış Akımları

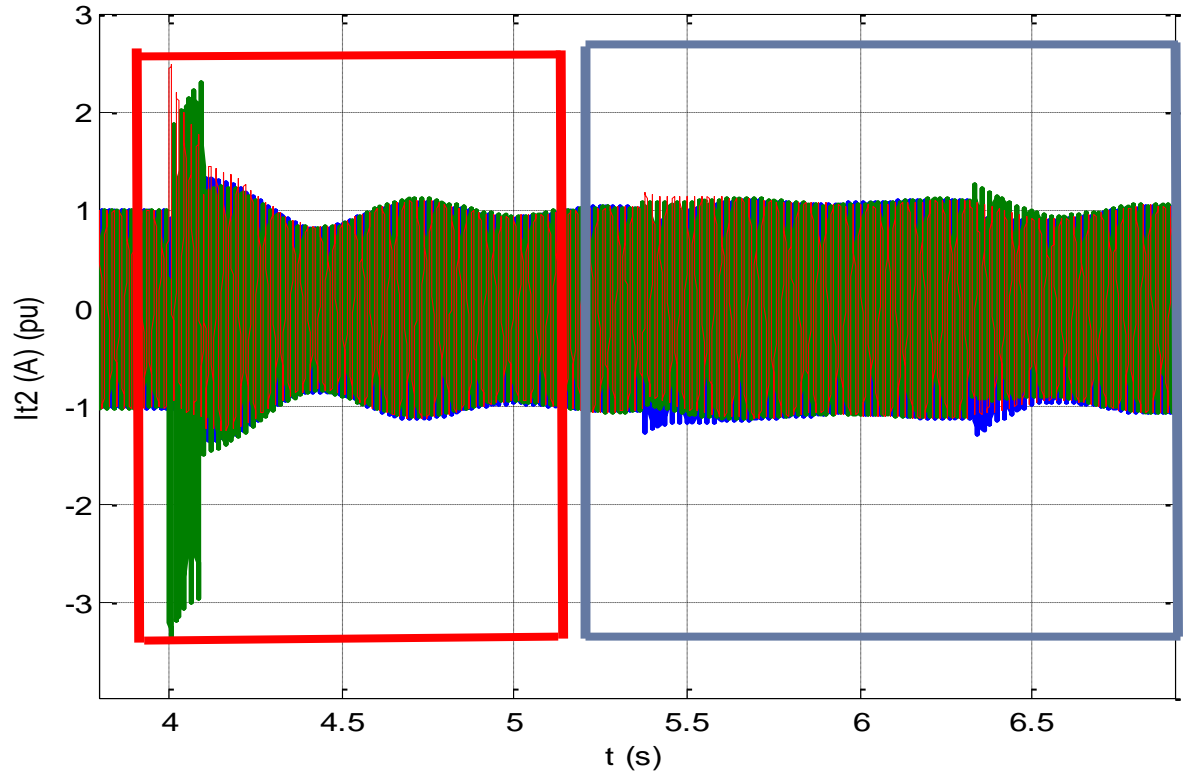
Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’de generatör çıkış akımları verilmiştir. Bu grafiklerde, şebekede meydana gelen arızalar sonucunda generatör akımlarında oluşan etki ve tepkiler görülmektedir. Daha önceki gerilim analizlerinde olduğu gibi, grafiklerdeki kırmızı çerçeve içerisine alınan bölüm faz toprak kısa devre arızasının, mavi çerçeve içerisine alınan bölüm ise ani gerilim düşümü arızasının meydana geldiği zamanı göstermektedir.

Faz toprak arızasının meydana geldiği B fazı her iki şekilde de magenta rengi ile gösterilmiştir. Her iki şekilde de görüldüğü gibi kısa devre anında B fazında asimetrik bir arıza oluşmuş ve ilk anda akımın negatif alternansı normal değerın yaklaşık üç katı artmıştır. Bu durum B fazının temas ettiği toprak empedansının ihmal edilecek kadar küçük olmasından kaynaklanmıştır. 154 kV hatta meydana gelen B fazının toprak kısa devresi neticesinde, yüksek gerilim sargısı yıldız bağlı ünite transformatörlerinin ve yine yıldız bağlı generatörlerin nötr noktalarına değişen alternanslarda akım akışı ile kapalı devre oluşmaktadır. Arıza süresince kısa devre akımı diğer iki faz akımının tersi yönünde, aynı açıda ve toplamları sıfır olacak şekilde meydana gelmiştir. 100 milisaniye süren arıza sonunda grafikleri karşılaştırdığımızda Ünite-1 generatör çıkış akımlarının Ünite-2 generatör çıkış akımlarına göre kararlı duruma daha hızlı geçtiği görülmektedir.

Gerilim ve akım salınımları, şebekeye bağlı yük empedansının sistem dengesini etkileyecek şekilde artması veya azalması, şebekeye paralel bağlı bir senkron generatörün devreden çıkması veya bunun gibi pek çok nedenden meydana gelebilir. Örneğin sabit güçte dengede olan bir şebekeye bağlı yük empedansının artması ile yükün omik, endüktif veya kapasitif durumuna göre yük, şebekeye paralel bağlı generatörlerden daha fazla güç çekme eğilimine gitmektedir. Bunun sonucunda ya akım yükselerek gerilimi düşürmekte ya da kapasitif yükün artması ile gerilim yükselmektedir. Şekil 6.10 ve şekil 6.11’de şebeke geriliminin 142 kV seviyelerine düştüğü görülmektedir. 5,3. saniyede meydana gelen yük değişimi ile oluşan salınım arızasında şebekedeki kurulu güç o an için sabit olduğundan yük akımının ani artışı gerilimi düşürmüştür. Ardından akım biraz daha düşerek normalin üzerinde ilerlemeye devam etmiştir. 6,3. saniye sonunda şebeke gerilimi tekrar yükselerek kararlı hale geçmiştir. Bu durum sonucunda her iki ünite de akım salınımları meydana gelmiştir. Şekil 6.10 ve şekil 6.11’deki akım grafikleri karşılaştırılıp incelendiğinde Ünite-1’in Ünite-2’e göre daha kararlı olduğu ve daha hızlı bir şekilde kararlı hale geçtiği görülmüştür.



Şekil 6.10 Ünite-1 generatör çıkış akımları (pu)



Şekil 6.11 Ünite-2 generatör çıkış akımları (pu)

### 6.2.2.3. Generatör Aktif ve Reaktif Güçleri

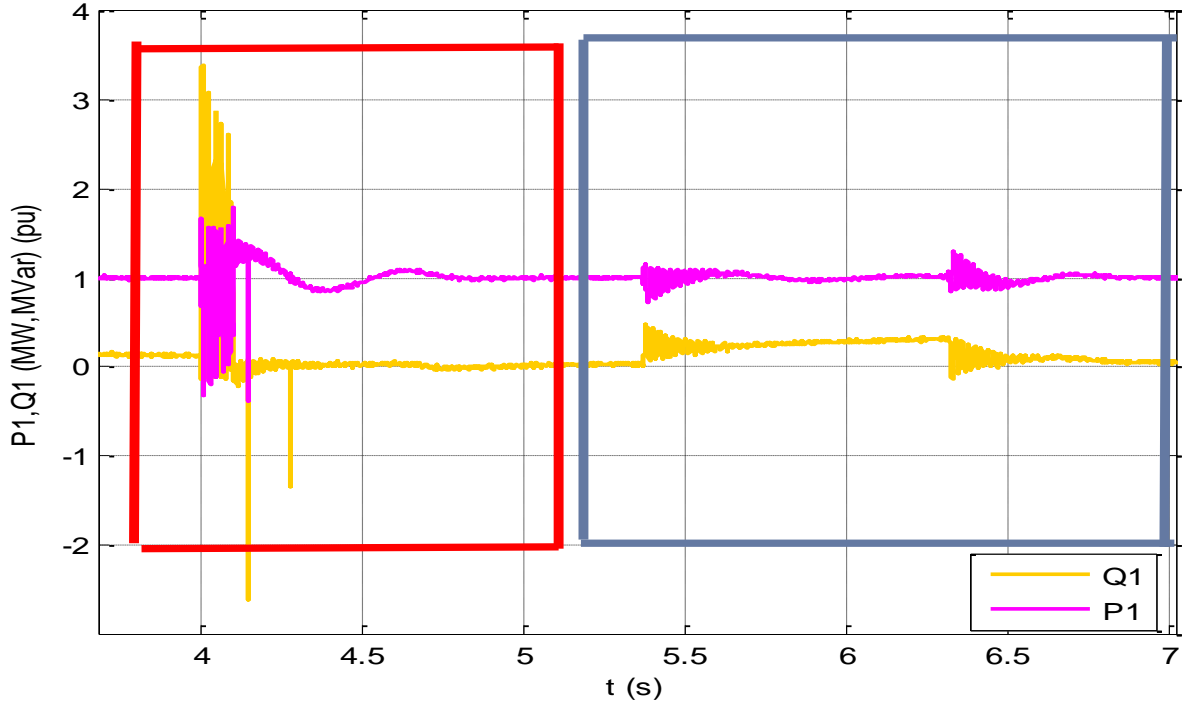
Generatörde üretilen elektrik gücünün temel güç kaynağı olan türbin mekanik gücü generatörün yüksüz durmunda iken, hız regülatörü sayesinde rotor hızının sabit kalmasını kanat aklığını sabitleyerek kolaylıkla sağlayabilmektedir. Bu durum, generatörün şebekeye bağlanması halinde farklı bir şekil almaktadır. Şebekedeki anlık yük değişimleri veya geçici rejim durumlarında generatörün elektromekanik momentinde (tork) anlık sapmalar meydana gelmekte, bu durumda ayar kanatları rotor hız sapmalarına tepki göstererek hızı dengede tutmaya çalışmaktadır. Bunun haricinde rotor açısında da sapmalar oluşmakta ve açının değişmesi ile reaktif güç de anlık olarak değişmektedir.

Şekil 6.12 ve şekil 6.13'te verilen grafiklerinde, Ünite-1 ve Ünite-2'nin, aktif ve reaktif güçleri verilmiştir. Bu grafiklerde generatörün nominal aktif ve reaktif güçleri birim değer olarak ayarlanmıştır. Her iki şekilde de görüldüğü gibi kararlı durumda aktif güç nominal değerlerde, reaktif güç eğrisinin ise şebekede veya generatörlerde çok fazla reaktif güç talebi olmadığından düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Sabit bir güçte akım arttığında gerilim düşer, gerilimin yükselmesi durumunda ise akım azalır.

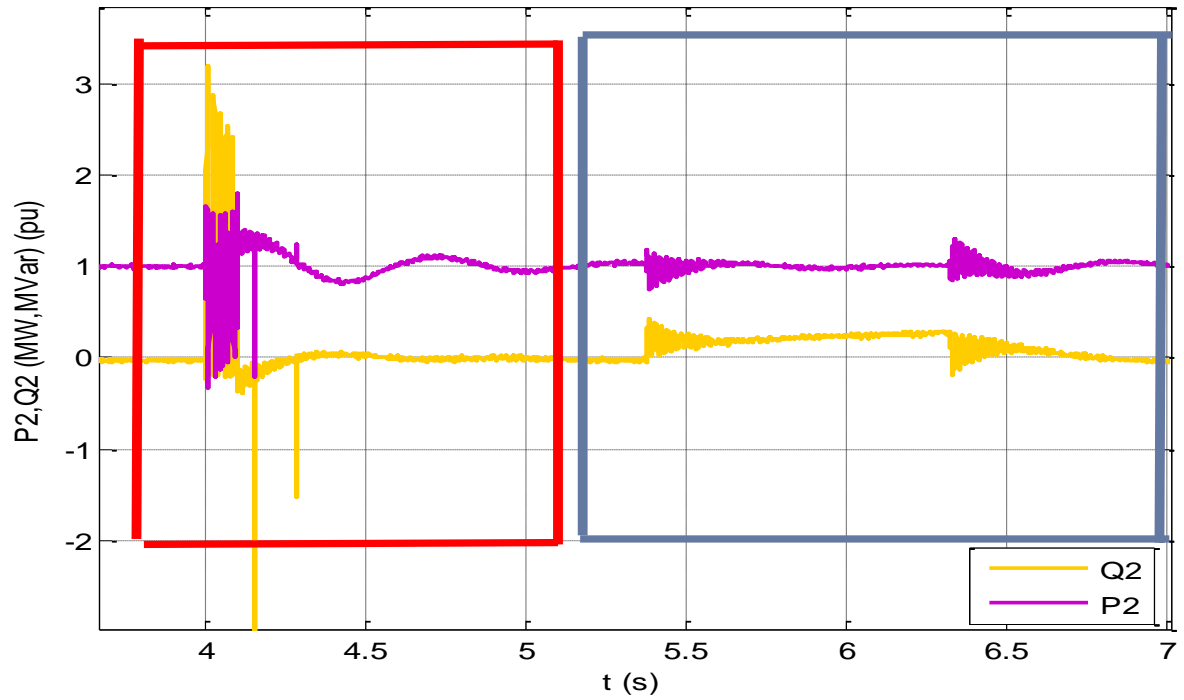
Şebekede meydana gelen faz toprak kısa devresi ile oluşan geçici rejim ve yük değişim etkisi ile meydana gelen elektromekanik moment salınımları her iki grafikte de görüldüğü gibi aktif ve reaktif güçlerde salınımlara neden olmuştur. Şekil 6.12 ve şekil 6.13'te kırmızı çerçeveye alınmış bölgelerde şebekede oluşan faz toprak kısa devre arızası görülmektedir. Bu arıza durumunda A fazının toprak arasındaki empedansının sıfıra yaklaşması, toprağın şebekeden düşük frekanslı büyük genlikli değişken bir akım çekmesine neden olmuştur. Bu durum sonucunda aktif gücün gerilim ve akım bileşenlerinde meydana gelen dengesizlik aktif güçte de geçici rejimlere neden olmuştur. Reaktif güçteki salınımların nedeni ise ağırlıklı olarak rotor açısındaki sapmalar ve ikaz akımının rotor hız sapmalarına karşı gösterdiği sönümlendirici tepkiler ile alakalı durumlardır. Her iki ünitenin kısa devre arızasındaki aktif ve reaktif güç salınımları karşılaştırıldığında, Ünite-1 güçlerinin daha hızlı kararlı hale geçtiği görülmektedir.

Şekil 6.12 ve şekil 6.13'te mavi çerçeve içerisine alınmış ve geçici gerilim düşümüne neden olmuş arızada aktif ve reaktif güçlerde kararsızlıklar meydana gelmiştir. Bu durum rotorun dönme momentinde kısa devre arızasına benzer frenleyici ve arttırıcı etkiler yaparak aktif güçte salınımlar oluşturmuştur. Şebekede meydana gelen gerilim düşümü ile generatör ikaz gerilimi şebeke gerilimini generatör geriliminin ayar değerine çıkarmaya

çalışarak reaktif gücün de artmasına neden olmuştur. Ünite-1 PSS'i aktif olduğundan ikaz gerilimi rotor hız sapmalarına bağlı değiştiğinden aktif ve reaktif güç değişimleri Ünite-2'e göre daha az etkilenmiş ve kararlı hale daha hızlı bir sürede ulaşmıştır.



Şekil 6.12 Ünite-1 generatör aktif ve reaktif güçleri (pu)



Şekil 6.13 Ünite-2 generatör aktif ve reaktif güçleri (pu)

#### 6.2.2.4. Generatör Yük Açıları

Yük empedansının faz açısına veya generatörün şebeke ile senkron dönen rotor açısına yük açısı denir. Saf endüktif yüklerde akım gerilimden  $90^\circ$  geride, saf kapasitif yüklerde  $90^\circ$  ileridedir. Dolayısıyla yük açısını, yükün omik, endüktif ve kapasitif dirençleri belirler. Tek fazlı sistemlerde gerilim ve akım arasındaki açı ve güç vektör diyagramındaki aktif güç ve görünür güç arasındaki aynı olduğundan her ikisinin de yük açısı olduğu söylenebilir. Üç fazlı sistemlerde ise bu durum her faz için farklı olabildiğinden genel ele alındığında yük açısı güç vektör diyagramındaki aktif güç ve görünür güç arasındaki açıdır. Bu durum omik yüklerde sıfır ama endüktif ve kapasitif yüklerde değişmektedir. DC devreleri için yük tarafından çekilen güç; DC yük gerilimi ile DC yük akımının çarpımından oluşur, ancak alternatif akım devrelerinde yük tarafından çekilen ortalama güç yük üzerindeki gerilimin rms değeri, yükten geçen akımın rms değeri ve güç faktörünün çarpımından oluşur. Güç faktörü yük açısının kosinüsüdür.  $\varphi$  açısı olarak gösterilen yük açısı ile güç faktörü arasındaki ilişki;

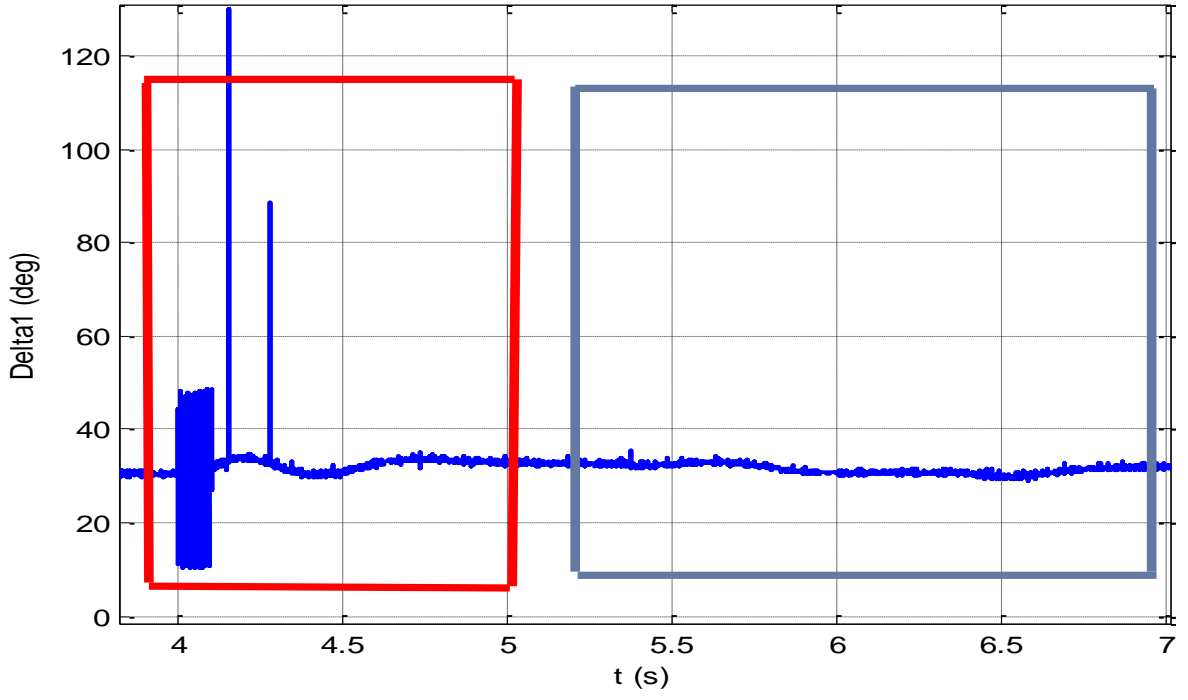
$$\text{Güç faktörü (PF)} = \text{Cos } \varphi \quad (6.1)$$

şeklindedir.

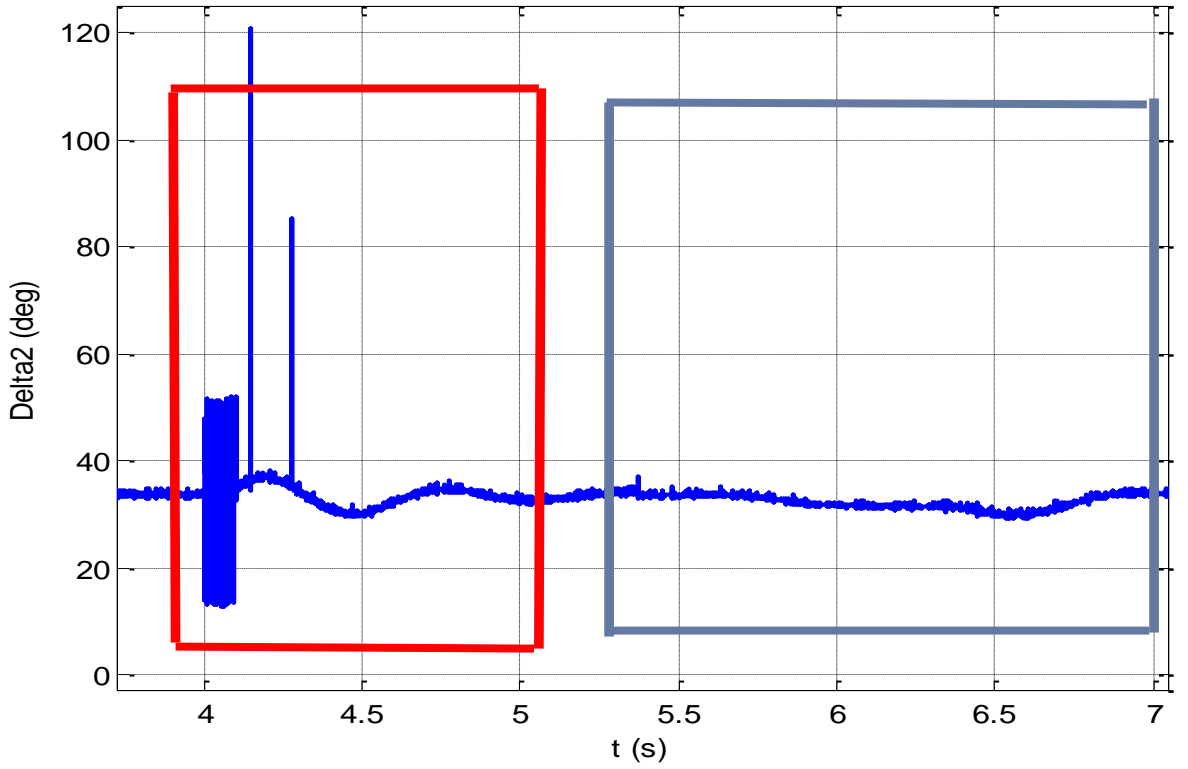
Güç sistem kararlılığında gerilim ne kadar etkili ise yük açısı diğer bir değişle rotor açısı da kayda değer bir öneme sahiptir. Bu yüzden yük açısının sabit tutulması güç sistem kararlılığın bir parçasıdır. Yük açısı reaktif güç açısıyla bire bir ilişkilidir. Çünkü reaktif gücün pozitif veya negatif yönde artması veya azalmasına bağlı olarak görünür güç de değiştiğinden yük açısında da buna paralel değişimler meydana gelmektedir. Şekil 6.14 ve Şekil 6.15 sırası ile her iki ünitenin yük açılarını gösteren grafiklerdir. Şekillerde kırmızı çerçeve içerisine alınmış bölüm faz toprak kısa devre arızasının olduğu zaman aralığındaki yük açıslarında meydana gelen değişimleri göstermektedir. Arıza anında aşırı akım çeken toprak aktif güçte ve reaktif güçte meydana getirdiği salınımlar nedeniyle yük açısında da benzer salınımlar meydana gelmiştir. Her iki ünite karşılaştırıldığı zaman PSS'in etkisi ile, Ünite-1 yük açısındaki salınımların Ünite-2 yük açısındaki salınımlara göre daha düzgün ve daha hızlı kararlı hale geçtiği görülmektedir.

Her iki şekilde de mavi çerçeve içerisine alınmış ikinci arıza bölümünde yük açıları küçük bir yükselişten sonra düşüşe geçerek sistemin kararlı hale geri gelmesi ile eski seviyelerine ulaştığı görülmüştür. Burda da Ünite-1 yük açısı salınımlarının Ünite-2'e göre daha kararlı olduğu sonucuna varılmıştır.





Şekil 6.14 Ünite-1 generatör yük açısı



Şekil 6.15 Ünite-2 generatör yük açısı

### 6.2.2.5. Rotor Hız Sapmaları

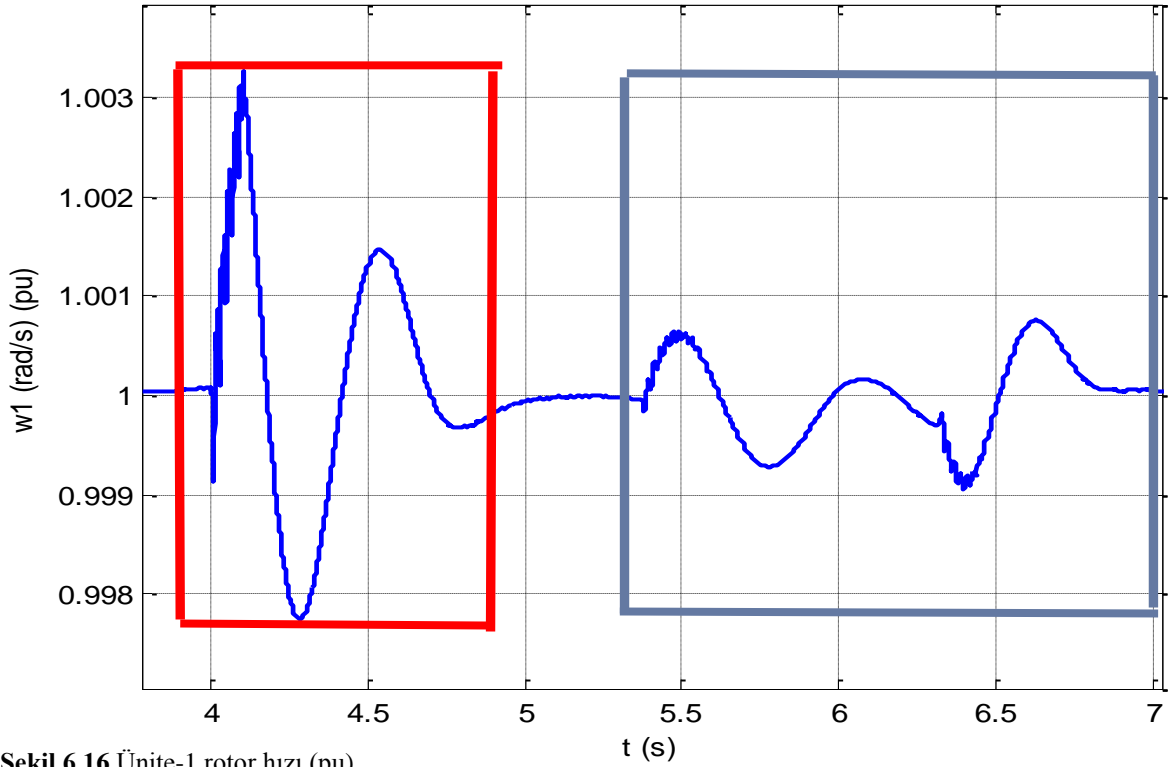
Hidroelektrik santrallerde rotorun dönme momenti, türbinin su basıncından elde ettiği mekanik güçten sağlanmaktadır. Senkron generatörlerin rotor hızı ve rotor kutup sayısı, paralel bağlanacağı şebekenin frekansına göre dizayn edilmektedir. Generatör türbin işletmede yüksüz durumdayken, mekanik tahrik gücü ile hareket ettirilen rotorun dönme momentine karşı, sadece ünite yataklarında ve rotor kütlelerinde dönme ile meydana gelen sürtünmelerin oluşturduğu zıt bir kuvvet ile dönüş yönünün tersi yönünde bir moment oluşmaktadır. Bu nedenle generatör, şebeke ile senkron olmadan önce türbin işletmesinde çalıştırılarak hız regülatöründeki ayar değeri sayesinde şebeke frekansını elde edeceği hıza ulaştırılır. Generatörün şebekeye bağlanması için zorunlu olan senkronizasyon şartları (frekans eşitliği, gerilim seviyesi eşitliği, faz açısı eşitliği, faz sırası eşitliği), rotorun nominal hıza ulaştırılması işleminden sonra ayarlanır.

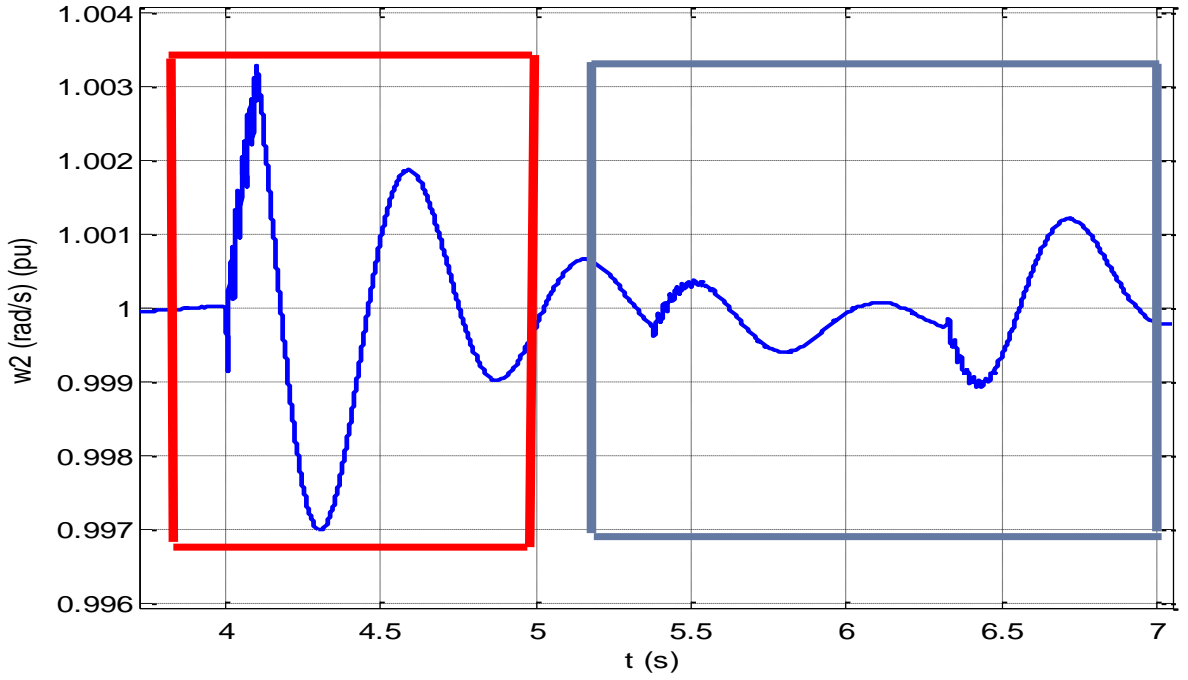
Eğer generatör, türbin işletme modunda çalıştırılıyorsa; sabit dönen rotor sargılarına ikaz akımı uygulandığında, stator sargılarında manyetik alan sayesinde gerilim endüklenir ama şebeke ile senkron olmadığından veya herhangi bir yüke bağlanmadığından rotorun dönme momentine zıt yönde etki eden herhangi bir elektriksel tork meydana gelmez. Eğer generatör, şebekeye senkron işletme modunda çalıştırılıyorsa, rotor alanı stator sargılarında akan yük akımının oluşturduğu döner alan ile aynı hızda fakat biraz ilerisinde dönmektedir. Bu durumun nedeni; rotorun dönmesini sağlayan tahrik gücü sayesinde oluşan elektromekanik momentin, şebeke hızı ile senkron hızda olan stator döner alanının meydana getirdiği elektromanyetik momentin üzerinde olmasıdır. Bu nedenle, statordan şebekeye aktarılan elektrik gücü arttıkça stator alanı rotor alanının gerisinde kalacak ve yük açısı sıfırdan büyük olacaktır.

Şekil 6.16 ve 6.17’de her iki ünitenin rotor hız değişim grafikleri birim değer olarak verilmiştir. Şebekede meydana gelen faz toprak kısa devre arızası ve yük değişimlerinin neden olduğu gerilim ve akım salınımlarında rotor hızında sapmalar meydana gelmiştir. Faz toprak kısa devre arızasında, B fazı üzerinden toprağa aşırı akım akışının meydana gelmesi, her iki ünitenin stator sargılarında da dengesiz yük akımlarının oluşmasına neden olmuştur. Yük akımlarındaki sapmalar şebeke frekansına senkron olan manyetik moment ve elektromanyetik tork arasındaki kenetlenmenin bozulmasına neden olarak rotora frenleyici veya hızlandırıcı etkilerde bulunmuştur. Yük değişimlerinin neden olduğu arıza durumunda stator sargılarında gerilimlerin düşmesi ve akımların yükselmesi rotorun

dönme momentumuna zıt yönde, yani frenleyici bir etkiye bulunarak rotor açısal hızında salınımlar meydana getirmiştir.

Rotor hız deviasyon grafiklerinde kırmızı çerçeve içerisinde alınmış kısım faz toprak kısa devre arızası, mavi çerçeve içerisinde alınmış kısım ise yük değişimlerini göstermektedir. Bu arızalar sırasında her iki grafikte de ünitelerin büyük güçlü şebekeden etkilendiği ama etkilenmelere karşı tepki gösterdiği görülmektedir. Bu tepkile neticesinde geçici rejimlerin sona ermesi ile ünitelerin hızlı bir şekilde kararlı hale geçtiği görülmektedir. Bununla beraber daha öncesinde de yaptığımız açıklamalarda, Ünite-1 ikaz kontrol sisteminde, giriş işareti rotor hız sapması olan multi-band PSS'in aktif durumda olduğu, Ünite-2'de ise d evre dışı olduğu belirtilmişti. Bu duruma istinaden her iki arıza durumunda da Ünite-1 hız sapmalarının Ünite-2 sapmalarına göre daha düzeyli ve daha kontrollü olduğu ve daha hızlı kararlı hale geçtiği görülmektedir.





Şekil 6.17 Ünite-2 rotor hızı (pu)

#### 6.2.2.6. Generatör İkaz Gerilimleri

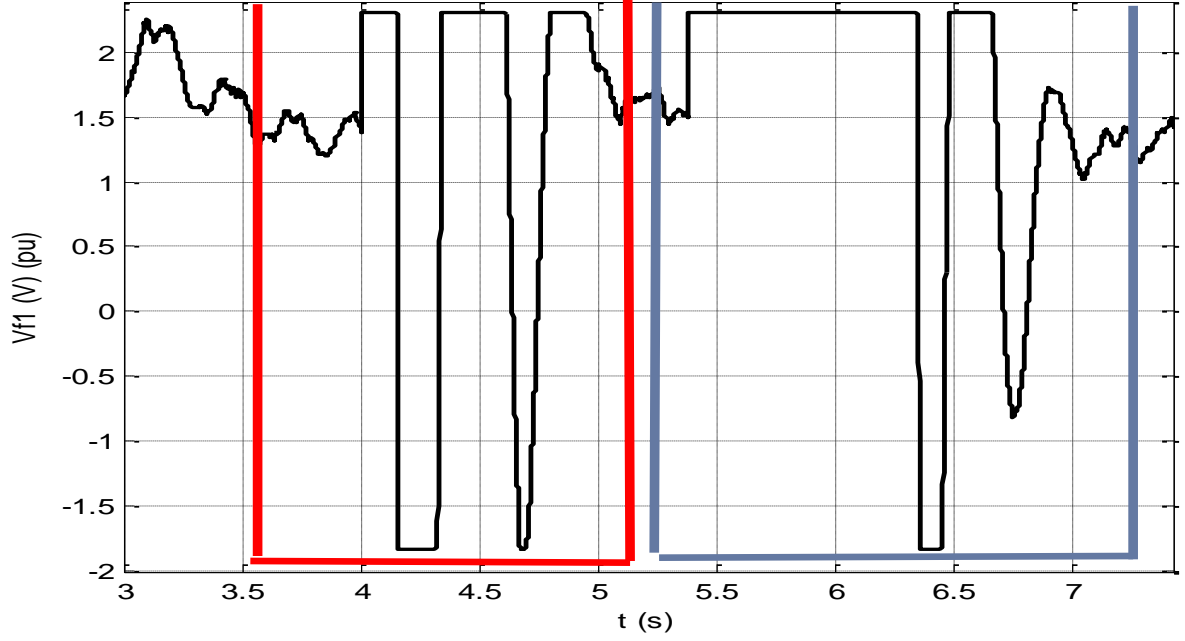
Senkron generatörlerin, türbin milinden elde ettiği mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirebilmesi için hareketli olan rotor alan sargılarının bir doğru akım kaynağından ikazlanması gerekmektedir. Stator sargılarından yük akımının akmasını sağlayan manyetik alan çizgileri ikaz gücü sayesinde oluşur. Bu güç, senkron generatörün yaklaşık % 0,3-0,5'i mertebesindedir. Ana generatör gücü ayar kantları ve ikaz gücüne bağlı olarak artmaktadır. Şayet generatör gücü değiştirilmeden ikaz gücü değiştirilirse bu durumda rotor açısında değişimler meydana gelir. Bunun sonucunda generatör reaktif gücü, düşük ikaz veya aşırı ikazlı duruma göre endüktif veya kapasitif özellik göstermektedir. Dolayısıyla şebekenin endüktif veya kapasitif özellikteki reaktif güç talebi, ikaz gücünün değiştirilmesi ile karşılanmaktadır. Bununla beraber ikaz sisteminin gelişen teknoloji ile güç sistem stabilitesine katkısı artırılmıştır. Bu durum PSS modellerinin geliştirilmesi ile daha da etkili hale gelmiştir. Şebekede meydana gelen geçici rejimler rotorun dönme momentinde kararsızlıklara neden olmaktadır. Daha önceki bölümlerde de, PSS'in giriş işareti olarak rotorun hız değişim bilgisinin kullanıldığı anlatılmış; buna bağlı olarak geçici rejimlerde rotorun dönme momentindeki salınımların, PSS tarafından sönümlendirildiği ve daha hızlı kararlı hale geçmesini sağladığı belirtilmişti.

Şekil 6.18 ve 6.19’da ünitelerin ikaz gerilim grafikleri verilmiştir. Her iki grafikte de, kırmızı çerçeve içerisine alınmış bölümde faz toprak kısa devre arızası, mavi çerçeve içine alınmış bölümde ise şebekede yükünün büyük miktarda değişmesinden kaynaklanan gerilim ve akım salınımlarının ikaz sistemlerinde meydana getirdiği tepkiler görülmektedir. Daha önceki bölümlerde ikaz sistemlerine geniş kapsamda yer verilmiş, generatör çıkış gerilim seviyelerini belirleyen temel unsur olduğu da anlatılmıştı. Her iki grafikte, kısa devre arızası ve yük değişimlerinden kaynaklanan salınımların meydana geldiği zaman aralıklarında ikaz gerilimlerinin tepkileri karşılaştırıldığında;

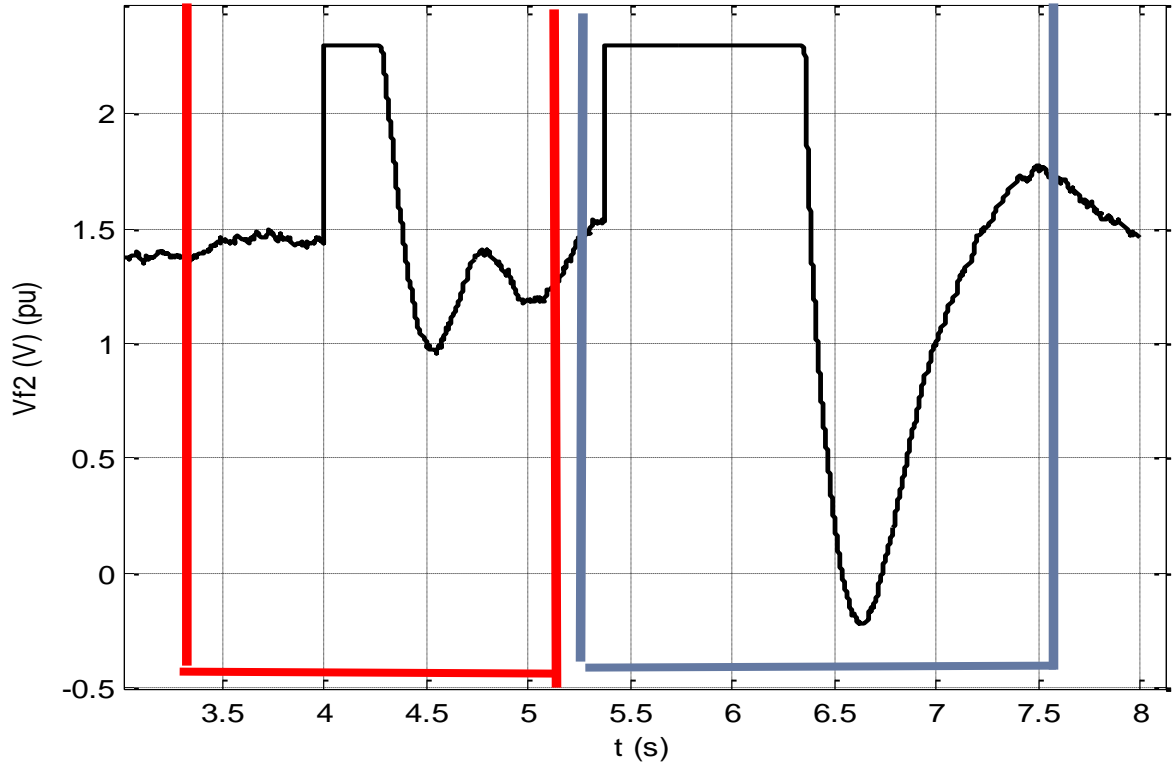
Şekil 6.18’da görüldüğü gibi Ünite-1 ikaz geriliminin, kısa devre arızasının ilk anında küçük bir yükseliş hemen ardından daha büyük bir düşüş ile tepki verdiği görülmektedir. İkaz sisteminde yüksek frekanslı ve büyük genlikli gerilimler ile meydana gelen bu tepkiler kısa bir süre devam ederek kararlı hale ulaşmıştır. Şekil 6.19’da verilen Ünite-2 ikaz geriliminde ise durum biraz farklıdır. Tepkiler Ünite-1’e göre küçük frekanslarda ve sabit yönlerde oluşmuştur. Aslında her iki ünitenin de tepkileri çıkış gerilimini ayar değerine ulaştırma yönünde meydana gelmiştir. Ama bu durumun sadece çıkış geriliminin referans alınması ile yetersiz olduğu, Ünite-2 ikaz sistemindeki tepkilerde görülmektedir. Dolayısıyla bu tür arızalardan direk olarak etkilenen ve bu etkiyi bütün güç bileşenlerine yansıtan rotor hız sapmasının, bir giriş işareti olarak kullanılması, IEEE’nin yaptığı çalışmalardan sonra benimsenmiştir. Ünite-1 ikaz sisteminde kullanılan multi-band güç sistem kararlılaştırıcısının giriş işareti olarak daha önce de belirtildiği gibi rotor hız sapması kullanılmıştır. Kısa devre arızası sırasında rotor hızındaki sapmalarını algılayan PSS, ikaz sisteminde rotor hızının dengelenmesi yönünde ikaz gerilimi arttıran veya azaltan işaretler oluşturarak senkron momentinin dengelenmesinde ve kararlı hale gelmesinde çok etkili olmuştur. Ünite-1 ikaz sisteminde görülen yüksek frekanslı ve büyük genlikli gerilimler bu durum neticesinde meydana gelmiştir.

Şekil 6.18 ve 6.19’da mavi çerçeve içerisine alınmış bölgede Ünite-1 ve Ünite-2 ikaz sistemlerinin, şebekeye bağlı yükün değişmesi durumunda gerilimde meydana gelen salınımlara karşı gösterdiği tepkiler görülmektedir. Bu tepkiler her iki ünite de ilk anda benzer şekilde meydana gelmiş daha sonra ise tekrar yük değişim durumuna bağlı olarak değişmiştir. İlk anda şebeke gerilimi düştüğünden her iki ünitenin ikaz gerilimlerinde de benzer şekilde uzun süreli olarak yükselme meydana gelmiştir. Bu durum rotor hızında büyük sapmalar oluşturmamıştır. Ama ikinci durumda yükün tekrar değişmesi ile PSS,

rotorda hız sapması algılayarak kararlılaştırıcı yönde tepkiler göstermiştir. Sonuç olarak gelişmiş ikaz sistemlerinin ve PSS'in güç sistemi bileşenlerine kararlılaştırıcı yöndeki etkileri yapılan analizlerden anlaşılmaktadır.



Şekil 6.18 Ünite-1 generatör ikaz gerilimi (pu)



Şekil 6.19 Ünite-2 generatör ikaz gerilimi (pu)

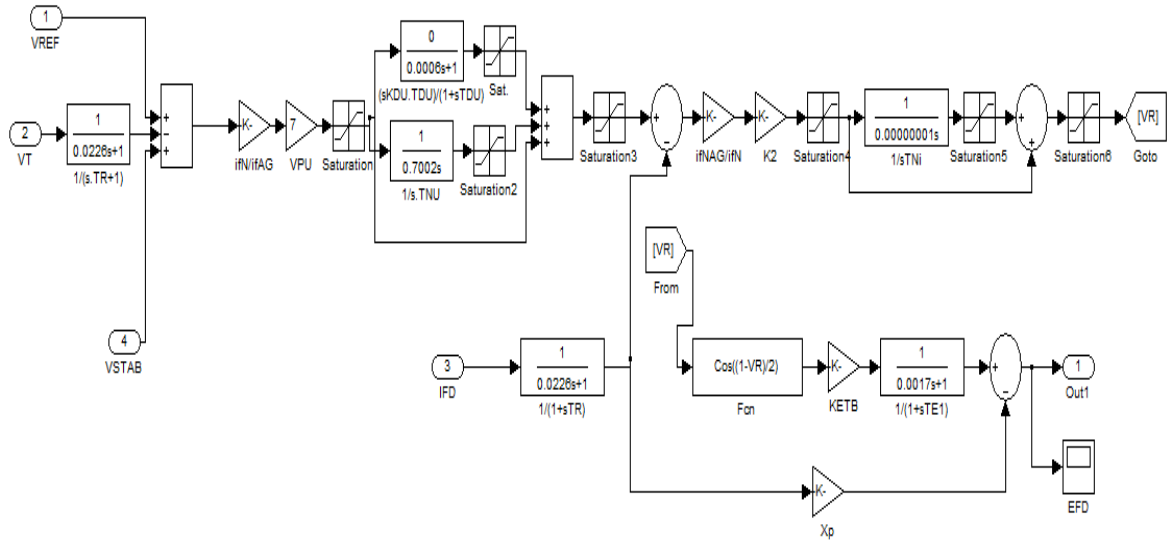
### 6.3. Gerçek Zamanlı Analizler

Bu çalışmada, 154 kV enterkonnekte şebekede 19.03.2013 tarihinde, saat 20:36'da meydana gelen ve yaklaşık 100 ms süren B fazı-toprak kısa devresi ve saat 20:42'de yük değişimlerinden meydana gelen ve yaklaşık 1,5 dakika devam eden gerilim düşümünün sistemde oluşturduğu etkiler ve sisteme bağlı bir hidroelektrik santralde, ünitelerin oluşturduğu tepkiler üzerine çeşitli analizler yapılmıştır.

Analizler, 2011 yılında Siirt ilinde işletmeye alınan Alkumru Hidroelektrik Santralin, benzer özelliklerde ve eş güçlerde olan iki ünitesinde yapılmıştır. Ünitelerin maksimum rezervuar su kotundaki türbin çıkış güçleri 88,59 MW, generatör çıkış güçleri ise 87,09 MW'tır. Türbin tipleri dikey eksenli Francis Türbin olup, generatör tipleri de dikey eksenli senkron generatördür. İkaz sistemleri aynı özellikte ST4B statik ikaz sistem modelidir. Her iki ünitenin ikaz sisteminde de PSS mevcuttur. Analizler sırasında ağırlıklı olarak PSS'in güç sistem kararlılığına etkisi gözlenmiştir. Bu gözlem için, işletmedeki bir generatörün arıza ve anlık gerilim osilasyonları öncesinde 1. ünitenin PSS kontrolü aktifleştirilerek 2. ünitenin PSS kontrolü devre dışı bırakılmıştır. Yapılan incelemeler sürecinde rezervuar su kotunun seviyesi düşük olduğundan, bu seviyedeki nominal türbin ve generatör gücü maksimum su kotundaki nominal değerlerin altındadır. Analizler sırasında, Ünite-1'in generatör çıkışındaki referans güç değeri 66,3 MW, Ünite-2'in ise 67,2 MW olarak ayarlanmıştır. Senkron generatörlerin stator terminallerindeki fazlar arası nominal gerilimleri 13,8 kV'tur. Senkron generatör ikaz sistemi için şekil 6.20'de matlab-simulink modeli gösterilmiş olan ST4B statik ikaz sistemi kullanılmış, beşinci bölümde bu konu ile ilgili detaylı bilgiler verilmiştir.

Şekil 6.20'de verilen ST4B statik ikaz sisteminin matlab-simulink modelinde dört giriş işareti ve bir çıkış işareti mevcuttur. Birinci giriş işareti olan  $V_{ref}$  girişi, operatör tarafından sisteme girilen gerilim ayar değeridir. Regülatör gerilimi, referans değere göre ayarlamaktadır. İkinci giriş değeri  $V_T$ , senkron generatörün terminal (uç) gerilimidir. Regülatör kontrol sisteminin  $V_{ref}$  ayar değeri ile  $V_T$  gerilim giriş bilgileri sayesinde regülatör ikaz çıkışını ayarlayarak referans gerilimine ulaşmaya çalışmaktadır.  $V_{stab}$  işareti güç sistem kararlılaştırıcı (PSS) giriş işaretidir.  $V_{stab}$  işareti geçici bozucu etkilerden kaynaklanan rotor osilasyonlarını önlemek amacı ile kullanılmaktadır.  $T_R$

gerilim transdüser zaman sabitidir.  $I_{N}$  nominal alan akımıdır.  $I_{FAG}$ , nominal gerilim için hava boşluğunda oluşan akımdır.  $V_{PU}$ , gerilim regülatörü oransal kazancı.  $K_{DU}$  türevsel zaman kazancı,  $T_{DU}$  ise türevsel zaman sabitidir.  $T_{NU}$  integral zaman sabitidir.  $T_{NI}$  akım regülatörü integral zaman sabitidir.  $K_{ETB}$  tristör kapı kontrol ve konvertör kazancı.  $T_{E1}$  kapı kontrol ve konvertör zaman sabiti.  $X_p$  güç devresindeki gerilim düşümü sabitidir.  $E_{FD}$  ikaz sistemi çıkış gerilimi yani diğer adıyla alan voltajıdır.  $I_{FD}$  alan akımıdır.



Şekil 6.20 ST4B ikaz sistemi modeli

Alkumru HES ünitelerinin türbin, generatör, ikaz sistemi, şalt sahası gibi ana teçhizatların kontrolü PLC'ler tarafından yapılmaktadır. Ünitelerdeki ana ve yardımcı teçhizatların çok fazla olması ve dağınık yerlerde olması nedeniyle sistem PLC ve skada sistemi sayesinde kolay bir şekilde izlenmekte ve kontrol edilmektedir. Alkumru hidroelektrik santralinde skada kontrol sistemi için Scala 2000 yazılımı kullanılmıştır. Skada sistemi sayesinde bütün ünitelerin kontrolleri yapılabilmekte, sistem uzaktan izlenebilmekte, ölçüm bilgileri analog değer, durum değişiklikleri dijital sinyal olarak okunabilmekte ve hata durumları alarm bilgisi olarak operatöre iletilmektedir. Grafiklere gelen ölçüm bilgileri generatör çıkışında, ikaz sisteminde, veya 154 kV şalt sahasındaki akım ve gerilim trafolarından transdüserlere, oradan da PLC'lere aktarılmaktadır. Bununla beraber hız vb. bilgiler de aynı şekilde PLC'de toplanmaktadır. Tüm PLC'ler birbiri ile LAN haberleşme protokolü üzerinden haberleşmektedir. PLC'lerin kendi arasındaki veri haberleşmeleri, skada sistemini yöneten bir ana bilgisayara da iletilmektedir. Bu



haberleşmeler ve değerlendirme süreleri nedeniyle, sinyallerin skada sistemine yansması bazı zamanlar küçük gecikmelere neden olmaktadır. Bunun sonucunda, milisaniye mertebelerinde okunan bazı sinyallerin gerçek değerden biraz farklı okunabilmesi gibi dezavantajlar ortaya çıkmaktadır.

### **6.3.1. Geçici Rejim Etkilerinin Gerçek Zamanlı Analizleri**

#### **6.3.1.1. 154 kV Şebeke Gerilimi ve 13,8 kV Generatör Çıkış Gerilimleri**

Şekil 6.21 ve 6.22’de sırasıyla 154 kV enterkonnekte şebeke ve 13,8 kV generatör çıkış terminallerinin fazlar arası gerilim grafikleri verilmiştir. Her iki şekilde de kırmızı çerçeve içerisine alınmış bölümde faz toprak kısa devre arızası, mavi çerçeve içerisine alınmış bölümde ise şebeke yükünün değişimi ile oluşan gerilim salınımları görülmektedir. Bu grafikler skada sisteminden alındığı için, AB, BC ve CA fazlar arası gerilimler kurucu firma tarafından sisteme sırasıyla U12, U23 ve U31 fazları olarak tanıtılmıştır. Şekil 6.21’de U12 kırmızı renkli, U23 mavi renkli ve U31 yeşil renkli eğrilerdir. Şekil 6.22’de ise üst kısımdaki eğriler Ünite-1, alt kısımda kalınlaştırılmış eğriler Ünite-2’ye ait gerilimleri göstermektedir. Ünite-1’de U12 kırmızı renkli, U23 mavi renkli, U31’de yeşil renklidir. Ünite-2’de ise U12 magenta, U23 cyan ve U31 sarı renkli eğrilerdir.

Grafiklerdeki eğriler incelendiğinde, kırmızı çerçeve içerisine alınmış bölümde Saat 20:36’da faz toprak kısa devre arızasının şebeke ve generatör gerilimlerinde oluşturduğu etkiler görülmektedir. Kısa devre arızası B fazında gerçekleştiği için B fazı ile toprak arasındaki potansiyel fark arıza anında sıfıra yaklaşarak, U12 ve U23 fazlar arası gerilimler anlık ve kısa süreli olarak nominal seviyenin altına hızlı bir düşüşe geçmiş ardından tekrar yükselmiştir. Generatörlerin çıkış gerilim eğrileri karşılaştırıldığında Ünite-1’in Ünite-2’ye göre daha az etkilendiği ve kararlı hale hızlı bir şekilde geçtiği görülmüştür. Bu durumun nedeni, arıza sırasında Ünite-1 güç sistem kararlılaştırıcısı aktifken, Ünite-2’de devre dışı olmasıdır. Saat 20:42’de şebeke yükünde meydana gelen büyük değişim nedeni ile şebekede ve buna bağlı olarak şebeke ile senkron çalışan generatör gerilimlerinde oluşan salınımlar şekil 6.21 ve 6.22’de mavi çerçeve içerisine alınmış bölümlerde görülmektedir. Şebeke yükünün değişimi sırasında her iki grafikte de fazlar arası gerilimler paralel bir şekilde düşerek yaklaşık 100 saniyenin ardından tekrar yükselişe geçmiştir. Ünitelerdeki ikaz sistemlerinin tepkileri sayesinde şebeke gerilimi sistem çökmeden istikrarlı hale

gelmiştir. Şebekeki bu olayda da PSS’i devrede olmadığından Ünite-2’in daha fazla etkilenip daha geç kararlı hale geldiği görülmüştür. Bu durum gelişmiş ikaz sistemlerinin ve bilhassa PSS’in gerilimdeki kararlılık için gerçekten etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.21 Enterkonnekte şebeke fazlar arası gerilimleri

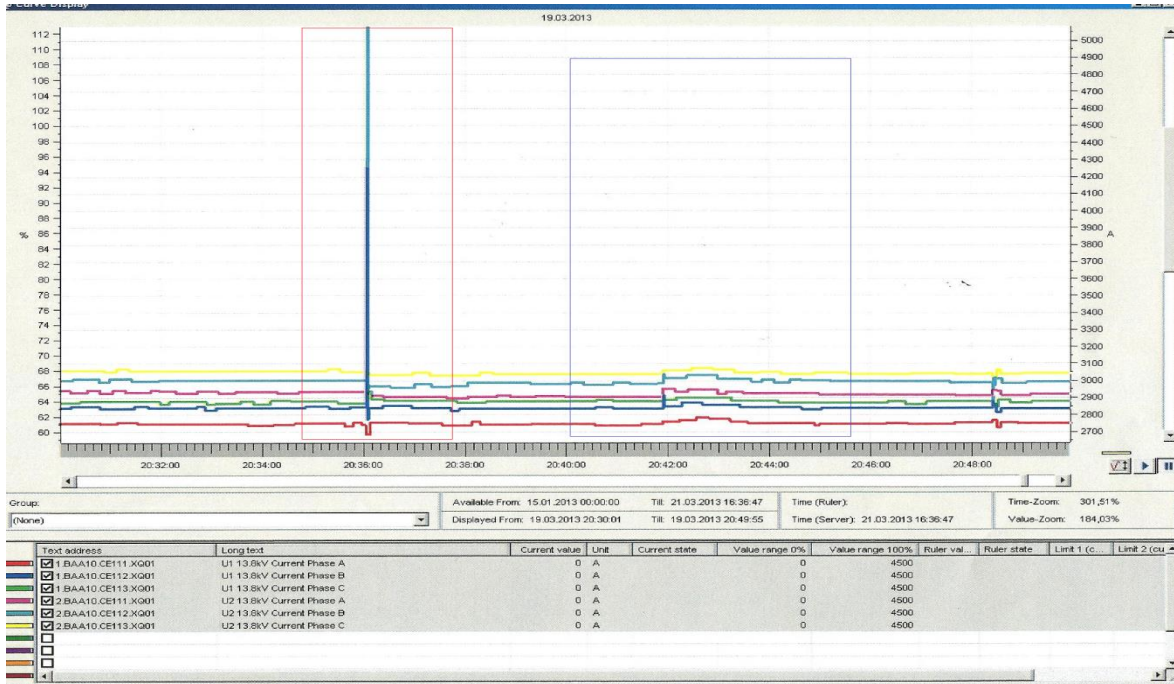


Şekil 6.22 Ünite-1 ve Ünite-2 13,8 kV generatör çıkış barası fazlar arası gerilimleri

### 6.3.1.2. Generatör Çıkış Akımları

Şekil 6.23 Ünite-1 ve Ünite-2 generatör çıkış akımlarını içermektedir. Grafikteki akım eğrilerinin renkleri, Ünite-1 için, A fazı kırmızı, B fazı mavi ve C fazı yeşil renkli eğriler, Ünite-2 için ise A fazı magenta, B fazı cyan ve C fazı sarı renkli olarak görülen eğrilerdir. Kırmızı çerçeve içerisine alınmış bölgede Saat 20:36'da meydana gelen faz toprak kısa devre arızası görülmektedir. Bu arıza B fazında gerçekleştiği için faz akımında, Ünite-1'de nominal akımın yaklaşık beş katı, Ünite-2'de ise yaklaşık yedi katı büyüklüğünde birer darbe akımı olduğu görülmüştür. Yaklaşık 100 ms kadar süren arıza sonunda faz toprak arası tekrar izole hale gelmiştir. Kısa devre arızasının Ünite-1'de oluşturduğu etkinin Ünite-2'e göre daha az olduğu bu analiz sonucunda da görülmüştür.

Kısa devre arızasının ardından, Şekil 6.23'te mavi çerçeve içerisine alınmış bölümde görüldüğü gibi, Saat 20:42'de şebekeye bağlı yükün üç fazda da aniden eşit oranlarda artması ile şebekeye senkron olan sabit güçteki generatörlerin faz akımlarında dengeli bir artış meydana gelmiştir. Generatör çıkış akımları yaklaşık bir dakikalık bir yüselişin ardından tekrar azalarak kararlı hal devam etmiştir. Burda da PSS'in etkisi ile Ünite-1 generatör çıkış akımlarının Ünite-2 generatör çıkış akımlarına göre daha az etkilendiği ve daha hızlı kararlı hale geçtiği görülmüştür.



Şekil 6.23 Ünite-1 ve Ünite-2 generatör çıkış akımları

### 6.3.1.3. Generatör Aktif ve Reaktif Güçleri

Şekil 6.6’da Ünite-1 ve Ünite-2’nin generatör çıkışındaki aktif ve reaktif güç eğrilerini içeren grafik verilmiştir. Ünite-1’in aktif gücü kırmızı, reaktif gücü ise mavi renkli eğriler, Ünite-2’nin ise aktif gücü yeşil, reaktif gücü magenta renkli eğriler ile gösterilmiştir. Saat 20:36’da meydana gelen kısa devre arızası kırmızı çerçeve içerisine alınmış, Saat 20:42’de meydana gelen yük değişimi ise mavi çerçeve içerisine alınmıştır.

Şekil 6.24’te kırmızı çerçeve içerisine alınmış bölümde görüldüğü gibi her iki generatöre ait aktif güçler, akım darbesinin yükselişine paralel yükselerek 100 ms sonra tekrar düşmüştür. Bu sırada ikaz gerilimlerinde generatör çıkış gerilimlerini dengeleyici yönde tepkiler meydana gelerek reaktif güçlerde de salınımlar oluşmasına neden olmuştur. Generatör uç gerilimlerindeki salınımların azaltılması ile aktif güç daha az etkilenmiştir. Her iki ünite de aktif gücü kararlılaştırıcı yönde tepkiler olmasına rağmen Ünite-1’de PSS’in etkisi ile farklılıklar görülmüştür. Bu farklılıklar, rotor hız sapmalarının PSS’in giriş bilgisi olarak kullanılması ile sağlanarak aktif güç salınıminin minimum seviyelere inmesine neden olmuştur.



Şekil 6.24 Ünite-1 ve Ünite-2 generatör aktif ve reaktif güçleri

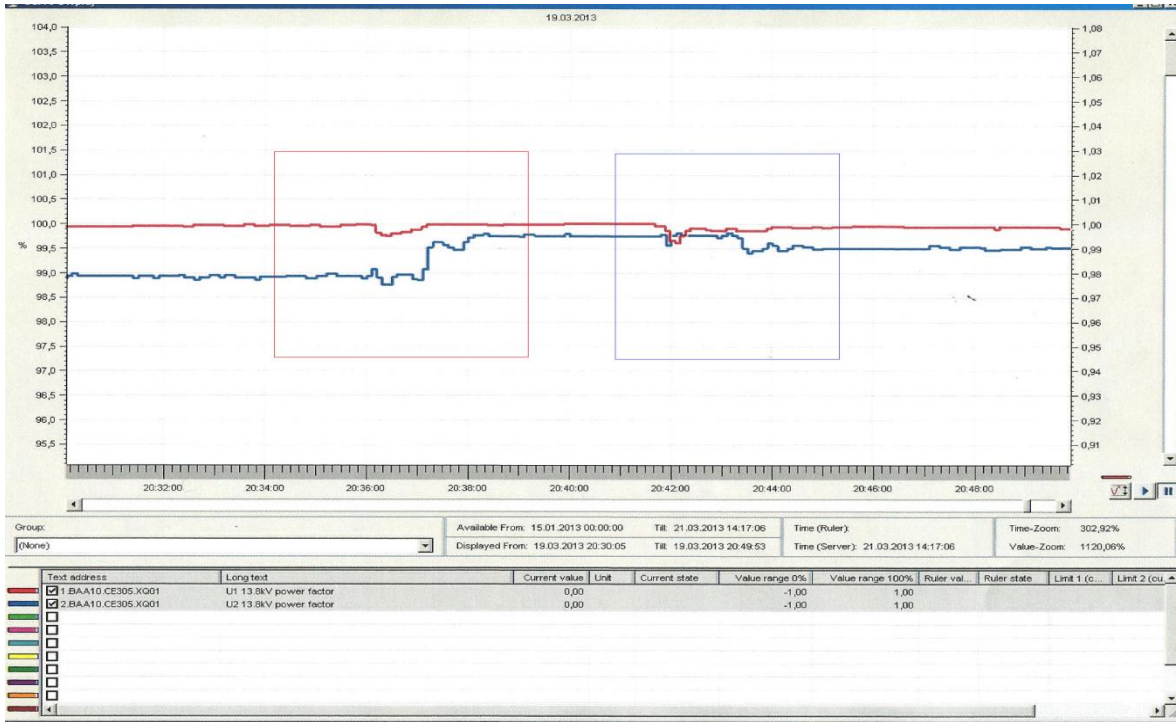
Şekil 6.24'te mavi çerçeve içerisine alınmış bölümde Saat 20:42'de şebeke yükünün büyük miktarda değişmesi ile aktif ve reaktif güçlerde oluşan salınımlar görülmektedir. Yük değişimi anında akım talebinin artması ile gerilimde azalma meydana gelerek aktif güçte küçük bir darbe oluşmasına neden olmuştur. Akım ve gerilimdeki sapmalar rotor açısında da küçük miktarlarda sapmalara neden olarak reaktif güçlerde salınımlar oluşturmuştur. Aslında reaktif güçteki bu salınımlar generatör çıkış gerilimlerinin sabitlenmesi için uygulanan değişik ikaz gerilimleri sonucunda olduğundan gerilimi düzenleyici yönde davranmıştır. Netice itibariyle, Ünite-1'de PSS'in aktif olması ile arızaların aktif güçte meydana getirdiği darbelerin aza indirgenerek sönmüldüğü, reaktif güç değişimindeki geçişlerin daha yumuşak ve daha düzgün olduğu görülmüştür.

#### **6.3.1.4. Generatör Güç Faktörleri**

Şekil 6.25'de Ünite-1 ve Ünite-2'nin generatör güç faktörlerine ait grafik verilmiştir. Ünite-1'in güç faktörü kırmızı renkli eğri, Ünite-2'nin ise mavi renkli eğridir. Grafikte, kırmızı çerçeve içerisine alınmış bölüm kısa devre arıza anında, mavi çerçeve içerisine alınmış bölüm ise aşırı yük değişim anındaki güç faktörü değişimlerini içermektedir. Güç faktörü yük açısının cosinüsü olduğundan yük açısının artmasına karşın azalmaktadır. Güç faktörü tamamen rezistif yüklerde "1" iken tamamen reaktif yüklerde "0" olur. Reaktif güç devre üzerindeki reaktanslardan meydana gelmektedir. Bu durumda bir enterkonnekte şebekede, senkron generatörler, transformatör, iletim hatları ve şebekeye bağlı yük reaktansları nedeniyle reaktif gücün oluşması dolayısıyla güç faktörünün sıfırdan farklı olması kaçınılmazdır.

Kısa devre arızası ve yük değişim arızası sırasında rotor hızında sapmaların oluşması ile güç faktöründe de sapmalar meydana gelmiştir. Ünite-1 ikaz sisteminde PSS devrede olduğundan güç faktörlerindeki sapmalar Ünite-2'e göre hem daha hem de daha kararlı olmuştur. Bunun nedeni daha önce de simülasyon analizlerinde açıklandığı gibi ikaz sistemindeki PSS kontrolün rotor hız sapmalarını sönmüldürücü yönde tepkiler oluşturmasıdır. Sonuç olarak bu analizde de ikaz sisteminin kararlılık yönündeki etkisi görülmektedir.





Şekil 6.25 Ünite-1 ve Ünite-2 generatör güç faktörleri

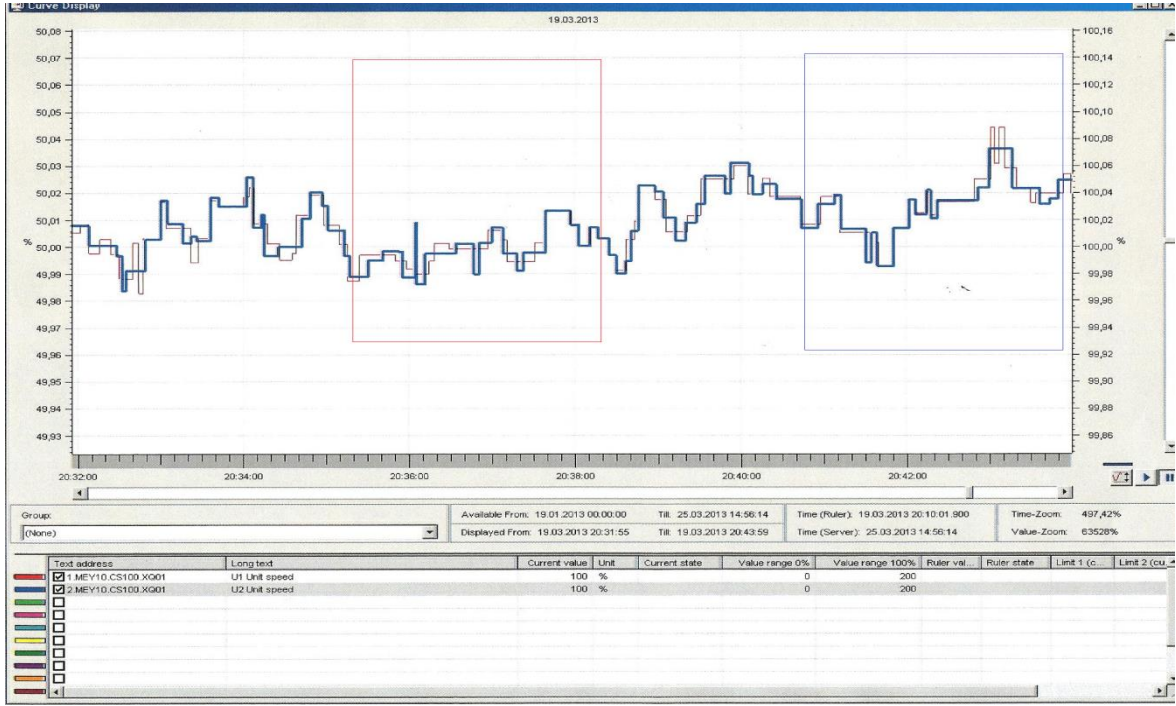
### 6.3.1.5. Rotor Hız Sapmaları

Senkron makinaların en önemli özelliklerinden biri de, senkron hızın döner manyetik alan hızı ile eşit hızda olmasıdır. Rotorun bir dakikadaki devir sayısının ayarlanması ile istenilen frekans elde edilir. Hidroelektrik santrallerde rotor devir hızı ayar kanatları ile ayarlanır. Ayar kanatlarının kontrolü, hidrolik hız regülatörü ile sağlanır. Bütün bu kontroller genellikle bir PLC tarafından PID kontrol mantığı ile yapılmaktadır. Bu kontrol ünitesine dijital hız regülatörü de denir. Senkron hızın şebeke frekansı ile ilişkisi 6.2 denkleminde verilmiştir. Dolayısıyla, şebeke ile senkron durumda olan bir generatörün rotor hızı şebeke frekansının değişmesi ile değişmektedir.

Şekil 6.8’de Ünite-1 ve Ünite-2 rotor hız eğrileri verilmiştir. Ünite-1 rotor hız eğrisi kırmızı renkli, Ünite-2 rotor hız eğrisi de mavi renkli çizgilerdir. Kırmızı çerçeve içerisine alınmış bölümde kısa devre arızası, mavi çerçeve içerisine alınmış bölümde ise yük değişim arızaları görülmektedir. Her iki arıza durumunda da Ünite-1’in daha az etkilendiği ve daha hızlı kararlı hale geçtiği görülmektedir. Bunun nedeni, her analizde yer verildiği gibi Ünite-1’de PSS’in aktif durumda Ünite-2’de ise devre dışı olmasıdır. İkaz sisteminde güç sistem kararlılaştırıcının giriş işaretlerinden biride rotor hız sapmasıdır. İkaz sistemindeki PSS’in aktif olması ile rotor hızının artması veya azalmasına karşı ikaz

geriliminin artırılıp azaltılması sağlanmıştır. Bu durum sonucunda oluşan rotor hız salınımlarına tampon vazifesi göstererek sönümlendirmeye çalışmıştır.

Sonuç olarak ikaz sisteminin şebeke kararlılığı üzerindeki etkileri sayesinde hepimiz için daha güvenli, sürekliliği daha fazla olan ve daha verimli güç şebekeleri sağlamaktadır.



Şekil 6.26 Ünite-1 ve Ünite-2 rotor hızları

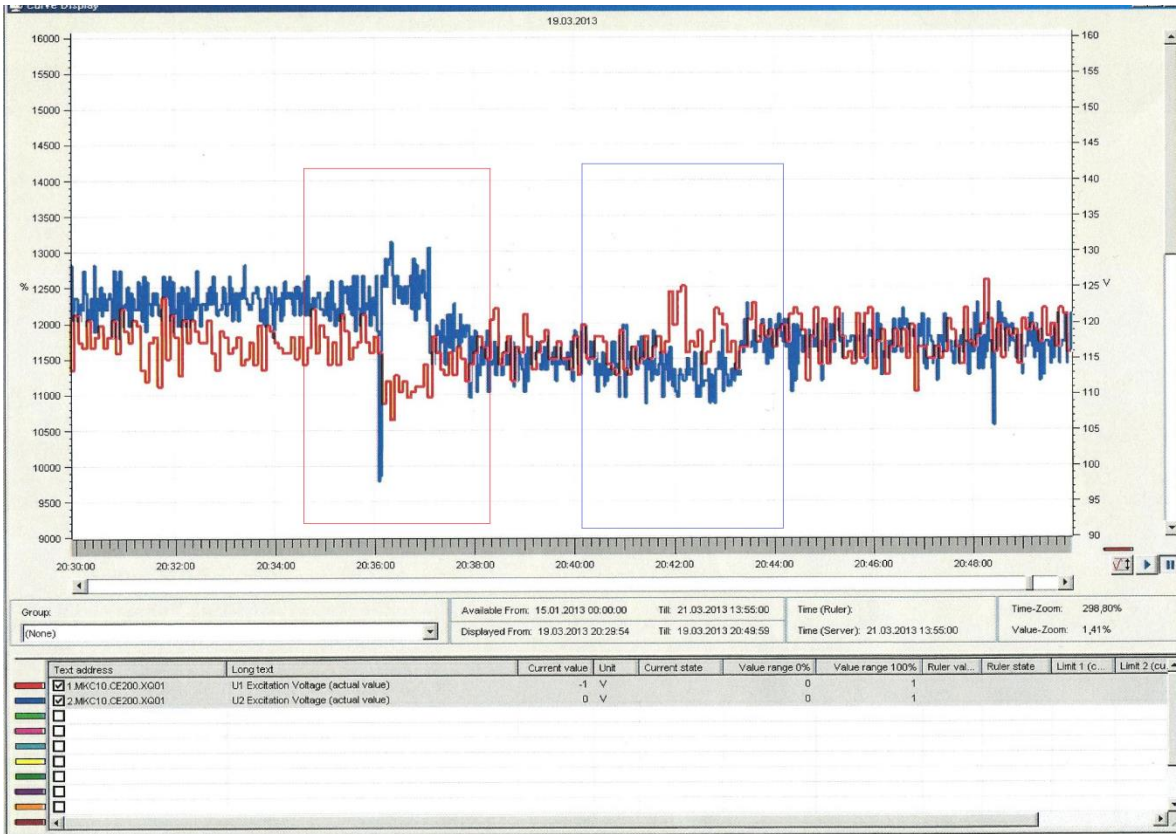
### 6.3.1.6. Generatör İkaz Gerilimleri

Şekil 6.27'de Ünite-1 ve Ünite-2 generatör ikaz gerilimleri verilmiştir. Kırmızı renkli eğri Ünite-1, mavi renkli eğri ise Ünite-2'nin ikaz gerilimleridir. Kırmızı çerçeve içerisine alınmış bölümde faz toprak kısa devre arızası, mavi çerçeve içerisine alınmış bölümde ise yük değişiminden kaynaklanan salınımların ikaz sisteminde oluşturduğu tepkiler görülmektedir. İkaz sistemindeki PID kontrolü sayesinde generatör çıkış geriliminin, operatör tarafından ayarlanan değerde sabit tutulduğu daha önceki bölümlerde anlatılmıştı. Dolayısıyla şebeke geriliminin düşmesi veya yükselmesi durumlarında ikaz kontrol sisteminin sınırlayıcı fonksiyonları sayesinde, ikaz geriliminde kararlılaştırıcı yönde tepkiler oluşturularak generatör çıkış gerilimi sabitlenmiş olur.

Enterkonnekte şebekede meydana gelen kısa devre arızası ve daha sonra gerçekleşen yük değişimi arızaları sırasında şebeke geriliminde oluşan salınımlar şebeke ile senkron

olan generatör çıkış gerilimlerine de aynı şekilde yansiyarak osilasyonlara neden olmuştur. Bu etki ile her iki ünite ikaz gerilimlerinde de generatör çıkış gerilimini referans değerinde sabitlemeye çalışan tepkiler meydana gelmiştir. Buna ilaveten, Ünite-1’de aktif durumda, Ünite-2’de ise devre dışı olan PSS’in etkileri de şekil 6.27’de görülmektedir. Arıza durumlarında statordan akan aşırı akım, rotora frenleyici etkide bulunarak şekil 6.26’da görüldüğü gibi hız sapmalarına neden olmuştur. Hız sapmasını algılayan PSS ikaz kontrol sisteminde, sapmalara göre işaret oluşturarak salınımları azaltıcı yönde tepkiler oluşturmuştur.

Sonuç olarak, gerçek zamanlı ve simülasyon analizleri karşılaştırıldığında, gelişmiş ikaz sistemlerinin şebekede kararsızlığa neden olabilecek herhangi bir arıza durumunda bütün güç bileşenlerine kararlı yönde etki gösterdiği tespit edilmiştir. Bununla beraber yapılan tüm analizlerde PSS kontrolü olan bir ikaz sisteminin, şebeke kararlılığında çok daha fazla etkili olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 6.27 Ünite-1 ve Ünite-2 generatör ikaz gerilimleri



## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışma, AVR kontrolörlü yarı iletken teknolojisi ile geliştirilmiş senkron generatör ikaz sistemlerinin PSS'in de kullanılması ile enterkonnekte sistemdeki geçici rejimlerde kararlılığın ve sürekliliğin sağlanması açısından ne derecede etkili olduğunu tespit etmek amacı ile yapılmıştır. Tez çalışmasının uygulama safhası, bir hidroelektrik santralinin iki ünitesinin Matlab/Simulink programında tasarlanmış benzetim modelinde yapılmıştır. Simülasyon sonuçları gerçek zamanlı benzer arızaların analiz sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, enterkonnekte şebekede aynı saat içerisinde meydana gelmiş gerçek zamanlı faz toprak arızası ve yük değişimleri simüle edilmiştir. Arıza sonucunda oluşan geçici rejimlerin hidroelektrik santralin ünitelerinde meydana getirdiği etkiler ve senkron generatör ikaz sistemlerinin kararlılık yönündeki tepkileri incelenmiştir. Benzetim modeli tasarlanırken, hidroelektrik santral teçhizatları ile aynı parametreler kullanılmıştır. Arıza öncesinde Ünite-1 ikaz sistemi PSS ile desteklenmiş, Ünite-2'de ise desteklenmemiştir. Bu uygulama sayesinde PSS'in de şebeke kararlılığındaki iyileştirici etkileri gözlemlenmiştir. Aynı uygulama gerçek zamanlı arızalarda da yapılmıştır. Enterkonnekte sistemde meydana gelen gerçek zamanlı faz toprak kısa devre arızası ve yük değişimlerinde elde edilen analiz sonuçları ve simülasyon analiz sonuçları;

1. Geçici rejimler sırasında 154 kV şebeke gerilimleri ve 13,8 kV generatör uç gerilimlerinde meydana gelen değişimlerin simülasyon ve gerçek zamanlı deneysel sonuçları karşılaştırıldığında, geliştirilmiş ikaz sistemleri sayesinde arıza sonrası şebeke gerilimlerinin daha hızlı bir şekilde kararlı duruma geldiği görüldü,
2. Generatör çıkış akımlarının simülasyon ve gerçek zamanlı deneysel sonuçları karşılaştırıldığında geliştirilmiş ikaz sistemleri sayesinde aşırı akımın çok fazla yükselmediği ve akımın daha hızlı bir sürede kararlı hale geldiği tespit edildi,
3. Simülasyon ve gerçek zamanlı deneysel çalışmalar sonucunda generatör aktif ve reaktif güçlerinin geliştirilmiş ikaz sistemleri sayesinde daha az salınım ve daha hızlı bir sürede kararlı hale geldiği belirlendi,
4. Simülasyon ve gerçek zamanlı deneysel çalışmalar sonucunda güç faktörlerinde ve yük açılarında, geliştirilmiş ikaz sistemleri sayesinde sisteme kararlılaştırıcı yönde etkiler gösterdiği görüldü,

5. Simülasyon ve gerçek zamanlı deneysel çalışmalar sonucunda rotor hız değişimlerinin PSS destekli geliştirilmiş ikaz sistemleri sayesinde daha hızlı kararlı hale geçtiği görüldü,
6. Simülasyon ve gerçek zamanlı deneysel çalışmalar sonucunda geliştirilmiş ikaz sistemleri sayesinde ikaz gerilimlerinin geçici rejim sonucunda güç bileşenlerinde veya rotor hız değişimlerinde oluşan salınımlara göre değiştiği ve güç bileşenlerine kararlılaştırıcı yönde etki ettiği tespit edildi,

Sonuç olarak; enterkonnekte sistemin kararlılığını ve sürekliliğini sağlaması açısından senkron generatörlerde PSS destekli AVR kontrolörlü yarı iletken teknolojisi ile geliştirilmiş ikaz sistemlerinin kullanılması tavsiye edilir.

## KAYNAKLAR

- ABB Switzerland Ltd.**, 2005. "Excitation basic theory seminar", ABB Turgi Switzerland.
- Akkaya, Y., Gök. A.**, 2013. "Güç Kalitesi Milli Projesi".  
[http://www.dektmk.org.tr/pdf/enerji\\_kongresi\\_11/115%20.pdf](http://www.dektmk.org.tr/pdf/enerji_kongresi_11/115%20.pdf) , 10 Ocak 2013.
- Andritz Hydro**, 2010. "Installation, Operation & Maintenance Manuel – Excitation System Of Alkumru", Project num. : H110.080084, Document num. : ALK08-GEN-9318.
- Arda, S.**, 2006. "Senkron Generatörlerin Uyarım Sistenlerinin Yarı İletkenli Devrelerle Denetimi", Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Baldwin, M .S. and Mc Fadden, D.P.**, 1981. "Power Systems Performance as Affected By Turbine-Generator Controls Response during Frequency Disturbances," IEEE Trans., 100, 2486-2494.
- Beagles, P.H ., Carlsen K., Crenshaw, M.L. and Temoshok, M.**, 1976. "Generator and Power System Performance with the GENERREX Excitation System", IEEE Trans., 95, 489-493.
- Bishop, J.S., Miller, D.H., and Shartrand, A.C.**, 1974. "Experience with ALTERREX Excitation for Large Turbine-Generators," Paper presented at the Joint IEEE/ASME Power Conference, Miami Beach.
- Boduroğlu, T.**, 1988. "Elektrik Makinaları Dersleri", Üçüncü Baskı, Beta Basım Yayın Dağıtım A.Ş., 4-41.
- Carleton, J.T., Bobo, P.O., and Burt, D.A.**, 1954. "Minimum Excitation Limit for Magnetic Amplifier Regulating System," AIEE Trans., 73, 869-874.
- Committee of the Canadian Electrical Association**, 1982. "Guide to the Characteristics, Performance and Hardware Requirements in the Specification of Excitation Systems Report of the Governor and Excitation Control System".
- Çolak, İ.**, 2003. "Senkron Makinalar", Birinci Baskı, Seçkin Yayıncılık, 18-119.
- Dillman, T.L., Skooglund J.W., K eay F.W., South W.H. and Raczkowski C.**, 1971 "A High Initial Response Brushless Excitation System," IEEE Trans., 90, 2089-2094.

- East Pittsburgh, Pa.**, 1964. "Westinghouse Electric Corporation, Electric Transmission and Distribution Reference Book".
- Edison Teach Center**, 2012. "AC Power Development Time Line and Early AC Power".  
<http://www.edisontechcenter.org/resources.html>, 15 Aralık 2012.
- Ferguson, R.W., Herbst, H. and Miller, R.W.**, 1957. "Analytical Studies of the Brushless Excitation System," AIEE Trans., Part III, 961-970.
- Fitzgerald, A.E. and Kingsley, C.**, 1961. "Electric Machinery, Second Edition", Mc Graw Hill.
- Freris L.L.**, 1966. "Analysis of a Hybrid Bridge Rectifier," Direct Current, 22-23.
- General Electric Instructions GEK -15014C**, "Inverse Time Maximum Excitation Limit".
- Gerlitz, R.K., Gorman, R.E., and Temoshok, M.**, 1975. "The GENERREX Excitation System for Large Steam Turbine-Generators," Paper GE 3-3003, Pacific Coast Electric Association Engineering and Operation Conference, Culver City, Calif.  
<http://bib.irb.hr/datoteka/475822>. Final\_paper\_-\_SiP2010\_Jerkovic.pdf, 2013.
- IEEE Committee Report**, 1968. "Computer Representation of Excitation Systems," IEEE Trans., 87, 1460-1464.
- IEEE Committee Report**, 1969. "Proposed Excitation System Definitions for Synchronous Machines," IEEE Trans., 88, 1248-1258,.
- IEEE Committee Report**, 1973. "Excitation System Dynamic Characteristics," IEEE Trans., 92, 64-75.
- IEEE Committee Report**, 1981. "Excitation System Models for Power System Stability Studies," IEEE Trans. 100, 494-509.
- IEEE Power Engineering Society**, 2005. "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability studies," IEE Std. 421-5.
- IEEE Report**, 1995. "Specification and characteristics of synchronous generator Exciters", IEEE Technical Report No:536121.
- IEEE Standard**, 1978. "IEEE Guide for Identification, Testing and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems", IEEE Standard 421.2-1990 (revision to IEEE Standard 421A -1978).
- IEEE Standard**, 1983. "Test Procedures for Synchronous Machines", IEEE Standard 115.

- IEEE Standard**, 1986. "Definitions for Excitation IEEE Systems for Synchronous Machines", Standard 421.1.
- IEEE Standard**, 1987. "IEEE Guide for the Preparation of Excitation System Specifications", IEEE Standard 421.4.
- IEEE Standard**, 1988. "Dictionary of Electrical and Electronics Terms (ANSI)", IEEE Standard 100.
- IEEE Task Force**, 1986. "Conventions for Block Diagram Representations," IEEE Trans., PWRS-1, 3, 95-100.
- IEEE Tutorial Course Text**, 1981. "Power System Stabilization via Excitation Control Chapter IV: Field Testing Techniques," Publication 81 EHO 175-0 PWR.
- Kerszenbaum, I.**, 1996. "Inspection of Large Synchronous Machines Checklists, Failure Identification, and Troubleshooting" Department of Electrical Engineering California State University, Long Beach, IEEE Press Power Systems Engineering Series.
- Kimbark, E.W.**, 1956. "PowerSystem stability, Vol.III: Synchronous Machines", John Wiley & Sons.
- Körpınar, A.**, 2008. "Türkiye Elektrik Sistemi", 8. İletim Tesis ve İşletme Grup Müdürlüğü, Ankara.
- Kundur, P. and Dandeno, P.L.**, 1983. "Implementation of Synchronous Machine Models into Power System Stability Programs," IEEE Trans., 102, 2047-2054.
- Kundur, P. and Rogers, G.J.**, 1997. "Discussion of reference by D.C. Lee, R.E. Beaulieu".
- Kundur, P.**, 1994. 'Power system stability and control', Mc Graw -Hill, New York.
- Kundur, P., Klein, M., Rogers, G.J. and Zywno, M.S.**, 1989. "Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability," IEEE Trans., PWRS-4, No. 2, 614-626.
- Lee, D.C. and Kundur, P.**, 1986. "Advanced Excitation Controls for Power System Stability Enhancement," CIGRE, 38-01, Paris, France.
- Margetta, R.D.**, 1986. "Static exciter system for large turbo-generators", South of Scotland Electricity Board, UK.
- MEB.**, 2011. "Elektrik-Elektronik Teknolojisi Enerji Üretimi", 522EE0124 Ankara.
- Mergen, A.F., ve Zorlu, S.**, 2005. "Elektrik Makineleri III Senkron Makineler", BirsenYayınevi.

- Nagy, I.**, 1970. "Analysis of Minimum Excitation Limits of Synchronous Machines," IEEE Trans., 89, 6, 1001-1008.
- Peneder, F. and Bertschi, R.**, 1985. "Static Excitation Systems with and without a Compounding Ancillary," Brown Boveri Review, 7-85, 343-348.
- Ribeiro, J.R.**, 1991. "Minimum Excitation Limiter Effects on Generator Response to System Disturbances," IEEE Trans. on Energy Conversion, 1, 29-38.
- Rubenstein, A.S. and Temoshok, M.**, 1954. "Underexcited Reactive Ampere Limit for Modern Amplidyne Voltage Regulator," AIEE Trans., 73, 1433-1438.
- Rubenstein, A.S. and Walkley, W.W.**, 1957. "Control of Reactive kVA with Modern Amplidyne Voltage Regulators," AIEE Trans., Part III, pp. 961-970.
- Rustebakke, H.M.**, 1983. "Electric Utility Systems and Practices", John Wiley & Sons.
- Şerifoğlu, N.**, 2007. "Elektrik makinaları Cilt II (Senkron makinalar ve doğru akım makinaları)", Birinci Baskı Nobel Yayın Dağıtım Ltd.Şti., 1193.
- Vedrana, J., Kresimir, M. and Zeljko, S.**, 2013. "Excitation System Models of Synchronous Generator",
- Witzke, R.L., Kresser, J.V. and Dillard, J.K.**, 1953. "Influence of AC Reactance On Voltage Regulation of 6-Phase Rectifiers," AIEE Trans., 72, 244-253.

## ÖZGEÇMİŞ

**Ferit TUFAN**

[tufanferit@hotmail.com](mailto:tufanferit@hotmail.com)

1979'de Batman'ın Kozluk ilçesinde doğdu. İlk ve orta eğitimini Batman'da, lise eğitimini ise Kozlukta tamamladı. 2000-2002 yılları arasında Ankara Üniversitesinde iki yıllık Endüstriyel Elektronik Bölümünde ön lisans eğitimi aldı. 2002-2006 yılları arasında dikey geçiş sınavı ile burslu olarak yerleştiği G.AÜ. Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünden lisans eğitimini yine burslu olarak tamamladı. 2006-2007 yılları arasında bir otelin teknik bakım sorumlusu olarak çalıştı. 2007-2008 yılları arasında askerlik görevini matematik öğretmeni olarak ifa etti. 2008-2010 yılları arasında Batman, Mardin ve Siirt illerinde TEDAŞ altyapısının geliştirilerek güncellenmesi ve yapılan güncellemelerin otomasyon sistemine tanımlanması için yapılan şehir şebekelerinin numaralandırması işlerinin başında yer aldı. 2010 yılında Limak Enerji A.Ş.'de işe başlayarak, Tuncelide Limak-Void/Siemens konsorsiyumunda yapılan Uzunçayır barajının devreye alma aşamasında yer aldı. Tunceli üniversitesinde henüz devam ettiği yüksek lisans eğitimine başladı. Uzunçayır HES devreye alındıktan sonra Siirt ilinde bulunan, Limak-Andritz konsorsiyumunda yapılan 270 MVA kurulu gücündeki Alkumru Hidroelektrik Santralinin kurulum aşamasında yer aldı. Halen Alkumru HES işletmesinde çalışmakta olup; Evli ve iki çocuk babasıdır.