



**HİDROELEKTRİK SANTRALLERDE KULLANILAN SENKRON
GENERATÖRLER İÇİN STATİK UYARTIM SİSTEMİ TASARIMI VE
UYGULAMASI**

Mustafa ERSAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2017

Mustafa ERSAN tarafından hazırlanan “HİDROELEKTRİK SANTRALLERDE KULLANILAN SENKRON GENERATÖRLER İÇİN STATİK UYARTIM SİSTEMİ TASARIMI VE UYGULAMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Erdal IRMAK

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan: Prof. Dr. Erdal BEKİROĞLU

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Abant İzzet Baysal Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Prof. Dr. Ramazan BAYINDIR

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 07/08/2017

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GÖKÇEN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mustafa ERSAN

07/08/2017

HİDROELEKTRİK SANTRALLERDE KULLANILAN SENKRON GENERATÖRLER İÇİN STATİK UYARTIM SİSTEMİ TASARIMI VE UYGULAMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Mustafa ERSAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2017

ÖZET

Bu çalışmada; elektrik santrallerinde kullanılan senkron generatörler için 30 kW'lık bir statik uyartım sistemi tasarımı ve uygulaması yapılmıştır. Bu amaçla, 274A ve 87V uyartım sargısı değerlerine sahip bir senkron generatörün uyartım ihtiyacını karşılayacak şekilde tam dalga tam kontrollü doğrultucu kullanılmıştır. Otomatik voltaj düzenleyici (AVR) yazılımında oluşturulan çalışma şartlarına göre, senkronizasyon öncesi generatörün gerilimi ve sonrasında ise reaktif gücü veya güç katsayı ayarlanabilmektedir. Doğrultucunun kontrolü için mikrodenetleyici tabanlı maliyeti düşük, hızlı ve kararlı bir ana kontrol ünitesi (MCU) tasarlanmıştır. Gerçek bir hidroelektrik santralde yer alan uyartım transformatörünün gücü, laboratuvar ortamında ayarlı bir alternatif gerilim kaynağı kullanılarak sağlanmış ve kontrollü doğrultucunun girişine uygulanmıştır. Sıfır geçiş dedektörleri ile kontrollü doğrultucunun giriş tarafından ölçülen sinyaller MCU tarafından algılanarak tristörlerin kontrolü için gerekli yüksek frekanslı tetikleme komutları üretilmektedir. Uyartım akımını doğrudan etkileyen tristör tetikleme açıları AVR tarafından gerçek zamanlı çalışma şartlarına göre otomatik olarak belirlenmekte ve daha sonra MCU'ya sayısal formatta gönderilmektedir. Sistem, gerçek bir hidroelektrik santralin çalışma şartları göz önüne alınarak geliştirildiği için uyartım akımı, gerilimi, generatör akımı, gerilimi, gücü, güç katsayısı, frekans gibi parametreler kapalı döngü kontrol için kullanılmış ve tüm bu parametreler görsel kontrolü kolaylaştırmak amacıyla dokunmatik bir kullanıcı paneli (HMI) üzerinde ayrıca kullanıcıya sunulmuştur. Kullanıcı uyartım sistemi ile ilgili tüm çalışma fonksiyonlarını, limit ve koruma değerini HMI üzerinden ayarlayabilmektedir. Üst otomasyon sistemleri ile haberleşmede sayısal kontrolün yanında Modbus TCP/IP haberleşme protokolü üzerinden veri alışverişine imkân sağlanmıştır. Böylece adaptasyonu kolay, maliyeti düşük ve tepki süresi yüksek bir statik uyartım sistem tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Bilim Kodu : 90514
Anahtar Kelimeler : Senkron Generatör, Statik Uyartım, Kontrollü Doğrultucu, PLC, Modbus TCP/IP
Sayfa Adedi : 87
Danışman : Doç. Dr. Erdal IRMAK

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF STATIC EXCITATION SYSTEM FOR SYNCHRONOUS GENERATOR USED IN HYDROELECTRIC POWER PLANTS

(M. Sc. Thesis)

Mustafa ERSAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2017

ABSTRACT

In this study, design and implementation of a 30 kW static excitation system have been realized for synchronous generators employed in electrical power plants. For this purpose, a full wave fully controlled rectifier has been used to meet the excitation requirement of a synchronous generator that has 274A and 87V excitation winding parameters. According to the operational cases created into the automatic voltage regulator (AVR) software, the generator voltage can be adjusted before the synchronization and its reactive power or power factor can be controlled after the synchronization. In order to control the rectifier, a microcontroller-based, low cost, fast and stable master control unit (MCU) has been designed. The power of the excitation transformer in a real hydroelectric plant has been provided by using an alternating voltage source in the laboratory environment and then applied to the input of the controlled rectifier. The signals measured from the input side of the controlled rectifier by the zero crossing detectors have been sensed by the MCU so that generating the high frequency switching signals required to control the thyristors. The triggering angles of thyristors which directly affect the excitation current have been automatically determined by the AVR according to the real time operational conditions and then sent to the MCU in digital format. Since the system has been achieved by considering the operational cases of a real hydroelectric power plant, some parameters such as excitation current and voltage, generator current and voltage, the power, the power factor and the frequency have been used to provide a closed-loop control and also all the parameters have been shown on a human machine interface (HMI) to facilitate the visual control. By using this HMI, the user can execute all operational functions and set all limit and protection controls related to the excitation system. In addition to digital control in communication with the upper automation systems, data exchange is also possible via Modbus TCP / IP communication protocol. Thus, design and application of a powerful static excitation system have been realized ensuring such advantages as easy adaptation, low cost and high response time.

Science Code : 90514

Key Words : Synchronous Generator, Static Excitation, Controlled Rectifier, Hydroelectric Power Plant, PLC, Modbus TCP/IP

Page Number : 87

Supervisor : Assoc. Prof. Erdal IRMAK

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren çok değerli Sayın Hocam Doç. Dr. Erdal IRMAK'a, destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan Öğr. Gör. Naki GÜLER'e, KONELSIS olarak maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen çok değerli Hüseyin GÜNEŞ'e, her zaman bana destekçi olduklarını bildiğim ve hissettiğim aileme, doğumuyla beni mutlu eden oğlum Atakan ERSAN'a ve çalışmalarımda manevi desteğini eksik etmeyen çok değerli eşim Gülizar ERSAN'a, teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. SENKRON GENERATÖRLER.....	11
2.1. Senkron Generatör Model Parametrelerinin Ölçülmesi.....	17
3. SENKRON GENERATÖR UYARTIM SİSTEMLERİ.....	23
3.1. Uyartım Sistemlerinin Sınıflandırılması	24
3.2. Fırçasız Uyartım Sistemleri.....	27
3.3. Fırçalı Uyartım Sistemleri.....	28
3.4. Kontrollü Doğrultucular.....	30
4. TASARIM VE UYGULAMA	33
4.1. Donanım Altyapısı	33
4.2. Yazılım Altyapısı	47
4.2.1. PLC yazılımı	47
4.2.2. Mikrodenetleyici yazılımı	63
4.2.3. Operatör paneli yazılımı.....	65
5. UYGULAMA SONUÇLARI.....	71

	Sayfa
6. SONUÇLAR.....	81
KAYNAKLAR.....	83
ÖZGEÇMİŞ.....	86

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Uyarım sistemlerinin sınıflandırılması	26
Çizelge 4.1. Sistemde kullanılan analog sinyaller ve türleri.....	41
Çizelge 4.2. Enerji analizörü modülünden okunan değerler.....	42
Çizelge 4.3. Tristörlerin tetiklenmesine ait değerler.....	63
Çizelge 5.1. 34 V _{AA} gerilim girişinde çıkış ve açılma değerleri.....	71
Çizelge 5.2. 50 V _{AA} gerilim girişinde çıkış ve açılma değerleri.....	74
Çizelge 5.3. 30 ve 50 V _{AA} gerilim girişinde çıkış ve açılma değerleri	75

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Çıkık kutuplu senkron makinanın yapısı	12
Şekil 2.2. Çıkık kutuplu bir senkron generatörün bir faz eşdeğer devresi	12
Şekil 2.3. Endüktif yüklü çıkık kutuplu senkron makinanın fazör diyagramı	14
Şekil 2.4. Stator direnci ihmal edilmiş endüktif yüklü senkron makinanın fazör diyagramı	14
Şekil 2.5. Çıkık kutuplu senkron generatörün bir faz eş değeri devresi	15
Şekil 2.6. Çıkık kutuplu senkron generatörün bir faz eşdeğer devresi	15
Şekil 2.7. Tipik bir senkron generatör açık devre karakteristik eğrisi	18
Şekil 2.8. Senkron generatör kısa devre karakteristiği eğrisi	19
Şekil 2.9. Senkron generatörün bir faz kısa devre eşdeğer devresi	20
Şekil 2.10. Senkron generatör bir faz kısa devre fazör diyagramı	20
Şekil 2.11. Kısa devre anında senkron generatörde oluşan manyetik alanlar	21
Şekil 3.1. Senkron generatör kararlılık eğrisi	23
Şekil 3.2. Fırçasız uyartım sistemi modeli	27
Şekil 3.3. Fırçalı tip uyartım sistemi modeli	29
Şekil 3.4. Üç fazlı tam kontrollü köprü tipi doğrultucu	30
Şekil 3.5. Üç faz gerilimi ve tetikleme sinyalleri	31
Şekil 4.1. Tasarımı yapılan sistemin blok diyagramı	33
Şekil 4.2. MCU'ya ait blok diyagramı	37
Şekil 4.3. Gerilim dönüştürücü bağlantı diyagramı	38
Şekil 4.4. Tristör tetikleme devresi	44
Şekil 4.5. Sıfır geçiş devresi	45

Şekil	Sayfa
Şekil 4.6. Tristör modüllerine ait bağlantı diyagramı	46
Şekil 4.7. Kullanılan sönümlleme devresi	47
Şekil 4.8. Uyarım sistemi çalışma modları	49
Şekil 4.9. FVR mod çalışma kontrol grafiği	51
Şekil 4.10. FCR mod çalışma kontrol grafiği	51
Şekil 4.11. Gerilim eşitleme moduna ait kontrol grafiği	53
Şekil 4.12. Ön hazırlık moduna ait kontrol grafiği	54
Şekil 4.13. Sabit reaktif güç moduna ait kontrol grafiği	55
Şekil 4.14. Sabit güç kat sayısı moduna ait kontrol güç grafiği	56
Şekil 4.15. Uyarım sistemi başlama işlem sırası	60
Şekil 4.16. Uyarım sistemi (a) normal duruş işlem sırası, (b) acil duruş işlem sırası ...	62
Şekil 4.17. MCU'ya ait kontrol blok diyagramı	64
Şekil 5.1. 32V girişli, FVR mod çalışma durumunda referans değer (a) 15V (b) 25V (c) 30V (d) 40V iken giriş ve çıkış gerilim grafikleri (Kanal1: x50, Kanal2: x50).....	72
Şekil 5.2. 50V girişli, FVR mod çalışma durumunda referans değer (a) 62V (b) 40V (c) 25V (d) 10V iken giriş ve çıkış gerilim grafikleri (Kanal1: x50, Kanal2: x50).....	73
Şekil 5.3. FVR mod giriş gerilimi 100 V iken çıkış gerilim şekilleri (Kanal1: x50, Kanal2: x50)	74
Şekil 5.4. FCR mod giriş gerilimi 100 V iken çıkış gerilim şekilleri (Kanal1: x50, Kanal2: x50)	75
Şekil 5.5. PLC grafik analiz uygulaması ile alınan uyarım akım, gerilim ve ayarlı giriş kaynağı gerilim değeri-1	76
Şekil 5.6. PLC grafik analiz uygulaması ile alınan uyarım akım, gerilim ve ayarlı giriş kaynağı gerilim değeri-2	77

Şekil	Sayfa
Şekil 5.7. PLC grafik analiz uygulaması ile alınan uyartım akım, gerilim ve ayarlı giriş kaynağı gerilim değeri-3	77
Şekil 5.8. PLC grafik analiz uygulaması ile alınan uyartım akım, gerilim ve ayarlı giriş kaynağı gerilim değeri-4	78
Şekil 5.9. 5A set değerinde yükün 10 Ω 'dan 5 Ω 'a düşürüldüğü andaki PLC ekranı....	79

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Tasarımı yapılan panonun görüntüsü.....	34
Resim 4.2.Pano ön görünümünde bulunan ekipmanlar	34
Resim 4.3. Uyarım panosunun ön bölümü ve ekipmanlar.....	36
Resim 4.4. PLC kart konfigürasyonu.....	40
Resim 4.5. Uyarım panosunun arka bölümü ve ekipmanlar	43
Resim 4.6. (a) FBD dilinde ve (b) ST dilinde yazılmış OR bloğuna ait şema.....	48
Resim 4.7. (a) Uyarım gerilim ve (b) akım kontrolüne ait geliştirilen yazılım bloğu ...	50
Resim 4.8. Gerilim eşitleme modunda kullanılan FBD bloğu.....	52
Resim 4.9. Ön hazırlık modunda kullanılan FBD bloğu	53
Resim 4.10. Sabit reaktif güç kontrolüne ait FBD bloğu.....	54
Resim 4.11. Sabit güç kat sayısı modunda kullanılan FBD bloğu.....	56
Resim 4.12. Analog dönüşüm bloğu.....	57
Resim 4.13. Üst ve alt limit alarm ve arıza değerleri belirleme ve üretme bloğu	58
Resim 4.14. Modbus TCP protokolü kullanılarak operatör paneline gönderilen değerler	58
Resim 4.15. Generatör parametreleri izleme sayfası	65
Resim 4.16. Yüksüz otomatik ve elle kontrole ait çalışma ayar sayfası.....	66
Resim 4.17. Paralel çalışma modları ayarlama sayfası.....	66
Resim 4.18. Koruma ve limit değerleri ayar sayfası.....	67
Resim 4.19. Değer ve süre giriş sayfası.....	67
Resim 4.20. Uyarım sistemi ana sayfa tasarımı.....	68
Resim 4.21. Alarm sayfası	68

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	İletkenin kesit alanı
B_{net}	Generatörde oluşan net akı yoğunluğu
B_r	Rotorda oluşan manyetik akı yoğunluğu
B_{stat}	Statorda oluşan manyetik akı yoğunluğu
E_a	Armatür gerilimi
E_f	İndüklenen gerilim
I_f	Uyartım akımı
K	Generatör sabiti
l	İletkenin uzunluğu
L_f	Uyartım sargı bobini
N	Sarım sayısı
R_a	Armatür sargı direnci
R_f	Uyartım sargı direnci
V_f	Uyartım gerilimi
V_m	Gerilim tepe değeri
X_s	Reaktans
X_d	Boyuna Reaktans
X_q	Enine Reaktans
I_d	Boyuna stator akımı
I_q	Enine stator akımı
Φ_f	Uyartım akısı
ω	Elektriksel hız
α	Tetikleme açısı
Kısaltmalar	Açıklamalar
ANSI	Amerikan Standart Enstitüsü
AVR	Otomatik voltaj regülatörü

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AUX	Yardımcı
CPU	Merkezi program ünitesi
FCR	Alan akım düzenleyici
FVR	Alan gerilim düzenleyici
HXL	Volt-frekans oranı limit
IEEE	Uluslararası Elektrik ve Elektronik Müh. Enstitüsü
LOS	Okuma kaybı
MCU	Ana kontrol ünitesi
OCC	Açık devre karakteristiği
OEL	Aşırı uyartım limiti
OEP	Aşırı uyartım koruma
OVL	Aşırı gerilim limiti
OVP	Aşırı gerilim koruma
PF	Güç katsayısı
PID	Oransal- integral- türev kontrol
PLC	Programlanabilir mantıksal denetleyici
PSS	Güç sistemi düzenleyici
SCC	Kısa devre karakteristiği
ST	Statik
UEL	Düşük uyartım limiti
UEP	Düşük uyartım koruma
UVP	Düşük gerilim koruma

1. GİRİŞ

Günümüzde enerji, yaşamın vazgeçilmez unsurlarından birisi haline gelmiştir. Teknolojinin gelişmesi ile enerji ihtiyacı bağımlılık derecesine ulaşmıştır. Günlük hayatta ısınma, haberleşme, beslenme gibi birçok ihtiyaç karşılanırken enerjinin gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Enerjide; güneş enerjisinin elektrik veya ısı enerjisine, ısı, buhar ve hidrolik enerjinin ise elektrik enerjisine dönüştürülmesi gibi tür dönüşümleri mümkündür. Bu sayede enerji istenen formatta istenen yere ulaştırılabilmektedir. Enerjinin en kolay iletim yolu ise elektrik enerjisidir. Bu kapsamda iletim ve dağıtım şebekeleri oluşturulmuş ve enerjinin son kullanıcıya kadar ulaştırılması sağlanmıştır. Kullanıcı elektrik enerjisini kendi ihtiyacına göre ısınma, aydınlanma, beslenme gibi farklı alanlarda kullanabilmektedir.

Enerji kaynakları, yenilenebilir ve yenilenemez olarak iki başlıkta incelenebilmektedir. Yenilenemeyen enerji kaynaklarının fosil kaynaklı olmaları ve çok uzun süreler sonucunda oluşmaları, bu tür enerji kaynaklarının tükenebileceği anlamına gelmektedir. Ayrıca fosil yakıtlı enerji kaynaklarının çevreye verdiği zararlar nedeniyle enerji üretiminde tercihler yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları, çevreye zarar vermemesi ve doğa dostu olması nedeniyle temiz veya yeşil enerji kaynakları olarak adlandırılabilir. Yenilenebilir enerji kaynakları güneş, hidroelektrik, rüzgâr, jeotermal, dalga veya akıntı olarak sınıflandırılabilir. Güneş enerjisinden elde edilen elektrik enerjisi kimyasal tepkimeler sonucu elde edilmesine karşın diğer enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisi mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi metoduna dayalı çalışmaktadır.

Mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesinde genellikle şebeke ile eş zamanlı çalışmaya imkan sağlayan senkron generatörler tercih edilmektedir. Senkron generatörler, hız (governör) ve gerilim (uyartım) kontrol sistemlerini içermektedir. Governör kontrol sistemleri, generatörde üretilen gerilimin frekansını ve aktif güç kontrolünü sağlamaktadır. Uyartım sistemleri ise kontrollü doğru akımın uyartım sargılarına uygulanması ile generatör gerilimini ve reaktif gücü kontrol etmektedir. Senkron generatörler, bu iki ana sistem olmadan enerji üretimi yapamamaktadır.

Uyartım sistemleri, standartlarda doğru akım tetiklemeli (DC), alternatör beslemeli doğrultuculu (AC) ve statik (ST) tip olmak üzere üç grupta sınıflandırılmaktadır [1]. Uygulamada kullanılan uyartım tipleri ise dinamik ve statik uyartım sistemleri olarak ayrılmaktadır. Dinamik uyartım sistemleri ana generatör şaftı üzerine bağlı yardımcı bir generatörün uyartımı yapılarak elde edilen üç faz gerilimin şaftla birlikte hareket eden kontrolsüz bir doğrultucu yardımıyla doğrultularak ana generatör alan sargılarına uygulanması prensibine dayalı olarak çalışmaktadır. Yardımcı generatörün alan sargılarının sabit olması ve uyartım akımının fırça, bilezik gibi herhangi bir ek aparata ihtiyaç duyulmadan bağlanabilmesi nedeniyle bu tip uyartım sistemlerine fırçasız uyartım sistemi adı da verilebilmektedir. Statik uyartım sistemleri ise tam veya yarı kontrollü doğrultucular ile elde edilen ayarlı doğru akımın generatör alan sargılarına fırça ve bilezikler yardımıyla uygulanması şeklinde çalışmaktadır. Ana generatörün terminallerinden elde edilen gerilim, uyartım transformatörü adı verilen bir transformatör aracılığıyla düşürülerek kontrollü doğrultucunun ihtiyacı olan giriş gücü sağlanmaktadır. Statik uyartım sistemleri, generatörün uyartım sargıları rotor üzerinde olması ve uyartım akımının fırça ve bilezikler aracılığıyla uygulanması nedeniyle fırçalı uyartım olarak da isimlendirilebilmektedir.

Uyartım sistemlerinde ana kontrol elemanı olarak otomatik gerilim düzenleyici (AVR) kullanılmaktadır. AVR'ler referans olarak aldığı generatör ve uyartım sisteminin akım ve gerilim değerlerini analiz ederek kullanıcının talep ettiği generatör gerilimi veya reaktif gücü sağlamak amacına dayalı olarak çalışmaktadır. AVR'lerde gerilim ayarı yapılırken çeşitli kontrol yöntemleri uygulanmaktadır. Bu kontrol yöntemlerinin uygulanmasının sonucunda uyartım sargılarına uygulanan doğru akım değeri değişiminin kararlılığı ve sürekliliğinin artırılması hedeflenmektedir.

Literatürde uyartım sistemleri uygulama alanları, kontrol teknikleri ve gelişimi üzerine çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiş ve bu çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir:

Uyartım sistemleri üreticiye bağlı olarak birçok farklı metotlarla gerçekleştirilebilmektedir. Ortaya çıkan bu çeşitliliğin önüne geçmek ve belirli bir kalıba oturtmak için uyartım sistemleri IEEE tarafından sınıflandırılmıştır. IEEE uyartım sistemlerini AC, DC ve ST olmak üzere üç ana başlıkta incelemektedir. Bu standart, yapılan uyartım sistemlerinin

özelliklerinin tanımlanması, performansının ölçülmesi, devreye alınmasındaki testler, standartlarının oluşturulması ve uyartım sistemi eğitimlerini içermektedir [1].

Geçmişte üretilen uyartım sistemleri, generatör gerilimini ayarlamak için gerçekleştirilmiştir. Günümüzde analog olarak kullanılan uyartım sistemlerinde gerilim ve reaktif güç düzenleyici bulunmaktadır. Bu sistemler birbirinden ayrı olarak kullanılmakta ve tasarlanan sistemlerde elektromekanik kontrolörler yer almaktadır. Gelişen teknoloji ile uyartım sistemleri tek bir kontrolörde toplanarak hem gerilim hem de reaktif güç kontrolünü yapabilmektedirler. Tek bir kontrolör ile gerçekleştirilen sistemler sayısal sistemler olduğu için daha az maliyetli ve daha kararlı sistemlerdir. Bu amaçla iki farklı kontrolörden tek bir kontrol sisteminin sayısal olarak gerçekleştirilmesi ve sayısal sistemlerin analog sistemlere göre üstünlüklerinin belirlenmesi için Schaefer'in gerçekleştirdiği bir çalışmada, geçmişteki kullanılan uyartım sistemlerinin dezavantajları ve sayısal uyartım sistemlerinin avantajlarından bahsedilmiştir. Sonuç olarak sayısal sistemlerin tepkisinin analog sistemlere göre daha hızlı olduğu görülmüş ve sayısal sistemlerin kontrolünün daha kolay olduğu ortaya çıkartılmıştır [2]. Ayrıca Lin ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada özellikle büyük güçlü generatörlerin sayısal olarak gerçekleştirilen uyartım sistem parametrelerinin şebeke üzerindeki etkilerinden bahsedilmiştir. Tepki hızı ve kazancı yüksek bir uyartım sistem tasarımının değişim durumlarındaki etkisi incelenmiştir. Uyartım sistemi parametrelerinin optimizasyonu metodunun yüksek ekonomik kazançlar sağladığı belirtilmiştir [3]. Parametrelerin ne denli önemli olduğu yapılan çalışmalar ile gösterilmektedir. Analog uyartım sistemleri devreye alma işlemi tamamlandıktan sonra çok arıza çıkartabilmektedir. Ayrıca devreye alma işlemleri zordur. Sadece uyartım sistemi değil endüstriyel olarak kullanılacak cihazların devreye alma personeli tarafından kolaylıkla çalışmaya hazırlanması ve daha sonra son kullanıcının gerekli olduğu durumda müdahale edebilmesi gerekmektedir. Sayısal sistemlerin önceliği adaptif olmasından ileri gelmektedir. Bu nedenle birçok çalışmada analog ve sayısal sistemler karşılaştırılmış ve sayısal sistemlerin üstünlüklerini gösteren çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Schaefer ve Kim tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada sayısal uyartım sistemlerinin analog uyartım sistemlerine göre üstünlüklerinden bahsedilmiş ve yapılan çalışmada sayısal sistemler parametrik olması nedeniyle farklı sistemlere daha kolay adapte edilebildiği ve değişimlere karşı daha basit bir şekilde uyum sağladığı gösterilmiştir [4]. Sayısal sistemlerin daha kolay uyum sağlamanın nedenlerinden birisi de o sisteme ait parametrelerin kolaylıkla sisteme girişinin

yapılmasıdır. Bu parametreler sistemin kararlı çalışmasında büyük etki yaratmaktadır. Bu nedenle belirlenecek olan parametrelerin en uygun şekilde seçilmesi gerekmektedir. Bunun için uyartımı yapılacak generatörün uyartım akımı ve gerilimi gibi değerlerin aşılması bir problem meydana gelmemesi için kontrol edilen sistemin üst limitlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Jianmin ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışmada uyartım sistemlerindeki parametrelerin şebeke üzerindeki etkileri incelenmiş ve uyartım sistemlerinin tepkilerinin optimize edilmesi gerektiği görülmüştür. Limit ve koruma değerlerinin optimize edilmediği sistemlerde gereksiz yere oluşabilecek arıza durumları üretim kaybına neden olabilmektedir [5].

Uyartım sistemleri, senkron generatörlerin gerilim ve güç katsayısını değiştirebilmektedir. Bu nedenle uyartım sisteminde oluşabilecek bir kararsızlık durumu şebekeyi veya yükü doğrudan etkilemektedir. Şebeke ile paralel olan generatörler sonsuz şebekede bağlı ise gerilim değişmesi beklenmez. Bu durumda uyartım sistemi reaktif güç veya güç katsayısı modu olarak belirlenen çalışma şekillerinden birisi seçilerek çalıştırılabilmektedir. Bu çalışmada generatörün reaktif güç ve güç kat sayısı gibi enerji kalitesi değerleri istenilen değerlerde sabit tutması ve yük değişimi gibi durumlarda hızlı bir tepki göstermesi ve kararlılığını koruması beklenmektedir. Bu nedenle oluşabilecek arıza durumlarına karşı generatör tepkisi, şebeke üzerinde oluşabilecek etkilerin incelenmesi ve analizinin yapılması oluşabilecek hataların önüne geçilmesi açısından önem arz etmektedir. Bu amaçla gerçekleştirilen bir çalışmada, Bijun ve diğerleri uyartım sistemi parametreleri ve çalışma modlarını Heffron-Philips model bir uyartım sistemi üzerinde analiz etmiştir. Uyartım sisteminin kararlılık durumları root locus metodu kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre parametrelerin optimizasyonunun önemi ortaya konulmuştur [6].

Optimize edilmiş parametreler ile uyartım sistemi, sahip olduğu güç değerinin altında uyartım gücüne ihtiyaç duyan generatörlerin uyartımını gerçekleştirilebilmektedir. Bu nedenle parametrelerin değiştirilmesi ile birçok farklı generatöre uygulanabilen sistemler gerçekleştirilebilmektedir. Bu amaçla Zhang ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada konfigürasyon yapılabilen bir AC tip uyartım sistemi çalışması yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda gerçekleştirilen uyartım sisteminin farklı sistemlerde tepkileri ölçülmüş ve incelenmiştir. Sonuç olarak adaptasyonu yapılan uyartım sisteminin farklı generatörlerde çalışabildiği görülmüştür [7].

Uyartım sistemlerinin amacı, senkron generatörlerin uyartım sargılarına kontrollü doğru akım uygulamaktır. Bu akımın uygulanmasında çeşitli kontrol teknikleri kullanılabilir. Kontrol tekniklerinin kullanılması ile daha hızlı ve doğru bir sonuç elde edilmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla birçok çalışma ve analiz gerçekleştirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda Yuan ve Jin tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada PID kontrol tekniği kullanılarak uyartım sistemi uygulaması yapılmıştır. Kontrol sistemlerinde kullanılan PID kontrol tekniğinin sağlıklı bir şekilde uygulanabilmesi için parametrelerinin optimal şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Yuan ve Jin gerçekleştirdikleri bu çalışmada PID parametrelerinin optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Bu sistemin bir güç santraline uygulandığında dinamik karakteristiklerini yüksek ölçüde arttırdığı görülmüştür [8].

Kontrol yöntemlerinin parametrelerinin generatörlere doğrudan etki etmesi ve anlık yüklerin devreye girip çıkması güç sistemlerinin de değişken bir yapıda olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle güç sistemlerinde dalgalanma, arıza gibi birçok olay meydana gelmektedir. Bu olaylar şebekeye paralel bağlı generatörün tepkisinin değişmesine neden olmaktadır. Generatörün reaktif güç ve/veya güç katsayısının bu değişimlere göre tepkisinin kararlı olması gerekmektedir. Selvi ve Ramya tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, bulanık mantık kontrol tekniği uygulanarak gerçekleştirilen bir uyartım sisteminin simülasyon çalışması analiz edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda kararlı çalışan bir sistemin şebekede oluşabilecek salınımları daha hızlı sönümlendiği görülmüştür. Bulanık mantık ile kontrol edilen güç sistemi düzenleyici [9] ile geleneksel sistem karşılaştırması verilmiş ve bulanık mantıkla kontrol edilen sistemin tepkisinin daha hızlı olduğu görülmüştür [10].

Kontrol tekniklerinin uyartım sistemlerindeki önemi literatürde birçok örnekte verilmektedir [8, 9, 10]. Bu çalışmalara farklı bir bakış açısı getirmek amacıyla Feng ve diğerleri tarafından genetik algoritma tabanlı AC1A tip [1] fırçasız uyartım sistemi parametrelerinin belirlenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. IGA olarak adlandırılan geliştirilmiş genetik algoritma, yeni bir kontrol tekniği olarak uygulanmıştır. Fırçasız uyartım sistemlerinde kullanılan ünitelerin oransal olmaması nedeniyle bu teknik geliştirilmiştir. Analiz sonuçlarında IGA'nın diğer kontrol yöntemlerine göre etkili ve daha uygulanabilir olduğu görülmüştür [11].

Türbin hız kontrolü, araç hız kontrolü, hava fan kontrolü gibi birçok alanda kendini gösteren kontrol yöntemleri uyartım sistemlerinde de kullanılabilmektedir. Geleneksel PID kontrol tekniklerinin denizde kullanılan senkron generatörlerin uyartım sistemlerinde yavaş tepki verdiği görülmüş ve Bo ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışmada PID tabanlı yapay sinir ağları kontrol yöntemi kullanılarak bir uyartım sistemi modeli gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan model ile gemilerde kullanılan generatörler için kendinden öğrenmeli bir sistem geliştirilmiştir ve geliştirilen bu sistemin daha hızlı tepkiye ve yüksek doğruluğa sahip olduğu görülmüştür [12].

Parametrelerin iyi ayarlanması, sistemlerin devreye alınma hızını önemli ölçüde etkilemektedir. Schaefer ve Kim tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada uyartım sistemlerinde kullanılan PID kontrolör parametrelerinin otomatik olarak belirlenmesi üzerinde durulmuş ve elde edilen sonuçlara göre otomatik olarak hesaplanan ve zamana göre değişiklik gösteren parametrelerin daha etkili sonuçlar doğurduğu görülmüştür [13].

Statik uyartım sistemleri, gücünü generatör terminal geriliminden sağlamaktadır. Ancak ilk anda generatörün gerilim indüklemesi için bir uyartım akımına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ihtiyaç duyulan uyartım akımı harici bir kaynaktan sağlanmaktadır. Ada mod olarak çalışan bir sistemde şebeke olmayacağı göz önüne alınırsa bu kaynak problem olabilmektedir. Irmak ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir simülasyon çalışmasında, ada mod çalışan bir generatörün ilk esnadaki uyartım akımının bir güneş paneli üzerinden sağlanması ve uyartım ve governör kontrolünün PI kontrol yöntemi ile yönetilerek salınımların en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Sonuç olarak kontrol tekniği uygulanmayan sistem, generatör gerilimini ayarlamakta problem yaşamakta ve yük değişimlerine karşı salınımları daha büyük olduğu görülmüştür. PI ile kontrol edilen uyartım sisteminde ise sistem kendini çok hızlı bir şekilde toparlayarak salınımları minimuma indirmiştir [14]. Bu salınımlar şebeke ile paralel çalışan generatörlerin şebeke üzerinde büyük etki edebileceğini göstermektedir. Bu salınımları azaltmak için bazı farklı kontrol teknikleri uygulanmıştır. Bu amaç doğrultusunda Kuz'menko ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada integral adaptasyon prensibi kullanılarak senkron generatörlerde kullanılan doğrusal olmayan uyartım sistemlerinin güvenilirliğinin artırılması üzerine bir çalışma yapılmış ve kontrol tekniği uygulanan sistemlerin daha hızlı karar vererek şebeke üzerinde salınım etkisini azalttığı görülmüştür [15].

Uyartım sistemleri senkron generatörlerin güç kalitesini etkilediği için şebekeyi de doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle uyartım sistemlerinin bir arıza durumuna karşı hızlı tepki ve öngörme yetisine sahip olması beklenmektedir. Sayısal olarak gerçekleştirilen uyartım sistemlerinde koruma ve limit değerlerinin kullanılacak olan generatörün nominal değerlerine göre belirlenmesi gerekmektedir. Bu sistemler de bu belirlenen akım, gerilim ve güç değerlerine göre koruma ve sınırlama yapmalıdırlar. Limit değeri, sistem arızaya geçmeden önceki değer olarak adlandırılabilir. Limit değerine ulaşan sistemde AVR, limit değerine ulaşan değeri güvenli aralık olarak belirlenen değerde sabit tutmaya çalışmaktadır. Bu değerler uyartım akımı, gerilimi veya generatör gerilimi gibi değerler olabilmektedir. Eğer AVR güvenli noktalara çekemiyorsa değer koruma değerini aştığı takdirde sistemi acil olarak durdurmaktadır. Koruma ve limit değerleri, üretim kaybı ve malzeme hasarının önüne geçmek açısından önem arz etmektedir. Schaefer ve diğerleri güvenilir bir sistem çalışması için uyartım sistemlerinde limit ve koruma değerlerinin öneminden bahseden bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu değerlerin optimum şekilde belirlenmesi üretim kaybını azaltacağı gibi generatörün hasar görmesini de engelleyecektir [16].

Uyartım sistemlerinde koruma ve limitler ile reaktif güç kontrolü genellikle aynı planda incelenmemektedir. Gerçekleştirilen simülasyon çalışmaları ise uygulamadan farklılık göstermektedir. Sonuç olarak bu farklılıklar limit ve koruma değerlerinde farklılığa neden olabilmektedir. Murdoch ve diğerleri bu probleme dikkat çekmek amacıyla uyartım sistemlerinin koruma ve limit değerlerinin gerilim/reaktif kontrolünün sistem dizaynı üzerine etkisini analiz etmişlerdir. Çalışmada IEEE model ST4B tip uyartım sistemi kullanılmıştır. Ayrıca yapılan çalışmada limit değerlerinin testleri üzerinde de durulmuştur. Limit ve koruma değerlerinin belirlendikten sonra uygulamada test edilmesi daha sonradan ortaya çıkabilecek problemlerin önüne geçilmesi için önemli olduğu görülmüştür [17].

Güç sistemlerine olan talep artışı, oransal olmayan parametreler ve belirsizlik içermesi araştırmacıları bu konu üzerinde modelleri basitleştirmek için çalışmaya yönlendirmiştir. Gerilim çökmeleri ve geçişleri, yüksek güçlü bir yükün şebekeye bağlanması veya şebekeden çıkması ya da kısa devre sonucu meydana gelmektedir. Moghaddam ve diğerleri generatör uyartım sistemlerinin hassasiyet analizi ve model parametrelerinin azaltılması üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Hassasiyet analizi sonunda uyartım sisteminin daha hızlı tepki verdiği ve daha kararlı çalıştığı görülmüştür [18].

Uyartım sistemi AVR'leri şebeke gerilim bilgisi, generatör akım ve gerilim bilgisi, uyartım akımı ve gerilimi, generatör kesicisi gibi bilgileri analiz ederek sistemin o anki durumuna göre çalışma modunu belirlemektedir. Okunan generatör gerilim ve akım bilgilerinden aktif, reaktif ve görünür güç değerleri ile güç katsayısı ve frekans gibi değerleri hesaplanabilmektedir. Bu nedenle generatörün ve diğer gerekli değerlerin yüksek doğrulukla okunması gerekmektedir. Generatörün şebeke ile bağlı olduğu durumlarda yük değişimleri şebekede gerilim düşümüne neden olabilmektedir. Gerilimin düşük olması akımın artmasına neden olmaktadır. Bu tür problemlere karşı AVR'nin nasıl davranacağı daha önceden belirlenebilmektedir. Bu doğrultuda Dale Buscher gerçekleştirdiği bir çalışmada AVR'nin okuduğu generatör geriliminin düşük olması halinde uyartım sisteminin nasıl davranması gerektiği üzerine bir araştırma yapmıştır. AVR generatör gerilimi düşük olduğunda uyartım akımının limit değerleri aşması, generatörde farklı problemlere neden olacağı için generatörün gerilim bilgilerinin doğru ölçülmesinin üzerinde durulmuştur. Limit ve koruma değerlerinin aşılması halinde sistemin acil olarak durdurulması en doğru karar olarak öne sürülmüştür [19].

Bir sistem uygulamaya aktarılmadan önce analizlerinin yapılması gerekmektedir. Bu ön çalışmaların yapılması uygulamada öngörülemeyen eksik ve hataların önceden ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Ayrıca gerçek hayatta uygulanması tehlike arz eden çalışmalar bu analizler ile kolayca belirlenebilmektedir. Bu analizlerin yapılabilmesi için bazı simülasyon programları geliştirilmiştir. Xu ve diğerleri Çin güç sistemi analizinde çok fazla tercih edilen PSASP programını kullanarak güç sistemi kararlılığı için kullanıcı tanımlı bir uyartım sistemi modelinin analizini gerçekleştirmişlerdir [20]. PSASP, Matlab/Simulink gibi simülasyon ve analiz yetisi yüksek bir programdır. Baojun ve diğerleri ise 1000 MW bir hidro generatörün uyartım sistemi tasarım ve analizini Matlab/Simulink kullanarak gerçekleştirmişlerdir [21].

Peng ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada küçük ve orta ölçekli hidroelektrik generatör grupları içeren elektrik şebekesinin dinamik analizinin öneminden yola çıkarak uyartım ve governör kontrolörlerini içeren bir dinamik eşdeğer model oluşturulmuştur. Oluşturulan bu model ile uyartım sisteminin şebeke üzerindeki geçici durum etkileri ve governör sisteminin generatör eşdeğer devresinin güç açısı karakteristiği ortaya çıkartılmıştır. Bu eşdeğer devre modelleri kullanılarak bir sistem uygulamaya geçilmeden önce matematiksel olarak kontrollerinin sağlanması amaçlanmıştır. Bu sayede

literatüre modellenmiş bir eş değer devre kazandırılmıştır [22]. Bu amaçla gerçekleştirilen bir başka çalışmada ise Ruuskanen ve diğerleri tarafından senkron generatör için tasarlanan fırçasız uyarım sistemi anlatılmıştır. Elde edilen model bir benzetim programı ile analiz edilmiştir [23].

Uyarım sistemlerinin, generatörlere uyarım akımı sağlamasının yanında bir arıza durumunda generatör uyarım sargılarında depolanan akımı da sönmülendirmesi gerekmektedir. Statik uyarım sistemlerinde sönmüleme bir direnç üzerinden gerçekleştirilebilmektedir. Ancak dinamik uyarım sistemlerinde kontrollü doğru akım öncelikli olarak bir uyarım generatörüne uygulanmaktadır. Uyarım generatörü armatür sargıları çıkışına bağlanan diyotlu kontrolsüz doğrultucu ile ana generatörün alan sargılarına uygulanabilmektedir. Burada kontrolsüz doğrultucu sistemi rotor miline bağlı bulunmaktadır. Bu nedenle ana generatörün alan sargıları doğrudan dışarı ile ilişkili değildir. Bu probleme çözüm olarak Rebollo ve diğerleri fırçasız uyarım sistemleri için uyarım sönmüleme sistemi geliştirerek 20 MVA bir generatör üzerinde analizini yapmışlar ve gerçekleştirilen çalışmanın geleneksel yöntemlere göre daha kararlı çalıştığını ortaya koymuşlardır [24].

Kontrollü doğru akım direk olarak tristörler aracılığıyla kontrollü doğrultuculardan elde edilebildiği gibi diyotlu doğrultucularla elde edilen doğru akımın kıyıcılarla kontrol edilmesiyle de elde edilebilmektedir. Kim ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada tristörlü statik uyarım sistemi çıkışlarına buck-boost kıyıcı kullanılarak gerçekleştirilen uyarım sisteminin kararlılığı incelenmiştir. Çıkış tarafında kullanılan kıyıcı sayesinde girişte gerilim ihtiyacı olduğu durumlarda gerilimin artırılması amaçlanmıştır [25].

Literatür özetlerinden görüldüğü üzere uyarım sistemleri, senkron generatörlerin ana bölümlerinden birisidir. Bu sistemler, senkron generatörlerin çıkış geriliminin üretilmesi ve güç katsayısının kontrolünde kullanılmaktadır. Bu nedenle enerji üretiminde uyarım sistemlerine büyük görev düşmektedir. Senkron generatörler şebekeye bağlı olmadığı durumda uyarım sistemleri, generatörlerin paralel bağlantı şartlarından birisi olan gerilimlerin eşit olması durumunu gerçekleştirmektedir. Generatörlerin şebekeye bağlı olduğu durumda ise enerjinin verimli üretilmesi açısından reaktif güç kontrolünü yapmaktadır. Generatörlerin şebekeye bağlı çalıştığı durumda uyarım sisteminde oluşan

değişiklikler şebekeyi doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle uyartım sistemlerinin kararlı ve hızlı tepkiye sahip olması beklenmektedir.

Tepki süresinin azaltılması ve kararlı çalışma için gerçekleştirilen çalışmalarda AVR'ler farklı kontrol teknikleri ile geliştirilerek daha kısa sürede tepki vermesi amaçlanmıştır. Ancak tepkilerin hızlı olabilmesi için generatör ve uyartım sisteminden okunan akım ve gerilim değerlerinin de hızlı algılanması gerekmektedir.

Generatörler tasarım aşamasında rotor şaftına bağlı bir uyartım generatörü ile birlikte üretilmektedir. Ancak bazı generatörler tasarım aşamasında böyle bir ekipmana sahip değildir. Bu tip generatörler haricen dışarıdan bağlanabilecek bir uyartım generatörü ile uyartımı yapılabileceği gibi uyartım sargılarına fırçalar ile uygulanabilecek bir akım kaynağı ile uyartım akımı sağlanabilir. Uyartım akımının direkt olarak sağlanabilmesi arıza kaynağı oluşturabilecek diğer ekipmanları azaltarak daha az malzeme ile uyartım akımının uygulanmasını kolaylaştırmaktadır.

Gerek literatür özetlerinde öne çıkartılan hususlar gerekse de yukarıda izah edilen kritik sorunlara çözüm olması amacıyla bu tez çalışmasında yeni bir statik uyartım sisteminin tasarımı ve uygulaması amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen sistem, küçük ve orta ölçekli hidroelektrik santrallerde kullanılan senkron generatörlerin uyartım ihtiyacını karşılayabilecek şekilde olup 30 kW gücündedir. AVR olarak PLC ve mikrodenetleyici birlikte kullanılmıştır. PLC ile generatörün değerleri okunmakta ve mikrodenetleyici ile tasarlanan tristör tetikleme kartına gerekli gerilim kontrol komutları gönderilmektedir. Tristör tetikleme kartı, tristörleri tetikleyerek gerekli uyartım gerilimini senkron generatörün uyartım sargılarına iletmektedir. Sargılara iletilen kontrollü doğru akım generatör şebekeye bağlanmadan önce generatör gerilimini ayarlamaktadır. Bu sayede senkronizasyon şartlarından birisi olan gerilimlerin eşitlenmesi uyartım sistemi tarafından gerçekleştirilmiş olmaktadır. Generatörün şebeke ile senkronizasyonu sağlandıktan sonra generatörün reaktif gücü uyartım akımının değiştirilmesi ile sürekli kontrol edilerek en verimli şekilde enerjinin üretilmesi sağlanmaktadır. Generatöre ve uyartım sistemine ait tüm değerler anlık olarak okunarak sistemin sağlığı açısından güvenli seviyede tutulmaktadır. Sistem geri bildirimli olarak çalışmaktadır. Bu nedenle herhangi bir anormal durumda kısa zamanda müdahale ederek üretim ve malzeme kaybını önlemektedir.

2. SENKRON GENERATÖRLER

Senkron generatörler, stator manyetik alan hızı ile rotor hızı arasında kayma olmaması ve bu nedenle de kontrollerinin kolay olması nedeniyle enerji üretim santrallerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu santraller buhar, su ve fosil yakıtlı olabilmektedir. Senkron generatörlerin en önemli parçalarından birisi hız kontrol ve gerilim kontrol bölümleridir. Hız kontrol sistemleri “governör sistemi” olarak adlandırılmaktadır. Governör sistemleri, generatörün şaftına bağlı olan türbin gibi tahrik makinasını kontrol ederek generatörün istenilen hızda dönmesini ve bu sayede generatörün hız ve aktif güç kontrolünün yapılmasını sağlamaktadır.

Governör kontrol sistemi ile hız ayarı yapılan generatörde gerilim indüklenmesi için bir manyetik alana ihtiyaç duyulmaktadır. Bir senkron generatörde rotor manyetik alanı sabit mıknatıslı yapılabileceği gibi alan sargıları ile de manyetik alan oluşturulabilmektedir. Özellikle yüksek güçlü sistemlerde alan sargılarına ayarlı bir doğru akım uygulanarak gerekli manyetik alan oluşturulmaktadır. Alan sargılarına uygulanacak doğru akımı ayarlayan sistemlere “uyartım” veya “ikaz” sistemi adı verilmektedir. Uyartım sistemleri generatörün gerilimini ve paralel bağlantı sonrası reaktif gücü ayarlayan sistemlerdir.

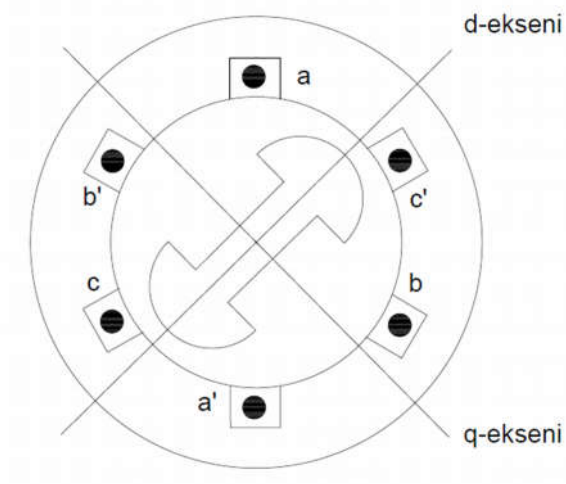
Bu bölümde; hidroelektrik santrallerde sıkça kullanılan çıkık kutuplu senkron generatöre ait eşdeğer devre şekilleri, üretilen gerilime ait eşitlikler, model parametrelerinin ölçülmesi, fazör diyagramlarından bahsedilmiştir.

2.1. Senkron Generatörlerin Eşdeğer Devreleri

Elektrik makinalarının modellenmesi ve generatör denklemlerinin oluşturulması için eşdeğer devre modelleri kullanılmaktadır. Eşdeğer devreler makine modelinde yer alan sargıların devre modelleri ile oluşturulmaktadır.

Şekil 2.1’de çıkık kutuplu senkron makinanın yapısı gösterilmektedir. Çıkık kutuplu senkron makinanın kutupları ve stator arasında hava boşluğu az, kutuplar arası ve stator arasındaki hava boşluğu fazladır. Bu nedenle çıkık kutuplu senkron makinada stator ile rotor arasındaki relüktans her noktada aynı değildir. Bu farklı relüktansı daha iyi açıklamak için makinanın senkron reaktansı iki farklı bileşende incelenmektedir [26]. Bunlar; boyuna

reaktans X_d ve enine reaktans X_q olarak adlandırılmaktadır. Stator akımı I_s ise I_d ve I_q olarak ikiye ayrılmaktadır.



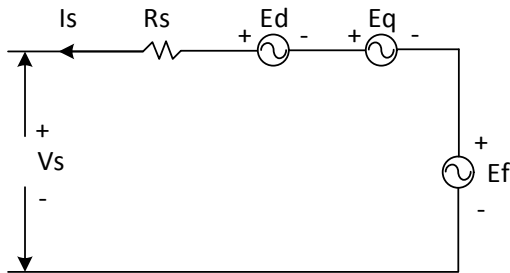
Şekil 2.1. Çıkık kutuplu senkron makinanın yapısı

E_f çıkık kutuplu senkron makinanın statorunda kutup akısı tarafından endüklenen faz gerilimi olarak alınırsa, E_d ve E_q stator sargılarında I_d ve I_q akımları tarafından endüklenen gerilimlerdir. Stator akımının I_d bileşeni E_f geriliminden 90° geride bir akı oluşturmaktadır. I_q bileşeni ise E_f ile aynı fazdadır [26].

Buna göre makinanın terminal gerilimi:

$$V_s = E_f + E_d + E_q - I_s R_s \quad (2.1)$$

Eş. 2.1'e göre çıkık kutuplu senkron generatörün bir faz eşdeğer devresi Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Çıkık kutuplu bir senkron generatörün bir faz eşdeğer devresi

Eş. 2.1’de verilen E_d ve E_q değerleri Eş. 2.2 ve 2.3’teki gibi yazılabilmektedir.

$$E_d = -jI_d X_d \quad (2.2)$$

$$E_q = -jI_q X_d \quad (2.3)$$

Eş. 2.2 ve 2.3, Eş. 2.1’de yerine konulursa, E_f değeri Eş. 2.4’teki gibi bulunabilmektedir.

$$E_f = V_s + I_s R_s + jI_d X_d + jI_q X_q \quad (2.4)$$

Eş. 2.4’te verilen değişkenler bilinirse, endüklenen gerilim E_f ile terminal gerilimi V_s arasındaki δ açısı bulunabilmektedir.

d-eksenindeki reaktans üzerine düşen gerilim Eş. 2.5’teki gibi yazılabilmektedir.

$$jI_d X_d = jI_d X_d + jI_d (X_d - X_q) \quad (2.5)$$

Eş. 2.5 kullanılarak Eş. 2.4, Eş. 2.6 gibi yazılabilmektedir.

$$\begin{aligned} E_f &= V_s + I_s R_s + jI_d X_q + jI_q X_q + jI_d (X_d - X_q) \\ &= V_s + I_s R_s + jI_s X_q + jI_d (X_d - X_q) \\ &= E_f' + jI_d (X_d - X_q) \end{aligned} \quad (2.6)$$

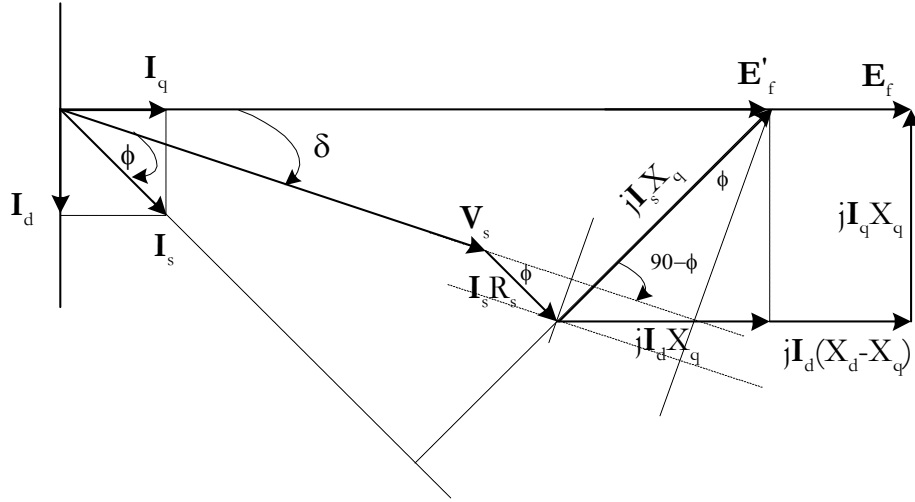
Burada;

$$E_f' = V_s + I_s R_s + jI_s X_q \quad (2.7)$$

$$I_s = I_d + I_q \quad (2.8)$$

değerlerine eşittir.

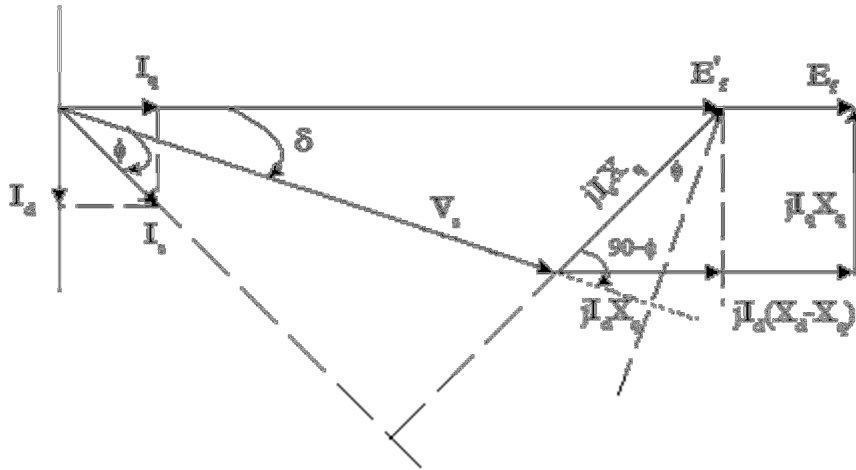
Şekil 2.3’te çıkık kutuplu senkron generatörün endüktif yüklü, Şekil 2.4’te ise stator direnci ihmal edilmiş durumuna ait fazör diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Endüktif yüklü çıkık kutuplu senkron makinanın fazör diyagramı

Şekil 2.3'te verilen fazör diyagramından E_f ile V_s arasındaki δ açısı Eş. 2.9'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$\tan \delta = \frac{I_s(X_q \cos \phi - R_s \sin \phi)}{V_s \pm I_s(X_q \sin \phi + R_s \cos \phi)} \quad (2.9)$$



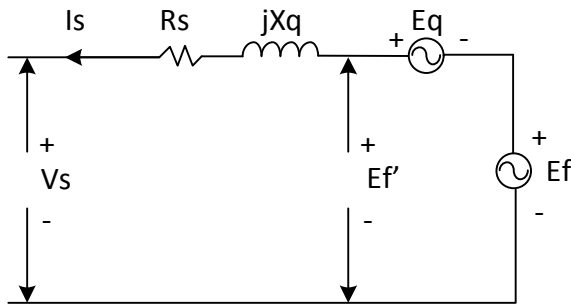
Şekil 2.4. Stator direnci ihmal edilmiş endüktif yüklü senkron makinanın fazör diyagramı

Eş. 2.9'un paydasındaki (+) işaret alternatör durumu için, (-) işaret motor durumunda geçerlidir.

Çıkık kutuplu senkron generatörün stator direnci ihmal edilirse, vektör diyagramı Şekil 2.4'teki gibi olmaktadır. Şekil 2.4'e göre E_f ile V_s arasındaki δ açısı Eş. 2.10'daki gibi hesaplanmaktadır.

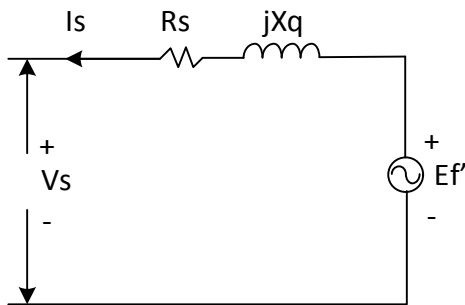
$$\tan \delta = \frac{I_s X_q \cos \phi}{V_s \pm I_s (X_q \sin \phi)} \quad (2.10)$$

Şekil 2.5'te çıkık kutuplu senkron generatörün bir faz eş değer devresi gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Çıkık kutuplu senkron generatörün bir faz eş değer devresi

Çıkık kutuplu senkron generatörde üretilen etkin gerilim değeri E_f' kabul edilirse, generatörün bir faz eş değer devresi Şekil 2.6'daki gibi çizilebilmektedir.



Şekil 2.6. Çıkık kutuplu senkron generatörün bir faz eşdeğer devresi

Üç fazlı bir senkron generatörde uyarım sargıları ve armatür sargıları olmak üzere iki farklı sargı tipi bulunmaktadır. Armatür sargıları, endüktans (jX_s) ve sargıların iç direnci (R_a) şeklinde ifade edilebilmektedir. E_a gerilimi generatörde üretilen gerilimi, $V(\Phi)$ ise çıkışlara aktarılan gerilimi göstermektedir. Uyarım sargıları direnç (R_f) ve bobin (L_f) olarak benzetimi yapılmaktadır. V_f , uyarım sargılarına uygulanan doğru gerilimi, I_f ise

uyartım akımını simgelemektedir. Burada sargılara uygulanan doğru akım generatörde bir manyetik akı (Φ_f) üretilmesini sağlamaktadır. Döner bir manyetik alanın kestiği stator (armatür) sargılarında ise bir gerilim indüklenmektedir. Stator fazında üretilen gerilim genliği Eş. 2.1 ile hesaplanmaktadır [26].

$$E_a = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot N_e \cdot \Phi \quad (2.11)$$

Burada;

E_a : Makinada üretilen gerilim (V)

N_e : Fazlara ait sargı sayısı

Φ : Makinada üretilen akı (Wb)

Eş. 2.11'deki sabit parametreler yerine K yazılırsa, Eş. 2.12 elde edilir. E_f geriliminin makinadaki $\emptyset$ akısına, dönüş hızına ve makine yapısına bağlı olduğu denklemden görülmektedir. Generatörün dönüş hızı governör kontrol sistemi ile şebeke frekansına eşitlenmektedir. Frekansın sabitlendiği varsayılırsa generatör çıkış geriliminin manyetik akı ile değiştirilebileceği denklemden görülmektedir. Manyetik akıya ait denklem Eş. 2.13'te verilmiştir. Manyetik akının tek değişken parametre olan uyartım akımı ile kontrol edilebileceği denklemden açıkça görülmektedir.

$$E_f = K \cdot \emptyset \cdot \omega \quad (2.12)$$

Burada;

K = Makine yapısına bağlı sabit bir değer

ω = Elektriksel hız (radyan/s)

$$\emptyset = N_f \cdot I_f \frac{\mu \cdot A}{l} \quad (2.13)$$

N_f = Uyartım sargısının sarım sayısı

μ = Manyetik geçirgenlik

A = İletkenin kesit alanı

l = İletken uzunluğu

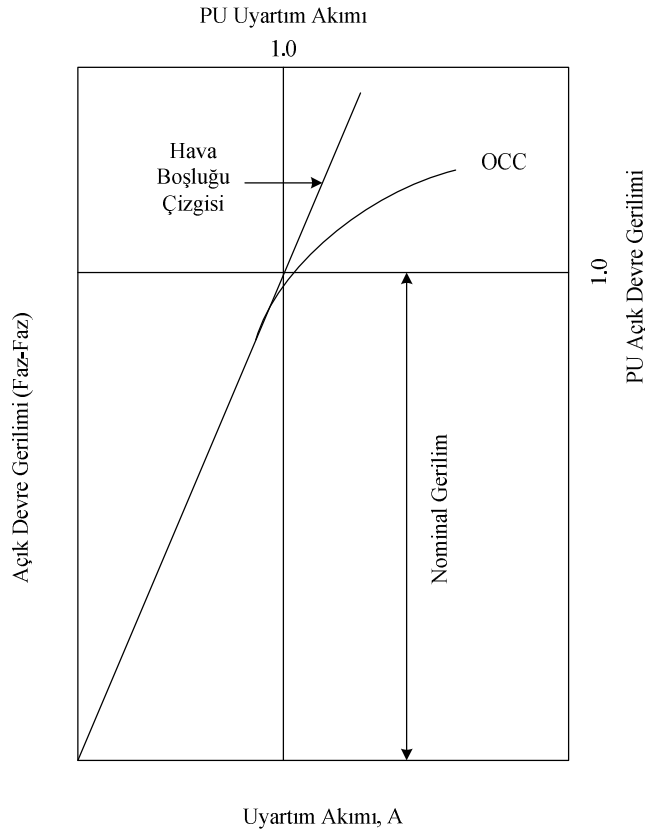
Manyetik akı (Φ), rotora akan uyarım akımına bağlı olarak değişmektedir. Uyarım akımı ile generatör çıkış gerilimi doğrudan ilişkilidir. Uyarım akımının kontrollü bir şekilde alan sargılarına uygulanması ile generatör çıkış geriliminin değiştirilebileceği görülmektedir. Uyarım devresi ve güç devresinin üst limitleri, eşdeğer devre parametrelerinde belirlenen akım, gerilim vb. değerler bulunduğu için, bu değerler yardımı ile belirlenmektedir.

2.2. Senkron Generatör Model Parametrelerinin Ölçülmesi

Generatör davranışlarının incelenmesi ve limitlerin belirlenmesi için generatör eşdeğer devre parametreleri kullanılmaktadır. Senkron generatörlerin eşdeğer devreleri üzerinde bulunan 3 büyüklük aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- ❖ Alan akımı ve akı arasındaki ilişki (alan akımı ve E_A)
- ❖ Senkron reaktans
- ❖ Armatür (Stator) direnci

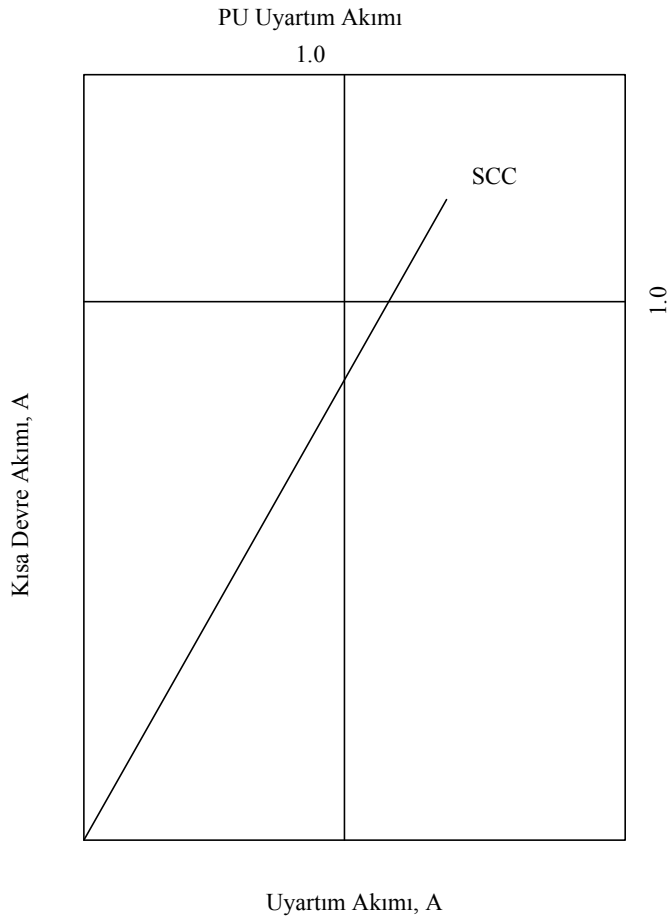
Generatörün uyarım akımı – uç gerilimi grafiğinin oluşturulması için “açık devre (open circuit (OC))” testi yapılmaktadır. Sıfır uyarım akımı ve yüksüz iken generatör nominal devrine çıkarılmaktadır. Uyarım akımı, adım adım arttırılarak her seviyedeki terminal gerilimleri ölçülmektedir. Terminallerin açık olması nedeniyle $I_A = 0$ ve bu nedenle E_A , $V_\emptyset$ ’ye eşit olacaktır. Bu sayede E_A (V_T)’nın I_f ye karşı olan tepkisine ait bir diyagram çıkartılabilmektedir. Bu eğri “açık devre karakteristiği”(open circuit characteristic (OCC)) olarak adlandırılmaktadır. Bu karakteristik ile verilen herhangi bir uyarım akımından generatör içerisinde üretilen gerilimi bulmak mümkündür. Tipik bir OCC eğrisi Şekil 2.7’de gösterilmektedir. Şekilde ilk eğri neredeyse hatasız şekilde oransal olarak yükselmektedir. Yüksek uyarım akımı seviyelerinde doyuma ulaşarak oransallık bozulmaktadır [29].



Şekil 2.7. Tipik bir senkron generatör açık devre karakteristik eğrisi [27]

Senkron makina yapısında bulunan doymamış demir, hava aralığı relüktansından binlerce kat daha küçük bir reaktansa sahiptir. Bu nedenle ilk olarak tüm manyeto motor kuvvetler hava aralığını yener ve bu nedenle akı lineer olarak artar. Demir doyuma ulaştığında demir relüktansı aşırı bir şekilde artış gösterir ve sonuç olarak akı çok daha yavaş bir şekilde artar. OCC'nin oransal kısmı "hava aralığı çizgisi" olarak adlandırılmaktadır [27].

Senkron generatörlerde gerçekleştirilen testlerden birisi de kısa devre analizidir. Kısa devre analizinde senkron generatörün nominal akımda ne kadar uyarıtım akımına ihtiyaç duyduğu görülmektedir. Bu test sonrasında generatörün tam güçteki uyarıtım akımı belirlenerek uyarıtım akımının üst limit değeri kolaylıkla bulunmuş olmaktadır. Şekil 2.8'de kısa devre analizine ait eğri görülmektedir.

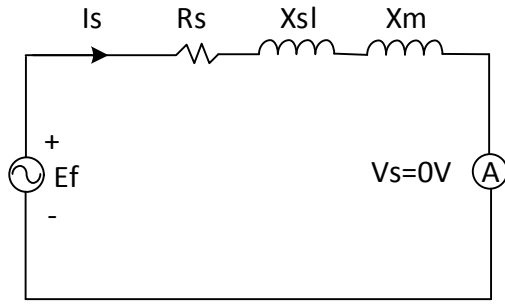


Şekil 2.8. Senkron generatör kısa devre karakteristiği eğrisi [27]

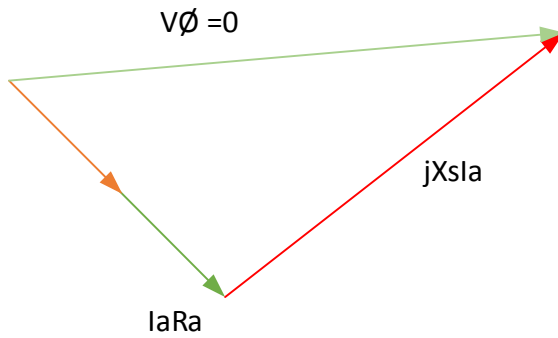
Bu analizin gerçekleştirilmesi için uyartım akımı sıfıra ayarlanıp, generatör terminalleri kısa devre edilmektedir. Daha sonra uyartım akımının artışı ile armatür akımı veya hat akımının değişimi izlenmektedir. Bu şekilde çizilen eğrilere “kısa devre karakteristiği (SCC)” adı verilmektedir. Genellikle düz bir çizgi olarak ortaya çıkmaktadır. Stator terminalleri kısa devre iken stator akımı Eş. 2.14 ile hesaplanmaktadır [27].

$$I_A = \frac{E_A}{R_A + jX_S} \quad (2.14)$$

Şekil 2.9’da kısa devre testi esnasında senkron generatörün bir faz eşdeğer devresi, Şekil 2.10’da fazör diyagramı ve Şekil 2.11’de manyetik alanlar gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Senkron generatörün bir faz kısa devre eşdeğer devresi



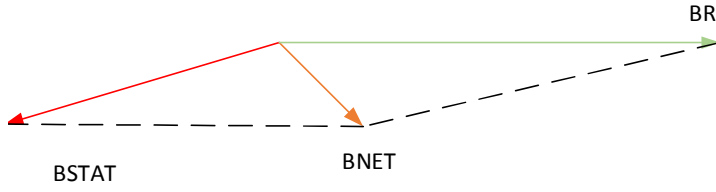
Şekil 2.10. Senkron generatör bir faz kısa devre fazör diyagramı [26]

Stator akı yoğunluğu B_{Stat} , rotor akı yoğunluğu B_R 'yi neredeyse sıfırlamaktadır. Bu nedenle net manyetik alan B_{net} çok düşüktür. Bu nedenle makine doyuma ulaşamaz ve SCC oransal olmaktadır. V_ϕ değeri 0'a eşit olduğu için makina iç empedansı aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

$$Z_s = \sqrt{R_A^2 + X_s^2} = \frac{E_A}{I_A} \quad (2.15)$$

$X_s \gg R_A$ olduğu için R_A ihmal edilebilir ve

$$X_s = \frac{E_A}{I_A} = \frac{V_{\phi,oc}}{I_A} \quad (2.16)$$



Şekil 2.11. Kısa devre anında senkron generatörde oluşan manyetik alanlar [27]

Armatür akımının büyüklüğü ise;

$$I_A = \frac{E_A}{\sqrt{R_A^2 + X_S^2}} \quad (2.17)$$

Eğer verilen durum için E_A ve I_A verilmiş ise X_S (senkron reaktans) bulunabilmektedir. Buradan yola çıkarak senkron reaktans X_S ve uyarım akımı I_f aşağıdaki yollar takip edilerek bulunabilir.

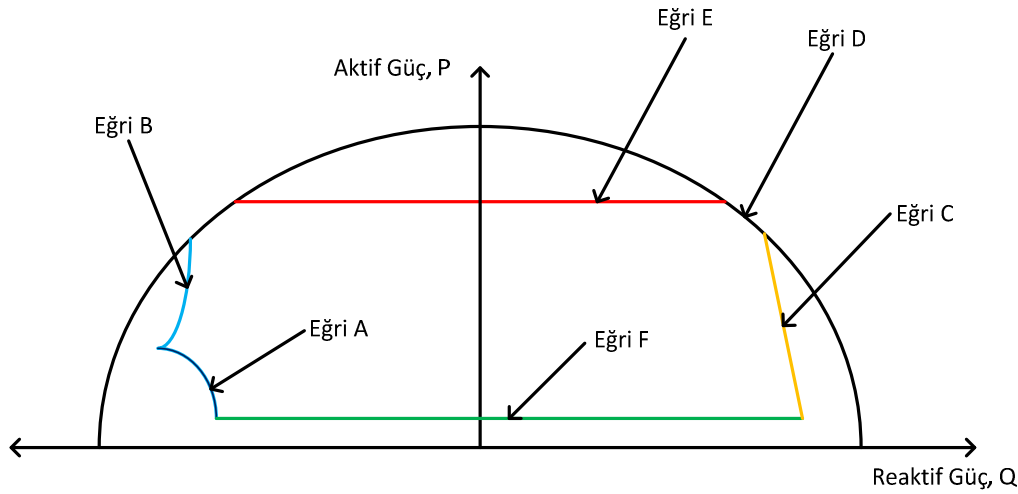
- ❖ OCC de elde edilen E_A değeri
- ❖ SCC de elde edilen I_{ASC} değeri
- ❖ Ve Eş. 2.7 uygulanarak X_S bulunabilmektedir.

Burada gerçekleştirilen testler sonucunda kullanılacak olan generatörün uyarım akım değerleri belirlenmektedir. Belirlenen uyarım akımının nominal değerleri, limit ve koruma değerlerinin belirlenmesinde büyük rol oynamaktadır. Bu nedenle gerçekleştirilen testlerin doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

3. SENKRON GENERATÖR UYARTIM SİSTEMLERİ

Generatörlerde gerilim üretilmesi için bir manyetik alana ihtiyaç duyulmaktadır. Bu manyetik alan kaynağı uyartım bölümü olarak adlandırılmaktadır. Uyartım sistemi tarafından oluşturulan manyetik alanın şiddeti, generatörlerde gerilim genliği ve güç katsayısını değiştirmektedir. Bu nedenle uyartım bölgesine uygulanan akımın kontrol edilebilir bir yapıda olması gerekmektedir.

Kontrol edilebilir yapıdaki uyartım akımı senkron generatörlerin çalışma bölgelerini değiştirdiğinden belirli sınırlar içerisinde tutulması gerekmektedir. Şekil 3.1’de generatör çalışma bölgeleri ve kararlılık sınırları görülmektedir.



Şekil 3.1. Senkron generatör kararlılık eğrisi

- Eğri A: minimum uyartım akımı
- Eğri B: uygulanabilir kararlılık limiti
- Eğri C: maksimum uyartım akımı
- Eğri D: maksimum stator akımı
- Eğri E: maksimum türbin gücü
- Eğri F: minimum türbin gücü

Uyartım ve güç kontrol sistemlerinde hem kararlılık hem de güvenlik açısından senkron generatöre ait bu eğrilerin bilinmesi gerekmektedir. Generatör üretici firmalar generatör içerisindeki sargıların dayanımı, silisyumlu saçların doyuma gitmesi gibi parametreleri

belirleyerek güvenli ve kararlı çalışma açısından uygulamada bu eğrilerin içerisinde kullanılmasını önermektedirler.

Kararlı çalışma bölgeleri generatör tiplerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Sistemler, uyarım güçleri farklı olan generatörler için bu sınırlar göz önünde bulundurularak tasarlanmaktadır.

3.1. Uyarım Sistemlerinin Sınıflandırılması

Senkron generatör ve uyarım sistemini incelemek ve generatörün şebeke kararlılığı üzerine etkilerini belirlemek için, generatör ve uyarım sistemlerinin matematik modelleri geliştirilmektedir. Gerçek sistemler için bozulmalar ve referans değerlerin değişimi modellenmektedir. Senkron generatörler için birçok uyarım sisteminin geliştirilmesi uyarım sistemlerinin sınıflandırılmasına sebep olmuştur.

IEEE “Güç Kararlılığı Çalışmaları için Uyarım Sistemlerinde Tavsiye Edilen Uygulamalar” adlı bir çalışma ele almış ve uyarım sistemlerini üç ana gruba ayırmıştır. Altında 19 farklı sistem barındıran bu 3 ana grup aşağıdaki gibidir:

- ❖ Doğru Akım Tetiklemeli Uyartıcılar (Tip DC)
- ❖ Alternatör Beslemeli Doğrultuculu Uyarım Sistemleri (Tip AC)
- ❖ Statik Uyarım Sistemleri (Tip ST)

Günümüzde, DC tip uyarım sistemleri diğer grup uyarım sistemlerinden daha fazla kullanılmaktadır. Bu grup uyarım sistemleri dört adet uyarım sistemi içermektedir:

DC1A tip uyarım sistemi voltaj regülatörünün buck-boost modda kendinden uyarımlı paralel alanlar için kullanılan sistemlerdir. Bu tür sistemler generatör çıkış gerilimini ana giriş olarak kullanan ve sürekli gerilim regülatörü olarak davranan kontrollü DA komütatörlü uyartıcılardan bahsetmektedir.

DC2A tip uyarım sistemlerinin DC1A tip uyarım sistemlerinden farkı voltaj regülatörünün çıkış limitleridir. DC3A tip uyarım sistemleri ise, daha eski sistemleri

açıklamaktadır. Bu tür sistemler süreksiz modda çalışan gerilim regülatörünü açıklamaktadır.

DC4B'nin DC1A'dan farkı ise PID kontrol sisteminin uygulanmasıdır. Bu sistemler yeni eklenmiştir.

AC tip uyartım sistemleri, AA generatör, elde edilen AA akımı doğrultmak için döner diyot sistemleri, durağan ve döner parçaları içermektedir. Bu tür uyartım sistemleri en geniş uyartım sistemi modeli barındıran gruptur ve sekiz adet sistem içermektedir. AC4A tip uyartım sistemi hariç diğer uyartım sistemlerinde, alan sargılarına negatif uyartım akımı uygulanmamaktadır. Bu tür uyartım sistemlerinin en önemli dezavantajı, sönümlemeye izin vermemesidir. AC1A tip uyartım sistemleri bağımsız uyartımlı olması halinde kontrolsüz doğrultuculu (diyot) alan kontrollü alternatör-doğrultucu olarak kullanılmaktadır. AC2A'nın AC1A'dan farkı ise uyartıcı zaman kompanzasyonu ve uyartıcı alan akımı limit özelliğinin bulunmasıdır. AC3A model uyartım sistemleri doğrusal olmayan kontrolle birlikte kendinden uyartımlı sistemler için kullanılmaktadır. AC4A model sistemler ise uyartıcı çıkışının tam kontrollü tristörler ile kontrol edildiği sistemler için kullanılmaktadır. AC5A model sistemler bağımsız uyartımlı fırçasız uyartım sistemleri için kullanılmaktadır. AC6A tip uyartım sistemler elektronik voltaj regülatörlü alan-kontrollü alternatör-doğrultuculu sistemleri açıklamaktadır. AC7B model sistemler ise yeni kontrol teknikleri ve PID kontrol tekniği ile birlikte çalışan sistemler için kullanılmaktadır. Model AC8B ise PID kontrolörlerin oransal, türevsel ve diferansiyel değişkenlerinin bağımsız olarak değişken atandığı sistemler için kullanılmaktadır.

ST tip uyartım sistemleri yedi model içermektedir [1]. Alan sargılarına kontrollü veya kontrolsüz doğrultucular tarafından uyartım akımı uygulanmaktadır. Bu tip uyartım sistemlerinin birkaç tanesi uygulanabilmektedir. Negatif uyartım akımı oluşturmak generatör iç sistemlerinde meydana gelebilecek bir problem esnasında çok çabuk sönümleme yapabileceği için bir avantaj olarak gösterilebilmektedir. ST1A tip sistemler uyartım için gerekli gücü generatör terminallerine bağlı transformatörlerden veya ayrı bir baradan alan sistemler için kullanılmaktadır. Bu tür sistemlerde kontrollü doğrultucu bulunmaktadır.

ST2A güç kaynağını belirlemek için generatörün hem akım hem de gerilim büyüklüklerini kullanan modeldir. Model ST3A uyarıcının kontrolünün doğrusal olması için alan gerilimini de kontrol döngüsünün içine sokmaktadır. ST4B ise ST3A'nın bir türevidir. Kontrolör olarak PI denetleyici kullanılmaktadır. ST5B ise ST1A'nın türevidir. Bu modelde ise düşük uyarım limiti, yüksek uyarım limiti gibi birçok limit değeri bulunmaktadır.

Genel olarak uyarım sistemlerinin sınıflandırılması Çizelge 3.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Uyarım sistemlerinin sınıflandırılması [1]

Uyarım Sınıfı	Uyartıcı Tipi	Uyarım Güç Kaynağı	Yüksek Tepki	Bilgisayar Model Tipi
DC	DC generator uyarıcı	Motor-generator seti veya senkron makine şaftı	Yok	DC1
			Yok	DC2
			Yok	DC3
AC	Alternatör-sabit kontrolsüz doğrultucu	Senkron makine şaftı	Yok	AC3
	Alternatör-dönen kontrolsüz doğrultucu (Fırçasız)	Senkron makine şaftı	Yok	AC1
			Var	AC2
	Alternatör-sabit kontrollü doğrultucu	Senkron makine şaftı	Var	AC4
ST	Potansiyel kaynaklı kontrollü doğrultucu	Senkron makine gerilim veya iç ihtiyaç gerilimi	Var	ST1
			Var	ST3
	Birleşik kaynaklı kontrolsüz doğrultucu	Senkron makine gerilimi ve akımı	Yok	ST2
	Birleşik kaynaklı kontrollü doğrultucu	Senkron makine gerilimi ve akımı	Var	ST3

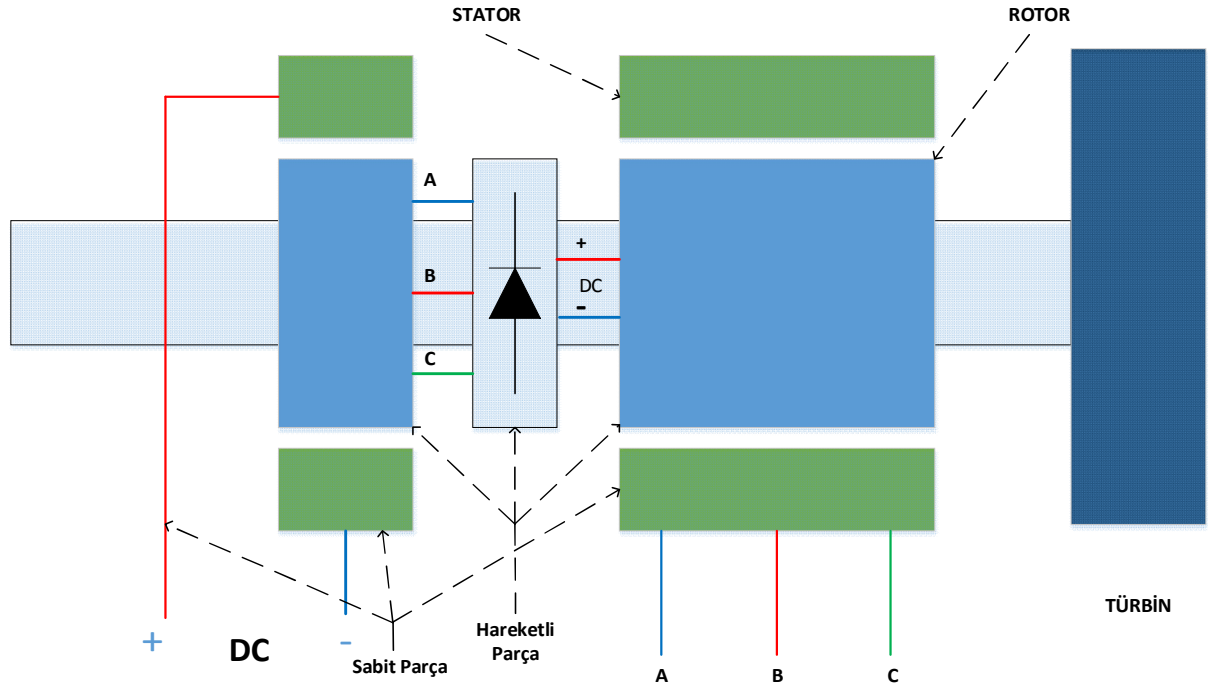
Farklı yöntemler ile elde edilen uyartım tipleri için ayrı standartlar kullanılmaktadır. Standartlarda belirtilen DC, AC ve ST tip uyartım sistemleri generatör tasarımlarına göre seçilmelidir.

3.2. Fırçasız Uyartım Sistemleri

Fırçasız uyartım sistemlerinde sargılara uygulanacak güç ayrı bir doğru veya alternatif akım generatöründen sağlanmaktadır. Uyartım generatöründe bulunan uyartım sargıları statorda, armatür sargıları ise rotorda yer almaktadır. Statorda bulunan uyartım sargıları hareketsizdir. Bu nedenle uyartım akımı kolaylıkla uygulanabilmektedir. Ancak armatür sargıları hareketlidir ve alternatif akım indüklenir. Ana generatör uyartım sargılarının ise doğru akım ile uyartılması gerekmektedir. Bu nedenle uyartım generatörü armatür sargılarına döner diyotlar bağlanarak kontrolsüz tam dalga doğrultucu yapılmaktadır. Şekil 3.2’de görüldüğü üzere tipik bir fırçasız uyartım sisteminde;

- Uyartım generatörü,
- Kontrolsüz doğrultucu,

bulunmaktadır .



Şekil 3.2. Fırçasız uyartım sistemi modeli

Uyartım generatörünün uyartım akımı AVR tarafından kontrol edilmektedir. Bu durum kararlı çalışma anında oldukça verimlidir. Ancak, kararsız çalışma durumunda güç dalgalarının sönümlenmesinde negatif bir etki yaratmaktadır [1]. Bu durumun kontrol edilmesinde kontrol döngüsüne güç sistemi düzenleyici (PSS) eklenmektedir. Bu sayede 0.1 Hz'den 3.0 Hz'e kadar olan salınımlar sınırlandırılabilir [9]. PSS giriş sinyali olarak aşağıdaki parametreler kullanılabilir:

- ❖ Hız değişimi
- ❖ Generatör aktif gücü
- ❖ Frekans değişimi
- ❖ EMK
- ❖ Generatör akımı

Genellikle bu değişkenlerden herhangi ikisi referans olarak seçilebilmektedir. Bu parametreler, uyartım sisteminin giriş değişkenlerini belirlemek için kullanılmaktadır. Generatör terminal gerilimi her zaman okunmaktadır. Ancak uyartım akımı ve gerilimi opsiyonel olarak ölçülmektedir. Limit ve koruma üniteleri ise bir problem esnasında sistemlerin zarar görmesini engellemek için uyartım akımını sınırlandırmaktadır. Uyartım akımının yanı sıra opsiyonel olarak:

- ❖ Generatör armatür gerilimi
- ❖ Uyartım gerilimi vb. fiziksel büyüklük sınırları belirlenebilmektedir.

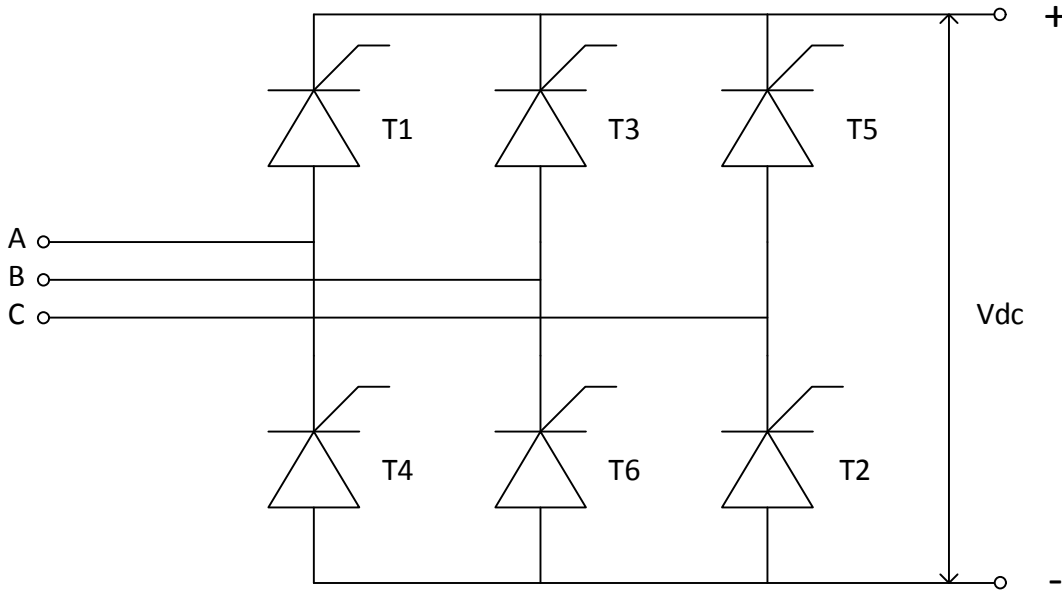
3.3. Fırçalı Uyartım Sistemleri

Fırçalı (statik) uyartım sistemleri temel olarak uyartım akımının bir güç dönüştürücüsü üzerinden haricen uyartım sargılarına uygulanması prensibine dayalı olarak çalışmaktadır. Şekil 3.3'te fırçalı tip uyartım sargılarına sahip bir generatör modeli görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere generatör modeli üzerinden uyartım akımı sağlayacak herhangi bir ünite bulunmamaktadır. Uyartım akımı harici bir güç dönüştürücüsü üzerinden fırçalar yardımı ile sargılara aktarılmaktadır.

Şekil 3.3'te görüldüğü gibi, bilezikler rotor shaftına sıkıca tutturulmaktadır. Ancak rotor shaftı ile bilezikler arasında yalıtım bulunmaktadır. Rotor sargılarının uçları bu bileziklere

3.4. Kontrollü Doğrultucular

Yüksek güç gerektiren DA sistemlerde kontrollü doğrultucular yaygın olarak kullanılmaktadır. Kontrollü doğrultucular alternatif akımın farklı açılarda iletilmesi prensibi ile çalışmaktadır. Bu amaçla AA sistemlerde sürülmesi kolay olan tristörler ile açı kontrolü sağlanmaktadır. 3 fazlı kontrollü bir doğrultucu Şekil 3.4'te görülmektedir.



Şekil 3.4. Üç fazlı tam kontrollü köprü tipi doğrultucu [30]

Şekil 3.4'ten görüldüğü üzere, 3 fazlı kontrollü bir doğrultucuda 6 adet tristör kullanılmaktadır. Tristörler, her fazın istenilen açı değerini geçirecek şekilde sürülerek ortalama çıkış gerilimi kontrol edilmektedir. 3 fazlı bir sistemin gerilim fonksiyonları referans alınan ilk faz için Eş. 3.1'de, ikinci faz için 120° geri olarak Eş. 3.2'de, 120 derece ilerideki üçüncü faz için Eş. 3.3'te verilmiştir.

$$V_a = V_m * \sin(\omega t) \quad (3.1)$$

$$V_b = V_m * \sin(\omega t - 120) \quad (3.2)$$

$$V_c = V_m * \sin(\omega t + 120) \quad (3.3)$$

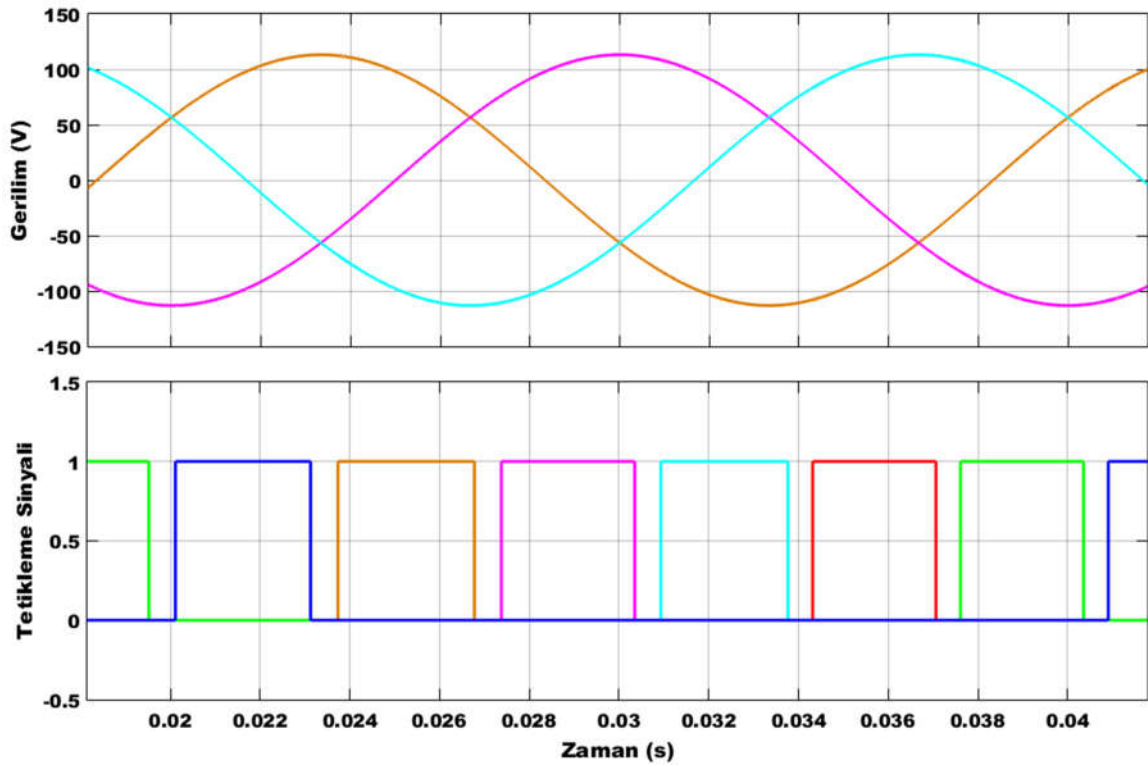
Burada;

V_m : Tepe değeri

ω : Açısal hız

t : Zaman

Şekil 3.5'te faz gerilimleri ve tetikleme sinyalleri görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere her faza ait tristörler birbirinden 180 derece açı farkı ile tetiklenmektedir. Böylece her fazın pozitif ve negatif alternansı aynı açı ile kırılmaktadır.



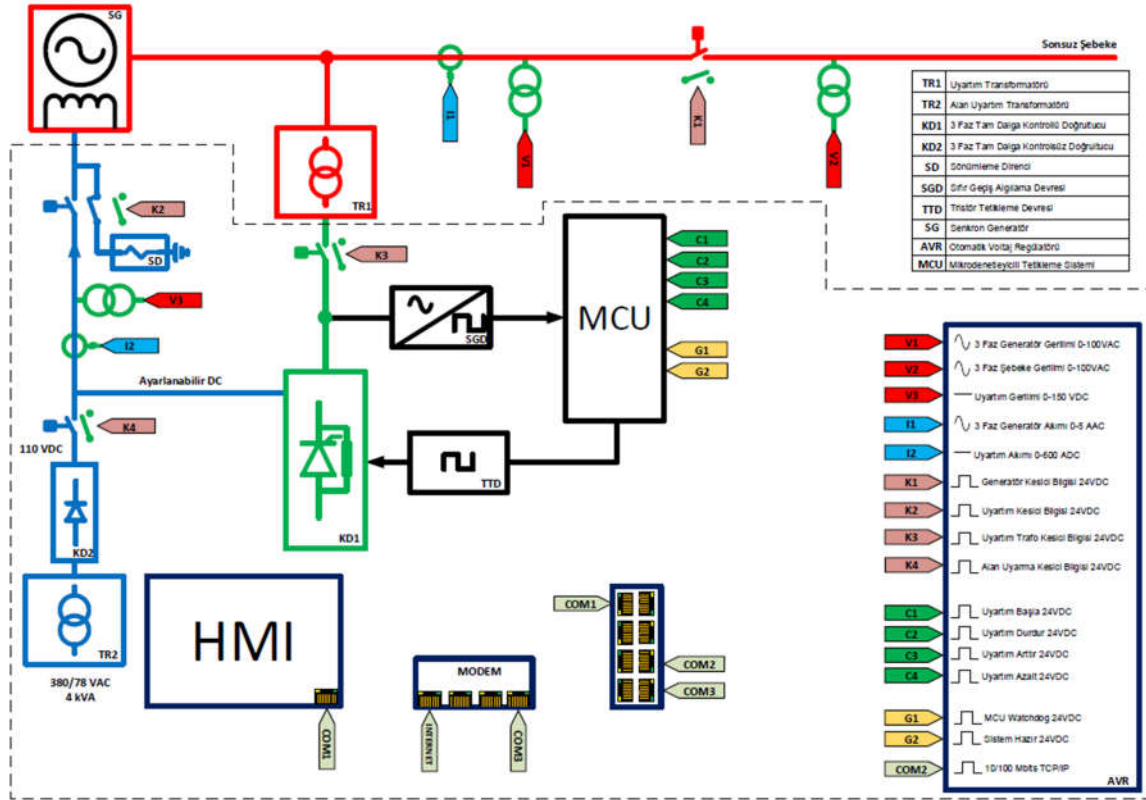
Şekil 3.5. Üç faz gerilimi ve tetikleme sinyalleri

Şekil 3.5'te görülen tetikleme sinyallerinin faz alternanslarına göre tristör çiftleri tetiklenmektedir. Her faz 150 derecelik bir bölgede kontrol edilmektedir. Tetikleme açısının değiştirilmesi kontrollü doğrultucu çıkış gerilimini değiştirmektedir.

Kontrollü doğrultucular kullanılarak istenilen seviyede doğru akım güç elektroniği anahtarlama elemanları sayesinde kolaylıkla elde edilebilmektedir. Bu nedenle uyarım sistemlerinde uyarım akımının kontrolünde tercih edilmektedir. Gerçekleştirilen tez çalışmasında da kontrollü doğrultucu kullanılarak ayarlı uyarım akımı sağlanmıştır.

4. TASARIM VE UYGULAMA

Gerçekleştirilen çalışmada, senkron generatörler için bir statik uyartım sistemi tasarlanmıştır. Sistemde uyartım akımı, kontrollü doğrultucu ile sağlanmaktadır. Kontrollü doğrultucunun tetiklenmesi için gerekli sinyaller ana kontrol ünitesi (MCU) tarafından ayarlanarak tristörlere uygulanmaktadır. Uyartım akımı otomatik voltaj regülatörü (AVR) tarafından belirlenmektedir. AVR, gerekli uyartım akımını sağlamak için MCU'ya komut göndererek tristörlerin tetikleme açısını belirlemektedir. Şekil 4.1'de, kesikli çizgi ile çerçeve içerisinde tasarımı gerçekleştirilen sistemin kapsamı ve kullanılan ekipmanların birbirleri ile ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Tasarımı yapılan sistemin blok diyagramı

4.1. Donanım Altyapısı

Şekil 4.1'de genel blok diyagramı gösterilen sistem, endüstriyel bir ürüne dönüşebilmesi açısından pano içerisine yerleştirilmiştir. Kullanılan pano çift yönlü olarak seçilmiştir. Ön ve arka kapağa sahip olan panonun ön kısmında elektrik ve elektronik içerikli, kullanıcı

kontrolüne açık bir tasarım yapılmıştır. Arka kısım ise güç sistemlerinin bulunduğu bölüm olarak ayrılmıştır. Panonun tasarımına ait görüntü Resim 4.1’de gösterilmektedir.



Resim 4.1. Tasarımı yapılan panonun görüntüsü

Pano ön kapağı cam kapak olarak kullanılmıştır. Cam kapak içerisinde elle kontrol butonları, operatör paneli ve acil durdurma butonu bulunmaktadır. Resim 4.2’de panonun ön panelinde bulunan ekipmanlar gösterilmiştir.



Resim 4.2. Pano ön görünümünde bulunan ekipmanlar

Resim 4.2’de görüldüğü gibi pano ön panelinde 4 temel eleman bulunmakta olup bunlar aşağıda açıklanmıştır.

A: Acil durdurma butonu;

Acil durdurma butonu, santral gibi çalışma sahasında bir problem olduğu anda sistemin tamamen durdurulmasını sağlayacak olan acil duruş butonudur. Bu buton otomasyon sistemindeki acil duruş butonu ile seri bir bağlantı içermektedir. Normalde kapalı kontaklardan geçen sinyalde bir kesilme olması durumunda sistem kendini emniyete alarak durmaktadır.

B: Harici kontrol butonları;

Sistemin elle kontrolüne imkan sağlayan butonları göstermektedir. Bu butonlar uyarım sisteminin çalışması için başlatma, durdurma, uyarım akımının arttırılması ve azaltılması ile sistemin otomatik veya kullanıcı kontrollü çalıştırılması seçimlerinin yapılması için kullanılmaktadır.

C: Uyarım kesicisi;

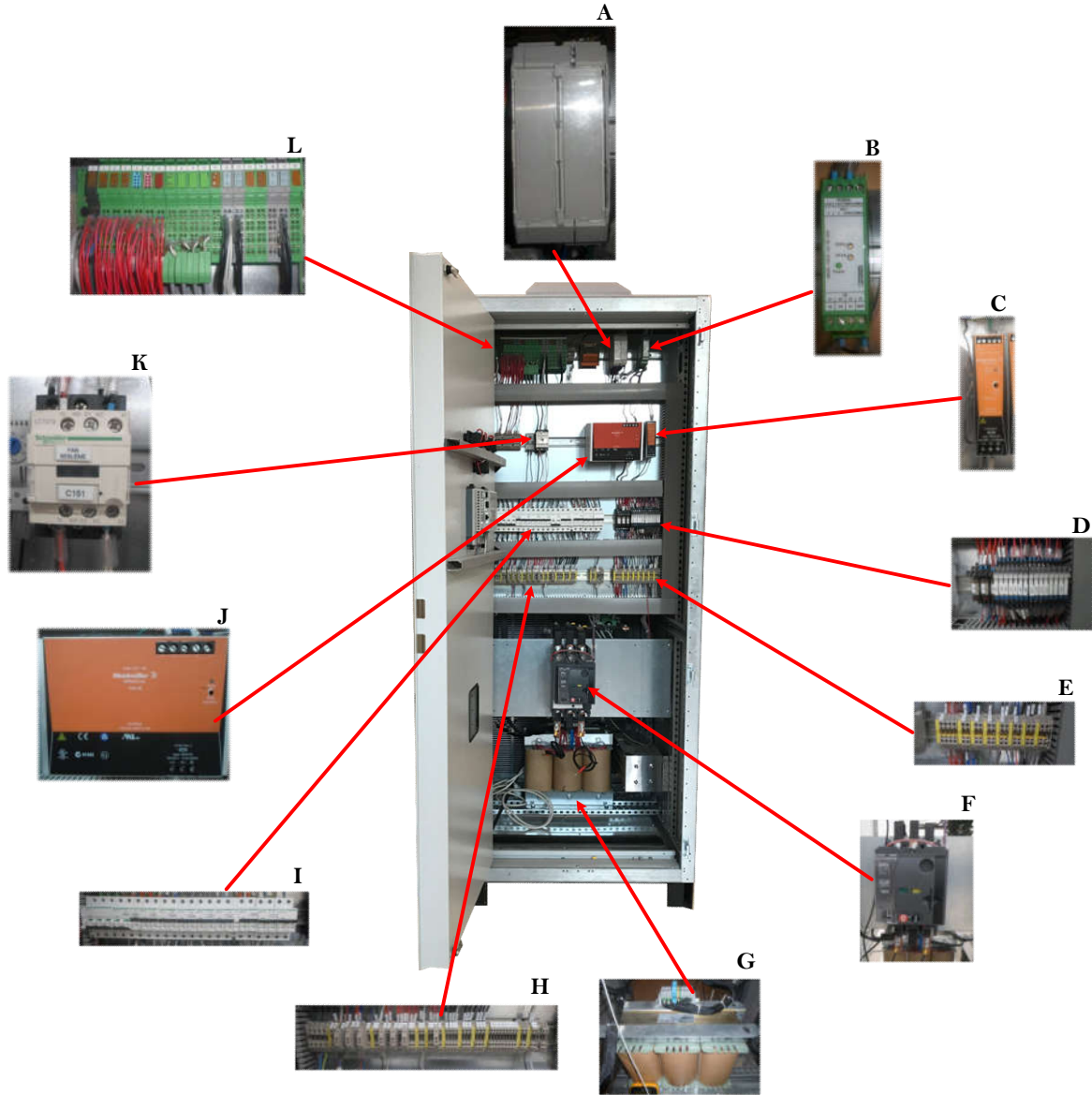
Bu kesici ile uyarım sistemine uygulanacak akım kontrol edilmektedir. 800 A’ya kadar geçiş akımına izin veren Schneider marka motorlu kesici tercih edilmiştir. Uyarım akımının pozitif barası seri olarak kesicinin ilk iki kontağından geçirilmiştir. Üçüncü kontak ise negatif barası için kullanılmıştır.

D: Operatör Paneli;

Schneider firmasına ait bir dokunmatik operatör panelini belirtmektedir. Operatör paneli kullanılan PLC sistemi ile haberleşerek sistemin tüm verilerini, parametre ayarlarını, anlık sistem durumunu kullanıcıya sunmaktadır.

Uyarım panosunun ön bölümünde AVR sistemini oluşturan birimler bulunmaktadır. Bu bölüm PLC, MCU, röleler, sigortalar, sinyal ve besleme klemensleri gibi üniteleri

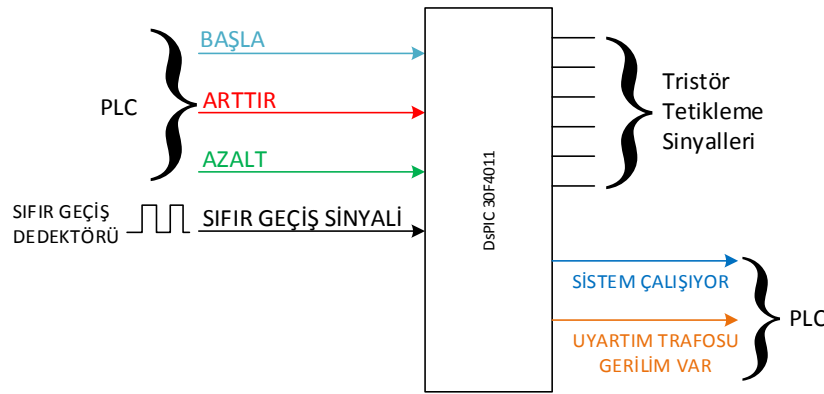
içermektedir. Resim 4.3 uyartım panosunun ön bölümünde bulunan ekipmanları göstermektedir.



Resim 4.3. Uyartım panosunun ön bölümü ve ekipmanlar

A: MCU Devresi;

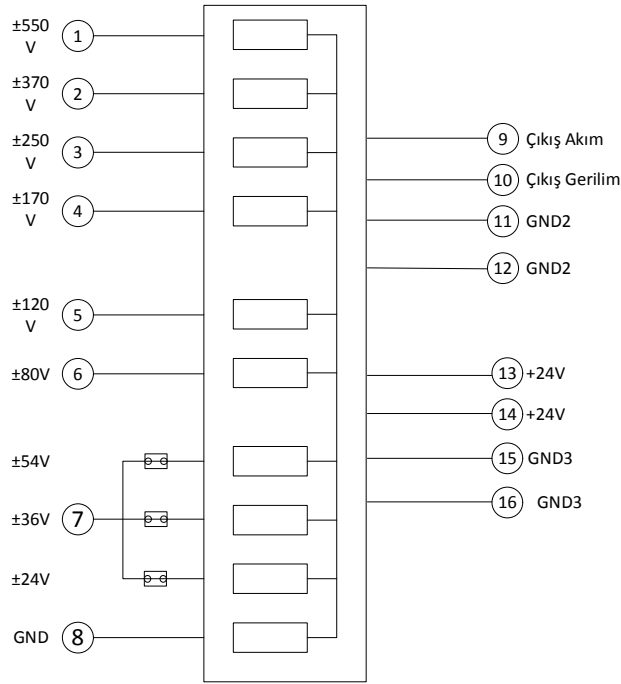
Microchip dsPIC firmasına ait dsPIC 30F4011 serisi mikroişlemci kullanılarak tristörler için gerekli tetikleme açısı hesaplanmakta ve tristörlere uygulanmaktadır. Bu ekipman MCU olarak adlandırılmaktadır. MCU kartı, PLC'den gelen komutlara göre tetikleme açısını ayarlamaktadır. MCU, PLC'den “başla”, “arttır”, “azalt” gibi komutlar alırken, PLC'ye “sistem hazır” ve “MCU çalışıyor” bilgisi vermektedir. MCU'ya ait blok diyagramı Şekil 4.2'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2. MCU'ya ait blok diyagramı

B: Gerilim Dönüştürücü;

Uyartım geriliminin okunması amacıyla Phoenix firmasına ait gerilim dönüştürücüyü göstermektedir. Cihaz üzerinde giriş gerilim kademesine göre bağlantı klemensi bulunmaktadır. Buradan giriş gerilim değerinin bir kademe üzeri seçilerek PLC'nin analog girişine 0-20 mA arası bir analog sinyal gönderilmektedir. PLC, bu sinyali uygun şekilde dönüştürerek gerçek değeri hesaplamaktadır. Uyartım geriliminin okunması uyartım sisteminin çalışma modlarından olan alan uyartım gerilim kontrolü (FVR) için önem arz etmektedir. Gerilim dönüştürücüye ait bağlantı diyagramı Şekil 4.3'de gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Gerilim dönüştürücü bağlantı diyagramı

C: 12V Güç Kaynağı;

Kullanılan güç kaynağı, MCU ve tristör tetikleme kartı için gerekli olan 12 V_{DA} gerilimi sağlamaktadır. 12 V_{DA} gerilimi MCU'ya uygulanarak 5 V_{DA} gerilime düşürülmektedir. Sistemde kullanılacak olan 5 V_{DA} gerilim buradan elde edilmektedir. Ayrıca tristörlerin tetiklenmesi için gerekli akım bu kaynaktan sağlanmaktadır.

D: Röleler;

PLC giriş çıkışlarının izolasyonu için kullanılan 24 V_{DA} ve 220 V_{AA} röleleri göstermektedir. Bu röleler kesici kontrolü, MCU komutları, sinyallerin 24 V_{DA} 'ya dönüştürülmesi için kullanılmaktadır.

E: Güç Klemensleri;

Sistemde kullanılan enerjinin dağıtımının yapıldığı klemensleri göstermektedir. Bu beslemeler 5 V_{DA} , 12 V_{DA} ve 220 V_{AA} olarak ayrılmıştır.

F: Uyarım kesicisi;

Uyarım akımının kontrolünde kullanılan bu kesici panonun ön kesitinde açıklanmıştır.

G: İlk Uyarım Transformatörü;

İlk uyarım akımı, transformatörden alınarak doğrultucu bloğuna uygulanmaktadır. Bu sayede, generatörde bir gerilim indüklenmesi sağlanmaktadır. Kullanılan transformatör 380-78 V_{AA} dönüştürme oranına sahiptir. Kontrolsüz doğrultucu çıkış gerilimi ise 120 V_{DA} 'dır.

H: Sinyal Klemensleri;

Uyarım sisteminde kullanılan sayısal ve analog sinyallerin pano içerisine ve dış sisteme aktarılmasında kullanılan klemensleri göstermektedir.

I: Sigortalar;

Sistem ana beslemeleri, güç kaynakları besleme ve çıkış kontrolleri, operatör paneli ve PLC besleme sigortalarını açıklamaktadır. Bu sigortalar enerji dağıtımını yaptığı alt sistemlerinin besleme kontrolünü yapmaktadır.

J: 24V Güç Kaynağı;

Güç kaynağı, PLC ve operatör paneli için gerekli olan 24 V_{DA} gerilim sağlamaktadır. Weidmuller firmasına ait güç kaynağının giriş beslemesi bir faz 220 V_{AA} şeklindedir.

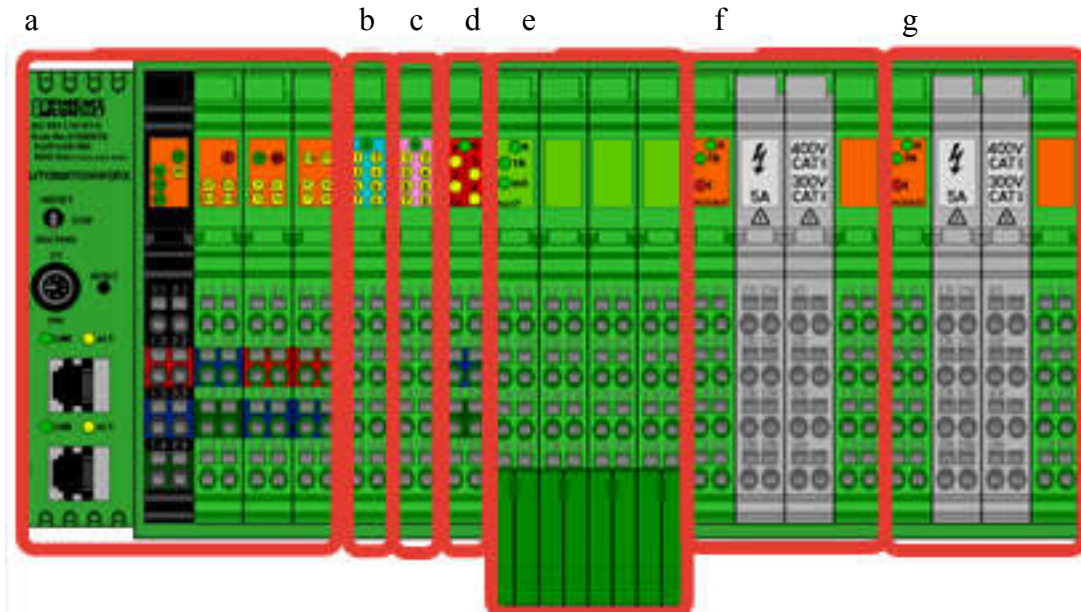
K: Fan Kontaktörü;

Sistem çalışırken tristörlerde ısınma meydana gelmektedir. Bu nedenle tristöre ait soğutma blokları bir fanla soğutulmaktadır. Sistemde bulunan 3 adet fan PLC ile kontrol edilerek uyarım akımı sağlandığı sürece fanlar çalıştırılmaktadır. Fanların durum bilgisi PLC tarafından sürekli olarak izlenmektedir. Fanların durması tristör bloğunun ısınmasına neden olacağı için sürekli çalıştırılması önem arz etmektedir.

L: PLC;

Phoenix marka PLC CPU ve kartları gösterilmiştir. AVR sisteminin ana parçalarından birisidir. Sistemde sayısal giriş ve çıkışlar, analog girişler ile birlikte enerji analiz modülleri bulunmaktadır.

Generatör, şebeke ve uyarım akım ve gerilimi PLC tarafından okunmaktadır. Sistem için gerekli uyarım akımı belirlenerek MCU'ya komutlar PLC tarafından gönderilmektedir. Resim 4.4'te PLC kart konfigürasyonu gösterilmektedir.



Resim 4.4. PLC kart konfigürasyonu

Resim 4.4'te gösterildiği üzere PLC sistemi üzerinde, bir adet CPU ve üzerinde giriş çıkış kartları, sayısal giriş ve çıkış kartı, analog giriş kartları ve enerji analizörü modülleri bulunmaktadır.

a: CPU;

Cihaz, iki adet ethernet girişi ile bir adet programlama için AUX girişine sahiptir. CPU kartı üzerinde 8 adet sayısal giriş ve 4 adet sayısal çıkış vardır.

b: 8'li Sayısal Giriş Kartı;

8'li 24 V_{DA} sayısal giriş kartı tercih edilmiştir. CPU üzerindeki 8 adet sayısal giriş ile birlikte sistemde toplam 16 adet sayısal giriş bulunmaktadır. Bu girişler kesici bilgisi, kontaktör durumu ve PLC'ye gönderilen komutların izlenmesinde kullanılmaktadır.

c: 8'li Sayısal Çıkış Kartı;

PLC kartı 8 adet sayısal çıkış içermektedir. Bu sayısal çıkışlar PLC tarafından gönderilen komutların cihazlara iletilmesinde kullanılmıştır.

d: 4'lü Sayısal Çıkış Kartı;

Sayısal çıkış kartı 4 adet çıkışa sahiptir. Bu çıkışlarla birlikte sistemde toplam 16 adet sayısal çıkış bulunmaktadır.

e: 4'lü Analog Giriş Kartı;

Bu PLC kartı ise sistemde kullanılacak olan analog sinyallerin okunmasında kullanılmaktadır. Sistemde 2 adet analog sinyal kullanılmaktadır. Çizelge 4.1 sistemde kullanılan analog sinyaller tanımlanmaktadır.

Çizelge 4.1. Sistemde kullanılan analog sinyaller ve türleri

No	Sinyal tanımı	Giriş aralıkları	Çıkış aralıkları
1	Uyartım akımı	0-600 A_{DA}	4-20 mA
2	Uyartım gerilimi	0-150 V_{DA}	0-20 mA

f: Generatör Enerji Analizörü Kartı;

Tercih edilen enerji analizörü modülü generatörün analizi için kullanılmaktadır. Generatör gerilim transformatörlerinden alınan 100 V_{AA} gerilimi 3 faz 3 telli olarak enerji analizörü modülünün girişine uygulanmaktadır. Generatörden alınan akım bilgileri ise akım transformatörlerinden alınan 5 veya 1 A_{AA} akım bilgisi enerji analizörünün akım

klemenslerine 3 faz ve 1 nötr şeklinde 4 telli olarak bağlanmaktadır. Akım ve gerilim bilgileri enerji analizörüne girilen generatör ile ilgili tüm güç, enerji, akım ve gerilim değerleri okunmaktadır. Enerji analizöründen okunabilecek değerler Çizelge 4.2’de gösterilmektedir.

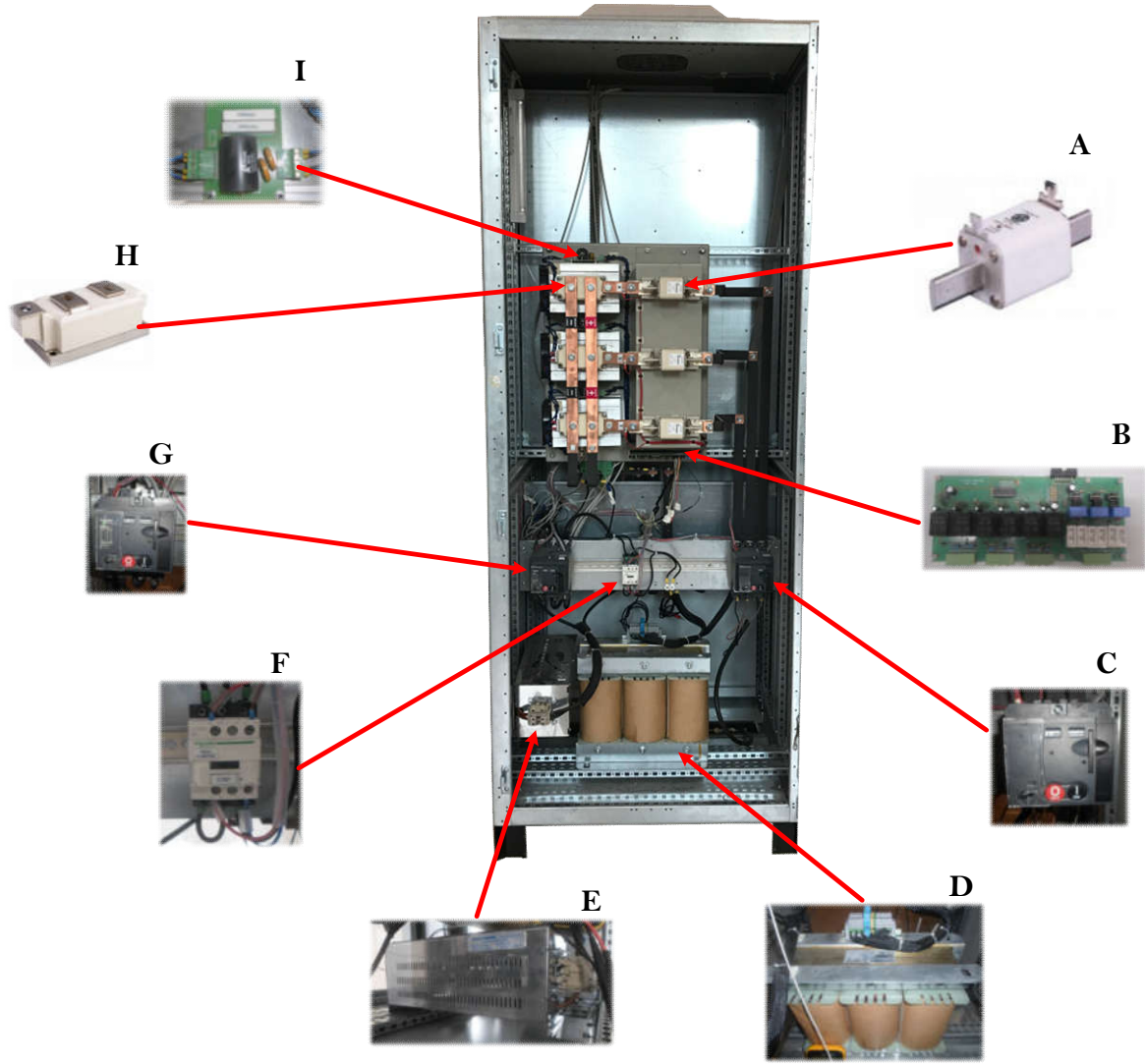
Çizelge 4.2. Enerji analizörü modülünden okunan değerler

1	Faz-faz gerilimleri
2	Faz-nötr gerilimi
3	Faz akımları
4	Nötr akımı
5	Her faz için ve toplam aktif güç
6	Her faz için reaktif güç
7	Her faz için ve toplam görünür güç
8	Her faz için ve toplam güç kat sayısı
9	Frekans
10	Güç akış yönü

g: Şebeke Enerji Analizörü Kartı;

Enerji analizörü modülü şebeke geriliminin okunması için kullanılmaktadır. Şebeke ile senkronizasyon sağlanması için akım bilgisine ihtiyaç duyulmaması nedeniyle akım bilgisi kullanılmamaktadır.

Uyartım panosunun güç kısmı arka tarafı olarak adlandırılan kısmında bulunmaktadır. Burada tristörler, tetikleme kartı, kesiciler, sönümlleme direnci gibi ekipmanlar bulunmaktadır. Resim 4.5 uyartım panosunun arka kısmında bulunan ekipmanları harflerle belirtilmiş şekilde göstermektedir.



Resim 4.5. Uyarım panosunun arka bölümü ve ekipmanlar

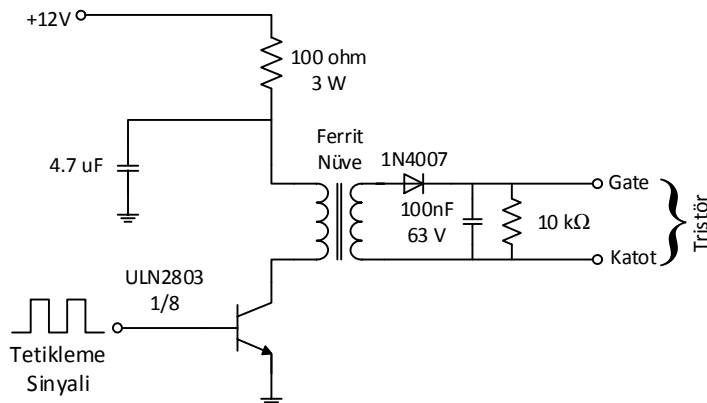
A: Hızlı Tip Bıçaklı Sigorta;

Kontrollü doğrultucu girişinde oluşabilecek ani akım artışlarına karşı kontrollü doğrultucuda meydana gelebilecek hasarı önlemek amacıyla bıçaklı sigortalar kullanılmıştır. Sigortalar 350 A olarak belirlenmiştir. Kullanılacak generatörün uyarım akımına göre değişiklik göstermektedir.

B: Tristör Sürücü ve Sıfır Geçiş Algılama Kartı;

Elektronik kart, MCU tarafından hesaplanmış olan tristör tetikleme sinyallerinin, tristörlerin girişine uygulanması için kullanılmaktadır. Sistemde tristörlerin tetiklenmesi için 12 V_{DA} gerilim kullanılmıştır.

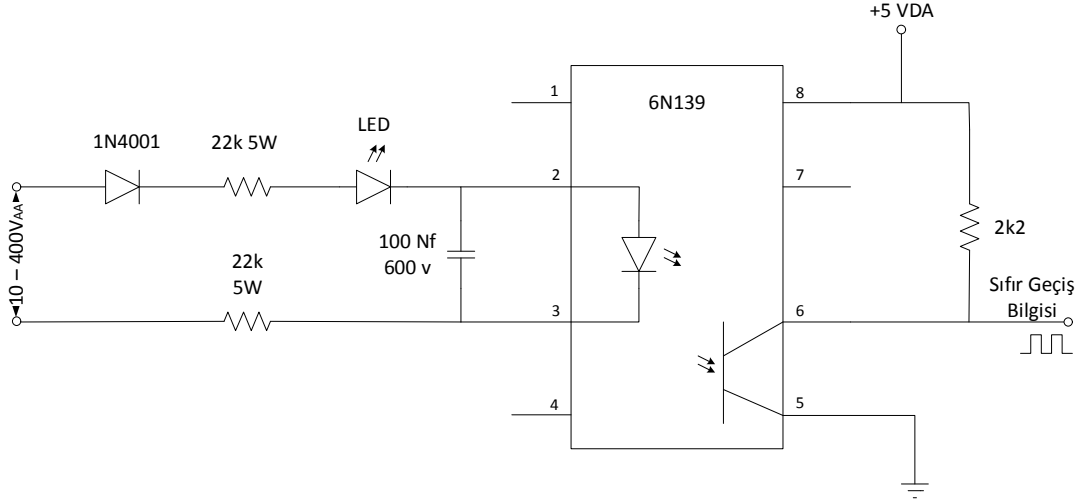
Sistemde bulunan 6 adet tristör kontrolü için kullanılan devrenin 1 tristör için olan devresi Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Sistemin girişine uygulanan 12 V_{DA} gerilim 100 Ω 3W direnç üzerinden 4,7 uF'lik kondansatörü şarj etmektedir. ULN2803 transistör entegresine uygulanan 25 us'lik sinyal kullanılan ferrit nüvenin akımında sıçrama oluşturmaktadır. Bu sayede tristör iletime geçmektedir. 4,7 uF'lik kondansatörün şarj olması için 300 us'lik bir bekleme süresi uygun görülmüştür. Tristörler iletimde kaldığı süre boyunca tristörlerin tutma akımı I_G'nin altında akım çekmesi durumunda tekrar kesime gideceği için bu çevrim sürekli olarak uygulanmaktadır.



Şekil 4.4. Tristör tetikleme devresi

Uyartım transformatöründen kontrollü doğrultucu girişine uygulanan AA sinyali ile tristörlerin tetiklenmesi için bu sinyalin sıfırdan geçtiği an ve periyot süresinin bilinmesi

gerekmektedir. Bu bilginin elde edilmesi için sıfır geçiş devreleri kullanılmaktadır. Sistemde kullanılan sıfır geçiş devresine ait devre Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Sıfır geçiş devresi

C: Uyartım Transformatörü Kesicisi;

Uyartım transformatöründen gelen alternatif gerilimin, kontrollü doğrultucu girişine uygulanmasında girişin kontrol edilmesi için kullanılan motorlu kesiciyi gösterilmektedir. Schneider firmasına ait olan motorlu kesici, PLC tarafından kontrol edilmektedir. Arıza durumunda veya sistemin çalışmaması halinde kesici kontakları açılarak kontrollü doğrultucunun emniyeti sağlanabilmektedir.

D: İlk Uyartım Akımı Transformatörü;

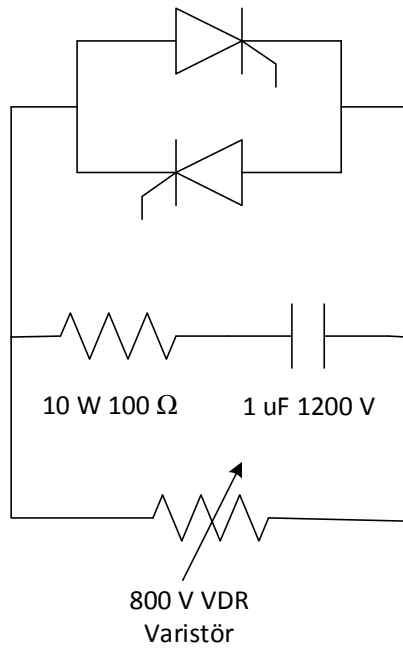
Transformatör, uyartım panosunun ön kısmında belirtilmiş olan ilk uyartım akımının sağlanması için kullanılan 380-78 V_{AA} transformatördür.

E: Sönümleme Direnci

Generatörün uyartım sargıları, üzerinde akım depo eden bobin özelliği taşımaktadır. Generatör veya santralde oluşabilecek arıza durumunda generatördeki manyetik alanın en kısa sürede sönümlenmesi istenmektedir. Sönümleme olayının gerçekleştirilmesi için, generatör sargılarında depolanan akımın harcanması prensibine dayanarak akım bir direnç

I: Sönümleme Devresi;

Tristörlerin tetiklenme yöntemlerinden birisi anot-katot arası gerilimin hızlı bir şekilde yükselmesidir. Sönümleme (snubber) devresinde bulunan direnç ve kondansatör bu etkiyi yavaşlatmakta ve bu nedenle tristörlerin kontrol dışı bir şekilde devreye girmesinin önüne geçilmektedir. Şekil 4.7’de kullanılan sönümleme devresi gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Kullanılan sönümleme devresi

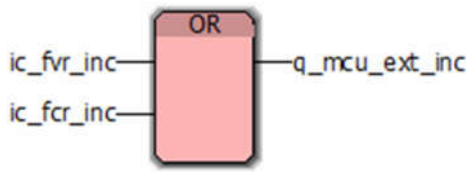
4.2. Yazılım Altyapısı

Sistemde yazılım özelliğine sahip PLC, MCU ve operatör paneli olmak üzere 3 ayrı bölüm bulunmaktadır. PLC, sistemin genel kontrolü işlemlerinin ve belirlenen çalışma türlerinin uygulanmasında kullanılmaktadır. MCU tristörlerin tetikleme açılarının hesabı ve sıfır geçiş sinyalinin algılanmasında görev almaktadır. Operatör paneli ise kullanıcıdan gelen komutların PLC’ye aktarılması ve sistem ile ilgili bilgilerin kullanıcıya aktarılması için tercih edilmiştir.

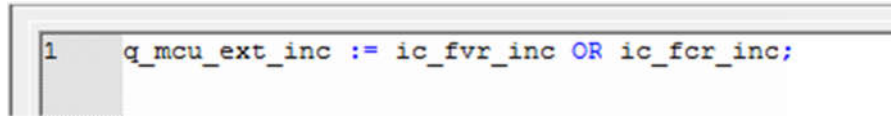
4.2.1. PLC yazılımı

PLC yazılımı PC Worx programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PC Worx programı IEC 61131 standardına uygun IL, FBD, LD, FFLD, SFC ve ST gibi yazılım dilleri ile tasarıma

imkân sağlamaktadır. Gerçekleştirilen PLC yazılımı FBD ve ST dilleri kullanılarak oluşturulmuştur. FBD, yapılacak işlemlerin bir blok içerisinde gerçekleştirildiği ve giriş-çıkış birimlerine sahip olan bir dildir. Sürükle-bırak mantığı ile istenen fonksiyona ait blok programlama sayfasına atılmaktadır. ST, C tabanlı yazılım kodları ile yazılım yapılması için tasarlanan bir yazılım dilidir. Bu sayede fonksiyon blokları ile gerçekleştirilmesi uzun sürebilecek olan bir yazılım algoritması, ST dili kullanılarak kolayca gerçekleştirilebilmektedir. Resim 4.6 (a) FBD, Resim 4.6 (b) ST yazılım diline ait aynı bloğu göstermektedir.



(a)



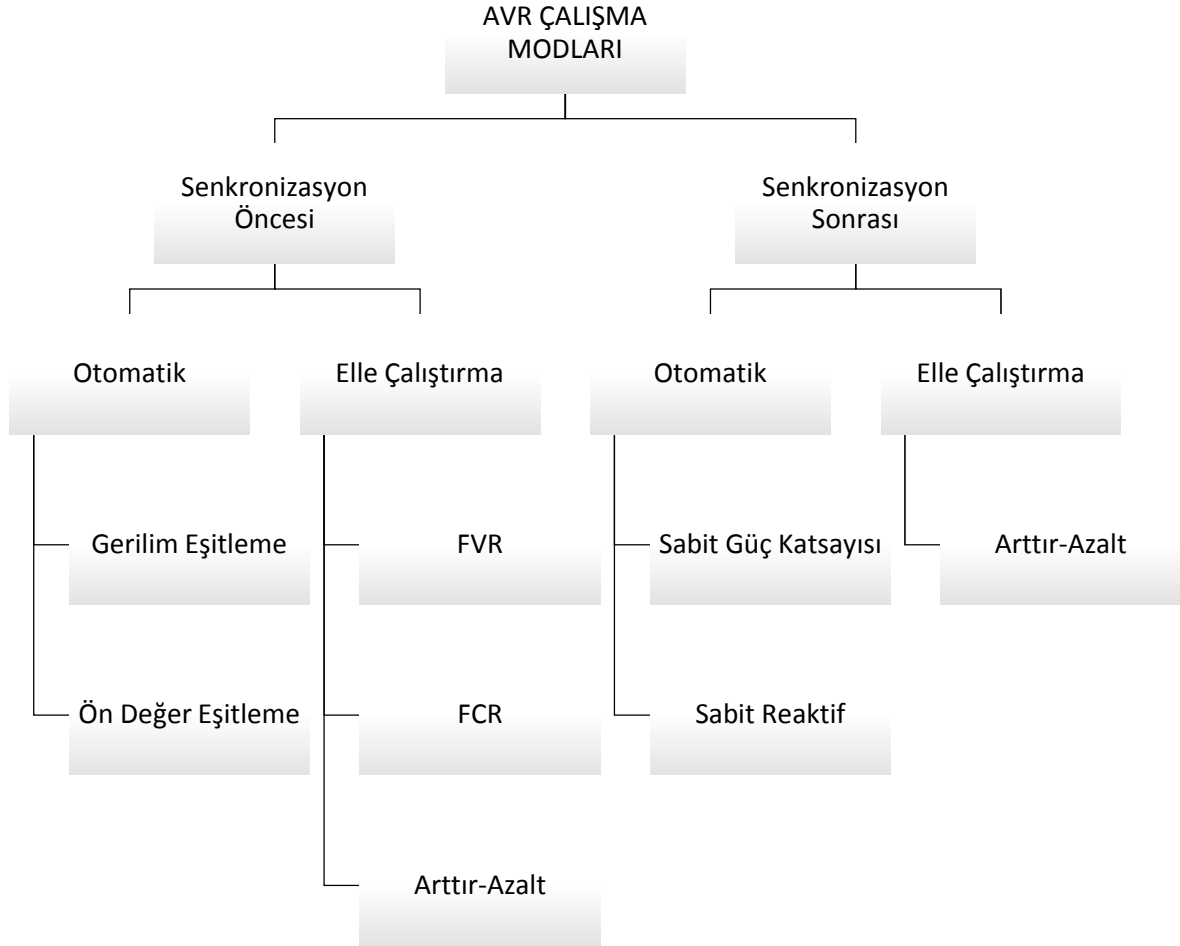
(b)

Resim 4.6. (a) FBD dilinde ve (b) ST dilinde yazılmış OR bloğuna ait şema

PLC programı, orta ölçekli bir hidroelektrik santralinin çalışma işlemleri göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Bir hidroelektrik santralinde uyarım sisteminin çalışması üst otomasyon sisteminden gelen “çalışmaya başla” komutu ile başlamaktadır. Bu komut generatörün nominal hızın %95 kadar olduğu anlamına gelmektedir. Bu komut sonrasında uyarım sistemi belirlenen çalışma türüne göre çalışmaktadır.

Gerçekleştirilen AVR farklı çalışma modlarına sahiptir. Bu modlar senkron öncesi veya sonrası olarak iki ana başlık altında incelenebilmektedir. Bu ana başlıkların altında otomatik veya elle çalıştırılma modları olarak da iki ayrı başlık şeklinde açıklanabilmektedir. Senkronizasyon öncesi otomatik çalışma modları ise “gerilim eşitleme” ve “ön değer eşitleme” olarak ayrılmıştır. Elle çalıştırma modları ise “alan gerilim ayarlama (FVR)”, “alan akımı ayarlama (FCR)”, butonla kontrole izin veren “arttır-azalt” olarak 3 bölümde gösterilmiştir. Senkronizasyon sonrası çalışma modunda ise

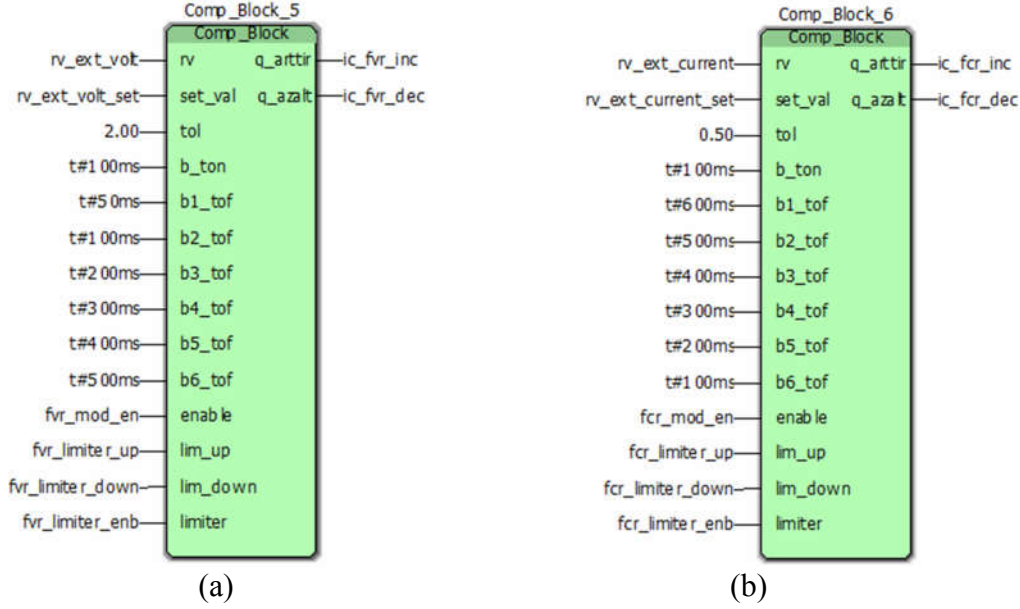
AVR kontrolüne bırakılan otomatik çalışma modları “sabit güç katsayısı” ve “sabit reaktif” olarak, elle çalıştırma modu ise “arttır-azalt” olarak ayrılmıştır. Bu çalışma modları Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Uyarım sistemi çalışma modları

Uyarım sisteminin ilk defa çalıştırılması, belirli basamaklar uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Generatör geriliminin hangi uyarım akımında şebeke gerilimi ile eşitlendiğinin kontrolü için generatör nominal hızda çalıştırılırken uyarım akımı belirli bir kademedede arttırılmaktadır. Elle kontrole imkan sağlayan bu uygulama ile generatörün uyarım sargılarına uygulanan akım ve gerilim değerlerinin nominal generatör gerilimindeki değerler bulunabilmektedir. Bu çalışma şekilleri alan akım kontrol (FCR) ve alan gerilim kontrol (FVR) modu olarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma modları için PLC içerisinde bir kontrol bloğu tasarlanmıştır. Bu blok gerçek uyarım akım veya gerilim değerini kendisine referans olarak girilen uyarım akım veya gerilim değerlerine

eşitlemektedir. Bu eşitleme esnasında yine tolerans aralığında ayarlama yapmaktadır. Uyarım gerilimi kontrolüne ait yazılım bloğu Resim 4.7 (a)'da, uyarım akım kontrolüne ait yazılım bloğu ise Resim 4.7 (b)'de gösterilmektedir.

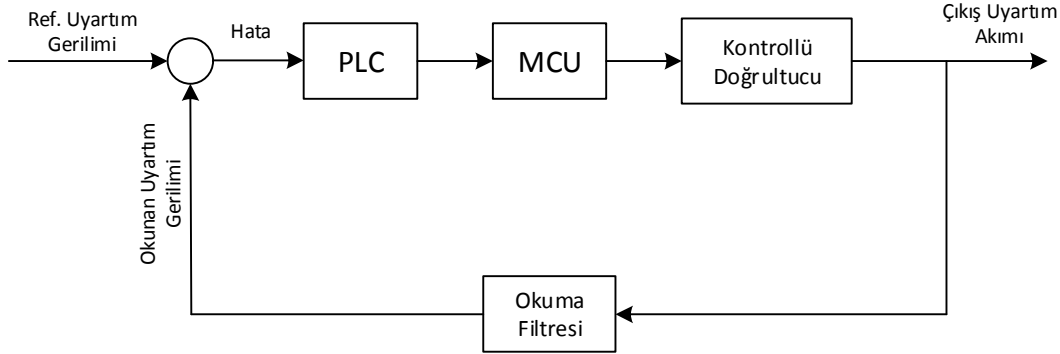


Resim 4.7. (a) Uyarım gerilim ve (b) akım kontrolüne ait geliştirilen yazılım bloğu

Resim 4.7 (a) ve (b)'de görüldüğü üzere sistemde kontrol için 6 farklı bölge uygulanmıştır. Bu bölgeler referans değeri ile gerçek değer arasındaki farkın büyüklüğüne göre gönderilen komutun duruş süresini göstermektedir. Eğer fark büyük ise en kısa duruş süresi, fark küçük ise en uzun duruş süresi seçilmektedir. Bloğun çalışması için aktif etme girişleri oluşturulmuştur. Bu değer operatör paneli üzerinden kullanıcı tarafından seçilebilmektedir. Blok üzerinde gerçek değer belirlenen değer altına inmesi veya üzerine çıkması halinde gerçek değeri bölge farkı gözetmeksizin belirlenen aralıklar içerisine çekecek limit değerleri ve bu değerlerin aktif hale getirilebilmesi için "limiter" olarak adlandırılan bir giriş bulunmaktadır. Bu girişler gerçek değer okunduğu blokların üst ve alt limitlerin elde edildiği yazılım kodlarından elde edilmektedir.

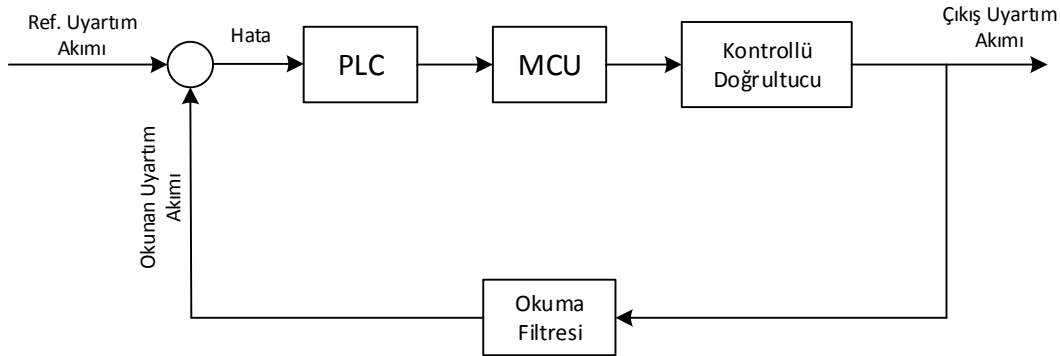
Elle çalışma işlemleri uyarım sisteminde, devreye alma esnasında veya bir arızanın tespit edilmesi durumunda kullanılmaktadır. Otomatik çalışma modlarında ise sistem elle çalışma esnasında elde edilen değerlere uygun olarak çalışmalıdır. Elle çalışma modunda elde edilen uyarım akım ve gerilim değerlerinin üst limitleri bulunmaktadır. Bu değerler uyarım sisteminin limit ve koruma değerlerinin bulunmasında yardımcı olmaktadır.

FVR mod çalışmaya ait kontrol grafiği Şekil 4.9’da gösterildiği gibidir. Geri beslemeli olarak okunan uyarım gerilimi referans olarak belirlenen değere eşitlemeye çalışmaktadır.



Şekil 4.9. FVR mod çalışma kontrol grafiği

Şekil 4.9’da görüldüğü üzere sistem hatayı sıfıra yaklaştırmak için uyarım akımını kontrol etmektedir. Bu çalışma şekline benzer olarak FCR mod çalışma kontrol grafiği de Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.10. FCR mod çalışma kontrol grafiği

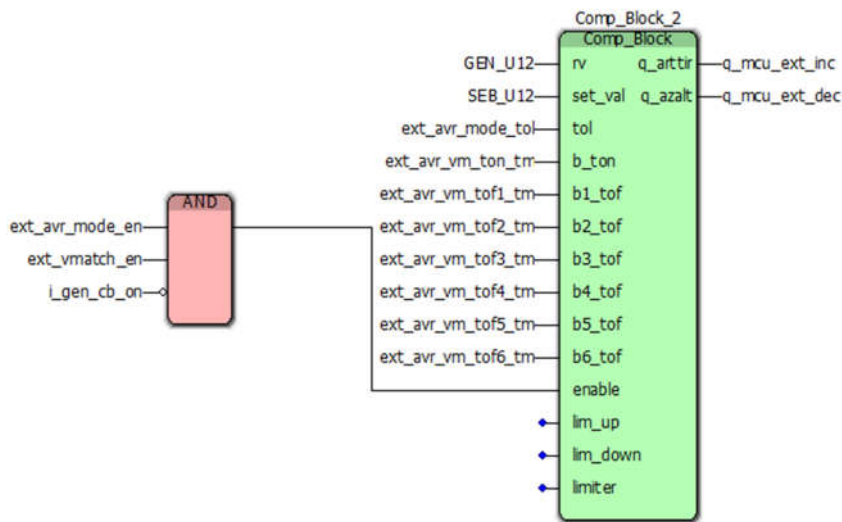
Şekil 4.10’den görüldüğü üzere sistem referans olarak uyarım akımı alınmaktadır. Okunan uyarım akımı ve referans olarak belirlenen uyarım akımı arasında hatanın sıfıra yaklaştırılması yönünde çalışmaktadır. Çıkış değeri tüm çalışma modlarında uyarım akımıdır.

Elle çalışma modları sistemin şebeke ile senkron olmasından sonra da kullanılabilir. Ancak kontrol edilen değer generatör gerilimi yerine güç katsayısı veya reaktif güç olacaktır.

Sistemde, yine aynı yazılım bloğu kullanılmaktadır. Bloklar referans olarak belirlenen değere göre çalışmaya devam etmektedir.

Otomatik çalışma modlarında Resim 4.8’de gösterilen kontrol blokları kullanılmıştır. Giriş referans ve gerçek değerler değiştirilerek uyarıtım akımının değişimi ile kullanılan değerlerin değişimi kontrol edilmektedir. Generatörün senkronizasyon öncesi kullanılan otomatik çalışma modları gerilim eşitleme ve ön hazırlık modu olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır.

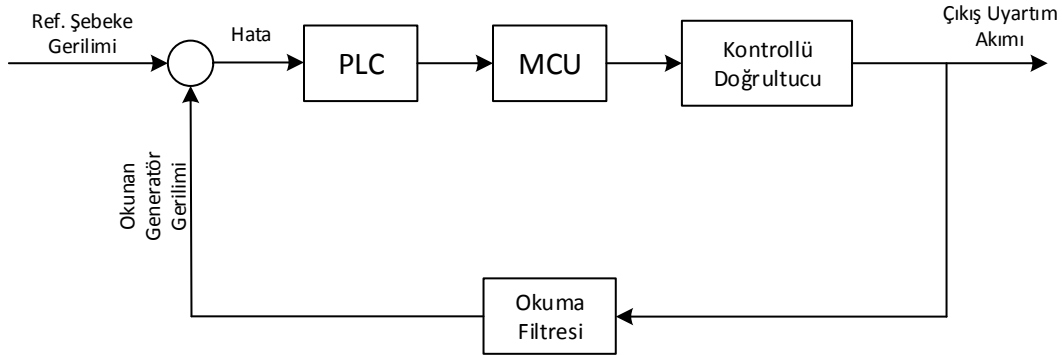
Gerilim eşitleme modunda referans olarak okunan değer şebeke gerilimidir. Gerçek değer generatör gerilimi olarak alınmıştır. Gerilim eşitleme modunun aktif olabilmesi için otomatik gerilim düzenleme modunun, gerilim eşitleme modunun aktif ve generatör kesicisinin açık olması gerekmektedir. Gerilim tolerans aralığında şebeke gerilimi ile eşitlenene kadar sistem uyarıtım akımını arttırmaktadır. Çalışma modları otomasyon sisteminden veya operatör paneli üzerinden değiştirilebilmektedir. Gerilim eşitleme modunda kullanılan yazılım bloğu Resim 4.8’de gösterilmektedir.



Resim 4.8. Gerilim eşitleme modunda kullanılan FBD bloğu

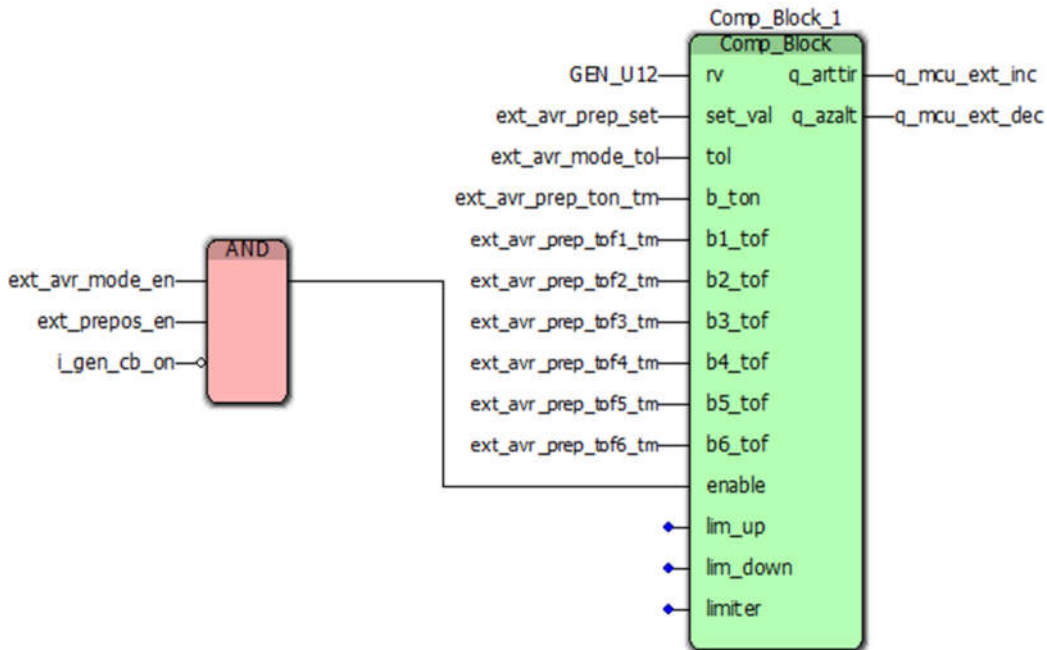
Generatör ile şebeke ile senkron olmadan önceki otomatik çalışma modlarından birisi de ön hazırlık modudur. Sistem çalışırken daha önceden girişine gönderilen değeri referans olarak generatör gerilimini eşitlemektedir. Blok girişinde kullanılan tolerans aralığında

gerilimi eşitleyerek mod kontrolü sağlanmaktadır. Gerilim eşitleme moduna ait kontrol grafiği Şekil 4.11’de verilmiştir.

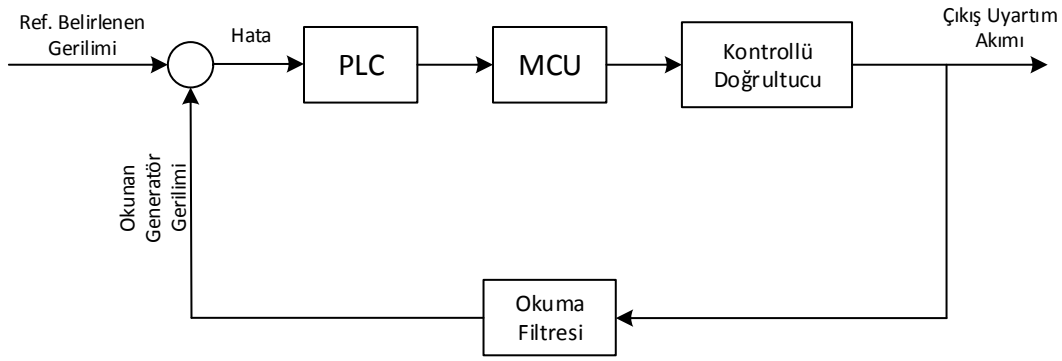


Şekil 4.11. Gerilim eşitleme moduna ait kontrol grafiği

Şebeke ile senkron çalışma durumu çalışma modlarından birisi de ön hazırlık modudur. Bu tip çalışmada sistem generatör gerilimini şebeke gerilimine eşitlemek yerine daha önceden kullanıcı tarafından belirlenen değere eşitlemektedir. Ön hazırlık modunda kullanılan yazılım bloğu Resim 4.9’da, kontrol grafiği ise Şekil 4.12’de gösterilmektedir.



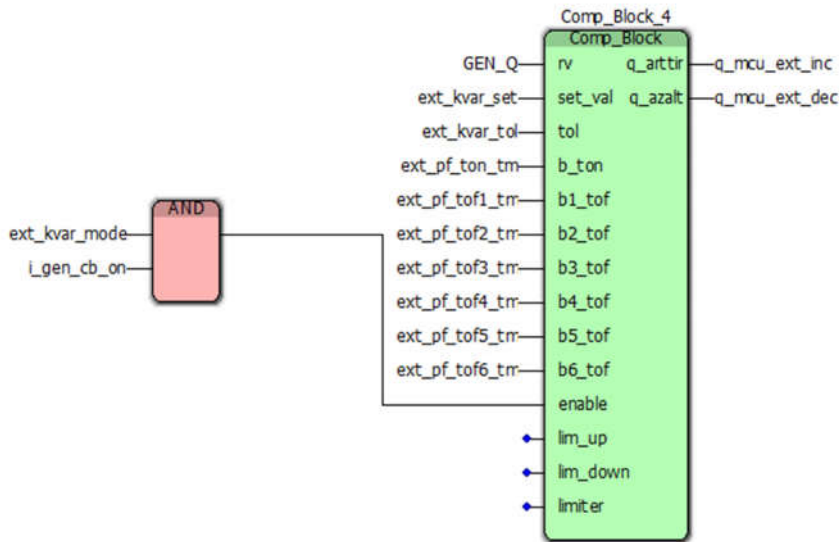
Resim 4.9. Ön hazırlık modunda kullanılan FBD bloğu



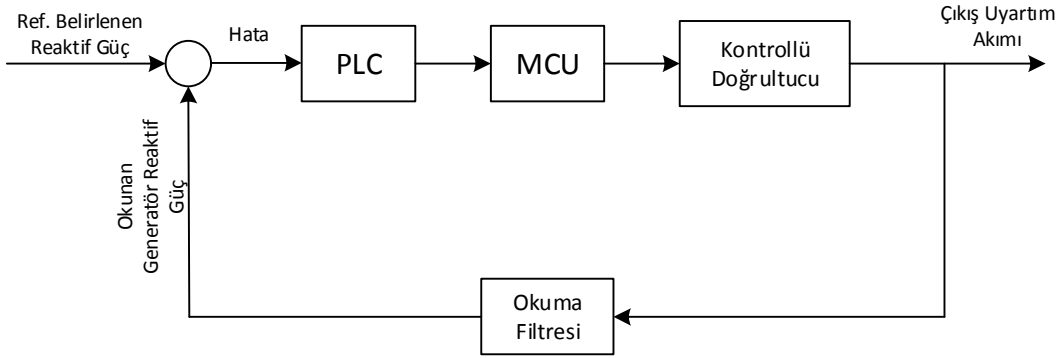
Şekil 4.12. Ön hazırlık moduna ait kontrol grafiği

Resim 4.9’da görüldüğü üzere bloğun aktif olabilmesi için sistemin otomatik gerilim düzenleme ve ön hazırlık modunun aktif olması ve generatör kesicisinin açık olması gerekmektedir. Sistem aktif olduğunda gerçek değeri referans değere toleranslar içerisinde ayarlamaktadır.

Sistem şebeke ile senkron olduktan sonra generatör kesicisinden alınan sinyal değişmektedir. Bu sinyal ile uyarım sistemi çalışma modlarında değişikliğe gitmektedir. Bu çalışma modlarından birisi sabit reaktif güç modudur. Bu çalışma modunda kullanıcı tarafından daha önceden belirlenen reaktif güç generatörün aktif gücüne bakmaksızın sabit tutulmaktadır. Sabit reaktif güç kontrolü için kullanılan yazılım bloğu Resim 4.10’da, bu moda ait kontrol grafiği ise Şekil 4.13’de gösterilmiştir.



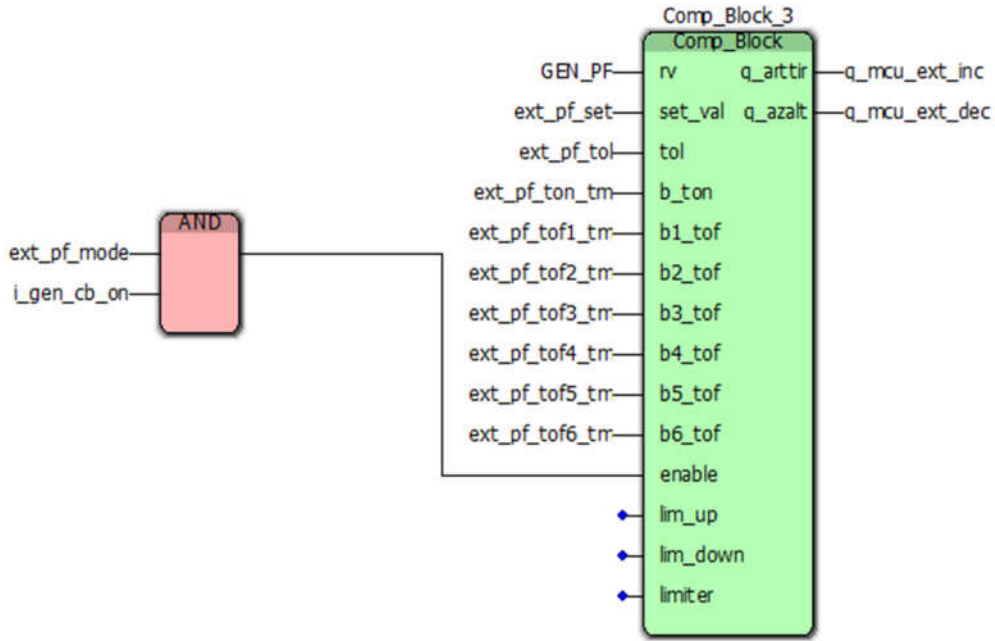
Resim 4.10. Sabit reaktif güç kontrolüne ait FBD bloğu



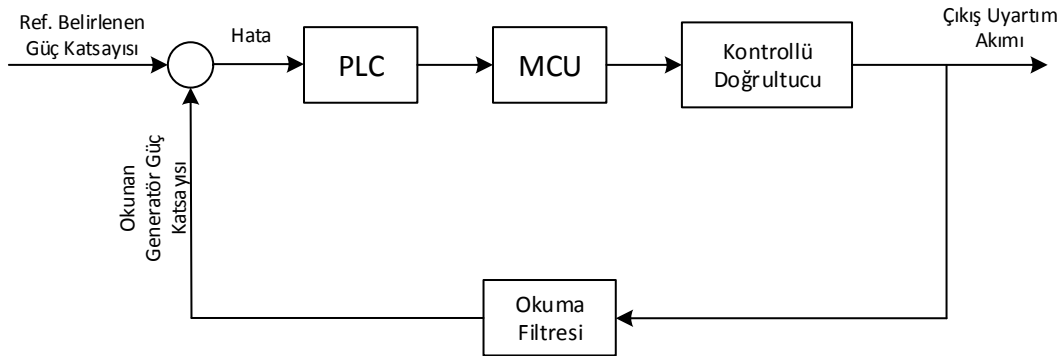
Şekil 4.13. Sabit reaktif güç moduna ait kontrol grafiği

Resim 4.10’da gösterildiği üzere sabit reaktif güç modunun aktif olabilmesi için sistemde kVAR modunun aktif olması ve generatör kesicisinin kapalı olması gerekmektedir. Blok limitleme fonksiyonuna sahiptir ve bu sayede istenen reaktif güç aralıkları belirlenebilmektedir.

Senkron sonrası çalışma modlarından birisi de sabit güç katsayısı modudur. Güç kat sayısı generatör enerji analizörü modülünden okunmaktadır. Kendisine referans olarak girilen değere göre sistemin güç katsayısını sabitlemektedir. PLC yazılımının gerçekleştirilmesinde aynı blok kullanılmıştır. Sabit güç kat sayısı modu için kullanılan yazılım bloğu Resim 4.11’de, kontrol grafiği Şekil 4.14’te gösterilmiştir.

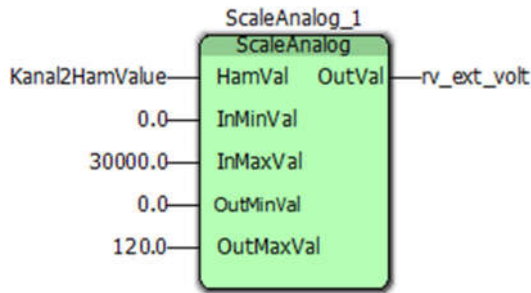


Resim 4.11. Sabit güç kat sayısı modunda kullanılan FBD bloğu



Şekil 4.14. Sabit güç kat sayısı moduna ait kontrol güç grafiği

Uyartım sisteminin akım gerilim değerlerinin okunması donanım altyapısında belirtilmiştir. Akım ve gerilim değerleri analog olarak okunmaktadır. Analog dönüşümler PLC’de yapılmaktadır. Bu dönüşümlerde Eş. 4.1’de gösterilen dönüşüm formülü uygulanarak dönüşüm bloğu tasarlanmıştır. Tasarlanan analog dönüşüm bloğu Resim 4.12’de gösterilmiştir.



Resim 4.12. Analog dönüşüm bloğu

Resim 4.12’de FBD ile tasarlanmış analog dönüşüm bloğu girişine analog karta uygulanan ham değeri göstermektedir. Bu değer 0-30000 arasındadır. Bu nedenle giriş değerinin aralıkları buna göre belirlenmiştir. Çıkış değeri ise kullanılan dönüştürücü veya sensöre bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

$$OutVal = (HamVal - InMinVal) \times \frac{(OutMaxVal - OutMinVal)}{(InMaxVal - InMinVal)} + OutMinVal \quad (4.1)$$

Burada:

OutVal: Hesaplamalar sonucunda ortaya çıkan gerçek ölçüm değeri

HamVal: Analog karttan değişkene aktarılan işlem yapılmamış değer

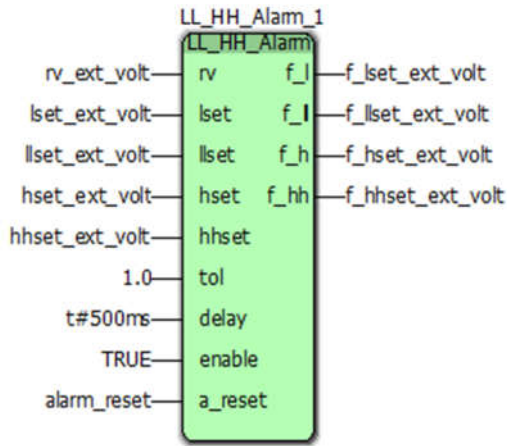
InMinVal: Analog kartın okuyabildiği en alt değer

InMaxVal: Analog kartın maksimum okuyabildiği değer

OutMinVal: Analog değer ile ölçümü yapılan büyüklüğün alt değeri

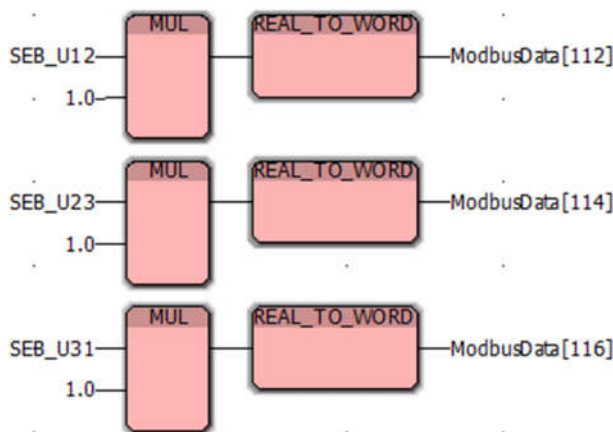
OutMaxVal: Analog değer ile ölçümü yapılan büyüklüğün üst değerini ifade etmektedir.

Eş. 4.1’de elde edilen gerçek çıkış değeri Resim 4.13’te gösterilen üst ve alt limit ve arıza üreten blok ile sürekli olarak kontrol edilmektedir. Elde edilen gerçek değer blok girişinde operatör paneli üzerinden girilebilen alt ve üst giriş ve çıkış değerleri aşması halinde çıkışında o limit değerine ait arıza üretilmektedir. Bu arıza sistemde kalıcı olarak üretilmiştir. Arızaların silinmesi için sistem içerisinde kullanılan yeniden kurma butonu (alarm reset) ile temizlenmelidir.



Resim 4.13. Üst ve alt limit alarm ve arıza değerleri belirleme ve üretme bloğu

PLC sistemi ile operatör panelinin haberleşmesi için Modbus TCP protokolü kullanılmıştır. Modbus TCP protokolü PLC ile operatör panelinde ortak bulunan protokol olduğu için tercih edilmiştir. PLC içerisinde bulunan tüm kontrol sinyalleri ve PLC'nin pano ve saha içerisinde aldıkları değerler bu protokol üzerinden operatör paneline aktarılmıştır. Operatör panelinden uyartım sistemi ile ilgili girilen tüm değerler de PLC'ye aktararak kullanıcı tarafından girilen limit, koruma, referans değerleri ile mod seçim parametreleri PLC tarafından okunmaktadır. Modbus TCP haberleşmesine ait yazılım bloğu Resim 4.14'te gösterilmiştir.

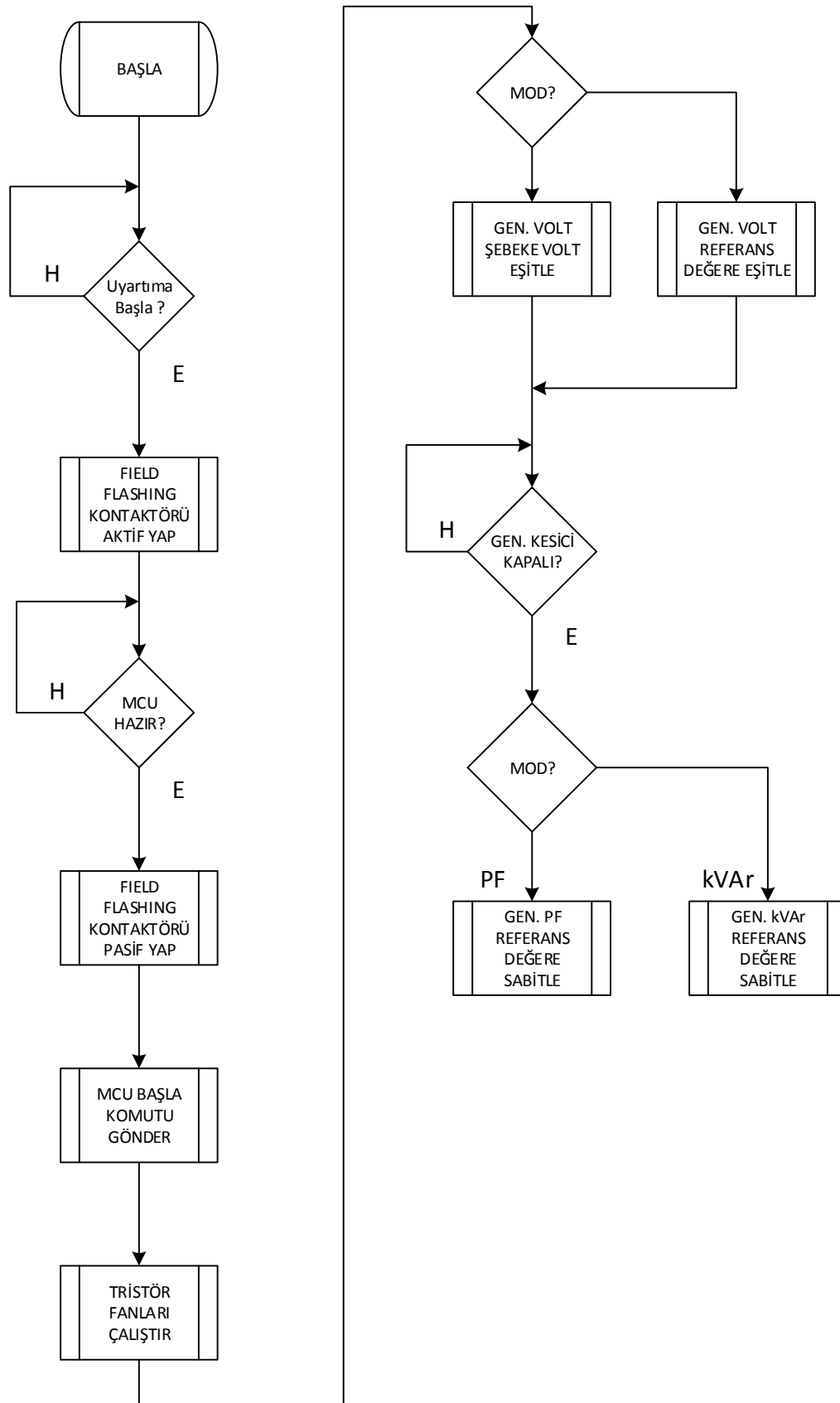


Resim 4.14. Modbus TCP protokolü kullanılarak operatör paneline gönderilen değerler

Resim 4.14'te şebeke faz gerilimlerine ait bilgilerin Modbus TCP üzerinden operatör paneli aktarılmasına ait yazılım blokları gösterilmektedir. Şebekenin birinci fazına ait

değer Modbus TCP 112. adresine atanmıştır. Bu değer, Modbus TCP protokolünü destekleyen bir cihaz tarafından PLC'nin Ethernet adresi üzerinden 112. adresten okunabilmektedir. Bu sayede sistemde bulunan diğer endüstriyel sistemler uyartım sistemine ait verilere kolay bir şekilde ulaşabilmektedir.

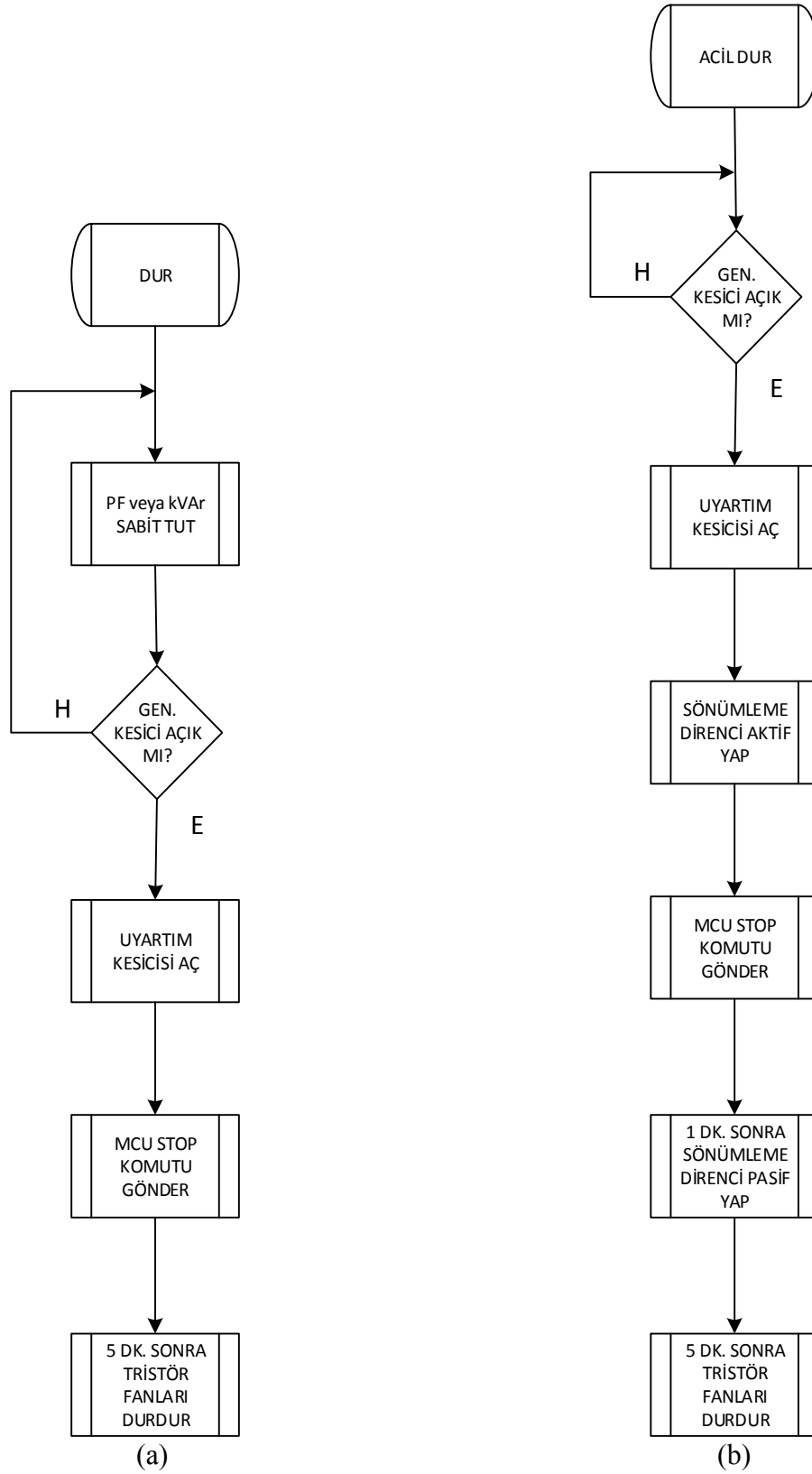
Sistemin otomatik çalışma esnasında pano içerisindeki kesiciler ve kontaktörleri kontrol ederek bir işlem sırası takip etmesi gerekmektedir. Bu işlem sırası gerçek bir hidroelektrik santralinde uygulanabilmektedir. İşlem sırası Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Uyarıtım sistemi başlama işlem sırası

Şekil 4.15'te gösterilen başlangıç işlem sırasında otomasyon sisteminden alınan başlama komutu ile ilk uyarım akımı uygulanmaktadır. MCU'dan alınan sistem çalışmaya hazır bilgisi ile ilk akım uyarım kontaktörü pasif yapılmaktadır. Kontrollü doğrultucu sistemi devreye alınır ve uyarım akımı belirlenen çalışma modlarına göre ayarlanmaktadır. Sistem bu aşamadan sonra generatör kesicisini kontrol etmektedir. Generatör kesicisinin kapanması uyarım sisteminin çalışma modunu değiştirmektedir. Daha önceden belirlenen çalışma moduna sistem çalışmasına devam etmektedir.

Uyarım sistemi, generatörün duruş esnasında uyarım akımını kontrol ederek generatör kesicisi açana kadar sabit güç kat sayısı ve reaktif gücü sabit tutarak generatör kesicisinin açılması ile uyarım akımını sıfırlamaktadır. Normal duruş olarak adlandırılan bu çalışma şekli acil duruşlarda değişiklik göstermektedir. Acil duruşlarda uyarım kesicisi açılarak generatör sargıları üzerinde depolanan akım sönmüleme direnci üzerinde tüketilmektedir. Şekil 4.16 (a)'da uyarım sisteminin normal duruşuna ait akış diyagramı, Şekil 4.16 (b)'de acil duruş işlem sırasına ait akış diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 4.16. Uyarım sistemi (a) normal duruş işlem sırası, (b) acil duruş işlem sırası

4.2.2. Mikrodenetleyici yazılımı

Tristörlerin tetikleme açılarının kontrolü için kullanılan MCU içerisinde dsPIC 30F4011 serisi mikrodenetleyici kullanılmıştır. Osilatör frekansı 12 MHz olarak seçilmiştir. Yazılımda yapılan ayarlamalar ile 96 MHz'e kadar çıkabilecek şekilde tasarlanmıştır. Mikrodenetleyici çalışma frekansının arttırılması ile çalışma hızı da yükseltilmiştir.

Mikrodenetleyici, harici kesme girişine uygulanan sıfır geçiş sinyali ile kontrollü doğrultucu girişine uygulanan alternatif akım geriliminin sıfır geçişini algılamaktadır. Bu sinyallerin yükselen kenarlarında mikrodenetleyici içerisinde kesme meydana gelmektedir. İki kesme arasında zamanlayıcıdan alınan değer hesaplanarak bir periyot için geçen süreyi hesaplamaktadır. Elde edilen değer bir sonraki periyot için tristör tetikleme açılarının belirlenmesi için kullanılmaktadır.

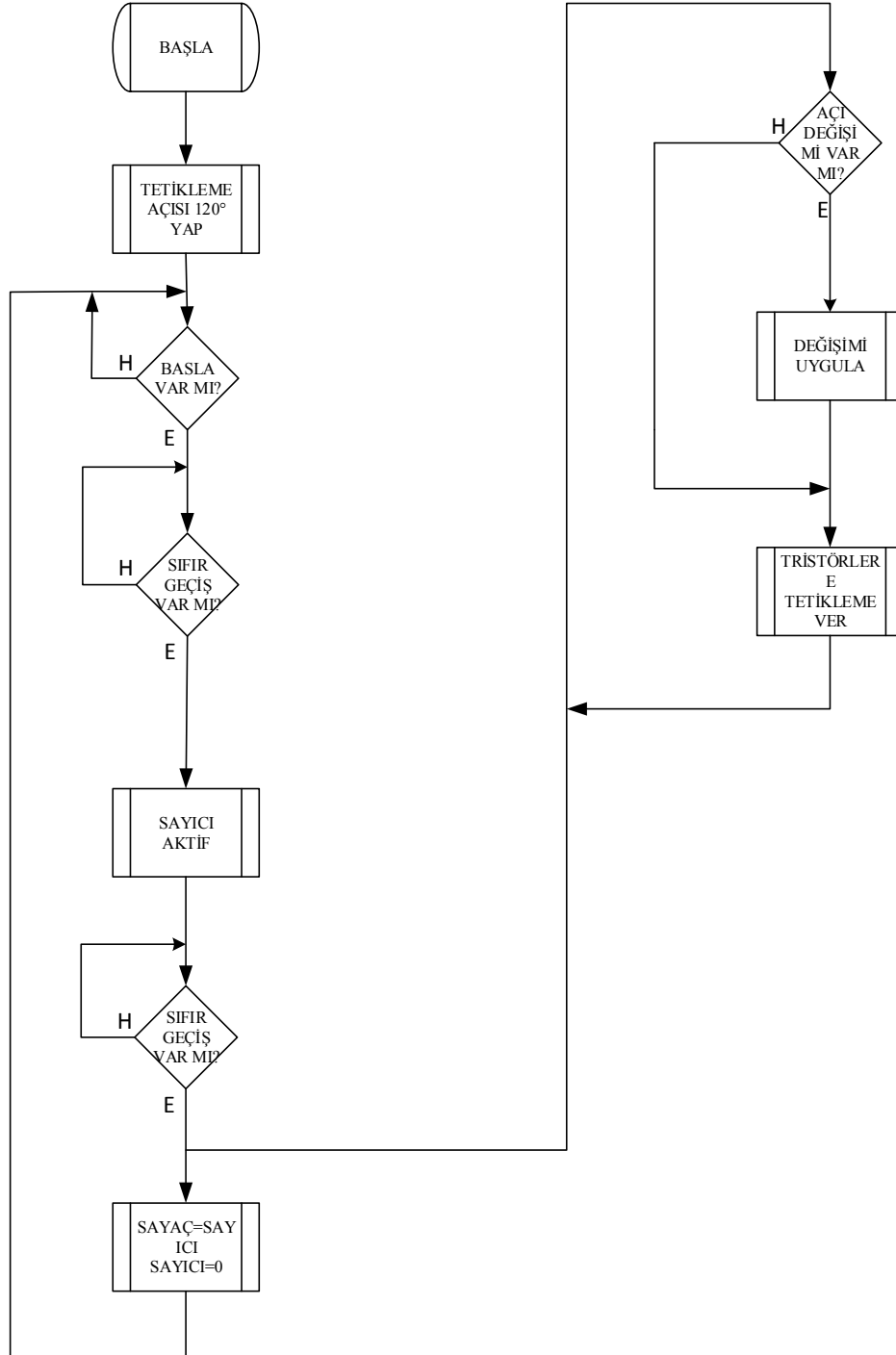
Tristörlerin tetikleme açısı normalde 120° olarak başlamaktadır. Tristörlerin tetiklenmesine ait değerler Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Daha sonra PLC'den gelen sayısal komutlara göre açı azaltılarak çıkış gerilimi arttırılabilmektedir. PLC çalışma moduna göre tristör açısı α 'yı belirlemek için arttırma ve azaltma komutları göndermektedir. Ayrıca sistemin tetiklemeye başlaması için bir komut kullanılmıştır. Bu komut mikrodenetleyiciye uygulandığı süre boyunca tetikleme işlemi devam etmektedir.

Çizelge 4.3. Tristörlerin tetiklenmesine ait değerler

No	Faz	İlk Açı	Son Açı
1	R0	$30^\circ + \alpha$	180°
2	R1	$210^\circ + \alpha$	360°
3	S0	$150^\circ + \alpha$	300°
4	S1	$330^\circ + \alpha$	120°
5	T0	$270^\circ + \alpha$	60°
6	T1	$90^\circ + \alpha$	240°

Mikrodenetleyici iki adet röleli çıkışa sahiptir. Bu çıkışlardan ilki sistemin çalıştığı bilgisini PLC'ye göndermek için, diğer çıkış ise sıfır geçiş sinyalinin durumunu bildiren

çıkışlardır. PLC bu çıkışları okuyarak mikrodenetleyici durumu ile ilgili bilgi sahibi olmaktadır. MCU'ya ait kontrol blok diyagramı Şekil 4.11'de gösterilmektedir.



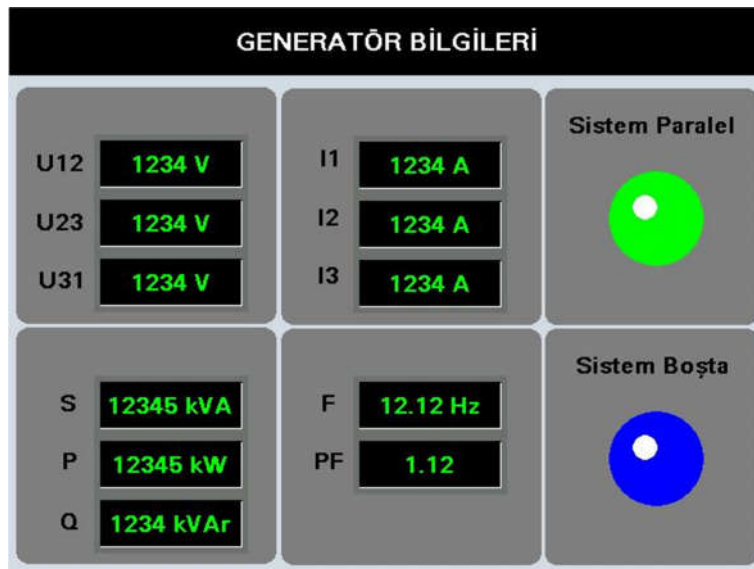
Şekil 4.17. MCU'ya ait kontrol blok diyagramı

Şekil 4.17'de gösterildiği üzere MCU sıfır geçiş devresinden gelen sinyallerin arasındaki süreyi hesaplayarak tristörlerin tetiklenmesi için gerekli açılar hesaplamaktadır. Bu açılar

PLC tarafından gelen sinyallere belirlenerek tristörlere uygulanmaktadır. Sıfır geçiş sinyallerinin alınmaması halinde PLC'ye durum ile ilgili bilgi verilmektedir. PLC içerisinde arıza üretilerek sistem acil duruşa götürülmektedir.

4.2.3. Operatör paneli yazılımı

Schneider firması ürünü olan Vijeo Designer programı kullanılarak tasarlanan operatör paneli ara yüzü, sistem üzerindeki tüm kontrol ve izleme fonksiyonlarına sahiptir. PLC ile okunan generatöre ait üç faz akım, gerilim ve güç değerleri ile birlikte generatörün şebeke ile paralel olup olmadığı geliştirilen arayüzde izlenebilmektedir. Bu sayede generatör ile ilgili kapsamlı bir izleme sistemi gerçekleştirilmiştir. Operatör paneli ile gerçekleştirilen generatör izleme arayüzü Resim 4.15'te gösterilmiştir.



Resim 4.15. Generatör parametreleri izleme sayfası

Sistemin çalışma modları ile alakalı ayarlama sayfaları kullanılarak, uyarım sisteminin çalışma modları belirlenebilmektedir. Resim 4.16'da gösterildiği üzere yüksüz otomatik ve manuel kontrol yapılarında gerekli ayar değerlerinin girilebileceği kutucuklar bulunmaktadır. "FCR Mod" olarak gösterilen blokta girilen değer sistemin çalışma değerini göstermektedir. Referans olarak uyarım akımının alındı bu çalışma şeklinde minimum ve maksimum değerler aralığında sistem çalıştırılmaktadır.

Yüksüz Manuel Sistem Ayarları		Yüksüz Otomatik Sistem Ayarları	
☐ FCR Mod Set: 123.12 A Max: 123.12 A Min: 123.12 A	☐ FVR Mod Set: 123.12 V Max: 123.12 V Min: 123.12 V	☐ Preposition Mod Set: 12345 V Max: 12345 V Min: 12345 V	☐ Gerilim Eşitleme Modu Şebeke: 12345 V Gen: 12345 V

Resim 4.16. Yüksüz otomatik ve elle kontrole ait çalışma ayar sayfası

Generatörün şebeke ile paralel çalışması, uyartım sisteminin çalışma şekillerinde değişiklik yapmasını gerektirmektedir. Bu nedenle şebeke ile bağlantı öncesinde ve sonrasında farklı çalışma şekilleri kullanılmaktadır. Resim 4.17’de görüldüğü üzere yükte çalışma durumuna göre Var ve PF olmak iki ayrı kontrol modu bulunmaktadır. Sistem şebeke ile paralel çalışırken burada seçilmiş çalışma moduna göre kendisine referans değeri belirlemektedir. Var modu seçildiğinde sistem “SET” kutucuğunun içerisinde yazılı olan reaktif güç değerinde generatörü sabit tutmaktadır. PF çalışma modu aktif edildiğinde sistem generatörün güç kat sayısını referans almaktadır ve kendisine verilen değerde generatörün güç kat sayısını sabit tutmaya çalışmaktadır.

Senkron Sistem Ayarları	
☐ VAr Mod Set: 1234 kVAr Max: 1234 kVAr Min: 1234 kVAr	☐ PF Mod Set: 1.12 Max: 1.12 Min: 1.12

Resim 4.17. Paralel çalışma modları ayarlama sayfası

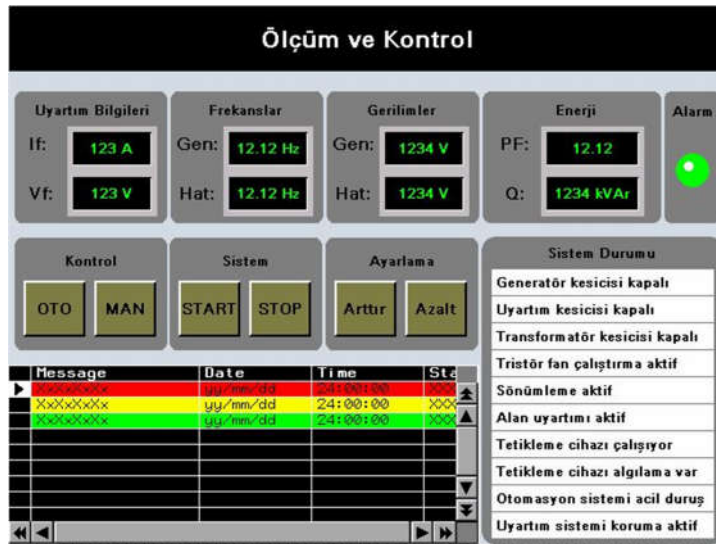
Literatürde de üzerinde çokça durulan koruma ve limit değerleri gerçekleştirilen sistemde de kullanılmaktadır. Generatör aşırı akım ve gerilim, generatör düşük gerilim, manyetik alan kaybı, uyarım akım ve gerilimi limit ve koruma değerleri Resim 4.18’de gösterilen arayüz aracılığıyla sisteme girilebilmektedir. İstenilen korumanın aktif veya pasif yapılabilmesi kullanıcının ihtiyacına bırakılmıştır. Ayrıca bloklar üzerinde bulunan yeşil butonlar ile bahsi geçen korumanın değeri ve arıza oluşması için gerekli süre girilebilmektedir. Resim 4.19’da koruma ve limit değerleri ve sürelerinin girilebileceği kutucuklar görülmektedir.

Resim 4.18. Koruma ve limit değerleri ayar sayfası

Resim 4.19. Değer ve süre giriş sayfası

Sistem ile ilgili genel görünüm izleme kontrol sayfası oluşturulmuştur. Bu sayfada uyarım akım ve gerilimi, generatör ve şebeke gerilim ve frekans değerleri, reaktif güç ve güç katsayısı aynı ekranda gösterilmektedir. Generatörün şebeke ile entegrasyonu izlenebilmektedir. Uyarım sistemi kontrol butonları da bu sayfa üzerinde bulunmaktadır. Butonlar sistemin otomatik ve manuel kontrol değişimi, uyarım başlama, durdurma komutları ile uyarımın akımının arttırılıp azaltılması bu sayfadan kontrol edilebilmektedir.

Ana sayfa olarak kullanılan bu sayfada sistemde bulunan generatör, uyarım, tranformatör ve sönümlleme direnci kesici durumları, tetikleme cihazı ile ilgili durumlar görülebilmektedir. Ayrıca sayfa altına eklenmiş bir alarm bloğu ile sistemdeki sinyaller eş zamanlı ve geriye dönük olarak incelenebilmektedir. Ana sayfa görüntüsü Resim 4.20’de gösterilmektedir.



Resim 4.20. Uyarım sistemi ana sayfa tasarımı

Sistemde kullanılan sinyaller bir alarm grubuna eklenerek geçmişe yönelik izleme ve analiz yapılmıştır. Bu sayede geçmişte oluşan tüm sinyaller incelenebilmekte ve arıza kaynağının tespiti kolaylaşmaktadır. Resim 4.21’de alarm sayfası gösterilmiştir.



Resim 4.21. Alarm sayfası

Bu sayede sistemde oluşan tüm olaylar kaydedilerek alarm sayfasından incelenebilmektedir. Alarm sayfası geçmişe yönelik arıza, alarm, mesaj ve komutları farklı renklerde yazarak takibi kolaylaştırmaktadır. Gelen arızalar kronolojik olarak sıralanmaktadır. Oluşturulan alarm sayfası filtrelemeye imkan sağlayarak istenen kelimenin, tarihin veya kategorinin bulunmasını sağlamaktadır.

Gerçekleştirilen statik uyarıtım sistemi çalışmasında kullanılan ekipmanlar arası uyum sağlanarak birçok farklı platformda haberleşmesi sağlanmıştır. Kullanılan PLC, mikrodeneleyici, kontrollü doğrultucu, operatör paneli birbirleri ile uyum içinde çalışarak uyarıtım sistemi AVR'sini oluşturmuştur. Tasarım ve uygulaması tamamlanan uyarıtım sistemi laboratuvar ortamında test edilmiş ve uygulama sonuçları kısmında elde edilen veriler sunulmuştur.

5. UYGULAMA SONUÇLARI

Bu bölümde uyartım sisteminin laboratuvar testlerinden alınan sonuçlar sunulmuştur. Laboratuvar testlerinde uyartım generatörü yerine 9 kVA 380 V_{AA}/0-380 V_{AA} bir ayarlı giriş kaynağı kullanılmıştır. Ayarlı giriş kaynağı çıkışları uyartım transformatörü kesicisine bağlanmıştır. Sistemde yük olarak 2x10 Ω 5A reosta kullanılmıştır. Bu şartlar altında sistemin FVR ve FCR modunda testleri gerçekleştirilmiştir.

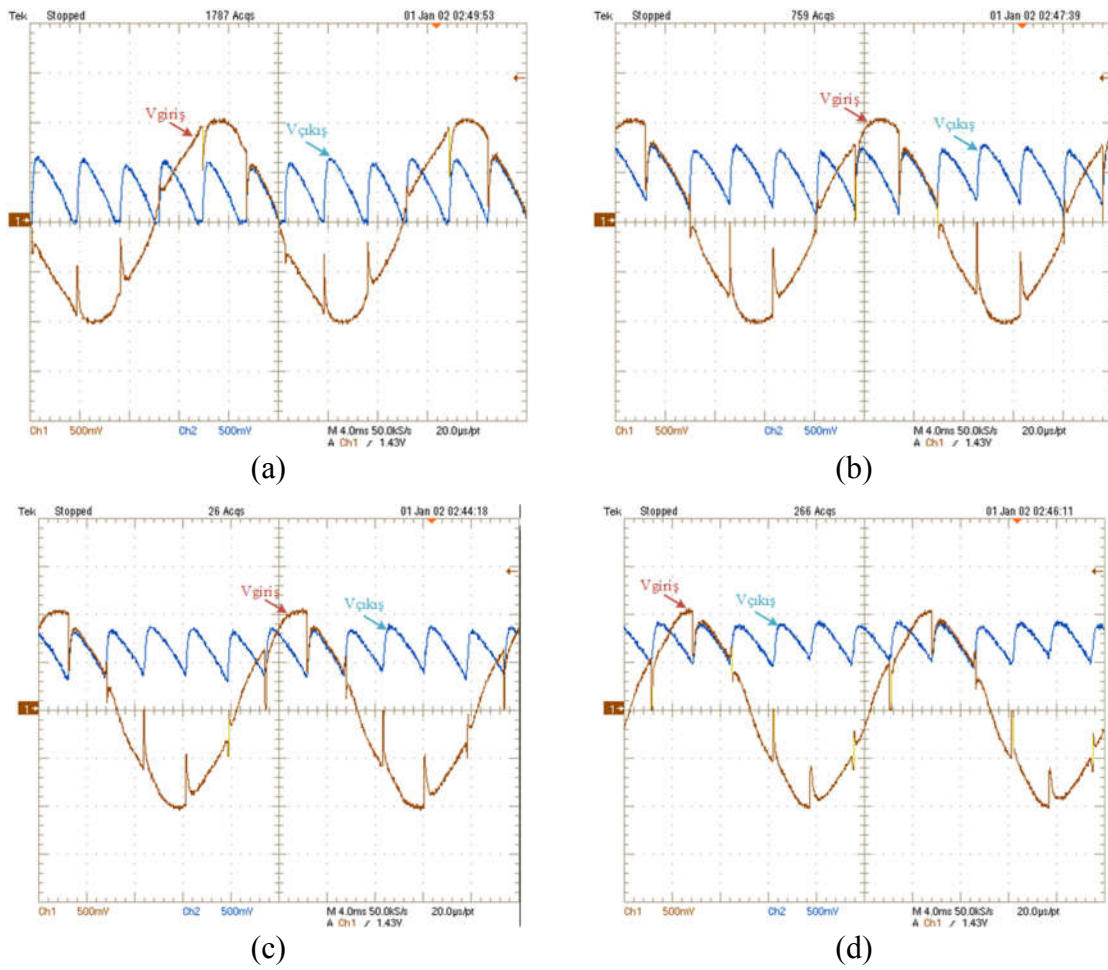
FVR modunda uyartım geriliminin referans değeri operatör paneli üzerinden belirlenerek PLC'ye gönderilmektedir. Referans değer ile gerilim sensöründen okunan gerçek değer PLC'de karşılaştırılmaktadır. Hesaplanan fark değerine göre tetikleme açısının değiştirilmesi için gerekli komutlar PLC tarafından MCU'ya gönderilmektedir. Böylece, uyartım gerilimi kontrolü geri bildirimli olarak sağlanmaktadır. Sabit giriş geriliminde, farklı tetikleme açılarında elde edilen çıkış gerilim ve akımları Çizelge 5.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. 34 V_{AA} gerilim girişinde çıkış ve açı değerleri

Giriş Gerilimi (V _{AA})	Referans Gerilimi	Çıkış Gerilimi (V _{DA})	Akım (A _{DA})	Açı (PLC'den Hesaplanan)	Yük (Ω)
34.2	40	41	6.00	40	5
34.2	35	34	5.40	52	5
34.2	30	31	4.62	63	5
34.2	20	20	2.50	71	5
34.2	15	14	1.25	78	5
34.2	5	5	0.60	69	5

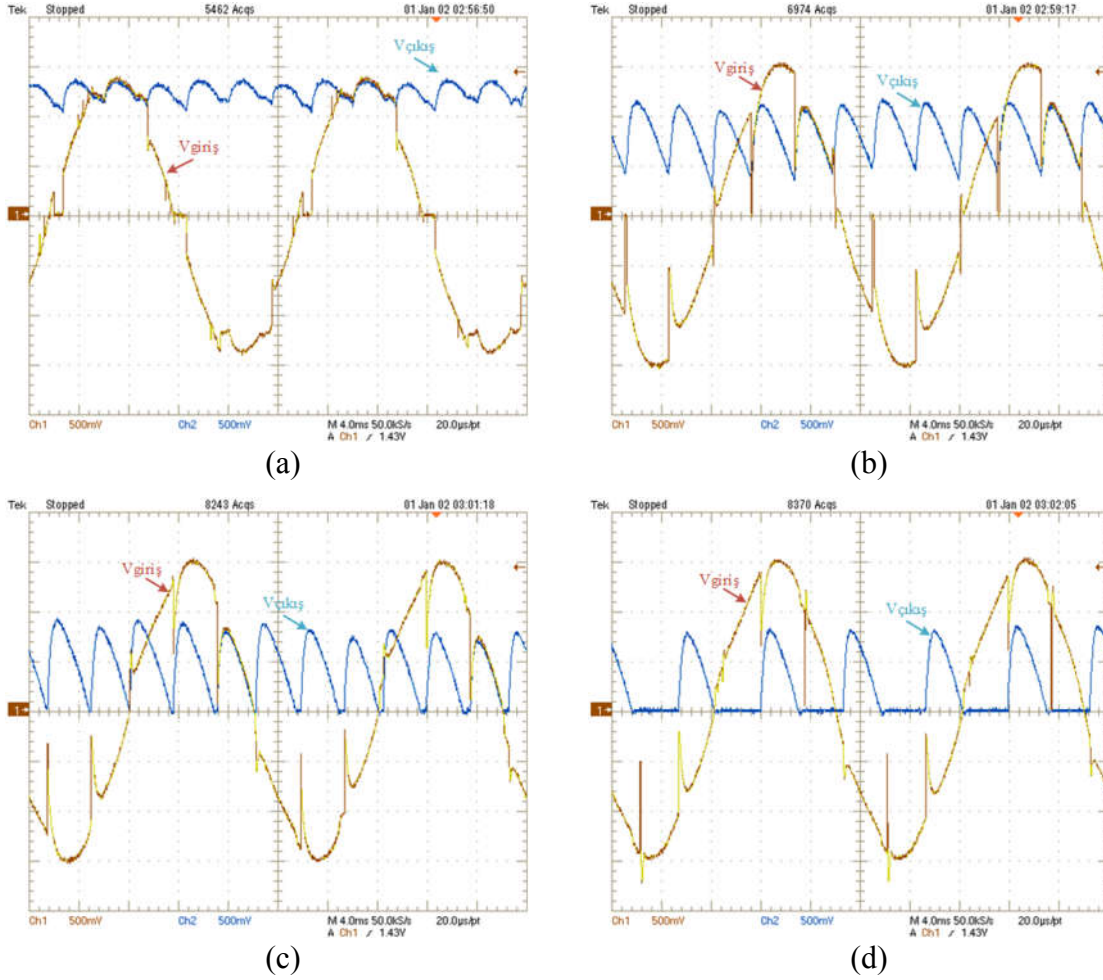
Giriş geriliminin 34.2 V olarak sabit tutulduğu FVR çalışma moduna ait osiloskop ekran çıktıları Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Referans gerilimin 15V olarak belirlendiği durumda tetikleme açısı PLC tarafından ayarlanarak, çıkış gerilimi 1V hata ile 15V'ye sabitlenmiştir. Bu duruma ait gerilim grafikleri Şekil 5.1 (a)'da görülmektedir. Benzer olarak yapılan diğer bir deneysel çalışmada referans değer olarak 25V belirlenmiştir. Bu durumda da tetikleme açısı kontrolü ile çıkış geriliminin 25V'ye sabitlendiği Şekil 5.1

(b)'de görülmektedir. Şekil 5.1 (c)'deki gerilim grafiklerinde görüldüğü üzere, uyarım gerilimi referans değer olan 30V'ye sabitlenmiştir. Referans değer 35V olarak belirlendiği durumda da kontrol sisteminin başarılı bir şekilde çıkış gerilimini istenilen değere getirdiği Şekil 5.1 (d)'de görülmektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan ayarlı alternatif gerilim kaynağında gerilim çökmelerinin meydana geldiği grafiksel sonuçlardan görülmektedir. Bu durum, şekillerden görüldüğü üzere iletim anlarında kaynak gücünün düşük olması sebebiyle gerçekleşmiştir. Giriş geriliminde oluşan bu çökmeler çıkış gerilimini etkilemediğinden herhangi bir iyileştirme yapılmamıştır.



Şekil 5.1. 32V girişli, FVR mod çalışma durumunda referans değer (a) 15V (b) 25V (c) 30V (d) 40V iken giriş ve çıkış gerilim grafikleri (Kanal1: x50, Kanal2: x50)

Laboratuvar ortamında gerçekleştirilen diğer bir test ise giriş geriliminin 50V'de sabit tutularak sabit yükte farklı referans değerlerinde çıkış geriliminin sabit tutulmasının sağlanmasıdır. Giriş geriliminin 50V olarak ayarlandığı bu testte, elde edilen sonuçlar Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



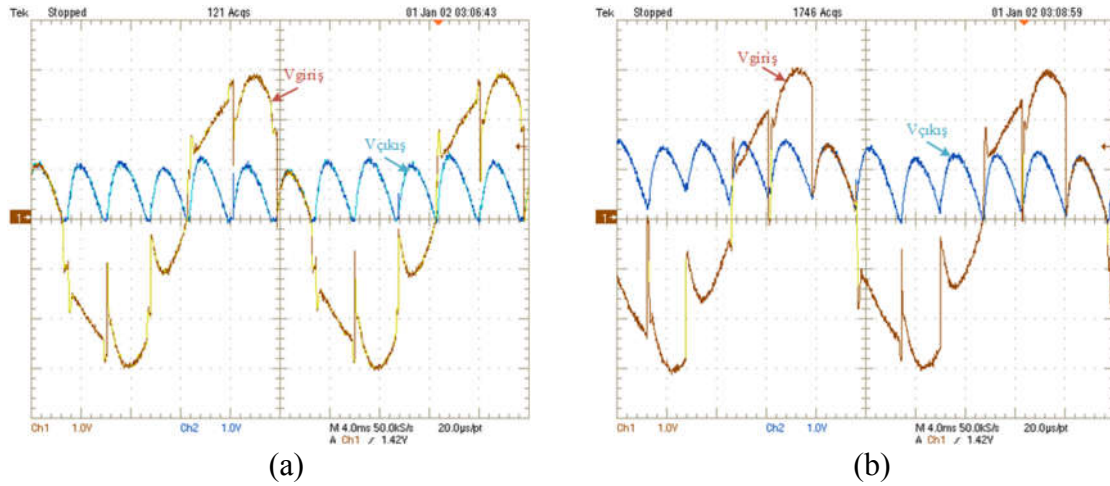
Şekil 5.2. 50V giriqli, FVR mod çalışma durumunda referans değeri (a) 62V (b) 40V (c) 25V (d) 10V iken giriş ve çıkış gerilim grafikleri (Kanal1: x50, Kanal2: x50)

FVR mod çalışmada, ayarlı güç kaynağı giriş gerilimi 50 V_{AC} iken çıkış gerilimleri farklı değerlerde test edilmiştir. Şekil 5.2 (a)'da gösterilen osiloskop çıktısında çıkış gerilimi referans değeri 62V'ye ayarlanmıştır. Bu testte tetikleme açısı 30°'dir. Bu tetikleme açısı en yüksek çıkış gerilimi elde etmek için gerekli açıdır. Gerilim grafiğinden uyartım sisteminin çıkış gerilimini belirtilen gerilim değerine sabitlediği görülmüştür. Şekil 5.2 (b)'de referans değeri 40V olarak belirlenmiştir. Çıkış gerilimi 1V hata ile referans değere eşitlendiği görülmüştür. Şekil 5.2 (c)'de referans değeri 30V iken giriş ve çıkış gerilim grafikleri gösterilmektedir. Diğer FVR mod çalışma testlerine benzer şekilde sistem çıkış gerilimini referans değere sabitlemektedir. Şekil 5.2 (d)'de verilen osiloskop çıktılarında set değeri 10V olarak belirlenmiştir. Çıkış gerilimi 0V'ye düşmektedir ve kesikli modda çalışmaktadır. Ancak sistem ortalama değeri referans değeri olan 10V olarak ölçülmektedir. Yapılan testler sonucunda elde edilen değerler Çizelge 5.2'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.2. 50 V_{AA} gerilim girişinde çıkış ve açı değerleri

Giriş Gerilimi (V _{AA})	Çıkış Gerilimi (V _{DA})	Akım (A _{DA})	Açı (PLC'den Hesaplanan)	Yük (Ω)
50.00	62	9.40	0	5
50.00	50	7.40	40	5
50.00	40	5.60	54	5
50.00	30	4.00	84	5
50.00	10	1.00	98	5

FVR çalışma modu için gerçekleştirilen son testte, ayarlı giriş kaynağı gerilimi 100 V_{AA} gerilime ayarlandıktan sonra çıkış gerilimi 30 ve 45 V_{DA} gerilime ayarlanmıştır. FVR modunda yapılan testlere ait osiloskop ekran çıktıları Şekil 5.3'te gösterilmektedir.



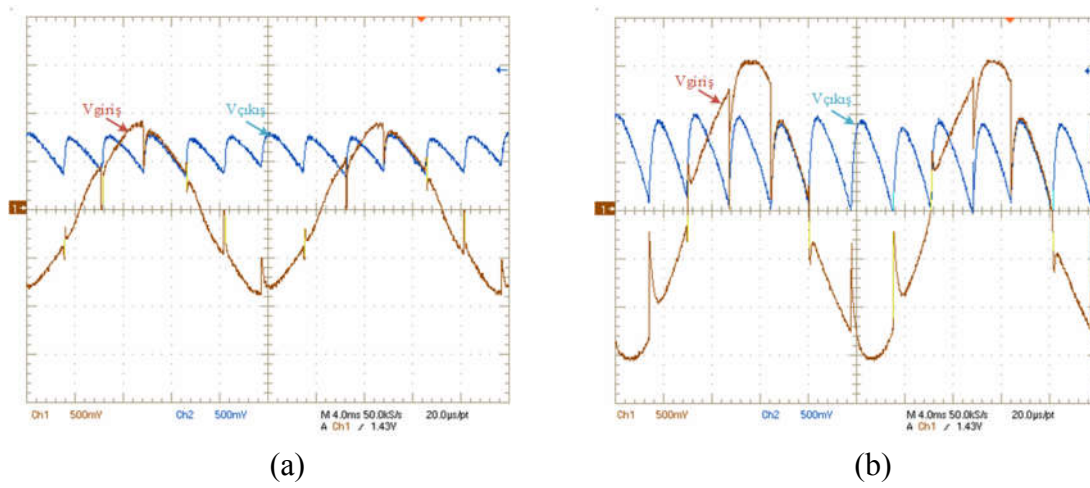
Şekil 5.3. FVR mod giriş gerilimi 100 V iken çıkış gerilim şekilleri (Kanal1: x50, Kanal2: x50)

FVR mod çalışma testlerine benzer olarak FCR mod çalışmaya ait uygulama testleri gerçekleştirilmiştir. FCR mod çalışma uygulamasında uyarım akımı referans değeri sabit tutularak giriş geriliminin değişimine göre çıkış gerilim ve tristör tetikleme açısının durumu incelenmiştir. Çizelge 5.3'te 35 V_{AA} giriş geriliminde ve farklı akım referans değerlerinde sistemde ile ilgili açıklamalar yer almaktadır.

Çizelge 5.3. 30 ve 50 V_{AA} gerilim girişinde çıkış ve açı değerleri

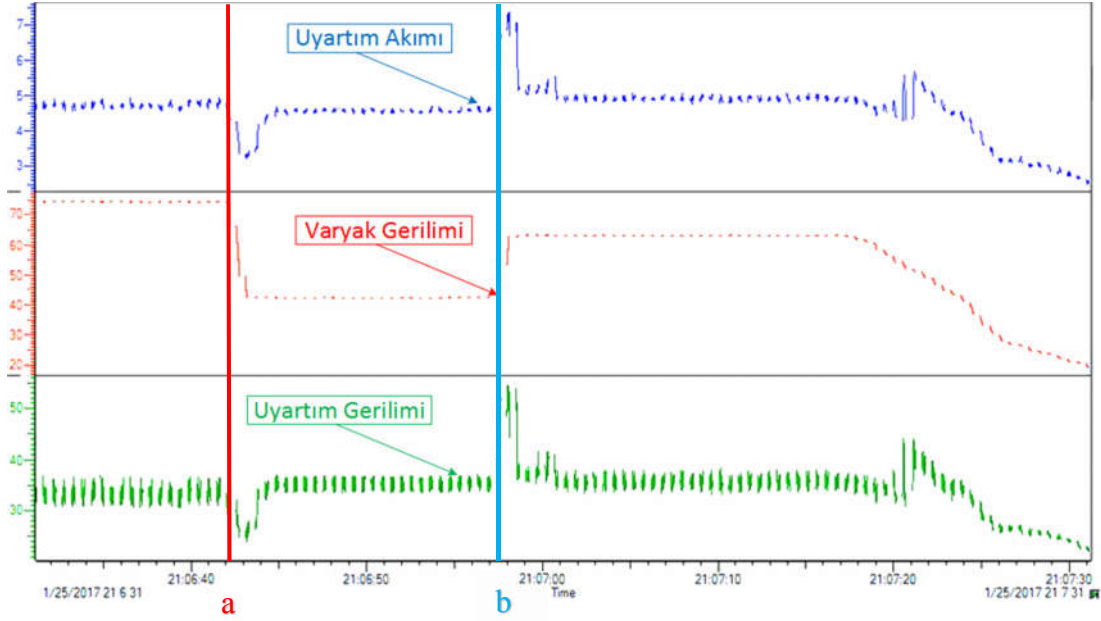
Giriş Gerilimi (V _{AA})	Çıkış Gerilimi (V _{DA})	Akım (A _{DA})	Açı (PLC'den Hesaplanan)	Yük (Ω)
50.00	30.00	4.00	85	5
50.00	44.00	6.00	77	5

Çizelge 5.3'te görüldüğü üzere uyartım akımı belirlenen değerde sabit tutulmaktadır. Bu çalışma yükün maksimum akımı olan 10A'ya kadar çeşitli değerlerde test edilmiştir. FCR mod çalışması ve çıkış gerilimi osiloskop ekran çıktıları Şekil 5.4'te gösterilmiştir.



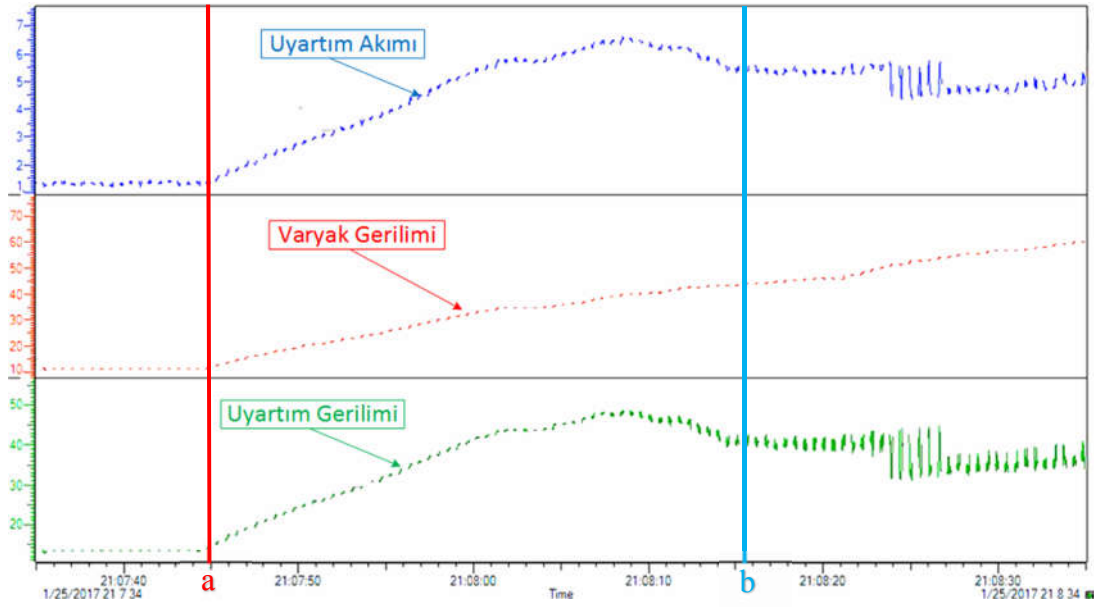
Şekil 5.4. FCR mod giriş gerilimi 100 V iken çıkış gerilim şekilleri (Kanal1: x50, Kanal2: x50)

Şekil 5.4'te FCR mod çalışmaya ait osiloskop ekran çıktıları verilmiştir. FCR modda uyartım akımı belirlenen referans değerde sabit tutulmaktadır. Bu çalışmalar PLC üzerinden gerçekleştirilen grafik analiz uygulaması ile farklı giriş gerilimlerinde sistemin çıkış gerilimini sabitleme kabiliyeti test edilmiştir. Grafik ekranı üzerinde uyartım akımı, ayarlı giriş kaynağı gerilimi ve uyartım gerilimi sırası ile ve zamana göre değişimi incelenmiştir.



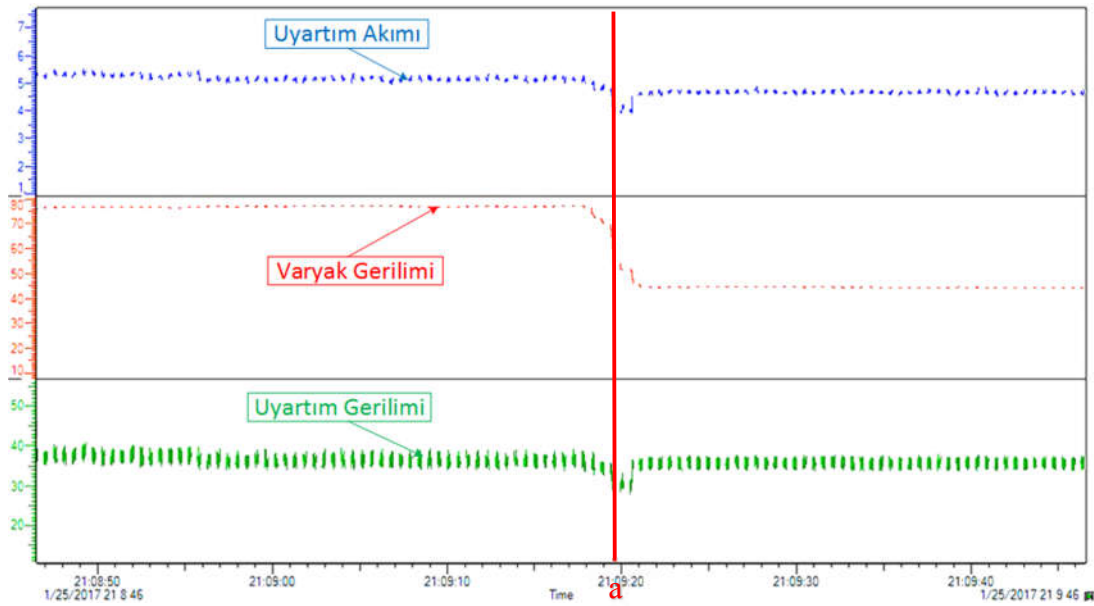
Şekil 5.5. PLC grafik analiz uygulaması ile alınan uyartım akım, gerilim ve ayarlı giriş kaynağı gerilim değeri-1

Şekil 5.5 incelendiğinde ilk anda ayarlı giriş kaynağı geriliminin $70 V_{AA}$, uyartım akımının referans değeri olan $5 A_{DA}$ ve uyartım geriliminin de $32 V_{DA}$ seviyelerinde olduğu görülmektedir. Ayarlı giriş kaynağı gerilimi a noktasında $70V$ 'den $42V_{AA}$ 'ya düşürülmüştür. Sistemin giriş geriliminin 1 s'de %50'lik bir düşümüne karşı 2 s'de referans uyartım akım değerine ulaştığı Şekil 5.5'ten görülmektedir. b noktasında ayarlı giriş kaynağı geriliminin artması, uyartım akımında kısa süreli bir artışa neden olmuştur. Artış anından itibaren 3s'lik bir süreçte başarılı bir şekilde uyartım gerilimi referans gerilime eşitlenmiştir.



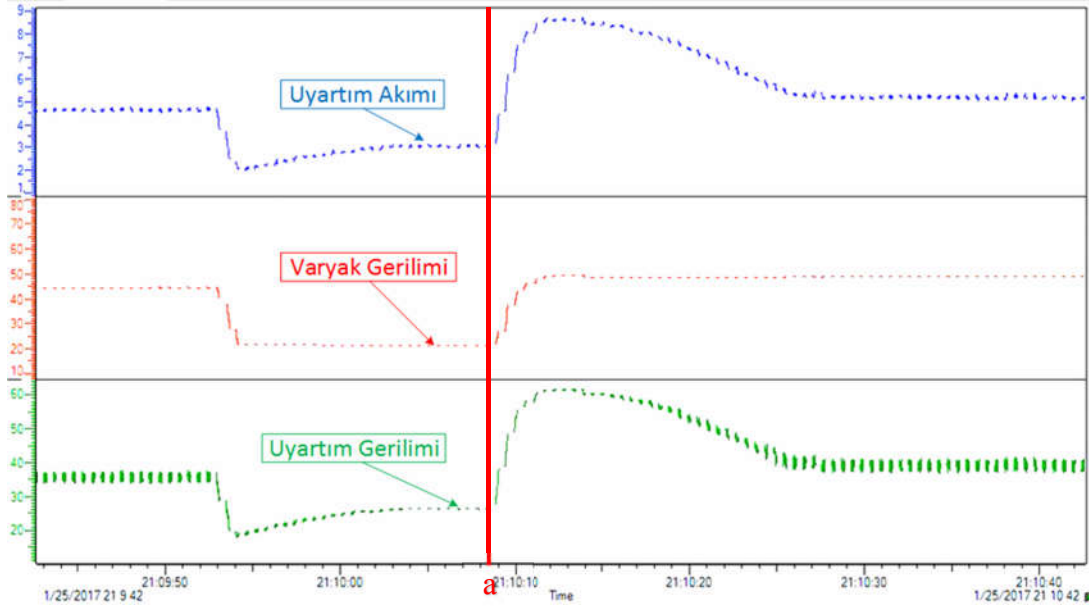
Şekil 5.6. PLC grafik analiz uygulaması ile alınan uyartım akım, gerilim ve ayarlı giriş kaynağı gerilim değeri-2

Şekil 5.6’da gösterildiği üzere ayarlı giriş kaynağı gerilimi a anında 0’dan 70 V_{AA}’ya kadar arttırılmıştır. b noktasında giriş geriliminin artırılması durumunda bile uyartım akımının daha önceden belirlenen tolerans aralığı olan ± 0.5 A aralığında uyartım akımını sabitlendiği görülmüştür. Bu sayede sistem belirlenen bir bant aralığında çalışarak uyartım akımında salınımlar oluşturmayacaktır.



Şekil 5.7. PLC grafik analiz uygulaması ile alınan uyartım akım, gerilim ve ayarlı giriş kaynağı gerilim değeri-3

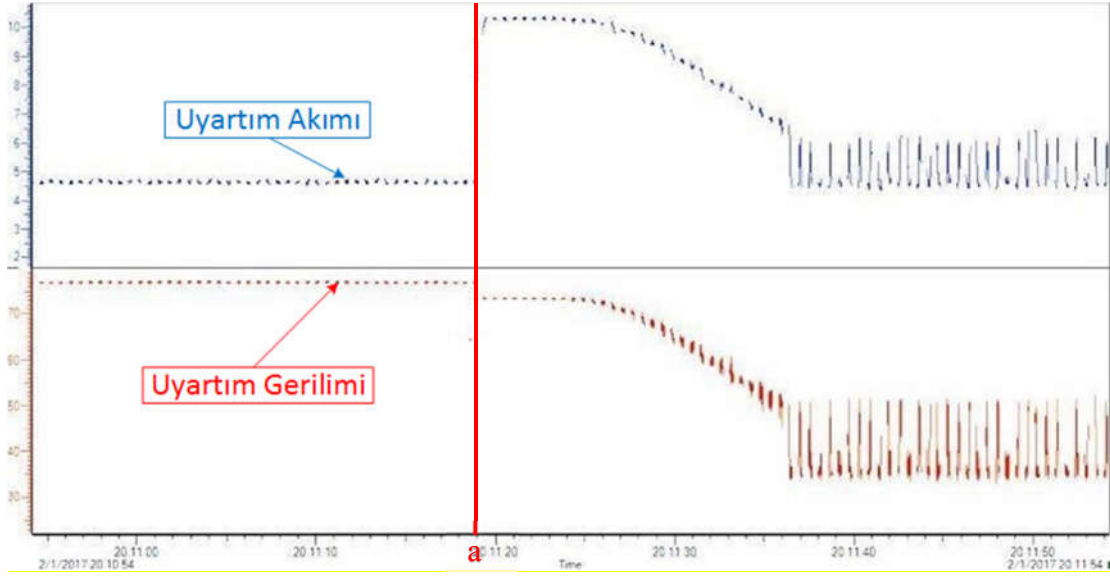
Şekil 5.7, normal çalışma durumunda a anındaki ayarlı giriş kaynağı gerilimindeki ani değişmeyi göstermektedir. Ayarlı giriş kaynağı gerilimindeki değişim kısa bir sürede sönümlenerek sistem referans değerde çalışmasına devam etmektedir.



Şekil 5.8. PLC grafik analiz uygulaması ile alınan uyartım akım, gerilim ve ayarlı giriş kaynağı gerilim değeri-4

Şekil 5.8’de görüldüğü üzere ayarlı giriş kaynağı gerilimi çıkışa referans olarak girilen akım değerinin altında ise sistem akımı arttırmak için akım arttırma komutu göndermektedir. Tristör tetikleme açısı 30 dereceye kadar çekilmektedir. Bu esnada ayarlı giriş kaynağı geriliminin arttırılması, a noktasından görüldüğü üzere, yüke akımın referans değerinden daha fazla akım uygulanmasına neden olmaktadır. Bu değişim sistem tarafından 10 s gibi bir süre içerisinde referans akımına sabitlenmiştir. Bu süreçte generatörün hızlı bir değişime ihtiyaç duymadığı anlarda değişimin çok hızlı olmaması reaktif güç kontrolü için daha sağlıklı olmaktadır.

Uyartım sistemlerinde yük değişimi olmamaktadır. Ancak tasarlanan sistemlerin tepkisinin incelenmesi açısından yük değişimi testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.10’da gösterildiği üzere sistemin yükü 10 Ω ’dan 5 Ω ’a düşürülmüş ve sistemin tepkisi incelenmiştir.



Şekil 5.9. 5A set değerinde yükün 10 Ω 'dan 5 Ω 'a düşürüldüğü andaki PLC ekranı

Şekil 5.9'dan görüldüğü üzere sistem 5A'da çalışırken yük a anında 10 Ω 'dan 5 Ω 'a düşürülmüştür. Bu değişim sistemden çekilen akımın artmasına neden olmuştur. Sistem FCR modda 5A'ya set edilmiştir. Bu nedenle sistem kendisini 5A'ya ayarlamaktadır. Bu değişim 17 saniye kadar sürmüştür. Sistem bu süre sonunda belirlenen uyartım akımı değerine ulaşmıştır. Böyle bir durum gerçek bir sistemde gerçekleşmeyecek bir benzetmedir. Ancak sistemin geri bildirimli olarak hangi durum olursa olsun referans değeri takip ettiği görülmüştür.

Gerçekleştirilen statik uyartımı çalışmasında laboratuvar ortamında FVR, FCR ve yük değişimi testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler sonucunda tasarlanan sistemin kendisine verilen set değerlerine belirlenen toleranslar aralığında uyum sağladığı gözlemlenmiştir. Bu aşamada Sabit Reaktif Güç ve Sabit Güç Katsayısı modları uyartım akımına bağlı olması nedeniyle gerçekleştirilmemiştir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, hidroelektrik santrallerinde kullanılan senkron generatörler için statik uyarım sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan statik uyarım sistemi 350 A, 200 V çıkış seviyesine sahiptir. Burada sağlanabilecek güç 70 kW'a kadar çıkabilmektedir. Kontrollü doğrultucu girişine uygulanan gerilim tetikleme açısı değiştirilerek çıkışta 0 ile maksimum gerilim değerine kadar çıkartılabilmektedir.

PLC ile gerçekleştirilen yazılım ile senkronizasyon öncesi ve sonrasında kullanılmak üzere 8 farklı çeşit çalışma modu oluşturulmuştur. Bu sayede kullanıcıya geniş bir çalışma seçeneği sunulmuştur. Bu seçeneklerden herhangi birini seçebilen kullanıcı uyarım akım ve gerilimi, reaktif güç veya güç katsayısını referans alarak uyarım sistemini çalıştırabilir.

Kullanıcı sistemin devreye alınması esnasında çalışma modlarını belirlemektedir. Sistem daha sonraki çalışmalarında kendisine daha önceden belirtilmiş çalışma modlarına göre çalışmaya devam etmektedir. Pano üzerinde bulunan operatör paneli sistem ile ilgili tüm izleme ve kontrol fonksiyonlarına sahiptir. Kullanıcı generatör, şebeke ve uyarım akım ve gerilimi dahil birçok veriye operatör paneli üzerinden ulaşabilmektedir. Ayrıca sistem ile ilgili koruma ve limit değerleri bu panelden girilebilmektedir. Panel ile PLC arasındaki haberleşme Modbus TCP/IP protokolü üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu sayede veri aktarımı kolaylıkla sağlanmıştır.

Sistemde kullanılan enerji analizörü modülleri dahili tip (in-line) haberleşme sistemine sahiptir. Bu haberleşme sisteminde analizörler PLC ile giriş-çıkış modüllerinin haberleşme protokolü ile aynı sistemle haberleşmektedir. Bu sayede diğer sistemlerde oluşabilecek haberleşmenin kopması ve gecikmesi gibi problemlerin önüne geçilmiştir. Ayrıca analizör modülü ile generatöre ait verilerin daha detaylı olarak incelenebilmesi sağlanmıştır. Bu sayede gerçekleştirilen uyarım sistemi generatörün ikincil bir koruma sistemi olarak çalışmaya imkan sağlamaktadır. Generatöre ait verilerin okunması otomasyon sistemine sahip olmayan yerlerde kontrol ve izleme kolaylığı oluşturmuştur.

Kullanılan PLC Modbus TCP/IP protokolüne sahiptir. Bu sayede üst otomasyon sistemleri ile adaptasyonu adres tablosu ile sağlanabilmektedir. Ayrıca otomasyon sistemlerinin olmadığı yerlerde bir Modbus Alıcı (Client) ile sistem verileri takip edilebilmektedir.

Bilindiği üzere güç elektroniği anahtarlamaında yüksek frekanslı sinyaller gerekmektedir. Geliştirilen hızlı ve kararlı sıfır geçiş algılama ve tristör tetikleme kartı dsPIC kullanılarak daha uygun maliyette bir sistem tasarımı yapılmıştır. Bu sayede kullanılacak MCU sisteminin maliyeti düşürölerek stok imkanı arttırılmıştır.

DsPIC 30F4011 serisi mikrodnetleyicisi ile gerçekleştirilen algılama ve kontrol yazılımında test aşamasında görölun sorunlar, farklı yazılım akışları kullanılarak giderilmiş ve böylece sistemin tetikleme ve algılama ile ilgili optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu sayede okunan sıfır geçiş sinyalleri hatasız izlenerek açı hesabı yapılmış ve tristörlerin tetiklenmesi için gerekli sinyaller üretilmiştir.

Uyartım sistemlerinde uyartım akımının uygulandığı sargılar sabittir. Bu nedenle yükte bir değişim olmaz. Ancak gerçekleştirilen sistemde akımın ani değişimlerinin incelenmesi için yük değişimi yapılmıştır. Yük değişimlerinde sistemin belirlenen uyartım akım veya gerilim değerine sabitlendiği görölmüştür.

Yapılan çalışmalar sonucunda uyartım sisteminin geliştirilebilmesi açısından bazı iyileştirmeler belirlenmiştir. Bunlardan ilki PLC ile MCU arasında sayısal kontrol yerine PLC'den alınan analog bir çıkışla veya haberleşme üzerinden kontrol açısının belirlenmesi sistemin açı kontrolünde daha etkili olmasını sağlayacaktır. Ayrıca AVR ve güç kısmının ayrılarak geliştirilen AVR'nin modüler yapılması durumunda her türlü güç katmanına uygulanabilirliği gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. İnternet: IEEE recommended practice for excitation system models for power system stability studies. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fdocument%2F7553421%2F&date=2017-09-15>. Son Erişim Tarihi: 15.09.2017.
2. Schaefer, R. (1995). *Steam turbine generator excitation system modernization*. Conference Record of 1995 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, 194-204.
3. Lin, W., Lee, C. (2007). *Parameters setting and tuning for transition to a digital-based excitation system*. TENCON 2007 - 2007 IEEE Region 10 Conference, 1-4.
4. Schaefer, R., Kim, K. (2000). *Digital excitation system provides enhanced tuning over analog systems*. Pulp and Paper Industry Technical Conference, 84-91.
5. Shouzhen, Z., Shande, S., Houlian, C., Jianmin, J. (1993). *Effects of the excitation system parameters on power system transient stability studies*, Advances in Power System Control, Operation and Management, 2, 532-535.
6. Zhao-wei, L., Yu-qiang, H., Xiao-dan, C., Wei, L., Bijun, L. (2014). *Parameters optimization of excitation system based on extended heffron-philips model*. Power and Energy Engineering Conference, 1-6.
7. Hu, X., Liu, W., Zhang, Lian. (2013). *A reconfigurable AC excitation control system for impulse hydroelectric generating unit based on fault-tolerance*. 2013 2nd International Symposium on Instrument and Measurement, Sensor Network and Automation, 227-231.
8. Yuan, C., Jin, M. (2010). *Research on PID parameters optimization of synchronous generator excitation control system*. Critical Infrastructure (CRIS), 2010 5th International Conference on, 1-5.
9. İnternet: IEEE guide for the preperation of excitation system specifications. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fdocument%2F6803835%2F&date=2017-09-15>. Son Erişim Tarihi: 15.09.2017.
10. Ramya, R., Selvi, K. (2011). *A simple fuzzy excitation control system for synchronous generator*. Emerging Trends in Electrical and Computer Technology (ICETECT), 2011 International Conference on. 35-39.
11. Feng, S., Jianbo, X., Yong-hong, X. (2008). *Study of brushless excitation system parameters estimation based on improved genetic algorithm*. Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 915-919.
12. Meng-di, Z., Xi-xiu, W., Wei, Q., Fei, L., Bo, L. (2012). *Application of PID control based BP-NN form arine generator excitation system*. 2012 Power Engineering and Automation Conference. 1-4.

13. Schaefer, R., Kim, K. (2014). *Auto tuning speeds commissioning of the generator excitation system*. Conference Record of 2014 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, 137-143.
14. Irmak, E., Güler, N., Ersan, M. (2016). *PI controlled solar energy supported static excitation system desing and simulation for synchronous generators*. IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications, 1024–1028.
15. Kuz'menko, A., Synitsin, A., Zyryanova, A. (2014). *The use of integral adaptation principle to increase the reliability of synchronous generator nonlinear excitation system*. 2014 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops, 415-420.
16. Scheafer, R., Jansen, D., McMullen, S., Rao, P. (2011). *Coordination of digital excitation system settings for reliable operation*. IEEE/IAS Pulp & Paper Industry Technical Paper Conference, 112-119.
17. Murdoch, A., Delmerico R., Venkataraman, S., Lawson, R., Curran, J., Pearson, W. (2000). *Excitation system protective limiters and their effect on volt/var control—design, computer modeling, and field testing*. *IEEE transactions on energy conversion*, 15, 440-450.
18. Moghaddam, I., Salami, Z., Mohajeryami, S. (2014). *Generator excitation systems sensitivity analysis and their model parameter's reduction*. 2014 Clemson University Power Systems Conference, 1-6.
19. Buscher, D. (2011). *Avoiding loss of voltage sensing runaway for generator excitation systems*. IEEE/IAS Pulp & Paper Industry Technical Paper Conference, 120-123.
20. Zhang, X. C., Cheng, G. H., Xu, Z. (2005). *User defined excitation system models for power system stability analysis in PSASP*. 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, 1-5.
21. Baojun, G., Peng, X., Yanling, L. (2010). *The excitation system simulation of huge hydro-generator*. 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 1-4.
22. Peng, C., Du, Z., Yang, D., Zhao, H., Zhang, Y., Yang, H. (2014). *An equivalent modeling for small and medium-sized hydropower generator group considering excitation and governor system*. 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. 1-5.
23. Ruuskanen, V., Niemela, M., Pyrhonen, J., Kanerva, S., Kaukonen, J. (2008). *Modelling the brushless excitation system for a synchronous machine*. IET Electric Power Applications, 3, 231-239.
24. Rebollo, E., Blaquez, F., Platero, C., Blaquez, F., Redondo, M. (2014). *Improved high-speed de-excitation system for brushless synchronous machines tested on a 20 MVA hydro-generator*. IET Electric Power Applications, 9, 415-411.

25. Kim, C., Rhew, H., Kim, Y. (1998). *Stability performance of new static excitation system with boost-buck converter*. Industrial Electronics Society, 1998. IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE, 1, 402-409.
26. Çolak, İ. (2010). *Senkron Makinalar* (İkinci baskı). Ankara: Seçkin Yayınevi., 50-89
27. Chapman, S. (2012). *Electric Machinery Fundamentals* (Fifth edition). New York: McGraw-Hill, 64-98
28. Mohan, N., Undeland, T., Robbins, W. (1995). *Power Electronics* (Second edition). New York: John Wiley and Son's, Inc. 103-112.
29. İnternet: Controlled Rectifiers. URL:
<http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%252Ffile.PostFileLoader.html%253Fid%253D58616591ed99e15c9a2592d8%2526assetKey%253DAS%25253A443617237049347%2525401482777999698%26usg%3DAFQjCNHWMl7FvFX6e8PWpt4YK2uflphO9w&date=2017-09-15>. Son Erişim Tarihi: 15.09.2017.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ERSAN, Mustafa
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 16.09.1989, Yozgat
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (542) 309 77 11
 e-mail : ersanmustafa@yandex.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Gazi Üniversitesi /Elektrik Öğretmenliği	2012
Lise	Yozgat Anadolu Meslek Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-Halen	KONELİSİS	Yazılım ve Proje Müdürü
2012-2013 İki Dönem	Gazi Üniversitesi	Öğretim Görevlisi
2012-Bir Dönem	Danış Tunalıgil Endüstri Meslek Lisesi	Öğretmen

Yayınlar

1. Irmak, E., Güler, N., Ersan, M. (2016). *PI controlled solar energy supported static excitation system desing and simulation for synchronous generators*. IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications, 1024–1028.
2. Kaplan, O., Issi, F., Ersan, M. (2013). *A high efficient driver design for LED lighting system*. 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 1548-1552.

3. Ersan, M., Irmak, E. (2012). Kablo Ucu Belirleme ve Arıza Tespit Sistemi. *Nevşehir Üniversitesi Ulusal Meslek Yüksekokulları Çalıştayı ve Öğrenci Sempozyumu 2012*.
4. Güler, N., Ersan, M. Irmak, E. (2012). Yenilenebilir Enerji Kaynakları Üzerine Eğitim Amaçlı Bir Simülasyon Çalışması. *Nevşehir Üniversitesi Ulusal Meslek Yüksekokulları Çalıştayı ve Öğrenci Sempozyumu 2012*.



GAZİ GELECEKTİR..