

**SENKRON GENERATÖRLERİN DSPIC KULLANILARAK  
PARALEL BAĞLANMASI VE ARAYÜZ ÜZERİNDEN YÜK  
KONTROLÜNÜN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**Naki GÜLER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIS 2012**

**ANKARA**

**SENKRON GENERATÖRLERİN DSPIC KULLANILARAK  
PARALEL BAĞLANMASI VE ARAYÜZ ÜZERİNDEN YÜK  
KONTROLÜNÜN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**Naki GÜLER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAYIS 2012**

**ANKARA**

Naki GÜLER tarafından hazırlanan “SENKRON GENERATÖRLERİN DSPIC KULLANILARAK PARALEL BAĞLANMASI VE ARAYÜZ ÜZERİNDEN YÜK KONTROLÜNÜN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Erdal IRMAK .....  
Tez Danışmanı, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile ELEKTRİK EĞİTİMİ Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Ercan Nurcan YILMAZ .....  
Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Erdal IRMAK .....  
Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Vedat KIRAY .....  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Turgut Özal Üniversitesi

Tarih: 03 / 05 / 2012

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yaptığımı bildiririm.

Naki GÜLER

**SENKRON GENERATÖRLERİN dsPIC KULLANILARAK PARALEL  
BAĞLANMASI VE ARAYÜZ ÜZERİNDEN YÜK KONTROLÜNÜN  
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Naki GÜLER**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
Mayıs 2012**

**ÖZET**

Günümüzde artan elektrik enerjisi talebi nedeniyle tek merkezli enerji üretim sistemleri yerine çok merkezli enerji üretim sistemleri (enterkonnekte sistemler) kullanılmaya başlanmıştır. Bu sistemlerde kullanılan generatörlerin, paralel bağlanabilmesi için şebeke gerilimi ile aynı koşullara sahip olmaları gerekmektedir. Bu çalışmada senkron generatörlerin paralel bağlanma şartlarının sağlanması ve sistem yükünün generatörler üzerine dağıtılması işlemleri bir bilgisayar arayüzü üzerinden kullanıcı kontrollü olarak sağlanmıştır. Paralel bağlanma şartlarının sağlanmasında ve yük paylaşımının gerçekleştirilmesinde PIC, PLC gibi diğer denetleyicilere göre daha üstün özellikleri bulunan dsPIC mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Çalışmada, paralel bağlanma ile yük kontrol ve paylaşım sistemleri görsel bir arayüz üzerinden gerçekleştirilebildiği gibi frekans, akım, gerilim, güç katsayısı, aktif, reaktif ve görünür güç parametreleri de arayüz üzerinden gerçek zamanlı olarak takip edilebilmektedir. Gerçekleştirilen bu sistem ile özellikle literatürde sık rastlanılmayan bilgisayar kontrollü ve izlemeli yük paylaşım sistemleri için yeni ve orijinal bir yaklaşım sunulmuştur.

**Bilim Kodu** : 703.3.012  
**Anahtar Kelimeler** : Senkron generatörler, paralel bağlanma, yük kontrolü,  
dsPIC  
**Sayfa Adedi** : 77  
**Tez Yöneticisi** : Yrd. Doç. Dr. Erdal IRMAK

**PARALLEL CONNECTION OF SYNCHRONOUS GENERATORS USING  
dsPIC AND ACHIEVING THE LOAD-SHARING CONTROL OVER AN  
INTERFACE  
(M.Sc. Thesis)**

**Naki GÜLER**

**GAZİ UNIVERSITY  
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY  
May 2012**

**ABSTRACT**

**Instead of single-center energy generation systems, multi-center ones (inter-connected systems) are being used in these days because of increasing energy demand. In order to perform the parallel connection of generators in inter-connected systems, they should have the same conditions with the grid voltage. In this thesis, operations for providing the parallel connection conditions of generators and sharing the system load between them have been achieved by a computer interface as user-controlled. For this aim, dsPIC microcontroller has been used in the experimental set due to its superior features compared to similar ones like PIC and PLC. The system can not only perform the parallel connection and load control and sharing procedures over the user interface, but also allow monitoring the most important parameters in real time such as frequency, currents, voltages, power factor, and active, reactive and apparent power values. Thanks to the system presented in this study, a novel and original solution is developed for computer controlled and monitored load-sharing systems, which is rarely studied in literature.**

**Science Code** : 703.3.012  
**Key Words** : Synchronous generators, parallel connection, load sharing control, dsPIC  
**Page Number** : 77  
**Adviser** : Assist. Prof. Dr. Erdal IRMAK

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca değerli bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, her aşamada beni yönlendiren ve yol gösteren danıőmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Erdal IRMAK'a teőekkürü bir borç bilirim. Tez hazırlama ve uygulama sürecinde desteğini esirgemeyen kıymetli hocalarım Sayın Prof. Dr. İlhami ÇOLAK'a, Sayın Prof. Dr. Güngör BAL'a, Sayın Doç. Dr. Ramazan BAYINDIR'a, Sayın Yrd. Doç. Dr. Orhan KAPLAN'a, sunulan bu tez çalışmasının nihai şeklini almasında kıymetli fikir ve önerileriyle beni yönlendiren hocalarım Sayın Doç. Dr. Ercan Nurcan YILMAZ'a ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Vedat KIRAY'a, çalıőmalarım boyunca bana yardımcı olan kıymetli arkadaşlarıma, desteğini ve güvenini hiçbir zaman esirgemeyen Sema KESKİN'e tüm içtenliğimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	vi
TEŞEKKÜR .....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ .....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. SENKRON MAKİNELER.....	9
2.1. Senkron Motorlar .....	10
2.2. Senkron Generatörler.....	11
2.2.1. Silindirik kutuplu senkron generatörler .....	13
2.2.2. Çıkık kutuplu senkron generatörler .....	16
2.3. Senkron Makinelerin V-Eğrileri.....	18
2.4. Senkron Generatörlerin Paralel Bağlanması.....	19
2.4.1. Frekans eşitliği .....	20
2.4.2. Gerilim eşitliği.....	21
2.4.3. Faz sıralarının aynı olması .....	23
2.4.4. Gerilim dalga şekillerinin benzerliği .....	25
2.4.5. Senkronizasyon anı.....	26
3. UYGULAMA ÇALIŞMALARI .....	29
3.1. Donanım ve Yazılım Altyapısı.....	29
3.1.1. dsPIC mikrodenetleyicisi .....	30

**Sayfa**

3.1.2. DA/DA çeviriciler .....	34
3.1.3. Sıfır geçiş detektörleri.....	38
3.1.4. Yazılım bileşenleri.....	41
3.2. Arayüz Tasarımı .....	43
3.3. Deneysel Çalışmalar .....	48
3.3.1. Frekansın ölçülmesi ve eşitlenmesi .....	50
3.3.2. Gerilimin ölçülmesi ve eşitlenmesi .....	52
3.3.3. Senkronizasyon anının algılanması .....	55
3.4. Yük Paylaşımının Gerçekleştirilmesi .....	55
3.4.1. Aktif yük paylaşımı .....	55
3.4.2. Reaktif yük paylaşımı .....	57
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME .....	61
5. SONUÇLAR .....	70
KAYNAKLAR.....	74
ÖZGEÇMİŞ.....	77

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Senkron makinenin iç yapısı.....	10
Şekil 2.2. Bir fazlı senkron makinenin elektrik devresi.....	11
Şekil 2.3. Silindirik kutuplu senkron makinenin bir faz eşdeğer devresi .....	13
Şekil 2.4. Senkron generatörün güç akış diyagramı .....	15
Şekil 2.5. Çıkık kutuplu senkron makinenin iç yapısı .....	16
Şekil 2.6. Çıkık kutuplu senkron generatörün bir faz eşdeğer devresi .....	17
Şekil 2.7. Senkron makinenin V-Eğrileri.....	19
Şekil 2.8. Frekansları farklı iki gerilim sinyali.....	20
Şekil 2.9. Frekansları aynı iki gerilimin karşılaştırılması .....	21
Şekil 2.10. Genlikleri farklı iki gerilim.....	22
Şekil 2.11. Genlikleri aynı iki gerilimin karşılaştırılması .....	23
Şekil 2.12. Faz sıraları farklı iki gerilimin karşılaştırılması.....	24
Şekil 2.13. Faz sıraları aynı iki gerilimin karşılaştırılması .....	24
Şekil 2.14. Dalga şekilleri farklı iki gerilimin karşılaştırılması .....	26
Şekil 2.15. Aralarında açı farkı olan iki gerilimin karşılaştırılması .....	27
Şekil 2.16. Üretilen gerilimlerin aynı fazlı olduğu an (Senkronizasyon anı).....	27
Şekil 3.1. Gerçekleştirilen uygulama çalışmasının blok diyagramı .....	30
Şekil 3.2. dsPIC mikrodenetleyicisinin kullanılan kanalları .....	33
Şekil 3.3. Cuk çevirici devre şeması.....	34
Şekil 3.4. Anahtarlama sinyali.....	37
Şekil 3.5. DGM sinyallerinde izolasyon ve gerilim yükseltme .....	38

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 3.6. Tasarlanan sıfır geçiş detektörünün devre şeması.....	39
Şekil 3.7. Sıfır geçiş detektörü çıkış sinyali .....	40
Şekil 3.8. dsPIC mikrodenetleyicisinin yazılım sinyal akış diyagramı .....	42
Şekil 3.9. Grafikselsel arayüz görüntüsü.....	44
Şekil 3.10. Generatör yönetim panelinin incelenmesi .....	45
Şekil 3.11. a: Paralel bağlantı sonrası arayüz üzerinde grafiklerin gösterimi, b: Akım grafikleri.....	47
Şekil 3.12. Güç grafikleri .....	48
Şekil 3.13. Sıfır geçiş detektörü çıkış sinyali .....	50
Şekil 3.14. Frekans sabitleme sisteminin akış diyagramı .....	52
Şekil 3.15. Gerilim ölçüm sisteminin blok diyagramı .....	53
Şekil 3.16. Yük paylaşım durumunda generatör akım ve gerilimleri.....	57
Şekil 3.17. Generatör 1'in reaktif yüklü olduğu durum.....	58
Şekil 3.18. Generatör 2'ye reaktif yük aktarıldığı durum.....	59
Şekil 4.1. Paralel bağlanma anı .....	61
Şekil 4.2. Paralel bağlanma şartları sağlanılırken grafikselsel ekranın gösterilmesi.....	62
Şekil 4.3. Akımların grafikselsel gösterimi.....	63
Şekil 4.4. Güç eğrilerinin grafikselsel olarak incelenmesi .....	64
Şekil 4.5. Yük paylaşımının eşit olduğu durumda a: gerilim (V) ve akım ( $I_1 - I_2$ ) eğrileri, b: Arayüz görüntüsü.....	65
Şekil 4.6. Generatörlerin yük paylaşım durumundaki akım – gerilim eğrileri .....	66
Şekil 4.7. Generatörlerin yük paylaşım durumundaki arayüz görüntüsü.....	67
Şekil 4.8. İkinci generatörün fazla yüklendiği durumdaki akım – gerilim eğrileri ....	68
Şekil 4.9. İkinci generatörün fazla yüklendiği durumdaki arayüz görüntüsü .....	68

**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 3.1. dsPIC deneme kartı .....	31
Resim 3.2. Tasarımı gerçekleştirilen Cuk çeviricinin görüntüsü .....	34
Resim 3.3. Sıfır geçiş devresi görüntüsü.....	40
Resim 3.4. Deneysel düzenek.....	49
Resim 3.5. Akım - gerilim algılama ve dönüştürme ünitesi.....	53
Resim 3.6. True - RMS entegreleri ile gerçekleştirilen devre görüntüsü .....	54

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu bölümde, çalışmada kullanılan bazı simgeler ve kısaltmalar açıklamaları ile verilmiştir.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
<b>Cosφ</b>	Güç katsayısı
<b>E<sub>f</sub></b>	Uyartım devresi gerilimi (V)
<b>E<sub>rms</sub></b>	Gerilimin etkin değeri (V)
<b>P</b>	Elektriksel güç (W)
<b>P<sub>f&amp;w</sub></b>	Mekanik kayıplar (W)
<b>P<sub>core</sub></b>	Nüve kayıpları (W)
<b>P<sub>cu</sub></b>	Stator bakır kayıpları (W)
<b>R<sub>f</sub></b>	Endüvi direnci (Ω)
<b>X<sub>f</sub></b>	Endüvi kaçak reaktansı (Ω)
<b>ω</b>	Açısal hız (rad/s)
<b>Ø</b>	Bobin sargılarını kesen akı miktarı (Wb)
<b>η</b>	Verim
<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>DA</b>	Doğru akım
<b>DGM</b>	Darbe genişlik modülasyonu
<b>dsPIC</b>	Dijital sinyal kontrolör
<b>IGBT</b>	Yalıtılmış kapılı çift kutuplu transistör

## 1. GİRİŞ

Yüksek güçlü enerji sistemlerinde, gerekli güç tek enerji kaynağı ile sağlanamadığından enerji ihtiyacının karşılanması için enterkonnekte sistemler kullanılmaktadır. Enterkonnekte sistemler birçok enerji üretim merkezinin paralel bağlanmasından oluşmaktadır. Enterkonnekte sisteme dâhil edilecek generatörlerin paralel bağlanması için bazı ön şartlar bulunmaktadır. Paralel bağlanılacak generatörlerin frekansları eşit, gerilimleri eşit, faz sıraları aynı, faz açıları aynı ve gerilim dalga şekillerinin benzer olması gerekmektedir [1]. Aksi halde paralele alınan generatör, sistemin geriliminde ani düşümlere, enerjinin anlık olarak kesilmesine ve sistemde bulunan diğer generatörler üzerinde vuruntulara neden olmaktadır. Bu nedenle paralel bağlanılacak generatörde üretilen gerilimin öncelikle paralel bağlanma şartlarına uygun hale getirilmesi gerekmektedir.

Generatörlerin paralel bağlanmasındaki diğer bir amaç, generatörlerden herhangi birisinin bakıma alınması gibi durumlarda enerji kesintisinin yaşanmamasıdır. Tek merkezli enerji üretim sistemlerinde generatörün periyodik bakım sürelerinde sistem enerjisi sürekli olarak kesintilere uğramaktadır. Enerji sürekliliğinin sağlanması açısından çok merkezli enerji üretim sistemleri daha kullanışlı olmaktadır.

Geçmişte teknolojik imkânların yetersizliği nedeni ile paralel bağlanma sistemleri kullanıcı kontrollü olarak gerçekleşmekteydi. Günümüzde generatörlerin paralel bağlanması için PLC, mikrodenetleyici ve bilgisayar tabanlı uygulamalar geliştirilmiştir. Garip tarafından yapılan tez çalışmasında senkron generatörlerin paralel bağlanma şartlarının sağlanması 16f877 mikrodenetleyici ile sağlanmıştır. Yapılan çalışmada şebeke ile etkileşimli çalışan bir sistem geliştirilmiş ve şebeke parametreleri referans alınarak mevcut generatörün paralel bağlanma şartları gerçekleştirilmiştir. [2]. Çolak ve Yılmaz yaptıkları çalışmada paralel bağlantıdan sonra oluşacak problemleri Delphi paket programı kullanarak en kısa sürede algılamak amacıyla bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Sistem elektrik güç sistemlerinde paralel bağlantıdan sonra oluşan aşırı akım, yüksek/düşük gerilim, yüksek/düşük frekans, ters güç akışı ve toprak hattıyla nötr arasında oluşan

potansiyel fark gibi problemleri tespit edebilmektedir [3]. Tamrakar ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada elektrik üretiminde kullanılan senkron ve asenkron generatörlerin paralel bağlanma durumları bilgisayar ortamında karşılaştırılmıştır. Ayrıca çalışmada asenkron-senkron bağlantının senkron-senkron bağlantıya göre daha kolay paralel bağlandığı ve asenkron motorun generatör olarak kullanılabilirdiği vurgulanmıştır [4]. Bekiroğlu ve Bayrak tarafından yapılan çalışmada senkron generatörlerin paralel bağlantısı 16f877 mikrodenetleyicisi ile otomatik olarak gerçekleştirilmiştir. Generatörlerin paralel bağlanması için gereken koşullar mikroşlemci tarafından takip edilerek tüm koşullar gerçekleştiğinde bağlantı sağlanmaktadır [5]. Bekiroğlu ve Bayrak yaptıkları diğer bir çalışmada senkron generatörlerin paralel bağlantısının eğitim sistemlerinde kullanılması için bir arayüz çalışması gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirilen çalışmada senkron generatörlerin paralel bağlanma şartları bir arayüz üzerinden izlenilerek makinelerin paralel bağlantı durumları gösterilmiştir [6]. Mahmoud ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, rüzgâr benzetimlerinde kullanılan senkron generatörlerin çıkışlarındaki alternatif gerilimi doğrultarak iki generatörün DA barada paralel bağlanmasını sağlamışlardır. Deneysel amaçlı yapılan çalışmada generatörlerin çıkışına 3 fazlı doğrultucu bağlayarak üretilen alternatif gerilimin doğru gerilime çevrilmesini sağlamışlardır. Üretilen doğru gerilimleri bir DA baraya bağlayarak bara çıkışında yükleri beslemişlerdir. Sistemde yük kontrolünü, DA/DA çeviricilerin darbeleme oranlarını değiştirerek sağlamışlardır [7]. Pican ve arkadaşları rüzgâr enerji kaynakları için, sabit mıknatıslı senkron generatörlerin paralel bağlanmasını bilgisayar kontrollü olarak gerçekleştirmişlerdir. Generatör çıkış gerilimlerini doğrultarak konvertörlerle çıkış gerilimini sabitlemişlerdir. Konvertörlerin çıkış gerilimini invertörler ile alternatif gerilime çevirerek sisteme bağlı üç generatörden üretilen gerilimlerin paralel bağlanma şartlarını sağlamışlardır. Bilgisayar arayüzü üzerinden generatörlerin çıkış gerilim, akım ve frekanslarını izlemişlerdir [8]. Goel ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, rüzgâr türbinlerinde üretilen gerilimin doğru gerilime çevrilerek paralel bağlanmasını sağlamışlardır. Ayrıca sistemin, değişken, sabit, dengeli ve dengesiz yükler altındaki tepkilerini incelemişlerdir [9]. Tu ve arkadaşları, generatörlerin paralel bağlanması sırasında oluşabilecek hataların incelenmesi için bir benzetim çalışması gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmada,

paralel bağlantı şartlarının yanlış olması durumunda çıkış gerilimi ve makinelerde dolaşan hata akımları grafiksel olarak incelenmiştir [10]. Varela ve Cruden küçük güçlü bir senkron generatörün gerilim ve frekans kararlılığını benzetim ve gerçek ortamda incelemiştir. Benzetimi gerçekleştirilen sistem uygulamaya aktararak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Uygulama ve benzetim aşamasında özellikle, makinenin V/f karakteristiğini çıkararak frekansın değişmesine karşılık gerilimin değişimini grafiksel olarak yorumlamışlardır. Elde edilen sonuçlara göre benzetim çalışmasında kullandıkları kontrol sistemlerinin uygulamada da yaklaşık sonuçlar verdiğini göstermişlerdir [11].

Literatürde yük paylaşım sistemleri ile ilgili de bazı çalışmalar bulunmaktadır. Liu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada paralel bağlı generatörler üzerinde omik ve endüktif yük paylaşım durumlarını incelemiştir. Yük paylaşımı sırasında geçici ve kararlı durum analizleri yaparak makinelerin dinamik denklemlerini açıklamışlardır [12]. Wang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada senkron generatörlere senkron motorları akuple ederek motorları frekans konvertörü ile kontrol etmişlerdir. Paralel bağlanma şartlarını sağlayarak, paralel bağlı generatörlerde yük paylaşım durumlarını incelemiştir. Generatörlerde aktif ve reaktif yük paylaşımını gerçekleştirmişlerdir. Aktif ve reaktif yük paylaşım durumlarında makinelerin analizlerini grafiksel olarak göstermişlerdir [13]. Miri yaptığı çalışmada üç adet senkron generatörü şebeke etkileşimli olarak paralel bağlamıştır. Paralel bağlı generatörlerde aşırı yük paylaşım durumlarını inceleyerek makinelerin mekanik ve elektriksel karakteristiklerini çıkarmıştır. Ayrıca aşırı yük paylaşım durumlarında makinelerin elektriksel ve mekaniksel değişim hızlarının analizini gerçekleştirmiştir [14]. Moura ve arkadaşları yaptıkları benzetim çalışmasında bir güç sistemini modelleyerek iki adet senkron generatörün paralel bağlanmasını gerçekleştirmişlerdir. Paralel bağlanma şartlarından olan gerilim eşitliğinin sağlanmasını inceleyerek generatör devir sayısı ve çıkış gerilimi arasındaki değişimleri analiz etmişlerdir. Gerçekleştirilen benzetim çalışmasında paralel bağlanma anında generatör çıkış gerilimlerini inceleyerek oluşan salınımların PI kontrol tekniği kullanılarak optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir [15]. Zhong ve Weiss yaptıkları benzetim çalışmasında yenilenebilir enerji sistemlerinde kullanılan statik senkron generatörün

modellemesini DA/AA çevirici benzetimi ile gerçekleştirmişlerdir. Senkron generatörü, bir DA/AA enerji dönüşümü yapan elektrik makinesi olarak düşünerek bir konvertör tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Çeviriciyi, senkron generatör parametrelerine uygun olarak modelleyerek senkron generatörlerin benzetim çalışmalarında kullanılması için bir model tasarlamışlardır. Ayrıca yaptıkları generatör benzetiminin aktif ve reaktif yük altındaki tepkilerini inceleyerek modelin doğrulanmasını sağlamışlardır [16]. Gawande ve arkadaşları yaptıkları benzetim çalışmasında bir güç sistemi modellemesi yaparak değişken yükler altında kararlı bir enerji üretim sistemi tasarlamışlardır. Değişken omik ve endüktif yükler altında sistem frekansının ve geriliminin değişmesini engelleyecek bir kontrol mekanizması geliştirmişlerdir [17]. Zhong ve Weiss yaptıkları benzetim çalışmasında geliştirdikleri senkron generatör benzetiminin frekans ve gerilim kararlılığını inceleyerek olumlu sonuçlar elde etmişlerdir. Ayrıca aktif ve reaktif yükler altında sistem frekans ve geriliminde meydana gelen değişimleri göstererek optimizasyonunu sağlamışlardır [18]. Sao ve Lehn paralel bağlı generatörlerde aktif ve reaktif yük paylaşımlarını inceleyerek iki generatör arasındaki yük değişimlerini analiz etmişlerdir. Yapılan benzetim çalışmasında generatörler arasında aktif yük paylaşımını sağlamak için generatör torkunu değiştirmişlerdir. Aktif yük paylaşımında generatörlerden birinin mekanik torkunu arttırırken diğerini azaltarak yük paylaşım durumlarını incelemişlerdir. Aktif yük paylaşımında elde ettikleri grafiksel sonuçlar torku yüksek olan generatörün üzerine daha fazla yük aldığını göstermektedir. Reaktif yük paylaşımı gerçekleştirmek için senkron generatörün uyarım akımlarını konvertörlerle değiştirmişlerdir [19]. Korkua ve Kenarangui yaptıkları benzetim çalışmasında enterkonnekte sistemlerde bulunan generatörlerin aktif ve reaktif yük paylaşım durumlarını simule etmişlerdir. Çalışmada aktif ve reaktif güçlerin ölçümünü ayrı ayrı yaparak gücün aktif ve reaktif bileşenlerinin eşit paylaşımlarını sağlamışlardır [20]. Vandoorn ve arkadaşları ada modunda çalışan senkron generatörlerde aktif ve reaktif yük paylaşım durumlarını incelemişlerdir. Yapılan benzetim çalışmasında, frekansın değişmesi ile yüklenme oranları arasındaki bağıntıyı açıklamışlardır. Aktif ve reaktif güç değişimlerine ait grafiksel sonuçları göstererek frekansa bağımlı değişimleri göstermişlerdir. Yapılan çalışmada sonuç olarak küçük bir güç sisteminin aktif, reaktif yük değişimlerine tepkisi ve çıkış

gerilimindeki değişimlerin optimizasyonunu incelemişlerdir [21]. Vilar ve Dougal rüzgâr türbinlerinde kullanılan sabit mıknatıslı senkron generatörlerin yüksek hızlarda enterkonnekte sisteme dahil edilmesi için doğrultucu ve invertör yapısı geliştirmişlerdir. Senkron generatörü döndüren mekanik kuvvet üzerinde değişimler olduğunda, üretilen gerilim üzerinde mekanik etkiden kaynaklı bir salınım olduğunu göstermişlerdir [22]. Majumder ve arkadaşları küçük ölçekli bir güç sisteminde bulunan paralel bağlı generatörler üzerindeki yük değişim durumlarını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, sistemde bulunan üç generatördeki yük değişim durumlarını inceleyerek grafiksel olarak analiz etmişlerdir. Ayrıca, enterkonnekte sistemlerde senkron generatörlerin kısa sürede kararlı duruma geçtiğini göstermişlerdir [23]. Oliveira ve arkadaşları dengesiz ve değişken yük altında senkron generatörün mekanik ve elektrik tepkilerini analiz etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada sistemin matematiksel ve deneysel sonuçlarını vererek, dengesiz yük altında makinenin mekanik yapısında meydana gelen etkileri grafiksel olarak yorumlamışlardır. Çalışmada dengesiz ve değişken yükler altında harmonik değerlerinin yükseldiğini vurgulamışlardır. Ayrıca harmonik etkinin artması sonucu makine veriminin düştüğünü de göstermişlerdir [24]. Conroy ve Watson yaptıkları çalışmada, rüzgâr türbinlerinde üretilen enerjinin şebekeye bağlanması ve aktif yük durumlarının incelenmesini simule etmişlerdir. Rüzgâr enerjisinin kontrol edilememesi sebebi ile güç elektroniği devreleri kullanılarak sabit frekans ve genlikte bir gerilim sinyali elde etmişlerdir. Sabit frekans ve genliğe sahip sistemi şebekeye paralel bağlayarak şebekedeki aktif yüklerin rüzgâr türbinleri tarafından beslenmesini sağlamışlardır [25].

Yukarıda detaylı bir şekilde verilen çalışmalar incelendiğinde, geliştirilen birçok uygulamada generatörlerin paralel bağlanma şartları mikrodenetleyici ve PLC kontrollü olarak sağlanmıştır [2-6]. Enterkonnekte sistemlerde paralel bağlanma şartlarının hızlı ve kararlı olarak sağlanması gerekmektedir. Aksi halde artan enerji talebine karşılık verememe, sistemdeki diğer generatörlere aşırı yüklenme, sistem frekansının azalması ve gerilim çökmeleri gibi olumsuz durumlar ortaya çıkmaktadır. Gerçekleştirilen bu tez çalışmasında literatürdeki benzer uygulamalara bir farklılık ve yenilik olarak, PIC ve PLC gibi denetleyicilerden daha hızlı ve yüksek çözünürlüklü

çalışan dsPIC kullanılarak sistem parametrelerinin hızlı, kararlı ve yüksek çözünlüklü olarak algılanması sağlanmıştır.

Gerçekleştirilen bu tez çalışmasının amacı senkron generatörlerin yük paylaşımının bilgisayar arayüzü üzerinden kontrolü ve sistem parametrelerinin arayüz üzerinden izlenmesini gerçekleştirmektir. Çalışmada iki adet senkron generatörün istenilen oranda yük paylaşımı sağlanmıştır. Bu amaçla öncelikle senkron generatörlerin paralel bağlantısı sağlanılmıştır. Sistemde kullanılan generatörlerin frekans değerleri, bilgisayar arayüzü üzerinden girilen referans frekans değerine ile belirlenmektedir. Referans frekans değerine bağlı olarak senkron generatörleri tahrik eden makinelerin devir sayıları ayarlanmaktadır. Çalışmada kontrol yöntemleri daha basit olduğundan senkron generatörler DA şönt motorları ile tahrik edilmiştir. Senkron generatörlerde üretilen gerilimin frekansı geri - beslemeli olarak okunmuştur. Frekansın algılanması için alternatif gerilimin pozitif alternansını kare dalgaya çeviren bir sıfır geçiş devresi tasarlanmıştır. Algılanan frekansla referans frekansın eşit olması için tahrik makinelerinin devir sayıları değiştirilmiştir. Böylece üretilen gerilimin frekansı ayarlanmıştır. Tahrik makinelerinin uyarım akımlarının kontrolü için iki adet Cuk konvertör tasarlanmıştır. Üretilen gerilimin frekansına bağlı olarak konvertörlerin darbeleme oranları değiştirilmiştir. Böylece DA motorlarının uyarım akımları ayarlanarak istenilen devirde dönmesi sağlanmıştır. Bu noktada dsPIC'e göre daha yavaş hızlarda çalışan denetleyicilerin bulunduğu sistemler [2-6], paralel bağlantıda önemli bir unsur olan sistem frekansını yavaş okumakta ve dolayısıyla frekansın sabitlenmesi daha uzun zamanlar almaktadır.

Generatörlerin anma gerilim ve devir sayıları göz önünde bulundurularak bir V/f oranı belirlenmiştir. Generatör frekansı ile aynı zamanda üretilen gerilimin genliği senkron generatörlerin uyarım akımları değiştirilerek V/f (gerilim / frekans) oranında sabit tutulmuştur. Deneysel uygulama sürecinde, 220 V - 50 Hz anma değerleri olan makineler kullanıldığı için V/f oranı 4,4 olarak belirlenmiştir. Gerilimlerin ayarlanması için senkron generatörlerin uyarım akımları bağımsız olarak iki ayrı konvertör ile değiştirilmiştir. Geri - beslemeli olarak gerilim değerine sürekli okunup istenilen değere getirilmiştir. Paralel bağlanılacak senkron

generatörlerin gerilimleri arasındaki maksimum fark %15 olabilir [2]. Bu çalışmada paralel bağlanılacak generatör gerilimleri arasındaki maksimum fark değeri %2 olarak belirlenmiş ve böylece paralel bağlanma anında generatörlerin birbiri üzerinde oluşturabilecekleri olumsuz etkiler azaltılmıştır. Ayrıca generatör gerilimlerinin hassas ve hızlı olarak okunması sistemin çalışma hızını, performansını ve çözünürlüğünü doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle sistemde hızlı ve kararlı çalışan mikrodenetleyiciler gerilim değerinin optimizasyonunu hızlandırmaktadır. Çalışmada kullanılan dsPIC mikrodenetleyicisi diğer mikrodenetleyicilere göre [2-6] sistemin gerilim optimizasyonunun hızlanmasını ve generatör uç gerilimleri arasındaki farkın minimuma indirgenmesini sağlamıştır.

Çalışmada, generatör devir yönünün değişmesi gibi durumlar olmadığından faz sıralarının aynı olması faz sırası röleleri ile sağlanmıştır. Kontrol edilebilir son şart olan senkronizasyon anının algılanması için generatörlerin aynı isimli fazları arasındaki zaman farkı bir işlemsel yükselteçte kare dalgaya çevrilmiştir. Elde edilen kare dalgaının uzunluğu dsPIC ile kontrol edilerek zaman farkının sıfıra yakın olduğu noktada paralel bağlantının gerçekleşmesi sağlanmıştır.

Çalışmada dsPIC mikrodenetleyicisi kullanılması ile daha hızlı, kararlı ve yüksek çözünürlüklü bir algılama sistemi oluşturulmuştur. PIC mikrodenetleyicilerine göre yüksek frekanslarda çalışması, işlem yapma hızının daha yüksek olması, harici kesmelerinin fazla olması, analog girişlerin fazla olması, giriş çıkış kanallarının fazla olması, 2 adet seri iletişim kanalının bulunması, 9 adet sayıcısının bulunması nedeni ile bu çalışmada dsPIC tercih edilmiştir.

Paralel bağlanma işlemi gerçekleştikten sonra generatörler arasında yük paylaşımının gerçekleştirilmesi için arayüz üzerinden generatörlerinin yüklenme oranlarının belirtilmesi gerekmektedir. Yük kontrolü olmayan sistemlerde generatörlerin beslediği yükler belirsiz ve geri-bildirimsiz olmaktadır [12,13]. Ayrıca, yük kontrolü kullanıcı denetiminde olmayan sistemlerde generatörlerin anma yük değerlerinin üzerine çıkması veya minimum yük ile çalışması gibi durumlar ortaya çıkmaktadır [12-19,24,25]. Gerçekleştirilen çalışmada arayüz üzerinden dsPIC'e gönderilen

yüklenme oranı bilgisine göre DA motorlarının uyarım akımları değiştirilerek aktif yük paylaşımı, senkron generatörlerin uyarım akımları değiştirilerek reaktif yük paylaşımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca generatörler üzerindeki aktif, ve reaktif güçler grafiksel ve sayısal olarak kullanıcılara gösterilmiştir. Böylece generatörlerin yükleri arayüz üzerinden kontrol ve takip edilmektedir.

Bu tez çalışmasının 1. Bölümünde tez konusu ile ilgili genel bilgiler verilerek tez çalışmasının kullanım alanları, gerekliliği ve konunun literatürdeki yeri vurgulanmıştır. 2. Bölümde tez çalışmasında kullanılan senkron generatörler hakkında teorik ve matematiksel bilgiler sunulmuştur. 3. Bölümde uygulama safhasında gerçekleştirilen donanım ve yazılım altyapısı açıklanarak tasarlanan uygulama devreleri ayrıntılı olarak sunulmuştur. 4. Bölümde uygulama sonuçları verilerek elde edilen sonuçların değerlendirilmesi sunulmuştur. 5. Bölümde çalışmanın tamamının değerlendirilmesi yapılarak çalışmanın konu üzerine getirdiği avantajlar açıklanmıştır.

## 2. SENKRON MAKİNELER

Senkron makineler genellikle enerji üretim merkezlerinde kullanılmaktadır. Senkron makineler motor ve generatör olarak çalışabilmektedir. Mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren senkron makineler senkron generatör, elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren senkron makineler senkron motor olarak adlandırılmaktadır. Senkron motorların devir sayılarının değiştirilmesi için özel düzenekler gerektirmesi ve uyarım sargılarına doğru gerilim uygulanması gibi özel koşullar gerektirmesi sebebi ile endüstride motor olarak fazla tercih edilmemektedir. Senkron generatörler senkron devir sayısında dönerek sabit frekanslı bir gerilim üretmektedirler. Bu nedenle yoğun olarak enerji üretim merkezlerinde kullanılmaktadırlar.

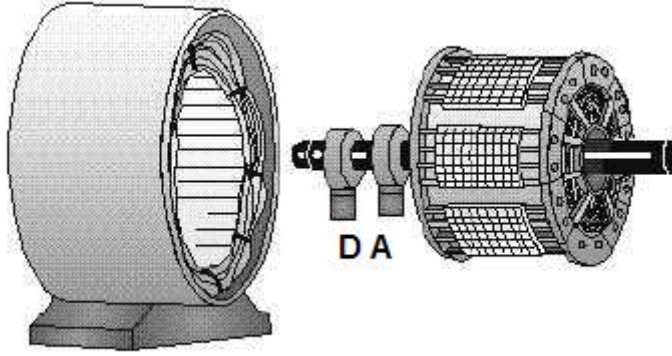
Enerji üretim merkezlerinde kullanılacak senkron generatörlerin yüksek güçlü olması istenmektedir. Senkron generatörlerde verimin güç ile doğru orantılı olarak artması üretim sistemlerinde senkron generatörlerin kullanılmasını olumlu kılan diğer bir özelliktir.

Senkron makineler endüvi ve endüktör olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır. Çalışma yapılarına göre dönen endüvi, duran endüktörlü veya dönen endüktör, duran endüvili olarak ikiye ayrılmaktadır. Ayrıca senkron makineler kutup yapısına bağlı olarak silindirik kutuplu ve çıkık kutuplu olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Silindirik kutuplu makinelerin endüktörleri uzun ve çapları küçüktür. Genellikle 2 veya 4 kutuplu olarak üretilirler. Senkron devre gelmeleri için yüksek hızlarda dönmeleri gerekmektedir. Bu nedenle yüksek hızlı uygulamalarda silindirik kutuplu senkron generatörler kullanılmaktadır. Çıkık kutuplu senkron makinelerin kutup sayıları fazla ve boyları kısadır. Kutup sayılarının fazla olması sebebi ile düşük devirlerde senkron hıza gelmektedirler. Çıkık kutuplu makineler çok yüksek güçlü olarak imal edilmektedir. Bu makineler milleri yere dik olarak çalışmaktadır [1].

Bu bölüm içerisinde senkron makinelerin yapıları ve mekanik değişimlerin üretilen enerji üzerindeki etkileri verilerek çalışmada kullanılan senkron generatörler hakkında teorik altyapının oluşması amaçlanmıştır.

## 2.1. Senkron Motorlar

Senkron motorlar elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren elektrik makineleridir. Senkron motorların çalışması için alternatif gerilim uygulamak yeterli değildir. Harici uyarım sargılarına bir doğru gerilim uygulanarak motor milinin hareket etmesi sağlanmaktadır. Şekil 2.1’de senkron makinenin iç yapısı görülmektedir. Motor olarak çalışan bir senkron makinenin endüvisine doğru akım uygulanarak endüvi bölgesinde sabit bir manyetik alan meydana gelmesi sağlanır.



Şekil 2.1. Senkron makinenin iç yapısı

Makinenin yapısına bağlı olarak bir yada üç fazlı alternatif gerilim makinenin sabit kısmına uygulanarak makine milinin hareket etmesi sağlanmaktadır. Makinenin devir sayısı uygulanan gerilimin frekansına ve makinenin kutup sayısına bağlı olarak değişmektedir. Senkron motorların devir sayıları “Eş. 2.1” ile hesaplanmaktadır.

$$n_m = \frac{f_e \times 120}{P} \quad (d/d) \quad (2.1)$$

$n_m$  : Mekanik frekans (d/d)

$f_e$  : Elektrik frekans (Hz)

$P$  : Kutup sayısını göstermektedir.

Senkron motorlarda makine milinde üretilen mekanik torku “Eş 2.2” açıklamaktadır. “Eş. 2.2” de görüldüğü gibi senkron makinelerde tork, uygulanan elektriksel güç ile doğru orantılı devir sayısı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Senkron motorların

sabit devir sayısı ile döndüğü düşünülürse “Eş. 2.3”e göre mekanik tork makineye uygulanan gerilim ile değiştirilebilir.

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (2.2)$$

$$P = U \times I \times \cos\varphi \quad (2.3)$$

$P$ : Elektrik gücü (W)

$T$  : Mekanik tork (Nm)

$\omega$  : Açısal hız (rad/s)

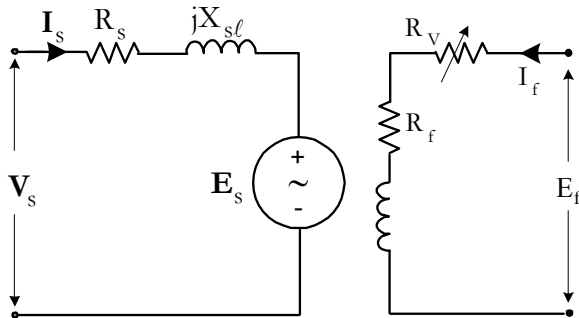
$U$  : Endüktör gerilimi (V)

$I$  : Endüktör akımı (A)

$\cos\varphi$  : Güç katsayısı

## 2.2. Senkron Generatörler

Senkron motorların yapısına benzer olarak, senkron generatörlerinde gerilim üretmesi için milinin dönmesi yeterli değildir. Faraday’ın sabit bir manyetik alan içerisinde hareket ettirilen iletkende gerilim indüklenir yasasına göre bir gerilim üretilmesi için bir manyetik alan gerekmektedir. Makine sargılarında manyetik alan oluşturmak için senkron generatörlerin uyarım sargılarına bir doğru gerilim uygulanır. Şekil 2.2’de senkron makinenin elektrik eşdeğer devresi görülmektedir.



Şekil 2.2. Bir fazlı senkron makinenin elektrik devresi

Oluşturulan manyetik alan nüve üzerine aktararak makinenin dönen kısmı üzerinde bir manyetik alan oluşturulması sağlanılır. Manyetik alan içerisinde hareket eden endüvi ya da endüktörde bir gerilim indüklenir. Uyarım kutupları makinenin sabit kısmına (endüktör) yerleştirilmiş ise dönen kısımda (endüvi) bir gerilim indüklenir. İndüklenen bu gerilim fırça ve bilezikler yardımı ile dışarı alınır. Uyarım kutupları makinenin dönen kısmına yerleştirilmiş ise makinenin sabit kısmında bir gerilim indüklenir. İndüklenen bu gerilimler “Eş. 2.4” ile hesaplanmaktadır [1].

$$e = \frac{d\phi}{dt} = N \times \frac{d\varphi}{dt} \quad (2.4)$$

$e$  : Makine sargılarında indüklenen gerilim (V)

$N$  : Makinede bulunan bobin grubuna ait sarım sayısı

$\phi$  : Bobin sargılarını kesen akı miktarı (Wb)

$\varphi$  : Açığa bağımlı olarak değişen manyetik akı miktarını (Wb)

göstermektedir.

Makinede üretilen gerilimin sinüzoidal olarak değiştiğini “Eş. 2.5” ve “Eş. 2.6” açıklamaktadır. Senkron generatörlerde üretilen gerilimin etkin değeri ( $E_{rms}$ ) “Eş. 2.7” ile hesaplanabilmektedir.

$$\varphi(t) = \phi_{max} \times \sin(\omega t) \quad (2.5)$$

$$e(t) = \omega \times N \times \phi_{max} \times \cos(\omega t) \quad (2.6)$$

$$E_{rms} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \times f e \times N \times \phi_{max} \text{ (V)} \quad (2.7)$$

$\phi_{max}$  : Nüve akısının maksimum değeri (Wb)

$\omega$  : Açısal frekansı (rad/s) göstermektedir.

Senkron generatörlerin dönme hızları ile frekansların arasındaki ilişkiyi “Eş. 2.8” açıklar.

$$f_e = \frac{n_m \times P}{120} \text{ (Hz)} \quad (2.8)$$

$f_e$  : elektriki frekans (Hz)

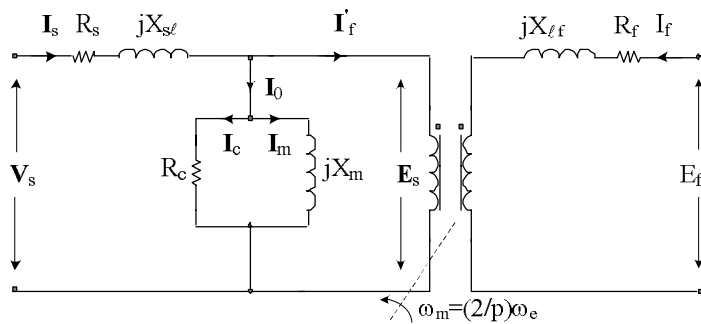
$n_m$  : manyetik alanın mekanik hızını (d/d)

$p$  : toplam kutup sayısını ifade etmektedir.

Eşitlikte görüldüğü gibi generatörde üretilen gerilimin frekansı makine kutup sayısına (P) ve makinenin mekanik hızına bağlı olarak değişmektedir. İmalat aşamasında makinelerin kutup sayıları belirlendiğinden bir senkron generatörün ürettiği gerilimin frekansını rotor frekansı ile değiştirmek mümkündür.

### 2.2.1. Silindirik kutuplu senkron generatörler

Silindirik kutuplu senkron generatörlerde, endüvi sargılarına doğru gerilim uygulandığında endüvide sabit bir manyetik alan meydana gelir. Sabit manyetik alana sahip endüvi hareket ettirilirse manyetik alan kuvvet çizgileri endüktöre yerleştirilmiş alternatif akım sargılarını keser ve endüktör sargılarında bir gerilim indüklenir. Endüvide meydana gelen manyetik alan kuvvet çizgileri, devresini nüve ve hava boşluğundan tamamlar. Havadan devresini tamamlayan kaçak akıların sebebi ile statorda kaçak endüktans ( $L_{sl}$ ) oluşur. Şekil 2.3'de silindirik kutuplu bir senkron generatörün bir faz eşdeğer devresi görülmektedir [1].



Şekil 2.3. Silindirik kutuplu senkron makinenin bir faz eşdeğer devresi

Şekil 2.3'te  $V_s$  (stator gerilimi) ile uyartılan bölge senkron makinenin endüktör bölgesinin elektriksel devresini,  $E_f$  ile uyartılan kısım ise kutup sargılarının bulunduğu endüvi bölgesinin elektriksel eşdeğer devresini temsil etmektedir.

Endüvi bölgesinde;

$X_{lf}$ : endüvi kaçak reaktansını ( $\Omega$ )

$R_f$ : endüvi direncini ( $\Omega$ )

$\omega_m$ : mekaniki açısal hızı (rad/s)

$\omega_e$ : elektriki açısal hızı (rad/s)

$I_f$ : uyartım devresi akımını (A)

$E_f$ : uyartım devresi gerilimini (V)

temsil etmektedir.

Senkron generatörler miline uygulanan mekaniki döndürme kuvvetine göre çıkışında bir elektriki güç üretirler. Üretilen gücün bir kısmı makine içerisinde kayıp güç olarak açığa çıkar. Kayıp güçlerden arta kalan elektriki güç alternatör çıkışına bağlı yüklere aktarılır. Makine miline uygulanan mekaniki güç ( $P_m$ ), tork ( $T_m$ ) ve makinenin açısal hızı ( $\omega_s$ ) arasındaki bağıntıyı “Eş. 2.9” açıklar. Alternatörlerde üretilen güç makineye uygulanan mekanik tork ile doğru orantılı olarak değişmektedir.

$$P_m = \omega_s T_m \quad (2.9)$$

Alternatörün elektriki gücü makine sargılarına uygulanan doğru akım kaynağından sağlandığı için makinenin giriş gücü ( $P_{in}$ ), uygulanan mekanik güç ( $P_m$ ) ve elektriki gücün ( $P_{dc}$ ) toplamına eşittir. “Eş. 2.10” alternatörün elektriki giriş gücünü, “Eş.2.11” makinenin toplam giriş gücünü açıklamaktadır.

$$P_{dc} = I_f^2 \times R_f \quad (2.10)$$

$$P_{in} = P_m + P_{dc} \quad (2.11)$$

Burada;

$P_{dc}$  : Makineye uygulanan elektriki güç (W)

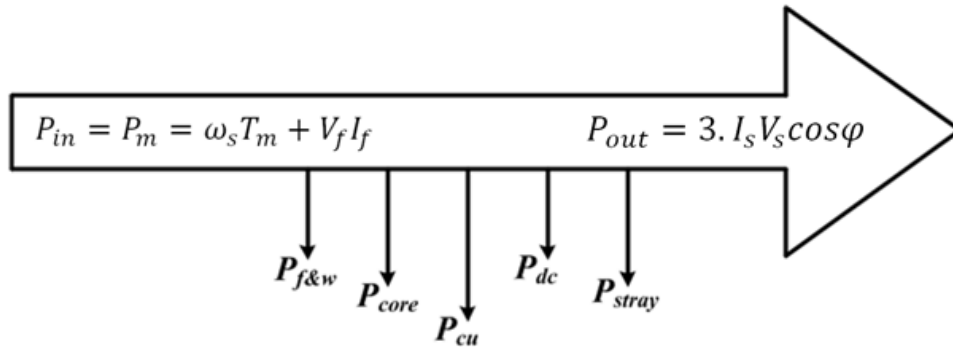
$P_{in}$  : Makinenin giriş gücü (W)

$P_m$  : Uygulanan mekanik güç

Alternatörde üretilen gücün bir kısmı makine içerisindeki kayıp güçler olarak ortaya çıkar üretilen güçten kayıp güç çıkartılırsa yükte harcanan güç bulunur. Senkron makinelerde meydana gelen güç kayıpları aşağıdaki başlıklar altında gösterilebilir.

- Mekanik Kayıplar ( $P_{f\&w}$ )
- Nüve Kayıpları ( $P_{core}$ )
- Stator Bakır Kayıpları ( $P_{cu}$ )
- Uyarım Sargılarında Meydana Gelen Bakır Kayıpları ( $P_{dc}$ )
- Kaçak Yük Kayıpları ( $P_{stray}$ )

Mekanik kayıplar, alternatörün hareketli kısımlarında meydana gelen sürtünme ve rüzgâr sebebi ile oluşan kayıplardır. Nüve kayıpları, makinenin nüve kısmında oluşan ve ısı olarak açığa çıkan kayıplardır. Stator bakır kayıpları, stator sargılarından geçen akım sebebi ile meydana gelen kayıplardır. Uyarım sargılarında meydana gelen bakır kayıpları, statorda meydana gelen bakır kayıplarına benzer olarak, uyarım sargılarından geçen akımdan kaynaklı oluşan kayıplardır. Şekil 2.4'te makine üzerindeki kayıplar, giriş gücü ve çıkış gücü gösterilmiştir [1].



Şekil 2.4. Senkron generatörün güç akış diyagramı

Makinelerde meydana gelen kayıplar sebebi ile sistemin giriş gücü çıkış gücüne hiçbir zaman eşit olmamaktadır. Senkron generatörlerde verim “Eş. 2.12” ile çıkış gücünün giriş gücüne oranı olarak açıklanabilir.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{3I_s V_s \cos \phi}{\omega_s T_m + I_f V_f} = \frac{3I_s V_s \cos \phi}{3I_s V_s \cos \phi + P_c + 3I_s^2 R_s} \quad (2.12)$$

Burada;

$P_{out}$  : Çıkış gücünü (W)

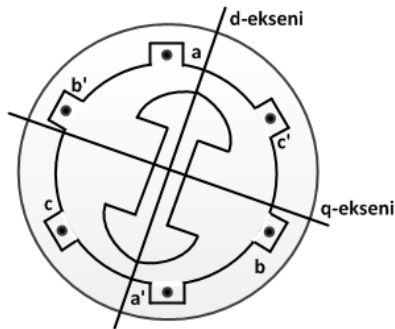
$I_s$  : stator akımı (A)

$P_c$  : Generatördeki toplam sabit üç kayıplarını (W) ifade etmektedir.

Makinenin çıkış gücü çekilen akım, üretilen gerilim ve güç katsayısına bağımlı olarak açıklanabilir. Makinenin giriş gücü, makineye uygulanan mekaniki güç ve kutup alanını oluşturan uyartım gücünün toplamından oluşmaktadır.

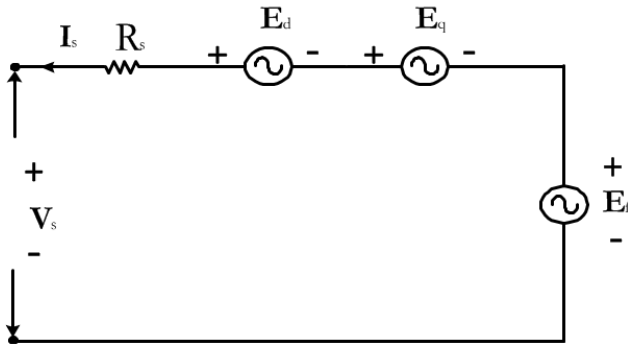
### 2.2.2. Çıkık kutuplu senkron generatörler

Çıkık kutuplu senkron makinelerin hava aralığı, kutup ile endüktör arasında az, kutuplar arasındaki oyuk bölge ile stator arasında fazladır. Çıkık kutuplu senkron makinelerin iç yapısı Şekil 2.5’te gösterilmiştir. Kutuplar arasındaki mesafenin değişken olması sebebi ile endüvi ve endüktör yapısı arasındaki relüktans değişkendir [1].



Şekil 2.5. Çıkık kutuplu senkron makinenin iç yapısı

Bu nedenle çıkık kutuplu senkron makineler  $d$  ve  $q$  olmak üzere iki eksende incelenmektedir.  $d$  eksenini boyunca görülen reaktans  $X_d$ ,  $q$  eksenini boyunca görülen reaktans  $X_q$  ile ifade edilmektedir. Ayrıca makinenin stator akımı ( $I_s$ ),  $I_d$  ve  $I_q$  olarak ikiye ayrılır. Çıkık kutuplu senkron generatörün bir faz eşdeğer devresi Şekil 2.6’da görülmektedir.



Şekil 2.6. Çıkık kutuplu senkron generatörün bir faz eşdeğer devresi

Stator akımının  $I_d$  bileşeni  $E_f$  geriliminden  $90^\circ$  geride bir akı oluşturur.  $I_q$  bileşeni ise  $E_f$  gerilimi ile aynı fazda bir akı oluşturur. “Eş. 2.13”, stator gerilimini açıklamaktadır.

$$V_s = E_f + E_d + E_q - (I_s \times R_s) \quad (2.13)$$

Burada;

$E_f$ : Statorda indüklenen faz gerilimi (V)

$E_d$ :  $I_d$  akımı tarafından indüklenen gerilimi (V)

$E_q$ :  $I_q$  akımı tarafından indüklenen gerilimi (V)

İfade etmektedir. “Eş. 2.14” ve “Eş. 2.15”  $E_d$  ve  $E_q$  gerilimlerini açıklar.

$$E_d = -jI_d X_d \quad (2.14)$$

$$E_q = -jI_q X_q \quad (2.15)$$

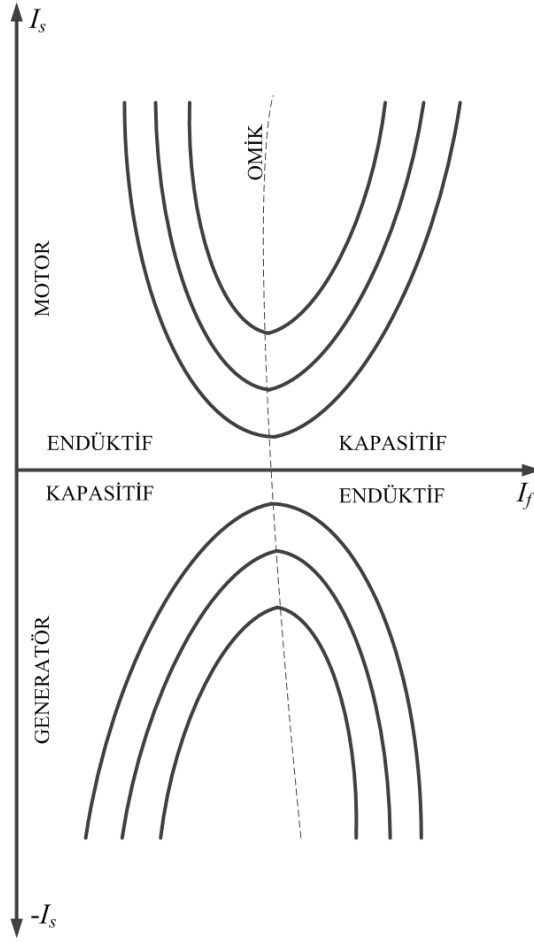
### 2.3. Senkron Makinelerin V-Eğrileri

Senkron makinelerin sabit gerilim ve frekansta çalışırken, uyarım akımının değişimine bağlı davranışları V-eğrileri ile açıklanmaktadır. V-eğrilerindeki temel gösterim amacı, güç katsayısı ve uyarım akımı arasındaki ilişkiyi açıklamaktır. Şekil 2.7’de senkron makinelerin V-eğrileri görülmektedir. Eğrinin sıfır eksenine göre yukarıda kalan kısmında makine motor olarak çalışma durumundadır.

Motor olarak çalışan bir senkron makinenin, uyarım akımı azaldıkça motor endüktif özellik göstermektedir. Motorun uyarım akımı azaldıkça endüktif özelliği artar, uyarım akımı kararlı çalışma sınırları içerisinde minimum seviyeye getirildiğinde endüvi akımı ile gerilimi arasındaki açı  $90^\circ$ ’ye yaklaşır. Bu durumda güç katsayısı da 0’a yaklaşır. Motorun uyarım akımı artırılırsa motorun çektiği endüvi akımı ( $I_s$ ) azalır ve motor omik bölgede çalışmaya doğru ilerler. Tam omik olarak çalışma noktasında ise güç katsayısı 1 değerini alır ve motorun çektiği endüvi akımı minimuma iner. Omik bölgeden sonra uyarım akımı artırılmaya devam edilirse motor artık kapasitif bölgede çalışmaya geçecektir [1].

Generatör olarak çalışan bir senkron makine için V-eğrisi sıfır ekseninin altında kalan bölgedir. Eğriden de açıkça görüldüğü gibi, generatör olarak çalışan bir senkron makine motor eğrisinin tam tersi bir yol izlemektedir. Generatörün uyarım akımı azaldıkça kapasitif özelliği artar, uyarım akımının optimum değerinde güç katsayısı 1 değerini alır ve makine omik özellikli çalışır. Makinenin uyarım sargılarından geçen akım artırılırsa makine endüktif bölgede çalışmaya başlar ve güç katsayısı 0-1 arasında değerler alır.

Senkron generatörlerin V-eğrilerinden faydalanılarak tez çalışmasında yük paylaşımı yapılırken makinelerin paralel bağlanmasından sonra, reaktif yük paylaşımı için uyarım akımları değiştirilmiştir.



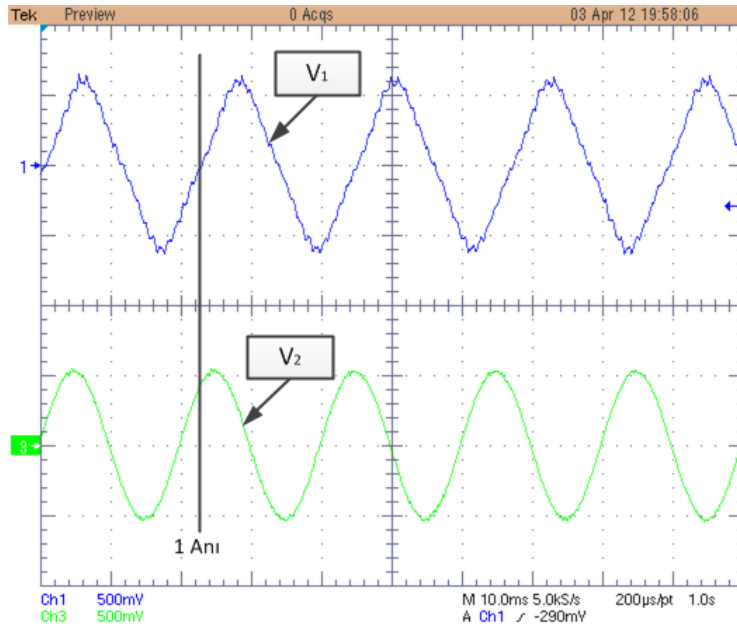
Şekil 2.7. Senkron makinenin V-Eğrileri

#### 2.4. Senkron Generatörlerin Paralel Bağlanması

Enterkonnekte sistemlerde paralel bağlanılacak generatörlerin şebeke ile aralarında bazı şartların sağlanması gerekmektedir. Paralel bağlanılacak generatörlerin frekansları eşit, gerilim genlikleri eşit, faz sıraları aynı, gerilim dalga şekillerinin aynı ve paralel bağlantının senkronizasyon anında gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Aksi hâlde generatör üzerinde yüksek akımlar dolaşması, sistem geriliminde ani düşmeler ve makinelerde vurutular gibi durumlar meydana gelecektir. Bu bölümde generatörlerin paralel bağlanması için gerekli şartlar açıklanmıştır.

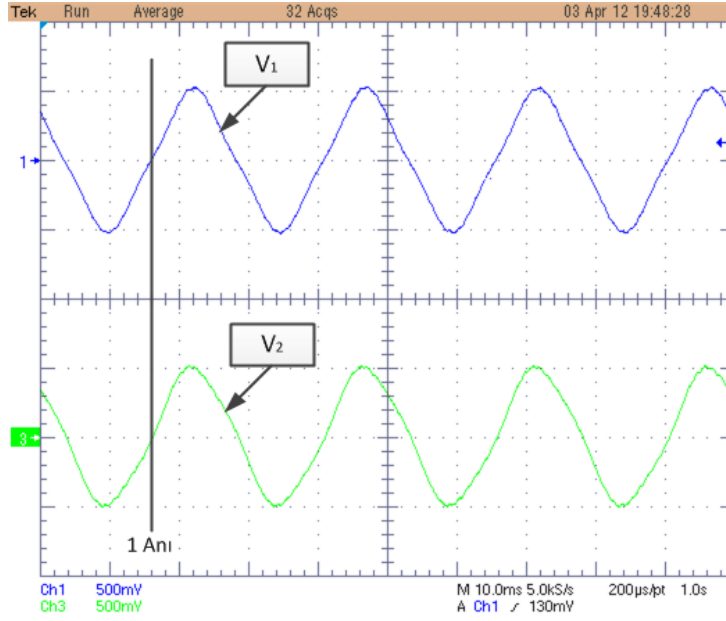
### 2.4.1. Frekans eşitliği

Paralel bağlanılacak generatörlerde üretilen gerilimin frekanslarının eşit olması gerekmektedir. Aksi durumda, generatörlerin anlık gerilim değerleri farklı olacağı için generatörler zarar görecektir. Şekil 2.8’de frekansları farklı iki gerilim sinyalinin karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 2.8. Frekansları farklı iki gerilim sinyali

Şekil 2.8’de 1 anı referans alınır, gerilim değerlerinin farklı olduğu görülmektedir. Bu durumda generatörler paralel bağlanırsa generatörün anlık gerilim değerleri farklı olacağı için gerilim çökmeleri ve makine üzerinde vuruntular olacaktır. Şekil 2.9’da frekansları aynı iki gerilim değeri görülmektedir. Şekildeki 1 anı ve zaman eksenini boyunca gerilim değerlerinin eşit olduğu gözlenmektedir. Bu durumda, paralel bağlanılacak kaynakların gerilimlerinin frekansları eşittir.



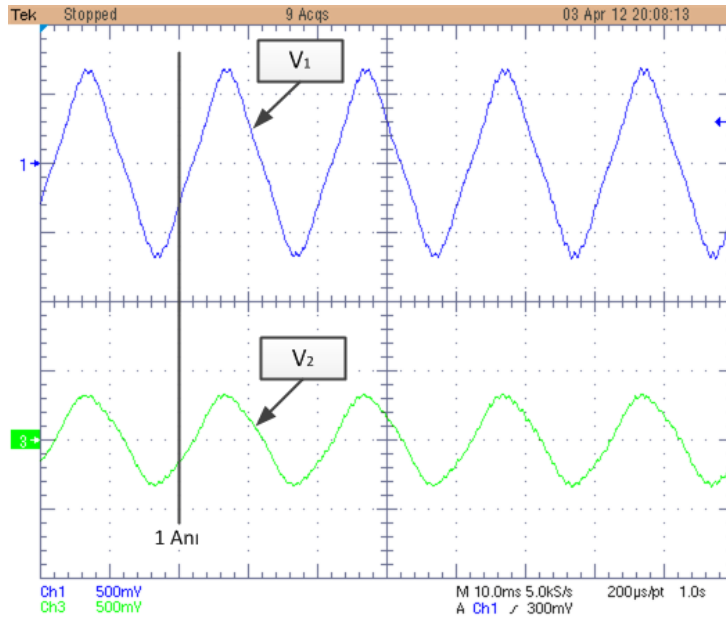
Şekil 2.9. Frekansları aynı iki gerilimin karşılaştırılması

Generatörlerde üretilen gerilimlerin frekanslarının makine devir sayılarına bağlı olarak değiştiği Bölüm 2.2’de verilmişti. Makine devir sayısı ile generatörlerin ürettiği gerilimlerin frekansları doğru orantılı olarak değişmektedir. Buna bağlı olarak makinelerin milinin dönmesini sağlayan tahrik makinelerinin devir sayıları değiştirilerek generatörlerin ürettiği gerilimin frekansı ayarlanmaktadır. Hidroelektrik enerji üretim sistemleri gibi enerji üretim sistemlerinde generatörlerin milini çeviren düzeneklerle üretilen gerilimin frekansı ayarlanmaktadır.

#### 2.4.2. Gerilim eşitliği

Paralel bağlanılacak generatörlerde üretilen gerilim değerlerinin eşit olması gerekmektedir. Gerilimlerin eşit olmaması durumunda gerilimi az olan generatör diğerine yük durumuna geçebilecek ayrıca, yük paylaşımında reaktif yük üzerine alamayacaktır. Bu olumsuz durumların önüne geçilmesi amacı ile paralel bağlanılacak generatörlerin öncelikle gerilim değerleri eşitlenir. Şekil 2.10’da genliği farklı iki gerilim değeri görülmektedir.

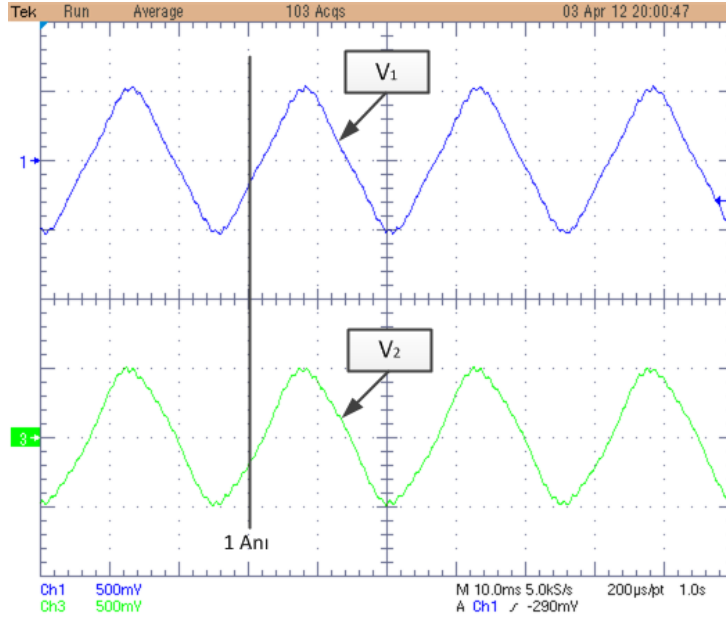
Şekil 2.10'da 1 anı incelenecek olunursa,  $V_1$  ve  $V_2$  gerilimlerinin ani değerlerinin eşit olmadığı görülmektedir. Zaman eksenini boyunca sinüzoidal değişen bu gerilimlerin genlikleri sıfır noktaları hariç hiçbir zaman eşit olmamaktadır. Bu nedenle, ani değerlerin farklı olması durumunda generatörlerin birbiri üzerinde oluşturdukları aşırı akım, gerilim çökmesi ve vurutuların oluşması genlikleri farklı bu iki gerilim için de söz konusudur. Şekil 2.11'de ise genlikleri aynı iki gerilim görülmektedir.



Şekil 2.10. Genlikleri farklı iki gerilim

Şekil 2.11'de 1 anı incelenecek olunursa,  $V_1$  ve  $V_2$  gerilimlerinin genliklerinin eşit olduğu görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, tüm zaman eksenini boyunca, gerilim değerleri eşittir.

Senkron generatörlerde üretilen gerilimin makinenin devir sayısına ve uyartım akımına bağlı olduğu Bölüm 2.2'de verilmiştir. "Eş. 2.6" ve "Eş. 2.7" makine içerisindeki manyetik akı yoğunluğu ile üretilen gerilim değerleri arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır. Generatörlerin kutup sargılarından geçen akım ayarlanarak uç gerilimi istenilen değere getirilmektedir.

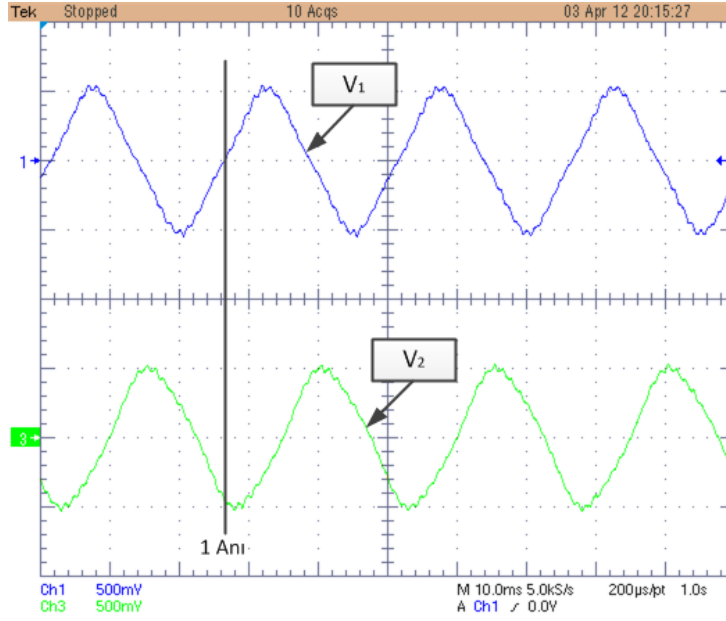


Şekil 2.11. Genlikleri aynı iki gerilimin karşılaştırılması

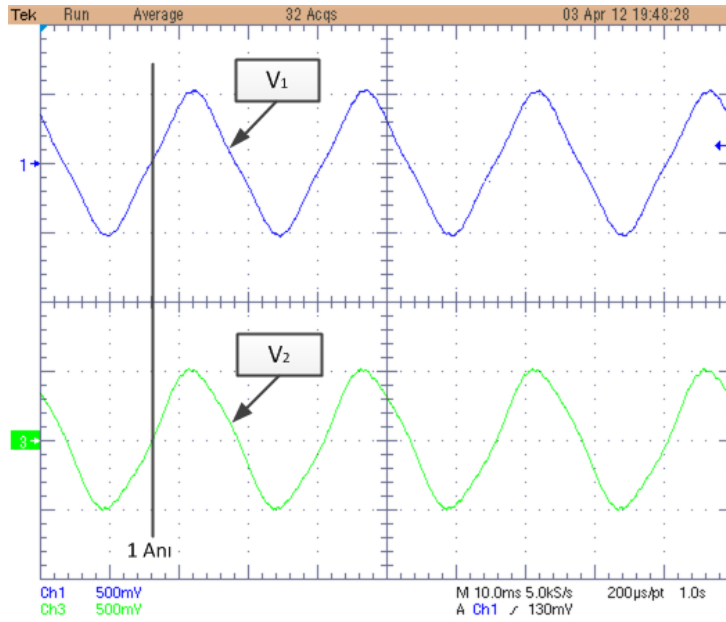
Tez çalışmasında generatörlerde üretilen gerilimin genliği, uyarım gerilimini kontrol eden DA/DA çeviricilerin kontrol sinyalleri, geri – bildirim değerine göre değiştirilerek ayarlanmıştır. Çıkış gerilimi sürekli olarak denetlenmiş ve çıkış geriliminin değeri istenilen değerden yüksek olduğu durumlarda kontrol sinyalinin doluluk oranı azaltılarak, çıkış geriliminin istenilen değerden düşük olduğu durumlarda doluluk oranı artırılarak uyarım geriliminin kontrolü sağlanmıştır.

### 2.4.3. Faz sıralarının aynı olması

Çıkış gerilimleri eşitlendikten sonra paralel bağlanılacak 3 fazlı senkron generatörlerde üretilen gerilimlerin faz sıralarının aynı olması gerekmektedir. Faz sıralarının farklı olması durumunda, generatörlerin ani gerilim değerleri farklı olacağı için generatörlerde yığılma, ani gerilim kesilmeleri ve aşırı yüklenme gibi generatörün mekanik yapısına zarar verecek durumlar oluşmaktadır. Şekil 2.12’de faz sıraları farklı gerilimler, Şekil 2.13’de faz sıraları aynı gerilimler görülmektedir.



Şekil 2.12. Faz sıraları farklı iki gerilimin karşılaştırılması



Şekil 2.13. Faz sıraları aynı iki gerilimin karşılaştırılması

Şekil 2.12’de incelenmenin kolaylaştırılması açısından anlık gerilim değerleri 1 anında işaretlenmiştir. 1 anında 1. gerilim değeri sıfır iken, 2. gerilim değeri negatif maksimum değerine yakındır. Bu noktada paralel bağlantı olursa fazlar yanlış

bağlanmış olacaktır ve 2. generatör uç gerilimini sıfıra götürmeye çalışacak ve makine üzerinde yüksek akımlar dolaşacaktır.

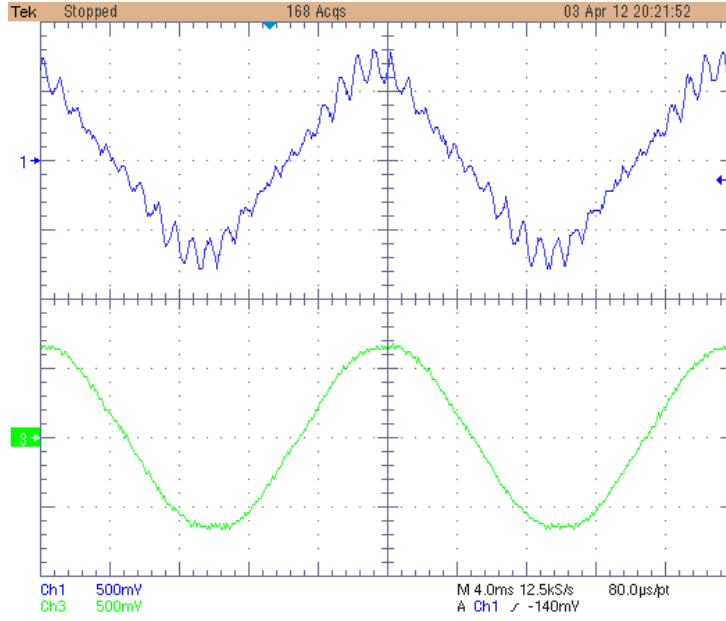
3 fazlı enerji üretim sistemlerinde faz sıralarının aynı olması, senkronizasyon anında da önemli bir unsurdur. Faz sıralarının farklı olması durumunda fazlardan birisi aynı eksene gelse dahi diğer fazlar aynı anda eşit gerilim değerleri almayacağı için diğer iki faz makine üzerinde mekaniki vuruntular ve ani gerilim çökmeleri meydana getirecektir. Bu olumsuz durumları engellemek için 3 fazlı enerji üretim sistemlerinde aynı isimli fazlar paralel bağlanmalıdır.

Bu tez çalışmasında uygulaması gerçekleştirilen sistem ada modunda çalıştırıldığından, şebeke etkileşimli olmadığı için faz sıralarının haricen değişmesi mümkün değildir. Bu nedenle mikrodenetleyici kontrollü özel bir faz sırası rölesi tasarlanmamıştır. Bunun yerine Entes firmasına ait FR-02 model faz sırası röleleri ile faz sıraları ayarlanmıştır. Sistemin ilk kurulum esnasında aynı isimli fazlar faz sırası rölelerine girilmiş ve deneysel çalışmalar boyunca bu faz sıraları değiştirilmemiştir. Şekil 2.13’de aynı adlı fazların üst üste geldiği durum görülmektedir.

Şekil 2.13 incelenecek olursa 1. ve 2. gerilim arasında bir açısal fark olmadığından 1 anında gerilimler aynı değeri alacaktır. Böylece iki generatörün de uç gerilimleri aynı değerleri alacağından makinelerin birbirleri üzerinde oluşturabilecekleri olumsuz durumlar minimize edilmiş olacaktır.

#### **2.4.4. Gerilim dalga şekillerinin benzerliği**

Diğer şartlarda olduğu gibi dalga şekillerinin benzerliği durumunda da amaç ani gerilim değerlerinin aynı olmasıdır. Aksi halde gerilim dalgasının farklı olduğu durumlarda generatörler birbirlerinden akım çekerek makinelerin aşırı yüklenmesine ve güç kayıplarına neden olacaktır. Şekil 2.14’de dalga şekilleri farklı iki gerilim eğrisi görülmektedir.

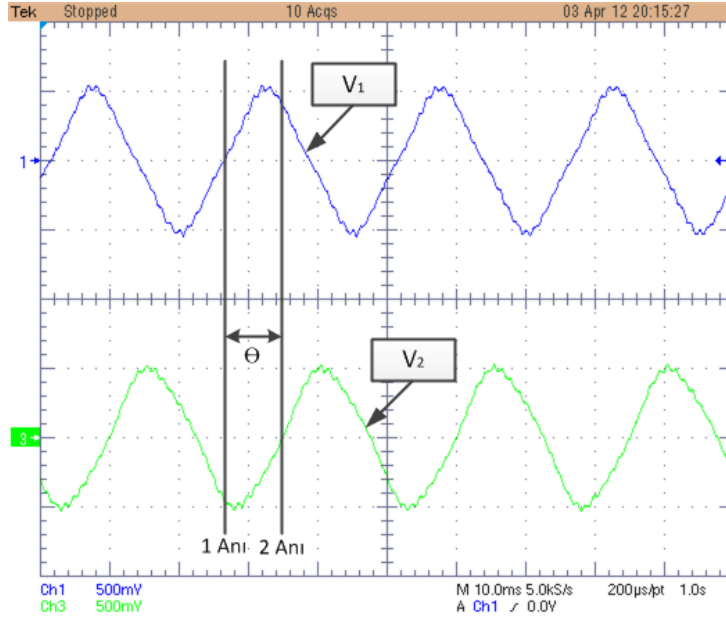


Şekil 2.14. Dalga şekilleri farklı iki gerilimin karşılaştırılması

Gerilim 1 ve gerilim 2 dalga şekline sahip iki kaynak paralel bağlanırsa, 1. gerilim üzerindeki gerilim azalmaları 2. kaynaktan akım çekilmesine sebep olacaktır. Bu durum makineler üzerinde gereksiz akım dolaşmasına sebep olacaktır. Bu durumun önüne geçilmesi amacı ile mümkün olduğu kadar dalga şekilleri aynı generatörler paralel bağlanmalıdır.

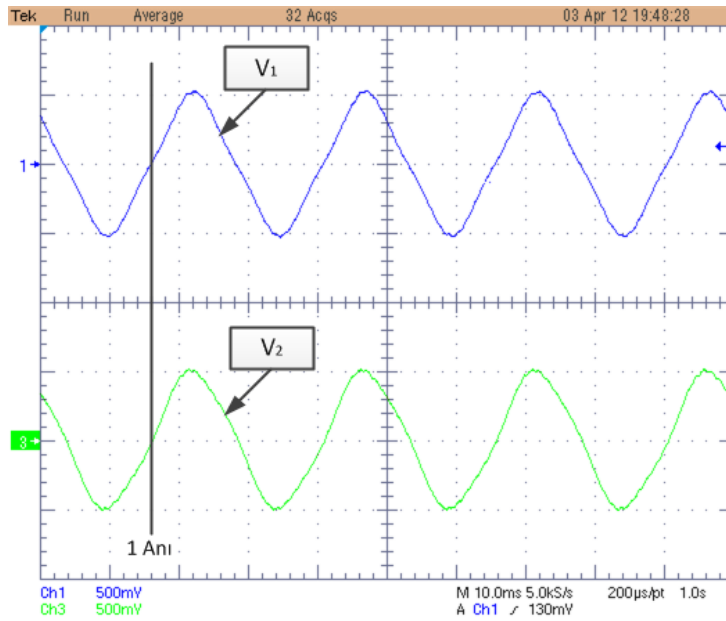
#### 2.4.5. Senkronizasyon anı

Paralel bağlanılacak generatörler arasında son kontrol edilebilir şart senkronizasyon anının algılanmasıdır. Senkronizasyon anı; üretilen aynı isimli fazların gerilim değerlerinin aynı olduğu noktalardır. Diğer tüm şartlar sağlandıktan sonra, generatörde üretilen gerilimler birbirleri ile örtüştükleri anda paralel bağlanma gerçekleştirilerek paralel bağlanma anında oluşabilecek ani akım çekilmesi, gerilim çökmeleri gibi olumsuz durumların önüne geçilmektedir. Şekil 2.15'te aralarında açı farkı olan iki gerilim görülmektedir. Gerilim 1 ve gerilim 2, 1 ve 2 anlarında karşılaştırılacak olunursa ani gerilim değerlerinin farklı olduğu görülmektedir. Bu noktada paralel bağlantının gerçekleşmesi üretilen gerilimler ve makine üzerinde olumsuz durumlar oluşturacaktır.



Şekil 2.15. Aralarında açı farkı olan iki gerilimin karşılaştırılması

Şekil 2.16'da senkronizasyon anının gerçekleştiği durum görülmektedir. Şekilde, 1 anı incelenecek olunursa, gerilim değerlerinin aynı olduğu ve tüm zaman eksenini boyunca da bu eşitliğin bozulmadığı görülmektedir.



Şekil 2.16. Üretilen gerilimlerin aynı fazlı olduğu an (Senkronizasyon anı)

Şekil 2.16 generatörlerin paralel bağlanması için tüm şartların gerçekleştiği andır. Bu anda güvenli paralel bağlantı sağlanabilir.

Bu bölümde senkron makinelerin yapısı ve kontrolü için gerekli teorik bilgiler verilerek paralel bağlanma şartları açıklanmıştır. Bu şartların gerekliliği vurgulanarak kontrol tekniği açıklanmıştır. Bundan sonraki bölümlerde bu bölümde elde edilen teorik bilgiler ışığında geliştirilen uygulama devreleri ve kontrol yöntemleri ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

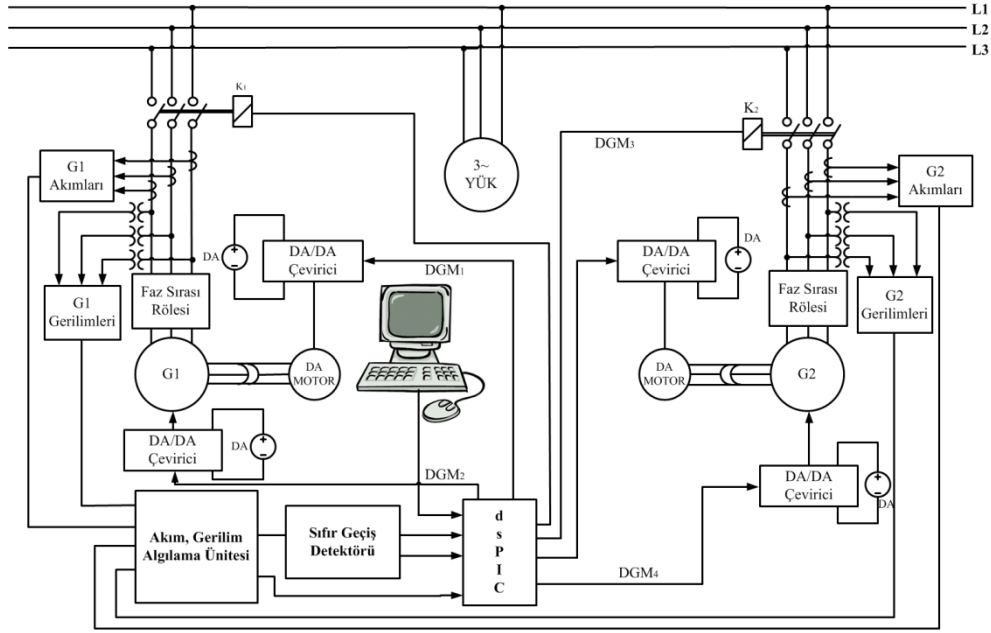
### 3. UYGULAMA ÇALIŞMALARI

Önceki bölümlerde senkron generatörlerin çalışması, mekanik enerjiden elektrik enerjisinin üretilmesi ve paralel bağlantı şartları verilmişti. Bu bölüm altında senkron generatörlerin otomatik paralel bağlantısını ve bilgisayar kontrollü bir kullanıcı arayüzü üzerinden yük paylaşımını sağlayan sistemin donanım - yazılım altyapısı, arayüz tasarımı, sistem üzerinde gerçekleştirilen uygulama çalışmaları, generatörlerde yük paylaşım durumlarının incelenmesi ve gerçekleştirilmesi anlatılmıştır.

#### 3.1. Donanım ve Yazılım Altyapısı

Çalışmada generatörlerin paralel bağlanma şartları PIC, PLC, DSP gibi diğer arabirim elemanlarına göre üstünlükleri bulunan dsPIC mikrodenetleyicisi kullanılarak sağlanmıştır. Generatörlerin çıkış gerilim genlikleri ve DA motorlarının devirleri DA/DA dönüştürücüler kullanılarak ayarlanmıştır. Bilgisayar ortamından paralel bağlantının kontrolü, gerilim, akım, güç katsayısı, aktif, reaktif ve görünür güç değerlerinin anlık olarak izlenmesi ve grafiksel olarak gösterimi için Visual C# görsel programlama dili kullanılarak bir arayüz geliştirilmiştir.

Şekil 3.1'de gerçekleştirilen uygulama setinin blok diyagramı görülmektedir. Sistemde bulunan DA motorlar tahrik makinesi olarak kullanılmıştır. DA motorların hız kontrolü için DA/DA çeviriciler kullanılmıştır. Generatör çıkış gerilim ve akımları sensörler yardımı ile akım gerilim algılama ünitesine girilerek analog değerlerin mikrodenetleyicinin algılayabileceği seviyelere getirilmesi sağlanmıştır. Faz sırası röleleri generatörlerin faz sıralarının kontrolü için kullanılmıştır. Sıfır geçiş detektörü sistemin frekans, senkronizasyon anı ve faz farkının algılanması için sinüzoidal dalgaları kare dalga biçimine çevirmiştir. dsPIC uygulama aşamasında denetleyici ve bilgisayar ile sistemin tümleşik çalışmasını sağlayan arabirimdir.



Şekil 3.1. Gerçekleştirilen uygulama çalışmasının blok diyagramı

### 3.1.1. dsPIC mikrodeneleyicisi

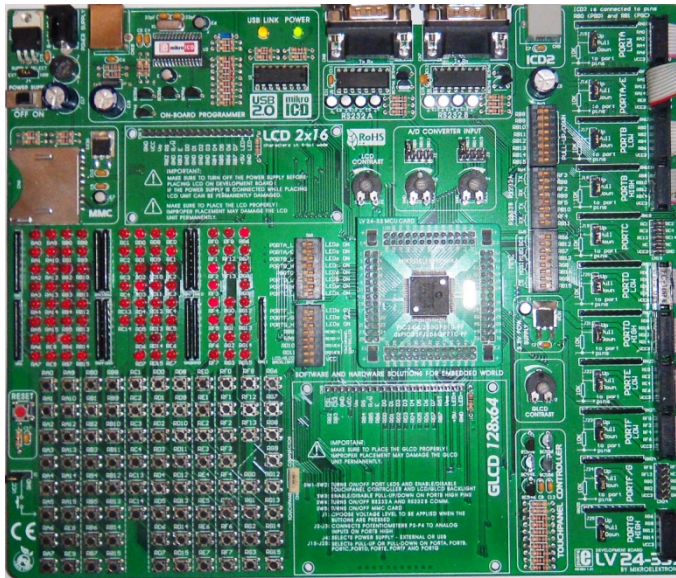
Bu tez çalışmasında PIC mikrodeneleyicileri ve endüstride sıkça kullanılan PLC'ye göre maliyetinin ucuz olması, daha hızlı işlem yapması ve çözünürlüğünün yüksek olması sebebi ile dsPIC tercih edilmiştir.

Deneyisel çalışmalarda ve endüstride dsPIC mikrodeneleyicisinin fazla tercih edilmemesinin sebebi, benzetim programlarında dsPIC mikrodeneleyicilerinin modellerinin bulunmaması, örnek yazılım ve donanım altyapısının az olmasıdır. Bu nedenle çalışma altyapısı oluşturulurken öncelikle mikrodeneleyiciye ait kütüphaneler HI-TECH C derleyicisi kullanılarak oluşturulmuştur. Oluşturulan kütüphane altyapıları kullanılarak sistem parametreleri algılanmıştır. Çalışmada kullanılan dsPIC, Microchip firması tarafından üretilen dsPIC33FJ128GP710 modeli olup özellikleri şu şekildedir.

- 16 Bit İşlemci
- İşlemci Çalışma Hızı 40 MIPS
- 128 KB Flash Hafıza

- 16,384 Byte Ram Bellek
- 3-3,6 V Çalışma Gerilimi
- 85 Adet Giriş/Çıkış Kanalı
- 2 Adet Seri İletişim Kanalı
- 32 Adet 12 Bit Analog Dijital Dönüşüm (ADC)
- 500 Ksps Analog Veri Örnekleme Hızı
- 8 Adet DGM Çıkışı
- 16 Bit DGM Çözünürlüğü
- 9 Adet 16 bit, 4 Adet 32 Bit Çözünürlüklü Sayıcı

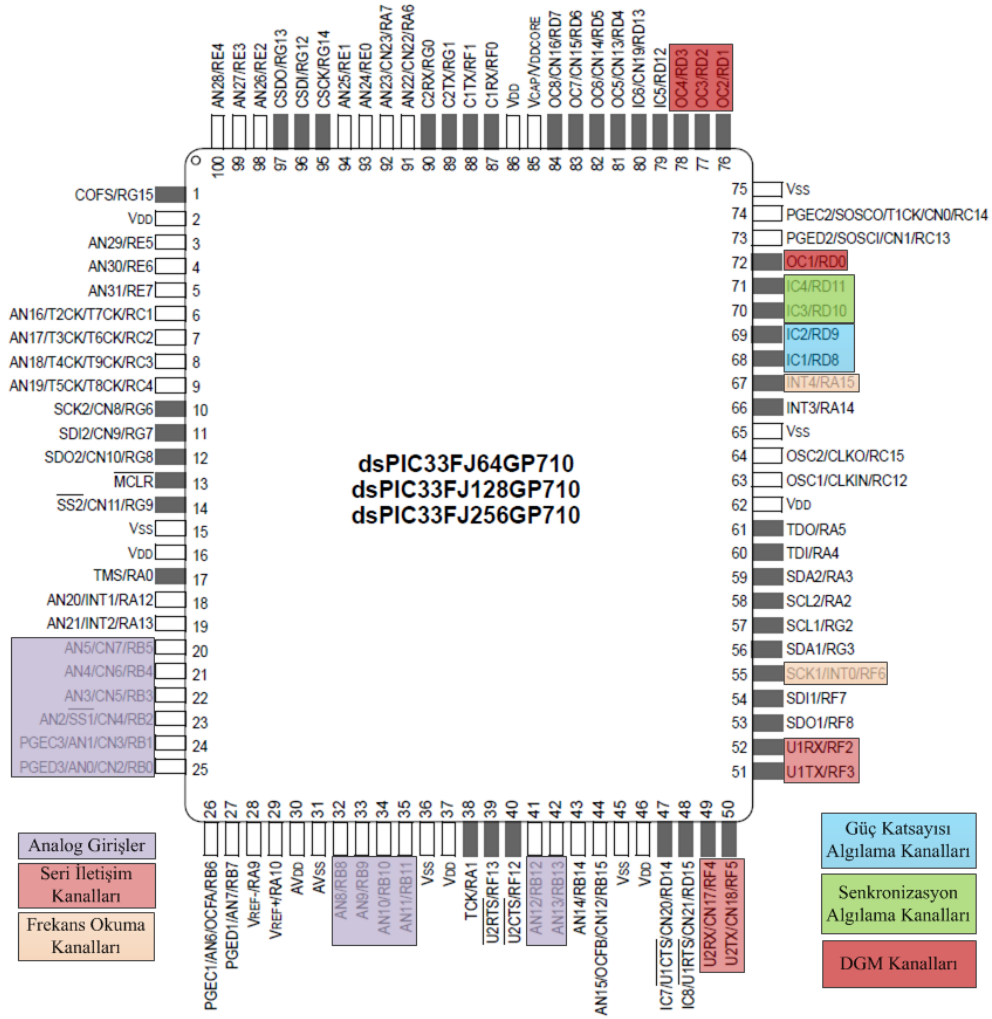
Yukarıda açıklanan özellikler generatörlerin paralel bağlanma şartlarının oluşturulması aşamasında frekans, gerilim ve senkronizasyon anının algılanması için kullanılmıştır. Diğer mikrodenetleyicilere göre fazla harici kesme kanalının bulunması, çok sayıda sayıcısının olması, frekansın hassas algılanmasını sağlamıştır. Ayrıca senkronizasyon anının algılanması aşamasında aynı isimli fazlar arasında zaman farklarının tespiti için de harici kesme kanalları kullanılarak gerilim sinyalleri arasındaki zaman farkı tespit edilmiştir. Paralel bağlantının gerçekleşmesinden sonra reaktif yükün ölçülebilmesi için sistemin akım ve gerilimi arasındaki zaman farkının algılanması amacı ile harici kesmeler kullanılmıştır.



Resim 3.1. dsPIC deneme kartı

Sistemin geri – beslemeli olarak kontrolünü sağlayan dsPIC'in programlanması ve çalıştırılması için kullanılan deneme kartı Resim 3.1'de görülmektedir. Şekil 3.2'de ise, denetleyicinin uygulama aşamasında kullanılan kontrol kanalları ayrıntılı olarak gösterilmiştir. 2 ayrı generatörün akım ve gerilimlerinin algılanması için 12 adet analog kanala ihtiyaç duyulmaktadır. PIC mikrodenetleyicilerinin birçoğunda 12 adet analog dijital çevrim kanalı bulunmamaktadır. PLC'lerde analog kanalların artırılması için ek modüller gerekmektedir. dsPIC mikrodenetleyicisinde 32 adet analog dijital çevrim kanalı bulunmaktadır. dsPIC'in 12 adet analog dijital çevrim kanalı kullanılarak her faza ait akım ve gerilim bilgileri algılanmıştır. Ayrıca PIC mikrodenetleyicilerine göre yüksek çözünürlüklü analog değer okunması sebebi ile daha hassas akım ve gerilim ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Mikrodenetleyicinin iki ayrı seri iletişim kanalı kullanılarak algılanan akım, gerilim, güç katsayısı gibi parametreler bilgisayara gönderilmiştir. Böylece verilerin yüksek hızlarda sıkışması, geç algılanması, bilgisayarın anlık depolama biriminin dolması gibi durumların önüne geçilmiştir.

Mikrodenetleyicide bulunan 4 adet darbe genişlik modülasyonu (DGM) kanalı DA motorlarının hız kontrolü ve senkron generatörlerin uyartım akımını ayarlamak için kullanılmıştır. Yaygın olarak kullanılan birçok mikrodenetleyicide kısıtlı sayıda DGM kanalının bulunması bu çalışmada kontrol edilecek 4 adet Cuk konvertörün kontrolü için yeterli olmamaktadır. Çalışmada kullanılan mikrodenetleyicinin 8 adet DGM kanalları bulunmaktadır. Bu kanallardan ikisi DA motorlarının uyartım akımlarını değiştirmek için kullanılmıştır. Ayrıca generatörlerin uç gerilimlerinin ayarlanması ve reaktif yük paylaşımı amacı ile senkron makinelerin uyartım sargılarına uygulanan gerilim iki adet Cuk konvertörle sağlanmıştır. Bu noktada konvertörlerin kontrolü için DGM kanalları kullanılmıştır. DGM kanallarının yüksek çevrim hızının bulunması, ayrıca sayıcı kanalının çözünürlüğüne bağlı olarak değişim oranının 1/1000 gibi değerlerde olması ile frekans ve gerilimin hassas olarak ayarlanması sağlanmıştır.



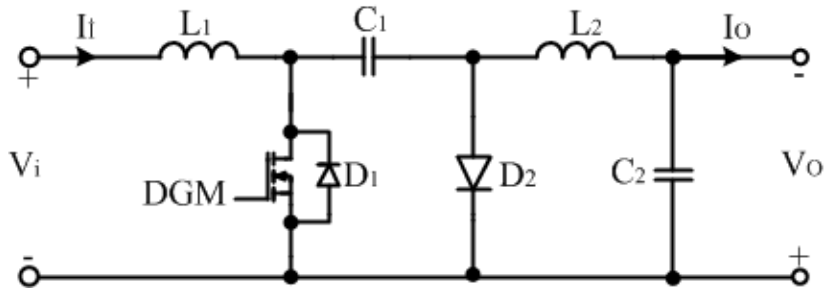
Şekil 3.2. dsPIC mikrodenetleyicisinin kullanılan kanalları

Mikrodenetleyicinin yüksek hızlı çalışması ile sistem parametrelerinin hızlı algılanması sağlanarak sistemde meydana gelen değişikliklerin anlık olarak izlenmesi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca senkronizasyon anının algılanması gibi hızlı değişim gösteren durumlarda, yüksek hız ile anlık takip başarılı olarak gerçekleştirilerek paralel bağlantı güvenli olarak sağlanmıştır. İşlemcinin yüksek hızlarda çalışması ölçümlerin hızlı olarak gerçekleştirilmesini sağlamıştır. Fakat paralel bağlantı zamanının hızlanması sadece algılama ve kontrol düzeneğine bağlı değildir. Sistemde bulunan elektrik makinelerinin mekanik tepkilerinin belirli bir zaman alması sebebi ile makineler istenilen devire ani olarak yükselememektedir. Bu nedenle paralel bağlantı süresi makinelerin tepki süresini aşmamaktadır.

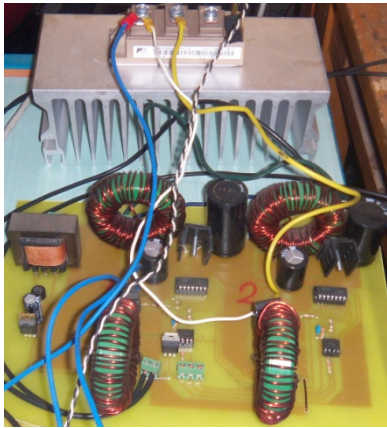
### 3.1.2. DA/DA çeviriciler

Günümüzde DA/DA çeviriciler şarj cihazları, DA motor kontrol üniteleri, bilgisayar güç kaynakları gibi birçok alanda sıkça kullanılmaktadır [26]. DA/DA çeviriciler yüksek frekanslı anahtarlama sinyalleri kullanılarak girişindeki doğru gerilimi çıkışta yükselten veya alçaltan güç elektroniği devreleridir. Bu tez çalışmasında DA motorlarının hız kontrollerinin sağlanması ve senkron generatörlerin uyartım akımlarının kontrolü için 4 adet Cuk çevirici kullanılmıştır.

Şekil 3.3'de Cuk çeviricinin devre şekli görülmektedir. Devre şeklinde de görüldüğü gibi Cuk çeviriciler giriş polaritesine göre ters polariteye sahip çıkış gerilimi verirler. Cuk çeviriciler kontrol sinyalinin (DGM) genişliğine bağlı olarak alçaltan ve yükselten durumlarda çalışabilmektedirler. Tasarımı gerçekleştirilen çeviriciler Resim 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.3. Cuk çevirici devre şeması



Resim 3.2. Tasarımı gerçekleştirilen Cuk çeviricinin görüntüsü

Çalışmada sadece alçaltan ya da sadece yükselten çevirici kullanılması motorun devir sayısının değiştirilme alanını kısıtlayacaktı. Çünkü alçaltan çeviriciler sadece giriş geriliminden daha alçak genliklerde çıkış gerilimi vermektedirler. Bu da uyarım akımının daha küçük bir bölgede değiştirilebilmesine izin verecektir. Yükselten çeviriciler, giriş gerilimine eşit veya büyük değerlerde çıkış gerilimi verebilmektedir. Bu durumda uyarım gerilimi yine küçük bir bölgede değiştirilmiş olacaktır. Bu nedenle hem alçaltan ve hem de yükselten durumlarda çalışabilen Cuk çevirici kullanılarak motorun geniş bir aralıkta devir sayısının değiştirilmesi sağlanmıştır.

DA makinelere uygulanan gerilimin üzerindeki dalgalanmalar yüksek frekanslı titreşimlere yol açacaktır. Bu da çıkış gerilimi üzerinde salınımların oluşmasına sebep olacaktır [22]. Cuk çeviricilerin yapısından kaynaklı, diğer alçaltan yükselten çeviricilere göre çıkış gerilimi üzerindeki salınım azdır. Şekil 3.3'te devre şeması verilen çevirici çıkışındaki akım üzerindeki dalgalanma "Eş. 3.1" de açıklanmıştır [26].

$$\Delta i_{L2} = \frac{V_o}{L_2} (1 - D)T_s \quad (\text{A}) \quad (3.1)$$

$$T_s = \frac{1}{f_s} \quad (\text{s}) \quad (3.2)$$

Burada;

$\Delta i_{L2}$  :  $L_2$  endüktansındaki akım üzerindeki dalgalanma (A)

$V_o$  : Çıkış gerilimi (V)

$D$  : DGM sinyalinin doluluk oranı (%)

$T_s$  : DGM sinyalinin frekansının periyot süresi (s)

$f_s$  : DGM sinyalinin frekansı (Hz)

Denklemden görüldüğü gibi, çıkış gerilimini doğuran  $i_{L2}$  akımı,  $L_2$  endüktansı, anahtarlama frekansı ve DGM sinyalinin doluluk oranına bağlıdır. Çeviricilerin kontrolü için kullanılan DGM sinyalinin anahtarlama frekansının artması çıkış gerilimi

üzerindeki dalgalanmayı azaltmaktadır. Anahtarlama frekansı, kullanılan anahtarlama elemanlarının frekans bandı içerisinde tutulmalıdır. Aksi halde anahtarlarda sürekli iletim, aşırı ısınma gibi durumlar ortaya çıkacaktır.

Çeviricilerde kullanılan anahtarlama elemanlarına uygulanan DGM sinyallerinin darbeleme oranları değiştirilerek çeviricilerin çıkış gerilimleri ayarlanmıştır. DGM sinyallerinin doluluk oranına bağımlı değişen çıkış gerilimi “Eş. 3.3” de verilmiştir.

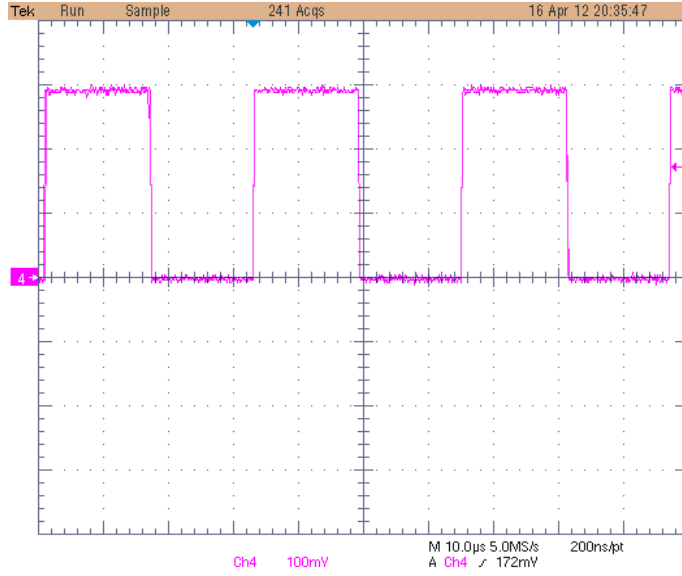
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1-D}{D} (V) \quad (3.3)$$

Burada;

$V_o$  : Çıkış akımı (A)

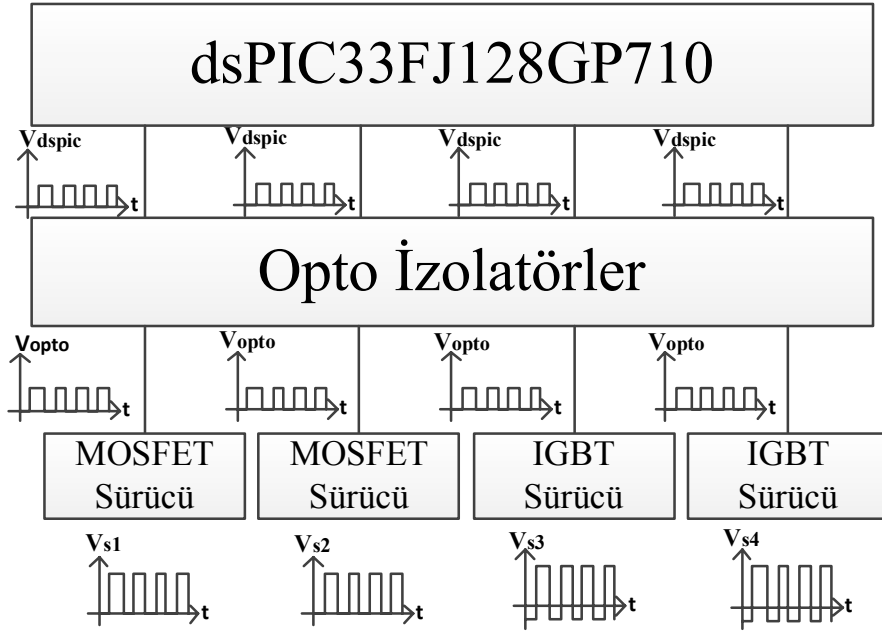
$V_i$  : Giriş akımı (A)

Üretilen gerilimin frekansının ve genliğinin hassas bir şekilde ayarlanması için çevirici çıkış geriliminin çözünürlüğünün yüksek olması gerekmektedir. Mikrodenetleyicilerde üretilen DGM sinyallerinin doluluk oranı, DGM kanalına aktarılan sayısal değere bağılı olarak değiştirilmektedir. DGM sinyallerinin sayısal değişme aralığı ne kadar yüksek olursa üretilen sinyalin doluluk oranı o kadar hassas olabilmektedir. Fakat doluluk oranının değişim aralığı arttırıldıkça üretilen sinyalin frekansı azalmaktadır. DGM sinyalinin frekansının azalması çıkış gerilimi üzerindeki salınımları arttırmaktadır. Bu nedenle frekans ve değişim oranının optimum seviyeye ayarlanması gerekmektedir. Çevirici çıkış geriliminin çok küçük değerlerde değiştirilmesini sağlamak amacı ile 1/1000 çözünürlüğe sahip DGM sinyalleri üretilmiştir. Üretilen DGM sinyallerindeki 1 değerlik sayısal değişim doluluk oranını %0.1 değiştirmektedir. DGM sinyalinin frekansını etkileyen diğer bir unsur da mikrodenetleyicinin çalışma frekansıdır. Tez çalışmasında 32kHz'lik DGM sinyalleri kullanılarak çeviricilerin kontrolü sağlanmıştır. dsPIC'te üretilen 32kHz frekanslı DGM sinyali şekil 3.4'te görülmektedir.



Şekil 3.4. Anahtarlama sinyali

dsPIC’te üretilen DGM sinyalleri, anahtarlama elemanlarının sürücülerine uygulanmıştır. Çalışmada anahtarlama elemanı olarak IXYS firması tarafından üretilen IXFH15N100Q model MOSFET’ler ve Fuji elektrik tarafından üretilen 2MBI100U4A model IGBT’ler kullanılmıştır. dsPIC tarafından üretilen kontrol sinyalleri sürücüler ile anahtarlama elemanlarını kontrol edecek seviyeye getirilmiştir. IGBT ve MOSFET sürücüler izolasyon yapmak ve kontrol sinyalinin anahtarlama gerilimini arttırmak için kullanılan elektronik malzemelerdir. Güç elektroniği devrelerinde izolasyon, güç devresi ile kontrol devresi arasında yalıtma işlemi yapmaktadır. İzolasyon amacı ile haricen 6N137 opto-izolatörler kullanılmıştır. Şekil 3.5’te dsPIC çıkışındaki DGM sinyallerinin anahtarlama elemanlarına uygulanması için gerçekleştirilen işlemler gösterilmiştir.



Şekil 3.5. DGM sinyallerinde izolasyon ve gerilim yükseltme

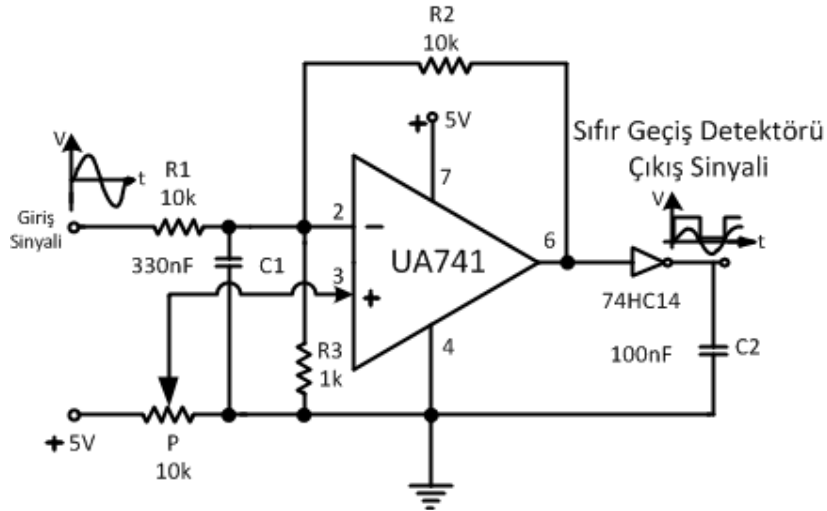
dsPIC'te üretilen sinyaller opto-izolatörlere girilerek izolatör çıkışında, gücü mikrodenetleyiciden bağımsız anahtarlama sinyalleri üretilmiştir. Üretilen sinyaller IGBT ve MOSFET sürücülerine uygulanarak gerilim seviyeleri yükseltilmiştir.

Tasarımı gerçekleştirilen çeviriciler ile generatörde üretilen gerilimin frekansı ve genliği geri bildirimli olarak kontrol edilmiştir. DA motorların uyarım akımını kontrol eden çeviriciler generatörlerde üretilen gerilimin frekansına göre çevirici çıkış gerilimlerini kontrol ederek generatör gerilimlerini istenilen frekans değerine sabitlemektedir. Generatörlerin uyarım akımlarını kontrol eden çeviriciler ise çıkış geriliminin genliğini belirlenen değere sabitlemek için kullanılmıştır. Frekans bilgilerinin algılanması için öncelikle üretilen gerilim sinyallerinin pozitif kısımlarının kare dalga biçimine çevrilmesi gerekmektedir. Bu amaçlar sıfır geçiş detektörleri kullanılmıştır.

### 3.1.3. Sıfır geçiş detektörleri

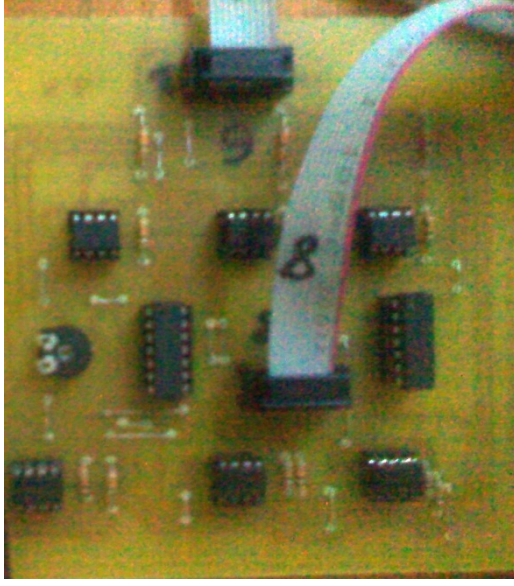
Sinüzoidal yapıya sahip gerilim sinyallerinin sıfır noktasından pozitif bölgeye çıkış anları sıfır geçiş anı olarak adlandırılmaktadır. Frekans ve güç katsayısının ölçülmesi

işlemlerinde gerilim ve akım bilgilerinin sıfırdan çıkış anları denetleyici tarafından algılanılarak ölçümler yapılmaktadır. Tez çalışmasında generatörlerde üretilen gerilimler üzerinde salınımlar bulunmaktadır. Geçmişte yapılan sıfır geçiş detektörleri, generatörde üretilen gerilim sinyalleri altında denenmiş ve detektörlerin sıfır anlarını doğru tespit edemediği gözlemlenmiştir. Konuyla ilgili detaylı bilgi [28] numaralı kaynaktan bulunabilir. Frekans ve sıfır anlarının doğru tespiti için tez çalışmasında, bozuk dalga şekilleri altında kararlı çalışan bir sıfır geçiş devresi tasarlanmıştır. Tasarımı gerçekleştirilen sıfır geçiş detektörünün devre şeması şekil 3.6'da görülmektedir [28].



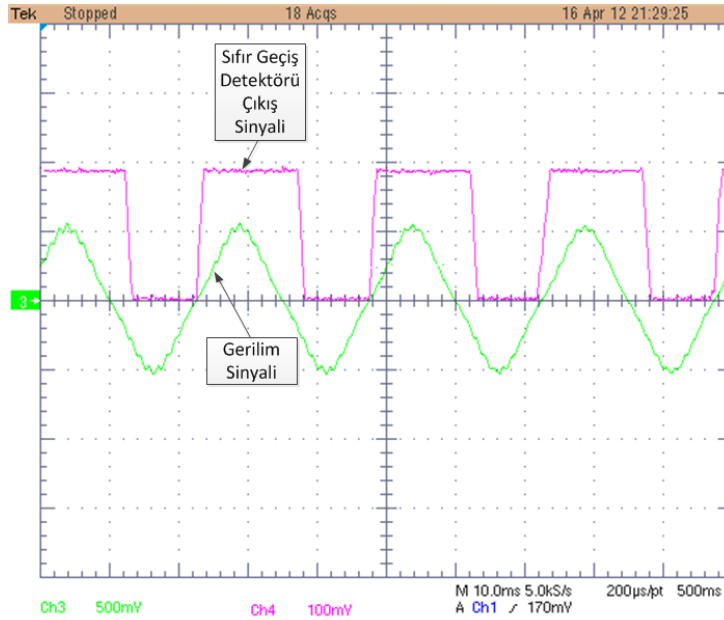
Şekil 3.6. Tasarlanan sıfır geçiş detektörünün devre şeması

Tez çalışmasında, frekansı 0 – 50Hz arasında değişim gösteren sinyallerin sıfır geçiş anları tespit edileceği için tasarlanan devrede eski nesil ve daha yavaş çalışan bir işlemsel yükselteç kullanılarak sistemin yüksek frekanslarda tepki vermesi engellenmiştir. Ayrıca, devre şeklinde gösterilen P ayarlanabilir direnci ile sıfır geçiş anlarına göre kalibrasyon yapılabilmektedir. Böylece manyetik bozulma gibi çevresel etkilerin giderilmesi kullanıcı kontrollü olarak düzeltilebilmektedir. Tasarımı gerçekleştirilen sıfır geçiş devresi Resim 3.3'de görülmektedir.



Resim 3.3. Sıfır geçiş devresi görüntüsü

Sıfır geçiş detektörü ile elde edilen sinyaller Şekil 3.7’de görölmektedir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi detektör, gerilim sinyalinin pozitif kısmını kare dalgaya çevirerek mikrodenetleyici tarafından ölçülebilecek şekle getirmektedir.



Şekil 3.7. Sıfır geçiş detektörü çıkış sinyali

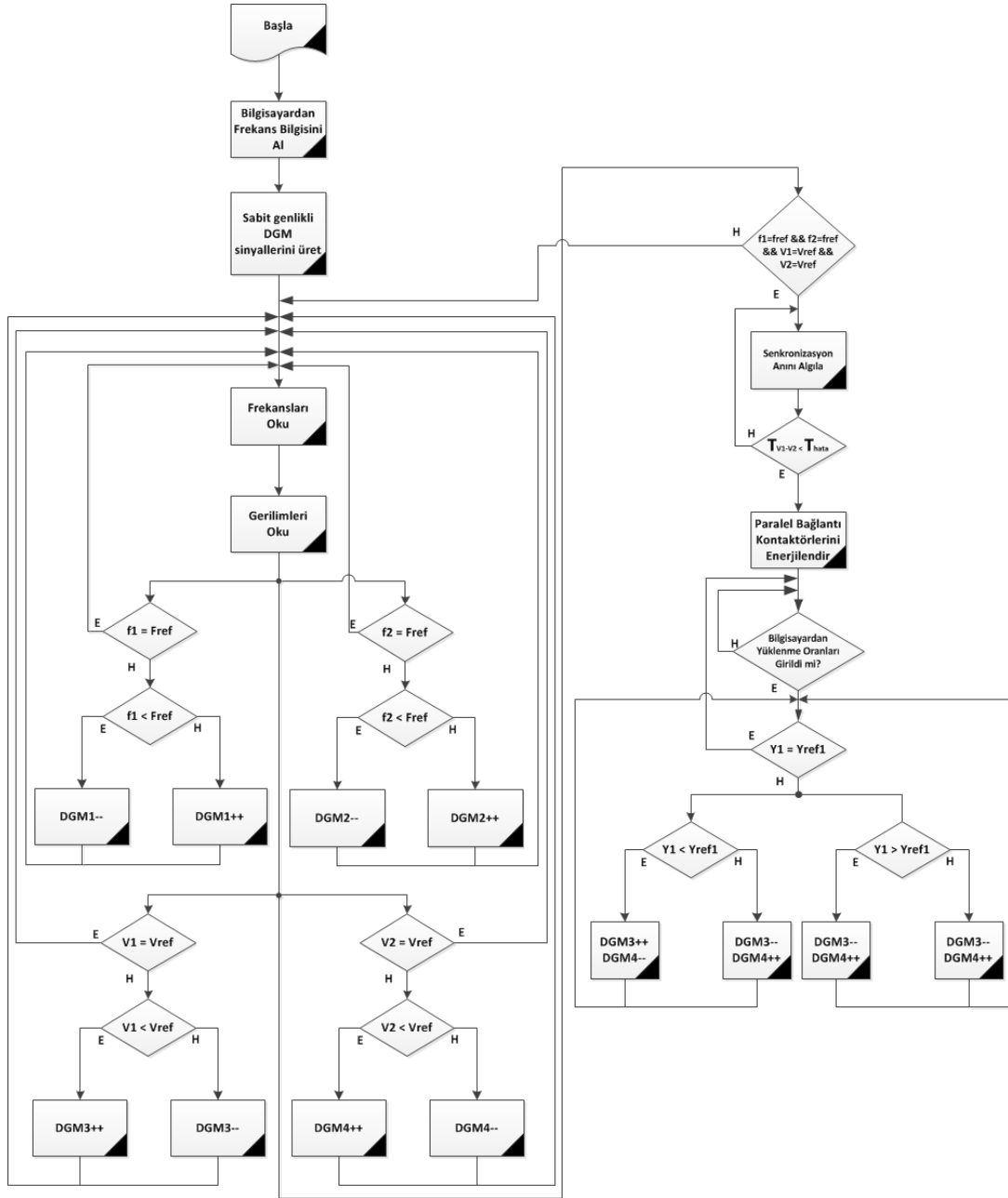
Kare dalgaya dönüştürülen gerilim sinyalinin pozitif kenarları arasındaki zaman farkı dsPIC tarafından algılanarak periyot süresi tespit edilmektedir. Böylece üretilen gerilimin frekansı algılanmaktadır. Aynı durum akım sinyalleri için de geçerlidir. Çekilen akımın pozitif kısma geçtiği anda kare dalga üretilerek sıfırdan geçiş anı tespit edilmektedir. Çalışmada elde edilen kare dalga sinyallerinin anlamlı hale getirilmesi için uygun yazılım altyapısı geliştirilmiş, frekans ve güç katsayısı doğru ve hassas olarak algılanmıştır.

#### **3.1.4. Yazılım bileşenleri**

Bu bölümde donanım altyapısı geliştirilen sistemden elde edilen analog gerilim sinyallerinin algılanması için geliştirilen denetleyici yazılımı ve bilgisayar üzerinden sistem parametrelerinin izlenmesi ve kontrolüne olanak tanıyan arayüz sunulmuştur.

Mikrodenetleyici içerisindeki analog dijital dönüşüm, harici kesme ve seri port gibi modüllerin kullanılabilmesi için denetleyiciye ait modül kütüphanelerinin derleyici içerisinde bulunması gerekmektedir. Aksi halde denetleyiciler içerisindeki modüller kullanılamayacaktır. Gerçekleştirilen çalışmada mikrodenetleyicinin sistem parametrelerini algılaması ve bilgisayar ile donanım yapısı arasındaki bağı sağlanması için HI-TECH C derleyicisi kullanılarak dsPIC için yazılım geliştirilmiştir. Denetleyicinin kütüphane yapısının derleyici içerisinde bulunmaması sebebi ile modüllerin kullanılması için gerekli kütüphaneler oluşturulmuştur. Analog dijital dönüşüm, DGM sinyallerinin üretilmesi, sayıcıların kullanılması, harici kesme kanallarının kullanılması, seri iletişim kanallarının kullanılması için ayrı kütüphane yapıları oluşturularak denetleyicinin belirtilen modülleri kullanıma hazır hale getirilmiştir. Oluşturulan kütüphane altyapıları ile denetleyicinin istenilen modüllerinin kullanılması ve istenildiğinde devre dışı bırakılması kolaylıkla sağlanmıştır. CCS C derleyicileri gibi hazır kütüphane yapıları bulunan derleyicilerde yazılımcıların kod ezberlemeleri gerekmektedir. C tabanlı geliştirilen özgün kütüphane yapıları ile esnek ve kullanışlı bir programlama altyapısı oluşturulmuştur. Kütüphane tabanlı geliştirilen yazılım ile tek işlemci üzerinden tüm sistem parametrelerinin algılanması ve bilgisayara gönderilmesi sağlanmıştır. Ayrıca

bilgisayar üzerinden belirlenen referans frekans ve yüklenme oranlarının kontrolü sağlanmıştır.



Şekil 3.8. dsPIC mikrodenetleyicisinin yazılım sinyal akış diyagramı

Şekil 3.8'de gerçekleştirilen dsPIC yazılımının akış diyagramı görülmektedir. Ana programda öncelikle generatörlerde üretilen gerilimlerin frekansı arayüz üzerinden girilen değere göre istenilen seviyeye getirilmiştir. Frekansın sabitlenmesi

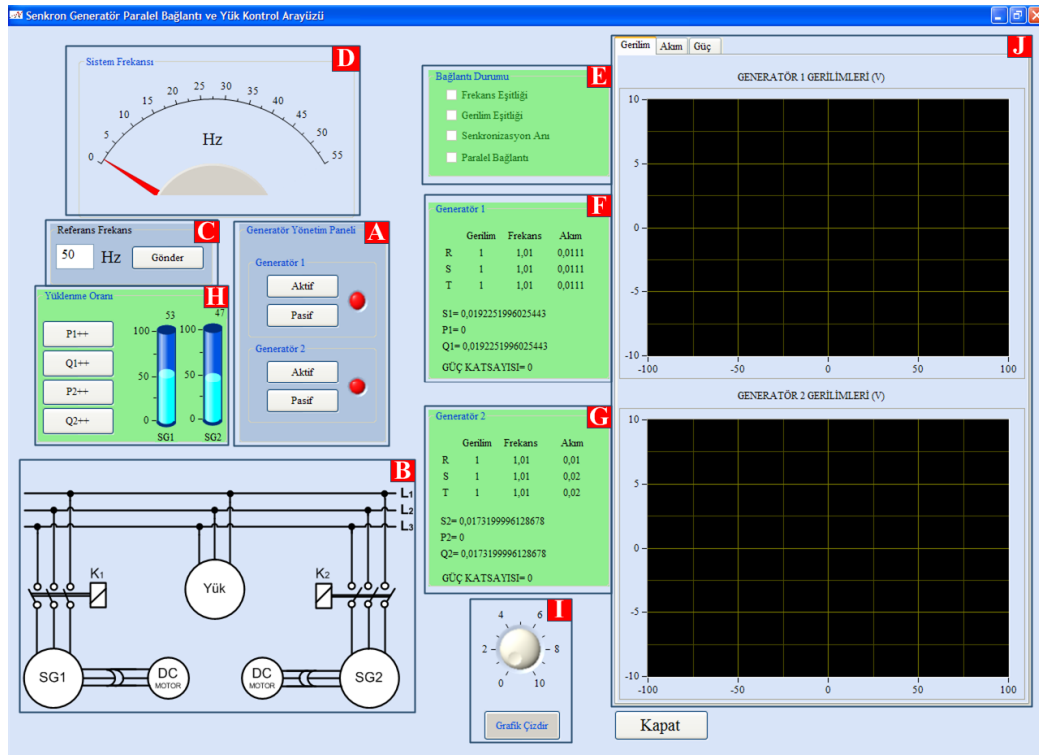
aşamasında gerilim de generatör devir sayısına bağlı olarak değiştiğinden generatör gerilimleri ve frekansları aynı anda değiştirilerek istenilen frekans ve gerilim eşitliği sağlanmıştır. Frekans ve gerilim eşitliğinin sağlanmasından sonra paralel bağlanma için gerekli son kontrol edilebilir şart senkronizasyon anının tespitidir. dsPIC'in harici kesme kanalları kullanılarak senkronizasyon anı algılanmıştır. Senkronizasyon anının sifıra yakın olduğu zamanlarda paralel bağlantı sağlanmıştır. Paralel bağlantı sağlanırken ve sağlandıktan sonra yük kontrolünün sağlanması için bilgisayar üzerinden yüklenme oranlarının belirlenmesi gerekmektedir. Aksi halde paralel olarak sisteme giren generatör üzerine yük almayacak veya az miktarda yük alacaktır. Arayüz üzerinden gönderilen yüklenme oranına göre aktif ve reaktif yük paylaşımı çeviricilere uygulanan DGM sinyallerinin genliği değiştirilerek yapılmıştır.

Sistemin bilgisayar ile etkileşimli çalışması için dsPIC'in seri port kanalları kullanılarak bilgisayar ve dış arabirimler haberleştirilmiştir. Çift yönlü haberleşme tekniği kullanılarak bilgisayardan denetleyiciye ve denetleyiciden bilgisayara veriler gönderilmiştir. Verilerin bilgisayar ortamında girilmesi ve denetleyiciden alınan verilerin gösterilmesi için grafiksel ve görsel özelliği yüksek bir arayüz geliştirilmiştir. Arayüz Visual C# programa dili kullanılarak hazırlanmıştır.

### **3.2. Arayüz Tasarımı**

Bilgisayar ile donanımsal yapıların birleştirilmesinde ve kontrolünde arayüzler kullanılmaktadır. Bilgisayarlı kontrol ve yönetim sistemlerinde bilgisayar üzerinden gönderilen veriler donanımsal denetleyici ile anlamlandırılarak çıkış ve girişler kontrol edilir. Gelen verilere göre donanımsal olarak yapılacak işlemler uygulanır. Bu çalışmada, esnek çalışma yapısı, kod ezberlemeyi minimuma indirmesi, grafiksel altyapısının zengin olması, donanımlar ile haberleşmesinin kolaylığı, görsel tema ve kontrol elemanları bakımından zengin olması sebebi ile Visual C# programlama dili tercih edilmiştir.

Çalışmada referans frekans bilgilerinin girilmesi ve yük oranlarının belirlenmesi arayüz üzerinden gerçekleştirilmiştir. Girilen frekans bilgisi dsPIC'e gönderilerek referans frekans değeri belirlenmektedir. Böylece mikrodenetleyici, generatörlerde üretilen gerilimlerin frekanslarını referans değere göre ayarlamaktadır. Şekil 3.9'da arayüz çalışmasının şekli görülmektedir.



Şekil 3.9. Grafiksel arayüz görüntüsü

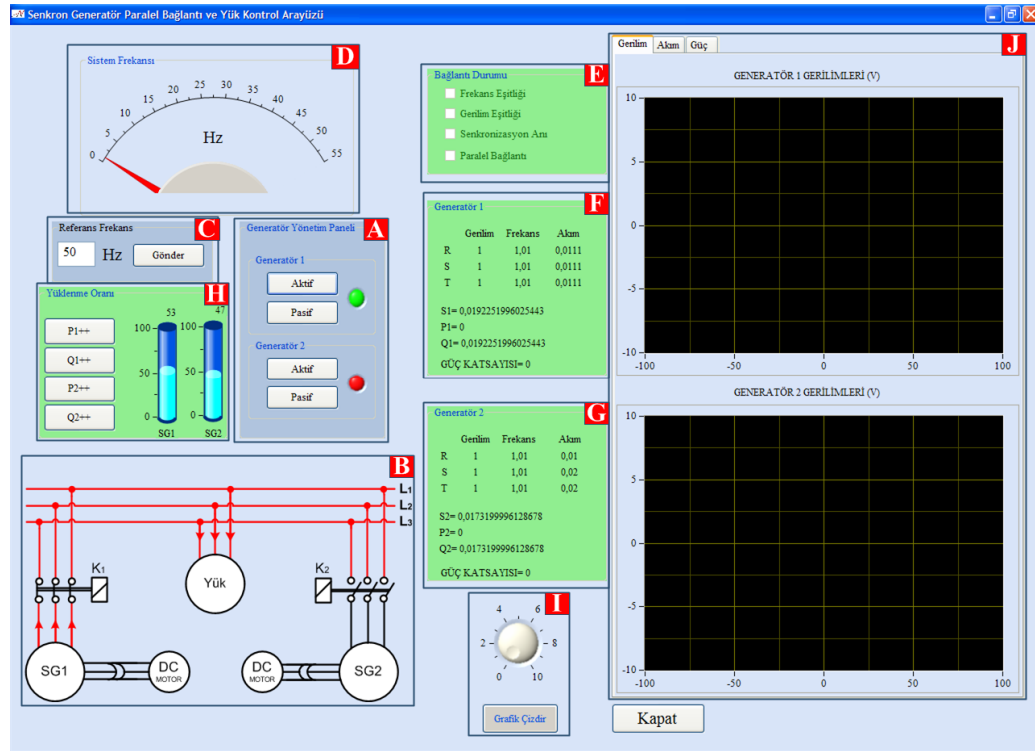
#### A: Generatör yönetim paneli

Bu panel içerisinde, yük altında kalkınacak generatörün seçimi yapılmaktadır. Generatör 1 ve generatör 2 için bulunan aktif butonları ile generatörden yüke enerji geçişi sağlanabilmektedir. Generatörlerden birisi sistemden çıkarılmak istenirse pasif butonuna basılarak ilgili generatörle yük arasındaki bağlantı kesilebilmektedir.

#### B: Generatör durumu izleme paneli

Bu panel içerisinde, A bölümünde yapılan değişikliklerin görsel olarak izlenmesi sağlanmaktadır. Generatörlerin yük altında kalkındığını veya paralel bağlantı gerçekleştikten sonra generatörlerin sisteme bağlandığını grafiksel olarak görmek

mümkündür. Şekil 3.10’da 1. generatörün yük altında kalkındığı durum görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi, generatör 1’in bağlı olduğu kontaktörün kontakları kapalı durumda, ayrıca generatör 1’in şebeke hat çizgileri kırmızı durumdadır.



Şekil 3.10. Generatör yönetim panelinin incelenmesi

### C: Referans frekans bölümü

Bu bölüm içerisinde, generatörlerde üretilen gerilimin frekansını belirlemektedir. İstenilen frekans değeri belirlenerek “Gönder” butonu ile frekans değeri dsPIC’e gönderilmektedir.

### D: Sistem frekansı bölümü

Bu bölümde bulunan analog frekansmetreden sistem frekansı anlık olarak takip edilebilmektedir.

#### E: Paralel bağlantı durumu

Bu bölümde, paralel bağlanma şartlarının sağlanma durumları anlık olarak izlenebilmektedir. Bağlantı şartları sağlandıkça ilgili kutucuklar onaylanmaktadır.

#### F – G : Generatörlere ait veriler

Bu iki bölüm içerisinde, generatörlere ait akım, gerilim, frekans, güç katsayısı, aktif, reaktif ve görünür güç değerleri anlık olarak izlenebilmektedir. Sistem parametreleri generatör fazları için ayrı ayrı gösterilmektedir.

#### H: Yük kontrol bölümü

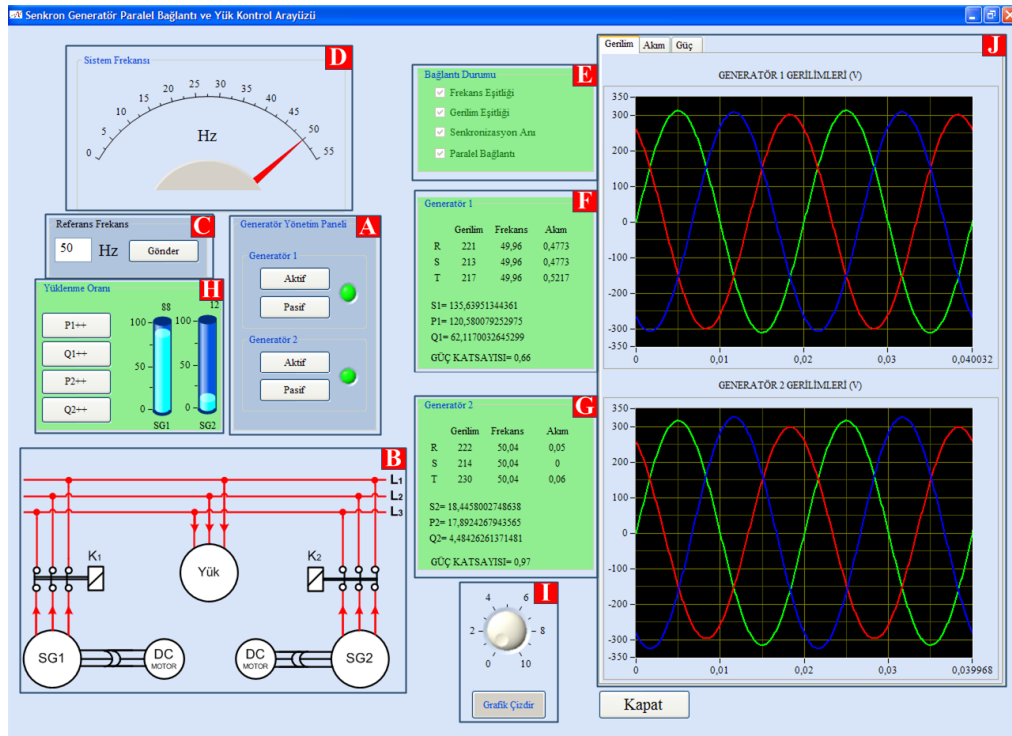
Bu bölüm içerisinde, generatörlerin yüklenme oranları butonlar yardımı ile değiştirilmektedir. Bölüm içerisinde kullanılan “P1++” ve “P2++” butonları ile generatörlerin üzerine aldığı aktif yük arttırılabilmektedir. “Q1++” ve “Q2++” butonları ile generatörlerdeki reaktif yük paylaşım durumları kontrol edilmektedir. Ayrıca blok içerisindeki tanklardan, generatörlerin yüklenme oranları izlenebilmektedir.

#### I: Grafik yönetim paneli

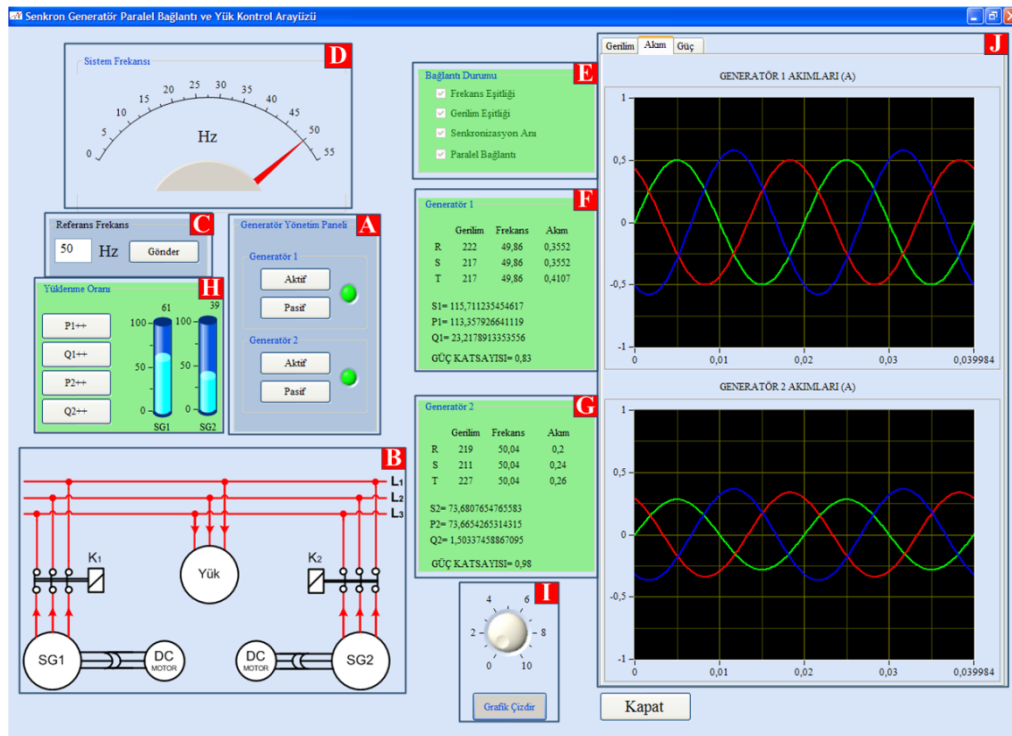
Bölüm içerisindeki “Grafik Çizdir” butonu, grafiksel alanların aktif edilmesi için kullanılmaktadır. Bölümdeki ayarlanabilir buton ile grafik eksenindeki zaman dilimi değiştirilmektedir. Şekil 3.11 (a)’da grafiksel bölümün aktif olduğu durum görülmektedir.

#### J: Grafik penceresi

Sayısal olarak alınan sistem parametreleri bu bölüm içerisinde grafiksel olarak gösterilmektedir. Grafiklerde akım, gerilim ve güç değerleri generatörler için ayrı ayrı çizdirilmektedir. Şekil 3.11 (b)’de akım, Şekil 3.12’de güç grafikleri görülmektedir.

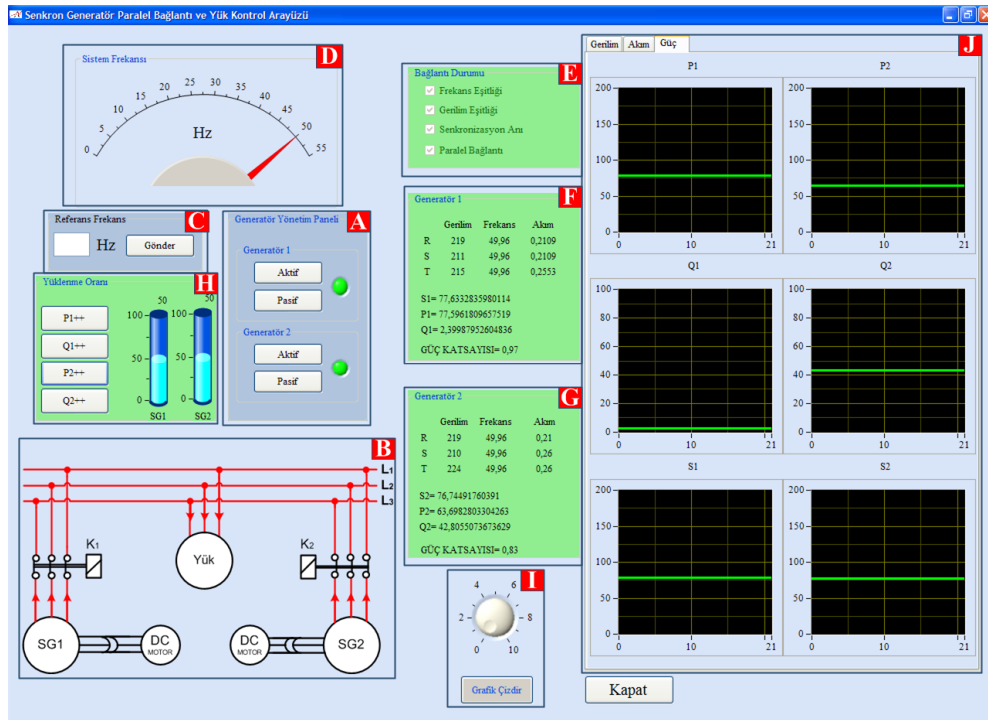


(a)



(b)

Şekil 3.11. a: Paralel bağlantı sonrası arayüz üzerinde grafiklerin gösterimi, b: Akım grafikleri



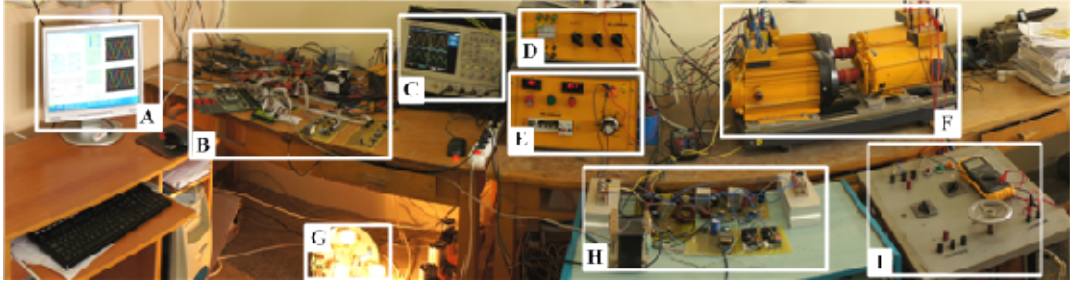
Şekil 3.12. Güç grafikleri

Bu bölümde, yapılan uygulama çalışmasında kullanılan devreler, kontrol teknikleri ve arayüz açıklanmıştır. Frekans, gerilim ve senkronizasyon anının algılanması için gerekli devre yapıları oluşturularak oluşturulan yapıların denetleyici tarafından kontrolüne ilişkin bilgiler verilmiştir.

### 3.3. Deneysel Çalışmalar

Bölüm 3.1'de paralel bağlantı şartlarının kontrolü ve sağlanması için gerekli donanımsal ve yazılımsal altyapının oluşturulması verilmişti. Bu bölümde oluşturulan donanımsal altyapı ile denetleyici yazılımının birleştirilmesi sunulmuştur.

Resim 3.4'te senkron generatörlerin paralel bağlanması ve yük kontrolü için gerçekleştirilen uygulama düzeneği görülmektedir.



Resim 3.4. Deneysel düzenek

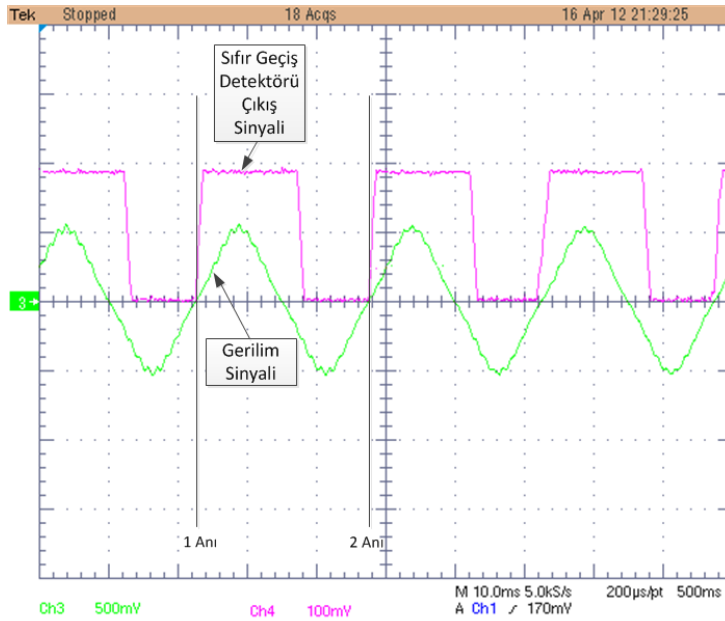
Resimde;

- A: Bilgisayar
- B: Paralel bağlantı kontrol ünitesi
- C: Osiloskop
- D: Reaktif yük
- E: Uyartım devresi için DA kaynak
- F: Elektrik makineleri
- G: Omik yük
- H: Cuk çeviriciler
- I: DA makinelerin kutup alanını oluşturmak için DA kaynak

DA motorlar ile generatörlerde üretilen gerilimlerin frekansları değiştirilerek istenilen değere getirilmektedir. Ayrıca yük kontrolü aşamasında motorların torkları değiştirilerek generatörden çekilen aktif yükün değiştirilmesi sağlanmıştır. Frekansın istenilen değere sabitlenmesi Bölüm 3.3.1’de sunulmuştur. Frekansın sabitlenmesi aşamasından sonra gerilim eşitliğinin sağlanması gerekmektedir. Bölüm 3.3.2’de gerilimin ölçülmesi ve eşitlenmesi sunularak ölçüm sırasında kullanılan donanımsal ve yazılımsal altyapı açıklanmıştır. Generatörlerin paralel bağlanılacak faz isimlerinin aynı olması şartı faz sırası röleleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan faz sırası röleleri ile faz sıralarının aynı olması sağlamıştır. Paralel bağlama aşamasında son şart olan senkronizasyon anının algılanması için kullanılan donanımsal ve yazılımsal altyapı Bölüm 3.3.3. altında sunulmuştur.

### 3.3.1. Frekansın ölçülmesi ve eşitlenmesi

Paralel bağlama şartlarından frekans değerinin sabitlenmesi için öncelikle üretilen gerilim sinyallerinin frekanslarının algılanması gerekmektedir. Frekans ölçümlerini gerçekleştirmek için yapılan sıfır geçiş devresinin çıkışındaki sinyal Şekil 3.13'te görülmektedir. Sinüzoidal yapıya sahip dalga şekli kare dalgaya çevrilmiş ve elde edilen kare dalga sinyalleri mikrodenetleyicinin harici kesme girişlerine uygulanmıştır. Harici kesme girişleri, girişlerine uygulanan kare dalga sinyallerinin düşen ve/veya yükselen kenarlarında kesme oluşturarak sinyalin lojik 1 veya 0 olduğunu bildiren özel giriş uçlarıdır. Üretilen kare dalga sinyalleri bir saniye boyunca sayılarak frekans bilgisi algılanabilmektedir. Fakat bu durumda sinyal 1 periyot boyunca iki kere yön değiştirdiğinden algılama çözünürlüğü en fazla 0.5 Hz olmaktadır. Paralel bağlanılacak generatörler arasında 0.5 Hz'lik frekans farklılığı paralel bağlantı anında ani gerilim düşmeleri ve generatör üzerinde mekanik yığılmalara sebep olacaktır. Bu olumsuz durumların engellenmesi açısından Şekil 3.13'te gösterilen 1 anında harici kesme oluştuğunda 32 bit çözünürlüğe sahip sayıcı aktif edilerek 2 anında oluşan 2. kesme sinyali ile durdurulması sağlanmıştır.



Şekil 3.13. Sıfır geçiş detektörü çıkış sinyali

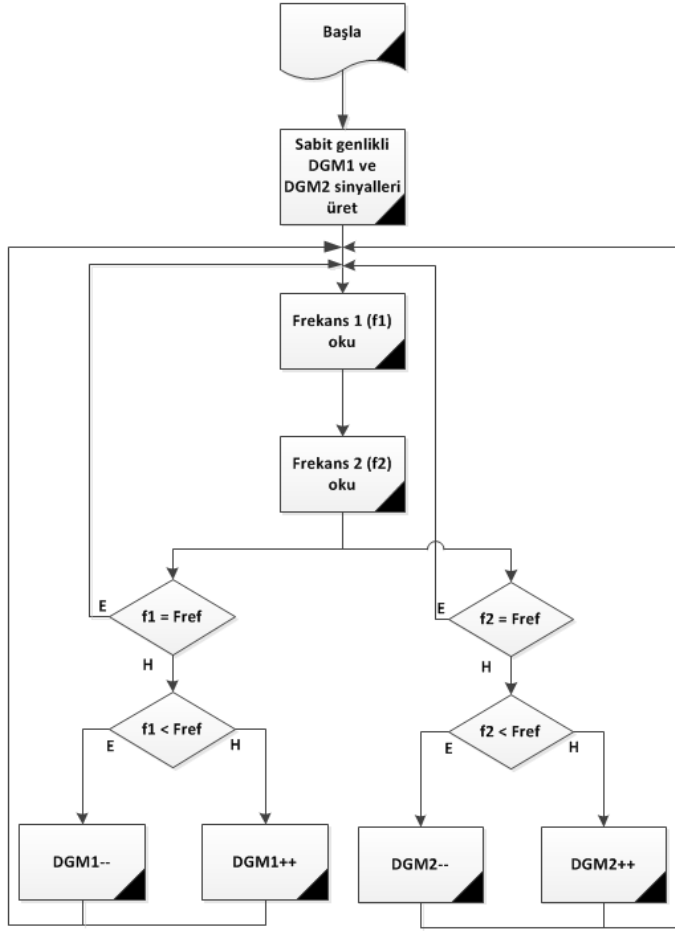
2. kesme oluştuktan sonra sayıcıdaki değer alınarak 1 ve 2 anı arasındaki zaman farkı hesaplanmıştır. Elde edilen zaman değeri ile periyot (T) değeri ölçölmüştür. Frekans (f) “Eş. 3.4” kullanılarak hesaplanmıştır.

$$f = \frac{1}{T} \text{ (Hz)} \quad (3.4)$$

Her iki generatör için de frekans değeri ayrı kesmeler kullanılarak hesaplanmıştır. 32 bit sayıcı modöller ile kesmeler arası yüksek değerlere bölünmüştür. Böylece ölçölen frekans değerlerinin çözünürlüğü artırılmıştır. Yüksek çözünürlöklü frekans algılama sistemi ile paralel bağlanma anında frekanstan kaynaklı oluşabilecek hatalar minimuma indirilmıştir.

Hesaplanan frekans değerleri ile arayüz üzerinden belirlenen frekans değerinin (referans frekans) karşılaştırılması sonucu DA motorların uyarım akımı değiştirilerek frekansın istenilen değere getirilmesi sağlanmıştır. Şekil 3.14’te frekansın istenilen bir frekans değerine ( $f_{ref}$ ) sabitlenmesine ilişkin akış diyagramı verilmiştir.

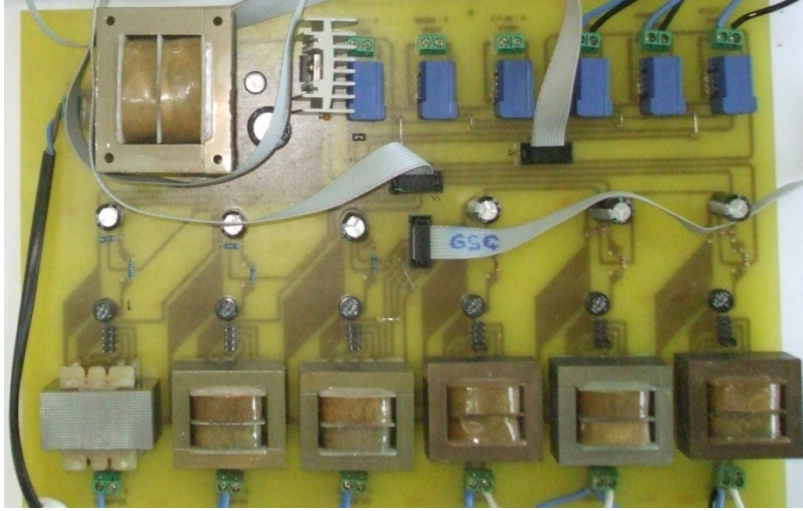
Yazılımda ilk aşamada çeviricilerin DGM oranları belirli bir seviyede başlatılarak motorlara gerilim uygulandığında hareket etmesi sağlanmıştır. Generatörden üretilen gerilimin frekansı algılanarak frekans değerinin istenilen frekanstan düşük olması durumunda çeviricinin darbeleme oranı azaltılarak DA motorunun uyarım akımının azalması sağlanmıştır. Uyarım akımını azalttıķça DA şönt motorun devir sayısı artarak istenilen frekans değerine gelmesi sağlanmaktadır. Üretilen gerilimin frekansının istenilen değerden fazla olması durumunda DA şönt motorun uyarım akımı arttırılarak devir sayısı azaltılmaktadır. Böylece generatörlerde üretilen gerilimin frekansı istenilen frekans değerine sabitlenmektedir. Generatör frekansının değişimi ile generatörde üretilen gerilimin genlikleri değişmektedir. Bu nedenle frekans eşitliği sağlanılırken gerilim eşitliğinin de kontrol edilmesi gerekmektedir.



Şekil 3.14. Frekans sabitleme sisteminin akış diyagramı

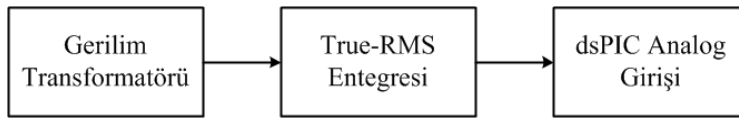
### 3.3.2. Gerilimin ölçülmesi ve eşitlenmesi

Generatörlerin paralel bağlanma şartlarından gerilim eşitliğinin sağlanması ve arayüz üzerinde değerlerin gösterilmesi için gerilim değerlerinin algılanması gerekmektedir. Denetleyicinin analog gerilim ölçüm seviyesinin maksimum +3.3 V olması nedeniyle üretilen alternatif gerilimlerin genliklerinin düşürülmesi gerekmektedir. Resim 3.5'te gerilimlerin genliklerinin düşürülmesi için tasarlanmış uygulama devresi görülmektedir.



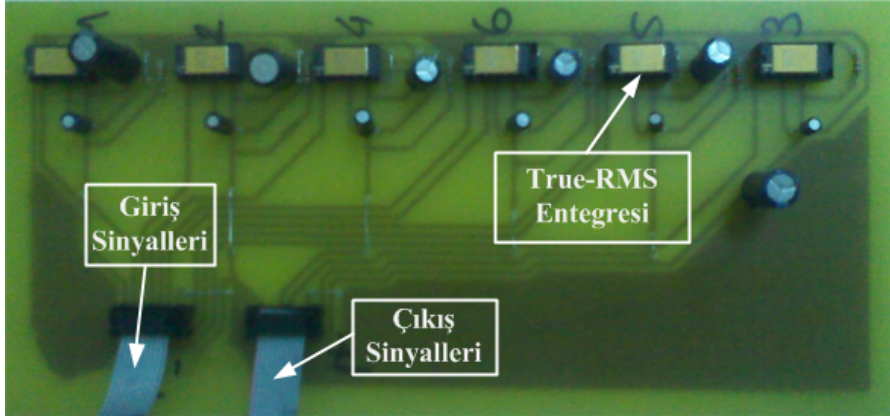
Resim 3.5. Akım - gerilim algılama ve dönüştürme ünitesi

Alternatif gerilimlerin frekansını değiştirmeden genliklerinin değiştirilmesi gerektiğinden her faz için ayrı gerilim transformatörleri kullanılmıştır. Kullanılan mikrodenetleyicinin analog dijital dönüşüm kanallarının negatif gerilim uygulanmasında zarar göreceği için gerilimlerin öncelikle doğru gerilim yapısına çevrilmesi gerekmektedir. Alternatif gerilimlerin etkin değerlerinin ölçülmesi için girişindeki alternatif gerilimleri doğru gerilime çevirerek çıkışında gerilimin etkin değerini veren (True RMS) entegreler kullanılmıştır. şekil 3.15'te gerçekleştirilen devrenin blok yapısı gösterilmiştir.



şekil 3.15. Gerilim ölçüm sisteminin blok diyagramı

Resim 3.6'da true-rms entegreleri ile gerçekleştirilen uygulama devresi görölmektedir. Entegre çıkışlarındaki 6 faza ait gerilim sinyalleri, dsPIC'in analog girişlerine uygulanarak generatörde üretilen gerilimlerin etkin değerleri ölçölmüştür.



Resim 3.6. True - RMS entegreleri ile gerçekleştirilen devre görüntüsü

Bölüm 2.4. altında açıklanan generatörlerin paralel bağlanması aşamasında meydana gelebilecek olumsuz durumların oluşmaması için generatör gerilimlerinin eşit olması gerekmektedir. Bölüm 2’de, generatörlerde üretilen gerilimin makinenin dönme hızına bağlı olarak değiştiği verilmişti. Üretilen gerilimin frekansa bağımlı bir katsayıya bağlı olarak değiştirilmesini sağlamak için makinenin anma değerleri göz önünde bulundurularak bir V/f oranı belirlenmiştir. “Eş. 3.5” te V/f katsayısının ( $k_G$ ) hesaplanması verilmiştir.

$$k_G = V/f \quad (3.5)$$

Çalışmada kullanılan senkron generatörlerin anma gerilim değeri 220V, anma frekans değeri 50Hz’dir. Makinelerin anma değerlerine göre  $k_G$  değeri 4.4 bulunmuştur. Gerilimin referans değere sabitlenmesi için senkron generatörlerin uyarım akımlarının değiştirilmesi gerekmektedir. Generatörlerde üretilen gerilim genliklerinin değiştirilmesi için tasarlanan Cuk çeviricilerin kontrol sinyallerinin doluluk oranları değiştirilerek üretilen gerilim istenilen değere sabitlenmiştir.

Akım – gerilim algılama ünitesi üzerinde bulunan akım sensörleri ile generatörlerden çekilen faz akımları, gerilim ölçümünde kullanılan aynı yöntemle ölçülmektedir. Generatörlerin gerilim genliklerinin eşitliği sağlandıktan sonra aynı isimli fazların üst üste geldiği anın algılanarak doğru paralel bağlantının gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

### 3.3.3. Senkronizasyon anının algılanması

Generatörlerin paralel bağlanması aşamasında son kontrol edilebilir şart olan senkronizasyon anının algılanmasının gerekliliği Bölüm 2.4.5 altında verilmişti. Bu amaçla generatörlerde üretilen gerilimlerin pozitif kısımları sıfır geçiş detektörleri tarafından kare dalga biçimine getirilmiştir. Her iki generatörün de aynı isimli fazlarına ait kare dalgalar arasındaki zaman farkı dsPIC'in harici kesme kanalları kullanılarak algılanmıştır. Elde edilen zaman farkının sıfıra yakın olduğu durumlarda paralel bağlantı sağlanılarak ikinci generatörün sisteme paralel bağlanması gerçekleştirilmiştir.

### 3.4. Yük Paylaşımının Gerçekleştirilmesi

Bu bölümde tezin genel amaçlarından, senkron generatörlerde yük paylaşım durumları incelenmiştir. Generatörlerin paralel bağlantısının gerçekleşmesinden sonra generatörler arasındaki yük dağılımının belirlenmesi gerekmektedir. Aksi halde sisteme sonradan dahil olan generatör üzerine çok az miktarda veya hiç yük almayacaktır [1]. Aşağıda aktif ve reaktif yük değişim durumları incelenmiştir. Bu amaçla sistemde 3x60W omik, 3x300VAr ayarlı reaktif yük kullanılmıştır.

#### 3.4.1. Aktif yük paylaşımı

Makinenin paralel bağlanma şartlarının sağlanması sırasında boş çalışma durumunda olduğu göz önünde bulundurulursa; senkron generatör, tahrik makinesinden sadece kayıpları karşılayacak kadar bir torka ihtiyaç duyacaktır. Bu durumda üretilen elektriki güç değeri boş çalışma durumundayken sisteme dahil olacağı için sadece kayıplarını karşılamaya devam edecektir. Bu nedenle, senkron generatörler paralel bağlandıktan sonra aktif yük paylaşımının kontrollü olarak yapılması gerekmektedir. Paralel bağlı senkron generatörlerde, generatörün üzerine aktif yük alabilmesi için generatörü tahrik eden makinenin torkunun değiştirilmesi gerekmektedir [1]. “Eş.3.6” senkron generatörlerde üretilen güç-tork ilişkisini açıklamaktadır.

$$P = T \times \omega \quad (3.6)$$

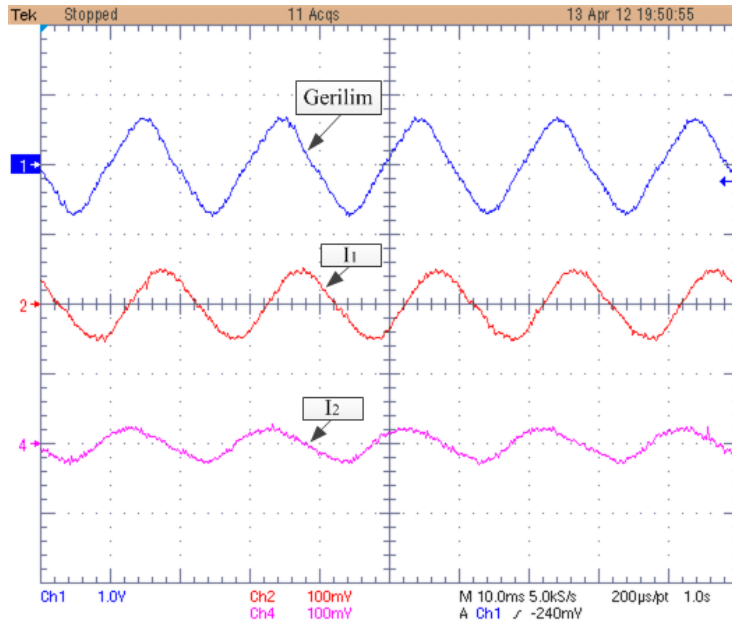
Burada;

P : Aktif güç (W)

$\omega$  : Açısal hız (rad/s)

T : Tork (Nm)

Eşitliğe göre makinede üretilen aktif gücün makine milindeki tork ile doğru orantılı olarak değiştiği görülmektedir. Generatör milindeki torku değiştirmek için tahrik makinelerinin torkunun değiştirilmesi gerekmektedir. Çalışmada generatörleri tahrik eden DA motorlarının devir sayıları artırılarak makinenin miline uygulanan mekanik kuvvetin artırılması sağlanmıştır. Tek generatörlü sistemlerde makine torku bağımsız olarak artırılmaya çalışılırsa sistem frekansında artma olacaktır [1]. Enterkonnekte sistemlerde paralel durumda bulunan generatörlerin torkları artırıldığında frekansın değişmemesi için toplam güç değerine göre bir generatörün torku artırılırken diğeri azaltılarak üretilen gerilimin frekansı sabit tutulmaktadır. Yapılan uygulama sonuçlarına göre bu durum doğrulanmış, makineyi tahrik eden DA motorlarının generatöre uyguladığı tork artırılarak makinenin üzerine aktif yük aldığı gözlenmiştir. Generatör 1 yükü beslerken generatör 2 paralel alınarak aktif yük paylaşımı incelenmiştir. Şekil 3.16'da generatör 1'in sistem gücünün %60'ını, generatör 2'nin %40'ını karşıladığını durum görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi generatör 2'den çekilen akım ( $I_2$ ), generatör 1'den çekilen akımdan ( $I_1$ ) azdır. Akımların faz eksenleri incelenecek olursa, sadece aktif yük paylaşımı yapıldığı için sistemde bulunan endüktif yükün etkisi sadece  $I_1$  akımı üzerinde görülmektedir. Etkinin  $I_1$  akımında görülmesinin sebebi sistemi paralel bağlantı gerçekleşmeden önce 1. generatörün beslemesidir.



Şekil 3.16. Yük paylaşım durumunda generatör akım ve gerilimleri

Endüktif yük bulunan sistemlerde yük paylaşımının sağlıklı olarak yapılabilmesi için reaktif yük paylaşım durumlarının da incelenmesi gerekmektedir.

### 3.4.2. Reaktif yük paylaşımı

Güç sistemlerinde aktif güç çeken yüklerin yanı sıra reaktif güç çeken yüklerde bulunmaktadır. Şebekeye bağlı motor ve balastlı floresan lamba gibi endüktif özellikli yükler şebekeden reaktif yük çekerler. Reaktif yükler kaynak geriliminden belirli bir faz farkı olan akım çekerler. Bu nedenle yük paylaşım ve kontrol aşamasında reaktif yüklerin varlığı göz ardı edilemez. Sistemden faz başına çekilen reaktif gücün hesabı için “Eş. 3.7” kullanılmıştır.

$$Q = U \times I \times \sin\phi \quad (3.7)$$

Burada;

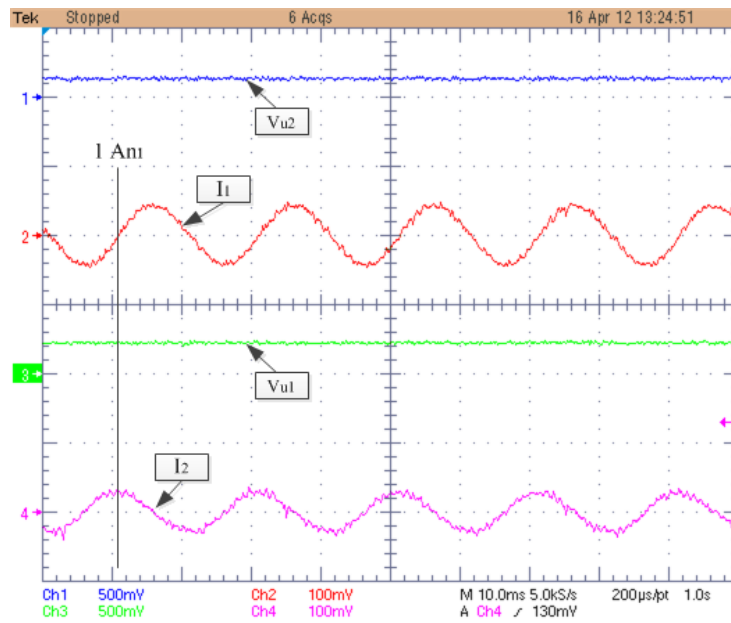
Q: Reaktif güç (Var)

U : Gerilimin etkin değeri (V)

I : Akımın etkin değeri (A)

$\phi$  : Akım ve gerilim arasındaki faz farkı

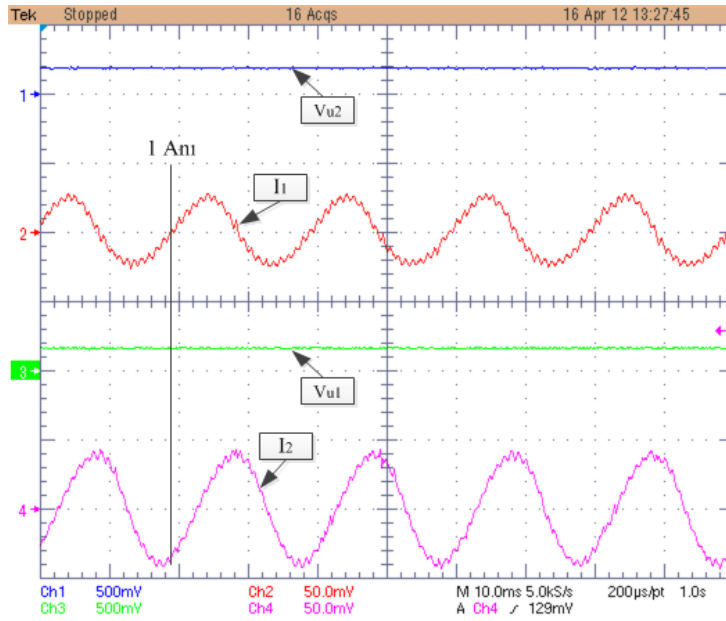
Aktif yük paylaşımının makine torku değiştirilerek sağlandığı Bölüm 3.4.1 altında verilmişti, ancak reaktif yük kontrolünde bu durum geçerli değildir. Senkron generatörlerde makine üzerine alınan reaktif yük, makinenin kutup sargılarına uygulanan doğru gerilim ile değiştirilmektedir [1]. Paralel bağlı senkron generatörlerde reaktif yük kontrolünün gerçekleştirilmesi için generatör uyarım akımının kontrol edilebilir bir yapıya sahip olması gerekmektedir. Makinelerin uyarım akımları DA/DA çeviriciler ile kontrol edilerek makinelerde reaktif yük paylaşımı gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.17’de generatör uyarım gerilimleri ve reaktif yük dağılımları görülmektedir.



Şekil 3.17. Generatör 1’in reaktif yüklü olduğu durum

Şekil 3.17’de 1 anı incelenilecek olunursa; generatör 1’den çekilen akımın ( $I_1$ ) generatör 2’den çekilen akımdan ( $I_2$ ) geride olduğu görülmektedir. Paralel bağlantıdan sonra kaynak gerilimlerinin aynı fazlı olduğu düşünülürse generatör 1’den, generatör 2’ye göre daha fazla reaktif yük çekildiği söylenebilir. 1. generatörün uyarım gerilimi ( $V_{u1}$ ) azaltılarak üzerine aldığı reaktif yükü generatör 2’ye aktarması sağlanabilir. Ancak bu durumda yükü besleyen gerilimde azalma olacaktır. Tersi şekilde generatör 2’nin uyarım gerilimi ( $V_{u2}$ ) artırılarak üzerine

reaktif yük alması sağlanabilir. Bu kontrol tekniğinde ise çıkış geriliminde artma olacaktır. Enterkonnekte şebekelerde çıkış geriliminin değişmesi alıcılar üzerinde oluşacak olumsuz etkilerden dolayı istenmemektedir. Gerilim kararlılığının korunması açısından generatörlerden birinin uyartım gerilimi artırılırken diğeri azaltılarak gerilim sabitlenebilir [1]. Şekil 3.18’de yüke uygulanan gerilim seviyesi sabit tutularak generatör 2’nin üzerine reaktif yük alması sağlanmıştır.



Şekil 3.18. Generatör 2’ye reaktif yük aktarıldığı durum

Şekil 3.17 ve Şekil 3.18 karşılaştırılacak olursa;  $V_{u1}$  azaltılıp  $V_{u2}$  artırılarak generatör 2’nin üzerine reaktif yük alması sağlanmıştır. 1 anında  $I_1$  akımının  $I_2$ ’ye göre ilerde olduğu görülmektedir. Bu durumda generatör 2’nin generatör 1’e göre daha fazla reaktif yüklendiği söylenebilir.

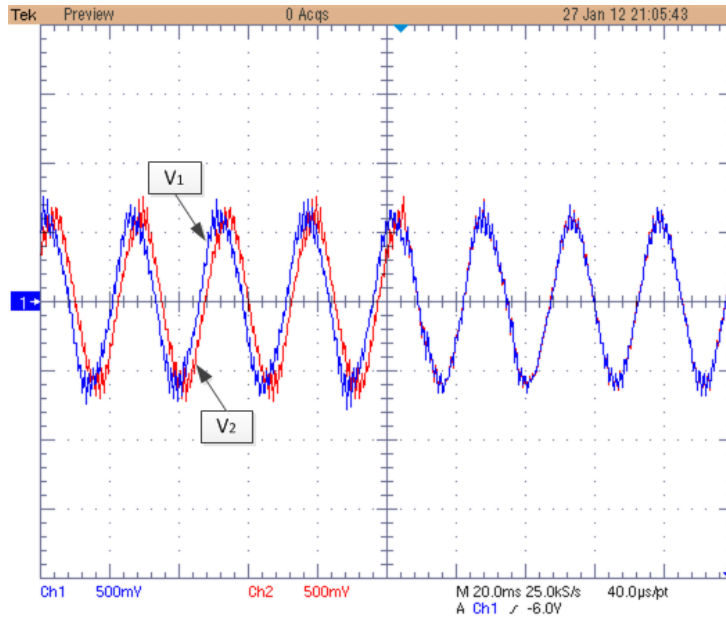
Bu bölümde, generatörlerin paralel bağlanma şartlarının algılanması ve kontrolü için gerçekleştirilen donanımsal ve yazılımsal altyapı açıklanmıştır. Ayrıca yük paylaşımının gerçekleştirilmesi aşamasında, aktif ve reaktif yük durumları incelenmiş, enerji üretim sistemlerinde aktif yük paylaşımının yanı sıra reaktif yük paylaşımının da yapılmasının zorunluluğu vurgulanmıştır. Aktif yük paylaşımının generatör torku değiştirilerek, reaktif yük paylaşımının ise generatörlerin uyartım

akımlarının değiştirilerek sağlandığı açıklanmıştır. Uygulama aşamasında aktif ve reaktif yük durumları göz önünde bulundurularak yük kontrolü gerçekleştirilmiştir.

#### 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Önceki bölümlerde, senkron makineler hakkında teorik bilgiler, senkron generatörlerin paralel bağlanması hakkında teorik bilgiler ve geliştirilen uygulamanın yazılım ve donanım altyapısı verilmiştir. Bu bölüm altında sistemin çalıştırılması ve test edilmesi aşamasında elde edilen deneysel sonuçlar sunulmuş ve bu sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır.

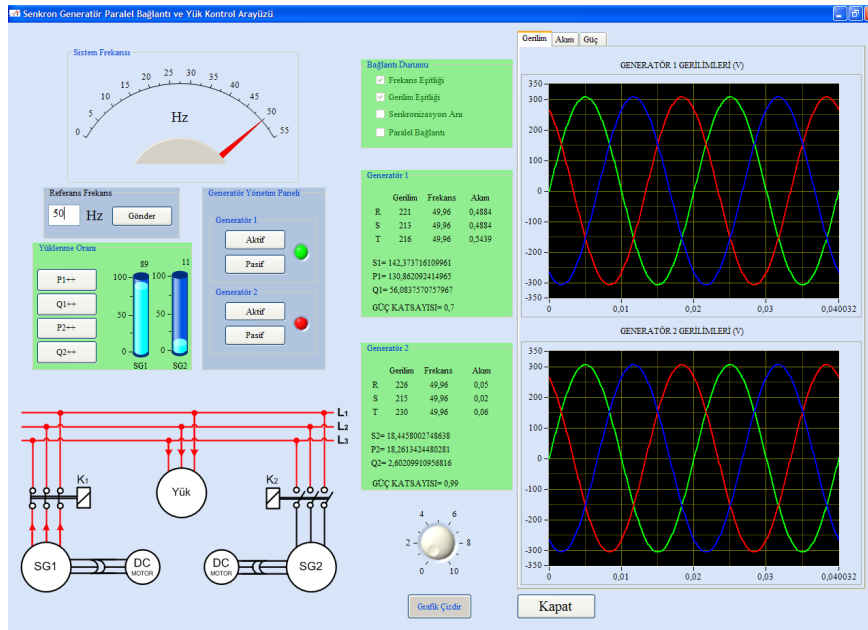
Tez çalışmasında öncelikle istenilen frekans değerinde paralel bağlantının gerçekleştirilmesine uygun donanım ve yazılım altyapısı geliştirilmiştir. Uygulama aşamasında senkron generatörlerde üretilen gerilimin frekans, genlik ve sıfır anlarını kontrol edecek donanımsal yapılar geliştirilmiştir. Frekans ve sıfır anlarının algılanması için sıfır geçiş devreleri, gerilim genliklerinin algılanabilmesi için gerilim algılama sistemleri tasarlanmıştır. Paralel bağlanılacak senkron generatörlerin frekansları arasındaki fark %0.8'e kadar, gerilimleri arasındaki fark %15'e kadar kabul edilebilmektedir [2,29]. Tez çalışmasında standartlardaki maksimum fark sınırları göz önünde bulundurularak, generatörlerde üretilen gerilim değerleri maksimum %2, frekans değerleri maksimum %0.8 hata ile eşitlenmiştir.



Şekil 4.1. Paralel bağlanma anı

Generatörlerin faz sıralarının aynı olması durumu faz sırası röleleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Generatörlerin 40 Hz'deki paralel bağlanma anı Şekil 4.1'de görülmektedir.

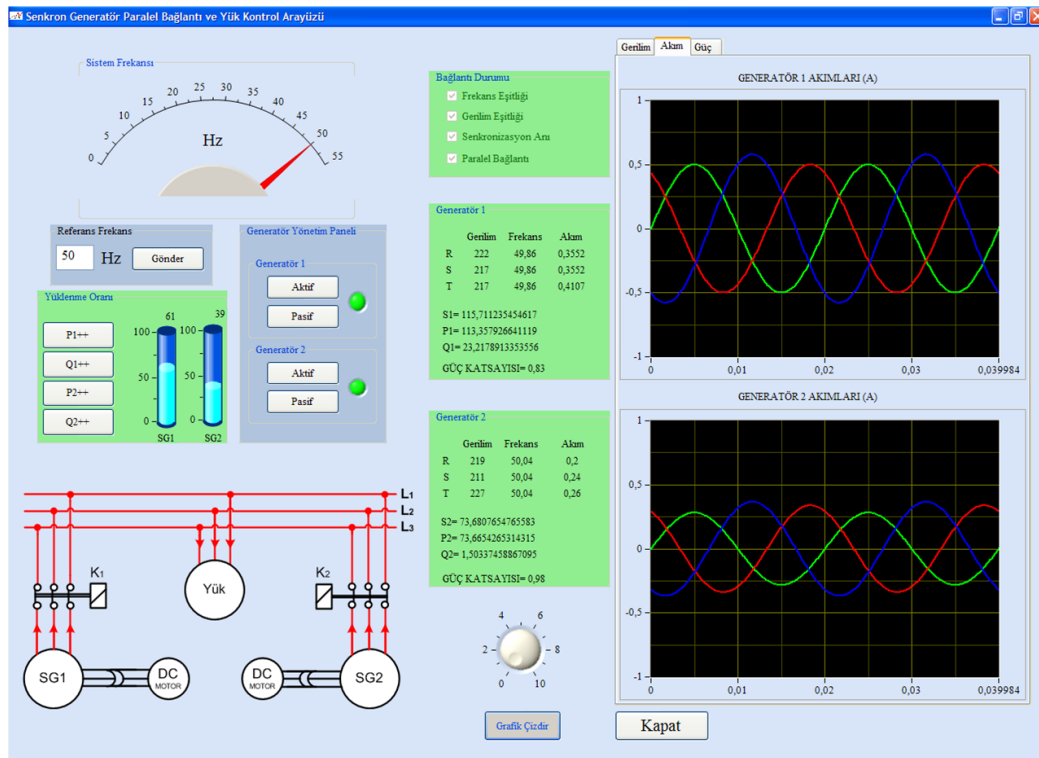
Paralel bağlanma anı iki gerilimin de aynı faza geçtiği andır. Generatör 1'de üretilen gerilim ( $V_1$ ) ile generatör 2'de üretilen gerilim ( $V_2$ ) arasındaki zaman farkı belirlenen tolerans değerinin altına düştüğü anda paralel bağlantı gerçekleştirilmiş ve ikinci generatör sisteme dâhil edilmiştir. Paralel bağlanma sistemi değişik frekans değerleri altında test edilmiş ve 35-50 Hz arasında istenilen herhangi bir frekans değerlerinde paralel bağlantı sağlıklı olarak gerçekleştirilmiştir. 35 Hz'den daha düşük frekanslarda üretilen gerilim seviyesinin algılama ünitesinde düşürülmesi sebebi ile sistem parametreleri algılanamamaktadır. Paralel bağlantı şartları sağlanırken sistemin gerilim ve frekans değerleri anlık olarak seri port aracılığı ile bilgisayar arayüzüne aktarılmaktadır. Bilgisayar arayüzüne aktarılan gerilim ve frekans değerlerine göre sistem akım ve gerilimindeki değişimler istenirse anlık olarak grafiksel ortamda izlenebilmektedir. Şekil 4.2'de paralel bağlanma şartları sağlanılırken grafiksel ekranda değişimlerin izlenmesi görülmektedir.



Şekil 4.2. Paralel bağlanma şartları sağlanılırken grafiksel ekranın gösterilmesi

Şekil üzerinde “Bağlantı Durumu” isimli kutucuk incelenirse, paralel bağlantı şartlarından frekans ve gerilim eşitliğinin sağlandığı görülmektedir. Bu anda sistem diğer şartları sağlanmak için çalışmaya devam etmektedir.

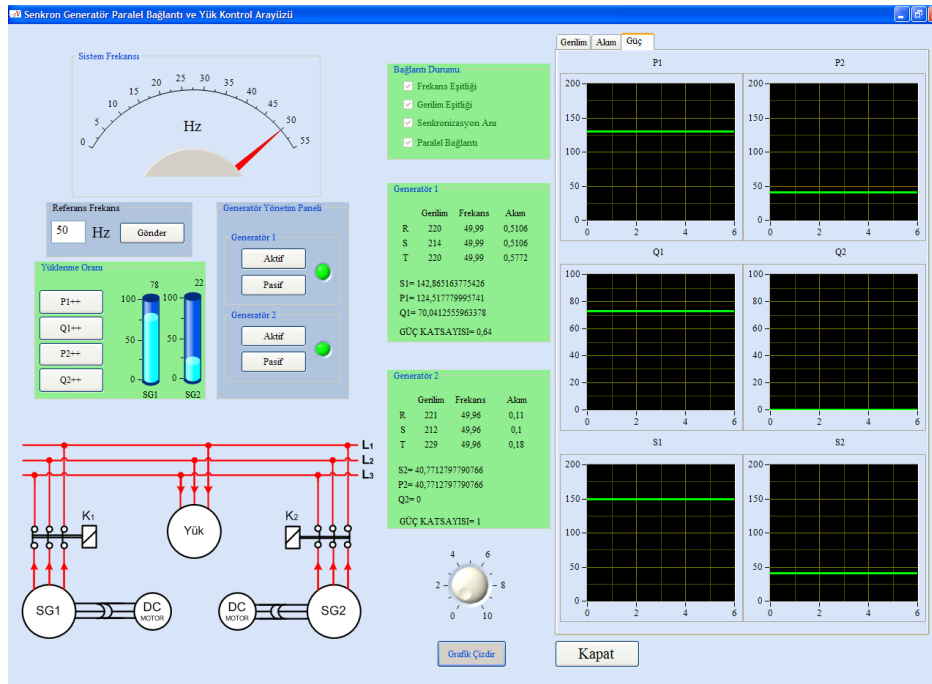
Paralel bağlanma işlemi tamamlandıktan sonra yük değişim durumları ve diğer sistem parametrelerinin sayısal olarak ve grafiksel olarak arayüz üzerinden izlenmesi sağlanmıştır. Denetleyicide hesaplanan akım ve güç değerleri bilgisayara gönderilerek seri port aracılığı ile alınan bilgiler arayüze aktarılmıştır. Arayüze aktarılan akım bilgileri akım bölümü altında grafiksel olarak incelenmektedir. Şekil 4.3’de grafiksel olarak akım eğrileri gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Akımların grafiksel gösterimi

Generatörlerden çekilen güç değerleri grafiksel olarak Şekil 4.4’te görülmektedir. Generatörlerden çekilen aktif güçler (P1 ve P2), reaktif güçler (Q1 ve Q2) ve görünür güçler (S1 ve S2) ayrı ayrı gösterilerek generatörlerin yüklenme durumları izlenebilmektedir. Şekil 4.4’te paralel bağlantı sonrası yük paylaşımı yapılmamış durumdaki güç grafikleri görülmektedir. Bu nedenle generatör 2’nin güç değerleri

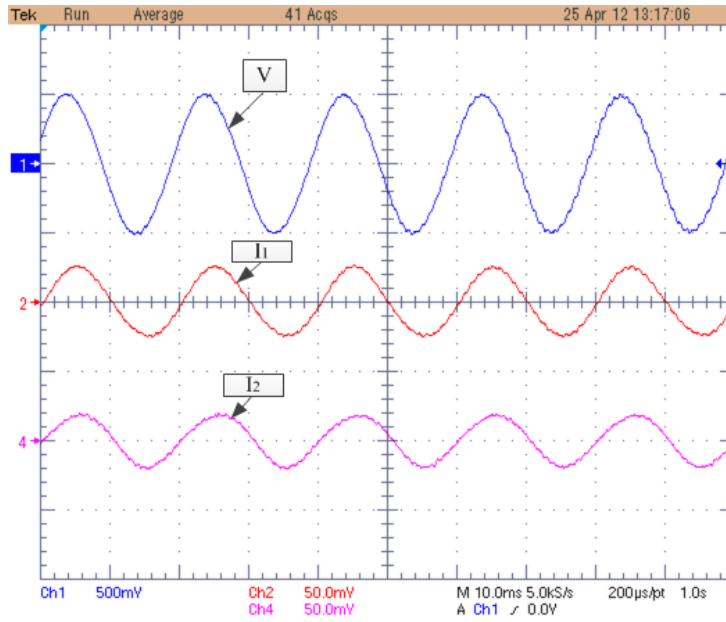
çok küçüktür. Paralel bağlantıdan önce (Şekil 4.2) ve sonra (Şekil 4.4) sistemin devre şekilleri incelenecek olursa, sistemde 1. generatör yük altında çalışırken 2. generatör sisteme dâhil edilmiştir. 2. generatörün paralel bağlanması ile  $K_2$  kontaktörü kapanmıştır. Uygulama aşamasında gerçekleşen bu durum grafiksel ortama taşınarak grafik üzerinden uygulama aşamasındaki tüm değişimlerin gözlenmesi sağlanmıştır.



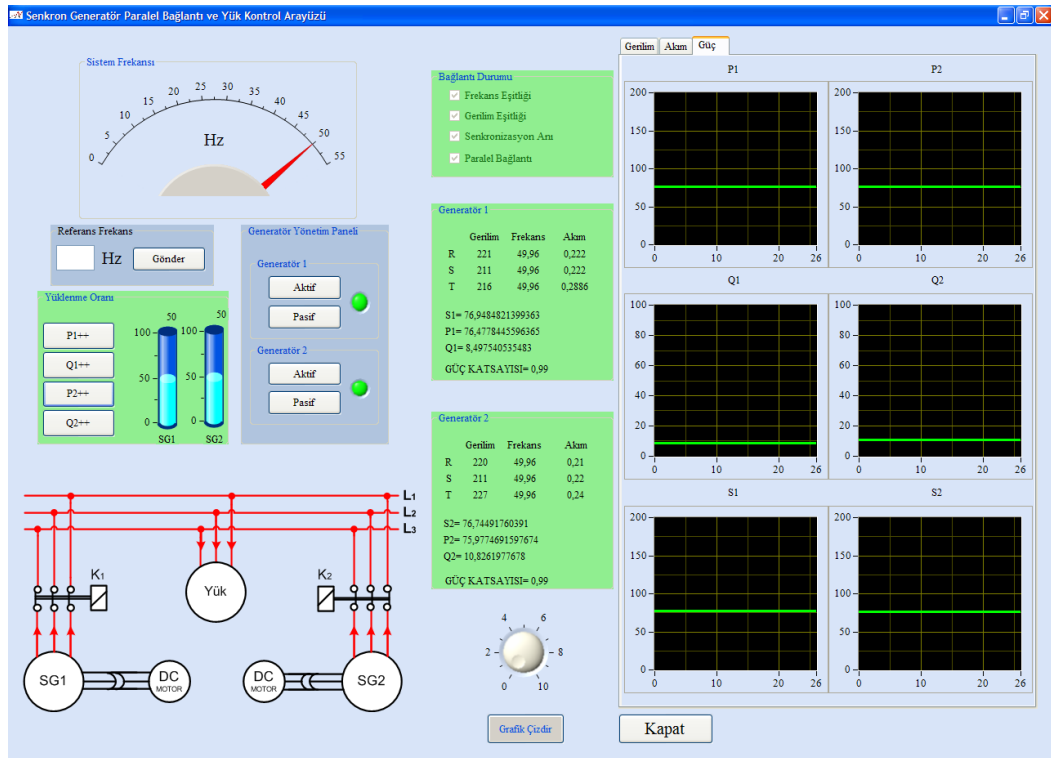
Şekil 4.4. Güç eğrilerinin grafiksel olarak incelenmesi

Paralel bağlantı aşamalarının gerçekleştirilmesinin ardından generatörlerin yüklenme oranları Bölüm 3 altında verilen aktif ve reaktif yük paylaşım durumları göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmiştir.

Oluşturulan uygulama setinde farklı değerlerdeki aktif ve reaktif yük paylaşım durumları incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda aktif ve reaktif yük kontrolü, kontrol butonları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.5 (a)'da generatörlerin aktif ve reaktif yükleri yarı yarıya paylaştıkları durumda akım ve gerilim eğrileri, Şekil 4.5 (b)'de bu durumdaki arayüz görüntüsü verilmiştir.



(a)

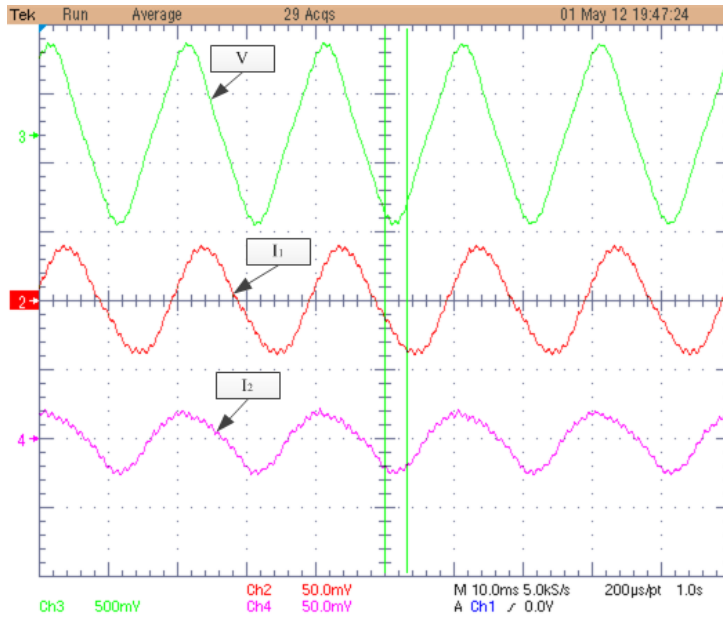


(b)

Şekil 4.5. Yük paylaşımının eşit olduğu durumda a: gerilim (V) ve akım ( $I_1 - I_2$ ) eğrileri, b: Arayüz görüntüsü

Şekilde akım eğrileri incelenilecek olursa, 1. generatörden çekilen akım ( $I_1$ ) ile 2. generatörden çekilen akımın ( $I_2$ ) eşit ve sistemde reaktif güç paylaşımı yapıldığından gerilim ile aralarındaki faz farklarının aynı olduğu görülmektedir. Sistemde yük paylaşımı %4 hata ile gerçekleştirilmiştir. Bu hata kabul edilebilir sınırlar içerisinde olup sebebi algılama ve ölçüm ünitelerinin hassasiyetidir.

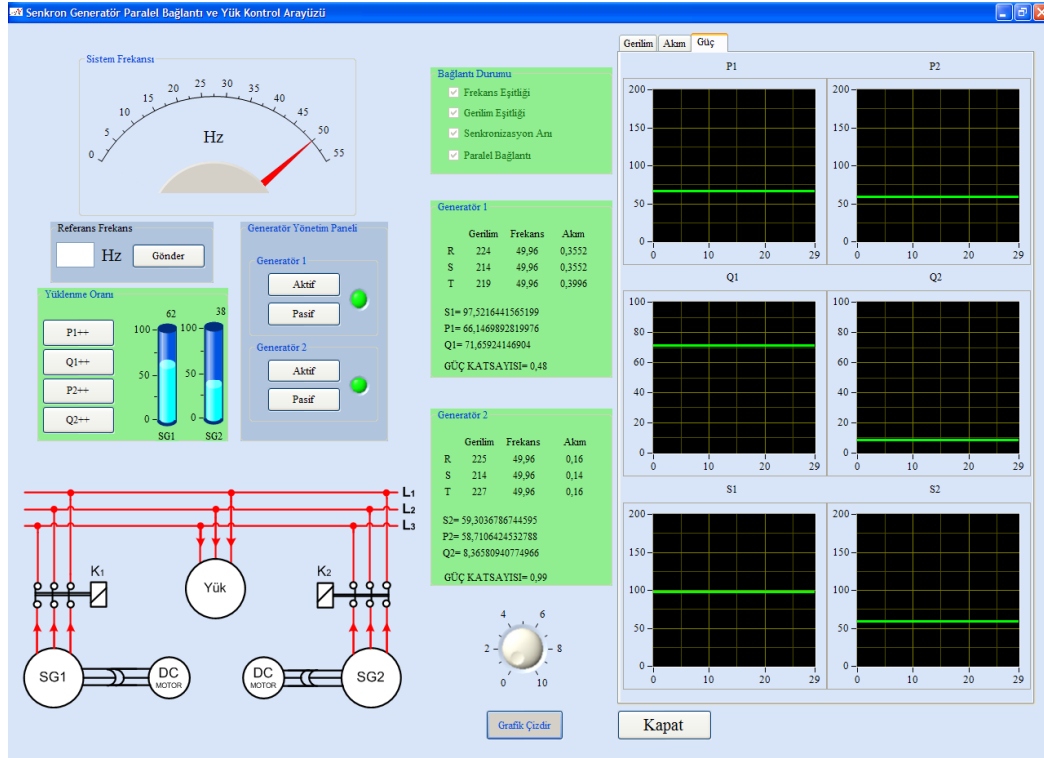
Şekil 4.6'da 1. generatörün sistem gücünün %62'sini, 2. generatörün %38'ini karşıladığı andaki akım ve gerilim eğrileri görülmektedir. Bu durumdaki bilgisayar arayüzünün görüntüsü Şekil 4.7'de verilmiştir. Gerek grafiklerde gerekse de kullanıcı arayüzündeki sayısal değerlerde görüldüğü gibi generatör 1 toplam görünür gücün 97VA'ini karşılarken generatör 2, 59VA'ini karşılamaktadır. Aynı şekilde toplam aktif gücün 66W'ını generatör 1, 58W'ını generatör 2 ve toplam reaktif gücün 71VAR'ını generatör 1, 8VAR'ını generatör 2 karşılamaktadır. Sistemde reaktif yük paylaşımı aktif yük paylaşımından bağımsız olarak gerçekleştirilebildiği için bu deneysel çalışmada 1. generatör üzerinde daha fazla reaktif yük almıştır.



Şekil 4.6. Generatörlerin yük paylaşım durumundaki akım – gerilim eğrileri

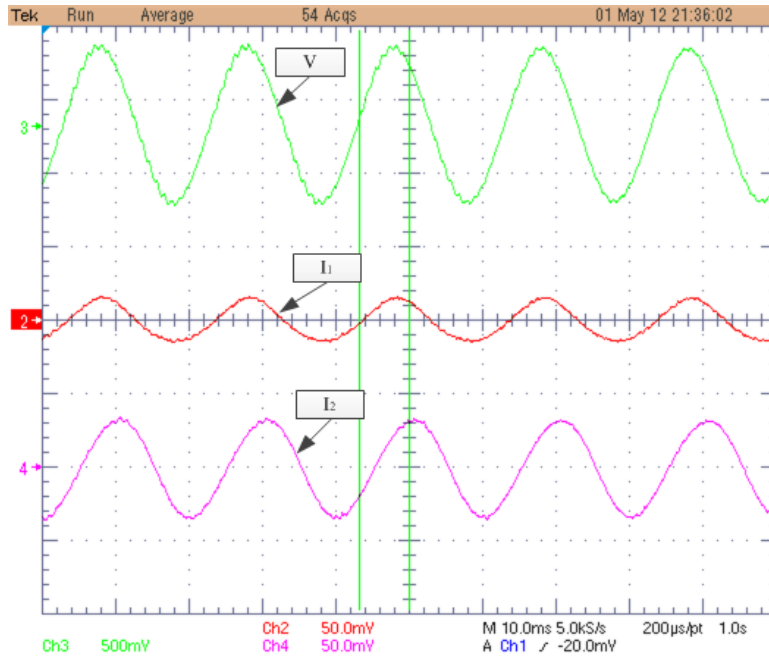
Şekil 4.6 ve Şekil 4.7'de görüldüğü gibi generatör 1'den karşılanan enerjinin güç katsayısı 0,48, generatör 2'den çekilen enerjinin güç katsayısı 0,99'dur. Bu sonuç

sistemde aktif ve reaktif gücün bağımsız olarak kontrol edilebildiğini kanıtlamaktadır. Deneysel çalışmada generatör 1'in yüklenme oranı daha fazla olduğu için, Şekil 4.6'da 1. generatörün akımının 2. generatörün akımına göre daha fazla olduğu görülmektedir.

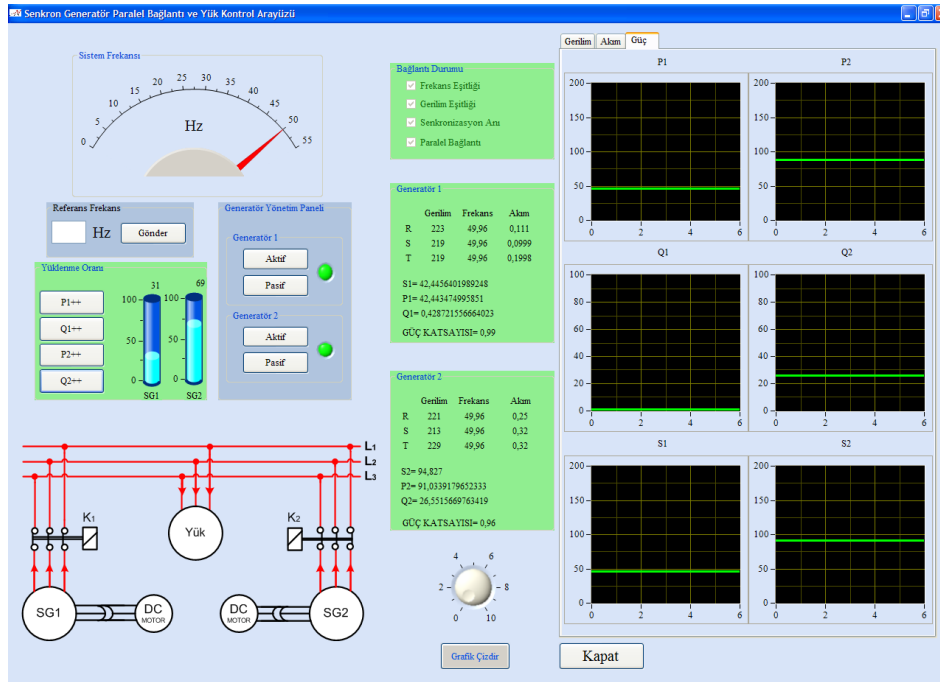


Şekil 4.7. Generatörlerin yük paylaşım durumundaki arayüz görüntüsü

Sistem gücünün %31'i birinci generatörden, %69'i ikinci generatörden karşıladığı durumdaki akım ve gerilim dalgaları Şekil 4.8'de görülmektedir. Bu durumdaki arayüz görüntüsü ise Şekil 4.9'da verilmiştir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi, 2. generatör yükün %61'ini üzerine almıştır. Bu nedenle,  $I_2$  akımı,  $I_1$  akımından fazladır. Bu durumdaki şekil ve arayüz görüntüsü incelenecek olursa, generatör 1 toplam görünür gücün 42VA'ini karşılarken generatör 2, 94VA'ini karşılamaktadır. Aynı şekilde, toplam aktif gücün 42W'ını generatör 1, 91W'ını generatör 2 karşılamaktadır. Bu deneysel çalışmada, reaktif yükün tamamı generatör 2'ye aktarılmıştır. Bu sonuç, Bölüm 3.4'te teorik olarak açıklanan aktif ve reaktif yük paylaşımlarının farklı yüklenme oranlarında kararlı ve doğru bir şekilde gerçekleştirildiğini kanıtlamaktadır.



Şekil 4.8. İkinci generatörün fazla yüklendiği durumdaki akım – gerilim eğrileri



Şekil 4.9. İkinci generatörün fazla yüklendiği durumdaki arayüz görüntüsü

Bu bölümde, generatörlerin paralel bağlanması ve yük kontrolünün sağlanması için tasarlanan sistem, farklı yük paylaşım durumlarında incelenmiştir. Sistemin paralel bağlanma şartlarının sağlanması aşamasında arayüz kısmında izlenebilen grafiksel ve

sayısal veriler gösterilerek sistem performansı değerlendirilmiştir. Generatörlerin yük paylaşım durumlarının incelenmesi yapılarak farklı yüklenme oranları deneysel olarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen akım gerilim grafikleri verilmiştir. Deneysel sonuçlar, hem sisteme bağlı bir osiloskoptan elde edilen gerçek zamanlı görüntüleri hem de bilgisayar arayüzündeki grafiksel görüntüler eşliğinde verilerek tasarlanan arayüzün doğrulanması sağlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar ve sonuçların analizi neticesinde sistemin optimum kararlılıkta, hızlı ve başarılı bir şekilde çalıştığı gözlenmiştir.

## 5. SONUÇLAR

Enerji ihtiyacının artması ve generatörlerin bakım sırasında enerji sürekliliğinin sağlanması için enterkonnekte sistemler kullanılmaktadır. Enterkonnekte sistemler birden fazla enerji üretim merkezini barındıran ve tek hat üzerinden alıcıların beslenmesini sağlayan sistemlerdir. Günümüzde yüksek güçlü enerji sistemlerinde enterkonnekte şebekeler kullanılmaktadır. Enterkonnekte sistemlerde, enerji ihtiyacının artması veya generatörlerden birinin bakıma alınması durumunda enerji sürekliliğinin sağlanması için enerji hattına paralel bir generatör bağlanmaktadır. Enerji hattına paralel bağlanacak generatörün mevcut şebeke şartlarına uyum sağlaması gerekmektedir.

Bu çalışmada öncelikle, senkron generatörlerin paralel bağlanma şartları incelenerek bu şartların sağlanması için gerekli donanımsal altyapı tasarlanmıştır. Bu amaçla geçmişte yapılan paralel bağlama sistemleri ve yük kontrol sistemleri incelenerek çalışmalarla ilgili özet bilgiler verilmiştir. İncelenen çalışmalarda kullanılan yöntemler ve karşılaşılabilecek sorunlar analiz edilerek bu sorunların giderilmesi amaçlı çalışmalar yapılmıştır. Paralel bağlantı sağlanmadan önce generatörlerde üretilen gerilimlerin genliklerinin, frekanslarının, faz sıralarının, senkronizasyonunun hızlı ve doğru tespit edilmesi paralel bağlantı sırasında oluşabilecek hataları minimuma indirgeyecektir. Bu amaçla, çalışmada PIC, PLC gibi denetleyicilere göre daha hızlı ve kararlı çalışan dsPIC mikrodenetleyicisi kullanılarak sistem parametrelerinin hızlı ve hassas algılanması sağlanmıştır.

Paralel bağlanma şartlarının sağlanması ve kontrolü aşamasında kullanılan mikrodenetleyici için C dilinde yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılımda özgün mikrodenetleyici kütüphaneleri kullanılarak kod kalabalığı ve gereksiz modüllerin kullanılması engellenmiştir. Böylece esnek çalışma yapısına sahip bir mikrodenetleyici yazılımı geliştirilmiştir. Mikrodenetleyici ve bilgisayar arayüzü arasında seri iletişim kanalları ile bağlantı sağlanılarak ölçülen analog ve dijital bilgilerin bilgisayar ortamına aktarılması sağlanmıştır. Bilgisayar ortamına aktarılan sistem parametrelerinin izlenmesi ve kontrolü için bir kullanıcı arayüzü

geliştirilmiştir. Arayüz üzerinden sistem frekansının belirlenmesi sağlanarak bilgisayar kontrollü bir güç sistemi uygulaması yapılmıştır. Ayrıca, paralel bağlanma aşamaları adım adım arayüze aktarılarak sistemdeki değişimlerin anlık olarak izlenmesi mümkün olmuştur. Böylece paralel bağlanılacak generatörün şartları sağlayıp sağlayamadığı ve eksik olan şartların belirlenmesi sağlanılmıştır. Arayüz üzerinde yük altında bulunan generatör ve güç akışı gösterilerek hangi generatörün sistemi beslediği veya hangi generatörün paralel durumda bulunduğu görsel olarak takip edilebilmektedir.

Paralel bağlantı sağlandıktan sonra, devreye sonradan giren generatör üzerine yük almayacaktır. Bu aşamada, generatörlerin yüklenme durumları arayüz üzerinden belirlenerek devreye sonradan giren generatörün istenilen oranda yük alması sağlanmaktadır. Sistemin aktif yük paylaşımlarını sağlamak için tahrik makineleri yüksek devir aralıklarında kontrol edilerek yük değişim aralığının kısıtlanması engellenmiştir. Ayrıca bu kontrol sistemi ile makinelere uygulanan düşük DA gerilimlerde dahi sistem frekansı istenilen değerlere getirilmiştir. Deneysel çalışmalar esnasında aktif ve reaktif yükler kullanılarak sistemin değişik yükler altındaki tepkisi incelenmiştir. Reaktif yük değişimleri senkron makinelerden çekilen akımların, güç katsayıları eşitlenerek gerçekleştirilmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Yük değişim durumları bilgisayar arayüzünde grafiksel ve sayısal olarak takip ve kontrol edilebilmektedir.

Arayüz ekranında sistemin akım ve gerilim değerleri de sayısal ve grafiksel olarak gösterilmektedir. Ayrıca grafiksel bölgedeki değişimlerin daha iyi izlenebilmesi için grafik ekranının gösterim süresi artırılıp azaltılabilmektedir. Sistemde, bakım ve arıza gibi durumlardan kaynaklı generatörlerden birinin devreden çıkarılması gerekebilir. Bu durumda, arayüz üzerindeki yönetim panelinden generatörlerin devre dışı bırakılması sağlanabilmektedir.

Kontrol aşamasında, arayüz üzerinde yapılan değişiklikler hızlı ve doğru bir şekilde mikrodenetleyiciye gönderilerek sistemin tepki süresi kısaltılmıştır. Güç sistemlerinde meydana gelebilecek kısa devre, aşırı akım, gerilim yükselmesi gibi

durumların bilgisayar ortamından izlenmesi sağlanarak arıza tespiti için altyapı oluşturulmuştur.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde paralel bağlı generatörlerin yük değişim durumları kullanıcıların tahrik sistemlerini haricen kontrol etmesi ile gerçekleştirilmiştir. Kullanıcı kontrollü sistemlerde kişilerin dikkatsiz davranması, ölçüm hataları ve yetersiz tecrübe tüm şebeke üzerinde etkisini gösterecek olumsuz durumlar doğurmaktadır. Bu çalışmada, bilgisayar arayüzü üzerinden girilen yük paylaşım oranlarına göre sistem yüklenme oranlarını ayarlayarak generatörler arasındaki yük dağılımlarını mikrodenetleyici üzerinden gerçekleştirmektedir. İnsan kontrollü yük paylaşım sistemlerinde, yük değişiminin hızlı yapılamaması enerji üretim merkezlerindeki generatörlerin aşırı yüklenmesi ve buna bağlı olarak gerilim çökmesi, frekansın değişmesi gibi olumsuz durumları beraberinde getirmektedir. Bu çalışmada yüksek frekanslı çalışan güç elektroniği çeviricileri kullanılarak yük paylaşımının hızlı ve minimum hata ile yapılması sağlanmıştır.

Donanım ve yazılım altyapısında esnek programlama dilleri, özgün kütüphaneler ve sistem parametrelerine göre uyarlanabilir devre tasarımları kullanılması ile sistemin farklı enerji sistemleri altında kullanılabilirliği arttırılmıştır. Ayrıca ana kontrolör olarak kullanılan dsPIC'in, PLC gibi elamanlara göre maliyetinin daha az olması, PIC mikrodenetleyicilerine göre daha hızlı ve yüksek çözünürlüklü olarak çalışması sistemin kullanılabilirliğini ve güvenilirliğini arttırmıştır.

Sonuç olarak sunulan bu tez çalışması ile özellikle literatürde çok sık rastlanılmayan bilgisayar kontrollü ve izlemeli otomatik paralel bağlanma ve yük paylaşım sistemleri için oldukça hızlı ve kararlı çalışabilen bir donanım ve yazılım altyapısı gerçekleştirilmiş ve başarıyla uygulanmıştır. Sistemde ileride yapılabilecek geliştirmelerle yüksek hızlı ve kararlı çalışan bir arıza tespit sistemi eklenebilir. Fakat yük değişimi ve paralel bağlanma aşamalarında mekaniksel değişimler yapılması gerektiği için ulaşılabilecek maksimum seviye makinelerin tepki hızlarıyla sınırlı kalacaktır. Ayrıca sistem üzerinde, generatörlerin devre dışı bırakılması sırasında oluşabilecek şebeke geriliminin düşmesi ve diğer generatörlere ani

yüklenme gibi olumsuz durumların kontrolü üzerine çalışmalar da yapılabilir. Çalışma üzerinde geliştirilecek yeni uygulamalar, yazılım aşamalarında esnek programlama dilleri kullanıldığı için kolaylıkla sisteme eklenebilecektir.

## KAYNAKLAR

1. Çolak, İ., “Senkron Makineler”, *Gazi Üniversitesi*, Ankara, 2003
2. Garip, İ., “Alternatörlerin Otomatik Paralel Bağlanması İçin Eğitim Amaçlı Bir Deney Setinin Geliştirilmesi ve Etkinliğinin Değerlendirilmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2008).
3. Çolak, İ, Yılmaz, E. N., “Simulation of the Parallel Connection of Electrical Power Stations”, *Int. J. Elect. Enging. Educ.*, 36 : 332–341 (1999).
4. Tamrakar, I., Shilpakar, L.B., Fernandes, B.G., Nilsen, R., “Voltage and frequency control of parallel operated synchronous generator and induction generator with STATCOM in micro hydro scheme”, *Generation, Transmission & Distribution IET* , 1(5) : 743-750(2007).
5. Bekiroglu, E., Bayrak, A., “Automatic synchronization unit for the parallel operation of synchronous generators” *EUROCON 2009*, Tshwane - South Africa, 766-771 (2009).
6. Bekiroğlu, E., Bayrak, A., “On-line educational tool for the parallel operation of the synchronous generators”, *Computer Applications in Engineering Education*, 19 (4) : 669-677 (2011).
7. Amin, M.M.N., Mirafzal, B., Mohammed, O., “A dc-bus voltage regulation for parallel wind-based synchronous generators”, *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Miami, FL, USA, 3161-3166 (2010).
8. Pican, E., Omerdic, E., Toal, E., Leahy, M., “Direct interconnection of offshore electricity generators”, *Energy*, 36 (3), 1543-1553 (2011).
9. Goel, P.K., Singh, B., Murthy, S.S., Tiwari, S.K., “Parallel Operation of Permanent Magnet Generators in Autonomous Wind Energy Conversion System”, *Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2010 IEEE* , India, 1-8 (2010).
10. Xiaoping Tu, Dessaint, L.-A., Fallati, N., Bruno De Kelper, “Modeling and Real-Time Simulation of Internal Faults in Synchronous Generators With Parallel-Connected Windings”, *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , 54 (3) :1400-1409 (2007).
11. Quinonez-Varela, G., Cruden, A., “Development of a Small-Scale Generator Set Model for Local Network Voltage and Frequency Stability Analysis” *Energy Conversion, IEEE Transactions on* , 22 (2) : 368-375 (2007).

12. Liu, W., Ding R., Wang, Z., “Integrated optimal control of speed, excitation and load sharing of parallel operating diesel generator sets” *Advances in Power System Control, Operation and Management, 1993. APSCOM-93., 2nd International Conference on*, Beijing , 142-146 (1993).
13. Wang, X., Chai, J., Wang, Z., “Research on parallel operation characteristics of variable frequency synchronous-motor-generator (SMG)” *Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on*, 1, 72- 75 (2005).
14. Miri, A.M., “Transient angular stability of three parallel connected synchronous generators with large load changes and control of active and reactive power”, *Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2008. OPTIM 2008. 11th International Conference on* , Karlsruhe ,.131-136 (2008).
15. Moura, F.A.M., Camacho, J.R., Resende, J.W., Mendes, W.R., “Synchronous generator, excitation and speed governor modeling in ATP-EMTP for interconnected DG Studies”, *Electrical Machines, 2008. ICEM 2008. 18th International Conference on* , Uberlandia , 1-6 (2008).
16. Qing-Chang Zhong, Weiss, G., “Static synchronous generators for distributed generation and renewable energy”, *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE '09. IEEE/PES* , Liverpool , 1-6 (2009).
17. Gawande, S.P., Porate, K.B., “Review of Parallel Operation of Synchronous Generator and Induction Generator for Stability”, *Emerging Trends in Engineering and Technology (ICETET), 2009 2nd International Conference on* , India, 716-721, (2009).
18. Zhong, Q-C., Weiss, G., “Synchronverters: Inverters That Mimic Synchronous Generators," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , 58 (4) : 1259-1267 (2011).
19. Sao, C., Lehn, P.W., “Autonomous load sharing between converters and generators in microgrids”, *Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE* , Sweden,1-8, (2011).
20. Korkua, S.K., Kenarangui, R., “Control Strategy for Load Sharing in Distributed Generation System in Parallel Operation”, *Green Technologies Conference, 2010 IEEE* , USA , 1-5 (2010).
21. Vandoorn, T. L., Meersman, B., De Kooning, J. D. M., Vandeveldel, L., “Directly-Coupled Synchronous Generators With Converter Behavior in Islanded Microgrids”, *Power Systems, IEEE Transactions on* , 99 : 1 - 12 (2012).

22. Vilar, Z.W., Dougal, R.A., “Load Following Ability of a Ship Generating Plant Comprising a Mixed Set of High-Speed and Synchronous Turbo-Generators”, *Electric Ship Technologies Symposium, 2007. ESTS '07. IEEE*, Columbia, 335-339 (May 2007).
23. Majumder, R., Ghosh, A., Ledwich, G., Zare, F., “Power sharing and stability enhancement of an autonomous microgrid with inertial and non-inertial DGs with DSTATCOM”, *International Conference on Power Systems, 2009. ICPS '09*, Avustralya , 1-6 (2009).
24. Oliveira, R.R., Rocha, C.A.L., Delaiba, A.C., Oliveira, J.C., Belchior, F.N., “Three-Phase Synchronous Generators Performance with Unbalanced and Non-Linear Loading - Analytical and Experimental Analysis”, *Industrial Electronics, 2006 IEEE International Symposium on* , Caldas Novas, 1744-1749,(2006).
25. Conroy, J.F., Watson, R., “Frequency Response Capability of Full Converter Wind Turbine Generators in Comparison to Conventional Generation”, *Power Systems, IEEE Transactions on* , 23 (2), 649-656 (2008).
26. Mohan, N., Robbin, W. P., and Undeland, T., “Power Electronics Converters, Applications, and Design,” 2nd ed. New York Wiley, 1995.
27. dsPIC333FJ128GP710 Data Sheet, *Microchip*, 2010.
28. Irmak, E., Çolak, İ., Kaplan, O., Güler, N., “Design and application of a novel zero-crossing detector circuit”, *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, Malaga, 1-4 (2011).
29. Kundu, D., “Technical requirements to connect parallel generators to the Ontario Hydro distribution electricity system”, *Transactions on Energy Conversion IEEE*, 7 (1), 8-14 (1992).
30. Çolak, I., Irmak, E., Güler, N., Issı, F., “Remote Monitoring and Reporting the Parameters of A Hybrid Power System via Internet”, *EVER'12*, Monaco (2012).
31. Irmak, E., Çolak, İ, Güler, N., Calpbinici, A., “FPGA Based Parallel Connection System of Separate Voltage Sources Using Cuk Converters”, *Spedam 12*, Kabul edildi, Italya (2012).
32. Irmak, E., Güler, N., Calpbinici, A., “Orta ölçekli bir işletmenin enerji izleme sisteminin tasarlanması”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Kabul edildi (2012).

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : GÜLER, Naki  
 Uyuşu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 01.12.1986 Ankara  
 Medeni hali : Bekâr  
 Telefon : 0 (506) 387 41 21  
 e-mail : [nakiguler@gazi.edu.tr](mailto:nakiguler@gazi.edu.tr)

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniv. FBE / Elektrik Eğitimi Bölümü	2012
Lisans	Gazi Üniv. / Elektrik Eğitimi Bölümü	2010
Lise	Abidinpaşa Endüstri Meslek Lisesi	2003

### İş Deneyimi

*Gazi Üniversitesi Atatürk Meslek Yüksek Okulu*

Öğretim Görevlisi (Dışarıdan Görevlendirme) (20 Eylül 2010 - 21 Ocak 2011)

*Gazi Meslek Yüksek Okulu*

Öğretim Görevlisi(Dışarıdan Görevlendirme) (09 Şubat 2011- 15 Ocak 2012)

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

1. Irmak, E., Colak, İ., Kaplan, O., Guler, N., “Design and application of a novel zero-crossing detector circuit”, *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, Malaga, 1-4 (2011).

2. Çolak, İ., Irmak, E., Güler, N., Issı, F., “Remote Monitoring and Reporting the Parameters of A Hybrid Power System via Internet”, *EVER’12*, Monaco (2012).
3. Irmak, E., Çolak, İ, Güler, N., Calpbınici, A., “FPGA Based Parallel Connection System of Separate Voltage Sources Using Cuk Converters”, *Spedam 12*, Kabul edildi, İtalya (2012).
4. Irmak, E., Güler, N., Calpbınici, A., “Orta ölçekli bir işletmenin enerji izleme sisteminin tasarlanması”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Kabul edildi (2012).
5. Irmak, E., Güler, N., “dsPIC mikrodeneleyicileri için kütüphanelerin oluşturulması ve deneysel çalışmalar”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, İnceleme aşamasında (2012).
6. Irmak, E., Güler, N., “Application of a High-Efficiency Voltage Regulation System with MPPT Algorithm”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Hakem incelemesinde (2012).

### Projeler

1. Irmak, E., Güler, N., Calpbınici, A., Köse, A., “ Endüstriyel İşletmelerde Elektrik Güç Parametrelerinin İnternet Üzerinden Takibi ve Analizi”, *Gazi Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi*, Proje Kodu: 07/2011-05.
2. Irmak, E., Güler, N., “Senkron Generatörlerin dsPIC Kullanılarak Paralel Bağlanması ve Arayüz Üzerinden Yük Kontrolünün Gerçekleştirilmesi”, *Gazi Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi*, Proje Kodu: 07/2011-32.