

**T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**SENKRON MOTORLU BİR HİBRİT REAKTİF GÜÇ KOMPAZASYON  
SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**Hasan Serdar DİRİK**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**EYLÜL 2021**

**ANTALYA**

**T.C.  
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**SENKRON MOTORLU BİR HİBRİT REAKTİF GÜÇ KOMPAZASYON  
SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**Hasan Serdar DİRİK**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**EYLÜL 2021**

**ANTALYA**

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

**SENKRON MOTORLU BİR HİBRİT REAKTİF GÜÇ KOMPAZASYON**  
**SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**Hasan Serdar DİRİK**  
**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**  
**ANABİLİM DALI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Bu tez .... / ..... / 201..... tarihinde jüri tarafından Oybirliği / Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Yavuz ÜSER (Danışman)  
Prof. Dr. Selçuk HELHEL  
Doç. Dr. Sertaç GÖRGÜLÜ

## ÖZET

### SENKRON MOTORLU BİR HİBRİT REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYON SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Hasan Serdar DİRİK

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Yavuz USER

Eylül 2021; 88 sayfa

Reaktif güç alternatif akımlı devrelerde yer alan bazı yüklerin çekmek zorunda oldukları fakat herhangi bir işe veya enerjiye dönüştüremedikleri bir güç türüdür. Bu güç, üretim ve iletim sisteminde gerilim düşümlerine, güç kayıplarına ve gerilim karasızlıklarına neden olur. Ayrıca iletim ve dağıtım sisteminin güç taşıma kapasitesini de sınırlandırdığı için arzu edilmeyen bir güçtür. Bu yüzden bu gücün bağlı yükler tarafından şebekeden çekilmesini engellemek amacıyla reaktif güç kompanzasyonu yapılır.

Reaktif güç kompanzasyonu için klasik olarak anahtarlamalı konsansatörler kullanılır. Ayrıca statik kompanzatörler (STATCOM, SSSC ve aktif güç filtreleri), SVC ve senkron makineler de kullanılabilir. Sıklıkla kullanılan anahtarlamalı kondansatörler kademeli bir şekilde kompanzasyon yaptıklarından dolayı tam kompanzasyon yapabilmeleri neredeyse hiç mümkün değildir. Bu tezde bu soruna çözüm olabilmesi için senkron motor ile anahtarlamalı kondansatörlerden oluşan bir hibrit reaktif güç kompanzasyon sisteminin tasarlanması amaçlanmıştır. Tasarlanan hibrit sistemde yükün ihtiyacı olan reaktif gücün ana kısmı anahtarlamalı kondansatörlerle karşılanırken kademeler arasında kalan gereksinim bir senkron motor tarafından karşılanmaktadır. Bu tezde önerilen sistemde ayrıca senkron motorun her bir fazının farklı miktarlarda reaktif güç verebilmesi amacıyla faz sargılarına değeri değiştirilebilen bobinler bağlanmıştır. Böylece sistemin dengesiz yüklerde de çalışabilmesi amaçlanmıştır.

Önerilen reaktif güç kompanzasyon sistemi MATLAB/Simulink ortamında yapılan simülasyonlarla ve laboratuvarında yapılan deneysel çalışmalarla test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar önerilen hibrit sistemin klasik kondansatör anahtarlamalı kompanzasyon sistemlerine göre daha yüksek başarıma sahip olduğunu ve güç katsayısını neredeyse 1 yaptığını göstermiştir.

**ANAHTAR KELİMELEER:** Dengesiz Yük, Hibrit Kompanzasyon, Reaktif Güç Kompanzasyonu, Senkron motor

**JÜRİ:** Dr. Öğr. Üyesi Yavuz ÜSER

Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Doç. Dr. Sertaç GÖRGÜLÜ

## **ABSTRACT**

### **DEVELOPMENT OF A HYBRID REACTIVE POWER COMPENSATION SYSTEM WITH SYNCHRONOUS MOTOR**

**Hasan Serdar DİRİK**

**MSc Thesis in Electric-Electronic Engineering**

**Supervisor: Asst. Prof. Dr. Yavuz ÜSER**

**September 2021; 88 pages**

Reactive power is a type of power that have to be drawn by some loads in alternative current circuits but cannot be converted to any work or energy. This power causes voltage drops, power losses and voltage instabilities in generation and transmission systems. It is also an undesirable power due to its limiting effect on power transmission capability of transmission and distribution systems. Therefore, reactive power compensation is done to prevent this power drawn by loads connected power grid.

Conventionally, switched capacitors are used for reactive power compensation. In addition, static compensators (STATCOM, SSSC and active power filters), SVC and synchronous machines can also be used. Since the frequently used switched capacitors compensate gradually, it is almost impossible to make full compensation. Therefore, in this thesis, it is aimed to design a hybrid reactive power compensation system with synchronous motor to solve this problem. In the designed hybrid system, the main part of the reactive power required by the load is met by switched capacitors, while the reactive power requirement between the stages is met by a synchronous motor. In the system proposed in this thesis, coils with variable value are connected to the phase windings in order to provide different amounts of reactive power for each phase of the synchronous motor. Thus, it is aimed that the system can operate under unbalanced loads.

The proposed reactive power compensation system has been tested with simulations in MATLAB environment and experimental works carried out in laboratory. The obtained results showed that the performance of the proposed system is better than the conventional capacitor switched compensation systems and the power coefficient gets closer to 1.

**KEYWORDS:** Unbalanced load, Hybrid compensation, Reactive Power Compensation, Synchronous Motor

**COMMITTEE:** Asst. Prof. Dr. Yavuz ÜSER

Prof. Dr. Selçuk HELHEL

Assoc. Prof. Dr. Sertaç GÖRGÜLÜ

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışması ile dengesiz yüklerin kompanzasyonunun var olan sistemlere göre daha da iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca konu ile ilgili literatüre bir katkının yapılmasının yanında uygulamada çalışan sistemlerin iyileştirilmesine yönelik bazı katkıların verilmesi mümkün olacağı düşünülmektedir.

Tezin hazırlanmasında bana desteklerini esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Yavuz USER'e, kuzenim Öğr. Gör. Dr. Hasan DİRİK'e ve Dr. Öğr. Üyesi Cenk GEZEGİN'e teşekkür ediyorum. Son olarak her türlü zorlukta bana destek olan eşim Gökçe DİRİK ve kızım Zeynep DİRİK'e teşekkür ediyorum.



## İÇİNDEKİLER

|                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| ÖZET.....                                                                 | i   |
| ABSTRACT.....                                                             | ii  |
| ÖNSÖZ .....                                                               | iii |
| AKADEMİK BEYAN .....                                                      | vi  |
| SİMGELER VE KISALTMALAR.....                                              | vii |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                                      | x   |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                                   | xiv |
| 1. GİRİŞ .....                                                            | 1   |
| 2. KAYNAK TARAMASI .....                                                  | 3   |
| 3. MATERYAL VE METOT .....                                                | 6   |
| 3.1. Genel Tanımlar .....                                                 | 6   |
| 3.2. Reaktif Güç Kompanzasyonunun Gerekliliği.....                        | 7   |
| 3.3. Reaktif Güç Kompanzasyon Biçimleri.....                              | 10  |
| 3.4. Tek Fazlı Sistemlerde Güç.....                                       | 12  |
| 3.5. Üç-Fazlı Sistemlerde Güç.....                                        | 13  |
| 3.6. Harmonikli Durumda Güç .....                                         | 15  |
| 3.7. Güç Katsayısı.....                                                   | 16  |
| 3.8. Etkin Değerlerin ve Güçlerin Ölçümü .....                            | 16  |
| 3.9. Senkron Makineler.....                                               | 18  |
| 3.10. Senkron Makinelerin Yapısı .....                                    | 19  |
| 3.11. Senkron Makinenin Eşdeğer Devresi Ve Fazör Diyagramları .....       | 20  |
| 3.12. Senkron Motor Karakteristikleri.....                                | 24  |
| 3.13. Hibrid Reaktif Güç Kompanzasyonu Sisteminin Yapısı .....            | 27  |
| 3.14. Hibrid Kompanzasyon Sisteminin Kontrolü .....                       | 31  |
| 4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....                                             | 40  |
| 4.1. Senkron Makinenin MATLAB Ortamında Modellenmesi.....                 | 40  |
| 4.2. Ayarlanabilir Faz Empedanslarının MATLAB Ortamında Modellenmesi .... | 41  |
| 4.3. Hibrid Sistemin MATLAB/Simulink Modeli.....                          | 43  |
| 4.4. Simülasyon Çalışmaları .....                                         | 48  |
| 4.5. Deneysel Çalışmalar .....                                            | 58  |

|                    |    |
|--------------------|----|
| 5. SONUÇLAR .....  | 70 |
| 6. KAYNAKLAR ..... | 71 |
| 7. EKLER.....      | 73 |
| ÖZGEÇMİŞ           |    |



## AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Senkron Motorlu Bir Hibrit Reaktif Güç Kompanzasyon Sisteminin Geliştirilmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

23/09/2021

Hasan Serdar DİRİK

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$Q_L$  : Endüktif Reaktif Güç

$Q_C$  : Kapasitif Reaktif Güç

$Z$  : Empedans

$R$  : Direnç

$X$  : Reaktans

$S$  : Görünür Güç

$P$  : Aktif Güç

$Q$  : Reaktif Güç

$\Delta U_{ab}$  : Gerilim Düşümü

$\Delta P_k$  : Kompanzasyon Öncesi Kayıp Güç

$\Delta P_{k-C}$  : Kompanzasyon Sonrası Kayıp Güç

$u(t)$  : Zamana Bağlı Gerilim

$i(t)$  : Zamana Bağlı Akım

$S(t)$  : Zamana Bağlı Görünür Güç

$D$  : Bozunum Güç

$\Delta U_{ab-C}$  : Gerilim Düşümünün Tam Kompanzasyon Sonrasındaki Değeri

$d\Delta P_k$  : Hattaki Aktif Güç Kaybı

$S_N$  : Hattın Güç Taşıma Kapasitesi

$k_O$  : Normal Durumda Hattın Kapasite Kullanım Oranı

$k_S$  : Tam Reaktif Güç Kompanzasyonu Sonrasında Hattın Kapasite Kullanım Oranı

$\Delta k$  : Tam Reaktif Güç Kompanzasyonu Sonrasında Hattaki Kapasite Değişimi

$Q_{3f}$  : Devredeki 3-fazlı kondansatörlerin tek-faz gücü

$Q_{3f1}, Q_{3f2}, \dots, Q_{3fp}$  : 3-fazlı kondansatör kademelerinin güçleri

$Q_{3a1}, Q_{3a2}, \dots, Q_{3aq}$  : a fazına bağlı 1-fazlı kondansatör kademelerinin güçleri

$Q_{3b1}, Q_{3b2}, \dots, Q_{3bq}$  : b fazına bağlı 1-fazlı kondansatör kademelerinin güçleri

$Q_{3c1}, Q_{3c2}, \dots, Q_{3cq}$  : c fazına bağlı 1-fazlı kondansatör kademelerinin güçleri

$K_{3f}$  : devredeki 3-fazlı kondansatörlerin tek-faz gücü

$K_{3f1}, K_{3f2}, \dots, K_{3fp}$  : 3-fazlı kondansatör kademelerinin konumunu

$K_{a1}, K_{a2}, \dots, K_{aq}$  : a-fazlı 1-fazlı kondansatör kademelerinin konumu

$K_{b1}, K_{b2}, \dots, K_{bq}$  : b-fazlı 1-fazlı kondansatör kademelerinin konumu

$K_{c1}, K_{c2}, \dots, K_{cq}$  : c-fazlı 1-fazlı kondansatör kademelerinin konumu

$p$  ve  $q$  : 3- ve 1- fazlı kondansatör kademelerinin sayısı

### **Kısaltmalar**

ADC : Analog Dijital Dönüştürücü

AFD : Ayrık Fourier Dönüşümü

DAQ : Veri Edinim Kartı

EGS : Etkin Güç Süzgeci

EPDK : Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu

FACTS : Esnek Alternatif Akım İletim Sistem

FKD : Faz Kilitleme Döngüsü

GK : Güç Katsayısı

RGK : Reaktif Güç Kontrolü

SVC : Statik Faz Kaydırıcılar

THK : Toplam Harmonik Kompanzasyonu

TCR : Tristör Kontrollü Reaktör

YSA : Yapay Sinir Ağları



## ŞEKİLLER DİZİNİ

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 3.1. Üç fazlı bir sisteme ait hat ve yükten oluşan sistemin tek-hat eşdeğer devresi           | 8  |
| Şekil 3.2. Bireysel kompanzasyonun tek hat şeması .....                                             | 10 |
| Şekil 3.3. Grup kompanzasyonun tek hat şeması .....                                                 | 11 |
| Şekil 3.4. Merkezi kompanzasyonun tek hat şeması .....                                              | 11 |
| Şekil 3.5. Tek-fazlı kaynak yük sistemi .....                                                       | 12 |
| Şekil 3.6. Saf sinüzoidal durum için akım, gerilim ve güçlerin zamana bağlı değişimleri.....        | 13 |
| Şekil 3.7. Üç-fazlı kaynak-yük sistemi .....                                                        | 14 |
| Şekil 3.8. Omik-endüktif karakterli yüke ait güç diyagramı .....                                    | 14 |
| Şekil 3.9. Aktif, reaktif, bozunum ve görünür güçlerin fazör gösterimi.....                         | 16 |
| Şekil 3.10. Senkron makinenin genel yapısı.....                                                     | 18 |
| Şekil 3.11. Amortisör sargılı bir çıkık kutuplu senkron makine rotorunun genel yapısı .....         | 20 |
| Şekil 3.12. Senkron makinenin tek faz için çizilmiş eşdeğer devresi.....                            | 20 |
| Şekil 3.13. Senkron makinenin basitleştirilmiş eşdeğer devresi.....                                 | 21 |
| Şekil 3.14. Senkron generatörün endüktif yük hali için fazör diyagramı .....                        | 21 |
| Şekil 3.15. Senkron generatörün kapasitif yük hali için fazör diyagramı.....                        | 22 |
| Şekil 3.16. Senkron generatörün saf omik yük hali için fazör diyagramı.....                         | 22 |
| Şekil 3.17. Senkron motorun düşük uyartım durumu için fazör diyagramı .....                         | 23 |
| Şekil 3.18. Senkron motorun birim güç faktörlü uyartım durumu fazör diyagramı .....                 | 23 |
| Şekil 3.19. Senkron motorun yüksek uyartım durumu için fazör diyagramı.....                         | 24 |
| Şekil 3.20. Senkron motorun V eğrileri .....                                                        | 25 |
| Şekil 3.21. Senkron motorun iki farklı mil momenti için rotor ve stator konumları ve yük açısı..... | 25 |
| Şekil 3.22. Senkron makine ve yük açısı karakteristiği .....                                        | 26 |
| Şekil 3.23. Hibrid reaktif güç kompanzasyon sisteminin genel yapısı .....                           | 27 |

|                                                                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 3.24.</b> Uyarıtım akımı sağlayıcısının açık devre şeması .....                                                                                                                          | 30 |
| <b>Şekil 3.25.</b> Bir ototrafo ve ototrafodan elde edilmiş bir ayarlanabilir endüktansın şematik gösterimleri .....                                                                              | 31 |
| <b>Şekil 3.26.</b> Faz empedanslarının değişiminde kullanılan motorların röle bağlantı şeması.....                                                                                                | 31 |
| <b>Şekil 3.27.</b> Hibrid sistemin genel kontrol adımlarına ait akış şeması .....                                                                                                                 | 32 |
| <b>Şekil 3.28.</b> Kondansatör kademelerinin klasik reaktif güç kompanzasyonuna uygun olarak belirlenme adımları akış şeması .....                                                                | 33 |
| <b>Şekil 3.29.</b> Klasik reaktif güç kompanzasyonu için belirlenmiş olan kademelerin hibrid kompanzasyona uygun hale getirilme adımları akış şeması.....                                         | 36 |
| <b>Şekil 3.30.</b> Artık reaktif güçlerin senkron motorla kompanze edilme adımları akış şeması.....                                                                                               | 39 |
| <b>Şekil 4.1.</b> Senkron makinenin basit MATLAB/Simulink modeli.....                                                                                                                             | 41 |
| <b>Şekil 4.2.</b> Ayarlanabilir faz empedansının MATLAB/Simulink modeli .....                                                                                                                     | 42 |
| <b>Şekil 4.3.</b> Ayarlanabilir faz empedansı motorunun MATLAB/Simulink modeli.....                                                                                                               | 42 |
| <b>Şekil 4.4.</b> Simülasyon çalışmalarında kullanılan ana MATLAB/Simulink dosyasının görünümü .....                                                                                              | 44 |
| <b>Şekil 4.5.</b> Simülasyon çalışmalarında kullanılan “Yuk” bloğunun iç görünümü .....                                                                                                           | 45 |
| <b>Şekil 4.6.</b> Simülasyon çalışmalarında kullanılan “kondansatörler_anahtarlama” bloğunun iç görünümü .....                                                                                    | 47 |
| <b>Şekil 4.7.</b> Simülasyon çalışmalarında kullanılan “Senkron_motor_kontrol” bloğunun iç görünümü .....                                                                                         | 48 |
| <b>Şekil 4.8.</b> Dengeli yükün her bir fazına ait <i>aktif güçlerin</i> değişimi .....                                                                                                           | 49 |
| <b>Şekil 4.9.</b> Dengeli yükün her bir fazına ait <i>reaktif güçlerin</i> değişimi.....                                                                                                          | 50 |
| <b>Şekil 4.10.</b> Dengeli yükün her bir fazına ait <i>güç faktörlerinin</i> değişimi.....                                                                                                        | 50 |
| <b>Şekil 4.11.</b> Dengeli yüke ait <i>gerilimin ve akımın</i> değişimi .....                                                                                                                     | 50 |
| <b>Şekil 4.12.</b> Hibrid ve klasik reaktif güç kompanzasyon sistemlerinin dengeli yük ile yapılan simülasyonlarında elde <i>şebeke tarafı aktif güçlerin</i> her bir faz için değişimleri.....   | 51 |
| <b>Şekil 4.13.</b> Hibrid ve klasik reaktif güç kompanzasyon sistemlerinin dengeli yük ile yapılan simülasyonlarında elde <i>şebeke tarafı reaktif güçlerin</i> her bir faz için değişimleri..... | 52 |

|                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.14.</b> Hibrid ve klasik reaktif güç kompanzasyon sistemlerinin dengeli yük ile yapılan simülasyonlarında elde <i>şebeke tarafı güç faktörlerinin</i> her bir faz için değişimleri.....  | 52 |
| <b>Şekil 4.15.</b> Hibrid ve klasik reaktif güç kompanzasyon sistemlerinin dengeli yük ile yapılan simülasyonlarında elde <i>şebeke tarafı gerilimlerinin ve akımlarının</i> değişimleri.....       | 53 |
| <b>Şekil 4.16.</b> Dengesiz yükün her bir fazına ait <i>aktif güçlerin</i> değişimi.....                                                                                                            | 54 |
| <b>Şekil 4.17.</b> Dengesiz yükün her bir fazına ait <i>reaktif güçlerin</i> değişimi.....                                                                                                          | 54 |
| <b>Şekil 4.18.</b> Dengesiz yükün her bir fazına ait <i>güç faktörlerinin</i> değişimi .....                                                                                                        | 54 |
| <b>Şekil 4.19.</b> Dengesiz yükün <i>gerilim ve akım</i> değişimi .....                                                                                                                             | 55 |
| <b>Şekil 4.20.</b> Hibrid ve klasik reaktif güç kompanzasyon sistemlerinin dengesiz yük ile yapılan simülasyonlarında elde <i>şebeke tarafı aktif güçlerin</i> her bir faz için değişimleri.....    | 56 |
| <b>Şekil 4.21.</b> Hibrid ve klasik reaktif güç kompanzasyon sistemlerinin dengesiz yük ile yapılan simülasyonlarında elde <i>şebeke tarafı reaktif güçlerin</i> her bir faz için değişimleri.....  | 56 |
| <b>Şekil 4.22.</b> Hibrid ve klasik reaktif güç kompanzasyon sistemlerinin dengesiz yük ile yapılan simülasyonlarında elde <i>şebeke tarafı güç faktörlerinin</i> her bir faz için değişimleri..... | 57 |
| <b>Şekil 4.23.</b> Hibrid ve klasik reaktif güç kompanzasyon sistemlerinin dengesiz yük ile yapılan simülasyonlarında elde <i>şebeke tarafı gerilimlerinin ve akımlarının</i> değişimleri.....      | 57 |
| <b>Şekil 4.24.</b> Deneysel çalışmalarda kullanılan bobin yüklerinin bağlantı şeması.....                                                                                                           | 60 |
| <b>Şekil 4.25.</b> Deneysel çalışmalarda kullanılan bobin yüklerinin ve ilgili donanımın görünümü .....                                                                                             | 60 |
| <b>Şekil 4.26.</b> Deneysel çalışmalarda kullanılan kondansatörlerin ve ilgili donanımsal kısmın bağlantı şeması .....                                                                              | 61 |
| <b>Şekil 4.27.</b> Deneysel çalışmalarda kullanılan kondansatörlerin ve ilgili donanımın görünümü .....                                                                                             | 61 |
| <b>Şekil 4.28.</b> Deneysel çalışmalarda kullanılan senkron motorun ve faz empedansı ototrafolarının bağlantı şeması.....                                                                           | 62 |
| <b>Şekil 4.29.</b> Deneysel çalışmalarda kullanılan faz empedansı ototrafolarının ve ilgili donanımın görünümü .....                                                                                | 63 |
| <b>Şekil 4.30.</b> Deneysel çalışmalarda kullanılan senkron motorun çeşitli görünümleri.....                                                                                                        | 64 |

**Şekil 4.31.** Senkron motorun uyartım akımı ayarında kullanılan varyağın görünümü...64

**Şekil 4.32.** Güç ölçümünde kullanılan ölçme kartının ve DAQ kartının bir görünümü. 66

**Şekil 4.33.** Kompanzasyon öncesinde ve sonrasında gerilimin ve akımın şebeke  
tarafındaki dalga biçimleri ..... 69



## ÇİZELGELER DİZİNİ

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Çizelge 1.1. Paralel kondansatör eklenerek sağlanan faydalar .....                                                                                      | 4  |
| Çizelge 4.1. Simülasyonda kullanılan yüklerin güçleri ve bağlı oldukları fazlar .....                                                                   | 46 |
| Çizelge 4.2. Simülasyonda kullanılan kondansatör kademelerinin güçleri ve bağlı oldukları fazlar .....                                                  | 47 |
| Çizelge 4.3. Dengeli yükler ile yapılan simülasyonlarda kullanılan yükler .....                                                                         | 49 |
| Çizelge 4.4. Dengesiz yükler ile yapılan simülasyonlarda kullanılan yükler .....                                                                        | 53 |
| Çizelge 4.5. Deneysel çalışmalarda kullanılan donanımlar .....                                                                                          | 58 |
| Çizelge 4.6. Deneysel çalışmada kullanılan DAQ kartları, kullanılan kanallar, kullanım biçimleri ve kullanım amaçları .....                             | 59 |
| Çizelge 4.7. Deneysel sistemde kullanılan yüklerin ve kondansatörlerin anma güç değerleri.....                                                          | 59 |
| Çizelge 4.8. Deneysel olarak kompanzasyon öncesinde, klasik ve hibrit kompanzasyon sonrasında her bir faz için elde edilen aktif güç değerleri .....    | 67 |
| Çizelge 4.9. Deneysel olarak kompanzasyon öncesinde, klasik ve hibrit kompanzasyon sonrasında her bir faz için elde edilen reaktif güç değerleri .....  | 67 |
| Çizelge 4.10. Deneysel olarak kompanzasyon öncesinde, klasik ve hibrit kompanzasyon sonrasında her bir faz için elde edilen güç faktörü değerleri ..... | 67 |

## 1. GİRİŞ

Elektrik güç sistemlerinde çeşitli güç kalitesi problemleriyle karşılaşılır. Bu güç kalitesi problemlerinin çoğunluğu doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu harmoniklerdir. Ayrıca doğrusal yüklerinde neden olduğu bazı problemler vardır ki bunlardan bazıları gerilim yükselmesi, gerilim çökmesi, kırpışma ve reaktif güç biçiminde kendini gösterir. Doğrusal yüklerin neden olduğu bu problemler arasında yaptığı etki bakımından en çok önem arz edeni reaktif gücün neden olduğu problemlerdir. Reaktif güç, aslında herhangi bir işe veya enerjiye dönüştürülemeyen ama özellikle manyetik devre yapısına sahip yükler tarafından aktif gücün yanında çekilmesi zorunlu olan bir güç çeşididir. Yani; işe yaramayan ama reaktif karakterli yükler tarafından çekilmek zorunda olunan ve bu yüzden de şebekeyi meşgul eden bir güç çeşididir. Bu güç kendi içinde endüktif ve kapasitif reaktif güçler olarak ikiye ayrılabilir. Her iki reaktif güç çeşidi vektöryel olarak birbirine zıt yönlü olup endüktif reaktif güç kapasitif reaktif güçle ve kapasitif reaktif güç de endüktif reaktif güçle kompanze edilebilir. Şebekeden çekilen reaktif gücün neden olduğu problemlerden bazıları fazladan gerilim düşümüne neden olması, hattın güç taşıma kapasitesini sınırlandırması, ekstra güç kaybına neden olması ve iletim seviyesinde gerilim kararsızlıklarına neden olmasıdır. Bu yüzden, reaktif gücün neden olduğu benzeri problemlerin çeşitli metotlar kullanılarak üstesinden gelinmesi bir zorunluluktur. Anahtarlama kondansatörler, senkron makineler, statik kompanzatörler ve yarıiletken anahtarlama L-C bankları (SVC gibi) bu problemlerin çözümünde kullanılan başlıca araçlardır. Ülkemizde ve dünyada güç kalitesini belirleyen bazı standartlar ve düzenlemeler bulunmaktadır. Başlıca uluslararası standartlar IEEE 519-1992 ve IEC 61000 standartlarıdır. Ülkemizde ise EPDK tarafından yayınlanan bazı yönetmelikler ile bu husus düzenleme altına alınmıştır. Özellikle bazı yönetmeliklerde elektrik dağıtım şirketlerine ve tüketicilere güç kalitesi ve reaktif güç konularında bazı görevler ve sorumluluklar yüklenmiştir. Öyle ki, EPDK'nın 30.12.2015 tarihli, 5999-3 sayılı kurul kararının (DAĞITIM LİSANSI SAHİBİ TÜZEL KİŞİLER VE GÖREVLİ TEDARİK ŞİRKETLERİNİN TARİFE UYGULAMALARINA İLİŞKİN USUL VE ESASLARI) 13. maddesinin 3. fıkrası gereğince: *“Kurulu gücü 50 kVA'nın altında olan müşteriler, çektikleri aktif enerji miktarının yüzde otuzüçünü aşan şekilde endüktif reaktif enerji tüketmeleri veya aktif enerji miktarının yüzde yirmisini aşan şekilde kapasitif reaktif enerji vermeleri halinde; kurulu gücü 50 kVA ve üstünde olanlar ise, çektikleri aktif enerji miktarının yüzde yirmisini aşan şekilde endüktif reaktif enerji tüketmeleri veya aktif enerji miktarının yüzde onbeşini aşan şekilde sisteme kapasitif reaktif enerji vermeleri halinde, reaktif enerji tüketim bedeli ödemekle yükümlüdür.”* [EPDK, 2015].

Basit bir hesaplamayla, 50 kVA ve üstü kurulu güce sahip tüketiciler için verilmiş oranların sağlanabilmesi için güç katsayısı değerinin en az endüktif reaktif güç için 0,9806 ve kapasitif reaktif güç için 0,9889 olması gerektiği görülür. Eskiden bu oranların daha yüksek olduğu göz önüne alınırsa söz konusu tüketicilerin daha etkin çalışan reaktif güç kompanzasyon sistemleri kurmalarının bir zorunluluk olduğu aşikârdır. Yani klasik kondansatör anahtarlama kompanzasyonunun bazı durumlarda yeterli olmayacağı açıktır. Ayrıca klasik kondansatör anahtarlama kompanzasyonunun rezonansa neden olma, minimum kademedan daha düşük reaktif gücü sağlayamama ve anahtarlama esnasında ani gerilim değişimine neden olma gibi dezavantajları da bulunur. İşte bu yüzden söz konusu problemlerin çözümü için literatürde önerilen ve uygulamada kullanılan pek çok reaktif güç kompanzasyon sistemi mevcuttur.

Bu tez çalışmasında söz konusu problemlere bir çözüm olabilmesi amacıyla geliştirilen bir hibrid reaktif güç kompanzasyon sistemi tanıtılmıştır. Sistem, klasik kondansatör anahtarlama kompanzasyon sistemlerinde yer alan kondansatör kademeleri arasındaki reaktif güç ihtiyacının bir senkron motor ile karşılanmasını amaçlamaktadır. Senkron motorun uyartım akımı değiştirilerek hem endüktif hem de kapasitif reaktif güç üretebilmesi önemli bir avantaj oluşturmaktadır. Dengesiz reaktif güç gereksiniminin normalde dengeli güç üreten senkron motorlar ile karşılanabilmesi amacıyla motorun her bir faz çıkışı üzerine ayarlanabilir empedanslar konulmuş ve böylece her bir fazından farklı miktarlarda reaktif güç alabilmek mümkün olmuştur. Önerilen yapının çalışabilirliği ve üstünlükleri simülasyonlar ve deneysel çalışmalar ile test edilerek ortaya konulmuştur.



## 2. KAYNAK TARAMASI

Enerji ihtiyacındaki artışı karşılayabilmek, kayıpları en aza indirmek ve enerji sistemlerinin verimliliğini arttırmak amacıyla hatların ve diğer işletme donanımlarının boş yere reaktif güçle yüklenmelerini engellemek en önemli çözümlerden biridir. Bu da alçak gerilim tesislerinde yapılacak reaktif güç kompanzasyonu ile mümkün olmaktadır [Vural 2003].

Güler'e göre elektrik enerji sistemlerinde işletmeyi kolaylaştırmanın, verimi arttırmanın ve enerji tasarrufu sağlamanın en etkin ve en kolay yöntemlerinden biri reaktif güç kompanzasyonudur [Güler 1995].

Reaktif güç kompanzasyonu ile, reaktif akım; kurulan reaktif güç kompanzasyon sistemi aracılığı ile karşılanacağı için; şebekeden daha düşük değerde akım çekilecektir. Bunun sonucu olarak da transformatörler ve hatlar daha az yüklenecektir. Ayrıca aşırı yüklenmeler önlenmiş olacaktır. Aşırı yüklenme durumu yoksa tesisin yüklenebilme kapasitesi artmış olacaktır [Ersamut 2009].

Bir şönt kompanzasyon sistemini şebekeye bağlayarak ve aynı genlikte zıt yönlü bir kompanzasyon akımını vererek yükün reaktif akımı kompanze edilir, gerilim kararlılığı sağlanır ve birim güç faktörüne ulaşılabilir [Dixon vd, 2005].

Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği, enerji sarfıyatı yüksek olan işletmeler için olası aşımelerde ciddi cezai sorumluluklar içerdiği için, reaktif güç kompanzasyonu kullanımı yüksek maliyetli donanımlar vasıtasıyla sağlanmaktadır. Bu amaçla son yıllarda yapılan çalışmalar ile kayıplara sebep olan reaktif gücün ortadan kaldırılması için çeşitli teknikler uygulanmaktadır. Bu nedenle reaktif gücün ihtiyaç duyulan noktaya en yakın yerde üretilmesi sisteminin verimini arttırmak açısından büyük faydalar sağlamaktadır. Reaktif güç kompanzasyonu için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde yüklerin ihtiyacı olan reaktif güçler, statik olarak çeşitli anahtarlama elemanları vasıtasıyla, kapasitör ve reaktörlerle, dinamik olarak senkron motorlarla karşılanmaktadır [Bal vd. 1995, Çolak vd. 2007].

Sinüzoidal bir kaynaktan beslenen doğrusal olmayan yüklerde güç faktörünün tam olarak 1 yapılması, sadece kompanzasyon ile yeterli değildir. Bağlanan kondansatör ile güç faktörü, belli bir aralıkta değişmektedir. Güç faktörünün yükseltilmesi için akım harmonikleri filtrelenerek kompanzasyon yapılmalıdır. Doğrusal olmayan yüklerde paralel bağlanan kondansatör değerinin artması ile güç faktörü aynı şekilde artmamaktadır. Güç faktörü belli bir değere kadar artış gösterip sonrasında kondansatör ilave edilmesine rağmen azalmaktadır. Bu olay bize pratikte ne kadar gereksiz kondansatör kullanıldığını gösterir [Kocatepe vd. 2003].

Kondansatör grupları ile gerçekleştirilen kompanzasyon tekniğinde, çeşitli güçlerde kondansatör grupları, sistemin güç katsayısına göre kademeli olarak devreye alınarak kompanzasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Ancak yük rejimi değişken olan işletmelerde, kondansatör gruplarının devreye alınıp çıkartılmaları sırasında kullanılan kontaktörlerin ve reaktif güç kontrol rölelerinin tepki hızlarının yavaş olması sebebiyle kompanzasyon ünitesi görevini tam anlamıyla gerçekleştirememektedir. Bu zaman gecikmesi nedeni ile yüklerin eksik ya da aşırı kompanze edilmesi, aboneleri

kullanmadıkları bir enerjinin bedelini ödemek zorunda bırakmaktadır [Miller 1982, El-Sadek vd. 1988].

Genel olarak güç kompanzasyonu yaklaşımları incelendiğinde; mekanik, harmonik, zaman gecikmesi, güvenilirlik, doğruluk, basitlik, enerji tüketimi ve kayıplar ön plana çıkmaktadır. İyi bir kompanzasyon sisteminde istenilmeyen durumların giderilmesi, yüksek doğruluk, güvenilir sonuçlar, basit işlemler, kısa hesaplama süreleri ve matematiksel modele ihtiyaç duymaması her zaman beklenen özelliklerdir [Bayındır vd. 2007, Sağiroğlu vd. 2006].

Enerji kalitesini sağlamak için iletim ve dağıtım sistemlerine paralel kondansatör eklenmesi ile elde edilen faydalar Çizelge 1.1’de görülmektedir. Bu tabloda 1 ile gösterilenler birincil öncelikli olanlar, 2 ile gösterilenler ise ikincil öncelikli olanlardır [IEEE, 1992].

**Çizelge 1.1.** Paralel kondansatör eklenerek sağlanan faydalar

| Faydalar                     | İletim Sistemi | Dağıtım Sistemi |
|------------------------------|----------------|-----------------|
| Ek reaktif güç               | 1              | 2               |
| Gerilim kontrolü             | 1              | 1               |
| Sistem kapasitesinin artması | 2              | 1               |
| Güç Kayıplarının azalması    | 2              | 1               |
| Maliyetlerin azalması        | -              | 1               |

Reaktif güç kompanzasyonu çeşitlerinden biri de senkron motor ile dinamik kompanzasyondur. Uyarım akımı farklı kontrol algoritmaları ile kontrol edilerek daha kararlı çalışma elde edilebilmektedir. Sesveren, senkron motor ile yapılan reaktif güç kompanzatorü (RGK) denetiminde kullanılabilen Yapay Sinir Ağları (YSA) modelini üretecek bir nesnel tabanlı yazılım ile yazılımda elde edilen YSA yapısını kullanan RGK’nın çalışmasını örnekleyecek bir simülatör hazırlamıştır. Senkron motor ile yapılan RGK denetiminde kullanılabilen YSA modeli gerçekleştirilmiş ve bir senkron kompanzatorü nasıl kontrol ettiği gösterilmiştir. Ayrıca, hazırlanan yazılım ile öğrencilerin eğitimini güncel teknolojiler kullanılarak desteklemenin yanında, birçok alanda kullanılan yapay zekanın farklı alanlarda uygulanabilirliğine bir örnek olması açısından teknik eğitim ve mühendislik eğitiminde yeni bir yaklaşım hayata geçirilmesi amaçlanmıştır [Sesveren 2008]

Literatürde senkron motor üzerine gerçekleştirilen çalışmaları yapı yönünden, daimi mıknatıslı senkron motor ve uyarım sargılı senkron motor çalışmaları olmak üzere iki temel sınıfa ayırmak mümkündür. Daimi mıknatıslı senkron motorlarda, uyarım doğal bir mıknatısla sağlandığı için çok büyük güçlerde tasarımı mümkün olmamaktadır. Daimi mıknatıslı senkron motorlarda mıknatıs tarafından sağlanan uyarım sabit olduğundan kompanzasyon uygulamalarında tercih edilmemektedir. Guo ve arkadaşları daimi mıknatıslı senkron motor kontrolünde çeşitli öğrenme algoritmalarının performansları üzerine çalışmışlardır [Guo vd. 2003].

Bayındır ve Görgün, yapmış oldukları çalışmalarında senkron motor kullanarak bir kompanzator uygulaması gerçekleştirmişlerdir. PIC 18F452 mikrodenetleyici kullanarak senkron motorun PI kontrolü gerçekleştirilmiş ve değişik uyarım akımlarında endüktif, kapasitif ve omik çalıştırılması uygulamasını gerçekleştirmişlerdir. Kullanıcıya

LCD ekran üzerinden anlık olarak sisteme ait akım, gerilim, frekans ve güç katsayısı büyüklükleri gösterilmiştir [Bayındır vd. 2009].

Gayakwad vd. şebekeden çekilen reaktif gücü azaltmak ve şebeke güç faktörünü 1'e yaklaştırmak amacıyla kullanılan bir FC-TCR tipi SVC için ateşleme açısı hesaplama yöntemi sunmuşlardır. Çeşitli seri R-L yüklerinden oluşan 440 V'luk 3-fazlı sistem PSIM yazılımı kullanılarak simüle edilmiştir. Güç faktörünün ve reaktif gücün kompanzasyon öncesi ve sonrası değişimleri incelenmiştir. Bir kapalı döngü kontrol sistemi ile sistemin geçerliliği ortaya konulmuştur [Gayakwad vd. 2014]

Gelen ve arkadaşları çalışmalarında Esnek Alternatif Akım İletim Sistem(FACTS) elemanlarından olan Tristör Kontrollü Reaktör (TCR) ve Statik Var Kompanzatör (SVC) kullanılarak enerji iletim sistemlerinde gerilim, akım ve güç akısı durumlarının, statik (sabit) ve dinamik (değişken) yük durumlarında hem simülasyon ortamında hem de deneysel ortamda incelenmesi ve birbirleriyle karşılaştırılmasını yapmışlardır. Simülasyon ortamında PI kontrolleri kullanılarak kompanze işleminin karşılaştırılması yapılmış olup bulanık mantık kontrol yönteminin daha verimli ve kararlı çalıştığını gözlemlemişlerdir [Gelen vd. 2009].

Salaan vd. yapay sinir ağı tabanlı bir gerçek zamanlı reaktif güç kontrolörü önermişlerdir. Yapay sinir ağı normal ve anormal koşullarda kondansatörleri anahtarlama kullanılmıştır. Yapay sinir ağı, en küçük hata kare yöntemi ile eğitilmiştir. Her bir yük için ağı giriş olarak aktif ve reaktif güçler kullanılmıştır. Bir mikro denetleyici kontrolör olarak kullanılmış ve model bir radyal güç şebekesinde test edilmiştir [Salaan vd. 2011].

### 3. MATERYAL VE METOT

#### 3.1. Genel Tanımlar

Güç sistemlerine bağlı yükler çalışabilmeleri için bağlı oldukları şebekeden güç çekmek zorundadırlar. Bu güç genel olarak iki alt bileşenin toplamından oluşur. Bunlardan biri işe dönüşürken diğeri fiziksel anlamda bir işe veya enerjiye dönüşmez. İşe dönüşen güç aktif güç olarak adlandırılır. Diğer bileşen ise herhangi bir işe veya enerjiye dönüştürülemeyip reaktif güç adını alır. Sonuç olarak reaktif güç, alternatif akım devrelerindeki yüklerin çekmiş olduğu fakat bir işe dönüştüremediği güç türüdür. Pratikte reaktif güç çeken önemli yükler asenkron motorlar, kaynak makineleri, gaz boşalmalı lambalar, endüksiyon fırınları ve ark ocaklarıdır. Bunun yanında transformatörler, iletim hatları ve düşük uyartımlı senkron generatörler de reaktif güç tüketen şebeke bileşenleridir.

Reaktif güç, bu gücü çeken yüklerin elektomanyetik alan oluşturabilmesi için çekmek zorunda olduğu bir güçtür. Bu gücün çekildiği hattan aktif gücün neden olduğu aktif akımın yanında reaktif akım da çekilir. Buda iletim hattının ohmik direncinden dolayı ekstra ısı kayıplarının ve gerilim düşümlerinin ortaya çıkmasına neden olur. Bunun yanında güç sisteminin üretim ve iletim kapasitesinin verimli kullanılamamasına neden olur. Reaktif gücün (enerjinin) sorun oluşturduğu bir başka alan ise şebeke gerilim kararlılığıdır. Endüktif karakterli hatlar ve transformatörlerin ihtiyacı olan reaktif güç karşılanamadığında gerilim genliği tehlikeli derecelerde düşer. Bu gerilim kararsızlığının ortaya çıkmasına ve hatta şebeke çökmesine neden olabilir. Sonuç olarak endüktif karakterli yüklerin ve şebeke elemanlarının ihtiyacı olan reaktif gücün karşılanması gerekir. Bunun için kullanılabilecek başlıca araçlar; kondansatör gurupları, senkron makinalar ve statik kompanzatörlerdir. Yüklerin ihtiyacı olan reaktif gücün tüketim noktasında karşılanmasına reaktif güç kompanzasyonu denir. Yukarıda anlatılanlar kapsamında reaktif güç kompanzasyonu hem ekonomik hem de teknik açıdan önemli bir gerekliliktir.

Ülkemizde EPDK tarafından yayınlanan 30.12.2015 tarihli 5999-3 sayılı “DAĞITIM LİSANSI SAHİBİ TÜZEL KİŞİLER VE GÖREVLİ TEDARİK ŞİRKETLERİNİN TARİFE UYGULAMALARINA İLİŞKİN USUL VE ESASLARI” isimli kurul kararının 13.maddesinin 3. Fıkrası gereğince: kurulu gücü 50 kVA’nın üzerindeki tüketiciler için aylık bazda tüketilen endüktif reaktif enerjinin aktif enerjiye oranı %20’yi geçmemelidir. Aynı oran kapasitif reaktif enerji için %15’i geçmemelidir. Yani;

$$\frac{E_{Q_L}}{E_P} < 0,20 \quad (3.1)$$

$$\frac{E_{Q_C}}{E_P} < 0,15 \quad (3.2)$$

oranları sağlamalıdır. Bu enerji oranlarını sağlamak için gereken güç değerleri için aşağıdaki eşitsizlikler yazılabilir:

$$Q_L < 0,20 \cdot P \quad (3.3)$$

$$Q_C < 0,15 \cdot P \quad (3.4)$$

Dolayısıyla olması gereken güç katsayısının sınır değerleri güç katsayısının tanımından yola çıkılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$(G.K)_L = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q_L^2}} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + (0,2 \cdot P)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,2^2}} = 0,9806 \quad (3.5)$$

$$(G.K)_C = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q_C^2}} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + (0,15 \cdot P)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,15^2}} = 0,9889 \quad (3.6)$$

Elde edilen sonuçlara göre güç katsayısının ohmik-endüktif yükler için 0,9806 değerinden ve ohmik-kapasitif yükler için ise 0,9889 değerinden büyük olması gerektiği ortaya çıkar.

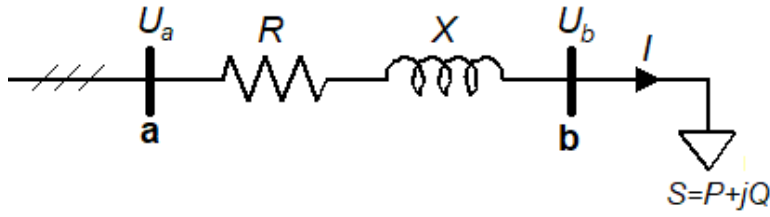
### 3.2. Reaktif Güç Kompanzasyonunun Gerekliliği

Reaktif güç birçok açıdan iletim ve dağıtım sisteminde istenmeyen bir güç türüdür. Bunun başlıca nedenleri gerilim düşümüne neden olması, aktif güç kaybına neden olması ve hatların güç taşıma kapasitesinin etkin kullanılmasına engel olmasıdır. Bu yüzden EPDK gibi kurumlar tarafından ülkemizde ve dünyada tüketicilere bazı yaptırımlar uygulanarak şebekeden çekilen reaktif güçlerin sınırlandırılmasına çalışılmaktadır. Öyle ki şebekeye bağlı tüketicilerin uymaları gereken oranları aşmaları durumunda parasal yaptırımlar uygulanmaktadır. Halbu ki bu gücün basit tesisler yardımıyla üretilmesi ve böylece şebekeden çekilmemesi mümkündür. Bu da tüketicilerin reaktif güç kompanzasyon sistemleri kurmak zorunda bırakmaktadır. Bu açıdan bakıldığında reaktif güç kompanzasyonunun tüketicileri mali bir yükten kurtardığını söyleyebiliriz.

Şebeke açısından bakıldığında reaktif güç kompanzasyonunun daha az gerilim düşümünü sağlaması, güç kayıplarının azaltılması ve mevcut kapasitenin etkin kullanılarak yeni üretim ve iletim tesislerine olan ihtiyacı azaltması gibi faydaları bulunur. Şimdi bu faydaları yakından inceleyelim.

#### Gerilim düşümünün azaltılması:

Şekil 3.1'deki gibi verilmiş olan üç-fazlı bir sistemde bir hatta ait direnç ve reaktans değerleri sırasıyla  $R$  [ $\Omega$ ] ve  $X$  [ $\Omega$ ] olarak verilmiş olsun. Aynı hat için hat akımı  $I$  [A], hattın sonundan çekilen aktif, reaktif ve görünür güçler sırasıyla  $P$  [W],  $Q$  [VAR],  $S$  [VA] ile gösterilsin. Ayrıca hattın başındaki ve sonundaki gerilimleri de  $U_a$  [V] ve  $U_b$  [V] gösterilsin.



**Şekil 3.1.** Üç fazlı bir sisteme ait hat ve yükten oluşan sistemin tek-hat eşdeğer devresi

Bu hattın empedansı ( $Z [\Omega]$ )

$$Z = R + jX \quad (3.7)$$

ile gösterilebilir. Aynı hattaki gerilim düşümü ( $\Delta U_{ab}$ )

$$\Delta U_{ab} = U_a - U_b = I \cdot Z \quad (3.8)$$

ile hesaplanır. Hattın sonundaki yükün çektiği görünür güç için ise

$$S = \sqrt{3} \cdot U_b \cdot I \quad (3.9)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.10)$$

eşitlikleri geçerlidir. (2) ve (3) eşitlikleri yardımıyla akım hesaplanırsa

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3} \cdot U_b} \quad (3.11)$$

bulunur. Son eşitlikteki değer (2)'deki yerine yazılırsa

$$\Delta U_{ab} = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3} \cdot U_b} \cdot Z \quad (3.12)$$

bulunur. Aynı hattın sonundaki yükün çektiği reaktif gücün tam olarak kompanze edildiğini düşünürsek ( $Q=0$ ) son eşitlik ile verilmiş olan gerilim düşümünün tam kompanzasyon sonrasındaki değeri ( $\Delta U_{ab-C}$ )

$$\Delta U_{ab-C} = \frac{\sqrt{P^2}}{\sqrt{3} \cdot U_b} \cdot Z \quad (3.13)$$

olacaktır. (3.12) ve (3.13) eşitlikleri karşılaştırıldığında reaktif güç kompanzasyonunun gerilim düşümünü azalttığı açık bir şekilde görülür.

### Kayıpların azaltılması:

Şekil 3.1’de tek-hat şeması verilmiş olan hattın hattın akan akım için

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{\sqrt{3} \cdot U_b} \quad (3.14)$$

ile hesaplandığını daha önce bulmuştuk. Aynı hattın akan akımın tam reaktif güç kompanzasyonu sonrasındaki değeri akımın reaktif bileşeni kompanse edildiğinden

$$I_C = \frac{\sqrt{P^2}}{\sqrt{3} \cdot U_b} \quad (3.15)$$

olacaktır. Dolayısıyla hattın ohmik direncinden dolayı kaybolan aktif gücü ( $I^2R$  kayıpları) kompanzasyon öncesi ve sonrası için ( $\Delta P_k$  ve  $\Delta P_{k-C}$ ) hesapladığımızda

$$\Delta P_k = I^2 \cdot R = \frac{P^2 + Q^2}{3 \cdot U_b^2} R \quad (3.16)$$

$$\Delta P_{k-C} = I_C^2 \cdot R = \frac{P^2}{3 \cdot U_b^2} R \quad (3.17)$$

bulunur. Son iki eşitlik tam reaktif güç kompanzasyonu ile hattaki aktif güç kaybının

$$d\Delta P_k = \Delta P_k - \Delta P_{k-C} = \frac{Q^2}{3 \cdot U_b^2} R \quad (3.18)$$

kadar azaltıldığı açıkça görülebilir.

### Mevcut kapasitenin etkin kullanımı:

Reaktif güç kompanzasyonu iletim ve dağıtım sistemindeki transformatörlerin ve hatların daha az yüklenmesine olanak tanır. Böylece mevcut tesislerin kapasitesi zorlanmadan ve ilave tesislerin yapılmasına gerek duyulmadan işletilmesi mümkün olur. Bu durumu şöyle açıklayabiliriz. Şekil 1’de verilmiş olan hattın güç taşıma kapasitesinin  $S_N$  olduğunu farz edelim. Normal durumda ve tam reaktif güç kompanzasyonu sonrasında hattın kapasite kullanım oranları sırasıyla  $k_O$  ve  $k_S$  olmak üzere

$$k_O = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{S_N} \quad (3.19)$$

$$k_S = \frac{\sqrt{P^2}}{S_N} \quad (3.20)$$

eşitlikleri ile hesaplanabilir. Bu da kompanzasyon sonrası hattın kullanım kapasitesi oranının

$$\Delta k = k_{\bar{o}} - k_s = \frac{\sqrt{Q^2}}{S_N} \quad (3.21)$$

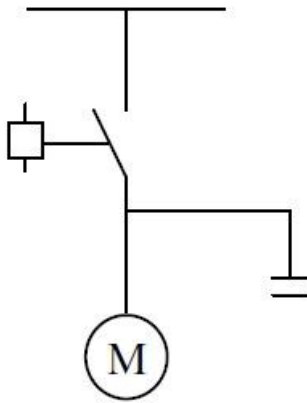
kadar arttırıldığını gösterir.

### 3.3. Reaktif Güç Kompanzasyon Biçimleri

Çok sayıda yükün yer aldığı tesislerin reaktif güç kompanzasyonu 3 farklı şekilde yapılabilir. Bunlar sırasıyla bireysel, grup ve merkezi kompanzasyon olarak adlandırılabilir.

#### Bireysel Kompanzasyon:

Sabit güçlü yüklerin reaktif güç ihtiyacı yükün ucuna yükün ihtiyacı kadar reaktif güç veren bir paralel bağlı kompanzatör (kondansatör gibi) yardımı ile karşılanabilir. Bu tür kompanzasyonda çok sayıda yükün yer aldığı sistemdeki her bir yükün kompanzasyonu tek tek yapılır. Yük ile paralelindeki kompanzatör aynı anahtar yardımı ile devreye alınır veya devre dışı bırakılır. Dolayısıyla toplamda tesisteki yüklerin ihtiyacı olan reaktif güç yerinde karşılanmış olur. Bireysel kompanzasyon iyi bir kompanzasyon tekniği olmasına karşın yüksek maliyetlidir. Ayrıca değişken yükler için uygun değildir. Fakat sabit güçlü yükler için uygundur. Bireysel kompanzasyonun tek hat şeması Şekil 3.2' de verildiği gibidir (Bayram, M. 2000).

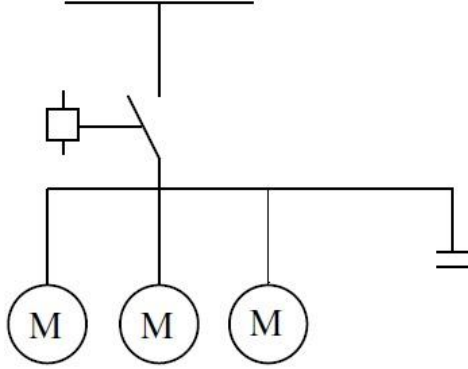


Şekil 3.2. Bireysel kompanzasyonun tek hat şeması

#### Grup Kompanzasyon:

Birden fazla yükün aynı noktadan beslendiği ve aynı devre kesici anahtarları yardımıyla gurup halinde devreye alınıp devre dışı bırakıldığı sistemlerde yapılan kompanzasyona verilen addır. Bireysel kompanzasyona göre daha düşük maliyetlidir. Merkezi panolara yapılan kompanzasyona nazaran tali panolarda yapılması dolayısıyla tali-ana pano arasındaki kablo kesitinin daha düşük olmasına imkân sağlar. Bu kompanzasyon sisteminde kompanzatörler bir arada bulunan reaktif karakterli yükleri

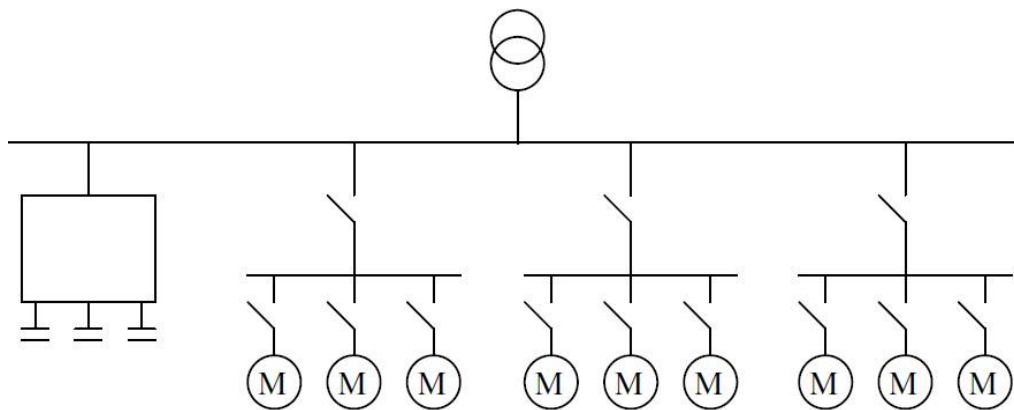
devreye sokan sistemlere bağlanır. Örneğin bir panodan beslenen motor veya ışık hatları grup kompanzasyona uygundur. Grup kompanzasyonun tek hat şeması Şekil 3.3'te verildiği gibidir (Bayram, M. 2000).



**Şekil 3.3.** Grup kompanzasyonun tek hat şeması

### Merkezi Kompanzasyon

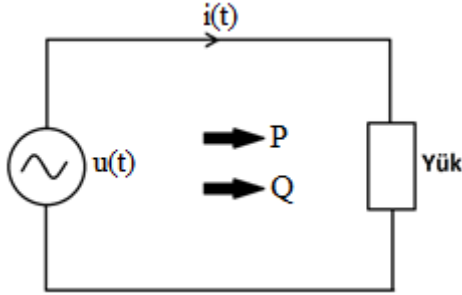
Bir tesisteki bütün yüklerin tek bir noktadan kompanze edildiği kompanzasyon biçimine merkezi kompanzasyon denir. Merkezi kompanzasyonda yüklerin farklı anlarda devreye girip çıkmalarından dolayı bir otomatik ayar düzeneğine ihtiyaç duyulur. Öyle ki yükün ihtiyacı olan reaktif gücün değişimiyle beraber devrede olması gereken kompanzatorlerin otomatik olarak ayarlanması sağlanır. Pratikte bu işi reaktif güç kontrol röleleri yapar. Merkezi kompanzasyon sistemi diğer iki kompanzasyon biçimine göre daha gelişmiş bir sistemdir. Bu kompanzasyon biçimi günümüzde en çok tercih edilen reaktif güç karşılama biçimidir. . Merkezi kompanzasyonun tek hat şeması Şekil 3.4'te verildiği gibidir (Bayram, M. 2000).



**Şekil 3.4.** Merkezi kompanzasyonun tek hat şeması

### 3.4. Tek Fazlı Sistemlerde Güç

Şekil 3.5’teki gibi verilen bir tek-fazlı kaynak-yük sistemini göz önüne alalım.



Şekil 3.5. Tek-fazlı kaynak yük sistemi

Genel olarak bir yükün çekmiş olduğu güç akım ile gerilimin çarpımına eşittir. Alternatif akım devrelerinde yer alan yüklerin çektiği bu güç görünür güç ( $S$ , [VA]) olarak adlandırılır. Şekil 3.5’te verilmiş olan sistemdeki gerilimin veya akımın zamana bağlı eşitlikleri aşağıdaki gibi verilmiş olsun.

$$u(t) = \sqrt{2}U \sin(\omega t) \quad (3.22)$$

$$i(t) = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi) \quad (3.23)$$

Bu durumda yükün kaynaktan çektiği görünür gücün zamana bağlı değerini gerilimin ve akımın anlık değerlerinin çarpımı olarak yazabiliriz.

$$S(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (3.24)$$

$$S(t) = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) - U \cdot I \cdot \cos(2\omega t - \varphi) \quad (3.25)$$

$$S(t) = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) - U \cdot I \cdot [\cos(2\omega t) \cdot \cos(\varphi) + \sin(2\omega t) \cdot \sin(\varphi)] \quad (3.26)$$

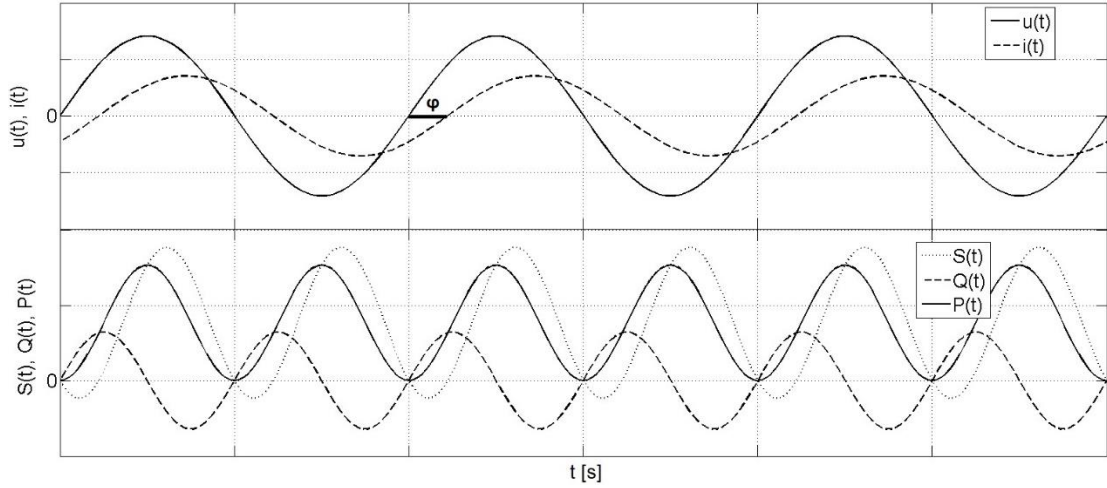
$$S(t) = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) [1 - \cos(2\omega t)] - U \cdot I \cdot \sin(\varphi) [\sin(2\omega t)] \quad (3.27)$$

Son eşitlikteki iki terimin katsayıları aktif ve reaktif güç olarak tanımlanır. Gerilimin ve akımın saf sinüs dalga biçimlerine sahip olduğu devrelerde görünür güç aslında iki alt bileşenin toplamından oluşur. Bunlar aktif güç ( $P$ , [W]) ve reaktif güç ( $Q$ , [VAr]) bileşenleri olarak adlandırılır. Dolayısıyla bu güçler için

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (3.28)$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi) \quad (3.29)$$

genel eşitlikleri elde edilir. Bu güçlerin zamana bağlı değişimleri Şekil 3.6’da verilmiştir. Aynı şekilde gerilimin ve akımın zamana bağlı değişimleri de verilmiştir. Bu değişimlere bakıldığında akım ile gerilim arasında  $\varphi$  kadar bir faz farkı olduğu görülür. Bu faz farkına bağlı olarak aktif ve reaktif güçler görünür güçlerden farklı bir değişim göstermektedir. Aktif gücün ortalaması sıfırdan farklı iken reaktif gücün ortalamasının sıfır olduğu şekilden de açık bir şekilde görülmektedir.



**Şekil 3.6.** Saf sinüzoidal durum için akım, gerilim ve güçlerin zamana bağlı değişimleri

Aktif ve reaktif güçlerin tanım olarak matematiksel hesabı için kullanılan genel eşitlikler aşağıdaki gibidir.

$$P = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u(t) \cdot i(t) dt \quad (3.30)$$

$$Q = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} u\left(t - \frac{T}{4}\right) \cdot i(t) dt \quad (3.31)$$

Bu değerler (2.19) ve (2.20)'de verilmiş olan akım ve gerilim eşitlikleri kullanılarak hesaplandığında,

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (3.32)$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi) \quad (3.33)$$

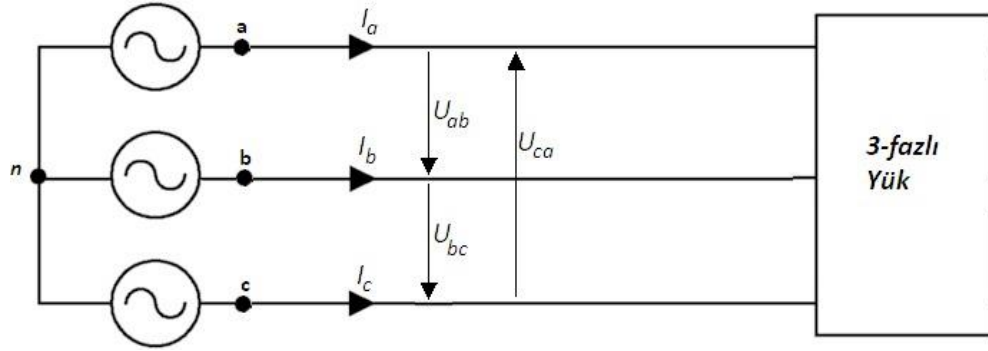
bulunur. Toplam güç, kaynak geriliminin ve akımının etkin değerleri çarpımı ile elde edilir. Öyle ki bu güç görünür güçtür;

$$S = U \cdot I \quad (3.34)$$

Son 3 denklem güçlerin matematiksel tanımından yola çıkılarak elde edilmiş olan eşitlikler olup daha önce bulunmuş olan denklemler ile aynıdır.

### 3.5. Üç-Fazlı Sistemlerde Güç

Şimdi de 3-fazlı sistemler için güç eşitliklerini yazalım. Bunun için Şekil 3.7'de verilmiş olan 3-fazlı kaynak yük sistemini göz önüne alalım.



Şekil 3.7. Üç-fazlı kaynak-yük sistemi

Sistemin dengeli olması durumunda gerilim ve akımlar için aşağıdaki eşitlikler geçerli olacaktır.

$$U = U_{ab} = U_{bc} = U_{ca} \quad (3.35)$$

$$I = I_a = I_b = I_c \quad (3.36)$$

Bu eşitliklerdeki  $U$  faz-faz gerilimini ve  $I$  hat akımını gösterir. Dengeli durum için sırasıyla aşağıdaki eşitlikler geçerlidir.

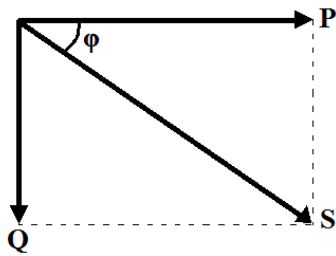
$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (3.37)$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin(\varphi) \quad (3.38)$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (3.39)$$

Geriliminin ve akımının zamana bağlı eşitlikleri (3.22) ve (3.23) ile verilmiş olan bir yükün akımı gerilimine göre geri fazdadır. Bu durum için yükün çektiği reaktif güce endüktif reaktif güç adı verilir. Güç sistemlerine bağlı yüklerin oldukça büyük bir kısmı omik-endüktif karakterlidir. Kapasitif veya omik-kapasitif karakterli yüklerin çektiği akımlar kendilerine uygulanan gerilime göre ileri fazdadır. Böylesi yüklerin çektiği reaktif güce ise kapasitif reaktif güç denir.

Yüklerin çektiği güçler güç diyagramı veya güç üçgeni adı verilen fazör diyagramları ile gösterilebilmektedir. Şekil 3.8’de ohmik-endüktif karakterli bir yüke ait güç diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.8. Omik-endüktif karakterli yüke ait güç diyagramı

Şekilde verilmiş olan güç diyagramı kullanılarak güçler için aşağıdaki eşitliklerin de yazılabileceği açıktır;

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (3.40)$$

$$P = S \cdot \cos(\varphi) \quad (3.41)$$

$$Q = S \cdot \sin(\varphi) \quad (3.42)$$

### 3.6. Harmonikli Durumda Güç

Harmonikli durumda güçlerin tanımı yapılırken genel olarak iki farklı yaklaşım kullanılmaktadır. Bunlar ilk kez 1927 yılında Budeanu tarafından ortaya konulan yaklaşım ve ilk kez Fryze tarafından 1932 yılında ortaya konulan yaklaşımlardır (Budeanu C. 1927, Fryze S. 1932 ve Emanuel A. E. 1990).

Gerilimin ve/veya akımın harmonik bileşenleri içermesi durumunda yukarıda yapılan güç tanımları yetersiz kalır. Bu durumda görünür, aktif ve reaktif gücün dışında yeni bir güç tanımına gerek duyulur ki bu güç Budeanu'nun güç tanımında bozunum güç olarak adlandırılmaktadır. Budeanu'nun güç tanımında aktif ve reaktif güçler, akımın ve gerilimin aynı frekanslardaki her bir harmonik bileşeninin ayrı ayrı bu güçlere katkılarının toplamı üzerinden hesaplanmaktadır. Bu güçlerin dışında kalan güç ise bozunum güç olarak tanımlanır.

Harmonikli durumda gerilimin ve akımın en genel biçimleri,

$$u(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} U_h \sin(h\omega t + \alpha_h) \quad (3.43)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \sin(h\omega t + \beta_h) \quad (3.44)$$

eşitlikleri ile verilir. Buna göre bu güçler için aşağıdaki eşitlikler geçerlidir;

$$S = \sqrt{\left( \sum_{h=1}^{\infty} U_h^2 \right) \cdot \left( \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \right)} = U \cdot I \quad (3.45)$$

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \cos(\alpha_h - \beta_h) \quad (3.46)$$

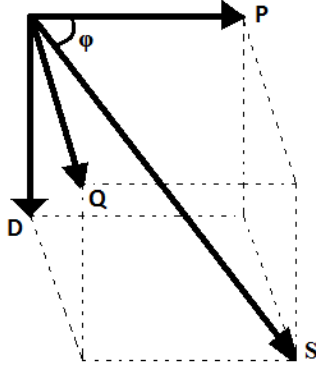
$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} U_h I_h \sin(\alpha_h - \beta_h) \quad (3.47)$$

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} (U_j^2 I_i^2 + U_i^2 I_j^2 - 2 U_i U_j I_i I_j \cos(\alpha_i - \beta_j))} \quad (3.48)$$

Her dört güç arasındaki ilişki ise,

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (3.49)$$

eşitliği ile gösterilir. Burada aktif ve reaktif güçler, aynı frekanslı olan akım ve gerilim bileşenlerinin oluşturduğu güçlerin toplamından oluşurken bozunum güç farklı frekanslı akım ve gerilim bileşenlerin toplamda oluşturduğu gücü gösterir. Söz konusu güçlerin fazör gösterimi Şekil 3.9'daki gibidir.



Şekil 3.9. Aktif, reaktif, bozunum ve görünür güçlerin fazör gösterimi

### 3.7. Güç Katsayısı

Şebekelerde yer alan yüklerin önemli bir kısmı omik-endüktif karakterlidir. Bu yüklerin çektiği akımlar ile bu yüklerin uçlarına gelen gerilimler arasında daima bir faz farkı ( $\phi$ ) oluşur. Bu açının 0'dan farklı bir değer alması durumunda (3.28) eşitliğinde yer alan  $\cos(\phi)$  değeri de 1'den daha küçük bir değer alır. Aynı zamanda (3.29) eşitliğinde yer alan  $\sin(\phi)$  değeri de 0'dan büyük bir değer alır. Sonuç olarak aktif gücün görünür güç içindeki oranında azalma ve reaktif gücün görünür güç içindeki oranında da artış olmuş olur. Bu yüzden  $\cos(\phi)$  değeri bir yükün çektiği etkin gücün toplam görünür güce oranının bir ölçütü olarak kullanılır ve güç katsayısı (GK) olarak bilinir.

$$GK = \cos(\phi) = \frac{P}{S} \quad (3.50)$$

Bir yükün güç katsayısı değeri 1'e ne kadar yakınsa çektiği gücü o derecede işe dönüştürüyor demektir. Güç katsayısının bu tanımı her ne kadar saf sinüzoidal gerilim ve akım için doğru olsa da harmonikli durumda anlamını yitirir. Bu yüzden güç katsayısının tanımı aktif gücün görünür güce oranı olarak tanımlanır. Güç katsayısı (GK), alternatif akım şebekesine bağlı bir yükün bu şebekeden çektiği gücü veya akımı hangi oranda işe veya enerjiye çevirdiğinin bir ölçütü olarak ortaya atılmış bir kavramdır.

$$GK = \frac{P}{S} \quad (3.51)$$

### 3.8. Etkin Değerlerin ve Güçlerin Ölçümü

Modern ölçüm sistemlerinde analog biçimli gerilim ve akım sinyalleri analog-dijital dönüştürücüler (ADC) yardımıyla örneklenerek dijital ortama veri olarak aktarılır. Bu veriler işlenerek etkin değerlerin, ortalama değerlerin, tepe değerlerinin, frekansın ve

güçlerin hesabı çeşitli yöntemler kullanılarak yapılır. Akımın ve gerilimin bir temel periyot boyunca örneklenmiş  $N$  adet değerleri aşağıda verildiği gibi olsun.

$$u = [u_1 \quad u_2 \quad \dots \quad u_{N-1} \quad u_N] \quad (3.52)$$

$$i = [i_1 \quad i_2 \quad \dots \quad i_{N-1} \quad i_N] \quad (3.53)$$

Bu durumda gerilimin ve akımın temel bileşeninin etkin değerleri ( $U_1$  ve  $I_1$ ) Fourier tekniği kullanılarak örneklenmiş değerler üzerinden aşağıdaki eşitliklerle hesaplanabilir.

$$U_{x1} = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=1}^N u_k \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (k-1)}{N}\right) \quad (3.54)$$

$$U_{y1} = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=1}^N u_k \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (k-1)}{N}\right) \quad (3.55)$$

$$I_{x1} = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=1}^N i_k \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (k-1)}{N}\right) \quad (3.56)$$

$$I_{y1} = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=1}^N i_k \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (k-1)}{N}\right) \quad (3.57)$$

$$U_1 = \sqrt{U_{x1}^2 + U_{y1}^2} \quad (3.58)$$

$$I_1 = \sqrt{I_{x1}^2 + I_{y1}^2} \quad (3.59)$$

Aynı yükün temel frekansta (50 Hz) çektiği gücün aktif ve reaktif bileşenleri ise aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanır.

$$P_1 = U_{x1} \cdot I_{x1} + U_{y1} \cdot I_{y1} \quad (3.60)$$

$$Q_1 = U_{x1} \cdot I_{y1} - U_{y1} \cdot I_{x1} \quad (3.61)$$

Bu güçler yükün yalnızca temel frekanstaki güçlerini ifade eder. Akımın ve/veya gerilimin harmonikli olması durumunda toplam aktif ve reaktif güçler her bir harmonik bileşenin neden olduğu aktif ve reaktif güç bileşenlerinin genel toplamlarıyla hesaplanır.

$$P_{\text{top}} = \sum_{h=1}^{\infty} P_h \quad (3.62)$$

$$Q_{\text{top}} = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h \quad (3.63)$$

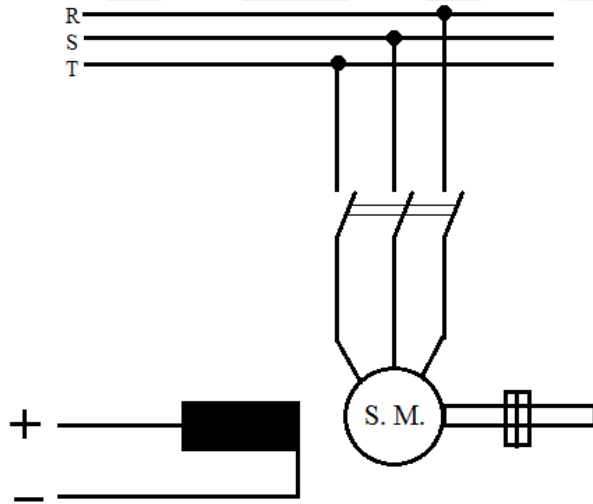
Gerilimin veya akımın yalnızca temel bileşeni değil de genel etkin değeri örnekleme değerleri üzerinden hesaplanabilir. Bunun için aşağıdaki eşitlikler kullanılabilir.

$$U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u_k^2} \quad (3.64)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_k^2} \quad (3.65)$$

### 3.9. Senkron Makineler

Bir elektrik makinesi çeşidi olan senkron makineler asenkron makineler gibi alternatif akım makineleridir. Genellikle generatör olarak üretilen bu makinelerin güçleri 1500-2000 MVA'ya kadar ulaşmıştır. Verdikleri gerilimlerde en fazla 27 kV kadardır. Küçük güçlerde bazı iyi özelliklerinden dolayı motor olarak ta imal edilmekte ve kullanılmaktadır. Bu makinaların dış kısmında bulunan hareketsiz parçasına stator veya endüvi denilmektedir. İç kısmında bulunan hareketli parçaya da rotor, endüktör veya kutup adı verilir. Bu makinalarda rotorun dönme hızı ile endüvide oluşan döner alanın hızı aynı olduğu için bu makinalara aynı hızlı anlamına gelen senkron makineler adı verilmiştir. Dolayısıyla motor çalışma durumlarında sabit hızda dönerler. Genel olarak doğru akım genaratörlerine dinamo da denildiği gibi, alternatif akım üreten senkron generatörlere alternatör de denilmektedir. Şekil 3.10'da bu makinelerin genel yapısı verilmiştir.



Şekil 3.10. Senkron makinenin genel yapısı

Senkron motorlar ile senkron generatörler arasında yapı bakımından hiçbir fark yoktur. Bir senkron makine hem generatör hem de motor olarak çalıştırılabilir. Yalnız ilk kalkışta yol vermeyi sağlamak için senkron generatörden farklı olarak kutuplarda sincap kafesli rotorda olduğu gibi bir kısa devre kafesi bulunabilir. Bu kafes yapıya amortisör kafesi veya amortisör sargısı adı verilir. Senkron motorlar sabit devir hızında dönerler. Rotor hızları senkron hıza eşittir.

$$n_s = \frac{60f}{p} \quad (3.66)$$

Örneğin 50 Hz frekansta kutup sayısı  $2p=4$  olan bir senkron motorun devir hızı

$$n_s = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ d/d} \quad (3.67)$$

'dir. Bir senkron makinenin senkron motor olarak çalışabilmesi için kutup sargılarına doğru gerilim uygulanması ve statoruna da bir alternatif gerilimin uygulanması gerekir. (Şekil 3.10)

Senkron motorlar sabit devrin istenildiği yerlerde kullanılabilirler. Ayrıca senkron motorların reaktif güç ayarını yapmak çok kolay olduğundan şebekelerin reaktif güç katsayılarını düzeltmek amacıyla da kullanılabilirler. Bu amaçla kullanılan motorlara senkron kompensatör veya dinamik faz kaydırıcı da denilmektedir.

### 3.10. Senkron Makinelerin Yapısı

Senkron makinaların dış kısmında bulunan stator üzerinde aynen asenkron makinalarda olduğu gibi 3 fazlı alternatif akım sargıları bulunur. Senkron makinelerin rotor tipine göre genel olarak 2 çeşidi vardır.

1-Yuvarlak rotorlu senkron makine

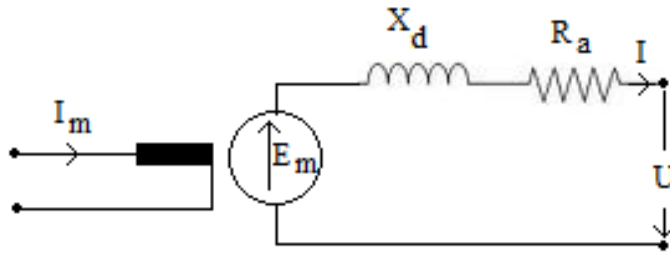
2-Çıkık kutuplu senkron makine

Statorda endüklenen gerilim sinüs şeklinde olabilmesi için sargılı rotorda oluklarının 1/3'ü boş bırakılır. Bunların kutup sayıları 2,4,6 olacak şekilde yapılırlar. Rotor çeşidi olarak çıkık kutuplu rotor da vardır.

Yan yana bulunan kutupların oluşturacağı manyetik alan N-S-N-S olacak şekilde sargıları sarılır. Rotordan alınan 2 tane uç mil üzerinde bulunan bileziklere bağlanır.

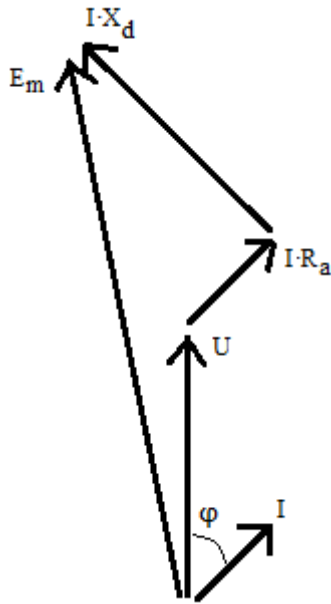
Kutuplar yapılırken statora yakın kısımlarına oluklar bırakılarak içlerine amortisör sargısı (çubukları) yerleştirilir. Amortisör sargısının yapısı aynen sincap kafesli asenkron motorların kafes yapısına benzer. Bu çubuklar her iki tarafları kısa devre halkaları ile birleştirilmiştir. Amortisör sargısının kullanılmasının amacı makine genaratör olarak çalışırken gerilimdeki dalgalanmaları önlemek ve motor çalışırken asenkron olarak yol vermeyi sağlamaktır. Amortisör sargısının rotor kutupları üzerindeki yerleşimi Şekil 3.11'de verilmiştir.





**Şekil 3.13.** Senkron makinenin basitleştirilmiş eşdeğer devresi

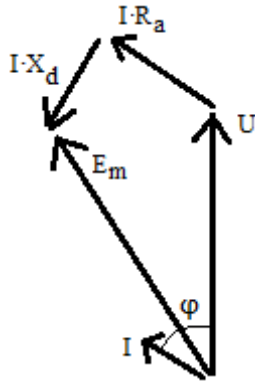
Şekil 3.13'te verilen eşdeğer devre senkron makinenin hem motor hem de generatör çalışma durumları için geçerlidir. Fakat motor çalışma durumunda akımın yönü içeriye doğru olacaktır. Aşağıda senkron makinenin generatör çalışma durumundaki 3 farklı yükteki (omik-endüktif, saf omik ve omik-kapasitif) fazör diyagramları görülmektedir.



**Şekil 3.14.** Senkron generatörün endüktif yük hali için fazör diyagramı

Şekil 3.14'teki fazör diyagramına bağlı olarak omik-endüktif yük durumu için geçerli olan aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

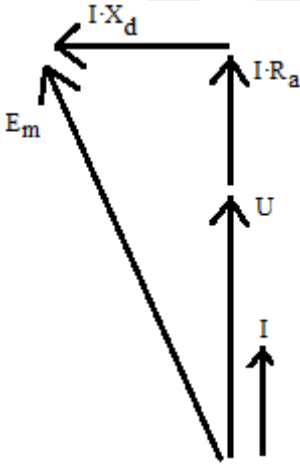
$$E_m = \sqrt{(U \cdot \cos \varphi + I \cdot R_a)^2 + (U \cdot \sin \varphi + I \cdot X_d)^2} \quad (3.69)$$



**Şekil 3.15.** Senkron generatörün kapasitif yük hali için fazör diyagramı

Şekil 3.15'teki fazör diyagramına bağlı olarak omik-kapasitif yük durumu için geçerli olan aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$E_m = \sqrt{(U \cdot \cos \varphi + I \cdot R_a)^2 + (U \cdot \sin \varphi - I \cdot X_d)^2} \quad (3.70)$$

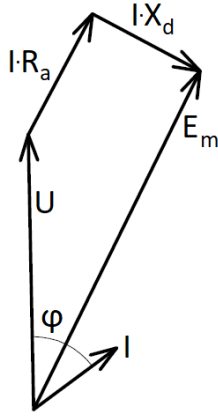


**Şekil 3.16.** Senkron generatörün saf omik yük hali için fazör diyagramı

Şekil 3.16'daki fazör diyagramına bağlı olarak saf omik yük durumu için geçerli olan aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$E_m = \sqrt{(U + I \cdot R_a)^2 + (I \cdot X_d)^2} \quad (3.71)$$

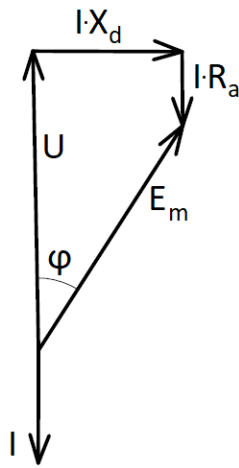
Benzer şekilde senkron motorun 3 farklı uyarım durumu için (düşük, birim güç faktörü ve yüksek) fazör diyagramları görülmektedir.



**Şekil 3.17.** Senkron motorun düşük uyarım durumu için fazör diyagramı

Şekil 3.17'deki fazör diyagramına bağlı olarak senkron motorun düşük uyarım durumu için geçerli olan aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

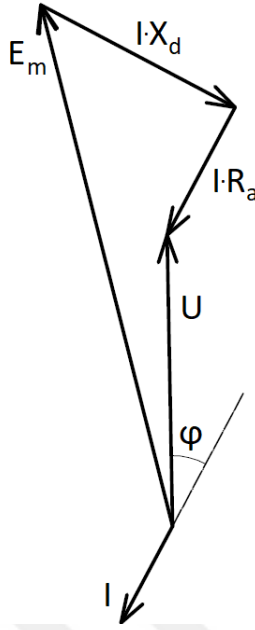
$$E_m = \sqrt{(U \cdot \cos \varphi - I \cdot R_a)^2 + (U \cdot \sin \varphi + I \cdot X_d)^2} \quad (3.72)$$



**Şekil 3.18.** Senkron motorun birim güç faktörlü uyarım durumu fazör diyagramı

Şekil 3.18'deki fazör diyagramına bağlı olarak senkron motorun birim güç faktörlü uyarım durumu için geçerli olan aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$E_m = \sqrt{(U - I \cdot R_a)^2 + (I \cdot X_d)^2} \quad (3.73)$$



**Şekil 3.19.** Senkron motorun yüksek uyarım durumu için fazör diyagramı

Şekil 3.19'daki fazör diyagramına bağlı olarak senkron motorun yüksek uyarım durumu için geçerli olan aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$E_m = \sqrt{(U \cdot \cos \varphi - I \cdot R_a)^2 + (U \cdot \sin \varphi - I \cdot X_d)^2} \quad (3.74)$$

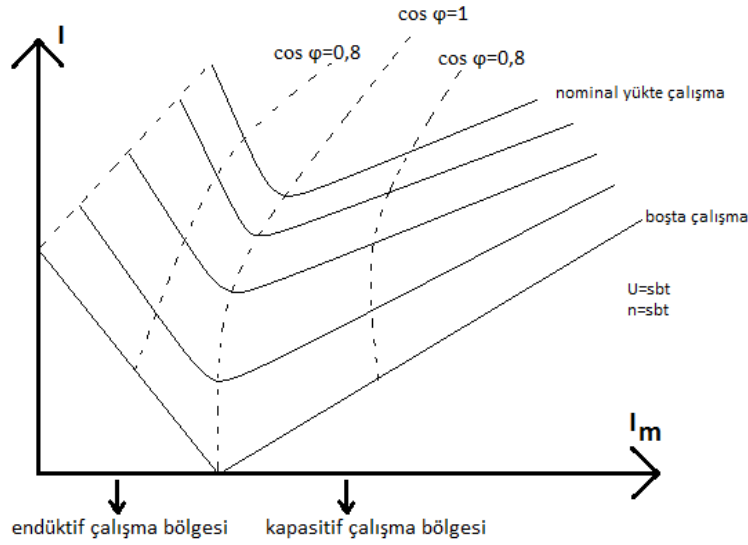
### 3.12. Senkron Motor Karakteristikleri

Senkron motorların en iyi bilinen iki karakteristiği bulunur. Bunlar Uyarma Akımı-Faz Akımı Karakteristiği ve Yük Açısı-Moment Karakteristikleridir. Aşağıda bu karakteristikler ile ilgili birtakım bilgiler verilmiştir.

#### Uyarma akımı - faz akımı karakteristiği (V eğrileri):

Sabit bir yük altına çalışan bir senkron motorun U (şebeke gerilimi) ile I motor akımı arasında bir faz farkı vardır.  $\varphi$  faz farkı olmak üzere motorun bu  $\varphi$  faz farkı  $I_m$  (uyarma akımı) ile ayarlanabilir. Düşük uyarma akımlarında motorun şebekeden çekeceği akımın reaktif bileşeni çok olacaktır. Uyarma akımı arttırılırsa bu akımın reaktif akım bileşenleri azalacaktır. Bu reaktif akım bileşeni endüktif karakterlidir. Yani motor omik-endüktif yük durumundadır. Uyarma akımının belli değerinde bu reaktif bileşen sıfır olur. ( $I_r=0$ )

Uyarma akımı daha da arttırılırsa motorun şebekeden çekeceği reaktif bileşen tekrar artar. Bu akım kapasitif karakterlidir. Yani motor omik-kapasitif karakterlidir. Bu durum grafiklerle gösterilirse bir V eğrisi elde edilir. Motorun milindeki yük farklı olursa elde edilen V eğrileri de farklı olur. Farklı yükler için elde edilen V eğrileri Şekil 3.20'de gösterildiği gibi olur.



**Şekil 3.20.** Senkron motorun V eğrileri

#### Yük açısı-moment karakteristiği:

Senkron motorlarda motorun stator döner alan hızı ile rotor kutupları aynı hızda döner. Dolayısıyla senkron motorlar sabit hızda dönen motorlardır. Yüksüz durumda yani boşta çalıştırılırken bir motorun statorundaki kutupların eksenini rotordaki kutupların eksenine ile çakışıkır. Bu durum Şekil 3.21’de gösterilmiştir.

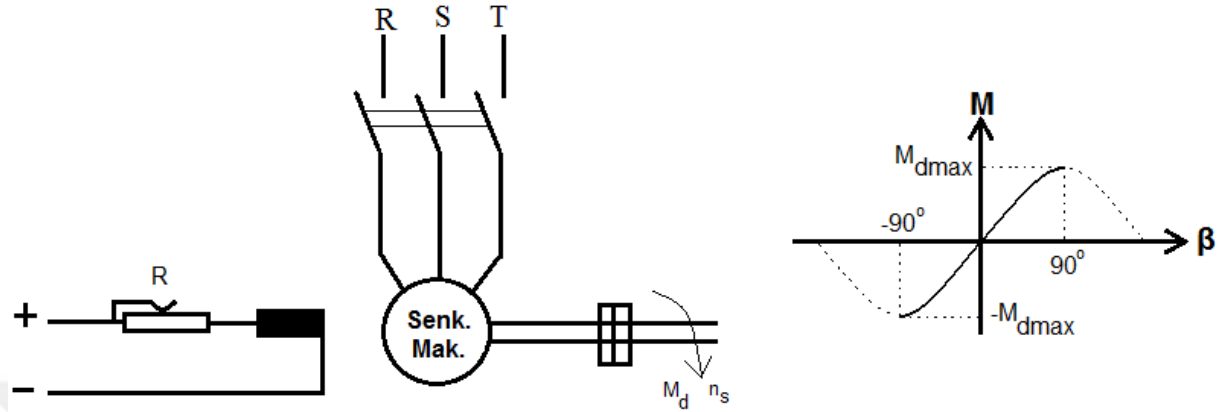


**Şekil 3.21.** Senkron motorun iki farklı mil momenti için rotor ve stator konumları ve yük açısı

Senkron motorun miline yavaş yavaş yük bindirildiğinde bu eksenler arasında bir açı oluşmaya başlar. Rotor kutupları stator kutuplarına göre  $\beta$  açısı kadar geride kalır. İşte bu açığa yük açısı denir. Motorun milindeki yükün momentine bağlı olarak bu  $\beta$  açısı değişir. Fakat devir sayısı değişmez.

Yük momenti arttırıldıkça  $\beta$  açısı büyür. Bu açı en fazla  $90^\circ$  olur. Bu açıyı yaratan mil momentine devrilme momenti veya kopma momenti denir.  $M_{dmax}$  ile gösterilir. Bu momentten daha fazla yük momentlerinde motor senkronizmden çıkar ve durur.

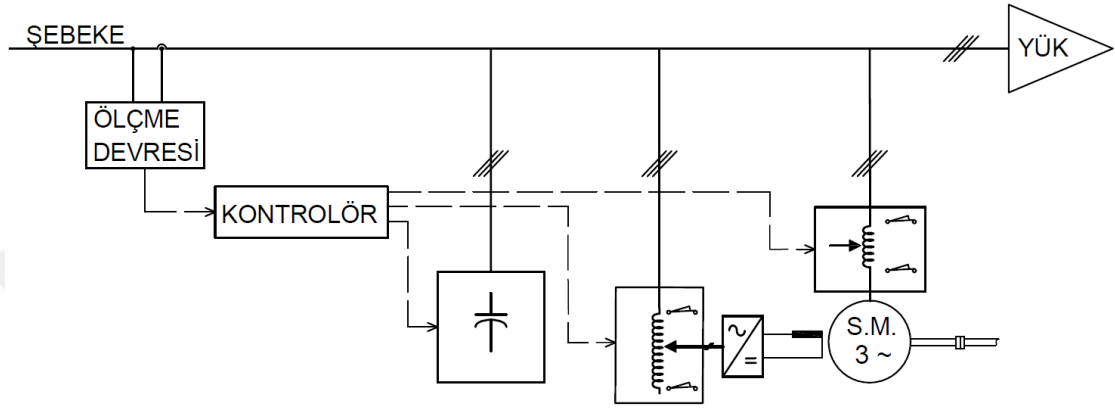
Eğer bir senkron makine bir senkron generatör olarak çalıştırılırsa  $\beta$  açısı 0 ile  $-90^\circ$  arasında değişir. Yine aynı şekilde bu  $M_{dmax}$  mil momentinde genaratör senkronizmden çıkar. Söz konusu yük açısının yük momentine bağlı değişimi Şekil 3.22'de verilmiştir.



Şekil 3.22. Senkron makine ve yük açısı karakteristiği

### 3.13. Hibrid Reaktif Güç Kompanzasyonu Sisteminin Yapısı

Bu tez çalışmasının amacını oluşturan hibrit kompanzasyon sisteminin genel yapısı Şekil 3.23'te verilmiştir. Bu sistem genel olarak bir anahtarlamalı kondansatör grubu ile bir senkron motoru koordineli bir biçimde çalıştırarak 3-fazlı ve dengeli/dengesiz yükün ihtiyacı olan reaktif gücü sağlamayı ve tam reaktif güç kompanzasyonunu yapmayı amaçlamaktadır.



**Şekil 3.23.** Hibrid reaktif güç kompanzasyon sisteminin genel yapısı

Bu sistemi oluşturan ana bileşenler sırasıyla:

- bir güç ölçme devresinden
- bir kontrolörden
- klasik kompanzasyon sistemlerinde de var olan bir kondansatör bankından,
- bir senkron motordan
- bir uyartım akımı sağlayıcısından (senkron motorun uyartım akımını sağlayan bir denetlenebilir ototrafo-doğrultucu yapısı) ve
- senkron motor faz sargılarına bağlı birer ayarlanabilir faz empedanslarından oluşmaktadır.

Sistemin çalışması çok kısaca şu şekildedir. Öncelikle şebeke tarafından ölçülen reaktif güç değerleri kontrolöre verilmektedir. Kontrolör, bir takım hesaplamalar sonunda bu güce en yakın kondansatör kademelerine karar vererek yalnızca bu kademeleri devreye almaktadır. Yalnız, klasik kondansatör anahtarlamalı kompanzasyon sistemlerinden farklı olarak ilgili kademelerin devreye girme sonrası şebeke tarafı artık reaktif güçlerinin bütün fazlar için ya tamamen endüktif ya da tamamen kapasitif olması sağlanmaktadır. Bunun nedeni senkron motora verilen uyartım akımının motorun her üç fazının reaktif güç çıkışını ya tamamen endüktif yada tamamen kapasitif değerlere getirebilmesidir. Kondansatör kademelerinin devreye alınması sonrasında uyartım akımı ve ayarlanabilir faz empedansları ayarlanarak senkron motorun fazlarından verdiği reaktif güçlerin değerleri şebeke tarafından ölçülen artık reaktif güç değerlerine eşit hale getirilmektedir. Böylece şebekeden çekilen reaktif gücün her üç faz için sıfıra olabildiğince yakın olması ve dengesiz yükün reaktif güç kompanzasyonunun tam anlamıyla yapılması amaçlanmaktadır. Aşağıda sırasıyla bu sistemde yer alan her bir bileşeni kısaca açıklanmıştır.

**Ölçme Devresi:** Ölçme devresi, şebekeden akım ve gerilim bilgisinin alınarak aktif ve reaktif güç hesaplamalarının yapıldığı kısım olup bu hesaplanan değerler kontrolöre iletilir. Bu tezin deneysel çalışmalarında kullanılan ölçme devresini temel olarak 3 adet akım sensörü ve 3 adet gerilim sensörü oluşturmuştur. Bu sensörlerin çıkışlarındaki küçük genlikli gerilim işaretleri bir DAQ kartının (Data Acquisition Card, Veri Edinim Kartı) ADC (Analog Digital Converter, Analog Dijital Çevirici) girişleri yardımıyla örneklenip bilgisayardaki MATLAB ortamına gönderilmiştir. Reaktif güçlerin hesabı da burada yapılmıştır. Hesaplamalar için (3.54-2.37) ve (3.61) eşitlikleri kullanılmıştır.

**Kontrolör:** Bu yapıda yer alan kontrolör, ölçme devresinden gelen şebeke tarafı reaktif güç değerlerini kullanarak bir takım hesaplamalar yapar ve yapılan hesaplamalara uygun olarak kondansatör kademelerini ve senkron motoru çalıştırır. Sonuç olarak şebeke tarafından ölçülen reaktif gücü olabildiğince sıfıra yakın bir değere getirmek için çeşitli anahtarlama yapar.

Kontrolör her bir faz için ayrı ayrı hesaplamalar yaptığından dolayı yük dengesiz dahi olsa tam kompanzasyonu gerçekleştirir. Bunun için klasik kondansatör anahtarlama kompanzasyon algoritmasına benzer bir biçimde kondansatör gruplarını devreye alır ya da çıkarır.

En küçük kondansatör kademelerinin kompanze edemediği artık reaktif güç ihtiyacını da senkron motorun vermesini sağlar. Eğer yükün ihtiyacı olan ve şebeke tarafından çekilen artık reaktif gücün cinsi endüktif ise senkron motorun uyartım akımını anma akımının altına indirerek endüktif reaktif güç üretilmesini sağlar. Benzer şekilde yükün ihtiyacı olan artık reaktif güç kapasitif özellikte ise senkron motorun uyartım akımını anma akımının üstüne çıkararak motorun kapasitif reaktif güç üretmesini sağlar.

Pratikte her bir fazın reaktif güç ihtiyacı genellikle dengesiz yüklerden dolayı aynı değildir. Bu yüzden motorun faz uçlarına bağlı olan ayarlanabilir bobinlerin değerleri kontrolör tarafından değiştirilerek senkron motorun her bir fazının reaktif güç çıkışı birbirlerinden bağımsız olarak istenilen reaktif güce getirilir.

Kontrolör yaptığı iş bakımından klasik reaktif güç kompanzasyonundaki reaktif güç kontrol rölesi ile benzer özellikler taşır. Burada kontrolör reaktif güç kontrol rölesinden farklı olarak senkron motorun her bir faz çıkışındaki reaktif gücü de kondansatörler kademelerinin verdiği reaktif güç ile koordineli bir şekilde denetler.

**Anahtarlama Kondansatörler:** Klasik kondansatör anahtarlama kompanzasyon sistemlerinde çok sayıda kondansatör kademesi bulunur. Bu kademelerin her birinin gücü de olabildiğince çeşitli olasılıkları sağlayabilmek için farklı değerlerdedir. Yapılan kompanzasyonun türü büyük çoğunlukla merkezi kompanzasyondur. Bu kompanzasyon sisteminde çok sayıda kondansatör bulunur. Bu kondansatörlerin çoğu 3-fazlı olup 3-fazlı kondansatörler devreye girdiklerinde yükün her bir fazına eşit miktarda reaktif güç verirler. Tek fazlı kondansatörler ise bağlı oldukları fazlara dengesiz yüklenme durumlarında ayrıca kapasitif reaktif güç sağlamakla görevlidirler.

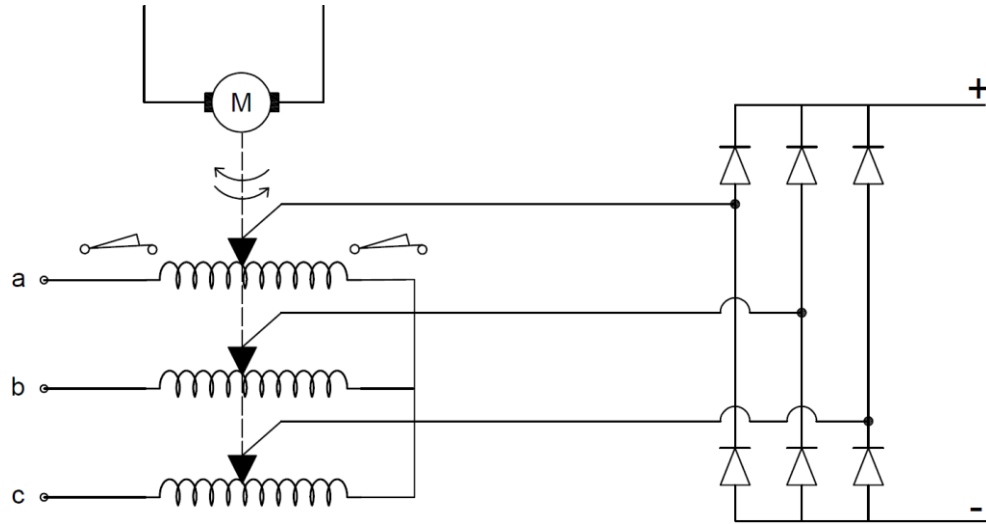
Klasik kompanzasyon sistemlerinde, değişken yük ortamında, hangi kondansatör kademelerinin devreye alınıp hangilerinin devre dışı bırakılacağına bir reaktif güç kontrol rölesi yardımıyla karar verilir. Karar verme sonrasında söz konusu rölenin kademe çıkışlarına bağlı kontaktör bobinleri enerjilendirilerek ilgili kademeler devreye alınır.

Bu tez çalışmasının konusunu oluşturan kompanzasyon sistemi burada bahsedilen klasik kondansatör anahtarlama kompanzasyon sistemi ile senkron kompanzatörün birleşiminden oluşur. Dolayısıyla anahtarlama kompanzasyon sistemi burada da kullanılmıştır. Klasik kompanzasyondan farklı olarak burada kondansatörlerin devreye girmesi sonrası fazların üçünün de ya endüktif ya da kapasitif bölgede olacak şekilde aynı artık reaktif güç ihtiyacı olması sağlanmaktadır.

**Uyartım Akımı Sağlayıcısı:** Bu tezde ortaya konulmuş olan yapıda senkron motorun faz sargılarından alınan reaktif güç endüktif olabileceği gibi kapasitif te olabilmektedir. Bu tamamen anahtarlama kompanzasyon sisteminin sağlayamadığı kademeler arası artık güç ile alakalıdır. Uyartım akımı anma değerinde iken senkron motorun bağlı olduğu şebekeyle yaptığı reaktif güç alışverişi neredeyse sıfırdır. Uyartım akımı anma değerinin altında (düşük uyartım) iken senkron motorun fazlarından verdiği reaktif güç endüktif karakterli olacaktır. Benzer şekilde senkron motorun uyartım sargısına verilen uyartım akımı anma değerinin üzerinde (aşırı uyartım) ise senkron motorun faz sargılarından kapasitif reaktif güç alınır.

Dolayısıyla, artık reaktif güç ihtiyacının endüktif olması durumunda uyartım akımının anma değerinin üzerine çıkarılması gerekir. Benzer şekilde artık reaktif güç ihtiyacının kapasitif olması durumunda uyartım akımının anma değerinin altına indirilerek endüktif güç sağlanması gerekir. Bunun için uyartım akımı sağlayıcısı kullanılır.

Bu tez çalışmasında önerilen ve deneysel çalışmalarda kullanılan uyartım akımı sağlayıcısı bir üç fazlı ototrafodan ve çıkışında yer alan bir üç fazlı kontrolsüz doğrultucudan oluşmaktadır. Fakat önemli olan uyartım akımının değiştirilebilir olması olduğundan bu yapı yerine bir DA-DA dönüştürücüsü, bir kontrollü doğrultucu veya değişken DA sağlayabilen benzeri yapılar da kullanılabilir. Şekil 3.24'te bu tez çalışmasında kullanılan uyartım akımı sağlayıcısının açık şeması görülmektedir.

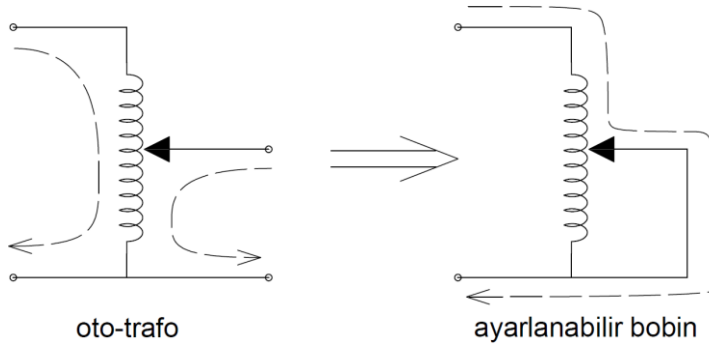


**Şekil 3.24.** Uyartım akımı sağlayıcısının açık devre şeması

Bu şemada yer alan ototrafonun mili bir DA motoru tarafından ileri veya geri yönde hareket ettirilmektedir. Motorun hareketi ile beraber ototrafonun çıkışından alınan 3-fazlı gerilimin değeri değişmektedir. Bu gerilim ototrafonun bağlı olduğu 3-fazlı kontrolsüz köprü doğrultucuya verilerek doğru gerilimin elde edilmesi sağlanmaktadır. Böylece değişken bir doğru gerilimin uygulandığı senkron motorun uyartım sargısından değişken bir doğru akımın akması sağlanmaktadır.

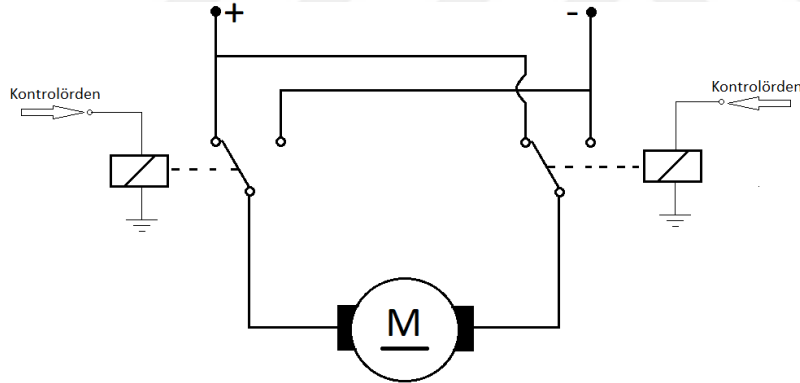
**Senkron Motor:** Bu tez çalışmasında kullanılan senkron motorun görevi anahtarlama kademelerinin anahtarlama sonrası tam kompanzasyon için gereken duyulan aktif reaktif gücü sağlamaktır. Senkron motorun vermesi gereken reaktif güç dengesiz bir güç olmasına karşın verdiği reaktif güç dengelidir. Fakat bir sonraki alt başlıkta anlatıldığı şekliyle ayarlanabilir empedanslar yardımıyla motorun her bir fazından verdiği güçler birbirlerinden bağımsız şekilde değiştirilebilir.

**Ayarlanabilir faz empedansları:** Ayarlanabilir empedansların temel görevi senkron motorun her bir fazının verdiği gücü birbirinden bağımsız bir şekilde değiştirmektir. Bunun için aktif güç kaybına da neden olmayacak bir pasif elemanın seçilmesi gereklidir. Bu yüzden direnç yerine akım sınırlandırmak amacıyla endüktansın kullanımı uygun görülmüştür. Pratikte büyük güçlü ve ayarlanabilir bir endüktans elde etmenin kolay bir yolu olarak sekonder uçları kısa devre edilmiş bir ototrafo kullanılabilir. Bu tezde de bu yol takip edilmiştir. Şekil 3.25'te bir tek-fazlı ototrafo ve bu ototrafodan elde edilmiş bir ayarlanabilir endüktansın şematik gösterimleri verilmiştir. Bu yapıda ototrafonun primer tarafının uçtan uca olan empedansından yararlanılır. Bu empedansın değeri devredeki bobin miktarının değişimi ile istenilen değere getirilir. Böylece akımın yolu üzerindeki empedansın değişimi ile beraber senkron motorun faz akımı/gücü değiştirilebilmektedir.



**Şekil 3.25.** Bir ototrafo ve ototrafodan elde edilmiş bir ayarlanabilir endüktansın şematik gösterimleri

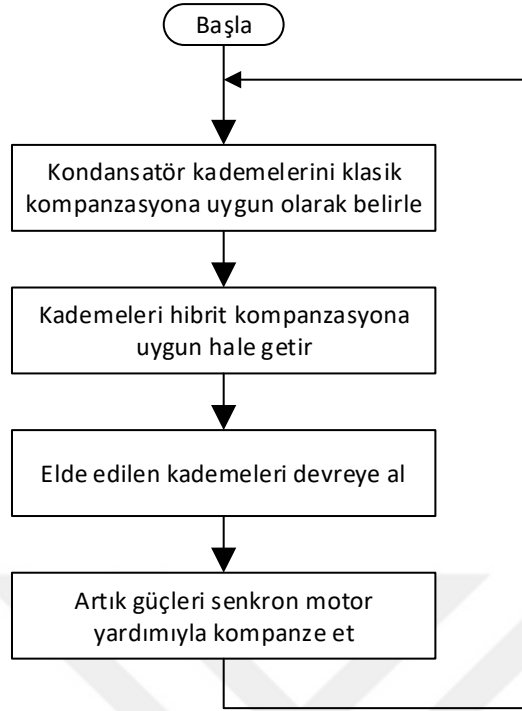
Ototrafoların (varyağın veya ayarlanabilir bobinlerin) her birinin kontrolörden gelen bilgiye göre değerinin artırılıp azaltılması için milinin ileri veya geri yönde hareket ettirilmesi gerekir. Deneysel düzenekte kullanılan tek-fazlı ototrafoların her birinin mili üzerinde bir DA motoru bulunmaktadır. Her bir motorun ileri veya geri yönde hareketini sağlamak için iki adet röle kullanılmış olup rölelerin bobinleri kontrolörün girişi/çıkışı olarak kullanılan DAQ kartları üzerinden kumanda edilmiştir. Şekil 3.26’da söz konusu motorun röle bağlantı şeması verilmiştir.



**Şekil 3.26.** Faz empedanslarının değişiminde kullanılan motorların röle bağlantı şeması

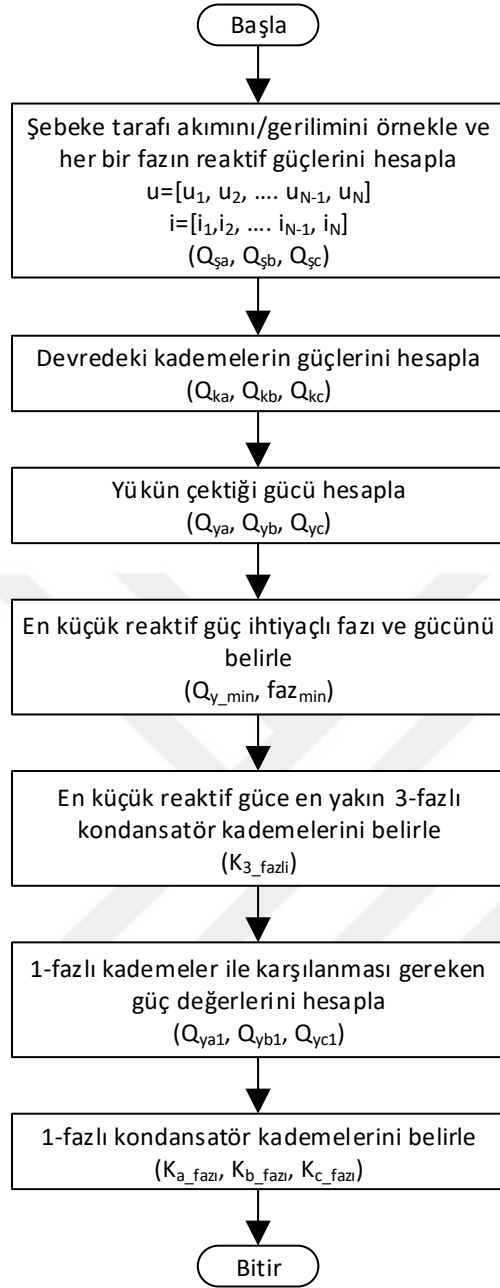
### 3.14. Hibrid Kompanzasyon Sisteminin Kontrolü

Hibrid reaktif güç sistemin kontrolü genel olarak 4 adımda gerçekleştirilmektedir. Bu adımlar Şekil 3.27’de verilmiştir.



**Şekil 3.27.** Hibrid sistemin genel kontrol adımlarına ait akış şeması

**İlk adımda,** Şekil 3.27’de verildiği gibi şebeke tarafından ölçülen reaktif güce uygun olarak devrede olması gereken kondansatör kademeleri belirlenmektedir. Kademelerin belirlenme biçimi klasik kondansatör anahtarlama reaktif güç kompanzasyonundaki biçim ile aynıdır. Belirlenen tek- ve üç-fazlı kondansatör kademelerinin devreye alınması halinde şebeke tarafında ölçülecek her bir fazın reaktif güçleri minimum değerlerinde olacaktır. Fakat, bu hali ile kondansatör kademelerinin kompanse edemediği artık reaktif güçleri senkron motor yardımıyla tam olarak kompanse edebilmek her zaman mümkün olmayacaktır. Çünkü klasik kompanzasyonda şebeke tarafındaki fazlara ait artık reaktif güçlerin bazıları endüktif olabileceği gibi bazıları da kapasitif olabilmektedir. Halbuki senkron motorun faz uçlarından verebildiği reaktif güçler aynı anda hem kapasitif hem de endüktif olamaz. İşte bu yüzden şebeke tarafı artık reaktif güçlerin aynı cinsten olması gerekmektedir. İlk adıma ait detaylı akış şeması Şekil 3.28’de verilmiştir.



**Şekil 3.28.** Kondansatör kademelerinin klasik reaktif güç kompanzasyonuna uygun olarak belirlenme adımları akış şeması

Bu akış şemasına uygun olarak yapılan işlemler sırasıyla şöyledir: Öncelikle şebeke tarafı 3-fazlı gerilimler ve akımlar bir ölçme kartı yardımıyla DAQ kartlarının okuyabileceği gerilim seviyesine getirilmektedir. Bu gerilimler DAQ kartlarının ADC girişleri tarafından örneklenerek MATLAB ortamına alınmaktadır. Burada (3.54-3.57) ve (3.61) eşitlikleri kullanılarak şebekenin her bir fazından çekilen reaktif güçler ( $Q_{şa}$ ,  $Q_{şb}$  ve  $Q_{şc}$ ) hesaplanmaktadır. Sonrasında devredeki kondansatör kademelerinin güçleri ( $Q_{ka}$ ,  $Q_{kb}$  ve  $Q_{kc}$ ) hesaplanmaktadır:

$$Q_{3f} = \frac{K_{3f1} \cdot Q_{3f1} + K_{3f2} \cdot Q_{3f2} + \dots + K_{3fp} \cdot Q_{3fp}}{3} \quad (3.75)$$

$$Q_{ka} = K_{a1} \cdot Q_{ka1} + K_{a2} \cdot Q_{ka2} + \dots + K_{aq} \cdot Q_{kaq} + Q_{3f} \quad (3.76)$$

$$Q_{kb} = K_{b1} \cdot Q_{kb1} + K_{b2} \cdot Q_{kb2} + \dots + K_{bq} \cdot Q_{kbq} + Q_{3f} \quad (3.77)$$

$$Q_{kc} = K_{c1} \cdot Q_{kc1} + K_{c2} \cdot Q_{kc2} + \dots + K_{cq} \cdot Q_{kcq} + Q_{3f} \quad (3.78)$$

Bu eşitliklerdeki

|                                    |   |                                                                              |
|------------------------------------|---|------------------------------------------------------------------------------|
| $Q_{3f}$                           | : | devredeki 3-fazlı kondansatörlerin tek-faz gücünü,                           |
| $Q_{3f1}, Q_{3f2}, \dots, Q_{3fp}$ | : | 3-fazlı kondansatör kademelerinin güçlerini,                                 |
| $Q_{3a1}, Q_{3a2}, \dots, Q_{3aq}$ | : | a fazına bağlı 1-fazlı kondansatör kademelerinin güçlerini,                  |
| $Q_{3b1}, Q_{3b2}, \dots, Q_{3bq}$ | : | b fazına bağlı 1-fazlı kondansatör kademelerinin güçlerini,                  |
| $Q_{3c1}, Q_{3c2}, \dots, Q_{3cq}$ | : | c fazına bağlı 1-fazlı kondansatör kademelerinin güçlerini,                  |
| $K_{3f}$                           | : | devredeki 3-fazlı kondansatörlerin tek-faz gücünü,                           |
| $K_{3f1}, K_{3f2}, \dots, K_{3fp}$ | : | 3-fazlı kondansatör kademelerinin konumunu (1: devrede ve 0: devrede değil), |
| $K_{a1}, K_{a2}, \dots, K_{aq}$    | : | a-fazı 1-fazlı kondansatör kademelerinin konumunu,                           |
| $K_{b1}, K_{b2}, \dots, K_{bq}$    | : | b- fazı 1-fazlı kondansatör kademelerinin konumunu,                          |
| $K_{c1}, K_{c2}, \dots, K_{cq}$    | : | c- fazı 1-fazlı kondansatör kademelerinin konumunu,                          |
| $p$ ve $q$                         | : | 3- ve 1- fazlı kondansatör kademelerinin sayısını                            |

göstermektedir. Sonrasında ise şebekeden çekilen güçler ile kademelerin verdiği güçler toplanarak yükün her bir fazının çektiği güç ( $Q_{ya}$ ,  $Q_{yb}$  ve  $Q_{yc}$ ) hesaplanmaktadır:

$$Q_{ya} = Q_{\text{şa}} + Q_{ka} \quad (3.79)$$

$$Q_{yb} = Q_{\text{şb}} + Q_{kb} \quad (3.80)$$

$$Q_{yc} = Q_{\text{şc}} + Q_{kc} \quad (3.81)$$

Bir sonraki adımda yükün en küçük reaktif güç çeken fazının güç değeri belirlenmektedir:

$$Q_{y\min} = \min[Q_{ya} \quad Q_{yb} \quad Q_{yc}] \quad (3.82)$$

Toplamda  $p$  adet 3-fazlı kondansatör kademelerinin var olduğu düşünülürse  $2^p$  tane 3-fazlı kondansatör kombinasyonu mümkündür. En uygun 3-fazlı kademe kombinasyonunu elde etmek için istenen güç ile bütün kombinasyonlar arasındaki fark alınarak minimum olanı seçilir. Dolayısıyla, bir önceki adımda belirlenen güce en yakın 3-fazlı kondansatör kademeleri aşağıdaki eşitlik ile bulunur.

$$[Q_{c3f}(i_{3f}) \quad i_{3f}] = \min \left( \left| Q_{ymin} - \frac{Q_{c3f}(1, \dots, 2^p)}{3} \right| \right) \quad (3.83)$$

Son eşitlikteki  $Q_{c3f}$  3-fazlı kondansatör kademe olasılıklarını,  $i_{3f}$  ise belirlenen kademelerin sıra numarasını göstermektedir. 3-fazlı kondansatör kademe olasılıkları

$$Q_{c3f} = [0, \quad Q_{3f1}, \quad Q_{3f2}, \quad \dots, \quad Q_{3f1} + \dots Q_{3fp}] \quad (3.84)$$

biçiminde olup küçükten büyüğe doğru bütün toplam güç olasılıklarını içermektedir. Böylece devrede olması 3 fazlı kondansatör kademeleri ( $K_{3\_fazlı}$ ) belirlenmiş olmaktadır.

Bir sonraki adımda yükün 1-fazlı kondansatör kademeleri ile karşılanması gereken güç değerleri ( $Q_{ya1}$ ,  $Q_{yb1}$  ve  $Q_{yc1}$ ) hesaplanmaktadır.

$$Q_{ya1} = Q_{ya} - \frac{Q_{c3f}(i_{3f})}{3} \quad (3.85)$$

$$Q_{yb1} = Q_{yb} - \frac{Q_{c3f}(i_{3f})}{3} \quad (3.86)$$

$$Q_{yc1} = Q_{yc} - \frac{Q_{c3f}(i_{3f})}{3} \quad (3.87)$$

Bir sonraki adımda devrede olması gereken 1-fazlı kondansatör kademeleri bulunmaktadır:

$$[Q_{ca}(i_a) \quad i_a] = \min \left( \left| Q_{ya1} - Q_{ca}(1, \dots, 2^q) \right| \right) \quad (3.88)$$

$$[Q_{cb}(i_b) \quad i_b] = \min \left( \left| Q_{yb1} - Q_{cb}(1, \dots, 2^q) \right| \right) \quad (3.89)$$

$$[Q_{cc}(i_c) \quad i_c] = \min \left( \left| Q_{yc1} - Q_{cc}(1, \dots, 2^q) \right| \right) \quad (3.90)$$

Son eşitliklerdeki  $Q_{ca}$ ,  $Q_{cb}$  ve  $Q_{cc}$  sırasıyla a, b ve c fazları için 1-fazlı kondansatör kademe olasılıklarını,  $i_a$ ,  $i_b$  ve  $i_c$  ise belirlenen kademelerin sıra numarasını göstermektedir. 1-fazlı kondansatör kademe olasılıkları

$$Q_{ca} = [0, \quad Q_{a1}, \quad Q_{a2}, \quad \dots, \quad Q_{a1} + \dots Q_{aq}] \quad (3.91)$$

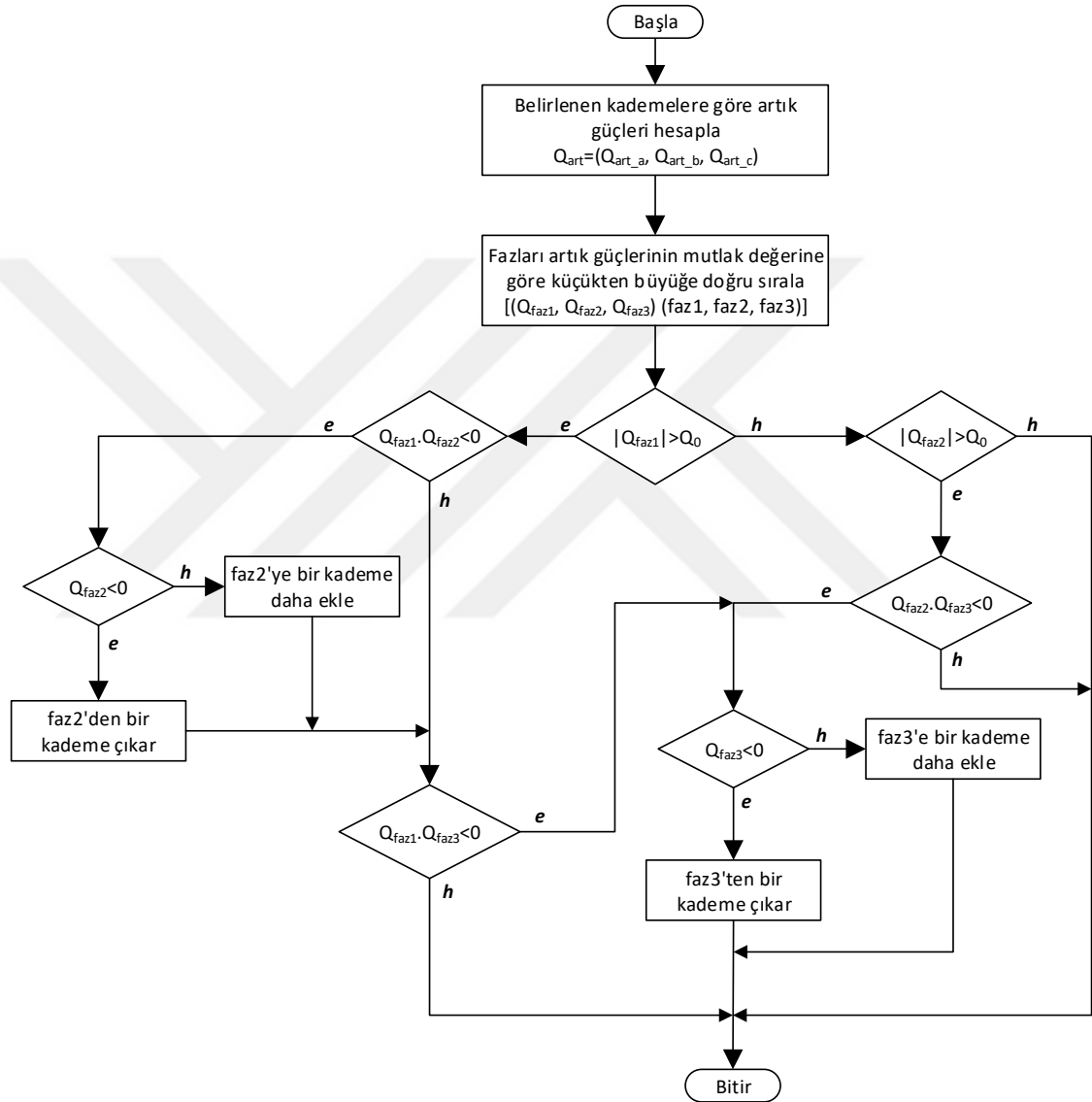
$$Q_{cb} = [0, \quad Q_{b1}, \quad Q_{b2}, \quad \dots, \quad Q_{b1} + \dots Q_{bq}] \quad (3.92)$$

$$Q_{cc} = [0, \quad Q_{c1}, \quad Q_{c2}, \quad \dots, \quad Q_{c1} + \dots Q_{cq}] \quad (3.93)$$

biçiminde olup küçükten büyüğe doğru bütün toplam güç olasılıklarını içermektedir. Böylece devrede olması 1-fazlı kondansatör kademeleri ( $K_{a\_fazlı}$ ,  $K_{b\_fazlı}$  ve  $K_{c\_fazlı}$ ) belirlenmiş olmaktadır.

**İkinci adımda**, artık reaktif güçlerin bütün fazlar için aynı cinsten olması sağlanmaktadır. İdealde bir fazın reaktif gücü sıfıra eşit ise tam kompanze edilmiş demektir. Burada ise, eğer fazlardan herhangi birinin reaktif gücünün ( $Q_{faz}$ ) mutlak değeri belirlenen bir

minimum değerin ( $Q_0$ ) altında ise tam kompanze edilmiş sayılmaktadır. Yani,  $|Q_{faz}| < Q_0$  ise tam kompanze edilmiş sayılır. Bu adımda tam kompanze edilmemiş fazların reaktif güçlerinin aynı işaretli yapılması amaçlanmaktadır. Bunu başarabilmek için artık reaktif gücünün cinsi endüktif olan bir faza yeni bir tek-fazlı kondansatör kademesi eklenerek kapasitif olması sağlanmaktadır. Benzer şekilde artık reaktif gücü kapasitif olan bir fazın çektiği reaktif gücü endüktif yapabilmek için devrede olan bir tek-fazlı kondansatör kademesi devre dışı bırakılır. Bu adıma ait detaylı akış şeması Şekil 3.29'da verilmiştir.



**Şekil 3.29.** Klasik reaktif güç kompanzasyonu için belirlenmiş olan kademelerin hibrid kompanzasyona uygun hale getirilme adımları akış şeması

Bu akış şemasına uygun olarak yapılan işlemler sırasıyla şöyledir: Öncelikle bir önceki adımda belirlenmiş olan kondansatör kademelerinin devrede olması halinde şebekeden çekilecek artık reaktif güç değerleri hesaplanmaktadır.

$$Q_{art\_a} = Q_{yal} - Q_{ca}(i_a) \quad (3.94)$$

$$Q_{art\_b} = Q_{yb1} - Q_{cb}(i_b) \quad (3.95)$$

$$Q_{art\_c} = Q_{yc1} - Q_{cc}(i_c) \quad (3.96)$$

Sonrasında ise fazların artık güçleri mutlak değerlerine göre küçükten büyüğe doğru sıralanmakta ve faz numaraları ile beraber ( $Q_{faz1}$ ,  $Q_{faz2}$ ,  $Q_{faz3}$ ) ve (faz1, faz2, faz3) değişkenlerine atanmaktadır. Değerlerin sıralanması sonrası ilk işlem olarak en küçük güç ihtiyacı olan fazın (“faz1”) tam kompanze durumda olup olmadığına bakılmaktadır. Yani,

eğer  $|Q_{faz1}| < Q_0 \rightarrow$  tam kompanze edilmiş ve

eğer  $|Q_{faz1}| > Q_0 \rightarrow$  tam kompanze edilmemiş demektir. Eğer “faz1” tam kompanze değilse bu fazın reaktif gücü ile bir sonraki fazın reaktif gücünün aynı cinsten olup olmadığına bakılmaktadır. Yani,

eğer  $|Q_{faz1}.Q_{faz2}| < 0 \rightarrow$  her iki fazın güçleri farklı cinstendir ve

eğer  $|Q_{faz1}.Q_{faz2}| > 0 \rightarrow$  her iki fazın güçleri aynı cinstendir. Güçler aynı cinsten ise sorun yok demektir. Farklı işaretli ise  $Q_{faz2}$ ’nin işaretine bakılarak kapasitif ise bir kademenin devreden çıkarılması ve endüktif ise yeni bir kademenin devreye alınması sağlanmaktadır. Yani,

eğer  $Q_{faz2} < 0 \rightarrow$  kapasitif ve

eğer  $Q_{faz2} > 0 \rightarrow$  endüktif olduğu sonucuna varılır. Bir sonraki adımda benzer işlemler uygulanarak  $Q_{faz1}$  ile  $Q_{faz3}$  güçlerinin aynı cinsten olup olmadığına bakılır. Yine güçler aynı cinsten ise sorun yok demektir. Farklı işaretli ise  $Q_{faz3}$ ’ün işaretine bakılarak kapasitif ise bir kademenin devreden çıkarılması ve endüktif ise yeni bir kademenin devreye alınması sağlanmaktadır.

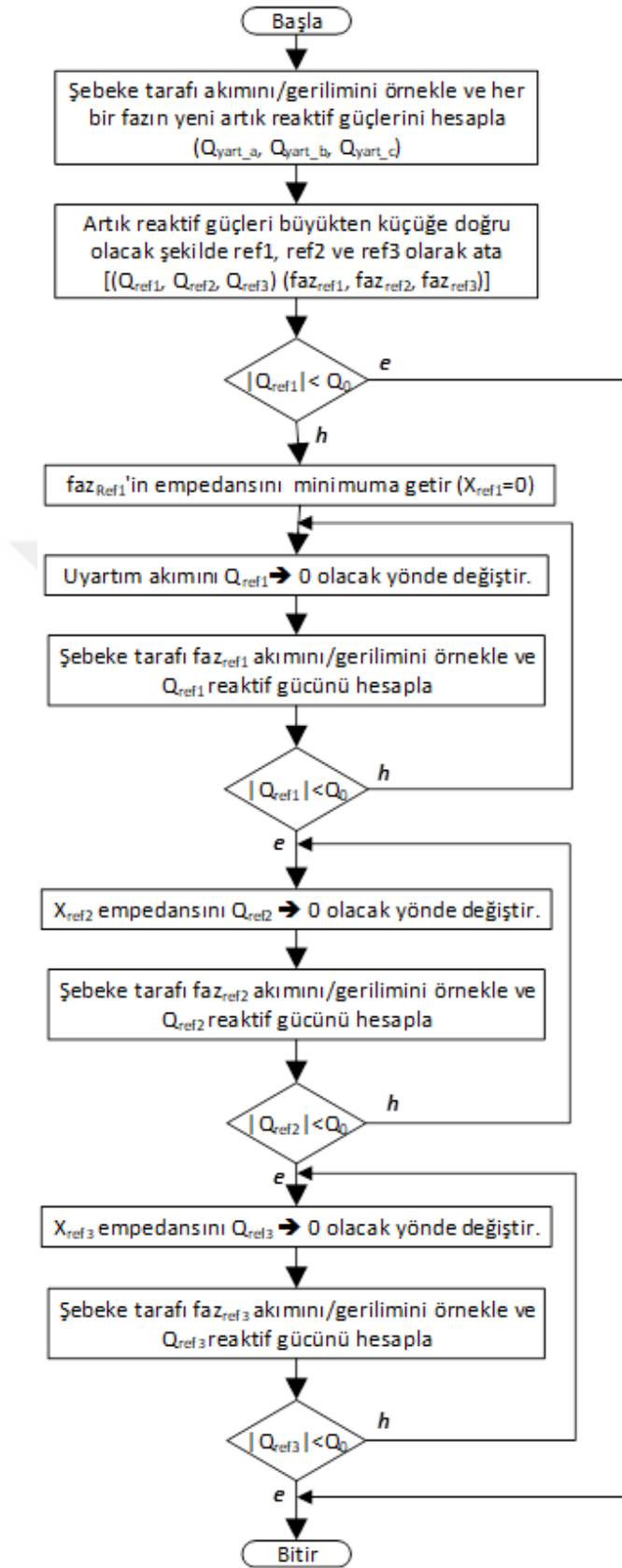
Eğer “faz1” tam kompanze ise bir sonraki fazın (“faz2”) tam kompanze olup olmadığına bakılmaktadır. Yukardakinin benzeri biçimde eğer “faz2” tam kompanze ise işlem sonlandırılırken tam kompanze değilse bu faz ile bir sonraki fazın (“faz3”) işaretlerinin aynı olup olmadığına bakılır. Eğer aynı ise işlem basamakları sonlandırılırken farklı ise  $Q_{faz3}$ ’ün endüktif veya kapasitif olup olmadığına bakılır. Yine yukardakinin benzeri biçimde kapasitif ise bir kademenin devreden çıkarılması ve endüktif ise yeni bir kademenin devreye alınması sağlanarak işlem basamakları sonlandırılır.

**Üçüncü adımda**, bir önceki adımın sonunda belirlenmiş olan kondansatör kademeleri devreye alınır. Bu bir sonraki adımda senkron motora ait kontrol algoritmasının (dördüncü adım) çalışabilmesi için gerekli olan şebeke tarafı artık güçlerinin belirlenebilmesi için gereklidir.

**Dördüncü adımda**, kondansatör kademelerinin devreye girmesi/çıkması sonrasındaki artık reaktif güçlerin sıfır veya sıfıra yakın bir değere getirilmesi ve böylece tam kompanzasyonun tamamlanması amaçlanmaktadır. Bunun için öncelikle en fazla artık gücü çeken faz “ref1” fazı olarak belirlenerek bu fazın ayarlanabilir faz empedansı sıfıra indirilir. Sonrasında ise uyartım akımı değiştirilerek aynı fazın artık reaktif gücü sıfıra

yaklaştırılır. Eğer uyartım akımı anma değerinin altında ise senkron motor endüktif bölgede çalışıyor demektir. Endüktif bölgede iken uyartım akımının artışı reaktif gücün azalmasına ve uyartım akımının azalışı da reaktif gücün artmasına neden olur. Benzer şekilde, eğer uyartım akımı anma değerinin üzerinde ise senkron motor kapasitif bölgede çalışıyor demektir. Kapasitif bölgede iken uyartım akımının artışı reaktif gücün de artışına neden olurken ve uyartım akımının azalışı reaktif gücün de azalmasına neden olur. Uyartım akımının uygun şekilde değiştirilmesi sonunda eğer,  $|Q_{ref1}| < Q_0$  ise “ref1” fazı tam kompanze edilmiş sayılır. Diğer fazların tam reaktif güç kompanzasyonu ise aynı fazlara ait ayarlanabilir faz empedanslarının değişimi ile yapılır. Empedansın artışı faz akımını sınırlandıracağından dolayı reaktif gücün azalmasına neden olur. Benzer şekilde empedansın azalması faz akımını da arttıracığından dolayı reaktif güç artar. Bu adıma ait detaylı akış şeması Şekil 3.30’da verilmiştir.





Şekil 3.30. Artık reaktif güçlerin senkron motorla kompanze edilme adımları akış şeması

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, tez çalışmaları kapsamında yapılan simülasyon çalışmaları verilmiştir. Simülasyon çalışmaları MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Önerilen hibrid kompanzasyon sisteminin temel donanımları olan ayarlanabilir endüktansın ve faz empedansları ayar motorlarının MATLAB/Simulink modeli bulunmadığından bu donanımlar modellenerek kullanılmıştır. Ayrıca senkron motorun MATLAB'daki simülasyon modeli dinamik özellikleri de içeren karmaşık bir model olup simülasyonların hızlı gerçekleştirilebilmesi amacıyla daha basit bir senkron motor simülasyon modeli oluşturulmuştur. Aşağıda sırasıyla bu modeller tanıtılmış ve sonrasında yapılan simülasyon çalışmaları ve sonuçları verilmiştir.

##### 4.1. Senkron Makinenin MATLAB Ortamında Modellenmesi

Senkron makineler, uyarım gerilimleri (veya akımları) ile orantılı olarak faz sargılarında 3-fazlı gerilim endüklenen ( $E_a$ ,  $E_b$  ve  $E_c$ ) makinelerdir. Bu gerilimlerin değeri ile makinenin bağlı olduğu hattın 3-fazlı gerilimleri ( $U_a$ ,  $U_b$  ve  $U_c$ ) arasındaki fark makinenin bağlı olduğu şebeke ile reaktif güç alışverişini belirler. Öyle ki,  $E > U$  olması durumunda şebekeye doğru bir reaktif güç (kapasitif reaktif güç) akışı gerçekleşir. Ters durumda ise, yani  $E < U$  olması halinde, şebekeden senkron makineye doğru bir reaktif güç (endüktif reaktif güç) akışı gerçekleşir.

Bir enerji dönüşüm makinası olarak göz önüne alındığında bir senkron makinenin milinden verilen/alınan mekanik güç ile 3-fazlı uçlarından alınan/verilen aktif elektrik gücü arasında yalnızca kayıplar kadar bir fark bulunur. Bu kayıp güç aynı zamanda senkron makinenin indüklenen gerilimleri arasındaki faz farkına bağlıdır.

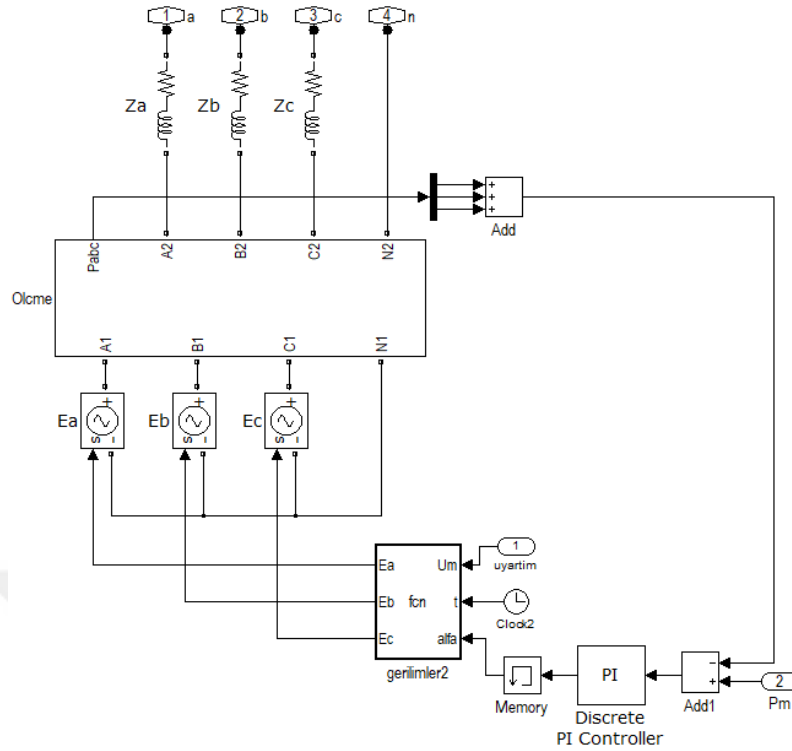
Bu iki bilgi göz önüne alınarak senkron makinenin basit bir MATLAB/simulink modeli Şekil 5.1'de verildiği biçimiyle oluşturulmuştur. Oluşturulan bu modelde senkron makine bir 3-fazlı gerilim kaynağına bağlı empedanslardan oluşmaktadır. Bu empedanslar ( $Z_a$ ,  $Z_b$  ve  $Z_c$ ) senkron makinenin faz sargı empedanslarını temsil etmektedir. Empedansların içeriğindeki dirençler kayıpları modellerken reaktans reaktif güç oranını belirlemektedir. Burada indüklenen gerilimlerin eşitlikleri

$$E_a = \sqrt{2} \cdot U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (4.1)$$

$$E_b = \sqrt{2} \cdot U_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \alpha) \quad (4.2)$$

$$E_c = \sqrt{2} \cdot U_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \alpha) \quad (4.3)$$

biçiminde olup bu eşitliklerdeki  $\alpha$  açısı aktif güç akışını belirleyen açıdır. Bu açı mekanik ve aktif güç arasındaki dengeye bağlı olarak bir PI döngüsü yardımıyla hesaplanmaktadır.



**Şekil 4.1.** Senkron makinenin basit MATLAB/Simulink modeli

#### 4.2. Ayarlanabilir Faz Empedanslarının MATLAB Ortamında Modellenmesi

MATLAB/Simulink kütüphanesinde sabit değerli endüktans modeli mevcut iken ayarlanabilir endüktans modeli bulunmamaktadır. Bu yüzden bu tez kapsamında bir ayarlanabilir endüktans modeli oluşturulmuştur. Model endüktansın tanım bağıntısından yola çıkılarak geliştirilmiştir. Endüktansın tanım bağıntısı

$$U_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \quad (4.4)$$

biçimindedir. Bu bağıntı

$$di_L(t) = \frac{1}{L} U_L(t) dt \quad (4.5)$$

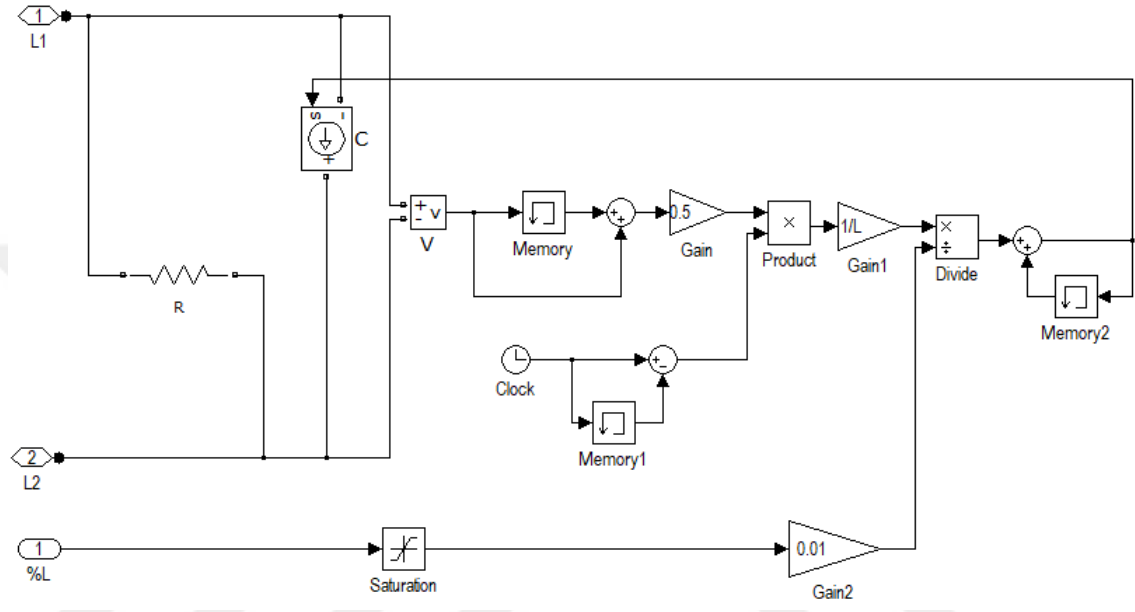
biçiminde yeniden yazılabilir. Son eşitlik akımın ve gerilimin ayrık değerlerinin farkı ve ortalaması kullanılarak yeniden aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$i_L(t) - i_L(t - dt) = \frac{1}{L} \frac{U_L(t) + U_L(t - dt)}{2} dt \quad (4.6)$$

Dolayısıyla endüktans akımının anlık değeri

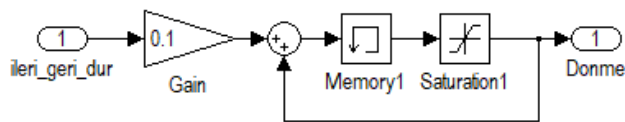
$$i_L(t) = \frac{1}{L} \frac{U_L(t) + U_L(t-dt)}{2} dt + i_L(t-dt) \quad (4.7)$$

olarak elde edilir. Bu eşitlikteki L endüktansı değeri 0 ile 1 arasında değişen bir %L değeri ile çarpılarak ayarlı endüktans modeli oluşturulabilir. Sonuç olarak bir akım kaynağı biçiminde oluşturulan ayarlanabilir endüktansın modeli Şekil 4.2’de verilmiştir.



**Şekil 4.2.** Ayarlanabilir faz empedansının MATLAB/Simulink modeli

Pratikte kullanılabilir bir ayarlanabilir faz empedansının ototrafolarından oluşturulduğunu daha önce açıklamıştık. Ototrafolar milleri üzerine yerleştirilmiş DA motorları tarafından değerleri değiştirilen donanımlardır. Şekil 4.3’te bir ototrafo motorunun MATLAB/Simulink ortamı için oluşturulmuş basit bir modeli verilmiştir. Bu modelin girişi 1, 0 ve -1 olabilmektedir. Burada, 1: ileri yönde çalışmayı, -1: geri yönde çalışmayı ve 0: durmayı simüle etmektedir. Modelin çıkışı ise değeri 0-100 arasında değişebilen “dönme” olup bu aynı zamanda ayarlanabilir endüktansın oranına tekabül etmektedir.

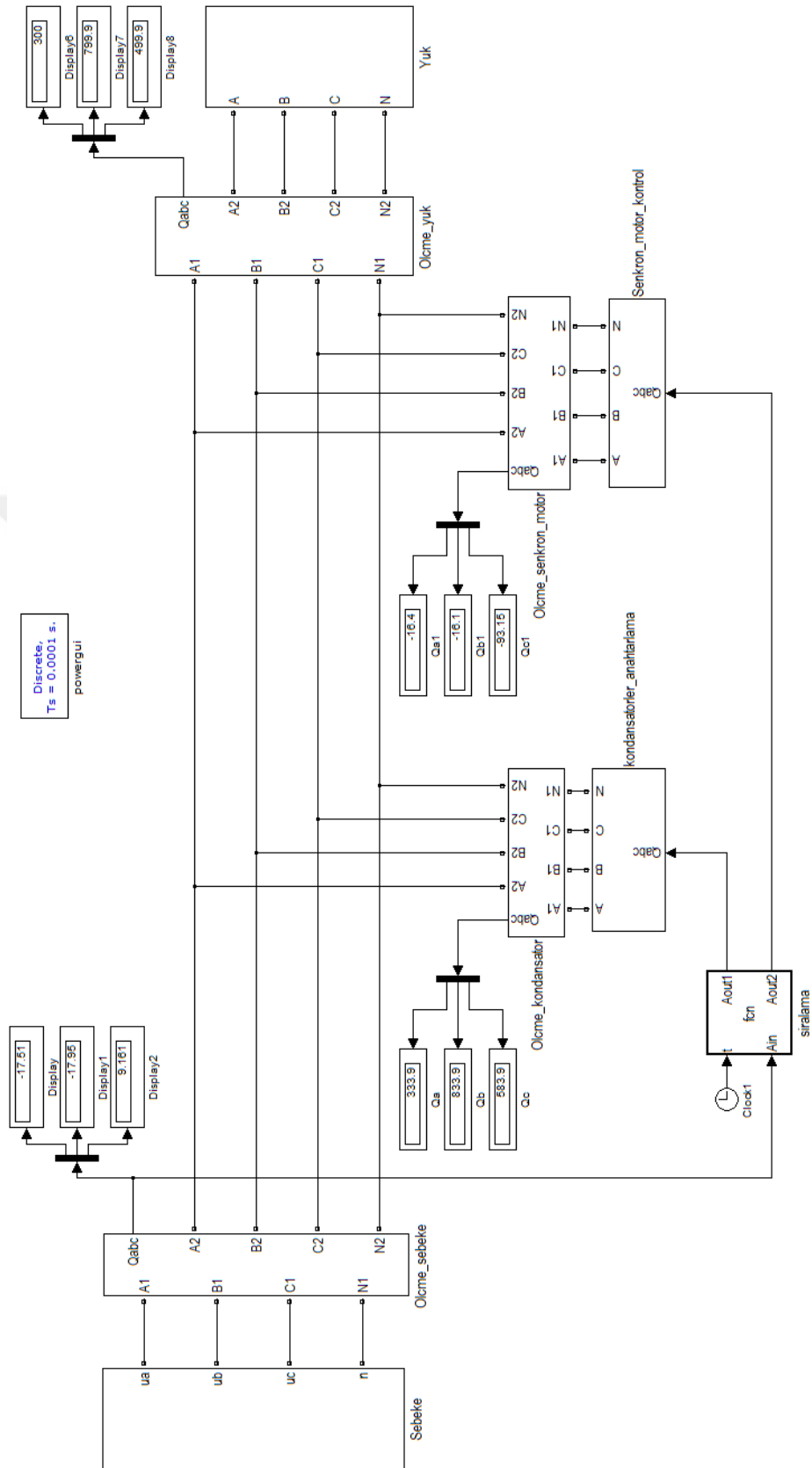


**Şekil 4.3.** Ayarlanabilir faz empedansı motorunun MATLAB/Simulink modeli

### 4.3. Hibrid Sistemin MATLAB/Simulink Modeli

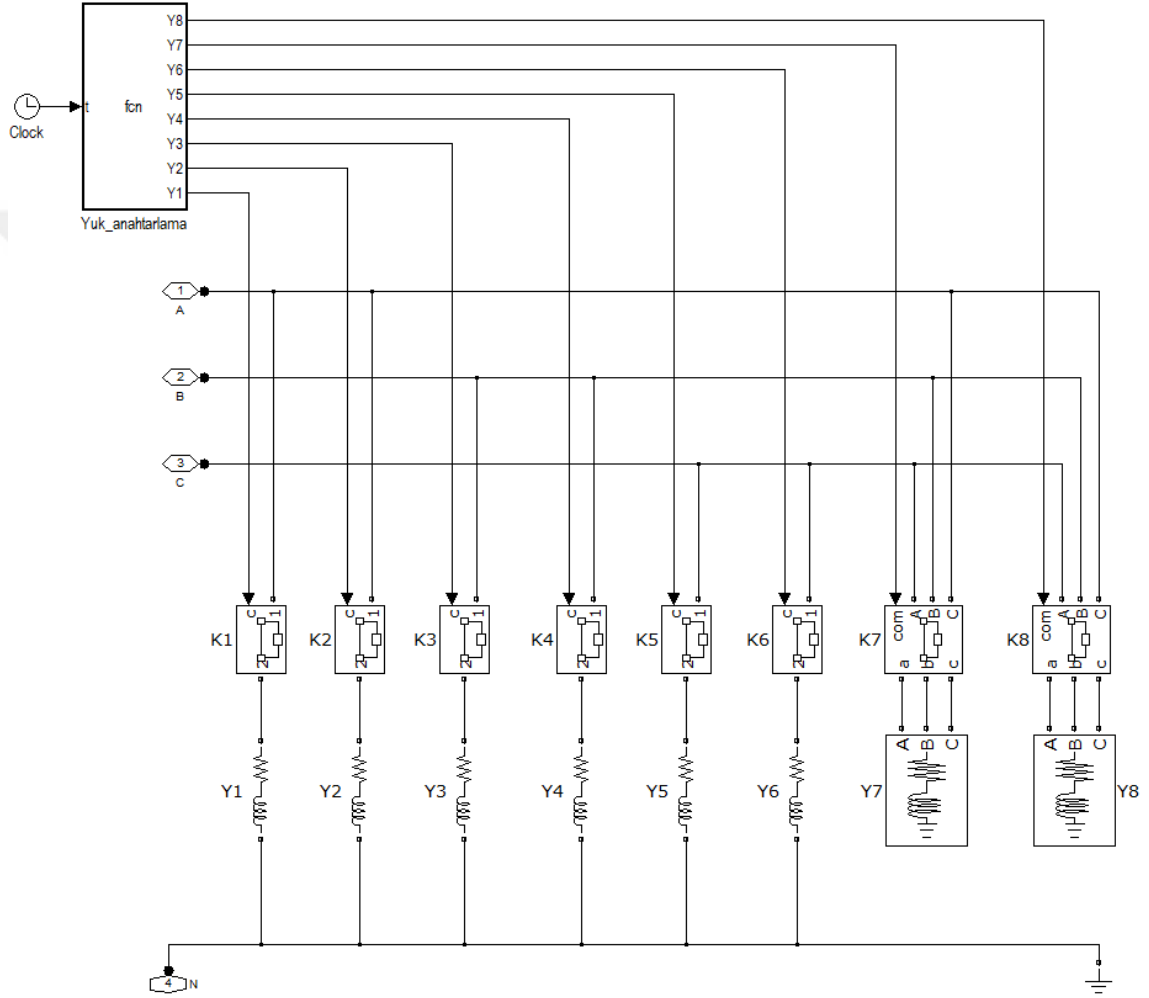
Bu tezde yapılan simülasyonların üzerinde gerçekleştirildiği ana MATLAB/Simulink dosyasının görünümü Şekil 4.4'te verilmiştir. Hibrid sistem şebeke ile yük arasına yerleştirilerek şebeke tarafı reaktif gücünü sıfıra yaklaştırmaya çalışmaktadır. Hibrid sistemin çalışabilmesi için gerekli ana bloklar “*olcme\_sebeke*”, “*kondansatör\_anahtarlama*”, “*senkron\_motor\_kontrol*” ve “*siralama*” şeklinde adlandırılmış bloklardır. Simülasyon modelinde ayrıca kaynağı modelleyen “*Sebeke*” bloğu ve yükü modelleyen “*Yuk*” bloğu da bulunmaktadır.





**Şekil 4.4.** Simülasyon çalışmalarında kullanılan ana MATLAB/Simulink dosyasının görünümü

Şimdi sırasıyla bu blokları yakından tanıyalım. Şekil 4.5'te “Yuk” bloğunun iç görünümü verilmiştir. Burada “Yuk\_anahtarlama” bloğu bir gömülü fonksiyon dosyası olup bu dosya üzerinden hangi yüklerin ne zaman devrede olacağı belirlenmiştir. Yük olarak 6 tanesi tek-fazlı ve 2 tanesi de üç-fazlı olmak üzere 8 tane R-L yükü kullanılmıştır. Yüklerin güçleri ve bağlı oldukları fazlar Çizelge 4.1’de verilmiştir. Çizelgede yer alıp simülasyonlarda kullanılan kondansatörlerin sayısı ve güçleri laboratuvar ortamında deneysel çalışmalar için donanımsal olarak oluşturulmuş olan hibrid kompanzasyon sisteminde yer alan kondansatör sayıları ve güçleri ile aynı seçilmiştir.

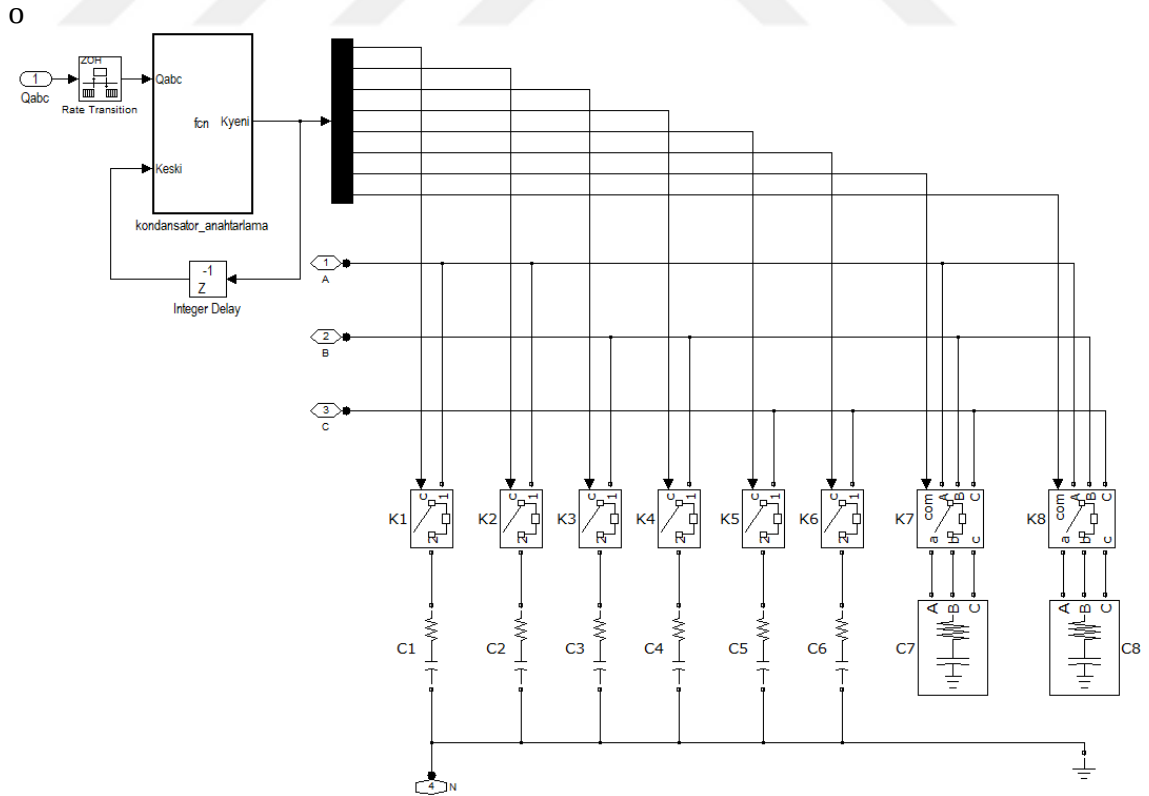


Şekil 4.5. Simülasyon çalışmalarında kullanılan “Yuk” bloğunun iç görünümü

**Çizelge 4.1.** Simülasyonda kullanılan yüklerin güçleri ve bağlı oldukları fazlar

| Yük | Güç            | Bağlı olduğu faz |
|-----|----------------|------------------|
| Y1  | 300 VAr-150 W  | A                |
| Y2  | 500 VAr-300 W  | A                |
| Y3  | 300 VAr-150 W  | B                |
| Y4  | 500 VAr-300 W  | B                |
| Y5  | 300 VAr-150 W  | C                |
| Y6  | 500 VAr-300 W  | C                |
| Y7  | 1000 VAr-700 W | A-B-C            |
| Y8  | 1000 VAr-700 W | A-B-C            |

Şekil 4.6’da “kondansatörler\_anahtarlama” bloğunun iç görünümü verilmiştir. Burada “kondansatör\_anahtarlama” bloğu da bir gömülü fonksiyon dosyası olup bu dosya üzerinden hangi kondansatörlerin ne zaman devrede olacağı belirlenmektedir. Yani, devreye alınacak kondansatör kademelerinin belirlenmesi bu dosya içindeki program vasıtasıyla yapılmaktadır. Bu program Ek 1’de verilmiştir. Kullanılan kondansatör kademelerinin sayısı 8 olup bunlardan 6 tanesi tek-fazlı ve 2 tanesi de üç-fazlıdır. Kondansatörlerin güçleri ve bağlı oldukları fazlar Çizelge 4.2’de verilmiştir. Bu çizelgede yer alan kondansatörler ile deneysel amaçla laboratuvarında kullanılan kondansatörlerin güçleri aynı seçilmiştir.



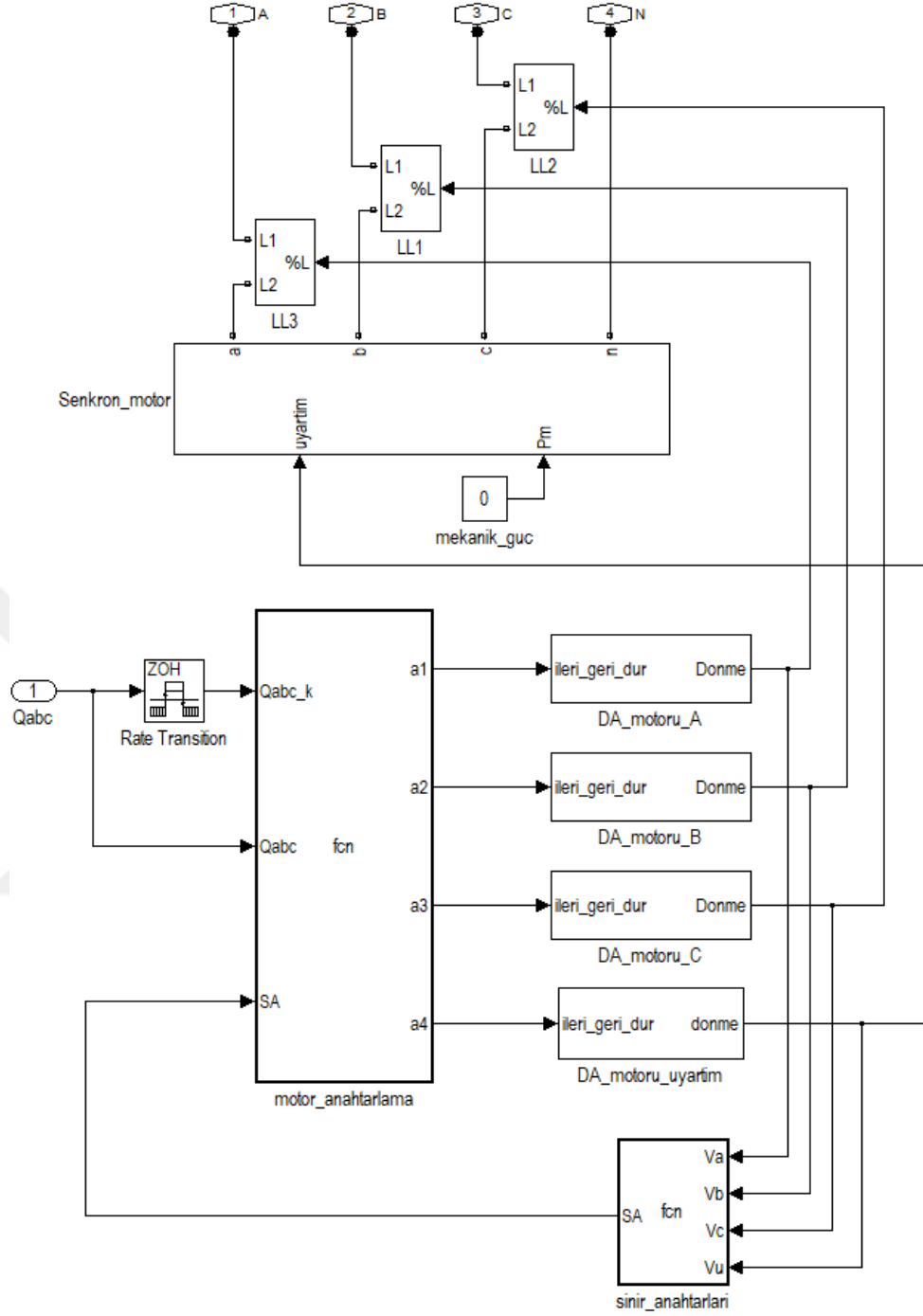
**Şekil 4.6.** Simülasyon çalışmalarında kullanılan “kondansatörler\_anahtarlama” bloğunun iç görünümü

**Çizelge 4.2.** Simülasyonda kullanılan kondansatör kademelerinin güçleri ve bağlı oldukları fazlar

| Kondansatör | Güç           | Bağlı olduğu faz |
|-------------|---------------|------------------|
| C1          | 250 VAr-5 W   | A                |
| C2          | 500 VAr-5 W   | A                |
| C3          | 250 VAr-5 W   | B                |
| C4          | 500 VAr-5 W   | B                |
| C5          | 250 VAr-5 W   | C                |
| C6          | 500 VAr-5 W   | C                |
| C7          | 1000 VAr-10 W | A-B-C            |
| C8          | 1500 VAr-15 W | A-B-C            |

Şekil 4.7’de de “Senkron\_motor\_kontrol” bloğunun iç görünümü verilmiştir. Burada “motor\_anahtarlama” bloğu bir gömülü fonksiyon dosyası olup bu dosya üzerinden faz empedanslarının ve uyartım ototrafosunun değerlerini değiştiren DA motorlarının kontrolü yapılmaktadır. Yani, senkron motorun faz uçlarından verdiği reaktif güçlerin ayarlandığı algoritma bu dosya içindeki program vasıtasıyla oluşturulmuştur. Bu program Ek 2’de verilmiştir. Burada şebeke tarafında ölçülen güçler hem anlık değer olarak hem de “Rate transition” bloğu üzerinden belli bir periyot boyunca sabit değerler olarak hesaplama bloğuna verilmektedir. Hesaplamalar sonunda 4 tane DA motorunun (3 tanesi faz empedanslarını değiştiren ve 1 tanesi de uyartım gerilimini değiştiren) ileri/geri/dur hareketleri için çıkış işaretleri (1, -1 ve 0 biçiminde) üretilmektedir.

Şekil 4.7’de ayrıca “sınır\_anahtarları” isimli bir blok yer almaktadır. Bu blok, gerçekte ototrafoların en üst veya en alt konumda olup olmadığını algılayan sınır anahtarlarını modelleyen gömülü fonksiyon kodları içermektedir. Bu kodlar Ek 3’te verilmiştir. Gerçekte her bir ototrafonun üzerinde biri en alt konumda diğeri de en üst konumda kontak konumu değişen 2 tane sınır anahtarı bulunur. Dolayısıyla 3 tanesi ayarlanabilir faz empedansı için ve 1 tanesi de uyartım akımı sağlayıcısı için kullanılan toplamda 4 tane ototrafonun toplamda 8 tane sınır anahtarı bulunur. Bu sınır anahtarlarının çalışması her bir ototrafoya ait DA akım motorunun dönme miktarı bilgisi kullanılarak söz konusu blok tarafından modellenmiştir. Öyle ki her bir motor modelinin çıkışından alınan dönme miktarı %100 iken üst konum sınır anahtarı “1” değerini alırken dönme miktarı %0 iken alt konum sınır anahtarı “1” değerini almaktadır. Diğer durumlarda ise sınır anahtarları “0” değerini almaktadır.



**Şekil 4.7.** Simülasyon çalışmalarında kullanılan “Senkron\_motor\_kontrol” bloğunun iç görünümü

#### 4.4. Simülasyon Çalışmaları

Bu tez kapsamında geliştirilmiş olan senkron motorlu hibrid reaktif güç kompanzasyon sistemi MATLAB/Simulink ortamında simüle edilmiştir. Simülasyonlar önerilen kompanzasyon sistemi ile klasik kondansatör anahtarlama kompanzasyon

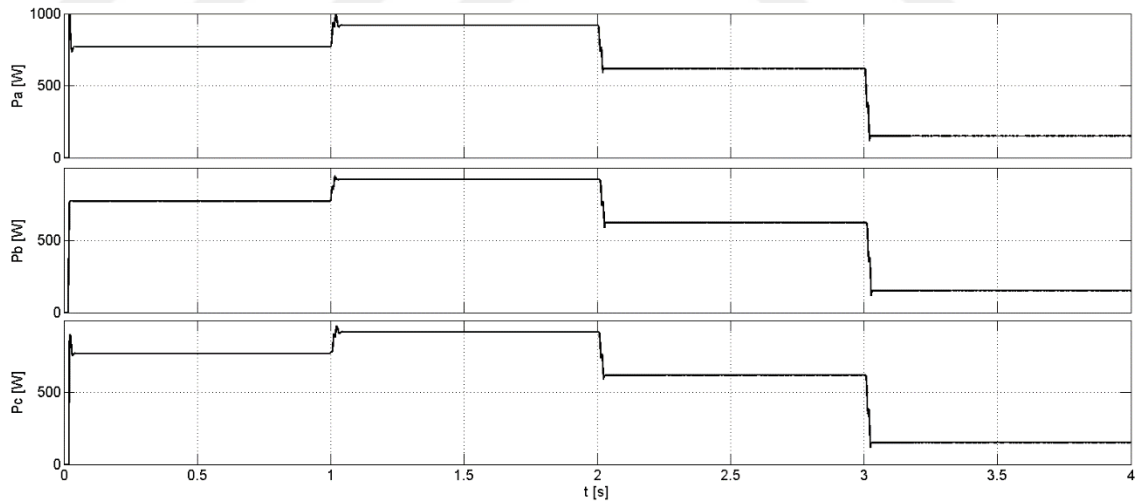
sisteminin dengeli ve dengesiz yük koşullarındaki çalışmalarının karşılaştırılması biçiminde yapılmıştır.

Öncelikle dengeli yükler kullanılarak 4'er saniyelik iki simülasyon yapılmıştır. Simülasyonların ilki yalnızca klasik kondansatör anahtarlama reaktif güç kompanzasyonu uygulanarak gerçekleştirilirken ikincisi geliştirilen hibrid reaktif güç kompanzasyon sistemi ile yapılmıştır. Her iki simülasyon aynı dengeli yükler için yapılmıştır. 4'er saniyelik simülasyonun her bir saniyesi sonunda yük kademelerinden bazıları devreye alınmış veya devre dışı bırakılmıştır. Bu yükler Çizelge 4.3'te verilmiştir.

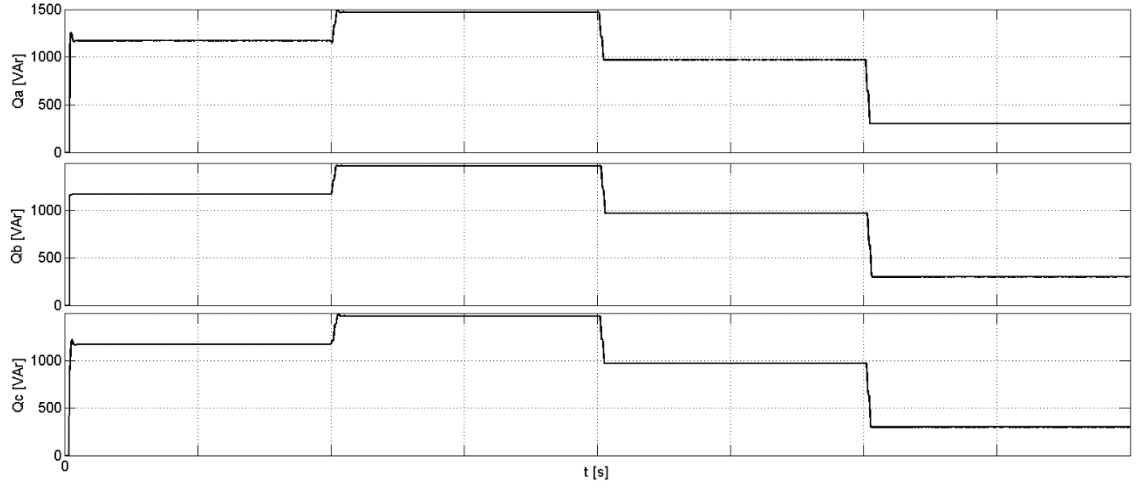
**Çizelge 4.3.** Dengeli yükler ile yapılan simülasyonlarda kullanılan yükler

| Zaman Aralığı | Devredeki Yükler        | Toplam Aktif Güç | Toplam Reaktif Güç | Güç faktörü |
|---------------|-------------------------|------------------|--------------------|-------------|
| 0-1 s         | Y2-Y4-Y6-Y7-Y8          | 2300 W           | 3500 VAr           | 0.549       |
| 1 s-2 s       | Y1-Y2-Y3-Y4-Y5-Y6-Y7-Y8 | 2750 W           | 4400 VAr           | 0.530       |
| 2 s-3 s       | Y1-Y3-Y5-Y7-Y8          | 1850 W           | 2900 VAr           | 0.538       |
| 3 s-4 s       | Y1-Y3-Y5                | 450 W            | 900 VAr            | 0.447       |

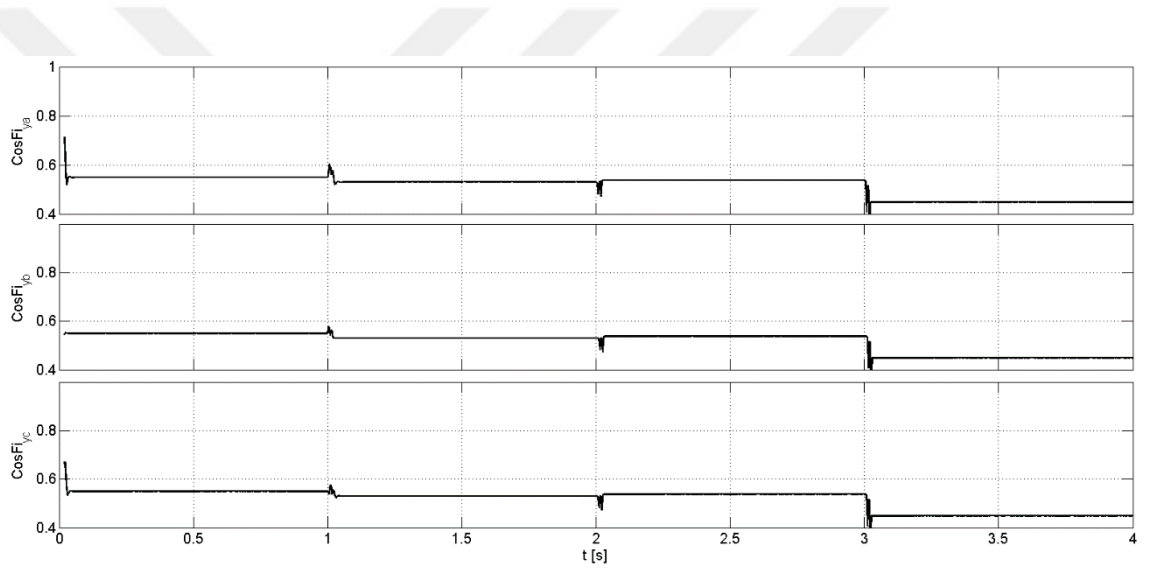
Çizelge 4.3'te verilen yük değerlerine uygun olarak dengeli yüklerin aktif, reaktif güçlerinin ve güç faktörlerinin zamana bağlı değişimleri Şekil 4.8-10'da verilmiştir. Yük dengeli olduğundan her üç faz için aynı güç ve güç faktörü değişimleri elde edilmiştir. Şekil 4.10'da verilmiş olan güç faktörü değişimleri yükün oldukça düşük güç faktörüne sahip olduğunu ve reaktif güç kompanzasyonuna ihtiyaç duyduğunu göstermektedir.



**Şekil 4.8.** Dengeli yükün her bir fazına ait *aktif güçlerin* değişimi

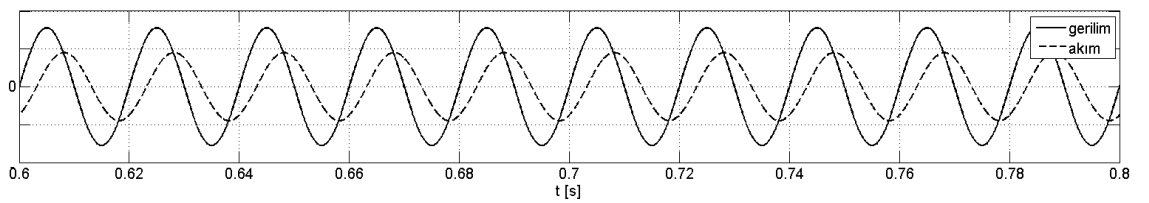


Şekil 4.9. Dengeli yükün her bir fazına ait *reaktif güçlerin* değişimi



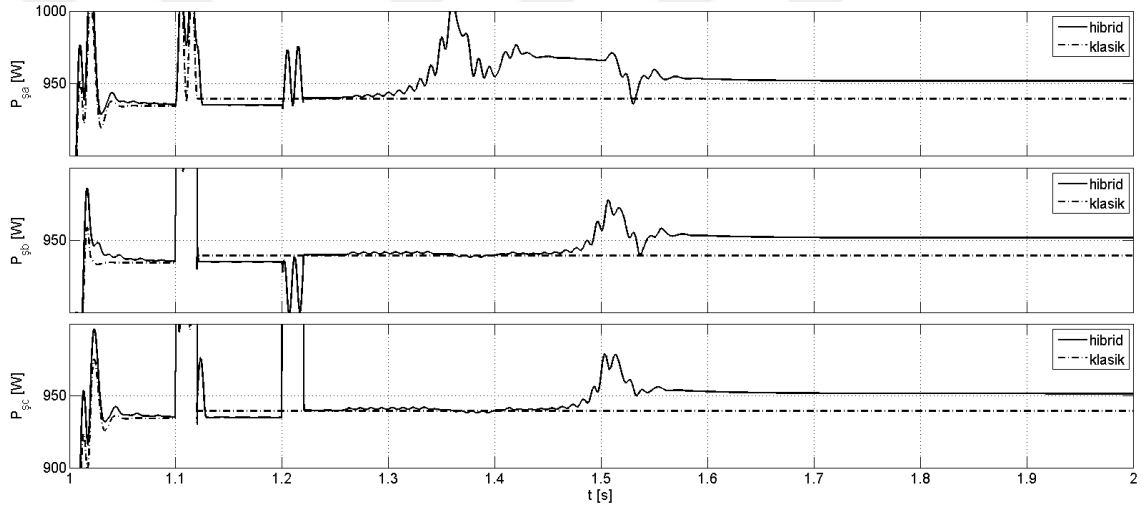
Şekil 4.10. Dengeli yükün her bir fazına ait *güç faktörlerinin* değişimi

Yükün düşük güç faktörüne sahip olmasından dolayı yüke ait gerilimler ve akımlar arasında bir faz farkı oluşacaktır. Bu fark Şekil 4.11’de açıkça görülmektedir. Yük endüktif karakterli olduğundan gerilimin akıma göre önde olduğu bir değişim elde edilmiştir. Reaktif güç kompanzasyonunun bir amacı da bu faz farkını sıfıra yaklaştırarak şebekeden çekilen reaktif gücün olabildiğince az olmasını sağlamaktır.

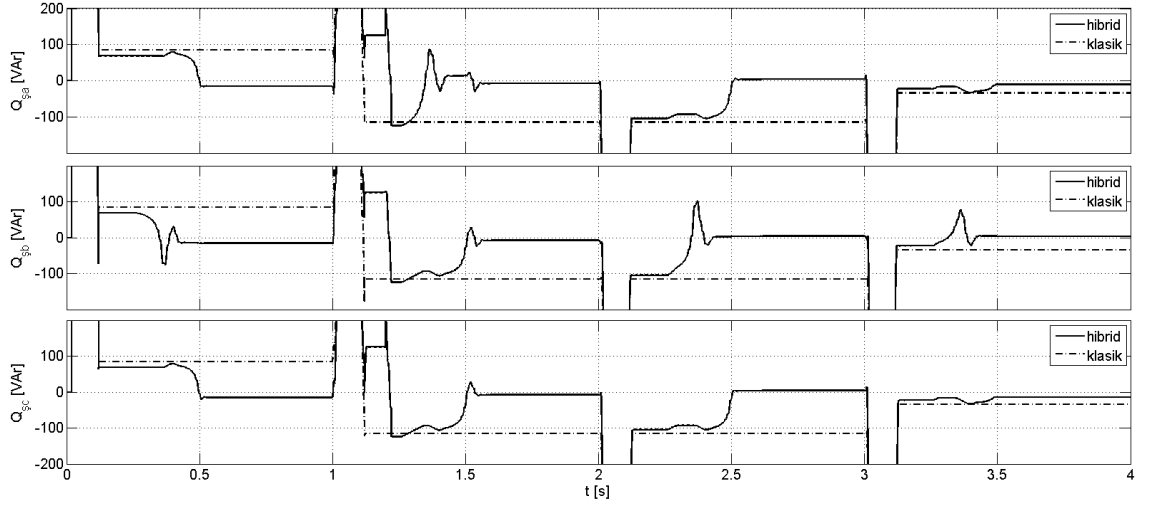


Şekil 4.11. Dengeli yüke ait *gerilimin ve akımın* değişimi

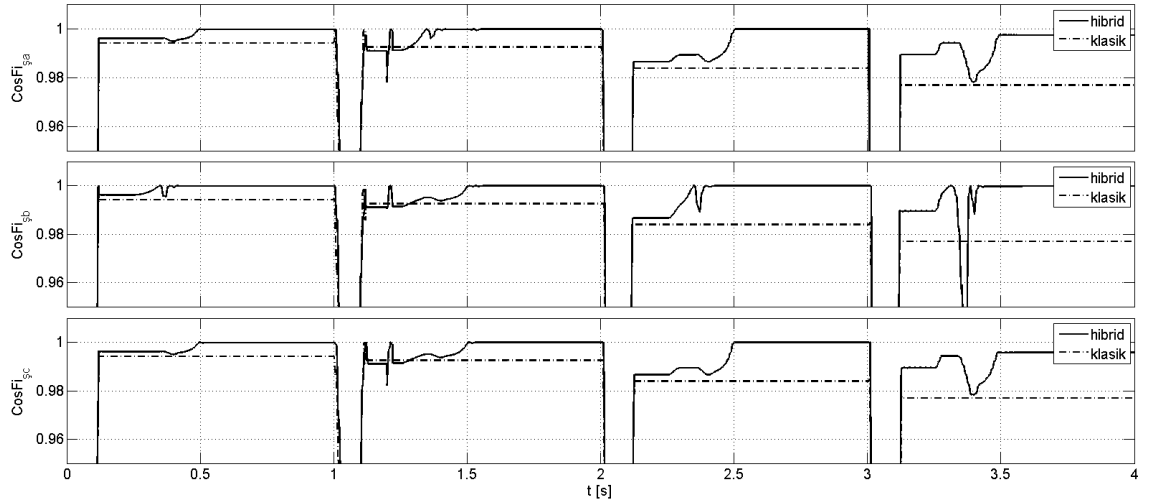
Dengeli yük ile yapılan simülasyonlarda şebeke tarafında elde edilen aktif güçlerin, reaktif güçlerin ve güç katsayılarının değişimleri Şekil 4.12-14'te verilmiştir. İdeal olarak bir reaktif güç kompanzasyon sisteminin bağlı olduğu hattan aktif güç çekmemesi gerekir. Şekil 4.12'de klasik kompanzasyon için verilmiş aktif güç aslında yükün şebekeden çektiği aktif güce eşittir. Fakat aynı şekilde hibrid sistem için verilen aktif gücün bu gücün üzerinde olduğu görülmektedir. Bu durum senkron motorun çekmiş olduğu aktif güçten kaynaklanır. Kayıp güç olarak da nitelendirilebilecek olan bu güç çok küçük değerlerde olup aslında önemsizdir. Şekil 4.13'te verilen şebeke tarafı reaktif güç değişimleri her iki kompanzasyon sisteminin reaktif gücü sıfıra yaklaştırabildiğini ve kompanzasyonu başarılı bir şekilde yapabildiğini göstermektedir. Fakat hibrid sistem ile elde edilen şebeke tarafı reaktif güç değerleri klasik sisteme göre sıfıra daha yakın (neredeyse sıfır) seyretmekte olup bu da hibrid sistemin başarımının daha iyi olduğunu göstermektedir. Bu durum Şekil 4.14'te verilen güç faktörü değişimlerinden de açıkça görülebilmektedir. Öyle ki hibrid sistem ile elde edilen güç faktörleri 0.999 civarında değişirken klasik sistemin güç faktörü daha düşük değerlerde kalmaktadır.



**Şekil 4.12.** Hibrid ve klasik reaktif güç kompanzasyon sistemlerinin dengeli yük ile yapılan simülasyonlarında elde şebeke tarafı aktif güçlerin her bir faz için değişimleri

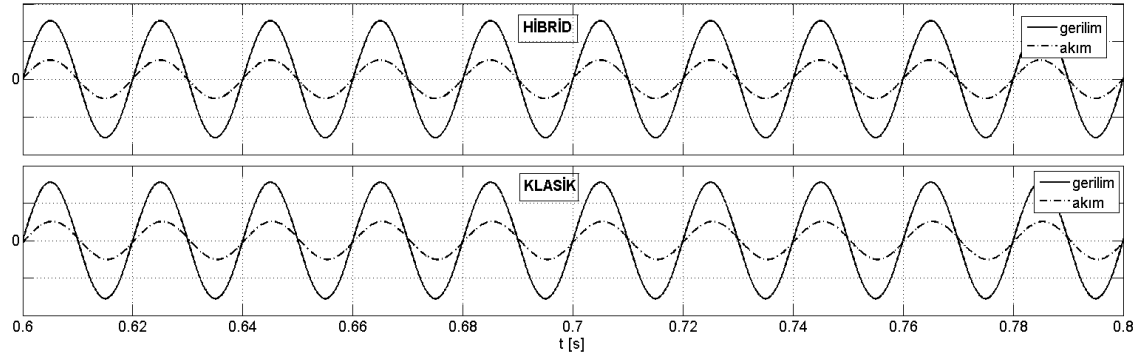


**Şekil 4.13.** Hibrid ve klasik reaktif güç kompanzasyon sistemlerinin dengeli yük ile yapılan simülasyonlarında elde *şebeke tarafı reaktif güçlerin* her bir faz için değişimleri



**Şekil 4.14.** Hibrid ve klasik reaktif güç kompanzasyon sistemlerinin dengeli yük ile yapılan simülasyonlarında elde *şebeke tarafı güç faktörlerinin* her bir faz için değişimleri

Her iki reaktif güç kompanzasyon sisteminin gerilim ile akım arasındaki faz farkını sıfıra yaklaştırabildiğini Şekil 4.15'teki değişimlerden de görebilmekteyiz. Bu değişimler aynı zamanda hibrid sistemin klasik sistemde olduğu gibi şebeke tarafı akımının dalga biçiminde herhangi bozulmaya neden olmadığını ve dolayısıyla harmonik oluşturmadığını da göstermektedir.



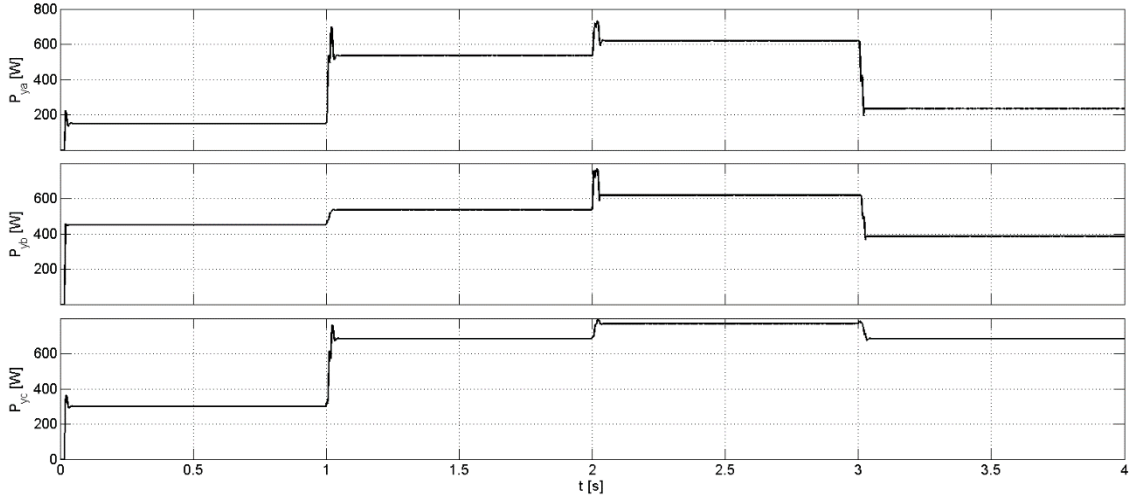
**Şekil 4.15.** Hibrid ve klasik reaktif güç kompanzasyon sistemlerinin dengeli yük ile yapılan simülasyonlarında elde şebeke tarafı gerilimlerinin ve akımlarının değişimleri

Geliştirilen hibrid reaktif güç kompanzasyonu dengesiz yükler de kullanılarak test edilmiştir. Bunun için yine 4'er saniyelik iki simülasyon yapılmıştır. Simülasyonların ilki yalnızca klasik kondansatör anahtarlama reaktif güç kompanzasyonu uygulanarak gerçekleştirilirken ikincisi geliştirilen hibrid reaktif güç kompanzasyon sistemi ile yapılmıştır. Her iki simülasyon aynı dengesiz yükler için yapılmıştır. Simülasyonların her bir saniyesi sonunda yük kademelerinden bazıları devreye alınmış veya devre dışı bırakılmıştır. Bu yükler Çizelge 4.4'te verilmiştir.

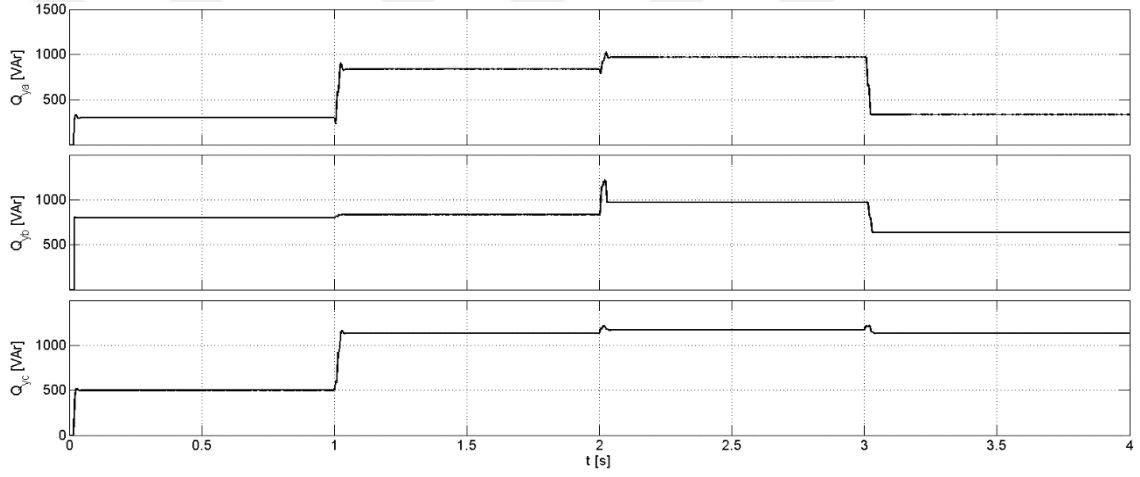
**Çizelge 4.4.** Dengesiz yükler ile yapılan simülasyonlarda kullanılan yükler

| Zaman Aralığı | Devredeki Yükler | Aktif Güçler |          |          | Reaktif Güçler |            |             |
|---------------|------------------|--------------|----------|----------|----------------|------------|-------------|
|               |                  | A-fazı       | B-fazı   | C-fazı   | A-fazı         | B-fazı     | C-fazı      |
| 0-1 s         | Y1-Y3-Y4-Y6      | 150<br>W     | 450<br>W | 300<br>W | 300<br>VAr     | 800<br>VAr | 500 VAr     |
| 1 s-2 s       | Y2- Y4-Y5-Y6-Y8  | 533<br>W     | 533<br>W | 683<br>W | 833<br>VAr     | 833<br>VAr | 1133<br>VAr |
| 2 s-3 s       | Y1-Y3-Y6-Y7-Y8   | 617<br>W     | 617<br>W | 766<br>W | 967<br>VAr     | 967<br>VAr | 1167<br>VAr |
| 3 s-4 s       | Y3-Y5-Y6-Y7      | 233<br>W     | 383<br>W | 683<br>W | 333<br>VAr     | 633<br>VAr | 1133<br>VAr |

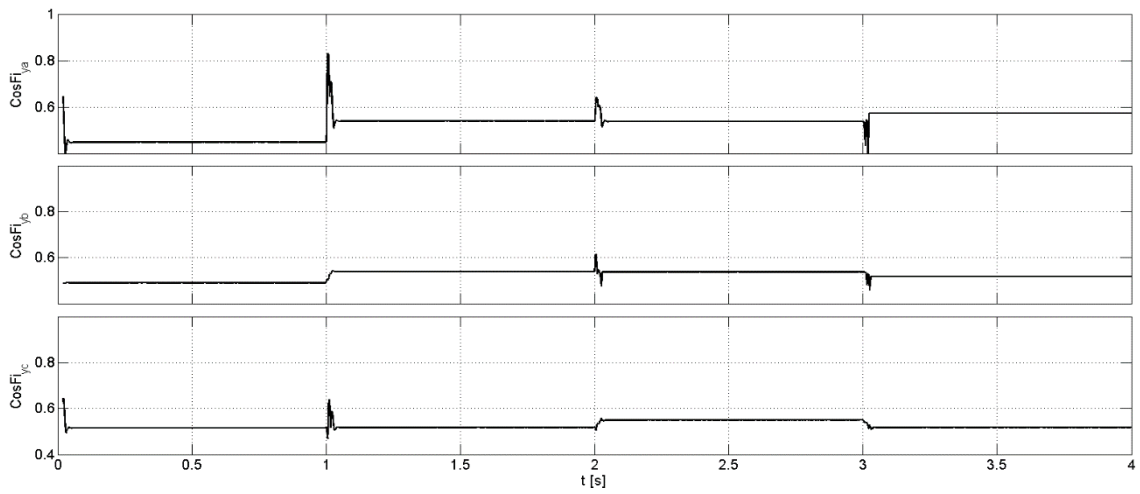
Çizelge 4.4'te verilen yük değerlerine uygun olarak dengesiz yüklerin aktif, reaktif güçlerinin ve güç faktörlerinin zamana bağlı değişimleri Şekil 4.16-18'de verilmiştir. Yük dengesiz olduğundan her üç faz için farklı güç ve güç faktörü değişimleri elde edilmiştir. Şekil 4.18'de verilmiş olan güç faktörü değişimleri (0.5 civarında) yükün oldukça düşük güç faktörüne sahip olduğunu ve reaktif güç kompanzasyonuna ihtiyaç duyduğunu açıkça göstermektedir.



**Şekil 4.16.** Dengesiz yükün her bir fazına ait *aktif güçlerin* değişimi

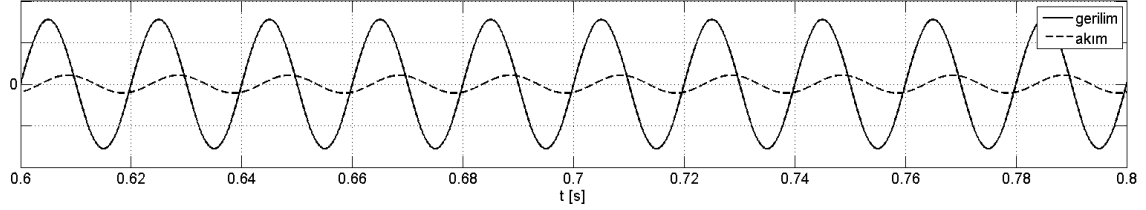


**Şekil 4.17.** Dengesiz yükün her bir fazına ait *reaktif güçlerin* değişimi



**Şekil 4.18.** Dengesiz yükün her bir fazına ait *güç faktörlerinin* değişimi

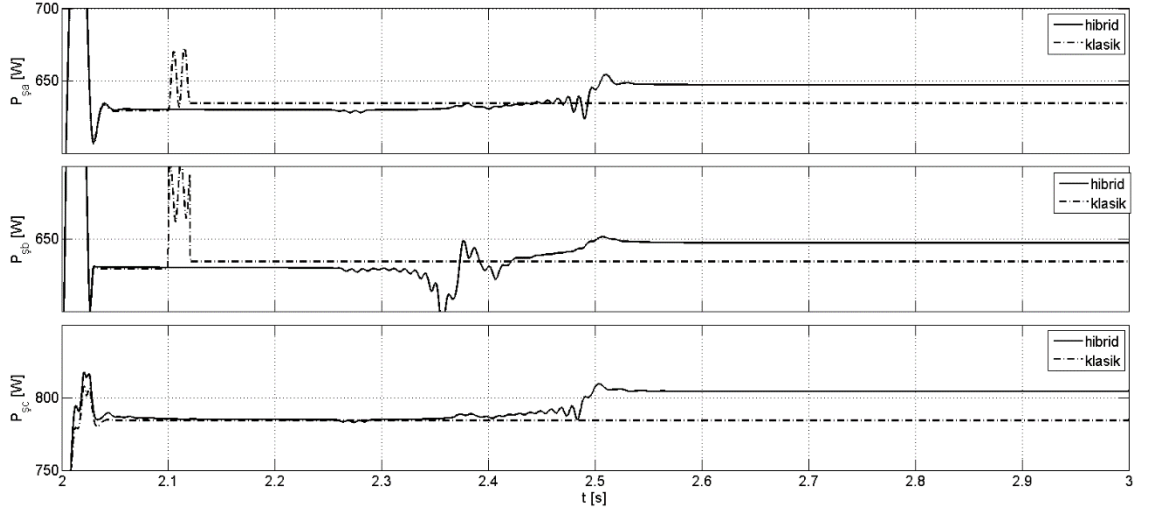
Yükün düşük güç faktörüne sahip olmasından dolayı yüke ait gerilimler ve akımlar arasında bir faz farkı oluşacaktır. Bu fark Şekil 4.19’da açıkça görülmektedir. Yük endüktif karakterli olduğundan gerilimin akıma göre önde olduğu bir değişim elde edilmiştir. Reaktif güç kompanzasyonu yardımıyla bu faz farkı şebeke tarafında sıfıra yaklaştırılmaya çalışılır.



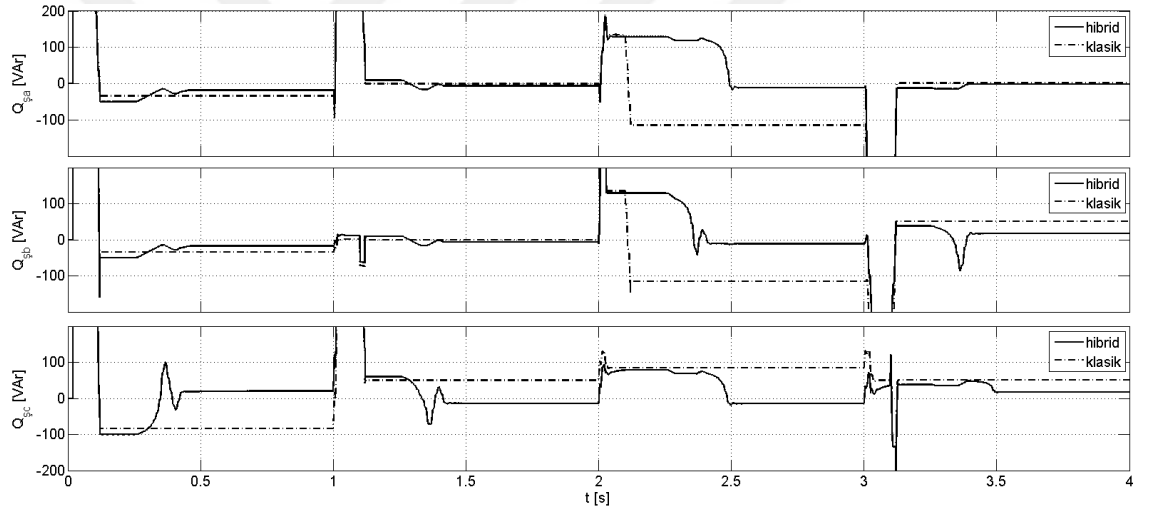
**Şekil 4.19.** Dengesiz yükün gerilim ve akım değişimi

Dengesiz yük ile yapılan simülasyonlarda şebeke tarafında elde edilen aktif güçlerin, reaktif güçlerin ve güç katsayılarının değişimleri Şekil 4.20-22’de verilmiştir. Reaktif güç kompanzasyonu yapan sistemlerin ideal olarak bağlı olduğu hattan herhangi bir aktif güç çekmemesi gerektiği daha önce de açıklanmıştı. Fakat dengeli yük durumu için elde edilen aktif güç değişimlerine benzer olarak burada da hibrid kompanzasyon sistemin çok az da olsa bağlı olduğu şebekeden bir güç çektiği Şekil 4.20’de görülmektedir. Bu durum daha önce de açıklandığı üzere senkron motorun kayıp güçlerinden dolayı çekmiş olduğu aktif güçten kaynaklanmaktadır.

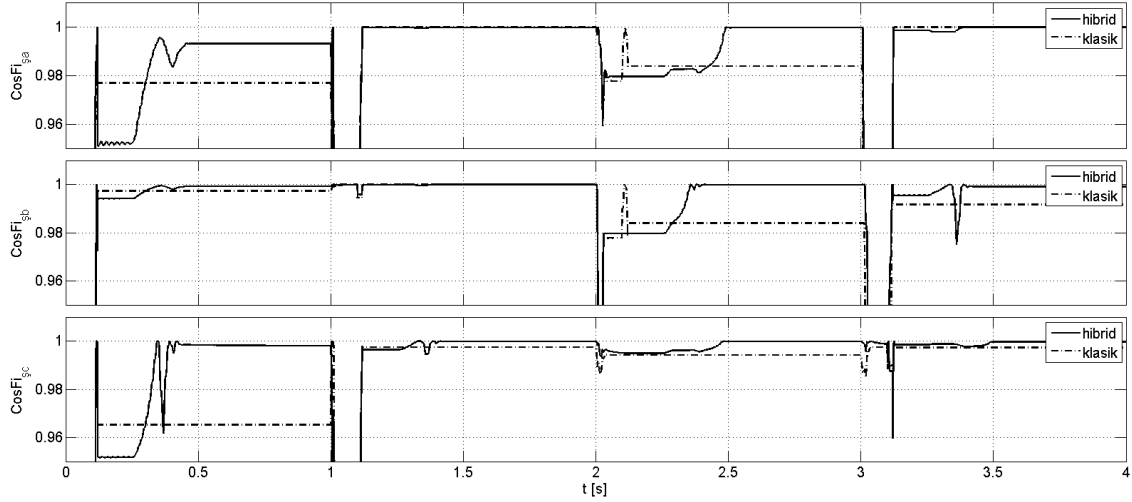
Şekil 4.21’de verilen şebeke tarafı reaktif güç değişimleri her iki kompanzasyon sisteminin reaktif gücü sıfıra yaklaştırabildiğini ve kompanzasyonu başarılı bir şekilde yapabildiğini göstermektedir. Fakat hibrid sistem ile elde edilen şebeke tarafı reaktif güç değerleri klasik sisteme göre sıfıra daha yakın (neredeyse sıfır) seyretmekte olup bu da hibrid sistemin başarımının daha iyi olduğunu göstermektedir. Bu durum Şekil 4.22’de verilen güç faktörü değişimlerinden de açıkça görülebilmektedir. Öyle ki hibrid sistem ile neredeyse birim güç faktörüne ulaşılırken klasik sistemin güç faktörü kısmen daha düşük değerlerde kalmaktadır.



**Şekil 4.20.** Hibrid ve klasik reaktif güç kompanzasyon sistemlerinin dengesiz yük ile yapılan simülasyonlarında elde *şebeke tarafı aktif güçlerin* her bir faz için değişimleri

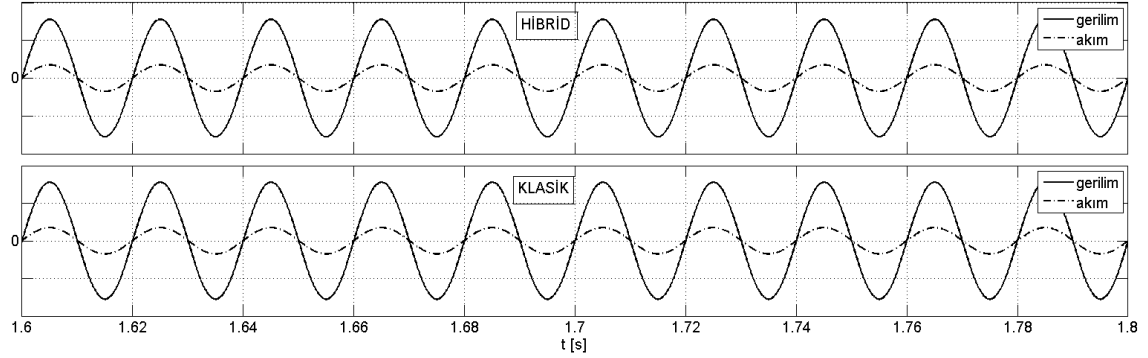


**Şekil 4.21.** Hibrid ve klasik reaktif güç kompanzasyon sistemlerinin dengesiz yük ile yapılan simülasyonlarında elde *şebeke tarafı reaktif güçlerin* her bir faz için değişimleri



**Şekil 4.22.** Hibrid ve klasik reaktif güç kompanzasyon sistemlerinin dengesiz yük ile yapılan simülasyonlarında elde *şebeke tarafı güç faktörlerinin* her bir faz için değişimleri

Her iki reaktif güç kompanzasyon sisteminin dengesiz yük koşullarında bile gerilim ile akım arasındaki faz farkını sıfıra yaklaştırabildiğini Şekil 4.23'teki değişimlerden de görülmektedir. Bu değişimler aynı zamanda dengesiz yük koşullarında da hibrid sistemin klasik sistemde olduğu gibi *şebeke tarafı* akımının dalga biçiminde herhangi bozulmaya neden olmadığını ve dolayısıyla harmonik oluşturmadığını da göstermektedir.



**Şekil 4.23.** Hibrid ve klasik reaktif güç kompanzasyon sistemlerinin dengesiz yük ile yapılan simülasyonlarında elde *şebeke tarafı gerilimlerinin ve akımlarının* değişimleri

Sonuç olarak hibrid sistem dengeli yük koşullarında olduğu gibi dengesiz yük koşullarında da reaktif güç kompanzasyonunu klasik kompanzasyona göre daha iyi bir şekilde başarmakta ve neredeyse birim güç faktörüne ulaşılmasını sağlayabilmektedir. Ayrıca elde edilen akım ve gerilim değişimleri sistemin SVC'li kompanzasyon sistemlerinde var olan harmonik akım problemine neden olmadığını da göstermektedir.

#### 4.5. Deneysel Çalışmalar

Tez çalışması boyunca üzerinde çalışılan hibrit reaktif güç kompanzasyon sistemi deneysel olarak da test edilmiştir. Bunun için öncelikle sistemi oluşturan her bir donanım tedarik edilerek sistemin tasarımı ve gerçekleştirilmesi yapılmıştır. Sistemde yer alan donanımın listesi Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Gerçeklenen bu sistemin en genel yapısı Şekil 3.1’de verildiği gibidir. Bu sistemde kontrolör (denetleyici) olarak bilgisayarda MATLAB ortamında m-file formatında yazılan programlar kullanılmıştır. Programların çevresel donanımlar ile olan bağlantısı ise 4 adet DAQ kartı yardımıyla sağlanmıştır. Çizelge 4.6’da söz konusu DAQ kartları, kullanılan kanalları, kullanım biçimleri ve kullanım amaçları verilmiştir.

**Çizelge 4.5.** Deneysel çalışmalarda kullanılan donanımlar

| No | Donanım             | Adet | Açıklama                                                                                                                                                       |
|----|---------------------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Senkron Makine      | 1    | Kapasitif/Endüktif reaktif güç üretiminde kullanılmıştır.                                                                                                      |
| 2  | Bilgisayar          | 1    | MATLAB yazılımı üzerinden sistemin kontrolü amacıyla kullanılmıştır.                                                                                           |
| 3  | DAQ Kartı           | 4    | Hibrit sistem ile bilgisayar arasında veri alışverişinde kullanılmıştır.                                                                                       |
| 4  | Ototrafo            | 4    | 1 tanesi uyartım akımı sağlayıcı devresinde (3-fazlı) ve 3 tanesi de senkron motorun çıkışlarında (1-fazlı) ayarlanabilir faz empedansı olarak kullanılmıştır. |
| 5  | Röle                | 25   | DAQ kartlarından gelen bilgi ile kontaktörleri ve ototrafo motorlarını sürmede kullanılmıştır.                                                                 |
| 6  | Kontaktör           | 17   | Yükleri, kondansatör gruplarını ve senkron makineyi devreye alma veya devre dışı bırakma amacıyla kullanılmıştır.                                              |
| 7  | Güç Kaynağı         | 1    | Röle kartlarının ve ölçme kartının beslenmesinde kullanılmıştır.                                                                                               |
| 8  | Ölçme Kartı         | 1    | Şebeke tarafı 3-faz akım ve gerilim değerlerinin ölçülüp DAQ kartları üzerinden bilgisayar ortamına aktarılması amacıyla kullanılmıştır.                       |
| 9  | 3-Fazlı Doğrultucu  | 1    | Uyartım akımı sağlayıcısına ait 3-fazlı ototrafonun çıkışından alınan gerilimlerden bir doğru gerilim elde etmek amacıyla kullanılmıştır.                      |
| 10 | 1-Fazlı Kondansatör | 6    | Kapasitif reaktif güç üretiminde kullanılmıştır.                                                                                                               |
| 11 | 3-Fazlı Kondansatör | 2    | Kapasitif reaktif güç üretiminde kullanılmıştır.                                                                                                               |
| 12 | 1-Fazlı Bobin       | 6    | Endüktif reaktif güç tüketiminde kullanılmıştır.                                                                                                               |
| 13 | 3-Fazlı Bobin       | 2    | Endüktif reaktif güç tüketiminde kullanılmıştır.                                                                                                               |
| 14 | 3-Fazlı Direnç Yüğü | 1    | Aktif güç tüketiminde kullanılmıştır.                                                                                                                          |

**Çizelge 4.6.** Deneysel çalışmada kullanılan DAQ kartları, kullanılan kanallar, kullanım biçimleri ve kullanım amaçları

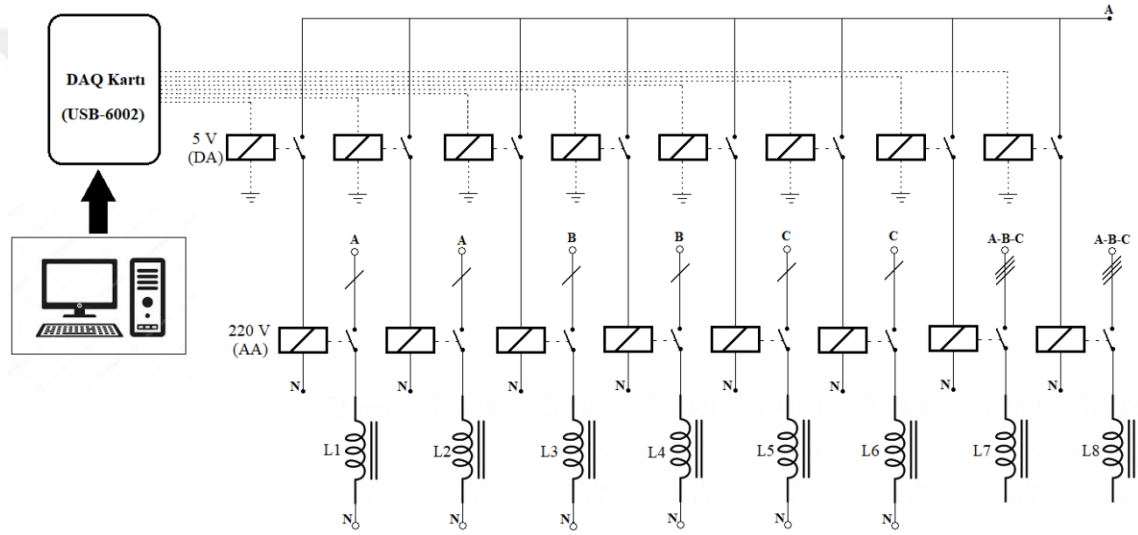
| DAQ Kartı | Kullanılan Kanallar                                 | Kullanım Biçimi | Kullanım Amacı                                                                               |
|-----------|-----------------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| USB-6210  | AI0/AI8-AI1/AI9-AI2/AI10-AI3/AI11-AI4/AI12-AI5/AI13 | Analog Giriş    | Şebeke tarafı gerilimlerinin ve akımlarının ölçümü                                           |
|           | P1.0-P1.1                                           | Dijital Çıkış   | Senkron motorun devreye alınması devre dışı bırakılması                                      |
| USB-6002  | P0.0-P0.1-P0.2-P0.3-P0.4-P0.5-P0.6-P0.7             | Dijital Çıkış   | Yüklerin anahtarlama                                                                         |
|           | P1.0-P1.2                                           | Dijital Çıkış   | Senkron motorun uyarım akımını değiştiren ototrafo motorunun ileri/geri yönde çalıştırılması |
|           | P1.1-P1.3                                           | Dijital Giriş   | Senkron motorun uyarım varyajına ait sınır anahtarların algılanması                          |
| USB-6008  | P0.0-P0.2-P0.4-P0.6-P1.0-P1.2                       | Dijital Çıkış   | Faz empedansı ototrafo motorlarının ileri/geri yönde çalıştırılması                          |
|           | P0.1-P0.3-P0.5-P0.7-P1.1-P1.3                       | Dijital Giriş   | Faz empedansı ototrafolarına ait sınır anahtarlarının algılanması                            |
| USB-6009  | P0.0-P0.1-P0.2-P0.3-P0.4-P0.5-P0.6-P0.7             | Dijital Çıkış   | Kondansatörlerin anahtarlama                                                                 |

Sistemde endüktif karakterli yük olarak 6 tanesi tek-fazlı, 2 tanesi üç-fazlı olmak üzere toplamda 8 tane bobin ve 1 tane de üç-fazlı direnç yükü kullanılmıştır. Ayrıca kademeli kompanzasyonda kullanılmak üzere 6 tanesi tek-fazlı ve 2 tanesi de üç-fazlı olmak üzere toplamda 8 tane de kondansatör kullanılmıştır. Direnç yükünün, bobinlerin ve kondansatörlerin anma güç değerleri ve bağlı oldukları fazlar Çizelge 4.7’de verilmiştir.

**Çizelge 4.7.** Deneysel sistemde kullanılan yüklerin ve kondansatörlerin anma güç değerleri

| Yükler |          |                  | Kondansatörler |          |                  |
|--------|----------|------------------|----------------|----------|------------------|
| No     | Güç      | Bağlı olduğu faz | No             | Güç      | Bağlı olduğu faz |
| L1     | 300 VAr  | A                | C1             | 250 VAr  | A                |
| L2     | 300 VAr  | B                | C2             | 250 VAr  | B                |
| L3     | 300 VAr  | C                | C3             | 250 VAr  | C                |
| L4     | 500 VAr  | A                | C4             | 1500 VAr | A-B-C            |
| L5     | 500 VAr  | B                | C5             | 1000 VAr | A-B-C            |
| L6     | 500 VAr  | C                | C6             | 500 VAr  | A                |
| L7     | 1100 VAr | A-B-C            | C7             | 500 VAr  | B                |
| L8     | 1000 VAr | A-B-C            | C8             | 500 VAr  | C                |
| R      | 1500 W   | A-B-C            |                |          |                  |

Yük olarak kullanılan bobinlerin bağlantı şeması Şekil 4.24'te verilmiştir. Bu yüklerin devreye alınması veya devre dışı bırakılması kontrolör olarak kullanılan programlar vasıtasıyla yapılmıştır. Bobinlerin devreye alınıp devre dışı bırakılması 220 V (AA)'luk anma bobin gerilimine sahip kontaktörler ile yapılmıştır. Kontaktör bobinlerinin enerjilendirilmesi ise 5 V (DA) anma bobin gerilimine sahip röleler yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu rölelerin açma/kapama işaretleri bilgisayarda MATLAB ortamında çalışan programlar vasıtasıyla üretilerek bir DAQ kartı (USB-6002) üzerinden rölelere iletilmiştir. Hibrit reaktif güç kompanzasyon sisteminin bu kısmının görünümü Şekil 5.25'te verilmiştir. Bu şekilde 8 adet bobin yükünün yanı sıra bu yükleri devreye almada kullanılan 8 adet kontaktör, bu kontaktörleri anahtarlamada kullanılan 8 adet röle (2 tane röle kartı üzerinde) ve bu kartları sürmede kullanılan ilgili DAQ kartı (USB-6002) da görülmektedir. Sistemde kullanılan direnç yükü sistemin yazılımından bağımsız olarak sürekli devrede olacak şekilde sisteme bağlanmıştır.

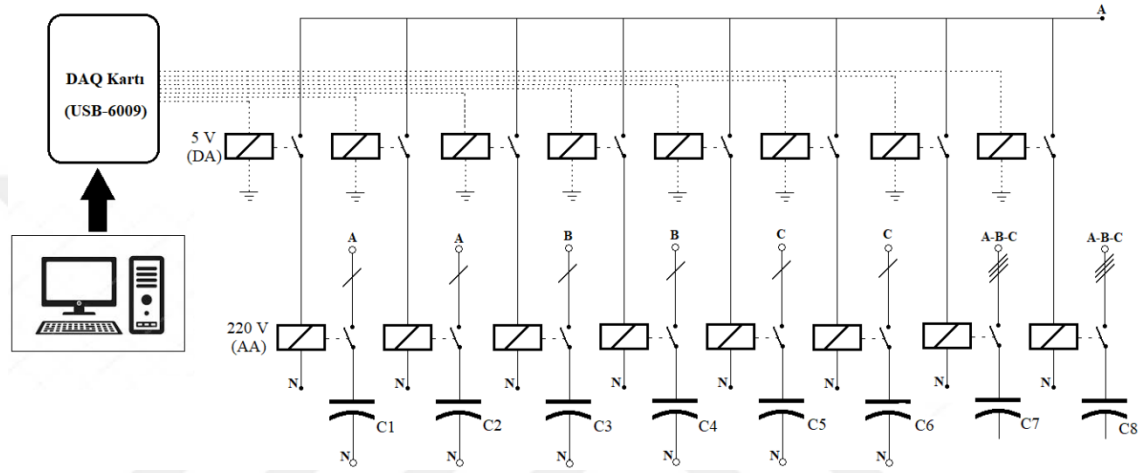


Şekil 4.24. Deneysel çalışmalarda kullanılan bobin yüklerinin bağlantı şeması



Şekil 4.25. Deneysel çalışmalarda kullanılan bobin yüklerinin ve ilgili donanımın görünümü

Gerçeklenen hibrit reaktif güç kompanzasyon sisteminde yer alan kondansatörlerin ve ilgili donanımsal kısmın bağlantı şeması da Şekil 4.26’da verilmiştir. Bu yapıda da bilgisayar ortamında üretilen anahtarlama işaretleri bir DAQ kartı (USB-6009) vasıtasıyla rölelere ve oradan da kontaktörlere iletilerek kondansatörlerin anahtarlama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kondansatörlerin devreye alınıp devre dışı bırakılması 220 V (AA)’luk anma bobin gerilimine sahip kontaktörler ile yapılmıştır. Kontaktör bobinlerinin enerjilendirilmesi ise 5 V (DA) anma bobin gerilimine sahip röleler yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu rölelerin açma/kapama işaretleri ise MATLAB ortamında çalışan programlar vasıtasıyla üretilmiştir. Hibrit reaktif güç kompanzasyon sisteminin bu kısmının dış görünümü Şekil 4.27’de verilmiştir.

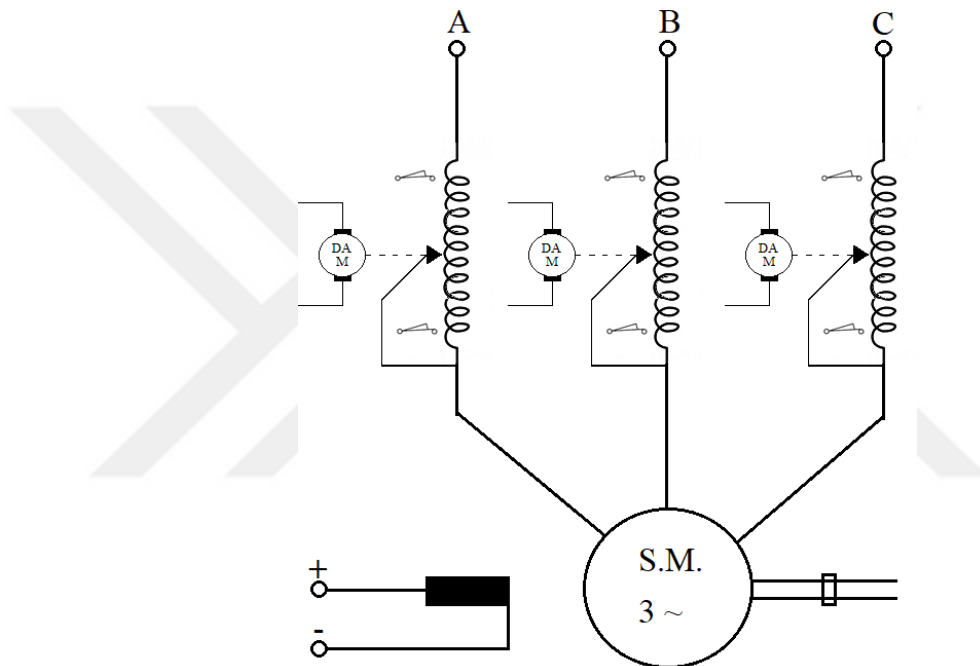


**Şekil 4.26.** Deneyisel çalışmalarda kullanılan kondansatörlerin ve ilgili donanımsal kısmın bağlantı şeması

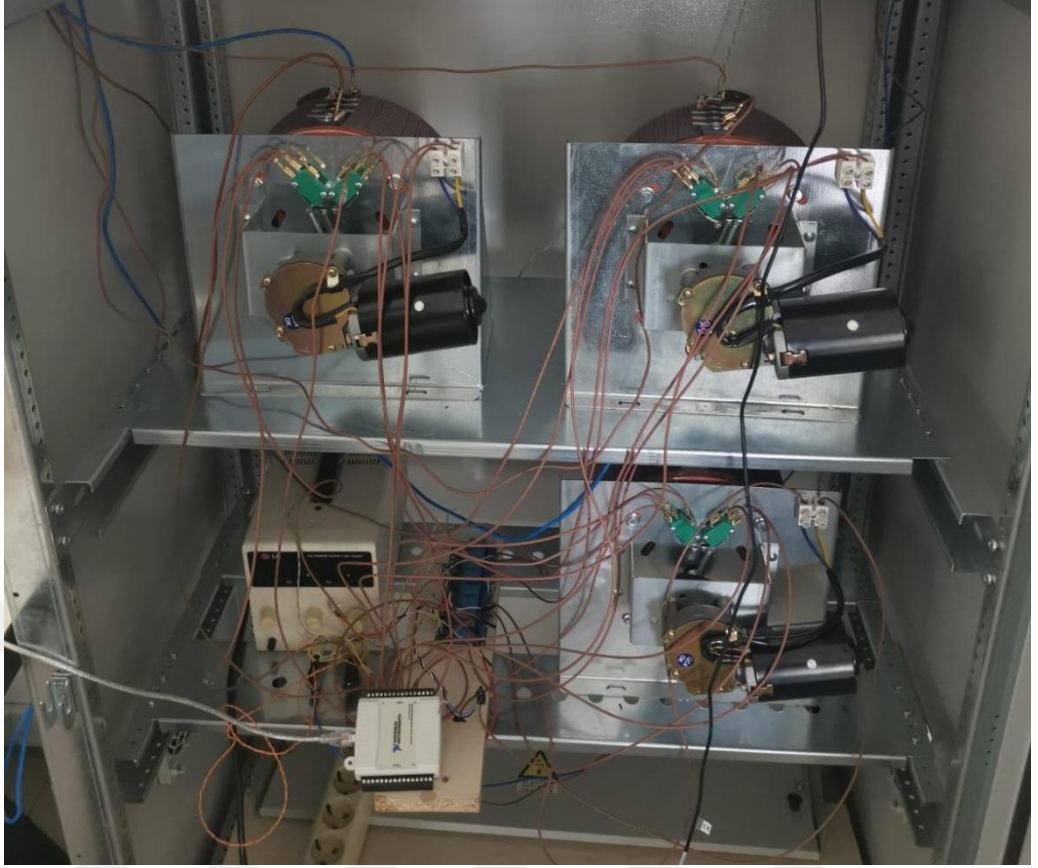


**Şekil 4.27.** Deneyisel çalışmalarda kullanılan kondansatörlerin ve ilgili donanımın görünümü

Deneyisel çalışmalarda kullanılan senkron motorun her bir fazına birer tek fazlı ototrafo bağlanmıştır. Sistemin bu kısmının bağlantı şeması Şekil 4.28’de verilmiştir. Bu şekilde de verildiği üzere ototrafolar birer ayarlanabilir empedans biçiminde bağlanarak kullanılmıştır. Her bir varyağa ait motorun kontrolü iki adet röle yardımıyla Şekil 3.4’te verilmiş olan bağlantı biçimi kullanılarak yapılmıştır. Toplamda 6 adet rölenin kontrolü için DAQ kartının (USB-6008) 6 tane dijital çıkışı kullanılmıştır. Ayrıca ototrafolar üzerinde gereğinden fazla dönmesini engellemek için kullanılan 6 tane sınır anahtarı mevcut olup bu sınır anahtarlarından alınan işaretler yine aynı DAQ kartının dijital girişleri yardımıyla bilgisayar ortamına da aktarılmıştır. Sistemin bu kısmının bir görünümü Şekil 4.29’da verilmiştir. Bu şekilde 3 tane ototrafo, her bir varyağa ait motorlar, sınır anahtarları ve DAQ kartı görülmektedir.



**Şekil 4.28.** Deneysel çalışmalarda kullanılan senkron motorun ve faz empedansı ototrafolarının bağlantı şeması



**Şekil 4.29.** Deneysel çalışmalarda kullanılan faz empedansı ototrafolarının ve ilgili donanımın görünümü

Deneysel sistemde kullanılan senkron motorun bazı resimleri Şekil 4.30’da verilmiştir. Bu şekilde ayrıca motorun klemens uçları ve plaka değerleri de görülmektedir. Senkron motorun uyarım akımı bağlantı şeması Şekil 3.2’de verilmiş olan bir uyarım akımı sağlayıcısı tarafından sağlanmıştır. Bu yapıda kullanılan üç-fazlı varyağın çıkış geriliminin kontrolü 3-fazlı varyağa ait motorun ileri/geri yönde çalıştırılması üzerinden sağlanmıştır. Söz konusu varyağın dış görünümü Şekil 4.31’de verilmiştir.



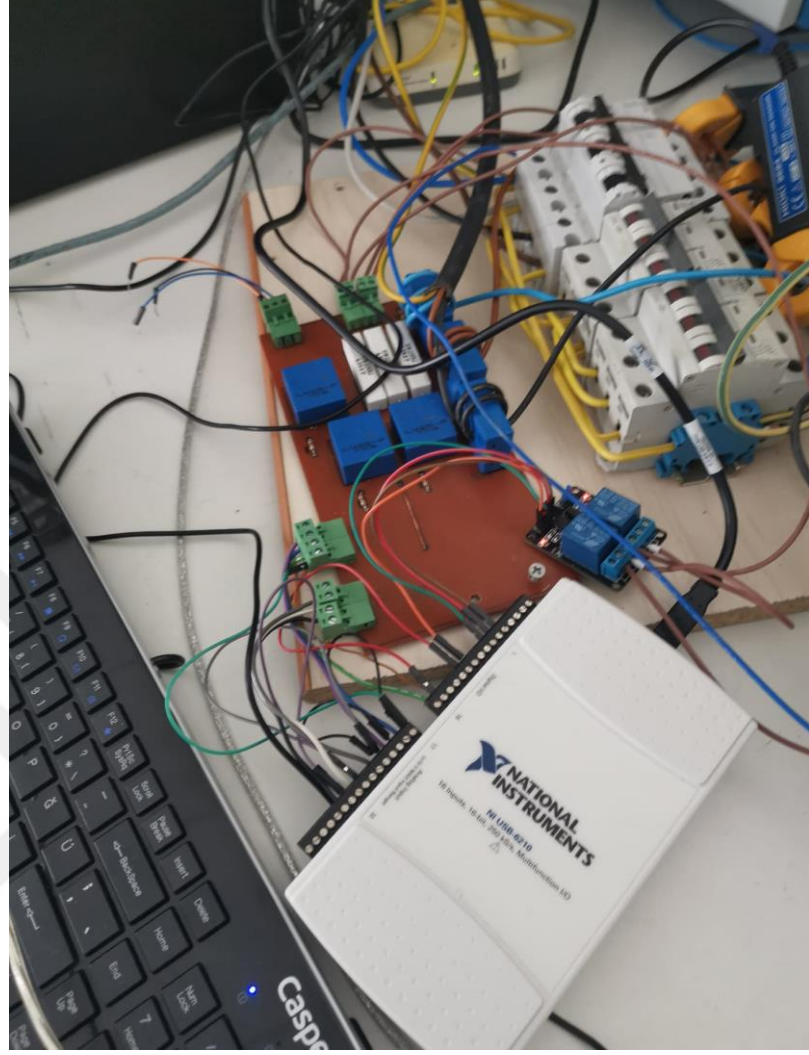
şekil 4.30. Deneysel çalışmalarda kullanılan senkron motorun çeşitli görünümleri



şekil 4.31. Senkron motorun uyarım akımı ayarında kullanılan varyağın görünümü

Hibrid reaktif güç kompanzasyon sisteminin Şekil 3.1’de verilmiş olan genel şemasına uygun olarak kontrolör tarafından şebeke tarafının reaktif güç değerlerine ihtiyaç duyulur. Bu yüzden reaktif güç değerlerinin ölçümü için bir ölçme kartı tasarlanmıştır. Tasarlanan bu kartın bir dış görünümü Şekil 4.32’de verilmiştir. Bu kart 3 tane gerilim sensörü (LEM LV25-P) ve 3 tane akım sensörü (LEM LA55-P) yardımıyla gerilimleri ve akımları ilgili DAQ kartının (USB-6210) analog girişlerine uygun gerilim değerlerine getirmektedir. Ölçme kartı ve DAQ kartı yardımıyla örneklenerek MATLAB’ın yazılım ortamına aktarılan gerilim ve akım değerleri reaktif güç değerlerinin hesaplanmasında kullanılmıştır.

Ölçme kartı ile elde edilen gerilim ve akım değerleri sensörlerin çevirme oranı, dirençlerdeki gerilim düşümü, DAQ kartının ölçme hatası gibi çeşitli nedenlerden dolayı genlik bakımından gerçek değeri vermez. Yani ölçülen değerler ham değerler olup bu değerlerin gerçek değerlere dönüşümünde kullanılmak üzere kalibrasyon katsayılarına ihtiyaç duyulur. Kalibrasyon katsayılarını elde etmek için deneysel olarak çeşitli yükler üzerinde hem ölçme kartı hem de bir güç kalitesi analizörü (Hioki 3198 PQA) yardımıyla bazı gerilim ve akım ölçümleri yapılmış ve ölçülen değerlerin genlik oranları kalibrasyon katsayıları olarak elde edilmiştir. Bu katsayılar Ek 4 ve Ek 5’te verilmiş olan MATLAB/m-file yazılımlarında kullanılarak güç değerlerinin doğru bir şekilde hesaplanması sağlanmıştır.



**Şekil 4.32.** Güç ölçümünde kullanılan ölçme kartının ve DAQ kartının bir görünümü

Deneysel çalışmalar iki farklı kısım halinde gerçekleştirilmiştir. İlk kısımda kompanzasyon sisteminde yalnızca kondansatörlerin var olduğu varsayılmış ve klasik reaktif güç kompanzasyonu uygulanmıştır. İkinci kısımda ise bu tezin konusunu ve amacını oluşturan senkron motorlu hibrit reaktif güç kompanzasyonunun deneysel çalışmaları yapılmıştır. Aynı yük koşulları altında gerçekleştirilmiş olan bu deneysel çalışmalar ile önerilen yöntemin klasik yöntemle olan üstünlükleri ortaya konulmaya çalışılmıştır.

İki kısımdan oluşan deneysel çalışmaların her biri bobin yüklerinin 7 farklı kombinasyonun devreye alınması sonrası yapılan ölçümlerden oluşmaktadır. Deneyler boyunca bobin yüklerinin haricinde bir tane de 3-fazlı  $R=1.5 \text{ kW}$ 'lık direnç yükünün de devrede olması sağlanmıştır. Her bir yük kombinasyonun kompanzasyonu öncesinde ve sonrasında gerilim ve akım değerleri örneklenerek MATLAB ortamına aktarılmış ve bu veriler kullanılarak güç değerleri hesaplanmıştır. Böylece kompanzasyon öncesi durum, klasik kompanzasyon ve hibrit kompanzasyon arasındaki farkların ortaya konulması amaçlanmıştır.

Klasik kompanzasyon için kullanılan MATLAB/m-file dosyası Ek 4'te verilmiştir. Hibrit kompanzasyon için kullanılan MATLAB/m-file dosyası ise Ek 5'te verilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda her bir faz için elde edilen aktif güç değerleri Çizelge 4.8'de, reaktif güç değerleri Çizelge 4.9'da ve güç faktörü değerleri de Çizelge 4.10'da verilmiştir.

**Çizelge 4.8.** Deneysel olarak kompanzasyon öncesinde, klasik ve hibrit kompanzasyon sonrasında her bir faz için elde edilen aktif güç değerleri

| No | Devredeki Yükler | Kompanzasyon Öncesi P (W) |        |        | Klasik Kompanzasyon P (W) |        |        | Hibrit Kompanzasyon P (W) |        |        |
|----|------------------|---------------------------|--------|--------|---------------------------|--------|--------|---------------------------|--------|--------|
|    |                  | A-fazı                    | B-fazı | C-fazı | A-fazı                    | B-fazı | C-fazı | A-fazı                    | B-fazı | C-fazı |
| 1  | L1-L2-R          | 533                       | 533    | 513    | 528                       | 529    | 518    | 554                       | 546    | 535    |
| 2  | L2-L4-L6-R       | 552                       | 532    | 553    | 544                       | 528    | 552    | 583                       | 557    | 567    |
| 3  | L2-L3-L5-L6-L7-R | 497                       | 613    | 622    | 507                       | 587    | 616    | 522                       | 633    | 693    |
| 4  | L1-L3-L5-L7-L8-R | 535                       | 611    | 624    | 528                       | 591    | 614    | 569                       | 642    | 660    |
| 5  | L3-L4-L5-L6-L7-R | 544                       | 577    | 632    | 544                       | 561    | 617    | 552                       | 584    | 674    |
| 6  | L4-L5-L7-R       | 563                       | 576    | 547    | 544                       | 567    | 554    | 554                       | 596    | 591    |
| 7  | L1-L4-L7-L8-R    | 596                       | 536    | 628    | 567                       | 531    | 624    | 608                       | 599    | 686    |

**Çizelge 4.9.** Deneysel olarak kompanzasyon öncesinde, klasik ve hibrit kompanzasyon sonrasında her bir faz için elde edilen reaktif güç değerleri

| No | Devredeki Yükler | Kompanzasyon Öncesi Q (VAr) |        |        | Klasik Kompanzasyon Q (VAr) |        |        | Hibrit Kompanzasyon Q (VAr) |        |        |
|----|------------------|-----------------------------|--------|--------|-----------------------------|--------|--------|-----------------------------|--------|--------|
|    |                  | A-fazı                      | B-fazı | C-fazı | A-fazı                      | B-fazı | C-fazı | A-fazı                      | B-fazı | C-fazı |
| 1  | L1-L2-R          | 293                         | 273    | 19     | 50                          | 35     | 34     | 9                           | 11     | -5     |
| 2  | L2-L4-L6-R       | 495                         | 273    | 514    | -80                         | -57    | -36    | 10                          | 13     | -6     |
| 3  | L2-L3-L5-L6-L7-R | 379                         | 1172   | 1130   | 39                          | 98     | 151    | 2                           | -8     | -12    |
| 4  | L1-L3-L5-L7-L8-R | 996                         | 1189   | 982    | -82                         | 100    | -55    | -10                         | 6      | 9      |
| 5  | L3-L4-L5-L6-L7-R | 865                         | 899    | 1158   | 33                          | 46     | 108    | -6                          | 14     | 12     |
| 6  | L4-L5-L7-R       | 876                         | 866    | 380    | 34                          | 63     | 66     | 8                           | -6     | 7      |
| 7  | L1-L4-L7-L8-R    | 1450                        | 709    | 734    | 125                         | -124   | -109   | -9                          | 11     | -12    |

**Çizelge 4.10.** Deneysel olarak kompanzasyon öncesinde, klasik ve hibrit kompanzasyon sonrasında her bir faz için elde edilen güç faktörü değerleri

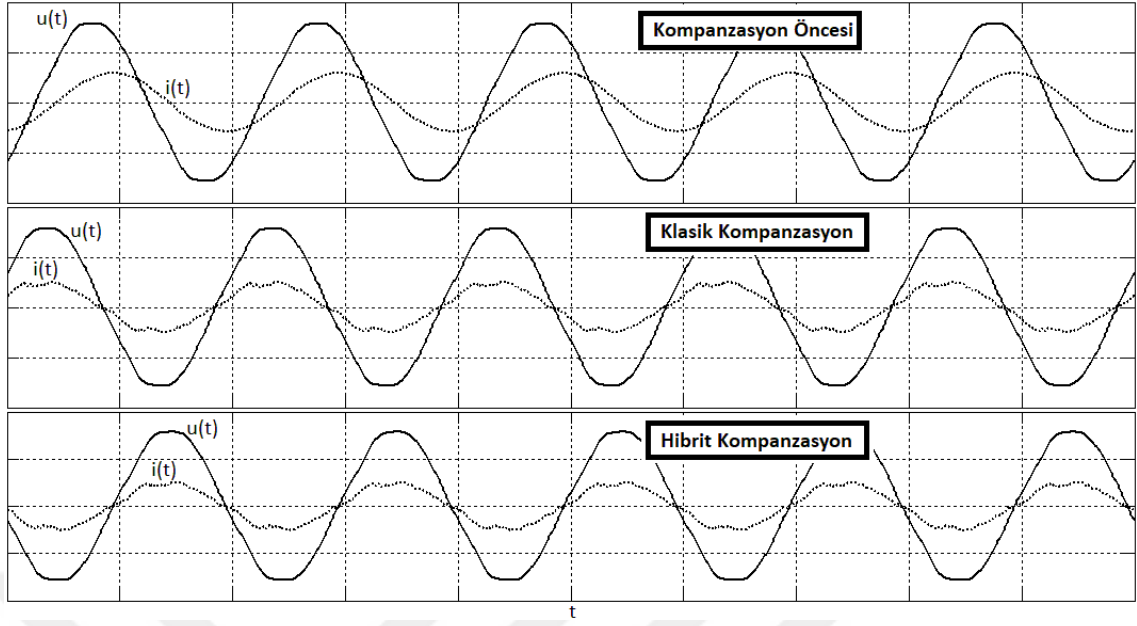
| No | Devredeki Yükler | Kompanzasyon Öncesi Cos ( $\varphi$ ) |        |        | Klasik Kompanzasyon Cos ( $\varphi$ ) |        |        | Hibrit Kompanzasyon Cos ( $\varphi$ ) |        |        |
|----|------------------|---------------------------------------|--------|--------|---------------------------------------|--------|--------|---------------------------------------|--------|--------|
|    |                  | A-fazı                                | B-fazı | C-fazı | A-fazı                                | B-fazı | C-fazı | A-fazı                                | B-fazı | C-fazı |
| 1  | L1-L2-R          | 0.876                                 | 0.890  | 0.999  | 0.995                                 | 0.997  | 0.998  | 1.000                                 | 1.000  | 1.000  |
| 2  | L2-L4-L6-R       | 0.744                                 | 0.889  | 0.732  | 0.989                                 | 0.994  | 0.998  | 1.000                                 | 1.000  | 1.000  |
| 3  | L2-L3-L5-L6-L7-R | 0.798                                 | 0.463  | 0.482  | 0.997                                 | 0.986  | 0.971  | 1.000                                 | 1.000  | 1.000  |
| 4  | L1-L3-L5-L7-L8-R | 0.473                                 | 0.457  | 0.536  | 0.988                                 | 0.986  | 0.996  | 1.000                                 | 1.000  | 1.000  |
| 5  | L3-L4-L5-L6-L7-R | 0.532                                 | 0.540  | 0.479  | 0.998                                 | 0.996  | 0.985  | 1.000                                 | 1.000  | 1.000  |
| 6  | L4-L5-L7-R       | 0.540                                 | 0.554  | 0.821  | 0.998                                 | 0.994  | 0.993  | 1.000                                 | 1.000  | 1.000  |
| 7  | L1-L4-L7-L8-R    | 0.380                                 | 0.603  | 0.650  | 0.976                                 | 0.974  | 0.985  | 1.000                                 | 1.000  | 1.000  |

Çizelge 4.8’de her bir yük senaryosuna (0...7) ve kompanzasyon durumuna (kompanzasyon öncesi, klasik kompanzasyon ve hibrit kompanzasyon) bağlı olarak sistemin (yük+kompanzasyon devresi) şebekeden çektiği aktif güç değerleri verilmiştir. Her üç durumda da sistemin şebekeden çektiği aktif güçlerin devredeki R yükünün gücünden (1500 W) daha büyük olduğu görülmektedir. Bunun temelde iki nedeni bulunmaktadır. İlki devredeki bobin yüklerinin ve kondansatörlerin de azda olsa bir aktif güç çekmeleridir. İkinci neden ise hibrit kompanzasyonda kullanılan senkron motorun da kendi güç kayıpları nedeniyle bir aktif güç çekmesidir. Şunu da söylemek gerekir ki bobin, direnç ve kondansatörlerin anma güç değerleri anma geriliminde geçerli olup deneysel çalışmalar esnasında ideal ve dengeli üç-fazlı gerilimi sağlamak oldukça zordur.

Hibrit kompanzasyon durumunda çekilen aktif gücün diğer iki duruma göre daha yüksek olması motor kayıplarının biraz daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, bu kayıp güçler motor akımına da bağlı olduğundan yükün durumuna bağlı olarak değişkenlik göstermiştir.

Çizelge 4.9’da her bir yük senaryosuna (1...7) ve kompanzasyon durumuna (kompanzasyon öncesi, klasik kompanzasyon ve hibrit kompanzasyon) bağlı olarak sistemin (yük+kompanzasyon devresi) şebekeden çektiği reaktif güç değerleri verilmiştir. Genel olarak bakıldığında çekilen reaktif güç değerlerinin kompanzasyon öncesinde yüksek değerlerde seyrettiği ama kompanzasyon sonrasında oldukça azaldığı anlaşılmaktadır. Fakat klasik kompanzasyon ile hibrit kompanzasyon arasında belirgin fark olduğu da görülmektedir. Klasik kompanzasyon sonrasında şebekeden çekilen reaktif güç değerleri beklenildiği gibi en küçük kondansatör kademe gücünün (250 VAr) de altına düşmesine rağmen tamamen sıfırlanamamıştır. Fakat bu değer hibrit sistemin kullanımı sonrasında neredeyse sıfıra olmuştur. Bu durum Çizelge 4.10’da verilmiş olan güç faktörü değerlerine de yansımıştır. Öyle ki kompanzasyon öncesinde 0.5 civarında olan güç faktörleri klasik kompanzasyon sonrası 0.98 civarına yükselirken hibrit kompanzasyon ile bu değer 1.00 yapılabilmektedir. Yükün dengesiz olup olmaması da sonuca etki etmemiştir. Sonuç olarak hibrit reaktif güç kompanzasyon sistemi klasik kompanzasyona göre çok daha iyi bir biçimde işlevini yerine getirmiş ve neredeyse tam kompanzasyonu sağlamıştır.

Her iki reaktif güç kompanzasyon sistemin deneysel olarak elde edilen örnek akım ve gerilim dalga biçimleri Şekil 4.33’te verilmiştir. Kompanzasyon öncesinde yükün şebekeden çektiği akım ile şebeke gerilimi arasında bir faz farkı olduğu açık bir biçimde görülmektedir. Kompanzasyon sonrasında bu faz farkının sıfır veya sıfıra çok yakın bir değere geldiği görülmektedir. Bu durum reaktif güç kompanzasyonunun doğal bir sonucu olarak karşımıza çıkmaktadır. Fakat kompanzasyon öncesinde akımın dalga biçimi sinüzoidal iken kompanzasyon sonrasında dalga biçiminde kısmi bir bozulma gözlenmektedir. Harmonik olarak göz önüne alınabilecek olan bu bozulmanın devreye giren kondansatörlerin neden olduğu paralel rezonans olayından kaynaklandığı düşünülmektedir. Hibrit kompanzasyonda devreye giren senkron motorun faz akımları da çok az harmonik içerse bile bunun klasik kompanzasyonda da var olması sorunun kaynağının kondansatörler olduğunu göstermektedir.



**Şekil 4.33.** Kompanzasyon öncesinde ve sonrasında gerilimin ve akımın şebeke tarafındaki dalga biçimleri

## 5. SONUÇLAR

Klasik kondansatör anahtarlama reaktif güç kompanzasyon sistemleri ile bu sistemlerde yer alan kondansatörlerin kademeli güç değerlerinden dolayı tam kompanzasyon yapabilmenin mümkün olmadığı görülmüştür. Söz konusu kompanzasyon sistemlerinin yalnızca endüktif yüklere uygun olmasından dolayı kapasitif yük durumuna cevap veremediği görülmüştür. Diğer kompanzasyon sistemlerinde karşılaşılan diğer sorunlar; dengesiz yük koşullarında istenilen başarımın sağlanamaması, harmonikli akımların çekilmesi (SVC'li sistemlerde) ve bazı durumlarda rezonans problemlerine neden olmalarıdır.

Bu tezde bir senkron motorun anahtarlama kondansatör grupları ile hibrit bir biçimde kullanımı önerilerek bahsedilen bazı problemlere çözüm olunması amaçlanmıştır. Önerilen hibrit sistemin, yapısında yer alan senkron motorun bir dinamik kompanzasyon olarak kullanımı ile güç katsayısını 1.00 civarında tutulabilmesi, uyartım akımı değiştirilerek hem kapasitif-reaktif hem de endüktif-reaktif bölgede çalıştırılabilmesi ve SVC sistemlerinde görülen harmonik probleminin yaşanmaması nedeniyle kompanzasyon uygulamaları için avantajlı bir sistem olacağı söylenebilir.

Önerilen hibrit sistem iki ana kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda yer alan anahtarlama kondansatörler yükün ihtiyacı olan kapasitif reaktif gücü sağlarken gereksinimi duyulan artık reaktif gücün her üç faz için ya endüktif ya da kapasitif değerde olmasını sağlamaktadır. Hibrit sistemin ikinci kısmında ise bir senkron motor ve bu motorun her bir fazına bağlı ayarlanabilir empedanslardan (ototrafo kullanılarak elde edilmiştir) oluşmaktadır. Bu kısım tam kompanzasyon için gereksinimi duyulan reaktif gücü sağlamak için kullanılmıştır. Bunun için senkron motor endüktif veya kapasitif bölgede çalıştırılarak ve faz sargılarına bağlı ayarlanabilir endüktanslar birbirlerinden bağımsız biçimde kontrol edilerek dengesiz artık güç gereksinimine cevap verilmesi sağlanmaktadır.

Senkron motor, tek başına dinamik faz kaydırıcı olarak enerji üretim santrallerinde kullanılmaktadır. Buna karşın, bu tezde simülasyonu ve deneysel çalışmaları gerçekleştirilmiş olan alçak gerilim seviyesinde klasik anahtarlama kondansatör grupları ile hibrit bir yapıda kullanılması ve her 3 fazın ayrı ayrı kompanze edilebiliyor olması tezin özgünlüğüne katkı sağlamaktadır.

Önerilen hibrit sistem MATLAB/Simulink ortamında yapılan simülasyon çalışmaları ve laboratuvar ortamında yapılan deneysel çalışmalar kullanılarak incelenmiştir. İncelemeler klasik kondansatör anahtarlama kompanzasyon ile hibrit kompanzasyon sistemlerinin karşılaştırması üzerinden gerçekleştirilmiştir. Hibrit sistemin hem dengeli hem de dengesiz yük koşullarında şebeke tarafı reaktif güç değerlerini her üç faz için neredeyse sıfır yaptığı ve böylece güç katsayısını 1.00 değerine yükselttiği yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir.

## 6. KAYNAKLAR

- Bal G. Çolak D. 1995. Reactive power compensator using constant capacitor and thyristor controlled reactor, Gazi University, J. of Institute of Science and Technology, 8(2): 9-15.
- Bayındır, R. Görgün, A. 2009. PIC tabanlı bir pı denetleyici ile senkron motor kullanılarak bir kompanzatör uygulaması, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15(1): 87-99.
- Bayındır R. Sagioglu S. Colak I. 2007 Yapay sinir ağları tabanlı reaktif güç kompanzasyonu, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Politeknik Dergisi, 10(2): 129-135.
- Bayram, M. 2000. Reaktif Güç Kompanzasyonu, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Budeanu C. 1927. Reactive and fictitious powers”, no.2, Rumanian National Inst., Bucuresti.
- Çolak D. Bayındır R. Görgün A. Kundakoğlu H. 2007. Senkron motorda değişik çalışma durumlarının gözlenmesi, EMO IV.Otomasyon Sempozyumu, Samsun, 78-92.
- Dixon, J. Morán L. Rodríguez J. Domke R. 2005. Reactive power compensation technologies: state of the art review. Proceedings of the IEEE, 2144 – 2164.
- El-Sadek, M. Z. Fetih, N. H. and Abdelbar, F. N. 1988. Starting of induction motors by static VAR compensators, Third International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives, 444–447.
- Emanuel A. E. 1990. Powers in nonsinusoidal situations-a review of definitions and physical meaning, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.5, no.3, 1377-1389.
- EPDK, 2015. Dağıtım lisansı sahibi tüzel kişiler ve görevli tedarik şirketlerinin tarife uygulamalarına ilişkin usul ve esaslar, 31/12/2015 tarihli ve 29579 sayılı Resmi gazete, 5999-3 sayılı Kurul Kararı
- Ersamut, R. 2009. Yüksek Lisans Tezi. Statik Var kompanzasyonu sistemlerinin incelenmesi ve karşılaştırılması, 26-32. İstanbul, Türkiye: Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Fryze S. 1932. Active, reactive and apparent power in circuits with nonsinusoidal voltage and current, Przegl Elektrotech, vol.22, 673-676.
- Gayakwad, D. R. Desai, S. P. Mehta, C. R. 2014. Automatic reactive power control using FC-TCR, International Journal of Advanced Computer Research, Volume 4, Number 2, Issue 15.
- Gelen, A. Yalçınöz, T. 2009. Tristör anahtarlama kapasitör (TSC) ve tristör anahtarlama reaktör-tabanlı statik Var kompanzatör’ün (TSR-tabanlı SVC) PI ile kontrolü, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der, 24(2): 237-244.

- Guo H. J. Sagawa S. Watanabe T. Ichinokura O. 2003. Sensorless driving method of permanent-magnet synchronous motors based on neural networks, IEEE Transactions On Magnetcs, 39: 3247-3249.
- Güler, Ö. 1995. Reaktif güç kompanzasyonu ve sakıncaları, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- IEEE, 1992, IEEE Std 1036-1992, IEEE Guide for Application of shunt power capacitors, IEEE, ABD.
- IEEE, 1993. IEEE Standard 519-1992: ‘IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems’, 1993.
- Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A., Arıkan, O. 2003. Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Miller T. J.E. 1982. Reactive power control in electric systems, A Wiley-Interscience Publication, New York, 182-222.
- Sagiroglu S. Colak I. Bayındır R. 2006. Power factor correction technique based on artificial neural networks, Energy Conversion and Management, Energy Conversion and Management, (47/18-19), 3204-3215.
- Salaan, C. J. O. and Estoperez, N R. 2011. An artificial neural network based real-time reactive power controller, World Congress on Engineering and Computer Science, October 19-21 2011, Vol 1, San Francisco, USA.
- Sesveren, Ö. 2008. Yapay sinir ağları temelli reaktif güç kompanzasyonu eğitim seti tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Vural, O. 2003. Yüksek Lisans Tezi. Alçak gerilim tesislerinde reaktif Güç kompanzasyonu. Diyarbakır: Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü.

## 7. EKLER

### Ek 1.

```

function Kyeni = fcn(Qabc,Keski)
Qsa=Qabc(1);      %A fazi sebeke tarafi olculen reaktif gucu
Qsb=Qabc(2);      %B fazi sebeke tarafi olculen reaktif gucu
Qsc=Qabc(3);      %C fazi sebeke tarafi olculen reaktif gucu

Qa1=250;          %1 fazli (A fazi) kondansator gucu (kademe: K1)
Qa2=500;          %1 fazli (A fazi) kondansator gucu (kademe: K2)
Qb1=250;          %1 fazli (B fazi) kondansator gucu (kademe: K3)
Qb2=500;          %1 fazli (B fazi) kondansator gucu (kademe: K4)
Qc1=250;          %1 fazli (C fazi) kondansator gucu (kademe: K5)
Qc2=500;          %1 fazli (C fazi) kondansator gucu (kademe: K6)
Q3f1=1000;        %3 fazli kondansator gucu (kademe: K7)
Q3f2=1500;        %3 fazli kondansator gucu (kademe: K8)

Qca1=[0 Qa1 Qa2 Qa1+Qa2]; %A fazi tek-fazli kademe gucu ihtimalleri
Qcb1=[0 Qb1 Qb2 Qb1+Qb2]; %B fazi tek-fazli kademe gucu ihtimalleri
Qcc1=[0 Qc1 Qc2 Qc1+Qc2]; %C fazi tek-fazli kademe gucu ihtimalleri
Qc3f=[0 Q3f1 Q3f2 Q3f1+Q3f2]; %uc-fazli kademe gucu ihtimalleri

Ka1=Keski(1);
Ka2=Keski(2);
Kb1=Keski(3);
Kb2=Keski(4);
Kc1=Keski(5);
Kc2=Keski(6);
K_3f1=Keski(7);
K_3f2=Keski(8);

%Devredeki kademelerin gucleri hesaplaniyor
Q3f=(K_3f1*Q3f1+K_3f2*Q3f2)/3;
Qka=Ka1*Qa1+Ka2*Qa2+Q3f;
Qkb=Kb1*Qb1+Kb2*Qb2+Q3f;
Qkc=Kc1*Qc1+Kc2*Qc2+Q3f;

%yuk=sebeke+kademe gucleri hesaplaniyor.
Qya=Qsa+Qka;
Qyb=Qsb+Qkb;
Qyc=Qsc+Qkc;
Qy=[Qya Qyb Qyc];

Qymin=min(Qy); %en kucuk reaktif guc ihtiyacli
faz gucunun ve faz sirasinin belirlenmesi
[val3,i3]=min(abs(Qymin-Qc3f/3)); %devrede olmasi gereken 3 fazli
kondansator kademeleri belirleniyor.

%tek fazli kademeler ile karsilanmasi gereken sebeke gucleri
hesaplaniyor.
Qya1=Qya-Qc3f(i3)/3;
Qyb1=Qyb-Qc3f(i3)/3;
Qyc1=Qyc-Qc3f(i3)/3;

%devrede olmasi gereken 1 fazli kondansator kademeleri belirleniyor.
[vala ia]=min(abs(Qya1-Qca1));

```

```

[valb ib]=min(abs(Qyb1-Qcb1));
[valc ic]=min(abs(Qyc1-Qcc1));
iabc=[ia ib ic];

%artik gucler hesaplaniyor
Qart_a=Qya1-Qca1(ia);
Qart_b=Qyb1-Qcb1(ib);
Qart_c=Qyc1-Qcc1(ic);
Qart=[Qart_a Qart_b Qart_c];

%artik gucler kucukten buyuge dogru siralanıyor
[X Y]=sort(abs(Qart));
faz1=Y(1);
faz2=Y(2);
faz3=Y(3);
Qfaz1=Qart(faz1);
Qfaz2=Qart(faz2);
Qfaz3=Qart(faz3);

Q0=20;
if abs(Qfaz1)>Q0
    if Qfaz1*Qfaz2<0
        if Qfaz2<0
            iabc(faz2)=iabc(faz2)-1;
        else
            iabc(faz2)=iabc(faz2)+1;
        end
    end
    if Qfaz1*Qfaz3<0
        if Qfaz3<0
            iabc(faz3)=iabc(faz3)-1;
        else
            iabc(faz3)=iabc(faz3)+1;
        end
    end
elseif abs(Qfaz2)>Q0
    if Qfaz2*Qfaz3<0
        if Qfaz3<0
            iabc(faz3)=iabc(faz3)-1;
        else
            iabc(faz3)=iabc(faz3)+1;
        end
    end
end

ia=iabc(1);
ib=iabc(2);
ic=iabc(3);

%ilgili 3-fazli kademeler devreye aliniyor.
if i3==1
    K_3f1=0;    K_3f2=0;
elseif i3==2
    K_3f1=1;    K_3f2=0;
elseif i3==3
    K_3f1=0;    K_3f2=1;
elseif i3==4

```

```
        K_3f1=1;      K_3f2=1;
end

%ilgili a-fazi kademeleri devreye aliniyor.
if ia==1
    Ka1=0;      Ka2=0;
elseif ia==2
    Ka1=1;      Ka2=0;
elseif ia==3
    Ka1=0;      Ka2=1;
elseif ia==4
    Ka1=1;      Ka2=1;
end

%ilgili b-fazi kademeleri devreye aliniyor.
if ib==1
    Kb1=0;      Kb2=0;
elseif ib==2
    Kb1=1;      Kb2=0;
elseif ib==3
    Kb1=0;      Kb2=1;
elseif ib==4
    Kb1=1;      Kb2=1;
end

%ilgili c-fazi kademeleri devreye aliniyor.
if ic==1
    Kc1=0;      Kc2=0;
elseif ic==2
    Kc1=1;      Kc2=0;
elseif ic==3
    Kc1=0;      Kc2=1;
elseif ic==4
    Kc1=1;      Kc2=1;
end

Kyeni=[Ka1 Ka2 Kb1 Kb2 Kc1 Kc2 K_3f1 K_3f2]';
```

**Ek 2.**

```
function [a1,a2,a3,a4] = fcn(Qabc_k,Qabc,SA)
```

```
Qyart_a=Qabc_k(1);
```

```
Qyart_b=Qabc_k(2);
```

```
Qyart_c=Qabc_k(3);
```

```
Qyart=[Qyart_a Qyart_b Qyart_c];
```

```
[Qref faz]=sort(abs(Qyart),'descend');
```

```
ref1=faz(1);
```

```
ref2=faz(2);
```

```
ref3=faz(3);
```

```
Qref1=Qyart(ref1);
```

```
Qref2=Qyart(ref2);
```

```
Qref3=Qyart(ref3);
```

```
Q0=20;
```

```
a_yeni=[0 0 0 0];
```

```
if abs(Qref1)>Q0
```

```
    if Qabc(ref1)>Q0
```

```
        a_yeni(4)=1;
```

```
    elseif Qabc(ref1)<-Q0
```

```
        a_yeni(4)=-1;
```

```
    else
```

```
        a_yeni(4)=0;
```

```
    end
```

```
    a_yeni(ref1)=-1;
```

```
if SA(2*ref1)==1 && abs(Qabc(ref1))<Q0
```

```
    if Qref1>0
```

```
        if Qabc(ref2)>Q0
```

```
            a_yeni(ref2)=-1;
```

```
        elseif Qabc(ref2)<-Q0
```

```
            a_yeni(ref2)=1;
```

```
        else
```

```
            a_yeni(ref2)=0;
```

```
        end
```

```
        if Qabc(ref3)>Q0
```

```
            a_yeni(ref3)=-1;
```

```
        elseif Qabc(ref3)<-Q0
```

```
            a_yeni(ref3)=1;
```

```
        else
```

```
            a_yeni(ref3)=0;
```

```
        end
```

```
    else
```

```
        if Qabc(ref2)>Q0
```

```
            a_yeni(ref2)=1;
```

```
        elseif Qabc(ref2)<-Q0
```

```
            a_yeni(ref2)=-1;
```

```
        else
```

```
            a_yeni(ref2)=0;
```

```
        end
```

```
        if Qabc(ref3)>Q0
            a_yeni(ref3)=1;
        elseif Qabc(ref3)<-Q0
            a_yeni(ref3)=-1;
        else
            a_yeni(ref3)=0;
        end

    end
elseif abs(Qref1)<1
    a_yeni(ref1)=1;
    a_yeni(ref2)=1;
    a_yeni(ref3)=1;
end

a1=a_yeni(1);
a2=a_yeni(2);
a3=a_yeni(3);
a4=a_yeni(4);
```

**Ek 3.**

```
function SA = fcn(Va,Vb,Vc,Vu)

if Va>99.9
    au=1;
    aa=0;
elseif Va<0.1
    au=0;
    aa=1;
else
    au=0;
    aa=0;
end

if Vb>99.9
    bu=1;
    ba=0;
elseif Vb<0.1
    bu=0;
    ba=1;
else
    bu=0;
    ba=0;
end

if Vc>99.9
    cu=1;
    ca=0;
elseif Vc<0.1
    cu=0;
    ca=1;
else
    cu=0;
    ca=0;
end

if Vu>380
    uu=1;
else
    uu=0;
end

if Vu<52
    ua=1;
else
    ua=0;
end

SA=[au aa bu ba cu ca uu ua];
```

**Ek 4.**

```

%Bu program klasik kompanzasyon icin gerekli hesaplamalari yapar
clc
clear all

dq1 = daq("ni");      %(USB-6210)
dq2 = daq("ni");      %(USB-6009)
dq3 = daq("ni");      %(USB-6002)

dq1.Rate=10000;      %ornekleme frekansi

%Gerilim ve akim kanallari tanimlaniyor (USB-6210)
addinput(dq1,"Dev1", [0 1 2 3 4 5],"Voltage");

%Kondansator kademelerinin bagli oldugu
%kanallar tanimlaniyor (USB-6009)
ch2_1=addoutput(dq2,'Dev2','Port0/Line0','Digital');
ch2_2=addoutput(dq2,'Dev2','Port0/Line1','Digital');
ch2_3=addoutput(dq2,'Dev2','Port0/Line2','Digital');
ch2_4=addoutput(dq2,'Dev2','Port0/Line3','Digital');
ch2_5=addoutput(dq2,'Dev2','Port0/Line4','Digital');
ch2_6=addoutput(dq2,'Dev2','Port0/Line5','Digital');
ch2_7=addoutput(dq2,'Dev2','Port0/Line6','Digital');
ch2_8=addoutput(dq2,'Dev2','Port0/Line7','Digital');

%L yuklerinin bagli oldugu kanallar tanimlaniyor (USB-6002)
ch3_1=addoutput(dq3,'Dev3','Port0/Line0','Digital');
ch3_2=addoutput(dq3,'Dev3','Port0/Line1','Digital');
ch3_3=addoutput(dq3,'Dev3','Port0/Line2','Digital');
ch3_4=addoutput(dq3,'Dev3','Port0/Line3','Digital');
ch3_5=addoutput(dq3,'Dev3','Port0/Line4','Digital');
ch3_6=addoutput(dq3,'Dev3','Port0/Line5','Digital');
ch3_7=addoutput(dq3,'Dev3','Port0/Line6','Digital');
ch3_8=addoutput(dq3,'Dev3','Port0/Line7','Digital');

%yuk senaryolari
%1: L yukleri devrede degil, 0: L yukleri devrede
write(dq3,[0 0 1 1 1 1 1 1])
% write(dq3,[1 0 1 0 1 0 1 1])
% write(dq3,[1 0 0 1 0 0 0 1])
% write(dq3,[0 1 0 1 0 1 0 0])
% write(dq3,[1 1 0 0 0 0 0 1])
% write(dq3,[1 1 1 0 0 1 0 1])
% write(dq3,[0 1 1 0 1 1 0 0])

%devredeki kondansator kademeleri
%1: kondansator devrede degil, 0: kondansator devrede
Kad=[1 1 1 1 1 1 1 1];
write(dq2,[1 1 1 1 1 1 1 1])

Qk1=250;      %1 fazli (A fazi) kondansator gucu (kademe: K1)
Qk2=250;      %1 fazli (B fazi) kondansator gucu (kademe: K2)
Qk3=250;      %1 fazli (C fazi) kondansator gucu (kademe: K3)
Qk4=1500;     %3 fazli kondansator gucu (kademe: K4)
Qk5=1000;     %3 fazli kondansator gucu (kademe: K5)

```

```

Qk6=500;          %1 fazli (A fazi) kondansator gucu (kademe: K6)
Qk7=500;          %1 fazli (B fazi) kondansator gucu (kademe: K7)
Qk8=500;          %1 fazli (C fazi) kondansator gucu (kademe: K8)

Qca1=[0 Qk1 Qk6 Qk1+Qk6]; %A fazi tek-fazli kademe gucu ihtimalleri
Qcb1=[0 Qk2 Qk7 Qk2+Qk7]; %B fazi tek-fazli kademe gucu ihtimalleri
Qcc1=[0 Qk3 Qk8 Qk3+Qk8]; %C fazi tek-fazli kademe gucu ihtimalleri
Qc3=[0 Qk5/3 Qk4/3 Qk5/3+Qk4/3]; %uc-fazli kademe gucu ihtimalleri

%2 saniye bekleme yapiliyor
pause(2)

n=1; %surekli calisma icin n sonsuz olmalidir.
for k=1:n %bu dongu n defa calisiyor
    %guc olcumu yapiliyor
    [P Q data3]=guc_olc(dq1);
    P
    Q

    Qsa=Q(1);
    Qsb=Q(2);
    Qsc=Q(3);

    Qq=[Qsa Qsb Qsc];

    %Devredeki kademelerin gucleri hesaplaniyor
    Qka=not(Kad(1))*Qk1+not(Kad(6))*Qk6+ ...
        not(Kad(4))*Qk4/3+not(Kad(5))*Qk5/3;
    Qkb=not(Kad(2))*Qk2+not(Kad(7))*Qk7+ ...
        not(Kad(4))*Qk4/3+not(Kad(5))*Qk5/3;
    Qkc=not(Kad(3))*Qk3+not(Kad(8))*Qk6+ ...
        not(Kad(4))*Qk4/3+not(Kad(5))*Qk5/3;

    %sebeke+kademe gucleri hesaplaniyor.
    Qska=Qsa+Qka;
    Qskb=Qsb+Qkb;
    Qskc=Qsc+Qkc;
    Qsk3=[Qska Qskb Qskc];

    %en kucuk reaktif guc ihtiyacli faz gucunun ve
    %faz sirasinin belirlenmesi
    [Qs_min faz]=min(Qsk3);

    %devrede olması gereken 3 fazli kondansator
    %kademeleri belirleniyor.
    [val3,i3]=min(abs(Qs_min-Qc3));

    %tek fazli kademeler ile karsilanmasi gereken
    %sebeke gucleri hesaplaniyor.
    Qsa1=Qska-Qc3(i3);
    Qsb1=Qskb-Qc3(i3);
    Qsc1=Qskc-Qc3(i3);

    %devrede olması gereken 1 fazli kondansator
    %kademeleri belirleniyor.

```

```
[Qa1 ia]=min(abs(Qsa1-Qca1));
[Qb1 ib]=min(abs(Qsb1-Qcb1));
[Qc1 ic]=min(abs(Qsc1-Qcc1));

%ilgili 3-fazli kademeler devreye aliniyor.
if i3==1
    Kad(5)=0;
    Kad(4)=0;
elseif i3==2
    Kad(5)=1;
    Kad(4)=0;
elseif i3==3
    Kad(5)=0;
    Kad(4)=1;
elseif i3==4
    Kad(5)=1;
    Kad(4)=1;
end

%ilgili a-fazi kademeleri devreye aliniyor.
if ia==1
    Kad(1)=0;
    Kad(6)=0;
elseif ia==2
    Kad(1)=1;
    Kad(6)=0;
elseif ia==3
    Kad(1)=0;
    Kad(6)=1;
elseif ia==4
    Kad(1)=1;
    Kad(6)=1;
end

%ilgili b-fazi kademeleri devreye aliniyor.
if ib==1
    Kad(2)=0;
    Kad(7)=0;
elseif ib==2
    Kad(2)=1;
    Kad(7)=0;
elseif ib==3
    Kad(2)=0;
    Kad(7)=1;
elseif ib==4
    Kad(2)=1;
    Kad(7)=1;
end

%ilgili c-fazi kademeleri devreye aliniyor.
if ic==1
    Kad(3)=0;
    Kad(8)=0;
elseif ic==2
    Kad(3)=1;
    Kad(8)=0;
elseif ic==3
    Kad(3)=0;
```

```

        Kad(8)=1;
elseif ic==4
        Kad(3)=1;
        Kad(8)=1;
end

Kad=not(Kad)
write(dq2,Kad)

%2 saniye bekleme yapiliyor
pause(2)

%guc olcumu yapiliyor
[P Q data4]=guc_olc(dq1);
P
Q
end

%asagidaki fonksiyon olcme karti yardimiyla
%gerilimlerin ve akimlarin orneklenmesini ve guclerin
%hesaplanmasını sağlar
function [P Q data] = guc_olc(dq1)
Ns=2000; %kanal basina alinacak ornek sayisi
f=50; T=1/f; w=2*pi*f;
N=dq1.Rate/f; %periyot basina ornek sayisi

%gerilim ve akim kalibrasyon katsayilari
K_ua=87.7;
K_ub=86.5;
K_uc=87.8;
K_ia=3.448;
K_ib=3.42;
K_ic=3.40;

%fourier katsayilari icin on hesaplamalar
cs=cos(w*[0:T/N:(Ns-1)*T/N]);
sn=sin(w*[0:T/N:(Ns-1)*T/N]);

data = read(dq1,Ns,"OutputFormat","Matrix");

ua=data(:,1); ub=data(:,2); uc=data(:,3);
ia=-1*data(:,4); ib=-1*data(:,5); ic=-1*data(:,6);
ualx=(2/Ns)*sum(ua.*cs')*K_ua; ualy=(2/Ns)*sum(ua.*sn')*K_ua;
ialx=(2/Ns)*sum(ia.*cs')*K_ia; ialy=(2/Ns)*sum(ia.*sn')*K_ia;
ublx=(2/Ns)*sum(ub.*cs')*K_ub; ubly=(2/Ns)*sum(ub.*sn')*K_ub;
iblx=(2/Ns)*sum(ib.*cs')*K_ib; ibly=(2/Ns)*sum(ib.*sn')*K_ib;
uclx=(2/Ns)*sum(uc.*cs')*K_uc; ucly=(2/Ns)*sum(uc.*sn')*K_uc;
iclx=(2/Ns)*sum(ic.*cs')*K_ic; icly=(2/Ns)*sum(ic.*sn')*K_ic;
Qa=(ualx*ialy-ualy*ialx)/2; Qb=(ublx*ibly-ubly*iblx)/2; ...
Qc=(uclx*icly-ucly*iclx)/2;
Q=[Qa Qb Qc];
Pa=(ualx*ialx+ualy*ialy)/2; Pb=(ublx*iblx+ubly*ibly)/2; ...
Pc=(uclx*iclx+ucly*icly)/2;
P=[Pa Pb Pc];
end

```

**Ek 5.**

```

%Bu program hibrit kompanzasyon icin gerekli hesaplamalari yapar
clc
clear all

dq11 = daq("ni");      %(USB-6210) akim-gerilim olcme
dq12 = daq("ni");      %(USB-6210) senkron motor devreye alma
dq21 = daq("ni");      %(USB-6009) C kondansatorler
dq31 = daq("ni");      %(USB-6002) L yukleri
dq32 = daq("ni");      %(USB-6002) Senkron Motor Uyartim ototrafo motoru
dq33 = daq("ni");      %(USB-6002) Senk. Motor Uyartim varyagi sinir
anaht.

dq41 = daq("ni");      %(USB-6008) senkron motor ototrafo motorlari
dq42 = daq("ni");      %(USB-6008) ototrafo sinir anahtarlari

dq11.Rate=10000;      %ornekleme frekansi

%Gerilim ve akim kanallari tanimlaniyor (USB-6210)
addinput(dq11,"Dev1",[0 1 2 3 4 5],"Voltage");

%senkron motor devreye alma kontaktoru tanimlaniyor (USB-6210)
addoutput(dq12,'Dev1',['Port1/Line0' 'Port1/Line1'],'Digital');

%Kondansator kademelerinin bagli oldugu
%kanallar tanimlaniyor (USB-6009)
addoutput(dq21,'Dev2',['Port0/Line0' 'Port0/Line1' ...
    'Port0/Line2' 'Port0/Line3' 'Port0/Line4' ...
    'Port0/Line5' 'Port0/Line6' 'Port0/Line7'],'Digital');

%L yuklerinin bagli oldugu kanallar tanimlaniyor (USB-6002)
addoutput(dq31,'Dev3',['Port0/Line0' 'Port0/Line1' ...
    'Port0/Line2' 'Port0/Line3' 'Port0/Line4' ...
    'Port0/Line5' 'Port0/Line6' 'Port0/Line7'],'Digital');

%Senkron Motor Uyartim varyagi motorunu calistiran
%kontaktorlerin bagli oldugu kanallar tanimlaniyor(USB-6002)
addoutput(dq32,'Dev3',['Port1/Line0' 'Port1/Line2'],'Digital');

%Senkron Motor Uyartim varyagi sinir anahtarlari (USB-6002)
addinput(dq33,'Dev3',['Port1/Line1' 'Port1/Line3'],'Digital');

%senkron motor faz empedans ototrafo motorlari (USB-6008)
addoutput(dq41,'Dev4',['Port0/Line0' 'Port0/Line2' ...
    'Port0/Line4' 'Port0/Line6' 'Port1/Line0' ...
    'Port1/Line2'],'Digital');

%senkron motor ototrafo sinir anahtarlari (USB-6008)
addinput(dq42,'Dev4',['Port0/Line1' 'Port0/Line3' ...
    'Port0/Line5' 'Port0/Line7' 'Port1/Line1' ...
    'Port1/Line3'],'Digital');

%senkron motor devreye alma kontaktoru (USB-6210)
write(dq12,[0 1]);  %[0 1]==>SM devrede

%devredeki kondansator kademeleri

```

```

%1: kondansator devrede degil, 0: kondansator devrede
Kad=[1 1 1 1 1 1 1 1];
write(dq21,[1 1 1 1 1 1 1 1])

%yük senaryolari
%1: L yukleri devrede degil, 0: L yukleri devrede
write(dq31,[0 0 1 1 1 1 1 1])
% write(dq3,[1 0 1 0 1 0 1 1])
% write(dq3,[1 0 0 1 0 0 0 1])
% write(dq3,[0 1 0 1 0 1 0 0])
% write(dq3,[1 1 0 0 0 0 0 1])
% write(dq3,[1 1 1 0 0 1 0 1])
% write(dq3,[0 1 1 0 1 1 0 0])

%Senkron Motor Uyartım varyagi motoru (USB-6002)
write(dq32,[1 1]); % [0 1]:motor saga doner, %[1 0]:motor sola doner

%senkron motor ototrafo motorlari (USB-6008)
write(dq41,[1 1 1 1 1 1]); %1:devrede degil, 0:devrede

%Senkron Motor Uyartım varyagi sinir anahtarları (USB-6002)
SA1=read(dq33,"OutputFormat","Matrix");

%senkron motor ototrafo sinir anahtarları (USB-6008)
SA2=read(dq42,"OutputFormat","Matrix");

Qk1=250; %1 fazli (A fazi) kondansator gucu (kademe: K1)
Qk2=250; %1 fazli (B fazi) kondansator gucu (kademe: K2)
Qk3=250; %1 fazli (C fazi) kondansator gucu (kademe: K3)
Qk4=1500; %3 fazli kondansator gucu (kademe: K4)
Qk5=1000; %3 fazli kondansator gucu (kademe: K5)
Qk6=500; %1 fazli (A fazi) kondansator gucu (kademe: K6)
Qk7=500; %1 fazli (B fazi) kondansator gucu (kademe: K7)
Qk8=500; %1 fazli (C fazi) kondansator gucu (kademe: K8)

Qca1=[0 Qk1 Qk6 Qk1+Qk6]; %A fazi tek-fazli kademe gucu ihtimalleri
Qcb1=[0 Qk2 Qk7 Qk2+Qk7]; %B fazi tek-fazli kademe gucu ihtimalleri
Qcc1=[0 Qk3 Qk8 Qk3+Qk8]; %C fazi tek-fazli kademe gucu ihtimalleri
Qc3=[0 Qk5/3 Qk4/3 Qk5/3+Qk4/3]; %uc-fazli kademe gucu ihtimalleri

%2 saniye bekleme yapiliyor
pause(2)

n=1; %surekli calisma icin n sonsuz olmalidir.
for k=1:n %bu dongu n defa calisiyor
    %guc olcumu yapiliyor
    Q=guc_olc(dq11);

    Qsa=Q(1);
    Qsb=Q(2);
    Qsc=Q(3);

    %Devredeki kademelerin gucleri hesaplaniyor
    Qka=not(Kad(1))*Qk1+not(Kad(6))*Qk6+ ...
        not(Kad(4))*Qk4/3+not(Kad(5))*Qk5/3;
    Qkb=not(Kad(2))*Qk2+not(Kad(7))*Qk7+ ...
        not(Kad(4))*Qk4/3+not(Kad(5))*Qk5/3;

```

```

Qkc=not (Kad(3)) *Qk3+not (Kad(8)) *Qk6+ ...
    not (Kad(4)) *Qk4/3+not (Kad(5)) *Qk5/3;

%sebeke+kademe gucleri hesaplaniyor.
Qska=Qsa+Qka;
Qskb=Qsb+Qkb;
Qskc=Qsc+Qkc;
Qsk3=[Qska Qskb Qskc];

%en kucuk reaktif guc ihtiyacli faz gucunun ve
%faz sirasinin belirlenmesi
[Qs_min faz]=min(Qsk3);

%devrede olması gereken 3 fazli kondansator
%kademeleri belirleniyor.
[val3,i3]=min(abs(Qs_min-Qc3));

%tek fazli kademeler ile karsilanmasi gereken
%sebeke gucleri hesaplaniyor.
Qsa1=Qska-Qc3(i3);
Qsb1=Qskb-Qc3(i3);
Qsc1=Qskc-Qc3(i3);

%devrede olması gereken 1 fazli kondansator
%kademeleri belirleniyor.
[Qa1 ia]=min(abs(Qsa1-Qca1));
[Qb1 ib]=min(abs(Qsb1-Qcb1));
[Qc1 ic]=min(abs(Qsc1-Qcc1));
iabc=[ia ib ic];

%artik gucler hesaplaniyor
Qart_a=Qsa1-Qca1(ia);
Qart_b=Qsb1-Qcb1(ib);
Qart_c=Qsc1-Qcc1(ic);
Qart=[Qart_a Qart_b Qart_c];

%artik guclerin hepsinin ya enduktif yada
%kapasitif bolgede olması saglaniyor
[X Y]=sort(abs(Qart));
if abs(Qart(Y(1)))>20 %Q<20 VAr ise Q=0 kabul edilmistir.
    imin=Y(1);
    pn=Qart(imin)>0;

    if (Qart(Y(2))>0)==pn
    else
        if pn==1
            iabc(Y(2))=iabc(Y(2))-1;
        else
            iabc(Y(2))=iabc(Y(2))+1;
        end
    end

    if (Qart(Y(3))>0)==pn
    else
        if pn==1
            iabc(Y(3))=iabc(Y(3))-1;
        else

```

```

            iabc(Y(3))=iabc(Y(3))+1;
        end
    end

elseif abs(Qart(Y(2)))>20
    imin=Y(2);
    pn=Qart(imin)>0;

    if (Qart(Y(3))>0)==pn
    else
        if pn==1
            iabc(Y(3))=iabc(Y(3))-1;
        else
            iabc(Y(3))=iabc(Y(3))+1;
        end
    end

elseif abs(Qart(Y(3)))>20
    imin=Y(3);
    pn=Qart(imin)>0;
end

ia=iabc(1);
ib=iabc(2);
ic=iabc(3);

%ilgili 3-fazli kademeler devreye aliniyor.
if i3==1
    Kad(5)=0;    Kad(4)=0;
elseif i3==2
    Kad(5)=1;    Kad(4)=0;
elseif i3==3
    Kad(5)=0;    Kad(4)=1;
elseif i3==4
    Kad(5)=1;    Kad(4)=1;
end

%ilgili a-fazi kademeleri devreye aliniyor.
if ia==1
    Kad(1)=0;    Kad(6)=0;
elseif ia==2
    Kad(1)=1;    Kad(6)=0;
elseif ia==3
    Kad(1)=0;    Kad(6)=1;
elseif ia==4
    Kad(1)=1;    Kad(6)=1;
end

%ilgili b-fazi kademeleri devreye aliniyor.
if ib==1
    Kad(2)=0;    Kad(7)=0;
elseif ib==2
    Kad(2)=1;    Kad(7)=0;
elseif ib==3
    Kad(2)=0;    Kad(7)=1;
elseif ib==4
    Kad(2)=1;    Kad(7)=1;
end

```

```

end

%ilgili c-fazi kademeleri devreye aliniyor.
if ic==1
    Kad(3)=0;    Kad(8)=0;
elseif ic==2
    Kad(3)=1;    Kad(8)=0;
elseif ic==3
    Kad(3)=0;    Kad(8)=1;
elseif ic==4
    Kad(3)=1;    Kad(8)=1;
end

Kad=not(Kad);
write(dq21,Kad);

%2 saniye bekleme yapiliyor
pause(2)
Q=guc_olc(dq11);

%senkron motor faz empedans ototrafolari ayarlaniyor.
m=20; h=5;
[Qmx mx]=max(abs(Q))

if Qmx > m+h
switch mx
    case 1
        write(dq41,[1 0 1 1 1 1]);
        while SA2(2)==1
            SA2=read(dq42,"OutputFormat","Matrix");
        end
        while abs(Q(1))>m-h
            Q=guc_olc(dq11);
            if Q(1)>0
                write(dq32,[0 1]);
            else
                write(dq32,[1 0]);
            end
        end
    case 2
        write(dq41,[1 1 1 0 1 1]);
        while SA2(4)==1
            SA2=read(dq42,"OutputFormat","Matrix");
        end
        while abs(Q(2))>m-h
            Q=guc_olc(dq11);
            if Q(2)>0
                write(dq32,[0 1]);
            else
                write(dq32,[1 0]);
            end
        end
    case 3
        write(dq41,[1 1 1 1 1 0]);
        while SA2(6)==1

```

```

        SA2=read(dq42,"OutputFormat","Matrix");
    end
    while abs(Q(3))>m-h
        Q=guc_olc(dq11);
        if Q(3)>0
            write(dq32,[0 1]);
        else
            write(dq32,[1 0]);
        end
    end
    otherwise
        disp('hata var')
end
write(dq41,[1 1 1 1 1 1]);

Q=guc_olc(dq11);
end

end

%asagidaki fonksiyon olcme karti yardimiyla
%gerilimlerin ve akimlari orneklenmesini ve guclerin
%hesaplanmasını sağlar
function Q=guc_olc(dq11);
Ns=2000; %kanal basına alınacak ornek sayisi
f=50; T=1/f; w=2*pi*f;
N=dq11.Rate/f; %periyot basına ornek sayisi

%gerilim ve akim kalibrasyon katsayilari
K_ua=87.7;
K_ub=86.5;
K_uc=87.8;
K_ia=3.448;
K_ib=3.42;
K_ic=3.40;

%fourier katsayilari icin on hesaplamalar
cs=cos(w*[0:T/N:(Ns-1)*T/N]);
sn=sin(w*[0:T/N:(Ns-1)*T/N]);

data = read(dq11,Ns,"OutputFormat","Matrix");

ua=data(:,1); ub=data(:,2); uc=data(:,3);
ia=-1*data(:,4); ib=-1*data(:,5); ic=-1*data(:,6);
ualx=(2/Ns)*sum(ua.*cs'); K_ua; ualy=(2/Ns)*sum(ua.*sn')*K_ua;
ialx=(2/Ns)*sum(ia.*cs'); K_ia; ialy=(2/Ns)*sum(ia.*sn')*K_ia;
ublx=(2/Ns)*sum(ub.*cs'); K_ub; ubly=(2/Ns)*sum(ub.*sn')*K_ub;
iblx=(2/Ns)*sum(ib.*cs'); K_ib; ibly=(2/Ns)*sum(ib.*sn')*K_ib;
uclx=(2/Ns)*sum(uc.*cs'); K_uc; ucly=(2/Ns)*sum(uc.*sn')*K_uc;
iclx=(2/Ns)*sum(ic.*cs'); K_ic; icly=(2/Ns)*sum(ic.*sn')*K_ic;
Qa=(ualx*ialy-ualy*ialx)/2; Qb=(ublx*ibly-ubly*iblx)/2; ...
Qc=(uclx*icly-ucly*iclx)/2;
Q=[Qa Qb Qc];
Pa=(ualx*ialx+ualy*ialy)/2; Pb=(ublx*iblx+ubly*ibly)/2; ...
Pc=(uclx*iclx+ucly*icly)/2;
P=[Pa Pb Pc];
end

```

## ÖZGEÇMİŞ

**HASAN SERDAR DİRİK**

### ÖĞRENİM BİLGİLERİ

|               |                                                                                  |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Yüksek Lisans | Akdeniz Üniversitesi                                                             |
| 2018-2021     | Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Antalya |
| Lisans        | Erciyes Üniversitesi                                                             |
| 2003-2008     | Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kayseri          |

### MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

|                                            |                        |
|--------------------------------------------|------------------------|
| Elektrik Mühendisi, 2008-2013              | Denba Telekom, Antalya |
| Elektrik Bakım ve Otomasyon Şefi 2013-2015 | As Çimento, Burdur     |
| Mühendis 2015-                             | Hsd Elektrik, Antalya  |