

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ESNEK ALTERNATİF AKIM İLETİM SİSTEMLERİ  
KONTROLÖRLERİNİN İNCELENMESİ VE ŞEBEKE  
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Müh. Koray KAYA  
504041032**

**Anabilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ**

**Programı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ**

**KASIM 2006**

**ESNEK ALTERNATİF AKIM İLETİM SİSTEMLERİ  
KONTROLÖRLERİNİN İNCELENMESİ VE ŞEBEKE  
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Müh. Koray KAYA  
504041032**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Eylül 2006  
Tezin Savunulduğu Tarih : 08 Kasım 2006**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Mustafa BAĞRIYANIK  
Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Ayşen DEMİRÖREN (İ.T.Ü.)  
Prof. Dr. Hasan DAĞ (İ.Ü.)**

**KASIM 2006**

## **ÖNSÖZ**

Yüksek lisans tezinde esnek alternatif akım iletim sistemlerinin tanımlanması, incelenmesi ve karşılaştırılması hedeflenmiştir. Bu amaca ulaşmamda benden maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Mustafa Bağrıyanık'a, Evren Yücel'e, Ş. Ali Kırmızııkaya'ya, Recep Ergin'e, Mehmet Dolanbay'a, Kenan Doğan'a, hep yanımda olan Ferhan Evcimen'e ve aileme teşekkürü bir borç bilirim.

**Eylül 2006**

**Müh. Koray KAYA**

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                 |             |
|---------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>ÖNSÖZ</b>                                                                    | <b>ii</b>   |
| <b>KISALTMALAR</b>                                                              | <b>vi</b>   |
| <b>TABLO LİSTESİ</b>                                                            | <b>vii</b>  |
| <b>ŞEKİL LİSTESİ</b>                                                            | <b>viii</b> |
| <b>SEMBOL LİSTESİ</b>                                                           | <b>xii</b>  |
| <b>ÖZET</b>                                                                     | <b>xiv</b>  |
| <b>SUMMARY</b>                                                                  | <b>xvi</b>  |
| <b>1. GİRİŞ</b>                                                                 | <b>1</b>    |
| 1.1. Giriş Ve Çalışmanın Amacı                                                  | 1           |
| <b>2. EAAİS KONTROLÖRLERİ KAVRAMI NEDİR?</b>                                    | <b>5</b>    |
| 2.1. Enerji Sistemleri, Enerji İletim Şebekeleri Ve Yük Akışı                   | 5           |
| 2.1.1. Giriş                                                                    | 5           |
| 2.1.2. Geleneksel Kontrol Mekanizmaları                                         | 6           |
| 2.1.3. Elektrik İletim Şebekelerinin Kısıtlamaları Ve Sınırları                 | 7           |
| 2.1.4. Yük Akışı Jakobiyen Matrisi                                              | 9           |
| 2.1.5. Küçük İşaret Kararlılık Analizi Ve Durum Matrisinin<br>Öz Özellikleri    | 10          |
| 2.1.6. Sistemin Bozulması – Çatallaşması (Bifurcation)                          | 13          |
| 2.2. Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri Kontrolörlerinin Gelişimi          | 13          |
| 2.2.1. EAAİS ve Yarıiletken Teknolojisinin Gelişimi                             | 13          |
| 2.2.2. EAAİS Kontrolörlerinin Kontrol Ettiği Sistem Büyüklükleri                | 17          |
| 2.3. Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi Kontrolörlerinin<br>Sınıflandırılması | 18          |
| 2.3.1. Giriş                                                                    | 18          |
| 2.3.2. Paralel Bağlı EAAİS Kontrolörler                                         | 19          |
| 2.3.3. Seri Bağlı EAAİS Kontrolörleri                                           | 22          |
| 2.3.4. Seri ve Paralel Birleşik Yapılı EAAİS Kontrolörleri                      | 24          |
| 2.3.5. Diğer EAAİS Kontrolörleri                                                | 26          |
| 2.3.6. Uygulanmış SVK Projesinin Yerleşim Planı                                 | 26          |

|                                                                                                            |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>3. ESNEK ALTERNATİF AKIM İLETİM SİSTEMLERİ KONTROLÖRLERİNİN YARARLARI</b>                               | <b>28</b> |
| 3.1. Giriş                                                                                                 | 28        |
| 3.2. Güç Akışı Kontrolü                                                                                    | 29        |
| 3.3. Güç Sistemlerinin Güvenliği Ve Kararlılığı                                                            | 31        |
| 3.3.1. Giriş                                                                                               | 31        |
| 3.3.2. Geçici Hal Kararlılığı Ve Dinamik Kararlılık                                                        | 31        |
| 3.3.3. Sürekli Hal Kararlılığı                                                                             | 34        |
| 3.3.3.1. Güç Transfer Kapasitesi Ve Termal Sınırlar                                                        | 34        |
| 3.3.3.2. Gerilim Kararlılığı Ve Reaktif Güç Kontrolü                                                       | 35        |
| 3.4. Diğer Yararları                                                                                       | 36        |
| 3.5. Farklı Sınıflardaki EAAİS Kontrolörlerinin Karşılaştırılması                                          | 37        |
| <b>4. BAŞLICA ESNEK ALTERNATİF AKIM İLETİM SİSTEMLERİ KONTROLÖRLERİNİN YAPILARI VE ÇALIŞMA PRENSİPLERİ</b> | <b>40</b> |
| 4.1. Giriş                                                                                                 | 40        |
| 4.2. Statik VAr Kompanzatörleri (SVK)                                                                      | 40        |
| 4.2.1. Tristör Kontrollü Reaktör (TKR)                                                                     | 40        |
| 4.2.2. Tristör Anahtarlamaalı Kondansatör (TAK)                                                            | 42        |
| 4.2.3. Sabit Kondansatör, Tristör Kontrollü Reaktör (SK-TKR)                                               | 45        |
| 4.2.4. Tristör Anahtarlamaalı Kondansatör, Tristör Kontrollü Reaktör (TAK-TKR)                             | 47        |
| 4.3. Statik Senkron Kompanzatör (SSK)                                                                      | 50        |
| 4.3.1. Statik Senkron Kompanzatörün Çalışma Prensibi ve Özellikleri                                        | 50        |
| 4.3.2. Statik Senkron Kompanzatörün Statik VAr Kompanzatörlerine Üstünlüğü                                 | 54        |
| 4.4. Tristör Kontrollü Seri Kondansatör (TKSK)                                                             | 55        |
| 4.5. Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü (BGAK)                                                             | 58        |
| <b>5. BENZETİM</b>                                                                                         | <b>62</b> |
| 5.1. Giriş                                                                                                 | 62        |
| 5.2. Test Sistemlerinin Benzetimi, İncelenmesi Ve Sonuçlar                                                 | 64        |
| 5.2.1. 5 Baralı Test Sistemi                                                                               | 64        |
| 5.2.2. 11 Baralı Test Sistemi                                                                              | 66        |
| 5.2.3. IEEE'nin 14 Baralı Test Sistemi                                                                     | 70        |
| 5.3. Trakya Bölgesi Elektrik Enerji İletim Sistemi Üzerinde İncelemeler                                    | 80        |
| <b>6. SONUÇLAR</b>                                                                                         | <b>89</b> |
| <b>KAYNAKLAR</b>                                                                                           | <b>92</b> |

|                                                          |            |
|----------------------------------------------------------|------------|
| <b>EK A. YÜK AKIŞI ANALİZİ VE NEWTON-RAPHSON YÖNTEMİ</b> | <b>96</b>  |
| <b>EK.B TEST SİSTEMLERİNE AİT VERİLER</b>                | <b>106</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ</b>                                          | <b>109</b> |

## KISALTMALAR

|                        |                                                          |
|------------------------|----------------------------------------------------------|
| <b>AA</b>              | : Alternatif Akım                                        |
| <b>AEDS</b>            | : Akümülatörlü Enerji Depolama Sistemi                   |
| <b>BGAK</b>            | : Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü                     |
| <b>DA</b>              | : Doğru Akım                                             |
| <b>EAAİS</b>           | : Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri                |
| <b>FAGK</b>            | : Faz Arası Güç Kontrolörü                               |
| <b>GTO</b>             | : Kapı Kesimli Tristör                                   |
| <b>HAGAK</b>           | : Hat Arası Güç Akış Kontrolörü                          |
| <b>IEEE</b>            | : Amerikan Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Enstitüsü |
| <b>IGCT</b>            | : Birleştirilmiş Kapı Kollektörlü Tristör                |
| <b>IGBT</b>            | : Yalıtılmış Kapı Bipolar Transistörü                    |
| <b>J<sub>LFV</sub></b> | : Cebirsel Denklemlerin Jakobiyen Matrisi                |
| <b>LTT</b>             | : Işık Tetiklemeli Tristör                               |
| <b>NGH-ASRB</b>        | : N. G. Hingorani'nin Alt Senkron Bastırıcısı            |
| <b>PSAT</b>            | : Güç Sistemleri Analizi Araç Kutusu                     |
| <b>SCR</b>             | : Silikon Kontrollü Doğrultucu                           |
| <b>SIT</b>             | : Statik İndüksiyon Transistörü                          |
| <b>SK-TKR</b>          | : Sabit Kondansatör-Tristör Kontrollü Reaktör            |
| <b>SMEDS</b>           | : Süper İletkenli Manyetik Enerji Depolama Sistemi       |
| <b>SSK</b>             | : Statik Senkron Kompanzatör                             |
| <b>SSÜ</b>             | : Statik Senkron Üreteci                                 |
| <b>SSSK</b>            | : Statik Senkron Seri Kompanzatör                        |
| <b>SVK</b>             | : Statik Var Kompanzatörü                                |
| <b>SVS</b>             | : Statik Var Sistemleri                                  |
| <b>SVÜT</b>            | : Statik VAR Üreteci veya Tüketeci                       |
| <b>TAK</b>             | : Tristör Anahtarlama Kondansatör                        |
| <b>TAR</b>             | : Tristör Anahtarlama Reaktör                            |
| <b>TASK</b>            | : Tristör Anahtarlama Seri Kondansatör                   |
| <b>TASR</b>            | : Tristör Anahtarlama Seri Reaktör                       |
| <b>TKFAR</b>           | : Tristör Kontrollü Faz Açısı Regülatörü                 |
| <b>TKFD</b>            | : Tristör Kontrollü Frenleme Direnci                     |
| <b>TKGR</b>            | : Tristör Kontrollü Gerilim Regülatörü                   |
| <b>TKGS</b>            | : Tristör Kontrollü Gerilim Sınırlayıcı                  |
| <b>TKR</b>             | : Tristör Kontrollü Reaktör                              |
| <b>TKSK</b>            | : Tristör Kontrollü Seri Kondansatör                     |
| <b>TKSR</b>            | : Tristör Kontrollü Seri Reaktör                         |

## TABLO LİSTESİ

|                                                                                                                                                                                                                       | <u>Sayfa No</u> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Tablo 2.1</b> : Üç kuşak EAAİS cihazının anahtarlama hızı açısından karşılaştırması.....                                                                                                                           | 15              |
| <b>Tablo 3.1</b> : Termal sınır ve döngüsel akış probleminde EAAİS cihazları.....                                                                                                                                     | 35              |
| <b>Tablo 3.2</b> : Gerilim kontrolü probleminde EAAİS cihazları.....                                                                                                                                                  | 36              |
| <b>Tablo 3.3</b> : EAAİS Kontrolörlerinin Kontrol Özellikleri.....                                                                                                                                                    | 39              |
| <b>Tablo 4.1</b> : Statik senkron kompanzatör ile statik VAR kompanzatörlerinin karşılaştırılması.....                                                                                                                | 55              |
| <b>Tablo 5.1</b> : 5-Baralı test sisteminde bara gerilimleri.....                                                                                                                                                     | 65              |
| <b>Tablo 5.2</b> : (a) LAKE barasında SVC, LAKE-MAIN hattında TKSK varken yük akışları.....                                                                                                                           | 65              |
| (b) MAIN-ELM hattında TKSK varken yük akışı.....                                                                                                                                                                      | 65              |
| <b>Tablo 5.3</b> : 11-Baralı test sisteminde farklı durumlarda sistemin bozulma noktaları ve durum matrisinin özdeğerleri.....                                                                                        | 67              |
| <b>Tablo 5.4</b> : 11-Baralı test sisteminde farklı durumlarda sistemin gerilim çökmesi yaşadığı noktalar ve $J_{LFV}$ matrisinin özdeğerleri.....                                                                    | 69              |
| <b>Tablo 5.5</b> : 14-Baralı test sisteminde 2-4 hattı kesildiğinde farklı durumlarda 1, 2, 4 ve 5 numaralı baralara ilişkin gerilim genliklerinin salınımlarının yüzde olarak ifadeleri.....                         | 76              |
| <b>Tablo 5.6</b> : Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde 1236_Yenibosna barasına 150MVAR'lık SVK ilavesi ile bara gerilimlerindeki değişimler.....                                                         | 82              |
| <b>Tablo 5.7</b> : Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde 1211_Davutpaşa barasına 100MVAR'lık SVK ilavesi ile bara gerilimlerindeki değişimler.....                                                         | 82              |
| <b>Tablo 5.8</b> : Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde 1121_Atışalanı barasına 200MVAR'lık SVK ilavesi ile bara gerilimlerindeki değişimler.....                                                         | 82              |
| <b>Tablo 5.9</b> : Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde 1236_Yenibosna barasına 150MVAR'lık ve 1211_Davutpaşa barasına 100MVAR'lık SVK ilavesi ile bazı hatlardaki reaktif yük akışlarındaki değişim..... | 83              |
| <b>Tablo 5.10</b> : Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde 3 hatta yapılan seri kompanzatör ilavesi ile bu hatlardaki aktif yük akışlarındaki, alıcı bara gerilimlerindeki ve faz açılarındaki değişim..... | 86              |
| <b>Tablo B.1</b> : 5-Baralı test sisteminde baralara ilişkin veriler.....                                                                                                                                             | 106             |
| <b>Tablo B.2</b> : 5-Baralı test sisteminde hatlara ilişkin veriler.....                                                                                                                                              | 106             |
| <b>Tablo B.3</b> : 11-Baralı test sisteminde baralara ilişkin veriler.....                                                                                                                                            | 107             |
| <b>Tablo B.4</b> : 11-Baralı test sisteminde hatlara ilişkin veriler.....                                                                                                                                             | 107             |
| <b>Tablo B.5</b> : 14-Baralı test sisteminde baralara ilişkin veriler.....                                                                                                                                            | 108             |
| <b>Tablo B.6</b> : 14-Baralı test sisteminde hatlara ilişkin veriler.....                                                                                                                                             | 108             |

## ŞEKİL LİSTESİ

|                                                                                                    | <b>Sayfa No</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Şekil 2.1</b> : Enerji iletim hattının temsili resmi.....                                       | 5               |
| <b>Şekil 2.2</b> : SVK modülü ve modülde bulunan yarı iletken elemanlar: LTT, GTO/IGCT, IGBT.....  | 16              |
| <b>Şekil 2.3</b> : Enerji sistemi kontrol hızının karşılaştırması.....                             | 17              |
| <b>Şekil 2.4</b> : Enerji iletiminin temel gösterimi.....                                          | 18              |
| <b>Şekil 2.5</b> : Güç sistemi: aktif güç-faz açısı ilişkisi.....                                  | 19              |
| <b>Şekil 2.6</b> : Paralel EAAİS kontrolörü.....                                                   | 20              |
| <b>Şekil 2.7</b> : Seri EAAİS kontrolörü.....                                                      | 23              |
| <b>Şekil 2.8</b> : Birleşik Kontrollü veya birleştirilmiş seri-paralel kontrolör.....              | 25              |
| <b>Şekil 2.9</b> : Birleştirilmiş seri-seri kontrolör.....                                         | 25              |
| <b>Şekil 2.10</b> : Uygulanmış SVK projesinin yerleşim planı ve tek kutuplu şeması.....            | 27              |
| <b>Şekil 3.1</b> : Gözlü şebekede yük akışı<br>(a) sistem şeması.....                              | 29              |
| (b) TKSK'lı sistem şeması.....                                                                     | 29              |
| (c) TKSR'li sistem şeması.....                                                                     | 29              |
| (d) TKFAR'lı sistem şeması.....                                                                    | 29              |
| <b>Şekil 3.2</b> : İki makineli sistemde geçici hal kararsızlılığı<br>(a) kompanzasyon yokken..... | 32              |
| (b) bir paralel kompanzatör varken.....                                                            | 32              |
| (c) bir seri kompanzatör varken.....                                                               | 32              |
| <b>Şekil 3.3</b> : Güç salınımlarının bastırılması<br>(a) generatör açısı.....                     | 34              |
| (b) transfer edilen güç.....                                                                       | 34              |
| (c) paralel kompanzatörün reaktif güç çıkışı.....                                                  | 34              |
| (d) seri kompanzasyon derecesi.....                                                                | 34              |
| <b>Şekil 4.1</b> : (a) Temel TKR devresi.....                                                      | 40              |
| (b) TKR'nin tetikleme açısı kontrolü.....                                                          | 40              |
| <b>Şekil 4.2</b> : Temel TKR akımının genliğinin tetikleme açısı ile değişimi.....                 | 41              |
| <b>Şekil 4.3</b> : V&I çalışma bölgesi<br>(a) TKR.....                                             | 42              |
| (b) TAR.....                                                                                       | 42              |
| <b>Şekil 4.4</b> : (a) Temel TAK devresi.....                                                      | 43              |
| (b) TAK'nın birleştirilmiş dalga şekilleri.....                                                    | 43              |
| <b>Şekil 4.5</b> : TAK'ta geçici bozulmanın olmadığı anahtarlama şartları.....                     | 44              |
| <b>Şekil 4.6</b> : TAK'nın V&I çalışma bölgesi.....                                                | 45              |
| <b>Şekil 4.7</b> : (a) Sabit kondansatörlü TKR'nin temel devresi.....                              | 46              |
| (b) TKR'nin çıkış büyüklükleri.....                                                                | 46              |
| <b>Şekil 4.8</b> : SK-TKR'nin V&I çalışma bölgesi.....                                             | 46              |
| <b>Şekil 4.9</b> : SK-TKR'nin çıkış karakteristiğine göre kayıpları.....                           | 47              |

|                   |                                                                                                                             |    |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Şekil 4.10</b> | : (a) TAK-TKR 'nin temel devre şeması.....                                                                                  | 48 |
|                   | (b) TAK-TKR 'nin reaktif güç talebi ile çıkış büyüklüğü arasındaki karakteristiği.....                                      | 48 |
| <b>Şekil 4.11</b> | : İki TAK'lı TAK-TKR sisteminin V-I grafiğinde çalışma bölgesi                                                              | 49 |
| <b>Şekil 4.12</b> | : TAK-TKR'nin kayıp&çıkış karakteristiği.....                                                                               | 50 |
| <b>Şekil 4.13</b> | : (a) Gerilim kaynaklı çevirici temelli reaktif güç kompanzatörü: SSK.....                                                  | 51 |
|                   | (b) SSK'nın da kondansatör geriliminin değiştirilmesi ile çıkış geriliminin endirekt kontrolü.....                          | 51 |
| <b>Şekil 4.14</b> | : 48-darbeli çeviricinin çıkış gerilim ve akım dalga şekilleri.....                                                         | 53 |
| <b>Şekil 4.15</b> | : Gerilim kaynaklı çevirici temelli SSK'da                                                                                  |    |
|                   | (a) V&I grafiğinde çalışma bölgesi.....                                                                                     | 54 |
|                   | (b) $\pm 100\text{MVAr}$ 48 darbeli tipte kayıplar ile çıkış büyüklüğü arasındaki ilişki.....                               | 54 |
| <b>Şekil 4.16</b> | : TKSK'nın devre şeması.....                                                                                                | 56 |
| <b>Şekil 4.17</b> | : TKSK'nın empedans&ateşleme açısı karakteristiği.....                                                                      | 57 |
| <b>Şekil 4.18</b> | : TKSK'da kondansatör geriliminin ters dönmesi                                                                              |    |
|                   | (a) kondansatör gerilimi ve TKR akımı.....                                                                                  | 58 |
|                   | (b) hat akımı ve kondansatör üzerindeki gerilim.....                                                                        | 58 |
| <b>Şekil 4.19</b> | : İki makineli güç sisteminde BGAK                                                                                          | 58 |
| <b>Şekil 4.20</b> | : İki gerilim kaynaklı çeviricinin arka arkaya bağlandığı BGAK'nın devre şeması.....                                        | 59 |
| <b>Şekil 4.21</b> | : BGAK Kontrollü iletim hattında.....                                                                                       | 61 |
| <b>Şekil 5.1</b>  | : 5-baralı test sisteminin tek kutuplu şeması.....                                                                          | 62 |
| <b>Şekil 5.2</b>  | : 11-baralı test sisteminin tek kutuplu şeması.....                                                                         | 63 |
| <b>Şekil 5.3</b>  | : IEEE'nin 14-baralı test sisteminin tek kutuplu şeması.....                                                                | 63 |
| <b>Şekil 5.4</b>  | : 5-Baralı test sisteminde her hat için seri kompanzasyon oranına göre toplam reaktif güç kaybı.....                        | 66 |
| <b>Şekil 5.5</b>  | : 11-Baralı test sisteminde yüklenme parametresine göre F6 bara gerilimlerinin karşılaştırılması                            |    |
|                   | (a) aktif yük 4,1pu.....                                                                                                    | 68 |
|                   | (b) aktif yük 4,19pu.....                                                                                                   | 68 |
|                   | (c) aktif yük 4,67pu.....                                                                                                   | 68 |
|                   | (d) aktif yük 4,76pu.....                                                                                                   | 68 |
| <b>Şekil 5.6</b>  | : 14-Baralı test sisteminde 2-4 hattının kesilmesi sonrası 1 numaralı bara gerilimindeki salınımın bastırılması.....        | 71 |
| <b>Şekil 5.7</b>  | : 14-Baralı test sisteminde 2-4 hattının kesilmesi sonrası 2 numaralı bara gerilimindeki salınımın bastırılması.....        | 72 |
| <b>Şekil 5.8</b>  | : 14-Baralı test sisteminde 2-4 hattının kesilmesi sonrası 4 numaralı bara gerilimindeki salınımın bastırılması.....        | 72 |
| <b>Şekil 5.9</b>  | : 14-Baralı test sisteminde 2-4 hattının kesilmesi sonrası 5 numaralı bara gerilimindeki salınımın bastırılması.....        | 73 |
| <b>Şekil 5.10</b> | : 14-Baralı test sisteminde 2-4 hattının kesilmesi sonrası 1 numaralı baraya bağlı generatörün rotor hızının değişimi.....  | 73 |
| <b>Şekil 5.11</b> | : 14-Baralı test sisteminde 2-4 hattının kesilmesi sonrası 2 numaralı baraya bağlı generatörün rotor hızının değişimi.....  | 74 |
| <b>Şekil 5.12</b> | : 14-Baralı test sisteminde 2-4 hattının kesilmesi sonrası 3 numaralı baraya bağlı generatörün rotor hızının değişimi.....  | 74 |
| <b>Şekil 5.13</b> | : 14-Baralı test sisteminde 2-4 hattının kesilmesi sonrası 2 numaralı baraya bağlı generatörün rotor açısının değişimi..... | 75 |

|                   |                                                                                                                                                                                                          |          |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Şekil 5.14</b> | : 14-Baralı test sisteminde 2-4 hattının kesilmesi sonrası 3 numaralı baraya bağlı generatörün rotor açısının değişimi.....                                                                              | 75       |
| <b>Şekil 5.15</b> | : 14-Baralı test sisteminde 4 numaralı barada kompanzatör yokken, TKSK varken ve SVK varken yüklenme parametresi ile bara gerilimlerinin değişimleri ve çökme noktası.....                               | 77       |
| <b>Şekil 5.16</b> | : 14-Baralı test sisteminde 5 numaralı barada kompanzatör yokken, TKSK varken ve SVK varken yüklenme parametresi ile bara gerilimlerinin değişimleri ve çökme noktası.....                               | 78       |
| <b>Şekil 5.17</b> | : 14-Baralı test sisteminde 13 numaralı barada kompanzatör yokken, TKSK varken ve SVK varken yüklenme parametresi ile bara gerilimlerinin değişimleri ve çökme noktası.....                              | 78       |
| <b>Şekil 5.18</b> | : 14-Baralı test sisteminde 14 numaralı barada kompanzatör yokken, TKSK varken ve SVK varken yüklenme parametresi ile bara gerilimlerinin değişimleri ve çökme noktası.....                              | 79       |
| <b>Şekil 5.19</b> | : 380/154kV Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminin tek kutuplu şeması.....                                                                                                                     | 81       |
| <b>Şekil 5.20</b> | : Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde, 1236_Yenibosna ve etrafındaki baralara ilişkin temel durumda yüklenme parametresi ile bara gerilimlerinin değişimleri, kırılma ve çökme noktası..... | 83       |
| <b>Şekil 5.21</b> | : Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde, 1236_Yenibosna ve etrafındaki baralara ilişkin SVK varken yüklenme parametresi ile bara gerilimlerinin değişimleri, kırılma ve çökme noktası.....    | 84       |
| <b>Şekil 5.22</b> | : Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde, 1211_Davutpaşa ve etrafındaki baralara ilişkin temel durumda yüklenme parametresi ile bara gerilimlerinin değişimleri, kırılma ve çökme noktası..... | 84       |
| <b>Şekil 5.23</b> | : Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde, 1211_Davutpaşa ve etrafındaki baralara ilişkin SVK varken yüklenme parametresi ile bara gerilimlerinin değişimleri, kırılma ve çökme noktası.....    | 85       |
| <b>Şekil 5.24</b> | : Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde, 1121_Atışalanı ve etrafındaki baralara ilişkin temel durumda yüklenme parametresi ile bara gerilimlerinin değişimleri, kırılma ve çökme noktası..... | 85       |
| <b>Şekil 5.25</b> | : Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde, 1121_Atışalanı ve etrafındaki baralara ilişkin SVK varken yüklenme parametresi ile bara gerilimlerinin değişimleri, kırılma ve çökme noktası.....    | 86       |
| <b>Şekil 5.26</b> | : Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde, temel durumda, SVK varken, TKSK varken ve SVK&TKSK varken oluşan bara gerilimleri.....                                                               | 87       |
| <b>Şekil A.1</b>  | : Güç sisteminin<br>(a) iki uçlu modeli.....<br>(b) fazör diyagramı.....                                                                                                                                 | 96<br>96 |
| <b>Şekil A.2</b>  | : Yük açısı sıfır olduğu durumda fazör diyagramları<br>(a) reaktif gücün pozitif olduğu durum.....<br>(b) reaktif gücün negatif olduğu durum.....                                                        | 97<br>97 |

|                  |                                                                                                     |     |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Şekil A.3</b> | : Yük açısı sıfırdan farklı; gerilim genliklerinin birbirine eşit olduğu durumda fazör diyagramları |     |
|                  | (a) aktif güç pozitif olduğu durum.....                                                             | 98  |
|                  | (b) aktif güç negatif olduğu durum.....                                                             | 98  |
| <b>Şekil A.4</b> | : m-ucunda akımın ve gerilimin aynı fazda olması halinde fazör diyagramı.....                       | 99  |
| <b>Şekil A.5</b> | : Üç baralı sistem.....                                                                             | 101 |

## SEMBOL LİSTESİ

|               |                                                                                |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| $E_k$         | : Gönderici uç geriliminin genliği                                             |
| $E_m$         | : Alıcı uç geriliminin genliği                                                 |
| $P_k$         | : Gönderici uç aktif gücü                                                      |
| $P_m$         | : Alıcı uç aktif gücü                                                          |
| $Q_k$         | : Gönderici uç reaktif gücü                                                    |
| $Q_m$         | : Alıcı uç reaktif gücü                                                        |
| $I_m$         | : Alıcı uç Akımı                                                               |
| $S_k$         | : Gönderici uç görünür gücü                                                    |
| $S_m$         | : Alıcı uç görünür gücü                                                        |
| $X$           | : Hat reaktansı                                                                |
| $R$           | : Hat direnci                                                                  |
| $\delta$      | : Yük açısı                                                                    |
| $\varphi$     | : Güç faktörü açısı                                                            |
| $Q_{kayıp}$   | : Hattın reaktif kaybı                                                         |
| $P_{kayıp}$   | : Hattın aktif kaybı                                                           |
| $B_{km}$      | : Alıcı uç ile gönderici uç arasındaki suseptans                               |
| $G_{km}$      | : Alıcı uç ile gönderici uç arasındaki kondüktans                              |
| $n$           | : Toplam düğüm sayısı                                                          |
| $Y_{ii}$      | : i ve j düğümleri arasındaki ortak admitans                                   |
| $Y_{ij}$      | : i ve j düğümleri arasındaki ortak admitans                                   |
| $\tilde{v}_i$ | : i düğümündeki toprağa göre fazörel gerilim                                   |
| $\tilde{i}_i$ | : i düğümünde şebekeye verilen fazörel akım                                    |
| $\theta_i$    | : i düğümü gerilimine ait faz açısı                                            |
| $P_n^a$       | : Bilinen aktif güç                                                            |
| $Q_n^a$       | : Bilinen reaktif güç                                                          |
| $[.]$         | : Matris veya vektör                                                           |
| $[.]^{-1}$    | : Matris veya vektörün tersi                                                   |
| $[J]$         | : Jacobian matrisi                                                             |
| $V^*, I^*$    | : Gerilim ve akımın kompleks eşleniği                                          |
| $y$           | : Baralara ilişkin gerilim genlikleri ve faz açıları gibi cebirsel değişkenler |
| $x_i$         | : Durum değişkenleri                                                           |
| $g$           | : Her baradaki aktif ve reaktif güç dengesi için cebirsel denklemler           |
| $f$           | : Diferansiyel denklemler                                                      |
| $J_{LFV}$     | : Yük akışı Jakobiyen matrisi                                                  |
| $X$           | : Durum vektörü                                                                |
| $u$           | : Sisteme giriş vektörü                                                        |
| $A$           | : Durum yada sistem matrisi                                                    |
| $B$           | : Kontrol yada giriş matrisi                                                   |
| $C$           | : Çıkış matrisi                                                                |
| $D$           | : İleri besleme matrisi                                                        |
| $\lambda$     | : Kompleks özdeğer                                                             |
| $\phi$        | : nx1'lik bir vektör                                                           |

|                    |                                                             |
|--------------------|-------------------------------------------------------------|
| $f$                | : Salınım frekansı                                          |
| $\zeta$            | : Sönüm oranı                                               |
| $P_{elk}$          | : Generatörün çıkışındaki elektriksel güç                   |
| $P_{mek}$          | : Generatörün girişindeki mekanik güç                       |
| $\delta_{krit}$    | : Kritik yük açısı                                          |
| $k$                | : Seri kapasitif kompanzasyon derecesi                      |
| $L$                | : Reaktör endüktansı                                        |
| $C$                | : Kondansatör kapasitansı                                   |
| $\alpha$           | : Tristörün tetikleme açısı                                 |
| $\sigma$           | : Tristörün iletim açısı                                    |
| $i_C, i_{LF}$      | : Kondansatör ve reaktör akımları                           |
| $B_L$              | : Etkin reaktif admitans                                    |
| $V_C, V_L, V_{SW}$ | : Kondansatör, reaktör ve anahtar gerilimleri               |
| $V$                | : Alternatif akım şebeke gerilimi                           |
| $B_C$              | : Kondansatör admitansı                                     |
| $Q_L, Q_C$         | : Endüktif ve kapasitif reaktif güç üretimleri              |
| $I_Q, I_q$         | : Reaktif akım                                              |
| $C_S$              | : SSK'nın giriş tarafındaki kondansatörün kapasitansı       |
| $v_{da}, i_{da}$   | : SSK'nın giriş tarafındaki kondansatörün gerilimi ve akımı |
| $X_T$              | : Kuplaj transformatörünün kaçak endüktansı                 |
| $V_1, \theta$      | : Şebeke gerilim genliği ve faz açısı                       |
| $V_2, \vartheta$   | : SSK çıkış gerilim genliği ve faz açısı                    |
| $\beta$            | : Senkronlama sinyali                                       |
| $X_L, X_C$         | : Endüktans ve kondansatör reaktansları                     |
| $X_{hat}$          | : Hattın bara tarafından görülen etkin reaktansı            |
| $X_{TKSK}$         | : TKSK'nın bara tarafından görülen etkin reaktansı          |
| $V_k$              | : Gönderici uç gerilim fazörü                               |
| $V_m$              | : Alıcı uç fazör gerilim fazörü                             |
| $V_{pq}, \rho$     | : BGAK'nın kontrol edilebilir gerilim fazörü ve açısı       |
| $\sigma$           | : BGAK için referans faz kaydırma değeri                    |
| $\lambda$          | : Yüklenme parametresi                                      |

# **ESNEK ALTERNATİF AKIM İLETİM SİSTEMLERİ KONTROLÖRLERİNİN İNCELENMESİ VE ŞEBEKE ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

## **ÖZET**

Günümüzde elektrik endüstrisi bir geçiş dönemindedir. Enerji, üretildiği noktalardan enerji yoğun merkezlere uzun mesafelerde taşınmaktadır. Enerjinin üretimi, iletimi ve dağıtımını artan bir hızla bağımsız şirketlerin kontrolüne geçmektedir. Bağımsız şirketler, hızla gelişen elektrik sektöründe yer bulabilmek için, enerji dolaşımındaki talepleri karşılamak zorundadırlar. İletim sistemleri giderek kendi ısı ve kararlılık sınırlarına yaklaşırken iletilen ve dağıtılan gücün kalitesine her zaman olduğundan daha fazla önem verilmektedir.

Sistemdeki karmaşık yapılar, yetersiz bir kontrol ve aşırı reaktif güç ihtiyacıyla birleşerek büyük dinamik salınımlar, geçici ve sürekli hal kararsızlığı, gerilim çökmesi, düşük transfer kapasitesi gibi bir çok sorunu beraberinde getirir.

Karmaşık yapıya bir aa iletim şebekesinde güç değişik hatlardan sağlanarak yüksek bir güvenlik elde edilirken, hatların yüklenmesinde gerçek bir kontrol yoktur. Sadece hatta seri ve paralel kondansatör ve reaktörler ilave edilerek veya çıkartılarak sınırlı bir değişiklik sağlanır. Sistem hem dinamik hem de sürekli hal çalışmasında gerçekte kontrolsüzdür.

İletim hattına bağlanma şekline göre paralel, seri ve birleşik yapıya olarak sınıflandırılan EAAİS cihazları bir iletim sisteminde gerilimin genliği, faz açısı ve hat empedansını kontrol eder.

EAAİS kontrolörlerinin gelişimini tetikleyen en önemli faktör güç yarıiletken cihazlarındaki hızlı gelişim olmuştur. Bu cihazların anma değerleri, karakteristikleri ve üstünlükleri, EAAİS cihazlarının fiyatında, performansında, boyutlarında, ağırlığında ve kayıplarında büyük öneme sahiptir.

EAAİS cihazları, güç akışı kontrolünde, dinamik kararlılıkta, sürekli ve geçici hal kararlılığında, iletim transfer kapasitesinin artırılmasında, gerilim kararlılığında, reaktif güç kontrolünde önemli faydalar sağlarken çevresel faktörler, yapım süresi, yerleşim alanı açısından da avantajlıdır.

Başlıca EAAİS cihazları SVK, TKSK, SSK ve BGAK' dır.

Bu tezde, EAAİS (esnek alternatif akım iletim sistemleri) kontrolörlerinin tanımlanması, gelişimi, sınıflandırılması, çalışma prensipleri ele alındıktan sonra 5-baralı, 11-baralı, 14-baralı test sistemleri ve 80-baralı 380kV/154kV Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sistemi üzerinde benzetim yapılarak genel hatlarıyla yararları ortaya konulmuştur; bu faydalar açısından paralel ve seri bağlı kompanzatörlerin birbirleriyle karşılaştırılması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar; seri bağlı kompanzatörlerin reaktif güç kayıplarını azalttığı ve hattın transfer kapasitesini arttırdığı; paralel bağlı kompanzatörlerin bağlandıkları noktada reaktif güç desteği ile

bara gerilimlerini istenilen değerde tuttuğu; tüm EAAİS cihazlarının küçük işaretle kararlılığında sistemi daha kararlı bir noktaya taşıdığı; salınımlı çalışmaya geçiş noktasında paralel bağlı kompanzatörlerin seri bağlı kompanzatörlere göre kararsızlık sınırını daha yukarıya taşıdığı; tüm EAAİS cihazlarının gerilim çökmesine karşı sistemin en yüksek yüklenebilme noktasını daha üst bir noktaya çıkarttığı; yine paralel bağlı kompanzatörlerin seri bağlı kompanzatörlere göre yüklenmeye daha fazla izin verdiği; sistemin hem salınımlı çalışmaya geğtiği hem de gerilim çöküntüsüne uğradığı noktaların, paralel ve seri bağlı kompanzatörlerin bir arada kullanılması durumunda tek başlarına kullanılmalarına göre yukarı doğru ötelendiği; şebekedeki hatlardan birinin devre dışı kalması durumunda bara gerilimleri, generatör rotor hızları ve rotor açılarında meydana gelen salınımlı çalışma modunun EAAİS cihazları ile bastırıldığı; üçüncü kuşak kontrolörlerin dinamik cevaplarının ikinci kuşak kontrolörlere göre daha hızlı olduğu ve salınım genliklerini yarı yarıya azalttığı yönündedir.

# **A STUDY OF FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEMS AND THEIR EFFECTS ON POWER NETWORK**

## **SUMMARY**

Nowadays, electrical industry is in a transition stage. Produced Electrical power is transmitted for a long distance where it is being produced. Production and transmission of electricity is going to be private company's business increasingly. Private companies have to be enough for demand on power circulation in order to find a place in power sector. Transmitted and distributed power's quality is having more importance when transmission systems are coming close to their thermal and stability limits.

Complex structure in system, insufficient control and extreme reactive power needs cause problems such as: big dynamic oscillations, temporary and permanent stage instability, low transfer capacity...vs. There is no real control on complex structured transmission line although high security is reached with a result of variety in provided power lines. Adding or removing parallel or serial capacitor to the line makes a limited difference. In fact, system is out of control both in the continuous and dynamic working period.

FACTS equipments, which are classified according to connection style (parallel, serial or unified) to the transmission line, controls the amplitude of voltage, phase angle and line impedance.

The major triggering effects on a development of FACTS controllers were the fast development in semiconductor devices. The nominal values, characteristics and superiorities of those devices have a great importance on FACTS device's price, performance, dimensions, weight and loss.

FACTS devices make a good contribution to the power circulation control, dynamic stability, steady state and temporary state stability, improvement in transmission transfer capacity, stability of voltage, reactive power control while they have an advantage of environmental factors, production time and housing area.

Major FACTS devices are: SVC, TCSC, STATCOM and UPFC.

In this thesis, first the definition of FACTS, their classification and working principles are covered and then their benefits are putted by making a simulation on 5-bus, 11-bus, 14-bus test systems and 80-bus 380kV/154kV Trakya electrical energy transmission system. In this point of view parallel and serial connected compensations are compared with each other. The results shows: serial connected capacitors decreased the reactive power loss and they improved the line's transfer capacity; parallel connected capacitors keeps bus voltage at the desired level at where they are connected; all FACTS devices moves the system to the more stable position at small signal stability; at transition to the oscillated operation, parallel connected capacitors enhances the instability level better than serial connected capacitors; all FACTS devices improves the maximum load level of system against voltage collapse; parallel connected controllers permits more loading compared to

the serial connected controllers; usage of both parallel and serial connected capacitors together have better improvement than when they are used alone on voltage collapse and transition to oscillation period.

Oscillations in bus voltage, generator's rotor speed and rotor phase angle which are caused by loss of a single line on a network are compensated by FACTS devices, third generation controllers have better dynamic responses than second generation ones and they reduces oscillation amplitude twice.

# 1. GİRİŞ

## 1.1 Giriş Ve Çalışmanın Amacı

Günümüzde elektrik endüstrisi bir geçiş dönemindedir. Dünyadaki enerji talebi ABD, Kanada, Japonya gibi gelişimini tamamlayan ülkelerle beraber gelişmekte olan kalabalık nüfusa ve geniş topraklara sahip olan Çin, Hindistan, Brezilya gibi ülkelerde hızla ve katlanarak artmaktadır. Enerji, üretildiği noktalardan enerji yoğun merkezlere uzun mesafelerde taşınmaktadır. 1000km uzunluktaki ve 800kV'a ulaşan gerilim seviyesine sahip aa iletim hatları, geniş topraklara sahip ülkelerde sık rastlanan yatırımlar arasına girmeye başlamıştır. Bir yandan ülkelerin iletim ve dağıtım alanında yaptığı yatırımlar sürerken diğer yandan gelişmiş ülkelerde enerjinin üretimi, iletimi ve dağıtımı artan bir hızla bağımsız şirketlerin kontrolüne geçmektedir. Bağımsız şirketler, hızla gelişen elektrik sektöründe yer bulabilmek için, enerji dolaşımındaki talepleri karşılamak zorundadırlar. Bu talepler karşılanırken, elektrik şebekesinin değişik noktalarından ve farklı miktarlarda enerjinin çekilebilmesine veya şebekeye verilebilmesine olanak sağlanmalı ve herhangi bir iletim hattında olabilecek enerji tıkanıklığının önüne geçilmelidir. İletim sistemleri giderek kendi ısı ve kararlılık sınırlarına yaklaşırken iletilen ve dağıtılan gücün kalitesine her zaman olduğundan daha fazla önem verilmelidir. Bu sırada hatlardaki güç akışı ve hatların güvenliği kontrol altında tutularak ulaşılabilecek en yüksek kararlılık çizgisi yakalanmalıdır. Bu noktada esnek alternatif akım iletim sistemleri (EAAİS) kontrolörleri taleplerin gerçekleştirilmesi açısından giderek artan bir öneme sahiptir [1].

İlk kez 1930'lu yıllarda elektrik sistemlerindeki problemler kontrolsüz kondansatörler, reaktörler, transformatörler ve senkron kondenserlerle çözülmeye çalışılmıştır. 1970'li yıllara gelindiğinde gerilim kararsızlığı ve frekans kontrolü sorunlarıyla karşılaşılırken, günümüzde sistemler oldukça karmaşık bir yapı haline gelmiştir. Bu yapı, dinamik kararsızlık, geçici ve sürekli hal kararsızlığı, gerilim çökmesi, düşük transfer kapasitesi gibi bir çok sorunu daha beraberinde getirmiştir [2].

Bir iletim hattındaki güç akışı; hat empedansı, alıcı ve verici uçlarındaki gerilimlerin arasındaki faz açısı ve bu gerilimlerin genliğinin fonksiyonudur [3, 17].

Kompleks yapıdaki aa iletim şebekesinde kaynak-yük arası güç akışı değişik iletim yollarını kullanır. Bu şekilde güç değişik hatlardan sağlanarak yüksek bir güvenlik elde edilirken, hatların yüklenmesinde gerçek bir kontrol yoktur. Sadece hatta seri ve paralel kondansatör ve reaktörler ilave edilerek veya çıkartılarak sınırlı bir değişiklik sağlanır. Sistem hem dinamik hem de sürekli hal çalışmasında gerçekte kontrolsüzdür [1, 4].

Dinamik ve sürekli hal kararlılığını içeren küçük işaret kararlılığı, güç sisteminin küçük bozulmalar altında senkronizmayı koruma yeteneğidir. Yükte ve üretimde küçük bozulmalar nedeniyle böyle bozulmalar sürekli olarak oluşur. Kararsızlık, salınımların artmasıdır. Küçük işaret kararlılığı kendi arasında, dinamik hal kararlılığı ve sürekli hal kararlılığı olmak üzere ikiye ayrılır [3, 5, 17].

Sistemin ana parametrelerindeki değişimler denge noktasının özdeğerlerinde de bozulmalara yol açar. Üretim ve yüklenme seviyeleri, sistemi bir denge noktasından bir başka denge noktasına götüren ve yavaş değişen bozulmuş parametrelerdir. Sistem bu durumda salınımlı bir halde kalabilir veya daha da öteye giderek gerilim çöküntülerine yol açabilir. Gerilimde çökmenin meydana geldiği nokta, sistemin en yüksek yüklenme noktasıdır [6, 7].

İletim hattına bağlanma şekline göre paralel, seri ve birleşik yapıları olarak sınıflandırılan EAAİS cihazları bir iletim sisteminde gerilimin genliği, faz açısı ve hat empedansını kontrol eder [8].

EAAİS kontrolörlerinin gelişimini tetikleyen en önemli faktör güç yarıiletken cihazlarındaki hızlı gelişim olmuştur. Kontrolörlerin temelinde aa/da veya da/aa çeviriciler, eviriciler ve yüksek güçlü aa anahtarları vardır. Buradaki anahtarların anma değerleri 1-5kA ve 5-10kV değerlerine ulaşmaktadır. Bu cihazların anma değerleri, karakteristikleri ve üstünlükleri, EAAİS cihazlarının fiyatında, performansında, boyutlarında, ağırlığında ve kayıplarında büyük öneme sahiptir [1].

İletim hatlarında kontrol cihazları cevap hızı açısından üç kuşak halinde sınıflandırılabilir: mekanik kontrollü, tristör kontrollü ve gerilim kaynaklı çevirici temelli cihazlar.

EAAİS cihazları, güç akışı kontrolünde, dinamik kararlılıkta, sürekli ve geçici hal kararlılığında, iletim kapasitesinin arttırılmasında, gerilim kararlılığında, reaktif güç kontrolünde önemli faydalar sağlarken çevresel faktörler, yapım süresi, boyutlar açısından da avantajlıdır [9, 10, 11].

1990'lı ve 2000'li yılların başında ikinci kuşak EAAİS cihazları ile ilgili pek çok çalışma yapılmıştır. EAAİS kavramını ortaya koyan Hingorani, bu cihazların yararlarını pek çok açıdan incelemiş, sınıflandırmasını yapmış ve özellikle SVK ile SSK'nın karşılaştırmasını ayrıntılı bir şekilde ele almıştır [1, 9, 11]. P. Moore ve P. Ashmole, 1990'lı yıllarda aralıklarla çıkardıkları çalışmalar ile EAAİS cihazlarının o tarihe kadarki gelişimlerini ve şebeke üzerine etkilerini ortaya koymuşlardır [2, 12, 13]. Özellikle C. A. Canizares, paralel ve seri bağlı EAAİS kontrolörlerinin gerilim kararlılığı üzerine etkilerini çok boyutlu olarak incelemiştir. Küçük işaret kararlılığı üzerine yaptığı çalışmaların yanında F. Milano ile çatallaşma teorisini ve çeşitlerini ortaya koymuş; şebekede salınımlı çalışma noktasının değişimi ve tahmini üzerine çalışmalar yapmıştır [14]. Ardından SSK ve TKSK'nın gerilim ve açı kararlılığı üzerine etkilerini ve sistemin salınımlı çalışmaya geçtiği noktalara kompanzatörlerin katkılarını araştırmıştır. İkinci ve üçüncü kuşak kontrolörlerin fazör domeninde matematiksel modellerini çıkartmıştır [6, 7, 15, 16].

Bu tezde, EAAİS (esnek alternatif akım iletim sistemleri) kontrolörlerinin tanımlanması, gelişimi, sınıflandırılması, çalışma prensipleri ele alındıktan sonra 5-baralı, 11-baralı ve 14-baralı test sistemleri ile 80-baralı 380kV/154kV Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sistemi üzerinde benzetim yapılarak genel hatlarıyla yararlarının ortaya koyulması ve ortaya koyulan faydalar açısından özellikle ikinci kuşak EAAİS cihazları olan paralel ve seri kompanzatörlerin birbirleriyle karşılaştırılması amaçlanmıştır.

İkinci bölümde; geleneksel kontrol mekanizmaları tanıtılmış, iletim hatlarının doğal sınırları irdelenmiş ve EAAİS kontrolörleri kavramının ne olduğu konusu ele alınmıştır. Öncelikle elektrik iletim şebekeleri açıklanarak EAAİS cihazlarının gelişimi ortaya koyulmuştur. Sonra kontrolörlerin hangi sistem büyüklüklerini kontrol ettiği incelenmiş ve EAAİS cihazları sınıflandırılmıştır. Son olarak, uygulanmış bir SVK projesinin yerleşim planı açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde; EAAİS kontrolörlerinin yararları ayrıntılı olarak açıklanmış ve bu yararlar üzerinden birbirleriyle karşılaştırılmaları yapılmıştır.

Dördüncü bölümde; başlıca EAAİS cihazları olan SVK, TKSK, SSK ve BGAK'nın çalışma prensipleri ayrıntılı olarak anlatılmıştır [1, 4].

Beşinci bölümde; 5-baralı, 11-baralı ve 14-baralı test sistemlerinde SVK, TKSK, SVK&TKSK ve SSK kontrolörleri sistemlere ilave edilerek benzetim yapılmıştır. Kontrolörlerin sağladığı yararlar ve karşılaştırılmaları tablolar ve şekillerle açıklanmıştır. 80-baralı 380kV/154kV Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sistemi modellenmiştir, yük akışı yapılmış ve gerilim açısından zayıf baralar tespit edilip SVK ile kompanze edilmiştir. Bu sayede bu baralarda ve bunlara bağlı diğer baralarda gerilim seviyesinde yükselme sağlanmıştır. Uzun ve yüklü hatlar ise TKSK ile kompanze edilerek aktif yük akışları dolayısıyla hattın transfer kapasitesi arttırılmıştır.

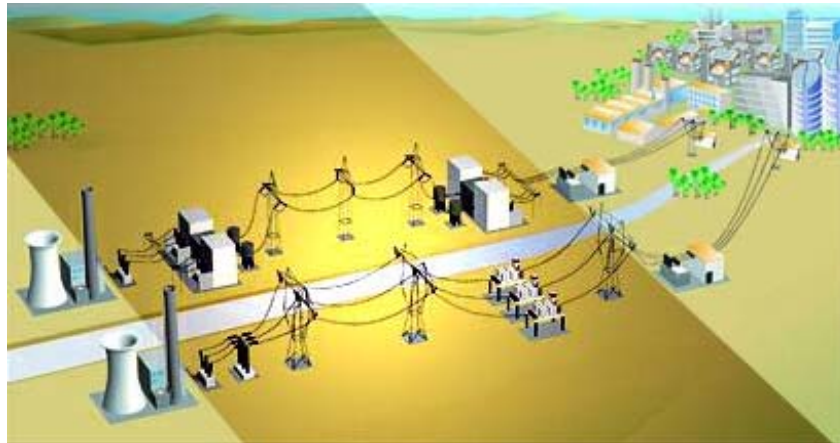
Altıncı bölümde; tezde anlatılan ve beşinci bölümde elde edilen sonuçlar ışığında EAAİS kontrolörlerinin faydaları ortaya koyulmuştur.

## 2. EAAİS (FACTS) Kontrolörleri Kavramı Nedir?

### 2.1 Enerji Sistemleri, Enerji İletim Şebekeleri Ve Yük Akışı

#### 2.1.1 Giriş

Elektrik enerjisinin, düşük maliyetli enerjiye duyulan ihtiyaçla beraber hızla artan kullanımı ve çevresel kaygılar beraberinde şehir merkezlerinden uzak yerlerde büyük enerji üretim tesislerinin gelişmesine yol açmıştır. Uzak noktalardaki büyük enerji ihtiyacı, üretim merkezlerinden yük merkezlerine elektrik enerjisinin iletim hatları üzerinden aktarılmasıyla karşılanmıştır (Şekil 2.1). Elektriğin daha ucuza ve daha güvenli sağlanabilmesi, yük merkezleri ile birkaç enerji üretim birimini birbirine bağlayan hatlar, bağlantılı komşu şebekeler, elektrik iletim şebekelerini giderek daha ağır ve karmaşık bir yapı haline getirirken, bölgeler, ülkeler, hatta kıtalararası bağlantıları ortaya çıkarmıştır. Bu kadar büyük bir şebekede, yetersiz bir kontrol ve aşırı reaktif güç ihtiyacı, büyük dinamik salınımlar gibi sorunları beraberinde getirmiştir [1, 4].



**Şekil 2.1:** Enerji iletim hattının temsili resmi [4]

Karmaşık yapıdaki aa iletim şebekesinde kaynak-yük arası güç akışı değişik iletim yollarını kullanır. Böyle bir şebekede yük akışı analizi yapılırken hatların aktif ve reaktif güç akışları bilinmelidir. Aktif ve reaktif güç akışını o hattın empedansı ve

gerilimi belirler. Sonuçta karmaşık yapılı bir aa iletim şebekesinde güç değişik hatlardan sağlanarak yüksek bir güvenlik elde edilirken, hatların yüklenmesinde gerçek bir kontrol yoktur. Sadece hatta seri ve paralel kondansatör ve reaktörler ilave edilerek veya çıkartılarak sınırlı bir değişiklik sağlanır [4].

Son yıllara kadar aktif ve reaktif güç kontrolü, iletim hattının empedansının dikkatli bir şekilde ayarlanması ile sağlanıyordu. Aynı şekilde uç gerilimleri de generatörün uyarmasının kontrolüyle ve kademeli transformatörlerin ayarlanmasıyla değiştirilmekteydi. Günümüzde ise seri ve paralel empedanslar sayesinde hat empedansı etkin bir şekilde kontrol edilmektedir [4].

### **2.1.2 Geleneksel Kontrol Mekanizmaları**

Günümüzdeki güç sistemleri büyük oldukları kadar mekanik kontrollüdür. Varolan iletim hatlarının kontrolü ve korumasında yaygın olarak mikro elektroniğin, bilgisayarların ve yüksek hızlı haberleşme birimlerinin kullanıldığını söyleyebiliriz. Çalışma esnasında son kontrolün yapıldığı noktaya kadar kontrol sinyalleri etkin ve hızlı bir şekilde gelmektedir. Ancak bu noktadaki anahtarlama cihazları mekaniktir ve sık sık devreye alıp çıkartmak mümkün değildir. Statik cihazlara göre aşınma ve yorulma görülmektedir. Buradan bakarsak hem dinamik hem de sürekli hal çalışmasında sistem gerçekte kontrolsüzdür [1].

Otomatik üretim kontrolünde megawattlar seviyesinde çıkış gücüne sahip generatörler, türbin tarafından sağlanan momentin kontrolü ile ayar edilirler. Bir elektromekanik sistemde bu bir buhar veya hidrolik türbini olabilir. Burada türbine giriş yapan su veya buhar miktarının kontrolü söz konusudur. Hız ayarının çıkışı birkaç mekanik kuvvetlendirmeden sonra türbin vanalarını kontrol eder [4]. Sistem, her aşamasında mekanik işlemlerden geçmektedir.

Uyarma kontrolünde, uyarma akımının değiştirilmesi ile generatör gerilimi kontrol edilir. Tek bir generatör ile frekansta ve şebeke geriliminde herhangi bir değişim yaratamayacak kadar büyük sistemlerde uyarma kontrolü sadece reaktif gücü sağlar. Modern sistemlerde uyarma devresi bir doğrultucu üzerinden çalışarak yeterli kontrol hızına erişir. Ancak dengeleyici ve koruyucu devre sinyalleri, sistemden ve generatörün milinden veya terminal frekansından alınır. Tüm ayar devresine bakınca yeterli kontrol hızı sağlanamamış olur.

Kademe değiştirme özelliğine sahip transformatörler bütün gerilim seviyelerinde sistemin tamamında gerilimin kontrol edilmesinde önemli birer araçtırlar. Gerilimi bir alt sistemden diğerine değiştirmek için kullanılırlar. Bunlar ya otomatik ya da elle kumanda edilebilirler. Hemen hemen tüm bağlaşımlı (enterkonnekte) sistemlerde bulunurlar. Kademeli alt sistemler arasında reaktif güç akışının uygun şekilde kontrol edilmesini sağlarlar. Ağır yük koşullarında şebeke gerilimleri, reaktif güç ihtiyaçlarını minimize etmek ve şönt kondansatör ve hat yüklenmesinin etkinliğini arttırmak için en yüksek seviyede tutulur. İletim şebekesinin izin verilebilen en yüksek çalışma gerilimi, olası anahtarlama çalışmaları ve devre dış kalma koşulları göz önüne alınarak, cihazların yalıtım seviyeleri aşılmayacak şekilde ayarlanır. Yüksüz durumda kademe değiştiren transformatörlerin özellikleri de yeterli gerilim görüntülerini sağlamaya yardım etmektedir [17]. Bu transformatörlerin çalışma hızları genel olarak düşüktür ve sık kullanımı durumunda elektriksel ve mekaniksel olarak aşınma ve kopmalar meydana gelmektedir [4].

Faz ötelemeli transformatörler, 3 fazlı transformatörlerin özel bir formudur. Hatta seri bağlı bir transformatörlerin ikincil sargısına bağlı olan kademeli bir gerilim transformatöründen oluşur. Genliğinde fark edilebilir bir değişiklik olmadan fazı ötelenmiş bir gerilim elde edilir. Düşük MVA kapasitelerine rağmen faz açısını kontrol ederek gerçek güç kontrolünü sağlarlar. Faz ötelemeli transformatör, yük altında kademe değiştirici olarak çalıştırılırsa kontrollü bir faz ötelemesi elde edilebilir [4]. Bu durumda yine mekanik parçalar kaçınılmaz olmaktadır.

### **2.1.3 Elektrik İletim Şebekelerinin Kısıtlamaları ve Sınırları**

Geleneksel kontrol mekanizmalarının enerji sistemlerine getirdiği sınırlı kontrolün yanında iletim hatlarının yüklenme kapasitesi de çeşitli kısıtlamalara sahiptir. Bu kısıtlamalar şöyledir [1],

- Isıl
- Dielektrik
- Kararlılık

İletim sistemleri giderek kendi ısıl ve kararlılık sınırlarına yaklaşırken iletilen ve dağıtılan gücün kalitesine her zaman olduğundan daha fazla önem verilmektedir. Bu sınırlar değişik biçimler alabilirken, tek bir alanda veya bölgede veya alanlar

arasındaki güç transferi, (burada kastedilen şişe boğazı diyebileceğimiz hatlar) yukarıda genel olarak ayırdıştırdığımız aşğıdaki karakteristiklerden bir veya bir kaçını bir risk faktörü olarak içerebilir [8],

- Sürekli halde güç alışveriş sınırı
- Gerilim kararlılık sınırı
- Dinamik gerilim sınırı
- Geçici hal kararlılık sınırı
- Güç sistemleri salınım bastırma sınırı
- Elde olmayan döngü akışı sınırı
- Isıl sınırlar
- Kısa devre akımı sınırı
- Frekans düşmesi
- Diğerleri

Bir havai iletim hattının ısıl kapasitesi, çevre sıcaklığı, rüzgâr şartları, iletken koşulları ve toprak parametrelerinin bir fonksiyonudur. Isıl kapasite, çevresel değişkenler ve hattın önceki yüklenmelerine göre azalır. Hattın anma değerlerine karar verilirken en kötü çevresel senaryo dikkate alınır. Ancak zaman içinde değişen çevresel koşullar, hattın aşırı yüklenmelerinden dolayı meydana gelen yorulmalar, transformatörlerdeki ve diğer hat elemanlarındaki yaşlanmalar ve artan kayıplar ve daha önemlisi artan güç talebi mevcut hatların ihtiyacı karşılayamaz noktasına gelmesine yol açar. Bu noktada ya mevcut iletkenin kapasitesi kesit büyütürerek arttırılacak (ki bu tüm hattı değiştirmeyi gerektirir) ya da hatta paralel ikinci bir hat çekilecektir [1]. Tabii ki yeniden bir yatırım, çevresel koşullar (hattın geçeceği alanlar), kamulaştırma bedelleri, uzun süreli bir inşa çalışması düşünülmesi gereken konulardır.

Hatların pek çoğu yalıtım açısından muhafazalı olarak tasarlanırlar. Anma gerilim değerleri sık sık %10–15 oranında artış gösterirler. Burada önemli olan dinamik ve geçici aşırı gerilimlerin sınırlar dâhilinde kalmasıdır. Sınırları zorlayan gerilim seviyelerinde geleneksel cihazlar çözümsüz kalabilirler [1].

Yukarıda sayıldığı üzere hattı zorlayan çeşitli kararlılık türleri vardır. Bağlısımlı iletim sistemlerinde enerji transferi, geçici hal, gerilim ve enerjinin kararlılığı tarafından kısıtlanmaktadır [18]. Yeni yüklerin ve üretim santrallerinin eklendiği enerji sisteminin karakteristiği zamanla değişmektedir. İletim hatları yeterli seviyede güncelleştirilemezse sürekli hal ve geçici hal kararlılık problemleri, tüm sistemin kararlılık çizgilerini daraltacaktır [19].

#### 2.1.4 Yük Akışı Jakobiyen Matrisi

Probleme genel olarak baktığımızda, doğrusal olmayan denklemler kümesi şu şekilde tanımlanır:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= 0 = f(x, y) \\ 0 &= g(x, y) \end{aligned} \quad (2.1)$$

y = baralara ilişkin gerilim genlikleri ve faz açıları gibi cebirsel değişkenler

x = durum değişkenleri

g = her baradaki aktif ve reaktif güç dengesi için cebirsel denklemler

f = diferansiyel denklemler

Yük akışı Jakobiyen matrisi, yük akışı analizi ve Newton-Raphson metodunun uygulanması (Ek A) ile elde edilir. Her iterasyondan sonra Jakobiyen matrisi tekrardan hesaplanır ve aşağıdaki doğrusal problem çözülür:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta x^i \\ \Delta y^i \end{bmatrix} &= - \begin{bmatrix} F_x^i & -F_y^i \\ G_x^i & J_{LFV}^i \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} f^i \\ g^i \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x^{i+1} \\ y^{i+1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x^i \\ y^i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x^i \\ \Delta y^i \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.2)$$

burada  $F_x = \nabla_x f$ ,  $F_y = \nabla_y f$ ,  $G_x = \nabla_x g$ ,  $J_{LFV} = \nabla_y g$  dir.  $\Delta x$  ve  $\Delta y$  artımları verilen  $\epsilon$  toleransından daha küçükse iterasyon duracaktır. Yük akışı Jakobiyen matrisi her zaman  $J_{LFV} \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$  formundadır. Jakobiyen matrisi, dört alt-matristen oluşur:

$$J_{LFV} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$J_{LFV}$  matrisinin özdeğerlerine bakıldığında,

- (i) Pozitif özdeğerler, sistemin gerilim açısından kararlı olduğunu gösterir. Genliğin azalması, gerilimin kararsızlık çizgisine daha yakın olduğunu belirtir. Özdeğerin genliği kararsızlığa yakınlığın bir ölçüsüdür.
- (ii) Sıfır özdeğer, reaktif güçteki herhangi bir değişimin gerilimde sonsuz değişime yol açacağını gösterir.
- (iii) Negatif özdeğer sistemin gerilim açısından kararsız olduğuna işaret eder.

### 2.1.5 Küçük İşaret Kararlılık Analizi Ve Durum Matrisinin Öz Özellikleri

Küçük işaret kararlılığı, küçük bozucularla karşılaşıldığında, güç sisteminin senkronizmayı sürdürme yeteneğidir. Küçük bir bozucu olduğunda, sistemin cevabını belirlemek için sistem doğrusallaştırılabilir. Kararsızlık iki şekilde oluşur [3]:

- (i) Senkronizma momentinin eksikliği yüzünden generatör rotor açısındaki sürekli artış,
- (ii) Yetersiz sönüm momenti eksikliği nedeniyle rotor salınımlarının artan genliği.

Günümüzde pratikte güç sistemlerinde küçük işaret kararlılık problemi çoğunlukla sistem salınımlarının yetersiz sönümünden dolayı ortaya çıkmaktadır.

Güç sistemi gibi dinamik bir sistemin davranışı  $n$  tane birinci dereceden doğrusal olmayan adi diferansiyel denklem ile ifade edilir. Bu durum sistemin analizi açısından zorluk çıkartır. Sistemin doğrusallaştırılması ve tek bir denge noktasına sahip olması kararlılık analizi açısından kolaylık getirir.

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}; u = \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

dir.  $X$  vektörü durum vektörü ve onun bileşenleri,  $x_i$ 'ler durum değişkenleridir.  $u$  sisteme giriş vektörüdür.  $\dot{X} = f\{x;u\}$  eşitliğini doğrusallaştırdığımızda aşağıdaki formu elde ederiz,

$$\dot{\Delta x} = A\Delta x + B\Delta u \quad (2.5)$$

$$\Delta y = C\Delta x + D\Delta u \quad (2.6)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_n} \end{bmatrix} C = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} D = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial u_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial g_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_n}{\partial u_n} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

A = durum yada sistem matrisi nxn

B = kontrol yada giriş matrisi nxr

C = çıkış matrisi mxn

D = ileri besleme matrisi mxr

(2.6) ve (2.7) eşitliklerinin Laplace dönüşümünü alarak aşağıdaki ifade elde edilir:

$$s\Delta x(s) - \Delta x(0) = A\Delta x(s) + B\Delta u(s) \quad (2.8)$$

$$\Delta y(s) = C\Delta x(s) + D\Delta u(s) \quad (2.9)$$

Sistemin transfer fonksiyonu bulunurken, başlangıç koşullarını sıfır kabul ederiz.,  $\Delta x(0) = 0$ .

$$(sI - A)\Delta x(s) = \Delta x(0) + B\Delta u(s) \quad (2.10)$$

$$\Delta x(s) = (sI - A)^{-1} [\Delta x(0) + B\Delta u(s)] = \frac{Ek(sI - A)}{\det(sI - A)} [\Delta x(0) + B\Delta u(s)] \quad (2.11)$$

$$\Delta y(s) = C \frac{Ek(sI - A)}{\det(sI - A)} [\Delta x(0) + B\Delta u(s)] + D\Delta u(s) \quad (2.12)$$

$\Delta x(s)$  ve  $\Delta y(s)$ 'in kutupları  $\det(sI - A) = 0$  eşitliğinin kökleridir. Burada s'nin değerleri A matrisinin özdeğerleri olarak bilinir ve bu eşitlikte karakteristik eşitlik olarak adlandırılır.

Doğrusal olmayan sistemlerin küçük işaret kararlılığı, sistemin karakteristik eşitliğinin kökleriyle yani A'nın özdeğerleriyle belirlenir [3, 17].

- Özdeğerler negatif gerçel kısımda ise, orijinal sistem asimptotik kararlıdır.

- Özdeğerlerde en az biri pozitif gerçektir, orijinal sistem kararsızdır.
- Özdeğerlerin gerçektir kısımları sıfıra eşitse, genel olarak bir yorumda bulunmak mümkün değildir.

A matrisinin özdeğerleri  $A\phi = \lambda\phi$  önemli çözümlerini veren  $\lambda$  skalar parametrelerinin değerleriyle verilir.  $A$   $n \times n$ ,  $\phi$   $n \times 1$  boyutludur. Özdeğerleri bulmak için,

$$(A - \lambda I)\phi = 0 \quad (2.13)$$

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (2.14)$$

Determinantın açılımı karakteristik denklemi verir.  $N$  çözüm  $\lambda = \lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$   $A$ 'nın özdeğerleridir. Özdeğerler gerçektir ya da kompleksdir.

Bir  $\lambda_i$  özdeğerine karşı düşen bir çalışma modunun zamana bağlı karakteristiği  $e^{\lambda_i t}$  ile verilir. Dolayısıyla sistemin kararlılığı özdeğerler yardımıyla aşağıdaki gibi belirlenir [3]:

- Bir gerçektir özdeğer, salınımsız çalışmaya karşılık düşer. Negatif gerçektir özdeğer sönüm modunu gösterir. Genliği büyüdükçe, sönme hızlanır. Pozitif gerçektir özdeğer periyodik olmayan kararsızlığı gösterir.
- Kompleks özdeğerler eşlenik çiftler oluştururlar. Her çift, salınımlı moda karşılık düşer.

Özdeğerlerin gerçektir bileşenleri sönümü; sanal bileşenleri salınım frekansını verir. Negatif gerçektir kısım sönümlü bir salınımı gösterir. Bu durumda kompleks özdeğer çifti için;

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (2.15)$$

olur. Salınım frekansı, Hz cinsinden,

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.16)$$

dir. Bu gerçektir ya da sönümlü frekansı gösterir. Sönüm oranı,

$$\xi = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (2.17)$$

bağıntısı ile verilir. Sönüm oranı  $\xi$  salınının genliğinin sönme hızını belirler. Genlik sönmesinin zaman sabiti  $1/|\sigma|$  dir. Diğer bir deyişle, genlik  $1/|\sigma|$  saniyede ya da salınının  $1/(2\pi\xi)$  periyodunda ilk genliğinin  $1/e$ 'sine ya da %37'sine düşer.

Durum matrisini yük akışı analizi ile birlikte ele aldığımızda (2.1) ve (2.2) denklemlerinden durum matrisi, yük akışı Jakobiyen matrisinin tekil olmaması şartı ile şu şekilde ifade edilebilir:

$$A = F_x - F_y J_{LFV}^{-1} G_x \quad (2.18)$$

Sistemin tüm özdeğerlerinin hesaplanması sistemin dinamik derecesine bağlı olarak uzamaktadır.

#### 2.1.6 Sistemin Bozulması - Çatallaşması (Bifurcation)

Sistemin ana parametrelerindeki değişimler denge noktasının özdeğerlerinde de bozulmalara yol açar. Örneğin hat kesintisi gibi ani değişimler güç sisteminde salınım problemlerine neden olur. Bunun yanında üretim ve yüklenme seviyeleri, sistemi bir denge noktasından bir başka denge noktasına götüren ve yavaş değişen bozulma parametreleridir. Bu parametreler her ne kadar kesin değerlerde de olsa sistemi kararsızlığa doğru götürebilir. Sistem bu durumda salınımlı bir halde kalabilir veya daha da öteye giderek gerilim çökmelerine yol açabilir. Bu şartlar durum matrisi özdeğerlerinin sıfır noktasında çıkması veya bir çift kompleks konjuge olması şeklinde kendini gösterir [7,14].

Lamda ( $\lambda$ ) bir yüklenme veya bozulma parametresi olarak tanımlanır. Yüklenme parametresinin değişimi sistemin mekanik yükünü (talep edilen aktif ve reaktif gücü) etkiler. Sistem yükündeki bu değişim, gerilim çökmesine kadar giden bir dizi bozulmaya neden olabilir. Gidebileceği ilk durum, biri kararsız diğeri kararlı iki denge noktasına sahip olduğu yeni lamdadır. İkincisi ise sanal eksen üzerinde bir çift kompleks konjuge özdeğerin olduğu tek bir denge noktasıdır. Bozulma parametresinin ( $\lambda$ ) değişimine göre bu özdeğer çifti, sanal eksenden sağa veya sola doğru uzaklaşabilir. Bu durumda özdeğerin hareket yönüne göre sistem salınımlı çalışmaya geçebilir veya geçmeyebilir [7, 14].

## **2.2 Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri Kontrolörlerinin Gelişimi**

### **2.2.1 EAAİS ve Yariletken Teknolojisinin Gelişimi**

Enerji sistemlerine, güç elektroniği teknolojisinin uygulanması kısa bir tarihe sahiptir. EAAİS kavramı, 1980'li yıllarda N.G. Hingorani tarafından ortaya koyulduktan sonra güç elektroniği teknolojisini temel alan cihazlarla beraber gelişmiş ve tüm dünyaya yayılmıştır [20].

İlk kez Japonya'da, 1970'li yıllarda üzerinde çalışmaya başlanarak 1980'li yılların başından itibaren kullanıma alınmıştır. Özellikle 70'li yıllarda hızla gelişmekte olan enerji sistemleri, gerilim kararsızlığı, uzun ve yüklü hatlardaki aktif güç kararsızlığı ve frekans kontrolü gibi sorunları ortaya çıkartmıştır. O yıllardan itibaren devreye alınan EAAİS kontrolörleri hala artan sayı ve çeşitte kullanılmaktadır [20].

1930–1980 yılları arasında (tristör öncesi dönem) enerji sistemlerinde problemler, kontrolsüz seri kondansatörler, senkron kondenserler, anahtarlı paralel kondansatörler ve reaktörler, mekanik kademe değiştiricili transformatörler kullanılarak çözülmekteydi. 1980–2000 yılları arasında ise bunların yerini tristör kontrollü seri kondansatörler, tristör kontrollü statik VAR kompanzatörleri, tristörlü kademe değiştiricili transformatörler aldı. 1990'lı yılların sonu ve 2000'li yıllardan itibaren statik senkron seri kompanzatörler, statik senkron kompanzatörler, birleştirilmiş güç akışı kontrolörleri kullanıma girdi [2]. Bu dönemde ABD, Brezilya, Kanada, Çin, Hindistan gibi toprakları çok geniş ve enerjiyi iç bölgelerde üretip liman kentlerine veya enerji yoğun bölgelere taşımak zorunda olan ülkelerde EAAİS cihazları kullanımının hızla arttığı görülmektedir.

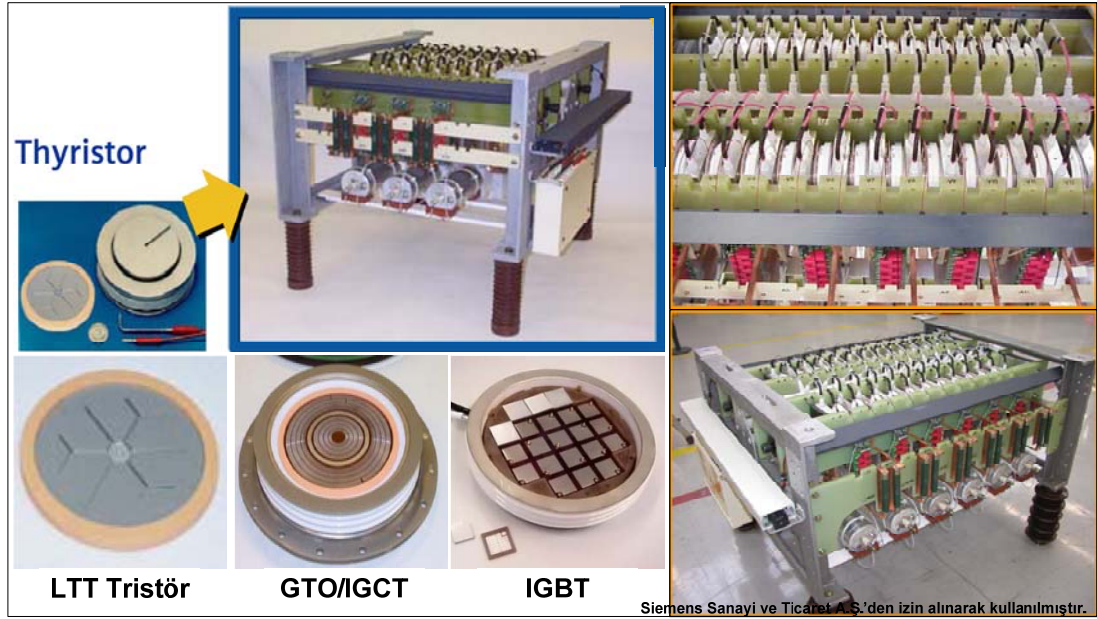
EAAİS kontrolörlerinin gelişimini tetikleyen en önemli faktör güç yariletken cihazlarındaki hızlı gelişim olmuştur. EAAİS uygulamaları genellikle yüzlerce megawattlık üç fazlı enerji sistemlerinde görülmektedir. Kontrolörlerin temelinde aa/da veya da/aa çeviriciler ve yüksek güçlü aa anahtarları vardır. Buradaki anahtarların anma değerleri 1-5kA / 5-10kV değerlerine ulaşmaktadır. Bu cihazların anma değerleri, karakteristikleri ve üstünlükleri, EAAİS cihazlarının fiyatında, performansında, boyutlarında, ağırlığında ve kayıplarında büyük öneme sahiptir [1].

**Tablo 2.1:** Üç kuşak EAAİS cihazının anahtarlama hızı açısından karşılaştırması

| EAAİS Kontrolörü | 1. Kuşak                   | 2. Kuşak                            | 3. Kuşak                                               |
|------------------|----------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Tipi             | Mekanik Anahtarlı Cihazlar | Tristör Kontrollü Elemanlar         | Gerilim Kaynaklı Çevirici Teknolojisi: GTO, IGBT, IGCT |
| Cevap Hızı       | Kesici Gecikmesi           | 2-3 Döngü (Anahtarlama frekansında) | 1-2 Döngü (Anahtarlama frekansında)                    |
|                  | Yavaş                      | Hızlı                               | Hızlı                                                  |

EAAİS teknolojisinin gelişiminin temel taşı (SCR) tristör olmuştur. Anma değeri 10MW'ı bulan tristörler, 500kV'luk iletim hatlarına seri bağlanmaktadır. Bu durum yarıiletkenin tetiklenmesi için gereken kapı darbeleri açısından problem yaratmaktadır. Sorun tetikleme devresinde fiber optik kabloların kullanımı ve soğutma tekniğindeki gelişim ile çözülmüştür. Geleneksel SCR'lerin kullanımını sınırlayan diğer problem ise yarıiletkenin ancak akımın bir sonraki sıfır geçişinde kesime gitmesidir. Bu sorun da kapıdan kesimli tristörlerin (GTO) geliştirilmesiyle çözülmüştür. Kapıdan kesimli tristörler, geleneksel tristörlerden %10-20 kadar daha fazla anahtarlama kaybına sebep olmasına rağmen yüksek gerilim ve güç değerlerinden ötürü tercih edilirler [12]. Bu noktada iletim ve kesim cihazlarındaki birim güç kapasitesindeki hızlı artış, yüksek anahtarlama hızları, darbe genişlik modülasyonu tekniği, düşük kayıplar EAAİS cihazlarının performansını ve kullanılabilirliğini yüksek seviyeye çıkartmıştır [13].

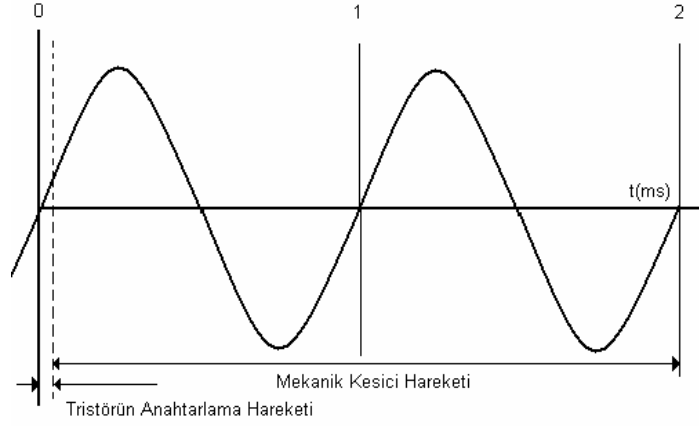
Üç kuşak EAAİS cihazları karşılaştırmalı olarak Tablo 2.1'de verilmiştir. Birinci kuşak cihazlar mekanik kontrollüken, ikinci kuşak cihazlar tristör kontrollüdür. Üçüncü kuşak kontrolörlerde ise çevirici temelli yapılar görülmektedir. Gerilim kaynaklı çevirici temelli üçüncü kuşak EAAİS kontrolörleri yüksek cevap hızlarıyla gelecekte iletim hatlarının sorunlarında en etkin çözüm olacaktır.



**Şekil 2.2:** SVK modülü ve modülde bulunan yarı iletken elemanlar: LTT, GTO/IGCT, IGBT [22]

Kapıdan kesimli tristörlerin dezavantajı, kesime gitmesi için gereken negatif akımın büyük olmasıdır. Günümüzde de devam eden süreçte kapıdan kesimli ve iletimli yarıiletken cihazlar sürekli olarak yenilenmektedir. MOSFET, yüksek kesme kapasitesi ve düşük anahtarlama kaybına sahiptir. SIT, yüksek güçlü ve yüksek frekanslı bir cihazdır. IGCT hızlı kesime giderken düşük anahtarlama kaybına sahiptir. Çipli yapısıyla IGBT, kapı sürmesinin kolaylığı, tepe akım, sağlamlık gibi güç MOSFET'lerinin ileri özelliklerini paylaşmanın yanında düşük anahtarlama ve iletim kayıplarına sahiptir. Ancak anahtarlama hızı MOSFET'ten daha düşüktür. [21]. Bunların yanında kapıdan kesimli tristörleri temel alarak geliştirilmeye devam eden pek çok yarıiletken anahtar vardır. EAAİS cihazlarında genelde tristörlerin tercih edilmesinin temel nedeni ulaşılan yüksek güç değerleridir. Şekil 2.2'de hızla gelişmekte olan yarıiletken elemanlar ve farklı açılardan görünen bir SVK anahtarı mevcuttur [22]. Sol tarafta günümüzde EAAİS cihazlarında sıkça kullanılan LTT görülmektedir. Fiber optik kablolar ile tetikleme yapılmaktadır. LTT'de yüksek güç değerinin yanında kapıdan kolay tetikleme imkanının olması elemanın avantajıdır. Üst ve sağ tarafta ise bir SVK anahtarında bulunan çok sayıdaki seri bağlı tristörler, ana baralar, ana bara taşıyıcıları ve yarıiletkenin soğutulmasında kullanılan su kanalları (tüm elemanlar kompakt bir yapı halinde modül içerisine yerleştirilmiş) ve modülü yerden izole eden izolatörler görülmektedir.

Tristör teknolojisindeki gelişim, enerji sistemlerinde düzgün, sürekli ve tekrar edilebilir bir kontrole imkân verir. En önemli avantajı ise anahtarlama hızıdır (Şekil 2.3) [8]. Tablo 2.1’de üç kuşak kontrolörün anahtarlama hızı açısından sıralanışı görülmektedir. Burada döngü, anahtarlama frekansı döngüsünü ifade etmektedir.



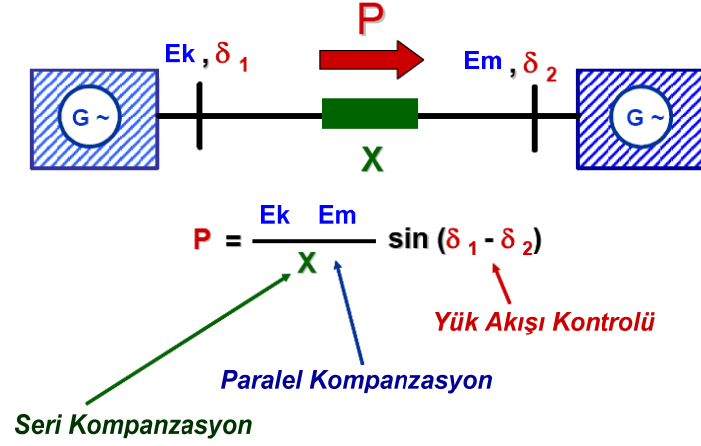
**Şekil 2.3:** Enerji sistemi kontrol hızının karşılaştırması [8]

Son dönemde kullanılan EAAİS kontrolörlerinde gerilim kaynaklı ve akım kaynaklı çeviriciler bulunmaktadır. Bazı temel avantajlardan dolayı gerilim kaynaklı çeviriciler tercih edilmektedir. Bu avantajlar şunlardır:

- i. Akım kaynaklı çeviriciler, çift yönlü ters gerilim kapasitesine sahip güç yarıiletkenleri gerektirir,
- ii. Akım kaynaklı çeviricinin da uçlarındaki akım yüklü reaktör, gerilim kaynaklı çeviricinin da uçlarındaki gerilim yüklü kondansatörden daha kayıplıdır,
- iii. Akım kaynaklı çevirici aa uçlarında, kapasitif filtre formunda bir gerilim kaynağına ihtiyaç duyar.

### 2.2.2 EAAİS Kontrolörlerinin Kontrol Ettiği Sistem Büyüklükleri

EAAİS cihazları yarıiletken temelli ve çok yüksek hızda hareket kontrolü yeteneğine sahiptir. Şekil 2.4’te görüldüğü üzere iletim hattının kontrolü üç parametrenin kontrolü anlamına gelmektedir.

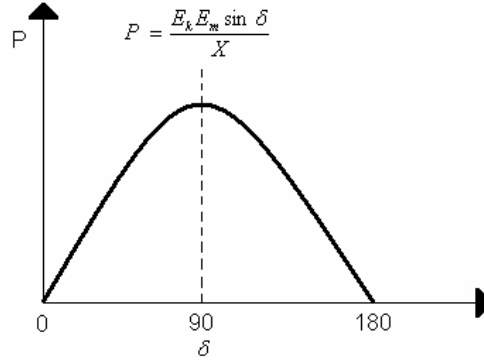


**Şekil 2.4:** Enerji iletiminin temel gösterimi [26]

- Gerilimin genliği (Paralel kompanzasyon)
- Gerilimin faz açısı (Yük akışı kontrolü)
- Hat empedansı (Seri kompanzasyon)

Geleneksel sistemler bu parametrelerin kontrolüne ilişkin yavaş yük değişimlerinde ve sürekli halde yeterli olabilirler. Ancak dinamik sistem şartlarında etkisizdirler [13]. İletim hattının güçlendirilmesi, hattın yapısına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Örgülü ve ağır yüklü şebekelerde yük akışı kontrolü, radyal ve paralel hatlı şebekelerde hat empedansının kontrolü ve zayıf sistemlerde gerilim kontrolü gereklidir.

Bu üç parametrenin yanına direkt aktif güç kontrolünü de dördüncü değişken olarak koyabiliriz [8]. Şekil 2.5'te aktif gücün faz açısıyla değişimi görülmektedir. Aktif güç, faz açısının yanında gerilimin genliği ve hat empedansının bir arada kontrolü ile etkin bir şekilde ayarlanabilir.



**Şekil 2.5:** Güç sistemi: aktif güç-faz açısı ilişkisi [8]

## 2.3 Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri Kontrolörlerinin Sınıflandırılması

### 2.3.1 Giriş

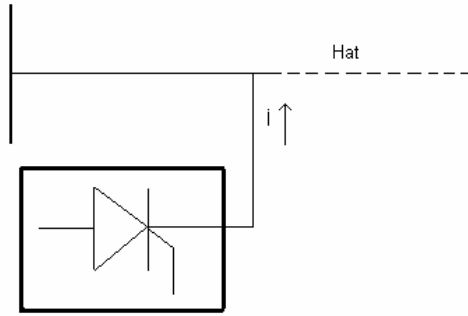
Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri kavramını ilk kez 1988 yılında ortaya koyan Hingorani EAAİS kontrolörlerini şöyle tanımlar: “EAAİS teknolojisi, tek bir yüksek güç kontrolöründen ziyade, birleştirilmiş parametreleri bireysel veya topluca kontrol etmek için uygulanan bir kontrolörler toplamıdır” [9, 23].

Geleneksel veya birinci kuşak diyebileceğimiz EAAİS cihazları, reaktörlerin ve kondansatörlerin mekanik anahtarlarla devreye alınıp çıkarılması prensibine göre çalışırken, ikinci kuşak EAAİS kontrolörleri statik elemanlar ile anahtarlama yapmaktadır. Üçüncü kuşak diyebileceğimiz gelişmiş EAAİS kontrolörleri ise prensip olarak kapıdan kesimli yarıiletkenlerin kullanıldığı iki tip çeviriciden yapılır. Bunlar gerilim ve akım kaynaklı çeviricilerdir. Bölüm 2.2.1’de verilen özelliklerden ve maliyet açısından değerlendirildiğinde genelde EAAİS cihazlarında gerilim kaynaklı çeviriciler kullanılmaktadır ve bu bölümde bu tarz bir sınıflandırılmadan kaçınılacaktır. Genel olarak EAAİS cihazları iletim hattına bağlanma şekillerine göre sınıflandırılır. Buna göre dört gruba ayrılırlar:

- Paralel bağlı
- Seri bağlı
- Seri ve paralel birleşik yapılı
- Diğerleri

### 2.3.2 Paralel Bağlı EAAİS Kontrolörleri

Değişken empedanslı, değişken kaynaklı veya bunların birleşimi olan kontrolörlerdir. Tüm paralel kontrolörlerde, bağlantı noktasından sisteme akım girişi yapılır (Şekil 2.6). Hatta paralel değişken empedans bağlıyken hat gerilimi değişken bir akım akışına sebep olur ve bu hatta akım girişi olarak ifade edilir. Hatta verilen akım, hat gerilimi ile  $90^0$  faz farklı ise, paralel kontrolör yalnızca değişken reaktif güç üretir veya tüketir. Aksi faz durumunda ise gerçek güç kullanır [1].



Şekil 2.6: Paralel EAAİS kontrolörü

*SVK(SVC)-statik VAr kompanzatörü:* Bara gerilimi gibi elektrik enerji sistemi parametrelerini sürdürmek ve kontrol etmek için, çıkışında kapasitif veya endüktif akım alışverişini ayarlayarak reaktif güç üreten veya tüketen, hatta paralel bağlı kontrolörlerdir [24].

Genel olarak terminolojide, tristör kontrollü veya tristör anahtarlama reaktör ve tristör anahtarlama kondansatör veya bunların birleşimi olarak geçer. SVK'lar kapıdan kesimli olmayan tristör temelli kontrolörlerdir. İleri ve geri reaktif güç için ayrı elemanlara sahiptirler. Tristör kontrollü veya tristör anahtarlama reaktörler reaktif güç tüketimi için kullanılırken reaktif güç üretimi için tristör anahtarlama kondansatörler kullanılır. Performans ve güç karşılaştırmasında geri de olsa statik senkron kompanzatörlere göre daha ucuz bir seçenektir.

*TKR(TCR)-tristör kontrollü reaktör:* Tristörün yarı iletim kontrolüyle sürekli halde etkin reaktansı değiştirilen paralel bağlı bir reaktördür. TKR, SVK'nın bir alt grubu olup tetikleme açısı kontrollü bir aa anahtarıdır [24].

*TAR(TSR)-tristör anahtarlama reaktör:* Tristörün sıfır veya tam iletim halinde çalışmasıyla etkin reaktansı kademeli biçimde değiştirilen paralel bağlı reaktördür. TAR, SVK'nın bir alt grubudur. Sistemden çekilen reaktif güç kademeli

değişikliklerle yapılır; tetikleme açısı kontrolü olmayan tristörlerle bir grup paralel bağlı reaktörü anahtarlar. Sürekli olmayan bir kontrol süresince daha az maliyetli ve daha az kayıplı bir çözümdür [24].

*TAK(TSC)-tristör anahtarlama kondansatör:* Tristörün sıfır veya tam iletim halinde çalışmasıyla etkin reaktansı, kademeli biçimde değiştirilen paralel bağlı kondansatördür. Sisteme verilen reaktif güç kademeli değişikliklerle yapılır; tetikleme açısı kontrolü olmayan tristörlerle bir grup kondansatörü anahtarlar [24].

Paralel bağlı tristör anahtarlama reaktörlerden farklı olarak anahtarlama kondansatörler, değişken tetikleme açısı kontrolüyle sürekli olarak anahtarlama yapamazlar.

*SSK(STATCOM)-statik senkron kompanzatör:* AA elektrik sisteminin hat geriliminden bağımsız olarak çıkışındaki kapasitif veya endüktif akımı kontrol edebilen ve paralel bağlı statik VAR kompanzatörü gibi çalışan kontrolörlerdir [24].

Gerilim kaynaklı veya akım kaynaklı çevirici olarak tasarlanabilirler. Maliyetten dolayı gerilim kaynaklı çeviricinin kullanıldığı devre tercih edilir. DA kondansatör gerilimi, çevirici için gerekli olan gerilim kadar bir gerilime otomatik olarak ayarlanır ve bu kondansatör gerilimi, herhangi bir aa bara gerilimi için gerekli olan reaktif akım gereksinimini sağlamak için aa çıkış gerilimini kontrol eder. Aynı zamanda SSK, bir aktif filtre gibi davranıp sistem harmoniklerini de emer. SSK doğru akım tarafında, olası bir aktif güç kaynağı veya aktif güç içeren bir akımı sisteme verebilecek bir kaynak bulundurur.

*SSÜ(SSG)-statik senkron üretici:* Gerçek ve reaktif gücü bağımsız bir şekilde kontrol ederek değiş tokuş etmek amacıyla aa güç sistemine bağlanabilen kendinden yön değiştirmeli statik anahtarlı güç çeviricisi, uygun bir elektrik enerjisi kaynağından sağladığı gücü, ayarlanabilir çok fazlı çıkış gerilimi üretmede kullanır. SSÜ, gücün üretilmesini veya tüketilmesini sağlayan bir statik senkron kompanzatörle herhangi bir enerji kaynağı birleşimidir. SSÜ’de kullanılan enerji kaynağı bir pil, motor volanı (düzenteker), süper iletkenli mıknatıs, büyük bir da kondansatörü, doğrultucu veya çevirici olabilir. Gerilim kaynaklı bir çevirici için, enerji kaynağı, bir elektronik arabirim üzerinden kondansatörü yüklemeli ve gerekli kondansatör gerilimini sürdürmelidir [24].

*AEDS(BESS)-akümülatörlü enerji depolama sistemi:* Paralel bağlı kimyasal temelli enerji depolama sistemi kullanılarak gerilim kaynaklı çevirici, aa sisteminden çekeceği veya sisteme vereceği enerji miktarını hızlı bir şekilde ayarlayabilir. İletim sistemi uygulamalarında bu sistem güç açısından zayıf kalabilir. Geçici zaman kararlılığı için kısa süreli olarak yeterlidir. Çevirici ani olarak kendi MVA gücündeki değerleri sistemden çekebilir veya sisteme verebilir. Ayrıca aktif güç alış veriş yokken çevirici aküleri yüklemeye kullanılabilir [24].

*SİMEDS(SMES)-süper iletkenli manyetik enerji depolama sistemi:* Bir süper iletkenli elektromagnetik enerji deposu cihazı, içerdiği elektronik çeviriciler ile aa sistemindeki güç akışını dinamik olarak hızlıca kontrol eder. Yani sisteme etkin bir şekilde aktif veya reaktif akım verir veya sistemden çeker [24].

*SVÜT(SVG)-statik VAr üretici veya tüketici:* Elektrik enerji sisteminden kontrollü kapasitif veya endüktif akım çeken statik elektrik cihazı, elemanı ya da sistemidir. Genel olarak paralel bağlı, tristör kontrollü reaktörler ve tristör anahtarlama kondansatörleri içerirler [24].

Statik VAr kompanzatörü ve statik senkron kompanzatör birer statik VAr üreticileridir. Ancak bunlar çıkış güçlerini değiştiren uygun kontrol döngülerine sahiptirler ve özel kompanzasyon ihtiyaçlarını karşılamakta kullanılırlar.

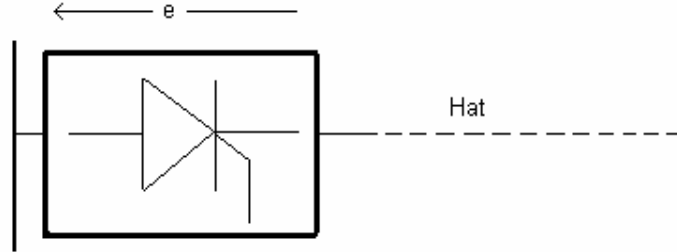
*SVS(SVS)-statik VAr sistemleri:* Çıkışları koordineli bir biçimde çalıştırılan farklı statik ve mekanik anahtarlama VAr kompanzatörlerinin bileşimidir [24].

*TKFD(TCBB)-tristör kontrollü frenleme direnci:* Bir enerji sisteminin kararlılığını kontrol etmeyi veya bir bozucu etki boyunca güç üretiminin ivmelenmesini minimumda tutmayı amaçlayan paralel bağlı tristör anahtarlama cihazlarıdır. Maliyet açısından bu cihazlar, tristör temelli tetikleme açısı kontrollü seçilmesi yerine tetikleme açısı kontrollü olmayan tristör anahtarlama tercih edilirler. Tetikleme açısı kontrollü olduğunda, sistemdeki düşük frekanslı salınımları bastırmada da kullanılabilirler [24].

### **2.3.3 Seri Bağlı EAAİS Kontrolörleri**

Seri bağlı kontrolörler de paralel bağlılar gibi değişken empedanslı, değişken kaynaklı veya bunların birleşimi olan kontrolörlerdir. Prensipte tüm seri kontrolörler, gerilimi hatta seri olarak verirler (Şekil 2.7). Değişken empedans hattan

akan akımla çarpıldığında hatta ilave edilen seri gerilime ulaşılır. Gerilim ile akım  $90^0$  faz farklı olur olmaz, seri kontrolör hatta değişken reaktif gücü verir veya hattan çeker. Diğer faz açısı durumlarında gerçek güç kullanımı da bilindiği üzere gerçekleştirilir [24].



**Şekil 2.7:** Seri EAAİS kontrolörü

*SSSK veya  $S^3K(SSSC)$ -statik senkron seri kompanzatör:* Harici bir elektrik enerji kaynağı olmadan, çıkış gerilimi hattan bağımsız olarak kontrol edilebilen, hat akımı ile  $90^0$  faz farklı olup hattaki gerilim düşümünü karşılamak için reaktif gücü kontrol eden ve dolayısıyla iletilen elektrik gücünü kontrol eden statik senkron bir üreteçtir. Hattaki rezistif gerilim düşümünü karşılama, gerçek güçteki ani yükselme ve alçalmaları karşılamaya ek olarak güç sisteminin dinamik davranışını iyileştirmek amacıyla geçici güç depolayan cihazlar da SSSK'ya entegre edilebilir [24].

Ana devresi gerilim kaynaklı çeviricidir. Hattın gerilimine göre küçük sayılabilecek gerilimleri seri olarak hat gerilimine ekler ve hatta bir transformatör üzerinden bağlıdır. Transformatörün birincil ve ikincil yanları arasında uygun bir yalıtım ile çeviricinin tümüyle topraktan yalıtımı sağlanmadıkça çevirici toprak potansiyelindedir. Transformatör çevirme oranı en ekonomik biçimde seçilir. Transformatörün birincil tarafındaki tüm hat akımı ikincil tarafta da çevirme oranıyla görülecektir ve çevirici hattan ayrılmadığı sürece hattaki tüm hatalı akımları da taşımak zorunda kalacaktır [1].

*HAGAK(IPFC)-hat arası güç akış kontrolörü:* Hatlardaki istenilen reaktif güç akışı dağılımını sürdürmek ve aa uçları arasındaki çift yönlü gerçek güç akışını kolaylaştırmak için ortak bir doğru akım barası ile iki veya daha çok SSSK'nın birbirine bağlandığı yapıdır. HAGAK'ın yapısı bir SSK'yı da içerecek şekilde düzenlenebilir ve paralel bir reaktif kompanzasyon da sağlanır [24].

*TKSK(TCSC)-tristör kontrollü seri kondansatör:* Düzgün, değişken ve kapasitif bir seri reaktans elde etmek için tristör kontrollü bir reaktöre paralel bağlı bir seri kondansatör ünitesidir. TKSK'nın yapısında kapıdan kesimli tristör yoktur. Seri kondansatörün karşısına, tristör kontrollü bir reaktör bağlanmıştır. Tristörün tetikleme açısı  $180^\circ$  olduğunda reaktör iletimde değildir ve sistem kondansatörün normal empedansını görmektedir. Tetikleme açısı  $180^\circ$ 'nin altına indiğinde kapasitif empedans artacaktır;  $90^\circ$  olduğunda ise reaktör tam olarak iletimde olup toplam empedans endüktif olacaktır. Bunun nedeni reaktör empedansının kondansatörünkinden yüksek olmasıdır.  $90^\circ$ 'lik tetikleme açısı hata akımının sınırlanmasına da yardımcı olur. TKSK daha iyi bir performans için farklı sayılarda ve boyutlarda kondansatörler ile donatılabilir [1].

*TASK(TSSC)-tristör anahtarlama seri kondansatör:* Seri kapasitif reaktansın kademeli kontrolünü sağlayan tristör anahtarlama bir reaktör ile paralel bağlı hatta seri bir kondansatör ünitesidir. Kapasitif empedansın sürekli kontrolü yerine reaktörler tetikleme açısının  $90^\circ$ 'den  $180^\circ$ 'ye kadar anahtarlama ile kademeli kontrol sağlar. Tetikleme açısı kontrolü olmadan daha az maliyetli ve kayıplı yapılabilir. Bazı tristör üniteleri kontrolsüz olurken birisi tetikleme açısı kontrollü olabilir [1].

*TKSR(TCSR)-tristör kontrollü seri reaktör:* Düzgün, değişken ve endüktif bir seri reaktans elde etmek için tristör kontrollü bir reaktöre paralel bağlı bir seri reaktör ünitesidir. Tetikleme açısı  $180^\circ$  iken iletim durur ve kontrolsüz reaktör hata akımı sınırlayıcısı olarak görev yapar.  $180^\circ$ 'nin altına düştüğünde ise açı  $90^\circ$ 'ye gelene kadar net endüktans azalır. Bu aralıkta sistem iki paralel reaktörden oluşur. TKSR tek bir ünitelerden oluşabileceği gibi birçok küçük ünitenin seri bağlanmasıyla da yapılabilir [25].

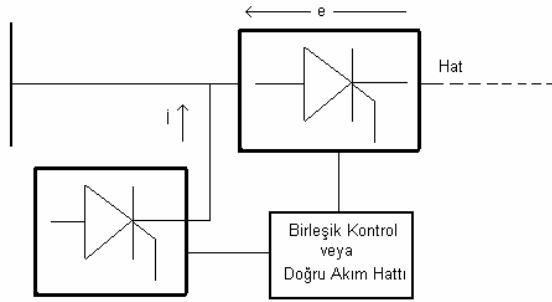
*TASR(TSSR)-tristör anahtarlama seri reaktör:* Seri endüktif reaktansın kademeli kontrolünü sağlayan tristör anahtarlama bir reaktör ile paralel bağlı hatta seri bir reaktör ünitesidir. Tetikleme açısı kontrolü olmadan tristörün kapalı veya açık olmasına göre kademeli olarak reaktörün (veya reaktörlerin) devreye alınmasından ibarettir [1].

*NGH-ASRB(NGH-SSR damper)-Hingorani'nin alt-senkron rezonans bastırıcısı:* Sistemdeki alt senkron rezonanslarda generatör türbininde mekanik parçalar (türbin

mili gibi) zarar görebilmekte hatta parçalanmaktadır (Southern California Edison Co., 1970s). Rezonans bastırıcı, bir kondansatörün karşısına birbirleri ile seri bağlı küçük bir endüktans, direnç ve bir tristörden oluşur [11].

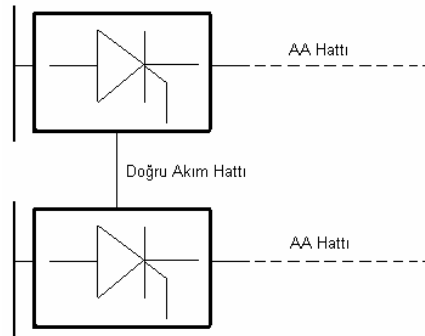
#### 2.3.4 Seri ve Paralel Birleşik Yapılı EAAİS Kontrolörleri

Ayrı seri ve paralel kontrolörlerin birleşimidir. Birbirlerine göre ayarlanmış bir biçimde kontrol edilirler. Prensipde birleşik seri ve paralel kontrolörler, paralel kısmı ile sisteme akım verirken seri kısmı ile hatta gerilim verirler (Şekil 2.8). Seri ve paralel kontrolörler birleştirilmiş yapıda ise aralarında gerçek güç transferi yapan bir güç hattı vardır.



**Şekil 2.8:** Birleşik kontrollü veya birleştirilmiş seri-paralel kontrolör

Diğer birleşik yapılı sistem, ayrı seri kontrolörlerin birleşimidir. Birden fazla sayıda iletim hattına bağlı olup birbirlerine göre ayarlanmış bir şekilde kontrol edilirler. Seri kontrolörler aralarındaki doğru akım hattı ile gerçek güç transferini gerçekleştirirken her hat için bağımsız olarak seri reaktif güç kompanzasyonunu da yaparlar (Şekil 2.9). Birleşik seri-seri bağlı kontrolörün gerçek güç transfer kapasitesi aktif ve reaktif güç akışları arasındaki dengeyi olası kılar. Buradaki birleşik sözcüğü, seri kontrolör çeviricilerinin da uçlarının birbirlerine bağlanması anlamındadır [1].



**Şekil 2.9:** Birleştirilmiş seri-seri kontrolör

*BGAK(UPFC)-birleştirilmiş güç akışı kontrolörü:* SSK'nın hatta paralel bağlı çıkış uçları ile SSSK'nın hatta seri bağlı çıkış uçları arasında çift yönlü gerçek güç akışına izin veren ve ortak bir doğru akım barası ile birbirlerine bağlanarak birleştirilmiş bir kontrolördür. Açısal sınırlama olmadan hatta gerilim verebilen BGAK, iletim hattı empedansını, hat gerilimini ve açısını veya gerçek ve reaktif güç akışını kontrol edebilir. Aynı zamanda bağımsız olarak paralel reaktif kompanzasyon da sağlayabilir. BGAK'ın etkinliğini arttırmak için da hattına ek bir depolama elemanı olarak süper iletken mıknatıs bağlanabilir. Gerçek güç alışverişi dış bir kaynaktan kontrol edilirse, sistem dinamikleri açısından daha etkin bir kontrol yapılmış olur [24].

*TKFAR(TCPST-TCPAR)-tristör kontrollü faz açısı regülatörü:* Hızlı değişen bir faz açısı sağlamak için tristörleri anahtarlama suretiyle ayar yapan faz ötelemeli transformatördür. Genelde faz öteleme, hatta seri 90°'lik bir gerilim vektörü ilavesiyle sağlanır. Bu vektör, diğer iki faza paralel bağlı bir transformatör ile elde edilir. Bu dik açılı seri gerilim, bir güç elektroniği devresi ile değişken yapılır. Bu devre, gerilimi ters olarak da tutup diğer yönde de faz ötelemesine olanak sağlar [24].

*FAGK(IPC)-faz arası güç kontrolörü:* Aktif ve reaktif güç desteği veren seri bağlı bir kontrolördür. Endüktif ve kapasitif dalları ile her faz için ayrı ayrı ötelenmiş gerilim sağlar. Aktif ve reaktif güç kontrolü ayarlı faz ötelemesinden veya dal empedansından bağımsız olarak mekanik veya elektronik anahtarlar ile ayar edilebilir. Endüktif ve kapasitif empedans konjuge çifti (eş empedans) halindeyse FAGK'ın her ucu, diğer uç gerilimlerinden bağımsız olarak bir pasif akım kaynağıdır [24].

### **2.3.5 Diğer EAAİS Kontrolörleri**

*TKGS(TCVL)-tristör kontrollü gerilim sınırlayıcı:* Geçici hal şartları boyunca uçlarındaki gerilimi sınırlamakta kullanılan tristör anahtarlama metal oksit varistördür (MOV). Boşluksuz bir tutucu ile seri bağlı bir tristörden meydana gelir. Genelde TKGS normal bir boşluksuz tutucudan daha güçlüdür ve dinamik aşırı gerilimleri bastırır [1].

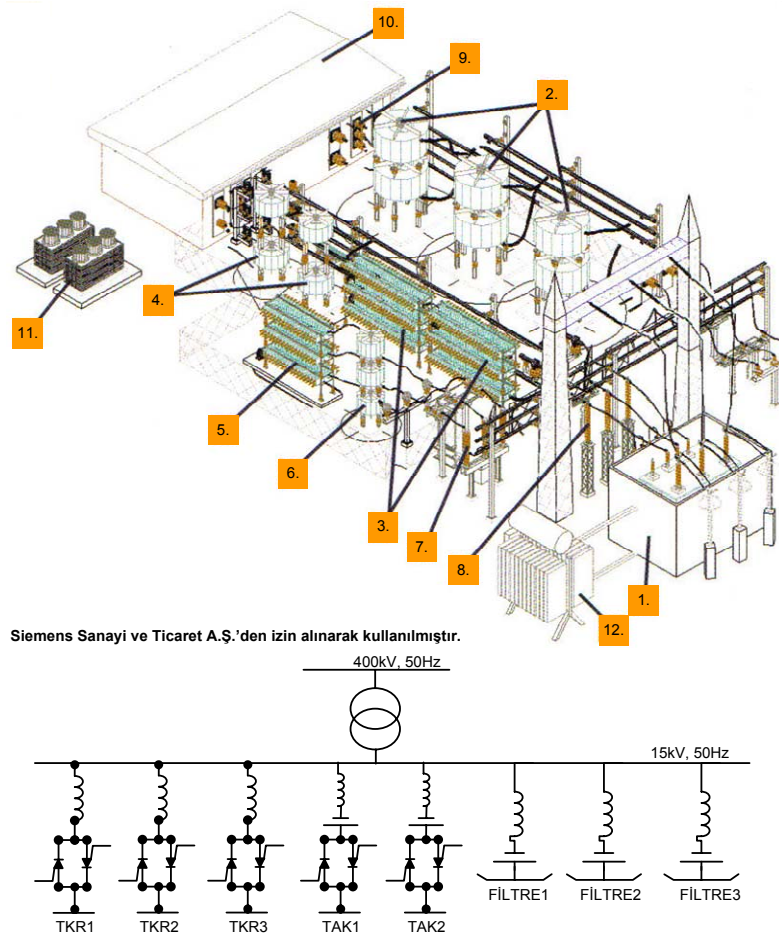
*TKGR(TCVR)-tristör kontrollü gerilim regülatörü:* Sürekli kontrol ile değişken bir hat gerilimini tristör kontrollü bir transformatör ile sağlar. Pratik olarak tristör

kontrollü kademe değiştiricili transformatörler veya tristör kontrollü aa-aa çeviriciler bu türdendir [1].

## 2.4 Uygulanmış SVK Projesinin Yerleşim Planı

Uygulanmış bir SVK projesinin yerleşim planı ve tek kutuplu şeması Şekil 2.10'da verilmiştir [26]. TKR, TAK ve filtre grubundan oluşan paralel kompanzasyon ünitesinin tipik gösteriminde iletim hattına bağlanan transformatör, kontrolör, kontrol binası ve iletim hattı elemanları yerleşimleriyle görülmektedir.

1. SVK transformatörü
2. TKR reaktörü
3. TAK kondansatörü
4. TAK reaktörü
5. Filtre kondansatörü
6. Filtre reaktörü
7. Kesici
8. Parafudr (tutucu)
9. İzolatör
10. Anahtarlama ve kontrol binası
11. Anahtar soğutma
12. Transformatör soğutma



Şekil 2.10: Uygulanmış SVK projesinin yerleşim planı ve tek kutuplu şeması [26]

### **3. ESNEK ALTERNATİF AKIM İLETİM SİSTEMLERİ KONTROLÖRLERİNİN YARARLARI**

#### **3.1 Giriş**

İletim sistemleri giderek kendi ısı ve kararlılık sınırlarına yaklaşırken iletilen ve dağıtılan gücün kalitesine her zaman olduğundan daha fazla önem verilmektedir. Finansal güçler ve pazar ise her zaman olduğundan daha fazla optimal ve kazançlı bir üretim, iletim ve dağıtım talep etmektedir [8]. Bu talepler karşısında enerji sistemlerinin kontrolü bölüm 2.1.3'te verilen kısıtlamaların kaldırılması veya genişletilmesini sağlar. Burada bahsedilen kontrol, bölüm 2.1.2'deki geleneksel kontrol mekanizmalarının eksiklerini ortadan kaldıran ve yariletken teknolojisine dayanan EAAİS cihazlarının kullanımıdır. Olası pek çok yararları vardır.

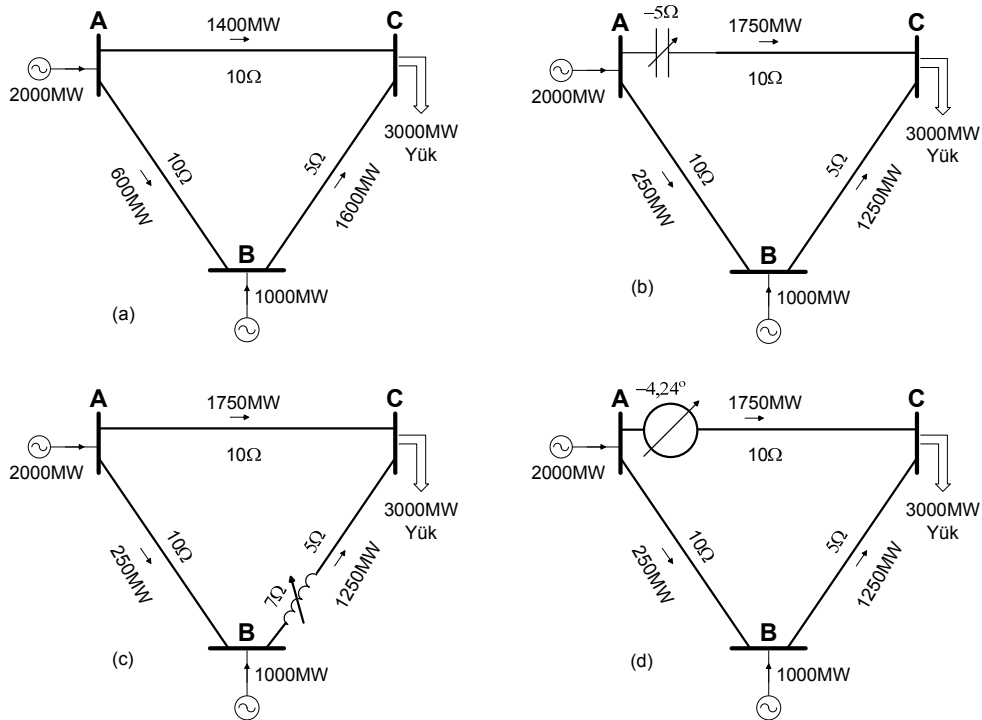
- Etkin güç akışı kontrolü
- İletim hatlarının daha fazla yüklenebilmesi ve daha verimli kullanılması
- Artan sistem güvenliği ve güvenilirliği
- Reaktif güç akışında azalma
- Gelişmiş sistem kararlılığı
  - o Gerilim kararlılığı
  - o Sürekli durum kararlılığı
  - o Dinamik kararlılık
  - o Geçici zaman kararlılığı
- Yeni üretim birimlerinin eklenmesinde esneklik
- Yeni iletim hatlarına olan ihtiyaçta azalma
- Döngüsel akışlarda azalma

EAAİS kontrolörlerinin faydaları oldukça fazladır. Gerçekten de bunların biri veya birkaçı bile EAAİS'nin seçimini haklı çıkarmaktadır [1, 8].

Bugünkü güç sistemlerinde gerçek güç akışı, artan üretim sahalarından açık veren üretim sahalarına doğru, iletim hat empedansının karar verdiği değişken bir reaktif güç akışıyla ve tüm paralel yollardan olmaktadır. Hat yükü ısı sınırlara ulaştığında, kabul edilemez dinamik şartlarda veya sürekli hal gerilim şartlarında, en yüksek iletim sınırlarına ulaşılmış olur. EAAİS teknolojisi bu sınırların birer birer üstesinden gelir. Bunu en az yatırımla ve gerekli en yüksek iletim kapasitesini sağlayarak yapar [9].

### 3.2 Güç Akışı Kontrolü

Güç akış kontrolünün kullanımı, sistemdeki bir daralmayı takip etme, şebekenin kendi ihtiyaçlarını kendisinin karşılaması, optimum güç akışının sağlanması, acil durumlarda devamlılığın sağlanması ya da bunların birleşimi amaçlı olabilir [1].



**Şekil 3.1:** Gözlü şebekede yük akışı: (a) sistem şeması; (b) TKSK'lı sistem şeması; (c) TKSR'li sistem şeması; (d) TKFAR'lı sistem şeması [11]

Güç akışının EAAİS cihazlarıyla kontrolü, Hingorani'nin 1993 yılında verdiği tek gözlü bir ağ şebekede basitçe şöyledir [11]:

Ek A'da verdiğimiz (A.1)-(A.15) denklemler ışığında AB, BC ve AC hatları sürekli halde sırasıyla 1000MW, 1250MW ve 2000MW kapasiteye sahiptirler. A

barasındaki generatör 2000MW ve B barasındaki generatör 1000MW anma değerinde çalışırken yük merkezine 3000MW dağıtılmaktadır. Şekil 3.1(a)'da hat empedansları gösterildiği üzere hat yükleri 600MW, 1600MW ve 1400MW olmuştur. BC hattında aşırı yüklenme meydana gelmiştir. Denklem (A.2)-(A.5)'te gösterildiği üzere güç, hattın ısı sınırlarından, daralmalarından ve hatların birbirleri ile olan ilişkisinden bağımsız olarak hat empedansına direkt bağlıdır.

AC hattına senkron frekansta  $-5\Omega$  reaktansa sahip bir kondansatör ilave edilerek (Şekil3.1(b)) hattın empedansı  $10\Omega$ 'dan  $5\Omega$ 'a düşürülür. Buna göre hat yükleri 250MW, 1250MW ve 1750MW olarak değişir. Seri kondansatör ayarlanabilir; termal sınırlara, hatların birbirleri ile olan ilişkisine ve daralmalara göre istenilen değere çekilebilir. Bölüm 2.1.2 ve 2.2.1'de anlatılanlar ışığında seri kondansatör, sonunda generatörün senkronizmadan düşerek tüm sistemin çöküşüne neden olabilecek bir olaya imkân tanımamak için tristör kontrollü seçilir. Böylece herhangi bir alt-senkron rezonans şartında ve güç akışında alçak frekanslı salınımlarda iletim sisteminin sürekli hal şartlarında kalmasını sağlar.

Benzer bir çözüm BC hattına  $7\Omega$ 'luk seri bir reaktör eklenip empedans arttırılarak da sağlanabilir. Hat yükleri Şekil 3.1(c)'deki gibi olacaktır. İstenmeyen salınımlara izin vermemek için seri reaktör tristör kontrollü seçilir. Bir başka çözüm ise AC hattına tristör kontrollü faz açısı regülâtörü eklemektir. Bu çözüm her üç hatta da koyulacak seri kondansatör veya reaktör yerine kullanılabilir (Şekil 3.1(d)). Tristör kontrollü faz açısı regülâtörü alt-senkron rezonansa neden olmaz. Toplam faz açısı  $8,5^\circ$ 'den  $4,2^\circ$ 'ye düşürülür ve istenilen değerler sağlanır.

Çözüm olarak seçilen EAAİS kontrolörleri ikinci kuşak (iki tristör temelli sistemler) cihazlardır ve henüz gelişimleri sürmektedir. Güç akışı kontrolü için üçüncü kuşak EAAİS kontrolörlerinin kullanımı daha uygundur. Gücün daha fazla kontrolü, istenilen iletim rotalarının kullanılmasını sağlayacaktır.

Güç ve kararlılık kontrolünde en hayati nokta empedansın ve faz açısının kontrolüdür. İletim hattında seri empedans genellikle %90 endüktif, %5-10 civarlarında da rezistiftir. Sürekli halde empedans, hatta seri TKSK ve TKSR konularak kontrol edilir. Kondansatörün negatif empedansından ötürü, değişken seri kapasite, hattın doğal pozitif empedansına eklenen değişken bir negatif empedans olarak adlandırılır [11].

### 3.3 Güç Sistemleri Güvenliği Ve Kararlılığı

#### 3.3.1 Giriş

Sistem güvenliği, sistemin geçici kararlılık sınırını yükselterek, kısa devre akımını ve aşırı yüklenmeleri sınırlayarak, kademeli karartmayı yöneterek ve sistemdeki ve makinelerdeki elektromekaniksel salınımları bastırarak arttırılabilir [1]. EAAİS, iletim şebekesinin bütün olarak çalışmasını yüksek gerilim kararlılığı ve güç akışı kontrolü ile destekler; faz açısı, gerilim, akım, seri ve paralel empedans gibi hat parametrelerini kontrol ederek aşırı yüklü hatlardaki yük akışını azaltır, şebeke kararlılığını geliştirir; hattı anma kapasitesine yakın değerlerde yüklerken bara gerilimini istenen seviyede tutarak beklenmedik olaylardaki güç sistemi güvenliğini sağlar [10, 27].

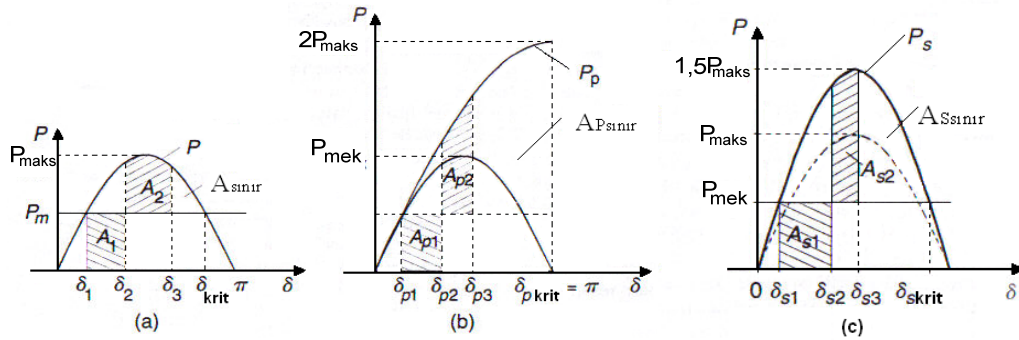
#### 3.3.2 Geçici Hal Kararlılığı Ve Dinamik Kararlılık

Geçici hal kararlılığı güç sisteminin tümünün kontrolü açısından önemli bir kavramdır. Şiddetli bir bozulmayla karşılaşıldığında güç sisteminin senkronizmayı koruma yeteneğidir. Geçici rejimde kilit nokta generatörün senkronizmayı kaybetmemesi ve salınımların hızla bastırılmasıdır. Geçici hal kararlılığı ile, bozucu etkiden sonraki bir kaç saniyelik süre için sistemin dinamik analizi yapılır. Şebekede bir arıza meydana geldiğinde, generatörün girişindeki mekanik güç rotoru daha hızlı döndürür ve rotorun kinetik enerjisinin artmasına yol açar. Böylece generatörün yüklenme açısı  $\delta$  artacaktır [28]. Sistemin geçici kararlılık açısından kararlı olup olmadığına  $\delta$  açısının zamana göre değişimine bakılarak karar verilir [5]. Kayıplar ihmal edilerek generatörün çıkışındaki elektriksel güç ifadesi şöyledir,

$$P_{elk} = \frac{V^2}{X} \sin \delta \quad (3.1)$$

Buna göre bir EAAİS kontrolörü,  $P_{elk}$ 'yi arttırarak yüklenme açısını küçük değişimler içinde tutar; generatörün rotorundaki kinetik enerjiyi bu sayede tüketerek geçici kararlılığı geliştirir.  $P_{elk}$ 'daki artış güç-yüklenme açısı ( $P$ - $\delta$ ) eğrisini yükselterek elde edilir. Bunun için hat üzerinde orta nokta kompanzasyonu, seri kondansatör ilavesi ve faz açısı öteleme yöntemleri EAAİS cihazları ile yapılır [5, 11, 13].

Şekil 3.2’de iki makineli bir sistem için kompanze edilmemiş (Şekil 3.2(a)), paralel olarak kompanze edilmiş (Şekil 3.2(b)) ve seri kompanzasyon uygulandığı durumlarda (Şekil 3.2(c)) geçici hal kararlılığı görülmektedir. Hata boyunca transfer edilen elektriksel güç ( $P_{elk}$ ) sıfırken giriş mekanik gücü ( $P_{mek}$ ) sabittir. Bu nedenle generatör ivmelenerek sürekli haldeki faz açısı  $\delta_1$  ( $\delta_{P1}, \delta_{S1}$ ) değerinden,  $\delta_2$  ( $\delta_{P2}, \delta_{S2}$ ) değerine gelir.  $A_1$  ( $A_{P1}, A_{S1}$ ) alanı ivmelenme enerjisini temsil eder. Hata bittikten sonra elektriksel güç, mekanik güçten fazladır ve generatör yavaşlamaya başlar. Biriktirilen kinetik enerji sistem dengeye gelene kadar artar. Bu denge enerjisi  $A_1$  ( $A_{P1}, A_{S1}$ ) alanı ile  $A_2$  ( $A_{P2}, A_{S2}$ ) alanının oluşturduğu bölge ile temsil edilir ve bu arada salınım yapar. En yüksek salınım açısı  $\delta_3$  ( $\delta_{P3}, \delta_{S3}$ ) değeridir.  $P$  &  $\delta$ , sabit  $P_m$  ve  $\delta_3$  ( $\delta_{P3}, \delta_{S3}$ ) -  $\delta_{krit}$  ( $\delta_{Pkrit}, \delta_{Skrit}$ ) arasında kalan alan veya  $A_{sınır}$  ( $A_{Psınır}, A_{Ssınır}$ ) ile gösterilen bölge geçici kararlılık çizgisine karar vermektedir [1].



**Şekil 3.2:** İki makineli sistemde geçici hal kararsızlılığı: (a) kompanzasyon yokken, (b) bir paralel kompanzatör varken, (c) bir seri kompanzatör varken [1]

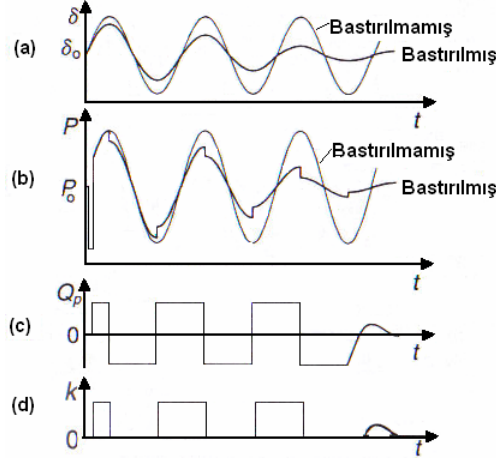
Buna göre paralel ve seri kompanzatörlerin kullanıldığı durumda geçici kararlılık çizgisi önemli bir gelişim göstermektedir. Paralel kompanzatör, kararlılık çizgisini oldukça artırırken, kompanzasyonsuz durumda yeterli kararlılık çizgisine sahip bir sistemde bu sınırı azaltmaksızın güç transfer kapasitesine katkıda bulunur. Seri kompanzatör yine kararlılık çizgisini önemli ölçüde artırırken hattın seri empedansını da azaltır. Burada kararlılık çizgisini seri kompanzasyonun derecesi belirler. Teorik olarak %100 olabilirken paralel hatlar arasındaki yük paylaşımı, hata akımının yüksekliği gibi nedenlerden ötürü %75’i aşmaz. Alt senkron endişelerden dolayı sıklıkla %30-40 ile sınırlandırılmıştır.

Birkaç saniyelik geçici olay süresinden sonraki birkaç dakikalık sürede sistemin bozucu etkiye cevabı “dinamik hal kararlılığı” olarak adlandırılır. Generatörün küçük

bozulmalara cevabı yüklenme açısındaki salınımdır. Bu salınım güç sisteminde de salınımlara yol açacaktır. Normal şartlar altında da sistem salınım yapar. Bu salınımlar senkronizmanın kaybedilmesine yol açabilir. Ayrıca sistemdeki elemanların bozulmasına ve iletim kapasitesinin düşmesine yol açar. Eğer dinamik sistem kararlı ise, salınımların genlikleri giderek küçülecek ve sistem birkaç salınımdan sonra sürekli çalışma koşullarına oturacaktır. Enerji dengesizliğinin söz konusu olduğu bu bir kaç dakikalık zaman, EAAİS cihazlarının yüksek cevap hızı ile kısaltılır ve bu sayede sistemdeki salınımlar bastırılır [5, 11, 13].

Bozucu etkiye uğramış bir makinenin hızlanan ve yavaşlayan salınımlarını gidermek için uygulanan paralel veya seri kompanzasyon gerekli şekilde ayarlanmalıdır. Salınım yapan generatör hızlandıkça  $\delta$  artar ( $d\delta/dt > 0$ ). Transfer edilen elektriksel güç, mekanik güçteki aşırılığı karşılamak için arttırılmalıdır. Salınan generatörün yavaşladığı durumda ise  $\delta$  azalır ( $d\delta/dt < 0$ ); elektriksel güç, yetersiz mekanik gücü dengelemek için azaltılmalıdır [1].

Şekil 3.3(a) ve (b)'de bastırılmış ve bastırılmamış durumlarda,  $\delta_0$  ve  $P_0$  sürekli hal değerleri olmak üzere yüklenme açısının ( $\delta$ ) ve elektriksel gücün ( $P$ ) sürekli hal değerleri etrafında salındığını görüyoruz. Bastırılmış durumda salınımlar başlangıç değerlerine oturmaktadır. Şekil 3.3(c)'de paralel bağlı bir kompanzatörün reaktif güç çıkışı görülmektedir. Kompanzatörün kapasitif çıkışı hat gerilimini ve transfer edilen gücü,  $d\delta/dt > 0$  olduğunda arttırır;  $d\delta/dt < 0$  olduğunda azaltır. Şekil 3.3(d)'de seri bağlı kompanzatörün seri kapasitif kompanzasyonunun ( $k$ ) değişen derecesi görülmektedir.  $d\delta/dt > 0$  olduğunda  $k$  değeri en yüksek değerini alırken  $d\delta/dt < 0$  olduğunda  $k$  değeri sıfır değerini almaktadır.  $k$  en yüksek değerini alınca etkin hat empedansı en küçük değerini alır; diğer bir deyişle transfer edilen elektriksel güç en yüksek değerini alır.  $k$  sıfır olduğunda etkin hat empedansı en yüksek değerindedir; transfer edilen elektriksel güç en küçük değerini alır.



**Şekil 3.3:** Güç salınımlarının bastırılması: (a) generatör açısı, (b) transfer edilen güç, (c) paralel kompanzatorün reaktif güç çıkışı, (d) seri kompanzasyon derecesi [1]

Geçici olayları bastırmada Hingorani'nin geliştirdiği ASRB hem geçici kararlılık açısından hem de dinamik kararlılık açısından yeterli bir çözüm getirir [19].

### 3.3.3 Sürekli Hal Kararlılığı

#### 3.3.3.1 Transfer Kapasitesi Ve Termal Sınırlar

Farklı kararlılık tipleri arasında sürekli hal kararlılığı, yük ve üretimdeki artış gibi yavaş ve kademeli değişiklikleri içerir. Bu açıdan sürekli hal kararlılığı sisteme yeni yapılacak ilaveler ve otomatik kontrol cihazlarının belirlenmesinde çok önemlidir. Sürekli hal kararlılığı, büyük ölçüde enerji üretim ve iletim kapasitesine ve otomatik kontrol elemanlarının etkinliğine bağlıdır [5]. Elektrik enerjisinin iletim hatları arasındaki alışverişi hızla artmakta ve bu durum hatların termal sınırlarına yakın seviyelerde yüklenmesini gerektirmektedir (bakınız bölüm 2.2.1.3) [1, 29].

Döngüsel akış, sistemin transfer kapasitesini düşüren önemli bir etmendir. Dolayısıyla sistemin termal sınırını düşürür. TKFAR ve BGAK gibi EAAİS cihazları döngüsel akışı önleme yeteneğine sahiptirler; bu sayede termal sınırları yükseltip sistem güvenliğini artırırlar [30].

Tablo 3.1'de çeşitli EAAİS kontrolörlerinin, hattın güç transfer kapasitesini artırma yöntemleri verilmiştir.

**Tablo 3.1:** Termal sınır ve döngüsel akış probleminde EAAİS cihazları [1]

| Problem                          | Çözüm                                                                      | EAAİS Cihazı              |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| Termal Sınırlar:                 |                                                                            |                           |
| İletimde aşırı yüklenme          | Aşırı yükün azaltılması                                                    | TKSK,SSSK,BGAK,FAGK,TKFAR |
| Paralel hatların anahtarlanması  | Devre yükünün sınırlanması                                                 | TKSK,SSSK,BGAK,TKFAR,FAGK |
| Döngüsel Akış:                   |                                                                            |                           |
| Paralel hatlarda yük paylaşımı   | Seri reaktansın ayarlanması                                                | FAGK,SSSK,BGAK,TKSK,TKFAR |
| Hata sonrası yük akışı paylaşımı | Şebekenin tekrardan planlanması veya termal sınırların tekrardan çizilmesi | FAGK,TCSC,SSSK,BGAK,TKFAR |
| Ters yönde yük akışı             | Faz açısının ayarlanması                                                   | FAGK,SSSK,BGAK,TKFAR      |

### 3.3.3.2 Gerilim Kararlılığı Ve Reaktif Güç Kontrolü

Gerilim kararlılığı, iletim hatlarının daha fazla yüklenebilirliği açısından önemli bir parametredir. Gerilimde kararsızlık, yoğun yüklerin bulunduğu ve yetersiz dinamik reaktif kompanzasyona sahip yük merkezlerinin doğal bir özelliğidir. İletim sisteminin sonundaki alıcı uçta kapasitif reaktif güç desteğinin zayıf olması durumunda şebeke giderek zayıflayacak ve sonunda gerilim çökmeleri görülecektir. Ayrıca gerilim kararlılığı, dağıtım sistemlerindeki otomatik kademe değiştiricili transformatörlerin kullanıcının ihtiyacı olan gerilimi sağlamak için hattın yüklenebilirliğini hesaba katmadan yaptığı müdahaleler ile bozulmaktadır. Bu nedenle alıcı noktadaki gerilimi kararlı kılabilmek için statik VAR kompanzatörleri sıklıkla kullanılır. Geleneksel SVK'lar reaktif güç dengesini sağlayarak gerilimi destekler ve hattın yüklenebilirliğini artırır. EAAİS cihazlarının sağladığı ilk avantaj, yalnızca devreye girip çıkan anahtarlamalı reaktörlere karşılık olarak kompanzasyon sonsuz süreli olarak değişmektedir. İkinci avantajı ise kompanzasyon yüksek hızda değişir. Bu iki avantaj gerilimin sürekli ve geçici haldeki kararlılığı açısından önemli bir üstünlük getirir [4, 13].

Gerilimde çökmenin meydana geldiği nokta, sistemin en yüksek yüklenme noktasıdır [6]. Buna göre çökme noktasının kararlılık sınırları dahilinde artırılması ile güç

iletimi kapasitesi arttırılır. Ek olarak reaktif güç akışındaki azalma hatların daha fazla aktif güç taşımaya izin verir [1].

Tablo 3.2’de reaktif güç dengesini ayarlayarak hat gerilim sınırlarına katkıda bulunan kompanzatörler görülmektedir.

**Tablo 3.2:** Gerilim kontrolü probleminde EAAİS cihazları [1]

| Problem                          | Çözüm                                                 | EAAİS Cihazı  |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------|
| Gerilim Sınırları:               |                                                       |               |
| Ağır yükte düşük gerilim         | Hatta reaktif güç vermek                              | SSK, SVK      |
| Hafif yükte yüksek gerilim       | Hattan reaktif güç çekmek                             | SSK, SVK, TKR |
| Kesintiyi izleyen yüksek gerilim | Hattan reaktif güç çekmek ve aşırı yüklenmeyi önlemek | SSK, SVK, TKR |
| Kesintiyi izleyen düşük gerilim  | Hatta reaktif güç vermek, aşırı yüklenmeyi önlemek    | SSK, SVK      |

### 3.4 Diğer Yararları

EAAİS cihazları, varolan iletim hatlarının yüklenme kapasitesinde sağladığı artış ile ilave hatların eklenmesine olan gereği ortadan kaldırır. Yeni iletim hatlarının kurulması beraberinde çevresel sorunlarda getirir. Belirlenen rota üzerinde ciddi bir çevresel yıkım söz konusudur. Yeni hatların inşa edilme süresine karşılık olarak 12-18 ay gibi çok daha kısa sürede tamamlanıp devreye alınırlar. Daha da önemlisi var olan enerji istasyonlarında kurulabilmeleridir, böylece yeni özel alanların kamulaştırılmasına gerek kalmaz. Bu avantajlar en fazla hızla endüstrinin geliştiği ve enerji yoğunluğunun arttığı bölgelerde önem kazanmaktadır [10, 13, 31].

EAAİS cihazları var olan şebekelere kesintilere neden olmadan kolayca adapte edilebilir. Yeni enerji üretim birimlerinin şebekeye eklenmesinde kolaylık sağlarlar [8].

Yeni iletim hatlarının inşası, kamulaştırma bedelleri, kurulum süresi, devreye alma süreci, çevresel yıkımlar yüksek maliyetler çıkartmaktadır. Enerji iletim sistemindeki problemlerin EAAİS cihazları ile çözülmesi halinde önemli ölçüde tasarruf sağlanır.

Bu da kullanıcıya satılan enerjinin de birim fiyatında bir azalmaya imkan tanır. Bu durumda EAAİS cihazları alternatif yöntemlere göre enerji sistemlerindeki problemleri çözmede en ekonomik yoldur [13].

### **3.5 Farklı Sınıflardaki EAAİS Kontrolörlerinin Karşılaştırılması**

Seri bağlı kontrolörlerinin hat geriliminin ve dolayısıyla akım-güç akışının sürdürülmesindeki etkisi önemlidir. Eğer amaç güç akışının kontrolü ve sistemdeki salınımları bastırmaysa, seri bağlı kontrolörler paralel bağlılara göre birkaç kat fazla güce sahiptirler. Diğer taraftan paralel bağlı kontrolörler, akım kaynağı gibi davranıp hatta akım verebilirler veya hattan akım çekebilirler. Bu nedenle paralel kontrolörler, reaktif akımın hatta verildiği bağlantı noktası civarında gerilim kontrolü açısından iyi bir çözümken, aktif ve reaktif akımın birlikte hatta verildiği noktada daha etkin bir gerilim kontrolü ve gerilim salınımlarını bastırma sağlarlar.

Ancak bu durum seri bağlıların hat gerilimini karşılamada kullanılmayacağı anlamına gelmemektedir. Tüm bunların yanında düzensiz olarak değişen gerilim, generatörlerin, transformatörlerin ve hatların empedansları üzerinde yüksek oranda gerilim düşümüne neden olur. Bu yüzden seri EAAİS kontrolörleri gerilim profilini geliştirmede en az maliyetli seçenek olabilir. Ama paralel kontrolörler, alt-istasyon baralarında gerilim profilinin sürdürülmesi açısından daha etkilidir ve önemli bir avantajı da bağlı olduğu baraya bağlanmış hatlardan bağımsız olarak hizmet vermeleridir.

Seri bağlı EAAİS cihazları hattın etkin empedansını azaltması sonucu, reaktif güç kayıplarını azaltır; en yüksek güç transfer sınırını artırır; geçici ve sürekli hal kararlılığını geliştirir ve hat üzerindeki gerilim regülasyonunu düzeltir [32].

Seri bağlılara göre gerekli MVA değerleri açısından daha yüksek seviyelere çıkan paralel bağlı kontrolörler güç akışı üzerinde kontrol sağlayamazlar.

Buna göre sürekli hal kararlılığına, seri bağlılar hattın termal sınırlarında artma ve hatlar arasındaki döngüsel akışlarda azalma sağlayarak, paralel bağlılar sistemin gerilim kararlılığını arttırarak destek verirler.

Diğer bir açıdan seri bağlı kontrolörler, sistemdeki beklenmedik olaylarda ve dinamik aşırı gerilimlerde kısa devre akımını sınırlamakta kullanılabilir ve hata

akımı çok yükseldiğinde metal oksit tutucular ile korunabilirler. Ancak, dinamik zorlanmaları karşılayacak anma değerlerine sahip olmaları gerekir.

Yukarıdaki karşılaştırma bizi seri ve paralel cihazların birleşimi bir yapının gerilim ve güç akışı kontrolü açısından çok daha etkin bir çözüm ortaya koyacağını göstermiştir. Bu birleşik yapılar reaktif güç akışı kontrolü gibi ek yararlar da sağlayacaktır.

EAAİS kontrolörlerinde kapıdan kesimli tristörlerin kullanımı aktif ve reaktif güç alışverişine imkan vererek daha fazla avantaj sağlar. Kontrolörlerin sadece reaktif güç alışverişi yapması durumunda doğru akım barası tarafında küçük bir depolama cihazı yeterli olurken, aktif güç kontrolü de istenildiğinde, çevirici için gerekli da kaynağı daha büyük olmalıdır. Bu kaynak çeviriciye kısa süreli (ana frekansın birkaç on döngülük bir zamanında) bağımsız bir kontrol imkanı tanır. Dışarıdan çeviricinin da yanına kondansatörler, aküler veya süper iletkenli mıknatıslar elektronik bir ara yüz üzerinden bağlanabilir. Ancak bu eklentiler EAAİS teknolojisinin boyutlarını arttıracaktır.

EAAİS cihazına eklenecek bir harici depolama elemanı kontrol açısından son derece önemlidir. Sistem dinamiklerinin kontrolü açısından daha etkili bir kontrol sağlar. Ayrıca çevirici temelli kontrolörlerde yüksek darbe sayılı darbe genişlik modülasyonunun kullanılması, sisteme verilen düşük dereceli harmonikleri azaltmada etkili bir çözümdür. Böylece cihaz bir aktif filtre gibi davranabilir. Tüm EAAİS kontrolörlerinin bölüm 3'te verdiğimiz yararlar açısından kontrol özellikleri toplu halde Tablo 3.3'te verilmiştir [9].

**Tablo 3.3: EAAİS Kontrolörlerinin Kontrol Özellikleri [9]**

| <b>EAAİS Kontrolörleri</b>                                                                                                                         | <b>Kontrol Özellikleri</b>                                                                                                                                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SSK<br>Statik Senkron Kompanzatör                                                                                                                  | Gerilim kontrolü, Var kompanzasyonu, salınımları bastırma, gerilim kararlılığı                                                                                    |
| SSK+AEDS veya SMED<br>Statik Senkron Kompanzatör ve Akümülatörlü Enerji Depolama Sistemi veya Süper İletkenli Manyetik Enerji Depolama Sistemi     | Gerilim kontrolü, Var kompanzasyonu, salınımları bastırma, geçici ve dinamik kararlılık, gerilim kararlılığı                                                      |
| SVK, TKR, TAR, TAK<br>Statik Var Kompanzatörleri                                                                                                   | Gerilim kontrolü, Var kompanzasyonu, salınımları bastırma, geçici ve dinamik kararlılık, gerilim kararlılığı                                                      |
| TKFD<br>Tristör Kontrollü Frenleme Direnci                                                                                                         | Salınımları bastırma, geçici ve dinamik kararlılık                                                                                                                |
| SSSK<br>Statik Senkron Seri Kompanzatör                                                                                                            | Akım kontrolü, salınımları bastırma, geçici ve dinamik kararlılık, gerilim kararlılığı, hata akımı sınırlama                                                      |
| SSSK+AEDS veya SMED<br>Statik Senkron Seri Kompanzatör ve Akümülatörlü Enerji Depolama Sistemi veya Süper İletkenli Manyetik Enerji Depolama Sist. | Akım kontrolü, salınımları bastırma, geçici ve dinamik kararlılık, gerilim kararlılığı                                                                            |
| TKSK, TASK<br>Tristör Kontrollü Seri Kondansatör, Tristör Anahtarlama Seri Kondansatör                                                             | Akım kontrolü, salınımları bastırma, geçici ve dinamik kararlılık, gerilim kararlılığı, hata akımı sınırlama                                                      |
| TKSR, TASR<br>Tristör Kontrollü Seri Reaktör, Tristör Anahtarlama Seri Reaktör                                                                     | Akım kontrolü, salınımları bastırma, geçici ve dinamik kararlılık, gerilim kararlılığı, hata akımı sınırlama                                                      |
| TKFAR<br>Tristör Kontrollü Faz Açısı Regülatörü                                                                                                    | Aktif güç kontrolü, salınımları bastırma, geçici ve dinamik kararlılık, gerilim kararlılığı                                                                       |
| BGAK<br>Birleştirilmiş Güç Akışı Kontrolörü                                                                                                        | Aktif ve reaktif güç kontrolü, gerilim kontrolü, Var kompanzasyonu, salınımları bastırma, geçici ve dinamik kararlılık, gerilim kararlılığı, hata akımı sınırlama |
| HAGAK<br>Hat Arası Güç Akış Kontrolörü                                                                                                             | Reaktif güç kontrolü, gerilim kontrolü, salınımları bastırma, geçici ve dinamik kararlılık, gerilim kararlılığı                                                   |
| TKGS<br>Tristör Kontrollü Gerilim Sınırlayıcı                                                                                                      | Geçici ve dinamik gerilim sınırlama                                                                                                                               |
| TKGR<br>Tristör Kontrollü Gerilim Regülatörü                                                                                                       | Reaktif güç kontrolü, gerilim kontrolü, salınımları bastırma, geçici ve dinamik kararlılık, gerilim kararlılığı                                                   |
| NGH-ASRB<br>Alt-Senkron Rezonans Bastırıcı (N.G.Hingorani)                                                                                         | Salınımları bastırma, geçici kararlılık, seri empedans kontrolü                                                                                                   |

## 4. BAŞLICA ESNEK ALTERNATİF AKIM SİSTEMLERİ KONTROLÖRLERİNİN YAPILARI VE ÇALIŞMA

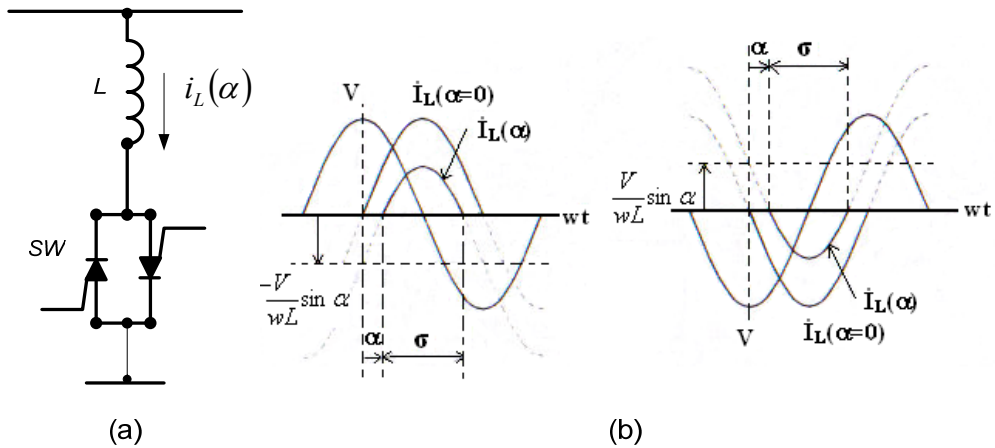
### 4.1 Giriş

EAAİS cihazlarını bölüm 2.3'te hatta bağlanma şekillerine göre sınıflandırdık. Bu bölümde başlıca EAAİS kontrolörleri tanıtılacaktır. Hem ikinci kuşağıdaki SVK'ların ve TKSK'ların, hem de ileri formdaki gerilim kaynaklı devre topolojilerini kullanan üçüncü kuşak SSK'ların ve BGAK'ların çalışma prensipleri, temel özellikleri devre şemaları ile birlikte verilecektir. Beşinci bölümde TKSK, SVK ve SSK, benzetimleri yapılarak aralarında bir karşılaştırma ortaya koyulacağından ötürü daha ayrıntılı olarak incelenecektir.

### 4.2 Statik VAR Kompanzatörleri (SVK)

#### 4.2.1 Tristör Kontrollü Reaktör (TKR)

Temel olarak bir fazlı TKR ele alınacaktır.  $L$  endüktanslı bir reaktör ve buna seri bağlı çift yönlü tristör anahtarından oluşur (Şekil 4.1(a)). Tristörler genel olarak 3-6kA ve 4-9kV aralığında anma değerlerine sahiptir; gerekli olan gerilim seviyesine çok sayıda tristörün seri bağlanması ile ulaşılır. Tüm tristörler kapı sinyaliyle ilettime geçip üzerlerinden akan akım sıfır olana kadar iletimdedirler.



Şekil 4.1: (a) Temel TKR devresi, (b) TKR'nin tetikleme açısı kontrolü [1]

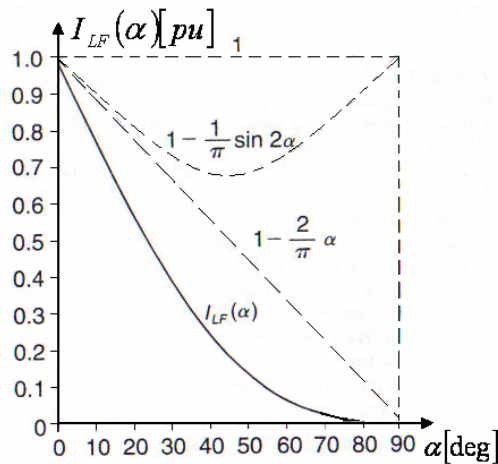
Reaktör üzerinden akan akım tetikleme açısının kontrolü ile kontrol edilir. Tristörler her yarım dalgada gerilimin tepe noktasına kadar beklenerek ateşlenir. Akımın kontrolü gerilimin pozitif ve negatif yarım dalgaları için Şekil 4.1(b)'de gösterilmiştir.  $\alpha$  tetikleme açısı  $0 \leq \alpha \leq \pi/2$  aralığında değişmektedir. Hat geriliminin  $v(t) = V \cos \omega t$  olduğu durumda reaktör üzerinden akan akım ifadesi şöyledir,

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_{\alpha}^{\omega t} v(t) dt = \frac{V}{\omega L} (\sin \omega t - \sin \alpha) \quad (4.1)$$

$\alpha = 0$  olduğunda (Denklem 4.1) akım ifadesi sinüzoidal bir hal almaktadır ve gerilimi  $90^\circ$  ötelenmiş olarak takip eder. Tristör, akımın sıfırdan geçtiği an otomatik olarak kesime gidecektir. Burada kontrol edilen yalnızca  $\alpha$  değil, aynı zamanda  $\sigma$  iletim açısıdır. İletim açısı ifadesi  $\sigma = \pi - 2\alpha$  olup tetikleme açısı ile ters orantılıdır. Reaktör akımı, iletim açısının arttırılması ile artacaktır.  $\alpha = \pi/2$  olduğunda iletim açısı ve reaktör akımı sıfırdır.  $i_{LF}(\alpha)$  reaktör akımının temel elemanın genliği şöyle ifade edilir,

$$I_{LF}(\alpha) = \frac{V}{\omega L} \left( 1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right) \quad (4.2)$$

$V$  şebeke geriliminin genliği,  $L$  reaktör endüktansı ve  $\omega$  şebeke geriliminin frekansıdır. Şekil 4.2'de reaktör akımının genliği  $I_{LF}(\alpha)$ 'nın değişiminin  $I_{LF \max}$ 'a göre normalize edilmiş değerinin tetikleme açısına göre değişimi görülmektedir. Akım burada sıfırdan en yüksek değerine kadar kontrol edilebilir.

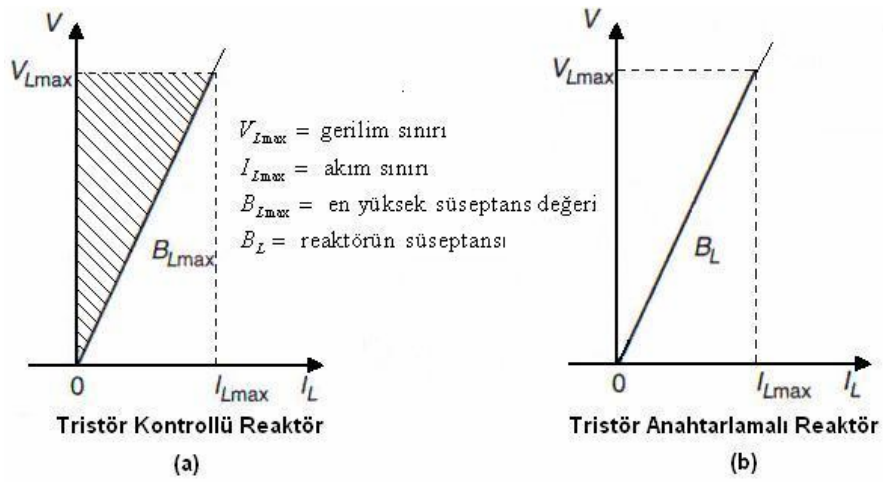


**Şekil 4.2:** Temel TKR akımının genliğinin tetikleme açısı ile değişimi [1]

Etkin reaktif admitans süseptans ile değişir. Süseptans  $B_L(\alpha)$  'nın ifadesi şöyledir,

$$B_L(\alpha) = \frac{1}{\omega L} \left( 1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right) \quad (4.3)$$

Etkin reaktif admitans temel akımla benzer olarak  $\alpha$  tetikleme açısı ile değişmektedir. Pratikte, uygulanan gerilimin en yüksek değeri ve karşılanan akım değeri elemanların güç değerleri ile sınırlıdır. TKR, tanımlı olan V-I alanının her yerinde çalıştırılabilir. Ancak sınırlara, ulaşılabilen en yüksek admitans, gerilim ve akım değerleri Şekil 4.3(a)'da görüldüğü üzere karar vermektedir.



Şekil 4.3: V&I çalışma bölgesi: (a) TKR, (b) TAR [1]

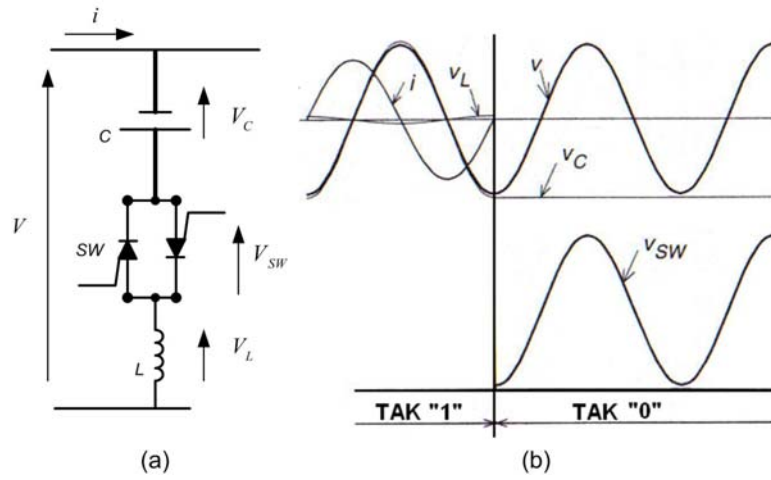
TKR,  $\alpha=0$  ve  $\alpha=\pi/2$  değerlerinde ve sabit tetikleme açısında çalıştırıldığında tristör anahtarlama reaktör olarak çalışır. TAR sabit bir endüktif admitans sağlar. Reaktif akım uygulanan gerilim ile orantılı olarak değişir (Şekil 4.3(b)). TAR'da reaktif admitans adimsal olarak değiştirilir.

TKR sinüzoidal olmayan bir akım dalga şekline sahiptir ve bu durum harmonik üretimine yol açar. Üç fazlı sistemlerde TKR'ler üçgen olarak bağlanıp 3., 9., 15., gibi üçün katları harmonikleri bastırır. Ancak diğer harmonikleri yok etmek için çeşitli teknikler gereklidir.

#### 4.2.2 Tristör Anahtarlama Kondansatör (TAK)

Tek fazlı tristör anahtarlama kondansatör Şekil 4.4(a)'da görülmektedir. TAK, bir kondansatör, çift yönlü tristör anahtarı ve göreceli olarak küçük, akımdaki ani yükselmeleri sınırlamak için kullanılan reaktörden oluşur. Reaktör ayrıca sistem

empedansı ile TAK arasında uygun bir frekansta meydana gelebilecek rezonansa karşı da kullanılır.



**Şekil 4.4:** (a) Temel TAK devresi, (b) TAK'nın birleştirilmiş dalga şekilleri [1]

Normal şartlarda tristör anahtarı iletimdedir. TAK, gerilimi  $v = V \sin \omega t$  olan aa sistemine bağlıdır ve akan akım ifadesi şöyledir,

$$i(\omega t) = V \frac{n^2}{n^2 - 1} \omega C \cos \omega t \quad (4.4)$$

$$n = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 LC}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (4.5)$$

Kondansatör üzerindeki gerilimin genliği şudur:

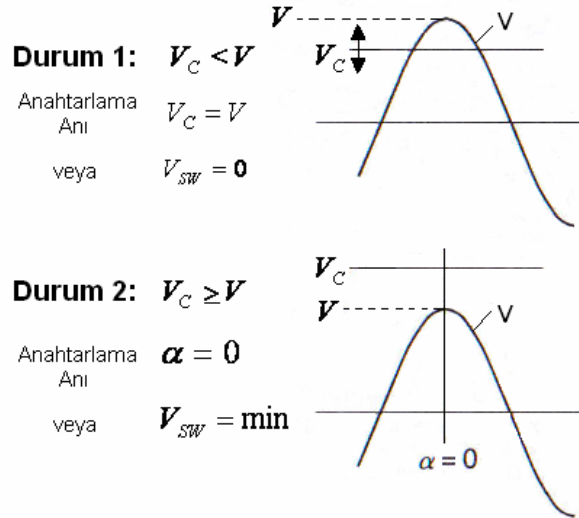
$$V_C = \frac{n^2}{n^2 - 1} V \quad (4.6)$$

TAK, akımın sıfırdan geçtiği noktada kapısına uygulanan işaretin kaldırılması ile kesime götürülür. Akım sıfırken kondansatör üzerindeki gerilim,  $v_{C,i=0} = Vn^2 / (n^2 - 1)$  'dir. Diğer bir deyişle akım sıfırken kondansatör üzerindeki gerilim en yüksek değerindedir; kesimde olan tristör anahtarı üzerindeki gerilim ise sıfır ile şebeke aa gerilimi arasındadır (Şekil 4.4(b)).

Eğer kesimdeki kondansatör üzerindeki gerilim değişmeden kalsaydı, TAK hiçbir geçici bozulma olmadan aa geriliminin en yüksek değerinde tekrardan anahtarlanabilirdi. Ancak kondansatör kesime gittikten sonra boşalır. Tekrardan

iletime geçtiğinde üzerindeki gerilim sıfır ile  $V_C$  (denklem (4.6)) arasında bir değer alır. Kondansatör üzerinde kalan gerilim ile aa geriliminin eşit olduğu anlarda yapılan anahtarlama ile en küçük geçici bozulma elde edilebilir. Anahtarlama anlarındaki sıfırdan farklı  $dv/dt$  değerleri, seri reaktör olmadan ve kondansatör yarı doluyken veya tümüyle boşalmışken dahi akımda ani değişimlerle sonuçlanır:  $i_C = CdV/dt$ . Reaktör ile birlikte kullanıldığında salınımlı bir geçici bozulma elde edilir.

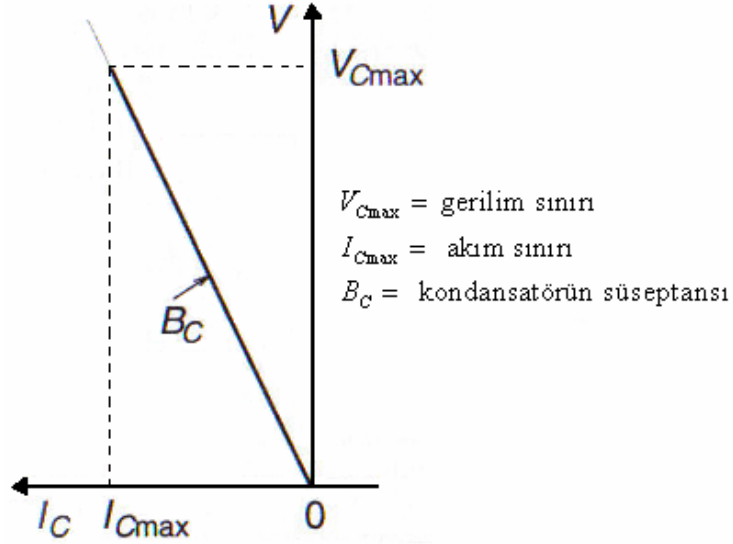
Şekil 4.5'te geçici bozulmanın olmadığı anahtarlama şartları anlatılmaktadır. Burada iki durum söz konusudur: birincisi, kondansatör üzerinde kalan gerilimin aa şebeke geriliminin en yüksek değerinden küçük olduğu ( $V_C < V$ ) durumdur ve doğru anahtarlama anı her iki gerilimin birbirine eşit olduğu andır; ikincisi, kondansatör üzerinde kalan gerilimin aa şebeke geriliminin en yüksek değerinden büyük veya eşit olduğu ( $V_C \geq V$ ) durumdur; doğru anahtarlama anı aa şebeke geriliminin en yüksek olduğu andır.



**Şekil 4.5:** TAK'ta geçici bozulmanın olmadığı anahtarlama şartları [1]

Geçici bozulmalardan kurtulmak için uygulanan bu şartlar kondansatörün, tetikleme açısı kontrolüne uygun olmadığını göstermektedir. Ayrıca bir kondansatör ünitesinin anahtarlanması için geçen en uzun gecikme zamanı şebeke geriliminin tam bir dalgasıdır. Bu nedenlerle tristör kontrollü kondansatör kullanılması pratikte zordur ve adimsal çalışan TAK tercih edilir.

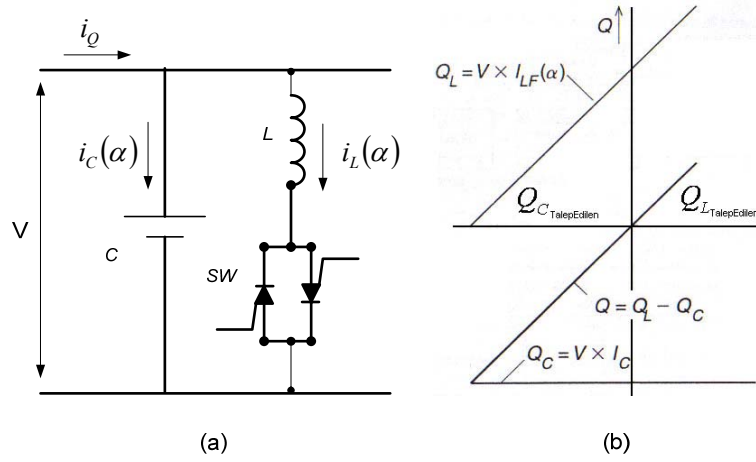
TAK, hatta bağılı olması ve bağılı olmaması şartına göre tek bir kapasitif admitansa sahiptir. TAK akımı uygulanan gerilim ile doğrusal olarak değişir. Şekil 4.6'da kondansatör admitansı V-I grafiğinde gösterilmiştir. En yüksek gerilim ve akım değerleri kullanılan elemanların çalışma değerleri ile sınırlanmıştır. Birkaç TAK birbirine paralel bağlanarak kullanılabilir.



Şekil 4.6: TAK'nın V&I çalışma bölgesi [1]

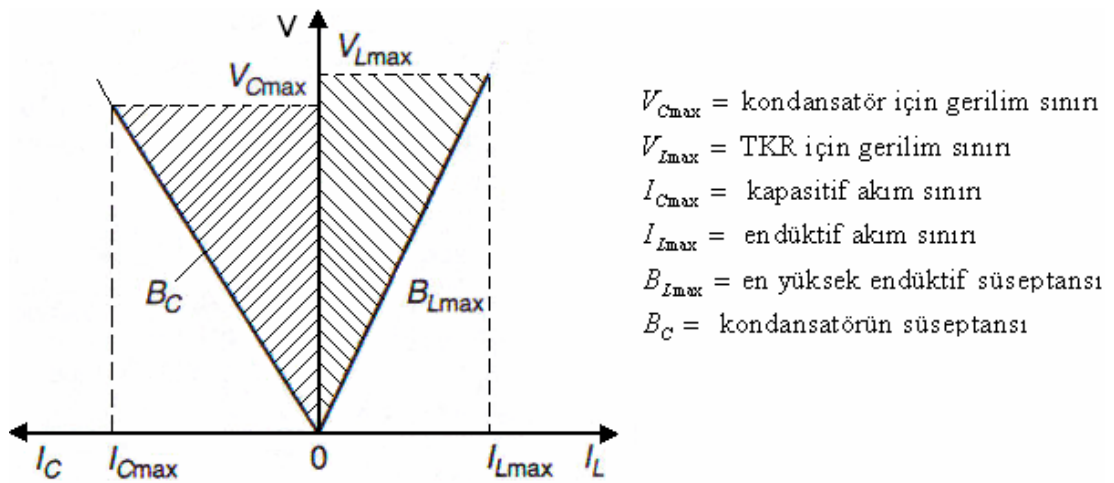
#### 4.2.3 Sabit Kondansatör, Tristör Kontrollü Reaktör (SK-TKR)

Sürekli hatta bağılı bir kondansatör ile bölüm 4.2.1'de anlatılan TKR paralel bağlanmıştır (Şekil 4.7(a)). Reaktördeki akım tetikleme açısı kontrolü ile kontrol edilir. Sabit kondansatör (SK) pratikte tam veya yarı bir filtre gibi çalışır. İstenilen reaktif gücü üretmek için temel frekansta gerekli olan kapasitif empedansı sağlarken seçilen frekanslarda düşük empedans gösterip TKR'nin ürettiği harmonikleri bastırır.



**Şekil 4.7:** (a) Sabit kondansatörlü TKR'nin temel devresi, (b) TKR'nin çıkış büyüklükleri [1]

SK tarafından sağlanan sabit kapasitif reaktif güç üretimi ( $Q_C$ ), TKR'nin sağladığı değişken endüktif reaktif güç üretimine ( $Q_L$ ) zıttır. Şekil 4.7(b)'de hatta verilen toplam reaktif güç ( $Q$ ) görülmektedir. En yüksek kapasitif reaktif güç TKR devre dışıyken ( $\alpha = 90^\circ$ ) olur. Kapasitif çıkışı azaltmak için reaktör, tetikleme açısının azaltılması ile devreye kontrollü olarak alınır. Reaktif güç çıkışının sıfır olduğu nokta kapasitif ve endüktif akımların birbirine eşit olduğu noktalardır; kapasitif ve endüktif çıkışlar birbirini yok eder. Tetikleme açısının daha da azaltılması endüktif bir çıkış alınmasını sağlar. Tetikleme açısının sıfır olması durumunda en yüksek endüktif çıkış elde edilir ve sisteme verilen reaktif güç kondansatörün kapasitif gücü ile tam iletimdeki reaktörün endüktif gücü arasındaki farktır.



**Şekil 4.8:** SK-TKR'nin V&I çalışma bölgesi [1]

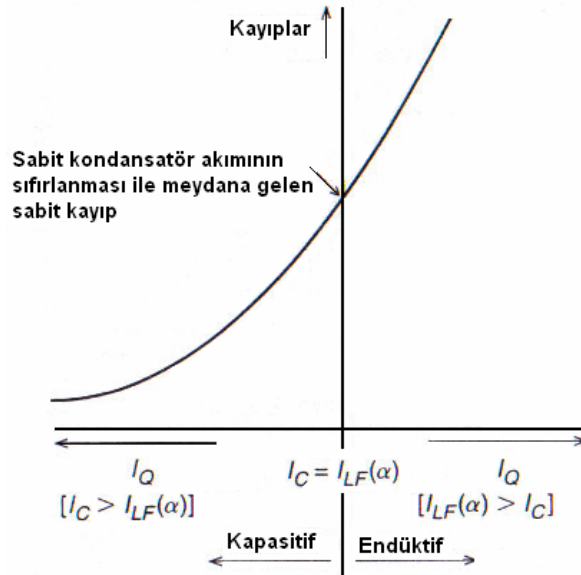
Kontrollü reaktif admitansa sahip SK-TKR, aa sistemine bağlandığında giriş referans sinyalinin (reaktif admitans veya akım) tam olarak takip eder. Şekil 4.8'deki V&I çalışma bölgesi, kompanzatörün ana elemanlarının anma gerilim ve akım değerlerinin belirlediği ulaşılabilir en yüksek kapasitif ve endüktif admitans değerlerine göre çizilmiştir. SK-TKR'nin dinamik performansı tetikleme açısı kontrolüne bağlıdır.

Sistem kondansatör, reaktör ve tristör üzerinde kayıplara sahiptir. Toplam kayıp, TKR akımının artması ile artarken kapasitif reaktif güç çıkışının artması ile azalmaktadır. Şekil 4.9'da görüldüğü üzere akımın endüktif yönde artması kayıplar açısından olumsuz bir durumdur. Bu sistemler ortalama kapasitif reaktif gücün yüksek olduğu uygulamalarda avantajlıyken, iletim hatlarının dinamik kompanzasyonu gibi ortalama endüktif reaktif gücün yüksek olduğu uygulamalarda dezavantajlıdır.

Kayıp, kapasitif ve endüktif yanda şöyledir:

$$I_Q = I_C - I_{LF}(\alpha) \quad (4.7)$$

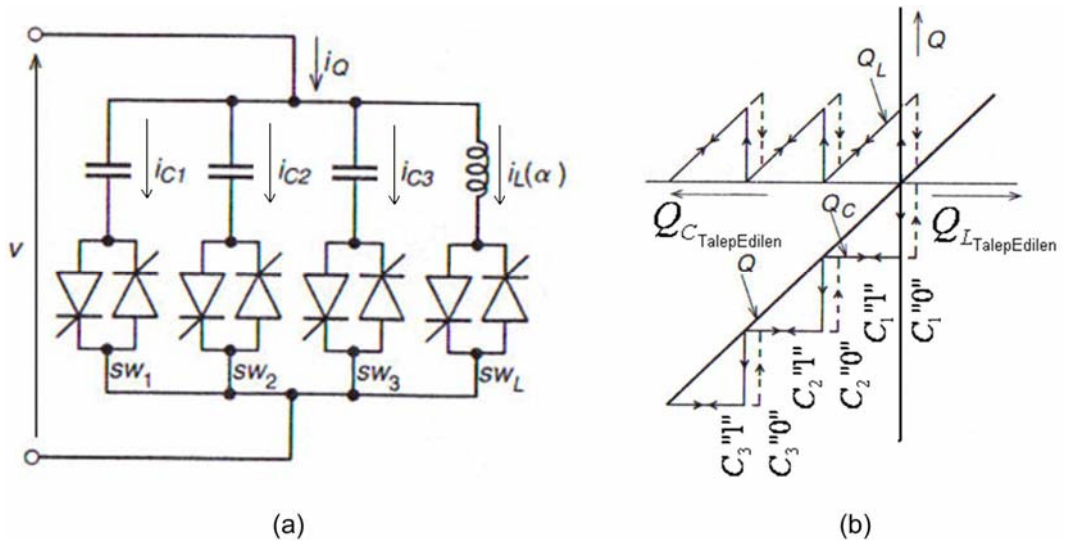
$$I_Q = I_{LF}(\alpha) - I_C \quad (4.8)$$



Şekil 4.9: SK-TKR'nin çıkış karakteristiğine göre kayıpları [1]

#### 4.2.4 Tristör Anahtarlamaalı Kondansatör, Tristör Kontrollü Reaktör (TAK-TKR)

TAK-TKR tip kompanzatör, bekleme anındaki kayıpları azaltarak ve artırılmış esnek çalışma sağlayarak iletim hatlarının dinamik kompanzasyonunda kullanılmak üzere geliştirilmiştir. Temel bir fazlı TAK-TKR devresi Şekil 4.10(a)'da görülmektedir. İstenilen kapasitif reaktif güce göre  $n$  adet TAK kolu olabilir. Bu adet çalışma gerilimine, en yüksek reaktif güç çıkışına, tristörlerin anma akımlarına, bara işçiliğine ve devreye alma maliyetlerine göre değişir.



Şekil 4.10: (a) TAK-TKR 'nin temel devre şeması, (b) TAK-TKR 'nin reaktif güç talebi ile çıkış büyüklüğü arasındaki karakteristiği [1]

Sistemin toplam kapasitif reaktif gücü  $n$  adet aralığa bölünmüştür. İlk aralıkta çıkış sıfır ile  $Q_{C_{max}}/n$  arasındadır.  $Q_{C_{max}}$  tüm TAK kollarının sağladığı toplam güçtür. Bu aralıkta bir adet TAK kolu devrede olup TAK negatif bir reaktif güç sağlarken, uygun tetikleme açısı ile kontrol edilen TKR pozitif reaktif güç sağlar; her ikisinin toplamı istenilen reaktif güç çıkışını verir. İkinci ve üçüncü aralıklarda da  $Q_{C_{max}}/n$ 'den  $2Q_{C_{max}}/n$ 'e kadar,  $2Q_{C_{max}}/n$ 'den  $3Q_{C_{max}}/n$ 'e kadar (devamında  $(n-1)Q_{C_{max}}/n$ 'den  $Q_{C_{max}}$ 'a kadar) reaktif güç TAK tarafından hatta verilir.

Reaktif güç çıkışının ifadesi şöyledir:

$$Q = V * [I_{LF}(\alpha) - \sum I_{Cn}] \quad (4.9)$$

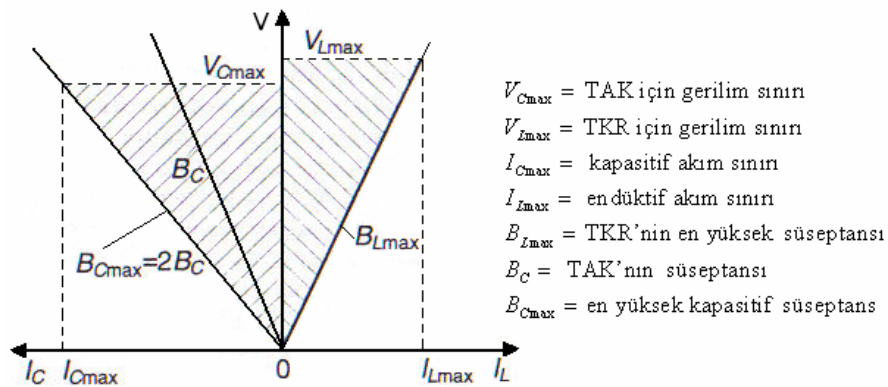
TAK'ların devreye alındığında oluşan aşırı kapasitif güç TKR'nin kontrollü olarak devreye alınmasıyla karşılanır. TKR, bir TAK kolu kadar reaktif güç çıkışına sahip olmalıdır. Pratikte, TAK kollarının anahtarlanması anındaki üst üste binmeden dolayı TKR'nin gücü bir tane TAK kolunun gücünden göreceli olarak daha büyük seçilir.

Sistemin talep güç ile çıkışı arasındaki ilişki Şekil 4.10(b)'de görülmektedir. Kapasitif reaktif güç çıkışı  $Q_C$  adımsal olarak değişir ve talebe yakın ve mutlaka karşılayacak şekilde devreye alınır.  $Q_L$  ise endüktif güç çıkışı olup aşırı reaktif gücü yok etmek için kontrollü olarak ayarlanır.

Sistemin kontrolünde üç temel nokta vardır:

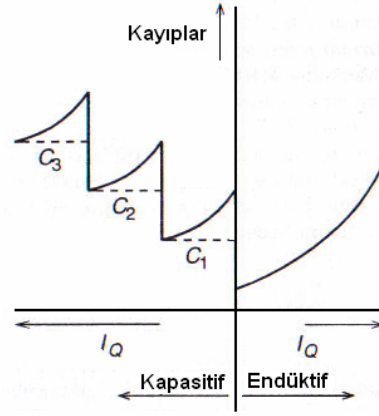
1. Gerekli kapasitif çıkış akımını karşılayacak TAK kol sayısına karar vermek; aşırı kapasitif akımın yok edilmesini sağlayacak endüktif akımın genliğine karar vermek.
2. TAK anahtarlarını, bölüm 4.2.2'de ve Şekil 4.5'te anlatılan geçici bozulmalara imkan tanımayan şartlarda kontrol etmek.
3. TKR'nin akımını tetikleme açısı kontrolü ile değiştirmek.

TAK-TKR'nin gerilim-akım eğrisi Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Kontrollü admitans giriştaki referans sinyali (reaktif admitans veya akım) tam olarak izler. SK-TKR'nin V-I karakteristiği ile bu karakteristik birbirinin benzeridir. Burada kapasitif akım sınırı daha yüksektir.



**Şekil 4.11:** İki TAK'lı TAK-TKR sisteminin V-I grafiğinde çalışma bölgesi [1]

Cevap hızı açısından SK-TKR'ye göre TAK-TKR, kullanılan TAK kol sayısına bağlı olarak çok az farkla daha yavaştır. Pratikte her ikisinin dinamik performansları da aynıdır.



**Şekil 4.12:** TAK-TKR'nin kayıp&çıkış karakteristiği [1]

Kayıp kapasitif ve endüktif yanda şöyledir:

$$I_Q = I_{LF}(\alpha) - \sum_n I_{Cn} \quad (4.10)$$

$$I_Q = I_{LF}(\alpha) \quad (4.11)$$

Şekil 4.10(a)'da verilen temel çalışma prensibine göre sistemin kayıp karakteristiği Şekil 4.12'de verilmiştir. Kapasitif çıkış, devreye giren TAK'ların sayısı ile artmakta olup bu sırada TKR, aşırı kapasitif güçleri yok etmektedir. Her TAK grubunun anahtarlanması ile kayıp, sabit bir miktarla artar. Bu kayıp TKR'nin kaybıyla toplanarak toplam kayıp elde edilir. TKR'nin kaybı sıfırla en yüksek değeri arasında değişmektedir. Ortalama kayıp, çıkan reaktif güç ile orantılıdır. Bu tarz bir kayıp karakteristiği avantajdır. Çünkü bu sistem dinamik kompanzasyon amaçlı olarak kullanılacaktır; yüksek ortalama reaktif güç talebi olmayan çalışmalar için uygundur.

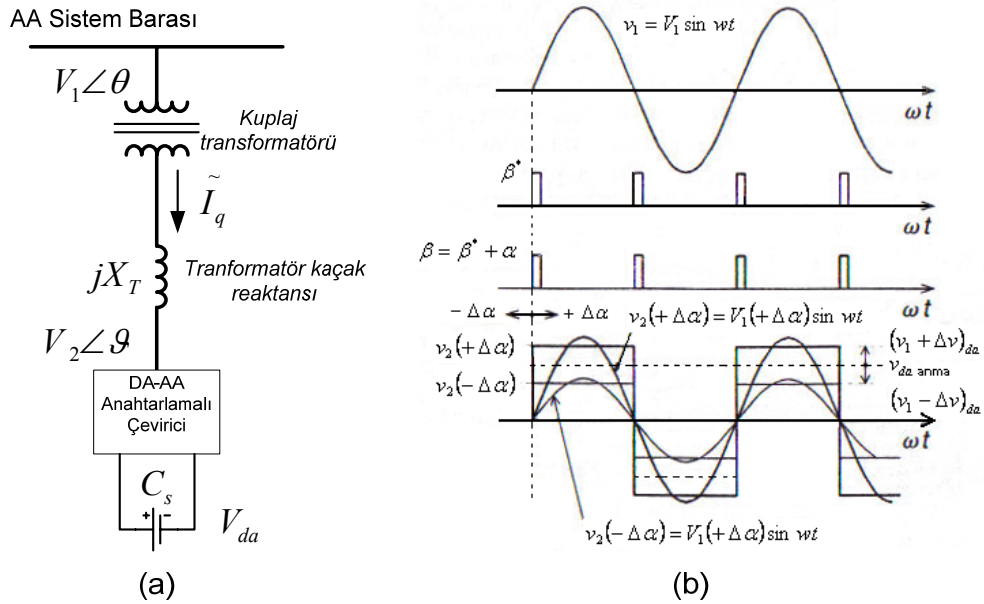
### 4.3 Statik Senkron Kompanzatör (SSK)

#### 4.3.1 Statik Senkron Kompanzatörün Çalışma Prensibi ve Özellikleri

Çeşitli anahtarlama güç çeviricileri ile kondansatör ve reaktör gibi güç depo eden elemanlara gerek kalmadan kontrol edilebilen reaktif güç sağlanabilir. SSK, yapısındaki gerilim kaynaklı çevirici sayesinde reaktif gücü, sistem fazları arasında dönen alternatif akım sayesinde gerilim kaynağı gibi çalışarak üretir. Fonksiyonel olarak bakıldığında reaktif güç üretimi, uyarma kontrollü ideal senkron makine gibidir. SSK aynı zamanda girişine olası bir da kaynağının (akümülatörlü enerji depolama sistemi-AEDS, süper iletkenli manyetik enerji depolama sistemi-SİMEDS)

bağlanması ile bir statik senkron üreteç haline gelir ve aa sistemiyle gerçek güç alışverişi de yapar. Anahtarlama güç çeviricisinde bir iç güç kaynağı olmadığından anlık güç girişi ile çıkışı birbirine eşittir.

Reaktif güç üretimi için temel çevirici devresi tek fazlı gösterimde Şekil 4.13(a)'da verilmiştir. Yüklü kondansatörün ( $C_s$ ) sağladığı giriş gerilim kaynağı ile çevirici, sistem frekansında, kontrollü bir üç fazlı gerilim üretir. Çevirici çıkışı sisteme göreceli olarak ufak bir bağlantı reaktansı (0,1-0,15 pu) üzerinden bağlıdır. Bu reaktans kuplaj transformatörünün kaçak endüktansıdır. Çıkış geriliminin genliğinin değiştirilmesi ile çevirici ile aa sistemi arasında reaktif güç alışverişi yapılır.



**Şekil 4.13:** (a) Gerilim kaynaklı çevirici temelli reaktif güç kompanzatörü:SSK, (b) SSK'nın da kondansatör geriliminin değiştirilmesi ile çıkış geriliminin endirekt kontrolü [1]

Eğer sistem faz açısı  $\theta$  ve çevirici çıkış gerilimi faz açısı  $\phi$  eşit ise reaktif  $\tilde{I}_q$  akımının yönünü  $V_1$  ve  $V_2$  gerilim genlikleri şöyle belirler:

- Eğer  $V_1 > V_2$  ise, akım sistemden çeviriciye doğru akar ve SSK reaktif güç çeker (endüktif).
- Eğer  $V_2 > V_1$  ise, akım çeviriciden sisteme doğru akar ve SSK reaktif güç üretir (kapasitif).

Çıkış geriliminin endirekt olarak da kondansatör gerilimi üzerinden ayarlandığı iç kontrol dalga şekilleri Şekil 4.13(b)'de gösterilmiştir.

$$v_1 = V_1 \angle 0^\circ \quad (4.12)$$

$$v_2 = V_2 (\Delta\alpha) \angle 0^\circ \quad (4.13)$$

$$\Delta v_{da} = \frac{1}{C_s} i_{da} dt \quad (4.14)$$

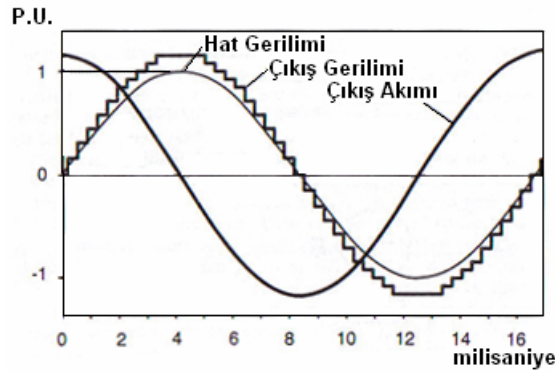
$$i_{da} = f(\Delta\alpha) \quad (4.15)$$

AA sistem gerilimi ( $v_1$ ), senkronlama sinyali ( $\beta$ ) sağlayan “faz kilitleme döngüsü” içinde çalışır. Çeviricinin çıkış akımının ( $I_q$ ) reaktif bileşeni, referans bir reaktif akımla karşılaştırılarak  $\alpha$  açısı elde edilir. Bu açı çeviricinin çıkış gerilimi ile şebeke gerilimi arasında gerekli olan faz ötelenmesini tanımlar. Faz ötelemesi gerekli da gerilim seviyesinin sağlanabilmesi için kondansatörün doldurulup boşaltılmasında kullanılır.  $\alpha$  açısı senkronlama sinyali  $\beta$  ile toplanarak çeviricinin reaktif akım referans değerini takip etmesini sağlar.  $(\alpha + \beta)$  açısı çeviricinin güç yarıiletken elemanlarının sürülmesinde kullanılır.

Çıkış geriliminin direkt olarak kontrol edildiği, yukarıda anlatılan yöntemde da kondansatör geriliminin de dışarıdan referans olarak girildiği ikinci bir yöntem daha vardır. Çevirici çıkış geriliminin ( $v_2$ ) hem genliği hem de faz açısı kontrol döngüsü içinde hesaplanarak güç yarıiletken anahtarlara uygun tetikleme işaretleri verilir.

DA kondansatörünün doğrudan reaktif güç üretiminde herhangi bir rolü yoktur. Çevirici, üç aa ucunu birbirine basit bir şekilde bağlayarak reaktif çıkış akımının aralarında özgürce akmasına olanak tanır. AA uçlarından baktığımızda, sıfır anlık net güç değişimi ile çevirici döngüsel bir akım akışı meydana getirir. Çıkış gerilim dalga şekli mükemmel bir sinüs dalgası değildir (Şekil 4.14). Bu nedenle çıkış akımı saf bir sinüs dahi olsa net anlık çıkış gücü artıp azalan dalgacıklı bir yapıya sahiptir. Anlık giriş ve çıkış güçlerinin eşitliğini bozmamak adına girişte sabit bir gerilim sağlayan da depolama kondansatöründen dalgacıklı bir akım çekilir. Bu dalgacıklı dalga şeklini azaltmak amacıyla tetikleme işaretleri yaratılırken darbe genişlik

modülasyonu kullanılır. Ayrıca darbe genişlik modülasyonlu çeviricilerde daha iyi bir kontrol cevabı elde edilir.



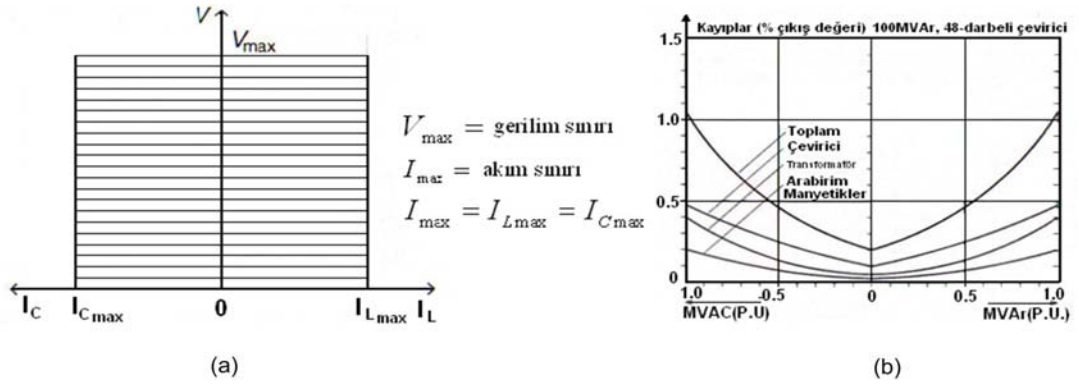
**Şekil 4.14:** 48-darbeleri çeviricinin çıkış gerilim ve akım dalga şekilleri [1]

Yarıiletken elemanların kayıpsız olmamasından dolayı sistem kayıpları meydana gelecektir. Bu kayıplar da kondansatöründe depolanan enerjiden karşılanır. Gerçekte bu enerji sistemden çekilen aktif enerji ile karşılanmıştır. Bu durum çeviricinin çıkış geriliminin sistem geriliminden bir miktar geri kalmasına yol açar. Faz açısının ayarlanması mekanizması, aynı zamanda kondansatör geriliminin arttırılmak veya azaltılmak suretiyle ayarlanmasıyla (çeviricinin çıkış geriliminin ayarlanması) reaktif güç üretiminin kontrol edilmesinde de kullanılabilir.

Çeviriciyi bir da kaynağı ile birleştirmek mümkündür. Bu durumda çevirici hem reaktif hem de aktif gücü kontrol edebilir. Güç salınımlarının bastırılmasında, yüksek güç taleplerinde ve kritik yüklerde etkin bir uygulama sağlar. Bu özellik geleneksel tristör kontrollü kontrolörlerden farklı bir avantaj olarak karşımıza çıkar.

SSK, aa sistem geriliminde bağımsız olarak aynı kapasitif ve endüktif akım sınır değerleri arasında değiştirilebilen harici referans değerine bağlı olan bir senkron gerilim kaynağı olarak da tanımlanabilir. Şekil 4.15(a)'da SSK'nın V&I çalışma bölgesi, çeviricinin en yüksek gerilim ve akım değerlerine göre sınırlandırılmış olarak verilmiştir. 0,2 pu değerindeki gerilim seviyelerinde dahi çevirici kayıplarını karşılamak üzere sistemden aktif güç çekmeye devam eder.

100MVA'lık 48 darbeleri bir gerilim kaynaklı çevirici de reaktif çıkış akımı ile kayıp arasındaki ilişki Şekil 4.15(b)'de verilmiştir. Toplam kayıp 8 adet 6 darbeleri çeviricinin her bir yarıiletken elemanından, transformatörden ve çevirici ile şebekeyi birbirine bağlayan manyetik elemanlardan oluşmaktadır.



**Şekil 4.15:** Gerilim kaynaklı çevirici temelli SSK'da (a) V&I grafiğinde çalışma bölgesi, (b)  $\pm 100\text{MVA}$  48 darbeli tipte kayıplar ile çıkış büyüklüğü arasındaki ilişki [1]

#### 4.3.2 Statik Senkron Kompanzatörün Statik VAr Kompanzatörlerine Üstünlüğü

SSK'lar ve SVK'lar lineer V&I çalışma bölgesi ve kompanzasyon kapasiteleri açısından benzer özelliklere sahiptirler. Ancak hatta paralel bağlı, gerilim kaynaklı çeviriciye sahip SSK, hatta paralel bağlı ve kontrollü reaktif admitansa sahip SVK'lardan temel özellik olarak ayrılmaktadır. Bu temel fark senkron kompanzatörlere daha üstün karakteristikler, daha iyi bir performans ve daha geniş uygulama esnekliği kazandırmıştır.

SSK, V&I ve V&Q karakteristiklerindeki üstünlüğü sayesinde sistem geriliminin 0.2 pu seviyelerine kadar düştüğü durumlarda da çalışmaya devam eder. Düşük sistem gerilimlerinde tam kapasitif çıkış akımını sürdürmesi aynı zamanda geçici hal kararlılığında ilk salınım esnasında daha etkili cevap vermesini sağlamıştır. Bu sayede geçici hal kararlılık çizgisi korunarak daha yüksek aktif güç transfer edilebilir. Senkron kompanzatörün cevap hızı da kapalı gerilim regülasyon döngüsü ile VAr kompanzatörlerine göre önemli ölçüde gelişmiştir. SSK'nın cevap hızı 200-350 $\mu\text{s}$  arasında değişirken SVK'ların cevap hızı 2,5-5ms aralığına ulaşabilmektedir. Gerçek güç alışverişi açısından senkron kompanzatör, girişine bağlanacak bir enerji depolama elemanı sayesinde SSÜ'ye dönüşerek sisteme kontrollü gerçek güç verebilir; aksi durumda sistemden gerçek gücü çekerek depolama elemanında enerjiyi depolayabilir. Kayıplar açısından her iki kompanzatörün birbirine büyük üstünlüğü yoktur. Çıkış güçleriyle doğru orantılı olarak kayıplar artmaktadır. Ancak SSK'da güç yarıiletkenlerinin ve bunlarla ilgili

devre elemanlarını daha çok olması toplamda SVK'ları daha avantajlı kılar. Fiziksel boyutlar ve devreye alınma açısından büyük kondansatörler ve reaktör üniteleri barındırmayan senkron kompanzatör, boyutlarda %30-40 kadar azalma sağlar. Boyutlardaki azalma, yerleşimi kolaylaştırır. Bunların sonucunda SSK'ların devreye alınmasındaki işçilik ve yerleşim alanı maliyetleri daha azdır. Tablo 4.1'de SSK ve SVK'lar karakteristikleri ve performansları açısından karşılaştırılmıştır.

**Tablo 4.1:** Statik senkron kompanzatör ile statik VAr kompanzatörlerinin karşılaştırılması [4]

| VAr Üretici                                 | Sbt.Kond.-TKR                                                                                                         | TAK-(TAR)                                                                                                             | TKR-TAK                                                                                                               | SSK                                                                                                                                   |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tip                                         | Kontrollü Empedans                                                                                                    | Kontrollü Empedans                                                                                                    | Kontrollü Empedans                                                                                                    | Senkron Gerilim Kaynağı                                                                                                               |
| V-I ve V-Q Karakteristikleri                | En yüksek kompanzasyon akımı sistem gerilimi ile orantılıdır.En yüksek reaktif güç çıkışı gerilimin karesi ile düşer. | En yüksek kompanzasyon akımı sistem gerilimi ile orantılıdır.En yüksek reaktif güç çıkışı gerilimin karesi ile düşer. | En yüksek kompanzasyon akımı sistem gerilimi ile orantılıdır.En yüksek reaktif güç çıkışı gerilimin karesi ile düşer. | En yüksek kompanzasyon akımı sistem geriliminden bağımsızdır. En yüksek reaktif güç çıkışı gerilimdeki azalmayla lineer olarak düşer. |
| Reaktif Güce Oranla Kayıp                   | Sıfır çıkışta yüksek kayıp. Kayıplar kapasitif çıkışla azalırken endüktif çıkışla artar.                              | Sıfır çıkışta düşük kayıp. Kayıplar kapasitif çıkışla adimsal olarak artar.                                           | Sıfır çıkışta düşük kayıp. Kayıplar kapasitif çıkışla adimsal, endüktif çıkışla lineer olarak artar.                  | Sıfır çıkışta düşük kayıp. Kayıplar hem kapasitif hem de endüktif çıkışla lineer olarak artar.                                        |
| Harmonik Üretici                            | Yüksek, kesin filtre gerekir.                                                                                         | Çok düşük, rezonanstan dolayı ayarlı filtre gerekir.                                                                  | Düşük, filtre gerekir.                                                                                                | Çok düşük seviyeye getirilebilir. Filtre gerekmez.                                                                                    |
| En Yüksek Teorik Gecikme                    | Yarım dalga                                                                                                           | Tam dalga                                                                                                             | Tam dalga                                                                                                             | İhmal edilir.                                                                                                                         |
| Gerilim Bozulmaları Altında Geçici Davranış | Zayıf                                                                                                                 | Tepkisiz                                                                                                              | Tepkisiz                                                                                                              | Bastırma eğilimi                                                                                                                      |

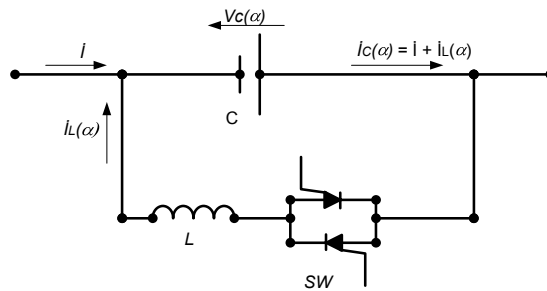
#### 4.4 Tristör Kontrollü Seri Kondansatör (TKSK)

Tristör kontrollü seri kompanzatör, hattaki en yüksek transfer edilebilirlik sınırını arttırırken, reaktif güç kayıplarını azaltır; hat reaktansını düşürerek geçici kararlılığı düzeltir; güç sistem kararlılığında ve hattaki gerilim regülasyonunda gelişme sağlar [29]. Kayıpsız bir iletim hattıyla birbirine bağlı iki bara arasındaki güç alışverişi şöyle ifade edilir,

$$P_{ij} = \frac{U_i U_j}{X_{ij}} \sin(\delta_{ij}) \quad (4.16)$$

$U_i$  ve  $U_j$ ,  $i$ . ve  $j$ . baraların gerilim genlikleri,  $\delta_i$  ve  $\delta_j$ , bunlara ait faz açıları ve  $X_{ij}$  bu baralar arasındaki hattın reaktansdır. Buradan açık olarak görülmektedir ki: baralar arasındaki hat reaktansı azaltılarak güç akışı arttırılabilir.

TKSK'nın temel devre şeması şöyledir (Şekil 4.16),



Şekil 4.16: TKSK'nın devre şeması

Seri kompanzasyon kondansatörü tristör kontrollü bir reaktör ile paralel bağlanmıştır. Pratikte TKSK, böyle birkaç temel kompanzatörün istenilen gerilim seviyesini ve çalışma karakteristiğini sağlamak üzere seri olarak bağlanmasıyla elde edilir. TASK'dan farkı tristörlere seri bağlı bir reaktörün olmasıdır. Temel çalışma prensibi, TKR tarafından etkin kompanzasyon kapasitesinin değiştirilerek, sürekli değişken bir kondansatör elde edilmesine dayanmaktadır. TKR, 4.2 bölümünde anlatıldığı üzere temel şebeke frekansında sürekli değişken bir reaktansa sahip olup ateşleme açısı  $\alpha$  ile kontrol edilir. TKSK'nın sürekli haldeki empedansı paralel bağlı LC devresinin empedansdır. Sabit kapasitif reaktans ( $X_C$ ) ve değişken endüktif reaktans ( $X_L$ ) vardır,

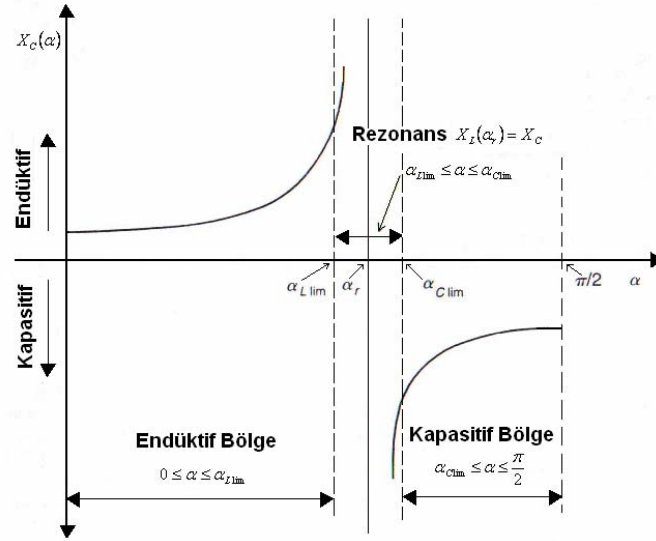
$$X_{TKSK}(\alpha) = \frac{X_C X_L(\alpha)}{X_L(\alpha) - X_C} \quad (4.17)$$

$$X_L(\alpha) = X_L \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin \alpha}, \quad X_L \leq X_L(\alpha) \leq \infty \quad (4.18)$$

$X_L = \omega L$  'dir.  $\alpha$  kondansatör geriliminin tepe değerinden (hat akımının sıfır geçişi) ölçülen gecikme açısıdır. Şekil 4.17'de gösterildiği üzere TKSK iki çalışma bölgesine sahiptir:

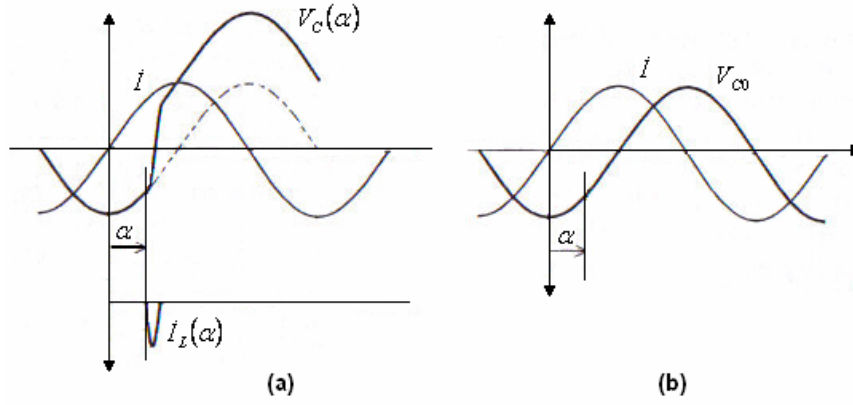
$$1. \quad \alpha_{C\lim} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} \rightarrow X_{TKSK}(\alpha) \text{ kapasitiftir} \quad (4.19)$$

$$2. \quad 0 \leq \alpha \leq \alpha_{L\lim} \rightarrow X_{TKSK}(\alpha) \text{ endüktiftir} \quad (4.20)$$



Şekil 4.17: TKSK'nın empedans-ateşleme açısı karakteristiği [1]

Anahtarın kapandığı anda iki olay meydana gelmektedir: birincisi, sabit akım kaynağı olan hat akımı, kondansatörü doldurmaya veya boşaltmaya devam eder; ikincisi, kondansatör yükü,  $LC$  devresinin yarım dalga rezonansı boyunca ters yönde kutuplanır ( $X_L < X_C$ ). Şekil 4.18(a)'da görüldüğü üzere kondansatör yükünün ters yöne dönmesi kondansatör gerilimine bir sonraki döngüde bir da sapma gerilimi eklenmesine yol açar. Bu durum aynı  $\alpha$  açısı için negatif yarım döngüde de geçerli olur. Şekil 4.18(b)'de anahtar açıkken seri kondansatör üzerinde  $i$  hat akımının ve akan akımın ürettiği  $V_{C0}$  geriliminin dalga şekilleri görülmektedir [1].



**Şekil 4.18:** TSKS’da kondansatör geriliminin ters dönmesi: (a) kondansatör gerilimi ve TKR akımı, (b) hat akımı ve kondansatör üzerindeki gerilim [1]

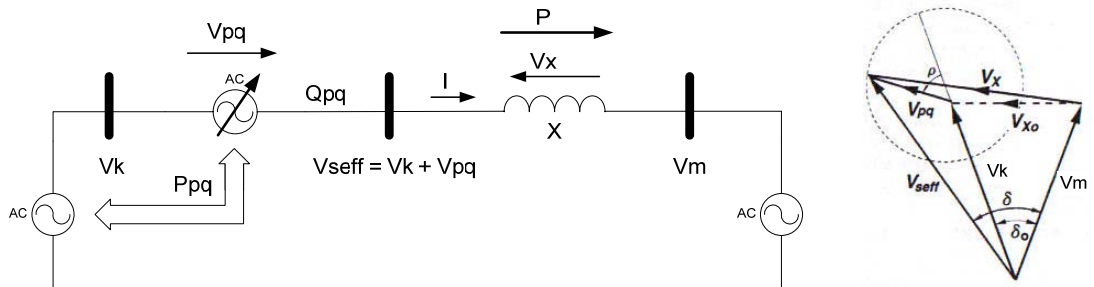
$X_{hat}$  hattın empedansı ve  $k$  seri kompanzasyon oranı olmak üzere TSKS’nın çıkışı seri suseptanstır ve değişken seri kapasitif reaktansın ( $X'_C$ ) bir fonksiyonudur (Denklem 4.21). Hattın bara tarafından görülen etkin reaktansı ( $X'_{hat}$ )  $k$ ’nın bir fonksiyonudur.

$$B(X'_C) = \frac{X'_C / X_{hat}}{X_{hat} (1 - \frac{X'_C}{X_{hat}})} \quad (4.21)$$

$$X'_{hat} = (1 - k) X_{hat} \quad (4.22)$$

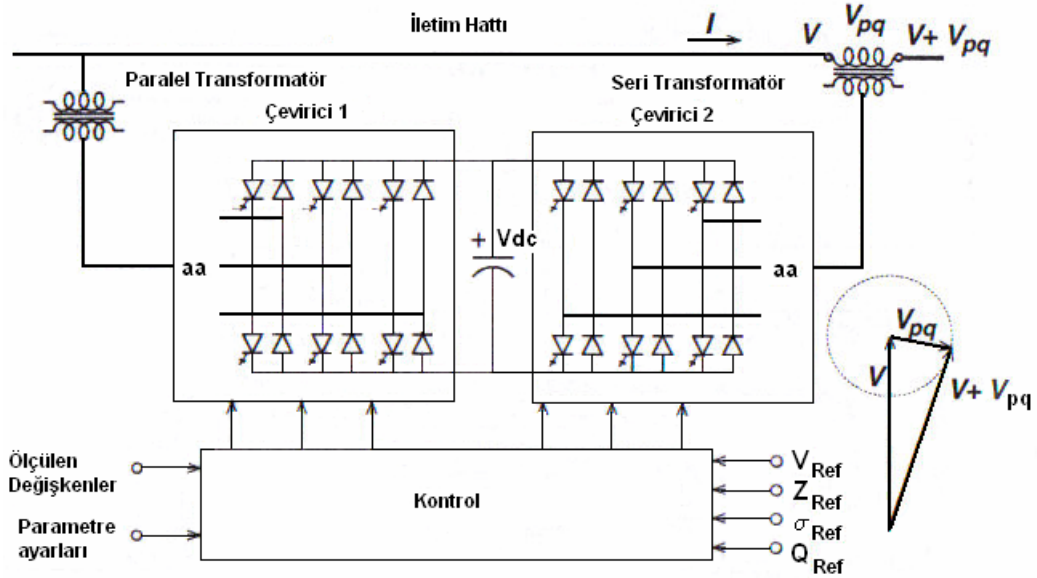
#### 4.5 Birleştirilmiş Güç Akışı Kontrolörü (BGAK)

BGAK, aa iletim sistemlerinin gerçek zamanlı kontrolü ve dinamik kompanzasyonu için geliştirilmiştir. Güç dağıtım endüstrisinin karşılaştığı çoğu problemi çözmede çok fonksiyonlu bir esnekliğe sahiptir. Geleneksel güç iletim sistemleri dahilinde BGAK, ani veya seçici olarak kontrol edilirken bağımsız olarak hem aktif hem de reaktif güç kontrolü yapabilir.



**Şekil 4.19:** İki makineli güç sisteminde BGAK [1]

Şekil 4.19’da gösterildiği üzere BGAK bir senkron gerilim kaynağı gibidir; temel frekansta, kontrol edilebilir gerilim genliği  $V_{pq}$  ( $0 \leq V_{pq} \leq V_{pq \max}$ ) ve gerilim açısı  $\rho$  ( $0 \leq \rho \leq 2\pi$ ) ile  $V_{pq}$  fazör gerilimine sahiptir. Hatta seri ve kontrol edilebilir bir gerilim eklenebilmektedir. Böylesine sınırsız çalışma fonksiyonlarıyla senkron gerilim kaynağı, iletim hattıyla aktif ve reaktif güç alışverişinde bulunur.



**Şekil 4.20:** İki gerilim kaynaklı çeviricinin arka arkaya bağlandığı BGAK'nın devre şeması [1]

BGAK, iki gerilim kaynaklı çeviriciye sahiptir (Şekil 4.20). Bu iki çevirici bir da depolama kondansatörü ile bağlanmıştır. Bu düzenleme ile, iki ideal çevirici arasında aktif gücün iki yönlü olarak akması ve her çeviricinin bağımsız olarak reaktif gücü kendi çıkış uçlarında üretmesi veya tüketmesi mümkündür. Seri çevirici, BGAK'a temel fonksiyonunu sağlar; hatta seri olarak bir giriş transformatörü üzerinden  $V_{pq}$  gerilimini ekler. Bu gerilim, bir senkron aa gerilim kaynağı gibidir. İletim hattı akımının üzerinden aktığı gerilim kaynağı ile sistem arasında reaktif ve aktif güç alışverişi yapılabilir. Transferi yapılan reaktif güç, çeviricinin kendi içinde üretilir; gerçek güç ise Şekil 4.20’de görüldüğü üzere da hattından talep edilen güce göre pozitif veya negatif olarak transfer edilir. Paralel çeviricinin temel fonksiyonu, seri çeviricinin da hattından talep ettiği pozitif veya negatif gerçek gücü hatta paralel bağlı transformatör ile sağlamaktır. Paralel çevirici gerek olduğu durumlarda seri çeviriciden bağımsız olarak paralel reaktif güç kompanzasyonu sağlar. Kontrol

devresine istenilen hat gerilimi, hat empedansı, faz ötelemesi ve üretilecek reaktif güç girilir.

BGAK tek başına paralel reaktif kompanzasyon, seri kompanzasyon ve faz açısı regülasyonu sağlar. BGAK'ın güç akış kontrolü, Şekil 4.19'daki fazör diyagramı baz alınarak şöyledir,

$$P - jQ_m = V_m \left( \frac{V_k + V_{pq} - V_m}{jX} \right)^* \quad (4.23)$$

$j = e^{j\frac{\pi}{2}} = \sqrt{-1}$  olmak üzere  $V_{pq} = 0$  alındığında,

$$P - jQ_m = V_m \left( \frac{V_k - V_m}{jX} \right)^* \quad (4.24)$$

$V_{pq} \neq 0$  alındığında,

$$P - jQ_m = V_m \left( \frac{V_k - V_m}{jX} \right)^* + \frac{V_m V_{pq}^*}{-jX} \quad (4.25)$$

$$V_k = V e^{j\frac{\delta}{2}} = V \left( \cos \frac{\delta}{2} + j \sin \frac{\delta}{2} \right) \quad (4.26)$$

$$V_m = V e^{-j\frac{\delta}{2}} = V \left( \cos \frac{\delta}{2} - j \sin \frac{\delta}{2} \right) \quad (4.27)$$

$$V_{pq} = V_{pq} e^{j(\frac{\delta}{2} + \rho)} = V_{pq} \left( \cos \left( \frac{\delta}{2} + \rho \right) + j \sin \left( \frac{\delta}{2} + \rho \right) \right) \quad (4.28)$$

Buna göre  $P$  ve  $Q_m$  için ifadeler şöyle olur:

$$P(\delta, \rho) = P_o(\delta) + P_{pq}(\rho) = \frac{V^2}{X} \sin \delta - \frac{VV_{pq}}{X} \cos \left( \frac{\delta}{2} + \rho \right) \quad (4.29)$$

$$Q_m(\delta, \rho) = P_{om}(\delta) + Q_{pq}(\rho) = \frac{V^2}{X} (1 - \cos \delta) - \frac{VV_{pq}}{X} \sin \left( \frac{\delta}{2} + \rho \right) \quad (4.30)$$

$$P_o(\delta) = \frac{V^2}{X} \sin \delta \quad (4.31)$$

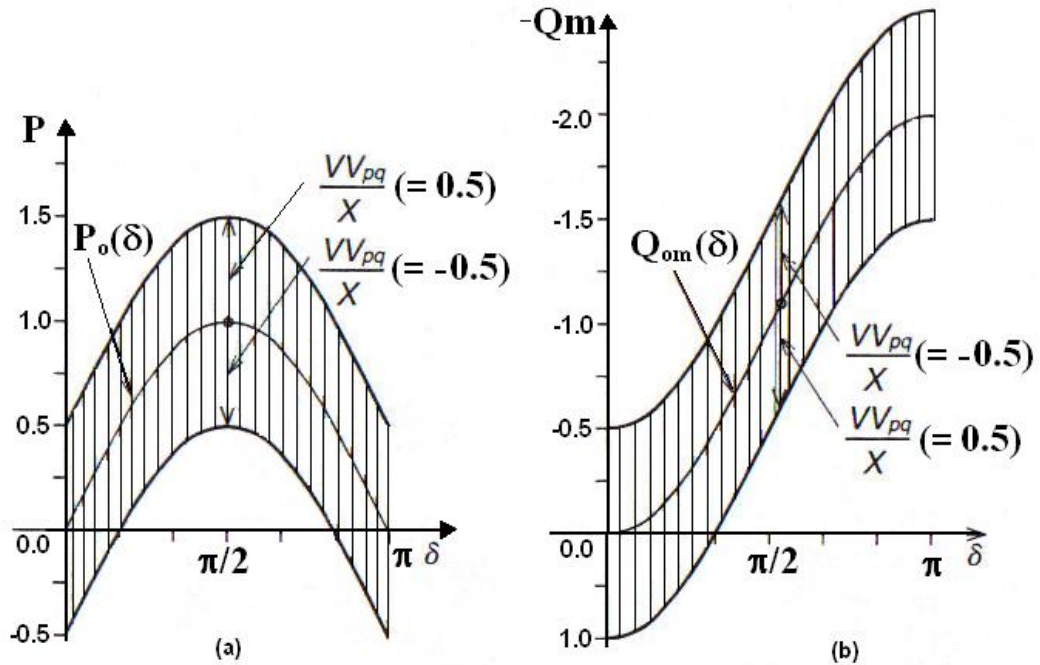
$$Q_{om}(\delta) = -\frac{V^2}{X} (1 - \cos \delta) \quad (4.32)$$

Kompanze edilmemiş sistemde iletim hattı faz açısı  $\delta$  'dır.  $\rho$  'nun 0 ile  $2\pi$  arasında değişmesi ile hat, faz açısından bağımsız olarak kontrol edilir;  $P_{pq}(\rho)$  ve  $Q_{pq}(\rho)$  elde edilir. Buna göre aktif ve reaktif güçler aşağıda verilen aralıklarda bağımsız olarak kontrollüdürler,

$$P_o(\delta) - \frac{VV_{pq\max}}{X} \leq P_o(\delta) \leq P_o(\delta) + \frac{VV_{pq\max}}{X} \quad (4.33)$$

$$Q_{om}(\delta) - \frac{VV_{pq\max}}{X} \leq Q_{om}(\delta) \leq Q_{om}(\delta) + \frac{VV_{pq\max}}{X} \quad (4.34)$$

Bu sonuçlar yalnızca güç akışı kontrolü açısından değil geçici zaman kararlılığı ve güç salınımlarının bastırılmasında da büyük gelişim sağlamaktadır (Şekil 4.21).



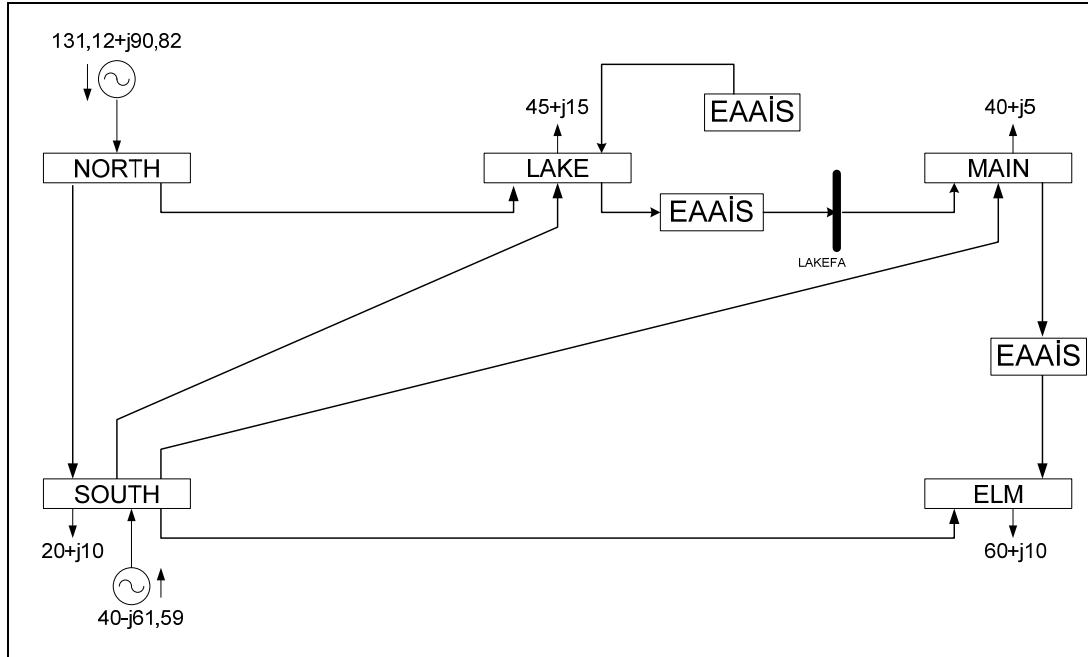
**Şekil 4.21:** BGAK kontrollü iletim hattında: (a) transfer edilebilir gerçek güç alanı, (b) alıcı uç reaktif güç talebi [1]

## 5. BENZETİM

### 5.1 Giriş

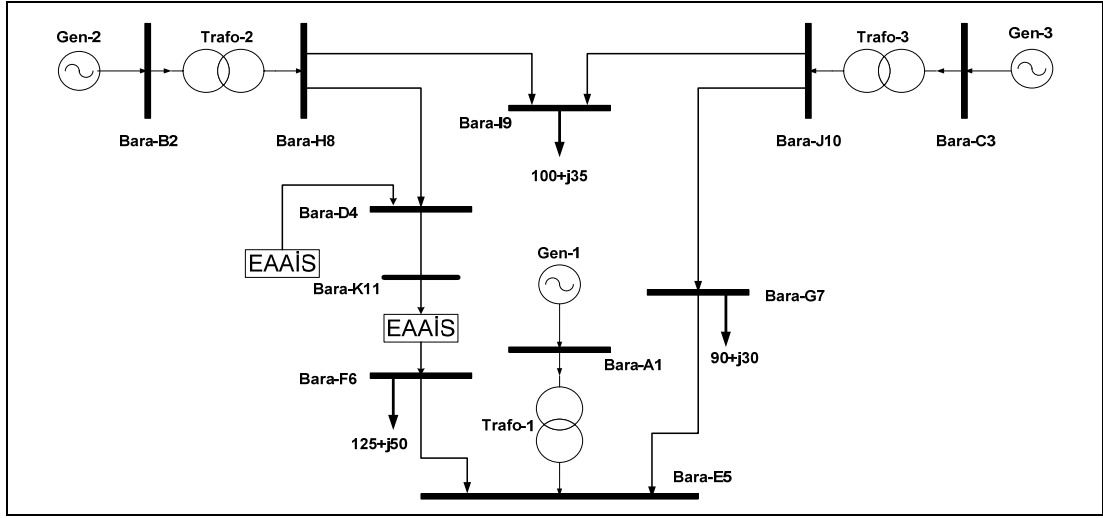
Bölüm 3’te verilen EAAİS cihazlarının faydaları ve birbirleri ile karşılaştırmaları örnek sistemler kullanılarak gösterilmeye çalışılmıştır. Benzetim Matlab bilgisayar programı altında PSAT araç kutusu kullanılarak yapılmıştır [33]. Benzetimde kullanılan EAAİS cihazlarının matematiksel modelleri fazör domenlidir; bunlar gerilim ve açı kararlılığı üzerine yapılan çalışmalarda, yük akışı, sürekli ve geçici hal kararlılık benzetimleri için uygun modellerdir [15]. Bilinen ve daha önce üzerlerinde pek çok çalışma yapılmış üç farklı test sistemi üzerinde çalışılmıştır (Ek B) [3, 19, 34]. Bunlardan ayrı olarak 80 baralı, 112 hatlı, 380kV ve 154kV gerilim seviyelerinden oluşan Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sistemi çizilmiştir; yük akışı yapılmış ve uygun yerlere EAAİS cihazlarının eklenmesiyle sisteme etkileri incelenmiştir [35].

- 5-baralı test sistemi



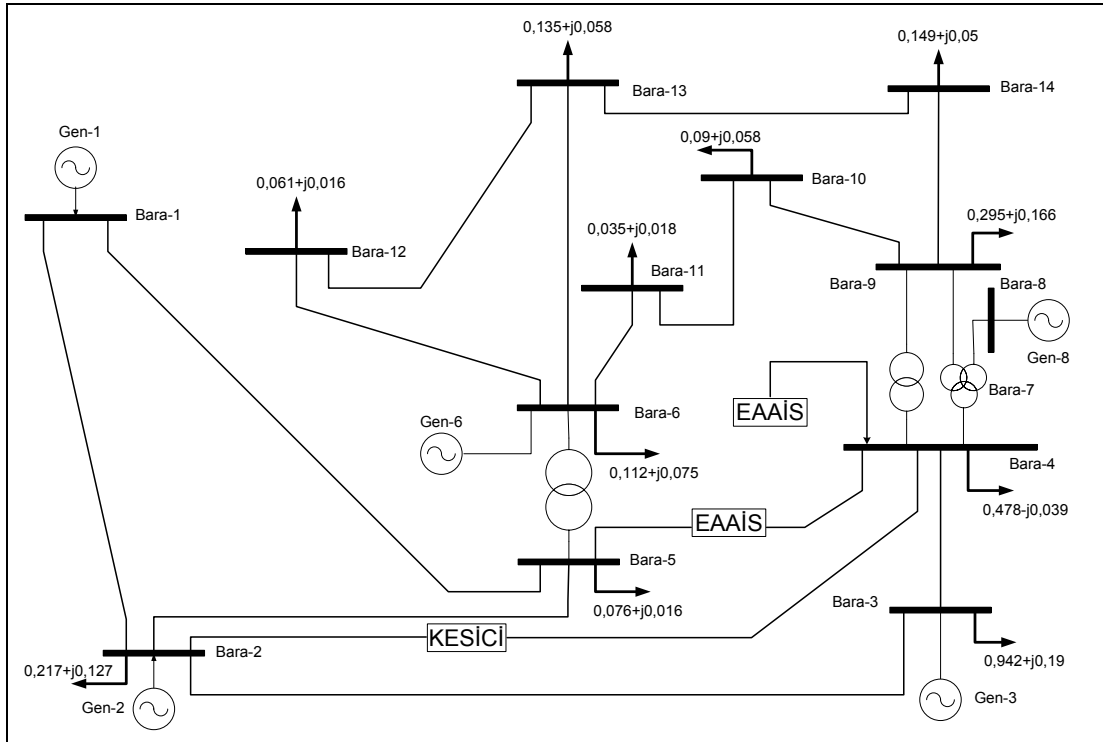
Şekil 5.1: 5-baralı test sisteminin tek kutuplu şeması [19]

- 11-baralı test sistemi



Şekil 5.2: 11-baralı test sisteminin tek kutuplu şeması [3]

- IEEE'nin 14-baralı test sistemi



Şekil 5.3: IEEE'nin 14-baralı test sisteminin tek kutuplu şeması [34]

## 5.2 Test Sistemlerinin Benzetimi, İncelenmesi ve Sonuçlar

### 5.2.1 5-Baralı Test Sisteminin İncelenmesi Ve Elde Edilen Sonuçlar

5-baralı test sistemimizde 2 generatör, 7 hat ve 4 PQ yükü bulunmaktadır (Şekil5.1). [19]. Toplam yük 165MW, 40MVAR'dır (Ek B.1). Kullanılan elemanlar statik modelde seçilmiştir. Sistemde en fazla reaktif yükün olduğu LAKE barasının profili EAAİS cihazlarının ilavesi ile düzeltilmiştir. Buna göre LAKE barasına önce SVK, sonra LAKE-MAIN hattı ortadan ikiye ayrılarak arasına yeni bir bara (LAKEFA) ve TKSK ilave edilerek bara gerilimleri, hatlar üzerindeki yük akışı ve toplam kayıplar incelenmiştir. Buna göre elde edilen sonuçlar Tablo 5.1, 5.2'de ve Şekil 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.1'de LAKE barasının gerilimi, SVK ilavesiyle istenilen 1 pu değerine çıkartılmıştır. SVK sisteme 20,5MVAR'lık bir katkı sağlamıştır. Ayrıca SVK ilavesi sistemdeki diğer bara gerilimleri üzerinde de olumlu etki yapmıştır. TKSK ilavesi ise bara gerilimleri üzerinde bir etki yapmamıştır. Tablo 5.2(a)'da kompanzatör yokken ve ilave edildikten sonra hatların yüklenmelerini görülmektedir. SVK ilavesi sayesinde reaktif gücün LAKE barasından diğer baralara akması sağlanmış ve generatör baralarına bağlı olan hatlardaki reaktif güç akışı azaltılmıştır. SVK'nın uygun baraya yerleştirilmesi ve etkin admitansının kontrolü ile hatlardaki reaktif güç akışı üzerinde kontrol sağlanabilmiştir. TKSK ilavesi ile LAKE-MAIN hattındaki aktif güç akışında, temel duruma oranla %9,7 oranında bir iyileşme sağlanmıştır. Seri kompanzasyon oranı burada %70 seçilmiştir. Bu hat seri kompanzasyon için uygun bir seçim değildir. Seri kompanzatörü %40 seri kompanzasyon ile MAIN-ELM hattı arasına koyduğumuzda ise bu yönde aktif yükteki artış %21,3 olmuştur (Tablo5.2(b)). Buna göre sistemde en fazla reaktif yükün çekildiği LAKE barasında paralel bağlı kompanzatör kullanımı, gerilimler açısından daha iyi bir sonuç verirken, sistemde en fazla aktif yükün çekildiği ELM barası yakınında kullanılan seri kompanzatör hattın transfer kapasitesini arttırmada daha iyi bir sonuç vermiştir. Diğer bir açıdan TKSK'nın kontrolü ile hattın reaktansı kontrol altında tutulabilmekte ve hattın daha fazla aktif güçle yüklenmesine izin verilmektedir.

**Tablo 5.1:** 5-Baralı test sisteminde bara gerilimleri

| Gerilimler (pu) | Temel Dur. | SVK   | TKSK  |
|-----------------|------------|-------|-------|
| 1-North         | 1,06       | 1,06  | 1,06  |
| 2-South         | 1          | 1     | 1     |
| 3-Lake          | 0,987      | 1     | 0,987 |
| 4-Main          | 0,984      | 0,994 | 0,985 |
| 5-Elm           | 0,972      | 0,975 | 0,972 |
| 6-Lakefa        |            |       | 0,987 |

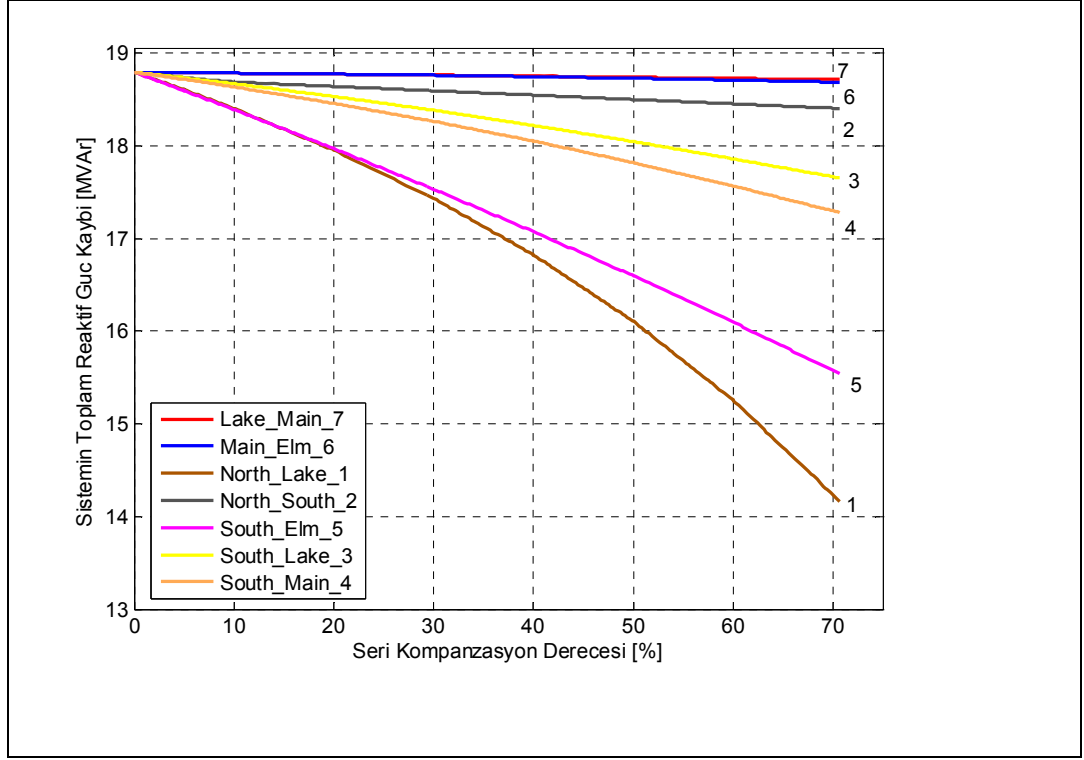
**Tablo 5.2:** (a) LAKE barasında SVK, LAKE-MAIN hattında TKSK varken yük akışları

| Yük Akışı   | Baradan  | Baraya   | Hat | P Akışı [MW] | Q Akışı [MVar] |
|-------------|----------|----------|-----|--------------|----------------|
| Temel Durum | 1-North  | 3-Lake   | 1   | 41,791       | 16,820         |
| SVK         | 1-North  | 3-Lake   | 1   | 41,946       | 11,282         |
| TKSK        | 1-North  | 3-Lake   | 1   | 42,551       | 16,996         |
| Temel Durum | 3-Lake   | 4-Main   | 7   | 19,386       | 2,865          |
| SVK         | 3-Lake   | 4-Main   | 7   | 19,646       | 11,192         |
| TKSK        | 6-Lakefa | 4-Main   | 7   | 21,264       | 2,869          |
|             | 3-Lake   | 6-Lakefa | 8   | 21,264       | 2,890          |

**Tablo 5.2:** (b) MAIN-ELM hattında TKSK varken yük akışı

| Yük Akışı   | Baradan | Baraya | Hat | P Akışı [MW] | Q Akışı [MVar] |
|-------------|---------|--------|-----|--------------|----------------|
| Temel Durum | 4-Main  | 5-Elm  | 6   | 6,598        | 0,5183         |
|             | 5-Elm   | 4-Main |     | -6,555       | -5,1701        |
| TKSK        | 4-Main  | 5-Elm  | 6   | 8,002        | 5,227          |
|             | 5-Elm   | 4-Main |     | -8,002       | 3,191          |

Sistemdeki 7 hat üzerine seri kompanzatör ilavesi yapılarak sistemin toplam reaktif kayıplarının kontrolörün seri kompanzasyon oranıyla değişimi elde edilmiştir (Şekil 5.4). Burada seri kompanzasyonun etkisini görebilmek için TKSK yerine sabit reaktanslı devre elemanı kullanılmıştır. Buna göre seri kompanzatörün ilavesi ile tüm hatlarda reaktif güç kayıplarında belli oranlarda azalma olmuştur. Reaktif güç alışverişinin en fazla olduğu NORTH-LAKE hattında en yüksek kayıp indirimi sağlanmıştır. Sıralama hatlardan akan reaktif güçlerle genelde orantılı olarak değişmiştir.



**Şekil 5.4:** 5-Baralı test sisteminde her hat için seri kompanzasyon oranına göre toplam reaktif güç kaybı

### 5.2.2 11-Baralı Test Sisteminin İncelenmesi ve Elde Edilen Sonuçlar

Tek kutuplu şeması Şekil 5.2’de görülen sistem, model 1 tipinde otomatik gerilim regülatörü ile donatılmış 3 generatör, 3 transformör, 7 hat ve 3 PQ yükünden oluşur [3]. Sistemdeki toplam yük 315MW ve 115MVar’dır (Ek B.2). 4 numaralı referansta yer alan 9-baralı orijinal test sistemi yapılacak incelemeye uygun olarak önce 10 ve sonra 11 baralı hale getirilmiştir. İlk olarak H8-F6 baraları arasında hat ortadan ikiye ayrılarak D4 barası ilave edilmiştir. Seçim en fazla yükün olduğu baranın F6 barası olmasından ötürü yapılmıştır. Böylece 10 baraya çıkan sistem, TKSK eklenmesi sırasında ilave bir K11 barasıyla 11-baralı bir sistem halini almıştır. SVK, D4 barasına; TKSK D4-F6 baraları arasında bağlanarak benzetim yapılmıştır. Kompanzatör yokken (temel durum), SVK varken, TKSK varken ve SVK-TKSK birlikte varken olmak üzere toplam 4 durumda F6 barasındaki aktif yük arttırılarak sistemin durum matrisinin özdeğerleri (küçük işaret kararlılığı), bara gerilim seviyeleri ve gerilim kararlılığı incelenmiştir.

Öncelikle sistemin değişik yüklenme durumlarında lamdanın (bozulma parametresi) değişimine göre özdeğerler bulunmuştur [16]. Sistemin salınımlı çalışmaya geçtiği değerler elde edilmiştir. Kompanzatörlerin ilavesi ile sistemin, lamdanın hangi

değerine kadar salınımsız çalışmaya geçmeden çalıştığı bulunmuştur. Sistemin bozulmaya gittiği noktalar karşılaştırılmıştır (Tablo 5.3).

$\lambda$ : yüklenme (bozulma) parametresi

$$P_L = P_{L0} (1 + \lambda) \quad (5.1)$$

$P_{L0}$ , yükün başlangıç değeridir. Yüklenme parametresi 0,01'lik adımlarla arttırılarak her durum için bozulmanın başladığı noktalar özdeğerlere bakılarak elde edilmiştir. Buna göre sonuçlar Tablo 5.3'te verilmiştir.

**Tablo 5.3:** 11-Baralı test sisteminde farklı durumlarda sistemin bozulma noktaları ve durum matrisinin özdeğerleri

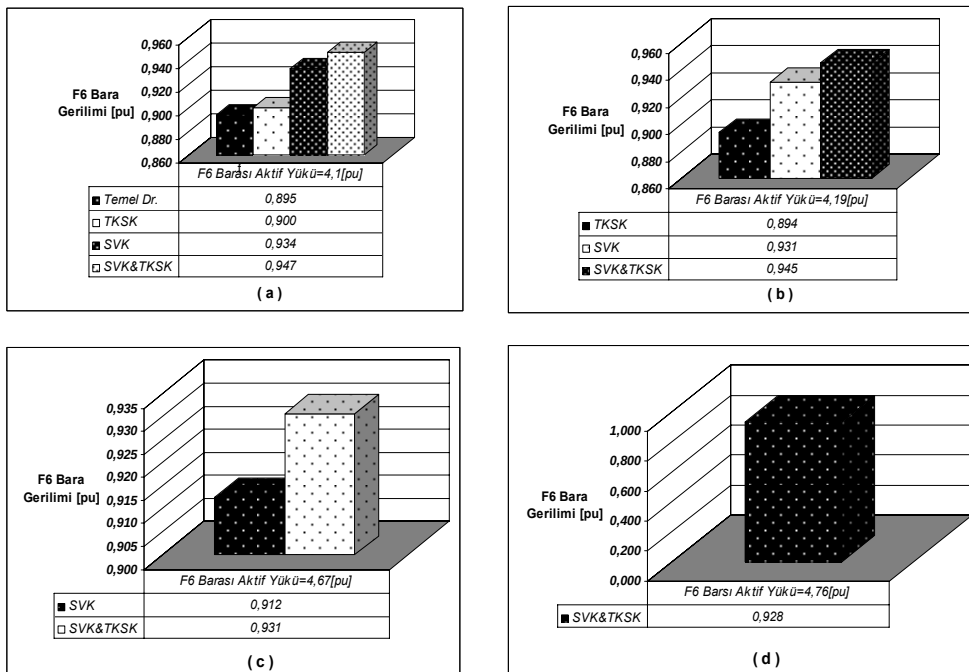
| Lamda<br>[ $\lambda$ ]<br>[pu] | F6 Barası Yüğü<br>$S = P + jQ$ [pu] | Her Kararsızlık Noktası İçin Durum Matrisinin Gerçek Kısmı En Küçük Olan 4 Özdeğeri |                |               |                |               |                |                 |                |
|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|
|                                |                                     | Temel Durumda                                                                       |                | TKSK Varken   |                | SVK Varken    |                | SVK&TKSK Varken |                |
|                                |                                     | Gerçek Ks.                                                                          | Sanal Ks.      | Gerçek Ks.    | Sanal Ks.      | Gerçek Ks.    | Sanal Ks.      | Gerçek Ks.      | Sanal Ks.      |
| 0                              | 1,25+j0,5                           | -0,1955                                                                             | 8,3764         | -0,2039       | 8,4239         | -0,1949       | 8,3565         | -0,2006         | 8,4163         |
|                                |                                     | -0,1955                                                                             | -8,3764        | -0,2039       | -8,4239        | -0,1949       | -8,3565        | -0,2006         | -8,4163        |
|                                |                                     | -0,2636                                                                             | 1,3074         | -0,2702       | 1,2999         | -0,4446       | 0,5707         | -0,4436         | 0,5693         |
|                                |                                     | -0,2636                                                                             | -1,3074        | -0,2702       | -1,2999        | -0,4446       | -0,5707        | -0,4436         | -0,5693        |
| 2,28                           | 4,1+j0,5                            | -0,4151                                                                             | 7,6704         | -0,4107       | 7,7253         | -0,3207       | 7,7722         | -0,3201         | 7,8532         |
|                                |                                     | -0,4151                                                                             | -7,6704        | -0,4107       | -7,7253        | -0,3207       | -7,7722        | -0,3201         | -7,8532        |
|                                |                                     | <b>0,0053</b>                                                                       | <b>1,8086</b>  | -0,0461       | 1,7484         | -0,4682       | 0,5924         | -0,4617         | 0,8916         |
|                                |                                     | <b>0,0053</b>                                                                       | <b>-1,8086</b> | -0,0461       | -1,7484        | -0,4682       | -0,5924        | -0,4617         | -0,8916        |
| 2,35                           | 4,19+j0,5                           |                                                                                     |                | -0,4354       | 0,8654         | -0,3301       | 7,6621         | -0,3281         | 7,7572         |
|                                |                                     |                                                                                     |                | -0,4354       | -0,8654        | -0,3301       | -7,6621        | -0,3281         | -7,7572        |
|                                |                                     |                                                                                     |                | <b>0,0035</b> | <b>1,8125</b>  | -0,4701       | 0,5939         | -0,4626         | 0,8928         |
|                                |                                     |                                                                                     |                | <b>0,0035</b> | <b>-1,8125</b> | -0,4701       | -0,5939        | -0,4626         | -0,8928        |
| 2,74                           | 4,67+j0,5                           |                                                                                     |                |               |                | -0,4788       | 0,9106         | -0,4684         | 0,9000         |
|                                |                                     |                                                                                     |                |               |                | -0,4788       | -0,9106        | -0,4684         | -0,9000        |
|                                |                                     |                                                                                     |                |               |                | <b>0,0404</b> | <b>6,0374</b>  | -0,2413         | 6,5720         |
|                                |                                     |                                                                                     |                |               |                | <b>0,0404</b> | <b>-6,0374</b> | -0,2413         | -6,5720        |
| 2,81                           | 4,76+j0,5                           |                                                                                     |                |               |                |               |                | -0,4697         | 0,9016         |
|                                |                                     |                                                                                     |                |               |                |               |                | -0,4697         | -0,9016        |
|                                |                                     |                                                                                     |                |               |                |               |                | <b>0,0371</b>   | <b>6,0633</b>  |
|                                |                                     |                                                                                     |                |               |                |               |                | <b>0,0371</b>   | <b>-6,0633</b> |

Özdeğerlerin pozitif eksene geçtiği noktalar sistemin bozulma (bifurcation) noktalarıdır. Yüklenme parametresinin sıfır olduğu durumda pozitif yarı düzlemde gerçek ve sanal bir kök yoktur; sistem karardır. Sisteme kompanzatör ilavesi ile

negatif yarı düzlemde ve gerçek ekseninde kökler dahil olmuştur. Aynı zamanda hemen hemen tüm özdeğerlerin gerçek kısımlarında negatif ekseninde bir büyüme söz konusudur. Kompanzatör ilavesi sistemi daha kararlı bir noktaya doğru çekmiştir. Yüklenme parametresinin artırıldığı durumlarda tabloda sistemin ilgili lamda değerinde bir çift kompleks konjuge özdeğere sahip olduğu ve sanal eksenin hemen sağına doğru hareket ettiği görülmüştür. Bölüm 2.1.6’da anlatıldığı üzere sistemde bir bozulma görülmekte olup sistem salınımlı çalışmaya geçmiştir.

F6 barasındaki aktif yükün 4,1pu’ya kadar artırıldığında kompanzatör yokken sistemde bozulma başlamıştır. Sisteme TSKK eklenerek yüklenme parametresi arttırılmaya devam edilmiştir. 4,19pu’ya geldiğimizde sistemde bozulma olduğu görülmüştür. SVK ilave edilerek yük arttırılmaya devam edilmiş; daha üst bir noktada (4,67pu noktası) bozulma yaşanmıştır. Bu noktadan sonra sistemde her iki EAAİS cihazı bir arada kullanılmış ve bozulma noktası daha yukarıya taşınmıştır. Yük, 4,75pu’ya kadar sorunsuz arttırılmıştır. Buna göre kompanzatör ilavesi küçük işaret kararlılığı açısından sisteme önemli bir katkı sağlamaktadır. Paralel bağlı kontrolörler, seri bağlılara göre yüklenme parametresinin daha üst değerlerinde sistemin kararsızlığa gitmesine olanak vermiştir. Her iki kontrolörün bir arada olması durumunda beklendiği üzere kararsızlık sınırı daha yukarı taşınmıştır.

**Şekil 5.5:** 11-Baralı test sisteminde yüklenme parametresine göre F6 bara gerilimlerinin karşılaştırılması; (a) aktif yük 4,1pu, (b) aktif yük 4,19pu, (c) aktif yük 4,67pu, (d) aktif yük 4,76pu



Şekil 5.5'teki sonuçlara göre sisteme kompanzatör eklenmesi yükün arttırıldığı durumlarda da bara gerilimlerinin düşmesini engellemiştir. Şekil 5.5(a)'da sistemin ilk kez gerilim çöküntüsüne uğradığı durumda kompanzatörlerin ilave edilmesi bara geriliminde iyileşme sağlamıştır. Şekil 5.5(b)'de ise paralel bağlı kompanzatörlerin bulunduğu durumlar, sadece seri bağlı kompanzatörün bulunduğu duruma göre sırasıyla %4,1 ve %5,7 oranında gerilimi daha fazla yükseltmişler. Şekil 5.5(c)'de ise birleşik yapılı kompanzatörün olduğu durum F6 bara geriliminde, sadece paralel bağlı kompanzatörün olduğu duruma göre %2,08'lik oranda daha fazla bir katkı sağlamıştır. Şekil 5.5(d)'de ise sistemin bozulmaya uğramasına rağmen birleşik yapılı kompanzatörün, F6 barasındaki gerilimi sınırlar içinde tutmaya devam ettiği görülmüştür.

**Tablo 5.4:** 11-Baralı test sisteminde farklı durumlarda sistemin gerilim çökmesi yaşadığı noktalar ve  $J_{LFV}$  matrisinin özdeğerleri

| Lamda [ $\lambda$ ] [pu] | F6 Barası<br>Yükü<br>$S = P + jQ$<br>[pu] | Her Çökme Noktası İçin Jakobiyen Matrisin En Küçük 4 Özdeğeri |               |               |                 |
|--------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------|---------------|-----------------|
|                          |                                           | Temel Durumda                                                 | TKSK Varken   | SVK Varken    | SVK&TKSK Varken |
|                          |                                           | Gerçek Ks.                                                    | Gerçek Ks.    | Gerçek Ks.    | Gerçek Ks.      |
| 0                        | 1,25+j0,5                                 | 1,365                                                         | 1,206         | 1,388         | 1,215           |
|                          |                                           | 7,263                                                         | 6,189         | 7,257         | 6,183           |
|                          |                                           | 7,943                                                         | 8,222         | 7,940         | 8,219           |
|                          |                                           | 15,979                                                        | 14,225        | 15,945        | 14,216          |
| 2,91                     | 4,89+j0,5                                 | <b>-0,013</b>                                                 | 0,142         | 0,289         | 0,350           |
|                          |                                           | 5,880                                                         | 5,415         | 6,316         | 5,719           |
|                          |                                           | 7,430                                                         | 7,609         | 7,518         | 7,772           |
|                          |                                           | 14,596                                                        | 13,478        | 15,110        | 13,751          |
| 3                        | 5,00+j0,5                                 |                                                               | <b>-0,003</b> | 0,215         | 0,308           |
|                          |                                           |                                                               | 5,334         | 6,261         | 5,700           |
|                          |                                           |                                                               | 7,536         | 7,496         | 7,743           |
|                          |                                           |                                                               | 13,396        | 15,059        | 13,724          |
| 3,24                     | 5,30+j0,5                                 |                                                               |               | <b>-0,001</b> | 0,172           |
|                          |                                           |                                                               |               | 6,097         | 5,641           |
|                          |                                           |                                                               |               | 7,448         | 7,657           |
|                          |                                           |                                                               |               | 14,905        | 13,639          |
| 3,48                     | 5,60+j0,5                                 |                                                               |               |               | <b>-0,003</b>   |
|                          |                                           |                                                               |               |               | 5,568           |
|                          |                                           |                                                               |               |               | 7,555           |
|                          |                                           |                                                               |               |               | 13,536          |

Yüklenme parametresi tekrardan sıfırdan 0,01 adımlarla arttırılarak  $J_{LFV}$  Jakobiyen matrisine bakılmıştır. Bu sayede bara gerilimlerinin çökmeye maruz kaldığı noktalar belirlenmiştir (Tablo 5.4).

Tablo 5.4'te sistemin farklı durumlarında gerilim çöküntüsünün meydana geldiği yüklenme parametrelerine ilişkin  $J_{LFV}$  matrisinin özdeğerleri görülmektedir. Sistemin durum matrisinin özdeğerlerine bakarak elde ettiğimiz kararsızlık veya salınımlı çalışma sonuçları bu kısımda da benzerdir. TKSK'nın ilavesi 2,91pu'ya kadar yüklenmeye müsaade ederken SVK, sınırı 3,24pu'ya çıkartmıştır. Birleşik yapıli kompanzatörün kullanılması durumunda ise yüklenme parametresi 3,48'e kadar çıkarılabilmektedir. Görülmektedir ki, paralel bağıli kompanzatörler, seri bağıllara göre gerilim çökmesine karşı sisteme daha fazla katkı yapabilmektedir.

### 5.2.3 IEEE'nin 14-Baralı Test Sisteminin İncelenmesi ve Elde Edilen Sonuçlar

Tek kutuplu çizimi Şekil 5.3'te gördüğümüz 14-baralı sistem, IEEE'nin model 1 tipindeki otomatik gerilim regülatörü ile donatılmış 5 generatör, 3 transformatör, 21 hat ve 11 PQ yükünden oluşur. Sistemdeki toplam anma yükü 259MW ve 73,5MVar'dır. Yük akışı bilgileri 34 numaralı referanstan elde edilmiştir (Ek B.3). Sistem yükleri 1,4 katı arttırılarak sistemin ağır yük altında benzetimi yapılmıştır.

$$\lambda = 0,4 \quad (5.2)$$

$$P_{\text{toplam yük}} = 1,4 * 259 = 362,6 \text{MW} \quad (5.3)$$

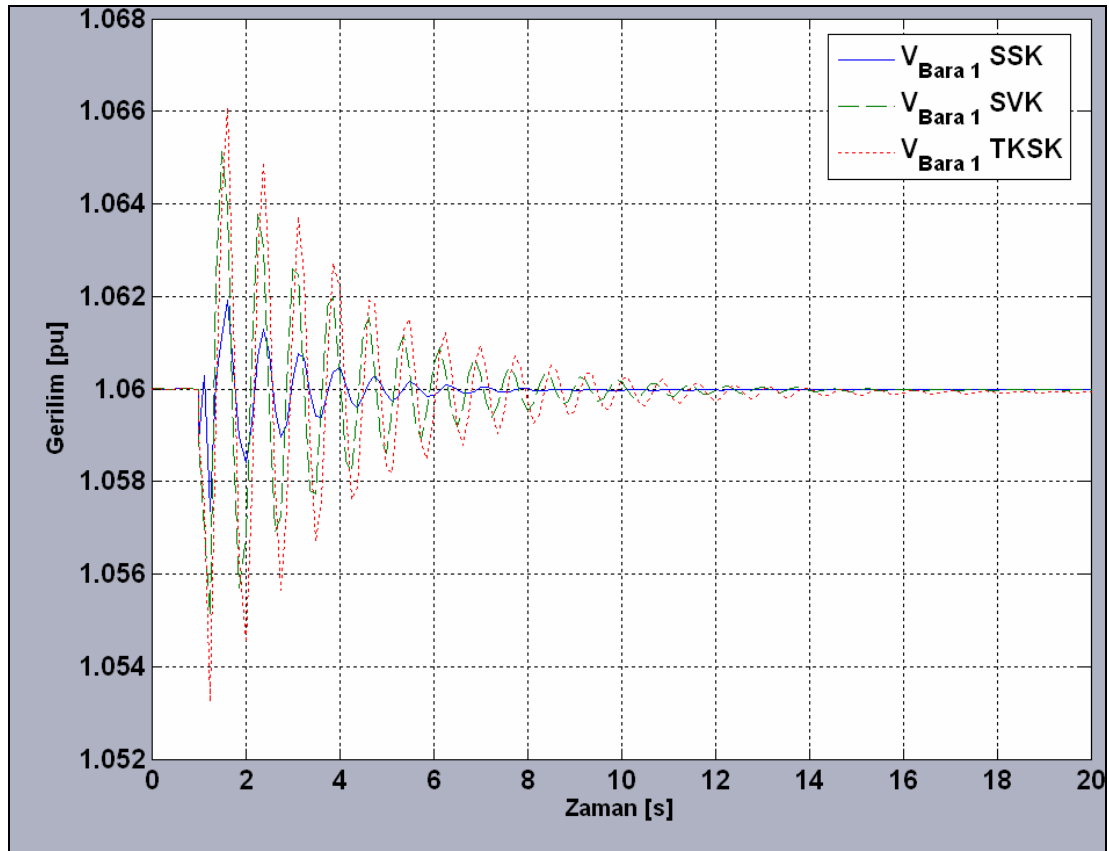
$$Q_{\text{toplam yük}} = 1,4 * 81,3 = 113,82 \text{MVar} \quad (5.4)$$

Amaç, bir hata veya beklenmedik bir olay nedeniyle hatlardan biri kesildiğinde sistemde generatörlerin rotor hızlarında, rotor açılarında ve bara gerilimlerinde oluşacak salınının değişimini ve kompanzatörlerin bu salınımları bastırmadaki etkinliğini ölçmektir. Diğer bir amacımız sistemde yüklenme sonucu meydana gelecek bara gerilimleri değişimlerine kompanzatörlerin katkısını görmektir. Bu test sisteminde öncekilerden farklı olarak kompanzatörlerin geçici hal cevaplarını karşılaştırırken temel üstünlüğü yüksek cevap hızı olan üçüncü kuşak EAAİS cihazı SSK'da kullanılmıştır.

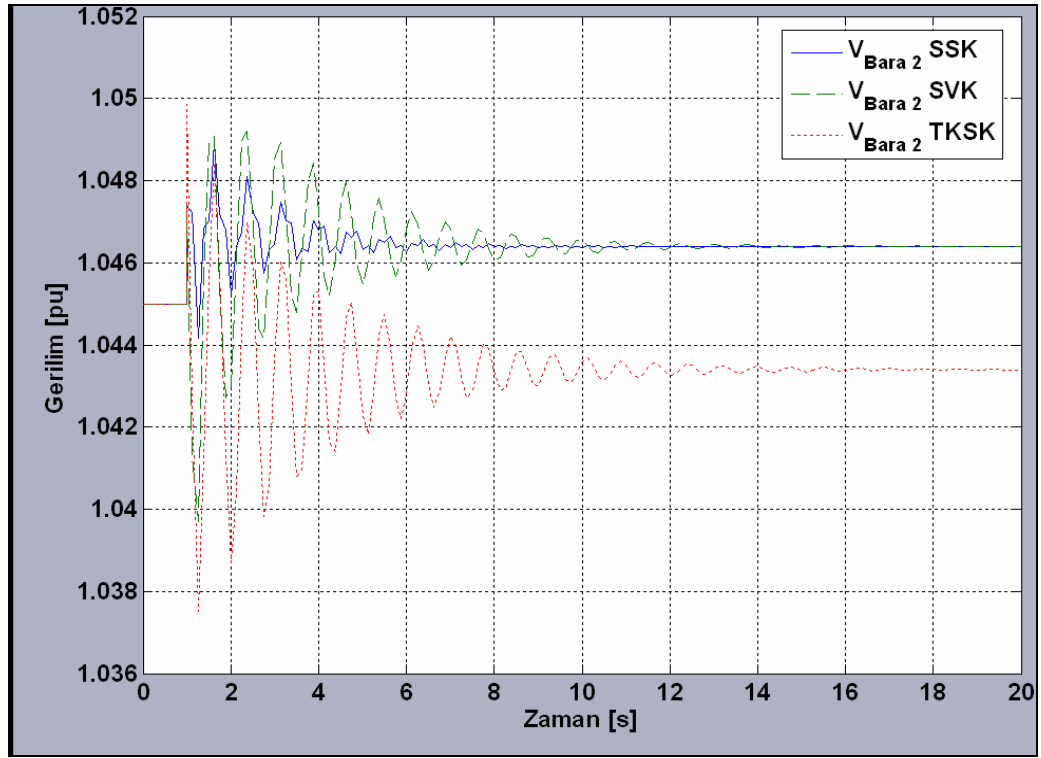
Öncelikle sistemde 4 numaralı baraya sırasıyla SVK ve SSK, 4-5 baraları arasına TKSK eklenmiştir. 2-4 hattı bir kesici üzerinden benzetimin 1.saniyesinde devre dışı

bıraktırılmıştır. 2-4 hattının seçilmesinin nedeni aktif yük akışında en fazla yüklenmiş 3. hat olmasıdır. Ayrıca bu hattın paralelindeki 4-5 hattının da aktif yük açısından en fazla yüklenmiş 2. hat olması EAAİS cihazının eklenmesi için uygundur [33]. Buna göre üç durumda da bara gerilimleri izlenmiştir. Özellikle hatta yakın olan ve generatörlerin olduğu bara gerilimleri önem arz etmektedir.

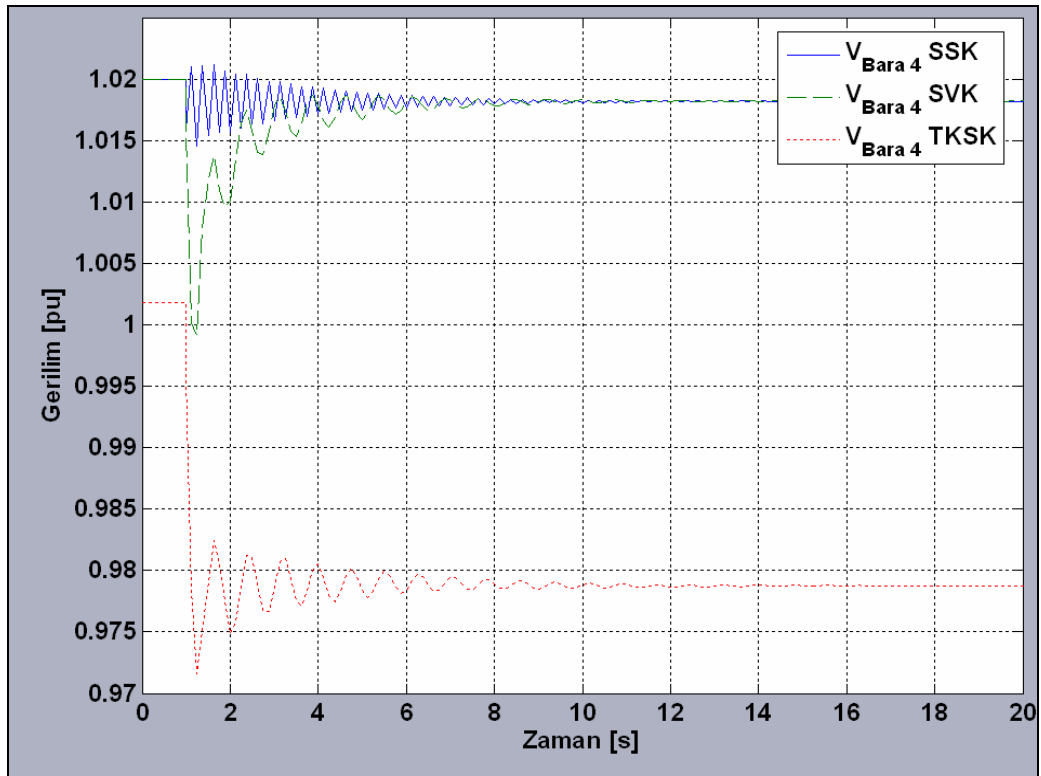
Devre dışı kalan hatta en yakın noktalarda bulunan baralardaki generatörlerin rotor hızı ve rotor açısı değişimlerine bakılmıştır.



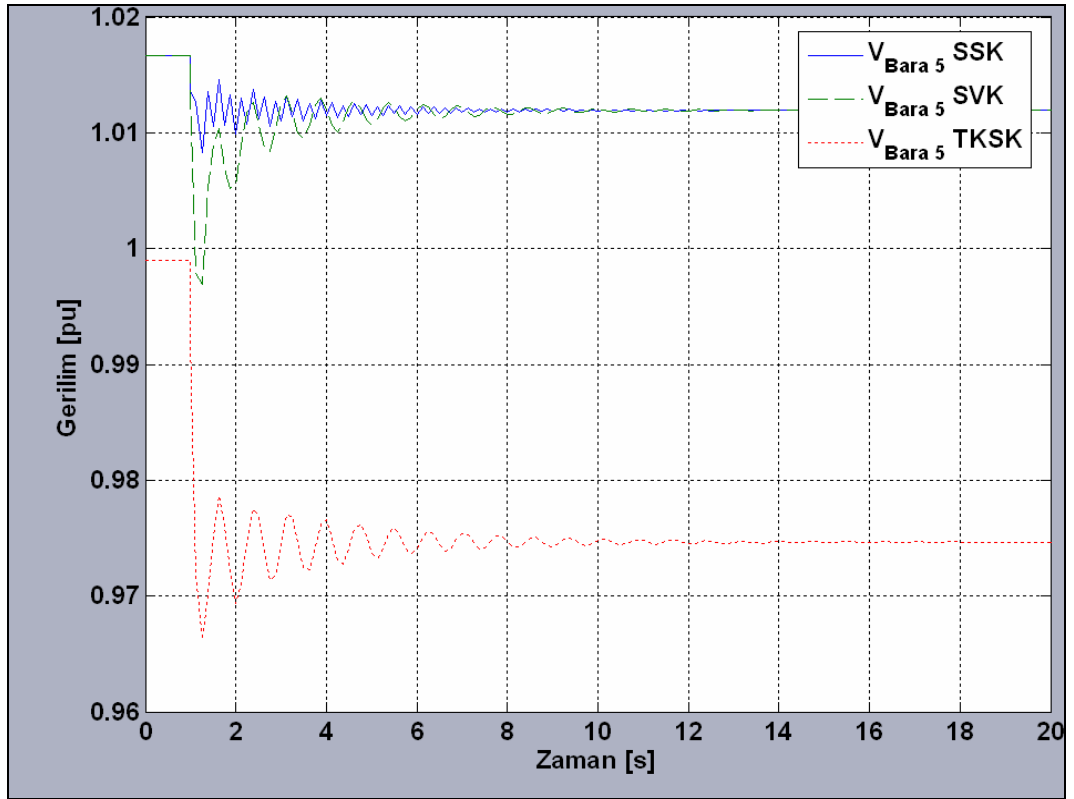
**Şekil 5.6:** 14-Baralı test sisteminde 2-4 hattının kesilmesi sonrası 1 numaralı bara gerilimindeki salınımların bastırılması



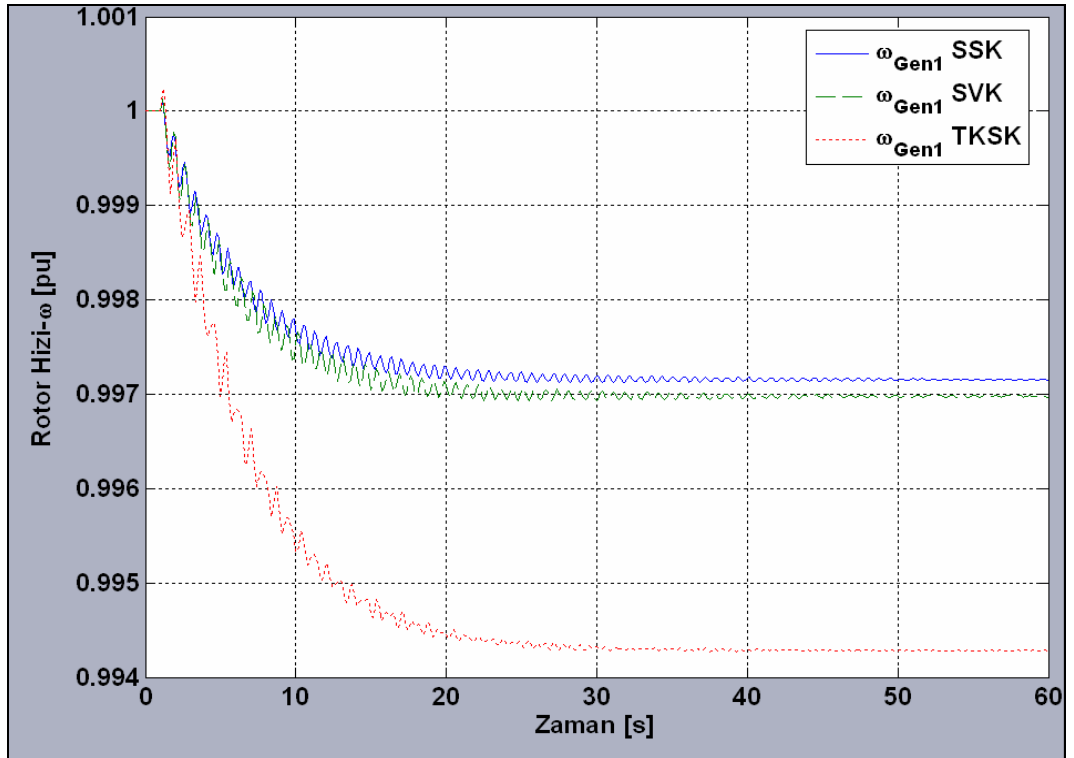
Şekil 5.7: 14-Baralı test sisteminde 2-4 hattının kesilmesi sonrası 2 numaralı bara gerilimindeki salınımın bastırılması



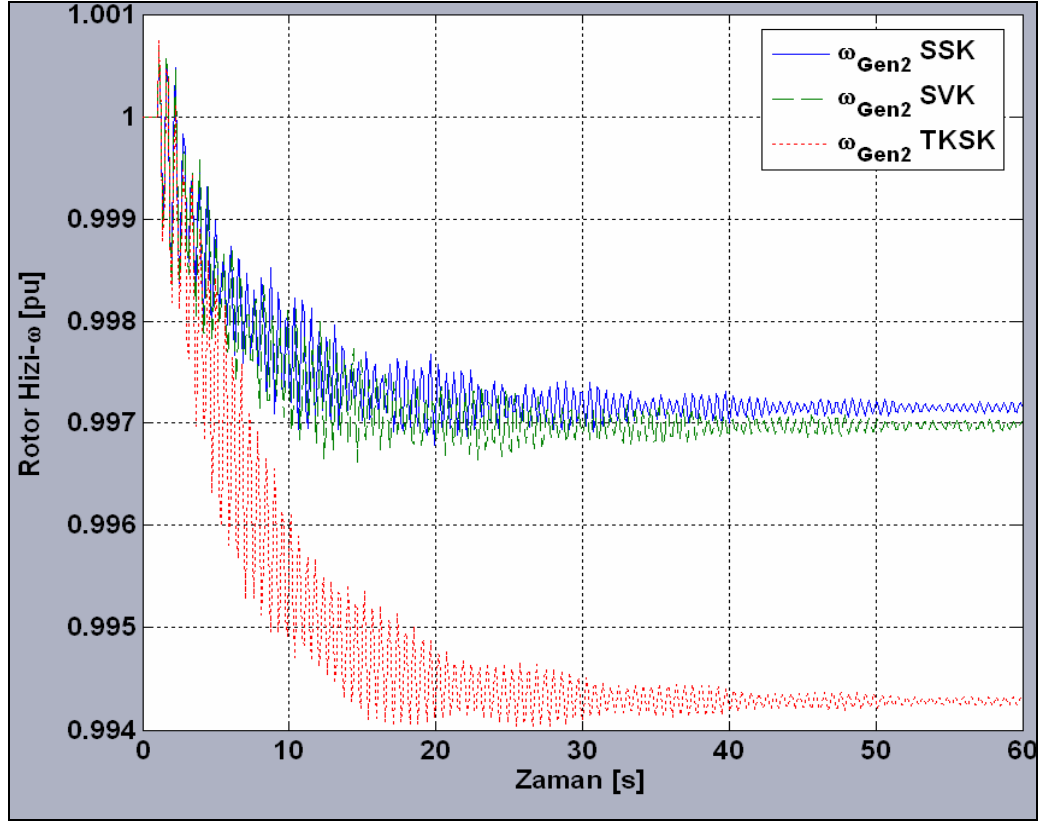
Şekil 5.8: 14-Baralı test sisteminde 2-4 hattının kesilmesi sonrası 4 numaralı bara gerilimindeki salınımın bastırılması



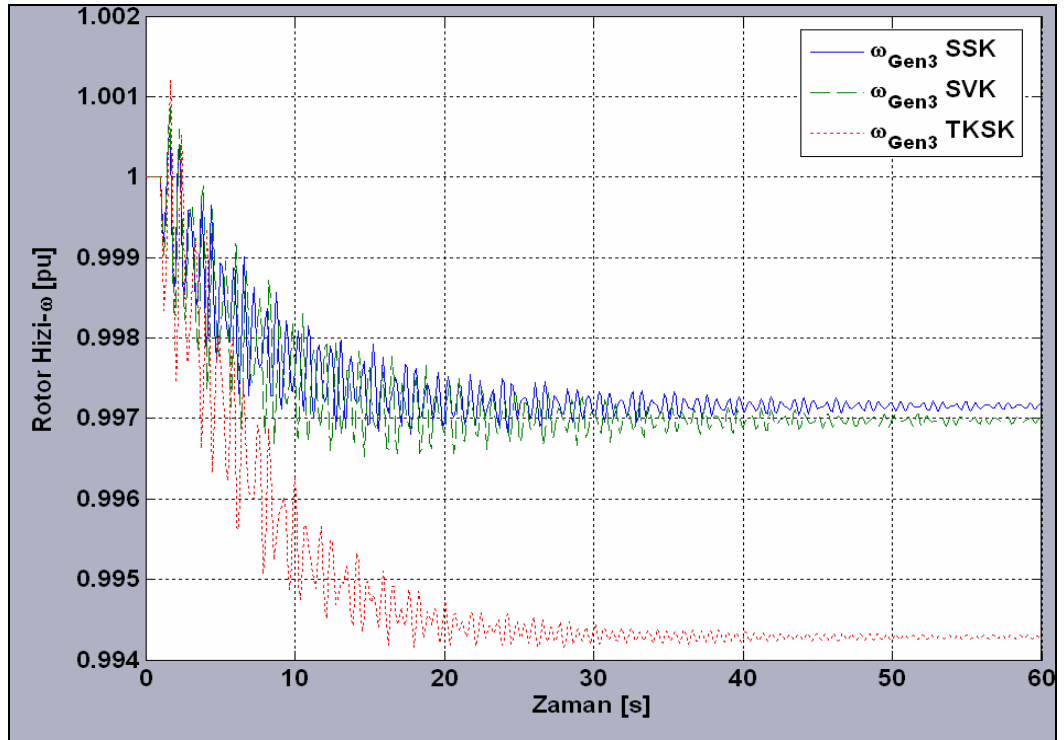
Şekil 5.9: 14-Baralı test sisteminde 2-4 hattının kesilmesi sonrası 5 numaralı bara gerilimindeki salınımın bastırılması



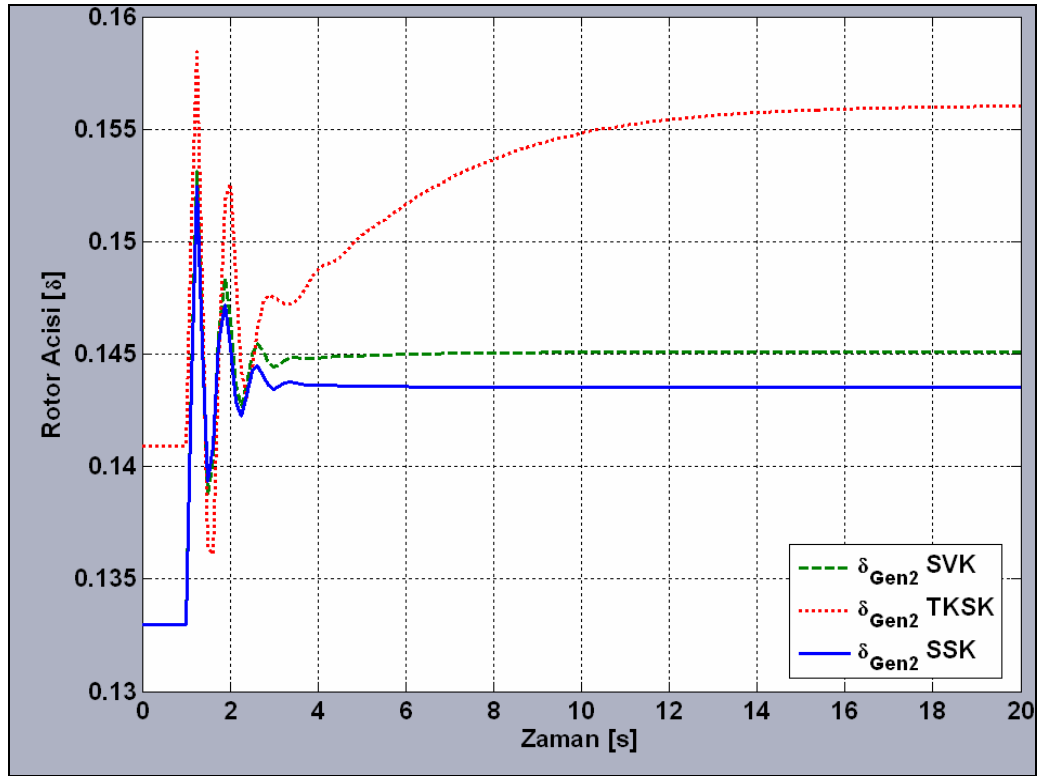
Şekil 5.10: 14-Baralı test sisteminde 2-4 hattının kesilmesi sonrası 1 numaralı baraya bağlı generatörün rotor hızının değişimi



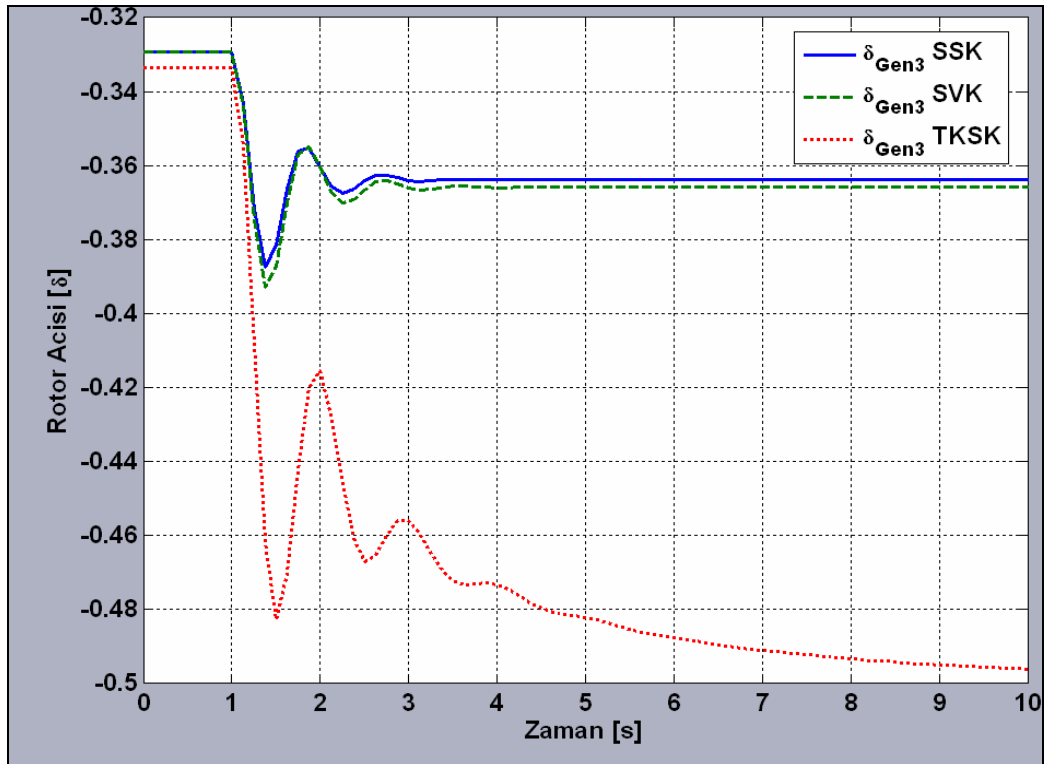
Şekil 5.11: 14-Baralı test sisteminde 2-4 hattının kesilmesi sonrası 2 numaralı baraya bağlı generatörün rotor hızının değişimi



Şekil 5.12: 14-Baralı test sisteminde 2-4 hattının kesilmesi sonrası 3 numaralı baraya bağlı generatörün rotor hızının değişimi



Şekil 5.13: 14-Baralı test sisteminde 2-4 hattının kesilmesi sonrası 2 numaralı baraya bağlı generatörün rotor açısının değişimi



Şekil 5.14: 14-Baralı test sisteminde 2-4 hattının kesilmesi sonrası 3 numaralı baraya bağlı generatörün rotor açısının değişimi

Şekil 5.6, 5.7, 5.8 ve 5.9’da 2-4 hattının devreden çıkmasından itibaren bu baralardaki gerilim profilleri görülmektedir. 1 numaralı bara referans bara, 2 numaralı bara devre dışı kalan hatta en yakın generatör barası, 4 ve 5 numaralı baralar ise yük ve kompanzatörlerin bağlandığı baralar olduğu için seçilmiştir. Gerilimlerdeki salınımlar kompanzatörler sayesinde bastırılmış ve sınırlar içerisinde bir değere oturması sağlanmıştır. Tüm şekillerde paralel bağlı kompanzatörler seri bağlı kompanzatöre göre sistemi reaktif güçle besleyip salınımları daha hızlı bastırmıştır. SVK ve SSK karşılaştırıldığında ise SSK salınımlara karşı daha hızlı cevap vermekte ve salınının genliğini daha küçük tutmaktadır. Tablo 5.5’te bara gerilimlerinin farklı durumlardaki yaptığı salınım zarfının veya salınım genliğinin yüzde olarak ifadeleri görülmektedir. En az genlikli salınım SSK’lı durumda elde edilmiştir.

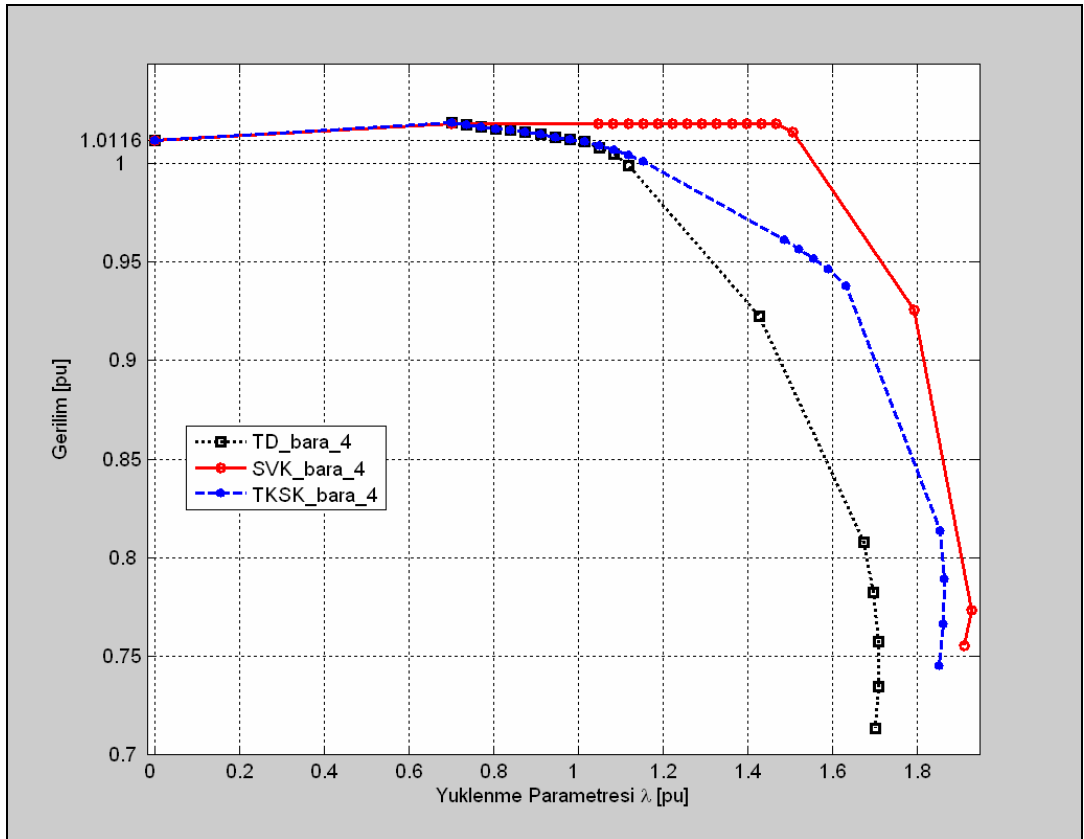
**Tablo 5.5:** 14-Baralı test sisteminde 2-4 hattı kesildiğinde farklı durumlarda 1, 2, 4 ve 5 numaralı baralara ilişkin gerilim genliklerinin salınımlarının yüzde olarak ifadeleri

| Bara No | EAAİS Kontrolörü | Gerilim Genliği Zarfı [%] |
|---------|------------------|---------------------------|
| 1       | TKSK             | 1,2                       |
|         | SVK              | 0,94                      |
|         | SSK              | 0,47                      |
| 2       | TKSK             | 1,15                      |
|         | SVK              | 0,86                      |
|         | SSK              | 0,38                      |
| 4       | TKSK             | 3,03                      |
|         | SVK              | 2,06                      |
|         | SSK              | 0,57                      |
| 5       | TKSK             | 3,27                      |
|         | SVK              | 1,98                      |
|         | SSK              | 0,88                      |

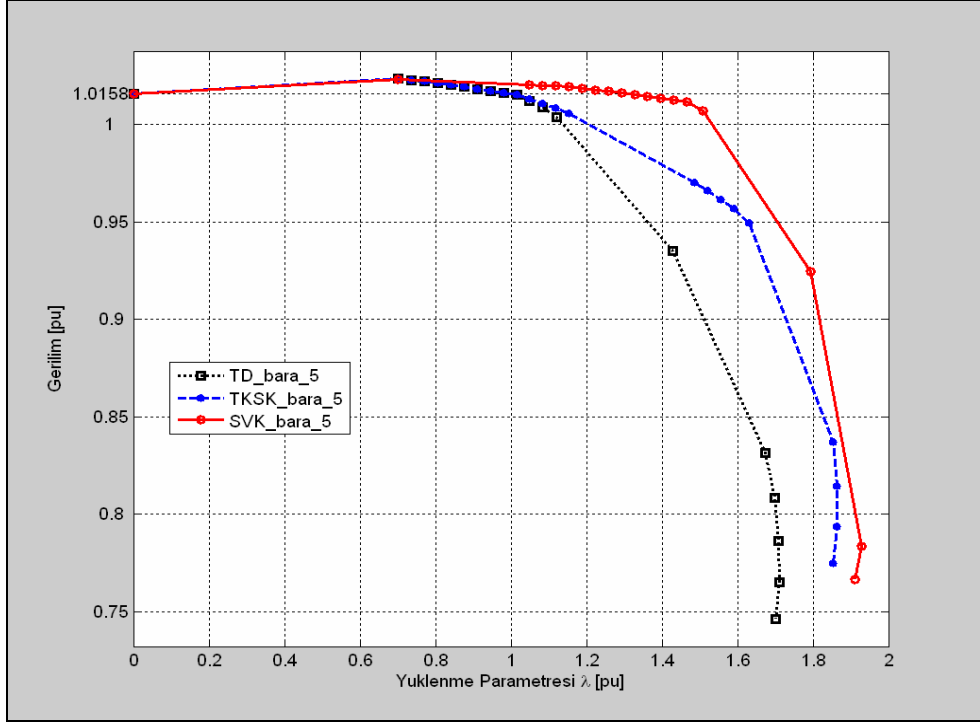
Şekil 5.10, 5.11 ve 5.12’de 1,2 ve 3 numaralı generatörlerin zamana göre rotor hızı cevaplarına bakılmıştır. Tüm kompanzatörler, 2-4 hattı kesintisinden dolayı meydana gelen salınımı bastırmıştır. Paralel bağlı kontrolörler, seri bağlı kontrolöre göre rotor hızı salınımlarını daha kısa sürede bastırmış ve daha üst bir noktada sürekli hal değerine oturmasını sağlamıştır. SVK ve SSK karşılaştırmasında ise her iki generatör için de en iyi performans SSK tarafından gösterilmiştir.

Şekil 5.13 ve 5.14'te 2 ve 3 numaralı baralardaki generatörlerin rotor açısı salınımları görülmektedir. Paralel bağlı EAAİS cihazları rotor açısındaki salınımı daha hızlı ve daha küçük genlikli bir zarf içinde bastırmıştır. SSK, SVK'ya göre daha iyi bir sonuç ortaya koymaktadır; rotor açısının genliği daha küçük olup salınım sıfır eksenine daha yakın bir noktada son bulmaktadır.

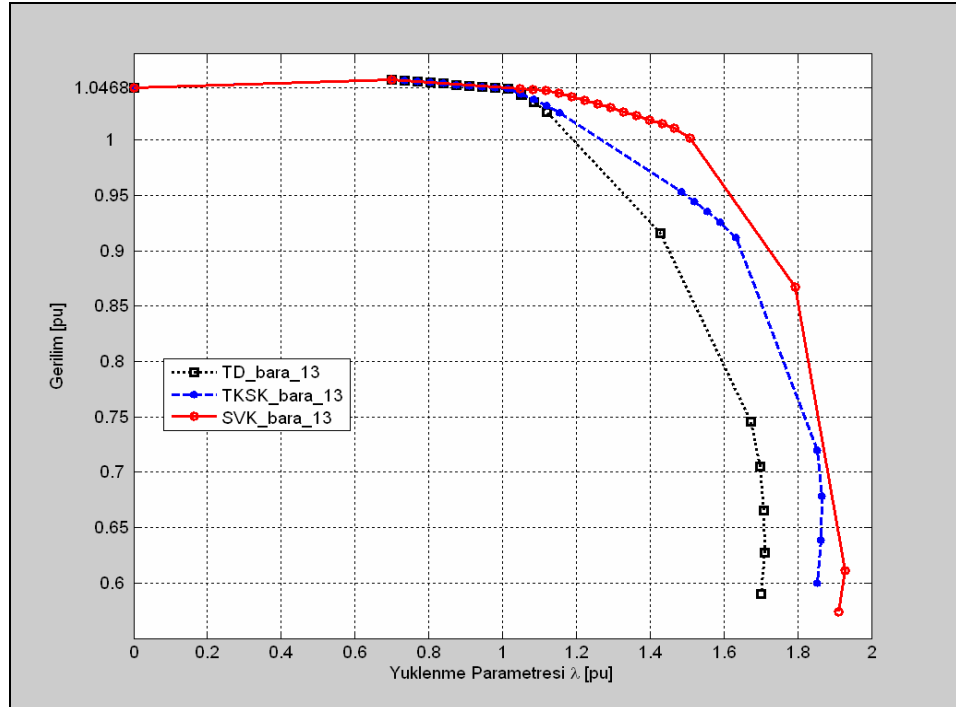
Hattın yüklenme parametresi lamda ( $\lambda$ ) ile bara gerilimleri arasındaki değişimi izlemek amacıyla sistemin yüklenme parametresi lamda sıfır yapılarak sistem nominal yükteki haline getirilmiştir. Benzetimde baralara ilişkin PV reaktif sınırları ve reaktif güç üretim sınırları dikkate alınmıştır. Simülasyon gerilim çökmesinin olduğu yani çatallaşmanın gerçekleştiği noktada durdurulmuş; burun eğrisinin (nose curve) tamamlanmasına izin verilmemiştir. Buna göre sonuçlar Şekil 5.15, 5.16 ve 5.17'de görülmektedir.



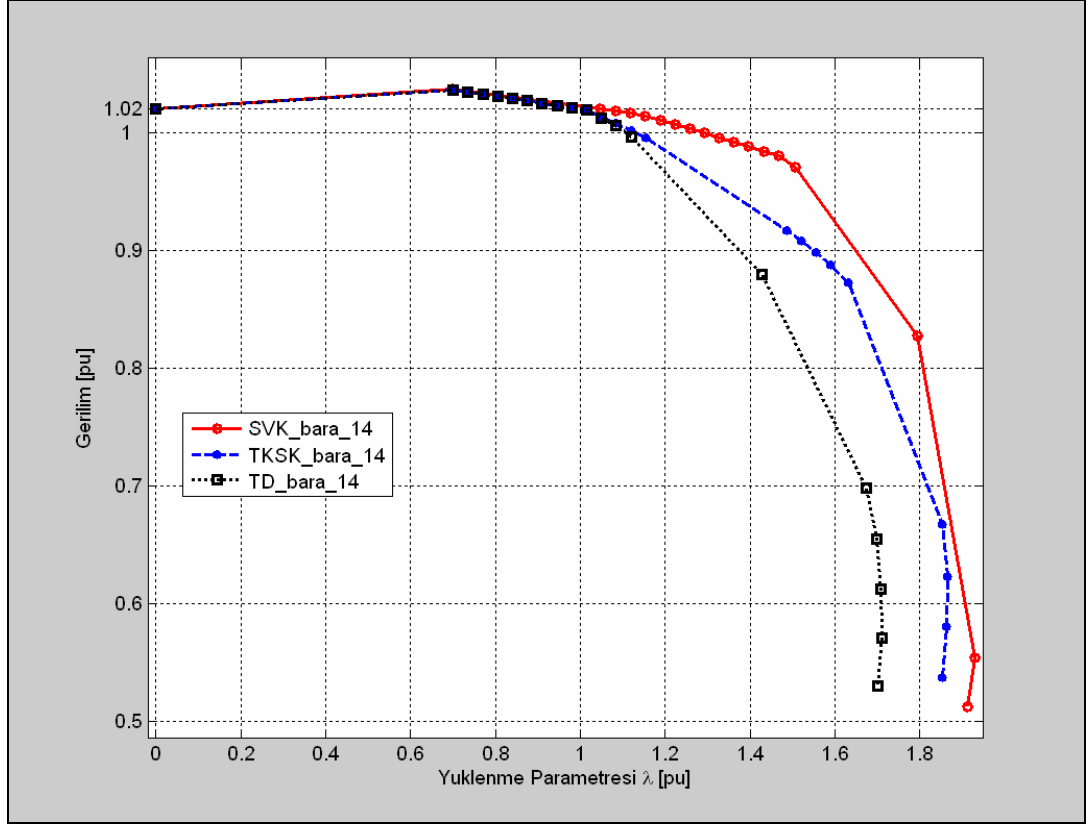
**Şekil 5.15:** 14-Baralı test sisteminde 4 numaralı barada kompanzator yokken, TSKS varken ve SVK varken yüklenme parametresi ile bara gerilimlerinin değişimleri ve çökme noktası



**Şekil 5.16:** 14-Baralı test sisteminde 5 numaralı barada kompanzator yokken, TSKS varken ve SVK varken yüklenme parametresi ile bara gerilimlerinin değişimleri ve çökme noktası



**Şekil 5.17:** 14-Baralı test sisteminde 13 numaralı barada kompanzator yokken, TSKS varken ve SVK varken yüklenme parametresi ile bara gerilimlerinin değişimleri ve çökme noktası



**Şekil 5.18:** 14-Baralı test sisteminde 14 numaralı barada kompanzatör yokken, TKSİ varken ve SVK varken yüklenme parametresi ile bara gerilimlerinin değişimleri ve çökme noktası

Kesintiye uğrayan 2-4 hattına en yakın baralar olan, 4. ve 5. baralarının gerilimleri ile uçtaki 13. ve 14. yük baraları gerilimlerinin yüklenme ile değişimine baktığımızda her bara için sisteme kompanzatör ilavesi çökme sınırının artırılması adına fayda sağlamıştır (Şekil 5.15 5.16 5.17 ve 5.18). Sistemin tüm durumlarında lamdanın 0,6-0,8 olduğu bölgede bara gerilimleri kırılma yaşamaktadır.

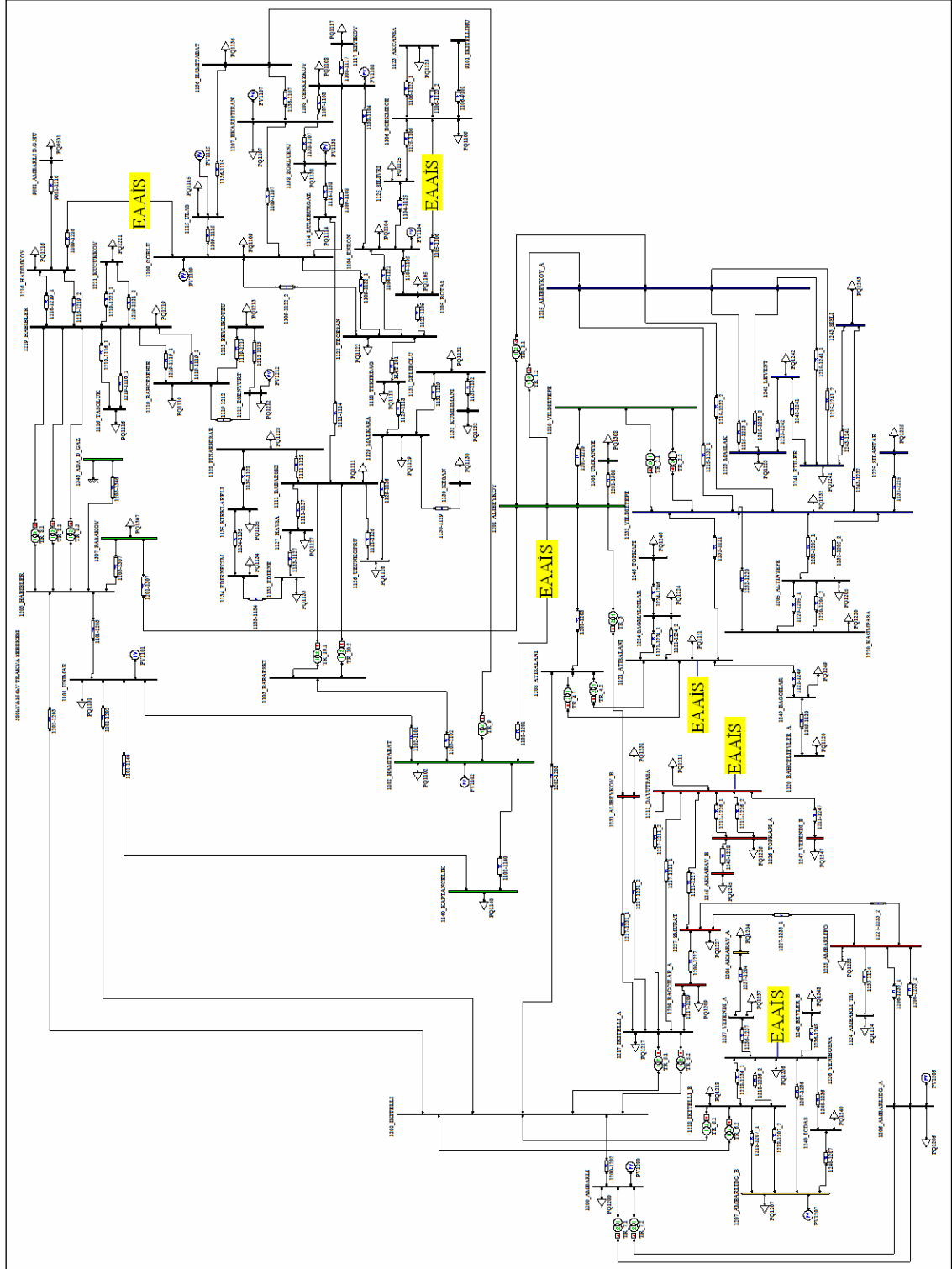
Sistem, temel durumunda şekillerde siyah renk ile gösterilen karakteristik yüklenme parametresinin 1,7pu olduğu bölgede gerilim çökmesine maruz kalmaktadır. 4-5 baraları arasına ilave edilen TKSİ ile çökme sınırı, daha yukarılara taşınmıştır. Şekillerde mavi çizgi ile görülen çökme karakteristiği 1,9pu değerine kadar çıkmıştır. Sisteme 4 numaralı barada paralel bağlı bir SVK ilavesi ile gerilim çökmesi sınırı lamdanın 1,95pu değerine taşınmıştır. Şekillerde kırmızı renkle gösterilen karakteristik tüm baralar için daha üst noktalarda kalmaktadır. Buna göre paralel bağlı kontrolörler, gerilim çökmesinde yüklenme parametresinin daha üst sınırlarına kadar erişebilmektedir.

### 5.3 Trakya Bölgesi Elektrik Enerji İletim Sistemi Üzerinde İncelemeler

Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminin 380kV ve 154kV baralarını içeren toplam 80 baradan ve 112 hattan oluşan bölümü modellenmiştir. Sisteme ait veriler 35 ve 36 numaralı referanslardan elde edilmiştir. Tek kutuplu çizimi Şekil 5.19’da görülmektedir. Sistemde 380kV/154kV 19 adet transformatör bulunmaktadır [35]. Bölgenin anadolu yakasındaki 1346\_ADA II DG barası referans bara olarak seçilmiştir. 13 adet bara generatör baraları olup bunların 12 tanesi PV olarak tanımlanmıştır. Sistemdeki toplam anma yükü 519,4MW ve 378,7MVar’dır; değerler 2005 yaz mevsimi yükleridir [36].

Sistemde paralel ve seri EAAİS cihazlarına ihtiyaç olan noktalar belirlenmiştir. Daha sıkışık ve enerji yoğun merkezlerin içinde yer alan 154kV baralarında paralel kompanzatör, enerji iletiminin yoğun olduğu ve enerjinin uzun mesafede iletildiği 380kV ve 154kV iletim hatlarında ise seri kompanzatör kullanılmıştır. Yük akışı yapılarak en düşük gerilime sahip ve en fazla yükün çekildiği baralar gerilim-yüklenme parametresi eğrilerine bakılarak karşılaştırılmış ve buna göre en fazla reaktif güce ihtiyacı olan 3 bara belirlenmiştir. Sırasıyla 1236\_Yenibosna, 1211\_Davutpaşa ve 1121\_Atışalanı baralarına SVK ilavesi yapılmıştır. İletim hattının kapasitesini arttırarak daha fazla aktif güç iletimine olanak sağlamak amacıyla en uzun ve reaktansı en yüksek hatlar karşılaştırılmıştır. Buna göre 380kV şebekesinde 1102\_Hamitabat-1201\_Alibeyköy, 154kV şebekesinde ise 1105\_Botaş-1106\_BÇekmece ve 1109\_Çorlu-1216\_Hadımköy hatlarına TSKS koyulmuştur.

1236\_Yenibosna barasına SVK ile 150MVAR’lık bir reaktif güç katkısı sağlanmıştır. Buna göre ilgili bara ve bu baraya direkt bağlı diğer bara gerilimlerinde önemli derecede iyileşme sağlanmıştır (Tablo 5.6). Bara gerilimlerinde %0,77-1,79 aralığında bir artış olmuştur. 1211\_Davutpaşa barasında 100MVAR’lık bir SVK ilave edilmiştir. İlgili bara ve bu baraya direkt bağlı bara gerilimlerinde de %1,58-2,94 arasında değişen oranlarda artış sağlanmıştır (Tablo 5.7). 1121\_Atışalanı barası ve bu baradan beslenen çevresindeki baralar Trakya şebekesinde gerilimin en düşük ve en fazla reaktif güç desteğine ihtiyaç olduğu bara grubudur. Burada, 200MVAR’lık bir SVK bağlanmıştır. Gerilimlerde yüzde olarak önceki gruplara göre daha fazla artış (%3,1-3,3 aralığında) sağlanmıştır (Tablo 5.8).



**Şekil 5.19:** 380/154kV Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminin tek kutuplu şeması

Şekil 5.20, 5.21, 5.22, 5.23, 5.24 ve 5.25’te temel durumlarda ve SVK ilavelerinden sonra 1236\_Yenibosna ve çevresindeki baralara, 1211\_Davutpaşa ve çevresindeki baralara ve 1121\_Atışalanı ve çevresindeki baralara ilişkin yüklenme parametresi ile

bara gerilimleri arasındaki değişimler görülmektedir. Yenibosna barasında yapılan SVK ilavesi sayesinde kırılma noktasının lamdanın 1,322pu değerinden 1,365pu değerine kaydığı görülmektedir. Yine Davutpaşa barasına yapılan SVK eklenmesi ile kırılma noktası 1,35pu'dan 1,37pu'ya kaymıştır. Atışalanı barasında sağlanan reaktif güç desteği ile kırılma noktası 1,35pu'dan 1,377pu'ya taşınmıştır. Her üç bara grubunda da gerilimin çökme noktası ötelenmiştir.

Reaktif akışlar açısından bakıldığında temel durumda 1236\_Yenibosna, 1211\_Davutpaşa ve 1121\_Atışalanı baralarına doğru olan reaktif yük akışı SVK'nın olduğu durumda tersine dönmüştür (Tablo 5.9).

**Tablo 5.6:** Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde 1236\_Yenibosna barasına 150MVAR'lık SVK ilavesi ile bara gerilimlerindeki değişimler

| Bara              | Gerilim [pu] |        | Gerilimdeki Artış [%] |
|-------------------|--------------|--------|-----------------------|
| 1218_İkitelli     | 1,0385       | 1,0465 | 0,77                  |
| 1236_Yenibosna    | 1,0317       | 1,05   | 1,77                  |
| 1237_Veliefendi_A | 1,0272       | 1,0456 | 1,79                  |
| 1240_İçdaş        | 1,0345       | 1,0484 | 1,34                  |
| 1248_BEvler_B     | 1,0313       | 1,0496 | 1,77                  |

**Tablo 5.7:** Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde 1211\_Davutpaşa barasına 100MVAR'lık SVK ilavesi ile bara gerilimlerindeki değişimler

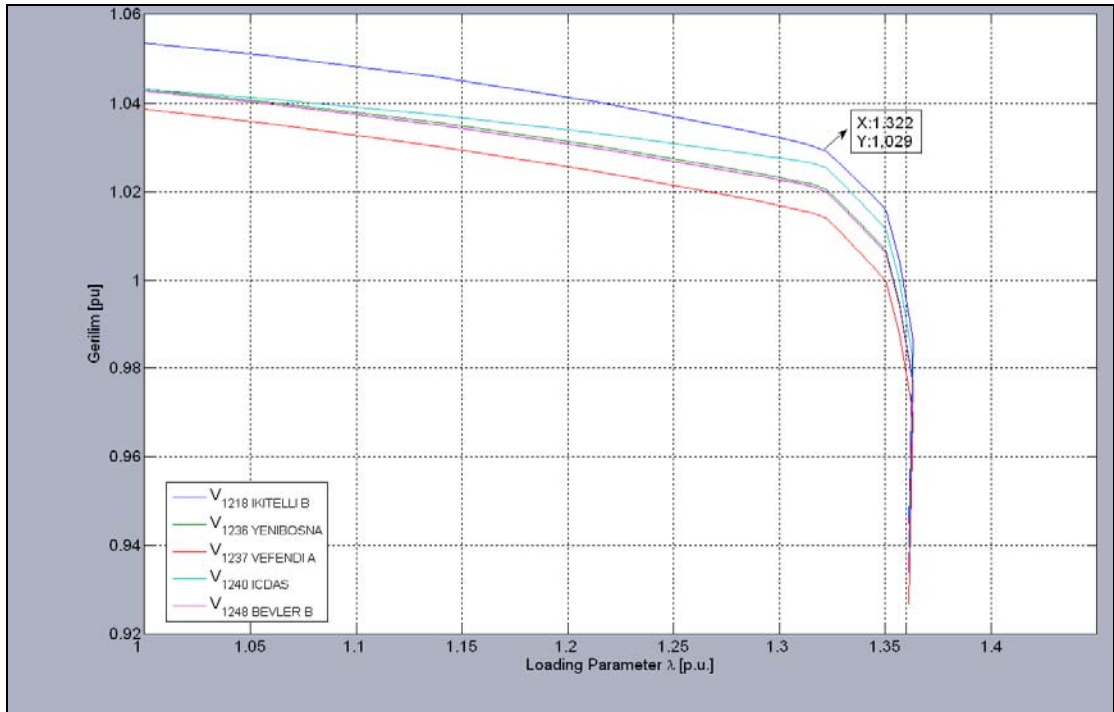
| Bara            | Gerilim [pu] |        | Gerilimdeki Artış [%] |
|-----------------|--------------|--------|-----------------------|
| 1211_Davutpaşa  | 1,0210       | 1,05   | 2,93                  |
| 1217_İkitelli_A | 1,0282       | 1,0438 | 1,58                  |
| 1226_Topkapı_A  | 1,0182       | 1,0481 | 2,94                  |
| 1227_SMurat     | 1,0272       | 1,0420 | 1,44                  |
| 1245_Aksaray_B  | 1,0175       | 1,0474 | 2,94                  |
| 1247_Vefendi_B  | 1,0201       | 1,05   | 2,93                  |

**Tablo 5.8:** Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde 1121\_Atışalanı barasına 200MVAR'lık SVK ilavesi ile bara gerilimlerindeki değişimler

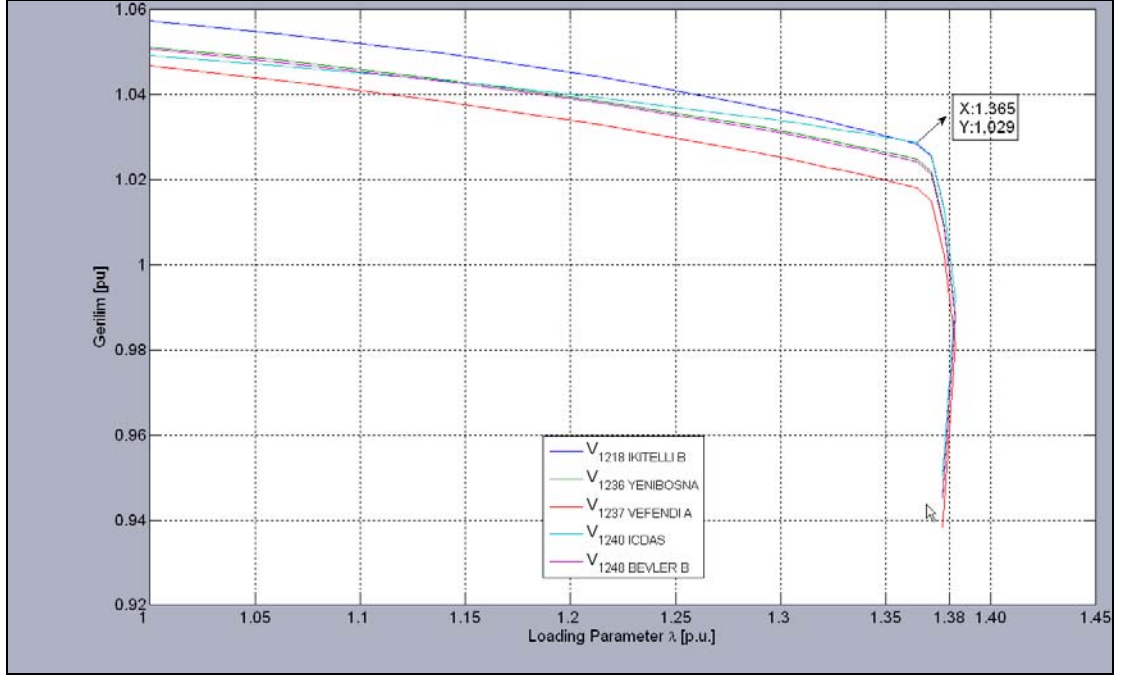
| Bara             | Gerilim [pu] |        | Gerilimdeki Artış [%] |
|------------------|--------------|--------|-----------------------|
| 1120_BEvler_A    | 0,9959       | 1,0285 | 3,27                  |
| 1121_Atışalanı   | 1,0181       | 1,05   | 3,13                  |
| 1224_Sağmalcılar | 1,0158       | 1,0477 | 3,14                  |
| 1246_Topkapı_B   | 1,0138       | 1,0458 | 3,16                  |
| 1249_Bağcılar_B  | 0,9967       | 1,0294 | 3,28                  |

**Tablo 5.9:** Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde 1236\_Yenibosna barasına 150MVAR’lık, 1121\_Atışalanı barasına 200MVAr’lık ve 1211\_Davutpaşa barasına 100MVAR’lık SVK ilavesi ile bazı hatlardaki reaktif yük akışlarındaki değişim

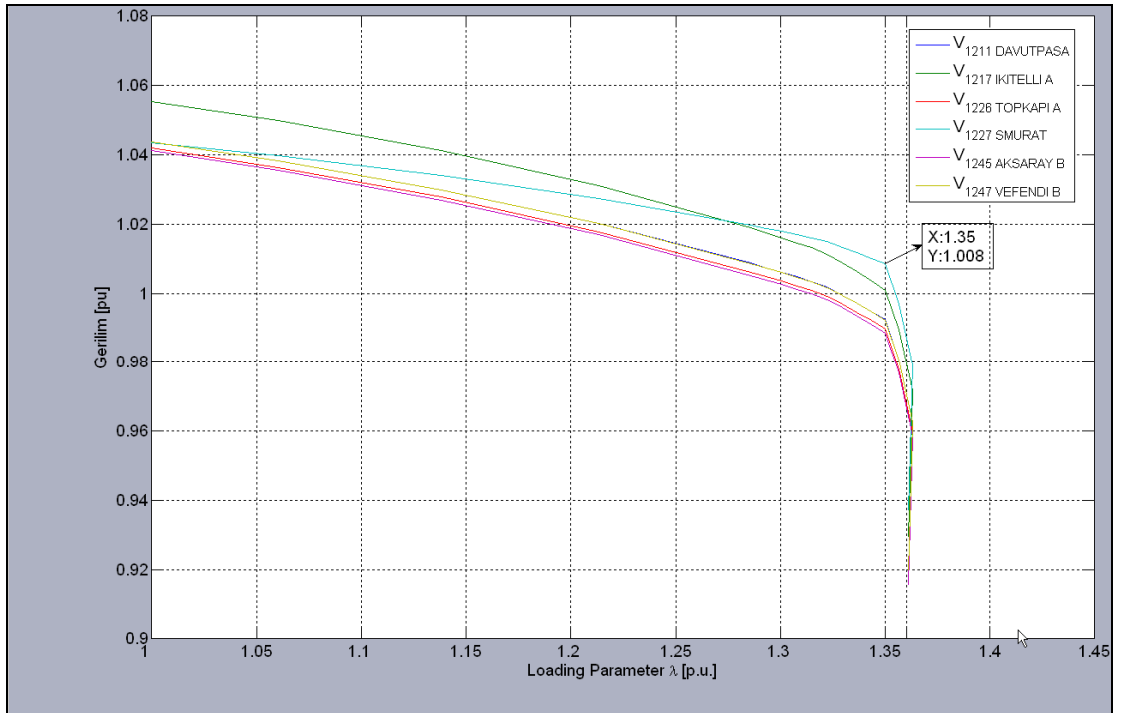
| Hat                               | Reaktif Yük Akışı [pu] |            |
|-----------------------------------|------------------------|------------|
|                                   | Temel Durumda          | SVK varken |
| 1207 AmbarlıDG B – 1236 Yenibosna | 0,3543                 | -0,1105    |
| 1218 İkitelli B – 1236 Yenibosna  | 0,1974                 | -0,5463    |
| 1240 İçdaş – 1236 Yenibosna       | 0,2728                 | -0,1842    |
| 1217 İkitelli A – 1211 Davutpaşa  | 0,2552                 | -0,5844    |
| 1227 SMurat – 1211 Davutpaşa      | 0,2871                 | -0,6303    |
| 1232 Yıldıztepe – 1121 Atışalanı  | 0,5905                 | -0,9778    |



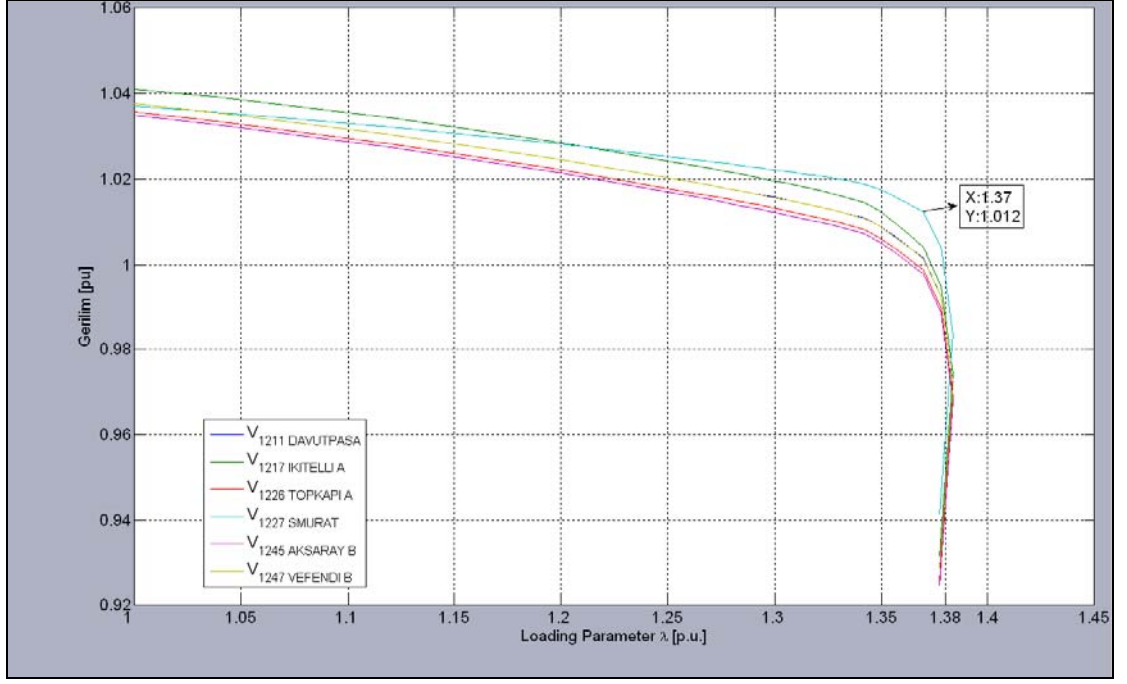
**Şekil 5.20:** Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde, 1236\_Yenibosna ve etrafındaki baralara ilişkin temel durumda yüklenme parametresi ile bara gerilimlerinin değişimleri, kırılma ve çökme noktası



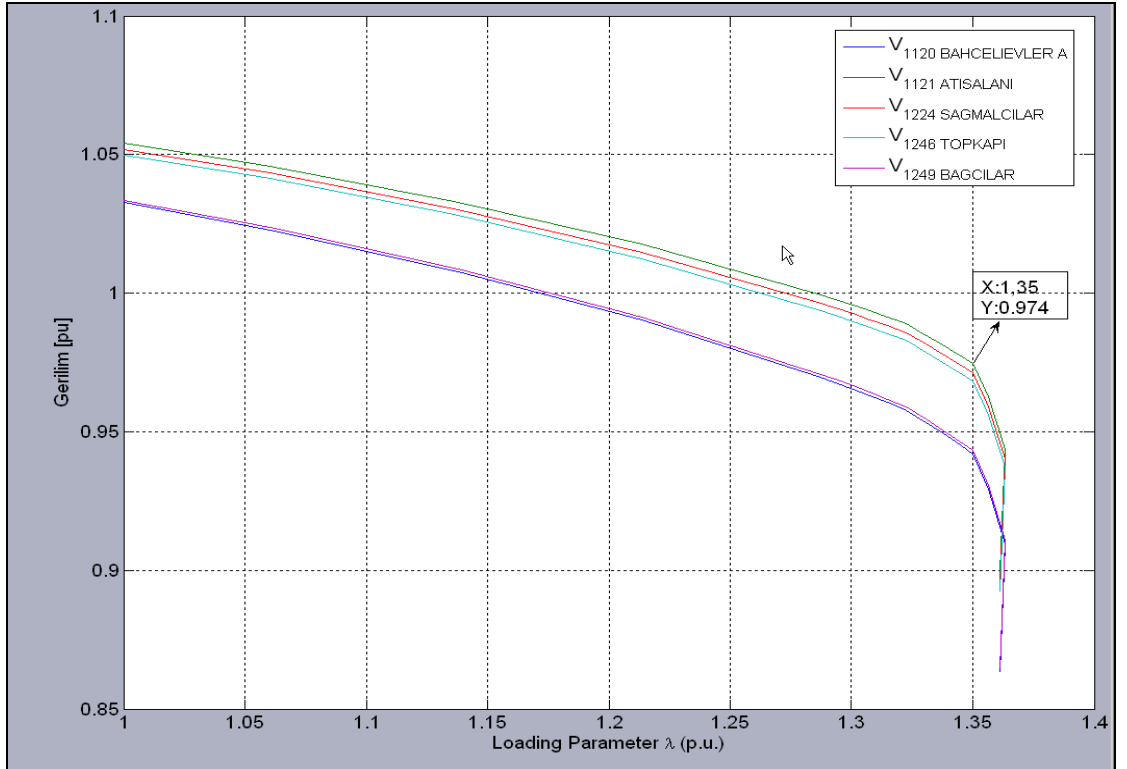
**Şekil 5.21:** Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde, 1236\_Yenibosna ve etrafındaki baralara ilişkin SVK varken yüklenme parametresi ile bara gerilimlerinin değişimleri, kırılma ve çökme noktası



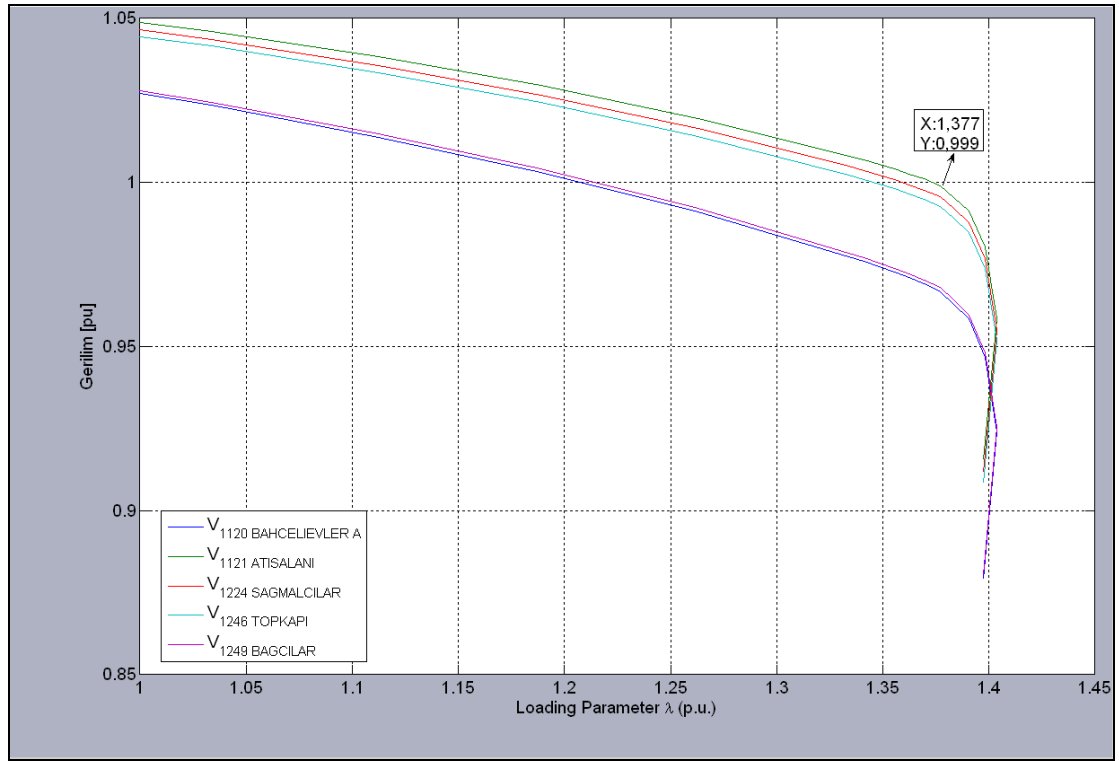
**Şekil 5.22:** Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde, 1211\_Davutpaşa ve etrafındaki baralara ilişkin temel durumda yüklenme parametresi ile bara gerilimlerinin değişimleri, kırılma ve çökme noktası



**Şekil 5.23:** Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde, 1211\_Davutpaşa ve etrafındaki baralara ilişkin SVK varken yüklenme parametresi ile bara gerilimlerinin değişimleri, kırılma ve çökme noktası



**Şekil 5.24:** Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde, 1121\_Atışalanı ve etrafındaki baralara ilişkin temel durumda yüklenme parametresi ile bara gerilimlerinin değişimleri, kırılma ve çökme noktası

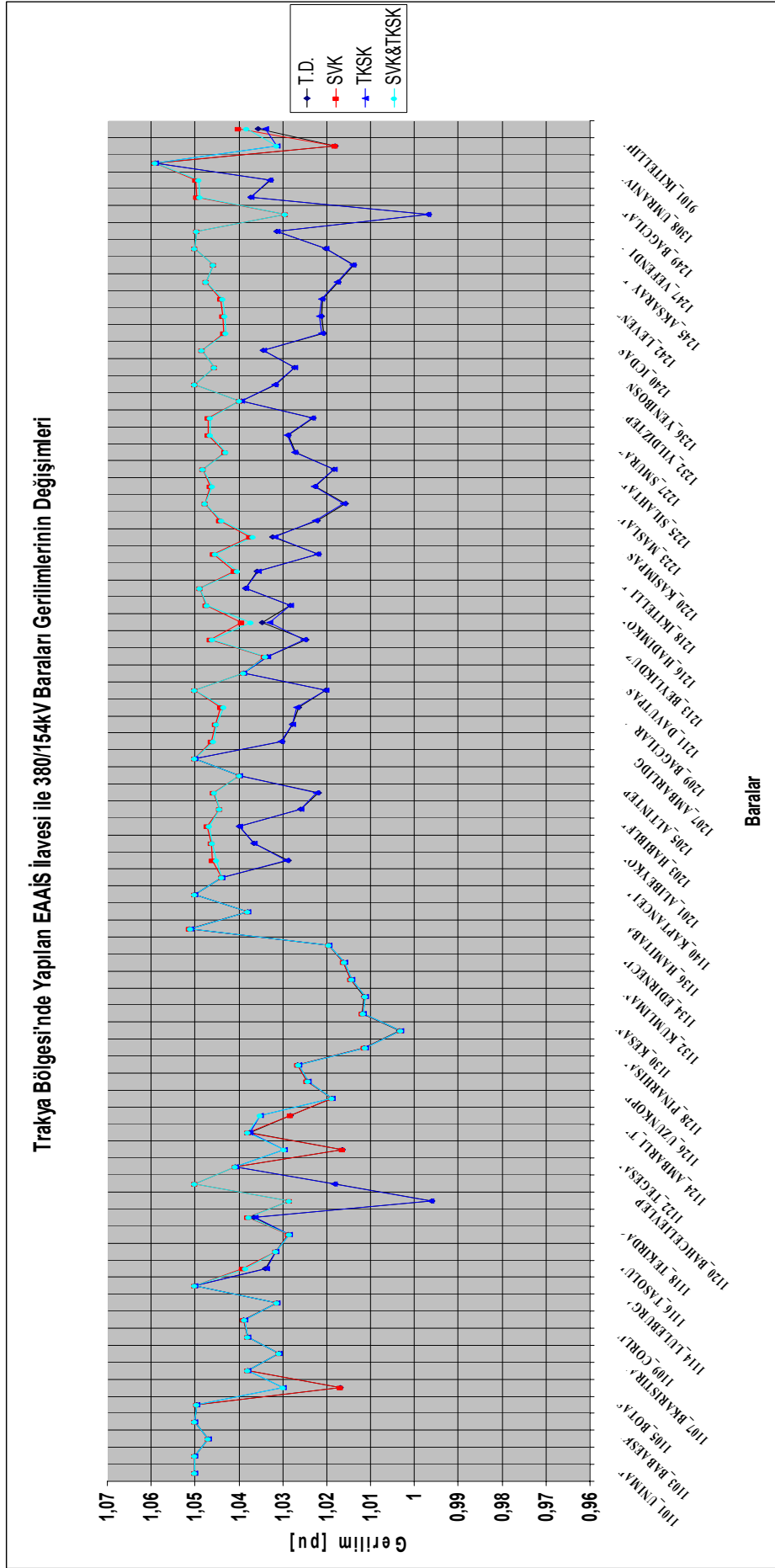


**Şekil 5.25:** Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde, 1121\_Atışalanı ve etrafındaki baralara ilişkin SVK varken yüklenme parametresi ile bara gerilimlerinin değişimleri, kırılma ve çökme noktası

TKSK eklenen 1102\_Hamitabat-1201\_Alibeyköy, 1105\_Botaş-1106\_BÇekmece ve 1216\_Hadımköy-1109\_Çorlu hatlarında seri kompanzasyon derecesi %35'tir. Üç hatta da aktif yük akışlarında önemli oranda (%18-36 aralığında) artış sağlanırken alıcı uç gerilimlerinde de az da olsa (%0-1 aralığında) artış görülmüştür (Tablo 5.10).

**Tablo 5.10:** Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde 3 hatta yapılan seri kompanzator ilavesi ile bu hatlardaki aktif yük akışlarındaki, alıcı bara gerilimlerindeki ve faz açılarındaki değişim

| Hatlar                        | Aktif Yük Akışı [pu] |             |           | Alıcı bara gerilimi [pu] ve faz açısı [deg] |           |             |           |                    |
|-------------------------------|----------------------|-------------|-----------|---------------------------------------------|-----------|-------------|-----------|--------------------|
|                               | Temel Durumda        | TKSK varken | % Değişim | Temel Durumda                               |           | TKSK varken |           | Gerilimde %Değişim |
|                               |                      |             |           | Gerilim                                     | Faz Açısı | Gerilim     | Faz Açısı |                    |
| 1102_Hamitabat-1201_Alibeyköy | 1,4338               | 1,7547      | 22,3      | 1,0288                                      | -16,30    | 1,0292      | -16,20    | 0,39               |
| 1105_Botaş-1106_BÇekmece      | 0,6360               | 0,7521      | 18,25     | 1,0169                                      | -20,37    | 1,03        | -19,64    | 1,2                |
| 1109_Çorlu-1216_Hadımköy      | -0,2681              | -0,3647     | 36,03     | 1,038                                       | -18,67    | 1,038       | -18,33    | 0                  |



**Şekil 5.26:** Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde, temel durumda, SVK varken, TKSK varken ve SVK&TKSK varken oluşan bara gerilimleri

Sistemin EAAİS cihazı yokken, 1236\_Yenibosna, 1211\_Davutpaşa ve 1121\_Atışalanı baralarında SVK varken, 1102\_Hamitabat-1201\_Alibeyköy, 1105\_Botaş-1106\_BÇekmece ve 1216\_Hadımköy-1109\_Çorlu hatlarında TKSK varken ve ilgili baralarda SVK ve TKSK beraber varken tüm bara gerilimlerinin profilleri çıkartılmıştır (Şekil 5.26). Temel durum ile sadece TKSK ilavesi yapılmış durum arasında bara gerilimleri açısından çok fazla fark yoktur; TKSK gerilim seviyesi açısından sistemin tümünde çok az bir katkı yapmıştır. Sadece SVK ilave edildiği durumda ise sistemin tümünde bara gerilimlerinde bir düzelme söz konusudur. Her iki EAAİS cihazının birarada olduğu durum ise sadece SVK olduğu durum ile benzer bir grafik çizmişse olsa 1106\_BÇekmece, 1123\_Akcansa ve 1125\_Silivri baralarında çok daha iyi bir gerilim seviyesi yakaladığı görülmektedir. Bara gerilimlerini yükseltme açısından SVK, TKSK'ya göre daha ideal bir çözümken iki kontrolörün bir arada kullanılması durumu sistemin tümünde daha iyi bir sonuç vermektedir.

## 6. SONUÇLAR

Günümüz elektrik sistemlerinin temel sorunları, sürekli ve geçici hal kararlılığı, dinamik salınımlar, gerilimde çökme ve kararsızlık, hatların transfer kapasitesindeki sınırlar, güç akışının ve frekansın kontrolüdür. Bu tezde hızla gelişen ve rekabete açılan elektrik endüstrisinde problemlerin çözümünde hayati öneme sahip EAAİS cihazları kavramı ortaya koyulmuş ve gelişimi anlatılmıştır. Bugüne kadar geliştirilen tüm kontrolörler tanımlanmış ve sınıflandırması ayrıntılı bir şekilde yapılmıştır.

EAAİS kontrolörlerinin yararları, iletim şebekelerindeki temel eksiklikler ve doğal sınırlamalarla birlikte ayrıntılı olarak incelenmiştir. EAAİS cihazlarının birbirleriyle karşılaştırılması yapılmış ve kontrol özellikleri net bir şekilde verilmiştir. Başlıca EAAİS cihazlarının yapıları ve çalışma prensipleri anlatılmıştır.

Anlatılanlar üç farklı test sistemi üzerinde denenmiş ve doğrulanmıştır. EAAİS cihazları test sistemi üzerinde birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Benzetim esnasında paralel kontrolör olarak SVK ve SSK, seri kontrolör olarak TKSK kullanılmıştır. 380kV/154kV Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sistemi modellenmiş, yük akışı yapılmış ve ihtiyaç duyulan baralara paralel ve seri kompanzatörler ilave edilmiştir.

Paralel bağlı kompanzatörler bara gerilim seviyelerini sağladıkları reaktif güçle istenilen değere taşırken, seri bağlı kompanzatörler hatların transfer kapasitesini arttırmış ve reaktif güç kayıplarını azaltmıştır.

Sistemin küçük işaret kararlılığı analizi yapılmıştır. Durum matrisinin özdeğerlerine bakılarak sistemin bozulmaya uğradığı noktalar tespit edilmiştir. Yüklenebilme açısından salınıma geçilen nokta EAAİS cihazlarının katılımıyla yukarılara taşınmıştır. Burada en yüksek katkı paralel ve seri kompanzatörlerin bir arada olduğu durumda sağlanmıştır. Ayrıca sistemin salınımlı çalışmaya geçmesinde tek başına SVK, TKSK'dan daha etkindir; salınım lamdanın daha yukarı seviyelerinde ortaya çıkmıştır. Tüm kontrolörler sistemdeki bozulmaya rağmen bara gerilimlerini sınırlar civarında tutmuştur.

Yüklenmedeki artış ile sistemin ( $J_{LFV}$ ) Jakobiyen matrisinin özdeğerlerine bakılarak sistemin gerilim çökmesine uğradığı noktalar tespit edilmiş ve EAAİS cihazlarının bu noktadaki etkinliği karşılaştırılmıştır. Küçük işaret kararlılığı analizinde elde edilen sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Tüm durumlar çökme sınırını yukarı taşımıştır. Paralel ve seri kompanzatörlerin bir arada kullanıldığı durumda en yüksek yüklenme noktasına erişilmiştir. Tek başına SVK, gerilim çökme noktasını TKSK'ya göre biraz daha yukarı taşımıştır.

Hatlardan birinin devre dışı kalması durumunda generatörlerin rotor açısı ve rotor hızı salınımlarına bakıldığında, EAAİS cihazları salınının bastırılmasına önemli katkıda bulunmuştur. Dinamik salınımların söndürülmesinde cevap süresi daha kısa olan üçüncü kuşak SSK kontrolörü diğerlerine göre daha etkilidir. Sönüm gerçekleşikten sonra sistemin oturduğu noktaya bakıldığında parametre, seri bağlı kontrolörlere göre paralel bağlı kontrolörlerin kullanıldığı durumlarda kesinti öncesi değere daha yakındır.

Kesinti sonrası bara gerilimlerine baktığımızda gerilimlerin tüm baralarda sınırlar dahilinde tutulduğu görülmüştür. Gerilimlerdeki salınımlar EAAİS cihazları açısından karşılaştırıldığında ise üçüncü kuşak kompanzatör SSK'nın ikinci kuşak kompanzatörlere göre açık farkla önde olduğunu görürüz. Salınım genliği yarı yarıya azalmıştır. Sistemde kesinti sonrası bara gerilimleri ile yüklenme parametresi arasındaki ilişkiye bakıldığında paralel bağlı kompanzatörün sınırı daha yukarıya taşıdığı görülmektedir.

Modellenen Trakya bölgesi elektrik enerji iletim sisteminde gerilim sorunu yaşayan en kötü üç bara gerilim-yüklenme parametresi eğrilerine bakılarak belirlenmiş ve bu baralara SVK kontrolörü bağlanarak reaktif güç katkısı yapılmıştır. Bara gerilimleri istenilen değerlere taşınırken eğrilerde iyileşmeler sağlanmıştır. Aktif yük akışının arttırılmak istenildiği uzun ve yüklü hatlara TKSK bağlanarak hat reaktansları azaltılmış ve hattın iletim kapasitesi arttırılmıştır; alıcı bara gerilimlerinde de artışlar elde edilmiştir. Tüm bara gerilimleri, temel durumda ve EAAİS cihazları varken karşılaştırılarak hangi seçeneğin daha iyi bir sonuç verdiği ortaya koyulmuştur.

Elektrik endüstrisinde artarak kullanılmaya başlanan ikinci kuşak EAAİS cihazları iletim şebekesinde meydana gelen problemlerin üstesinden yüksek oranda gelmektedir. Hala geliştirilmekte olan ve az sayıda uygulama alanı bulabilmiş

üçüncü kuşak EAAİS kontrolörleri ise ileride enerji ihtiyacının çok arttığı ve enerji kalitesinin çok küçük toleranslar içinde kalması zorunlu şebekelerde gerekli ihtiyacı karşılayacak yapıdadır.

Tezde SVK, TKSK ve SSK kontrolörleri, fazör domenli matematiksel modeller kullanılarak karşılaştırılmıştır. İleride bu kontrolörlerle beraber diğer üçüncü kuşak cihazlarında zaman domeni matematiksel modellerinin çıkarılması ve benzetim sonuçlarının bu modellerle de elde edilerek daha karmaşık şebekeler üzerinde çalışılması ileriye yönelik incelemeler olarak önerilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Hingorani, N.G., Gyugyi, L.,** 1999. *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, ISBN: 0-7803-3455-8, The Institute of Electrical and Electronics Engineers Press, Inc., New York.
- [2] **Ashmole, P.H.,** 1994. Introduction to FACTS, *Flexible AC Transmission Systems (FACTS) - The Key to Increased Utilisation of Power Systems, IEE Colloquium on 12 January, 1/1-1/2.*
- [3] **Kundur, P.,** 1994. *Power system stability and control*, McGraw-Hill, New York.
- [4] **Mathur, R.M., Varma, R.K.,** 1999. *Thyristor-Based FACTS Controllers For Electrical Transmission Systems*, ISBN: 0-471-20643-1, The Institute of Electrical and Electronics Engineers Press, A John Wiley&Sons. Inc. Publication, USA.
- [5] **Tacer, M.E.,** 1990. *Enerji Sistemlerinde Kararlılık*, İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi, Ofset Baskı Atölyesi.
- [6] **Cañizares, C.A., Faur, Z.T.,** 1999. Analysis of SVC and TCSC Controllers in Voltage Collapse, *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 14, No. 1, February, 158-165.
- [7] **Rosehart, W.D., Cañizares, C.A.,** 1999. Bifurcation Analysis of Various Power System Models, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 21, No. 3, March, 171-182.
- [8] **Paserba, J.J.,** 2004, How to FACTS Controllers Benefit AC Transmission Systems, *Power Engineering Society General Meeting, 2004 IEEE*, Volume 2, 6-10 June, 1257-1262.
- [9] **Hingorani, N.G.,** 1994. FACTS Technology and Opportunities, *Flexible AC Transmission Systems (FACTS) - The Key to Increased Utilisation of Power Systems, IEE Colloquium on, 12 January, 4/1-4/10.*

- [10] **Reed, G., Paserba, J.J., Salavantis, P.,** 2003. The FACTS on Resolving Transmission Gridlock, *IEEE power&energy magazine*, September/October, 41-46.
- [11] **Hingorani, N.G.,** 1993. Flexible AC Transmission, *Spectrum IEEE*, Volume 30, Issue 4, April, 40-45.
- [12] **Moore, P., Ashmole, P.H.,** 1998. Flexible AC Transmission Systems: Part 4 Advanced FACTS Controllres, *Power Engineering Journal*, April, 95-100.
- [13] **Moore, P., Ashmole, P.H.,** 1995. Flexible AC Transmission Systems, *Power Engineering Journal*, December, 282-286.
- [14] **Cañizares, C.A., Mithulananthan, N., Milano, F., Reeve, J.,** 2004. Linear Performance Indeces To Predict Oscillatory Stability Problems in Power Systems, *IEEE Transactions On Power Systems*, Vol. 19, No.2, May, 1104-1114.
- [15] **Cañizares, C.A.,** 2000. Power Flow and Transient Stability Models of FACTS Controllers for Voltage and Angle Studies, *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000*, Vol. 2, 23-27 January, 1447-1454.
- [16] **Lerm, A.A.P., Cañizares, C.A., Mithulananthan, N.,** 2001. Effects of Limits in Small Signal Stability Analysis of Power Systems, *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2001*, Vol. 3, 15-19 July, 1805 – 1810.
- [17] **Demirören, A., Zeynelgil, L.** 2004. *Elektrik Enerji Sistemlerinin Karalılığı, Kontrolu ve Çalışması*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [18] **Edris, A.,** 2000. FACTS Technology Development: An Update, *Power Engineering Review, IEEE*, Volume 20, Issue 3, March, 4-9.
- [19] **Acha, E., Esquivel, C.R.F., Perez, H.A., Camacho, C.A.,** 2004. *FACTS Modelling and Simulation in Power Networks*, ISBN: 0-470-85271-2, John Wiley&Sons LTD, England.

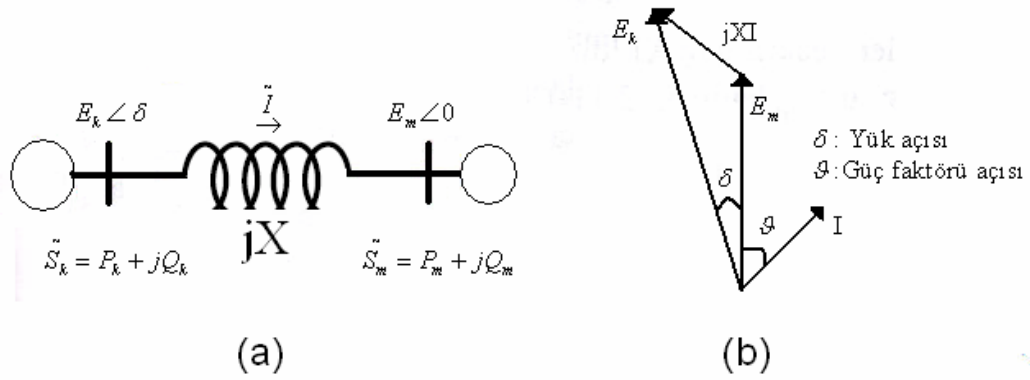
- [20] **Matsuno, K., Iyoda, I., Oue, Y.**, 2002. An Experience of FACTS Development 1980s and 1990s, *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: AsiaPacific. IEEE/PES*, Volume 2, 6-10 October, 1378-1381.
- [21] **Gürdal, O.**, 2000. *Güç Elektroniği (Analiz, Tasarım, Simülasyon)*, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- [22] *Power Transmission and Distribution, Use of High-Power Thyristor Technology for Short-Circuit Current Limitation in High Voltage Systems*, 2004. Advanced Power Electronic Components [Catalogue], SIEMENS.
- [23] **Ge, S.Y., Chung, T.S.**, 1999. Optimal Active Power Flow Incorporating Power Flow Control Needs in Flexible AC Transmisson Systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No. 2, May, 738-744.
- [24] **Adapa, R., Baker, M.H., Bohmann, L., Clark, K., Habashi, K., Gyugyi, L. Lemay, J., Mehraban, A.S., Myers, A.K., Reeve, J., Sener, F., Torgersen, D.R., Wood, R.R.**, 1997. Proposed Terms and Definitions For Flexible AC Transmission System (FACTS), *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, No. 4, 1848-1853.
- [25] **Yan, P., Sekar, A.**, 2005. Steady-State Analysis of Power System Having Multiple FACTS Devices Using Line-Flow-Based Equations, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 152, No. 1, January, 31-39.
- [26] *Power Transmission and Distribution, Discover the World of FACTS Technology: Technical Compendium*, 2006. A typical SVC Layout [Catalogue], SIEMENS.
- [27] **Song, S.H., Lim, J.U., Moon, S.**, 2003. FACTS Operation Scheme for Enhancement of Power System Security, *IEEE Bologna PowerTech Conference*, Volume 3, 23-26 June, 36-41.
- [28] **Tan, Y.I., Wang, Y.**, 1998. Effects of FACTS Controller Line Compensation on Power System Stability, *IEEE Power Engineering Rewiev*, August, 55-56.

- [29] **Moghavvemi, M., Farugue, M.O.**, 2000. Effects of FACTS Devices on Static Voltage Stability, *TENCON 2000 Proceedings*, Volume 2, 24-27 September, 357-362.
- [30] **Wu, W., Wong, C.**, 2003. FACTS Applications in Preventing Loop Flows in Interconnected Systems, *Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE* Volume 1, 13-17 July, 170-174.
- [31] **Galiana, F.D., Almeida, K., Toussaint, M., Griffin, J., Atanackovic, D., Ooi, B.O., McGillis, D.T.**, 1996. Assesment and Control of the Impact of FACTS Devices on Power System Performance, *Power Systems IEEE Transactions on*, Volume 11, Issue 4, November, 1931-1936.
- [32] **Bağrıyanık, M., Dağ, H.**, 2001. Determination of Location of Series Compensation Devices Using Fuzzy Decision Making, *ETEP*, Vol. 11, No.4, 241-245.
- [33] **Milano, F.**, 2005. An Open Source Power System Analysis Toolbox, *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 20, Issue 3, August, 1199 – 1206.
- [34] IEEE 14 Bus Test Case, 1993. Washington University, Electrical Engineering Archive, 2001, Web site:  
<http://www.ee.washington.edu/energy/apt/nsf/security2.html>
- [35] **TEİAŞ**, 2004. *Türkiye Ulusal Elektrik Ağındaki Havai Hatların, Trafoların ve Generatörlerin Elektriki Karakteristikleri*, TEİAŞ Yük Tevzi Dairesi Başkanlığı Etüd ve Raporlama Müdürlüğü.
- [36] **TEİAŞ**, 2006. *2005 Puant (Yaz) Yük Şartlarında Yük Akışı, Üç Faz ve Faz Toprak Kısa Devre Etüdü*, TEİAŞ Yük Tevzi Dairesi Başkanlığı Etüd ve Raporlama Müdürlüğü.

## EK.A YÜK AKIŞI ANALİZİ VE NEWTON-RAPHSON YÖNTEMİ

Yük akışı dinamik sistemin anlık görüntüsüdür. Sistem, lineer olmayan denklemleri barındırmakta ve çözüm bu denklemler kümesinin çözümü olmaktadır.

Şekil 2.2(a)'daki yapı bir enerji sisteminin bir iletim hattı ile bağlanmış, birinden diğerine enerji iletimi olan iki kısmını temsil etmektedir. İki kaynak arasında hat elemanlarının empedanslarını gösteren saf endüktif bir reaktans vardır.



Şekil A.1: Güç sisteminin (a) iki uçlu modeli; (b) fazör diyagramı.

Buna göre Şekil 2.2(b)'de fazör diyagramı görülmektedir [12].

m-ucundaki kompleks güç ifadesi,

$$S_m = P_m + jQ_m = \tilde{E}_m \tilde{I}_m^* = \tilde{E}_m \left[ \frac{\tilde{E}_k - \tilde{E}_m}{jX} \right] = \tilde{E}_m \left[ \frac{E_k \cos \delta + jE_k \sin \delta - \tilde{E}_m}{jX} \right]^* \quad (\text{A.1})$$

olur.

$$P_m = \frac{E_k E_m \sin \delta}{X} \quad (\text{A.2})$$

$$Q_m = \frac{E_k E_m \cos \delta - E_m^2}{X} \quad (\text{A.3})$$

$$P_k = \frac{E_k E_m \sin \delta}{X} \quad (\text{A.4})$$

$$Q_k = \frac{E_k^2 - E_k E_m \cos \delta}{X} \quad (\text{A.5})$$

bulunur. Yukarıdaki eşitlikler bir elektrik enerjisi sisteminin aktif kısımları arasındaki aktif gücün iletilme biçimini ifade etmektedir. Bu bağıntılar yardımıyla, gerilim genlikleri ve açılarındaki farkların etkileri ayrı ayrı göz önüne alınarak, aktif güç ve reaktif güç iletiminin kaynak gerilimlerine olan bağımlılığı incelenirse şu sonuçlara varılır:

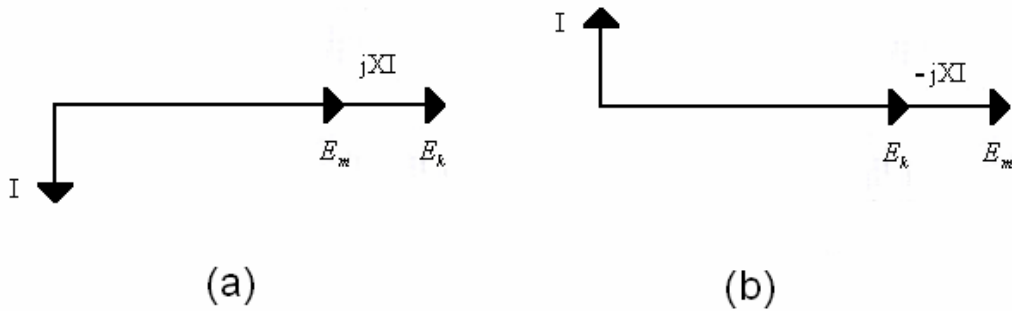
a)  $\delta = 0$  koşulu ele alındığında,

$$P_m = P_k = 0 \quad (\text{A.6})$$

$$Q_m = \frac{E_m(E_k - E_m)}{X} \quad (\text{A.7})$$

$$Q_k = \frac{E_k(E_k - E_m)}{X} \quad (\text{A.8})$$

olur. Aktif güç iletimi sıfırdır.  $E_k > E_m$  olduğunda,  $Q_k$  ve  $Q_m$  pozitifdir. Diğer bir deyişle reaktif güç akışı k-ucundan m-ucuna doğrudur. Buna karşılık düşen fazör diyagramı Şekil 2.3(a)'da gösterilmiştir.  $E_k < E_m$  olduğunda,  $Q_k$  ve  $Q_m$  negatiftir ve bu kez reaktif güç akışı m-ucundan k-ucuna doğrudur. Buna karşılık düşen fazör diyagramı Şekil 2.3(b)'de gösterilmiştir.



**Şekil A.2:** Yük açısı sıfır olduğu durumda fazör diyagramları: (a) reaktif gücün pozitif olduğu durum; (b) reaktif gücün negatif olduğu durum.

Buradan elde edilen sonuç şudur:

- Endüktif reaktans üzerinden endüktif akım iletimi alıcı uç geriliminde azalmaya neden olur.
- Endüktif reaktans üzerinden kapasitif akım iletimi alıcı uç geriliminde artmaya neden olur.

Buna göre,

$$Q_k - Q_m = \frac{(E_k - E_m)^2}{X} = XI^2 \quad (\text{A.9})$$

Dolayısıyla X tarafından tüketilen reaktif güç  $XI^2$  dir.

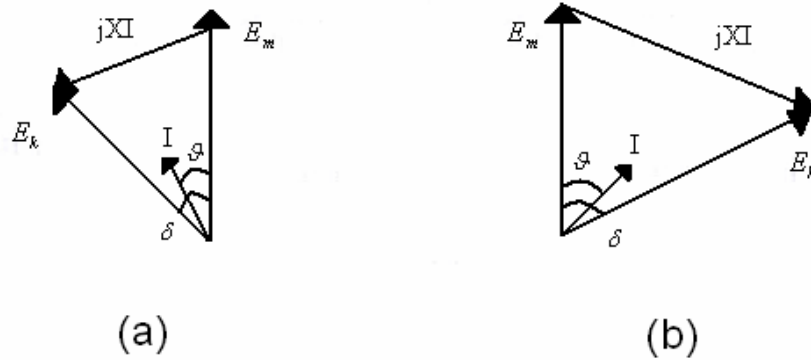
b)  $E_k = E_m = E$  ve  $\delta \neq 0$  koşulu ele alındığında,

$$P_k = P_m = \frac{E^2}{X} \sin \delta \quad (\text{A.10})$$

$$Q_k = -Q_m = \frac{E^2}{X} (1 - \cos \delta) = \frac{1}{2} XI^2 \quad (\text{A.11})$$

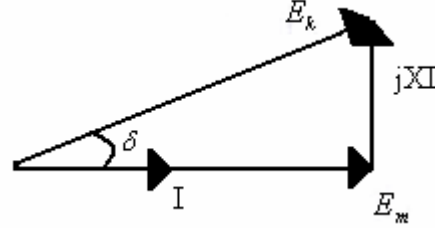
olur.  $\delta > 0$  için,  $P_k$  ve  $P_m$  pozitifdir. Aktif güç akışı m-ucundan k-ucuna doğrudur.

$\delta < 0$  için, aktif güç akışının yönü k-ucundan m-ucuna doğrudur. Her iki durumda da, reaktif güç iletimi yoktur. Bunun yerine, her iki uç X tarafından tüketilen  $XI^2$  gücünün yarısını sağlar. Bu duruma karşılık düşen fazör diyagramları Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



**Şekil A.3:** Yük açısı sıfırdan farklı; gerilim genliklerinin birbirine eşit olduğu durumda fazör diyagramları: (a) Aktif güç pozitif olduğu durum; (b) aktif güç negatif olduğu durum.

Eğer I akımı  $E_m$  ile aynı fazda ise (m ucundaki güç faktörü birim ise), fazör diyagramı Şekil 2.5'teki gibi olur. Bu durumda,  $E_k$ 'nın genliği  $E_m$ 'den sadece biraz büyüktür. k-ucu X tarafından tüketilen  $XI^2$  gücünün tamamını sağlar.



**Şekil A.4:** m-ucunda akımın ve gerilimin aynı fazda olması halinde fazör diyagramı

İletilen aktif güç ( $P_m$ ) gerilim genliklerinin ve  $\delta$ 'nın fonksiyonudur. Bununla beraber, güç sisteminde tatmin edici bir çalışma için, herhangi bir baradaki gerilimin genliği anma değerinden fazla sapamaz. Dolayısıyla, aktif güç iletiminin kontrolü, öncelikle  $\delta$  açısındaki değişimlerle sağlanır.

c)  $\delta$ ,  $E_k$  ve  $E_m$  çeşitli durumlar alabilir. Genel bir ifadeyi ortaya koyalım,

$$I = \frac{E_k \cos \delta + jE_k \sin \delta - E_m}{jX} \quad (\text{A.12})$$

olur. Eşitlik (2.3), (2.5) ve (2.12)'den,

$$Q_k - Q_m = \frac{E_k^2 + E_m^2 - 2E_k E_m \cos \delta}{X} = XI^2 \quad (\text{A.13})$$

bulunur. Eğer X endüktif reaktansına ek olarak R seri direnci de dikkate alınırsa,

$$Q_{kayıp} = XI^2 = X \frac{P_m^2 + Q_m^2}{E_m^2} \quad (\text{A.14})$$

$$P_{kayıp} = RI^2 = R \frac{P_m^2 + Q_m^2}{E_m^2} \quad (\text{A.15})$$

olur. Buna göre X tarafından tüketilen reaktif gücün bütün koşullarda  $XI^2$  olduğu görülmektedir.  $RI^2$  ise aktif güç kaybıdır. İletilen reaktif güçteki artış, reaktif güç kaybı kadar aktif güç kaybını da arttırır. Bu, güç iletiminin verimliliği ve gerilim regülasyonu üzerinde etkilidir.

Bu analizden şu genel sonuçlar çıkartılır [12],

- Aktif güç iletimi, esas olarak iki uç gerilim arasındaki aıya bağlıdır.
- Reaktif güç iletimi, esas olarak gerilimlerin genliklerine bağlıdır. Reaktif güç geriliminin genliği daha yüksek olan taraftan geriliminin genliği daha düşük olan tarafa doğru iletilir.
- Reaktif güç uzun mesafeler boyunca iletilemez, bunu yapılabilmesi için büyük bir gerilim farkının olması gerekir.
- Reaktif güç iletimindeki bir artış reaktif güç kaybı kadar aktif güç kaybında da artışa neden olur.

Güç akışı analizi, belirli u ya da bara koşulları için bir iletim sistemindeki g akışlarının ve gerilimlerin hesabını içerir. Bu tip hesaplamalar, güç sistemlerinin dinamik davranışı kadar sürekli hal davranışının analizi için de gereklidir. Bu kısımda, açıklanacak yük akışı analizi hem sürekli halde hem de sistem kararlılık analizlerinde kullanılacaktır.

Baraların sınıflandırılması şu şekildedir,

- Gevşek bara (salınım barası): Gerilimin genliği ve faz açısı bellidir. Sistemdeki güç kayıpları önceden bilinmediği için, en az bir baranın belirsiz P ve Q değerlerine sahip olması gerekir. Buna göre gevşek bara gerilimi bilinen tek baradır.
- Gerilim kontrollü bara (PV): Aktif güç ve gerilimin genliği bellidir. Ayrı ayrı cihazların karakteristiklerine bağlı olarak reaktif güç sınırları da belirlenmiştir. Generatörlü, senkron kondenserli ve statik var kompanzatrl baralar bu tiptendir.
- Yük barası (PQ): Aktif ve reaktif güç bellidir. Normal olarak yüklerin sabit güce sahip oldukları varsayılır. Eğer dağıtım transformatörünün etkisi ihmal edilirse, P ve Q yüklerinin bara geriliminin bir fonksiyonu olarak değiştiği söylenebilir.
- Cihaz barası: Cihazlarla ilgili özel sınır koşuları verilmiştir.

Şebeke bara (düğüm) gerilimleri ve akımları arasındaki bağıntılar çevre eşitlikleri veya düğüm eşitlikleri ile gösterilebilir. Genelde, düğüm eşitlikleri tercih edilir; çünkü bağımsız düğüm eşitliği sayısı bağımsız çevre eşitliği sayısından daha azdır.

Düğüm admitans matrisi yardımıyla, şebeke eşitlikleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_1 \\ \tilde{I}_2 \\ \vdots \\ \tilde{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_1 \\ \tilde{V}_2 \\ \vdots \\ \tilde{V}_n \end{bmatrix} \quad (\text{A.16})$$

$n$  : Toplam düğüm sayısı

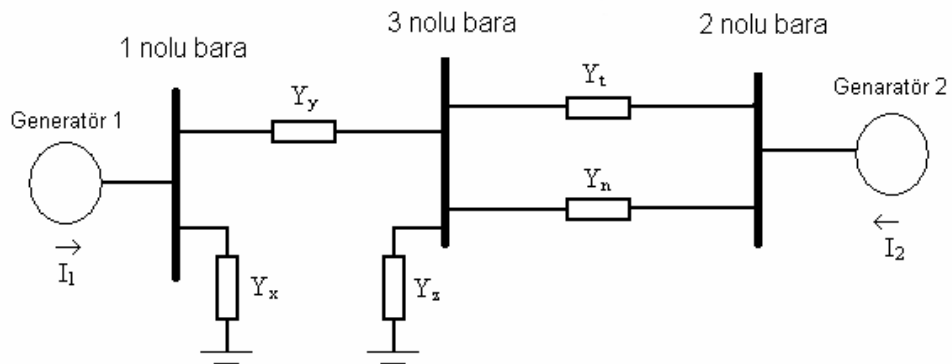
$Y_{ii}$  :  $i$  düğümüne ait öz admitans ( $i$  düğümünde sonlanan tüm admitansların toplamı)

$Y_{ij}$  :  $i$  ve  $j$  düğümleri arasındaki ortak admitans ( $i$  ve  $j$  düğümleri arasındaki tüm admitansların toplamının ters işaretlisi)

$\tilde{V}_i$  :  $i$  düğümündeki toprağa göre fazörel gerilim

$\tilde{I}_i$  :  $i$  düğümünde şebekeye verilen fazörel akım

Şebeke düğümlerine bağlanmış olan generatörlerin, doğrusal olmayan yüklerin ve diğer cihazların etkileri düğüm akımında yansıtılır. Bununla beraber, sabit empedanslı (doğrusal) yükler düğüm admitans matrisinde yer alırlar. Şekil 2.6'da verilen basit üç baralı sistem göz önüne alınarak, düğüm eşitliklerini oluşturulması açıklanacaktır.



Şekil A.5: Üç baralı sistem

Düğüm admitans matrisinin elemanları şöyledir,

$$\begin{aligned}
 Y_{11} &= y_x + y_y & Y_{12} &= 0 & Y_{13} &= -y_y \\
 Y_{21} &= 0 & Y_{22} &= y_t + y_n & Y_{23} &= -(y_t + y_n) \\
 Y_{31} &= -y_y & Y_{32} &= -(y_t + y_n) & Y_{33} &= y_y + y_z + y_t + y_n
 \end{aligned} \tag{A.17}$$

Düğüm akımları,

$I_1 = G_1$  generatöründen 1 düğümüne gelen akım

$I_2 = G_2$  generatöründen 2 düğümüne gelen akım

$I_3 = 0$

olur. Buna göre düğüm eşitlikleri,

$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_1 \\ \tilde{I}_2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & 0 & Y_{13} \\ 0 & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_1 \\ \tilde{V}_2 \\ \tilde{V}_3 \end{bmatrix} \tag{A.18}$$

olarak yazılır.

Düğüm admitans matrisiyle ilgili olarak şu genel sonuçlara varılır[12],

- Şebeke boyutu ile artan seyreklik derecesine sahip, az elemanlı (seyrek) bir matristir.
- Şebeke yüzer (toprağa bağlı paralel dal yok) ise bu matris tekildir.
- Zayıf köşegensel baskınlığa sahiptir.

$$|Y_{ii}| \geq \sum_{j \neq i} |Y_{ij}| \tag{A.19}$$

- Eğer faz kaydırıcı transformatör yoksa bu matris simetriktir.

Doğrusal olmayan güç akışı eşitliklerinde, eğer  $\tilde{I}$  akım girişleri bilinirse (2.18) eşitliği doğrusal olacaktır. Bununla beraber, akım girişleri düğümlerin çoğunda bilinmez Herhangi bir k düğümündeki akım P, Q ve  $\tilde{V}$  değerlerine şöyle bağlıdır:

$$\tilde{I}_k = \frac{P_k - jQ_k}{\tilde{V}_k^*} \quad (\text{A.20})$$

Yük baraları için P ve Q bellidir. Gerilim kontrollü baralar için de P ve  $\tilde{V}$  bellidir. Diğer düğüm tipleri için P, Q,  $\tilde{V}$  ve  $\tilde{I}$  arasındaki bağıntılar o düğümlere bağlanmış olan cihazların karakteristikleri ile tanımlanır. Çeşitli düğüm tiplerini getirdiği sınır koşulları problemi doğrusal olmayan hale sokar ve dolayısıyla, güç akışı eşitlikleri Gauss-Siedel ya da Newton-Raphson yöntemleri gibi teknikler kullanılarak tekrarlamalı olarak çözülürler.

En başarılı güç akışı programlarında, polar koordinatlı güç eşitliği kullanılmaktadır. Herhangi bir k düğümü için,

$$\tilde{S}_k = P_k + jQ_k = \tilde{V}_k \tilde{I}_k^* \quad (\text{A.21})$$

$$\tilde{I}_k = \sum_{m=1}^n Y_{km} \tilde{V}_m \quad (\text{A.22})$$

$$\Rightarrow P_k + jQ_k = \tilde{V}_k \sum_{m=1}^n (G_{km} - jB_{km}) \tilde{V}_m^* \quad (\text{A.23})$$

elde edilir.  $\tilde{V}_k$  ve  $\tilde{V}_m^*$  fazörlerinin çarpımı aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

$$\tilde{V}_k \tilde{V}_m^* = (V_k e^{j\theta_k}) (V_m e^{-j\theta_m}) = V_k V_m e^{j(\theta_k - \theta_m)} = V_k V_m (\cos \theta_{km} + j \sin \theta_{km}) \quad (\text{A.24})$$

burada,  $\theta_{km} = \theta_k - \theta_m$  'dir. Buna göre,  $P_k$  ve  $Q_k$  eşitlikleri gerçek biçimde şöyle yazılabilir,

$$P_k = V_k \sum_{m=1}^n (G_{km} V_m \cos \theta_{km} + B_{km} V_m \sin \theta_{km}) \quad (\text{A.25})$$

$$Q_k = V_k \sum_{m=1}^n (G_{km} V_m \sin \theta_{km} - B_{km} V_m \cos \theta_{km}) \quad (\text{A.26})$$

Bu eşitliklere göre, her bir bara için P ve Q değerleri bütün baralara ilişkin gerilimlerin genliklerinin ve açılarının fonksiyonudur. Eğer baralardaki aktif ve reaktif güç değerleri biliniyorsa, bilinen değerleri göstermek üzere  $a$  üst indisi kullanılarak, yük akışı eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$\begin{aligned} P_1(\theta_1, \dots, \theta_n, V_1, \dots, V_n) &= P_1^a \\ &\vdots \\ P_n(\theta_1, \dots, \theta_n, V_1, \dots, V_n) &= P_n^a \\ Q_1(\theta_1, \dots, \theta_n, V_1, \dots, V_n) &= Q_1^a \\ &\vdots \\ Q_n(\theta_1, \dots, \theta_n, V_1, \dots, V_n) &= Q_n^a \end{aligned} \quad (\text{A.27})$$

Newton-Raphson yöntemindeki genel yapı uygulandığında,

$$\begin{bmatrix} P_1^a - P_1(\theta_1, \dots, \theta_n, V_1, \dots, V_n) \\ \vdots \\ P_n^a - P_n(\theta_1, \dots, \theta_n, V_1, \dots, V_n) \\ Q_1^a - Q_1(\theta_1, \dots, \theta_n, V_1, \dots, V_n) \\ \vdots \\ Q_n^a - Q_n(\theta_1, \dots, \theta_n, V_1, \dots, V_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \vdots \\ \Delta \theta_n \\ \Delta V_1 \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} \quad (\text{A.28})$$

veya

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (\text{A.29})$$

elde edilir. Aktif ve reaktif gücün gerilim ve faz açına göre değişimini ifade eden 2x2'lik matris “Jacobian” matristir. (2.28) ve (2.29) eşitliklerinde tüm baraların PQ barası olduğu varsayılmıştı. Bir PV barası için, sadece P belirlidir ve gerilimin genliği sabittir. Dolayısıyla, her bir PV barası için  $\Delta Q$  ve  $\Delta V$  ‘ye karşılık düşen

terimler ortadan kalkar. Buna göre, her bir PV barası için Jacobian matrisi 1x1'lik bir matristir.

$$J = \left[ \frac{\partial P}{\partial \theta} \right] \quad (\text{A.30})$$

## EK.B TEST SİSTEMLERİNE AİT VERİLER

### B.1 5-Baralı Test Sistemine İlişkin Veriler

5-baralı sistemin 19 numaralı referanstan alınan yük akışı bilgileri Tablo B.1 ve B.2’de verilmiştir. İlave edilen baraya ilişkin bilgilerde tablolarda yer almaktadır.

**Tablo B.1:** 5-Baralı test sisteminde baralara ilişkin veriler

| Bara   |   | Gerilim [pu] | Teta [deg] | P Yük [MW] | Q Yük [MVar] |
|--------|---|--------------|------------|------------|--------------|
| North  | 1 | 1.060        | 0.0        | 0.0        | 0.0          |
| South  | 2 | 1.0          | -2.06      | 20.0       | 10.0         |
| Lake   | 3 | 0.987        | -4.64      | 45.0       | 15.0         |
| Main   | 4 | 0.984        | -4.96      | 40.0       | 5.0          |
| Elm    | 5 | 0.972        | -5.77      | 60.0       | 10.0         |
| Lakefa | 6 | 0.987        | -4.75      | 0.0        | 0.0          |

**Tablo B.2:** 5-Baralı test sisteminde hatlara ilişkin veriler

| Bağlı Olduğu Baralar |   | Direnci [pu] | Reaktansı [pu] | Suseptansı [pu] |
|----------------------|---|--------------|----------------|-----------------|
| 1                    | 3 | 0.08         | 0.24           | 0.05            |
| 1                    | 2 | 0.02         | 0.06           | 0.06            |
| 2                    | 3 | 0.06         | 0.18           | 0.04            |
| 2                    | 4 | 0.06         | 0.18           | 0.04            |
| 2                    | 5 | 0.04         | 0.12           | 0.03            |
| 4                    | 5 | 0.08         | 0.24           | 0.05            |
| 6                    | 4 | 0.005        | 0.015          | 0.01            |
| 3                    | 6 | 0.005        | 0.015          | 0.01            |

### B.2 11-Baralı Test Sistemine İlişkin Veriler

11-baralı sistemin 3 numaralı referanstan alınan yük akışı bilgileri Tablo B.3 ve B.4’te verilmiştir.

**Tablo B.3:** 11-Baralı test sisteminde baralara ilişkin veriler

| Bara |    | Gerilim [pu] | Teta [deg] | P Yük [MW] | Q Yük [MVar] |
|------|----|--------------|------------|------------|--------------|
| A1   | LV | 1.04         | 0.0        | 0.0        | 0.0          |
| B2   | LV | 1.025        | 9.246      | 0.0        | 0.0          |
| C3   | LV | 1.025        | 4.645      | 0.0        | 0.0          |
| D4   | HV | 1.015        | -0.164     | 0.0        | 0.0          |
| E5   | HV | 1.026        | -2.216     | 0.0        | 0.0          |
| F6   | HV | 0.996        | -3.981     | 125        | 50           |
| G7   | HV | 1.013        | -3.694     | 90         | 30           |
| H8   | HV | 1.026        | 3.685      | 0.0        | 0.0          |
| I9   | HV | 1.016        | 0.699      | 100        | 35           |
| J10  | HV | 1.034        | 1.947      | 0.0        | 0.0          |
| K11  | HV | 1.006        | -2.072     | 0.0        | 0.0          |

**Tablo B.4:** 11-Baralı test sisteminde hatlara ilişkin veriler

| Bağlı Olduğu Baralar |    | Direnci [pu] | Reaktansı [pu] | Suseptansı [pu] | Çevirme Oranı [kV/kV] |
|----------------------|----|--------------|----------------|-----------------|-----------------------|
| 8                    | 9  | 0.0085       | 0.072          | 0.149           | 0.0                   |
| 9                    | 10 | 0.0119       | 0.1008         | 0.209           | 0.0                   |
| 10                   | 7  | 0.039        | 0.17           | 0.358           | 0.0                   |
| 7                    | 5  | 0.017        | 0.092          | 0.158           | 0.0                   |
| 8                    | 4  | 0.016        | 0.0805         | 0.306           | 0.0                   |
| 4                    | 11 | 0.008        | 0.04025        | 0.0765          | 0.0                   |
| 11                   | 6  | 0.008        | 0.04025        | 0.0765          | 0.0                   |
| 6                    | 5  | 0.01         | 0.085          | 0.176           | 0.0                   |
| 1                    | 5  | 0.0          | 0.0576         | 0.0             | 16,5/230              |
| 3                    | 10 | 0.0          | 0.0586         | 0.0             | 13,8/230              |
| 2                    | 8  | 0.0          | 0.0625         | 0.0             | 18/230                |

### B.3 14-Baralı Test Sistemine İlişkin Veriler

IEEE'nin 14 baralı sisteminin 34 numaralı referanstan alınan yük akışı bilgileri Tablo B.5 ve B.6'da verilmiştir. Tüm değerler sistemin temel durumdaki değerleridir.

**Tablo B.5:** 14-Baralı test sisteminde baralara ilişkin veriler

| Bara |    | Gerilim [pu] | Teta [deg] | P Yük [MW] | Q Yük [MVar] |
|------|----|--------------|------------|------------|--------------|
| 1    | HV | 1.060        | 0.0        | 0.0        | 0.0          |
| 2    | HV | 1.045        | -4.98      | 21.7       | 12.7         |
| 3    | HV | 1.010        | -12.72     | 94.2       | 19.0         |
| 4    | HV | 1.019        | -10.33     | 47.8       | -3.9         |
| 5    | HV | 1.020        | -8.78      | 7.6        | 1.6          |
| 6    | LV | 1.070        | -13.37     | 11.2       | 7.5          |
| 7    | ZV | 1.062        | -13.37     | 0.0        | 0.0          |
| 8    | TV | 1.090        | -13.36     | 0.0        | 0.0          |
| 9    | LV | 1.056        | -14.94     | 29.5       | 16.6         |
| 10   | LV | 1.051        | -15.10     | 9.0        | 5.8          |
| 11   | LV | 1.057        | -14.79     | 3.5        | 1.8          |
| 12   | LV | 1.055        | -15.07     | 6.1        | 1.6          |
| 13   | LV | 1.050        | -15.16     | 13.5       | 5.8          |
| 14   | LV | 1.036        | -16.04     | 14.9       | 5.0          |

**Tablo B.6:** 14-Baralı test sisteminde hatlara ilişkin veriler

| Bağlı Olduğu Baralar |    | Direnci [pu] | Reaktansı [pu] | Suseptansı [pu] | Çevirme Oranı |
|----------------------|----|--------------|----------------|-----------------|---------------|
| 1                    | 2  | 0.01938      | 0.05917        | 0.0528          | 0.0           |
| 1                    | 5  | 0.05403      | 0.22304        | 0.0492          | 0.0           |
| 2                    | 3  | 0.04699      | 0.19797        | 0.0438          | 0.0           |
| 2                    | 4  | 0.05811      | 0.17632        | 0.0340          | 0.0           |
| 2                    | 5  | 0.05695      | 0.17388        | 0.0346          | 0.0           |
| 3                    | 4  | 0.6701       | 0.17103        | 0.0128          | 0.0           |
| 4                    | 5  | 0.01335      | 0.04211        | 0.0             | 0.0           |
| 4                    | 7  | 0.0          | 0.20912        | 0.0             | 0.978         |
| 4                    | 9  | 0.0          | 0.55618        | 0.0             | 0.969         |
| 5                    | 6  | 0.0          | 0.25202        | 0.0             | 0.932         |
| 6                    | 11 | 0.09498      | 0.19890        | 0.0             | 0.0           |
| 6                    | 12 | 0.12291      | 0.25581        | 0.0             | 0.0           |
| 6                    | 13 | 0.06615      | 0.13027        | 0.0             | 0.0           |
| 7                    | 8  | 0.0          | 0.17615        | 0.0             | 0.0           |
| 7                    | 9  | 0.0          | 0.11001        | 0.0             | 0.0           |
| 9                    | 10 | 0.03181      | 0.08450        | 0.0             | 0.0           |
| 9                    | 14 | 0.12711      | 0.27038        | 0.0             | 0.0           |
| 10                   | 11 | 0.08205      | 0.19207        | 0.0             | 0.0           |
| 12                   | 13 | 0.22092      | 0.19988        | 0.0             | 0.0           |
| 13                   | 14 | 0.17093      | 0.34802        | 0.0             | 0.0           |

## ÖZGEÇMİŞ

Koray Kaya 10.02.1981 tarihinde İstanbul'ta doğdu. İlköğretimini Ambarlı İlköğretim Okulu'nda, orta öğretimini Yamanevler İlköğretim Okulu'nda ve Ümraniye Süper Lisesi'nde tamamladı. 1999 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi elektrik mühendisliği bölümünü kazandı ve lisans eğitimini 2004 yılında bu bölümde bitirdi. Mart 2004 tarihinden itibaren Siemens, İletim ve Dağıtım Bölümü, Alçak Gerilim kısmında proje mühendisi olarak çalışmaktadır. 2004 yılında başladığı yüksek lisans eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesi elektrik mühendisliği bölümünde sürdürmektedir. İlgilendiği alanlar alçak gerilim şalt tesisleri ve yüksek gerilim enerji iletim hatlarıdır.