

**FAZLARIN BAĞIMSIZ OLARAK KONTROL EDİLDİĞİ ÜÇ SEVİYELİ BİR
STATKOM'UN REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU AMACIYLA
TASARLANMASI**

HABİB BEHPOOR

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

ELEKTRİK ve ELEKTRONİK Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2010

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından **ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan

Prof.Dr. Birsen Saka

Üye (Danışman)

Prof.Dr. Işık Çadircı

Üye

Doç.Dr. Uğur Baysal

Üye

Doç.Dr. İres İskender

Üye

Dr. Halas Bilge Mutluer

ONAY

Bu tez/...../..... tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Adil DENİZLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

FAZLARIN BAĞIMSIZ OLARAK KONTROL EDİLDİĞİ ÜÇ SEVİYELİ BİR STATKOM'UN REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU AMACIYLA TASARLANIP GELİŞTİRİLMESİ

Habib Behpoor

ÖZ

Günümüzde elektrik iletim sistemlerinin büyümesi ve daha karmaşık bir yapıya kavuşmasıyla birlikte çeşitli güç kalitesi sorunları da gündeme gelmektedir. İletim sistemi planlaması yapılırken sistemin ihtiyaçlarını karşılayacak elektrik iletim hattı, transformatör merkezi v.b. genel çözümlerin yanında sistemin belirli kısımlarında meydana gelen, güç kalitesini ve arz güvenilirliğini etkileyen problemlerin de sistemi olumsuz yönde etkileyeceği hesaba katılarak yerel çözümler üzerinde de durulmalıdır. Elektrik sistemlerinin daha verimli işletilmesi, stabilitenin ve güç kalitesinin artırılması amacıyla geleneksel çözümlere alternatif olarak FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) adı verilen sistemler geliştirilmiş ve bu kapsama giren çeşitli teknolojik uygulamalar dünyanın farklı bölgelerinde kullanılmaya başlanmıştır. FACTS genel olarak AA İletim sistemlerinde dinamik gerilim, empedans ve faz açısı kontrolü sağlayan sistemler olarak tarif edilebilir.

STATKOM (Statik/Senkron Kompansator) FACTS kapsamında değerlendirilen, yük akışı kontrolü sağlayan, geçici kararlılık sınırlarını iyileştiren, terminal gerilimi düzenlemesi sağlayan ve baraya şönt bağlanan güç elektroniği çevirgeçlerine dayalı bir sistemdir. STATKOM terminallerindeki gerilim düşük olduğu zaman reaktif güç üretimi yaparak, gerilim yüksek olduğu zaman ise reaktif güç tüketerek gerilim regülasyonunu sağlar. Bu işlemin gerçekleştirilmesi için gerilim kaynaklı çevirgeç (voltage source converter) ve bu yapının içinde de güç elektroniği anahtarlama elemanları (GTO,IGBT v.b.) kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında dünyada uygulanan STATKOM teknolojileri incelenmiş, iletim sisteminde kullanılmak üzere çok seviyeli, alternatif STATKOM sistemleri PSCAD yazılımı kullanılarak modellenmiş, bu model üzerinde kararlı durum ve dinamik başarımlar analizleri yapılmıştır. Özellikle dengesiz sistemlerde her üç fazın bağımsız olarak kontrol edilebildiği üç seviyeli bir STATKOM'un tasarlanmasına yönelik çalışmalar

yapılmıştır. STATKOM'un elektrik sisteminde meydana gelebilecek çeşitli problemler karşısında verdiği tepkiler çeşitli benzetimler yapılarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: STATKOM, gerilim kaynaklı çevirgeç, gerilim düzenleme, reaktif güç kompanzasyonu bilgisayar benzetimi

Danışman: Prof.Dr. Işık ÇADIRCI, Hacettepe Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü,

DESIGN OF A THREE-LEVEL STATCOM FOR REACTIVE POWER COMPENSATION OF UNBALANCED PHASES

Habib Behpoor

ABSTRACT

In recent years, as the electrical power systems are extending and incorporating complex structures some power quality problems start to arise. During transmission system planning, besides general system solutions like transmission line and substation investments that will fulfill the system requirements, it should be noticed that some disturbances occurring locally, which affect the power quality and supply reliability may cause problems for the entire system and some local precautions should be taken. In order to operate the electrical systems more efficiently and to increase the power quality and system stability, as an alternative to the traditional solutions, FACTS (Flexible AC Transmission Systems) have been developed and installation of systems including FACTS technologies have been initiated in different parts of the world. FACTS can be generally described as equipment providing dynamic voltage, impedance and phase angle control in electrical power systems.

STATCOM which is one of the FACTS technologies is a device that can be used in power flow control, improving the transient stability margins and regulating the terminal voltage. It is connected as a shunt device to the busbar and contains power electronic devices to achieve its goal. STATCOM maintains voltage regulation as it supplies reactive power when the terminal voltage is high and consumes reactive power when it is low. It uses a circuit topology which is named as Voltage Source Converter which contains power electronic switches (GTO, IGBT,IGCT etc.) in order to achieve this process. Within this thesis study, the STATCOM technologies that are used in different parts of the world have been examined, computer models have been developed for the multi-level STATCOM alternatives for possible use in electrical transmission systems, by PSCAD software. Some steady state and transient analyses have been carried out by the use of this computer model, and the results of this study are used towards a design of a three-level STATCOM whose all three phases can be controlled independently , for especially unbalanced loads. The response of the STATCOM

against voltage regulation problems that can occur in the transmission system has been examined by making some computer simulations.

Keywords: STATCOM, Voltage source converter, voltage regulation, computer simulation

Advisor: Prof.Dr. Işık ÇADIRCI, Hacettepe University, Department of Electrical and Electronics Engineering Department.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması TÜBİTAK Kamu Kurumları Araştırma Projeleri Destekleme Programı (Program Kodu:1007) kapsamındaki 105G129 no'lu "Türkiye Elektrik Sistemi'nde Güç Kalitesine Etki Eden Değişkenleri ve Güç Akışını İzleme, Problemlerin Tespiti, Değerlendirilmesi ve Karşı Önlemlerin Hayata Geçirilmesi Projesi "kapsamında desteklenmiştir.

Bu tez çalışmasında bana kendisiyle çalışma fırsatını veren ve sürekli desteğini esirgemeyen Prof.Dr. Işık ÇADIRCI'ya,

Tez çalışmamda ve iş hayatımda sürekli destek olan ve yardım eden başta proje yöneticimiz Prof. Dr. Muammer ERMIŞ olmak üzere tüm Milli Güç Kalitesi Projesi çalışanlarına,

Yardımlarını esirgemeyen değerli çalışma arkadaşım Cem Özgür Gerçek Burhan Gültekin, ve

Bugüne kadar sürekli yanımda olan canım eşim ve aileme,

çok teşekkür ederim.

Hacettepe Üniversitesi 2010

Habib Behpoor

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|---|-----------|
| ÖZ | i |
| ABSTRACT | iii |
| TEŞEKKÜR..... | v |
| İÇİNDEKİLER DİZİNİ..... | vi |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | xi |
| ÇİZELGELER DİZİNİ..... | xiv |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ..... | xvii |
| 1. GİRİŞ..... | 1 |
| 1.1 Tezin amacı ve hedefleri | 3 |
| 1.2 Reaktif güç kompanzasyonu | 4 |
| 1.2.1 Reaktif güç kompanzasyonunun tanımı..... | 4 |
| 1.2.2 Reaktif gücün şebekeye etkisi | 6 |
| 1.3 Statik Senkron Kompanzator (STATKOM)..... | 6 |
| 1.3.1 STATKOM'un tanımı ve genel çalışma prensibi | 6 |
| 1.3.2 STATKOM'un uygulama alanları | 8 |
| 1.3.3 Şebeke ve STATKOM arasındaki vektörel ilişkiler | 9 |
| 1.4 STATKOM tipleri ve özellikleri..... | 13 |
| 1.4.1 Dağıtım STATKOM'u (D-STATKOM) | 13 |
| 1.4.2 İletim STATKOM'u (T-STATCOM)..... | 13 |
| 1.4.2.1 Çok darbeli (Multi-Pulse) STATKOM | 13 |
| 1.4.2.2 Çok seviyeli (Multi-level)STATKOM | 14 |
| 1.4.3 Dünyadaki mevcut STATKOM tipleri | 14 |
| 1.5 Üç seviyeli H-köprü temelli STATKOM..... | 16 |
| 1.5.1 Giriş..... | 16 |
| 1.5.2 Bireysel H-Köprü yapısı..... | 18 |
| 1.5.3 Üç seviyeli STATKOM geriliminin matematiksel analizi..... | 19 |
| 2. PROBLEMİN TANIMI VE ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ..... | 22 |
| 2.1 Dengesizlik..... | 22 |
| 2.1.1 Tanım | 22 |
| 2.1.2 Dengesizlik nasıl oluşur?..... | 22 |
| 2.2 DENGESİZLİK ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ..... | 23 |
| 2.2.1 Dört telli bağlı STATKOM..... | 23 |
| 2.2.1.1 Reaktif güç kontrolü..... | 24 |
| 2.2.1.2 DA bağ gerilimi kontrolü | 25 |
| 2.2.2 Üçgen bağlı STATKOM..... | 25 |
| 2.2.2.1 Referans akım hesaplama..... | 25 |
| 2.2.2.1.1 Steinmetz yöntemi [17]. | 26 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 2.2.2.1.2 | Giriş..... | 26 |
| 2.2.2.1.3 | Steinmetz yöntemi hesapları | 26 |
| 2.2.2.1.4 | Referans yük akımı okuma metodu | 27 |
| 2.2.2.1.5 | STATKOM'a referans akım uygulanması | 29 |
| 2.2.2.2 | Referans akım kontrolü | 30 |
| 2.2.2.3 | DA bağ gerilimi kontrolü | 30 |
| 3. | STATKOM TASARIMI..... | 32 |
| 3.1 | Güç devresi tasarımı..... | 32 |
| 3.1.1 | Dört telli bağlı STATKOM sisteminin teknik özellikleri | 32 |
| 3.1.1.1 | Kuplaj reaktörü hesapları..... | 32 |
| 3.1.1.2 | DA bağ kondansatörü hesapları | 33 |
| 3.1.1.3 | Kuplaj direnci hesapları | 33 |
| 3.1.1.4 | PI parametrelerinin belirlenmesi | 34 |
| 3.1.2 | Üçgen bağlı STATKOM teknik özellikleri | 34 |
| 3.1.2.1 | Kuplaj reaktörü hesapları..... | 34 |
| 3.1.2.2 | DA bağ kondansatör hesapları | 35 |
| 3.1.2.3 | Kuplaj direnci hesapları | 36 |
| 3.1.2.4 | PI parametrelerinin belirlenmesi | 36 |
| 3.1.3 | Süzgeç elemanları..... | 37 |
| 3.1.3.1 | Akord süzgeç (Tuned filter) | 37 |
| 3.1.3.2 | Süzgeç teknik özellikleri | 38 |
| 3.1.3.3 | Üçüncü harmonik süzgeci (Third Harmonic Blocking Filter) | 42 |
| 3.1.3.4 | Üçüncü harmonik süzgeci teknik özellikleri | 42 |
| 3.2 | STATKOM yapısında kullanılan kontrol elemanları | 46 |
| 3.2.1 | Oransal tümlevsel (PI:Proportional Integral) denetleç..... | 46 |
| 3.2.2 | PLL (Faz Kilitlemeli Döngü) denetleç | 46 |
| 3.2.3 | Anahtarlama açısı seçme bloğu (Look-up Table)..... | 47 |
| 4. | BENZETİM ÇALIŞMALARI | 48 |
| 4.1 | Dört telli STATKOM benzetimi | 48 |
| 4.1.1 | STATKOM güç devresinin şeması (Devre I)..... | 48 |
| 4.1.2 | STATKOM güç devresinin şeması (Devre II)..... | 49 |
| 4.1.3 | Benzetim bilgileri | 49 |
| 4.1.4 | Şebeke özellikleri | 50 |
| 4.2 | Üçgen bağlı STATKOM benzetim çalışmaları | 50 |
| 4.2.1 | Güç sistemi devre şeması | 51 |
| 4.2.2 | Benzetim bilgileri | 51 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 4.2.3 | Şebeke özellikleri | 52 |
| 5. | BENZETİM SONUÇLARI | 53 |
| 5.1 | (Devre I) benzetim sonuçları | 53 |
| 5.1.1 | STATKOM geçiş tepkileri | 53 |
| 5.1.2 | DA bağ gerilimi ve alfa açıları tepkisi..... | 53 |
| 5.1.3 | STATKOM çalışma kipi değişimleri (Dengeli ve Dengesiz Durumlar)..... | 55 |
| 5.1.4 | STATKOM ve şebeke çıkış gerilimleri (Dengeli ve Dengesiz Durumlar)..... | 60 |
| 5.1.5 | (Devre I) Gerilim harmonikleri analizi..... | 64 |
| 5.1.6 | Şebeke akımları (Devre I)..... | 68 |
| 5.1.7 | Şebeke akımları TTB Oranı (Devre I)..... | 71 |
| 5.1.8 | (Devre II) benzetim sonuçları | 71 |
| 5.1.8.1 | STATKOM modülasyon endeksi tepkisi | 71 |
| 5.1.8.2 | DA bağ gerilimi ve alfa açıları tepkisi..... | 72 |
| 5.1.8.3 | STATKOM çalışma kipi değişimleri (Dengeli ve Dengesiz Durumlar)..... | 74 |
| | (Dengeli ve Dengesiz Durumlar)..... | 74 |
| 5.1.8.4 | STATKOM ve şebeke çıkış gerilimleri (Dengeli ve Dengesiz Durumlar)..... | 79 |
| 5.1.8.5 | (Devre II) Gerilim harmonikleri analizi..... | 83 |
| 5.1.8.6 | Şebeke akımları (Devre II)..... | 87 |
| 5.2 | Üçgen bağlı STATKOM benzetim çalışmaları sonucu..... | 90 |
| 5.2.1 | STATKOM modülasyon endeksi tepkisi | 90 |
| 5.2.2 | DA Bağ gerilimi ve alfa açıları tepkisi | 91 |
| 5.2.3 | STATKOM çalışma kipi değişimleri (Dengeli ve Dengesiz Durumlar)..... | 93 |
| 5.2.4 | Üçgen bağlı STATKOM çalışma kipi değişimleri (Dengeli ve Dengesiz Durumlar)..... | 98 |
| 5.2.5 | Bara reaktif güç değişimi | 100 |
| 5.2.6 | STATKOM ve şebeke gerilimleri (Dengeli ve Dengesiz Durumlar)..... | 102 |
| 5.2.7 | Üçgen bağlı STATKOM gerilim harmonikleri analizi..... | 106 |
| 5.2.8 | Şebeke akımları grafiği..... | 108 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 5.2.9 | Tam yük durumunda TTB yüzdeleri | 113 |
| 6. | DÖRT TELLİ VE ÜÇGEN BAĞLI STATKOM'LARIN KARŞILAŞTIRMASI | 114 |
| 6.1 | Giriş..... | 114 |
| 6.2 | Reaktif güç tepkisi yönüyle karşılaştırma | 114 |
| 6.3 | TTB yönüyle karşılaştırma..... | 114 |
| 6.3.1 | Dört telli (Devre I) ve (Devre II)..... | 114 |
| 6.3.2 | Dört Telli (Devre I) ve Üçgen Bağlı STATKOM..... | 116 |
| 6.3.4 | Dört Telli (Devre II) ve Üçgen Bağlı STATKOM..... | 116 |
| 7. | SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 117 |
| 7.1 | Dört telli Devre-I sonuçları | 117 |
| 7.2 | Dört telli Devre-II sonuçları | 119 |
| 7.3 | Üçgen bağlı STATKOM sonuçları | 121 |
| 7.4 | Öneriler | 122 |
| | KAYNAKLAR..... | 123 |
| EK-1 | Dört telli bağlı STATKOM'un güç sistemi PSCAD devre şeması..... | 126 |
| EK-2 | Kondansatör ön şarj devresinin PSCAD devre şeması | 127 |
| EK-3 | Dört telli bağlı STATKOM'un PSCAD devre şeması..... | 128 |
| EK-4 | Reaktif güç, teta ve alfa açısı kontrol Bloğunun PSCAD devre şemaları... 129 | |
| EK-5 | PLL (Faz Kilitlemeli Döngü) bloğunun PSCAD devre şeması..... | 130 |
| EK-6 | 3,5,7,11,13 ve 17. Harmonik Süzgeçlerinin PSCAD devre şemaları | 131 |
| EK-7 | Aktif ve reaktif güç hesaplama Bloğunun PSCAD devre şemaları..... | 132 |
| EK-8 | Üçgen bağlı STATKOM'un güç devresinin PSCAD'deki devre şeması | 133 |
| EK-9 | Üçgen bağlı STATKOM'un PSCAD devre şeması | 134 |
| EK-10 | Referans akım, teta ve alfa açısı kontrol bloğu PSCAD devre şemaları..... | 135 |
| EK-11 | Üçgen Bağlı STATKOM için kullanılan PLL (FazKilitlemeli Döngü) bloğu PSCAD devre şemaları..... | 136 |
| EK-12 | STATKOM ve bara reaktif güç hesaplama bloğu PSCAD devre şemaları..... | 137 |
| EK-13 | Elektrik piyasasında sunulan yönetmelik..... | 138 |
| | ÖZGEÇMİŞ..... | 139 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|---|----|
| Şekil 1.1. Görünür güç ve bileşenlerinin vektörel gösterimi | 4 |
| Şekil 1.2. Yük akımı ve bileşenleri..... | 5 |
| Şekil 1.3. STATKOM teknolojileri | 7 |
| Şekil 1.4. STATKOM'un elektrik sistemine bağlantısı..... | 7 |
| Şekil 1.5. Kayıplı sistem fazor diagramı | 9 |
| Şekil 1.6. Kayıpsız sistemde ($R=0$) gerilim ve akımı arasındaki vektörel ilişki..... | 11 |
| Şekil 1.7. AA şebeke ve STATKOM akım ve gerilim grafikleri (kayıpsız durum) .. | 11 |
| Şekil 1.8. STATKOM gerilimi ve akımı arasındaki vektörel ilişki ($R \ll X$) | 12 |
| Şekil 1.9. Üç fazlı gerilim kaynaklı çevirgeç devresi | 14 |
| Şekil 1.10. Üç seviyeli STATKOM temel yapısı | 17 |
| Şekil 1.11 Bireysel H-Köprü yapısı | 18 |
| Şekil 1.12 Bireysel H-Köprü faz-nötür gerilimi | 18 |
| Şekil 1.13. Üç seviye STATKOM'un ürettiği faz-nötür kare dalga Şekli..... | 19 |
| Şekil 2.1 Simetrik bileşenlerin grafiksel gösterimi..... | 22 |
| Şekil 2.2. Dört telli bağlı STATKOM'un üç faz şebeke ile bağlantısı..... | 24 |
| Şekil 2.3. Dört telli bağlı STATKOM kontrol devresi şeması..... | 24 |
| Şekil 2.4. Üçgen bağlı STATKOM'un üç faz şebeke ile bağlantısı | 25 |
| Şekil 2.5. İdeal üç-faz kompanzasyon yapan sistem | 27 |
| Şekil 2.6. Sonuçta oluşan yük: dengesiz ancak güç faktörü 1 olan yük..... | 27 |
| Şekil 2.7. Kapasitif yük için gerilimin sıfır olduğu zaman akım değeri..... | 28 |
| Şekil 2.8. Rezistif yük için gerilimin sıfır olduğu zaman akım değeri..... | 28 |
| Şekil 2.9. Endüktif yük için gerilimin sıfır olduğu zaman akım değeri | 28 |
| Şekil 2.10. STATKOM ve referans akımları devre şeması | 29 |
| Şekil 2.11. Üçgen bağlı STATKOM kontrol devresi şeması | 30 |
| Şekil 3.1. Akord süzgeç devre şeması | 37 |
| Şekil 3.2. Süzgeçsiz STATKOM akımı için frekans karakteristiği | 41 |
| Şekil 3.3. Süzgeçli STATKOM akımı için frekans karakteristiği | 41 |
| Şekil 3.4. Üçüncü Harmonik süzgeci devre şeması..... | 42 |
| Şekil 3.5. Şebeke ve STATKOM'un 3.Harmonik süzgeç ile bağlantısı | 43 |
| Şekil 3.6. Çeşitli R değerine göre süzgeç direnci aktif güç tüketimi..... | 44 |
| Şekil 3.7. Üçüncü harmonik süzgeçsiz şebeke akımı frekans karakteristiği | 45 |
| Şekil 3.8. Üçüncü harmonik süzgeçli şebeke akımı frekans karakteristiği | 45 |
| Şekil 3.9. Oransal tümlevsel denetleç şeması | 46 |
| Şekil 3.10. PLL şeması..... | 46 |
| Şekil 3.11. PLL çıkış sinyali | 47 |
| Şekil 4.1. STATKOM tek hat şeması (Devre I) | 48 |
| Şekil 4.2. STATKOM (Devre II) tek hat şeması | 49 |
| Şekil 4.3. Üçgen bağlı STATKOM'un güç sistemi tek hat şeması | 51 |
| Şekil 5.1. STATKOM modülasyon endeksi grafiği (Dengeli ve Dengesiz Durumlar) | 53 |
| Şekil 5.2. DA bağ gerilimi tepki grafiği | 54 |

| | |
|--|----|
| Şekil 5.3. STATKOM ve kaynak gerilimi arasındaki afa açıları değişimi grafiği | 54 |
| Şekil 5.4. Referans güç ve STATKOM'ların tepkisi (Dengeli ve Dengesiz Durumlar) | 55 |
| Şekil 5.5. STATKOM çalışma kipi değişimleri (Endüktif-Kip Dengeli Durum) | 56 |
| Şekil 5.6. STATKOM çalışma kipi değişimleri (Kapasitif-Kip Dengeli Durum) | 57 |
| Şekil 5.7. STATKOM çalışma kipi değişimleri (Endüktif-Kip Dengeli Durum) | 58 |
| Şekil 5.8. STATKOM çalışma kipi değişimleri (Dengesiz Durum)..... | 59 |
| Şekil 5.9. Şebeke ve STATKOM gerilimleri grafiği (Endüktif-Kip Dengeli Durum) | 60 |
| Şekil 5.10. Şebeke ve STATKOM gerilimleri grafiği (Kapasitif-Kip Dengeli Durum) | 61 |
| Şekil 5.11. Şebeke ve STATKOM gerilimleri grafiği (Kapasitif-Kip Dengeli Durum) | 62 |
| Şekil 5.12. Şebeke ve STATKOM gerilimleri grafiği (Dengesiz Durum) | 63 |
| Şekil 5.13 Şebeke akımları grafiği (Endüktif-Kip Dengeli Durum)..... | 68 |
| Şekil 5.14. Şebeke akımları grafiği (Kapasitif-Kip Dengeli Durum)..... | 69 |
| Şekil 5.15. Şebeke akımları grafiği (Dengesiz Durum) | 70 |
| Şekil 5.16. STATKOM modülasyon endeksi grafiği (Dengeli ve Dengesiz Durumlarda) | 72 |
| Şekil 5.17. DC link (DA bağ gerilimi) tepki grafiği | 73 |
| Şekil 5.18. STATKOM ve şebeke gerilimleri arasındaki afa açıları değişimi grafiği | 73 |
| Şekil 5.19. STATKOM Reaktif Güç Değişimi Tepkisi..... | 74 |
| Şekil 5.20. STATKOM çalışma kipi değişimleri (Endüktif-Kip Dengeli Durum) | 75 |
| Şekil 5.21. STATKOM çalışma kipi değişimleri (Kapasitif-Kip Dengeli Durum) | 76 |
| Şekil 5.22. STATKOM çalışma kipi değişimleri (Endüktif-Kip Dengeli Durum) | 77 |
| Şekil 5.23. STATKOM çalışma kipi değişimleri (Dengesiz Durum)..... | 78 |
| Şekil 5.24. Şebeke ve STATKOM gerilimleri grafiği (Endüktif-Kip Dengeli Durum) | 79 |
| Şekil 5.25. Şebeke ve STATKOM gerilimleri grafiği (Kapasitif-Kip Dengeli Durum) | 80 |
| Şekil 5.26. Şebeke ve STATKOM gerilimleri grafiği (Endüktif-Kip Dengeli Durum) | 81 |
| Şekil 5.27. Şebeke ve STATKOM gerilimleri grafiği (Dengesiz Durum) | 82 |
| Şekil 5.28. Şebeke akımları grafiği (Endüktif-Kip Dengeli Durum)..... | 87 |
| Şekil 5.29. Şebeke akımları grafiği (Kapasitif-Kip Dengeli Durum)..... | 88 |
| Şekil 6.30. Şebeke akımları grafiği (Dengesiz Durum)..... | 89 |
| Şekil 5.31. STATKOM modülasyon endeksi grafiği | 91 |
| Şekil 5.32. STATKOM DA bağ gerilimi tepkisi ve alfa açıları grafiği | 92 |
| Şekil 6.33. STATKOM ve şebeke gerilimi arasındaki afa açıları değişimi grafiği | 92 |

| | |
|---|-----|
| Şekil 5.34. Referans akım değişimleri (Dengeli ve Dengesiz Durumlarda) | 93 |
| Şekil 5.35. Referans akımı değişimleri (Dengesiz Durum) | 94 |
| Şekil 5.36. Referans akımı değişimleri (Dengesiz Durum) | 95 |
| Şekil 5.37. Referans akımı değişimleri (Endüktif-Kip Dengeli Durum)..... | 96 |
| Şekil 5.38. Referans akımı değişimleri (Kapasitif-Kip Dengeli Durum)..... | 97 |
| Şekil 5.39. STATKOM Çalışma Kipi Değişimleri (Dengesiz Durum)..... | 98 |
| Şekil 5.40. STATKOM Çalışma Kipi Değişimleri (Dengesiz Durum)..... | 98 |
| Şekil 5.41. STATKOM Çalışma Kipi Değişimleri (Endüktif-Kip Dengeli Durum) | 99 |
| Şekil 5.42. STATKOM Çalışma Kipi Değişimleri (Kapasitif-Kip Dengeli Durum) | 99 |
| Şekil 5.43. Bara Reaktif Güç Değişimleri (Dengesiz Durum)..... | 100 |
| Şekil 5.44. Bara Reaktif Güç Değişimleri (Dengesiz Durum)..... | 100 |
| Şekil 5.45. Bara Reaktif Güç Değişimleri (Endüktif-Kip Dengeli Durum) | 101 |
| Şekil 5.46. Bara Reaktif Güç Değişimleri (Kapasitif-Kip Dengeli Durum) | 101 |
| Şekil 5.47. STATKOM ve şebeke gerilimleri (Dengesiz Durum)..... | 102 |
| Şekil 5.48. STATKOM ve şebeke gerilimleri (Dengesiz durum) | 103 |
| Şekil 5.49. STATKOM ve şebeke gerilimleri ((Endüktif-Kip Dengeli Durum) | 104 |
| Şekil 5.50. STATKOM ve şebeke gerilimleri (Kapasitif-Kip Dengeli Durum) | 105 |
| Şekil 5.51. Şebeke akımları grafiği (Dengesiz Durum)..... | 108 |
| Şekil 5.52. Şebeke akımları grafiği (Dengesiz Durum)..... | 110 |
| Şekil 5.53. Şebeke akımları grafiği (Endüktif-Kip Dengeli durum) | 111 |
| Şekil 6.54. Şebeke akımları grafiği (Kapasitif-Kip Dengeli durum) | 112 |
| Şekil 6.1. Üçüncü harmonik süzgeci bypass anahtarı devre şeması..... | 115 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

| | |
|--|----|
| Çizelge 1.1. Dünyada şu ana kadar geliştirilen çeşitli STATKOM tipleri | 14 |
| Çizelge 1.2 Biresel H-köprü yapısındaki anahtarlar ve diyotların durumu | 19 |
| Çizelge 3.1. Reaktif güç kontrol devresi | 34 |
| Çizelge 3.2. STATKOM'un DA bağ gerilimi kontrol | 34 |
| Çizelge 3.3. Dört telli ve üçgen bağlı sistemlerin süzgeç R,L,C değerleri..... | 40 |
| Çizelge 3.4. Referans akım kontrol devresi..... | 36 |
| Çizelge 3.5. STATKOM DA bağ gerilimi Kontrolü..... | 37 |
| Çizelge 3.6. Modülasyon endeksine göre..... | 47 |
| Çizelge 4.1. Benzetim Bilgileri | 49 |
| Çizelge 4.2. STATKOM'un bağlandığı üç faz şebeke özellikleri..... | 50 |
| Çizelge 4.3. STATKOM transformatörü teknik özellikleri..... | 50 |
| Çizelge 4.4. Üç seviyeli STATKOM devre parametreleri | 50 |
| Çizelge 4.5. Benzetim Bigileri..... | 51 |
| Çizelge 4.6. STATKOM'un bağlandığı üç faz Şebeke özellikleri | 52 |
| Çizelge 4.7. STATKOM transförmatörü teknik özellikleri..... | 52 |
| Çizelge 4.8. Üç seviyeli STATKOM devre parametreleri | 52 |
| Çizelge 5.1. Çevirgeç faz-nötür gerilimi..... | 64 |
| Çizelge 5.2. Çevirgeç faz-nötür gerilimi..... | 64 |
| Çizelge 5.3. Çevirgeç faz-nötür gerilimi..... | 64 |
| Çizelge 5.4. Ortak Bağlantı Noktası faz-nötür gerilimi | 65 |
| Çizelge 5.5. Ortak Bağlantı Noktası faz-nötür gerilimi | 65 |
| Çizelge 5.6. Ortak Bağlantı Noktası faz-nötür gerilimi | 65 |
| Çizelge 5.7. Çevirgeç faz-faz gerilimi | 66 |
| Çizelge 5.8. Çevirgeç faz-faz gerilimi | 66 |
| Çizelge 5.9. Çevirgeç faz-faz gerilimi | 66 |
| Çizelge 5.10. Ortak Bağlantı Noktası faz-faz gerilimi | 67 |
| Çizelge 5.11. Ortak Bağlantı Noktası faz-faz gerilim | 67 |
| Çizelge 5.12. Ortak Bağlantı Noktası faz-faz gerilimi | 67 |
| Çizelge 5.13. A fazı akım harmonik analizi..... | 68 |
| Çizelge 5.14. B fazı akım harmonik analizi..... | 68 |
| Çizelge 5.15. C fazı akım harmonik analizi..... | 69 |
| Çizelge 5.16. A fazı akım harmonik analizi..... | 69 |
| Çizelge 5.17. B fazı akım harmonik analizi..... | 69 |
| Çizelge 5.18. C fazı akım harmonik analizi..... | 70 |
| Çizelge 5.19. A fazı akım harmonik analizi..... | 70 |
| Çizelge 5.20. B fazı akım harmonik analizi..... | 70 |
| Çizelge 5.21. C fazı akım harmonik analizi..... | 71 |
| Çizelge 5.22. Şebeke akımları THB Oranı (Dengeli Durum) | 71 |
| Çizelge 5.23. Çevirgeç faz-nötür gerilimi | 83 |
| Çizelge 5.24. Çevirgeç faz-nötür gerilimi..... | 83 |
| Çizelge 5.25. Çevirgeç faz-nötür gerilimi..... | 83 |
| Çizelge 5.26. Ortak Bağlantı Noktası faz-nötür gerilimleri | 84 |

| | |
|---|-----|
| Çizelge 5.27. Ortak Bağlantı Noktası faz-nötür gerilimleri | 84 |
| Çizelge 5.28. Ortak Bağlantı Noktası faz-nötür gerilimleri | 84 |
| Çizelge 5.29. Çevirgeç faz-faz gerilim | 85 |
| Çizelge 5.30. Çevirgeç faz-faz gerilim | 85 |
| Çizelge 5.31. Çevirgeç faz-faz gerilim | 85 |
| Çizelge 5.32. Ortak Bağlantı Noktası faz-faz gerilimi | 86 |
| Çizelge 5.33. Ortak Bağlantı Noktası faz-faz gerilimi | 86 |
| Çizelge 5.34. Ortak Bağlantı Noktası faz-faz gerilimi | 86 |
| Çizelge 5.35. A fazı akım harmonik analizi..... | 87 |
| Çizelge 5.36. B fazı akım harmonik analizi..... | 87 |
| Çizelge 5.37. C fazı akım harmonik analizi..... | 88 |
| Çizelge 5.38. A fazı akım harmonik analizi..... | 88 |
| Çizelge 5.39. B fazı akım harmonik analizi..... | 88 |
| Çizelge 5.40. C fazı akım harmonik analizi..... | 89 |
| Çizelge 5.41. A fazı akım harmonik analizi..... | 89 |
| Çizelge 5.42. B fazı akım harmonik analizi..... | 89 |
| Çizelge 5.43. C fazı akım harmonik analizi..... | 90 |
| Çizelge 5.44. şebeke akımları TTB oranları (Dengeli durum)..... | 90 |
| Çizelge 5.45. Çevirgeç faz-faz gerilimi | 106 |
| Çizelge 5.46. Çevirgeç faz-faz gerilimi | 106 |
| Çizelge 6.47. Çevirgeç faz-faz gerilimi | 106 |
| Çizelge 5.48. Çevirgeç faz-faz gerilim | 107 |
| Çizelge 5.49. Ortak Bağlantı Noktası faz-faz gerilim | 107 |
| Çizelge 5.50. Ortak Bağlantı Noktası faz-faz gerilim | 107 |
| Çizelge 5.51 Ortak Bağlantı Noktası faz-faz gerilim | 108 |
| Çizelge 5.52. Ortak Bağlantı Noktası faz-faz gerilim | 108 |
| Çizelge 5.53. A fazı akım harmonik analizi..... | 109 |
| Çizelge 5.54. B fazı akım harmonik analizi..... | 109 |
| Çizelge 5.55. C fazı akım harmonik analizi..... | 109 |
| Çizelge 5.56. A fazı akım harmonik analizi..... | 110 |
| Çizelge 5.57. B fazı akım harmonik analizi..... | 110 |
| Çizelge 5.58. C fazı akım harmonik analizi..... | 111 |
| Çizelge 5.59. A fazı akım harmonik analizi..... | 111 |
| Çizelge 5.60. B fazı akım harmonik analizi..... | 112 |
| Çizelge 5.61. C fazı akım harmonik analizi..... | 112 |
| Çizelge 5.62. A fazı akım harmonik analizi..... | 113 |
| Çizelge 5.63. B fazı akım harmonik analizi..... | 113 |
| Çizelge 5.64. C fazı akım harmonik analizi..... | 113 |
| Çizelge 5.65. şebeke akımları TTB oranı | 113 |
| Çizelge 6.1. Dört telli (Devre I) ve (Devre II) TTB oranları..... | 115 |
| Çizelge 6.2. Dengeli ve dengesiz durumlar için TTB Kaşılaştırması | 116 |
| Çizelge 6.3. Dengeli ve dengesiz durumlar için TTB Kaşılaştırması | 116 |
| Çizelge 7.1. Çevirgeç ve OBN THB Miktarları..... | 118 |
| Çizelge 7.2. Şebeke akımları TTB Miktarları | 118 |

| | |
|--|-----|
| Çizelge 7.3. Çevirgeç ve OBN THB Miktarları..... | 120 |
| Çizelge 7.4. Şebeke akımları TTB Miktarları..... | 120 |
| Çizelge 7.5. Çevirgeç ve OBN THB Miktarları..... | 121 |
| Çizelge 7.6. Şebeke akımları TTB Miktarları..... | 122 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|--------------|--|
| AA | Alternatif Akım |
| CMC | Kaskad Bağlı Çok Seviyeli Çevirgeç |
| DA | Doğru akım |
| FACTS | Esnek AA İletim Sistemleri |
| GKÇ | Gerilim Kaynaklı Çevirgeç |
| HF | Harmonik Süzgeç |
| Lookup Table | Değer Alım Çizelgesi |
| OBN | Ortak Bağlantı Noktası |
| PI | Oransal Tümlensel |
| PLL | Faz Kilitlemeli Döngü |
| TTB | Toplam Talep Bozunumu |
| THB | Toplam Harmonik Bozunum |
| STATKOM | Statik Senkron Kompanzatör |
| α | STATKOM Gerilimi İle Şebeke Gerilimi Arasındaki Aç |

1. GİRİŞ

Elektrik iletim ve dağıtım sistemlerinin güvenilir ve düşük maliyetli olarak planlanması, işletilmesi ve tüketiciye kaliteli ve yeterli elektrik enerjisi arz edilmesi için sistem yapılandırılmasında ve işletilmesinde çeşitli arz güvenilirliği ve kalitesi koşulları belirlenmeli ve uygulanmalıdır.

Elektrik iletim ve dağıtım sistemleri planlanırken sistemde zaman zaman meydana gelebilecek kısıtlılık durumları göz önünde bulundurularak bu durumlarda sistemin vereceği tepkiler önceden belirlenmeli ve arıza durumunda sistemin en az zararı görerek kısa zamanda normal şartlarına dönmesini sağlayacak teknik tedbirler alınmalıdır.

Elektrik İletim sistemlerinde güç kalitesini belirleyen temel parametreler frekans ve gerilimdir. Arıza durumunda sistemin frekans değerinin ve gerilimlerin belirli bir aralıkta kalması gereklidir. Kararlılığı arttırmak ve sistemde meydana gelen bozucu etkileri karşılayarak sistemi normal çalışma düzenine geri döndürmek adına çeşitli teknolojilere sahip cihazlar kullanılmaktadır. Elektrik sisteminde yer alan transformatör merkezlerindeki baralara şönt bağlanan kapasitör bankaları, ya da reaktörler, hatlara seri olarak bağlanan seri kapasitör üniteleri bu grupta değerlendirilebilecek cihazlardır.

Gelişen güç elektroniği teknolojileri geçmişten günümüze kullanılmakta olan bu tip konvansiyonel cihazlara çeşitli alternatifler sunmaktadır. Güç Elektroniği'nde kullanılan çeşitli anahtarlama elemanlarını içeren ve 1990'dan bu yana İletim sistemlerinde kullanılmaya başlanan kontrol cihazlarına genel olarak FACTS (Flexible AC Transmission Systems:Esnek AA İletim Sistemleri) adı verilmektedir. FACTS cihazları yüksek gerilim iletim ve dağıtım sistemlerinde gerilim, empedans ve faz açısı dinamik kontrolü sağlarlar. FACTS cihazları sayesinde varolan sistem imkanlarından daha fazla faydalanılması, geliştirilmiş sistem güvenliği ve kullanımı, arttırılmış dinamik ve geçici rejim (transient) şebeke kararlılığı ve arttırılmış güç kalitesi ve çevresel faydalar sağlarlar. Ayrıca ilk etapta pahalı bir yatırım olarak görünmelerine rağmen uzun vadede geçici çözüm sağlayacak iletim ve dağıtım yatırımlarına göre daha ekonomik çözümler sağlayabilirler.

Çoğu ülkede özellikle üretim tesisleri ve yüklerin hızlı bir şekilde değiştiği deregüle elektrik piyasasında, iletim ve dağıtım sisteminin enerji taşıma kapasitesini arttırmak ve hatlardaki yük akışını kontrol edebilmek hayati önem taşır. Yeni iletim ve dağıtım hattı yatırımları yapmak ekonomik ve çevresel kısıtlamalarla sınırlanabilir. Bu durumda FACTS cihazları akılcı çözümler sunabilmektedir.

Günümüzdeki modern endüstri tesisleri yüksek kalitede elektrik enerjisine ihtiyaç duyarlar. Enerji kalitesi sabit gerilim ve frekans ve kesintisiz kaynak kriterleriyle sağlanır. Gerilim çökmeleri, frekansta değişimler ya da kaynaktan meydana gelecek kesintiler üretim sürecinin durmasına ve dolayısıyla ekonomik kayıplara yol açacaktır. FACTS cihazları güç kalitesinin sağlanmasında da önemli rol oynarlar [1].

FACTS cihazlarının iletim sisteminde kullanılmak üzere seri denetleç, şönt denetleç ya da her ikisinin birleşimi şeklinde tasarlanmış çeşitli tipleri bulunmaktadır. İletim sisteminin bölgesel ihtiyaçlarına göre tasarımlar değişiklik göstermektedir.

1970'lerin başından itibaren tristörler ile kapasitör ve reaktörlerin birlikte kullanımıyla oluşturulmuş farklı tasarımlara sahip cihazlar iletim ve dağıtım sistemlerinde sisteme reaktif güç enjekte ederek AA gerilim regülasyonu yapma amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Bu amaçla kullanılan tasarımlardan bazıları;

- SVC (Statik Reaktif Güç Kompanzatorü)
- TCSC (Tristör Kontrollü Seri Kapasitör)
- TSC (Tristör Anahtarlama Kapasitör)
- TCR (Tristör Kontrollü Reaktör)

olarak sıralanabilir [2]. Sonraki aşamada yarı iletken teknolojileri kullanarak üretilen yüksek güç değerlerinde çalışan anahtarlama elamanlarının devreye girmesiyle 90'ların başından itibaren farklı cihazlar gündeme gelmeye başlamıştır. GTO (Gate turn-off Thyristor), IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor) gibi kendi kesme kabiliyeti olan yarı iletkenler içeren yeni bir güç elektroniği aygıtı olan VSI (Voltage Source Inverters:Gerilim Kaynaklı Evirgeçleri) geliştirilmiştir. VSI denetleme mekanizması yardımıyla ihtiyaca göre sistemden reaktif güç emilimi sağlayan ya da sisteme reaktif güç sağlayan bir devre yapısıdır. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan

FACTS cihazlarından olan STATKOM (Statik Senkron Kompanzatör), SSSC (Statik Senkron Seri Kompanzatör) ve ikisinin birleşiminden oluşan UPFC (Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü) VSI teknolojisini içeren cihazlardır [3].

1.1 Tezin amacı ve hedefleri

Statik senkron kompanzatör olarak adlandırılan STATKOM sistemleri, dönen bir motor olan senkron kondenser'in tam bir statik karşılığıdır. STATKOM'un senkron kondenser'e olan üstünlükleri çok hızlı tepki gösterme becerisi ve her fazın ayrı ayrı kontrol edilebilme yeteneğidir. Bir STATKOM sistemi sadece çevirgeci düşünüldüğünde sürekli $\pm Q$ MVar aralığında şebeke frekansında (50Hz) hem endüktif, hem de kapasitif reaktif güçleri üretebilmektedir. Diğer bir deyişle, Q MVar'lık bir kurulu çevirgeç gücünün reaktif güç üretme kapasitesi $2Q$ MVar'dır. Bu açıdan rakip sistem olan Statik VAr Kompanzatörüne (SVC) bir üstünlük sağlanmaktadır. Bir SVC $+Q$ / $-Q$ aralığında kesintisiz reaktif güç üretebilmesi için $-2Q$ MVar Tristör kontrollü Reaktör (TCR) ve $+Q$ MVar kurulu gücünde şönt süzgeç bankalarına ihtiyaç duymaktadır. STATKOM sisteminin SVC sistemine bir diğer üstünlüğü ise geniş bir terminal gerilimi değişim aralığında maksimum reaktif güç üretiminin neredeyse sabit kalmasıdır. Bu açılardan STATKOM sistemi, dağıtım ve iletim sistemlerinin güç kalitesi problemlerinin çözümünde doğrudan kullanabilecek geleceğin teknolojisi olarak gözükmektedir.

Statik Senkron Kompanzatör (STATKOM) sistemleri 400kV veya 154kV iletim sistemlerinde daha çok gerilim düzenlemesi ve sistem kararlılık parametrelerinin iyileştirilmesi amacıyla tasarlanıp uygulanmaktadır. Dağıtım sistemlerinde ise daha çok hem endüktif hem de kapasitif bölgede reaktif güç kompanzasyonu amacıyla kullanılmaktadır. Tasarlanan STATKOM yapıları çoğunlukla üç faz dengeli güç üretecek şekilde kontrol edilmektedir. Ancak bu tür STATKOM yapıları dağıtım sistemlerinde ark ocakları gibi dengesiz reaktif güç üreten yükler için etkisiz kalmaktadırlar. Ayrıca elektrik iletim ve dağıtım sistemlerinde olası faz-toprak hatalarında sistem kararlılığını artırmaya yönelik etkide bulunmak, uygulanan ayrı türdeki STATKOM yapıları içinde imkansız olmaktadır. Bu yüzden hem dağıtım sistemlerinde, hem ark ocakları gibi dengesiz yüklerde, hem de iletim ve dağıtım sistemlerinde yukarıda anlatılan durumlara çözüm olarak her fazı bağımsız olarak kontrol edebilen STATKOM yapılarının tasarlanıp uygulanması gerekmektedir.

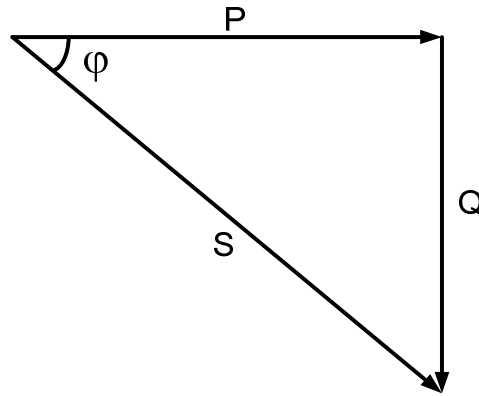
Bu tez çalışmasında günümüzde iletim ve dağıtım sistemlerinin çeşitli güç kalitesi sorunlarına çözüm olan Statik Senkron Kompanzator (STATKOM) sistemlerinin bağımsız faz kontrollü olarak tasarlanması anlatılacaktır. Tasarım, çeşitli bilgisayar programları kullanarak yapılacaktır. Temel olarak iki farklı devre topolojisinin benzetimi PSCAD yazılımı ile gerçekleştirilecek ve karşılaştırılacaktır.

1.2 Reaktif güç kompanzasyonu

1.2.1 Reaktif güç kompanzasyonunun tanımı

Ohmik yüklerin dışındaki alternatif akım yüklerinin çoğu hem ohmik hem de endüktif özelliktedirler. Bu nedenle bu yükler şebekeden görünür güç (S) çekerler. Görünür güç iki bileşenden meydana gelir. Bunlardan birincisi, tesislerde yüklerin ihtiyaç duyduğu aktif güç (P) olup alıcılar tarafından faydalı hale getirilir. Örneğin motorlarda mekanik güce, ısı tüketicilerinde termik güce ve aydınlatma tüketicilerinde aydınlatma gücüne dönüşür. İkinci bileşen ise reaktif güçtür (Q). Reaktif güç alıcılar tarafından faydalı hale çevrilemez, manyetik alanın oluşturulması için şebekeden çekilir ve tekrar şebekeye geri dönüş yapar. Bu durum elektrik tesislerinde kayıplara neden olur. Kullanılan devre elemanlarının akım ve güç değerlerini artırır. Generatörleri, enerji nakil hatlarını ve transformatörleri gereksiz yere yükler [4]. Ayrıca iletim ve dağıtım hattından çekilebilecek aktif gücün düşmesine neden olur. Reaktif güç endüktif ve kapasitif olmak üzere iki karakterde olabilir. Tek fazlı sistemde yükün şebekeden çektiği görünür güç şu şekilde ifade edilmektedir;

$$S = VI \quad (1.1)$$



Şekil 1.1. Görünür güç ve bileşenlerinin vektörel gösterimi

Burada;

V : Şebeke geriliminin etkin değeri,

I : Yük akımının etkin değeri,

olmaktadır.

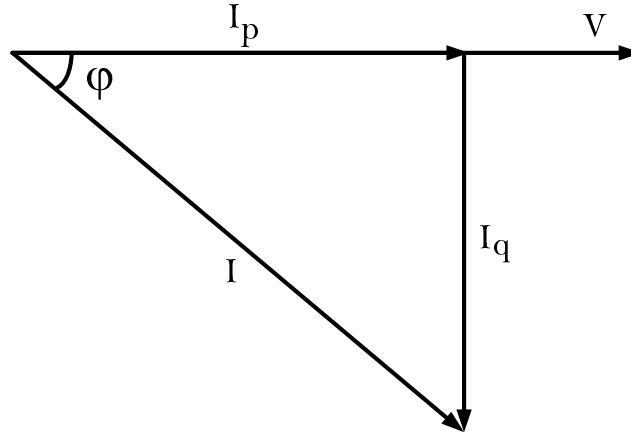
Şekil 1.1'den anlaşılacağı üzere, görünür güç ile aktif ve reaktif bileşenleri arasındaki bağıntı saf sinüs dalga şekilleri için aşağıdaki gibidir;

$$P = S \cos \varphi \quad (1.2)$$

$$Q = S \sin \varphi \quad (1.3)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.4)$$

Aslında güçler arasındaki vektörel bağıntı akımlardan gelmektedir. Şekil 1.2.'de yük akımı ve bileşenlerinin vektörel gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.2. Yük akımı ve bileşenleri

I_p : Yük akımının aktif bileşeni

I_q : Yük akımının reaktif bileşeni olmak üzere;

$$I_p = I \cos \varphi \quad (1.5)$$

$$I_q = I \sin \varphi \quad (1.6)$$

$$I = \sqrt{I_p^2 + I_q^2} \quad (1.7)$$

Sinuzoidal gerilimi ile yük akımı arasındaki açının kosinüsü güç faktörü (pf) olarak adlandırılır. Bu açının sıfır dereceye veya sıfır dereceye mümkün olduğunca yaklaştırılması reaktif güç kompanzasyonunun bir başka tanımıdır [5]. EPDK'nın 10/11/2004 tarihli ve 25639 sayılı resmi gazetede yayımladığı elektrik iletim sistemi arz güvenilirliği ve kalitesi yönetmeliğinin reaktif enerji kompanzasyonu

başlıklı 11. Maddesine göre "iletim sistemine doğrudan bağlı tüketiciler ve dağıtım lisansına sahip tüzel kişiler tarafından; iletim sistemine bağlantıyla ilgili her bir ölçüm noktasında ve her bir uzlaşma periyodunda, sistemden çekilen endüktif reaktif enerjinin sistemden çekilen aktif enerjiye oranı yüzde yirmiye, sisteme verilen kapasitif reaktif enerjinin sistemden çekilen aktif enerjiye oranı ise yüzde onbeşi geçemez" [6]. Verilen tanım aşağıdaki gibidir;

$$\frac{\text{Çekilen endüktif reaktif güç}}{\text{Çekilen aktif güç}} \leq \%20$$

$$\frac{\text{Çekilen kapasitif reaktif güç}}{\text{Çekilen aktif güç}} \leq \%15$$

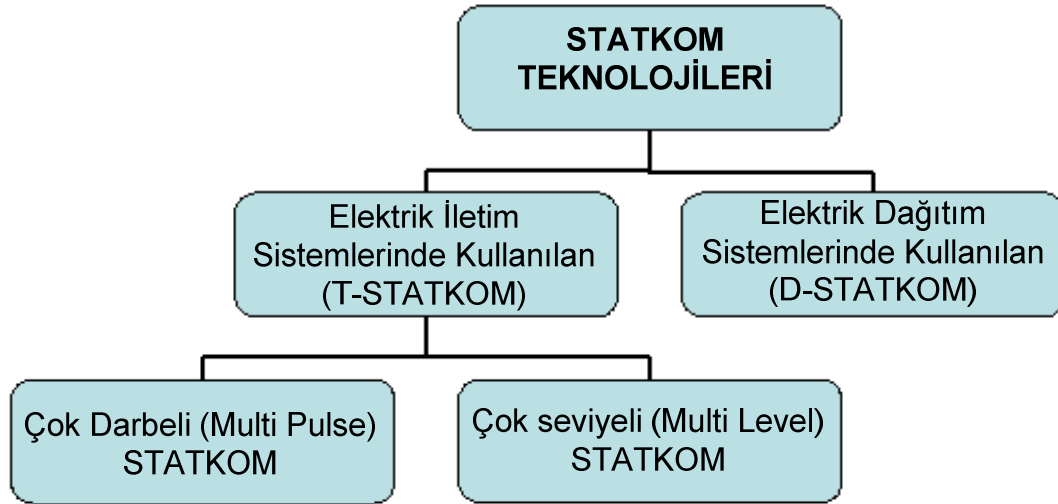
1.2.2 Reaktif gücün şebekeye etkisi

Şebekeye bağlı endüktif ve kapasitif devrelerde faz farkına göre reaktif güç oluşur. Pratik uygulamada fabrikalar, elektrik makineleri, iş makineleri ve motorlar endüktif kipte çalıştıklarından bağlandıkları şebekeden reaktif güç çekerler. Çekilen reaktif güç aynı zamanda verimin düşmesine neden olur. Aynı sistemin öncelikle kompanze edilmemiş ve sonra kompanze edilmiş hali karşılaştırıldığında aktif güç kapasitesinin arttığı görülür. İşte verimin artması ve şebekenin reaktif güçten kötü etkilenmemesi örneğin, gerilim dengesizliği ve güç faktörünü düşmesini engellemek için eğer sabit endüktif güç tüketimi varsa sistemin girişine kompanzasyon kondansatörleri bağlanır ve devrede üretilen reaktif güç şebekeden çekilmesi yerine bu reaktif güç kondansatörlerden sağlanır. Ancak, bu gibi durumlarda güç sistemlerinde rezonans durumlarının iyi incelenmesi gerekir. Hızlı değişen reaktif güç ihtiyaçları için uygun bu bir çözüm olmamaktadır.

1.3 Statik Senkron Kompanzator (STATKOM)

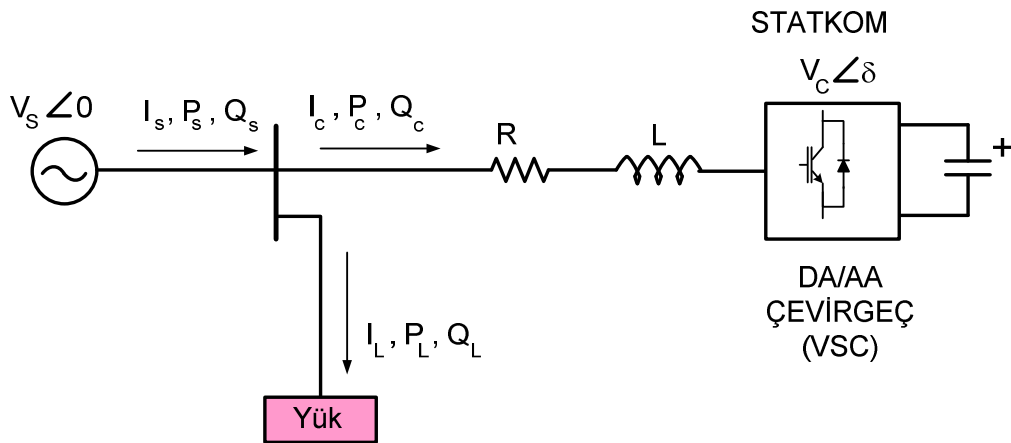
1.3.1 STATKOM'un tanımı ve genel çalışma prensibi

STATKOM elektrik sisteminde yer alan bir noktaya (bara) şönt olarak bağlanan ve çıkışının kontrol edilebilir olması sayesinde elektrik sisteminin çeşitli özel parametreleri üzerinde denetleme imkanı veren, gerekli durumlarda elektrik sistemine reaktif güç üretimi ve sistemden reaktif güç tüketimi gerçekleştirerek kompanzasyon işlemini hızlı bir şekilde yerine getiren bir cihazdır. Elektrik sistemlerinde kullanılan STATKOM teknolojileri şu şekildedir [7]:



Şekil 1.3. STATKOM teknolojileri

STATKOM basit olarak ele alındığında DA bir kaynağa ya da depolama elemanına bağlı DA/AA çevirgeç ve bu çevirgeçle elektrik sistemi arasındaki bağlantıyı sağlayan bir indirici transformatör ve/veya eşlenik endüktif empedans ile temsil edilir. STATKOM yapısında yer alan VSC (Voltage Source Converter: Gerilim kaynaklı Çevirgeç) tasarımında kullanılan yarı iletken anahtarlama elemanları (GTO, IGBT veya IGCT) sayesinde üç faz gerilimler üzerinde hızlı genlik ve faz kontrolü sağlar. Endüktif empedans üzerinde oluşan gerilim farkı STATKOM ve sistem arasında reaktif güç transferi gerçekleştirerek, STATKOM'un bağlı olduğu noktada gerilim iyileştirmesi sağlamaktadır [3].



Şekil 1.4. STATKOM'un elektrik sistemine bağlantısı

Şekil 1.4'te STATKOM'un elektrik sistemine bağlantısını gösteren şematik yapısı görülmektedir. Bu şemaya göre STATKOM'un çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilir. Endüktif empedansın önünde DA/AA çevirgeç (VSC) tarafından, kontrol edilebilir bir AA gerilim elde edilir. Bu elde edilen gerilim sistem barasının gerilimiyle karşılaştırılarak STATKOM'un üstleneceği rol belirlenir. AA bara gerilimi DA/AA çevirgeç tarafından elde edilmiş olan gerilimden büyük olduğu durumda ($V_S > V_C$) elektrik sistemi STATKOM'u baraya şönt bağlı durumda bir reaktör olarak algılar ve STATKOM bağlı olduğu noktadan reaktif güç tüketmeye başlar. Tersi durumunda, yani çevirgeç tarafından elde edilen gerilim bara geriliminden büyük olduğu durumda ($V_C > V_S$) STATKOM şönt kapasitör olarak çalışır ve sisteme reaktif güç verir. Gerilimlerin eşit olduğu durumda güç alış verişi sıfırdır. STATKOM'un DA tarafında bir enerji depolama aygıtı bulunacak olursa elektrik sistemine gerçek güç (P) transferi sağlanabilir. Bu STATKOM terminal gerilimi ile AA sistem arasındaki faz açısının ayarlanarak yapılır. AA sistemin faz açısının çevirgeç tarafından üretilen gerilimin faz açısının önünde olduğu durumda (leading) STATKOM sistemden aktif güç tüketir. AA sistemin faz açısı çevirgecin ürettiği gerilimin faz açısının gerisinde kaldığı durumda (lagging) STATKOM sisteme aktif güç sağlar [8].

1.3.2 STATKOM'un uygulama alanları

STATKOM'un kullanım alanları genel olarak aşağıda verilmektedir [9]:

- Zayıf elektrik şebekesi veya reaktif gücü sabit olmayan yükler
- Dengesiz yükler
- Ark fırınları (ocakları)
- Rüzgar çiftlikleri
- Kaynak işlemleri
- Endüstriyel değirmenler
- Madencilik ve yük asansörleri
- Liman vinçleri

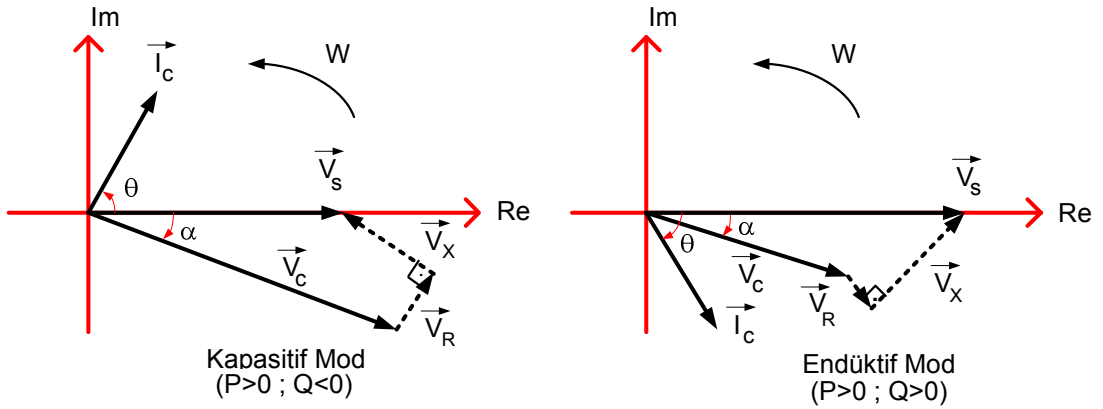
STATKOM kullanılarak gerçekleştirilen temel sistem uygulamaları şunlardır [3]:

- Etkin gerilim regülasyonu ve kontrolü
- Güç faktörünün kontrol edilmesi

- Geçici aşırı/düşük gerilimlerin önüne geçilmesi
 - Kararlı durum güç transferi kapasitesinin artırılması
 - Geçici durum stabilitesi sınırlarının iyileştirilmesi
 - Elektrik sistemindeki osilasyonların sönümlendirilmesi
 - Filiker kontrolü
 - Yük akışı performansının arttırılarak sistem çökmelerinin (blackout) önüne geçilmesi.
 - Güç kalitesinin iyileştirilmesi
- olarak sıralanabilir.

1.3.3 Şebeke ve STATKOM arasındaki vektörel ilişkiler

STATKOM'un endüktif ve kapasitif çalışması sırasında gerilim ve akımlar arasındaki vektörel ilişki Şekil (1.5)'te gösterilmektedir.



Şekil 1.5. Kayıplı sistem fazor diagramı

V_s : AA Şebeke gerilimi faz-nötür etkin değeri.

V_c : STATKOM faz-nötür Gerilimi ana bileşeni etkin değeri

I_s : Şebeke Akımı etkin değeri

I_L : Yük Akımı etkin değeri

I_c : STATKOM Akımı etkin değeri

Q_s : Şebekeden çekilen reaktif güç

Q_L : Yükün çektiği reaktif güç

Q_c : STATKOM reaktif gücü

α : AA şebeke gerilimi ve STATKOM ana bileşeni arasındaki faz açısı

R : Eşdeğer direnc

L : Eşdeğer endüktans

Şekil 1.5'e göre aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$\overline{V}_S = \overline{V}_C + \overline{V}_R + \overline{V}_X \quad (1.8)$$

Burada $X = 2\pi fL$, $\overline{V}_R = R\overline{I}_C$ ve $\overline{V}_X = jX\overline{I}_C$

Şekil 1.5'te \overline{V}_R ve \overline{V}_X vektörlerinin Re ve Im ekseninde çözümü ile (1.9) ve (1.10) denklemleri sağlanabilir:

$$V_S - V_C \cos \delta = (R \cos \theta + X \sin \theta) I_C \quad (1.9)$$

$$V_C \sin \alpha = (X \cos \theta - R \sin \theta) I_C \quad (1.10)$$

Diğer taraftan, STATKOM'un tükettiği aktif ve reaktif güç her faz için kaynak tarafında aşağıdaki denklemler ile gösterilmektedir:

$$P_C = V_S I_C \cos \theta \quad (1.11)$$

$$Q_C = V_S I_C \sin \theta \quad (1.12)$$

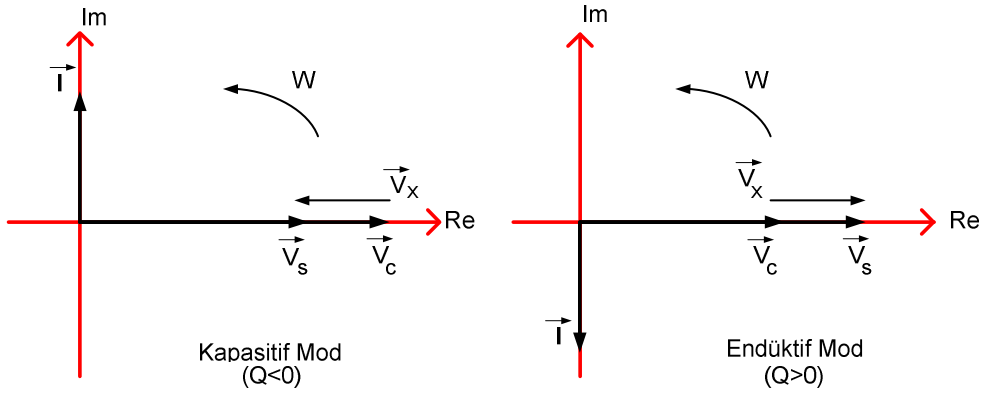
STATKOM'un giriş aktif ve reaktif gücü (P_C ve Q_C) aynı zamanda V_S ve V_C faz-nötür gerilimleri, sistem parametreleri R , X , θ ve α açıları terimleri cinsinden gösterilebilir.

$$P_C = \frac{V_S}{X} \left[\frac{R V_S \sin \theta + X V_C \sin \theta \sin \alpha - R V_C \sin \theta \cos \alpha + R V_C \cos \theta \sin \alpha}{R \cos \theta + X \sin \theta} \right] \quad (1.13)$$

$$Q_C = V_S \frac{V_S - V_C \cos \alpha}{R \cos \theta + X \sin \theta} \sin \theta \quad (1.14)$$

Aktif güç tüketiminin sıfır olduğu durumda STATKOM ile şebeke arasındaki fazör diyagram Şekil 1.6'da gösterilmektedir. P_C sıfır iken $\sin \alpha$ ve dolayısıyla α 'nın sıfır olması gerekir. Böylece Şekil 1.5'te verilen fazör diagram Şekil 1.6'daki kayıpsız sistem fazör diagramına dönüşür. Kayıpsız STATKOM için (1.17) nolu denklem, (1.18) denklemine sadeleşir.

$$Q_C = V_S \frac{V_S - V_C}{X} \quad (1.15)$$

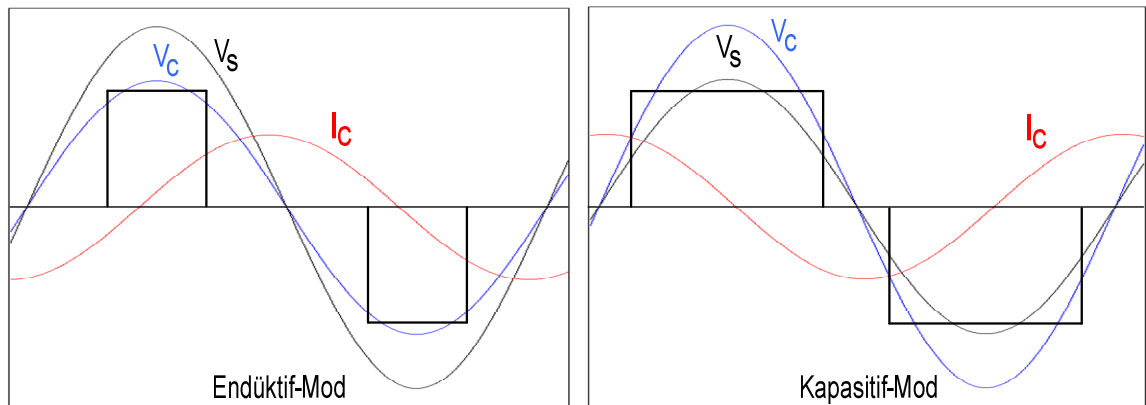


Şekil 1.6. Kayıpsız sistemde ($R=0$) gerilim ve akımı arasındaki vektörel ilişki

Kayıpsız sistemde, STATKOM gerilimi AA şebeke gerilimi ile aynı fazda ve ve hat akımı tamamen endüktiftir.

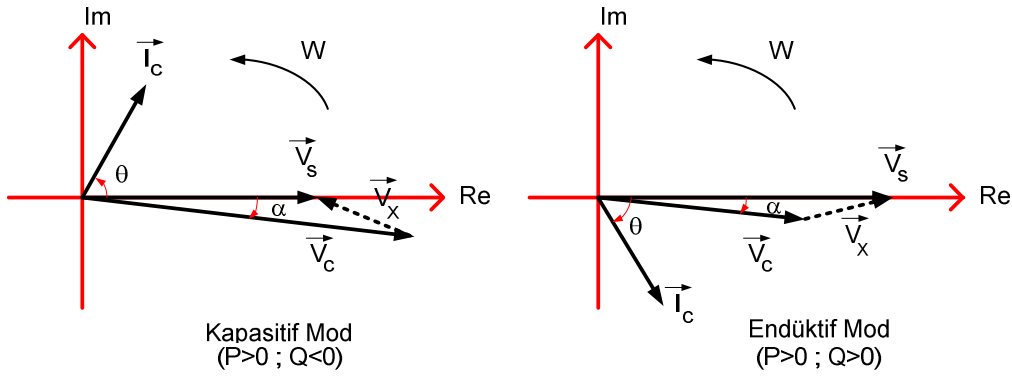
- 1) Eğer V_C ve V_S eşit ise reaktif güç üretimi yoktur.
- 2) Eğer $V_C < V_S$ olursa V_X gerilimini geriden takip (lagging) eden I_C akımı aynı zamanda V_S gerilimi V_X gerilimi ile aynı fazda olduğu için ikisini de geriden takip etmektedir. Böylece, AA şebeke gerilimi bu akımı endüktif olarak görmektedir ve bu durumda STATKOM'un çalışması endüktif kip olarak adlandırılır.
- 3) Eğer $V_C > V_S$ olursa I_C akımı V_X gerilimini geriden takip etmesine rağmen, V_S gerilimi V_X gerilimi ile ters yönde olduğu için önden gitmektedir (leading). Böylece, I_C akımı kapasitif olmakta ve STATKOM'un çalışması kapasitif kip olarak adlandırılmaktadır.

Endüktif ve kapasitif kipler için AA şebeke ve STATKOM akım ve gerilim dalga şekilleri Şekil 1.7'de gösterilmektedir.



Şekil 1.7. AA şebeke ve STATKOM akım ve gerilim grafikleri (kayıpsız durum)

STATKOM geçici rejim çalışması esnasında, DA bağ kapasitör gerilimi her peryod içinde şarj ve deşarj olmaktadır. Aktif güç kaynaktan DA bağına doğru veya aksine evirgeç yolu ile akacaktır. STATKOM devresinde kullanılmakta olan süzgeç ve DA bağ aktif güç tüketimini karşılamak için durağan durumda bile V_s ve V_c gerilimleri arasında α açısı olması gerekmektedir. Diğer taraftan, STATKOM modeli $R \ll X$ şartını uygulayarak, aktif güç akışını önleyerek basitleştirilebilir. Şekil 1.5'teki fazör diagramı yukarıdaki şartı farz ederek Şekil 1.8'de gösterildiği gibi basitleştirilmiştir:



Şekil 1.8. STATKOM gerilimi ve akımı arasındaki vektörel ilişki ($R \ll X$)

Tamamen endüktif ve kapasitif çalışma durumlarında α ve θ değerleri aşağıdaki gibidir:

- a) Durağan durumda: $\begin{cases} 0 \leq \alpha \leq 2.5^\circ \\ 89 \leq \theta \leq 90^\circ \end{cases}$
- b) Geçici rejimde ise: $-5 \leq \alpha \leq 5^\circ$

Böylece durağan durumunda gerektiğinde aşağıdaki basitleştirmeler yapılabilir:

$$\sin \alpha \cong \alpha \quad (\alpha \text{ radyan cinsinden verilmiştir})$$

$$\sin \theta \cong 1 \text{ ve } \cos \theta \cong 0$$

Bu sadeleştirmeleri kullanarak aşağıdaki denklemler elde edilir:

$$P \cong \frac{V_s V_c}{X} \sin \alpha \quad (1.16)$$

$$Q_c \cong V_s \frac{V_s - V_c \cos \alpha}{X} \quad (1.17)$$

Sonuçta ;

$$P \cong \frac{V_s V_c}{X} \alpha \quad (1.18)$$

$$Q_c \cong V_s \frac{V_s - V_c}{X} \quad (1.19)$$

olur.

Denklem (1.16) ve (1.17)'de gösterildiği gibi STATKOM iç direnç kayıpından dolayı reaktif gücün sıfır olduğu durumda STATKOM aktif güç tüketir [10].

1.4 STATKOM tipleri ve özellikleri

Dağıtım ve iletim sistemlerinde kullanılan çevirgeç tabanlı bir FACTS aygıtı olan STATKOM teknolojileri Şekil 1.3.'te verilmekte olan tiplere ayrılmıştır [11].

1.4.1 Dağıtım STATKOM'u (D-STATKOM)

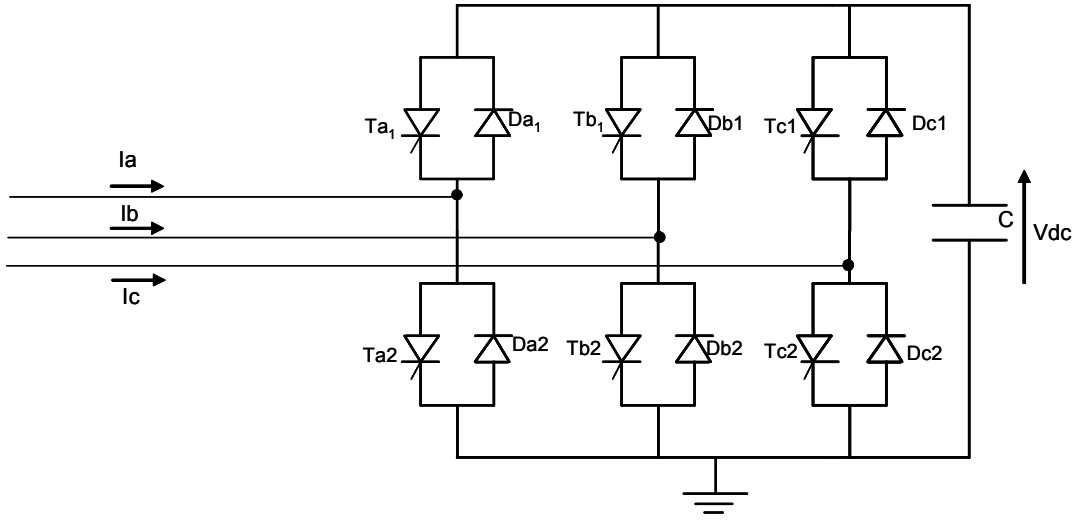
Dağıtım STATKOM'u (D-STATKOM) Elektrik dağıtım sistemlerinde değişken yüklerden kaynaklanan bozucu etkilere karşı kompanzasyon amaçlı kullanılmaktadır.

1.4.2 İletim STATKOM'u (T-STATCOM)

İletim STATKOM'u (T-STATCOM) gerilim regülasyonu ve kontrolü, kararlılık ve enterkonnekte sistemlerdeki salınımların sönümlendirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. İletim sistemlerine kullanılan STATKOM tipi ikiye ayrılmaktadır:

1.4.2.1 Çok darbeli (Multi-Pulse) STATKOM

Şekil 1.9'da gösterilen 6 darbeli bir gerilim kaynaklı çevirgeç ve bu devreye bağlı bir transformatör ile temel anlamda STATKOM yapısı oluşturulmuş olur. Bu şekilde oluşturulmuş sistem fazla miktarda harmonik bileşen içereceğinden pratik uygulamaları sınırlıdır. Harmonik sınırlandırılması için çıkış fazları kaydırılmış olan özdeş altı darbeli çevirgeç üniteleri faz kaydırmalı transformatörlere bağlanarak çıkış gerilimi elde edilir. Bu faz farkı yıldız ve üçgen bağlı transformatörler ya da zig-zag transformatörlerle elde edilebilir.



Şekil 1.9. Üç fazlı gerilim kaynaklı çevirgeç devresi

1.4.2.2 Çok seviyeli (Multi-level) STATKOM

Çok seviyeli çevirgeçler çok sayıda avantajlar sunar. Örneğin yüksek gerilim uygulamalarında daha düşük dv/dt çalışma kabiliyetine sahiptir.

Çok seviyeli çevirgeç tipleri şunlardır:

- (i) Kenetlenmiş diyot
- (ii) "Flying" kapasitörler
- (iii) Kaskad bağlı çok seviyeli çevirgeçler (CMC)

Bu üç sınıfın içinden diğer iki topoloji ile karşılaştırdığında (CMC) modüler yapı ve daha az bileşene sahiptir. Sonuçta, yukarıda anlatılan topolojilere göre daha fazla kullanılmaktadır [12].

1.4.3 Dünyadaki mevcut STATKOM tipleri

Günümüzde güç elektroniği teknolojisinin ilerlemesi ile birlikte dünyada şu ana kadar geliştirilen belli başlı İletim STATKOM'ları Çizelge 1.1.'de gösterilmektedir [7]:

Çizelge 1.1. Dünyada şu ana kadar geliştirilen çeşitli STATKOM tipleri

| Proje Adı | Proje Yeri | Kurulma Tarihi | Anma Değerleri | Kullanılan Teknik |
|---------------------------|-------------------|----------------|------------------------|-----------------------------|
| VELCO Essex STATKOM-Based | Essex Substation, | Mayıs, 2001 | -41 MVar ile +133 MVar | 3-seviyeli Gerilim kaynaklı |

| | | | | |
|---|---|----------------|--|---|
| FACTS Project | Burlington, Vermont, ABD | | arası / 115 kV- AA | çevirgeç (VSC) (6 tane paralel çevirgeç) |
| SDG&E Talega STATKOM/BTB FACTS Project | Talega Substation, San Clemente, California, ABD | Şubat, 2003 | -100 MVar ile +100 MVar arası / 138kV- AA | 3-seviyeli VSC (8 tane paralel çevirgeç) |
| Shin-Shinano 3 Terminal Voltage Sourced Converter BACK-to-BACK System [VSC-BTB] | Shin- Shinano Substation, Nagano, Japonya | Ocak, 1999 | 53 MVA 275kV (terminal A), 66kV (terminal B&C) | 2-seviyeli 9- darbeli PWM kontrollü VSC (4 tane paralel çevirgeç) |
| The Hagfors SVC Light | Hagfors, İsveç | 1999 | 0 ile 44 MVar arası / 10.5kV- AA | PWM kontrollü VSC |
| The Moselstahlwerk SVC Light | Moselstahl werk, Trier, Almanya | 2000 | 0 ile 38 MVar arası / 20kV | PWM kontrollü VSC |
| Eagle Pass / Piedras Negras BTB Light | Coahula, Meksika | Temmuz 2000 | 0 ile 36 MVar arası / 138kV | PWM kontrollü <i>Neutral Point Clamped</i> (NPC) tip VSC |
| TVA Sullivan STATKOM | Tennessee , ABD | 1995 | -100 MVA ile +100 MVA arası / 161kV | 48-darbeli VSC |
| A Transmission SVC for National Grid Company | London, İngiltere | Ocak, 1997 | 0 ile 225 MVar arasısı / 400kV | Çok-seviyeli VSC |
| STATKOM for Northeast Utilities | Stamford, Connecticu t, İngiltere | 2003 | -150MVar ile +150MVar arası / 115kV | VSC |

| | | | | |
|---------------------------------------|------------|------|--|------------------|
| Tornio Avesta Polarit | Finlandiya | 2001 | 0 ile 164 MVar arası | - |
| Evron | Fransa | 2002 | 0 ile 364MVar arası | - |
| Holly | ABD | 2003 | -100MVar ile +100MVar arası | - |
| Inuyama STATKOM Project | Japonya | 1991 | -80 MVA ile +80 MVA arası / 154kV | 48-darbeleri VSC |
| AEP UPFC | ABD | 1997 | 2 x 160 MVar / 138kV | 3-seviyeli VSC |
| 20MVA Static Synchronous Compensator | Çin | 1999 | -20 MVar ile 20 MVar arası / 220kV | 4-seviyeli VSC |
| STATKOM Based Relocatable SVC Project | İngiltere | 2001 | -75 MVar ile 75 MVar arası / 275 & 400kV | - |

1.5 Üç seviyeli H-köprü temelli STATKOM

1.5.1 Giriş

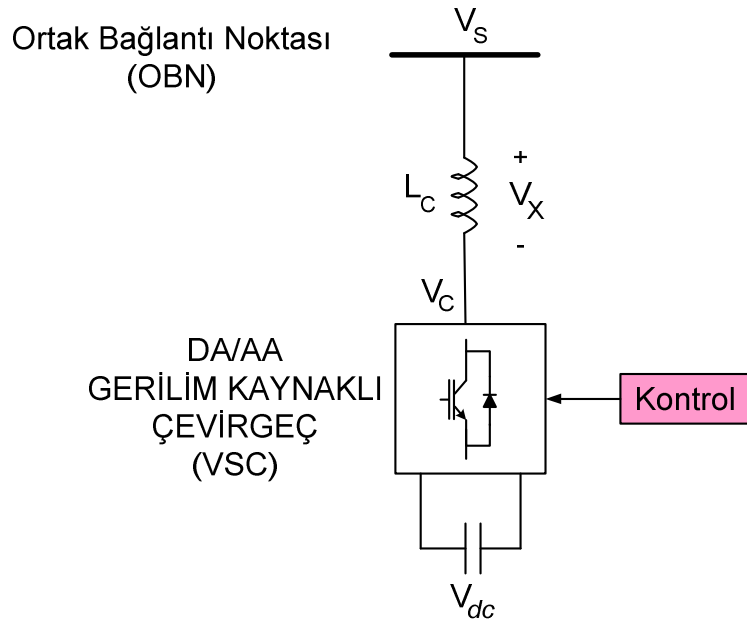
Çok seviyeli STATKOM yapısı, gerilim kaynaklı çevirgeç (VSC), DA bağ kapasitörleri, reaktörler ve/veya kuplaj trafosundan oluşur. Ortak Bağlantı Noktası (OBN)'de kuplaj reaktörü üzerindeki AA gerilim farkı STATKOM ve güç sistemi arasında reaktif güç alışverişini sağlar. Eğer STATKOM çıkış gerilimi (V_C), sistem çıkış gerilimi den (V_S) büyük ise bu durumda reaktif güç, güç sistemine verilir. Eğer (V_S) gerilimi Sistem gerilimi (V_S)'den küçük ise reaktif güç STATKOM'a doğru akar. İki yönlü reaktif güç akışının sağlamak için, STATKOM çıkış geriliminin reaktif güç gereksinimine göre değişmesi gerekmektedir.

Bu değişim iki yolla yapılabilir:

- i) DA gerilim seviyesini sabit tutarak anahtarlama açısını değiştirmek.

ii) Anahtarlama açısını sabit tutup DA gerilim seviyesini değiştirmek.

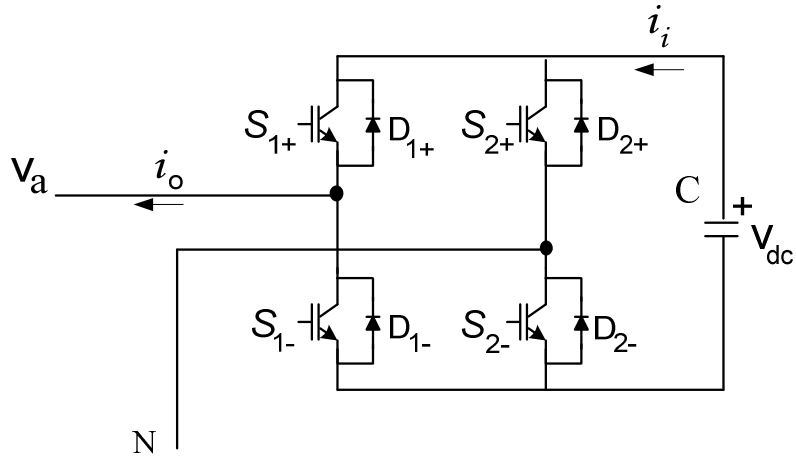
DA bağ gerilimi kapasitör gerilimlerinin değişimi STATKOM ve güç sistemi arasında aktif gücün aktarılmasının değiştirilmesiyle elde edilir. Bunu V_C ve V_S arasında faz açısını ayarlayarak yapabiliriz. Her iki kontrol yönteminin avantajı ve dezavantajları vardır. Çok hızlı gerilim kontrolü gereken durumlarda yöntem (ii) tercih edilir [13].



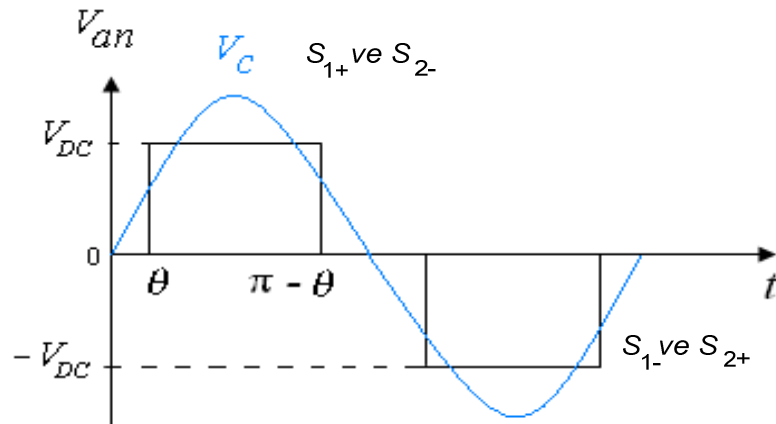
Şekil 1.10. Üç seviyeli STATKOM temel yapısı

1.5.2 Tek H-Köprü yapısı

Şekil 1.11'de H-Köprü temel yapısı verilmektedir. Bu yapıda S_{1-} , S_{2-} , S_{1+} ve S_{2+} anahtarları önceden belirlenen θ açısına göre tetiklenmektedir. θ açısı reaktif güç kontrol devresinde kullanılan PI elemanlarından elde edilen (m_a) modülasyon endeksine karşılık gelen açıdır. Yarı iletken cihazların bulunan açığa göre açılıp kapanması ile üç seviyeli çıkış gerilimi elde edilir [14].



Şekil 1.11. Bireysel H-Köprü yapısı



Şekil 1.12. Bireysel H-Köprü faz-nötür gerilimi

Şekil 1.11'de verilen bireysel H-köprü topolojisinde kullanılan anahtarlar ve diyotların açılıp ve kapandığı durumlar Çizelge 1.2'de verildiği gibi 5 durumdan oluşmaktadır. Görüldüğü gibi S_{1+} ve S_{1-} veya (S_{2+} ve S_{2-}) anahtarları aynı zamanda iletimde olması DA bağ geriliminin kısa devre olmasına neden olur. Burada dört tanımlı durum (1,2,3 ve 4) vardır. Tanımlı olmayan durum (durum 5) Çizelge 1.2'de verilmiştir. Tanımlı olmayan durum (durum 5) gerilimin polaritesi

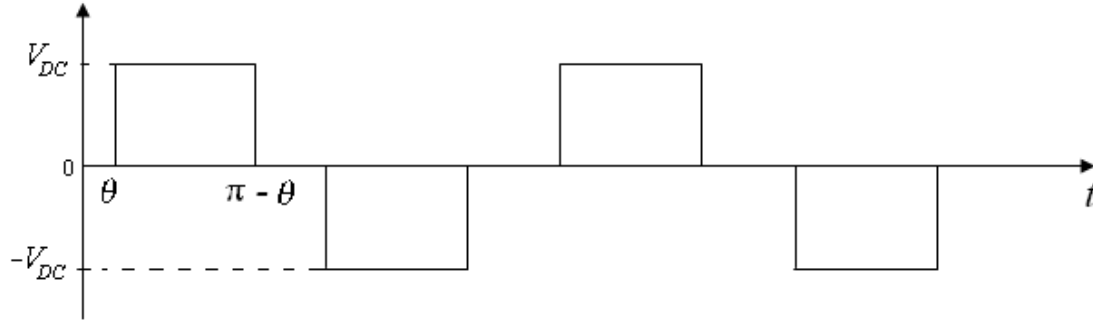
akım yönüyle değiştiği için kullanılmamalıdır. Kullanılan anahtar ve diyotların anahtarlama metoduna göre nasıl değiştikleri Çizelge 1.2’de belirtilmiştir.

Çizelge 1.2. Biresel H-köprü yapısındaki anahtarlar ve diyotların durumu

| Durum | Durum No. | v_{aN} | İletimde Olan Aletler |
|---|-----------|-----------------------|--|
| S_{1+}, S_{2-} iletimde ve S_{1-}, S_{2+} kesimde | 1 | V_{dc} | S_{1+}, S_{2-} eğer $i_o > 0$ D_{1+}, D_{2-} eğer $i_o < 0$ |
| S_{1-}, S_{2+} iletimde ve S_{1+}, S_{2-} kesimde | 2 | $-V_{dc}$ | D_{1-}, D_{2+} eğer $i_o > 0$ S_{1-}, S_{2+} eğer $i_o < 0$ |
| S_{1+}, S_{2+} iletimde ve S_{1-}, S_{2-} kesimde | 3 | 0 | S_{1+}, D_{2+} eğer $i_o > 0$ D_{1+}, S_{2+} eğer $i_o < 0$ |
| S_{1-}, S_{2-} iletimde ve S_{1+}, S_{2+} kesimde | 4 | 0 | D_{1-}, S_{2-} eğer $i_o > 0$ S_{1-}, D_{2-} eğer $i_o < 0$ |
| S_{1-}, S_{2-}, S_{1+} ve S_{2+} kesimde | 5 | $-V_{dc}$ V_{dc} | D_{1-}, D_{2+} eğer $i_o > 0$ D_{1+}, D_{2-} eğer $i_o < 0$ |

1.5.3 Üç seviyeli STATKOM geriliminin matematiksel analizi

S_{1-}, S_{2-}, S_{1+} ve S_{2+} anahtarların, örnek θ açısıyla açılıp ve kapanması durumunda elde edilen kare dalga Şekli 1.13’te verilmiştir;



Şekil 1.13. Üç seviye STATKOM'un ürettiği faz-nötür kare dalga Şekli

Yukarıda Şekil 1.10’da görülen örneğin, A fazı faz-nötür gerilim grafiğine Fourier analizi uygulandığında gerilim ifadesi elde edilebilir. Şekilde görülen grafik yarı-tek dalga simetrisine sahiptir ve bu dalganın Fourier ifadesi [15]:

$$f(t) = F_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cos(hwt) + b_h \sin(hwt)\} \text{dir.} \quad (1.20)$$

Çıkış gerilimi “odd-quarter” dalga olduğu için

$$\text{ve } b_h = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(t) \sin(h\theta) d\theta \quad ,h=1,3,5,\dots \quad (1.21)$$

$b_h = 0$, $h=2,4,6,\dots$ (çift h'ler için) olur.

Kullanılan DA kondansatör gerilimleri V_{dc} ise ;

$$b_h = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(t) \sin(h\theta) d\theta = \frac{4V_{dc}}{\pi h} \left[-\cos(h\theta) d\theta \right]_0^{\frac{\pi}{2}} \quad (1.22)$$

$$b_h = \frac{4V_{dc}}{\pi h} \left[-\cos\left(h\left(\frac{\pi}{2}\right)\right) + \cos(h(\theta)) \right] \quad (1.23)$$

$$b_h = \frac{4V_{dc}}{\pi h} [\cos(h(\theta))] \quad (1.24)$$

olur.

$$\text{Ana bileşen için } h=1, b_1 = \frac{4V_{dc}}{\pi} [\cos(\theta)] \text{ olur.} \quad (1.25)$$

Böylece, STATKOM ana bileşen gerilim genliği;

$$\hat{V}_C = \frac{4V_{dc}}{\pi} [\cos(\theta)] \quad (1.26)$$

olur,

Kullanılan modülasyon endeksi metoduna göre, $m_a = \cos\theta$ şeklinde ifade edilebilir.

Eğer V_C ve V_{dc} gerilimi arasındaki ilişki sabit bir K sayısı olarak farz edilirse;

$$V_C = KV_{dc} \quad (1.27)$$

Yukarıdaki denklemleri kullanarak;

$$P_C \cong \frac{V_S KV_{dc}}{X} \sin\alpha \quad (1.28)$$

$$Q_C \cong \frac{V_S}{X} (V_S - KV_{dc} \cos\alpha) \quad (1.29)$$

şeklinde yazılabilir.

Bu durum için, VSC giriş (faz-nötür) geriliminin en yüksek değeri \hat{V}_C , modülasyon endeksi m_a terimi ile DA bağ gerilimi ile aşağıda gösterildiği gibi ilişkilendirebilir:

$$\hat{V}_C = \frac{4V_{dc}}{\pi} \cos\theta \text{ ve } m_a = \cos\theta \quad (1.30)$$

$$\hat{V}_C = \frac{4V_{dc}}{\pi} m_a \quad (1.31)$$

(1.24) ve (1.27) kullanarak;

$$K = 0.9m_a \quad (1.32)$$

$$V_C = 0.9V_{dc}m_a \text{ olur.} \quad (1.33)$$

(1.33)'ü, (1.28) ve (1.29) yerleştirerek;

$$P_C \cong \frac{V_S}{X} 0.9m_a V_{dc} \sin \alpha \quad (1.34)$$

$$Q_C \cong \frac{V_S}{X} (V_S - 0.9m_a V_{dc} \cos \alpha) \quad (1.35)$$

elde edilebilir. Denklem (1.35)'ten iki farklı çalışma kipi doğmaktadır:

1) $0.9m_a V_{dc} \cos \alpha$ değeri V_S değerinden küçük olursa, Q_C pozitif olur ve sonuçta VSC reaktif güç tüketir (endüktif mod).

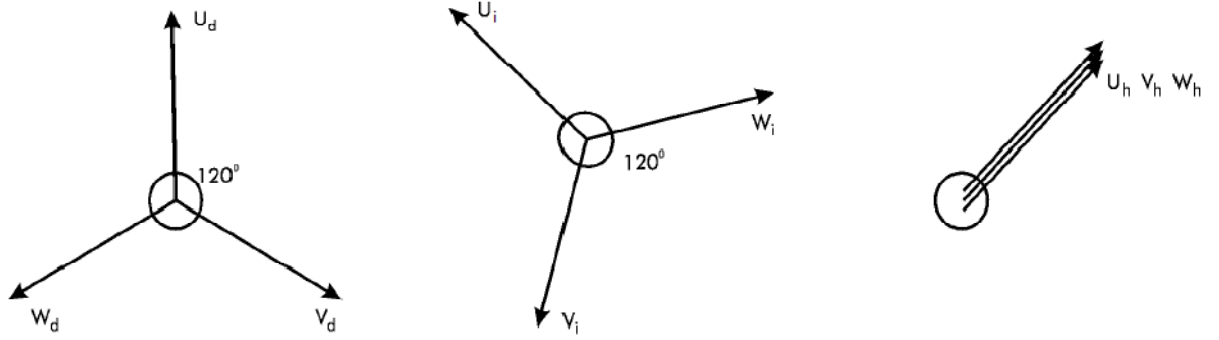
2) $0.9m_a V_{dc} \cos \alpha$ değeri V_S değerinden büyük olursa, Q_C negatif olur ve sonuçta VSC'den kaynağa reaktif güç basılır (Kapasitif kip) [10].

2. PROBLEMİN TANIMI VE ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

2.1 Dengesizlik

2.1.1 Tanım

Üç fazlı bir güç sistemi, her üç fazın akım ve gerilimleri aynı büyüklüğe sahipse ve faz açıları arasında 120 derecelik bir fark varsa, simetrik veya dengeli olarak adlandırılır. Bu şartlardan herhangi biri yoksa, sistem dengesiz veya simetrik olmayan bir sistem olarak nitelendirilir.



Şekil 2.1. Simetrik bileşenlerin grafiksel gösterimi

2.1.2 Dengesizlik nasıl oluşur?

Sistem operatörleri, dağıtım şebekesi ile tüketicinin dahili şebekesi arasındaki bağlantı noktasında dengeli bir sistem gerilimi elde etmeyi amaçlarlar. Normal şartlar altında bu gerilim değeri şu etkenler tarafından belirlenir:

- Jeneratörlerin terminal gerilimleri
- Elektrik sisteminin empedansı

Dağıtım ve iletim şebekeleri vasıtasıyla yükler tarafından çekilen akımlar, üretim tarafındaki sistem gerilimleri, geniş merkezi enerji santrallerinde kullanılan senkron jeneratörlerinin yapıları ve çalışma şekilleri gereği genellikle büyük oranda simetriktir. Bu yüzden merkezi üretim sisteminin dengesizliğe bir katkısı yoktur. Fakat küçük ölçüde dağıtılan üretimlerde şebekenin tüketici tarafında bu durum farklılık göstermektedir. Şebekeyle yüklerin bağlantı noktası göreceli olarak yüksek bir empedansa sahiptir. Bu da kısa devre gücünün düşük olmasına sebep olur. Bu yüzden daha yüksek gerilim seviyelerindeki bağlantılara kıyasla potansiyel olarak daha dengesiz gerilimler oluşmaktadır.

Elektrik sistemi bileşenlerinin empedansları her faz için aynı büyüklükte değildir. Hatların geometrik konfigürasyonunun nötür hattına göre asimetrik olması örneğin, hattın elektriksel parametrelerinde farklılıklara sebep olur. Genel olarak bu tip farklılıklar çok küçüktür ve gerekli önlemlerin alınmasıyla kolaylıkla giderilebilir. Pratikte karşılaşılan çoğu durumda, yüklerin asimetrik oluşu gerilim dengesizliğinin oluşmasının ana nedenidir.

Yüksek ve orta gerilim seviyelerinde, yükler genellikle üç fazlı ve dengelidir. Bu duruma istisna olarak AA tren gibi tek ya da iki fazlı yükler de vardır. Aydınlatma sistemleri gibi alçak gerilim yükleri genelde tek fazlıdır ve bu yüzden fazlar arası dengenin sağlanması zordur.

Anormal sistem koşulları da dengesizliğe neden olabilir. Bu anormal koşullara faz – nötür, faz-faz, kısa devre hataları örnek olarak verilebilir. Bu tip hatalar bir ya da daha çok fazlarda gerilim düşümlerine sebep olduğu gibi diğer fazlarda da aşırı gerilimlere neden olabilirler. Bu da sistemde gerilimde dengesizliğinin oluşmasına neden olur ve böylelikle sistemin davranışı dengesiz bir karakter gösterebilir [16].

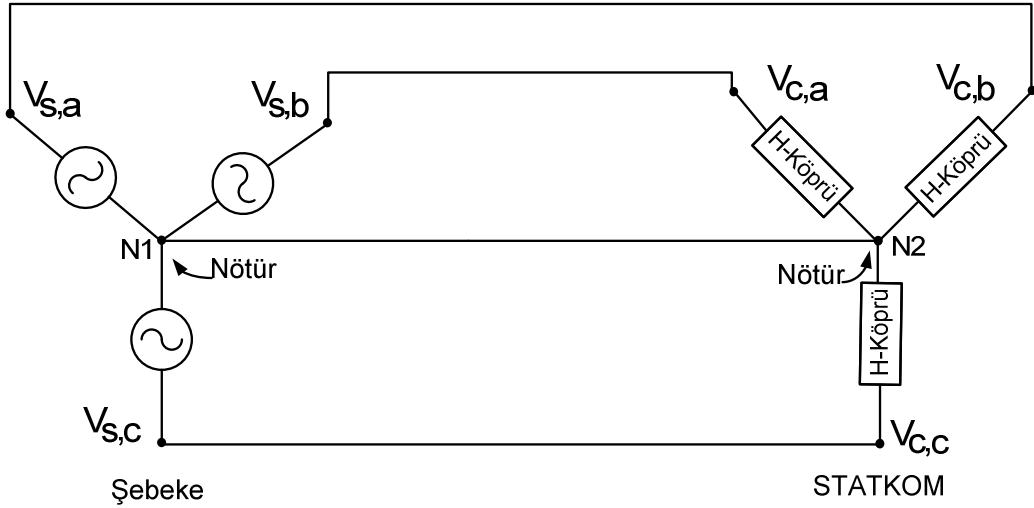
2.2 DENGESİZLİK ÇÖZÜM YÖNTEMLERİ

Bölüm 2.1’de anlatılan dengesizlik problemlerini (reaktif güç dengesizliği ve gerilim dengesizliği) çözmek için STATKOM teknolojisi kullanılabilir. Bu çalışmada reaktif güç dengesizliğini çözmek amacıyla iki ayrı topoloji incelenmiştir:

- i) Dört telli bağlı STATKOM
- ii) Üçgen bağlı STATKOM

2.2.1 Dört telli bağlı STATKOM

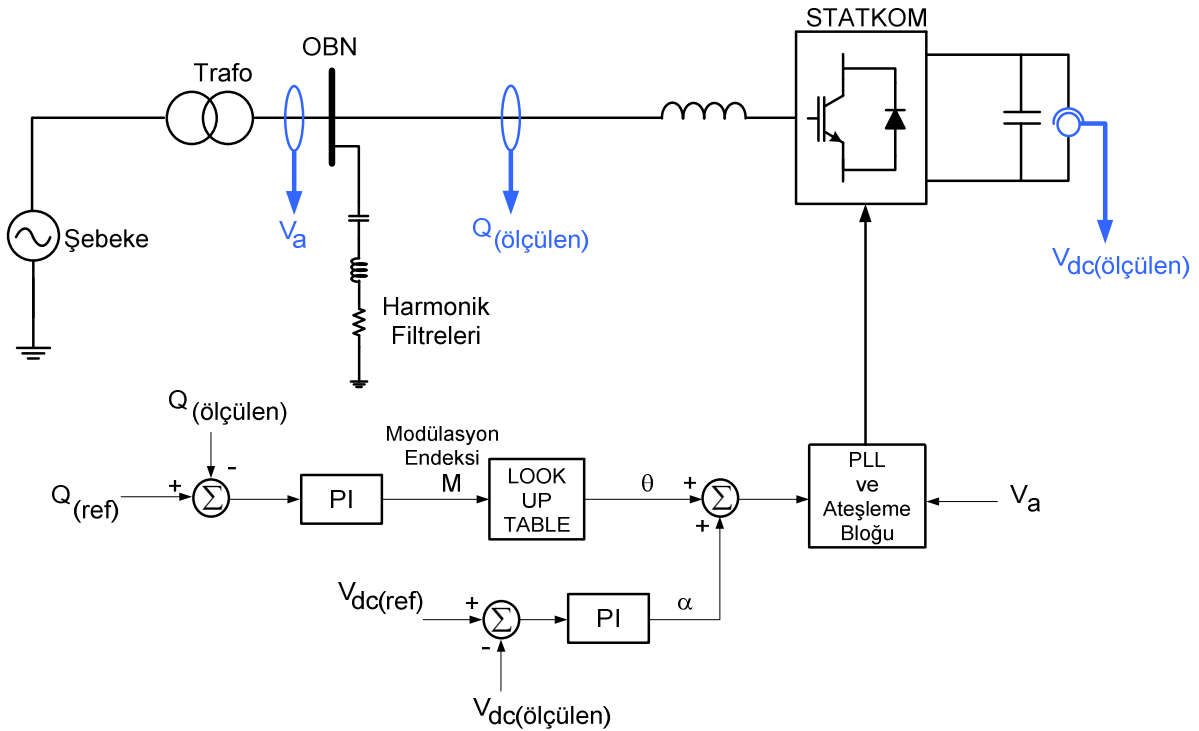
Şekil 2.2’de gösterilen STATKOM yapısı, reaktif güç tüketiminde dengesizlik probleminin çözümünde kullanılabilir. Bu topolojide hem kaynak ve hem STATKOM yıldız bağlıdır. Şekilde gösterildiği gibi yıldız bağlı H-Köprülerin ortak noktaları yıldız bağlı şebekenin ortak noktasına bağlanır. Bu sistemde, uygun bir denetim yöntemini kullanarak her fazın reaktif gücünü birbirinden bağımsız olarak kontrol etmek mümkündür.



Şekil 2.2. Dört telli bağlı STATKOM'un üç faz şebeke ile bağlantısı

2.2.1.1 Reaktif güç kontrolü

Dört telli STATKOM topolojisinde kullanılan reaktif güç kontrol bloğu Şekil 2.3'te verilmiştir. Bu devrede her faz için ayarlanan reaktif güç, ölçülen reaktif güç ile karşılaştırılır. Karşılaştırmadan elde edilen miktar PI bloğundan geçirilir. PI çıkışından elde edilen değer, kullandığımız kontrol metoduna göre modülasyon endeksi değeri karşılığıdır. Modülasyon endeksi değeri bir açı seçme bloğu aracılığıyla bir açığa dönüşür. Bu açı H-köprülerin tetikleme açısını belirler. Bu açığa göre STATKOM endüktif veya kapasitif davranmaktadır.



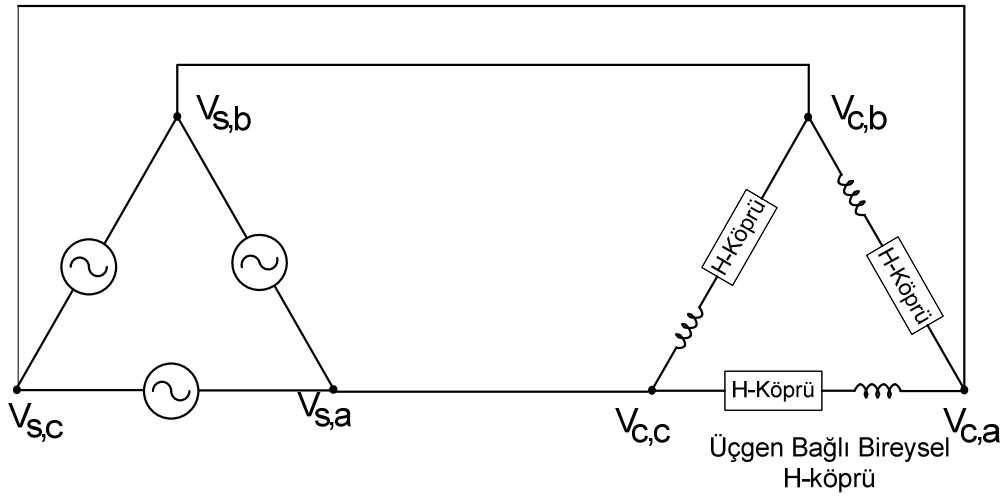
Şekil 2.3. Dört telli bağlı STATKOM kontrol devresi şeması

2.2.1.2 DA bağ gerilimi kontrolü

Şekil 2.3'te gösterilen DA bağ gerilimini sabit tutmak için ayarlanan gerilim kapasitörün iki ucundaki gerilim ile karşılaştırılıp farkı PI'dan geçirilir. PI çıkışından elde edilen miktar, her faza ait olan alfa açısını belirler. Alfa açısı, şebeke ve STATKOM gerilimlerinin arasındaki açı olarak kullanılır. Bu açı, aldığı eksi veya artı değerlerine göre STATKOM gerilimini alfa açısı kadar sağa veya sola kaydırarak aktif güç akışını şebekeden STATKOM'a doğru veya STATKOM'dan şebekeye doğru sağlamaktadır.

2.2.2 Üçgen bağlı STATKOM

Şekil 2.4'te üçgen bağlı H-Köprü topolojisi verilmiştir. Bu topolojide sistemin reaktif güç kompanzasyonu tepkisi dengeli ve dengesiz durumlar için denenmiştir. Bu sistemde istenilen reaktif güç her faz için birbirinden bağımsız olarak kontrol edilmektedir.



Şekil 2.4. Üçgen bağlı STATKOM'un üç faz şebeke ile bağlantısı

2.2.2.1 Referans akım hesaplama

İkinci çözüm yöntemi olan üçgen bağlı STATKOM topolojisinde reaktif güç kompanzasyonu için Steinmetz yöntemini kullanarak üçgen bağlı STATKOM'ların yükten gelen referans akımına göre kontrol edilmesi mümkündür.

2.2.2.1.1 Steinmetz yöntemi [17].

2.2.2.1.2 Giriş

Güç faktörünün düzeltilmesi veya gerilim regülasyonu için kullanılan kompanzasyon kavramı, kontrollü bir reaktif güç kaynağı veya sabit gerilim kontrol karakteristikli bir cihaz şeklinde modellenebilir. İki model sonuçta aynı da olsa, verilen uygulamalara göre biri daha etkin olacaktır. Dengesiz yükler düşünülürken, hem yükü hem de kompanzasyon sistemini, admittansları ve empedansları ile modellemeye başlamak yararlı olacaktır. Analizler aynı zamanda yeterli miktarda güç faktörü düzeltmeyi de kapsamalıdır. Daha önemli olarak, yük ve kompanzasyon sistemi admittansları bazında, faz dengelemesinin ve güç faktörünün düzeltilmesinin anlık davranışı, yük kompanzasyonu ve sorunları için temel bir bakış kazandırır. Buradaki amaç, herhangi topraklanmamış üç faz lineer bir yükün, kaynak ve yük arasındaki gerçek güç akışını değiştirmeden, dengeli gerçek üç faz yüke dönüştürülebilmesidir.

2.2.2.1.3 Steinmetz yöntemi hesapları

Steinmetz yönteminde sunulan paralel süseptans değerleri aşağıda verilmiştir.

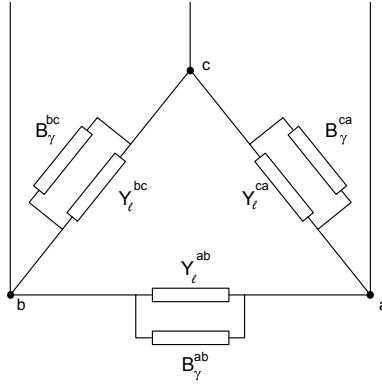
$$B_{\gamma}^{ab} = -B_{\ell}^{ab} + (G_{\ell}^{ca} - G_{\ell}^{bc}) / \sqrt{3} \quad (2.1)$$

$$B_{\gamma}^{bc} = -B_{\ell}^{bc} + (G_{\ell}^{ab} - G_{\ell}^{ca}) / \sqrt{3} \quad (2.2)$$

$$B_{\gamma}^{ca} = -B_{\ell}^{ca} + (G_{\ell}^{bc} - G_{\ell}^{ab}) / \sqrt{3} \quad (2.3)$$

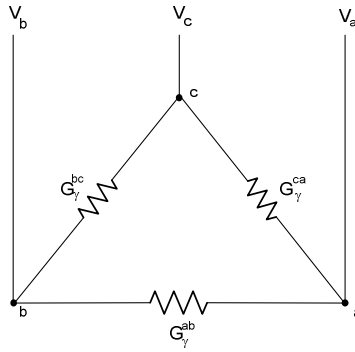
Sonuçta, oluşan kompanze edilmiş yük admittansları, Şekil 2.5'deki eşdeğer devrede gösterildiği gibi saf olarak rezistif ve dengelidir. Bu eşdeğer devre sadece pozitif bileşen gerilimleri için geçerlidir .

Eğer yük kondüktansları dengeli ise (yükün her fazdan aynı gücü talep ettiğini belirtir), $G_{\ell}^{ca} - G_{\ell}^{bc} = 0$ olur ve kompanzasyon yapan sistem her koldaki reaktif gücü yok etmekten başka bir şey yapmaz. Burada, $Y_l^{ab}, Y_l^{bc}, Y_l^{ca}$ üçgen bağlı yükün admittanslarını göstermektedir.



Şekil 2.5. İdeal üç-faz kompanzasyon yapan sistem

Sonuçta meydana gelen yük admittansları Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Bunlar gerçek değerlerdir ve ortalama güç faktörü değerini verirler ama dengesiz kalmışlardır.



Şekil 2.6. Sonuçta oluşan yük: dengesiz ancak güç faktörü 1 olan yük

Denklem (3.14),(3.15) ve (3.16) Gerilim ve akım cinsinden ifade edilebilir;

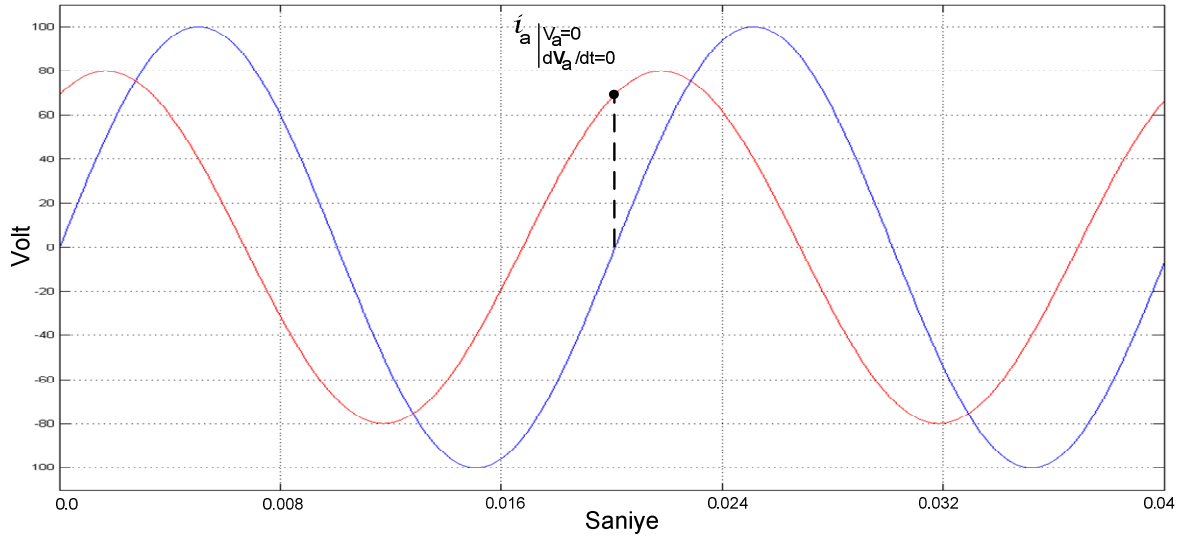
$$B_{\gamma}^{ab} = -\frac{1}{3\sqrt{2}} \left[i_a \Big|_{v_a=0}^{v_a=0} + i_b \Big|_{v_b=0}^{v_b=0} - i_c \Big|_{v_c=0}^{v_c=0} \right] \quad (2.4)$$

$$B_{\gamma}^{bc} = -\frac{1}{3\sqrt{2}} \left[-i_a \Big|_{v_a=0}^{v_a=0} + i_b \Big|_{v_b=0}^{v_b=0} + i_c \Big|_{v_c=0}^{v_c=0} \right] \quad (2.5)$$

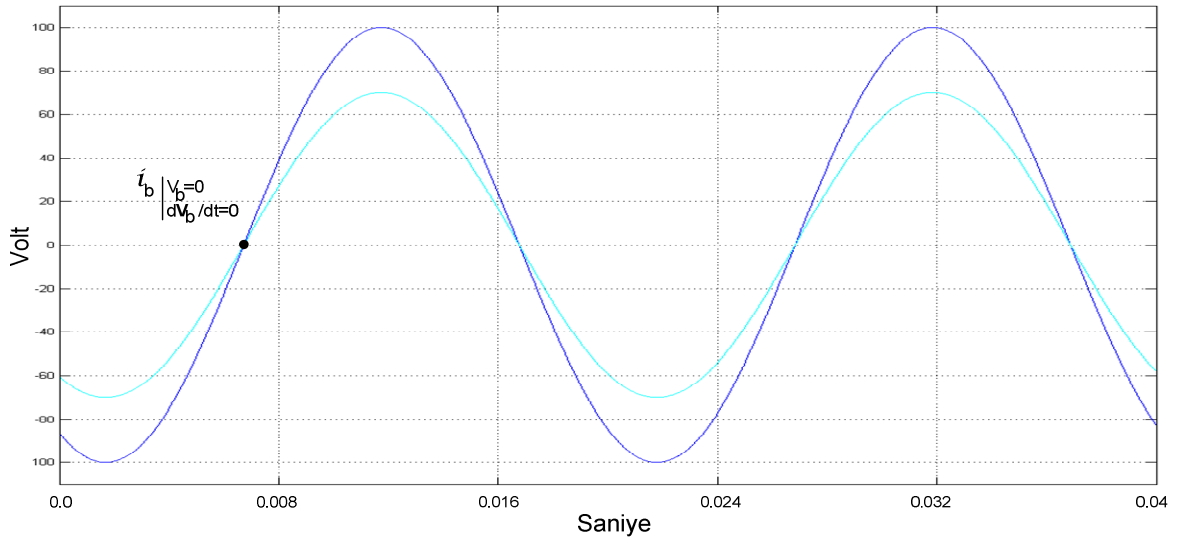
$$B_{\gamma}^{ca} = -\frac{1}{3\sqrt{2}} \left[i_a \Big|_{v_a=0}^{v_a=0} - i_b \Big|_{v_b=0}^{v_b=0} + i_c \Big|_{v_c=0}^{v_c=0} \right] \quad (2.6)$$

2.2.2.1.4 Referans yük akımı okuma metodu

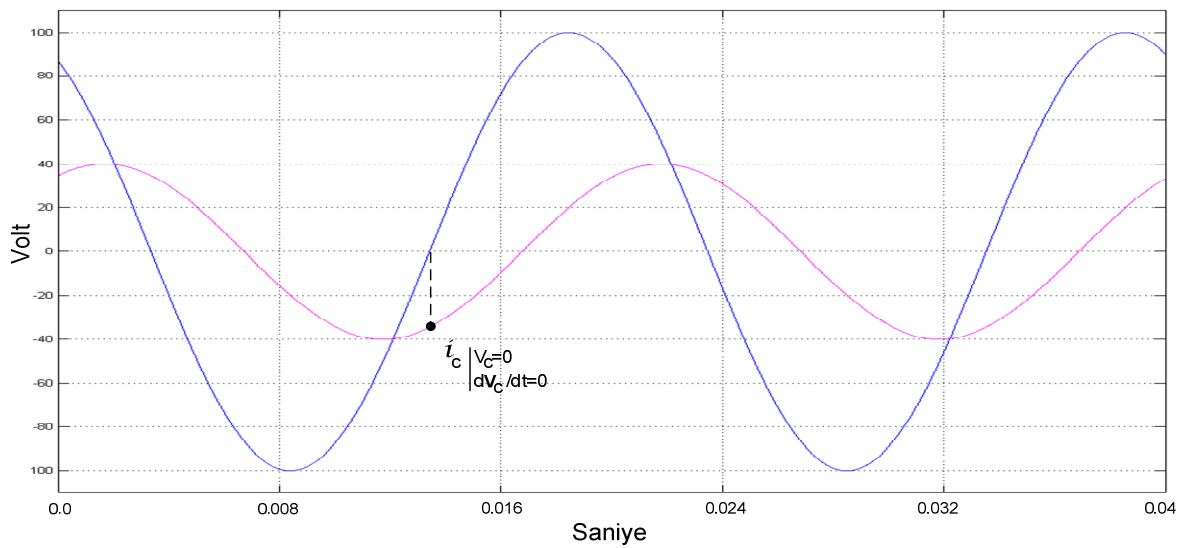
Üçgen bağlı H-köprülerin aldığı referans akım, yük akımının kapasitif, endüktif veya rezistif olduğu duruma göre belirlenir. Alınan referanslar gerilimin sıfır olduğu zaman akımın değeri olarak kullanılır. Bu değerler (2.4), (2.5) ve (2.6) denklemlerde yerleştirilerek fazlar arası süseptans elde edilir.



Şekil 2.7. Kapasitif yük için gerilimin sıfır olduğu zaman akım değeri



Şekil 2.8. Rezistif yük için gerilimin sıfır olduğu zaman akım değeri



Şekil 2.9. Endüktif yük için gerilimin sıfır olduğu zaman akım değeri

Fazlar arası STATKOM referans akımı, aynı fazların arasındaki süseptans ve gerilim değerleri çarpımına eşittir. Bulunan referans akımlar aşağıdaki gibidir [18].

$$I_{ref}^{ab} = B_{\gamma}^{ab} \times V_{ab} \quad (2.7)$$

$$I_{ref}^{bc} = B_{\gamma}^{bc} \times V_{bc} \quad (2.8)$$

$$I_{ref}^{ca} = B_{\gamma}^{ca} \times V_{ca} \quad (2.9)$$

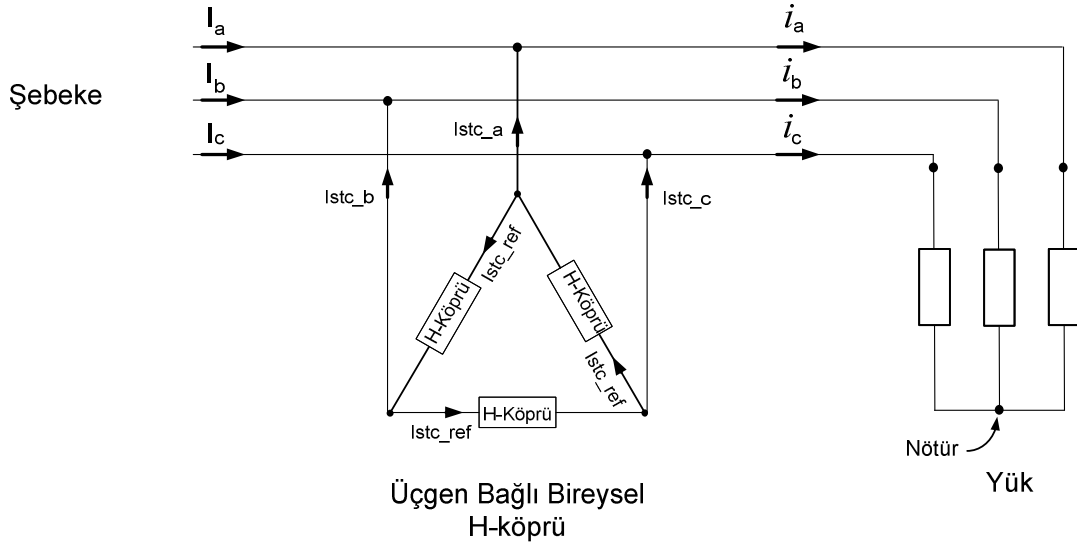
2.2.2.1.5 STATKOM'a referans akım uygulanması

Bulunan I_{ref}^{ab} , I_{ref}^{bc} , I_{ref}^{ca} referans akımları daha sonra Şekil 2.11'de verilmekte olan referans akım kontrol devresine uygulanacaktır. Üçgen Bağlı STATKOM tipi benzetiminde Şekil 2.10'da gösterildiği gibi referans akım değerleri fazlar arasındaki STATKOM'ların referans akımı olarak kullanılacaktır.

$$I_{stc_ab} = I_{ref}^{ab} \quad (2.10)$$

$$I_{stc_bc} = I_{ref}^{bc} \quad (2.11)$$

$$I_{stc_ca} = I_{ref}^{ca} \quad (2.12)$$



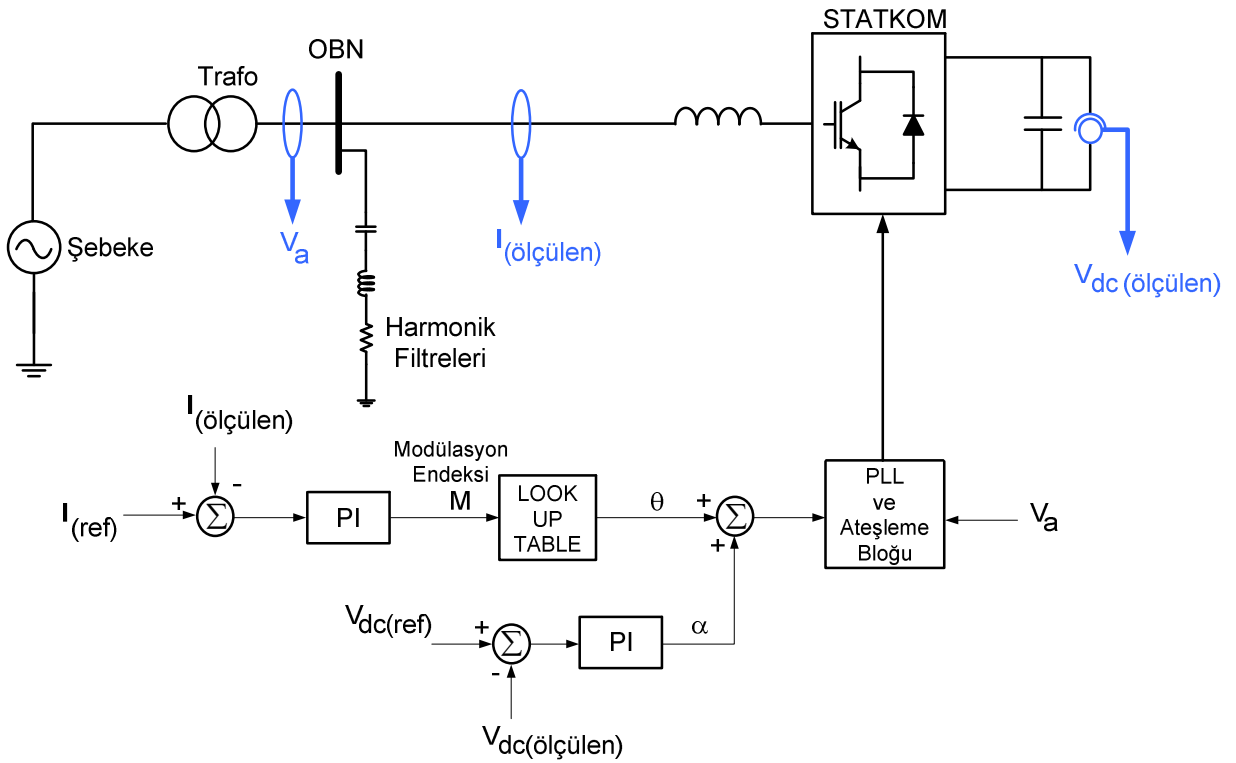
Şekil 2.10. STATKOM ve referans akımları devre şeması

Bulunan referans akımlarına göre fazlar arasındaki STATKOM çalışma kipi aşağıdaki gibi verilmektedir:

- 1) $I_{ref}^{stc} > 0$ Endüktif kip
- 2) $I_{ref}^{stc} = 0$ Güç yok
- 3) $I_{ref}^{stc} < 0$ Kapasitif kip

2.2.2.2 Referans akım kontrolü

Reaktif gücü kontrol etmek için Şekil 2.11'de verilen kontrol devresi kullanılmaktadır. Bu devrede her STATKOM için steinmetz yöntemi ile bulunan referans akım, ölçülen STATKOM akımı ile karşılaştırılıp, akım farkı bir PI'dan geçirilir. Bu değer modülasyon endeksine (m) karşılık gelir ve anahtarlama açısı seçme (Lookup table) bloğunu kullanarak eşdeğer açı bulunur. Bu açı (θ) anahtarlama açısı olarak sisteme uygulanır. STATKOM üretilen açı değerine göre endüktif veya kapasitif davranacaktır.



Şekil 2.11. Üçgen bağlı STATKOM kontrol devresi şeması

2.2.2.3 DA bağ gerilimi kontrolü

Şekil 2.11'de gösterilen DA bağ gerilimini sabit tutmak için ayar gerilimi kapasitörün iki ucundaki gerilimle karşılaştırılıp farkı PI dan geçirilir. PI çıkışından

elde edilen miktar, her faza ait olan alfa açısını belirler. Alfa açısı şebeke ve STATKOM gerilimlerinin arasındaki açı miktarı olarak kullanılır. Bu açı, aldığı eksi veya artı değerlerine göre STATKOM gerilimini alfa açısı kadar sağa veya sola kaydırarak aktif güç akışını kaynaktan STATKOM'a doğru veya STATKOM'dan kaynağa doğru sağlamaktadır.

3. STATKOM TASARIMI

3.1 Güç devresi tasarımı

3.1.1 Dört telli bağlı STATKOM sisteminin teknik özellikleri

Bu bölümde bulunan tüm değerler Devre-I ve Devre-II için aynıdır. Dolayısıyla devre II için hesaplamalar tekrarlanmamıştır.

3.1.1.1 Kuplaj reaktörü hesapları

Dört telli bağlı STATKOM'un çıkış geriliminin tepe değeri aşağıdaki gibidir:

$$\hat{V}_C = \frac{4V_{dc}}{\pi} \cos \theta .$$

Modülasyon endeksi ise;

$$m_a = \cos \theta \text{ 'dır.}$$

STATKOM'un kapasitif veya endüktif kipte basabileceği/çekebileceği en yüksek değer ise toplam $\pm 1 \text{ MVar}$ ve her faza ait olan güç miktarı $Q_{\max} = \pm 0.33 \text{ MVar}$ olacaktır. Böylece, kapasitif kip için ($V_C > V_S$) aşağıdaki denklem elde edilebilir:

$$Q_{\max} = \frac{(V_S - V_C)}{X_L} V_S \quad (3.1)$$

$$X_L = \frac{(V_S - V_C)}{Q_{\max}} V_S \quad (3.2)$$

Aynı zamanda eğer -0.33 MVar güce karşılık gelen modülasyon endeksi $m_a = 0.98$ seçilirse, STATKOM gerilim genliğinin tepe değeri (1.24) ile elde edilmektedir.

$$\hat{V}_C = \frac{4V_{dc}}{\pi} m_a$$

$$\cos 10 = 0.98 \text{ için } m_a = \cos \theta$$

$$V_{dc} = 0.51 \text{ kV}$$

$$\hat{V}_C = \frac{4V_{dc}}{\pi} m_a = \frac{4}{\pi} \times 0.51 \text{ kV} \times 0.98 = 0.61 \text{ kV}$$

$$V_C = 431.6 \text{ V} \quad \text{olur.}$$

$$X_L = \frac{(282.8 - 431.6)}{0.33 \times 10^6} \times 282.8 = 0.12 \Omega$$

$$X_L = \omega L = (2\pi \times 50) \times L$$

$$L = \frac{X_L}{(2\pi \times 50)} = \frac{0.12}{341.159} = 3.8 \times 10^{-4} \text{ H}$$

$L = 0.38 \text{ mH}$ olmaktadır.

3.1.1.2 DA bağ kondansat6ru hesapları

STATKOM Kapasit6r değeri aşağıdaki denkleme g6re hesaplanmaktadır.

$$C = \frac{2\tau S}{V_{dc}^2} \quad [19]. \quad (3.3)$$

Burada;

$$\tau = (15 - 30) \text{ ms}$$

$$S = VI$$

$$V_{dc} = 0.51 \text{ kV} \text{ alınmıştır}$$

τ : Kapasit6r şarj ve deşarj s6resi

S : her faza ait g6r6nen g6ç, VA

V_{dc} : DA bağ gerilimine eşit olmaktadır

B6ylece, kapasit6r değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$C = \frac{2\tau S}{V_{dc}^2} = \frac{(2 \times 0.02 \times 0.33 \text{ MVA})}{(510 \text{ v})^2} = 0.050 \text{ F}$$

$$C = 50 \text{ mF.}$$

3.1.1.3 Kuplaj direnci hesapları

Akord s6zgeç için kullanılan kalite fakt6ru (Quality factor), end6ktans değerinin kuplaj direnç değerine oranı olarak tanımlanır:

$$Q = \frac{X_0}{R} \quad (3.4)$$

Eğer $Q = 50 - 100$ arasında bir değer farz edilirse, 6rneğin $Q = 75$ seçilirse kuplaj direnci bulmak için aşağıdaki hesaplar yapılabilir:

$$R = \frac{X_0}{Q} = \frac{2\pi f L}{Q} = \frac{2\pi \times 50 \times 0.001}{75} = 8.37 \times 10^{-5} \Omega$$

$$R = 0.083 \text{ m}\Omega \text{ olur.}$$

3.1.1.4 PI parametrelerinin belirlenmesi

Reaktif Güç Kontrolü için kullanılan PI parametreleri, deneme-yanılma metodu ile bulunmuştur. Bu değerler benzetim çalışmalarında kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. Reaktif güç kontrol devresi

| PI denetleç parametreleri | |
|---------------------------|---------|
| PI Denetleç Parametreleri | |
| Parametre | Değer |
| Kp | 0.2 |
| Ki | 0.04 |
| Max Değeri | 0.995 s |
| Min Değeri | 0 |

Şekil 2.3'te DA bağ gerilimi kontrolü için kullanılan PI (Kp ve Ki) parametreleri, deneme-yanılma metodu ile bulunmuştur. Bu değerler benzetim çalışmalarında kullanılmıştır.

Çizelge 3.2. STATKOM'un DA bağ gerilimi kontrol

| PI denetleç parametreleri | |
|---------------------------|---------|
| PI Denetleç Parametreleri | |
| Parametre | Değer |
| Kp | 200 |
| Ki | 0.001 s |
| Max Değeri | 5 |
| Min Değeri | -5 |

3.1.2 Üçgen bağlı STATKOM teknik özellikleri

3.1.2.1 Kuplaj reaktörü hesapları

Aynı dört telli bağlı STATKOM gibi, üçgen bağlı STATKOM çıkış gerilimi tepe değeri için aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$\hat{V}_C = \frac{4V_{dc}}{\pi} \cos \theta.$$

Modülasyon endeksi ise;

$$m_a = \cos \theta \text{ 'dir.}$$

STATKOM'un kapasitif veya endüktif durumda basabileceği/çekebileceği en yüksek değer ise toplam $\pm 1 \text{ MVAr}$ dir. Böylece her faza ait olan güç miktarı $Q_{\max} = \pm 0.33 \text{ MVAr}$ olacaktır. Sonuçta, (3.1) ve (3.2) denklemlerini kullanarak üçgen bağlı STATKOM için aynı hesaplar yapılacaktır. Aynı zamanda eğer $Q_{\max} = -0.33 \text{ MVA}$ güce karşılık gelen modülasyon endeksi, $\theta = 10^\circ$ iken $m_a = \cos \theta$ için STATKOM gerilim genliği;

$$\hat{V}_C = \frac{4V_{dc}}{\pi} m_a$$

$$\cos 10 = 0.98 \text{ için } m_a = 0.98$$

$$V_{dc} = 0.74 \text{ kV}$$

$$\hat{V}_C = \frac{4V_{dc}}{\pi} m_a = \frac{4}{\pi} \times 0.74 \text{ kV} \times 0.98 = 0.927 \text{ kV}$$

$$V_C = 0.626 \text{ V} \text{ olmaktadır.}$$

$$X_L = \frac{(282.8 - 927.8)}{-0.33 \times 10^6} \times 282.8 = 0.316 \Omega$$

$$X_L = \omega L = (2\pi \times 50) \times L$$

$$L = \frac{X_L}{(2\pi \times 50)} = \frac{0.316}{341.159} = 0.001 \text{ H}$$

$$L = 1 \text{ mH} \text{ olur.}$$

3.1.2.2 DA bağ kondansatör hesapları

Denklem (3.3)'ten STATKOM DA kapasitör değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$C = \frac{2\tau S}{V_{dc}^2} \text{ [19].}$$

Burada;

$$\tau = (15 - 30) \text{ ms}$$

$$S = VI$$

$$V_{dc} = 0.51 \text{ kV}$$

τ : Kapasitör şarj ve deşarj süresi

S : her faza ait sanal güç

V_{dc} : DA bağ gerilimine eşit olmaktadır

Böylece, yukarıda verilen denkleme göre kapasitör değeri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$C = \frac{2\tau S}{V_{dc}^2} = \frac{(2 \times 0.03 \times 0.33 MVA)}{(740v)^2} = 0.0361F$$

$C = 36 \text{ mF}$ olur.

3.1.2.3 Kuplaj direnci hesapları

Akord süzgeç için kullanılan kalite faktörü (Quality factor), endüktans değerinin kuplaj direncine oranı olarak tanımlanır:

$$Q = \frac{X_0}{R} \quad (3.5)$$

Eğer $Q = 50 - 100$ arasında bir değer farz edilirse, örneğin $Q = 75$ seçilirse kuplaj direncini bulmak için aşağıdaki hesaplar yapılabilir:

$$R = \frac{X_0}{Q} = \frac{2\pi f L}{Q} = \frac{2\pi \times 50 \times 0.001}{75} = 8.37 \times 10^{-5} \Omega.$$

$R = 0.0837 \text{ m}\Omega$ olmaktadır.

3.1.2.4 PI parametrelerinin belirlenmesi

Referans akım ve DA bağ gerilimi kontrolü için kullanılan PI parametreleri, deneme-yanılma metodu ile bulunmuştur. Bu değerler benzetim çalışmalarında kullanılmıştır.

Çizelge 3.3. Referans akım kontrol devresi

PI denetleç parametreleri

| PI Denetleç Parametreleri | |
|---------------------------|---------|
| Parametre | Değer |
| Kp | 0.00001 |
| Ki | 0.04 s |
| Max Değeri | 0.995 |
| Min Değeri | 0 |

Çizelge 3.4. STATKOM DA bağ gerilimi Kontrolü

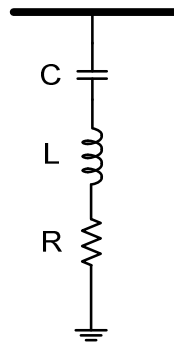
| PI denetleç parametreleri | |
|---------------------------|---------|
| PI Denetleç Parametreleri | |
| Parametre | Değer |
| Kp | 300 |
| Ki | 0.001 s |
| Max Değeri | 5 |
| Min Değeri | -5 |

3.1.3 Süzgeç elemanları

STATKOM'un çalışması sırasında şebekede büyük ölçüde 3,5,7,11,13 ve 17. harmonikler basılmaktadır. Bu harmonikler STATKOM'un reaktif güç kompanzasyonu etkisini azaltır. Böylece istenilen reaktif gücü basmak/çekmek için STATKOM'un maliyeti artar. Bu sorunu gidermek için akord edilmiş süzgeç (tuned filter) kullanılabilir. Akord süzgeç uygulayarak yukarıda verilen harmoniklerin standartlarda belirtilen limit değerlerin altına düşürülmesi sağlanır. Ayrıca harmonik süzgeçler reaktif güç üretimi için kullanılabilir. Böylece sistemin basabileceği kapasitif reaktif güç kapasitesi artar ve daha ekonomik bir STATKOM sistemi elde edilir.

3.1.3.1 Akord süzgeç (Tuned filter)

Akord süzgeç seri LC'den oluşan ve belirlenen harmonik frekansına ayarlanan bir devredir [20].



Şekil 3.1. Akord süzgeç devre şeması

Süzgeç devre ampedansı aşağıdaki gibidir;

$$Z_f = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) \quad (3.6)$$

Burada ;

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{olur.} \quad (3.7)$$

$$X_L = \omega_n L \quad (3.8)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega_n C} \quad (3.9)$$

Akord frekansında ise;

$$X_L = X_C \quad (3.10)$$

3.1.3.2 Süzgeç teknik özellikleri

$Q = 50kVar$ farzedilirse, süzgeç reaktif gücü aşağıdaki gibidir:

$$Q = \frac{V^2}{X_f} \quad (3.11)$$

$$X_f = \frac{V^2}{Q} = \frac{(0.4kv)^2}{50K \text{ var}} = 3.2\Omega \quad (3.12)$$

n, harmonik bileşeni olmak üzere;

$$\frac{1}{\omega_n C} = \omega_n L \quad (3.13)$$

$$(\omega_n)^2 = LC \quad \text{ve} \quad f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{olur.}$$

Aynı zamanda,

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = X_f \quad (3.14)$$

$$1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 = X_f \omega C$$

$$1 - \left(\frac{2\pi f_1}{2\pi f_n}\right)^2 = X_f \omega C$$

$$1 - \left(\frac{f_1}{f_n}\right)^2 = X_f \omega C \quad \text{ve} \quad \frac{f_1}{f_n} = \frac{1}{n}$$

$$C = \frac{1 - \left(\frac{1}{n}\right)^2}{X_f \omega} \quad (3.15)$$

olmaktadır.

Kapasitör hesapları

Yukarıda verilen denklemde n=5 için;

$$\omega = 2\pi \times 50 = 314.159 \text{ rad/sn.}$$

$$C = \frac{1 - \left(\frac{1}{5}\right)^2}{3.2\omega} = 954.93 \mu\text{F}$$

Endüktans hesapları

$$L = \frac{1}{\omega_n^2 C} = \frac{1}{(2\pi \times 250)^2 \times (0.00095493)} = \frac{1}{2356.19} = 0.0004244 \text{ H}$$

Böylece 5. Harmonik için C=954.93 μF ve L=424.4 μH olmaktadır.

Direnç hesapları

Akord süzgeç için kullanılan kalite faktörü, Q, endüktans değerinin kuplaj direncine olan oranı olarak tanımlanır:

$$Q = \frac{X_0}{R} \quad (3.16)$$

Eğer Q = 50 – 100 arasında bir değer farz edilirse, örneğin Q = 75 seçilirse kuplaj direncini bulmak için aşağıdaki hesaplar yapılabilir:

$$R = \frac{X_0}{Q} = \frac{2\pi f L}{Q} = \frac{2\pi \times 50 \times 0.001}{75} = 8.37 \times 10^{-5} \Omega$$

$$R = 0.0837 \text{ m}\Omega \text{ olur.}$$

Yukarıda verilmekte olan Akord Süzgeç denklemlerini kullanarak üçgen bağlı STATKOM sistemine tasarlanan 3.harmonik fitre R,L ve C değerleri aynı şekilde bulunmaktadır.

$$n = 3$$

$$\omega = 2\pi \times 50 = 314.159 \text{ rad/sn.}$$

$$C = \frac{1 - \left(\frac{1}{3}\right)^2}{3.2\omega} = 8.8419 \times 10^{-4} \text{ F}$$

$$L = \frac{1}{\omega_n^2 \times C} = \frac{1}{(2\pi \times 150)^2 \times (0.00088419)} = \frac{1}{785.39} = 0.001273 \text{ H}$$

Böylece 3.harmonik için $C = 884.19 \mu\text{F}$ ve $L = 1.273 \text{ mH}$

R değeri ise önceki bölümdeki gibi hesaplanır:

$$R = \frac{X_0}{Q} = \frac{2\pi f L}{Q} = \frac{2\pi \times 50 \times 0.001273}{75} = 0.0053 \Omega$$

$R = 5.3 \text{ m}\Omega$ olur.

Diğer harmonik süzgeçleri ($n=5,7,11,13,17$. Harmonik süzgeç özellikleri) dört telli ve üçgen bağlı STATKOM'lar için R,L ve C değerleri aynı şekilde hesaplanmıştır. Bu değerler Çizelge 3.5'te gösterilmiştir:

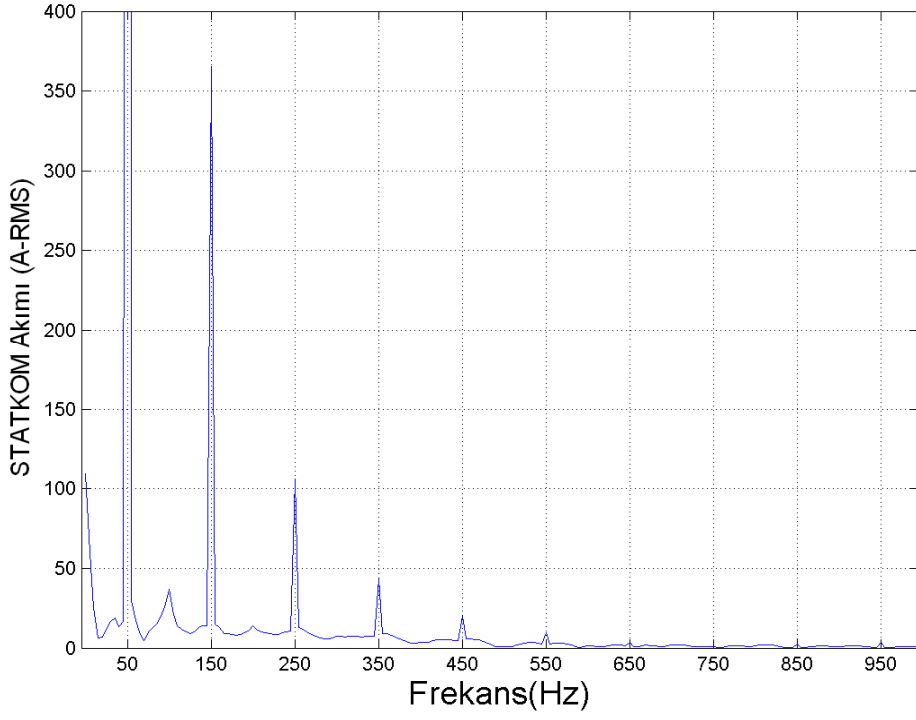
Çizelge 3.5. Dört telli ve üçgen bağlı sistemlerin süzgeç R,L,C değerleri

| Harmonik Süzgeç (HF) | C(μF) | L(μH) | R(m Ω) |
|----------------------|--------------------|--------------------|----------------|
| 5.HF | 954.93 | 424.4 | 2.6 |
| 7.HF | 974.419 | 212.2 | 1.3 |
| 11.HF | 986.49 | 88.84 | 53 |
| 13.HF | 988.83 | 60.63 | 37 |
| 17.HF | 991.277 | 35.37 | 22 |

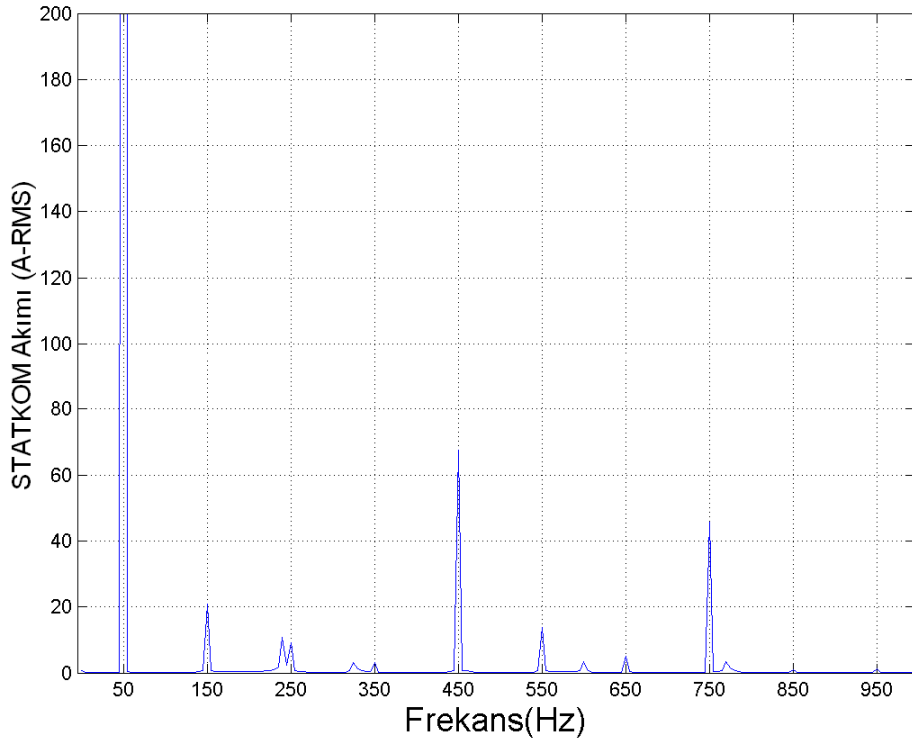
Süzgeç karakteristiği

Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te dört telli ve üçgen bağlı STATKOM topolojilerinde kullanılan süzgeçlerin etkisi gösterilmiştir. Her iki topolojide (süzgeçsiz ve süzgeçli) trafonun sekonder tarafındaki hat akımlarının frekans karakteristikleri verilmiştir. Böylece tasarlanan süzgeçleri kullanarak 3,5,7,11,13 17.harmoniklerin

standartlarda belirtilen limit değerlerin altında kalacak şekilde süzülmesi mümkün olacaktır.



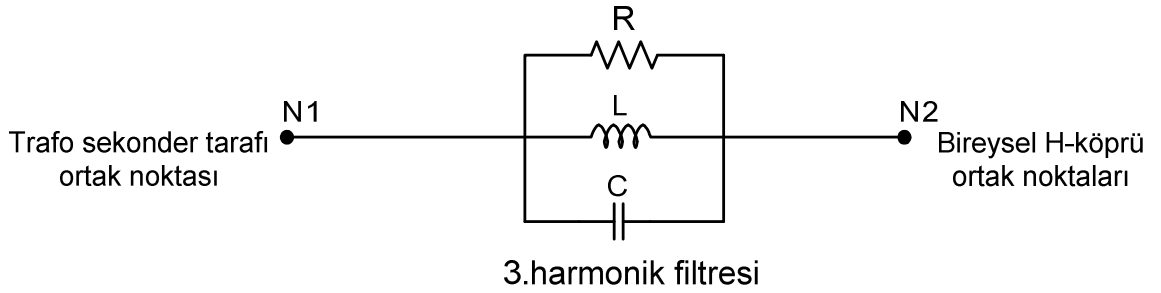
Şekil 3.2. Süzgeçsiz STATKOM akımı için frekans karakteristiği



Şekil 3.3. Süzgeçli STATKOM akımı için frekans karakteristiği

3.1.3.3 Üçüncü harmonik süzgeci (Third Harmonic Blocking Filter)

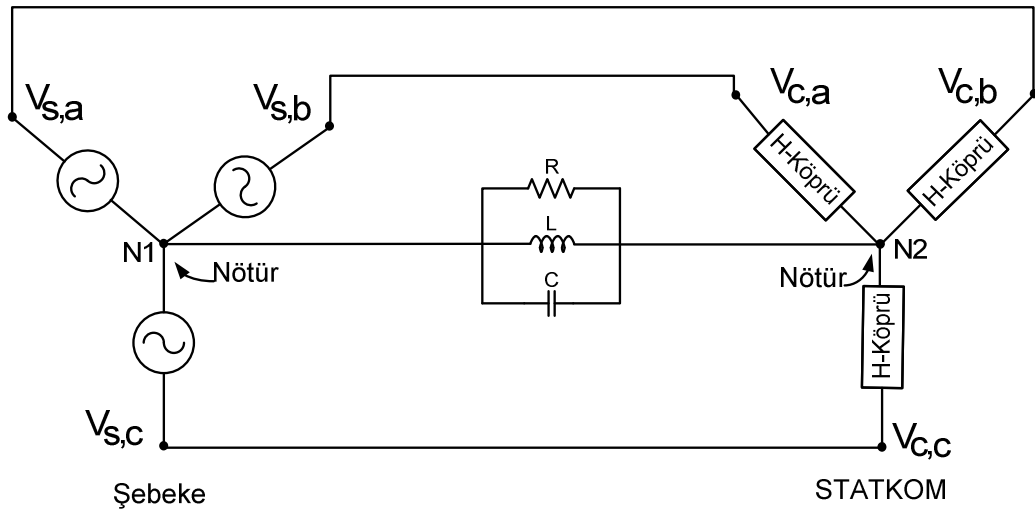
Bu süzgeç dört telli bağlı STATKOM modelinde nötür iletkeninden akan 3.harmonik bileşeni bloke etmek için kullanılmaktadır. Bu süzgeç literatürde "3rd Harmonic Blocking Filter" olarak adlandırılır. Tasarlanan süzgeç nötür iletkeni üzerine bağlanır. Şekil 3.4'te verilen harmonik süzgecinde, $f_o=150$ Hz ve $X_L = X_C$ olduğu zaman üçüncü harmonik akımına en yüksek empedans göstermektedir. Böylece üçüncü harmonik akımın devrede dolaşması engellenir ve akım Toplam Talep Bozunumu (TTB) değerine üçüncü harmoniğin etkisi azaltılmış olur [21].



Şekil 3.4. Üçüncü harmonik süzgeci devre şeması

3.1.3.4 Üçüncü harmonik süzgeci teknik özellikleri

Dört telli STATKOM Benzetiminde kullanılan 3. Harmonik süzgeçi parametreleri (3.17) ve (3.18) denklemleri kullanarak hesaplanmaktadır:



Şekil 3.5. Şebeke ve STATKOM'un 3.harmonik süzgeç ile bağlantısı

Nötür iletkenindeki üçüncü harmonik akımı önlemek için Şekil 3.8'deki süzgeç kullanılmaktadır. Bu devre üçüncü harmonik akımına $X_L = X_C$ olduğu zaman açık devre olarak görünmektedir ve böylece dört telli bağlı STATKOM topolojisinde dengeli ve dengesiz durumlarla üçüncü harmonik akımı süzölmüş olur. Üçüncü harmonik süzgeci teknik özellikleri aşağıda verilmektedir:

Bu durum (3.harmonik) için $f_0 = 150$ Hz olmak üzere,

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.17)$$

$$X_L = X_C \quad (3.18)$$

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

$$LC = \frac{1}{\omega_0^2} = \frac{1}{(2\pi \times 150)^2} = 1.125 \times 10^{-6}$$

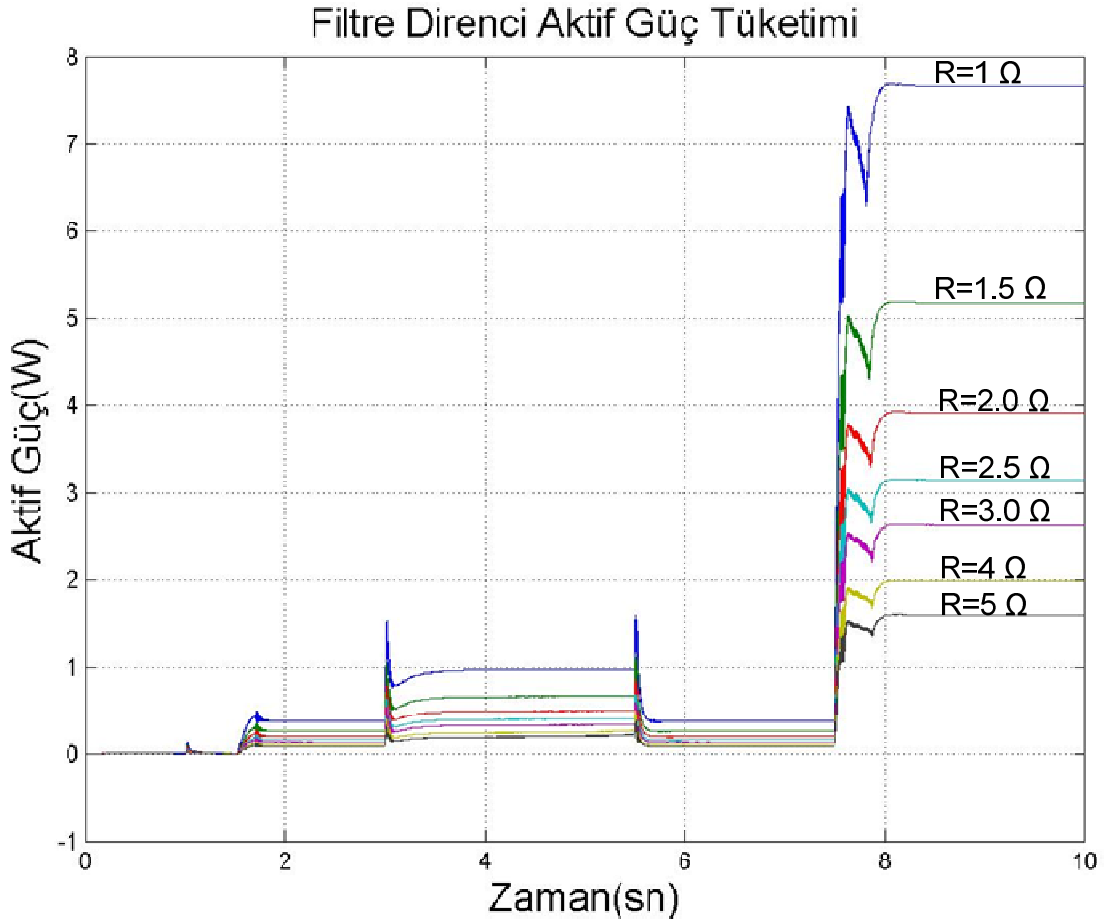
Örneğin, eğer $C = 0.001$ F olursa;

$$L = \frac{1.125 \times 10^{-6}}{C} = \frac{1.125 \times 10^{-6}}{0.001} = 0.001125 \text{H}$$

$$L = 1125 \mu\text{H}$$

olarak bulunmuştur.

Üçüncü harmonik süzgeci için kullanılan R değeri ise aktif güç tüketiminin az olması önceliğine göre bulunmaktadır.Çeşitli R değerlerine göre süzgeç tepkisi aşağıdaki gibi incelenmiş ve en uygun değer seçilmiştir. Benzetim çalışmalarında kullanılan 3.harmonik süzgeci için $R=1-5 \Omega$ arasındaki değerler için aktif güç tüketimi değerleri bulunmuştur. Bu değerler Şekil 3.6'da verilmiştir.

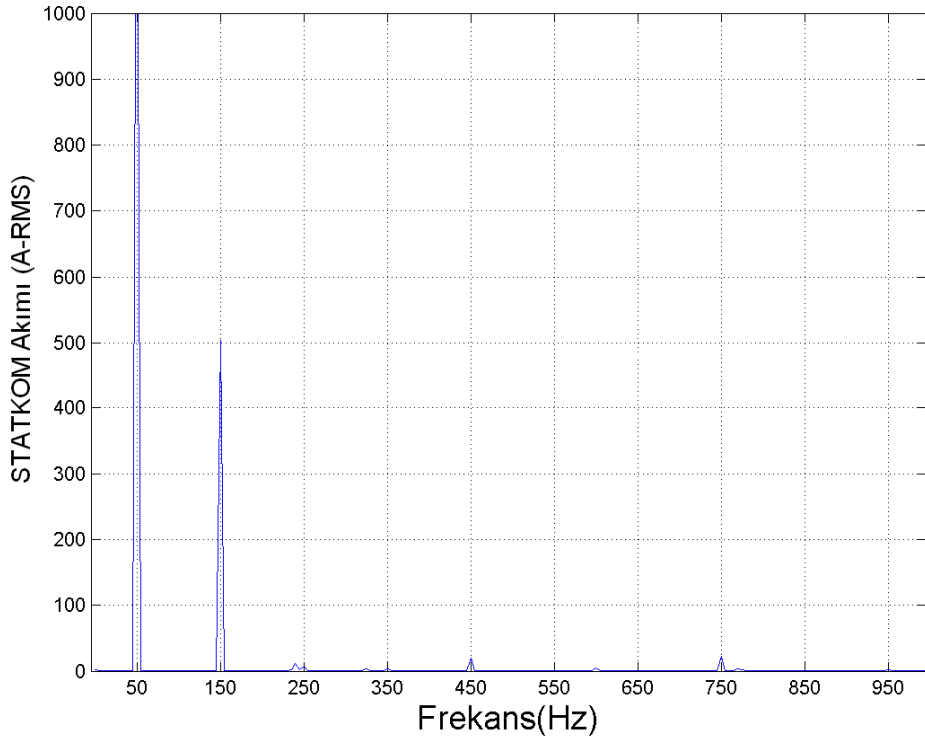


Şekil 3.6. Çeşitli R değerine göre süzgeç direnci aktif güç tüketimi

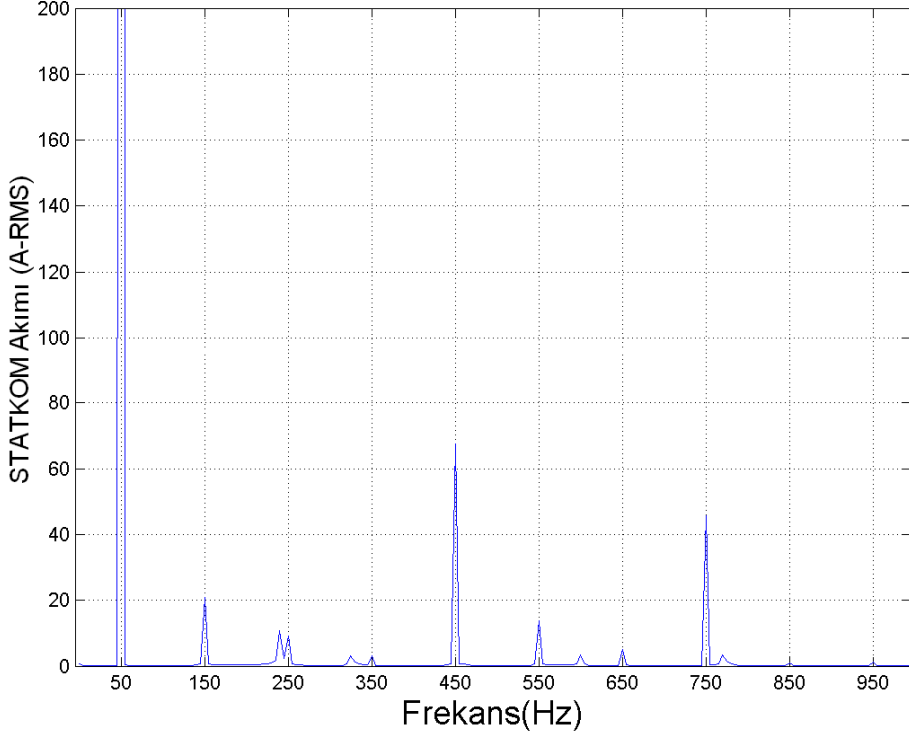
Görüldüğü gibi R değerinin artması ile direnç akımı azalmaktadır. Dolayısıyla $P = RI^2$ denkleminde göre, R değerinin artırılması aktif güç tüketiminin azalmasına neden olur. Sonuçta, çalışmalarda aktif güç tüketimi önceliği ve süzgecinin verdiği tepkiye göre en uygun değer $R=2.5\Omega$ olarak seçilmiştir.

Süzgeç karakteristiği

Şekil 3.7 ve 3.8'de dört telli STATKOM 3.harmonik filtesiz ve 3.harmonik süzgeçli topolojilerdeki frekans karakteristiği verilmiştir. Şekil 3.8'de görüldüğü gibi 3.harmonik akımı kullanılan 3.harmonik süzgeciyle büyük miktarda azaltılmıştır. Böylece STATKOM'un ürettiği kare dalga geriliminden dolayı dengeli ve dengesiz durumlardaki 3.harmonik akımın akması engellenir.



Şekil 3.7. Üçüncü harmonik süzgeçsiz şebeke akımı frekans karakteristiği

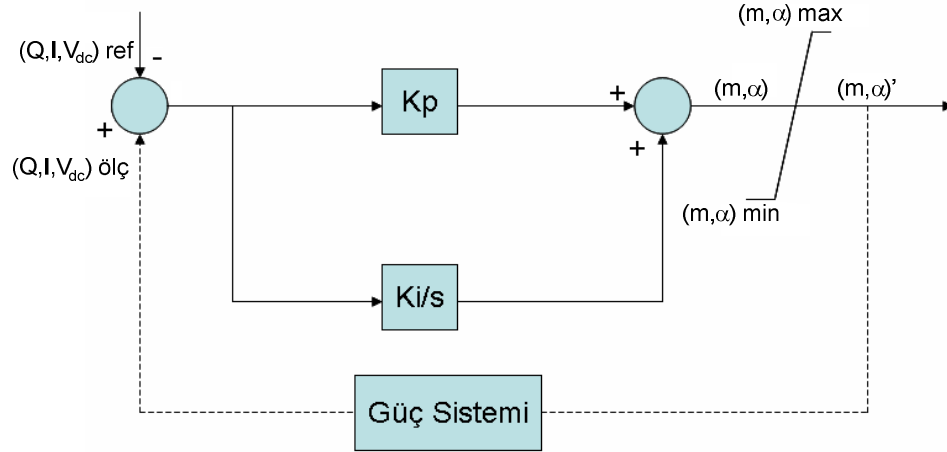


Şekil 3.8. Üçüncü harmonik süzgeçli şebeke akımı frekans karakteristiği

3.2 STATKOM yapısında kullanılan kontrol elemanları

3.2.1 Oransal tümlevsel (PI:Proportional Integral) denetleç

PI denetleç STATKOM reaktif güç ve DA bağ gerilimi kontrolü için kullanılmaktadır. PI denetleç blok şeması aşağıdaki şekilde görülmektedir [22]:

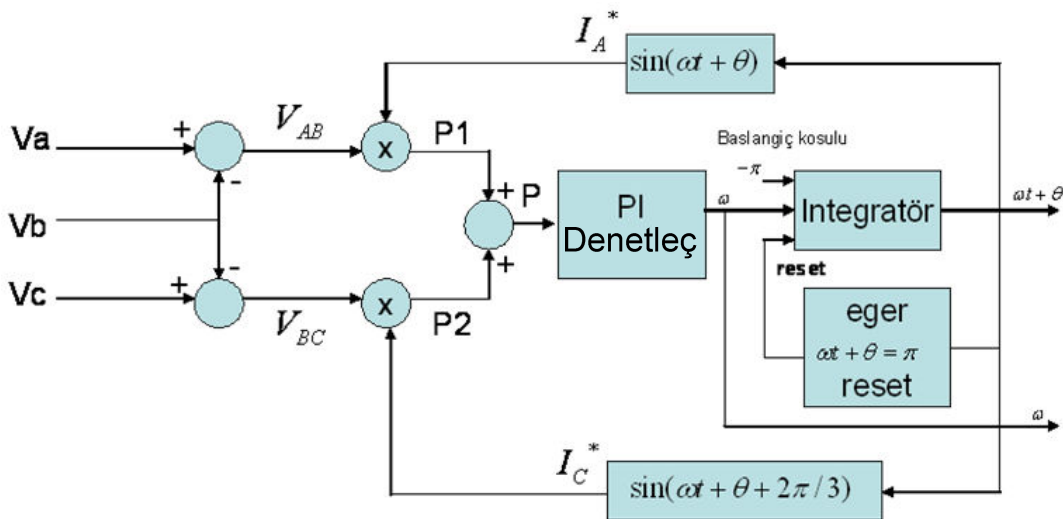


Şekil 3.9. Oransal tümlevsel denetleç şeması

K_p ve K_i çarpanları sırasıyla oransal (proportional) ve tümlevsel (integral) çarpanlarıdır.

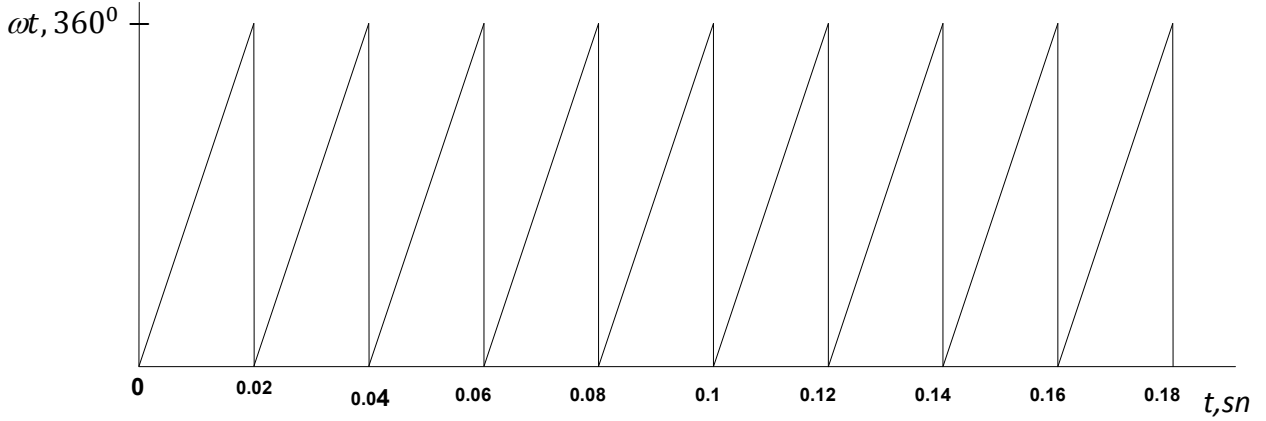
3.2.2 PLL (Faz Kilitlemeli Döngü) denetleç

STATKOM kontrol devresinde kullanılan PLL denetleç sistem AA gerilimin pozitif bileşenleriyle STATKOM tetikleme sinyali arasındaki senkronizasyonu sağlar. PLL çıkışı PI denetleç çıkışındaki faz kaydırma açısıyla birlikte tetikleme devrelerine giriş sinyali olarak verilir. PLL blok şeması aşağıdaki şekildedir [23].



Şekil 3.10. PLL şeması

PLL girişi ölçülen üç faz AA gerilimidir. Çıkış olarak ωt elde edilir. ωt sinyali 50 Hz frekansa sahip bir üçgen dalgadır.



Şekil 3.11. PLL çıkış sinyali

3.2.3 Anahtarlama açısı seçme bloğu (Look-up Table)

Aşağıdaki çizelgede benzetim çalışmalarında kullanılan açısı bulma tablosu gösterilmektedir. Tabloda her bir modülasyon endeksine karşılık gelen bir anahtarlama açısı (θ) bulunmaktadır. Bu açısı $m = \cos \theta$ formülüne göre bulunur. Örnek olarak eğer modülasyon endeksi $m = 0.050$ olursa eşdeğer açısı $\theta = \cos^{-1}(0.050) = 87.14$ derece olarak bulunmuştur.

Çizelge 3.6. Modülasyon endeksine göre anahtarlama açısı seçme bloğunun bir örneği

| Modülasyon Endeksi, m | Teta(θ) açısı, derece |
|-----------------------|--------------------------------|
| 0.000 | 90.00 |
| 0.005 | 89.71 |
| 0.010 | 89.43 |
| 0.015 | 89.14 |
| 0.020 | 88.85 |
| 0.025 | 88.57 |
| 0.030 | 88.28 |
| 0.035 | 87.99 |
| 0.040 | 87.71 |
| 0.045 | 87.42 |
| 0.050 | 87.14 |
| . | . |
| . | . |
| . | . |
| 0.975 | 12.84 |
| 0.980 | 11.48 |
| 0.985 | 9.94 |
| 0.990 | 8.11 |
| 0.995 | 5.73 |
| 1.000 | 0.00 |

4. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Üç seviyeli STATKOM yapısını oluşturan dört telli ve üçgen bağlı STATKOM topolojilerinin benzetimi PSCAD yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Üçgen bağlı STATKOM topolojisinde 3,5,7,11,13 ve 17. harmonik süzgeçleri kullanılmıştır.

4.1 Dört telli STATKOM benzetimi

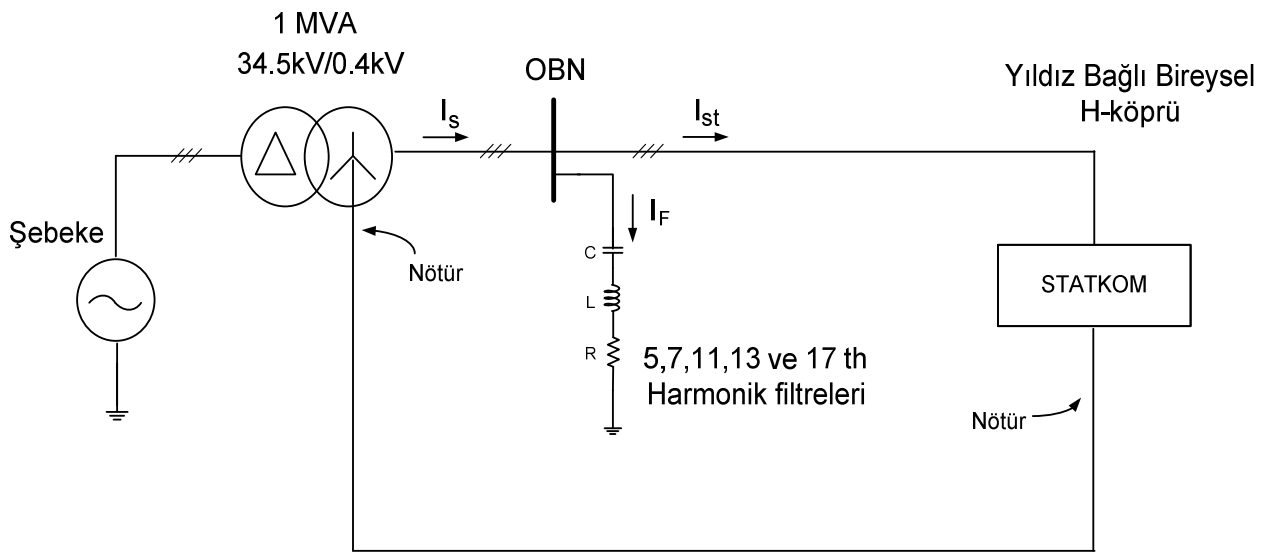
Dört telli STATKOM topolojisinin benzetimi iki ayrı durum için yapılmıştır:

- i) Üçüncü harmonik süzgeçsiz (Devre I)
- ii) Üçüncü harmonik süzgeçli (Devre II)

Dört telli bağlı STATKOM, (OBN) noktasında 34.5kV/0.4kV ve 1MVA bir trafoya ve tasarlanan harmonik süzgeçlerine bağlanmaktadır. Verilen her iki durumda 5,7,11,13 ve 17. harmonik süzgeçleri bulunmaktadır. Devre-II topoloji için ayrıca nötür iletken üzerine 3.harmonik bağlanmıştır.

4.1.1 STATKOM güç devresinin şeması (Devre I)

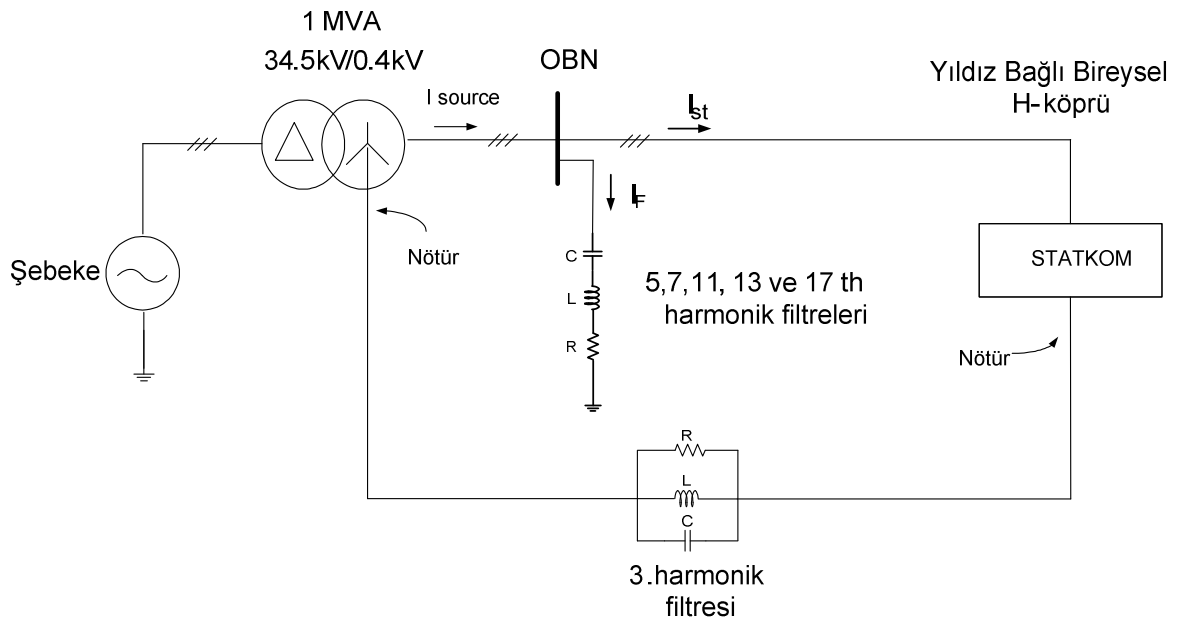
Benzetimi yapılan güç devresi aşağıdaki devrede verilmektedir. Bu güç devresinde Şekil 4.1'de gösterildiği gibi her faza tek seviyeli bir H-köprü bağlanmaktadır. Bu benzetimde istenilen reaktif güç STATKOM tarafından (kapasitif veya endüktif davranarak) şebekeye basılır veya şebekeden çekilir. Verilmekte olan güç sisteminde 5,7,11,13 ve 17.harmonikleri süzmek için süzgeç uygulanmıştır.



Şekil 4.1. STATKOM tek hat şeması (Devre I)

4.1.2 STATKOM güç devresinin şeması (Devre II)

Benzetimi yapılan güç sistemi aşağıdaki devrede verilmektedir. Verilen güç devresinde her faza tek seviyeli bireysel H-köprü (STATKOM) bağlanmaktadır. Bu benzetimde istenilen reaktif güç STATKOM tarafından (kapasitif veya endüktif davranarak) şebekeye basılır veya şebekeden çekilir. Verilmekte olan güç devresinde 3,5,7,11,13 ve 17.harmonikleri süzmek için süzgeç uygulanmıştır. 3.harmonik süzgeç şebekenin nötürü ile STATKOM nötür noktaları arasında Şekil 4.2’de gösterildiği gibi bağlanmıştır.



Şekil 4.2. STATKOM (Devre II) tek hat şeması

4.1.3 Benzetim bilgileri

Dört telli bağlı STATKOM benzetimi için kullanılan yazılım bilgileri Çizelge 4.1’deki gibidir.

Çizelge 4.1. Benzetim Bilgileri

| Benzetim Bilgileri | |
|--------------------------------|-------|
| Yazılım Adı | PSCAD |
| Yazılım Versiyonu | 4.2 |
| Benzetim Süresi (sn) | 10 |
| Çözüm Adımı Süresi (μ sn) | 10 |
| Çizim Adımı Süresi (μ sn) | 50 |

4.1.4 Şebeke özellikleri

Dört telli bağlı STATKOM devresinde kullanılan şebeke ve trafo özellikleri Çizelge 4.2, 4.3 ve 4.4'te belirtilmektedir. Bu değerler pratik uygulamalara uygun bir şekilde seçilmiştir.

Çizelge 4.2. STATKOM'un bağlandığı üç faz şebeke özellikleri

| Şebeke özellikleri | |
|------------------------------|----------|
| Genişlik(AA;L-L etkin değer) | 34.5 kV |
| Frekans | 50 Hz |
| Kısa Devre Gücü | 1000 MVA |

Çizelge 4.3. STATKOM transformatörü teknik özellikleri

| Trafo bilgileri | |
|------------------------|------------|
| Bağlantı Tipi | Dyn |
| %Uk | 0.05 [pu] |
| Vp/Vs | 34.5/0.4kV |
| Anma Gücü | 1MVA |

Çizelge 4.4. Üç seviyeli STATKOM devre parametreleri

| Üç seviyeli Gerilim Kaynaklı Çevirgeç (STATKOM) | |
|--|---------------------|
| H-köprü | 3 Adet Yıldız Bağlı |
| Çevirgeç Anma Gücü | 1 MVA |
| Çevirgeç DA Gerilimi | 510 V |
| Anahtarlama Frekansı | 50 Hz |
| Anahtarlama Elemanı | IGBT |
| Kondansatör Değeri | 50 mF |

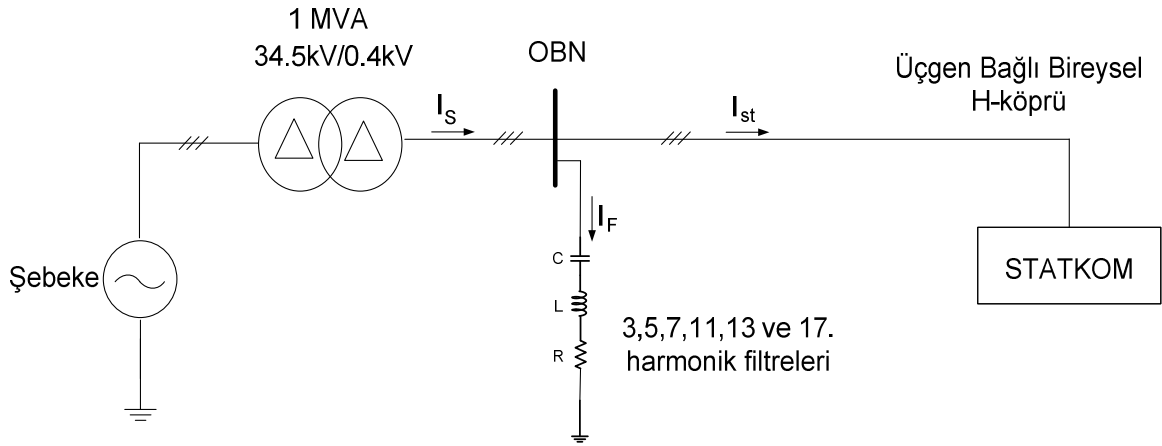
4.2 Üçgen bağlı STATKOM benzetim çalışmaları

Benzetimi yapılan güç sistemi Şekil 4.3'te verilmektedir. Verilen güç devresinde tek seviyeli bireysel H-köprüler üçgen şeklinde (STATKOM) bağlanmaktadır. Bu

benzetimde istenilen reaktif güç STATKOM tarafından (kapasitif veya endüktif davranarak) şebekeye basılır veya şebekeden çekilir. Verilmekte olan güç devresinde 3,5,7,11,13 ve 17.harmonikleri süzmek için süzgeç uygulanmıştır.

4.2.1 Güç sistemi devre şeması

Üçgen bağlı güç devresi şeması Şekil 4.1'te verilmiştir. STATKOM, (OBN) noktasında 34.5kV/0.4kV ve 1MVA bir trafoya ve tasarlanan harmonik süzgeçlerine bağlanmaktadır.



Şekil 4.3. Üçgen bağlı STATKOM'un güç sistemi tek hat şeması

4.2.2 Benzetim bilgileri

Üçgen Bağlı STATKOM benzetim çalışmaları için kullanılan yazılım bilgileri Çizelge 4.5'teki gibidir:

Çizelge 4.5. Benzetim Bigileri

| Benzetim Bilgileri | |
|--------------------------|-------|
| Yazılım Adı | PSCAD |
| Yazılım Versiyonu | 4.2 |
| Benzetim Süresi (sn) | 10 |
| Çözüm adımı Süresi (µsn) | 10 |
| Çizim Adımı Süresi (µsn) | 50 |

4.2.3 Şebeke özellikleri

Üçgen Bağlı STATKOM devresinde kullanılan şebeke ve trafo özellikleri Çizelge 4.6, 4.7 ve 4.8'de belirtilmektedir. Bu değerler uygulamalara uygun bir şekilde seçilmektedir.

Çizelge 4.6. STATKOM'un bağlandığı
üç faz şebeke özellikleri

| Şebeke özellikleri | |
|------------------------------|----------|
| Genişlik(AA;L-L etkin değer) | 34.5 kV |
| Frekans | 50 Hz |
| Kısa Devre Gücü | 1000 MVA |

Çizelge 4.7. STATKOM transformatörü
teknik özellikleri

| Trafo bilgileri | |
|------------------------|------------|
| Bağlantı Tipi | Dd |
| %Uk | 0.05 [pu] |
| Vp/Vs | 34.5/0.4kV |
| Anma Gücü | 1MVA |

Çizelge 4.8. Üç seviyeli STATKOM devre parametreleri

| Üç seviyeli Gerilim Kaynaklı Çevirgeç (STATKOM) | |
|--|--------------------|
| H-Köprü | 3 Adet Üçgen Bağlı |
| Çevirgeç Anma Gücü | 1 MVA |
| Çevirgeç DA Gerilimi | 740 V |
| Anahtarlama Frekansı | 50 Hz |
| Anahtarlama Elemanı | IGBT |
| Kondansatör Değeri | 40 mF |

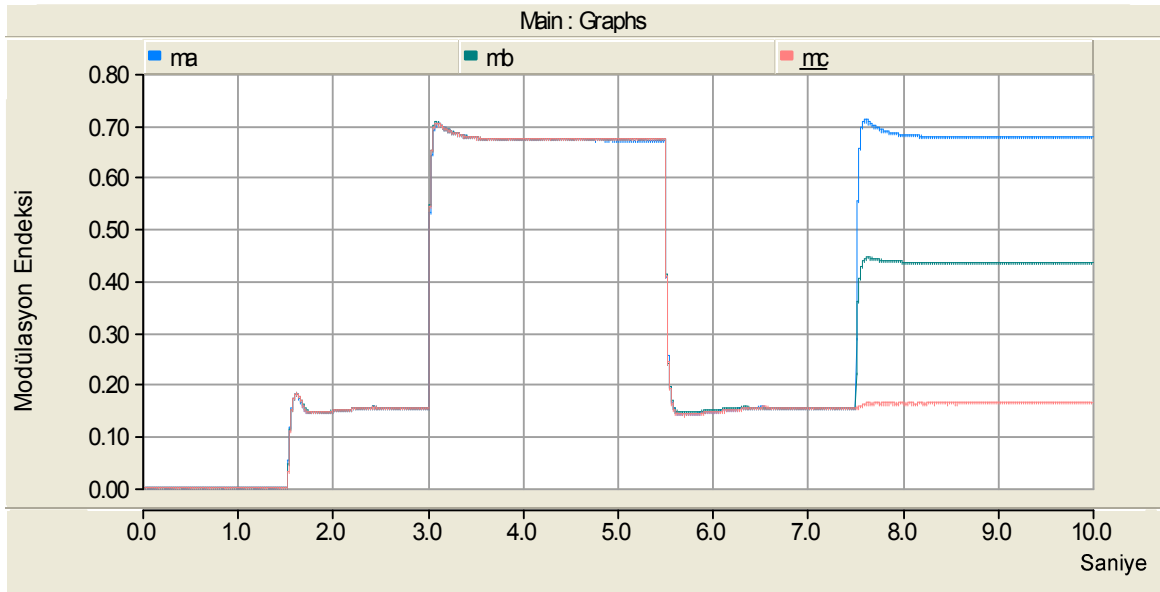
5. BENZETİM SONUÇLARI

5.1 (Devre I) benzetim sonuçları

Bilgisayar modellemesi yapılmış olan dört telli bağlı STATKOM (Devre I) modeli ile dinamik benzetim çalışmaları yapılmıştır. Endüktif, kapasitif ve dengesiz çalışma durumlarında STATKOM'un verdiği tepkiler gözlemlenmiştir.

5.1.1 STATKOM geçiş tepkileri

Şekil 5.1'de verildiği gibi STATKOM'un takip ettiği reaktif güce karşılık gelen modülasyon endeksi tepkisi görülmektedir. İstenilen reaktif güç değerleri dengeli durumlar için $+0.33\text{MVAR}$, -0.033MVAR , $+0.033\text{MVAR}$ ve dengesiz durum için $Q_a = -0.33\text{MVAR}$, $Q_b = 0.0\text{MVAR}$ ve $Q_c = +0.33\text{MVAR}$ olmaktadır. Görüldüğü gibi modülasyon endeksi $0 < m < 1$ değerleri arasında değişmektedir ve hiçbir geçici rejim olayı yoktur.



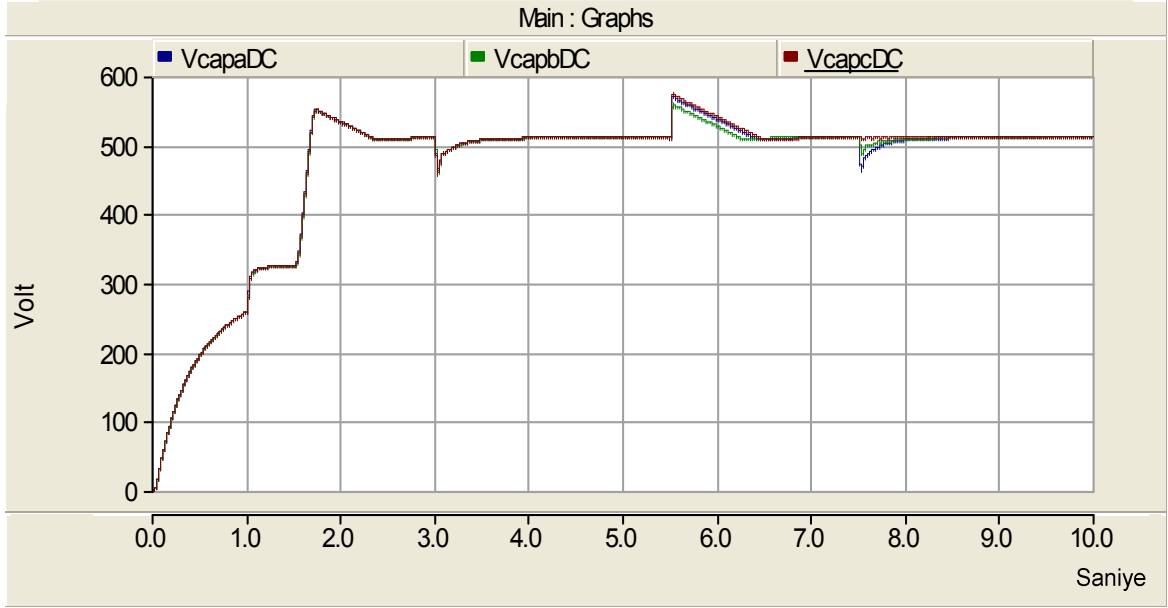
Şekil 5.1. STATKOM modülasyon endeksi grafiği (Dengeli ve Dengesiz Durumlar)

m_a : A fazı modülasyon endeksi, m_b : B fazı modülasyon endeksi, m_c : C fazı modülasyon endeksi

5.1.2 DA bağ gerilimi ve alfa açıları tepkisi

Şekil 5.2'de görüldüğü gibi (0-1.5) saniye arası kapasitör şarj süresi ve STATKOM'un reaktif güç değişimi sırasındaki DA bağ gerilimi değişimini göstermektedir. Yapılan benzetim çalışmasında kondansatör gerilimi 510 voltta

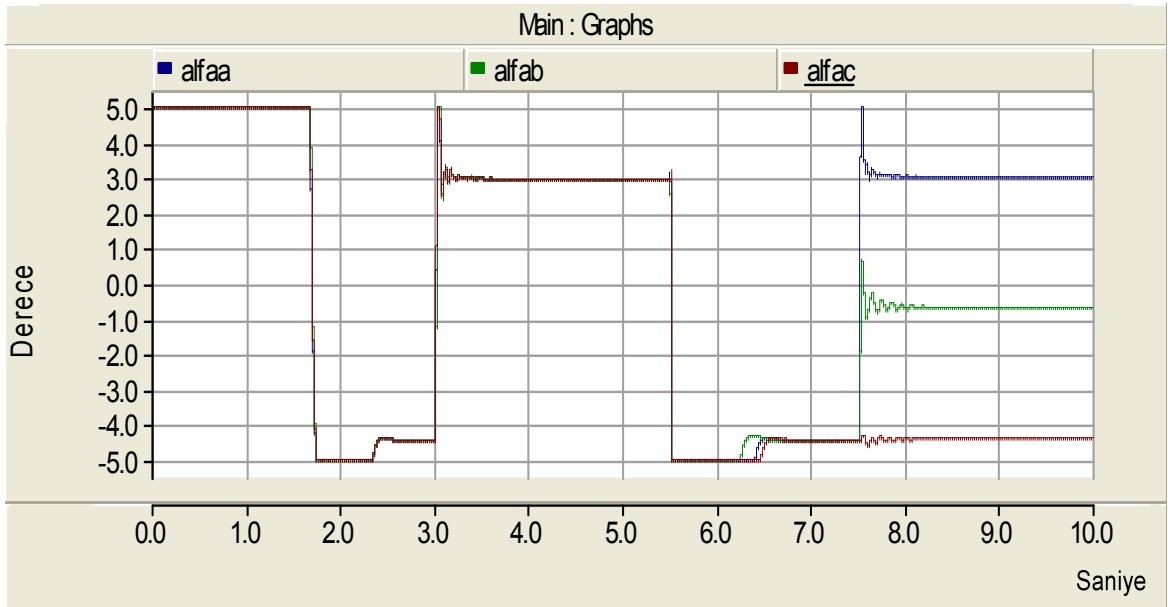
tutulmaktadır. Görüldüğü gibi güç değişimi anındaki geçişler kabul edilebilir bir zaman aralığında yapılmış ve hiçbir geçici rejim olayı yoktur.



Şekil 5.2. DA bağ gerilimi tepki grafiği

VcapaDC: A fazı DA bağ gerilimi, *VcapbDC*: B fazı DA bağ gerilimi, *VcapcDC*: C fazı DA bağ gerilimi

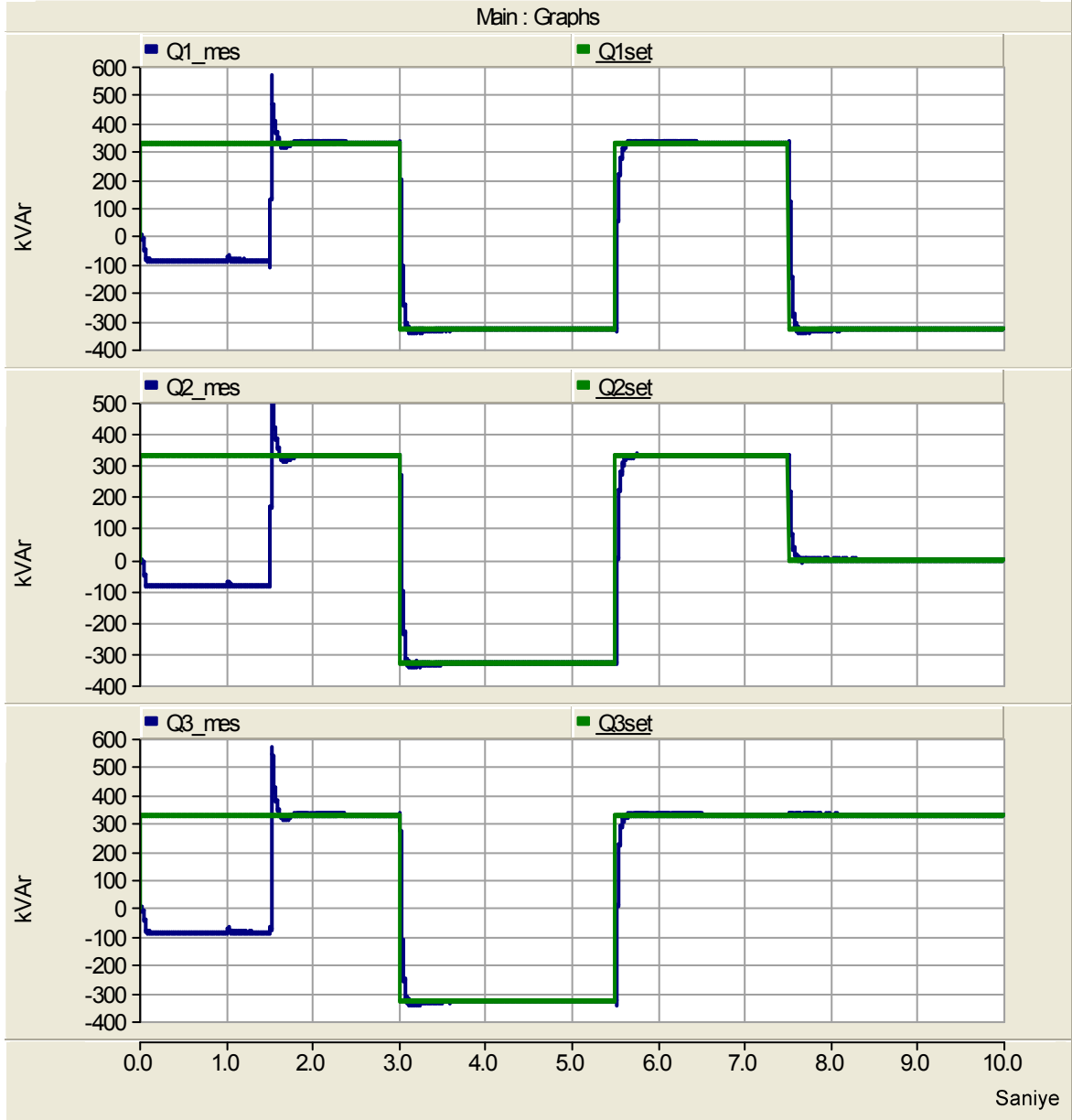
Şekil 5.3'de DA bağ gerilimi kapasitörünün aktif güç talebine karşılık gelen alfa açısını göstermektedir. Şekilde gösterildiği gibi α , $-4.5^\circ < \alpha < 3^\circ$ aralığında değişmekte, ancak STATKOM'un güç değişimi sırasında geçici olarak limitlere dayanmaktadır.



Şekil 5.3. STATKOM ve kaynak gerilimi arasındaki alfa açıları değişimi grafiği

5.1.3 STATKOM çalışma kipi değişimleri (Dengeli ve Dengesiz Durumlar)

Şekil 5.4'de STATKOM'un reaktif güç tepkileri çeşitli durumlar için gösterilmiştir. Burada STATKOM endüktif, kapasitif, endüktif ve dengesiz durumlarında çalıştırılmış ve STATKOM tepki süreleri incelenmiştir.



Şekil 5.4. Referans güç ve STATKOM'ların tepkisi
(Dengeli ve Dengesiz Durumlar)

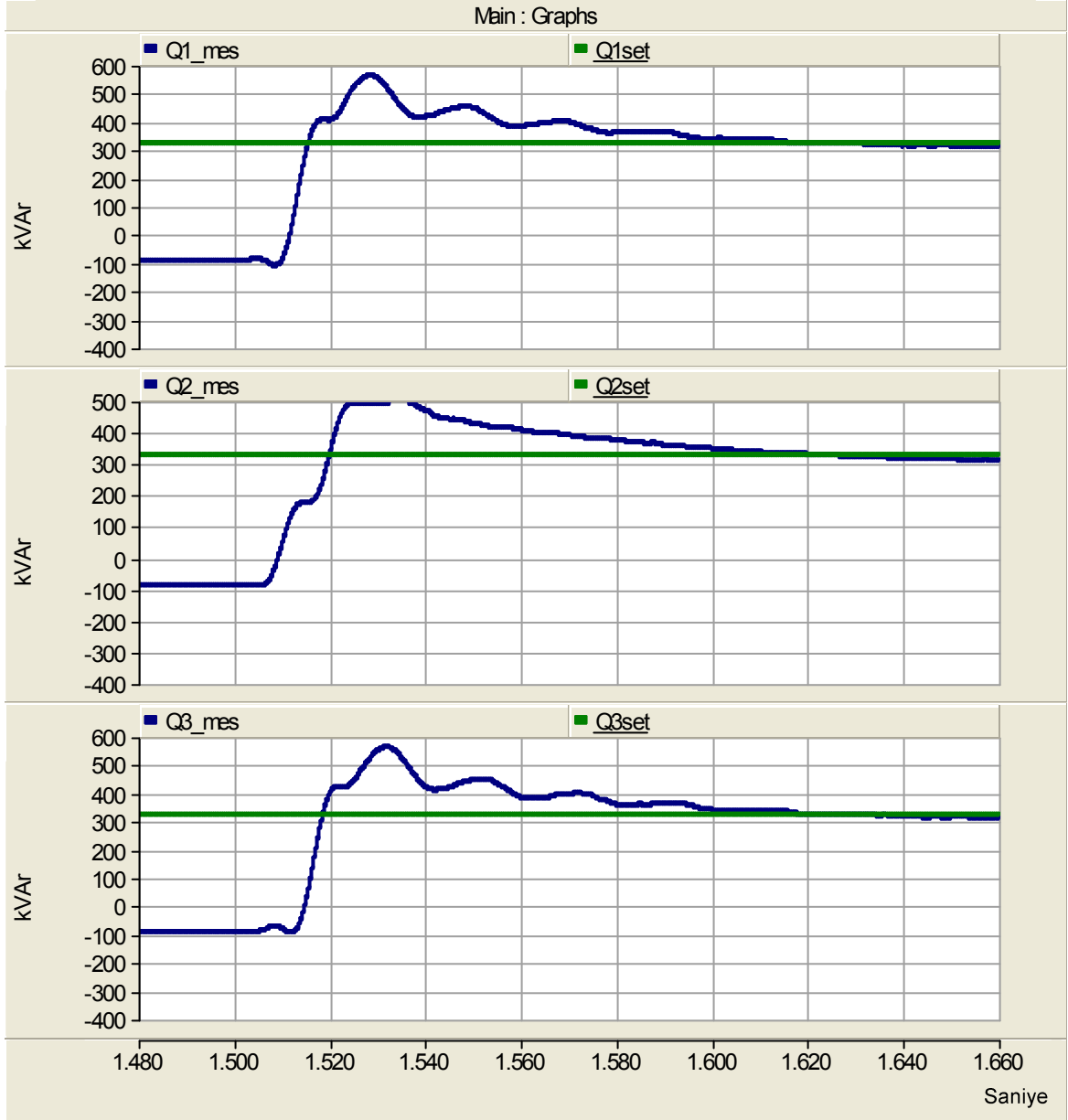
Q_{1_mes} : A fazından ölçülen reaktif güç, Q_{2_mes} : B fazından ölçülen reaktif güç,

Q_{3_mes} : C fazından ölçülen reaktif güç

Q_{1_set} : A fazı için istenilen reaktif güç, Q_{2_set} : B fazı için istenilen reaktif güç,

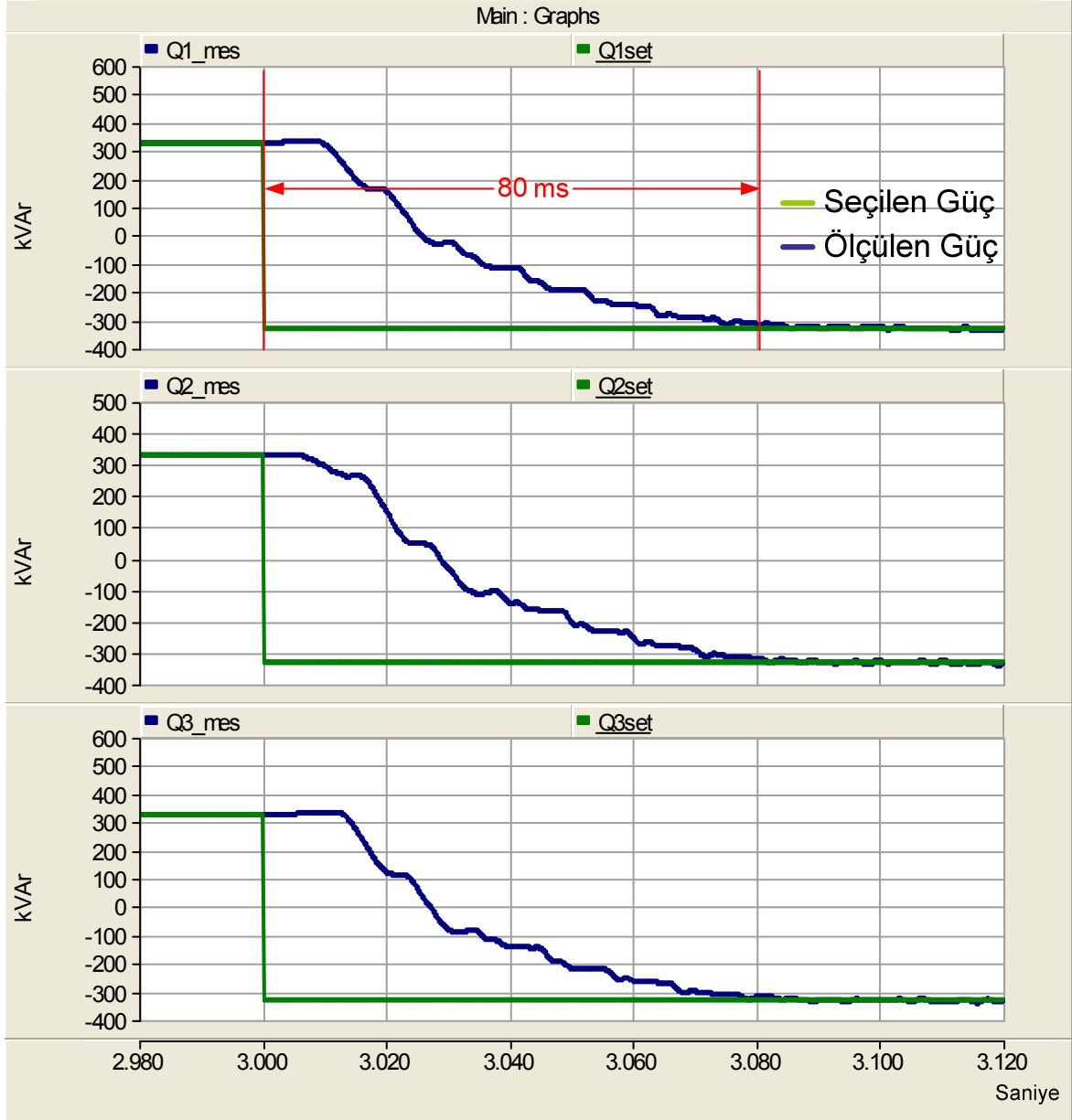
Q_{3_set} : C fazı için istenilen reaktif güç

Şekil 5.5'te STATKOM'un seçilen dengeli endüktif güce göre ilk tepki süresi gösterilmiştir. Görüldüğü gibi STATKOM ilk güç değişimi süresi yaklaşık $t_s = 100$ ms'dir.



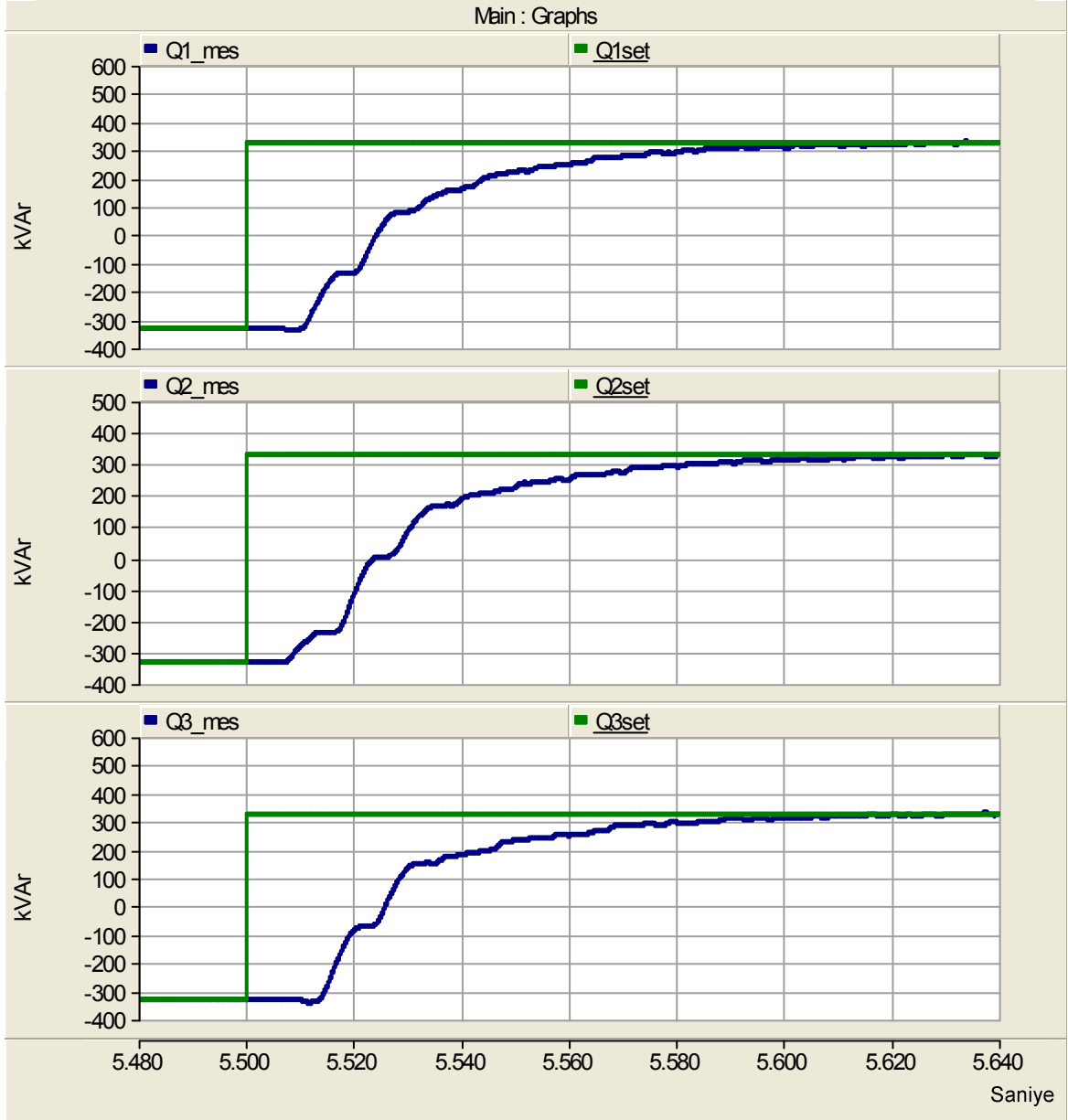
Şekil 5.5. STATKOM çalışma kipi değişimleri
(Endüktif-Kip Dengeli Durum)

Şekil 5.6'da STATKOM'un seçilen dengeli kapasitif güce göre ilk tepki süresi gösterilmiştir. Verilen durum için STATKOM güç değişimi süresi yaklaşık $t_s = 80$ ms'dir.



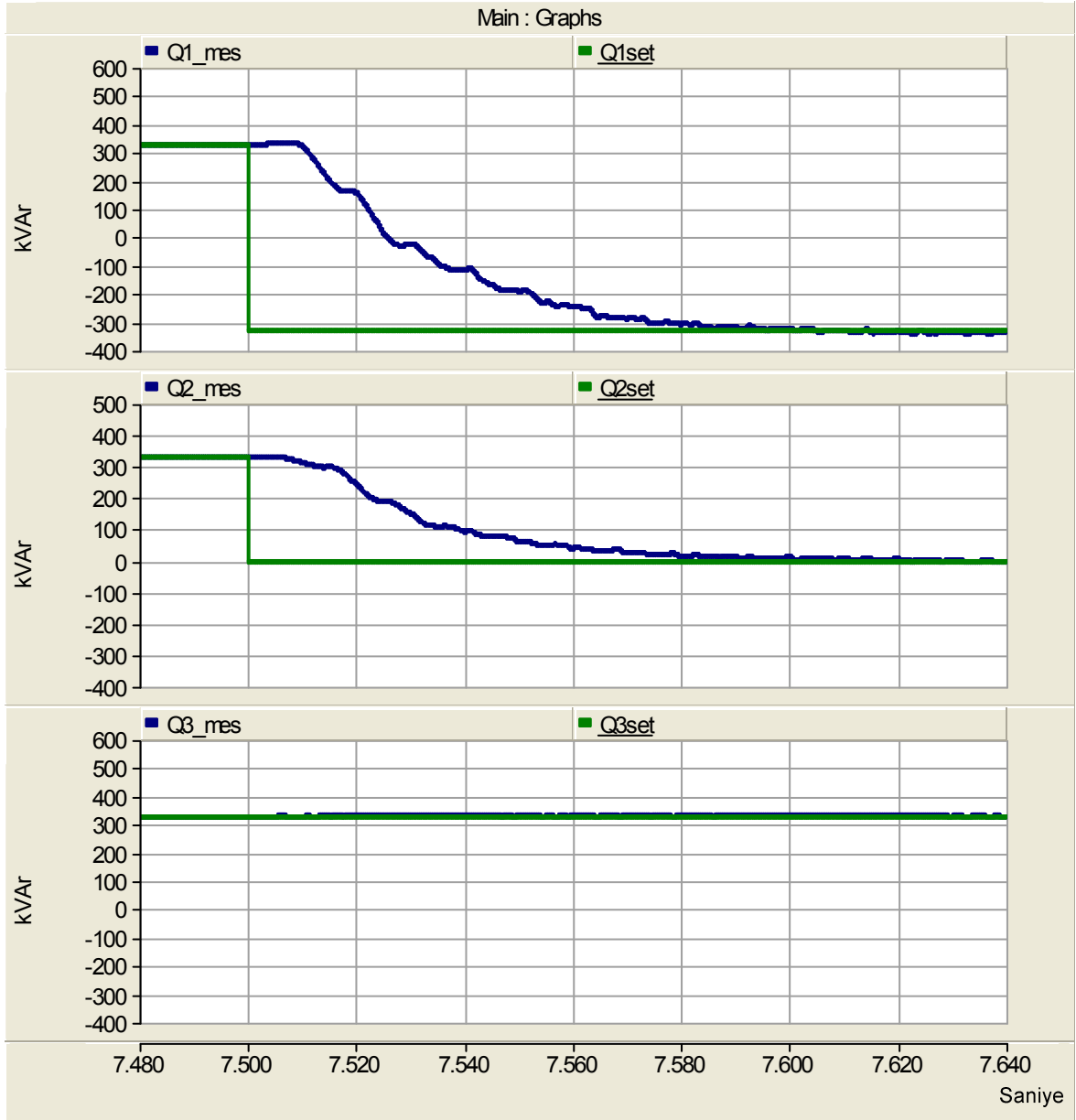
Şekil 5.6. STATKOM çalışma kipi değişimleri
(Kapasitif-Kip Dengeli Durum)

Şekil 5.7'de STATKOM'un seçilen dengeli endüktif güce göre tepki süresi gösterilmiştir. Verilen durum için STATKOM güç değişimi süresi yaklaşık $t_s = 80$ ms'dir.



Şekil 5.7. STATKOM çalışma kipi değişimleri
(Endüktif-Kip Dengeli Durum)

Şekil 5.8'de STATKOM'un dengesiz güce göre tepki süresi gösterilmiştir. Verilen durum için STATKOM güç değişimi süresi yaklaşık $t_s = 80$ ms'dir.

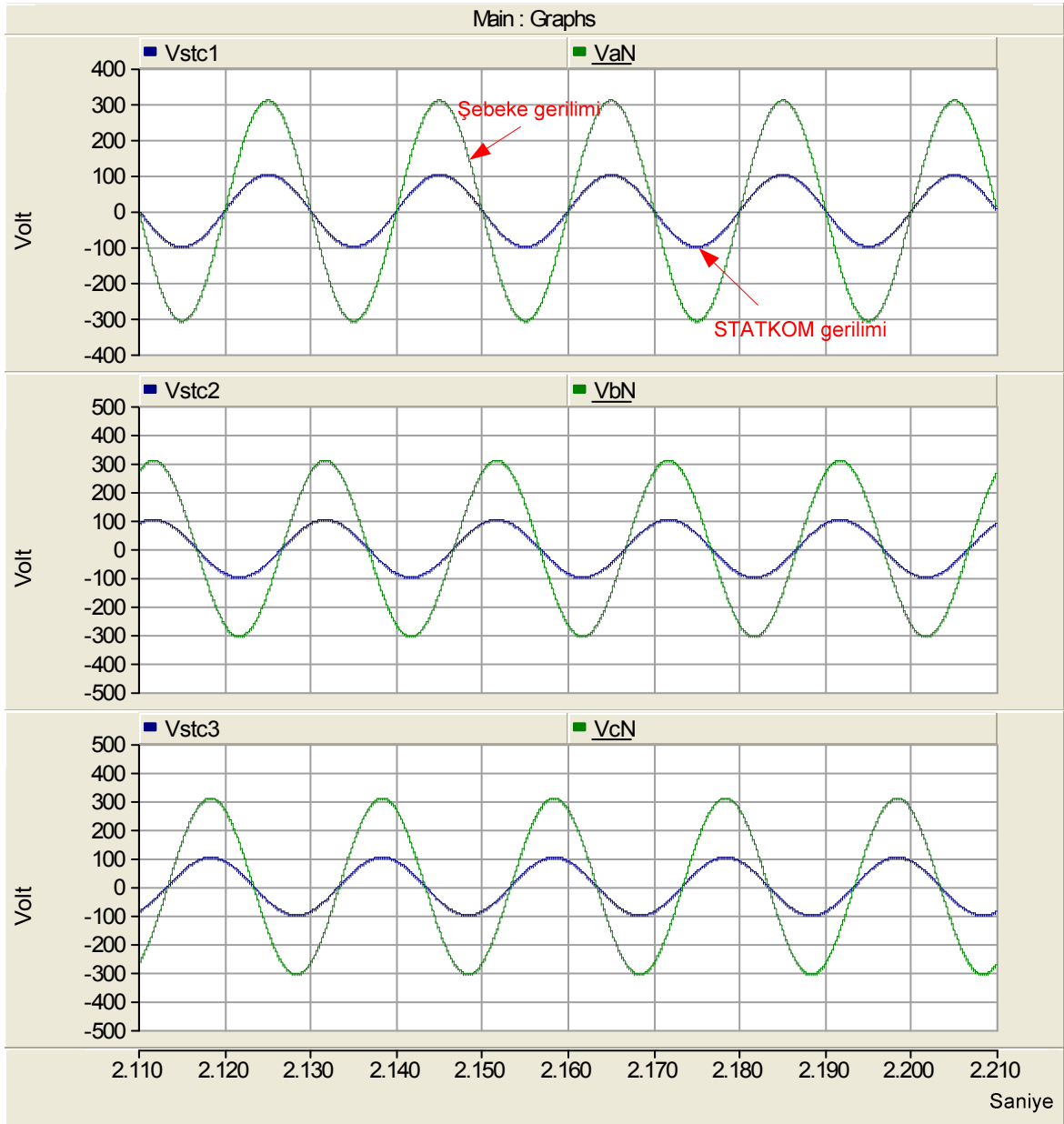


Şekil 5.8. STATKOM çalışma kipi değişimleri (Dengesiz Durum)

5.1.4 STATKOM ve şebeke çıkış gerilimleri (Dengeli ve Dengesiz Durumlar)

Bü bölümde STATKOM gerilimlerinin ana bileşeni ve şebeke gerilimleri grafiği dengeli ve dengesiz durumlar için verilmiştir.

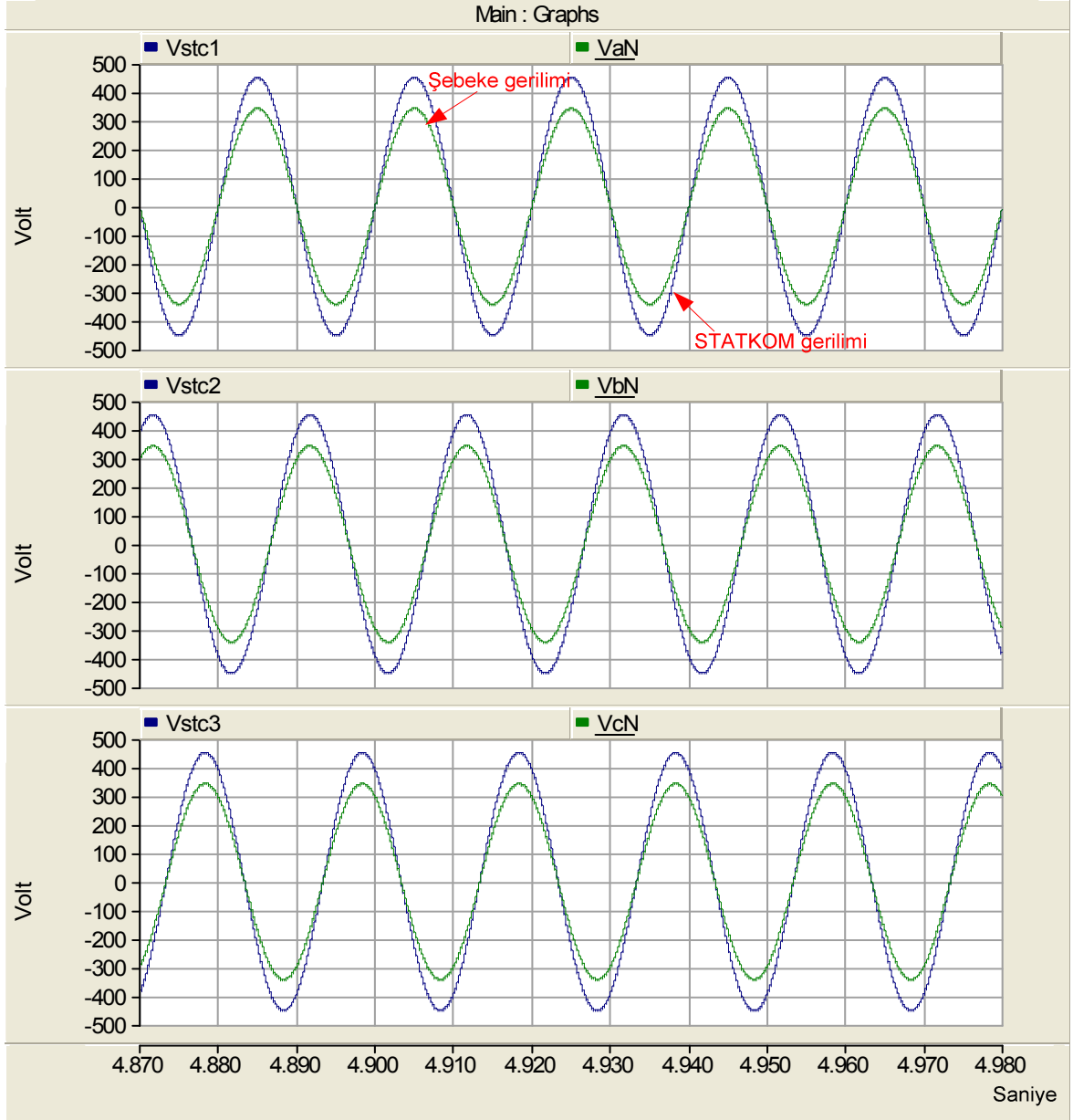
Şekil 5.9'da görüldüğü gibi STATKOM'un her üç fazı dengelidir. STATKOM endüktif kipte çalıştığı için STATKOM geriliminin tepe değerleri, şebeke gerilimleri tepe değerine göre küçüktür.



Şekil 5.9. Şebeke ve STATKOM ana bileşen gerilimleri grafiği (Endüktif-Kip Dengeli Durum)

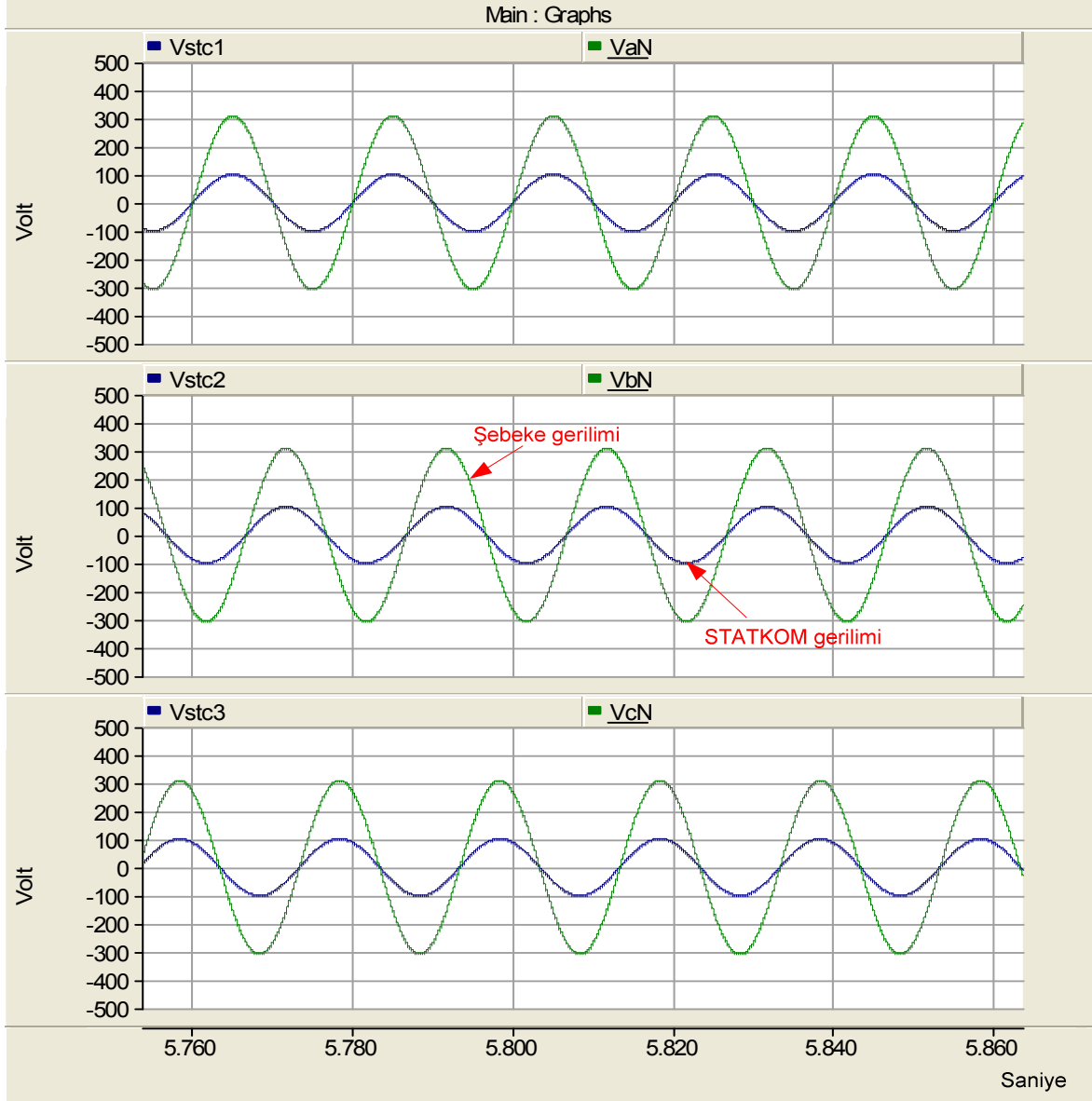
V_{stc1} : A fazına bağlı STATKOM'un ana bileşen gerilimi, V_{stc2} : B fazına bağlı STATKOM'un ana bileşen gerilimi, V_{stc3} : C fazına bağlı STATKOM'un ana bileşen gerilimi

Şekil 5.10'da gösterildiği gibi STATKOM'un her üç fazi dengelidir. STATKOM kapasitif kipte çalıştığı için STATKOM geriliminin tepe değerleri, şebeke gerilimleri tepe değerine göre büyüktür.



Şekil 5.10. Şebeke ve STATKOM ana bileşen gerilimleri grafiği (Kapasitif-Kip Dengeli Durum)

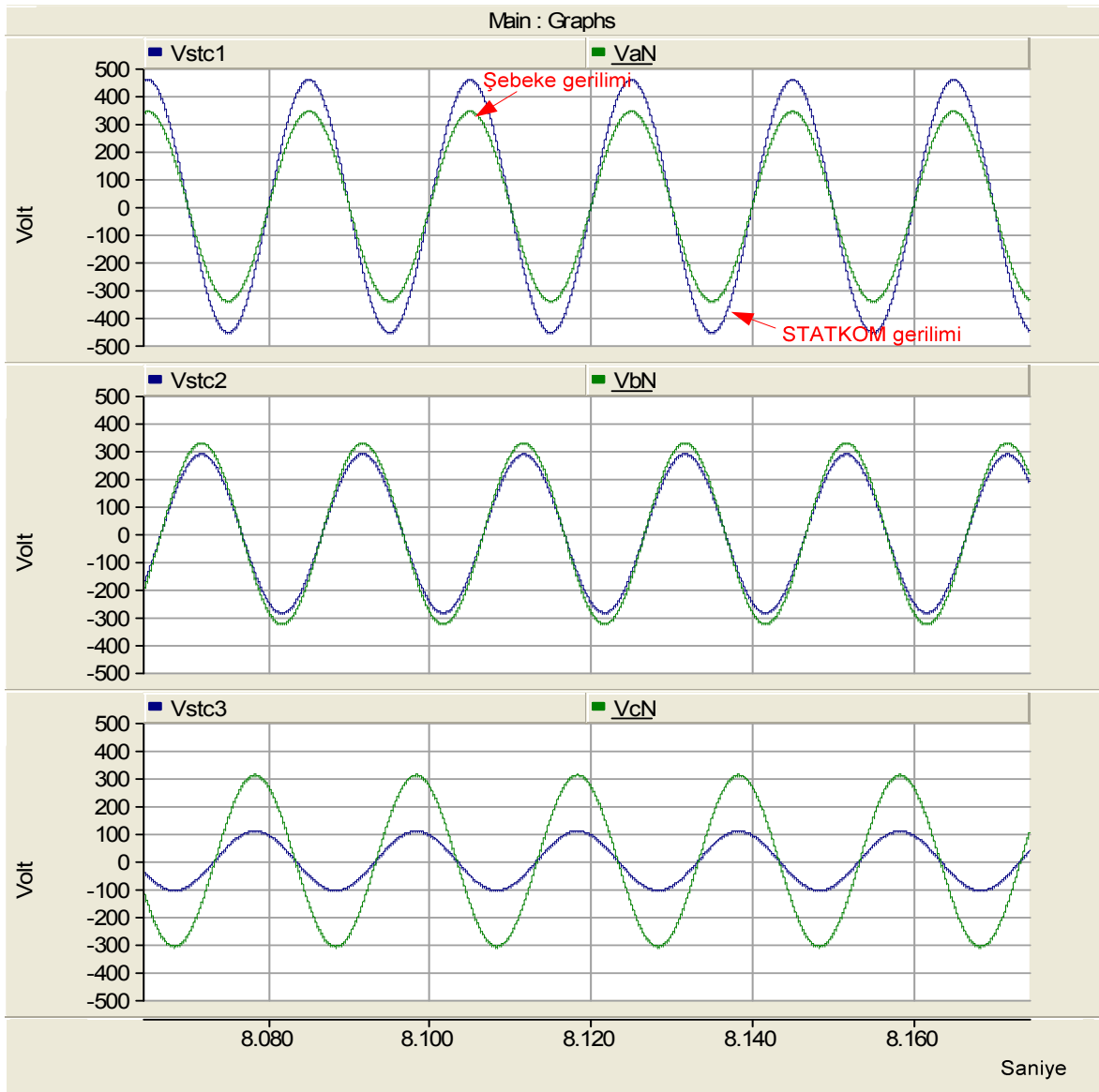
Şekil 5.11'de görüldüğü gibi STATKOM'un her üç fazı dengelidir. STATKOM endüktif kipte çalıştığı için STATKOM geriliminin tepe değerleri, şebeke gerilimleri tepe değerine göre küçüktür.



Şekil 5.11. Şebeke ve STATKOM ana bileşen gerilimleri grafiği (Kapasitif-Kip Dengeli Durum)

Şekil 5.12'de üç farklı durum görülmektedir.

- 1) A fazında STATKOM gerilimi tepe değeri şebeke gerilimine tepe değerine göre büyük olduğu için bu faza bağlı STATKOM kapasitif kipte çalışmaktadır.
- 2) B fazında reaktif güç sıfırdır. Ancak şebeke ve STATKOM arasındaki reaktörden dolayı olan reaktif güç tüketimine göre belli bir miktar reaktif güç tüketimi vardır. Bu nedenle STATKOM gerilimi tepe değeri şebeke gerilimine tepe değerine göre küçüktür. Dolayısıyla şebekeden STATKOM'a reaktif güç akışı vardır.
- 3) C fazında STATKOM gerilimi tepe değeri şebeke gerilimi tepe değerine göre küçük olduğu için bu faza bağlı STATKOM endüktif kipte çalışmaktadır.



Şekil 5.12. Şebeke ve STATKOM ana bileşen gerilimleri grafiği (Dengesiz Durum)

5.1.5 (Devre I) Gerilim harmonikleri analizi

Çizelge 5.1, 5.2 ve 5.3'te verilen ortak bağlantı noktası faz-nötür gerilimi harmonik yüzdelerine göre, dengeli ve dengesiz durumlarda gerilim harmonik yüzdeleri ve gerilim THB oranlarının standart limitlerin üstünde olduğu görülmektedir [24],[25]. Bunun nedeni STATKOM'un ürettiği kare dalgadaki tek harmonik bileşenleri oranının fazla olmasıdır.

Çizelge 5.1. Çevirgeç faz-nötür gerilimi
harmonik analizi (Endüktif Kip-Dengeli Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|--------------------|-----|----|----|----|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|------|
| A fazı Yüzdesi (%) | 100 | 96 | 90 | 81 | 57 | 44 | 17 | 6.4 | 4 | 11 | 17 | 22 | 26 | 32 | %178 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 5.2. Çevirgeç faz-nötür gerilimi
harmonik analizi (Kapasitif Kip-Dengeli Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|--------------------|-----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| A fazı Yüzdesi (%) | 100 | 41 | 13 | 18 | 12 | 1.2 | 0.7 | 7.3 | 1.8 | 6 | 2.7 | 5 | 3.8 | 5.4 | %49.8 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 5.3. Çevirgeç faz-nötür gerilimi
harmonik analizi (Dengesiz Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|--------------------|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|----|-----|-------|
| A fazı Yüzdesi (%) | 100 | 40 | 15 | 18 | 12 | 2.5 | 0.6 | 7.3 | 0.6 | 6 | 1.6 | 5.3 | 3 | 5.5 | %49.5 |
| B fazı Yüzdesi (%) | 100 | 75 | 36 | 0.8 | 20 | 8 | 12 | 9.2 | 0.17 | 7.3 | 8.4 | 3.8 | 3 | 8.1 | %88.5 |
| C fazı Yüzdesi (%) | 100 | 95 | 89 | 80 | 54 | 40 | 13 | 1.6 | 8.1 | 15 | 19 | 21 | 18 | 11 | %172 |
| IEEE Std. 519-1992 | | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 5.4, 5.5 ve 5.6'da verilen ortak bağlantı noktası faz-nötür gerilimlerinin THB değerinin ve dengeli durumlarda gerilim harmonik yüzdelerinin verilen standart limitlerin altında olduğu görülmektedir. Ancak dengesiz durum için B fazındaki 3.harmonik yüzdesinin standart limitin üstünde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni STATKOM'un ürettiği kare dalgadaki 3.harmonik bileşen oranının fazla olmasıdır. Sonuçta ortak bağlantı noktasındaki toplam THB değeri limitleri geçilmemektedir.

Çizelge 5.4. Ortak Bağlantı Noktası faz-nötür gerilimi
harmonik analizi (Endüktif Kip–Dengeli Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| A fazı Yüzdesi (%) | 100 | 2.9 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.7 | 0.2 | 0.6 | %3 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 5.5. Ortak Bağlantı Noktası faz-nötür gerilimi
harmonik analizi (Kapasitif Kip–Dengeli Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|--------------------|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| A fazı Yüzdesi (%) | 100 | 5 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.6 | 0.2 | 0.4 | %5 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 5.6. Ortak Bağlantı Noktası faz-nötür gerilimi
harmonik analizi (Dengesiz Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| A fazı Yüzdesi (%) | 100 | 5 | 1.2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 0.2 | 0.6 | 0.1 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.3 | 0.4 | %5.7 |
| B fazı Yüzdesi (%) | 100 | 6.3 | 1.1 | 1.6 | 1.6 | 0.5 | 0.2 | 0.6 | 0.1 | 0.1 | 0.6 | 0.3 | 0.2 | 0.3 | %6.9 |
| C fazı Yüzdesi (%) | 100 | 2.7 | 1.5 | 1.6 | 1.6 | 0.5 | 0.2 | 0.5 | 0.1 | 0.2 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | %4 |
| IEEE Std. 519-1992 | | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 5.7, 5.8 ve 5.9'da verilen çevirgeç faz-faz gerilimleri THB değerine göre, dengeli durumlarda 3.harmonik yüzdelerinin verilen standart limitlerin altında olduğu görülmektedir. Faz-faz ölçüm nedeniyle 3.harmonik yüzdesi limitlerin çok altında olduğu görülür, ancak dengesiz durum için farklıdır. Bu durumda dengesizlik olduğu için hem 3.harmonik ve hem diğer tek harmoniklerin mevcut olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.7. Çevirgeç faz-faz gerilimi
harmonik analizi (Endüktif Kip–Dengeli Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|----------------------|-----|-----|----|----|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|------|
| AB fazlararası değer | 100 | 0.2 | 90 | 81 | 58 | 45 | 19 | 7 | 0.4 | 12 | 17 | 2.2 | 26 | 21 | %148 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 5.8. Çevirgeç faz-faz gerilimi
harmonik analizi (Kapasitif Kip–Dengeli Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|----------------------|-----|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| AB fazlararası değer | 100 | 0.1 | 13 | 18 | 12 | 1.5 | 0.6 | 7.3 | 0.2 | 6 | 2.5 | 0.7 | 3.3 | 3.3 | %27.5 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 5.9. Çevirgeç faz-faz gerilimi
harmonik analizi (Dengesiz Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|----------------------|-----|------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| AB fazlararası değer | 100 | 8 | 11 | 12 | 3.2 | 3.5 | 6.1 | 4 | 0.5 | 7.5 | 2.8 | 4.4 | 3.3 | 7 | %23.4 |
| BC fazlararası değer | 100 | 33 | 53 | 24 | 4.6 | 16 | 15 | 7 | 2.6 | 10 | 2.5 | 8.3 | 4.6 | 8.8 | %72.8 |
| CA fazlararası değer | 100 | 18.2 | 24 | 2 | 7 | 7 | 2.2 | 6.4 | 1.2 | 4.3 | 3.3 | 1.8 | 4.4 | 2.7 | %33.5 |
| IEEE Std. 519-1992 | | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 5.10, 5.11 ve 5.12’de verilen ortak bağlantı noktası faz-faz gerilimleri THB değerine göre, dengeli durumlarda tüm harmonik yüzdelerinin verilen standart limitlerin altında olduğu görülmektedir. Faz-faz harmonik bileşenleri ölçüm nedeniyle, 3.harmonik yüzdesinin limitlerin çok altında olduğu görülmektedir. Devre yapısında mevcut süzgeçlerden dolayı ortak toprak noktasındaki gerilim harmonik yüzdeleri ve THB miktarı limitlerin altındadır.

Çizelge 5.10. Ortak Bağlantı Noktası faz-faz gerilimi

harmonik analizi (Endüktif Kip–Dengeli Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| AB fazlararası değer | 100 | 0.1 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 0.3 | %0.6 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 5.11. Ortak Bağlantı Noktası faz-faz gerilim

harmonik analizi (kapasitif Kip –Dengeli Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|-----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| AB fazlararası değer) | 100 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | %0.53 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

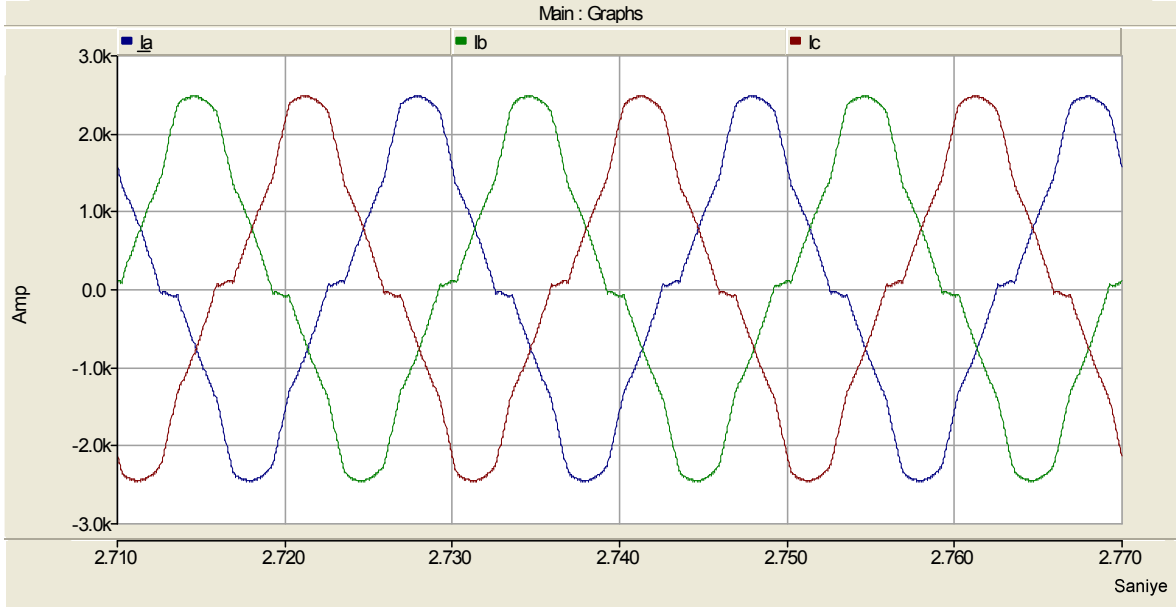
Çizelge 5.12. Ortak Bağlantı Noktası faz-faz gerilimi

harmonik analizi (Dengesiz Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| AB fazlararası değer | 100 | 1 | 1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | %1.5 |
| BC fazlararası değer | 100 | 2.2 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | %2.3 |
| CA fazlararası değer | 100 | 1.8 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | %1.8 |
| IEEE Std. 519-1992 | | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

5.1.6 Şebeke akımları (Devre I)

Bu bölümde, STATKOM'un tam endüktif/kapasitif ve dengesiz durumlarda şebekeye bastığı akımlar, akım harmonik bileşenleri yüzdeleri ve TTB miktarları verilmiştir.



Şekil 5.13. Şebeke akımları grafiği (Endüktif-Kip Dengeli Durum)

I_a : A fazı akımı, I_b : B fazı akımı, I_c : C fazı akımı

Çizelge 5.13, 5.14 ve 5.15'te STATKOM'un endüktif-kip dengeli durumda şebekeye bastığı akımın harmonik bileşenleri yüzdeleri ve TTB değerleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi 3.harmonik yüzdesi limitin üstündedir. Dolayısıyla TTB miktarı verilen standart değerlere göre büyüktür.

Çizelge 5.13. A fazı akım harmonik analizi

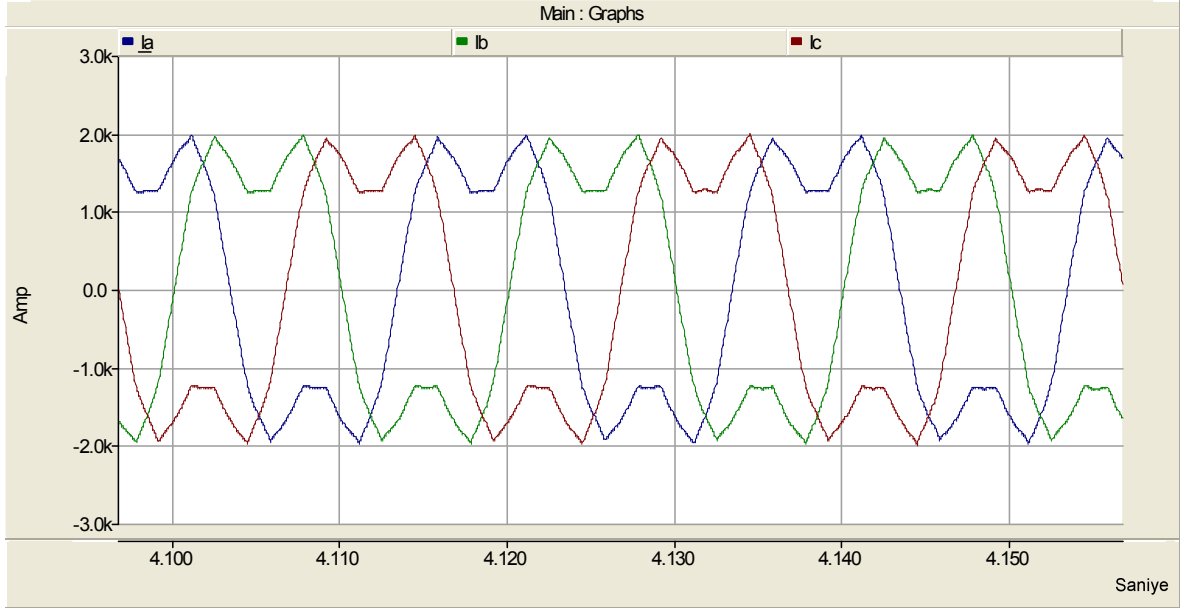
| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| Yüzdesi (%) | 100 | 17.4 | 0.8 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.4 | 0.1 | 0.3 | %17.4 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |

Çizelge 5.14. B fazı akım harmonik analizi

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| Yüzdesi (%) | 100 | 17.4 | 0.8 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.4 | 0.1 | 0.3 | %17.4 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |

Çizelge 5.15. C fazı akım harmonik analizi

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| Yüzdesi (%) | 100 | 17.4 | 0.8 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.4 | 0.1 | 0.3 | %17.4 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |



Şekil 5.14. Şebeke akımları grafiği (Kapasitif-Kip Dengeli Durum)

Çizelge 5.16, 5.17 ve 5.18'de STATKOM'un kapasitif-kip dengeli durumda şebekeye bastığı akımın harmonik bileşenleri yüzdeleri ve TTB değerleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi 3.harmonik yüzdesi limitin üstündedir. Dolayısıyla TTB miktarı verilen standart değerlere göre büyüktür.

Çizelge 5.16. A fazı akım harmonik analizi

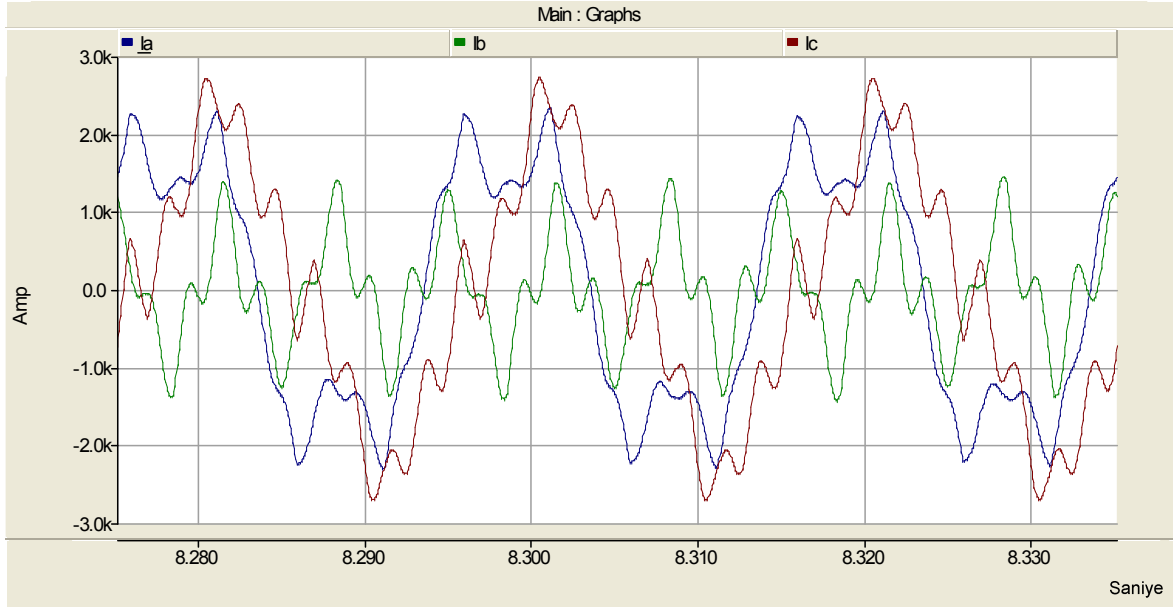
| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Yüzdesi (%) | 100 | 37 | 0.8 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.4 | 0.1 | 0.3 | %37 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |

Çizelge 5.17. B fazı akım harmonik analizi

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Yüzdesi (%) | 100 | 37 | 0.8 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.4 | 0.1 | 0.3 | %37 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |

Çizelge 5.18. C fazı akım harmonik analizi

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Yüzdesi (%) | 100 | 37 | 0.8 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.4 | 0.1 | 0.3 | %37 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |



Şekil 5.15. Şebeke akımları grafiği (Dengesiz Durum)

Çizelge 5.19, 5.20 ve 5.21’de STATKOM’un dengesiz durumda şebekeye bastığı akımın harmonik bileşenleri yüzdeleri ve TTB değerleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi dengesizlik miktarına göre bu durum için çoğu harmonik yüzdeleri limitin üstündedir. Dolayısıyla TTB miktarı verilen standart değerlere göre büyüktür.

Çizelge 5.19. A fazı akım harmonik analizi

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| Yüzdesi (%) | 100 | 36 | 5.1 | 4.6 | 2.9 | 0.7 | 0.2 | 0.6 | 0.1 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | %36.7 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |

Çizelge 5.20. B fazı akım harmonik analizi

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|------|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| Yüzdesi (%) | 100 | 1625 | 172 | 176 | 109 | 29 | 9.2 | 22 | 2.4 | 2.2 | 17 | 10 | 7.4 | 6.2 | %1648 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |

Çizelge 5.21. C fazı akım harmonik analizi

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Yüzdesi (%) | 100 | 17.4 | 5.8 | 4.3 | 2.7 | 0.7 | 0.2 | 0.4 | 0.2 | 0.2 | 0.4 | 0.4 | 0.3 | 0.3 | %19 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |

5.1.7 Şebeke akımları TTB Oranı (Devre I)

Çizelge 5.22. Şebeke akımları TTB Oranı (Dengeli Durum)

| Kullanılan STATKOM Topolojisi | Tam Endüktif Çalışma Sırasındaki TTB (%) | Tam Kapasitif Çalışma Sırasındaki TTB (%) |
|-------------------------------|--|---|
| Dört telli bağlı STATKOM | 17.5 | 37 |

Çizelge 5.22’de şebekede mevcut olan akım TTB miktarı dengeli iken IEEE standartlarına göre sınırı geçmiş durumdadır. Bunun nedeni, üretilen kare dalgadaki 3.harmonik miktarıdır. Yukarıda verilen akım harmonikleri analiz çizelgelerinde görüldüğü gibi dengeli durumlar için 5,7,11,13 ve 17.harmoniklerin standartların altında ve 3.harmoniğin verilen standart değerinden büyük bir rakam olduğu görülmektedir. Bu sorunu gidermek için STATKOM (Devre I) yapısında üçüncü harmonik süzgeci uygulanması öngörülür. Bu uygulama (Devre II)’de gerçekleştirilmiştir.

5.1.8 (Devre II) benzetim sonuçları

Bilgisayar modellemesi yapılmış olan dört telli bağlı STATKOM (Devre II) modeli ile dinamik çalışmalar yapılmıştır. Endüktif, kapasitif ve dengesiz çalışma durumlarında STATKOM’un verdiği tepkiler gözlemlenmiştir.

5.1.8.1 STATKOM modülasyon endeksi tepkisi

Şekil 5.16’da STATKOM’un dengeli durumlar için geçiş tepkileri, (Devre I) benzetim sonuçları ile aynı olmaktadır ve modülasyon endeksi, $0 < m < 1$ arasında değişmektedir. Ancak dengesiz durum için geçiş tepkileri aynı değildir. Dengesiz durumlarda üçüncü harmonik akımı oranı diğer harmonik bileşenlerine göre daha fazladır ve üçüncü harmonik süzgeci, akımın büyük bir kısmının devreden geçmesini engellemiştir. Bu nedenle seçilen reaktif güce karşılık gelen

modülasyon endeksi bulunmamıştır. Dolayısıyla reaktif güç kopanzasyonu başarılmamıştır.



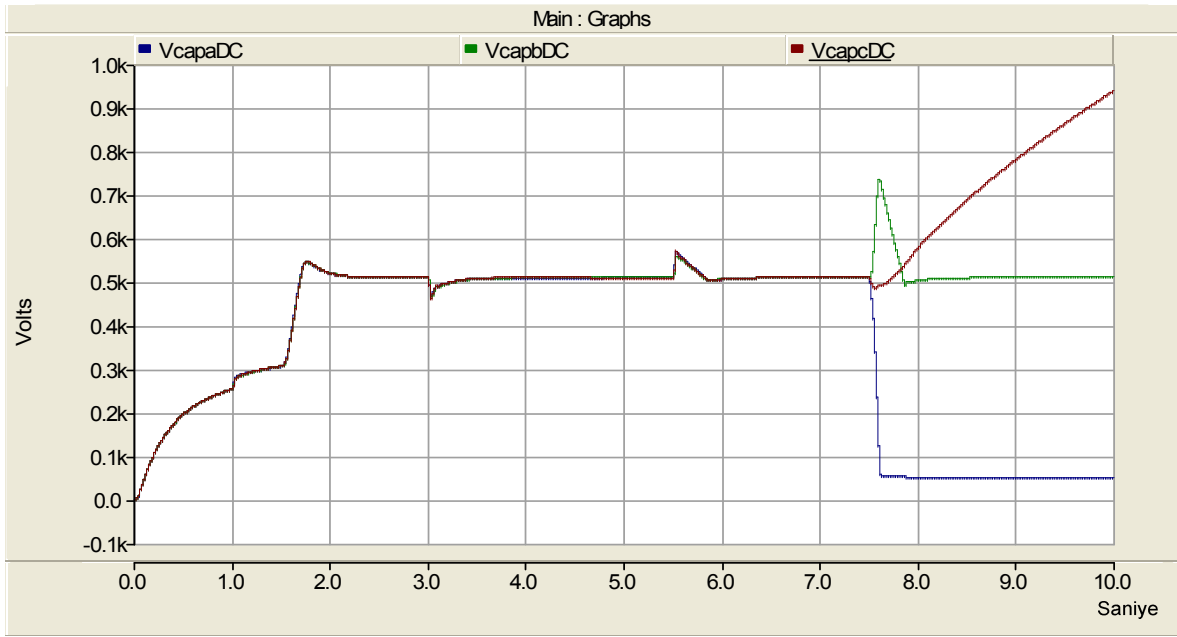
Şekil 5.16. STATKOM modülasyon endeksi grafiği
(Dengeli ve Dengesiz Durumlarda)

m_a : A fazı modülasyon endeksi, m_b : B fazı modülasyon endeksi, m_c : C fazı modülasyon endeksi

5.1.8.2 DA bağ gerilimi ve alfa açıları tepkisi

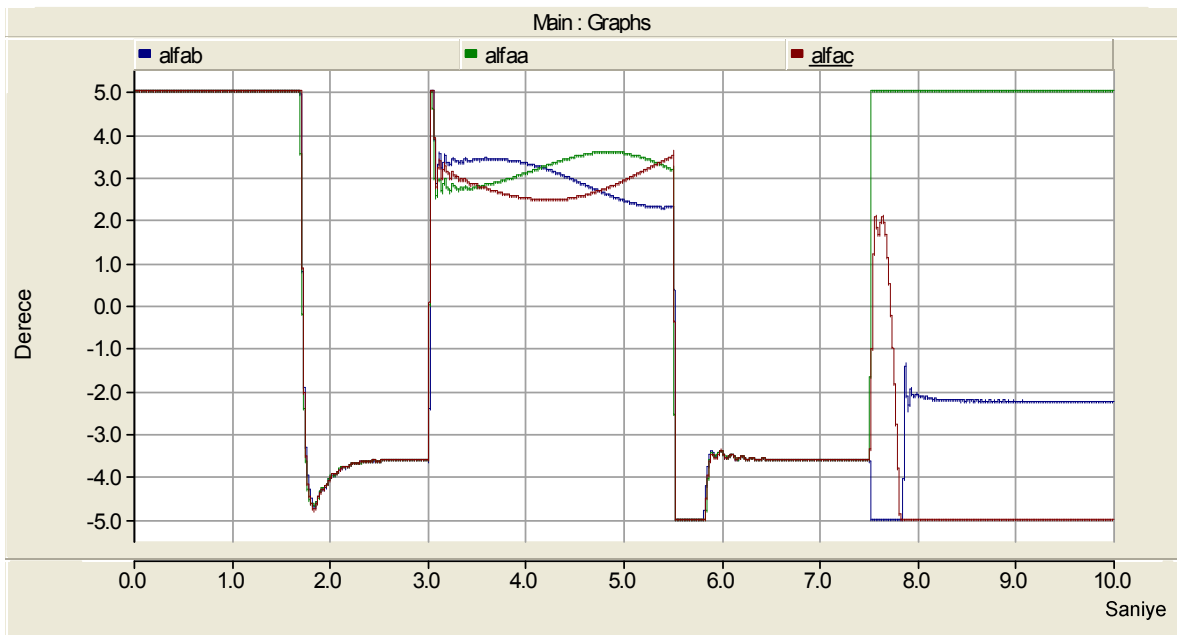
Şekil 5.17'de (0-1.5) saniye arası kapasitör şarj süresi ve STATKOM'un reaktif güç değişimi sırasındaki DA bağ gerilimi değişimi gösterilmektedir. Yapılan benzetim çalışmasında Kondansatör gerilimi 510 Voltta tutulmaktadır. Bu çalışmada dengeli durumlar için aynı (Devre I)'de verildiği gibi hiçbir geçici rejim olayı yoktur. Ancak dengesiz durum için üçüncü harmonik süzgeçten dolayı güç değişimi anındaki geçişler yapılmamış ve geçici rejim olayı olmuştur. Dolayısıyla kondansatör gerilim değerleri istenilen değerde tutulamamıştır.

Şekil 5.18'da dengeli durumlarda DA bağ gerilimi kapasitörünün aktif güç talebine karşılık gelen alfa açısının limitler arasında olduğu, ancak dengesiz durumlarda limitlere dayandığı gösterilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi $-3.5^{\circ} < \alpha < 3.5^{\circ}$ aralığında değişmekte, ancak STATKOM'un güç değişimi sırasında geçici olarak limitlere dayanmaktadır.



Şekil 5.17. DC link (DA bağ gerilimi) tepki grafiği

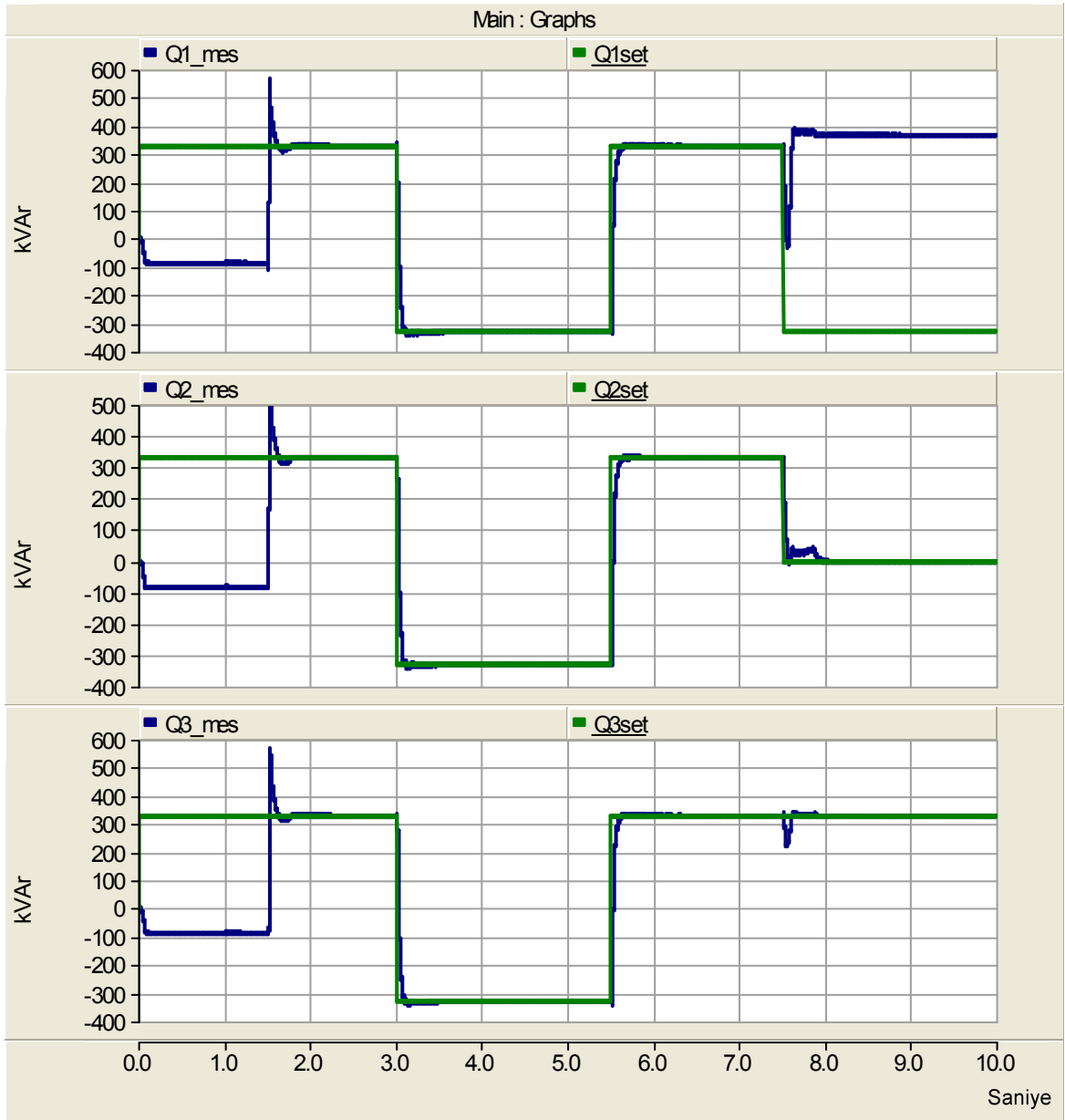
$VcapaDC$: A fazı DA bağ gerilimi, $VcapbDC$: B fazı DA bağ gerilimi, $VcapcDC$: C fazı DA bağ gerilimi



Şekil 5.18. STATKOM ve şebeke gerilimleri arasındaki afa açılı değişimi grafiği

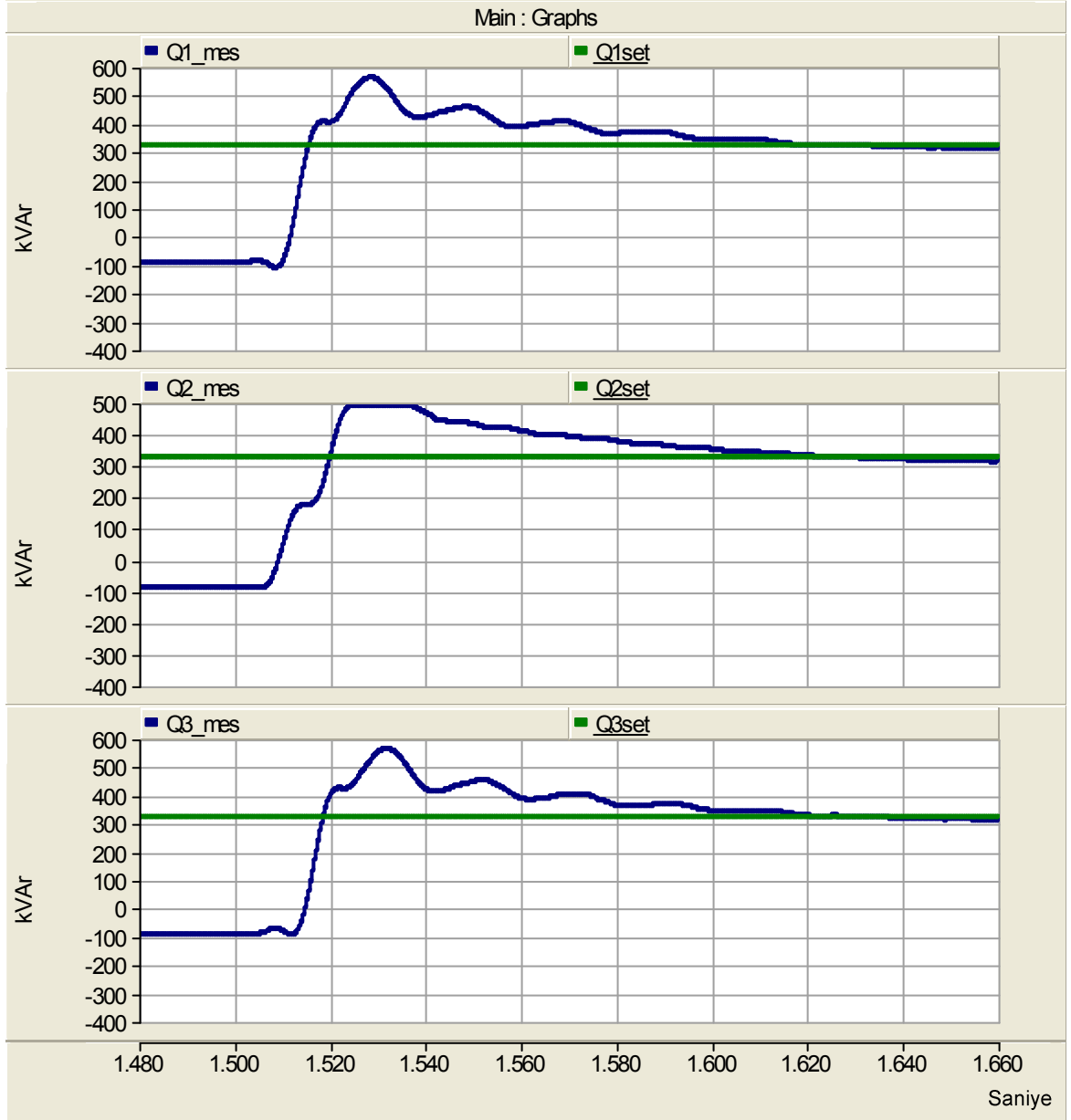
5.1.8.3 STATKOM çalışma kipi değişimleri (Dengeli ve Dengesiz Durumlar)

Şekil 5.19'da STATKOM'un reaktif güç tepkileri çeşitli durumlar için gösterilmiştir. Burada STATKOM endüktif kip dengeli ($Q_1 = Q_2 = Q_3 = 330 \text{ kVAr}$), kapasitif kip dengeli durum ($Q_1 = Q_2 = Q_3 = -330 \text{ kVAr}$), ve dengesiz ($Q_1 = -330 \text{ kVAr}$, $Q_2 = 0.0 \text{ kVAr}$, $Q_3 = 330 \text{ kVAr}$) durumda çalıştırılmış ve STATKOM tepki süreleri incelenmiştir.



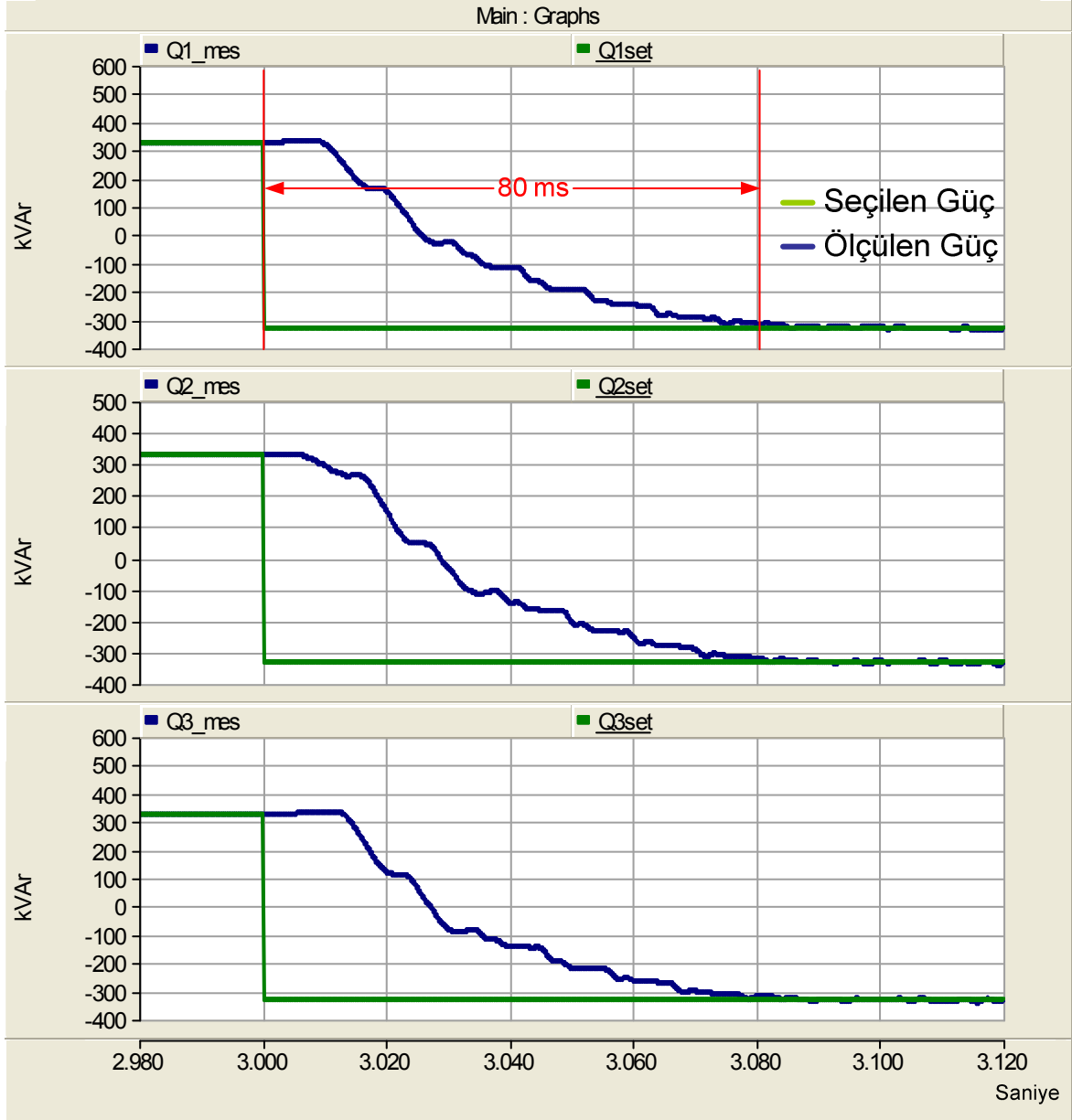
Şekil 5.19. STATKOM Reaktif Güç Değişimi Tepkisi
(Dengeli ve Dengesiz Durumlar)

Şekil 5.20'de STATKOM'un seçilen dengeli endüktif güce göre tepki süresi gösterilmiştir. Görüldüğü gibi STATKOM ilk güç değişimi geçiş süresi yaklaşık $t_s = 100$ ms'dir.



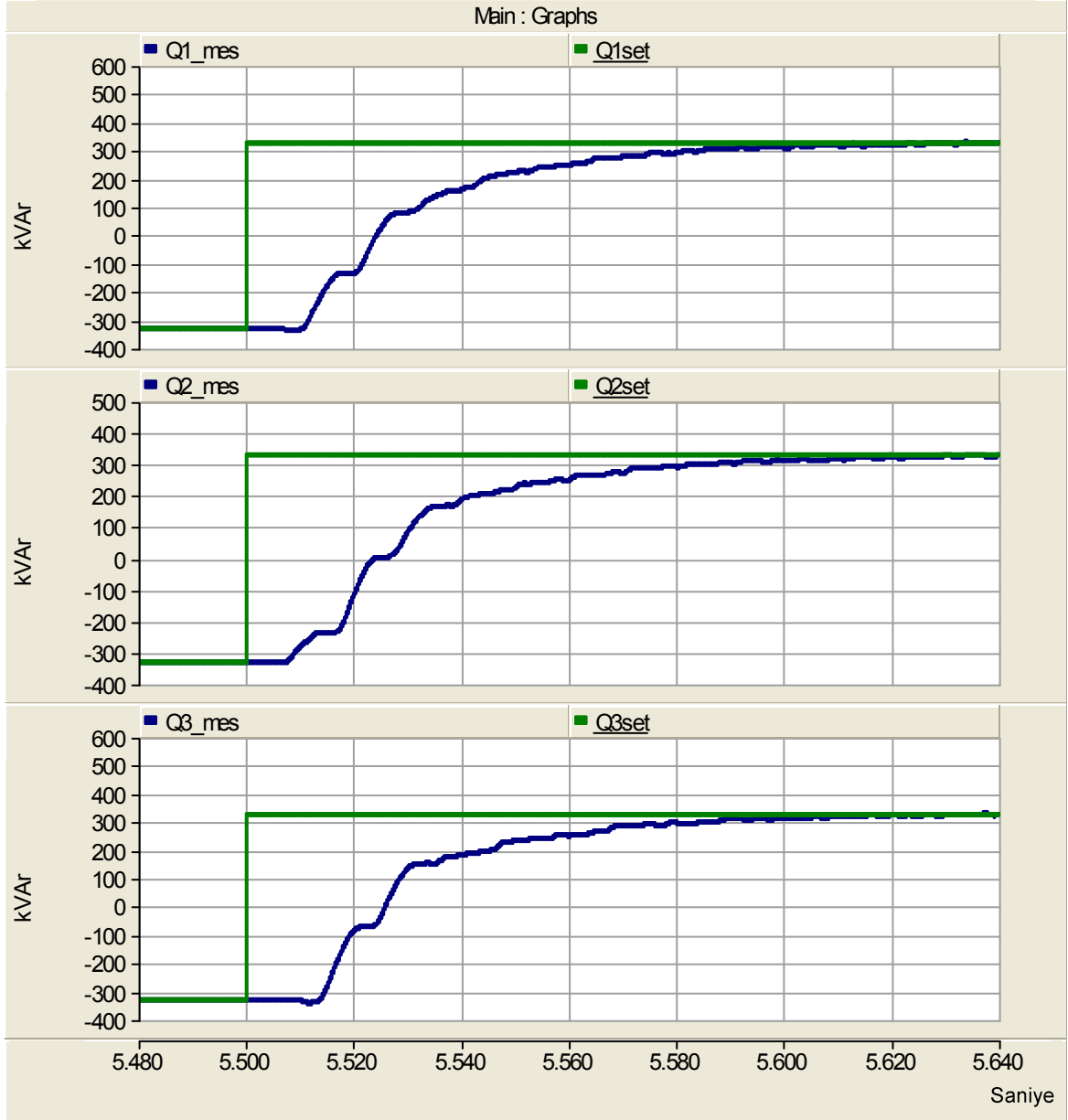
Şekil 5.20. STATKOM çalışma kipi değişimleri (Endüktif-Kip Dengeli Durum)

Şekil 5.21'de STATKOM'un seçilen dengeli kapasitif güce göre tepkime süresi gösterilmiştir. Verilen durum için STATKOM güç değişimi geçiş süresi yaklaşık $t_s = 80$ ms'dir.



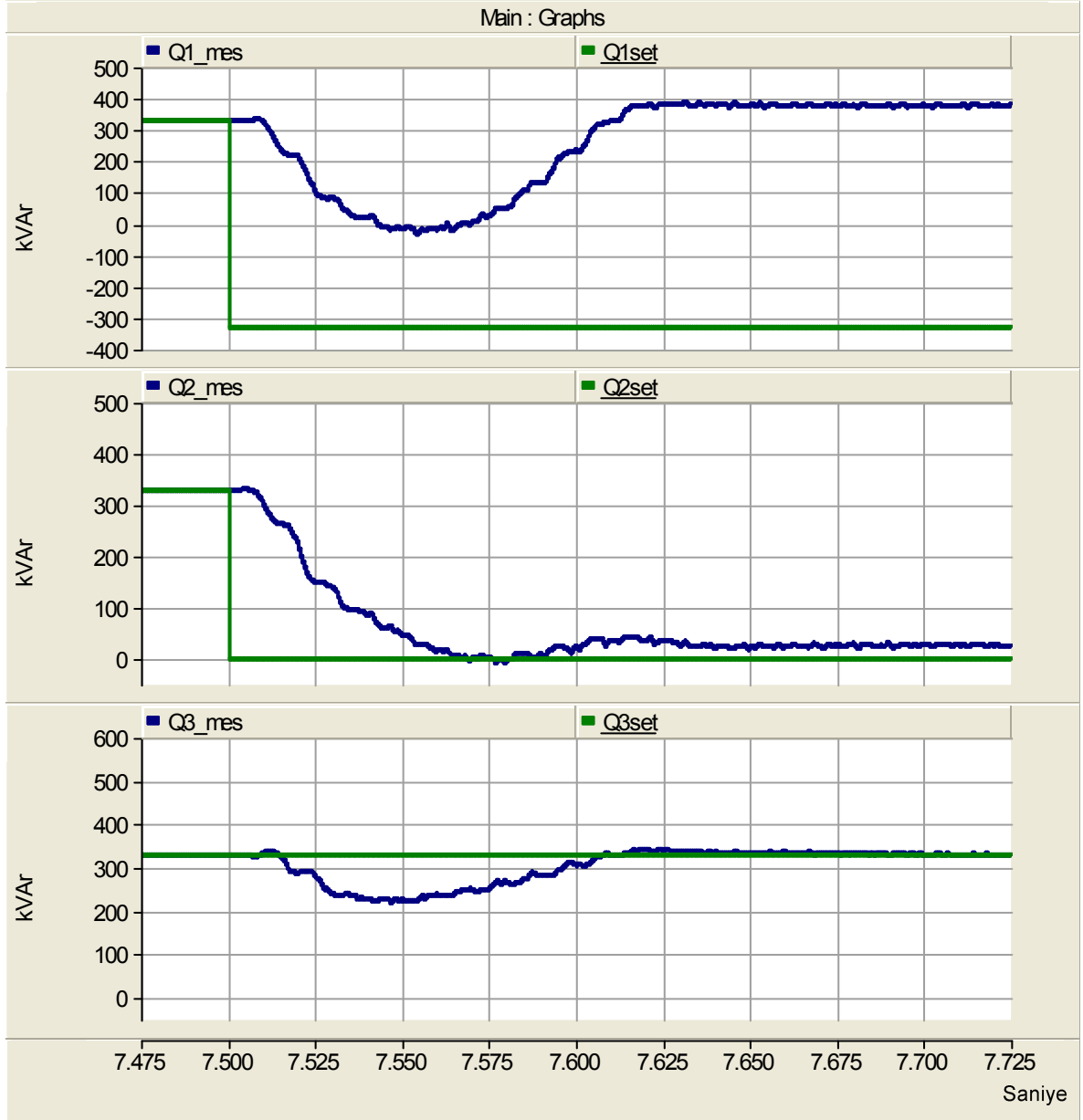
Şekil 5.21. STATKOM çalışma kipi değişimleri
(Kapasitif-Kip Dengeli Durum)

Şekil 5.22'te STATKOM'un seçilen dengeli endüktif güce göre tepkime süresi gösterilmiştir. Verilen durum için STATKOM güç değişimi geçiş süresi yaklaşık $t_s = 80$ ms'dir.



Şekil 5.22. STATKOM çalışma kipi değişimleri
(Endüktif-Kip Dengeli Durum)

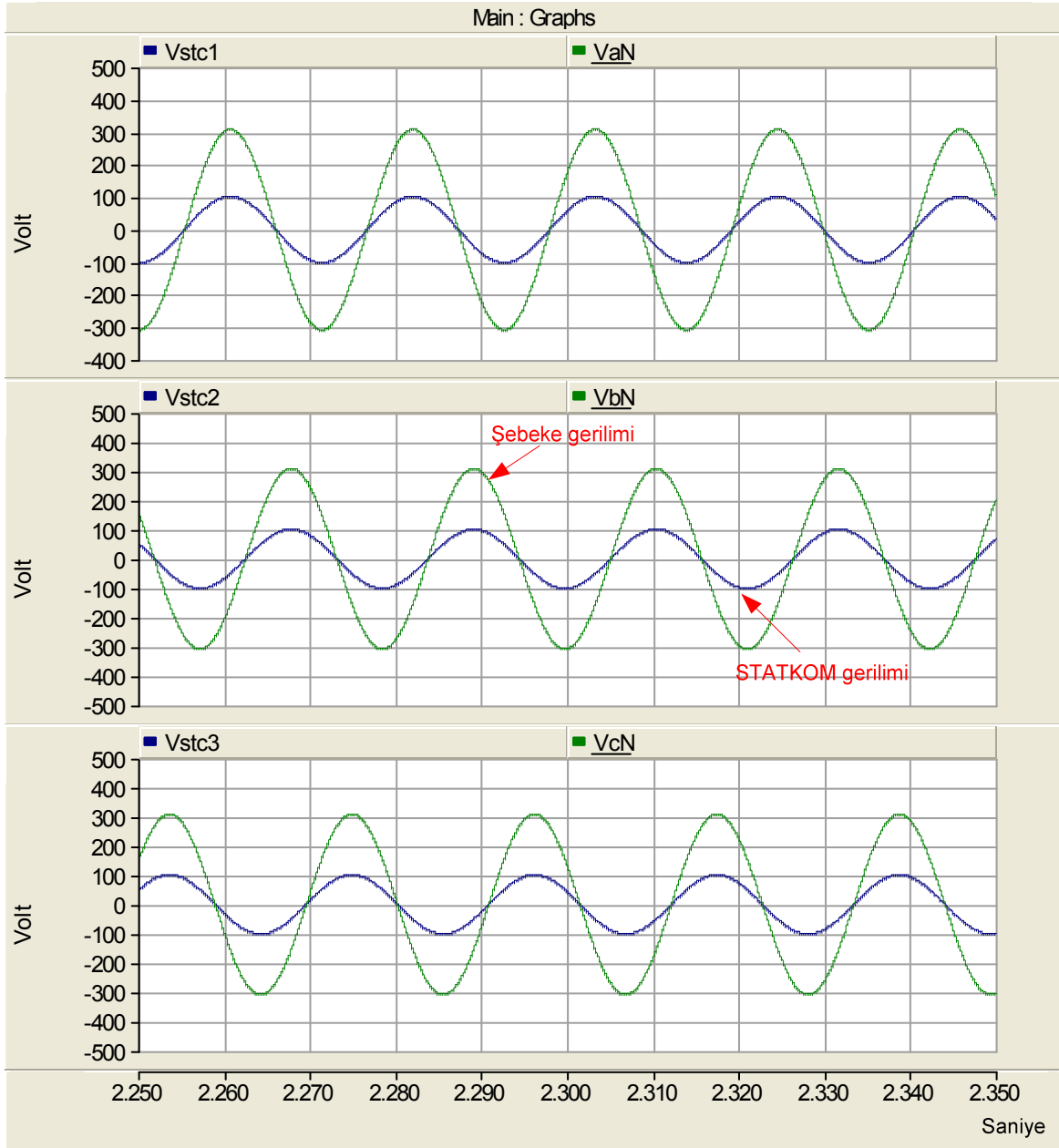
Şekil 5.23'te STATKOM'un dengesiz güce göre tepki süresi gösterilmiştir. Dengesiz durumda şebeke akımında üçüncü harmonik çok fazladır. Sonuçta STATKOM Devre-II'de üçüncü harmonik süzgeci bu akımın çoğu kısmının nötür iletken bağlantısından akmasını engellemektedir. Bu nedenle dengesiz durumda seçilen güç değişimi yapılmamıştır.



Şekil 5.23. STATKOM çalışma kipi değişimleri (Dengesiz Durum)

5.1.8.4 STATKOM ve şebeke çıkış gerilimleri (Dengeli ve Dengesiz Durumlar)

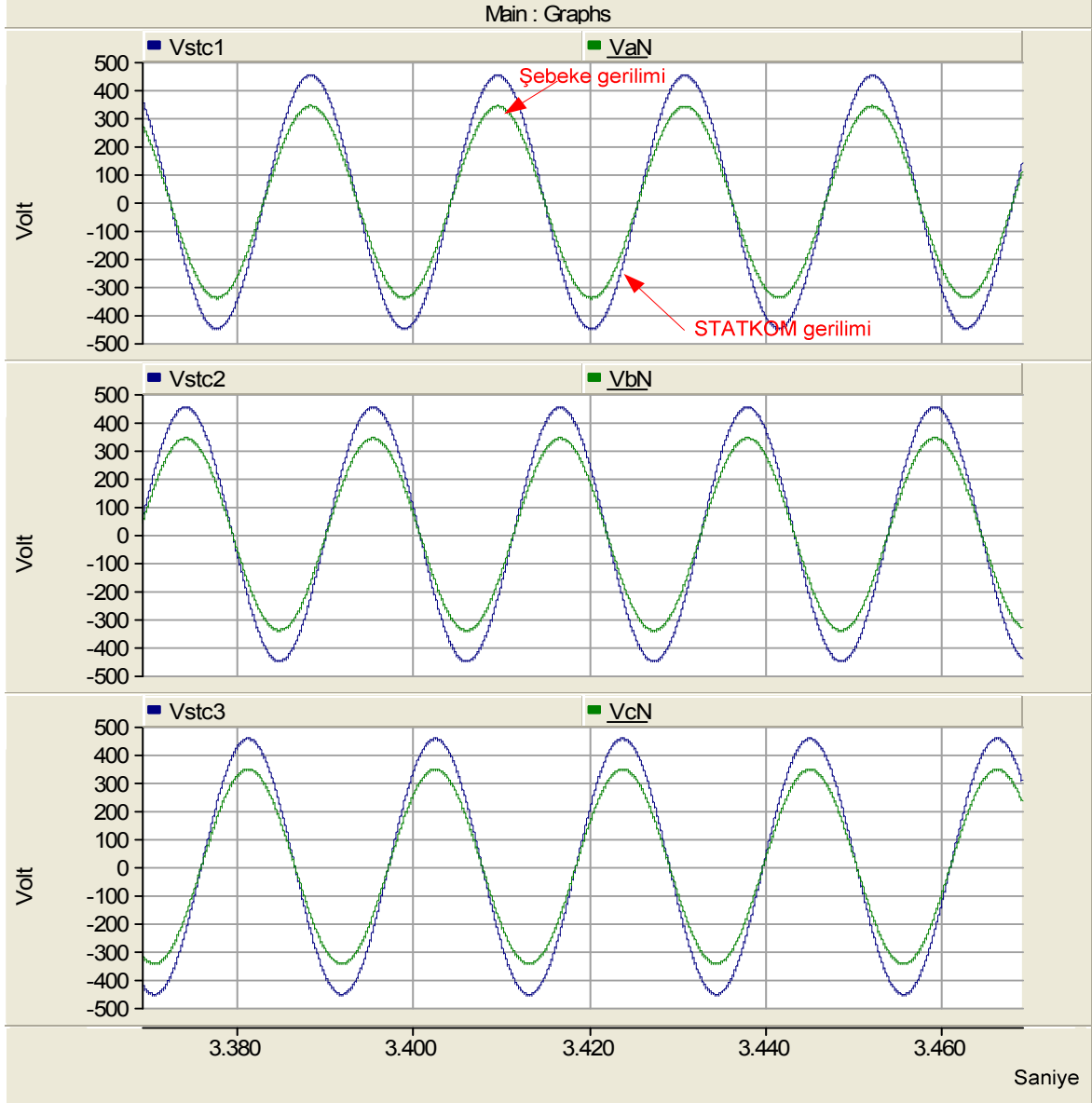
Şekil 5.24'te görüldüğü gibi STATKOM'un her üç fazı dengelidir. STATKOM endüktif kipte çalıştığı için STATKOM geriliminin tepe değerleri, şebeke gerilimleri tepe değerine göre küçüktür.



Şekil 5.24. Şebeke ve STATKOM ana bileşeni gerilimleri grafiği (Endüktif-Kip Dengeli Durum)

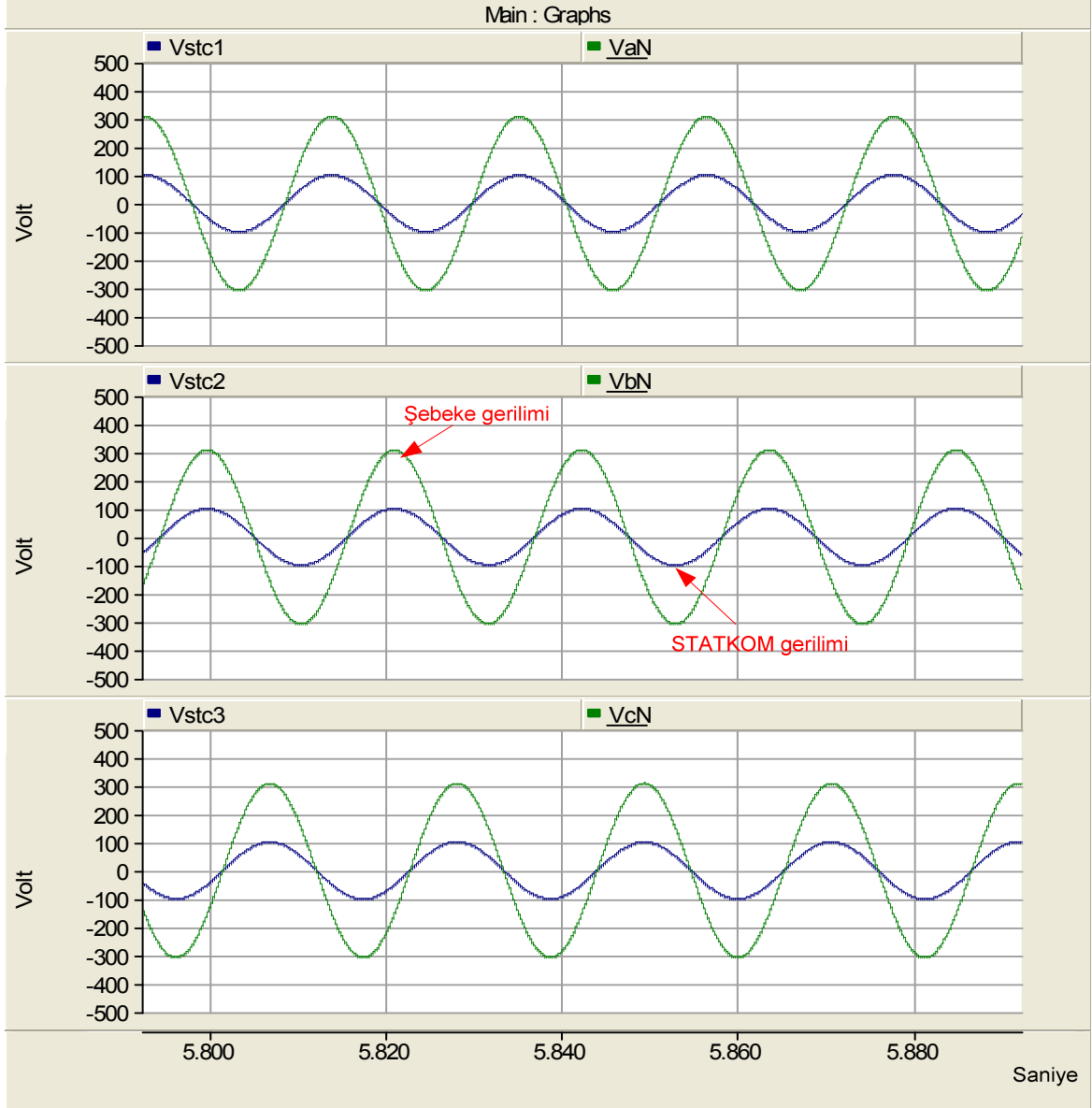
V_{stc1} : A fazına bağlı STATKOM'un ana bileşen gerilimi, V_{stc2} : B fazına bağlı STATKOM'un ana bileşen gerilimi, V_{stc3} : C fazına bağlı STATKOM'un ana bileşen gerilimi

Şekil 5.25'te gösterildiği gibi STATKOM'un her üç fazi dengelidir. STATKOM kapasitif kipte çalıştığı için STATKOM geriliminin tepe değerleri, şebeke gerilimleri tepe değerine göre büyüktür.



Şekil 5.25. Şebeke ve STATKOM ana bileşeni gerilimleri grafiği
(Kapasitif-Kip Dengeli Durum)

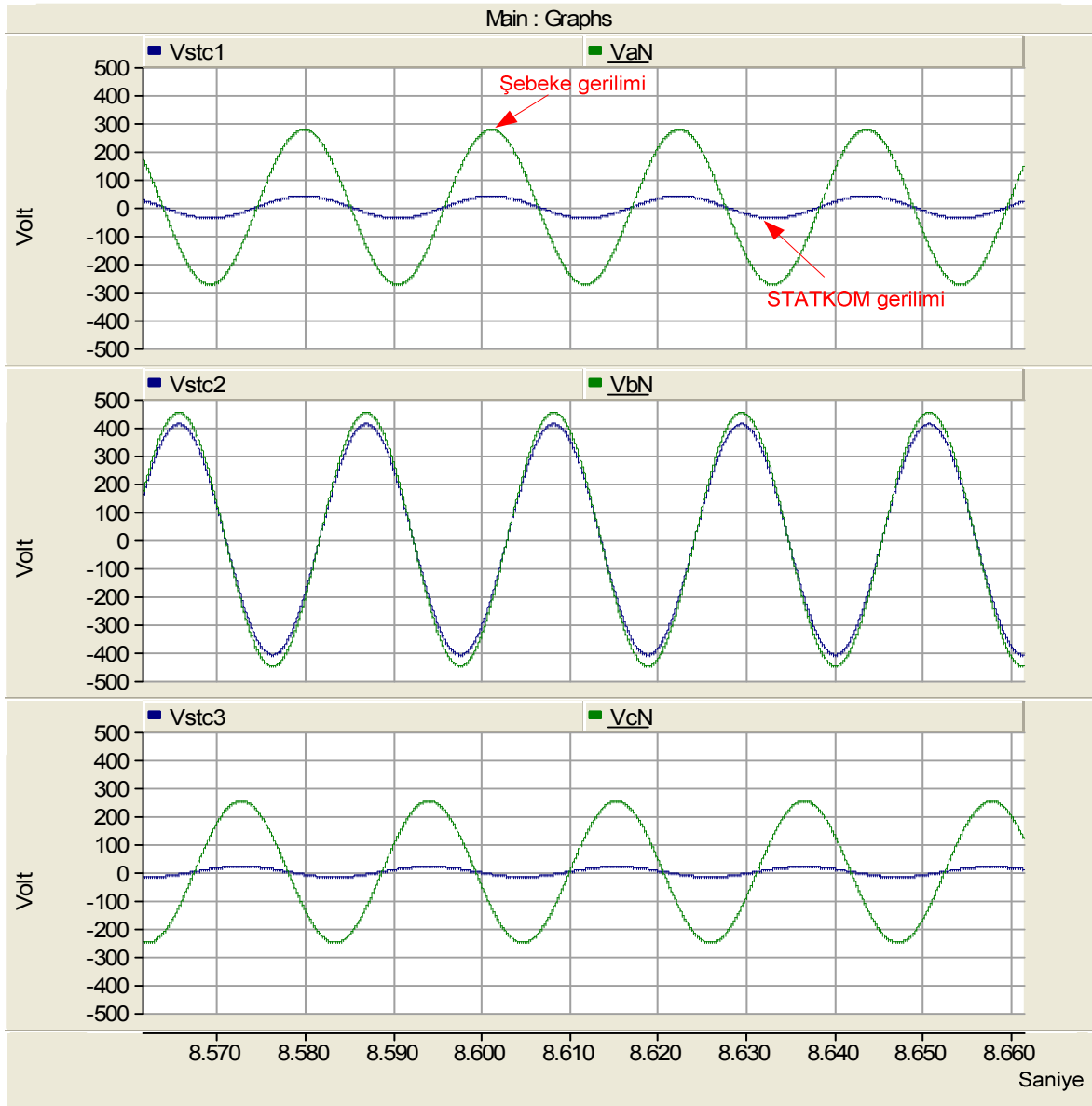
Şekil 5.26'da görüldüğü gibi STATKOM'un her üç fazı dengelidir. STATKOM endüktif kipte çalıştığı için STATKOM gerilimi tepe değerleri, şebeke gerilimleri tepe değerine göre küçüktür.



Şekil 5.26. Şebeke ve STATKOM ana bileşeni gerilimleri grafiği (Endüktif-Kip Dengeli Durum)

Şekil 5.27’de görüldüğü gibi üç farklı durum görülmektedir.

- 1) A fazında bağlı STATKOM gerilimi tepe değeri şebeke gerilimi tepe değerine göre küçüktür. Dolayısıyla bu faza bağlı STATKOM endüktif kipte çalışmaktadır.
- 2) B fazında reaktif güç sıfırdır. Ancak şebeke ve STATKOM arasında mevcut olan reaktörden dolayı reaktif güç tüketimi vardır. Bu nedenle STATKOM gerilimi tepe değeri şebeke gerilimi tepe değerine göre küçüktür. Dolayısıyla bu faza bağlı STATKOM endüktif kipte çalışmaktadır.
- 3) C fazında STATKOM gerilimi tepe değeri şebeke gerilimi tepe değerine göre küçüktür. Dolayısıyla bu faza bağlı STATKOM endüktif kipte çalışmaktadır.



Şekil 5.27. Şebeke ve STATKOM ana bileşeni gerilimleri grafiği (Dengesiz Durum)

5.1.8.5 (Devre II) Gerilim harmonikleri analizi

Çizelge 5.23, 5.24 ve 5.25'te verilen çevirgeç faz-nötür gerilimi harmonik yüzdelerine göre, dengeli ve dengesiz durumlarda gerilim harmonik yüzdeleri ve gerilim THB değerlerinin standart limitlerin üstünde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni STATKOM'un ürettiği kare dalgadaki tek harmonik bileşenleri oranının fazla olmasıdır.

Çizelge 5.23. Çevirgeç faz-nötür gerilimi
harmonik analizi (Endüktif Kip-Dengeli Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|--------------------|-----|----|----|----|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|------|
| A fazı Yüzdesi (%) | 100 | 96 | 90 | 81 | 57 | 44 | 18 | 6.7 | 4 | 11 | 17 | 22 | 26 | 32 | %179 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 5.24. Çevirgeç faz-nötür gerilimi
harmonik analizi (Kapasitif Kip-Dengeli Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|--------------------|-----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| A fazı Yüzdesi (%) | 100 | 39 | 17 | 17 | 12 | 4.2 | 2.3 | 7.3 | 1.3 | 6.2 | 1.4 | 5.4 | 2.5 | 4.8 | %49 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 5.25. Çevirgeç faz-nötür gerilimi
harmonik analizi (Dengesiz Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|--------------------|-----|-----|------|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| A fazı Yüzdesi (%) | 100 | 159 | 105 | 60 | 24 | 14 | 2.7 | 5.2 | 10 | 13 | 15 | 16 | 20 | 25 | %206 |
| B fazı Yüzdesi (%) | 100 | 47 | 7.4 | 22 | 13 | 7 | 8 | 2.2 | 7.4 | 0.1 | 6.2 | 3.1 | 5.4 | 5.4 | %56 |
| C fazı Yüzdesi (%) | 100 | 64 | 62.5 | 58 | 58 | 56 | 58 | 60 | 60 | 60 | 60 | 57 | 54 | 54 | %211 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | -- | - | %8 |

Çizelge 5.26, 5.27 ve 5.28’de verilen ortak bağlantı noktası faz-nötür gerilimi harmoniği yüzdelere göre, endüktif-kip dengeli durumda gerilim harmonik yüzdelерinin limitlerin altında olduğu, ancak ölçümler nötür noktasından olduğu için 3.harmonik bileşeni yüzdesinin limitin üstünde olduğu görülür. Kapasitif-kip dengeli durum için de aynı durum vardır, ancak 11.harmonik yüzdesi limitin üstündedir. Her iki durum için THB miktarı limitlerin üstündedir. Dengesiz durum için yapılan gerilim harmonik analizinde görüldüğü gibi dengesizlikten dolayı hem 3.harmonik, hem 5,7,11,13,17.harmonik yüzdeleri limitleri geçmiştir. Dolayısıyla THB miktarları da limitlerin üstünde görülmektedir.

Çizelge 5.26. Ortak Bağlantı Noktası faz-nötür gerilimleri
harmonik analizi (Endüktif-Kip dengeli Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|--------------------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| Yüzdesi (%) | 100 | 31.5 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 0.3 | 0.3 | %31.7 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 5.27. Ortak Bağlantı Noktası faz-nötür gerilimleri
harmonik analizi (Kapasitif-Kip dengeli Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|--------------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| Yüzdesi (%) | 100 | 50 | 0.1 | 0.9 | 6.2 | 1.7 | 0.3 | 0.3 | 0.1 | 0.3 | 0.1 | 0.5 | 0.1 | 0.2 | %50.4 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 5.28. Ortak Bağlantı Noktası faz-nötür gerilimleri
harmonik analizi (Dengesiz Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|--------------------|-----|------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| A fazı Yüzdesi (%) | 100 | 14 | 11 | 20 | 35 | 7.6 | 2.6 | 0.8 | 1.2 | 0.2 | 0.4 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | %45 |
| B fazı Yüzdesi (%) | 100 | 14.5 | 6.4 | 12 | 20 | 5 | 1.6 | 0.5 | 0.6 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | %30 |
| C fazı Yüzdesi (%) | 100 | 18 | 11 | 22 | 38 | 8.4 | 2.8 | 0.7 | 1.2 | 0.1 | 0.5 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | %49.5 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | -- | - | %8 |

Çizelge 5.29, 5.30 ve 5.31’de verilen çevirgeç faz-faz gerilimi harmonik yüzdelerine göre, endüktif-kip dengeli durumda ölçümler faz-faz noktalarından alındığı için 3. harmonik yüzdeleri düşüktür. Bu durum için sadece 3 ve 21.harmonik yüzdeleri limitin altındadır. Diğer harmonik yüzdeleri gerilim kare dalga şeklinde olduğu için limit değerini geçmiştir. Kapasitif-kip dengeli durum için aynı şekilde sadece 3,21 ve 25.harmonik yüzdeleri limitin altındadır. Diğer yüzdeler limitin üstünde görülmektedir. Dengesizlik miktarına göre, bu durum için tüm harmonik yüzdeleri limitin üstünde görülmektedir.

Çizelge 5.29. Çevirgeç faz-faz gerilim
harmonik analizi (Endüktif-Kip dengeli Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|----------------------|-----|-----|----|----|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|------|
| AB fazlararası değer | 100 | 0.5 | 90 | 81 | 57 | 45 | 18 | 6.4 | 0.3 | 12 | 17 | 2.1 | 27 | 21 | %147 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 5.30. Çevirgeç faz-faz gerilim
harmonik analizi (Kapasitif-Kip dengeli Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|----------------------|-----|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-------|
| AB fazlararası değer | 100 | 1.3 | 17 | 18 | 12 | 3.7 | 2.2 | 8 | 0.4 | 7 | 0.4 | 1.8 | 2.4 | 5 | %30.5 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 5.31. Çevirgeç faz-faz gerilim
harmonik analizi (Dengesiz Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|----------------------|-----|----|-----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| AB fazlararası değer | 100 | 63 | 5.5 | 21 | 11 | 6 | 8.3 | 2 | 6.6 | 1.2 | 6 | 1.9 | 7.3 | 6.8 | %70 |
| BC fazlararası değer | 100 | 42 | 5.4 | 21 | 15 | 7 | 5.2 | 2.7 | 6.1 | 3.6 | 8.2 | 4.2 | 7 | 3 | %52 |
| CA fazlararası değer | 100 | 40 | 75 | 24 | 38 | 26 | 23 | 19 | 16 | 27 | 32 | 21 | 7 | 32 | %119 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | -- | - | %8 |

Çizelge 6.32, 5.33 ve 5.34'te verilen ortak bağlantı noktası faz-faz gerilimi harmonik yüzdelerine göre, tüm durumlar için ortak bağlantı noktasındaki süzgeçlerden dolayı ve ölçüm faz-faz olduğu için, hem 3.harmonik, hem de diğer gerilim harmonik yüzdeleri limitin altında görülmektedir.

Çizelge 5.32. Ortak Bağlantı Noktası faz-faz gerilimi
harmonik analizi (Endüktif-Kip dengeli Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| AB fazlararası değer | 100 | 0.1 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.3 | 0.3 | %0.62 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 5.33. Ortak Bağlantı Noktası faz-faz gerilimi
harmonik analizi (Kapasitif-Kip dengeli Durum)

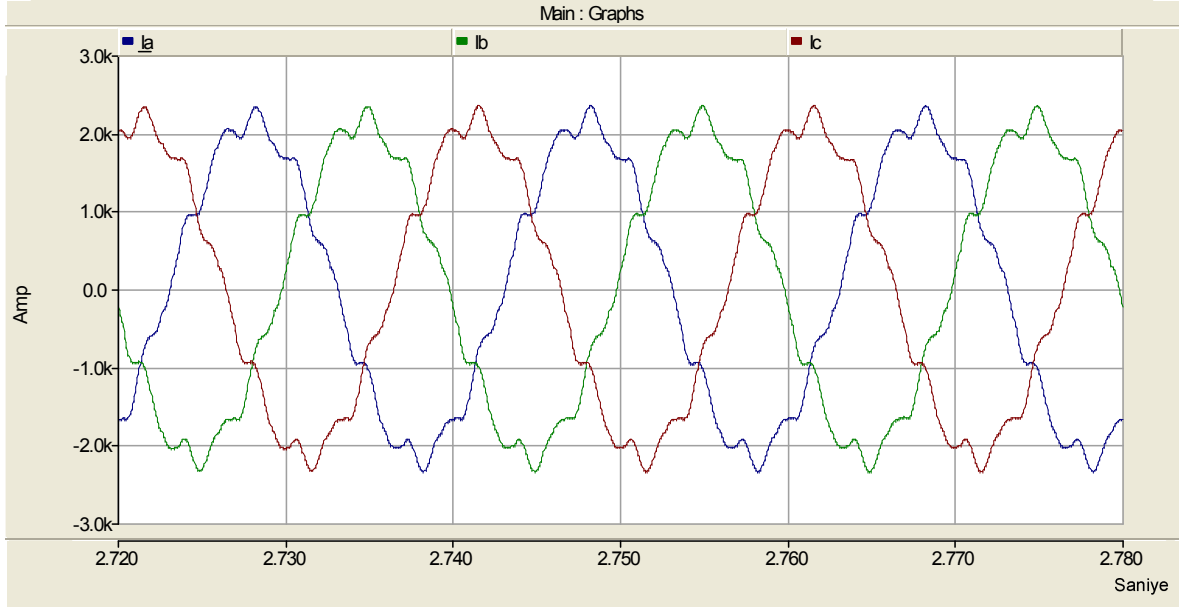
| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| AB fazlararası değer | 100 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | %0.5 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 5.34. Ortak Bağlantı Noktası faz-faz gerilimi
harmonik analizi (Dengesiz Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| AB fazlararası değer | 100 | 5 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | %5 |
| BC fazlararası değer | 100 | 3.5 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | %3.5 |
| CA fazlararası değer | 100 | 1.6 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | %1.6 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | -- | - | %8 |

5.1.8.6 Şebeke akımları (Devre II)

Bu bölümde, STATKOM'un tam endüktif/kapasitif ve dengesiz durumlarda şebekeye bastığı akımlar, akım harmonik bileşenleri yüzdeleri ve TTB miktarları verilmiştir.



Şekil 5.28. Şebeke akımları grafiği (Endüktif-Kip Dengeli Durum)

I_a : A fazı akımı, I_b : B fazı akımı, I_c : C fazı akımı

Çizelge 5.35, 5.36 ve 5.37'de STATKOM'un endüktif-kip dengeli durumda şebekeye bastığı akımın harmonik bileşenleri yüzdeleri ve TTB değerleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi 3.harmonik yüzdesi, kullanılan süzgeçten dolayı limitin altındadır. Dolayısıyla bu durum için TTB miktarı verilen standart değerlere göre küçüktür.

Çizelge 5.35. A fazı akım harmonik analizi

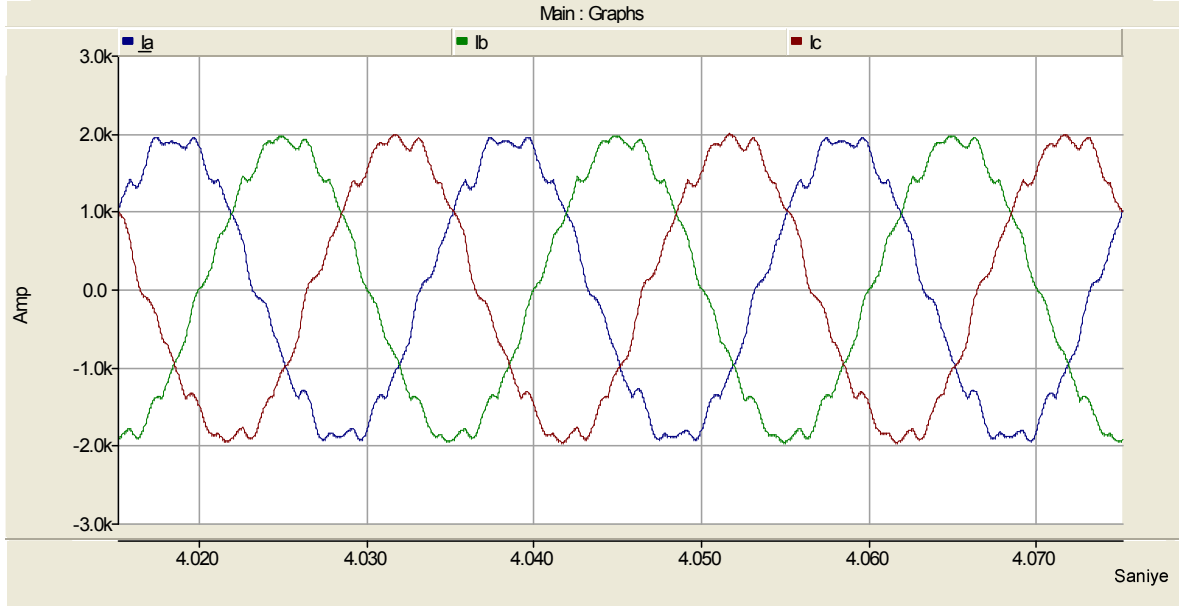
| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Yüzdesi (%) | 100 | 0.7 | 1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.5 | 0.1 | 0.2 | %1.3 |
| IEEE Std. 519-1992 | | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |

Çizelge 5.36. B fazı akım harmonik analizi

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Yüzdesi (%) | 100 | 0.7 | 1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.5 | 0.1 | 0.2 | %1.3 |
| IEEE Std. 519-1992 | | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |

Çizelge 5.37. C fazı akım harmonik analizi

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 0.7 | 1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.5 | 0.1 | 0.2 | %1.3 |
| IEEE Std. 519-1992 | | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |



Şekil 5.29. Şebeke akımları grafiği (Kapasitif-Kip Dengeli Durum)

I_a : A fazı akımı, I_b : B fazı akımı, I_c : C fazı akımı

Çizelge 5.38, 5.39 ve 5.40'ta STATKOM'un Kapasitif-Kip Dengeli Durumda şebekeye batığı akımın harmonik bileşenleri yüzdeleri ve TTB değerleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi 3.harmonik yüzdesi kullanılan süzgeçten dolayı limitin altındadır. Dolayısıyla bu durum için TTB miktarı verilen standart değerlere göre küçüktür.

Çizelge 5.38. A fazı akım harmonik analizi

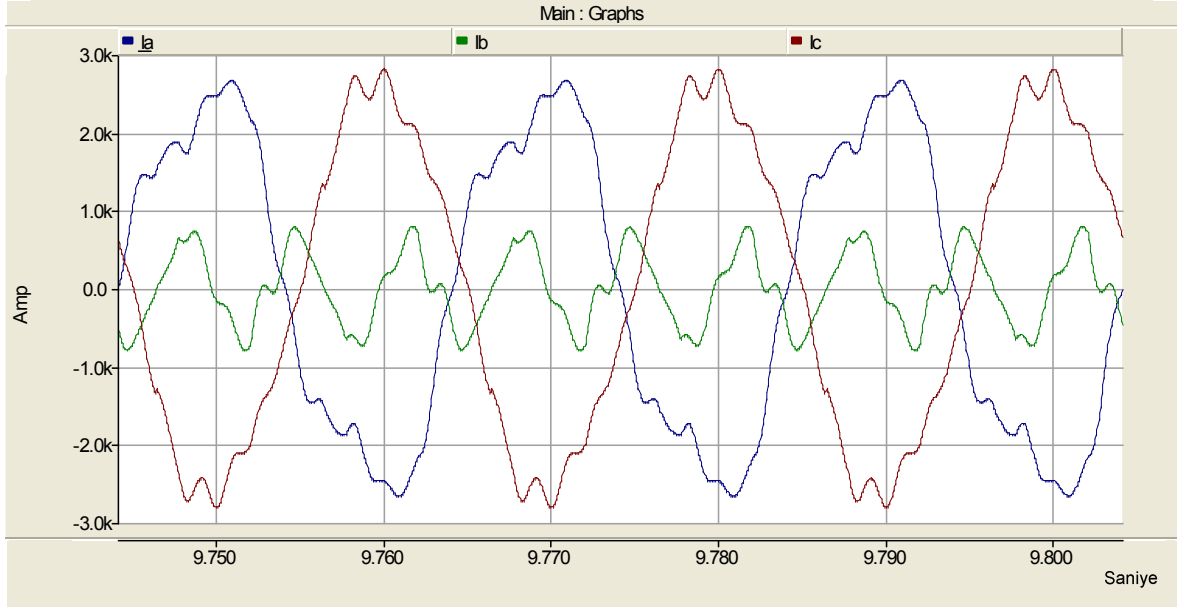
| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Yüzdesi (%) | 100 | 0.3 | 0.7 | 0 | 1.4 | 0.4 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.5 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | %1.7 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |

Çizelge 5.39. B fazı akım harmonik analizi

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Yüzdesi (%) | 100 | 0.3 | 0.7 | 0.1 | 1.4 | 0.4 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.5 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | %1.7 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |

Çizelge 5.40. C fazı akım harmonik analizi

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Yüzdesi (%) | 100 | 0.3 | 0.7 | 0 | 1.4 | 0.4 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.5 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | %1.7 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |



Şekil 6.30. Şebeke akımları grafiği (Dengesiz Durum)

I_a : A fazı akımı, I_b : B fazı akımı, I_c : C fazı akımı

Çizelge 5.41, 5.42 ve 5.43'te STATKOM'un dengesiz durumda şebekeye bastığı akımın harmonik bileşenleri yüzdeleri ve TTB değerleri verilmiştir. Görüldüğü gibi dengesizlik miktarına göre bu durum için çoğu harmonik yüzdeleri limitin üstündedir. Dolayısıyla TTB miktarı verilen standart değerlere göre büyüktür.

Çizelge 5.41. A fazı akım harmonik analizi

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| Yüzdesi (%) | 100 | 18 | 0.3 | 1.3 | 4.4 | 1.2 | 0.6 | 0.1 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | %18.6 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |

Çizelge 5.42. B fazı akım harmonik analizi

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|------|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| Yüzdesi (%) | 100 | 1709 | 30 | 95 | 303 | 84 | 42 | 14 | 32 | 2 | 16 | 10 | 2.2 | 10 | %1742 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |

Çizelge 5.43. C fazı akım harmonik analizi

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Yüzdesi (%) | 100 | 6 | 4.3 | 1.3 | 1.1 | 1.1 | 0.6 | 0.2 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | %7.7 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |

5.1.8.7 Şebeke akımları TTB oranı (Devre II)

Çizelge 5.44'te görüldüğü gibi şebekede mevcut olan akım TTB miktarı, dengeli durum için IEEE standartlarına göre sınırın altındadır. Bu benzetimde üçüncü harmonik süzgeci kullanımı için dengeli durum harmonik yüzdeleri azalmıştır. Ancak dengesiz durumda, yukarıda verilen ayrıntılı akım harmonikleri analizi çizelgelerinde, görüldüğü gibi 3.harmoniğin azalmasına rağmen reaktif güç kompanzasyonu yapılamamıştır.

Çizelge 5.44. şebeke akımları TTB oranları (Dengeli durum)

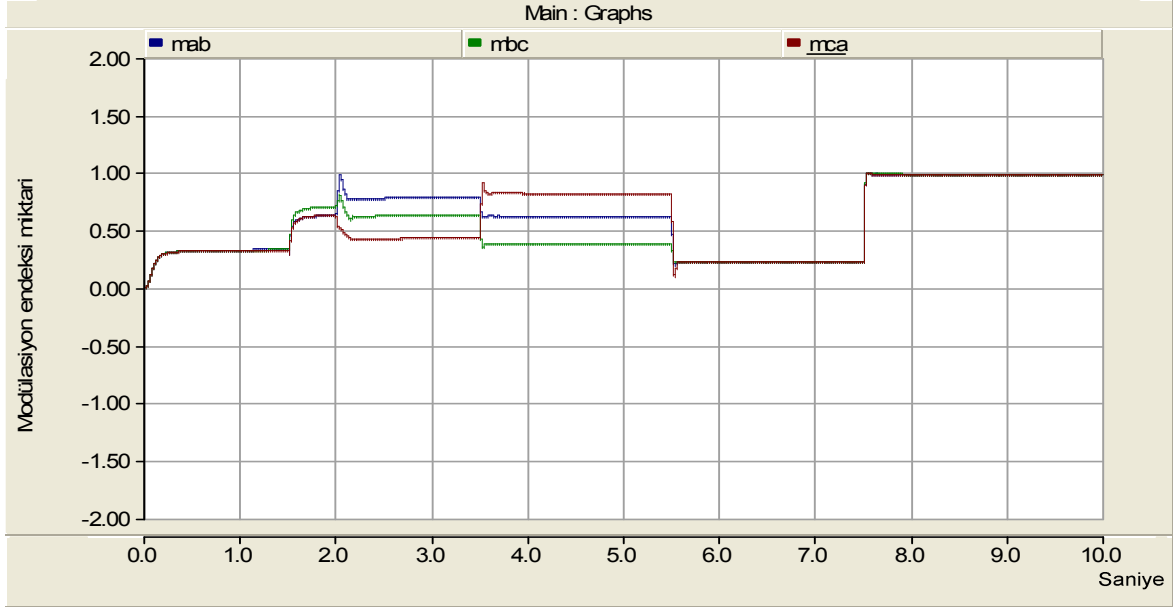
| Kullanılan STATKOM Topolojisi | Tam Endüktif Çalışma Sırasındaki TTB (%) | Tam kapasitif Çalışma Sırasındaki TTB (%) |
|-------------------------------|--|---|
| Dört telli STATKOM | 1.3 | 1.7 |

5.2 Üçgen bağlı STATKOM benzetim çalışmaları sonucu

Bilgisayar modellemesi yapılmış olan üçgen STATKOM modeli ile dinamik çalışmalar yapılmıştır. Endüktif, kapasitif ve dengesiz çalışma durumlarında STATKOM'un verdiği tepkiler gözlemlenmiştir.

5.2.1 STATKOM modülasyon endeksi tepkisi

Şekil 5.31'de verildiği gibi STATKOM'un takip ettiği referans akıma karşılık gelen modülasyon endeksi tepkileri görülmektedir. İstenilen referans akıma göre modülasyon endeksi $0 < m < 1$ değerleri arasında değişmektedir ve hiçbir geçici rejim olayı yoktur.



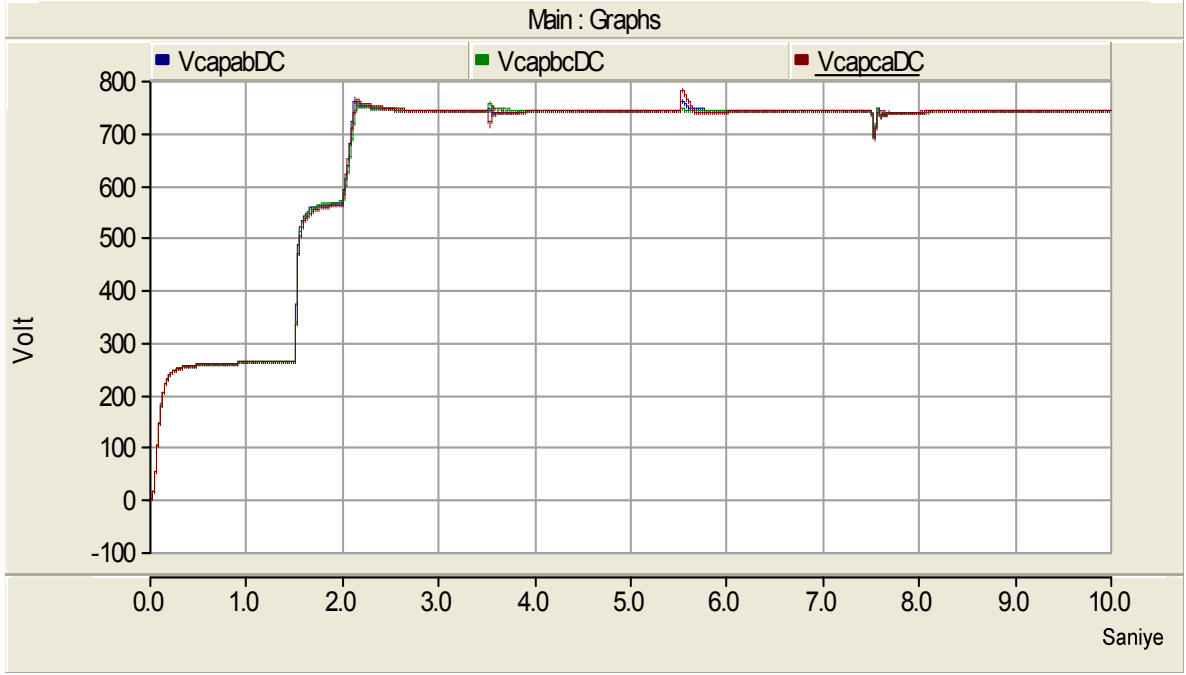
Şekil 5.31. STATKOM modülasyon endeksi grafiği

m_{ab} : ab fazı modülasyon endeksi, m_{bc} : bc fazı modülasyon endeksi, m_{ca} : ca fazı modülasyon endeksi

5.2.2 DA Bağ gerilimi ve alfa açıları tepkisi

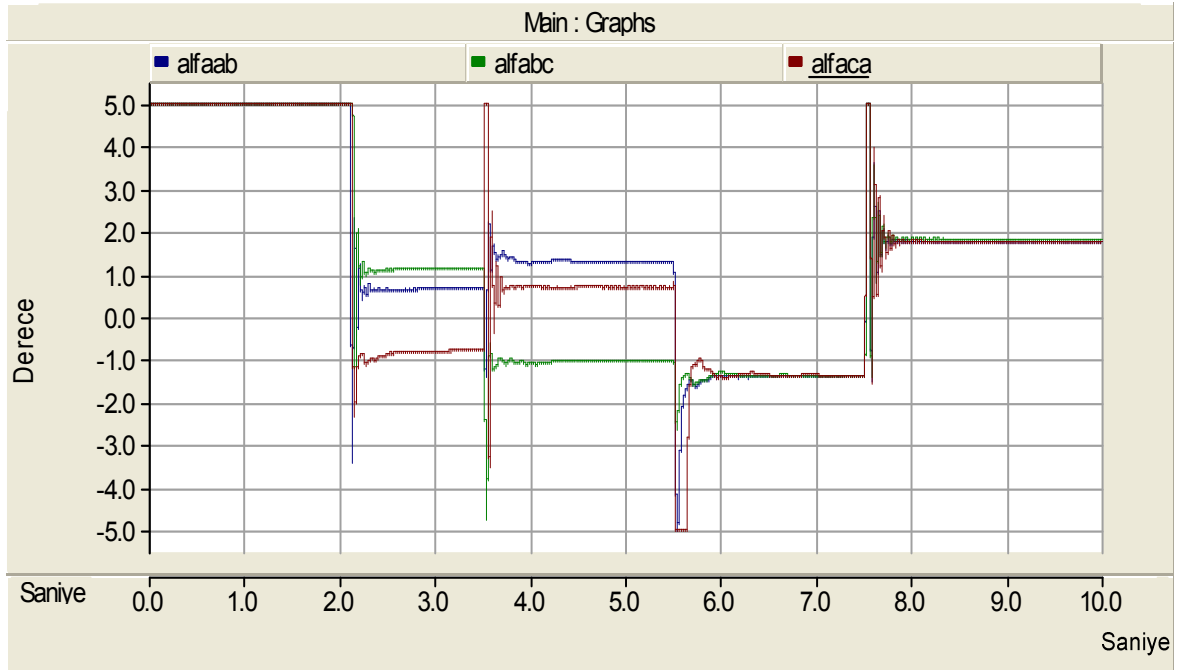
Şekil 5.32'de (0-1.5) saniye arası kapasitör şarj süresi ve STATKOM'un reaktif güç değişimi sırasındaki DA bağ gerilimi değişimini göstermektedir. Görüldüğü gibi güç değişimi anındaki geçişler kabul edilebilir bir zaman aralığında yapılmıştır ve hiçbir geçici rejim olayı yoktur.

Şekil 5.33'te DA bağ gerilimi kapasitörünün aktif güç talebine karşılık gelen alfa açısını göstermektedir. Şekilde gösterildiği gibi α , $-1.5^{\circ} < \alpha < 1.8^{\circ}$ aralığında değişmekte, ancak STATKOM'un güç değişimi sırasında geçici olarak limitlere dayanmaktadır.



Şekil 5.32. STATKOM DA bağ gerilimi tepkisi ve alfa açıları grafiği

$V_{capabDC}$: AB fazlararası STATKOM'un DA bağ gerilimi, $V_{capbcDC}$: BC fazlararası STATKOM'un DA bağ gerilimi, $V_{capcaDC}$: CA fazlararası STATKOM'un DA bağ gerilimi

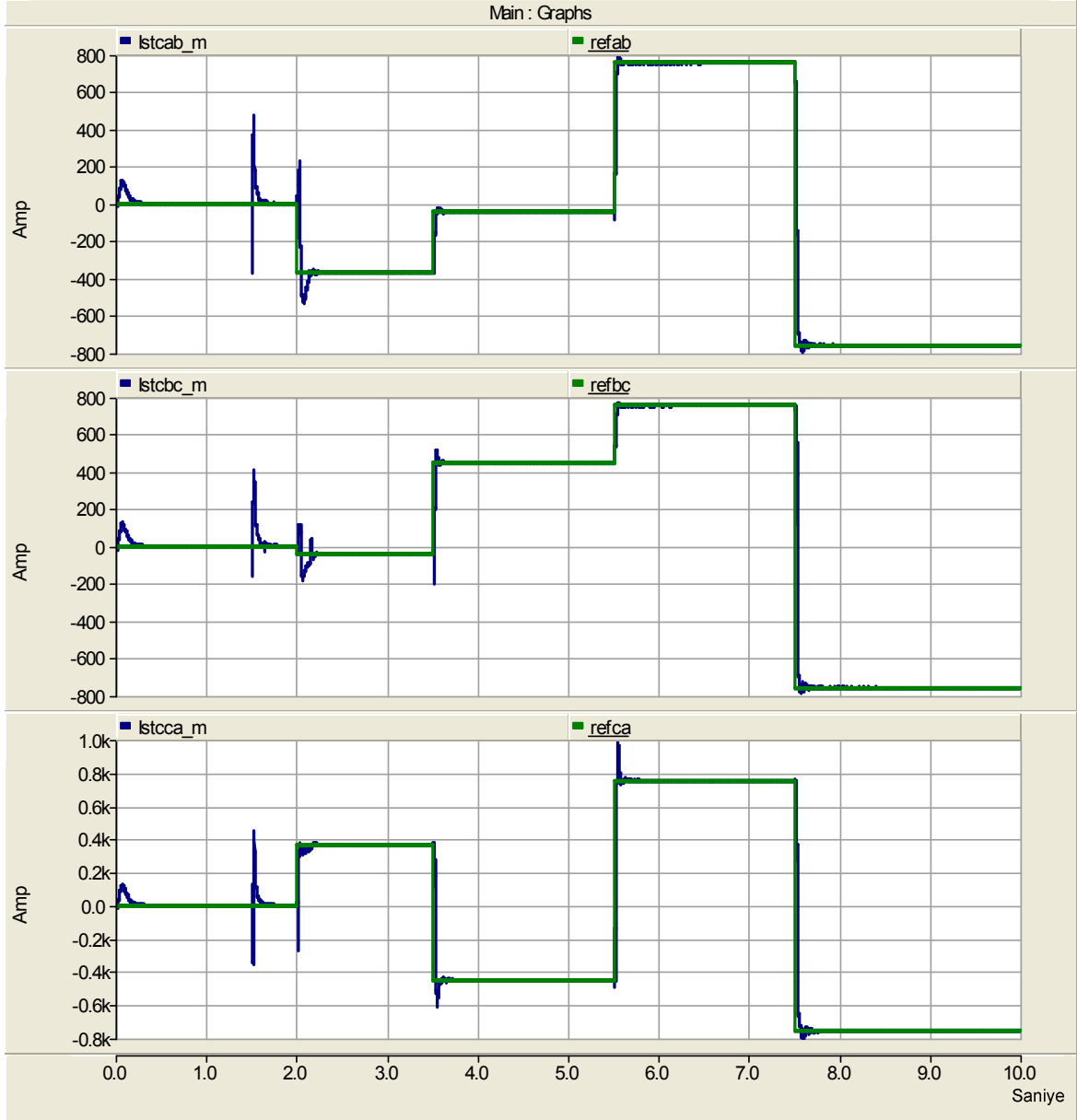


Şekil 5.33. STATKOM ve şebeke gerilimi arasındaki alfa açıları değişimi grafiği

5.2.3 STATKOM çalışma kipi değişimleri (Dengeli ve Dengesiz Durumlar)

Şekil 5.34'te seçilen referans akımları ve STATKOM geçiş tepkileri gösterilmiştir.

Bu çalışmada üçgen bağlı STATKOM'un dengersiz, endüktif ve kapasitif modlar için tepkileri gözlenmiştir.

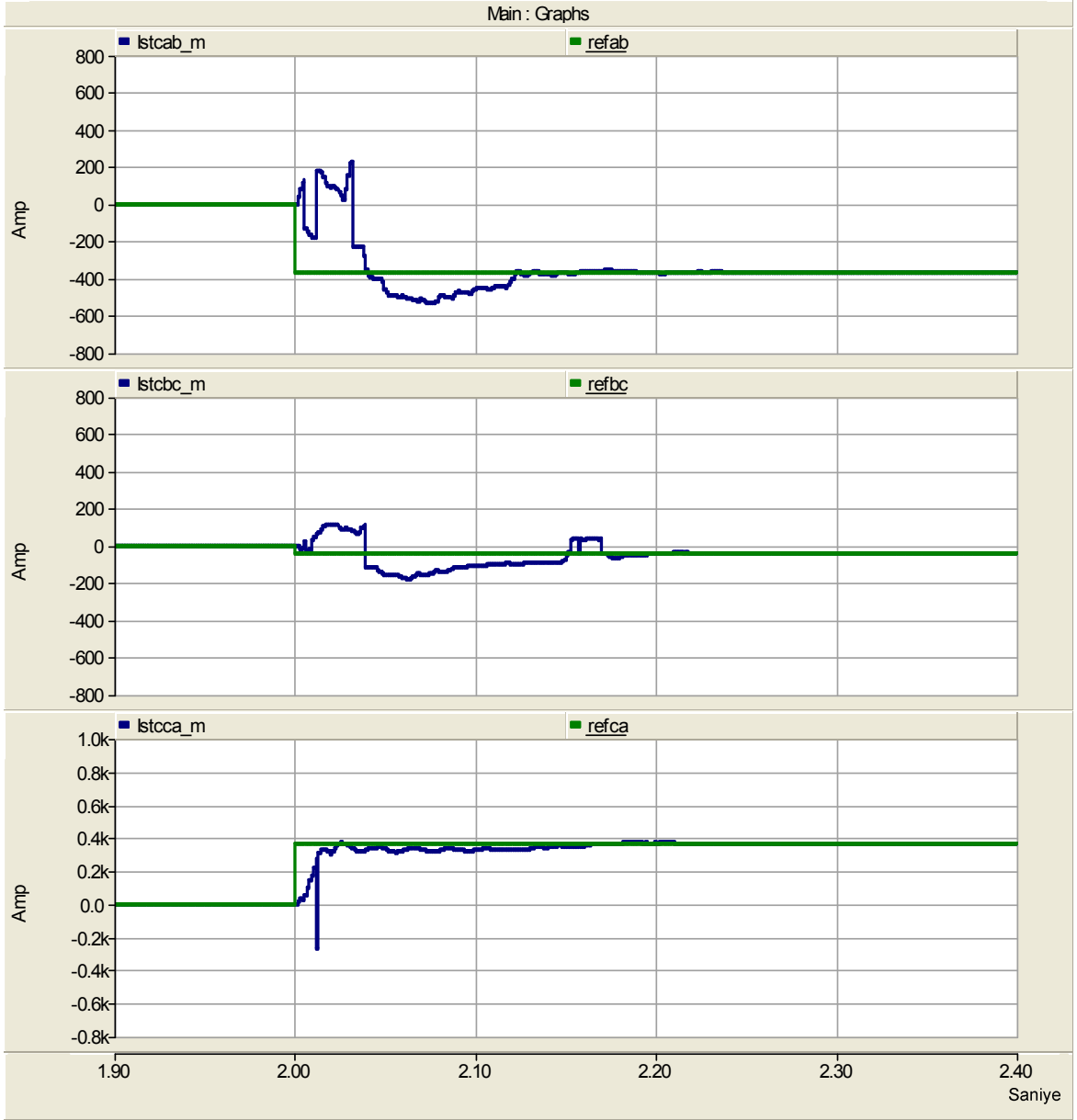


Şekil 5.34. Referans akım değişimleri
(Dengeli ve Dengesiz Durumlarda)

ref_{ab} : AB fazlararası STATKOM referans akımı, ref_{bc} : BC fazlararası STATKOM referans akımı, ref_{ca} : CA fazlararası STATKOM referans akımı

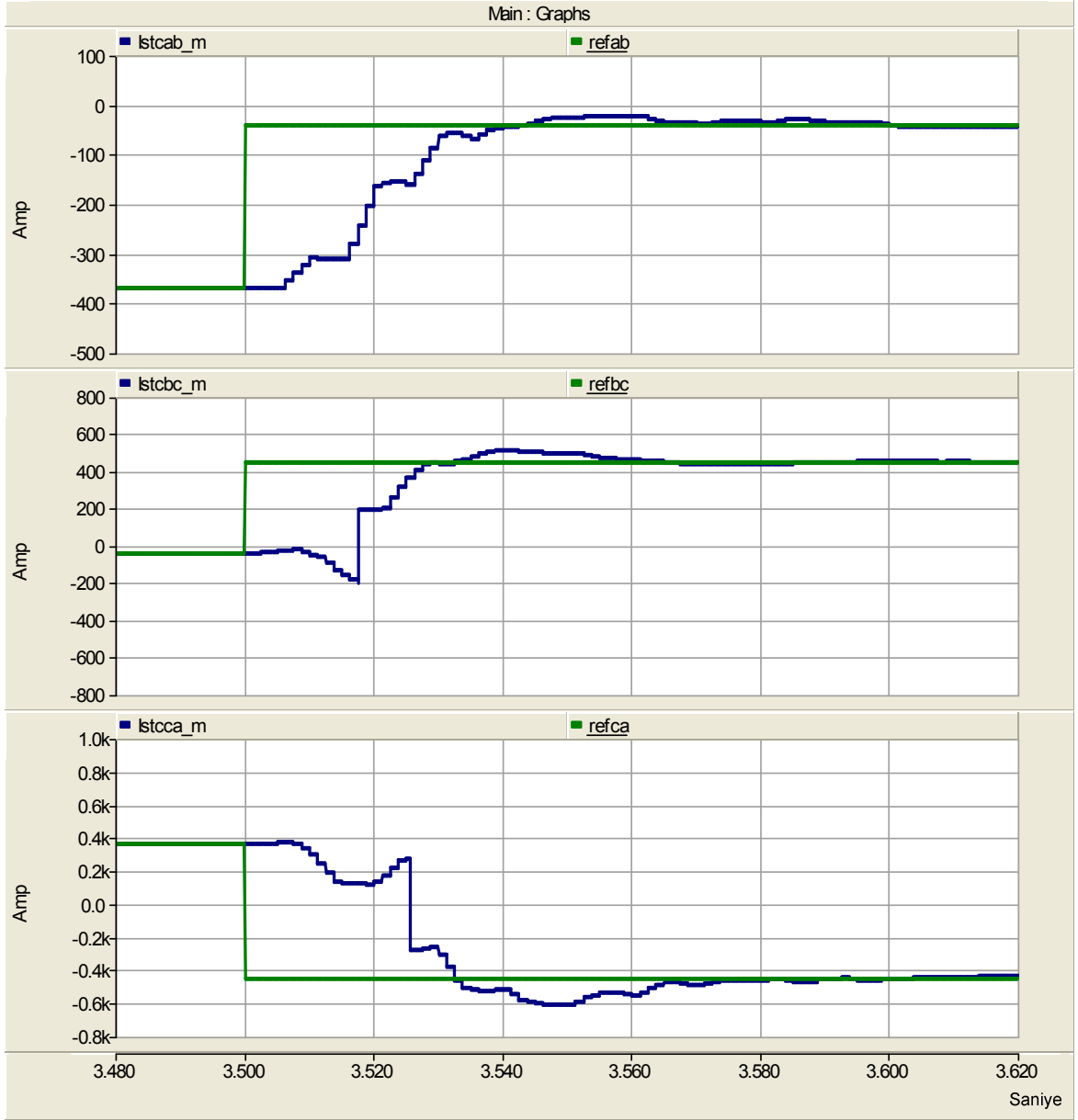
ref_{ab_mes} : AB fazlararası STATKOM akımı, ref_{bc_mes} : BC fazlararası STATKOM akımı, ref_{ca_mes} : CA fazlararası STATKOM akımı

Şekil 5.35'te dengesiz durum için seçilen referans akımları ve STATKOM geçiş tepkileri gösterilmiştir. Verilen durum için $t_s = 200$ ms'dir.



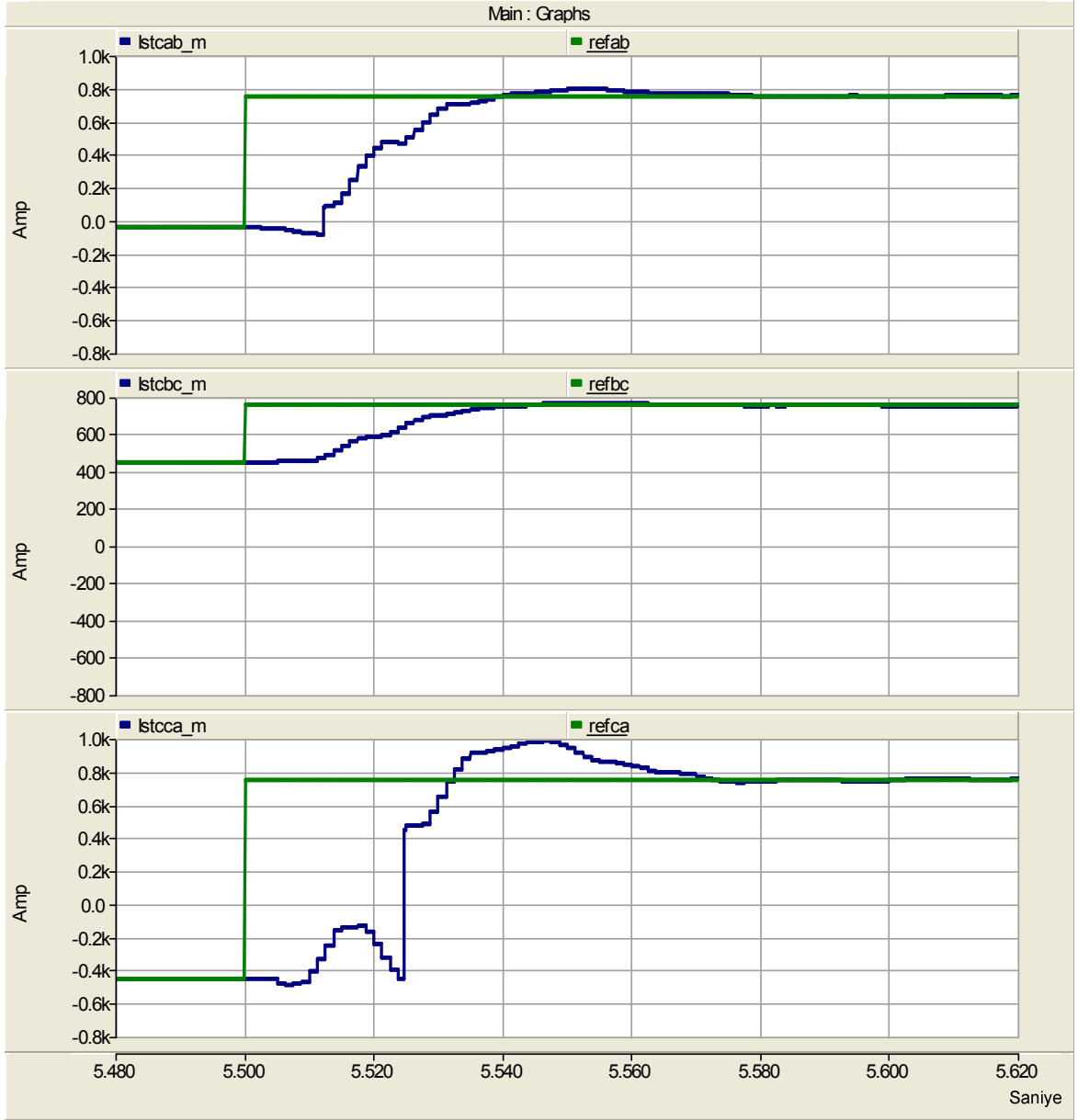
Şekil 5.35. Referans akımı değişimleri (Dengesiz Durum)

Şekil 5.36'da dengesiz durum için seçilen referans akımları ve STATKOM geçiş tepkileri gösterilmiştir. Verilen durum için $t_s = 75$ ms'dir.



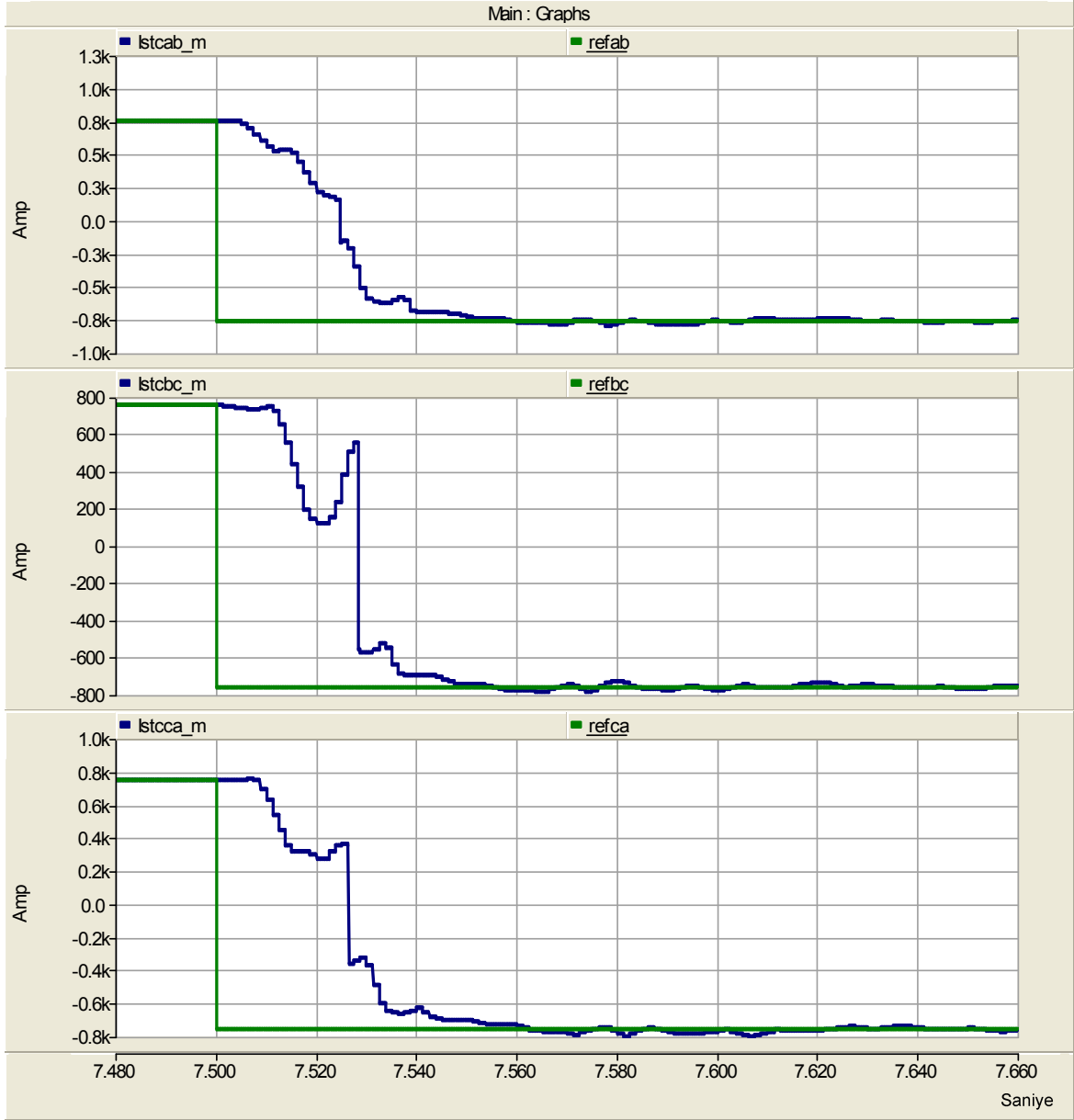
Şekil 5.36. Referans akımı değişimleri (Dengesiz Durum)

Şekil 5.37’de endüktif ve dengeli durum için seçilen referans akımları ve STATKOM geçiş tepkileri gösterilmiştir. Verilen durum için $t_s = 75$ ms’dir.



Şekil 5.37. Referans akımı değişimleri (Endüktif-Kip Dengeli Durum)

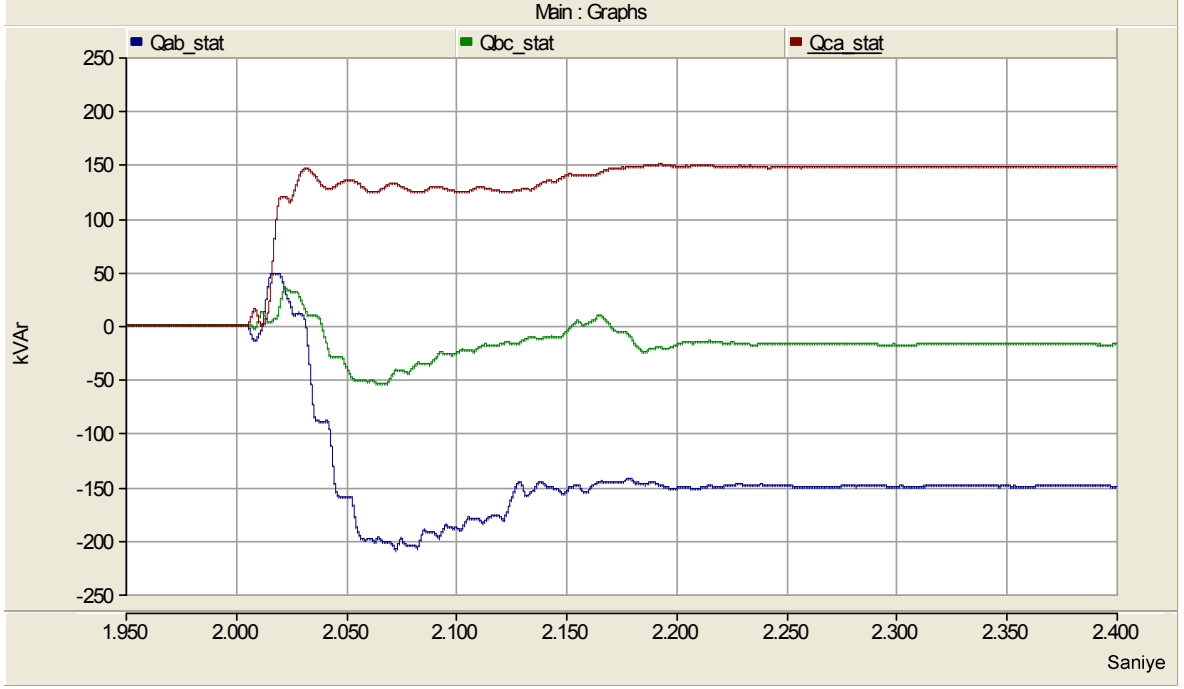
Şekil 5.38'de kapasitif ve dengeli durum için seçilen referans akımları ve STATKOM geçiş tepkileri gösterilmiştir. Verilen durum için $t_s = 60$ ms'dir.



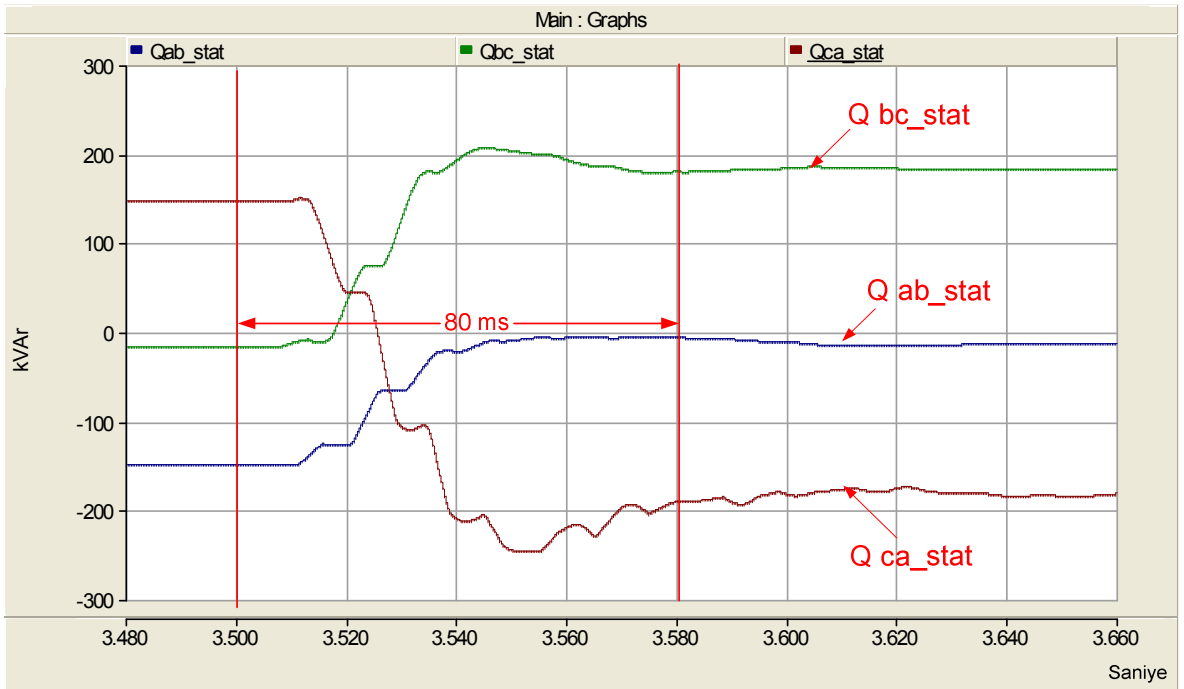
Şekil 5.38. Referans akımı değişimleri (Kapasitif-Kip Dengeli Durum)

5.2.4 Üçgen bağlı STATKOM çalışma kipi değişimleri (Dengeli ve Dengesiz Durumlar)

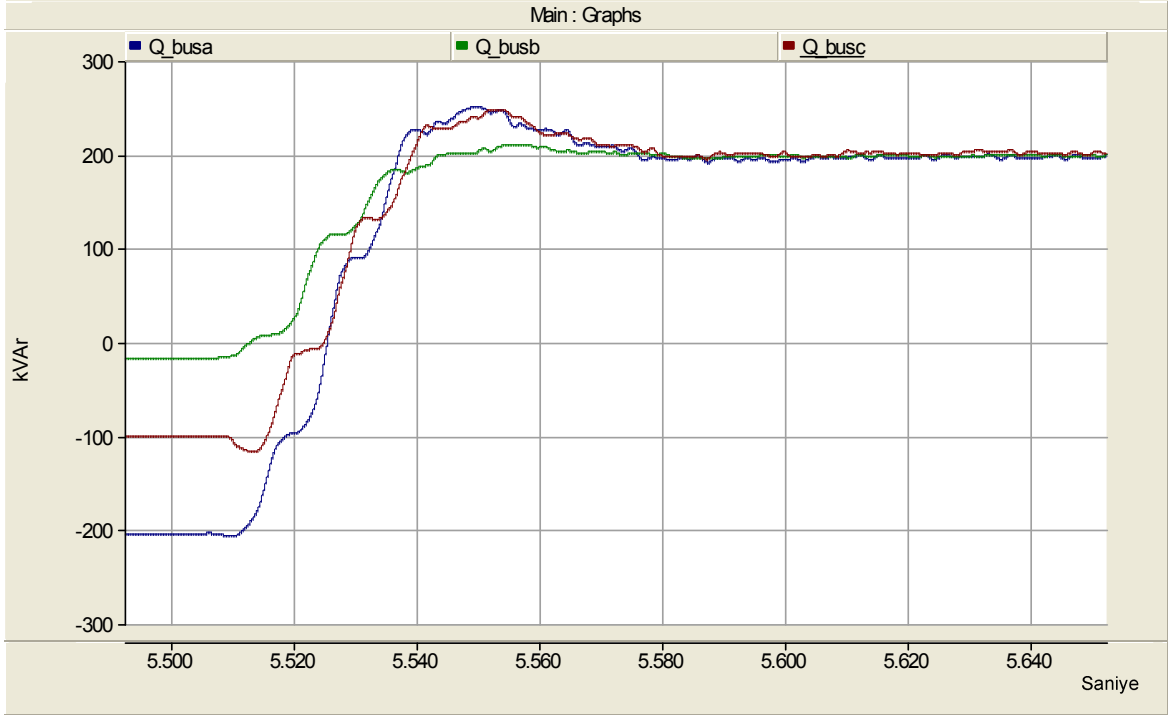
Bu bölümde verilmekte olan grafiklerde fazlar arasında bağlı olan STATKOM'ların istenilen referans akımlara göre bastığı/çektığı reaktif güç miktarı ve reaktif güç tepkileri gösterilmektedir.



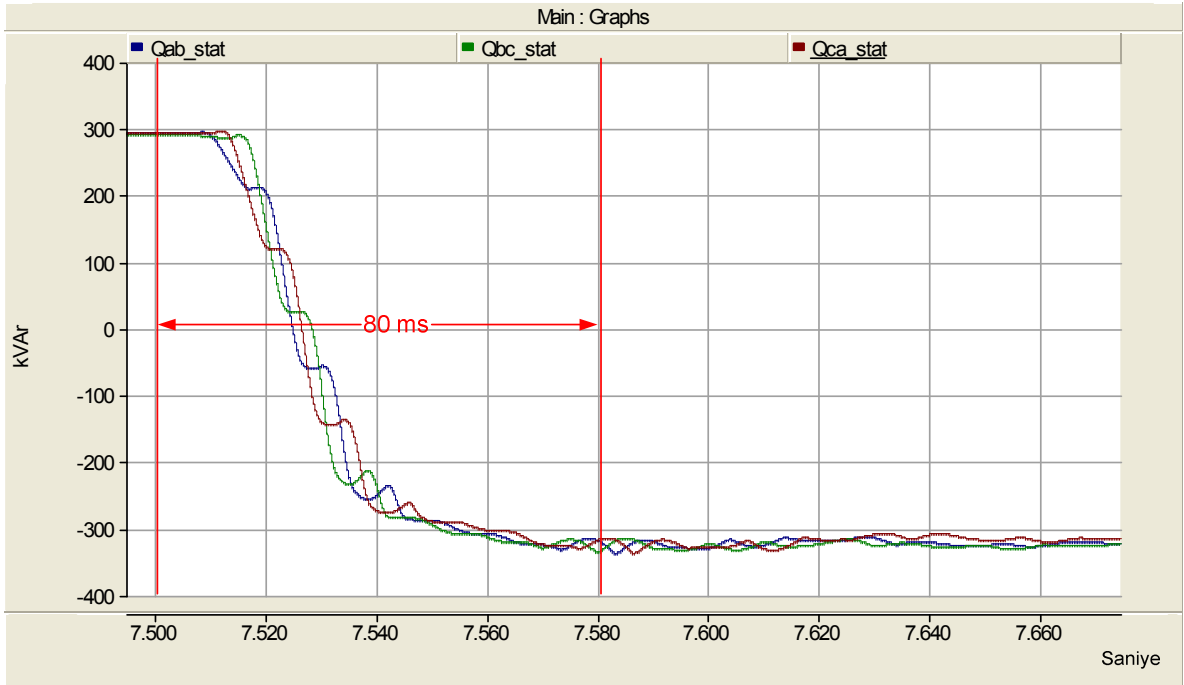
Şekil 5.39. STATKOM Çalışma Kipi Değişimleri (Dengesiz Durum)



Şekil 5.40. STATKOM Çalışma Kipi Değişimleri (Dengesiz Durum)



Şekil 5.41. STATKOM Çalışma Kipi Değişimleri (Endüktif-Kip Dengeli Durum)



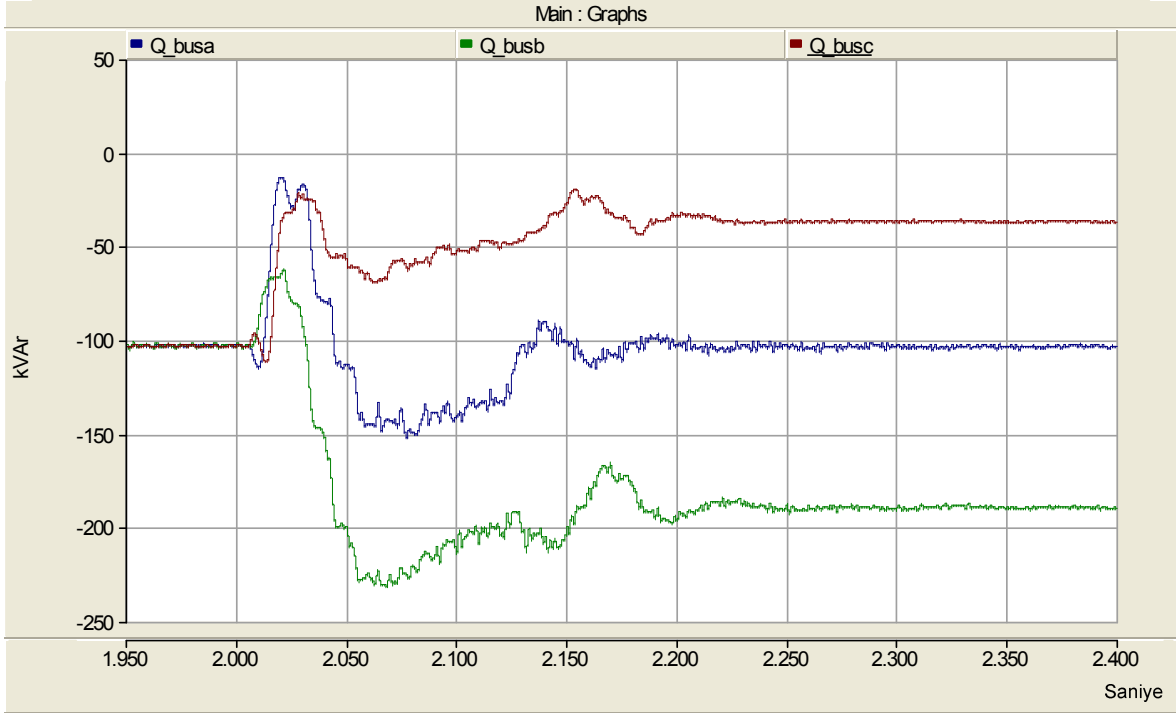
Şekil 5.42. STATKOM Çalışma Kipi Değişimleri (Kapasitif-Kip Dengeli Durum)

Q_{ab_stat} : AB fazlararası STATKOM gücü, Q_{bc_stat} : BC fazlararası STATKOM gücü,

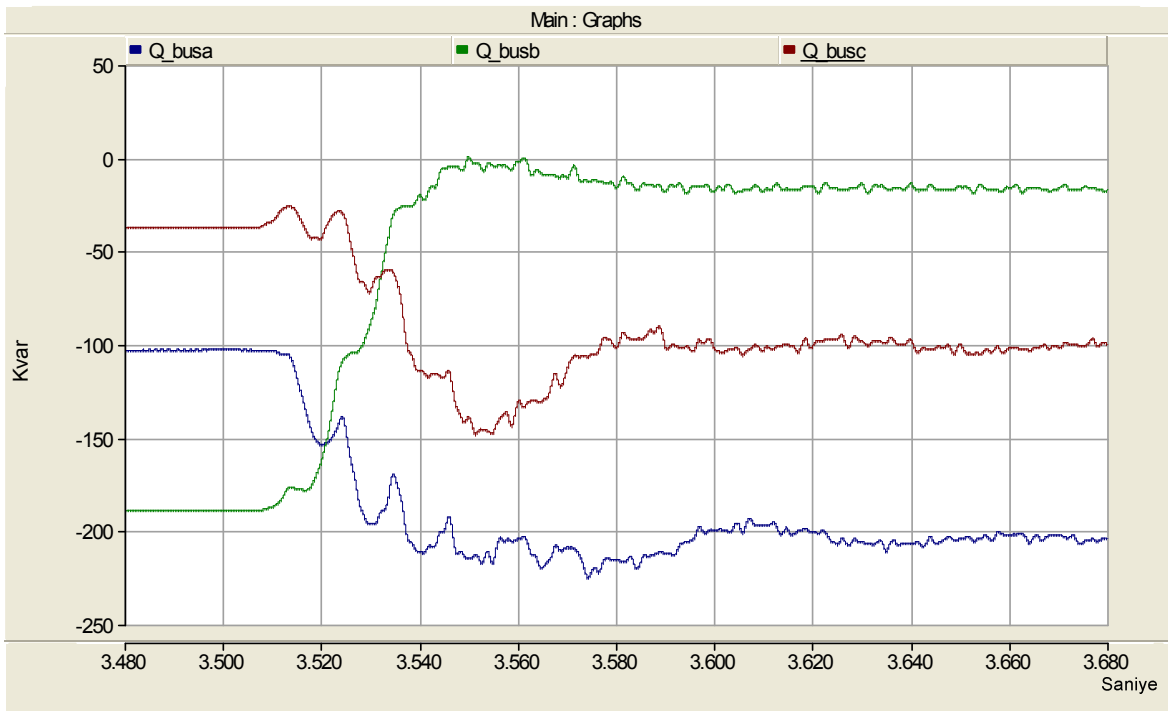
Q_{ca_stat} : CA fazlararası STATKOM gücü

5.2.5 Bara reaktif güç değişimi

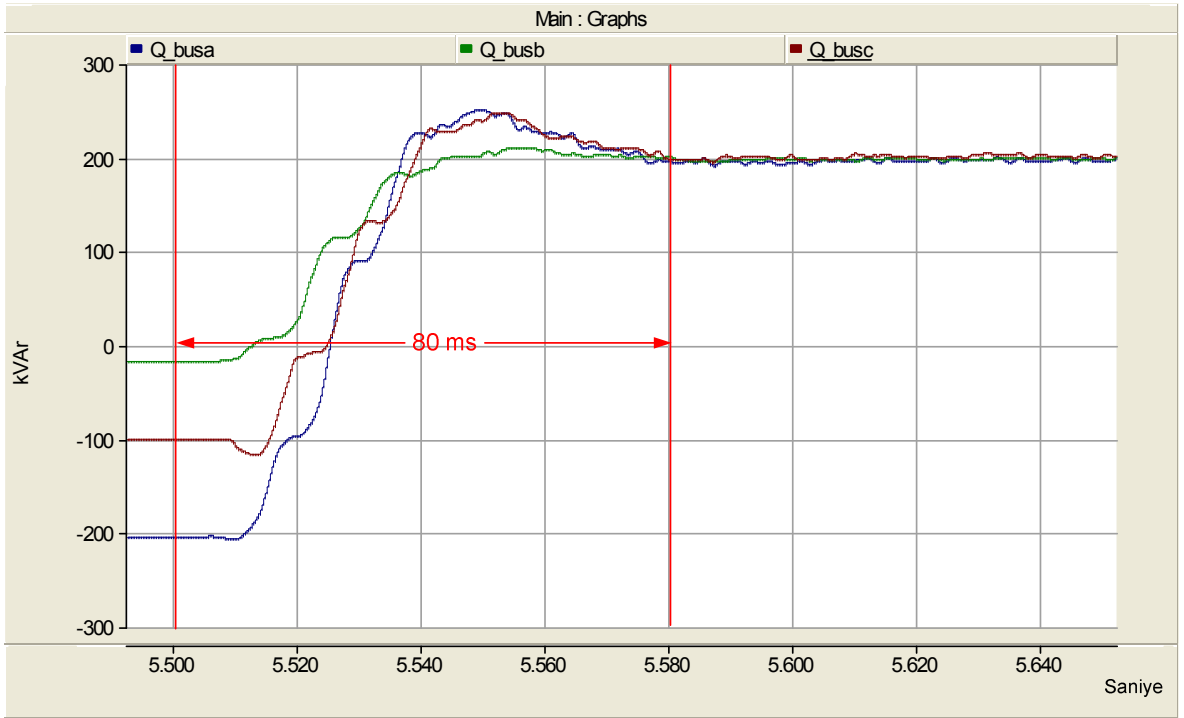
Bu bölümde verilmekte olan grafiklerde STATKOM'ların istenilen referans akımlara göre baraya bastığı/çektığı reaktif güç miktarı ve reaktif güç tepkileri gösterilmektedir.



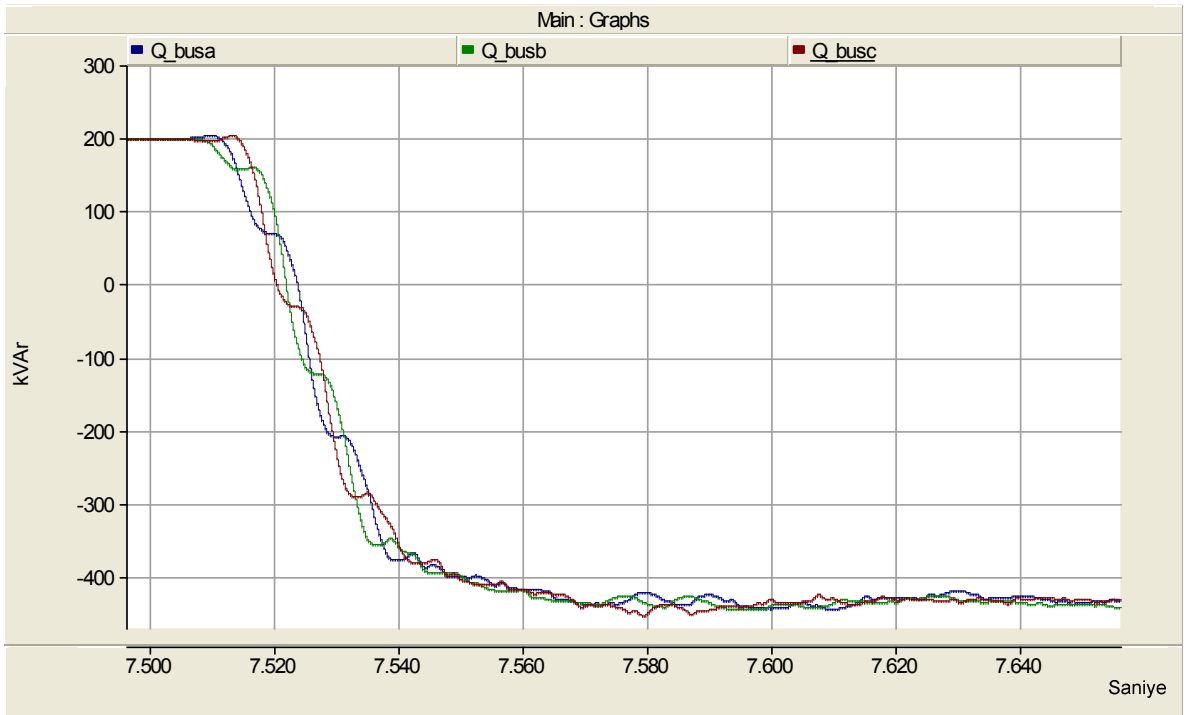
Şekil 5.43. Bara Reaktif Güç Değişimleri (Dengesiz Durum)



Şekil 5.44. Bara Reaktif Güç Değişimleri (Dengesiz Durum)



Şekil 5.45. Bara Reaktif Güç Değişimleri (Endüktif-Kip Dengeli Durum)



Şekil 5.46. Bara Reaktif Güç Değişimleri (Kapasitif-Kip Dengeli Durum)

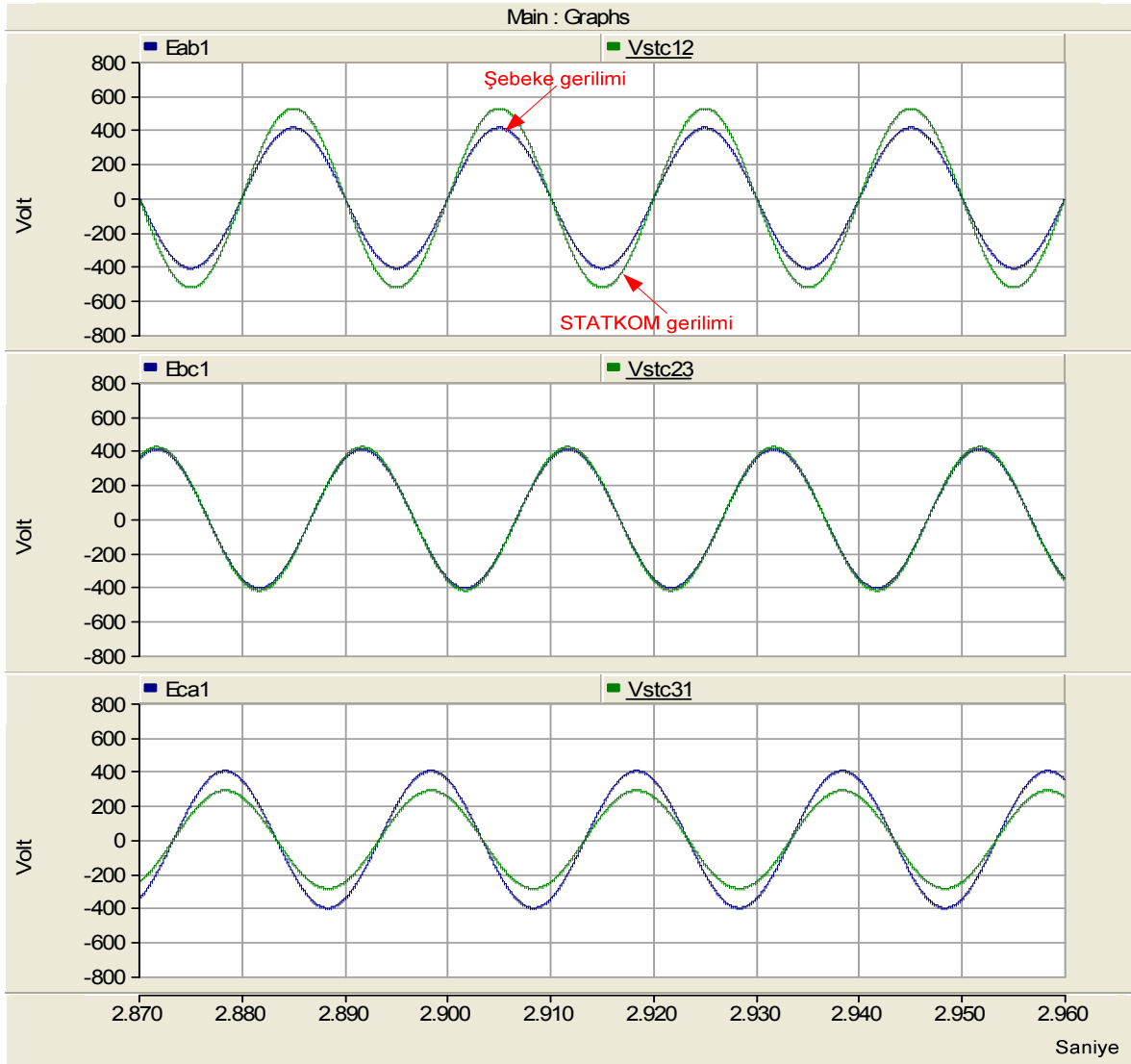
Q_{busa} : Sekonder tarafı A fazı gücü, Q_{busb} : Sekonder tarafı B fazı gücü,

Q_{busc} : Sekonder tarafı C fazı gücü

5.2.6 STATKOM ve şebeke gerilimleri (Dengeli ve Dengesiz Durumlar)

Şekil 5.47’de üç farklı durum görülmektedir.

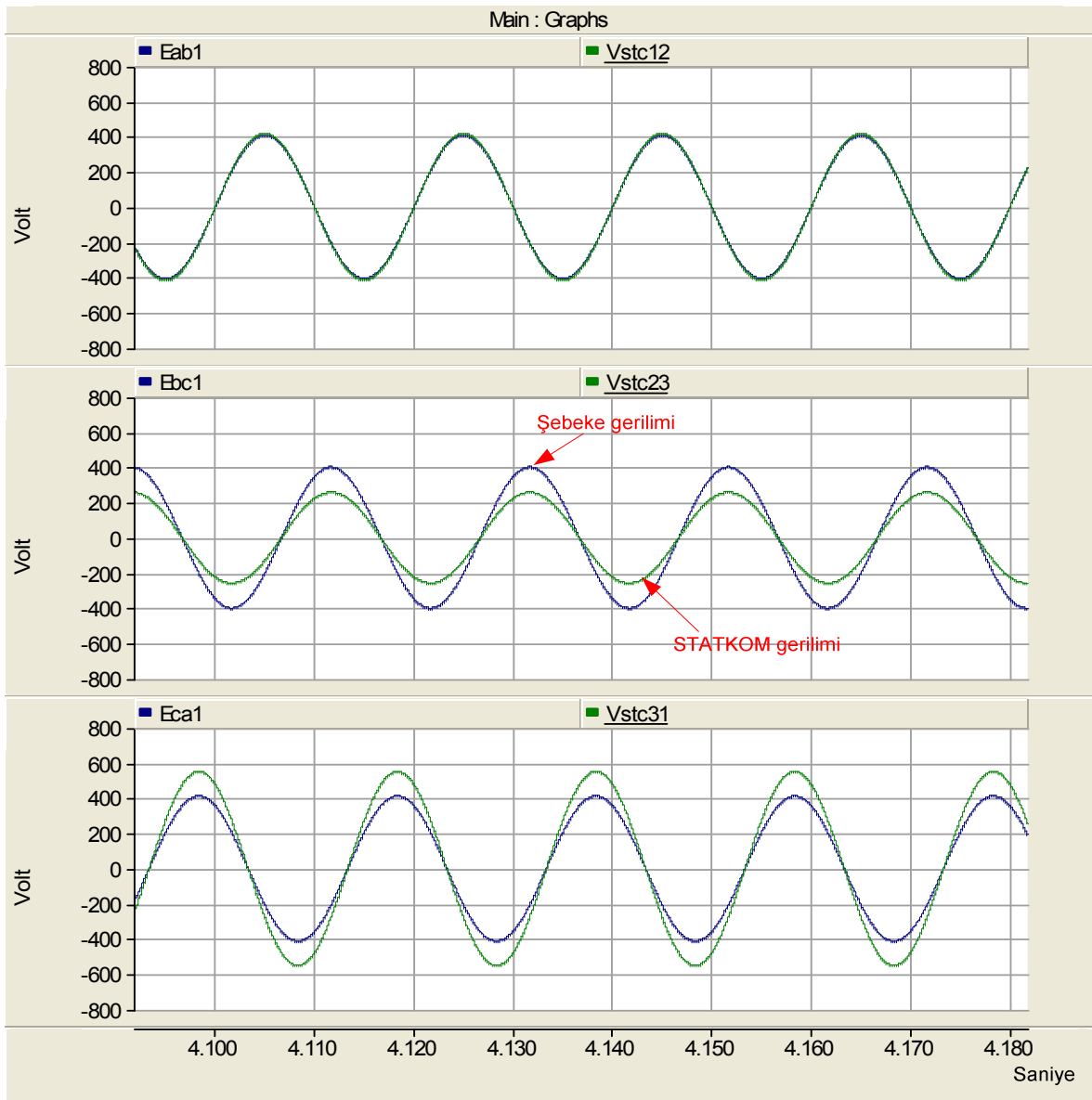
- 1) A fazında STATKOM gerilimi tepe değeri şebeke gerilimi tepe değerine göre küçüktür. Dolayısıyla, STATKOM endüktif kipte çalışmaktadır.
- 2) B fazında reaktif güç sıfırdır. Ancak şebeke ve STATKOM arasında mevcut olan reaktörden dolayı reaktif güç tüketimi vardır. Bu nedenle STATKOM gerilimi tepe değeri şebeke gerilimi tepe değerine göre küçüktür. Dolayısıyla bu faza bağlı STATKOM endüktif kipte çalışmaktadır. Dolayısıyla, şebekeden STATKOM’a reaktif güç akışı vardır.
- 3) C fazında STATKOM gerilimi tepe değeri şebeke gerilimi tepe değerine göre büyüktür. Dolayısıyla, STATKOM kapasitif kipte çalışmaktadır.



Şekil 5.47. STATKOM ve şebeke gerilimleri (Dengesiz Durum)

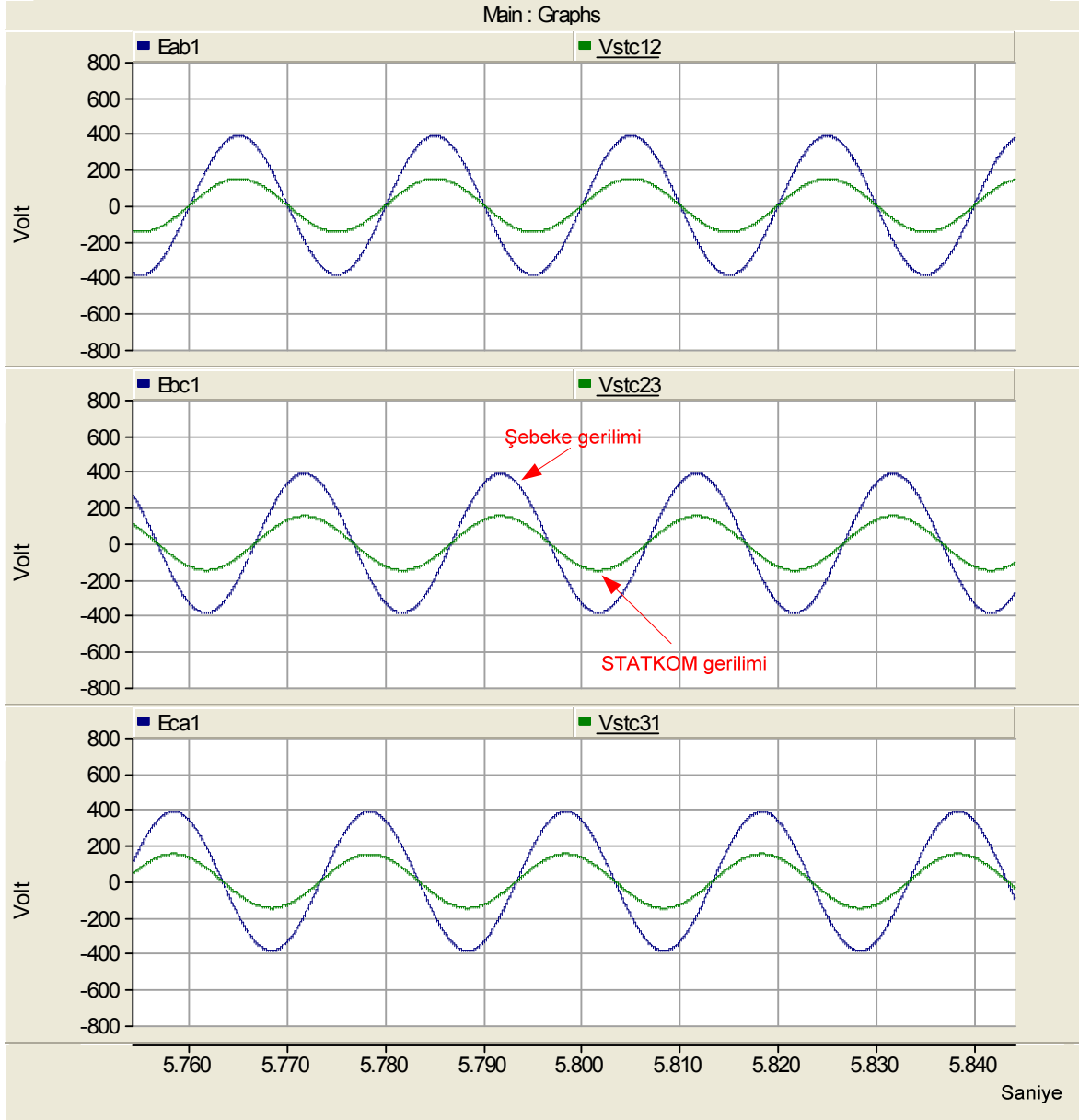
Şekil 5.48'de üç farklı durum görülmektedir.

- 1) A fazı için reaktif güç sıfırdır. Ancak şebeke ve STATKOM arasında mevcut olan reaktörden dolayı reaktif güç tüketimi vardır. Bu nedenle STATKOM gerilimi tepe değeri şebeke gerilimi tepe değerine göre küçüktür. Böylece, A fazına bağlı STATKOM endüktif kipte çalışmaktadır. Dolayısıyla, şebekeden STATKOM'a reaktif güç akışı vardır.
- 2) B fazında STATKOM gerilimi tepe değeri şebeke gerilimi tepe değerine göre büyüktür. Dolayısıyla, STATKOM kapasitif kipte çalışmaktadır.
- 3) C fazında STATKOM gerilimi tepe değeri şebeke gerilimi tepe değerine göre küçük olduğu için, bu faza bağlı STATKOM endüktif kipte çalışmaktadır.



Şekil 5.48. STATKOM ve şebeke gerilimleri (Dengesiz durum)

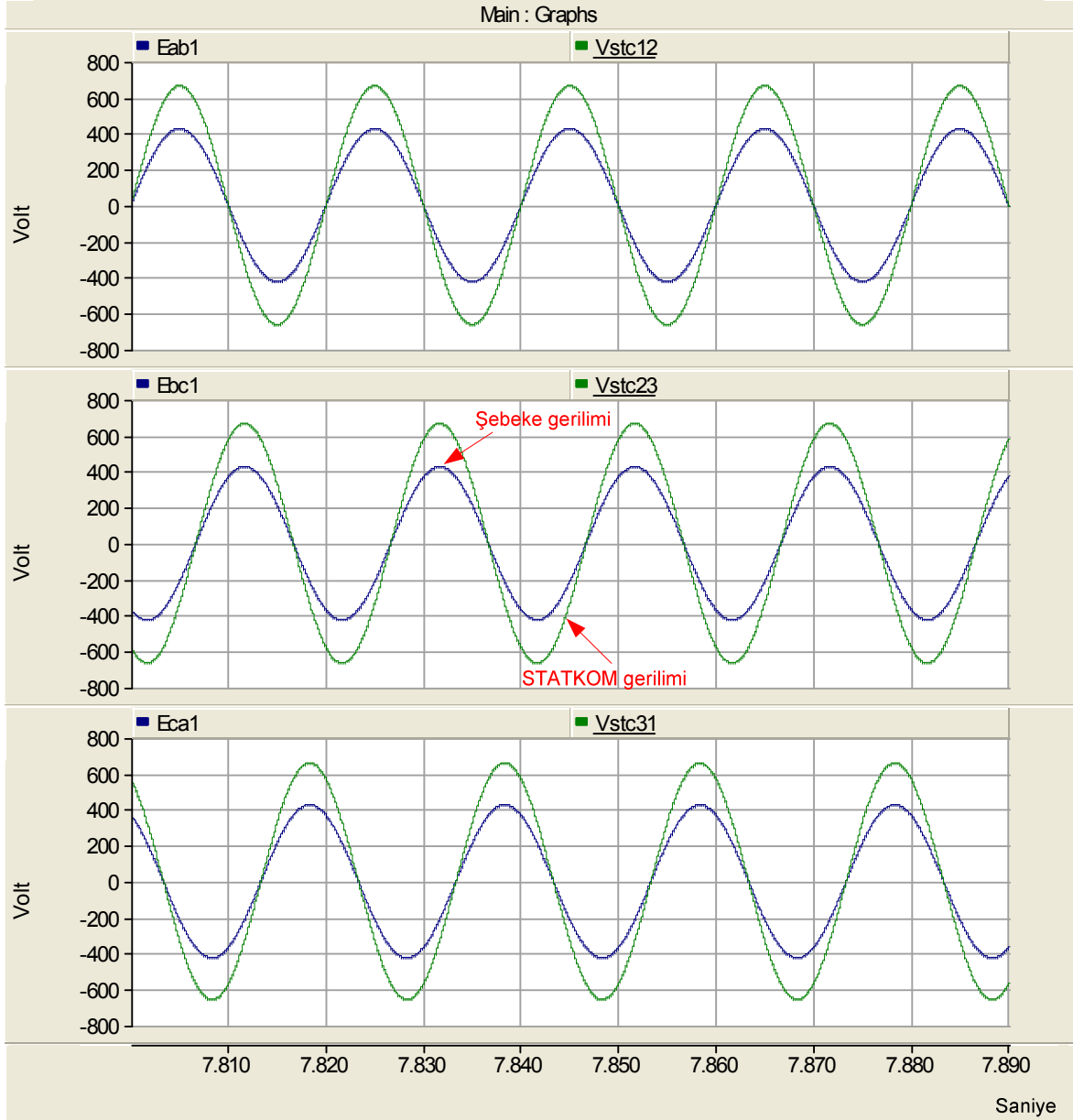
Şekil 5.49'da görüldüğü gibi STATKOM'un her üç fazı dengeli ve kapasitif güç bastığı için STATKOM gerilimi tepe değerleri, şebeke gerilimleri tepe değerine göre büyüktür.



Şekil 5.49. STATKOM ve şebeke gerilimleri ((Endüktif-Kip Dengeli Durum))

E_{ab1} : AB fazlararası STATKOM'un ana bileşen gerilimi, E_{bc1} : BC fazlararası STATKOM'un ana bileşen gerilimi, E_{ca1} : CA fazlararası STATKOM'un ana bileşen gerilimi

Şekil 5.50'de görüldüğü gibi STATKOM'un her üç fazı dengelidir. STATKOM endüktif kipte çalıştığı için STATKOM geriliminin tepe değerleri, şebeke gerilimleri tepe değerine göre küçüktür.



Şekil 5.50. STATKOM ve şebeke gerilimleri (Kapasitif-Kip Dengeli Durum)

E_{ab1} : AB fazlararası STATKOM'un ana bileşen gerilimi, E_{bc1} : BC fazlararası STATKOM'un ana bileşen gerilimi, E_{ca1} : CA fazlararası STATKOM'un ana bileşen gerilimi

5.2.7 Üçgen bağlı STATKOM gerilim harmonikleri analizi

Çizelge 5.45, 5.46, 5.47 ve 5.48'de verilen çevirgeç faz-faz gerilimi harmonik yüzdelerine göre, hem dengesiz durumlarda, hem de endüktif/kapasitif-kip çalışmalarda, yapılan ölçüm çevirgeç faz-faz gerilimi olduğu için harmonikler süzölmüş durumda ölçülmüştür. Dolayısıyla ölçüm sonucu elde edilen değerlere göre, hemen hemen tüm harmonik yüzdeleri limiti geçmiştir.

Çizelge 5.45. Çevirgeç faz-faz geriliminin harmonik analizi (Dengesiz Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|----------------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| AB fazlararası değer | 100 | 19 | 24 | 0.7 | 4.4 | 7.9 | 3.7 | 6.3 | 0.6 | 5.6 | 1.6 | 4.5 | 3.1 | 4.3 | %37.7 |
| BC fazlararası değer | 100 | 48 | 7.1 | 22 | 13 | 7.3 | 8.2 | 2.1 | 7.4 | 1.3 | 5.4 | 3.5 | 1.9 | 3.4 | %57.8 |
| CA fazlararası değer | 100 | 75 | 37 | 1.5 | 20 | 9 | 13 | 10 | 1.4 | 7.1 | 10 | 5.7 | 2.7 | 11 | %92.7 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 5.46. Çevirgeç faz-faz geriliminin harmonik analizi (Dengesiz Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|----------------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| AB fazlararası değer | 100 | 49 | 6.2 | 23 | 13 | 8.1 | 8.7 | 1.3 | 7.6 | 2 | 5.7 | 4 | 3.8 | 4.9 | %59 |
| BC fazlararası değer | 100 | 80 | 47 | 13 | 22 | 18 | 6.5 | 13 | 11 | 3.8 | 4.9 | 10 | 10 | 4.5 | %102 |
| CA fazlararası değer | 100 | 11 | 24 | 6.6 | 9.6 | 1.3 | 3.6 | 4 | 5.3 | 0.2 | 4.5 | 2.8 | 2.3 | 3.8 | %33.3 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 6.47. Çevirgeç faz-faz geriliminin harmonik analizi

(Endüktif Kip-Dengeli Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|----------------------|-----|----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|------|
| AB fazlararası değer | 100 | 93 | 81 | 64 | 25 | 7.4 | 17 | 22 | 22 | 17 | 11 | 5 | 8.4 | 17 | %154 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 5.48. Çevirgeç faz-faz geriliminin
harmonik analizi (Kapasitif Kip-Dengeli Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|----------------------|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| AB fazlararası değer | 100 | 27 | 11 | 3.8 | 7.6 | 7.4 | 5.5 | 4.7 | 3.6 | 2.6 | 3.3 | 3.1 | 2.7 | 2.8 | %32 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 5.49, 5.50, 5.51 ve 5.52’de verilen çevirgeç faz-faz geriliminin harmonik yüzdelerine göre, hem dengesiz durumlarda, hem de endüktif/kapasitif-kip çalışmalarda, yapılan ölçüm ortak bağlantı noktası faz-faz gerilimi olduğu için harmonikler süzölmüş durumda ölçülmüştür. Dolayısıyla ölçüm sonucu elde edilen değerlere göre, hemen hemen tüm harmonik yüzdelerinin limitin altında olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.49. Ortak Bağlantı Noktası faz-faz geriliminin
harmonik analizi (Dengesiz Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| AB fazlararası değer | 100 | 0.3 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | %0.5 |
| BC fazlararası değer | 100 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | %0.4 |
| CA fazlararası değer | 100 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | %0.4 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 5.50. Ortak Bağlantı Noktası faz-faz geriliminin
harmonik analizi (Dengesiz Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| AB fazlararası değer | 100 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | %0.45 |
| BC fazlararası değer | 100 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | %0.45 |
| CA fazlararası değer | 100 | 0.5 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | %0.6 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 5.51. Ortak Bağlantı Noktası faz-faz geriliminin
harmonik analizleri (Endüktif Kip-Dengeli Durum)

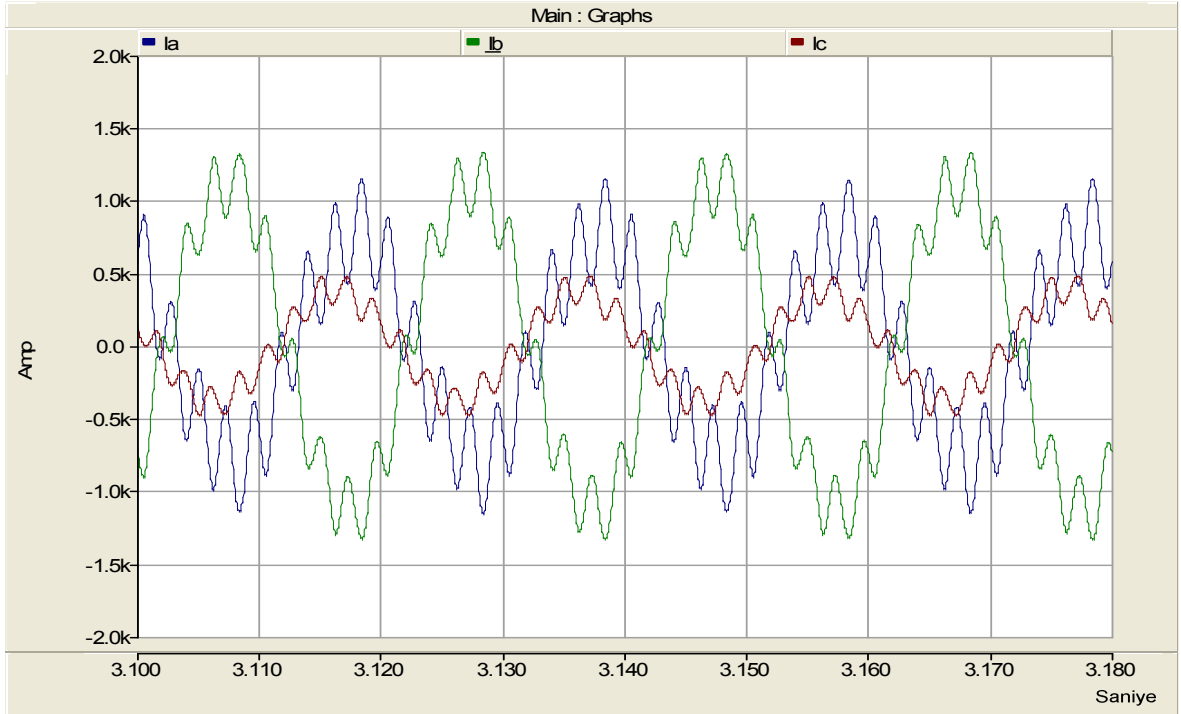
| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| A-B Yüzdesi (%) | 100 | 0.1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | %0.4 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

Çizelge 5.52. Ortak Bağlantı Noktası faz-faz geriliminin
harmonik analizleri (Kapasitif Kip-Dengeli Durum)

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | THB |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| A-B Yüzdesi (%) | 100 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | %0.36 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 5 | 6 | 5 | 3.5 | 3 | 2 | 1.5 | 1.5 | 0.5 | 1.5 | 0.5 | - | - | %8 |

5.2.8 Şebeke akımları grafiği

STATKOM'un dengesiz ve tam endüktif/kapasitif durumlarda şebekeye bastığı akımlar, akım harmonik bileşenleri yüzdeleri ve THB miktarları verilmiştir.



Şekil 5.51. Şebeke akımları grafiği (Dengesiz Durum)

I_a : A fazı akımı, I_b : B fazı akımı, I_c : C fazı akımı

Çizelge 5.53, 5.54 ve 5.55'te STATKOM'un dengesiz durumda şebekeye bastığı akımın harmonik bileşenleri yüzdeleri ve TTB değerleri gösterilmiştir. Görüldüğü sadece 3.harmonik yüzdeleri limitin üstündedir. Diğer harmonik yüzdeleri limitin altındadır. Fazlardaki dengesizlik miktarına göre 3.harmonik değerleri farklı olduğu için TTB miktarları değişmektedir. Bu durum için A fazı TTB miktarı limitin üstünde görülmektedir.

Çizelge 5.53. A fazı akımının harmonik analizi

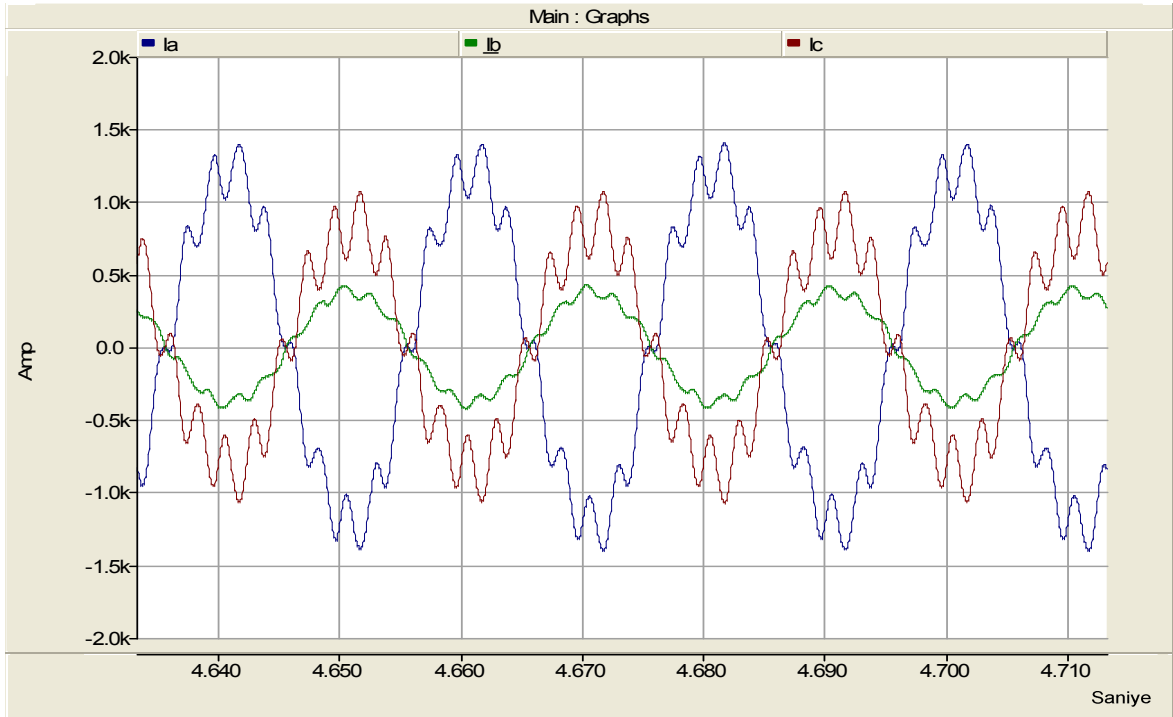
| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Yüzdesi (%) | 100 | 6.1 | 1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | %6.2 |
| IEEE Std. 519-1992 | | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |

Çizelge 5.54. B fazı akımının harmonik analizi

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Yüzdesi (%) | 100 | 3.7 | 1.4 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | %4 |
| IEEE Std. 519-1992 | | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |

Çizelge 5.55. C fazı akımının harmonik analizi

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Yüzdesi (%) | 100 | 3 | 0.7 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 0.4 | 0.2 | 0.4 | 0.1 | 0.3 | 0.3 | %3.2 |
| IEEE Std. 519-1992 | | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |



Şekil 5.52. Şebeke akımları grafiği (Dengesiz Durum)

I_a : A fazı akımı, I_b : B fazı akımı, I_c : C fazı akımı

Çizelge 5.56, 5.57 ve 5.58'de STATKOM'un başka bir dengesiz durumda şebekeye bastığı akımın harmonik bileşenleri yüzdeleri ve TTB değerleri gösterilmiştir. Görüldüğü sadece 3.harmonik yüzdeleri limitin üstündedir. Diğer harmonik yüzdeleri limitin altındadır. Fazlardaki dengesizlik miktarına göre 3.harmonik değerleri farklı olduğu için TTB miktarları değişmektedir. Bu durum için C fazı TTB miktarı limitin üstünde görülmektedir.

Çizelge 5.56. A fazı akımının harmonik analizi

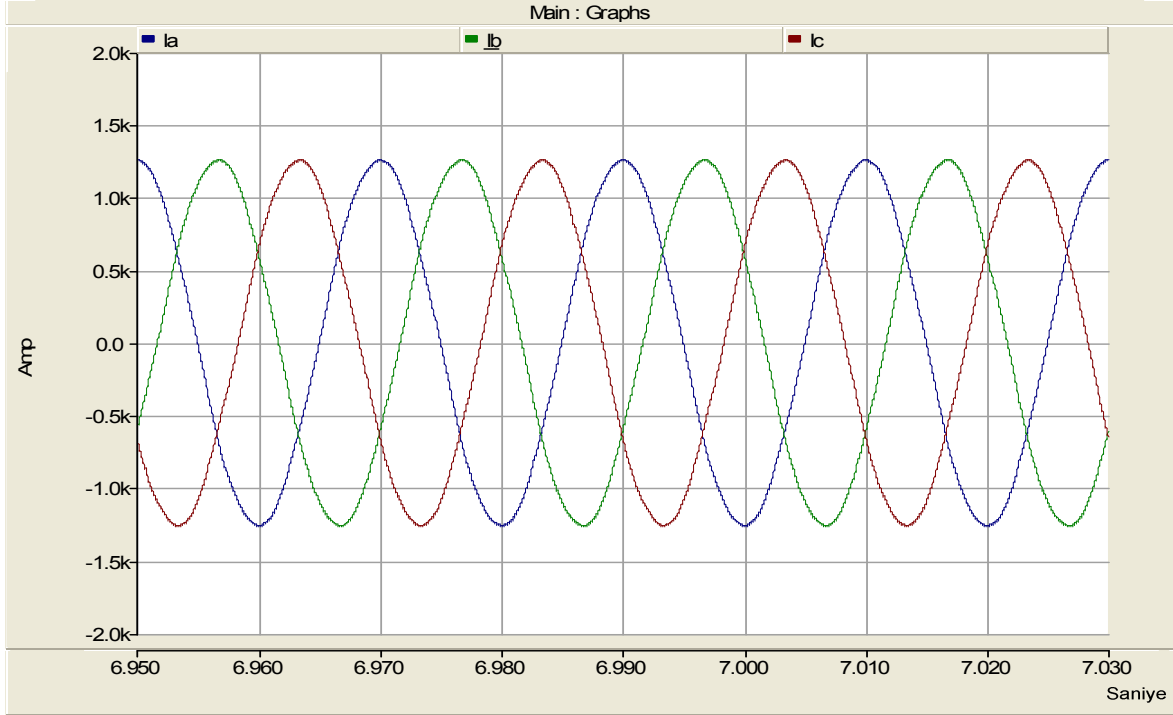
| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Yüzdeleri (%) | 100 | 5 | 0.7 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | %5 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |

Çizelge 5.57. B fazı akımının harmonik analizi

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Yüzdeleri (%) | 100 | 2.4 | 1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 0.3 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | %2.7 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |

Çizelge 5.58. C fazı akımının harmonik analizi

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Yüzdesi (%) | 100 | 7 | 1.6 | 0.4 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | %7.2 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |



Şekil 5.53. Şebeke akımlarının grafiği (Endüktif-Kip Dengeli durum)

I_a : A fazı akımı, I_b : B fazı akımı, I_c : C fazı akımı

Çizelge 5.59, 5.60 ve 5.61'de STATKOM'un endüktif-kip dengeli durumda şebekeye bastığı akımın harmonik bileşenleri yüzdeleri ve TTB değerleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi tüm harmonik yüzdeleri limitin altındadır. Dolayısıyla TTB miktarı verilen standart değerlerin altında görülmektedir.

Çizelge 5.59. A fazı akımının harmonik analizi

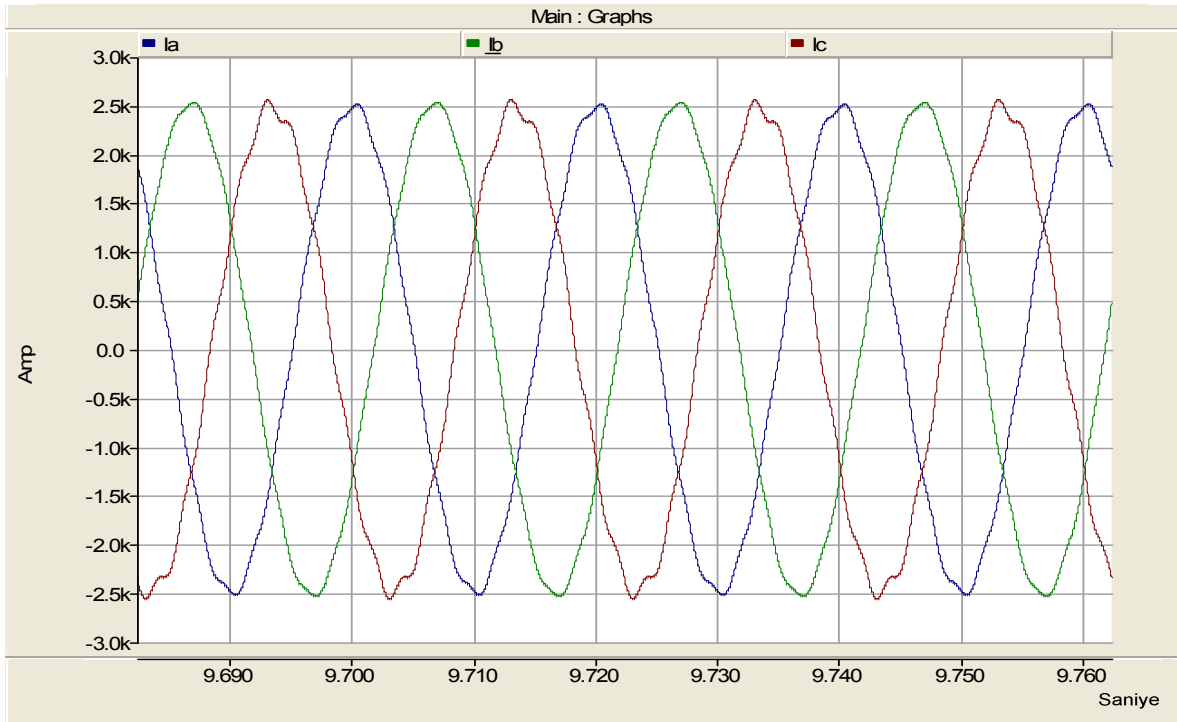
| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Yüzdesi (%) | 100 | 0.1 | 1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | %1 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |

Çizelge 5.60. B fazı akımının harmonik analizi

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Yüzdesi (%) | 100 | 0.1 | 1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | %1 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |

Çizelge 5.61. C fazı akımının harmonik analizi

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Yüzdesi (%) | 100 | 0.1 | 1 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | %1 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |



Şekil 6.54. Şebeke akımlarının grafiği (Kapasitif-Kip Dengeli durum)

I_a : A fazı akımı, I_b : B fazı akımı, I_c : C fazı akımı

Çizelge 5.62, 5.63 ve 5.64'te STATKOM'un kapasitif-kip dengeli durumda şebekeye bastığı akımın harmonik bileşenleri yüzdeleri ve TTB değerleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi tüm harmonik yüzdeleri limitin altındadır. Dolayısıyla TTB miktarı verilen standart değerlerin altında görülmektedir.

Çizelge 5.62. A fazı akımının harmonik analizi

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Yüzdesi (%) | 100 | 0.4 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | %0.6 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |

Çizelge 5.63. B fazı akımının harmonik analizi

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Yüzdesi (%) | 100 | 0.4 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | %0.6 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |

Çizelge 5.64. C fazı akımının harmonik analizi

| Harmonik No. | 1 | 3 | 5 | 7 | 11 | 13 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | TTB |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Yüzdesi (%) | 100 | 0.4 | 0.3 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | %0.6 |
| IEEE Std. 519-1992 | 100 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 1.5 | 1.5 | 1.5 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | %5 |

5.2.9 Tam yük durumunda TTB yüzdeleri

Tam endüktif ve kapasitif kip için şebeke akımları TTB oranı Çizelge 5.65'te verilmektedir. Şebekede mevcut olan akım TTB miktarı dengeli iken IEEE standartlarına göre sınırın altındadır. Bu benzetimde harmonik süzgeçler kullanıldığı için harmonik yüzdeleri azalmıştır. Yukarıda verilen ayrıntılı akım harmonikleri analizi çizelgelerinde görüldüğü gibi 3,5,7,11,13 ve 17.harmonikler standartlar limitlerin altındadır. Görüldüğü gibi üçüncü harmonik üçgen bağlı STATKOM'un içerisinde dolaştığı için şebekede etkisi azalmıştır.

Çizelge 5.65. Şebeke akımları TTB oranı

| STATKOM Topolojisi | Tam Endüktif Çalışma Sırasındaki TTB (%) | Tam Kapasitif Çalışma Sırasındaki TTB (%) |
|---------------------|--|---|
| Üçgen bağlı STATKOM | 1 | 0.6 |

6. DÖRT TELLİ VE ÜÇGEN BAĞLI STATKOM'LARIN KARŞILAŞTIRMASI

6.1 Giriş

Benzetimleri yapılmış dört telli ve üçgen STATKOM topolojilerinde elde edilen sonuçlara göre her iki yöntemin avantaj ve dezavantajları incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

6.2 Reaktif güç tepkisi yönüyle karşılaştırma

Dört telli (Devre I ve Devre II) ve Üçgen bağlı STATKOM'ların dengeli ve dengesiz durumlarda istenilen reaktif güce olan geçiş süreleri yaklaşık aynı, $t_s = 80$ ms'dir.

6.3 TTB yönüyle karşılaştırma

Bu bölümde, benzetimleri yapılmış dört telli ve üçgen topolojilerdeki 3,5,7,11,13 ve 17. harmonik yüzdeleri ve her faza ait TTB miktarları birbiriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılan topolojiler aşağıdaki sırayla verilmiştir:

- 1) Devre I ve Devre II
- 2) Üçgen ve Devre I
- 3) Üçgen ve Devre II

6.3.1 Dört telli (Devre I) ve (Devre II)

Çizelge 6.1'de verilmekte olan dört telli (Devre I) ve (Devre II) topolojilerindeki şebeke akımlarının TTB miktarı verilmiştir. Topolojilerin dengeli ve dengesiz durumlarda akım TTB miktarları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada dört telli (Devre II) topolojideki TTB miktarı, dört telli (Devre I) topolojisine göre daha azdır. Dolayısıyla TTB ve şebeke kirliliği bakımından Dört telli (Devre II) daha uygun görülmektedir.

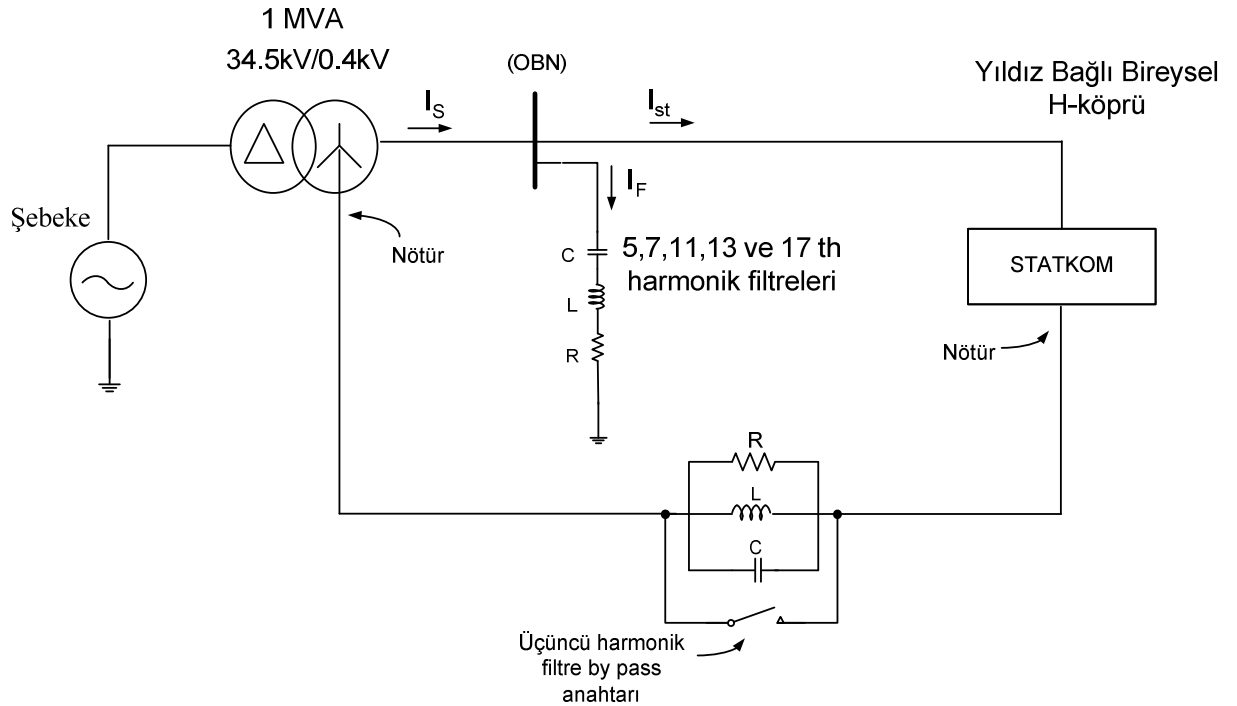
Akım harmonik analizlerinde görüldüğü gibi dengesiz durumlarda, üçüncü harmonik bileşeni ortak toprak bağlantı noktasından akmaktadır. Devre II topolojisinde üçüncü harmonik süzgeci, akan üçüncü harmonik akımına açık devre olarak davrandığı için, reaktif güç kompanzasyonu için gereken akım miktarı şebekede azalır. Dolayısıyla devre II topolojisinde dengesiz durumlarda reaktif güç kompanzasyonu mümkün değildir. Ancak yapılan benzetimlerde dengesizlik problemini çözmek için reaktif güç kompanzasyonuna daha çok önem

verilmektedir. Bu önceliği korumak için aşağıda sunulan devre yapısı dengeli ve dengesiz durumlarda hem reaktif güç kompanzasyonun yapılmasını ve hem şebekedeki TTB yüzdeleri standart limitlerinin altında tutulmasını sağlamak için kullanılabilir.

Çizelge 6.1. Dört telli (Devre I) ve (Devre II) TTB oranları

| STATKOM Tipi | Dengeli | | | Dengesiz |
|--------------------------|---------|----------------------------|----------------------------|----------|
| | Akım | TTB,(%) (Tam Endüktif) | TTB,(%) (Tam Kapasitif) | TTB,(%) |
| Dört Telli (Devre I) | I_a | 17.4 | 37.0 | 36.7 |
| | I_b | 17.4 | 37.0 | 1648.0 |
| | I_c | 17.4 | 37.0 | 19.0 |
| Dört Telli (Devre II) | I_a | 1.3 | 1.7 | 18.6 |
| | I_b | 1.3 | 1.7 | 1742.0 |
| | I_c | 1.3 | 1.7 | 7.7 |

Üçüncü harmonik süzgecini kullanmak ve devre dışı bırakmak için Şekil 5.53'te verilen devre şemasındaki "bypass" anahtar dört telli STATKOM topolojisinde dengeli durumlar için açık durumda ve dengesizlik anında kapalı tutularak optimum bir çözüm sunar. Dolayısıyla hem dengeli durumda THB oranı azalır, hem de dengesiz durum için reaktif güç kompanzasyonu sağlanır. Bu yöntem kolaylıkla pratik uygulamalar için kullanılabilir.



Şekil 6.1. Üçüncü harmonik süzgeci bypass anahtarı devre şeması

6.3.2 Dört Telli (Devre I) ve Üçgen Bağlı STATKOM

Çizelge 6.2'de verilmekte olan şebeke akımları TTB miktarları karşılaştırılıp incelenmiştir. Elde edilen TTB miktarlarına göre dengeli ve dengesiz durumlarda görüldüğü gibi üçgen bağlı STATKOM TTB miktarı, dört telli (Devre I) topolojisine göre daha azdır. Bu nedenle TTB ve şebeke kirliliği bakımından üçgen bağlı STATKOM topolojisi daha uygun görülmektedir.

Çizelge 6.2. Dengeli ve dengesiz durumlar için TTB Kaşılaştırması

| STATKOM Tipi | Dengeli | | | Dengesiz |
|----------------------|---------|---------------------|---------------------|----------|
| | Akım | TTB (Tam Endüktif) | TTB (Tam Kapasitif) | TTB |
| Dört Telli (Devre I) | I_a | 17.4 | 37 | 36.7 |
| | I_b | 17.4 | 37 | 1648 |
| | I_c | 17.4 | 37 | 19 |
| Üçgen | I_a | 1 | 0.6 | 5 |
| | I_b | 1 | 0.6 | 2.7 |
| | I_c | 1 | 0.6 | 7.2 |

6.3.4 Dört Telli (Devre II) ve Üçgen Bağlı STATKOM

Bu bölümde Çizelge 6.3'te verilmekte olan şebeke akımları TTB miktarları incelenmiştir. Elde edilen TTB miktarlarına göre dengeli ve dengesiz durumlarda görüldüğü gibi üçgen bağlı STATKOM TTB miktarı, dört telli topolojiye göre daha azdır. Bu nedenle TTB ve şebeke kirliliği bakımında üçgen bağlı STATKOM topolojisi daha uygun görülmektedir.

Çizelge 6.3. Dengeli ve dengesiz durumlar için TTB Kaşılaştırması

| STATKOM Tipi | Dengeli | | | Dengesiz |
|-----------------------|---------|---------------------|---------------------|----------|
| | Akım | TTB (Tam Endüktif) | TTB (Tam Kapasitif) | TTB |
| Dört Telli (Devre II) | I_a | 1.3 | 1.7 | 18.6 |
| | I_b | 1.3 | 1.7 | 1742 |
| | I_c | 1.3 | 1.7 | 7.7 |
| Üçgen | I_a | 1 | 0.6 | 17.0 |
| | I_b | 1 | 0.6 | 10.0 |
| | I_c | 1 | 0.6 | 27.0 |

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.Bölümde iletim sistemlerinde kullanılan dört telli ve üçgen bağlı STATKOM topolojilerin, reaktif güç tepkileri, akım ve gerilim harmonik analizleri yapılmıştır. Yapılan benzetim sonuçları özet olarak aşağıda verilmiştir;

7.1 Dört telli Devre-I sonuçları

1) Reaktif güç değişimi anındaki DA bağ gerilimi 510 Volt'ta tutulmaktadır. Şekil 5.2'de görüldüğü gibi güç değişimi anındaki geçişler kabul edilebilir bir zaman aralığında gerçekleşmiş ve hiçbir geçici rejim olayı yoktur.

2) Reaktif güç tepkisi dengeli (Endüktif-Kip ve Kapasitif-Kip) ve dengesiz durumlar için 80 ms'dir.

3) Gerilim ve akım harmonik analizleri yapılmış ve 31'e kadar tek harmonik değerleri elde edilmiştir.

3.1) Çevirgeç faz-nötür gerilim harmonik değerlerine göre, dengeli ve dengesiz durumlarda gerilim harmonik değerleri ve gerilim THB oranlarının standart limitlerin üstünde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni STATKOM'un ürettiği kare dalgadaki tek harmonik bileşenlerinin fazla olmasıdır.

3.2) OBN faz-nötür gerilimleri THB değerlerine göre, dengeli durumlarda gerilim harmonik değerlerinin verilen standart limitlerin altında olduğu görülmektedir. Ancak dengesiz durum için bazı fazlardaki 3.harmonik yüzdesi standart limitin üstünde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni STATKOM'un ürettiği kare dalgadaki 3.harmonik bileşeninin fazla olmasıdır. Sonuçta toplam THB değeri limitleri geçmemektedir.

3.3) Çevirgeç faz-faz gerilimleri THB değerine göre, dengeli durumlarda 3.harmonik değerlerinin verilen standart limitlerin altında olduğu görülmektedir. Faz-faz ölçüm nedeniyle 3.harmonik yüzdesinin limitlerin çok altında olduğu görülmektedir, ancak dengesiz durum için farklıdır. Bu durumda dengesizlik olduğu için Çizelge 5.9'da görüldüğü gibi hem 3.harmonik ve hem diğer tek harmoniklerin mevcut olduğu ve limit değerlerin geçildiği görülmektedir.

3.4) OBN faz-faz gerilimleri THB değerine göre, dengeli durumlarda tüm harmonik değerlerinin verilen standart limitlerin altında olduğu görülmektedir. Faz-faz

harmonik bileşenlerinin ölçüm nedeniyle 3.harmonik yüzdesinin limitlerin çok altında olduğu görülmektedir. Kullanılan 5,7,11,13 ve 17.harmonik süzgeçlerden dolayı ortak bağlantı noktasındaki gerilim harmonik değerleri ve THB miktarı limitlerin altındadır. Dengeli durumlar için çevirgeç faz-nötür ve faz-faz, OBN faz-nötür ve faz-faz THB değerleri Çizelge 7.1'de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Çevirgeç ve OBN THB Miktarları

| Dört telli bağlı STATKOM (Devre-I) | Tam Endüktif Çalışma Sırasındaki THB (%) | Tam Kapasitif Çalışma Sırasındaki THB (%) | IEEE Std. 519-1992 |
|------------------------------------|--|---|--------------------|
| Çevirgeç faz-nötür | 178 | 49.8 | 8 |
| Ortak Bağlantı Noktası faz-nötür | 3 | 5 | 8 |
| Çevirgeç faz-faz | 148 | 27.5 | 8 |
| Ortak Bağlantı Noktası faz-faz | 0.6 | 0.53 | 8 |

4) Akım harmonik analizlerinde, endüktif kip ve kapasitif kip dengeli durumlarda 3.harmonik yüzdesi limit değerlerine göre yüksektir. Elde edilen değerler Çizelge 7.2'de verilmiştir.

Çizelge 7.2. Şebeke akımları TTB Miktarları

| Kullanılan STATKOM Topolojisi | Tam Endüktif Çalışma Sırasındaki TTB (%) | Tam Kapasitif Çalışma Sırasındaki TTB (%) | IEEE Std. 519-1992 |
|------------------------------------|--|---|--------------------|
| Dört telli bağlı STATKOM (Devre-I) | 17.5 | 37 | 5 |

TTB'nin yüksek olmasının nedeni, üretilen kare dalgadaki 3.harmonik miktarı ve nötür ilenken bağlantısından akan 3.harmonik akımıdır. Bölüm 5'te verilen akım harmonikleri analiz çizelgelerine göre dengeli durumlar için 5,7,11,13 ve 17.harmoniklerin standartların altında ve 3.harmoniğin verilen standart değerine göre yüksek olduğu görülmektedir.

7.2 Dört telli Devre-II sonuçları

1) Reaktif güç değişimi anındaki DA bağ gerilimi 510 Volt'ta tutulmaktadır. Şekil 5.17'de görüldüğü gibi dengeli durumlarda güç değişimi anındaki geçişler kabul edilebilir bir zaman aralığında yapılmış ve hiçbir geçici rejim olayı olmamıştır. Devre-II'de dengesiz durum için 3.harmonik süzgeci kullanıldığı için DA bağ gerilimi 510 Volt'ta sabit tutulamamıştır.

2) Reaktif güç tepkisi dengeli (Endüktif-Kip ve Kapasitif-Kip) durumlar için 80 ms'dir. Dengesiz durum için 3.harmonik süzgeci kullanımı nedeniyle reaktif güç kompanzasyonu yapılamamıştır.

3) Gerilim harmonik analizleri yapılmış ve 31'e kadar tek harmonik değerleri elde edilmiştir.

3.1) Çevirgeç faz-nötür gerilim harmonik değerlerine göre, Çizelge 5.23, 5.24 ve 5.25'te görüldüğü gibi, dengeli ve dengesiz durumlarda gerilim harmonik değerleri ve gerilim THB değerlerinin standart limitlerin üstünde olduğu görülmektedir. Bunun nedeni STATKOM'un ürettiği kare dalgadaki tek harmonik bileşenlerinin fazla olmasıdır.

3.2) OBN faz-nötür gerilim harmonik değerlerine göre, Çizelge 5.26, 5.27 ve 5.28'de görüldüğü gibi, endüktif-kip dengeli durumda gerilim harmonik değerlerinin limitlerin altında olduğu, ancak ölçümler nötür noktasından olduğu için, 3.harmonik bileşeni yüzdesi limitin üstünde görülmektedir. Kapasitif-kip dengeli durum için de aynı durum vardır, ancak 11.harmonik yüzdesi limitin üstündedir. Her iki durum için THB değeri limitlerin üstündedir. Dengesiz durum için yapılan gerilim harmonik analizlerine göre, görüldüğü gibi dengesiz durum için hem 3.harmonik ve hem 5,7,11,13 ve 17.harmonik değerleri limitleri geçmiştir. Dolayısıyla THB miktarları da limitlerin üstünde görülmektedir.

3.3) Çevirgeç faz-faz gerilim harmonik değerlerine göre, Çizelge 5.29, 5.30 ve 5.31'de görüldüğü gibi, endüktif-kip dengeli durumda, ölçümler faz-faz noktalarından alındığı için, 3. Harmonik değerleri düşüktür. Bu durum için sadece 3 ve 21.harmonik değerleri limitin altındadır. Diğer harmonik değerleri gerilim kare dalga şeklinde olduğu için limit değerini geçmiştir. Kapasitif-kip dengeli durum için aynı şekilde sadece 3, 21 ve 25.harmonik değerleri limitin altındadır. Diğer

yüzdeler limitin üstünde görülmektedir. Dengesizlik miktarına göre, bu durum için tüm harmonik değerleri limitin üstünde görülmektedir.

3.4) OBN faz-faz gerilim harmonik değerlerine göre, Çizelge 5.32, 5.33 ve 5.34'te görüldüğü gibi, tüm durumlar için ortak bağlantı noktasındaki süzgeçlerden dolayı ve ölçüm faz-faz olduğu için, hem 3. Harmonik ve hem diğer gerilim harmonik değerleri limitin altında görülmektedir.

Dengeli durumlarda çevirgeç faz-nötür ve faz-faz, OBN faz-nötür ve faz-faz için THB değerleri Çizelge 7.3'te verilmiştir.

Çizelge 7.3. Çevirgeç ve OBN THB Miktarları

| Dört telli bağlı STATKOM | Tam Endüktif Çalışma Sırasındaki THB (%) | Tam Kapasitif Çalışma Sırasındaki THB (%) | IEEE Std. 519-1992 |
|----------------------------------|--|---|--------------------|
| Çevirgeç faz-nötür | 179 | 49 | 8 |
| Ortak Bağlantı Noktası faz-nötür | 31.7 | 50.4 | 8 |
| Çevirgeç faz-faz | 147 | 30.5 | 8 |
| Ortak Bağlantı Noktası faz-faz | 0.62 | 0.5 | 8 |

4) Akım harmonik analizlerinde, endüktif kip ve kapasitif kip dengeli durumlarda tüm harmonik değerleri limit değerlerinin altındadır. TTB değerleri Çizelge 7.4'te verilmiştir.

Çizelge 7.4. Şebeke akımları TTB Miktarları

| Kullanılan STATKOM Topolojisi | Tam Endüktif Çalışma Sırasındaki TTB (%) | Tam Kapasitif Çalışma Sırasındaki TTB (%) | IEEE Std. 519-1992 |
|-------------------------------------|--|---|--------------------|
| Dört telli bağlı STATKOM (Devre-II) | 1.3 | 1.7 | 5 |

TTB miktarı, dengeli durum için IEEE standartlarına göre sınırının altındadır. Bu benzetimde kullanılan üçüncü harmonik süzgeci nedeniyle dengeli durum harmonik değerleri azalmıştır. Dengesiz durum için, Bölüm 5.1.8.6.'da verilen ayrıntılı akım harmonikleri analizlerine göre 3.harmonik akımı süzölmüştür.

7.3 Üçgen bağlı STATKOM sonuçları

1) Reaktif güç değişimi anındaki DA bağ gerilimi 710 Volt'ta tutulmaktadır. Şekil 5.32'de görüldüğü gibi güç değişimi anındaki geçişler kabul edilebilir bir zaman aralığında yapılmıştır ve hiçbir geçici rejim olayı yoktur.

2) Reaktif güç tepkisi dengeli (Endüktif-Kip ve Kapasitif-Kip) ve dengesiz durumlar için 80 ms'dir.

3) Gerilim harmonik analizleri için 31'e kadar tek harmonik değerleri, standartlarda verilen sınır değerlerle karşılaştırmak için elde edilmiştir.

3.1) Çevirgeç faz-faz gerilim harmonik değerlerine göre, Çizelge 5.45, 5.46, 5.47 ve 5.48'de görüldüğü gibi, hem dengesiz durumlarda, hem de endüktif/kapasitif-kip çalışmalarda, yapılan ölçüm çevirgeçte faz-faz olduğu için harmonikler süzölmüş durumda ölçülmüştür. Dolayısıyla ölçüm sonucu elde edilen değerlere göre, hemen hemen tüm harmonik değerleri limiti geçmiştir.

3.2) OBN faz-faz gerilim harmonik değerlerine göre, Çizelge 5.49, 5.50, 5.51 ve 5.52'de görüldüğü gibi, hem dengesiz durumlarda, hem de endüktif/kapasitif-kip çalışmalarda, yapılan ölçüm ortak bağlantı noktasında faz-faz olduğu için harmonikler süzölmüş durumda ölçülmüştür. Dolayısıyla ölçüm sonucundan elde edilen değerlere göre, hemen heme tüm harmonik değerlerin limitin altında olduğu görülmektedir. Dengeli durumlarda çevirgeç faz-faz, OBN faz-faz için THB değerleri çizelge 8.8'de verilmiştir.

Çizelge 7.5. Çevirgeç ve OBN THB Miktarları

| Dört telli bağlı STATKOM | Tam Endüktif Çalışma Sırasındaki THB (%) | Tam Kapasitif Çalışma Sırasındaki THB (%) | IEEE Std. 519-1992 |
|--------------------------------|--|---|--------------------|
| Çevirgeç faz-faz | 154 | 32 | 8 |
| Ortak Bağlantı Noktası faz-faz | 0.3 | 1.8 | 8 |

4) Akım harmonik analizlerinde, endüktif kip ve kapasitif kip dengeli durumlar için tüm harmonik değerleri limit değerlerin altındadır. THB değerleri Çizelge 7.6'da verilmiştir.

Çizelge 7.6. Şebeke akımları TTB Miktarları

| Kullanılan STATKOM Topolojisi | Tam Endüktif Çalışma Sırasındaki TTB (%) | Tam Kapasitif Çalışma Sırasındaki TTB (%) | IEEE Std. 519-1992 |
|-------------------------------|--|---|--------------------|
| Üçgen bağlı STATKOM | 1 | 0.6 | 5 |

TTB miktarı dengeli iken IEEE standartlarına göre sınırı altındadır. Benzetimde kullanılan harmonik süzgeçleri için harmonik değerleri azalmıştır. Bölüm 5.2.8'de verilen ayrıntılı akım harmonikleri analizinde 3,5,7,11,13 ve 17. Harmonikler standart limitlerin altındadır. Çizelge 7.6'da görüldüğü gibi üçüncü harmonik üçgen bağlı STATKOM'un içerisinde dolaştığı için şebekede etkisi azalmıştır.

7.4 Öneriler

7.Bölümde yapılan karşılaştırmalara göre STATKOM (Devre-II), STATKOM (Devre-I)'e göre daha avantajlıdır. STATKOM (Devre-II) topolojisinde üçüncü harmonik süzgeci kullanıldığı için, dengesiz durumlarda reaktif güç kompanzasyonu yapılamamıştır. STATKOM (Devre-II)'yi hem dengeli ve hem dengesiz durumlarda kullanmak için Şekil 6.1'e önerilen anahtar, 3.harmonik süzgecini dengesiz durumlar için bypass edecektir. Böylece dengeli durumlarda 3.harmonik süzgeci devrede olacaktır. Dengesiz durumda, 3.harmonik süzgecin bypass olunmasıyla, reaktif güç kompanzasyonu yapılacaktır. Sonuçta iki topoloji birleşimiyle yeni bir topoloji elde edilir. Bu yöntem kolaylıkla AG pratik uygulamalar için kullanılabilir.

Üçgen bağlı STATKOM için elde edilen THB ve TTB miktarlarına göre, bu topolojide 3.harmonik akımlar dengeli ve dengesiz durumlarda üçgen bağlantısı içerisinde dolaştığı için hatlarda çok az miktarda bulunmaktadır. Aynı zamanda dengeli ve dengesiz durumlar için hem harmonik süzme, hem de reaktif güç kompanzasyonu yapılabilir. Üçgen bağlı STATKOM topolojisi OG pratik uygulamalarda kolaylıkla kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] M.H. Baker, B.D. Gemmell, C. Chorwill, D.J. Hanson, STATCOM Helps to Guarantee a Stable System, IEEE/ PES Transmisson and Distribution Conference and Exposition 2 (2001) 1129-1132.
- [2] S. Suresh Kumar, V. Subbiah, A. Kandaswany, G. Dinesh Kumar, R. Sujay, S. Manoharan, A State of Art STATCOM for Instantaneous Var Compensation and Harmonic Suppression to Enhance Power Quality, Quality and Security of Electric Power Delivery Systems, CIGRE/IEEE PES International Symposium (2003) 86-90.
- [3] Ricardo Davalos Marin, Detailed analysis of a multi-pulse STATCOM, Doktora Öncesi Tezi, CINVESTAV - Unidad Guadalajara (2003).
- [4] Kalyan K. Sen, Static Synchronous Compensator:Theory, Modelling and Applications, IEEE Transactions on Power Delivery, 13 (1) (1998), 241 – 246.
- [5] Bayram, M., Kuvvetli Akım Tesislerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2000
- [6] Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği Ve Kalitesi Yönetmeliği, T. C. Enerji Piyasasi Düzenleme Kurumu (2004).
- [7] Cem Özgür GERÇEK ve Burhan GÜLTEKİN, TÜBİTAK-Bilten Güç Kalitesi Milli Projesi Alt Proje 8: STATKOM Teknik Raporu, Ankara, Eylül 2007.
- [8] Yong Hua Song, Allan T Johns, Flexible AC Transmision Systems (FACTS) , Published By: The İstitution Of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 1999.
- [9] ABB, STATCOM Converter solutions for reliable and stable grids. [http://www05.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/81e499e35cc1e8f8c12571220051ede1/\\$File/Statcom.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/81e499e35cc1e8f8c12571220051ede1/$File/Statcom.pdf)
- [10] Alper Çetin, Design and İmplementation Of A Voltage Source Converter Based STATCOM For Reactive Power Compensation And Harmonic Filtering, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Doktora Tezi, ÖDTÜ, Ankara, 2007.

- [11] Armağan Akgül, Modelling and simulation of a STATCOM for use in transmission systems, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, 2007.
- [12] Jose Rodriguez, J S Lai and F. Z. Peng, Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 49, no. 4, pp. 724-738, August 2002
- [13] C. Schauder and H. Mehta, Vector analysis and control of advanced static VAR compensators, Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 140, no. 4, pp. 299–306, July 1993
- [14] Mohammad H.Rashid, Power electronic Hand Book, Academic Press 2001
- [15] Ned MOHAN, Tore M. UNDELAND, William P. ROBBINS, Power electronics Applications and design, 2nd Edition, 2002.
- [16] Fatih Tefvik Apay, Güç Kalitesi Parametrelerinin Ölçülmesi ve Değerlendirilmesi, F.B.E. Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Tesisleri Programında Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 2008.
- [17] Miller T. J. E., Reactive Power Control in Electric Systems, General Electric Company Corporate Research and Development Center, Schenectady, New York, pp. 33-37, 1982
- [18] Erdinç Yalvaç, Compensation of various SVC topologies and control strategies for heavy industry, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Ankara, 2009
- [19] Teratam Bunyagul, and Somchai Chatratana, Analysis and Performance Investigation of a Cascaded Multilevel STATCOM for Power System Voltage Regulation Nitus Voraphonpiput, International Energy Journal, 8 (2), 2007.
- [20] Jos Arrillaga and Neville R. Watson, Power system harmonics second edition, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2003.
- [21] MIRUS International Inc. Frequently Asked Questions, Harmonic Mitigating Transformers. http://www.mirusinternational.com/downloads/hmt_faq19.pdf

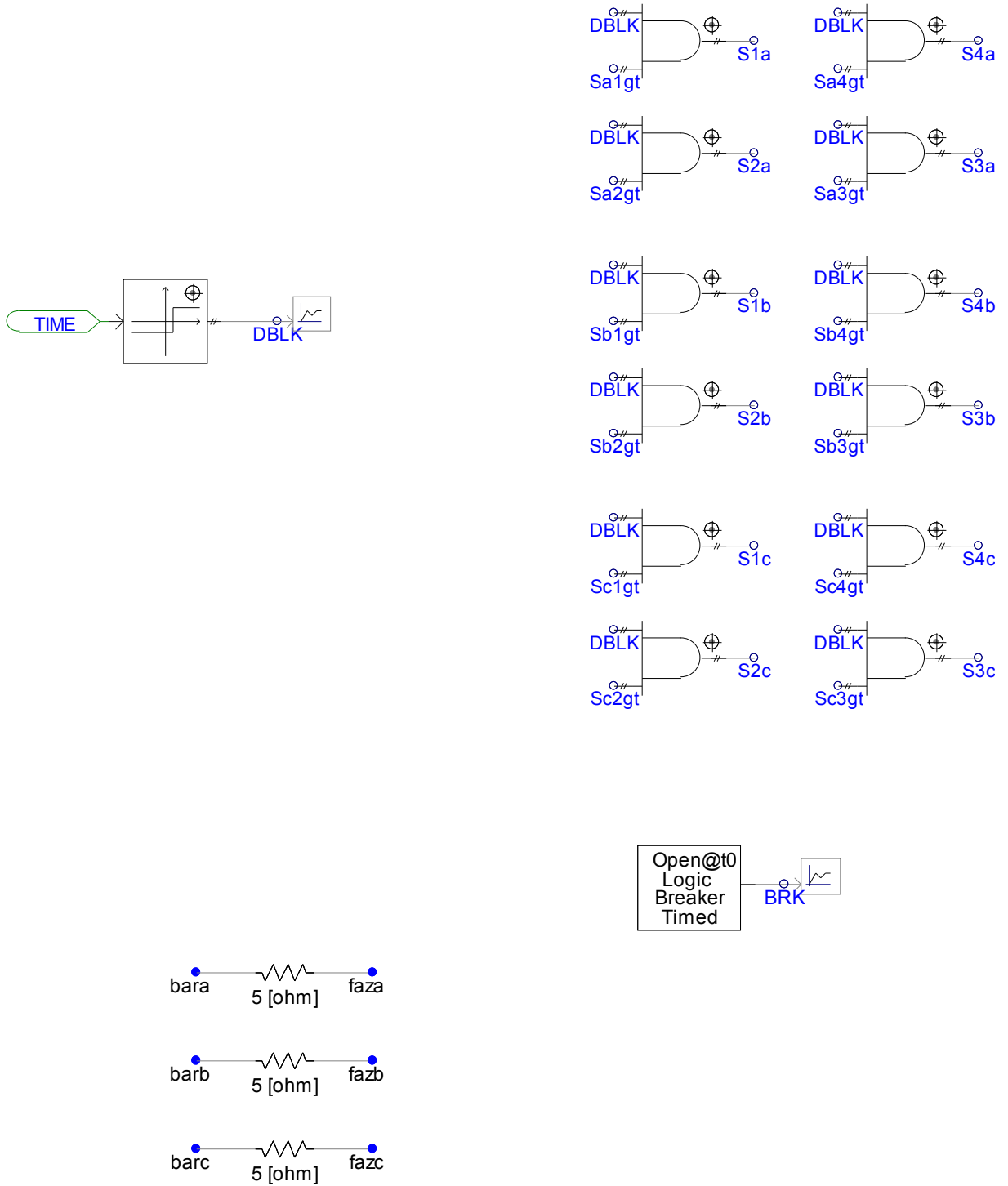
[22] M.L. Crow, Zhiping Yang, STATCOM Control for Power system Voltage Control Applications, IEEE Transactions on Power Delivery, 15 (4) (2000), 1311 – 1317.

[23] Carlos A.C Cavaliere, Edson H. Watanabe, Mauricio Aredes, Multipulse STATCOM Operation Under Unbalanced Voltages, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 1 (2002), 567 - 572.

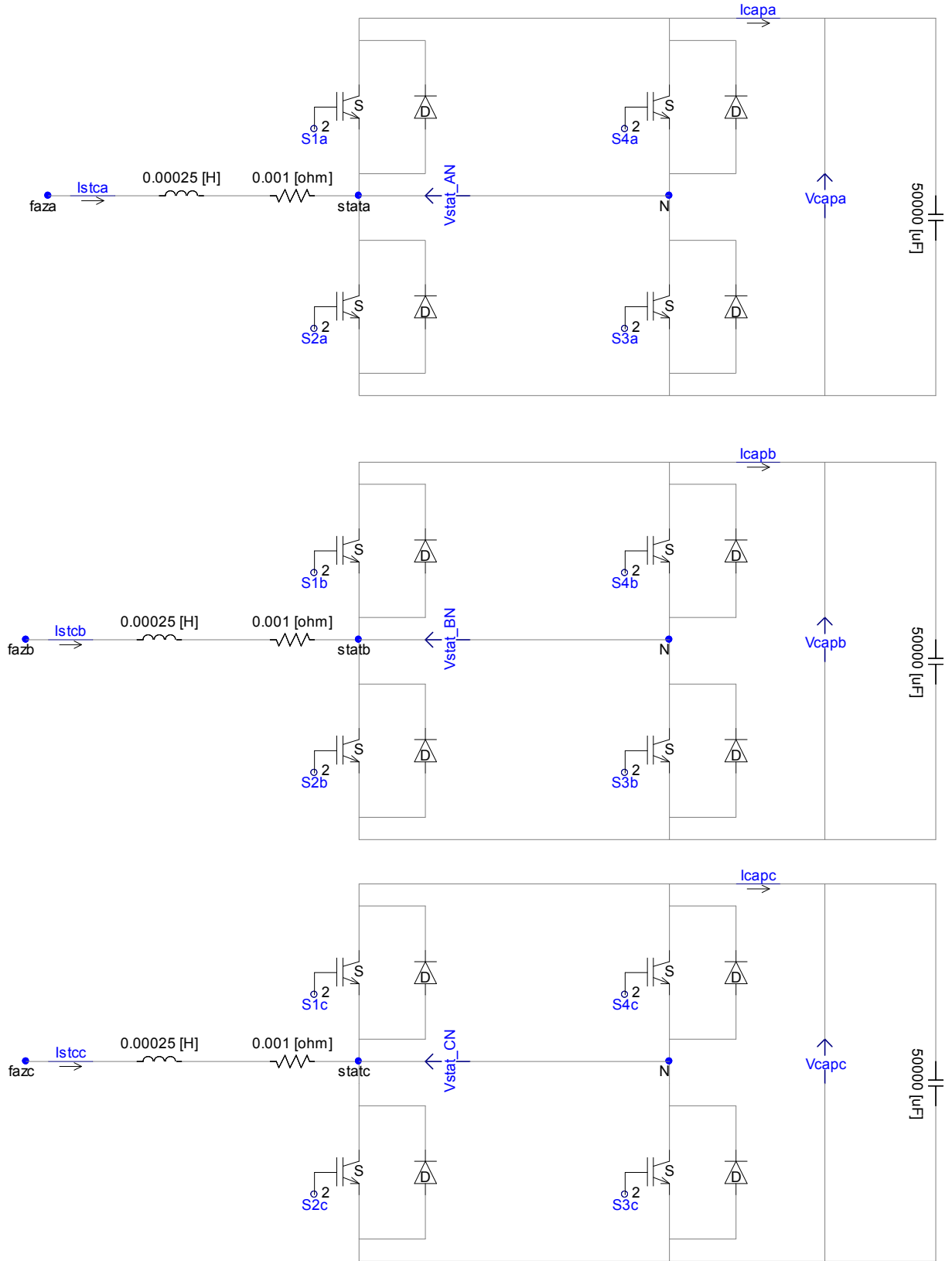
[24] IEEE Std 519-1992, Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 1993.

[25] Elektrik Piyasasında Dağıtım Sisteminde Sunulan Elektrik Enerjisinin Tedarik Sürekliliği, Ticari Ve Teknik Kalitesi Hakkında Yönetmelik, T. C. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (2007).

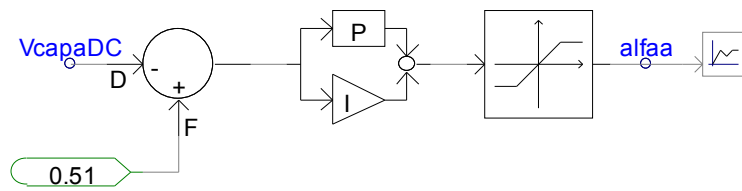
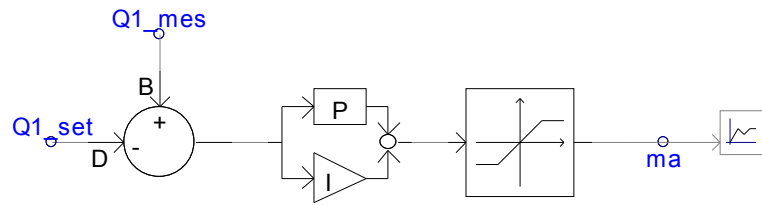
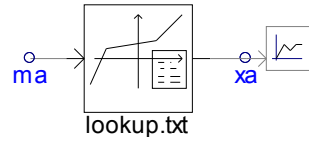
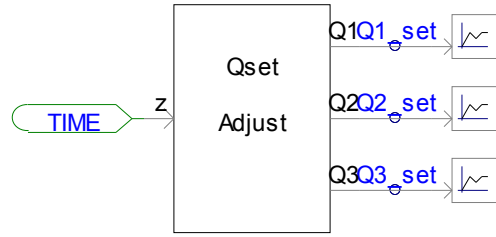
EK-2 Kondansatör ön şarj devresinin PSCAD devre şeması



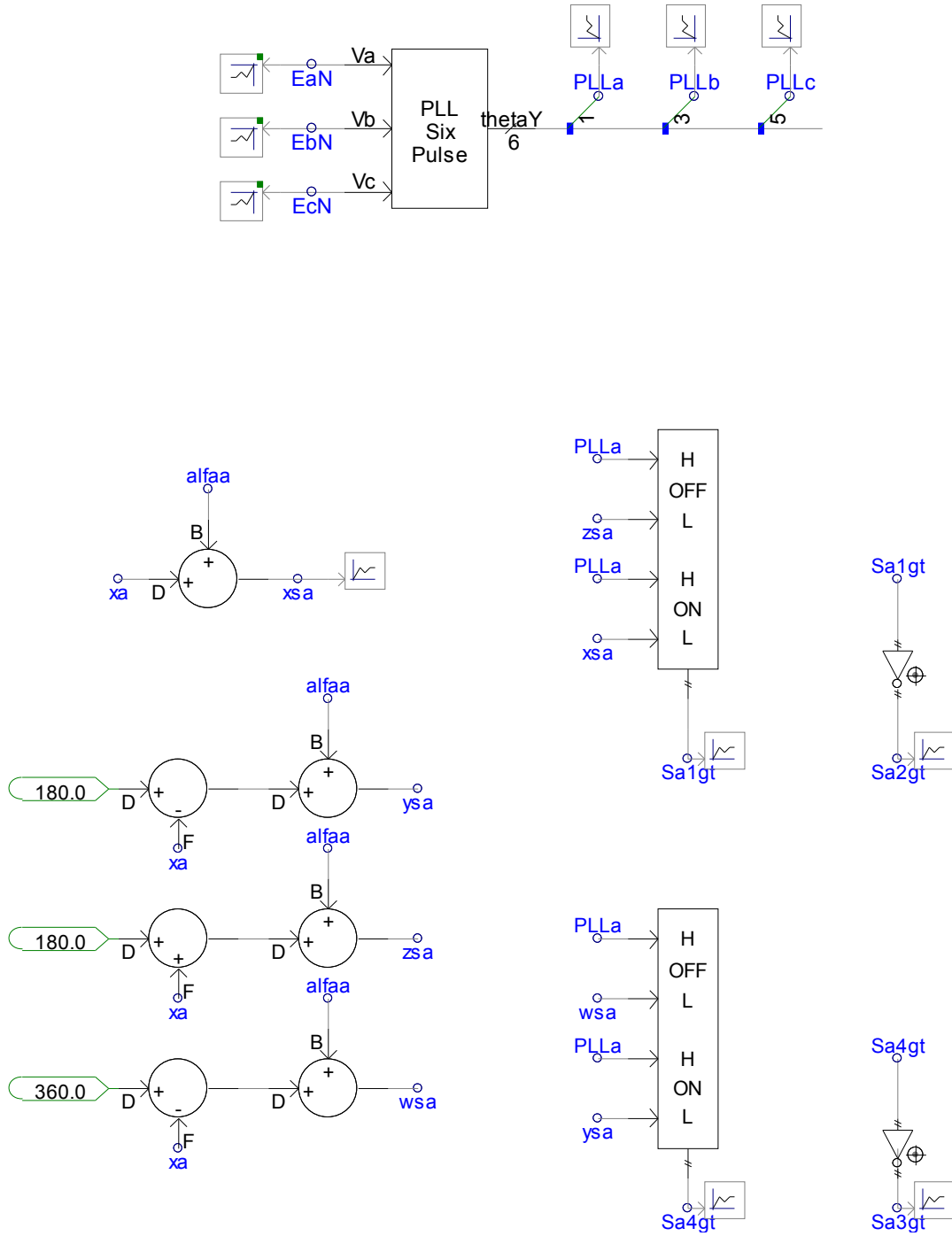
EK-3 Dört telli bağlı STATKOM'un PSCAD devre şeması



EK-4 Reaktif güç, teta ve alfa açısı kontrol Bloğunun PSCAD devre şemaları

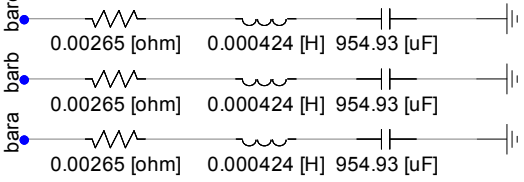


EK-5 PLL (Faz Kilitlemeli Döngü) bloğunun PSCAD devre şeması

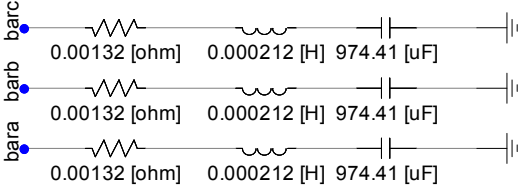


EK-6 3,5,7,11,13 ve 17. Harmonik Süzgeçlerinin PSCAD devre şemaları

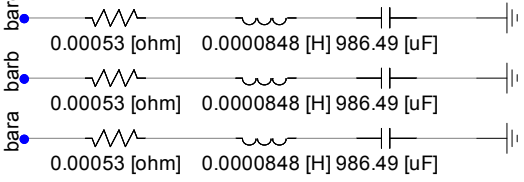
5th harmonik filtre



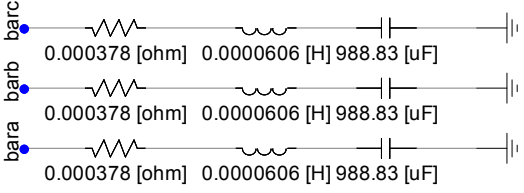
7th harmonik filtre



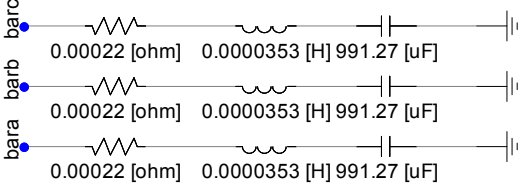
11th harmonik filtre



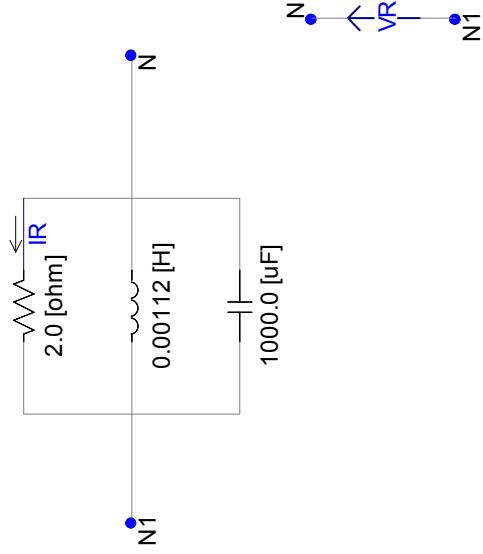
13th harmonik filtre



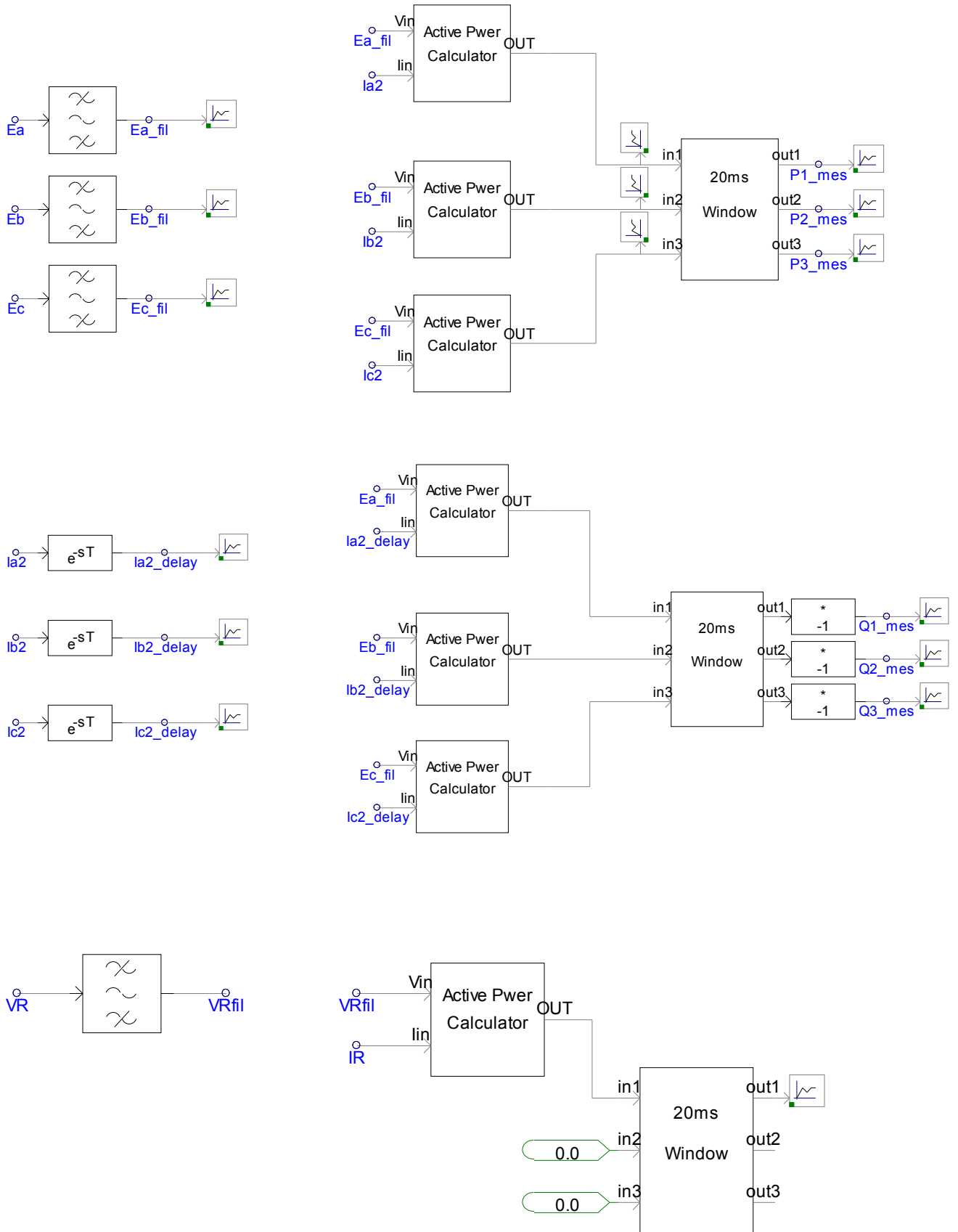
17th harmonik filtre



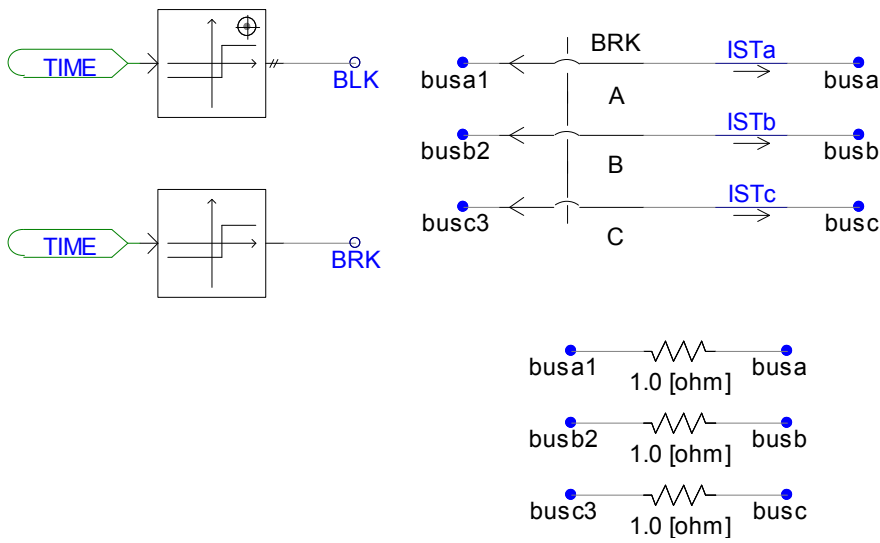
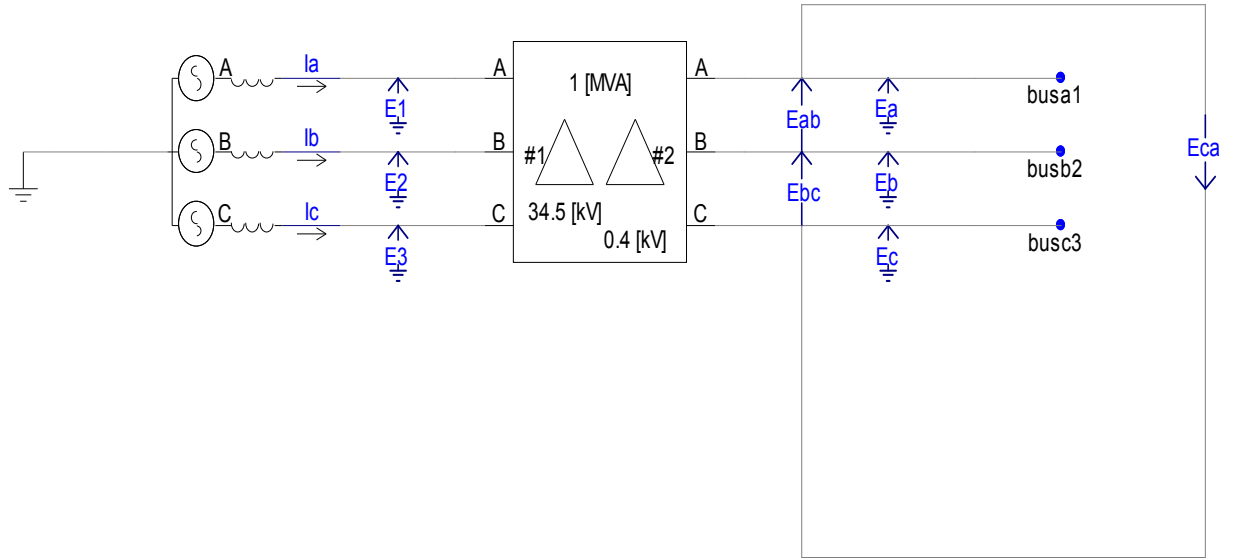
3. Harmonik filtre



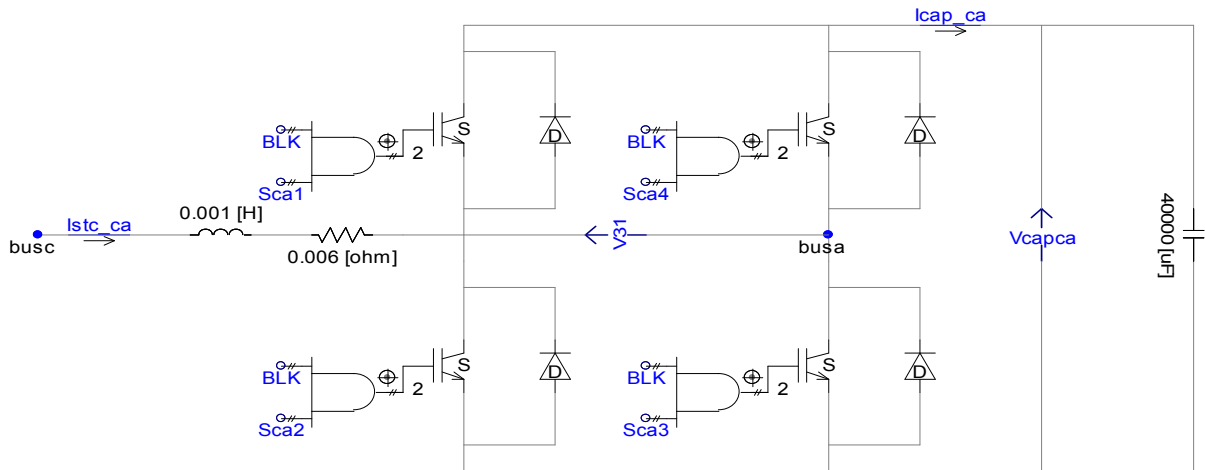
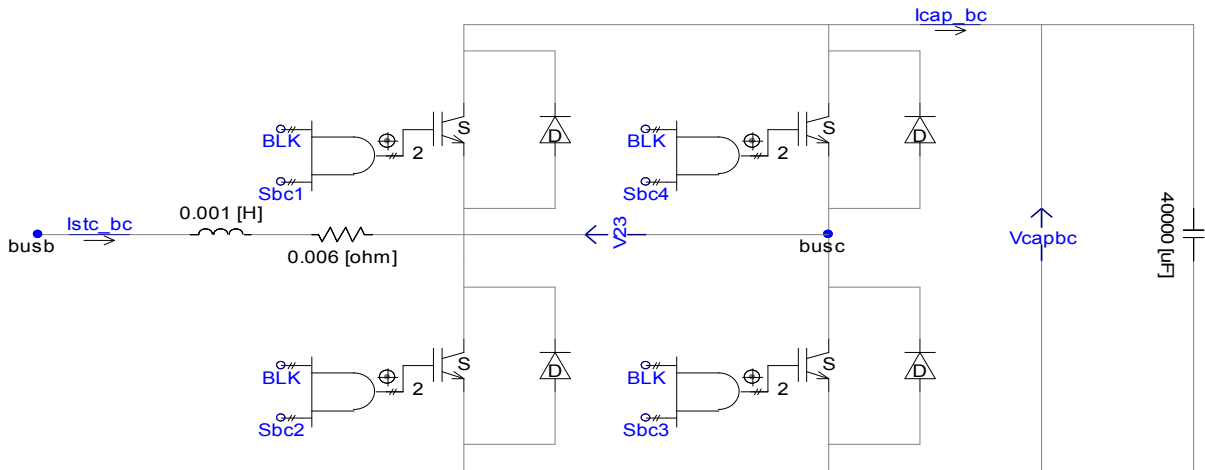
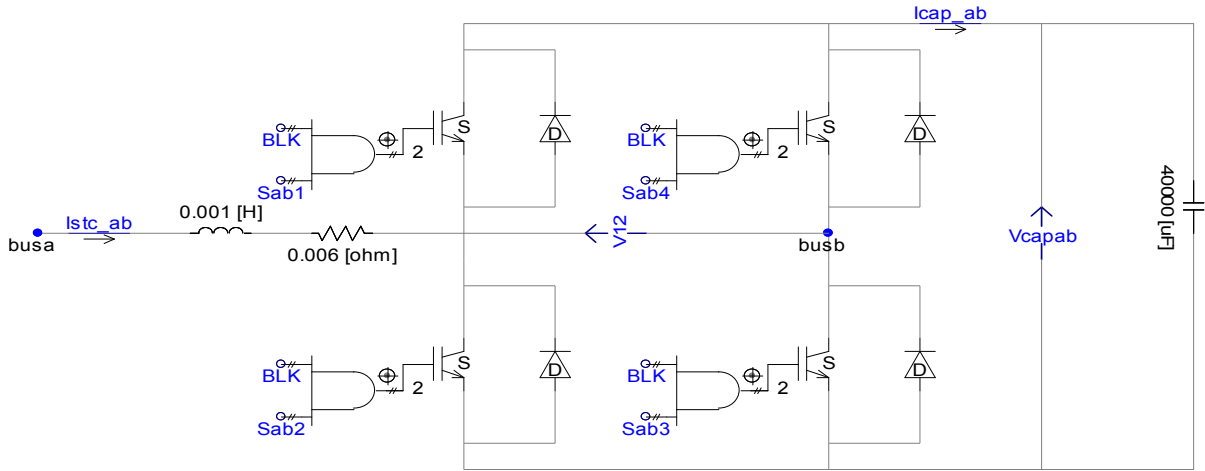
EK-7 Aktif ve reaktif güç hesaplama Bloğunun PSCAD devre şemaları



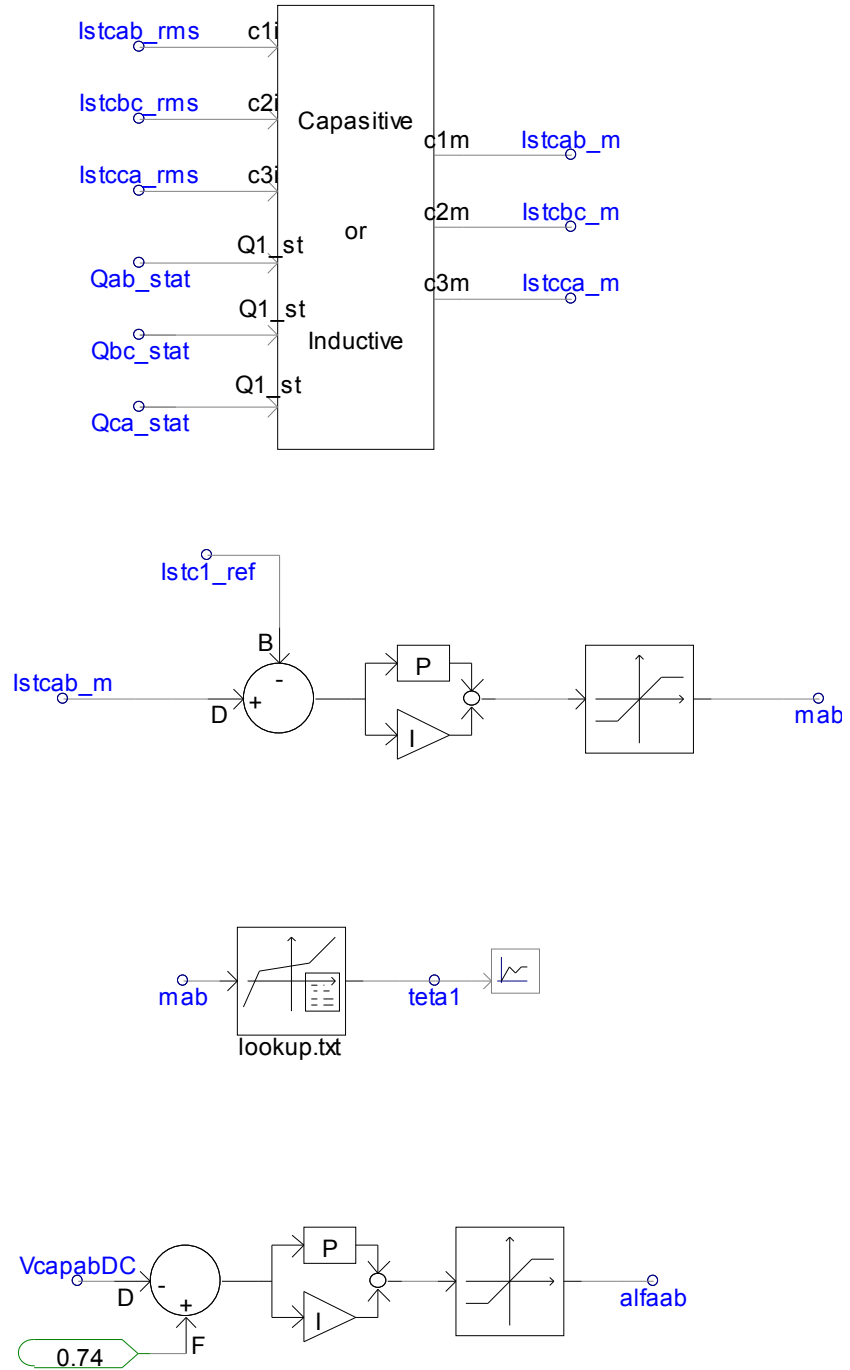
EK-8 Üçgen bağlı STATKOM'un güç devresinin PSCAD devre şeması



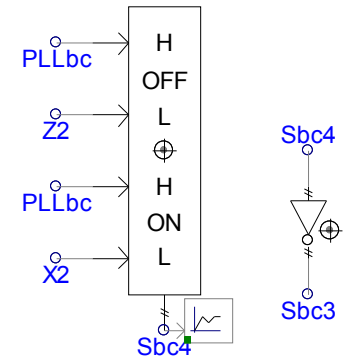
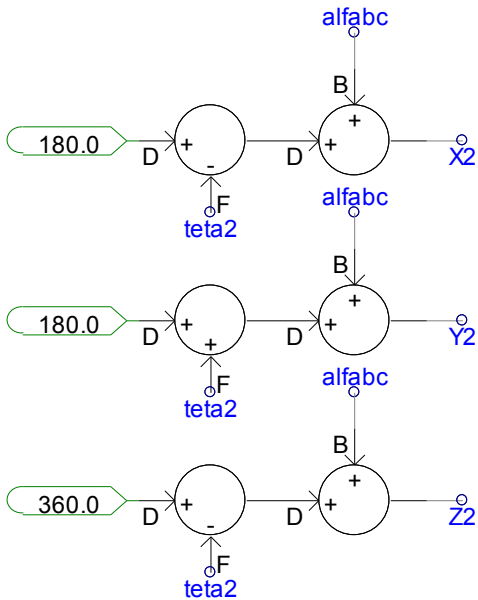
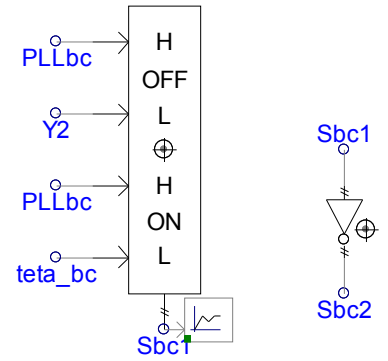
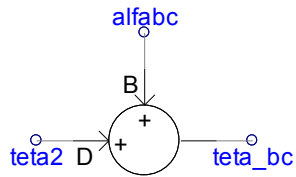
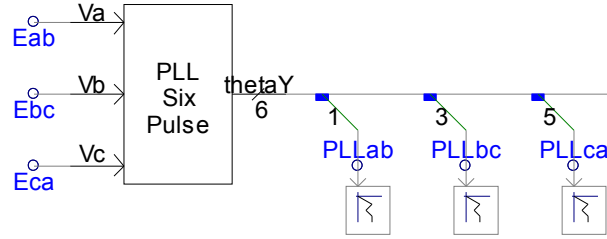
EK-9 Üçgen bağlı STATKOM'un PSCAD devre şeması



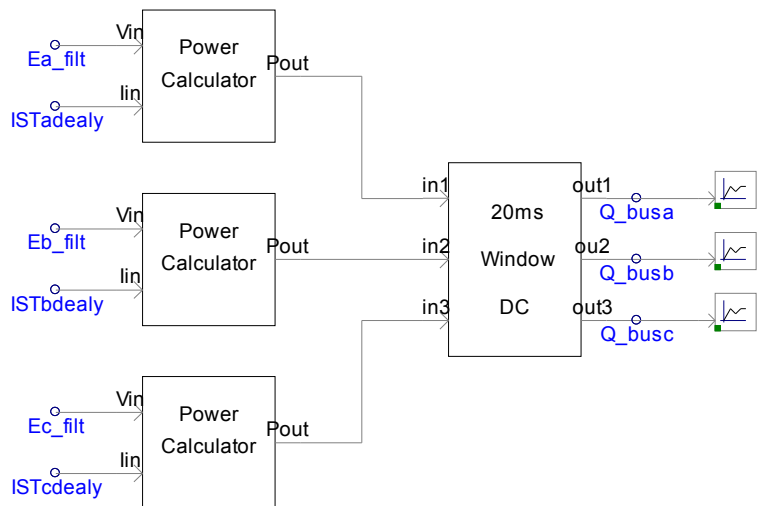
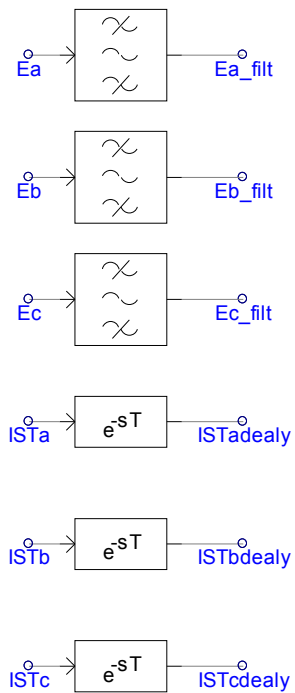
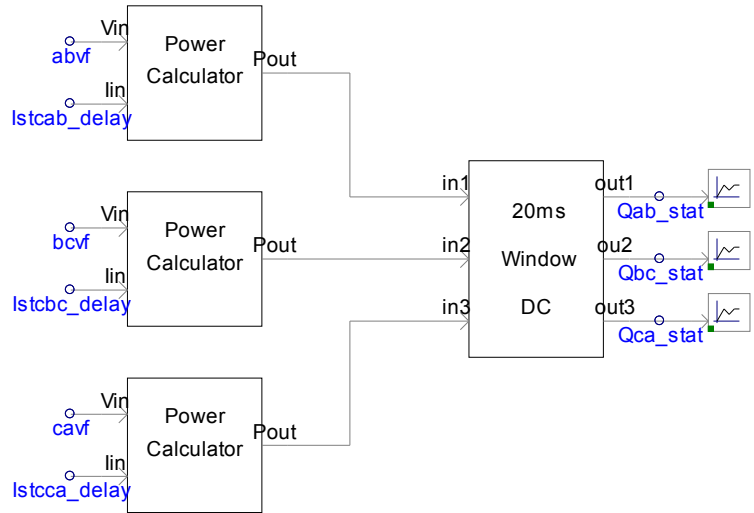
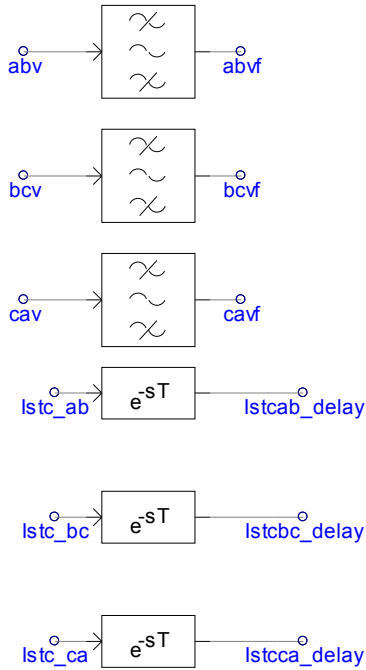
EK-10 Referans akım, teta ve alfa açısı kontrol bloğunun PSCAD devre şemaları



EK-11 Üçge bağlı STATKOM için kullanılan PLL (Faz Kilitlemeli Döngü) bloğunun PSCAD devre şemaları



EK -12 STATKOM ve bara reaktif güç hesaplama bloğunun PSCAD devre şemaları



EK-13 Elektrik piyasasında sunulan yönetmelik

Gerilim Harmonikleri için Sınır Değerler

| Tek Harmonikler | | | | Çift Harmonikler | |
|-------------------------|-----------------|----------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| 3'un Katları Olmayanlar | | 3'un Katları Olanlar | | Harmonik Sırası h | Sınır Değer (%) |
| Harmonik Sırası h | Sınır Değer (%) | Harmonik Sırası h | Sınır Değer (%) | | |
| 5 | % 6 | 3 | % 5 | 2 | % 2 |
| 7 | % 5 | 9 | % 1,5 | 4 | % 1 |
| 11 | % 3,5 | 15 | % 0,5 | 6.....24 | % 0,5 |
| 13 | % 3 | 21 | % 0,5 | | |
| 17 | % 2 | | | | |
| 19 | % 1,5 | | | | |
| 23 | % 1,5 | | | | |
| 25 | % 1,5 | | | | |

THB değeri (40. harmoniğe kadar değerler dâhil) en fazla % 8 olarak uygulanır.

Akım Harmonikleri için Maksimum Yük Akımına (IL) göre Sınır Değerler

| Tek Harmonikler | | | | | | |
|-----------------|------|------------------|------------------|------------------|-------------|------|
| I_{sc}/I_L | <11 | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $35 \leq h$ | TTB |
| <20* | 4.0 | 2.0 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 5.0 |
| 20<50 | 7.0 | 3.5 | 2.5 | 1.0 | 0.5 | 8.0 |
| 50<100 | 10.0 | 4.5 | 4.0 | 1.5 | 0.7 | 12.0 |
| 100<1000 | 12.0 | 5.5 | 5.0 | 2.0 | 1.0 | 15.0 |
| >1000 | 15.0 | 7.0 | 6.0 | 2.5 | 1.4 | 20.0 |

Çift harmonikler, kendinden sonraki tek harmonik için tanımlanan değerlerin %25'i ile sınırlandırılmıştır.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Habib Behpoor

Dogum Yeri : İran

Dogum Yılı : 1977

Medeni Hali : Evli

Egitim ve Akademik Durumu:

Lise 1993 -1994 Cefer Abad İmam humeyni Matamatik ve Fizik Lisesi

Lise 1994 -1995 Pars Abad 17 şehriver Matamatik ve Fizik Lisesi

Lise 1996 -1999 Ardebil Misag Matamatik ve Fizik Lisesi

Ön Lisans 1999 -2001 Ahar Azad İslami Üniversitesi

Lisans 2004-2006 Tabriz Azad İslami Üniversitesi,

Yabancı Dil: İngilizce

İş Tecrübesi:

2006 - 2007 Fen Eğitim Okulu Öğretmenliği, İran.

2008-2009 Hacettepe Üniversitesi'nde güç kalitesi milli projesi'nde bursiye olarak çalıştım. Ankara, Türkiye.