

T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

## **STATCOM İLE GÜÇ AKIŞ KONTROLÜ**

Resul ÇÖTELİ

Tez Yöneticisi

Yrd. Doç. Dr. Zafer AYDOĞMUŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2006

T.C.  
FIRAT ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

## STATCOM İLE GÜÇ AKIŞ KONTROLÜ

Resul ÇÖTELİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Bu tez, ..... tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Zafer AYDOĞMUŞ

Üye: Prof. Dr. Mehmet CEBECİ

Üye: Yrd. Doç. Dr. Çetin GENCER

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu 'nun ...../...../..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında bana bilgi ve tecrübesi ile her zaman yardımcı olan değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Zafer AYDOğMUŞ 'a, ayrıca her konuda bana yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Hüseyin ALTUN 'a, Sayın Yrd. Doç. Dr. Beőir DANDIL 'a, Sayın Yrd. Doç. Dr. Selçuk YILDIRIM 'a, Öğr. Gör. Cafer BAL 'a ve Arş. Gör. Abdulkadir ŐENGÜR 'e teşekkür ederim.

Arş. Gör. Resul ÇÖTELİ

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	
İÇİNDEKİLER.....	I
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	II
TABLolar LİSTESİ.....	V
SİMGELER.....	VI
KISALTMALAR.....	VIII
ÖZET.....	IX
ABSTRACT.....	X
1. GİRİŞ.....	1
2. DÖNÜŞTÜRÜCÜLER .....	4
2.1. Akım Beslemeli Dönüştürücüler.....	4
2.2. Gerilim Beslemeli Dönüştürücüler .....	5
2.3. Tek Fazlı Gerilim Beslemeli Dönüştürücüler.....	6
2.4. Üç Fazlı Gerilim Beslemeli Dönüştürücüler.....	10
2.5. Çok Darbeli Gerilim Beslemeli Dönüştürücüler .....	16
2.6. Çok Seviyeli Gerilim Beslemeli Dönüştürücüler .....	20
2.7. Darbe Genişlik Modülasyonlu Gerilim Beslemeli Dönüştürücüler.....	25
3. STATCOM.....	29
3.1. STATCOM İçin Temel Kontrol Yaklaşımları.....	42
4. BENZETİM SONUÇLARI.....	48
5. SONUÇLAR.....	62
KAYNAKLAR.....	64
ÖZGEÇMİŞ.....	67
EK-1 d-q ve $\alpha - \beta$ DÖNÜŞÜMLERİ	

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1 Üç fazlı bir ABD.....	5
Şekil 2.2 Tek fazlı tam dalga GBD ve akım-gerilimlerinin dalga şekli .....	7
Şekil 2.3 GBD 'nin bir faz bacağı ve bir faz bacağının çıkış geriliminin dalga şekli.....	8
Şekil 2.4 Üç fazlı iki seviyeli GBD.....	10
Şekil 2.5 Şekil 2.4 'teki üç fazlı GBD 'nin akım ve gerilimlerinin dalga şekilleri.....	11
Şekil 2.6 GBD 'nin bir faz bacağının 4 bölgede çalışması, akım-gerilim dalga şekilleri ve fazör diyagramı .....	15
Şekil 2.7 a) 12 darbeli dönüştürücü, b) İki adet 6 darbeli dalgadan 12 darbeli dalganın elde edilmesi.....	19
Şekil 2.8 24 darbeli GBD çalışmasının farklı şekillerde elde edilmesi a) Alternatif gerilim tarafında seri bağlı iki adet 12 darbeli dönüştürücü ile 24 darbeli dönüştürücü çalışması elde etmek için transformatör bağlantısı, b) AA tarafında paralel bağlı iki adet 12 darbeli dönüştürücü ile 24 darbeli dönüştürücü çalışması elde etmek için transformatör bağlantısı.....	20
Şekil 2.9 ÇS-GBD 'nin eşdeğer devresi.....	22
Şekil 2.10 Üç seviyeli diyot kenetlemeli ÇS-GBD 'nin bir faz bacağı.....	22
Şekil 2.11 Üç seviyeli kondansatör kenetlemeli ÇS-GBD 'nin bir faz bacağı.....	24
Şekil 2.12 5 seviyeli P2 ÇS-GBD 'nin bir faz eşdeğer devresi.....	24
Şekil 2.13 Kaskat ÇS-GBD 'nin tek fazlı devresi.....	25
Şekil 2.14 Ana frekansın dokuz katı bir anahtarlama frekansı ile DGM dönüştürücünün çalışması, a) Bir faz bacağı, b) DGM dalgaları.....	26
Şekil 3.1 STATCOM 'un genel gösterimi.....	32
Şekil 3.2 GBD 'nin dört bölgede çalışması.....	33
Şekil 3.3 SVG 'nin temel çalışma prensibi.....	34
Şekil 3.4 İleri güç faktöründe dönüştürücü ile güç sistemin akım-gerilimleri arasındaki faz ilişkisi.....	35
Şekil 3.5 SVG 'nin akım ve gerilim dalga şekli.....	37

<b>Şekil 3.6</b> GBD tabanlı Var generatörün V-I çalışma bölgesi.....	39
<b>Şekil 3.7</b> 48 darbeli $\pm 100$ MVAR GBD tabanlı SVG 'nin VAR çıkışına karşı meydana gelen kayıplar.....	40
<b>Şekil 3.8</b> 12 darbeli seri bağlı geleneksel STATCOM devresi.....	42
<b>Şekil 3.9</b> İç kontrolünün şematik olarak gösterilmesi.....	43
<b>Şekil 3.10</b> GBD tabanlı SVG 'lerde kondansatör geriliminin değiştirilmesi ile (dolaylı kontrol) reaktif çıkışın kontrolü.....	44
<b>Şekil 3.11</b> DGM-STATCOM devresi.....	45
<b>Şekil 3.12</b> GBD kullanılarak yapılan SVG 'lerde iç gerilim kontrolü ile (doğrudan kontrol) reaktif çıkışın kontrolü .....	46
<b>Şekil 3.13</b> Gerilim kontrol sisteminin genel blok diyagramı.....	46
<b>Şekil 4.1</b> DGM-STATCOM 'un kontrol şeması.....	48
<b>Şekil 4.2</b> MATLAB Simulink 'te oluşturulan güç sistemi ve DGM-STATCOM devre modeli.....	49
<b>Şekil 4.3</b> STATCOM devresinin kontrolör kısmı.....	50
<b>Şekil 4.4</b> Doğru gerilim kontrolünün iç yapısı.....	50
<b>Şekil 4.5</b> STATCOM 'un bağlı bulunduğu baranın akımının $I_q$ bileşeninin değişimi.....	51
<b>Şekil 4.6</b> STATCOM 'un bağlı bulunduğu baranın akımının $I_d$ bileşeninin değişimi.....	52
<b>Şekil 4.7</b> Benzetimi yapılan sistemde dönüştürücünün doğru geriliminin değişimi.....	53
<b>Şekil 4.8</b> STATCOM 'un indüktif çalışmadan kapasitif çalışmaya geçişi anında STATCOM 'un bağlı bulunduğu baranın akımı ve gerilimi arasındaki faz ilişkisi.....	53
<b>Şekil 4.9</b> Modülasyon indeksinin değişimi.....	54
<b>Şekil 4.10</b> İkinci benzetim uygulaması için STATCOM 'un akımının $I_q$ bileşeninin değişimi.....	55
<b>Şekil 4.11</b> İkinci benzetim uygulaması için STATCOM 'un akımının $I_d$ bileşeninin değişimi.....	56
<b>Şekil 4.12</b> İkinci benzetim uygulaması için modülasyon indeksinin değişimi.....	56
<b>Şekil 4.13</b> İkinci benzetim uygulaması için STATCOM 'un akım ve gerilimi arasındaki faz ilişkisi.....	57
<b>Şekil 4.14</b> İkinci benzetim uygulaması için STATCOM 'un doğru geriliminin değişimi .....	58
<b>Şekil 4.15</b> 58 MVA 'lık 0.85 geride güç faktörlü 3 adet yükün geleneksel STATCOM ile kompanzasyon yapılması durumunda bara akım ve geriliminin değişimi.....	58

<b>Şekil 4.16</b>	Geleneksel STATCOM 'un bağlı bulunduğu barada reaktif gücün değişimi.....	59
<b>Şekil 4.17</b>	Geleneksel STATCOM 'un bağlı bulunduğu barada aktif gücün değişimi.....	60
<b>Şekil 4.18</b>	Geleneksel STATCOM 'un doğru geriliminin değişimi.....	60
<b>Şekil 4.19</b>	Benzetim programında kullanılan GBD 'nin çıkış gerilimi.....	61

## TABLULAR LİSTESİ

<b>Tablo</b>	<b>Sayfa</b>
<b>Tablo 2.1</b> Üç fazlı iki seviyeli GBD için anahtarlama özelliği.....	12
<b>Tablo 2.2</b> Üç fazlı iki seviyeli GBD 'nin faz-nötr gerilimi için anahtarlama özellikleri.....	13

## SİMGELER

AA	: Alternatif akım
DA	: Doğru akım
V	: Gerilim (V)
$V_L$	: Endüktans gerilimi (V)
$V_C$	: Kapasitans gerilimi (V)
$V_{Ref}$	: Referans gerilim (V)
$V_{DA}$	: Doğru gerilim (V)
I	: Akım (A)
$I_{AB}$	: Hat akımı (A)
$I_d$	: Akımın aktif bileşeni
$I_q$	: Akımın reaktif bileşeni
$I_{d-Ref}$	: Referans aktif akım bileşeni
$I_{q-Ref}$	: Referans reaktif akım bileşeni
$I_C$	: Kapasitans akımı (A)
$I_L$	: İndüktans akımı (A)
Z	: Empedans ( $\Omega$ )
$Z_{Ref}$	: Referans empedans ( $\Omega$ )
L	: Endüktans (H)
C	: Kapasitans (F)
$X_L$	: Endüktif reaktans ( $\Omega$ )
$X_C$	: Kapasitif reaktans ( $\Omega$ )
P	: Aktif güç (VA)
$P_{Ref}$	: Referans aktif güç (VA)
Q	: Reaktif güç (VAR)
$Q_L$	: Endüktif reaktif güç (VAR)

$Q_C$	: Kapasitif reaktif güç (VAR)
$Q_{Ref}$	: Referans reaktif güç (VAR)
$\omega$	: Açısal hız (rad/sn)
$\alpha$	: Tetikleme açısı
$\delta$	: Faz açısı
$T$	: Periyot (sn)
$f$	: Frekans (1/sn)
$s$	: Laplace dönüşüm operatörü
$k$	: Kazanç sabiti
$T_d$	: İletim gecikmesi (sn)
$G(s)$	: Kazanç
$\varphi$	: GBD 'nin çıkış gerilimi ile güç sisteminin gerilimi arasındaki faz farkı
$\omega_{PI}$	: Kesme frekansı
$\omega_b$	: Açık çevrim Kesme frekansı
$\omega_{bc}$	: Kapalı çevrim Kesme frekansı
$k_d$	: Gerilimlerin açı dönüşümüne kazancı
$K_V$	: Gerilim geri besleme kazancı

## KISALTMALAR

FACTS	: Flexible alternating current systems (Esnek iletim hatları )
STATCOM	: Statik senkron kompanzatör
D-STATCOM	: Dağıtım STATCOM 'u
SSR	: Senkron altı rezonans
SVC	: Statik Var kompanzatör
ASVC	: İleri statik Var kompanzatör
TCSC	: Tristör kontrollü seri kondansatör
SSSC	: Statik senkron seri kompanzatör
TSC	: Tristör anahtarlamalı kondansatör
TCR	: Tristör kontrollü reaktör
UPFC	: Birleştirilmiş güç akış kontrolörü
IGBT	: Kapıdan izoleli bipolar tristör
IGCT	: Tümüleşik kapı kontrollü tristör
GTO	: Kapıdan tıkamalı tristör
BJT	: Bipolar jonksiyonlu transistör
MOSFET	: Metal oksit alan etkili transistör
DGEM	: Darbe genlik modülasyonu
DGM	: Darbe genişlik modülasyonu
SDGM	: Sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu
SVG	: Statik Var generatör
AHF	: Aktif harmonik filtre
GBD	: Gerilim beslemeli dönüştürücü
ABD	: Akım beslemeli dönüştürücü
ÇS-GBD	: Çok seviyeli gerilim beslemeli dönüştürücü

**ÖZET**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**STATCOM İLE GÜÇ AKIŞ KONTROLÜ**

**Resul ÇÖTELİ**

**Fırat Üniversitesi**  
**Fen Bilimleri Enstitüsü**  
**Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı**  
**2006, Sayfa: 67**

Güç sistemlerinin kompanzasyonunun güç elektroniği tabanlı aygıtlar ile yapılması halinde güç sistemi tam ve esnek bir şekilde kontrol edilebilir. Bu aygıtların çoğu güç sistemlerinde dinamik kompanzasyon, kararlılığın iyileştirilmesi ve güç akışının kontrolü için kullanılmaktadır. Reaktif güç kompanzasyonu için kullanılan güç elektroniği aygıtlarından biri gerilim beslemeli dönüştürücülerdir (GBD). Bir güç sistemine paralel bir GBD bağlandığı zaman bu statik senkron kompanzator olarak adlandırılır.

Bu tez çalışmasında, bir iletim hattındaki güç akışının kontrolü için, MATLAB-SIMULINK Toolbox 'ı kullanılarak dönüştürücü tabanlı FACTS aygıtı olan STATCOM 'un (Statik Senkron Kompanzator) bilgisayar benzetimi yapılmıştır. Benzetim programında STATCOM uygulamalarında en yaygın kullanılan dönüştürücü tipi olan GBD tercih edilmiştir. DGM tekniği harmonik içeriğini azalttığı ve ara yüz manyetik devresini daha basitleştirdiği için STATCOM 'un kontrolünde bir DGM tekniği olan sinüzoidal DGM (SDGM) kullanılmıştır. STATCOM 'un dinamik cevabı, referans reaktif akım değeri tam indüktiften tam kapasitife ve STATCOM 'un bağlı bulunduğu baranın gerilim değeri değiştirilerek gözlemlenmiştir. Ayrıca bir dağıtım STATCOM 'u ile (D-STATCOM) yük kompanzasyonu yapılmış ve geleneksel STATCOM ile DGM-STATCOM arasındaki kontrol farkını daha iyi görebilmek için geleneksel STATCOM 'la ilgili benzetim sonuçlarına da yer verilmiştir. Bilgisayar benzetim programının sonuçları STATCOM 'un beklenmeyen ani değişikliklere bile çok hızlı bir şekilde cevap verdiğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** FACTS, Kompanzasyon, GBD, STATCOM, DGM.

**ABSTRACT**  
**MASTER THESIS**

**CONTROLLING OF POWER FLOW USING STATCOM**

**Resul ÇÖTELİ**

**Firat University**  
**Graduate School of Natural and Applied Sciences**  
**Department of Electrical Education**

**2006, Page: 67**

An electric power system can control completely and flexibility if reactive power compensation is fulfilled through power electronic based devices. A number of power electronics devices have been used for dynamic compensation, improving system stability and power flow. Voltage source converter (VSC) is one of the power electronic devices that used for reactive compensation. A converter which is connected in shunt to the power system is called as static synchronous compensator (STATCOM).

In this study, a computer simulation of STATCOM which is FACTS devices based on converter for power flow in transmission line is carried out by using MATLAB SIMULINK TOOLBOX. In computer simulation, we preferred VSC because it is widely used in literature. We also used sinusoidal PWM (SPWM) technique which is known as one of the PWM technique. Because PWM technique provides lower harmonic content and allows simplification of the interface magnetics. The dynamic response of STATCOM was observed by changing reference reactive current from full inductive to full capacitive and modifying the voltage of bus which STATCOM is coupled. In addition to these simulation results load compensation was done by a distribution STATCOM (D-STATCOM) and results of traditional STATCOM was presented to show difference between PWM-STATCOM and traditional STATCOM. The computer simulation results show that STATCOM have fast response ability for any change in the power system.

**Keyword:** FACTS, Compensation, VSC, STATCOM, PWM.

## 1. GİRİŞ

Reaktif güç kompanzasyonu, elektrik enerji sistemlerinin kontrolünde önemli bir sorundur. Reaktif güç, iletim sisteminde kayıpları artırır, iletim hattının güç iletim kapasitesini azaltır ve hat sonundaki gerilimin genliğinde çok büyük değişimler meydana gelir (Gyugyi, 1988). Bu yüzden alternatif akımlı güç sistemlerinde iletilebilir gücü arttırmak ve kayıpları azaltmak için reaktif güç kompanzasyonu yapmak gerekir. Ayrıca, uzun iletim hatlarında hat endüktansının ve kapasitesinin etkisi, az yüklü durumlarda aşırı gerilimlere ve çok yüklü durumlarda ise gerilim azalmalarına neden olur. Bu nedenle iletim hattı geriliminin kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu da hattın belli noktalarında güç akış kontrolörleri ile kompanzasyon yapılarak gerçekleştirilir. Bara gerilimi ve baranın reaktif gücü kontrol edilerek, kararlılık sınırları artırılır, iletim kapasitesinin etkili kullanımı sağlanır ve gerilim düşümü azaltılır. Sabit ve mekanik anahtarlama reaktör-kondansatör grupları ve senkron generatörler, iletim hatlarındaki gerilim profilini kontrol ederek kararlı durum güç akışını arttırmak için uzun süreden beri kompanzasyon amacı ile kullanılmaktadırlar. Geleneksel kondansatör ve reaktör grupları ile yapılan kompanzasyonun en büyük dezavantajı sistemde meydana gelen değişimlere yeterince hızlı cevap verememesidir.

1980 'lerden beri iletim hatlarının reaktif kompanzasyonunun tristörler ve diğer yarı iletken elemanlarla hızlı bir şekilde yapıldığı takdirde, güç sisteminin dinamik kararlılığını iyileştirebileceği ve gerilim çöktürmelerini önleyebileceği görülmüştür. Son yıllarda güç sistemleri için hızlı kompanzasyon ihtiyacı giderek önem kazanmaktadır ve güç elektroniği elemanları iletim sistemlerinin bu hızlı kompanzasyon ihtiyacına cevap verebilen elemanlar olduklarından kompanzasyon uygulamalarda tercih edilmektedir (Gyugyi, 1993).

Son yıllarda, transfer edilen gücün kapasitesini, kontrol edilebilirliğini arttırmak, sistemin reaktif güç talebinin hızlı bir şekilde sağlamak için, statik kontrolörler ve güç elektroniği elemanları yardımı ile kompanzasyon yapılmaktadır. Yarı iletken tabanlı anahtarlama tip dönüştürücüler ile şönt reaktif kompanzasyon aygıtları tasarlanabilir. Kompanzasyon için kullanılan bu tip aygıtlara FACTS (Flexible Alternating Current Systems, Esnek İletim Hatları) aygıtları denir. FACTS aygıtları, iletim hatlarının kompanzasyonunda kondansatör veya reaktör gruplarına ihtiyaç duymadan anahtarlama dönüştürücü devreleri yardımı ile reaktif güç üretip tüketebilmektedirler. Güç iletim sistemlerinde FACTS 'lerin kullanılması ve gelişmesi güç sistemlerinin kararlılığını iyileştirmek için birçok uygulamayı da beraberinde getirdi (Hingorani, 1993). FACTS aygıtları, sistemin kararlılığını arttırmak ve güç akışını kontrol etmek için kullanılabilir. Bu tip aygıtların en büyük avantajı esneklikleri ve kontrol edilebilirlikleridir (Cheng, 2002).

FACTS 'lerle ilgili uygulamalar genellikle gerilim kararlılığının artırılması, salınımların sönümlenmesi, güç sistemlerinde gerilim kontrolü ve güç sistemlerinin kararlılığının iyileştirilmesi gibi konular üzerine yapılmaktadır. Bu uygulamalar gerilim değerinin ve faz açısının kontrolü ile yapılabilir (Yang, 2001).

STATCOM (statik senkron kompanzator), SSSC (statik seri senkron kompanzator) ve UPFC (birleştirilmiş güç akış kontrolörü) gibi FACTS aygıtları güç sistemlerinin performansının artırılması ve kontrolü için yeni güç elektroniği donanımlarını ortaya çıkarmaktadır. Ayrıca bu aygıtları TSC (tristör denetimli kondansatör) ve TCR (tristör denetimli reaktör) gibi geleneksel VAR kompanzatorlerin yerine güç sistemlerinde yeni reaktif güç kontrolörleri olarak kabul edilmektedir. Statik bir kondenser, doğru akım tarafına kondansatör bağlı gerilim beslemeli dönüştürücü (GBD) kullanılan ileri bir statik var kompanzator (ASVC) olarak bilinir. Yani gerilim kaynaklı dönüştürücü kullanılırsa bu tip statik Var kompanzatorler (SVC) STATCOM veya STATCON adını alır. STATCOM, FACTS aygıtları içerisinde en çok tercih edilen kontrolörlerden biridir. Mekanik eylemsizliği olmayan senkron kompanzatorün işletme karakteristiğine benzemesi yüzünden STATCOM olarak isimlendirilmiştir. STATCOM reaktif gücü üretebilme ve tüketebilme, ayrıca elektrik güç sisteminin özel parametrelerinin kontrolünü yapabilmesi için çıkış değerlerini değiştirebilme yeteneğine sahip şönt bağlı bir reaktif güç ekipmanıdır. STATCOM 'da güç elektroniği elemanları kullanıldığı için STATCOM üç faz geriliminin değerini ve faz açısını hızlı bir şekilde kontrol edebilir.

İlk zorlanmış komutasyonlu prototip bir ASVC 1981 'de rapor edildi. Genellikle son sekiz yıla kadar STATCOM üzerine yayınlanan makalelerin denetimli anahtarların anahtarlama hızlarının yeterince yüksek olmamalarından dolayı çok darbeli dönüştürücüler üzerine yoğunlaştığı görülür. Gyugyi, Gyugyi ve diğ. ve Schauder ve Mehta tarafından yapılan çalışmalarda, kare dalga çok darbeli dönüştürücülerin kontrolü ve performansı üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca Schauder ve Mehta tarafından yapılan çalışmada dönüştürücünün doğru geriliminin sabit olup olmamasına bağlı olarak ortaya çıkan iki durum için Park dönüşümü kullanarak STATCOM 'un basitleştirilmiş bir matematiksel modelini çıkarılarak bu matematiksel model yardımı ile kontrol sistemi için gerekli olan transfer fonksiyonunu türetilmiştir. Gyugyi ve Rao ve diğ. 'nin yaptığı çalışmada STATCOM 'un çalışmasını modellemek için sistemi durağan çatıya dönüştürmüşlerdir. Payidar ve Devi 'nin çalışmasında ise modellemede döne çatıda d-q değişkenlerini kullanarak STATCOM 'un matematiksel modeli çıkarılmıştır

Yarı iletken anahtar teknolojisindeki gelişmeye paralel olarak harmonik içeriğinin azaltılması için darbe genişlik modülasyon tekniklerinin (DGM) kullanılabilirliği Kuang ve Ooi, Mwinyiwiwa ve diğ. tarafından yapılan çalışmalarda gösterilmiştir. Ayrıca çok darbeli

dönüştürücülerin oluşturulması için kullanılan zigzag transformatör kullanım ihtiyacını ortadan kaldırdığı için Peng ve Lai, Patil ve Mathur ayrıca Hocgraf çok seviyeli dönüştürücü yapısı üzerinde çalışmalar yapmışlardır. İlk çok seviyeli kaskat dönüştürücü tabanlı prototip statik var generatör (SVG) referans Peng ve Lai tarafından rapor edilmiştir. Daha sonra ise referans Liang ve Nwankpa tarafından 1996 yılında 50 MVA 'lık çok seviyeli kaskat dönüştürücü tabanlı STATCOM tasarlanmıştır. Dizdareviç ve Andersson tarafından önerilen kontrol şemasında, güç sistemi ile dönüştürücü arasındaki aktif güç akışını ve buna bağlı olarak ta dönüştürücünün çıkış geriliminin şebeke gerilimine göre faz açısı kontrol edilerek dönüştürücünün reaktif akımının kontrolü sağlanmıştır. Bu çalışmada dönüştürücü akımının doğru akım bileşeni, ölçülen anlık üç faz akımının  $\alpha - \beta$  ve d-q kullanılarak iki faza indirgenmesi ile bulunur. Lehn ve Iravani ise yaptıkları çalışmada doğrusal çok değişkenli uzay vektör kuramını kullanarak GBD tabanlı FACTS kompanzatorların dinamik kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Sistemin modellenmesinde ve gerçekleştirilmesinde d-q dönüşümünden faydalanmışlardır. Jiang ve Ekstrom ise STATCOM 'un bağlandığı güç sisteminde tek faz-toprak arızasının neden olduğu aşırı akımları denetlemek için DGM tabanlı bir kontrolör tasarlamışlardır. Bu kontrolörü tasarlarken Dizdareviç ve Andersson tarafından yapılan çalışmadan faydalanmışlardır. Dizdareviç ve Andersson ve Tin ve Wang ise çalışmalarında adaptif doğrusal olmayan kontrol ve  $H_\infty$  gibi yeni ve daha ileri kontrol teknikleri STATCOM 'un kontrolü için önermişlerdir.

Bu tez çalışmasında, güç sisteminin dinamik kompanzasyonunu gerçekleştirmek için şönt bir FACTS aygıtı olan STATCOM 'un benzetimi yapılmıştır. Benzetim için MATLAB Software 'nin Simulink Toolbox 'ından yararlanılmış, güç sistemi ve kompanzatorde dahil olmak üzere tüm sistemin modellenmesinde bir bağlantı transformatörü, iletim hattı, iki seviyeli gerilim beslemeli dönüştürücü (GBD), GBD 'nin çıkışındaki akım harmoniklerini azaltmak için bir filtre, generatör ve yük kullanılmıştır. Uygulama bölümünde DGM-STATCOM için referans reaktif akım değeri benzetim programı çalıştırıldıktan 0.2 sn sonra +1 pu 'dan -1 pu 'ya ve bara gerilimi değiştirilerek DGM-STATCOM 'un dinamik cevabı ve bunun yanında DGM-STATCOM 'un sistem kararlılığına etkisi incelenmiştir. İkinci olarak bir dağıtım STATCOM 'u (D-STATCOM) yardımı ile yük kompanzasyonu yapılmıştır. Son olarak DGM-STATCOM ile geleneksel STATCOM arasındaki farkı daha iyi görebilmek için geleneksel STATCOM 'un benzetim sonuçları verilmiştir.

## 2. DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

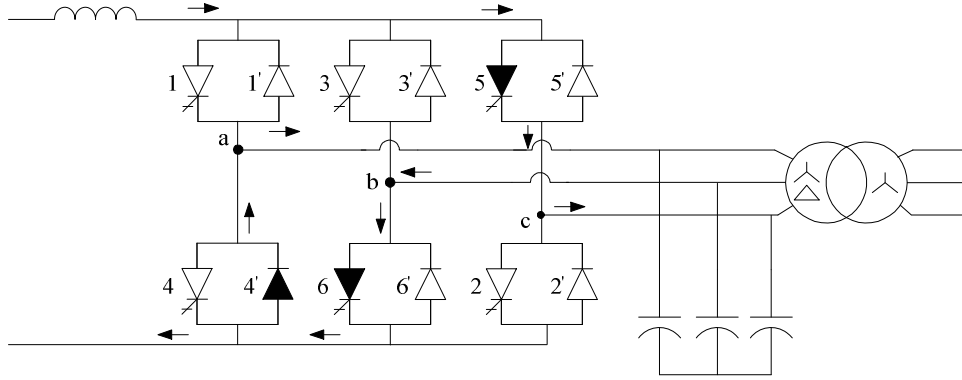
Dönüştürücüler bir tarafında bulunan doğru gerilimden uygun anahtarlama dizisi ile faz açısı, genliği ve frekansı kontrol edilebilir alternatif bir gerilim üretirler. Aynı devre hem evirici hem de doğrultucu olarak çalışabildiği için bu devreye dönüştürücü adı verilir. Alternatif gerilim ve frekans uygulamaya bağlı olarak değişken veya sabit olabilir. FACTS uygulamalarında yüksek gerilim ve güç harmonikleri birçok sorun yaratabileceği için çıkış gerilim dalgasının frekansı, dönüştürücün bağlı bulunduğu güç sisteminin frekansına eşit olacak şekilde kontrol edilir. Dönüştürücü için doğru gerilim sabit veya değişken olabilir. Bu doğru gerilim şebekeden, doğrultucu yardımı ile dönel bir alternatif akım makinasından, batarya, yakıt hücresi veya güneş kolektörlerinden sağlanabilir. Dönüştürücülerde genellikle transistör, tristör, MOSFET, IGBT ve GTO gibi yarı iletken anahtarlar kullanılır. Bu elemanlardan transistör ve MOSFET düşük ve orta güç uygulamalarında, tristör ve GTO ise yüksek güç uygulamalarında kullanılır.

Uygulamaya göre dönüştürücün çıkışı tek veya çok fazlı olabilir. Kendinden komutasyonlu dönüştürücüler,

- Doğru akım tarafında doğru bir gerilim kaynağı bulunan gerilim beslemeli dönüştürücüler (GBD)
- Doğru akım tarafında doğru bir akım kaynağı bulunan akım beslemeli dönüştürücüler (ABD) olarak ikiye ayrılabilir.

### 2.1 Akım Beslemeli Dönüştürücüler

Değişken bir gerilim kaynağı büyük değerli bir endüktansı seri bağlayarak ve bir geri besleme akım kontrol döngüsünün içerisinde gerilimi kontrol ederek değişken bir doğru akım kaynağı elde edilebilir. Değişken doğru gerilim bir diyot doğrultucu yardımı ile bir generatörden, DA-DA bir dönüştürücü yardımı ile bir güç kaynağından elde edilebilir. ABD 'lerde kaynak olarak akım kaynağı kullanılır ve ABD çıkışında akım üretir. Bu tip dönüştürücülerde akım daima bir yönde aktığı için gücün ters dönüşü doğru geriliminin polaritesinin yönünün değiştirilmesi ile gerçekleştirilir. Bunu başarmak için çift yönlü gerilim tutma kapasitesine sahip yarı iletken anahtarlara ihtiyaç duyulur. ABD 'lerde kullanılan yarı iletken anahtarları gerilimin ters dönmesine dayanmalıdır ve bu yüzden güç MOSFET 'leri, BJT, IGBT, MCT, IGCT ve GTO gibi asimetric gerilim tutan yarı iletken anahtarlar kullanılamayabilir. Bu yarı iletken anahtarların yerine simetric gerilim tutan GTO 'lar ve tristörler kullanılmalıdır. Ayrıca ileri yönde gerilim tutabilen yarı iletken anahtarları seri diyotlar ile kullanılabilir. Üç fazlı bir ABD devresi Şekil 2.1 'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Üç fazlı bir ABD

ABD 'lerin genel uygulama alanları,

- Büyük güçlü asenkron ve senkron motorların hız kontrolü
- Yüksek frekanslı indüksiyon ısıtması
- Doğru akım motor sürücüleri
- Aktif harmonik filtreleri (AHF)
- Süper iletkenli mıknatıs enerji depolaması
- Rotoru sargılı senkron motorun değişken frekansta başlatılması gibi uygulamaları kapsar (Bose, 2001).

## 2.2 Gerilim Beslemeli Dönüştürücüler

ABD 'lerde kaynak olarak akım kaynağı kullanılır ve çıkışında akım üretir. Gerilim beslemeli dönüştürücülerde (GBD) ise kaynak olarak gerilim kaynağı kullanılır ve çıkışında gerilim üretilir. GBD 'lerde doğru gerilim daima bir polarite sahiptir ve gücün ters dönüşü doğru akımının ters dönüşü ile sağlanır ve bu nedenle GBD 'de tek yönlü gerilim tutma kapasiteli yarı iletken anahtarlar kullanılır. Bu yüzden GBD 'ler, performansları ve ekonomik nedenlerden dolayı FACTS uygulamalarında ABD 'lere göre daha çok tercih edilirler ve uygulama alanının % 90 'ında GBD 'ler kullanılır (Uzunoviç, 2001).

GBD 'lerin çok geniş bir uygulama alanı vardır (Bose, 2002). GBD 'ler,

- Alternatif akım motor sürücüleri
- Kesintisiz alternatif akım güç kaynakları
- İndüksiyonla ısıtma
- Statik Var generatörler (SVG) ve statik VAR kompanzatorler (SVC)
- Aktif harmonik filtreler (AHF) şeklinde sıralanabilir.

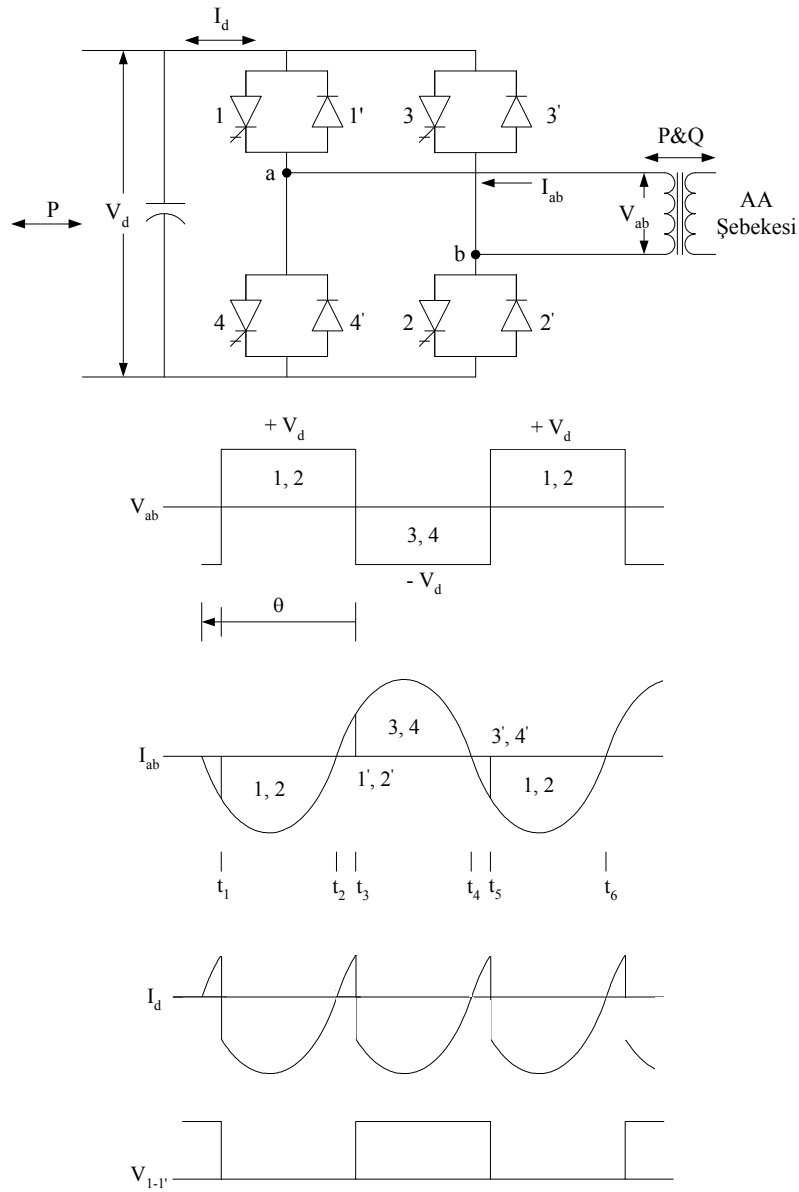
GBD 'nin doğru gerilim tarafında bulunan kaynağının genliğinin değerini değiştirerek ve dönüştürücün kazancını sabit tutarak değişken genlikli bir çıkış gerilimi elde etmek mümkündür. Bu tip dönüştürücülerde çıkıştaki alternatif gerilimin genliğini değiştirmek için girişteki doğru gerilimin genliği değiştirilir. Çıkıştaki alternatif geriliminin dalga şekli kare dalgaya benzemektedir. Üç fazlı temel dönüştürücü devresi ters paralel bağlı olan 6 adet asimetrik yarı iletken anahtarlama elemanlarından oluşan 6 darbeli evirici yapısı olarak bilinir. GBD 'lerde doğru akım her iki yönde de aktığı için dönüştürücü çift yönlü akım geçirecek şekilde olmalıdır ve bu yüzden bir geri besleme diyotu yük akımı yön değiştirdiği zaman denetimli anahtarları korumak için bu anahtarlama elemanlarına daima paralel bağlanır. Ayrıca dönüştürücüdeki doğru gerilim ters dönmediği için denetimli anahtarlar ters gerilim tutma kapasitesine sahip olmasına ihtiyaç duyulmaz. GBD 'lerde yarı iletken anahtarlama elemanları daima doğru gerilimli besleme yüzünden ileri yönlü biaslanmış olarak kalır. Bu yüzden GTO, BJT, IGBT, güç MOSFET 'leri ve IGCT 'ler gibi tam denetimli ileri veya asimetrik tutmalı yarı iletken anahtarlama elemanları kullanmak daha uygundur. Tam denetimli anahtarlama elemanları kullanılmadan önce tristörler kullanılarak dönüştürücü devreleri gerçekleştirildi. Tam denetimli anahtarların gelişmesine paralel olarak tristörlü dönüştürücü devreleri günümüzde pek fazla tercih edilmemektedir. GTO, IGBT, MTO ve IGCT gibi tam denetimli anahtarlama elemanları veya buna benzer tam denetimli elemanlar kapıdan iletme ve kesime gitme yeteneğine sahiptirler. Bu elemanlar kapıdan kesime götürülemeyen kapasitesi olmayan tristörlerden daha fazla kayıplara sahip ve daha pahalıdır. Fakat tam denetimli anahtarlama elemanları ile yapılan dönüştürücüler tüm sistem maliyeti düşünüldüğünde ve performans açısından değerlendirildiğinde önemli avantajlara sahiptir.

Dönüştürücü, alternatif akım tarafında güç sistemine transformatör yardımı ile bağlanırken, doğru akım tarafına ise bir doğru gerilim kondansatörü bağlanır. Bu kondansatörün, doğru geriliminde değişme olmadığı, doğru akımdaki değişmelere ise dayanabilecek kadar büyük olduğu varsayılır ve kalıcı durumda bir gerilim kaynağı olarak düşünülebilir.

### **2.3 Tek Fazlı Gerilim Beslemeli Dönüştürücüler**

FACTS kontrolörlerde genellikle üç fazlı dönüştürücüler kullanılmasına rağmen GBD 'lerin çalışma ilkelerinin anlaşılması açısından tek fazlı dönüştürücüler önemlidir. En basit dönüştürücü yapılarından biri Şekil 2.2 'de gösterilen tek fazlı tam dalga dönüştürücüdür. Eğer akım, alternatif akım tarafından doğru akım tarafına akıyorsa pozitif (doğrultucu modunda), doğru akımdan alternatif akım tarafına akıyorsa negatif (evirici modunda) olduğu varsayılır. Ayrıca Şekil 2.2 'de gösterilen  $I_d$  akımının kondansatörünün dolması için doğru akım tarafına akması gerekir. Bu  $I_d$  akımı harmonikler içerir ve bu harmonikler tek fazlı tam dalga bir

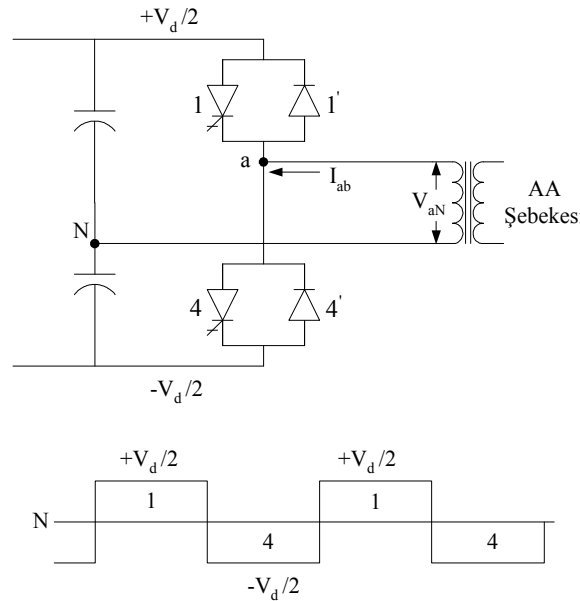
dönüştürücüde iki ve ikinin katlarıdır. Bu dönüştürücü 4 anahtarlama elemanından düzgün bir doğru gerilim sağlamak için bir kondansatörden meydana gelmektedir. Şekil 2.2 'den de görüleceği gibi 1 ve 2 nolu anahtarlama elemanları ilettime sokulursa ilk yarım periyot için  $V_{ab}$  gerilimi  $+V_d$  olur. Diğer yarım periyotta ise 3 ve 4 nolu anahtarlama elemanları ilettime sokulup 1 ve 2 nolu anahtarlama elemanlar kesime götürülürse bu defa  $V_{ab}$  gerilimi  $-V_d$  olur. Bu alternatif gerilim, alternatif akımın genliği, dalga şekli ve faz açısından bağımsız meydana gelir. Alternatif akım sistemin gerilimi ve empedansı ile dönüştürücün ürettiği alternatif gerilimin bir sonucu olarak meydana gelir.



Şekil 2.2 Tek fazlı tam dalga GBD ve akım-gerilimlerinin dalga şekli

Şekil 2.2 'deki gibi sinüzoidal,  $\theta$  açısı kadar ileride ve şebekeden eviriciye doğru bir akım aktığı varsayılırsa,

- $t_1$  ile  $t_2$  zaman aralığında 1 ve 2 nolu anahtarlama elemanları iletimde, 3 ve 4 nolu anahtarlama elemanları kesimde  $V_{ab}$  pozitif,  $I_{ab}$  negatiftir. Güç akışı, 1 ve 2 nolu anahtarlama elemanları yardımı ile dönüştürücünün doğru gerilim tarafından şebekeye doğrudur (evirici olarak).
- $t_2$  ile  $t_3$  zaman aralığında akım yön değiştirir ve pozitif olur. Akım 1' ve 2' diyotlarından akar. Güç akışı şebekeden dönüştürücünün doğru gerilim tarafına doğrudur (doğrultucu olarak).
- $t_3$  ile  $t_4$  zaman aralığında 1 ve 2 nolu anahtarlama elemanları kesimde, 3 ve 4 nolu anahtarlama elemanları iletimdedir. Ayrıca  $I_{ab}$  aynı yönde akmaya devam ederken  $V_{ab}$  negatiftir. Akım 3 ve 4 nolu anahtarlama elemanlarından akar. Güç akışı, doğrultucunun doğru gerilim tarafından şebekeye doğrudur (evirici olarak).
- $t_4$  ile  $t_5$  zaman aralığında 3 ve 4 nolu anahtarlama elemanları iletimde kalmaya devam ederler, 1 ve 2 nolu anahtarlama elemanları ise kesimdedirler.  $V_{ab}$  negatiftir.  $I_{ab}$  ise yön değiştirir. Güç akışı ise doğrultucunun doğru gerilim tarafından şebekeye doğru 3' ve 4' diyotları üzerinden akmaktadır (doğrultucu olarak).



Şekil 2.3 GBD 'nin bir faz bacağı ve bir faz bacağının çıkış geriliminin dalga şekli

Dönüştürücülerin çalışmasını daha iyi anlaşılabilmesi için Şekil 2.3 'teki bir faz bacağının çalışmasının incelenmesinde fayda vardır. Eğer Şekil 2.3 'teki devredeki anahtarlama

elemanları sıralı olarak açılıp kapatılırsa alternatif gerilimin şekli bir kare dalga olur. Bu devreye göre,

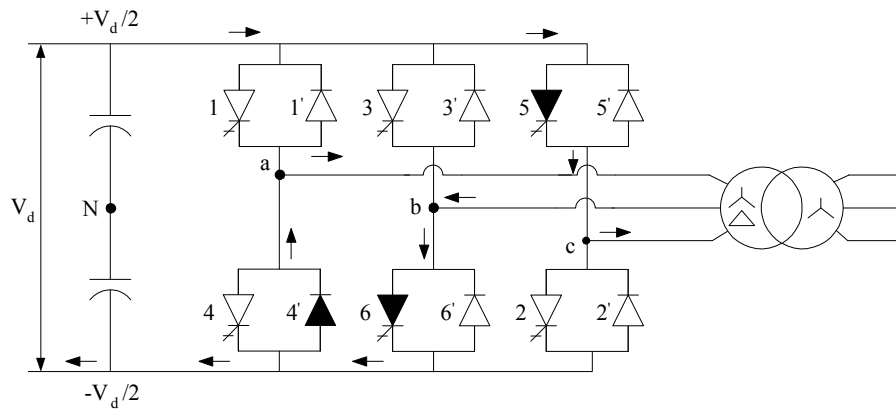
- 1) Alternatif akım ve gerilim arasında herhangi bir faz ilişkisi olabilir. Yani ileri veya geri reaktif güçlü bir evirici veya bir doğrultucu olarak dört bölgenin tamamında çalışabilir. Eğer dönüştürücü ile şebeke arasında aktif güç alışverişi de olması isteniyorsa o zaman dönüştürücü ayrıca bir doğru gerilim sistemine ihtiyaç duyar. Eğer dönüştürücü sadece reaktif güç alışverişi için tasarlanmışsa doğru gerilim sistemine ihtiyaç duyulmaz ve dönüştürücü kondansatör ile sonlandırılır.
- 2) Aktif ve reaktif güç alışverişi, şebeke gerilimine göre dönüştürücün ürettiği alternatif gerilimin faz açısı ve genliğinin yardımı ile bağımsız bir şekilde kontrol edilebilir.
- 3) Dönüştürücüdeki diyotlar doğrultucu görevini, denetimli anahtarlama elemanları ise evirici görevini yerine getirirler. Bir periyot boyunca dönüştürücü faz açısı ve net güç akışına göre ya evirici ya da doğrultucu olarak çalışır. Dönüştürücü birim güç faktöründe doğrultucu olarak çalıştığı zaman sadece diyotlar, evirici olarak çalıştığı zaman ise denetimli anahtarlar iletimdedir.
- 4) Denetimli anahtarlardan herhangi biri kesime sokulduğu zaman alternatif akım gerçekte tamamen kesilmez. Dönüştürücü birim güç faktöründe çalışmıyorsa, bir denetimli anahtardan değil de diyotlar üzerinden akar. Birim güç faktöründe çalışıyorsa ise diğer bir denetimli anahtardan akmaya devam eder. Aynı faz bacağındaki denetimli anahtarlar aynı anda iletme sokulursa dönüştürücünün doğru gerilim tarafı kısa devre olur. Kondansatörde kısa devre olan bu bacak üzerinden çok hızlı bir şekilde boşalacağı için faz bacağı üzerinde bulunan denetimli anahtarlar zarar görebilir. Kısaca bir faz bacağı üzerindeki denetimli anahtarlardan biri iletme sokulursa diğeri kesime götürülmelidir.
- 5) Faz bacaklarının birkaç tanesi paralel olarak bağlanabilir. Bu faz bacaklarının her biri uygun anahtarlama elemanları ve manyetik bir yalıtım ile şebekeye bağlanarak bağımsız bir şekilde çalıştırılabilir.
- 6) Denetimli anahtarların anahtarlama ile dönüştürücünün doğru gerilimine bağlı olarak alternatif akımın dalga şekli meydana gelir.

Şekil 2.3 'te gösterilen dönüştürücünün çıkış gerilimi  $V_{ab}$  ana harmonik bileşenine ek olarak bir çok harmonik içerir. Bu harmonikler  $2n \pm 1$ 'in katlarıdır. Burada n, 1, 3, 5, gibi tamsayılardır. Her gerilim harmoniğinin genliği ana harmoniğin  $1/n$  'i kadardır (3. harmoniğın genliği ana harmoniğın  $1/3$  'ü, 5. harmoniğın genliği ana harmoniğın  $1/5$  'i...vb ) Ana frekansta 0.1 p.u 'luk bir reaktans için 5. harmonik akımının genliği 0.2 p.u 'luk gerilim harmoniği için 0.4 p.u olabileceği için şebekeye akan akım harmoniklerinin genlikleri önemlidir. Dönüştürücü

tarafından üretilen akım harmoniklerini yok etmenin veya azaltmanın en basit yolu pasif LC filtreleri kullanmaktır (Kimbark, 1971). Akım harmoniklerini filtrelemek için dönüştürücü genellikle transformatörün kaçak endüktansının kullanılması ile gerçekleştirilen endüktif bir ara yüz ile güç sistemine bağlanır. Bu bağlantı transformatörü kondansatörün iletim hattı gibi kapasitif bir yüke hızlı bir şekilde boşalmasını da önler. Ayrıca şebekeye doğru akan akım ve bu akımın dalga şekli de bu endüktansın değerine bağlıdır. Düşük frekans bileşenlerini yok etmek için tasarlanan veya düşük frekansa ayarlanmış geleneksel alçak geçiren seri ya da paralel LC filtrelerinin değerleri büyüktür. Bu nedenle paralel bağlı ayarlı seri LC filtreleri veya çentik filtreleri 5., 7., 11., ve 13. gibi bileşenler için kullanılır. Zorlanmış komutasyonlu ABD 'ler için bir LC filtresi kullanılır. GBD 'ler için bağlantı reaktansı ve transformatör, birinci dereceden harmonik akım filtresi gibi davranırlar. Toplam endüktans değeri izin verilen akım harmonik bozulmalarını karşılayacak şekilde seçilmelidir. Ek bir LC filtresi de harmonik içeriğini azaltmak için kullanılabilir (Yong, 1999).

## 2.4 Üç Fazlı Gerilim Beslemeli Dönüştürücüler

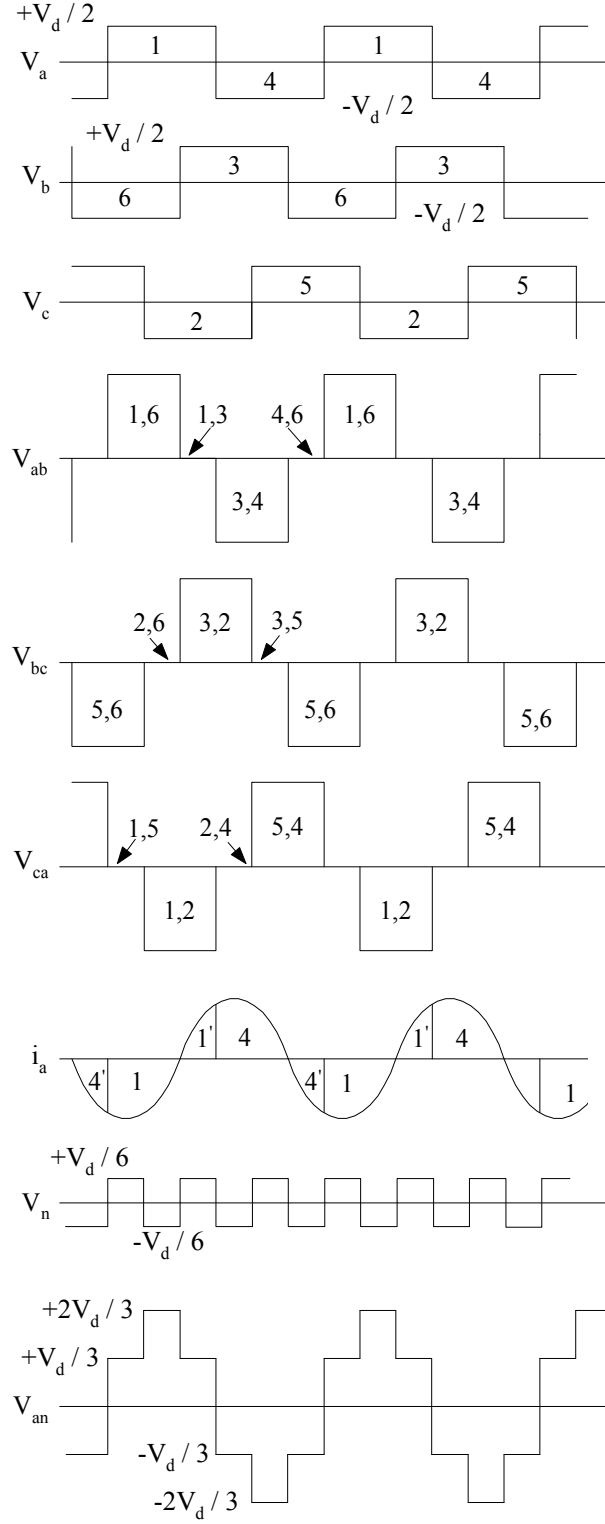
Üç fazlı dönüştürücüler alternatif akım motor sürücülerinde ve genel amaçlı alternatif akım kaynakları için yaygın şekilde kullanılırlar. Şekil 2.4 'te üç fazlı iki seviyeli bir GBD devresi gösterilmiştir. Dönüştürücüde 6 adet GTO, IGBT gibi denetimli anahtarlama elemanı ve aynı faz bacağı üzerinde bulunan denetimli anahtarlama elemanları kesime sokulduğu zaman indüktif akımın üzerinden geçmesi için 6 adet denetimsiz anahtar (diyot) kullanılmıştır.



Şekil 2.4 Üç fazlı iki seviyeli GBD

Üç fazlı dönüştürücüler, aralarında  $120^\circ$  faz farkı ve birbiri ile uyum içinde çalışan üç faz bacağından meydana gelir. Bu üç faz bacağından çıkışında kare dalgalar üretilir. Her faz bacağındaki denetimli ve denetimsiz anahtarlama elemanları Tablo 2.1 'den de görüleceği gibi

toplam  $180^\circ$  iletimde kalır ve anahtarlama özelliği her  $30^\circ$  'de değişir. Şekil 2.5 'te dönüştürücünün faz-nötr, faz-faz gerilimleri ve tek faz akımı gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Şekil 2.4 'teki üç fazlı GBD 'nin akım ve gerilimlerinin dalga şekilleri

Şekil 2.5 'te gösterilen faz-faz gerilimleri tepe değeri  $V_d$  olan  $120^\circ$  'lik darbe genişliğine sahiptirler.  $V_a$ ,  $V_b$  ve  $V_c$  kare dalga gerilimleri, kondansatörün orta noktası N 'ye göre faz çıkış gerilim değerleridir. Alternatif gerilimin nötr noktası kondansatörün orta noktasına fiziksel olarak bağlandığında, bu gerilimler dönüştürücünün alternatif gerilim tarafının faz-nötr gerilimleri olur. Bu durumda dönüştürücü 6 darbeli tam dalga dönüştürücü olarak değil de iki adet 3 darbeli dönüştürücü olarak çalışır. Bu üç faz bacağı arasında  $120^\circ$  'lik faz farkı vardır. b faz bacağındaki bulunan 3 ve 6 nolu anahtarlama elemanları, a faz bacağındaki bulunan 1 ve 4 nolu anahtarlama elemanlarından  $120^\circ$  sonra anahtarlanır. Aynı şekilde c faz bacağındaki bulunan 2 ve 5 nolu anahtarlama elemanları, b faz bacağındaki bulunan 3 ve 6 nolu anahtarlama elemanlarından  $120^\circ$  sonra anahtarlanır.

Ayrıca Şekil 2.5 'te gösterilen hat gerilimlerinin dalga şekilleri karakteristik olarak hem 6 adımlı dalga şekline hem de üç fazlı kontrollü köprü doğrultucunun hat akımının dalga şekline benzer. Dalga şeklindeki karakteristik harmonikler  $6n \pm 1$  'in katlarıdır. Burada n, 1; 2; 3;... gibi tamsayılarıdır. Üç fazlı ana ve harmonik bileşenleri  $120^\circ$  'lik bir faz kaydırması ile dengelenir. Bu tip dönüştürücüler kare dalga veya 6 adımlı dönüştürücü olarak bilinir.

**Tablo 2.1** Üç fazlı iki seviyeli GBD için anahtarlama özelliği

İletim periyotları (Derece)	a fazında iletimdeki anahtarlama elemanı	b fazında iletimdeki anahtarlama elemanı	c fazında iletimdeki anahtarlama elemanı
0-30	1'	6'	5
30-60	1'	6	5
60-90	1'	6	2'
90-120	1	6	2'
120-150	1	3'	2'
150-180	1	3'	2
180-210	4'	3'	2
210-240	4'	3	2
240-270	4'	3	5'
270-300	4	3	5'
300-330	4	6'	5'
330-360	4	6'	5'

Tablo 2.2 'de gösterildiği gibi faz-nötr gerilimi  $V_d/3$  'lük adımlardan oluşur. Genliği  $V_d/2$  olan periyodik bir kare dalga olan a fazı için Fourier analizi yapılırsa dalganın üç ve üçün katları harmoniklerden oluştuğu görülür. Buna göre,

$$V_a = \frac{4}{\pi} \left( \frac{V_d}{2} \right) \left[ \cos \omega t - \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t + \dots \right] \quad (2.1)$$

Fourier serisi ile ifade edilebilir.  $V_b$  fazının anlık değeri,  $\omega t$  yerine  $\omega t - \frac{2\pi}{3}$ ,  $V_c$  fazının anlık değerini ise  $\omega t$  yerine  $\omega t + \frac{2\pi}{3}$  yazılarak bulunur. Üç fazlı sistemlerde tüm üç ve üçün katları harmonikler ( $\cos 3(\omega t \pm \frac{2\pi}{3})$ ,  $\cos 9(\omega t \pm \frac{2\pi}{3})$ , ..... vb terimleri) aynı fazlı olduğu için  $\cos 3\omega t$  'ye indirgenir.

**Tablo 2.2** Üç fazlı iki seviyeli GBD 'nin faz-nötr gerilimi için anahtarlama özellikleri

İletim periyotları (Derece)	$V_{aN}$	$V_{bN}$	$V_{cN}$
0-30	$+V_d/3$	$-2V_{dc}/3$	$+V_d/3$
30-60	$+V_d/3$	$-2V_{dc}/3$	$+V_d/3$
60-90	$+2V_d/3$	$-V_d/3$	$-V_d/3$
90-120	$+2V_d/3$	$-V_d/3$	$-V_d/3$
120-150	$+V_d/3$	$+V_d/3$	$-2V_d/3$
150-180	$+V_d/3$	$+V_d/3$	$-2V_d/3$
180-210	$-V_d/3$	$+2V_d/3$	$-V_d/3$
210-240	$-V_d/3$	$+2V_d/3$	$-V_d/3$
240-270	$-2V_d/3$	$+V_d/3$	$+V_d/3$
270-300	$-2V_d/3$	$+V_d/3$	$+V_d/3$
300-330	$-V_d/3$	$-V_d/3$	$+2V_d/3$
330-360	$-V_d/3$	$-V_d/3$	$+2V_d/3$

Tablo 2.2 'den  $V_{ab}$  gerilimi hesaplanacak olursa,

$$V_{ab} = V_a - V_b = V_d / 3 - (-2 V_d / 3) = V_d \quad (2.2)$$

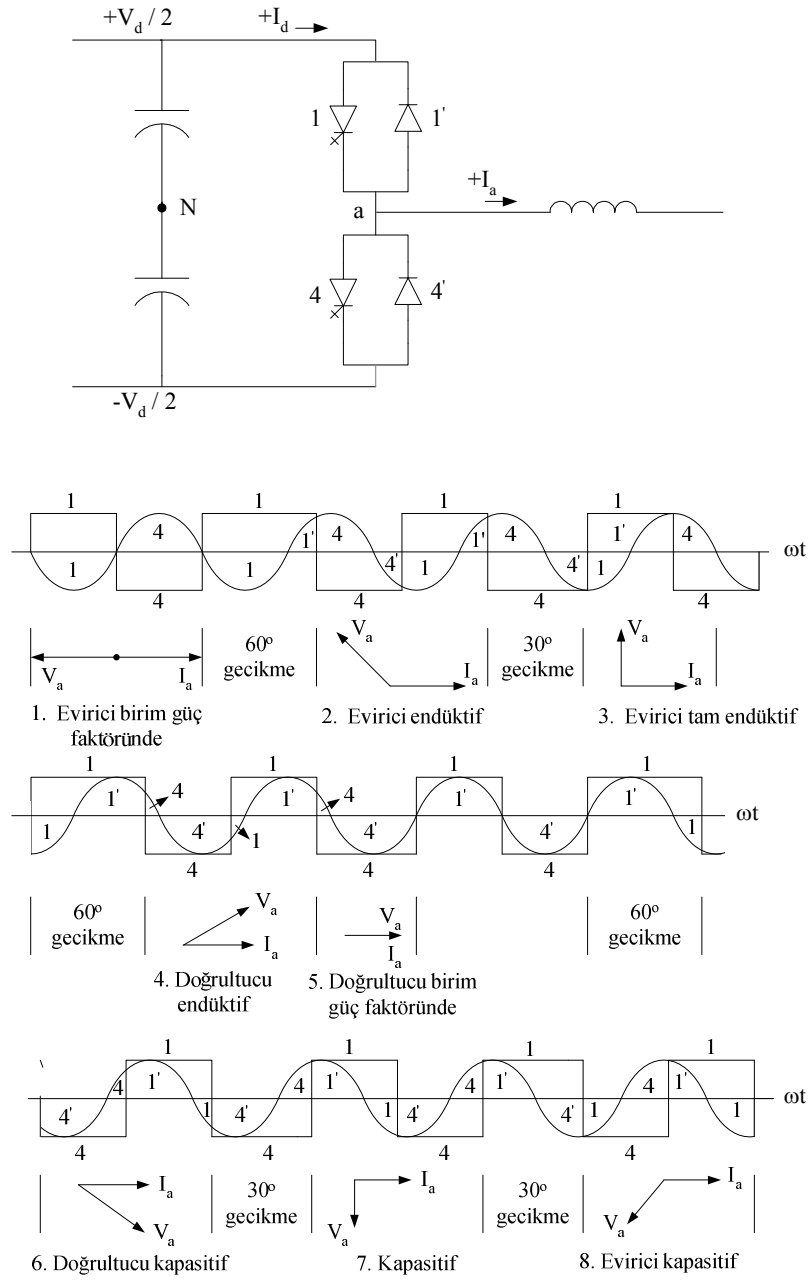
şeklinde bulunur. Faz-faz geriliminin etkin değeri ise,

$$V_{LL} = \sqrt{\frac{2}{2\pi} \int_0^{2\pi/3} V_d^2 d(\omega t)} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_d = 0.8165 V_d \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilir.

Daha önceden de bahsedildiği gibi her faz bacağı bağımsız bir şekilde çalışır ve anahtarlama elemanlar açılıp kapatılması ile doğru gerilim alternatif bir gerilime dönüştürülür. Güç, şebekeden kondansatöre doğru diyetler, kondansatörden şebekeye doğru ise denetimli anahtarlama elemanlar yardımı ile akar. Şekil 2.6 'da kondansatörün orta noktası N 'ye göre bir faz bacağının alternatif gerilimi ile sinüzoidal akım arasındaki faz açısının değiştirilmesi ile doğrultucu ve evirici modunda çalışma durumları gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 2.6 'da her periyot için akım ve gerilim arasındaki faz açısı bir periyotluk süre boyunca fazör olarak gösterilmiştir.

İlk olarak bir periyotta dönüştürücünün birim güç faktöründe çalışması gösterilmiştir. Birim güç faktöründen  $60^\circ$  'lik bir evirici çalışmasının ileri bir periyodunu görmek için  $60^\circ$  'lik bir faz farkı meydana getirilir. Daha sonra dönüştürücünün dört bölgede çalışmasını görebilmek için sırası ile  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $30^\circ$  'lik faz farkları meydana getirilir. Şekil 2.6 'dan da görüleceği gibi ilk yarım periyot boyunca dönüştürücünün birim güç faktörü ile çalışması boyunca 1 nolu anahtarlama elemanı iletimdedir ve akım  $+ V_d / 2$  'lik kondansatörden şebekeye doğru akar. Daha sonraki periyotta ise 1 nolu anahtarlama elemanı kesime götürülüp 4 nolu anahtarlama elemanı iletime geçirilir. Bu durumda akım şebekeden 4 nolu anahtarlama elemanı yardımı ile  $- V_d / 2$  'lik kondansatöre doğru akar. Bu bir periyot boyunca dönüştürücü birim güç faktöründe çalışır. Bu durumda hiçbir diyet iletimde değildir. Akımın sıfırdan geçişinde 1 nolu anahtarlama elemanı kesime gider, 4 nolu anahtarlama elemanı ise iletime geçer. Yumuşak anahtarlama diye bilinen sıfır akım anahtarlama ile anahtarlama elemanlarının açılıp-kapatılması, akımın yüksek olduğu zaman yapılan anahtarlama ile karşılaştırıldığında anahtarlama kayıplarının ve anahtarlama elemanları üzerindeki gerilim baskısının azaldığı söylenebilir.



**Şekil 2.6** GBD 'nin bir faz bacağına 4 bölgede çalışması, akım-gerilim dalga şekilleri ve fazör diyagramı

Bir sonraki yarım periyot için 1 nolu anahtarlama elemanının kesime götürülmesi ve 4 nolu anahtarlama elemanının iletme sokulması  $60^\circ$  geciktirilir (2. durum). Şekil 2.6 'dan akımın yönü değiştiği zaman akım 1 nolu diyottan akmaya başladığı görülür. Diğer yarım periyotta ise dönüştürücü akım ve gerilim arasında  $120^\circ$  faz farkı olan indüktif reaktif güçlü bir evirici olarak çalışır. Bu bir periyotta, besleme gücünü  $120^\circ$  4 nolu anahtarlama elemanı doğru gerilim tarafından alternatif akım tarafına (evirici çalışması),  $60^\circ$  ise 4' nolu diyot yardımı ile

besleme gücü tekrar geri alternatif akım tarafından doğru gerilim tarafına iletir (doğrultucu çalışması). Bunu 1 nolu anahtarlama elemanının  $120^\circ$  iletimde kalıp besleme gücünü doğru gerilim tarafından alternatif akım tarafına (evirici çalışması), 1' nolu diyot ise  $60^\circ$  iletimde kalıp besleme gücünü tekrar alternatif akım tarafından doğru gerilim tarafına aktarır (doğrultucu çalışması). Kısaca akım 4 nolu anahtarlama elemanından 1 nolu anahtarlama elemanına 4' nolu diyot yardımı ile 1 nolu anahtarlama elemanından 4 nolu anahtarlama elemanına 1' nolu diyot yardımı ile akar.

3. durumdaki çalışmada  $30^\circ$ 'lik faz kaydırmasından sonra akım ile gerilim arasında  $90^\circ$ 'lik bir faz farkı meydana gelir ve dönüştürücü saf bir indüktif yükmiş gibi davranır. Bu durumda 1 nolu anahtarlama elemanı gücü doğru gerilim tarafından alternatif akım tarafına iletir. Daha sonra ise akım, 1' nolu diyot üzerinden akmaya başlar. Sonraki yarım periyotta akım, 4 nolu anahtarlama elemanından, daha sonra ise 4' nolu diyottan akar.

$60^\circ$ 'lik bir gecikme ile dönüştürücü indüktif modda bir doğrultucu olarak çalışır (4. durumdaki tam periyotluk dalga). Bunu 5. durumda  $30^\circ$ 'lik akım ve gerilim arasında ek bir faz gecikmesi yapılarak dönüştürücünün birim güç faktöründe bir doğrultucu olarak çalışması sağlanır.  $60^\circ$ 'lik diğer bir gecikme ile 6. durumda görüldüğü gibi akım gerilimden  $60^\circ$  ileride kapasitif modda bir doğrultucu olarak çalışır.

Normalde dönüştürücünün çıkış gerilimi ve frekansı sürekli olarak kontrol edilir. Makina sürücü uygulamaları için gerilim ve frekans kontrol aralığı geniştir. Kesintisiz bir AA güç kaynağı için frekans sabittir fakat kaynaktaki ve yükteki değişimler yüzünden kontrolü gerekir. Dönüştürücülerde frekans kontrolü çok kolaydır. Frekans komutları sabit veya değişken olabilir. Bu komutlar donanım, yazılım ve D/A dönüştürücülerin yardımı ile bir mikroişlemci tarafından üretilebilir. Dönüştürücünün çıkış gerilimi ise,

- Giriş geriliminin kontrolü (dalga veya darbe genlik modülasyonu olarak bilinen DGEM ile)
- DGM ile dönüştürücü içerisinde gerilim kontrol metodu ile kontrol edilebilir (Bose, 2002).

Statik güç dönüştürücülerinin en büyük dezavantajı harmonik üretimidir. Çok darbeli dönüştürücü, çok seviyeli dönüştürücü topolojisi, DGM veya pasif filtreler kullanılarak bu harmoniklerin bazıları yok edilebilir (Yong, 1999).

## 2.5 Çok Darbeli Gerilim Beslemeli Dönüştürücüler

GBD'lerin çıkış gerilimlerinin ve akımlarının dalga şekilleri tam sinüs değildir. Yüksek güç uygulamalarında çıkış geriliminin dalga şeklini sinüse yaklaştırarak filtre boyutunu azalttığı için dönüştürücünün çıkışının çok adımlı olması istenir. Çok adımlı dönüştürücülerde harmonik

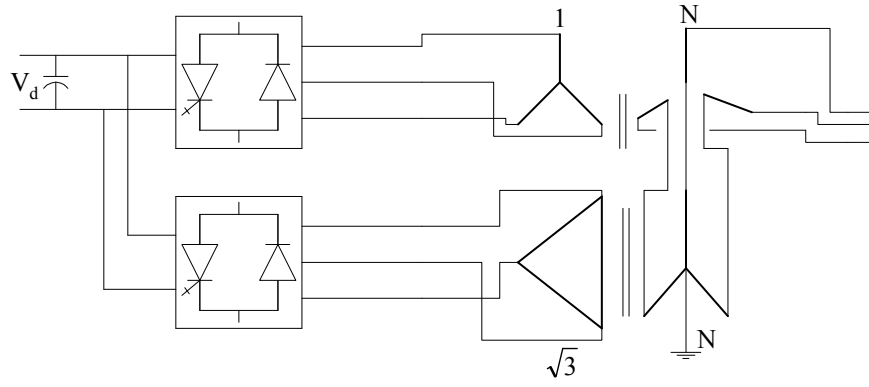
içeriği  $6k \pm 1$ 'dir. 6 adımlı dalga'nın daha düşük dereceli harmonikleri (5. ve 7.) 12 adımlı bir dalga üretilerek yok edilebilir. 6 darbeli GBD 'lerin çıkışı  $(6k \pm 1)f$  frekanslı harmonikler ve akımda  $6k.f$  frekanslı harmonikler içerir. Burada  $f$  ana frekans,  $k$  ise 1, 2, 3.. gibi tam sayıdır. Dönüştürücünün çıkışındaki bazı harmonikler pasif filtreler kullanılarak yok edilebilir. Fakat bu yöntem özellikle düşük frekanslarda önemli sorunlar ortaya çıkmaktadır. Dönüştürücün çıkış dalgalarında görülen harmonik seviyesini azaltmanın en basit yolu kullanılan dönüştürücü sayısını arttırarak bağlantı transformatörü kullanmaktır. Bu teknik tristörlü evirici ve doğrultuculara geniş şekilde kullanılır (Yong, 1999). 6 adımlı dönüştürücüler uygun transformatör bağlantıları ile 6 adımlının katları olan (12, 18, 24... vb.) dönüştürücüler elde edilebilir. Bu tür dönüştürücülere çok darbeli dönüştürücüler denir. Çok darbeli GBD 'lerde çıkış gerilimi temel olarak üç fazlı birkaç tane dönüştürücün manyetik bir bağ ile bağlanması ile elde edilir. İstenilen seviyede bir dalga şekli ve gerilim oranını elde etmek için transformatörler kullanılır. Çok darbeli dönüştürücülerde karmaşık manyetik devreler kullanılır. Ayrıca anahtarlama elemanları çok yüksek gerilim seviyelerine dayanabilsin diye birçok anahtarlama elemanı seri ya da paralel bağlanır. Bu durumda meydana gelecek asenkron anahtarlama problemlerinden kaçınmak için bu tip dönüştürücüler birkaç yüz Hz kadar olan çok düşük anahtarlama frekanslarında çalıştırılmalıdır. Düşük anahtarlama frekansından dolayı dönüştürücüde meydana gelen toplam kaybın sadece 1/3 anahtarlama kayıpları yüzünden meydana gelir. Geri kalan kayıplar ise manyetik arayüzden dolayıdır (iletim kayıpları) (CIGRE, 1998). Bununla birlikte güç anahtarlarını seri ya da paralel bağlanmaktansa bağımsız olarak çalışan dönüştürücüleri seri ya da paralel bağlamak daha avantajlıdır. Bu ayrıca harmonik içeriğinin azaltılması için de önemlidir. Çok darbeli dönüştürücüler çıkışları bir diğer faz bacağına göre fazı, faz kaydırma transformatörleri ile kaydırılan özdeş üç fazlı köprüler bağlanılarak elde edilir. Yıldız ve üçgen bağlantı arasında  $30^\circ$ 'lik bir faz farkı vardır ve bu durumda her transformatöre bağlanılan 6 darbeli dönüştürücüler ile 5. ve 7. harmonikler yok edilerek 12 darbeli çalışma elde edilir. Bu prensiple birden fazla 6 darbeli dönüştürücün dönüştürülen çıkışları birincil sargısında toplanarak 24 darbeli veya 48 darbeli çalışmada elde edilebilir (24 darbeli çalışma için 4, 48 darbeli çalışma için 8 dönüştürücü). Yüksek güç uygulamalarında çok darbeli GBD 'lerde kullanılan manyetik arayüzün karmaşık bir yapıya sahip olması bu tip GBD 'ler için büyük bir dezavantajdır (Martin, 2001).

12 darbeli dönüştürücü çalışması için transformatörün ikincil tarafının biri yıldız diğeri üçgen bağlanarak ikincil sargıda  $30^\circ$ 'lik bir faz farkı meydana getirilir. Transformatörün birincil tarafı ya bir ya da iki adet yıldız ya da üçgen bağlı sargılardan oluşur. Transformatör faz kaydırması birincil tarafta 5. ve 7. akım harmoniklerini ve doğrultucunun doğru gerilim yönünde 6. gerilim harmoniklerini yok eder. 5. ve 7. akım harmonikleri transformatörün ikincil

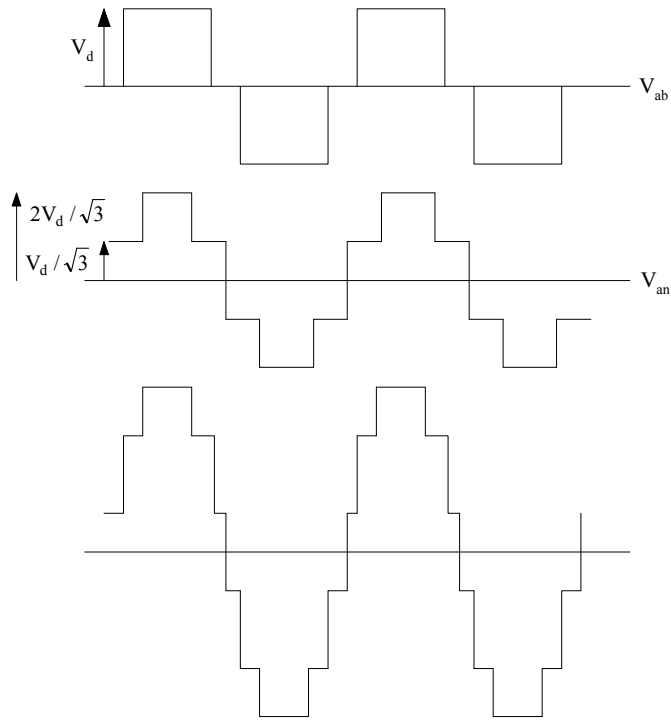
tarafında dolaşmasına rağmen birincil tarafına bu akım harmonikleri geçmez. Harmonikleri yok etmek için yapılan işlemler ile dönüştürücün alternatif gerilim tarafında sinüs gerilimine daha yakın çok adımlı gerilim dalga şekli elde edilir. Eğer faz kaydırması yapılırsa faz-nötr gerilimi, harmonikler ve  $12n \pm 1$ 'in katlarının haricindeki harmonikler faz-faz gerilimine zıt fazda ve  $1/\sqrt{3}$  katı olur. Birleştirilen çıkış gerilimi ana harmonikle karşılaştırıldığı zaman  $12n \pm 1$ 'in katları harmonikler ve genlikleri  $1/V_{11}, 1/V_{13}, 1/V_{23}, 1/V_{25} \dots$ , olan 12 darbeleri bir dalga şekline sahip olur. Şekil 2.7'den de görüleceği gibi 12 darbeleri GBD'nin çıkış geriliminin dalga gerilim şekli 6 darbeleri dönüştürücü çalışmasının çıkış dalga şeklinden daha çok sinüse benzemektedir. Toplam 6 faz bacağına sahip olan iki adet 6 darbeleri dönüştürücü aynı doğru gerilim kaynağına birlikte bağlanır ve 12 darbeleri dönüştürücü gibi beraber çalışırlar. Bu durumda iki adet ayrı transformatöre ihtiyaç duyulur aksi takdirde karakteristik olmayan harmoniklerdeki faz kaydırması genel nüve akısı yüzünden çok büyük akım dolaşmasına sebep olur (Mwinyiwiwa, 1998). Sonuç olarak bu harmoniklere bağlı olarak döngüde büyük bir akım transformatörün kaçak endüktansı ile sınırlandırılan bu döngüde akacaktır.

Ayrıca iki dönüştürücü doğru gerilim tarafında seri olarak da bağlanabilir. Bu durumda iki kondansatörün gerilimlerinin eşit tutulması oldukça önemlidir. Her iki dönüştürücün de doğru gerilimi, bir doğru gerilim dengeleme kontrolü ile evirici yönünde veya doğrultucu yönünde çalışması kaydırılarak artırılıp azaltılabilir. Çok darbeleri dönüştürücülerin çıkış geriliminin genliği, dönüştürücünün girişinde bulunan gerilimin genliği değiştirilerek kontrol edilir.

GBD'ler alternatif gerilim tarafında özel sargılı transformatörlerle (faz kaydırma transformatörleri) paralel bağlanabilir. 3 adet bağımsız GBD'nin çıkış gerilimleri bu transformatörler yardımı ile toplanabilir. En basit şekilde n tane transformatör kullanılmışsa manyetik ara yüz transformatörün birincil veya ikincil sargılarında  $60/n^\circ$ 'lik bir faz farkı meydana getirilir. İki adet 12 darbeleri dönüştürücü arasında  $15^\circ$ 'lik faz kaydırması meydana getirilerek bu dönüştürücülerin 24 darbeleri olarak çalıştırılabilir. Bu şekilde yapılarak dönüştürücünün alternatif gerilim tarafında 12 darbeleri çalışmada görülen bazı harmoniklerin yok edilmesi sağlanır. 24 darbeleri dönüştürücülerde dönüştürücünün alternatif çıkış gerilimi  $24n \pm 1$ 'in mertebeden harmonikler içerir. Bağımsız dönüştürücülerin çıkış gerilimleri eşit açılarla fazları kaydırılır (Mori ve diğ., 1993). Bununla birlikte faz kaydırma transformatörleri güç transformatörlerine göre pahalıdırlar.



(a)



(b)

Şekil 2.7 a) 12 darbeli dönüştürücü b) İki adet 6 darbeli dalgadan 12 darbeli dalganın elde edilmesi

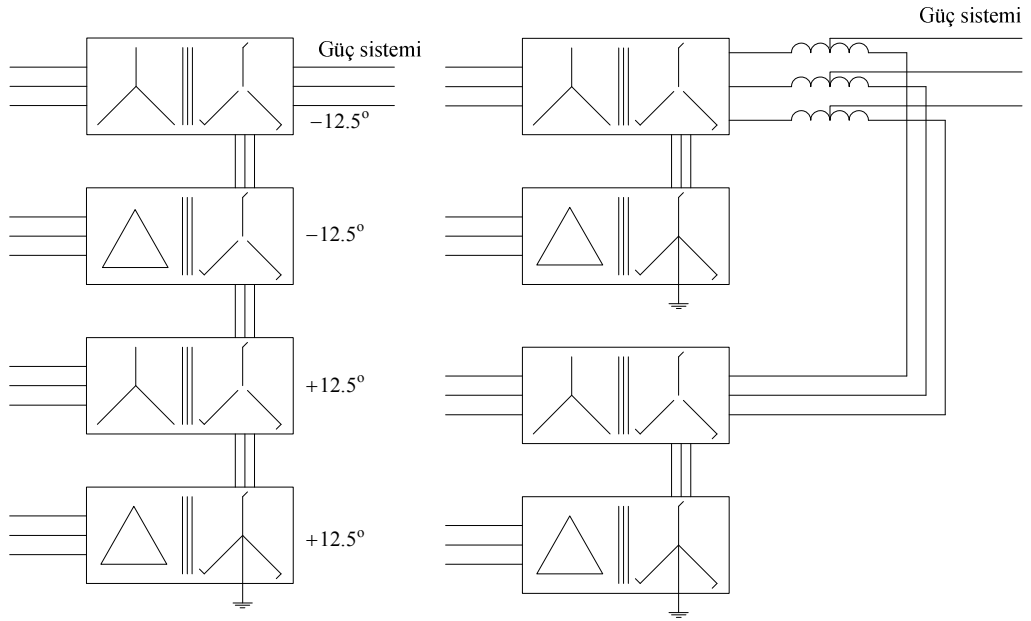
Darbe sayısının artırılması ile doğru gerilim yönünde yönündeki akım harmonikleri azalır. 12 darbeli dönüştürücü için 6., 8., ... vb. harmonikler yok edilir ve sadece 12 darbeli harmonikler (12., 24., ...) doğru gerilim tarafında görülür.

Yüksek güç uygulamalarında aşağıdaki gibi çok darbeli GBD yapıları gerçekleştirilebilir;

- 1) 4 adet 6 darbeli dönüştürücü doğru gerilim tarafında paralel
- 2) 6 darbeli dönüştürücülerin 4 'ü seri

3) 12 darbeleri seri bağılı dönüştürücülerin ikisi birbirine paralel bağlanabilir.

Her 6 darbeleri dönüştürücü için ikisinin yıldız, diğeri ikisinin ikincil sargıları ise üçgen bağılı olan transformatörler gerekir. Bu transformatörlerin birincil tarafları 12 darbeleri dizinin harmonik akımlarını yok etmek için paralel bağlanabilir. Şekil 2.8 'de gösterildiği gibi dönüştürücü tarafından üretilen küçük harmoniklerin yok edilmesi için 12 darbeleri dönüştürücünün faz reaktörleri yardımı ile güç sistemine bağlanması daha uygundur. Alternatif gerilim tarafından bakıldığında 24 darbeleri dönüştürücülerde bile kabul edilebilir seviyeden daha yüksek gerilim harmoniklerine sahiptir. Bu durumda dönüştürücü transformatörlerinin sistem tarafına yerleştirilen 23. ve 25. harmoniklere ayarlanmış yüksek geçiren bir filtre kullanılması gerekir.



**Şekil 2.8** 24 darbeleri GBD çalışmasının farklı şekillerde elde edilmesi a) Alternatif gerilim tarafında seri bağılı iki adet 12 darbeleri dönüştürücü ile 24 darbeleri dönüştürücü, b) AA tarafında paralel bağılı iki adet 12 darbeleri dönüştürücü ile 24 darbeleri dönüştürücü çalışması elde etmek için transformatör bağlantısı

## 2.6 Çok Seviyeli Gerilim Beslemeli Dönüştürücüler

Çok darbeleri dönüştürücülere ek olarak çok adımlı gerilim dalgaları çok seviyeli gerilim beslemeli dönüştürücüler (ÇS-GBD) kullanılarak da elde edilebilir. Orta ve yüksek güçlü uygulamalarda klasik dönüştürücülerin, verimlerinin düşük olması, transformatör kullanılmasından dolayı maliyetlerinin yüksek olması, akım ve gerilim yükselme zamanının bir sonucu olarak anahtarlama elemanları üzerinde büyük akım ve gerilim darbelerinin oluşması gibi dezavantajları vardır. Devre topolojileri nedeni ile ÇS- GBD 'ler yüksek güç uygulamaları için yeni bir güç dönüşüm sistemleridir.

Son yıllarda yüksek gerilim meydana getirebilen ve devre yapıları ile harmonik içeriğini azaltabilen ÇS-GBD 'ler güç elektroniğinde hızla gelişen bir alan olmaktadır. ÇS-GBD 'ler çıkış harmonik içeriği, verimleri, anahtarlar üzerinde meydana gelen gerilim baskısı ve güç faktörü açısından geleneksel dönüştürücülerden daha iyi bir performansa sahiptirler (Xu ve diğ., 2004). Temel olarak ÇS- GBD 'lerde çıkış geriliminin dalga şekli, dönüştürücün doğru gerilim tarafında bulunan kondansatörlerin geriliminin farklı seviyelerinden elde edilir. ÇS-GBD 'ler orta gerilim seviyelerinde transformatör kullanmaksızın doğrudan sisteme bağlanabilir. Ayrıca yükseltici transformatörler yardımı ile de yüksek gerilim seviyelerinde kullanılabilirler. ÇS-GBD 'ler son zamanlarda alternatif akım güç kaynaklarında, reaktif güç kompanzasyonu, pompalar, devre soğutucuları ve ayarlanabilir hız sürücü devreleri gibi endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. ÇS- GBD 'lerin en büyük özelliği anahtarlama frekansı artmadan ya da dönüştürücü çıkış gerilimi azalmadan çıkış dalga şeklindeki harmoniklerin azaltılmasıdır (Sirisukprasert, 2004).

ÇS- GBD 'lerin özellikleri şöyle sıralanabilir;

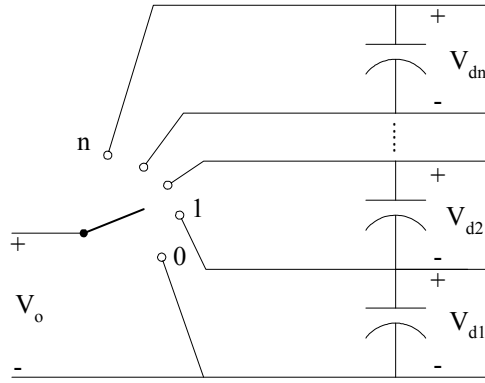
- DA tarafındaki yüksek gerilim sadece bir anahtar tarafından tutulmak zorunda değildir. Gerilim, birden fazla anahtar tarafından tutulabilir.
- Gerilim seviyesinin sayısı arttıkça çıkış harmonik içeriği çok düşük olur.
- Çok küçük bozunumlu giriş akımı çekerler.

Şekil 2.9 'da ÇS- GBD 'nin eşdeğer devresi gösterilmiştir. Kondansatörlerin bağlı bulunduğu anahtarlar kontrol edilerek birkaç seviyeli çıkış gerilimi üretilebilir. Negatif bir çıkış gerilimi üretmek için çıkışın referansı kondansatörlerin farklı noktalarına bağlanabilir. Literatürde ÇS- GBD 'ler iki gruba ayrılır. Bunlar, topoloji tabanlı ve hibrit ÇS-GBD 'lerdir. İlk grupta bulunan ÇS-GBD 'ler 4 'e ayrılabilirler. Bunlar;

- Diyot kenetlemeli ÇS-GBD
- Kondansatör kenetlemeli ÇS-GBD
- P2 ÇS-GBD
- Ayrık DA kaynaklı Kaskat GBD 'dir(CMC)

İkinci gruptaki ÇS-GBD 'ler ise

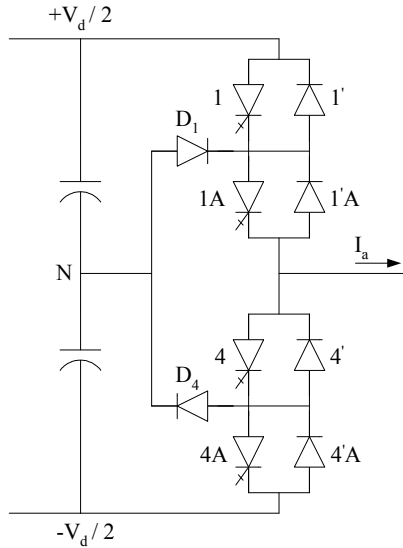
- Çok darbeli iki ve üç seviyeli GBD 'ler
- Değişik seviyeli hibrit hücreli GBD 'ler olmak üzere ikiye ayrılır.



Şekil 2.9 ÇS-GBD 'nin eşdeğer devresi

ÇS- GBD 'lerin en düşük seviyeli dönüştürücüler 3 seviyelidir. ÇS- GBD 'lerin gerilimin seviye sayısı arttıkça çıkış geriliminin basamak sayısında da bir artış olacağından çıkış gerilimi sinüse yaklaşır. Ayrıca çıkış geriliminin sayısı sonsuz yapılırsa çıkış gerilimindeki toplam harmonik bozulma (THD) sıfır olur (Lai ve diğ, 1996).

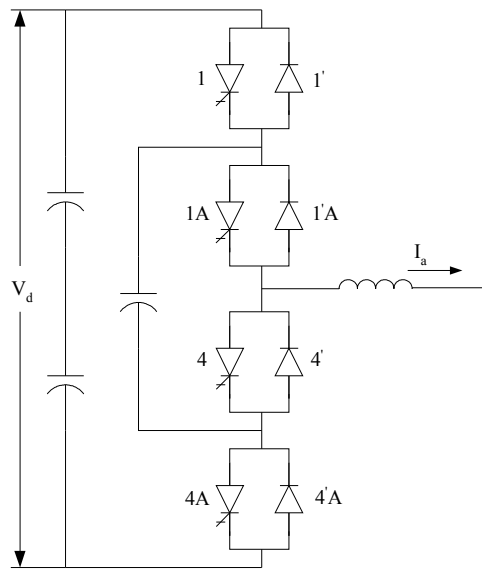
Diyot kenetlemeli GBD çok seviyeli dönüştürücü topolojisi arasında en çok bilinen yapıdır. Diyot kenetlemeli bir GBD ile  $m$  seviyeli bir faz gerilimi üretebilmek için  $m-1$  adet kondansatöre ihtiyaç vardır ve 3 seviyeli diyot kenetlemeli ÇS-GBD için iki adet kondansatör gereklidir ve her kondansatör üzerindeki gerilim  $V_d / 2$ 'dir. Üç seviyeli diyot kenetlemeli bir dönüştürücünün bir faz bacağı Şekil 2.10 'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10 Üç seviyeli diyot kenetlemeli ÇS-GBD 'nin bir faz bacağı

Şekilde gösterilmeyen iki faz bacağı da aynı kondansatöre bağlanarak üç fazlı yapı elde edilebilir. Bu kondansatörlerle doğru gerilim daha küçük gerilim seviyelerine bölünür. Ayrıca her anahtar üzerindeki gerilim baskısı diyotlar yardımı ile bir kondansatör üzerindeki gerilim olan  $V_d/2$  ile sınırlandırılır. Bir faz bacağının alt ve üstünde bulunan anahtarlama elemanları  $D_1$  ve  $D_4$  diyotları yardımı ile kondansatörün orta noktası  $N$  'ye bağlanır. Üç seviyeli dönüştürücülerde ekstra iki diyot kullanmaya ek olarak her faz bacağında iki tane yerine 4 tane anahtarlama elemanı kullanılmaktadır. Bununla birlikte aynı gerilim oranı anahtarların sayısını iki katına çıkarıldığı zaman doğru gerilim ve dönüştürücünün güç kapasitesi de iki katına çıkacaktır. Gerilim seviyesi arttıkça harmonik bozunumu azalır. Diğer ÇS-GBD 'lere göre diyot kenetlemeli ÇS-GBD 'lerin kontrolleri basittir ve yüksek verim sağlanır. Bunun yanında fazlardan kenetleme diyotlarının kullanılması ve kondansatör gerilimlerinin dengesizliğinden dolayı güç akışının zor olması ise bir dezavantajdır.

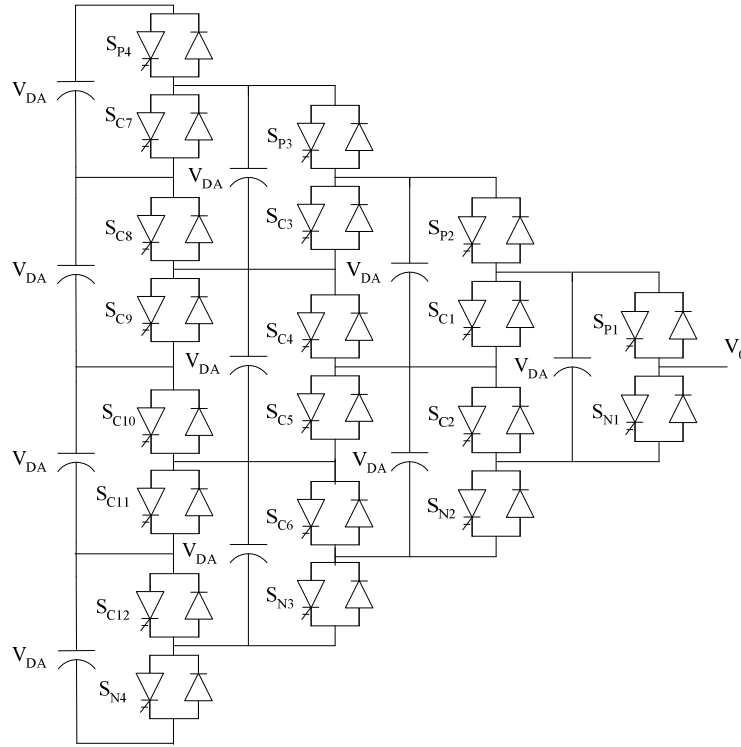
Diyot kenetlemeli yapıdaki kenetleme diyotlarının kullanımından kaçınmak için, kondansatör kenetlemeli yapı geliştirilmiş ve şimdiye kadar birçok uygulama alanı bulmuştur (Tuncer, 2003). Kondansatör kenetlemeli ÇS-GBD 'de her kondansatör üzerindeki gerilim diğer kondansatörlerden farklı olması için kondansatörler merdiven şeklinde sıralanır.  $m$  seviyeli bir çıkış üretebilmek için kondansatör kenetlemeli ÇS-GBD 'lerde  $m-1$  adet kondansatör kullanılır. Bununla ilgili bir faz bacağının eşdeğer devresi Şekil 2.11 'de gösterilmiştir. Kondansatör kenetlemeli dönüştürücü yapısı dalga şeklinin oluşmasında daha fazla esnekliğe ve kenetleme kondansatörleri tarafından gerilimin dengelenmesine izin verir (Rodriguez ve diğ., 2002). İki kondansatör arasındaki gerilimin artırılması ile çıkış dalgasında gerilim seviyesinin genliği de artırılmış olur.



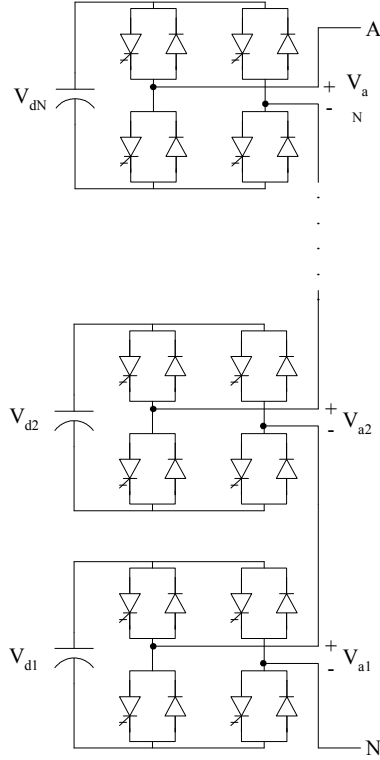
Şekil 2.11 Üç seviyeli kondansatör kenetlemeli ÇS-GBD 'nin bir faz bacağı

P2 ÇS-GBD 'ler ise temel iki seviyeli hücrelerin birkaçının birleştirilmesinden oluşturulur. Bu tip ÇS-GBD 'ler yük karakteristiğinden bağımsız bir şekilde her gerilim seviyesini bağımsız bir şekilde dengeleyebilir. Şekil 2.12 'de beş seviyeli P2 ÇS- GBD 'nin bir faz bacağı gösterilmiştir.  $S_{P1}$ - $S_{P4}$  ve  $S_{N1}$ - $S_{N4}$  anahtarlama elemanları ve bunlara bağlı olan ters paralel bağlı diyotlar istenilen çıkış geriliminin dalga şeklini oluşturan ana elemanlardır. Geri kalan anahtarlama elemanları ve ters paralel bağlı diyotlar kondansatör gerilimini dengeleme ve kenetleme için kullanılır.

Birinci kategoride bahsedilen ayrıık doğru gerilim kaynaklı kaskat ÇS-GBD 'ler (CMC) ise kısaca kaskat ÇS-GBD olarak bilinir. Bu tip ÇS-GBD 'lerin genel fonksiyonu daha önceden bahsedilen dönüştürücüler ile aynıdır. Aynı fazdaki tam köprü dönüştürücülerin alternatif gerilim çıkışlarından elde edilecek gerilim, bağımsız dönüştürücü çıkışlarının toplamı olacak şekilde seri bağlanır. CMC 'ler güneş kolektörleri, yakıt hücreleri veya bataryalardan elde edilen bağımsız doğru gerilim kaynaklarından istenilen gerilimi üretirler. Bu tip dönüştürücülerde çıkış faz gerilim seviyesinin sayısı  $m = 2N + 1$  şeklinde tanımlanır. Burada N, CMC 'de kullanılan doğru gerilim kaynak sayısıdır. En az harmonik bozulması, farklı dönüştürücü seviyelerinde iletim açısı kontrol edilerek elde edilebilir. Üç adet kaskat ÇS-GBD 'nin (üç fazlı kaskat ÇS-GBD) çıkış gerilimleri yıldız ya da üçgen bağlanabilir (Sirisukprasert, 2004).



Şekil 2.12 5 seviyeli P2 ÇS- GBD 'nin bir faz eşdeğer devresi



Şekil 2.13 Kaskat ÇS- GBD 'nin tek fazlı devresi

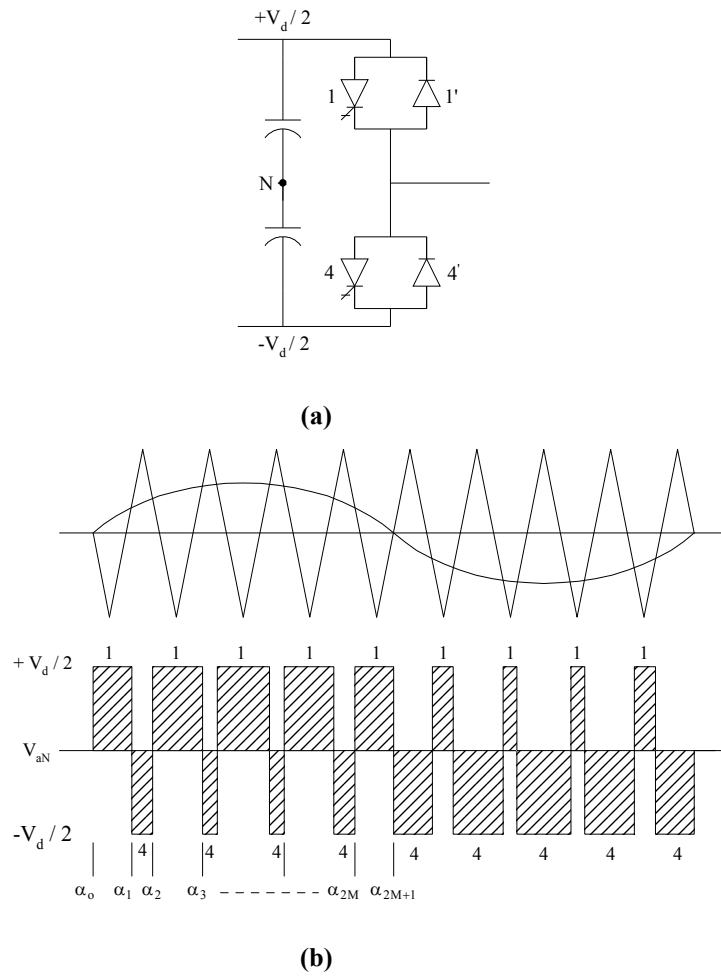
## 2.7 Darbe Genişlik Modülasyonlu Gerilim Beslemeli Dönüştürücüler

DGM dönüştürücülerin esas avantajı, dönüştürücü kazancının ve buna bağlı olarak da dönüştürücün çıkış geriliminin kontrol edilebilmesidir. Farklı dönüştürücü yapıları ile kullanılan birçok DGM tekniği vardır. En popüler olan DGM tekniği, sinüzoidal DGM (SDGM) 'dir. Şekil 2.14 (b) 'de sistem frekansı ile aynı frekansta bir sinüs dalgası (modulasyon dalgası) ve ana frekansın dokuz katı bir testere dişli (taşıyıcı dalga) dalga olmak üzere iki kontrol sinyalinin karşılaştırılması gösterilmiştir. Anahtarların iletme girmesi veya kesime gitmesi için gerekli darbeler, sinüs dalgası ile testere dişli dalganın geçiş noktalarına göre üretilir. Testere dişli dalganın negatif eğimli olduğu yerde sinüs dalgası ile kesiştiğinde 4 nolu anahtarlama elemanına kesime gitmesi için, 1 nolu anahtarlama elemanına ise iletme geçmesi için darbeler gönderilir. Testere dişli dalganın pozitif eğimli olduğu durumda ise yukarıda bahsedilen durumun tam tersi geçerlidir.

SDGM 'ye ek olarak birçok DGM tekniği de geliştirilmektedir. Bu tekniklerin bazıları birkaç değişiklik ile yüksek güç dönüştürücülerine uygulanabilir. Seçici harmonik eliminasyonu (SHE), ilk harmoniğin genliğini belirlemek için çentikler eklenirse gerilim kontrolü için güç dönüştürücülerinde uygulanabilir. Bu yöntem, belirli harmonik bileşenlerini yok etmek için

tasarlanabildiği için bu yöntem kullanılarak harmoniklerin tam bir kontrolü gerçekleştirilebilir. Bu nedenle verilen bir harmonik içeriği için anahtarlama frekansını da azaltır.

DGM GBD 'ler iki veya ÇS-GBD 'lerde her anahtarlama elemanı her periyotta açılıp kapatılır. Bu GBD 'ler ile alternatif çıkış gerilimi, gerilim darbelerinin genişliği ve-veya dönüştürücünün doğru geriliminin genliği değiştirilerek kontrol edilebilir. Diğer yaklaşım ise her yarım periyotta çok darbeye sahip olmak ve daha sonra alternatif gerilimin genliğini değiştirerek darbelerin genişliğini değiştirmektir. Böyle yapmanın prensipteki nedeni, dönüştürücünün çıkışında üretilen alternatif gerilimin genliğinin değiştirilebilmesi ve bu alternatif gerilimin harmonik mertebesinin azaltılabilmesidir. Ayrıca anahtarlama kayıplarını azaltmak için sıfır akım veya sıfır gerilim anahtarlama olarak bilinen yumuşak anahtarlama birleştirilen rezonans DGM dönüştürücü yapıları da vardır. Bu tip dönüştürücüler bazı düşük güç uygulamalarında oldukça fazla kullanılmaya başlanmıştır. Ancak daha yüksek ekipman maliyetlerinden dolayı henüz yüksek güç uygulamalarında kullanılmamaktadır.



**Şekil 2.14** Ana frekansın dokuz katı bir anahtarlama frekansıyla DGM dönüştürücünün çalışması

a) Bir faz bacağı, b) DGM dalgaları

Taşıyıcı dalganın frekansı, çıkış geriliminin ana frekansını belirler. Taşıyıcı dalganın frekansının modülasyon dalgasının frekansına oranı,

$$m_f = \frac{f_T}{f_m} \quad (2.4)$$

olarak yazılır ve bu oran frekans modülasyon oranı olarak isimlendirilir. Burada  $f_T$ , taşıyıcı dalganın frekansı ve  $f_m$  ise modülasyon dalgasının frekansıdır.  $m_f$  tek tamsayı seçildiği için faz-nötr gerilimi ve faz-faz gerilimleri tek simetrilere oluşur. Bu yüzden dönüştürücünün çıkış geriliminin Fourier analizi yapıldığında sadece sinüs serisinin katsayıları sonludur, kosinüs serisinin katsayıları ise sıfırdır. Bu yüzden faz-nötr ve faz-faz gerilimlerinde tek sayılı harmonikler görülür, çift harmonikler görülmez. frekans modülasyon oranı,  $m_f$ ,  $2m_f$ ,  $3m_f$  gibi anahtarlama frekansı veya katlarında merkezlenmiş yan bantlar olarak görülen harmonik derecelerine etki eder. Eğer frekans modülasyon oranı için katları seçilirse  $m_f$  'nin katlarında meydana gelen harmonikler dönüştürücünün çıkış geriliminde yok edilir. Harmoniklerin meydana geldiği frekanslar aşağıda belirtilmiştir.

$$\begin{aligned} & m_f, m_f \pm 2 \\ & 2m_f, 2m_f \pm 1 \\ & 3m_f, 3m_f \pm 2 \\ & 4m_f, m_f \pm 1, \dots \end{aligned} \quad (2.5)$$

Modülasyon indeksi  $m$  ise,

$$m = \frac{V_T}{V_m} \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilir. Modülasyon dalgasının genliği değiştirilerek (0 ile  $V_T$  arasında) darbe genişlikleri 0 ile  $180^\circ$  arasında değiştirilebilir. Şekil 2.13 (a) 'da gösterilen dönüştürücünün orta nokta N 'ye göre faz-nötr çıkış gerilimi,

$$V_{aN_{max}} = m \frac{V_{dc}}{2} \quad (2.7)$$

olarak yazılabilir.  $V_{bN}$  ise a fazından  $120^\circ$  geride olan b fazının kondansatörün orta noktasına göre çıkış gerilimidir. Transformatörün yıldız bağlı ikincil tarafının nötr noktasının gerilimi  $V_n$ ,

$$V_n = \frac{V_{aN} + V_{bN} + V_{cN}}{3} \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilir. Birkaç on Watt 'lık düşük güçlü ve düşük gerilimli DGM dönüştürücüler birkaç yüz KHz 'lik, birkaç yüz Kw 'lık endüstriyel sürücülerde ise birkaç on KHz 'lik bir iç DGM frekansına sahip olmalıdırlar. Yüksek güç ve gerilim oranına sahip FACTS teknolojileri için birkaç yüz Hz 'lik veya düşük KHz oranında olan düşük frekanslar uygulanabilir gözükabilir.

### 3. STATCOM

Reaktif güç kompanzasyonu elektrik enerji sistemlerinin kontrolünde önemli bir sorundur. Reaktif güç, iletim sisteminde kayıpları artırır, iletim hattının güç iletim kapasitesini azaltır ve hat sonundaki gerilimin genliğinde çok büyük değişmelere neden olur (Gyugyi, 1988). Bu yüzden alternatif akımlı güç sistemlerinde iletilebilir gücü arttırmak ve kayıpları azaltmak için reaktif güç kompanzasyonunun yapılması gerekir. Sabit veya mekaniksel anahtarlamalı kondansatör veya reaktör grupları hat boyunca gerilim şeklini kontrol ederek kararlı durumda iletilebilir gücü arttırmak amacı ile uzun süreden beri kullanılmaktadır. Ayrıca senkron generatörler iletim ve dağıtım sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu için kullanılmaktadır. Eşzamanlı generatörler birçok işlevsel karakteristiklere sahip olmalarına rağmen (düşük sistem gerilim seviyelerinde bile yüksek kapasitif çıkış akımı ve şebeke ile harmonik rezonansa neden olmayan indüktif bir kaynak empedansı) çalışma noktasında cevap hızının yavaş olması ve düşük kısa devre empedansı gibi birçok eksikliği vardır. Son çeyrek yüzyıldan beri yapılan çalışmalar iletim hattının reaktif kompanzasyonun güç elektroniği tabanlı devreler ile yapılması durumunda güç sisteminin geçici ve dinamik kararlılığının her ikisini de iyileştirebileceği görüldü (Gyugyi, 1994). Değişik güç elektroniği anahtarlamalı dönüştürücü devreleri ile endüktans veya kondansatörler olmaksızın doğrudan denetlenebilir bir reaktif güç üretebilme fikri 1976 'da Gyugyi tarafından ortaya atılmıştır. Esnek iletim hatları olarak bilinen FACTS kavramı 1988 'de Hingorani tarafından önerildi. Burada esneklik, çalışma noktasında meydana gelen değişmeye ve kontrol girişine sistemin hızlı bir şekilde cevap verme yeteneği olarak anlaşılır (Cavaliere ve diğ., 1999). FACTS 'ler alternatif iletim hatlarının bir veya daha fazla parametresini (gerilim, faz açısı ve empedans gibi) kontrol ederek dinamik kararlılığını arttırmaları ve daha iyi bir güç akış kontrolü sağlarlar. Bununla birlikte iletim hatları için bu yaklaşımın uygulanması kapı tetikleme darbeleri ile kesime giden yüksek akım ve gerilim oranlarına sahip uygun güç elektroniği elemanları olmaksızın yapılması mümkün değildi. Günümüzde GTO ve IGBT gibi tam denetimli güç anahtarları geleneksel tristörlerle karşılaştırılabilecek yüksek güç tutma seviyelerine ulaşmıştır (Larsen ve diğ., 1992). FACTS programı altında EPRI (The Electric Power Research Institute) iletim sistemlerinde bu yeni güç elektroniği tabanlı teknolojinin gerçekleştirilmesi için yüksek güç kapasiteli anahtarlama elemanlarının, yeni evirici devre topolojilerinin ve ileri kontrol tekniklerinin geliştirilmesi için destek verdi (Schauer, 1997).

Eğer kompanzasyonda yüksek dinamik performans isteniyorsa STATCOM (Statik Senkron Kompanzator), SSSC (Statik Senkron Seri Kompanzator) ve UPFC (Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü) gibi aygıtlarla yapılmalıdır (Gonzalez ve diğ., 2000). STATCOM, SSSC ve

UPFC hat başı ve hat sonundaki yüklerde ve bir elektriksel iletim hattına bağlanan farklı generatörlerle beraber güç akışını kontrol etmek için kullanılır (Sen, 1998). Sürekli ve kontrol edilebilir bir Var kaynağı olarak Statik Var generatörün (SVG) ilk pratik uygulaması Mitsubishi Electric Corporation ve Kansai Electric Power tarafından 1980 'de yapıldı. Bu SVG (77 kV ve 20 MVA) zorlanmış komutasyonlu dönüştürücü kullanılarak gerçekleştirildi (Sumi ve diğ., 1981). 1988 'de ise bir grup araştırmacı sadece test sistemi için GTO kullanılarak self komutasyonlu dönüştürücü kullanılan bir SVG geliştirdi (Edwards ve diğ., 1988).

SVC 'ler (Statik Var Kompanzator) kondansatör veya reaktör gruplarını düzenli bir şekilde anahtarlanması ile bunları devreye alıp çıkararak kontrol edilebilir bir reaktif güç üretir veya tüketirler. Bu yaklaşımın amacı, iletim hattının kompanzasyon ihtiyacını karşılamak için sürekli veya kademeli olarak ayarlanabilen bir reaktif empedans üretmektir. Günümüzde STATCOM veya statik kondenser olarak bilinen ileri statik Var kompanzator (ASVC) başlıca güç sisteminden reaktif akım çekecek şekilde kontrol edilen ve endüktans-kondansatör gibi bir enerji depolama elemanı ile üç fazlı sistem arasına bağlanan statik evirici kullanılarak yapılan FACTS aygıtlarıdır (Schauder, 1993). STATCOM 'un esas fonksiyonu bağlantı noktasında iletim hattının gerilimini düzenlemektir. STATCOM bunu iletim hattından kontrollü bir reaktif akım çekerek başarır (Schauder ve Mehta, 1993). STATCOM 'un çalışma karakteristiği senkron kondenser ile aynıdır.

STATCOM 'un ana bloğu, giriş tarafındaki doğru gerilimi faz açısı ve genliği kontrol edilebilir sistem frekansı ile aynı frekansta üç fazlı alternatif gerilime dönüştüren GBD 'lerdir. STATCOM 'da GBD yerine değişik devre topolojileri de kullanılabilir ancak tam denetimli yarı iletken anahtar kullanılarak yapılan çok fazlı GBD 'lerin şu anda en uygun olduğu görülmektedir (Arabi ve diğ., 1996). Bir GBD ile reaktif güç üretilmesinin tek hat diyagramı Şekil 3.1 'de gösterilmiştir. Şekil 3.1 'den de görüleceği gibi STATCOM en basit şekilde bir bağlantı transformatörü, bir GBD ve bir adette doğru gerilim enerji depolama aygıtından meydana gelir. Bu doğru gerilim enerji depolama aygıtı genellikle küçük bir kondansatör olduğu için STATCOM iletim hattı ile sadece reaktif güç alışverişi yapar. GBD 'nin doğru gerilim tarafında bulunan kondansatörün değeri STATCOM 'un fiziksel boyutu, performansı ve maliyeti üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu nedenle kondansatör değerinin uygun şekilde seçilmesi STATCOM 'un maliyetinin düşürülmesi ve performansı açısından önemlidir (Liang ve Nwankpa, 1999). Dönüştürücünün doğru geriliminde meydana gelecek dalgalanma miktarı, nominal gerilim değerinin % 10 'u olacak şekilde bir kondansatör değeri seçilir (Soto ve Gren, 2002).

Şekil 2.2 'de gösterilen tek fazlı bir dönüştürücünün sistem davranışı,

$$C \frac{dV_{DA}}{dt} = a.i_L \quad (3.1)$$

ve,

$$L \frac{di_L}{dt} + R.i_L = V_{ab} - a.V_d \quad (3.2)$$

formülü ile ifade edilebilir. Burada  $V_{ab}$ ; sistem gerilimi,  $V_d$ ; Kondansatör gerilimi,  $a$  ise anahtarlama fonksiyonudur. Anahtarlama frekansı ve onun katlarında merkezlenen harmonikler ihmal edildiği, kondansatör gerilimindeki dalgalanmanın küçük olduğu ve sistem geriliminin sinüs olduğu varsayılırsa, kalıcı durumda,

$$a(t) = m_a \sin(\omega t) \quad (3.3)$$

$$i_L(t) = I \sin(\omega t + \varphi_i) \quad (3.4)$$

denklemleri yazılabilir. Denk.(3) ve denk.(4) 'te,  $I$ ; endüktansın tepe akımı,  $m_a$ ; modülasyon indeksi,  $\varphi_i$  ise direnç değeri sıfıra yaklaşırken (Şekil 2.2 'de sıfır olarak alınmış)  $\pm 90^\circ$  alınır.

Ayrıca,

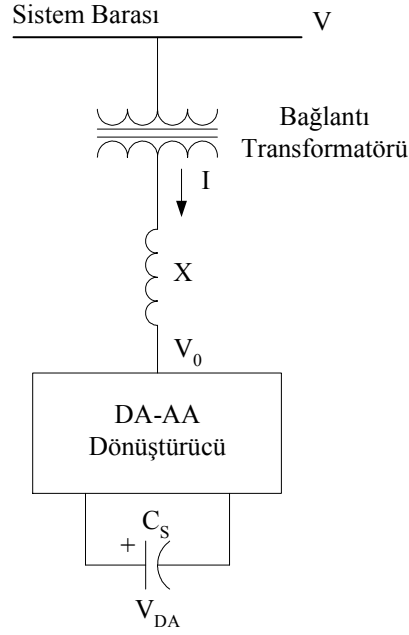
$$C \frac{dV_{DA}}{dt} = m_a \sin(\omega t) I \sin(\omega t + \varphi_i) = \pm \frac{1}{2} m_a I \cos(2\omega t) \quad (3.5)$$

$$V_d(t) = V_{DA} + \frac{1}{4\omega C} m_a I \cos(2\omega t) \quad (3.6)$$

olarak denk.(1), denk.(3) ve denk.(4) 'ten bulunabilir. Dönüştürücüde kullanılacak kondansatör değeri,

$$C = \frac{\Delta Q_{mak}}{\Delta V_d} \quad (3.7)$$

formülü ile bulunur. Burada  $\Delta Q_{mak}$  ; kondansatör akımının integralinin maksimum değeri ile ortalama değerinin farkı,  $\Delta V_d$  ise kondansatör gerilimindeki değişim miktarıdır. STATCOM, anahtarlamalardan dolayı meydana gelen aktif güç kaybına ve kondansatörün boyutuna bağlı olarak iletim hattı ile aktif güç alışverişi de yapabilir ve çalışma bölgesi 2 bölgeden 4 bölgeye çıkar. STATCOM 'un dört bölgede çalışması Şekil 3.2 'de gösterilmiştir. Bu şekilde yapılarak aktif ve reaktif çıkış gücünün modülasyonu için son derece etkili kontrol stratejileri, sistemin geçici ve sürekli hal kararlılık sınırlarını iyileştirmek için tasarlanabilir (Patil, 1999).



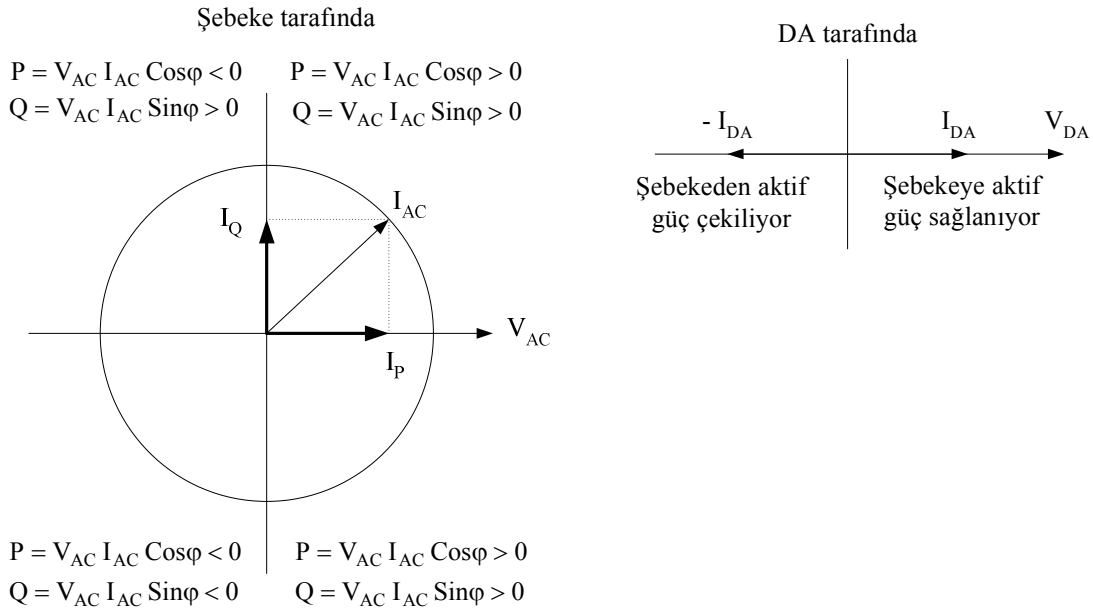
Şekil 3.1 STATCOM 'un genel gösterimi

Kontrol edilebilir statik Var generatör (SVG) olarak kullanılan GBD 'nin çalışması dönüştürücüdeki anahtarların detaylı çalışması düşünülmezsizin giriş gücünün çıkış gücüne eşit olması gerekliliği ile açıklanabilir. GBD 'de kullanılan anahtarlama elemanları doğru gerilimli giriş devresini direkt olarak alternatif gerilimli çıkış devresine bağlar. Bu yüzden, kayıplar ihmal edilirse alternatif gerilim tarafındaki net anlık güç daima doğru gerilim tarafındaki net anlık güce eşit olmalıdır (Gyugyi, 1999). Dönüştürücü sadece reaktif güç çıkışı sağladığı zaman (dönüştürücü çıkış gerilimi ile bara gerilimi aynı fazda) doğru akım kaynağı (dolu kondansatör) tarafından sağlanan aktif güçte sıfır olmalıdır. Ayrıca tanımlardan sıfır frekansta reaktif güç de (kondansatörde) sıfırdır ve kondansatörün reaktif güç üretiminde hiçbir etkisi yoktur. Yani dönüştürücü, sadece reaktif çıkış akımlarını fazlar arasında serbest dolaşacak bir biçimde üç fazlı alternatif gerilim çıkışlarını enterkonnekte bağlar. Şebekeden bakıldığında dönüştürücü net anlık güç değişiminin sıfır olduğu fazlar arasında dolaşan bir akım akışı meydana getirir (Gyugyi ve diğ., 1999).

Doğru gerilimi depolayan kondansatöre duyulan ihtiyaç kuramsal olarak anlık giriş-çıkış güçleri arasındaki eşitlik koşulundan ve gerilim kaynağına duyulan ihtiyaçtan dolayıdır. GBD 'nin çıkış geriliminin dalga şekli tam sinüs değildir. Bu nedenden dolayı GBD 'nin çıkış akımları tam sinüs olmasına rağmen net anlık çıkış gücü (VA) bir dalgalanma bileşenine sahiptir. Bu yüzden anlık giriş ve çıkış güçleri arasındaki eşitliği bozmamak için girişte sabit bir gerilim çıkışı sağlayan doğru gerilimi depolayan kondansatörden bir dalgalanma akımı

çekmelidir. Giriş dalgalanma akım bileşeninin bulunması tamamen kullanılan çıkış dalga şeklini üretme tekniklerinin bir fonksiyonu olan çıkış dalgasının dalgalanma bileşenine sahip olmasından dolayıdır. Pratik bir SVG 'de iki veya üç seviyeli GBD 'ler ya çıkış gerilimi için ya da giriş akımı için pratik olarak harmonik gereksinimini karşılamayacaktır. Bununla birlikte bu tip GBD 'lerden birkaç tanesini birleştirerek çok darbeli yapı oluşturulursa (ya da uygun DGM teknikleri ve diğer dalga şekillendirme teknikleri) çıkış gerilimindeki bozulmalar ve kondansatör dalgalanma akımı kuramsal olarak istenilen seviyeye düşürülebilir. İdeal bir GBD kullanılarak yapılan bir SVG, sinüzoidal bir çıkış gerilimi üretecek, şebekeden sinüzoidal bir reaktif akım ve kondansatörden sıfır bir dalgalanma akımı çekecektir.

Şekil 3.2 'de STATCOM 'un alternatif akımının ve geriliminin fazör diyagramı gösterilmiştir. Şekilde bara akımı  $I$  'nın sırası ile şebeke gerilimi ile ve dik fazda olan  $I_p$  ve  $I_Q$  akımları gösterilmiştir. Eğer STATCOM devresindeki kayıplar ihmal edilirse (STATCOM ile sistem arasındaki aktif güç alışverişi sıfır) aktif akım bileşeni  $I_p$  ve doğru akım sıfırdır. Bu durumda alternatif akım  $I$  'nın reaktif bileşen  $I_Q$  'a eşittir. Şekil 3.2 'den aktif ve reaktif güç akışı pozitifken, güç sistemden STATCOM 'a doğru, negatifken ise STATCOM 'dan sisteme doğru akar.

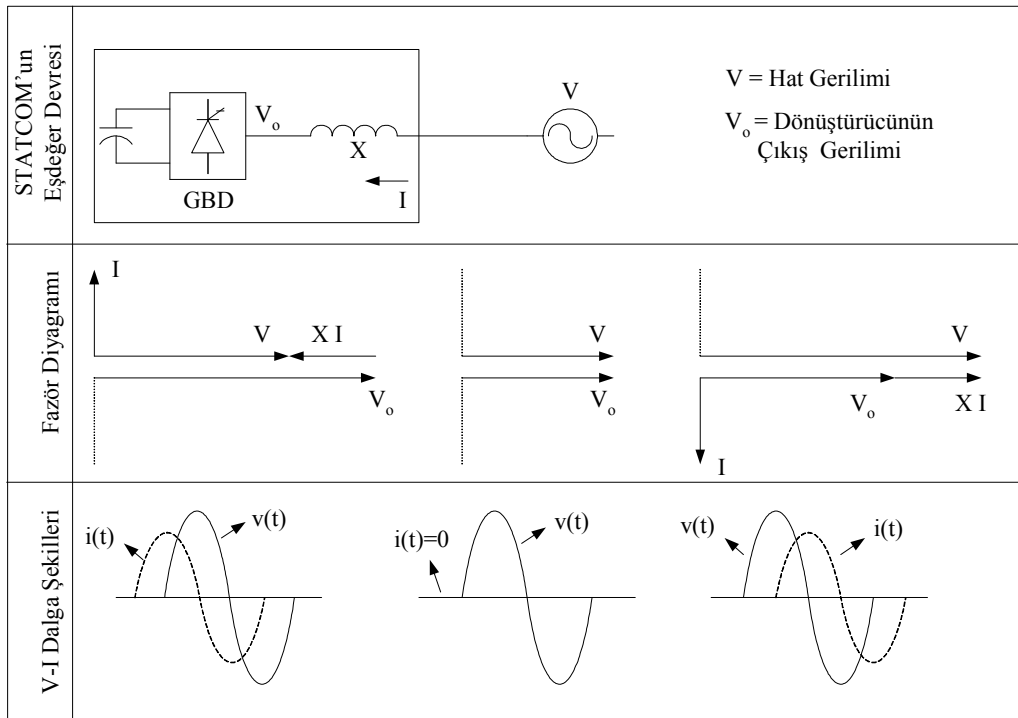


Şekil 3.2 GBD 'nin dört bölgede çalışması

Dönüştürücü, dolu bir kondansatörden sağlanan doğru gerilimden güç sistemi ile aynı frekansta genliği ve faz açısı hızlı bir şekilde kontrol edilebilir üç fazlı alternatif bir çıkış gerilimi üretir. Üretilen bu gerilimler, şebeke gerilimi ile aynı fazda ve şebekeye bir bağlantı

transformatörü yardımı ile bağlanır. Üretilen çıkış geriliminin genliği değiştirilerek dönüştürücü ile güç sistemi arasındaki reaktif güç değişimi senkron makinalara benzer bir şekilde kontrol edilebilir. Yani, dönüştürücünün ürettiği çıkış gerilimi ile şebeke geriliminin genliği arasındaki fark, bağlantı transformatörü yardımı ile sistemden veya sisteme doğru reaktif güç akışını belirler. Dönüştürücü tarafından üretilen çıkış geriliminin genliği bara geriliminin genliğinden fazla ise akım bağlantı transformatörünün kaçak reaktansı yardımı ile dönüştürücüden baraya doğru akar ve dönüştürücü sistem için kapasitif reaktif güç üretir. Dönüştürücü tarafından üretilen çıkış geriliminin genliği, bara geriliminin genliğinden az ise o zaman akım, baradan dönüştürücüye doğru akar ve dönüştürücü indüktif reaktif güç tüketir. Eğer dönüştürücünün çıkış geriliminin genliği ile bara geriliminin genliği birbirine eşitse bu durumda reaktif güç değişimi sıfırdır. Bununla ilgili durumlar Şekil 3.3 'te gösterilmiştir.

STATCOM ile güç sistemi arasındaki aktif güç alışverişi ise güç sisteminin gerilimi ile GBD 'nin çıkış gerilimi arasındaki faz farkı ayarlanarak kontrol edilebilir. GBD 'nin çıkış gerilimi bara geriliminden ileri fazda ise GBD kendi doğru gerilim enerji deposundan sisteme aktif güç sağlar. GBD 'nin çıkış gerilimi bara geriliminden geri fazda tutulursa, GBD şebekeden aktif güç çeker.

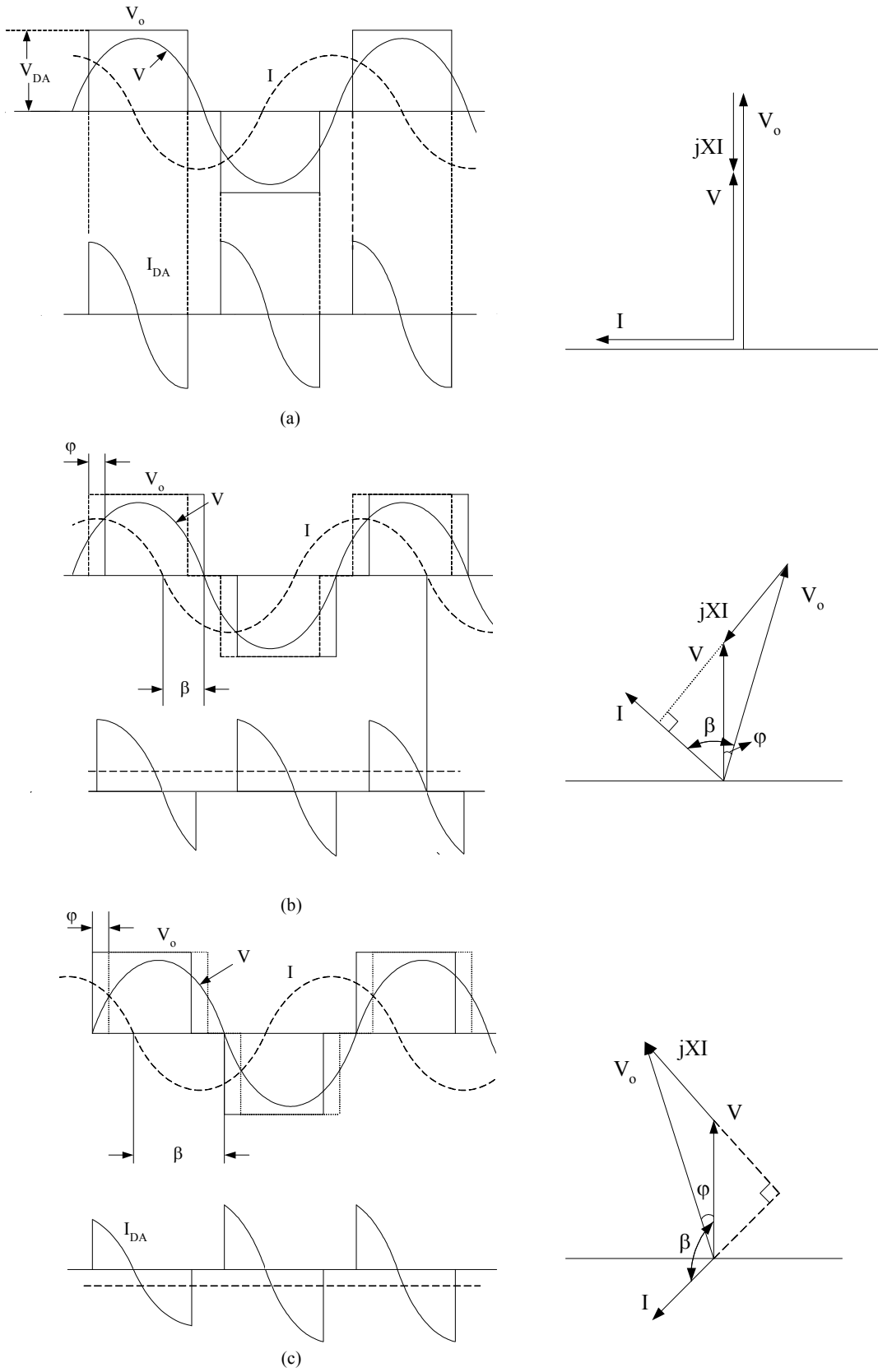


Şekil 3.3 SVG 'nin temel çalışma prensibi



gerilim değeri ve buna bağılı olarak da  $V_0 = k V_{DA}$  olduğu için dönüştürücünün ürettiği çıkış geriliminin genliği kontrol edilebilir. Burada  $k$ , dönüştürücünün doğru gerilim tarafında bulunan gerilimin genliğini şebeke tarafında faz-nötr gerilimi ile ilişkilendiren bir faktördür.

Eğer GBD 'de kullanılan anahtarlama elemanları ideal kabul edilirse GBD 'de meydana gelen anahtarlama kayıpları ihmal edilebilir. Pratikte anahtarlama elemanlarında kayıplar meydana gelir ve kondansatörde depo edilen enerji bu iç kayıpları karşılamak için kullanılır. Dönüştürücüye akan aktif güç, anahtarlama kayıplarını karşılamak ve kondansatörü istenilen gerilim seviyesinde şarjlı tutmak içindir. STATCOM 'un çıkış gerilimi ile sistem gerilimi tam olarak aynı fazda olursa STATCOM ile sistem arasında aktif güç alışverişi olmaz. Bununla birlikte dönüştürücü ve transformatörde meydana gelen kayıpları karşılayıp kondansatör gerilimini istenilen seviyede tutulabilmesi için STATCOM 'a doğru bir aktif güç akışının olması gerekir. Bunun için sistem gerilimi ile STATCOM 'un çıkış gerilimi arasında çok küçük bir faz farkı meydana getirilir. DGM-STATCOM 'larda bu küçük faz farkı sinüzoidal modülasyon işaretinin faz açısı ayarlanarak oluşturulur. Eğer STATCOM 'a doğru akan aktif güç dönüştürücü ve transformatörde meydana gelen toplam kayıplardan fazla ise kondansatör gerilimi artacak tam tersi durumda ise kondansatör gerilimi azalacaktır (Liang ve diğ., 1999). GBD 'nin iç kayıplarından dolayı, dönüştürücünün çıkış gerilimi ile güç sisteminin gerilimi arasında bir faz farkı meydana getirilerek dönüştürücünün iç kayıplarının sistem tarafından karşılanması sağlanır. Ayrıca faz açısını kontrol ederek kondansatörün gerilimi arttırılıp azaltulabilir. Kondansatörün gerilimi değiştiği için GBD 'nin çıkış geriliminin genliği ve buna bağılı olarak da reaktif güç alışverişi kontrol edilebilir. Eğer GBD 'nin çıkış geriliminin fazı  $\phi$  kadar geciktirilirse kondansatöre doğru akan akım Şekil 3.5(b) 'de gösterildiği gibi pozitif bir doğru gerilim bileşenine sahiptir. Bu sebeple kondansatör dolarak doğru gerilim değeri artar ve GBD 'nin iç kayıpları karşılanır. Tersisi durumda ise (kondansatör geçici durumda aşırı dolu) GBD 'nin çıkış geriliminin faz açısı güç sisteminin faz açısına göre  $\phi$  kadar ileri fazda tutulursa GBD 'ye doğru akan akım Şekil 3.5(c) 'de gösterildiği gibi negatif bir doğru gerilim bileşenine sahip olur ve kondansatör boşalarak doğru gerilim azalır. Kısaca GBD 'nin çıkış gerilimi ile güç sistemi arasındaki faz farkını kontrol ederek kondansatörün gerilimini sabit tutmak mümkündür. Kondansatör şarjlıdır ve her anahtarlama periyodu boyunca boşalır. Fakat kalıcı durumda ortalama kondansatör gerilimi sabit kalır. SVG 'lerde doğru gerilim kaynağı (batarya, yakıt hücresi, vs) veya yüksek kapasiteli (büyük kapasiteli kondansatör, süper iletken mıknatıs) GBD 'lerin kullanılması durumunda dönüştürücü güç sistemi ile aktif ve reaktif güç değişiminin her ikisini de kontrol edebilir. Aktif ve reaktif gücün her ikisinin de kontrol edilmesi yüklere kesintisiz güç sağlama ve güç salınımlarının sönümlenmesi gibi uygulamalarda önemli bir özelliktir. Bu özellik anahtarlama tip Var generatörlere özgüdür (Hingorani ve diğ., 1999).



Şekil 3.5 SVG 'nin akım ve gerilim dalga şekli, a) Kalıcı durum, b) Dolma durumu, c) Boşalma durumu

Bir güç sisteminde statik kompanzator uygulamanın başlıca amacı generatörden yüke kadar verilen bir iletim şebekesinde güç iletim kapasitesini arttırmaktır. Statik kompanzatorler aktif güç üretip tüketemediği için (GBD 'nin iç kayıpları ihmal edilir ve STATCOM 'un enerji depolama aygıtının olmadığı varsayılırsa) sistemin güç iletimi gerilim kontrolünden dolayı olarak etkilenir. Yani kompanzatorün reaktif çıkış gücü (indüktif veya kapasitif) sistemde meydana gelecek bozulma ve beklenmeyen olaylar karşısında istenilen güç akışını devam ettirmek için iletim hattının belli noktasındaki gerilim kontrol edilerek değiştirilir.

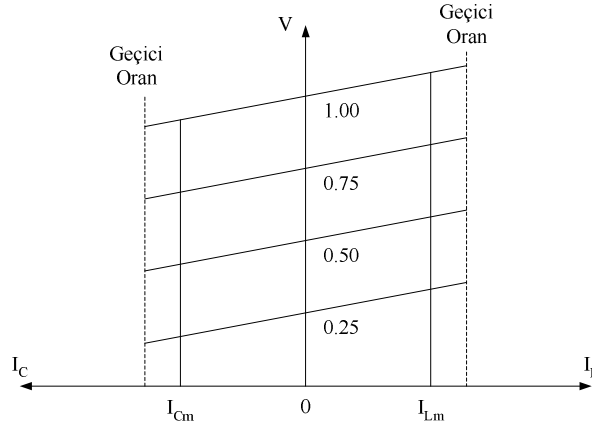
Kompanzasyon ya doğrudan gerilim desteği sağlama (çok yüklü durumda güç akışını arttırmayı kolaylaştırmak için gerekli olan gerilim seviyesini korumak ve gerilim kararsızlığını önlemek için) ya da geçici ve sürekli durumda sistemin kararlılığını iyileştirme (ilk salınım kararlılık bölgesini arttırmak ve güç salınımlarının sönümlenmesini sağlamak için) ihtiyacından dolayı yapılır.

Çoğu uygulamada statik kompanzator mükemmel bir çıkış gerilim regülatörü olarak kullanılmaz. Bunun yerine çıkış geriliminin kompanzasyon akımı ile orantılı olarak değişmesine izin verilir. Bunun nedenleri,

- Verilen maksimum kapasitif ve indüktif değerli bir kompanzatorün lineer çalışma bölgesi eğer bir regülasyon eğimine izin verilirse genişletilebilir. Burada regülasyon eğimi, kompanzatorün çıkış gerilimi tam kapasitif kompanzasyonda nominal yüksüz değerinden daha küçük, tam indüktif kompanzasyonda ise nominal değerinden daha büyük olmasına izin verilmesi
- Tam regülasyon (sıfır eğim), eğer sistem empedansı çalışma frekansında düşük ise kötü şekilde tanımlanmış çalışma noktası ve salınımlarla sonuçlanması
- Regülasyon eğimi, statik kompanzatorleri ve iletim hattının gerilimini kontrol etmek için kullanılan diğer gerilim regülatörlerini otomatik yük paylaşımına zorlaması şeklinde sıralanabilir.

STATCOM 'un V-I karakteristiği bağlantı transformatörünün kaçak reaktansına ve GBD 'nin çıkış gerilimine bağlıdır. Genelde kaçak reaktans değeri % 10 ile % 20 arasında bir değere sahiptir (STATCOM 'un nominal akımında nominal sistem geriliminin yaklaşık %10 ile %20 'lik gerilim düşümü ve gerilim yükselmesi için). STATCOM kendi aşırı gerilim tutucusunun sağladığı koruma seviyesine kadar olan geçici ve dinamik aşırı gerilimlere dayanmalıdır. Anlık uygulanan gerilimin genliği, referans doğru gerilimin genliğini aştığı geçici durum boyunca STATCOM 'da kullanılan diyotlar yardımı ile akım akacak ve bu akım kondansatörü daha yüksek bir gerilim değerine dolmasına neden olacaktır. STATCOM 'un tipik V-I karakteristiği Şekil 3.6 'da gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi STATCOM kapasitif ve indüktif kompanzasyonun her ikisini de güç sisteminin geriliminden bağımsız sağlayabilir ve

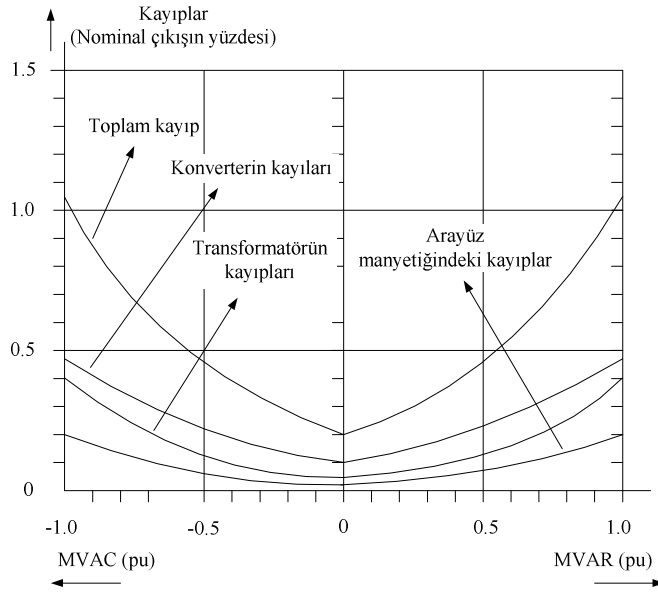
nominal maksimum kapasitif-indüktif oranının üzerinde çıkış akımını kontrol edebilir. Yani, STATCOM güç sisteminin geriliminin herhangi bir değerinde bile tam kapasitif reaktif güç sağlayabilir. Şekil 3.6 'dan ayrıca STATCOM indüktif ve kapasitif çalışma bölgelerinin her ikisinde de arttırılmış geçici bir orana sahiptir. Kapasitif bölgede maksimum ulaşılabilir geçici aşırı akım GBD 'de kullanılan anahtarlama elemanlarının maksimum akım kesme yetenekleri ile tanımlanır.



Şekil 3.6 GBD tabanlı Var generatörünün V-I çalışma bölgesi

STATCOM 'un çalışması sinüzoidal bir gerilim üretme esaslı olduğu için, STATCOM 'un geçici bozulmalara cevabı hızlı ve iyidir. Bir STATCOM 'un kalıcı durum çalışma şartı, sistem gerilimine (ve sistemin empedansına), STATCOM 'un kaynak gerilimine ve bağlantı transformatörünün kaçak reaktansına bağlıdır.

Şekil 3.7 'de 100 MVA 'lık (48 darbeleri GBD) bir STATCOM 'un reaktif çıkış akımı yardımı ile kayıpları gösterilmiştir. Toplam kayıp, 8 adet iki seviyeli GBD 'de, GBD 'lerin çıkış gerilimini oluşturmak için kullanılan manyetik ara yüzde ve ana bağlantı transformatöründe meydana gelmektedir. GBD 'de meydana gelen kayıplar yarı iletken iletimi, anahtarlama kayıpları ve snubber devresinde meydana gelen kayıpları kapsar. Bu kayıplar büyük oranda dönüştürücüde kullanılan yarı iletken anahtarlama elemanlarının karakteristiğine ve her periyotta yapılması gereken anahtarlama sayısına bağlıdır. Şekilde gösterilen kayıp karakteristiği 6  $\mu$ F snubber kondansatörü, 60 Hz 'lik anahtarlama frekansında çalışan 4 kA 'lık bir tepe akım değerinde kesime götürebilen ve 4.5 kV 'luk gerilim oranlı anahtarlama elemanları kullanılan GTO tabanlı dönüştürücü için geçerlidir. Düşük anahtarlama frekansından dolayı dönüştürücü kayıplarının sadece yaklaşık 1/3 'ü anahtarlama kayıplarıdır (snubber ve yarı iletken) geri kalan kayıplar ise iletim kayıplarıdır.



**Şekil 3.7** 48 darbeli  $\pm 100$  MVAR GBD tabanlı SVG 'nin VAR çıkışına karşı meydana gelen kayıplar

Meydana gelen manyetik kayıplar ise ana bağlantı transformatörü ve dönüştürücünün çıkış gerilimini toplamak için kullanılan manyetik ara yüzden dolaydır. Ana transformatörde meydana gelen kayıplar yüksek güç uygulamalarında kaçınılmazdır. Ara yüz manyetik devresinde meydana gelen kayıplar ise dönüştürücünün yapısına ve kullanılan çalışma moduna bağlıdır. DGM tekniğinin GBD 'lere uygulanması ile geleneksel STATCOM 'ların en büyük dezavantajlarından biri olan karmaşık ara yüz manyetik devresini biraz basitleştirilir.

Geçici kararlılığı arttırmak ve güç salınımlarını sönmölemek, generatörlerin yavaşlayıp hızlanmasını önlemek, iletilebilir gücü kontrol etmek için iletim hattının geriliminin uygun şekilde değişimini gerektirir. Geçici kararlılık, büyük bir bozulmadan sonra güç sisteminin tekrar eski haline getirilmesi olarak gösterilebilir. Örneğin çok yüklü bir iletim hattında meydana gelen bir arıza, generatör hat sonunda sabit bir mekaniksel giriş gücü beslerken iletilebilir güçte büyük bir azalma ile sonuçlanabilir. Elektriksel çıkış gücü ile mekaniksel giriş gücü arasındaki fark, generatörlerin hızlanmasına neden olur. Belirli bir güç seviyesindeki ve arıza giderildikten sonraki geçici kararlılık, elektriksel güç iletimini ve bunun vasıtası ile sistemin makinadan çektiği enerjinin oranını denetleyen arıza sonrası sistemin P- $\delta$  karakteristiği ile belirlenir. Çıkış gerilimini düzenlemek için kontrol edilen statik bir kompanzator arızadan sonra iletim gerilimini devam ettirerek geçici kararlılığı arttırabilir. Bununla birlikte geçici kararlılık, generatörün ilk hızlanma periyodu için geçici olarak gerilim değeri referans gerilim değerinin üzerine çıkarılarak arttırılabilir. Nominal değerinin üzerine çıkarılan gerilim iletilen elektriksel gücü ve buna bağlı olarak da generatörün yavaşlamasını

arttıracaktır. Güç salınımlarının sönümlenmesi genellikle etkin rotor açısının (veya güç iletim açısı) değişim miktarı ile orantılı olarak kompanzatorün çıkış geriliminin değişmesini gerektirir. Rotor açısı değiştiği zaman bu frekans ve aktif güç değişimi ile sonuçlanır. Pratikte iletilebilir gücün veya sistem frekansının değişimi ölçülür ve bunlar istenilen çıkış gerilimini üreterek VAR çıkışının kontrolü için kullanılır. Gerilim regülasyonu alanında statik kompanzator generatörün servis dışı kalması, hatların-yüklerin devreye alınıp çıkarılması ve arızalar yüzünden meydana gelen hızlı ve beklenmeyen gerilim bozulmalarını önleyen bir Var kaynağı olarak görülebilir.

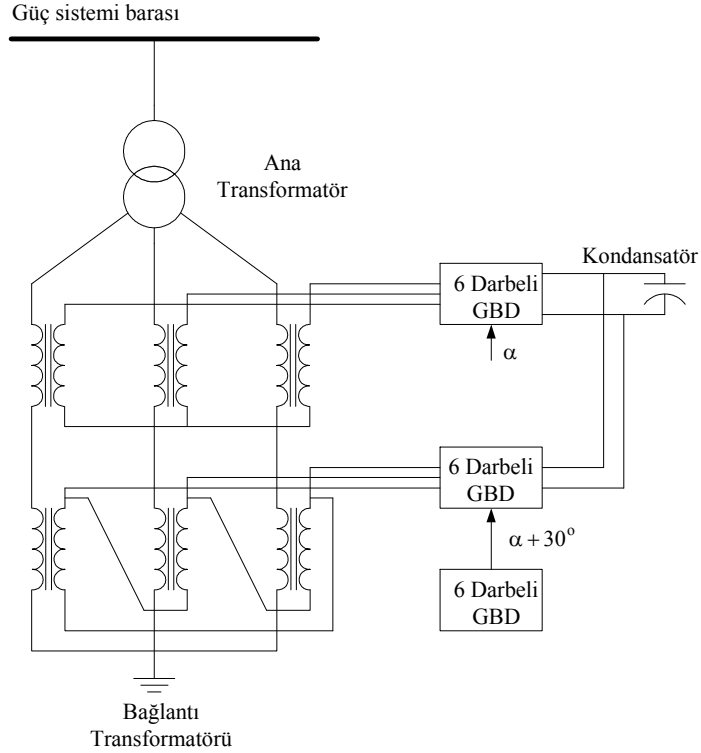
### 3.1 STATCOM İçin Temel Kontrol Yaklaşımları

STATCOM, kullanılan kontrol yöntemine göre ikiye ayrılır. Bunlar; darbe genişlik modülasyonlu STATCOM (DGM-STATCOM) ve geleneksel ( faz kontrol tekniği) STATCOM 'dur. Her iki STATCOM 'un alternatif gerilim tarafı bir transformatöre, doğru gerilim tarafı ise bir kondansatöre bağlanan eviriciden oluşur. Dönüştürücüyü baraya bağlamak için bir bağlantı transformatörü kullanılır. Bu iki STATCOM arasındaki tek fark kontrol metotlarıdır.

Geleneksel STATCOM 'da kontrol GBD 'nin düşük anahtarlama frekansında yapılır. STATCOM 'un kontrolü, dönüştürücünün çıkış gerilimini şebeke gerilimine göre bir kaç derece ileri ya da geri fazda tutulması için denetimli anahtarların anahtarlama açılarının değiştirilmesi ile gerçekleştirilir. GBD 'nin çıkış gerilimi, kontrol edilmek istenen baranın gerilimine göre ileri ya da geri fazda tutulmasındaki amaç, aktif güç akışının şebekeden dönüştürücüye doğru ya da dönüştürücüden şebekeye doğru olmasını sağlamaktır. Bu durumda kondansatörün dolup boşalması ile doğru gerilimin değeri ve buna bağlı olarak ta GBD 'nin çıkış gerilimi değişir (Soto, 2002). Şekil 3.8 'de geleneksel STATCOM devresi gösterilmiştir. İki GBD 'nin doğru gerilim tarafları aynı kondansatöre paralel bağlanabilir. Ayrıca bu iki GBD seri olarak da bağlanabilir. Bu durumda GBD 'nin çıkış geriliminin genliği paralel bağlanılan durumdakinin iki katı olur. Fakat GBD 'lerin doğru gerilimlerinin eşit olması gerektiğinden bu tip yapılandırma genelde tercih edilmez. GBD 'lerin alternatif gerilim tarafında karakteristik harmoniklerin yok edilmesi için bağlantı transformatörünün hat tarafında GBD 'ler seri bağlanabilir. Bununla birlikte daha düşük harmonik içerikli gerilim dalga şekli elde etmek için GBD ve transformatörleri paralel bağlamak gereklidir (Cavaliere ve diğ., 1999).

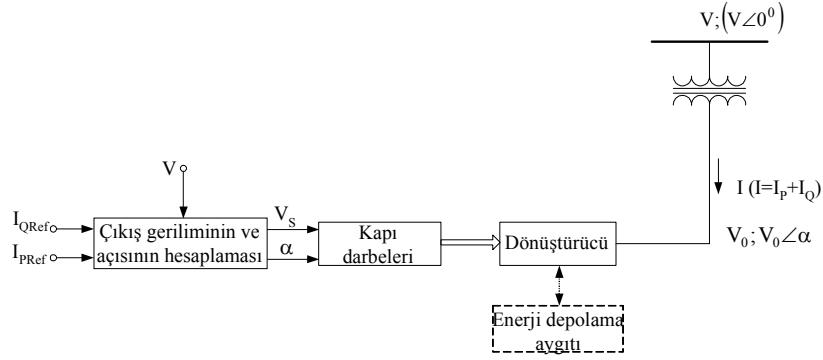
Bir SVG (statik Var generatör), birçok denetimli anahtarlama elemanından meydana gelir. Bu anahtarlama elemanları için kapı tetikleme darbeleri reaktif ve/veya aktif güç referans işaretleri için talebe uygun olarak iç dönüştürücü kontrolü ile üretilir. Referans işaretler, STATCOM 'un işlevsel çalışmasını belirleyen sistem değişkenleri ve operatör bilgilerinden sistem kontrolü veya dış kontrol ile elde edilir.

İç kontrol dönüştürücü için çok önemlidir. İç kontrolün birçok işlevi vardır. Bunlar genellikle anahtarlama elemanlarını kendi maksimum akım ve gerilim sınırları içinde tutması ile ilişkilidir. İç kontrol ayrıca güç sisteminin frekansı ile aynı frekansta istenilen genlik ve faz açılı bir çıkış gerilimi üretecek şekilde dönüştürücüdeki anahtarlama elemanlarını çalışmasını sağlar. Bu şekilde iç kontrol ile dönüştürücü faz açısı ve genliği uygun referans sinyaller vasıtasıyla dış kontrol tarafından denetlenen bir bağlantı reaktansı ile güç sistemine bağlanan sinüzoidal bir gerilim kaynağı olarak görülebilir.



**Şekil 3.8** 12 darbeli seri bağlı geleneksel STATCOM devresi

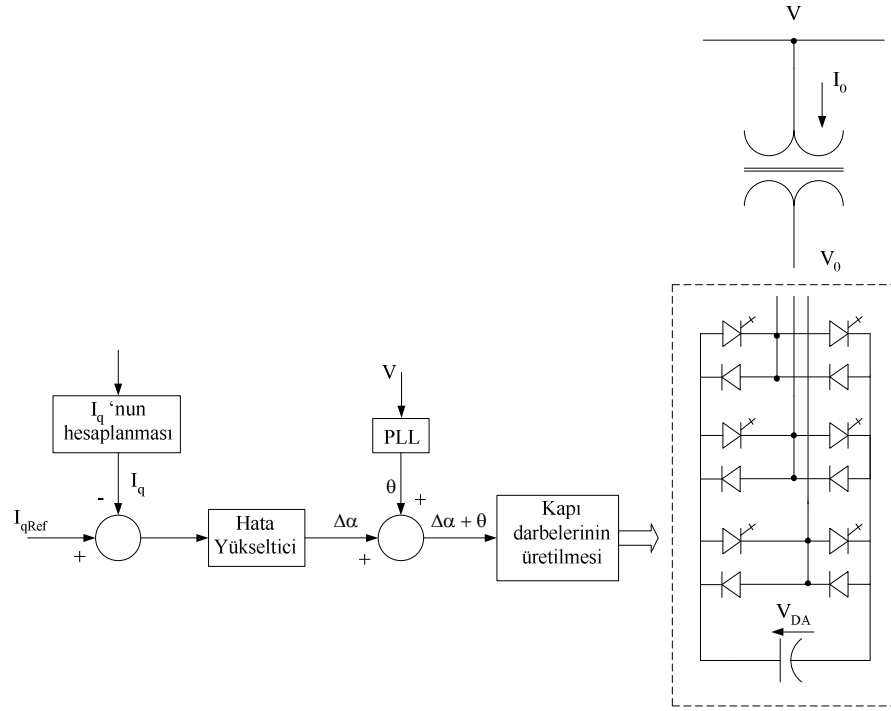
Yukarıda da bahsedildiği gibi iç kontrolün ana fonksiyonu kompanzasyon için gerekli olan reaktif güç (ve aktif güç) değişimini gerçekleştiren senkron bir çıkış gerilimi üretecek şekilde anahtarlama elemanlarını çalıştırmaktır. Şekil 3.9 'da gösterildiği gibi iç kontrol bunu dış kontrol tarafından sağlanan  $I_{qRef}$  ( $I_{dRef}$ ) değerinden gerekli olan çıkış geriliminin genliğini ve faz açısını hesaplayarak gerçekleştirir. Böylece çıkış gerilimine uygun şekilde anahtarlama elemanlarının açma-kapama sürelerini belirleyerek aralarında  $120^\circ$  'lik faz farkı olan çıkış gerilimleri üretir.



**Şekil 3.9** İç kontrolün şematik olarak gösterilmesi

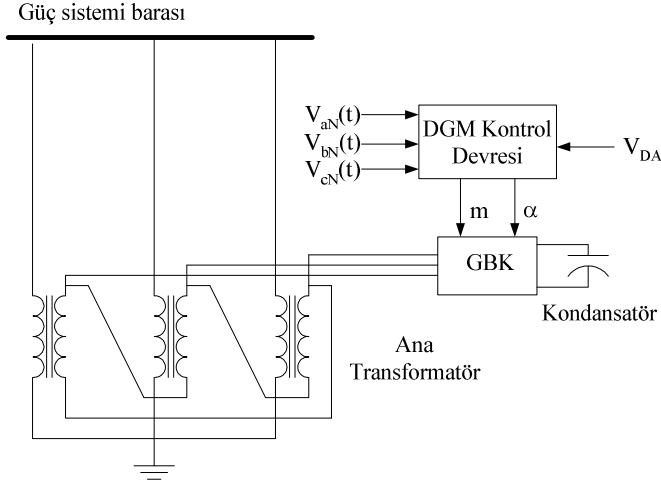
Çıkış geriliminin genliği ve faz açısı, GBD 'nin güç sisteminden çekeceği reaktif ve aktif gücü ve bunun vasıtası ile güç sistemi ile aktif ve reaktif güç alışverişini belirleyen iç parametrelerdir. Eğer GBD 'nin sadece reaktif güç değişimi yapması isteniyorsa, o zaman iç kontrole giriş gerekli olan reaktif akımdır. İç kontrol yardımı ile dönüştürücünün çıkış gerilimi ve faz açısı ile direk orantılı olan kondansatörün gerilimi kontrol edilir. Bu orantıdan dolayı reaktif çıkış akımı kondansatörün geriliminin kontrolü ile dolaylı olarak (çıkış geriliminin açısının kontrolü ile) kontrol edilebilir.

Şekil 3.10 'da sadece reaktif güç kompanzasyonu yapıldığı varsayılarak (aktif güç alışverişi sıfır) kondansatörün geriliminin kontrolüne dayanan dolaylı kontrol tabanlı yaklaşıma ilişkin blok diyagram gösterilmiştir. İç kontrole girişler, kontrol edilmek istenen baranın gerilim (V), dönüştürücünün çıkış akımı (I) ve referans reaktif akım ( $I_{qRef}$ ) değerleridir. Bara gerilimi temel bir senkronizasyon işareti elde etmek için faz kilitleme döngüsüne (PLL) girilir. Dönüştürücünün çıkış akımı vektör dönüşümleri kullanılarak aktif ve reaktif bileşenlerine ayrılır. Reaktif akım bileşeni, referans reaktif akım ile karşılaştırılır. Daha sonra elde edilen hata uygun bir yükselticiden geçirildikten sonra, gerekli doğru gerilim seviyesinin elde edilmesi için kondansatörün dolmasını veya boşalmasını sağlayan güç sisteminin gerilimi ile dönüştürücünün çıkış gerilimi arasındaki faz farkını belirler. Daha sonra elde edilen açı, reaktif akımın referans değerinin sağlanabilmesi için sistem açısı ile toplanarak  $\theta + \alpha$  dönüştürücünün anahtarlar elemanlarına kapı darbelerinin üretilmesinde kullanılır.



**Şekil 3.10** GBD tabanlı SVG 'lerde kondansatör geriliminin değiştirilmesi ile (dolaylı kontrol) reaktif çıkışın kontrolü

STATCOM 'larda harmonik içeriğinin azaltılması için faz kaydırma transformatörleri yardımı ile iki veya üç seviyeli GBD 'ler kullanılmaktadır. Bu şekilde dönüştürücünün 6 darbeleri çalışması ile üretilen karakteristik harmonik dereceleri yok edilir. Bununla birlikte iletim sistemlerini de kapsayan bu uygulamalarda faz kaydırma transformatörleri STATCOM 'un boyutunu ve karmaşıklığını artırır. STATCOM 'un DGM teknikleri ile kontrolü, dönüştürücünün alternatif çıkış gerilimini değiştirmek için ayarlanabilir görev oranlı çok darbeleri yapı temeline dayanır. Darbe sayısının artması düşük mertebeli harmonik içeriğini azaltır, yüksek dereceli harmonik içeriğini artırır. Bunun yanında darbe sayısının artması anahtarlama kayıplarını artırır. Bunun yanında (Uzunoviç, 2001). Dönüştürücünün reaktif çıkış akımının bu şekilde kontrolü doğrudan (DGM, vb) kontrol olarak ta bilinir. Basit bir DGM kontrol devresi Şekil 3.11 'de gösterilmiştir.



**Şekil 3.11** DGM-STATCOM devresi

Doğrudan kontrol şeması Şekil 3.12 'de gösterilmiştir. Şekil 3.12 'den de görüleceği gibi bu iç kontrol şemasında dönüştürücünün doğru gerilimin kontrolü de gerekir. Bu yaklaşımda doğru gerilimin değişmediği kabul edilir. İç kontrole girişler dolaylı kontroldeki gibi bara gerilimi ( $V$ ), GBD 'nin çıkış akımı ( $I$ ), reaktif akım ( $I_{qRef}$ ) ve doğru gerilimin ( $V_{DARef}$ ) referans değeridir.  $V_{DARef}$  değeri GBD 'nin kendi iç kayıplarını karşılamak için güç sisteminden çekeceği aktif güç miktarını belirler. Dönüştürücünün akımları yine vektör dönüşümü kullanılarak aktif ve reaktif bileşenlerine ayrılır. Bu bileşenlerin her biri doğru gerilim regülasyonundan elde edilen aktif ve kompanzasyon ihtiyacına göre belirlenen reaktif akım referans değerleri ile karşılaştırılır. Elde edilen hata işaretleri uygun yükselticiden geçirildikten sonra istenilen çıkış geriliminin faz açısı ve genliğine dönüştürülür.

DGM-STATCOM 'un geçici durum cevabı, bara geriliminin referans gerilim dalgasını yakından izlemesi için yeterince hızlı olmak zorunda olan güç sisteminin gerilim kontrol döngüsü ile tanımlanır. Diğer taraftan kondansatörün zaman cevabının bu kadar hızlı olmasına gerek duyulmaz. Öyle ki doğru gerilimin kontrol döngüsünün cevap hızı, alternatif gerilim kontrol döngüsünün cevap hızının 1/3 katı seçilir. Bu nedenle kontrol döngüleri Şekil 3.13 'teki gibi benzer kontrol blokları bağımsız sistemler gibi tasarlanabilir.



Düşük frekanslarda doğru gerilim döngüsü birinci mertebeden bir sistemin karakteristiklerine sahiptir ve transfer fonksiyonu yaklaşık olarak,

$$G(s) = \frac{\Delta V}{\Delta \alpha} = \frac{A_0}{\frac{s}{\omega_b} + 1} \quad (3.12)$$

Burada  $\Delta \alpha$ , güç sisteminin gerilimi ile GBD'nin çıkış gerilimi arasındaki faz kaydırma açısının değişimidir.  $A_0$ , kompanzatorün açık çevrim kazancı ve  $\omega_b$  açık döngü kesme frekansdır (Moran ve diğ., 1993). Standart bir tasarım yaklaşımı uygulayarak, PI kontrolör aşağıdaki fonksiyonları yerine getirmesi için kullanılır.

1) İntegral terimi I, döngü sonlu bir doğru akım kazancına sahip olduğu için kalıcı durum hatasını gidermek için gereklidir.

2) Oransal terim P ise band genişliğini etkiler.

PI kontrolörün transfer fonksiyonu,

$$G(s) = k_p + \frac{k_i}{s} = \frac{s/\omega_{PI} + 1}{s/k_i} \quad (3.13)$$

ifadesi ile bulunabilir. Burada  $\omega_{PI} = k_i / k_p$ 'dir. Burada kesme frekansı  $\omega_{PI}$  açık döngü kesme frekansına ( $\omega_b$ ) eşit yapılır. Doğru gerilim kontrolünün kapalı çevrim transfer fonksiyonu,

$$H(s) = \frac{k_d G_{PI}(s) G(s)}{1 + K_V K_D G_{PI}(s) G(s)} \quad (3.14)$$

şeklinde yazılabilir. Denk.(4.3)'te  $k_d$ , gerilimlerin açı dönüşümüne kazancı ve  $K_V$ , gerilim geri beslemesinin kazancıdır. Kapalı çevrim kesme frekansı,

$$\omega_{bc} = K_V K_d k_i A_0 \quad (3.15)$$

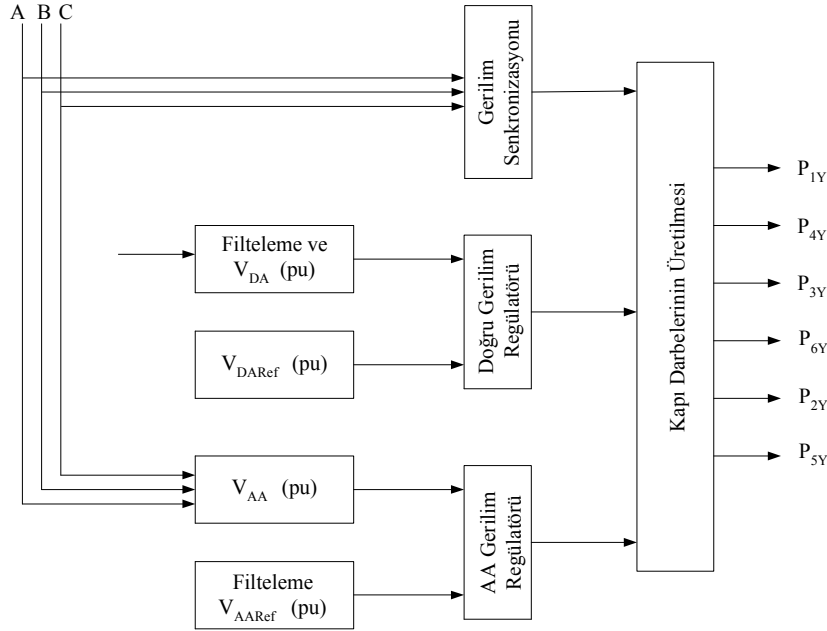
ile ifade edilebilir. Denk.(4.4)'ten,

$$k_i = \frac{\omega_{bc}}{K_V K_d A_0}, \quad k_p = \frac{k_i}{\omega_{PI}} \quad (3.16)$$

şeklinde yazılabilir.

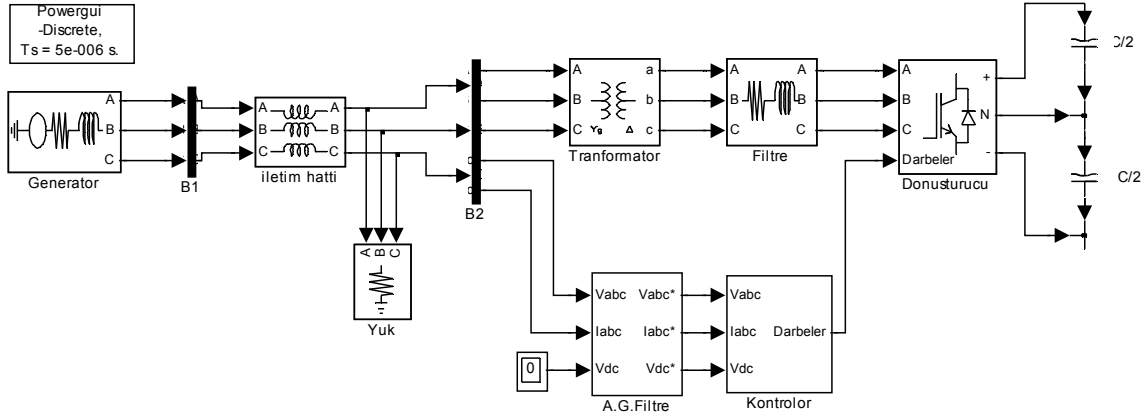
#### 4. BENZETİM SONUÇLARI

Bu tez çalışmasında bir güç sistemlerinin reaktif güç kompanzasyonunda kullanılan ve şönt bir FACTS aygıtı olan DGM-STATCOM 'un MATLAB-SIMULINK Toolbox 'ı kullanılarak benzetimi yapılmıştır. Benzetimi yapılan DGM-STATCOM 'un genel kontrol şeması Şekil 4.1 'de gösterilmiştir. Bu kontrol şemasında doğru gerilim kontrolü, kondansatörün geriliminin belirli bir referans değerde sabit kalmasını sağlar. Ayrıca sistem ile dönüştürücü arasındaki aktif güç alışverişini doğru gerilim kontrolü belirler. Kontrolörün gürültülerden etkilenmemesi için ölçülen doğru ve alternatif gerilim değerleri başlangıçta ikinci dereceden alçak geçiren bir filtreden geçirilir. Alternatif gerilim kontrolü ise sistem ile dönüştürücü arasındaki reaktif güç alışverişini belirler.



Şekil 4.1 DGM-STATCOM 'un kontrol şeması

Benzetim programında 500 KVA 'lık STATCOM, Y –  $\Delta$  bağlantı transformatörü yardımı ile güç sisteminin barasına bağlanmıştır. Benzetimi yapılan güç sistemi ve STATCOM devresi Şekil 4.2 'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi STATCOM devresi, bağlantı transformatörü, kontrolör, filtre, iki seviyeli GBD ve GBD için gerekli olan doğru gerilimi sağlayan bir kondansatörden meydana gelir.



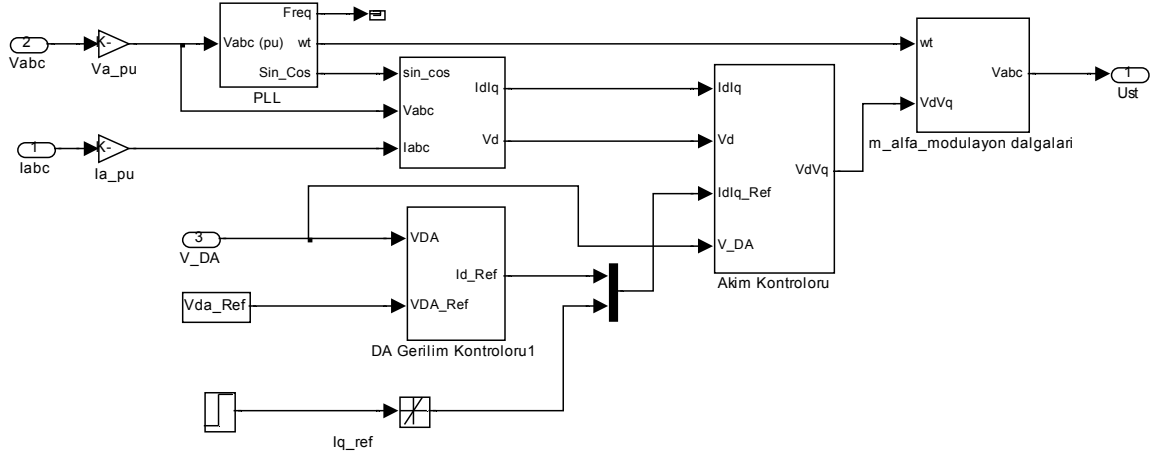
Şekil 4.2 MATLAB Simulink 'te oluşturulan güç sistemi ve DGM-STATCOM devre modeli

Benzetim programında ilk olarak STATCOM 'un referans reaktif akım bileşeni değiştirilerek güç sisteminin kapasitif ve endüktif yüklü olduğu durumlar için STATCOM 'un dinamik cevabı gözlemlenmiştir. İkinci olarak, bir dağıtım STATCOM 'un (D-STATCOM) bağlı bulunduğu baranın gerilim değerindeki değişmelere bağlı olarak D-STATCOM 'un bu değişmelere verdiği cevap incelenmiştir. Ayrıca DGM-STATCOM ile geleneksel STATCOM arasındaki kontrol strateji farkını görmek için 58 MVA, 0.857 geride güç faktörlü üç tane yükün bağlı olduğu baraya geleneksel STATCOM bağlanmıştır. Bu benzetim için geleneksel STATCOM 'un doğru geriliminin ve bara akım-geriliminin değişimlerinin sonuçları verilmiştir.

STATCOM 'da reaktif güç alışverişisi transformatörün birincil tarafının gerilimi ile aynı fazda transformatörün ikincil tarafında bir gerilim üretilerek başlanır. İkincil tarafın gerilimi 1350 Hz 'lik kırıyıcı frekansı kullanılarak DGM-GBD yardımı ile üretilir. DGM-GBD tarafından üretilen harmoniklerin frekanslarını azaltmak için GBD 'nin çıkış gerilimi bağlantı transformatörüne bağlanmadan önce filtrelenir. GBD için kapı darbeleri, sinüzoidal DGM (SDGM) olarak bilinen, kontrolörden elde edilen modülasyon dalgaları ile anahtarlama frekansı isteğe bağlı olan taşıyıcı dalga ile karşılaştırılması sonucu elde edilir.

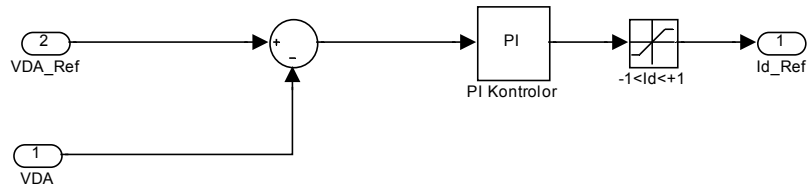
DGM-STATCOM 'un kontrolör kısmının iç yapısı Şekil 4.3 'te gösterilmiştir. Şekil 4.3 'ten de görüleceği gibi STATCOM 'un kontrolü, güç sisteminin gerilimini düzenleme, doğru gerilimi istenilen seviyede tutma ve güç sistemi ile senkronizasyonu sağlama gibi üç ana döngüden meydana gelmektedir. İlk olarak, kontrol edilmek istenilen baranın anlık gerilim değerleri ölçülür. Ölçülen bu değerler pu 'ya (per unit) çevrildikten sonra gerilim senkronizasyon bloğuna giriş olarak kullanılır. Baranın akımları pu 'ya çevrildikten sonra baranın akım ve gerilim değerleri Park dönüşümü kullanılarak akım ve gerilimin aktif ve reaktif bileşenleri (d ve q) elde edilir. Doğru gerilim kontrol bloğundan ise  $I_{d\_Ref}$  değeri elde edilir. Kontrolörde kullanılan bloklardan PLL (faz kilitleme döngüsü), STATCOM 'un bağlı olduğu

baranın a fazının geriliminin ana bileşeninin sıfır geçişine senkronize olur. Yani a fazının geriliminin faz açısını, frekansını ve açılal hızını belirler.



Şekil 4.3 STATCOM devresinin kontrolör kısmı

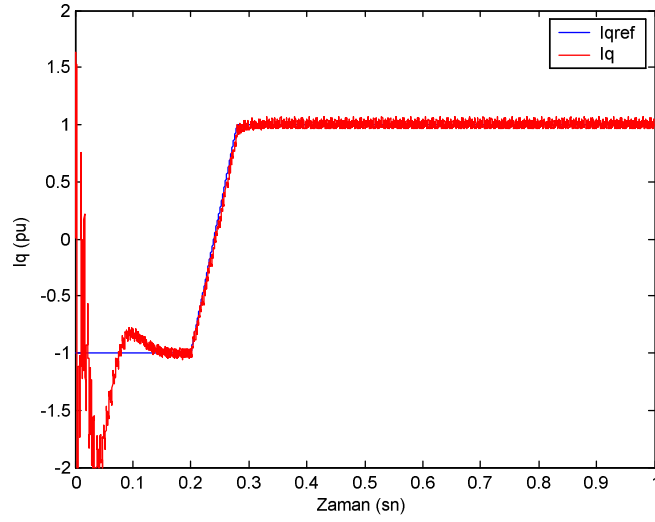
STATCOM 'da doğru gerilim kontrolü ile sistemden dönüştürücüye ya da dönüştürücünden sisteme akacak olan aktif güç miktarı belirlenir. Doğru gerilim kontrolörü ile ilgili kontrolör iç yapısı Şekil 4.4 'te gösterilmiştir. Ölçülen doğru gerilim değeri ile referans doğru gerilim değeri karşılaştırılıp bir PI kontrolörden geçirildikten sonra referans aktif akım bileşeni ( $I_{d\_Ref}$ ) bulunur. Daha sonra ölçülen aktif akım bileşeni ( $I_d$ ) değeri ile karşılaştırılır. Hata değeri bir PI kontrolörden geçirilerek GBD 'nin üretmesi gereken gerilimin reaktif bileşeni ( $V_q$ ) bileşeni elde edilir. Aynı şekilde referans reaktif akım bileşeni ( $I_{q\_Ref}$ ) değeri ile ölçülen reaktif akım değeri ( $I_q$ ) karşılaştırılıp hata değeri bir PI kontrolörden geçirildikten sonra GBD 'nin üretmesi gereken gerilimin aktif bileşeni ( $V_d$ ) bileşeni bulunur. Daha sonra elde edilen  $V_d$  ve  $V_q$  tekrar üç faza çevrilerek DGM kontrolü için gerekli olan modülasyon dalgaları elde edilmiş olur.



Şekil 4.4 Doğru gerilim kontrolünün iç yapısı

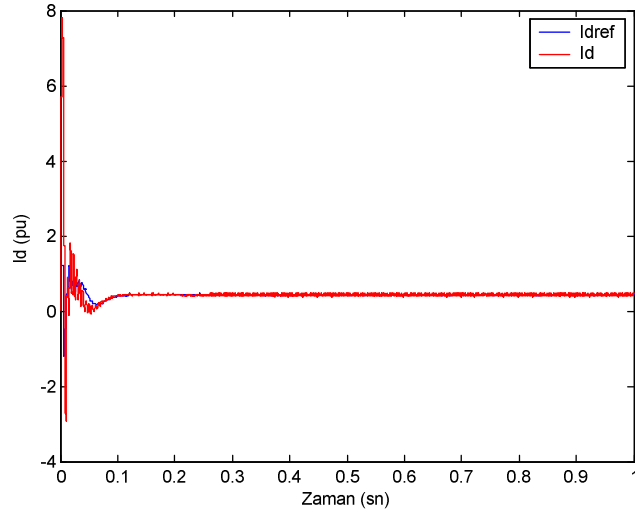
Daha önceden belirtildiği gibi STATCOM 'un dinamik cevabı, sistemdeki değişikliklere ne kadar hızlı cevap verdiği ile ilgilidir. Benzetimde, en kötü durum düşünülerek

STATCOM 'un dinamik cevabı test edilmiştir. Bunun için, sistemin ilk olarak tam endüktif çalıştığı belli bir müddet sonra ise tam kapasitif çalışmaya başladığı varsayılarak STATCOM 'un bu değişikliğe verdiği cevap incelenmiştir. İlk durumda referans reaktif akım değeri -1 pu 'ya ayarlanmıştır. Benzetim programı çalıştırıldıktan sonra 0.2 sn sonra ise referans reaktif akım değeri +1 pu 'ya değiştirilerek STATCOM tam endüktif çalışırken 0.2 sn sonra tam kapasitif çalıştırılmıştır. STATCOM, herhangi bir geçici durum olmaksızın bu ani değişikliğe çok kısa sürede cevap vererek, bara akımının reaktif akım bileşeni referans reaktif akım bileşenini izlemiştir. Şekil 4.5 'te, reaktif akım bileşeni ile referans reaktif akım bileşeni gösterilmiştir. Görüldüğü gibi  $I_q$ ,  $I_{q\_Ref}$  'i takip ederek STATCOM sistem için gerekli kompanzasyon akımını sağlamakta ve istenilen oranda sistemi kompanze edebilmektedir.



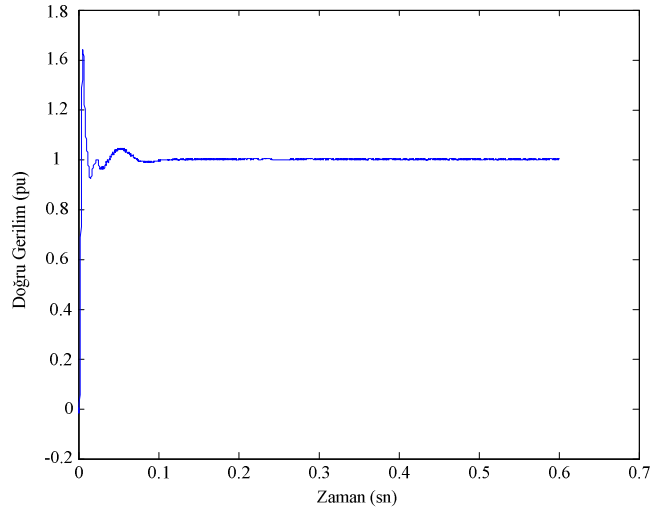
**Şekil 4.5** STATCOM 'un bağlı bulunduğu baranın akımının  $I_q$  bileşeninin değişimi

Benzetim programı çalıştırıldıktan sonra dönüştürücünün bağlı bulunduğu transformatörün alternatif gerilim tarafından aktif güç çekerek (akımın  $I_d$  bileşeni) kondansatör dolmaya başlar. Kondansatör gerilimi referans gerilim değerine ulaştıktan sonra gerilim değerini sabit tutabilmek için transformatörde, filtrede ve dönüştürücüde meydana gelen kayıpları karşılayacak kadar şebekeden dönüştürücüye doğru bir aktif güç akışının olması gerekir. Benzetim programı sonucundan da görüleceği gibi  $I_d$  bileşeni pozitifdir.  $I_d$  bileşeninin pozitif olması, şebekeden dönüştürücüye doğru bir aktif güç akışının olduğu anlamına gelir (tersi durumda dönüştürücünden şebekeye aktif akışı anlamına gelir). Bu durumla ilgili benzetim programının sonucu Şekil 4.6 'da gösterilmiştir.



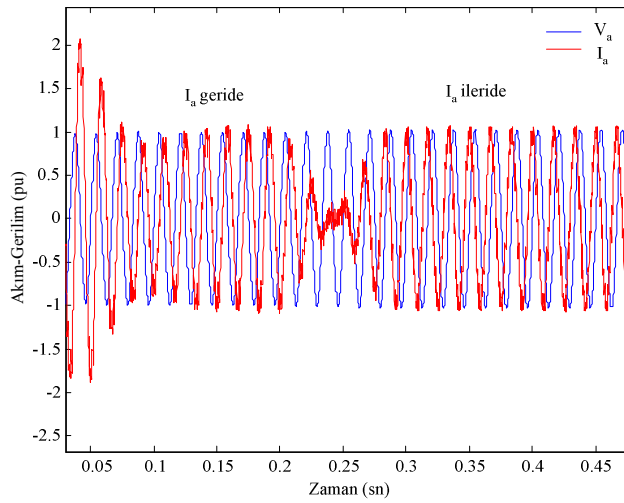
**Şekil 4.6** STATCOM 'un bağlı bulunduğu baranın akımının  $I_d$  bileşeninin değişimi

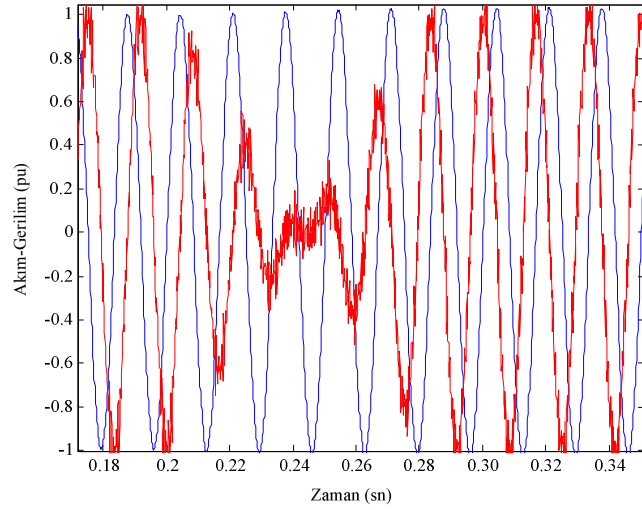
Kalıcı durum çalışma şartları altında, doğru gerilim kontrol döngüsü, kondansatör geriliminin sabit kalmasını sağlar. DGM-STATCOM 'u geleneksel STATCOM 'dan ayıran en önemli özellikte doğru gerilimin sabit tutulmasıdır. Bununla birlikte, GBD 'nin çıkış akımının genliğinde değişmelerle sonuçlanan alternatif gerilimin komut sinyallerinde geçici değişmeler meydana geldiği zaman kondansatörde gerilim dalgalanmaları meydana gelir. Gerilim dalgalanmalarının genliği kondansatör değerinin uygun seçilmesi ile etkili bir şekilde kontrol edilebilir. Kondansatörde meydana gelen dalgalanma geriliminin genliği meydana gelen geçici değişmelerin süresine ve boyutuna bağlıdır. Benzetimi yapılan sistemde doğru geriliminin değişimi Şekil 4.7 'de verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi DGM-STATCOM 'da doğru gerilim, sistem kalıcı duruma ulaştıktan sonra referans gerilim değerinde sabit kaldığı görülür. Ayrıca 0.2. sn  $I_{q\_Ref}$  değerinin -1 pu 'dan + 1 pu 'ya değişimi esnasında bile doğru gerilim bu değişmeden hemen hemen hiç etkilenmez.



**Şekil 4.7** Benzetimi yapılan sistemde dönüştürücünün doğru geriliminin değişimi

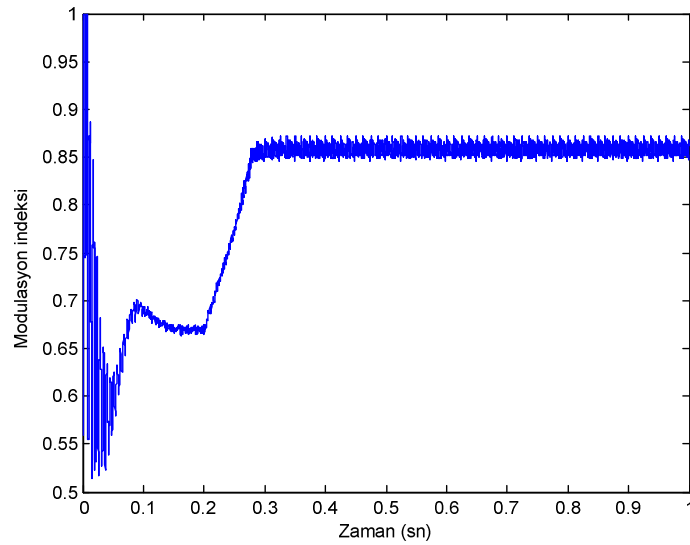
Benzetim programında, STATCOM kontrol edilmek istenilen baraya bir transformatör yardımı ile paralel bağlanmıştır. STATCOM 'un akım gerilimi arasındaki faz ilişkisi, güç sisteminin çalışma şartlarına (endüktif ya da kapasitif) bağlıdır. Yani, güç sisteminin endüktif olduğu durumda STATCOM kapasitif bir reaktif akım, güç sisteminin kapasitif olduğu durumda ise endüktif bir reaktif akım üretir. Benzetim programında  $I_{q,Ref}$  -1 pu 'dan +1 pu 'ya değiştirildiği zaman, baranın bir fazının akımı ve gerilimi gözlemlenirse, bu esnada baranın akım ve gerilimleri arasındaki faz ilişkisinin de değiştiği görülür. 0.2. sn 'ye kadar akım gerilimi  $90^\circ$  geride takip ederken (tam kapasitif çalışma) 0.2. sn 'den sonra reaktif akım bileşeni değiştiği için akım gerilimden  $90^\circ$  ileride olacaktır (tam endüktif çalışma). Bununla ilgili benzetim programının sonucu Şekil 4.8 'de gösterilmiştir.





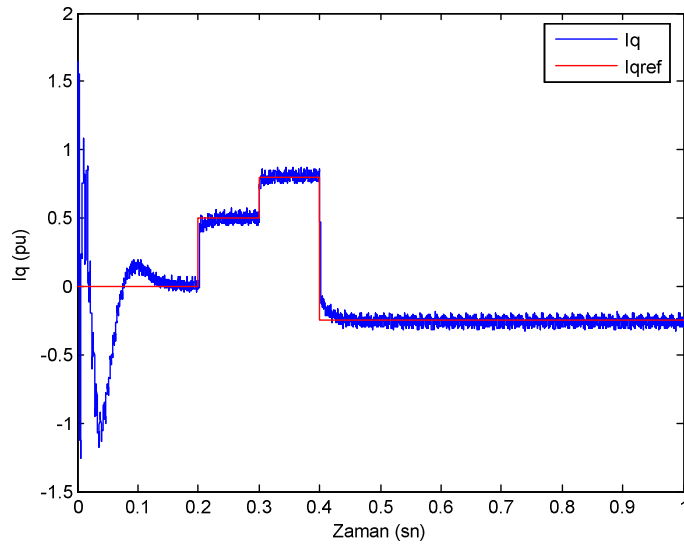
**Şekil 4.8** STATCOM 'un endüktif çalışmadan kapasitif çalışmaya geçişi anında baranın akımı ve gerilimi arasındaki faz ilişkisi

DGM-STATCOM 'larda doğru gerilim sabit olduğu için GBD 'nin çıkış geriliminin genliği, modülasyon indeksi değiştirilerek ayarlanır. DGM-STATCOM 'da çıkış geriliminin genliği  $V = m V_{DA} \angle \phi$  olarak ifade edilir. STATCOM 'un kapasitif çalışabilmesi için, STATCOM 'un çıkış geriliminin genliğinin bara geriliminin genliğinden büyük olması bunun başarılabilmesi için de modülasyon indeksinin artması gerekmektedir. Şekil 4.9 'dan da görüleceği gibi benzetim modelinde  $I_{q\_Ref}$  değerinin -1 pu 'dan + 1 pu 'ya değiştirilmesi durumunda modülasyon indeksi artarak, GBD 'nin gerilim regülasyonu için gerekli olan çıkış gerilimini üretmesi sağlanır. Aşırı modülasyondan kaçınılması için, modülasyon indeksi 0 ile 1 aralığında sınırlandırılmıştır.



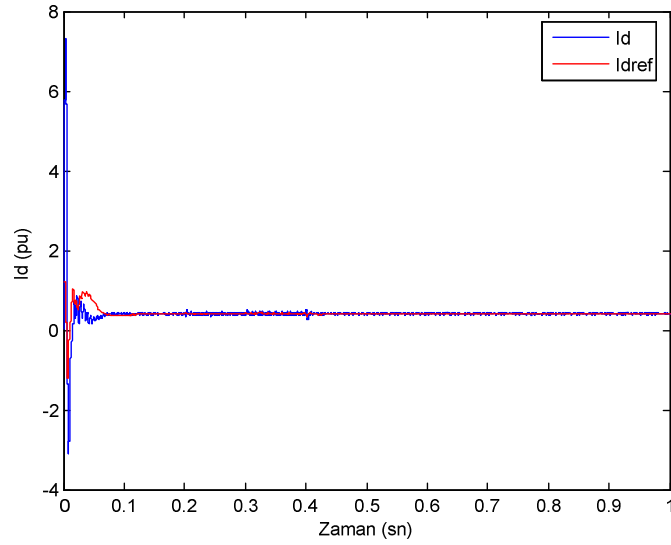
**Şekil 4.9** Modülasyon indeksinin değişimi

İkinci uygulamada bir D-STATCOM 'un bağılı bulunduğu baranın geriliminin değeri değiştirilerek D-STATCOM 'un bu değişime vermiş olduğu cevaplar incelenmiştir. Bara geriliminin genliğı STATCOM 'un çıkış geriliminden büyük ise bu durumda STATCOM endüktif bir reaktif akım çekerek tersi durumda ise şebekeye kapasitif bir reaktif akım vererek iletim hattının kompanzasyon ihtiyacına cevap verir. Bara gerilimi 0.2 sn 'ye kadar STATCOM gerilimi ile aynı genlikte, 0.2. ile 0.3. sn 'ler arasında 0.97 pu 'ya, 0.3. ile 0.4 sn 'ler arasında 0.94 pu 'ya, 0.4. sn 'den sonra ise 1.02 pu 'ya ayarlanmıştır. Sistemde meydana gelen değişmelere STATCOM 'un cevabı çok hızlıdır ve güç sisteminin anlık kompanzasyon akımı talebini karşılayabildiğı Şekil 4.10 'dan görülebilmektedir.



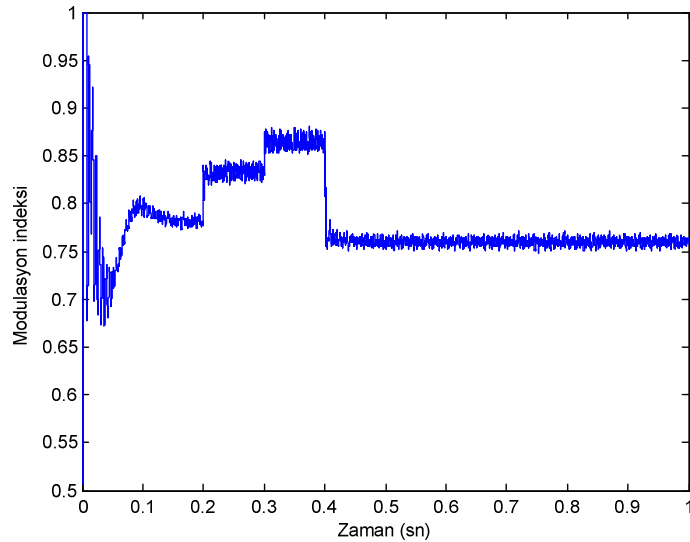
Şekil 4.10 İkinci benzetim uygulaması için STATCOM 'un akımının  $I_q$  bileşeninin değişimi

Sistemimizde meydana gelen kayıplar ilk uygulamada olduğu gibi kondansatörü istenilen gerilim seviyesinde dolu tutmak için şebeke tarafından dönüştürücüye doğru bir aktif güç akışı sağlanmıştır. Bununla ilgili benzetim sonucu Şekil 4.11 'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11 İkinci benzetim uygulaması için STATCOM 'un akımının  $I_d$  bileşeninin değişimi

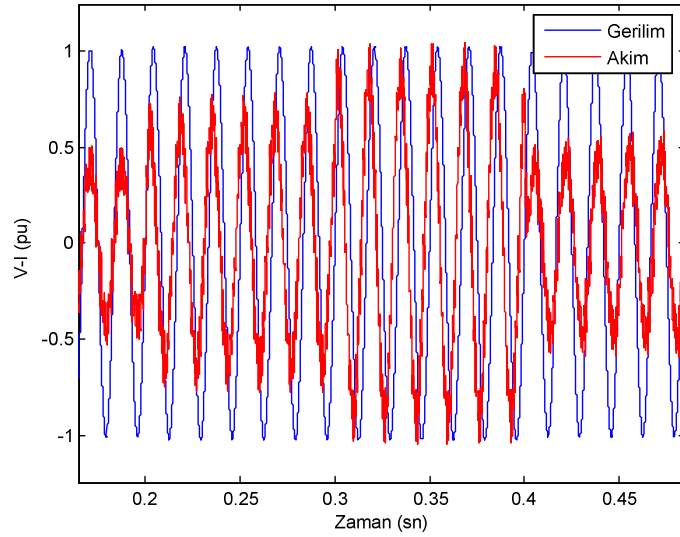
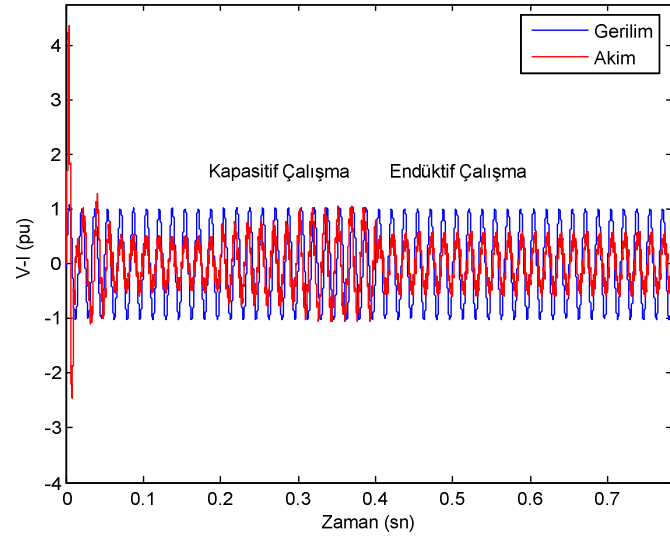
STATCOM kompanzasyon için gerekli olan akımı giriş tarafında bulunan doğru gerilimi bir anahtarlama dizisi ile kontrol edilebilir bir alternatif gerilime dönüştürerek yapar. Daha önceden belirtildiği gibi DGM-STATCOM 'larda çıkış geriliminin genliği dönüştürücünün kazancı değiştirilerek ayarlanır. STATCOM 'un kapasitif çalışabilmesi için çıkış geriliminin genliğinin bara geriliminin genliğinden büyük, endüktif çalışabilmesi için ise küçük olması gerekir. Bunu sağlayabilmek için modülasyon indeksinin değiştirilmesi gerekir.



Şekil 4.12 İkinci benzetim uygulaması için modülasyon indeksinin değişimi

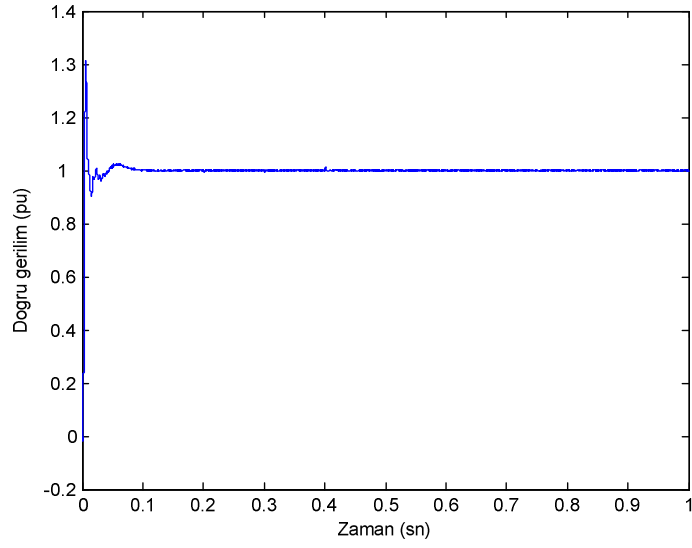
Şekil 4.12 'den görüldüğü gibi bara geriliminin genliğinde bir azalma olduğu zaman STATCOM 'un gerekli kompanzasyon akımını sağlayabilmesi için, modülasyon indeksi artarak

dönüştürücünün çıkış geriliminin genliği artar. Bu şekilde STATCOM bağlı bulunduğu baraya gerilim desteği sağlamış olur. Bara geriliminin genliğinde bir artış olduğu zaman ise modülasyon indeksi azalarak dönüştürücünün çıkış geriliminin genliğinin azalması sağlanır. Güç sisteminin geriliminde meydana gelen değişimler esnasında STATCOM 'un akım ve gerilimi arasındaki faz ilişkisi Şekil 4.13 'te verilmiştir.



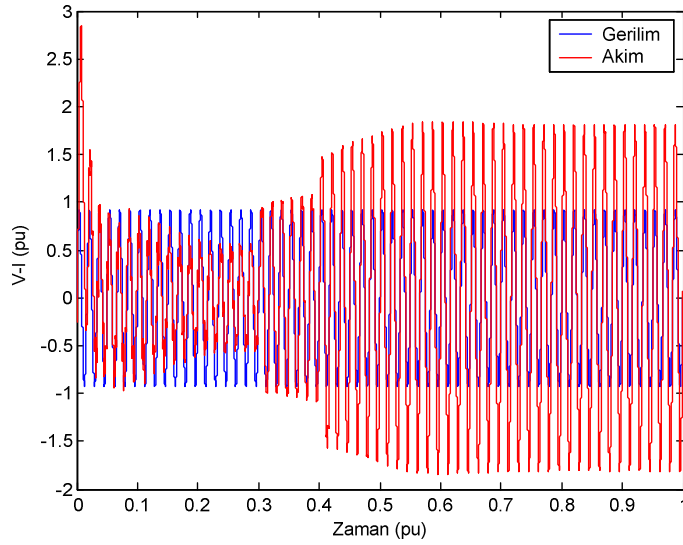
**Şekil 4.13** İkinci benzetim uygulaması için STATCOM 'un akım ve gerilimi arasındaki faz ilişkisi

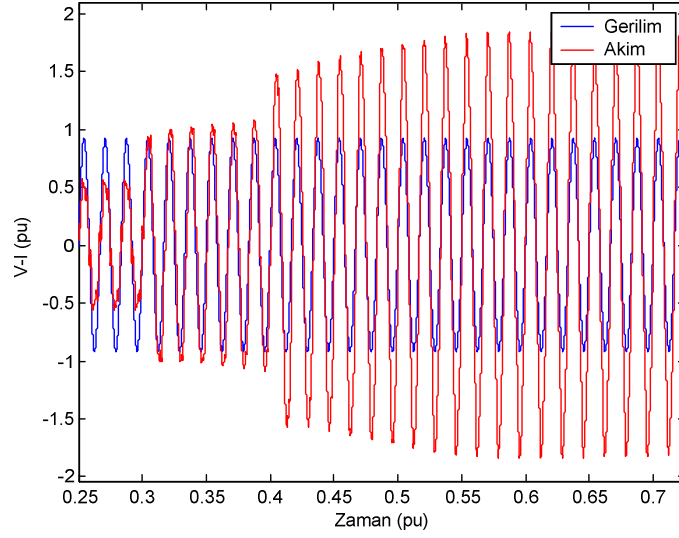
İkinci uygulama için STATCOM 'un doğru geriliminin değişimi Şekil 4.14 'te verilmiştir. İlk uygulamada verildiği gibi doğru gerilim değeri sabit kalmıştır.



Şekil 4.14 İkinci benzetim uygulaması için STATCOM 'un doğru geriliminin değişimi

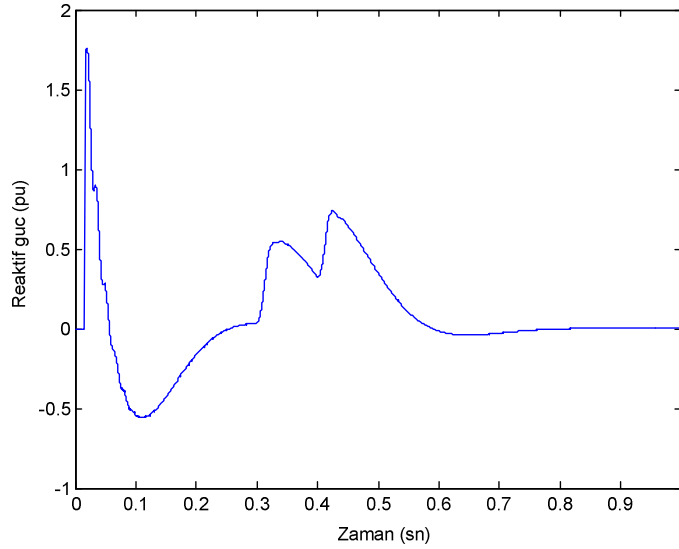
Üçüncü olarak, geleneksel STATCOM 'un bağlı bulunduğu baraya 58 MVA, 0.85 geride güç faktörlü üç adet endüktif yük bağlanmıştır. Bunlardan bir tanesi direkt, diğer ikisi ise üç fazlı anahtarlar yardımı ile şebekeye bağlanmıştır. Üç fazlı anahtarlar sırası ile 0.3. ve 0.4. sn 'lerde anahtarlanarak diğer iki yükün çalıştırılması sağlanmıştır. Benzetim programı çalıştırıldıktan 0.3 sn sonra bir anahtar yardımı ile 2. endüktif yük devreye alınmıştır. Bu durum için baranın bir fazının akım ve gerilimleri arasındaki ilişki Şekil 4.15 'te verilmiştir. Görüldüğü gibi yük değişimlerinde sistemin ihtiyacı olan kompanzasyon akımını sağlamaktadır.





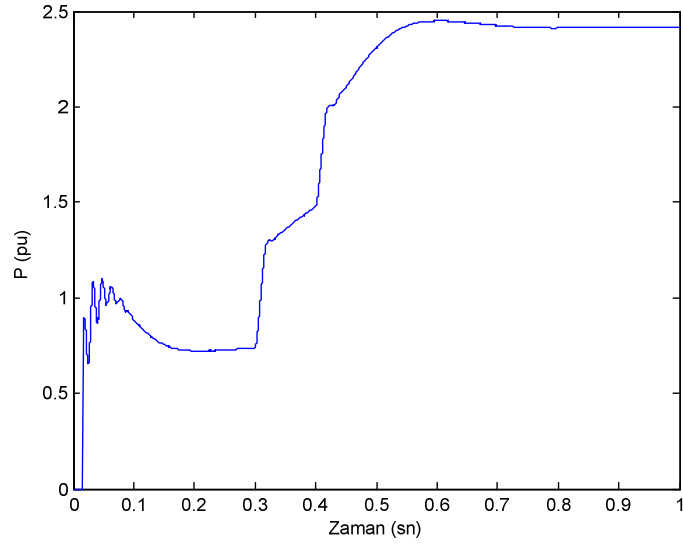
**Şekil 4.15** 58 MVA 'lık 0.85 geride güç faktörlü 3 adet yükün geleneksel STATCOM ile kompanzasyon yapılması durumunda bara akım ve geriliminin değişimi

Geleneksel STATCOM 'un bağlı bulunduğu baradan çekilen reaktif gücün değişimi Şekil 4.16 'da verilmiştir.



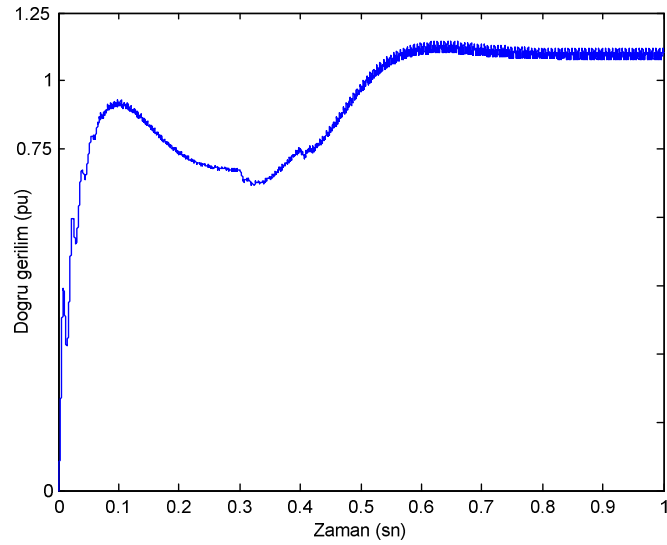
**Şekil 4.16** Geleneksel STATCOM 'un bağlı bulunduğu barada reaktif gücün değişimi

Geleneksel STATCOM 'un bağlı bulunduğu barada aktif gücün değişimi ile ilgili benzetim sonucu Şekil 4.17 'de verilmiştir.



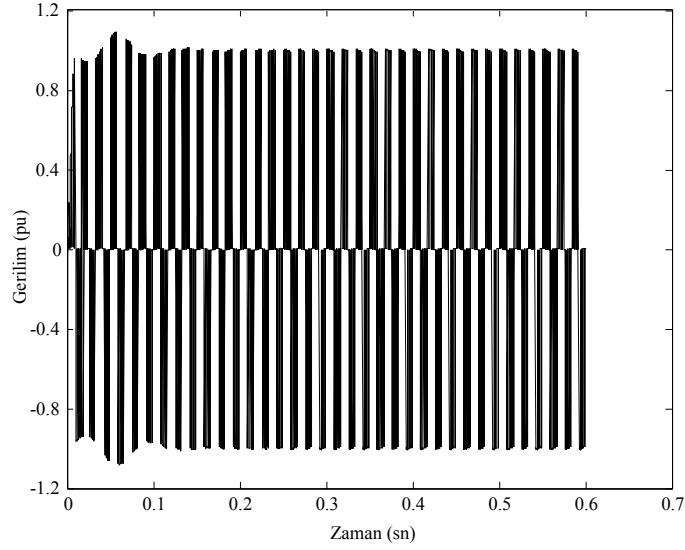
**Şekil 4.17** Geleneksel STATCOM'un bağlı bulunduğu barada aktif gücün değişimi

3. bölümde, DGM-STATCOM ile geleneksel STATCOM arasındaki tek farkın kontrol yönteminden kaynaklandığından bahsedilmişti. DGM-STATCOM'larda doğru gerilim sabit tutulurken geleneksel STATCOM'larda doğru gerilim dönüştürücünün çıkış geriliminin genliğini değiştirmek için ayarlanıyordu. Geleneksel STATCOM'un doğru geriliminin değişimi ile benzetim sonucu Şekil 4.18'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi geleneksel STATCOM'da, yük ya da sistem için gerekli kompanzasyon akımı doğru gerilim değeri değiştirilerek elde edilir.



**Şekil 4.18** Geleneksel STATCOM'un doğru geriliminin değişimi

Benzetim modelinde iki seviyeli GBD kullanılmıştır. İki seviyeli GBD 'lerin harmonik içeriklerinin ÇS-GBD 'lere göre daha fazla olmasına rağmen, SDGM-STATCOM 'un çalışma mantığının anlaşılması ve iki seviyeli GBD 'lerin devre yapılarının basitliği nedeni ile benzetim programında tercih edilmiştir. Bağlantı transformatörünün ikincil tarafı yardımı ile güç sistemine bağlanan GBD 'nin ikincil tarafında ürettiği iki seviyeli gerilimin dalga şekli Şekil 4.15 'te gösterilmiştir.



**Şekil 4.19** Benzetim programında kullanılan GBD 'nin çıkış gerilimi

Benzetim sonuçlarından da görüleceği gibi STATCOM yükün reaktif güç ihtiyacına çok kısa sürede cevap vermektedir. Ayrıca STATCOM bağlı bulunduğu baraya gerilim desteği de sağlamaktadır. STATCOM 'un bu yeteneği, özellikle kritik yüklerin kompanzasyonunda çok büyük önem taşımakta ve iletilebilir aktif güç miktarını artırmaktadır. Ayrıca STATCOM kendi endüktif ve kapasitif akım sınırları içerisinde yükün artıp azalmasından bağımsız bir şekilde gerekli kompanzasyon akımını sağlayabilmektedir.

## 5. SONUÇ

Daha verimli bir elektrik güç üretimi ve iletimine duyulan ihtiyaç yeni teknolojileri de beraberinde getirmektedir. Tüm dünyada iletim sistemleri sürekli değişim halindedir ve yeniden yapılandırılmaktadır. İletim sistemlerine kullanıcı sayısının artması ile birlikte daha fazla yüklenilmektedir. Son yirmi yıl boyunca FACTS teknolojisi adı altında birçok kontrolör önerilmekte ve güç sistemlerine uygulanmaktadır. FACTS aygıtları güç akış kontrolü, paralel hatlar arasındaki yük paylaşımı, gerilim regülasyonu, geçici kararlılığı iyileştirme ve sistemdeki salınımların azaltılmasında kullanılmaktadır. İletim sistemleri, çok farklı üretim ve yük özelliklerine tepki göstermeleri için esnek yapıda olmalıdırlar. Ayrıca iletim sistemlerine yapılan yatırımların en iyi şekilde kullanılması, endüstrinin desteklenmesi, yeni iş imkanları oluşturulması ve ekonomik kaynakların etkili bir şekilde kullanılması için de önemlidir.

FACTS bu ihtiyaçlara cevap veren bir teknolojidir ve sistemin esnekliği, performansı ve aygıt kullanımını geliştirme ile birlikte iletim sistemlerinin işleyişini önemli bir şekilde değiştirir. Güç elektroniği teknolojisinin gelişmesi var olan iletim sistemlerinin daha iyi kullanılmasına imkân verir. Yaklaşık son 40 yıldır tristör tabanlı güç elektroniği elemanları elektrik güç iletim sistemlerinin kontrolü ve kompanzasyonu için kullanılmaktadır. Alternatif iletim sistemlerinin reaktif seri ve şönt kompanzasyonu için tristör anahtarlama ve kontrollü kondansatör veya reaktör ile yüksek gerilimli doğru akım iletimi için hat komutasyonlu dönüştürücüler ile sunulan bu teknoloji enterkonnekte bağlı şebekelere uygulanmasına çok büyük katkıda bulunmaktadır. Tam denetimli anahtarlama elemanları kullanılarak yapılan anahtarlama tip kompanzatorler şimdiye kadar elde edilemeyen sistem cevap hızının, bağımsız bir şekilde aktif reaktif güç akışı yeteneğinin elde edilmesine ayrıca sistemin kararlılığının artırılmasına, çok amaçlı ve tam hat yüklenmelerinin sağlanması için gerilimin kontrolüne olanak sağlar. Ayrıca bu kontrolörler değişen çalışma ve şebeke gereksinimlerine bağlı olarak geliştirilebilme ve dönüştürülebilme imkanı sağlar.

Dönüştürücü tabanlı FACTS kontrolörlerde, hızlı bir şekilde kontrol edilebilen statik, senkron alternatif gerilim kaynağı gerçekleştirmek için kendinden komutasyonlu gerilim kaynaklı dönüştürücüler kullanılır. Bu yaklaşım sistem geriliminden bağımsız reaktif kompanzasyon akımı ya da sistem akımından bağımsız reaktif kompanzasyon gerilimi sağlayabilir. FACTS kontrolörler hem kontrol edilebilir bir reaktif kompanzasyon sağlayabilme hem de sistem ile aktif güç alışverişi yapabilme yeteneğine sahiptirler. Güç akış kontrolörlerinin tristör tabanlı güç elektroniği elemanları ile yapılması önemli ölçüde donanım boyutunu ve kurulum zahmetini de azaltmaktadır.

Bu tezin giriş bölümünde reaktif gücün hızlı bir şekilde kontrol edilmesinin önemi, FACTS kavramının ortaya çıkmasına, dönüştürücü tabanlı kompanzatorlerin avantajlarına,

dönüştürücü tabanlı bir FACTS aygıtı olan STATCOM konseptinin ortaya çıkışına ve reaktif güç kompanzasyonunun FACTS aygıtları ile yapılması durumunda ne gibi faydaları olacağına kısaca değinilmiştir.

İkinci bölümde, ABD 'lere göre uygulama açısından ve ekonomik yönden birçok avantajı olan ve literatürde en çok kullanılan dönüştürücü türü olan gerilim kaynaklı dönüştürücüler hakkında bilgi verilmiştir. Ayrıca, çok darbeli, çok seviyeli dönüştürücü yapısına ve DGM tekniği kullanılarak kontrol edilen dönüştürücülere değinilmiştir.

Üçüncü bölümde, STATCOM hakkında genel bilgi, STATCOM 'un ilk uygulamaları, çalışma prensibi ve STATCOM için önerilen kontrol yaklaşımları üzerinde durulmuştur.

Uygulama kısmında ise MATLAB-SIMULINK Toolbox 'ı kullanılarak benzetimi yapılan DGM-STATCOM ve geleneksel STATCOM 'un benzetim sonuçlarına yer verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürdeki sonuçlarla karşılaştırıldığı zaman, oluşturulan benzetim modelinin sonuçlarının uyumlu olduğu görülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Arabi, S., and Kundur, P., A Versatile FACTS Devices Model for Power Flow and Stability Simulations, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, no. 4, 1996.
- Bose, K. B., Modern Power Electronics and AC Drivers, Prentice Hall PTR, 2002.
- Cavaliere, C. A. C., Watanabe, E. H., Aredes, M., Comparison Between the Conventional STATCOM and the PWM STATCOM, 1999.
- Cheng, H., In, I. and Chen S., DC-Link Voltage Control and Performance Analysis of STATCOM
- CIGRE, Static Synchronous Compensator, Working Group 14.19, 1998.
- Edwards, C. W., and et, all, Advanced Static Var Generator Employing GTO Thyristors, IEEE PES Winter Power Meeting, NO. 38WM109-1, 1988.
- Gonzalez, P. G., and Cerrada, A. G., Control System for A PWM-Based STATCOM, IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 15, no. 4, 2000.
- Gyugyi, L., Reactive Power Generation and Control by Thyristor Circuits, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-15, no. 5, pp. 521-532, 1979.
- Gyugyi, L., Power Electronics in Electric Utilities: Static Var Compensators, Proceedings of The IEEE, vol. 76, no. 4, pp. 483-493, 1988.
- Gyugyi, L., Dynamic Compensation of AC Transmission Lines by Solid-State Synchronous Voltage Sources, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 9, Issue: 2, 904-908, 1994.
- Hingorani, N. G., Flexible AC Transmission Systems. IEEE Spectrum, 1993; 40-5.
- Kimbark, E. W., Direct Current Transmission, Vol. 1, John Wiley, New York 1971.
- Lai, J. S. and Peng, F. Z., Multilevel Converters-A New Breed of Power Converters, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, pp. 509-517, 1996.
- Larsen, E., Miller, N., Nilsson, S. and Lindgren, S., Benefit of GTO-Based Compensation Systems for Electric Utility Applications, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 7, No. 4, 2056-2064, 1992.
- Liang, Y. and Nwakpa, C. O., A New Type of STATCOM Based on Cascading Voltage-Source Evmicis with Phase Shifted Unipolar SPWM, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, No. 5, 1999.
- Martin, R. D., Detailed Analysis of A Multi-Pulse STATCOM, PhD. Thesis, 2001.
- Mori, S., Katsuhiko, M., Hasegawa, T., et al., "Development of a Large Static Var Generator Using Self-Commutated Evmicis for Improving Power System Stability, IEEE Trans. Power Systems, 8, (1), 371-377, 1993.

- Moran, L., Phoivos, P. D., and Joos, D., A Solid-State High Performance Reactive-Power Compensator, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No. 5, pp.969–977,1993.
- Mori, S., Katsuhiko, M., Hasegawa, T., et al., “Development of a Large Static Var Generator Using Self-Commutated Eviricis for Improving Power System Stabiltly, IEEE Trans. Power Systems, 8, (1), 371-377, 1993.
- Mwinyiwiwa, B., Ooi, and Wolanski, Z., “UPFC Using Multiconverter Operated by Phase-Shifted Triangle Carrier SPWM Strategy”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.34, No.3, pp. 495 – 500, 1998.
- Patil, K. V., Dynamic Compensation of Electrical Power Systems Using A NEW BVSI STATCOM, Phd. Thesis, London, 1999.
- Proposed Terms and Definitions for Flexible AC Transmission System (FACTS), IEEE Trans. On Power Delivery, Volume: 12, Issue:4, Oct, 1997, 1848-1853.
- Rodriguez, J., Lai, J. S., and Peng, F. Z., Multilevel Eviricis: A Survey of Topologies, Controls and Applications, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 49, 724-738, 2002.
- Schauder, C., and Mehta, H., Vector Analysis and Control of Advanced Static VAR Compensators, IEE Proceedings-C, Vol. 140, No. 4, pp.299–306, 1993.
- Schauder, C., Gernhardt, M., Stacey, E., Lemak, T., Gyugyi, L. Cease, T. W., and Edris, A., “Operation of  $\pm 100$  MVAR TVA STATCOM”, IEEE Winter Meeting, PE – 509-PWRD-0-01, 1997.
- Sen, K. K., STATCOM-Static Synchronous Compensator: Theory, Modelling and Applcations, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol: 2, pp: 1177-1183, 1999.
- Sirisukprasert, S., Lai, J., S. and Liu, T. H., Optimum Harmonic Reduction with A Wide Range of Modulation Indexes for Multilevel Converters, Industry Applications Conference, Vol. 4, P. 2094-2098, 2000.
- Sirisukprasert, S., The Modelling and Control A Cascaded Multilevel Converter Based STATCOM, Phd Thesis, Blacksburg, Virginia, 2004.
- Soto, D. and Green, T., C., A Comprasion of High-Power Converter Topologies for the Implementation of FACTS Controllers, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2002.
- Sumi, Y., Harumoto, Y., Hasegawa, T., Yano, M., Ikeda, K. and Matsuura, T., 'New Static VAR Control using Forced-Commutated Evirici" IEEE Trans on Power Apparatus ans. Systems, Vol. PAS-100, No.9, pp. 4216-4224, 1981.
- Uzunovic, E., EMTP, Transient Stability and Power Flow Models and Controls of VSC Based FACTS Controllers, Phd. Thesis, Canada, 2001.

- Yang, Z., Shen, C., Zhang, L., Crow, M., L., "Integration of a STATCOM and Battery Energy Storage", IEEE Trans. on Power System, Vol. 16, no. 2, May 2001, pp. 254-260.
- Wang, H. F., Applications of Damping Torque Analysis to STATCOM Control, Electrical Power and Energy Systems, Vol. 22, pp. 197-204, 2000.
- Wu, H. and He, X., Research on PWM Control of A Cascade Multilevel Converter, Power Electronics and Motion Control Conference, Proceedings, PIEMC 2000 The Third International, Vol. 3, pp. 1099-1103, 2000.
- Xu, X., Zou, Y., Ding, K. and Liu, F., Cascade Multilevel Evirici with Phase-Shift SPWM and its Application in STATCOM, The 30<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Busan, Korea, 2004.
- Tuncer, S., Uzay Vektör Darbe Modülasyonu Kullanan Beş Seviyeli İverter Tasarımı ve Uygulaması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003.

## ÖZGEÇMİŞ

Resul ÇÖTELİ, 1978 yılında Elazığ 'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Elazığ 'da tamamladıktan sonra 1996 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü 'nde lisans eğitimine başladı. 2000 yılında lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl Elazığ Maden Çok Programlı Lisesine Elektrik Öğretmeni olarak göreve başladı. 2001–2002 yılları arasında askerlik görevini yaptı. 2004 yılında Elazığ Halk Eğitim Merkezine ataması yapıldı. Aynı yıl Fırat Üniversitesinde açılan Araştırma Görevlisi sınavını kazandı. Halen Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

Arş. Gör. Resul ÇÖTELİ

## EK-1

1920 'lerin sonlarında R. H. Park elektrik makinalarının analizi için yeni bir yaklaşım sunmuştur. Bu yaklaşımda stator değişkenleri, bir senkron makinanın rotorunda sabit referanslı bir çatıya indirgenmiştir. Senkron makinanın gerilim denklemlerinde zamanla değişen indüktansı yok eden Park dönüşümü senkron makine analizi ve hesaplamalarını basitleştirmiştir.

Park dönüşümü zamanla değişen değişkenlerle işlem yapabilmek için yeni bir yol geliştirmiştir. Bugün Park dönüşümünü temel alan dönüşüm teknikleri güç sistemleri üzerine yapılan değişik çalışmalarda kullanılmaktadır (güç kalitesi, güç akış kontrolü,..vb).

Değişken değiştirmek ilk olarak alternatif akım makinalarının analizinde kullanılmasına rağmen değişik statik ve sabit parametrelili güç sistemi bileşenlerinin analizinde de kullanılır. Ayrıca transformatörler, iletim hatları ve yükler ve kondansatör grupları,... vb ile ilişkili olan değişkenler d-q 'ya dönüştürülebilir.

Üç fazlı anlık değişkenlerin toplamı sıfır ise düzlemde tek bir nokta ile gösterilebilirler. Yani sinüzoidal değişken  $y(t)$ ,

$$y(t) = \hat{Y} \cos(\omega t + \varphi) = \frac{1}{2} (\hat{Y} e^{j(\omega t + \varphi)} + \hat{Y} (e^{j(\omega t + \varphi)})^*) \quad (1)$$

şeklinde tanımlanabilir. Eğer karmaşık vektör,  $\bar{y}(t) = \hat{Y} e^{j(\omega t + \varphi)}$  olarak ifade edilirse üç fazlı sinüzoidal değerler tek bir karmaşık vektör ile gösterilebilir.  $\bar{f}(t)$  ile gösterilen üç faz değişkenleri için karmaşık vektör  $e^{j0}, e^{-j2\pi/3}$  ve  $e^{j2\pi/3}$  yönlerindeki üç vektörün izdüşümü  $f_a(t), f_b(t)$  ve  $f_c(t)$  üç fazlı anlık değişkenleri verecek şekilde seçilir. Böylece,

$$f_a(t) = \Re((\bar{f}(t)(e^{j0})) = \frac{1}{2} (\bar{f}(t)(e^{j0}) + \bar{f}(t)^*(e^{j0})^*) \quad (2)$$

$$f_b(t) = \Re((\bar{f}(t)(e^{-j2\pi/3})) = \frac{1}{2} (\bar{f}(t)(e^{-j2\pi/3}) + \bar{f}(t)^*(e^{-j2\pi/3})^*) \quad (3)$$

$$f_c(t) = \Re((\bar{f}(t)(e^{j2\pi/3})) = \frac{1}{2} (\bar{f}(t)(e^{j2\pi/3}) + \bar{f}(t)^*(e^{j2\pi/3})^*) \quad (4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Ayrıca,

$$\begin{aligned} f_a(t) + f_b(t)e^{j2\pi/3} + f_c(t)e^{-j2\pi/3} &= \frac{1}{2} \{ [\bar{f}(t) + \bar{f}(t)^*] + [\bar{f}(t) + \bar{f}(t)^* e^{j4\pi/3}] + [\bar{f}(t) + \bar{f}(t)^* e^{-j4\pi/3}] \} \\ &= \frac{1}{2} 3\bar{f}(t) \end{aligned} \quad (5)$$

elde etmek mümkündür. Böylece karmaşık bir vektör aşağıdaki gibi üç fazlı anlık değerlerinden hesaplanabilir.

$$\bar{f}(t) = \bar{K} \begin{bmatrix} f_a(t) \\ f_b(t) \\ f_c(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

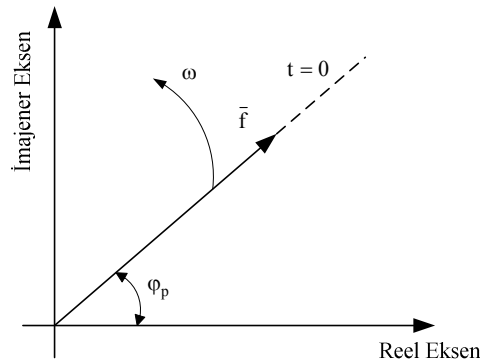
Burada,  $\bar{K} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & e^{j2\pi/3} & e^{-j2\pi/3} \end{bmatrix}$  şeklindedir. Üç bir fazlı sistemde anlık değerler denk.(7) 'de gösterildiği gibi simetrik bileşenler (pozitif, negatif ve sıfır dizi bileşenleri) yardımı ile de bulunabilir.

$$\begin{bmatrix} f_a(t) \\ f_b(t) \\ f_c(t) \end{bmatrix} = F_p \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_p) \\ \cos(\omega t + \varphi_p - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + \varphi_p + 2\pi/3) \end{bmatrix} + F_n \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_p) \\ \cos(\omega t + \varphi_p + 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + \varphi_p - 2\pi/3) \end{bmatrix} + F_o \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi_o) \\ \cos(\omega t + \varphi_o - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + \varphi_o + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Denk.(7)  $\bar{K}$  ile çarpılırsa,

$$\bar{f} = F_p e^{j\omega t} + F_n e^{-j\omega t} + 0 \quad (8)$$

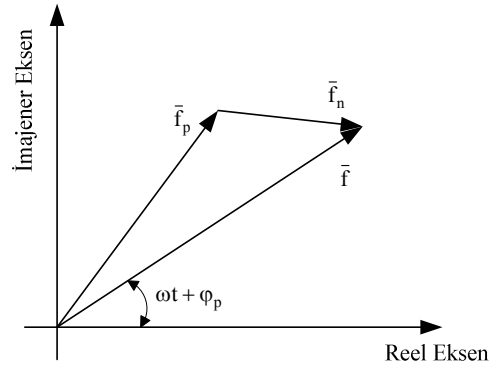
Denk.(8) 'den, üç fazlı değişkenler sadece pozitif dizi bileşeni içeriyorsa vektör açısal hızı  $\omega$  ve sabit bir genlik ile saat ibrelerinin tersi yönünde döneceği görülür. Şekil 1 'de sadece pozitif dizili vektör gösterilmiştir.



**EK-1-Şekil 1** Sadece pozitif dizili karmaşık bir vektörün kartezyen düzleminde gösterilmesi

Tersi durumda ise yani üç fazlı değişkenler sadece negatif dizi bileşeni içeriyorsa vektör açısal hızı  $\omega$  ve sabit bir genlik ile saat ibreleri yönünde döner. Eğer vektör hem pozitif hem de

negatif dizi bileşenleri içeriyorsa (dengesiz ise)bu durumda vektör Şekil 2 'de gösterildiği gibi olacaktır. Eğer üç fazlı değişkenler sıfır dizili ise bileşke karmaşık vektör sıfıra eşit olacaktır.



**EK-1-Şekil 2** Kartezyen düzlemde pozitif ve negatif dizili karmaşık bir vektörün gösterilmesi

ds, qs ve dq Bileşenleri

ds ve qs sırası ile  $\bar{f}(t)$  karmaşık vektörünün reel ve imajener parçaları olarak tanımlanır. Burada,

$$\bar{f}_{ds,qs}(t) = \bar{f}(t) = f_{ds}(t) + jf_{qs}(t) \quad (9)$$

şeklinde yazılabilir. Üç faz değişkenlerinin ds, qs koordinatlarına dönüşüm matrisi ise,

$$T = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

şeklinde dir. Üç fazlı değişkenlerde ds, qs koordinatlarına dönüşüm,

$$\begin{bmatrix} f_{ds} \\ f_{qs} \\ 0 \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} f_a(t) \\ f_b(t) \\ f_c(t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

şeklinde ifade edilir. Üç fazlı bir sistem için toplam anlık güç,

$$P_{abc} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = \frac{3}{2} \Re((\bar{v}(t) \bar{i}^*(t))) \quad (12)$$

ds, qs koordinatlarında toplam güç üç fazlı sistemde ifade edilen güce eşit olmalıdır. Yani,

$$P_{ds,qs} = P_{abc} = \frac{3}{2}(v_{qs}i_{qs} + v_{ds}i_{ds}) \quad (13)$$

olmalıdır. Burada  $v_{ds}$ ,  $v_{qs}$ ,  $i_{ds}$  ve  $i_{qs}$  önceden verilen dönüşüm ile hesaplanır. Anlık güç denkleminde bulunan 3/2 sabit katsayısı dönüşüm formülünde kullanılan katsayıdan dolayı kullanılır. ds ve qs akım ve gerilim dalgaları referans çatının açılma hızına bağlı olmasına rağmen toplam güç bu çatıdan bağımsızdır. Buraya kadar bahsedilen durağan çatı (ds, qs) olarak tanımlanır. Dönel çatı olarak bilinen dq bileşenleri ise,

$$\bar{f}_{dq}(t) = f_d(t) + jf_q(t) = \bar{f}_{ds,qs}(t)e^{-j\omega t} \quad (14)$$

Burada,

$$f_d(t) = f_{ds}(t)\cos(\omega t) + f_{qs}(t)\sin(\omega t) \quad (15)$$

$$f_q(t) = -f_{ds}(t)\sin(\omega t) + f_{qs}(t)\cos(\omega t) \quad (16)$$

şeklindedir. dq çatıda direnç için akım ve gerilim ilişkileri,

$$v_d(t) = R i_d(t) \quad (17)$$

$$v_q(t) = R i_q(t) \quad (18)$$

şeklinde yazılır. dq çatıda indüktans için akım ve gerilim ilişkileri,

$$v_d(t) = L \frac{di_d(t)}{dt} - \omega L i_q(t) \quad (19)$$

$$v_q(t) = L \frac{di_q(t)}{dt} + \omega L i_d(t) \quad (20)$$

Aynı şekilde kondansatör için akım ve gerilim ilişkileri yazılırsa,

$$i_d(t) = C \frac{dv_d(t)}{dt} - \omega C v_q(t) \quad (21)$$

$$i_q(t) = C \frac{dv_q(t)}{dt} + \omega C v_d(t) \quad (22)$$

olarak yazılır.