

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNİN UPFC İLE KONTROLÜ

M. Mustafa ERTAY

Tez Yöneticisi

Yrd. Doç. Dr. Zafer AYDOĞMUŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2006

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNİN UPFC İLE KONTROLÜ

M. Mustafa ERTAY

Yüksek Lisans Tezi

Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı

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: Doç. Dr. Hüseyin ALTUN

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

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması süresince bana karşı olan anlayışı, desteği ve sabrından dolayı tez yöneticim, hocam Yrd. Doç. Dr. Zafer Aydoğmuş'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışması süresince gösterdikleri sabır ve destekten dolayı anneme, babama ve kardeşlerime çok teşekkür ederim.

M. Mustafa Ertay

İÇİNDEKİLER

ŞEKİLLER LİSTESİ	IV
TABLOLAR LİSTESİ	IX
SİMGELER.....	X
KISALTMALAR.....	XI
ÖZET	XII
ABSTRACT	XIII
1. GİRİŞ	1
1.1. Enerji İletim Sistemleri ve FACTS Teknolojisi	1
1.2. Tezin Amacı	3
1.3. Tezin Bölümleri	4
2. ESNEK ALTERNATİF AKIM İLETİM SİSTEMLERİ (FACTS)	5
2.1. Giriş	5
2.2. FACTS Teknolojisinin Amaçları	6
2.3. İletim Sistemlerinin Sınırlamaları ve FACTS Teknolojisi	6
2.4. FACTS Aygıtlarının Sınıflandırılması	9
2.5. Geleneksel Tristör Tabanlı FACTS Aygıtları	10
2.5.1. Tristör Kontrollü Statik Var Kompanzatör (TCSVC)	10
2.5.2. Tristör Anahtarlama Seri Kapasitör (TSSC)	12
2.5.3. Tristör Anahtarlama Seri Reaktör (TSSR)	12
2.5.4. Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC)	13
2.5.5. Tristör Kontrollü Seri Reaktör (TCSR)	15
2.5.6. Tristör Kontrollü Dinamik Fren (TCDB)	15
2.5.7. NGH Senkron altı Rezonans Sönümleyici (NGH-SSR Damper)	16
2.5.8. Tristör Kontrollü Faz Açısı Düzenleyicisi (TCPAR)	17
2.5.9. Tristör Kontrollü Gerilim Sınırlayıcı (TCVL)	18
2.5.10. Tristör Kontrollü Gerilim Düzenleyicisi (TCVR)	18
2.6. Konverter Tabanlı FACTS Aygıtları	19
2.6.1. SVS (Senkron Gerilim Kaynağı) Kavramı	19
2.6.2. Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM)	23
2.6.3. Statik Seri Senkron Kompanzatör (SSSC)	25
2.6.4. Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC)	28
2.6.5. Hat arası Güç Akış Kontrolörü (IPFC)	29

2.6.6.	Dönüştürülebilir Statik Kompanzatör (CSC)	30
2.7.	FACTS Aygıtlarının Kullanım Alanları	30
3.	BİRLEŞİK GÜÇ AKIŞ KONTROLÖRÜ (UPFC)	32
3.1.	Giriş	32
3.2.	UPFC Temel Donanım Yapısı	32
3.3.	UPFC Temel Çalışma İlkesi ve Karakteristikleri	33
3.3.1	UPFC Kontrol Fonksiyonları	35
3.4.	UPFC Güç Akış Kontrol Durumları	37
3.5.	Aktif ve Reaktif Güç Kontrolünün Temel Prensipleri	39
3.5.1.	Bir İletim Hattında Güç Akışı	39
3.5.2.	UPFC ile Aktif ve Reaktif Güç Kontrolü	42
3.5.3.	UPFC 'nin Tristör Tabanlı FACTS Aygıtları İle Karşılaştırılması	46
3.5.3.1.	Performans Karşılaştırması	47
3.5.3.2.	Donanım Karşılaştırması	47
4.	UPFC'NİN MATEMATİKSEL MODELİ	49
4.1.	Giriş	49
4.2.	UPFC Dinamik Modeli	49
5.	UPFC SİSTEMİNİN MODELLENMESİ	52
5.1.	Giriş	52
5.2.	UPFC 'nin Temel Kontrolü	53
5.3.	UPFC Sisteminin Modellenmesi İle İlgili Bilgiler	54
5.4.	UPFC Kontrol Sistemi Modeli	56
5.4.1.	Şönt Konverter Kontrolü	56
5.4.2.	Seri Konverter Kontrolü	59
5.5.	Enerji İletim Sistemi Modeli	62
5.6.	Yük Modeli	62
6.	UPFC SİSTEMİ SİMULİNK MODELİ	63
6.1.	Giriş	63
6.2.	İletim Hattı 1 Modeli	65
6.3.	Şönt Konverter Kontrol Modeli	66
6.4.	İletim Hattı 2 Modeli	67

6.5.	Seri Konverter Kontrol Modeli	68
6.6.	UPFC DC gerilim Modeli	69
6.7.	Yük Modeli	70
7.	UYGULAMALAR	71
7.1.	Giriş	71
7.1.1.	Uygulama 1	72
7.1.2.	Uygulama 2	76
7.1.3.	Uygulama 3	80
7.1.4.	Uygulama 4	85
7.1.5.	Uygulama 5	90
7.1.6.	Uygulama 6	94
8.	SONUÇLAR	98
	KAYNAKLAR	100
	ÖZGEÇMİŞ	103

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1	: UPFC Sistemi	3
Şekil 2.1	: TCSVC devre konfigürasyonu	11
Şekil 2.2	: TCSVC'nin V-I karakteristiği	11
Şekil 2.3	: TSSC devre konfigürasyonu	12
Şekil 2.4	: TSSR devre diyagramı	12
Şekil 2.5	: TCSC devre konfigürasyonu	13
Şekil 2.6	: TCSC'nin X-I karakteristiği	14
Şekil 2.7	: TCSR devre konfigürasyonu	15
Şekil 2.8	: TCDB devre konfigürasyonu	15
Şekil 2.9	: NGH Sönümlenme şeması	16
Şekil 2.10	: a) TCPAR devre konfigürasyonu b) Faz kayması.	17
Şekil 2.11	: TCVL devre konfigürasyonu	18
Şekil 2.12	: a) AC-AC gerilim konverteri b) Tristör kontrollü bir kademe dönüştürücüsü ile Düzenleyici bir transformatör	18
Şekil 2.13	: Genelleştirilmiş senkron gerilim kaynağı	20
Şekil 2.14	: Temel 6-darbeli Gerilim Kaynaklı Konverter	20
Şekil 2.15	: Gerilim dalga şekilleri	21
Şekil 2.16	: Çok Darbeli Konverter yapısı	21
Şekil 2.17	: STATCOM Devre Konfigürasyonu	23
Şekil 2.18	: STATCOM Reaktif güç alışveriş durumları (a) Reaktif güç üretimi (Kapasitif Mod) (b) Reaktif güç tüketimi (İndüktif Mod)	24
Şekil 2.19	: (a) STATCOM V-I karakteristiği (b) TCSVC V-I karakteristiği	25
Şekil 2.20	: SSSC Devre konfigürasyonu	25
Şekil 2.21	: SSSC eşdeğer devresi ve fazör diyagramı	26
Şekil 2.22	: UPFC'nin şematik diyagramı	28
Şekil 2.23	: Temel IPFC şeması	29
Şekil 2.24	: CSC ve temel çalışma konfigürasyonları	30
Şekil 3.1	: Birleşik Güç Akış Kontrolörünün temel uygulaması	32
Şekil 3.2	: UPFC temel devre şeması ve özellikleri	33
Şekil 3.3	: UPFC kontrol fonksiyonları. a) Gerilim regülasyonu. b) Seri kompanzasyon . c) Faz açısı regülasyonu. d) Çok fonksiyonlu güç akış kontrolü	36
Şekil 3.4	: Konverter 2'nin bağımsız aktif güç kontrolü ve Konverter1 ve Konverter 2'nin bağımsız reaktif güç kontrolü	37

Şekil 3.5	: Konverter 1'in bağımlı aktif güç kontrolü (Konverter 2'nin talebine bağlı) ve Konverter 2'nin bağımsız reaktif güç kontrolü	37
Şekil 3.6	: Konverter 1'in bağımsız reaktif güç kontrolü ve Konverter 2'nin bağımsız aktif güç kontrolü	37
Şekil 3.7	: Konverter 1'in ve Konverter 2'nin bağımsız reaktif güç kontrolü	38
Şekil 3.8	: Konverter 1'in bağımsız reaktif güç kontrolü	38
Şekil 3.9	: Konverter 2'nin bağımsız reaktif güç kontrolü	38
Şekil 3.10	: Temel iki makineli bir sistem	39
Şekil 3.11	: Kompanzasyonsuz bir sistem için P-Q yörüngesi	41
Şekil 3.12	: a) Vse ile temsil edilen UPFC ve iki makineli sistem b) Vse fazörü	42
Şekil 3.13	: $\delta=0^0,30^0,60^0,90^0$ güç açısı değerlerine göre iki makineli bir sistem için UPFC tarafından kontrol edilebilir bölgeler	45
Şekil 4.1	: İki portlu bir aygıt olarak UPFC	49
Şekil 4.2	: UPFC bağlı bir enerji iletim sistemi	50
Şekil 5.1	: UPFC sistemi tek faz devre şeması	52
Şekil 5.2	: UPFC sistemi düzenlenmiş eşdeğer tek faz devre şeması	55
Şekil 5.3	: Şönt konverter aktif ve reaktif akımlarının vektör gösterimi	57
Şekil 5.4	: Şönt konverter kontrol şeması	57
Şekil 5.5	: UPFC DC-link eşdeğer devresi	58
Şekil 5.6	: Seri konverter kontrol modeli için basitleştirilmiş eşdeğer devre	60
Şekil 5.7	: Seri konverter kontrol şeması	61
Şekil 6.1	: UPFC sistemi simulink modeli	63
Şekil 6.2	: UPFC sistemi simulink modeli prensip şeması	64
Şekil 6.3	: İletim hattı 1 modeli	65
Şekil 6.4	: Şönt konverter kontrol modeli	66
Şekil 6.5	: İletim Hattı 2 Modeli	67
Şekil 6.6	: Seri konverter kontrol modeli	68
Şekil 6.7	: UPFC DC gerilim Modeli	69
Şekil 6.8.	: Yük Modeli	70
Şekil 7.1	: (a) Bara 1 geriliminin zamana göre değişimi	72
Şekil 7.1	: (b) Bara 1 geriliminin $t=0.05$ 'te genişletilmiş grafiği	72
Şekil 7.2	: (a) Bara 1 gerilimi V_{ld} ve V_{lq} bileşenlerinin zamana göre değişimleri ...	72
Şekil 7.2	: (b) V_{ld} geriliminin $t=0.05$ 'te genişletilmiş grafiği	73
Şekil 7.3	: DC gerilimin zamana göre değişimi.	73

Şekil 7.4	:	Şönt konverter çıkış geriliminin (rms) zamana göre değişimi.	73
Şekil 7.5	:	Şönt konverter akımı I_{qsh} bileşeninin zamana göre değişimi.	73
Şekil 7.6	:	Şönt konverter reaktif gücünün zamana göre değişimi.	74
Şekil 7.7	:	(a) Şönt konverter kompanzasyon karakteristiği.	74
Şekil 7.7	:	(b) Şönt konverter $t=0.15$ 'te genişletilmiş kompanzasyon karakteristiği.	74
Şekil 7.8	:	Şönt konverter üç faz çıkış geriliminin zamana göre değişimi.	74
Şekil 7.9	:	Bara 1 aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi.	75
Şekil 7.10	:	Yük aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi.	75
Şekil 7.11	:	UPFC kontrolü ve UPFC kontrolü olmadan bara 1 geriliminin karşılaştırmalı olarak zamana göre değişimi.	75
Şekil 7.12	:	UPFC kontrolü ve UPFC kontrolü olmadan bara 1 reaktif güç akışının karşılaştırmalı olarak zamana göre değişimi	75
Şekil 7.13	:	(a) Bara 1 geriliminin zamana göre değişimi.	76
Şekil 7.13	:	(b) Bara 1 geriliminin $t=0.05$ 'te genişletilmiş grafiği	76
Şekil 7.14	:	Bara 1 gerilimi d ve q bileşenlerinin zamana göre değişimi.	77
Şekil 7.15	:	Bara 1 gerilimi d bileşeninin zamana göre değişimi.	77
Şekil 7.16	:	DC gerilimin zamana göre değişimi.	77
Şekil 7.17	:	Şönt konverter çıkış geriliminin (rms) zamana göre değişimi.	77
Şekil 7.18	:	Şönt konverter akımı I_{qsh} bileşeninin zamana göre değişimi.	78
Şekil 7.19	:	Şönt konverter reaktif gücünün zamana göre değişimi.	78
Şekil 7.20	:	(a) Şönt konverter kompanzasyon karakteristiği.	78
Şekil 7.20	:	(b) Şönt konverter $t=0.13$ 'te genişletilmiş kompanzasyon karakteristiği....	78
Şekil 7.21	:	Şönt konverter üç faz çıkış geriliminin zamana göre değişimi	79
Şekil 7.22	:	Bara 1 aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi.....	79
Şekil 7.23	:	Yük aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi.	79
Şekil 7.24	:	UPFC kontrolü ve UPFC kontrolü olmadan bara 1 geriliminin karşılaştırmalı olarak zamana göre değişimi.	79
Şekil 7.25	:	UPFC kontrolü ve UPFC kontrolü olmadan bara 1 reaktif güç akışının karşılaştırmalı olarak zamana göre değişimi.	80
Şekil 7.26	:	(a) Bara 1 geriliminin zamana göre değişimi.	80
Şekil 7.26	:	(b) Bara 1 geriliminin $t=0.05$ 'te genişletilmiş grafiği	81
Şekil 7.27	:	(a) Bara 1 gerilimi V_{1d} ve V_{1q} bileşenlerinin zamana göre değişimleri....	81
Şekil 7.27	:	(b) V_{1d} geriliminin zamana göre değişimi	81
Şekil 7.28	:	DC gerilimin zamana göre değişimi.	81

Şekil 7.29 :	Şönt konverter çıkış geriliminin (rms) zamana göre değişimi.	82
Şekil 7.30 :	Şönt konverter akımı I_{qsh} bileşeninin zamana göre değişimi.	82
Şekil 7.31 :	Şönt konverter reaktif gücünün zamana göre değişimi.....	82
Şekil 7.32 :	(a) Şönt konverter kompanzasyon karakteristiği.	82
Şekil 7.32 :	(b) Şönt konverter $t=0.15$ 'te genişletilmiş kompanzasyon karakteristiği..	83
Şekil 7.32 :	(c) Şönt konverter $t=0.25$ 'te genişletilmiş kompanzasyon karakteristiği	83
Şekil 7.33 :	Şönt konverter üç faz çıkış geriliminin zamana göre değişimi.	83
Şekil 7.34 :	Kaynak üç faz geriliminin zamana göre değişimi.	83
Şekil 7.35 :	Bara 1 aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi.	84
Şekil 7.36 :	UPFC kontrolü ve UPFC kontrolü olmadan bara 1 geriliminin karşılaştırmalı olarak zamana göre değişimi	84
Şekil 7.37 :	UPFC kontrolü ve UPFC kontrolü olmadan bara 1 reaktif güç akışının karşılaştırmalı olarak zamana göre değişimi.	84
Şekil 7.38 :	(a) Bara 1 geriliminin zamana göre değişimi.	85
Şekil 7.38 :	(b) Bara 1 geriliminin $t=0.05$ 'te genişletilmiş grafiği	85
Şekil 7.39 :	Bara 1 gerilimi V_{1d} ve V_{1q} bileşenlerinin zamana göre değişimleri.	85
Şekil 7.40 :	Bara 1 gerilimi V_{1d} bileşeninin genişletilmiş grafiği	86
Şekil 7.41 :	Bara 2 geriliminin zamana göre değişimi.	86
Şekil 7.42 :	Bara 2 gerilimi V_{2d} ve V_{2q} bileşenlerinin zamana göre değişimleri.	86
Şekil 7.43 :	Bara 2 gerilimi V_{2d} bileşeninin zamana göre değişimi.	86
Şekil 7.44 :	Bara 1 ve bara 2 gerilim açılarının zamana göre değişimleri.....	87
Şekil 7.45 :	V_{1a} ve V_{2a} gerilim dalga şekillerinin zamana göre değişimi.	87
Şekil 7.46 :	DC gerilimin zamana göre değişimi.	87
Şekil 7.47 :	Şönt ve seri konverter çıkış gerilimlerinin zamana göre değişimi.	87
Şekil 7.48 :	İletim hattı akımı d ve q bileşenlerinin zamana göre değişimi.....	88
Şekil 7.49 :	iletim hattı bara 2 aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi...	88
Şekil 7.50 :	Şönt konverter aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi.....	88
Şekil 7.51 :	Seri konverter aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi.....	88
Şekil 7.52 :	V_{2a} ve V_{sea} gerilim dalga şekillerinin zamana göre değişimi.....	89
Şekil 7.53 :	(a) Bara 1 geriliminin zamana göre değişimi	90
Şekil 7.53 :	(b) Bara 1 geriliminin genişletilmiş grafiği	90
Şekil 7.54 :	Bara 1 gerilimi V_{1d} ve V_{1q} bileşenlerinin zamana göre değişimleri.....	90
Şekil 7.55 :	Bara 2 geriliminin zamana göre değişimi	91
Şekil 7.56 :	Bara 2 gerilimi V_{2d} ve V_{2q} bileşenlerinin zamana göre değişimleri.	91
Şekil 7.57 :	Bara 1 ve bara 2 gerilim açılarının zamana göre değişimleri.	91

Şekil 7.58 :	V1a ve V2a gerilim dalga şekillerinin zamana göre değişimi.	91
Şekil 7.59 :	Şönt ve seri konverter çıkış gerilimlerinin zamana göre değişimi.....	92
Şekil 7.60 :	İletim hattı akımı d ve q bileşenlerinin zamana göre değişimi.	92
Şekil 7.61 :	iletim hattı bara 2 aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi...	92
Şekil 7.62 :	Şönt konverter aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi.	93
Şekil 7.63 :	Seri konverter aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi.....	93
Şekil 7.64 :	V2a ve Vsea gerilim dalga şekillerinin zamana göre değişimi.....	94
Şekil 7.65 :	(a) Bara 1 geriliminin zamana göre değişimi.	94
Şekil 7.65 :	(b) Bara 1 geriliminin genişletilmiş grafiği	94
Şekil 7.66 :	Bara 1 gerilimi V_{1d} ve V_{1q} bileşenlerinin zamana göre değişimleri.	95
Şekil 7.67 :	Bara 2 geriliminin zamana göre değişimi.	95
Şekil 7.68 :	Bara 2 gerilimi V_{2d} ve V_{2q} bileşenlerinin zamana göre değişimleri.	95
Şekil 7.69 :	Bara 1 ve Bara 2 gerilim açılarının zamana göre değişimleri..	95
Şekil 7.70 :	V1a ve V2a gerilim dalga şekillerinin zamana göre değişimi.	96
Şekil 7.71 :	Şönt ve seri konverter çıkış gerilimlerinin zamana göre değişimi.....	96
Şekil 7.72 :	DC gerilimin zamana göre değişimi	96
Şekil 7.73 :	İletim hattı akımı d ve q bileşenlerinin zamana göre değişimi.	96
Şekil 7.74 :	iletim hattı bara 2 aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi...	96
Şekil 7.75 :	Şönt konverter aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi.	97
Şekil 7.76 :	V2a ve Vsea gerilim dalga şekillerinin zamana göre değişimi.....	97

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. FACTS Aygıtlarının sürekli durum uygulamaları	7
Tablo 2.2 FACTS aygıtları ve kullanım alanları	31

SİMGELER

- b_{cap} : DC kapasitör süseptansı (pu)
 g_{cap} : DC kapasitör kondüktansı (pu)
 X_s : İletim hattı reaktansı (pu)
 X_{sh} : Şönt konverter bağlantı transformatörü kaçak reaktansı (pu)
 X_{ser} : Seri konverter bağlantı transformatörü kaçak reaktansı (pu)
 R_s : İletim hattı rezistansı (pu)
 R_{ser} : Seri konverter bağlantı transformatörü rezistansı (pu)
 R_{sh} : Şönt konverter bağlantı transformatörü rezistansı (pu)
 V_s : Hat başı kaynak gerilimi (pu)
 V_r : Hat sonu gerilimi (pu)
 V_{se} : Seri enjekte edilen gerilim (rms, pu)
 V_{sh} : Şönt konverter çıkış gerilimi (rms, pu)
 ω : Açısal frekans (rad/s)
 ω_b : Baz frekansı (rad/s)
 δ : Güç açısı

KISALTMALAR

AT	: Akım trafosu
CSC	: Dönüştürülebilir Statik Kompanzatör
FACTS	: Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri
GT	: Gerilim Trafosu
GTO	: Kapıdan Tıkanabilir Tristör
HVDC	: Yüksek Gerilim Doğru Akım
IPFC	: Hat Arası Güç Akış Kontrolörü
NGH-SSR Damper	: Narain G. Hingorani-Senkronaltı Rezonans Sönümleyici
SSSC	: Statik Senkron Seri Kompanzatör
STATCOM	: Statik Senkron Kompanzatör
SVS	: Senkron Gerilim Kaynağı
TCR	: Tristör Kontrollü Reaktör
TSC	: Tristör Anahtarlama Kapasitör
TSR	: Tristör Anahtarlama Reaktör
TCSVC	: Tristör Kontrollü Statik Var Kompanzatör
TSSC	: Tristör Anahtarlama Seri Kapasitör
TSSR	: Tristör Anahtarlama Seri Reaktör
TCSC	: Tristör Kontrollü Seri Kapasitör
TCSR	: Tristör Kontrollü Seri Reaktör
TCDB	: Tristör Kontrollü Dinamik Fren
TCPAR	: Tristör Kontrollü Faz Açısı Düzenleyicisi
TCVL	: Tristör Kontrollü Gerilim Sınırlayıcı
TCVR	: Tristör Kontrollü Gerilim Düzenleyici
UPFC	: Birleşik Güç Akış Kontrolörü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNİN UPFC İLE KONTROLÜ

M. Mustafa ERTAY

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı

2006, Sayfa: 103

Artan enerji talebi, yeni hatların yapılmasındaki kısıtlamalar ve geleneksel kompanzasyon aygıtlarının dezavantajları gibi birçok sebepten dolayı, mevcut enerji iletim sistemlerinin verimliliğinin maksimuma çıkarılması zorunlu hale gelmiştir. Mevcut enerji iletim sistemlerinin kullanımını maksimize etmek için mümkün olan seçenekler analiz edildiğinde, yüksek seviyeli güvenilirlik ve kararlılık ile güç elektroniği çözüm olarak görünmektedir.

Güç elektroniği teknolojisinin hızlı gelişimi, güç sistemlerinin kontrolü için yeni bir teknoloji olan, Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS, Flexible Alternating Current Transmission Systems) teknolojisine olanak tanımıştır. Son on beş yıl içerisinde FACTS teknolojisi adı altında birçok kontrol aygıtı tasarlanmış ve dünya çapında birçok uygulama gerçekleştirilmiştir.

Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC), en önemli FACTS aygıtlarından biridir. UPFC, güç akışını etkileyen bütün iletim hattı parametrelerinin kontrolüne imkân tanıdığı için FACTS aygıtları içerisinde en çok yönlü aygıttır.

Bu tezde temel olarak iki çalışma yapılmıştır. İlk olarak FACTS aygıtları incelenmiştir. Daha sonra UPFC ve bir yük bulunan bir enerji iletim sisteminin modellenmesi ve benzetimi gerçekleştirilmiştir. Bunun için ilk önce FACTS aygıtlarına ilişkin bir literatür taraması yapılmıştır. Bunun sonucunda bu aygıtlar sınıflandırılmış ve kullanım alanları, temel devre yapıları ve çalışma prensipleri genel olarak incelenmiştir. Daha sonra, UPFC detaylı bir şekilde incelenmiş ve bir matematiksel modeli elde edilmiştir. Enerji iletim sistemine ait matematiksel denklemler ve UPFC 'ye ilişkin kontrol şemaları kullanılarak, UPFC ve bir yük bulunan bu enerji iletim sisteminin, modellenmesi ve MATLAB/simulink ortamında çeşitli durumlar için benzetimi gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji Talebi, Enerji İletim Sistemleri, Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri, Güç Sistemleri, Bilgisayar Benzetimi.

ABSTRACT

Master Thesis

THE CONTROL OF THE ENERGY TRANSMISSION SYSTEMS WITH UPFC

M. Mustafa ERTAY

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Education

2006, Page: 103

Due to many reasons such as, an increasing demand for energy, the constraints in the building of new transmission lines and the disadvantages of the conventional compensation devices, it has been necessary to maximised the benefits of existing energy transmission systems. An in-depth analysis of the options available for maximising the existing transmission systems, with high level of reliability and stability, has pointed in the direction of power electronics.

The rapid development of the power electronics technology, makes it possible the development of a new technology for the control of the power systems, called “Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS)”. During the last fifteen years under the title “FACTS” technology a number of control devices have been designed and implemented around the world.

The Unified Power Flow Controller (UPFC) is one of the most important device among the FACTS devices. Since UPFC, makes it possible to control all parameters that effects power flow is the most versatile of the FACTS devices.

In this thesis basically two studies have been done. Firstly, FACTS devices have been investigated. And then, modelling and simulation of an energy transmission system that includes UPFC and a load is realized. For this purpose a literature survey corresponding to FACTS devices have been performed. As a result FACTS devices are classified and their applications, basic circuit arrangements and working principles are generally investigated. And then UPFC has been investigated in detail, an appropriate mathematical model of UPFC for the purpose has been obtained. By using the equations that belongs to energy transmission system and control schemes corresponding to UPFC, modelling and simulation of an energy transmission system that includes UPFC and a load is realized in the MATLAB/Simulink.

Keywords: Energy Demand, Energy Transmission Systems, Flexible Alternating Current Transmission Systems, Power Systems, Computer Simulation.

1. GİRİŞ

1.1. Enerji İletim Sistemleri ve FACTS Teknolojisi

Elektrik arz endüstrisi dünya çapında büyük bir dönüşüm geçirmektedir. Piyasa baskıları, sınırlı doğal kaynaklar ve elektrik enerjisi için sürekli artan talepler bu dönüşümün nedenlerinden bazılarıdır. Bu hızlı gelişimin altyapısına karşın birçok kuruluşun genişleme programı; elektrik üretim santrallerinin ve yeni iletim hatlarının yapımını ve bunların lisanslanmasını engelleyen toprak kullanımı, çevresel ve düzenleyici kısıtlamalar gibi çeşitli nedenlerden dolayı engellenmektedir. Bu nedenle mevcut iletim hatlarının kullanımının maksimuma çıkarılması zorunlu hale gelmiştir. Mevcut iletim hatlarının kullanımını maksimize etmek için mümkün olan seçenekler analiz edildiğinde yüksek seviyeli güvenilirlik ve kararlılık ile güç elektroniği çözüm olarak görünmektedir. Yeni güç elektroniği donanımı ve tekniklerinin, yavaş cevap zamanları ve yüksek bakım maliyetlerine sahip ve normal olarak elektromekanik teknolojilere dayalı olan geleneksel çözümlerin yerini alacağı konusunda genel bir uzlaşma vardır.

Bir elektrik güç sistemi, üretim kaynakları ve tüketici yüklerinin iletim hattı şebekeleri, transformatörler ve yardımcı donanımlar yolu ile birbirine bağlantısı olarak görülebilir. Güç sistemlerinin yapısı ekonomik, politik, mühendislik ve çevresel kararların bıraktığı bir sonuç olarak birçok değişime sahiptir. Güç sistemleri yapılarına bağlı olarak gözlü (ağ) ve boyuna sistemler içerisinde genişçe sınıflandırılabilir. Gözlü sistemler yüksek nüfus yoğunluğuna sahip yerler ile güç istasyonlarının yük talep merkezlerine yakın yapılması mümkün olan yerlerde bulunabilir. Boyuna sistemler ise büyük miktarda gücün güç istasyonlarından yük talep merkezlerine uzun mesafeler üzerinden iletileceği bölgelerde bulunabilir (Acha vd., 2004).

Güç sisteminin yapısından bağımsız olarak güç akışları şebeke boyunca çoğunlukla iletim hattı empedansının bir fonksiyonu olarak dağıtılmıştır. Düşük empedanslı bir iletim hattı yüksek empedanslı bir iletim hattından daha fazla güç akışına izin verir. Bu her zaman tercih edilen bir durum değildir. Çünkü bu çoğu kez birçok işletimsel problemlere neden olur. Bu problemlere örnek olarak kontrolsüz aktif ve reaktif güç akışlarının neden olduğu sistem kararlılığının kaybedilmesi, güç akış döngüleri, yüksek iletim kayıpları, gerilim limiti ihlalleri ve iletim hattı kapasitesinin termal limite kadar kullanılmasındaki yetersizlik gösterilebilir. Uzun vadede böyle problemler yeni güç santralleri ve iletim hatları inşa ederek geleneksel olarak çözülmüştür. Böyle bir çözüm, uzun yapım zamanları gerektirir ve gerçekleştirmek için çok pahalıdır.

Bahsedilen nedenlerden dolayı mevcut güç sistemlerinin kapasitesini artırmayı-geliştirmeyi ve işletimsel problemleri çözmeyi amaçlayan ve bunun için en son güç elektroniği donanım ve tekniklerini kullanan kısa adı FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems, Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri) olan yeni bir teknolojik düşünce ortaya atılmıştır (Acha vd., 2004).

1980'lerin sonunda EPRI (Elektrik Gücü Araştırma Enstitüsü) tarafından tanıtılan FACTS kavramının arkasındaki temel düşünce mekanik kontrolörlerin yerini güvenli ve hızlı olan güç elektroniği elemanlarının alması, böylece var olan güç sistemi kapasitesinin kullanımını optimize etme ve denetlenebilirliği artırmaktır. FACTS aygıtları güç akış kontrolü ve gerilim kontrolü için kullanılan geleneksel donanımın yerini güç elektroniği tabanlı eşdeğer donanım ile almaktadır (Hasanovic, 2000).

Bu yüksek hızlı güç elektroniği tabanlı aygıtların kullanılması ile geçmişte gerçekleştirilemeyen çok sayıda önemli işlemsel fonksiyonlar artık kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. Bunlardan bazıları şunlardır;

- Önceden tanımlı rotalar da yönetilmek için gücün geniş aralıkta devamlı kontrolü,
- İletim hatlarının, kendi termal limitlerine yakın düzeylere güvenli yüklenmeleri ve tam kapasiteli kullanılması (aşırı yükleme olmadan),
- Aşırı yüklü iletim hatlarının rahatlatılması yoluyla toplam sistem kayıplarının minimize edilmesi,
- Sahip olunan iyi ve tam kontrol kapasitesi yoluyla sistem güvenliği ve kararlılığını artırmak,
- Hataların ve donanım bozukluklarının etkilerini sınırlandırarak ardı ardına servis kesilmelerini önlemek,
- Sistem donanımı ve iletim kapasitesinin kullanımı üzerinde ters etkisi olan güç sistemi osilasyonlarının sönümlenmesi (Hingorani, 1993).

FACTS teknolojisi yukarıda da ifade edildiği gibi güç elektroniği tabanlı bir teknolojidir. FACTS adı altında bugüne kadar birçok güç akış kontrolörü önerilmiş ve dünya çapında birçok FACTS uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu güç elektroniği tabanlı kontrolörleri genel olarak geleneksel tristör tabanlı kontrolörler ve SVS (Senkron Gerilim Kaynağı) prensibine göre çalışan konverter tabanlı kontrolörler olarak ikiye ayırmak mümkündür. Tristör tabanlı aygıtlara TCSVC, TCSC, TCPAR örnek olarak gösterilebilir. En son jenerasyon FACTS kontrolörleri SVS prensibine göre çalışan konverter tabanlı kontrolörlerdir. Bunların en başta gelenleri STATCOM, SSSC, IPFC ve UPFC 'dir.

Bu tezin ana konusunu oluşturan UPFC (Birleşik Güç Akış Kontrolörü), güç akışını etkileyen bütün iletim hattı parametrelerinin kontrolünü sağlayan çok yönlü ve gelişmiş bir FACTS aygıtıdır.

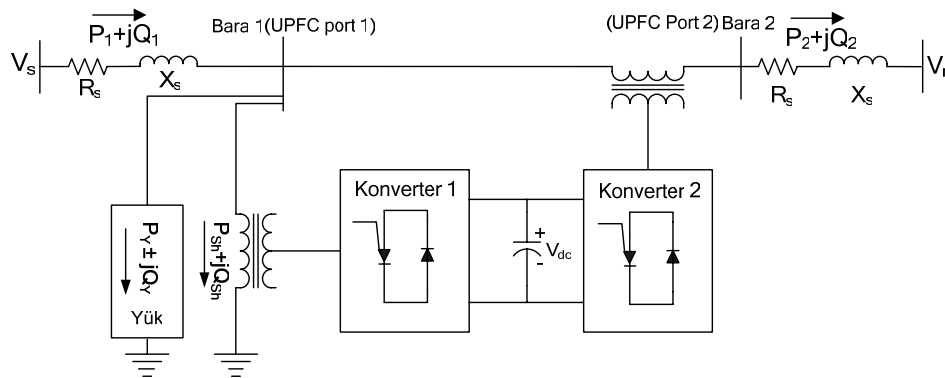
UPFC 'yi önemli yapan özellik, açısal olarak kısıtlamasız ve kontrol edilebilir bir seri gerilim enjeksiyonu yapabilme yeteneğine sahip olmasıdır. Bu özellik sayesinde eş zamanlı veya seçici bir şekilde iletim hattı empedansı, bara gerilimi büyüklükleri ve aktif ve reaktif güç akışları kontrol edilebilmektedir.

1.2. Tezin Amacı

Bu tezin iki ana amacı vardır. İlk amacı FACTS teknolojisine yönelik bir literatür taraması yapmak ve bunun sonucunda FACTS kontrolörlerini sınıflandırarak incelemektir. İkinci amacı ise, bu kontrolörlerden Birleşik Güç Akış Kontrolörünü (UPFC) detaylı bir şekilde incelemek ve MATLAB-Simulink programında benzetimini gerçekleştirmektir. Tezin amaçları maddeler halinde verilebilir.

- FACTS teknolojisine yönelik bir literatür taraması yapmak ve bunun sonucunda FACTS kontrolörlerini sınıflandırarak incelemek,
- Birleşik Güç Akış Kontrolörünü (UPFC) detaylı bir şekilde incelemek,
- Literatürden Birleşik Güç Akış Kontrolörü 'nün (UPFC) amaca uygun bir matematiksel modelini elde etmek,
- MATLAB-Simulink programını kullanarak, Birleşik Güç Akış Kontrolörü'nün (UPFC), kontrolünü modellemek ve bu modeli aynı şekilde MATLAB-Simulink ortamında modellenmiş bir enerji iletim sisteminde çeşitli durumlar için benzetim yaparak incelemektir.

Bu çalışmada aşağıdaki sistemin benzetimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1.1 UPFC sistemi.

UPFC ve iletim sistemi parametreleri;

$R_s = 0.0075$, $X_s = 0.075$, $X_{sh} = 0.15$, $R_{sh} = 0.01$, $b_{cap} = 2.0$, $g_{cap} = 0.02$, $V_s = 1.0 \angle 30^\circ$, $V_r = 1.0$ şeklindedir. Bütün değerler per-unit olarak verilmiştir. Sistemin baz değerleri UPFC için $S_b = 100$ MVA, $V_b = 400$ kV, iletim sistemi için $S_{bi} = 300$ MVA, $V_{bi} = 400$ kV şeklindedir.

1.3. Tezin Bölümleri

Bölüm 2’de, FACTS teknolojisi ile ilgili bir literatür taraması yapılmıştır. Bu bölümde FACTS aygıtlarının amaçları, sınıflandırılması, çalışma prensipleri ve kullanım alanları genel olarak incelenmiştir.

Bölüm 3’te UPFC detaylı bir şekilde incelenmiş, çalışma prensibi ve karakteristikleri verilmiştir. Ayrıca bu bölümde UPFC ile aktif ve reaktif güç kontrolü genel olarak verilmiş ve UPFC ’nin diğer FACTS aygıtları ile karşılaştırılması yapılmıştır.

Bölüm 4’te ise UPFC ’nin bir matematiksel modeli sunulmuştur.

Bölüm 5’te UPFC bulunan bir enerji iletim sistemi verilmiş ve bu sistemin matematiksel olarak modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu bölümde kontrol şemaları kullanılarak UPFC ’ye ilişkin bir kontrol sistemi modeli sunulmuştur.

Bölüm 6’da UPFC sistemi, bölüm 5’te verilen matematiksel denklemlerden ve kontrol şemalarından yararlanılarak Matlab/simulink ortamında modellenmiştir. Bu model enerji iletim sistemi, UPFC kontrol sistemi, ve yük modeli gibi komple bir sistemin modellenmesini içermektedir.

Bölüm 7’de, elde edilen simulink modeli ile çeşitli durumlar için benzetimler yapılmış ve sonuçlar grafikler halinde verilerek yorumlanmıştır. Son bölümde ise bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ortaya konulmuştur. Ek-1’de d-q dönüşümü ilgili bilgiler sunulmuştur.

2. ESNEK ALTERNATİF AKIM İLETİM SİSTEMLERİ (FACTS)

2.1. Giriş

Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS) 1980'lerin sonunda Amerika'daki EPRI (Elektrik Gücü Araştırma Enstitüsü) tarafından tanıtılmıştır. FACTS terimi 1988 yılında EPRI Elektriksel Sistemler Bölümü Başkan Yardımcısı Dr. Narain Hingorani tarafından ortaya atılmıştır (Cigre, 1993). FACTS 'in açılımındaki “Esnek” ifadesi, bu aygıtların kontrol edilebilir olduğu anlamına gelmektedir. FACTS güç elektroniği ve geleneksel güç iletim donanımının bir kombinasyonudur.

Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri, Yüksek Gerilim Doğru Akım (HVDC) ve ilgili tristör gelişmelerine benzer olarak, mekanik olarak kontrol edilen şimdiki alternatif akım güç sistemlerinin sınırlamalarını yenmek için dizayn edilmiştir (Hingorani, 1993).

Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi, alternatif akım iletiminin, iletilebilir güç kapasitesini ve kontrol edilebilirliğini artırmak için güç elektroniği aygıtlarının kullanımını öngören bir kavramdır. Yarı iletken teknolojisinin gelişmesi, özellikle tristör teknolojisi kullanımının artmasıyla, tristörün anahtarlama kapasitesini kullanan enerji sistemleri endüstrisinde yaygın kullanım alanı bulmuştur. FACTS aygıtları, mevcut sistemin kendi ısı kapasitesinin altında çalıştığı durumlarda, varolan iletim imkanlarıyla daha çok enerji taşınmasına izin vererek sistemin iletim kapasitesini artırır ve yeni iletim hatlarının inşa edilmesini imkanlar dahilinde erteler. Yani FACTS aygıtları, iletim sisteminin kapasitesini artıran, iletim yönünü kontrol eden, kararlılığı artıran güç elektroniği destekli iletim donanımlarının planlanması olarak ifade edilebilir.

IEEE'ye göre FACTS; Denetlenebilirliği ve güç transfer kapasitesini arttırmak için bir veya daha fazla alternatif akım iletim sistemi parametresinin kontrolünü sağlayan güç elektroniği tabanlı bir sistem ve diğer statik donanımdır.

FACTS kontrolörleri güç elektroniği tabanlı bir uygulama olduğu için geleneksel mekanik kontrolörlere (şönt kapasitör, seri kapasitör, faz kaydırıcı vb) göre daha hızlıdır. Bu kontrolörler uygun bir şekilde ayarlandığı zaman iletim sistemlerinin kararlı çalışma limitlerini artırır. Bu aygıtlar iletim hattının seri empedansı, paralel empedansı, akımı, gerilimi ve aktif ve reaktif gücü gibi şebeke parametrelerinin uygun kompanzasyonu yoluyla güç sisteminin kontrolünü sağlar (Maram, 2003).

2.2. FACTS Teknolojisinin Amaçları

FACTS aygıtlarının iki ana amacı vardır. Bunlar;

- 1. İletim sistemlerinin güç transfer kapasitesini artırmak,**
- 2. Tanımlanan iletim rotaları üzerinde güç akışını kontrol etmek (Cigre, 1993).**

Buradaki ilk amaç, belirli bir hatta güç akışının iletim hattının termal limitlerine kadar artabilmesini içine alır. Aynı zamanda burada sistem hataları esnasında ve sonrasında güç akışının gerçek zamanlı uygun kontrolü yoluyla sistem kararlılığı korunmalıdır. İkinci amaç ise şunu ifade eder; bir hatta akımı kontrol edebilme yoluyla güç akışı seçilen iletim koridorlarına kısıtlanabilir. Aynı zamanda bu amaç içerisinde, birincil güç akışı beklenmeyen koşullar altında sistemde istenen tüm güç iletimini sağlamak için hızlı bir şekilde kullanılabilir ikincil bir güzergâha değişebilir. Bu iki temel amacın başarımının iletim sistemlerinin kullanımını önemli bir şekilde arttıracak ve yeni iletim hatları için minimal gereksinimler ile özelleştirmeyi kolaylaştırmada başlıca bir rol oynayacağı söylenebilir (Vural, 2001).

2.3. İletim Sistemlerinin Sınırlamaları ve FACTS Teknolojisi

Belirli bir güç sisteminin karakteristikleri, yük büyüdükçe ve üretim arttıkça zaman ile değişir. Eğer iletim olanakları yeterli bir şekilde geliştirilmezse, güç sistemi sürekli durum ve geçici durum problemlerine karşı zayıf bir hale gelir ve kararlılık sınırları daralır (Acha vd., 2004).

İletim sistemi sınırlamaları aşağıdaki bir veya daha fazla karakteristikleri içerebilir;

- Sürekli durum güç transfer limiti
- Gerilim kararlılık limiti
- Dinamik gerilim limiti
- Geçici kararlılık limiti
- Güç sistemi osilasyon sönümleme limiti
- Döngü akış limiti
- Termal limit
- Kısa devre akım limiti

Her bir iletim engeli veya bölgesel kısıtlama bu bir veya daha fazla sistem seviye problemine sahiptir (Paserba, 2003).

Her bir uygulamada bir FACTS kontrolörü belirli iletim sınırlamalarını hafifletmek, üretimin dağıtımını kolaylaştırmak için kullanılır ve yeterli sistem güvenilirlik ve güvenlik düzeyini rahat bir noktaya getirir. Her bir aygıtın gerilim, empedans veya iletim açısını kontrol etmedeki yeteneği her bir aygıtın güç iletimini kontrol etmek için bağlı kapasitesini belirler. Genel de şönt aygıtlar (TCSVC (Tristör Kontrollü Statik Var Kompanzator) , STATCOM (Statik Kompanzator) gibi) mükemmel sürekli durum kontrolü veya kararlılık artırımı sunar. Seri aygıtlar (SSSC, TCSC, TCSR vb.) hem güçlü bağlı sürekli durum akış kontrolü ve hem de kararlılık artırımı sunar. Kombine seri-şönt aygıtlardan TCPAR, hat boyunca etkin faz açısını kontrol ederek güç akışını düzenler. UPFC (Birleşik Güç Akış Kontrolörü) bütün zaman dilimlerinde ve uygulamalarda mükemmel kontrol sağlar.

Her bir FACTS kontrolörü yukarıda da ifade edildiği gibi bir veya daha fazla temel sistem sınırlama koşullarını dengelemek için dizayn edilir. Aynı problemi birden fazla FACTS kontrolörü çözebilmesine rağmen bazı kontrolörler belirli uygulamalar için diğerlerinden çok daha uygundur (Cigre, 1993).

Daha önce sıralanan sistem sınırlamalarının bazıları ve FACTS aygıtlarının bu problemlerde kullanımı geleneksel çözümlerle karşılaştırmalı olarak Tablo 2.1. 'de verilmiştir.

Tablo 2.1. FACTS Aygıtlarının sürekli durum uygulamaları

Sınırlama	Problem	Düzeltilici eylem	Geleneksel çözüm	FACTS aygıtı
Gerilim kararlılık limiti	Ağır yükte düşük gerilim	Reaktif güç sağlamak	Şönt kapasitör, Seri kapasitör	TCSVC, TCSC, STATCOM
	Hafif yükte yüksek gerilim	Reaktif güç tüketmek	Şönt kapasitör ,Şönt reaktörün anahtarlanması	TCSVC, STATCOM
	Servis kesilmelerinde yüksek gerilim	Reaktif güç tüketmek	Şönt reaktör eklenmesi	TCSVC, STATCOM
Termal limit	Hat veya transformatörün aşırı yüklenmesi	Aşırı yükü azaltmak	Hat veya transformatör eklemek	TCSC, UPFC, TCPAR
			Seri reaktör eklenmesi	TCSVC, TCSC
Döngü akış limiti	Paralel geçitler arasında yük paylaşımı	Seri reaktansı veya faz açısını ayarlamak	Seri reaktör \kapasitör eklenmesi veya PAR eklenmesi	UPFC, TCSC TCPAR
Kısa devre akım limiti	Yüksek kısa devre akımı	Kısa devre akımını sınırlamak	Seri reaktör eklenmesi	UPFC, TCSC
Kararlılık	Sınırlı iletim gücü	Hat Reaktansının azaltılması	Seri reaktör veya kapasitör eklenmesi	TCSC, SSSC

FACTS aygıtları Tablo 2.1'den de anlaşılacağı gibi güç akış denetiminde, döngü akış denetiminde, paralel geçitler arasında yük paylaşımında, gerilim ayarlanmasında, dinamik ve geçici kararlılığın iyileştirilmesinde ve sistem salınımlarının bastırılmasında verimli bir şekilde kullanılabilir.

FACTS aygıtlarının sağladığı yararlar maddeler halinde verilebilir;

- Güç akışının düzenli kontrolünü sağlar. Bu FACTS aygıtlarının ana fonksiyonudur.
- Mevcut iletim sistemlerinin daha iyi kullanımını sağlar.
- Yeni hatların yapımını imkanlar dahilinde erteler.
- İletim sistemlerinin geçici ve dinamik kararlılığını artırır.
- Güç kalitesini iyileştirir.
- Aşırı yüklü iletim hatlarının rahatlatılması yoluyla toplam sistem kayıplarının minimize edilmesini sağlar.
- Sistem donanımı ve iletim kapasitesinin kullanımı üzerinde ters etkisi olan güç sistemi osilasyonlarının sönümlenmesini sağlar.
- Sahip olunan iyi ve tam kontrol kapasitesi yoluyla sistem güvenliği ve kararlılığını artırır.
- Hataların ve donanım bozukluklarının etkilerini sınırlandırarak ardı ardına servis kesilmelerini önler.
- En düşük maliyetli üretimin kullanımını artırır. İletim ara bağlantıları için ana nedenlerden bir tanesi, en düşük maliyetli üretimi kullanmaktır. Kapasitenin uygun maliyetli artırımı en düşük maliyetli üretimin kullanımını artırır.
- İletim hatlarını geliştirir.
- Reaktif güç akışlarını azaltır. Böylece hatların daha fazla aktif güç taşımalarını sağlar.
- Döngü akış denetimi sağlar.

2.4. FACTS Aygıtlarının Sınıflandırılması

Mevcut FACTS aygıtları şunlardır.

- Tristör Kontrollü Statik Var Kompanzatör (TCSVC)
- Tristör Anahtarlama Seri Kapasitör (TSSC)
- Tristör Anahtarlama Seri Reaktör (TSSR)
- Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC)
- Tristör Kontrollü Seri Reaktör (TCSR)
- Tristör Kontrollü Dinamik Fren (TCDB)
- Narain G. Hingorani-Senkronaltı Rezonans Sönümleyici (NGH-SSR Damper)
- Tristör Kontrollü Faz Açısı Düzenleyicisi (TCPAR)
- Tristör Kontrollü Gerilim Sınırlayıcı (TCVL)
- Tristör Kontrollü Gerilim Düzenleyici (TCVR)
- Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM)
- Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC)
- Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC)
- Hat Arası Güç Akış Kontrolörü (IPFC)
- Dönüştürülebilir Statik Kompanzatör (CSC)

FACTS aygıtları iki şekilde sınıflandırılabilir. Bunlar;

1. İletim hattına bağlanış şekillerine göre yapılan sınıflandırma.

2. Kullandıkları teknolojilere göre yapılan sınıflandırma.

FACTS aygıtları iletim hattına bağlanış şekillerine göre 4 kategoride incelenebilir. Bunlar;

- Seri FACTS aygıtları
- Şönt FACTS aygıtları
- Kombine seri-seri FACTS aygıtları
- Kombine seri-şönt FACTS aygıtları

FACTS aygıtları kullandıkları teknolojilere göre 2 kategoride incelenebilir. Bunlar;

- Geleneksel Tristör tabanlı FACTS Aygıtları
- Konverter tabanlı (veya SVS tabanlı) FACTS Aygıtları

Bu tez çalışmasında FACTS aygıtları için ikinci sınıflandırma kullanılmıştır.

2.5. Geleneksel Tristör Tabanlı FACTS Aygıtları

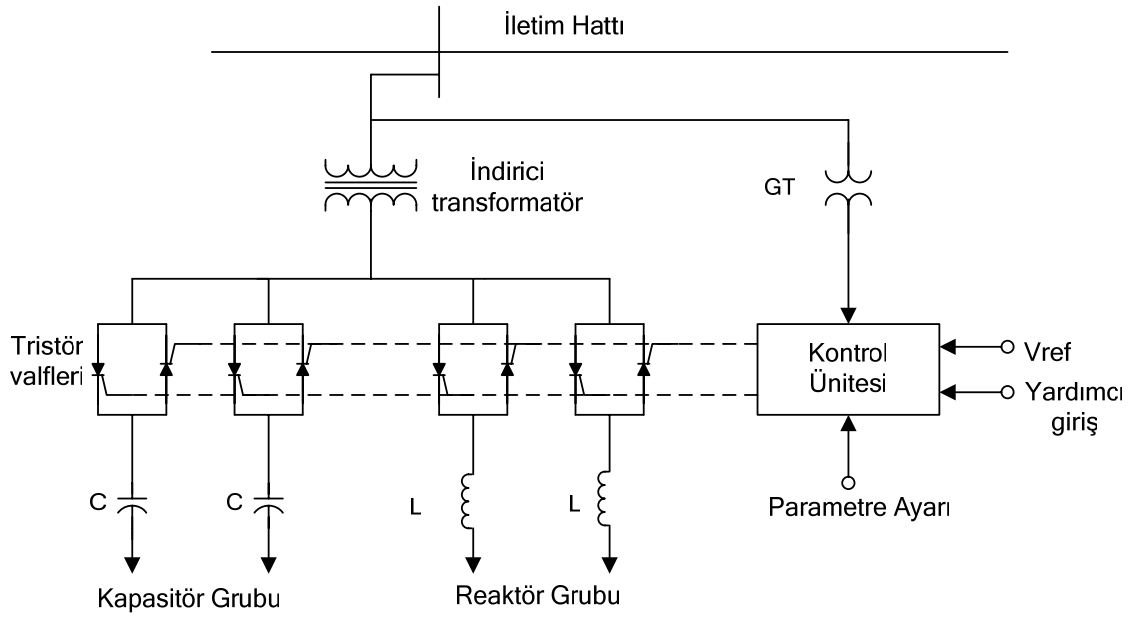
Bu kategorideki FACTS aygıtları anahtarlama ve düzenleme aygıtı olarak tristör kullanılmaktadırlar. Genel olarak bu kategorideki aygıtlara tristör kontrollü FACTS aygıtları denilebilir. Bu tristör tabanlı aygıtlar mekanik olarak çalışan geleneksel aygıtların (kesici anahtarlama kapasitör ve reaktör, faz kaydırıcı, transformatör kademe değiştiricisi vb.) devre konfigürasyonuna benzer devre konfigürasyonlarına sahip olmalarına karşın bu aygıtlardan son derece hızlı çalışırlar.

Bu aygıtlar şu şekilde sıralanabilir;

- Tristör Kontrollü Statik Var Kompanzatör (TCSVC)
- Tristör Anahtarlama Seri Kapasitör (TSSC)
- Tristör Anahtarlama Seri Reaktör (TSSR)
- Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC)
- Tristör Kontrollü Seri Reaktör (TCR)
- Tristör Kontrollü Dinamik Fren (TCDB)
- Narain G. Hingorani-Senkron altı Rezonans Sönümleyici (NGH-SSR Damper)
- Tristör Kontrollü Faz Açısı Düzenleyicisi (TCPAR)
- Tristör Kontrollü Gerilim Sınırlayıcı (TCVL)
- Tristör Kontrollü Gerilim Düzenleyici (TCVR)

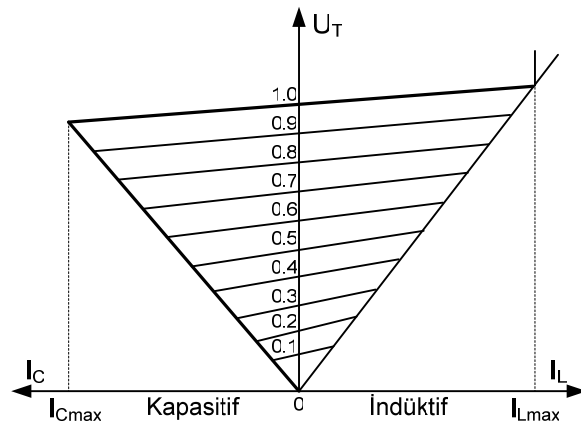
2.5.1. Tristör Kontrollü Statik Var Kompanzatör (TCSVC)

TCSVC için ilk uygulanan FACTS aygıtıdır demek yanlış olmaz, 1970'lerin başlarında ark fırını kompanzasyonu için geliştirilen TCSVC daha sonraları enerji iletim uygulamaları için kullanılmıştır. Tipik şönt bağlı bir TCSVC Şekil 2.1'de görüldüğü gibi tristör anahtarlama kapasitörler (TSC) ve tristör kontrollü reaktörlerden (TCR) oluşmaktadır. TCSVC şönt bağlı reaktör ve/veya kapasitörleri hızlı bir şekilde sisteme dahil etmek veya kaldırmak için tristör valfleri kullanır. Bu kapasitörlerin ve reaktörlerin uygun bir şekilde koordinasyonlu çalışması sonucunda, reaktif güç çıkışı elemanların kapasitif ve endüktif oranları dahilinde sürekli değiştirilebilir (Hingorani,1993).



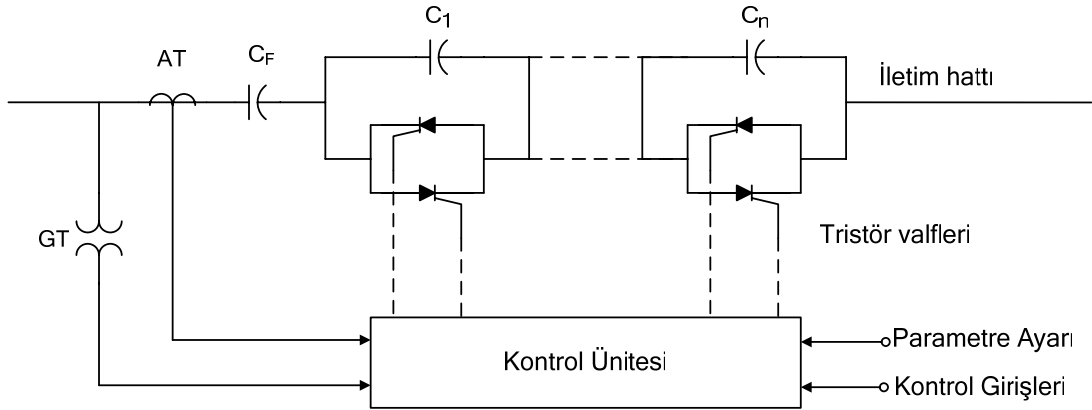
Şekil 2.1 TCSVC devre konfigürasyonu

TCSVC normal olarak iletim hattının seçili terminalindeki gerilimi ayarlamak için kullanılır. Buna ek olarak TCSVC geçici ve dinamik kararlılığı sağlamada da kullanılır (Hingorani,1993). Şekil 2.2’de TCSVC’nin V-I karakteristiği görülmektedir. Bu karakteristiğe göre TCSVC’nin gerilim sağlama kapasitesi azalan sistem gerilimi ile azalmaktadır. Bu kapasitör ve reaktörlerin azalan sistem gerilimi ile azalan çıkış akımı sağladığı anlamına gelir.



Şekil 2.2 TCSVC’nin V-I karakteristiği.

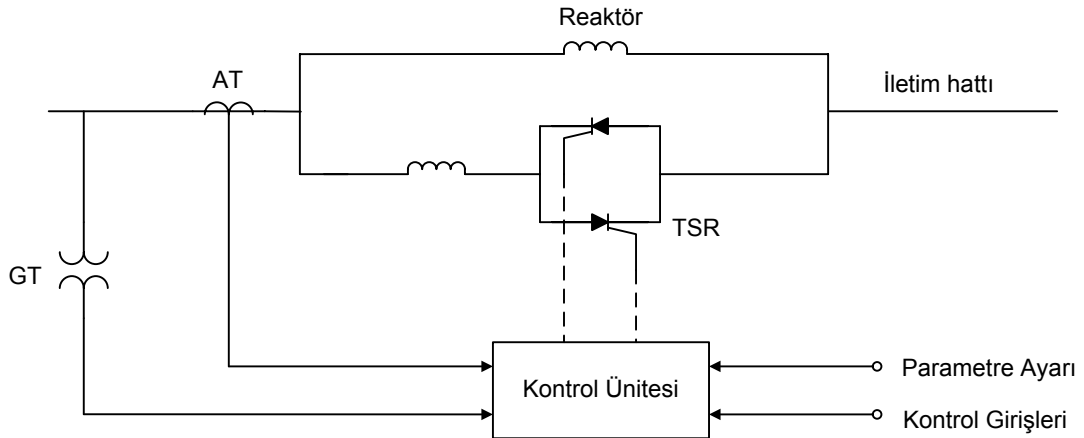
2.5.2. Tristör Anahtarlama Seri Kapasitör (TSSC)



Şekil 2.3 TSSC devre konfigürasyonu

C_F sabit bir kapasitör, C_1 'den C_n 'ye olan kapasitörler tristör valfleri tarafından anahtarlanan kapasitörler olmak üzere TSSC devre konfigürasyonu yukarıdaki gibidir. Aşırı gerilim seviyelerinden korumak üzere kapasitör grubuna ($C_1...C_n$) paralel bir Metal oksit varistör (MOV) veya ZnO tipi bir gerilim durdurucu yerleştirilir. Seri kompanzasyonun derecesi seri kapasitör gruplarının sayısını artırarak veya azaltarak kontrol edilir. Bunu yerine getirmek için her bir kapasitör bir tristör valfi ile kontrol edilir. Geçici anahtarlama minimize etmek ve doğal iletimi kullanabilmek için tristör valflerinin çalışması gerilim ve akım sıfır geçişleri ile koordinelidir. Sürekli tetikleme açısı kontrolü yoktur. Bu yöntemde akım kırılmaz. TSSC sürekli durumda aktif güç akış kontrolü, geçici kararlılığın iyileştirilmesi, güç osilasyonlarının sönümlenmesi ve paralel hatlarda güç akışını dengelemede kullanılabilir (Gyugyi.1991) ve (Vural, 2001).

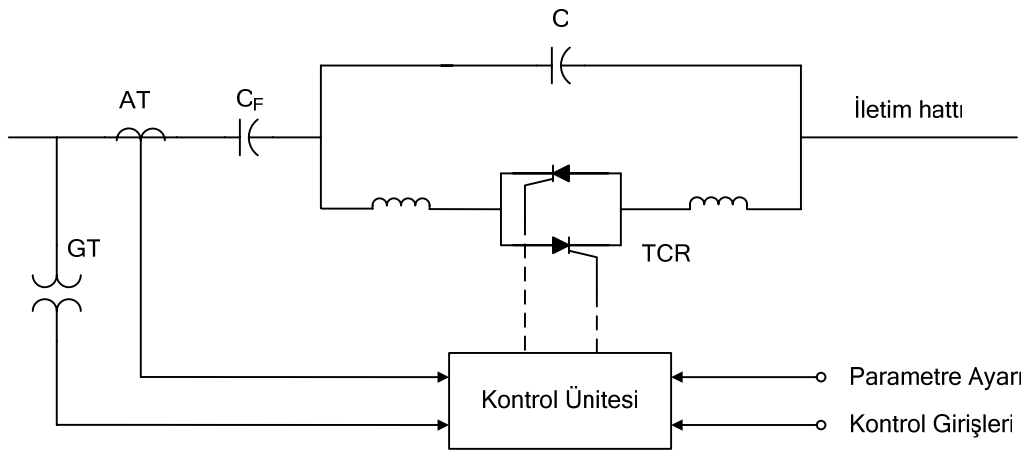
2.5.3. Tristör Anahtarlama Seri Reaktör (TSSR)



Şekil 2.4 TSSR devre diyagramı

TSSR bir indüktif reaktans kompanzatorüdür. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi tristör anahtarlamalı reaktör ve buna şönt olan bir seri reaktörden ibarettir. Seri indüktif reaktansın kademeli olarak kontrolünü sağlamak için kullanılır (Edris vd, 1997). Burada tristörler tam olarak iletimde veya kesimdedir. Sürekli olarak tetikleme açısı kontrolü yoktur. Güç akış kontrolü, güç osilasyonlarının sönümlenmesi, seri empedans kontrolü ve geçici kararlılığın iyileştirilmesinde kullanılabilir.

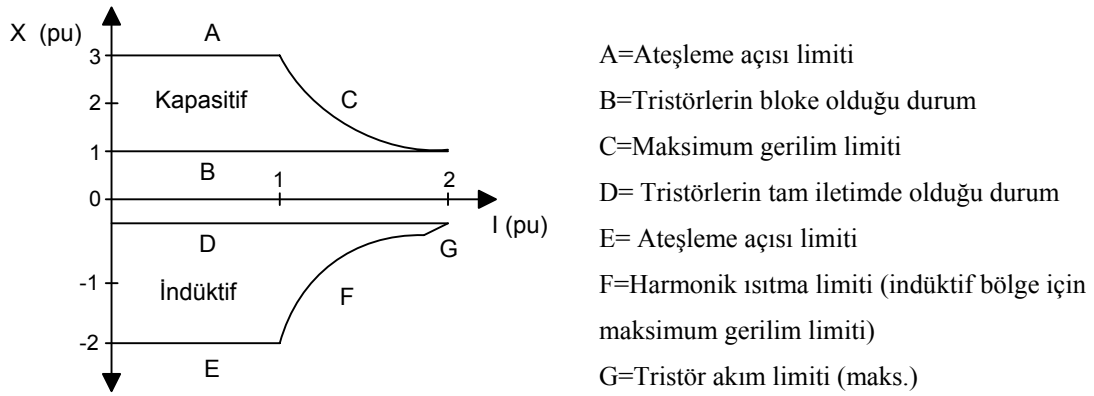
2.5.4. Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC)



Şekil 2.5. TCSC devre konfigurasyonu

TCSC tipik seri bir FACTS aygıtıdır. TCSC konfigürasyonları şekil 2.5'te de görüldüğü gibi sabit kapasitör yanında (C_F), Tristör kontrollü reaktörler (TCR) ve bunlara paralel bağlı bir kapasitör (C) kullanır. TCR-C kombinasyonu ana frekans kapasitif reaktansının geniş bir aralık üzerinde düzgün bir şekilde kontrol edilmesine izin verir (Cigre,1993). Aşırı gerilim seviyelerinden korumak üzere C kapasitörüne paralel bir Metal oksit varistör (MOV) yerleştirilir. TCSC üç temel çalışma moduna sahiptir; bunlar (1) tristörlerin tam iletimde olduğu durum (By-pass modu), (2) tristörlerin bloke olduğu durum, (3) vernier modu (tristörlerin kısmi olarak iletimde olduğu durum) olarak ifade edilir. (1) modunda hat akımının büyük bir kısmı TCR üzerinden akar ve TCSC, küçük net bir indüktif empedansa sahiptir. (2) modunda TCSC empedansı sadece kapasitör (C) reaktansına eşit olmaktadır. (3) modunda TCSC kapasitif veya indüktif bölgede çalışabilir. Bu mod tristör tetikleme açılarının sürekli değişimi ile TCSC'nin dinamik çalışmasının sağlandığı bir çalışma modudur. Bu mod SSR'yi önlemede kullanılmaktadır (Larsen vd. ,1993), (Medina, 2003)ve (Bowler vd.,1992).

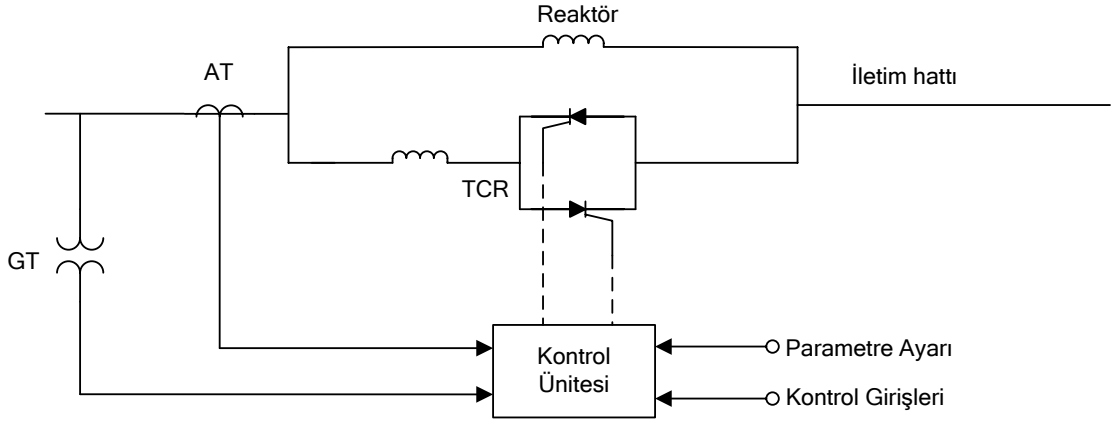
Seri kompanzasyon derecesi (kapasif bölgede) reaktörler üzerinden akan akım kontrol edilerek belirlenir. Bir başka deyişle tristör iletim periyodunu arttırarak veya azaltarak seri kompanzasyon derecesi kontrol edilir. Reaktörlerin anma frekansındaki reaktansı tristörlerin ateşleme açıları kontrol edilerek değiştirilir. Reaktörlerin reaktansının değişmesiyle TCSC reaktansı dolayısıyla iletim hattı reaktansı ve empedansı değişir. Tristörlerin ateşleme açısı ile değişen reaktör reaktanslarının etkin değeri C kapasitörünün reaktansından büyük olduğu sürece eşdeğer reaktans kapasitif olur. Bir başka deyişle reaktörlerin admittansı, C kapasitörünün admittansından aşağıda tutulur. Genel olarak TCSC kapasitif bölgede yani şekil 2.6’da da görüldüğü gibi ABC alanı içerisinde çalışır. Maksimum kapasitans, ateşleme açısı (Şekil 2.6) tarafından sınırlanır. TCSC’nin indüktif bölgede çalışması bazı hata durumlarında koruma amaçlı olarak kullanılabilir (Tso vd., 1999) ve (Gyugyi.1991) .



Şekil 2.6 TCSC’nin X-I karakteristiği

TCSC, tristörlerin tetikleme açılarının kontrolü ile reaktansını düzgün ve hızlı bir şekilde değiştirebilir. TCSC istenen yollar boyunca güç akışını direkt olarak düzenleyebilir ve sistemin hat sınırlarına daha yakın çalışmasına izin verir. Hızlı ve esnek düzenleme yeteneğinden dolayı güç sisteminin dinamik performansı ve geçici kararlılığını iyileştirebilir. Bununla beraber SSR ve güç salınımlarının söndürülmesinde de kullanılır. Güç akış kontrolü ve güç salınımlarını söndürme açısından TCSVC’den daha yüksek bir etkinliğe sahiptir.

2.5.5. Tristör Kontrollü Seri Reaktör (TCSR)

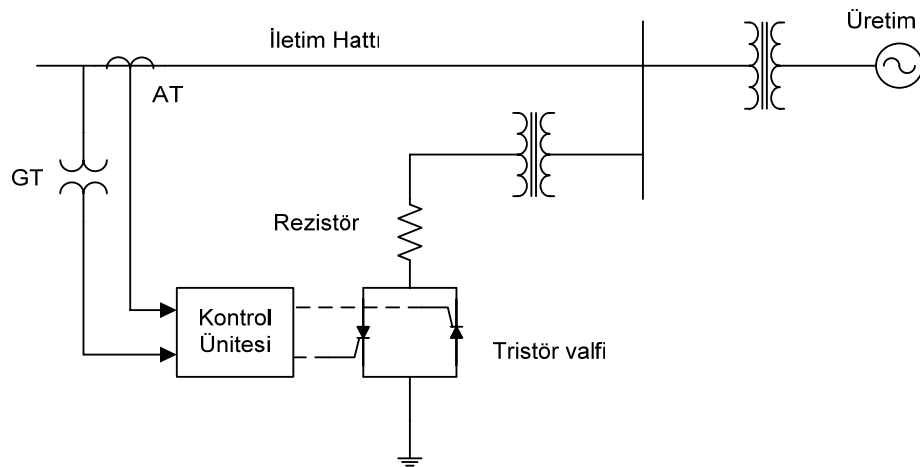


Şekil 2.7 TCSR devre konfigürasyonu

TCSR bir indüktif reaktans kompanzatörüdür. Hattın etkin indüktif empedansını kontrol etmek için kullanılır (Edris vd., 1997). Şekil 2.7'de görüldüğü gibi bir TCR ve buna paralel bir reaktörden ibarettir.

TCR tetikleme açısı 180^0 olduğunda iletimden çıkar ve kontrolsüz reaktör bir hata akımı sınırlayıcısı olarak rol oynar. Tetikleme açısı 180^0 'nin altına düşerse tetikleme açısı 90^0 'ye düşene kadar net indüktans azalır. TCSR tek büyük bir ünite veya küçük çok sayıda ünitelerden oluşabilir. TCSR osilasyonların sönümlenmesinde, geçici ve dinamik kararlılığın iyileştirilmesinde kullanılır (Hingorani, 1993).

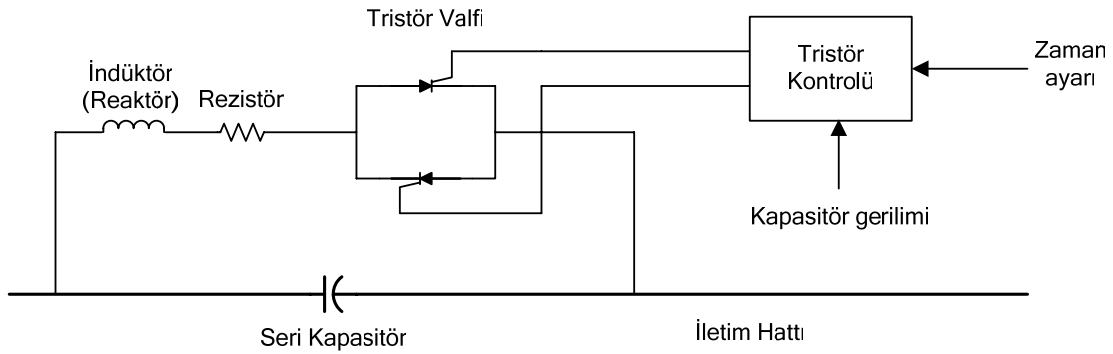
2.5.6. Tristör Kontrollü Dinamik Fren (TCDB)



Şekil 2.8 TCDB devre konfigürasyonu

Şekil 2.8’de görüldüğü gibi tristör valfi ile kontrol edilen TCDB, iletim hattına şönt bağlı bir rezistif yüküdür. Böyle bir yük her bir saykılta tristör anahtarlama ile yarım saykıldan yarım saykıla herhangi bir özel güç akış osilasyonunu sönümlemek için seçici bir şekilde uygulanabilir. Böylece üretim üniteleri daha az senkronizm kaybetme riski ile çalışırlar. TCDB osilasyonları sönümleme dışında eğer hızlı yanıtli bir kontrolör uygulanmışsa geçici kararlılık içinde kullanılabilir (Hingorani, 1993) .

2.5.7. NGH Senkron altı Rezonans Sönümleyici (NGH-SSR Damper)

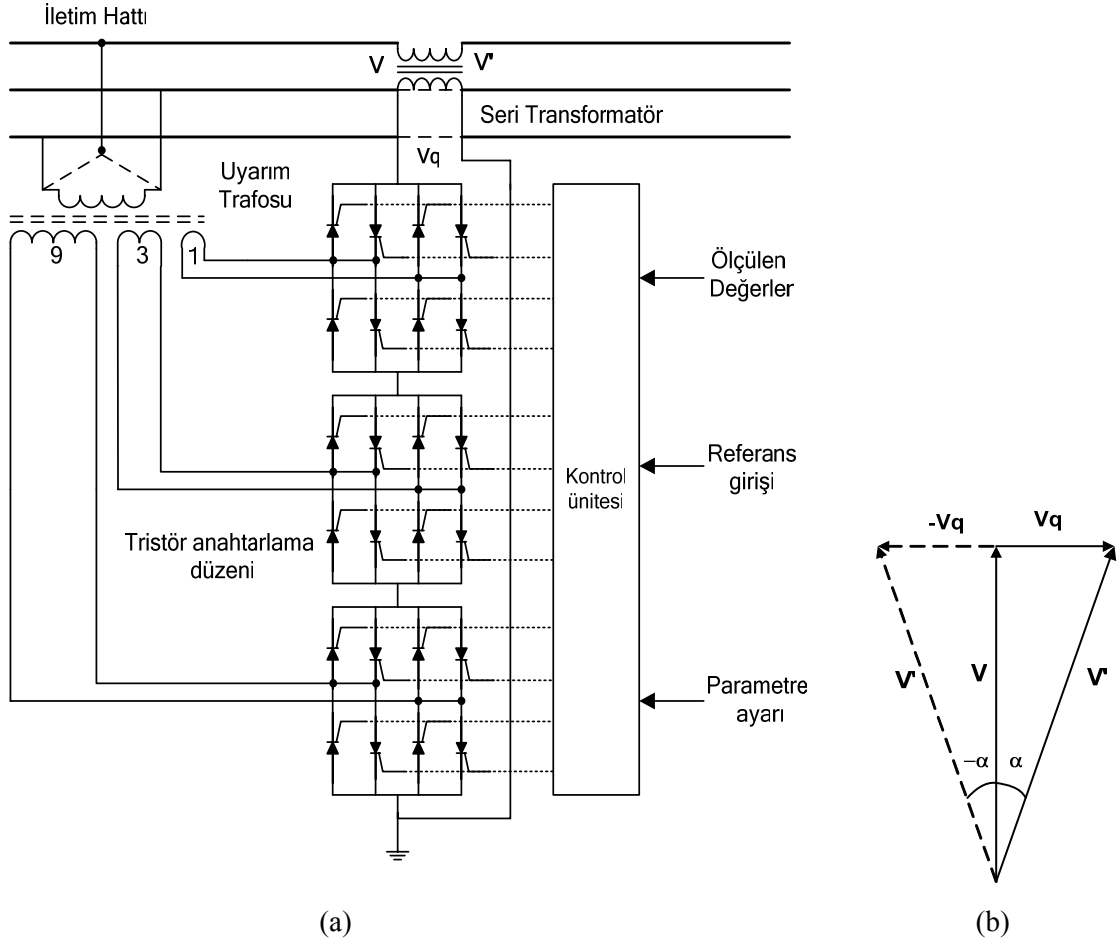


Şekil 2.9 NGH Sönümleme şeması

Narain Hingorani tarafından geliştirilen NGH-SSR sönümleyici şekil 2.9’da görüldüğü gibi hatta seri bağlı kapasitör karşısında tristör valfi ve buna seri küçük bir reaktör ve rezistörden oluşmaktadır. Ana ilkesi iletim hattında seri kapasitörü by-pass edecek bir akım yolu sağlayarak senkron altı rezonans osilasyonlarını sönümlemektir. NGH-SSR söndürücünün çalışması iki prensibe dayanmaktadır. Bunlardan ilki tristörlerin 60 Hz frekansta, kapasitör geriliminin her bir sıfır geçişinden 8.33 ms sonra veya bir saykılın yarısında (veya 180^0) tetiklenmesidir. Eğer gerilim dalgası diğer frekansları da içeriyorsa bazı yarım saykılar 8.33 ms’den daha uzun olacaktır. Bu durumda 8.33 ms’de tetiklenen tristörler yarım saykılın uzayan kısmı esnasında biraz akım akmasına neden olur ve osilasyonları sönümler. İkinci prensip ise; tristörleri 8.33 ms’den oldukça erken veya kapasitör geriliminin sıfır geçişini takiben 180^0 ’den daha az bir açıda tetiklemektir. Erken tetikleme kombine devre (rezistör, reaktör ve kapasitör) empedansının, sadece kapasitörün bulunduğu durumdan çok daha negatif olmasına neden olur. Ayrıca tetikleme açısının modülasyonu ile empedans ana frekansın altında herhangi bir istenmeyen frekansta kuvvetli bir sönümleme etkisine sahip olabilir.

NGH-SSR sönümleyicinin en önemli özelliği seri kapasitörün DC öngerilimini ortadan kaldırmasıdır. Böylelikle kapasitör her bir yarım saykılta deşarj olmaktadır. Seri kapasitörün bu yükü senkron altı osilasyonu besler ve kapasitör karşısında yüksek aşırı gerilimlere neden olur (Hingorani,1993).

2.5.8. Tristör Kontrollü Faz Açısı Düzenleyicisi (TCPAR)

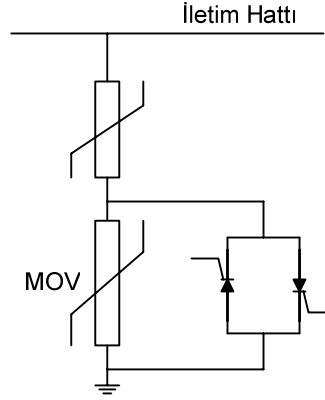


Şekil 2.10 a) TCPAR devre konfigürasyonu b) Faz kayması

Faz kayması hattın gerilim fazörüne dik fazlı ve değişken bir gerilim bileşeni ekleyerek veya çıkararak elde edilir. Böyle bir gerilim yukarıda devre konfigürasyonu görülen TCPAR ile elde edilebilir. TCPAR şekil 2.10 (a)'da görüldüğü gibi özdeş olmayan, 1:3:9 sarım oranına sahip üç sekonder sargısı bulunan bir uyarım transformatörü kullanır. Tristör anahtarlama düzeni her bir sargıyı pozitif veya negatif yönde devreye almaya veya devreden çıkarmaya izin verir. Böylece anahtarlabilir bir gerilim aralığı oluşur. Elde edilen gerilim seri transformatör yoluyla iletim hattına enjekte edilir. Her bir ünite basamağı ile ilgili gerilim meydana gelen faz kaymasını belirler. Enjekte edilen gerilimin büyüklüğü tristör tetikleme açısı kontrolü ile devamlı ve hızlı bir şekilde değiştirilebilir. Bu şekilde TCPAR sürekli durumda hat boyunca etkin faz açısını kontrol ederek güç akışını düzenler ve sistemin geçici ve dinamik kararlılığını artırır (Hingorani, 1993) ve (Gyugyi, 1991).

2.5.9. Tristör Kontrollü Gerilim Sınırlayıcı (TCVL)

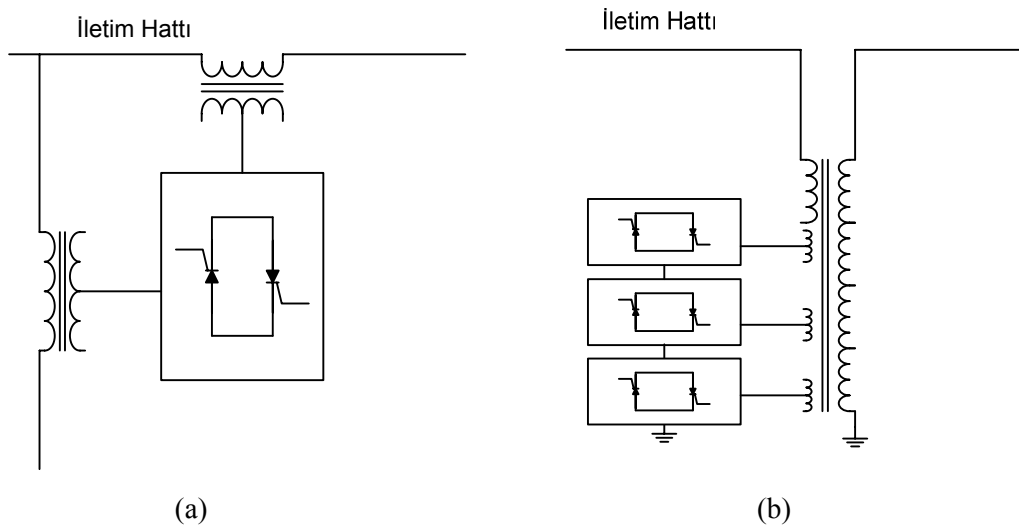
Bu aygıt geçici durumlar esnasında terminalleri karşısındaki gerilimi sınırlamak için tristör anahtarlamalı bir Metal oksit varistör (MOV) kullanır. İletim hatlarında geçici ve dinamik gerilim sınırlamasında kullanılabilir.



Şekil 2.11 TCVL devre konfigürasyonu

2.5.10. Tristör Kontrollü Gerilim Düzenleyicisi (TCVR)

Bu aygıt sürekli kontrol ile aynı fazlı değişken gerilim sağlayan tristör kontrollü bir transformatördür. Transformatör bir tristör kontrollü kademe değıştircisi ile düzenleyici bir transformatör veya tristör kontrollü AC-AC gerilim konverteri olabilir. İletim hatlarında reaktif güç kontrolü, güç osilasyonlarının sönümlenmesi, geçici ve dinamik kararlılığın iyileştirilmesi için kullanılabilir.



Şekil 2.12 a) AC-AC gerilim konverteri b) Tristör kontrollü bir kademe değıştircisi ile düzenleyici bir transformatör.

2.6. Konverter Tabanlı FACTS Aygıtları

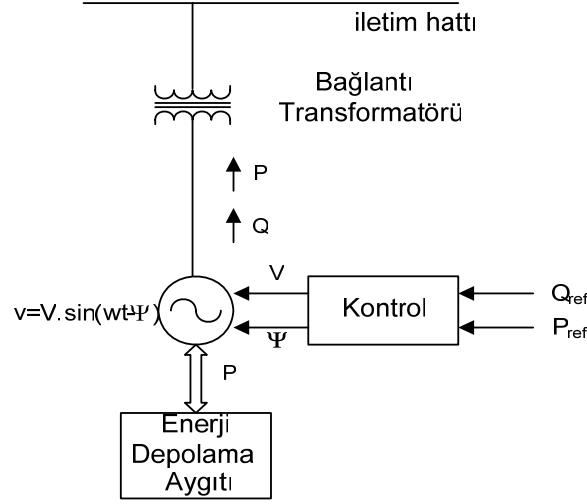
Bu kategorideki aygıtlar SVS (Senkron Gerilim Kaynağı) prensibine göre çalışan anahtarlamalı konverterler kullanırlar. Bu konverterler yapıtaşı olarak GTO gibi kendinden denetimli yarı iletken elemanlar kullanır. Konverter tabanlı aygıtlar geleneksel tristör tabanlı FACTS aygıtları ile karşılaştırıldıklarında gerilim, hat empedansı ve faz açısı kontrolü için tekdüze uygulanabilme ve üstün performans karakteristikleri sağlarlar. SVS yaklaşımı AC sistemle aktif gücü direkt olarak değiş tokuş edebilme ve bağımsız, kontrol edilebilir reaktif güç kompanzasyonu sağlama özelliklerini sunmuştur. Bu aygıtlar şu şekilde sıralanabilir.

- Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM)
- Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC)
- Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC)
- Hat Arası Güç Akış Kontrolörü (IPFC)
- Dönüştürülebilir Statik Kompanzatör (CSC)

Bu aygıtlara geçmeden önce SVS kavramı üzerinde durulacaktır.

2.6.1. SVS (Senkron Gerilim Kaynağı) Kavramı

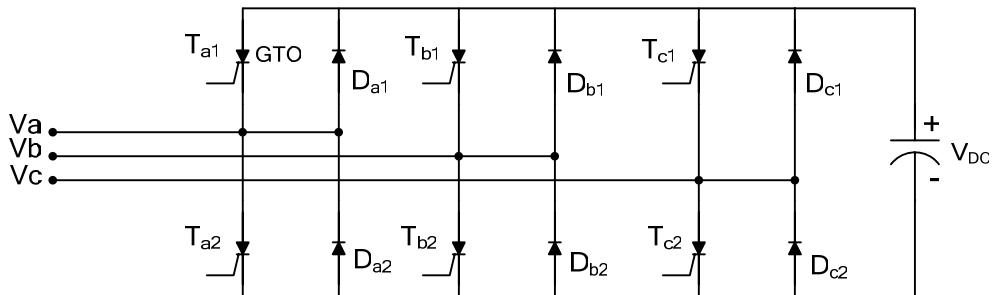
Şekil 2.13'te gösterilen Statik (Solid-State) Senkron gerilim kaynağı ana frekansta, kontrol edilebilir genlikte ve faz açısında, dengeli üç faz gerilimleri üreten ideal bir senkron makine gibi dikkate alınabilir. Bu ideal senkron makine ataletle sahip değildir. Yanıtı anlıktır. Mevcut sistem empedansını önemli bir şekilde değiştirmez ve dahili olarak reaktif (hem kapasitif hem indüktif) güç üretebilir. Ayrıca eğer AC sisteme güç sağlayan veya AC sistemden güç çeken uygun bir depolama aygıtı ile bağlanmış ise AC sistem ile aktif gücü dinamik bir şekilde değiş tokuş edebilir (Gyugyi, 1993).



Şekil 2.13 Genelleştirilmiş senkron gerilim kaynağı

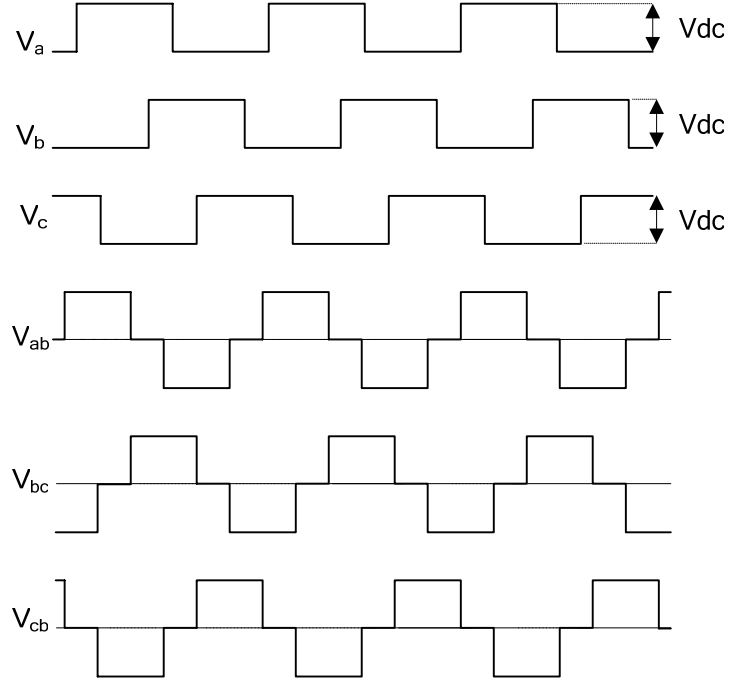
Şekil 2.13'te statik (solid-state) senkron gerilim kaynağının fonksiyonel bir modeli görülmektedir. P_{ref} ve Q_{ref} referans sinyalleri, üretilen çıkış geriliminin V değerini ve ψ faz açısını belirler ve böylelikle senkron gerilim kaynağı ve AC sistem arasında aktif ve reaktif güç alışverişi olur. Eğer dinamik aktif güç alışveriş işlevi gerekli değil ise ($P_{ref} = 0$), SVS ideal bir senkron kondansör gibi kendine yeten reaktif bir güç kaynağı haline gelir ve harici enerji depolama aygıtı devre dışı bırakılabilir.

SVS çeşitli anahtarlama güç konverterleri ile uygulanabilir. Bu konverterler burada VSC (Gerilim Kaynaklı Konverter) olarak dikkate alınmıştır. VSC bu kategorideki FACTS aygıtlarında kullanılmaktadır. Şekil 2.14'te temel 6-darbeli bir VSC görülmektedir. Bu özel DC-AC anahtarlama konverter çok darbeli uygun devre konfigürasyonlarında GTO (Kapıdan Tıkanabilir) tristörler kullanır.



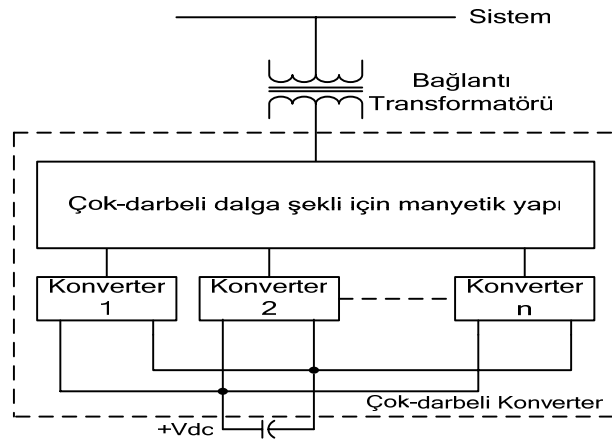
Şekil 2.14 Temel 6-darbeli Gerilim Kaynaklı Konverter

Şekil 2.15 ‘te görüldüğü gibi konverter bir DC gerilim kaynağı (yükli bir kapasitör) ile uygun konverter anahtarlama yoluyla 3 çıkış terminalini ardı ardına DC kaynağa bağlayarak, belirli bir frekansta dengeli gerilim dalga şekilleri üretebilir.



Şekil 2.15 Gerilim dalga şekilleri

Yukarıdaki gibi gerilim dalga şekilleri üreten birkaç temel konverter Şekil 2.16’daki gibi aynı DC kaynaktan çalışabilir. Uygun ardışık faz yer değişimi ile bu gerilim dalga şekillerini üreterek, elde edilen bileşen dalga şekilleri gene uygun bir manyetik devre düzenlemesinin kullanımı ile toplanırsa çok darbeli bir çıkış gerilimi dalga şekli elde edilebilir. Bu konverterlerin yeterli sayıda kullanımı ile yaklaşık bir sinüs dalgası elde edilebilir.



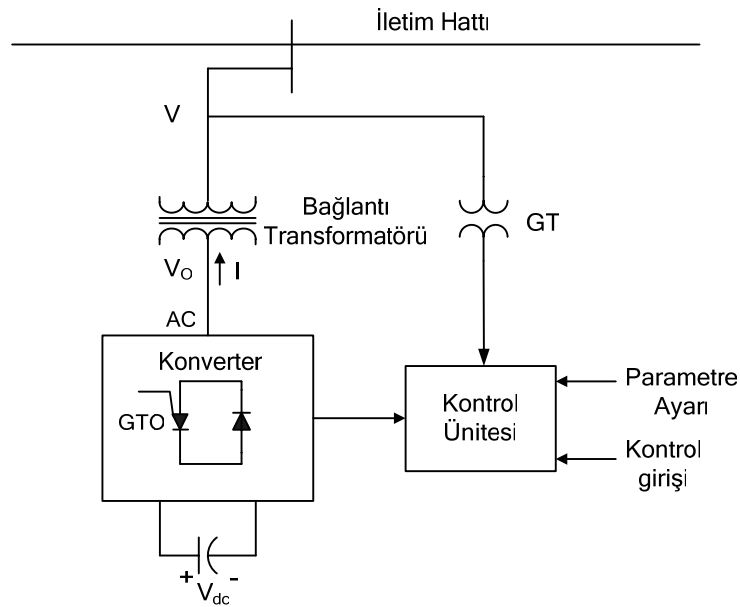
Şekil 2.16 Çok Darbeli Konverter yapısı

Şekil 2.16'daki sistemde konverter ve AC sistem arasındaki reaktif güç alış veriş, üretilen çıkış gerilimini değiştirerek kontrol edilebilir. Eğer çıkış geriliminin büyüklüğü AC sistem geriliminin büyüklüğünü geçerse, akım reaktans yolu ile konverterden AC sisteme akar ve konverter AC sistem için reaktif (kapasitif) güç üretir. Eğer konverter çıkış geriliminin büyüklüğü AC sistem geriliminin büyüklüğünün altına düşerse AC sistemden konvertere reaktif akım akar ve konverter AC sistemden reaktif (indüktif) güç tüketir. Eğer çıkış geriliminin büyüklüğü AC sistem gerilimine eşitse, reaktif güç alış veriş sıfırdır. Benzer olarak konverter ve AC sistem arasındaki aktif güç alış veriş, üretilen çıkış geriliminin fazını AC sistem gerilimine göre kaydırarak kontrol edilebilir. Eğer konverter çıkış gerilimi AC sistem geriliminden ileri fazlı ise konverter AC sisteme DC depolama aygıtından aktif güç sağlar. Eğer konverter çıkış gerilimi AC sistem geriliminden geri fazlı ise konverter AC sistemden DC depolama aygıtı için aktif güç tüketir (Gyugyi,1993).

SVS yaklaşımına göre çalışan VSC'ler kullanan FACTS aygıtlarının geleneksel tristör tabanlı FACTS aygıtları ve mekaniksel aygıtlara olan üstünlükleri şöyle sıralanabilir;

- Geliştirilmiş çalışma ve performans karakteristikleri,
- Aynı güç elektroniği aygıtının değişik kompanzasyon ve kontrol uygulamalarında tek düze kullanımı,
- Azaltılmış donanım boyutu ve kurulum işi,
- Düzgün dinamik kontrol için hızlı ve devamlı cevap karakteristikleri,
- Direkt güç transferi uygulamaları için gerilim ve güç akışının bağımsız kontrolü,
- Sürekli durum ve dinamik sistem koşulları için otomatikleştirilmiş aktif ve reaktif güç kontrolü,
- Yüksek performanslı çalışma için ileri kontrol yöntemleri,
- Gelişmiş güç yarı iletken teknolojilerinin kullanılması ile azaltılmış kayıplar, azaltılmış çalışma maliyetleri ve yüksek güvenilirlik,
- Minimal seviyede bakım ve servis gereksinimleridir.

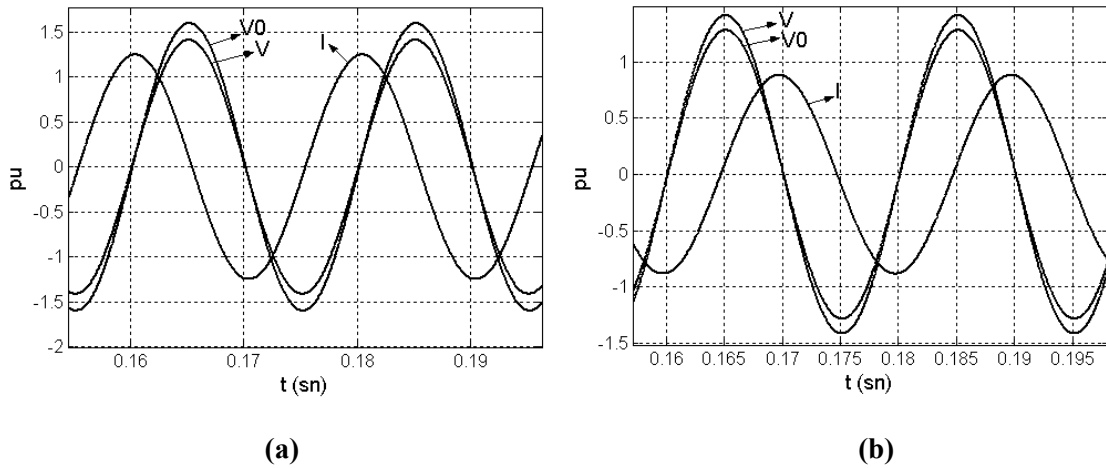
STATCOM iletim hattına şönt olarak bağlanan bir FACTS aygıtıdır. Literatürde STATCON veya ASVC (Gelişmiş Statik Var Kompanzatör) olarak adlandırıldığı çalışmalarda olmuştur. Şekil 2.17’de STATCOM devre konfigürasyonu gösterilmektedir. Basit olarak STATCOM bağlantı transformatörü, konverter ve bir DC kapasitörden ibarettir. Bu yapı daha önce ifade edilen SVS yaklaşımının çoklu konverter yapıları ile bir uygulamasıdır. Burada V_{AC} sistem gerilimini V_0 ise STATCOM çıkış gerilimini ifade etmektedir. TCSVC gibi reaktif şönt kompanzasyon için kullanılabilir. Bağlı bulunduğu bara gerilimini düzenlemek için iletim hattına reaktif güç sağlayabilir veya iletim hattından reaktif güç tüketebilir.



Şekil 2.17 STATCOM Devre Konfigürasyonu.

STATCOM çıkışında ana frekansta, kontrol edilebilir genlikte ve faz açısında, dengeli üç faz gerilimleri elde edilir. Bu düzenlemede AC sistem ile aygıt arasındaki sürekli durum güç alışverişi genel olarak reaktiftir. STATCOM ve AC sistem arasındaki reaktif güç alış veriş konverter çıkış geriliminin büyüklüğünü düzenleyerek kontrol edilir.

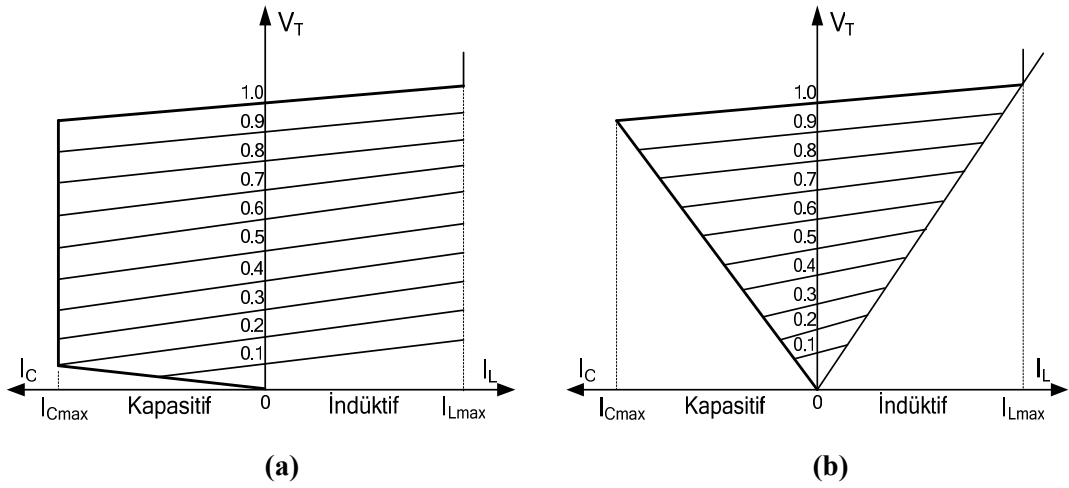
Eğer STATCOM çıkış geriliminin büyüklüğü AC sistem geriliminin büyüklüğünü geçerse ($V_O > V$) I akımı transformatör reaktansı yolu ile STATCOM'dan AC sisteme akar ve aygıt iletim hattı için reaktif güç üretir. Konverter çıkış akımı iletim hattı geriliminden 90° ileridedir. Bu durumda aygıt kapasitif modda çalışmış olur. Şekil 2.18 (a)'da bu durum gösterilmektedir. Eğer STATCOM çıkış geriliminin büyüklüğü AC sistem geriliminin büyüklüğünden küçük olursa ($V_O < V$) akım transformatör reaktansı yolu ile AC sistemden STATCOM'a akar ve aygıt iletim hattından reaktif güç tüketir. Konverter akımı iletim hattı geriliminden 90° geridedir. Bu durumda aygıt indüktif modda çalışmış olur. Şekil 2.18 (b)'de bu durum gösterilmektedir. Eğer konverter çıkış gerilimi ile iletim hattı gerilimlerinin büyüklükleri eşit ise ($V_O = V$) AC sistem ile aygıt arasında herhangi bir reaktif güç alışverişi olmaz (Uzunović vd. ,1997).



Şekil 2.18 STATCOM Reaktif güç alışveriş durumları (a) Reaktif güç üretimi (Kapasitif mod)
(b) Reaktif güç tüketimi (İndüktif mod) .

Kapasitör, konverter için gerekli DC gerilimi sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Konverter çıkış gerilimi ile AC sistem gerilimi arasındaki faz farkına bağlı olarak kapasitör şarj veya deşarj olmaktadır. Sürekli durumda konverter çıkış gerilimi AC sistem geriliminden geri fazda tutularak sistemden çekilen aktif güç (küçük miktarda) transformatör ve konverter kayıplarını karşılamaktadır (Uzunović vd. ,1997) ve (Eminoğlu vd, 2002).

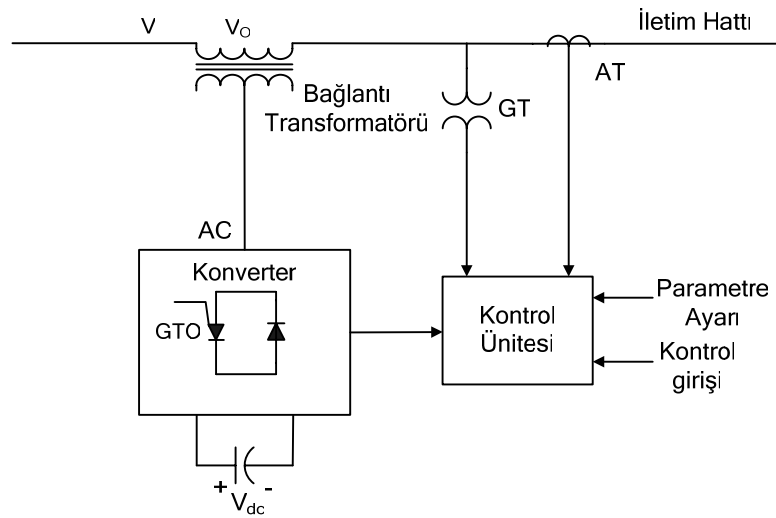
Aynı görevi yapan TCSVC'den çok üstün özellikleri vardır. Cevap süresi TCSVC'ye göre çok hızlıdır. Reaktif güç üretmek için kapasitör veya reaktör grupları kullanmadığı için rezonans noktası oluşturma potansiyeli yoktur. Aynı şekilde kapasitör veya reaktör grupları kullanmadığı ve yüksek kapasiteli yarı iletken güç aygıtlarının varlığından dolayı küçük bir kurulum alanı gerektirir. Eğer dc kapasitöre ek olarak uygun bir enerji depolama aygıtı ile bağlanırsa, STATCOM ile aktif güç kontrolüde mümkündür.



Şekil 2.19 (a) STATCOM V-I karakteristiği (b) TCSVC V-I karakteristiği.

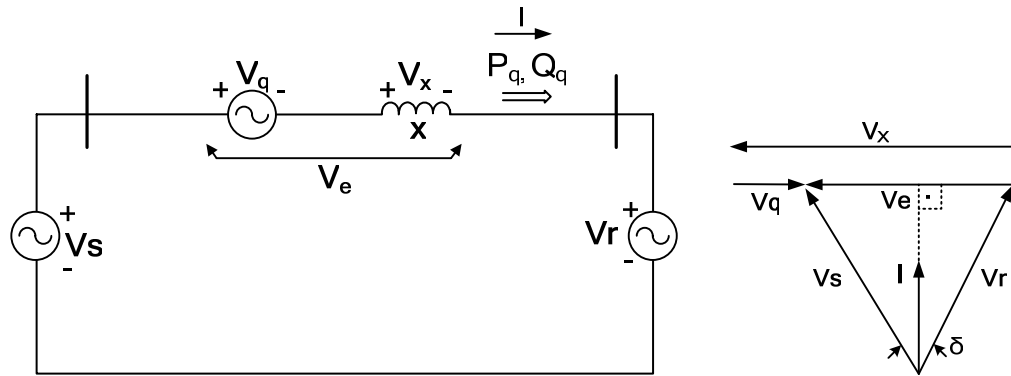
Şekil 2.19’da TCSVC ve STATCOM V-I karakteristikleri verilmiştir. Düşük gerilimlerde STATCOM ’un akım sağlama kapasitesi TCSVC ’den çok daha iyidir. STATCOM herhangi bir sistem gerilimi değerinde tam kapasitif veya tam indüktif çıkış akımı sağlayabilir. STATCOM tarafından sağlanan reaktif güç kompanzasyonu miktarı TCSVC tarafından sağlanan reaktif güç miktarından daha fazladır çünkü TCSVC’de düşük bir gerilim düzeyinde reaktif güç gerilimin karesi ile orantılı olarak azalırken STATCOM ’da gerilim ile doğrusal olarak azalır. Bu STATCOM’un reaktif güç denetlenebilirliğini TCSVC’den üstün kılmaktadır (Paserba vd., 2000).

2.6.3. Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC)



Şekil 2.20 SSSC Devre konfigürasyonu.

SSSC iletim hattına eklediği gerilimin etkisine göre seri kapasitör veya reaktör olarak görülebilir. Şekil 2.21’de SSSC eşdeğer devresi ve fazör diyagramı verilmiştir. Burada SSSC çıkış gerilimi hat akımına dik ve bu akıma göre 90^0 ileri veya geri fazda olan bir AC gerilim kaynağı ile temsil edilmiştir. Buradaki seri kompanzasyon seri kapasitör ile yapılan kompanzasyon ile kavramsal olarak aynıdır. Fakat kompanzasyon karakteristikleri biraz farklıdır. SSSC hat akımından bağımsız olarak iletim hattına gerilim enjekte eder. Konverter çıkış gerilimi tetikleme açısı değiştirilerek kontrol edilebilir. Eğer konverter çıkış gerilimi hat akımından 90^0 geri fazda ise aygıt hat reaktansını azaltmak için kapasitif reaktif güç sağlar. Eğer konverter çıkış gerilimi hat akımına göre 90^0 ileri fazda olursa SSSC hat reaktansını arttırmak için indüktif reaktif güç sağlar (Han vd., 2002) . Bu şekilde aygıtın bağlı olduğu bara gerilimi veya iletim hattının güç akışı kontrol edilir.



SSSC kapasitif modda çalıştırıldığında hat reaktansı üzerine düşen gerilim artmaktadır. Hat reaktansı ise azalmaktadır. Bu durumda iletim hattına eklenen seri gerilim kaynağı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$Vq = Vc = -jkXI \quad (2.1)$$

Burada X hat reaktansı I hat akımıdır, k ise seri kompanzasyon derecesini gösteren bir katsayıdır. Bu katsayı geleneksel seri kompanzasyonda $k=X_c/X$ olarak tanımlanır. $kX = X_c$ ifadesi gerçek eşdeğeri gibi aynı kompanzasyon gerilimini üreten sanal bir kapasitör olarak düşünülebilir. Ancak gerçek seri kapasitöre olan farkı SSSC'nin akım değişimlerine karşın sabit kompanzasyon gerilimi sağlamasıdır veya eklenen kompanzasyon geriliminin genliğinin hat akımı genliğinden bağımsız olmasıdır.

SSSC indüktif modda çalıştırıldığında hat reaktansı üzerine düşen gerilim azalmaktadır. Hat reaktansı ise artmaktadır. İndüktif modda çalışması aynı zamanda bazı hata durumlarının giderilmesinde de kullanılır. SSSC uygun kontroller ile SSR osilasyonları da sönümleyebilir. İki çalışma modunda dikkate alındığında sisteme eklenen gerilim,

$$V_q = \pm jV_q(\zeta) \frac{I}{i} \quad (2.2)$$

şeklinde yazılabilir burada $V_q(\zeta)$ eklenen kompanzasyon gerilimi ($0 \leq V_q(\zeta) \leq V_{qmax}$) ve ζ seçilen bir kontrol parametresi ve I hat akımıdır. i ise kompanzasyon durumundaki hat akımıdır.

Şekil 2.21'de verilen iki makineli sistem boyunca akan aktif ve reaktif güçler aşağıdaki gibi V_q 'nın bir fonksiyonu olarak yazılabilir.

$$P_q = \frac{V^2}{X} \sin \delta + \frac{V}{X} V_q \cos \left(\frac{\delta}{2} \right) \quad (2.3)$$

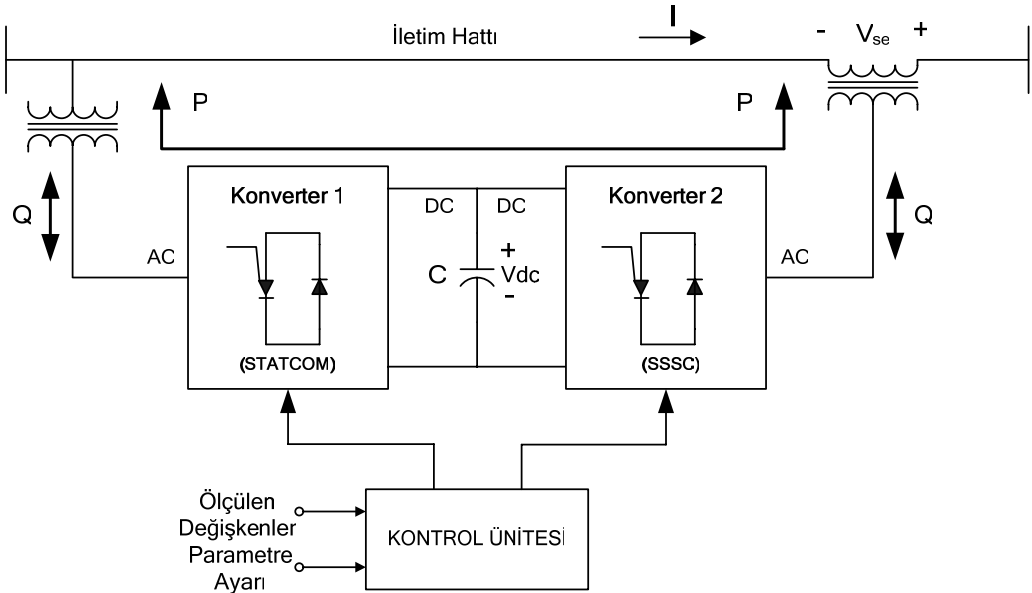
$$Q_q = \frac{V^2}{X} (1 - \cos \delta) + \frac{V}{X} V_q \sin \left(\frac{\delta}{2} \right) \quad (2.4)$$

Kapasitif çalışma durumlarında iletilen aktif güç artmaktadır. İndüktif çalışma durumlarında ise iletilen aktif güç aynı oranda azalmaktadır. Aynı görevi yapan TCSC'ye göre daha geniş bir kontrol aralığına sahip olduğu söylenebilir.

2.6.4. Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC)

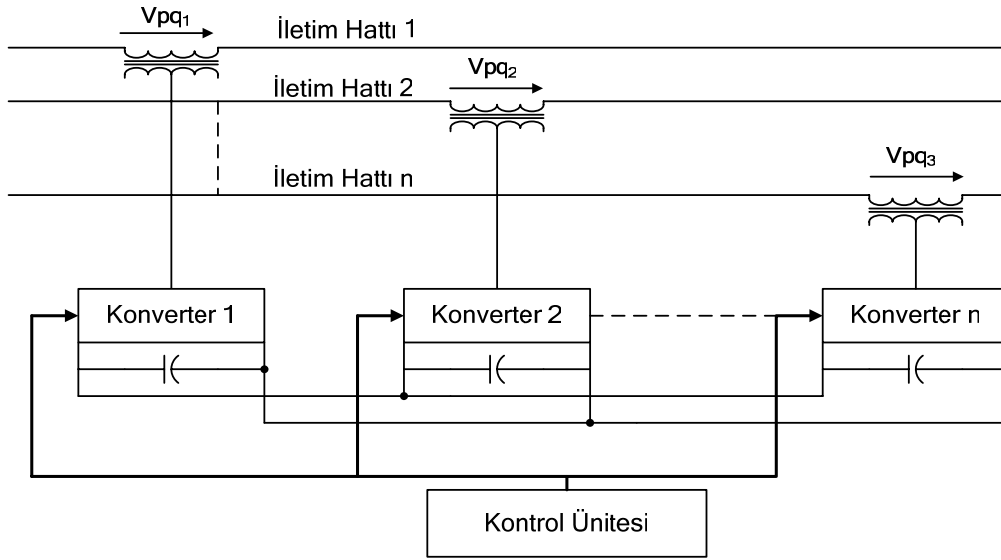
1991’de Laszlo Gyugyi tarafından önerilen UPFC, çok yönlü ve etkili bir FACTS aygıtıdır. UPFC AC iletim sistemlerinin gerçek-zamanlı kontrolü ve dinamik kompanzasyonu için önerilmiştir. Şekil 2.22 ‘den de görüldüğü gibi UPFC ortak bir dc kapasitörden çalışan bir STATCOM ve bir SSSC’nin kombinasyonudur. Burada STATCOM Konverter 1, SSSC ise Konverter 2 olarak adlandırılmıştır. Bu yapı aktif gücün iki konverterin AC terminalleri arasında serbestçe çift yönlü akışına izin veren ideal bir AC- AC güç konverteri olarak çalışır. Ayrıca her bir konverter kendi AC çıkış terminalinde bağımsız olarak reaktif güç üretebilir veya tüketebilir (Gyugyi vd.,1994).

UPFC birbirinden tamamiyle bağımsız olarak iletim hattı üzerindeki aktif ve reaktif güç akış denetimi, gerilim regülasyonu, seri ve şönt kompanzasyon, faz kaydırma gibi bir çok işleve sahiptir. UPFC’nin aşırı yüklenmiş hatlar, paralel hatlar arasındaki yük dağılımı (load-sharing), loop-flow (döngü akış) denetimi, sistemlerin dinamik ve geçici rejim koşullarında kararlılık denetimi gibi farklı problemlerin çözümünde de kullanılması amaçlanmıştır. UPFC’de bir denetim modundan diğerine mekanik olarak bir geçiş söz konusu değildir. Gelişmiş güç elektroniği tekniği sayesinde elektronik olarak kip değiştirebilmektedir. Bu avantaj güç sistemindeki değişen koşullara karşı oldukça esnek bir çalışma olanağı sunmaktadır (Vural ve Tümay,2002).



Şekil 2.22 UPFC 'nin şematik diyagramı

2.6.5. Hat arası Güç Akış Kontrolörü (IPFC)



Şekil 2.23 Temel IPFC şeması

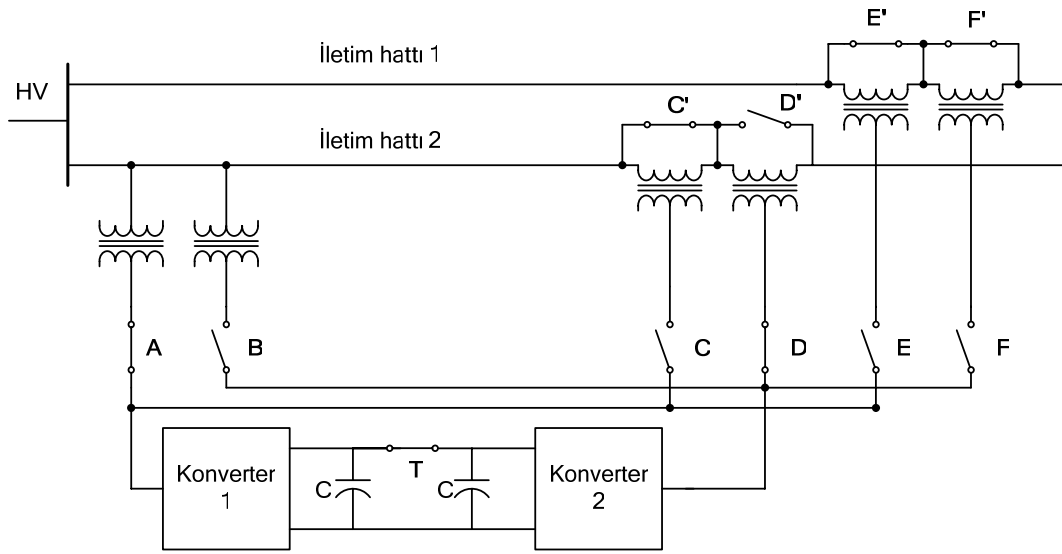
1998 yılında önerilen IPFC, belirli bir istasyonda birçok sayıda iletim hattının kompanzasyon problemini hedef alır. Şekil 2.23'te görüldüğü gibi IPFC farklı iletim hatlarına bağlanan, DC terminalleri birbirine bağlanmış iki veya daha fazla SSSC'den oluşmaktadır. DC kapasitörlerin birbirine bağlanması konverterler arasında aktif gücün çift yönlü dolaşımına olanak tanır. Yani IPFC her bir tek hattın bağımsız kontrol edilebilir seri kompanzasyonu ile birlikte, kompanze edilen hatlar arasında direkt olarak aktif güç transferi kapasitesi sağlar. Bu kapasite aşağıdaki ifadeleri mümkün kılar;

- Hatlar arasında hem aktif hem de reaktif güç akışını eşitler,
- Aktif güç transferi yoluyla aşırı yüklü hatların yükünü azaltır,
- Dinamik bozucu etkiler için tüm kompanzasyon sisteminin etkinliğini artırır,
- Rezistif gerilim düşümlerine karşın ve reaktif güç talebine ilişkin kompanzasyon sağlar.

Şekil 2.23'teki temel IPFC şemasında konverterlerin her biri farklı bir iletim hattı için seri kompanzasyon sağlamaktadır. Bu konverterler seri reaktif kompanzasyonun yanı sıra kendi iletim hattından ortak DC-link bağlantısına aktif güç sağlamak için kontrol edilmektedir. Ek olarak IPFC yapısı SSSC'lerin aktif güç talebi açığını karşılamak ve şönt reaktif kompanzasyon sağlamak için ortak DC-link'e bağlanmış bir STATCOM içerebilir.

2.6.6. Dönüştürülebilir Statik Kompanzatör (CSC)

FACTS aygıtları içerisinde CSC en son jenerasyon ve en kapsamlı FACTS aygıtıdır. CSC çok yönlü gerilim ve güç akış fonksiyonları sunmaktadır. Şekil 2.24'te görüldüğü gibi konfigürasyon olarak UPFC'ye benzemekle beraber yerine getirdiği işlevler açısından benzersizdir. STATCOM, SSSC, IPFC ve UPFC olmak üzere dört temel konfigürasyonda çalışabilmektedir. Uygun anahtarları kapatarak CSC toplam 11 farklı kompanzasyon modunda çalışabilmektedir. Kullanılan konfigürasyona bağlı olarak bara üzerindeki gerilimi ve bara çıkışındaki bir veya iki iletim hattındaki güç akışını eşzamanlı olarak düzenleyebilme yeteneğine sahiptir (Lockwood ve diğ, 2004).



Şekil 2.24 CSC ve temel çalışma konfigürasyonları

AD veya AF devrede iken UPFC modu

DE veya CF devrede iken IPFC modu

AD veya AF (T açık iken) devrede iken ayrı olarak STATCOM ve SSSC modu

AB devrede iken STATCOM modu (yedek transformatör kullanımı)

CD veya EF devrede iken SSSC modu (yedek transformatör kullanımı)

2.7. FACTS Aygıtlarının Kullanım Alanları

Geleneksel tristör tabanlı ve konverter tabanlı FACTS aygıtlarının farklı kontrol karakteristikleri ve uygulama limitleri vardır. Her bir FACTS kontrolörü bir veya daha fazla temel sistem sınırlama koşullarını dengelemek için dizayn edilir.

Aynı problemi birden fazla FACTS kontrolörü çözebilmesine rağmen bazı kontrolörler belirli uygulamalar için diğerlerinden çok daha uygundur. Bu nedenle mevcut duruma en uygun aygıt seçilmelidir. Bu bölüme kadar incelenen FACTS aygıtları ve bunların kullanım alanları Tablo 2.2 'de verilmiştir.

Tablo 2.2 FACTS aygıtları ve kullanım alanları

FACTS Aygıtı	Kullanım Alanı
TCSVC	Gerilim Kontrolü, Reaktif Kompanzasyon, Geçici ve dinamik kararlılığın iyileştirilmesi
TSSC, TSSR	Genel güç akış kontrolü, Seri empedans kontrolü, Güç osilasyonlarının sönümlenmesi, Geçici ve dinamik kararlılığın iyileştirilmesi
TCSC, TCSR	Tam güç akış kontrolü, Seri empedans kontrolü, Güç osilasyonlarının sönümlenmesi, Geçici ve dinamik kararlılığın iyileştirilmesi
TCDB (TCBR)	Güç osilasyonlarının sönümlenmesi, Geçici kararlılığın iyileştirilmesi
NGH-SSR	SSR sönümlenme, Seri empedans kontrolü, Geçici kararlılığın iyileştirilmesi
TCPAR (TCPST)	Güç akış kontrolü, Faz açısı kontrolü, Güç osilasyonlarının sönümlenmesi, Geçici ve dinamik kararlılığın iyileştirilmesi
TCVL	Geçici ve dinamik gerilim sınırlaması
TCVR	Reaktif güç kontrolü. , gerilim kontrolü, Güç osilasyonlarının sönümlenmesi, geçici ve dinamik kararlılığın artırılması
STATCOM	Gerçek zamanlı gerilim kontrolü, Hızlı reaktif kompanzasyon, gerilim kararlılığı, Güç osilasyonlarının sönümlenmesi
SSSC	Gerçek zamanlı tam güç akış kontrolü, Seri empedans kontrolü, Güç osilasyonlarının sönümlenmesi, Hata akımı sınırlama, Geçici kararlılığın iyileştirilmesi
UPFC	Gerçek zamanlı tam güç akış kontrolü, gerçek zamanlı tam gerilim kontrolü, tam hat empedansı kontrolü, Güç osilasyonlarının sönümlenmesi, Hata akımı sınırlama, Geçici ve dinamik kararlılığın iyileştirilmesi, Harmonik izolasyonu, güç kalitesi kontrolü
IPFC	Hatlar arası aktif güç transferi ve aktif güç dengelenmesi, Reaktif güç kontrolü, Gerilim kontrolü, Geçici ve dinamik kararlılığın iyileştirilmesi
CSC	STATCOM, SSSC, IPFC ve UPFC modunda çalışabilme ve toplam 11 farklı kompanzasyon modunda çalışabilme. Gerçek zamanlı tam güç akış kontrolü, Hatlar arası aktif güç transferi ve aktif güç dengelenmesi, Gerçek zamanlı tam gerilim kontrolü, tam hat empedansı kontrolü, Güç osilasyonlarının sönümlenmesi, Hata akımı sınırlama, Geçici ve dinamik kararlılığın iyileştirilmesi, Harmonik izolasyonu

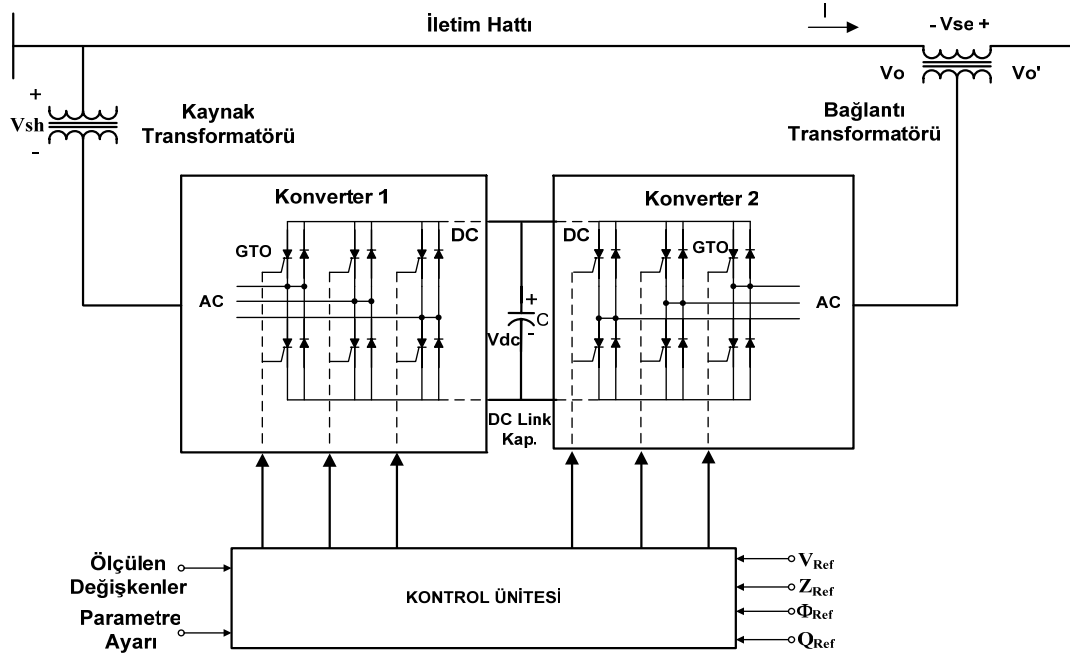
3. BİRLEŞİK GÜÇ AKIŞ KONTROLÖRÜ (UPFC)

3.1. Giriş

Bu bölümde 2.6.4.'te genel olarak anlatılan Birleşik Güç Akış Kontrolörü (UPFC) detaylı bir şekilde incelenmiştir.

3.2. UPFC Temel Donanım Yapısı

Şekil 3.1'den de görüldüğü gibi UPFC'nin temel uygulaması için ortak bir kondansatörün meydana getirdiği bir DC linkten çalışan iki VSC kullanılmaktadır. Gerilim Kaynaklı Konverterler birçok sayıda GTO tristör valflerinden oluşmaktadır (Gyugyi, 1991). Aşağıdaki şekilde olduğu gibi üç fazlı bir konverter için en basit konfigürasyon 6 tristör valfinden oluşmaktadır. UPFC'de kullanılan konverterlerin ana fonksiyonu DC bir giriş gerilimini seçilen bir referans fazına göre istenen büyüklükte, frekansta ve faz kaymasında simetrik bir AC çıkış gerilimine dönüştürmektir. DC link kapasitörü Konverter 1 ve Konverter 2 arasında aktif güç değişimi için bir yol sağlamak amacıyla dizayn edilmiştir. Kapasitör aynı zamanda dahili olarak üretilen veya tüketilen reaktif gücün kontrolü için her iki konvertere gerekli olan düzgün bir DC gerilim sağlar. Teorik olarak eğer DC gerilim sabit tutulursa sürekli durumda DC kapasitörün içine veya dışına herhangi bir akım akışı olmaz. Bu yüzden bu özel uygulamada sadece küçük kapasiteli bir kapasitöre ihtiyaç vardır.

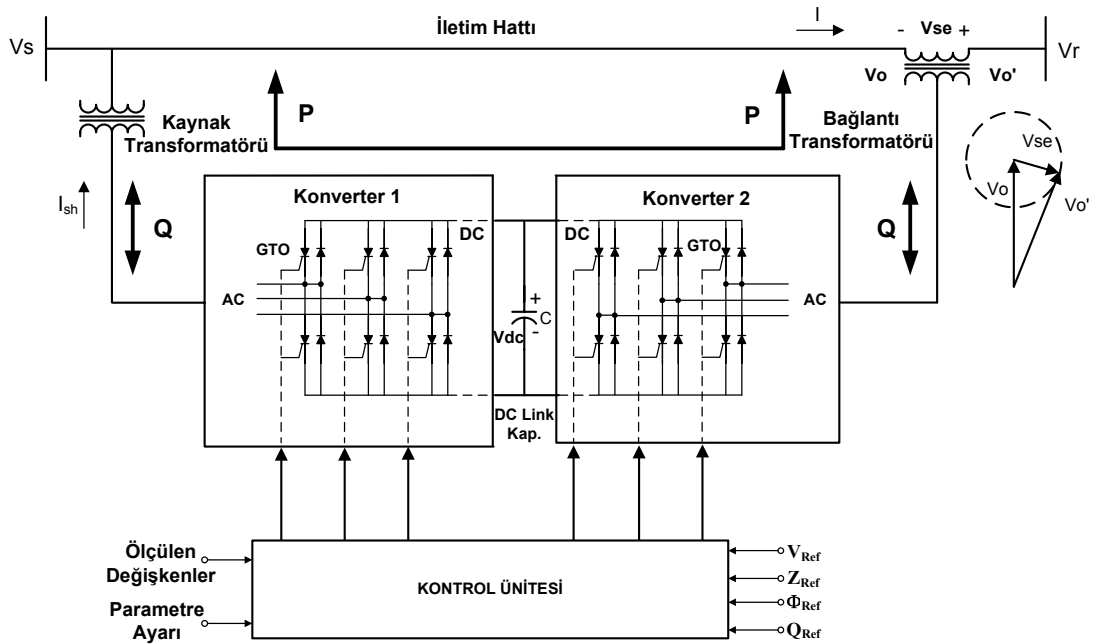


Şekil 3.1 Birleşik Güç Akış Kontrolörünün temel uygulaması.

UPFC sistemi iki bağlantı transformatörü kullanmaktadır. Bu transformatörler UPFC ile iletim hattını izole etmek ve konverterler tarafından üretilen gerilim ile güç sistemi arasındaki gerilim seviyelerini karşılaştırmak için kullanılmaktadır. Şekil 3.1 'deki UPFC yapısı kavramsal bir devredir. Gerçek uygulamalarda çoklu konverter yapıları ve karmaşık transformatör yapıları kullanılmaktadır.

3.3. UPFC Temel Çalışma İlkesi ve Karakteristikleri

UPFC, GTO tristör valfleri kullanan ve gerilim kaynaklı konverter (VSC) olarak dikkate alınan 2 anahtarlamalı konverterden oluşmaktadır. Bu konverterler şekil 3.2'de görüldüğü gibi "Konverter 1" ve "Konverter 2" olarak adlandırılmıştır. Konverterler, bir DC depolama kapasitörü tarafından sağlanan ortak bir DC-linkten çalışmaktadır. Bu düzenleme aktif gücün iki konverterin AC terminalleri arasında serbestçe akabildiği ve her bir konverterin kendi AC çıkış terminalinde bağımsız olarak reaktif güç üretebildiği veya tüketebildiği ideal bir AC-AC güç konverteri olarak çalışır (Gyugyi vd.,1994).



Şekil 3.2 UPFC temel devre şeması ve özellikleri.

Konverter 2, seri bağlantı transformatörü ile AC sistem terminal gerilimi $V_o(t)$ 'ye eklenen $V_{se}(t)$ gerilimini üretmek için kullanılır. Burada V_{se} gerilimi ana frekansta (ω) ,değişken büyüklükte ($0 \leq V_{se} \leq V_{semax}$) ve faz açısında ($0 \leq \rho \leq 2\pi$) üretilerek seri bağlantı transformatörü yardımıyla iletim hattına enjekte edilmektedir. Enjekte edilen seri gerilim hat akımından bağımsızdır. Konverter 2, hatta seri V_{se} gerilimini enjekte ederek UPFC 'nin temel fonksiyonunu yerine getirmektedir.

Bu şartlarda hatta seri olarak enjekte edilen konverter 2 çıkış gerilimi V_{se} , direkt gerilim kontrolü, seri kompanzasyon ve faz kaydırma için kullanılabilir. İletim hattına seri olarak enjekte edilen konverter 2 çıkış gerilimi esasen bir AC gerilim kaynağı olarak rol oynar. Enjekte edilen gerilim kaynağından akan akım iletim hattı akımıdır ve iletilen elektrik gücü ve iletim hattı empedansının bir fonksiyonudur.

Denklem 3.1'den anlaşılacağı üzere enjekte edilen gerilim kaynağının görünür gücü, maksimum enjekte edilen gerilim ve maksimum hat akımının çarpımı ile belirlenir. Toplam görünür güç iki bileşenden oluşur; birincisi maksimum hat akımı ve bu akım ile aynı fazlı olan maksimum enjekte edilen gerilimin bileşeni tarafından belirlenen maksimum aktif güç, diğeri ise maksimum hat akımı ve bu akım ile dik fazlı olan maksimum enjekte edilen gerilimin bileşeni tarafından belirlenen maksimum reaktif güçtür. Daha öncede ifade edildiği gibi gerilim kaynaklı konverter, uygulanan gerilim/empedans/faz açısı kontrolü tarafından talep edilen bütün reaktif gücü dahili olarak kendi AC terminalinde üretebilir veya tüketebilir ve sadece aktif güç talebini kendi DC giriş terminalinden sağlar.

$$S = V_{se} \cdot I^* = P_{se} + jQ_{se} \quad (3.1)$$

AC güç sistemine şönt bir bağlantı transformatörü yoluyla bağlanan Konverter 1, öncelikli olarak konverter 2'nin ortak DC-link terminalinde AC güç sisteminden aktif güç talebini karşılamak için kullanılır. Bu nedenle Konverter 1'in bağlı olduğu transformatör, kaynak transformatörü olarak adlandırılmıştır. Konverter 1, DC terminaline veya terminalinden transfer ettiği aktif güçten bağımsız olarak kendi AC terminalinde reaktif gücü üretebilir veya tüketebilir. Aynı zamanda iletim hattı için reaktif güç kompanzasyonu sağlayarak bağımsız bir gelişmiş statik var kompanzatorü (ASVC) işlevini yerine getirebilir. Böylece UPFC'nin giriş terminalinde indirek bir gerilim regülasyonu yürütülebilir. Konverter 1'in çıkış gerilimi DC gerilimi düzenlemek ve konverterin içsel kayıplarını karşılamak için sistem geriliminden küçük bir açılı ile geri fazda tutulur.

UPFC 'de ortak DC kapasitör yoluyla bağlanan 2 konverterin güç devre konfigürasyonu benzer olmasına karşın çalışma gereksinimleri farklıdır. Daha öncede ifade edildiği gibi Konverter 1, konverter 2'nin talebini karşılamak için DC-link kapasitörüne aktif güç sağlar ve iletim hattı için şönt reaktif kompanzasyon sağlar. DC-link kapasitörünün içine veya dışına aktif güç akışı AC güç sistemi ve konverter arasındaki aktif güç alışverişi yoluyla kontrol edilir. Bu aktif güç alışverişi AC sistem ve konverter gerilimleri arasındaki faz açısı tarafından yönetilir.

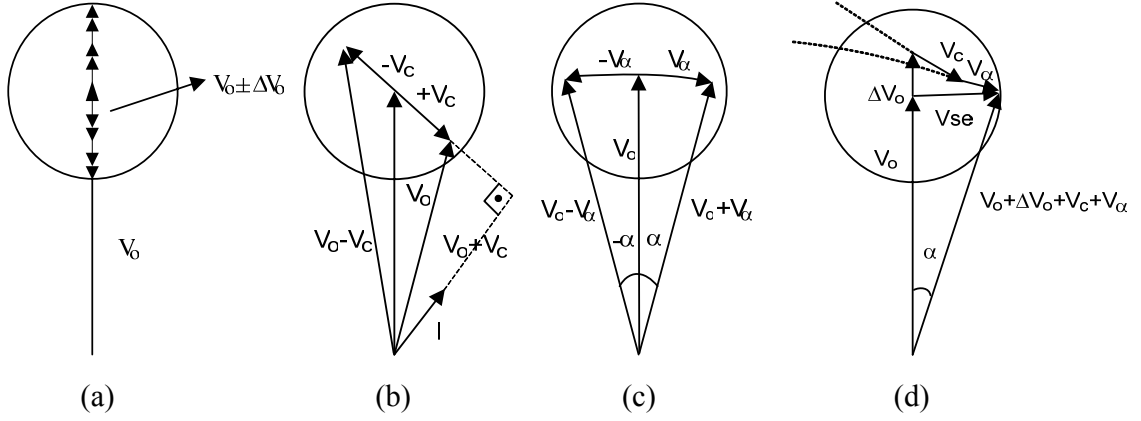
Hat kompanzasyonunu şekillendiren reaktif güç alışverişi AC sistem ve konverter gerilimleri arasındaki genlik farkı tarafından belirlenir. Eğer bu fark sıfır ise reaktif güç alışverişi de sıfırdır (konverter gerilimi sistem gerilimine göre aynı genliktedir.) . Eğer bu fark pozitif ise konverter AC sistem için reaktif güç üretir. Eğer negatif ise konverter AC sistemden reaktif güç tüketir. İki konverterin AC terminalleri boyunca yalnızca aktif gücün transferi yapılmaktadır. Dolayısıyla UPFC'nin AC terminalleri boyunca yani; Konverter 1'den Konverter 2'ye doğru herhangi bir reaktif güç akışı söz konusu değildir.

Konverter 2, güç akış kontrolü için istenen AC gerilimi hatta seri bir şekilde enjekte eder. Genel olarak enjekte edilen gerilimin faz açısı güç akış kontrol modunu (iletim hattı gerilimi, empedansı veya açısı) belirler. Böylece konverter 2 tarafından üretilen çıkış geriliminin genliği sıfırdan UPFC kapasitesi tarafından belirlenen bir maksimuma kadar kontrol edilmektedir. Gerilim enjeksiyonunun sonuçları olarak aktif ve reaktif güçler konverter 2'nin AC çıkış terminalinde değiş tokuş edilir ve direkt olarak kontrol edilebilir değildir. Aktif ve reaktif güç arasındaki oran kesinlikle enjekte edilen gerilim ve hat akımı arasındaki bağıl faz açısı tarafından belirlenir (Gyugyi,1991).

UPFC'nin dahili kontrolü, istenen reaktif şönt kompanzasyon, seri kompanzasyon, iletim açısı ve terminal gerilimi için seçilen öncelik sırasına göre dıştan türetilmiş referans sinyallerini kabul etmek için düzenlenmiştir. Bu referans sinyalleri güç akış kontrolörünün giriş (şönt bağlı) ve çıkış (seri bağlı) terminallerinde konverterleri AC gerilimler üretmeye zorlamak için kapalı kontrol çevrimlerinde kullanılır ve böylece istenen iletim parametrelerini (Q_{ref} (girişte), V_{ref} , Z_{ref} , θ_{ref} (çıkışta)) saptar. Aynı zamanda kontrol gerekli DC-link gerilimini sürdürür ve iki konverter arasında düzgün aktif güç transferini sağlar (Gyugyi, 1993).

3.3.1. UPFC Kontrol Fonksiyonları

UPFC, reaktif şönt kompanzasyon, seri kompanzasyon ve faz kaydırma işlemlerinin hepsini yerine getirir. Bu fonksiyonları ayrı ayrı yerine getirdiği gibi kombine bir şekilde de yerine getirir. UPFC uygun genlikte ve faz açısında iletim hattına seri enjekte edilen V_{se} gerilimini V_o terminal gerilimine ekleyerek çoklu kontrol hedeflerini karşılar. İletim hattına seri enjekte edilen V_{se} gerilimi ile elde edilen UPFC kontrol fonksiyonları fazör tanıtımıyla şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3 UPFC kontrol fonksiyonları. a) Gerilim regülasyonu. b) Seri kompanzasyon .
c) Faz açısı regülasyonu. d) Çok fonksiyonlu güç akış kontrolü.

Gerilim Regülasyonu: Şekil 3.3 (a)'da gösterilen bu durum benzer olarak son derece küçük adımlara sahip olan bir transformatör kademe değiştiricisi ile elde edilebilir. $V_{se} = \pm \Delta V_0$ gerilimi V_0 gerilimini artıracak veya azaltacak yönde enjekte edilir.

Seri Kompanzasyon: Şekil 3.3 (b)'de gösterilen seri kompanzasyon $V_{se} = \pm V_c$ geriliminin iletim hattına hat akımı I ile dik fazlı olarak enjekte edilir.

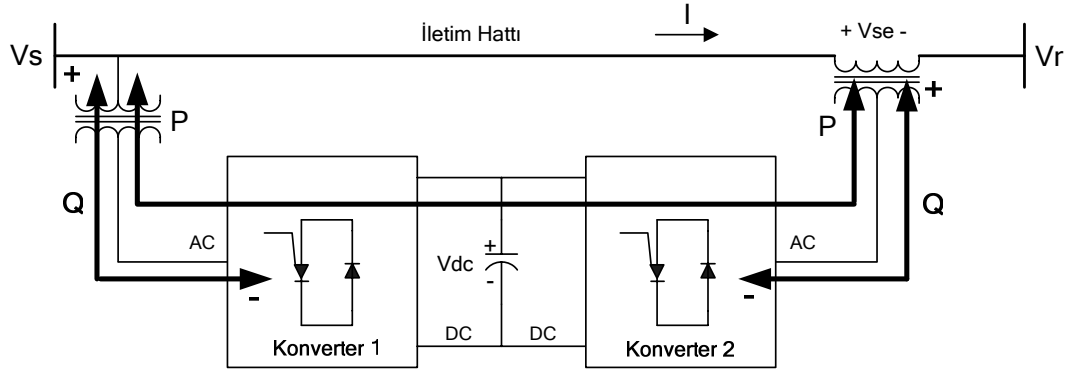
İletim Açısı Regülasyonu (Faz kaydırma): Şekil 3.3 (c)'de $V_{se} = \pm V_\alpha$ gerilimi V_0 'a göre açısal bir ilişki ile enjekte edilir. Büyüklükte herhangi bir değişme olmadan istenen α faz kayması elde edilebilir.

Çok Fonksiyonlu Güç Akış Kontrolü: Şekil 3.3 (d)'de $V_{se} = V_\alpha + V_c + \Delta V_0$ gerilimi enjekte edilerek; eşzamanlı olarak terminal gerilim regülasyonu, seri kapasitif hat kompanzasyonu ve faz kaydırma işlemleri yerine getirilir.

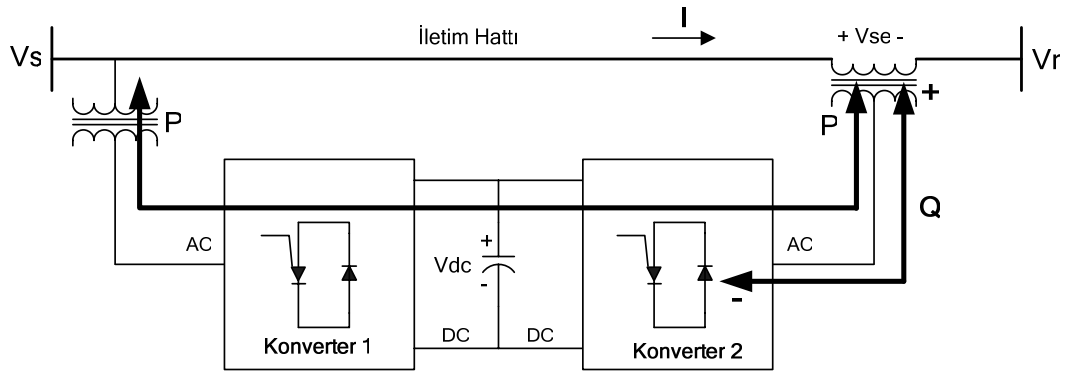
Bu kavramlar genellenmiş bir güç akış kontrolöründe birleştirilebilir. Bu konseptte geleneksel terimler (seri kompanzasyon, faz kaydırma vb.) konu dışı kalmaktadır. UPFC basit olarak sistem çalışma koşullarını ve yük talebini sağlamak, hattaki aktif ve reaktif güç akışını değiştirmek veya sürdürmek için enjekte edilen gerilimin büyüklüğünü ve açısal pozisyonunu kontrol eder (Gyugyi ve diğ.,1994).

3.4. UPFC Güç Akış Kontrol Durumları

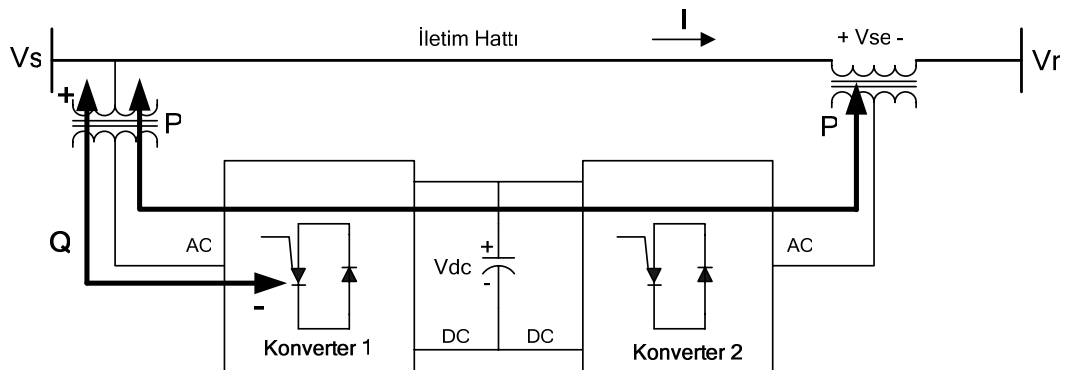
UPFC'nin güç akış kontrol durumları aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



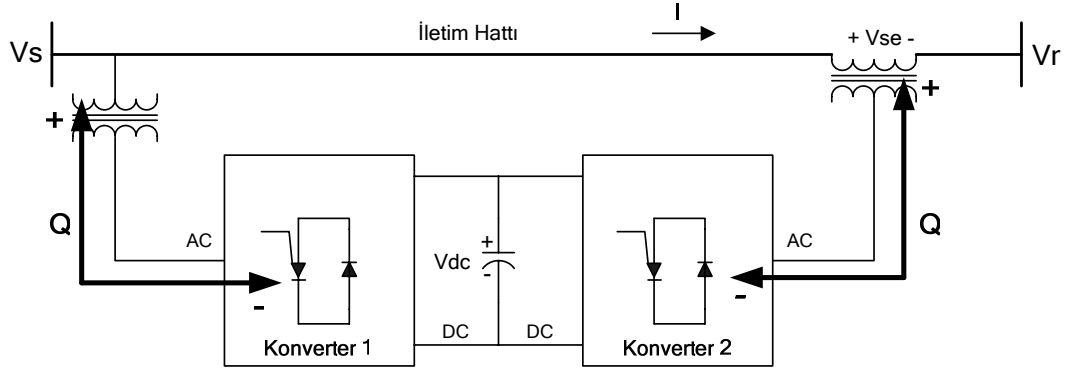
Şekil 3.4 Konverter 2'nin bağımsız aktif güç kontrolü ve Konverter 1 ve Konverter 2'nin bağımsız reaktif güç kontrolü.



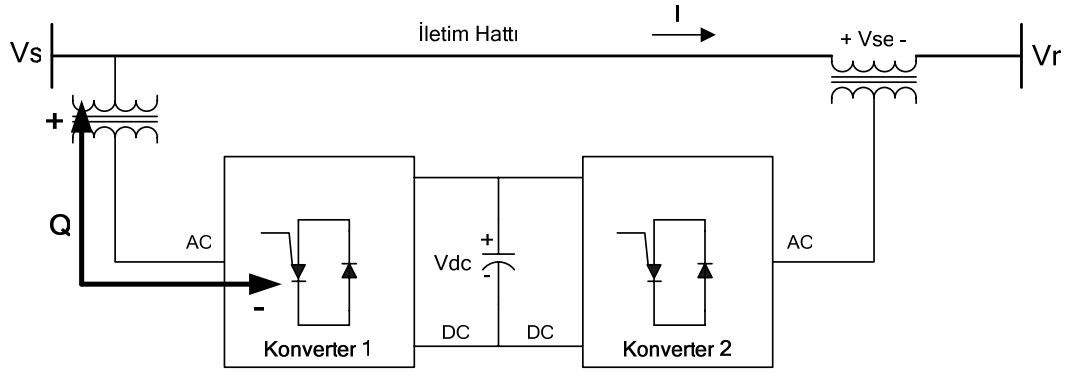
Şekil 3.5 Konverter 1'in bağımlı aktif güç kontrolü (Konverter 2'nin talebine bağlı) ve Konverter 2'nin bağımsız reaktif güç kontrolü.



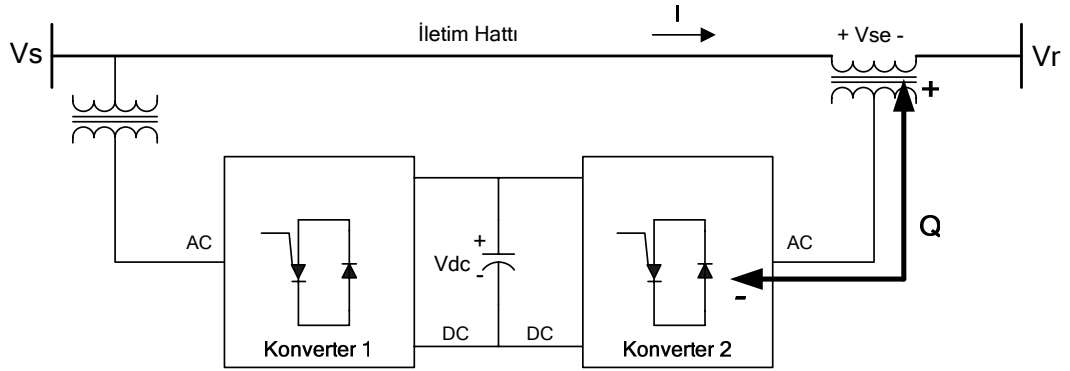
Şekil 3.6 Konverter 1'in bağımsız reaktif güç kontrolü ve Konverter 2'nin bağımsız aktif güç kontrolü.



Şekil 3.7 Konverter 1'in ve Konverter 2'nin bağımsız reaktif güç kontrolü.



Şekil 3.8 Konverter 1'in bağımsız reaktif güç kontrolü.



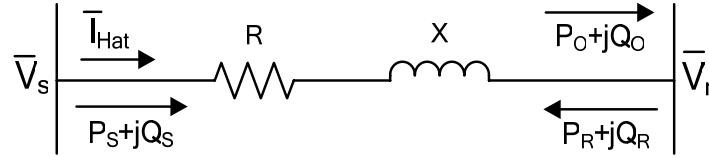
Şekil 3.9 Konverter 2'nin bağımsız reaktif güç kontrolü.

Daha önce ifade edildiği gibi UPFC 'de konverterler boyunca bir reaktif güç akışı olmamaktadır. Bu verilen şekillerde de gösterilmiştir. Reaktif güç sadece konverterlerin AC terminallerinde, konverter anahtarlamalarıyla dahili olarak üretilir veya tüketilir. Bir başka deyişle konverterler üç AC terminali reaktif çıkış akımlarının serbestçe akabileceği bir şekilde birbirine bağlar. AC terminaller açısından bu olayı ifade etmek gerekirse, konverterler fazlar arasında devrolan bir reaktif güç değişimi kurar (Hingorani vd., 1990) ve (Gyugyi.1993).

3.5. Aktif ve Reaktif Güç Kontrolünün Temel Prensipleri

3.5.1. Bir İletim Hattında Güç Akışı

Bu bölümde şekil 3.10 'da verilen iletim hattının bağlı olduğu V_s ve V_r baraları arasındaki güç akışı incelenmiştir. Şekil 3.10'da görülen sistemde $\bar{V}_s = V_s \angle \delta_s$ ve $\bar{V}_r = V_r \angle \delta_r$ sırasıyla verici ve alıcı uç bara gerilimlerinin etkin değer fazörleri, $\bar{I}_{\text{Hat}}$ iletim hattı akımının fazörü ve R ve X ise sırasıyla iletim hattının rezistansı ve reaktansıdır.



Şekil 3.10 Temel iki makineli bir sistem

Verici uç barasına aktarılan kompleks güç;

$$S_s = P_s + jQ_s = \bar{V}_s \cdot \bar{I}_{\text{hat}}^* \quad (3.2)$$

Burada P_s ve Q_s verici uç barasına aktarılan aktif ve reaktif güçlerdir. Ohm kanunu kullanılarak hat akımı aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\bar{I}_{\text{hat}} = \frac{\bar{V}_s - \bar{V}_r}{R + jX} = (\bar{V}_s - \bar{V}_r)(G + jB) \quad (3.3)$$

G, burada hat kondüktansı ve değeri $G = \frac{R}{R^2 + X^2}$. B ise hattın süseptansıdır ve değeri

$B = -\frac{X}{R^2 + X^2}$. Denklem (3.2) 'nin kompleks eşleniği alınır ve denklem (3.3) denklem (3.2)'de yerine yazılırsa aşağıdaki ifade elde edilir.

$$S_s^* = P_s - jQ_s = V_s^* I_{\text{hat}} = V_s^* (\bar{V}_s - \bar{V}_r)(G + jB) = (V_s^2 - \bar{V}_s^* \bar{V}_r)(G + jB) \quad (3.4)$$

Euler özdeşliği kullanılarak $(V \angle -\delta = V(\cos \delta - j \sin \delta))$ $\bar{V}_s^* \cdot \bar{V}_r$ terimi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\bar{V}_s^* \bar{V}_r = V_s \angle -\delta_s V_r \angle \delta_r = V_s V_r \angle -(\delta_s - \delta_r) = V_s V_r (\cos(\delta_s - \delta_r) - j \sin(\delta_s - \delta_r)) \quad (3.5)$$

Denklem (3.5) denklem (3.4) 'deki yerine yazılır ve denklem (3.4)'deki gerçekte ve imajiner kısımlar ayrıştırılırsa verici uç barasına aktarılan aktif ve reaktif güçler elde edilir.

$$\begin{aligned} P_S &= V_S^2 \cdot G - V_S \cdot V_r \cdot G \cdot \cos(\delta_S - \delta_r) - V_S \cdot V_r \cdot B \cdot \sin(\delta_S - \delta_r) \\ Q_S &= -V_S^2 \cdot B - V_S \cdot V_r \cdot G \cdot \sin(\delta_S - \delta_r) + V_S \cdot V_r \cdot B \cdot \cos(\delta_S - \delta_r) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Benzer şekilde alıcı uç barasında alınan aktif ve reaktif güçlerde yazılabilir.

$$\begin{aligned} P_O &= -P_r = -V_r^2 \cdot G + V_S \cdot V_r \cdot G \cdot \cos(\delta_S - \delta_r) - V_S \cdot V_r \cdot B \cdot \sin(\delta_S - \delta_r) \\ Q_O &= -Q_r = V_r^2 \cdot B - V_S \cdot V_r \cdot G \cdot \sin(\delta_S - \delta_r) - V_S \cdot V_r \cdot B \cdot \cos(\delta_S - \delta_r) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Denklem (3.7)'de P_r ve Q_r alıcı uç barasına aktarılan (alıcı uç barasını terk eden ve verici uç barasına doğru akan) aktif ve reaktif güçlerdir. Hattaki güç kayıpları ise aşağıdaki denklemlerle verilebilir.

$$\begin{aligned} P_k &= P_S - (-P_r) = (V_S^2 + V_r^2) \cdot G - 2V_S \cdot V_r \cdot G \cdot \cos(\delta_S - \delta_r) \\ Q_k &= Q_S - (-Q_r) = -(V_S^2 + V_r^2) \cdot B + 2V_S \cdot V_r \cdot B \cdot \cos(\delta_S - \delta_r) \end{aligned} \quad (3.8)$$

İletim hatlarında genel olarak $X \gg R$ 'dir. Bu nedenle G kondüktansı genellikle ihmal edilir. B süseptansı ise $B = -\frac{1}{X}$ şeklinde alınabilir. Bu yaklaşımlar ışığında hat üzerinde verici uç barasından alıcı uç barasına iletilen gücün ifadesi aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$P_S = -P_r = -V_S \cdot V_r \cdot B \cdot \sin(\delta_S - \delta_r) = \frac{V_S \cdot V_r}{X} \cdot \sin(\delta_S - \delta_r) = \frac{V_S \cdot V_r}{X} \cdot \sin(\delta) = P_O(\delta) \quad (3.9)$$

$\delta = \delta_S - \delta_r$ açısı güç açısı olarak ifade edilir.

İletim hattına verici uç barası tarafından aktarılan ve hat tarafından alıcı uç barasında alınan reaktif güçler denklem (3.10)'da verilmiştir.

$$\begin{aligned} Q_S &= -V_S^2 \cdot B + V_S \cdot V_r B \cos(\delta_S - \delta_r) = \frac{V_S^2 - V_S \cdot V_r \cos(\delta)}{X} \\ -Q_r &= V_r^2 \cdot B - V_S \cdot V_r B \cos(\delta_S - \delta_r) = \frac{-V_r^2 + V_S \cdot V_r \cos(\delta)}{X} = Q_O(\delta) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Denklem (3.9)'dan da görüleceği üzere iletim hattında iletilen aktif gücün miktarını;

- Her iki uç gerilim büyüklüklerinin arttırılması veya azaltılması (gerilim regülasyonu)
- Hat reaktansının arttırılması veya azaltılması (hat kompanzasyonu)
- Güç açısının değişimi (faz kayması)

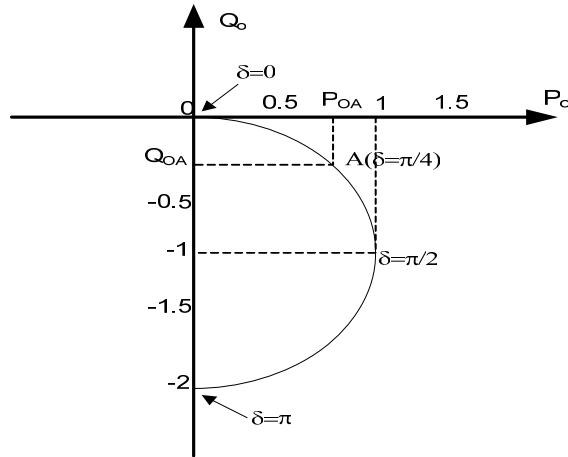
etkilemektedir.

Dolayısıyla aktif ve reaktif güç akışına V_s , V_r , X ve δ parametreleri etki etmektedir. Denklem (3.9) ve (3.10) aşağıdaki şekilde birleştirilirse bu ilişki daha iyi anlaşılabilir.

$$(P_o(\delta))^2 + \left(Q_o(\delta) + \frac{V_r^2}{X} \right)^2 = \left(\frac{V_s \cdot V_r}{X} \right)^2 \quad (3.11)$$

Bu denklem $(0, -\frac{V_r^2}{X})$ merkezli ve $\frac{V_s \cdot V_r}{X}$ yarıçaplı bir çember tanımlar. Aynı zamanda alıcı uçta alınan aktif ve reaktif güçler ile V_s , V_r , X ve δ parametrelerini ilişkilendirir.

Burada güç açısının P_o ve Q_o 'a nasıl bir etki yaptığını görmek için şekil 3.11 kullanılmıştır. Bu şekilde $V_s = V_r = V$ ve $\frac{V^2}{X} = 1$ olduğu varsayılmıştır. Bu şekilden herhangi bir δ açısı için P_o ve Q_o değerleri bulunabilir.



Şekil 3.11 Kompanzasyonsuz bir sistem için P-Q yörüngesi

Örneğin $\delta=\pi/4$ için (çemberdeki A noktası) $P_{OA} = 0.707$ ve $Q_{OA} = -0.293$ olur.

Benzer şekilde verici uç barasından iletim hattına gönderilen aktif ve reaktif güçler arasındaki ilişki elde edilebilir.

$$(P_s(\delta))^2 + \left(Q_s(\delta) - \frac{V_s^2}{X} \right)^2 = \left(\frac{V_s \cdot V_r}{X} \right)^2 \quad (3.12)$$

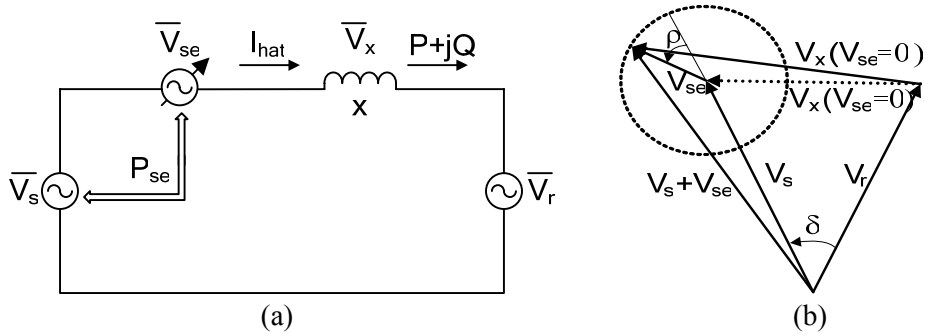
Ortalama reaktif güç denklem (3.13)'de tanımlanmıştır.

$$Q_{sr} = \frac{Q_s - Q_r}{2} = -\frac{V_s^2 - V_r^2}{2} \cdot B = \frac{V_s^2 - V_r^2}{2X} \quad (3.13)$$

Denklem (3.13)'ten hem iki gerilim büyüklüklerinin hem de hat reaktansının reaktif güç akışına etki ettiği görülmektedir. Eğer iki gerilim büyüklüğü de aynı ise her bir bara hat tarafından tüketilen reaktif gücün yarısını gönderecektir. Eğer $V_s > V_r$ ise güç akışı verici uçtan alıcı uç barasına doğrudur (Hasanoviç vd, 2002).

3.5.2. UPFC ile Aktif ve Reaktif Güç Kontrolü

Şekil 3.10'daki sistem şekil 3.12 (a)'da yeniden çizilmiştir. Bu sistemde X iletim hattı empedansı olarak verilmiş ve hat rezistansı ihmal edilmiştir. Ayrıca bu sistemde şekil 3.10'daki temel güç sistemi UPFC'yi temsil eden V_{se} seri gerilim kaynağı eklenerek genişletilmiştir. V_{se} gerilim kaynağı önceki kısımlarda ifade edildiği gibi iletim hattı için duruma göre reaktif güç üretebilir veya iletim hattından reaktif güç tüketebilir. Fakat aktif güç verici uç generatörü tarafından ona sağlanmalı veya ondan tüketilmelidir. UPFC tarafından hatta seri enjekte edilen gerilim V_{se} fazörü ile temsil edilmektedir. Burada $\overline{V_{se}}$ fazörü, V_{se} ($0 \leq V_{se} \leq 0.5$ p.u.) büyüklüğüne ve ρ ($0 \leq \rho \leq 360^\circ$) faz açısına sahiptir. I_{hat} fazörü ile temsil edilen hat akımı seri gerilim kaynağı V_{se} boyunca akar ve genel olarak hem reaktif hem de aktif güç alışverişine sebep olur.



Şekil 3.12 a) V_{se} ile temsil edilen UPFC ve iki makineli sistem b) V_{se} fazörü

UPFC 'nin doğru bir şekilde temsil edilmesi için seri gerilim kaynağı V_{se} 'nin sadece Q_{se} reaktif gücünü üretmesi şart koşulmuştur. Böylece P_{se} aktif gücünü verici uç generatörüne transfer edeceği varsayılmıştır. Bu verici uç generatörü ve V_{se} arasında aktif güç akışı için mükemmel bir bağlantıdır. Bu devre yapısı UPFC 'deki iki konverter arasında DC-link 'in aktif güç akışı için verici uç barası ve enjekte edilen seri gerilim kaynağı arasında çift yönlü bir bağlantı meydana getirdiği devre yapısı ile uyum içindedir. Burada UPFC'nin şönt kompanzasyon kapasitesini kullanmadığı ve UPFC şönt konverterinin (Konverter 1) birlik güç faktöründe çalıştığı ve tek fonksiyon olarak seri konverterin aktif güç talebini verici uç generatörüne transfer ettiği varsayılmıştır. Bu varsayımlarla, seri gerilim kaynağı ile birlikte verici uç generatörüne aktif güç akış bağlantısı temel UPFC 'nin doğru bir temsidir (Gyugyi vd, 1994).

Bu oluşturulan devreye göre aşağıdaki güç denklemleri yazılabilir.

Hat sonu kompleks gücü;

$$S = \overline{V_r} \overline{I_{hat}}^* = \overline{V_r} \left(\frac{\overline{V_s} + \overline{V_{se}} - \overline{V_r}}{jX} \right)^* \quad (3.14)$$

Burada $\overline{V_{se}} = V_{se} \angle (\delta_s - \rho)$ şeklindedir.

Bu kompleks gücün kompleks eşleniği ise aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$S^* = P - jQ = \overline{V_r}^* \left(\frac{\overline{V_s} + \overline{V_{se}} - \overline{V_r}}{jX} \right) \quad (3.15)$$

Denklem (3.15) 'ten aktif ve reaktif güçlerin faz açısına göre değişimi aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$P = \frac{V_s \cdot V_r}{X} \cdot \sin \delta + \frac{V_r \cdot V_{se}}{X} \cdot \sin(\delta - \rho) = P_o(\delta) + P_{se}(\delta, \rho) \quad (3.16)$$

$$Q = -\frac{(V_r)^2}{X} + \frac{V_s \cdot V_r}{X} \cdot \cos \delta + \frac{V_r \cdot V_{se}}{X} \cdot \cos(\delta - \rho) = Q_o(\delta) + Q_{se}(\delta, \rho) \quad (3.17)$$

$V_{se}=0$ durumu sistemin kompanzasyon yapılmayan durumunu ifade etmektedir. Bu durumda aktif ve reaktif güçler Denklem (3.9) ve (3.10) 'daki gibidir.

Denklem (3.16) ve (3.17)'den anlaşılacağı üzere hat sonu aktif ve reaktif gücü aşağıdaki sınırlarda kontrol edilebilmektedir.

$$\begin{aligned} P_{\min}(\delta) &\leq P \leq P_{\max}(\delta) \\ Q_{\min}(\delta) &\leq Q \leq Q_{\max}(\delta) \end{aligned} \quad (3.18)$$

Burada aktif ve reaktif güç sınır değerleri aşağıdaki gibi yazılır.

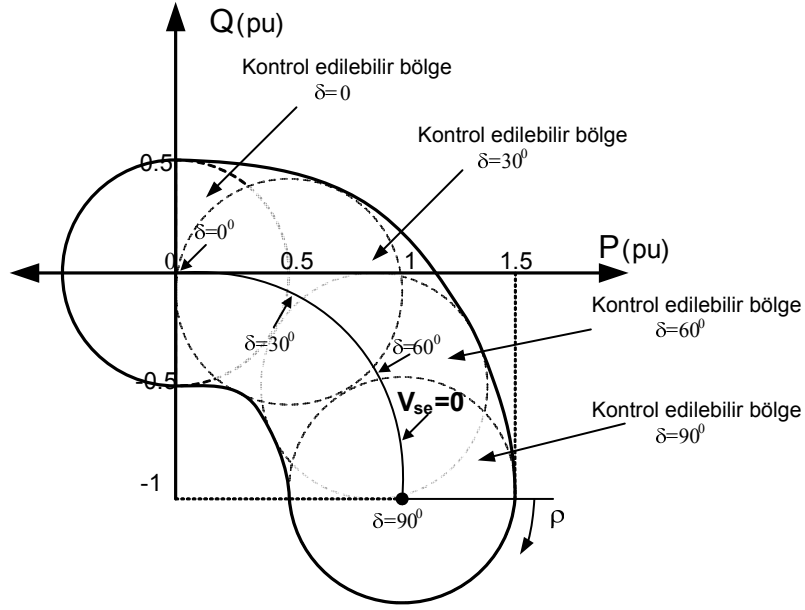
$$P_{\min}(\delta) = P_o(\delta) - \frac{V_r \cdot V_{se \max}}{X} \quad P_{\max}(\delta) = P_o(\delta) + \frac{V_r \cdot V_{se \max}}{X} \quad (3.19)$$

$$Q_{\min}(\delta) = Q_o(\delta) - \frac{V_r \cdot V_{se \max}}{X} \quad Q_{\max}(\delta) = Q_o(\delta) + \frac{V_r \cdot V_{se \max}}{X} \quad (3.20)$$

Şekil 3.12'den iletim hattının $(V_s + V_{se})$ 'yi etkin verici uç gerilimi gibi gördüğü kolayca gözlenebilir. Şu açıktır ki UPFC iletim hattı boyunca gerilime (Hem büyüklüğüne hem de açısına) etki eder. Dolayısıyla UPFC V_{se} 'nin büyüklüğü ve açısını değiştirerek, iletilebilir aktif gücü olduğu gibi verici ve alıcı uç gerilimleri arasında verilen herhangi bir güç açısında hattın reaktif güç talebini de kontrol edebilir.

Seri enjekte edilen gerilim fazörünün $V_{se \max}$ etkin değeri ile 0° 'dan 360° kadar döndürülmesi, aktif ve reaktif gücün $(P_o(\delta), Q_o(\delta))$ merkezli ve $\frac{V_r V_{se \max}}{X}$ yarıçaplı bir sınır çemberi içerisinde kontrol edilebilmesine izin verir. Bu çember aşağıdaki denklem ile tanımlanır.

$$(P(\delta, \rho) - P_o(\delta))^2 + (Q(\delta, \rho) - Q_o(\delta))^2 = \left(\frac{V_r \cdot V_{se \max}}{X} \right)^2 \quad (3.21)$$



Şekil 3.13 $\delta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ güç açısı değerlerine göre iki makineli bir sistem için UPFC tarafından kontrol edilebilir bölgeler.

Şekil 3.13'te 4 güç açısı değerine göre ($\delta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$) ve enjekte edilen gerilim fazörü V_{se} 'nin ρ açısı ve V_{se} büyüklüğünün bir fonksiyonu olarak alıcı uç barasından talep edilen Q reaktif gücü, P iletilen gücüne karşı çizilmiştir. Bu çizimlerin her biri $V_{se}=0$ olarak gösterilen temel (kompanzasyonsuz) P-Q eğrisi (Şekil 3.11) üzerinde farklı bir nokta olmaktadır. Şekil 3.13 güç açısı aralığı $0 \leq \delta \leq 90^\circ$ için Q ve P arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Burada $V_s = V_r = V$, $\frac{V^2}{X} = 1$ ve $\frac{V_r V_{se} \max}{X} = 0.5$ pu şeklindedir.

Şekil 3.13 dikkate alınırsa güç açısı $\delta=0$ için $V_{se}=0$ ve P ve Q sıfırdır. Yani sistem (Q, P) koordinatlarının orijininde durmaktadır. {Q,P} düzlemindeki çemberler Q ve P değerlerinin değişimlerini göstermektedir. V_{se} gerilim fazörü maksimum değeri $V_{se \max}$ ile tam bir devir döner.

Çemberler içerisindeki alan V_{se} fazörünün, V_{se} büyüklüğü ve ρ açısını kontrol ederek elde edilebilir tüm P ve Q değerlerini tanımlar. UPFC her iki yönde 0.5 p.u gerilim değeri şartıyla ya verici ya da alıcı uç generatöründe herhangi reaktif güç talebi zorlaması olmadan 0.5 p.u güç akışı oluşturabilir. Aynı zamanda UPFC bir uçtaki generatörü diğer uçtaki generatöre reaktif güç sağlamak için zorlayabilir.

Genel olarak, verilen herhangi bir δ açısında iletilen güç P ve iletim hattı alıcı uç reaktif güç talebi Q , enjekte edilen gerilim fazörü V_{se} , maksimum genliği ile tam bir devir döndürülerek $\{Q, P\}$ düzleminde elde edilen sınırlar içerisinde UPFC tarafından serbestçe kontrol edilebilir. Her bir düzlemdeki sınır $V_{se}=0$ da temel güç iletimini karakterize eden Q - P eğrisindeki güç açısı tarafından tanımlanan nokta etrafında merkezlenmiştir. Şekil 3.13 UPFC'nin benzersiz kapasitesi ile herhangi bir güç açısında aktif ve reaktif güç akışını bağımsız olarak kontrol edebildiğini göstermektedir (Gyugyi vd. ,1994) ve (Hasanoviç vd. , 2002).

3.5.3. UPFC 'nin Geleneksel Tristör Tabanlı FACTS Aygıtları İle Karşılaştırılması

Geleneksel tristör kontrollü güç akış kontrolörleri, mekanik anahtarların yerini tristör valflerinin aldığı geleneksel güç sistemi kompanzasyonu ve kontrol şemaları kullanır. Her bir şema güç akışından etkilenen özel bir sistem parametresini kontrol etmek için geliştirilmiştir. Böylece statik var kompanzatörler; reaktif güç ve gerilim kontrolü, tristör kontrollü seri kompanzatörler; hat empedansı ayarlanması ve kademe değiştirici transformatörler; faz kaydırma işlemleri için uygulanır. Her biri farklı üretim ve kurulum gereksinimleri ile özel dizayn edilmiş bir sistemdir. Tristör kontrollü güç akış kontrolörleri, güç sistemi kararlılık iyileştirmelerinde hızlı elektronik kontrollerin etkinliğini göstermede önemli bir rol oynamaktadır.

UPFC geleneksel tristör kontrollü yaklaşımların başlıca kusurlarının üstesinden gelebilecek potansiyele sahiptir. Teknik açıdan pratik bir şekilde iletim hattı kompanzasyon problemlerini ve bütün güç akış kontrolünü tek düze bir şekilde idare etmeyi mümkün kılar. Anahtarlama kapasitörler ve reaktörler veya kademe değiştirici transformatörler yerine yalnızca senkron gerilim kaynakları kullanır. Evrensel olarak uygulanabilir bir tek kompanzatör\ kontrolör aygıtı olmasının genel çekiciliği dışında, gerilim kaynağı tabanlı evrensel güç akışı yaklaşımı fonksiyonel esneklik sağlar ve çalışma performansına geleneksel tristör kontrollü sistemler ile genel de ulaşamaz (Gyugyi,1991).

3.5.3.1. Performans Karşılaştırması

- UPFC eşzamanlı olarak (Çok-fonksiyonlu) veya seçime bağlı olarak hat empedansı, gerilim ve faz açısını tek bir seri gerilim kaynağı enjeksiyonu ile değiştirebilir veya düzenleyebilir.
- Geleneksel yaklaşım bunları yapmak için farklı bağımsız donanımlar gerektirir. Tristör kontrollü bir faz açısı düzenleyicisi (faz açısı için) ve statik var kompanzatör (reaktif güç kontrolü için) gibi geleneksel FACTS aygıtları ancak kombine bir şekilde kullanılırsa bunları gerçekleştirebilir.
- UPFC seri gerilim enjeksiyonu yoluyla güç akış kontrolünü gerçekleştirmek için gereken bütün reaktif gücü dahili olarak üretir.
- Geleneksel aygıtlar örneğin faz kaydırıcı kendi reaktif güç talebini üretemez. Bunu hat tarafından veya ayrı kontrol edilebilir bir reaktif güç kaynağından elde edebilir.
- Ek güç donanımı olmadan, direkt olarak aynı fazlı gerilim enjeksiyonu ile gerilimi düzenleyebilir.
- Geleneksel yaklaşım bağımsız bir tristör anahtar düzenlemesi ile aynı fazda transformatör sarımlarının başka bir takımını gerektirir.
- UPFC seri gerilim enjeksiyonun reaktif güç talebinden bağımsız olarak hat için kontrol edilebilir şönt reaktif güç kompanzasyonu sağlama yeteneğine sahiptir.
- Geleneksel yaklaşımda faz kaydırıcı ve statik var kompanzatörün kombine bir düzenlemesinde kompanzatörün Var kapasitesi, seri gerilim enjeksiyonundan kaynaklanan reaktif güç talebini sağlamak için ayrılmıştır.

3.5.3.2. Donanım Karşılaştırması

- UPFC tek bir güç elektroniği donanımı yapıtaşından ibarettir. Bu da gerilim kaynaklı konverterdir. Bu konverter GTO valfleri kullanan ve herhangi bir istenen değer için esnek bir harmonik nötrleştirme yapısında, standart 6 darbeleri modüllerden yapılabilir. UPFC yaklaşımı bağlantı transformatörü dışında, kapasitörler ve reaktörler gibi herhangi büyük bir AC depolama bileşeni gerektirmez.
- Her bir geleneksel tristör kontrollü güç akış kontrolörü için donanım uygulaması farklıdır. Örneğin SVC bir bağlantı transformatörünün sekonder devresinde düşük bir bağlı gerilim düzeyinde çalışan tristör anahtarlamalı kapasitör ve reaktörler kullanır. Faz kaydırıcı tamamen değişik bir tristör valfi yapısı ve çok sayıda izole edilmiş sekonder sargılar ile nispeten karmaşık bir transformatör kullanır.

UPFC 'nin özellikleri şu maddeler ile özetlenebilir;

- UPFC yapısı itibari ile GTO valfleri kullanan ve ortak bir DC-link 'ten çalışan, iki gerilim kaynaklı konverter kullanır. İletim hattına şönt bağlı olan konverter 1'in temel görevi, konverter 2'nin seri gerilim enjeksiyonu için gereken aktif güç talebini karşılamaktır. Gerekli aktif gücü iletim hattından elde ederek konverter 2'ye sağlar veya konverter 2'den alarak iletim hattına geri verir.
- Konverter 1 tek başına gelişmiş bir statik var kompanzatör gibi çalışarak hat için bağımsız reaktif şönt kompanzasyon sağlar. Böylece UPFC'nin giriş terminalinde in-direk bir gerilim regülasyonu sağlar.
- Konverter 1, dc terminaline veya terminalinden transfer ettiği aktif güçten bağımsız olarak kendi AC terminalinde reaktif güç üretebilir veya tüketebilir.
- Konverter 2 bağlantı transformatörü yolu ile iletim hattına temel frekansta, değişken büyüklükte ($0 \leq V_{sc} \leq V_{semax}$) ve faz açısında ($0 \leq \rho \leq 2\pi$) bir gerilim enjekte ederek UPFC' nin en önemli fonksiyonunu yerine getirir. Konverter 2'nin iletim hattına enjekte ettiği seri gerilim kaynağı ile gerek eşzamanlı olarak yani, aynı anda gerekse seçici bir şekilde ayrı ayrı olarak güç akışına etki eden üç parametre (gerilim, empedansı, faz açısı) düzenlenebilir.
- Konverter 2 kendi AC terminalinde dahili olarak reaktif güç üretebilir veya tüketebilir.
- Aktif güç iki konverterin AC terminalleri arasında her iki yönde serbestçe akabilir. Fakat UPFC boyunca bir reaktif güç akışı yoktur. Reaktif güç her bir konverter tarafından kendi AC terminalinde bağımsız olarak üretilir veya tüketilir.
- UPFC aktif ve reaktif gücü birbirinden bağımsız olarak kontrol eder.
- DC-link kapasitörü her iki konverterin doğru bir şekilde çalışması ve iletim hattından veya iletim hattına reaktif güç sağlamak veya tüketmek için yeterli yüksek bir DC gerilim sağlar. İki konverter ve AC güç sistemi arasındaki reaktif güç alışverişi dahili konverter anahtarlama devreleri ile sağlanır.

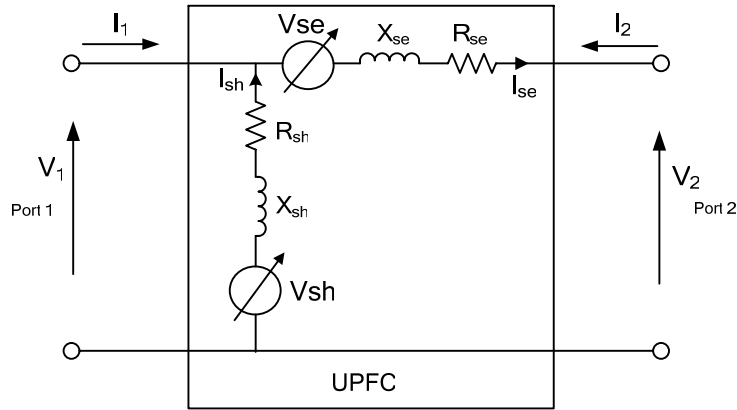
4. UPFC’NİN MATEMATİKSEL MODELİ

4.1. Giriş

UPFC kavramı önerildiğinden bu yana matematiksel modeli ile ilgili literatüre birçok çalışma girmiştir. Genel olarak üç tip modelleme söz konusudur. Bunlar elektromanyetik model, dinamik model ve sürekli durum modeli olarak sıralanabilir. Elektromanyetik modeller donanımla ilgili çalışmalar, dinamik modeller geçici ve dinamik kararlılık çalışmaları ve sürekli durum modelleri ise güç sistemi sürekli durum değerlendirmeleri için kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında UPFC ’nin bir dinamik modeli kullanılmıştır.

4.2. UPFC Dinamik Modeli

UPFC fonksiyonel olarak Şekil 4.1’deki devre ile temsil edilebilir. R_{sh} ve X_{sh} sırasıyla şönt konverter bağlantı transformatörü rezistansı ve kaçak reaktansı, R_{se} ve X_{se} ise sırasıyla seri konverter bağlantı transformatörü rezistansı ve kaçak reaktansıdır (Padiyar ve Prabhu, 2005).



Şekil 4.1 İki portlu bir aygıt olarak UPFC

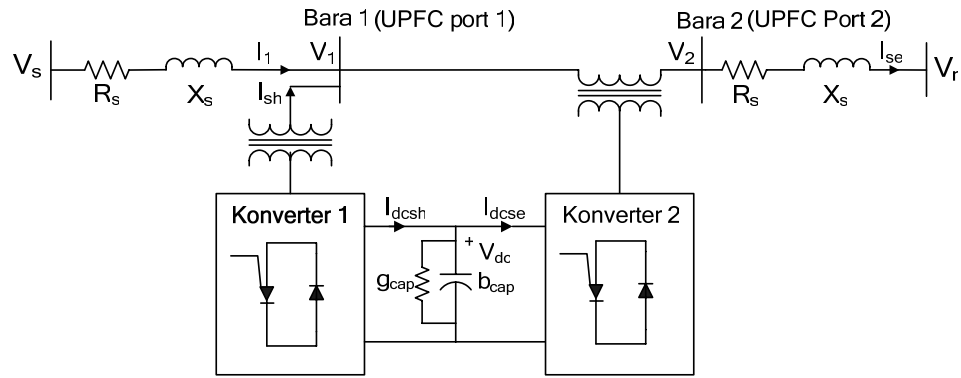
UPFC, sürekli durumda kayıplar için çektiği aktif güç hariç bir bütün olarak iletim hattına aktif güç sağlamaz veya iletim hattından aktif güç tüketmez. DC terminallerinde bir güç kaynağı olmadığı sürece bu geçerlidir. Bu nedenle şönt konverter gerektiğinde seri konverter tarafından çekilen veya sağlanan herhangi bir değerdeki aktif gücü ve kayıplar için gereken aktif gücü AC sistemden kompanze etmelidir.

Yani aktif güç dengesinin sağlanması gerekmektedir. Eğer güç dengesi sağlanmaz ise kapasitör sabit bir gerilimde kalmaz. Güç dengesi matematiksel olarak şekil 4.1 'deki devreye göre aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Padiyar ve Kulkarni, 1997).

$$(\overline{V_1 I_1^*} + \overline{V_2 I_2^*}) - P_k = 0 \quad (4.1)$$

Kontrol analizini basitleştirmek, performansı geliştirmek ve aktif ve reaktif güç akışı arasındaki etkileşimi azaltmak için UPFC şönt ve seri konverterlerini temsil eden anlık üç faz değişkenleri literatürde genel olarak, d-q (park) dönüşümü yapılarak verilmiştir.

D-Q dönüşümü anlık üç fazlı niceliklerin senkron olarak dönen bir ortogonal koordinat sistemine dönüştürülmesini esas alır. Bu koordinat sisteminde nicelikler sabit değerlerdir (papiç, 2000) ve (schauder ve Mehta, 1993). Ek-1'de park (d-q) dönüşümü ile ilgili bilgiler verilmiştir.



Şekil 4.2 UPFC bağlı bir enerji iletim sistemi.

UPFC dinamik denklemleri Şekil 4.2 'deki sisteme göre verilmiştir. Burada g_{cap} ve b_{cap} sırasıyla kapasitör kondüktansı ve süseptansıdır. Buna göre şönt konverter akımını temsil eden dinamik denklemler d-q referans çatısına göre aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{dsh}}{dt} \\ \frac{di_{qsh}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{sh}\omega_b}{X_{sh}} & \omega \\ \omega & -\frac{R_{sh}\omega_b}{X_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dsh} \\ i_{qsh} \end{bmatrix} + \frac{\omega_b}{X_{sh}} \begin{bmatrix} V_{dsh} - V_{1d} \\ V_{qsh} - V_{1q} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Benzer şekilde seri konverter bağlantı transformatöründen akan akımı temsil eden dinamik denklemler d-q referans çatısına göre aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{dse}}{dt} \\ \frac{di_{qse}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s \omega_b}{x_s} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_s \omega_b}{x_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dse} \\ i_{qse} \end{bmatrix} + \frac{\omega_b}{x_s} \begin{bmatrix} V_{2d} - V_{rd} \\ V_{2q} - V_{rq} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Denklem (4.2) ve (4.3)'teki nicelikler;

V_{dsh} ve V_{qsh} = Şönt konverter çıkış gerilimi d-q bileşenlerini,

V_{dse} ve V_{qse} = Seri konverter çıkış gerilimi d-q bileşenlerini,

R_{sh} ve X_{sh} = Şönt konverter bağlantı transformatörü rezistansı ve kaçak reaktansını,

R_s ve X_s = İletim hattı rezistansı ve reaktansını (seri transformatör rezistansı ve kaçak reaktansı dahil),

V_{1d} ve V_{1q} = Sistem bara1 gerilimi d-q bileşenlerini,

V_{2d} ve V_{2q} = Sistem bara 2 gerilimi d-q bileşenlerini,

ω ve ω_b = sırasıyla d-q sistemi açısal frekansı ve temel şebeke açısal frekansını göstermektedir.

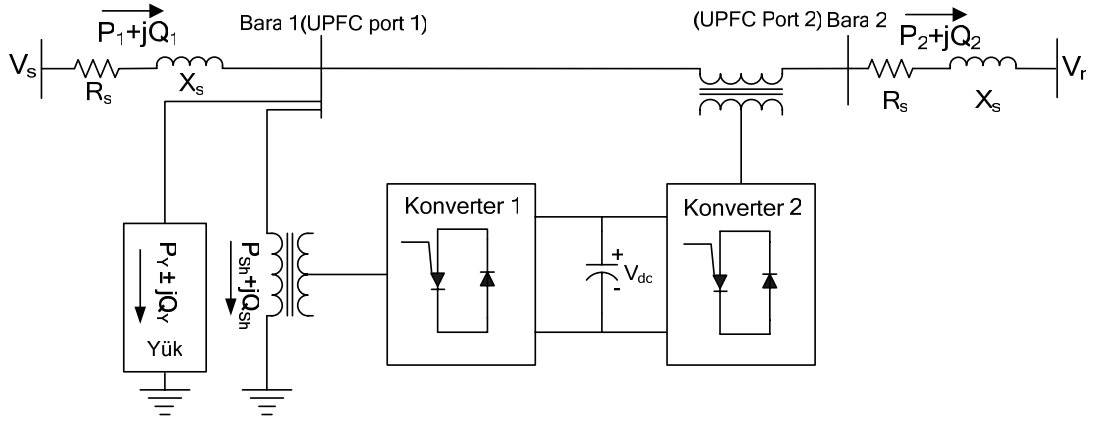
Ayrıca $V_{2d} = V_{1d} + V_{dse}$ ve $V_{2q} = V_{1q} + V_{qse}$ şeklindedir.

UPFC dinamik modeli DC-link kapasitör dinamikleri üzerine odaklanmıştır. DC-link kapasitör dinamikleri seri ve şönt konverter kontrol değişkenlerinin bir fonksiyonudur. Seri konverter tarafından iletim hattına eklenen seri konverter gerilimi ve iletim hattı akımı arasındaki aktif güç değişimi, bu değişimin yönüne bağlı olarak DC-link kapasitör geriliminin artmasına veya azalmasına neden olmaktadır. DC-link kapasitör gerilimindeki artma veya azalma DC-link gerilimini düzenlemek için şönt transformatör boyunca gerekli aktif gücü alan veya veren şönt konverter tarafından kontrol edilir. UPFC DC-link dinamik denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{g_{cap} \omega_b V_{dc}}{b_{cap}} + \frac{\omega_b}{b_{cap}} (i_{dcsh} - i_{dcse}) \quad (4.4)$$

Bu bölümde verilen denklemlerdeki nicelikler per-unit değerlerdir.

5. UPFC SİSTEMİNİN MODELLENMESİ



Şekil 5.1 UPFC sistemi tek faz devre şeması.

5.1. Giriş

Bu tez çalışmasında Şekil 5.1 'deki UPFC sistemi, bu bölümde matematiksel olarak modellendikten sonra, bölüm 6'da Matlab\Simulink ortamında modellenecek ve bölüm 7'de çeşitli durumlar için benzetim yapılarak incelenecektir. Burada, UPFC 'ye ilişkin bir kontrol sistemi modeli gerçekleştirilecek ve konverter çıkış gerilimleri olarak kontrol sistemi çıkışları kullanılacaktır. Konverter çıkışlarını, kontrol sistemi çıkışları temsil etmektedir. UPFC konverterlerinin ideal sinüzoidal gerilimler ürettiği varsayılacaktır.

Bu çalışmada UPFC kontrol sistemi modellenecek ve benzetim çalışmalarıyla, bu kontrol sistemi modelinin enerji iletim sistemindeki bara gerilimlerinin ve aktif ve reaktif güç akışının kontrolüne etkisi incelenmeye çalışılacaktır. Dolayısıyla, UPFC 'ye ilişkin bu kontrol sistemi modeli ile UPFC 'nin kontrol özellikleri incelenmeye çalışılacaktır. Şekil 5.1 'deki sistemde konverterler temsili olarak verilmiştir. Bu sistem sonraki bölümlerde düzenlenmiş olarak tekrar verilecektir.

Bu bölümde ilk önce UPFC 'nin temel kontrolü ele alınacak ve UPFC konverterlerinin kontrol modeli için gerekli denklemler elde edilecektir. UPFC konverterlerinin kontrol modeli ayrı ayrı verilecek ve kontrol şemaları sunulacaktır. Daha sonra UPFC sisteminde yer alan enerji iletim sistemi ve yük modeli için gerekli denklemler elde edilecektir. Elde edilen matematiksel denklemlerden faydalanılarak bölüm 6'da UPFC sistemi Matlab\Simulink ortamında modellenecektir.

5.2. UPFC 'nin Temel Kontrolü

UPFC şönt konverteri, şönt akımın kontrolü için çalıştırılmaktadır. Bu akımın aktif bileşeni ile seri konverterin aktif güç talebi karşılanmakta ve DC-link geriliminin kontrolü sağlanmaktadır. Şönt akımın aktif bileşeni AC sistemden çekilir ve değerini iki konverter arasındaki aktif güç dengesi belirler. Şönt akımın reaktif bileşeni ise AC sisteme reaktif güç desteği sağlamak ve bara gerilimini düzenlemek için kontrol edilmektedir. Aynı zamanda şönt konverter ile AC sistemden küçük bir miktar aktif güç çekilerek konverter ve manyetik elemanlardaki güç kayıpları karşılanmaktadır.

UPFC şönt konverteri (Konverter 1) hem seri hem de şönt konverterin doğru çalışması için gerekli olan güvenilir DC link kapasitör gerilimini sürdürmede ve bağlı bulunduğu bara gerilimine destek için reaktif güç sağlamada önemli bir rol oynamaktadır. Şönt konverterin amacı reaktif gücün hızlı bir şekilde kontrolünü sağlamak ve DC link kapasitör geriliminin sabit kalmasını sağlamaktır. Şönt konverterin ürettiği veya tükettiği reaktif güç şönt konverter çıkış gerilimi büyüklüğünün ayarlanması ile kontrol edilir. DC link kapasitör gerilimi ise bu gerilimin faz açısının ayarlanması ile kontrol edilir. Şönt konverter çıkış gerilimi faz açısının, ayarlanması ile aktif güç tüketilir veya üretilir.

UPFC seri konverteri (Konverter 2), iletim hattına seri eklenen gerilim ve bu gerilimin faz açısının kontrolü için çalıştırılmaktadır. Bu gerilim ilavesi hattaki güç akışına etki etmesi için tasarlanır. Bu gerilim iletim hattına seri, ayarlanabilir büyüklükte ve faz açısında enjekte edilmektedir. Enjekte edilen gerilim V_{dse} ve V_{qse} gibi iki bileşene ayrılarak bu ortogonal bileşenlerin büyüklüğü birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilmektedir. Böylece seri enjekte edilen gerilimin büyüklüğü ve faz açısı kontrol edilebilmektedir. Bu bileşenlerden V_{dse} bara gerilimi ile aynı fazlı ve reaktif güç kontrolüne, V_{qse} ise bara gerilimine dik olup aktif güç kontrolüne etki etmektedir.

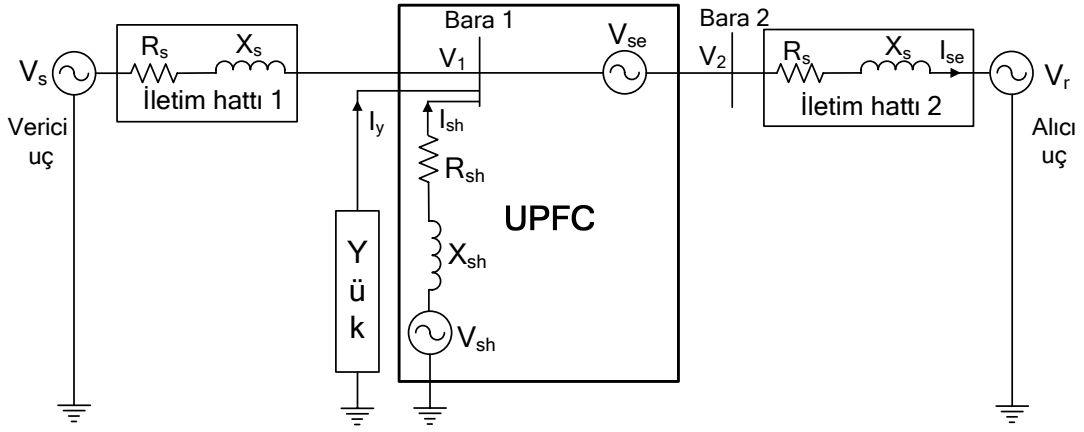
UPFC konverterleri kapalı döngülü kontrol sistemleri ile kontrol edilmektedir. UPFC temel kontrol dizaynı aktif ve reaktif güç akışı, bara gerilim büyüklüğü (V_1 , V_2) ve DC gerilim büyüklüğünü içermektedir. Literatürde seri konverter için aktif güç, kontrol şemalarında her zaman yer alırken ikinci kontrol bileşeni olarak bara gerilimi büyüklüğü (V_2) veya reaktif güç (Q_2) yer almaktadır. Şönt konverter kontrol şemalarında ise V_{dc} kontrol bileşeni her zaman yer alırken, ikinci kontrol bileşeni olarak bara gerilim büyüklüğü (V_1) veya reaktif güç (Q_1) yer almaktadır. Kontrol şemaları kontrol amaçlarına göre değişiklik gösterebilmektedir.

En sık kullanılan kontrol şeması vektör-kontrolü yaklaşımını temel alan şemadır. Bu şema aktif ve reaktif gücün ayırık kontrolüne izin verdiğinden dolayı UPFC uygulaması için uygundur. Bu dengeli üç fazlı bir sistemi senkron olarak dönen ortogonal bir sisteme dönüştürerek başarılabılır. Bu dönüşüm Ek-1’de verilmiştir. Yeni koordinat sisteminin d bileşeni anlık gerilim vektörü ile çakışık, q bileşeni ise buna dik bir şekilde seçilir. Bu koordinat sisteminde d eksenini akım bileşeni anlık aktif güce ve q eksenini akım bileşeni reaktif güce katkıda bulunur. Bu kontrol şeması hem seri hem de şönt konverter kontrolü için uygulanabilir.

Seri konverter kontrolü için diğer bir yaklaşım ise verici ve alıcı uç baraları arasındaki gerilim düşümünün iki bileşene ayrılmasıdır. Bunlardan bir tanesi verici uç gerilimi ile aynı fazlı diğeri ise buna diktir. Verici uç gerilimi ile aynı fazlı olan bileşen reaktif güç akışı, dik fazlı olan aktif güç akışını etkilemektedir. Bu tez çalışmasında bu yaklaşımlara yönelik kontrol şemaları kullanılmıştır.

5.3. UPFC Sisteminin Modellenmesi İle İlgili Bilgiler

UPFC sistemi devre şeması Şekil 5.2 ’de düzenlenmiş olarak verilmiştir. Tüm UPFC sisteminin modellenmesinde d-q koordinatlarında verilen denklemler kullanılmıştır. Kullanılan bütün denklemlerdeki nicelikler per-unit değerlerdir. UPFC sistemi temel iki makineli bir sistemdir. V_s ve V_r dengeli üç fazlı gerilimler üreten sinüzoidal gerilim kaynaklarıdır (Şekil 5.2 ’de V_s ve V_r tek faz olarak verilmiştir.). Burada UPFC konverterlerinin ideal kontrol edilebilir, sinüzoidal gerilim kaynakları olduğu varsayılmıştır. Konverter gerilimlerini temsilen kontrol sistemi çıkışları kullanılmıştır. UPFC konverterlerini V_{sh} ve V_{se} gerilim kaynakları temsil etmektedir. UPFC DC-link eşdeğeri Şekil 5.2 ’deki devrede yer almamaktadır. DC-link eşdeğeri ayrı olarak şönt konverter kontrol modeli içerisinde sunulmaktadır. UPFC bu sistemde enerji iletim sistemi üzerindeki bir yük istasyonuna yerleştirilmiştir. Enerji iletim sistemi burada iki bölüm olarak yani iletim hattı 1 ve iletim hattı 2 olarak adlandırılmıştır. İletim hattı 1 bara gerilimi V_1 ’in hesaplanması için modellenmiştir. İletim hattı 2 ise iletim hattı akımı I_{se} ’nin hesaplanması için modellenmiştir.



Şekil 5.2 UPFC sistemi düzenlenmiş eşdeğer tek faz devre şeması.

V_s, V_r = Verici ve alıcı uç kaynak gerilimi büyüklüğü

V_1, V_2 = Bara 1 ve bara 2 gerilimi büyüklüğü

V_{sh}, V_{se} = Şönt ve seri konverter gerilimi büyüklüğü

R_s, X_s = İletim hattı rezistansı ve reaktansı

R_{sh}, X_{sh} = Şönt konverter bağlantı transformatörü rezistansı ve kaçak reaktansı

I_{se} = İletim hattı akımı

I_{sh} = Şönt konverter akımı

I_y = Yük akımı

Burada iletim hattı rezistansı ve reaktansı, seri konverter bağlantı transformatörü rezistansı ve kaçak reaktansınıda içermektedir.

UPFC ve iletim sistemi parametreleri;

$R_s = 0.0075, X_s = 0.075, X_{sh} = 0.15, R_{sh} = 0.01, b_{cap} = 2.0, g_{cap} = 0.02, V_s = 1.0 \angle 30^\circ, V_r = 1.0$

şeklindedir. Bütün değerler per-unit olarak verilmiştir. Sistemin baz değerleri UPFC için $S_b = 100$ MVA, $V_b = 400$ kV, iletim sistemi için $S_{bi} = 300$ MVA, $V_{bi} = 400$ kV şeklindedir.

5.4. UPFC Kontrol Sistemi Modeli

Genel olarak UPFC üç kontrol parametresine sahiptir. Bunlar; şönt reaktif akım ve iletim hattına seri olarak eklenen gerilimin büyüklüğü ve faz açısıdır. İletim hattına uygun büyüklükte ve faz açısında eklenen seri gerilim ile aktif ve reaktif güç akışlarının kontrolü bağımsız olarak gerçekleştirilebilir. Şönt reaktif akım ile iletim hattına reaktif güç sağlayarak bara geriliminin kontrolü yapılabilir. UPFC kontrol sistemi şu görevleri yerine getirmektedir.

1. Şönt akımın kontrolü ile bara geriliminin kontrolü, şönt reaktif kompanzasyon ve DC gerilimin kontrolü.
2. Seri enjekte edilen gerilimin kontrolü ile aktif ve reaktif güç akışının kontrolü.

Kontrol dizaynı bu görevlere göre gerçekleştirilmiştir. UPFC kontrol dizaynı üç bölümden oluşmaktadır. Bunlar şönt konverter kontrol modeli, seri konverter kontrol modeli ve DC gerilim modelidir. Bilindiği gibi DC-link gerilimi şönt konverter tarafından kontrol edilmektedir, bu nedenle DC gerilim modeli şönt konverter kontrol modeli başlığı altında verilmiştir.

5.4.1. Şönt Konverter Kontrolü

Şönt reaktif güç enjeksiyonu bara geriliminin kontrolü için kullanılabilir. Bunun için şönt akım aktif ve reaktif akım bileşenlerine ayrılır. Bu bileşenlerden aktif akım UPFC şönt konverter bara 1 gerilimi ile aynı fazlı reaktif akım ise bu gerilim ile dik fazlıdır (Padiyar ve Kulkarni,1998). Bu ilişki şekil 5.3'te gösterilmektedir. UPFC şönt konverter akımı D-Q referans çatısına göre aşağıdaki gibi verilebilir.

$$\frac{di_{dsh}}{dt} = -\frac{R_{sh}\omega_b i_{dsh}}{X_{sh}} + \omega i_{qsh} + \frac{\omega_b}{X_{sh}}(V_{dsh} - V_{ld}) \quad (5.1)$$

$$\frac{di_{qsh}}{dt} = -\frac{R_{sh}\omega_b i_{qsh}}{X_{sh}} - \omega i_{dsh} + \frac{\omega_b}{X_{sh}}(V_{qsh} - V_{lq}) \quad (5.2)$$

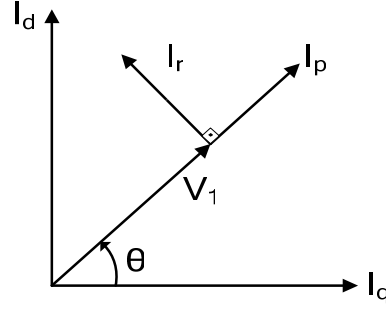
Burada $\omega = \omega_b = 2\pi 50$ şeklindedir.

Şönt akımın d-q bileşenleri aşağıdaki gibi aktif ve reaktif bileşenlerine dönüştürülebilir.

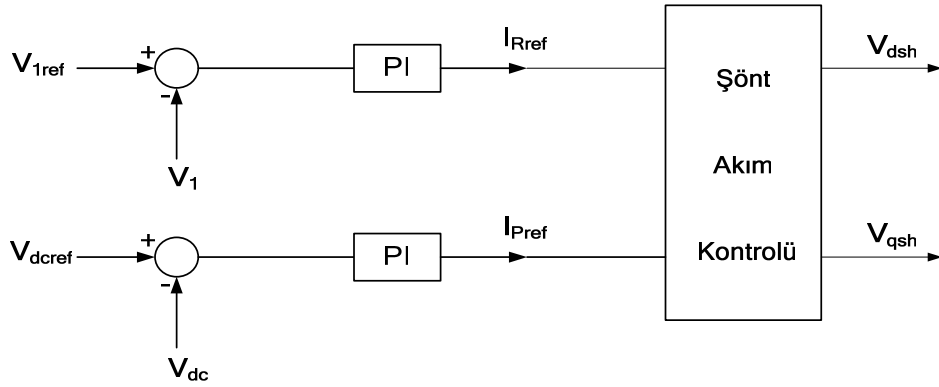
$$\begin{aligned} i_{rsh} &= i_{dsh} \cos \theta - i_{qsh} \sin \theta \\ i_{psh} &= i_{dsh} \sin \theta + i_{qsh} \cos \theta \end{aligned} \quad (5.3)$$

Burada θ açısı; $\theta = \tan^{-1} \frac{V_{ld}}{V_{lq}}$ şeklinde ifade edilir. Bara gerilimi V_1 rms değeri olup aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$V_1 = \sqrt{V_{ld}^2 + V_{lq}^2} \quad (5.4)$$



Şekil 5.3 Şönt konverter aktif ve reaktif akımlarının vektör gösterimi.



Şekil 5.4 Şönt konverter kontrol şeması

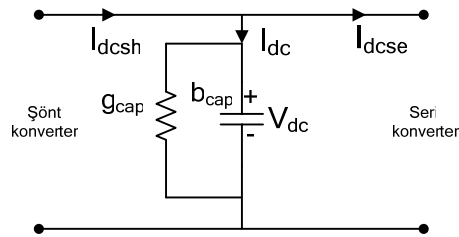
Yukarıdaki şemada aktif ve reaktif akımlar aşağıdaki gibi d-q bileşenlerine dönüştürülebilir.

$$\begin{aligned} i_{dsh} &= i_{rsh} \cos \theta + i_{psh} \sin \theta \\ i_{qsh} &= -i_{rsh} \sin \theta + i_{psh} \cos \theta \end{aligned} \quad (5.5)$$

Şekil 5.4'deki şemada kullanılan iki PI kontrolör ile şönt konverter aktif ve reaktif akım referans bileşenleri ayarlanmaktadır. Bu akım bileşenleri d-q bileşenlerine dönüştürülerek şönt akım kontrol bloğunda, şönt konverter çıkış gerilimi hesaplanmaktadır. Şönt konverter çıkış gerilimi d-q bileşenleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} v_{dsh} &= -R_{sh}i_{dsh} - \frac{x_{sh}}{\omega_b} \frac{di_{dsh}}{dt} + x_{sh}i_{qsh} + V_{1d} \\ v_{qsh} &= -R_{sh}i_{qsh} - \frac{x_{sh}}{\omega_b} \frac{di_{qsh}}{dt} - x_{sh}i_{dsh} + V_{1q} \end{aligned} \quad (5.6)$$

UPFC performansı seri ve şönt konverterler arasındaki DC-link geriliminin kararlılığına bağlıdır. Kararlı bir gerilim elde etmek için DC-link'in uygun bir modeli geliştirilmelidir. Böyle bir devre şekil 5.5'te görülmektedir. Bu devrede g_{cap} ve b_{cap} kapasitörün sırasıyla kondüktansı ve süseptansıdır. Bu model anlık aktif güç dengesi prensibine dayanmaktadır. Kayıplar ihmal edildiğinde, her durumda şönt konverter tarafından sağlanan aktif güç seri konverter tarafından tüketilen aktif güce eşit olmalıdır (yu vd, 1996).



Şekil 5.5. UPFC DC-link eşdeğer devresi

Bu model kullanılarak DC-link gerilimi için aşağıdaki dinamik denklem elde edilir.

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{g_{cap}\omega_b V_{dc}}{b_{cap}} + \frac{\omega_b}{b_{cap}}(i_{dcsh} - i_{dcse}) \quad (5.7)$$

Bilindiği gibi V_{dc} gerilimi seri ve şönt konverter kontrol değişkenlerinin bir fonksiyonudur. Buna göre güç eşitliklerinden faydalanılarak seri ve şönt konverter çıkış güçleri aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned} V_{dc}I_{dcsh} &= V_{dsh}i_{dsh} + V_{qsh}i_{qsh} \\ V_{dc}I_{dcse} &= V_{dse}i_{dse} + V_{qse}i_{qse} \end{aligned} \quad (5.8)$$

Denklem 5.8 'den DC akımlar çekilirse;

$$I_{dcsh} = \frac{V_{dsh}i_{dsh} + V_{qsh}i_{qsh}}{V_{dc}} \quad (5.9)$$

$$I_{dcse} = \frac{V_{dse}i_{dse} + V_{qse}i_{qse}}{V_{dc}} \quad (5.10)$$

elde edilir. Denklem (5.9) ve (5.10) denklem (5.7)'de yerlerine yazılırsa DC gerilim için aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{g_{cap}\omega_b V_{dc}}{b_{cap}} + \frac{\omega_b}{b_{cap}} \left(\frac{V_{dsh}i_{dsh} + V_{qsh}i_{qsh} - V_{dse}i_{dse} - V_{qse}i_{qse}}{V_{dc}} \right) \quad (5.11)$$

Seri veya şönt konverter tarafından sağlanan veya çekilen aktif güç DC-link devresinde I_{dcse} ve I_{dcsh} akımları olarak ortaya çıkmaktadır. Değişken seri gerilim enjeksiyonu yapıldığında kayıplardan dolayı kapasitör gerilimi değişmektedir. Bu nedenle şönt konverter kontrol şemasında DC gerilim PI çıkışı aktif akım referansı olarak ayarlanarak kayıplar I_{dcsh} akımı ile kompanze edilmektedir. (Padiyar ve Kulkarni,1998).

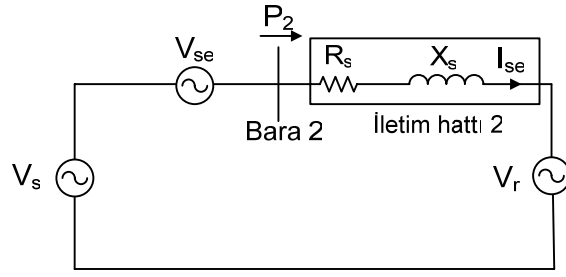
UPFC seri konverter kapasitesi devre dışı olduğunda örneğin; sadece bara 1 geriliminin kontrolü yapılıyorsa DC gerilim denklemi aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{g_{cap}\omega_b V_{dc}}{b_{cap}} + \frac{\omega_b}{b_{cap}} \left(\frac{V_{dsh}i_{dsh} + V_{qsh}i_{qsh}}{V_{dc}} \right) \quad (5.12)$$

5.4.2. Seri Konverter Kontrolü

Aktif ve reaktif güç akış kontrolünü gerçekleştirmek için iletim hattına uygun büyüklükte ve açıda seri gerilim eklenmesi gerekmektedir. Seri konverter kontrol modeli için Şekil 5.6'daki basitleştirilmiş devre kullanılmıştır. Bu devreye göre alıcı uç akımı d-q bileşenleri aşağıdaki gibi verilir.

$$\begin{aligned} \frac{di_{dse}}{dt} &= -\frac{R_s\omega_b i_{dse}}{x_s} + \omega i_{qse} + \frac{\omega_b}{x_s} (V_{2d} - V_{rd}) \\ \frac{di_{qse}}{dt} &= -\frac{R_s\omega_b i_{qse}}{x_s} - \omega i_{dse} + \frac{\omega_b}{x_s} (V_{2q} - V_{rq}) \end{aligned} \quad (5.13)$$



Şekil 5.6 Seri konverter kontrol modeli için basitleştirilmiş eşdeğer devre

Burada $V_{2d} = V_{1d} + V_{dse}$ ve $V_{2q} = V_{1d} + V_{qse}$ şeklindedir. (V_{2d}, V_{2q}) , (V_{1d}, V_{1q}) , (V_{dse}, V_{qse}) , ve (V_{rd}, V_{rq}) sırasıyla bara 2, bara 1, seri konverter ve alıcı uç gerilimleri d-q bileşenleridir.

Seri konverter bağlantı transformatörü rezistansı ve kaçak reaktansının burada iletim hattı empedansına dahil olduğu kabul edilmiştir. Bara 2 gerilimi cebirsel olarak bara 1 gerilimi ve seri konverter çıkış gerilimi ile ilişkilendirilirse, bara 2 gerilimi etkin değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

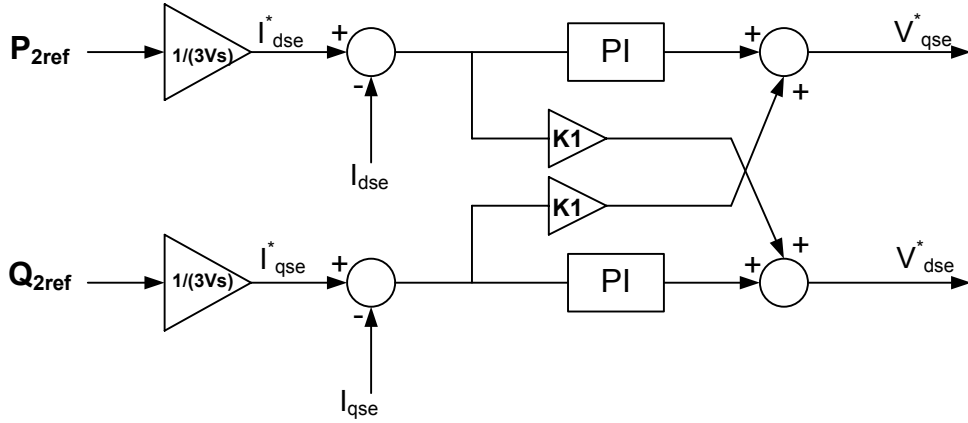
$$\begin{aligned} V_2 &= \sqrt{(V_{2d})^2 + (V_{2q})^2} \\ &= \sqrt{(V_{1d} + V_{dse})^2 + (V_{1q} + V_{qse})^2} \end{aligned} \quad (5.14)$$

Burada $V_s = V_1 = V_r$ olduğu varsayılırsa alıcı uçtaki güç sürekli durumda yaklaşık olarak P_2 gücüne eşittir. Bu durumda hat sonu gücü P_2 gücünü kontrol ederek kontrol edilebilir. P_2 gücü aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$P_2 = V_{2d} i_{dse} + V_{2q} i_{qse} \quad (5.15)$$

Seri konverter çıkış gücü ise;

$$P_{se} = V_{dse} i_{dse} + V_{qse} i_{qse} \quad (5.16)$$



Şekil 5.7. Seri konverter kontrol şeması

UPFC 'nin ana görevi aktif ve reaktif güç akış kontrolüdür. Bu görevi seri konverter yerine getirmektedir. Bu tez çalışmasında seri konverter kontrol modeli için Şekil 5.7'deki kontrol şeması kullanılmaktadır. Bu şemaya göre aktif ve reaktif güç referanslarından elde edilen referans akım d ve q bileşenleri iletim hattı akımının d ve q bileşenleri ile karşılaştırılmaktadır. Daha sonra kullanılan iki PI kontrolör ile gerilim referansları d ve q bileşenleri (V_{dse} , V_{qse}) elde edilmektedir. Bu şemada K1 kazançları sönümleme rezistörü olarak rol oynamaktadır (Xu ve Agelidis, 2001).

Şekil 5.7 'deki kontrol şeması matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} V_{dse}^* \\ V_{qse}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 & -\left(K_{p1} + \frac{K_{i1}}{s}\right) \\ K_{p2} + \frac{K_{i2}}{s} & K_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dse}^* - i_{dse} \\ i_{qse}^* - i_{qse} \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

d-q koordinatlarında i_{dse} akımı aktif güç ile ilişkilidir. Dolayısıyla aktif güç bu şemaya göre q eksenli gerilim bileşeni (V_{qse}) ile kontrol edilmektedir. i_{qse} akımı ise reaktif güç ile ilişkilidir. Dolayısıyla reaktif güç bu şemaya göre d eksenli gerilim bileşeni (V_{dse}) ile kontrol edilmektedir. V_{dse} gerilimi ile i_{qse} akımının dolayısıyla reaktif güç akışının, V_{qse} gerilimi ile de i_{dse} akımının dolayısıyla aktif güç akışının kontrolü mümkündür (Watanabe vd, 1999).

Bu şemadan elde edilen gerilimler referans gerilimlerdir. Daha öncede ifade edildiği gibi seri konverterin ideal kontrol edilebilir gerilim kaynağı olduğu kabul edilmiştir. Bu nedenle seri konverter çıkış gerilimi bu şemadan elde edilen referans V_{se} gerilimine eşittir.

5.5. Enerji İletim Sistemi Modeli

Daha öncede ifade edildiği gibi enerji iletim sistemi, iletim hattı 1 modeli ve iletim hattı 2 modelinden oluşmaktadır. İletim hattı 1, bara 1 gerilimi V_1 'in hesaplanması için modellenmiştir. İletim hattı 1 modeli için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır.

$$V_{1d} = -R_s i_d - \frac{x_s}{\omega_b} \frac{di_d}{dt} + x_s i_q + V_{sd} \quad (5.18)$$

$$V_{1q} = -R_s i_q - \frac{x_s}{\omega_b} \frac{di_q}{dt} - x_s i_d + V_{sq} \quad (5.19)$$

Burada i_d ve i_q akımları şönt konverter, iletim hattı ve yük akımı d ve q bileşenlerinin toplamıdır. V_{sd} ve V_{sq} kaynak gerilimi d-q bileşenleridir.

İletim hattı 2 ise, iletim hattı akımı I_{se} 'nin hesaplanması için modellenmiştir. İletim hattı 2 modeli için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır.

$$\frac{di_{dse}}{dt} = -\frac{R_s \omega_b i_{dse}}{x_s} + \omega i_{qse} + \frac{\omega_b}{x_s} (V_{2d} - V_{rd}) \quad (5.20)$$

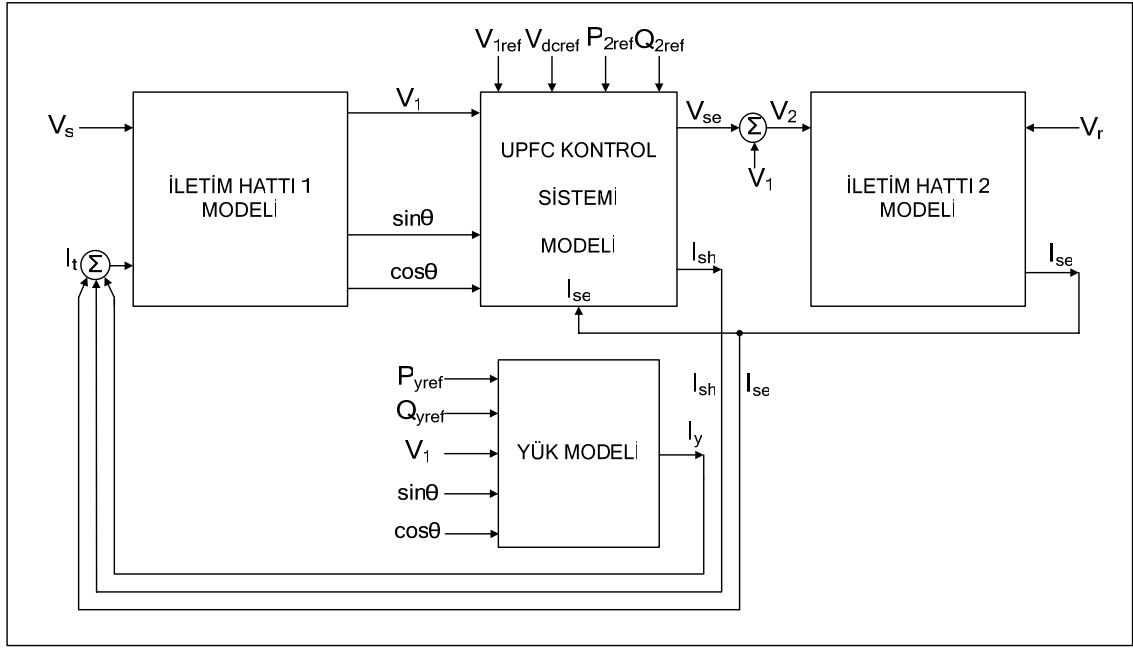
$$\frac{di_{qse}}{dt} = -\frac{R_s \omega_b i_{qse}}{x_s} - \omega i_{dse} + \frac{\omega_b}{x_s} (V_{2q} - V_{rq}) \quad (5.21)$$

5.6. Yük Modeli

Yük UPFC sisteminde şönt konverterinde bağlı olduğu bara 1 kısmına bağlanmıştır. Bu yük yerel bir yüküdür. Yük akımı matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir. Yük burada gerilim bağımlı bir güç tüketicisi olarak temsil edilmektedir.

$$I_{yük} = \frac{(P_{yük} \pm jQ_{yük})}{V_{yük-barası}^*} \quad (5.22)$$

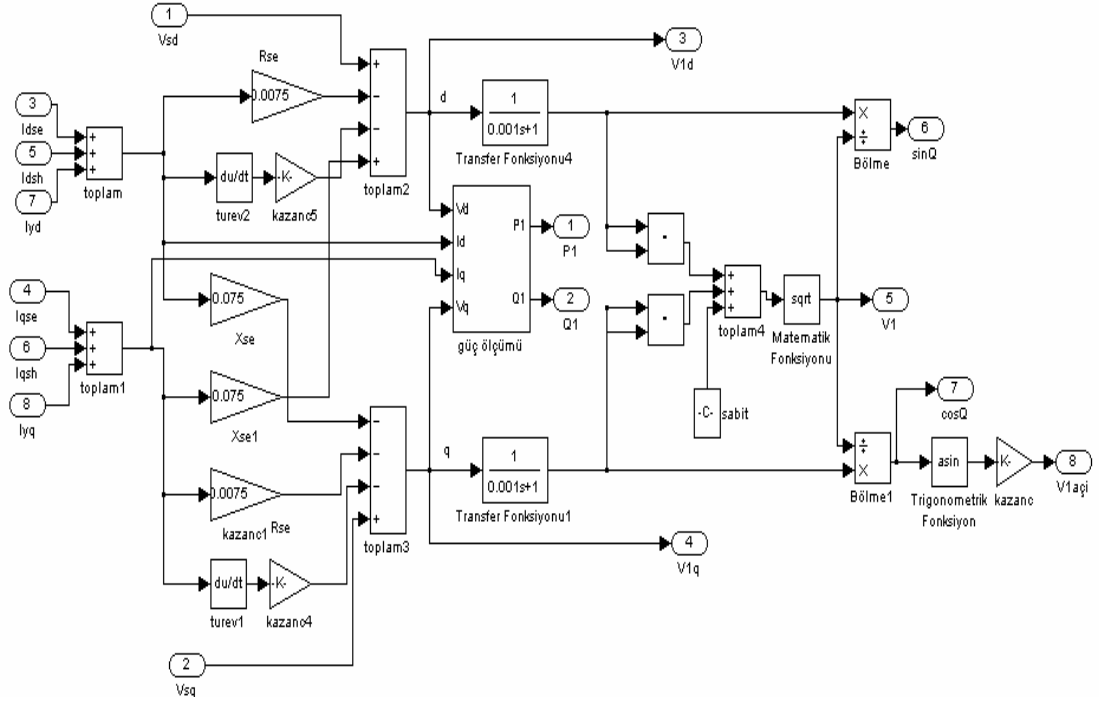
$$\begin{aligned} P_{yük} &= fP(|V_{yük-barası}|), \\ Q_{yük} &= fQ(|V_{yük-barası}|) \end{aligned} \quad (5.23)$$



Şekil 6.2 UPFC sistemi simulink modeli prensip şeması.

UPFC sistemi simulink modeli yukarıdaki şemaya göre açıklanabilir. Burada UPFC 'ye ilişkin bloklar UPFC kontrol sistemi modeli altında toplanmıştır. Bu sistemde iletim hattı 1 bloğundan elde edilen bara 1 gerilimi (V_1), UPFC kontrol sistemi bloğunda referans değeri ile karşılaştırılmaktadır. Aradaki hata PI kontrolöre gönderilmektedir. Bara 1 gerilimi (V_1), şönt konverter akımı (I_{sh}) ile düzenlenmektedir. Aynı zamanda iletim hattı 1 bloğundan elde edilen $\sin\theta$ ve $\cos\theta$ bilgileri UPFC kontrol sistemi (şönt konverter kontrol modeli) ve yük modeline gönderilmektedir. $\sin\theta$ ve $\cos\theta$ bilgileri ile şönt konverter ve yük akımları, d ve q bileşenlerine dönüştürülmektedir. İletim hattı 2 bloğunda hesaplanan I_{se} akımı, UPFC kontrol sistemine (Seri konverter kontrol modeli) verilerek burada, aktif ve reaktif güç referanslarından elde edilen referans akımlar ile karşılaştırılmaktadır. Verilen aktif ve reaktif güç referanslarına göre, UPFC kontrol sistemi (Seri konverter kontrol modeli) bir V_{se} gerilimi üretmekte ve bunu iletim hattı 2 bloğuna göndermektedir. Bara 1 geriliminin düzenlenmesi ve aktif güç transferinde rol oynayan şönt akım (I_{sh}) ve yük akımı (I_y) iletim hattı 1 bloğuna verilmektedir. İletim hattı 2 bloğundan elde edilen İletim hattı akımı (I_{se}), aynı şekilde iletim hattı 1 bloğuna gönderilerek iletim sisteminin akım döngüsü sağlanmaktadır.

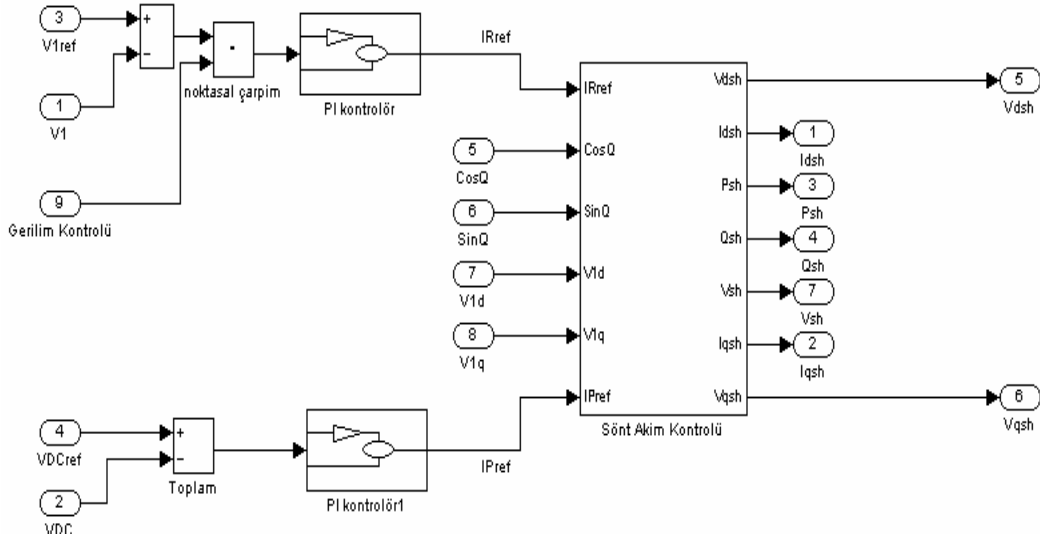
6.2. İletim Hattı 1 Modeli



Şekil 6.3 İletim hattı 1 modeli.

İletim hattı 1 modeli ile bara 1 gerilimi ve bu baradaki aktif ve reaktif güç akışları hesaplanmaktadır. Bu blok bölüm 5'te verilen ilgili denklemler kullanılarak modellenmiştir. Bu bloğa giriş olarak I_{sh} , I_{se} ve I_y akım bileşenleri ve kaynak gerilimi bileşenleri verilmiştir. İletim hattı 1 modelinden elde edilen $\sin\theta$ ve $\cos\theta$ bilgileri şönt konverter kontrol modeli ve yük modeline verilmektedir.

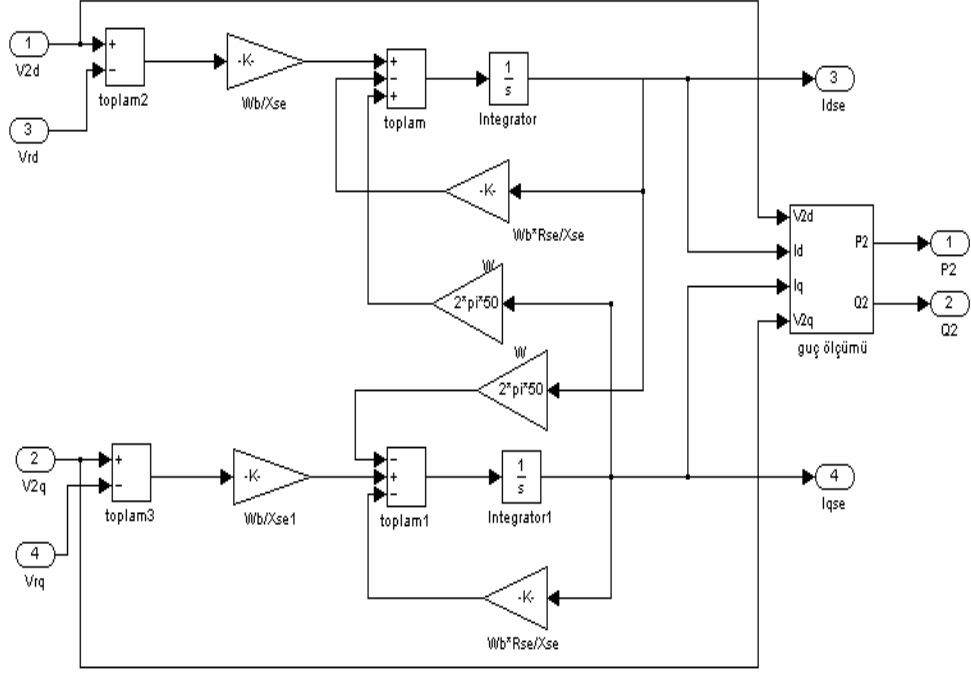
6.3. Şönt Konverter Kontrol Modeli



Şekil 6.4 Şönt konverter kontrol modeli.

Şönt konverter kontrol modeli bölüm 5'te verilen ilgili kontrol şeması kullanılarak modellenmiştir. İletim hattı 1 bloğundan elde edilen V_1 gerilimi ve DC gerilim modeli bloğundan elde edilen V_{dc} gerilimi, şönt konverter kontrol modeli bloğunda referans değerleri ile karşılaştırılmaktadır. Aradaki hata PI kontrolörlere gönderilmektedir. PI kontrolör çıkışları, şönt akım aktif ve reaktif referans bileşenleridir. PI kontrolörleri ile bu referans bileşenler ayarlanmaktadır. Şönt akım aktif ve reaktif referans bileşenleri iletim hattı 1 bloğundan elde edilen $\sin\theta$ ve $\cos\theta$ bilgileri ile şönt akım kontrolü bloğunda d ve q bileşenlerine dönüştürülmektedir. Buradan elde edilen şönt akım d ve q bileşenleri iletim hattı 1 bloğuna verilmektedir. Şönt akım kontrolü bloğunda aynı zamanda ilgili denklemler kullanılarak şönt konverter çıkış gerilimi d ve q bileşenleride hesaplanmaktadır.

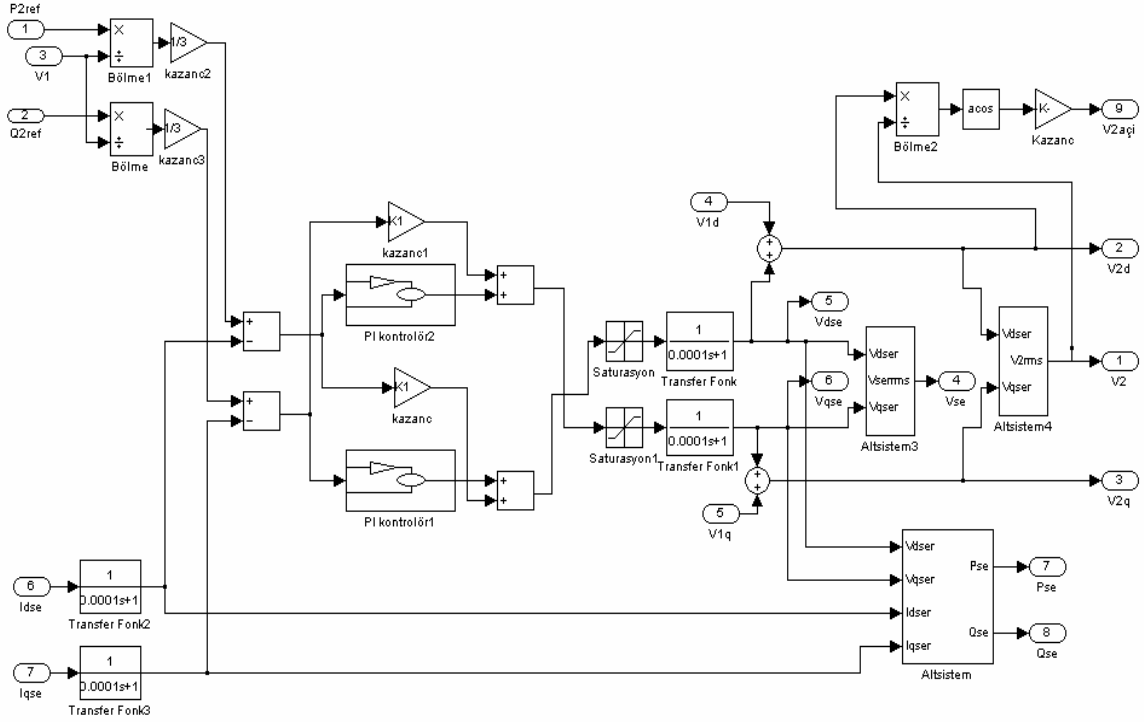
6.4. İletim Hattı 2 Modeli



Şekil 6.5 İletim Hattı 2 Modeli

İletim hattı 2 modeli ile iletim hattı akımı (I_{se}) ve bara 2 aktif ve reaktif güçleri hesaplanmaktadır. Bu blok bölüm 5'te verilen denklemler kullanılarak yukarıda görülen temel simulink bloklarıyla modellenmiştir. Bu bloğa giriş olarak V_2 ve V_r gerilimi d ve q bileşenleri verilmiştir. Bu bloktan elde edilen iletim hattı akımı (I_{se}) seri konverter kontrol modeli ve iletim hattı 1 modeli bloğuna verilmektedir.

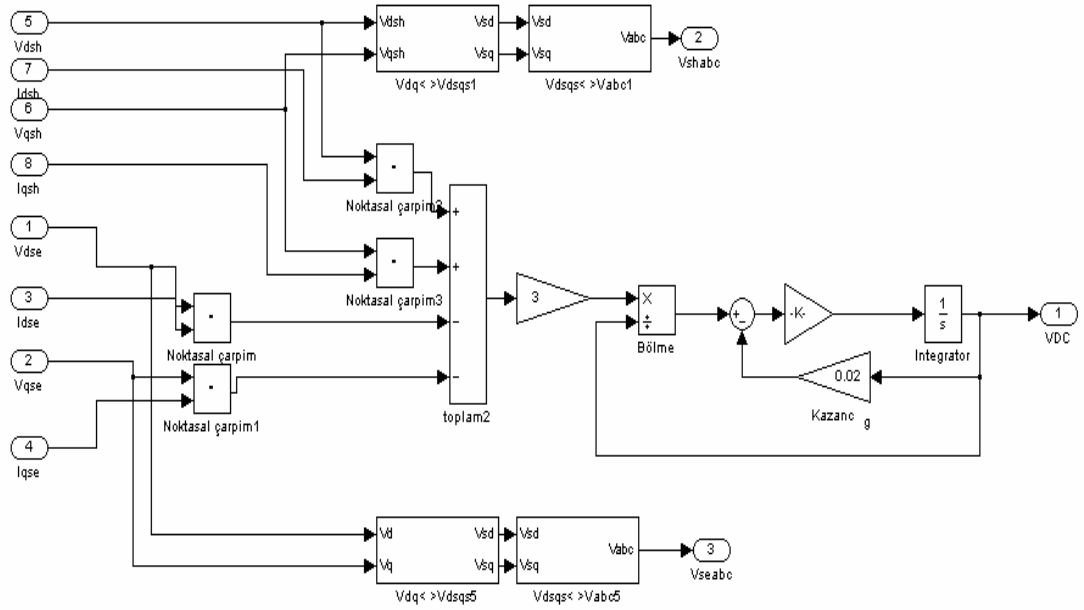
6.5. Seri Konverter Kontrol Modeli



Şekil 6.6 Seri konverter kontrol modeli.

Seri konverter kontrol modeli bölüm 5'te verilen ilgili kontrol şeması kullanılarak simulink bloklarıyla modellenmiştir. Burada aktif ve reaktif güç referanslarından elde edilen referans akımlar, iletim hattı akımlarıyla karşılaştırılarak aradaki hata kontrolörlere gönderilmektedir. İletim hattı akım bileşenleri ve seri gerilim bileşenleri için filtre ve geciktirme amaçlı bloklar kullanılmıştır. Saturasyon blokları kullanarak seri konverter çıkış gerilimi bileşenleri sınırlandırılmıştır. Kullanılan sınırlar $[0.5, -0.5]$ şeklindedir. Seri konverter kontrol modeli bloğunda üretilen seri gerilimler iletim hattı gerilim bileşenlerine eklenmektedir. Bu blokta V_2 gerilimi, seri konverter aktif ve reaktif gücü hesaplanmaktadır..

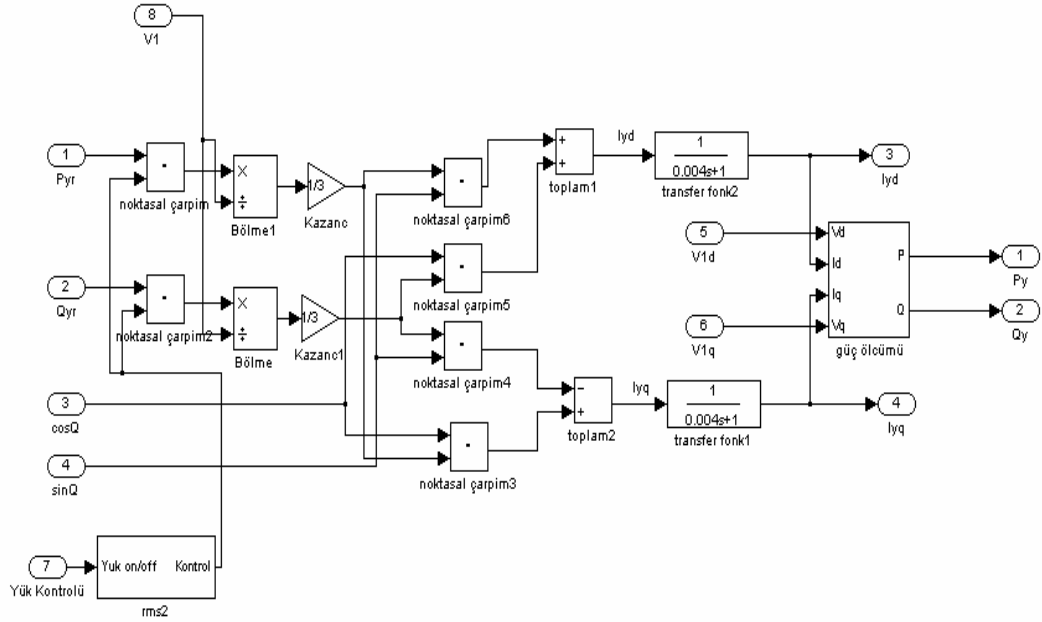
6.6. UPFC DC gerilim Modeli



Şekil 6.7 UPFC DC gerilim Modeli

UPFC DC gerilim modeli bölüm 5’te verilen ilgili denklemler kullanılarak simulink bloklarıyla modellenmiştir.

6.7. Yük Modeli



Şekil 6.8 Yük Modeli

Şönt konverter kontrol modelinde olduğu gibi yük modelinde de aktif ve reaktif yük akımı bileşenleri iletim hattı 1'den elde edilen $\sin\theta$ ve $\cos\theta$ bilgileri ile d ve q bileşenlerine dönüştürülmektedir. Buradan elde edilen yük akımı d ve q bileşenleri iletim hattı 1 modeline verilmektedir. Yük burada bir gerilim bağımlı güç tüketicisi olarak modellenmiştir. Bu modelde yük akımlarının gecikmesini sağlamak için transfer fonksiyonu blokları kullanılmaktadır.

7. UYGULAMALAR

7.1. Giriş

Benzetim çalışmaları şunları içermektedir;

1. İletim hattı bara 1 geriliminin kontrolü,
2. Hat sonu aktif ve reaktif gücünün kontrolü,

Bölüm 6'da Matlab/simulink ortamında modellenen sistemin özellikleri, bu bölümde çeşitli durumlar için benzetim yapılarak incelenmiştir. Benzetim metodu olarak ode45 (dormand-prince) kullanılmıştır. İlk üç uygulamada, UPFC şönt konverterinin bağlı olduğu bara 1 geriliminin kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde UPFC seri konverter kapasitesi kullanılmamıştır. UPFC, indüktif veya kapasitif yük devreye girdiğinde reaktif güç desteği ile bara 1 gerilimini referans değerde tutmaktadır.

Diğer uygulamalarda ise UPFC şönt ve seri konverter kapasiteleri kullanılmıştır. Bu çalışmalarda UPFC, hem bara 1 gerilimini düzenlemekte, hem de iletim hattı bara 2 aktif ve reaktif güç akışını kontrol etmektedir. UPFC bara 1 gerilimi kontrolü belirli aralıklarda veya belirli bir sürede devreye alınmıştır. Seri konverter kontrolü ise her zaman devrededir.

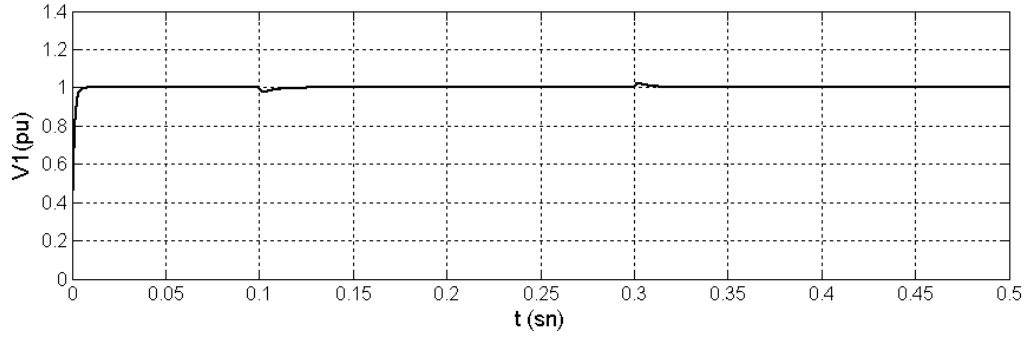
UPFC ve iletim sistemi parametreleri;

$$R_s = 0.0075, X_s = 0.075, X_{sh} = 0.15, R_{sh} = 0.01, b_{cap} = 2.0, g_{cap} = 0.02, V_s = 1.0 \angle 30^\circ, V_r = 1.0$$

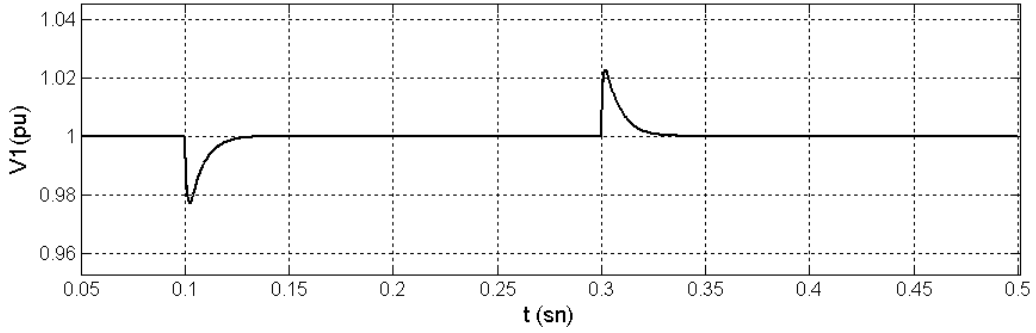
şeklindedir. Bütün değerler per-unit olarak verilmiştir. Sistemin baz değerleri UPFC için $S_b = 100$ MVA, $V_b = 400$ kV, iletim sistemi için $S_{bi} = 300$ MVA, $V_{bi} = 400$ kV şeklindedir.

7.1.1. Uygulama 1

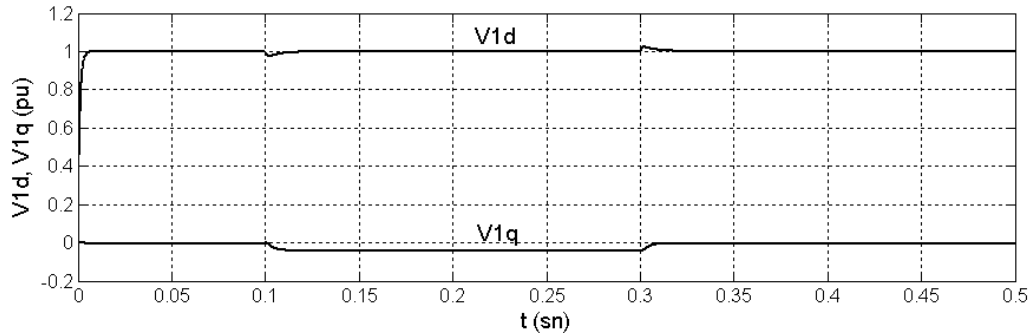
Bu bölümde sistemin bara 1 bölümüne indüktif yük eklendiğinde bara 1 geriliminin kontrolü yapılmıştır. Benzetim parametreleri; $V_s=1 \angle 0$ pu, $V_r=1 \angle 0$ pu, yük= $P+jQ=3+j2.25$ pu (g.f=0.8 geri), $V_{lref}=1$ pu, $V_{dref}=3.4$ pu . UPFC bara 1 gerilimi kontrolü $t=0.04$ 'te devreye girmektedir. Yük $t=0.1$ 'de devreye girmekte ve $t=0.3$ 'te devre dışı kalmaktadır. UPFC bara 1 gerilimi kontrolü $t=0.3$ 'te devre dışı kalmaktadır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.



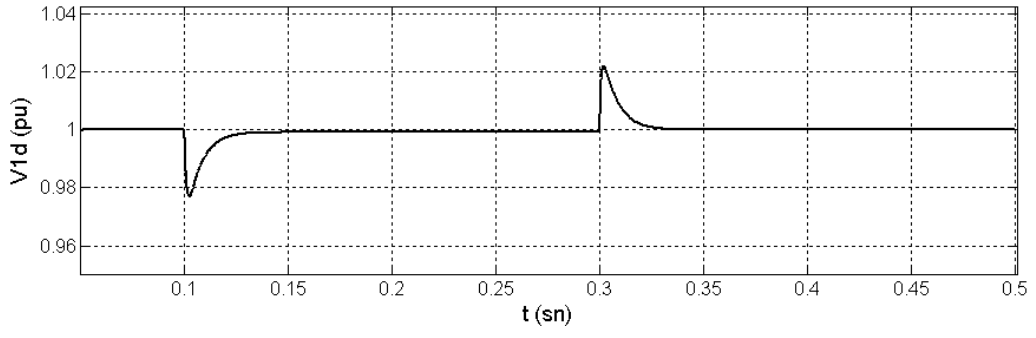
Şekil 7.1 (a) Bara 1 geriliminin zamana göre değişimi.



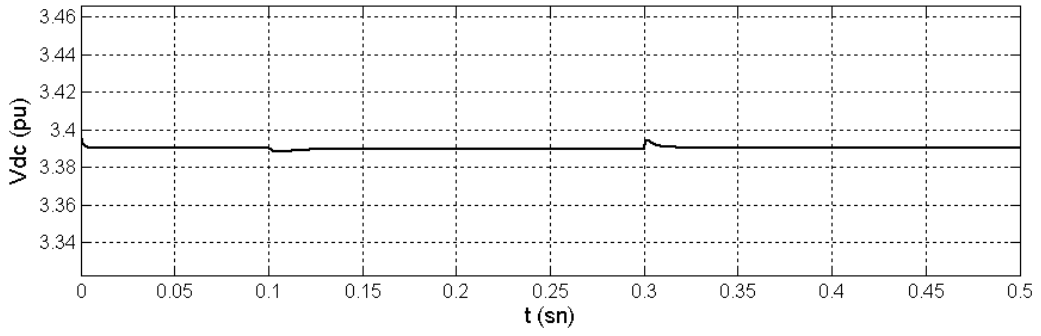
Şekil 7.1 (b) Bara 1 geriliminin $t=0.05$ 'te genişletilmiş grafiği.



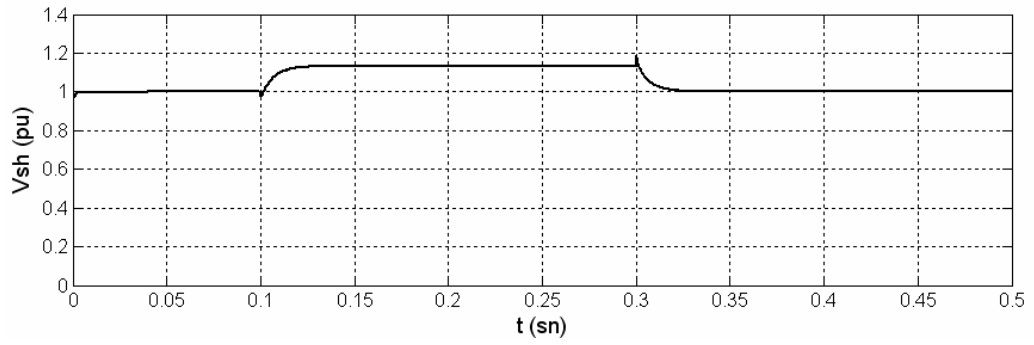
Şekil 7.2 (a) Bara 1 gerilimi V_{1d} ve V_{1q} bileşenlerinin zamana göre değişimleri.



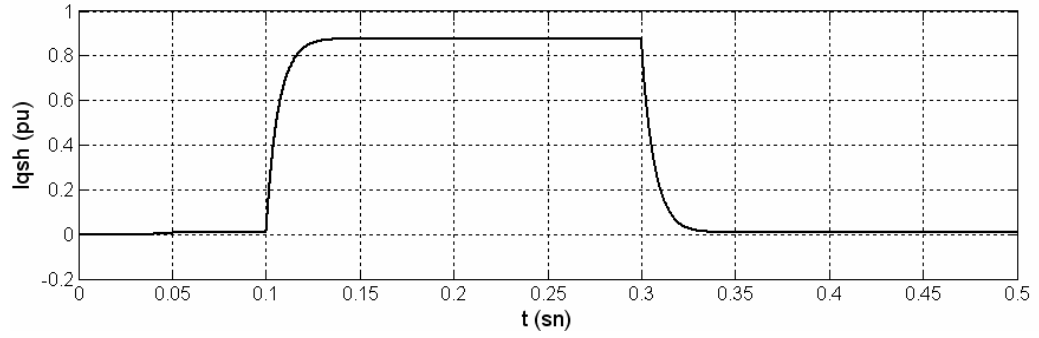
Şekil 7.2 (b) V_{1d} geriliminin $t=0.05$ 'te genişletilmiş grafiği.



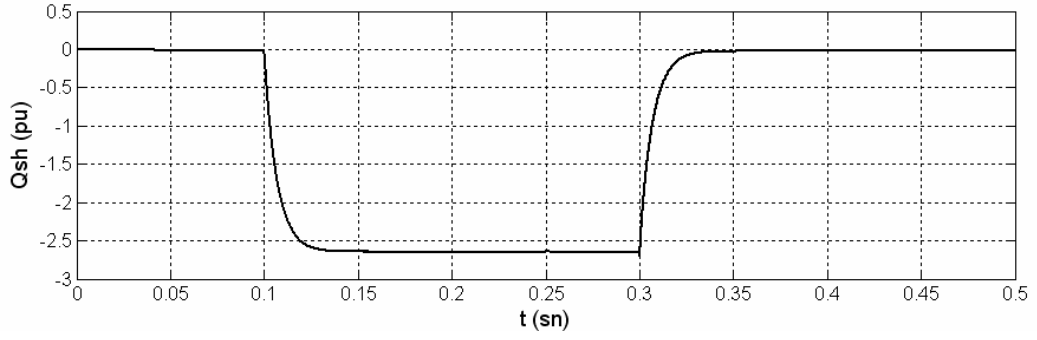
Şekil 7.3 DC gerilimin zamana göre değişimi.



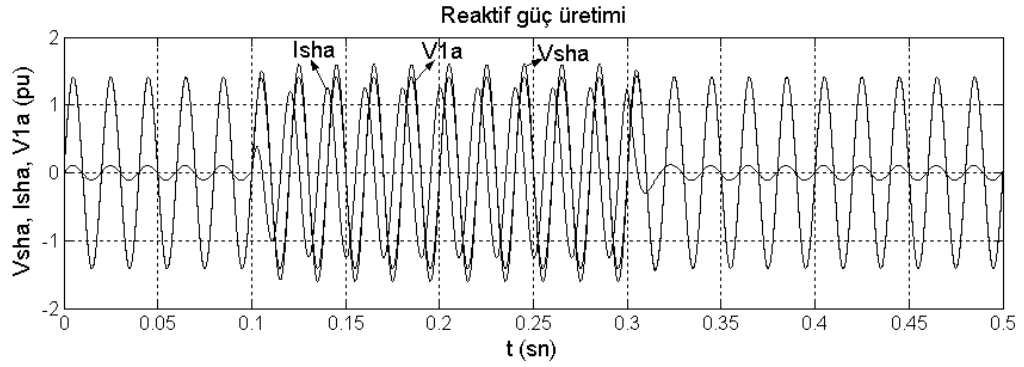
Şekil 7.4 Şönt konverter çıkış geriliminin (rms) zamana göre değişimi.



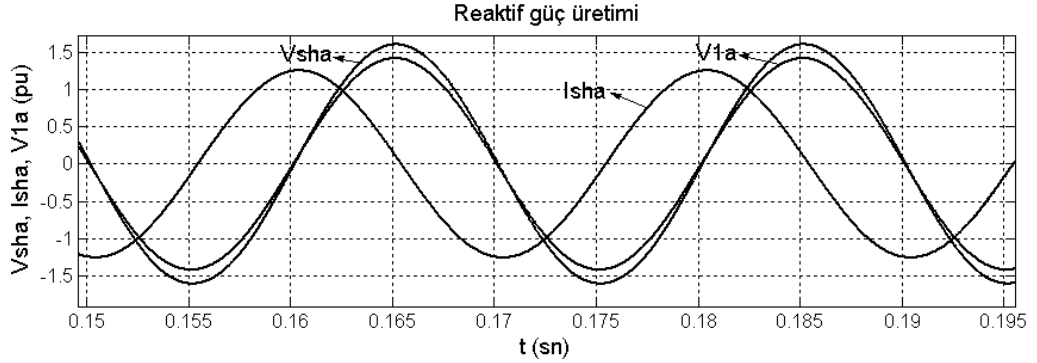
Şekil 7.5 Şönt konverter akımı I_{qsh} bileşeninin zamana göre değişimi.



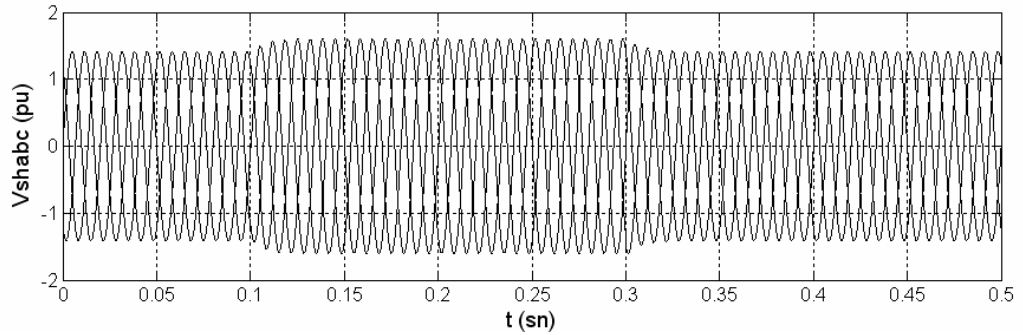
Şekil 7.6 Şönt konverter reaktif gücünün zamana göre değişimi.



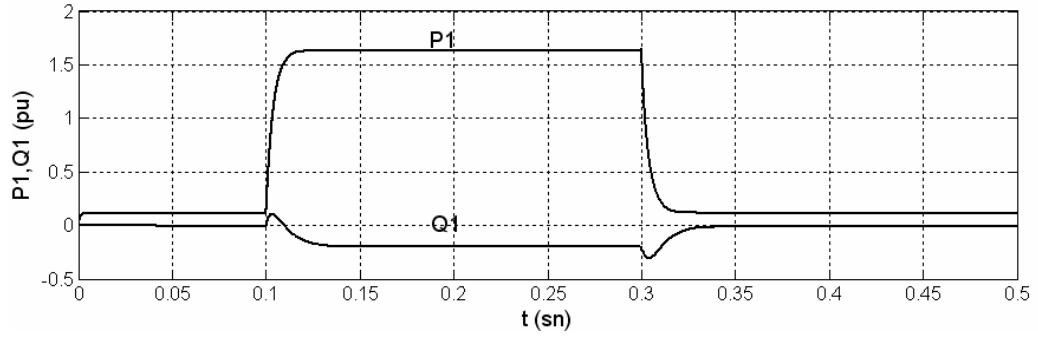
Şekil 7.7 (a) Şönt konverter kompanzasyon karakteristiği.



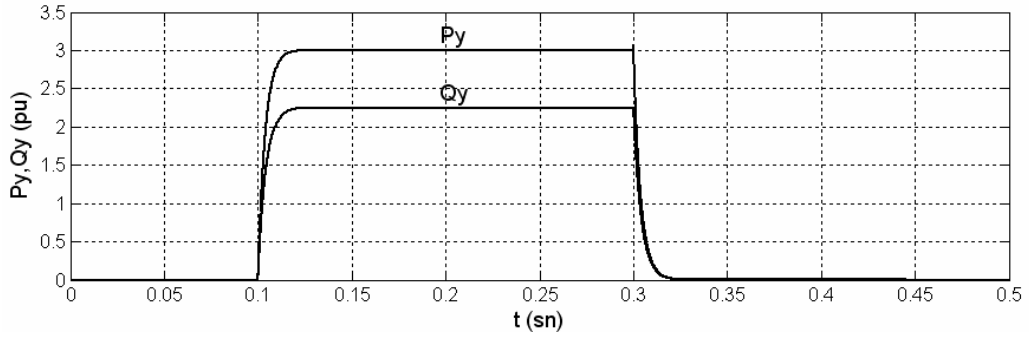
Şekil 7.7 (b) Şönt konverter $t=0.15$ 'te genişletilmiş kompanzasyon karakteristiği. (Vsha: Şönt konverter çıkış gerilimi a fazı, Isha: Şönt konverter çıkış akımı a fazı, V1a: Bara 1 gerilimi a fazı)



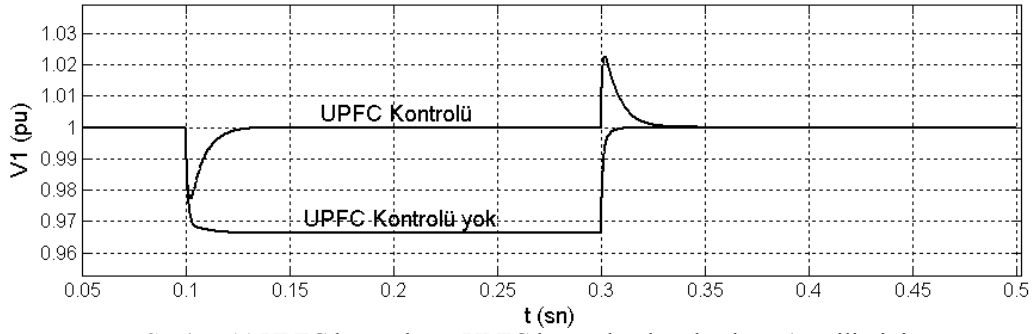
Şekil 7.8 Şönt konverter üç faz çıkış geriliminin zamana göre değişimi.



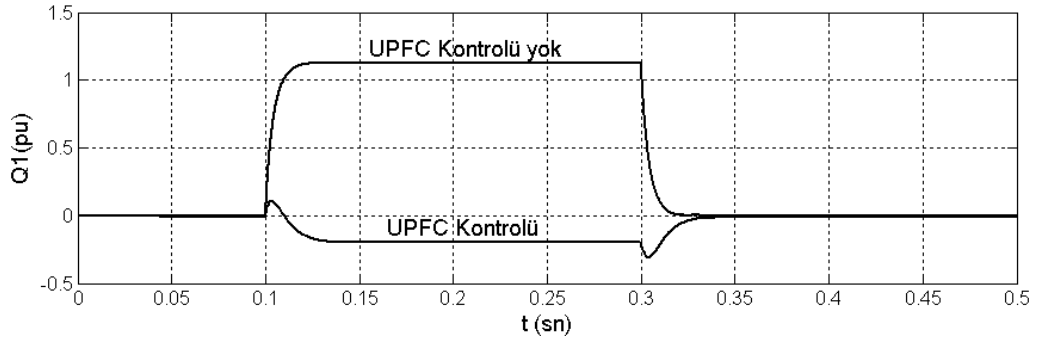
Şekil 7.9 Bara 1 aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi.



Şekil 7.10 Yük aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi.



Şekil 7.11 UPFC kontrolü ve UPFC kontrolü olmadan bara 1 geriliminin karşılaştırmalı olarak zamana göre değişimi.



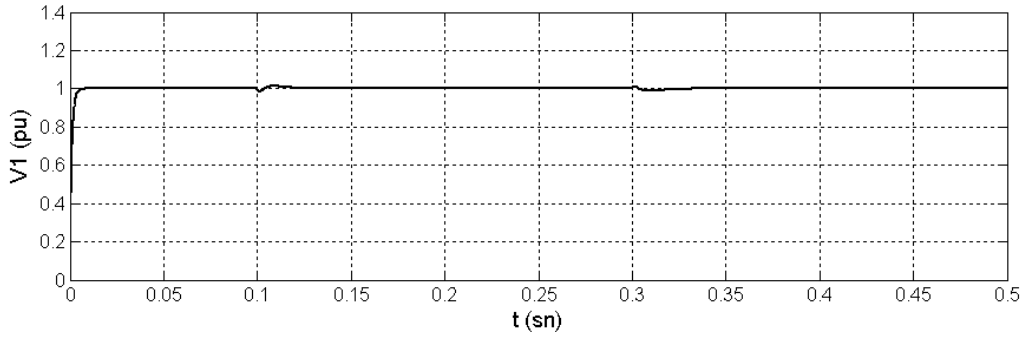
Şekil 7.12 UPFC kontrolü ve UPFC kontrolü olmadan bara 1 reaktif güç akışının karşılaştırmalı olarak zamana göre değişimi.

Uygulama 1'den elde edilen sonuçlara göre, $t=0.1$ 'de indüktif yük devre girdiği zaman bara 1 gerilimi azalmaktadır. Azalan bara 1 gerilimi çok kısa sürede UPFC bara 1 gerilimi kontrolü ile referans değer olan 1 pu değerine yükselmektedir. Şönt konverter gerilimi rms değeri (V_{sh}) yük devrede olduğu süre içinde bara 1 gerilimi rms değerinden (V_1) büyük bir değerdedir. Kompanzasyon karakteristiği ve Q_{sh} grafiklerine göre UPFC sisteme reaktif güç sağlayarak bara 1 gerilimini referans değerinde tutmaktadır. UPFC şönt konverteri bu durumda kapasitif modda çalışmaktadır.

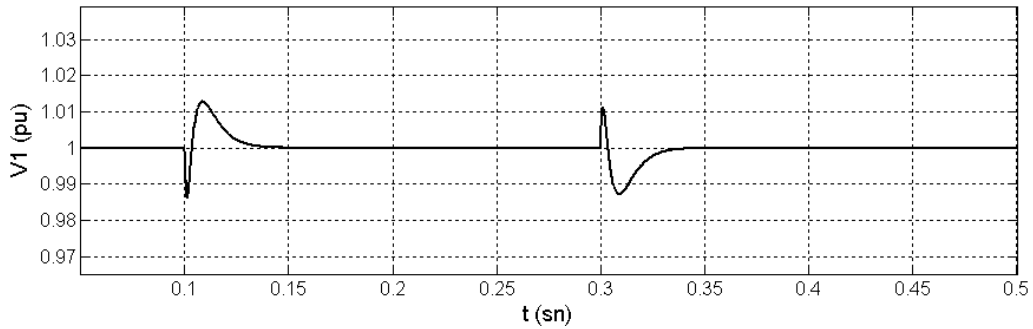
İndüktif yük $t=0.3$ 'te devre dışı kaldığında, bara 1 gerilimi kısa bir süre için yükselmekte, daha sonra ise tekrar referans değer olan 1 pu değerine sabitlenmektedir. Karşılaştırmalı grafiklerde ise UPFC kontrolünün etkisi görülmektedir.

7.1.2. Uygulama 2

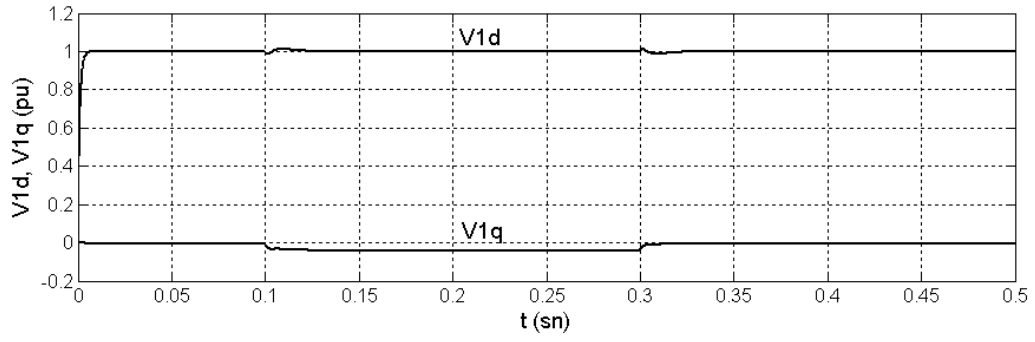
Bu bölümde sistemin bara 1 bölümüne kapasitif yük eklendiğinde bara 1 geriliminin kontrolü yapılmıştır. Benzetim parametreleri; $V_s=1 \angle 0$ pu, $V_r=1 \angle 0$ pu, yük= $P-jQ=3-j2.25$ pu (g.f = 0.8 ileri), $V_{1ref}=1$ pu, $V_{dref}=3.4$ pu. UPFC bara 1 gerilimi kontrolü $t=0.04$ 'te devreye girmektedir. Yük $t=0.1$ 'de devreye girmekte ve $t=0.3$ 'te devre dışı kalmaktadır. UPFC bara 1 gerilimi kontrolü $t=0.3$ 'te devre dışı kalmaktadır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.



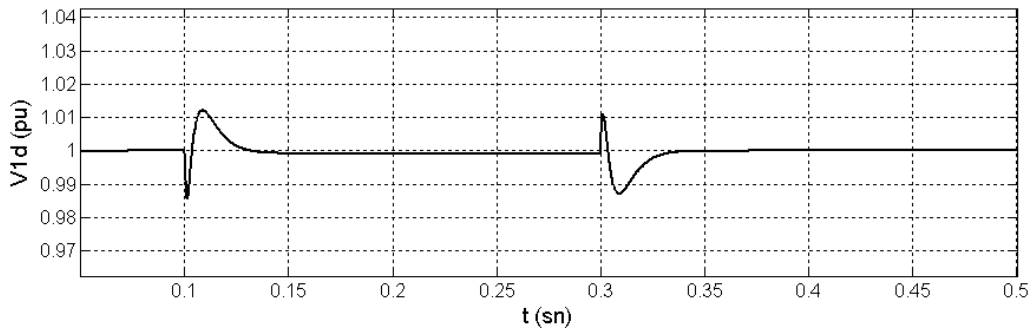
Şekil 7.13 (a) Bara 1 geriliminin zamana göre değişimi.



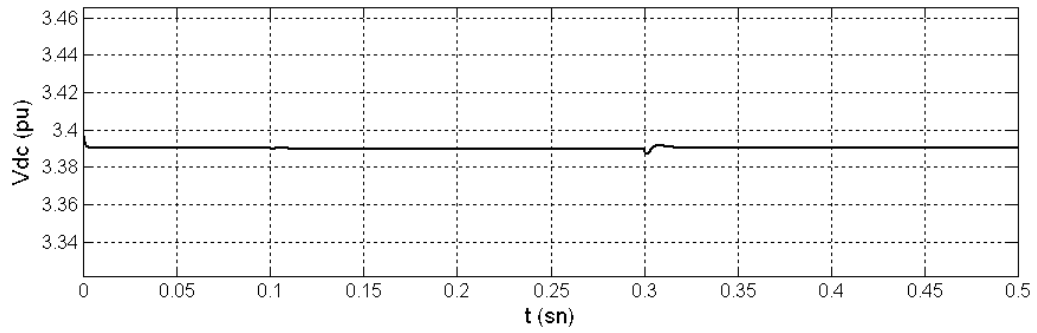
Şekil 7.13 (b) Bara 1 geriliminin $t =0.05$ 'te genişletilmiş grafiği.



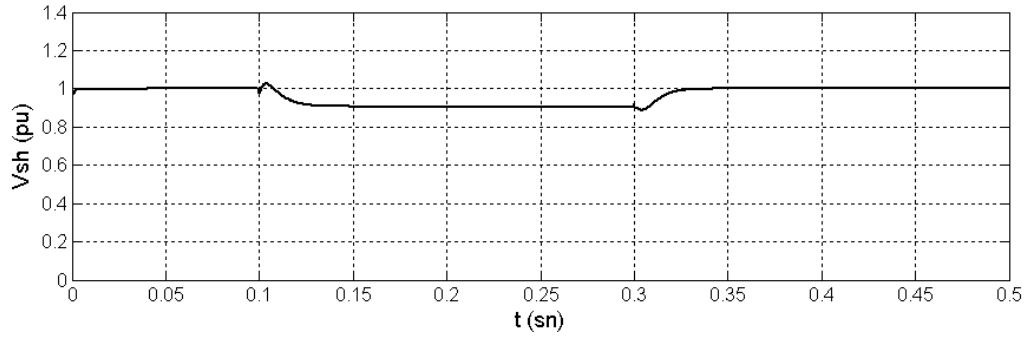
Şekil 7.14 Bara 1 gerilimi d ve q bileşenlerinin zamana göre değişimleri.



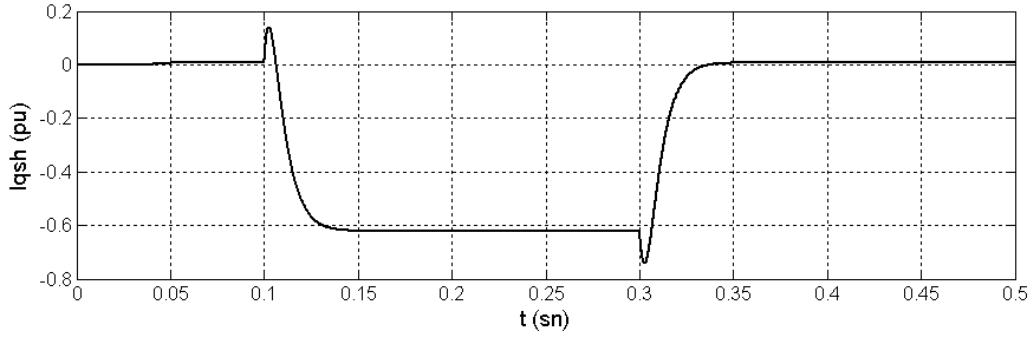
Şekil 7.15 Bara 1 gerilimi d bileşeninin zamana göre değişimi.



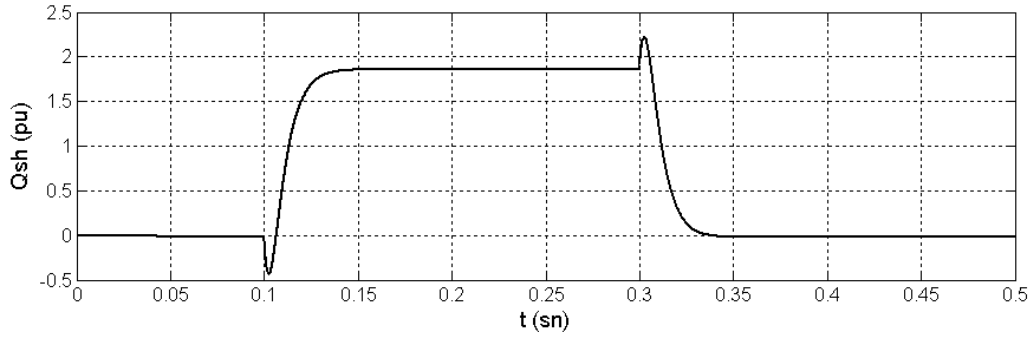
Şekil 7.16 DC gerilimin zamana göre değişimi.



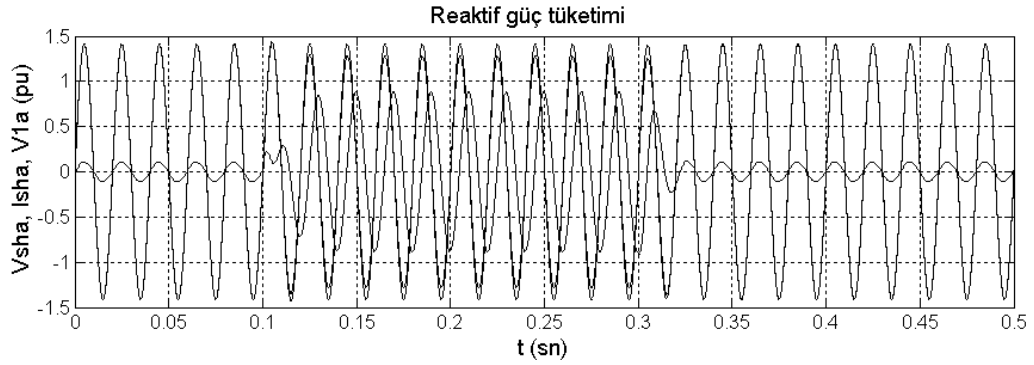
Şekil 7.17 Şönt konverter çıkış geriliminin (rms) zamana göre değişimi.



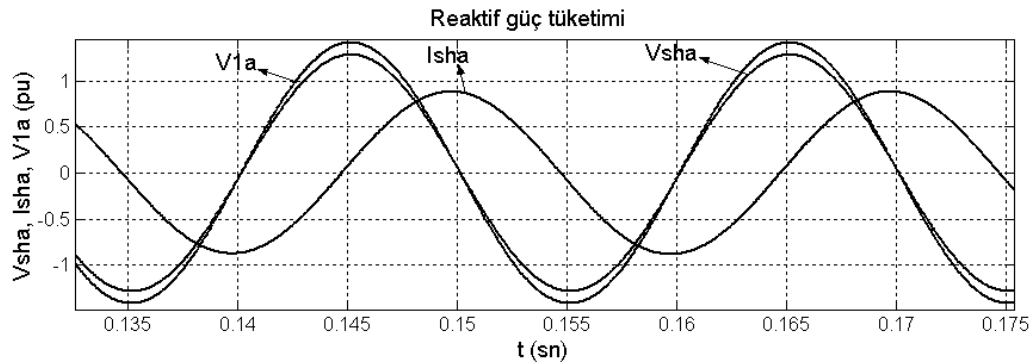
Şekil 7.18 Şönt konverter akımı I_{qsh} bileşeninin zamana göre değişimi.



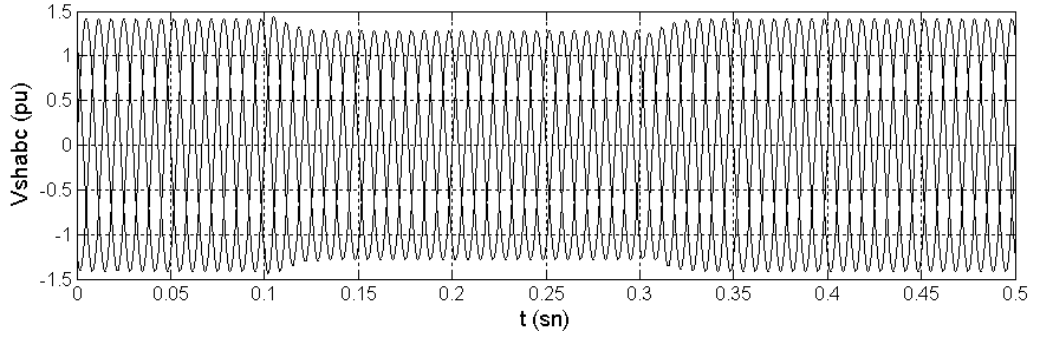
Şekil 7.19 Şönt konverter reaktif gücünün zamana göre değişimi.



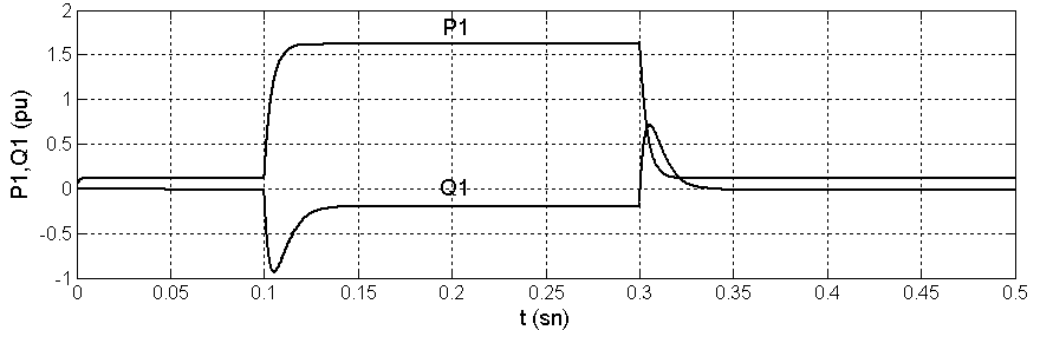
Şekil 7.20 (a) Şönt konverter kompanzasyon karakteristiği.



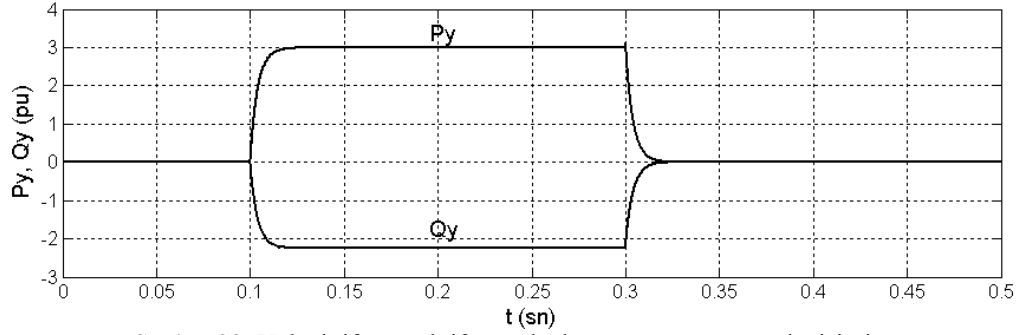
Şekil 7.20 (b) Şönt konverter $t=0.13$ 'te genişletilmiş kompanzasyon karakteristiği. (Vsha: Şönt konverter çıkış gerilimi a fazı, Isha: Şönt konverter çıkış akımı a fazı, V1a: Bara 1 gerilimi a fazı)



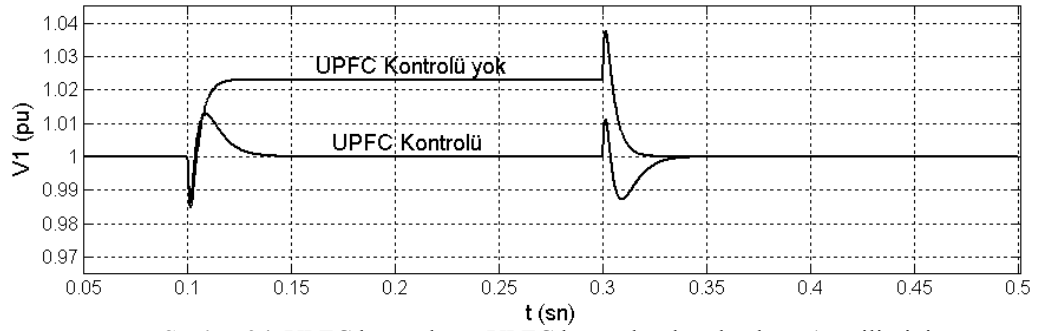
Şekil 7.21 Şönt konverter üç faz çıkış geriliminin zamana göre değişimi.



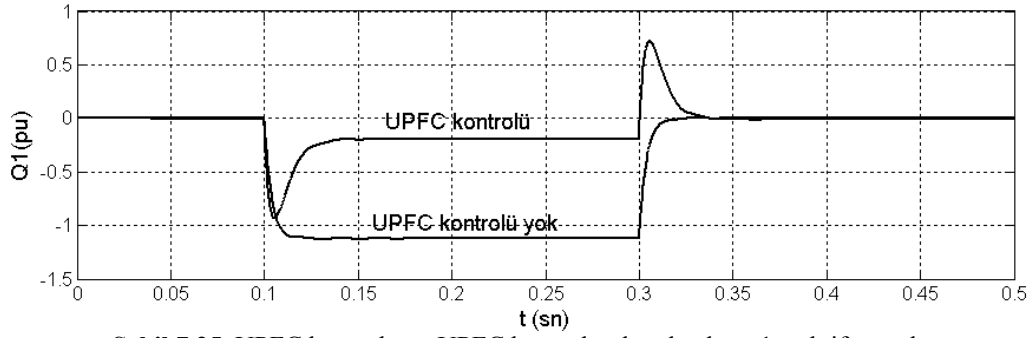
Şekil 7.22 Bara 1 aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi.



Şekil 7.23 Yük aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi.



Şekil 7.24 UPFC kontrolü ve UPFC kontrolü olmadan bara 1 geriliminin karşılaştırmalı olarak zamana göre değişimi.

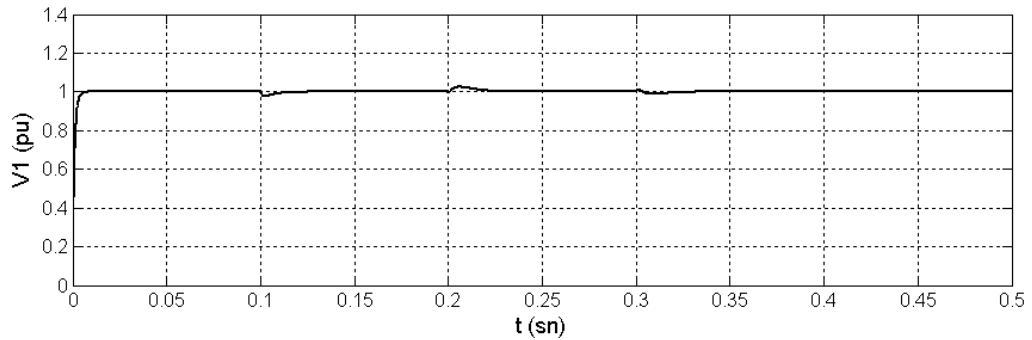


Şekil 7.25 UPFC kontrolü ve UPFC kontrolü olmadan bara 1 reaktif güç akışının karşılaştırmalı olarak zamana göre değişimi.

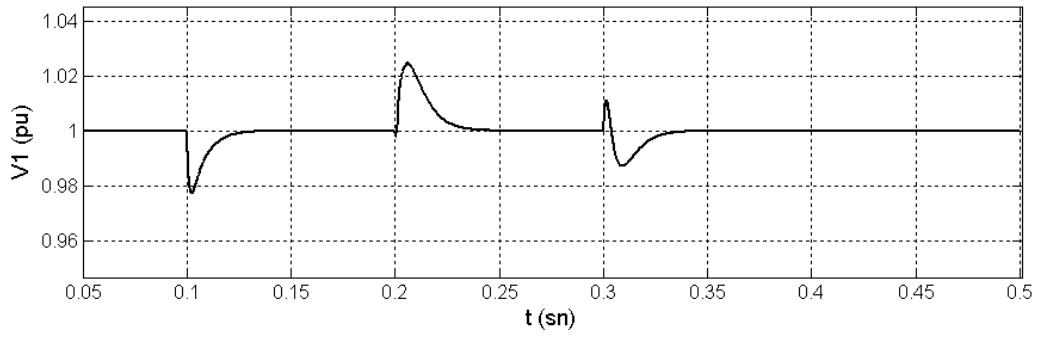
Uygulama 2’den elde edilen sonuçlara göre $t=0.1$ ’de kapasitif yük devre girdiği zaman bara 1 gerilimi artmaktadır. Artan bara 1 gerilimi çok kısa sürede UPFC bara 1 gerilimi kontrolü ile referans değer olan 1 pu değerine düşürülmektedir. Şönt konverter gerilimi rms değeri (V_{sh}) yük devrede olduğu süre içinde bara 1 gerilimi rms değerinden (V_1) küçük bir değerdedir. Kompanzasyon karakteristiğinde de görüldüğü gibi şönt konverter çıkış gerilimi genliği, iletim hattı bara 1 gerilimi genliğinden küçüktür. Kompanzasyon karakteristiği ve Q_{sh} grafiklerine göre UPFC sistemden reaktif güç çekerek bara 1 gerilimini referans değerde tutmaktadır. UPFC şönt konverteri bu durumda indüktif modda çalışmaktadır. Kapasitif yük $t=0.3$ ’te devre dışı kaldığında, bara 1 gerilimi kısa bir süre için yükselmekte, daha sonra ise tekrar referans değer olan 1 pu değerine sabitlenmektedir. Karşılaştırmalı grafiklerde ise UPFC kontrolünün etkisi görülmektedir.

7.1.3. Uygulama 3

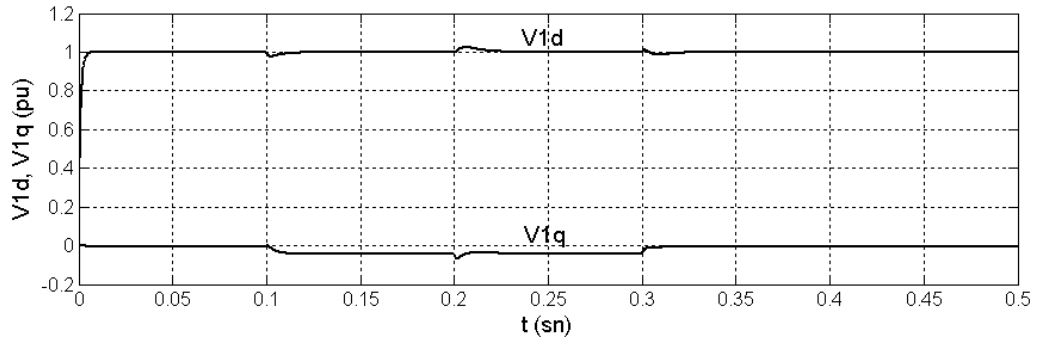
Bu bölümde değişken yükte, reaktif güç desteği ile bara 1 geriliminin kontrolü yapılmıştır. Benzetim parametreleri; $V_s=1 \angle 0$ pu, $V_r=1 \angle 0$ pu, $V_{ref}=1$ pu, $V_{dref}=3.4$ pu. Yük, $0.1 \leq t \leq 0.2$ aralığında $P+jQ=3+j2.25$ (g.f = 0.8 geri), $0.2 \leq t \leq 0.3$ aralığında $P-jQ=3-j2.25$ pu (g.f = 0.8 ileri), UPFC bara 1 gerilimi kontrolü $t=0.04$ ’te devreye girmektedir. UPFC bara 1 gerilimi kontrolü $t=0.3$ ’te devre dışı kalmaktadır. Yük $t=0.1$ ’de devreye girmekte ve $t=0.3$ ’te devre dışı kalmaktadır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.



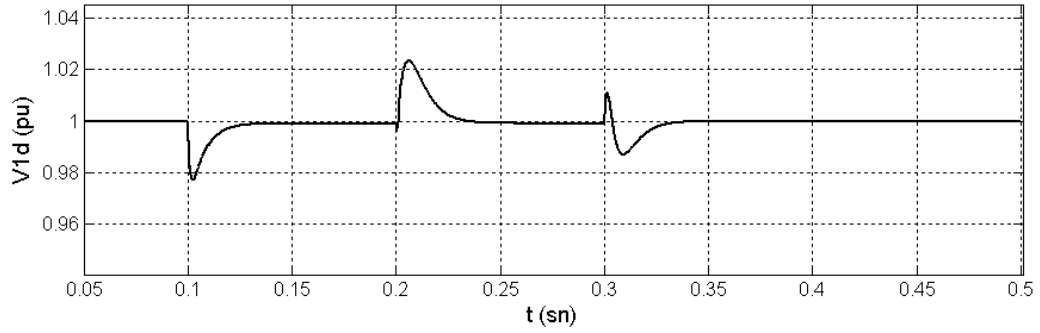
Şekil 7.26 (a) Bara 1 geriliminin zamana göre değişimi.



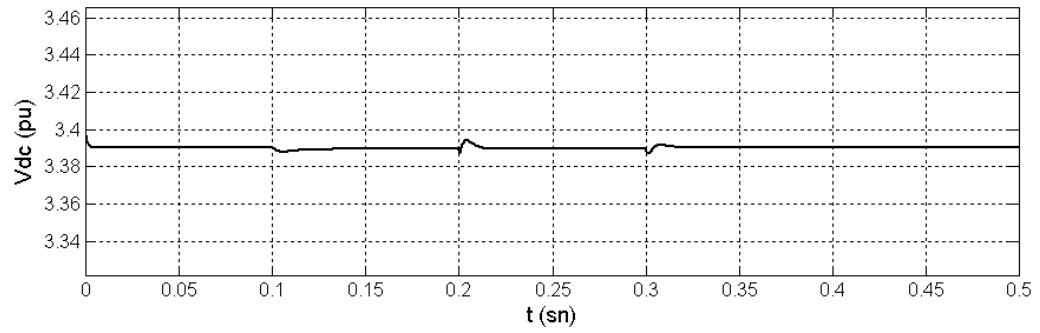
Şekil 7.26 (b) Bara 1 geriliminin $t=0.05$ 'te genişletilmiş grafiği.



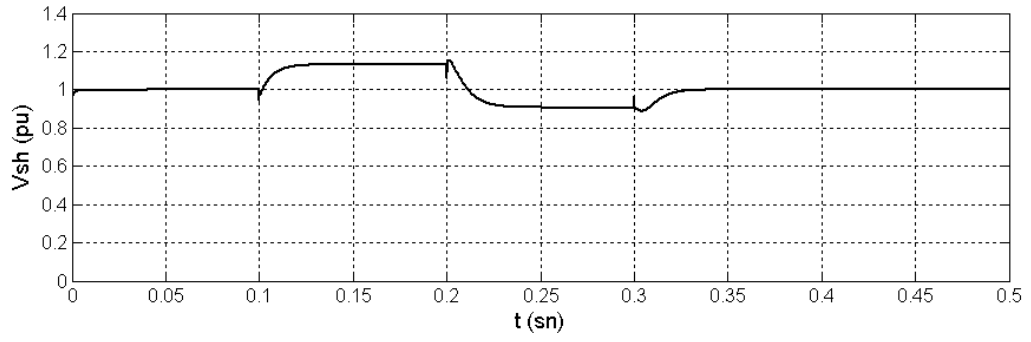
Şekil 7.27 (a) Bara 1 gerilimi V_{1d} ve V_{1q} bileşenlerinin zamana göre değişimleri.



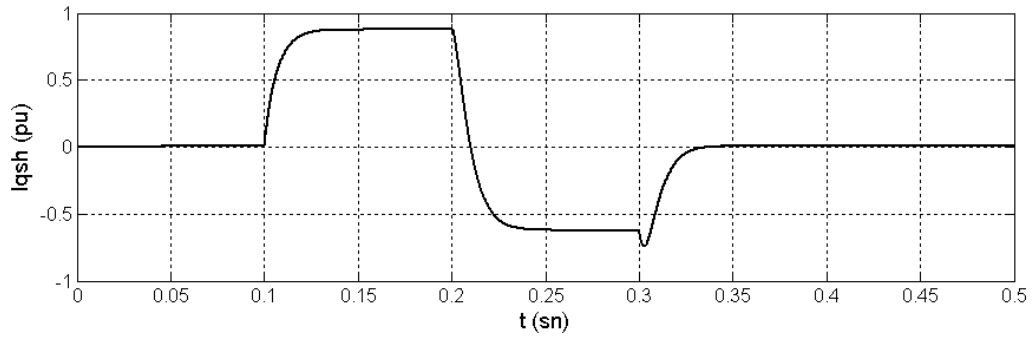
Şekil 7.27 (b) V_{1d} geriliminin $t=0.05$ 'te genişletilmiş grafiği.



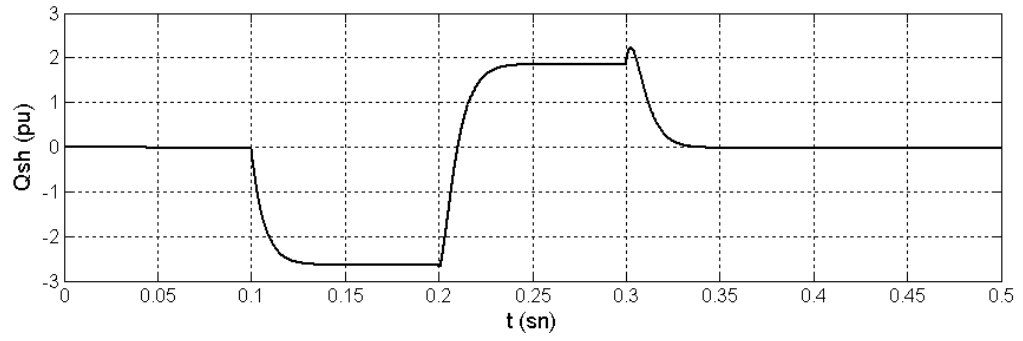
Şekil 7.28 DC gerilimin zamana göre değişimi.



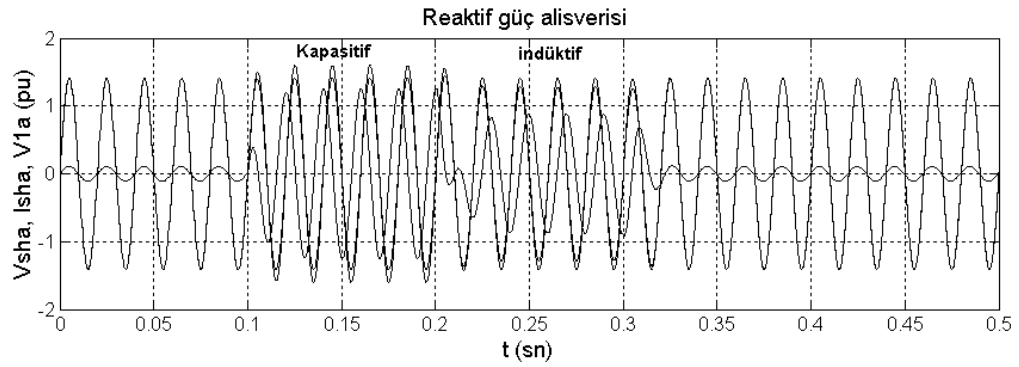
Şekil 7.29 Şönt konverter çıkış geriliminin (rms) zamana göre değişimi.



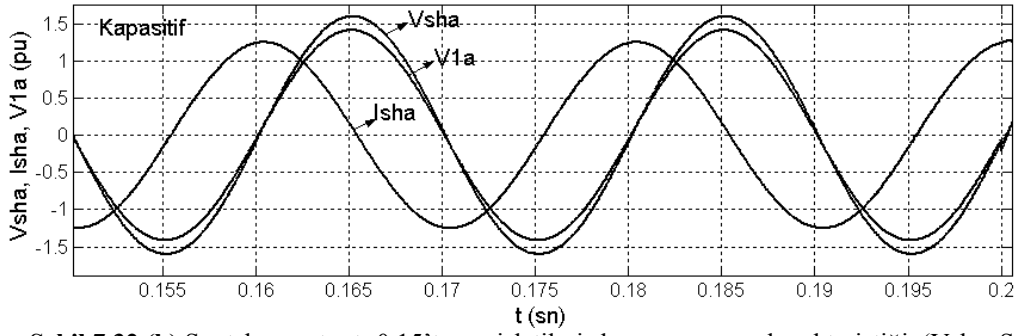
Şekil 7.30 Şönt konverter akımı I_{qsh} bileşeninin zamana göre değişimi.



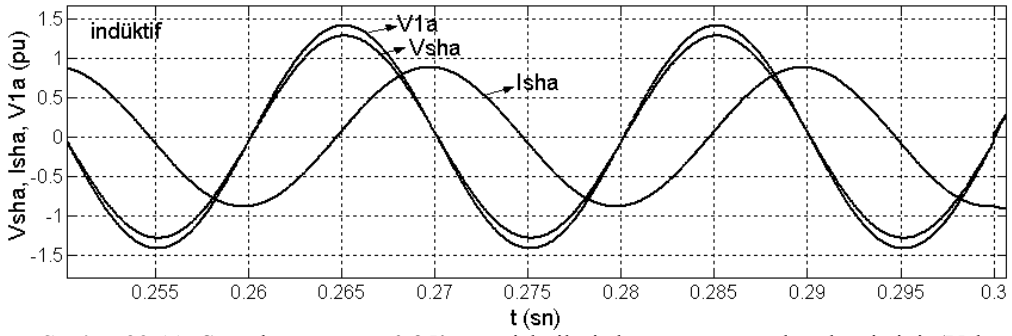
Şekil 7.31 Şönt konverter reaktif gücünün zamana göre değişimi.



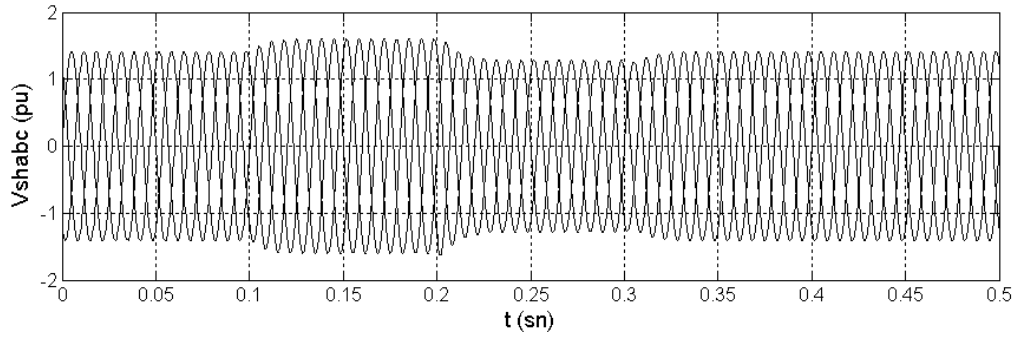
Şekil 7.32 (a) Şönt konverter kompanzasyon karakteristiği.



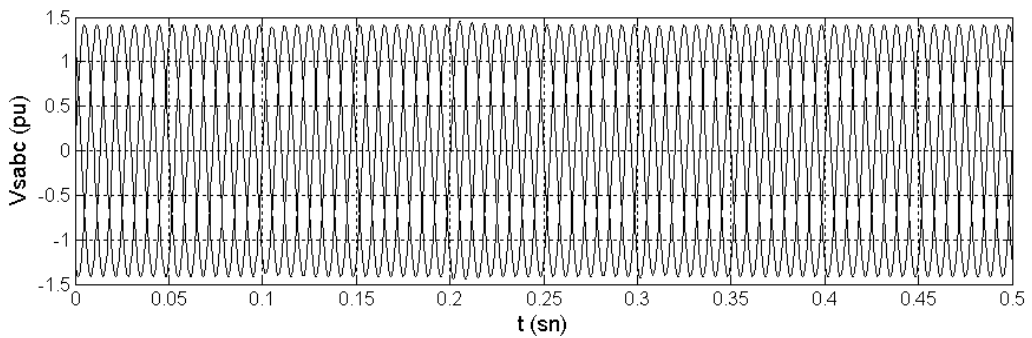
Şekil 7.32 (b) Şönt konverter $t=0.15$ 'te genişletilmiş kompanzasyon karakteristiği. (Vsha: Şönt konverter çıkış gerilimi a fazı, Isha: Şönt konverter çıkış akımı a fazı, V1a: Bara 1 gerilimi a fazı)



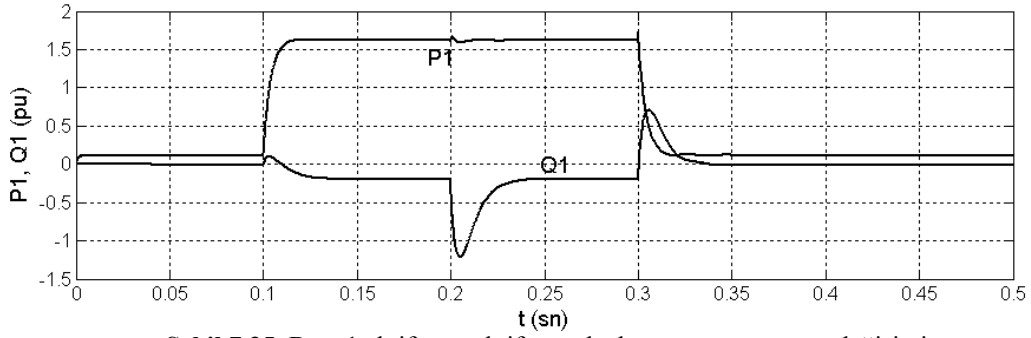
Şekil 7.32 (c) Şönt konverter $t=0.25$ 'te genişletilmiş kompanzasyon karakteristiği. (Vsha: Şönt konverter çıkış gerilimi a fazı, Isha: Şönt konverter çıkış akımı a fazı, V1a: Bara 1 gerilimi a fazı)



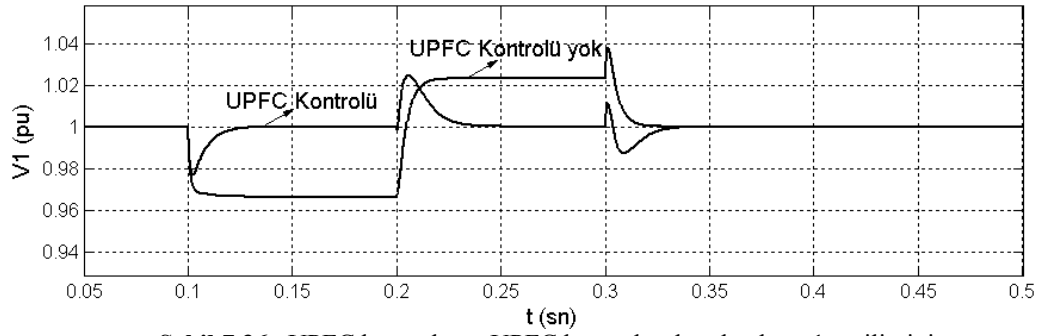
Şekil 7.33 Şönt konverter üç faz çıkış geriliminin zamana göre değişimi.



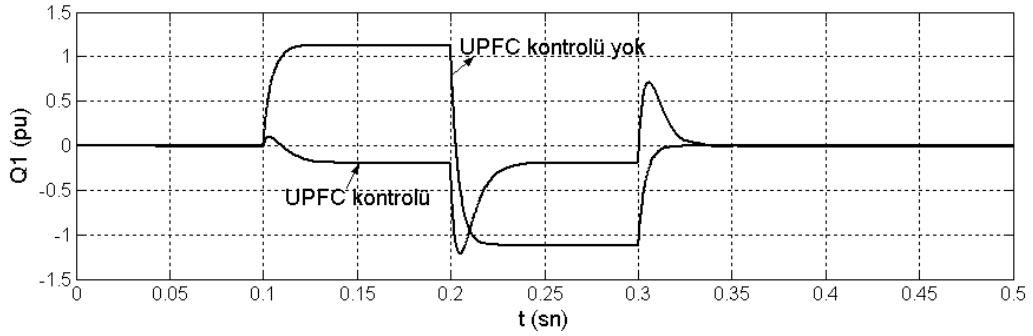
Şekil 7.34 Kaynak üç faz geriliminin zamana göre değişimi.



Şekil 7.35 Bara 1 aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi.



Şekil 7.36 UPFC kontrolü ve UPFC kontrolü olmadan bara 1 geriliminin karşılaştırmalı olarak zamana göre değişimi

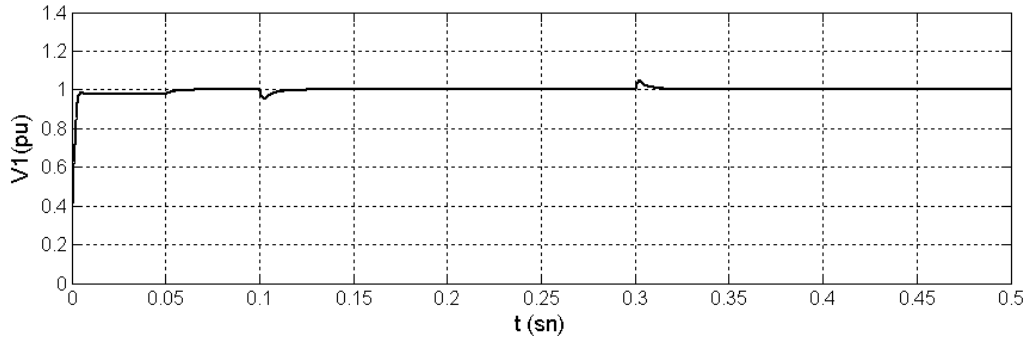


Şekil 7.37 UPFC kontrolü ve UPFC kontrolü olmadan bara 1 reaktif güç akışının karşılaştırmalı olarak zamana göre değişimi.

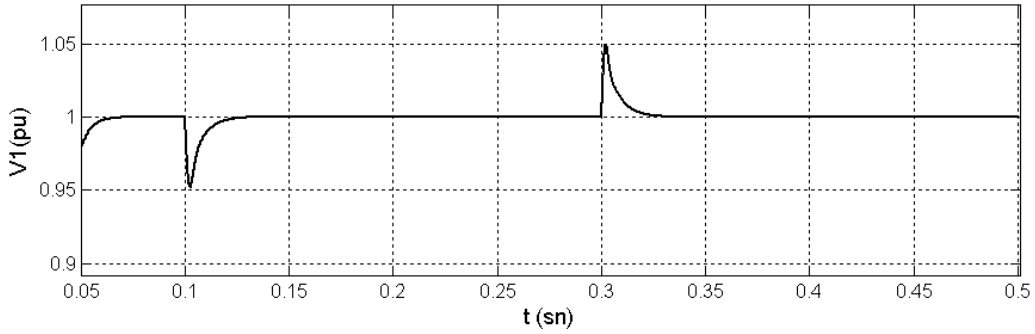
Uygulama 3'ten elde edilen sonuçlara göre, $t=0.1$ 'de $P+jQ$ yükü devreye girdiği zaman bara 1 gerilimi azalmaktadır. Azalan bara 1 gerilimi çok kısa sürede UPFC bara 1 gerilimi kontrolü ile referans değer olan 1 pu değerine yükseltilmektedir. $P+jQ$ yükü $t=0.2$ 'de devre dışı kalmaktadır. $t=0.2$ 'de $P-jQ$ yükü devreye girdiği zaman bara 1 gerilimi artmaktadır. Artan bara 1 gerilimi çok kısa sürede UPFC bara 1 gerilimi kontrolü ile referans değer olan 1 pu değerine düşürülmektedir. $P-jQ$ yükü $t=0.3$ 'te devre dışı kalmaktadır. I_{qsh} , Q_{sh} , V_{sh} ve kompanzasyon karakteristiği grafiklerine göre UPFC, $0.1 \leq t \leq 0.2$ aralığında sisteme reaktif güç sağlamakta (kapasitif mod), $0.2 \leq t \leq 0.3$ aralığında ise sistemden reaktif güç çekmektedir (indüktif mod). Bu şekilde bara 1 gerilimi referans değerinde tutulmaktadır. Karşılaştırmalı grafiklerde ise UPFC kontrolünün etkisi görülmektedir.

7.1.4. Uygulama 4

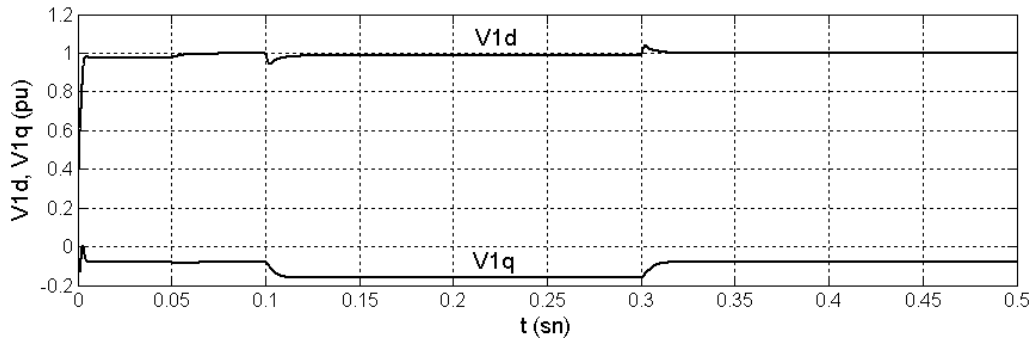
Bu bölümde iletim hattı bara 2 aktif gücü kontrolü ve reaktif güç desteği ile bara 1 geriliminin kontrolü yapılmıştır. Benzetim parametreleri; $V_s = 1 \angle 0$ pu, $V_r = 1 \angle 0$ pu, yük= $P+jQ=3+j2.25$ pu (g.f =0.8 geri), $V_{1ref}=1$ pu, $V_{dref}=3.4$ pu, $P_{2ref} = 3$ pu . UPFC bara 1 gerilimi kontrolü $t=0.05$ 'te devreye girmektedir. UPFC bara 1 gerilimi kontrolü $t= 0.3$ 'te devre dışı kalmaktadır. Yük $t=0.1$ 'de devreye girmekte ve $t= 0.3$ 'te devre dışı kalmaktadır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.



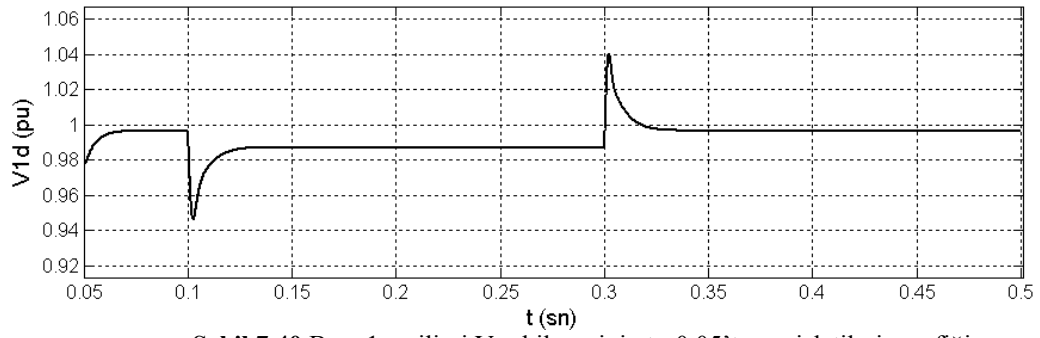
Şekil 7.38 (a) Bara 1 geriliminin zamana göre değişimi.



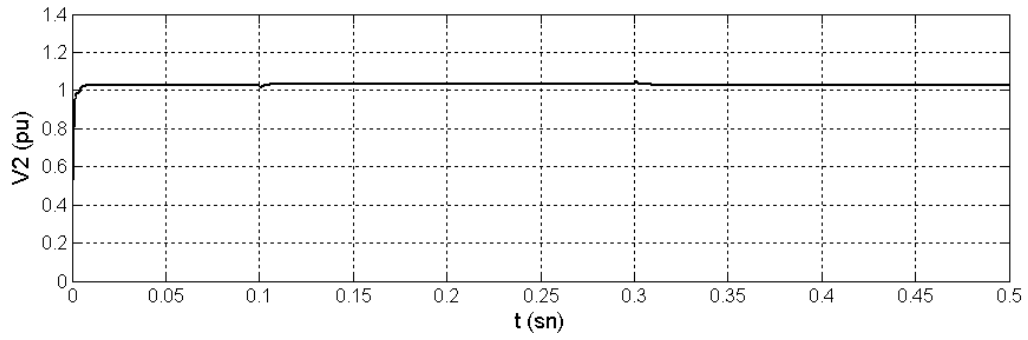
Şekil 7.38 (b) Bara 1 geriliminin $t=0.05$ 'te genişletilmiş grafiği.



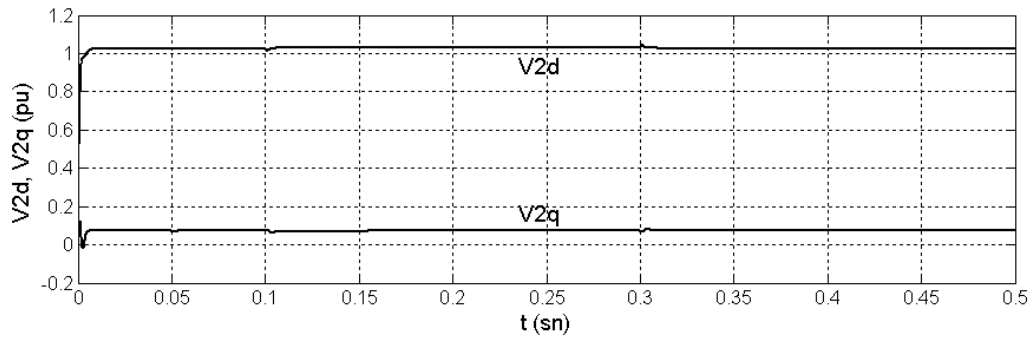
Şekil 7.39 Bara 1 gerilimi V_{1d} ve V_{1q} bileşenlerinin zamana göre değişimleri.



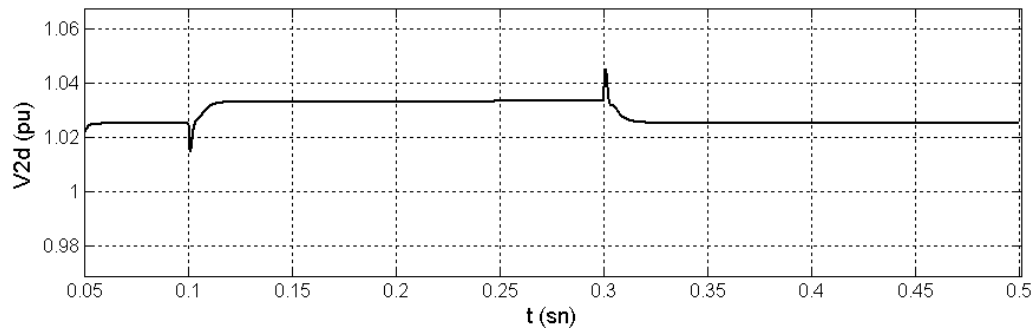
Şekil 7.40 Bara 1 gerilimi V_{1d} bileşeninin $t=0.05$ 'te genişletilmiş grafiği.



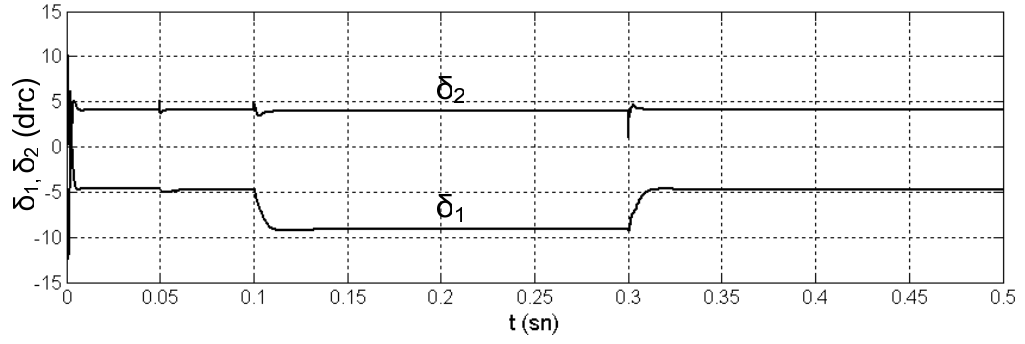
Şekil 7.41 Bara 2 geriliminin zamana göre değişimi.



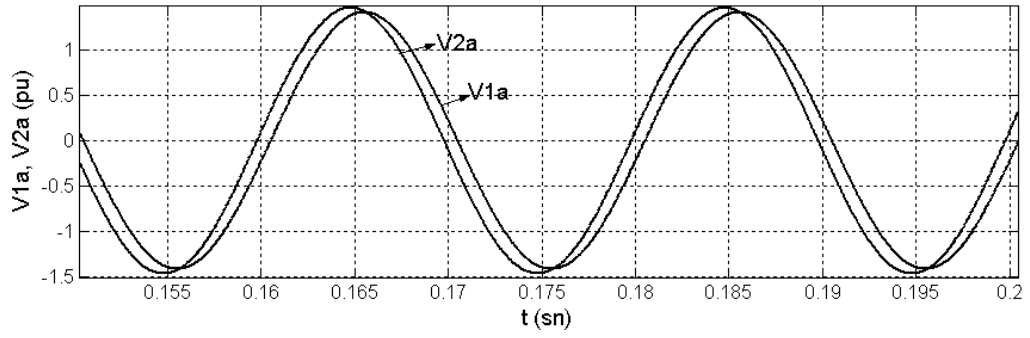
Şekil 7.42 Bara 2 gerilimi V_{2d} ve V_{2q} bileşenlerinin zamana göre değişimleri.



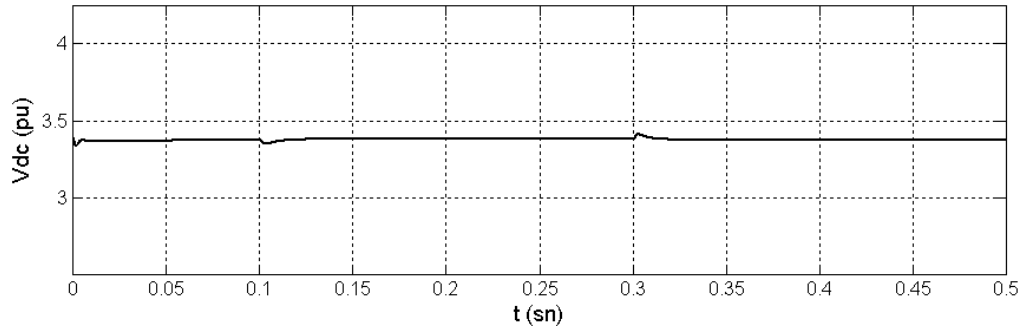
Şekil 7.43 Bara 2 gerilimi V_{2d} bileşeninin $t=0.05$ 'te genişletilmiş grafiği.



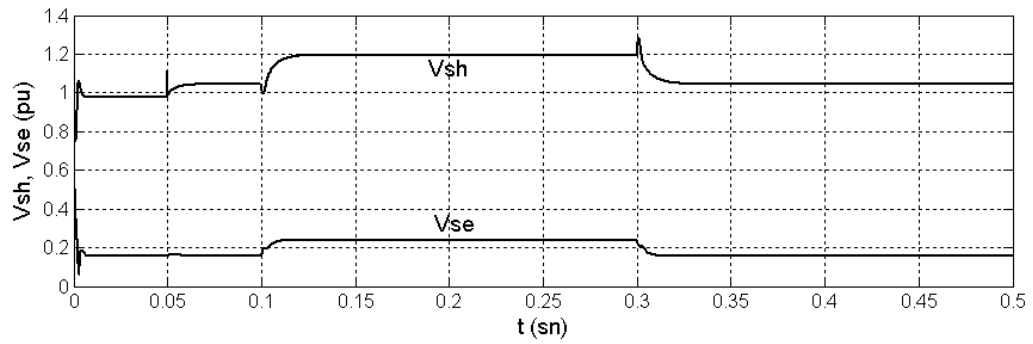
Şekil 7.44 Bar 1 ve bar 2 gerilim açılarının zamana göre değişimleri.



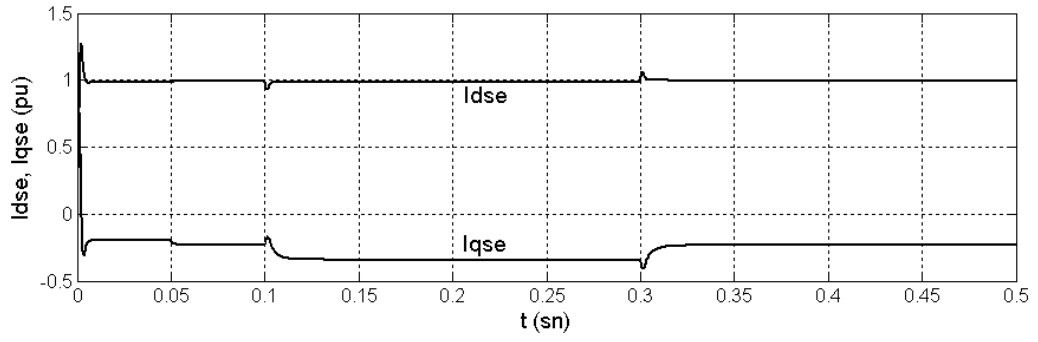
Şekil 7.45 $V1a$ ve $V2a$ gerilim dalga şekillerinin zamana göre değişimi.



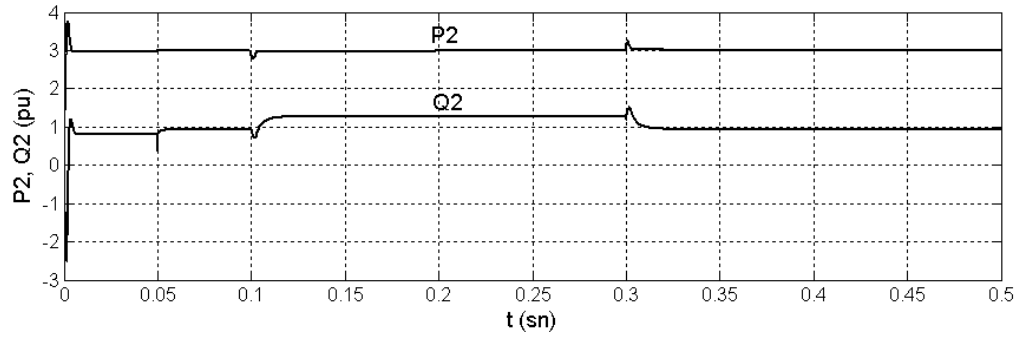
Şekil 7.46 DC gerilimin zamana göre değişimi.



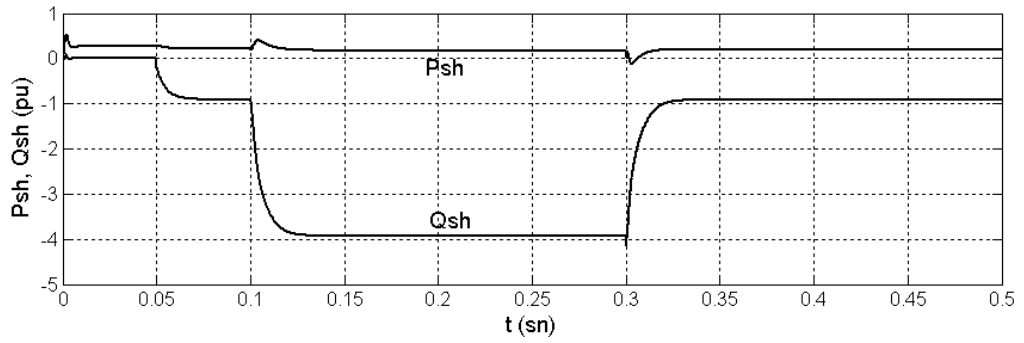
Şekil 7.47 Şönt ve seri konverter çıkış gerilimlerinin zamana göre değişimi.



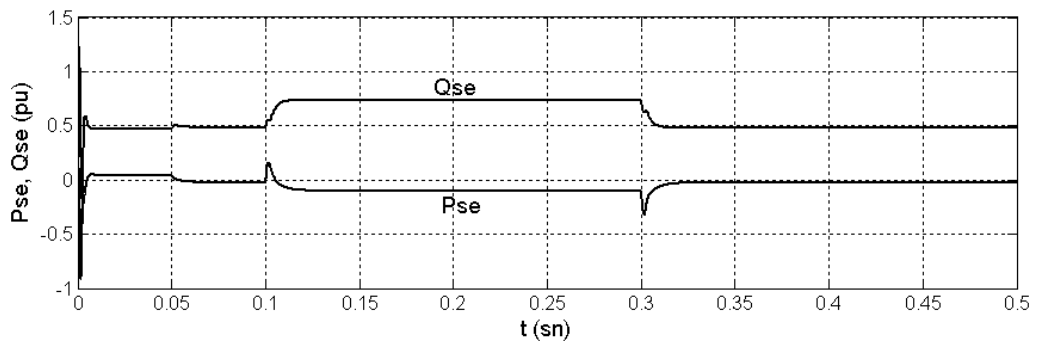
Şekil 7.48 İletim hattı akımı d ve q bileşenlerinin zamana göre değişimi.



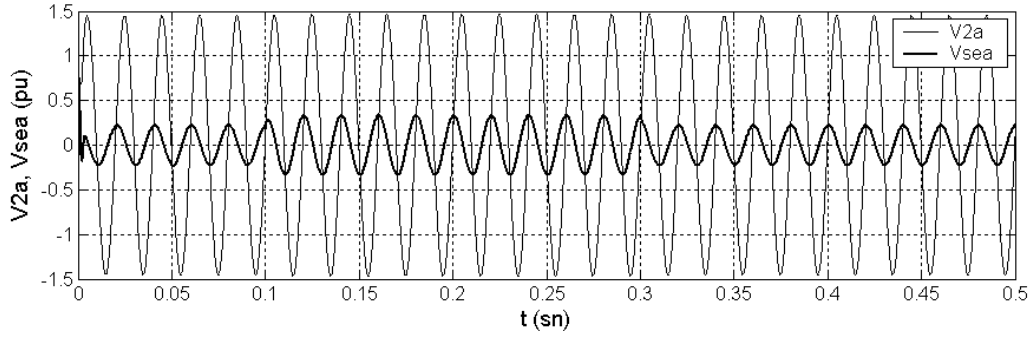
Şekil 7.49 iletim hattı bara 2 aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi.



Şekil 7.50 Şönt konverter aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi.



Şekil 7.51 Seri konverter aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi.



Şekil 7.52 V2a ve Vsea gerilim dalga şekillerinin zamana göre değişimi.

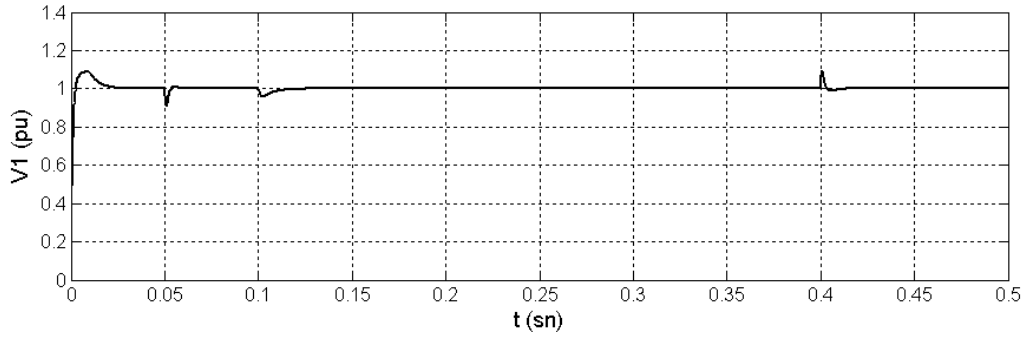
Uygulama 4'te $P_{2ref}=3$ pu olarak alınmıştır. P_2 aktif gücü başlangıçta verilen referans değerine ulaşmaktadır. Seri konverter verilen referans değeri sağlamak için sisteme, yük devrede iken yaklaşık 0.25 pu değerinde bir gerilim ($V_{se, rms}$) enjekte etmektedir. Yük devreye girerken ve devreden çıkarken P_2 aktif gücünde kısa süreli değişimler olmaktadır. Fakat kısa sürede P_2 aktif gücü referans değerine geri dönmektedir. Yük devreye girdiğinde Q_2 reaktif gücü artmaktadır.

Başlangıçta bara 1 geriliminin referans değerinin altında olduğu görülmektedir. Şönt konverter bara 1 gerilimi kontrolü devreye girdikten sonra V_1 gerilimi istenen referans değerine ulaşmıştır. Yük $t=0.1$ 'de devreye girdiğinde bara 1 gerilimi (V_1) azalmaktadır. Buna karşın şönt konverter gerilimi rms değeri (V_{sh}) yükselmektedir. Şönt konverter, bara 1 gerilimini 1 pu değerinde sabit tutmak için sisteme reaktif güç sağlamaktadır. Burada bara 1 gerilimi için sağlanan reaktif gücün bir önceki uygulamaya göre arttığı gözlenmiştir.

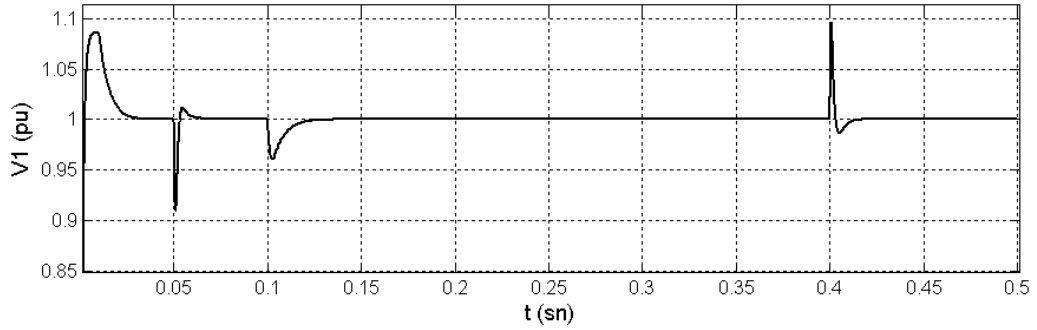
Bara 1 ve bara 2 gerilimleri arasındaki açı seri konverter gerilim enjeksiyonuna bağlı olarak değişmekte ve yük devreye girdikten sonra artarak yaklaşık 15 derece olmaktadır.

7.1.5. Uygulama 5

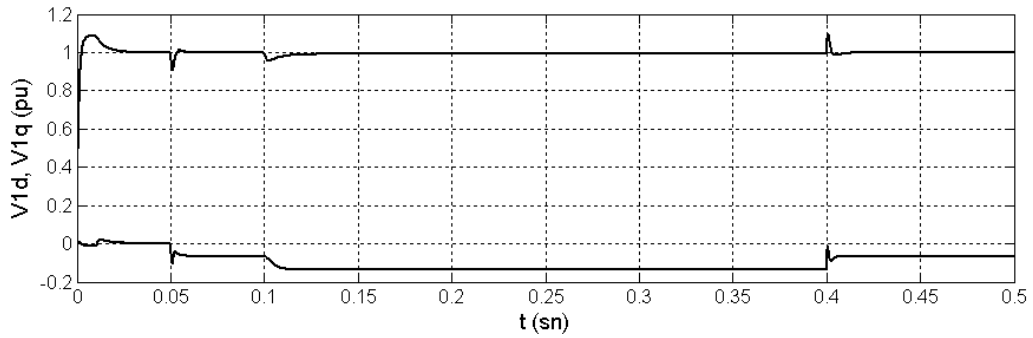
Benzetim parametreleri; $V_s = 1.1 \angle 0$ pu, $V_r = 1 \angle 0$ pu, $yük = P + jQ = 3 + j2.25$ pu (g.f=0.8 geri), $V_{lref} = 1$ pu, $V_{dref} = 3.4$ pu $P_{2ref} = 3$ pu . Bu bölümde iletim hattı P_2 aktif gücünün ve bara 1 geriliminin kontrolü yapılmıştır. UPFC bara 1 gerilimi kontrolü $t=0.01$ 'den itibaren devrededir. Yük $t=0.1$ 'de devreye girmekte ve devrede kalmaktadır. P_{2ref} değeri $t=0.05$ 'te step değişimi ile 0 pu değerinden 3 pu değerine, $t=0.4$ 'te ise, 3 pu değerinden 0 pu değerine düşmektedir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.



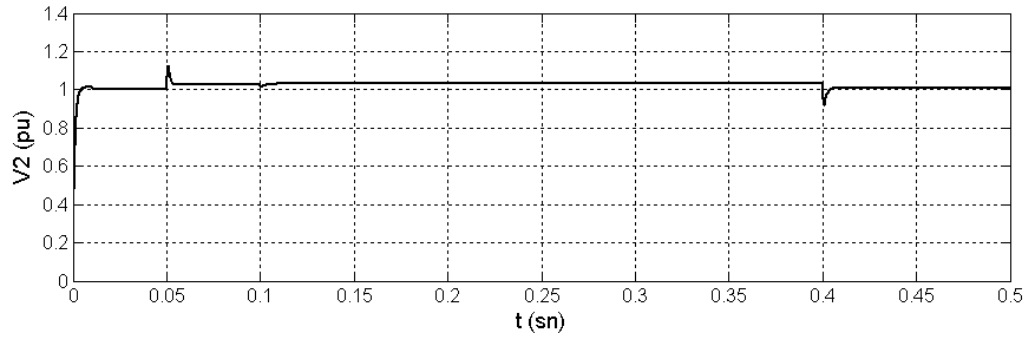
Şekil 7.53 (a) Bara 1 geriliminin zamana göre değişimi.



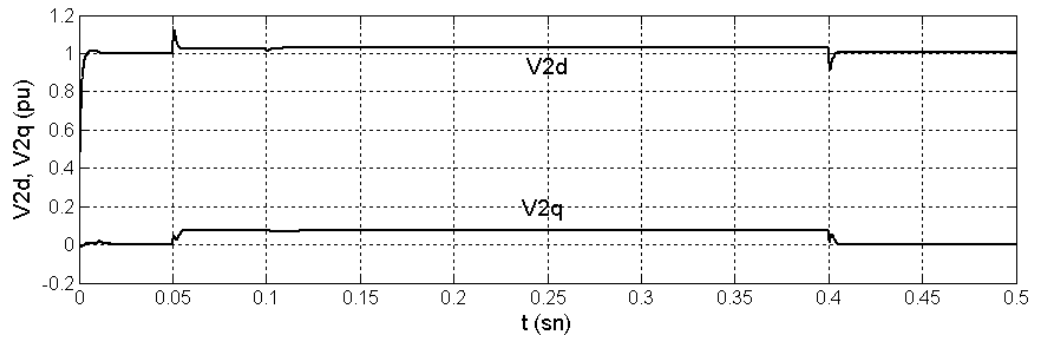
Şekil 7.53 (b) Bara 1 geriliminin genişletilmiş grafiği.



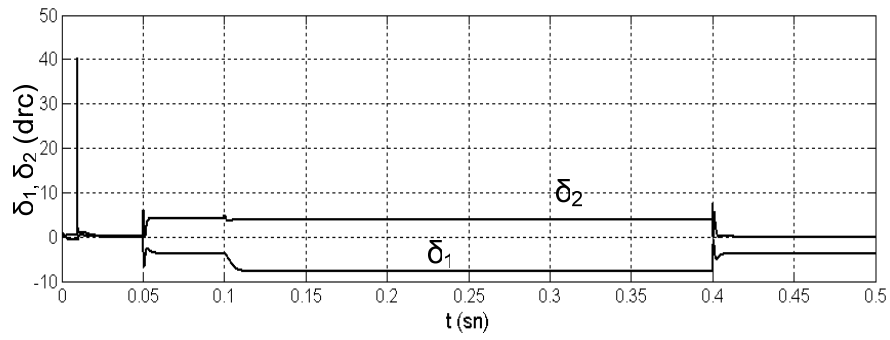
Şekil 7.54 Bara 1 gerilimi V_{1d} ve V_{1q} bileşenlerinin zamana göre değişimleri.



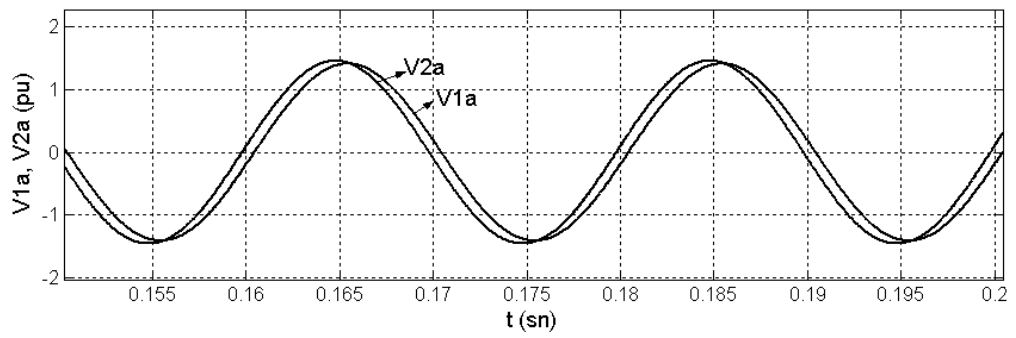
Şekil 7.55 Bara 2 geriliminin zamana göre değişimi.



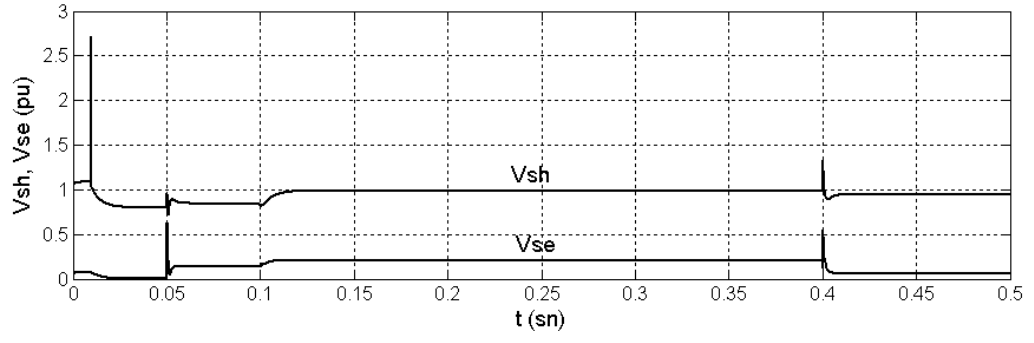
Şekil 7.56 Bara 2 gerilimi V_{2d} ve V_{2q} bileşenlerinin zamana göre değişimleri.



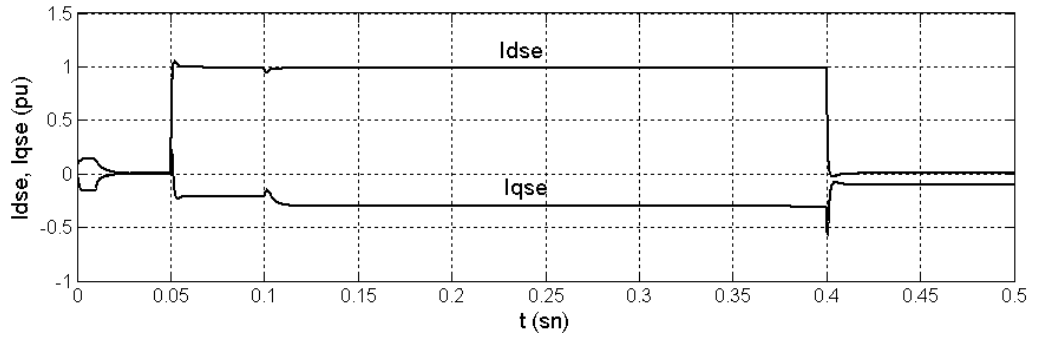
Şekil 7.57 Bara 1 ve bara 2 gerilim açılarının zamana göre değişimleri.



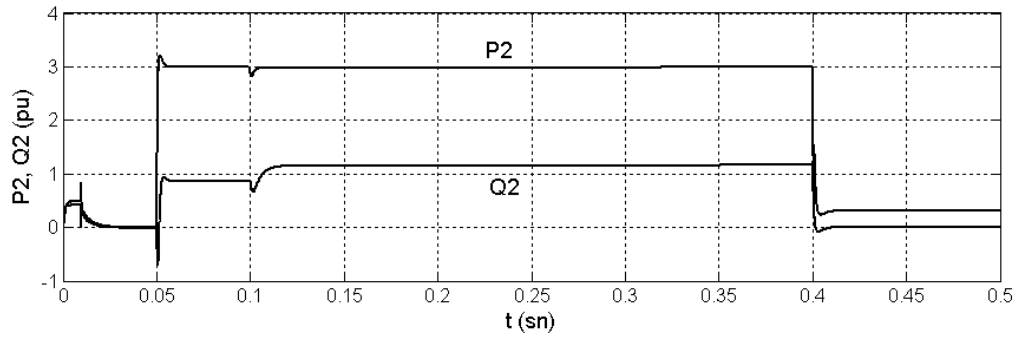
Şekil 7.58 V1a ve V2a gerilim dalga şekillerinin zamana göre değişimi.



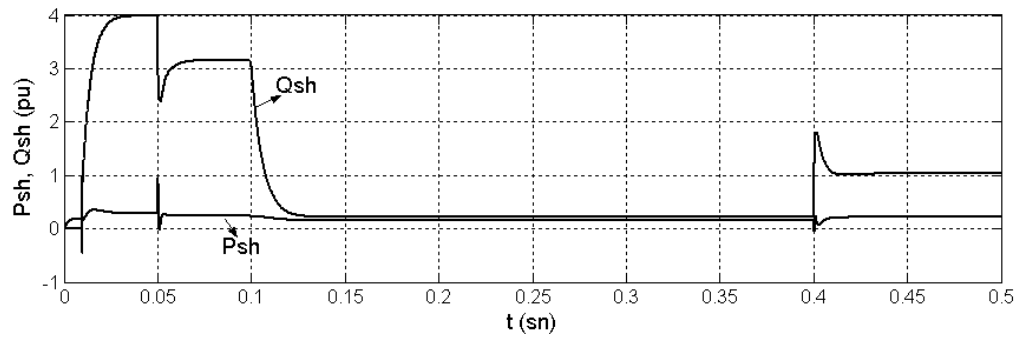
Şekil 7.59 Şönt ve seri konverter çıkış gerilimlerinin zamana göre değişimi.



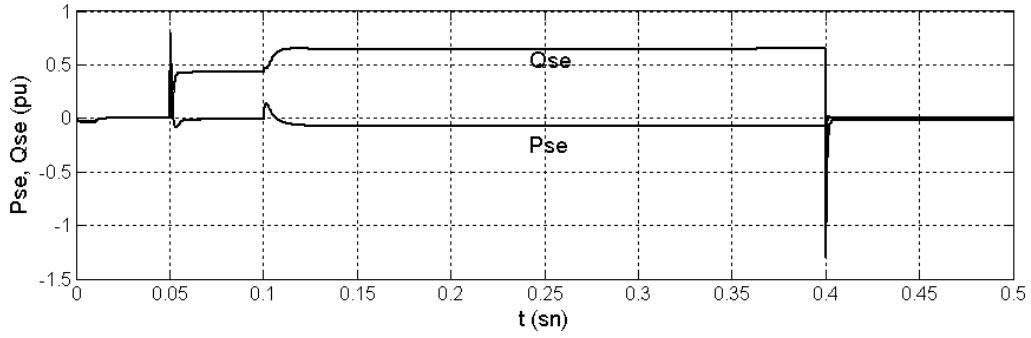
Şekil 7.60 İletim hattı akımı d ve q bileşenlerinin zamana göre değişimi.



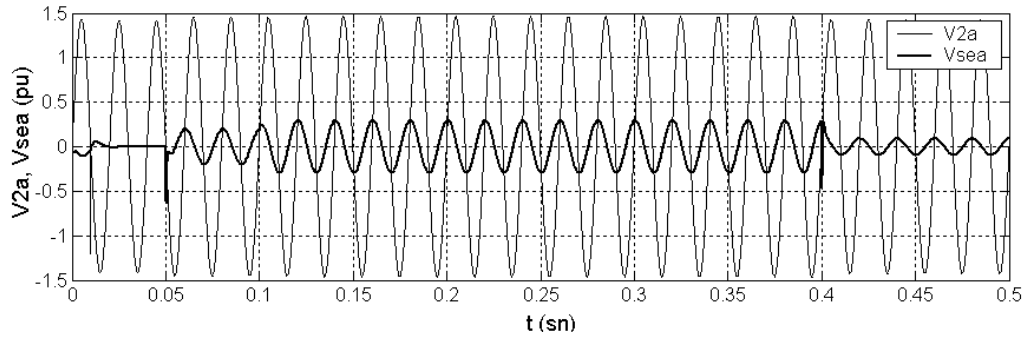
Şekil 7.61 İletim hattı bara 2 aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi.



Şekil 7.62 Şönt konverter aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi.



Şekil 7.63 Seri konverter aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi.



Şekil 7.64 V2a ve Vsea gerilim dalga şekillerinin zamana göre değişimi.

Uygulama 5'te $V_s = 1.1 \angle 0$ pu değerindedir. Başlangıçta bara 1 gerilimi kaynak geriliminden dolayı referans değerden büyüktür. $t=0.01$ 'de UPFC bara 1 gerilimi kontrolü devreye girdikten sonra, bara 1 gerilimi referans değerine azalmaktadır. Şönt konverter bu durumda sistemden reaktif güç çekerek bara 1 gerilimini referans değerde sabit tutmaktadır.

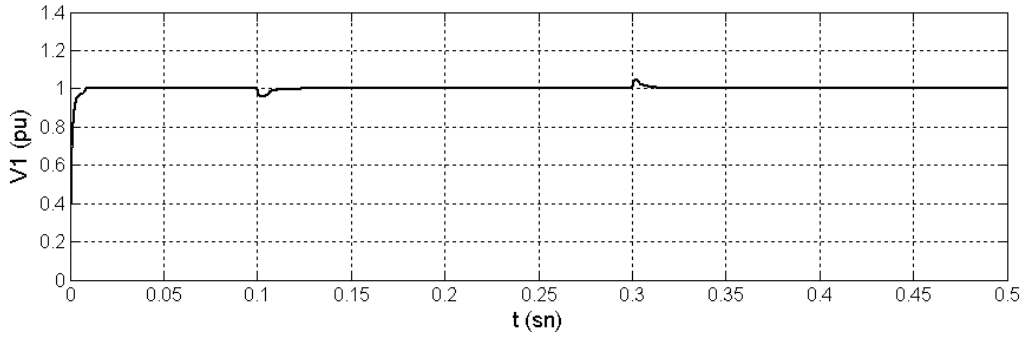
$P_{2ref}=3$ pu olarak alınmıştır. P_{2ref} değerinde step değişimi ile iletim hattı P_2 aktif gücü $0.1 < t < 0.4$ aralığında istenen referans değerde kontrol edilmiştir. Seri konverter verilen referans değeri sağlamak için sisteme, yük devrede iken yaklaşık 0.22 pu değerinde bir gerilim ($V_{se, rms}$) enjekte etmektedir. P_2 aktif gücü verilen aralıkta referans değerindedir.

Yük devreye girerken P_2 aktif gücünde kısa süreli değişimler olmaktadır. Fakat kısa sürede P_2 aktif gücü referans değerine geri dönmektedir. Yük devreye girdiğinde Q_2 reaktif gücü artmaktadır.

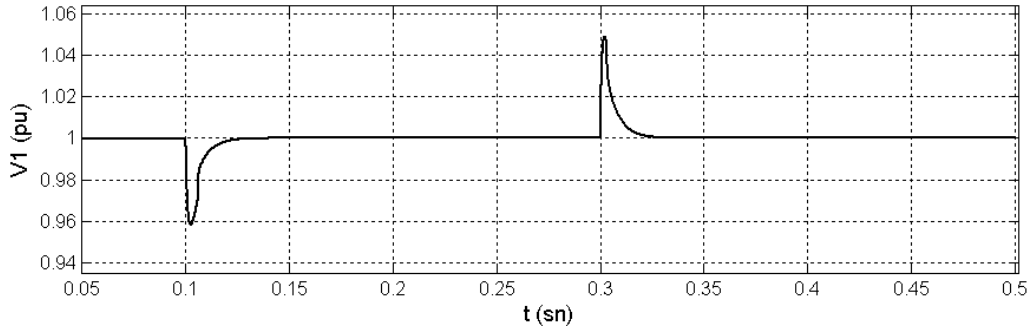
Bara 1 ve bara 2 gerilimleri arasındaki açı seri konverter gerilim enjeksiyonuna bağlı olarak değişmekte ve yük devreye girdikten sonra artarak yaklaşık 15 derece olmaktadır.

7.1.6. Uygulama 6

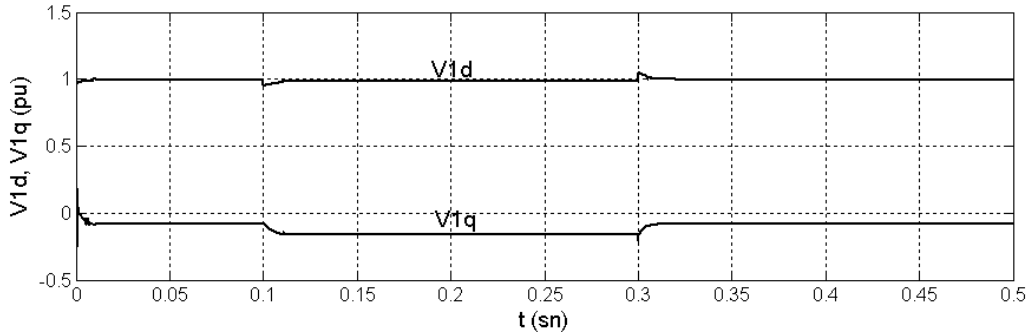
Benzetim parametreleri; $V_s = 1 \angle 0$ pu, $V_r = 1 \angle 0$ pu, yük= $P+jQ=3+j2.25$ pu (g.f=0.8 geri), $V_{1ref}=1$ pu, $V_{dcref}=3.4$ pu $P_{2ref}=3$, $Q_{2ref}=0$ pu . Bu bölümde iletim hattı aktif ve reaktif güç kontrolü ile bara 1 geriliminin kontrolü yapılmıştır. UPFC bara 1 gerilim kontrolü $t=0.05$ 'te devrededir. Yük $t=0.1$ 'de devreye girmekte ve $t=0.3$ 'te devreden çıkmaktadır. UPFC bara 1 gerilim kontrolü $t=0.3$ 'te devre dışı kalmaktadır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.



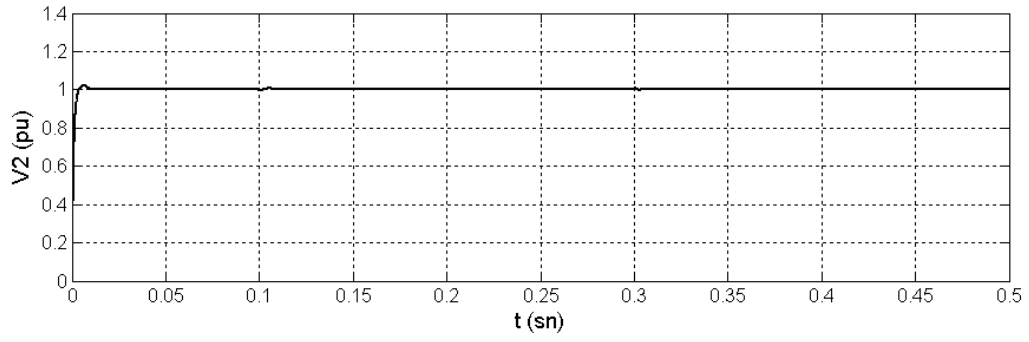
Şekil 7.65 (a) Bara 1 geriliminin zamana göre değişimi.



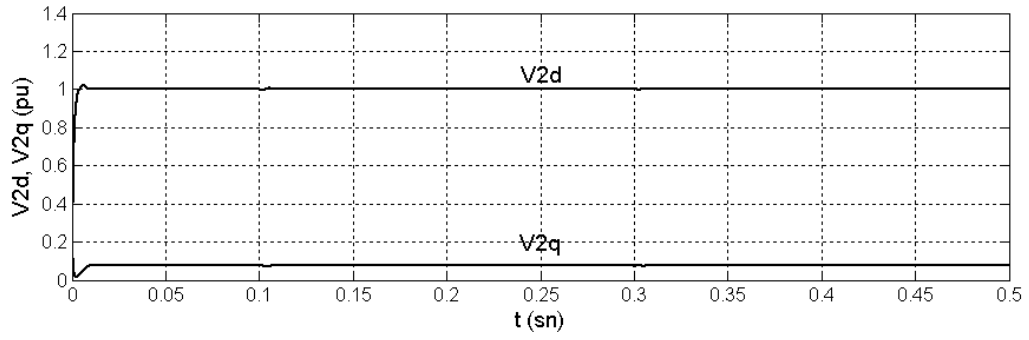
Şekil 7.65 (b) Bara 1 geriliminin genişletilmiş grafiği.



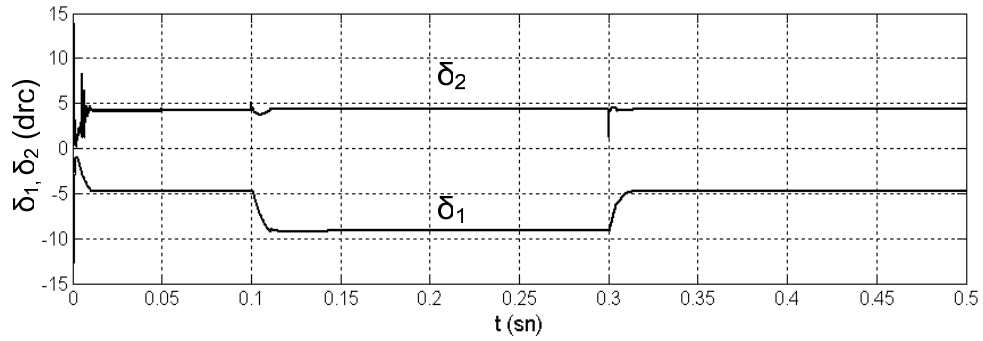
Şekil 7.66 Bara 1 gerilimi V_{1d} ve V_{1q} bileşenlerinin zamana göre değişimleri.



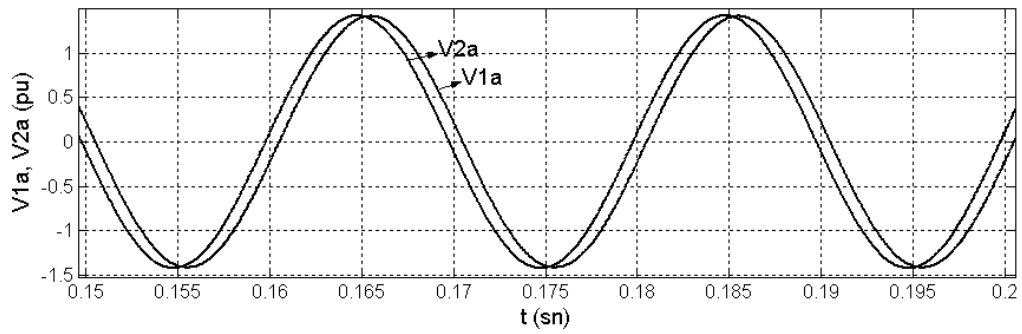
Şekil 7.67 Bara 2 geriliminin zamana göre değişimi.



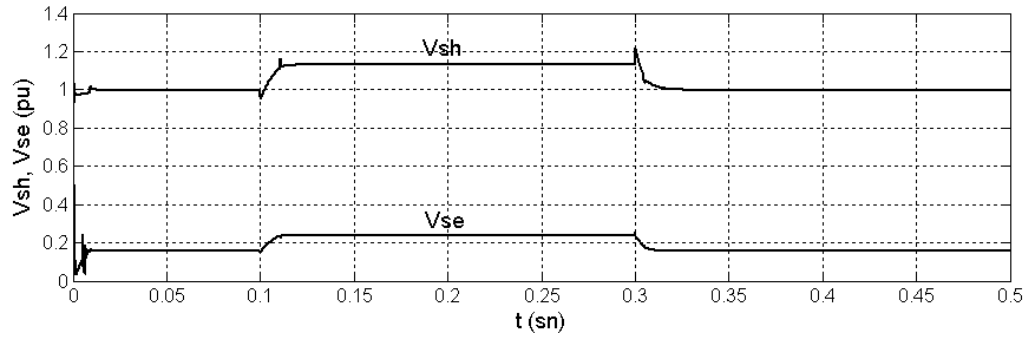
Şekil 7.68 Bara 2 gerilimi V_{2d} ve V_{2q} bileşenlerinin zamana göre değişimleri.



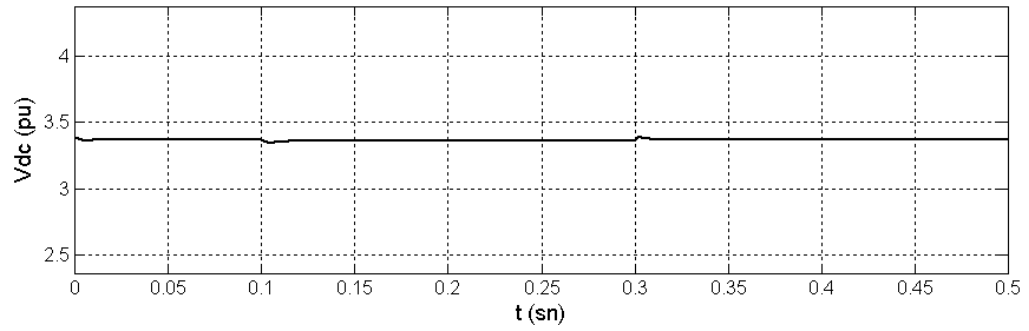
Şekil 7.69 Bara 1 ve bara 2 gerilim açılarının zamana göre değişimleri.



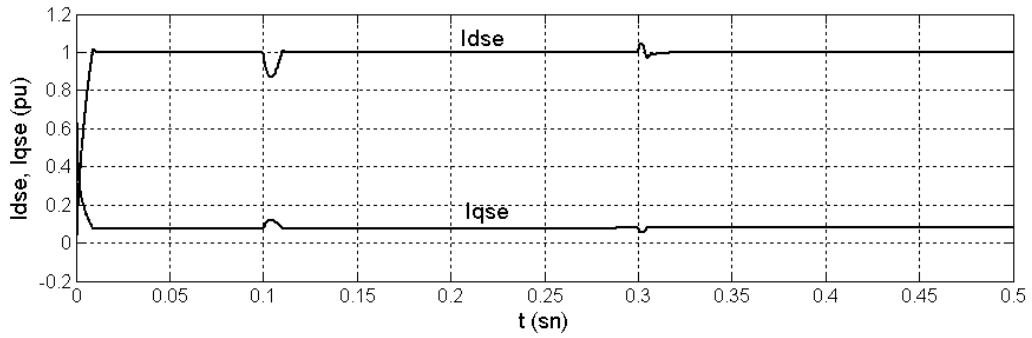
Şekil 7.70 V1a ve V2a gerilim dalga şekillerinin zamana göre değişimi.



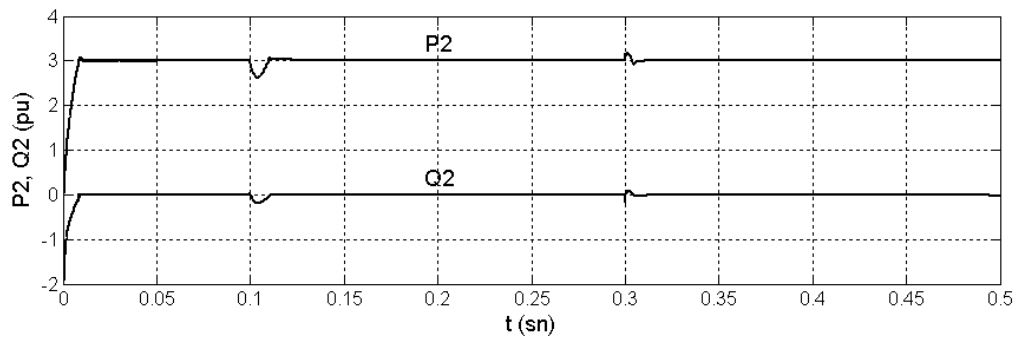
Şekil 7.71 Şönt ve seri konverter çıkış gerilimlerinin zamana göre değişimi.



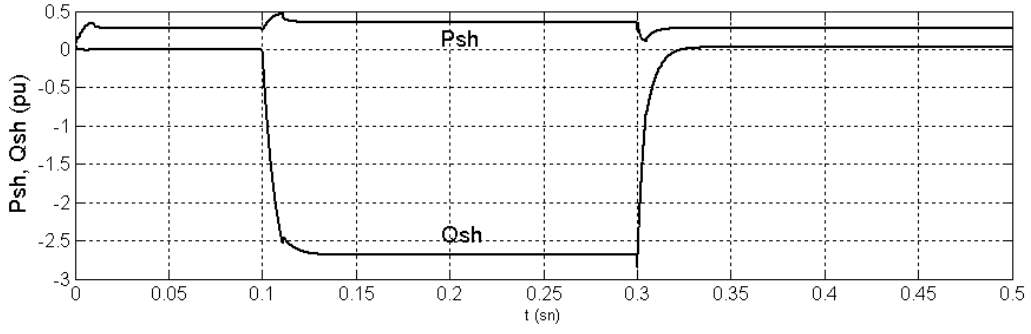
Şekil 7.72 DC gerilimin zamana göre değişimi



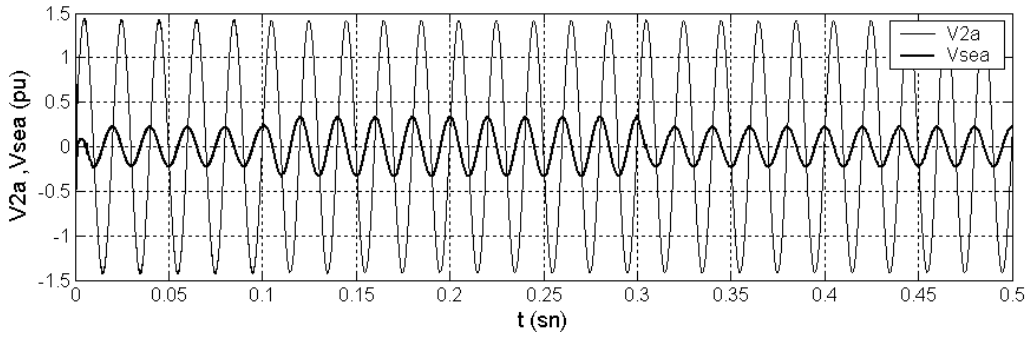
Şekil 7.73 İletim hattı akımı d ve q bileşenlerinin zamana göre değişimi.



Şekil 7.74 iletim hattı bara 2 aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi.



Şekil 7.75 Şönt konverter aktif ve reaktif güç akışlarının zamana göre değişimi.



Şekil 7.76 V2a ve Vsea gerilim dalga şekillerinin zamana göre değişimi.

Uygulama 6'da $V_s = 1 \angle 0$ pu değerindedir. $P_{2ref}=3$ pu ve $Q_{2ref}=0$ pu olarak alınmıştır. Seri konverter verilen referans değerleri sağlamak için sisteme, yük devrede iken yaklaşık 0.24 pu değerinde bir gerilim (V_{se} , rms) enjekte etmektedir. P_2 ve Q_2 güçleri referans değerlerine ulaşmaktadır. Yük devreye girerken ve çıkarken P_2 ve Q_2 güçlerinde kısa süreli değişimler olmaktadır. Fakat kısa sürede P_2 ve Q_2 güçleri referans değerlerine geri dönmektedirler.

Yük $t=0.1$ 'de devreye girdiğinde bara 1 gerilimi (V_1) azalmaktadır. Buna karşın şönt konverter gerilimi rms değeri (V_{sh}) yükselmektedir. Şönt konverter, bara 1 gerilimini 1 pu değerinde sabit tutmak için sisteme reaktif güç sağlamaktadır.

8. SONUÇLAR

Geleneksel kompanzasyon aygıtlarının dezavantajları, artan enerji talebi, yeni hatların yapılmasındaki kısıtlamalar gibi birçok sebepten dolayı elektrik kuruluşları FACTS teknolojisine büyük bir ilgi göstermektedirler. Bu tez çalışmasında geleneksel tristör tabanlı ve konverter tabanlı FACTS aygıtları adları altında FACTS aygıtlarının büyük çoğunluğu ele alınmıştır. Şurası açıktır ki konverter tabanlı aygıtlar tristör tabanlı aygıtlardan çok daha iyi çalışma özellikleri, işlevsel performans ve uygulama esnekliği göstermektedir. Özellikle CSC ve UPFC bu aygıtlar içerisinde çok yönlü ve en güçlü aygıtlardır.

FACTS aygıtlarının maliyetleri, geleneksel kompanzasyon aygıtlarına göre oldukça yüksektir. Fakat bu aygıtların kurulumu ile elde edilecek faydalar yeni hatların kurulumu ile elde edilecek faydalara eşdeğer olabilir. Dolayısıyla bu aygıtların kurulumu yeni hatların yapımını imkanlar dahilinde erteleyebilir. Bundan dolayı iletim sistemi problemlerini en uygun maliyetli ve koordineli bir biçimde çözmek için derinlemesine sistem analizi gereklidir. Bu, geleneksel donanım ve FACTS aygıtlarının sisteme olan faydalarını karşılaştırmayı içerir. İletim sistemi planlayıcıları sistem analizi ile en makul çözümü bulmalıdır.

FACTS aygıtlarının maliyetinin gelişen yarı iletken teknolojisi ile birlikte azalması beklenmektedir. Yeni bir uygulama olan FACTS teknolojisinin enerji iletim sistemlerinde uygulamalarının artması ile enerji iletimi daha kaliteli ve etkin bir şekilde gerçekleştirilecek ve enerjinin kontrolü daha da kolaylaşacaktır.

UPFC kavramı ile ortaya çıkan kontrol edilebilir büyüklükte ve faz açısında kısıtlamasız gerilim enjekte etme özelliği güç akış kontrolü için yeni olanaklar açmıştır. Özellikle kısıtlamasız seri gerilim enjeksiyonu sadece gerilim regülasyonu, seri kompanzasyon ve faz açısı düzenleme gibi kombine uygulamalara imkan tanımakla kalmaz aynı zamanda beklenmedik sistem koşullarını verimli bir şekilde idare etmek için seçili kompanzasyon modundan bir diğerine gerçek zamanlı geçişi sağlar.

Bu tez çalışmasında ana konu olarak, UPFC bulunan bir enerji iletim sisteminin, Matlab/simulink ortamında modellenmesi ve çeşitli durumlar için benzetimi gerçekleştirilmiştir. UPFC sistemi, Matlab/simulink ortamında alt sistemler halinde modellenmiştir. Matlab/simulink modeli gerçekleştirilmeden önce, UPFC 'ye ve enerji iletim sistemine ilişkin matematiksel denklemler verilmiş, UPFC konverterlerine ilişkin kontrol şemaları sunulmuş, ve bu verilere göre UPFC sistemi simulink ortamında modellenmiştir. Modellemede d-q koordinatlarında verilen denklemler kullanılmıştır.

Benzetim çalışmalarında, ilk önce sadece UPFC şönt konverter kapasitesine ilişkin çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda reaktif güç kontrolü ile enerji iletim sisteminin, bara 1 geriliminin kontrolü yapılmıştır. UPFC ’nin indüktif ve kapasitif yük durumlarında gerilim kontrolüne etkisi yapılan benzetimlerde incelenmiştir. Daha sonraki benzetim çalışmalarında ise, UPFC ’nin iki konverter kapasiteside kullanılmış ve referanslarda yapılan step değişimi, değişik yük durumları ve kaynak geriliminin yükselmesi gibi çeşitli durumlar için enerji iletim sisteminin bara 1 gerilim kontrolü ve hat sonu aktif ve reaktif gücünün kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu alışmada, UPFC ’yi temsil eden kontrol sistemi ile yük değişimleri ve kaynak gerilimindeki değişimlere rağmen, gerilim kontrolü ve aktif ve reaktif güç kontrolünde istenen referans değerler elde edilmiştir. Sonuçlar göstermiştirki çok fonksiyonlu bir FACTS aygıtı olan UPFC ile enerji iletim sistemlerinde gerilim kontrolü, aktif ve reaktif güç kontrolü etkin bir şekilde yapılabilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Hasanovic, A., 2000, Modeling and Control of the Unified Power Flow Controller (UPFC), Master Thesis , West Virginia University, 1p.
2. Vural , A. M.,2001, Flexible AC Transmission a Unified Power Flow Controller, Master Thesis ,TC YÖK Dökümantasyon merkezi.
3. Oliveira M. M.,2000, Power Electronics for Mitigation of Voltage Sags and Improved Control of AC Power Systems,Phd .
4. Cigre Study committee 14 working Group 14.14, 1993, FACTS Tutorial Draft 1.
5. Hingorani,N.,G.,1993, Flexible AC transmission, IEEE reprinted from IEEE Spectrum,Volume 30, No.4 , 40-45
6. Maram ,S., 2003,Hierarchical Fuzzy Control of the UPFC and SVC located in AEP's Inez Area, Master Thesis.
7. Gyugyi, L.,1993, Solid-State Synchronous Voltage Sources for Dynamic Compensation and Real-Time Control of AC Transmission Lines,IEEE STANDARDS PRESS Institute of Electrical and Electronics Engineers 445 Hoes Lane Piscataway, NJ 08855 Printed in USA — 1993 ISBN 1-55937-381-4
8. Gyugyi,L.,1991, A unified Power Flow Control Concept For Flexible AC Transmission Systems,Presented at the fifth International Conference on AC and DC Power Transmission,IEE,London september17-20
9. Gyugyi,L.,Schauder,C.,D.,Williams,S.,L.,Rietman,T.,R.,Torgerson,D.,R.,Edris,E.,1994, The Unified Power Flow Controller: A New Approach to Power Transmission Control,IEEE/PES 1994 Summer meeting, paper no 94 SM 474-7 PWRD, San Francisco,CA july 24-28.
10. Vural, A.,M.,Tümay,M.,2002, Gelişmiş Güç Akış Denetleyicileri İle Donatılmış Güç Sistemlerinin Newton-Raphson Metodu İle Analizi,Elektrik -elektronik - bilgisayar mühendisliği 10. Ulusal kongresi,63-66.
11. Gyugyi, L.,1993, Dynamic compansation of AC transmission lines by solid-state synchronous voltage souces, IEEE/PES 1993 Summer meeting,paper no 93 SM 434-1 PWRD,Vancouver Canada, july 18-22.
12. Larsen, E., V., Clark, K., Miske, S., A., Urbanek, J., 1993, Characteristics and rating considerations of thyristor controlled series compansation, IEEE/PES 1993 Summer meeting, paper no 93 SM 433-3 PWRD, Vancouver Canada, july 18-22.
13. Bowler, C., Larsen, E., Damsky, B., Nilsson, S., 1992, Benefits of thyristor controlled series compansation, CIGRE paper No 14/37/38-04.
14. Tso, S.,K., Liangb, J., Zhoub ,X.,X., 1999, Coordination of TCSC and SVC for improvement of power system performance with NN-based parameter adaptation, ELSEVIER,Electrical Power and Energy Systems 21 235–244.

15. Medina A. , Ramos-Paz, A., Fuerte-Esquivel, C.R., 2003, Swift computation of the periodic steady state solution of power systems containing TCSCs ELSEVIER, Electrical Power and Energy Systems 25, 689–694
16. Uzunovic, E., Canizares C., A., Reeve J.,1997, Fundamental Frequency Model of Static Synchronous Compensator, North American Power Symposium (NAPS), Laramie, Wyoming, 49-54.
17. Paserba, J., J., Reed, G., F., Takeda, M., Aritsuka, T., 2000, FACTS and Custom Power Equipment for the Enhancement of Power Transmission System Performance and Power Quality, Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning (VII SEPOPE) Curitiba, Brazil, May 21-26.
18. Eminoğlu, U., Herdem, S., Yalçınöz, T., 2002 ,İnvertör temelli facts cihazları kullanarak Reaktif güç kompanzasyonu ile gerilim kontrolü, Elektrik -elektronik - bilgisayar mühendisliği 10. Ulusal kongresi, 152-155.
19. Han , B., M., Kim, H., J., Baek, S., T., 2002 ,Performance analysis of SSSC based on three-level multi-bridge PWM inverter, ELSEVIER ,Electric Power Systems Research 61 (2002) 195–202.
20. Lockwood, S. Navarro, R. Bajrektarevic, E.,. Burke, P. , Kang , S., Ferron, P., Kotecha, V., Kolluri, S. , Nagle, M., Lee, S., Zhang, P., Agarwal, S. K. , Papic, M., Useldinger, J., Patro, P. C. Arnold, L., Osborn, D., Fan, L., Hopkins, L., Vaiman, M. Y., Vaiman, M. M. ,Utility Experience Computing Physical and Operational Margins: Part II – Application to Power System Studies, 2004.
21. Paserba J., 2003, How FACTS Controllers Benefit AC Transmission Systems, Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE PES Volume 3, 7-12 Sept. 2003 vol.3 949 - 956
22. Padiyar, K. R. , Kulkarni, A.M., 1998, Control Design and Simulation of Unified Power Flow Controller, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, 1348-1354
23. Kulkarni, A.M., Padiyar, K. R., 1997, Performance Evaluation of Unified Power Flow Controller using Transient Simulation, International Conference on Power Electronics and Drive Systems, IEEE, 734-739
24. Schauder, C.; Mehta, H.; 1993, Vector analysis and control of advanced static VAR compensators Generation, Transmission and Distribution [see also IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution], IEE Proceedings C Volume 140, Issue 4, 299 - 306
25. Fujita, H.,Watanabe, Y., Akagi, H.,1998, Control and Analysis of a Unified Power Flow Controller, IEEE Transactions on Power Electronics, 805-809
26. Schauder, C.; Mehta, H.; 1993, Vector analysis and control of advanced static VAR compensators, Generation, Transmission and Distribution IEE Proceedings Volume 140, Issue 4, ,299 – 306

27. Yu, Q., Norum, L., Undeland, T., Round, S., 1996, Investigation of Dynamic Controllers for a Unified Power Flow Controller, 1764-1769
28. Papic, I., 2000, Mathematical analysis of FACTS devices based on a Voltage source converter Part1 : Mathematical models, Electric power systems research 56 139-148
29. Gyugyi, L., Hingorani, N.G., P.R. Nannery, Tai, N., 1990, Advanced static var compensator using gate turn off thyristors for utility applications Cigre 23-203
30. Papic, I., zunko, P. Povh, D., Weinhold, M. ,1997, Basic Control of Unifie Power Flow Controller, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 4, 1734-1739
31. A-A. Edris, yers, J. Reeve, F. Sener, Adapa, R., M. H. Baker, L. Bohmann K. Clark, K.J. Lemay, A. S. Merhaban, 1997 , “Proposed terms and definitions for Flexible AC transmission system (FACTS)”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, 1848- 1853
32. Hasanović, A., Feliachi A., Schoder, K., 2002, “Unified power flow controllers in : The Power Electronics Handbook” Edited By Timothy L. Skvarenina, Purdue University West Lafayette, Indiana, crc press , 2002.
33. Acha, E., Fuerte-Esquivel C., R., Ambriz-Pe´rez, H., Angeles-Camacho, C., “FACTS Modelling and Simulation in Power Networks, John Wiley&Sons LTD”, 2004.
34. Xu, L.; Agelidis, V.G. 2002, Flying capacitor multilevel PWM converter based UPFC, Electric Power Applications, IEE Proceedings, Volume 149, Issue 4, 304 – 310

ÖZGEÇMİŞ

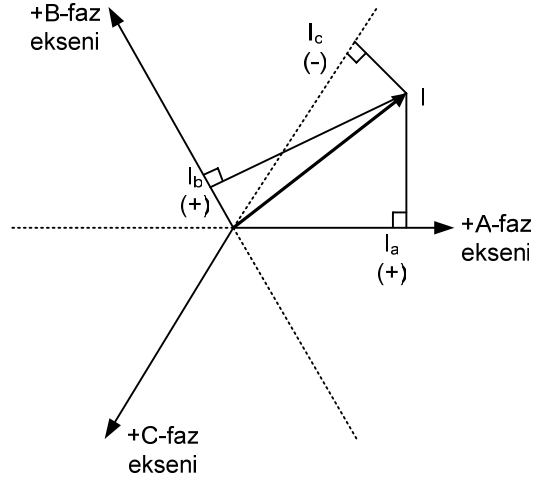
1979'da Elazığ'da doğdu. İlköğrenimini Gaziantep, Nizip ve Artvin'de yaptı. Orta öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 1998 yılın da ÖSYS 'na girerek Fırat Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Elektrik bölümünü kazandı. Fırat Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Elektrik bölümünden 2000 yılında ilk yüzde 10'a girerek mezun oldu. Aynı yıl ÖSYM tarafından ilk defa yapılan DGS'ye (Dikey Geçiş Sınavı) girdi. Bu sınav sonucunda gene 2000 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik öğretmenliğini kazandı. Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Öğretmenliği bölümünden 2003 yılında mezun oldu. Aynı yıl Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Anabilimdalı'nda açılan Yüksek Lisans sınavlarına girerek yüksek lisans yapmaya hak kazandı.

EK-1 D-Q DÖNÜŞÜMÜ

D-Q dönüştürme, koordinatların üç fazlı durağan bir koordinat sisteminden iki fazlı dönen bir koordinat sistemine dönüştürme işlemidir. Bu iki adımda gerçekleştirilmektedir.

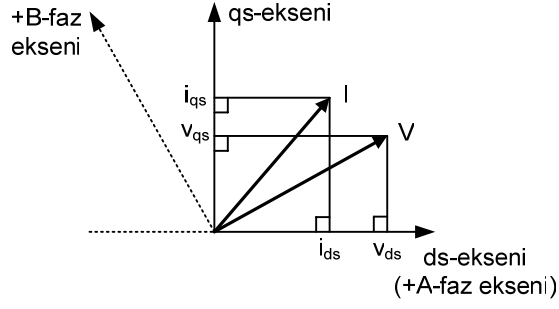
- üç fazlı (a,b,c) durağan bir koordinat sisteminin, iki fazlı durağan bir koordinat sistemine (ds,qs) dönüştürülmesi,
- İki fazlı (ds,qs) durağan bir koordinat sisteminin, iki fazlı dönen bir koordinat sistemine (d,q) dönüştürülmesi.

Toplamı sıfıra eşit olan bir üç faz değişken takımı Şekil 1'deki gibi bir düzlemde tek bir nokta ile temsil edilebilir. Orijinden bu noktaya çizilen vektör faz değişkenlerinin anlık değerine karşılık gelen, simetrik olarak yerleştirilmiş her bir üç faz ekseninde dikey bir izdüşümüne sahiptir. Faz değişkenlerinin anlık vektörlere dönüştürme akımlara uygulandığı gibi gerilimlere de uygulanabilir. Faz değişkenlerinin değeri değiştiğinde, ortak vektör çeşitli yörüngeler tanımlayarak düzlem etrafında döner. I vektörü sürekli durum dengesizlik, harmonik dalga şekli bozulmaları ve geçici bileşenleri kapsayan üç faz takımı üzerindeki bütün bilgileri içerir (Schauder ve Mehta, 1993).



Şekil 1 Anlık üç faz değişkenlerinin vektör gösterimi

Vektör gösterimi her bir vektörün kendi ds-qs bileşenleri aracılığıyla tanımlandığı bir ortogonal koordinat sistemi tanımlanarak genişletilebilir (Schauder ve Mehta, 1993) ve (Papic, 2000). Bu Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2 Ortogonal koordinatların vektör gösterimi.

Faz değişkenlerinden ds-qs koordinatlarına dönüşüm, T_1 dönüşüm matrisi ile sağlanmaktadır.

$$T_1 = \frac{\sqrt{2}}{3} \begin{bmatrix} 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (E1.1)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_o \end{bmatrix} = T_1 \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_o \end{bmatrix} = T_1 \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (E1.2)$$

Buradaki sabitler güç korunumu prensibine göre türetilmiştir.

$$P_{abc} = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c = 3(V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) = P_{dsqs} \quad (E1.3)$$

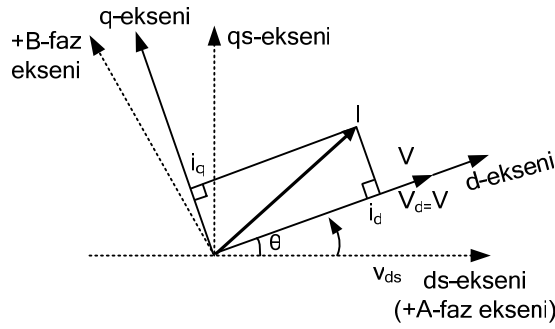
V_a , V_b ve V_c aşağıdaki gibi dengeli üç faz gerilimleridir.

$$\begin{aligned} V_a &= \sqrt{2} V_{rms} \sin \omega t \\ V_b &= \sqrt{2} V_{rms} \sin(\omega t - 120) \\ V_c &= \sqrt{2} V_{rms} \sin(\omega t - 240) \end{aligned} \quad (E1.4)$$

Ters dönüşüm matrisi ise aşağıdaki gibidir.

$$T_1^{-1} = \sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (E1.5)$$

Vektör koordinat çatısının daha fazla manipülasyonu güç kontrol amaçları için değişkenlerin yararlı bir biçimde ayrılması ile sonuçlanır. Şekil 3'teki bu yeni koordinat sisteminde d eksenini anlık gerilim vektörü ile her zaman çakışık ve q eksenini ise buna diktir. d ve q eksenleri düzlemde sabit değildir. Gerilim vektörünün yörüngesini takip ederler (Schauder ve Mehta, 1993) ve (Papic, 2000).



Şekil 3 Dönen referans çatısı

D-Q koordinatları senkron olarak dönen bir referans çatısı içerisinde T_2 dönüşüm matrisi ile elde edilmektedir.

$$T_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (E1.6)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = T_2 \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = T_2 \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (E1.7)$$

V_a , V_b ve V_c aşağıdaki gibi dengeli üç faz gerilimleri olmak üzere;

$$\begin{aligned} V_a &= \sqrt{2}V_{rms}\sin(\theta) \\ V_b &= \sqrt{2}V_{rms}\sin(\theta - 120) \\ V_c &= \sqrt{2}V_{rms}\sin(\theta - 240) \end{aligned} \quad (E1.8)$$

$\theta = \omega t$ olmak üzere;

T_2 dönüşüm matrisi kullanılarak gerilimin ds-qş bileşenleri aşağıdaki gibi d-q bileşenlerine dönüştürülebilir.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} \quad (E1.9)$$

Dengeli sürekli durum koşulları altında senkron referans çatısındaki gerilim ve akım vektörlerinin koordinatları sabit niceliklerdir.

Ters dönüşüm matrisi ise;

$$T_2^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (E1.10)$$

D-Q referans çatısına göre aktif ve reaktif güçler;

$$\begin{aligned} P &= 3(V_d I_d + V_q I_q) \\ Q &= 3(V_d I_q - V_q I_d) \end{aligned} \quad (E1.11)$$

Görünür güç ise;

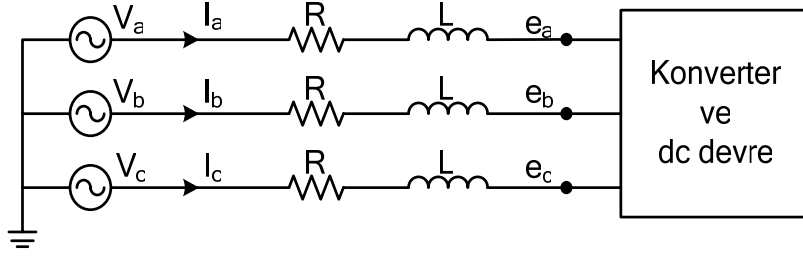
$$\begin{aligned} V^{\wedge} &= V_d + jV_q \\ I^{\wedge} &= I_d + jI_q \end{aligned} \quad (E1.12)$$

olmak üzere;

$$S = P + jQ = VI^* = 3(V_d I_d + V_q I_q) + j3(-V_d I_q + V_q I_d) \quad (E1.13)$$

şeklinde elde edilmektedir.

D-Q dönüşümü aşağıdaki üç fazlı sistem için uygulanmıştır.



Şekil 4 Üç fazlı sisteme bağlı bir konverterin eşdeğer devre diyagramı.

Bu devre için anlık değişkenlere göre AC kısım devre denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{\omega_b}{L} \begin{bmatrix} V_a - e_a \\ V_b - e_b \\ V_c - e_c \end{bmatrix} \quad (E1.14)$$

Aşağıda bir per-unit sistemi verilmiştir.

$$i_x' = \frac{i}{i_b}; v_x' = \frac{v}{v_b}; e_x' = \frac{e}{e_b}; z_b = \frac{v_b}{i_b}; x' = \frac{\omega_b L}{z_b}; R' = \frac{R}{z_b}; x = a, b, c \quad (E1.15)$$

Bu per-unit sistemi denk 15'teki sisteme adapte edilirse;

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a' \\ i_b' \\ i_c' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R' \omega_b}{x'} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R' \omega_b}{x'} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R' \omega_b}{x'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a' \\ i_b' \\ i_c' \end{bmatrix} + \frac{\omega_b}{x'} \begin{bmatrix} V_a' - e_a' \\ V_b' - e_b' \\ V_c' - e_c' \end{bmatrix} \quad (E1.16)$$

elde edilir. Per-unit sistemi adapte edildikten sonra D-Q dönüşümü ile aşağıdaki matris elde edilmektedir.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R' \omega_b}{x'} & \omega \\ -\omega & -\frac{R' \omega_b}{x'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d' \\ i_q' \end{bmatrix} + \frac{\omega_b}{x'} \begin{bmatrix} V_d' - e_d' \\ -e_q' \end{bmatrix} \quad (E1.17)$$

Burada; ω_b = baz frekansı ve ω =şebeke açısal frekansıdır.