

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜLERDE KULLANILAN
YUMUŞAK ANAHTARLAMA TEKNİKLERİNİN
İNCELENMESİ VE SİMÜLASYONU

ALİ SAYGUN SAYGI

KOCAELİ 2017

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

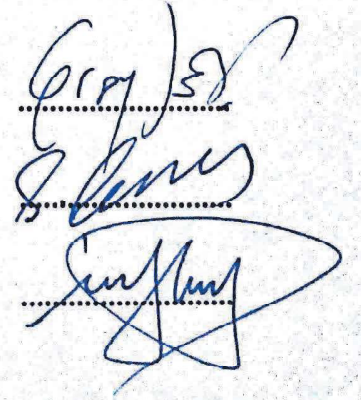
YÜKSEK LİSANS TEZİ

DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜLERDE KULLANILAN YUMUŞAK
ANAHTARLAMA TEKNİKLERİNİN İNCELENMESİ VE
SİMÜLASYONU

ALİ SAYGUN SAYGI

Yrd.Doç.Dr.Ersoy BEŞER
Danışman, Kocaeli Üniv.
Yrd.Doç.Dr.Sabri ÇAMUR
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.
Yrd.Doç.Dr.Mustafa TURAN
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.

Tezin Savunulduğu Tarih: 23.06.2017



ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüzde endüstride oldukça yaygın kullanım alanına sahip olan anahtarlama DA-DA dönüştürücüler yüksek frekanslarda çalıştırıldıklarında anahtarlama kayıpları artmakta buna bağlı olarak devrelerin verimi düşmektedir.

DA-DA dönüştürücülerde anahtarlama anında devrenin ana anahtarı üzerinde harcanan gücün azaltılması için literatürde yumuşak anahtarlama olarak geçen teknikler yer almaktadır.

Bu çalışmada, literatürde yumuşak anahtarlama tekniklerini içeren bastırma hücreli DA-DA dönüştürücü devreleri incelenmiş, simülasyon ortamında devreler gerçekleştirilerek anahtarlama kayıplarının giderilmesi amaçlanmıştır.

Tez çalışması sürecinde desteklerini esirgemeyen danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Ersoy BEŞER'e, teknik destek sağlayan Dr. Murat ÜNLÜ'ye, amirim Elk. Y. Müh. İ. Emre AFACAN'a, çalışma arkadaşlarım Elk. Müh. Ersan DURULGAN ve İhl. Uz. Sabri BIÇAKCI'ya, aileme ve sevgili eşim Ayşegül SAYGI'ya teşekkür ederim.

Haziran - 2017

Ali Saygun SAYGI

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
TABLOLAR DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
GİRİŞ	1
1. DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜLER	6
1.1. İzolasyonsuz (Endüktanslı) DA-DA Dönüştürücüler	8
1.1.1. Düşürücü (buck) DA-DA dönüştürücüler	8
1.1.2. Yükseltici (boost) DA-DA dönüştürücüler	11
1.1.3. Düşürücü-yükseltici (buck-boost) DA-DA dönüştürücüler	14
1.1.4. CUK tipi DA-DA dönüştürücüler	17
1.1.5. SEPIC tipi DA-DA dönüştürücüler	19
1.1.6. ZETA tipi DA-DA dönüştürücüler	20
1.2. İzolasyonlu (Transformatörlü) DA-DA Dönüştürücüler	21
1.2.1. Tam köprü (full bridge) DA-DA dönüştürücüler	21
1.2.2. Yarım köprü (half bridge) DA-DA dönüştürücüler	22
1.2.3. İleri yönlü (forward) DA-DA dönüştürücüler	24
1.2.4. Geri dönüşlü (flyback) DA-DA dönüştürücüler	25
1.2.5. Push-pull DA-DA dönüştürücüler	26
2. DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜLERDE KULLANILAN YUMUŞAK ANAHTARLAMA TEKNİKLERİ	28
2.1. ZVS ve ZCS Pasif Bastırma Hücreli DA-DA Dönüştürücü	31
2.1.1. Dönüştürücünün çalışma aralıkları	33
2.1.2. Bastırma hücresinin tasarımı	38
2.2. Temel ZCT Aktif Bastırma Hücreli DA-DA Dönüştürücü	40
2.2.1. Dönüştürücünün çalışma aralıkları	40
2.3. Temel ZVT Aktif Bastırma Hücreli DA-DA Dönüştürücü	45
2.3.1. Dönüştürücünün çalışma aralıkları	46
2.4. Geliştirilmiş ZCT Aktif Bastırma Hücreli DA-DA Dönüştürücü	49
2.4.1. Dönüştürücünün çalışma aralıkları	50
2.4.2. Bastırma hücresinin tasarımı	55
2.5. Geliştirilmiş ZVT Aktif Bastırma Hücreli DA-DA Dönüştürücü	56
2.5.1. Dönüştürücünün çalışma aralıkları	57
2.5.2. Bastırma hücresinin tasarımı	64
2.6. ZVZCT Aktif Bastırma Hücreli DA-DA Dönüştürücü	65
2.6.1. Dönüştürücünün çalışma aralıkları	66
2.6.2. Bastırma hücresinin tasarımı	73
3. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI	76
3.1. ZVS ve ZCS Pasif Bastırma Hücreli DA-DA Dönüştürücü Simülasyonu	76

3.2. Temel ZCT Aktif Bastırma Hücreli DA-DA Dönüştürücü	
Simülasyonu.....	84
3.3. Temel ZVT Aktif Bastırma Hücreli DA-DA Dönüştürücü	
Simülasyonu.....	88
3.4. Geliştirilmiş ZCT Aktif Bastırma Hücreli DA-DA Dönüştürücü	
Simülasyonu.....	94
3.5. Geliştirilmiş ZVT Aktif Bastırma Hücreli DA-DA Dönüştürücü	
Simülasyonu.....	100
3.6. ZVZCT Aktif Bastırma Hücreli DA-DA Dönüştürücü	
Simülasyonu.....	106
3.7. Simülasyon Sonuçları.....	114
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	116
KAYNAKLAR.....	119
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	121
ÖZGEÇMİŞ.....	122

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Darbe genişlik ayarı tekniği	7
Şekil 1.2.	Düşürücü dönüştürücünün a) devre şeması b) bu devrenin çalışması ile ilgili temel dalga şekilleri	9
Şekil 1.3.	Düşürücü dönüştürücünün iletim durumu	10
Şekil 1.4.	Düşürücü dönüştürücünün kesim durumu	10
Şekil 1.5.	Yükseltici dönüştürücünün a) devre şeması b) devrenin çalışması ile ilgili temel dalga şekilleri	12
Şekil 1.6.	Dönüştürücünün iletim durumu	13
Şekil 1.7.	Dönüştürücünün kesim durumu	13
Şekil 1.8.	Düşürücü-yükseltici dönüştürücünün a) devre şeması b) devrenin çalışması ile ilgili temel dalga şekilleri	15
Şekil 1.9.	Dönüştürücünün iletim durumu	16
Şekil 1.10.	Dönüştürücünün kesim durumu	16
Şekil 1.11.	CUK tipi dönüştürücünün a) devre şeması b) devrenin çalışması ile ilgili temel dalga şekilleri	17
Şekil 1.12.	CUK tipi dönüştürücünün kesim durumu	18
Şekil 1.13.	CUK tipi dönüştürücünün iletim durumu	18
Şekil 1.14.	SEPIC tipi dönüştürücünün a) devre şeması b) iletim durumu c) kesim durumu	19
Şekil 1.15.	ZETA tipi dönüştürücünün a) devre şeması b) şarj modu c) deşarj modu	20
Şekil 1.16.	Tam köprü (full bridge) DA-DA dönüştürücü devresi	21
Şekil 1.17.	Tam köprü düşürücü dönüştürücünün çalışması ile ilgili temel dalga şekilleri	22
Şekil 1.18.	Yarım köprü (half bridge) DA-DA düşürücü dönüştürücü devresi	23
Şekil 1.19.	Dönüştürücünün çalışması ile ilgili dalga şekilleri	23
Şekil 1.20.	İleri yönlü (forward) dönüştürücü devresi	24
Şekil 1.21.	İleri yönlü dönüştürücüye ait temel dalga şekilleri	24
Şekil 1.22.	Geri dönüşlü (flyback) dönüştürücü devre şeması	25
Şekil 1.23.	Dönüştürücüye ait temel dalga şekilleri	26
Şekil 1.24.	Push-pull dönüştürücü devresi	26
Şekil 1.25.	Dönüştürücüye ait temel dalga şekilleri	27
Şekil 2.1.	a) Anahtarlama sinyali, b) HS, c) ZCS ve ZVS, ç) ZCT ve ZVT dalga şekilleri	30
Şekil 2.2.	Pasif bastırma hücreli düşürücü DA-DA dönüştürücü devresi	31
Şekil 2.3.	Dönüştürücünün çalıştırılmasıyla ilgili dalga şekilleri	32
Şekil 2.4.	Dönüştürücünün çalışma aralıklarındaki eşdeğer devre şemaları a) $t_0 < t < t_2$, b) $t_2 < t < t_4$, c) $t_4 < t < t_5$, ç) $t_5 < t < t_6$, d) $t_6 < t < t_7$, e) $t_7 < t < t_8$, f) $t_8 < t < t_9$, g) $t_9 < t < t_{10}$, ğ) $t_{10} < t < t_{11}=t_0$	33
Şekil 2.5.	Temel ZCT aktif bastırma hücreli yükseltici dönüştürücü devresi	40
Şekil 2.6.	Dönüştürücünün çalıştırılmasıyla ilgili dalga şekilleri	41

Şekil 2.7.	Dönüştürücünün çalışma aralıklarındaki eşdeğer devre şemaları a) $t_0 < t < t_1$, b) $t_1 < t < t_2$, c) $t_2 < t < t_3$, ç) $t_3 < t < t_4$, d) $t_4 < t < t_0$	42
Şekil 2.8.	Dengesizlik durumunda oluşan ek devre şemaları a) $I_{Lr} > I_i$, b) $I_i > I_{Lr}$	45
Şekil 2.9.	Temel ZVT aktif bastırma hücreli yükseltici dönüştürücü devresi.....	46
Şekil 2.10.	Dönüştürücünün çalıştırılmasıyla ilgili dalga şekilleri	47
Şekil 2.11.	Dönüştürücünün çalışma aralıklarındaki eşdeğer devre şemaları a) $t_0 < t < t_1$, b) $t_1 < t < t_2$, c) $t_2 < t < t_3$, ç) $t_3 < t < t_4$, d) $t_4 < t < t_5$, e) $t_5 < t < t_6$, f) $t_6 < t < t_0$	48
Şekil 2.12.	Geliştirilmiş ZCT aktif bastırma hücreli yükseltici dönüştürücü devresi.....	49
Şekil 2.13.	Dönüştürücünün çalışması ile ilgili dalga şekilleri	51
Şekil 2.14.	Dönüştürücünün çalışma aralıklarındaki eşdeğer devre şemaları a) $t_0 < t < t_1$, b) $t_1 < t < t_2$, c) $t_2 < t < t_3$, ç) $t_3 < t < t_4$, d) $t_4 < t < t_5$, e) $t_5 < t < t_6$, f) $t_6 < t < t_7$, g) $t_7 < t < t_0$	52
Şekil 2.15.	Geliştirilmiş ZVT aktif bastırma hücreli yükseltici dönüştürücü devresi.....	57
Şekil 2.16.	Dönüştürücünün çalışması ile ilgili dalga şekilleri	58
Şekil 2.17.	Dönüştürücünün çalışma aralıkları ile ilgili eşdeğer devre şemaları a) $t_0 < t < t_2$, b) $t_2 < t < t_3$, c) $t_3 < t < t_4$, ç) $t_4 < t < t_5$, d) $t_5 < t < t_6$, e) $t_6 < t < t_7$, f) $t_7 < t < t_8=t_0$	59
Şekil 2.18.	ZVZCT aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi.....	65
Şekil 2.19.	Dönüştürücüye ait temel dalga şekilleri.....	66
Şekil 2.20.	Dönüştürücünün çalışma aralıklarına ait eşdeğer devre şemaları a) $t_0 < t < t_1$, b) $t_1 < t < t_2$, c) $t_2 < t < t_3$, ç) $t_3 < t < t_4$, d) $t_4 < t < t_5$, e) $t_5 < t < t_6$, f) $t_6 < t < t_7$, g) $t_7 < t < t_8$, ğ) $t_8 < t < t_9$, h) $t_9 < t < t_{10}$, ı) $t_{10} < t < t_{11}=t_0$	67
Şekil 3.1.	Simülasyon çalışmasında da kullanılan pasif bastırma hücreli düşürücü DA-DA dönüştürücü devresi	76
Şekil 3.2.	Pasif bastırma hücreli düşürücü DA-DA dönüştürücünün simülasyon görüntüsü	77
Şekil 3.3.	$D=0,5$ için S ana anahtarı akım (I_S) ve gerilim (V_S), D_F ana diyotu akım (I_{DF}) ve gerilim (V_{DF}), çıkış akımı (I_0), çıkış gerilimi (V_0), çıkış gücü (P_0) simülasyon dalga şekilleri.....	79
Şekil 3.4.	$D=0,5$ için L_S bastırma bobini akımı (I_{LS}), C_S bastırma gerilimi (V_{CB}), D_1 , D_2 ve D_3 yardımcı diyotlarının gerilimleri (V_{D1} , V_{D2} , V_{D3}) simülasyon dalga şekilleri.....	80
Şekil 3.5.	$D=0,75$ için S ana anahtarı akım (I_S) ve gerilim (V_S), D_F ana diyotu akım (I_{DF}) ve gerilim (V_{DF}), çıkış akımı (I_0), çıkış gerilimi (V_0), çıkış gücü (P_0) simülasyon dalga şekilleri.....	81
Şekil 3.6.	$D=0,75$ için L_S bastırma bobini akımı (I_{LS}), C_S bastırma kondansatörü gerilimi (V_{CS}), C_B tampon kondansatörü gerilimi (V_{CB}), D_1 , D_2 ve D_3 yardımcı diyotlarının gerilimleri (V_{D1} , V_{D2} , V_{D3}) simülasyon dalga şekilleri.....	82
Şekil 3.7.	Ana anahtar üzerinde harcanan enerji grafikleri a) $D=0,5$ için bastırma hücresiz, b) $D=0,5$ için bastırma hücreli, c) $D=0,75$ için bastırma hücresiz, ç) $D=0,75$ için bastırma hücreli	83

Şekil 3.8.	Simülasyon çalışmasında kullanılan ZCT aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi.....	84
Şekil 3.9.	ZCT Aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA dönüştürücünün simülasyon görüntüsü	85
Şekil 3.10.	$D=0,5$ için S ana anahtarı akım (I_S) ve gerilim (V_S), L_r bobini akım (I_{Lr}), C_r kondansatörü gerilimi (V_{Cr}), çıkış akımı (I_0), çıkış gerilimi (V_0) çıkış gücü (P_0) simülasyon dalga şekilleri	86
Şekil 3.11.	$D=0,6$ için S ana anahtarı akım (I_S) ve gerilim (V_S), L_r bobini akım (I_{Lr}), C_r kondansatörü gerilimi (V_{Cr}), çıkış akımı (I_0), çıkış gerilimi (V_0) çıkış gücü (P_0) simülasyon dalga şekilleri	87
Şekil 3.12.	Simülasyon çalışmasında kullanılan ZVT aktif bastırma hücreli yükseltici dönüştürücü devresi	88
Şekil 3.13.	ZVT aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA dönüştürücünün simülasyon görüntüsü	89
Şekil 3.14.	$D=0,5$ için S ana anahtarı akım (I_S) ve gerilim (V_S), çıkış akımı (I_0), çıkış gerilimi (V_0), çıkış gücü (P_0) simülasyon dalga şekilleri.....	90
Şekil 3.15.	$D=0,5$ için D_F ana diyotu akım (I_{DF}) ve gerilim (V_{DF}), S_1 yardımcı anahtar gerilimi (V_{S1}), L_r bobini akımı (I_{Lr}) simülasyon dalga şekilleri.....	91
Şekil 3.16.	$D=0,6$ için S ana anahtarı akım (I_S) ve gerilim (V_S), çıkış akımı (I_0), çıkış gerilimi (V_0), çıkış gücü (P_0) simülasyon dalga şekilleri.....	92
Şekil 3.17.	$D=0,6$ için D_F ana diyotu akım (I_{DF}) ve gerilim (V_{DF}), S_1 yardımcı anahtar gerilimi (V_{S1}), L_r bobini akımı (I_{Lr}) simülasyon dalga şekilleri.....	93
Şekil 3.18.	Simülasyon çalışmasında kullanılan geliştirilmiş ZCT aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi.....	94
Şekil 3.19.	Geliştirilmiş ZCT aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA dönüştürücünün simülasyon görüntüsü	95
Şekil 3.20.	$D=0,5$ için S ana anahtarı akım (I_S), gerilim (V_S) ile S_1 yardımcı anahtarın akım (I_{S1}) ve gerilim (V_{S1}), çıkış akımı (I_0), gerilimi (V_0), gücü (P_0) simülasyon dalga şekilleri.....	96
Şekil 3.21.	$D=0,5$ için L_r bobini akımı (I_{Lr}), C_r kondansatörü gerilimi (V_{Cr}), D_1 yardımcı diyot akım (I_{D1}), gerilim (V_{D1}) ile D_F ana diyot akım (I_{DF}) ve gerilim (V_{DF}) simülasyon dalga şekilleri	97
Şekil 3.22.	$D=0,75$ için S ana anahtarı akım (I_S), gerilim (V_S) ile S_1 yardımcı anahtarın akım (I_{S1}) ve gerilim (V_{S1}), çıkış akımı (I_0), gerilimi (V_0), gücü (P_0) simülasyon dalga şekilleri.....	98
Şekil 3.23.	$D=0,75$ için L_r bobini akımı (I_{Lr}), C_r kondansatörü gerilimi (V_{Cr}), D_1 yardımcı diyot akım (I_{D1}), gerilim (V_{D1}) ile D_F ana diyot akım (I_{DF}) ve gerilim (V_{DF}) simülasyon dalga şekilleri	99
Şekil 3.24.	Simülasyon çalışmasında kullanılan geliştirilmiş ZVT aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi.....	100
Şekil 3.25.	Geliştirilmiş ZVT aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA dönüştürücünün simülasyon görüntüsü	101
Şekil 3.26.	$D=0,5$ için ana anahtarı akım (I_S), S ana anahtarı gerilim (V_S), çıkış akımı (I_0), çıkış gerilimi (V_0), çıkış gücü (P_0) simülasyon dalga şekilleri.....	102

Şekil 3.27.	D=0,5 için L_r bobini akım (I_{Lr}), C_B tampon kondansatörü gerilim (V_{CB}), D_F ana diyotu akım (I_{DF}), D_F ana diyotu gerilim (V_{DF}), S_1 yardımcı anahtarı gerilim (V_{S1}) simülasyon dalga şekilleri.....	103
Şekil 3.28.	D=0,6 için ana anahtarı akım (I_S), S ana anahtarı gerilim (V_S), çıkış akımı (I_0), çıkış gerilimi (V_0), çıkış gücü (P_0) simülasyon dalga şekilleri	104
Şekil 3.29.	D=0,6 için L_r bobini akım (I_{Lr}), C_B tampon kondansatörü gerilim (V_{CB}), D_F ana diyotu akım (I_{DF}), D_F ana diyotu gerilim (V_{DF}), S_1 yardımcı anahtarı gerilim (V_{S1}) simülasyon dalga şekilleri	105
Şekil 3.30.	Simülasyon çalışmasında kullanılan ZVZCT aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi	106
Şekil 3.31.	ZVZCT aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA dönüştürücünün simülasyon görüntüsü	107
Şekil 3.32.	D=0,5 için S ana anahtarı akım (I_S) ve gerilim (V_S), çıkış akımı (I_0), çıkış gerilimi (V_0), çıkış gücü (P_0) simülasyon dalga şekilleri	108
Şekil 3.33.	D=0,5 için S_1 yardımcı anahtarı akım (I_{S1}) ve gerilim (V_{S1}) simülasyon dalga şekilleri.....	109
Şekil 3.34.	D=0,5 için D_F ana diyotu akım (I_{DF}) ve gerilim (V_{DF}) simülasyon dalga şekilleri.....	110
Şekil 3.35.	D=0,33 için S ana anahtarı akım (I_S) ve gerilim (V_S), çıkış akımı (I_0), çıkış gerilimi (V_0), çıkış gücü (P_0) simülasyon dalga şekilleri.	111
Şekil 3.36.	D=0,33 için S_1 yardımcı anahtarı akım (I_{S1}) ve gerilim (V_{S1}) simülasyon dalga şekilleri.....	112
Şekil 3.37.	D=0,33 için D_F ana diyotu akım (I_{DF}) ve gerilim (V_{DF}) simülasyon dalga şekilleri.....	113

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1.	Yumuşak anahtarlama tekniklerinin özellikleri	74
Tablo 3.1.	Dönüştürücüde kullanılan yarı iletken elemanlara ait bilgiler	77
Tablo 3.2.	Dönüştürücüde kullanılan yarı iletken elemanlara ait bilgiler	100
Tablo 3.3.	Dönüştürücüde kullanılan yarı iletken elemanlara ait bilgiler	106
Tablo 3.4.	Bastırma hücreli dönüştürücülerin özellikleri	114



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ΔI_L	: Bobin akımı değişimi, (A)
ΔV_C	: Kondansatör gerilimi değişimi, (V)
C	: Kapasitans, (F)
C_B	: Tampon kondansatörü, (F)
C_F	: Kondansatör, (F)
C_r	: Rezonans kondansatörü, (F)
C_s	: Bastırma kondansatörü, (F)
D_F	: Ana diyot
f_P	: Anahtarlama frekansı, (kHz)
I_0	: Çıkış akımı, (A)
I_C	: Kondansatör akımı, (A)
I_{CF}	: Kondansatör akımı, (A)
I_D	: Diyot akımı, (A)
I_i	: Giriş akımı, (A)
I_L	: Bobin akımı, (A)
I_L	: Bobin akımı, (A)
I_{LF}	: Bobin akımı, (A)
I_m	: Maksimum akım, (A)
I_{rr}	: Ters toparlanma akımı, (A)
L	: Endüktans, (H)
L_r	: Rezonans bobini, (H)
L_s	: Bastırma bobini, (H)
P_0	: Çıkış gücü, (W)
P_i	: Giriş gücü, (W)
t	: Süre, (s)
t_f	: Düşme zamanı, (ns)
T_P	: Anahtarlama periyodu, (s)
t_r	: Yükselme zamanı, (ns)
t_{rr}	: Ters toparlanma süresi, (ns)
V_0	: Çıkış gerilim, (V)
V_c	: Kontrol gerilimi, (V)
V_C	: Kondansatör gerilimi, (V)
V_{Ce}	: Anahtar uçlarındaki gerilim, (V)
V_{CF}	: Kondansatör gerilimi, (V)
V_D	: Diyot gerilimi, (V)
V_f	: Geri besleme gerilimi, (V)
V_i	: Giriş gerilimi, (V)
V_L	: Bobin gerilimi, (V)
V_L	: Bobin gerilimi, (V)
V_{LF}	: Bobin gerilimi, (V)
V_m	: Maksimum gerilim, (V)
V_r	: Referans gerilimi, (V)
V_{st}	: Testere dişi gerilimi, (V)

Kısaltmalar

D	: Doluluk Oranı
DA	: Doğru Akım
DGA	: Darbe Genlik Ayarı
EMI	: Electromagnetic Interference (Elektromanyetik Girişim)
HS	: Hard Switching (Sert Anahtarlama)
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor (İzole Kapılı Bipolar Transistör)
MOSFET	: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (Metal Oksit Yarıiletkenli Alan Etkili Transistör)
PWM	: Pulse Width Modulation (Darbe Genlik Ayarı DGA)
SS	: Soft Switching (Yumuşak Anahtarlama)
ZCS	: Zero Current Switching (Sıfır Akımda Anahtarlama)
ZCT	: Zero Current Transition (Sıfır Akımda Geçiş)
ZVS	: Zero Voltage Switching (Sıfır Gerilimde Anahtarlama)
ZVT	: Zero Voltage Transition (Sıfır Gerilimde Geçiş)

DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜLERDE KULLANILAN YUMUŞAK ANAHTARLAMA TEKNİKLERİNİN İNCELENMESİ VE SİMÜLASYONU

ÖZET

Yüksek frekanslı anahtarlama DA-DA dönüştürücüler, kontrol kolaylığı, hızlı cevap verme ve yüksek güç yoğunluğu avantajları nedeniyle endüstride; batarya şarj istasyonları, yenilenebilir enerji sistemleri, yakıt pili, güç faktörü düzeltme, led aydınlatma, gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, DA-DA dönüştürücülerde, yüksek güçlü uygulamalarda anahtarlama frekansı arttıkça anahtarlama kayıpları, elektromanyetik girişim (EMI: Electromagnetic Interference) gürültüleri ve düşük verim sorunları ortaya çıkmaktadır. Bu sorunların üstesinden; dönüştürücünün sert anahtarlama (HS: Hard Switching) ile çalıştırılması yerine, dönüştürücüye pasif ve aktif bastırma hücreleri ilave edilerek dönüştürücünün yumuşak anahtarlama (SS: Soft Switching) ile çalıştırılmasıyla gelinebilmektedir. Bu çalışmada, literatürde yumuşak anahtarlama teknikleri olarak yer alan; sıfır akımda geçiş (ZCT: Zero Current Transition) ve sıfır gerilimde geçiş (ZVT: Zero Voltage Transition) tekniklerinin birleştirilmesiyle geliştirilen sıfır gerilim ve sıfır akımda geçiş (ZVZCT: Zero Voltage Zero Current Transition) tekniği ile sıfır akımda anahtarlama (ZCS: Zero Current Switching) ve sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS: Zero Voltage Switching) tekniklerini içeren aktif ve pasif bastırma hücreli DA-DA dönüştürücüler incelenmiş, dönüştürücü devreleri simülasyon ortamında gerçekleştirilerek özellikleri karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sıfır Akımda Anahtarlama (ZCS), Sıfır Akımda Geçiş (ZCT), Sıfır Gerilimde Anahtarlama (ZVS), Sıfır Gerilimde Geçiş (ZVT), Sıfır Gerilim ve Sıfır Akımda Geçiş (ZVZCT).

COMPARATIVE AND SIMULATION STUDY OF SOFT SWITCHING METHODS USED IN DC-DC CONVERTERS

ABSTRACT

High frequency switched-mode DC-DC converters are widely used in industry such as battery charging, renewable energy, fuel-cell, power factor correction, led lighting applications, due to their low response time, easy controlling and high power density. However, at high switching frequency, switching losses, electromagnetic interference (EMI) and lower efficiency become substantial problem. These problems must be eliminated or reduced by using additional passive and active snubber cells in order to operate the converter with soft switching (SS) instead of hard switching (HS). In this study, properties of soft switching methods named as zero voltage transition (ZVT), zero current transition (ZCT), and zero voltage zero current transition (ZVZCT) developed by combining the ZVT and ZCT, zero voltage switching (ZVS) and zero current switching (ZCS) are studied and discussed, simulations of soft switching DC to DC converters including these methods are accomplished and according to results of simulations properties of converters are discussed.

Keywords: Zero Current Switching (ZCS), Zero Current Transition (ZCT), Zero Voltage Switching (ZVS), Zero Voltage Transition (ZVT), Zero Voltage Zero Current Transition (ZVZCT).

GİRİŞ

Günümüzde endüstride yaygın olarak kullanılan anahtarlama DA-DA dönüştürücüler yüksek anahtarlama frekanslarında çalıştırıldığında daha yüksek güç yoğunluğu ve daha hızlı cevap elde edilmekte ve bobin, kondansatör, transformatör boyutları küçülmektedir. Ancak, dönüştürücüde frekans arttırıldıkça buna bağlı olarak anahtarlama kayıpları ile elektromanyetik girişim (EMI: Electromagnetic Interference) gürültüleri artmaktadır. Bu nedenle dönüştürücü yüksek frekansta çalıştırılmak istendiğinde anahtarlama kayıplarının, EMI gürültülerinin, akım ve gerilim streslerinin önüne geçilebilmek için sert anahtarlama (HS: Hard Switching) yerine yumuşak anahtarlama (SS: Soft Switching) kullanılmaktadır [1-9].

Dönüştürücüde oluşan anahtarlama kayıpları, devrede yer alan yarı iletkenlerin iletme girmesi sürecinde yarı iletken elemanın uçlarındaki gerilimin düşmesi ve üzerinden geçen akımın yükselmesi ile kesime girme esnasında yarı iletken elemanın uçlarındaki gerilimin yükselmesi ve üzerinden geçen akımın düşmesinin aynı zaman aralığında meydana gelmesi ile oluşmaktadır. İletme girme işleminde, parazitik kondansatörün deşarjında oluşan enerji kaybı ile ana diyotun ters toparlanma sürecinde oluşan enerji kaybı da anahtarlama kayıplarına eklenir [1].

Yumuşak anahtarlama, temel olarak, anahtarlama kayıpları ve EMI gürültülerinin özel düzenlerle yok edilmesi veya en aza indirilmesi şeklinde tanımlanır. Yumuşak anahtarlama amacıyla geliştirilen ve dönüştürücülerin normalde bir parçası olmayan ilave düzen ve devrelere ise bastırma hücreleri denilmektedir.

Literatürde genellikle kullanılan yumuşak anahtarlama teknikleri; sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS: Zero Voltage Switching), sıfır akımda anahtarlama (ZCS: Zero Current Switching), sıfır gerilimde geçiş (ZVT: Zero Voltage Transition) ve sıfır akımda geçiş (ZCT: Zero Current Transition) teknikleri ile ZVT ve ZCT tekniklerinin beraber kullanıldığı ZVZCT tekniğidir.

Genel olarak ifade etmek gerekirse; ZCS tekniği anahtarın ilettime girme işleminde anahtardan geçen akımın yükselme hızının sınırlandırılması, ZVS tekniği anahtarın kesime girme işleminde uçlarında oluşan gerilimin yükselme hızının sınırlandırılması, ZCT tekniği anahtarın kesime girme işleminde anahtardan geçirilen akımın kısa bir süre sıfırda tutulması, ZVT tekniği anahtarın ilettime girme işleminde anahtarın uçlarındaki gerilimin kısa bir süre sıfırda tutulması prensibine dayanmaktadır.

Yumuşak anahtarlama tekniklerini gerçekleştirmek için oluşturulan yardımcı devrelere bastırma hücreleri denilmektedir. Bastırma hücreleri ilave bir veya daha fazla anahtarlama elemanının kullanılıp kullanılmamasına göre aktif veya pasif bastırma hücreleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Aşağıda yumuşak anahtarlama teknikleri üzerine literatürde yapılan çalışmalara kronolojik olarak yer verilmiştir.

Hua ve diğ. (1994a) tarafından yapılan çalışmada, literatürdeki yayınlarda temel yumuşak anahtarlama tekniklerinden sayılan ZCT tekniğini içeren aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA dönüştürücü geliştirilmiştir. Çalışmada, 1 kW gücünde ve 100 kHz frekansta çalışan dönüştürücü, aktif bastırma hücresi ile birlikte gerçekleştirilerek ana anahtarın yumuşak anahtarlama ile kesime zorlanmasıyla yükseltici dönüştürücünün verimi % 93'ten, % 97'ye çıkarılmıştır [2].

Hua ve diğ. (1994b) tarafından yapılan çalışmada, literatürde temel yumuşak anahtarlama teknikleri arasında geçen ZVT tekniği ile gerçekleştirilen aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA dönüştürücü modeli geliştirilmiştir. 600W gücünde ve 300 kHz frekansta çalışan bu dönüştürücüde ana anahtar yumuşak anahtarlama ile ilettime geçirilerek dönüştürücüden % 98 oranında verim elde edilmiştir [5].

Bodur ve Bakan (2002) tarafından yapılan çalışmada, [5]'de meydana gelen bazı sorunların üstesinden gelebilmek amacıyla ZVT tekniğini içeren yeni bir aktif bastırma hücresi geliştirilmiş, geliştirilen bu bastırma hücresi 2 kW gücünde ve 50 kHz frekansta çalışan yükseltici DA-DA dönüştürücü devresinde kullanılmıştır. Geliştirilen aktif bastırma hücresi kullanılarak [5]'deki sorunlar bertaraf edilmiş ve dönüştürücünün verimi % 91'den % 97'ye yükseltilmiştir [6].

Lee ve diğ. (2003) tarafından gerçekleştirilen çalışmada [2]'de meydana gelen bazı sorunların üstesinden gelebilmek amacıyla ZCT tekniği içeren yeni bir bastırma hücreli yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi gerçekleştirilmiştir. 1 kW gücünde ve 100 kHz anahtarlama frekansında çalıştırılan dönüştürücüde ana anahtar yumuşak anahtarlama ile kesime zorlanarak yaklaşık % 95 oranında verim elde edilmiştir. Ayrıca [2]'deki ana anahtarda oluşan akım stresi sorununun üstesinden gelinmiştir [10].

Bodur ve diğ. (2003) tarafından yapılan çalışmada, ZVS ve ZCS tekniklerini içeren pasif bastırma hücreli düşürücü DA-DA dönüştürücü devresi gerçekleştirilmiştir. 5 kW gücünde 50 kHz frekansta çalışan dönüştürücüde düşük maliyetli pasif bastırma hücresi kullanılarak dönüştürücünün verimi % 91'den % 98'e yükseltilmiştir [11].

Das ve Moschopoulos (2007) tarafından yapılan çalışmada, literatürde yer alan ZCT tekniğini içeren DA-DA dönüştürücü devreleri incelenmiş ve 1 kW gücünde ve 50 kHz frekansta çalışan yeni bir ZCT aktif bastırma hücreli devre geliştirilmiştir. Geliştirilen devrenin, çalışmada incelenen diğer aktif bastırma hücrelerinden, daha yüksek güç uygulamaları için en verimli devre modeli olduğu gösterilmiştir [12].

Panda ve diğ. (2008) tarafından yapılan çalışmada, düşük gerilim altında çalışan ve yüksek verim gerektiren taşınabilir uygulamalar için 50W gücünde 500 kHz frekansta çalışan ZVT pasif bastırma hücreli düşürücü DA-DA dönüştürücü devresi geliştirilmiştir. Ana anahtarın ve devredeki diğer bütün yarı iletkenlerin yumuşak anahtarlama ile çalıştığı dönüştürücüde verim % 87'den % 96'ya yükseltilmiştir [13].

Park ve diğ. (2010) tarafından yapılan çalışmada, 600 W ve 30 kHz frekansta çalışan aktif bastırma hücreli yeni bir yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi geliştirilmiştir. Geliştirilen dönüştürücüde verim % 91'den % 96'ya yükseltilmiştir [14].

Altıntaş ve diğ. (2014) tarafından yapılan çalışmada ZVT ve ZCT tekniklerinin her ikisini birlikte içeren aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi gerçekleştirilmiştir. 1 kW gücünde ve 100 kHz frekansta çalışan dönüştürücüde akım ve gerilim stresleri gibi sorunların üstesinden gelinmiş ve devredeki tüm yarı iletkenler yumuşak anahtarlama ile çalışmıştır. Geliştirilen aktif bastırma hücresi kullanılarak dönüştürücünün verimi % 98'e yükseltilmiştir [7].

Aksoy ve diğ. (2015) tarafından yapılan çalışmada, yeni bir ZVZCT aktif bastırma hücreli 1 kW ve 100 kHz frekansta çalışan yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi geliştirilmiş ve simülasyon ortamında incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda ana anahtar ve ana diyot üzerinde ilave bir gerilim stresi oluşmayan dönüştürücüde ana anahtar üzerinde oluşan akım stresi ise kabul edilebilir seviyede kalmıştır. Ayrıca dönüştürücü düşük yüklerde ve geniş bir gerilim aralığında çalışmaktadır [15].

Şahin ve diğ. (2016) tarafından yapılan çalışmada 500 W gücünde 100 kHz frekansta çalışan yeni bir ZVZCT aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi geliştirilmiştir. Geniş bir giriş gerilimi altında çalışabilen dönüştürücüde ana elemanlar üzerinde ilave bir akım ve gerilim stresi oluşmamaktadır. Dönüştürücünün verimi nominal çıkış gücünde % 98,5 olarak elde edilmiştir [8].

Tsai ve Su (2017) tarafından yapılan çalışmada, çok çıkışlı yumuşak anahtarlama SEPIC dönüştürücü gerçekleştirilmiştir. Ana ve yardımcı anahtarın ZVS ve ZCS teknikleri ile anahtarlanmasıyla anahtarlama kayıpları ve EMI gürültüleri azaltılmış ve verim arttırılmıştır. Çok çıkışlı olması dönüştürücünün yenilenebilir enerji uygulamaları için de uygun olduğu yapılan deneysel çalışmalar sonucunda görülmüştür [16].

Bu tezde, [2,5,6,7,10,11]'de gerçekleştirilen bastırma hücreli dönüştürücüler incelenmiş, dönüştürücülerin çalışmaları simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sonucunda bastırma hücreli dönüştürücülerin dalga şekilleri ve ana anahtarları üzerinden anahtarlama sırasında harcanan enerji miktarı hesaplanmıştır.

Yapılan literatür araştırmasından sonra bu çalışmanın birinci bölümünde, endüstride ve literatürde yaygın olarak kullanılan DA-DA dönüştürücüler incelenmiştir. DA-DA dönüştürücülere ait literatür araştırması yapılarak, dönüştürücülerin devre modelleri, dalga şekilleri ve çalışma prensipleri hakkında bilgiler verilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, literatürde çalışılan yumuşak anahtarlama teknikleri hakkında bilgi verilmiş, bu çalışmanın konusu olan ve çeşitli teknikleri içeren aktif ve pasif bastırma hücreli DA-DA dönüştürücü devreleri incelenmiştir. Aktif ve pasif bastırma hücrelerinin çalışma şekilleri ayrıntılı olarak anlatılmış, devre topolojileri ile temel dalga şekilleri teorik olarak incelenmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, ikinci bölümde [2,5,6,7,10,11]'de anlatılan yumuşak anahtarlama teknikleri ile çalışan dönüştürücülerin bir simülasyon programı ile simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda devrelerin üzerindeki elemanların akım, gerilim dalga şekilleri elde edilmiş, anahtarlama esnasında ana anahtar üzerinde harcanan enerji miktarı normal dönüştürücü ve bastırma hücresi kullanılan dönüştürücü olmak üzere ayrı ayrı hesaplanarak karşılaştırma yapılmıştır.

Çalışmanın son bölümünde üçüncü bölümde yapılan simülasyonlarda elde edilen bilgiler doğrultusunda sonuçlara yer verilmiştir.

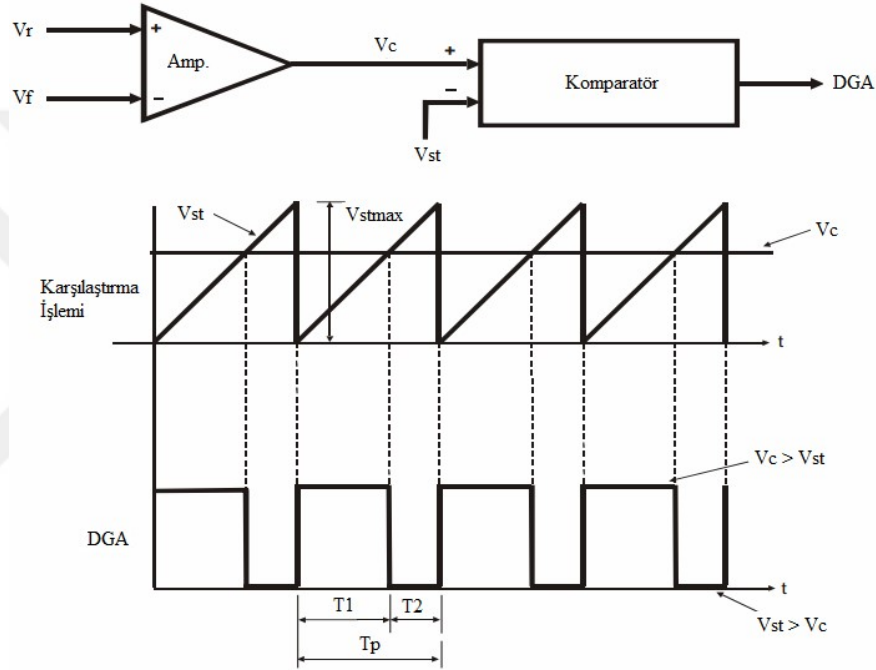
1. DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

Günümüzde yaygın kullanım alanına sahip DA-DA dönüştürücüler, akademik çalışmalarda da geniş bir şekilde incelenmektedir. Endüstride yüksek frekanslı devreler ve başka bir ifadeyle DA transformatörler olarak da bilinen DA-DA dönüştürücüler; motor kontrolü, anahtarlama güç kaynakları, batarya şarjı, galvanoteknikle kaplama, kaynak makineleri, DA regülatörler, DA şalterler, DA gerilim kaynakları gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Literatürde anahtarlama ve rezonanslı olmak üzere ikiye ayrılan DA-DA dönüştürücülerin, daha çok anahtarlama tipte olanları en yaygındır [17].

Anahtarlama temel DA-DA dönüştürücüler, bir kontrollü yarı iletken güç elemanı, bir yarı iletken güç diyotu ve bir bobinden oluşan üç temel elemanın farklı şekillerde bağlanmasıyla elde edilmiştir. Devrede ya tam iletimde ya da tam kesimde olarak çalıştırılan kontrollü güç elemanına güç anahtarı veya aktif eleman denilmektedir. Diyot ise yarı iletken pasif güç elemanıdır. Anahtarlama DA-DA dönüştürücülerin çalışma prensibi, anahtarlama bobinin enerji aktarımına dayalıdır. Bu dönüştürücülerde, bir anahtarlama periyodu içerisinde güç anahtarı veya güç diyotu iletimdedir. Genellikle, anahtar iletimde iken bobinde biriktirilen enerji, diyot iletimde iken çıkışa aktarılır. Anahtarlama DA-DA dönüştürücülerde yarı iletken güç elemanı olarak genellikle; yüksek güç ve düşük frekanslarda SCR, orta güç ve orta frekanslarda BJT, düşük güç ve yüksek frekanslarda MOSFET, ortamın üzerindeki güç ve frekanslarda ise IGBT kullanılmaktadır [17].

Anahtarlama DA-DA dönüştürücülerde çalışma frekansına göre bobin değerinin yeterince büyük olduğu ve böylece bobinden geçen akımın genellikle kesintisiz ve düzgün olduğu kabul edilmektedir. Devrenin tasarımı ve devrede kullanılan bobin, kondansatör, diyot ve anahtarların seçimi oldukça önemlidir. Dönüştürücünün çalışma frekansı arttırıldıkça kullanılan elemanların boyutlarının küçülmesine ve maliyetleri ile giriş, çıkış akım ve gerilim dalgalanmalarının azalmasına rağmen, devrede EMI gürültüleri, anahtarlama kayıpları ile akım ve gerilim stresleri artmaktadır [17].

Anahtarlama DA-DA dönüştürücülerde güç anahtarının kontrolü darbe genişlik ayarı (DGA) ile yapılmaktadır. Bu teknikte, sabit çalışma frekansı altında güç anahtarının iletim süresi değiştirilerek, bağıl iletim süresi ve böylece DA çıkış gerilimi kontrol edilmektedir. Gerçekleştirilmesi oldukça kolay olan DGA tekniğinde, güç anahtarı kontrol sinyalinin elde edilişi ve kontrolün sağlanması, Şekil 1.1’de görülmektedir [17].



Şekil 1.1. Darbe genişlik ayarı tekniği [17]

Dönüştürücüde, Denklem (1.1)’deki gibi bir anahtarlama periyodu içerisinde güç anahtarı iletim süresinin anahtarlama periyoduna oranı bağıl iletim süresi veya doluluk oranı olarak tanımlanır ve D veya λ ile gösterilir. Böylece, bağıl iletim süresi;

$$D = \frac{T_1}{T_p} \text{ ve } 0 < D < 1 \quad (1.1)$$

bağıntısı ile ifade edilir [17].

Şekil 1.1’de görüldüğü gibi V_r referans gerilimi ile V_f geri besleme geriliminin bir yükseltme işleminden geçirilmesiyle V_c kontrol gerilimi elde edilmekte ve bu gerilim ile istenilen frekansta V_{st} testere dişi geriliminin karşılaştırılmasıyla güç anahtarının

kontrol sinyali elde edilmektedir. Burada, referans giriş gerilimi ile DA çıkış geriliminin ayarı ve geri besleme giriş gerilimi ile DA çıkış geriliminin regülasyonu sağlanmaktadır [17].

Anahtarlamalı dönüştürücülerin çıkış gerilimi, ayrıca frekans modülasyonu (FM) tekniği ile de kontrol edilebilmektedir. Bu teknikte, anahtarlama frekansı veya periyot değiştirilerek bağlı iletim süresi, dolayısıyla çıkış gerilimi kontrol edilmektedir. Ancak bu kontrol yöntemi, düşük yük veya geçici rejim şartlarında çalışma gibi zorunlu hallerde ve geçici olarak kullanılmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda, giriş ve çıkıştaki dalgalanmaların filtre edilebilmesi açısından, frekansın sabit kalması istendiğinden yaygın olarak DGA yöntemi kullanılmaktadır [17]. Anahtarlamalı DA-DA dönüştürücüler, izolasyonsuz (endüktanslı) ve izolasyonlu (transformatörlü) dönüştürücüler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

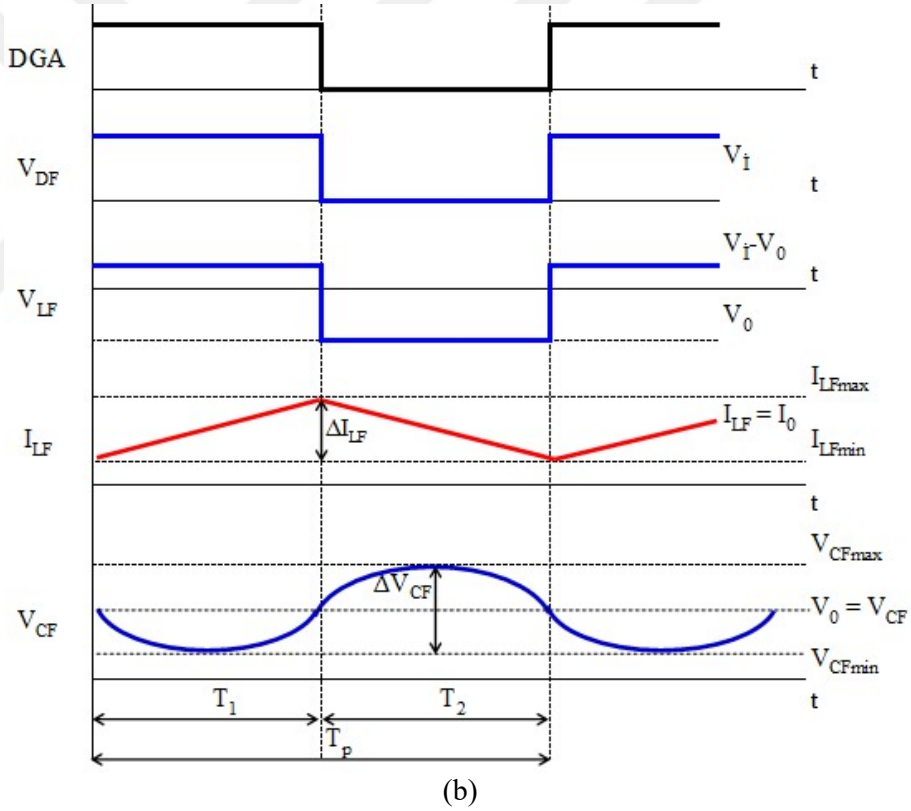
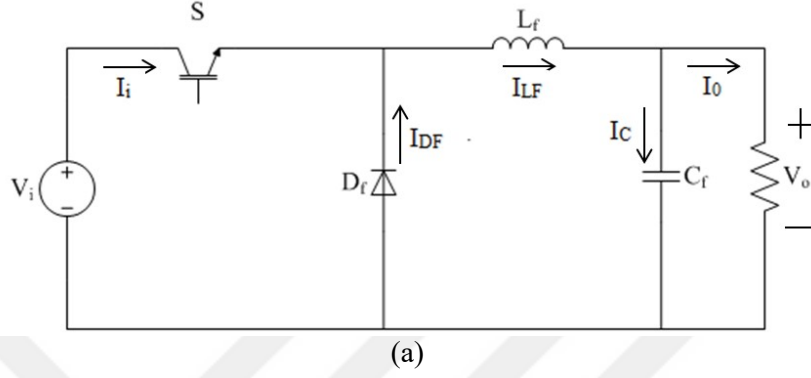
1.1. İzolasyonsuz (Endüktanslı) DA-DA Dönüştürücüler

İzolasyonsuz dönüştürücülerde enerji aktarımı anahtarlanan bobinler vasıtasıyla yapılmaktadır. Dönüştürücüdeki kontrollü yarı iletken güç elamanının iletimde olduğu süre boyunca bobinde biriktirilen enerji elemanın kesime girmesiyle birlikte yüke aktarılır. Bu dönüştürücülerin tasarımı izolasyonlu olanlara göre daha kolay olmasına rağmen en büyük dezavantajları giriş ile çıkış arasında izolasyonun olmamasıdır. İzolasyonsuz dönüştürücülerin; yükseltici (boost), düşürücü (buck) ve düşürücü-yükseltici (buck-boost) olmak üzere üç temel türü ile CUK, SEPIC ve ZETA isimli türleri bulunmaktadır [17].

1.1.1. Düşürücü (buck) DA-DA dönüştürücüler

Düşürücü dönüştürücüde temel olarak, güç anahtarı iletimdeyken giriş gerilim kaynağı hem çıkışı besler hem de bobinde ilave bir enerji biriktirir ve güç diyotu iletimdeyken bobindeki bu enerji çıkışa aktarılır. Devre modeli ve devrenin çalışması ile ilgili temel dalga şekilleri Şekil 1.2’de verilen sürekli halde çalıştırılan bu dönüştürücüde sıfır ile giriş gerilimi arasında kontrol edilebilen bir DA çıkış gerilimi elde edilir. Güç elemanları giriş gerilimine maruz kalır. Bobin çıkışa seri bağlı olduğundan, ortalama olarak bobin akımı çıkış akımına eşittir. Çıkış akımındaki

dalgalanma ve gerekli kondansatör değeri çok düşüktür. Fakat giriş gerilim kaynağından çekilen akım çok dalgalıdır [17].

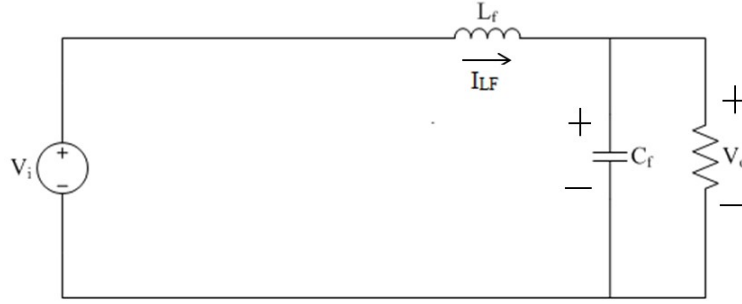


Şekil 1.2. Düşürücü dönüştürücünün a) devre şeması b) bu devrenin çalışması ile ilgili temel dalga şekilleri

T_1 aralığında dönüştürücü, Şekil 1.3'teki gibi çalışmaktadır. Bu aralık için;

$$\frac{d_{iLF}}{dt} = \frac{V_i - V_o}{L_f} \quad (1.2)$$

eşitliği yazılabilir [17].

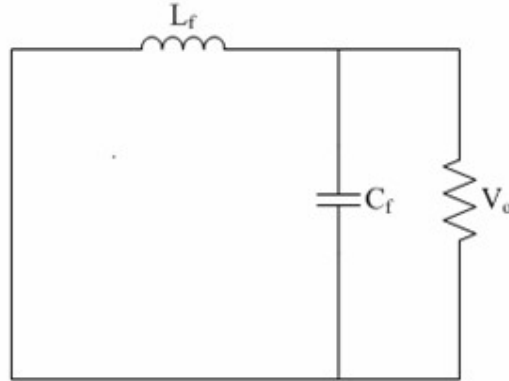


Şekil 1.3. Düşürücü dönüştürücünün iletim durumu

Dönüştürücü T_2 aralığında Şekil 1.4'teki gibi çalışmaktadır. Bu aralık için;

$$\frac{d_{iLF}}{dt} = -\frac{V_o}{L_F} \quad (1.3)$$

ifadesi yazılabilir [17].



Şekil 1.4. Düşürücü dönüştürücünün kesim durumu

T_1 aralığında bobinin akımındaki yükselme miktarı için;

$$\Delta I_{LF}(T_1) = \frac{V_i - (V_{ce} - I_{LF} R_{LF}) - V_o}{L_F} \cdot T_1 \quad (1.4)$$

T_2 aralığında bobinin akımındaki azalma miktarı için;

$$\Delta I_{LF}(T_2) = \frac{V_o + (V_{Df} + I_{LF} R_{LF})}{L_F} \cdot T_2 \quad (1.5)$$

ifadeleri yazılabilir [18].

Sürekli hal şartlarında bobinin akımındaki yükselme miktarı ile azalma miktarı eşit kabul edilir. Bu nedenle Denklem (1.4) ve (1.5) eşitlenerek;

$$V_0 = (V_i - V_{ce})\left(\frac{T_1}{T_1 + T_2}\right) - V_{DF}\left(\frac{T_2}{T_1 + T_2}\right) - I_{LF}R_{LF} \quad (1.6)$$

elde edilmesiyle ve;

$$\frac{T_1}{T_1 + T_2} = D \quad (1.7)$$

$$\frac{T_2}{T_1 + T_2} = 1 - D \quad (1.8)$$

ifadeleri de kullanılarak;

$$V_0 = (V_i - V_{ce})D - V_{DF}(1 - D) - I_{LF}R_{LF} \quad (1.9)$$

şeklinde çıkış gerilimi sadeleştirilir. Burada V_{ce} , V_{DF} ve R_{LF} değerlerinin yeterince küçük olduğundan ihmal edilirse çıkış gerilimi;

$$V_0 = V_i D \quad (1.10)$$

şeklinde bulunur.

Kayıpların ihmal edildiği durumda giriş gücü ile çıkış güçlerinin birbirine eşitliğinden;

$$I_0 V_0 = I_i V_i \quad (1.11)$$

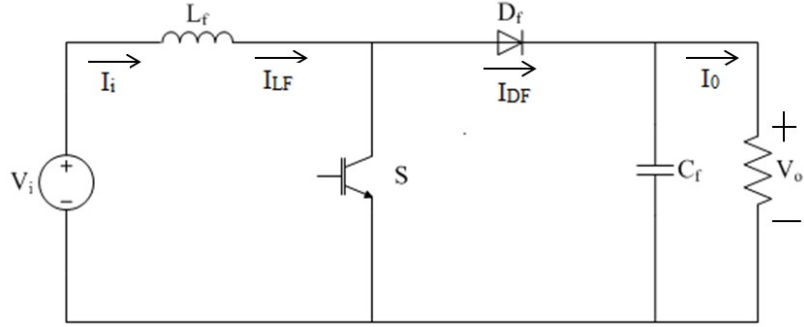
$$I_i = D I_0 \quad (1.12)$$

şeklinde giriş-çıkış akım denklemi bulunur [18].

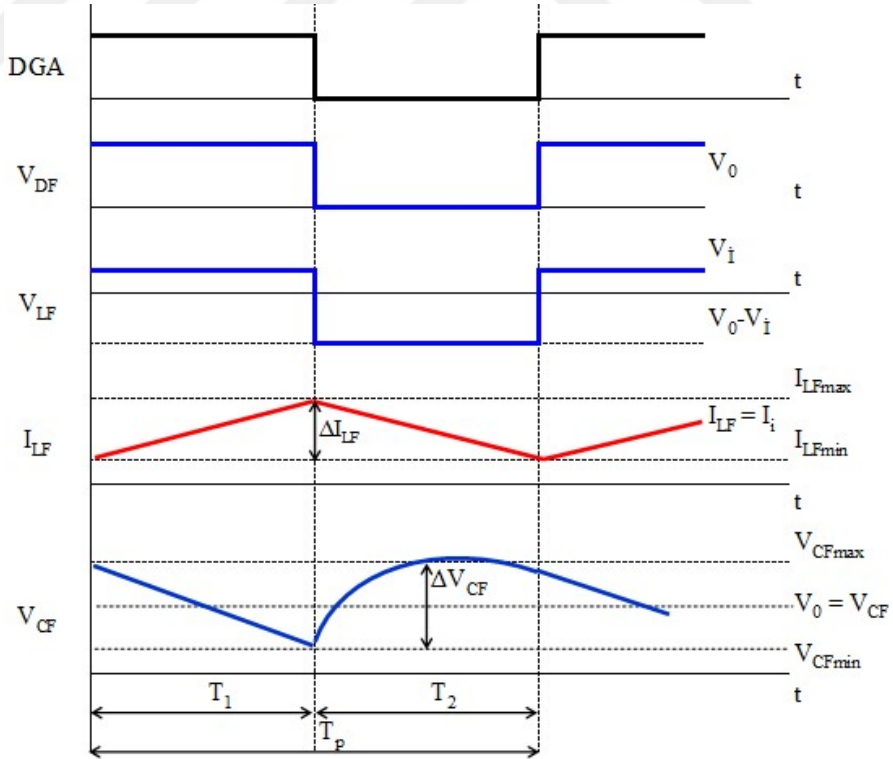
1.1.2. Yükseltici (boost) DA-DA dönüştürücüler

Bu dönüştürücüde, temel olarak, güç anahtarı iletimdeyken giriş gerilim kaynağı sadece bobine ilave bir enerji verir ve aynı esnada yükü kondansatör besler. Güç diyotu iletimdeyken ise, hem giriş gerilim kaynağı çıkışı besler hem de bobindeki ilave enerji yüke aktarılır. Sürekli halde çalışan bu dönüştürücüde, DA çıkış gerilimi,

giriş gerilimi ve belirlenen bir maksimum gerilim arasında kontrol edilir. Güç elemanları çıkış gerilimine maruz kalır. Bobin girişe seri bağlı olduğundan, bobin akımı giriş akımına eşittir ve giriş akımındaki dalgalanma düşük olur. Fakat çıkış akımındaki dalgalanma ve gerekli kondansatör değeri yüksektir. Dönüştürücüye ait devre şeması ve dönüştürücünün sürekli halde çalışmasıyla ilgili temel dalga şekilleri Şekil 1.5'te yer almaktadır [17].



(a)



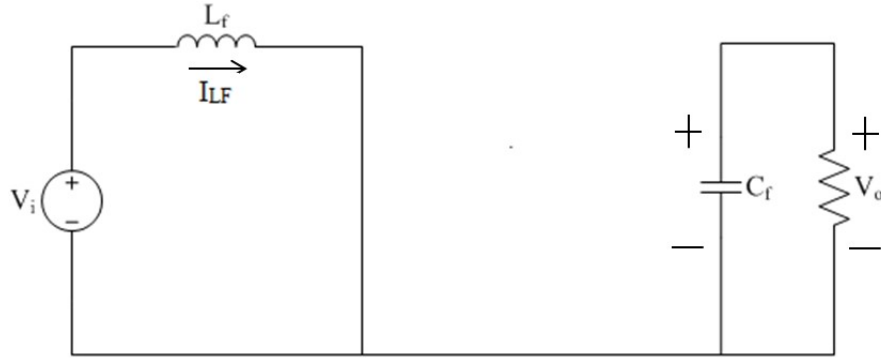
(b)

Şekil 1.5. Yükseltici dönüştürücünün a) devre şeması b) devrenin çalışması ile ilgili temel dalga şekilleri

Yükselti dönüştürücü T_1 aralığında Şekil 1.6'daki gibi çalışmaktadır. Bu aralık için;

$$\frac{d_{iLF}}{dt} = \frac{V_{LF}}{L_F} \quad (1.13)$$

ifadesi yazılabilir [17].

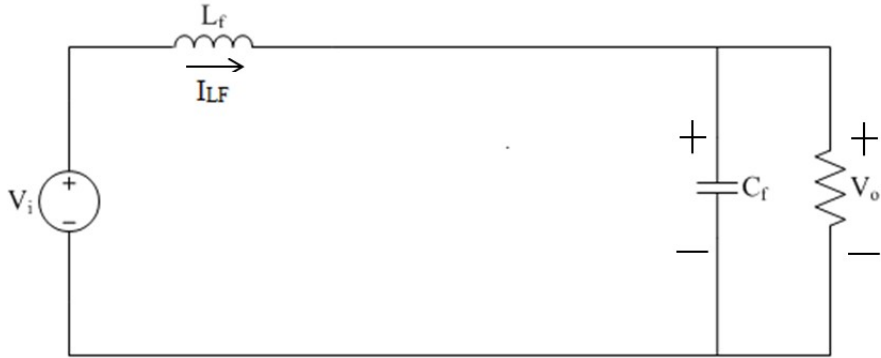


Şekil 1.6. Dönüştürücünün iletim durumu

Dönüştürücü T_2 aralığında Şekil 1.7'deki gibi çalışmaktadır. Bu aralık için;

$$\frac{d_{iLF}}{dt} = -\frac{V_0 - V_i}{L_F} \quad (1.14)$$

ifadesi yazılabilir [17].



Şekil 1.7. Dönüştürücünün kesim durumu

T_1 aralığında bobin akımının yükselme miktarı için;

$$\Delta I_{LF}(T_1) = \frac{V_i}{L_F} T_1 \quad (1.15)$$

T_2 aralığında bobin akımının düşme miktarı için;

$$\Delta I_{Lf}(T_2) = \frac{V_i - V_0}{L_F} T_2 \quad (1.16)$$

ifadeleri yazılabilir [19].

Bir periyottaki bobin akımının değişiminin mutlak değeri sıfır olacağından Denklem (1.15) ve (1.16)'nın toplamının sıfıra eşitlenmesiyle ve Denklem (1.7) ile (1.8)'in kullanılmasıyla;

$$V_0 = \frac{V_i}{1-D} \quad (1.17)$$

şeklinde çıkış gerilimi ifadesi elde edilir [19].

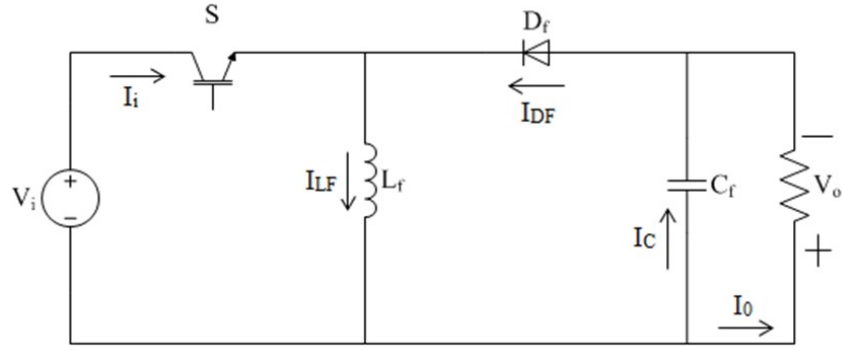
Kayıpların ihmal edildiği durumda giriş gücü ile çıkış güçlerinin birbirine eşitliğinden;

$$I_i = \frac{1}{1-D} I_0 \quad (1.18)$$

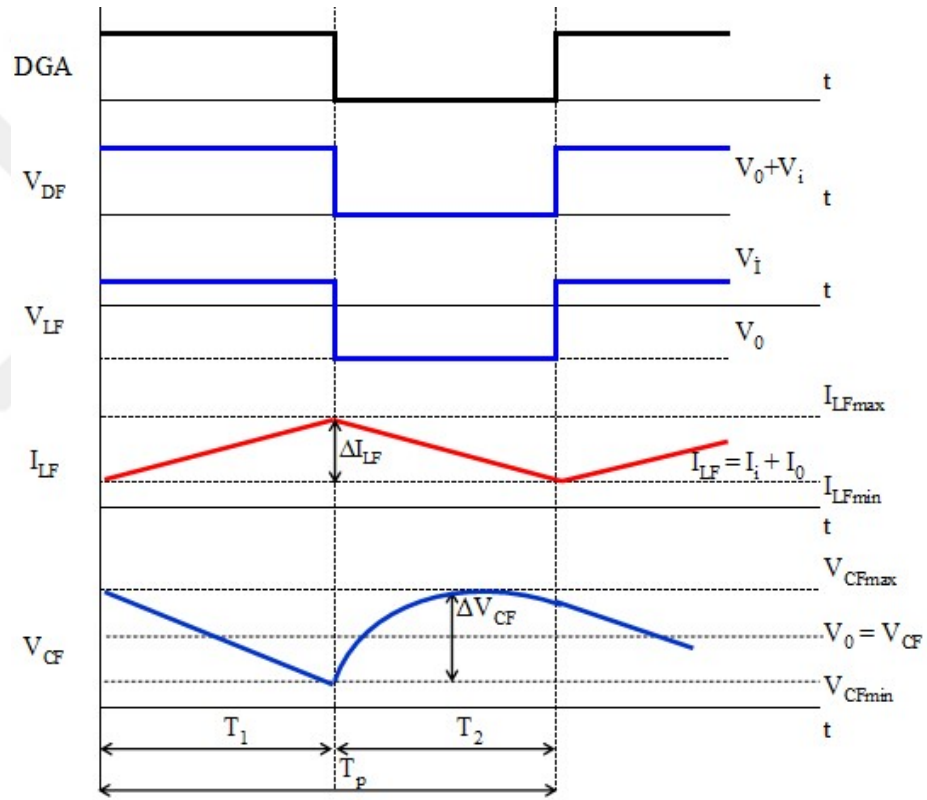
şeklinde dönüştürücünün giriş-çıkış akım bağıntısı elde edilir.

1.1.3. Düşürücü-yükseltici (buck-boost) DA-DA dönüştürücüler

Düşürücü-yükseltici dönüştürücüde temel olarak, güç anahtarı iletimdeyken giriş gerilim kaynağı sadece bobine ilave bir enerji verir ve aynı zamanda yükü kondansatör besler. Güç diyotu iletimdeyken ise, sadece bobindeki ilave enerji yüke aktarılır. Sürekli halde çalışan bu dönüştürücüde, sıfır ve belirlenen bir maksimum gerilim arasında kontrol edilebilen bir DA çıkış gerilimi elde edilir. Güç elemanları giriş ve çıkış gerilimlerinin toplamına maruz kalır. Bobin giriş veya çıkışa seri bağlı olmadığından, bobin akımı giriş ile çıkış akımlarının toplamına eşittir ve giriş ile çıkış akımlarındaki dalgalanmalar büyüktür. Ayrıca, bu dönüştürücünün önemli bir özelliği çıkış geriliminin giriş gerilimine göre ters yönlü olmasıdır. Bu nedenle, bu dönüştürücüye ters çıkışlı dönüştürücü de denilmektedir. Düşürücü-yükseltici dönüştürücüye ait devre şeması ile temel dalga şekilleri Şekil 1.8'de gösterilmektedir [17].



(a)



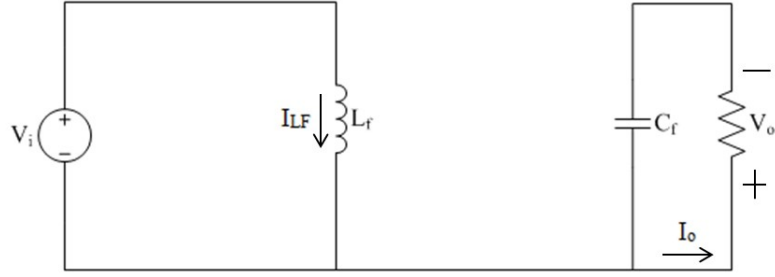
(b)

Şekil 1.8. Düşürücü-yükseltici dönüştürücünün a) devre şeması
b) devrenin çalışması ile ilgili temel dalga şekilleri

Dönüştürücünün T_1 aralığındaki çalışması Şekil 1.9'daki gibi olup bu aralık için;

$$\frac{d_{iLF}}{dt} = \frac{V_i}{L_f} \quad (1.19)$$

ifadesi geçerlidir [17].

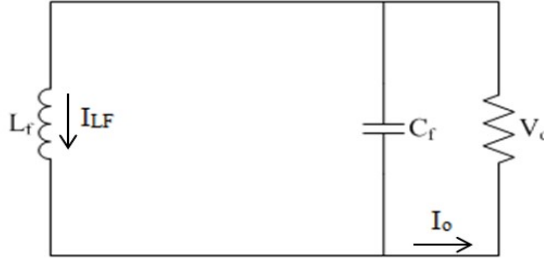


Şekil 1.9. Dönüştürücünün iletim durumu

Dönüştürücünün T_2 aralığındaki çalışması Şekil 1.10'daki gibi olup bu aralık için;

$$\frac{dI_{LF}}{dt} = -\frac{V_o}{L_F} \quad (1.20)$$

ifadesi geçerlidir [17].



Şekil 1.10. Dönüştürücünün kesim durumu

T_1 aralığında bobin akımı yükselme miktarı için;

$$\Delta I_{LF}(T_1) = \frac{V_i}{L_F} T_1 \quad (1.21)$$

T_2 aralığında bobin akımı azalma miktarı için;

$$\Delta I_{LF}(T_2) = \frac{V_o}{L_F} T_2 \quad (1.22)$$

ifadelerinin elde edilip eşitlenmesi ve Denklem (1.7) ile (1.8)'in kullanılmasıyla;

$$V_o = \frac{D}{1-D} V_i \quad (1.23)$$

şeklinde çıkış gerilimi denklemi oluşturulur.

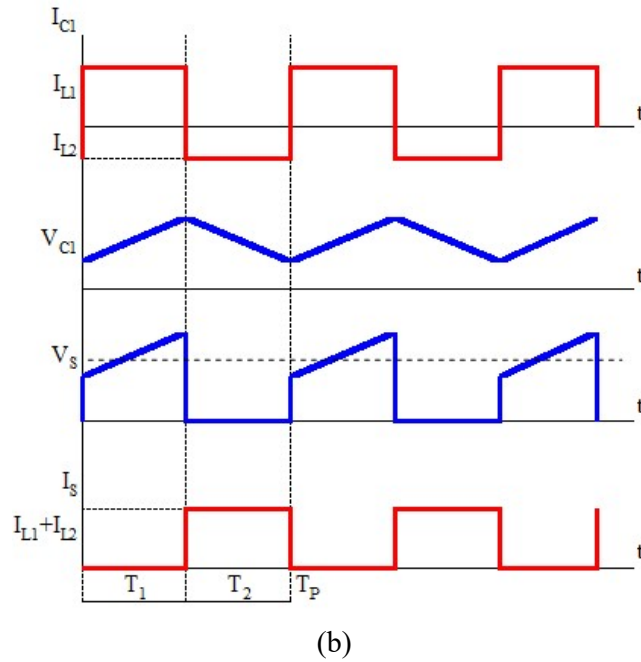
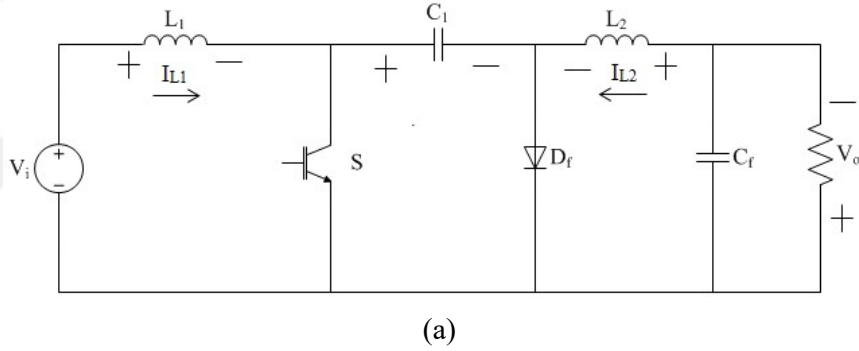
Kayıpların ihmal edilmesiyle giriş gücü ile çıkış güçlerinin birbirine eşitliğinden;

$$I_i = \frac{D}{1-D} I_o \quad (1.24)$$

ifadesi ile dönüştürücünün akım bağıntısı elde edilir.

1.1.4. CUK tipi DA-DA dönüştürücüler

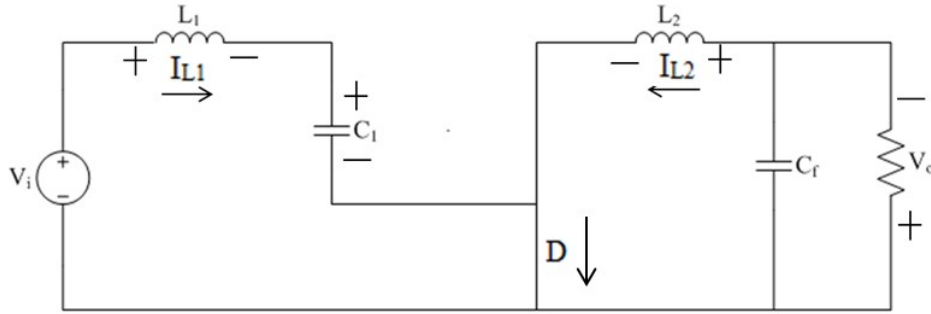
Düşürücü-yükseltici dönüştürücülere benzer şekilde CUK tipi dönüştürücüler de çıkış gerilimini hem düşürebilmekte hem de yükseltebilmektedir. Çıkış gerilimi ters yönlüdür. Dönüştürücünün devre şeması ile temel dalga şekilleri Şekil 1.11’de yer almaktadır [20].



Şekil 1.11. CUK tipi dönüştürücünün a) devre şeması b) devrenin çalışması ile ilgili temel dalga şekilleri

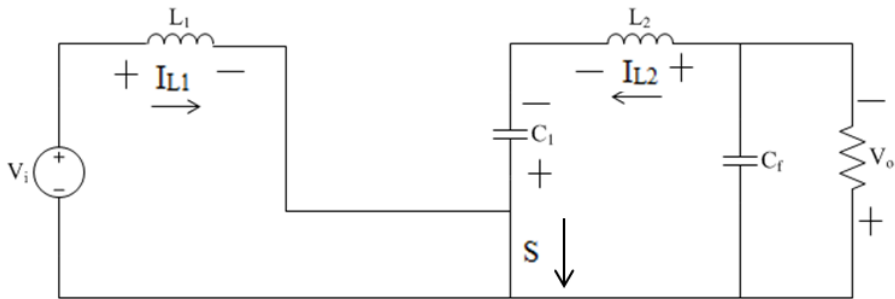
Dönüştürücünün giriş ve çıkış akım ile gerilim bağıntıları yaklaşık olarak düşürücü-yükseltici dönüştürücünün aynısıdır. Dönüştürücünün en önemli avantajı giriş ve çıkışında yer alan bobinler sayesinde giriş ve yük akımlarının dalgalılığının az olmasıdır. En önemli dezavantajı ise yüksek akım dalgalanmasını taşıyabilecek kapasiteye sahip bir C_1 enerji transfer kondansatörüne ihtiyaç duymasıdır. Diğer bir dezavantajı ise çok sayıda devre elemanının bulunmasıdır [20].

Şekil 1.12'den görüleceği üzere dönüştürücünün güç anahtarı kesim durumundayken; C_1 kondansatörü, giriş gerilimi ve L_1 bobini üzerindeki enerji ile diyot üzerinden şarj olurken, L_2 bobini üzerindeki enerji ile yükü besler. Böylece i_{L2} akımı gittikçe azalır [20].



Şekil 1.12. CUK tipi dönüştürücünün kesim durumu

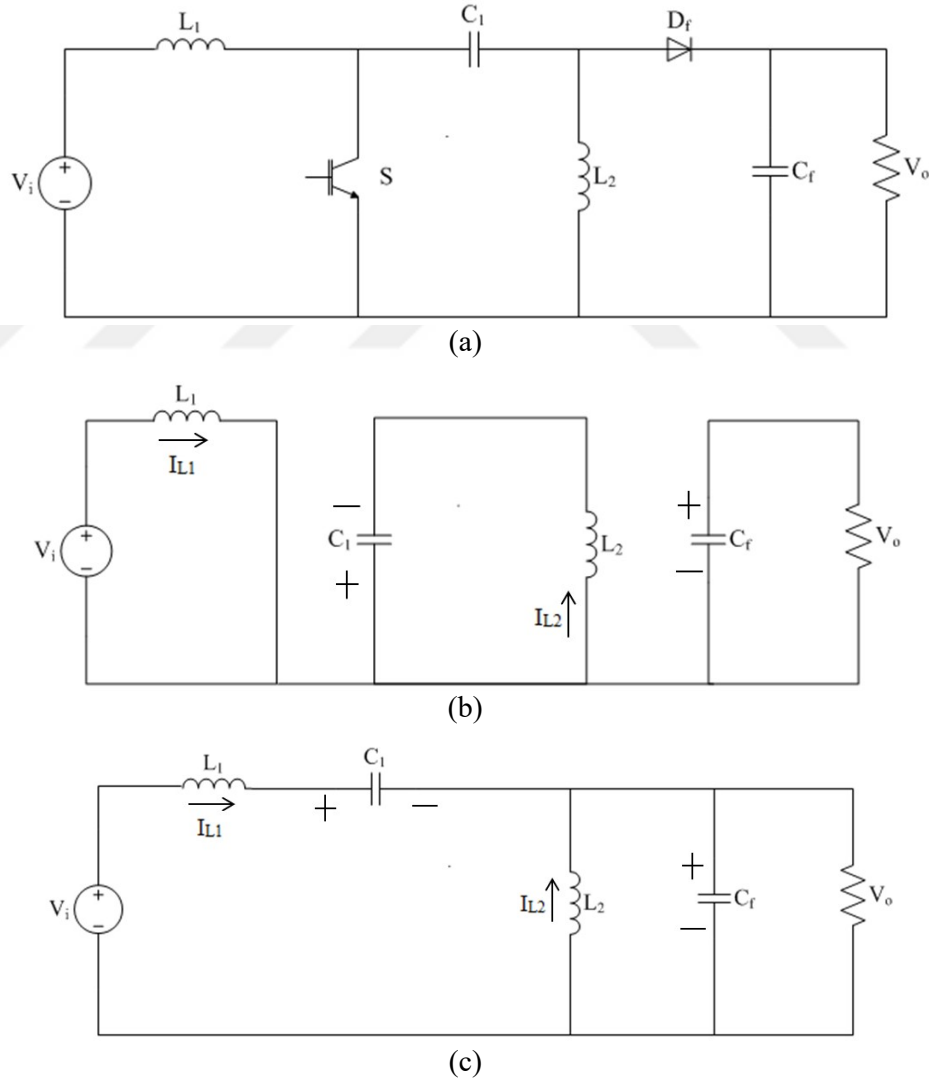
Şekil 1.13'ten görüleceği üzere güç anahtarı iletim durumundayken; i_{L1} ve i_{L2} akımları güç anahtarı üzerinden akar. $V_{C1} > V_0$ olduğundan C_1 güç anahtarı üzerinden yüke ve L_2 bobinine enerji aktarır. Böylece i_{L2} artar. Girişteki enerji L_1 bobinine aktarıldığından i_{L1} akımı da artar [20].



Şekil 1.13. CUK tipi dönüştürücünün iletim durumu

1.1.5. SEPIC tipi DA-DA dönüştürücüler

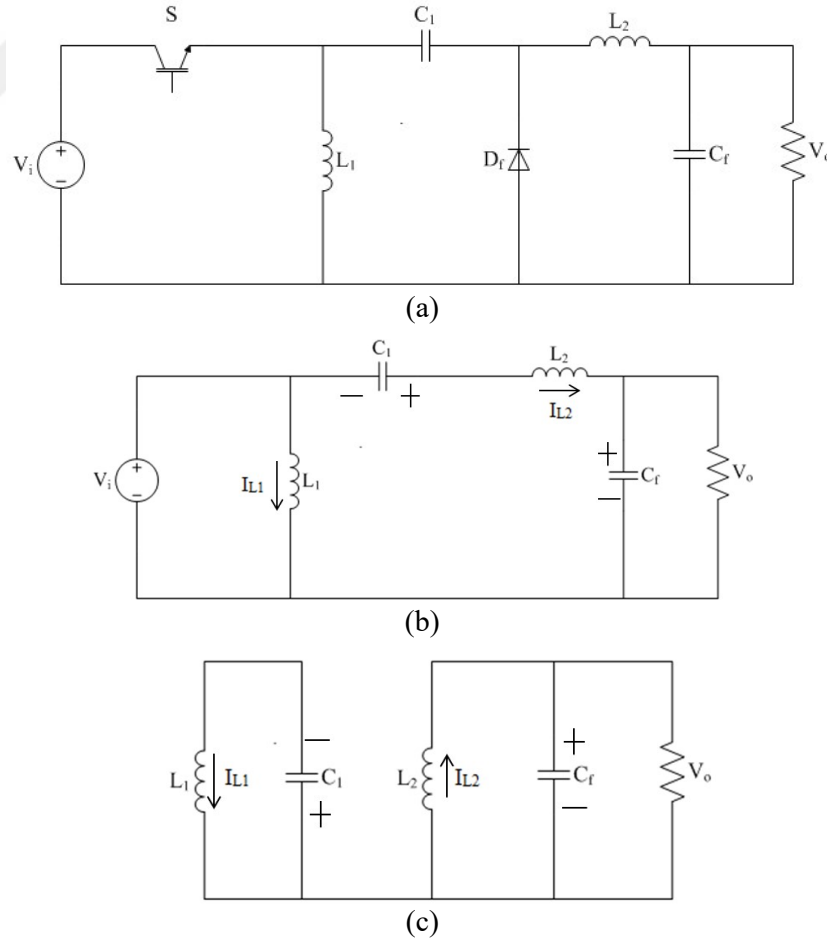
SEPIC (Single-ended primary inductance converter) tipi DA-DA dönüştürücüler yapı itibarıyla CUK tipi DA-DA dönüştürücülere benzemekte olup, devre şeması ile dönüştürücünün iletim ve kesim durumundaki devre şeması Şekil 1.14'te yer almaktadır. Dönüştürücünün gerilim bağıntısı CUK tipi dönüştürücülere benzer şekilde düşürücü-yükseltici dönüştürücü ile aynıdır. Dönüştürücünün çıkış geriliminin polaritesi giriş gerilimi ile aynıdır [21]. L_2 bobini sayesinde yük akımındaki dalgalılık CUK tipi dönüştürücüye oranla daha azdır [22].



Şekil 1.14. SEPIC tipi dönüştürücünün a) devre şeması b) iletim durumu c) kesim durumu

1.1.6. ZETA tipi DA-DA dönüştürücüler

ZETA tipi DA-DA dönüştürücüler SEPIC tipte olduğu gibi gerilimi hem yükseltme hem de düşürebilme özelliğine sahiptir. Ayrıca bu tip dönüştürücüde çıkış geriliminin polaritesi giriş gerilimi ile aynıdır. Dönüştürücü, anahtarın iletimde diyotun kesimde olduğu ve anahtarın kesimde diyotun iletimde olduğu şarj ve deşarj modu olmak üzere iki farklı çalışma moduna sahiptir. Birinci modda L_1 ve L_2 bobinleri giriş kaynağından beslenmektedir. İkinci modda diyot iletimdedir ve L_2 bobininde biriken enerji yüke aktarılır [23]. Gerilim ve akım bağıntısı CUK ve SEPIC tipteki dönüştürücülere benzer şekilde düşürücü-yükseltici dönüştürücülerle aynıdır. ZETA ve CUK tipi dönüştürücülerde yük tarafındaki akım dalgalanması SEPIC tipi dönüştürücüye göre daha fazladır [22]. Dönüştürücüye ait devre şeması ile çalışma modları Şekil 1.15'te yer almaktadır.



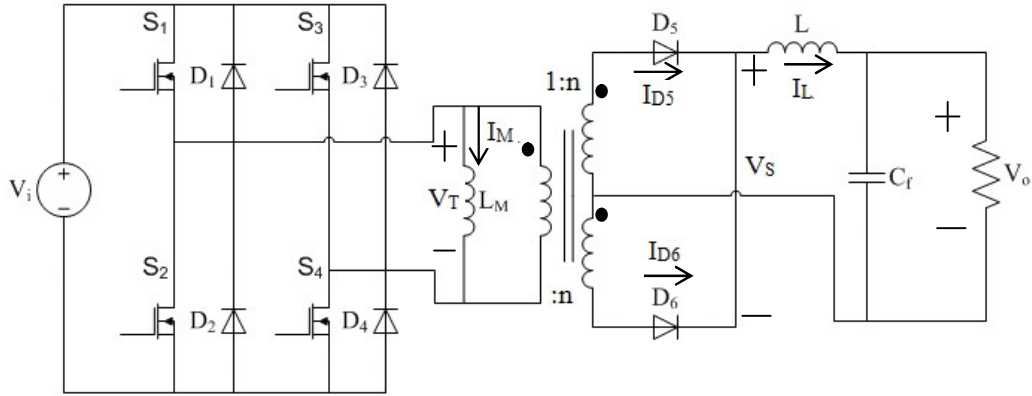
Şekil 1.15. ZETA tipi dönüştürücünün a) devre şeması b) şarj modu c) deşarj modu

1.2. İzolasyonlu (Transformatörlü) DA-DA Dönüştürücüler

İzolasyonlu DA-DA dönüştürücülerin çalışma prensipleri izolasyonsuz dönüştürücülere benzemektedir. İkisi arasındaki temel fark dönüştürücünün giriş ve çıkışının transformatör ile birbirinden izole edilmesidir. İzolasyonlu DA-DA dönüştürücüler; tam köprü (full bridge), yarım köprü (half bridge), ileri yönlü (forward), geri dönüşlü (flyback) ve push-pull dönüştürücüler olarak sınıflandırılmaktadır. Temelde bu dönüştürücüler de izolasyonsuz dönüştürücüler gibi yükseltici (boost), düşürücü (buck), düşürücü-yükseltici (buck-boost) dönüştürücülerden birinin özelliğini taşımaktadır [17].

1.2.1. Tam köprü (full bridge) DA-DA dönüştürücüler

Tam köprü (full bridge) DA-DA düşürücü dönüştürücünün devre şeması Şekil 1.16'da gösterilmektedir. Dönüştürücünün girişi ile çıkışı arasındaki izolasyon 3 sargılı transformatör ile sağlanmıştır. Bu dönüştürücü genelde düşük çıkış gerilimi istenilen uygulamalarda tercih edilmektedir [24].



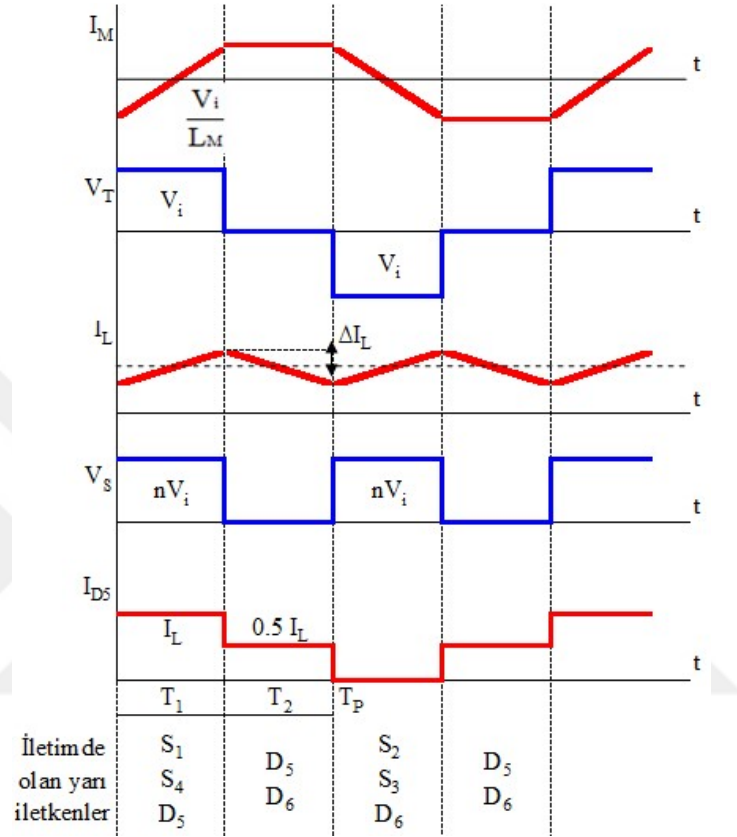
Şekil 1.16. Tam köprü (full bridge) DA-DA dönüştürücü devresi

Dönüştürücünün çıkış gerilim ifadesi olarak;

$$V_o = nDV_i \quad (1.25)$$

yazılabilir. Burada doluluk oranı (D) $0 \leq D < 1$ aralığında değiştirilerek çıkış gerilimi kontrol edilir. Transformatörün fiziksel dönüştürme oranı (n) vasıtasıyla da gerilim arttırılabilir veya düşürülebilir. Denklem (1.25) dönüştürücünün sürekli akım modunda çalışması için geçerlidir. Tam köprü dönüştürücüler kesintili akım

modunda düşük güçlerde çalışabilirler. Dönüştürücünün çalışması ile ilgili temel dalga şekilleri Şekil 1.17’de yer almaktadır [24].

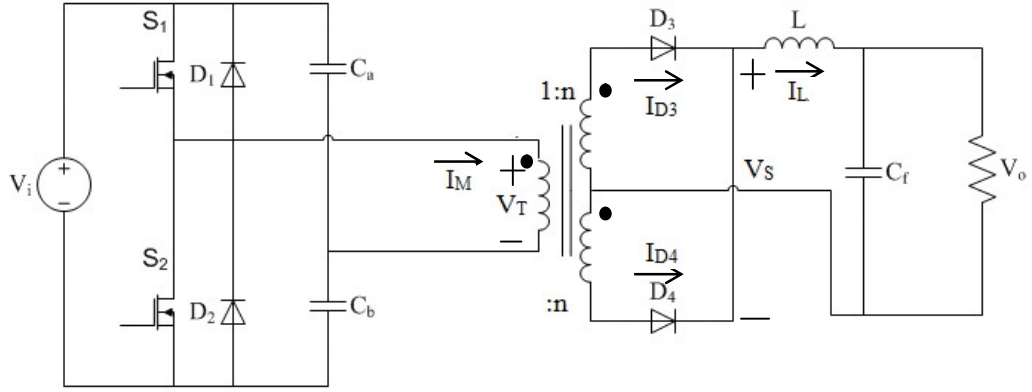


Şekil 1.17. Tam köprü düşürücü dönüştürücünün çalışması ile ilgili temel dalga şekilleri

Tam köprü dönüştürücüler genellikle anahtarlama güç kaynaklarında, 750 W ve üzerindeki güçlerde genellikle kullanılmaktadır. Daha düşük güçler için devrenin fazla eleman içermesi sebebiyle maliyet açısından kullanılması tercih edilmemektedir [24].

1.2.2. Yarım köprü (half bridge) DA-DA dönüştürücüler

Yarım köprü (half bridge) DA-DA dönüştürücünün düşürücü devre şeması Şekil 1.18’de yer almaktadır. Bu dönüştürücülerin tam köprü dönüştürücülerden farkı iki MOSFET ve bunların ters paralel bağlı diyotları yerine yüksek değerli kondansatörlerin bulunmasıdır. Devrede kullanılan yarı iletken elemanların sayısının azlığı nedeniyle düşük güçlerde kullanılması daha uygundur [24].



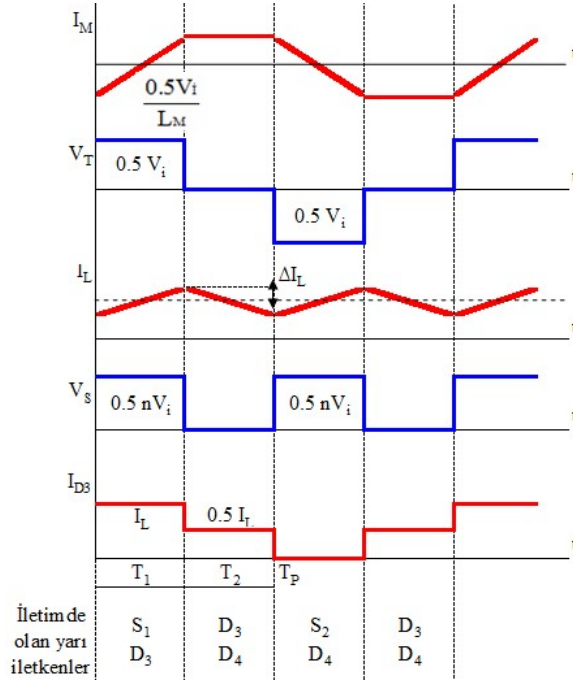
Şekil 1.18. Yarım köprü (half bridge) DA-DA düşürücü dönüştürücü devresi

Dönüştürücünün çıkış gerilim bağıntısı olarak;

$$V_o = 0,5nDV_i \quad (1.26)$$

yazılabilir [24].

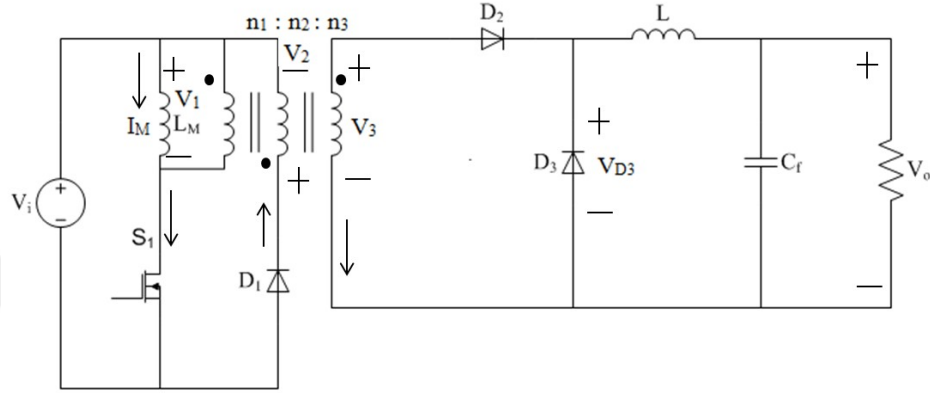
Dönüştürücünün çalışması ile ilgili temel dalga şekilleri Şekil 1.19'da yer almaktadır [24].



Şekil 1.19. Dönüştürücünün çalışması ile ilgili dalga şekilleri

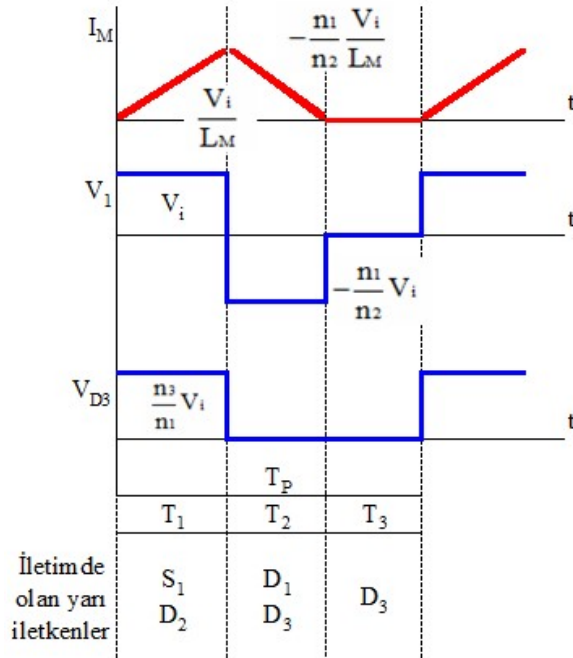
1.2.3. İleri yönlü (forward) DA-DA dönüştürücüler

İleri yönlü (forward) düşürücü DA-DA dönüştürücünün tek transistörlü olan devre şeması Şekil 1.20’de gösterilmektedir. Bu dönüştürücüler, yarım köprü ve tam köprü dönüştürücülerin kullanılmadığı düşük güçlerde tercih edilmektedir [24].



Şekil 1.20. İleri yönlü (forward) dönüştürücü devresi

Dönüştürücünün çalışmasına ait temel dalga şekilleri Şekil 1.21’de yer almaktadır [24].



Şekil 1.21. İleri yönlü dönüştürücüye ait temel dalga şekilleri

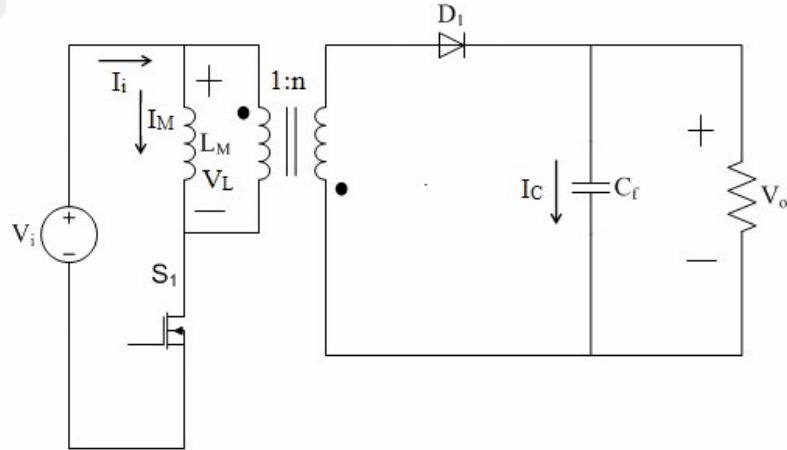
Dönüştürücünün çıkış gerilim ifadesi olarak;

$$V_0 = \frac{n_3}{n_1} D V_i \quad (1.27)$$

eşitliği geçerlidir. Transformatörün dönüştürme oranı $n_1=n_2$ için doluluk oranı $0 \leq D < 0,5$ olarak sınırlandırılmıştır. Bu dönüştürücülerin iki MOSFET'li olan modelleri de literatürde yer almaktadır. İki MOSFET'li olan modeller yarım köprü dönüştürücülerle aynı güçlerdeki uygulamalarda kullanılmaktadır [24].

1.2.4. Geri dönüşlü (flyback) DA-DA dönüştürücüler

Geri dönüşlü (flyback) DA-DA dönüştürücüler temel olarak düşürücü-yükseltici dönüştürücülere benzemektedir. Şekil 1.22'de yer alan dönüştürücü devresinde ana anahtar iletimdeyken L_m bobini giriş gerilimi ile enerjilenir. D_1 diyotu iletime geçince L_m bobininde biriken enerji yükü aktarılır [24].



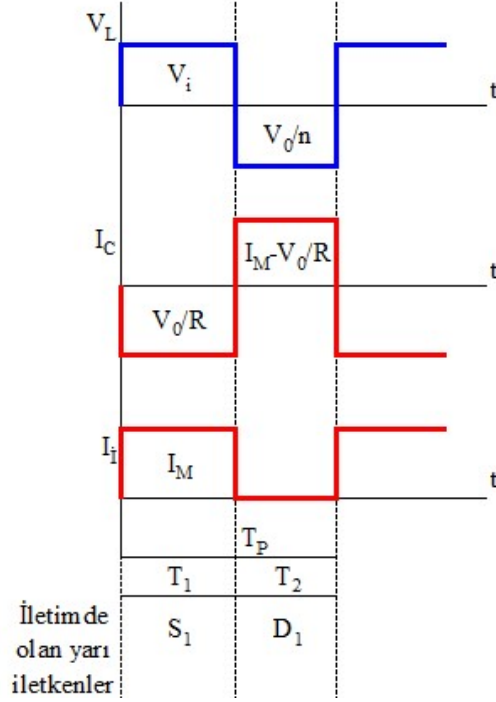
Şekil 1.22. Geri dönüşlü (flyback) dönüştürücü devre şeması

Dönüştürücüye ait çıkış gerilim ifadesi yükseltici dönüştürücüye benzer olarak;

$$V_0 = n \frac{D}{1-D} V_i \quad (1.28)$$

şeklinde yazılır. Dönüştürücüye ait temel dalga şekilleri Şekil 1.23'te gösterilmiştir. Geri dönüşlü dönüştürücüler genellikle 50 W ile 100 W güç aralığındaki yüksek çıkış gerilimi gerektiren televizyon, bilgisayar monitörü gibi cihazlarda kullanılmaktadır. Az sayıda devre elemanı içermesi en önemli avantajı olup, devredeki ana anahtarda

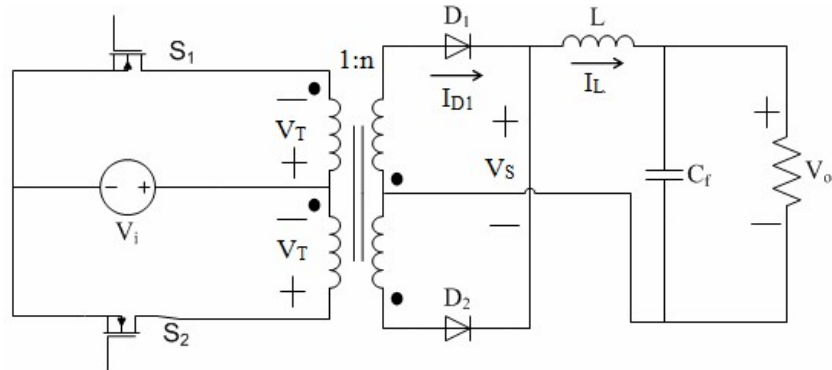
oluşan yüksek gerilim stresi ve zayıf geçiş regülasyonu bu dönüştürücünün dezavantajlarını oluşturmaktadır [24].



Şekil 1.23. Dönüştürücüye ait temel dalga şekilleri

1.2.5. Push-pull DA-DA dönüştürücüler

Push-pull düşürücü dönüştürücü devre modeli Şekil 1.24'te görülmektedir. Dönüştürücünün sekonder tarafı yarım köprü ve tam köprü dönüştürücülere benzemektedir [24].

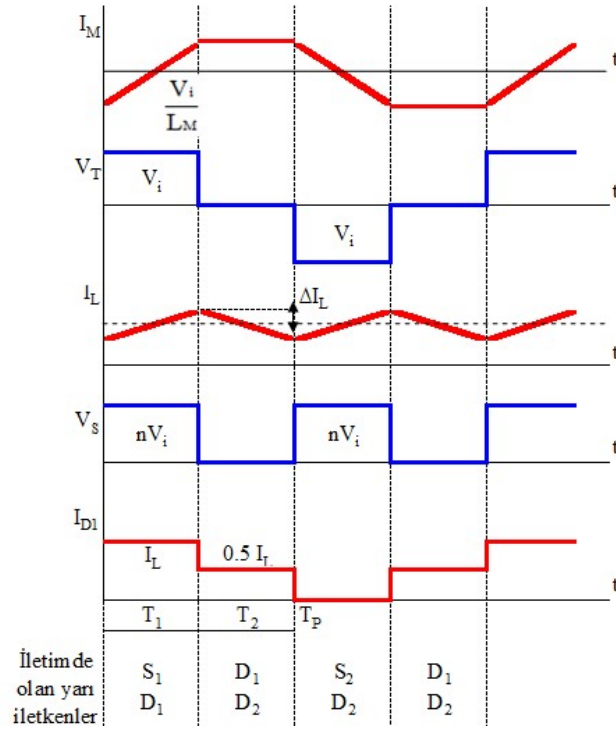


Şekil 1.24. Push-pull dönüştürücü devresi

Dönüştürücüye ait çıkış gerilimi;

$$V_0 = nDV_i \quad (1.29)$$

şeklinde yazılır. Doluluk oranı $0 \leq D < 1$ aralığında ayarlanabilir. Ancak sadece doluluk oranının değiştirildiği kontrol şekli önerilmemektedir. Dönüştürücünün çalışmasına ait temel dalga şekilleri Şekil 1.25'te yer almaktadır [24].



Şekil 1.25. Dönüştürücüye ait temel dalga şekilleri

2. DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜLERDE KULLANILAN YUMUŞAK ANAHTARLAMA TEKNİKLERİ

Yüksek frekanslı anahtarlama DA-DA dönüştürücüler, kontrol kolaylığı, hızlı cevap verme ve yüksek güç yoğunluğu avantajları nedeniyle endüstride; batarya şarj istasyonları, yenilenebilir enerji sistemleri, yakıt pili, güç faktörü düzeltme, LED aydınlatma, gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, anahtarlama DA-DA dönüştürücülerde anahtarlama frekansı arttıkça güç yoğunluğunun daha da artmasına rağmen anahtarlama kayıpları, elektromanyetik girişim (EMI: Electromagnetic Interference) gürültüleri ve düşük verim sorunları ortaya çıkmaktadır. Bu sorunların üstesinden; dönüştürücünün sert anahtarlama (HS :Hard Switching) ile çalıştırılması yerine, dönüştürücüye pasif ve aktif bastırma hücreleri ilave edilerek dönüştürücünün yumuşak anahtarlama (SS: Soft Switching) ile çalıştırılmasıyla gelinebilmektedir.

Endüstride yaygın olarak kullanılan anahtarlama dönüştürücüler yüksek frekanslarda çalıştırıldığında daha yüksek güç yoğunluğu ve daha hızlı cevap elde edilmekte ve bobin, kondansatör, transformatör boyutları küçülmektedir. Ancak, dönüştürücüde frekans arttırıldıkça buna bağlı olarak anahtarlama kayıpları ile elektromanyetik girişim gürültüleri artmaktadır. Bu nedenle dönüştürücü yüksek frekansta çalıştırılmak istendiğinde anahtarlama kayıplarının, EMI gürültülerinin akım ve gerilim streslerinin önüne geçilebilmek için sert anahtarlama yerine yumuşak anahtarlama kullanılmaktadır [1-8].

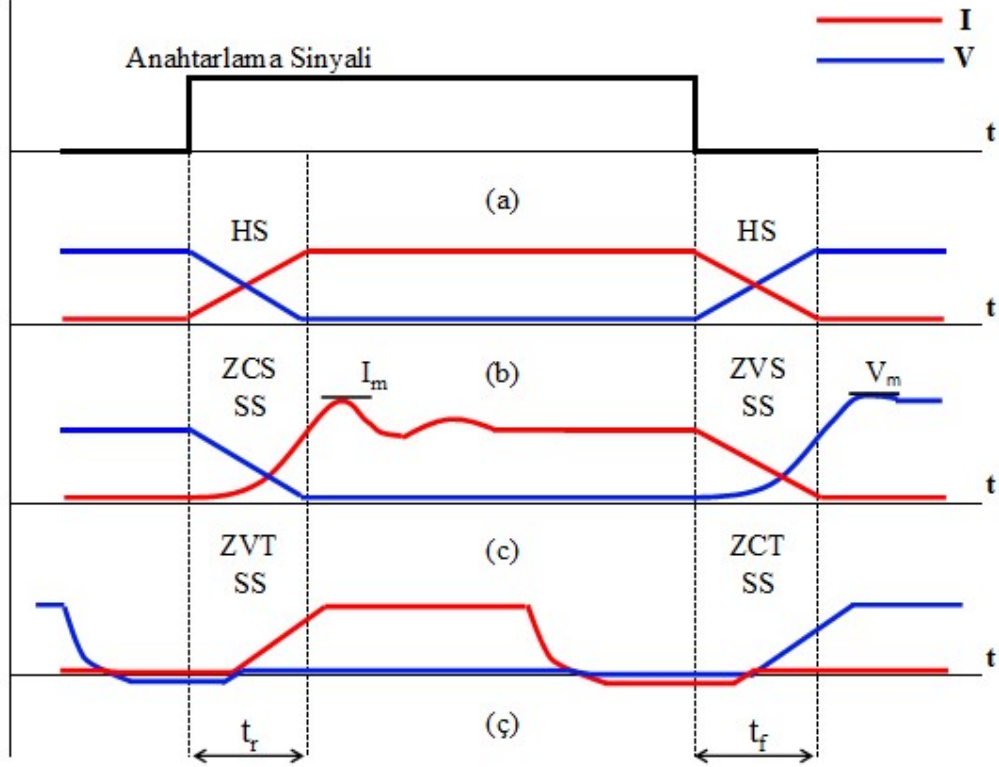
Dönüştürücüde oluşan anahtarlama kayıpları, devrede yer alan yarı iletkenlerin iletme girmesi sürecinde elemanın uçlarındaki gerilimin düşmesi ve üzerinden geçen akımın yükselmesi ile kesime girme esnasında elemanın uçlarındaki gerilimin yükselmesi ve üzerinden geçen akımın düşmesinin aynı zaman aralığında meydana gelmesi ile oluşmaktadır. İletme girme işleminde, parazitik kondansatörün deşarjında oluşan enerji kaybı ile ana diyotun ters toparlanma sürecinde oluşan enerji kaybı da anahtarlama kayıplarına eklenir [1].

Genellikle literatürde kullanılan yumuşak anahtarlama teknikleri; sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS), sıfır akımda anahtarlama (ZCS), sıfır gerilimde geçiş (ZVT) ve sıfır akımda geçiş (ZCT) teknikleridir.

Şekil 2.1 üzerinden genel olarak ifade etmek gerekirse; ZCS tekniği, güç anahtarının ilettime girme işleminde anahtara küçük değerli bir bobin seri bağlanarak anahtardan geçirilen akımın yükselme hızının sınırlandırılması, ZVS tekniği, güç anahtarının kesime girmesi işleminde anahtara küçük değerli bir kondansatör paralel bağlanarak anahtarın uçlarında oluşan gerilimin yükselme hızının sınırlandırılması, ZCT tekniği, ana anahtarın kesime girme işleminde anahtardan geçirilen akımın kısa bir süre sıfırda tutulması, ZVT tekniği, ana anahtarın ilettime girme işleminde anahtarın uçlarındaki gerilimin kısa bir süre sıfırda tutulması prensibine dayanmaktadır. ZVS ile ZCS tekniklerinde anahtarlama kayıpları azaltılırken, ZCT ve ZVT tekniklerinde anahtarlama kayıpları yok edilir. Yalnızca ZVT tekniğinde güç anahtarının parazitik kondansatörünün deşarj enerji kaybı yok edilir ve bu enerji geri kazanılır. Yüksek değerlerde parazitik kondansatörlere sahip olan MOSFET güç elemanlarında bu SS tekniği büyük önem taşır. ZCS tekniğinde kullanılan seri bobin güç anahtarı üzerinde ilave bir gerilim stresine, ZVS tekniğinde kullanılan paralel bağlı kondansatör ise ilave bir akım stresine neden olmaktadır. Seri bobinin neden olduğu ilave gerilim stresinin önlenemediği kabul edilmektedir. ZVT ile ZCT tekniklerinde ilave bir anahtarın kullanıldığı bastırma hücreleri ile yumuşak anahtarlama sağlanır. Yumuşak anahtarlama tekniklerini gerçekleştirmek için oluşturulan yardımcı devrelere bastırma hücreleri denilmektedir. Bastırma hücreleri ilave bir veya daha fazla anahtarlama elemanının kullanılıp kullanılmamasına göre aktif veya pasif bastırma hücreleri olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İyi bir bastırma hücresinde;

- Ana anahtarın ve diyotun SS ile ilettime ve kesime girmelerinin sağlanması,
- Ana anahtar ve diyot üzerinde ilave bir akım ve gerilim stresinin oluşmaması,
- Varsa yardımcı anahtar ile diyotun SS ile ilettime ve kesime girmelerinin ve üzerlerindeki ilave bir akım ve gerilim stresinin makul düzeyde kalmasının sağlanması,
- Anahtarlama enerjilerinin geri kazanılması,

- Anahtarların parazitik kondansatörlerinin enerjilerinin geri kazanılması, dönüştürücünün bastırma hücresi ile birlikte geniş bir yük aralığında çalışmasının sağlanması,
- Bastırma hücresinin maliyetinin düşük olması,
- Dönüştürücünün veriminin ve güç yoğunluğunun artırılması istenir [17].



Şekil 2.1 a) Anahtarlama sinyali, b) HS, c) ZCS ve ZVS, ç) ZCT ve ZVT dalga şekilleri

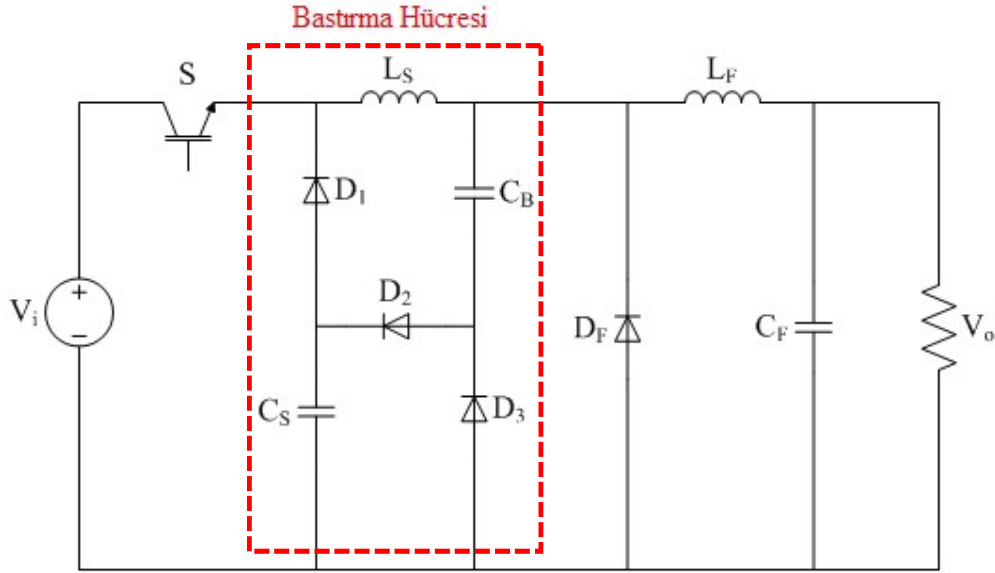
Başlangıçta ZVT ve ZCT olmak üzere ayrı ayrı oluşturulan aktif bastırma hücrelerinin daha sonraki yıllarda geliştirilmesiyle her ikisinin de beraber kullanıldığı ZVZCT bastırma hücreleri literatüre kazandırılmıştır.

Sonuç olarak, yumuşak anahtarlama ile devrenin güç yoğunluğunu artırmanın ana hedef olduğu daima göz önünde bulundurulmalı, bir bastırma hücresinin sağladığı SS yararları ile devreye kattığı külfetler iyice karşılaştırılmalı ve nihai seçim yapılmalıdır [17].

Bu çalışmada; ZVS ve ZCS tekniği ile yumuşak anahtarlamanın sağlandığı pasif bastırma hücreli dönüştürücü modeli, literatürde ilk olarak çalışılan ZVT ve ZCT teknikleri ile bunların daha sonra geliştirilmiş versiyonları ve her ikisinin birleştirilmesiyle oluşturulan ZVZCT tekniklerini içeren aktif bastırma hücreli dönüştürücüler incelenmiş ve simülasyon ortamında çalışmaları irdelenmiştir.

2.1. ZVS ve ZCS Pasif Bastırma Hücreli DA-DA Dönüştürücü

Şekil 2.2’de basit yapılı ve kolay kontrollü pasif bastırma hücreli DA-DA düşürücü devre şeması yer almaktadır. Bu model özellikle yüksek güç ve frekanslı endüstriyel uygulamalarda IGBT kullanılan DGA dönüştürücüler için uygundur. Sunulan bastırma hücreli dönüştürücüde, aktif ve pasif bütün yarı iletken elemanlar yumuşak anahtarlama ile çalışır. Düşük maliyetli bastırma hücreli bu dönüştürücüde bastırma hücresi, L_S bastırma bobini, C_S bastırma kondansatörü ile C_B tampon kondansatörü ve üç adet yardımcı diyottan oluşmaktadır. Pasif bastırma hücreli bu dönüştürücünün verimi yüksek olup, geniş bir yük aralığında çalışmaktadır [11].

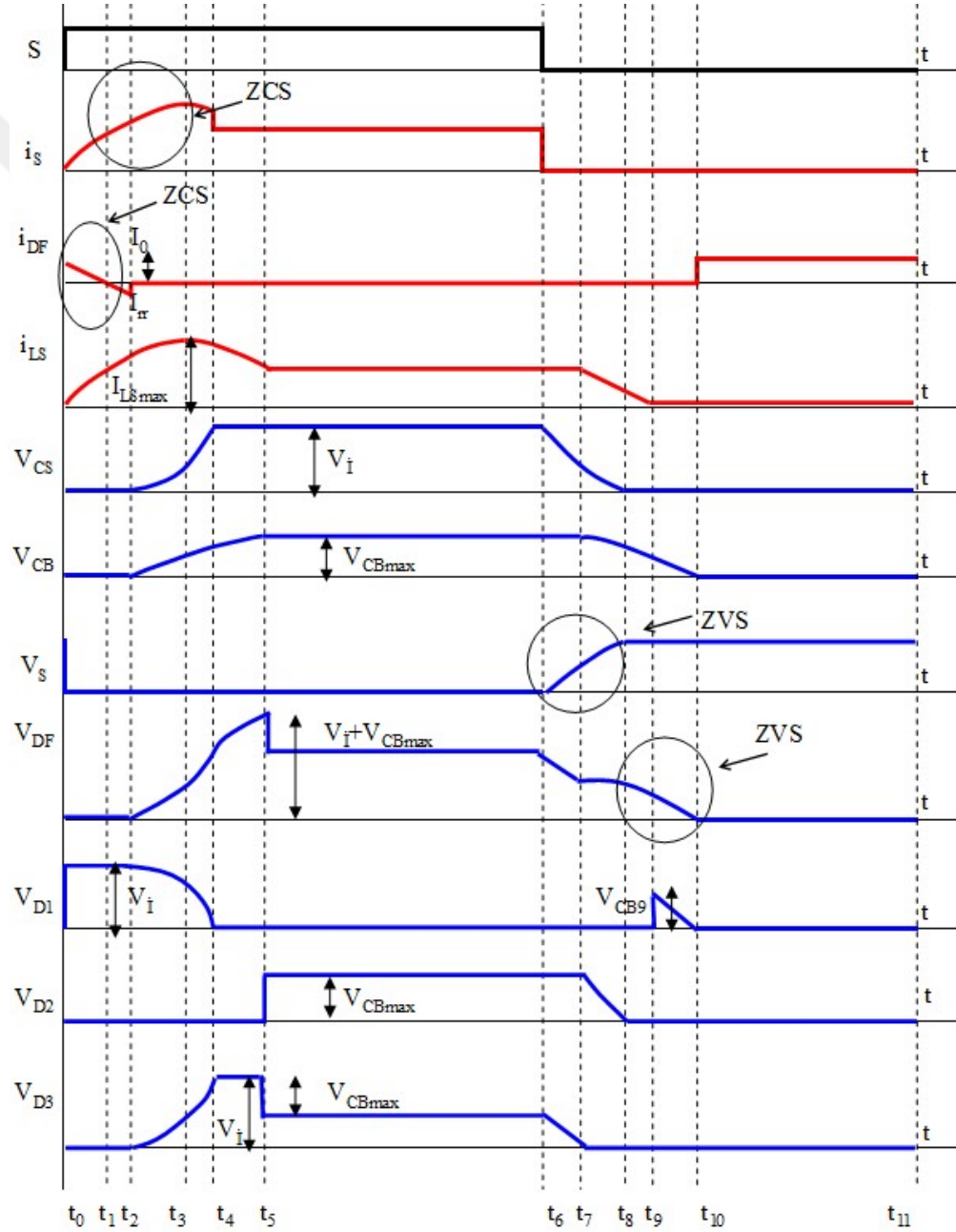


Şekil 2.2. Pasif bastırma hücreli düşürücü DA-DA dönüştürücü devresi

Pasif bastırma hücreli dönüştürücünün Şekil 2.3’te gösterilen bir anahtarlama periyodundaki sürekli hal analizini kolaylaştırmak için;

- V_i giriş geriliminin sabit,

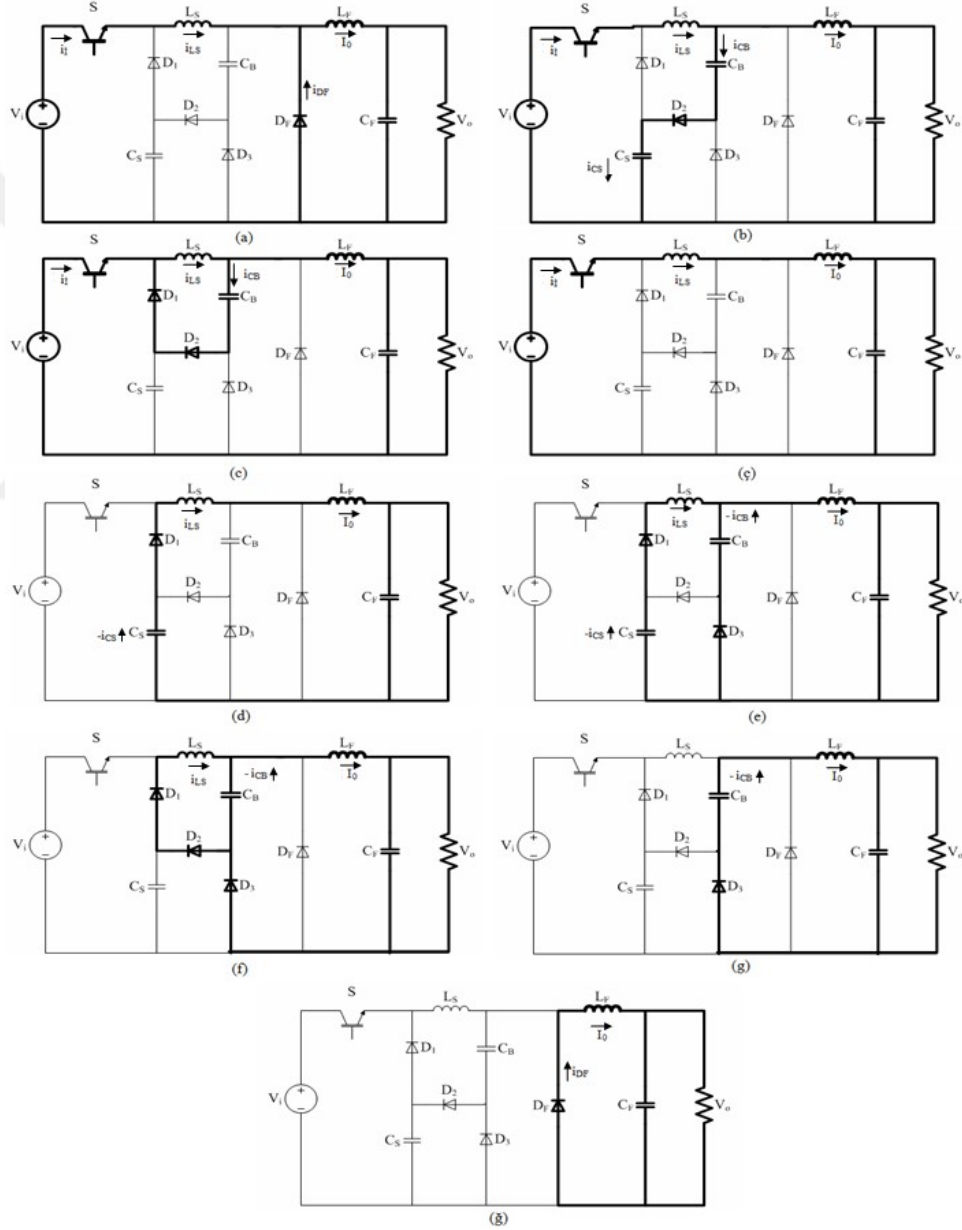
- V_0 çıkış geriliminin sabit veya C_F çıkış kondansatörünün çok büyük,
- I_0 çıkış akımının sabit veya L_F ana bobininin yeterince büyük,
- L_F ana bobininin, bastırma bobini L_S 'den çok büyük,
- Rezonans devresinin ideal veya kayıpsız ve yarı iletken elemanların ideal, olduğu kabul edilir ve sadece D_F ana diyotunun ters toparlanma süresi dikkate alınır [11].



Şekil 2.3. Dönüştürücünün çalıştırılmasıyla ilgili dalga şekilleri

2.1.1. Dönüştürücünün çalışma aralıkları

Pasif bastırma hücreli düşürücü DA-DA dönüştürücünün bir anahtarlama periyodundaki sürekli hal çalışmasında Şekil 2.3'te gösterildiği üzere 9 aralık oluşur. Bu aralıklarda dönüştürücünün eşdeğer devre şemaları Şekil 2.4'te görülmektedir [11].



Şekil 2.4. Dönüştürücünün çalışma aralıklarındaki eşdeğer devre şemaları
a) $t_0 < t < t_2$, b) $t_2 < t < t_4$, c) $t_4 < t < t_5$, ç) $t_5 < t < t_6$, d) $t_6 < t < t_7$, e) $t_7 < t < t_8$,
f) $t_8 < t < t_9$, g) $t_9 < t < t_{10}$, ğ) $t_{10} < t < t_{11}=t_0$

S ana anahtarına $t=t_0$ anında kontrol sinyali uygulanmasıyla başlayan $t_0 < t < t_2$ aralığının başında; $I_S=0$, $I_{DF}=I_0$, $I_{LS}=0$, $V_{CS}=0$ ve $V_{CB}=0$ olur. Bu aralık için;

$$I_{LS} = I_S = I_i = \frac{V_i}{L_S}(t - t_0) \quad (2.1)$$

$$I_{DF} = I_0 - I_{LS} = -\frac{V_i}{L_S}(t - t_0) + I_0 \quad (2.2)$$

eşitlikleri elde edilir. I_{LS} akımı L_S bastırma bobini tarafından sınırlandırıldığı için, S ana anahtarı yaklaşık ZCS ile iletme girer. Bu aralıkta, eşzamanlı ve lineer olarak I_{LS} akımı artar ve I_{DF} akımı azalır. Önce $t=t_1$ anında, I_{LS} akımı I_0 değerine ulaşır ve I_{DF} akımı sıfıra düşer. Sonra $t=t_2$ anında, I_{DF} akımının negatif olarak I_{tr} değerine ulaşması ve D_F ana diyotunun yaklaşık olarak ZVS ve ZCS ile kesime girmesiyle bu aralık biter ve;

$$t_{01} = \frac{L_S}{V_i} I_0 \quad (2.3)$$

$$t_{12} = t_{tr} = \frac{L_S}{V_i} I_{tr} \quad (2.4)$$

eşitlikleri yazılabilir. Burada t_{tr} ve I_{tr} değerleri D_F diyotunun “ters toparlanma süresi” ile “ters toparlanma akımı” değerleridir. Bu değerler, D_F diyotunun I_0 iletim akımı ve $-V_i / L_S$ akım azalma hızı parametreleri için geçerlidir [11].

$t_2 < t < t_4$ aralığının başındaki $t=t_2$ anı için $I_S = I_0 + I_{tr}$, $I_{DF}=0$, $I_{LS}=I_0 + I_{tr}$, $V_{CS}=0$ ve $V_{CB}=0$ eşitlikleri geçerlidir. D_F diyotunun kesime girmesiyle başlayan bu aralıkta, V_i -S- L_S - C_B - D_2 - C_S yolu ile sabit I_0 akımı altında bir rezonans oluşur. Bu aralıkta;

$$I_{LS} = I_{tr} \cos(\omega_l(t - t_2)) + \frac{V_i}{Z_l} \sin(\omega_l(t - t_2)) + I_0 \quad (2.5)$$

$$V_{CS} = \frac{C_c}{C_S} [-V_i \cos(\omega_l(t - t_2)) + Z_l I_{tr} \sin(\omega_l(t - t_2)) + V_i] \quad (2.6)$$

$$V_{CB} = \frac{C_c}{C_B} [-V_i \cos(\omega_l(t - t_2)) + Z_l I_{tr} \sin(\omega_l(t - t_2)) + V_i] \quad (2.7)$$

eşitlikleri mevcuttur. Bu eşitliklerde;

$$C_e = \frac{C_s C_B}{C_s + C_B} \quad (2.8)$$

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_s C_e}} \quad (2.9)$$

$$Z_1 = \sqrt{\frac{L_s}{C_e}} \quad (2.10)$$

bağıntıları geçerlidir. Bu aralıkta, önce $t=t_3$ anında, I_{LS} akımı maksimum değerine ulaşır. Sonra $t=t_4$ anında, V_{CS} geriliminin V_i değerine ulaşması ve D_1 diyotunun ZVS ile iletme girmesiyle bu aralık tamamlanır. Sonuçta;

$$I_{LS \max} = \sqrt{I_{rr}^2} + \left(\frac{V_i}{Z_1}\right)^2 + I_0 \quad (2.11)$$

$$t_{23} = \frac{1}{\omega_1} \arctg \frac{V_i}{Z_1 I_{rr}} \quad (2.12)$$

$$t_{34} = \frac{1}{\omega_1} \arcsin \frac{\left(\frac{C_s}{C_e} - 1\right) V_i}{\sqrt{V_i^2 + Z_1^2 I_{rr}^2}} \quad (2.13)$$

ifadeleri elde edilir [11].

$t_4 < t < t_5$ aralığının başında, $I_s = I_{LS4}$, $I_{DF}=0$, $I_{LS}=I_{LS4}$, $V_{CS}=V_i$ ve $V_{CB}=V_{CB4}$ eşitlikleri mevcuttur. $t=t_4$ anında D_1 diyotunun iletme girmesiyle başlayan bu aralıkta L_s - C_B - D_2 - D_1 yolu ile bir rezonans oluşur. Bu rezonans için;

$$I_{LS \max} = (I_{LS4} - I_0) \cos(\omega_2(t - t_4)) + \frac{V_{CB4}}{Z_2} \sin(\omega_2(t - t_4)) + I_0 \quad (2.14)$$

$$V_{CB} = V_{CB4} \cos(\omega_2(t - t_4)) + Z_2(I_{LS4} - I_0) \sin(\omega_2(t - t_4)) \quad (2.15)$$

ifadeleri elde edilir. Bu ifadelerde;

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_S C_B}} \quad (2.16)$$

$$Z_2 = \sqrt{\frac{L_S}{C_B}} \quad (2.17)$$

bağıntıları geçerlidir. I_{LS} akımının tekrar I_0 değerine düşmesi ve V_{CB} geriliminin maksimum değerine ulaşmasıyla, $t=t_5$ anında D_1 ile D_2 diyotları yaklaşık ZCS ile kesime girer ve bu aralık tamamlanır. Bu aralığın süresi;

$$t_{45} = \frac{1}{\omega_2} \arctg \frac{Z_2(I_{LS4} - I_0)}{V_{CB4}} \quad (2.18)$$

şeklinde ifade edilir [11].

$t_5 < t < t_6$ aralığı süresince yük tarafı S ana anahtarı üzerinden V_i giriş gerilimi ile beslenir ve bastırma hücresi etkili değildir. Bu aralığın süresi normal DGA dönüştürücünün iletim süresinin büyük bir bölümüdür ve DGA kontrolü ile belirlenir. Bu aralıkta $I_i = I_s = I_{LS} = I_0$ eşitliği mevcuttur [11].

$t=t_6$ anında, $I_s = I_0$, $I_{DF}=0$, $I_{LS}=I_0$, $V_{CS}=V_i$ ve $V_{CB}=V_{CBmax}$ eşitlikleri mevcuttur. S ana anahtarının kontrol sinyalinin kesilmesiyle başlayan $t_6 < t < t_7$ aralığında, ZVS ile ilettime giren D_1 diyotu üzerinden C_s kondansatörü yükü beslemeye devam eder. Bu aralık için;

$$V_{CS} = -\frac{I_0}{C_s}(t - t_6) + V_i \quad (2.19)$$

ifadesi geçerlidir. V_{CS} geriliminin $V_{CB5}=V_{CBmax}$ değerine düşmesi ve D_3 diyotunun ZVS ile ilettime girmesiyle bu aralık tamamlanır. Bu aralığın süresi;

$$t_{67} = \frac{C_s}{I_0}(V_i - V_{CB \max}) \quad (2.20)$$

ile ifade edilir.

$t_7 < t < t_8$ aralığının başında, $I_S=0$, $I_{DF}=0$, $I_{LS}=I_0$, $V_{CS}=V_{CB\max}$ ve $V_{CB}=V_{CB\max}$ eşitlikleri mevcuttur. $t=t_7$ anında D_3 diyotunun iletme girmesiyle başlayan bu aralıkta, L_S - C_B - D_3 - C_S - D_1 yolu ile bir paralel rezonans oluşur. Bu durumda;

$$I_{LS} = \left(1 - \frac{C_e}{C_B}\right) I_0 \cos(\omega_1(t - t_7)) + \frac{C_e}{C_B} I_0 \quad (2.21)$$

$$V_{CS} = -\frac{C_e}{C_S} \left[Z_1 \left(1 - \frac{C_e}{C_B}\right) I_0 \sin(\omega_1(t - t_7)) \right] - \frac{I_0}{C_S + C_B} (t - t_7) + V_{CB\max} \quad (2.22)$$

$$V_{CB} = -\frac{C_e}{C_B} \left[Z_1 \left(1 - \frac{C_e}{C_B}\right) I_0 \sin(\omega_1(t - t_7)) \right] - \frac{I_0}{C_S + C_B} (t - t_7) + V_{CB\max} \quad (2.23)$$

ifadeleri elde edilir. V_{CS} geriliminin sıfıra düşmesi ve D_2 diyotunun ZVS ile iletme girmesiyle bu aralık biter. C_B kondansatörünün de yardımıyla C_S kondansatörü S ana anahtarının yaklaşık ZVS ile kesime girmesini sağlar [11].

$t=t_8$ anında, $I_S=0$, $I_{DF}=0$, $I_{LS}=I_{LS8}$, $V_{CS}=0$ ve $V_{CB}=V_{CB8}$ eşitlikleri geçerlidir. D_2 diyotunun iletme girmesiyle başlayan $t_8 < t < t_9$ aralığında L_S - C_B - D_2 - D_1 yolu ile yeni bir paralel rezonans oluşur. Bu rezonans için;

$$I_{LS} = -(I_0 - I_{LS8}) \cos(\omega_2(t - t_8)) - \frac{V_{CB8}}{Z_2} \sin(\omega_2(t - t_8)) + I_0 \quad (2.24)$$

$$V_{CB} = V_{CB8} \cos(\omega_2(t - t_8)) - Z_2(I_0 - I_{LS8}) \sin(\omega_2(t - t_8)) \quad (2.25)$$

ifadeleri geçerlidir. I_{LS} akımının sıfır olması ve yaklaşık ZCS ile D_1 ve D_2 diyotlarının kesime girmesiyle bu aralık tamamlanır. Bu aralığın süresi;

$$t_{89} = \frac{1}{\omega_2} \left[\arcsin \frac{Z_2 I_0}{\sqrt{Z_2^2 (I_0 - I_{LS8})^2 + V_{CB8}^2}} - \arctg \frac{Z_2 (I_0 - I_{LS8})}{V_{CB8}} \right] \quad (2.26)$$

şeklinde bulunur. Böylece, L_s bobininde depolana enerji tamamen yükte aktarılmış olur [11].

$t_9 < t < t_{10}$ aralığının başında $I_S=0$, $I_{DF}=0$, $I_{LS}=0$, $V_{CS}=0$ ve $V_{CB}=V_{CB9}$ eşitlikleri mevcuttur. $t=t_9$ anında D_1 ve D_2 diyotlarının kesime girmesiyle başlayan bu aralıkta, C_B kondansatörü sabit I_0 akımı ile deşarj olur. Bu durum;

$$V_{CB} = -\frac{I_0}{C_B}(t - t_9) + V_{CB9} \quad (2.27)$$

bağıntısı ile ifade edilebilir. V_{CB} geriliminin sıfıra düşmesi ve D_F ana diyotunun ZVS ile ilettime girmesiyle, $t=t_{10}$ anında bu aralık sona erer. Bu aralığın süresi için;

$$t_{910} = \frac{C_B}{I_0} V_{CB9} \quad (2.28)$$

ifadesi geçerlidir. Böylece, C_B kondansatöründe depolanan enerji de bu aralığın sonunda tamamen yüke aktarılmış olur [11].

$t_{10} < t < t_{11}$ aralığı boyunca sabit I_0 yük akımı serbest geçiş diyotu D_F üzerinden devresini tamamlar ve bastırma hücresi aktif değildir. Bu aralığın süresi, normal DGA dönüştürücünün kesim süresinin büyük bir kısmıdır ve DGA kontrolü ile belirlenir. Bu aralıkta $I_{DF}=I_0$ eşitliği mevcuttur ve $t=t_{11}=t_0$ anında, S ana anahtarına yeniden kontrol sinyalinin uygulanmasıyla, bir anahtarlama periyodu tamamlanır ve yeni bir anahtarlama periyodu başlar [11].

2.1.2. Bastırma hücresinin tasarımı

Pasif bastırma hücresi yumuşak anahtarlama sayesinde ana anahtar ve ana diyotun çok düşük anahtarlama kaybı ile çalışmasını sağlar. Fakat ana ve bastırma hücresinde bir miktar ek kayıpların oluşmasına neden olur. Tasarım işlemi, temel olarak maksimum çıkış akımında bile ana anahtar ve ana diyotun yumuşak anahtarlama sağlanması ile oluşan ek kayıpların makul seviyelerde kalmasına dayanmaktadır [11].

L_S bastırma bobini, ana anahtarın ilettime girmesi esnasında ve onun akım yükselme süresi kadar bir zamanda, en fazla maksimum yük akımı kadar bir akım artışına izin vermek üzere seçilir. Bu durum;

$$\frac{V_1}{L_S} t_r \leq I_{0 \max} \quad (2.29)$$

bağıntısı ile ifade edilebilir [11].

Aynı zamanda, ana diyotun kesime girmesi esnasında ve onun ters toparlanma süresinin üç katı kadar bir zamanda, en fazla maksimum yük akımı kadar bir akım artışına izin vermelidir. Bu durumda ise;

$$\frac{V_i}{L_s} 3t_{rr \max} \leq I_{0 \max} \quad (2.30)$$

bağıntısı yazılabilir. Burada, t_r ana anahtarın akım yükselme süresidir. t_{rr} ise, $I_{0 \max}$ iletim akımı ve $-V_i / L_s$ akım azalma hızı değerlerine karşılık gelen ana diyotun ters toparlanma süresidir [11].

C_s bastırma kondansatörü, ana anahtarın kesime girmesi esnasında ve en az onun akım düşme süresi kadar bir zamanda, maksimum yük akımında bile kaynak gerilimine kadar dolmak üzere seçilir. Bu kondansatörün sabit yük akımı ile deşarj olduğu kabul edilirse;

$$\frac{C_s}{I_{0 \max}} V_i \geq t_r \quad (2.31)$$

ifadesi elde edilir. Burada t_r , ana anahtarın akım düşme süresidir [11].

C_B tampon kondansatörü, maksimum yük akımında en fazla önceden belirlenen bir maksimum değere kadar dolmak üzere seçilir. Bu kondansatör, prensip olarak ana diyotun yumuşak kesime girmesi ve C_s kondansatörünün şarj olması esnasında L_s bobininde biriken enerjileri üstlenir. Buna göre enerji dengesi yaklaşık olarak;

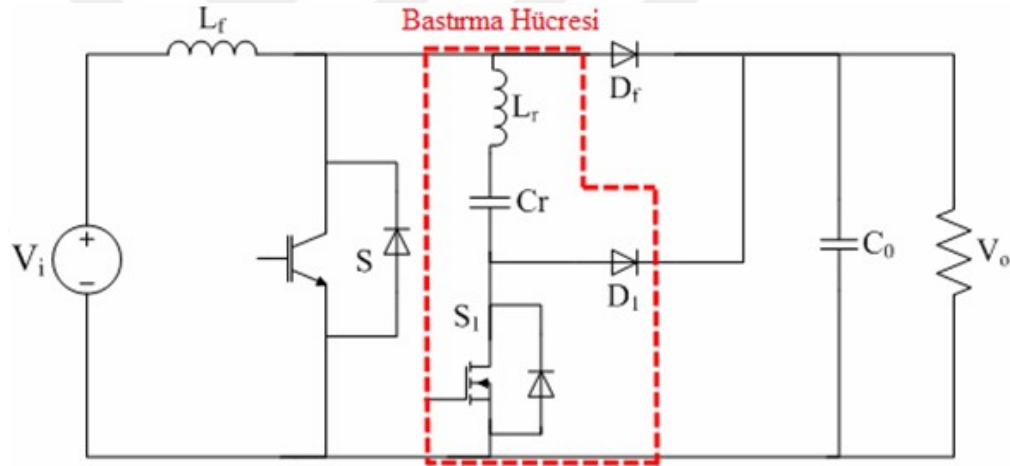
$$\frac{1}{2} C_s V_i^2 + \frac{1}{2} L_s I_{rr \max}^2 \cong \frac{1}{2} C_B V_{CB \max}^2 \quad (2.32)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada, $I_{rr \max}$ ana diyotun $I_{0 \max}$ iletim akımı ve $-V_i / L_s$ akım azalma hızı parametrelerine karşılık gelen ters toparlanma akımıdır. Ayrıca, burada C_B 'nin C_s 'den yeterince büyük olması gerekir. Şunu da hemen belirtmek gerekir ki, $V_{CB \max}$ geriliminin büyük olması ana diyotun maruz kaldığı gerilimi artırır, küçük olması ise L_s bobininin enerjisinin yüke aktarılma süresini artırır. C_B değerinin, C_s değerinin 5 katı civarında seçilmesinin iyi sonuçlar verdiği bilinmektedir [11].

2.2. Temel ZCT Aktif Bastırma Hücreli DA-DA Dönüştürücü

ZCT tekniğinde, iletimdeki anahtarın akımı sıfırken kesime girmesi sağlanarak geçişin kayıpsız yapılması hedeflenmektedir. Temel ZCT bastırma hücreli Şekil 2.5'teki devrede, bastırma hücresi; bir yardımcı anahtar, rezonans bobini ve kondansatörü ile yardımcı diyottan oluşmaktadır. Dönüştürücünün genel özellikleri aşağıdaki gibidir [2].

- Ana anahtar ve ana diyot üzerindeki gerilim stresleri düşüktür.
- Sirkülasyon enerjisi minimumdur.
- Geniş yük aralığında çalışılabilir.
- Sabit frekansta çalışabilir.



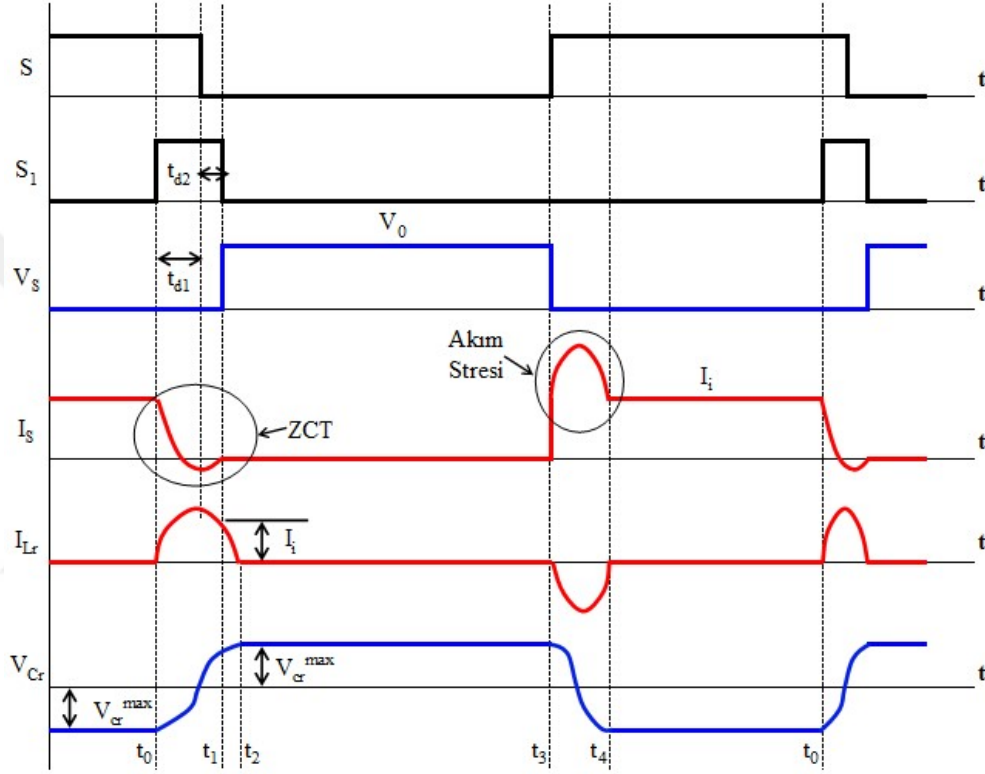
Şekil 2.5. Temel ZCT aktif bastırma hücreli yükseltici dönüştürücü devresi

Bu dönüştürücünün dezavantajı, aynı anda ana anahtar HS ile iletme geçerken ana diyot da HS ile kesime girdiğinden aynı anda kısa devre oluşur. EMI gürültüleri ve kayıplara neden olan bu durumun önüne geçmek oldukça zordur [3]. Ayrıca, ana anahtarın parazitik kondansatöründeki enerji geri kazanılamaz ve ana diyot HS ile kesime girdiğinden bu diyotun ters toparlanma kayıpları büyüktür. Ana anahtarda akım stresi oluşması da devrenin maliyetini arttırmaktadır [4].

2.2.1. Dönüştürücünün çalışma aralıkları

Şekil 2.6'dan görüleceği üzere, Şekil 2.5'te yer alan yükseltici dönüştürücüde, bastırma hücresi vasıtası ile ana anahtar iletimdeyken üzerinden geçen akım sıfıra

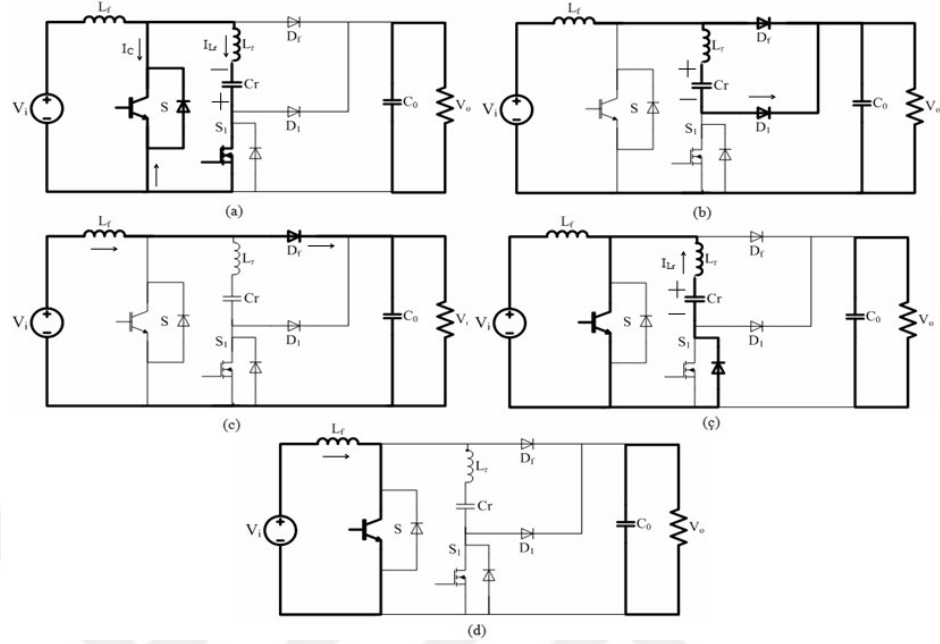
indirilir ve bu aralıkta ana anahtarın kontrol sinyali kesilir. Bu şekilde ana anahtar kayıpsız bir şekilde kesime sokulur. Ayrıca, dönüştürücüde ana diyot ZVS ile ilettime girerken, yardımcı anahtar ZCS ile ilettime girer. Her iki yarı iletken de kesime HS ile girer [4].



Şekil 2.6. Dönüştürücünün çalıştırılmasıyla ilgili dalga şekilleri

Dönüştürücüde yer alan aktif bastırma hücresi, ana anahtarda ZCS oluşturmak için çok kısa olan anahtarlama geçiş süresi boyunca aktiftir. Analizde, L_f bobini I_l akım kaynağı olarak kabul edilmiştir. Sürekli halde bir çalışma periyodu içinde 5 çalışma aralığı oluşur ve dönüştürücünün bu çalışma aralıklarındaki eşdeğer devre şemaları Şekil 2.7’de gösterilmektedir [2].

t_0 anından önce, S ana anahtarı iletimdedir ve C_r kondansatörü $-V_{crmax}$ gerilimi ile doludur. t_0 anında S_1 yardımcı anahtarının ilettime girmesiyle L_r ile C_r arasında rezonans başlar. Bu rezonans ana anahtarın akımını sinüzoidal olarak azalmaya zorlar [2].



Şekil 2.7. Dönüştürücünün çalışma aralıklarındaki eşdeğer devre şemaları a) $t_0 < t < t_1$, b) $t_1 < t < t_2$, c) $t_2 < t < t_3$, ç) $t_3 < t < t_4$, d) $t_4 < t < t_0$

Çeyrek rezonans periyodu t_{d1} sonunda, C_r gerilimi sıfıra düşer ve L_r akımı maksimum değeri olan I_{Lrmax} 'a ulaşır ve;

$$t_{d1} = \frac{1}{4} T_r \quad (2.33)$$

$$I_{Lr \max} = \frac{V_{Cr \max}}{Z_r} \quad (2.34)$$

eşitlikleri yazılır [2]. Bu eşitliklerde, rezonans periyodu;

$$T_r = 2\pi\sqrt{L_r C_r} \quad (2.35)$$

rezonans tankının empedansı;

$$Z_r = \sqrt{L_r / C_r} \quad (2.36)$$

olarak tanımlanır. Ana anahtar için sıfır akımda kesime girmeyi sağlayabilmek için I_{Lrmax} değeri I_1 'den büyük olmalıdır. Ana anahtar akımı sıfıra düştüğünde ona ters paralel bağlı olan diyot iletime geçer ve S anahtarının kontrol sinyali $t = t_0 + t_{d1}$ anında kesilir [2].

S kesime girdikten kısa bir süre sonra S_1 de kesime sokulur. Sürekli halde, t_1 anındaki rezonans bobini akımı daima I_l 'ye eşittir. Buradan iki kontrol sinyalinin kesime gitmeleri arasındaki t_{d2} süresi kondansatör geriliminin tepe değerini belirler;

$$V_{Cr \max} = \frac{Z_r I_l}{\cos(2\pi t_{d2} / T_r)} \quad (2.37)$$

ve sürekli halde;

$$V_{Cr \max} \leq V_0 \quad (2.38)$$

eşitlikleri mevcuttur.

$$\alpha = 2\pi(t_{d2} / T_r) \quad (2.39)$$

olarak tanımlandığında;

$$V_{Cr \max} = \frac{Z_r I_r}{\cos \alpha} \quad (2.40)$$

şeklinde Denklem (2.37) sadeleştirilir. Denklem (2.34) ile Denklem (2.37)'nin ortak çözümünden;

$$I_{Lr \max} = \frac{I_l}{\cos \alpha} \geq I_l \quad (2.41)$$

elde edilir. Denklem (2.38) şartı sağlandığı sürece, ZCS çalışma giriş gerilimi ve yük akımından bağımsızdır. Gerçekte, t_{d2} süresi, T_r süresinin 0,07 katı civarında seçilebilir. Bu durumda $I_{Lr \max}$ değeri I_l akımından % 10 fazla olur ve ZCS kesin olarak gerçekleşir. S_1 anahtarı t_2 anında kesime sokulduğunda, D_f ve D_1 ilettime başlar. L_r ile C_r arasındaki rezonans, t_2 anında I_{Lr} akımı sıfır olana kadar devam eder [2].

t_2 anında L_r ile C_r yarı rezonansı tamamlar ve D_1 diyotu ters kutuplanır. $t_2 < t < t_3$ aralığı yükseltici DGA dönüştürücüde ana anahtarın kesim aralığına eşdeğerdir [2].

t_3 anında S anahtarı ilettime girer ve yükseltici L_r bobini giriş gerilimi ile enerjilenir. $t_3 < t < t_4$ aralığında S anahtarı ve S_1 anahtarının ters paralel diyotu üzerinden L_r ve C_r bir yarı rezonans oluşturur ve C_r 'nin polaritesi ters çevrilir [2].

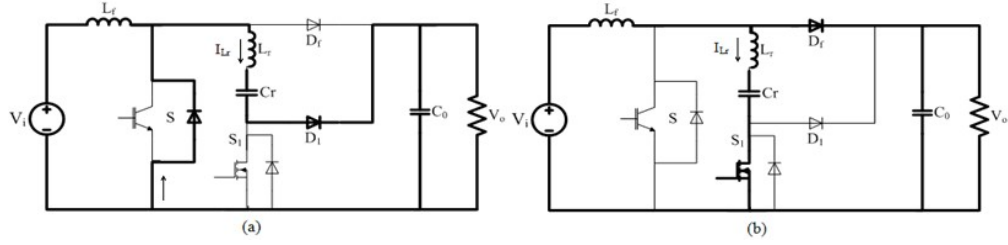
$t_4 < t < t_0$ aralığında devrenin çalışması, yükseltici DGA dönüştürücüde ana anahtarın iletim aralığına eşdeğerdir. t_4 'ten sonra t_0 'a geri dönülür ve anahtarlama periyodu tekrarlanır [2].

Sürekli rejimde bastırma hücresinde depo edilen enerji, bütün anahtarlama aralığında sabittir. Devrenin her bir durumunda L_r ile C_r üzerindeki toplam gerilim sıfırdır veya geçen akım sıfırdır. Dolayısıyla, rezonans elemanları ve diğer devre elemanları arasında enerji transferi oluşmaz. Bastırma hücresinde depo edilen enerji, şebeke ve yükün durumuna göre kendiliğinden ayarlanır ve aşağıdaki gibi hesaplanır [2];

$$E = \frac{1}{2} L_r \left(\frac{I_i}{\cos \alpha} \right)^2 \quad (2.42)$$

Devredeki sirkülasyon enerjisi, giriş akımı arttığında (giriş gerilimi azaldığında veya yük akımı arttığında) artar. Uygulamada, rezonans süresi anahtarlama periyoduna göre çok kısa olduğundan rezonans bobini yükseltici bobine göre küçük seçilir. Dolayısıyla, ZCT-DGA dönüştürücünün sirkülasyon enerjisi, klasik ZCS rezonans dönüştürücüye göre oldukça küçüktür [2].

Sürekli halde, t_1 anında rezonans bobini akımı yük veya şebekeden bağımsız olarak daima I_i 'ye eşittir. Herhangi bir nedenle t_1 anında I_{Lr} akımının I_i 'den büyük olması durumunda Şekil 2.7.b ile Şekil 2.7.c'de gösterilen devre şemaları arasında, Şekil 2.8.a'da gösterilen devre topolojisi oluşur. Bu çalışma durumu esnasında, rezonans kolu enerjiyi yüke aktarır. Dolayısıyla rezonans kolunda depo edilen enerji artar. Bunun tersi olduğunda yani I_{Lr} akımının I_i 'den küçük olması durumunda Şekil 2.7.b ile Şekil 2.7.c'de gösterilen devre şemaları arasında, Şekil 2.8.b'de gösterilen devre topolojisi oluşur. Bu aralıkta yükseltici bobin rezonans koluna enerji aktarır. Dolayısıyla rezonans kolunda depo edilen enerji, Denklem (2.42) ile verilen denge durumuna ulaşana kadar artar [2].



Şekil 2.8. Dengesizlik durumunda oluşan ek devre şemaları a) $I_{Lr} > I_i$, b) $I_i > I_{Lr}$

Sürekli haldeki çalışmadan, ZCT-DGA tekniğinin ana anahtar ve diyotta ilave bir gerilim stresi oluşturmada ana anahtar için sıfır akımda kesime girmeyi sağladığı görülmektedir. Ana anahtarın akımında rezonans akımı görülmekle birlikte, bu akımın ortalaması DGA çalışma ile aynı olduğundan iletim kayıplarını arttırmaz. Bir başka avantaj devredeki sirkülasyon enerjisinin minimum olmasıdır. Şebeke ve yük değişimlerine bağlı olmaksızın rezonans tankında depo edilen enerjinin daima adaptif olarak ayarlanacağı dolayısıyla ZCS çalışma durumunu oluşturmak için gerekli olan değerinden biraz daha fazla olduğu Denklem (2.42)'den görülmektedir [2].

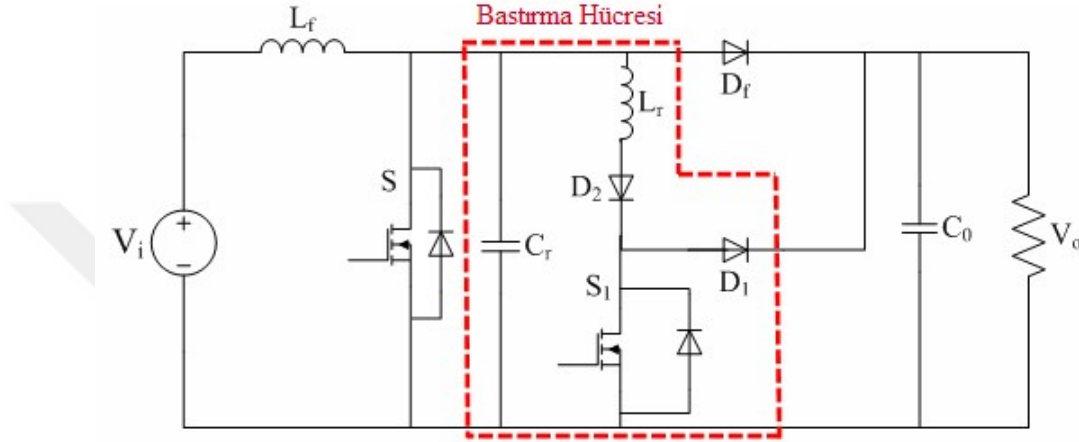
Güç faktörü düzeltme (PFC: Power Factor Correction) gibi yüksek gerilim uygulamalarında, ana diyotta ciddi bir ters toparlanma problemi oluşur. Bu problemi çözmek için genellikle ana diyota veya ana anahtara seri bir bobin (veya doyuma gidebilen bobin) kullanılır. Ana anahtar kesime girerken, anahtar içinden geçen akımın di/dt değeri yüksek olduğundan, bobin uçlarında gerilim darbesi oluşur. Bu gerilim darbesini bastırmak için çoğunlukla yüksek kayıplı bir bastırıcı kullanılır. Aynı şekilde ilave bobin bulunan yükseltici ZCT dönüştürücüde, ana anahtarın kesime girmesi esnasında di/dt 'nin kontrollü olması nedeniyle bu gerilim darbesi daha küçüktür. Dolayısıyla bu salınımı azaltmak için daha küçük bir bastırıcı kullanılabilir [2].

2.3. Temel ZVT Aktif Bastırma Hücreli DA-DA Dönüştürücü

ZVT tekniğinde, kesimdeki anahtarın uçlarındaki gerilim sıfırken anahtarın iletme geçmesi hedeflenir. Temel ZVT bastırma hücreli Şekil 2.9'daki dönüştürücüde, ana anahtara paralel bağlı rezonans kondansatörü, rezonans bobini, yardımcı anahtar ve üç adet yardımcı diyot ile bastırma hücresi gerçekleştirilmiştir [5].

Dönüştürücünün genel özellikleri olarak;

- Ana anahtar ve ana diyotun her ikisi için yumuşak anahtarlama,
- Minimum anahtar gerilimi ve akım stresi,
- Sabit frekansta çalışma sayılabilir [5].



Şekil 2.9. Temel ZVT aktif bastırma hücreli yükseltici dönüştürücü devresi

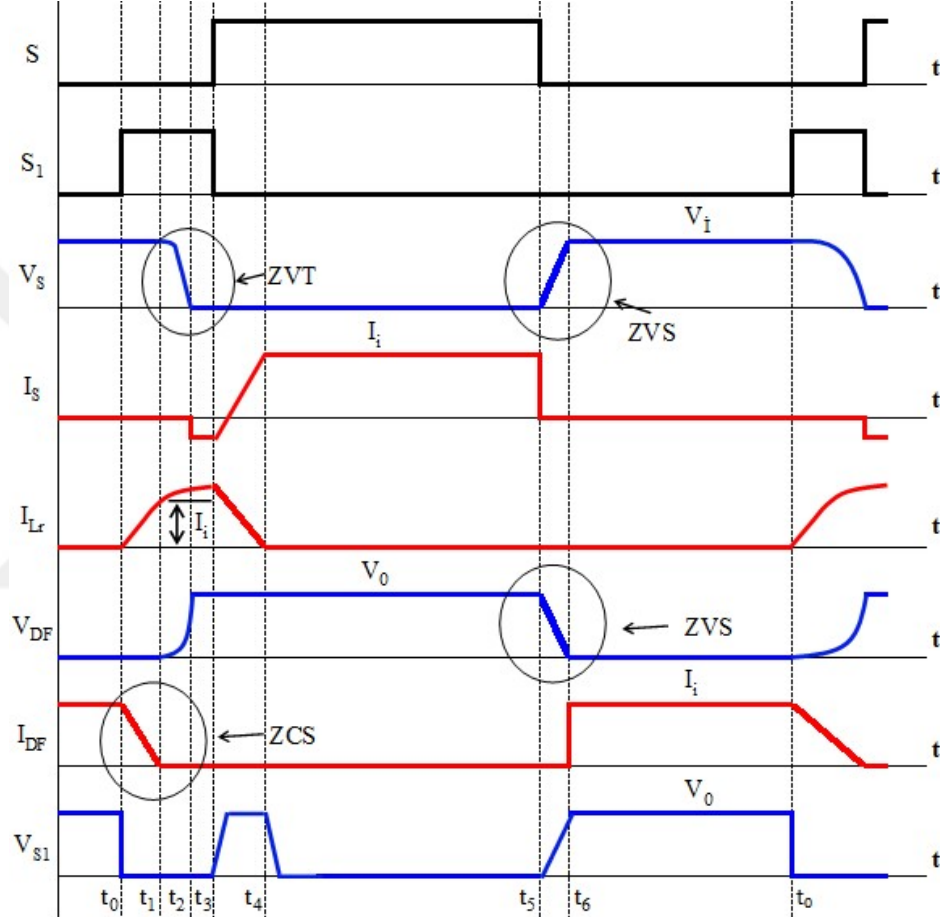
Dönüştürücünün dezavantajları ise yardımcı anahtarın HS ile kesime girmesi sonucunda oluşan kayıplar ile devrenin çalışmasının hat ve yüke oldukça bağımlı olması ve bobinde depolanan enerjinin yüke aktarımının çok zor olmasıdır [6].

2.3.1. Dönüştürücünün çalışma aralıkları

Şekil 2.9'da yer alan bastırma hücresinin, ana anahtarda hiçbir gerilim ya da akım stresi oluşturmada anahtarın ZVT ile kayıpsız bir şekilde ilettime girmesini sağladığı Şekil 2.10'daki dalga şekillerinden görülmektedir. Ayrıca ana anahtar C_r kondansatöründen dolayı ZVS ile kesime girer. Ana diyot, seri L_r bobininden ötürü ZCS ile kesime ve ZVS ile ilettime girmektedir. Böylece ana diyotun ters toparlanma kayıplarının çoğunlukla önüne geçilmektedir. Bununla birlikte S_1 yardımcı anahtarı ZCS ile ilettime girmektedir. S_1 yardımcı anahtarındaki kabul edilebilir akım stresi dışında dönüştürücüde yer alan diğer elemanlarda da gerilim ya da akım stresi oluşmaz [4,5].

Devrede bulunan C_r rezonans kapasitesi, ana anahtarın çıkış kapasitesidir. Analizi basitleştirmek için, giriş filtre bobinin ideal bir I_1 DA akım kaynağı olarak kabul edilebilecek kadar büyük olduğu varsayılmıştır. Çıkıştaki filtre kondansatörünün

sabit bir V_0 gerilim kaynağı olarak kabul edilebilecek kadar büyük olduğu kabul edilmiştir. Şekil 2.10'da gösterildiği gibi bir anahtarlama periyodunda 7 çalışma kademesi oluşur ve bu çalışma aralıkları için dönüştürücünün eşdeğer devre şemaları Şekil 2.11'de gösterilmektedir [5].



Şekil 2.10. Dönüştürücünün çalıştırılmasıyla ilgili dalga şekilleri

t_0 'dan önce S ana anahtarı ve S_1 yardımcı anahtarı kesimdedir ve D_f diyotu iletimdedir. t_0 anında S_1 ilettime girer. L_r akımı lineer olarak yükselerek t_1 anında I_i değerine ulaşır ve D_f yumuşak anahtarlama ile kesime girer. Kesim esnasındaki kontrollü dv/dt ve di/dt 'den dolayı, hızlı bir diyot kullanıldığında D_f diyotunun ters toparlanma akımı ihmal edilebilir. t_{01} süresi;

$$t_{01} = \frac{I_i}{V_0 / L_r} \quad (2.43)$$

şeklinde verilebilir [5].

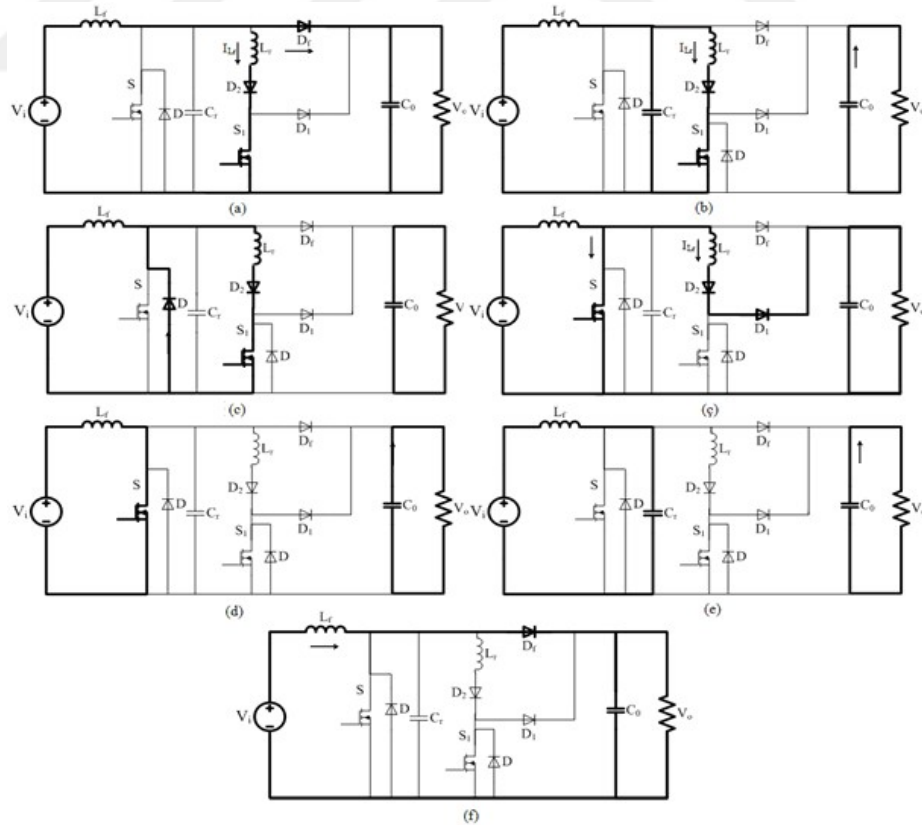
$t_1 < t < t_2$ aralığında L_r ve C_r arasında oluşan rezonans nedeniyle L_r akımı artmaya devam eder. C_r kondansatörünün gerilimi rezonans ile azalarak t_2 anında sıfır olur ve S 'nin ters paralel diyotu iletime girer. Bu rezonans süresi t_{12} ;

$$t_{12} = \frac{\pi}{2} \sqrt{L_r C_r} \quad (2.44)$$

şeklinde hesaplanır [5].

$t_2 < t < t_3$ aralığında S 'ye ters paralel bağlı olan diyot iletimdedir. ZVS'nin gerçekleşebilmesi için S 'nin kontrol sinyali ters paralel bağlı diyot iletimde iken verilmelidir. Ayrıca, S_1 ve S 'nin kontrol sinyalleri arasındaki t_D gecikme süresi aşağıdaki şartı sağlamalıdır [5];

$$t_D \geq t_{01} + t_{02} = \frac{I_L}{V_0 / L_r} + \frac{\pi}{2} \sqrt{L_r C_r} \quad (2.45)$$



Şekil 2.11. Dönüştürücünün çalışma aralıklarındaki eşdeğer devre şemaları a) $t_0 < t < t_1$, b) $t_1 < t < t_2$, c) $t_2 < t < t_3$, d) $t_3 < t < t_4$, e) $t_4 < t < t_5$, f) $t_5 < t < t_6$, g) $t_6 < t < t_0$

t_3 anında S_1 kesime girer ve D_1 'in ilettime girmesiyle S_1 'in gerilimi V_0 değerinde sınırlanır. Bu esnada S ilettime girer. Rezonans bobininde depo edilen enerji bu aralıkta yüke aktarılır. L_r akımı lineer olarak azalarak t_4 anında sıfır olur [5].

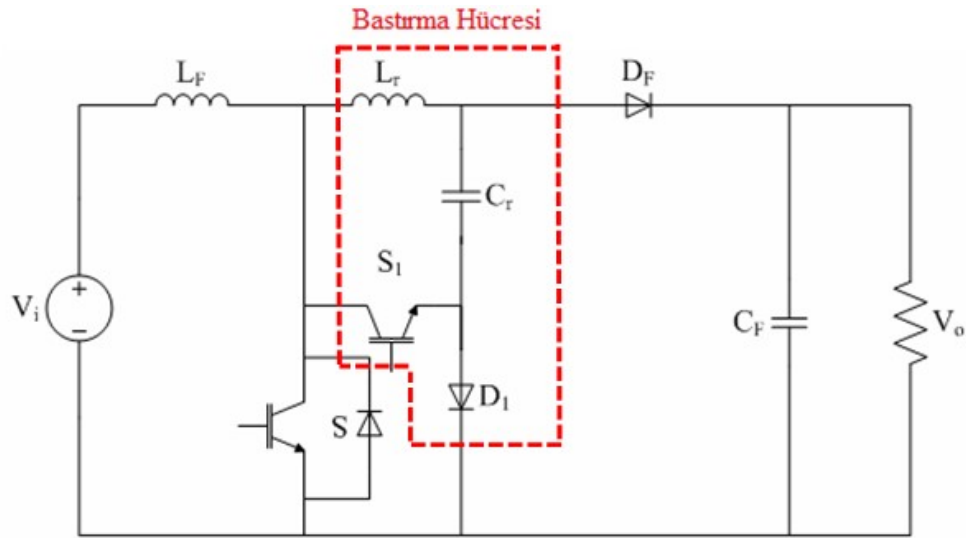
D_1 diyotu t_4 anında kesime girer. $t_4 < t < t_5$ aralığında devrenin çalışması yükseltici DGA dönüştürücü ile aynıdır [5].

t_5 anında S kesime girer. $t_5 < t < t_6$ aralığında C_r lineer olarak I_i akımı ile V_i gerilimine kadar şarj olur [5].

$t_6 < t < t_0$ aralığı, yükseltici DGA dönüştürücüdeki enerjinin serbest dolaşım aralığıdır. t_0 anında S_1 ilettime girerek anahtarlama periyodu tekrar başlar [5].

2.4. Geliştirilmiş ZCT Aktif Bastırma Hücreli DA-DA Dönüştürücü

Temel ZCT tekniğinde ana anahtarda oluşan akım stresi ve iletim kayıplarının önüne geçebilmek için tasarlanan Şekil 2.12'deki dönüştürücünün aktif bastırma hücresi; L_r rezonans bobini, C_r kondansatörü ile yardımcı anahtar ve diyottan oluşmaktadır [10].



Şekil 2.12. Geliştirilmiş ZCT aktif bastırma hücreli yükseltici dönüştürücü devresi

Temel ZCT tekniklerinde; devrede yer alan yardımcı anahtarın HS ile kesime girmesi ve rezonans akımı nedeniyle ciddi bir akım stresi ve ana diyotun ters toparlanma akımı nedeniyle yüksek di/dt ve EMI oluşmaktadır [10].

Bu sorunların üstesinden gelebilmek için tasarlanan bu bastırma hücresinde L_r bobini yardımıyla ana anahtar SS ile ilettime girer. Ayrıca yine bu bobin vasıtasıyla D_F ana diyotunun ters toparlanma kayıpları büyük oranda engellenir. Yardımcı anahtar ZCS ile ilettime ve kesime girer. Son olarak ana anahtarda hiçbir akım ya da gerilim stresi oluşmaz. Böylece temel ZCT yapısına nazaran eleman değeri küçülmüş olur ve maliyet azalır [4].

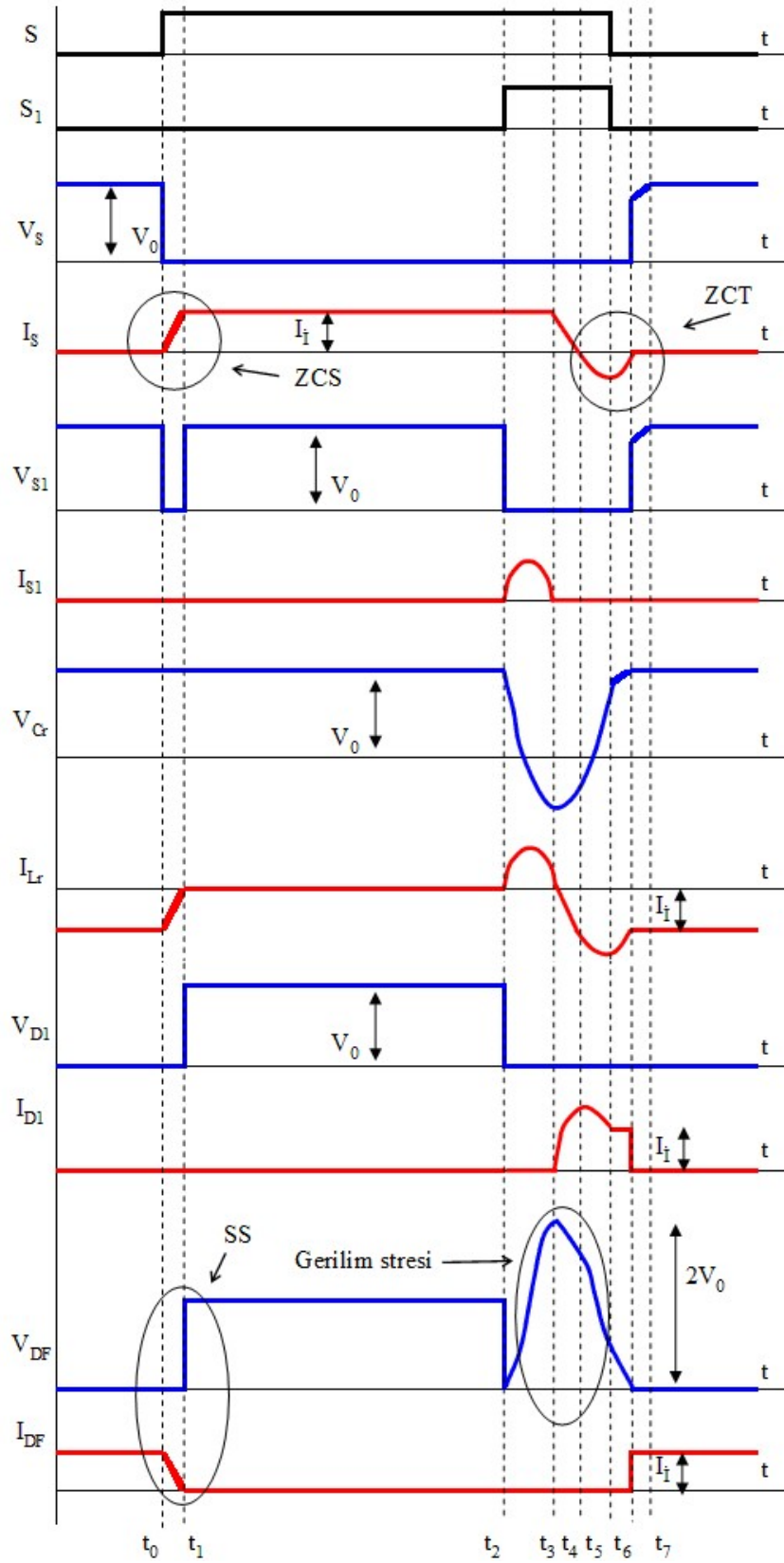
İyi tasarlanmış bir bastırma hücresinde ana akım yolları üzerinde aktif ya da pasif hiçbir yardımcı elemanın olmaması istenir. Çünkü bu ana akım yolu üzerindeki elemanlar iç dirençlerinden ötürü kayıplara neden olarak verimi düşürür. Ayrıca ısınma problemine yol açarak soğutma maliyetini arttırır. Bu dönüştürücüde L_r bobininin ana akım yolu üzerinde olması dönüştürücünün dezavantajıdır. Çünkü bobinin iç direncinden dolayı oluşacak olan kayıplar dönüştürücü verimini bir miktar düşürür. Bastırma hücresinin bir başka sorunu da D_F ana diyotunda V_0 değerinin 2 katı değerde bir gerilim stresi oluşmasıdır. Ayrıca ana anahtarın parazitik kondansatörünün enerjisi geri kazanılamaz [4].

2.4.1. Dönüştürücünün çalışma aralıkları

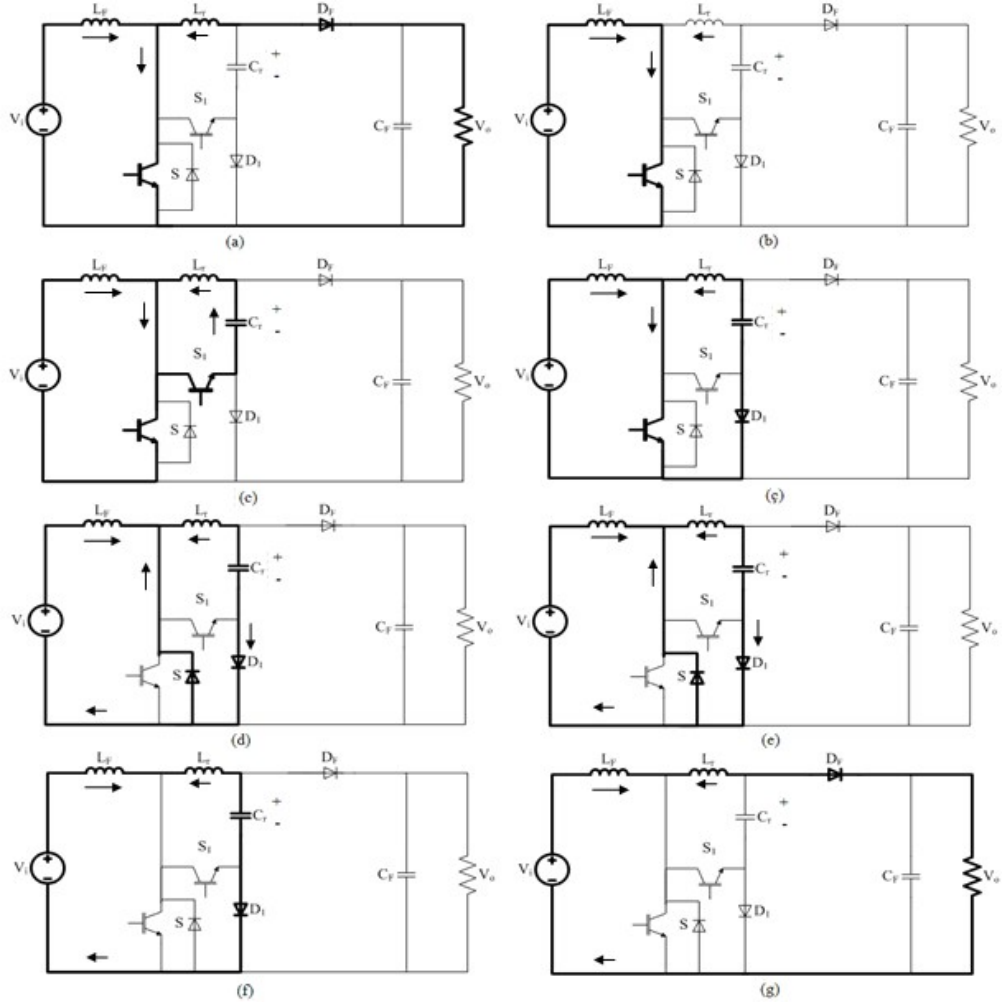
Geliştirilmiş ZCT aktif bastırma hücreli yükseltici dönüştürücünün Şekil 2.13'teki analizini yapabilmek için aşağıdaki kabuller yapılmıştır [10].

- Bütün devre elemanları idealdir.
- V_0 çıkış gerilimi sabittir.
- L_f bobini giriş akımını geçirecek kadar büyük seçilmiştir.

Dönüştürücünün sürekli halde bir anahtarlama periyodunda 8 çalışma aralığı bulunmaktadır. Bu çalışma aralıklarında dönüştürücünün eşdeğer devre şemaları Şekil 2.14'te verilmiştir [10].



Şekil 2.13. Dönüştürücünün çalışması ile ilgili dalga şekilleri



Şekil 2.14. Dönüştürücünün çalışma aralıklarındaki eşdeğer devre şemaları
a) $t_0 < t < t_1$, b) $t_1 < t < t_2$, c) $t_2 < t < t_3$, ç) $t_3 < t < t_4$, d) $t_4 < t < t_5$, e) $t_5 < t < t_6$,
f) $t_6 < t < t_7$, g) $t_7 < t < t_0$

t_0 anından önce S ana anahtarı, S_1 yardımcı anahtarı kesimdedir ve I_i giriş akımı L_r rezonans bobini ve D_F ana diyotu üzerinden akmaktadır. t_0 anında S ana anahtarı L_r bobini yardımıyla SS ile ilettime geçer. L_r bobini ile D_F ana diyotu üzerinden geçen I_i akımı lineer olarak sıfıra düşer ve sonrasında D_F ana diyotu SS ile kesime girer. $t_0 < t < t_1$ aralığı boyunca rezonans bobini akımı;

$$i_{L_r}(t) = \frac{V_0}{L_r}(t - t_0) \quad (2.46)$$

ve bu aralığın zamanı;

$$\Delta t_1 = \frac{I_L L_r}{V_0} \quad (2.47)$$

ile ifade edilir [10].

$t_1 < t < t_2$ aralığı boyunca dönüştürücünün çalışması klasik DGA dönüştürücünün iletimdeki çalışma durumuyla aynıdır. Bu aralık boyunca S_1 yardımcı anahtarının üzerinde çıkış gerilimi bulunur ve C_r üzerinde de t_1 öncesi gibi V_0 çıkış gerilimi bulunmaya devam eder [10].

t_2 anında S_1 yardımcı anahtarı L_r yardımıyla ZCS ile yumuşak bir şekilde iletime geçer ve sonrasında L_r ile C_r arasında C_r - L_r - S_1 yoluyla bir rezonans başlar. Bu aralıkta rezonans kolunda yer almayan S anahtarı üzerinde ilave bir akım stresi oluşmaz. Yarı rezonans periyodundan sonra t_3 anında C_r kondansatörünün gerilimi polarite değiştirir. Bu aralık boyunca rezonans kondansatörünün gerilimi ve rezonans bobinin akımı için;

$$V_{Cr}(t) = V_0 \cos \omega_r t \quad (2.48)$$

$$i_{Lr}(t) = \frac{V_0}{Z_0} \sin \omega_r t \quad (2.49)$$

ifadeleri geçerlidir ve burada;

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (2.50)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (2.51)$$

ile tanımlanır. Bu aralığın süresi rezonans periyodunun yarısıdır ve;

$$\Delta t_3 = \frac{T_r}{2} = \pi \sqrt{L_r C_r} \quad (2.52)$$

$$T_r = 2\pi \sqrt{L_r C_r} \quad (2.53)$$

bağıntıları geçerlidir [10].

t_3 anında D_1 yardımcı diyotu iletme geçer ve L_r akımı ters yönde akmaya başlar. Bu iletim süresinde S_1 yardımcı anahtarı ZCS ile kesime girer. t_4 anına kadar L_r akımı negatif sinüzoidal olarak artmaya devam eder ve S ana anahtarının akımı sıfıra düşer. Bu aralıkta ana anahtarın akımı;

$$i_s(t) = I_i - \frac{V_0}{Z_0} \sin \omega_r t \quad (2.54)$$

ve bu aralığın süresi;

$$\Delta t_4 = \frac{T_r}{2\pi} \sin^{-1} \frac{Z_0}{V_0} I_i \quad (2.55)$$

bağıntıları ile ifade edilir [10].

t_4 anında ana anahtarın akımı sıfıra ulaşır ve ters paralel diyotu iletme geçer. Bu süre boyunca ana anahtar ZCS ile kesime sokulabilir. $t_4 < t < t_5$ aralığında;

$$V_{Cr}(t) = -V_0 \cos \omega_r t \quad (2.56)$$

$$i_{Lr}(t) = -\frac{V_0}{Z_0} \sin \omega_r t \quad (2.57)$$

ifadeleri geçerlidir [10].

t_5 anında ana anahtar ve yardımcı anahtar kontrol tasarımını basitleştirmek amacıyla aynı anda ve ZCS ile kesime girer. $t_4 < t < t_6$ süresi için;

$$\Delta t_5 + \Delta t_6 = T_r \left[\frac{1}{2} - \left(\frac{1}{\pi} \sin^{-1} \frac{Z_0}{V_0} I_i \right) \right] \quad (2.58)$$

bağıntısı yazılır [10].

t_6 anında L_r akımı I_i giriş akımına ulaşır ve rezonans periyodunun yarısı tamamlanmadığından C_r gerilimi V_0 çıkış geriliminden küçüktür. t_6 anında rezonans durur. C_r gerilimi Denklem (2.56) ve Denklem (2.57) kullanılarak;

$$V_{Cr}(t_6) = V_0 \sqrt{1 - \left(\frac{Z_0 I_i}{V_0} \right)^2} < V_0 \quad (2.59)$$

şeklinde bulunur [10].

$t_6 < t < t_7$ aralığı boyunca I_i giriş akımı C_r kondansatörünü lineer olarak $+V_0$ çıkış gerilimine şarj eder. Bu aralığın süresi;

$$\Delta t_7 = \frac{C_r}{I_i} [V_0 - V_{Cr}(t_6)] \quad (2.60)$$

şeklinde ifade edilir [10].

t_7 anında C_r gerilimi V_0 çıkış gerilimine ulaşır ve ana diyot ZVS ile iletme, yardımcı diyot ZVS ile kesime girer. Dönüştürücünün $t_7 < t < t_0$ aralığındaki çalışması klasik DGA yükseltici dönüştürücü ile aynıdır. t_0 anında ana anahtar tekrar iletme geçer ve anahtarlama periyodu tekrarlanır [10].

2.4.2. Bastırma hücresinin tasarımı

ZCS şartını sağlamak ve iletim kayıplarını azaltmak için L_r akımı;

$$I_{Lrmax} > I_{imax}, I_{Lrmax} = K I_{imax} \quad (2.61)$$

şeklinde ifade edilir ve burada $K = 1,1 - 1,2 - 1,3$ değerlerinden birini alır. C_r kondansatörünün gerilimi çıkış gerilimine eşittir ve rezonans tankının empedansı ise;

$$Z_0 = \frac{V_{Cr}}{I_{Lr \max}} = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (2.62)$$

bağıntısı ile ifade edilir [10].

Z_0 değeri ve T_r 'nin aşağıdaki farklı değerleri için L_r ve C_r değerlerinde;

$$C_r = \frac{T_r}{2\pi Z_0} \quad (2.63)$$

$$L_r = Z_0^2 C_r \quad (2.64)$$

bağıntıları geçerlidir. Burada $T_r = T_s/2, T_s/4, T_s/6, T_s/8, T_s/10$ eşitliği mevcuttur [10].

S ana anahtarının ZCS ile anahtarlanması için yardımcı anahtarın ilettime girmesi, $t_2 < t < t_3$ aralığında anlatılan ana anahtarın kesime girmesinden önce ve yarım rezonans periyodunda gerçekleştirilmelidir. Böylece yardımcı anahtarın minimum iletim süresi için;

$$t_{onS1 \min} \geq \frac{T_r}{2} = \pi \sqrt{L_r C_r} \quad (2.65)$$

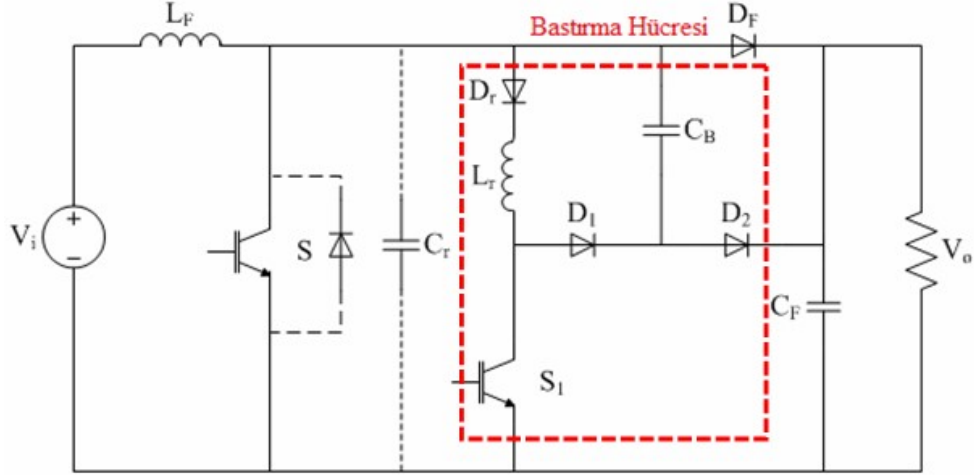
eşitliği geçerlidir ve dolayısıyla, ana anahtar iletimini, yarım rezonans periyodu sonunda akımı sıfıra inene kadar sürdürmelidir. Böylece, doğru ZCS çalışma için ana anahtarın minimum iletim süresinde aşağıdaki eşitlik geçerlidir [10].

$$t_{onS \min} \geq \pi \sqrt{L_r C_r} + \frac{T_r}{2\pi} \sin^{-1} \frac{Z_0}{V_0} I_i \quad (2.66)$$

2.5. Geliştirilmiş ZVT Aktif Bastırma Hücreli DA-DA Dönüştürücü

Temel ZVT tekniğinde, ana anahtar ZVT sayesinde ZVS ile ilettime girerken yaklaşık ZCS ile de kesime girmektedir. Ana diyot ise ilettime ve kesime ZVS ile girmektedir. Ancak ana anahtar yaklaşık ZVS ile kesime girerken, yardımcı anahtar ise yaklaşık ZCS ile ilettime geçmektedir. Ayrıca, devrenin çalışması hat ve yük şartlarına oldukça bağlıdır. Yardımcı anahtarın SS ile kesime girmesi ve bobinde depolanan enerjinin yüke aktarımı oldukça zordur ve ilave devreler gerektirmektedir. Bu tür sorunların üstesinden gelebilmek amacıyla Şekil 2.15'te gösterilen geliştirilmiş ZVT aktif bastırma hücresi tasarlanmıştır [6].

Geliştirilmiş bastırma hücresi temel ZVT bastırma hücresine ilaveten, bir diyot ve bir kondansatör bulunmaktadır. Geliştirilmiş ZVT bastırma hücreli dönüştürücü düşük yük altında çalışabilmekte ve dönüştürücüde yer alan tüm yarı iletkenler ilettime ve kesime tam veya yaklaşık ZVS ve/veya ZCS ile girmektedir. Ana anahtar ve ana diyot üzerinde ilave bir akım ve gerilim stresi oluşmaz. Ayrıca yardımcı elemanlarda oluşan gerilim ve akım stresleri kabul edilebilir düzeyde kalmaktadır [6].



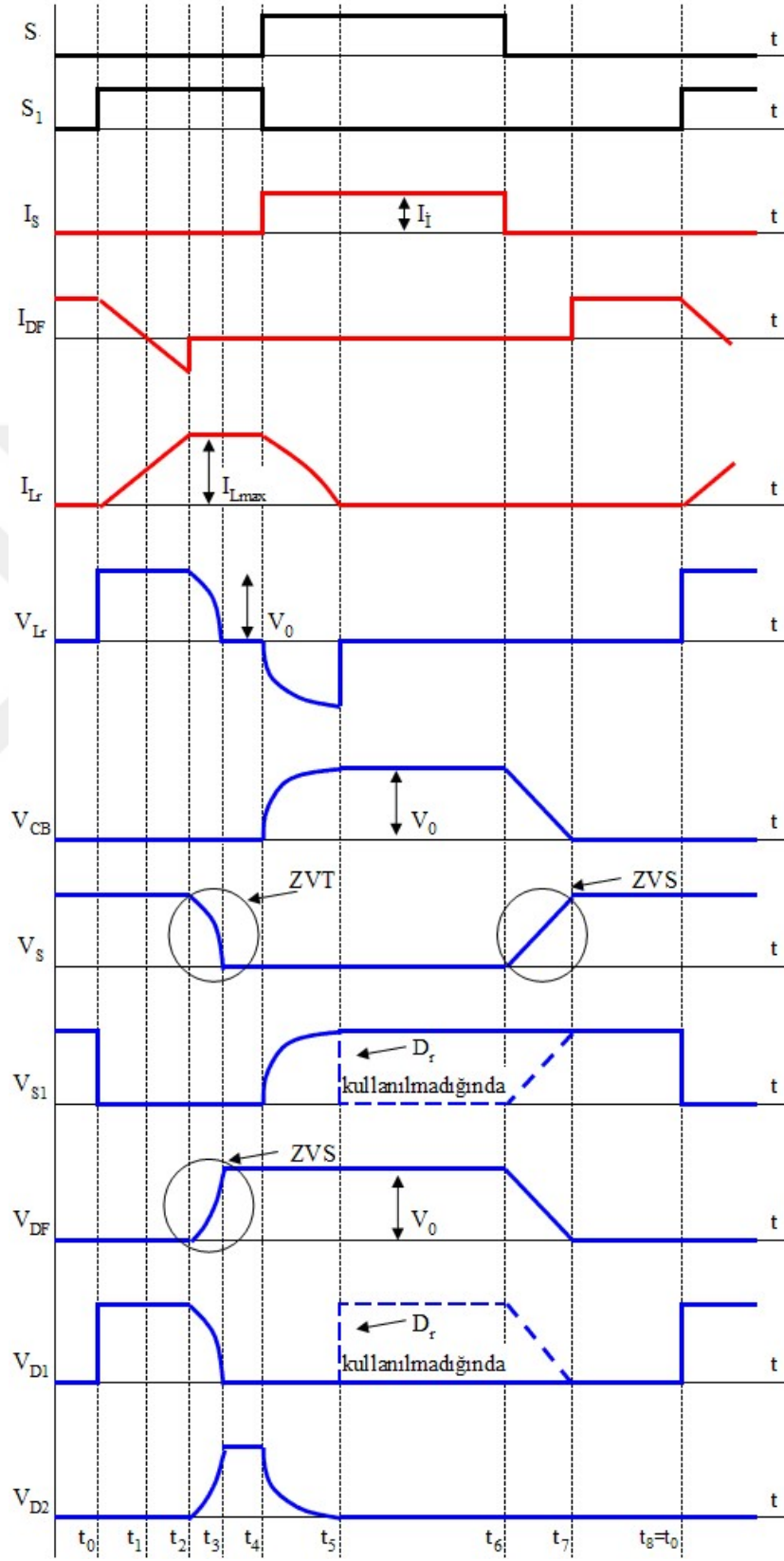
Şekil 2.15. Geliştirilmiş ZVT aktif bastırma hücreli yükseltici dönüştürücü devresi

2.5.1. Dönüştürücünün çalışma aralıkları

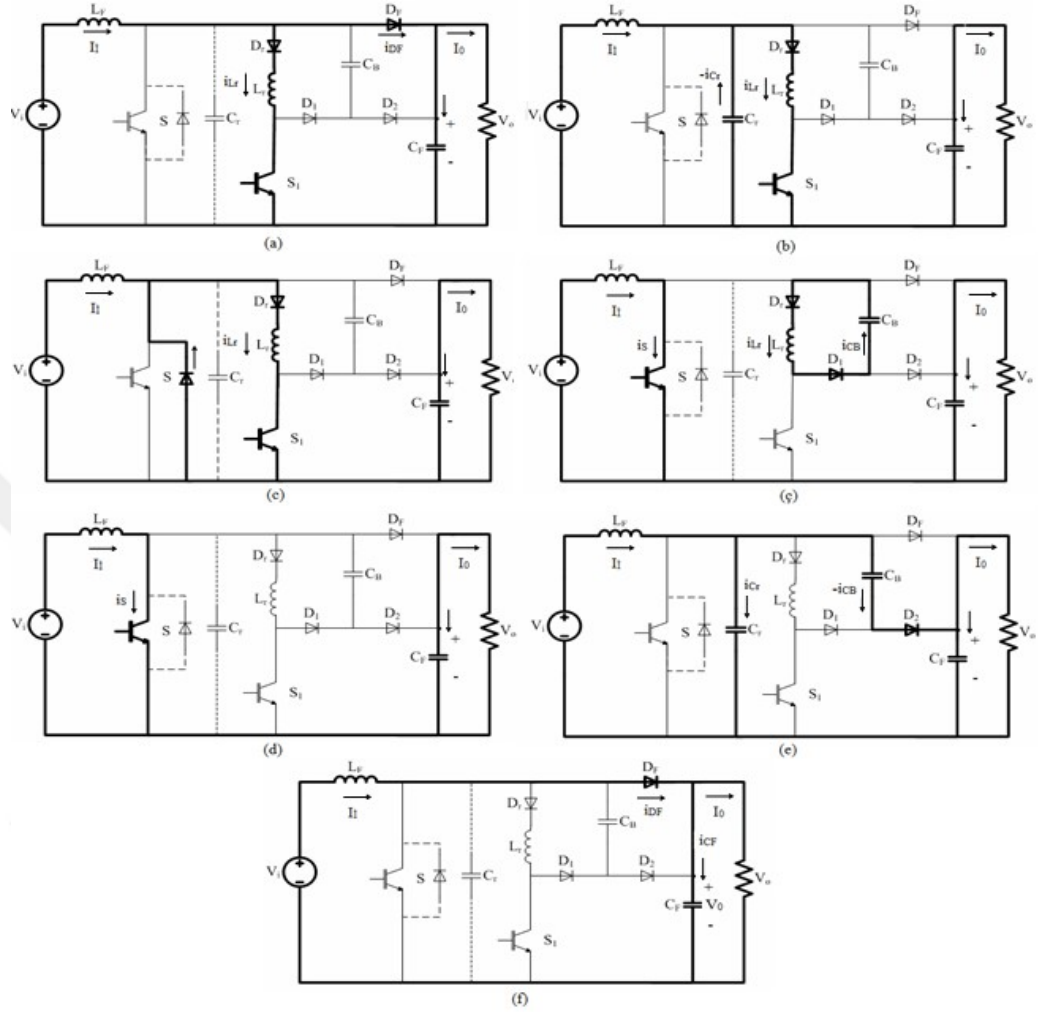
Dönüştürücünün sürekli halde Şekil 2.16’da gösterildiği üzere 7 çalışma aralığı bulunmaktadır. Dönüştürücünün sürekli halde bir çalışma periyodunun analizini gerçekleştirmek için;

- V_i giriş geriliminin sabit,
- V_o çıkış geriliminin sabit ve C_F kondansatörünün yeterince büyük,
- I_i giriş akımının sabit ve L_F bobininin yeterince büyük,
- Rezonans devrelerinin ideal,
- L_F bobininin L_r bobininden yeterince büyük,
- Gerilim düşümleri ile yarı iletkenlerin parazitik kapasitelerinin ihmal edilmiş,
- Ana diyot hariç diğer bütün diyotların ters toparlanma sürelerinin ihmal edilmiş olduğu kabulleri yapılmıştır [6].

Şekil 2.15’te gösterilen devrede, S_1 yardımcı anahtarı düşük güç kapasitesine sahip olup S ana anahtarından daha hızlıdır. Gerçekte S ana anahtarına paralel C_r kondansatörü gerekli değildir ve S ana anahtarına ters paralel bağlı diyot kullanılmaz. L_r bobinine seri bağlı diyot temel ZVT aktif bastırma hücresindeki gibi kullanılmaktadır. C_r , S ana anahtarının parazitik kapasitesi ile devredeki tüm parazitik kapasitelerin toplamıdır. Dönüştürücünün yedi çalışma bölgesine ait eşdeğer devre şemaları Şekil 2.17’de yer almaktadır [6].



Şekil 2.16. Dönüştürücünün çalışması ile ilgili dalga şekilleri



Şekil 2.17. Dönüştürücünün çalışma aralıkları ile ilgili eşdeğer devre şemaları
a) $t_0 < t < t_2$, b) $t_2 < t < t_3$, c) $t_3 < t < t_4$, ç) $t_4 < t < t_5$, d) $t_5 < t < t_6$, e) $t_6 < t < t_7$,
f) $t_7 < t < t_8=t_0$

$t_0 < t < t_2$ aralığının başında S ana anahtarı ve S_1 yardımcı anahtarı kesimdedir. D_F ana diyotu iletimde ve L_F bobininden gelen I_i giriş akımını geçirmektedir. $t=t_0$ anında $I_{S1}=0$, $I_{DF}=I_i$, $I_S=0$, $V_{Cr}=V_0$ ve $V_{CB}=0$ 'dır. $t=t_0$ anında S_1 yardımcı anahtarına kontrol sinyali uygulanır. D_r diyotu ve S_1 yardımcı anahtarı yaklaşık ZCS ile iletime geçer. D_r ve S_1 üzerinden geçen akımın yükselmesi L_r tarafından sınırlanır. Bu aralık boyunca aynı anda ve oranda S_1 akımı artar ve D_F akımı düşer. Bu aralıkta;

$$i_{Lr} = i_{S1} = \frac{V_0}{L_r}(t - t_0) \quad (2.67)$$

$$i_{DF} = I_i - i_{Lr} = I_i - \frac{V_0}{L_r}(t - t_0) \quad (2.68)$$

ifadeleri geçerlidir [6].

Bu aralıkta ilk olarak $t=t_1$ anında S_1 akımı I_i giriş akımına ulaşır ve D_F akımı sıfıra düşer. Sonrasında S_1 akımı yükselmeye devam eder ve D_F akımı da düşmeye devam eder. Sonuç olarak $t=t_2$ anında D_F diyotunun ters toparlanma akımı $-I_{rr}$ değerine düşer ve böylece D_F diyotu ZVS ile kesime girer ve bu aralık tamamlanır.

Bu aralıkta;

$$t_{01} = \frac{L_r}{V_0} I_i \quad (2.69)$$

$$i_{Lr} = i_{S1} = I_i + \frac{V_0}{L_r}(t - t_1) \quad (2.70)$$

$$i_{DF} = -\frac{V_0}{L_r}(t - t_1) \quad (2.71)$$

$$I_{Lr2} = i_{Lr}(t_2) = i_{S1}(t_2) = I_i + I_{rr} \quad (2.72)$$

$$I_{DF2} = i_{DF}(t_2) = -I_{rr} \quad (2.73)$$

$$t_{12} = t_{rr} = \frac{L_r}{V_0} I_{rr} \quad (2.74)$$

ifadeleri de yazılabilir. Burada, I_{rr} ve t_{rr} ; $I_F=I_i$ ve $-di/dt=-V_0/L_r$ değerleri için sırasıyla ana diyotun ters toparlanma akımı ve süresidir. Böylece, bu aralığın sonunda D_F diyotu ZVS ile kesime girmiş olur [6].

$t=t_2$ anından önce ana anahtar ve ana diyot kesimdedir. Yardımcı anahtar ise iletimde olup I_i+I_{rr} akımını geçirmektedir. $t=t_2$ anında, $i_S=0$, $i_{S1}=I_i+I_{rr}$, $i_{DF}=0$, $v_{Cr}=V_0$ ve $v_{CB}=0$ 'dır [6].

$t=t_2$ anında L_r ile C_r arasında C_r - D_r - L_r - S_1 yolu üzerinden I_i ve I_{Lr2} akımı ile paralel rezonans başlar. Bu rezonans için;

$$i_{Lr} = i_{S1} = I_i + I_r \cos \omega_l(t - t_2) + \frac{V_0}{Z_l} \sin \omega_l(t - t_2) \quad (2.75)$$

$$v_{Cr} = v_S = V_0 \cos \omega_l(t - t_2) - Z_l I_r \sin \omega_l(t - t_2) \quad (2.76)$$

ifadeleri yazılabilir [6].

$t=t_3$ anında, C_r kondansatöründe depolanan enerjinin L_r bobinine transferi tamamlanır. L_r bobininin akım ve enerji değerleri maksimuma aynı zamanda ulaşır. Denklem (2.75) ile Denklem (2.76)'dan;

$$I_{Lr \max} = I_i + \sqrt{V_0^2 + Z_l^2 I_r^2} / Z_l \quad (2.77)$$

$$W_{Lr \max} = \frac{1}{2} L_r I_{Lr \max}^2 = \frac{1}{2} L_r (I_i + I_r)^2 + \frac{1}{2} C_r V_0^2 \quad (2.78)$$

$$t_{23} = \sqrt{L_r C_r} \arctg \frac{V_0}{Z_l I_r} \quad (2.79)$$

ifadeleri elde edilir ve burada;

$$\omega_l = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (2.80)$$

$$Z_l = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (2.81)$$

olarak ifade edilir. Burada dikkat edilmesi gereken husus; C_r , ana anahtarın, ana diyotun ve yardımcı diyotların parazitik kapasitelerini içermekte olduğudur. S ana anahtarının ve D_1 yardımcı diyotunun parazitik kondansatörleri V_0 'dan sıfıra deşarj olur ve diğerleri de sıfırdan V_0 'a şarj olur. Ayrıca gerçekte, ilave bir C_r kondansatörü gerekmemektedir veya C_r , toplam parazitik kapasite olarak varsayılabilir [6].

$t_3 < t < t_4$ anından önce, yalnızca S_1 yardımcı anahtarı iletimdedir ve maksimum L_r akımını geçirmektedir. $t=t_3$ anında $i_S=0$, $i_{S1}=I_{Lr \max}$, $i_{DF}=0$, $v_{Cr}=0$ ve $v_{CB}=0$ 'dır. v_{Cr} değerinin sıfır olmasından hemen sonra ana anahtarın ters paralel bağlı diyotu ilettime geçer ve bu aralık için;

$$i_{Lr} = i_{S1} = I_{Lr \max} \quad (2.82)$$

eşitliği ile S anahtarın ters paralel bağlı diyotu üzerinden geçen akım için;

$$i_{DS} = I_{Lr \max} - I_i \quad (2.83)$$

ifadesi yazılabilir. Ana anahtarın ters paralel bağlı diyotunun iletimde olduğu bu aralıkta, ana anahtar için temel ZVT sağlanır. Ana anahtarın ters paralel bağlı diyotu normal ZVT dönüştürücüde gerekli iken, bu dönüştürücüde ihtiyaç duyulmaz ve t_3 anında bir sonraki aralığa doğrudan geçilir [6].

$t_4 < t < t_5$ aralığının başında $i_S=0$, $i_{S1}=I_{Lr \max}$, $i_{DF}=0$, $v_{Cr}=0$ ve $v_{CB}=0$ 'dır. t_4 anında ve aynı anda olmak üzere S anahtarına kontrol sinyali uygulanır ve S_1 anahtarının kontrol sinyali kesilir. Aynı zamanda, S anahtarı ZVS ile iletime geçer ve üzerinden I_i akımını geçirmeye başlar, S_1 anahtarı ise C_B yardımıyla yaklaşık ZVS ile kesime girer. L_r ve C_B arasında L_r - D_1 - C_B - D_r yolu ile $I_{Lr \max}$ akımı altında seri bir rezonans başlar. Burada, D_1 yardımcı diyotu t_4 anında ZVS ile iletime geçer. Bu rezonans anı için;

$$i_{Lr} = i_{D1} = I_{Lr \max} \cos \omega_2(t - t_4) \quad (2.84)$$

$$v_{CB} = v_{S1} = Z_2 I_{Lr \max} \sin \omega_2(t - t_4) \quad (2.85)$$

ifadeleri geçerlidir. Bu aralıkta L_r bobininde depolanan enerji C_B kondansatörüne transfer edilir ve transfer edilen enerji ile C_B kondansatörünün sıfırdan V_0 gerilimine şarj olduğu varsayılırsa yukarıdaki bağıntılardan;

$$v_{CB5} = v_{CB}(t_5) = v_{CB \max} = Z_2 I_{Lr \max} = V_0 \quad (2.86)$$

$$t_{45} = \frac{\pi}{2} \sqrt{L_r C_B} \quad (2.87)$$

$$\frac{1}{2} L_r I_{Lr \max}^2 = \frac{1}{2} C_B V_{CB \max}^2 = \frac{1}{2} C_B V_0^2 \quad (2.88)$$

eşitlikleri elde edilir. Eğer C_B değeri küçükse V_0 gerilimine tekrar şarj olur ve artan enerji yüke transfer edilir. Eğer C_B değeri büyükse gerilimi V_0 değerine ulaşamaz ve;

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_B}} \quad (2.89)$$

$$Z_2 = \sqrt{L_r / C_B} \quad (2.90)$$

bağıntıları elde edilir. Bu aralıkta C_B kondansatörü S_1 anahtarının gerilim yükselme miktarını sınırlar ve S_1 yaklaşık ZVS ile kesime girer. Ayrıca, S_1 anahtarı ile D_2 diyotunun parazitik kapasiteleri C_B ile birleşir. $t=t_5$ anında i_{L_r} sıfıra düşer düşmez D_r ile D_1 yardımcı diyotları L_r yardımıyla yaklaşık ZCS ile kesime girer ve bu aralık sonlanır [6].

$t_5 < t < t_6$ aralığı boyunca S anahtarı I_i akımını iletmeye devam eder ve bastırma hücresi aktif değildir. Bu aralığın süresi normal DGA dönüştürücünün iletim süresinin büyük bir bölümünü oluşturur ve DGA tarafından belirlenir. Bu aralık için $i_S = I_i$ eşitliği geçerlidir [6].

$t_6 < t < t_7$ aralığından önce $i_S = I_i$, $i_{S1} = 0$, $i_{DF} = 0$, $v_{Cr} = 0$ ve $v_{CB} = V_0$ 'dır. $t=t_6$ anında, S anahtarının kontrol sinyalinin kesilmesiyle S anahtarı yaklaşık ZVS ile kesime girer ve D_2 yardımcı diyotu, V_0 gerilimine şarj olan C_B kondansatörü nedeniyle ZVS ile iletme geçer. Bu aralık boyunca C_r şarj olurken, C_B deşarj olur. t_7 anında C_r kondansatörünün gerilimi V_0 'a ulaşırken C_B gerilimi sıfıra düşer. Ana diyot ZVS ile iletme geçer ve D_2 yardımcı diyotu ZVS ile kesime girer ve bu aralık son bulur. Bu durumda;

$$v_{Cr} = v_S = V_0 - v_{CB} = \frac{I_i}{C_r + C_B} (t - t_6) \quad (2.91)$$

$$t_{67} = \frac{C_r + C_B}{I_i} V_{CB \max} = \frac{C_r + C_B}{I_i} V_0 \quad (2.92)$$

eşitlikleri bulunur. Bu aralıkta C_B kondansatörü S anahtarının gerilim yükselişini sınırlar. Böylece S yaklaşık ZVS ile kesime girer. Ayrıca, D_F diyotunun parazitik kapasitesi C_r ve C_B ile birleşir. $t_4 < t < t_6$ aralığında, yük akımı düşürülürse C_B kondansatörünün geriliminin V_0 'a ulaşamayacağına dikkat edilmelidir. Benzer şekilde bu aralıkta C_B kondansatörünün bastırma etkisi orantılı olarak düşürülür

fakat, bu aralığın süresi değiştirilemez. Bu özellik düşük yüklerde çalışmayı mümkün kılar [6].

$t_7 < t < t_8$ aralığı boyunca D_F diyotu I_I akımını iletmeye devam eder ve bastırma hücresi aktif değildir. Bu aralığın süresi normal DGA dönüştürücünün kesim süresinin büyük bölümünü oluşturmaktadır. Bu aralık için $i_{DF}=I_I$ yazılabilir. Böylece $t=t_8$ anında bir anahtarlama periyodu tamamlanır ve diğer bir anahtarlama periyodu başlar [6].

2.5.2. Bastırma hücresinin tasarımı

Geliştirilen bastırma hücresinin tasarımı, yalnızca ana anahtar, ana diyot ve yardımcı anahtarın SS ile iletme geçmesi ve kesime girmesinin sağlanmasına dayanmayıp, bastırma hücresindeki enerjinin yüke aktarımının gerçekleştirilebilmesine de dayanmaktadır. İlk olarak L_r bastırma bobini seçilirken;

$$\frac{V_0}{L_r} 3t_{rn} \leq I_{I \max} \quad (2.93)$$

şartı göz önünde bulundurulmaktadır [6]. Burada t_{rn} ana diyotun nominal ters toparlanma süresidir. Daha sonra C_B , L_r bobininde depolanan enerji kendisine transfer edildiğinde yaklaşık olarak çıkış gerilimine şarj olacak şekilde seçilmiştir. Denklem (2.78) ile Denklem (2.88) kullanılarak [6];

$$\frac{1}{2} L_r (I_{I \max} + I_{rr \max})^2 + \frac{1}{2} C_r V_0^2 \cong \frac{1}{2} C_B V_0^2 \quad (2.94)$$

denklemini elde edilir. Burada, $I_{rr \max}$ ana diyotun $I_F=I_{I \max}$ ve $-di/dt=-V_0/L_r$ değerleri için ters toparlanma akımıdır. Son olarak, L_r ve C_B seçiminde aşağıdaki eşitlikler göz önünde bulundurulur [6];

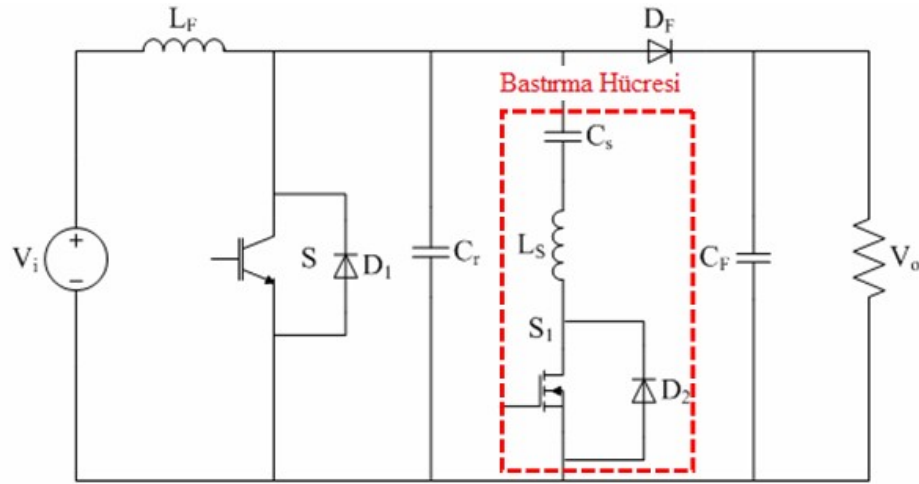
$$t_{45} = \frac{\pi}{2} \sqrt{L_r C_B} \geq t_{fs1} \quad (2.95)$$

$$t_{67} = \frac{C_r + C_B}{I_{I \max}} V_0 \geq t_{fs} \quad (2.96)$$

Burada, t_{fs1} ile t_{fs} sırasıyla S_1 anahtarı ile S anahtarının düşme zamanlarıdır.

2.6. ZVZCT Aktif Bastırma Hücreli DA-DA Dönüştürücü

Şekil 2.18’de yer alan dönüştürücüde kullanılan aktif bastırma hücresi, ana anahtarın ZVT ile ilettime geçmesini ve ZCT ile kesime girmesini sağlamaktadır. Ayrıca diğer bütün yarı iletkenlerin SS ile ilettime veya kesime girdiği bu dönüştürücü yüksek frekans uygulamalarında da başarılı bir şekilde çalışmaktadır. Basit yapısı, kontrol kolaylığı ve az sayıda yardımcı eleman içeren bu bastırma hücresinde ana ve yardımcı elemanlar üzerinde ilave bir gerilim stresi oluşmaz [7].



Şekil 2.18. ZVZCT aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi

Temel ZVT aktif bastırma hücreli dönüştürücüde ana anahtar ZVT ile mükemmel bir şekilde ilettime geçmekte ve yaklaşık ZVS ile de kesime girmektedir, fakat dönüştürücünün çalışması yük ve hat şartlarına oldukça bağlıdır [7].

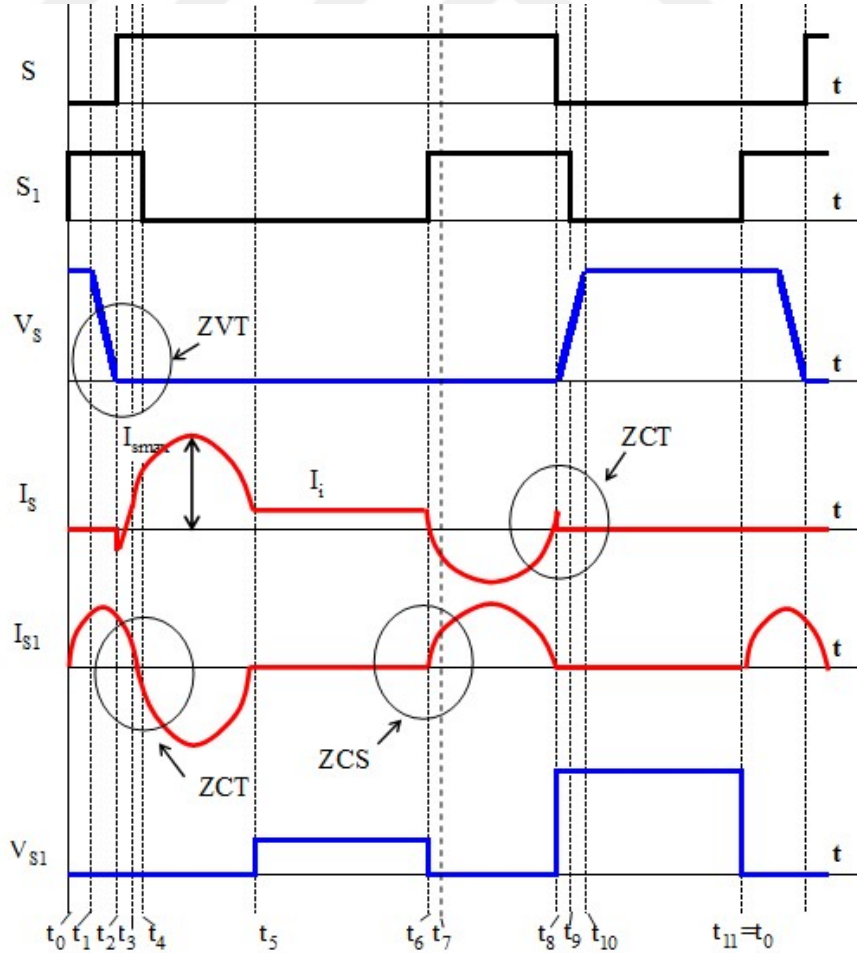
Temel ZCT aktif bastırma hücreli dönüştürücüde ana anahtar ZCS ve ZVS ile kesime girmektedir. Yardımcı anahtar ise ilettime yaklaşık ZCS ile geçmektedir. Dönüştürücünün çalışması yüke oldukça bağlıdır. Dönüştürücüde ana anahtar ilettime girdiğinde ana diyot üzerinden ters toparlanma akımı akmaktadır ve burada ana anahtar ile ana diyot üzerinde bir kısa devre oluşmaktadır. Ayrıca yardımcı anahtar kesime HS ile girmektedir ve anahtarların parazitik kondansatörleri anahtarlar üzerinden deşarj olmaktadır [7].

Şekil 2.18’de gösterilen aktif bastırma hücresi, temel ZCT aktif bastırma hücresindeki sorunların üstesinden gelmek amacıyla tasarlanmıştır. Yumuşak

anahtarlama teknikleri temel ZCT bastırma hücresinden topolojilerinde herhangi bir değişiklik yapmadan alınmıştır. Gerçekleştirilen ZVZCT bastırma hücreli dönüştürücüde ana anahtar iletime ZVT ile geçmekte ve kesime ZCT ile girmektedir. Devrede yer alan bütün yarı iletken dönüştürücüler SS ile anahtarlansaktadır [7].

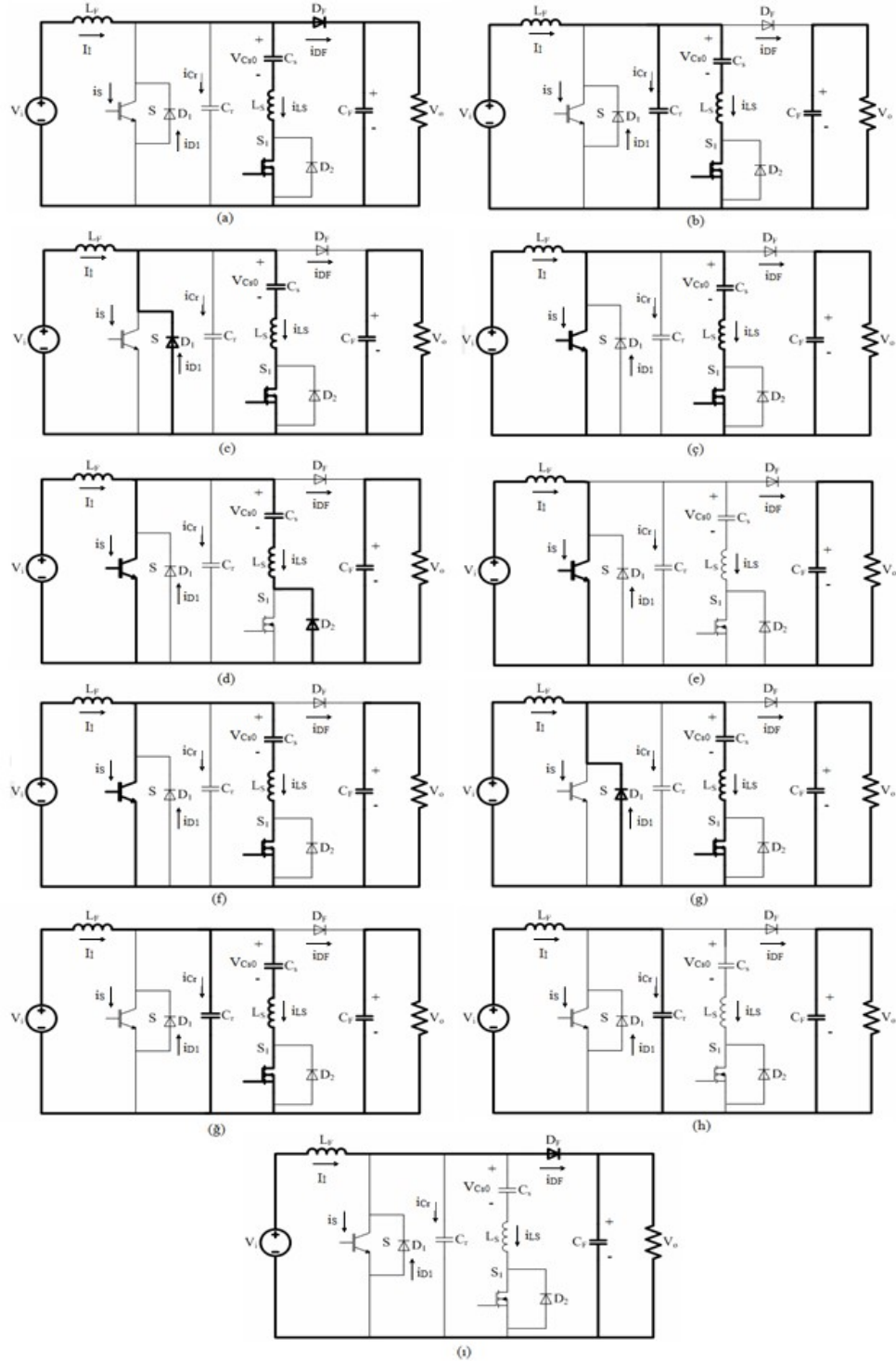
2.6.1. Dönüştürücünün çalışma aralıkları

ZVZCT aktif bastırma hücresi L_s bastırma bobini, C_s bastırma kondansatörü, S_1 yardımcı anahtarı ve D_1 yardımcı diyottan oluşmaktadır. Şekil 2.18'deki dönüştürücüde gösterilen C_r kondansatörü S ana anahtarının ve devredeki diğer parazitik kapasitelerin toplamı olarak varsayılmaktadır ve gerçek dönüştürücüde kullanılmasına gerek yoktur. Dönüştürücünün Şekil 2.19'da gösterildiği üzere bir anahtarlama periyodunda 11 çalışma aralığı bulunmaktadır [7].



Şekil 2.19. Dönüştürücüye ait temel dalga şekilleri

Her bir çalışma aralığı için dönüştürücüye ait eşdeğer devre şemaları Şekil 2.20’de yer almaktadır.



Şekil 2.20. Dönüştürücünün çalışma aralıklarına ait eşdeğer devre şemaları
a) $t_0 < t < t_1$, b) $t_1 < t < t_2$, c) $t_2 < t < t_3$, ç) $t_3 < t < t_4$, d) $t_4 < t < t_5$, e) $t_5 < t < t_6$,
f) $t_6 < t < t_7$, g) $t_7 < t < t_8$, ğ) $t_8 < t < t_9$, h) $t_9 < t < t_{10}$, ı) $t_{10} < t < t_{11}=t_0$

Dönüştürücünün bir anahtarlama periyodundaki sürekli hal analizini yapabilmek için; giriş ve çıkış gerilimleri ile giriş akımı sabit kabul edilmiş ve ana diyotun ters toparlanma süresi hesaba katılmıştır. Ayrıca denklemler oluşturulurken tüm yarı iletkenlerin ve rezonans devrelerinin ideal olduğu kabul edilmiştir [7].

$t_0 < t < t_1$ aralığının başında S ana anahtarı ve S_1 yardımcı anahtarı kesimdedir. D_F ana diyotu ise iletimdedir ve üzerinden I_i akımını geçirmektedir. $t=t_0$ anında, $i_s=0$, $i_{Ls}=i_{S1}=0$, $i_{DF}=I_i$, $v_{Cr}=V_0$ ve $v_{Cs}=V_{Cs0}$ 'dır. C_s 'nin başlangıç gerilimi V_{Cs0} rezonans devresinin verimi ile tayin edilir. Devrenin yumuşak anahtarlama aralığı C_s 'nin başlangıç gerilimine bağlıdır. Yumuşak anahtarlama V_{Cs0} değerine bağlıdır. $t=t_0$ anında yardımcı anahtara kontrol sinyali uygulanmasıyla bu aralığın başlamasıyla L_s ve C_s arasında rezonans başlar. Rezonansa bağlı olarak aynı anda S_1 anahtarının akımı artar, D_F diyotunun akımı düşer. S_1 yardımcı anahtarının akım yükselme miktarı kendisine seri bağlı L_s bobini tarafından sınırlanır ve böylece yardımcı anahtar ZCS ile iletme geçer. Bu aralık için;

$$i_{Ls} = (V_0 - V_{Cs0}) \frac{\sin \omega_s(t - t_0)}{L_s \omega_s} \quad (2.97)$$

$$v_{Cs} = V_0 - (V_0 - V_{Cs0}) \cos \omega_s(t - t_0) \quad (2.98)$$

eşitlikleri yazılabilir. Burada;

$$\omega_s = \sqrt{\frac{1}{L_s C_s}} \quad (2.99)$$

olarak belirtilir. $t=t_1$ anında bastırma kondansatörünün gerilimi v_{Cs} , V_{Cs1} değerine, i_{S1} akımı I_i değerine ve i_{DF} akımı sıfıra düşer. i_{DF} akımı $-I_{Tr}$ değerine ulaşınca D_F diyotu kesime girer ve bu aralık biter. Bu aralıkta, S_1 yardımcı anahtarı L_s yardımıyla ZCS ile iletme geçer, D_F diyotu ise L_s ve C_r yardımıyla yaklaşık ZCS ve ZVS ile kesime girer. Bu aralığın sonunda;

$$i_{Ls} = \dot{I}_{S1} = I_i + I_{Tr} \quad (2.100)$$

$$v_{Cs} = V_{Cs1} \quad (2.101)$$

ifadeleri yazılabilir [7].

$t=t_1$ anından önce $i_s=0$, $\dot{I}_{LS}=\dot{I}_{S1}=I_i+I_{rr}$, $i_{DF}=0$, $v_{Cr}=V_0$ ve $v_{CS}=V_{CS1}$ 'dir. S ana anahtarı ve D_F ana diyotu kesimdedir. Yardımcı anahtar iletimde olup I_i akımı ile I_{rr} akımının toplamını iletmektedir. $t=t_1$ anında C_r - L_S - C_S arasında rezonans başlar ve;

$$i_{LS} = I_i + I_{rr} \cos \omega_r(t - t_1) - \frac{(V_{CS1} - V_0)}{\omega_r L_S} \sin \omega_r(t - t_1) \quad (2.102)$$

$$v_{Cr} = -(V_{CS1} - V_0) \cos \omega_r(t - t_1) + V_{CS1} - L_S \omega_r I_{rr} \sin \omega_r(t - t_1) \quad (2.103)$$

bağıntıları geçerlidir. Bu bağıntılarda;

$$\omega_r = \sqrt{\frac{1}{L_S C_r}} \quad (2.104)$$

olarak belirtilir. $t=t_2$ anında v_{Cr} sıfır olur ve bu aralık biter. Böylece C_r 'de biriken enerjinin rezonans devresine transferi tamamlanır. Bu anda D_1 diyotu yaklaşık ZVS ile iletime geçer. C_r , S ana anahtarının ve devredeki diğer parazitik kapasitelerin toplamı olarak varsayılır ve gerçekte ilave bir C_r kondansatörünün kullanılmasına gerek yoktur. $t_1 < t < t_2$ aralığının sonunda;

$$i_{LS} = i_{S1} = I_{LS2} \quad (2.105)$$

$$v_{CS} = V_{CS2} \quad (2.106)$$

eşitlikleri mevcuttur [7].

$t_2 < t < t_3$ aralığının başında t_2 anında D_1 diyotunun iletime girmesinden hemen sonra $i_s=0$, $i_{LS}=\dot{I}_{S1}=I_{LS2}$, $i_{DF}=0$, $v_{Cr}=0$ ve $v_{CS}=V_{CS2}$ 'dir. Bu aralıkta, L_S ve C_S arasındaki rezonans devam eder. Bu rezonans için;

$$i_{LS} = I_{LS2} \cos \omega_s(t - t_2) - \frac{V_{CS1}}{\omega_s L_S} \sin \omega_s(t - t_2) \quad (2.107)$$

$$v_{CS} = V_{CS1} \cos \omega_s(t - t_2) + L_S \omega_s I_{LS2} \sin \omega_s(t - t_2) \quad (2.108)$$

bağıntıları elde edilir. Bu aralığın başlangıcında C_r gerilimi sıfırdır ve D_1 diyotu iletimdedir. Bu diyot I_i akımından artan L_S akımını üzerinden geçirir. Bu aralığın

periyodu ana anahtarın ZVT periyodudur ve ZVT aralığı olarak adlandırılır. Bu aralıkta D_1 diyotu iletimde iken S ana anahtarına kontrol sinyali uygulanır. $t=t_3$ anında, I_{LS} akımı giriş akımına düştüğünde ve D_1 ZCS ile kesime girdiğinde bu aralık biter. Bu aralığın sonunda;

$$i_{LS} = i_{S1} = I_{LS3} = I_l \quad (2.109)$$

$$v_{CS} = V_{CS3} \quad (2.110)$$

eşitlikleri geçerlidir [7].

$t_3 < t < t_4$ aralığı D_1 diyotunun kesime girmesi ile başlar. Bu aralığın başlangıcında $i_S=0$, $i_{LS}=i_{S1}=I_{LS3}=I_l$, $i_{DF}=0$, $v_{Cr}=0$ ve $v_{CS}=V_{CS3}$ 'dir. Ana anahtar ZVT ile iletime geçer ve akımı yükselmeye başlar. L_S ve C_S arasındaki rezonans devam eder. Bu aralık için;

$$i_{LS} = I_l \cos \omega_s(t - t_3) - \frac{V_{CS4}}{\omega_s L_S} \sin \omega_s(t - t_3) \quad (2.111)$$

$$v_{CS} = V_{CS4} \cos \omega_s(t - t_3) + L_S \omega_s I_l \sin \omega_s(t - t_3) \quad (2.112)$$

ifadeleri elde edilir. $t=t_4$ anında ana anahtarın akımı giriş akımına yükselir ve i_{LS} sıfır olur. Yardımcı anahtar üzerinden geçen akım sıfır olur ve yardımcı anahtarın kontrol sinyalinin kesilmesiyle bu aralık biter. Bu aralığın sonunda;

$$i_{LS} = i_{S1} = I_{LS4} = 0 \quad (2.113)$$

$$v_{CS} = V_{CS4} \quad (2.114)$$

eşitlikleri mevcuttur [7].

$t_4 < t < t_5$ aralığı, S_1 yardımcı anahtarının ZCT ile mükemmel bir şekilde kesime girmesiyle başlar. Bu aralıkta; $i_S=I_l$, $i_{LS}=i_{S1}=I_{LS4}=0$, $i_{DF}=0$, $v_{Cr}=0$ ve $v_{CS}=V_{CS4}$ eşitlikleri mevcuttur. Bu aralığın başlangıcında D_2 diyotu ZCS ile iletime geçer ve üzerinden geçen akım yükselmeye başlar. L_S ile C_S arasındaki rezonans halen devam etmektedir. i_{LS} akımı negatif olur ve ana anahtar üzerinden geçen akım giriş akımından daha yüksektir ve;

$$i_{LS} = -\frac{V_{Cs4}}{\omega_s L_s} \sin \omega_s(t - t_4) \quad (2.115)$$

$$v_{Cs} = V_{Cs4} \cos \omega_s(t - t_4) \quad (2.116)$$

bağıntıları ifade edilir. $t=t_5$ anında ana anahtarın akımı giriş akımına düşer ve i_{LS} akımı sıfır olur. i_{D2} sıfır olur ve ZCS ile kesime girer. Bu aralığın sonunda;

$$i_{LS} = i_{S1} = I_{LS4} = 0 \quad (2.117)$$

$$v_{Cs} = V_{Cs5} \quad (2.118)$$

eşitlikleri mevcuttur [7].

$t_5 < t < t_6$ aralığının başında, $i_s = I_i$, $i_{LS} = i_{S1} = I_{LS4} = 0$, $i_{DF} = 0$, $v_{Cr} = 0$ ve $v_{Cs} = V_{Cs5}$ eşitlikleri vardır. Bu aralıkta, ana anahtar I_i akımını iletmeye devam eder ve bastırma hücresi aktif değildir. Bu aralık normal yükseltici dönüştürücünün iletim aralığıdır ve iletim süresi DGA kontrolü ile belirlenir. Bu aralık için $i_s = I_i$ eşitliği yazılabilir [7].

$t_6 < t < t_7$ aralığının başında $i_s = I_i$, $i_{LS} = i_{S1} = 0$, $i_{DF} = 0$, $v_{Cr} = 0$ ve $v_{Cs} = V_{Cs5}$ 'tir. $t=t_7$ anında yardımcı anahtara kontrol sinyali uygulanmasıyla L_s ve C_s arasında C_s - L_s - S_1 - S yolu üzerinden yeni bir rezonans başlar ve;

$$i_{LS} = -\frac{V_{Cs5}}{\omega_s L_s} \sin \omega_s(t - t_5) \quad (2.119)$$

$$v_{Cs} = V_{Cs5} \cos \omega_s(t - t_5) \quad (2.120)$$

bağıntıları ifade edilir. L_s bobininden ötürü yardımcı anahtar ZCS ile iletme geçer. Aynı anda bastırma bobini üzerinden akan akım artar ve ana anahtar akımı rezonans nedeniyle düşer. $t=t_7$ anında S_1 anahtarının akımı giriş akımına ulaşır, ana anahtarın akımı sıfıra düşer ve bu aralık biter. Bu aralığın sonunda;

$$i_{LS} = i_{S1} = I_{LS7} = I_i \quad (2.121)$$

$$v_{Cs} = V_{Cs7} \quad (2.122)$$

eşitlikleri mevcuttur [7].

$t_7 < t < t_8$ aralığının başında, $i_s=0$, $i_{LS}=i_{S1}=I_i$, $i_{DF}=0$, $v_{Cr}=0$ ve $v_{Cs}=V_{Cs7}$ 'dir. $t=t_7$ anında S anahtarının akımı sıfıra düşmesi ile aralık başlar. D_1 diyotu ZCS ile iletme geçer. D_1 diyotu iletimde iken S anahtarının kontrol sinyali kesilirse S, ZVS ve ZCS ile kesime girer. C_s - L_s - S_1 - D_1 yolu üzerinden bir rezonans başlar. D_1 diyotu I_i akımından artan i_{LS} akımını geçirir. Bu aralık için;

$$i_{LS} = I_i \cos \omega_s(t - t_8) - \frac{V_{Cs7}}{\omega_s L_s} \sin \omega_s(t - t_8) \quad (2.123)$$

$$v_{Cs} = V_{Cs7} \cos \omega_s(t - t_8) + L_s \omega_s I_i \sin \omega_s(t - t_8) \quad (2.124)$$

bağıntıları elde edilir. $t=t_8$ anından hemen önce, i_{D1} akımı sıfıra düşer. $t=t_8$ anında i_{D1} diyotu $-I_{rr}$ akımına ulaşır, kesime girer ve bu aralık sonlanır ve;

$$i_{LS} = i_{S1} = I_{LS8} = I_i - I_{rr} \quad (2.125)$$

$$v_{Cs} = V_{Cs8} = V_{Cs0} \quad (2.126)$$

eşitlikleri geçerlidir [7].

$t_8 < t < t_9$ aralığı D_1 diyotunun ZCS ile kesime girmesiyle başlar. Bu aralıkta, $i_s=0$, $i_{LS}=i_{S1}=I_{LS8}=I_i - I_{rr}$, $i_{DF}=0$, $v_{Cr}=0$ ve $v_{Cs}=V_{Cs8}=V_{Cs0}$ eşitlikleri vardır. $t=t_8$ anında C_r , C_s ve L_s arasında rezonans başlar ve $t=t_9$ anında bu rezonansla i_{LS} akımı sıfıra düşer ve C_r kondansatörü sıfırdan V_{Cs8} gerilimine şarj olur. S_1 yardımcı anahtarının kontrol sinyalinin kesilmesiyle bu aralık sonlanır. S_1 yardımcı anahtarı ZCS ile kesime girer. Bu aralık için;

$$i_{LS} = I_i - I_{rr} \cos \omega_r(t - t_8) - \frac{V_{Cs8}}{\omega_r L_s} \sin \omega_r(t - t_8) \quad (2.127)$$

$$v_{Cs} = V_{Cs8} - V_{Cs8} \cos \omega_r(t - t_8) + L_s \omega_r I_{rr} \sin \omega_r(t - t_8) \quad (2.128)$$

ifadeleri geçerlidir ve bu aralığın sonunda;

$$i_{LS} = i_{S1} = I_{LS9} = 0 \quad (2.129)$$

$$v_{Cs} = V_{Cs9} = V_{Cs0} \quad (2.130)$$

eşitlikleri mevcuttur [7].

$t=t_9$ anında $i_S=0$, $i_{LS}=i_{S1}=I_{LS9}=0$, $i_{DF}=0$, $v_{Cr}=V_{CS8}$ ve $v_{CS}=V_{CS9}=V_{CS0}$ 'dır. Bu aralık boyunca C_r lineer olarak giriş akımı ile şarj olur. Bu aralık için;

$$v_{Cr} = V_{CS9} + \frac{I_i}{C_r}(t - t_9) \quad (2.131)$$

ifadesi yazılabilir. t_{10} anında C_r uçlarındaki gerilimin V_0 gerilimine ulaşmasıyla D_F diyotu ZVS ile ilettime geçer ve bu aralık sonlanır [7].

$t=t_{10}$ anında, $i_S=0$, $i_{LS}=i_{S1}=0$, $i_{DF}=0$, $v_{Cr}=V_0$ ve $v_{CS}=V_{CS0}$ 'dır. $t_{10} < t < t_{11} = t_0$ aralığı normal yükseltici dönüştürücünün kesim aralığıdır ve bu aralık boyunca D_F diyotu I_i akımını iletmeye devam eder ve bastırma hücresi aktif değildir. Bu aralığın süresi DGA kontrolü ile belirlenir ve $i_{DF}=I_i$ eşitliği yazılabilir. $t=t_{11}=t_0$ anında bir anahtarlama periyodu tamamlanır ve diğer anahtarlama periyodu başlar [7].

2.6.2. Bastırma hücresinin tasarımı

Bastırma hücresinin tasarımı yapılırken;

- C_r kondansatörünün ana anahtarın ve devredeki diğer parazitik kapasitelerin toplamı olduğu,
- Ana anahtarda giriş akımının 3 katına kadar ilave akım stresinin kabul edilebileceği,
- C_S kondansatörünün başlangıç geriliminin rezonans devresindeki kayıplara bağlı olduğu ve basitleştirmek için bu kayıpların hesaba katılmadığı,
- Ana anahtarın ZCT ile kesime girme süresinin ana anahtarın düşme zamanından uzun olduğu kabulleri yapılır ve;

$$\frac{V_0 - V_{cS1}}{L_S} t_{r2} \leq I_{i \max} \quad (2.132)$$

eşitliğindeki şartın sağlanması hedeflenir. Burada t_{r2} yardımcı anahtarın yükselme zamanıdır. V_{cS1} , t_{r2} boyunca sabit varsayılır [7].

Bu bölümde anlatılan yumuşak anahtarlama tekniklerinin genel bir özeti Tablo 2.1’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Yumuşak anahtarlama tekniklerinin özellikleri

Özellik	Pasif ZVS ZCS	Temel ZCT	Temel ZVT	Geliştirilmiş ZCT	Geliştirilmiş ZVT	ZVZCT
Ana anahtar iletme girme	ZCS	HS	ZVT	ZCS	ZVT	ZVT
Ana anahtar kesime girme	ZVS	ZCT	ZVS	ZCT	ZVS	ZCT
Yardımcı anahtar iletme girme	-	ZCS	ZCS	ZCS	ZCS	ZCS
Yardımcı anahtar kesime girme	-	HS	HS	ZCS	ZVS	ZCT
Ana diyot iletme girme	ZVS	ZVS	ZVS	ZVS	ZVS	ZVS
Ana diyot kesime girme	ZCS ZVS	HS	ZCS	ZCS	ZVS	ZCS
Akım stresi	Az	Yüksek	Az	Hayır	Hayır	Hayır
Gerilim stresi	Yüksek	Az	Hayır	Yüksek	Hayır	Hayır
Bastırma hücresinde kullanılan eleman sayısı	6	4	5	4	6	3

Tablo 2.1’den de görüleceği üzere ana anahtarın ZVT ile ilettime geçmesi, ZCT ile kesime girmesi, bütün yarı iletken elemanlarının yumuşak anahtarlama ile çalışması, akım ve gerilim streslerinin olmaması ve bastırma hücresinde kullanılan eleman sayısının az olması sebepleri ile ZVZCT yumuşak anahtarlama tekniği öne çıkmaktadır.

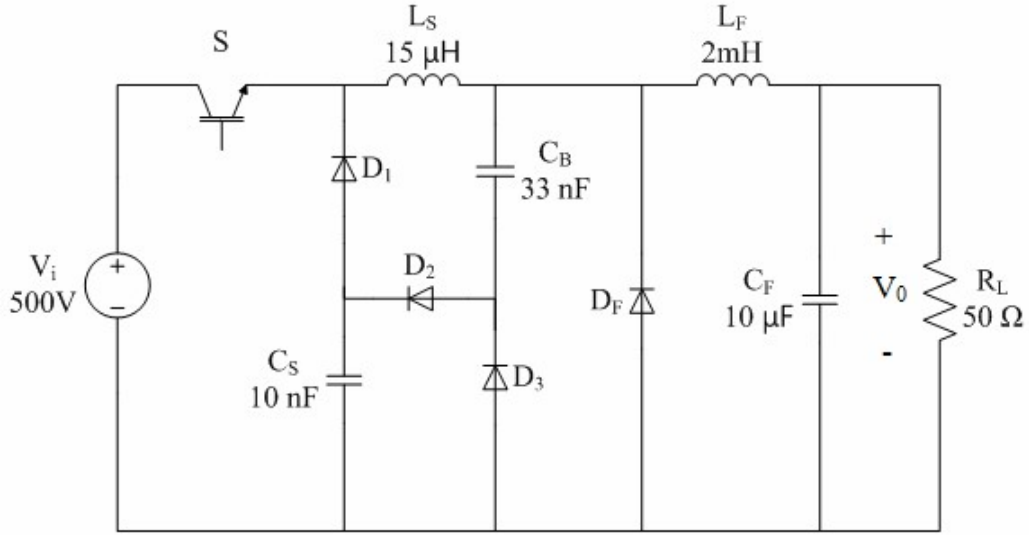


3. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

Bölüm 2’de ayrıntılı bir şekilde anlatılan yumuşak anahtarlama tekniklerini içeren DA-DA düşürücü ve DA-DA yükseltici dönüştürücüler bir simülasyon programı ile simülasyon ortamında oluşturularak çalışmaları incelenmiştir.

3.1. ZVS ve ZCS Pasif Bastırma Hücreli DA-DA Dönüştürücü Simülasyonu

Bölüm 2’de anlatılan pasif bastırma hücreli düşürücü DA-DA DGA dönüştürücünün çalışmasını incelemek için, Şekil 3.1’de görülen IGBT ana anahtarlı düşürücü DA-DA dönüştürücü simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir.



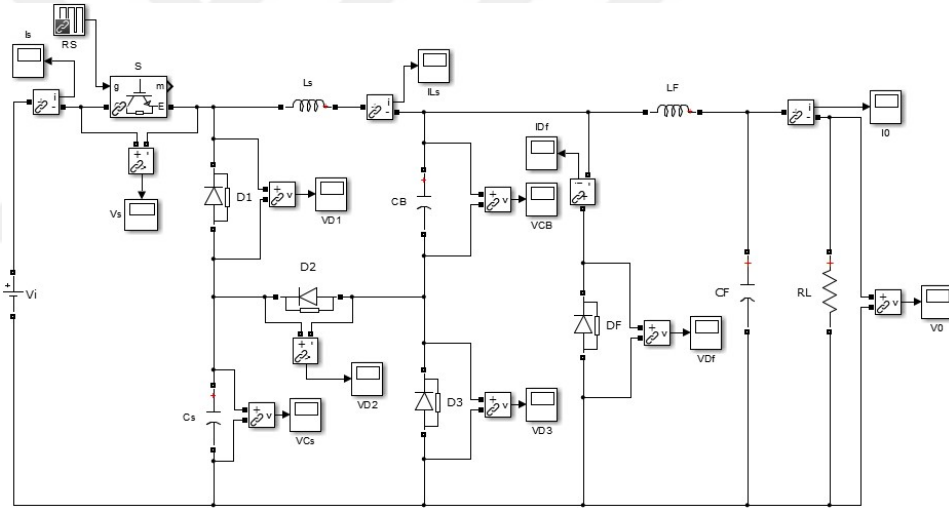
Şekil 3.1. Simülasyon çalışmasında da kullanılan pasif bastırma hücreli düşürücü DA-DA dönüştürücü devresi [11]

Simülasyonda gerçekleştirilen dönüştürücüde kullanılan yarı iletken devre elemanlarını gerçeğe benzetmek amacıyla Tablo 3.1’de verilen yarı iletkenlere ait üretici firma kataloglarından elde edilen yükselme süresi (t_r), düşme süresi (t_f) ve ters toparlanma süresi (t_{rr}) bilgileri kullanılmıştır [11].

Tablo 3.1. Dönüştürücüde kullanılan yarı iletken elemanlara ait bilgiler

Devre Elemanı	t_r (ns)	t_f (ns)	t_{rr} (ns)
S	150	700	-
D_F	-	-	50
D_1, D_2, D_3	-	-	60

Şekil 3.1’de gösterilen devrenin simülasyon ortamındaki görüntüsü Şekil 3.2’de yer almaktadır. Devrenin simülasyonu gerçekleştirilirken doluluk oranı (D) 0,5 ve 0,75 olarak seçilmiştir.



Şekil 3.2. Pasif bastırma hücreli düşürücü DA-DA dönüştürücünün simülasyon görüntüsü

ZVS ve ZCS pasif bastırma hücreli DA-DA dönüştürücünün 0,5 doluluk oranında gerçekleştirilen simülasyonu sonucunda elde edilen S ana anahtar akım (I_S) ve gerilim (V_S), D_F ana diyotu akım (I_{DF}) ve gerilim (V_{DF}), çıkış akımı (I_O), gerilimi (V_O) ve çıkış gücü (P_O) dalga şekilleri Şekil 3.3’te, L_S bastırma bobini akımı (I_{L_S}), C_S bastırma kondansatörü gerilimi (V_{CS}), C_B tampon kondansatörü gerilimi (V_{CB}), D_1 , D_2 , D_3 yardımcı diyotlarının gerilimleri (V_{D1} , V_{D2} , V_{D3}) dalga şekilleri Şekil 3.4’te; 0,75 doluluk oranında gerçekleştirilen simülasyonu sonucunda elde edilen S ana anahtar akım (I_S) ve gerilim (V_S), D_F ana diyotu akım (I_{DF}) ve gerilim (V_{DF}), çıkış akımı (I_O), gerilimi (V_O) ve çıkış gücü (P_O) dalga şekilleri Şekil 3.5’te, L_S bastırma

bobini akımı (I_{LS}), C_S bastırma kondansatörü gerilimi (V_{CS}), C_B tampon kondansatörü gerilimi (V_{CB}), D_1 , D_2 ve D_3 yardımcı diyotlarının gerilimleri (V_{D1} , V_{D2} , V_{D3}) dalga şekilleri Şekil 3.6’da yer almaktadır.

Simülasyon sonucunda, pasif bastırma hücreli ve hücresiz dönüştürücünün S ana anahtarının üzerinde harcanan enerjinin gösterildiği grafikler Şekil 3.7’de yer almaktadır.

Grafikler üzerinden;

$$E = \int_0^T P dt = P \Delta t \quad (3.1)$$

bağıntısı yardımıyla, pasif bastırma hücreli dönüştürücüde $D=0,5$ doluluk oranında ana anahtar üzerinde harcanan güç;

$$P = \frac{E}{\Delta t} = \frac{0,093}{0,05 - 0,04} = 9,3W \quad (3.2)$$

$D=0,5$ için bastırma hücresiz dönüştürücüde ana anahtar üzerinde harcanan güç;

$$P = \frac{E}{\Delta t} = \frac{0,586}{0,05 - 0,04} = 58,6W \quad (3.3)$$

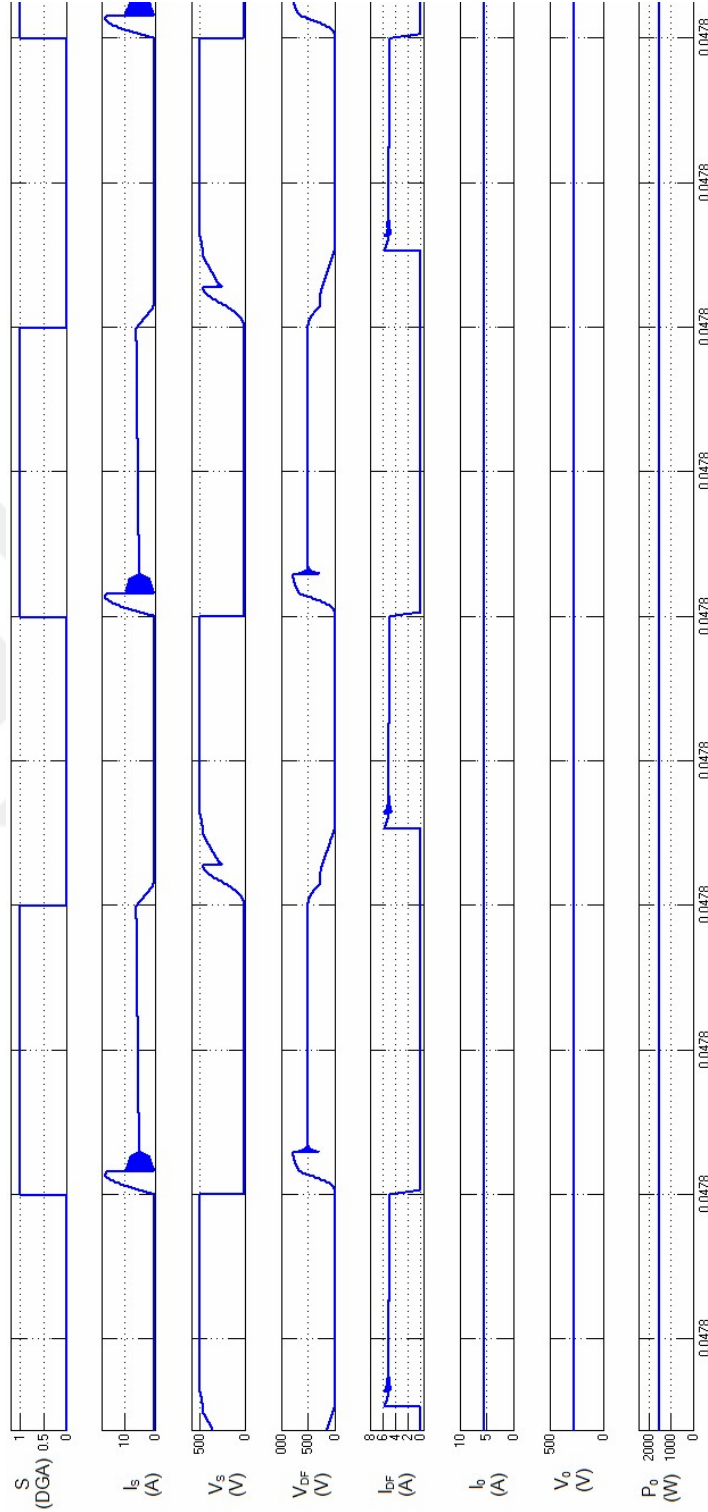
$D=0,75$ için bastırma hücreli dönüştürücüde ana anahtar üzerinde harcanan güç;

$$P = \frac{E}{\Delta t} = \frac{0,164}{0,05 - 0,04} = 16,4W \quad (3.4)$$

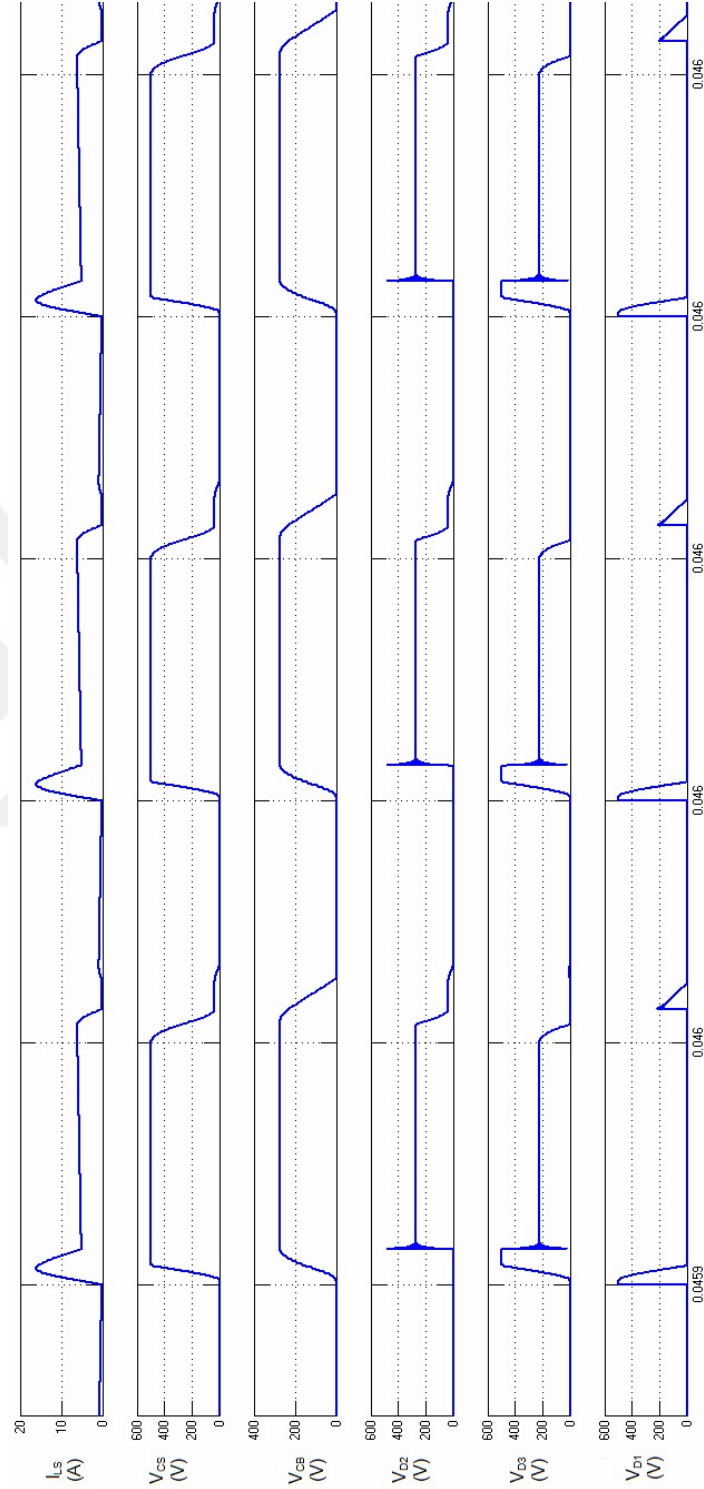
$D=0,75$ için bastırma hücresiz dönüştürücüde ana anahtarda harcanan güç;

$$P = \frac{E}{\Delta t} = \frac{0,839}{0,05 - 0,04} = 83,9W \quad (3.5)$$

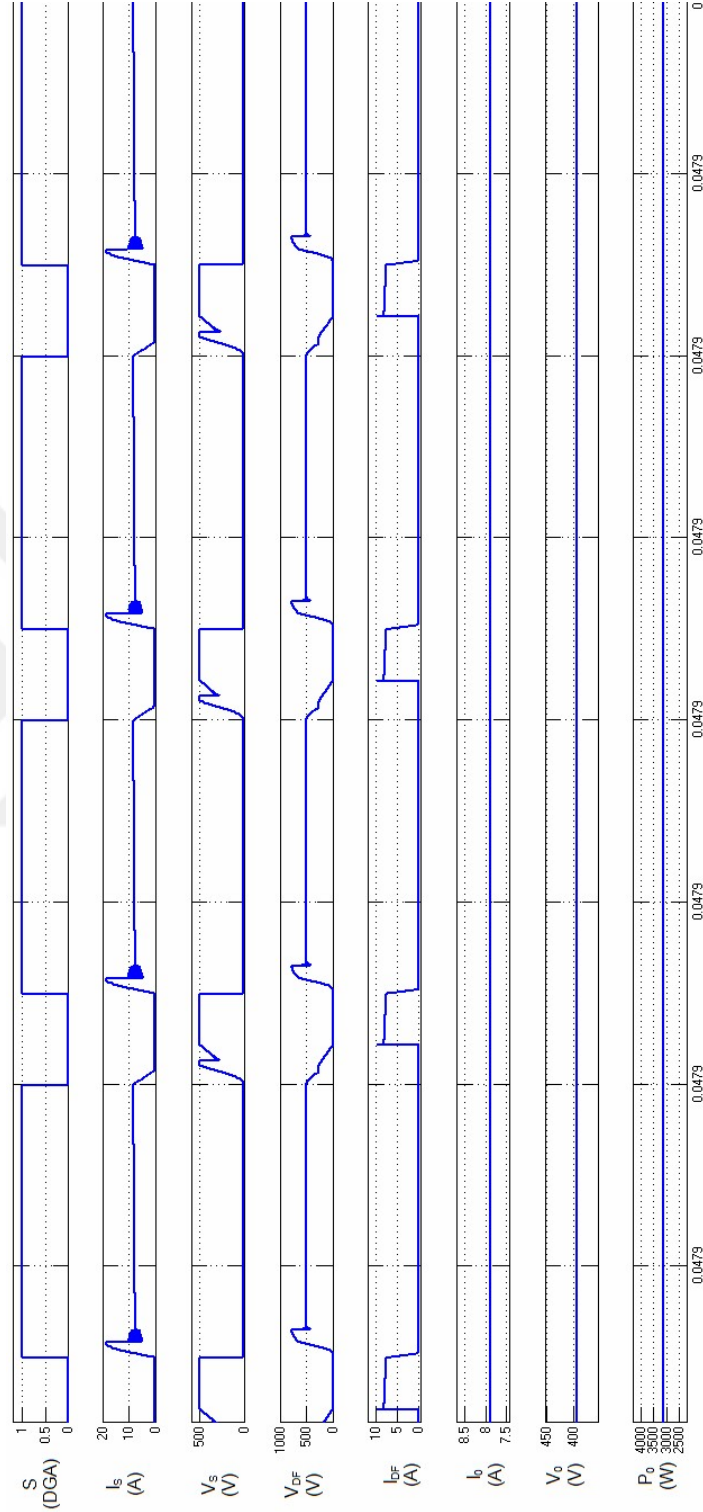
olarak hesaplanmıştır. Dönüştürücüde pasif bastırma hücresi kullanılarak ana anahtar üzerinde harcanan güç $D=0,5$ için % 84,1 ve $D=0,75$ için % 80,4 oranında azaltılmıştır.



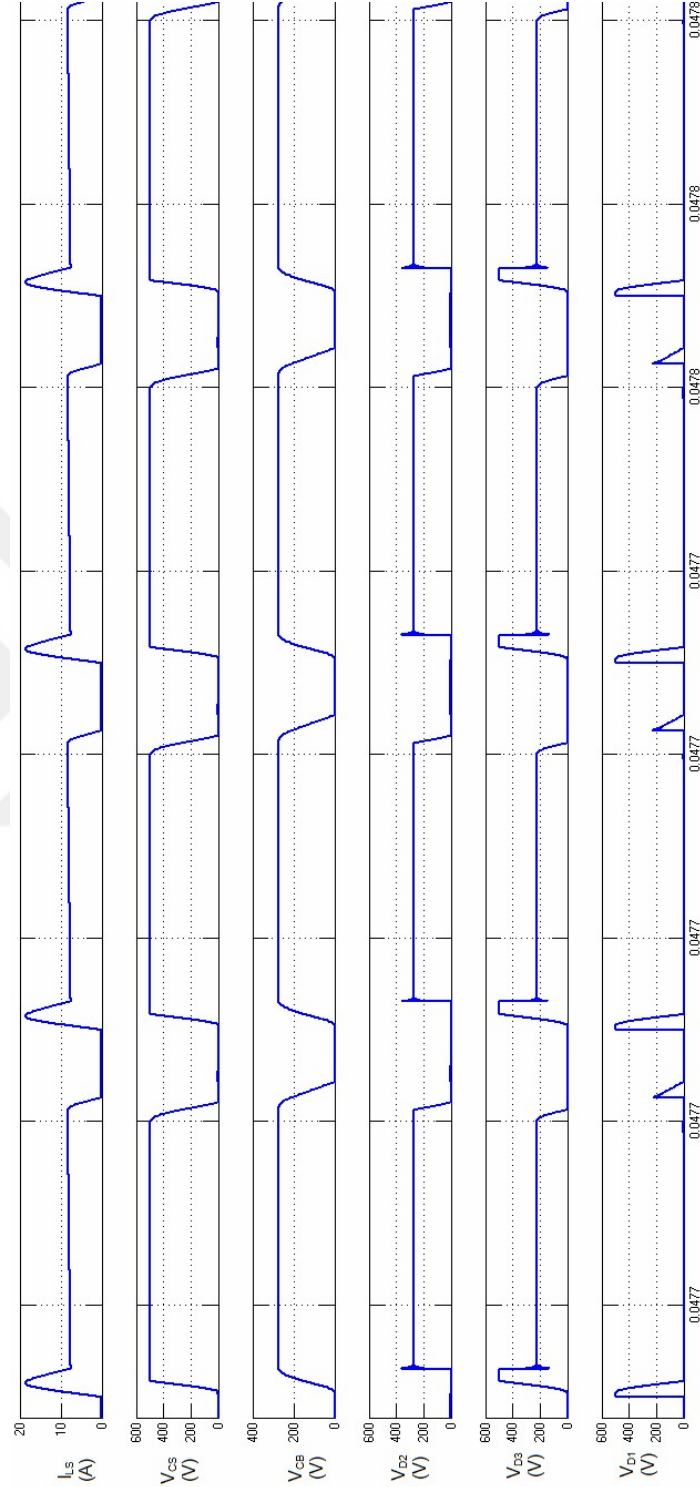
Şekil 3.3. $D=0,5$ için S anahtarı akım (I_S) ve gerilim (V_S), D_F ana diyotu akım (I_{DF}) ve gerilim (V_{DF}), çıkış akımı (I_O), çıkış gerilimi (V_O), çıkış gücü (P_O) simülasyon dalga şekilleri



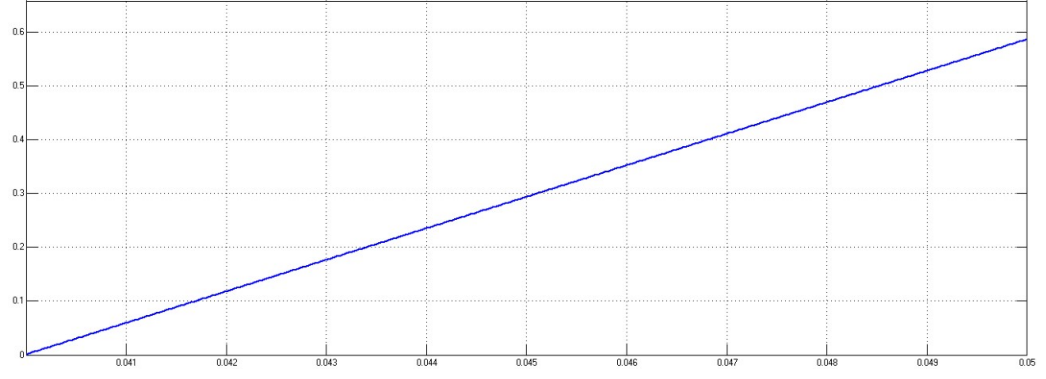
Şekil 3.4. $D=0,5$ için L_S bastırma bobini akımı (I_{L_S}), C_S bastırma kondansatörü gerilimi (V_{C_S}), C_B tampon kondansatörü gerilimi (V_{C_B}), D_1 , D_2 ve D_3 yardımcı diyotlarının gerilimleri (V_{D_1} , V_{D_2} , V_{D_3}) simülasyon dalga şekilleri



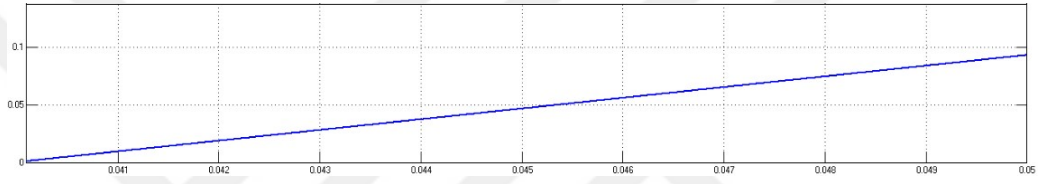
Şekil 3.5. $D=0,75$ için S ana anahtarı akım (I_S) ve gerilim (V_S), D_F ana diyotu akımı (I_{DF}) ve gerilim (V_{DF}), çıkış akımı (I_o), çıkış gerilimi (V_o), çıkış gücü (P_o) simülasyon dalga şekilleri



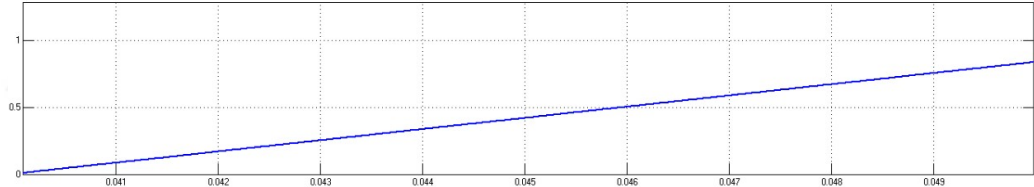
Şekil 3.6. $D=0,75$ için L_S bastırma bobini akımı (I_{L_S}), C_S bastırma kondansatörü gerilimi (V_{C_S}), C_B tampon kondansatörü gerilimi (V_{C_B}), D_1 , D_2 ve D_3 yardımcı diyotlarının gerilimleri (V_{D_1} , V_{D_2} , V_{D_3}) simülasyon dalga şekilleri



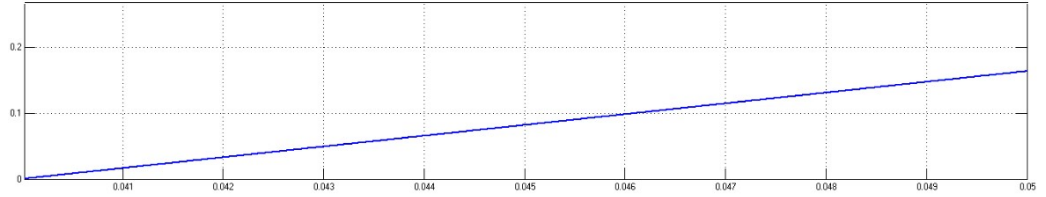
(a)



(b)



(c)

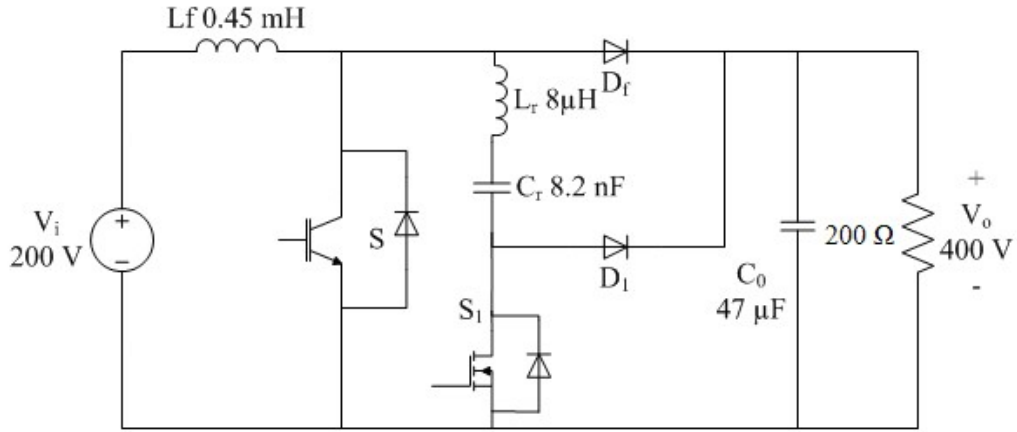


(ç)

Şekil 3.7. Ana anahtar üzerinde harcanan enerji grafikleri a) $D=0,5$ için bastırma hücresiz, b) $D=0,5$ için bastırma hücreli, c) $D=0,75$ için bastırma hücresiz, ç) $D=0,75$ için bastırma hücreli

3.2. Temel ZCT Aktif Bastırma Hücreli DA-DA Dönüştürücü Simülasyonu

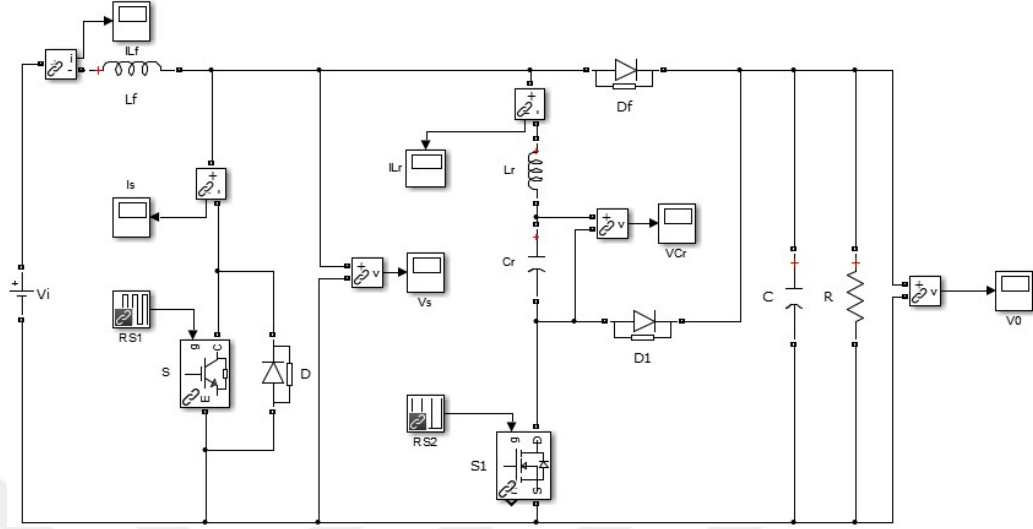
Bölüm 2’de anlatılan temel ZCT aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA DGA dönüştürücünün çalışmasını incelemek için, Şekil 3.8’de görülen IGBT ana anahtarlı yükseltici DA-DA dönüştürücü simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.8. Simülasyon çalışmasında kullanılan ZCT aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi [2]

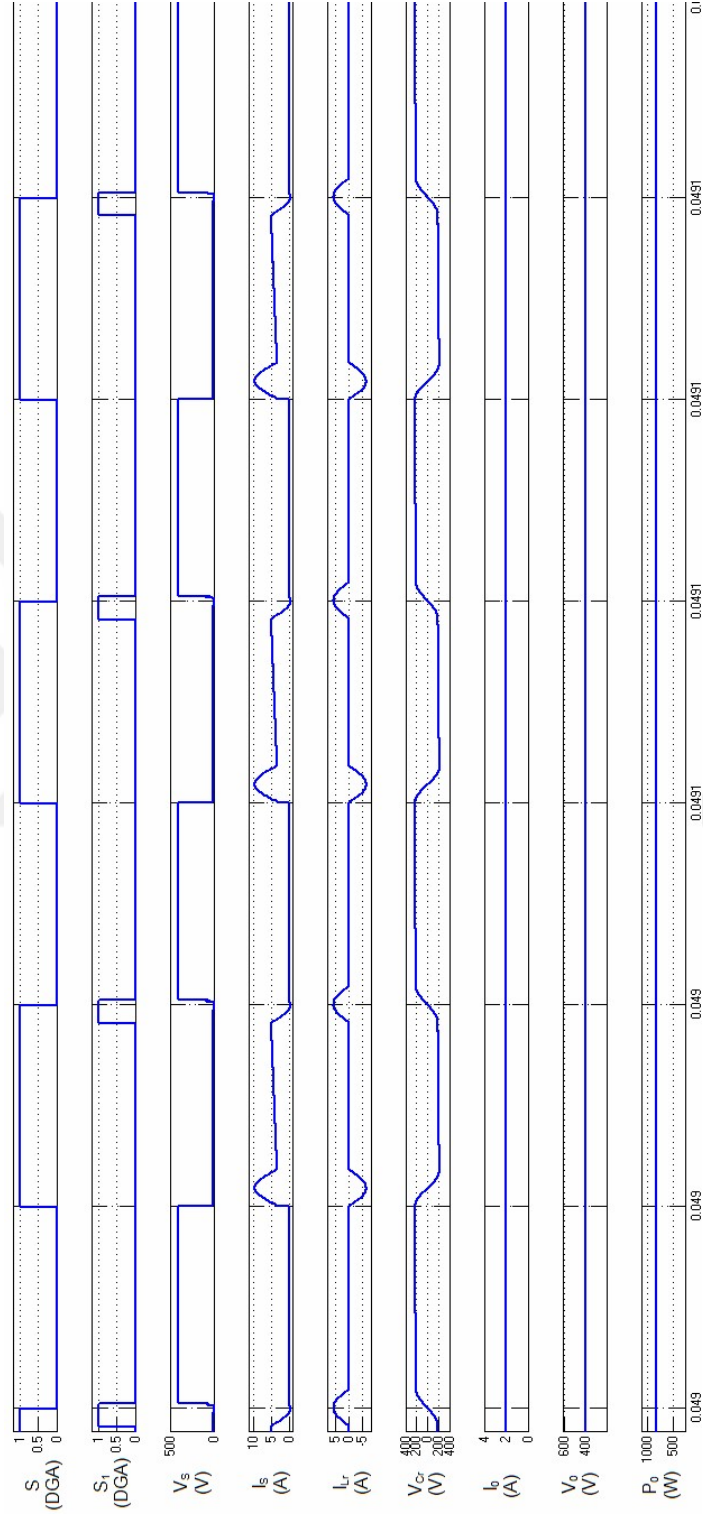
Simülasyonda gerçekleştirilen dönüştürücüde kullanılan S ana anahtarını gerçeğe benzetmek amacıyla üretici firma kataloglarından anahtarın yükselme süresi (t_r) 37 ns ve düşme süresi (t_f) 420 ns olarak elde edilmiştir. L_r ve C_r değerleri sırasıyla 10 μ H ve 8,2 nF olarak seçilmiştir [2]. Şekil 3.8’de gösterilen devrenin simülasyon ortamındaki görüntüsü Şekil 3.9’da yer almaktadır. Devrenin simülasyonu gerçekleştirilirken doluluk oranı (D) 0,5 ve 0,6 olarak seçilmiştir.

Temel ZCT aktif bastırma hücreli DA-DA dönüştürücünün $D=0,5$ doluluk oranı için gerçekleştirilen simülasyonu sonucunda elde edilen S ana anahtarı akım (I_S) ve gerilim (V_S), L_r bobini akımı (I_{L_r}), C_r kondansatörü gerilimi (V_{C_r}), çıkış akımı (I_0), çıkış gerilim (V_0) ve çıkış gücü (P_0) dalga şekilleri Şekil 3.10’da; $D=0,6$ doluluk oranı için gerçekleştirilen simülasyonu sonucunda elde edilen S ana anahtarı akım (I_S) ve gerilim (V_S), L_r bobini akımı (I_{L_r}), C_r kondansatörü gerilimi (V_{C_r}), çıkış akımı (I_0), çıkış gerilim (V_0) ve çıkış gücü (P_0) dalga şekilleri Şekil 3.11’de yer almaktadır.

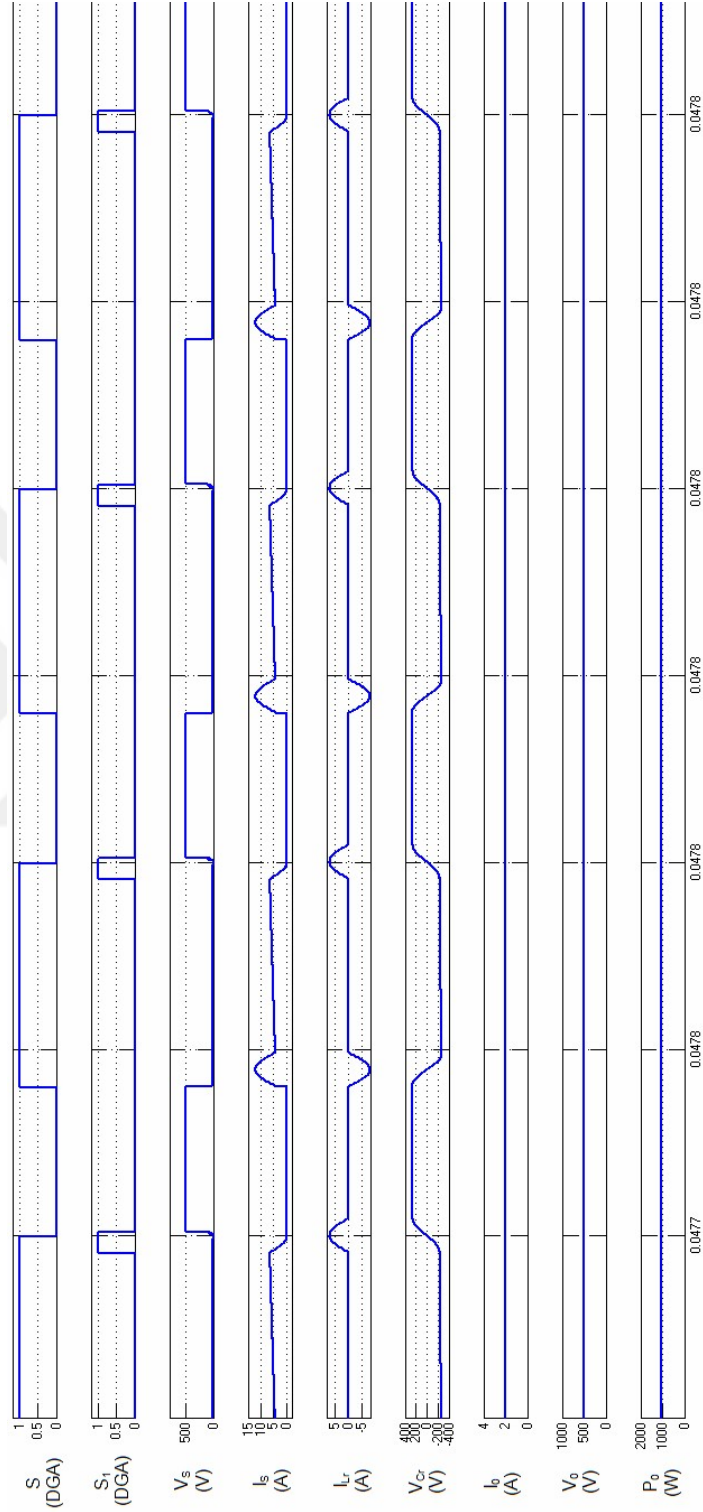


Şekil 3.9. ZCT Aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA dönüştürücünün simülasyon görüntüsü

Denklem (3.1) ve Denklem (3.2) yardımıyla simülasyonda aktif bastırma hücreli dönüştürücüde $D=0,5$ doluluk oranında ana anahtar üzerinde harcanan güç 3,94 W, bastırma hücresiz dönüştürücüde harcanan güç 52,7 W; $D=0,6$ doluluk oranında ana anahtar üzerinde harcanan güç 5,6 W, bastırma hücresiz dönüştürücüde harcanan güç 81,3 W olarak elde edilmiştir. Dönüştürücüde aktif bastırma hücresi kullanılarak ana anahtar üzerinde harcanan güç $D=0,5$ için % 92,5 oranında, $D=0,6$ için % 93,1 oranında azaltılmıştır.



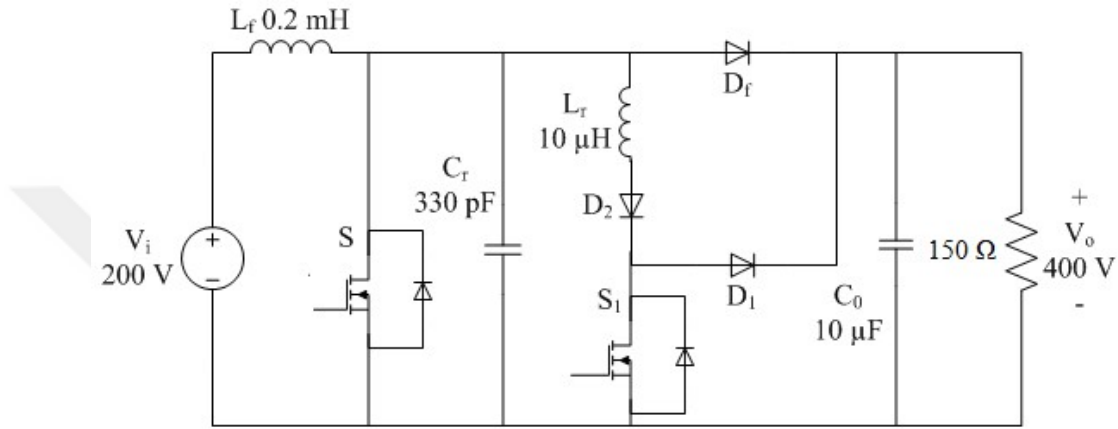
Şekil 3.10. $D=0,5$ için S anahtarı akım (I_S) ve gerilim (V_S), L_r bobini akım (I_{Lr}), C_r kondansatörü gerilimi (V_{Cr}), çıkış akımı (I_o), çıkış gerilimi (V_o) çıkış gücü (P_o) simülasyon dalga şekilleri



Şekil 3.11. $D=0,6$ için S anahtarı akım (I_S) ve gerilim (V_S), L_r bobini akım (I_{Lr}), C_r kondansatörü gerilimi (V_{Cr}), çıkış akımı (I_0), çıkış gerilimi (V_0) çıkış gücü (P_0) simülasyon dalga şekilleri

3.3. Temel ZVT Aktif Bastırma Hücreli DA-DA Dönüştürücü Simülasyonu

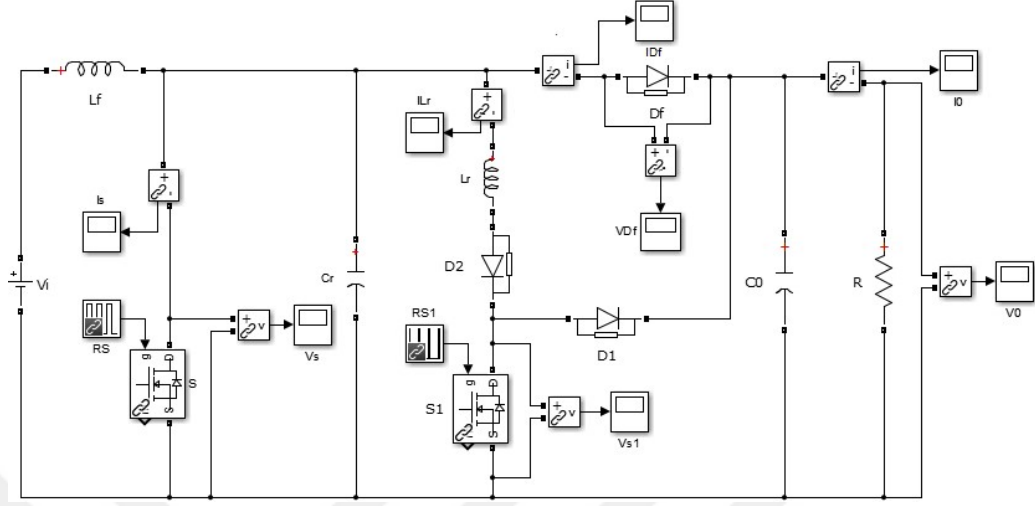
Bölüm 2’de anlatılan temel ZVT aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA DGA dönüştürücünün çalışmasını incelemek için, Şekil 3.12’de görülen MOSFET ana anahtarlı yükseltici DA-DA dönüştürücü simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.12. Simülasyon çalışmasında kullanılan ZVT aktif bastırma hücreli yükseltici dönüştürücü devresi [5]

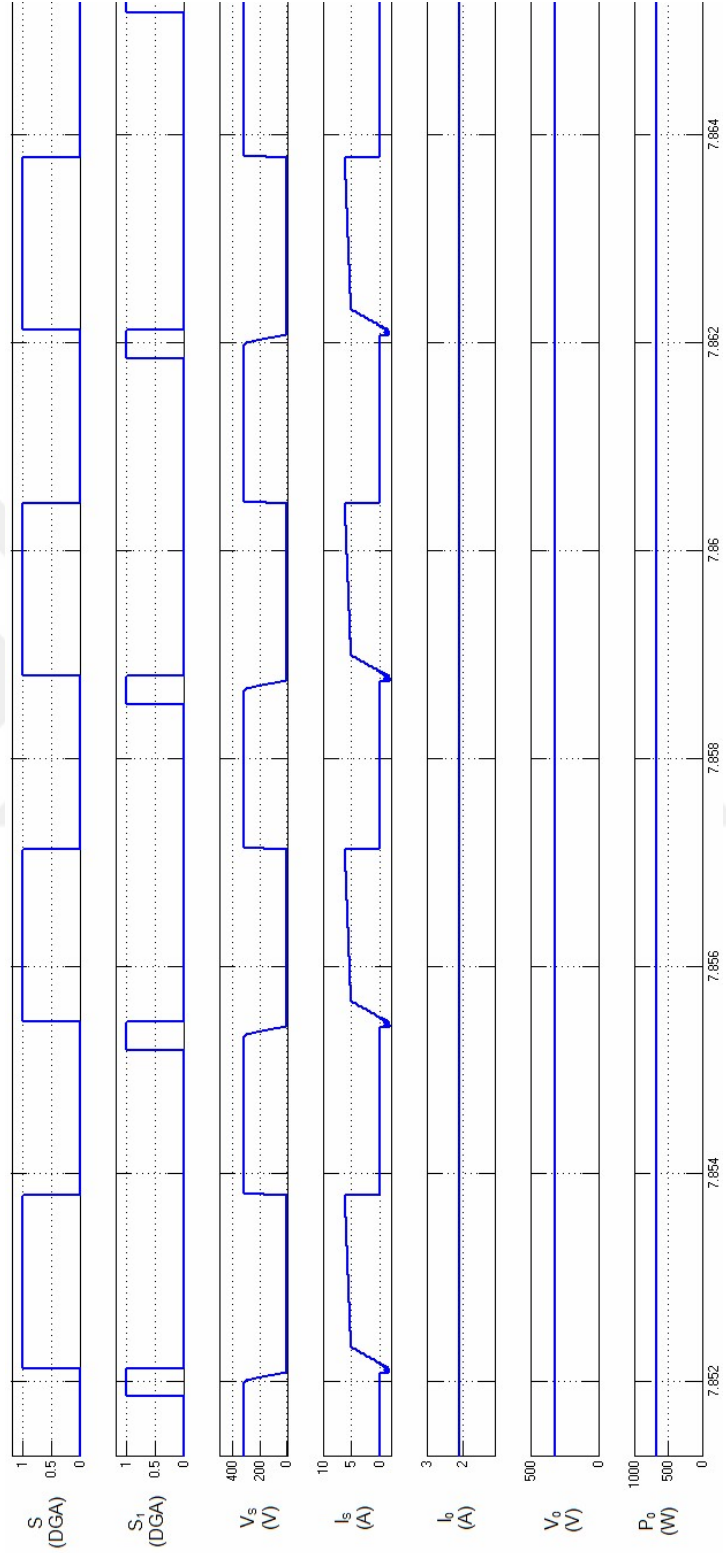
Simülasyonda gerçekleştirilen dönüştürücüde S ana anahtarı olarak MOSFET kullanılmıştır. L_r ve C_r değerleri sırasıyla 10 μ H ve 330 pF olarak seçilmiştir [5]. Şekil 3.12’de gösterilen devrenin simülasyon ortamındaki görüntüsü Şekil 3.13’te yer almaktadır. Devrenin simülasyonu gerçekleştirilirken doluluk oranı (D) 0,5 ve 0,6 olarak seçilmiştir.

Temel ZVT aktif bastırma hücreli DA-DA dönüştürücünün D=0,5 doluluk oranı için gerçekleştirilen simülasyonu sonucunda elde edilen S ana anahtar akım (I_S) ve gerilim (V_S), çıkış akım (I_0), gerilim (V_0) ve çıkış gücü (P_0) dalga şekilleri Şekil 3.14’te, D_F ana diyotu gerilim (V_{DF}) ve akım (I_{DF}) ile S_1 yardımcı anahtarı gerilim (V_{S1}), L_r bobini akımı (I_{Lr}) dalga şekilleri Şekil 3.15’te; D=0,6 doluluk oranı için gerçekleştirilen simülasyonu sonucunda elde edilen S ana anahtar akım (I_S) ve gerilim (V_S), çıkış akım (I_0), gerilim (V_0) ve çıkış gücü (P_0) dalga şekilleri Şekil 3.16’da, D_F ana diyotu gerilim (V_{DF}) ve akım (I_{DF}) ile S_1 yardımcı anahtarı gerilim (V_{S1}), L_r bobini akımı (I_{Lr}) dalga şekilleri Şekil 3.17’de yer almaktadır.

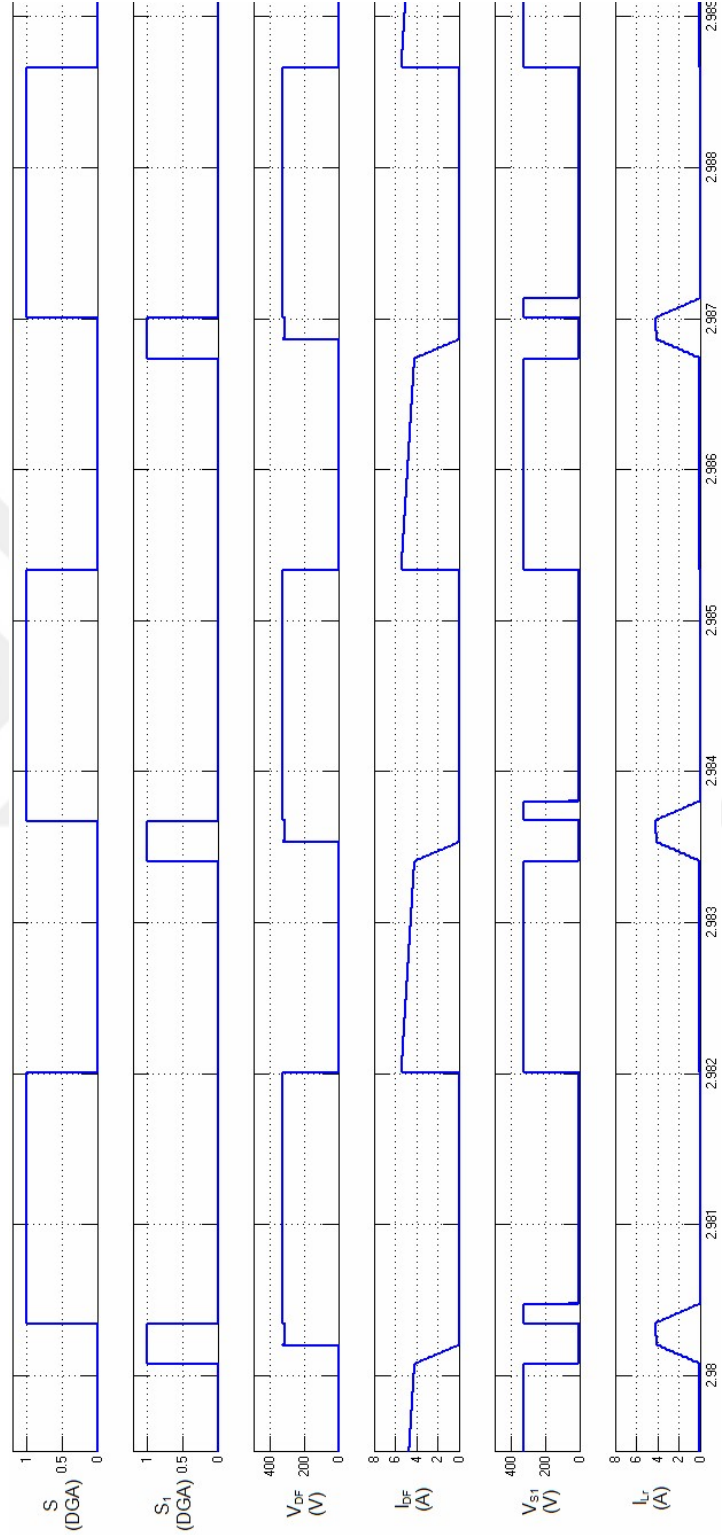


Şekil 3.13. ZVT aktif bastırma hücreli yükseltilici DA-DA dönüştürücünün simülasyon görüntüsü

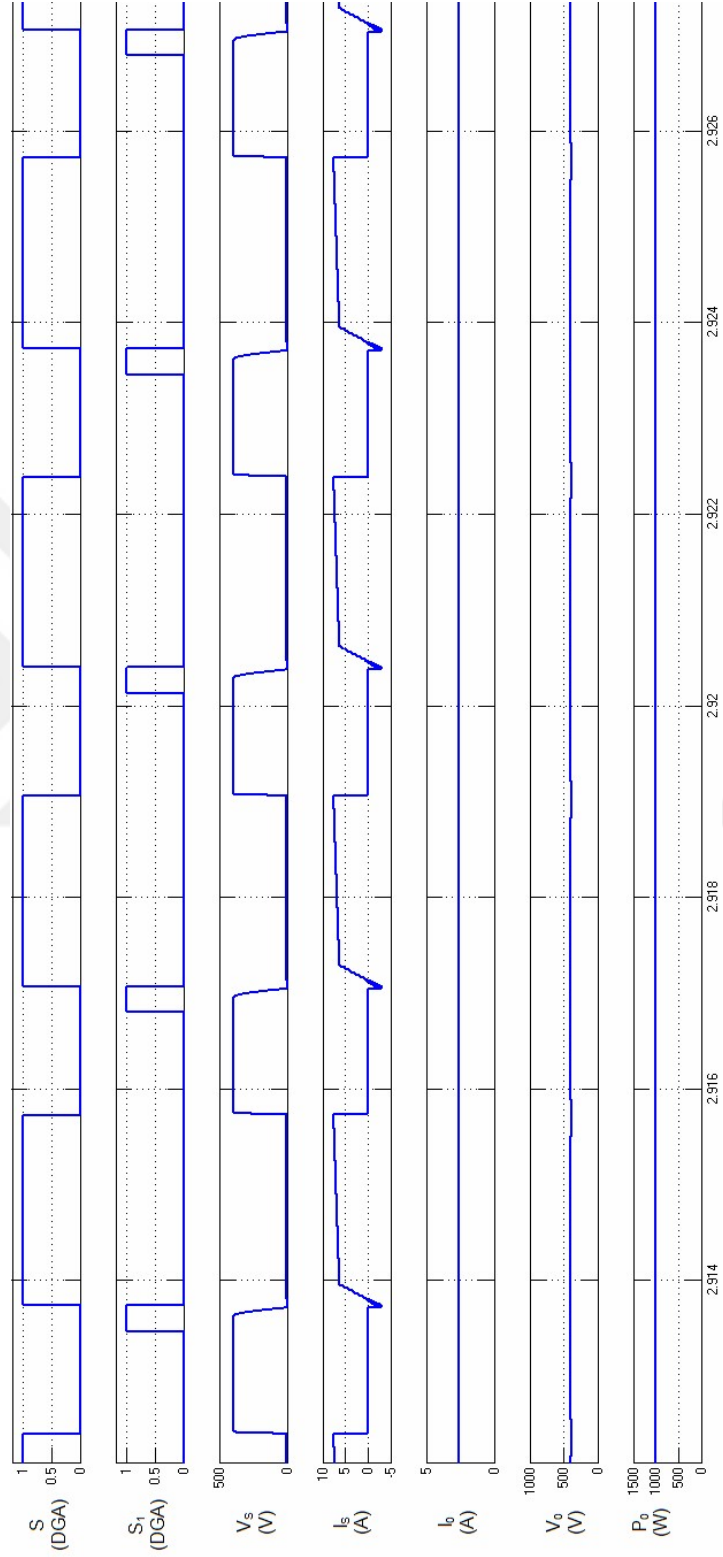
Denklem (3.1) ve Denklem (3.2) yardımıyla simülasyonda aktif bastırma hücreli dönüştürücüde $D=0,5$ doluluk oranında ana anahtar üzerinde harcanan güç 2,6 W, bastırma hücresiz dönüştürücüde harcanan güç 20,28 W; $D=0,6$ doluluk oranında ana anahtar üzerinde harcanan güç 3,18 W, bastırma hücresiz dönüştürücüde harcanan güç 28,58 W olarak elde edilmiştir. Dönüştürücüde aktif bastırma hücresi kullanarak ana anahtar üzerinde harcanan güç $D=0,5$ için % 87,2 oranında, $D=0,6$ için % 88,9 oranında azaltılmıştır.



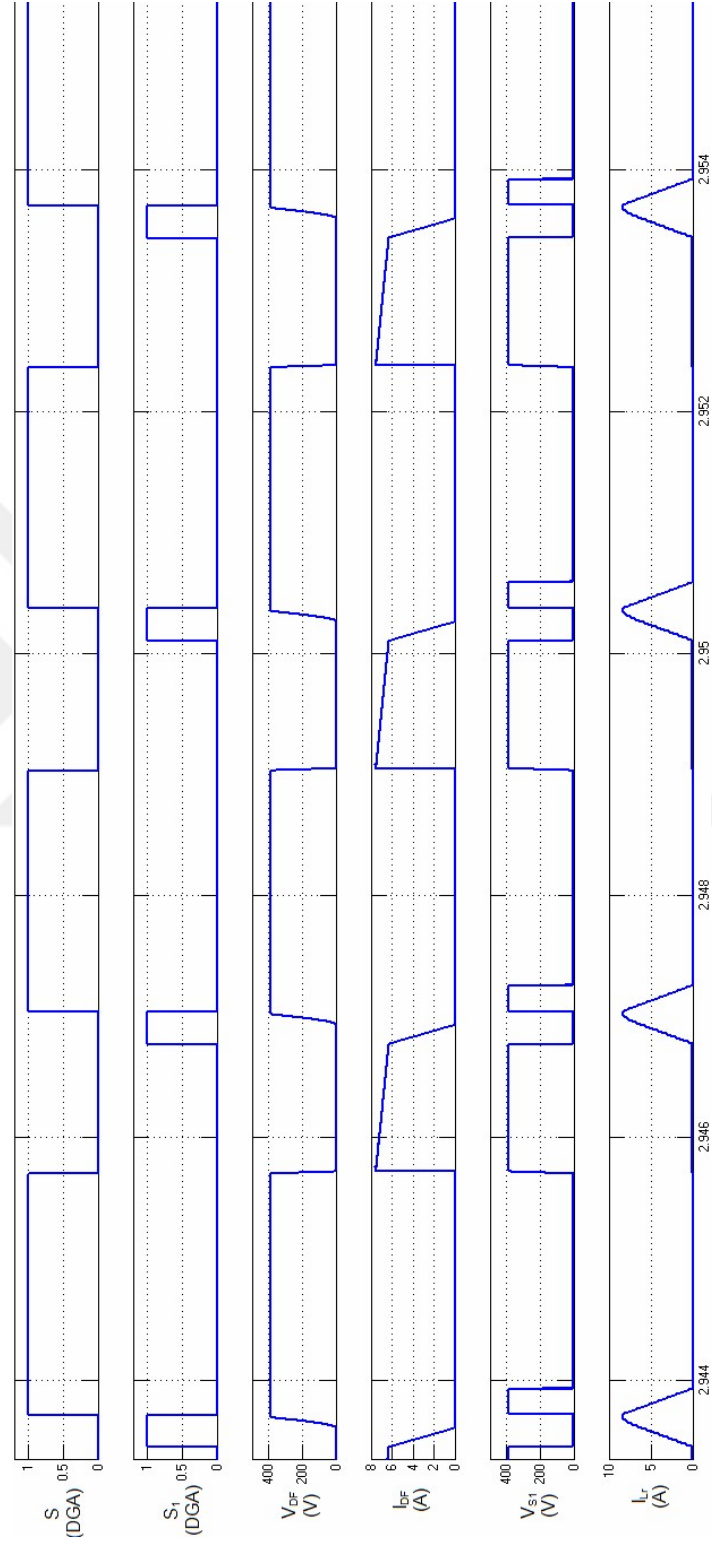
Şekil 3.14. $D=0,5$ için S ana anahtarı akım (I_S) ve gerilim (V_S), çıkış akımı (I_O), çıkış gerilimi (V_O), çıkış gücü (P_O) simülasyon dalga şekilleri



Şekil 3.15. $D=0,5$ için D_F ana diyotu akım (I_{DF}) ve gerilim (V_{DF}), S_1 yardımcı anahtar gerilimi (V_{S1}), L_r bobini akımı (I_{Lr}) simülasyon dalga şekilleri



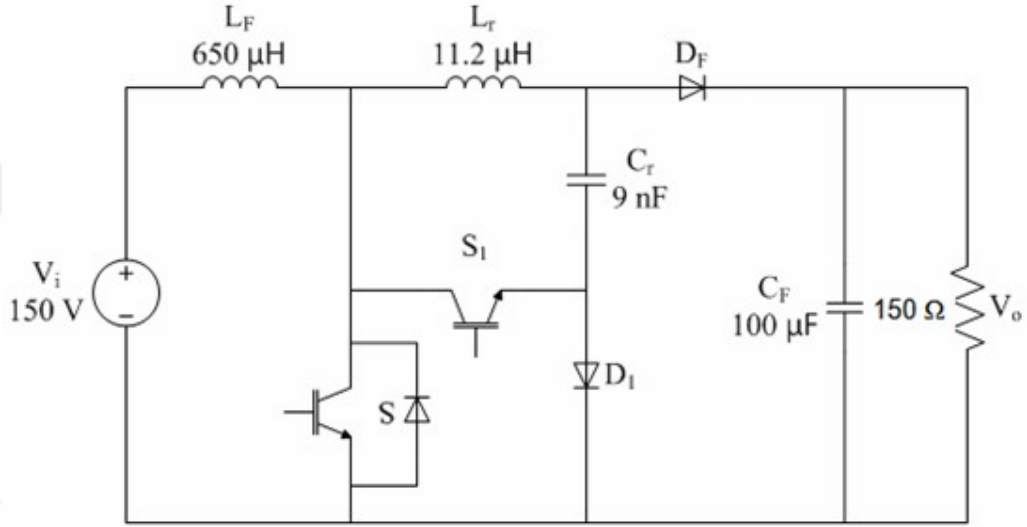
Şekil 3.16. $D=0,6$ için S ana anahtarı akım (I_S) ve gerilim (V_S), çıkış akımı (I_O), çıkış gerilimi (V_O), çıkış gücü (P_O) simülasyon dalga şekilleri



Şekil 3.17. $D=0,6$ için D_F ana diyotu akım (I_{DF}) ve gerilim (V_{DF}), S_1 yardımcı anahtar gerilimi (V_{S1}), L_r bobini akımı (I_{Lr}) simülasyon dalga şekilleri

3.4. Geliştirilmiş ZCT Aktif Bastırma Hücreli DA-DA Dönüştürücü Simülasyonu

Bölüm 2’de anlatılan geliştirilmiş ZCT aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA DGA dönüştürücünün çalışmasını incelemek için, Şekil 3.18’de görülen IGBT ana anahtarlı yükseltici DA-DA dönüştürücü simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir.

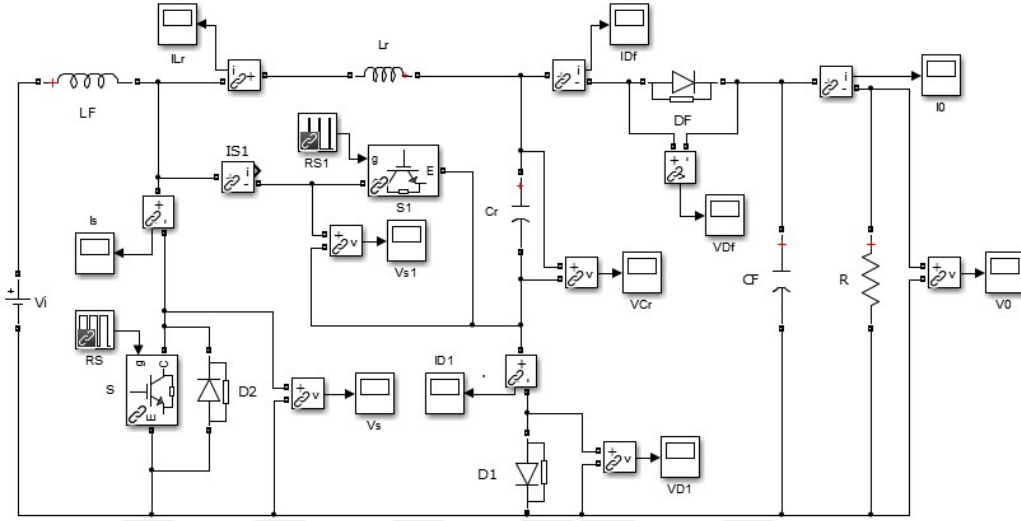


Şekil 3.18. Simülasyon çalışmasında kullanılan geliştirilmiş ZCT aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi [10]

L_r ve C_r değerleri sırasıyla $11.2 \mu\text{H}$ ve 9 nF olarak seçilmiştir [10]. Şekil 3.18’de gösterilen devrenin simülasyon ortamındaki görüntüsü Şekil 3.19’da yer almaktadır. Devrenin simülasyonu gerçekleştirilirken doluluk oranı (D) 0,5 ve 0,75 olarak seçilmiştir. Simülasyonda gerçekleştirilen dönüştürücüde kullanılan S ana anahtarı ve S_1 yardımcı anahtarına ait düşme süresi (t_f) 420 ns olarak alınmıştır.

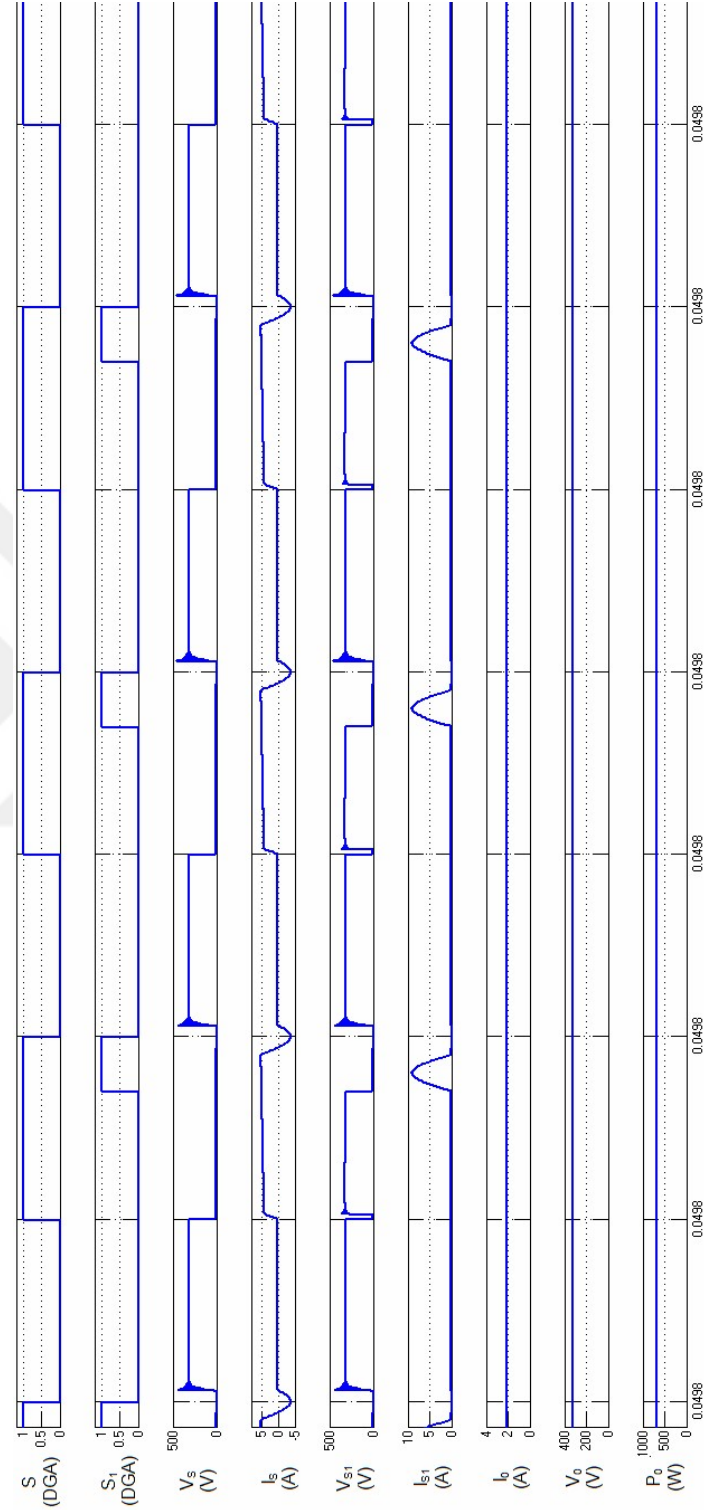
Geliştirilmiş ZCT aktif bastırma hücreli DA-DA dönüştürücünün $D=0,5$ doluluk oranı için gerçekleştirilen simülasyonu sonucunda elde edilen S ana anahtarı akım (I_S), gerilim (V_S) ile S_1 yardımcı anahtarın akım (I_{S1}) ve gerilim (V_{S1}), çıkış akımı (I_0), gerilimi (V_0), gücü (P_0) dalga şekilleri Şekil 3.20’de, L_r bobini akımı (I_{Lr}), C_r kondansatörü gerilimi (V_{Cr}), D_1 yardımcı diyotu akım (I_{D1}), gerilim (V_{D1}) ile D_F ana diyot akım (I_{DF}) ve gerilim (V_{DF}) dalga şekilleri Şekil 3.21’de; $D=0,75$ doluluk oranı için gerçekleştirilen simülasyonu sonucunda elde edilen S ana anahtarı akım (I_S), gerilim (V_S) ile S_1 yardımcı anahtarın akım (I_{S1}) ve gerilim (V_{S1}), çıkış akımı (I_0),

gerilimi (V_0), gücü (P_0) dalga şekilleri Şekil 3.22’de, L_r bobini akımı (I_{Lr}), C_r kondansatörü gerilimi (V_{Cr}), D_1 yardımcı diyotu akım (I_{D1}), gerilim (V_{D1}) ile D_F ana diyot akım (I_{DF}) ve gerilim (V_{DF}) dalga şekilleri Şekil 3.23’te yer almaktadır.

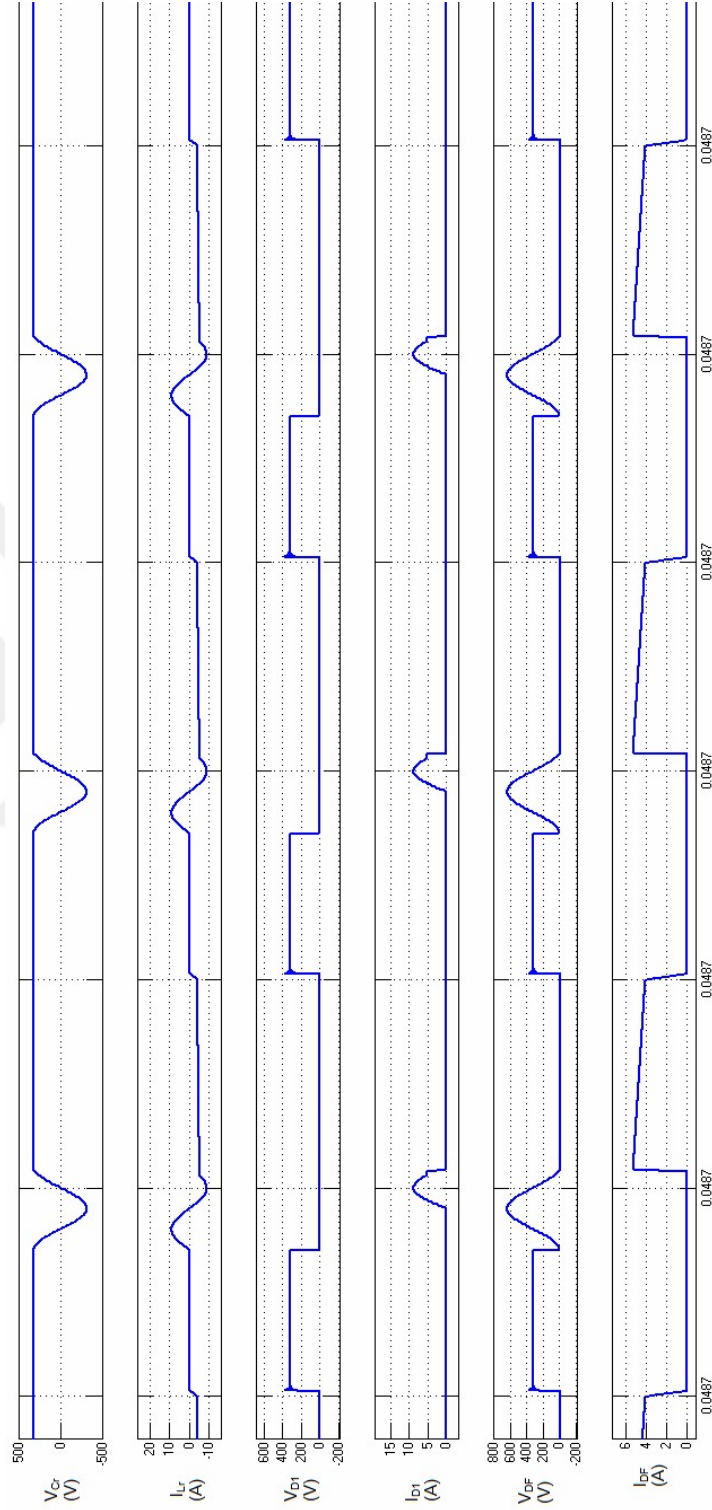


Şekil 3.19. Geliştirilmiş ZCT aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA dönüştürücünün simülasyon görüntüsü

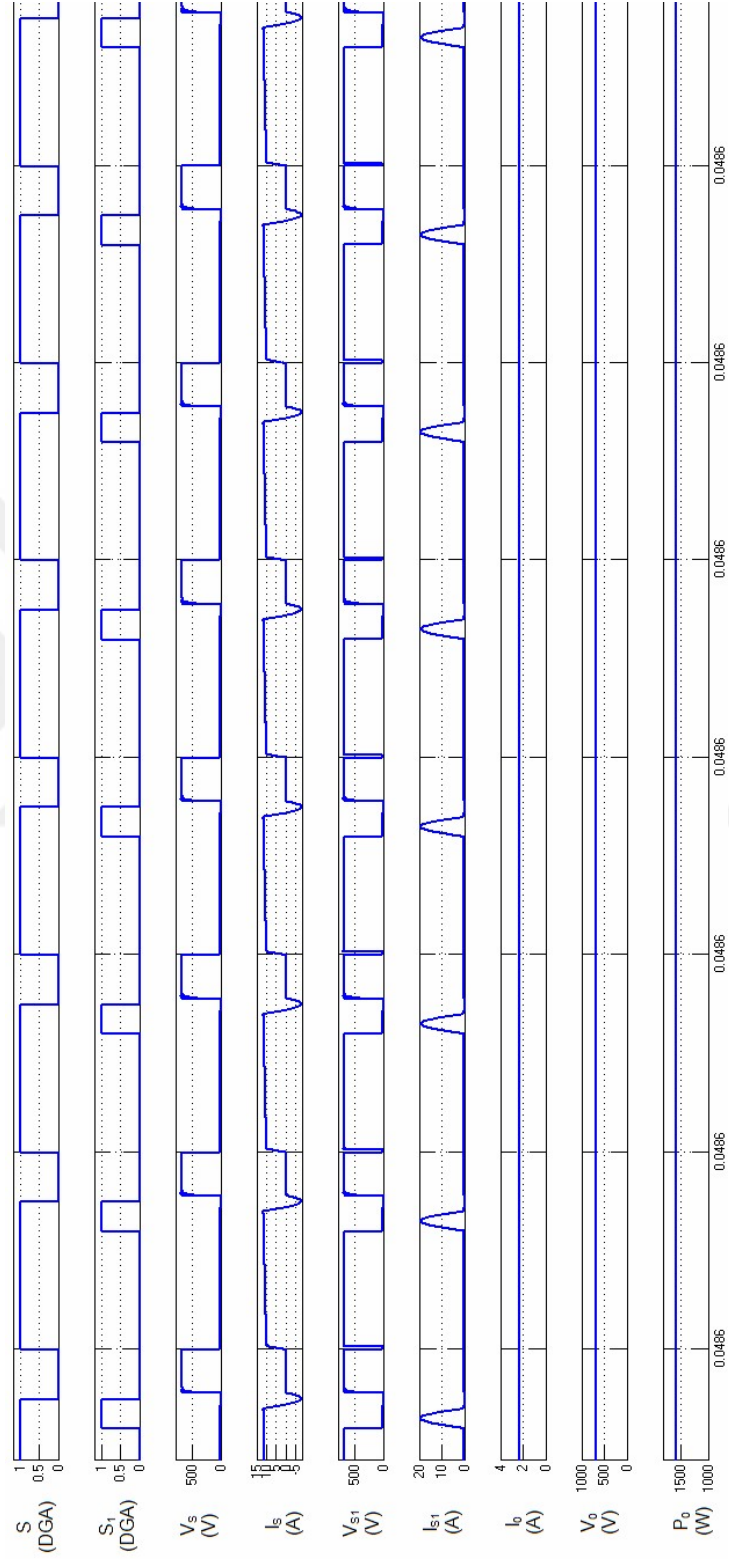
Denklem (3.1) ve Denklem (3.2) yardımıyla simülasyonda aktif bastırma hücreli dönüştürücüde $D=0,5$ doluluk oranında ana anahtar üzerinde harcanan güç 3,15 W, bastırma hücresiz dönüştürücüde harcanan güç 36,5 W; $D=0,75$ doluluk oranında ana anahtar üzerinde harcanan güç 9,86 W, bastırma hücresiz dönüştürücüde harcanan güç 159,5 W olarak elde edilmiştir. Dönüştürücüde aktif bastırma hücresi kullanılarak ana anahtar üzerinde harcanan güç $D=0,5$ için % 91,3 oranında, $D=0,75$ için % 93,8 oranında azaltılmıştır.



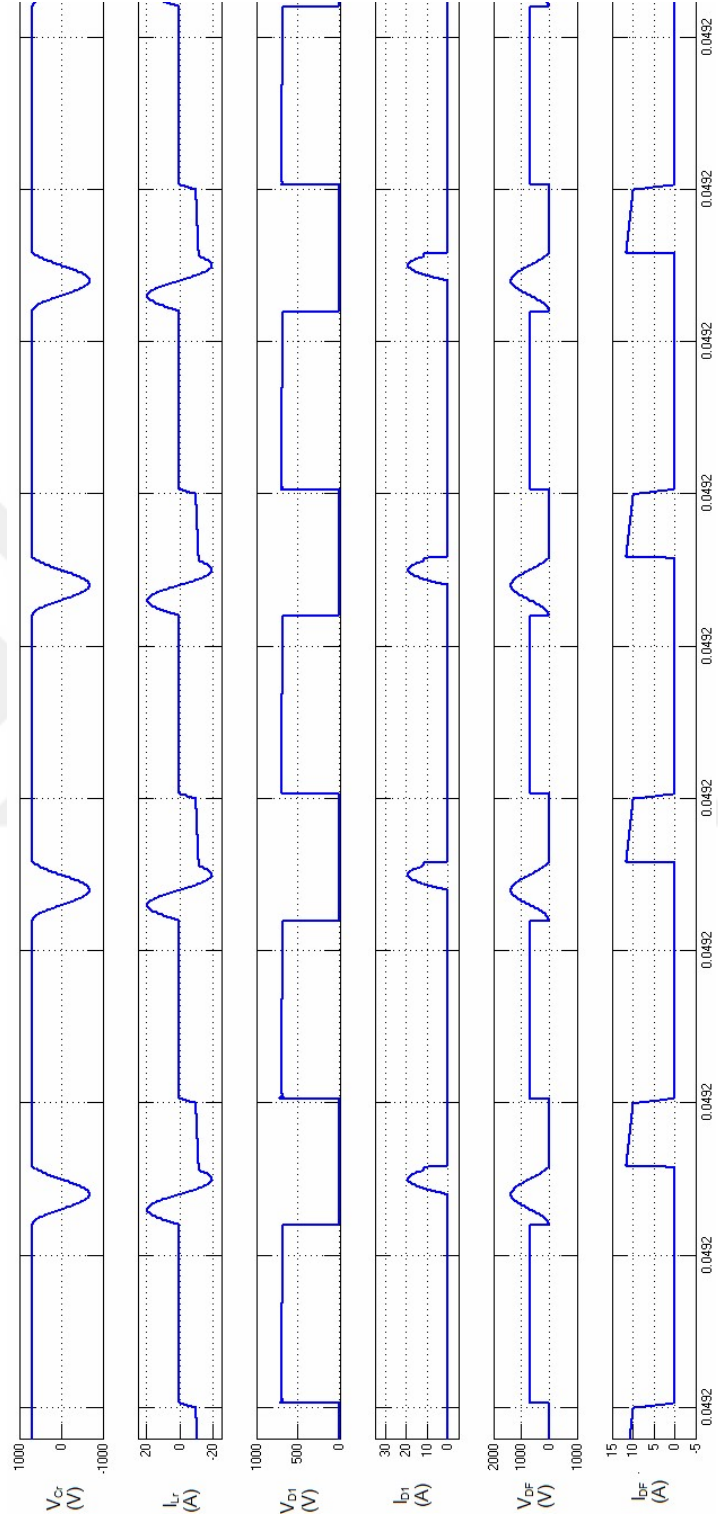
Şekil 3.20. $D=0,5$ için S ana anahtarın akım (I_S), gerilim (V_S) ile S_1 yardımcı anahtarın akım (I_{S1}) ve gerilim (V_{S1}), çıkış akımı (I_O), gerilimi (V_O), gücü (P_O) simülasyon dalga şekilleri



Şekil 3.21. $D=0,5$ için L_r bobini akımı (I_{Lr}), C_r kondansatörü gerilimi (V_{Cr}), D_1 yardımcı diyot akım (I_{D1}), gerilim (V_{D1}) ile D_F ana diyot akım (I_{DF}) ve gerilim (V_{DF}) simülasyon dalga şekilleri



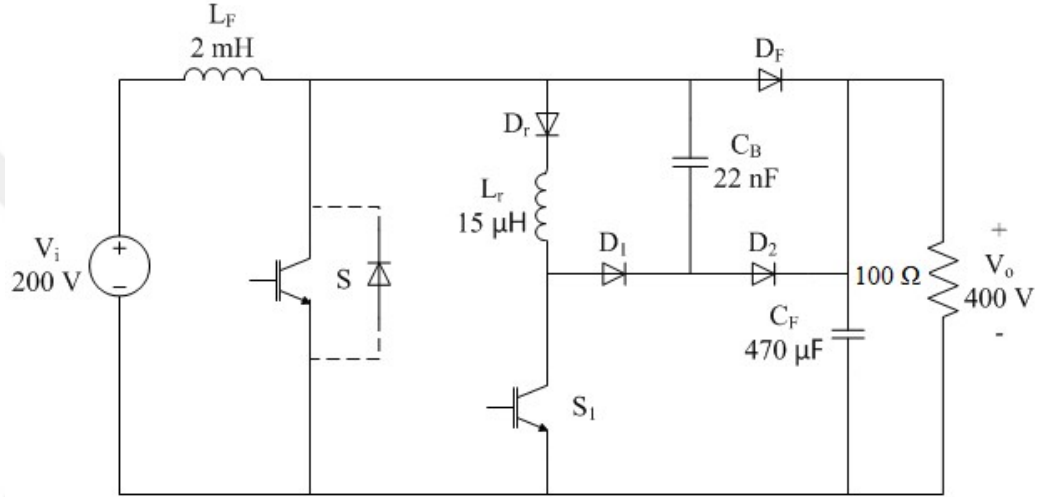
Şekil 3.22. $D=0,75$ için S ana anahtarı akım (I_S), gerilim (V_S) ile S_1 yardımcı anahtarın akım (I_{S1}) ve gerilim (V_{S1}), çıkış akımı (I_0), gerilimi (V_0), gücü (P_0) simülasyon dalga şekilleri



Şekil 3.23. $D=0,75$ için L_r bobini akımı (I_{Lr}), C_r kondansatörü gerilimi (V_{Cr}), D_1 yardımcı diyot akımı (I_{D1}), gerilim (V_{D1}) ile D_F ana diyot akım (I_{DF}) ve gerilim (V_{DF}) simülasyon dalga şekilleri

3.5. Geliştirilmiş ZVT Aktif Bastırma Hücreli DA-DA Dönüştürücü Simülasyonu

Bölüm 2’de anlatılan geliştirilmiş ZVT aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA DGA dönüştürücünün çalışmasını incelemek için, Şekil 3.24’te görülen IGBT anahtarlı yükseltici DA-DA dönüştürücü simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir.



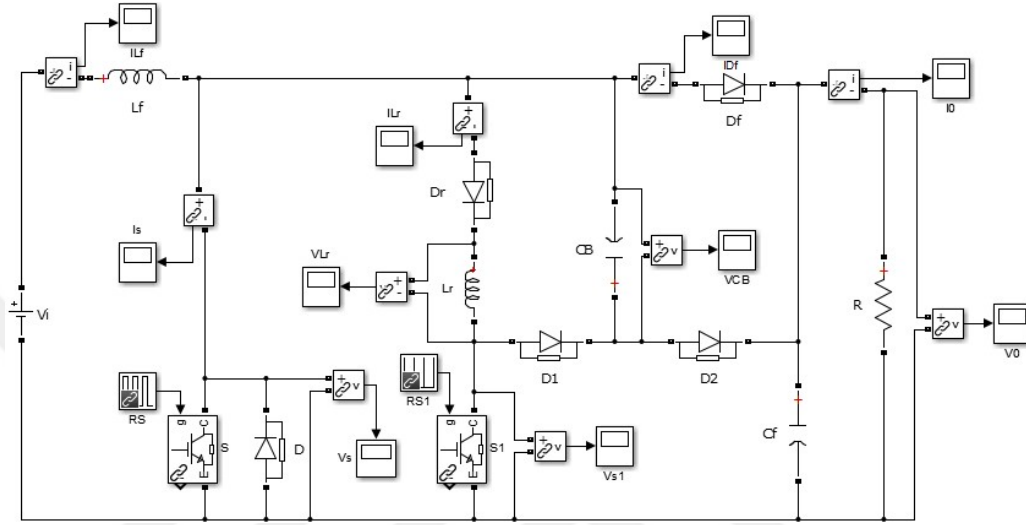
Şekil 3.24. Simülasyon çalışmasında kullanılan geliştirilmiş ZVT aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi [6]

Simülasyonda gerçekleştirilen dönüştürücüde kullanılan yarı iletken devre elemanlarını gerçeğe benzetmek amacıyla Tablo 3.2’de verilen yarı iletken elemanlara ait üretici firma kataloglarından elde edilen yükselme süresi (t_r), düşme süresi (t_f) ve ters toparlanma süresi (t_{rr}) bilgileri kullanılmıştır [6].

Tablo 3.2. Dönüştürücüde kullanılan yarı iletken elemanlara ait bilgiler

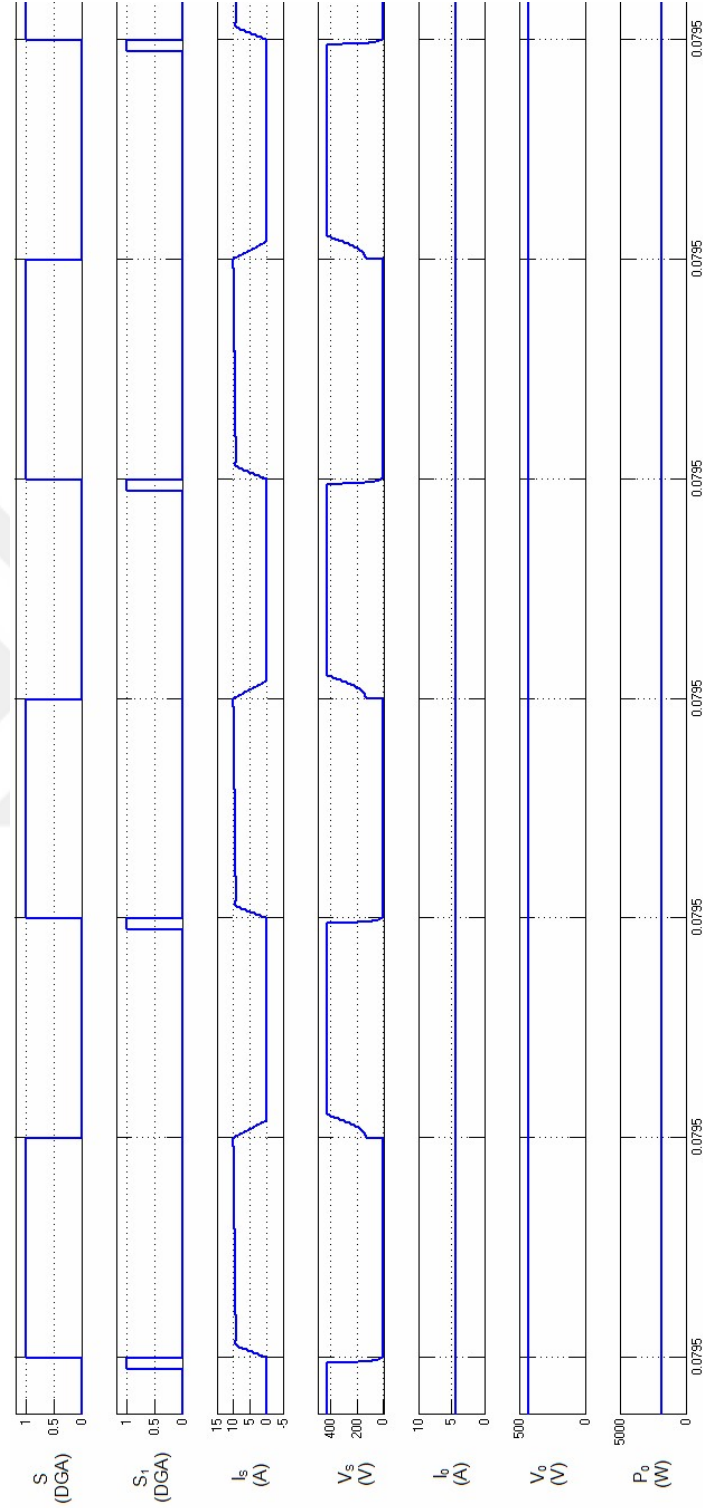
Devre Elemanı	t_r (ns)	t_f (ns)	t_{rr} (ns)
S	150	700	-
S ₁	100	500	-
D _F	-	-	60
D ₁ , D ₂ , D _r	-	-	60

Şekil 3.24'te gösterilen devrenin simülasyon ortamındaki görüntüsü Şekil 3.25'te yer almaktadır. Devrenin simülasyonu gerçekleştirilirken doluluk oranı (D) 0,5 ve 0,6 olarak seçilmiştir.

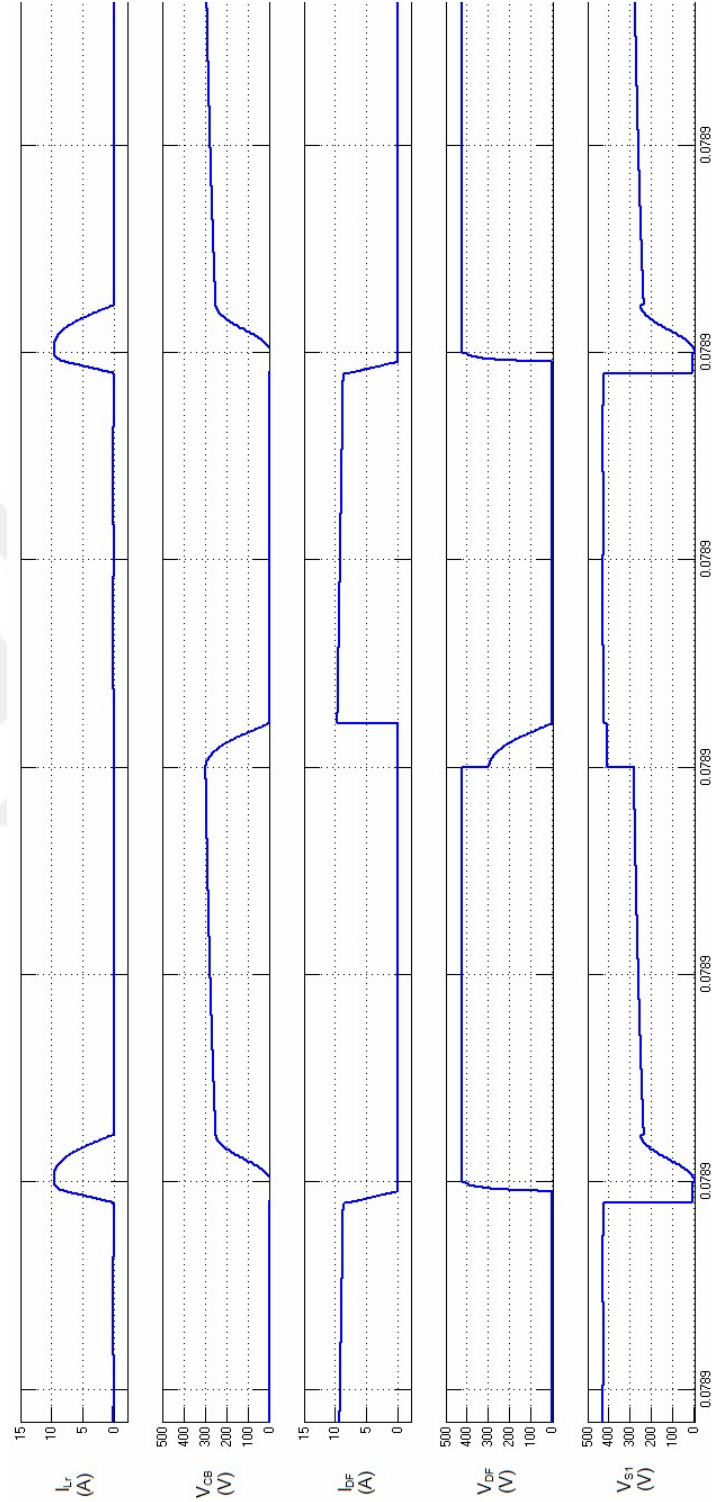


Şekil 3.25. Geliştirilmiş ZVT aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA dönüştürücünün simülasyon görüntüsü

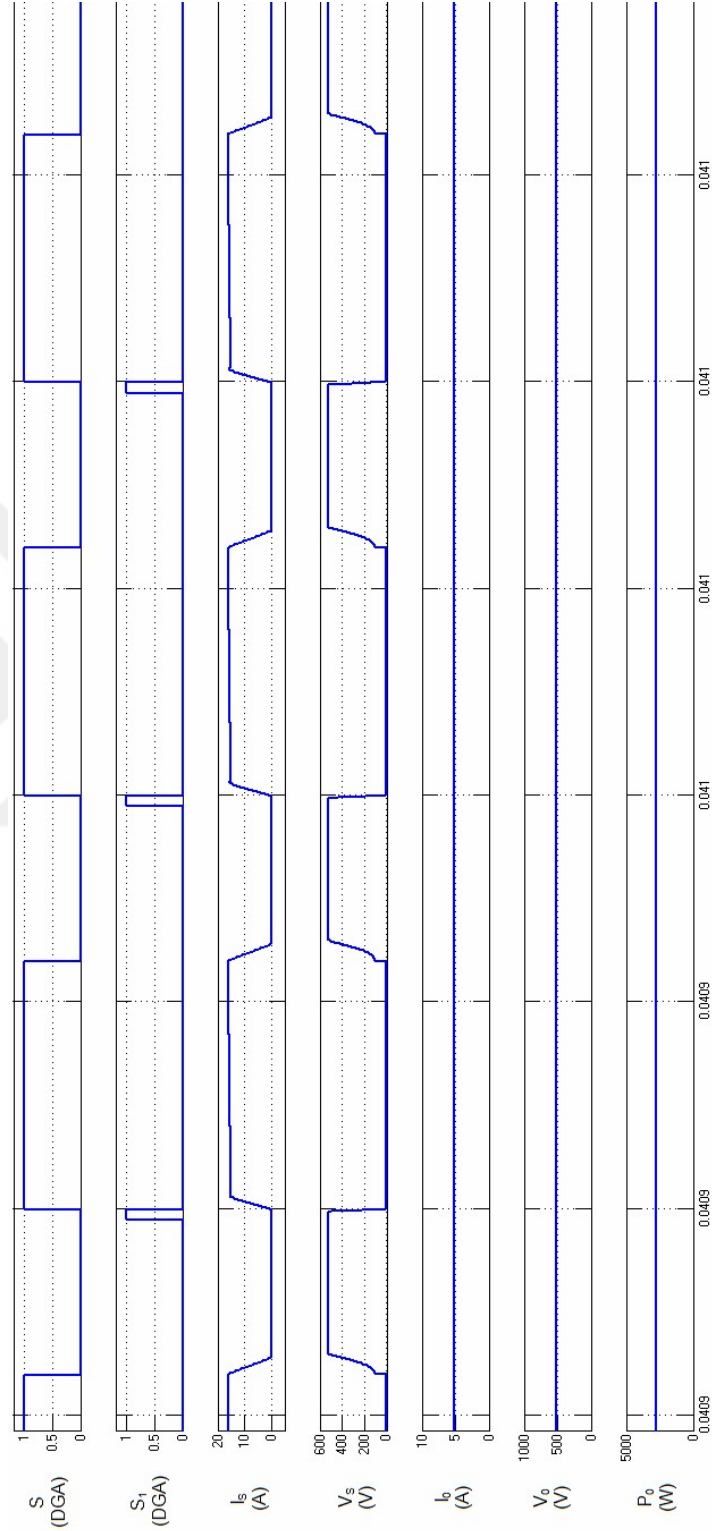
Geliştirilmiş ZVT aktif bastırma hücreli DA-DA dönüştürücünün $D=0,5$ doluluk oranında gerçekleştirilen simülasyonunda elde edilen S anahtarı akım (I_S), S anahtarı gerilim (V_S), çıkış akımı (I_O), çıkış gerilimi (V_O), çıkış gücü (P_O) dalga şekilleri Şekil 3.26'da, L_r bobini akım (I_{Lr}), C_B tampon kondansatörü gerilim (V_{CB}), D_F ana diyotu akım (I_{DF}), D_F ana diyotu gerilim (V_{DF}), S_1 yardımcı anahtarı gerilim (V_{S1}) dalga şekilleri Şekil 3.27'de; $D=0,6$ doluluk oranında gerçekleştirilen simülasyonunda elde edilen S anahtarı akım (I_S), S anahtarı gerilim (V_S), çıkış akımı (I_O), çıkış gerilimi (V_O), çıkış gücü (P_O) dalga şekilleri Şekil 3.28'de, L_r bobini akım (I_{Lr}), C_B tampon kondansatörü gerilim (V_{CB}), D_F ana diyotu akım (I_{DF}), D_F ana diyotu gerilim (V_{DF}), S_1 yardımcı anahtarı gerilim (V_{S1}) dalga şekilleri Şekil 3.29'da yer almaktadır. Denklem (3.1) ve Denklem (3.2) yardımıyla simülasyonda aktif bastırma hücreli dönüştürücüde $D=0,5$ doluluk oranında ana anahtar üzerinde harcanan güç 35,87 W, bastırma hücresiz dönüştürücüde harcanan güç 108,4 W; $D=0,6$ doluluk oranında ana anahtar üzerinde harcanan güç 58,9 W, bastırma hücresiz dönüştürücüde harcanan güç 196,3 W olarak elde edilmiştir. Dönüştürücüde aktif bastırma hücresi kullanılarak ana anahtar üzerinde harcanan güç $D=0,5$ için % 66,9, $D=0,6$ için % 69,9 oranında azaltılmıştır.



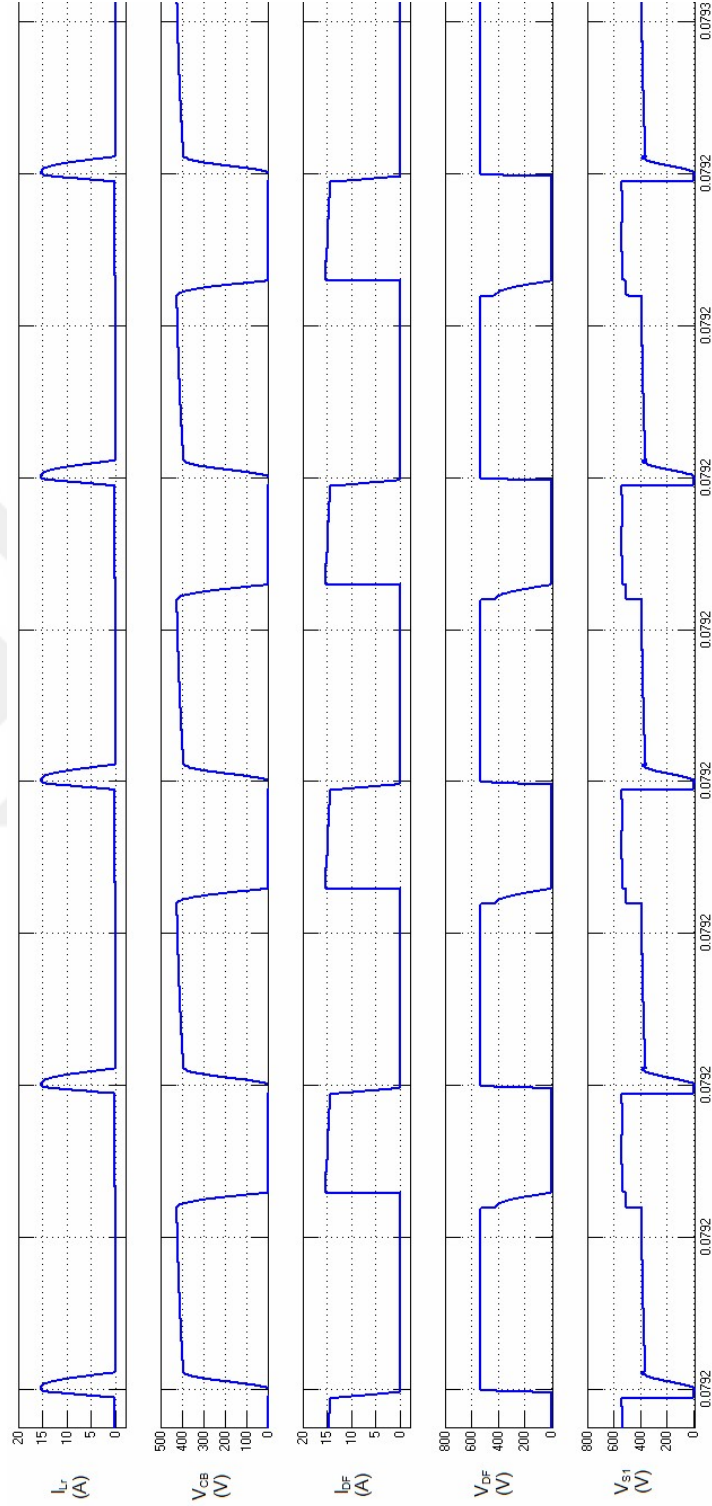
Şekil 3.26. $D=0,5$ için ana anahtarı akım (I_s), S ana anahtarı gerilim (V_s), çıkış akımı (I_o), çıkış gerilimi (V_o), çıkış gücü (P_o) simülasyon dalga şekilleri



Şekil 3.27. $D=0,5$ için L_r bobini akım (I_{Lr}), C_B tampon kondansatörü gerilim (V_{CB}), D_F ana diyotu akım (I_{DF}), D_F ana diyotu gerilim (V_{DF}), S_1 yardımcı anahtarı gerilim (V_{S1}) simülasyon dalga şekilleri



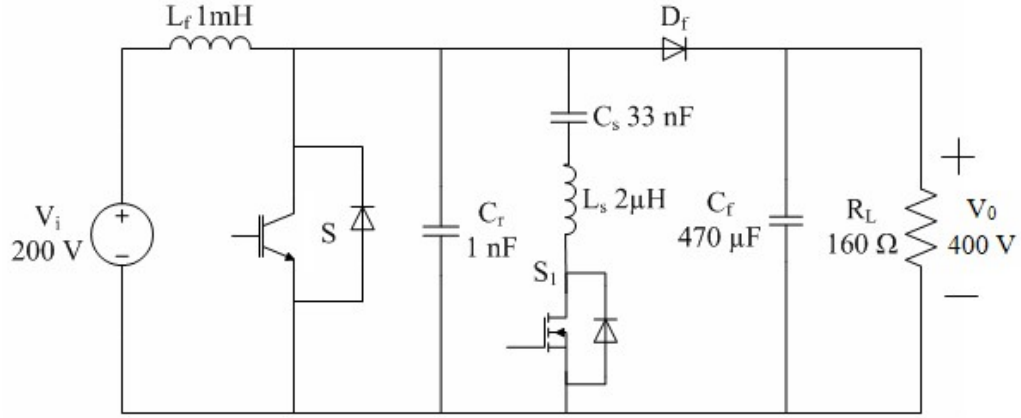
Şekil 3.28. $D=0,6$ için ana anahtarı akım (I_s), S anahtarı gerilim (V_s), çıkış akımı (I_o), çıkış gerilimi (V_o), çıkış gücü (P_o) simülasyon dalga şekilleri



Şekil 3.29. $D=0,6$ için L_r bobini akım (I_{Lr}), C_B tampon kondansatörü gerilim (V_{CB}), D_F ana diyotu akım (I_{DF}), D_F ana diyotu gerilim (V_{DF}), S_1 yardımcı anahtarı gerilim (V_{S1}) simülasyon dalga şekilleri

3.6. ZVZCT Aktif Bastırma Hücreli DA-DA Dönüştürücü Simülasyonu

Bölüm 2’de anlatılan ZVZCT aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA DGA dönüştürücünün çalışmasını incelemek için, Şekil 3.30’da görülen IGBT anahtarlı yükseltici DA-DA dönüştürücü simülasyon ortamında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.30. Simülasyon çalışmasında kullanılan ZVZCT aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA dönüştürücü devresi [7]

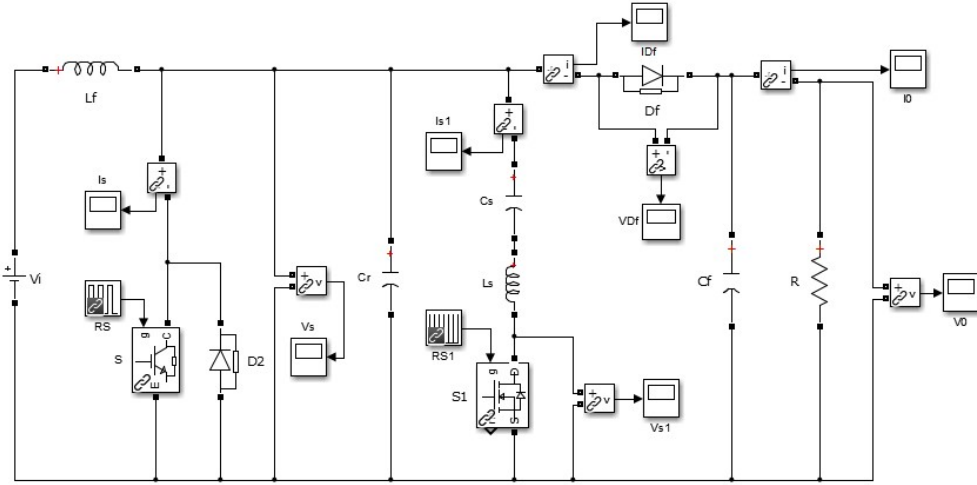
Simülasyonda gerçekleştirilen dönüştürücüde kullanılan yarı iletken devre elemanlarını gerçeğe benzetmek amacıyla elemanlara Tablo 3.3’te verilen yarı iletken elemanlara ait üretici firma kataloglarından elde edilen yükselme süresi (t_r), düşme süresi (t_f) ve ters toparlanma süresi (t_{rr}) bilgileri kullanılmıştır [7].

Tablo 3.3. Dönüştürücüde kullanılan yarı iletken elemanlara ait bilgiler

Devre Elemanı	t_r (ns)	t_f (ns)	t_{rr} (ns)
S	20	125	-
S ₁	40	58	-
D _F	-	-	50

Şekil 3.30’da gösterilen devrenin simülasyon ortamındaki görüntüsü Şekil 3.31’de yer almaktadır. Devrenin simülasyonu gerçekleştirilirken doluluk oranı (D) 0,5 ve 0,33 olarak seçilmiştir. Devrede yer alan yardımcı S₁ anahtarının kontrol sinyali; ana anahtarın ilettime geçmesinden yaklaşık 150 ns önce verilmiş ve yaklaşık 400 ns

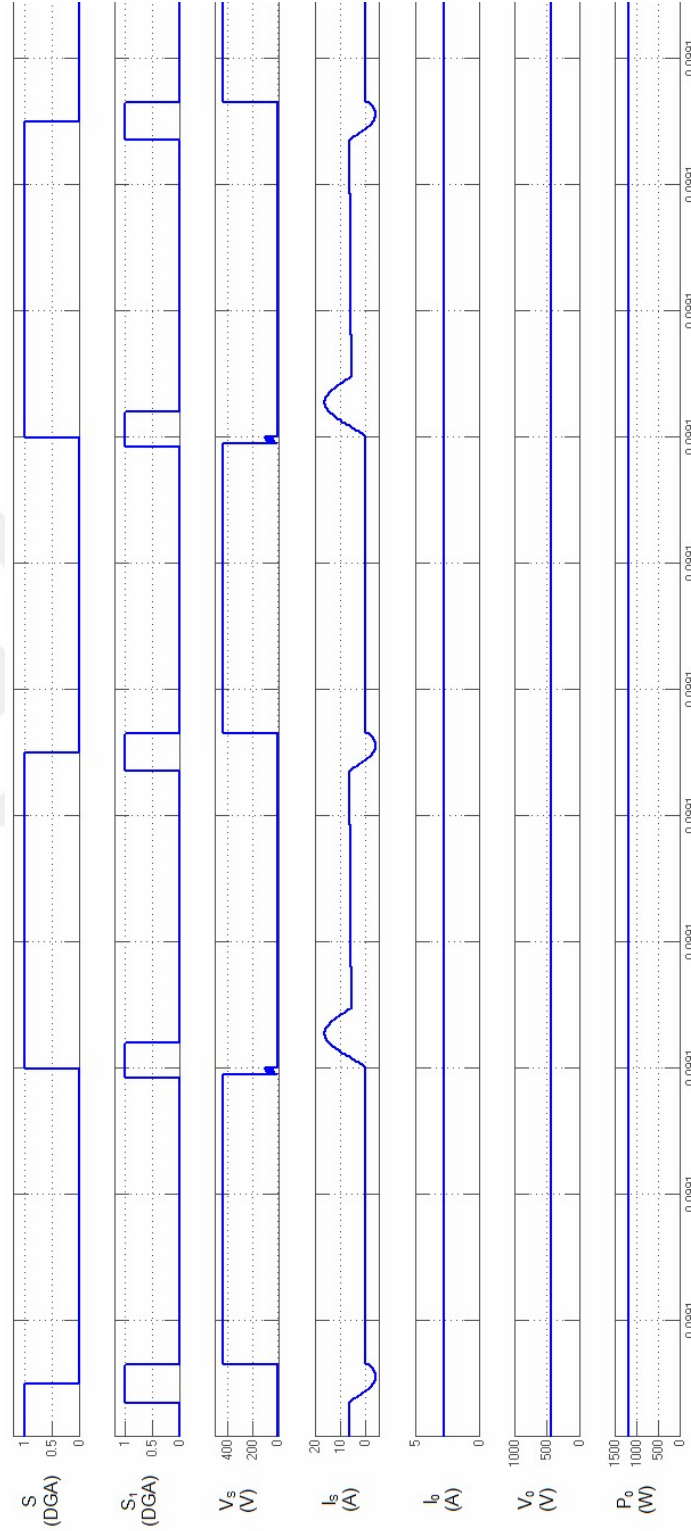
sonra da kesilmiştir. Yine yardımcı anahtarın kontrol sinyali ana anahtarın kesime girmesinden yaklaşık 300 ns önce verilmiş ve 300 ns sonra da kesilmiştir [7].



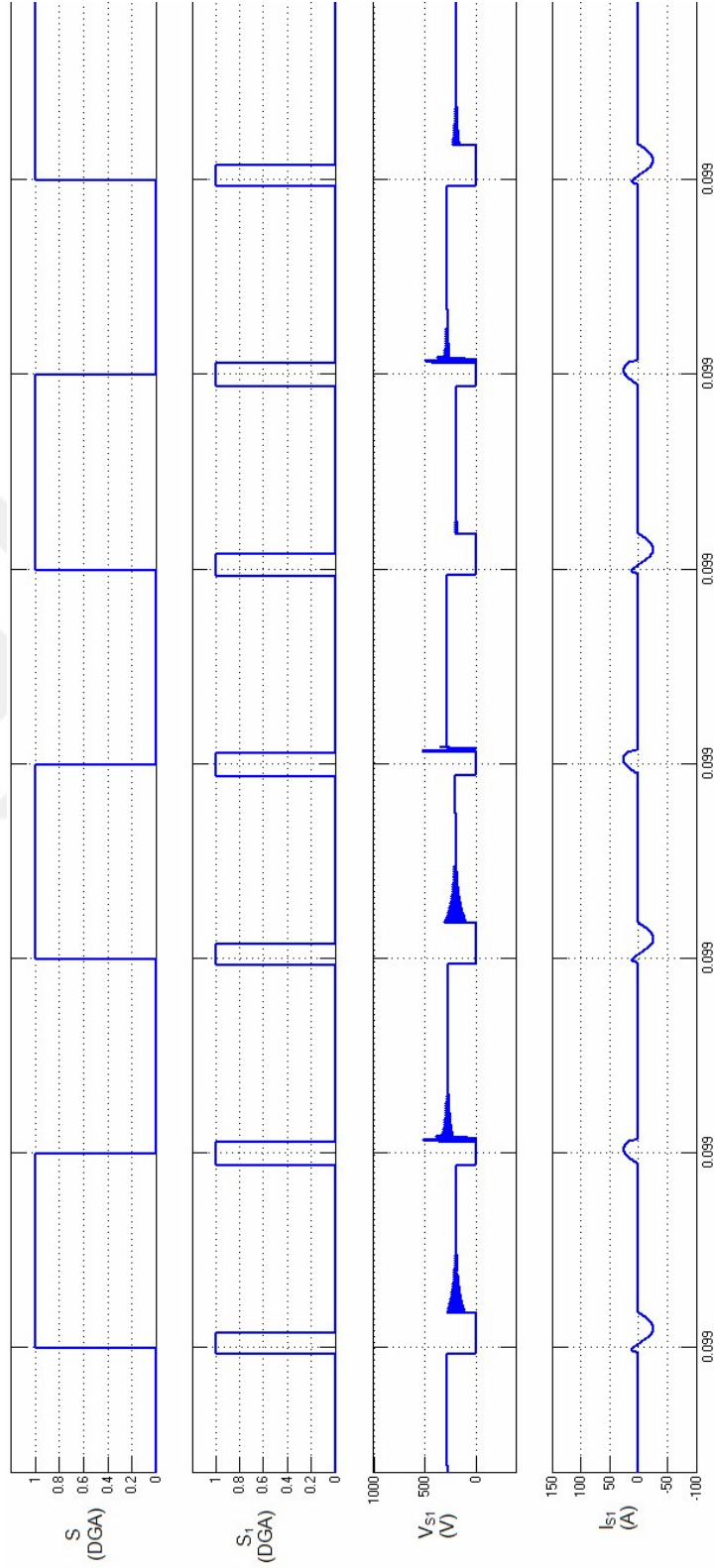
Şekil 3.31. ZVZCT aktif bastırma hücreli yükseltici DA-DA dönüştürücünün simülasyon görüntüsü

ZVZCT aktif bastırma hücreli DA-DA dönüştürücünün $D=0,5$ doluluk oranında gerçekleştirilen simülasyonu sonucunda elde edilen S ana anahtarı akım (I_S) ve gerilim (V_S), çıkış akımı (I_0), çıkış gerilimi (V_0), çıkış gücü (P_0) dalga şekilleri Şekil 3.32’de, S_1 yardımcı anahtarı akım (I_{S1}) ve gerilim (V_{S1}) dalga şekilleri Şekil 3.33’te, D_F ana diyotu akım (I_{DF}) ve gerilim (V_{DF}) dalga şekilleri Şekil 3.34’te; $D=0,33$ doluluk oranında gerçekleştirilen simülasyonu sonucunda elde edilen S ana anahtarı akım (I_S) ve gerilim (V_S), çıkış akımı (I_0), çıkış gerilimi (V_0), çıkış gücü (P_0) dalga şekilleri Şekil 3.35’te, S_1 yardımcı anahtarı akım (I_{S1}) ve gerilim (V_{S1}) dalga şekilleri Şekil 3.36’da, D_F ana diyotu akım (I_{DF}) ve gerilim (V_{DF}) dalga şekilleri Şekil 3.37’de yer almaktadır.

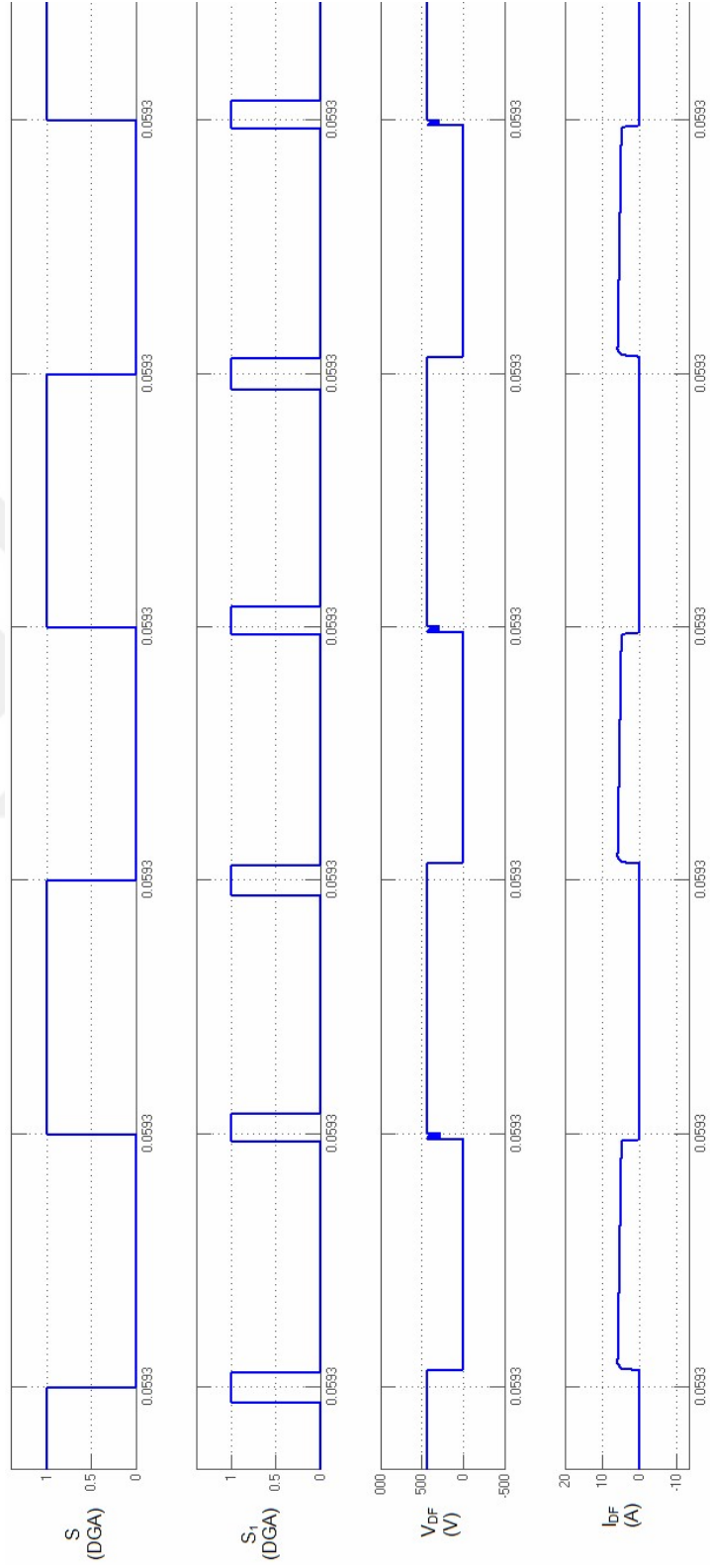
Denklem (3.1) ve Denklem (3.2) yardımıyla simülasyonda aktif bastırma hücreli dönüştürücüde $D=0,5$ için ana anahtar üzerinde harcanan güç 5,17 W, bastırma hücresiz dönüştürücüde harcanan güç 41,2 W; $D=0,33$ için ana anahtar üzerinde harcanan güç 2,58 W, bastırma hücresiz dönüştürücüde harcanan güç 18,4 W olarak elde edilmiştir. Dönüştürücüde aktif bastırma hücresi kullanılarak ana anahtar üzerinde harcanan güç $D=0,5$ için % 87,4, $D=0,33$ için % 85,9 oranında azaltılmıştır.



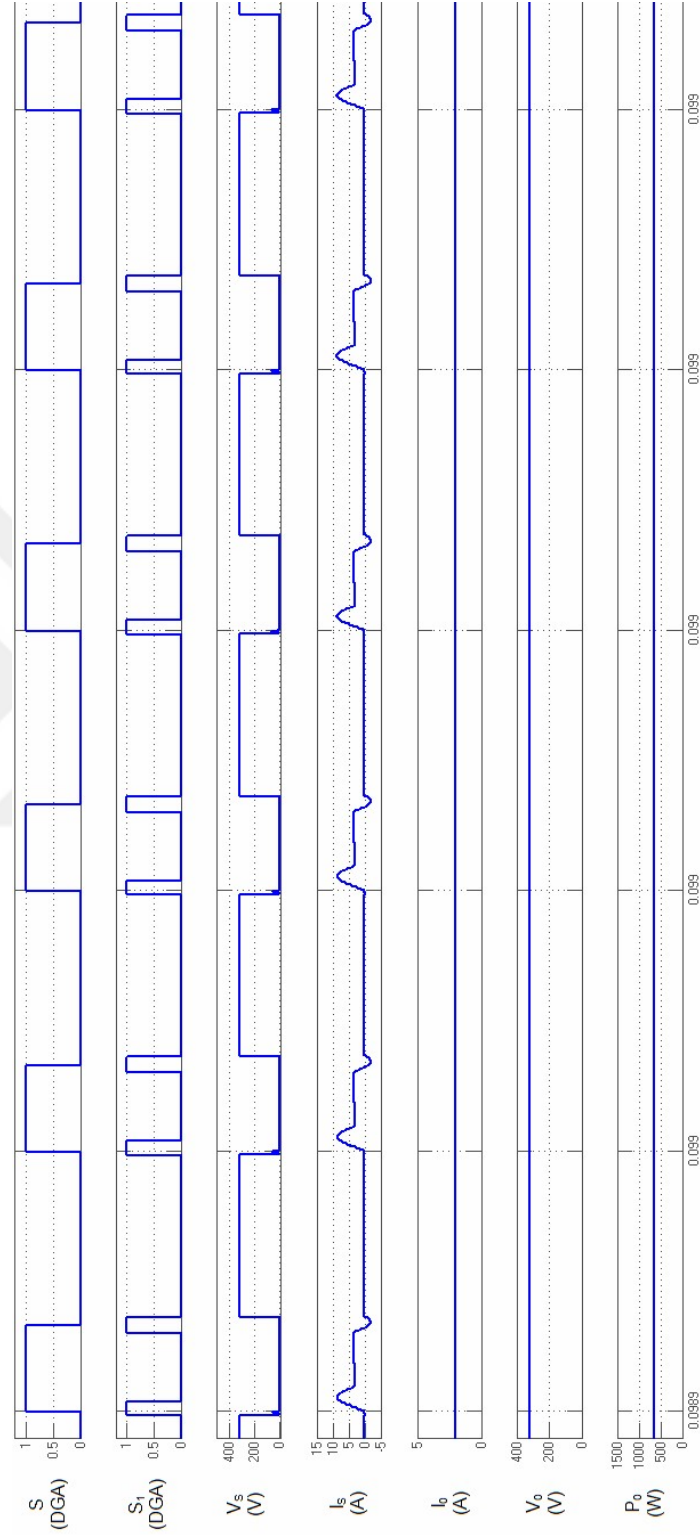
Şekil 3.32. $D=0,5$ için S ana anahtarı akım (I_s) ve gerilim (V_s), çıkış akımı (I_o), çıkış gerilimi (V_o), çıkış gücü (P_o) simülasyon dalga şekilleri



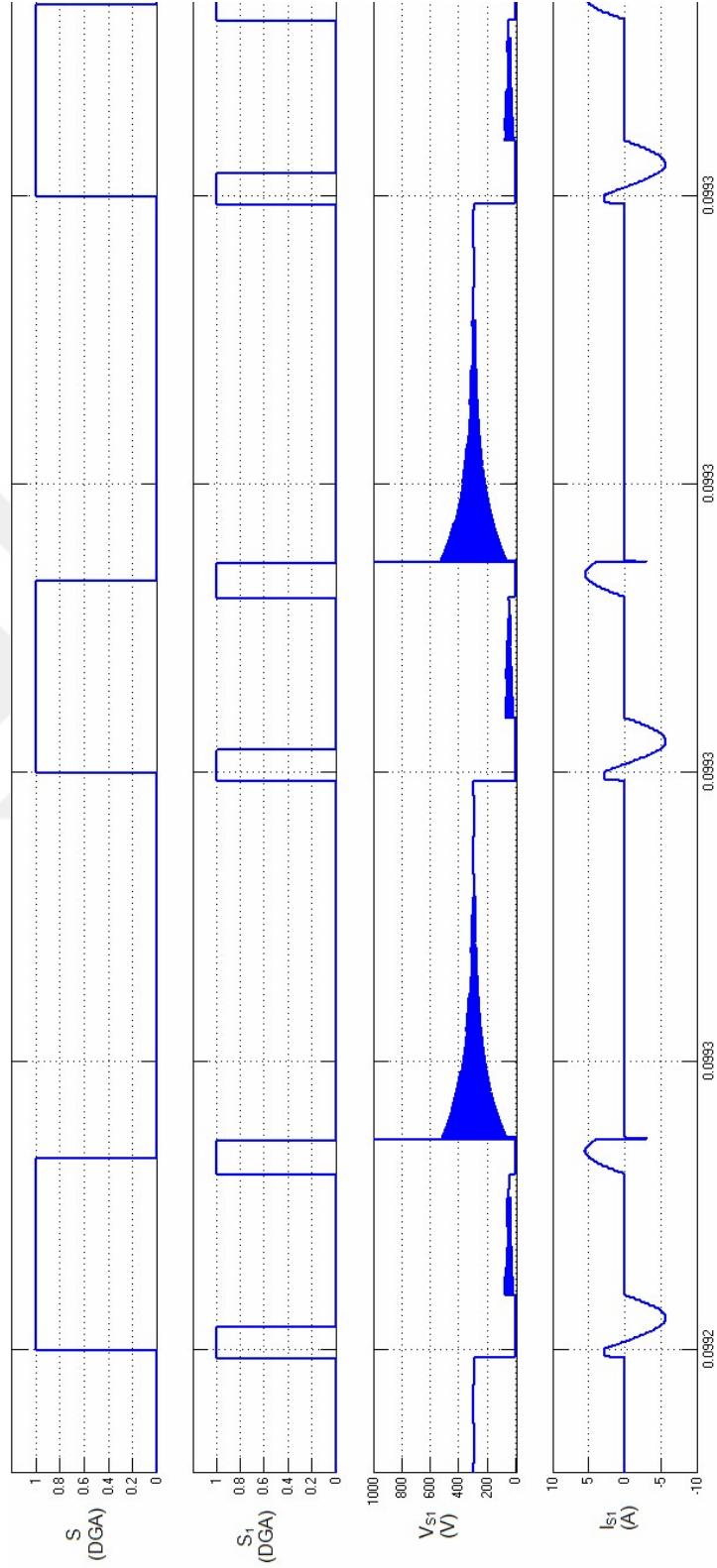
Şekil 3.33. $D=0,5$ için S_1 yardımcı anahtarı akım (I_{S1}) ve gerilim (V_{S1}) simülasyon dalga şekilleri



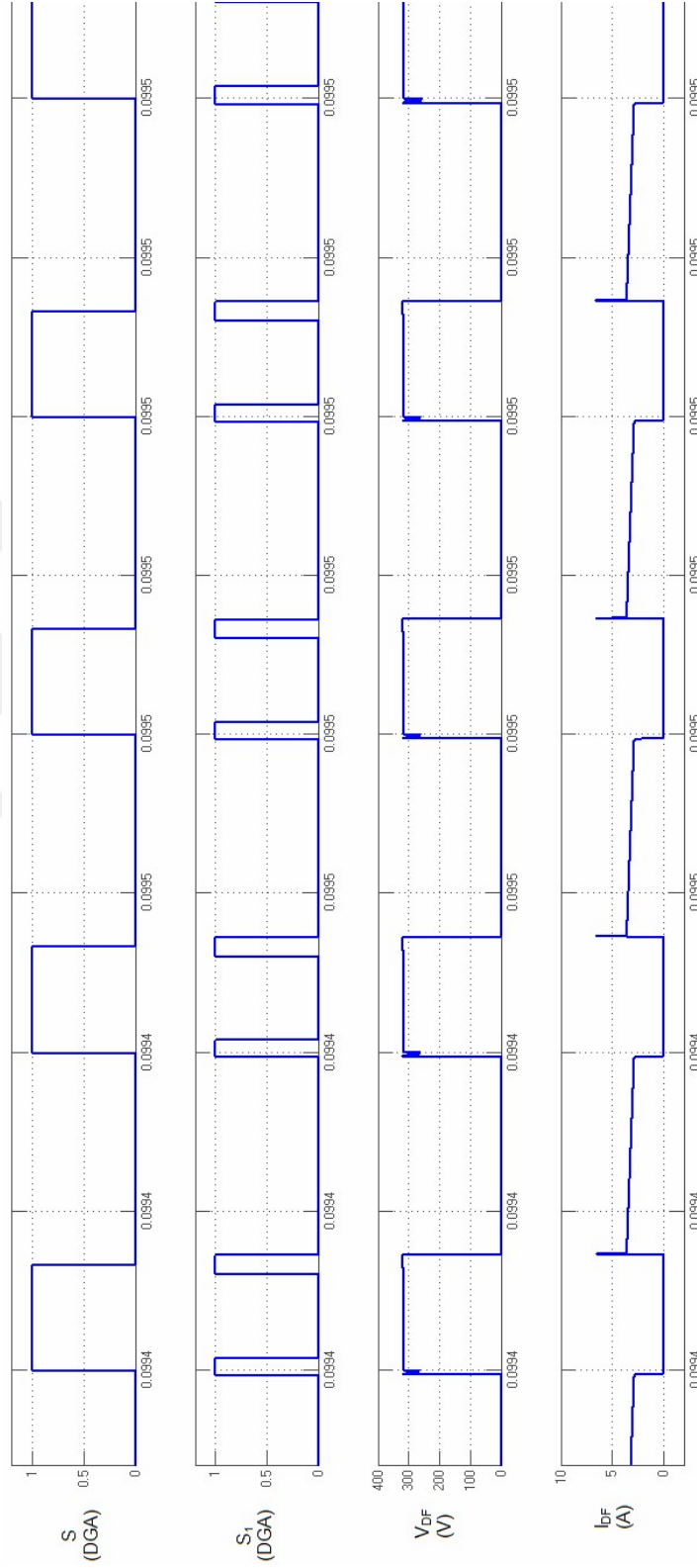
Şekil 3.34. $D=0,5$ için D_F ana diyotu akım (I_{DF}) ve gerilim (V_{DF}) simülasyon dalga şekilleri



Şekil 3.35. $D=0,33$ için S ana anahtarı akım (I_S) ve gerilim (V_S), çıkış akımı (I_O), çıkış gerilimi (V_O), çıkış gücü (P_O) simülasyon dalga şekilleri



Şekil 3.36. $D=0,33$ için S_1 yardımcı anahtarı akım (I_{S1}) ve gerilim (V_{S1}) simülasyon dalga şekilleri



Şekil 3.37. $D=0,33$ için D_F ana diyotu akım (I_{DF}) ve gerilim (V_{DF}) simülasyon dalga şekilleri

3.7. Simülasyon Sonuçları

Simülasyon çalışması sonucunda, incelenen bastırma hücreli dönüştürücülere ait simülasyon sonuçları ışığında hazırlanan özet bilgiler Tablo 3.4'te yer almaktadır.

Tablo 3.4. Bastırma hücreli dönüştürücülerin özellikleri

Özellik	Pasif ZVS ZCS	Temel ZCT	Temel ZVT	Geliştirilmiş ZCT	Geliştirilmiş ZVT	ZVZCT
Ana anahtar iletme girme	ZCS	HS	ZVT	ZCS	ZVT	ZVT
Ana anahtar kesime girme	ZVS	ZCT	ZVS	ZCT	ZVS	ZCT
Yardımcı anahtar iletme girme	-	ZCS	ZCS	ZCS	ZCS	ZCS
Yardımcı anahtar kesime girme	-	HS	HS	ZCS	ZVS	ZCT
Ana diyot iletme girme	ZVS	ZVS	ZVS	ZVS	ZVS	ZVS
Ana diyot kesime girme	ZCS ZVS	HS	ZCS	ZCS	ZVS	ZCS
Akım stresi	Az	Yüksek	Az	Hayır	Hayır	Hayır
Gerilim stresi	Yüksek	Az	Hayır	Yüksek	Hayır	Hayır
Ana anahtar üzerinde harcanan enerjinin düşürülmesi	D=0,5 P ₀ =1250W % 84,1	D=0,5 P ₀ =800W % 92,5	D=0,5 P ₀ =600W % 87,2	D=0,5 P ₀ =600W % 91,3	D=0,5 P ₀ =1600W % 66,9	D=0,5 P ₀ =1000W % 87,4
	D=0,75 P ₀ =3000W % 80,4	D=0,6 P ₀ =1250W % 93,1	D=0,6 P ₀ =1000W % 88,9	D=0,75 P ₀ =1600W % 93,8	D=0,6 P ₀ =2500W % 69,9	D=0,33 P ₀ =600W % 85,9

Bu bölümde, literatüde yer alan altı farklı yumuşak anahtarlama tekniğinin her biri için yayınlanmış makale baz alınarak simülasyon çalışması yapılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmasında elde edilen sonuçların makalelerde yer alan sonuçlar ile bire bir benzer olduğu görülmüştür. Yapılan simülasyon çalışmalarında, ana anahtarın bastırma hücreli ve bastırma hücresiz durumlar için harcadığı güç ayrı ayrı hesaplanmış ve sonuçlara yer verilmiştir. Çalışma sonucunda ana anahtarın üzerinde harcanan gücü azaltma bakımından incelendiğinde en iyi sonucun temel ve geliştirilmiş ZCT aktif bastırma hücreli dönüştürücü simülasyonunda elde edilmiştir. Ancak, bastırma hücresinde kullanılan eleman sayısının azlığı, ilave akım ve gerilim streslerinin olmaması, devredeki tüm elemanların yumuşak anahtarlama ile ilettime geçmesi ve kesime girmesi ve ana anahtarın ZVT ile ilettime geçmesi, ZCT ile kesime girmesi gibi özellikleri ile ZVZCT bastırma hücresi öne çıkmaktadır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yüksek lisans tez çalışması ilk olarak literatür araştırması ile başlamış, literatürde yer alan yumuşak anahtarlama teknikleri detaylı olarak incelenmiştir. Literatür incelemesinden sonra seçilen altı adet yumuşak anahtarlama tekniklerini sağlayan bastırma hücreli dönüştürücü devresi simülasyon ortamında gerçekleştirilerek çalışmaları incelenmiştir. Farklı çıkış gücü ve gerilim değerleri altında yapılan simülasyon sonucunda, dönüştürücülerde yer alan yarı iletken devre elemanlarının anahtarlama özellikleri elde edilmiştir. Aşağıda simülasyon sonuçlarında elde edilen verilerin özeti yer almaktadır.

i) ZVS ve ZCS pasif bastırma hücreli DA-DA dönüştürücü devresinde yarı iletken elemanlar, tam veya yaklaşık ZVS ve/veya ZCS altında kesime girmekte ve ilettime geçmektedir. S ana anahtarı, yaklaşık ZCS altında ilettime ve yaklaşık ZVS ile kesime girer. D_F ana diyotu ZVS ve ZCS altında kesime ZVS ile ilettime girmektedir. Dönüştürücü oldukça basit yapılıdır ve ek bir anahtara ihtiyaç yoktur. Ana anahtar ilave gerilim stresine ve ana diyot ilave akım stresine maruz kalmaz. Ana anahtarda bir miktar ilave akım stresi oluşur, fakat ana diyot kaynak geriliminin iki katına yakın bir gerilim stresine maruz kalır.

ii) Temel ZCT aktif bastırma hücreli DA-DA dönüştürücü devresinde ana anahtar ZCT ile kesime girmekte ve HS ile ilettime geçmektedir. Diğer yarı iletkenler için bu durum söz konusu değildir. Ana anahtar üzerinde ilave akım stresi oluşmaktadır.

iii) Temel ZVT aktif bastırma hücreli DA-DA dönüştürücü devresinde ana anahtar ZVT ile ilettime geçmekte ve ZVS ile kesime girmektedir. Ana diyot ise ZVS ile ilettime geçerken ZCS ile kesime girmektedir. Devrenin çalışması sırasında yarı iletkenler üzerinde ilave bir gerilim ve akım stresi oluşmaz.

iv) Geliştirilmiş ZCT aktif bastırma hücreli DA-DA dönüştürücü devresinde; ana anahtar kesime ZCT ile girmekte ve ZCS ile ilettime girmektedir. Ana diyot da SS ile

anahtarlanmakta olup ana diyot üzerinde giriş geriliminin yaklaşık 2 katı kadar gerilim stresi oluşmaktadır.

v) Geliştirilmiş ZVT aktif bastırma hücreli DA-DA dönüştürücü devresinde; ana anahtar ZVT ile iletme geçerken, ZVS ile kesime girmektedir. Ana diyot ise ZCS veya ZVS ile kesime girmektedir. Devrede kullanılan yarı iletken elemanların üzerinde ilave bir akım veya gerilim stresi oluşmamaktadır.

vi) Daha önce anlatılan yumuşak anahtarlama tekniklerinin modern hali olan ZVZCT aktif bastırma hücreli DA-DA dönüştürücü devresinde ana anahtar ZCT ile kesime girerken ZVT ile iletme geçmektedir. Dönüştürücüde diğer yarı iletken elemanlar da SS ile iletme ve kesime girmektedir. Ayrıca yarı iletken elemanlar üzerinde ilave bir akım veya gerilim stresi oluşmamaktadır.

vii) Simülasyon çalışmasında altı farklı yumuşak anahtarlama tekniği gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar, baz alınan makalelerde verilen sonuçlar ile benzer çıkmıştır.

viii) Yapılan simülasyon çalışmalarında, ana anahtarın bastırma hücreli ve bastırma hücresiz durumlar için harcadığı güç ayrı ayrı hesaplanmış ve sonuçlara yer verilmiştir.

ix) Çalışma sonucunda ana anahtarın üzerinde harcanan gücü azaltma bakımından incelendiğinde en iyi sonucun temel ve geliştirilmiş ZCT aktif bastırma hücreli dönüştürücü simülasyonunda elde edilmiştir.

Dönüştürücüde yumuşak anahtarlama sağlamak için oluşturulan bastırma hücreleri, dönüştürücünün ana anahtar ve ana diyotu üzerinde ilave akım ve gerilim streslerinin veya ek kayıpların oluşmasına da neden olabilir. Bu ek kayıplar yok edilmeli veya en düşük seviyelerde tutulmalıdır. Ayrıca, bu hücrelerin çalışması ana anahtarının iletim ve kesime girme sürelerinin dışına taşınabilir. Bu taşmalar minimum seviyelerde kalmalı, böylece bastırma hücresi DGA kontrolüne engel olmamalı ve dönüştürücü değişken veya hafif yüklerde de çalışabilmelidir. Bunun yanında, bastırma hücreleri dönüştürücünün karmaşıklık ve maliyetini arttırabileceğinden bu artışlar da düşük seviyelerde kalmalıdır. Yumuşak anahtarlama veya bastırma hücrelerinde hedefin

özetle; devrenin verimi, güç yoğunluğu ile frekansının artırılması, EMI gürültülerinin ve anahtarlama enerji kayıplarının azaltılması, düşük yüklerde de yumuşak anahtarlamanın sağlanabilmesi, devrenin maliyetinin ve karmaşıklığının mümkün olduğunca en az seviyede tutulması, olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Bir bastırma hücresinin seçilme kararı, bu hücrenin sağladığı bütün yumuşak anahtarlama yararları ile bu hücrenin neden olduğu ek külfetler iyice karşılaştırılarak verilmelidir [16].

Sonuç olarak, günümüzde ana anahtarın hem iletme hem de kesime yumuşak anahtarlama ile geçişinin sağlandığı ZVT ve ZCT tekniklerinin birleştirilmesiyle elde edilen ZVZCT tekniğini içeren bastırma hücrelerine literatürde daha çok rastlanmaktadır. Bu tez çalışmasında incelenen ZVZCT aktif bastırma hücreli dönüştürücü devresinin simülasyonu sonucundan da görüleceği üzere, ZVZCT tekniği içeren aktif bastırma hücreli dönüştürücülerde ana anahtarın yanında devredeki diğer yarı iletken elemanların da yumuşak anahtarlama altında çalışması, devre yapısının basitliği, akım ve gerilim streslerinin kabul edilebilir seviyelerde kalması gibi nedenlerle ZVZCT aktif bastırma hücreleri daha avantajlıdır.

KAYNAKLAR

- [1] Bodur H., Aksoy İ., Akın B., DC-DC Dönüştürücülerde Yumuşak Anahtarlama Teknikleri, *Kaynak Elektrik*, 2002, **1**(158), 100-108.
- [2] Hua G., Yang E. X., Jiang Y., and Lee F. C., Novel Zero-Current-Transition PWM Converters, *IEEE Trans. Power Electron.*, 1994, **9**(6), 601–606.
- [3] Bodur H., Bakan A.F., An Improved ZCT-PWM DC-DC Converter for High-Power and Frequency Applications, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2004, **51**(1), 89-95.
- [4] Şahin Y., Aksoy İ., Tınç N.S., DC-DC Dönüştürücülerde Kullanılan Yumuşak Anahtarlama Yöntemlerinin Karşılaştırılması, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, Bursa, 27-29 Kasım 2014.
- [5] Hua G., Leu C. S., Jiang Y., Lee F. C., Novel Zero-Voltage-Transition PWM Converters, *IEEE Trans. Power Electron.*, 1994, **9**(2), 213–219.
- [6] Bodur H., Bakan A. F., A New ZVT-PWM DC-DC Converter, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2002, **17**(1), 40–47.
- [7] Altıntaş N., Bakan A.F., Aksoy İ., A Novel ZVT-ZCT-PWM Boost Converter, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2014, **29**(1), 256-265. .
- [8] Şahin Y., Aksoy İ., Tınç N.S., A New Soft-Switched ZCZVT-PWM DC-DC Boost Converter, *TUBİTAK Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, DOI:10.3906/elk-1508-258.
- [9] Şahin, Y., PWM DC-DC Dönüştürücü Ailesi İçin Yeni Bir Yumuşak Anahtarlama Hücresinin Tasarımı, Uygulaması ve Karşılaştırmalı Analizi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2016, 442604.
- [10] Lee D.-Y., Lee M.-K., Hyun D.-S., Choy Ick., New Zero-Current-Transition PWM DC/DC Converters Without Current Stres, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2003, **18**(1), 95-104.
- [11] Bodur H., Bakan A. F., Baysal M., A Detailed Analytical Analysis of a Passive Resonant Snubber Cell Perfectly Constructed For a Pulse Width Modulated DC-DC Buck Converter, *Electrical Engineering*, 2003, **85**(2003), 45-52.
- [12] Das P., Moschopoulos G., A Comparative Study of Zero-Current-Transition PWM Converters, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2007, **54**(3), 1319-1328.

- [13] Panda A.K., Pattnaik S., Mohapatra K.K., A Novel Soft-Switching Synchronous Buck Converter for Portable Applications, *International Journal of Power Management Electronics*, DOI:10.1155/2008/862510.
- [14] Park S.-H., Park S.-R., Yu J.-S., Jung Y.-C., Won C.-Y., Analysis and Design of a Soft-Switching Boost Converter With an HI-Bridge Auxiliary Resonant Circuit, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2010, **25**(8), 2124-2149.
- [15] Aksoy İ., Bodur H., Altıntaş N., ZVZCT PWM Boost DC-DC Converter, *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 2015, **9**(8), 853-856.
- [16] Tsai C.-T., Su J.-C., A Soft-Switching SEPIC with Multi-Output Sources, *MDPI Electronics*, 2017, **6**(35), 1-18.
- [17] Bodur H., *Güç Elektroniği*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2010.
- [18] Ürgün S., Erfidan T., Çoruh N., DA - DA Buck Tipi Dönüştürücü Tasarımı ve Gerçeklenmesi, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (Eleco 2008)*, Bursa, 26-30 Kasım 2008.
- [19] Çoruh N., Erfidan T., Ürgün S., DA - DA Boost Tipi Dönüştürücü Tasarımı ve Gerçeklenmesi, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (Eleco 2008)*, Bursa, 26-30 Kasım 2008.
- [20] Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P., *Power Electronics*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., USA, 2003.
- [21] Erickson R.W., DC-DC Power Converters, *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, 1999, **5**, 53-63.
- [22] Ion F., Predusca G., A Comparative Study of Sepic, Cuk and Zeta Converters, *Scientific Bulletin of the Electrical Engineering Faculty*, 2008, **1**(8), 17-22.
- [23] Raj N.S.S., Urmila B., PV Fed Zeta Converter, *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2013, **3**(4), 2692-2696.
- [24] Erickson R.W., Maksimovic D., *Fundamentals Of Power Electronics*, 2nd. ed., Kluwer Academic Publishers, New York, 2001.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Saygı A.S.**, Beşer E., Ünlü M., Comparative Study Of Soft Switching Methods Used In DC-DC Converters, *Journal of Naval Science and Engineering*, 2017, **13**(1), 1-22.



ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Edirne’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Edirne’de tamamladı. 2003 yılında girdiği Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nden 2009 yılında mezun oldu. 2008-2010 yılları arasında ERDE Grubu A.Ş.de Proje Sorumlusu olarak çalıştı. 2010 yılından itibaren Deniz Kuvvetleri Komutanlığında Mühendis Subay olarak görev yapmaktadır.

