

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YUMUŞAK ANAHTARLAMALI YENİ BİR DC-DC  
DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN GELİŞTİRİLMESİ VE  
GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**NAİM SÜLEYMAN TİNÇ**

**DOKTORA TEZİ  
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ELEKTRİK MAKİNALARI VE GÜÇ ELEKTRONİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
PROF. DR. HACI BODUR**

**İSTANBUL, 2016**

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YUMUŞAK ANAHTARLAMALI YENİ BİR DC-DC**  
**DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN GELİŞTİRİLMESİ VE**  
**GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Naim Süleyman TİNĞ tarafından hazırlanan tez çalışması 14.11.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Prof. Dr. Hacı BODUR  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Hacı BODUR  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Yaşar BİRBİR  
Marmara Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Nihan ALTINTAŞ  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa Caner AKÜNER  
Marmara Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Atiye Hülya OBDAN  
Yıldız Teknik Üniversitesi



Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Doktora Bursu ve Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'nün 2015-04-02-DOP01 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

## ÖNSÖZ

---

Yenilenebilir enerji sistemleri, elektrikli araçlar, güç faktörü düzeltme devreleri gibi endüstriyel uygulamalarda DC-DC dönüştürücülerin kullanımı büyük önem arz etmektedir. Kullanılan bu dönüştürücünün performansının yüksek olması güç yoğunluğunun artırılması ile mümkün olmaktadır. Bu amaçla geliştirilen yumuşak anahtarlama teknikleri sayesinde daha yüksek verimler elde edilebilmektedir. “Yumuşak Anahtarlama Yeni Bir DC-DC Dönüştürücünün Geliştirilmesi ve Gerçekleştirilmesi” başlıklı bu doktora tezinde yeni bir aktif bastırma hücreli dönüştürücü topolojisi sunularak ulusal ve uluslar arası düzeyde bilime, teknolojiye ve endüstriye katkı yapılması hedeflenmiştir.

Bu tez çalışması sırasında “2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Doktora Bursu” ile tezimin araştırma ve geliştirilmesine destek veren Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu’na (TÜBİTAK) desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam sırasında değerli zamanını esirgemedi bana yardımcı olan, tecrübeleri ve engin bilgisinden faydalandığım ve kendisiyle çalışmaktan büyük onur duyduğum saygı değer hocam Sayın Prof. Dr. Hacı BODUR’a saygı ve sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Yine tez çalışmalarım sırasında bana her türlü bilimsel desteği veren, bilgiler aktaran, deneysel çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen ve kendisiyle çalışmaktan büyük onur duyduğum saygı değer hocam Sayın Doç. Dr. İsmail AKSOY’a şükranlarımı sunarım. Doktora süresince tez izleme komitemin değerli üyelerinden saygı değer hocam Sayın Prof. Dr. Yaşar BİRBİR’e doktora tezimin gelişmesi, olgunlaşması ve nihai sonuca ulaşmasında verdiği değerli fikirleri ve sağladığı katkılarından dolayı teşekkür ederim. Doktora eğitimim süresince birlikte sorumluluk duygusu ve iyi bir ekip olgusuyla birçok akademik çalışmalara imza attığımız, değerli dostum ve kıymetli mesai arkadaşım Arş. Gör. Dr. Yakup ŞAHİN’e katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca zaman zaman fikir alışverişinde bulunduğum ve birlikte çalışmaktan her zaman gurur duyacağım Yıldız Teknik Üniversitesi Güç Elektroniği grubu öğretim üye ve elemanlarına da teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak bütün öğrenim hayatım boyunca gerek maddi gerekse manevi destekleriyle yanımda olan, kalpleri ve gönülleri her daim benimle olan ve bugünlere gelmemdeki en büyük emek sahipleri değerli babam Orhan TİNÇ ve değerli annem Ayşe TİNÇ’a sonsuz şükranlarımı sunuyorum. Ayrıca çalışmalarım sırasında büyük bir sabır ve destekle yanımda olan sevincimin ortak paydaşları değerli eşim Pınar TİNÇ ve kızım Ayşenur TİNÇ’a sevgi ve sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Kasım, 2016

Elk. Yük. Müh. Naim Süleyman TİNÇ

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	vi
KISALTMA LİSTESİ .....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	x
ÖZET .....	xi
ABSTRACT .....	xiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ .....	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	5
1.3 Hipotez.....	6
BÖLÜM 2	
YUMUŞAK ANAHTARLAMA TEKNİKLERİ .....	7
2.1 Giriş .....	7
2.2 Anahtarlama Kavramı ve Yumuşak Anahtarlama .....	7
2.3 Yumuşak Anahtarlama Teknikleri.....	9
2.3.1 Sıfır Gerilimde Anahtarlama (ZVS).....	9
2.3.2 Sıfır Akımda Anahtarlama (ZCS) .....	10
2.3.3 Sıfır Akımda Geçiş (ZCT).....	11
2.3.4 Sıfır Gerilimde Geçiş (ZVT) .....	11
BÖLÜM 3	
YUMUŞAK ANAHTARLAMALI PWM DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜLER .....	12
3.1 Giriş .....	12

3.2	Örnek ZVT PWM DC-DC Dönüştürücü 1 .....	14
3.2.1	Çalışma Modları .....	15
3.2.2	Genel Değerlendirme ve Sonuçlar.....	19
3.3	Örnek ZVT PWM DC-DC Dönüştürücü 2 .....	21
3.3.1	Çalışma Modları .....	22
3.3.2	Genel Değerlendirme ve Sonuçlar.....	26
3.4	Örnek ZCT PWM DC-DC Dönüştürücü 1 .....	28
3.4.1	Çalışma Modları .....	29
3.4.2	Genel Değerlendirme ve Sonuçlar.....	32
3.5	Örnek ZCT PWM DC-DC Dönüştürücü 2 .....	35
3.5.1	Çalışma Modları .....	35
3.5.2	Genel Değerlendirme ve Sonuçlar.....	38

## BÖLÜM 4

ÖNERİLEN YENİ ZVT PWM DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜ .....	41
4.1 Giriş .....	41
4.2 Tanım ve Kabuller .....	41
4.3 Çalışma Modları .....	42
4.4 Tasarım Prosedürü .....	50
4.4.1 Rezonans Endüktansının Seçimi .....	51
4.4.2 Rezonans Kondansatörlerinin Seçimi.....	51
4.5 Simülasyon Çalışması.....	54
4.6 Dönüştürücü Özellikleri.....	56

## BÖLÜM 5

ÖNERİLEN YENİ ZVT PWM DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN DENEYSEL UYGULAMASI.....	58
5.1 Giriş .....	58
5.2 Deneysel Çalışma .....	60

## BÖLÜM 6

SONUÇ VE ÖNERİLER.....	67
KAYNAKLAR .....	70
ÖZGEÇMİŞ.....	73

## SİMGE LİSTESİ

---

$C_F$	Çıkış filtre kondansatörü
$C_r$	Rezonans kondansatörü
$C_s$	Bastırma kondansatörü
$D_F$	Ana diyot
$D_1$	Ana anahtarın dahili diyodu
$D_2$	Yardımcı diyot
$f_p$	Anahtarlama frekansı
$I_i$	Giriş akımı
$I_{LF}$	Ana endüktans akımı
$I_o$	Çıkış akımı
$i_{DF}$	Ana diyot akımı
$i_{Lr}$	Rezonans endüktansı akımı
$L_e$	Eşdeğer paralel endüktans
$L_F$	Ana endüktans
$L_r$	Rezonans endüktansı
$R_L$	Omik yük direnci
$S_1$	Ana anahtar
$S_2$	Yardımcı anahtar
$V_i$	Giriş gerilimi
$V_{DF}$	Ana diyot uçlarındaki gerilim
$V_o$	Çıkış gerilimi
$V_{S1}$	Ana anahtar uçlarındaki gerilim
$V_{S2}$	Yardımcı uçlarındaki gerilim
$\omega$	Rezonans açısal frekansı
$Z$	Rezonans empedansı
$\lambda$	Doluluk oranı

## KISALTMA LİSTESİ

---

DC	Doğru Akım (Direct Current)
EMI	Elektromanyetik Girişim (Electomagnetic Interference)
HS	Sert Anahtarlama (HS)
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
RFI	Radyo Frekans Girişimi (Radio Frequecny Interference)
SS	Yumuşak Anahtarlama (SS)
ZCS	Sıfır Akımda Anahtarlama (Zero Current Switching)
ZCT	Sıfır Akımda Geçiş (Zero Current Transition)
ZVS	Sıfır Gerilimde Anahtarlama (Zero Voltage Switching)
ZVT	Sıfır Gerilimde Geçiş (Zero Voltage Transition)

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1	(a) Güç elemanın kontrol sinyali, (b) HS, (c) ZCS - ZVS ve (d) ZCT - ZVT yumuşak anahtarlama teknikleri ile temel akım ve gerilim dalga şekilleri [5]..... 10
Şekil 3. 1	Temel ZVT dönüştürücüsüne ait devre şeması ..... 12
Şekil 3. 2	Temel ZCT dönüştürücüsüne ait devre şeması..... 13
Şekil 3. 3	ZVT Örnek 1 dönüştürücüsüne ait devre şeması..... 14
Şekil 3. 4	ZVT Örnek 1 dönüştürücüsünün çalışma modlarına ait eşdeğer devre şemaları (a) Mod 1, (b) Mod 2, (c) Mod 3, (d) Mod 4, (e) Mod 5, (f) Mod 6, (g) Mod 7, (h) Mod 8 ..... 17
Şekil 3. 5	ZVT Örnek 1 dönüştürücüsünün simülasyon sonuçları (a) Ana anahtar akım ve gerilimi, (b) Yardımcı anahtar akım ve gerilimi ..... 20
Şekil 3. 6	ZVT Örnek 1 dönüştürücüsünün simülasyon sonuçları (a) Ana diyot akım ve gerilimi, (b) Yardımcı diyot akım ve gerilimi..... 21
Şekil 3. 7	ZVT Örnek 2 dönüştürücüsüne ait devre şeması..... 22
Şekil 3. 8	ZVT Örnek 2 dönüştürücüsünün çalışma modlarına ait eşdeğer devre şemaları (a) Mod 1, (b) Mod 2, (c) Mod 3, (d) Mod 4, (e) Mod 5, (f) Mod 6, (g) Mod 7, (h) Mod 8 (i) Mod 9..... 23
Şekil 3. 9	ZVT Örnek 1 dönüştürücüsünün simülasyon sonuçları (a) Ana anahtar akım ve gerilimi, (b) Yardımcı anahtar akım ve gerilimi ..... 27
Şekil 3. 10	ZVT Örnek 2 dönüştürücüsünün simülasyon sonuçları (a) Ana diyot akım ve gerilimi, (b) Yardımcı diyot akım gerilimi ..... 28
Şekil 3. 11	ZCT Örnek 1 dönüştürücüsüne ait devre şeması..... 29
Şekil 3. 12	ZCT Örnek 1 dönüştürücüsünün çalışma modlarına ait eşdeğer devre şemaları (a) Mod 1, (b) Mod 2, (c) Mod 3, (d) Mod 4, (e) Mod 5, (f) Mod 6, (g) Mod 7 ..... 31
Şekil 3. 13	ZCT Örnek 1 dönüştürücüsünün simülasyon sonuçları (a) Ana anahtar akım ve gerilimi, (b) Yardımcı anahtar akım ve gerilimi ..... 33
Şekil 3. 14	ZCT Örnek 1 dönüştürücüsünün simülasyon sonuçları (a) Ana diyot akım ve gerilimi, (b) Yardımcı diyot akım ve gerilimi..... 34
Şekil 3. 15	ZCT Örnek 2 dönüştürücüsüne ait devre şeması..... 35
Şekil 3. 16	ZCT Örnek 2 dönüştürücüsünün çalışma modlarına ait eşdeğer devre şemaları (a) Mod 1, (b) Mod 2, (c) Mod 3, (d) Mod 4, (e) Mod 5, (f) Mod 6, (g) Mod 7, (h) Mod 8 ..... 37
Şekil 3. 17	ZCT Örnek 2 dönüştürücüsünün simülasyon sonuçları (a) Ana anahtar akım ve gerilimi, (b) Yardımcı anahtar akım ve gerilimi ..... 39
Şekil 3. 18	ZCT Örnek 2 dönüştürücüsünün simülasyon sonuçları (a) Ana diyot akım ve gerilimi, (b) Yardımcı diyot akım ve gerilimi..... 40

Şekil 4. 1	Önerilen yeni ZVT PWM DC-DC yükseltici dönüştürücünün temel devre şeması.....	42
Şekil 4. 2	Önerilen ZVT PWM DC-DC yükseltici dönüştürücünün çalışma modlarına ait 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) $t_6 < t < t_7$ , (h) $t_7 < t < t_8$ , (i) $t_8 < t < t_9$ , (j) $t_9 < t < t_{10} = t_0$ .....	45
Şekil 4. 3	Önerilen ZVT PWM DC-DC yükseltici dönüştürücünün çalışma aralıklarına ilişkin temel dalga şekilleri.....	47
Şekil 4. 4	Farklı $C_{r2}$ kondansatör değerlerine göre $C_{r1}$ kondansatörü ve $L_r$ endüktansı akımının maksimum değerleri arasındaki değişim .....	52
Şekil 4. 5	Farklı $C_{r2}$ kondansatör değerlerine göre $C_{r1}$ kondansatörü ve ZVT süresi arasındaki değişim .....	53
Şekil 4. 6	Farklı $C_{r2}$ kondansatör değerlerine göre $L_r$ endüktansı ve ZVT süresi arasındaki değişim .....	53
Şekil 4. 7	Farklı $C_{r2}$ kondansatör değerlerine göre $L_r$ endüktansı ve ZCT süresi arasındaki değişim .....	54
Şekil 4. 8	Önerilen dönüştürücünün simülasyon şematığı.....	54
Şekil 4. 9	Önerilen yeni ZVT PWM DC-DC dönüştürücünün simülasyon sonuçları (a) Anahtar kontrol sinyalleri, (b) Ana anahtar akımı ve gerilimi.....	55
Şekil 4. 10	Önerilen yeni ZVT PWM DC-DC dönüştürücünün simülasyon sonuçları (a) Yardımcı anahtar akımı ve gerilimi, (b) Ana diyot akımı ve gerilimi .....	56
Şekil 5. 1	Önerilen ZVT PWM DC-DC yükseltici dönüştürücünün deneysel devre şeması.....	59
Şekil 5. 2	Önerilen ZVT PWM DC-DC yükseltici dönüştürücünün deneysel uygulama devresi .....	59
Şekil 5. 3	Ana anahtar ve yardımcı anahtar kontrol sinyalleri.....	60
Şekil 5. 4	Ana anahtarın akım ve gerilim dalga şekilleri.....	61
Şekil 5. 5	Yardımcı anahtarın akım ve gerilim dalga şekilleri .....	62
Şekil 5. 6	Ana diyodun akım ve gerilim dalga şekilleri.....	63
Şekil 5. 7	100 W gücünde ana anahtar ve yardımcı anahtar kontrol sinyalleri .....	64
Şekil 5. 8	100 W gücünde ana anahtarın akım ve gerilim dalga şekilleri.....	64
Şekil 5. 9	100 W gücünde yardımcı anahtarın akım ve gerilim dalga şekilleri .....	65
Şekil 5. 10	100 W gücünde ana diyodun akım ve gerilim dalga şekilleri .....	65
Şekil 5. 11	Önerilen dönüştürücünün HS ve SS durumunda verim eğrileri .....	66

## ÇİZELGE LİSTESİ

---

	Sayfa
Çizelge 5. 1 Deneysel devre parametreleri.....	58
Çizelge 5. 2 Uygulamada kullanılan yarı iletken elemanların katalog değerleri.....	59
Çizelge 5. 3 Yarı iletken güç elemanlarının anahtarlama durumları ve akım-gerilim stresleri.....	66

# YUMUŞAK ANAHTARLAMALI YENİ BİR DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN GELİŞTİRİLMESİ VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Naim Süleyman TINĖ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hacı BODUR

Bu tez çalışmasında yeni bir aktif bastırma hücreesine sahip sıfır gerilim geçişli (ZVT) darbe genişlik modülasyonlu (PWM) DC-DC yükseltici türü bir dönüştürücü sunulmuştur. Dönüştürücüdeki tüm yarı iletken elemanlar yumuşak anahtarlama ile iletme ve kesime girmektedir. Sunulan dönüştürücünün temel özelliği, eklenen bastırma hücrelerinin ana anahtarda ve ana diyotta ilave akım ya da gerilim stresi oluşturmamasıdır. Aynı zamanda yardımcı anahtar ve yardımcı diyotlar üzerinde de herhangi bir gerilim stresi yoktur. Ana anahtar ZVT ile iletme ve ZVS ile kesime girerken yardımcı anahtar ise ZCS ile iletme ve ZCT ile kesime girmektedir. Önerilen dönüştürücü hafif yük şartlarında dahi kusursuz olarak yumuşak anahtarlama ile çalışmaktadır. Bununla birlikte dönüştürücünün düşük maliyet ve basit yapıya sahip olması temel avantajdır. Önerilen dönüştürücü batarya güç kaynaklı ve düşük DC bara gerilimli uygulamalarda kullanılabilir. Tez çalışmasında, sunulan yeni dönüştürücünün teorik analizi yapılmış ve bu teorik analiz laboratuvar ortamında kurulan 500 W ve 100 kHz'lik bir prototiple doğrulanmıştır. Sunulan dönüştürücü nominal çıkış gücünde % 97.8'lik verimiyle oldukça elverişli bir sonuç ortaya koymaktadır.

Tezin birinci bölümünde, yapılan literatür taraması sonucunda tez konusu ile ilgili yapılan çalışmalar hakkında kısa bilgiler, tezin amacı ve hipotez verilmiştir.

İkinci bölümde, yumuşak anahtarlama kavramı ve mevcut yumuşak anahtarlama teknikleri hakkında detaylı bilgilere yer verilmiştir.

Üçüncü bölümde, ileri yumuşak anahtarlama teknikleri ZVT ve ZCT ile ilgili yapılan örnek dönüştürücüler detaylı olarak analiz edilmiş, simülasyon sonuçları verilmiş ve bu sonuçlar üzerinden dönüştürücülerin avantaj ve dezavantajları vurgulanmıştır.

Dördüncü bölümde, bu tez çalışmasında önerilen yeni ZVT PWM DC-DC dönüştürücünün çalışma prensibi, çalışma modları, tasarım prosedürü, simülasyonu ve genel özellikleri verilmiştir.

Beşinci bölüm önerilen dönüştürücünün deneysel sonuçlarını kapsamaktadır. Sunulan dönüştürücünün 500 W ve 100 kHz'lik deneysel uygulaması yapılarak hem nominal güçte hem de hafif yüklerde elde edilen sonuçlar gösterilerek dönüştürücünün katkıları anlatılmıştır.

Altıncı ve son bölümde ise bu tez çalışmasında literatüre kazandırılan ve önerilen yeni ZVT PWM DC-DC dönüştürücünün genel özellikleri ve gelecekte yapılması planlanan hedefler belirtilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sıfır gerilimde geçiş, sıfır akımda geçiş, yumuşak anahtarlama, sert anahtarlama, darbe genişlik modülasyonu.

**DEVELOPING AND APPLICATION OF A NEW SOFT SWITCHED  
DC-DC CONVERTER**

Naim Süleyman TİNÇ

Department of Electrical Engineering

PhD. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Hacı BODUR

In this thesis, a novel ZVT-PWM DC-DC boost converter with an active snubber cell is proposed. All of the semiconductor devices in the converter turn on and off with soft switching (SS). The main feature of the proposed converter is the absence of extra current or voltage stress on the main switch and main diode. There is also no extra voltage stress on the auxiliary switch and the auxiliary diodes. The main switch turns on with Zero Voltage Transition (ZVT) and turns off with Zero Voltage Switching (ZVS). The auxiliary switch turns on with Zero Current Switching (ZCS) and turns off with Zero Current Transition (ZCT). The proposed converter smoothly operates under light-load conditions. Having a simple structure at low cost is the main advantage of the proposed converter. The proposed soft-switching topology can be used in applications with the battery power source and low-voltage dc-link. In this thesis, the theoretical analysis of proposed converter is made and this analysis is verified by a prototype with 500 W and 100 kHz. The proposed converter yields a desirable outcome with the efficiency of 97.8 % at nominal output power.

In the first chapter of the thesis, as a result of the review of the literature, it is given on brief informations about the studies which is made on the subject of the this thesis, the thesis's purpose and hypothesis.

In the second chapter, it is given the detailed acknowledge about soft switching and soft switching techniques.

In the third chapter, the example type converters with ZVT and ZCT are analyzed by detailed, their simulation results are given and the advantages and disadvantages of these convertes are emphasized.

In the fourth chapter, the operational principle, operation modes, design procedure, simulation and basic features of proposed novel ZVT PWM DC-DC converter are given.

The fifth chapter covers the experimental results of the proposed converter. The proposed converter are operated at 500 W and 100 kHz and the experimental results are shown for both nominal power and light loads. So, the contributions of converter are explained.

In the sixth and final chapter, the features of the proposed and brought to literature novel ZVT PWM DC-DC converter are emphasized and the aims planned for future are determined.

**Keywords:** Zero voltage transition, zero current transition, soft switching, hard switching, pulse width modulation

#### 1.1 Literatür Özeti

Darbe genişlik modülasyonlu (PWM) DC-DC dönüştürücüler yüksek güç yoğunluğu, hızlı geçiş cevabı ve kontrol kolaylığından dolayı rüzgâr ve güneş enerji sistemleri, elektrikli araçlar, güç faktörü düzeltme devreleri gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek güç yoğunluğu, devrenin hacminin düşmesi anlamına geldiğinden dolayı devrede daha küçük boyutlu filtre elemanlarının kullanımına imkân sağlar. Ancak yüksek güç yoğunluğu için aynı zamanda anahtarlama frekansının da artırılması gerekmektedir. DC-DC dönüştürücülerde anahtarlama frekansının artırılması her ne kadar güç yoğunluğunu artıran bir unsur olsa da bu durum yarı iletken elemanlarda yüksek anahtarlama kayıpları ve elektromanyetik girişim (EMI) gürültüleri gibi olumsuzluklara da neden olmaktadır. Bu olumsuzluklar dönüştürücünün performansını doğrudan etkiler ve toplam dönüştürücü veriminde azalmaya sebep olur. DC-DC dönüştürücülerde hem yüksek frekanslara çıkılarak güç yoğunluğunu artırmak hem de yüksek frekansların neden olacağı anahtarlama kayıplarını ve EMI gürültülerini azaltmak için literatürde yumuşak anahtar teknikleri geliştirilmiştir. [1-4]

Yumuşak anahtarlama (SS), genel manada, anahtarlama kayıpları ve EMI gürültünün özel düzenlerle yok edilmesi veya en aza indirilmesi şeklinde tanımlanır. Yumuşak anahtarlama sayesinde sert anahtarlama (HS) durumunda oluşan problemlerin üstesinden gelinabilmektedir. Yumuşak anahtarlama amacıyla geliştirilen ve dönüştürücülerin temel bir parçası olmayan ilave düzen ve devrelere ise bastırma hücresi denilmektedir. Yumuşak anahtarlama teknikleri genel olarak sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS), sıfır akımda anahtarlama (ZCS), sıfır gerilimde geçiş (ZVT) ve sıfır akımda geçiş (ZCT) olmak üzere 4 gruba ayrılır. Bunlardan ZVT ve ZCT teknikleri ileri

yumuşak anahtarlama teknikleri olup bu teknikler ile yarı iletken anahtarların anahtarlama kayıpları tamamen sıfırlanabilmektedir [5].

ZVT tekniği ile ilgili ilk çalışma 1994 yılında yapılmış ve literatüre temel ZVT dönüştürücüsü olarak kazandırılmıştır [6]. Bu dönüştürücüde, ana anahtar kesimdeyken, aktif bir elemana sahip bir bastırma hücresi yardımıyla ana anahtarın gerilimi sıfıra düşürülür ve anahtar gerilimi sıfırda tutuluyorken iletim sinyali verilir. Böylece ana anahtar ZVT ile kayıpsız bir şekilde ilettime girmiş olur. Ana anahtarın kesime girmesi ise ZVS ile gerçekleşir. Aynı zamanda ana diyot ZCS ile kesime girerken yardımcı anahtar ZCS ile ilettime girer. Fakat bu dönüştürücüde yardımcı anahtarın kesime girmesi sert anahtarlama (HS) şeklinde gerçekleşir. Ayrıca devrenin çalışması yük koşullarına bağlıdır [7]. Temel ZVT dönüştürücüsündeki bu sorunların üstesinden gelebilmek için literatürde birçok ZVT dönüştürücüsü sunulmuştur [8-18]. Sunulan dönüştürücülerin bazılarında bu problemler tekrar ederken [8-9] bazıları ise beraberinde başka sorunları getirmiştir [10-17]. [8-9] nolu çalışmalarda temel ZVT dönüştürücüsüne benzer şekilde ana anahtar ZVT ile ilettime ve ZVS ile kesime girerken yardımcı anahtarın kesime girmesi sert anahtarlama altında gerçekleşmiştir.

Yumuşak anahtarlama amacıyla gerçekleştirilen [10] nolu çalışmada ana anahtar ZVT ile ilettime girerken kesime girmesi sert anahtarlama altında meydana gelmektedir. [11] nolu çalışmada önerilen ZVT dönüştürücüde, temel ZVT dönüştürücüden farklı olarak, bastırma hücresine eklenen ilave bir kondansatör yardımıyla yardımcı anahtarın da yumuşak olarak kesime girmesi sağlanmıştır. Ancak bu dönüştürücünün sahip olduğu bastırma hücresinin ana anahtarda ilave bir akım stresi ve yardımcı anahtarda ise ilave bir gerilim stresi oluşturması dönüştürücüde bir dezavantaj oluşturmaktadır.

[12] nolu çalışmada ana anahtarın ZVT ile ilettime ve ZVS ile kesime girmesinin yanı sıra diğer tüm yarı iletkenler de yumuşak anahtarlama ile çalışmaktadır. Fakat gerek ana anahtarın maruz kaldığı ilave akım stresi gerekse yardımcı diyodun maruz kaldığı ilave gerilim stresi dönüştürücünün başlıca mahsurlarıdır.

Ana anahtarın ZVT ile ilettime sokulduğu [13-16] nolu çalışmalarda tüm yarı iletken elemanlar yumuşak anahtarlama ile çalışırken ana anahtarda ilave akım stresi oluşmaktadır. Özellikle [17] nolu çalışmada bu akım stresinin periyodun önemli kısmında anahtar üzerinde var olması ciddi kayıplara neden olmaktadır.

DC-DC dönüştürücülere yumuşak anahtarlama amacıyla eklenen bastırma hücrelerinin yarı iletken elemanlarda ilave akım ya da gerilim stresi oluşturmaması dönüştürücüyü daha cazip kılmaktadır. Bu bağlamda 2002 yılında önerilen [18] nolu çalışma ZVT dönüştürücülerinde sık rastlanan dezavantajların birçoğunu ortadan kaldırarak tüm yarı iletken elemanların yumuşak anahtarlama ile iletme ve kesime girmesini sağlamıştır. Ayrıca bu dönüştürücüde elemanlar üzerinde herhangi bir ilave akım ya da gerilim stresi bulunmamaktadır.

Bir diğer ileri yumuşak anahtarlama tekniği olan ZCT tekniği ile ilgili ilk çalışma da yine 1994 yılında yapılmış ve literatüre temel ZCT dönüştürücüsü olarak kazandırılmıştır [19]. Bu dönüştürücü de ise kesime girme işlemi sırasında aktif elemana sahip bir bastırma hücresi yardımıyla önce ana anahtarın içinden geçen akım sıfıra düşürülür. Anahtar akımı sıfırda tutuluyorken anahtarın iletim sinyali kesilir ve anahtar kayıpsız bir şekilde kesime girmiş olur. Aynı zamanda ana diyot yumuşak anahtarlama ile iletme girerken yardımcı anahtar ZCS ile iletme girer. Fakat dönüştürücünün en temel problemi ana anahtarın iletme girmesi ve ana diyotun kesime girmesinin sert anahtarlama altında meydana gelmesidir. Ana diyotta ters toparlanma akımları büyük kayıplara neden olur. Bununla beraber yardımcı anahtarın kesime girmesi de sert anahtarlama ile olur. Temel ZCT dönüştürücüsündeki bu olumsuzlukların üstesinden gelebilmek için birçok çalışma yapılmıştır [20-26].

Ana anahtarın ZCT ile kesime girdiği [20] nolu çalışmada ana elemanların iletim ve kesime girme işlemleri yumuşak anahtarlama altında gerçekleşmektedir. Ancak bastırma hücresi elemanı olan yardımcı anahtar sert anahtarlama ile kesime girerek ilave anahtarlama kayıplarına neden olmaktadır.

[21] nolu çalışmada yardımcı elemanlar dâhil tüm yarı iletken elemanların yumuşak anahtarlama ile iletme ve kesime girmesini sağlamıştır. Ancak bastırma hücresinin ana elemanlar üzerinde oluşturduğu akım stresleri ilave iletim kayıplarına neden olmaktadır. [22-23] nolu çalışmalarda ise tüm yarı iletkenler herhangi bir ilave akım stresine maruz kalmadan iletme ve kesime girebilmektedir. Ancak ana diyot üzerinde oluşan gerilim stresi seçilecek güç elemanının dayanım kriterini artırmakta ve maliyetin artmasına sebep olmaktadır.

Yarı iletken elemanların yumuşak anahtarlama konusunda başarılı bir çözüm sunan [24-25] nolu çalışmalarda hem ana diyodun ilave gerilim stresine maruz kalması hem de

ana anahtarın ilave akım stresine maruz kalması bu dönüştürücülerde bulunan önemli kusurlardır.

2003 yılında önerilen [26] nolu çalışma ile elemanlar üzerinde ilave akım stresi oluşmadan tüm elemanların yumuşak anahtarlama ile ilettime ve kesime girmesi sağlanmıştır. Ancak bu dönüştürücüde hem ana diyot üzerinde çıkış geriliminin 2 katı kadarlık bir gerilim stresi oluşması hem de ana akım yolu üzerinde bir bastırma endüktansı bulunması ciddi sorunlardır.

Yumuşak anahtarlama için tasarlanan bastırma hücrelerinde ana akım yolları üzerinde eleman bulunması istenmeyen bir durumdur. Bu durum anahtarlar üzerinde çınlama adı verilen yüksek frekanslı salınımlara yol açmaktadır. Ana akım yolu üzerinde bastırma endüktansının bulunduğu hem ZVT dönüştürücüleri [27-28] hem de ZCT dönüştürücülerinde [29-30] çınlama olayı gerçekleşeceği için bu devrelerin uygulama aşamasında zener diyotlu bastırma devreleri kullanılmalıdır. Bu durum ise devrenin maliyetini artıran bir unsurdur.

Ayrıca yumuşak anahtarlama amacıyla sunulan bazı dönüştürücülerin bastırma hücrelerinde trafo yapısının bulunması hem özel tasarım gerektiren hem de uygulama zorluğu oluşturan bir durumdur [31-35]. Özellikle bastırma hücresinde geri dönüşlü veya normal trafo yapısı kullanılan devrelerde trafo tasarımının iyi yapılması gerekmektedir. Aksi halde geri dönüşlü yapılarda sık karşılaşılan kaçak endüktans etkisi devrenin verimini düşürmektedir. Kaçak endüktans etkisinin azaltılması için devrede ilave RCD bastırma düzeneklerine ihtiyaç duyulmakta ve dolayısıyla maliyet artmaktadır.

Literatürde yer alan yumuşak anahtarlama DC-DC dönüştürücülere bakıldığında zaman zaman bu dönüştürücülerin öncelikli amacının dönüştürücüdeki ana anahtar ve ana diyotların ilettime ve kesime girme kayıplarının azaltılması veya sıfırlanması olduğu gözükmektedir. Bu amaçla önerilen bastırma hücreleri yukarıda bahsedildiği gibi bir takım dezavantajları da beraberinde getirebilmektedir. Dolayısıyla iyi bir yumuşak anahtarlama DC-DC dönüştürücüden beklenen özellikleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- Dönüştürücüdeki tüm yarı iletken elemanların yumuşak anahtarlama ile ilettime ve kesime girmesi ve böylece anahtarlama kayıplarının minimize edilmesi,

- Ana akım yolları üzerinde ilave yardımcı eleman bulunmaması,
- Özellikle ana elemanlar olmak üzere tüm yarı iletken elemanlarda ilave akım ya da gerilim stresleri olmaması,
- Yumuşak anahtarlama enerjilerinin geri kazanılması,
- EMI gürültülerin azaltılması,
- Ana diyot ters toparlanma kayıplarının yok edilmesi,
- Kontrolünün kolay olması ve yüksek verime sahip olması,
- Trafo ve kuplajlı endüktans gibi özel tasarım gerektiren elemanların kullanıldığı bastırma hücrelerinin tercih edilmemesi,
- Ve tüm bunlar yapılırken devrenin yapısının karmaşık hale getirilmemesi ve maliyetin aşırı derecede arttırılmaması.

## 1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, DC-DC dönüştürücülerde anahtarlama kayıplarını yok eden, literatürde yer alan devrelerin dezavantajlarının birçoğunu ortadan kaldıran ve avantajlarının birçoğunu barındıran yeni bir yumuşak anahtarlama bastırma hücresinin geliştirilmesi ve gerçekleştirilmesidir. Tasarımı, analizi ve deneysel çalışması yapılacak olan yeni dönüştürücüde tüm yarı iletkenlerin yumuşak anahtarlama ile ilettime ve kesime girmesi tezin temel amaçlarından biridir. Bu amaca ulaşırken ana elemanlar üzerinde herhangi bir ilave akım ya da gerilim stresi olmaması gözetilerek yumuşak anahtarlama hücresinden beklenen özelliklerinin birçoğunun sağlanması hedeflenmektedir. Çünkü yarı iletken elemanlar üzerindeki ilave akım stresleri iletim kayıplarına yol açmaktadır. İlave gerilim stresleri olması durumunda ise kullanılacak eleman yüksek gerilimli seçileceğinden maliyet artacaktır. Sonuç olarak optimum bir bastırma hücresi ile yumuşak anahtarlama devrelerinden beklenen özelliklerin birçoğunu sağlayan bir bastırma hücresi tasarlanarak DC-DC yükseltici dönüştürücü üzerinde uygulanması amaçlanmaktadır. Böylece sert anahtarlama yükseltici dönüştürücülerdeki anahtarlama kayıpları yok edilecek ve yüksek verimli bir DC-DC dönüştürücü ortaya konacaktır.

### 1.3 Hipotez

Darbe genişlik modülasyonlu DC-DC dönüştürücülerden beklenen özellikler hızlı geçiş cevabı, kontrol kolaylığı ve yüksek güç yoğunluğu olarak sıralandırılabilir. Bu dönüştürücülerde yüksek güç yoğunluğunun elde edilebilmesi ancak yüksek frekanslarda mümkün olabilmektedir. Ancak DC-DC dönüştürücülerdeki yarı iletken elemanların yüksek frekanslarda çalıştırılması durumunda ciddi anahtarlama kayıpları ve EMI gürültüleri oluşmaktadır. Bu olumsuzluklar dönüştürücü verimini ve performansını önemli ölçüde azaltmaktadır. Literatüre kazandırılan yumuşak anahtarlama teknikleri ile bu sorunun üstesinden gelinmiş ve anahtarlama kayıpları olmadan yüksek frekanslara çıkılabilme imkânı oluşmuştur.

Yumuşak anahtarlama teknikleri ZCS, ZVS, ZCT ve ZVT olmak üzere 4 temel başlık altında ayrılmaktadır. ZCS ve ZVS teknikleri genellikle pasif bastırma hücreleri ile gerçekleştirilmekte ve bu teknikler ile anahtarlama kayıpları azaltılabilmektedir. ZVT ve ZCT teknikleri ise ileri yumuşak anahtarlama teknikleri olup en az bir yardımcı anahtara ihtiyaç duyan aktif bastırma hücreleri ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu teknikler ile anahtarlama kayıplarının tamamen yok edilmesi mümkün olmaktadır.

Literatürde önerilen bazı yumuşak anahtarlama dönüştürücüler anahtarlama kayıplarını azaltılırken veya yok ederken başlıca problemleri de beraberinde getirmektedir. Bu problemler; ana elemanlar üzerinde ilave akım ya da gerilim streslerinin olması, yüksek frekanslı salınımlar, maliyetin artması v.b gibi sıralanabilir. Dolayısıyla DC-DC dönüştürücülerde anahtarlama kayıplarını yok etmek için bir bastırma hücresi tasarımı yapılırken ekstra dezavantajlarında önüne geçilebilmesi verim ve performans bakımından önem arz etmektedir.

Bu bağlamda literatüre kazandırılacak yumuşak anahtarlama bastırma hücresi anahtarlama kayıplarını yok ederken, akım ya da gerilim stresleri gibi ilave dezavantajlara da yol açmayacak şekilde tasarlanmalıdır.

Bu amaçla tasarlanan yeni yumuşak anahtarlama bastırma hücresi tüm yarı iletken elemanlar için yumuşak anahtarlama sağlayarak anahtarlama kayıplarını minimize etmektedir. Üstelik ilave akım ya da gerilim stresleri ve çınılama gibi dezavantajları barındırmadan yumuşak anahtarlama gerçekleştirebilmesi dönüştürücünün en önemli unsurlarından biridir.

# YUMUŞAK ANAHTARLAMA TEKNİKLERİ

## 2.1 Giriş

Bu bölümde anahtarlama, sert anahtarlama ve yumuşak anahtarlama kavramları için genel açıklamalar yapılarak bastırma hücreleri ile gerçekleştirilen yumuşak anahtarlama teknikleri anlatılmıştır.

## 2.2 Anahtarlama Kavramı ve Yumuşak Anahtarlama

Anahtarlama kavramı, esasen bir güç elemanının iletim ve kesime girme işlemidir. Ek bir düzen kullanılmadan doğal olarak gerçekleşen anahtarlama Sert Anahtarlama (HS) olarak adlandırılmaktadır. Yarı iletken güç elemanlarının anahtarlama işlemlerinde sert anahtarlamanın neden olduğu bir takım kayıplar meydana gelmektedir. Bu kayıplar, güç anahtarının akım ve geriliminin çakışmasından dolayı oluşan anahtarlama kayıpları, güç diyotunun ters toparlanma kayıpları ve güç anahtarının parazitik kondansatörünün deşarj kaybı olarak sıralanabilir. Anahtarlama frekansının artırılması güç yoğunluğunu artırsa da bahsedilen kayıplar anahtarlama frekansı ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Dolayısıyla sert anahtarlama ile çalışan dönüştürücülerde, anahtarlama kayıpları arttıkça, kullanılan güç elemanlarının nominal değerleri ile soğutucu ve soğutma sisteminin boyutları da artar. Sonuç olarak, devrenin hacmi ile maliyeti artar ve güç yoğunluğu düşer. Bunun yanı sıra, anahtarlama işlemleri sırasında, yüksek akım ve gerilim yükselme hızları, yüksek değerli Elektro Manyetik Girişim (EMI) ve Radyo Frekans Girişimine (RFI) neden olur. Bu girişimler, kontrol ve haberleşme sinyallerini olumsuz etkiler. Sert anahtarlamaadaki problemleri çözmek için Yumuşak Anahtarlama (SS) teknikleri geliştirilmiştir.

Yumuşak anahtarlama, esasen, anahtarlama güç kayıpları ve EMI gürültünün ek bastırma hücreleri ile yok edilmesi veya minimize edilmesi şeklinde tanımlanır. Literatürde stres azaltma, bastırma gibi terimlerle de ifade edilen yumuşak anahtarlama, yarı iletken güç elemanlarının maruz kaldığı akım ve gerilim değerlerini en aza indirme ve akım yükselme hızı ( $di/dt$ ) ile gerilim yükselme hızlarının ( $dv/dt$ ) azaltılması işlevlerini sağlar. Ayrıca yumuşak anahtarlama beklenen temel işlevler anahtarlama kayıpları ile EMI gürültünün azaltılması ve anahtarlama enerjisinin yüke aktarılmasıdır. Genel olarak ise yumuşak anahtarlama istenen fonksiyonlar, genel olarak aşağıda sıralanmıştır.

- Yarı iletken güç elemanının akım ve gerilim çakışmasını azaltmak veya yok etmek.
- EMI gürültülerini azaltmak veya sıfırlamak.
- Diyot ters toparlanma kayıplarını minimize etmek.
- Güç anahtarının akım ve gerilim yükselme hızlarını sınırlandırmak.
- Anahtarın parazitik kondansatörünün enerjisini geri kazanmak.
- Dönüştürücünün yüksek frekanslarda kayıpsız çalışabilmesini sağlamak.
- Anahtarlama periyodunun büyük bir kısmında PWM çalışmayı korumak.
- Hafif yüklerde dahi yumuşak anahtarlama ile çalışmayı korumak.
- Güç yoğunluğunu artırarak devrenin boyut ve maliyetini azaltmak.
- Kayıpları engelleyerek dönüştürücünün toplam verimini artırmak.

DC-DC dönüştürücülerde yumuşak anahtarlama sağlayabilmek için bastırma hücresi adı verilen ilave düzenlere ihtiyaç vardır. Bastırma hücreleri aktif ve pasif olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Pasif bastırma hücreleri yapısı itibariyle daha basit olup devrede ilave aktif güç elemanı gerektirmeyen düzenlerdir. Pasif bastırma hücreleri ile ancak ZCS ve/veya ZVS teknikleri başarılabilmektedir. Dolayısıyla birçok pasif bastırma hücresinde anahtarların kayıpları tam olarak sıfırlanamamaktadır. Aktif bastırma hücreleri ise ileri yumuşak anahtarlama teknikleri olan ZVT ve ZCT tekniklerini başarılabilmektedir. Bu tekniklerde anahtarlama kayıplarının tamamen yok edilmesi sağlanmaktadır. Özellikle yarı iletken güç elemanının MOSFET olması

durumunda ZVT ve IGBT olması durumunda ise ZCT teknikleri elverişli sonuçlar ortaya koymaktadır.

Bastırma hücreleri, yarı iletken güç elemanlarında kayıpları engellese de bu hücreler özellikle ana anahtar ve ana diyot üzerinde ilave akım ya da gerilim streslerinin oluşmasına neden olabilir. Bu akım ya da gerilim stresleri yok edilmeli veya en düşük seviyede tutulmalıdır. Ayrıca, bu hücrelerin çalışması güç anahtarının iletim ve kesime girme sürelerinin dışına taşmamalı ve böylece bastırma hücresi PWM kontrolüne engel olmamalıdır. Son olarak, bastırma hücrelerinin dönüştürücünün karmaşıklık ve maliyetini artırmaması da dikkat edilmesi gereken bir diğer husustur.

### **2.3 Yumuşak Anahtarlama Teknikleri**

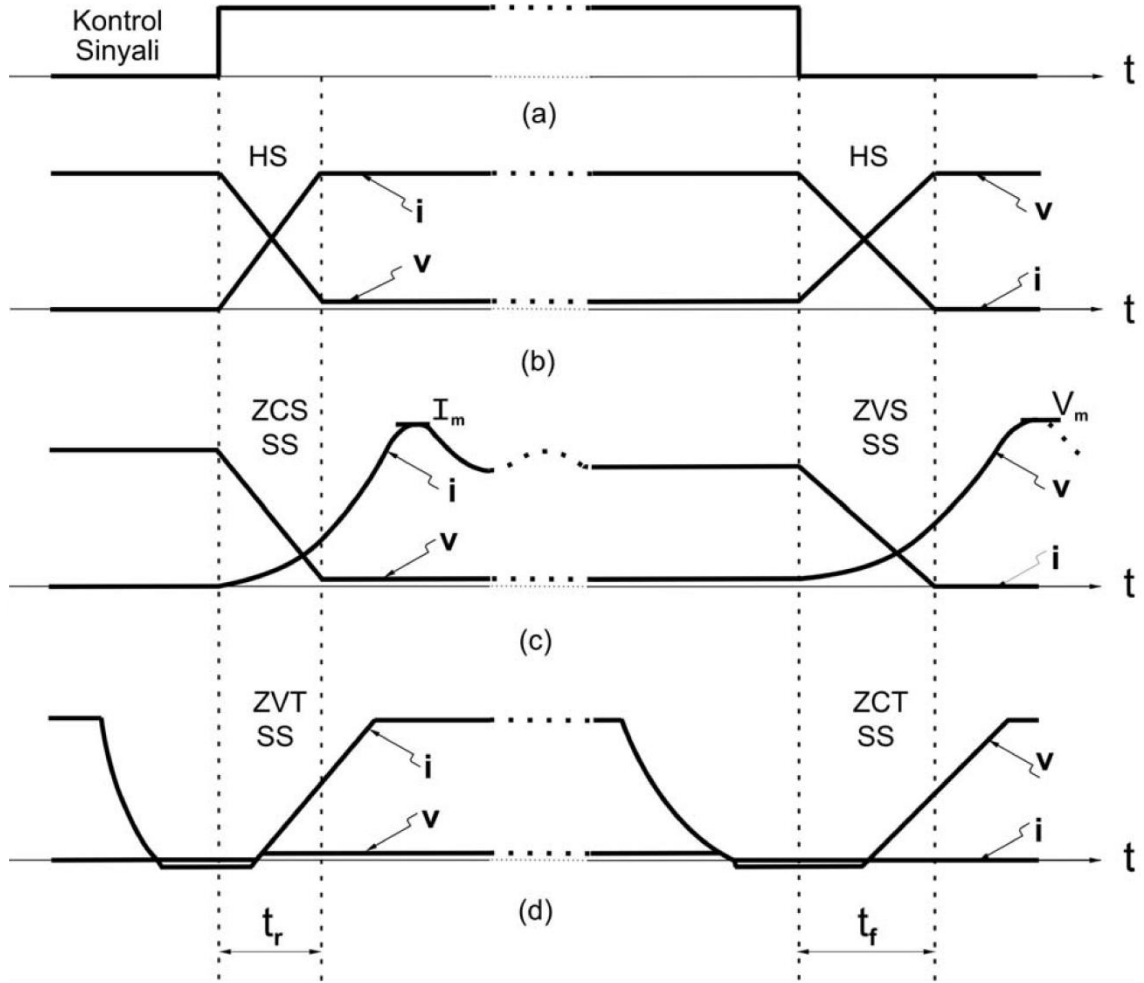
Yumuşak anahtarlama teknikleri, anahtarlama kayıplarını en aza indirerek yüksek frekanslarda çalışmaya olanak sağladığı için DC-DC dönüştürücülerin gelişiminde önemli bir role sahiptir. Yumuşak anahtarlama teknikleri,

- 1) Sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS)
- 2) Sıfır akımda anahtarlama (ZCS)
- 3) Sıfır akımda geçiş (ZCT)
- 4) Sıfır gerilimde geçiş (ZVT)

olmak üzere şeklinde 4 gruba ayrılır. Şekil 2.1’de, sırasıyla, bir yarı iletken güç elemanının kontrol sinyali, sert anahtarlama ve yumuşak anahtarlama teknikleriyle temel akım ve gerilim dalga şekilleri görülmektedir [5].

#### **2.3.1 Sıfır Gerilimde Anahtarlama (ZVS)**

Sıfır Gerilimde Anahtarlama (ZVS), güç elemanının kesime girmesi işleminde gerçekleştirilen bir yumuşak anahtarlama tekniğidir. Bu teknikte, güç anahtarına küçük değerli paralel bir kondansatör bağlanarak, kesime girme sürecinde elemanın uçlarında oluşan gerilimin yükselme hızı sınırlanır. Böylece, kesime girmede, akım ile gerilim çakışması ve doğal olarak anahtarlama enerji kaybı azaltılır. Elde edilen anahtarlama enerjisi ise kondansatöre aktarılır. Kondansatöre aktarılan bu enerji, modern bastırma hücrelerinde geri kazanılır [5].



Şekil 2. 1 (a) Güç elemanın kontrol sinyali, (b) HS, (c) ZCS - ZVS ve (d) ZCT - ZVT yumuşak anahtarlama teknikleri ile temel akım ve gerilim dalga şekilleri [5]

### 2.3.2 Sıfır Akımda Anahtarlama (ZCS)

Sıfır Akımda Anahtarlama (ZCS), güç elemanının iletme girmesi işleminde gerçekleştirilen bir yumuşak anahtarlama tekniğidir. Bu teknikte, güç anahtarına küçük değerli seri bir endüktans bağlanarak, iletme girme sürecinde elemandan geçen akımın yükselme hızı sınırlanır. Böylece, iletme girmede, akım ile gerilim çakışması azaltıldığından dolayı anahtarlama enerji kaybı da azaltılmış olur. Bu teknikte, iletme girme sürecindeki anahtarlama enerjisi endüktansa aktarılır. Endüktanstaki bu enerji, klasik bastırma hücrelerinde bir dirençte harcanırken modern bastırma hücrelerinde kısa süreli bir kısmi rezonans ile geri kazanılabilmektedir [5].

ZCS ve ZVS tekniklerinde anahtarlama enerji kaybı tamamen yok edilememektedir. Bu nedenle, bu tekniklere yaklaşık ZCS ve yaklaşık ZVS teknikleri de denilmektedir. Genel olarak, ZCS'de kullanılan endüktans seri bastırma elemanı ve ZVS'de kullanılan

kondansatör ise paralel bastırma elemanı olarak adlandırılır. Seri bastırma elemanı güç elemanında ilave gerilim stresine, paralel bastırma elemanı ise akım stresine yol açmaktadır [28].

### **2.3.3 Sıfır Akımda Geçiş (ZCT)**

Sıfır Akımda Geçiş (ZCT), güç elemanının kesime girmesinde gerçekleştirilen ileri bir yumuşak anahtarlama tekniğidir. Bu teknik ile anahtardan geçen akım kısa süreli bir kısmi rezonansla sıfıra düşürüldükten sonra kontrol sinyali kesilir ve akım ile gerilim çakışması tamamen engellenmiş olur. Akım ile gerilimin çakışmaması durumu anahtarlama kayıplarının tamamen yok edilmesini sağlar [5]. ZCT tekniğinde kesime girme de anahtarlama kayıpları yok edildiği için bu teknik ile yapılan çalışmalarda IGBT güç elemanının kullanılması tercih edilebilir. Çünkü IGBT elemanında kesime girme esnasında kuyruk akımı denilen ve ilave anahtarlama kayıplarına neden olan bir akım meydana gelmektedir. ZCT tekniği ile kesime girme işleminde IGBT elemanın kuyruk akımından dolayı oluşan kayıplar da sıfırlanabilmektedir.

### **2.3.4 Sıfır Gerilimde Geçiş (ZVT)**

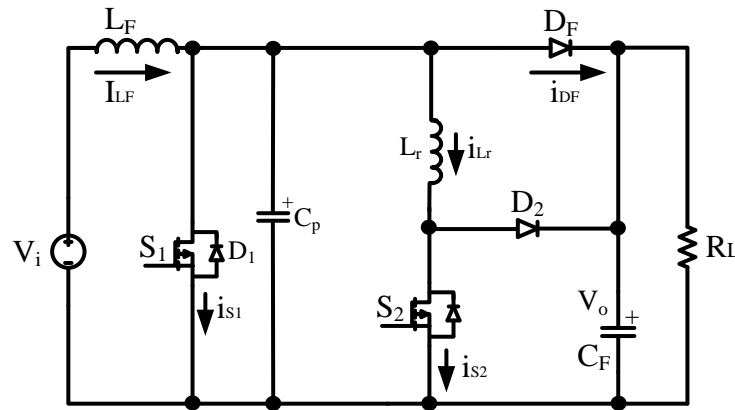
Sıfır Gerilimde Geçiş (ZVT), güç elemanının ilettime girmesinde gerçekleştirilen ileri bir yumuşak anahtarlama tekniğidir. Bu teknik ile anahtar uçlarındaki gerilim kısa süreli bir kısmi rezonansla sıfıra düşürüldükten sonra anahtara kontrol sinyali verilir. Yine bu teknikte de akım ile gerilim çakışmasının önüne geçilerek anahtarlama kayıpları tamamen sıfırlanmış olur. ZVT tekniğinde ilettime girme de anahtarlama kayıpları yok edildiği için bu teknik ile yapılan çalışmalarda MOSFET güç elemanının kullanılması tercih edilebilir. Çünkü yüksek değerli parazitik kondansatöre sahip olan MOSFET'lerde parazitik kondansatörünün enerjisi ancak ZVT tekniği ile geri kazanılabilmektedir.

## YUMUŞAK ANAHTARLAMALI PWM DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

### 3.1 Giriş

Bölüm 2’de anlatılan yumuşak anahtarlama kavramı çerçevesinde ZVT ve ZCT teknikleri iletme ve kesime girme anahtarlama kayıplarının tamamen yok edilmesi, anahtarlama enerjilerinin geri kazanımı hususunda etkin çözümler sunmaktadır. Literatürde yumuşak anahtarlama konusunda gerek ZVT gerekse ZCT tekniklerinin kullanıldığı birçok dönüştürücü yapısı önerilmiştir.

ZVT tekniği ile yumuşak anahtarlama konusunda önerilen ilk dönüştürücü Şekil 3.1’de gösterilen temel ZVT dönüştürücüsüdür [6]. Bu dönüştürücüde bastırma hücresi sayesinde ana anahtarın gerilimi sıfıra düşürüldükten sonra anahtarın kontrol sinyali uygulanır. Böylece hiçbir anahtarlama kaybı olmadan ana anahtarın ZVT ile iletme girmesi sağlanır.



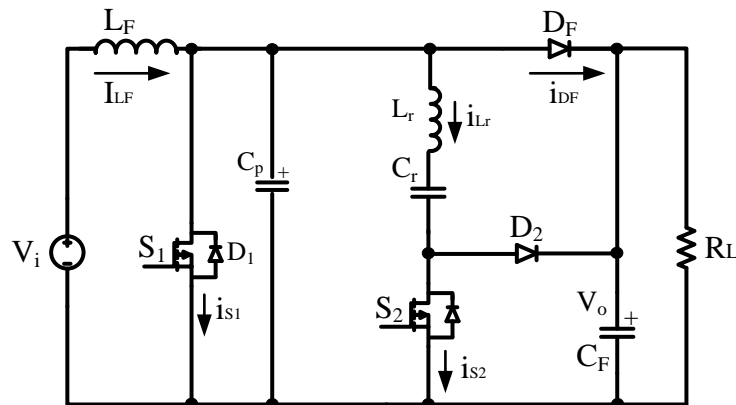
Şekil 3.1 Temel ZVT dönüştürücüsüne ait devre şeması [6]

Oldukça basit bir yapıya sahip olan bu dönüştürücünün sahip olduğu dezavantajlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Yardımcı anahtar sert anahtarlama altında kesime girer ve anahtarlama kayıpları oluşturur.
- Ana anahtarın uçlarındaki kondansatörün şarjı yük akımına bağlı olduğu için dönüştürücünün hafif yüklerde çalışması iyi değildir.

Şekil 3.2’de gösterilen ve ZCT tekniği konusunda ilk dönüştürücü olan temel ZCT dönüştürücüsünde ana anahtarın kesime girme anahtarlama kayıpları tamamen sıfırlanmaktadır [19]. Yine burada da dönüştürücüye eklenen aktif bir bastırma hücresi ile ana anahtarın akımı sıfıra düşürüldükten sonra anahtarın kontrol sinyali kesilir. Böylece ana anahtar ZCT ile kayıpsız bir şekilde kesime girer. Temel ZVT dönüştürücüsünden farklı olarak bastırma hücresinde ilave bir kondansatöre sahip olan bu dönüştürücünün başlıca dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Ana anahtar sert anahtarlama altında iletme girer. Dolayısıyla iletme girmede anahtarlama kayıpları oluşmaktadır.
- Yardımcı anahtarın kesime girmesi sert anahtarlama altında gerçekleşir.
- Bastırma hücresi ana anahtarda ilave akım stresi oluşturur. Dolayısıyla ilave iletim kayıpları söz konusudur.
- Ana diyot sert anahtarlama ile kesime girer. Dolayısıyla diyot ters toparlanma kayıpları engellenemez.



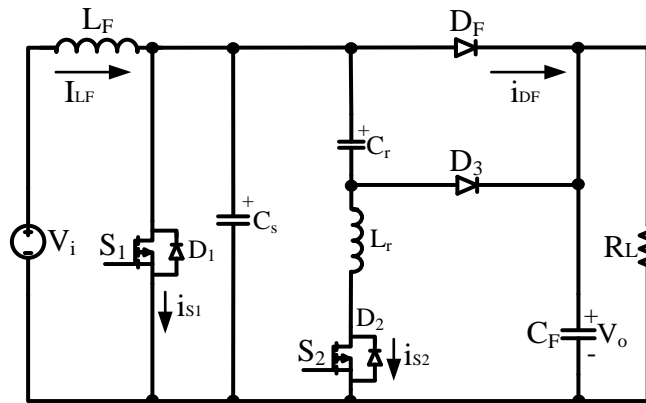
Şekil 3.2 Temel ZCT dönüştürücüsüne ait devre şeması [19]

Temel ZVT ve temel ZCT dönüştürücülerdeki bu problemlerin önüne geçebilmek için daha sonraki yıllarda birçok çalışma yapılmıştır. Bu bölümde, literatürde yer alan ZVT ve ZCT PWM DC-DC dönüştürücülere örnek dönüştürücü tiplerinin çalışma prensipleri incelenmiş ve çalışma modları analiz edilmiştir. Ayrıca örnek tip dönüştürücülerin simülasyonu yapılarak avantaj ve dezavantajları vurgulanmıştır. Simülasyon çalışmaları ilgili dönüştürücülerin yer aldığı referans çalışmalardaki güç, frekans ve eleman değerleri temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Örnek tip dönüştürücülerin çalışma prensipleri incelenirken teorik analizi kolaylaştırmak için aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- Giriş gerilimi  $V_i$  sabittir.
- $C_F$  kondansatörü çıkış gerilimini sabit tutacak kadar büyüktür.
- Bütün güç elemanları ve pasif elemanlar idealdir.
- $L_F$  endüktansı giriş akımını sabit tutacak kadar büyüktür.
- Diyotlardaki ters toparlanma süreleri ihmal edilmiştir.

### 3.2 Örnek ZVT PWM DC-DC Dönüştürücü 1

ZVT tekniği yarı iletken güç anahtarlarının iletme girme kayıplarını yok etmek üzere geliştirilmiş bir yumuşak anahtarlama tekniğidir. Literatürde ZVT tekniği ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların birçoğunda ZVT tekniği anahtarlama kayıplarının yok edilmesinde iyi bir çözüm sunarken bir takım dezavantajları da beraberinde getirmektedir.



Şekil 3.3 ZVT Örnek 1 dönüştürücüsüne ait devre şeması [12]

Şekil 3.3'te ZVT Örnek 1 dönüştürücüsüne ait temel devre şeması verilmiştir [12]. Burada  $V_i$  giriş gerilim kaynağı,  $V_o$  çıkış gerilimi,  $S_1$  ana anahtar,  $S_2$  yardımcı anahtar,

$D_1$  ve  $D_2$  anahtarların dahili diyotları,  $L_F$  ana endüktans,  $C_F$  çıkış filtre kondansatörü,  $D_F$  ana diyot,  $D_3$  yardımcı diyot,  $L_r$  rezonans endüktansı,  $C_r$  rezonans kondansatörü,  $C_s$  bastırma kondansatörü ve  $R_L$  omik yüküdür.

### 3.2.1 Çalışma Modları

ZVT Örnek 1 dönüştürücüsünün bir anahtarlama periyodu içerisinde sekiz çalışma modu vardır. Bu çalışma modları Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

**Mod 1** [ $t_0 < t < t_1$  : Şekil. 3.4 (a) ]

$t = t_0$  anında  $S_2$  anahtarına bir kontrol sinyali uygulanmasıyla bu mod başlatılır. Hem ana diyodun ters toparlanma akımının hemde yardımcı anahtar akımının değişim hızları  $L_r$  sayesinde sınırlandırıldığından dolayı  $S_2$  yaklaşık ZCS ile iletme girerken  $D_F$  diyonu da yaklaşık ZCS ile kesime girer. Bu modda  $L_r$ 'nin akımı ve  $C_r$ 'nin gerilimine ait ifadeler aşağıdaki gibidir:

$$i_{L_r}(t) = \frac{V_o}{Z_1} \sin(\omega_1(t-t_0)) \quad (3.1)$$

$$v_{C_r}(t) = V_o - V_o \cos(\omega_1(t-t_0)) \quad (3.2)$$

Bu denklemlerde,

$$Z_1 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (3.3)$$

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (3.4)$$

eşitlikleri geçerlidir.

**Mod 2** [ $t_1 < t < t_2$  : Şekil. 3.4 (b) ]

$D_F$  diyonu ZCS ile kesime girer girmez  $C_s$  kondansatörü  $C_r$  ve  $L_r$  üzerinden rezonansla deşarj olmaya başlar.  $D_F$  diyonu üzerindeki gerilimin yükselme oranı  $V_o - V_{C_s}$ 'dir ve bu değer ZVS ile kesime girmeyi başarmak için  $C_s$  tarafından sınırlandırılır. Bu modda rezonans endüktans akımı, rezonans kondansatör gerilimi ve bastırma kondansatörü gerilimi ifadeleri aşağıdaki gibidir:

$$i_{L_r}(t) = \frac{V_1}{Z_2} \sin(\omega_2(t-t_1)) + I_1 \cos(\omega_2(t-t_1)) \quad (3.5)$$

$$v_{C_s}(t) = \frac{C}{C_s} \left[ V_1 \cos(\omega_2(t-t_1)) - I_1 Z_2 \sin(\omega_2(t-t_1)) - V_1 \right] + \frac{I_{LF}}{C_r + C_s} (t-t_1) + V_o \quad (3.6)$$

$$v_{C_r}(t) = \frac{C}{C_r} \left[ V_1 \cos(\omega_2(t-t_1)) - I_1 Z_2 \sin(\omega_2(t-t_1)) - V_1 \right] + \frac{I_{LF}}{C_r + C_s} (t-t_1) + V_{C_r}(t_1) \quad (3.7)$$

Bu denklemlerde,

$$I_1 = i_{L_r}(t_1) - \frac{C}{C_s} I_{LF} \quad (3.8)$$

$$V_1 = V_o - V_{C_r}(t_1) \quad (3.9)$$

$$C = \frac{C_r C_s}{C_r + C_s} \quad (3.10)$$

$$Z_2 = \sqrt{\frac{L_r}{C}} \quad (3.11)$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_r C}} \quad (3.12)$$

eşitlikleri geçerlidir.

**Mod 3** [ $t_2 < t < t_3$  : Şekil. 3.4 (c) ]

$t = t_2$  anında  $V_{C_s}$  gerilimi sıfıra düşer ve ana anahtarın dahili diyodu  $D_1$  iletme girer. Bu andan sonra  $S_1$  ana anahtarı ZVT ile iletme sokulabilir.  $L_r$  üzerindeki gerilim  $-V_{C_r}$  değerine eşit olduğundan dolayı  $L_r$  endüktansı akımı negatif eğimdedir. Ana anahtarın ZVT ile iletme girebilmesi için  $D_1$  diyodu iletimdeyken anahtarın sinyali uygulanmalıdır. Bu modda ana anahtar akımının yükselme hızı  $L_r$  ve  $C_r$  arasındaki rezonansa bağlıdır. Bu modda  $i_{L_r}$  ve  $V_{C_r}$  için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

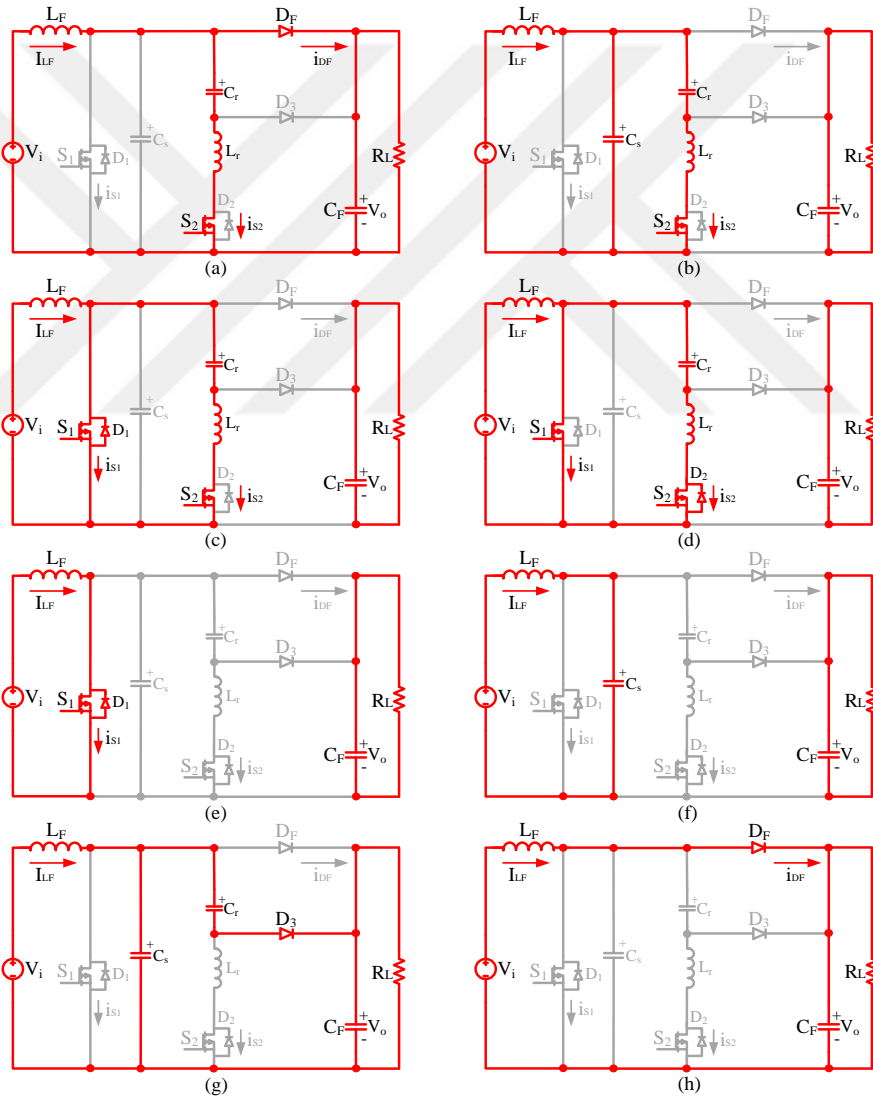
$$i_{L_r}(t) = I_2 \cos(\omega_1(t-t_2)) - \frac{V_2}{Z_1} \sin(\omega_1(t-t_2)) \quad (3.13)$$

$$V_{C_r}(t) = I_2 Z_1 \sin(\omega_1(t-t_2)) + V_2 \cos(\omega_1(t-t_2)) \quad (3.14)$$

Bu denklemlerde,

$$I_2 = i_{L_r}(t_2) = \sqrt{\frac{L_r i_{L_r-peak}^2 - C_r V_2^2}{L_r}} \quad (3.15)$$

$$V_2 = V_{C_r}(t_2) = \frac{I_{LF}}{C_r}(t_2 - t_1) + \frac{C_s}{C_r} V_o + V_{C_r}(t_1) \quad (3.16)$$



Şekil 3. 4 ZVT Örnek 1 dönüştürücüsünün çalışma modlarına ait eşdeğer devre şemaları (a) Mod 1, (b) Mod 2, (c) Mod 3, (d) Mod 4, (e) Mod 5, (f) Mod 6, (g) Mod 7, (h) Mod 8 [12]

**Mod 4** [ $t_3 < t < t_4$  : Şekil. 3.4 (d) ]

$t = t_3$  anında bir önceki aralıkta sinyali uygulanan ana anahtarın akımı giriş akımına erişince  $L_r$  akımı sıfıra düşer ve  $S_2$  yardımcı anahtarının dahili diyodu  $D_2$  iletme girer.  $D_2$  diyodunun iletimde olduğu sürede yardımcı anahtarın sinyali kesilerek yardımcı anahtar ZCT ile kesime sokulmuş olur.  $L_r$  ve  $C_r$  arasındaki rezonans bu aralıkta da devam eder.  $C_r$  gerilimi azalırken  $L_r$  akımı ters yönde artmaya başlar.  $L_r$ 'nin artan akımı ana anahtar üzerinden akacağı için anahtar üzerinde ilave bir akım stresi oluşur. Aynı zamanda bu aralıkta  $D_3$  yardımcı diyodu üzerinde bir gerilim stresi oluşur ve bu gerilim stresi  $V_o + V_{Cr\_peak}$  değerine eşittir.  $V_{Cr\_peak}$  aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$V_{Cr\_peak} = \sqrt{\frac{L_r i_{Lr}^2(t_2) - C_r V_{Cr}^2(t_2)}{C_r}} \quad (3.17)$$

Aralığın sonunda  $L_r$  akımı sıfıra düşer ve  $V_{Cr}$ 'nin polaritesi yön değiştirir. Bu modda ana anahtar üzerinde oluşan akım stresi aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir:

$$i_{S1\_peak} = I_{LF} + i_{Lr\_peak} \quad (3.18)$$

**Mod 5** [ $t_4 < t < t_5$  : Şekil. 3.4 (e) ]

$t = t_4$  anında  $S_2$  anahtarının sinyali önceki aralıkta kesildiği için  $L_r$  ve  $C_r$  arasındaki rezonans bu modun başında sona erer. Bu mod klasik PWM yükseltici dönüştürücünün iletim aralığıdır.

**Mod 6** [ $t_5 < t < t_6$  : Şekil. 3.4 (f) ]

Ana anahtar sinyalinin kesilmesiyle başlayan bu aralıkta  $C_s$  kondansatörü sabit giriş akımı altında lineer olarak çıkış gerilimine şarj olur.

**Mod 7** [ $t_6 < t < t_7$  : Şekil. 3.4 (g) ]

$C_s$  kondansatörünün gerilimi  $V_o - V_{Cr\_peak}$  değerine erişince  $D_3$  diyodu ZVS ile iletme girer. Böylece  $C_r$  kondansatörü  $D_3$  diyodu üzerinden enerjisini çıkışa aktarırken  $C_s$  kondansatörü de şarj olmaya devam eder. Aralık sonunda  $V_{Cs}$  çıkış gerilimine erişir ve  $V_{Cr}$  de sıfıra düşer.

**Mod 8** [ $t_7 < t < t_8$  : Şekil. 3.4 (h) ]

$t = t_7$  anında  $D_F$  ana diyodunun ZVS altında ilettime girmesiyle başlayan bu mod klasik PWM yükseltici dönüştürücünün kesim aralığıdır. Bu modun sonunda başlangıç koşullarına dönülür ve bir anahtarlama periyodu tamamlanmış olur.

### 3.2.2 Genel Değerlendirme ve Sonuçlar

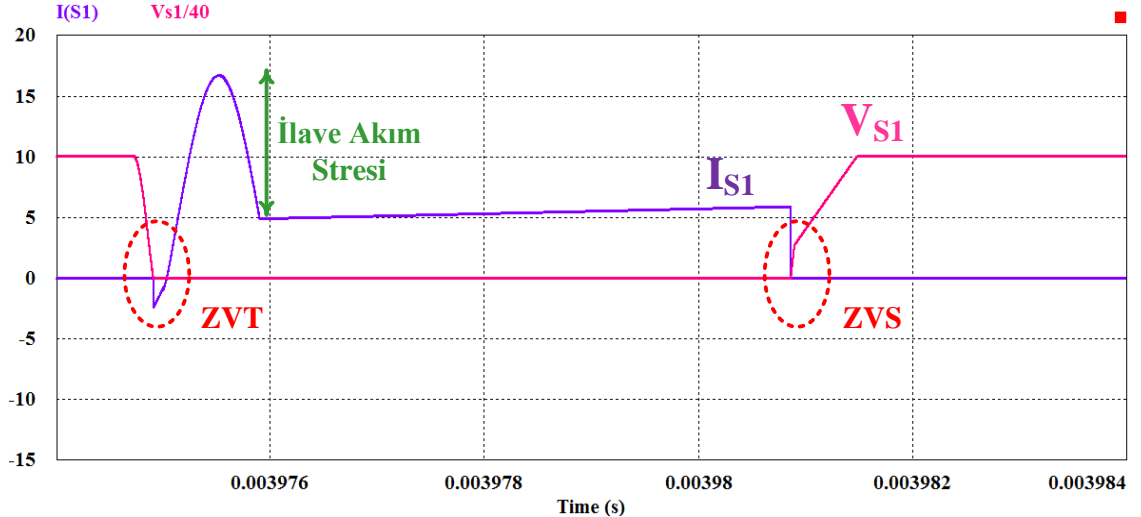
ZVT Örnek 1 dönüştürücüsü 400 V çıkış gerilimi, 750 W çıkış gücü ve 80 kHz anahtarlama frekansı altında deneysel çalışmaları sunulmuş bir dönüştürücüdür [12]. Bu değerler ile simülasyon çalışması yapılmış ve elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

Şekil 3.5 (a) ana anahtarın akım ve gerilim dalga şekillerini, Şekil 3.5 (b) ise yardımcı anahtarın akım ve gerilim dalga şekillerini göstermektedir. Şekillerden görüldüğü gibi ana anahtar ZVT ile ilettime ve ZVS ile kesime girmektedir. Yardımcı anahtar ise ZCS ile ilettime ve ZCT ile kesime girmektedir. Ancak burada ana anahtarda ilave bir akım stresi olması dönüştürücünün dezavantajlarından biridir.

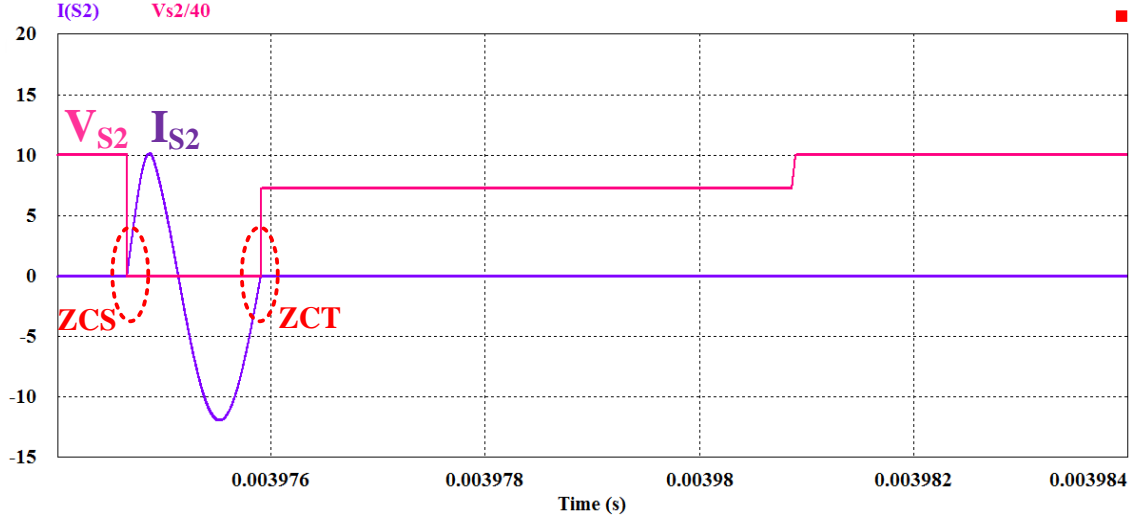
Şekil 3.6 (a) ana diyodun akım ve gerilim dalga şekillerini, Şekil 3.6 (b) ise yardımcı diyodun akım ve gerilim dalga şekillerini göstermektedir. Şekillerden her iki elemanında yumuşak anahtarlama ile ilettime ve kesime girdiği görülmektedir. Ancak yardımcı diyot üzerinde ilave bir gerilim stresi olması dönüştürücünün bir diğer dezavantajıdır.

Sonuç olarak yumuşak anahtarlamanın tüm yarı iletkenlerde sağlandığı ZVT Örnek 1 dönüştürücüsünün başlıca dezavantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- 1) Ana anahtar üzerinde ilave akım stresi oluşur. Bu durum anahtarda ilave iletim kayıplarına neden olur.
- 2) Yardımcı diyotta ilave gerilim stresi oluşur. Bu durumda uygulama aşamasında seçilecek olan yardımcı diyodun gerilim dayanımının daha fazla olması gerektiğinden dolayı diyot maliyeti artar.

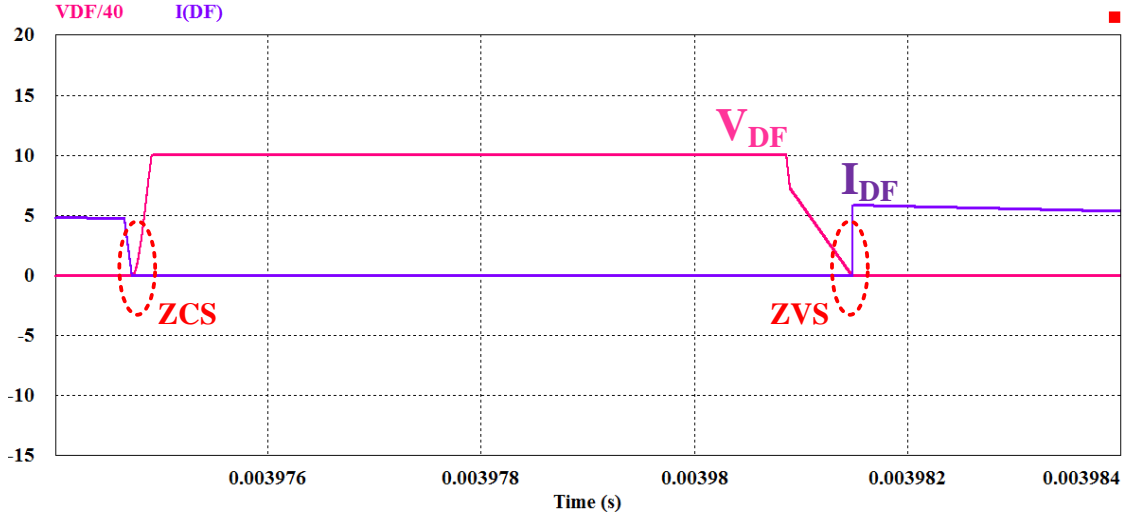


(a)

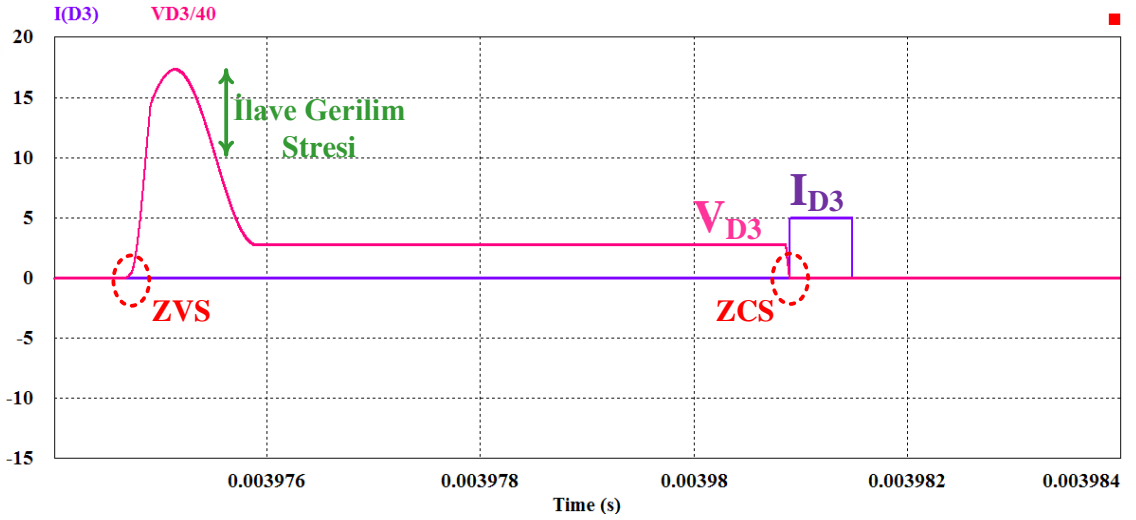


(b)

Şekil 3. 5 ZVT Örnek 1 dönüştürücüsünün simülasyon sonuçları (a) Ana anahtar akım ve gerilimi, (b) Yardımcı anahtar akım ve gerilimi (5A/div, 200V/div, 2  $\mu$ s/div)



(a)

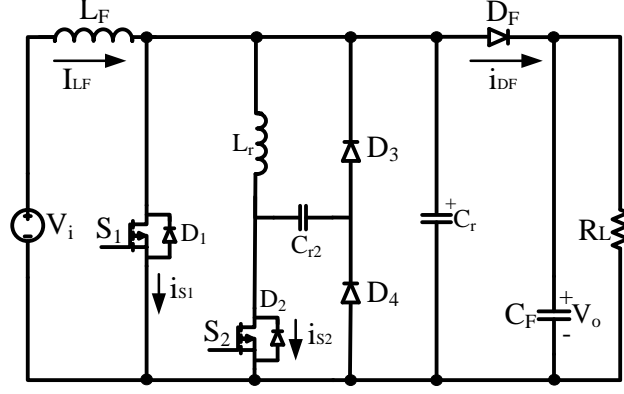


(b)

Şekil 3. 6 ZVT Örnek 1 dönüştürücüsünün simülasyon sonuçları (a) Ana diyot akım ve gerilimi, (b) Yardımcı diyot akım ve gerilimi (5A/div, 200V/div, 2  $\mu$ s/div)

### 3.3 Örnek ZVT PWM DC-DC Dönüştürücü 2

Şekil 3.7’de ZVT Örnek 2 dönüştürücüsüne ait temel devre şeması verilmiştir [17]. Burada  $V_i$  giriş gerilim kaynağı,  $V_o$  çıkış gerilimi,  $S_1$  ana anahtar,  $S_2$  yardımcı anahtar,  $D_1$  ve  $D_2$  anahtarların dahili diyotları,  $L_F$  ana endüktans,  $C_F$  çıkış filtre kondansatörü,  $D_F$  ana diyot,  $D_3$  ve  $D_4$  yardımcı diyotlar,  $L_r$  rezonans endüktansı,  $C_r$  ve  $C_{r2}$  rezonans kondansatörleri ve  $R_L$  omik yüküdür.



Şekil 3.7 ZVT Örnek 2 dönüştürücüsüne ait devre şeması [17]

### 3.3.1 Çalışma Modları

ZVT Örnek 2 dönüştürücüsünün bir anahtarlama periyodu içerisinde dokuz çalışma modu vardır. Bu çalışma modları Şekil 3.8’de gösterilmiştir.

**Mod 1** [ $t_0 < t < t_1$  : Şekil. 3.8 (a) ]

Bu mod süresince  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarları kesim durumunda olup ana endüktansta biriken enerji  $D_F$  ana diyodu üzerinden çıkışa aktarılmaktadır. Aynı zamanda rezonans endüktansı akımı sıfır ve rezonans kondansötörü gerilimi ise  $V_o$  değerlerine eşittir. Bu mod için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

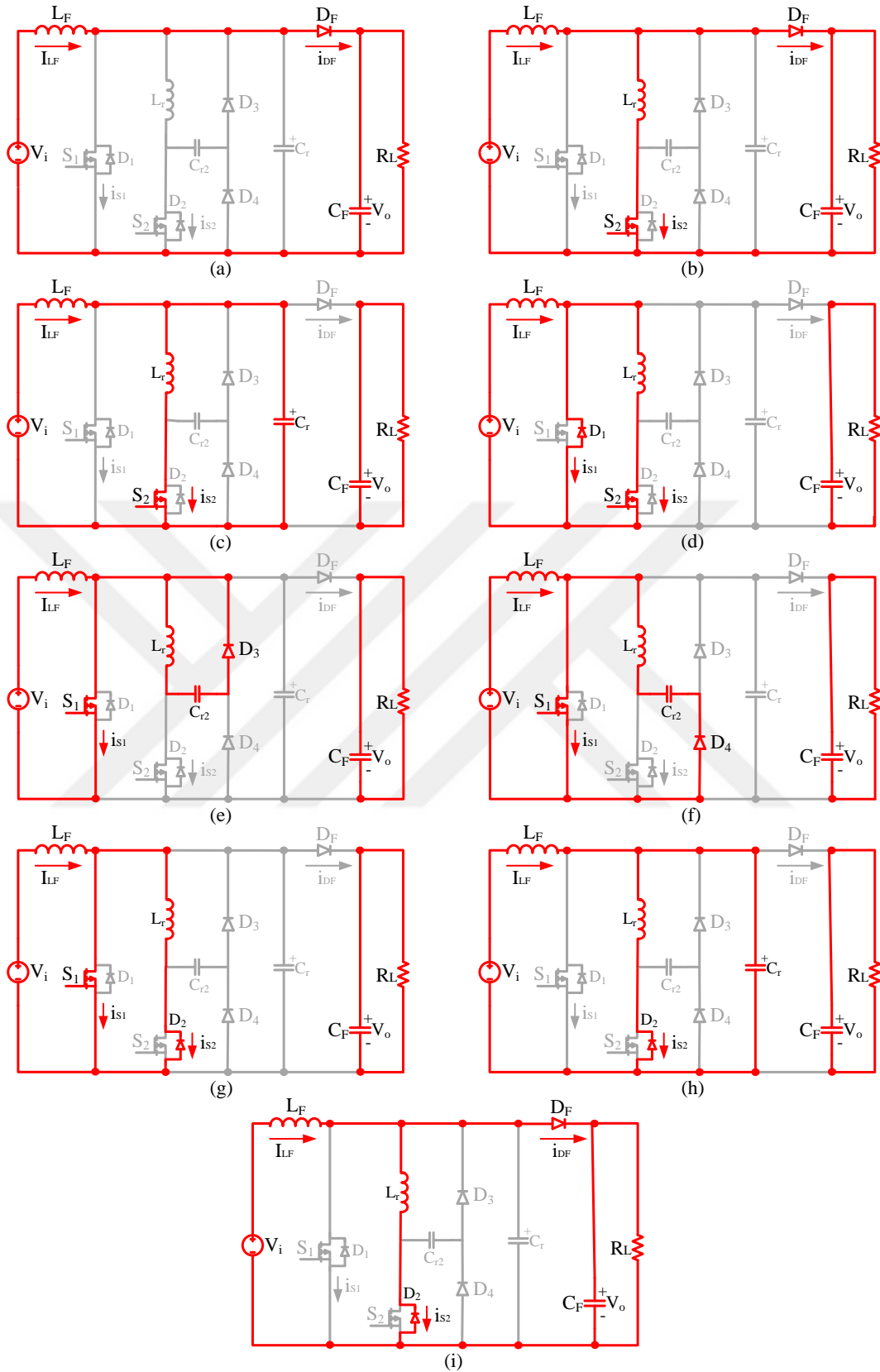
$$i_{L_r}(t) = \frac{V_i - V_o}{L_F}(t - t_0) + I(t_0) \quad (3.19)$$

$$v_{C_r}(t) = V_o \quad (3.20)$$

**Mod 2** [ $t_1 < t < t_2$  : Şekil. 3.8 (b) ]

Yardımcı anahtara kontrol sinyali uygulandığı zaman bu mod başlar. Yardımcı anahtarın ZCS ile iletme girmesiyle birlikte rezonans endüktansı akımı sıfırdan itibaren lineer olarak artmaya başlar.  $t = t_2$  anında rezonans endüktansı akımının giriş akımına erişmesi ile bu mod sona erer. Bu mod için aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$i_{L_r}(t) = \frac{V_o}{L_r}(t - t_1) \quad (3.21)$$



Şekil 3. 8 ZVT Örneğ 2 dönüştürücüsünün çalışma modlarına ait eşdeğer devre şemaları (a) Mod 1, (b) Mod 2, (c) Mod 3, (d) Mod 4, (e) Mod 5, (f) Mod 6, (g) Mod 7, (h) Mod 8 (i) Mod 9 [17]

**Mod 3** [ $t_2 < t < t_3$  : Şekil. 3.8 (c) ]

$t = t_2$  anında rezonans endüktansı akımının giriş akımına ulaşmasıyla  $D_F$  ana diyodu ZCS ile kesime girer ve bu mod başlar. Daha sonra  $L_r$  ve  $C_r$  arasında bir rezonans oluşur. Böylece  $C_r$  kondansatörü gerilimi rezonansla azalırken  $L_r$  endüktansı akımı giriş akımının üzerine çıkar.  $C_r$  geriliminin sıfıra düşmesiyle bu mod sona erer. Bu mod için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$i_{L_r}(t) = \frac{V_o}{Z_r} \sin(\omega_r(t-t_2)) + I_{LF} \quad (3.22)$$

$$v_{C_r}(t) = V_o \cos(\omega_r(t-t_2)) \quad (3.23)$$

Bu denklemlerde,

$$Z_r = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (3.24)$$

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (3.25)$$

eşitlikleri geçerlidir.

**Mod 4** [ $t_3 < t < t_4$  : Şekil. 3.8 (d) ]

$t = t_3$  anında  $C_r$  rezonans kondansatörü geriliminin sıfıra düşmesiyle birlikte ana anahtarın dahili diyodu ( $D_1$ ) iletme girer. Bu durumda,  $S_1$  ana anahtarının gerilimi sıfıra eşittir ve anahtara kontrol sinyali uygulanarak ZVT ile iletme girmesi sağlanır. Bu mod süresince rezonans endüktansı akımının giriş akımından fazla kısmı anahtarın dahili diyodu üzerinden serbestçe dolaşır. Dolayısıyla bu mod serbest dolaşım aralığı olarak adlandırılır. Bu mod için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$i_{L_r}(t) = \frac{V_i}{Z_r}(t-t_3) + I_{LF} \quad (3.26)$$

$$v_{C_r}(t) = 0 \quad (3.27)$$

**Mod 5** [ $t_4 < t < t_5$  : Şekil. 3.8 (e) ]

Mod 4'te  $S_1$  ana anahtarının ZVT ile iletme girmesi sağlandıktan sonra  $t = t_4$  anında  $S_2$  yardımcı anahtarının sinyali kesilir ve bu mod başlar. Üzerinde akım bulunan  $L_r$

endüktansı ve boş olan  $C_{r2}$  kondansatörü arasında  $D_3$  diyodu üzerinden bir rezonans başlar.  $C_{r2}$  geriliminin rezonansla artmaya başlaması  $S_2$  yardımcı anahtarının ZVS ile kesime girmesini sağlar.  $L_r$  ve  $C_{r2}$  arasındaki çeyrek rezonans süresi kadar devam eden bu mod  $L_r$  akımının sifıra düşmesiyle sona erer. Bu mod için aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$i_{L_r}(t) = i_{L_r}(t_3) \cos(\omega_a(t-t_4)) \quad (3.28)$$

Bu denklemde,

$$\omega_a = \frac{1}{\sqrt{L_r C_{r2}}} \quad (3.29)$$

eşitliği geçerlidir.

**Mod 6** [ $t_5 < t < t_6$  : Şekil. 3.8 (f) ]

Mod 5'te  $L_r$  akımının sifıra düşmesinden sonra  $C_{r2}$  ve  $L_r$  arasındaki rezonans ters yönde  $D_2$  diyodu ve  $S_1$  ana anahtarı üzerinden devam eder. Böylece  $C_{r2}$  deşarj olurken  $L_r$  akımı ters yönde artar.  $C_{r2}$  gerilimi sifıra düştüğü anda  $L_r$  akımı maksimum değere ulaşır ve bu mod sona erer. Bu mod için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$v_{C_{r2}}(t) = Z_a i_{L_r}(t_3) \sin(\omega_a(t-t_4)) \quad (3.30)$$

$$v_{C_{r2}}(t_6) = 0 \quad (3.31)$$

**Mod 7** [ $t_6 < t < t_7$  : Şekil. 3.8 (g) ]

$t = t_6$  anında  $C_{r2}$  kondansatörünün gerilimi sifıra düştükten  $L_r$  akımının giriş akımından fazla olan kısmı yardımcı anahtarın dahili diyodu ( $D_2$ ) üzerinden geçerek serbest dolaşım oluşturur. Ana anahtarın kontrol sinyalinin kesilmesiyle sona eren bu mod için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$i_{L_r}(t) = \frac{V_i}{L_r}(t-t_3) + I_{L_r} \quad (3.32)$$

$$i_{L_r}(t_7) = -i_{L_r}(t_3) \quad (3.33)$$

**Mod 8** [ $t_7 < t < t_8$  : Şekil. 3.8 (h) ]

$t = t_7$  anında  $S_1$  ana anahtarının ZVS altında kesime girmesiyle başlayan bu modda  $C_r$  kondansatörü giriş akımı ve  $L_r$  endüktansı akımı ile şarj olur. İki endüktans akımı  $C_r$  kondansatörünü şarj ettiğinden dolayı kondansatör gerilimi  $L_r$  endüktansının akımı bitmeden çıkış gerilimine erişir ve bu mod sona erer. Bu mod için aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$i_{L_r}(t) = I_{LF} - [I_{LF} + i_{L_r}(t_3)] \cos(\omega_r t) \quad (3.34)$$

**Mod 9** [ $t_8 < t < t_9$  : Şekil. 3.8 (i) ]

$t = t_8$  anında  $C_r$  kondansatörü geriliminin çıkış gerilimine erişmesiyle  $D_F$  ana diyodu ZVS ile iletme girer ve bu mod başlar. Rezonans endüktansı kalan enerjisini ana diyot üzerinden çıkışa aktarır. Bu modun sonunda rezonans endüktansı akımı sıfıra düşer ve klasik PWM yükseltici dönüştürücünün kesim aralığı olan başlangıç koşullarına dönülür. Bu mod için aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$i_{L_r}(t) = \frac{V_o}{L_r} t - i_{L_r}(t_3) \quad (3.35)$$

### 3.3.2 Genel Değerlendirme ve Sonuçlar

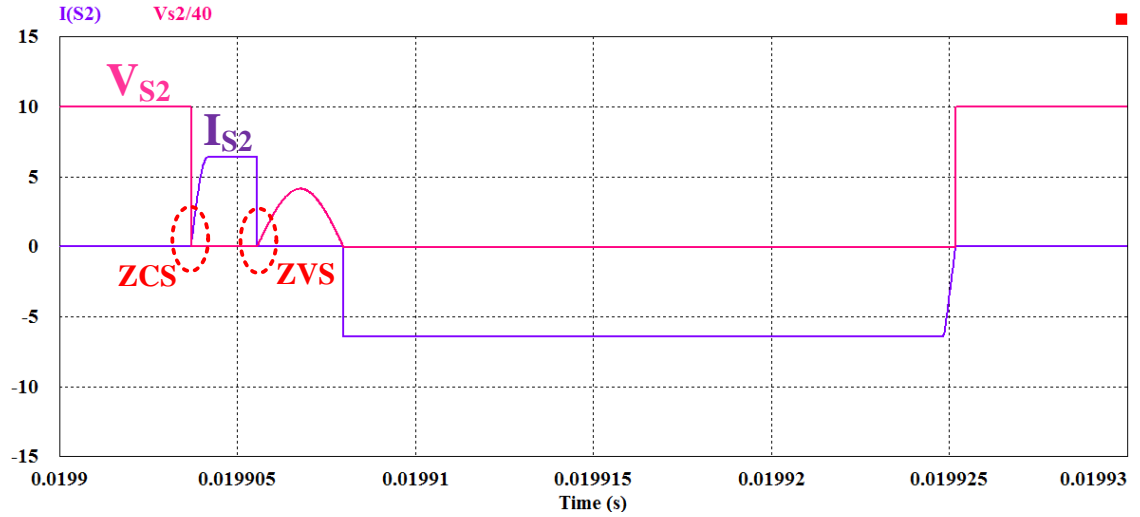
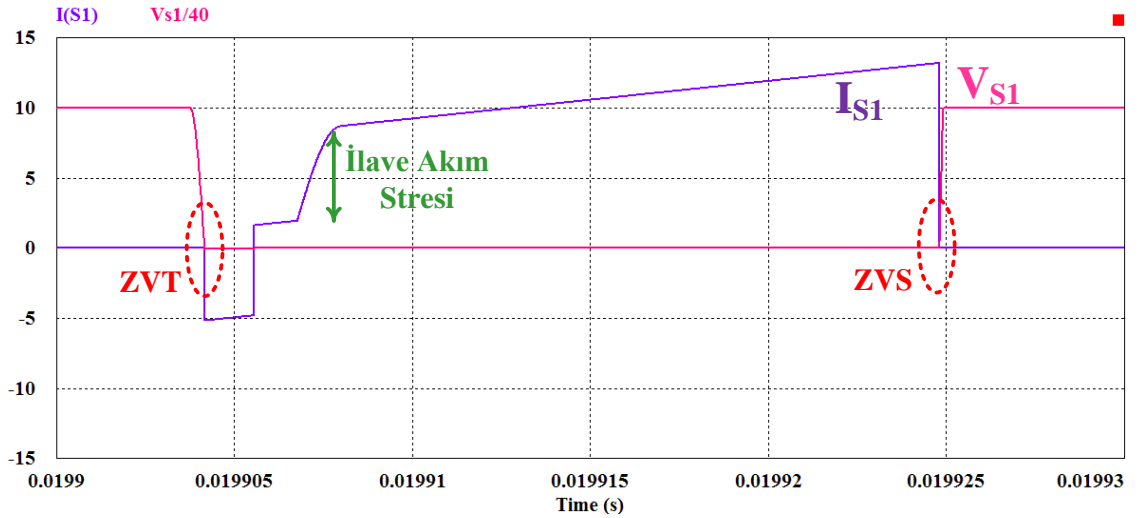
ZVT Örnek 2 dönüştürücüsü 400 V çıkış gerilimi, 600 W çıkış gücü ve 30 kHz anahtarlama frekansı altında deneysel çalışmaları sunulmuş bir dönüştürücüdür [17]. Bu değerler ile simülasyon çalışması yapılmış ve elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

Şekil 3.9 (a)  $S_1$  ana anahtarının akım ve gerilim dalga şekillerini, Şekil 3.9 (b) ise  $S_2$  yardımcı anahtarının akım ve gerilim dalga şeklini göstermektedir. Burada ana anahtar ZVT ile iletme ve ZVS ile kesime girmektedir. Yardımcı anahtar ise ZCS ile iletme ve ZVS ile kesime girmektedir. Ana anahtar üzerinde ciddi bir akım stresi vardır ve bu akım stresi periyodun büyük bir kısmında anahtar üzerinde kayıp oluşturmaktadır.

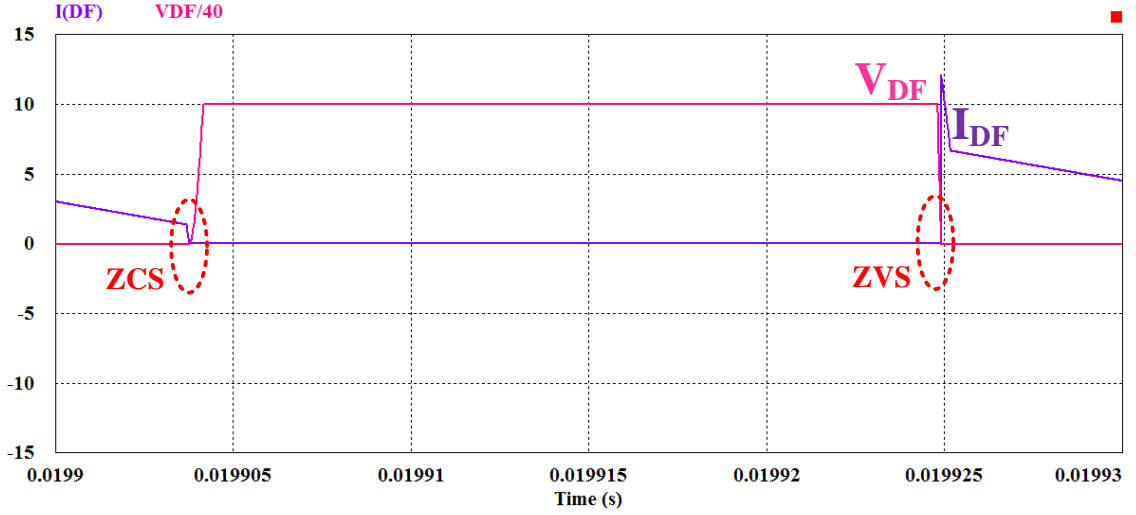
Şekil 3.10 (a)  $D_F$  ana diyodunun akım ve gerilim dalga şekillerini, Şekil 3.10 (b) ise  $D_3$  ve  $D_4$  yardımcı diyotlarının akım ve gerilim dalga şekillerini göstermektedir. Diyotların iletme ve kesime girmeleri yumuşak anahtarlama altında gerçekleşmektedir. Özellikle şekilden görüldüğü gibi yardımcı diyotlarda hiçbir zaman akım gerilim çakışması yaşanmamaktadır.

Sonuç olarak ZVT Örnek 2 dönüştürücüsünde tüm yarı iletkenler yumuşak anahtarlama ile çalışmasına rağmen bu dönüştürücü bazı dezavantajlara sahiptir. Bu dezavantajlar aşağıdaki gibidir:

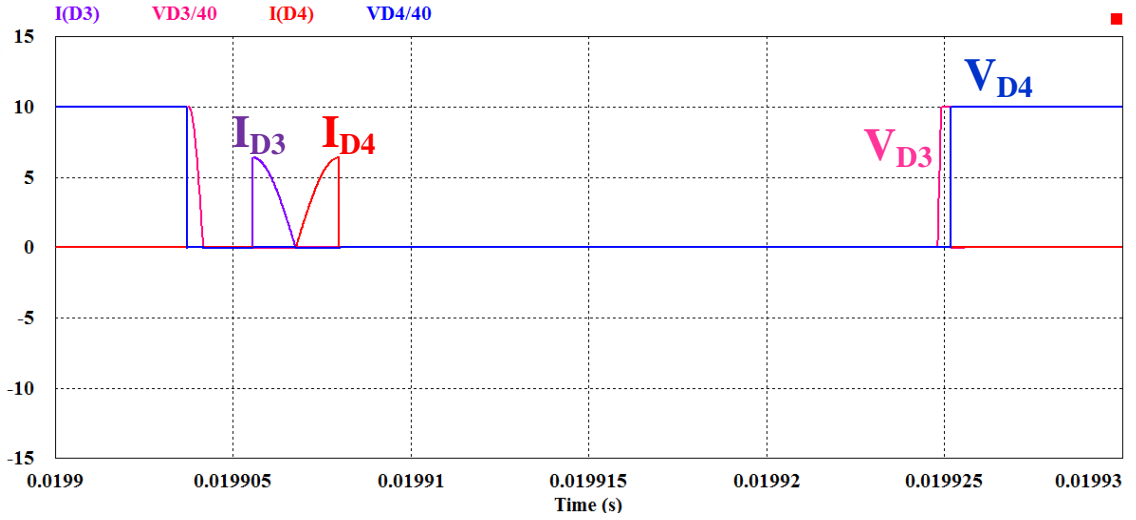
- 1) Rezonans endüktansı akımı ana anahtar üzerinden uzun bir süre serbestçe dolaşmaktadır. Bu süre zarfında üzerinden giriş akımından fazla akım geçen ana anahtarda ilave iletim kayıpları oluşmaktadır.
- 2) Uygulama sonuçlarında yardımcı anahtar geriliminde yüksek frekanslı salınımlar meydana gelmektedir. Bu salınımları EMI gürültülerine neden olur.



Şekil 3. 9 ZVT Örnek 2 dönüştürücüsünün simülasyon sonuçları (a) Ana anahtar akım ve gerilimi, (b) Yardımcı anahtar akım ve gerilimi (5A/div, 200V/div, 5  $\mu$ s/div)



(a)



(b)

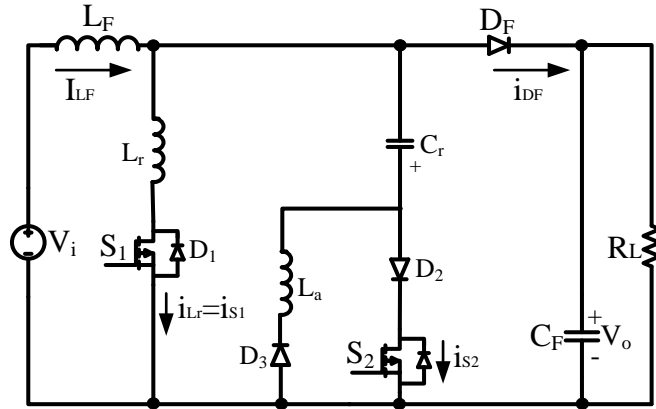
Şekil 3. 10 ZVT Örnek 2 dönüştürücüsünün simülasyon sonuçları (a) Ana diyot akım ve gerilimi, (b) Yardımcı diyotların akım ve gerilimleri (5A/div, 200V/div, 5  $\mu$ s/div)

### 3.4 Örnek ZCT PWM DC-DC Dönüştürücü 1

ZCT tekniği yarı iletken güç anahtarlarının kesime girme kayıplarını yok etmek üzere geliştirilmiş bir yumuşak anahtarlama tekniğidir. Literatürde ZCT tekniği ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların bir kısmında ZCT tekniği anahtarlama kayıplarının yok edilmesinde iyi bir çözüm sunarken bir takım dezavantajları da beraberinde getirmektedir.

Şekil 3.11'de ZCT Örnek 1 dönüştürücüsüne ait temel devre şeması verilmiştir [25]. Burada  $V_i$  giriş gerilim kaynağı,  $V_o$  çıkış gerilimi,  $S_1$  ana anahtar,  $S_2$  yardımcı anahtar,  $D_1$  ana anahtarın dahili diyodu,  $D_F$  ana diyot,  $D_2$  ve  $D_3$  yardımcı diyotlar,  $L_F$  ana

endüktans,  $C_F$  çıkış filtre kondansatörü,  $L_r$  ve  $L_a$  rezonans endüktansları,  $C_r$  rezonans kondansatörü ve  $R_L$  omik yüküdür.



Şekil 3.11 ZCT Örnek 1 dönüştürücüsüne ait devre şeması [25]

### 3.4.1 Çalışma Modları

ZCT Örnek 1 dönüştürücüsünün bir anahtarlama periyodu içerisinde yedi çalışma modu vardır [25]. Bu çalışma modları Şekil 3.12’de gösterilmiştir.

**Mod 1** [ $t_0 < t < t_1$  : Şekil. 3.12 (a) ]

$t = t_0$  anından önce bütün anahtarlar kesimdedir ve giriş akımı  $D_F$  diyodu üzerinden çıkışa doğru geçer.  $t = t_0$  anında  $S_1$  anahtarına kontrol sinyali uygulanır ve ana anahtar seri  $L_r$  endüktansı sayesinde ZCS ile iletme girer.  $L_r$  akımı giriş akımına ulaştığı anda  $D_F$  diyodu ZCS ile kesime girer ve bu mod tamamlanır. Bu mod süresince  $C_r$  gerilimi  $-V_o$  değerindedir. Bu mod için aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$i_{L_r}(t) = \frac{V_o}{L_r} t \quad (3.36)$$

**Mod 2** [ $t_1 < t < t_2$  : Şekil. 3.12 (b) ]

Bu modda  $L_r$  endüktansı akımı  $D_3$  ve  $S_1$  üzerinden  $L_a - C_r - L_r$  arasındaki rezonansla artmaya devam eder. Rezonans esnasında önce  $C_r$ 'nin enerjisi  $L_a$ 'ya aktarılır, daha sonra da  $L_a$  enerjisini  $C_r$ 'ye aktararak  $C_r$  gerilimini  $V_o$  değerine çıkarır.  $L_a$  akımının da sıfıra düşmesiyle  $D_3$  diyodu ZCS ile kesime girer ve bu mod tamamlanır. Bu mod için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$i_{L_r}(t) = I_{LF} + V_o \sqrt{\frac{C_r}{L_r + L_a}} \sin(\omega_a t) \quad (3.37)$$

$$i_{L_a}(t) = V_o \sqrt{\frac{C_r}{L_r + L_a}} \sin(\omega_a t) \quad (3.38)$$

$$v_{C_r}(t) = -V_o \cos(\omega_a t) \quad (3.39)$$

Bu denklemlerde,

$$\omega_a = \frac{1}{\sqrt{(L_r + L_a) C_r}} \quad (3.40)$$

eşitliği geçerlidir.

**Mod 3** [ $t_2 < t < t_3$  : Şekil. 3.12 (c) ]

Bu mod klasik PWM yükseltici dönüştürücünün iletim aralığıdır. Bu modda giriş akımı  $S_1$  ana anahtarı üzerinden serbestçe akar.

**Mod 4** [ $t_3 < t < t_4$  : Şekil. 3.12 (d) ]

$t = t_3$  anında  $S_2$  yardımcı anahtarına iletim sinyali verilerek yardımcı anahtar ZCS ile iletme sokulur.  $C_r$  kondansatörü gerilimi ve  $L_r$  endüktansı akımı  $S_1 - S_2 - D_2 - C_r - L_r$  üzerinden bir rezonansla azalmaya başlar.  $L_r$  rezonans endüktansı akımı sifıra düştüğü anda bu mod tamamlanır. Bu mod için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$i_{L_r}(t) = I_{LF} - V_o \sqrt{\frac{C_r}{L_r}} \sin(\omega_0 t) \quad (3.41)$$

$$v_{C_r}(t) = V_o \cos(\omega_0 t) \quad (3.42)$$

Bu denklemlerde,

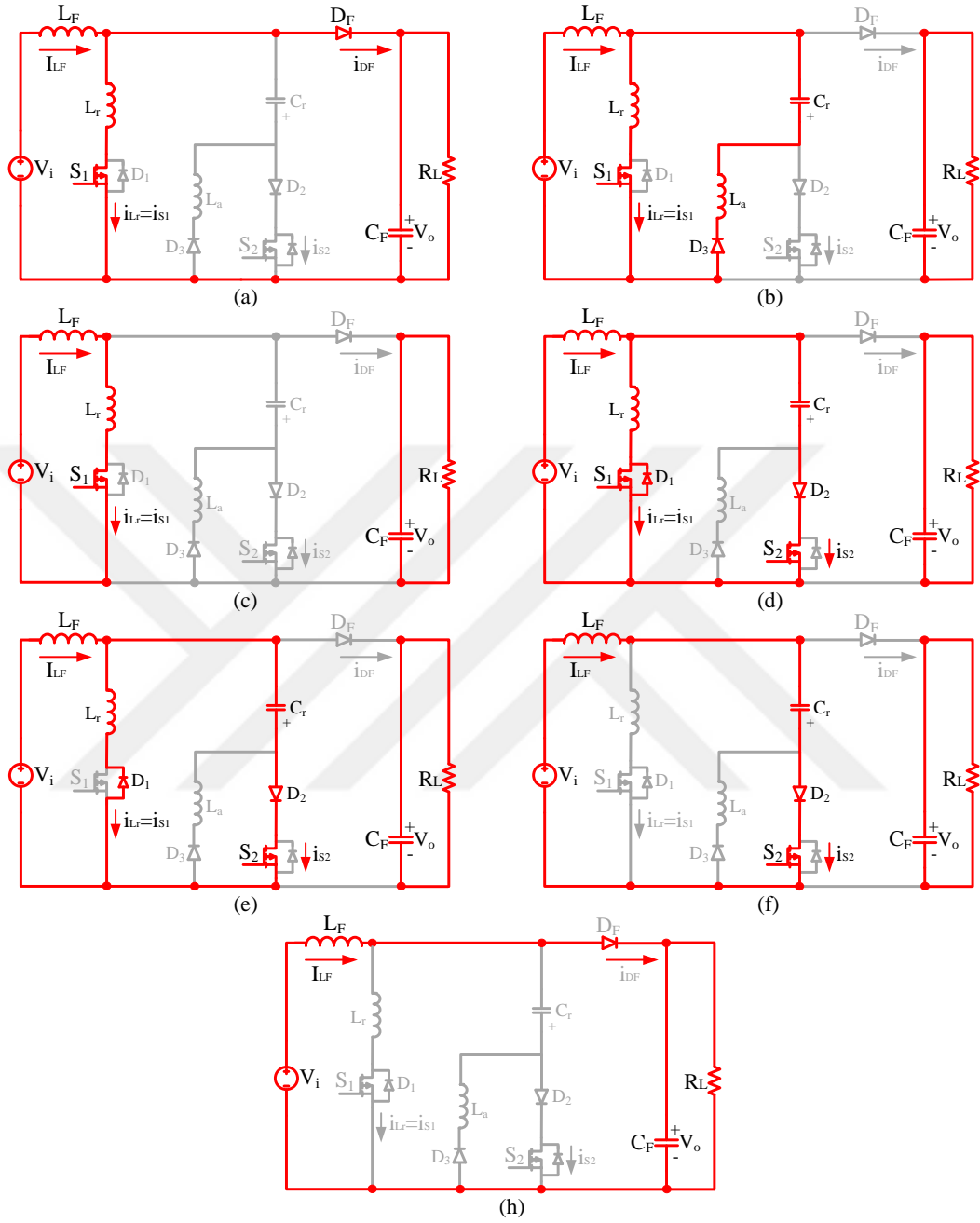
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (3.43)$$

eşitliği geçerlidir.

**Mod 5** [ $t_4 < t < t_5$  : Şekil. 3.12 (e) ]

Bu mod süresince  $L_r$  endüktansı akımı ters yönde artar ve bu akım ana anahtarın dahili diyodundan geçer. Tam bu esnada ana anahtarın kontrol sinyali kesilerek ZCT ile

kayıpsız bir şekilde kesime girmesi sağlanır. Mod sonunda  $L_r$  endüktansı akımı sıfıra düşer ve bu mod tamamlanır. Bu mod için aşağıdaki denklemler yazılabilir:



Şekil 3. 12 ZCT Örnek 1 dönüştürücüsünün çalışma modlarına ait eşdeğer devre şemaları (a) Mod 1, (b) Mod 2, (c) Mod 3, (d) Mod 4, (e) Mod 5, (f) Mod 6, (g) Mod 7 [25]

$$i_{L_r}(t) = I_{LF} - V_o \sqrt{\frac{C_r}{L_r}} \sin(\omega_0 t + \theta) \quad (3.44)$$

$$v_{C_r}(t) = V_o \cos(\omega_0 t + \theta) \quad (3.45)$$

Bu denklemlerde,

$$\theta = \sin^{-1} \alpha \quad (3.46)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \cdot \frac{I_{LF}}{V_o} \quad (3.47)$$

eşitlikleri geçerlidir.

**Mod 6** [ $t_5 < t < t_6$  : Şekil. 3.12 (f) ]

$L_r$  akımının sıfıra düşmesiyle başlayan bu modda  $C_r$  kondansatörü  $S_2$  anahtarı üzerinden giriş akımı altında lineer olarak  $-V_o$  değerine şarj olur. Bu mod için aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$v_{C_r}(t) = -V_o \sin \Delta - \frac{I_{LF}}{C_r} t \quad (3.48)$$

Bu denklemde,

$$\Delta = \frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \alpha \quad (3.49)$$

eşitliği geçerlidir.

**Mod 7** [ $t_6 < t < t_7$  : Şekil. 3.12 (g) ]

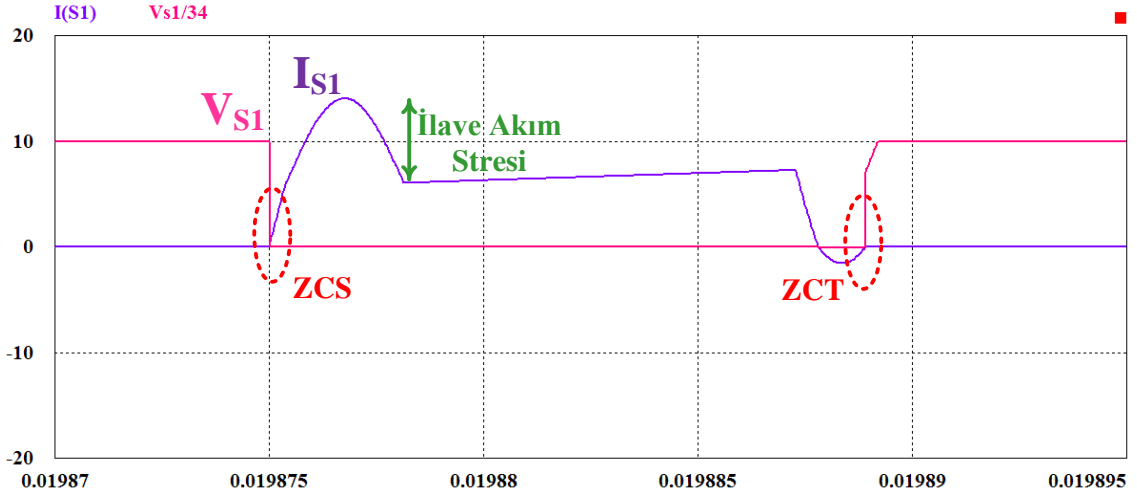
$C_r$  kondansatör geriliminin çıkış gerilimine erişmesiyle  $D_F$  ana diyodunun ZVS ile ilettime girer. Bu mod klasik PWM yükseltici dönüştürücünün kesim aralığıdır. Bu modun herhangi bir anında yardımcı anahtarın akımı kesilerek yardımcı anahtarın yumuşak bir şekilde kesime girmesi sağlanır. Bu modun sonunda bir anahtarlama periyodu tamamlanır ve başlangıç koşullarına dönülür.

### 3.4.2 Genel Değerlendirme ve Sonuçlar

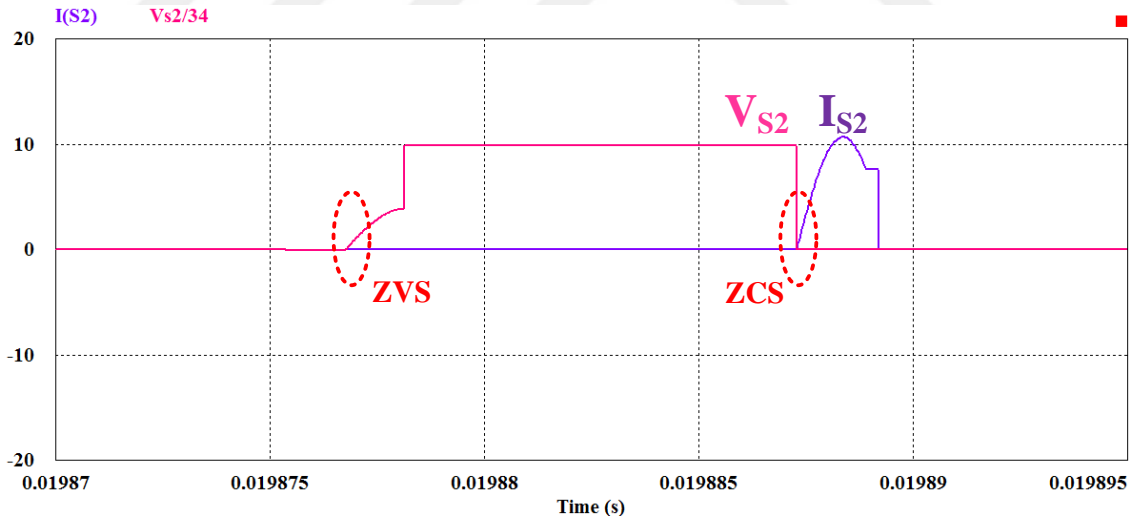
ZCT Örnek 1 dönüştürücüsü 340 V çıkış gerilimi, 1 kW çıkış gücü ve 40 kHz anahtarlama frekansı altında deneysel çalışmaları sunulmuş bir dönüştürücüdür [25]. Bu değerler ile simülasyon çalışması yapılmış ve elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te gösterilmiştir. Şekil 3.13'den ana anahtarın ZCS ile ilettime ve ZCT ile kesime girdiği ve yardımcı anahtarın ise ZCS ile ilettime ve ZCS-ZVS ile

kesime girdiği açıkça gözükmektedir. Bunların yanı sıra ana anahtarın ilave bir akım stresine maruz kaldığı da Şekil 3.13 (a)'da net bir şekilde gözükmektedir.

Şekil 3.14 (a)  $D_F$  ana diyodunun akım ve gerilim dalga şekillerini, Şekil 3.14 (b) ise  $D_3$  yardımcı diyodunun akım ve gerilim dalga şekillerini göstermektedir. Her iki elemanda yumuşak anahtarlama ile iletme ve kesime girmektedir. Ancak ana diyotun çıkış geriliminin iki katı kadar bir gerilime maruz kalması önemli bir dezavantajdır.



(a)



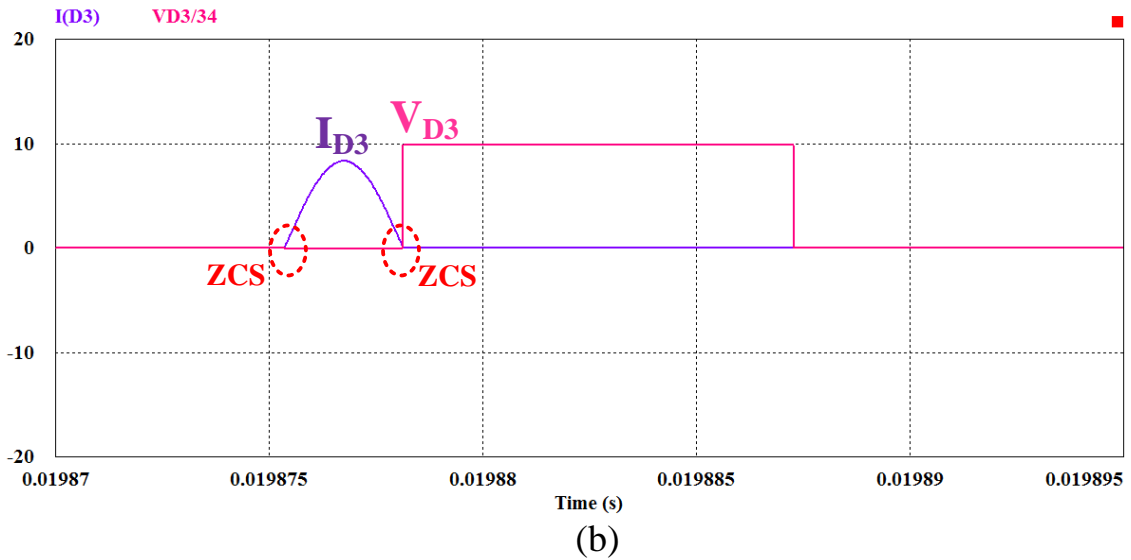
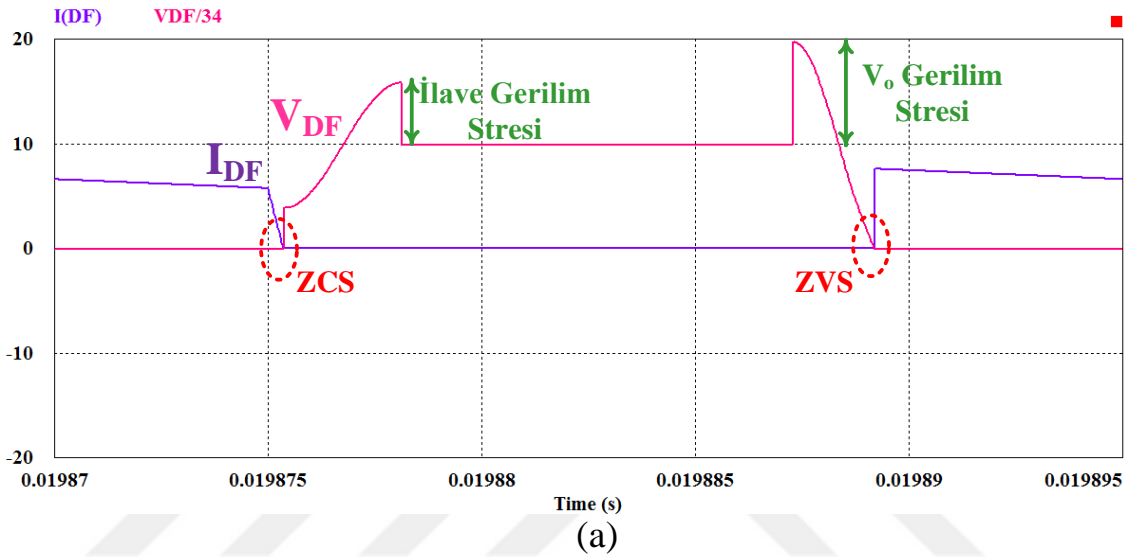
(b)

Şekil 3. 13 Örnek ZCT 1 dönüştürücüsünün simülasyon sonuçları (a) Ana anahtar akım ve gerilimi, (b) Yardımcı anahtar akım ve gerilimi (10A/div, 340V/div, 5  $\mu$ s/div)

Sonuç olarak ZCT Örnek 1 dönüştürücüsü özellikle ana anahtarın kesime girme anahtarlama kayıplarının azaltılmasında iyi bir çözüm ortaya koysa da aşağıda sıralanan kusurları dönüştürücü için aşılması gereken problemlerdir:

- 1) Ana anahtar üzerinde oluşan ilave akım stresi iletim kayıplarını artırır.

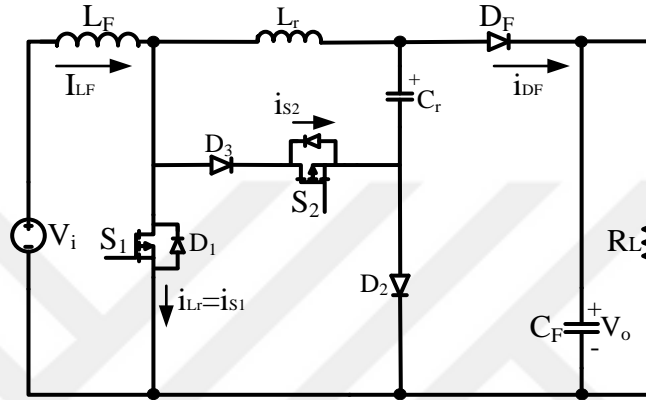
- 2) Ana diyotta çıkış geriliminin iki katı değerinde yüksek bir gerilim stresi oluşur. Bu durumda uygulama aşamasında seçilecek olan ana diyodun gerilim dayanımı daha fazla olması gerekir. Dolayısıyla maliyet artar.
- 3) Ana anahtara seri rezonans endüktansı ile anahtarın parazitik kondansatörü arasında çınlama adı verilen yüksek frekanslı salınımlar meydana gelir. Bu salınımları engellemek için uygulama devresinde zener diyotlu ek bastırma devresi kullanılmıştır.



Şekil 3. 14 Örnek ZCT 1 dönüştürücüsünün simülasyon sonuçları (a) Ana diyot akım ve gerilimi, (b) Yardımcı diyot akım ve gerilimi (10A/div, 340V/div, 5  $\mu$ s/div)

### 3.5 Örnek ZCT PWM DC-DC Dönüştürücü 2

ZCT Örnek 2 dönüştürücüsü ZCT Örnek 1 dönüştürücüsünün akım stresi problemini çözmek için geliştirilmiş bir dönüştürücüdür. Şekil 3.15'te temel devre şeması verilen ZCT Örnek 2 dönüştürücüsünde  $V_i$  giriş gerilim kaynağı,  $V_o$  çıkış gerilimi,  $S_1$  ana anahtar,  $S_2$  yardımcı anahtar,  $D_1$  ana anahtarın dahili diyodu,  $D_F$  ana diyot,  $D_2$  ve  $D_3$  yardımcı diyotlar,  $L_F$  ana endüktans,  $C_F$  çıkış filtre kondansatörü,  $L_r$  rezonans endüktansı,  $C_r$  rezonans kondansatörü ve  $R_L$  omik yüküdür [26].



Şekil 3.15 ZCT Örnek 2 dönüştürücüsüne ait devre şeması [26]

#### 3.5.1 Çalışma Modları

ZCT Örnek 2 dönüştürücüsünün bir anahtarlama periyodu içerisinde sekiz çalışma modu vardır [26]. Bu çalışma modları Şekil 3.16'da gösterilmiştir.

**Mod 1** [ $t_0 < t < t_1$  : Şekil. 3.16 (a) ]

$t = t_0$  anından önce anahtarlar kesimdedir ve giriş akımı  $L_r$  rezonans endüktansı ve  $D_F$  ana diyodu üzerinden akar.  $t = t_0$  anında  $S_1$  anahtarına bir kontrol sinyali uygulanır ve ana anahtar ZCS ile yumuşak bir şekilde iletme girer. Ana diyot ve rezonans endüktansı akımı giriş akımından sıfıra doğru lineer bir şekilde azalır ve böylece ana diyot  $D_F$  yumuşak bir şekilde kesime girer. Bu mod için aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

$$i_{L_r}(t) = \frac{V_o}{L_r} t - I_{L_F} \quad (3.50)$$

**Mod 2** [ $t_1 < t < t_2$  : Şekil. 3.16 (b) ]

Bu mod klasik PWM yükseltici dönüştürücünün iletim modudur. Bu mod esnasında yardımcı anahtar ve  $C_r$  kondansatörü çıkış gerilimini üzerinde tutar.

**Mod 3** [ $t_2 < t < t_3$  : Şekil. 3.16 (c) ]

$t = t_2$  anında yardımcı anahtara iletim sinyali verilir ve  $L_r$  ile  $C_r$  arasında yardımcı anahtar üzerinden bir rezonans başlar. Bu durumda yardımcı anahtar seri  $L_r$  endüktansı sayesinde ZCS ile iletme girer. Bu modda ana anahtar rezonans yolu üzerinde olmadığı için ana anahtar üzerinde ilave bir akım stresi oluşmaz. Rezonans süresinin yarısında  $C_r$  rezonans kondansatörü gerilim kutup değiştirir ve bu mod sona erer. Bu mod için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$i_{L_r}(t) = \frac{V_o}{Z_o} \sin(\omega_r t) \quad (3.51)$$

$$v_{C_r}(t) = V_o \cos(\omega_r t) \quad (3.52)$$

Bu denklemlerde,

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad (3.53)$$

$$Z_o = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (3.54)$$

eşitlikleri geçerlidir.

**Mod 4** [ $t_3 < t < t_4$  : Şekil. 3.16 (d) ]

$t = t_3$  anında  $D_2$  yardımcı diyodu ZCS ile iletme girer ve rezonans endüktansı akımı  $C_r$  kondansatörünün aktardığı enerji ile ters yönde sinüzoidal olarak artmaya başlar. Bu mod esnasında üzerinden akım geçmeyen yardımcı anahtarın kontrol sinyali istenilirse kesilebilir. Bu mod için aşağıdaki eşitlik yazılabilir:

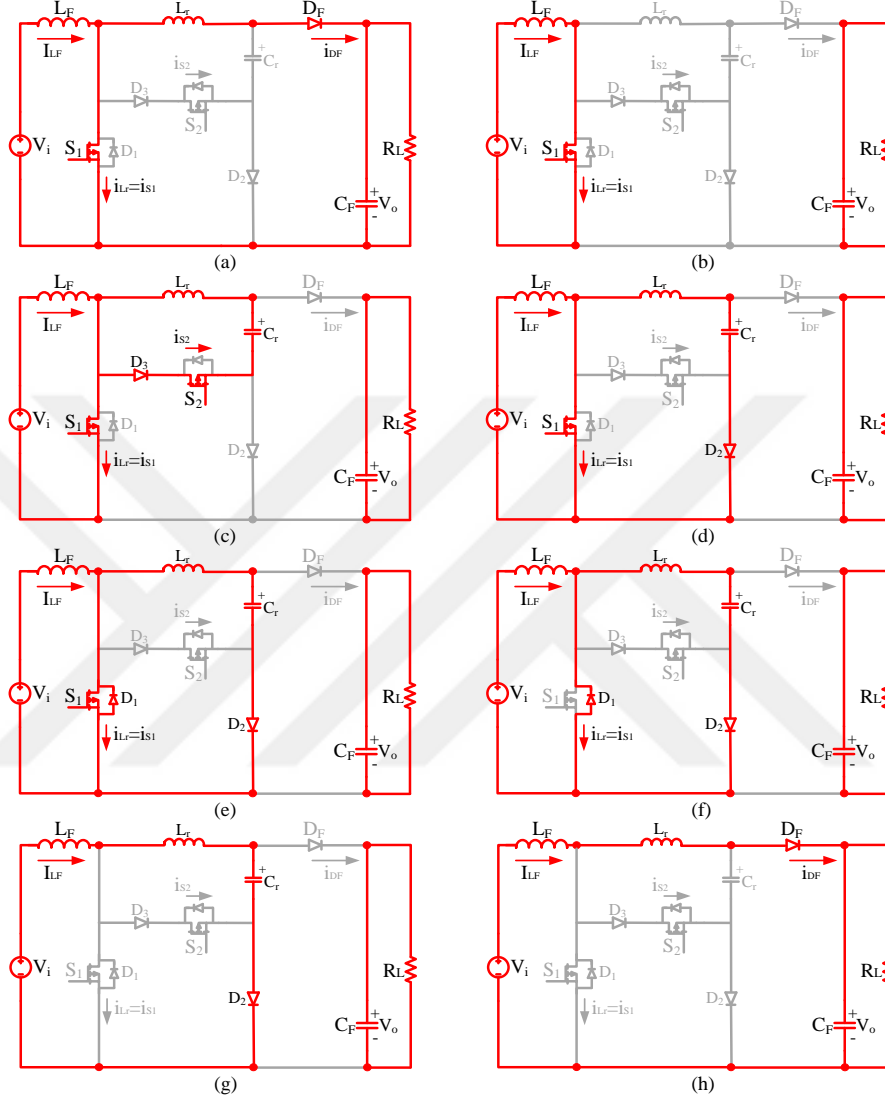
$$i_{L_r}(t) = I_{LF} - \frac{V_o}{Z_o} \sin(\omega_r t) \quad (3.55)$$

**Mod 5** [ $t_4 < t < t_5$  : Şekil. 3.16 (e) ]

$t = t_4$  anında ana anahtarın akımı sıfıra düşer ve anahtarın dahili diyodu iletme girerek  $L_r$  rezonans endüktansı akımının giriş akımından fazla kısmını geçirir. Bu mod esnasında ana anahtarın sinyali kesilerek ZCT ile kesime girmesi sağlanır. Bu mod için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$i_{L_r}(t) = -\frac{V_o}{Z_o} \sin(\omega_r t) \quad (3.56)$$

$$v_{C_r}(t) = -V_o \cos(\omega_r t) \quad (3.57)$$



Şekil 3. 16 ZCT Örnek 2 dönüştürücüsünün çalışma modlarına ait eşdeğer devre şemaları (a) Mod 1, (b) Mod 2, (c) Mod 3, (d) Mod 4, (e) Mod 5, (f) Mod 6, (g) Mod 7, (h) Mod 8 [26]

**Mod 6** [ $t_5 < t < t_6$  : Şekil. 3.16 (f) ]

$t = t_5$  anında kontrolü basitleştirmek için ana anahtar ve yardımcı anahtar birlikte kesime sokularak her ikisi içinde yumuşak kesime girme sağlanmış olur. Bu modun sonunda  $L_r$  endüktansı akımı giriş akım seviyesine düşer ve bu mod tamamlanır.

**Mod 7** [ $t_6 < t < t_7$  : Şekil. 3.16 (g) ]

$t = t_6$  anında  $L_r$ 'nin akımı giriş akım değerine düştüğü zaman  $C_r$  kondansatör gerilimi  $V_o$  değerinin altındadır. Çünkü rezonansın yarı periyodu tamamlanmamıştır. Bu modun başlangıcında rezonans sona erer ve  $C_r$  kondansatörü sabit giriş akımı ile lineer olarak  $V_o$  değerine şarj olur. Bu mod için aşağıdaki denklem yazılabilir:

$$v_{C_r}(t_6) = V_o \sqrt{1 - \left( \frac{Z_0 I_{LF}}{V_o} \right)^2} \leq V_o \quad (3.58)$$

**Mod 8** [ $t_7 < t < t_8$  : Şekil. 3.16 (h) ]

$t = t_7$  anında  $C_r$  kondansatörü geriliminin çıkış gerilimine erişmesiyle  $D_F$  ana diyodu ZVS ile iletme girer ve bu mod başlar. Bu mod klasik PWM yükseltici dönüştürücünün kesim aralığıdır. Bu modun sonunda  $S_1$  ana anahtarına tekrar sinyal verilmesiyle bir anahtarlama periyodu tamamlanır ve başlangıç koşullarına dönlür.

### 3.5.2 Genel Değerlendirme ve Sonuçlar

ZCT Örnek 2 dönüştürücüsü 340 V çıkış gerilimi, 1 kW çıkış gücü ve 100 kHz anahtarlama altında deneysel çalışmaları sunulmuş bir dönüştürücüdür [26]. Bu değerler ile simülasyon çalışması yapılmış ve elde edilen simülasyon sonuçları Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de gösterilmiştir.

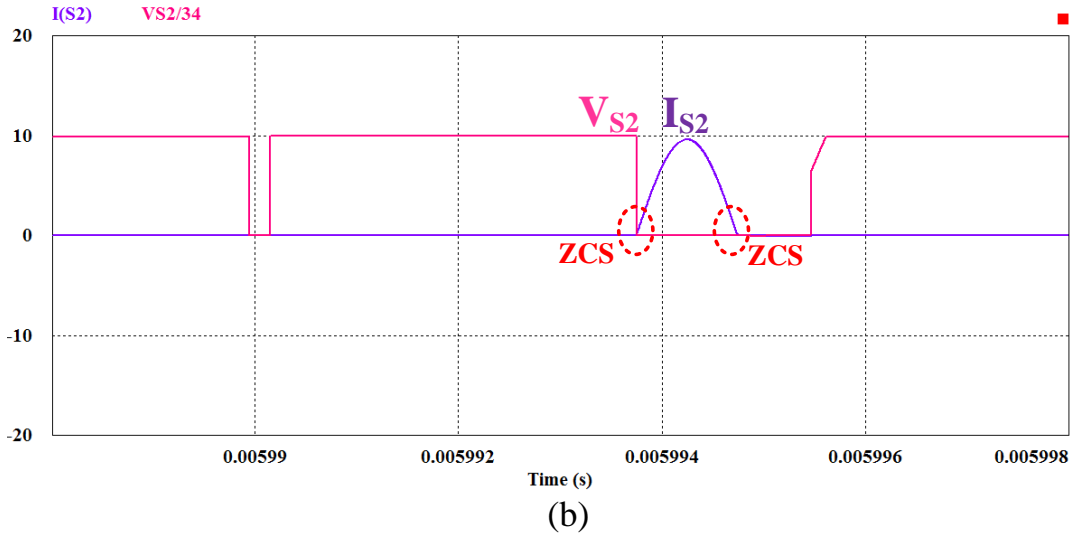
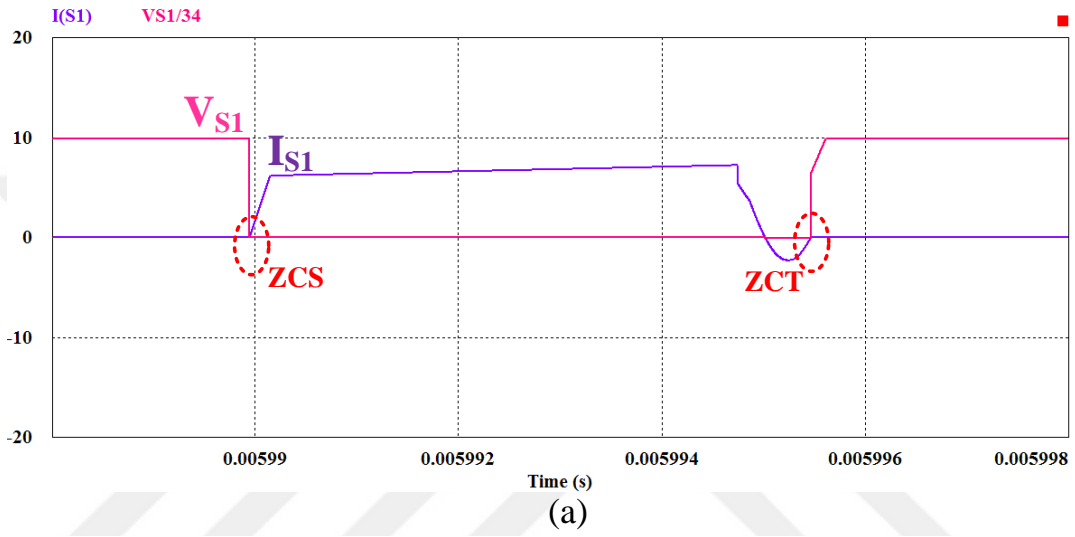
Şekil 3.17'de ana anahtar ve yardımcı anahtarın akım ve gerilim simülasyon sonuçları verilen ZCT Örnek 2 dönüştürücüsünün ana anahtarda akım stresi oluşturmadan yumuşak anahtarlama sağladığı gözükmemektedir. Şekil 3.18'de ise diyotlara ilişkin simülasyon sonuçları verilmiş olup,  $D_F$  diyodunda yüksek bir gerilim stresi olduğu göze çarpmaktadır.

Sonuç olarak ZCT Örnek 1 dönüştürücüsünün akım stresi problemi ZCT Örnek 2 dönüştürücüsü ile çözülmüş ve tüm yarı iletken elemanların yumuşak anahtarlama ile çalışması sağlanmıştır. Ancak ZCT Örnek 2 dönüştürücüsünde bazı dezavantajlar bulunmaktadır. Bu dezavantajlar aşağıda verilmiştir.

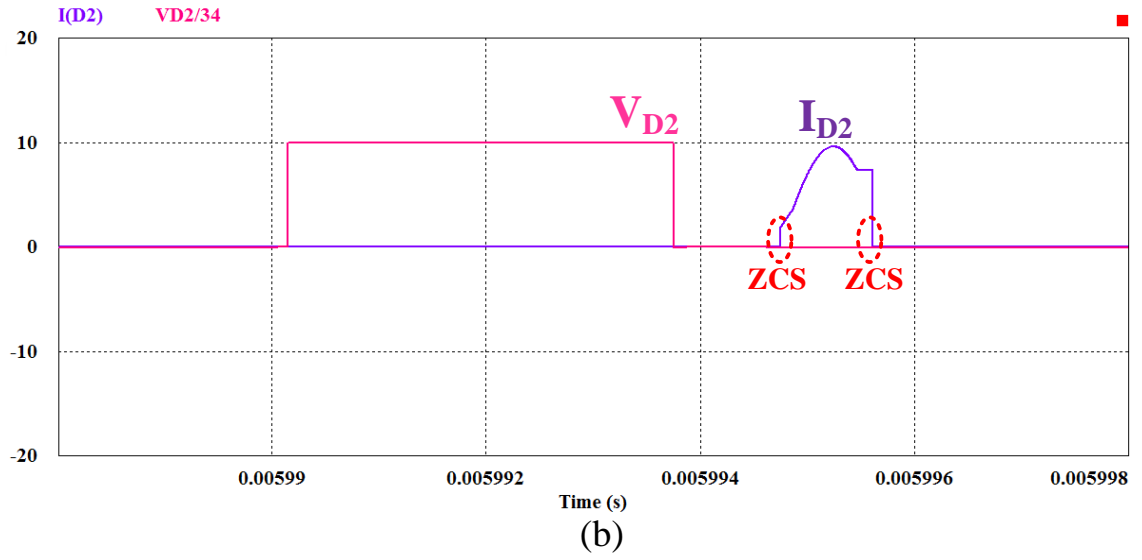
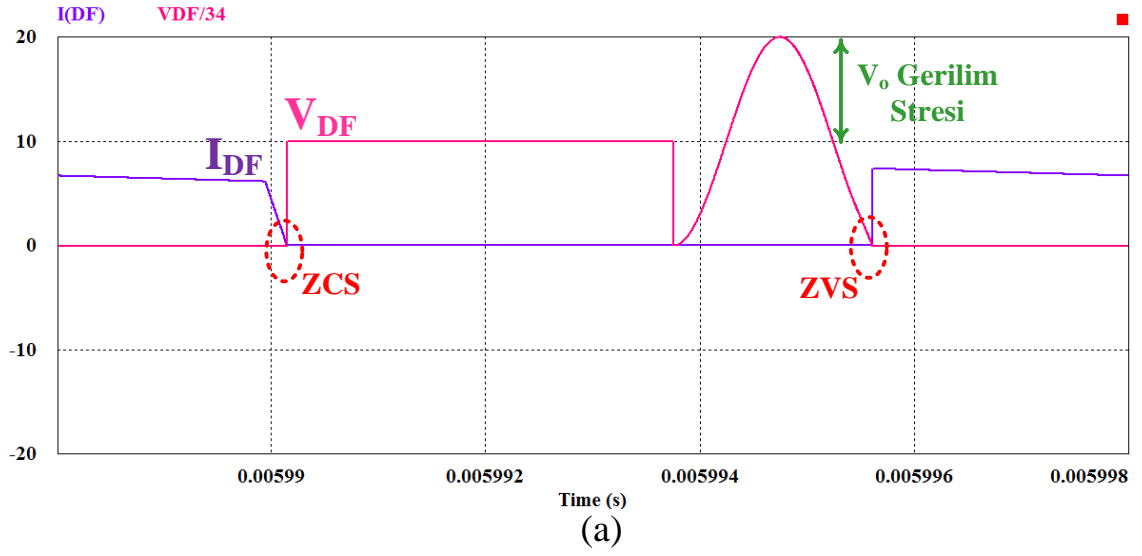
- 1) Ana akım yolu üzerinde bastırma hücresi elemanı bulunması istenmeyen bir durumdur.
- 2)  $L_r$  rezonans endüktansı ile ana anahtarın parazitik kondansatörü arasındaki yüksek frekansları salınımlar EMI gürültülerine neden olur. Uygulama

aşamasında bu salınımlar bir bastırma devresi ile giderilmelidir. Bu durumda maliyetin artmasına sebep olmaktadır.

- 3) Ana diyotta çıkış geriliminin iki katı değerinde yüksek bir gerilim stresi oluşur. Uygulamada kullanılacak diyodun maliyetinin daha yüksek olmasına sebep olan bu durum dönüştürücüyü dezavantajlı kılan bir diğer unsurdur.
- 4) Ayrıca devrenin deneysel sonuçlarında yardımcı anahtar ve ana diyotta gerilim pikleri oluştuğu gözükmemektedir.



Şekil 3. 17 ZCT Örnek 2 dönüştürücüsünün simülasyon sonuçları (a) Ana anahtar akım ve gerilimi, (b) Yardımcı anahtar akım ve gerilimi (10 A/div, 340V/div, 2  $\mu$ s/div)



Şekil 3. 18 ZCT Örnek 2 dönüştürücüsünün simülasyon sonuçları (a) Ana anahtar akım ve gerilimi, (b) Yardımcı anahtar akım ve gerilimi (10 A/div, 340V/div, 2  $\mu$ s/div)

### ÖNERİLEN YENİ ZVT PWM DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜ

#### 4.1 Giriş

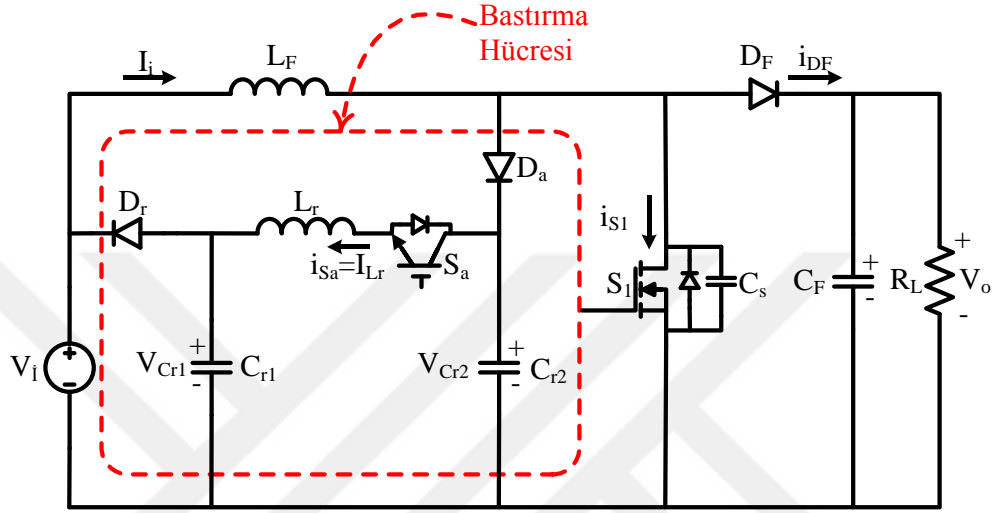
Bu bölümde, önerilen aktif bastırma hücresinin kullanıldığı yeni ZVT PWM DC-DC dönüştürücü devresinin kararlı durum analizi yapılmış ve her bir çalışma modu ayrıntılı olarak verilmiştir. Daha sonra 100 V giriş gerilimi, 300 V çıkış gerilimi, 100 kHz anahtarlama frekansı ve 500 W çıkış güç değerlerinde bir prototip uygulaması için gerekli tasarım prosedürü açıklanmıştır. Tasarım prosedürü neticesinde belirlenen eleman değerleri kullanılarak PSIM 9.1.1 programında bir simülasyon çalışması yapılmış ve elde edilen sonuçlar verilmiştir. Son olarak ise önerilen dönüştürücünün özellikleri maddeler halinde sıralanmıştır.

#### 4.2 Tanım ve Kabuller

Bu tez çalışmasında önerilen ZVT PWM DC-DC yükseltici dönüştürücüye ait devre şeması Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Bu devrede,  $V_i$  giriş gerilimi,  $V_o$  çıkış gerilimi,  $S_1$  ana anahtar,  $L_F$  ana endüktansı,  $C_F$  çıkış filtre kondansatörü,  $D_F$  ana diyot ve  $R_L$  omik yüküdür. Önerilen bastırma hücresinde ise,  $S_a$  yardımcı anahtar,  $D_r$  ve  $D_a$  yardımcı diyotlar,  $L_r$  rezonans endüktansı,  $C_{r1}$ ,  $C_{r2}$  ve  $C_s$  rezonans kondansatörleridir. Önerilen dönüştürücünün kararlı hal teorik analizlerini basitleştirmek için aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- Giriş gerilimi  $V_i$  sabittir.
- $C_F$  kondansatörü çıkış gerilimini sabit tutacak kadar büyüktür.
- $L_F$  endüktansı giriş akımını sabit tutacak kadar büyüktür.

- Ana endüktans  $L_F$ , bastırma endüktansı  $L_r$ 'den yeterince büyüktür.
- Tüm yarı iletken elemanlar idealdir.
- Ana elemanlardaki ve yardımcı elemanlardaki gerilimi düşümleri ihmal edilmiştir.
- Diyotlardaki ters toparlanma süreleri ihmal edilmiştir.



Şekil 4. 1 Önerilen yeni ZVT PWM DC-DC yükseltici dönüştürücünün temel devre şeması

### 4.3 Çalışma Modları

Önerilen dönüştürücünün kararlı hal çalışmasında bir anahtarlama periyodu süresince on çalışma modu meydana gelmektedir. Bu çalışma modlarının eşdeğer devreleri Şekil 4.2'de verilmiştir. Ayrıca, çalışma modlarına ilişkin teorik dalga şekilleri de Şekil 4.3'te gösterilmiştir.

**Mod 1** [ $t_0 < t < t_1$  : Şekil. 4.2 (a) ]

Bu mod başlamadan önce  $S_1$  ana anahtarı ve  $S_a$  yardımcı anahtarı kesimdedir.  $L_F$  ana endüktansı ve  $V_i$  giriş kaynağı, klasik yükseltici dönüştürücünün kesim aralığında olduğu gibi,  $D_F$  ana diyodu üzerinden yükü beslemektedir.  $t = t_0$  anında,  $i_{S1} = 0$ ,  $i_{DF} = I_i$ ,  $i_{Lr} = i_{Sa} = 0$ ,  $v_{Cs} = v_{Cr2} = V_o$  ve  $v_{Cr1} = 0$  değerindedir.

Bu çalışma modunun başlangıcı olan  $t = t_0$  anında yardımcı anahtar  $S_a$ 'ya iletim sinyali verilir ve bu aralık başlar. Aralığın başlamasıyla birlikte eş zamanlı olarak  $S_a$  anahtar

akımı  $i_{Sa}$  artar ve  $D_F$  ana diyodu akımı  $i_{DF}$  azalır. Aynı zamanda  $C_{r1}$  kondansatörü ise şarj olur. Bu çalışma moduna ait matematiksel bağıntılar aşağıdaki gibidir:

$$i_{Lr}(t) = \frac{V_o}{Z_1} \sin(\omega_1 t) \quad (4.1)$$

$$v_{Cr1}(t) = -V_o \cos(\omega_1 t) + V_o \quad (4.2)$$

$$t_{0-1} = \frac{1}{\omega_1} \cos^{-1} \left( \frac{V_{C1A} - V_o}{-V_o} \right) \quad (4.3)$$

Bu denklemlerde,

$$Z_1 = \sqrt{\frac{L_r}{C_{r1}}} \quad (4.4)$$

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_r C_{r1}}} \quad (4.5)$$

eşitlikleri geçerlidir.

$t = t_1$  anında ana diyot akımı  $i_{DF}$  sıfıra düşer ve yardımcı anahtar akımı  $i_{Sa}$  giriş akımı seviyesine ulaşır. Aynı zamanda  $C_{r1}$  kondansatörü ise belli bir gerilim seviyesine şarj olmuştur ( $V_{C1A}$ ). Seri bağlı rezonans endüktansından dolayı yardımcı anahtarın iletme girmesi ve ana diyodun ise kesime girmesi ZCS ile gerçekleşir.  $D_a$  yardımcı diyodu yardımcı anahtara seri olduğundan dolayı bu diyotta ZCS ile iletme girmektedir.

**Mod 2** [ $t_1 < t < t_2$  : Şekil. 4.2 (b) ]

Bu modun başlangıcında,  $t = t_1$  anında,  $i_{SI} = 0$ ,  $i_{Lr} = i_{Sa} = I_i$ ,  $i_{DF} = 0$ ,  $v_{Cs} = v_{Cr2} = V_o$  ve  $v_{Cr1} = V_{C1A}$  değerindedir.  $D_F$  ana diyodunun ZCS ile kesime girmesiyle başlayan bu modda  $C_s - D_a - S_a - L_r - C_{r1}$  ve  $C_{r2} - S_a - L_r - C_{r1}$  yollu iki rezonans oluşur. Böylece  $C_s$  ve  $C_{r2}$  kondansatörlerinin enerjileri  $L_r$  ve  $C_{r1}$ 'e aktarılır. Bu çalışma moduna ait matematiksel bağıntılar aşağıdaki gibidir:

$$i_{Lr}(t) = \left( I_i - \frac{C_{eq}}{C_a} I_i \right) \cos(\omega_2 t) - \frac{V_{C1A} - V_o}{Z_2} \sin(\omega_2 t) + \frac{C_{eq}}{C_a} I_i \quad (4.6)$$

$$v_{Cr1}(t) = -\frac{C_{eq}}{C_{r1}} \left[ (V_o - V_{C1A}) \cos(\omega_2 t) - Z_2 \left( I_i - \frac{C_{eq}}{C_a} I_i \right) \sin(\omega_2 t) - (V_o - V_{C1A}) \right] + \frac{I_i}{C_{r1} + C_a} + V_{C1A} \quad (4.7)$$

$$v_{Cr2}(t) = \frac{C_{eq}}{C_a} \left[ (V_o - V_{C1A}) \cos(\omega_2 t) - Z_2 \left( I_i - \frac{C_{eq}}{C_a} I_i \right) \sin(\omega_2 t) - (V_o - V_{C1A}) \right] + \frac{I_i}{C_{r1} + C_a} + V_o \quad (4.8)$$

Bu denklemlerde,

$$C_a = C_{r2} + C_s \quad (4.9)$$

$$C_{eq} = \frac{C_a C_{r1}}{C_a + C_{r1}} \quad (4.10)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{1}{L_r C_{eq}}} \quad (4.11)$$

$$Z_2 = \sqrt{\frac{L_r}{C_{eq}}} \quad (4.12)$$

eşitlikleri geçerlidir.

$t = t_2$  anında,  $C_{r1}$  kondansatörü geriliminin giriş gerilimine erişmesiyle ( $v_{Cr1} = V_i$ )  $D_r$  yardımcı diyodu ZVS altında iletme girer ve bu mod sona erer. Bu modun sonunda  $C_s$  ve  $C_{r2}$  kondansatör gerilimleri belli bir gerilim seviyesine ( $V_{C2A}$ ) kadar düşerken rezonans endüktansı akımı da belli bir akım değerine ( $I_{LrA}$ ) ulaşmıştır.

**Mod 3** [ $t_2 < t < t_3$  : Şekil. 4.2 (c) ]

Bu modun başlangıcında,  $t = t_2$  anında,  $i_{S1} = 0$ ,  $i_{Lr} = i_{Sa} = I_{LrA}$ ,  $i_{DF} = 0$ ,  $v_{Cs} = v_{Cr2} = V_{C2A}$  ve  $v_{Cr1} = V_i$  değerindedir.  $D_r$  yardımcı diyodunun ZVS ile iletme girmesiyle başlayan bu modda  $C_s - D_a - S_a - L_r - D_r - V_i$  ve  $C_{r2} - S_a - L_r - D_r - V_i$  yollu rezonanslar oluşur.  $C_s$  ve  $C_{r2}$  kondansatörlerinin gerilimleri eş zamanlı olarak azalırken  $i_{Lr}$  rezonans endüktansı akımı da artmaya devam eder. Rezonans kondansatörlerinin gerilimleri giriş gerilimine eşit olduğu anda rezonans endüktansı akımı maksimum değerdedir ( $I_{Lr} = I_{Lrmax}$ ). Bu andan sonra  $L_r$  endüktansına negatif gerilim geldiğinden dolayı  $I_{Lr}$  akımı azalmaya başlayacaktır. Eş zamanlı olarak  $v_{Cs}$  ve  $v_{Cr2}$  gerilimleri de azalmaya devam etmektedir. Bu çalışma moduna ait matematiksel bağıntılar aşağıdaki gibidir:

$$i_{Lr}(t) = \frac{V_i - V_{C2A}}{Z_3} \sin(\omega_3 t) + I_{LrA} \cos(\omega_3 t) \quad (4.13)$$

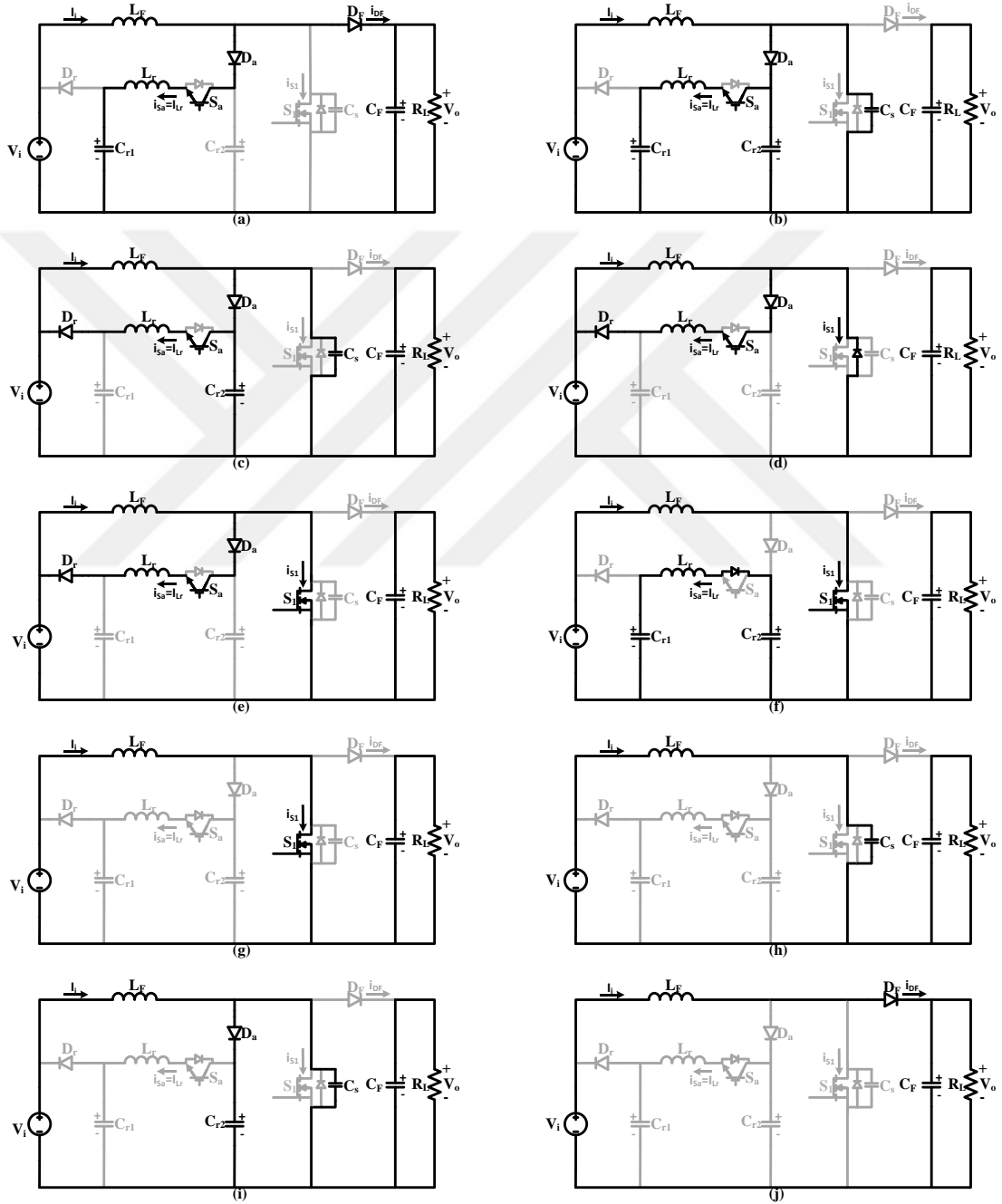
$$v_{Cr2}(t) = v_{Cs}(t) = (V_{C2A} - V_i) \cos(\omega_3 t) + Z_3 I_{LrA} \sin(\omega_3 t) + V_i \quad (4.14)$$

Bu denklemlerde,

$$Z_3 = \sqrt{\frac{L_r}{C_{r2} + C_s}} \quad (4.15)$$

$$\omega_3 = \frac{1}{\sqrt{L_r (C_{r2} + C_s)}} \quad (4.16)$$

eşitlikleri geçerlidir.



Şekil 4. 2 Önerilen ZVT PWM DC-DC yükseltici dönüştürücünün çalışma modlarına ait 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)  $t_6 < t < t_7$ , (h)  $t_7 < t < t_8$ , (i)  $t_8 < t < t_9$ , (j)  $t_9 < t < t_{10} = t_0$

$t = t_3$  anında  $C_s$  ve  $C_{r2}$  kondansatörlerinin gerilimleri sıfıra düşer ( $v_{Cs} = v_{Cr2} = 0$ ). Bu esnada  $L_r$  endüktansının akımı giriş akımının üzerinde belli bir değerdedir ( $I_{Lr} = I_{LrB}$ ). Kondansatör gerilimlerinin sıfır olmasıyla birlikte  $L_r$  endüktans akımının giriş akımından fazla kısmı akımı  $S_1$  ana anahtarının ters paralel diyodunu ilettime sokar ve böylece bu mod tamamlanmış olur.

**Mod 4** [ $t_3 < t < t_4$  : Şekil. 4.2 (d) ]

Bu modun başlangıcında,  $t = t_3$  anında,  $i_{S1} = (I_i - I_{LrB})$ ,  $i_{Lr} = i_{Sa} = I_{LrB}$ ,  $i_{DF} = 0$ ,  $v_{Cs} = v_{Cr2} = 0$  ve  $v_{Cr1} = V_i$  değerindedir.  $S_1$  ana anahtarının ters paralel diyodunun ilettime girmesiyle başlayan bu aralıkta  $L_r$  endüktansı enerjisini giriş gerilim kaynağına aktarır ve  $I_{Lr}$  akımı lineer olarak azalır.  $I_{Lr}$  akımının giriş akımından fazla olan kısmı ana anahtarın ters paralel diyodundan geçer. Ters paralel diyodun iletimde olması sayesinde anahtar uçlarındaki gerilimin sıfırda tutulduğu bu aralıkta ana anahtara kontrol sinyali verilerek anahtarın ZVT ile mükemmel bir şekilde ilettime girmesi sağlanır. Ana anahtarın ters paralel diyodunun iletimde olduğu bu aralığa ZVT aralığı denir. Bu aralıkta ZVT ile yumuşak anahtarlamaı sağlamak için anahtarın ters paralel diyodu iletimdeyken anahtara kontrol sinyali uygulanmalıdır. Bu çalışma moduna ait matematiksel bağıntılar aşağıdaki gibidir:

$$i_{Lr}(t) = -\frac{V_i}{L_r}t + I_{LrB} \quad (4.17)$$

$$t_{3-4} = \frac{I_{LrB}}{V_i}L_r \quad (4.18)$$

$t = t_4$  anında rezonans endüktansı akımının giriş akım değerine düşmesiyle bu mod sona erer.

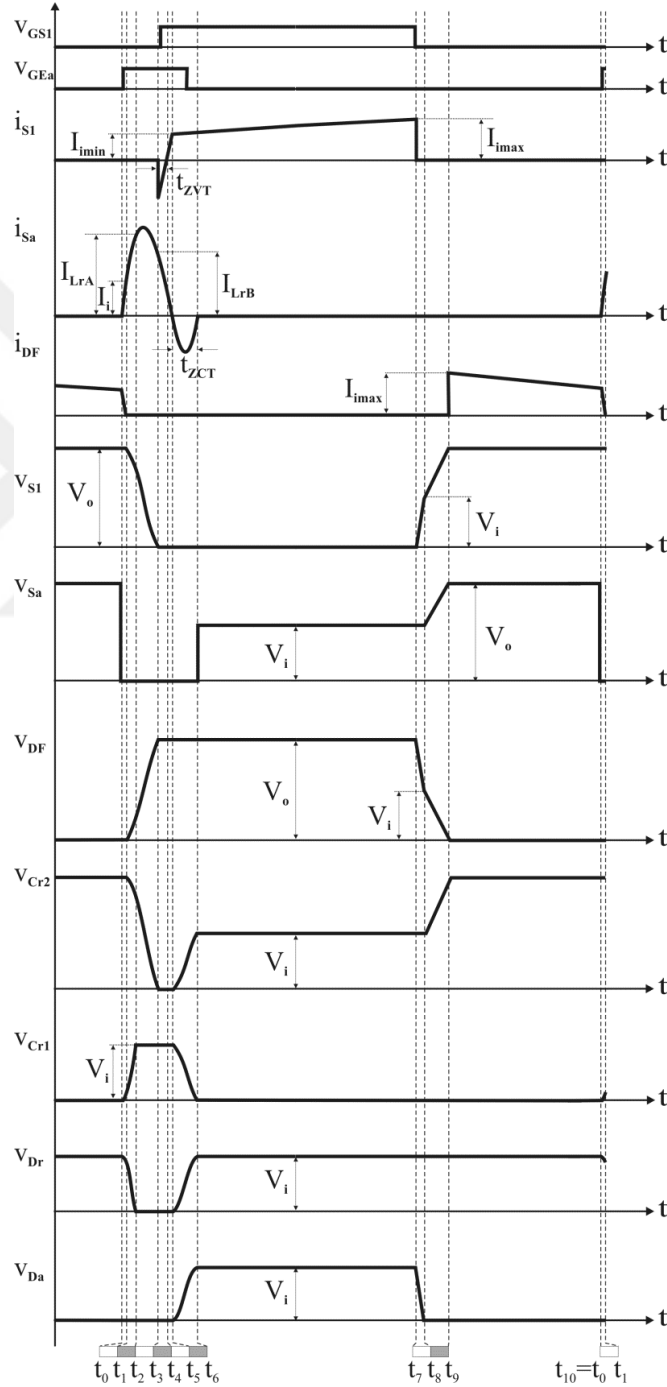
**Mod 5** [ $t_4 < t < t_5$  : Şekil. 4.2 (e) ]

Bu modun başlangıcında,  $t = t_4$  anında,  $i_{S1} = 0$ ,  $i_{Lr} = i_{Sa} = I_i$ ,  $i_{DF} = 0$ ,  $v_{Cs} = v_{Cr2} = 0$  ve  $v_{Cr1} = V_i$  değerindedir. Rezonans endüktansı akımının giriş akım seviyesine düşmesiyle başlayan bu aralıkta rezonans endüktansı akımı  $I_{Lr}$  sıfıra doğru lineer olarak azalmaya devam ederken bir önceki aralıkta kontrol sinyali verilmiş olan ana anahtarın akımı da giriş akım seviyesine doğru artar. Bu çalışma moduna ait matematiksel bağıntılar aşağıdaki gibidir:

$$i_{Lr}(t) = -\frac{V_i}{L_r}t + I_i \quad (4.19)$$

$$t_{4-5} = \frac{I_i}{V_i}L_r \quad (4.20)$$

$t = t_4$  anında  $i_{S1} = I_i$  ve  $I_{Lr} = 0$  değerine erişince  $D_a$  ve  $D_r$  yardımcı diyotları ZCS ile kesime girer ve bu mod sona erer.



Şekil 4. 3 Önerilen ZVT PWM DC-DC yükseltici dönüştürücünün çalışma aralıklarına ilişkin temel dalga şekilleri

**Mod 6** [ $t_5 < t < t_6$  : Şekil. 4.2 (f) ]

Bu modun başlangıcında,  $t = t_5$  anında,  $i_{SI} = I_i$ ,  $i_{Lr} = i_{Sa} = 0$ ,  $i_{DF} = 0$ ,  $v_{Cs} = v_{Cr2} = 0$  ve  $v_{Cr1} = V_i$  değerindedir. Rezonans endüktansı akımının sıfıra düşmesi ve ana anahtar akımının da giriş akım seviyesine erişmesiyle başlayan bu modda, ana anahtar giriş akımını geçirirken aynı zamanda  $C_{r1}$ ,  $L_r$  ve  $C_{r2}$  yolu üzerinden de bir rezonans başlar. Burada giriş gerilimiyle dolu olan  $C_{r1}$  kondansatörü enerjisini, yardımcı anahtarın ters paralel diyodu üzerinden  $L_r$  bastırma endüktansı ve  $C_{r2}$  kondansatörüne aktarır. Böylece  $C_{r1}$  kondansatörü gerilimi azalırken,  $C_{r2}$  kondansatörü gerilimi de artar. Aynı zamanda rezonans endüktansı akımı da ters yönde artmaya başlar.

$C_{r1}$  ve  $C_{r2}$  kondansatör gerilimleri birbirine eşit olduğu anda ( $v_{Cr1} = v_{Cr2}$ ) rezonans endüktansı akımı da ters yönde maksimum değerine ulaşır ( $I_{Lr} = -I_{Lrmax2}$ ). Bu andan sonra  $I_{Lr}$  akımı da ters yönde azalmaya başlar. Yardımcı anahtar  $S_a$ 'nın ters paralel diyodunun iletimde olduğu bu modun ortalarında  $S_a$ 'nın sinyali kesilerek yardımcı anahtarın da ileri bir SS tekniği olan ZCT ile mükemmel bir şekilde kesime girmesi sağlanır. Bu çalışma moduna ait matematiksel bağıntılar aşağıdaki gibidir:

$$i_{Lr}(t) = -\frac{V_i}{Z_e} \sin(\omega_e t) \quad (4.21)$$

$$v_{Cr1}(t) = \frac{V_i C_e}{C_{r1}} + \frac{V_i C_e}{C_{r1}} \cos(\omega_e t) \quad (4.22)$$

$$v_{Cr2}(t) = \frac{V_i C_e}{C_{r2}} - \frac{V_i C_e}{C_{r2}} \cos(\omega_e t) \quad (4.23)$$

Bu denklemlerde,

$$C_e = \frac{C_{r1} C_{r2}}{C_{r1} + C_{r2}} \quad (4.24)$$

$$\omega_e = \frac{1}{\sqrt{L_r C_e}} \quad (4.25)$$

$$Z_e = \sqrt{\frac{L_r}{C_e}} \quad (4.26)$$

eşitlikleri geçerlidir.

$t = t_6$  anında  $C_{r1}$  kondansatörünün enerjisi tamamen  $C_{r2}$  kondansatörüne aktarılır ve bu mod sona erer. Bu modun sonunda  $v_{Cr1} = 0$ ,  $I_{Lr} = 0$  ve  $v_{Cr2} = V_i$  değerindedir.

**Mod 7** [ $t_6 < t < t_7$  : Şekil. 4.2 (g) ]

Bu modun klasik PWM DC-DC yükseltici dönüştürücünün iletim aralığıdır. Bu mod süresince bastırma hücresi aktif değildir ve ana endüktans ana anahtar üzerinden giriş gerilimi ile enerjilenir.  $t = t_7$  anında ana anahtarın sinyalinin kesilmesiyle bu aralık sona erer.

**Mod 8** [ $t_7 < t < t_8$  : Şekil. 4.2 (h) ]

Bu modun başlangıcında,  $t = t_7$  anında,  $i_{SI} = I_i$ ,  $i_{Lr} = i_{Sa} = 0$ ,  $i_{DF} = 0$ ,  $v_{Cs} = 0$ ,  $v_{Cr2} = V_i$  ve  $v_{Cr1} = 0$  değerindedir. Ana anahtar sinyalinin kesilmesiyle başlayan bu aralıkta  $C_s$  kondansatörü sabit giriş akımıyla  $v_{Cr2}$  değerine kadar şarj olur. Böylece ana anahtarın sinyali kesilmesiyle anahtar uçlarındaki gerilimin yükselme hızı sınırlandırılığundan dolayı ana anahtar ZVS ile kesime girer. Bu çalışma moduna ait matematiksel bağıntılar aşağıdaki gibidir:

$$v_{Cs}(t) = \frac{I_i}{C_s} t \quad (4.27)$$

$$t_{7-8} = \frac{V_i}{I_i} C_s \quad (4.28)$$

$t = t_8$  anında  $C_s$  kondansatörü geriliminin  $C_{r2}$  kondansatörü gerilimine erişmesiyle  $D_a$  yardımcı diyodu ZVS ile ilettime girer ve bu mod sona erer.

**Mod 9** [ $t_8 < t < t_9$  : Şekil. 4.2 (i) ]

Bu modun başlangıcında,  $t = t_8$  anında,  $i_{SI} = 0$ ,  $i_{Lr} = i_{Sa} = 0$ ,  $i_{DF} = 0$ ,  $v_{Cs} = v_{Cr2} = V_i$  ve  $v_{Cr1} = 0$  değerindedir.  $D_a$  diyodunun ilettime girmesiyle başlayan bu aralıkta, hem  $C_s$  kondansatörünü hem de  $C_{r2}$  kondansatörü sabit giriş akımı altında lineer olarak şarj olur. Bu çalışma moduna ait matematiksel bağıntılar aşağıdaki gibidir:

$$v_{Cr2}(t) = v_{Cs}(t) = \frac{I_i}{C_{r2} + C_s} t \quad (4.29)$$

$$t_{8-9} = \frac{V_o}{I_i} (C_{r2} + C_s) \quad (4.30)$$

$t = t_9$  anında  $C_s$  ve  $C_{r2}$  kondansatörü gerilimlerinin eş zamanlı olarak çıkış gerilimi değerine erişmesiyle ( $v_{Cs} = v_{Cr2} = V_o$ )  $D_F$  ana diyodu ZVS altında iletme girer ve bu mod sona erer.

**Mod 10** [ $t_9 < t < t_{10} = t_0$  : Şekil. 4.2 (j) ]

$D_F$  ana diyodunun ZVS ile iletme girmesiyle başlayan bu aralık klasik PWM yükseltici dönüştürücünün kesim aralığıdır. Bu aralıkta giriş kaynağı ve ana endüktans yükü besler. Bu mod süresince  $i_{SI} = 0$ ,  $i_{Sa} = 0$ ,  $i_{DF} = I_i$ ,  $v_{Cs} = v_{Cr2} = V_o$  ve  $v_{Cr1} = V_i$  değerindedir.

Bu modun sonunda,  $t = t_{10}$  anında, bir periyot tamamlanmış ve böylece başlangıç koşullarına dönmüş olur. Bir sonraki periyotta yine aynı aralıklar periyodik olarak devam eder.

#### 4.4 Tasarım Prosedürü

Bu tez çalışmasında sunulan ZVT PWM DC-DC dönüştürücünün deneysel uygulamasına geçilmeden önce devrede kullanılacak bastırma hücresi eleman değerlerinin belirlenmesi gereklidir. Bu eleman değerleri için bir tasarım prosedürü oluşturulurken öncelikle aşağıdaki kabuller yapılmıştır:

- Nominal çıkış gücü:  $P_o = 500$  W
- Anahtarlama frekansı:  $f_p = 100$  kHz
- Çıkış gerilimi:  $V_o = 300$  V
- Giriş gerilimi:  $V_i = 100$  V
- Doluluk oranı:  $\lambda = 2/3$
- Hedeflenen minimum verim değeri:  $\eta \geq \% 95$
- Ana endüktans akımında müsaade edilen maksimum dalgalanma:  $\Delta I_{LF} = \% 30$

Sunulan yeni dönüştürücüde bastırma hücresinin temel elemanları rezonans endüktansı ve rezonans kondansatörleridir. Devrenin yukarıdaki koşullarda çalıştırılması kabulünde bastırma hücresi elemanlarının tasarım prosedürü iki başlık halinde incelenebilir.

#### 4.4.1 Rezonans Endüktansının Seçimi

Rezonans endüktansının değeri belirlenirken yukarıda verilen kabuller doğrultusunda minimum % 95 verim elde edilebilmesi için gerekli giriş gücü ve maksimum giriş akım ifadesi aşağıdaki eşitliklerle ifade edilebilir:

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \geq 0.95 \quad (4.31)$$

$$P_i \leq 526.32 \text{ W} \quad (4.32)$$

$$I_{i\max} = 1.15 \frac{P_i}{V_i} = 6.053 \text{ A} \quad (4.33)$$

Öncelikle bastırma hücresinin temel elemanlarından olan rezonans endüktansı değeri seçilirken en önemli kriter yumuşak anahtarlanmanın sağlanmasıdır. Bunu sağlamak için aşağıdaki durum garanti edilmelidir [32].

$$\frac{V_o}{L_r} 3t_{rr} \leq I_{i\max} \quad (4.34)$$

Burada,  $t_{rr}$  ana diyodun ters toparlanma süresidir ve bu değer kullanılacak elemanın kataloğundan belirlenebilir. Denklem (4.34) ifadesinden görüldüğü gibi rezonans endüktansı akımı ana diyodun ters toparlanma süresinin üç katı süre zarfında en fazla giriş akımına erişebilmelidir. Bir başka ifadeyle  $L_r$  rezonans endüktansı ana diyodun ters toparlanma kayıplarını minimize edebilecek değerde olmalıdır. Bu değer eşitlik (4.33) ve (4.34) kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$L_r \geq \frac{300}{6.053} 3 \cdot 35 \cdot 10^{-9} \geq 5.2 \mu\text{H} \quad (4.35)$$

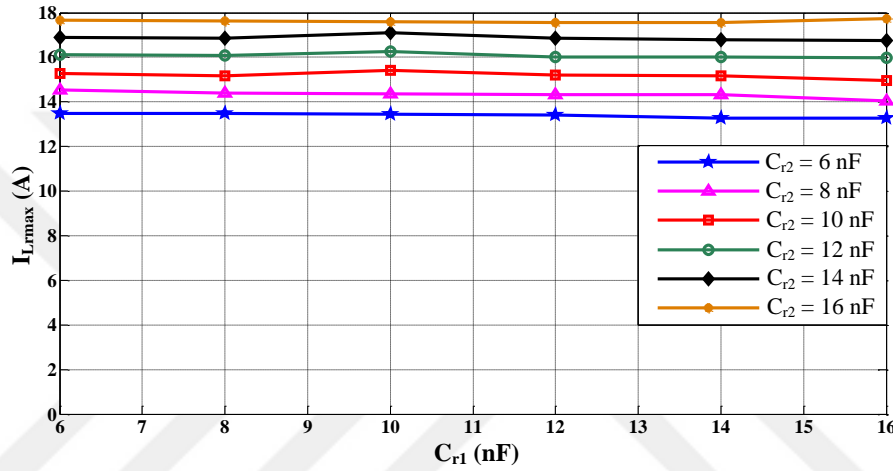
Deneysel uygulamada  $L_r$  endüktans değeri eşitlik (4.35)'den elde edilen değer dikkate alınarak  $5.5 \mu\text{H}$  olarak seçilmiştir.

#### 4.4.2 Rezonans Kondansatörlerinin Seçimi

Sunulan dönüştürücüde  $C_{r1}$ ,  $C_{r2}$  ve  $C_s$  olmak üzere üç rezonans kondansatörü bulunmaktadır.  $C_{r1}$  ve  $C_{r2}$  kondansatör değerlerini tespit etmek için simülasyon çalışmalarında yapılan analiz ile bazı karakteristik eğriler ortaya konulmuştur. Şekil 4.4'te  $C_{r1}$  ve  $C_{r2}$  kondansatörlerinin değerlerine bağlı olarak  $L_r$  endüktansı üzerindeki

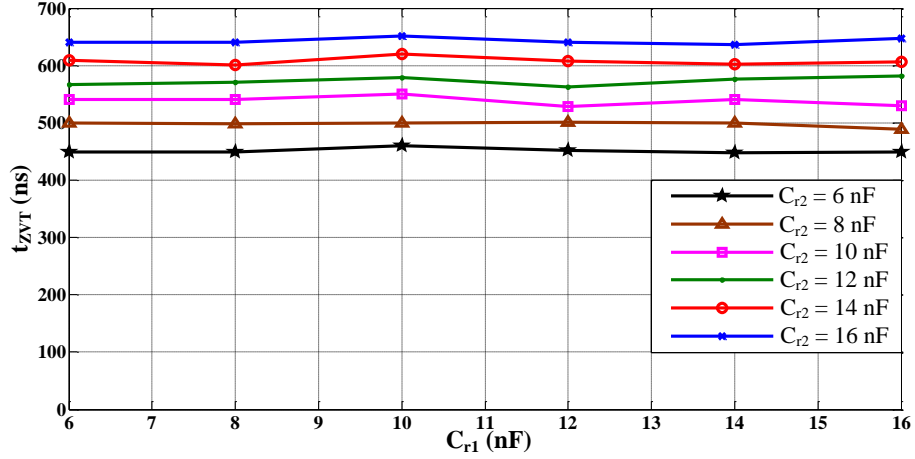
akım değişimi verilmiştir.  $L_r$  endüktansı akımı sunulan dönüştürücüde aynı zamanda yardımcı anahtar üzerinden geçen akımdır.

DC-DC dönüştürücülerde yumuşak anahtarlama için tasarlanan aktif bastırma hücrelerinin tamamında yardımcı anahtardan geçen akım nominal giriş akımının üzerine çıkmaktadır. Yumuşak anahtarlamanın sağlanabilmesi için bu durum gereklidir. Ancak bu akım değerinin çok yüksek olmaması istenir. Bu nedenle sunulan dönüştürücüde yardımcı anahtar akımının giriş akımının en fazla 3 katına erişebileceği kabulü dikkate alınarak Şekil 4.4'ten  $C_{r2}$  kapasitör değerinin 10 nF'tan büyük olamayacağı tespit edilir.



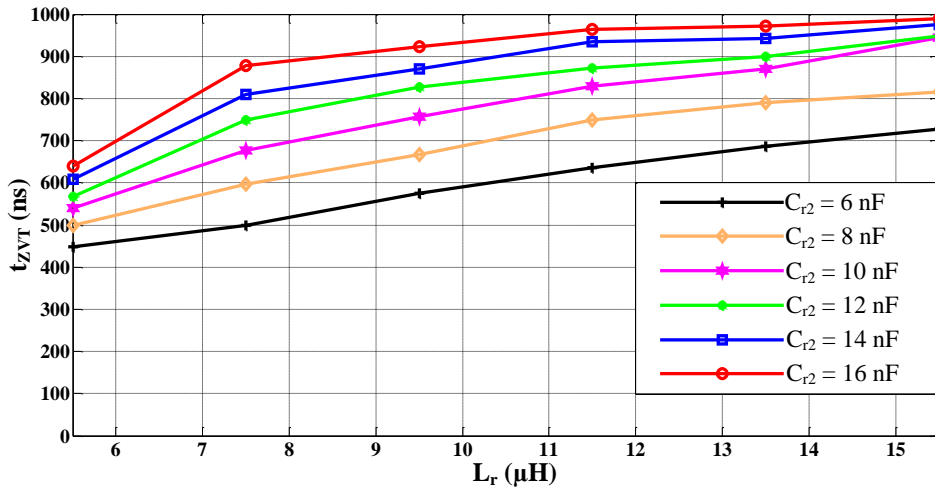
Şekil 4. 4 Farklı  $C_{r2}$  kondansatör değerlerine göre  $C_{r1}$  kondansatörü ve  $L_r$  endüktansı akımının maksimum değerleri arasındaki değişim

Rezonans kondansatörlerinin belirlenmesi için yapılan bir diğer analiz ise kondansatör değerlerine bağlı olarak ana anahtarın ZVT süresinde gözlenen değişimlerdir. Şekil 4.5'te  $C_{r1}$  ve  $C_{r2}$  kondansatörlerinin değerlerine bağlı olarak ana anahtarın ZVT süresi; yani ana anahtarın ters paralel diyodunun iletimde olduğu sürenin değişimi verilmiştir. Yumuşak anahtarlamanın sağlanabilmesi için bu süre zarfında ana anahtara kontrol sinyali uygulanmalıdır. Bir diğer önemli husus ise sunulan dönüştürücüde rezonans endüktansı enerjisi anahtarın ters paralel diyodu üzerinden giriş kaynağına geri aktarıldığından dolayı enerji aktarımı bitmeden bu diyodun kesime gidemeyeceğidir. Dolayısıyla mod 4 çalışmada anlatılan bu hususa ilişkin eşitlik (4.18)'den anahtarın dahili diyodunun iletime kalması gereken minimum süre; yani ZVT süresi 547.56 ns olarak hesaplanır. Sonuç olarak Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'deki karakteristik eğriler göz önünde bulundurularak  $C_{r1}$  ve  $C_{r2}$  değerleri için optimum değer 10 nF olarak belirlenir.

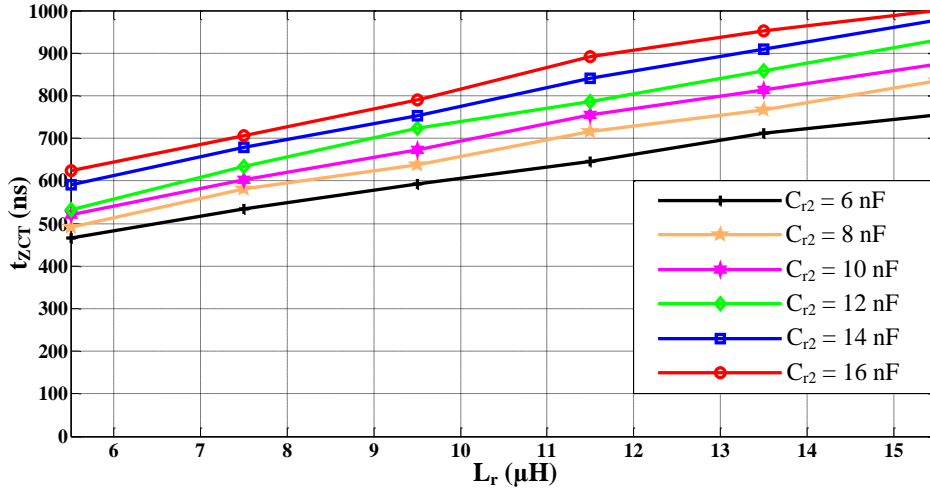


Şekil 4. 5 Farklı  $C_{r2}$  kondansatör değerlerine göre  $C_{r1}$  kondansatörü ve ZVT süresi arasındaki değişim

Eleman değerlerini desteklemek için karakteristik eğriler farklı karşılaştırmalarla ortaya konabilir. Şekil 4.6'da  $L_r$  endüktansı ve  $C_{r2}$  kondansatörünün ana anahtarın ZVT süresi ile değişimi verilirken Şekil 4.7'de ise yardımcı anahtarın ZCT süresine bağlı değişim eğrileri gösterilmiştir. Her iki şekilden de görüldüğü gibi  $L_r$  endüktansı için  $5.5 \mu\text{H}$  ve  $C_{r2}$  kondansatörü için ise  $10 \text{ nF}$  değerleri optimum değerlerdir. Bu değerlerden büyük eleman seçilmesi durumunda ZVT ve ZCT süreleri artmaktadır. ZVT ve ZCT sürelerinin artması yumuşak anahtarlanmanın kesin olarak sağlanabilmesi açısından olumlu olsa da bu durum geçici rejim aralıklarının ve sirkülasyon enerjisi kayıplarının artmasına yol açmaktadır.



Şekil 4. 6 Farklı  $C_{r2}$  kondansatör değerlerine göre  $L_r$  endüktansı ve ZVT süresi arasındaki değişim

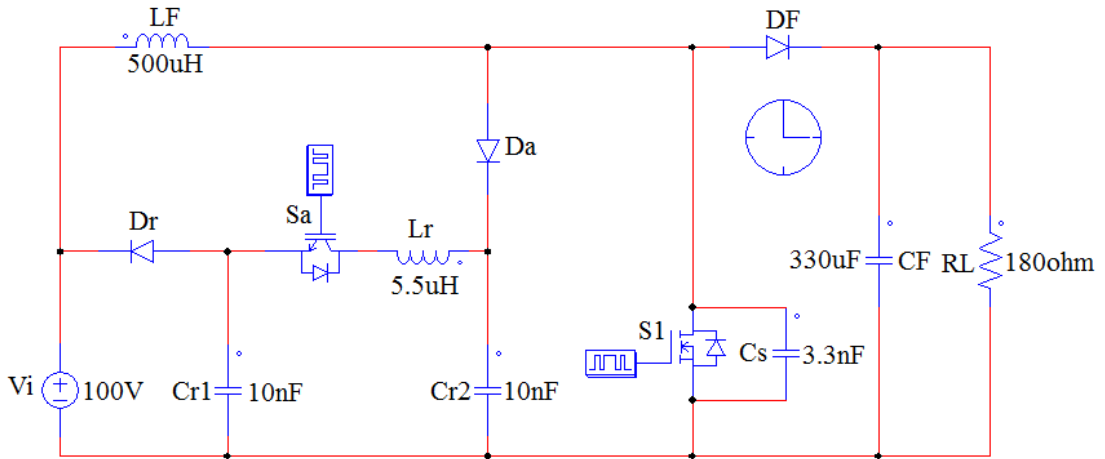


Şekil 4. 7 Farklı  $C_{r2}$  kondansatör değerlerine göre  $L_r$  endüktansı ve ZCT süresi arasındaki değişim

Son olarak bir diğer rezonans kondansatörü  $C_s$ 'nin değeri de (4.27) ve (4.28) eşitlikleri kullanılarak belirlenebilir. Bu ifadelerin bulunduğu modda ana anahtarın kesime girmesi gerçekleşmektedir. Ana anahtarın ZVS ile kesime girmesinin sağlanabilmesi için anahtar uçlarındaki gerilimin düşme süresi  $t_f$  bu modun süresinden yüksek olmalıdır. Dolayısıyla bu eşitliklerden yola çıkılarak uygulama devresi için ideal bir  $C_s$  değeri 3.3 nF olarak belirlenmiştir.

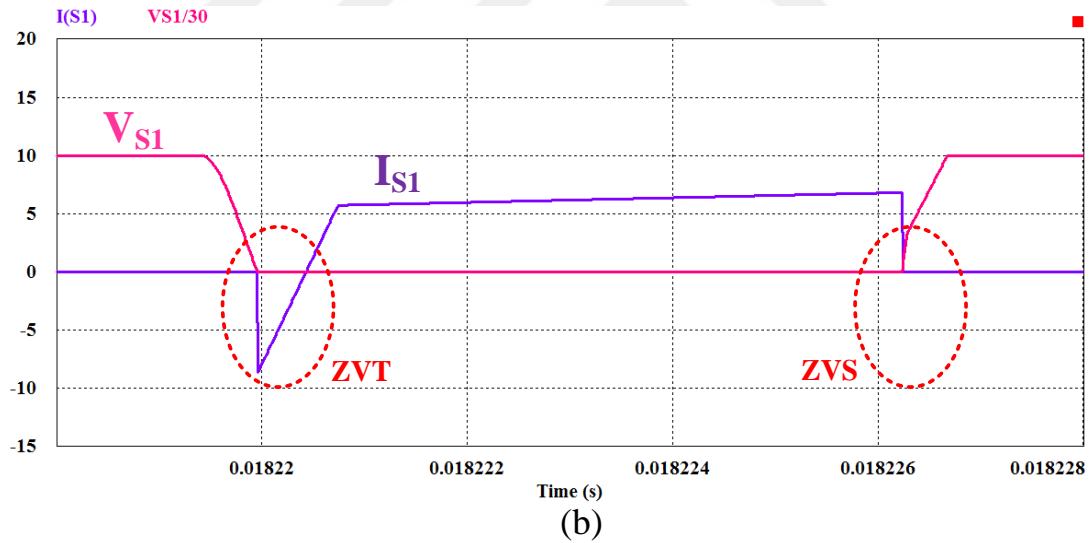
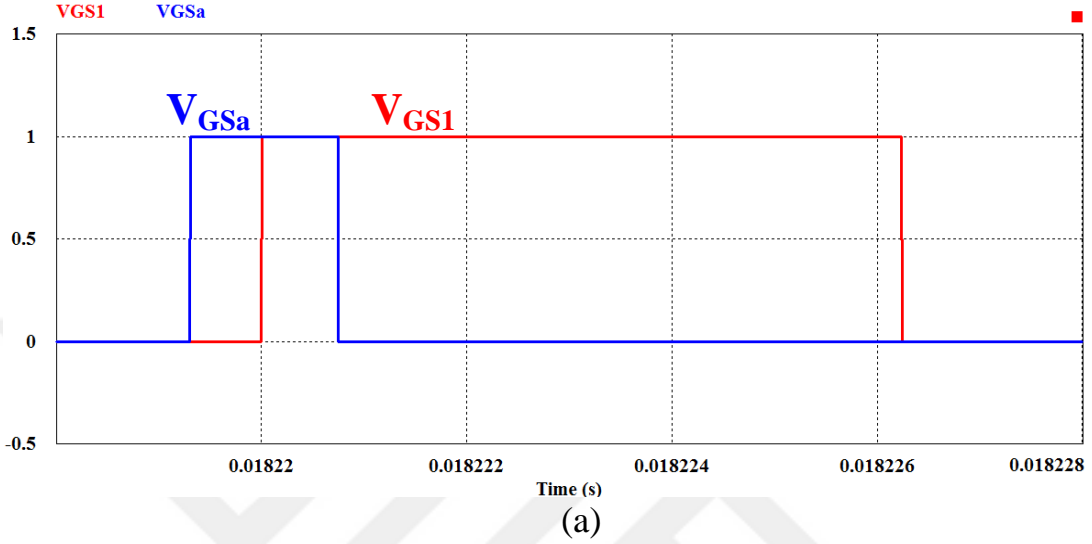
#### 4.5 Simülasyon Çalışması

Bir önceki başlık altında tasarım prosedürü belirlenen yeni ZVT PWM DC-DC yükseltici dönüştürücünün teorik analizlerini doğrulamak amacıyla PSIM 9.1.1 programında bir simülasyon çalışması yapılmıştır. Önerilen dönüştürücünün simülasyon programında kurulan devre şeması Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4. 8 Önerilen dönüştürücünün simülasyon şeması

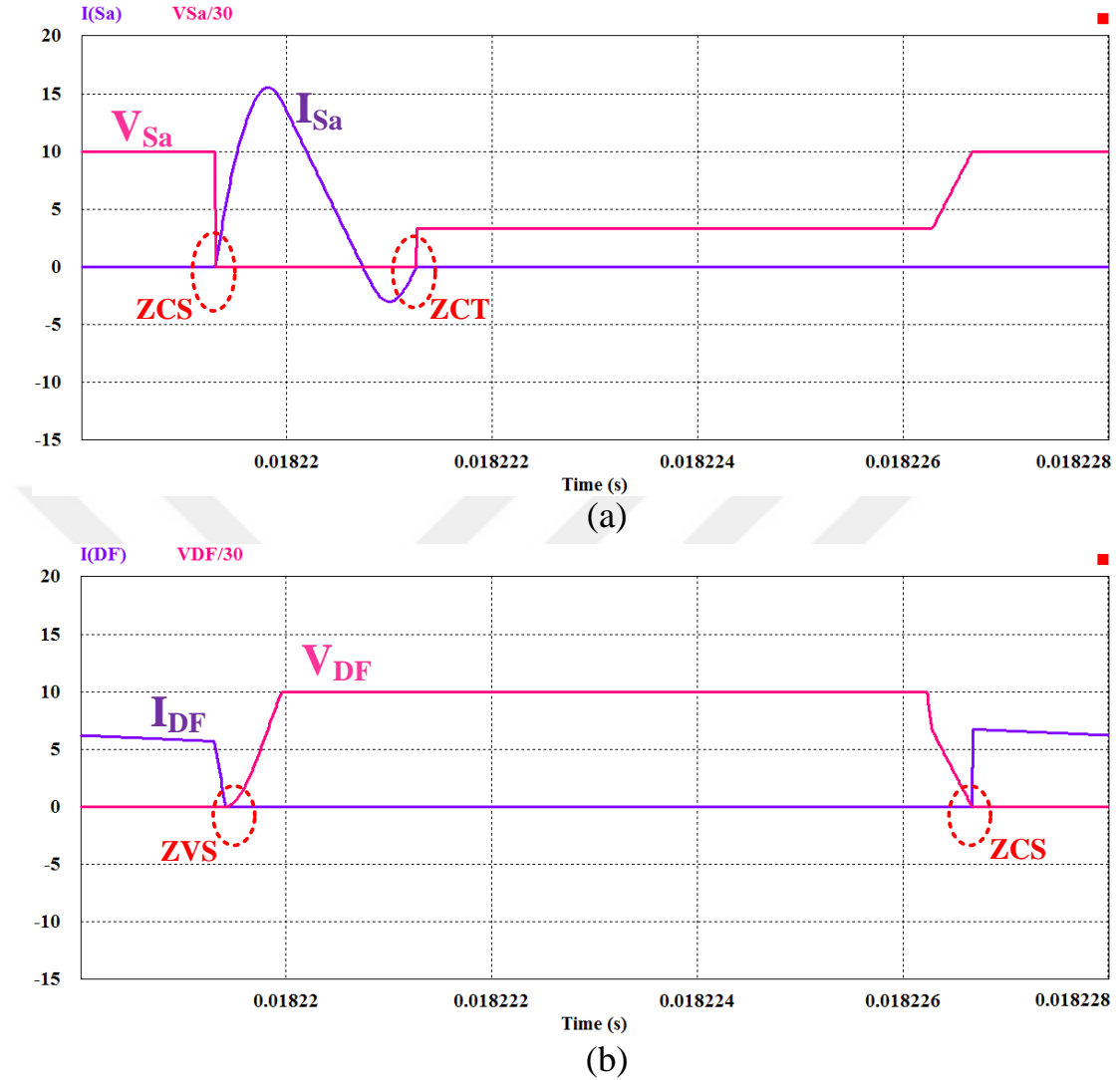
Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da önerilen dönüştürücüye ait simülasyon sonuçları verilmiştir. Şekil 4.9 (a)'da ana anahtar ve yardımcı anahtar kontrol sinyalleri, Şekil 4.9 (b)'de ise ana anahtarın akım ve gerilim dalga şekilleri verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi ana anahtar ZVT ile ilettime girerken ZVS ile kesime girmektedir. Ayrıca anahtar üzerinde herhangi bir ilave akım ya da gerilim stresi oluşmamaktadır.



Şekil 4.9 Önerilen yeni ZVT PWM DC-DC dönüştürücünün simülasyon sonuçları (a) Anahtar kontrol sinyalleri, (b) Ana anahtar akımı ve gerilimi (5 A/div, 150V/div, 2  $\mu$ s/div)

Şekil 4.10 (a)'da yardımcı anahtarın akım ve gerilimi, Şekil 4.10 (b)'de ise ana diyodun akım ve gerilimine ilişkin simülasyon sonuçları verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi yardımcı anahtar ZCS ile ilettime girerken kesime girme ZCT ile gerçekleşmektedir. Ana diyot ise ZVS ile ilettime ve ZCS ile kesime girer. Her iki elemanda da ilave gerilim ya da akım stresi olmadığı simülasyon sonuçlarından açıkça gözükmektedir. Yumuşak

anahtarlamının sağlanması için yardımcı anahtarda gerekli olan ilave akım seviyesi ise makul seviyededir.



Şekil 4.10 Önerilen yeni ZVT PWM DC-DC dönüştürücünün simülasyon sonuçları (a) Yardımcı anahtar akımı ve gerilimi, (b) Ana diyot akımı ve gerilimi (5 A/div, 150V/div, 2  $\mu$ s/div)

#### 4.6 Dönüştürücü Özellikleri

Bu tez çalışmasında sunulan ZVT PWM DC-DC yükseltici dönüştürücü literatürde yer alan yumuşak anahtarlama dönüştürücülerin avantajlarının birçoğunu barındırmakta ve dezavantajlarının birçoğunun da üstesinden gelmektedir. Sunulan yeni dönüştürücünün aşağıda maddeler halinde sıralanan özellikleri bakımından yumuşak anahtarlama konusunda literatüre oldukça elverişli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Dönüştürücü özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- 1) Ana anahtar kayıpsız bir şekilde ZVT ile iletme ve yaklaşık olarak ZVS ile kesime girer. Böylece akım ile gerilimin çakışmasından dolayı oluşacak anahtarlama kayıplarının önüne geçilir.
- 2) Ana diyot ZVS ile iletme ve ZCS ile kesime girer. Dolayısıyla ana diyodun ters toparlanma kayıpları minimize edilmiş olur.
- 3) Yardımcı anahtar ZCS ile iletme ve ZCT ile kesime girer.
- 4) Dönüştürücünün ana elemanları olan ana anahtar ve ana diyotta ilave hiçbir akım ya da gerilim stresi meydana gelmez. Dolayısıyla elemanlarda ilave iletim kayıpları oluşmamasının yanı sıra seçilecek elemanın gerilim dayanımı da çıkış geriliminin üzerine çıkmayacağından dolayı ilave maliyet ortaya çıkmaz.
- 5) Yardımcı anahtar ve yardımcı diyotlar üzerinde ilave gerilim stresi oluşmaz.
- 6) Yardımcı anahtardan geçen akımın maksimum değeri önerilen dönüştürücüde makul değerdedir ( $\leq 3I_{imax}$ ).
- 7) Dönüştürücüdeki tüm yarı iletken elemanlar yumuşak anahtarlama altında iletme ve kesime girdiğinden dolayı anahtarlama kayıpları minimize edilmiştir.
- 8) Sunulan dönüştürücü hafif yük şartları altında bile yumuşak anahtarlama çalışmayı koruyabilmektedir. Dolayısıyla dönüştürücü geniş bir yük aralığından sorunsuz çalışabilmektedir.
- 9) Geçici rejim aralıklarının toplamı anahtarlama periyodunun çok küçük bir parçasıdır.
- 10) Ana anahtarın MOSFET güç elemanı olarak seçilmesi dönüştürücüyü daha kullanışlı kılmaktadır. Çünkü sadece ZVT tekniği ile parazitik kondansatörün enerjisi geri kazanılabilir. MOSFET'lerin parazitik kondansatör değerlerinin yüksek olduğu göz önünde bulundurulursa ZVT tekniği ana anahtar için önemli bir kazanım sağlamaktadır.
- 11) Yardımcı anahtarın ise IGBT güç elemanı olarak seçilmesi dönüştürücünün üstünlüğü açısından önemli bir noktadır. Çünkü sadece ZCT tekniği ile IGBT elemanının kesime girmesi esnasında meydana gelen kuyruk akımı kayıpları engellenebilir.

## ÖNERİLEN YENİ ZVT PWM DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN DENEYSEL UYGULAMASI

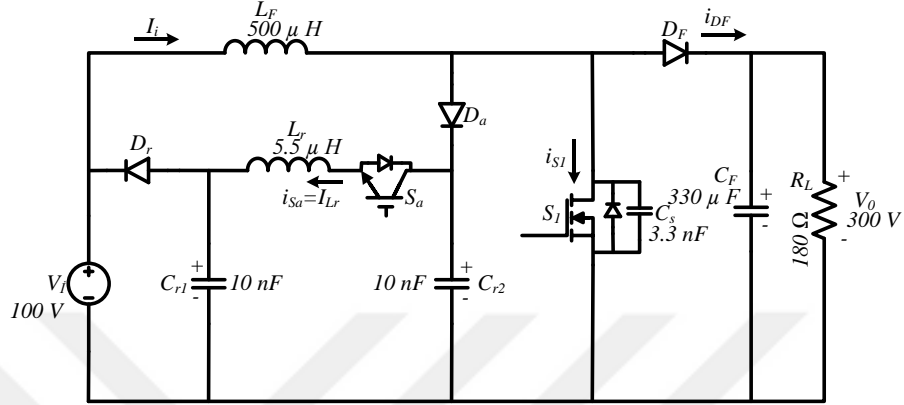
### 5.1 Giriş

Bu bölümde, önerilen yeni ZVT PWM DC-DC yükseltici dönüştürücünün laboratuvar ortamında gerçekleştirilen bir prototipine ait deneysel sonuçlar verilmiştir. 500 W çıkış gücü ve 100 kHz anahtarlama frekansında çalıştırılan dönüştürücüde kullanılan devre parametreleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

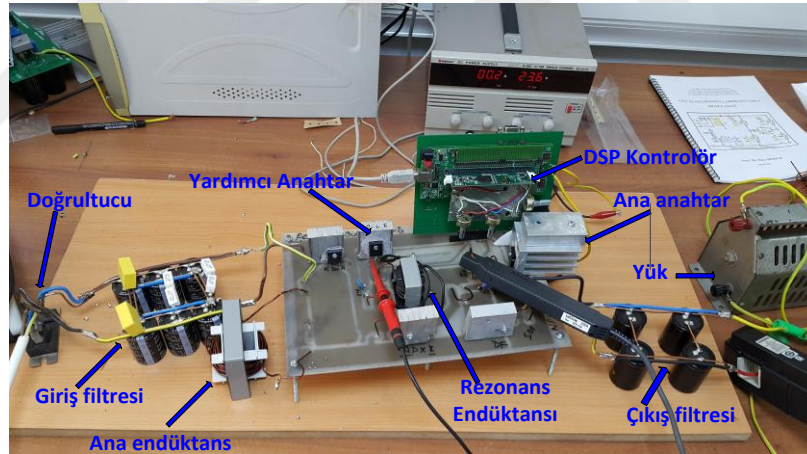
Çizelge 5.1 Deneysel devre parametreleri

Parametre	Sembol	Değer
<i>Çıkış gücü</i>	$P_o$	500 W
<i>Anahtarlama frekansı</i>	$f$	100 kHz
<i>Giriş gerilimi</i>	$V_i$	100 V
<i>Çıkış gerilimi</i>	$V_o$	300 V
<i>Ana endüktans</i>	$L_F$	500 $\mu H$
<i>Rezonans endüktansı</i>	$L_r$	5.5 $\mu H$
<i>Rezonans kapasitörü 1</i>	$C_{r1}$	10 nF
<i>Rezonans kapasitörü 2</i>	$C_{r2}$	10 nF
<i>Rezonans kapasitörü 3</i>	$C_s$	3.3 nF
<i>Çıkış filtre kapasitörü</i>	$C_F$	330 $\mu F$

Şekil 5.1’de önerilen ZVT PWM DC-DC dönüştürücünün deneysel devre şeması verilmiştir. Bu şemada,  $V_i$  100 V’luk giriş gerilim kaynağı,  $V_o$  300 V’luk çıkış gerilim kaynağı,  $S_1$  ana anahtarı MOSFET,  $S_a$  yardımcı anahtarı IGBT,  $D_F$ ,  $D_r$  ve  $D_a$  diyotları silikon diyotlardır. Önerilen dönüştürücüde kullanılan yarı iletken güç anahtarları ve diyotların nominal değerleri Çizelge 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5. 1 Önerilen ZVT PWM DC-DC yükseltici dönüştürücünün deneysel devre şeması



Şekil 5. 2 Önerilen ZVT PWM DC-DC yükseltici dönüştürücünün deneysel uygulama devresi

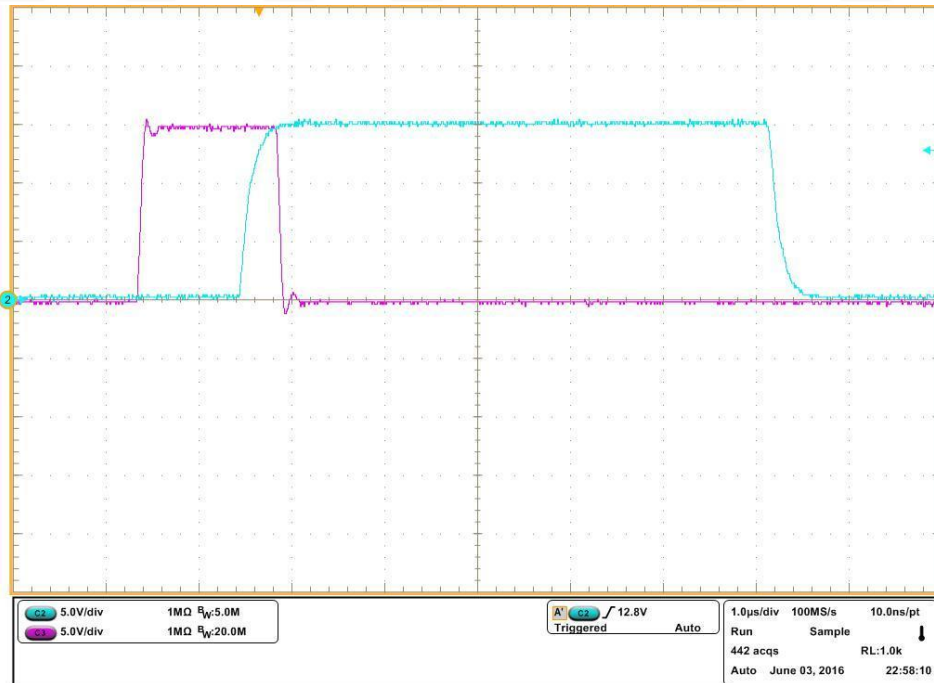
Çizelge 5.2 Uygulamada kullanılan yarı iletken elemanların katalog değerleri

Yarı iletken güç elemanı	Parça numarası	V (V)	I (A)	$t_r$ (ns)	$t_f$ (ns)	$t_{rr}$ (ns)
$S_1$	IRF460	500	20	59	58	570
$S_a$	IXGH24N60C4D1	600	24	33	68	100
$D_F$	MUR1560	600	15	-	-	35
$D_a, D_r$	MUR860	600	8	-	-	60

## 5.2 Deneysel Çalışma

Önerilen ZVT PWM DC-DC dönüştürücünün teorik analizi laboratuvar ortamında 500 W çıkış gücü ve 100 kHz frekans değerlerinde bir prototiple doğrulanmıştır. Dönüştürücünün deneysel prototipine ait fotoğraf Şekil 5.2’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi DC giriş gerilimi şebeke gerilimi ile beslenen bir varyaktan alınarak diyot köprüsü ile doğrultulmuş ve giriş filtre kondansatörleri ile filtre edilerek devreye uygulanmıştır. Deneysel prototip 100 V giriş gerilimine karşılık 300 V çıkış gerilimi elde etmek üzere doluluk oranı potansiyometre ile ayarlanarak tam yük altında çalışma sağlanmıştır. Tam yük altında deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar Şekil 5.3 - Şekil 5.6’da verilmiştir.

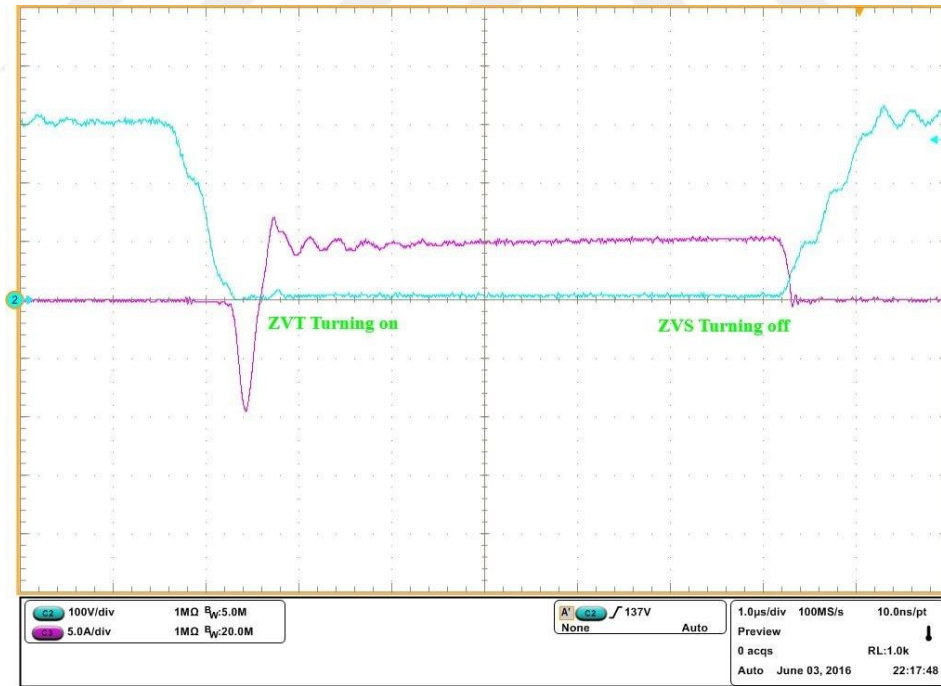
Şekil 5.3’te ana anahtar ve yardımcı anahtarın kontrol sinyalleri görülmektedir. Şekilden görüldüğü gibi yardımcı anahtar kontrol sinyali periyodun küçük bir kısmında aktiftir ve PWM çalışma periyot boyunca korunmuştur. Burada anahtarlar için gerekli kontrol sinyalleri bir Dijital Sinyal İşleyici (DSP) ile elde edilmiştir. DSP’nin analog-dijital çevirici (ADC) kanalı vasıtasıyla dışarıdan bir potansiyometre ile kontrol sinyallerinin doluluk oranı istenilen değere ayarlanabilmektedir. Bu tez çalışmasında doluluk oranı 0.66 olarak ayarlanmıştır.



Şekil 5. 3 Ana anahtar ve yardımcı anahtar kontrol sinyalleri (5V/div, 1 µs/div)

Şekil 5.4'te tam yük altında 500 W gücünde çalıştırılan dönüştürücüde ana anahtarın akım ve gerilim dalga şekilleri verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi ana anahtar uçlarındaki gerilim bastırma hücresi yardımıyla sıfıra düşürüldükten sonra anahtar dahili diyodu iletime girerek endüktans akımının giriş akımından fazla olan kısmını geçirmektedir. Böylece herhangi bir akım ve gerilim çakışması olmadan anahtar üzerindeki gerilim sıfırda tutuluyorken ana anahtara kontrol sinyali verilerek ana anahtarın ZVT ile kayıpsız bir şekilde iletime girmesi sağlanmıştır. Dolayısıyla sert anahtarlamalı dönüştürücülerde meydana gelen iletime girme anahtarlama kayıpları bu dönüştürücüde tamamen sıfırlanmakta ve mükemmel bir iletime girme işlemi sağlanmaktadır.

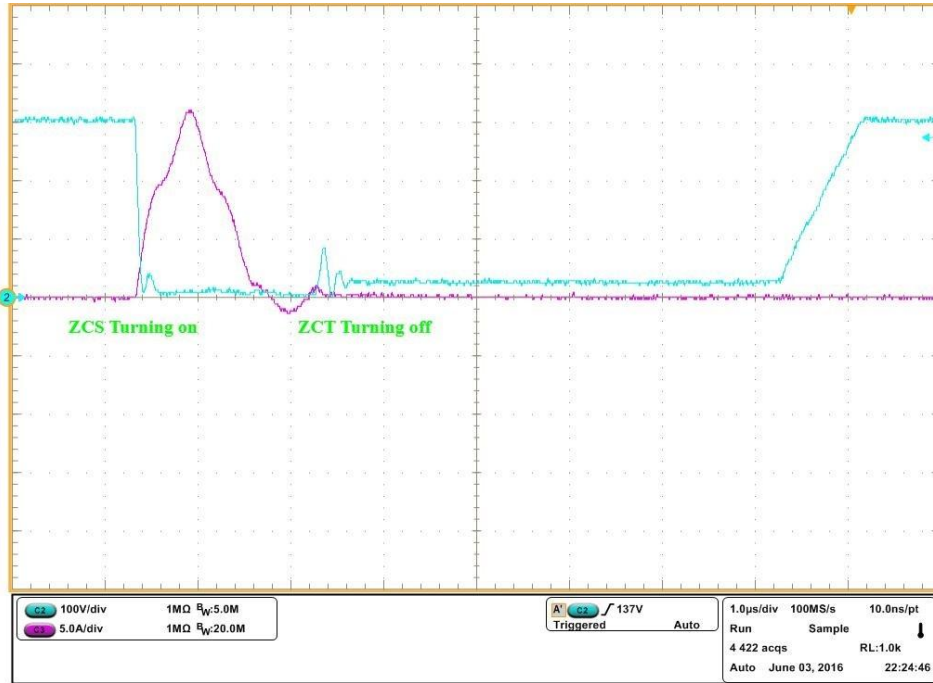
Yine Şekil 5.4'ten görüldüğü gibi kesime girme aşamasında anahtarın gerilim yükselme hızı sınırlandırılarak akım gerilim çakışması en aza indirilmiş ve ana anahtarın kesime girmesi ZVS altında gerçekleşmiştir. Bastırma hücresi sayesinde ana anahtarın iletime girme kayıpları yok edilmiş ve kesime girme kayıpları ise minimize edilmiştir. Bu esnada ana anahtar üzerinde herhangi bir ilave akım ya da gerilim stresi olmadığı şekilden açıkça görülmektedir.



Şekil 5. 4 Ana anahtarın akım ve gerilim dalga şekilleri (5A/div, 100V/div, 1 µs/div)

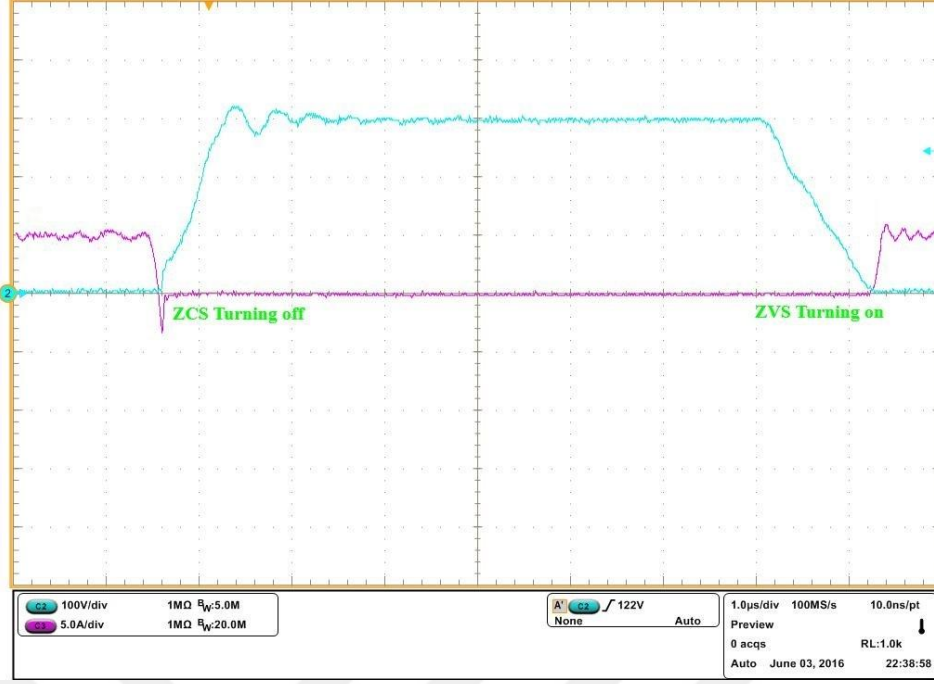
Şekil 5.5'te tam yük altında, 500 W gücünde, çalıştırılan dönüştürücüde yardımcı anahtarın akım ve gerilim dalga şekilleri verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi iletime girme esnasında yardımcı anahtara seri bağlı olan rezonans endüktansı sayesinde

yardımcı anahtarın akım yükselme hızı sınırlandırılmış ve yardımcı anahtarın ZCS ile iletme girmesi sağlanmıştır. Kesime girme esnasında ise uçlarında gerilim bulunmayan yardımcı anahtarın dahili diyodu iletimdeyken anahtarın sinyali kesilerek ZCT ile kayıpsız bir şekilde kesime girme sağlanmıştır. Yardımcı anahtar olarak IGBT yarı iletken güç elemanı kullanıldığı göz önünde bulundurulursa kesime girme işleminde oluşacak olan kuyruk akım kayıplarının da tamamen yok edildiği gözükmektedir. Ayrıca yumuşak anahtarlama sağlamak amacıyla devrede bulunan yardımcı anahtarın uçlarında herhangi bir ilave gerilim stresi bulunmaması da dönüştürücünün önemli özelliklerinden biridir. Şekilden görüldüğü gibi yardımcı anahtarda herhangi bir ilave gerilim stresi bulunmamakta ve akımın tepe değeri ise makul bir seviyede kalmaktadır.



Şekil 5. 5 Yardımcı anahtarın akım ve gerilim dalga şekilleri (5A/div, 100V/div, 1  $\mu$ s/div)

Şekil 5.6'da ana diyodun akım ve gerilim dalga şekilleri verilmiştir. Ana diyot ZVS ile iletme girerken ZCS ile de kesime girmektedir. Rezonans endüktansı sayesinde ZCS ile kesime girmesi sağlanan ana diyodun şekilden de görüldüğü gibi ters toparlanma akımı küçük bir değere düşürülmüş ve dolayısıyla ters toparlanma kayıpları önemli ölçüde azaltılmıştır. Ayrıca ana diyotta da hiçbir ilave akım ya da gerilim stresinin olmadığı şekilden açıkça görülmektedir.

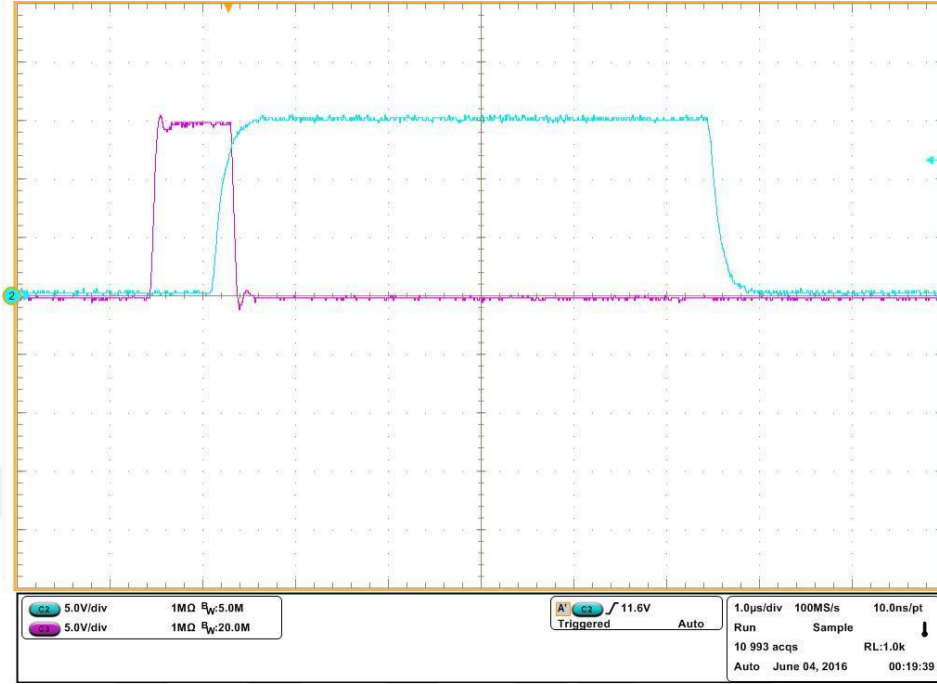


Şekil 5. 6 Ana diyodun akım ve gerilim dalga şekilleri (5A/div, 100V/div, 1  $\mu$ s/div)

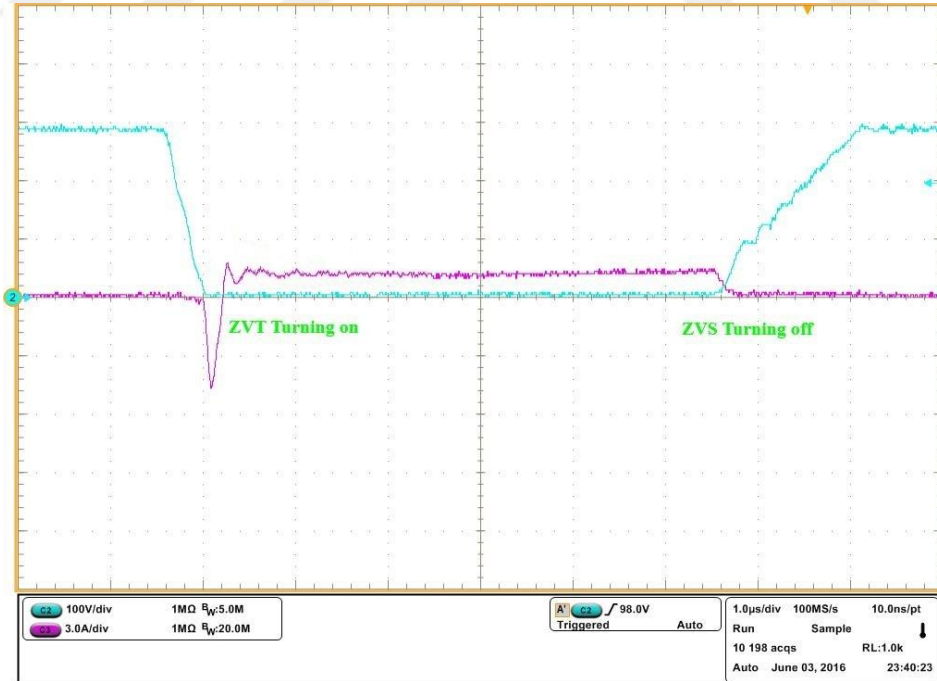
Tam yük altında elde edilen deneysel sonuçlar Bölüm 4'te verilen dönüştürücünün simülasyon sonuçlarını ve teorik analizini doğrulamaktadır. Ayrıca önerilen dönüştürücünün geniş bir yük aralığında çalışması dönüştürücünün en önemli özelliklerinden biridir. Bunu doğrulamak amacıyla yukarıdaki deneysel verilere ilave olarak deneysel prototip devresinin çıkışına 900  $\Omega$ 'luk bir yük bağlanarak devre 100 W çıkış gücü koşulunda çalıştırılmıştır. 100 W çıkış gücünde elde edilen deneysel sonuçlar Şekil 5.7 – Şekil 5.10'da verilmiştir. Bu şekillerden de görüldüğü gibi önerilen dönüştürücüde hafif yüklerde dahi yumuşak anahtarlama koşullarının sağlandığı ve geniş bir yük aralığında çalışabildiği görülmektedir.

Şekil 5.7 – Şekil 5.10'da hafif yük altında, 100 W gücünde, çalıştırılan dönüştürücüye ait deneysel sonuçlar verilmiştir. Şekil 5.7'de ana anahtar ve yardımcı anahtar kontrol sinyalleri verilmiştir. Hafif yüklerde yardımcı anahtarın iletim süresinin normal yük koşullarındakine göre daha kısa tutulabileceği ve geçici rejim aralıklarının daha kısa sürede biteceği gözükmemektedir. Şekil 5.8'de ise 100 W gücünde ana anahtarın akım ve gerilim dalga şekilleri verilmiştir. Tam yükte olduğu gibi hafif yüklerde de ana anahtar ZVT ile iletme girmekte ve ZVS ile kesime girmektedir. Ayrıca şekilden görüldüğü gibi anahtarda hiçbir ilave akım ya da gerilim stresi bulunmamaktadır. Şekil 5.9'da yardımcı anahtarın akım ve gerilim dalga şekilleri 100 W gücü için verilmiştir. Yardımcı anahtar hafif yüklerde dahi yumuşak anahtarlama ile çalışmakta ve anahtarda

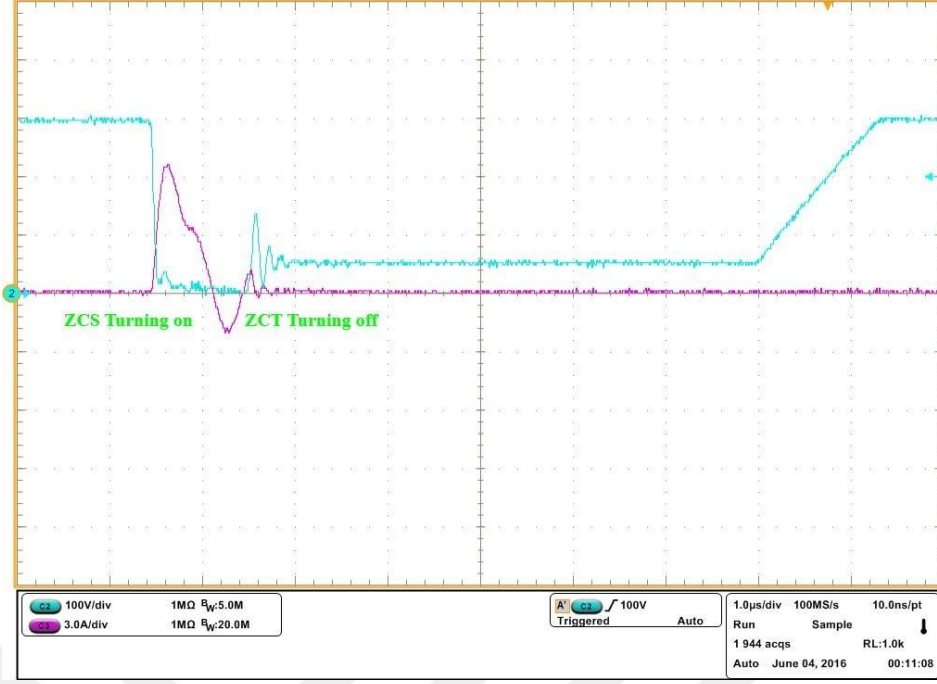
herhangi bir gerilim stresi bulunmamaktadır. Son olarak Şekil 5.10 ana diyodun hafif yüklerde ilave akım ya da gerilim stresine maruz kalmadan yumuşak bir şekilde ilettime ve kesime girdiğini göstermektedir.



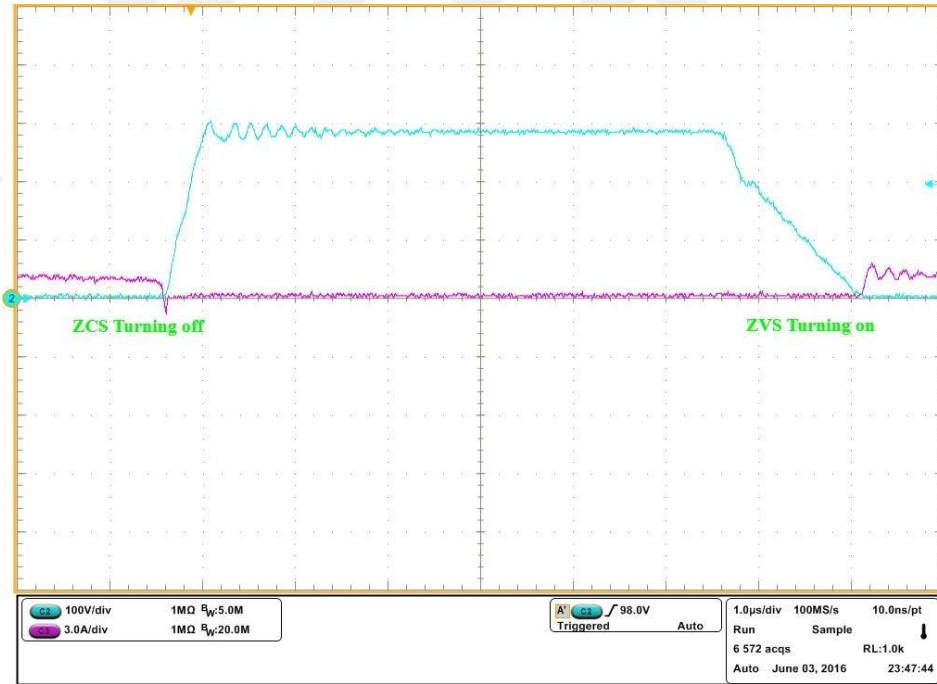
Şekil 5. 7 100 W gücünde ana anahtar ve yardımcı anahtar kontrol sinyalleri (5V/div, 1  $\mu$ s/div)



Şekil 5. 8 100 W gücünde ana anahtarın akım ve gerilim dalga şekilleri (3A/div, 100V/div, 1  $\mu$ s/div)



Şekil 5. 9 100 W gücünde yardımcı anahtarın akım ve gerilim dalga şekilleri (3A/div, 100V/div, 1  $\mu$ s/div)



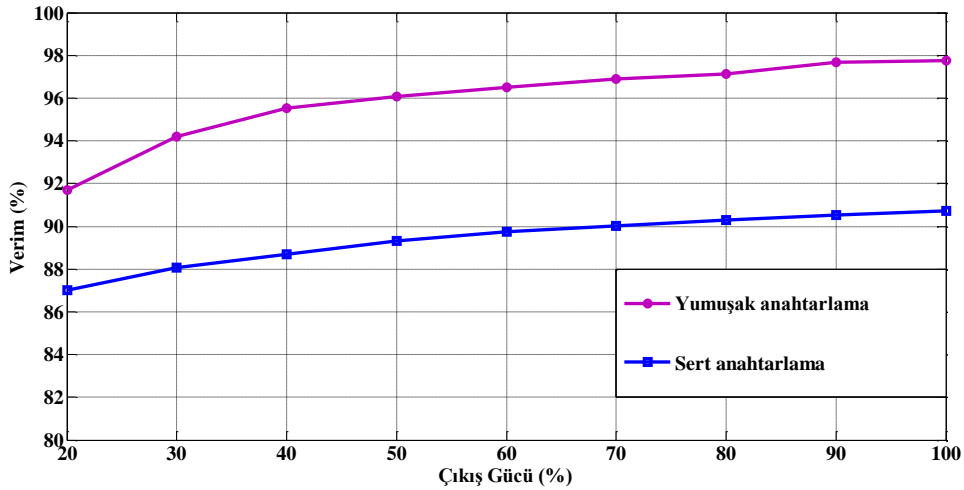
Şekil 5. 10 100 W gücünde ana diyodun akım ve gerilim dalga şekilleri (3A/div, 100V/div, 1  $\mu$ s/div)

Sonuç olarak önerilen ZVT PWM DC-DC yükseltici dönüştürücüde geniş bir yük aralığında yumuşak anahtarlama sağlandığı deneysel sonuçlardan görülmektedir. Çizelge 5.3'te sunulan dönüştürücüdeki yarı iletken güç elemanlarının anahtarlama durumları ve akım-gerilim stresleri açısından özellikleri verilmiştir.

Çizelge 5.3 Yarı iletken güç elemanlarının anahtarlama durumları ve akım-gerilim stresleri

Güç elemanı	İletime girme	Kesime girme	Akım stresi	Gerilim stresi
$S_1$	ZVT	ZVS	Yok	Yok
$D_F$	ZVS	ZCS	Yok	Yok
$S_a$	ZCS	ZCT	$\leq 3I_{imax}$	Yok
$D_r$	ZVS	ZCS	Yok	Yok
$D_a$	ZCS/ZVS	ZCS/ZVS	Yok	Yok

Önerilen dönüştürücünün yumuşak anahtarlama sağladığı deneysel sonuçlarla ortaya konulmuştur. Bölüm 4’te tasarım prosedürü yapılırken dönüştürücü veriminin minimum %95 olarak elde edilmesi hedeflenmişti. Şekil 5.11’de önerilen dönüştürücünün sert anahtarlama (HS) ve yumuşak anahtarlama (SS) çalışma koşullarında güç değişimine karşın elde edilen verim eğrileri verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi her iki anahtarlama durumunda da çıkış gücünün artması ile verim artmaktadır. Nominal çıkış gücünde, sert anahtarlama ile elde edilen verim %90.72 iken bu değer, önerilen aktif bastırma hücresi sayesinde, yumuşak anahtarlama ile çalışmada %97.8’e ulaşmaktadır.



Şekil 5. 11 Önerilen dönüştürücünün HS ve SS durumunda verim eğrileri

### SONUÇ VE ÖNERİLER

PWM DC-DC dönüştürücüler endüstride güç faktörü düzeltme devreleri, elektrikli araçlar, anahtarlama güç kaynakları, güneş ve rüzgâr enerji sistemleri gibi uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu dönüştürücülerden beklenen özellikler güç yoğunluğunun yüksek olması, dinamik cevabının hızlı olması ve kontrolünün kolay olmasıdır. Güç yoğunluğu dönüştürücü hacminin azalması ile artar. DC-DC dönüştürücülerde özellikle filtre elemanlarının boyutları güç yoğunluğunu azaltan en temel unsurlardandır. Güç yoğunluğunu artırmanın yöntemlerinden biri de anahtarlama frekansının artırılmasıdır. Çünkü yüksek anahtarlama frekansında filtre elemanları boyutları küçüleceğinden güç yoğunluğu da artmaktadır.

DC-DC dönüştürücülerde anahtarlama frekansının artırılması güç yoğunluğunu artmasını sağlasa da bir takım sorunlara da sebep olmaktadır. Bu sorunlar anahtarlama güç kayıplarının artması, diyot ters toparlanma kayıplarının artması, EMI gürültülerinin artması şeklinde sıralanabilir. Bu sorunların üstesinden gelmek için literatüre yumuşak anahtarlama kavramı kazandırılmıştır. Yumuşak anahtarlama temel olarak akım ve gerilim çakışmalarının en aza indirilerek anahtarlama güç kayıplarının minimize edilmesidir. Yumuşak anahtarlama amacıyla geliştirilen dört temel teknik vardır. Bunlar; sıfır akımda anahtarlama (ZCS), sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS), sıfır akımda geçiş (ZCT) ve sıfır gerilimde geçiş (ZVT) teknikleridir. Bu tekniklerden en yaygın olanları modern bastırma hücreleri ile sağlanan ileri yumuşak anahtarlama teknikleri olan ZCT ve ZVT teknikleridir.

ZVT ve ZCT teknikleri konusunda literatürde bir çok devre topolojisi önerilmiştir. Bu devrelerin bir çoğundan yumuşak anahtarlama ile iletim ve kesim durumları sağlanmakta ve anahtarlama kayıpları en aza indirilmektedir. Önerilen birçok devre

anahtarlama kayıplarının azaltılması hususunda elverişli sonuçlar ortaya koysa da bazı sakıncaları da beraberinde getirmektedir. Literatürde ZCT ve ZVT amacıyla önerilmiş ancak aşağıdaki dezavantajlara sahip birçok dönüştürücü tipi mevcuttur:

Yumuşak anahtarlamanın tüm anahtarlarda sağlanmadığı dönüştürücüler. Bu dönüştürücülerin bir kısmında yardımcı anahtarın iletimi ya da kesimi sert anahtarlama ile gerçekleşirken bir kısmında ise ana anahtar ya sert iletime girmekte ya da sert kesime girmektedir. Bu durumda önerilen bu dönüştürücülerde anahtarlama kayıplarının tamamen yok edilmesi mümkün olmamaktadır.

Yumuşak anahtarlamanın tüm diyotlarda sağlanmadığı dönüştürücüler. Bu dönüştürücülerin bir kısmında ana diyodun iletimi ya da kesimi sert anahtarlama ile gerçekleşirken bir kısmında ise yardımcı diyot veya diyotlar ya sert iletime girmekte ya da sert kesime girmektedir. Bu durumda önerilen bu dönüştürücülerde diyot ters toparlanma kayıplarının devreye etkileri yüksek olmaktadır.

Yapısında yumuşak anahtarlama sağlamaya yönelik bastırma hücresi bulunan ancak bastırma hücresinin yarı iletken güç elemanlarında ilave akım ya da gerilim stresleri oluşturduğu dönüştürücüler. Bu dönüştürücülerin akım stresi bulunduranlarında ilave iletim kayıpları oluşurken gerilim stresi bulunduranlarında ise maliyet artmaktadır.

Tez çalışması içeriğinde 2. Bölüm’de yukarıda anlatılan dezavantajlardan en az birine sahip olan dört tip dönüştürücü çalışma modlarının analizi ve simülasyon sonuçları ile detaylıca verilmiştir.

Bu doktora çalışmasında yumuşak anahtarlama amacıyla yeni bir ZVT PWM DC-DC dönüştürücü sunulmuştur. Sunulan dönüştürücü literatürde yer alan birçok dönüştürücülerin avantajlarına sahipken yukarıda bahsedilen dezavantajların üstesinden gelmektedir.

Önerilen yeni dönüştürücüde ana anahtar ZVT ile iletime ve ZVS ile kesime girerken yardımcı anahtar ise ZCS ile iletime ve ZCT ile kesime girmektedir. Böylece anahtarlarda iletime ve kesime girme anahtarlama kayıpları yok edilerek önemli bir avantaj sağlanmıştır. ZVS ile iletime ve ZCS ile de kesime giren ana diyotta ters toparlanma kayıplarının en aza indirilmesi sağlanırken yardımcı diyotların da yumuşak anahtarlama ile iletime ve kesime girmeleri dönüştürücü kayıplarını en aza indirmiştir. Ayrıca tüm yarı iletken elemanların yumuşak bir şekilde çalışmasının yanı sıra

dönüştürücüdeki yarı iletken ana elemanların hiçbirinde ilave gerilim ya da akım stresleri olmaması dönüştürücünün en önemli özelliklerinden biridir. Ayrıca bastırma hücresinde kullanılan elemanlarda da ilave hiçbir gerilim stresi bulunmazken yardımcı anahtarın akım değeri de makul seviyededir.

Sunulan dönüştürücünün detaylı bir şekilde teorik analizleri yapılarak eş değer çalışma modları verilerek dönüştürücünün özellikleri vurgulanmıştır. Dönüştürücünün bir prototipini hazırlamak üzere tasarım kriterleri belirlenmiş ve bu tasarım parametrelerine göre 500 W ve 100 kHz'lik bir prototiple önerilen dönüştürücünün deneysel uygulaması gerçekleştirilmiştir. Ayrıca dönüştürücü 100 W'lık hafif yük koşulunda da çalıştırılarak devrenin hafif yük koşullarındaki yumuşak anahtarlama bozmadan çalışması doğrulanmıştır. Her iki çalışma durumu için dönüştürücüye ait deneysel dalga şekilleri tez içerisinde verilmiş ve bu sonuçlar yorumlanarak dönüştürücünün teorik analizleri doğruladığı gözlemlenmiştir. Ayrıca tam yükte % 90.72 olan dönüştürücü veriminin önerilen bastırma hücresi sayesinde % 97.8'e çıktığı tespit edilmiştir.

Bu doktora tezinin ulusal ve uluslar arası düzeyde bilime katkı sağlayacağı ve bu konuda yapılacak akademik çalışmalar için referans olabileceği düşünülmektedir. Bu doktora tezi neticesinde yumuşak anahtarlama konusundan önemli bir deneyim kazanılmış olup bundan sonraki süreçte farklı dönüştürücü türleri üzerinde yumuşak anahtarlama çalışmaları yapılması planlanmaktadır.

## KAYNAKLAR

---

- [1] Wang, C. M., (2006). “Novel Zero-Voltage-Transition PWM DC-DC Converters”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 53: 254-262.
- [2] Altintas, N., Bakan, A. F. ve Aksoy, I., (2014). “A Novel ZVT-ZCT-PWM DC-DC Converter”, IEEE Transactions on Power Electronics, 25: 2093-2105.
- [3] Adib, E. ve Farzanehfard, H., (2008). “Family of Zero-Current Transition PWM Converters”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55: 3055-3063.
- [4] Huang, W., Gao, X., Bassan, S. ve Moschopoulos, G., (2008). “Novel Dual Auxiliary Circuits for ZVT-PWM Converters”, Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 33: 153–160.
- [5] Bodur, H., (2012). Güç Elektroniği, 2. Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [6] Hua, G., Leu, C. S., Jiang, Y. ve Lee, F. C. Y., (1994). “Novel Zero-Voltage-Transition PWM Converters”, IEEE Transactions on Power Electronics, 9: 213-219.
- [7] Zhang, X., Jiang, L., Deng, J., Li, S. ve Chen, Z., (2014). “Analysis and Design of A New Soft Switching Boost Converter with A Coupled Inductor”, IEEE Transactions on Power Electronics, 29: 4270-4277.
- [8] Lee, K. J., Park, B. G., Kim, R. Y. ve Hyun D. S., (2012). “Nonisolated ZVT Two-Inductor Boost Converter with A Single Resonant Inductor for High Step-Up Applications”, IEEE Transactions on Power Electronics, 27: 1966-1973.
- [9] Tsai, H. Y., Hsia, T. H. ve Chen, D., (2007). “A Novel Soft-Switching Bridgeless Power Factor Correciton Circuit,” IEEE European Conference on Power Electronics and Applications, 2-5 Eylül 2007, Aalborg, Danimarka.
- [10] Park, S. ve Choi, S., (2010). “Soft-Switched CCM Boost Converter With High Voltage Gain for High-Power Applications”, IEEE Transactions on Power Electronics, 25: 1211-1217.
- [11] Moschopoulos, G., Jain, P. ve Joos, G., (1995). “A Novel Zero-Voltage Switched PWM Boost Converter”, IEEE Transactions on Power Electronics, 2: 694-700.
- [12] Tseng, C. J., ve Chen, C. L., (1998). “Novel ZVT-PWM Converters with Active Snubbers,” IEEE Transactions on Power Electronics, 13: 861-869.

- [13] Li, W. ve He, X., (2009). “High Step-Up Soft Switching Interleaved Boost Converters with Cross-Winding-Coupled Inductors and Reduced Auxiliary Switch Number”, *IET Power Electronics*, 2: 125-133.
- [14] Aksoy, I., Bodur, H. ve Bakan, A. F., (2010). “A New ZVT-ZCT-PWM Boost Converter”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29: 256-265.
- [15] Stein, C. M. O. ve Hey, H. L., (2000) “A True ZCZVT Comutation Cell for PWM Converters”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 15: 185-193.
- [16] Jain, N., Jain, P. K. ve Joos, Geza., (2004). “A Zero Voltage Transition Boost Converter Employing a Soft Switching Auxiliary Circuit With Reduced Conduction Losses”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19: 130-139.
- [17] Park, S. H., Park, S. R., Yu, J. S., Jung, Y. C. ve Won C. Y., (2010). “Analysis and Design of a Soft-Switching Boost Converter with a HI-Bridge Auxiliary Resonant Circuit”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25: 2142-2149.
- [18] Bodur, H. ve Bakan, A. F., (2002). “A New ZVT-PWM DC-DC Converter”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 17: 40-47.
- [19] Hua, G., Yang, E. X., Jiang, Y. ve Lee, F. C., (1994). “Novel Zero-Current-Transition PWM Converters”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 9: 601-606.
- [20] Chen, Y. T., Shiu, S. M. ve Liang, R. H., (2012). “Analysis and Design of Zero-Voltage-Switching and Zero-Current-Switching Interleaved Boost Converter,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27: 161–173.
- [21] Mao, H., Lee, F.C.Y., Zhou, X., Dai, H., Cosan, M. ve Boroyevich, D., (1997). “Improved Zero-Current-Transition Converters for High-Power Applications”, *IEEE Transations on Industrial Applications*, 33: 1220-1232.
- [22] Saha, S., Majumdar, B., Halder, T. ve Biswas, S. K., (2005) “New Fully Soft-Switched Boost-Converter with Reduced Conduction Losses”, *International Conference on Power Electronics and Drives Systems*, 28-30 Kasım 2005, Kuala Lumpur, Malezya.
- [23] Choi, H. S. ve Cho, B. H., (2002). “Novel Zero-Current-Switching (ZCS) PWM Switch Cell Minimizing Additional Conduction Loss”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49: 165-172.
- [24] Bodur, H. ve Bakan, A. F., (2004). “An Improved ZCT-PWM DC-DC Converter for High-Power and Frequency Applications”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51: 89-95.
- [25] Fuentes, R. C. ve Hey, H. L., (1999). “An Improved ZCS-PWM Commutation Cell for IGBT’s Application”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 14: 939–948.
- [26] Lee, D. Y., Lee, M. K., Hyun, D. S. ve Choy, I., (2003). “New Zero Current Transition PWM DC-DC Converters Without Current Stress”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 18: 95-104.
- [27] Mousavi, A., Das, P. ve Moschopoulos, G., (2012). “A Comparative Study of A New ZCS DC-DC Full-Bridge Boost Converter with A ZVS Active Clamp Converter”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27: 1347–1358.

- [28] Dusmez, S., Khaligh, A. ve Hasanzadeh, A., (2015). "A Zero-Voltage-Transition Bidirectional DC/DC Converter", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62: 3152-3162.
- [29] Rezvanyvardom, M., Adib, E. ve Farzenahfard, H., (2011). "New Interleaved Zero-Current Switching Pulse-Width Modulation Boost Converter with One Auxiliary Switch," IET Power Electronics, 4: 979–983.
- [30] Rezvanyvardom, M., Adib, E., Farzenahfard, H., ve Mohammadi, M., (2012). "Analysis, Design and Implementation of Zero-Current Transition Interleaved Boost Converter," IET Power Electronics, 5: 1804–1812.
- [31] Ting, N. S., Sahin, Y. ve Aksoy, I., (2015). "A New ZCT-ZVT PWM Interleaved DC-DC Boost Converter", ACEMP-OPTIM Electromotion Joint Conference, 2-4 Eylül 2015, Antalya, Türkiye.
- [32] Bodur, H., Cetin, S. ve Yanik, G., (2011). "A New Zero-Voltage Transition Pulse Width Modulated Boost Converter," IET Power Electronics, 4: 827-834.
- [33] Wang, C. M., Lin, C. H., Lu, C. M. ve Li, J. C., (2015). "Design and Realisation of A Zero-Voltage Transition Pulse-Width Modulation Interleaved Boost Power Factor Correction Converter," IET Power Electronics, 8: 1542-1551.
- [34] Akın, B., (2014). "An Improved ZVT–ZCT PWM DC–DC Boost Converter With Increased Efficiency," IEEE Transactions on Power Electronics, 29: 1919-1926.
- [35] Akın, B. ve Bodur, H., (2011). "A New Single-Phase Soft-Switching Power Factor Correction Converter", IEEE Transactions on Power Electronics, 26: 436-443.

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Naim Süleyman TİNĞ  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 20/09/1988 - ERZURUM  
**Yabancı Dili** : İngilizce  
**E-posta** : nsting@yildiz.edu.tr, dadasnst@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Elektrik Müh.	Yıldız Teknik Üniv.	Halen
Y. Lisans	Elektrik Müh.	Yıldız Teknik Üniv.	2013
Lisans	Elek. Elekt. Müh.	Erciyes Üniversitesi	2010
Lise	Fen Bilimleri	Erzurum-İlıca Süper Lisesi	2006

### İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2011-	Yıldız Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2010-2011	Erzincan Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

## **YAYINLARI**

### **Makale**

1. Ting, N. S., Aksoy, I. ve Sahin, Y., (2016). "A Novel ZVT PWM DC-DC Boost Converter with Active Snubber Cell", IET Power Electronics, Doi: 10.1049/iet-pel.2015.1052.
2. Sahin, Y., Ting, N. S. ve Aksoy, I., (2016). "A New Soft Switched ZCZVT-PWM DC-DC Boost Converter", Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Doi: 10.3906/elk-1508-258.
3. Sahin, Y., Aksoy, I. ve Ting, N. S., (2015). "An Improved ZCZVT-PWM DC-DC Boost Converter", Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 33(4):639-651.
4. Tınğ, N. S., Şahin, Y., Girgin, Ö. ve Aksoy, İ., (2015). "Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Şebekeye Entegre Sabit Miknatıslı Senkron Generatörün Güç Kontrolü ve Sistemin Modellenmesi", 3e Electrotech, 249:206-216.
5. Şahin, Y., Tınğ, N. S., Girgin, Ö. ve Aksoy, İ., (2015). "DC-DC Dönüştürücülerde Kullanılan Yumuşak Anahtarlama Teknikleri ve Bu Tekniklerin Kıyaslanması", 3e Electrotech, 249:108-116.
6. Girgin, Ö., Obdan, A. H., Tınğ, N. S. ve Şahin, Y., (2015). "İnverterlerde Rezonanslı DC Hat Kullanılarak Anahtarlama Kayıplarının Azaltılması", 3e Electrotech, 252:162-167.

### **Bildiri**

1. Ting, N. S., Sahin, Y. ve Aksoy, I., (2016). "A Soft Switching Power Factor Correction Interleaved AC-DC Boost Converter", IEEE 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), 27-01 July 2016, Bydgoszcz, Poland.
2. Sahin, Y., Ting, N. S., Akboy, E. ve Aksoy, I., (2016). "A New Soft Switching Three Level T-Type Inverter", IEEE 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), 27-01 July 2016, Bydgoszcz, Poland.
3. Ting, N. S., Sahin, Y. ve Aksoy, I., (2016). "Single Phase ZVT Sinusoidal PWM

- Full-Bridge Inverter with Active Snubber Cell”, International Conference on Recent Innovations in Engineering and Technology (ICRIET), 18-21 June 2016, Paris, France.
4. Sahin, Y., Ting, N. S. ve Aksoy, I., (2016). “A Soft Switching DC-DC Boost Converter with Passive Snubber”, International Conference on Recent Innovations in Engineering and Technology (ICRIET), 18-21 June 2016, Paris, France.
  5. Ting, N. S., Sahin, Y. ve Aksoy, I., (2016). “A ZVT-ZCT-PWM DC-DC Boost Converter with Direct Power Transfer”, 18th International Conference on Electrical Engineering (ICEE'16), 20-21 May 2016, London, United Kingdom.
  6. Sahin, Y., Ting, N. S. ve Aksoy, I., (2016). “1 kW Power Factor Correction ZVZCT Boost Converter with an Active Snubber Cell”, 18th International Conference on Electrical Engineering (ICEE'16), 20-21 May 2016, London, United Kingdom.
  7. Sahin, Y., Ting, N. S. ve Aksoy, I., (2016). “A Soft Switching PWM DC-DC Boost Converter with Increased Efficiency by Using ZVT-ZCT Techniques”, 18th International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ICECCE'16), 15-16 February 2016, Barcelona, Spain.
  8. Sahin, Y., Ting, N. S. ve Aksoy, I., (2016). “A Single Phase ZVT-ZCT Power Factor Correction Boost Converter”, 18th International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ICECCE'16), 15-16 February 2016, Barcelona, Spain.
  9. Ting, N. S., Aksoy, I. ve Sahin, Y., (2015). “A New Zero-Voltage-Transition PWM DC-DC Boost Converter”, IEEE Acemp-Optim-Electromotion Joint Conference, 02-04 September 2015, Antalya, Turkey.
  10. Ting, N. S., Sahin, Y. ve Aksoy, I., (2015). “A New ZCT-ZVT PWM Interleaved DC-DC Boost Converter”, IEEE Acemp-Optim-Electromotion Joint Conference, 02-04 September 2015, Antalya, Turkey.
  11. Ting, N. S., Yasa, Y., Aksoy, I. ve Sahin, Y., (2015). “Comparison of SVPWM, SPWM and HCC Control Techniques in Power Control of PMSG used in Wind Turbine Systems”, IEEE Acemp-Optim-Electromotion Joint Conference, 02-04 September 2015, Antalya, Turkey.

12. Sahin, Y., Ting, N. S. ve Aksoy, I., (2015). "A New Soft Switched ZCZVT PWM DC-DC Boost Converter", IEEE Acemp-Optim-Electromotion Joint Conference, 02-04 September 2015, Antalya, Turkey.
13. Sahin, Y., Aksoy, I. ve Ting, N. S., (2015). "A New Reduced Voltage Stress ZVT-ZVS PWM Full-Bridge DC-DC Converter", IEEE The 6th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 17-18 June 2015, Aachen, Germany.
14. Tinç, N. S., Aksoy, İ. ve Şahin, Y., (2015). "Elektrikli Araçların Batarya Şarjında Kullanılan Güç Faktörü Düzeltmeli Klasik ve Interleaved Yükseltici Türü Dönüştürücülerin Karşılaştırılması", 6. Enerji Verimliliği, Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi (EVK), 02-04 Haziran 2015, Sakarya, Turkey.
15. Sahin, Y., Aksoy, I. ve Ting, N. S., (2015). "Geliştirilmiş ZCZVT-PWM DC-DC Yükseltici Dönüştürücü", 6. Enerji Verimliliği, Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi (EVK), 02-04 Haziran 2015, Sakarya, Turkey.
16. Tinç, N. S., Aksoy, İ. ve Şahin, Y., (2014). "Rüzgâr Türbinlerinde Kullanılan Sabit Mıknatıslı Senkron Generatörün Güç Kontrolünde Uzay Vektörü PWM ve Histerezis Akım Kontrolü Tekniklerinin Karşılaştırılması", 8. Elektrik, Elektronik, Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu (ELECO), 28-30 Kasım 2014, Bursa, Turkey.
17. Sahin, Y., Aksoy, I. ve Ting, N. S., (2014). "DC-DC Dönüştürücülerde Kullanılan Yumuşak Anahtarlama Yöntemlerinin Karşılaştırılması", 8. Elektrik, Elektronik, Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu (ELECO), 28-30 Kasım 2014, Bursa, Turkey.

## **Proje**

1. Yumuşak Anahtarlama Yeni Bir DC-DC Dönüştürücünün Geliştirilmesi ve Gerçekleştirilmesi / Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler Koordinatörlüğü 2015-04-02-DOP01 Nolu DOP Projesi / Araştırmacı

## **ÖDÜLLERİ**

1. Erzurum Ilıca YDA Lisesi Okul Birinciliği - 2006