

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

**YENİ BİR SENKRON YUMUŞAK ANAHTARLAMALI DC-DC DÜŞÜRÜCÜ
DÖNÜŞTÜRÜCÜ**

MUHAMMET ABDULLAH EREL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK MAKİNALARI VE GÜÇ ELEKTRONİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. MUHAMMET GARİP**

İSTANBUL, 2016

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YENİ BİR SENKRON YUMUŞAK ANAHTARLAMALI DC-DC DÜŞÜRÜCÜ
DÖNÜŞTÜRÜCÜ**

Muhammet Abdullah EREL tarafından hazırlanan tez çalışması 23/11/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Muhammet GARİP
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Muhammet GARİP
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Yaşar BİRBİR
Marmara Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Nihan ALTINTAŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimimin tez kısmını teşkil eden bu çalışmada Yumuşak Anahtarlamalı Senkron DC-DC Dönüştürücülerini inceledim. Hazırladığım tezin daha sonra bu konuda yapılacak çalışmalar için yardımcı olmasını umarım.

Çalışmalarım sırasında büyük bir anlayış ve sabır gösteren, beni yönlendiren ve destekleyen tez yöneticisi değerli hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Muhammet GARİP'e, lisans döneminde dersini aldığım da beni Güç Elektroniği alanını sevdiren ve yüksek lisansta bu programı seçmeme vesile olan Prof. Dr. Hacı BODUR'a, idari görevleri ve yüksek yoğunluğuna rağmen her seferinde fedakarlık göstererek, her konuda bana yardımcı olan ve bu süreçte yoluma devam etmemi sağlayan kıymetli hocam Doç. Dr. İsmail AKSOY'a en içten şükranlarımı sunarım.

Ayrıca, yaşamış olduğum bu süreçte maddi ve manevi olarak arkamda duran ve beni teşvik eden aileme destekleri için çok teşekkür ederim.

Kasım, 2016

Muhammet Abdullah EREL

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1. Giriş	1
BÖLÜM 2	
YUMUŞAK ANAHTARLAMA VE BASTIRMA HÜCRESİ KAVRAMI	5
2.1 Giriş	5
2.2 Yumuşak Anahtarlama ve Bastırma Hücresi Kavramı.....	5
2.3 Yumuşak Anahtarlama Teknikleri	8
2.3.1 Sıfır Akımda Anahtarlama (ZCS)	9
2.3.2 Sıfır Gerilimde Anahtarlama (ZVS)	9
2.3.3 Sıfır Akımda Geçiş (ZCT)	9
2.3.4 Sıfır Gerilimde Geçiş (ZVT)	10
2.4 Bastırma Hücrelerinin Sınıflandırılması	10
2.5 Bastırma Hücrelerinin Karşılaştırılması.....	12

BÖLÜM 3

DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜLER	14
3.1 Giriş	14
3.2 Anahtarlamalı DC-DC Dönüştürücüler	14
3.3 Buck DC-DC Dönüştürücü	15
3.3.1 Dönüştürücünün Çalışma İlkeleri ve Analizleri	16
3.3.2 Sürekli ve Kesintili Akım Çalışma Modu	20
3.4 Senkron Düşürücü (Buck) Dönüştürücü.....	21
3.4.1 Senkron Buck Dönüştürücü Çalışma Prensibi ve Analizi	22
3.4.2 Sürekli ve Kesintili Akım Çalışma Modu	24

BÖLÜM 4

ZVT-ZCT PWM SENKRON DÜŞÜRÜCÜ (BUCK) DÖNÜŞTÜRÜCÜ	27
4.1 Giriş	27
4.2 Dönüştürücü 1	27
4.2.1 Devrenin Çalışma Aralıkları	28
4.3 Dönüştürücü 2	36
4.3.1 Devrenin Çalışma Aralıkları	37

BÖLÜM 5

ZVT-PWM SENKRON DÜŞÜRÜCÜ DÖNÜŞTÜRÜCÜ DEVRESİ	50
5.1 Giriş	50
5.2 Çalışma Prensibi ve Analizi.....	50
5.3 Çalışma Aralıkları.....	51
5.4 Simülasyon Sonuçları	60
5.5 Önerilen Dönüştürücünün Özellikleri	63

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER	65
----------------------------	----

KAYNAKLAR.....	67
----------------	----

ÖZGEÇMİŞ.....	69
---------------	----

SİMGE LİSTESİ

C_S	Parasitik kondansatör
C_0	Çıkış kondansatörü
C_r	Rezonans kondansatörü
C_b	Tampon kondansatörü
D	Ana diyot
D_1	Yardımcı diyot
D_{yar}	Yardımcı diyot
D_S	Schottky diyot
I_0	Çıkış akımı
I_{rr}	Ana diyot ters toparlanma akımı
I_L	Endüktans akımı
I_S	Ana transistör akımı
I_{S1}	Yardımcı transistör akımı
I_{S2}	Senkron transistör akımı
i_{DF}	Ana diyot akımı
i_{LS}	Bastırma devresi endüktans akımı
I_i	Giriş akımı
L_S	Bastırma devresi endüktansı
L_r	Rezonans endüktansı
L_0	Ana endüktans
L_b	Tampon endüktansı
L_{ra}	Rezonans endüktansı
L_{rb}	Rezonans endüktansı
R	Yük direnci
S	Ana transistör
S_1	Yardımcı transistör
S_{yar}	Yardımcı transistör
S_2	Senkron transistör
S_{senk}	Senkron transistör
T_S	Anahtarlama periyodu
T_{on}	Doyunda kaldığı süre
v_{CS}	Bastırma devresi kondansatör gerilimi

v_{CB}	Rezonans kondansatörü gerilimi
v_S	Ana transistör gerilimi
v_{S1}	Yardımcı transistör gerilimi
v_{S2}	Senkron transistör gerilimi
v_D	Ana diyot gerilimi
v_L	Endüktans gerilimi
V_i	Giriş gerilimi
V_o	Çıkış gerilimi
P_s	Güç kaybı
ω_r	Rezonans açısal frekansı
ω_s	Bastırma açısal frekansı
λ	Bağıl iletim süresi



KISALTMA LİSTESİ

CCM	Sürekli Akım Modu (Continuous Current Mode)
DC	Doğru Akım (Direct Current)
DCM	Kesintili Akım Modu (Discontinuous Current Mode)
EMI	Elektromanyetik Girişimi (Electro-magnetic Interference)
FM	Frekans Modülasyonu
HS	Sert Anahtarlama (Hard Switching)
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
RFI	Radyo Frekans Girişimi (Radio-frequency Interference)
SS	Yumuşak Anahtarlama (Soft Switching)
ZCS	Sıfır Akımda Anahtarlama (Zero Current Switching)
ZCT	Sıfır Akımda Geçiş (Zero Current Transition)
ZVS	Sıfır Gerilimde Anahtarlama (Zero Current Switching)
ZVT	Sıfır Gerilimde Geçiş (Zero Voltage Transition)

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	(a) Bir anahtarlama güç elemanının kontrol sinyali ile (b) HS (c) ZCS ile ZVS ve (d) ZCT ile ZVT çalışmaları ile ilgili temel dalga şekilleri (Bodur, 2003)	8
Şekil 2.2	Bastırma hücrelerinin genel olarak sınıflandırılması (Bodur vd., 2002)..	11
Şekil 2.3	Bastırma hücrelerinin gelişmişlik açısından sınıflandırılması (Bodur vd., 2002).....	12
Şekil 3.1	Buck DC-DC dönüştürücü devre şeması[9]	15
Şekil 3.2	S anahtarı iletimde iken dönüştürücü eşdeğer devre şeması.....	16
Şekil 3.3	S anahtarı kesimde iken dönüştürücü eşdeğer devre şeması.....	17
Şekil 3.4	Buck DC-DC dönüştürücünün temel dalga şekilleri	18
Şekil 3.5	Sürekli ve kesintili akım modu çalışmaya ait şekil.....	21
Şekil 3.6	Senkron buck dönüştürücü devre şeması	22
Şekil 3.7	(a) sürekli akım modu (b) kesintili akım modu.....	24
Şekil 3.8	Senkron ve senkron olmayan buck dönüştürücü endüktans akım modu (Nowakowski & Tang,2009)	25
Şekil 3.9	Sürekli ve kesintili mod sınır durumu	25
Şekil 4.1	ZVT-ZCT PWM Senkron Düşürücü (Buck) Dönüştürücü devre şeması[20]..	28
Şekil 4.2	Aralık 1'e ait eşdeğer devre şeması	29
Şekil 4.3	Aralık 2'ye ait eşdeğer devre şeması.....	30
Şekil 4.4	Aralık 3'e ait eşdeğer devre şeması	31
Şekil 4.5	Aralık 4'e ait eşdeğer devre şeması	31
Şekil 4.6	Aralık 5'e ait eşdeğer devre şeması	32
Şekil 4.7	Aralık 6'ya ait eşdeğer devre şeması.....	33
Şekil 4.8	PSIM devre şeması	34
Şekil 4.9	Ana anahtar gerilim ve akım değişimleri.....	34
Şekil 4.10	Senkron anahtar gerilim ve akım değişimleri.....	35
Şekil 4.11	Rezonans ve tampon endüktans akımları	35
Şekil 4.12	Rezonans ve tampon kondansatör gerilimleri	35
Şekil 4.13	Çıkış akımı ve çıkış gerilimi	36
Şekil 4.14	ZVT PWM Senkron Düşürücü (Buck) Dönüştürücü devre şeması.....	36

Şekil 4.15	Aralık 1'e ait eşdeğer devre şeması	38
Şekil 4.16	Aralık 2'ye ait eşdeğer devre şeması.....	39
Şekil 4.17	Aralık 3'e ait eşdeğer devre şeması	40
Şekil 4.18	Aralık 4'e ait eşdeğer devre şeması	41
Şekil 4.19	Aralık 5'e ait eşdeğer devre şeması	42
Şekil 4.20	Aralık 6'ya ait eşdeğer devre şeması.....	43
Şekil 4.21	Aralık 7'ye ait eşdeğer devre şeması.....	44
Şekil 4.22	Aralık 8'e ait eşdeğer devre şeması	45
Şekil 4.23	PSIM devre şeması	46
Şekil 4.24	S, S1 ve S2 anahtarlarının kontrol sinyalleri.....	46
Şekil 4.25	Ana anahtar akım ve gerilim değişimleri.....	47
Şekil 4.26	Yardımcı anahtar akım ve gerilim değişimleri.....	47
Şekil 4.27	Senkron anahtarın akım ve gerilim değişimleri.....	48
Şekil 4.28	Yardımcı devrenin endüktans akımı ve kapasitör gerilimi	48
Şekil 4.29	Ana diyotun akım ve gerilim değerleri	49
Şekil 5.1	Önerilen ZVT PWM senkron düşürücü dönüştürücü devre şeması.....	51
Şekil 5.2	Aralık 1'e ait eşdeğer devre şeması	52
Şekil 5.3	Aralık 2'ye ait eşdeğer devre şeması.....	53
Şekil 5.4	Aralık 3'e ait eşdeğer devre şeması	54
Şekil 5.5	Aralık 4'e ait eşdeğer devre şeması	55
Şekil 5.6	Aralık 5'e ait eşdeğer devre şeması	56
Şekil 5.7	Aralık 6'ya ait eşdeğer devre şeması.....	56
Şekil 5.8	Aralık 7'ye ait eşdeğer devre şeması.....	57
Şekil 5.9	Aralık 8'e ait eşdeğer devre şeması	58
Şekil 5.10	Aralık 9'a ait eşdeğer devre şeması.....	58
Şekil 5.11	Aralık 10'a ait eşdeğer devre şeması.....	59
Şekil 5.12	PSIM de gerçekleştirilen devre şeması.	60
Şekil 5.13	Anahtarların kontrol sinyalleri.	61
Şekil 5.14	Ana anahtarın akım ve gerilim değişimleri.....	61
Şekil 5.15	Yardımcı anahtarın akım ve gerilim değişimleri.....	62
Şekil 5.16	Senkron anahtarın akım ve gerilim değişimleri.....	62
Şekil 5.17	Rezonans endüktans akımları ve rezonans kondansatör gerilimi.....	63
Şekil 5.18	Çıkış gerilim ve akım değişimleri.	63

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1	Klasik ve modern bastırma hücrelerinin karşılaştırılması (Bodur vd., 2002).....	13
Çizelge 5.1	Devrede kullanılan elemanların anahtarlama durumları.....	59

YENİ BİR SENKRON YUMUŞAK ANAHTARLAMALI DC-DC DÜŞÜRÜCÜ DÖNÜŞTÜRÜCÜ

Muhammet Abdullah EREL

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Muhammet Garip

Yüksek güç yoğunluğu, hızlı geçiş cevabı ve kontrol kolaylığı nedeniyle darbe genişlik modülasyonu (PWM) tekniği endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Daha yüksek güç yoğunluğu ve daha hızlı geçiş cevabı için çalışma frekansının yükseltilmesi gerektiği, fakat bu durumda yarı iletken elemanların anahtarlama kayıpları ile elektromanyetik girişim (EMI) ve radyofrekans girişimi (RFI) gürültülerinin arttığı bilinmektedir. Bu kayıp ve gürültülerin düşürülmesi ve frekansın yükseltilebilmesi, ancak sert anahtarlama (HS) yerine yumuşak anahtarlama (SS) tekniklerinin kullanılmasıyla sağlanabilmektedir. Bu konudaki çalışmalar son yıllarda cazibesini gittikçe artan bir şekilde sürdürmektedir.

Bu çalışmada yumuşak anahtarlama teknikleri ve bastırma hücreleri incelenmiştir. Sıfır gerilimde ve sıfır akımda anahtarlama iki senkron düşürücü (buck) DC-DC dönüştürücü ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Önerilen bastırma hücresi ana anahtar için sıfır gerilimde geçiş (ZVT) ve sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS) sağlar. Dönüştürücüdeki bütün yarı iletken elemanlar yumuşak anahtarlama ile iletme ve kesime girer. Dönüştürücü basit yapılı ve düşük fiyatlıdır. Sunulan ZVT PWM senkron düşürücü dönüştürücünün çalışma prensibi ve teorik

analizi, 1 kW ve 50 kHz'lik bir dűűrűcű dűnűűtűrűcű prototipi PSIM siműlasyon programı ile dođrulanmıűtır.

Anahtar Kelimeler: DC-DC dűnűűtűrűcűler, yumuűak anahtarlama teknikleri, sıfır gerilimde anahtarlama



A NEW SYNCHRONOUS SOFT SWITCHING DC-DC BUCK CONVERTER

Muhammet Abdullah EREL

Department of Electrical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Asst. Professor Muhammet GARİP

Pulse width modulation (PWM) technique has been widely used in industry due to its high power density, fast transient response and ease of control. Operating frequency should be increased in order to obtain higher power density and faster transient response but in that case electromagnetic interference (EMI) and radio frequency interference (RFI) noises and switching losses in semi-conductor devices increase as well. In order to decrease these noises and losses, soft switching (SS) techniques should be used instead of hard switching (HS) techniques. This approach has been very popular in last years and continues to be so.

Soft switching techniques and snubber cells are investigated in this study. Two switching synchronous step-down (buck) DC-DC converters at low voltage and current is investigated in detail.

Suggested snubber cell allows switching to zero voltage transition (ZVT) and zero voltage switching (ZVS) for the main switch, . All semiconductors in the converter turn on and off under soft switching. The converter is inexpensive and simple in structure. Presented ZVT PVM synchronous step-down converter's working principles and theory is confirmed with 1kW and 50kHz step-down converter prototype using PSIM simulation program.

Keywords: DC-DC converter, soft switching, zero voltage transition, zero voltage switching



**YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

1.1 Giriş

Yüksek güç yoğunluğu, hızlı geçiş cevabı ve kontrol kolaylığı nedeniyle, darbe genişlik modülasyonlu (PWM) DC-DC dönüştürücüler, endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. PWM DC-DC dönüştürücülerde daha yüksek güç yoğunluğu ve daha hızlı geçiş cevabı, anahtarlama frekansı yükseltilerek elde edilebilir. Ancak, anahtarlama frekansı arttıkça, anahtarlama kayıpları ve elektromanyetik girişim (EMI) gürültüsü de artmaktadır. Bu problemler, sert anahtarlama (HS) yerine bastırma hücreleri tercih edilmesiyle elde edilen yumuşak anahtarlama (SS) tekniklerinin kullanılması ile sağlanabilmektedir (Hua vd., 1994; Bodur ve Bakan, 2002).

Yumuşak anahtarlama, anahtarlama esnasında, elemanın maruz kaldığı akım ve gerilim değerleri ile akım ve gerilim yükselme hızlarının bastırılması, akım ve gerilim değişimlerinin şekillendirilmesi, anahtarlama kayıpları ile EMI gürültünün azaltılması ve anahtarlama enerjisinin yüke veya kaynağa transfer edilmesi durumlarını kapsar. Literatürde, RC/RCD, kutuplu/kutupsuz, rezonanslı/rezonanssız ve aktif/pasif gibi çok farklı türde sunulmuş bastırma hücresi mevcuttur (Ferraro, 1982; Bodur ve Bakan, 2002).

Temel olarak anahtarlama kayıpları, anahtarlama esnasındaki akım ve gerilimin üst üste binmesiyle oluşan enerji kaybı, diyodun ters toparlanma enerji kaybı ile parazitik kondansatörün deşarj enerji kaybından oluşur. Genel olarak SS teknikleri, sıfır akımda anahtarlama (ZCS), sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS), sıfır akımda geçiş (ZCT) ve sıfır

gerilimde geçiş (ZVT) ile anahtarlama şeklinde sıralamak mümkündür (Smith vd., 1999; Bodur ve Bakan, 2002).

Dönüştürücülerde anahtarlama elemanı olarak MOSFET'lerin tercih edildiği durumlarda, iletme girme esnasında parazitik kondansatörünün deşarjından dolayı meydana gelen kayıplar anahtarlama kayıplarının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. MOSFET'ler yüksek güçlü dönüştürücülerde kullanıldığında, iletim durumundaki iç direncinden dolayı iletim güç kayıpları yüksektir (Hua vd., 1994; Stein vd., 2000).

Rezonanslı dönüştürücülerde komütasyonların sıfır gerilimde anahtarlama (ZVS) veya sıfır akımda anahtarlama (ZCS) ile gerçekleştirilmesinden dolayı, anahtarlama kayıpları azalır. Ancak, rezonanslı dönüştürücülerde, aşırı gerilim ve akım stresleri oluşur, normal PWM dönüştürücülere göre güç yoğunluğu düşük ve kontrolü daha zordur (Mao vd., 1997; Smith vd., 1997; Tseng vd., 1998; Grigore vd., 1998; Menegaz vd., 1999; Bodur ve Bakan, 2002).

Rezonanslı ve normal PWM tekniklerinin istenen özelliklerini birleştirmek için, normal PWM dönüştürücülere rezonanslı aktif bastırma hücreleri eklenerek, çok sayıda sıfır gerilim geçişli (ZVT) ve sıfır akım geçişli (ZCT) PWM dönüştürücü sunulmuştur. Bu dönüştürücülerde, iletme ve kesime girme işlemleri, bir rezonans tarafından sağlanan çok kısa bir ZVT veya ZCT süresinde ZVS ve/veya ZCS altında gerçekleşir. Böylece, rezonanslar çok kısa zaman aralıklarında oluştuğu için, dönüştürücü çalışma periyodunun büyük bir kısmında normal bir PWM dönüştürücü özelliği gösterir. Fakat, bastırma elemanlarının çalışma özellikleri nedeniyle, PWM çalışmanın iletim ve kesim durumları oldukça kısa bir süreye sahiptir (Hua vd., 1994; Grigore vd., 1998; Bodur ve Bakan, 2002).

Temel ZVT-PWM dönüştürücüde, ana anahtar, paralel rezonanslı bir bastırma hücresi yardımıyla ZVT ile mükemmel olarak iletme girmektedir. Ana diyot ZVS ile iletim ve kesime girer. Yük akımı, bir yardımcı anahtar aracılığı ile, ana diyodun ters toparlanma akımı ve ana anahtarın parazitik kondansatörünü kapsayan rezonans kondansatörünün enerjisi, rezonans endüktansına aktarılır. Bununla birlikte, ana anahtar sadece yaklaşık ZVS altında kesime ve yardımcı anahtar yaklaşık ZCS ile iletme girer. Yardımcı anahtar sert anahtarlama ile kesime girer (Hua vd., 1994; Bodur ve Bakan, 2002).

Tseng ve Chen (1998), Moschopoulos vd. (1995) tarafından geliştirilen bastırma hücrelerine ilave olarak bir diyot kullanılarak rezonans kondansatörünün deşarj olması sağlanarak yardımcı anahtarın ek gerilim stresine maruz kalması önlenmiştir. Kim vd. (2000) tarafından yapılan çalışmada, temel ZVT'de kullanılan bastırma hücrelerine paralel olarak iki kondansatör ve bir diyot ilave edilmiş, böylece yardımcı anahtarın kesime girme kayıplarının azaltılması ve devre veriminin yükseltilmesi sağlanmıştır[1].

Bodur ve Bakan (2002) tarafından önerilen ZVT-PWM dönüştürücü temel ZVT dönüştürücüdeki sorunların birçoğunu çözmektedir. Yardımcı anahtar, yaklaşık olarak sıfır gerilimde kesime girer ve ana anahtar üzerinde ilave bir akım stresi oluşmamaktadır. Ana anahtar uçlarında paralel bir kondansatör kullanılmadığından sirkülasyon enerjisi daha azdır. Ana anahtar yaklaşık sıfır gerilimde kesime girer, ayrıca devrenin çalışması yük akımının değişmesiyle etkilenmez[1].

Martins vd. (2002)'nin önerdikleri bastırma hücresi temel ZVT devresindeki dezavantajlarını büyük ölçüde ortadan kaldırmıştır. Yardımcı anahtarın, yumuşak bir şekilde kesime girmesi sağlanmış ve bununla birlikte ana anahtarda ilave bir akım stresi meydana gelmez. Ayrıca yardımcı anahtarda ilave bir gerilim stresi de yoktur. Fakat ana anahtarın kesime girmesi yaklaşık olarak sıfır gerilimde olmaktadır ve bu durum yük akımına bağlı olarak gerçekleşmektedir.

Huang ve Moschopoulos (2006)'un sundukları bastırma hücresi ana elemanın ZVT ile iletme girmesini sağlanmıştır. Bastırma hücrelerinde kullanılan yardımcı anahtarın ZCS ile iletme ve ZVS ile kesime girerken, ana eleman üzerinde hiçbir ilave akım stresi meydana gelmemektedir. Ana elemanın kesime girme işlemi yaklaşık ZVS ile gerçekleşir fakat bu da yük akımına bağlı olarak sağlanmaktadır. Ayrıca, devredeki geçici olayların süresi fazladır[1].

Geliştirilmiş veyahut yeni oluşturulmuş ZVT ve ZCT dönüştürücüler ile temel ZVT ve ZCT dönüştürücülerdeki meydana gelen sorunlar çeşitli yöntemlerle çözülmeye çalışılmıştır. Birçok farklı çözüm yöntemi geliştirilmiş olsada bazı problemler ve anahtarlama kayıpları oluşmaktadır. Bu problemleri yok etmek için ZVT ve ZCT tekniklerinin birleştirilmesiyle elde edilen ZVT-ZCT-PWM DC-DC dönüştürücüler önerilmiştir (Stein vd., 2000, Bodur ve Bakan, 2004, Bakan vd., 2005). Bu dönüştürücülerde ana anahtarın

iletime ve kesime girme işlemleri tam olarak sıfır gerilimde ve sıfır akımda gerçekleştirilmektedir. Ayrıca ilave olarak kullanılan yardımcı anahtarın da yumuşak anahtarlama ile ilettime girmesi ve kesime girmesi sağlanmıştır[1].

Bölüm 2’de yumuşak anahtarlama teknikleri ve bastırma hücreleri hakkında bilgi verilmiştir. Bölüm 3’de düşürücü DC-DC dönüştürücüler ve senkron düşürücü DC-DC dönüştürücüler anlatılmıştır.

Bölüm 4’te literatürde bulunan iki adet sıfır gerilim anahtarlama ve sıfır akımda anahtarlama dönüştürücü detaylı şekilde incelenmiştir.

Bölüm 5’te PWM senkron dönüştürücü devresi için yeni bir aktif bastırma hücresi sunulmuştur. Bu çalışmada temel olarak normal PWM dönüştürücüsü devresine ilave edilen yeni bir aktif bastırma hücresi sayesinde, ana anahtar ZVT ile ilettime giren ZVS ile kesime giren, bütün yarı iletken elemanlar yumuşak anahtarlama ile ilettime ve kesime girmektedir. Sunulan dönüştürücünün çalışma prensibi ve teorik analizi, 1 kW ve 50 kHz’lik bir dönüştürücü prototipi PSIM simülasyon programı ile doğrulanmıştır.

YUMUŞAK ANAHTARLAMA VE BASTIRMA HÜCRESİ KAVRAMI

2.1 Giriş

Bu bölümde, ilk olarak sert ve yumuşak anahtarlama kavramları ve bastırma hücresi kavramı ele alınmış, sonrasında yumuşak anahtarlama teknikleri incelenmiş olup ve son olarak bastırma hücrelerinin sınıflandırması ve karşılaştırması verilmiştir.

2.2 Yumuşak Anahtarlama ve Bastırma Hücresi Kavramı

Anahtarlama, temel olarak bir güç elemanının iletme ve kesime girme işlemlerine verilen addır. Anahtarlama işlemlerinde, güç anahtarının akım ve geriliminin üst üste binmesiyle meydana gelen anahtarlama kayıpları yanında, güç diyotunun ters toparlanma kaybı ve güç anahtarının parazitik kondansatörünün deşarj kaybı da oluşmaktadır. Bu anahtarlama kayıplarının her biri anahtarlama frekansı ile doğru orantılı olarak değişim göstermektedir. Ek bir düzen kullanılmadan doğal olarak gerçekleşen anahtarlamalara Sert Anahtarlama (HS) denilmektedir. (Bodur,2003)

Sert anahtarlama yöntemi ile çalışan devrelerde, anahtarlama kayıpları arttıkça, kullanılan güç elemanlarının nominal değerleri ile soğutucu ve soğutma sisteminin boyutları da artar. Bu sebepten dolayı, mevcut devrenin hacmi ile maliyeti artarken, bunların aksine güç yoğunluğu azalır. Ayrıca, anahtarlama işlemleri sırasında oluşan büyük değerlere sahip akım ve gerilim yükselme hızları, yüksek değerli Elektromanyetik Girişimi (EMI) ve Radyo Frekans Girişimi (RFI) gürültülerine neden olurken, bu gürültüler de kontrol ve haberleşme sinyallerinin bozulmasına sebep olur.

Sert anahtarlamaadaki bu problemlerin çözülmesi isteği Yumuşak Anahtarlama (SS) yönteminin oluşmasını sağlamıştır. Yumuşak anahtarlama kavramı, temel olarak, anahtarlama kayıpları ile EMI gürültüsünün özel düzenlerle sifira indirgenmesi veya en aza indirilmesi olarak tanımlanır. Yayınlarda stres azaltma, bastırma, yük hattını şekillendirme gibi terimler ile de ifade edilen yumuşak anahtarlama, anahtarlama sırasında, elamanın maruz kaldığı akım ve gerilim değeri ile akım ve gerilim yükselme hızlarının bastırılması, akım ve gerilim değeri şeklindirilmesi, anahtarlama kayıpları ile EMI gürültüsünün azaltılması ve anahtarlama enerjisinin yüke veya kaynağa transfer edilmesi fonksiyonlarını kapsamaktadır. Yumuşak anahtarlama yapabilmek amacı ile geliştirilen ve dönüştürücülerin temel bir parçası olmayan ek düzen ve devrelere, bastırma hücreleri adı verilmektedir.

Bastırma hücreleri iki gruba ayrılırken, bunlar klasik ve modern olarak sınıflandırılmıştır. Bu iki grup bastırma hücresi arasındaki temel fark, modern hücrelerin bir kısmı rezonansa sahip olmasıdır. Bu rezonans, sadece anahtarlama işlemleri sırasında etkili olup geçici, periyodun tamamına yayılmayan ve yük akımından bağımsız bir rezonanstır. Kısmi rezonans, temel olarak, bastırma işleminin kısa süreli ve mükemmel olması ile bastırma enerjisinin geri kazanılmasını sağlamaktadır.

Bastırma hücreleri, dönüştürücünün ana anahtar ve ana diyotu üzerinde ilave akım ve gerilim streslerinin oluşmasına ayrıca ek kayıpların meydana gelmesine sebep olabilir. Bu ek kayıplar yok edilmeli, yapılamıyorsa en aza indirgenmelidir. Ayrıca, bastırma hücrelerinin çalışması güç anahtarının iletim ve kesime girme sürelerinin dışına çıkabilir. Bu taşmalar en düşük seviyede tutulmalı, böylece bastırma hücresi Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) kontrolüne engel olmamalı ve dönüştürücü değışken veya hafif yükte çalışmada da fayda gösterebilmelidir. Bunların yanı sıra, bastırma hücreleri dönüştürücünün karmaşıklığını ve fiyatını arttıracığından bu artışların da ölçülü seviyelerde tutulması gerekmektedir.[2]

Yumuşak anahtarlama ve bastırma hücrelerinde nihai maksadının devrenin güç yoğunluğunun arttırılması olduğu unutulmamalıdır. Bir bastırma hücresinin seçilme kararı, bu hücrenin yumuşak anahtarlama yöntemi ile sağladığı yararların, bu ek düzenin sebep olduğu külfetler ile iyice karşılaştırılarak verilmelidir.[2]

Yumuşak anahtarlama ile sağlanmak istenen özellikler, genel hatları ile aşağıda verilmiştir. Bu fonksiyonlar birbirini etkilemekte veya birbirini tamamlayan özelliklere sahiptir.

- Anahtarlama geçişleri esnasında akım ve gerilimin üst üste binmesini azaltmak.
- Akım ve gerilimin yükselme hızlarını sınırlamak.
- Yük hattı akım ve gerilim değişimlerini düzenlemek.
- Anahtarlama enerji kayıplarını bastırmak.
- EMI ve RFI gürültülerini bastırmak.
- Anahtarlama enerjilerini geri kazanmak.
- Çalışma frekansını yükseltmek.
- Periyodun büyük bir kısmında PWM çalışmayı korumak.
- Hafif yüklerde de yumuşak anahtarlamaı sürdürmek.
- Devrenin boyut ve maliyetini azaltmak.
- Devrenin verim ve güç yoğunluğunu arttırmak.

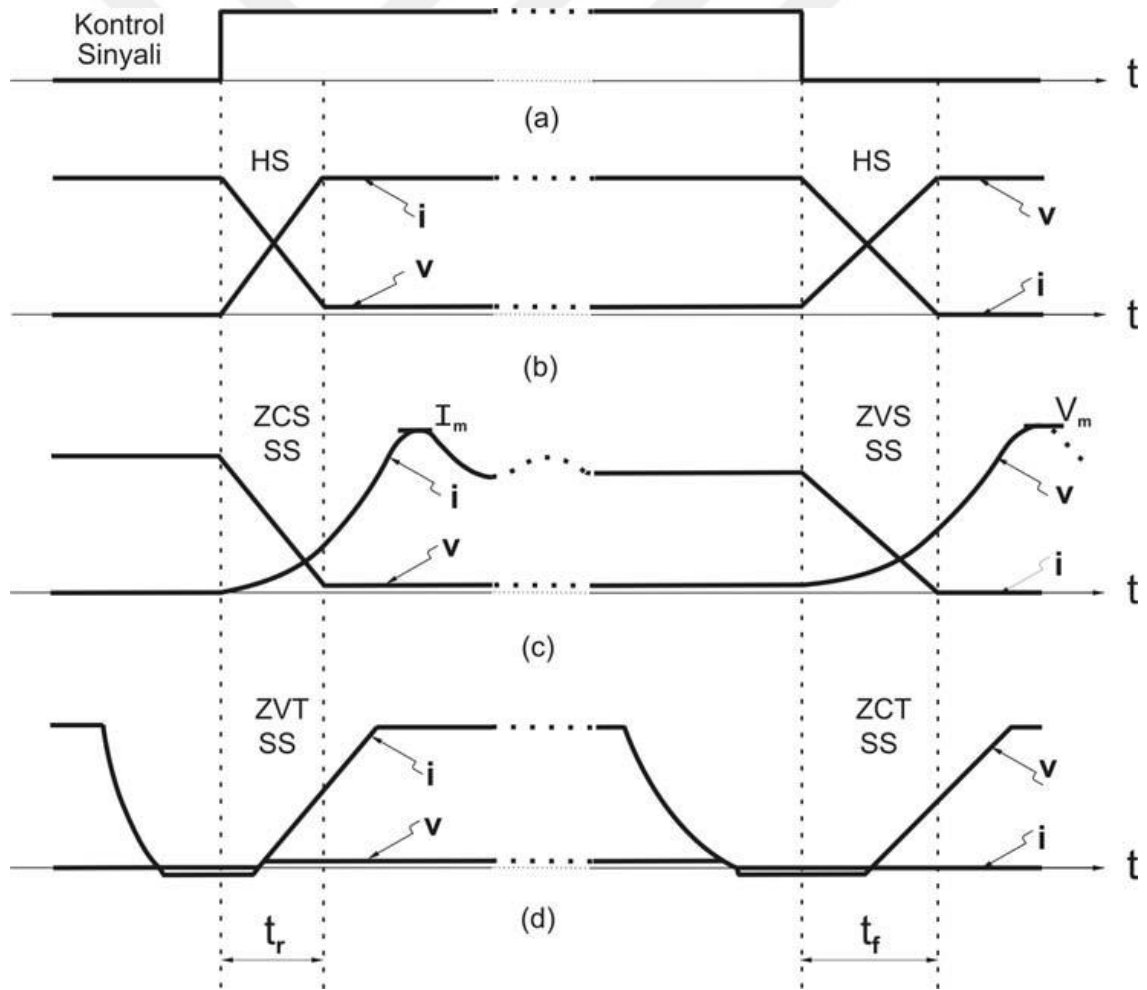
DC-DC dönüştürücülerde, iletim ve kesim durumlarındaki akım ve gerilim değişimlerinde dalgalanmalar olmadığından dolayı, sirkülasyon enerjisi veya reaktif enerjinin de olmadığı kabul edilebilir. Bu durum ise, anahtarlama işlemleri dikkate alınmadığı durumlarda, devredeki güç yoğunluğunun çok yüksek olduğunu gösterir. Ayrıca, anahtarlama frekansı yükseldikçe, endüktans ile kondansatör değerleri birbirleri ile orantılı olarak azalırken, güç yoğunluğu daha da yükselir. Ancak, frekans yükseldiğinde, anahtarlamaadaki enerji kayıpları ve EMI gürültü artmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, endüstride yaygın olarak kullanılan PWM DC-DC dönüştürücülerin gelişimi, anahtarlama da yaşanan problemlerin çözümüne dayanmaktadır. Bu yüzden yumuşak anahtarlama teknikleri, çalışma frekansının artması ile meydana gelecek olan anahtarlama kayıplarını en aza indirerek, PWM DC-DC dönüştürücülerin gelişmesinde hayati bir role sahiptir. Bu özellikleri sebebiyle günümüzde, akademik ve endüstriyel çalışmalarda cazibesini korumakta ve günden güne de artmaktadır.(Bodur,2003)

2.3 Yumuşak Anahtarlama Teknikleri

Yumuşak anahtarlama teknikleri, genel olarak,

- Sıfır Akımda Anahtarlama (ZCS)
- Sıfır Gerilimde Anahtarlama (ZVS)
- Sıfır Akımda Geçiş (ZCT)
- Sıfır Gerilimde Geçiş (ZVT)

şeklinde 4 genel gruba ayrılmaktadır. Şekil 2.1'de, bir anahtarlama elemanının kontrol sinyali ile sert anahtarlama (HS) ve yumuşak anahtarlama (SS) teknikleriyle ilgili temel dalga şekilleri görülmektedir. ZCS ile ZVS temel ve ZCT ile ZVT ileri yumuşak anahtarlama teknikleridir.



Şekil 2.1 (a) Bir anahtarlama güç elemanının kontrol sinyali ile (b) HS (c) ZCS ile ZVS ve (d) ZCT ile ZVT çalışmaları ile ilgili temel dalga şekilleri (Bodur, 2003)

2.3.1 Sıfır Akımda Anahtarlama (ZCS)

Sıfır Akımda Anahtarlama (ZCS), iletme girme işlemi sırasında gerçekleşen bir SS tekniğidir. Bu teknikte, temel olarak güç anahtarına küçük değerli bir endüktans seri bağlanarak, iletme girme işlemi sırasında elemandan geçen akımın yükselme hızı sınırlanır. Böylece, akım ile gerilimin üst üste binmesi ve anahtarlama enerji kaybı azaltılır. Esasen, iletme girme işlemindeki anahtarlama enerjisi endüktansa aktarılır. Endüktanstaki bu enerji, klasik hücrelerde ilave bir dirençte harcanır, ancak modern hücrelerde kısa süreli bir kısmi rezonans ile gerilim kaynağı veya yüke aktarılarak bu enerji geri kazanılmaktadır.

2.3.2 Sıfır Gerilimde Anahtarlama (ZVS)

Sıfır Gerilimde Anahtarlama (ZVS), kesime girme işlemi sırasında gerçekleşen bir SS tekniğidir. Bu teknikte, temel olarak güç anahtarına küçük değerli bir kondansatör paralel bağlanarak, iletimden çıkma işlemi sırasında elemanın uçlarında oluşan gerilimin yükselme hızı sınırlandırılmaktadır. Böylelikle, iletimden çıkma işleminde, anahtarlama enerji kaybı azaltılmış olur ve anahtarlama enerjisi de kondansatöre aktarılır. Kondansatöre aktarılan bu enerji ise modern hücrelerde geri kazanılmaktadır.

ZCS ve ZVS tekniklerinde anahtarlama enerji kaybı tamamen yok edilememektedir. Bu nedenle, bu tekniklere yaklaşık ZCS ve yaklaşık ZVS teknikleri olarak ta adlandırılmaktadır. Genel olarak, ZCS'de kullanılan endüktansa seri bastırma elemanı, ZVS'de kullanılan kondansatöre paralel bastırma elemanı denir. Normal olarak, seri endüktans güç elemanı üzerinde ilave bir gerilim stresine ve paralel kondansatör ise ilave bir akım stresine neden olmaktadır. Seri endüktansın neden olduğu ek gerilim stresinin önlenemediği kabul edilmektedir.

2.3.3 Sıfır Akımda Geçiş (ZCT)

Sıfır Akımda Geçiş (ZCT), kesime girme işlemi sırasında gerçekleştirilen ileri bir SS tekniğidir. Bu teknikte, güç anahtarlarından geçen akım kısa süreli bir kısmi rezonans ile sıfıra çekilir ve akım sıfırda tutulurken kontrol sinyali kesilir. Böylelikle, akım ve gerilimin üst üste binmesi engellenerek, anahtarlama enerji kaybı tamamen yok edilir.

Mükemmel bir kesime girme işlemi sağlanmış olur. Burada hem ZCS hem de ZVS tekniğinin sağlandığı söylenebilir. Akımın sıfıra düşmesi ileri alınarak gerçekleştirilen bir SS tekniğidir. Anahtarlama enerjisinin geri kazanıldığı bu teknik, sadece modern hücrelerle sağlanabilmektedir ve bir yardımcı veya ilave bir yarı iletken anahtar gerekmektedir.

2.3.4 Sıfır Gerilimde Geçiş (ZVT)

Sıfır Gerilimde Geçiş (ZVT), iletme girme işlemi sırasında gerçekleşen bir ileri SS tekniğidir. Bu teknikte, güç anahtarı uçlarındaki gerilim kısa süreli bir kısmi rezonansla sıfıra düşürülür ve bu gerilim sıfırda tutulurken kontrol sinyali uygulanmaktadır. Böylece, anahtarlama enerji kaybı tamamen yok edilmiş olur, bu sayede mükemmel bir iletme girme işlemi sağlanmaktadır. Gerilimin sıfıra düşmesi ileri alınarak gerçekleştirilen bu teknikte de hem ZVS hem de ZCS teknikleri sağlanmaktadır. Anahtarlama enerjisinin geri kazanıldığı bu teknik de modern hücreler ile sağlanır ve yardımcı bir ilave anahtar gerektirmektedir.

Burada ayrıca belirtmek gerekir ki, yalnızca bu teknikte güç anahtarının parazitik kondansatörünün deşarj enerji kaybı yok edilmektedir. Ayrıca bu enerji geri kazanılır. Özellikle, yüksek değerlerde parazitik kondansatörlere sahip olan MOSFET güç elemanlarında bu SS tekniği çok büyük önem taşımaktadır.

2.4 Bastırma Hücrelerinin Sınıflandırılması

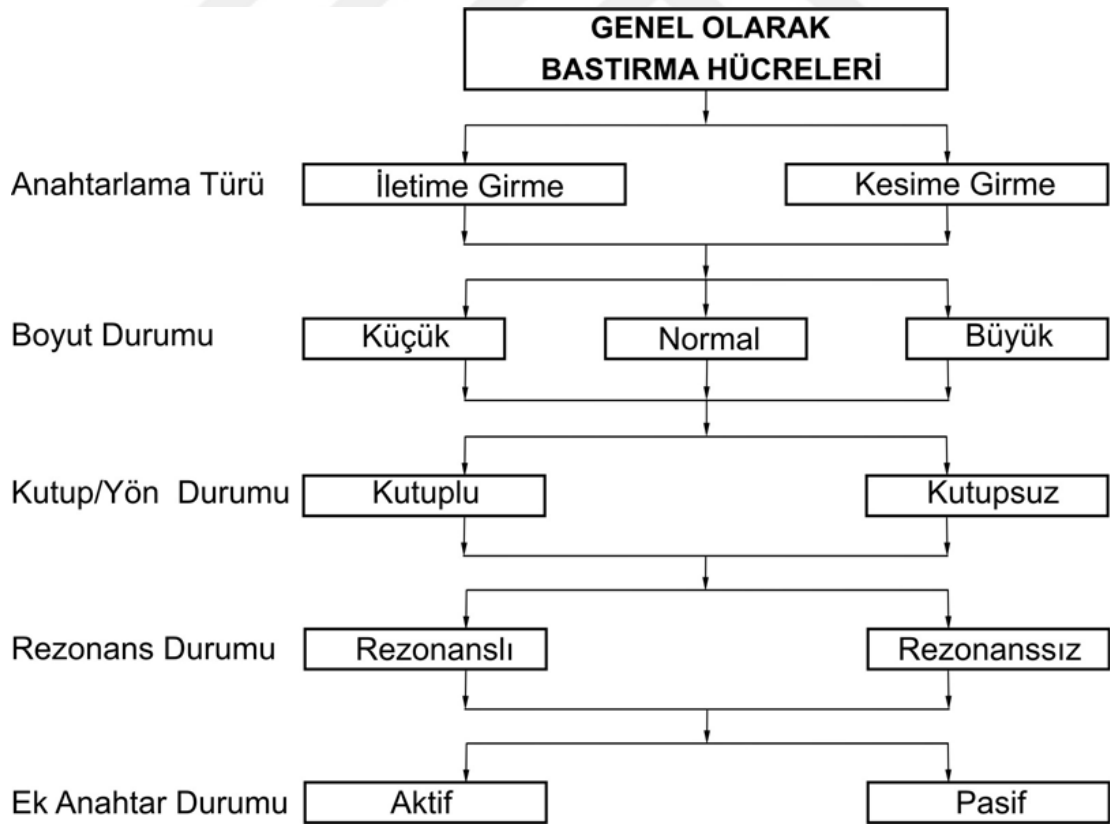
Bastırma hücreleri, genel olarak Şekil 2,2'de görüldüğü gibi, anahtarlama türüne, boyutuna, yön ve rezonans ile ilave bir anahtarın olup olmamasına göre sınıflandırılmaktadır. Bunların yanı sıra, gelişmişlik ölçüsüne göre bastırma hücreleri Şekil 2.3'de verildiği gibi de sınıflandırılabilir. (Bodur, 2002)

Bir bastırma hücresi, tasarlanırken genellikle ya iletme ya da kesime girme işlemleri sırasında yumuşak anahtarlama sağlama amacı güdülmektedir. Bazen, belirli kriterler gözetilerek hücrenin boyutu tanımlanır. Kontrollü güç elemanlarında, yaygın olarak kutuplu veya tek yönlü bastırma hücreleri kullanılır. Özellikle diyot ve tristörlerde, ters toparlanma işlemine de katkı sağlaması için kutupsuz veya iki yönlü hücreler tercih edilmektedir.

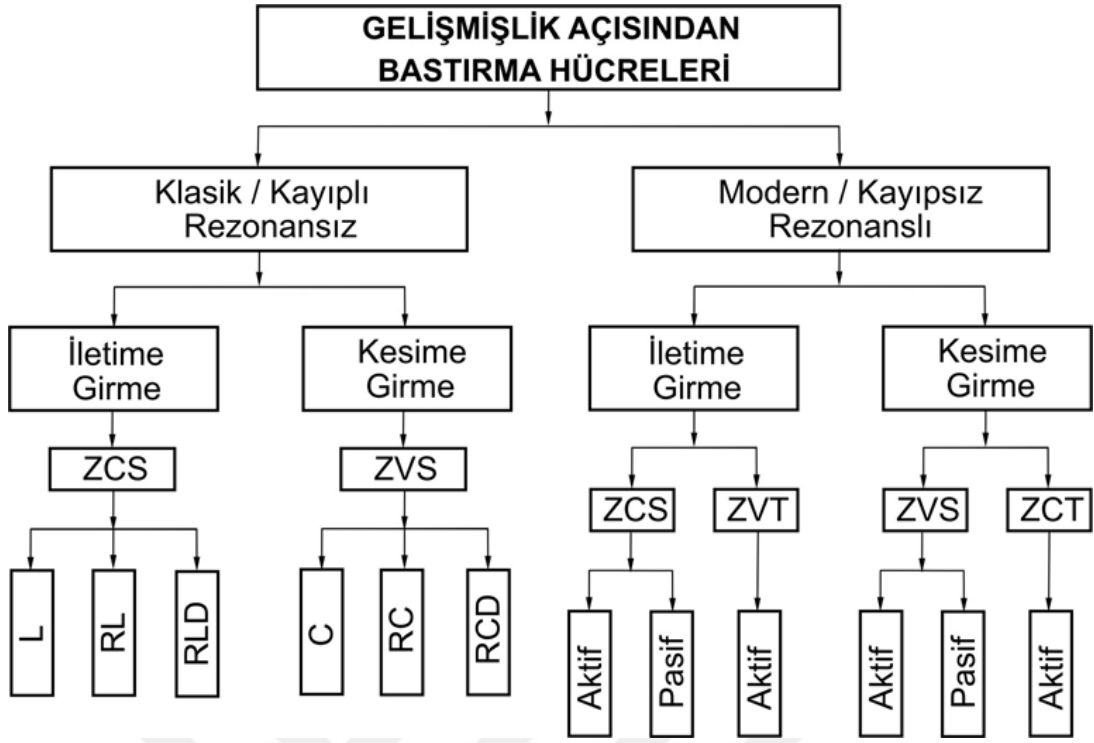
Klasik hücreler rezonanssız, modern hücreler ise rezonanslı olanlardır. Buradaki rezonans, yalnızca anahtarlama işlemleri sırasında etkili olan geçici veya kısmi bir rezonanstır. Kısmi rezonans, temel olarak, bastırma işleminin minimal sürede ve mükemmel olması sebebiyle bastırma enerjisinin geri kazanılmasını sağlamaktadır.

Herhangi bir ilave veya yardımcı anahtar kullanılmayan hücreler pasif olarak adlandırılırken, en az bir yardımcı anahtar içeren hücreler aktif olarak tanımlanmaktadır.

Verilen sınıflandırmalarda, bütün bastırma hücreleri ayrı ve etraflı olarak sunulmuştur. Fakat yapılan çalışmalarda, bir güç elemanının yumuşak anahtarlama ile hem iletim hem de kesime girmesi istenir. Bunun için, iki bastırma hücresinin birlikte kullanılması zorunluluğu doğar. Bu durumlarda, bastırma hücrelerinin veya ilave devrelerin tamamı, tek bir hücre olarak sayılır ve bir bütün olarak tasarlanır. Bununla birlikte dönüştürücüler, genellikle bastırma hücresine göre tanımlanmışlardır. ZCS-PWM dönüştürücü, ZVT-PWM dönüştürücü ve ZCS-ZVS-PWM dönüştürücü gibi[1].



Şekil 2.2 Bastırma hücrelerinin genel olarak sınıflandırılması (Bodur vd., 2002)



Şekil 2.3 Bastırma hücrelerinin gelişmişlik açısından sınıflandırılması (Bodur vd., 2002)

2.5 Bastırma Hücrelerinin Karşılaştırılması

Klasik ve modern bastırma hücrelerinin Tablo 2.1’de detaylı olarak karşılaştırması yapılmıştır. Özet olarak, klasik hücreler, rezonanssız, kayıplı ve pasif hücrelerdir. Modern hücreler ise, kısmi rezonanslı, kayıpsız ve aktif veya pasif hücrelerdir. (Bodur vd., 2002)

Çizelge 2.1 Klasik ve modern bastırma hücrelerinin karşılaştırılması (Bodur vd., 2002)

Klasik Bastırma Hücreleri	Modern Bastırma Hücreleri
<ul style="list-style-type: none"> • Rezonans devresi mevcut değildir. • Yardımcı bir anahtar yoktur. • İletime girme işleminde ZCS sağlanır. • Anahtarlama enerji kayıpları büyük ölçüde bastırılır. • Anahtarlama enerjileri geri kazanılmaz ve dirençlerde harcanır. • Ana anahtar üzerinde, ZCS’de ilave gerilim ve ZVS’de ise ilave akım stresi oluşur. • Bastırma hücresinin çalışması hat gerilimi ve yük akımına büyük ölçüde bağlıdır. Yani değişken ve hafif yük şartları altında çalışma oldukça zordur. • Düşük frekanslı klasik devreler için uygundur. • Basit yapılı ve ucuzdur. 	<ul style="list-style-type: none"> • Hepsi kısmi rezonanslıdır. • Aktif olanlarında yardımcı anahtar vardır. • İletime girme işleminde ZCS sağlanır. • Kesime girmede ZVS sağlanır. • Anahtarlama enerji kayıpları, pasif olanlarda büyük ölçüde, aktif olanlarda ise tamamen bastırılır. • Anahtarlama enerjileri, pasif olanlarda büyük ölçüde, aktif olanlarda ise tamamen geri kazanılır. • Ana anahtar üzerinde, pasif olanlarda genellikle ilave stresler oluşur, aktif olanlarda ise hiçbir ilave stres oluşmayabilir. • Bastırma hücresinin çalışması hat gerilimi ve yük akımına pasif olanlarda epeyce bağlıdır, aktif olanlarda bu bağlılık büyük ölçüde azaltılabilir ve hatta yok edilebilir. • Yüksek frekanslı modern devreler için gerekli bastırıcılarıdır. • Pasif olanların basit yapılı ve ucuz, fakat aktif olanların daha karmaşık ve pahalı olduğu kabul edilebilir. <p>Ayrıca,</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aktif olanlarda, yardımcı anahtar içinde yumuşak anahtarlamanın sağlanması oldukça önemlidir ve bu sağlanabilir. • Parazitik kondansatörün deşarj enerji kaybının yok edilmesi ve bu enerjinin geri kazanılması, sadece aktif olan ZVT’de mümkün olmaktadır. Bu ise MOSFET için çok önemlidir.

DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜLER

3.1 Giriş

Bu bölümde, temel buck (düşürücü) DC-DC dönüştürücü, senkron buck dönüştürücü ve ZVT senkron buck dönüştürücü ele alınmıştır. Ayrıca, çalışma prensipleri incelenmiştir.

3.2 Anahtarlama DC-DC Dönüştürücüler

Anahtarlama DC-DC dönüştürücüleri, genel olarak, anahtarlama tekniği ile bir DC gerilimi başka bir DC gerilime çevirmek için kullanılan güç elektroniği sistemleridir [14]. Yüksek verimlilikleri ve küçük boyutları sebebiyle günümüzde oldukça revaçtadırlar. Anahtarlama DC-DC dönüştürücüler yoğunlukla bilgisayarlarda ve çeşitli elektronik cihaz adaptörlerinde kullanılırlar.

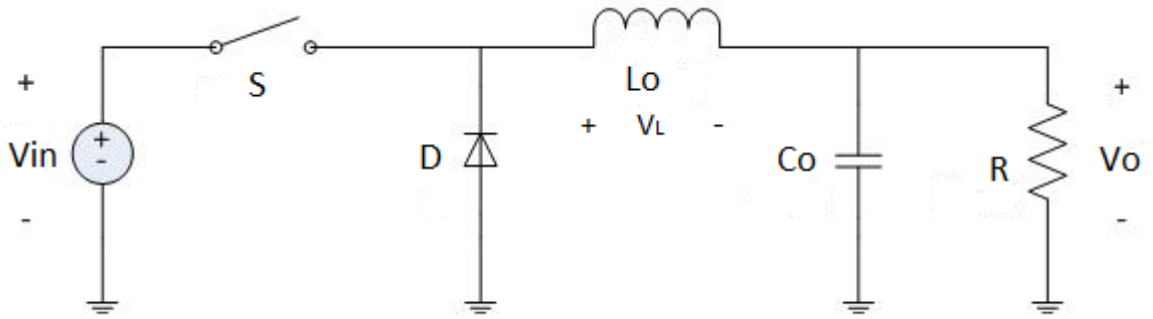
Anahtarlama DC-DC dönüştürücüler, kontrollü bir yarı iletken güç elemanı, bir diyot ve endüktans oluşun üç temel elemanın farklı biçimlerde bağlanmasıyla elde edilmektedir. Devredeki yarı iletken güç elemanı ya doyum bölgesinde ya da kesim bölgesinde çalıştırılır.

Anahtarlama DC-DC dönüştürücülerin çalışma prensibi, anahtarlama endüktansın enerji aktarımına dayanmaktadır. Temel olarak, birinci aralıkta DC giriş kaynağından endüktansa yüklenen enerji, ikinci aralıkta çıkışa aktarılır. Bu dönüştürücülerde, bir anahtarlama periyodu boyunca sırası ile anahtarlama elemanı ve diyot iletimdedir.

Anahtar iletimde iken endüktansa aktarılan enerji, diyot iletimde iken çıkışa aktarılır [14].

3.3 Buck DC-DC Dönüştürücü

Düşürücü DC-DC dönüştürücü devre şeması Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Burada; V_{in} giriş gerilimini, L endüktansı, V_L endüktans gerilimini, S anahtarlama elemanı, D diyotu, C kapasitörü, RL yük direncini ve V_o çıkış gerilimini ifade eder. Burada L endüktansı ve C kapasitörü birlikte filtre işlevi görmektedir.



Şekil 3.1 Buck DC-DC dönüştürücü devre şeması[9]

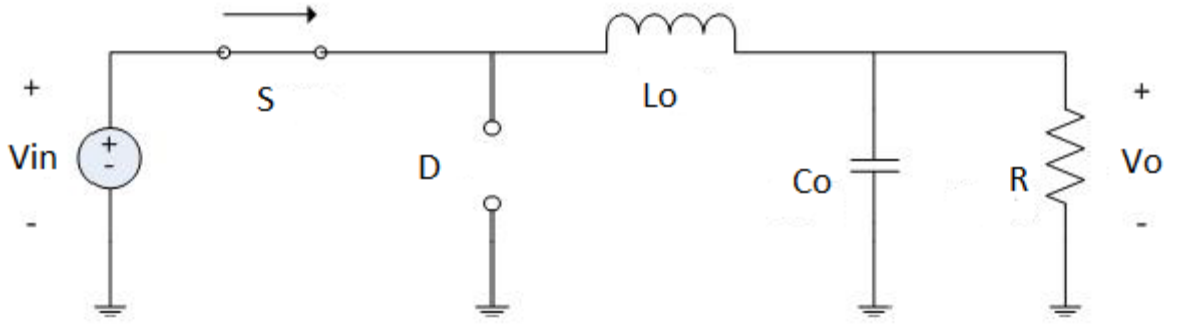
Buck DC-DC dönüştürücü, DC çıkış gerilimini, DC giriş geriliminden daha düşük birimde gerilim elde etmek amacıyla kullanılan, izole olmayan ve giriş-çıkış gerilim polariteleri aynı olan bir anahtarlama DC-DC dönüştürücüdür. En yaygın kullanım alanları, regüle edilmiş DC güç kaynakları, akü şarj sistemleri ve DC motor hız kontrol devreleridir [14]. Bu çalışmada düşürücü DC-DC dönüştürücü ideal bileşenlerden oluştuğu varsayılmıştır.

Şekil 3.1’de S anahtarlama elemanı çeşitli kontrol teknikleriyle doyum ve kesim bölgesinde çalışır. Doyumda olduğu süre boyunca girişteki enerji çıkışa aktarılır, kesimde olduğu sürede ise endüktansa aktarılarak depolanan enerji, çıkışı beslemeye devam etmektedir. S anahtarlama elemanının doyumda kalma süresi, çıkışa aktarılan enerjinin miktarını belirlediği göz önüne alındığında, S anahtarlama elemanının doyumda tutulduğu süre çıkış geriliminin seviyesini belirlemektedir. Denklem 3.1 anahtarlama elemanının doyumda tutulduğu sürenin (t_{on}), tüm periyot süresine (T_s) ve D çalışma oranını vermektedir [14].

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} \quad 0 \leq D \leq 1 \quad (3.1)$$

3.3.1 Dönüştürücünün Çalışma İlkeleri ve Analizleri

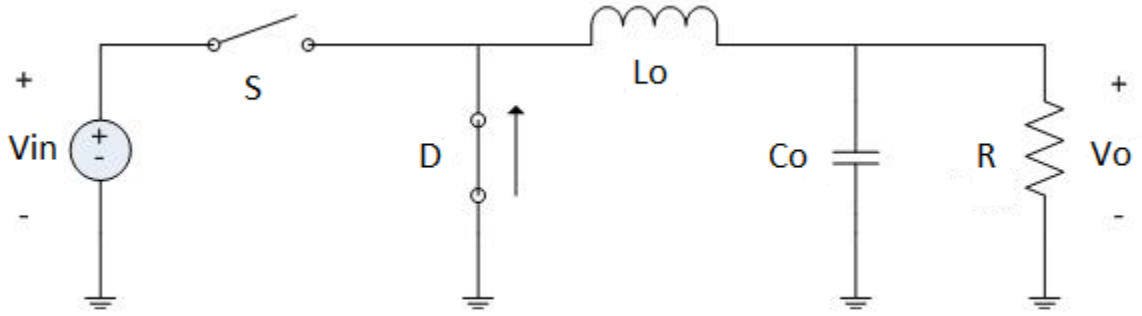
S anahtarı doyum bölgesinde, diyot kesimde iken oluşan eşdeğer devre Şekil 3.2’de verilmektedir. Bu durumda, endüktans üzerindeki gerilim, denklem 3.2’de gösterildiği gibi giriş gerilimi ile çıkışta oluşan gerilimin farkına eşit olur. Giriş gerilimi ve çıkış geriliminin sabit olduğu kabul edildiği ideal durumda, endüktans üzerinden akan akım doğrusal olarak artarak şekil 3.4’te gösterildiği gibi 0-DTs süresi sonunda maksimum değere ulaşmaktadır[14].



Şekil 3.2 S anahtarı iletimde iken dönüştürücü eşdeğer devre şeması

$$V_L = V_{in} - V_0 \quad 0 \leq t \leq DT_s \quad (3.2)$$

S anahtarı kesimde ve diyotun iletimde olduğu eşdeğer devre Şekil 3.3’te verilmiştir. Bu durumda, denklem 3.3’te gösterildiği gibi endüktans üzerindeki gerilim, çıkış geriliminin tersine eşit olmaktadır. Anahtar kesime girdiğinde endüktansta biriken enerji nedeniyle endüktans akımı akmaya devam eder. Ancak endüktans üzerindeki gerilimin negatif polarite de olması nedeniyle akım azalarak akar. Şekil 3.4’te gösterildiği gibi DTs-Ts aralığında akım minimum değere ulaşır.



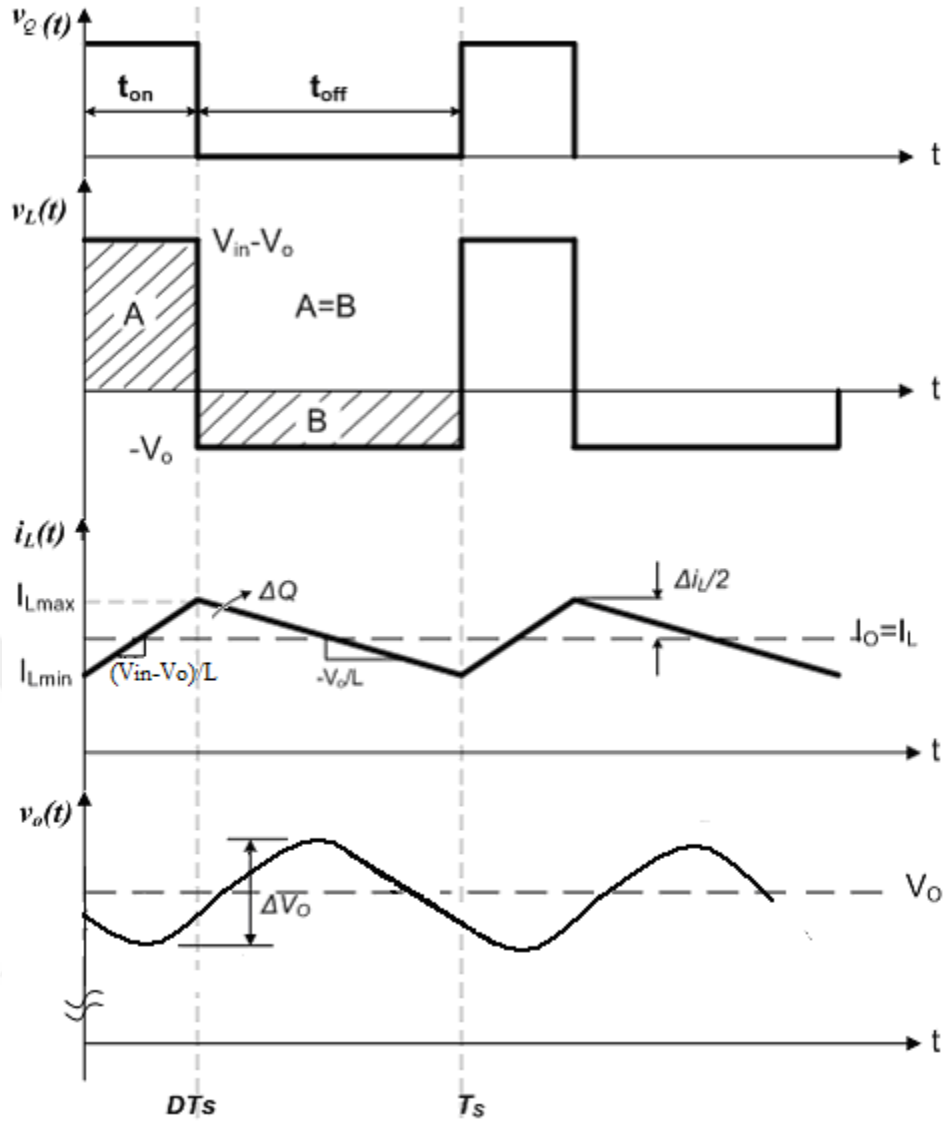
Şekil 3.3 S anahtarı kesimde iken dönüştürücü eşdeğer devre şeması

$$V_L = -V_0 \quad DT_S \leq t \leq T_S \quad (3.3)$$

Anahtarlama elemanının iletimde ve kesimde olması durumlarında oluşan eşdeğer devrelere göre, devre elemanları üzerinde oluşan akım - gerilim dalga şekilleri Şekil 3.4'te verilmiştir. Sürekli akım çalışma durumunda dalga şekli bir periyottan diğerine tekrar etmek zorunda olduğundan, endüktansın gerilimin bir periyottaki integrali sıfır olmak zorundadır. Bu durumda endüktans üzerindeki ortalama gerilim sifıra eşit olacağından Şekil 3.4'te endüktans geriliminin dalga seklinde gösterilen A ve B alanlarının eşit olması gerekir (denklem 3.4).

$$(V_{in} - V_0)DT_S = V_0(T_S - DT_S) \quad (3.4)$$

$$D = \frac{V_0}{V_{in}} \quad (3.5)$$



Şekil 3.4 Buck DC-DC dönüştürücünün temel dalga şekilleri

Şekil 3.4'te; V_Q ; S anahtarı kapı sinyalini, V_L ; endüktans gerilimini, i_L ; endüktans akımını, V_o ; çıkış gerilimini göstermektedir.

$$(V_{in} - V_o)DT_s = V_o(T_s - DT_s) \quad (3.4)$$

$$D = \frac{V_o}{V_{in}} \quad (3.5)$$

Denklem 3.4 üzerinde gerekli işlemler yapıldığında, düşürücü (buck) DC-DC dönüştürücünün ortalama giriş ve çıkış gerilimleri arasındaki ilişki bulunur (denklem 3.5). D çalışma oranı çıkış geriliminin giriş gerilimine oranıdır ve D çalışma oranı 0 ile 1 arasında bir değer olmak zorunda olduğundan denklem 3.1, çıkış gerilimi, giriş

geriliminden her zaman küçüktür ve bu düşürücü DC-DC dönüştürücünün genel özelliğidir. Endüktans akımındaki dalgalanma tercih edilmekte olan bir durum değildir. Bu nedenle dalgalanma miktarının sınırlandırılması istenilmektedir ve bu dalgalanma miktarı, dönüştürücü devresindeki endüktansın değerinde önemli rol oynamaktadır. Endüktans değeri ile endüktans akımındaki dalgalanma arasındaki bağıntı denklem 3.6'da verilmiştir [14].

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int V_L(t) dt \quad (3.6)$$

Buradan endüktans akımındaki dalgalanmanın Şekil 3.4'teki endüktans gerilim (V_L) eğrisi altındaki alanın endüktans değerine oranı ile belirlendiği görülmektedir. Buna göre endüktans akımındaki dalgalanma denklem 3.7 elde edilir.

$$\Delta i_L = \frac{1}{L} (V_{in} - V_0) D T_S = \frac{1}{L} V_0 (1 - D) T_S \quad (3.7)$$

Benzer şekilde, çıkış gerilimi üzerindeki meydana gelen dalgalanma hiçbir dönüştürücü için istenen bir durum değildir. Bu sebepten, çıkış gerilimindeki dalgalanma, kondansatör yardımıyla sınırlandırılır. Kondansatörün kapasitans değeri ile çıkış gerilimi üzerindeki dalgalanma miktarı arasındaki ilişki yardımıyla (denklem 3.8) elde edilmiştir [14].

$$V_C(t) = \frac{1}{C} \int i_C(t) dt \quad (3.8)$$

Çıkış gerilimindeki dalgalanmalar uygulanabilir bir kapasite değeri için Şekil 3.4'teki dalga şekilleri göz önüne alınarak sürekli akım iletim durumu için hesaplanmaktadır. Endüktans akımı i_L üzerindeki tüm dalgalanmanın kapasite üzerinden aktığı ve akımın ortalama bileşeninin de direnç üzerinden yüke aktığını varsayarsak, DQ alanı bize ek yüklemeyi gösterir. Bu durumda, iki tepe değer arası gerilim dalgalanması denklem 3.9'da verilmiştir [14].

$$\Delta V_0 = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{2} \frac{1}{C} \frac{\Delta i_L T_S}{2} \quad (3.9)$$

3.3.2 Sürekli ve Kesintili Akım Çalışma Modu

Düşürücü (Buck) DC-DC dönüştürücü sürekli ve kesintili akım modları olmak üzere iki modda çalışmaktadır. Anahtarlama elemanın kesimde olduğu sürede endüktans akımı sıfır seviyesine kadar düşmesi durumuna süreksiz akım modu (discontinuous current mode-DCM), sıfır seviyesine kadar inmez ise sürekli akım modu (continuous current mode-CCM) oluşur. Bu iki durumun gösterdiği frekans domeni cevapları çok farklı olduğundan, dönüştürücünün sürekli olarak bu modlardan sadece birinde çalışması istenmektedir. Denklem 3.10'da sürekli akım modu (CCM) ve denklem 3.11'de süreksiz akım modu (DCM) şartları verilmiştir [14].

$$\frac{\Delta i_L}{2} < I_{0min} \quad (3.10)$$

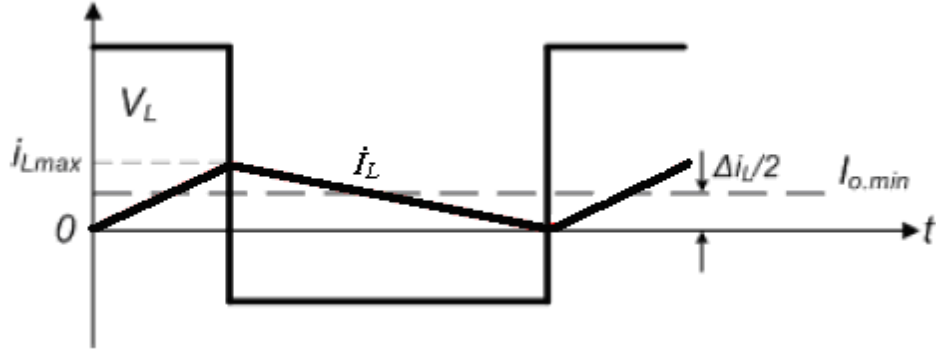
$$\frac{\Delta i_L}{2} < I_{0min} \quad (3.11)$$

Şekil 3.4'te gösterildiği gibi, Δi_L endüktans akımı üzerindeki tepeden-tepeye dalgalanma miktarını ifade eder. Denklem 3.12'de endüktans akımı yükselirken, denklem 3.13'te endüktans akımı azalırken ki Δi_L değerlerini gösterir.

$$\Delta i_L = \frac{V_{in} - V_0}{L} D T_S \quad (3.12)$$

$$\Delta i_L = \frac{V_0}{L} (1 - D) T_S \quad (3.13)$$

Sürekli akım çalışma sırasında, uç değerindeki V_L ve i_L Şekil 3.5'te gösterilmiştir. Akım sınırda olmasından dolayı periyodun sonunda endüktans akımı sıfır olmaktadır. Şekil 3.5'te de görüldüğü gibi çıkış akımı I_{0min} 'den daha küçük olursa sistem kesintili akım çalışma durumuna geçer.



Şekil 3.5 Sürekli ve kesintili akım modu çalışmaya ait şekil

Dönüştürücünün sürekli akım modunda çalışabilmesi için gerekli olan en düşük endüktans değeri denklem 3.14'te verilmiştir. Bu denklemlere göre, endüktans değerinin düşürülmek istenmesi durumunda anahtarlama frekansının artırılması gerektiği ortaya çıkmaktadır. (denklem 3.15).[14]

$$I_{o,min} = \frac{\Delta i_L}{2} \rightarrow I_{o,min} = \frac{V_0(1-D)}{2L} T_S \quad (3.14)$$

$$L > \frac{V_0(1-D)}{2I_{o,min}f_S} \quad (3.15)$$

3.4 Senkron Düşürücü (Buck) Dönüştürücü

Son yıllarda özellikle bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler ile yüksek akım, düşük çıkış gerilimi verebilen güç kaynaklarına gereksinim iyiden iyiye artmaya başlanmıştır. Bu isteklerin karşılanabilmesi için, bir yandan da yüksek akımda çalışabilmek için dönüştürücülerin paralel çalıştırılması gündeme gelirken, aynı zamanda gerilim düşümlerini azaltmak için senkron düşürücü (buck) türü devrelerin kullanımı da yaygınlaşmaya başlamıştır.

Dönüştürücülerin çıkış gerilimindeki dalgalanma seviyesi dikkat edilen bir kalite unsurudur. Senkron düşürücü (buck) dönüştürücüde transistor sayısına ve çıkış giriş gerilimi arasındaki orana göre dalgalanma değeri değişmekte, bazı sunulan çalışmalarda teorik olarak sıfır yapılabilmektedir.

Senkron buck dönüştürücüler sağladıkları avantajların yanında çeşitli zorluklar da getirmektedir. Bu dönüştürücüler artan anahtarlama eleman sayısı nedeniyle başta

maliyet olmak üzere, denetim karmaşıklığı ve yerleşim açısından zorluklar ortaya çıkarmaktadır[15].

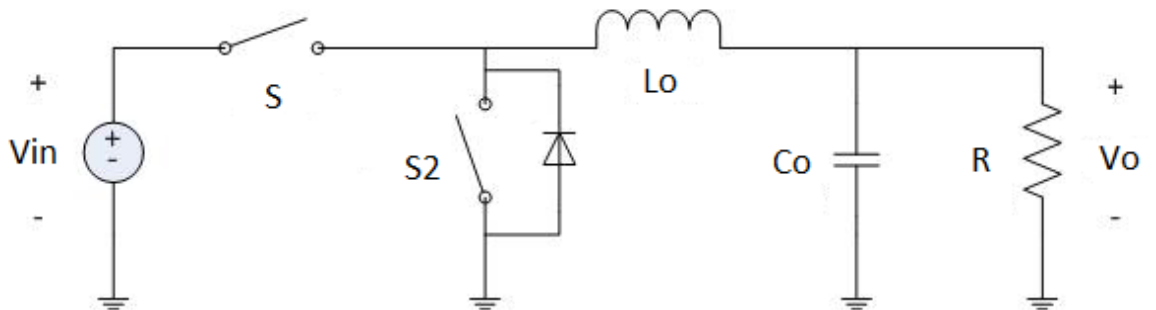
3.4.1 Senkron Buck Dönüştürücü Çalışma Prensipleri ve Analizi

Daha öncesinde, senkron transistorlarının kullanılmamasının başlıca sebebi, transistor ve schottky diyot arasındaki muazzam maliyet farkıydı. FET teknolojisinin zamanla gelişmeye devam etmesi, FET'lerin daha ucuzlamasına ve diyotlara oranla tercih edilmelerini sağladı[16].

Senkron buck dönüştürücü, temel olarak, diyotu başka bir transistor ile yer değiştirmiş buck dönüştürücü ile yapısal olarak aynıdır. Bu MOSFET yardımcı anahtar olarak adlandırılmaktadır. Bu MOSFET, dönüştürücüye ait olan ana MOSFET ile birlikte senkronize olarak iletme ve kesime girmektedir. Bu sebepten dolayı, bu devre topolojisine senkron buck dönüştürücü denmektedir.

Tasarımlarda yüksek akım ve düşük çıkış gerilimi istenmektedir, serbest diyot içinde gerçekleşen aşırı güç kaybı, minimum çıkış gerilimini sınırlandırmayı başarabilmektedir. Yüksek akımdaki kayıpları azaltmak ve düşük çıkış gerilimini sağlayabilmek için serbest diyot, iç direnci $R_{DS(ON)}$ çok düşük olan bir MOSFET ile değiştirilmiştir[16].

Senkron buck dönüştürücü devresinin basit bir şeması Şekil 3.6 'da verilmiştir. D_1 diyotu başka bir MOSFET (S_2) ile yer değiştirmiştir. Devre iki adet transistore sahiptir, bunlar ana anahtar ya da üst anahtar (S) ve alt anahtar veya senkron anahtar S_2 adlandırılmaktadır.



Şekil 3.6 Senkron buck dönüştürücü devre şeması

Ana MOSFET, girişten çıkışa enerji transferini sağlar ve endüktans akımı şarj eder. Ana MOSFET 'in kesimde olduğu sırada, Senkron MOSFET anahtarı iletime geçerek endüktans akımının sirkülasyonunu sağlar ve endüktanstaki enerjinin deşarj olması için bir akım yolu oluşmasını sağlar. Ancak, özellikle dikkat edilmesi gerekir ki, iki MOSFET aynı anda iletimde olmaması gerekmektedir. Eğer iki anahtar da aynı anda iletimde olursa, giriş gerilimi ile toprak arasında bir kısa devre meydana gelir ve bu durum gerçekleşirse çok büyük bir hataya sebep olur[16].

MOSFET boyunca gerçekleşen bileşke gerilim düşüşü, serbest diyotun ileri gerilim düşüşünden daha az olabilmektedir. Ayrıca, kanaldan kaynağa ($R_{DS(ON)}$) düşük direnci kayıpların azalmasında büyük ölçüde yardımcıdır ve böylece, senkron anahtarın genel çevrim verimliliği optimize edilmiş olur.

Aşağıdaki denklemlerde de görülmektedir ki, senkron buck dönüştürücü kayıpları çok büyük ölçüde azalmaktadır ve buna bağlı olarak verim çok önemli bir şekilde artış göstermiştir. İlk olarak, diyottaki kayıplar denklem 3.16'da hesaplanmış ve gösterilmiştir.

$$P_D = V_D \cdot I_{0max} \cdot (1 - D) \quad (3.16)$$

Hesaplamaların kolay olması için örnek veriler olarak, giriş gerilimini 12V, çıkış gerilimini 3.3V ve yük akımını 30A olarak varsayalım. Bu örnekte, anahtarın iletim aralığını zamanın %27.5 ve diyotun iletim aralığını zamanın %72.5 olarak kabul ediyoruz. Sıradan bir Schottky diyotta (B340LB) 0.4V ile güç kaybı 8.7 W'tır. Güç kaybı için akım 30A'dır.

$$P_S = I_{0max}^2 \cdot R_{DS(ON)} \cdot (1 - D) \quad (3.17)$$

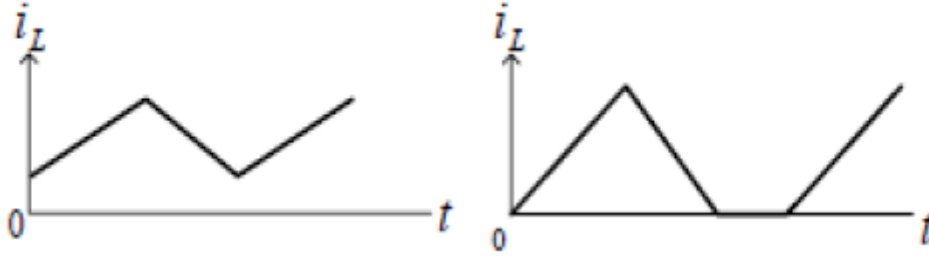
Tipik bir MOSFET (FDS6699S)'i ele aldığımızda, iç direnci 3.6 mΩ'dur ve sebep olduğu güç kaybı 2.349 W.

Açıkça görülmektedir ki, güç kaybı temel olarak iletim döngüsüne bağlıdır. Bir senkron buck dönüştürücünün sebep olduğu kayıpları, Schottky diyotun sebep olduğu kayıplar ile kıyasladığımızda oldukça azdır. Bu nedenlerden, senkron buck dönüştürücü, düşük gerilimli DC-DC dönüştürücülerde kullanımı daha da artmaktadır.

Bu ve bunun gibi birçok sebepten dolayı, senkron buck dönüştürücüler yüksek verime sahip olduklarından ve devre hacmini azalttığından dolayı oldukça ilgi çekmektedirler[16].

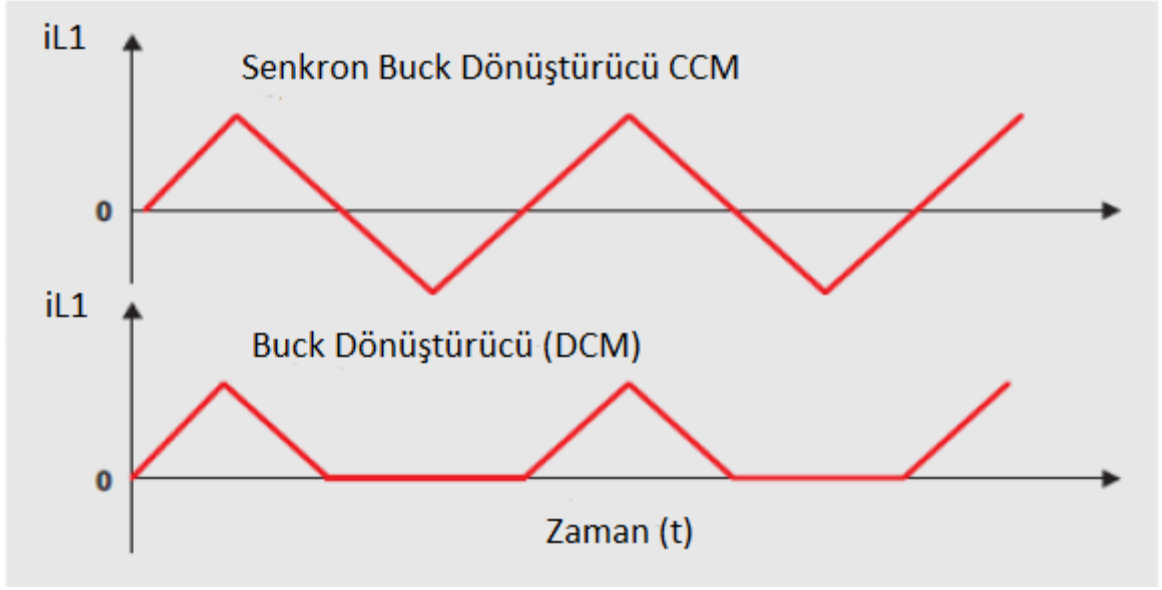
3.4.2 Sürekli ve Kesintili Akım Çalışma Modu

Düşürücü (buck) DC-DC dönüştürücü sürekli ve kesintili akım modları olmak üzere iki modda çalışabilir. Anahtarlama elemanın kesimde olduğu sürede endüktans akımı sıfır seviyesine kadar düşer ise süreksiz akım modu (discontinuous current mode-DCM), düşmez ise sürekli akım modu (continuous current mode-CCM) oluşur. Bu iki durumun gösterdiği frekans domeni cevapları çok farklı olduğundan, çeviricinin sürekli olarak bu modlardan sadece birinde çalışması istenir.



Şekil 3.7 (a) sürekli akım modu (b) kesintili akım modu

Senkron buck dönüştürücülerde, iletim kaybı azalır ve endüktans akımının çift yönlü akmasına izin verir. Böylece, senkron buck dönüştürücü her zaman sürekli akım modunda çalışmayı sağlamaktadır. Bu dönüştürücüler, senkron olmayan buck dönüştürücünün diyot ileri gerilim düşüşü olmadığı için tam yükte yüksek verime sahiptir. Her iki dönüştürücüde, tam yükte sürekli akım modunda çalışabilirken, hafif yükte senkron olmayan buck dönüştürücü, diyotun ters endüktans akımını engellemesinden dolayı kesime girmektedir[16].



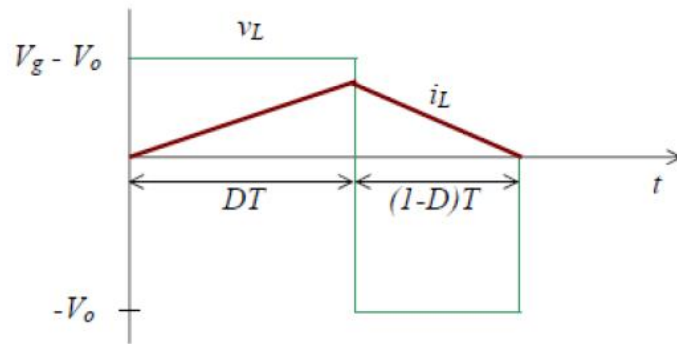
Şekil 3.8 Senkron ve senkron olmayan buck dönüştürücü endüktans akım modu
(Nowakowski & Tang,2009)

Şekil 3.9'da görüldüğü gibi, ortalama endüktans akımı:

$$I_L = \frac{\Delta I_L}{2} \quad (3.18)$$

Minimum endüktans akımı, $I_{Lmin} = 0$ ve maksimum endüktans akımı:

$$I_{Lmax} = \Delta I_L \quad (3.19)$$



Şekil 3.9 Sürekli ve kesintili mod sınır durumu

Şekil 3.9 görüldüğü gibi, endüktans akımı ve akım dalgalanması:

$$I_L = I_0 = \frac{V_0}{R} \text{ ve } \Delta I_L = \frac{1}{L} \cdot (V_{in} - V_0) \cdot D \cdot T_S = \frac{1}{L} \cdot V_0 \cdot (1 - D) \cdot T_S \quad (3.20)$$

Hafif yük koşulunda, sürekli akım modunda çalışma için:

$$I_L = I_0 = \frac{\Delta I_L}{2}$$

$$I_{0min} = \frac{V_0(1-D)}{2 \cdot L} T_S \quad (3.21)$$

Bu noktada, buck dönüştürücü için minimum endüktans akımı sürekli akım modunda çalışması için aşağıda hesaplanmıştır.

$$L > \frac{V_0 \cdot (1-D)}{2 \cdot f_S \cdot I_{0min}} \quad (3.22)$$

Denklem 3.22'ye göre, sürekli akım modunu sağlamakta, endüktans değerinin azaltılması için anahtarlama frekansının arttırılması gerekmektedir[16].

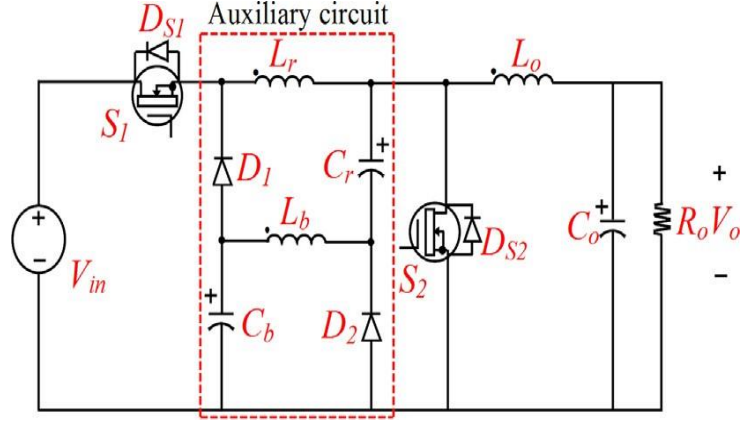
ZVT-ZCT PWM SENKRON DÜŞÜRÜCÜ (BUCK) DÖNÜŞTÜRÜCÜ

4.1 Giriş

Bu bölümde, literatürde yer alan ZVT-ZCT DC-DC dönüştürücüler incelenerek, tezde geliştirilen devrenin altyapısı oluşturulmak istenmiştir. Bunun için (S. Shiva Kumar vd., 2014) ve (S. Pattnaik vd., 2008) tarafından sunulmuş olan iki devre detaylı olarak incelenmiştir.

4.2 Dönüştürücü 1

Şekil 4.1’de verilen ve S.Shiva Kumar ve arkadaşları tarafından 2014 yılında yapılan çalışmada, basit bir yapıya sahip pasif yumuşak anahtarlama hücresi ile sıfır gerilimde ve sıfır akımda anahtarlamanın gerçekleştirildiği PWM senkron düşürücü dönüştürücü devresi önerilmiştir. Bu dönüştürücüye ait devre şeması Şekil 4.1’de verilmiştir. Klasik PWM dönüştürücü ile karşılaştırıldığında kullanılan pasif bastırma hücresi sayesinde elemanlar üzerindeki stresler düşürülmüş, anahtarlama kayıpları azaltılmış ve elemandaki iletim kayıpları azaltılmıştır.



Şekil 4.1 ZVT-ZCT PWM Senkron Düşürücü (Buck) Dönüştürücü devre şeması[20]

Önerilen dönüştürücü klasik PWM senkron düşürücü dönüştürücüden farklı olarak önerilen pasif bastırma hücrelerini kapsamaktadır. Önerilen pasif bastırma hücresi, L_r rezonans endüktansını, C_r rezonans kondansatörünü, L_b tampon endüktansını, C_b tampon kondansatörü, D_1 ve D_2 yardımcı diyotlardan oluşmaktadır. Devrenin bir anahtarlama periyodu içerisindeki kararlı rejim analizinde aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- Giriş gerilimi sabit kabul edilmiştir.
- Çıkış filtre kondansatörü C_o ve çıkış filtre endüktansı L_o in yeterince büyük olduğu kabul edilmiştir.
- Diyotların ters toparlanma kaybı ihmal edilmiştir.
- Devre elemanlarının kayıpsız olduğu kabul edilmiştir.
- L_o endüktansı L_r endüktansına göre çok büyük olduğu kabul edilmiştir.

4.2.1 Devrenin Çalışma Aralıkları

Bu bölümde önerilen dönüştürücünün çalışma aralıkları incelenmiştir. Dönüştürücünün bir çalışma periyodu içerisinde 6 çalışma aralığı oluşmaktadır. Bu çalışma aralıklarına ilişkin devre şemaları verilmiştir.

Aralık 1

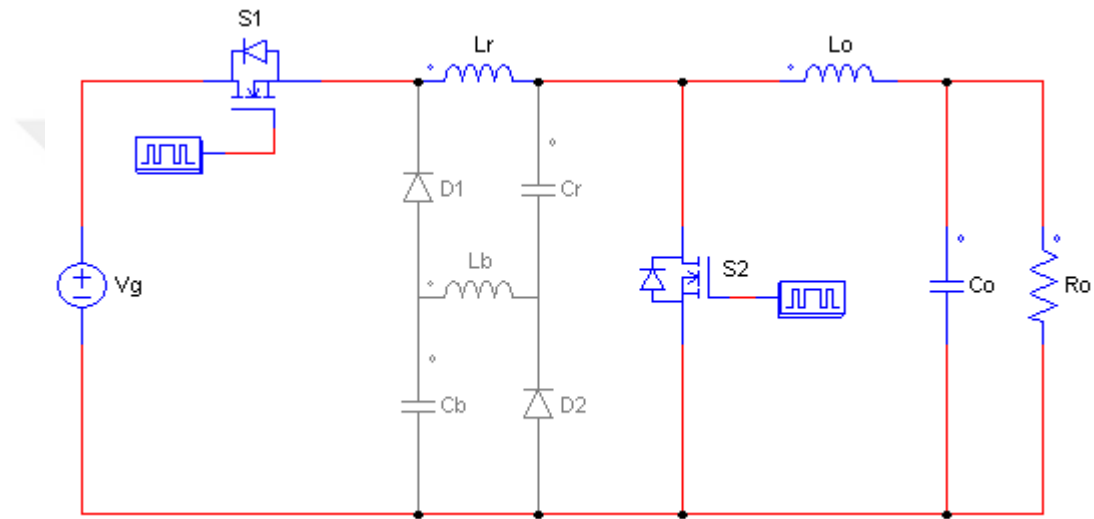
Bu aralıkta, ana anahtar S_1 iletim durumundadır. Akım yolu Şekil 4.2'de gösterildiği gibidir. S_1 anahtarına kontrol sinyali uygulandığında iletime girer. Anahtara seri bağlı olan L_r endüktansı nedeniyle iletime girme işlemi ZCS ile gerçekleşir. L_r akımı artarken

eş zamanlı olarak i_{DS2} akımı düşer. i_{DS2} akımının sıfıra düşmesi ve L_r akımının I_0 'a ulaşmasıyla bu aralık sona erer.

$$i_S(t - t_0) = i_{Lr}(t - t_0) = \frac{V_g}{L_r}(t - t_0) \quad (4.1)$$

$$i_{DS2}(t - t_0) = I_{0(ort)} - i_{Lr} = I_{0(ort)} - \frac{V_g}{L_r}(t - t_0) \quad (4.2)$$

$$t_{01} = \frac{L_r}{V_{in}} * I_{0(ort)} \quad (4.3)$$



Şekil 4.2 Aralık 1'e ait eşdeğer devre şeması

Aralık 2

S_2 anahtarının gövde diyodunun kesime girmesiyle birlikte akım rezonans elemanları L_r , C_r ve dengeleme elemanları L_r , C_b 'den geçmeye başlar. L_r , L_b , C_r ve C_b arasında bir rezonans başlar. C_b kondansör geriliminin giriş gerilimine ulaşmasıyla birlikte bu aralık sona erer.

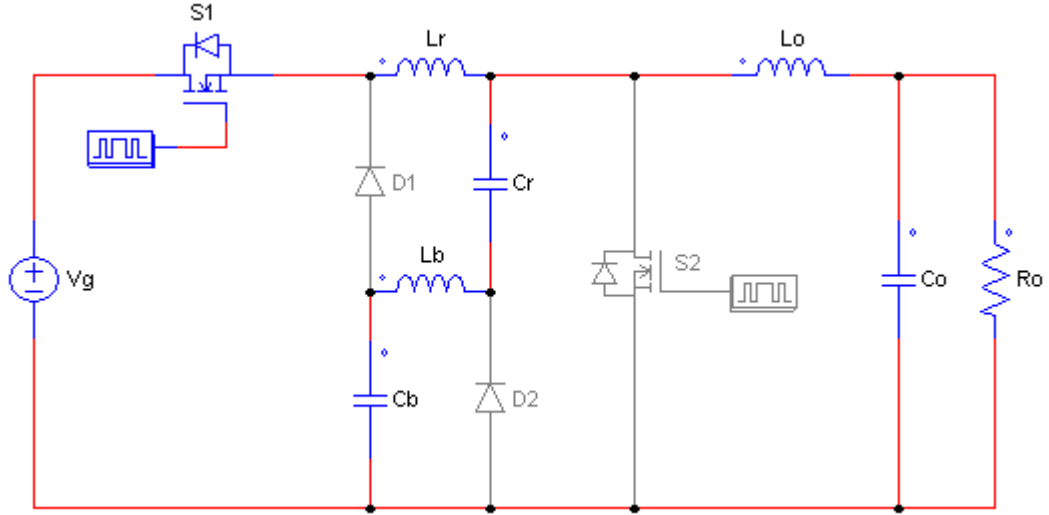
$$C_e = \frac{C_r C_b}{C_r + C_b}, L_e = L_r + L_b, \omega_x = \frac{1}{\sqrt{L_e C_e}}, Z_x = \sqrt{\frac{L_e}{C_e}}$$

$$i_{Lr}(t - t_1) = I_{0(ort)} + \frac{V_g}{Z_x} \sin \omega_x(t - t_1) \quad (4.4)$$

$$i_{Lb}(t - t_1) = i_{Lr} - I_{0(ort)} = \frac{V_g}{Z_x} \sin \omega_x(t - t_1) \quad (4.5)$$

$$V_{Cr}(t - t_1) = \frac{C_e}{C_r} [-V_g \cos \omega_x(t - t_1) + V_g] \quad (4.6)$$

$$V_{Cb}(t - t_1) = \frac{C_e}{C_b} [-V_g \cos \omega_x(t - t_1) + V_g] \quad (4.7)$$



Şekil 4.3 Aralık 2'ye ait eşdeğer devre şeması

Aralık 3

C_b kondansatör geriliminin giriş gerilimine ulaşmasıyla birlikte bu aralık başlar. D_1 diyodu ZVT altında iletme girer. L_r , L_b ve C_r arasında yeni bir rezonans başlar. L_r akımı yük akımı seviyesine düştüğünde ve C_r kondansatörü maksimum değerine ulaştığında bu aralık sona erer.

$$\omega_y = \frac{1}{\sqrt{(L_r + L_b)C_r}}, Z_y = \sqrt{\frac{L_r + L_b}{C_r}}$$

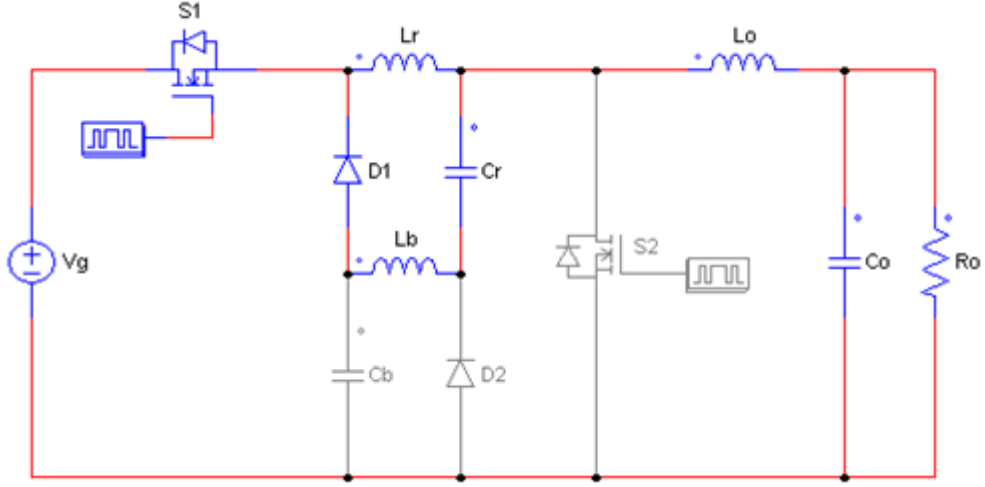
$$i_{Lr}(t - t_2) = (i_{Lr(maks)} - I_{0(ort)}) \cos \omega_y(t - t_2) - \frac{V_{Crm}}{Z_y} \sin \omega_y(t - t_2) + I_{0(ort)} \quad (4.8)$$

$$i_{Lb}(t - t_2) = i_{Lr}(t - t_2) - I_{0(ort)} = (i_{Lr(maks)} - I_{0(ort)}) \cos \omega_y(t - t_2)$$

$$- \frac{V_{Crm}}{Z_y} \sin \omega_y(t - t_2) \quad (4.9)$$

$$V_{Cr}(t - t_2) = (i_{Lr(maks)} - I_{0(ort)})Z_y \sin \omega_y(t - t_2) + V_{Crm} \cos \omega_y(t - t_2) \quad (4.10)$$

$$t_{23} = \frac{1}{\omega_y} \tan^{-1} \left(\frac{i_{Lr(maks)} - I_{0(ort)}}{V_{Cr(m)}} \right) \quad (4.11)$$

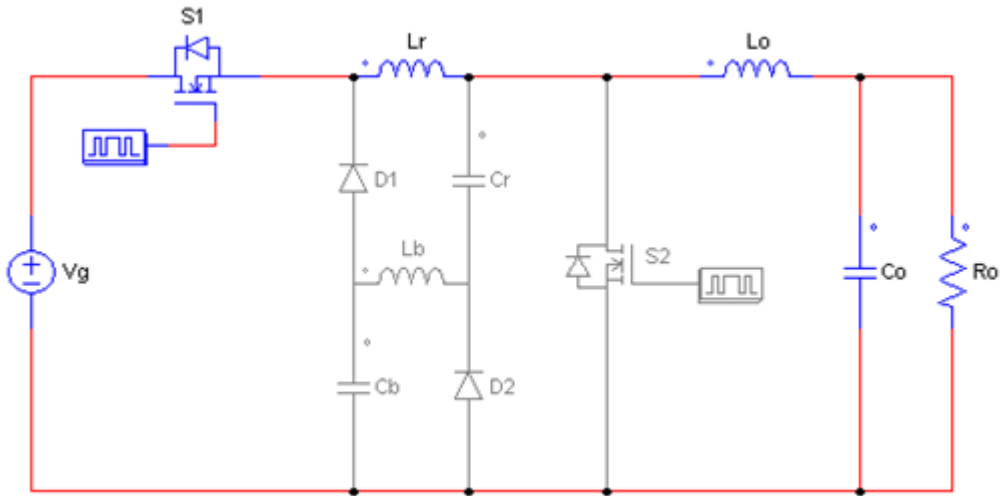


Şekil 4.4 Aralık 3'e ait eşdeğer devre şeması

Aralık 4

D_1 ve D_2 diyotları kesimdedir. S_1 anahtarı iletimdedir ve rezonans endüktansından çıkış akımı geçmektedir. Bu aralıkta herhangi bir rezonans oluşmaz. Düşürücü dönüştürücü devrede anahtarın iletimde olduğu ve iletim süresinin PWM kontrol sinyali tarafından belirlendiği aralıkla özdeş çalışma aralığıdır.

$$i_S = i_{Lr} = \frac{V_g}{L_r} (t - t_3) \quad (4.12)$$



Şekil 4.5 Aralık 4'e ait eşdeğer devre şeması

Aralık 5

Bu aralıkta S_1 anahtarının kontrol sinyalinin kesilmesiyle birlikte anahtar ZVT ile kesime girer. Eş zamanlı olarak S_2 anahtarına kontrol sinyalinin uygulamasıyla birlikte ZCT ile ilettime girer. S_2 anahtarının iletimde olduğu esnada C_r kondansatör gerilimi sıfıra düşer ve L_r , L_b ve C_b arasında yeni bir rezonans başlar.

$$V_{Cr}(t - t_4) = 0$$

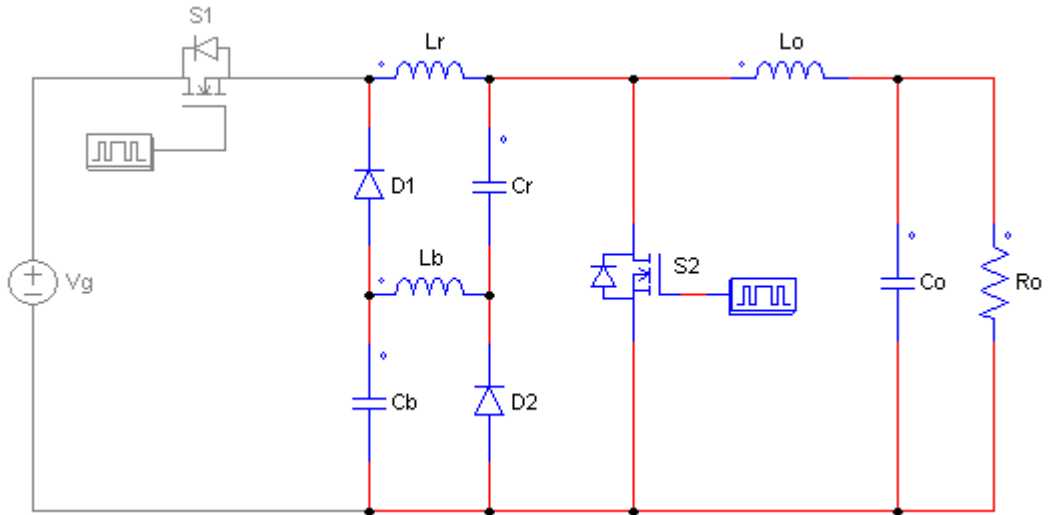
$$i_{Lr}(t - t_4) = I_{0(ort)} \cos \omega_z(t - t_4) - \frac{V_g}{Z_z} \sin \omega_z(t - t_4) \quad (4.13)$$

$$V_{Cb}(t - t_4) = \frac{V_g}{Z_z} \cos \omega_z(t - t_4) - I_{0(ort)} Z_z \sin \omega_z(t - t_4) \quad (4.14)$$

$$i_{Lb}(t - t_4) = I_{0(ort)} + i_{Lr} \quad (4.15)$$

$$\omega_z = \frac{1}{\sqrt{(L_r + L_b)C_b}}, Z_z = \sqrt{\frac{(L_r + L_b)}{C_b}}$$

$$t_{45} = \frac{1}{\omega_z} \tan^{-1} \frac{V_g}{I_{0(ort)} Z_z} \quad (4.16)$$



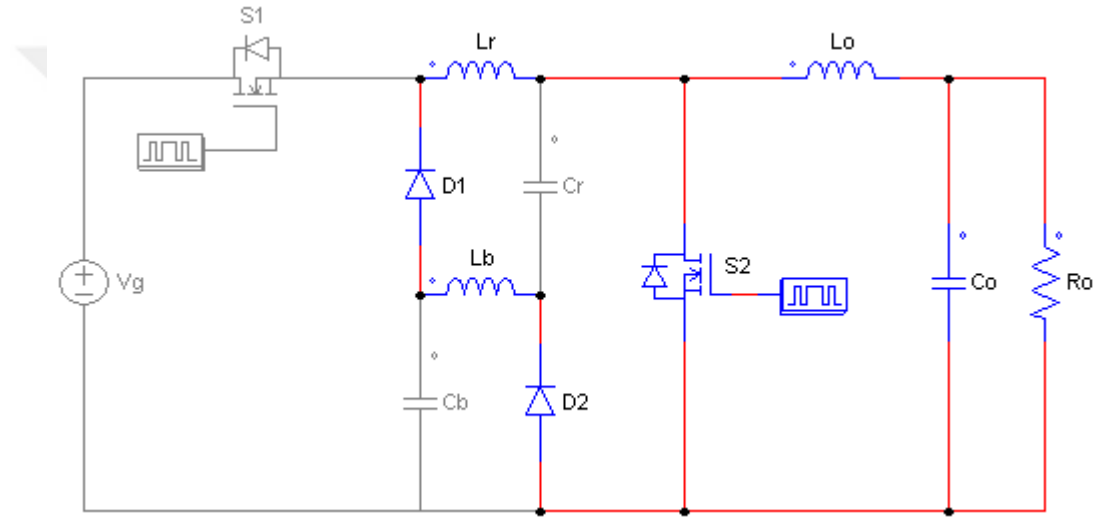
Şekil 4.6 Aralık 5'e ait eşdeğer devre şeması

Aralık 6

L_r rezonans akımının I_0 değerine ulaşmasıyla birlikte S_2 anahtarı ZCT altında kesime girer. L_r ve L_b de kalan enerji yüke aktarılır. S_1 anahtarının gövde diyodunun ilettime girmesiyle bu aralık sona erer. L_r endüktans akımı minimum değerine düşer. S_1 anahtarına kontrol sinyalinin uygulanması ile yeni bir çalışma periyodu başlar.

$$V_{Cr}(t - t_5) = -\frac{I_0}{C_r}(t - t_5) \quad (4.17)$$

$$i_{Lr}(t - t_5) = -\frac{V_0}{L_r}(t - t_5) + I_{0(ort)} \quad (4.18)$$



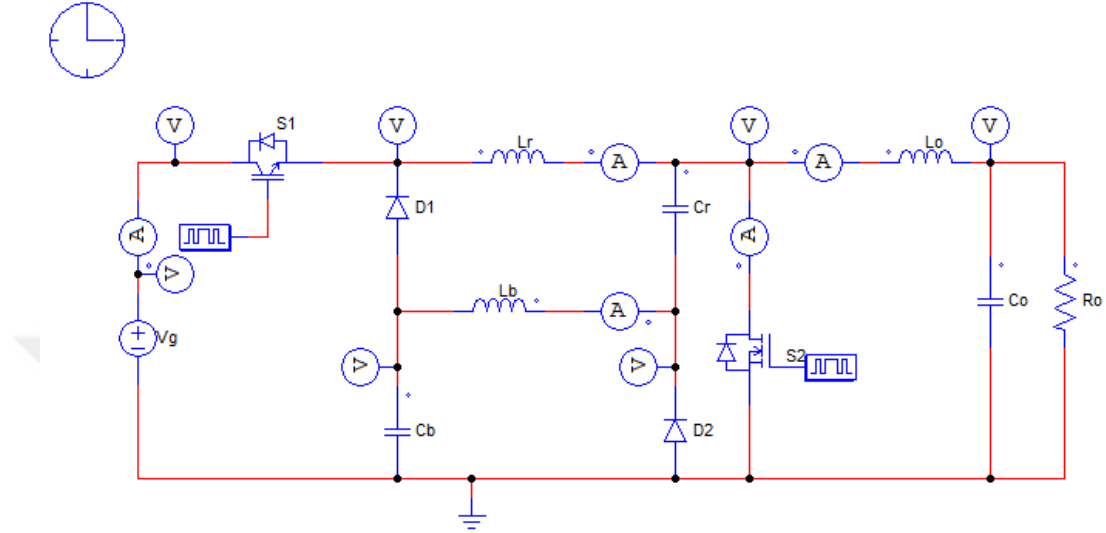
Şekil 4.7 Aralık 6'ya ait eşdeğer devre şeması

İncelenen dönüştürücünün temel özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

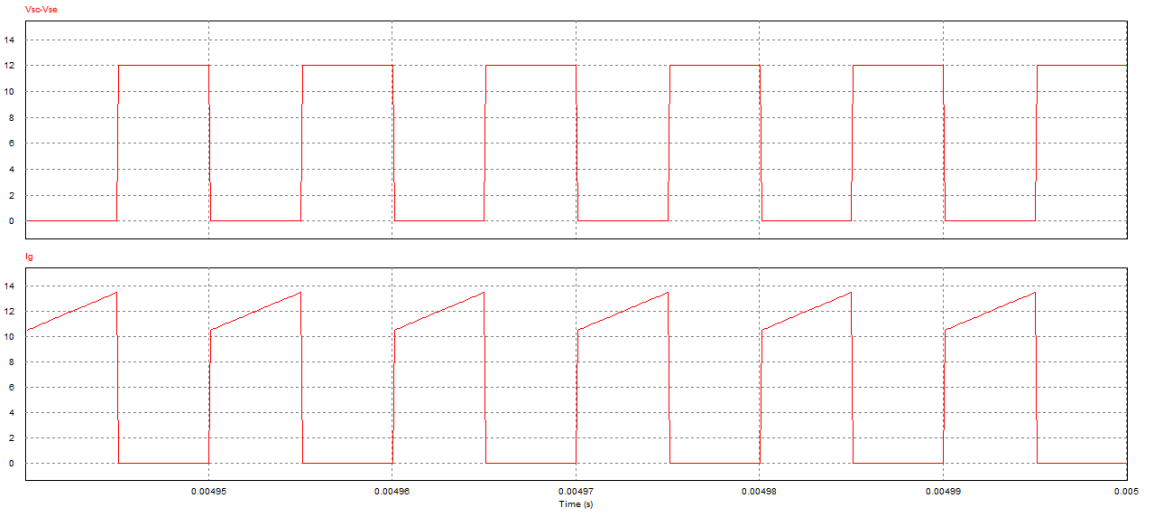
- S_1 , ana anahtarının ilettime girmesi ZVT ile gerçekleşmektedir. S_2 , yardımcı anahtarı ZCT ile ilettime ve ZVT ile kesime girmektedir. Devredeki bütün diyotlar ZVT ile ilettime ve ZCT ile kesime girmektedir.
- Önerilen dönüştürücü basit yapılı ve düşük maliyetlidir. Pasif bastırma hücresi kullanıldığından kontrolü kolaydır.
- Önerilen dönüştürücü geniş bir çalışma aralığında klasik dönüştürücü gibi çalışmaktadır.

- Başlıca dezavantajı ana akım yolu üzerinde bulunan L_r endüktansdır. Ana anahtar iletimde iken sürekli olarak bu endüktans üzerinden ana akım geçmektedir.

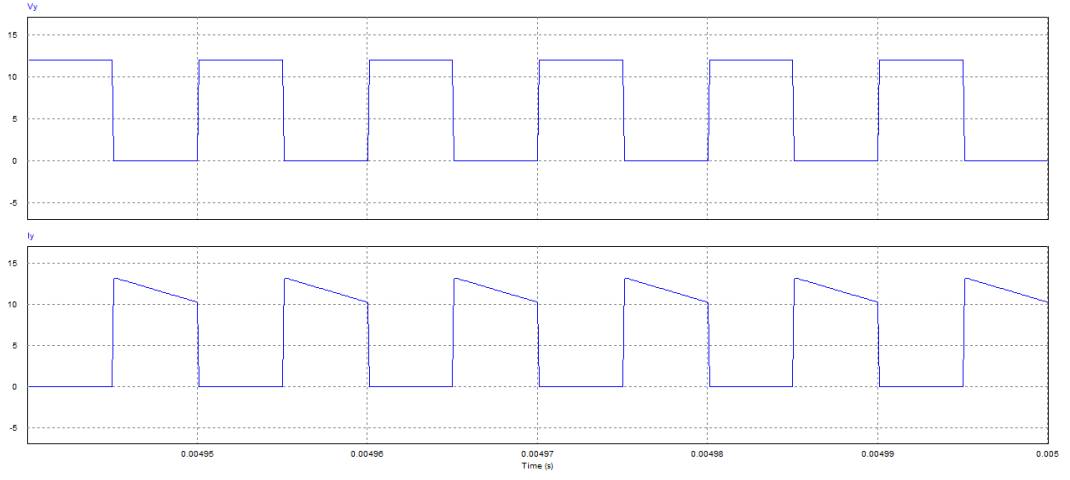
PSIM programı yardımıyla devrenin çalışması incelenmiş ve devreye ait dalga şekilleri elde edilmiştir.



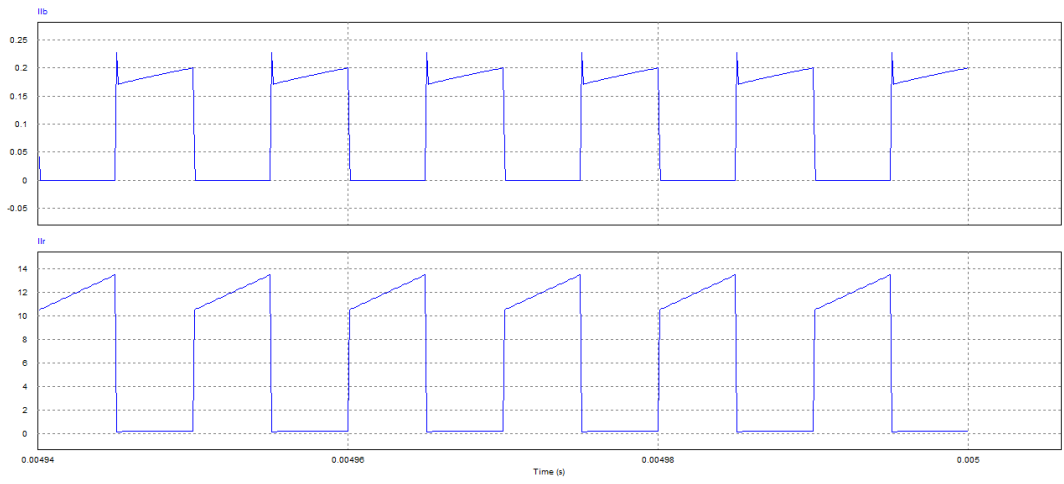
Şekil 4.8 PSIM devre şeması



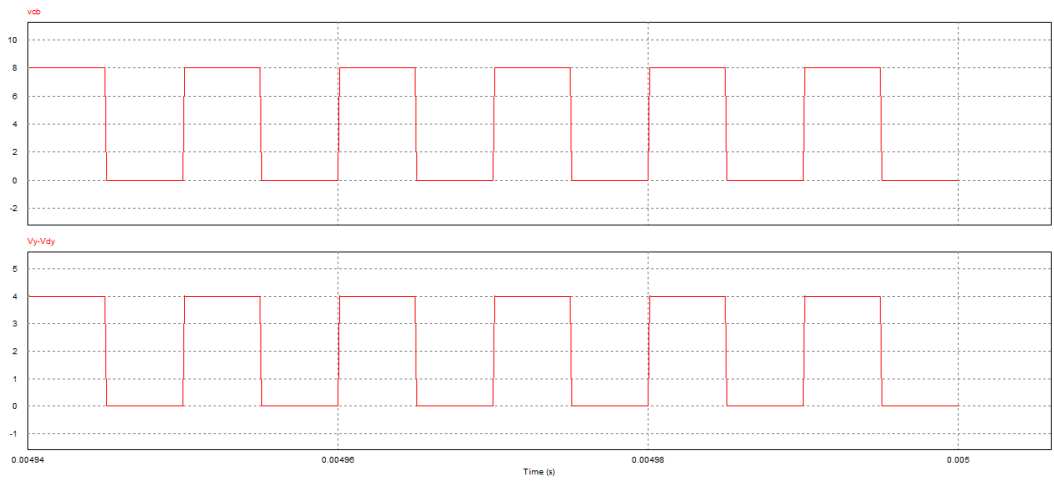
Şekil 4.9 Ana anahtar gerilim ve akım değişimleri



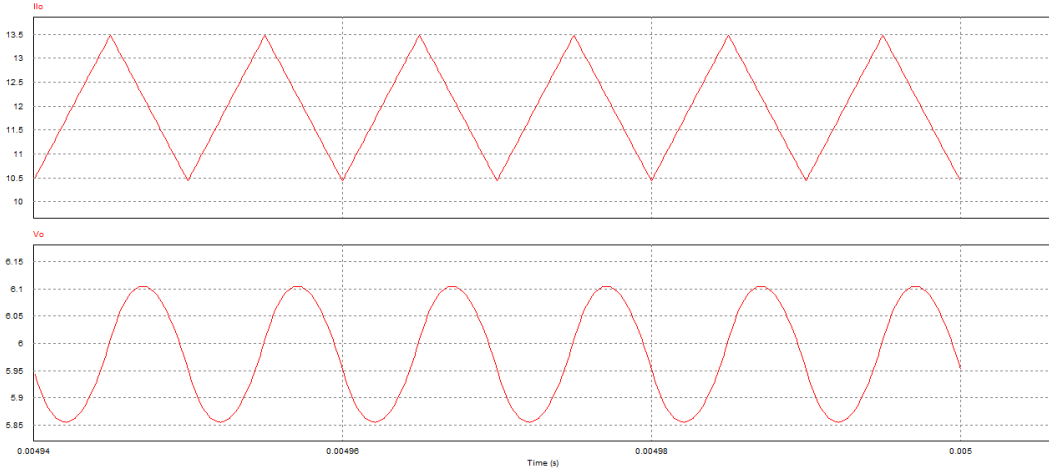
Şekil 4.10 Senkron anahtar gerilim ve akım değişimleri



Şekil 4.11 Rezonans ve tampon endüktans akımları



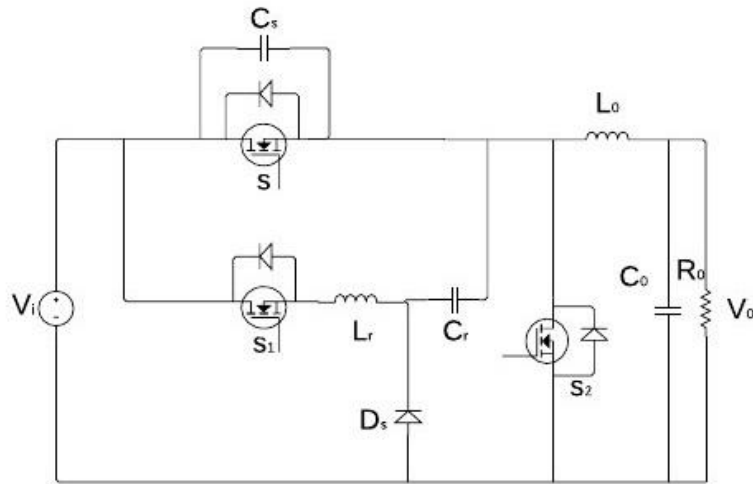
Şekil 4.12 Rezonans ve tampon kondansatör gerilimleri



Şekil 4.13 Çıkış akımı ve çıkış gerilimi

4.3 Dönüştürücü 2

Şekil 4.9’da verilen ve S. Pattnaik ve arkadaşları tarafından 2008 yılında yapılan çalışmada, nispeten karmaşık bir yapıya sahip pasif yumuşak anahtarlama hücresi ile sıfır gerilimde anahtarlamanın gerçekleştirildiği PWM senkron düşürücü dönüştürücü devresi sunulmuştur. Bu dönüştürücüye ait devre şeması Şekil 4.14’te verilmiştir. Klasik PWM dönüştürücü ile karşılaştırıldığında kullanılan pasif bastırma hücresi sayesinde elemanlar üzerindeki stresler düşürülmüş, anahtarlama kayıpları azaltılmış ve elemandaki iletim kayıpları azaltılmıştır. Söz konusu modifikasyon sonucu ortaya çıkan maliyet artışı ile verimlilikteki iyileşme dengesi dikkate alınması gerekmektedir.



Şekil 4.14 ZVT PWM Senkron Düşürücü (Buck) Dönüştürücü devre şeması

İncelenen dönüştürücü klasik PWM senkron düşürücü dönüştürücüden farklı olarak önerilen pasif bastırma hücrelerini kapsamaktadır. Önerilen pasif bastırma hücresi, S_1 yardımcı devre anahtarı, L_r rezonans endüktansını, C_r rezonans kondansatöründen oluşmaktadır. Yardımcı devre sadece, ana anahtarın ZVS koşullarını sağlayabilmek için kısa bir iletim aralığında çalışmaktadır. Ayrıca, ana anahtarın gövde diyotu da dönüştürücü için fayda sağlamaktadır. Devre yüksek frekanslı bir schottky diyot D_S içermektedir ve bu diyot senkron anahtar iletime girmeden önce, kondansatör gerilimini çıkışa aktarmak için kullanılmaktadır. Devrenin bir anahtarlama periyodu içerisindeki kararlı rejim analizinde aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- Giriş gerilimi V_i sabittir.
- Çıkış gerilimi V_o sabittir veya çıkış kapasitörü C_o yeterince büyüktür.
- Çıkış akımı I_o sabittir veya çıkış endüktansı L_o yeterince büyüktür.
- Çıkış endüktansı L_o , rezonans endüktansı L_r 'den daha büyüktür.
- Yarı iletken elemanlar ideal kabul edilmiştir.

4.3.1 Devrenin Çalışma Aralıkları

Bu bölümde önerilen dönüştürücünün çalışma aralıkları incelenmiştir. Dönüştürücünün bir çalışma periyodu içerisinde 8 çalışma aralığı oluşmaktadır. Bu çalışma aralıklarına ilişkin devre şemaları verilmiştir.

Aralık 1

$t = t_0$ anından önce, S_2 anahtarının gövde diyotu iletimdeyken; ana S anahtarı ve yardımcı S_1 anahtarı kapalıdır. t_0 'da sıfır-akım açık olmasını fark eden yardımcı S_1 anahtarı, L_r rezonans endüktans seri gibi açılır. L_r rezonans endüktansı ve C_r rezonans kapasitansındaki akım i_{S_2} 'deki akım düşümüyle aynı oranda yükselir. Bu modda L_r ve rezonans kapasitörü C_r arasında rezonans oluşur. Aralık, S_2 'nin esas diyotunun iletimi durdurması sonucunda i_{L_r} 'nin i_0 'a ulaşip ve i_{S_2} 'nin sıfıra düşmesiyle $t = t_1$ 'de sona erer. Bu devreyi kontrol eden gerilim ve akım ifadeleri aşağıda belirtilmiştir, $\omega = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}$,

$$Z = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}}$$

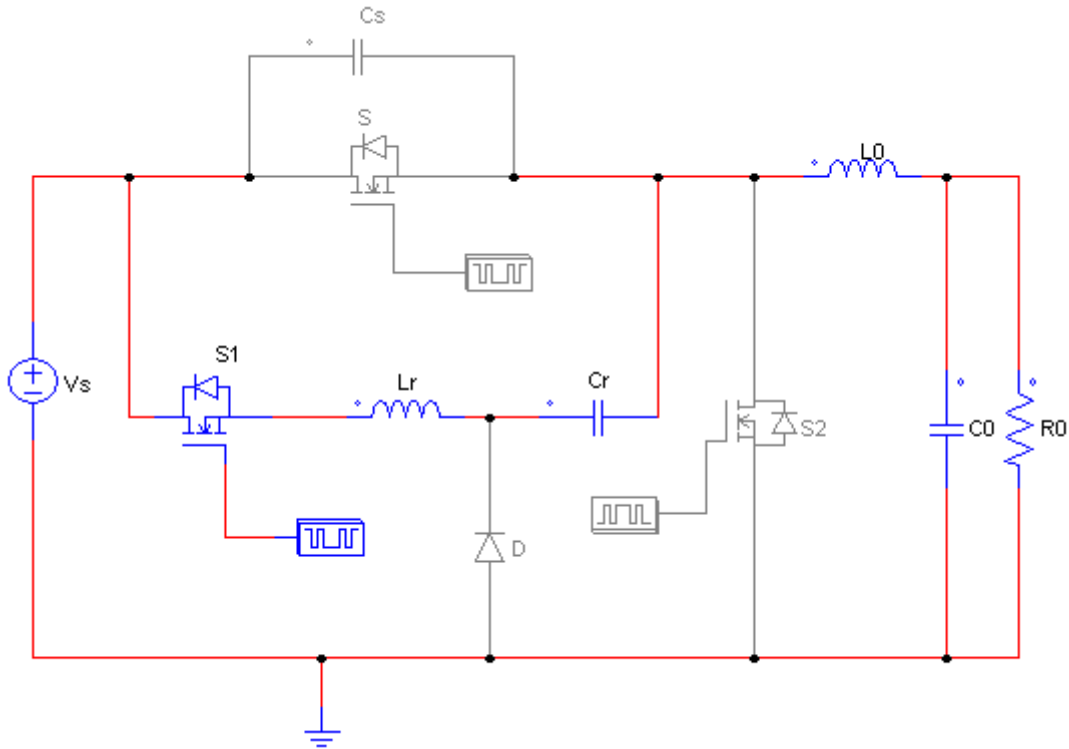
$$i_{S2} = I_0 - i_{Lr} \quad (4.19)$$

$$i_{Lr}(t - t_0) = \frac{V_i}{Z} \sin \omega(t - t_0) \quad (4.20)$$

$$t_{01} = t_1 - t_0 = \frac{1}{\omega} \sin^{-1} \left(\frac{I_0 Z_i}{V_i} \right) \quad (4.21)$$

$$V_{Cr}(t_1 - t_0) = V_{Cr1} \quad (4.22)$$

$$i_{Lr}(t_1 - t_0) = I_0 \quad (4.23)$$



Şekil 4.15 Aralık 1'e ait eşdeğer devre şeması

Aralık 2

L_r ve C_r rezonansta kalmaya devam eder. t_1 anında senkron S_2 anahtarı ZVS altında ilettime girer. Bu aralık, i_{Lr} akımının maksimum değeri $i_{Lr(max)}$ 'e ulaşır ZVS altında S_2 anahtarının kesime girmesiyle son bulması için gerçekleştirilir. Bu aralığın, gerilim ve akım ifadeleri aşağıdaki gibidir.

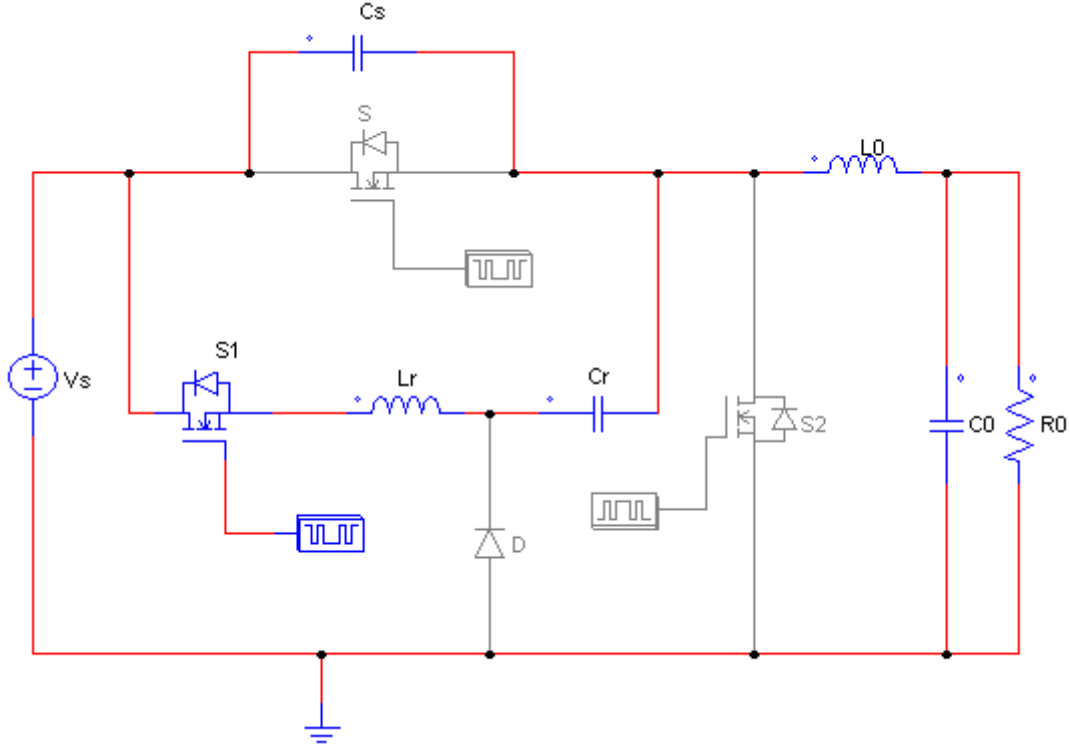
$$i_{S2} = i_{Lr0} - I_0 \quad (4.24)$$

$$i_{Lr}(t - t_1) = \frac{V_i - V_{Cr1}}{Z} \sin \omega(t - t_1) + I_0 \cos(t - t_1) \quad (4.25)$$

$$i_{Lr}(t_2 - t_1) = I_{Lrmax} \quad (4.26)$$

$$t_{12} = \frac{1}{\omega} \tan^{-1} \left(\frac{V_i - V_{Cr1}}{I_0 Z} \right) \quad (4.27)$$

$$V_{Cr}(t_2 - t_1) = V_{Cr2} \quad (4.28)$$



Şekil 4.16 Aralık 2'ye ait eşdeğer devre şeması

Aralık 3

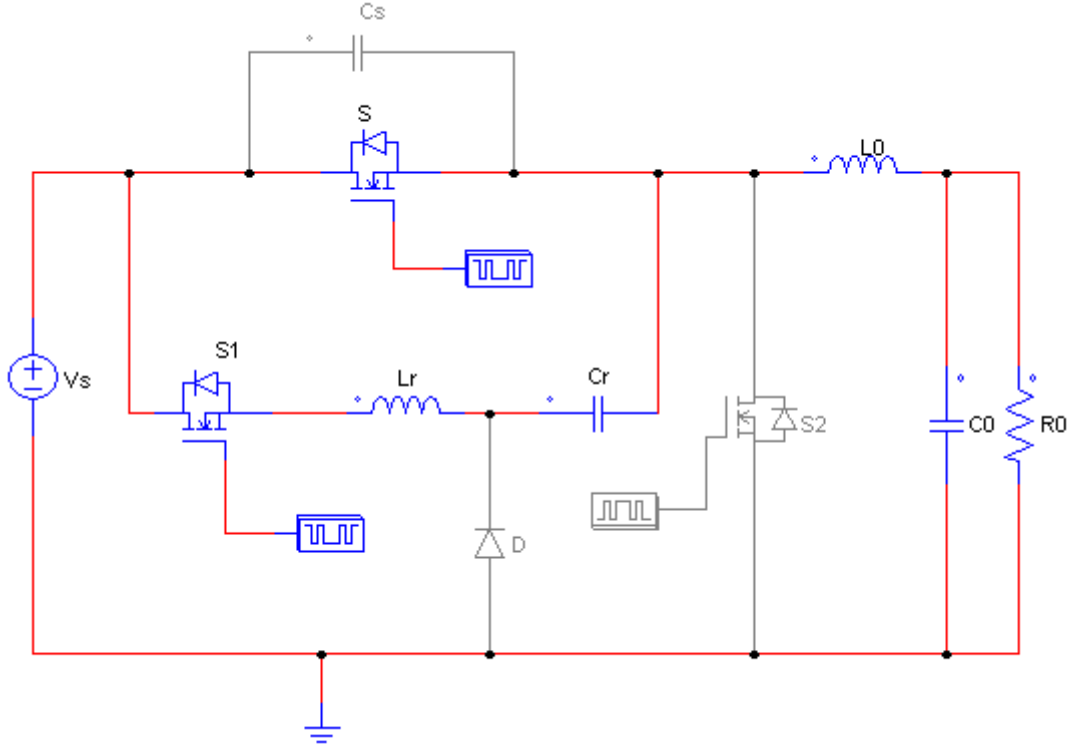
t_2 anında, i_{Lr} maksimum değeri olan $i_{Lr(maxs)}$ 'e ulaşır. i_{Lr} 'nin I_0 yük akımından fazla olması dolayısıyla, C_s kapasitörü, gövde diyotunun iletimine sebep olarak ana anahtar S 'nin gövde diyotu boyunca yüklenecek ve yükünü boşaltacak. Bu aralık, i_{Lr} rezonans akımının I_0 yük akımına düşmesiyle sona erer. Bu sayede ana S anahtarının gövde diyotu boyunca akım sıfır olur ve gövde diyotun kesime girmesine sebep olur. Aynı anda ana S anahtarı ZVS altında iletime girer. Bu aralığın, gerilim ve akım ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$i_{Lr}(t - t_2) = -\frac{V_{Cr2}}{Z} \sin \omega(t - t_2) + I_{Lrmax} \cos \omega(t - t_2) \quad (4.29)$$

$$t_{23} = \frac{1}{\omega} [\tan^{-1}(\frac{I_{Lrmax}Z}{V_{Cr2}}) - \sin^{-1}(I_0)] \quad (4.30)$$

$$i_{Lr}(t_{23}) = I_0 \quad (4.31)$$

$$V_{Cr}(t_{23}) = V_{Cr3} \quad (4.32)$$



Şekil 4.17 Aralık 3'e ait eşdeğer devre şeması

Aralık 4

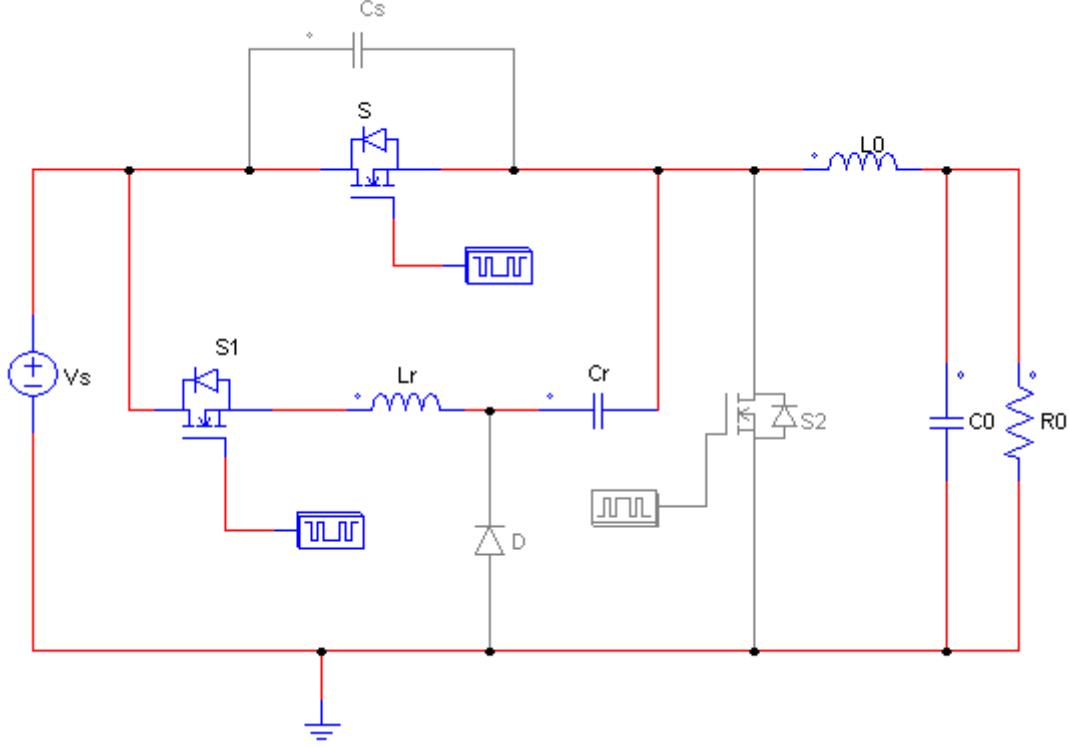
t_3 anında, ana anahtar ZVS ile iletme girer. Bu aşamada, i_s 'in yükselme oranı L_r ve C_r arasındaki rezonans tarafından belirlenir. Rezonans süreci bu aralıkta devam eder ve i_{Lr} akımı azalmaya devam eder. Bu aralık, i_{Lr} sıfıra düşünce ve S_1 ZCS ile kesime girince sona erer. Bu aralığın, gerilim ve akım ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$i_{Lr}(t - t_3) = -\frac{V_{Cr3}}{Z} \sin \omega(t - t_3) + I_0 \cos \omega(t - t_3) \quad (4.33)$$

$$i_{Lr} = 0 \quad (4.34)$$

$$t_{34} = \tan^{-1}\left(\frac{I_0 Z}{V_{Cr3}}\right) \quad (4.35)$$

$$V_{Cr}(t_4) = V_{Crmax} \quad (4.36)$$



Şekil 4.18 Aralık 4'e ait eşdeğer devre şeması

Aralık 5

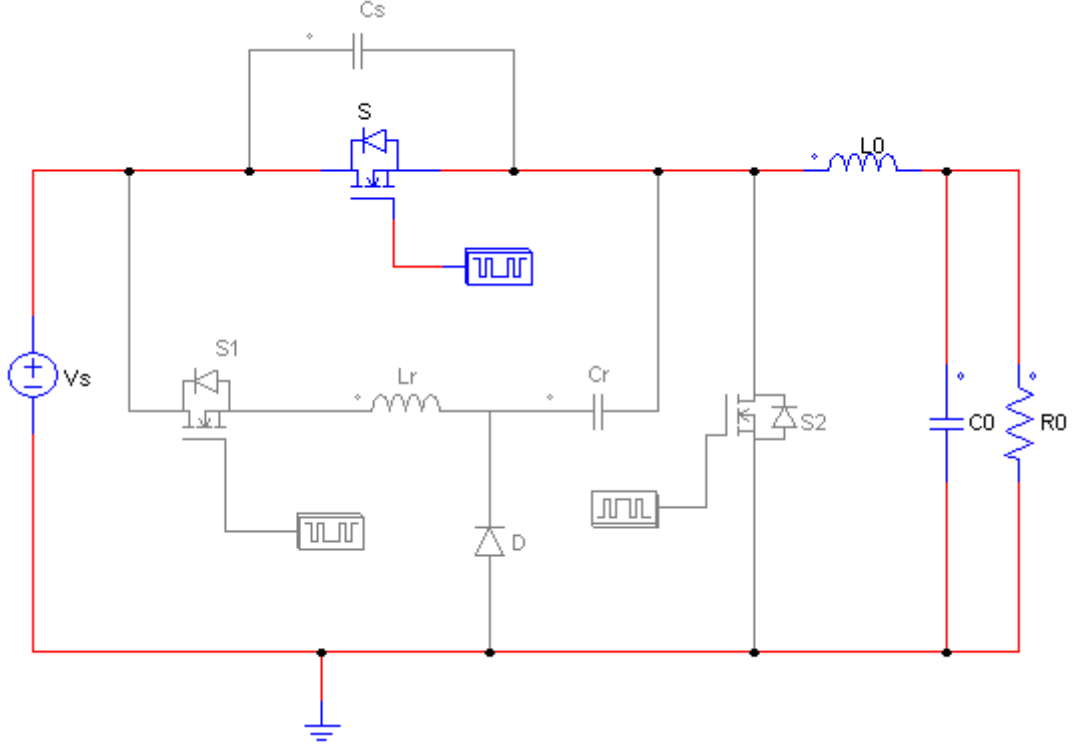
t_4 anında yardımcı anahtar S_1 ZCS ile kesime girer. S_1 'in gövde diyotu, rezonans kapasitörü C_r 'in deşarj olmaya başlamasından dolayı ilettime başlar. i_{Lr} rezonans akımı ters yönde yükselerek maksim negatife ulaşır ve sifıra yükselir. Bu anda S_1 'in gövde diyotu kesime girer ve aralık sona erer. Bu aralığı, tanımlayan ifadeler aşağıdaki gibidir.

$$i_{Lr}(t - t_4) = \frac{V_{Crmax}}{Z} \sin \omega(t - t_4) \quad (4.37)$$

$$i_{Lr}(t_5) = 0 \quad (4.38)$$

$$t_{45} = \frac{\pi}{\omega} \quad (4.39)$$

$$V_{Cr}(t_5) = -V_{Cr4} \quad (4.40)$$



Şekil 4.19 Aralık 5'e ait eşdeğer devre şeması

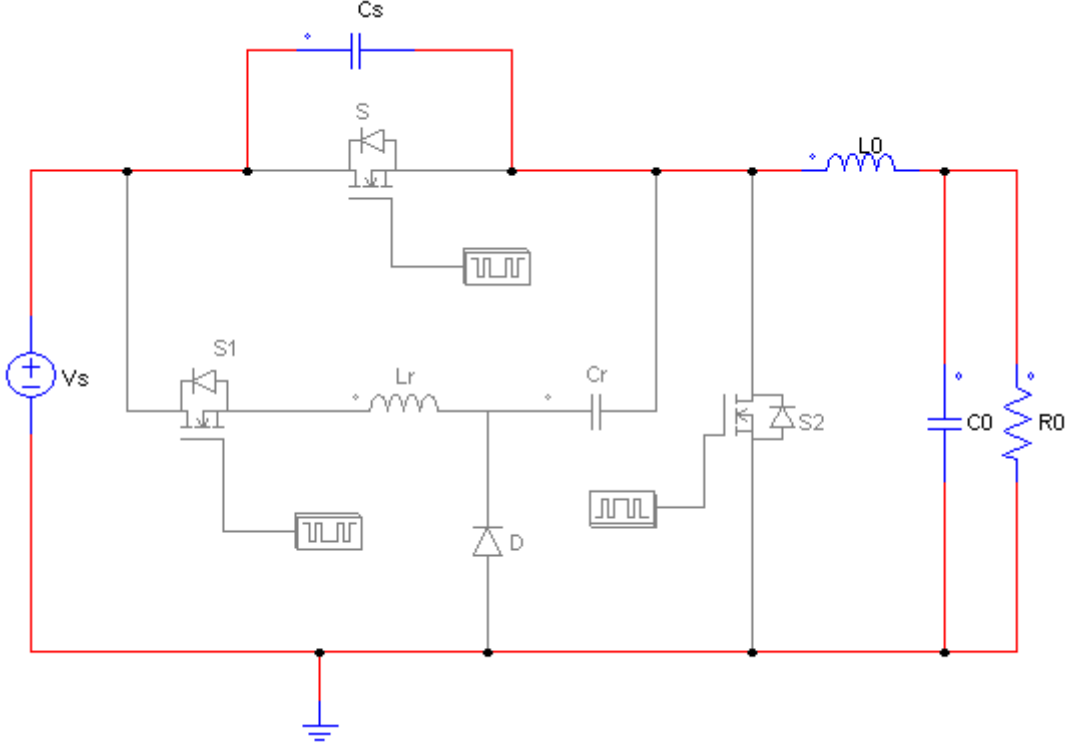
Aralık 6

S_1 'in gövde diyotunun t_5 anında kesime girmesiyle mevcut durumda sadece ana S anahtarı yük akımını taşır. Bu aralıkta rezonans yoktur ve devre çalışması konvansiyonel PWM buck dönüştürücü ile aynıdır. Bu modun gerilim ve akım ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$$i_S = I_0 \quad (4.41)$$

$$i_{Lr}(t_6) = 0 \quad (4.42)$$

$$V_{Cr}(t_6) = -V_{Cr4} \quad (4.43)$$



Şekil 4.20 Aralık 6'ya ait eşdeğer devre şeması

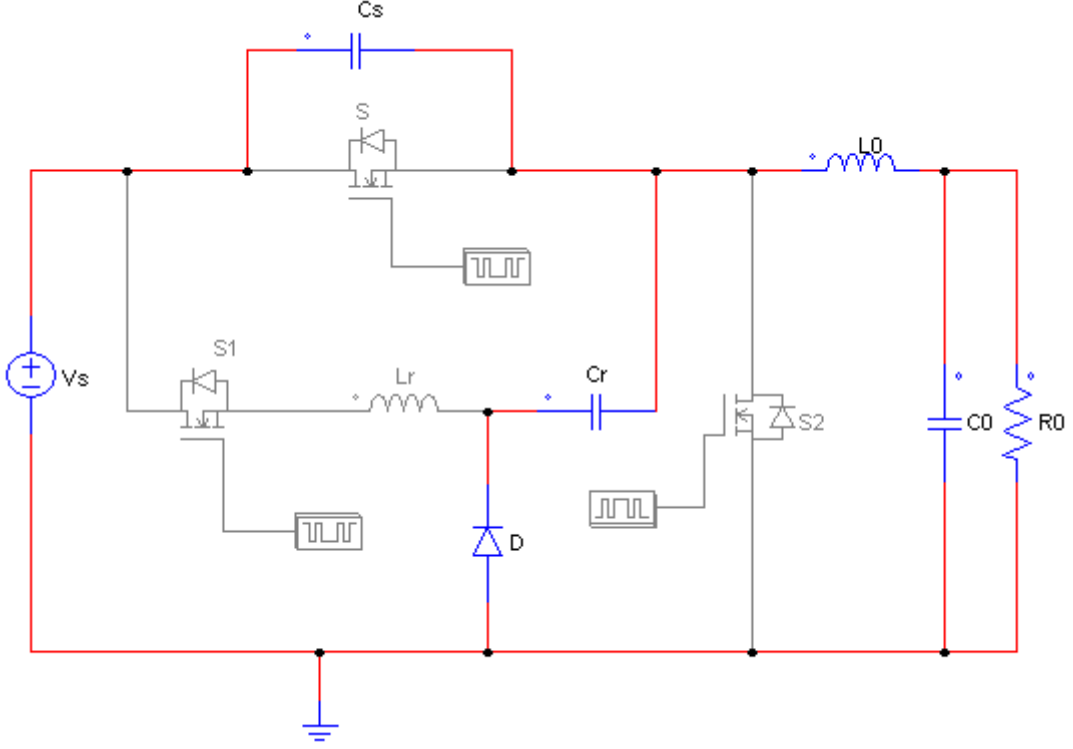
Aralık 7

t_6 anında, ana S anahtarı ZVS ile kesime girer. Schottky diyotu iletme başlar. C_r kapasitöründe depo edilen rezonans enerjisini çok kısa bir zaman aralığı için yüksek frekans Schottky diyotu D_s boyunca yüke doğru deşarj olur. Bunun sonucunda çıkış geriliminin iletim kayıp ve düşüşleri çok düşük olur. Bu aralık C_r kapasitörü tamamen deşarj olduğunda sona erer. Bu aralığı tanımlayan denklemler aşağıda verilmiştir.

$$V_{Cr}(t - t_6) = -V_{Cr4} + \frac{I_0}{C_r}(t - t_6) \quad (4.44)$$

$$V_{Cr}(t_7) = 0 \quad (4.45)$$

$$t_{67} = \frac{C_r V_{Cr4}}{I_0} \quad (4.46)$$

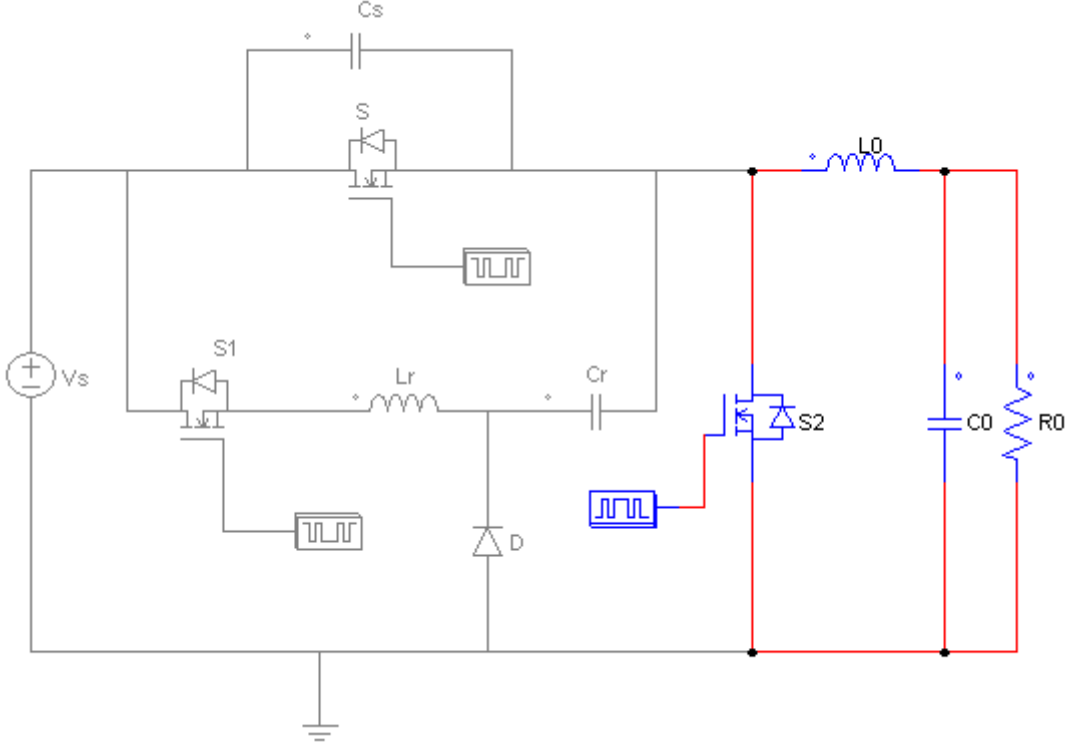


Şekil 4.21 Aralık 7'ye ait eşdeğer devre şeması

Aralık 8

t_7 anında, S_2 anahtarının gövde diyotu, C_r 'nin tam deşarj olması ve Schottky diyotunun ZVS altında kesime girmesiyle, iletime girer. Ölü zaman kaybı konvansiyonel senkron buck dönüştürücülere kıyasla göz ardı edilecek küçüklüktedir. Bu aralık boyunca, S_1 anahtarı sıradaki anahtarlama döngüsünde iletime girene kadar, dönüştürücü, konvansiyonel PWM buck dönüştürücü gibi çalışır. Bu aralığı tanımlayan ifadeler aşağıdaki gibidir.

$$i_{S2} = I_0 \quad (4.47)$$

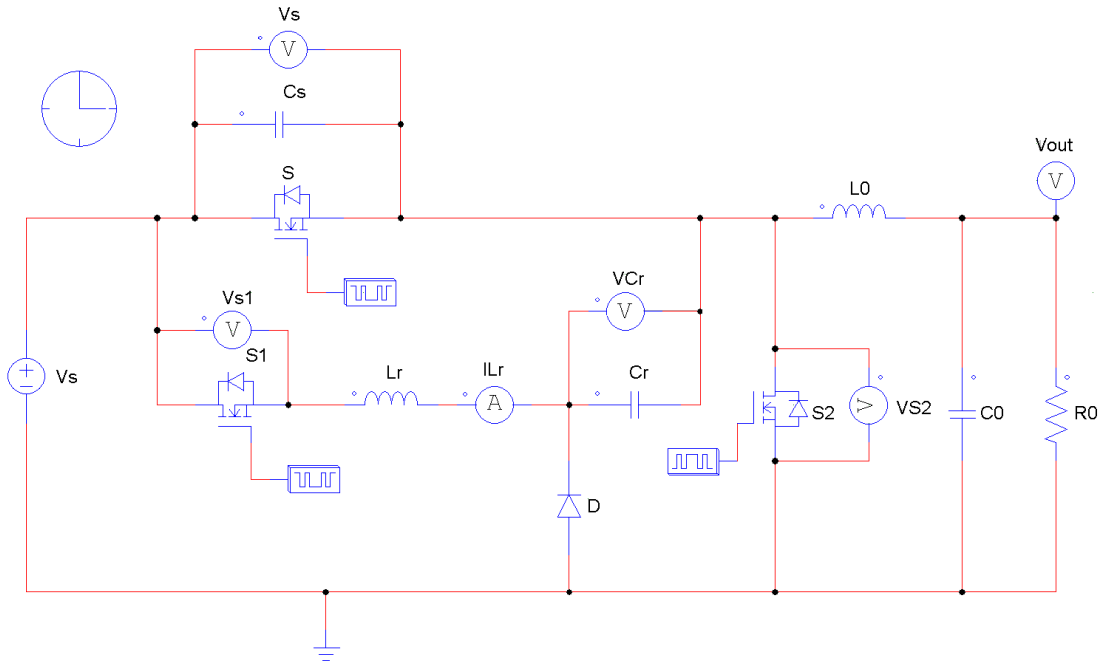


Şekil 4.22 Aralık 8'e ait eşdeğer devre şeması

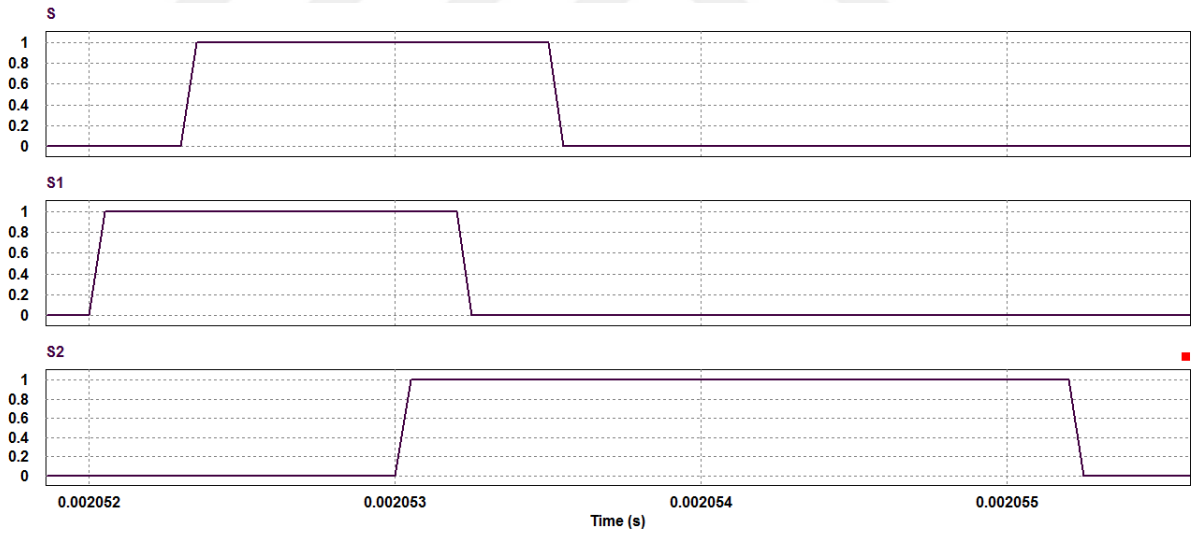
İncelenen dönüştürücünün temel özellikleri aşağıda sıralanmıştır.

- Devredeki, tüm aktif ve pasif yarı iletken elemanlar ya ZVS veyahut ZCS ile iletme ve kesime girmektedir.
- Önerilen dönüştürücü basit bir yapıya sahiptir, maliyeti uygun ve pasif bastırma hücresi kullanıldığından kontrolü kolaydır.
- Dönüştürücü, yüksek verimliliğe ve geniş bir çalışma yük aralığına sahiptir.
- Dönüştürücü, iletim aralığının büyük bir kısmında konvansiyonel PWM çalışmayı sağlamaktadır.
- Ana anahtar ve yardımcı anahtar ek bir gerilim stresine maruz kalmazlar. Bunun yanında, ana anahtar üzerinde hafifçe yükselen bir akım stresi mevcuttur fakat yardımcı anahtar üzerindeki akım stresi güvenli sınırlar içerisindedir.

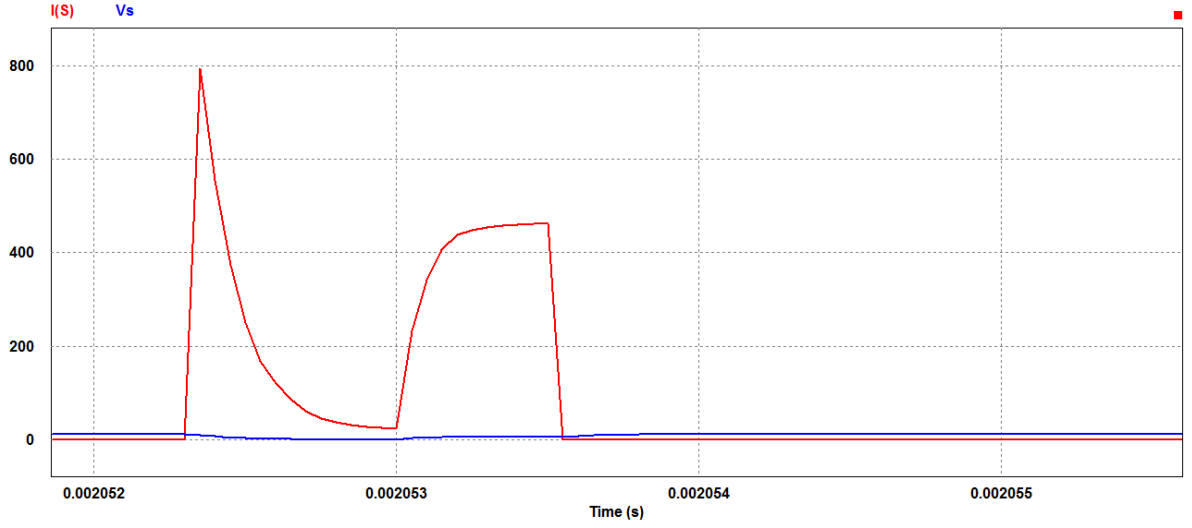
PSIM programı yardımıyla devrenin çalışması incelenmiş ve devreye ait dalga şekilleri elde edilmiştir.



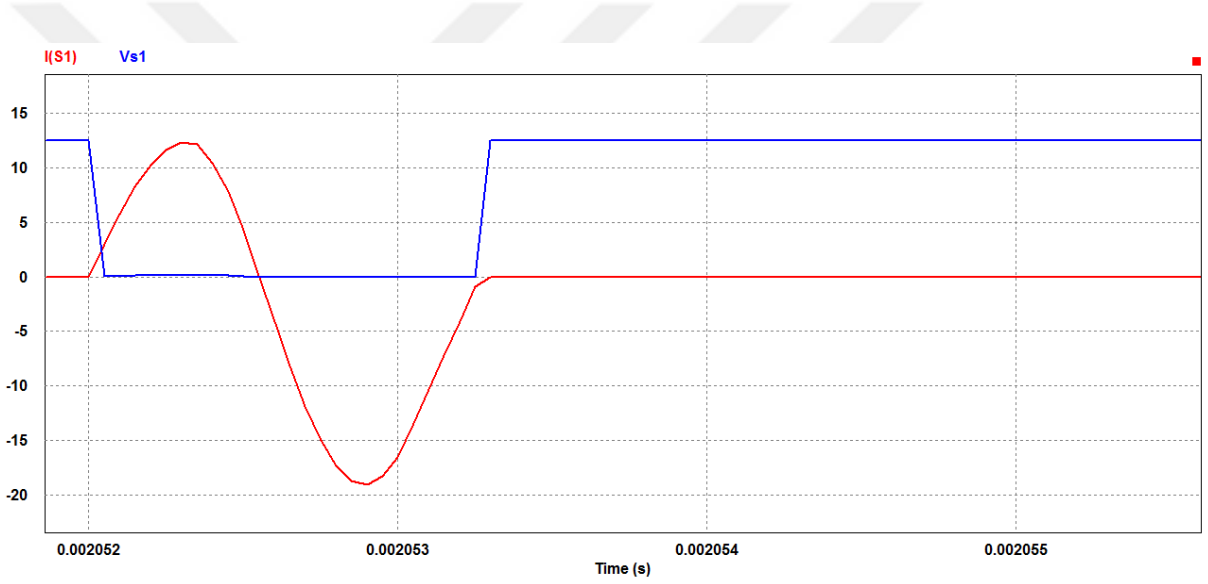
Şekil 4.23 PSIM devre şeması



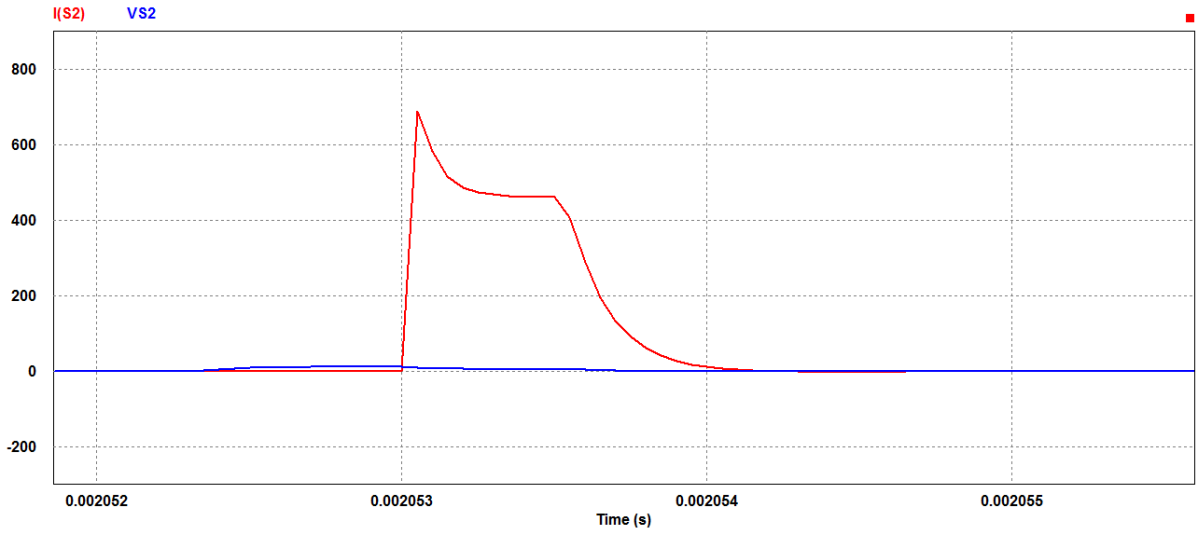
Şekil 4.24 S, S1 ve S2 anahtarlarının kontrol sinyalleri



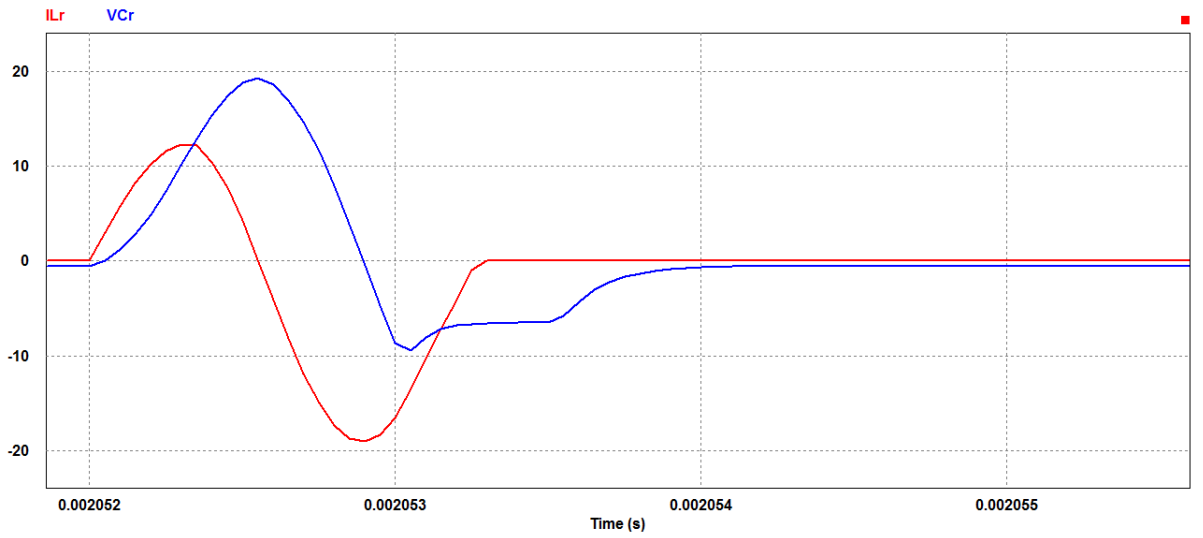
Şekil 4.25 Ana anahtar akım ve gerilim değişimleri



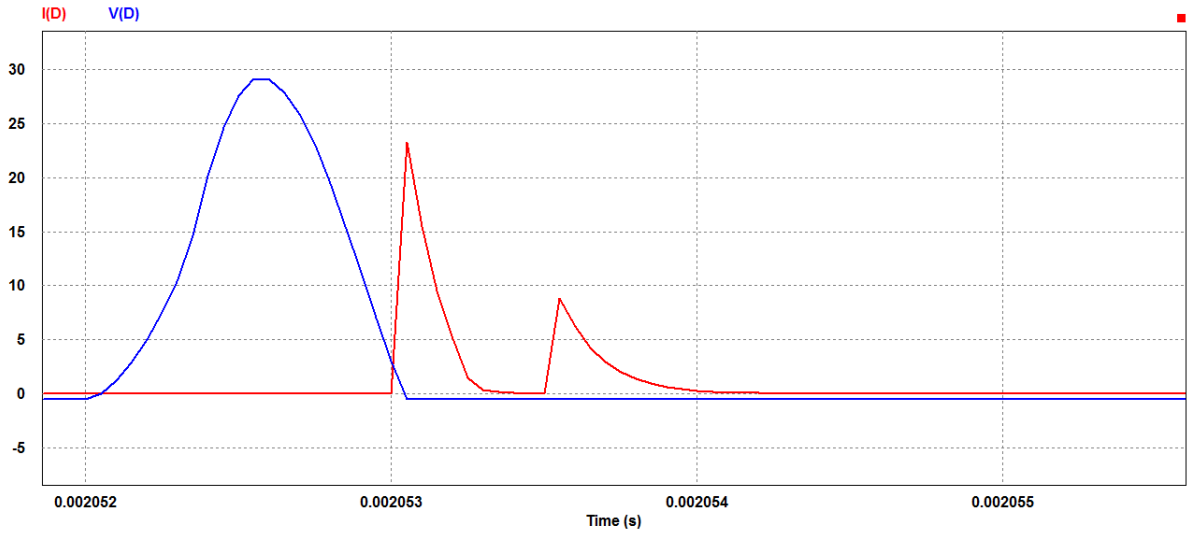
Şekil 4.26 Yardımcı anahtar akım ve gerilim değişimleri



Şekil 4.27 Senkron anahtarın akım ve gerilim değişimleri



Şekil 4.28 Yardımcı devrenin endüktans akımı ve kapasitör gerilimi



Şekil 4.29 Ana diyotun akım ve gerilim değerleri

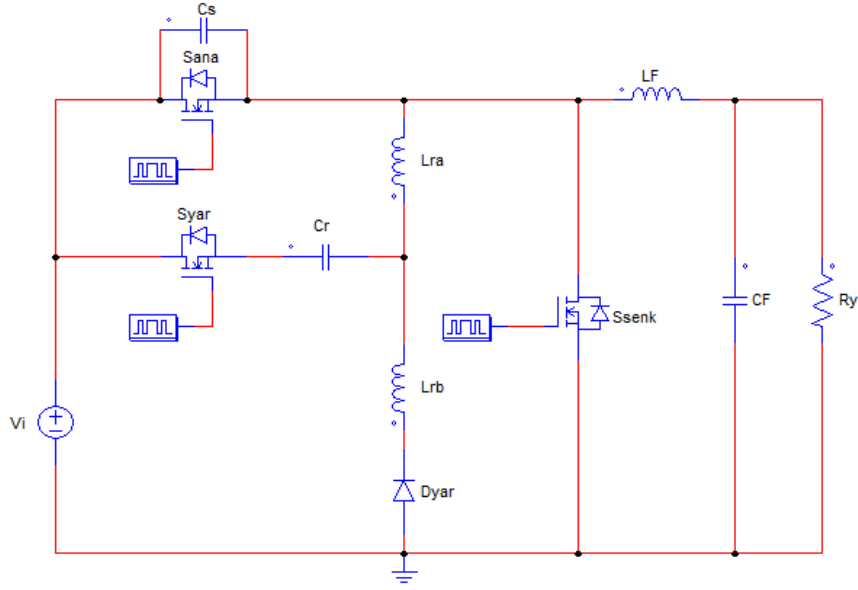
ZVT-PWM SENKRON DÜŞÜRÜCÜ DÖNÜŞTÜRÜCÜ DEVRESİ

5.1 Giriş

Bu tezde, PWM senkron düşürücü dönüştürücü devresi için yeni bir aktif bastırma hücresi sunulmuştur. Bu çalışmada temel olarak normal PWM senkron düşürücü dönüştürücü devresine ilave olarak yeni bir aktif bastırma hücresi eklemiştir. Önerilen dönüştürücüde ana anahtar ZVT ile ilettime ve ZVS ile kesime girmektedir. Bütün yarı iletken elemanlar yumuşak anahtarlama ile ilettime ve kesime girmektedir. Önerilen dönüştürücü basit yapılı ve düşük fiyatlıdır.

5.2 Çalışma Prensipleri ve Analizi

Önerilen ZVT PWM senkron düşürücü dönüştürücünün devre şeması Şekil 5.1' de verilmiştir. Sunulan aktif bastırma hücresi, temel olarak, yardımcı anahtar S_{yar} , yardımcı diyot D_{yar} , rezonans endüktansları L_{ra} ve L_{rb} ve rezonans kondansatörü C_r elemanlarından oluşmaktadır. C_s , ana anahtarın ve diğer elemanların parasitik kondansatörlerini temsil etmektedir.



Şekil 5.1 Önerilen ZVT PWM senkron düşürücü dönüştürücü devre şeması.

Önerilen dönüştürücünün bir anahtarlama periyodu esnasındaki kararlı durum analizini kolaylaştırmak için, aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

- Giriş gerilimi V_i sabittir.
- Çıkış gerilimi V_0 sabittir veya çıkış kondansatörü C_F yeterince büyüktür.
- Çıkış akımı I_0 sabittir veya ana endüktans L_F yeterince büyüktür.
- Yarı iletken elemanlar ve rezonans devreleri idealdir.
- Ana endüktans L_F rezonans endüktansları L_{ra} ve L_{rb} 'den çok büyüktür.
- Bütün diyotların ters toparlanma süreleri ihmal edilir.

5.3 Çalışma Aralıkları

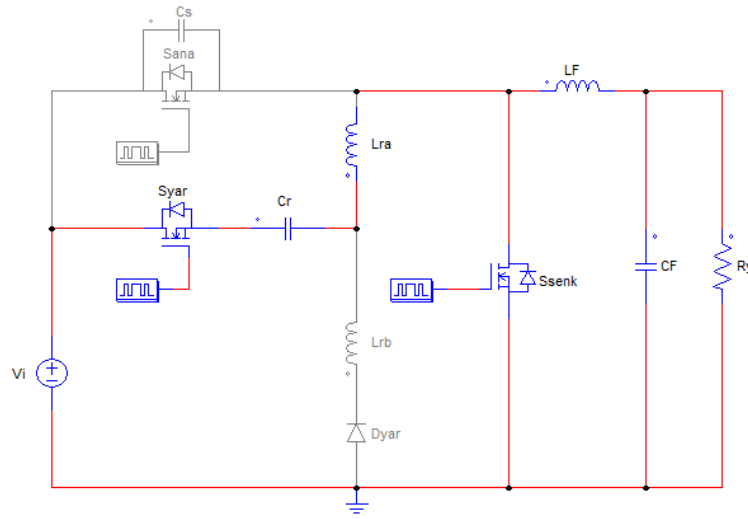
Aralık 1

Bu aralığın başında S_{senk} anahtarının diyotu çıkış akımını geçirmektedir. C_r , kondansatörünün başlangıç rezonans devre elemanlarına bağlıdır. S_{yar} , anahtarına kontrol sinyalinin uygulanmasıyla birlikte bu aralık başlar. C_r ve L_{ra} arasında bir rezonans başlar. Oluşan rezonans ile endüktans akımı sıfırdan I_0 değerine artarken kondansatör gerilimi bir miktar düşer. Endüktans akımının I_0 değerine erişmesiyle birlikte S_{senk} anahtar diyotunun akımı sıfıra düşer ve sıfır akım altında (ZCS) kesime

girer. S_{yar} , anahtarı seri rezonans endüktansından dolayı sıfır akım altında (ZCS) ile iletme girer.

$$i_{Lra}(t) = \frac{2\sqrt{C_r} V_i \sin\left(\frac{t}{\sqrt{C_r} \sqrt{L_{ra}}}\right)}{\sqrt{L_{ra}}} \quad (5.1)$$

$$v_{Cr}[t] = V_i - 2V_i \cos\left[\frac{t}{\sqrt{C_r} \sqrt{L_{ra}}}\right] \quad (5.2)$$



Şekil 5.2 Aralık 1'e ait eşdeğer devre şeması

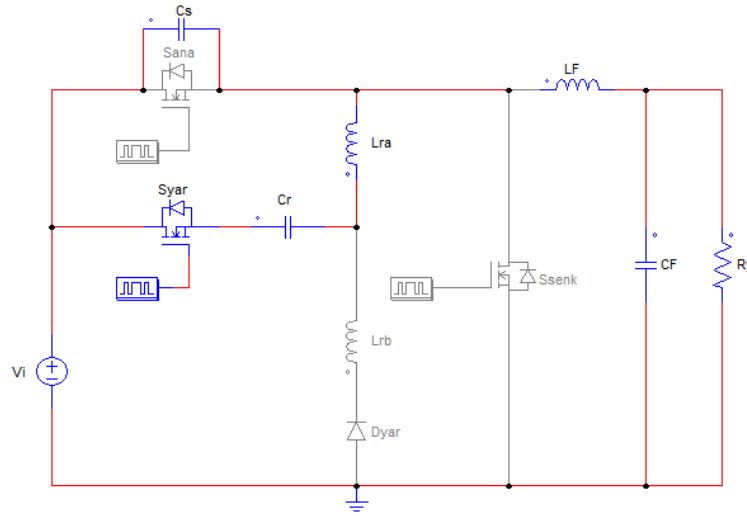
Aralık 2

S_{senk} , anahtar diyotunun akımının sıfıra düşmesiyle birlikte bu aralık başlar. Çıkış akımı I_0 altında S_{ana} anahtarının parasitik kondansatörü ile C_r ve L_{ra} arasında bir rezonans başlar. Bu aralıkta C_r kondansatör geriliminin sabit kaldığı kabul edilebilir. S_{ana} uçlarındaki gerilimin sıfıra düşmesiyle birlikte bu aralık sonra erer.

$$i_{sen}[t] = \frac{2C_r I_{Lra} + 2C_r I_{Lra} \cosh\left[\frac{(C_r + C_s)t}{\sqrt{-C_r C_s (C_r + C_s) L_{ra}}}\right] + 3\sqrt{-C_r C_s (C_r + C_s) L_{ra}} V_i \sinh\left[\frac{(C_r + C_s)t}{\sqrt{-C_r C_s (C_r + C_s) L_{ra}}}\right]}{2(C_r + C_s) L_{ra}} \quad (5.3)$$

$$v_{C_r}[t] = -\frac{1}{2C_r(C_r + C_s)^2} (C_r(C_r + C_s)(-2I_o t + C_r V_i - 2C_s V_i) + 3C_r C_s(C_r + C_s)V_i \text{Cosh}\left[\frac{(C_r + C_s)t}{\sqrt{-C_r C_s(C_r + C_s)L_{ra}}}\right] - 2C_s I_o \sqrt{-C_r C_s(C_r + C_s)L_{ra}} \text{Sinh}\left[\frac{(C_r + C_s)t}{\sqrt{-C_r C_s(C_r + C_s)L_{ra}}}\right]) \quad (5.4)$$

$$v_{C_s}[t] = -\frac{1}{2(C_r + C_s)^2} ((C_r + C_s)(-2I_o t + C_r V_i - 2C_s V_i) - 3C_r(C_r + C_s)V_i \text{Cosh}\left[\frac{(C_r + C_s)t}{\sqrt{-C_r C_s(C_r + C_s)L_{ra}}}\right] + 2I_o \sqrt{-C_r C_s(C_r + C_s)L_{ra}} \text{Sinh}\left[\frac{(C_r + C_s)t}{\sqrt{-C_r C_s(C_r + C_s)L_{ra}}}\right]) \quad (5.5)$$



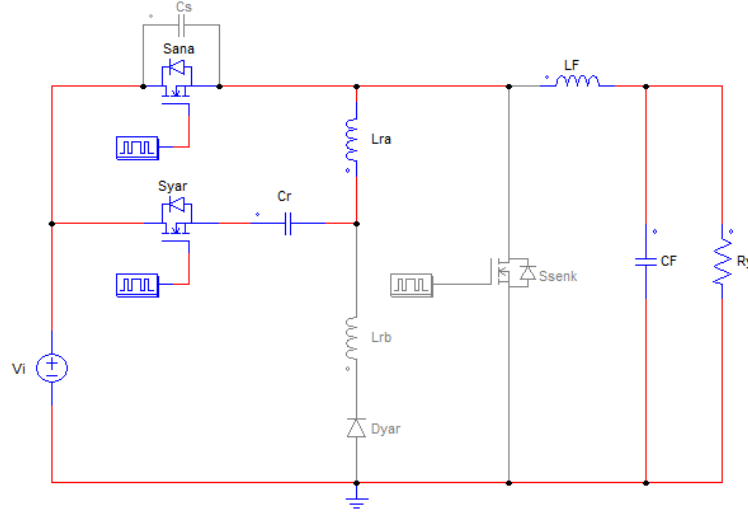
Şekil 5.3 Aralık 2'ye ait eşdeğer devre şeması

Aralık 3

C_s , geriliminin 0 olmasıyla S_{ana} anahtarının diyotu iletme girer ve bu aralık başlar. Diyot endüktans akımının I_0 'den fazla olan kısmını geçirir. Bu aralık ana anahtarın ZVT süresine eşittir. S_{ana} , anahtarının kontrol sinyali bu aralık içerisinde uygulanır. L_{ra} , rezonans endüktans akımı maksimum değerine ulaştığında C_r kondansatör uçlarındaki gerilim sıfır olur. L_{ra} , rezonans endüktans akımının I_0 'a ve diyot akımının 0'a düşmesiyle bu aralık sona erer.

$$i_{L_{ra}}[t] = \frac{4i_{L_{ra}0}\sqrt{L_{ra}} \text{Cos}\left[\frac{t}{\sqrt{C_r L_{ra}}}\right] + \sqrt{C_r} V_i \text{Sin}\left[\frac{t}{\sqrt{C_r L_{ra}}}\right]}{4\sqrt{L_{ra}}} \quad (5.6)$$

$$v_{Cr}[t] = \frac{-\sqrt{C_r} V_i \cos\left[\frac{t}{\sqrt{C_r} \sqrt{L_{ra}}}\right] + 4i_{L_{ra}0} \sqrt{L_{ra}} \sin\left[\frac{t}{\sqrt{C_r} \sqrt{L_{ra}}}\right]}{4\sqrt{C_r}} \quad (5.7)$$



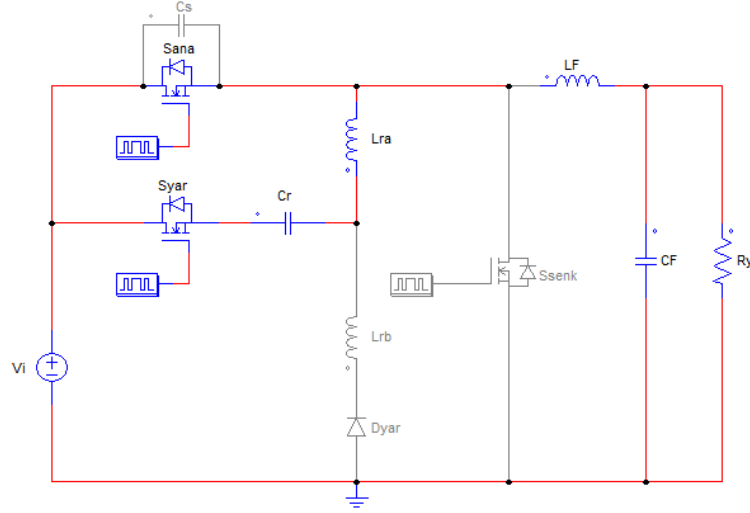
Şekil 5.4 Aralık 3'e ait eşdeğer devre şeması

Aralık 4

C_r , kondansatör uçlarındaki gerilimin bir önceki aralıkta yön değiştirmiş ve L_{ra} rezonans endüktans akımı azalmaya devam etmektedir. Sana anahtarının ZVT ile iletme girmesiyle birlikte içinden geçen akımı rezonans ile artırır. C_r , kondansatör uçlarındaki gerilimin V_i 'ye ulaşmasıyla birlikte D_{yar} diyotu ZVS ve ZCS ile iletme girer ve bu aralık sona erer.

$$i_{L_{ra}}[t] = \frac{4I_o \sqrt{L_{ra}} \cos\left[\frac{t}{\sqrt{C_r} \sqrt{L_{ra}}}\right] - 3\sqrt{C_r} V_i \sin\left[\frac{t}{\sqrt{C_r} \sqrt{L_{ra}}}\right]}{4\sqrt{L_{ra}}} \quad (5.8)$$

$$v_{Cr}[t] = \frac{3\sqrt{C_r} V_i \cos\left[\frac{t}{\sqrt{C_r} \sqrt{L_{ra}}}\right] + 4I_o \sqrt{L_{ra}} \sin\left[\frac{t}{\sqrt{C_r} \sqrt{L_{ra}}}\right]}{4\sqrt{C_r}} \quad (5.9)$$



Şekil 5.5 Aralık 4'e ait eşdeğer devre şeması

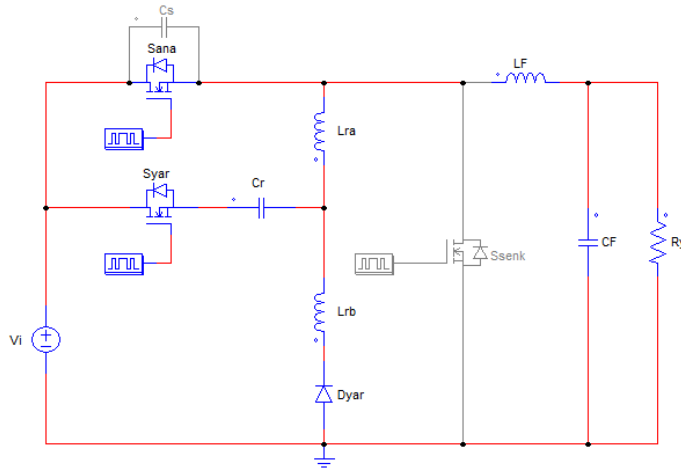
Aralık 5

D_{yar} , diyotunun iletme girmesiyle birlikte L_{rb} endüktansından geçen akım artmaya ve L_{ra} endüktansından geçen akım düşmeye devam eder. L_{ra} ve L_{rb} endüktans akımlarının eşit olduğunda C_r kondansatör uçlarındaki gerilim maksimum değerine ulaşır. L_{ra} ve L_{rb} endüktans akımları eşit olduğunda S_{yar} anahtarından geçen akım sıfıra düşer ve gövde diyotu iletme girer.

$$i_{L_{ra}}[t] = \frac{1}{L_{ra}(L_{ra} + L_{rb})^2} (L_{ra}(L_{ra} + L_{rb})(i_{L_{ra0}}L_{ra} - tVi) + i_{L_{ra0}}L_{ra}L_{rb}(L_{ra} + L_{rb})\text{Cosh}\left[\frac{(L_{ra} + L_{rb})t}{\sqrt{-C_r L_{ra} L_{rb}(L_{ra} + L_{rb})}}\right] - L_{rb}\sqrt{-C_r L_{ra} L_{rb}(L_{ra} + L_{rb})}Vi\text{Sinh}\left[\frac{(L_{ra} + L_{rb})t}{\sqrt{-C_r L_{ra} L_{rb}(L_{ra} + L_{rb})}}\right]) \quad (5.10)$$

$$i_{L_{rb}}[t] = \frac{1}{(L_{ra} + L_{rb})^2} \left(\begin{aligned} & \left((L_{ra} + L_{rb})(i_{L_{ra0}}L_{ra} - tVi) - i_{L_{ra0}}L_{ra}(L_{ra} + L_{rb})\text{Cosh}\left[\frac{(L_{ra} + L_{rb})t}{\sqrt{-C_r L_{ra} L_{rb}(L_{ra} + L_{rb})}}\right] \right) \\ & + \sqrt{-C_r L_{ra} L_{rb}(L_{ra} + L_{rb})}Vi\text{Sinh}\left[\frac{(L_{ra} + L_{rb})t}{\sqrt{-C_r L_{ra} L_{rb}(L_{ra} + L_{rb})}}\right] \end{aligned} \right) \quad (5.11)$$

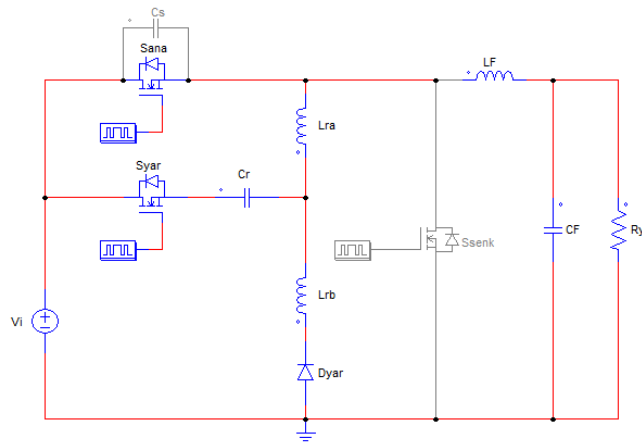
$$v_{C_r}[t] = \frac{C_r L_{ra} Vi + C_r L_{rb} Vi\text{Cosh}\left[\frac{(L_{ra} + L_{rb})t}{\sqrt{-C_r L_{ra} L_{rb}(L_{ra} + L_{rb})}}\right] + i_{L_{ra0}}\sqrt{-C_r L_{ra} L_{rb}(L_{ra} + L_{rb})}\text{Sinh}\left[\frac{(L_{ra} + L_{rb})t}{\sqrt{-C_r L_{ra} L_{rb}(L_{ra} + L_{rb})}}\right]}{C_r(L_{ra} + L_{rb})} \quad (5.12)$$



Şekil 5.6 Aralık 5'e ait eşdeğer devre şeması

Aralık 6

S_{ana} , anahtarının içinden geçen akım artmaya devam eder. L_{ra} , endüktansından geçen akımın sıfıra düşmesiyle birlikte S_{ana} anahtarının içinden geçen akım I_0 değerine ulaşır. L_{rb} endüktans akımı artmaya devam eder. S_{yar} , anahtarının gövde diyotu iletimdedir ve L_{ra} ile L_{rb} endüktans akımlarının farkını geçirmeye devam eder. L_{ra} endüktans akımı rezonans ile ters yönde artmaya başlar. C_r , kondansatör gerilimi ve L_{rb} endüktans akımı azalmaya başlar. L_{rb} endüktans akımının sıfır olmasıyla birlikte bu aralık sona erer. D_{yar} diyodu ZCS ile kesime girer. Bu aralığın matematiksel denklemleri 5. aralık ile aynıdır.



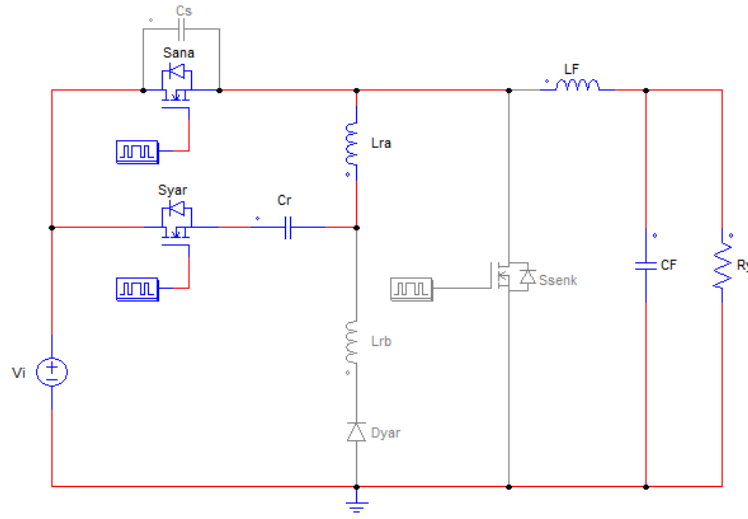
Şekil 5.7 Aralık 6'ya ait eşdeğer devre şeması

Aralık 7

S_{ana} , anahtarının içinden çıkış akımı ve rezonans akımı geçer. L_{ra} endüktans akımı ters yönde maksimum değerine ulaştığında C_r kondansatör uçlarındaki gerilim ilk olarak sifıra düşer ve daha sonra yön değiştirir. L_{ra} endüktans akımının sifıra düşmesiyle birlikte S_{yar} anahtarının gövde diyotu kesime girer ve bu aralık sona erer. S_{yar} , anahtarı ZCT ile kesime girmiştir.

$$i_{Lra}[t] = i_{Lra0} \cos \left[\frac{t}{\sqrt{C_r} \sqrt{L_{ra}}} \right] + \frac{\sqrt{C_r} V_i \sin \left[\frac{t}{\sqrt{C_r} \sqrt{L_{ra}}} \right]}{4 \sqrt{L_{ra}}} \quad (5.13)$$

$$v_{Cr}[t] = -\frac{1}{4} V_i \cos \left[\frac{t}{\sqrt{C_r} \sqrt{L_{ra}}} \right] + \frac{i_{Lra0} \sqrt{L_{ra}} \sin \left[\frac{t}{\sqrt{C_r} \sqrt{L_{ra}}} \right]}{\sqrt{C_r}} \quad (5.14)$$

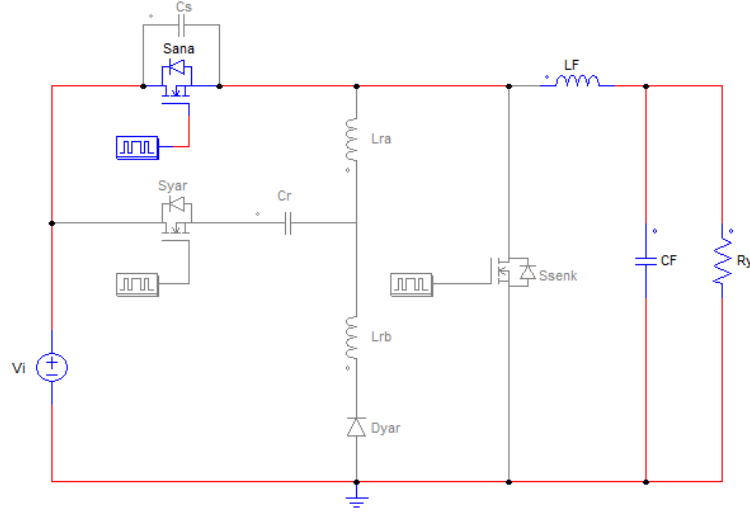


Şekil 5.8 Aralık 7'ye ait eşdeğer devre şeması

Aralık 8

Bu aralık normal PWM dönüştürücüde anahtarın iletim aralığına eşdeğerdir. Sana anahtarı iletimdedir.

$$I_{Sana} = I_0 \quad (5.15)$$

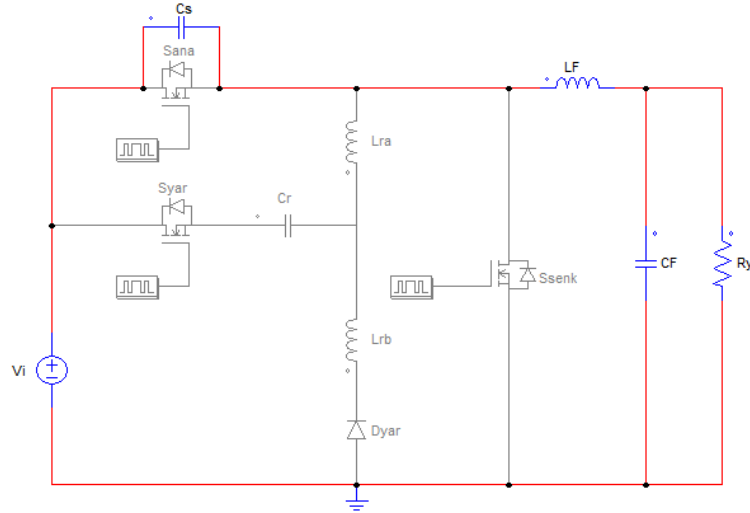


Şekil 5.9 Aralık 8'e ait eşdeğer devre şeması

Aralık 9

S_{ana} anahtarının kontrol sinyalinin kesilmesiyle birlikte C_s kondansatörü çıkış akımı ile lineer olarak şarj olur. C_s kondansatör gerilimi giriş gerilimine ulaştığında S_{senk} anahtarının diyodu iletme girer. S_{ana} anahtarı yaklaşık olarak ZVS ile kesime girer.

$$v_{Cs}[t] = \frac{I_o t}{C_s} \quad (5.16)$$

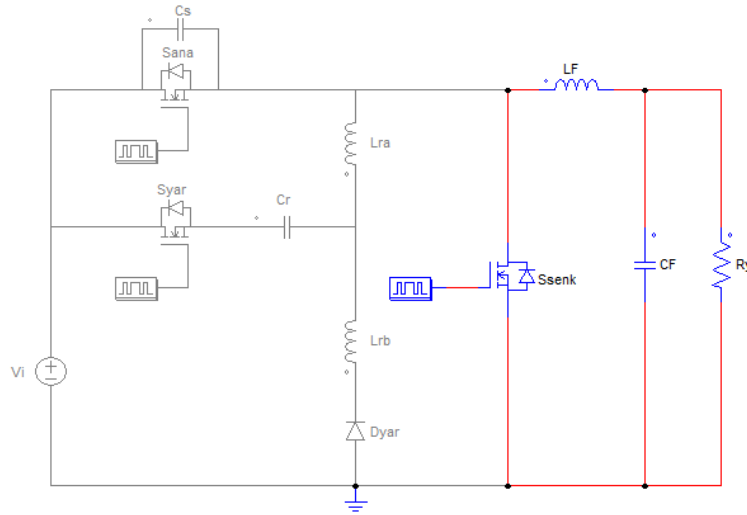


Şekil 5.10 Aralık 9'a ait eşdeğer devre şeması

Aralık 10

Bu aralık normal PWM dönüştürücüde senkron anahtarın diyotunun iletim aralığına eşittir. Diyot yaklaşık olarak ZVS altında iletme girer ve S_{senk} anahtarına kontrol sinyali uygulanır.

$$I_{Ssenk} = I_0 \quad (5.17)$$



Şekil 5.11 Aralık 10'a ait eşdeğer devre şeması

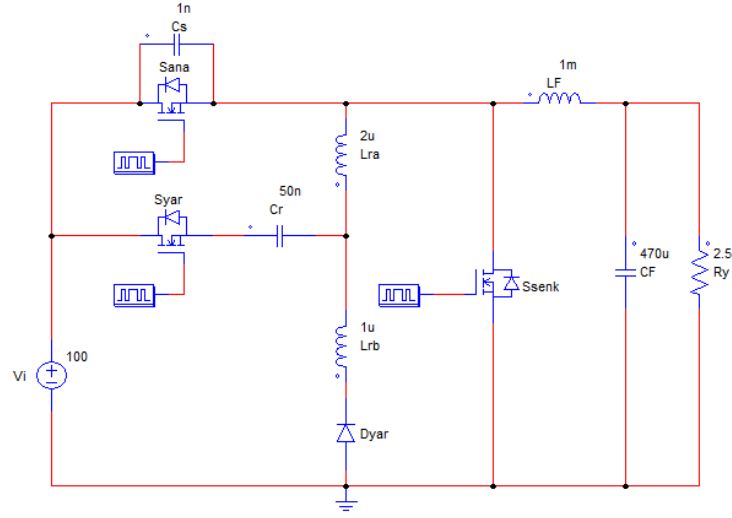
Devrede kullanılan yarı iletken elemanların anahtarlama durumları Çizelge 5.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.1 Devrede kullanılan elemanların anahtarlama durumları

Eleman	İletime Girme	Kesime Girme
Sana	ZVT	ZVS
Syar	ZCS	ZCT
Ssenk	ZVS	ZVS,ZCS
Dyar	ZCS	ZCS

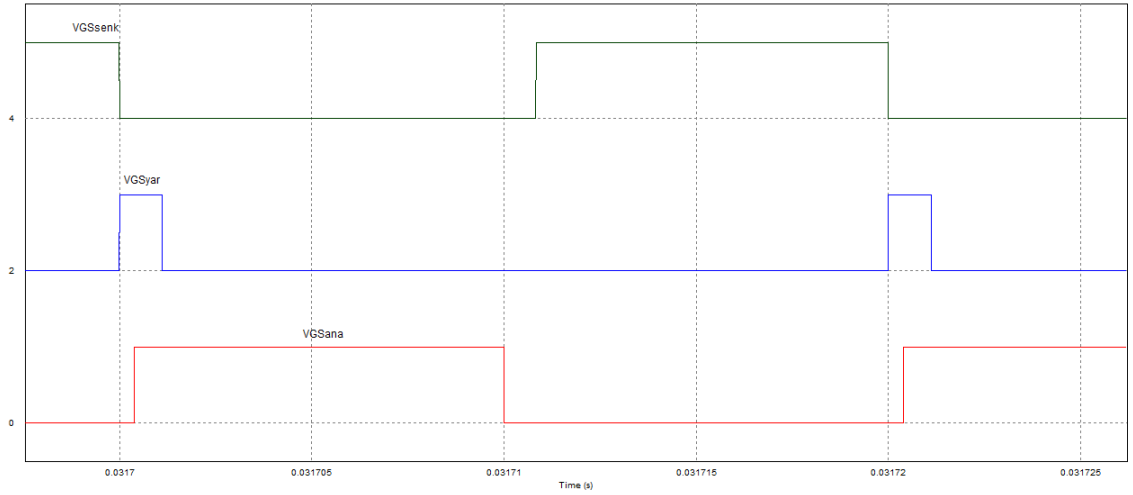
5.4 Simülasyon Sonuçları

Sunulan ZVT PWM senkron düşürücü dönüştürücünün çalışma prensibi ve teorik analizini doğrulamak için 1 kW ve 50 kHz'lik bir dönüştürücü prototipi PSİM simülasyon programında gerçekleştirilmiştir. C_r , rezonans kondansatörü 50nF, L_{ra} rezonans endüktansı 2uH, L_{rb} rezonans endüktansı 1uH olarak seçilmiştir. C_s , kondansatörü S_{ana} , anahtarının parasitik kondansatörü olarak kabul edilmiş ve değeri 1nF olarak seçilmiştir. PSİM programında gerçekleştirilen devre şeması Şekil 5.12 de verilmiştir.



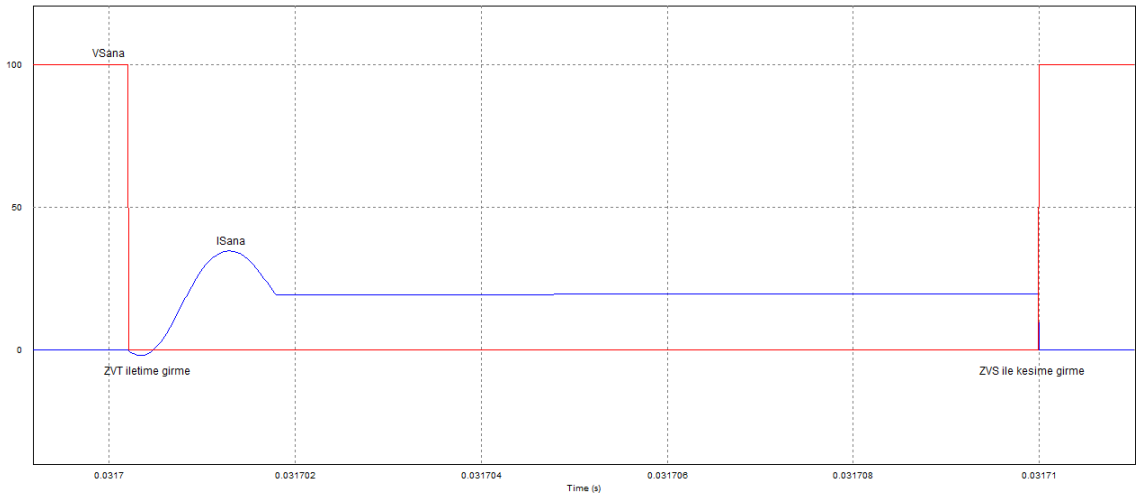
Şekil 5.12 PSİM de gerçekleştirilen devre şeması.

Devrede bulunan anahtarlara ait kontrol sinyalleri Şekil 5.13'te verilmiştir. Düşürücü dönüştürücünün ana anahtarı periyodun %50'sinde iletimde olacak şekilde seçilmiştir. Bu durumda çıkışta ortalama olarak 50 V'luk bir DC gerilim elde edilmiştir. Çalışma periyodunun geri kalan kısmında senkron anahtar kontrol sinyali uygulanmıştır. Yardımcı anahtarın kontrol sinyali ise anahtara sinyal uygulanmadan önce verilmiştir. Yardımcı anahtar diyotunun iletime olduğu aralık içerisinde herhangi bir anda yardımcı anahtarın kontrol sinyali kesilebilir. Yardımcı anahtar periyot içerisinde çok kısa bir süre iletimdedir. Dönüştürücü periyodun büyük bir kısmında normal senkron düşürücü dönüştürücü olarak çalışmaktadır.



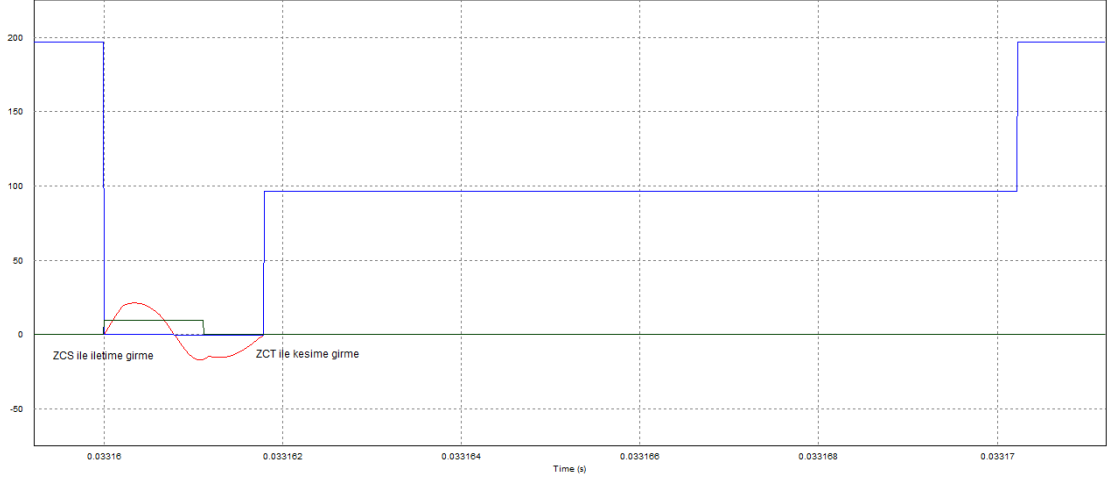
Şekil 5.13 Anahtarların kontrol sinyalleri.

Şekil 5.14'te ana anahtarın gerilim ve akımı değişimleri verilmiştir. Bu değişimlerden ana anahtar S_{ana} 'nın uçlarındaki gerilim sıfırda iken yani dahi diyotu iletimde iken kontrol sinyalinin uygulandığı, böylece ana anahtarın ZVT ile iletime girdiği görülmektedir. Ana anahtardan çok kısa bir süreliğine çıkış akımına ilave olarak rezonans akımının geçtiği görülmektedir. PWM çalışma tarafından belirlenen sürenin sonunda kontrol sinyali kesildiğinde ana anahtarın uçlarındaki C_s kondansatörü sayesinde yaklaşık olarak ZVS ile kesime girdiği görülmektedir. Ana anahtar uçlarında herhangi bir gerilim stresinin oluşmadığı görülmektedir.



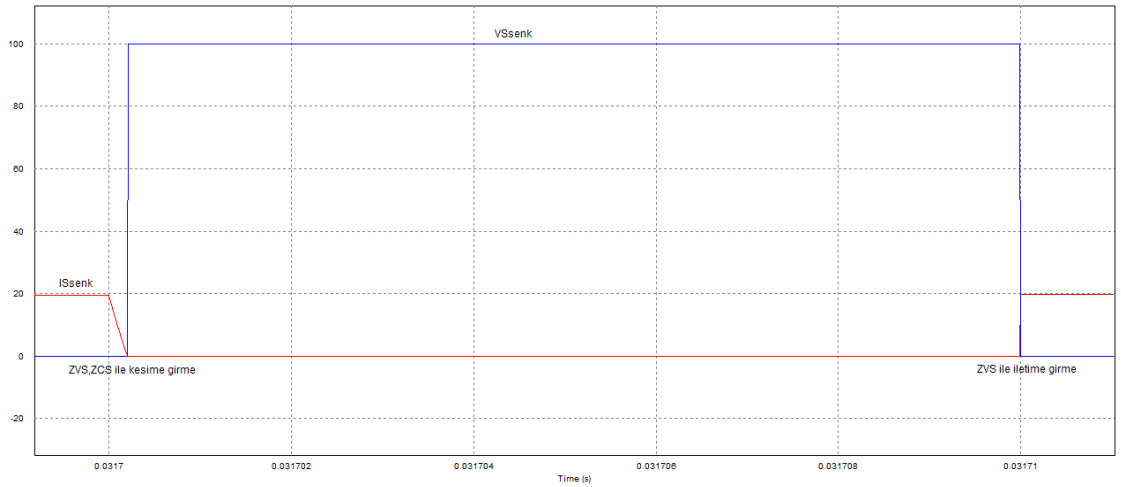
Şekil 5.14 Ana anahtarın akım ve gerilim değişimleri.

Şekil 5.15'te yardımcı anahtarın gerilim ve akımı değişimleri verilmiştir. Değişimlerden görüldüğü gibi yardımcı anahtarın kontrol sinyali ana anahtarın ZVT iletime girme işlemlerinden önce verilmektedir. Yardımcı anahtarın yaklaşık ZCS ile iletime girdiği görülmektedir. Kesime girme anında ise, ZCT ile kesime girerken ZCT işleminde yaklaşık ZCS ile kesime girmektedir.

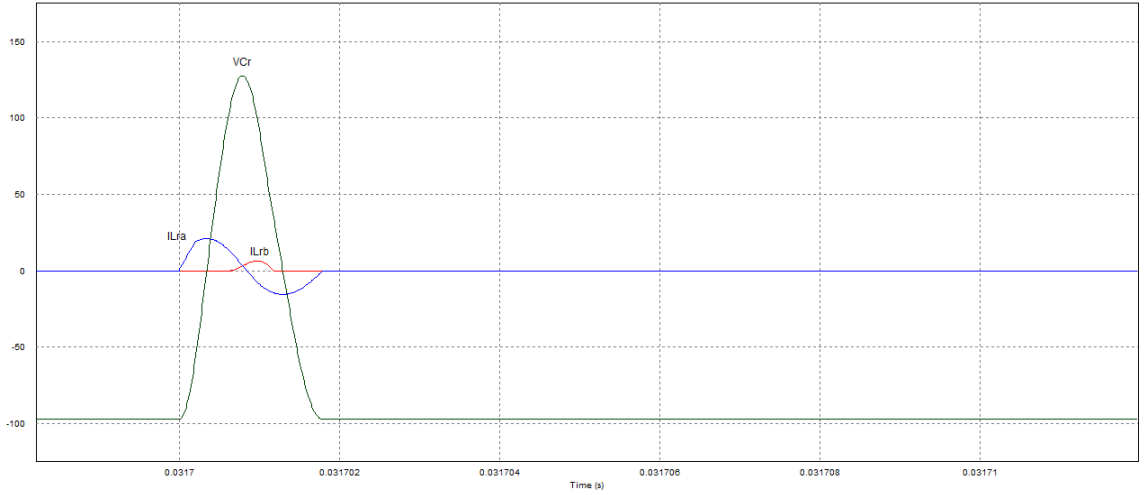


Şekil 5.15 Yardımcı anahtarın akım ve gerilim değişimleri

Şekil 5.16'da senkron anahtarın gerilim ve akımına ait değişimler verilmiştir. Değişimlerden ZVS ve ZCS ile iletime ve ZVS ile kesime girdiği görülmektedir. Şekil 5.17'de ise rezonans endüktans akımları ile rezonans kondansatör gerilimi görülmektedir. Kondansatör geriliminin bir rezonans periyodunun sonunda tekrar ilk değerine döndüğü görülmektedir.

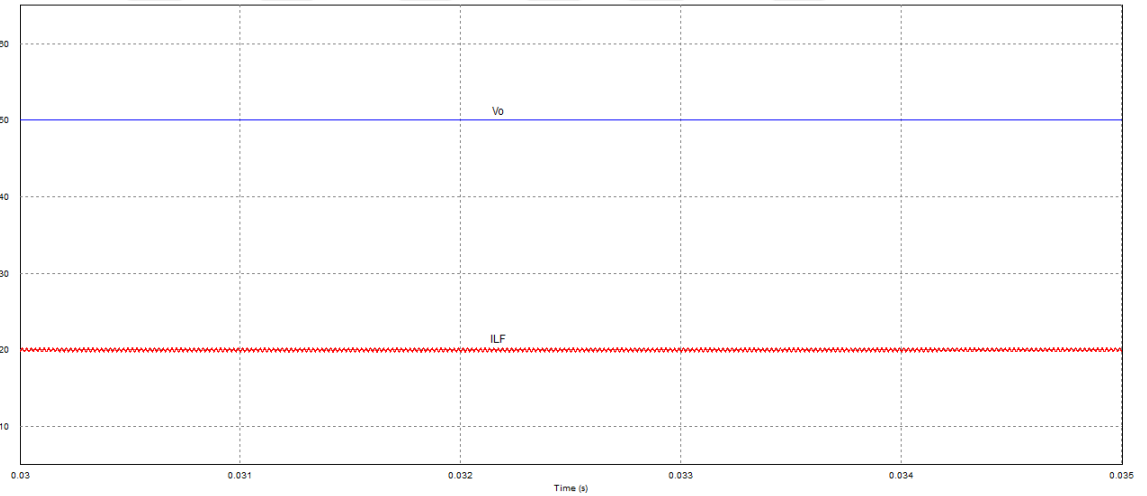


Şekil 5.16 Senkron anahtarın akım ve gerilim değişimleri



Şekil 5.17 Rezonans endüktans akımları ve rezonans kondansatör gerilimi.

Şekil 5.18’de ise çıkış gerilim ve akımının değişimleri verilmiştir. Seçilen doluluk oranı ile dönüştürücünü çalışması durumunda çıkış geriliminin ortalama olarak 50 V’a oturduğu görülmektedir. Dönüştürücü 1 kW’lık bir çıkış gücü için çalıştırıldığından çıkış akımı ortalama olarak 20 A değerindedir.



Şekil 5.18 Çıkış gerilim ve akım değişimleri.

5.5 Önerilen Dönüştürücünün Özellikleri

- 1) Ana anahtarın ZVT ile ilettime ve ZVS ile kesime girmesi ve yardımcı anahtarın ZCS ile ilettime ve ZCT ile kesime girmesi sağlanır.
- 2) Ana diyot ile diğer diyotların tamamı yumuşak anahtarlama ile çalışır.

- 3) Ana diyot üzerinde ek bir akım stresi oluşmaz.
- 4) Ana ve yardımcı yarı iletkenlerin hiçbirisinde ilave bir gerilim stresi oluşmaz.
- 5) Ana akım yolunda ilave bir eleman mevcut değildir.
- 6) ZVT işlemindeki geçici rejim aralıkları toplam süresinin çok düşük olduğu söylenebilir.
- 7) Yumuşak anahtarlama geniş bir hat gerilimi ve yük akımı aralığında korunur.

Sonuç olarak, elde edilen bütün simülasyon sonuçları, bu bölümde sunulan dönüştürücü için öngörülen çalışma prensibi ve teorik analizini tam olarak doğruladığı görülmüştür. Ana anahtarın anahtarlama işlemleri mükemmel olarak sıfır gerilim altında ZVT ile yapılmıştır. Ayrıca diğer bütün yarı iletken elemanların tam veya yaklaşık ZVS ve/veya ZCS altında iletme ve kesime girdiği gözlenmiştir.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, ZVT-PWM senkron düşürücü dönüştürücü devresi için yeni bir aktif bastırma hücresi sunulmuştur. Çalışmada temel olarak normal PWM senkron düşürücü dönüştürücü devresine ilave olarak yeni bir aktif bastırma hücresi eklenmiştir. Önerilen dönüştürücüde ana anahtar ZVT ile ilettime ve ZVS ile kesime girmektedir.

Tezde ilk olarak yumuşak anahtarlama teknikleri ve bastırma hücreleri, sonra DC-DC dönüştürücüler ve senkron DC-DC dönüştürücüler ele alınmış ve daha sonra literatürde yer alan ZVT PWM ve ZVT-ZCT PWM dönüştürücü incelenmiş, yeni bir rezonans devresi önerilmiştir.

Dönüştürücü-1'de ana anahtarın ilettime ve kesime girmesi tam olarak sıfır gerilimde sağlanırken, başlıca dezavantajı ana akım yolu üzerinde bulunan endüktanstır. Ana anahtar iletimde iken sürekli olarak bu endüktans üzerinden ana akım geçmektedir. Dönüştürücü-2'de ise ana anahtarın ilettime ve kesime girmesi yaklaşık olarak sıfır gerilimde sağlanmaktadır. Ana anahtar ve yardımcı anahtar ek bir gerilim stresine maruz kalmazken, ana anahtar üzerinde hafifçe yükselen bir akım stresi mevcuttur fakat yardımcı anahtar üzerindeki akım stresi güvenli sınırlar içerisinde dir.

Önerilen dönüştürücüde ana anahtar ZVT ile ilettime ve ZVS ile kesime girmektedir. Bütün yarı iletken elemanlar yumuşak anahtarlama ile ilettime ve kesime girmektedir. Ana diyot üzerinde ek bir akım stresi oluşmaz ve ayrıca, ana ve yardımcı yarı iletkenlerin hiçbirisinde ilave bir gerilim stresi oluşmamaktadır. Önerilen dönüştürücü basit yapılı ve düşük fiyatlıdır.

Geliştirilen dönüştürücünün etraflı bir analizi yapılmıştır. Dönüştürücünün çalışma prensibi ve teorik analizi, 1 kW ve 50 kHz'lik bir prototip ile tam olarak doğrulanmıştır. Ana anahtarın tam olarak sıfır gerilim altında ilettime ve yaklaşık olarak sıfır gerilimde kesime girdiği ayrıca, yardımcı anahtarın ve senkron anahtarın da yumuşak bir şekilde ilettime ve kesime girdiği görülmüştür. Geliştirilen rezonans devresinin ve ZVT PWM senkron düşürücü dönüştürücünün yüksek güç ve yüksek frekans uygulamalarında kullanılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmanın, daha sonra yapılacak olan benzer çalışmalar için iyi bir referans olması beklenmektedir. Gelecekteki benzer çalışmaların, frekans ve güç ile güç yoğunluğu daha yüksek, yapısı daha basit ve daha ucuz olan DC-DC dönüştürücülerin geliştirilmesi şeklinde süreceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Aksoy İ., (2007). Yeni Bir Yumuşak Anahtarlama DC-DC PWM Dönüştürücünün Tasarım, Analiz ve Uygulaması, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [2] Altıntaş N., (2007). Yumuşak Anahtarlama Dc-Dc Dönüştürücülerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] Bakan, A.F., Bodur,H., ve Aksoy, İ., (2005), "A Novel ZVT-ZCT PWM DC-DC Converter", 11th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE2005), Dresden, 1-8.
- [4] Bodur, H., Aksoy, İ., ve Bakan, A.F., (2005), "PWM DC-DC Dönüştürücülerde ZVT ve ZCT Tekniklerine Genel Bir Bakış", Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi, İstanbul, 390-393.
- [5] Bodur, H., Aksoy, İ., ve Akın, B., (2002), "DC-DC Dönüştürücülerde Yumuşak Anahtarlama Teknikleri", Kaynak Elektrik, 158, 100-108.
- [6] Bodur, H., Aksoy, İ., ve Akın, B., (2002), "Anahtarlama ve Rezonanslı Dönüştürücüler", Kaynak Elektrik, 160, 104-112.
- [7] Bodur, H., ve Bakan, A.F., (2002), "A New ZVT-PWM DC-DC Converter," IEEE Trans. on Power Electron., 17, 40-47.
- [8] Bodur, H., ve Bakan, A.F., (2004), "A New ZVT-ZCT-PWM DC-DC Converter," IEEE Trans.Power Electron., 19, 676-684.
- [9] Hua, G., Leu, C.S., Jiang, Y., Lee, F.C.Y., (1994), "Novel Zero-Voltage-Transition PWM Converters", IEEE Trans. on Power Electron., 9 (2): 213-219.
- [10] Hua, G., Yang, E.X., Jiang, Y., Lee, F.C.Y., (1994), "Novel Zero-Current Transition PWM Converters", IEEE Trans. on Power Electron., 9 (6): 601-606.
- [11] Ferraro, A., (1982), "An Overview Of Low-Loss Snubber Technology For Transistor Converters", IEEE Power Electron. Spec. Conf., 466-477.
- [12] A. K. Panda, ve Aroul. K., (2006). A Novel Technique to Reduce the Switching Losses in a Synchronous Buck Converter, Power Electronics, Drives and Energy Systems, PEDES '06. International Conference.

- [13] S. Pattnaik, A. K. Panda, Aroul K., K. K. Mahapatra, (2008). Experimental Validation of A Novel Zero Voltage Transition Synchronous Buck Converter, TENCON 2008 – IEEE Region 10 Conference.
- [14] Mamur A., (2012). FPGA Denetimli Düşürücü DC-DC Dönüştürücünün Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri, Elazığ.
- [15] Erdoğan A. D. ve Aydemir M. T., (2003). Paralel Bağlı Buck Türü Dc/Dc Dönüştürücülerde Dalgalanma Analizi, Elektrik -Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi
- [16] Yabancı M. O., (2012). Design Of Multiphase Synchronous Buck Converter, Yüksek Lisans Tezi, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir
- [17] Ghasemikashitaban M., (2013). Yükseltici DA/DA Dönüştürücü Devrelerde Yumuşak Anahtarlama Analizi Ve Deneysel Çalışmaları, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- [18] Cory M., (2010). Conventional And Zvt Synchronous Buck Converter Design, Analysis, And Measurement, Yüksek Lisans Tezi, B.S. Electrical Engineering Purdue University, Orlando
- [19] Zengin S., (2013). İki Aşamalı Ve Yumuşak Anahtarlama Tipi Flyback Tipi Fotovoltaik Mikro-Evirici Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [20] Kumar S. S., Panda A.K., Ramesh T., (2014) A ZVT–ZCT PWM Synchronous Buck Converter With A Simple Passive Auxiliary Circuit For Reduction Of Losses And Efficiency Enhancement, Ain Shams Engineering Journal, 491–50
- [21] Nowakowski R., & Tang N. (2007). Efficiency of synchronous versus nonsynchronous buck converter. Retrieved March 19, 2011, from www.ti.com/lit/an/slyt358/slyt358.pdf.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Muhammet Abdullah EREL
Doğum Tarihi ve Yeri : 12/08/1991 – SAKARYA
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : muhammeterel@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Fen Bilimleri Enst. Elektrik Müh. Anabilim Dalı Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programı	Yıldız Teknik Üniversitesi	-
Lisans	Elektrik Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2014
Lise		Sakarya Anadolu Lisesi	2009

YAYINLARI

Bildiri

1. **M. A. EREL**, M. GARİP, (2016). "Senkron Buck Dönüştürücülerde Sıfır Gerilimde Geçiş (ZVT) Tekniği Kullanılarak Anahtarlama Kayıplarının Azaltılması", 4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, 3-5 November 2016, Antalya.

