KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YUMUŞAK ANAHTARLAMALI EVİRİCİLER İÇİN YENİ BİR ZVT-ZCT KISMİ REZONANSLI DA HAT DEVRESİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Satılmış ÜRGÜN

Anabilim Dalı: Elektrik Mühendisliği

Danışman: Prof.Dr. Bekir ÇAKIR

KOCAELİ, 2008

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YUMUŞAK ANAHTARLAMALI EVİRİCİLER İÇİN YENİ BİR ZVT-ZCT KISMİ REZONANSLI DA HAT DEVRESİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Satılmış ÜRGÜN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 08 Temmuz 2008

Tezin Savunulduğu Tarih: 01 Ağustos 2008

Tez Danışmanı
Prof.Dr. Bekir ÇAKIR
(.....)

Üye
Prof.Dr. Hacı BODUR
(.....)

Üye
Prof. Dr. Kadir ERKAN
(.....)

Üye
Doç.Dr. Hadi SARUL
(.....)

Üye
Prof. Dr. Nurettin ABUT
(.....)

KOCAELİ, 2008

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Son yıllarda, modern yarıiletken güç elemanlarındaki teknolojik gelişmeler çok sayıda dönüştürücü uygulamalarında birçok ilerlemeye ve yeni dönüştürücü yapılarının doğmasına neden olmuştur. Endüstride ve ticari cihazlarda en çok görülen uygulama DA gerilimini istenilen genlikte ve frekansta tek ya da çok fazlı AA gerilimine çeviren eviricilerdir. Bu alandaki gelişmeler yarıiletken güç elemanlarının gelişimiyle paralel olmuştur.

Bu uygulama alanlarında çalışma frekansının arttırılması büyük bir avantajdır. Bununla birlikte, sert anahtarlamalı çalışmalarda artan frekansla birlikte anahtarlama kayıpları ve elektromanyetik girişimler de artmaktadır. Artan frekansla birlikte anahtarlama kayıplarının artması sistemin verimini düşürmektedir. Bu sakıncaları ortadan kaldırmak için yumuşak anahtarlama yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu doktora tez çalışmasında, gerilim ara devreli evirici yapıları için geliştirilen yeni bir ZVT-ZCT kısmi rezonanslı DA hat uygulaması sunulmaktadır. Geliştirilen devre oldukça basit yapılı ve kontrolü de oldukça kolaydır. Bu çalışmanın bundan sonraki araştırmalar için faydalı olmasını dilerim.

Çalışmam süresince her aşamada desteğini gördüğüm danışman hocam Sayın Prof. Dr. Bekir ÇAKIR ‘a, tezimin her aşamasında maddi ve manevi desteğini eksik etmeyen Yrd. Doç. Dr. Tarık ERFİDAN’a, değerli fikirleriyle ilham kaynağı olan Sayın Prof. Dr. Hacı BODUR’a ve tezin yazımındaki yardımlarından dolayı Elk. Yük. Müh. Nasır ÇORUH’a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vi
SİMGELER VE KISALTMALAR vii
ÖZET viii
İNGİLİZCE ÖZET ix

BÖLÜM 1. GİRİŞ 1

BÖLÜM 2. YUMUŞAK ANAHTARLAMA TEKNİKLERİ 6
2.1. Giriş 6
2.2. Yumuşak Anahtarlama Kavramı 6
2.3. Yumuşak Anahtarlama Tekniklerinin Sınıflandırılması 9
2.3.1. Sıfır akımda anahtarlama 10
2.3.2. Sıfır gerilimde anahtarlama 10
2.3.3. Sıfır akımda geçiş 10
2.3.4. Sıfır gerilimde geçiş 11

BÖLÜM 3. YUMUŞAK ANAHTARLAMALI EVİRİCİLER 12
3.1. Giriş 12
3.2. Pasif Bastırma Hücreli Eviriciler 13
3.3. Aktif Bastırma Hücreli Eviriciler 14
3.4. Rezonans Kutuplu Eviriciler 15
3.5. Rezonans DA Hatlı Eviriciler 18
3.6. Kısmi Rezonanslı DA Hatlı Eviriciler 22

BÖLÜM 4. KISMİ REZONANSLI DA HATLI EVİRİCİLER 25
4.1. Giriş 25
4.2. İki Aktif Anahtar Kullanılan Yapılar 25
4.3. Üç Aktif Anahtar Kullanılan Yapılar 37
4.4. Dört Aktif Anahtar Kullanılan Yapılar 41

BÖLÜM 5.YUMUŞAK ANAHTARLAMALI EVİRİCİLER İÇİN YENİ BİR ZVT-ZCT KISMİ REZONANSLI DA HAT 46
5.1. Giriş 46
5.2. Tanımlar ve Kabuller 46
5.3. Devrenin Çalışma Aralıkları 47
5.4. Tasarım Kriterleri 56
5.5. Sunulan Devrenin Benzeşimi 58

BÖLÜM 6. YENİ ZVT-ZCT KIZMİ REZONANSLI DA HAT DEVRESİNİN UYGULAMASI 63
6.1. Giriş 63
6.2. Devre Şemaları 63
6.3. Kontrol Yöntemi 67
6.4. Uygulama Sonuçları 68

BÖLÜM 7. SONUÇ VE ÖNERİLER 76

KAYNAKLAR 79

ÖZGEÇMİŞ… 84

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Üç fazlı Evirici 6
Şekil 2.2. IGBT için anahtarlama karakteristikleri (a) Kesim Anahtarlaması, (b) İletim Anahtarlaması. 7
Şekil 2.3. (a) Bir anahtarlama güç elemanının kontrol sinyali ile (b) HS, (c) ZCS ile ZVS ve (d) ZCT ile ZVT çalışmalarıyla ilgili temel dalga şekilleri 9
Şekil 3.1. Yumuşak anahtarlamalı evirici yapılarının sınıflandırılması 12
Şekil 3.2. Eviriciler için pasif bastırma yapıları (a) kayıpsız bastırma, (b) R-C-D bastırma 14
Şekil 3.3. DA taraflı yumuşak-anahtarlamalı evirici 15
Şekil 3.4. AA taraflı yumuşak-anahtarlamalı evirici 15
Şekil 3.5. Rezonans kutuplu evirici(RPI) ayağı 16
Şekil 3.6. (RPI) faz ayağının dalga şekilleri 17
Şekil 3.7. RPI'daki V_f gerilimi ve yük akımı 17
Şekil 3.8. Rezonans DA hatlı evirici 18
Şekil 3.9. DPM kullanılarak gerçekleştirilen hat-hat gerilim sentezi 19
Şekil 3.10. RDCLI eviricisinin bir rezonans darbesindeki eşdeğer devresi 19
Şekil 3.11. RDCL eviricisinin tipik dalga şekilleri(I_x=0). 20
Şekil 3.12. Pasif kenetlemeli RDCLI 21
Şekil 3.13. Aktif kenetlemeli RDCLI 21
Şekil 3.14. Gerilim kenetlemeli paralel rezonans dönüştürücü 22
Şekil 3.15. VCPRC'in tipik dalga şekli 23
Şekil 4.1. Kısmi Rezonanslı DA-hatlı evirici yapısı 26
Şekil 4.2. Kapasite akımı ve DA hat geriliminin dalga şekilleri 28
Şekil 4.3. İki anahtarlı gerilim ara devreli evirici 28
Şekil 4.4. Çalışma aralıkları 30
Şekil 4.5. Eşdeğer paralel kısmi rezonans devresi 31
Şekil 4.6. Eşdeğer devreye ait akım ve gerilim şekilleri 33
Şekil 4.7. Eşdeğer devreye ait çalışma aralıkları 36
Şekil 4.8. SIS devresinin modeli 37
Şekil 4.9. Çalışma aralıkları 38
Şekil 4.10. Dört anahtarlı eşdeğer paralel kısmi rezonans devresi 41
Şekil 4.11. DA hat akımı negatif olma durumu gerilim ve akım dalga şekilleri 42
Şekil 4.12. DA hat akımı pozitif olma durumu için çalışma aralıkları 43
Şekil 4.13. DA hat akımı negatif olma durumu akım ve gerilim dalga şekilleri 44
Şekil 4.14. DA hat akımı negatif olma durumu için çalışma aralıkları 45
Şekil 5.1. Yeni ZVT-ZCT kısmi rezonanslı DA-hat evirici 46
Şekil 5.2. Sunulan devrede çalışma aralıklarının eşdeğer devre şemaları 48
Şekil 5.3. Sunulan devrede çalışma aralıkları ile ilgili temel dalga şekilleri 50
Şekil 5.4. Benzeşimi yapılan evirici devresi 58

Şekil 5.5. (a) T_1 anahtarlama işareti, (b) T_2 anahtarlama işareti, (c) T_1 anahtarına ait akım, (d) T_1 anahtarına ait gerilim 58
Şekil 5.6. (a) T_2 anahtarına ait gerilim, (b) T_2 anahtarına ait gerilim, (c) DA hat gerilimi, (d) Yük akımı 59
Şekil 5.7. (a) D_2 diyotuna ait gerilim, (b) D_2 diyotuna ait akım, (c) D_F diyotuna ait gerilim, (d) D_F diyotuna ait akım … 59
Şekil-5.8. (a) C_S kapasitesine ait gerilim, (b) C_S kapasitesine ait akım, (c) L_{S1} bobinine ait gerilim, (d) L_{S1} bobinine ait akım … 60
Şekil 5.9. (a) L_{S2} bobinine ait gerilim, (b) L_{S2} bobinine ait akım, (c) sert anahtarlama için T_1 gerilimi (d) sert anahtarlama için T_1 akımı … 60
Şekil 5.10. (a) Sert anahtarlama için T_1 gerilimi, (b) sert anahtarlama için T_1 akımı, (c) sert anahtarlama için T_1 anahtarı üzerindeki güç kaybı …..... 61
Şekil 5.11. (a)Yumuşak anahtarlama için T_1 gerilimi, (b) yumuşak anahtarlama için T_1 akımı, (c) yumuşak anahtarlama için T_1 anahtarı üzerindeki güç kaybı … 61
Şekil 6.1. Yeni bir ZVT-ZCT kısmi rezonanslı DA-hat uygulamasınn devre şeması63
Şekil 6.2. Yeni bir ZVT-ZCT kısmi rezonanslı DA-hat uygulamasının devre resmi 64
Şekil 6.3. Kontrol Devresi 65
Şekil 6.4. Besleme Devresi 66
Şekil 6.5. Sürücü Devre Şeması..... 66
Şekil 6.6. MPLAB yazılımı ile anahtarlama hücreleri için gerekli işaretlerin elde edilmesi 67
Şekil 6.7. Ana ve yardımcı anahtarların sürme işaretleri..... 68
Şekil 6.8. Ana anahtarın gerilim ve akım değişimleri 69
Şekil 6.9. Yardımcı anahtarın gerilim ve akım değişimleri..... 69
Şekil 6.10. DA hattın gerilim ve akım değişimleri 70
Şekil 6.11. D_2 diyotunun gerilim ve akım değişimleri..... 70
Şekil 6.12. D_F diyotunun gerilim ve akım değişimleri 71
Şekil 6.13. L_{S2} bobininin gerilim ve akım değişimleri 71
Şekil 6.14. C_S kapasitesinin gerilim ve akım değişimleri..... 72
Şekil 6.15. L_{S1} bobininin gerilim ve akım değişimleri 72
Şekil 6.16. (a) Sert anahtarlama için ana anahtarın gerilim ve akım değişimleri, (b) sert anahtarlamada ortaya çıkan anahtarlama kayıpları..... 73
Şekil 6.17. (a) Yumuşak anahtarlama için ana anahtarın gerilim ve akım değişimleri, (b) yumuşak anahtarlamada ortaya çıkan anahtarlama kayıpları..... 73
Şekil 6.18. Sert anahtarlama için anahtarda oluşan kayıplar 74
Şekil 6.19. Yumuşak anahtarlama için ana ve yardımcı anahtarda oluşan kayıplar.. 74
Şekil 6.20. Yumuşak anahtarlama durumu için geliştirilen yumuşak anahtarlama hücresinin verimi 75

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 6.1. Uygulama sisteminde kullanılanyarıiletken elemanların bazı nominal değerleri…. 65
Tablo 6.2. Sürücü entegrenin karakteristik özellikleri.... 66

SİMGELER VE KISALTMALAR

PWM :Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
EMI :Elektromanyetik Girişim (Elektro Magnetic Interference)
MOSFET :Metal Oxide Field Effect Transistor
IGBT :Insulated Gate Bipolar Transistor
ZCS :Sıfır Akımda Anahtarlama (Zero Current Switching)
ZVS :Sıfır Gerilimde Anahtarlama (Zero Voltage Switching)
ZCT :Sıfır Akımda Geçiş (Zero Current Transition)
ZVT :Sıfır Gerilimde Geçiş (Zero Voltage Transition)
DA :Doğru Akım
AA :Alternatif Akım
V_{da} :Kaynak Gerilimi
L_s :Bastırma Bobini
C_s , C_f :Bastırma Kapasitesi
$S_1,\ldots,S_N$:Yarı İletken Anahtar
HS :Sert Anahtarlama (Hard Switching)
SS :Yumuşak Anahtarlama (Soft Switching)
$D_1,\ldots,D_N$, D_r, D_o, D_s :Diyot
D_f :Serbest Geçiş Diyotu
ω :Rezonans Frekansı (rad/sn)
Z :Empedans
V_{Cr} :Kapasite gerilimi
I_L :Yük akımı
T_1 :Ana anahtar
T_2 :Yardımcı anahtar
i_{T1} :T_1 Anahtarından geçen akım
i_{LS1} :L_{S1} Bobininden geçen akım
I_{rr} :Ters Toparlanma akımı
t_{rr} :Ters toparlanma süresi
V_{CSmax} :C_S kapasitesinde depolanan en yüksek gerilim
i_{LSmax} :L_S bobininde depolanan en yüksek gerilim
W_{CS} :C_S kapasitesinde depolanan enerji
RPI :Rezonans Kutuplu Evirici (Resonant Pole Inverter)
QRDCLI :Kısmi Rezonanslı DA Hatlı Evirici (Quasi Resonant DC Link Inverter)

YUMUŞAK ANAHTARLAMALI EVİRİCİLER İÇİN YENİ BİR ZVT-ZCT KISMİ REZONANSLI DA-HAT

Satılmış ÜRGÜN

Anahtar Kelimeler: Evirici, Yumuşak Anahtarlama, Sıfır Akımda Geçiş, Sıfır Gerilimde Geçiş

Özet: Gerilim ara devreli eviriciler, sürücü sistemleri ve kesintisiz güç kaynakları gibi uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulama alanlarında çalışma frekansının arttırılması büyük bir avantajdır. Bununla birlikte, sert anahtarlamalı çalışmalarda artan frekansla birlikte anahtarlama kayıpları ve elektromanyetik girişimler de artmaktadır. Artan frekansla birlikte anahtarlama kayıplarının artması sistemin verimini düşürmektedir. Bu sakıncaları ortadan kaldırmak için yumuşak anahtarlama yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada, geliştirilen ZVT-ZCT kısmi rezonanslı yumuşak anahtarlama hücresi ile DA hat gerilimi istenilen süre kadar sıfıra çekilebilmektedir. Bastırma hücresinde bulunan ana anahtar iletime geçerken sıfır gerilimde geçiş (ZVT) ve kesime giderken sıfır akımda geçiş (ZCT) yöntemleri sağlanmaktadır. Sunulan devre, daha önce yapılan çalışmalarda ulaşılmak istenen özellikleri barındırmakta ve bu devrelerdeki sakıncalar ortadan kaldırılmaktadır. Bu, yeni ZVT-ZCT kısmi rezonanslı DA hat devresinin ayrıntılı olarak analizi yapılmış ve uygulaması 50kHz hat frekansı için 1200W'lık örnek devre ile gerçekleştirilmiştir. Yumuşak anahtarlama hücresinde bulunan bütün yarıiletken elemanlar yumuşak anahtarlama şartları altında anahtarlanmaktadır. Ana anahtar ve eviricide bulunan yarı iletken anahtarlar üzerinde ilave bir gerilim stresi oluşmamaktadır.

A NEW ZVT–ZCT QUASI-RESONANT DC LINK FOR SOFT SWITCHING INVERTERS

Satılmış ÜRGÜN

Keywords : Inverter, Soft Switching, Zero Voltage Transition (ZVT), Zero Current Transition (ZCT)

Abstract: The voltage source inverter has a large domain of applications, as adjustable speed drives, uninterruptable power supplies, etc. The increasing of switching frequency is primarily advantage in many of those applications. However, in hard-switching operation, switching losses increase with the switching frequency, which strongly reduce the power converter efficiency. To eliminate these problems soft-switching methods are essential.

In this thesis, the new ZVT–ZCT Quasi-Resonant DC Link, which ensures zero crossings at any time required for soft-switching (SS) and provides zero voltage transition (ZVT) turn-on and zero current transition (ZCT) turn-off together for the main switch of active snubber cell in pulse width modulated (PWM) or space vector modulated (SVM) operation of inverter is presented. The new circuit combines the most desirable features of the circuits presented previously and overcomes most drawbacks of these circuits by using only one auxiliary switch with fewer amounts of other components. Consequently, new ZVT–ZCT Quasi-Resonant DC Link, which is verified by a prototype of a 1200W and 50 kHz circuit, is analyzed in detail. All semiconductor devices operate under soft-switching(SS), the main switch is subjected to no additional voltage and current stresses, and the stresses on the auxiliary switch is very low in the proposed new inverter.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Son yıllarda, modern yarıiletken güç elemanlarındaki teknolojik gelişmeler çok sayıda dönüştürücü uygulamasında birçok ilerlemeye ve yeni dönüştürücü yapılarının doğmasına neden olmuştur. DA gerilimi istenilen genlikte ve frekansta tek ya da çok fazlı AA gerilime dönüştüren eviriciler, endüstride en çok karşılaşılan uygulamalardan bir tanesidir. Bu alandaki gelişmeler yarıiletken güç elemanlarının gelişimiyle paralel olmuştur. Eviricilerin gelişim sürecinde, anahtarlama elemanı olarak önce TRİSTÖR, daha sonra TRANSİSTOR, MOSFET (Metal Oxide Field Effect Transistor) ve IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) kullanılmıştır [1-4].

Güç transistörlerinin avantajı, iletim kayıplarının düşük olması, dezavantajı ise düşük hızda anahtarlanmasıdır. Bu da önemli anahtarlama kayıplarına neden olduğundan yüksek hızlarda çalışmayı engeller. MOSFET'ler gerilim kontrollü elemanlar olduğu için, yüksek hızlarda çalışırlar. Fakat, MOSFET'lerin iletim gerilim düşümleri transistörlere göre yüksek olduğundan daha fazla iletim kaybı oluştururlar. Transistörlerin düşük iletim kaybı ve MOSFET'lerin hızlı anahtarlama yetenekleri bir araya getirilerek MOS kontrollü bipolar eleman olan IGBT'ler üretilmiştir [5].

IGBT'ler orta güçlü uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. MOS giriş kapısı, yüksek anahtarlama hızı, düşük iletim gerilim düşümü, yüksek akım taşıma kapasitesi ve yüksek derecede dayanıklılık gibi istenilen birçok özelliğe sahiptir.

Filtreleme ve enerji depolama amacıyla kullanılan reaktif elemanların boyutlarının azaltılması, verimin arttırılması ve harmoniklerin istenilen düzeye indirilmesinde asıl etken anahtarlama frekansıdır. Her ne kadar IGBT hızlı olsa da iletim ve kesim durumlarında akım ve gerilim çakışmalarından dolayı anahtarlama kayıpları

meydana gelir. Bu kayıp anahtarlama frekansının 5-6 kHz'i aştığı durumlarda önemli sorunlara neden olur.

IGBT'nin yüksek hızda anahtarlanmasıyla oluşan çıkış geriliminin neden olduğu dv/dt oranı yüksektir. Örneğin yük olarak motor kullanılırsa, bu oran sargıların üzerinde nominal değerin iki katı kadar geçiş gerilimleri oluşturarak sargı yalıtımına zarar verir. Ayrıca bu yüksek dv/dt oranı, evirici çıkışında elektro manyetik girişimlerin (EMI: Electro Magnetic Interference) üretilmesine neden olur. Bu EMI 10 kHz'den 30 MHz'e kadar frekans içeriğine sahiptir ve bastırılması çok zordur.

Yukarıda bahsedilen sorunların üstesinden gelmek ve dönüştürücüleri geliştirmek için yeni bir yaklaşıma ihtiyaç duyulmuş ve bu amaçla yumuşak anahtarlama teknikleri geliştirilmiştir. Bu tezde, çeşitli yumuşak anahtarlamalı evirici yapıları incelenmiş ve mevcut eviricilerdeki sakıncalar ortadan kaldırılmıştır.

Sert anahtarlamalı eviricilerin sakıncalarını ortadan kaldırmak için birçok yumuşak anahtarlamalı evirici yapısı üzerinde çalışılmıştır [11–26]. Yumuşak anahtarlamalı eviriciler, verimin iyileştirilmesi ve EMI gürültülerinin düşürülmesini amaçlamaktadır. Yumuşak anahtarlamalı eviriciler, elektrikli ulaşım teknolojileri, endüksiyon ısıtma sistemleri, kesintisiz güç kaynakları, çalkalama ve karıştırma cihazları ve çeşitli elektrik motorlu tahrik sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [27–35].

Son yıllarda bir çok anahtarlama yapısı üzerinde çalışılmıştır. Bunlar, Rezonanslı DA hat, kısmi rezonanslı DA hat, pasif kenetlemeli rezonanslı DA hat, PWM rezonanslı DA hat, aktif kenetlemeli rezonanslı DA hat, paralel rezonanslı DA hat ve senkronize rezonanslı DA hattır. Fakat bu yapıların çoğunun sakıncaları mevcuttur. Örneğin rezonanslı DA hat ve senkronize rezonanslı DA hatta anahtarlar üzerinde aşırı gerilimler görülür. PWM rezonanslı DA hat ve aktif kenetlemeli rezonanslı DA hattın gerçekleştirilmesi zordur. PWM rezonanslı, senkronize rezonanslı DA hat ve kısmi rezonanslı DA hat yapılarında yüksek kayıplar ve doluluk oranı sınırlamaları mevcuttur. Son olarak, paralel rezonanslı DA hat ve kısmi rezonanslı DA hat yapılarının denetimi oldukça güçtür [1-49].

Literatürdeki yumuşak anahtarlama hücrelerinde, ana anahtar, yardımcı anahtar ve bütün diyotlarda kayıpsız geçişler sağlayabilmek, toplam kayıpları azaltmak, denetimi basitleştirmek ve elemanların streslerini azaltabilmek için farklı sayıda anahtar kullanılan çeşitli yapılar üzerinde çalışılmıştır [35-49].

Monteiro tarafından 2002 yılında yapılan çalışmada üç anahtarlı aktif yumuşak anahtarlama hücresi sunulmuştur. Bu çalışmada, ana anahtar DA kaynak ve evirici arasına seri olarak bağlanmıştır ve anahtarlar dışında dört adet pasif eleman kullanılmıştır. Ana anahtarın kesim durumundan önce, her iki yardımcı eleman da anahtarlanarak sıfır gerilimde geçiş (ZVS) işlemi gerçekleştirilmiştir [42].

Shireen tarafından gerçekleştirilen iki anahtarlı yumuşak anahtarlama yapısı 2003 yılında sunulmuştur. Bu çalışmada, iki aktif anahtar yanında dört adet pasif eleman kullanılmıştır. Buradaki ana anahtarda da sıfır gerilimde anahtarlama işlemi yapılmış elemanların anahtarlama işaretleri ile ilgili ayrıntılı bilgi verilmemiştir [43].

Monteiro 2003 yılında sunduğu çalışmada ise flyback transformatör kullanarak aktif anahtar sayısını ikiye indirmiştir. Devrede yine ilk çalışmada olduğu gibi ZVS işlemi gerçekleştirilmiştir [44].

Behara tarafından 2004 yılında gerçekleştirilen çalışmada, dört anahtar kullanılan yumuşak anahtarlama hücresi sunulmuştur. Anahtarlar dışında altı adet pasif eleman kullanılmış ve devre yaklaşık olarak 15 kHz'de çalıştırılmıştır [46].

2004 yılında Bodur tarafından sunulan çalışmada, DA-DA dönüştürücülerde yumuşak anahtarlama şartları hem ZVT hem de ZCT olarak gerçekleştirilmiştir. Bütün yarıiletken elemanlarda yumuşak anahtarlama şartları sağlanmış ve devre yüksek verimle çalıştırılmıştır [47].

Obdan tarafından 2006 yılında gerçekleştirilen çalışmada yumuşak anahtarlama hücresinde ana ve yardımcı olmak üzere iki anahtar kullanılmıştır. Anahtarlar dışında iki adet ortak nüve üzerine sarılmış bobin, kondansatör ve diyot kullanılmıştır.

Devrede ana anahtar için ZVS şartları sağlanmıştır. Ana anahtar 50 KHz'de çalıştırılmıştır [48].

Yumuşak anahtarlama hücresinde iki anahtar kullanılan başka bir yapı da Mandrek tarafından 2007 yılında gerçekleştirilmiştir. Devrede anahtarlar dışında beş adet pasif eleman kullanılmıştır. Bu çalışmada ZCS ve ZVS şartları gerçekleştirilmiştir [49].

Yapılan çalışmalardan görüldüğü gibi, genellikle ZVS şartları sağlanmaya ve pasif eleman sayısı azaltılmaya çalışılmıştır. Yalnızca Bodur tarafından gerçekleştirilen ZCZVT yumuşak anahtarlamalı DA-DA dönüştürücü çalışmasında, ana anahtardaki anahtarlama kayıpları yok edilmiştir.

Bu tez çalışmasında, DA-DA dönüştürücülerde başarıyla uygulanan bu yöntemin eviricilerde de uygulamak üzere yeni bir ZCZVT hücresi tasarlanmıştır. Tasarlanan bu tek hücre ile eviricideki bütün yarıiletken elemanlar için yumuşak anahtarlama şartları sağlanmıştır.

Sunulan yumuşak anahtarlama hücresi, yalnızca anahtarlama anlarında devreye girmekte, bütün yük aralıklarında çalışmakta ve farklı yarı iletkenler ile de kullanılabilmektedir. Akım ve gerilim yükselme hızlarının sınırlandırılmasıyla diyotlarda meydana gelen ters toparlanma kayıpları da önemli ölçüde azaltılmıştır.

İkinci bölümde, yumuşak anahtarlama kavramı ve teknikleri detaylı olarak incelenmiştir.

Üçüncü bölümde, yumuşak anahtarlamalı eviriciler sınıflandırılmış ve yapıları incelenmiştir.

Dördüncü bölümde, kısmi rezonanslı DA hatlı evirici yapıları incelenmiştir.

Beşinci bölümde gerçekleştirilen ZVT-ZCT kısmi rezonanslı DA hat hücresinin çalışma prensibi ve etraflı bir kararlı durum analizi sunulmuştur.

Altıncı bölümde, önerilen ZVT-ZCT kısmi rezonanslı DA hat hücresinin, uygulama devresi ile bu devreden alınan sonuçlar verilmiştir. Sunulan teorik analiz, giriş gerilimi 250 V, anahtarlama frekansı 50 kHz ve gücü 1200 W olan bir prototip ile doğrulanmıştır

Son bölüm olan yedinci bölümde ise yapılan çalışmalar özetlenmiş ve bu konuda çalışmak isteyenlere öneriler sunulmuştur.

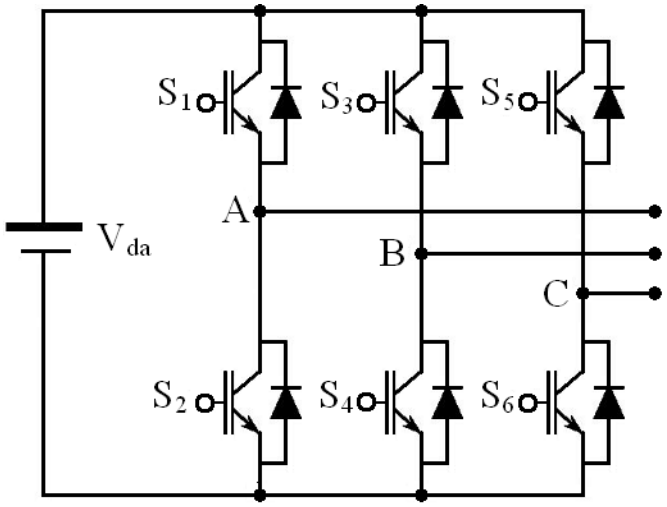
BÖLÜM 2. YUMUŞAK ANAHTARLAMA TEKNİKLERİ

2.1. Giriş

Bu bölümde yumuşak anahtarlama kavramı ve yumuşak anahtarlama teknikleri anlatılmıştır.

2.2. Yumuşak Anahtarlama Kavramı

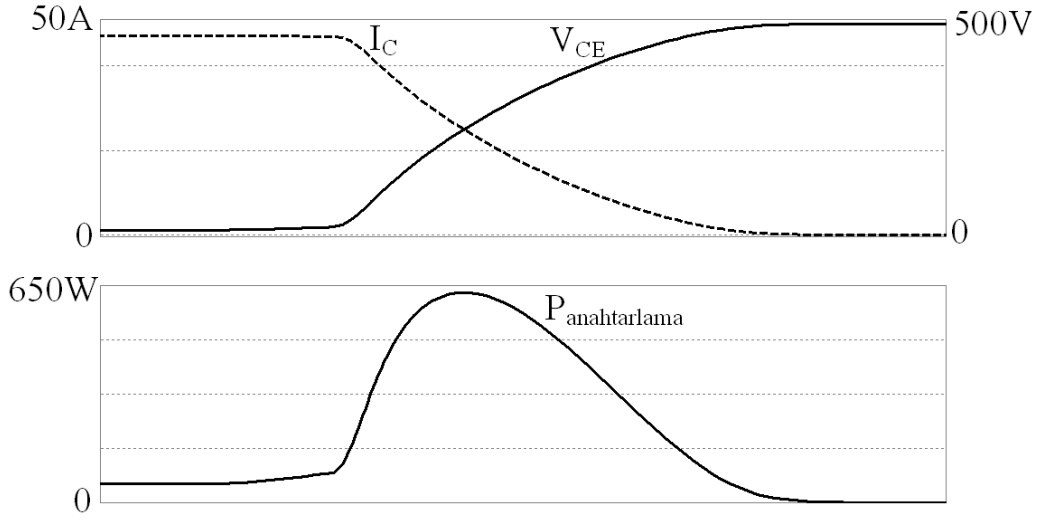
Geleneksel DA-AA dönüştürücü yapısı Şekil 2.1'de görülmektedir. AA çıkış gerilimi genellikle PWM anahtarlama yöntemi kullanılarak elde edilir. PWM kontrolü ile düşük frekanslı bileşenler denetlenir ve akımın yüksek frekanslı bileşenleri de endüktif yüklerle filtre edilir.



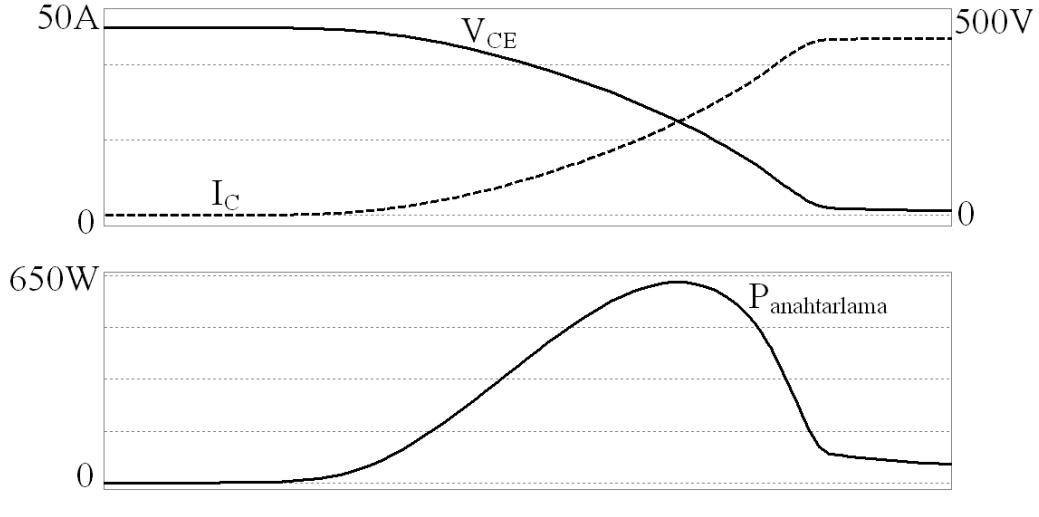
Şekil 2.1. Üç-fazlı evirici

Geleneksel üç fazlı eviriciler sert anahtarlama ile çalışırlar. Sert anahtarlama, yarı iletken anahtarın ideal olmayan özelliklerinden dolayı, yüksek anahtarlama kayıplarına ve elektro manyetik girişimlere neden olur [10]. Şekil 2.2'de 50A 500V değerlerinde çalışan bir IGBT için anahtarlama anında üzerindeki akım-gerilim değişimleri ve buna göre oluşan anahtarlama kaybı verilmiştir. Anahtarlama

devrelerinde oluşan EMI gürültü seviyesi doğrudan di/dt ve dv/dt oranları ile ilişkilidir. Sürücü uygulamalarında hızlı dinamik cevap, düşük gürültü ve küçük filtre elemanı gibi sınırlandırmalardan dolayı çalışma frekansının 10kHz ile 20kHz arasında olması istenir. Sonuç olarak yüksek anahtarlama kayıpları ve yüksek EMI gürültüsü yumuşak anahtarlamalı evirici tasarımının odak noktasını oluşturmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 2.2. IGBT için anahtarlama karakteristikleri (a) Kesim Anahtarlaması (b) İletim Anahtarlaması.

Şekil 2(a) ve (b)'den görüldüğü gibi, ek bir düzenek kullanılmadan gerçekleştirilen anahtarlamalar sert anahtarlama (HS: Hard Switching) olarak adlandırılmaktadır.

Sert anahtarlamadaki problemlerin ortadan kaldırılması çalışmaları yumuşak anahtarlama (SS: Soft Switching) kavramını ortaya çıkarmıştır.

Yumuşak anahtarlama, temel olarak, anahtarlama kayıplarının ve EMI gürültülerinin özel düzeneklerle yok edilmesi veya en aza indirilmesi şeklinde tanımlanır. Yumuşak anahtarlama amacıyla geliştirilen ve dönüştürücülerin temel bir parçası olmayan ilave düzenek ve devrelere ise bastırma hücreleri denilmektedir. Yapılan çalışmalarda bastırma hücreleri, yumuşak anahtarlama, stres azaltma, bastırma ve yük hattını şekillendirme gibi terimlerle ifade edilmiştir [52].

Bastırma hücreleri, dönüştürücünün ana anahtar ve ana diyotu üzerinde ilave akım ve gerilim streslerinin veya ek kayıpların oluşmasına neden olabilir. Bu ek kayıplar yok edilmeli veya en düşük seviyede tutulmalıdır. Ayrıca, bu hücrelerin çalışması güç anahtarının iletim ve kesime girme sürelerinin dışına taşabilir. Bu taşmalar en düşük seviyede kalmalı, böylece bastırma hücresi PWM kontrolüne engel olmamalı ve dönüştürücü değişken veya hafif yüklerde de çalışabilmelidir. İlave olarak, bastırma hücreleri dönüştürücünün karmaşıklık ve maliyetini arttırabilir. Bu artışlar da düşük seviyelerde kalmalıdır [52].

Yumuşak anahtarlama veya bastırma hücrelerinde asıl amacın, devrenin güç yoğunluğunun arttırılması olduğu daima göz önünde tutulmalıdır. Bir bastırma hücresinin seçiminde, bu hücrenin sağladığı faydalar ile hücrenin neden olduğu ek külfetler iyice karşılaştırılarak karar verilmelidir [52].

Yumuşak anahtarlamadan istenen fonksiyonlar, genel olarak aşağıda sıralanmıştır. Bu fonksiyonların çoğu birbirine bağlı veya birbirini tamamlayıcı niteliktedir [52].

- 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 gürültülerini bastırmak.
- Anahtarlama enerjilerini geri kazanmak.

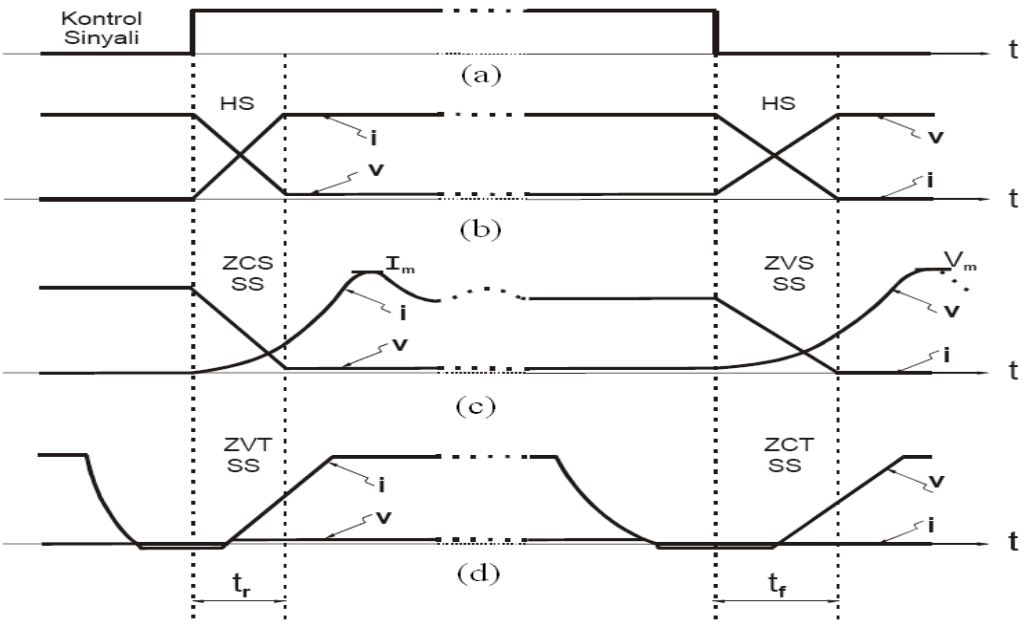
• Çalışma frekansını yükseltmek.
• Periyodun büyük bir kısmında PWM çalışmayı korumak.
• Hafif yüklerde de yumuşak anahtarlamayı sürdürmek.
• Devrenin boyut ve maliyetini düşürmek.
• Devrenin verim ve güç yoğunluğunu arttırmak.

2.3. Yumuşak Anahtarlama Tekniklerinin Sınıflandırılması

Yumuşak anahtarlama teknikleri genel olarak,

1. Sıfır Akımda Anahtarlama (ZCS:Zero Current Switching)
2. Sıfır Gerilimde Anahtarlama (ZVS: Zero Voltage Switching)
3. Sıfır Akımda Geçiş (ZCT: Zero Current Transition)
4. Sıfır Gerilimde Geçiş (ZVT: Zero Voltage Transition)

şeklinde 4 genel gruba ayrılır. Şekil 2.3'te, bir anahtarlama elemanının kontrol sinyali ile sert anahtarlama ve yumuşak anahtarlama teknikleriyle ilgili temel dalga şekilleri görülmektedir. ZCS ile ZVS temel ve ZCT ile ZVT ileri yumuşak anahtarlama teknikleri olarak ifade edilirler [52].



Şekil 2.3. (a) Bir anahtarlama güç elemanın kontrol sinyali ile (b) HS, (c) ZCS ve ZVS ile (d) ZCT ve ZVT çalışmalarıyla ilgili temel dalga şekilleri [52].

2.3.1 Sıfır akımda anahtarlama

Sıfır Akımda Anahtarlama (ZCS), güç anahtarının iletime girme işleminde gerçekleştirilen bir yumuşak anahtarlama tekniğidir. Bu teknikte, temel olarak güç anahtarına küçük değerli bir bobin seri bağlanarak, iletime girme işleminde elemandan geçen akımın yükselme hızı sınırlandırılır. Böylece, akım ile gerilimin üst üste binmesi ve anahtarlama enerji kaybı azaltılır. Aslında, iletime girme işlemindeki anahtarlama enerjisi bobine aktarılır. Bobindeki bu enerji, klasik hücrelerde bir dirençte harcanır, fakat modern hücrelerde kısa süreli bir kısmi rezonans ile gerilim kaynağı veya yüke aktarılarak geri kazanılır [52].

2.3.2 Sıfır gerilimde anahtarlama

Sıfır Gerilimde Anahtarlama (ZVS), kesime girme işleminde gerçekleştirilen bir yumuşak anahtarlama tekniğidir. Bu teknikte, temel olarak güç anahtarına küçük değerli bir kondansatör paralel bağlanarak, iletimden çıkma işleminde elemanın uçlarında oluşan gerilimin yükselme hızı sınırlandırılır. Böylece, iletimden çıkma işleminde, anahtarlama enerji kaybı azaltılır ve anahtarlama enerjisi kondansatöre aktarılır. Kondansatördeki bu enerji, modern hücrelerde geri kazanılır.

ZCS ve ZVS tekniklerinde anahtarlama enerji kaybı tamamen yok edilememektedir. Bu nedenle, bu tekniklere yaklaşık ZCS ve yaklaşık ZVS teknikleri de denilmektedir. Genel olarak, ZCS'de kullanılan bobine seri bastırma elemanı ve ZVS'de kullanılan kondansatöre paralel bastırma elemanı denilir. Normal olarak, seri bobin güç elemanı üzerinde ilave bir gerilim stresine ve paralel kondansatör ise ilave bir akım stresine neden olur. Seri bobinin neden olduğu ek gerilim stresinin önlenemediği kabul edilmektedir [52].

2.3.3 Sıfır akımda geçiş

Sıfır Akımda Geçiş (ZCT), kesime girme işleminde akımın sıfıra düşmesinin öne alındığı ileri bir yumuşak anahtarlama tekniğidir. Bu teknikte, güç anahtarından geçen akım kısa süreli bir kısmi rezonansla sıfıra düşürülür ve akım sıfırda

tutulurken kontrol sinyali kesilir. Böylece, akım ile gerilimin üst üste binmesi ve anahtarlama enerji kaybı tamamen yok edilir. Mükemmel bir kesime girme işlemi sağlanır. Burada ZCS ve ZVS'nin birlikte sağlandığı söylenebilir. Anahtarlama enerjisinin geri kazanıldığı bu teknik, ancak modern hücrelerle sağlanabilir ve bir yardımcı veya ilave yarı iletken anahtar gerektirir [52].

2.3.4 Sıfır gerilimde geçiş

Sıfır Gerilimde Geçiş (ZVT), iletime girme işleminde uygulanan ileri bir yumuşak anahtarlama tekniğidir. Bu teknikte, güç anahtarı uçlarındaki gerilim kısa süreli bir kısmi rezonansla sıfıra düşürülür ve bu gerilim sıfırda tutulurken kontrol sinyali uygulanır. Böylece, anahtarlama enerji kaybı tamamen yok edilir ve mükemmel bir iletime girme işlemi sağlanır. Gerilimin sıfıra düşmesi öne alınarak gerçekleştirilen bu teknikte de ZCS ve ZVS'nin birlikte sağlandığı söylenebilir. Anahtarlama enerjisinin geri kazanıldığı bu teknik de modern hücrelerle elde edilir ve ilave bir anahtar gerektirir.

Burada hemen şunun belirtilmesi gerekir ki, sadece bu teknikte güç anahtarı parazitik kondansatörünün deşarj enerjisi geri kazanılır. Yüksek değerlerde parazitik kondansatörlere sahip olan MOSFET'lerde ZVT yumuşak anahtarlama tekniği büyük önem taşır [52].

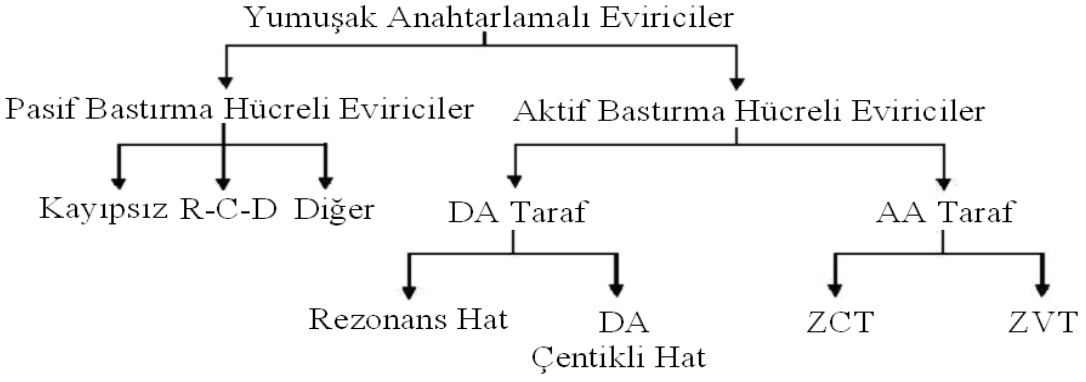
BÖLÜM 3. YUMUŞAK ANAHTARLAMALI EVİRİCİLER

3.1. Giriş

Yumuşak anahtarlamalı dönüştürücüler, anahtarlama işlemini güç elemanı üzerindeki akım ya da gerilim sıfıra yakınken gerçekleştirir. Bu, anahtarlama kayıplarını önemli ölçüde azaltır ve yüksek frekanslarda çalışmaya izin verir. Aynı zamanda anlık dv/dt oranını azaltarak EMI gürültülerini ortadan kaldırır.

Yumuşak anahtarlamanın DA/DA dönüştürücülerde ve endüksiyon ısıtma sistemlerinde kullanılması çok yaygındır. DA/DA dönüştürücülerde kullanılan yumuşak anahtarlama yönteminin anlaşılması oldukça kolaydır, çünkü akım yalnızca kaynaktan yüke doğru transfer edilmektedir ve anahtarlama frekansı sabittir. Yumuşak anahtarlamanın DA/AA dönüştürücülerde kullanılması oldukça karmaşıktır. Çünkü DA/AA dönüştürücülerde, DA barası ve AA çıkış arasında karşılıklı güç akışı söz konusudur.

Son yıllarda endüstriyel uygulamalarda, birçok yumuşak anahtarlamalı evirici yapısı önerilmiştir. Bu yapılar, yardımcı anahtarların kullanılma durumlarına göre aktif ve pasif bastırma hücreleri olmak üzere iki temel gruba ayrılır. Yumuşak anahtarlamalı yapıların sınıflandırılması Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



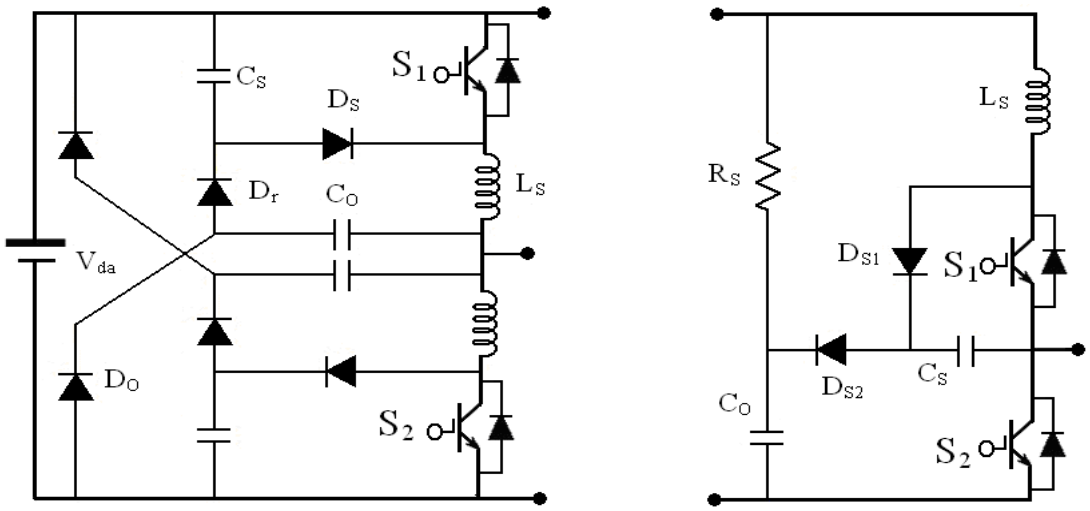
Şekil 3.1. Yumuşak anahtarlamalı evirici yapılarının sınıflandırılması.

3.2 Pasif Bastırma Hücreli Eviriciler

Pasif yaklaşımda, iki ana yöntem vardır; kayıpsız bastırma ve kayıplı R-C-D bastırma. İletim durumunda bastırma hücresinin temel görevi, anahtara seri bir bobin bağlanması ile akımın yükselme hızını düşürmektir. Kesim durumunda ise bastırma hücresinin temel görevi, anahtara paralel bir kapasitenin bağlanması ile gerilimin yükselme hızını düşürmektir. Ek elemanlar kullanılarak, bastırma bobini ve kapasitesinde depolanan enerji bir direnç üzerinde harcanır. Bastırma enerjisi dirençte harcanıyorsa bu yöntem R-C-D bastırma hücresi olarak adlandırılır.

Bir fazlı kayıpsız bir bastırma hücresi Şekil 3.2.(a)'da gösterilmektedir ve burada yardımcı devre aktif eleman içermez. S_1 ana anahtarında bastırma işlemini gerçekleştirmek için L_s, C_s, D_s, D_r ve D_o elemanları kullanılmıştır. Aynı elemanlar kullanılarak S_2 ana anahtarındaki bastırma işlemleri de gerçekleştirilir. S_1 anahtarı iletime geçirildiğinde, L_s bobini anahtar üzerinden geçen akımın hızlı bir şekilde yükselmesini engeller. Böylece, akım ve gerilim çakışmaları sınırlandırılarak S_1 anahtarının iletim anahtarlama kayıpları azaltılmış olur. S_1 anahtarı ve L_s bobininin akımı yük akımına ulaşıncaya kadar artar.

S_1 kesime götürüldüğünde, L_s de depolanan enerjinin, ana anahtar dışında farklı bir yoldan boşaltılması gerekir. Diğer yandan S_1 anahtarı üzerinde gerilim stresi de oluşabilir. Kesimde L_s bobini üzerinde depolanan enerji C_s, D_s ve D_r elemanları kullanılarak C_o kapasitesine aktarılır. Bastırma kapasitesi S_1 'in kesime götürüldüğü durumlarda yük akımı üzerinden V_{da} gerilimine şarj edilir. Eğer yük akımı seviyesi düşükse bastırma kapasitesini şarj etmek için daha uzun süreye ihtiyaç duyulur. Bu sorun evirici çıkışında gerilim bozulmalarına ya da cihazın yüksek gerilimlerde kesime gitmesine neden olur. Pasif bastırma yapılarının diğer bir örneği de Şekil 3.2.(b)'de görülmektedir. Bu devrede, Şekil 3.2(a)'dan farklı olarak, gerilim stresi sorunlarıyla uğraşılmamaktadır.



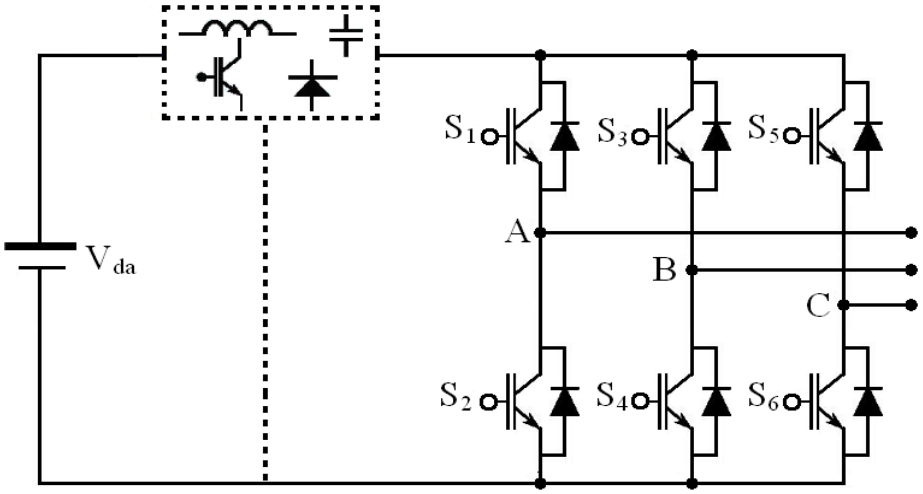
(a) (b)

Şekil 3.2. Eviriciler için pasif bastırma yapıları: (a) Kayıpsız bastırma, (b) R-C-D bastırma.

Daha öncede ifade edildiği gibi pasif bastırma devrelerinde, sıfır akımda anahtarlama ya da sıfır gerilimde anahtarlama yöntemlerinde olduğu gibi tam bir yumuşak anahtarlama işlemi yoktur. Buna göre kayıplar tamamen yok edilemez yalnızca sınırlandırılır. Çünkü eleman sayısının fazla oluşu ve yüksek akımda meydana gelebilecek bozulmalar onlarca kHz'lik frekanslarda çoğunlukla pratik bir çözüm olarak görülmez. Bunun için endüstride çok fazla kullanım alınanına sahip değildir. Sonuç olarak aktif bastırma yaklaşımı ön plana çıkar.

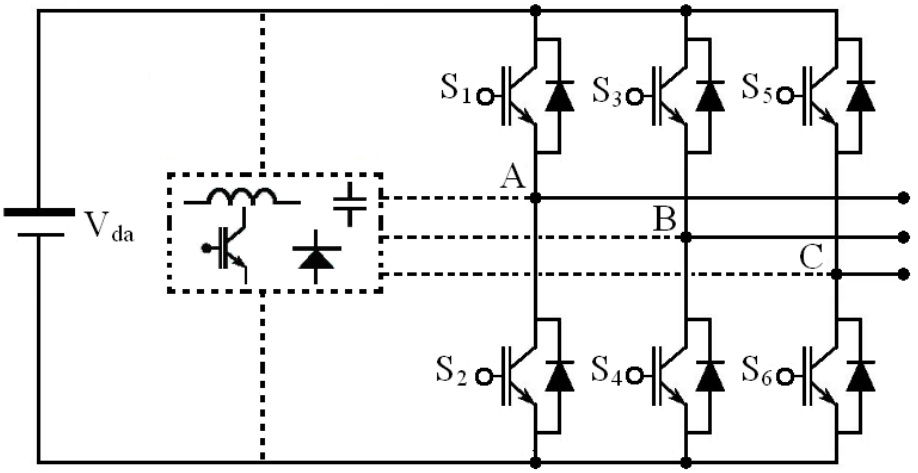
3.3. Aktif Bastırma Hücreli Eviriciler

Aktif yumuşak anahtarlama yapılarında anahtarlama işlemi için DA tarafta ve AA tarafta olmak üzere iki temel yaklaşım bulunmaktadır. DA taraflı yumuşak anahtarlamalı eviricinin temel mantığı, yardımcı bir devre kullanarak DA hatta istenilen bir sürede sıfır gerilim geçişleri oluşturmaktır [12-13]. Böylece Faz kollarındaki uygun anahtarlar sıfır gerilim şartları altında anahtarlanabilirler. Yumuşak anahtarlama hücresindeki bazı anahtarlar DA giriş kaynağı ve üç fazlı köprü anahtarları arasına bağlanmak zorundadır. Şekil 3.3'te görüldüğü üzere, DA kaynak ve evirici arasına bağlanan yardımcı devre ayrıca DA kaynağın eksi ucuna da bağlanır. Eğer DA hatta seri bağlanan yardımcı anahtar yoksa DA hattın gerilim stresi sert anahtarlamalı eviriciden daha fazla olabilir. Bunun dışında yardımcı eleman hatta seri bağlanmışsa akım stresleri daha fazla olabilir.



Şekil 3.3. DA taraflı yumuşak-anahtarlamalı evirici.

AA taraflı yumuşak anahtarlamada, DA taraflı yumuşak anahtarlamadan farklı olarak, ZVS ve ZCS şartları DA hat gerilimini değiştirmeden gerçekleştirilir [14-18]. Bu nedenle Şekil 3.4'te görüldüğü gibi, yardımcı devre her bir faz ayağının AA çıkış düğümlerine yerleştirilir. AA taraflı yumuşak anahtarlamalı eviricilerin ana avantajı, yardımcı devrenin DA hatta paralel olmasıdır. Bu nedenle yardımcı devre, DA taraflı yumuşak anahtarlamalı eviriciden farklı olarak yük akımını taşımaz.

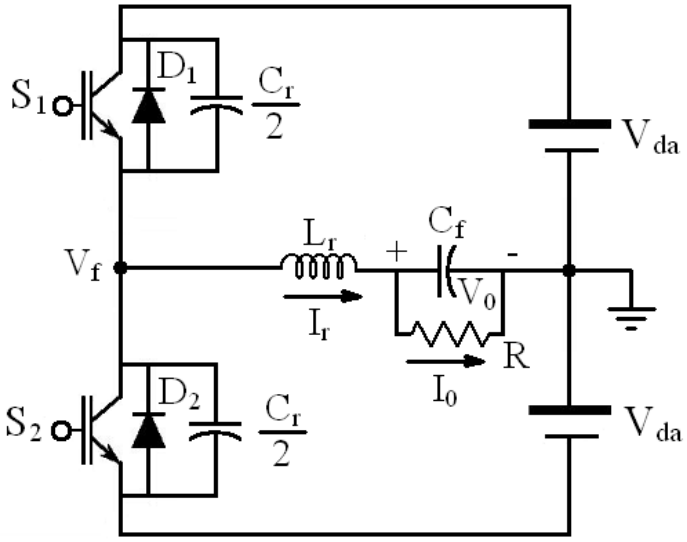


Şekil 3.4. AA taraflı yumuşak-anahtarlamalı evirici.

3.4. Rezonans Kutuplu Evirici

Yumuşak anahtarlamalı eviriciler içerisinde, rezonans kutuplu evirici (RPI:Resonant Pole Inverter) ilk kullanılan yapıdır [13]. RPI eviricinin her bir faz ayağı Şekil 3.5'te

gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, evirici kutbu S_1 ve S_2 anahtarlarından oluşmaktadır. ZVS şartlarını oluşturabilmek için rezonans bobini, yüke paralel bağlı filtre kapasitesine seri bağlanır. Evirici faz gerilimi olan V_f ayarlanarak, istenilen düşük frekanslı gerilim elde edilir.



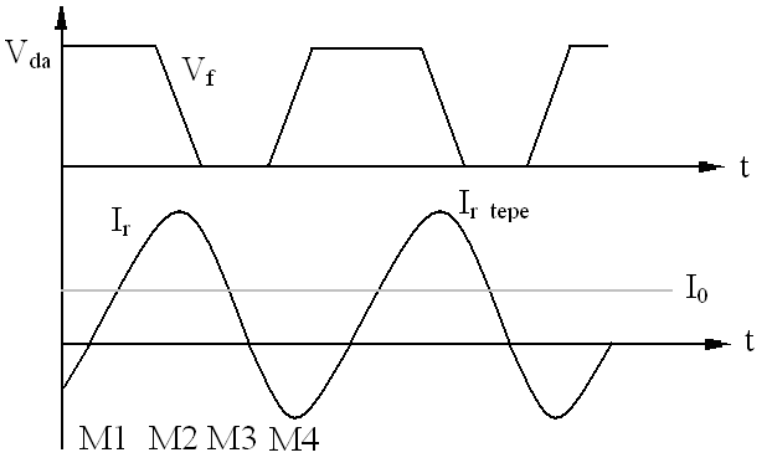
Şekil 3.5. Rezonans kutuplu evirici (RPI) ayağı.

S_1 iletimdeyken devre, denklem (3.1) ve (3.2) ile ifade edilebilir.

$$\frac{d}{dt} I_r = \frac{V_{da} - V_0}{L_r} \tag{3.1}$$

$$\frac{d}{dt} V_0 = \frac{I_r - (V_0/R)}{C_f} \tag{3.2}$$

Anahtarlama frekansı V_0'ın temel frekansından çok yüksekse çıkış geriliminin sabit olduğu varsayılır. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi M1 aralığında, I_r akımı doğrusal rampa şeklinde yükselir. S_1 anahtarı kesime götürüldüğünde rezonans çevrimi başlar. Rezonans bobini, S_1 ve S_2 anahtarlarının parazitik kapasitesileri ile rezonansa girer. M2 aralığında, S_1 anahtarı çıkış kapasitesini şarj ederken aynı anda S_2'nin parazitik kapasitesini de D_2 üzerinden deşarj eder. Eğer bobin akımı yaklaşık olarak sabit olursa anahtarların parazitik kapasiteleri doğrusal bir şekilde şarj ya da deşarj olur. D_2 iletimde olduğunda S_2 anahtarı ZVS şartlarında iletime girer.

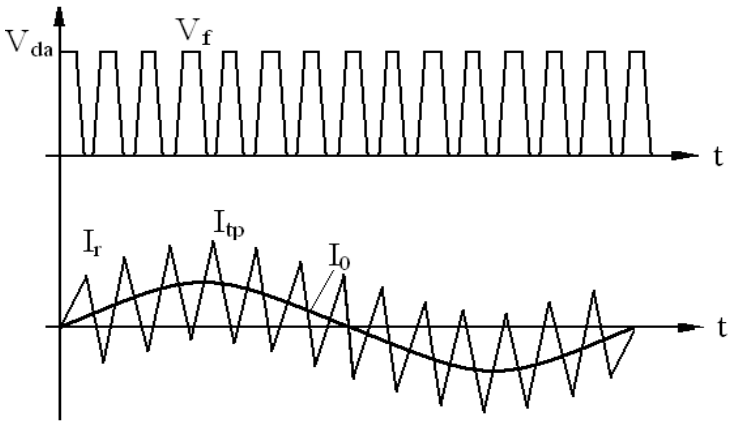


Şekil 3.6. RPI faz ayağının dalga şekilleri.

Evirici anahtarlarında ZVS şartlarını garanti etmek için iki koşul aynı anda gerçekleşmelidir. İlk olarak I_r akımı kesim için anahtardan geçmelidir. İkinci olarak komütasyon için gerekli V_f geriliminin C_f kapasitesinde depolandığından emin olunmalıdır. C_f, C_r'den çok büyük olursa ZVS şartlarının gerçekleşmesi için,

$$I_{r\min} = \frac{2}{Z_0}\sqrt{V_{da}V_0} \tag{3.3}$$

olmalıdır. Burada $Z_0 = \sqrt{L_r/C_r}$ bağıntısı mevcuttur. D_2 diyotu iletime geçtiğinde, S_2 anahtarı ZVS şartlarında iletime girer. RPI'daki V_f gerilimi ve yük akımı örnek olarak Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. RPI'daki V_f gerilimi ve yük akımı.

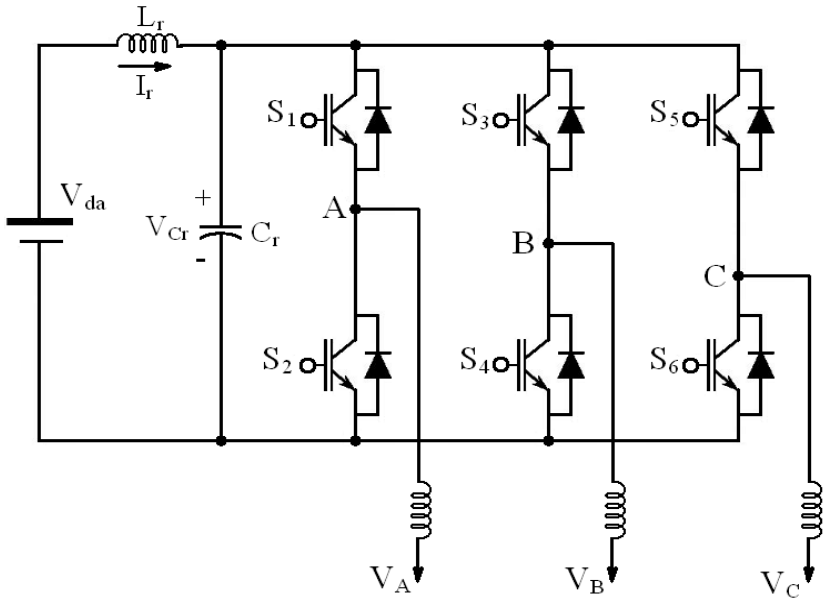
RPI'nın çalışması göstermektedir ki ZVS şartlarını gerçekleştirebilmek için akım ana diyottan ana anahtara doğru akmalıdır. Bu geçiş, V_o çıkış gerilimi, V_{da} geriliminden düşük olduğu müddetçe devam eder. Anahtarlama frekansı yaklaşık olarak,

$$f_s = \frac{V_{da}^2 - V_0^2}{4V_{da} I_r I_0} \tag{3.4}$$

şeklinde belirlenir. Eşitlik 3.4 incelendiğinde çıkış geriliminin $0\text{-}0{,}8V_{da}$ arasında değiştiği görülür ve anahtarlama frekansı da $0.36f_{max}\text{-}f_{max}$ değerleri arasında değişir. $V_0=V_{dc}$ olduğunda anahtarlama frekansı sıfırdır. Maksimum çıkış gerilimi düşük anahtarlama frekanslarında elde edilir.

3.5. Rezonans DA-Hatlı Evirici

Rezonans DA-Hatlı evirici ilk kullanılan yumuşak anahtarlamalı evirici yapılarıdır [12–35]. Şekil 3.8'de Rezonans DA-hatlı eviricinin temel yapısı görülmektedir.

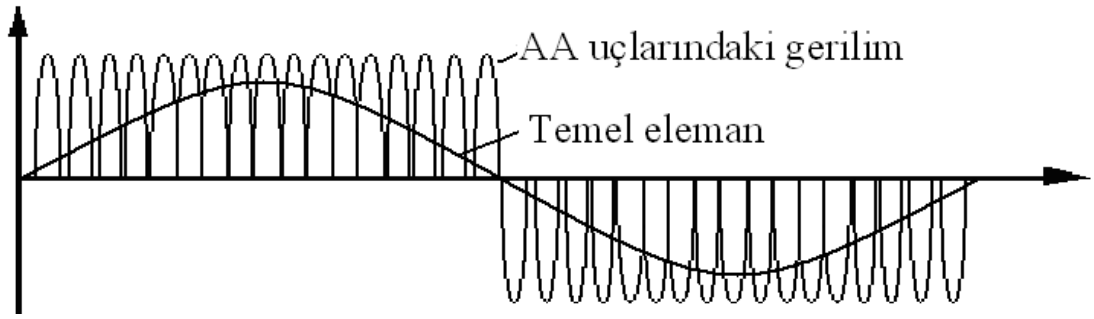


Şekil 3.8. Rezonans DA-hatlı evirici.

Rezonans DA-hatlı eviricide, rezonans kapasitesi gerilimi tüm güç anahtarından etkilenir. Bu birleşik gerilim rezonans hat diye ifade edilir. Rezonans hat, evirici

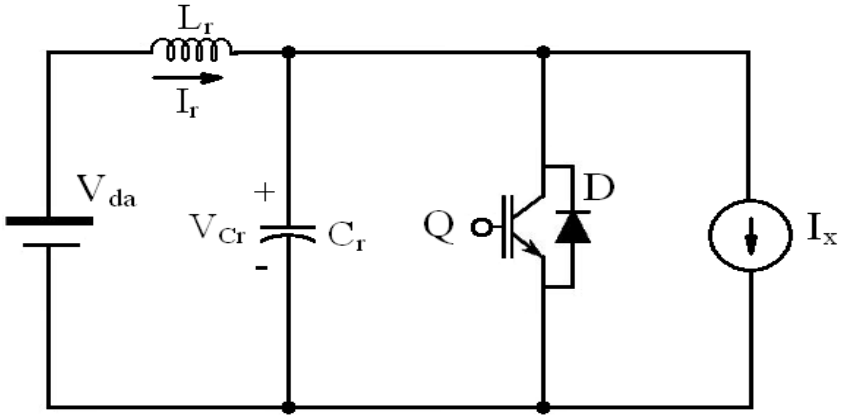
anahtarlarının uygun şekilde denetlenmesiyle periyodik olarak sıfıra çekilir. Anahtarlama kayıplarını azaltmak için güç elemanlarının sıfır geçişlerinde anahtarlanması gerekir.

Eviricinin ana anahtarları konumlarını yalnızca hat gerilimi sıfırdan geçerken değiştirirler. Evirici çıkışı rezonans hat gerilim darbelerinden oluşur. Bu yüzden, sert anahtarlamalı eviricilerde kullanılan PWM (Pulse Width Modulation) yönteminden tamamen farklı strateji üretilmesi gerekir. İstenilen frekanslı çıkış gerilimi ayrık rezonans darbelerinden oluştuğu için ayrık darbe modülasyon (DPM = Discrete Pulse Modulation) yöntemi kullanılmalıdır. DPM kullanılarak elde edilen gerilimin sentezi Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. DPM kullanılarak gerçekleştirilen Hat-hat gerilim sentezi.

Analizi kolaylaştırmak için rezonans frekansının temel frekanstan çok yüksek olduğu durumlar göz önüne alınarak Şekil 3.8'de verilen devre basitleştirilmiştir. Her bir rezonans darbesi için eşdeğer devre Şekil 3.10'da gösterilmektedir. Dikkat edilirse I_x yük akımı, her bir rezonans darbesinde sabittir.

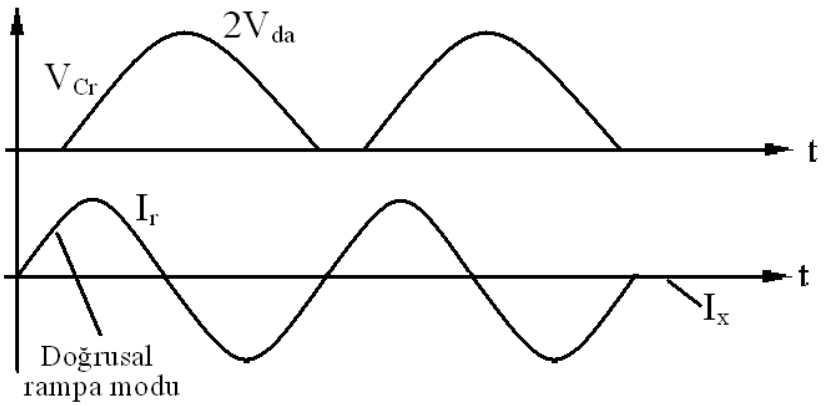


Şekil 3.10. RDCLI eviricisinin bir rezonans darbesindeki eşdeğer devresi.

Eğer, rezonans çevriminde Q anahtarı kesime götürülür ve V_{da} gerilimi devreye uygulanırsa kapasite gerilimi,

$$v_{Cr}(t) = V_{da}(1 - \cos \omega t) \tag{3.5}$$

şeklinde yazılır. Burada ω, LC devresinin rezonans frekansıdır ve ωt=2π olduğunda kapasite gerilimi V_{Cr}, sıfıra düşer. Daha sonra Q anahtarı için sıfır gerilimde anahtarlama şartları başlar. Anahtar iletime geçirildiğinde bobin akımı doğrusal rampa şeklinde yükselir. Anahtar kesime götürülmeden önce, kapasite geriliminin sıfıra düşeceğinden emin olmak için L_r'de yeterli enerjinin depolanması gerekir. Tipik dalga şekilleri Şekil 3.11'de gösterilmektedir.



Şekil 3.11. RDCL eviricisinin tipik dalga şekilleri (I_x=0).

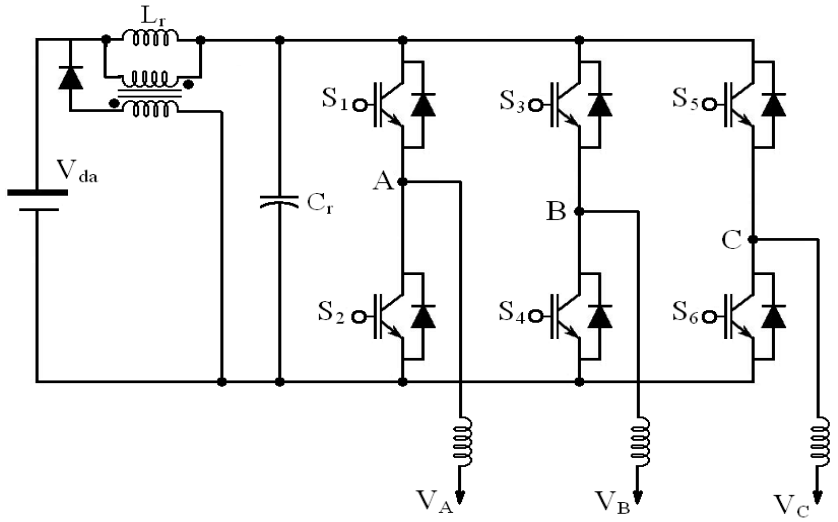
I_x akımının değeri, faz akımlarına ve eviricinin tüm anahtarlarının durumlarına bağlıdır. I_x akımı, anahtarlama frekansına ve kontrol yöntemine bağlı olarak büyük değişimler gösterebilir ve rezonans çevrimi boyunca evirici konumları değişmedikçe sabit kalır. ZVS den emin olmak için I_r-I_x akımı, rezonans çevriminin aynı koşullarda yeniden başlaması için kontrol edilmelidir. Böylece rezonans çevrimi sürekli olarak aynı koşullarda başlar.

Anahtarlar iletime-kesime götürülürken LC devresinin uyartım başlangıç koşulları değiştirilir. Bu yüksek gerilim sıçramalarına neden olur. Genel olarak anahtarların gerilim stresi $2V_{da}$'dır. Aslında rezonans DA-hatlı devre, anahtarlar üzerindeki gerilim streslerini sınırlandırmak için kullanılır. Şekil 3.12 ve 3.13'te gösterildiği

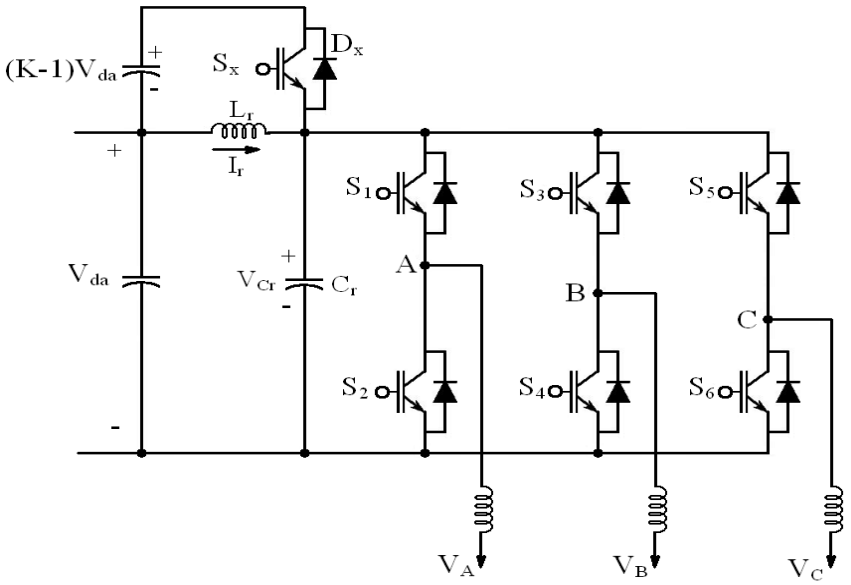
gibi, pasif ve aktif kenetlemeli olmak üzere iki farklı rezonans DA hatlı evirici yapısı mevcuttur.

K kenetleme oranı, f_o rezonans frekansının, f_s anahtarlama frekansına oranı ile ilişkilidir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{\pi f_0}{f_s} = \cos^{-1}(1-K) + \frac{\sqrt{K(2-K)}}{K-1} \tag{3.6}$$



Şekil 3.12. Pasif kenetlemeli RDCLI.



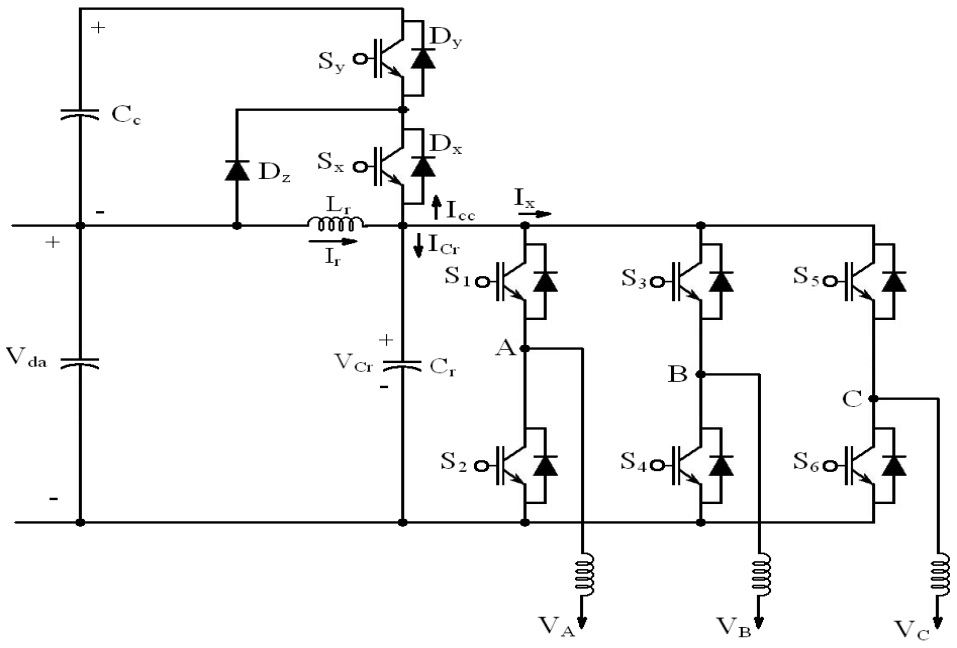
Şekil 3.13. Aktif kenetlemeli RDCLI.

Kenetleme geriliminin $2V_{da}$'dan düşük olması durumu için K kenetleme oranı, rezonans tank frekansının anahtarlama frekansına oranının tersidir. Hat frekansı, azalan K oranı ile birlikte azalır ve K=1 için sıfıra yaklaşır. Bununla birlikte elemanların seçiminde çalışma frekansının belirlenmesi gerekir.

3.6. Kısmi Rezonanslı DA-Hatlı Eviriciler

Kısmi rezonanslı DA-hatlı eviriciler (QRDCLI=Quasi Resonant DC Link Inverter) PWM denetimi ve yumuşak anahtarlama işlemlerinin gerçekleştirildiği diğer bir yapıdır [35]. Rezonans hat, sürekli salınım yaptığı RDCLI yapılarının aksine, yaklaşık sabit bir değere kenetlenir. Rezonans hat, PWM darbesinin sonlandırıldığı yada başlatıldığı anda çalışmaya başlar. Elde edilen yaklaşık kare dalga darbeler geleneksel sert anahtarlamalı eviricilerde olduğu gibidir.

Bir QRDCLI yapısı olan gerilim kenetlemeli paralel rezonans dönüştürücü (VCPRQ) Şekil 3.14'te görülmektedir [36].



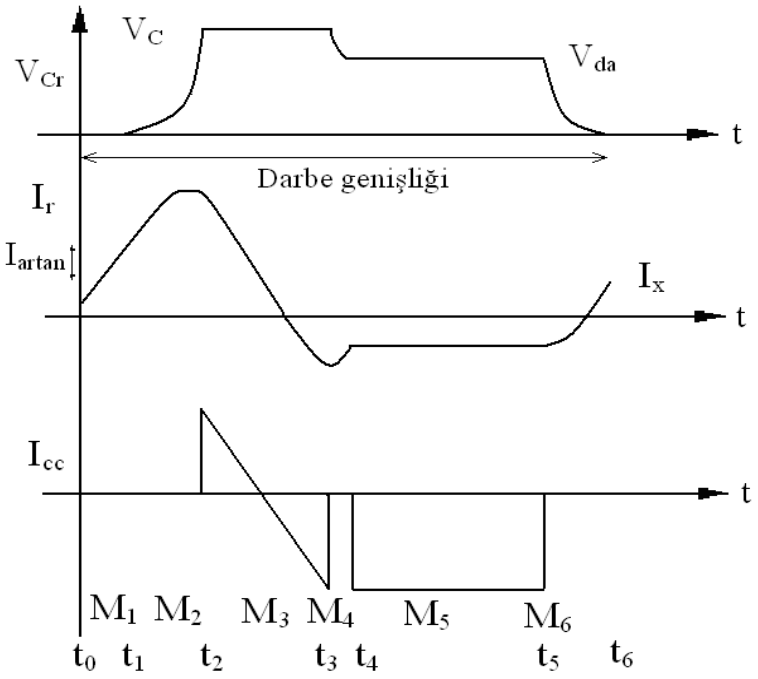
Şekil 3.14. Gerilim kenetlemeli paralel rezonanslı dönüştürücü.

Bu dönüştürücü Şekil 3.13'te gösterilmiş olan aktif kenetlemeli DA hatlı dönüştürücünün bir çeşididir. Burada S_y, D_y ve D_z rezonans hat geriliminin (V_{cr})

darbe genişliğini ayarlamak için kullanılmaktadır. Eklenen bu elemanlarla PWM kontrol yapısı elde edilir. Eviricinin dalga şekilleri Şekil 3.15'de gösterilmektedir. Eviricinin çalışması şu şekilde gerçekleşmektedir;

M_1 aralığında V_{cr}=0 ile başlar, eviricinin bütün anahtarları kısa devre edilir ve rezonans bobinindeki akım rampa şeklinde artar. Böylece, rezonans kayıpları ortadan kaldırılırken V_{cr}'nin sıfıra düştüğünden emin olunur.

M_2 durumu başladığında ana anahtarlar istenilen durum için anahtarlanırlar. L_r ve C_r arasındaki rezonans başlatılmış olur. M_3 aralığında V_{cr} kenetleme seviyesine ulaştığında D_x ve D_y rezonans bara gerilimine $V_{da}+V_c$ kenetlenir. D_x ve D_y iletime girdiğinde S_x ve S_y anahtarları sıfır gerilim şartlarında iletime geçirilir. Bu durum Şekil 3.15'te görüldüğü gibi rezonans akımının rampa şeklinde düşmesine ve ters yöne dönmesine neden olur.



Şekil 3.15. VCPRC'in tipik dalga şekli.

Rezonans akımı ters yönde akarken S_x ve S_y anahtarları arasında paylaşılır. Burada, PWM darbesi sonlandırılırken L_r bobininde V_{cr}'nin rezonansına yetecek kadar

enerjinin depolandığından emin olunmalıdır. Rezonans kapasite gerilimini sıfırlamak için gereken minimum akım,

$$I_{min} = I_x - I_r = \frac{\sqrt{V_{da}^2 - V_c^2}}{Z_0} \tag{3.7}$$

denklemi ile ifade edilir.

M_3 aralığının sonunda S_x ve S_y anahtarlarının her ikisi de kesime gider böylece C_r kapasitesi üzerindeki gerilim rezonans ile sıfırlanır ve mümkün olan minimum darbe genişliği üretilir. Bu daha önce incelenen ACRDCLI ile benzerdir.

M_4 aralığında yalnızca S_y kesime giderse V_{cr}, V_{da}'ya kadar rezonansa gider ve D_x vasıtasıyla bu değere kenetlenir.

M_5 aralığında, S_x anahtarı ile V_{cr} darbesinin genişletilmesi ve D_z serbest geçiş diyotu üzerinden I_r akımının geçmesi olayları gerçekleşir. Bu aralıkta I_r ve I_x akımlarının her ikisi de D_z ve S_x'den akar. Darbeyi sonlandırmak için S_x kesime götürülür ve V_{cr} sıfır için rezonansa girer.

Kısmi rezonanslı DA-hatlı eviricilerin amacı rezonans bara (hat) geriliminin darbe genişliğini denetlemektir. Bu dönüştürücülerin tasarım kriterleri rezonans kutuplu yapılara göre daha karmaşıktır. Yalnızca bir darbenin genişliği değişken olduğundan üç faz çıkışının tamamen denetlenmesi oldukça zordur. Prensip olarak çıkışın istenilen değerde uzay vektör ayarı yöntemi ile denetlenmesi için iki darbe genişliğinin bağımsız olması gerekir. Sabit frekans ile çalışma içinse üç darbe genişliğinin de bağımsız olarak denetlenmesi gerekir.

Kısmi rezonanslı DA-hatlı eviricilerin bir üstünlüğü de geleneksel PWM yöntemleri ile denetlenebilmeleridir. Yüksek frekansta sıfır gerilimde anahtarlama ve PWM yöntemleriyle aynı oranlarda verim olmak üzere iki faydası vardır. Bununla birlikte, yüksek anahtarlama frekanslarında tam hat kullanımı ve çok yüksek verime erişemezler.

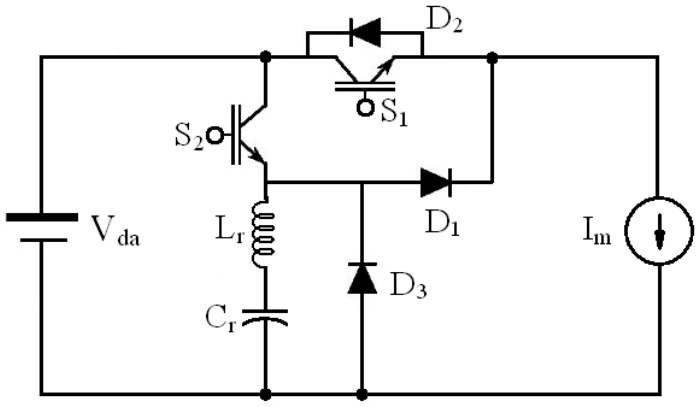
BÖLÜM 4. KISMİ REZONANSLI DA-HATLI EVİRİCİLER

4.1. Giriş

Yumuşak anahtarlama hücresinde, ana anahtar, yardımcı anahtar ve bütün diyotlarda kayıpsız geçişler sağlayabilmek, toplam kayıpları azaltmak, denetimi basitleştirmek ve elemanların streslerini azaltabilmek için iki, üç ve dört anahtar kullanılan çeşitli yapılar üzerinde çalışılmıştır [35–49].

4.2. İki Aktif Anahtar Kullanılan Yapılar

İki anahtarla gerçekleştirilen kısmi rezonanslı DA-hatlı evirici yapısı da Şekil 4.1'de gösterilmektedir [43]. Devrede iki adet anahtar kullanılmış ve bu anahtarlar V_{da} gerilim kaynağı ve evirici arasına bağlanmıştır. Şekil 4.1'den görüldüğü gibi devre, S_2 anahtarına seri olarak bağlı olan L_r ve C_r rezonans elemanları, S_1 anahtarı ve üç adet diyottan meydana gelmektedir. Bastırma hücresi, eviricinin anahtarlama anlarında hat gerilimini küçük bir aralık boyunca sıfıra çeker. Eviricinin AA tarafındaki yükün yüksek oranda endüktif olduğu düşünülürse evirici yapısı bir akım kaynağı I_m ile ifade edilebilir. Evirici anahtarlarının konumlarının değiştirilmek istendiği her hangi bir anda S_1 anahtarı belirlenen aralık boyunca hat gerilimini sıfıra çekmek için iletime geçirilir. Belirlenen sıfır gerilim aralığı boyunca evirici anahtarları sıfır gerilimde anahtarlanmış olur. Ayrıca burada seri S_1 anahtarı kayıpsız bir şekilde kesime gider. S_1 anahtarına paralel bulunan D_2 diyotu ise reaktif ya da rejeneratif akımın geri dönmesine olanak tanır.



Şekil 4.1. Kısmi rezonanslı DA-hatlı evirici yapısı.

Devrenin çalışması, Şekil 4.2'de görüldüğü gibi altı aralıktan oluşur. Başlangıçta V_{da} gerilimi S_1 ana anahtarı üzerinden yükü besler. Kısmi rezonanslı DA-hat devresi, hat gerilimini aşağıdaki aralıklarda anlatıldığı gibi sıfıra çeker.

M_1 aralığında S_2 anahtarı $t=t_0$ anında iletime geçirilir. Ana anahtar S_1 yük akımını geçirmeye devam eder, rezonans akımı seri LC rezonans devresinin içerisinden geçer ve C_r kapasitesini şarj eder. Kapasite akımı ve gerilimi Denklem(4.1) ve Denklem (4.2) ile ifade edilir.

$$i_c(t) = -(V_s - V_0)\sqrt{C_r / L_r}\,\sin\omega_0 t \tag{4.1}$$

$$V_c(t) = V_{da}(1 - \cos\omega_0 t) + V_0 \cos\omega_0 t \tag{4.2}$$

Burada V_0, kapasite üzerindeki başlangıç gerilimi ve ω_0 rezonans frekansıdır ($\omega_0 = 1/\sqrt{L_r C_r}$). Bu aralık Şekil 4.2'de görüldüğü gibi $t=t_1=\pi/\omega_0$ anında $i_c(t)$ kapasite akımı sıfıra giderken sona erer ve böylece S_2 anahtarı, sıfır akımda kesime gider. Denklem (4.2)'den $t=\pi/\omega_0$ anındaki kapasite geriliminin tepe değeri,

$$v_{c,\max} = 2V_{da} - V_0 \tag{4.3}$$

şeklinde bulunur. M_2 aralığında kapasite akımı yönünü değiştirir ve D_1 diyotu üzerinden Denklem (4.4)'te ifade edildiği gibi akar.

$$i_c(t) = (V_s - V_0)\sqrt{C_r / L_r}\sin\omega_0 t \tag{4.4}$$

Ana anahtar S_1 içerisinden geçen akım, $i_c(t)$ akımı artarken azalır. $i_c(t)=I_m$ olduğunda, $t=t_2$ anında S_1 sıfır akımda kesime gider. Kapasite gerilimi,

$$V_c(t) = V_s(1+\cos\omega_0 t) - V_0\cos\omega_0 t \tag{4.5}$$

şeklinde ifade edilir. M_3 aralığındaki akım ve gerilim denklemleri M_2 ile aynıdır. Rezonans devresinin akımının yük akımından artan kısmı $i_c(t)$-I_m, D_2 diyotu üzerinden kaynağa aktarılır. Bu aralık, $t=t_3$ anında, $i_c(t)$ akımının I_m değerine ulaşması ile biter.

M_4 aralığında kapasite sürekli akım modunda deşarj olmaya devam eder. Kapasite akımı ve gerilim denklemleri,

$$i_c(t)=I_m \tag{4.6}$$

$$V_c(t) = -\frac{I_m}{C_r}t + V_{c2} \tag{4.7}$$

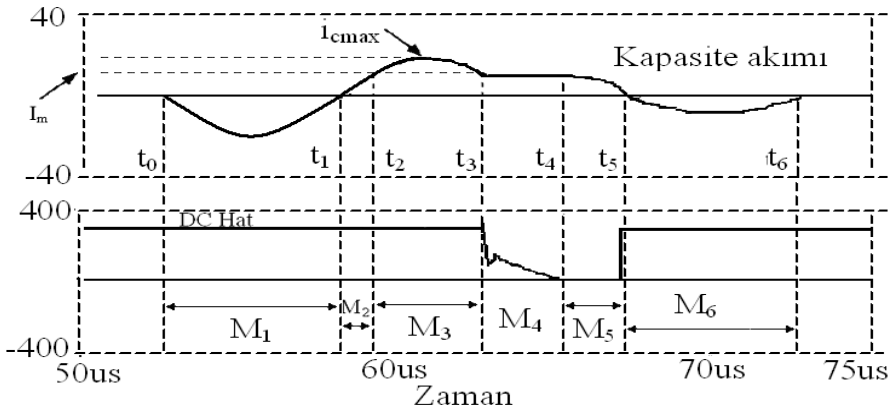
şeklinde ifade edilir. Burada V_{c2}, M_3 aralığındaki kapasite gerilimidir. Bu aralık $t=t_4$ anında $V_c(t)=0$ olduğunda sona erer ve akım D_3 ve D_1 diyotları üzerinden akar.

M_5 aralığında serbest geçiş diyotundaki kapasite akımı ve gerilimi,

$$i_c(t) = I_m \tag{4.8}$$

$$v_c(t) = -I_m\sqrt{C_r / L_r}\sin\omega_0 t \tag{4.9}$$

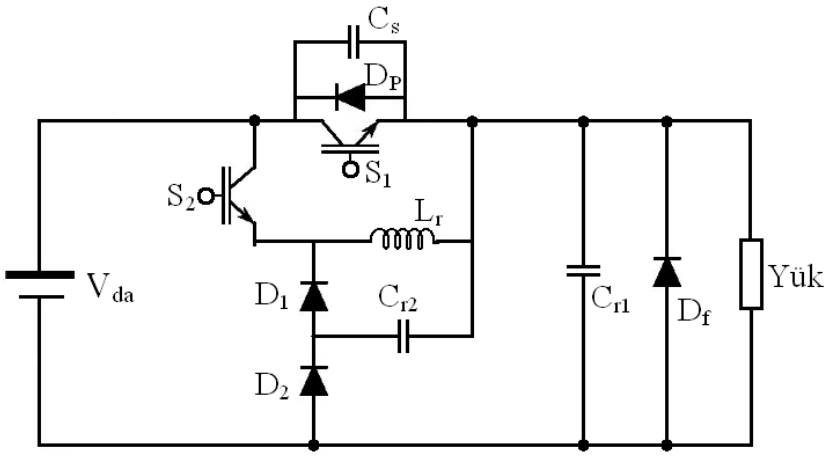
şeklinde ifade edilir. Bu aralık $t=t_5$ anında, kapasite akımı sıfıra düştüğünde sona erer. M_6 aralığında $t=t_5$ anında kapasite akımı sıfıra düştüğünde D_3 diyotu iletime geçer. Bu aralık $t=t_6$ anında kapasitenin geriliminin V_0 değerine şarj olması ve kapasite akımının sıfıra düşmesi ile sona erer.



Şekil 4.2. Kapasite akımı ve DA hat geriliminin dalga şekilleri[43].

Rezonans devre elemanlarının seçiminden sonra iki anahtar için anahtarlama işaretlerinin üretilmesi oldukça kolaydır. DA hat geriliminde oluşturulacak sıfır geçişleri, istenilen aralıktaki anahtarlama işaretleri ile kontrol edilir.

Şekil 4.1'de gösterilen evirici yapısına C_{r2} kapasitesinin eklenmesiyle oluşturulan yeni evirici yapısı Şekil 4.3'te gösterilmektedir [40]. Burada C_{r2} kapasitesini eklemenin iki yararı olacaktır. Bunlardan birincisi, S_2 yardımcı anahtarı iletime geçirildiğinde, DA-hat gerilimi herhangi bir sirkülasyon enerjisi olmadan kaynak gerilimine kenetlenir. İkinci olarak yardımcı anahtarın kesimi anında, V_{Cr2} gerilimi bu eleman üzerinde görülür ve değeri çok küçüktür. Böylece yardımcı anahtardaki kesim kayıpları büyük ölçüde azaltılmış olur.



Şekil 4.3. İki anahtarlı gerilim ara devreli evirici.

Şekil 4.3'te gösterilen devrenin çalışması, Şekil 4.4'te görüldüğü gibi, bir periyot için dokuz çalışma aralığından oluşmaktadır. Burada yük akımının sabit olduğu ve hat geriliminde dalgalanmaların oluşmadığı kabul edilmiştir.

M_1 aralığı başlamadan önce yük akımı, D_f serbest geçiş diyotu içerisinden akar. Bu aralık Şekil 4.4'te görüldüğü gibi yardımcı anahtar S_2'nin iletime geçirilmesiyle başlar. Yardımcı anahtar S_2, ZCS altında iletime girer. Rezonans bobini içerisinden geçen akım doğrusal olarak artarken, D_f içerisinden geçen akım da doğrusal olarak azalır. Bu aralık, rezonans bobini içerisinden geçen akımın yük akımına eşit olması ile sona erer.

M_2 aralığı, Şekil 4.4'te görüldüğü gibi D_f diyotunun kesime gitmesi ve L_r bobininin yük akımının tamamını taşıması ile birlikte başlar. L_r bobini ve Cr_2 kapasitesi arasında rezonans başlar ve Cr_1 kapasitesi şarj olur.

Şekil 4.4'ten görüldüğü gibi M_3 aralığında D_1 diyotu iletime geçer ve bu aralıkta rezonans bobininden geçen akımın toplamı Cr_1, Cr_2 ve yük üzerinden geçen akımların toplamına eşit olur. Bu aralık S_2'nın kesime gitmesiyle devam eder ve S_1 iletime geçer. Cr_1 kapasitesi üzerindeki gerilim, Cr_2 kapasitesinin de yardımıyla kaynak gerilimine kenetlenir.

M_4 aralığında S_1 ana anahtarı iletime geçirildiğinde ve yardımcı anahtar kesime götürüldüğünde yük akımı ana anahtar ve rezonans devresi arasında paylaşılır. Bu aralık rezonans bobini üzerinden geçen akım sıfıra düştüğünde sona erer.

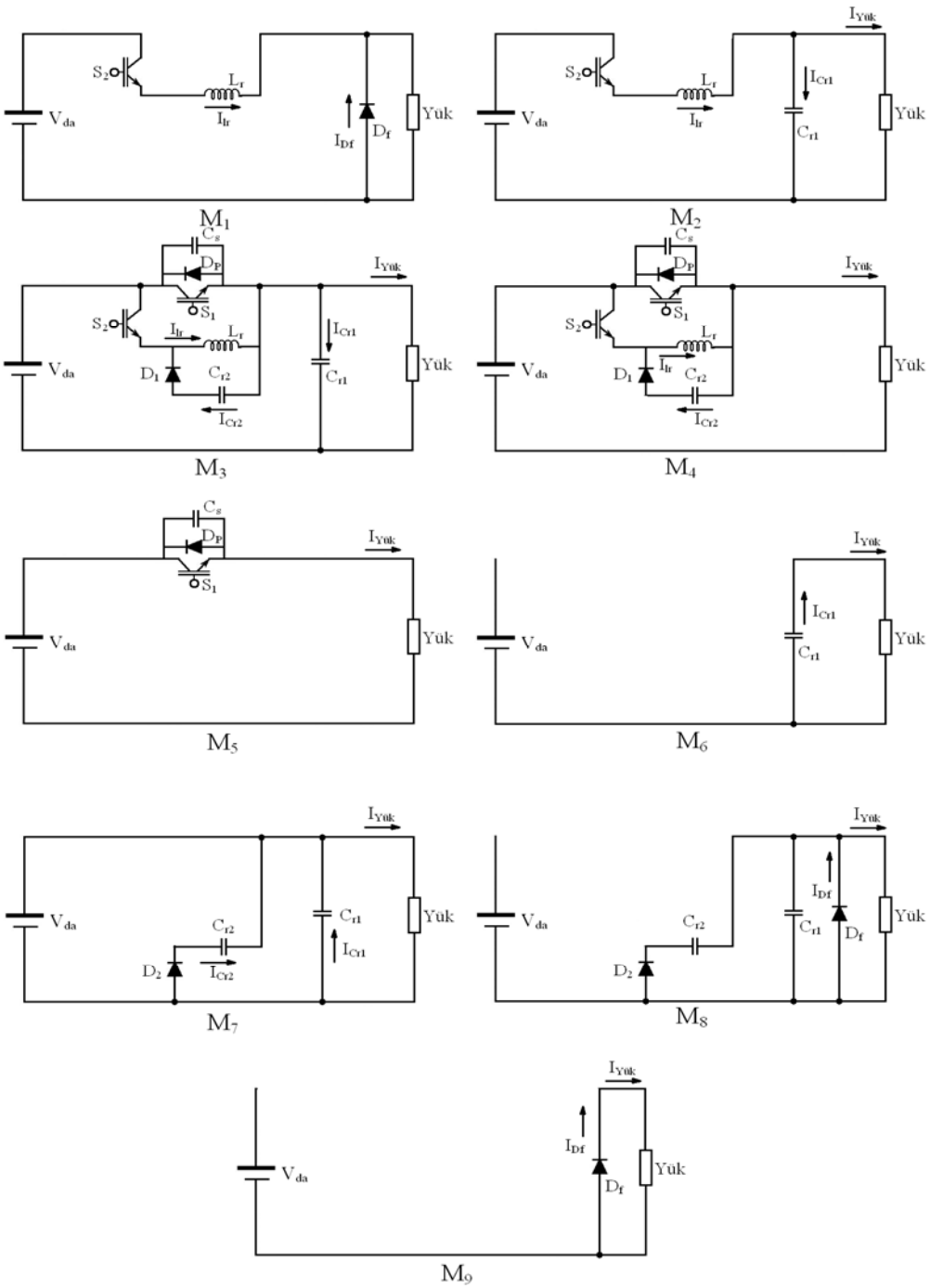
M_5 aralığında ana anahtar yük akımını taşır ve diğer devre elemanlarının hiç biri iletimde değildir.

M_6 aralığında ana anahtar bastırma kapasitesi C_s yardımıyla ZVS altında kesime gider. Cr_1 kapasitesi, yük akımını sağlar ve böylece üzerindeki gerilim Cr_2 gerilimine eşit oluncaya kadar deşarj olur.

M_7 aralığı Cr_1 ve Cr_2 kapasitelerinin deşarj olmasıyla başlar. Yük akımı I_0, Cr_1 ve Cr_2 kapasitelerinin deşarj akımlarının toplamına eşit olur.

M_8 aralığında kapasite deşarj akımları toplamının I_0 yük akımından daha düşük olmasıyla birlikte D_f serbest geçiş diyotu iletime geçer.

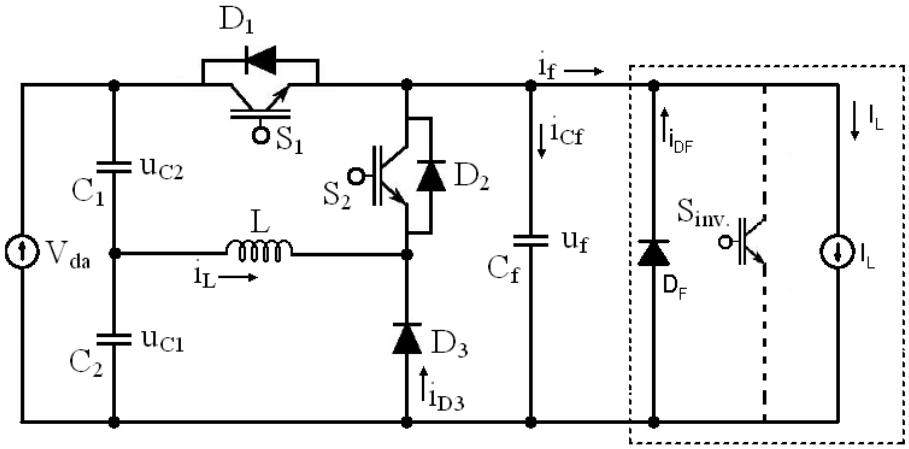
M_9 aralığında serbest geçiş diyotu D_f yük akımının tamamını iletir ve bir sonraki anahtarlama anı beklenir.



Şekil 4.4. Çalışma aralıkları [40].

Paralel kısmi rezonans devresi Şekil 4.5'te görüldüğü gibi evirici ve kaynak arasına bağlanmıştır. Devrede birbirine seri olarak bağlanan C_1 ve C_2 kapasiteleri gerilim kaynağına paralel olarak bağlanmıştır. Evirici ve V_{da} gerilim kaynağı, S_1 anahtarı ve D_1 diyotu ile ikiye ayrılmıştır. Kısmi rezonans devresi oluşturmak için kapasitelerin ortasına L bobini, paralel C_f kapasitesi, yardımcı anahtar S_2 ve D_2 diyotu bağlanmıştır [49].

Burada eviriciye bağlanan asenkron makinanın kaçak endüktansının, L bobininden çok daha büyük olduğu kabul edilmektedir. Evirici yük devresi, I_L akım kaynağı şeklinde modellenmiştir.



Şekil 4.5. Eşdeğer paralel kısmi rezonans devresi.

Motor çalışmada, bir anahtarlama periyodunda çalışma aralıkları aşağıdaki gibidir.

Aralık 0 [$-\infty$, t_0]: Paralel kısmi rezonanslı DA-hat devresinin analizi kararlı hal için yapılmıştır. Bu aralık başında t_0 anına kadar S_1 anahtarı iletimde ve S_2 anahtarı kesimdedir. Şekil 4.7.(a)'dan görüldüğü gibi u_f evirici giriş gerilimi, V_{da} kaynak gerilimine eşittir ve L üzerinden akım geçmemektedir.

Aralık 1 [t_0, t_1]: Yardımcı anahtar S_2, iletime girdikten sonra bobin içerisinden geçen i_L akımı C_1-L-S_2-S_1 yolu üzerinden doğrusal olarak artar. Bu aralık için I_L akımı, C_f kapasitesinin sabit deşarj akımıdır.

$$i_L(t > t_0) = -\frac{(1-k)\cdot V_{da}}{L}(t - t_0) \tag{4.10}$$

burada,

$$U_{C2} = k.V_{da} \tag{4.11}$$

$$k = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \tag{4.12}$$

Bir sonraki aralıkta rezonans işleminin gerçekleşmesi için L bobininde yeterli enerjinin depolanmış olması gerekmektedir.

Aralık 2 [t_1, t_2]: Şekil 4.7.(c)'den görüldüğü gibi S_1 anahtarı, giriş kapasitesi C_f üzerinden ZCS altında kesime gider. Kapasite akım ve gerilimi,

$$u_f(t > t_1) = k.V_{da} + (i_L(t_1) - I_L).\sqrt{\frac{L}{C_f}} \sin \omega(t - t_1) + (1-k)V_{da}.\cos \omega(t - t_1) \tag{4.13}$$

$$i_L(t - t_1) = (i_L(t_1) - I_L)\cos \omega(t - t_1) - \frac{(1-k).V_{da}}{\sqrt{\frac{L}{C_f}}} \sin \omega(t - t_1) + I_L \tag{4.14}$$

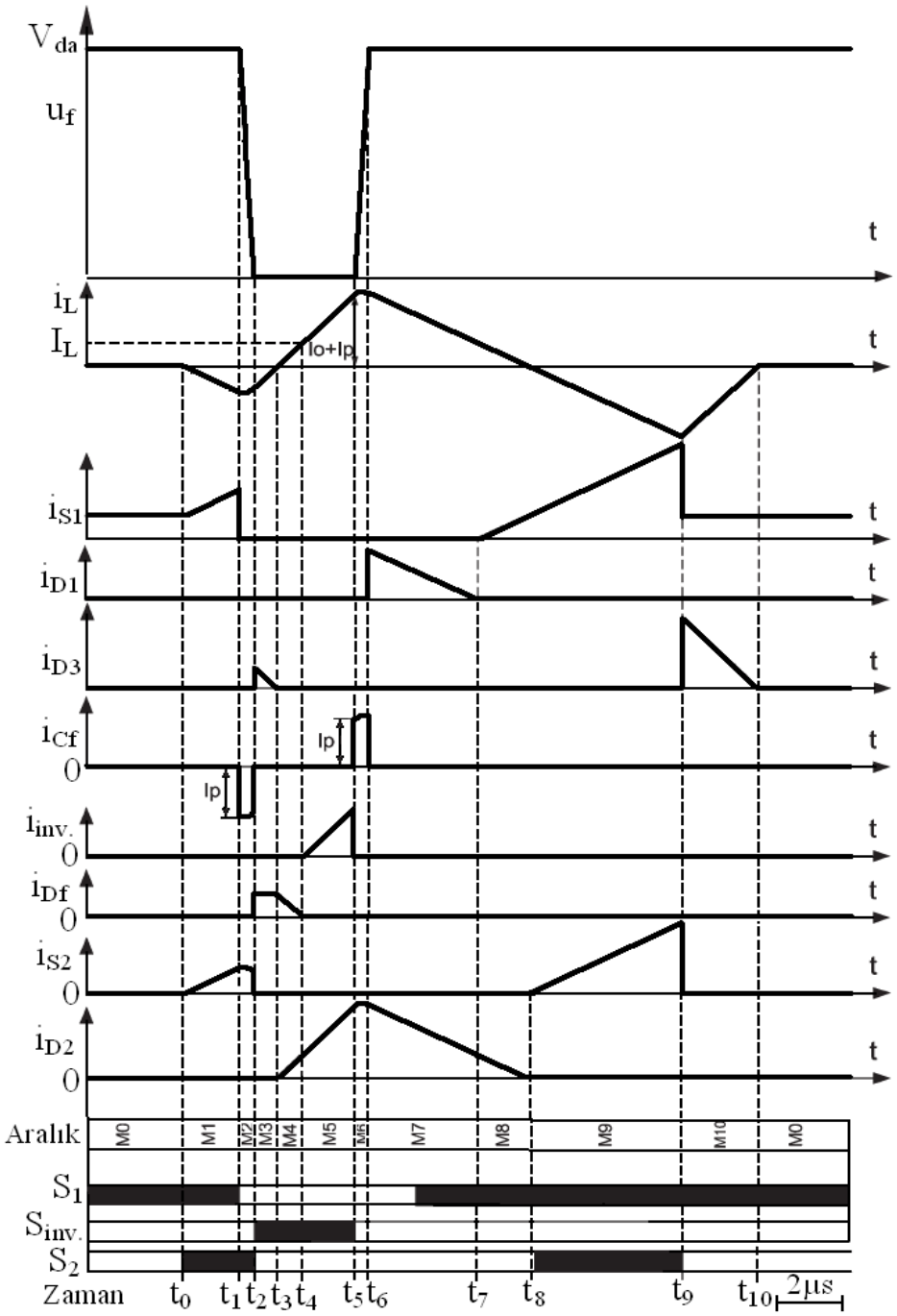
denklemleri ile ifade edilir.

Aralık 3 [t_2, t_3]: C_f kapasitesinin gerilimi t_2 anında sıfır olur. Bu aralıkta evirici anahtarları ZVS altında iletime geçerken, yardımcı anahtar S_2'de yine ZVS altında kesime gider. Yük akımı I_L, serbest geçiş diyotu D_f üzerinden akar. Bobin içerisinden geçen akım L-C_1-C_2-D_3 yolu üzerinden deşarj olur ve akım sıfıra düştüğünde bu aralık sona erer.

$$i_L(t > t_2) = i_L(t_2) + \frac{k.V_{da}}{L}(t - t_2) \tag{4.15}$$

Aralık 4 [t_3, t_4]: D_3 diyotunun kesime girmesinin ardından L bobini D_2 diyotu üzerinden tekrar şarj olur. Burada,

$$i_L(t > t_3) = \frac{k.V_{da}}{L}(t - t_3) \tag{4.16}$$



Şekil 4.6. Eşdeğer devreye ait akım ve gerilim şekilleri [49].

Şekil 4.7.(g) de görüldüğü gibi yük D_2 ve D_f diyotlarının oluşturduğu iki farklı devre üzerinden beslenir.

Aralık 5 [t_4, t_5]: Bobin içerisinden geçen akım, I_L akımından büyük olduğunda evirici anahtarları iletim durumuna geçer. Bu aralıkta, L bobini C_f kapasitesinde yeterli enerji depolayacak kadar şarj olmalıdır. Burada $i_L(t)$ akımı,

$$i_L(t > t_4) = \frac{k.V_{da}}{L}(t - t_4) + I_L \tag{4.17}$$

ile ifade edilir.

Aralık 6 [t_5, t_6]: Evirici anahtarları t_5 anında kesime gider ve L rezonans bobinindeki enerji C_f kapasitesine iletilir. Bu aralıkta,

$$i_L(t > t_5) = \frac{k.V_{da}}{\sqrt{\frac{L}{C_f}}} \sin \omega(t - t_5) + (i_L(t_5) - I_L)\cos \omega(t - t_5) + I_L \tag{4.18}$$

$$u_f(t > t_1) = k.V_{da} + (i_L(t_1) - I_L).\sqrt{\frac{L}{C_f}} \sin \omega(t - t_1) + (1 - k)V_{da}.\cos \omega(t - t_1) \tag{4.19}$$

eşitlikleri geçerlidir.

Aralık 7 [t_6, t_7]: Bu aralığın başında t_6 anında u_f kapasite geriliminin V_{da} hat gerilimine ulaşmasıyla D_1 diyotu iletime geçer. Rezonans bobini enerjisini L-D_2-D_1-C_1 yolu üzerinden boşaltır. Bu aralıkta,

$$i_L(t > t_6) = i_L(t_6) + \frac{(1 - k).V_{da}}{L}(t - t_6) \tag{4.20}$$

denklemi geçerli olur. S_1 ana anahtarı ZVS altında iletime girer.

Aralık 8 [t_7, t_8]: Rezonans bobini içerisinden geçen akım, yük akımından daha küçük olduğundan yük akımını karşılamak için S_1 anahtarı içerisinden de akım geçer. Şekil 4.7.(i)'de görüldüğü gibi bu aralıkta bobin içerisinden geçen akım doğrusal olarak sıfıra düşer.

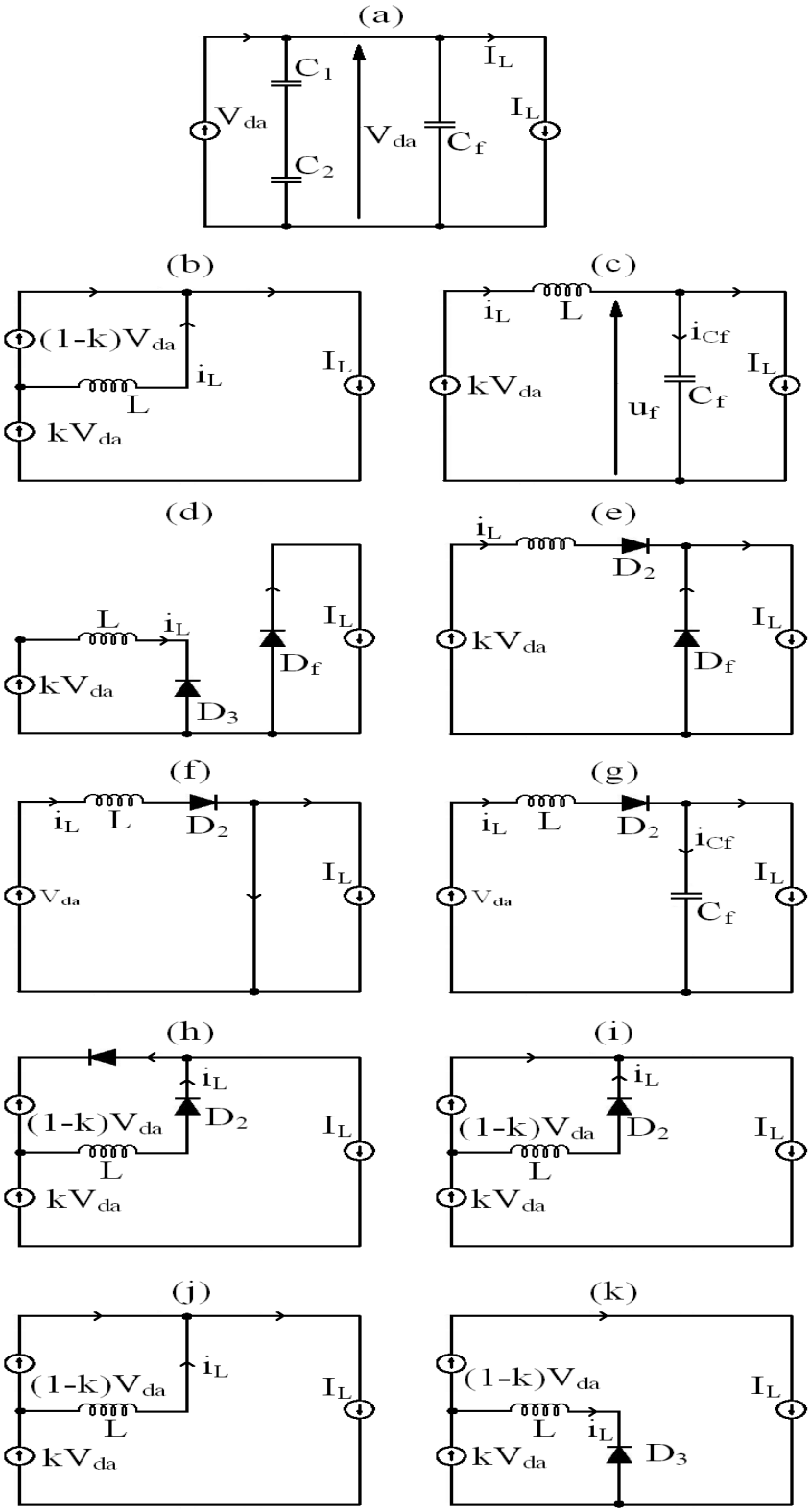
Aralık 9 [t_8, t_9]: C_1 ve C_2 kapasitelerindeki gerilimi dengede tutmak için S_2 anahtarı iletime geçirilir. Şekil 4.7.(j)'de görüldüğü gibi rezonans bobini içerisinden geçen akım C_1-S_1-S_2-L yolunu izler.

$$i_L(t > t_8) = -\frac{(1-k).V_{da}}{L}(t - t_8) \tag{4.21}$$

Aralık 10 [t_9, t_{10}]: Bu aralıkta yardımcı anahtar S_2 kesime gider ve bobin içerisinden geçen akım L-C_2-D_3 elemanları üzerinden sıfıra düşer. Bu aralıkta,

$$i_L(t > t_9) = i_L(t_9) + \frac{k.V_{da}}{L}(t - t_{10}) \tag{4.22}$$

denklemi geçerli olur.



Şekil 4.7. Eşdeğer devreye ait çalışma aralıkları [49].

4.3. Üç Aktif Anahtar Kullanılan Yapılar

Üç anahtar kullanılarak gerçekleştirilen yumuşak anahtarlama hücresi Şekil 4.8'te gösterilmektedir [42]. Yardımcı anahtar devresi, S_1 anahtarı, D_1 diyotu ve C_r kapasitesinden oluşmaktadır. Bu devrede $I_p>0$ ve S_1 anahtarı iletimdeyken V_{da} kaynağının dönüştürücüye bağlandığı düşünülmektedir.

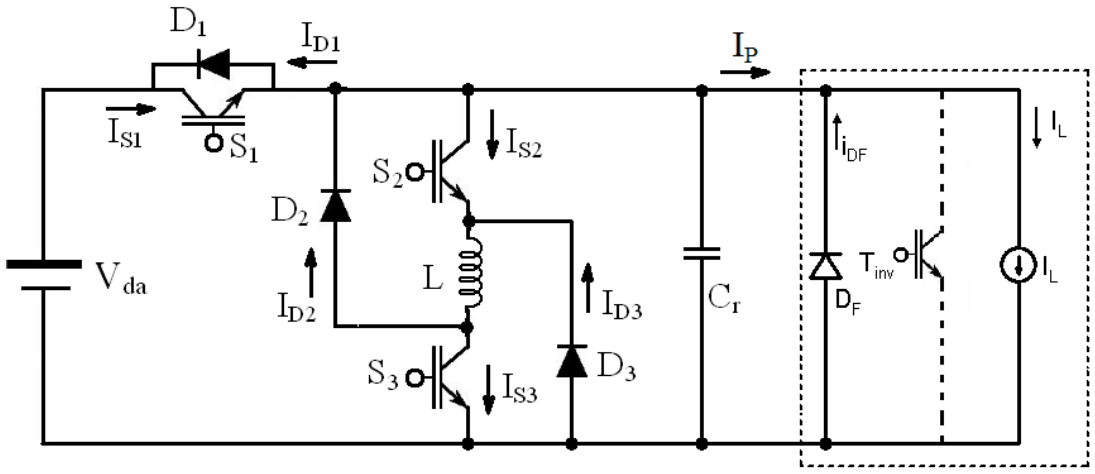
Burada kullanılan evirici yapısında amaç, anahtarlama anlarında hat gerilimini sıfıra çekmektir. Şekil 4.8'ten de görüldüğü gibi üç fazlı evirici yerine akım kaynağı, anahtar ve diyot kullanılmıştır. Devrenin çalışması altı aralıkta incelenir. Analiz, S_1 iletimde, S_2 ve S_3 kesimde ve V_{Cr} kapasitesinde V_{da} gerilimine eşit olduğu durum ile başlar.

Aralık 1 [t_0, t_1]: Bu aralık, Şekil 4.9.(a)'da görüldüğü gibi, $t=t_0$ anında S_2 ve S_3 anahtarlarının iletime girmesiyle başlar. Bobin akımı $t=t_1$ anında I_{Lkrit} değerine ulaşana kadar doğrusal olarak artar. V_{Cr} kapasite gerilimi, V_{da} değerine eşit olur. Bobin akımı,

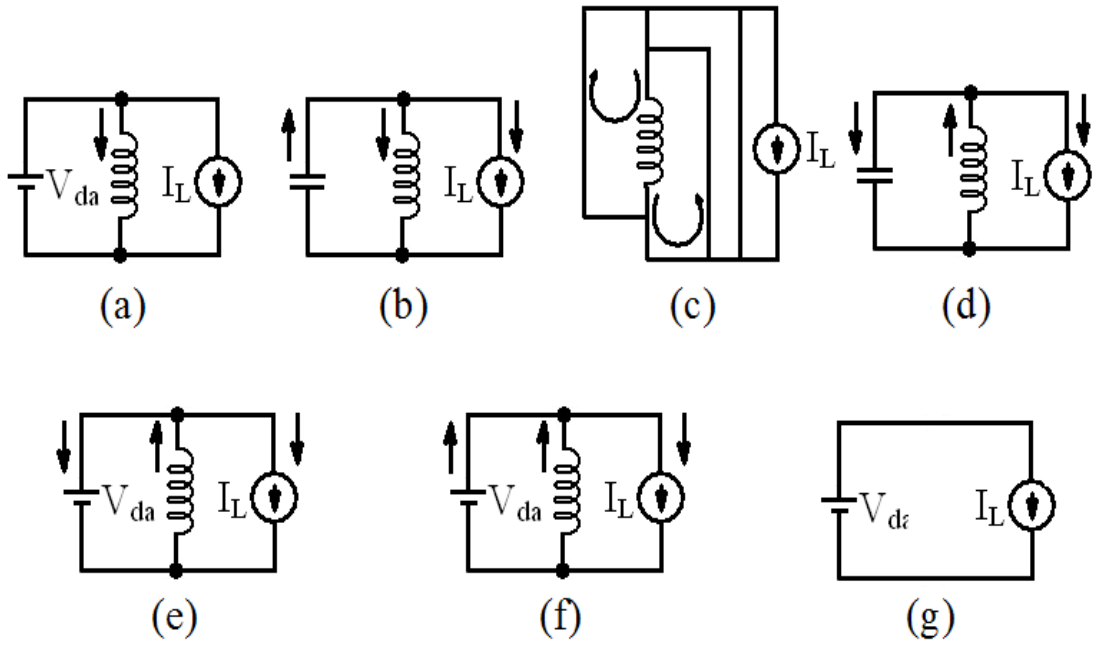
$$i_L(t) = \frac{1}{L} V_{DC}(t - t_0) \tag{4.23}$$

şeklinde ifade edilir. $t=t_1$ anında bobin akımı,

$$i_L(t_1) = I_{Lkrit} \tag{4.24}$$



Şekil 4.8. SIS devresinin modeli.



Şekil 4.9. Çalışma aralıkları.

olur. Bobinde depolan enerji,

$$W_L = \frac{1}{2} L.i_L^2(t_1) = \frac{1}{2} L(I_{Lkrit})^2 \tag{4.25}$$

şeklinde ifade edilir.

Aralık 2 [t_1, t_2]: Bu aralıkta Şekil 4.9.(b)'de gösterildiği gibi S_1 anahtarı, $t = t_1$ anında kesime gider ve V_{da} gerilim kaynağı devreden ayrılır. Kapasite gerilimi v_C ve bobin akımı i_L,

$$v_C(t) = V_{da}.\cos\left[\omega_R.(t-t_1)\right] - (I_{Lkrit} + I_L) Z_0.\sin\left[\omega_R.(t-t_1)\right] \tag{4.26}$$

$$i_L(t) = (I_{Lkrit} + I_L).\cos\left[\omega_R.(t-t_1)\right] + \frac{V_{da}}{Z_0}.\sin\left[\omega_R.(t-t_1)\right] - I_L \tag{4.27}$$

şeklinde ifade edilir. Burada;

$$\omega_R = 1/\sqrt{LC} \tag{4.28}$$

$$Z_0 = \sqrt{L/C} \tag{4.29}$$

eşitlikleri geçerlidir. Bu çalışma aralığı t=t_2 anında C_r kapasitesinin deşarj olmasıyla biter. Böylece:

$$v_c(t_2) = 0 \tag{4.30}$$

$$i_L(t_2) = I_{L\max} \tag{4.31}$$

eşitlikleri geçerli olur. Bobinde depolan enerji:

$$W_L = \frac{1}{2} L.i_L^2(t_2) = \frac{1}{2} L(I_{Lkrit})^2 \tag{4.32}$$

şeklinde ifade edilir.

Aralık 3 [t_2, t_3]: Bu aralığın başında t = t_2 anında C_r kapasitesi tamamen deşarj olmuştur ve yardımcı anahtarlar S_2 ve S_3'e hala anahtarlama işaretleri uygulanmaktadır. Bununla beraber D_2 ve D_3 diyotları L bobini içerisinden geçen akım için serbest geçiş yolu oluştururlar. Bu aralıkta eviricinin anahtarları ZVS altında anahtarlanmış olur. Bobin akımı i_L ve depolanan enerji, v_L = 0 durumuna kadar sabit kalır. Bu aralık eviricide her anahtarlama işleminde gerçekleştirilir ve S_2 ve S_3'ün kesime gittiği t=t_3 anında biter. S_1 anahtarının kesim durumu devam eder. Bu andaki bobin akımı,

$$i_L(t_3) = i_L(t_2) = I_{L\max} \tag{4.33}$$

şeklinde ifade edilir.

Aralık 4 [t_3, t_4]: Bu aralıkta, L bobininde depolanmış olan enerji t = t_3 anından sonra C_r kapasitesinde depolanır ve kapasite sıfırdan V_{da} değerine şarj olur. Kapasite gerilimi,

$$v_C(t) = Z_0\left(I_{L\max} + I_L\right).\sin\left[\omega_R.\left(t - t_3\right)\right] \tag{4.34}$$

şeklinde ifade edilir. Bobin akımı;

$$i_L(t) = \left(I_{L\max} + I_L\right).\cos\left[\omega_R.\left(t - t_3\right)\right] + I_L \tag{4.35}$$

şeklinde ifade edilebilir.

Aralık 5 [t_4, t_5]: Bu aralığın başında $t=t_4$ anında, v_c gerilimi ve i_L akımının değerleri $v_c(t_4)=V_{da}$ ve $i_L(t_4)>I_0$'dır. Kapasite üzerinde depolanan enerjiden dolayı D_1 diyotu iletime geçer ve bobin akımı çıkış akımından daha büyük olur. Bobin üzerinden akan akım sıfır olmadığı için D_2 ve D_3 diyotları hala iletimdedir. Bobinden akan akım i_L doğrusal olarak şu şekilde ifade edilir.

$$i_L(t) = \frac{1}{L}V_{da}\left(t - t_4\right) + i_L(t_4) \tag{4.36}$$

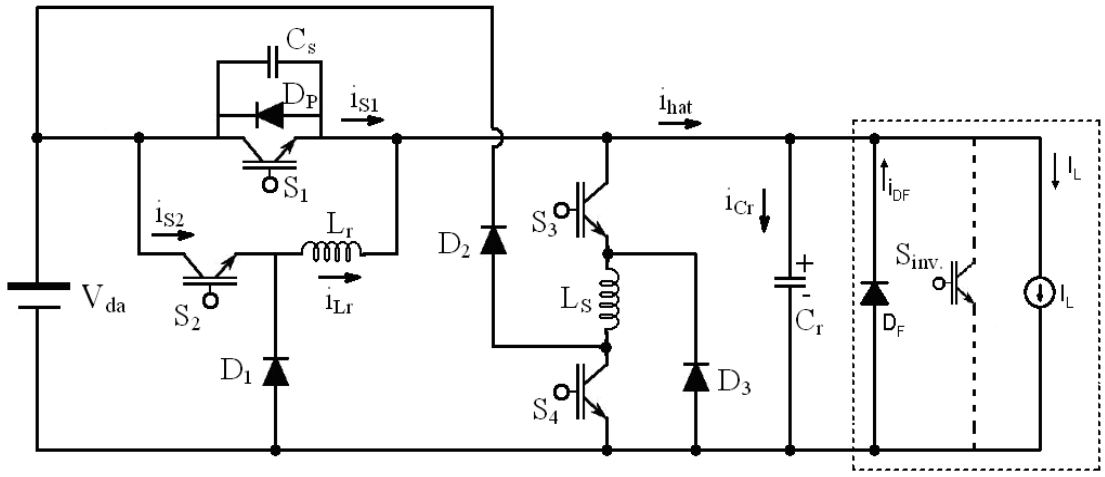
Burada t_4 anındaki i_L akımı Şekil 4.9.(g)'de verilmiştir. D_1 diyotu $t=t_5$ anında $i_L=I_L$ olana kadar iletimde kalır.

Aralık 6 [t_5, t_6]: Bu aralıkta bobin akımı $t=t_5$ anında çıkış akımına eşit olur ve D_1 diyotu kesime giderken S_1 anahtarı da iletmeye başlar. Bu aralıkta devrenin iki durumu söz konusudur. Birinci durumda, akım S_1 anahtarı ve L, D_2 ve D_3 yolundan geçerek yükü besler. İkinci durumda ise bobin akımı doğrusal olarak azalırken ve S_1 içerisinden geçen akım doğrusal olarak artar.

Şekil 4.9.(g)'den görüldüğü gibi bobin akımı i_L, $t=t_6$ anında sıfır olduğunda D_2 ve D_3 diyotları kesime gider. Gerilim kaynağı V_{da} eviriciyi besler ve $i_{S1}=I_L$ olur. Böylece ZVS işlemi tamamlanmış olur. Burada anlatılan $t_P=t_6-t_0$ aralığı evirici anahtarı konum değiştirilmek istendiğinde ilklendirilerek anahtarlama işlemi gerçekleştirilebilir.

4.4. Dört Aktif Anahtar Kullanılan Yapılar

Dört anahtar kullanılarak gerçekleştirilen yumuşak anahtarlama yapısı Şekil 4.10'da görülmektedir. Burada, DA hat akımı hat içerisinde serbestçe dolanmakta ve i_{hat} şeklinde ifade edilmektedir. Bu devre ile, bobin içerisinde depolanan enerji hem evirici tarafına hemde kaynak tarafına gönderilebilmekte ve her anahtarlama durumu için ZVS şartlarını sağlamaktadır. Evirici çalışma aralıkları incelenirken i_{hat} akımının pozitif yada negatif olmasına göre iki farklı çalışma durumu ortaya çıkar [46].

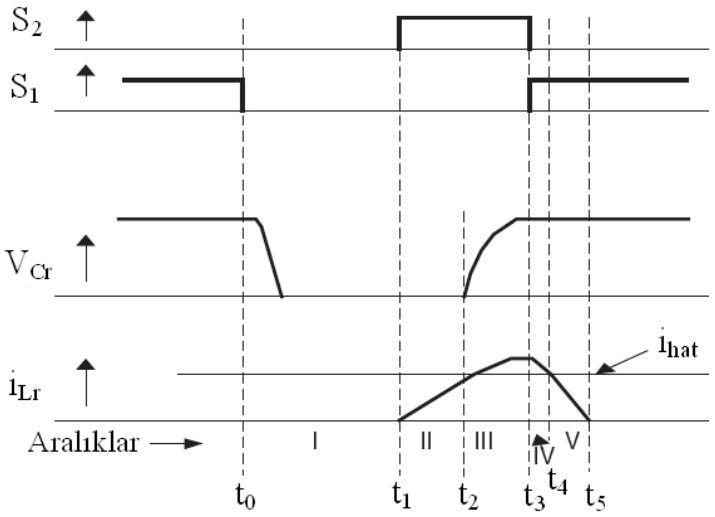


Şekil 4.10. Dört anahtarlı eşdeğer paralel kısmi rezonans devresi.

DA hat akımının pozitif olma durumu için devreye ait akım ve gerilim dalga şekilleri Şekil 4.11'den görülmektedir. S_1 ana anahtarı, DA hat akımını iletir ve rezonans kapasitesi C_r hat gerilimine kenetlenir. Şekil 4.12 de eviricinin yumuşak anahtarlama işleminde ortaya çıkan çalışma aralıkları görülmektedir.

Aralık 1 [t_0, t_1]: Bu aralık Şekil 4.11 ve 4.12.(a)'da gösterildiği gibi S_1'in anahtarlama işaretinin kesilmesiyle başlar. Aralığın başında rezonans kapasitesi kısa sürede deşarj olur. Evirici anahtarlarına bağlı ters paralel diyotlar, üzerlerindeki gerilimin sıfır olması nedeniyle ileri yönde iletime geçer. Evirici anahtarları ZVS altında konumlarını değiştirirler. Bu aralık t_1 anında yardımcı anahtar S_2'nin iletime geçirilmesiyle sona erer.

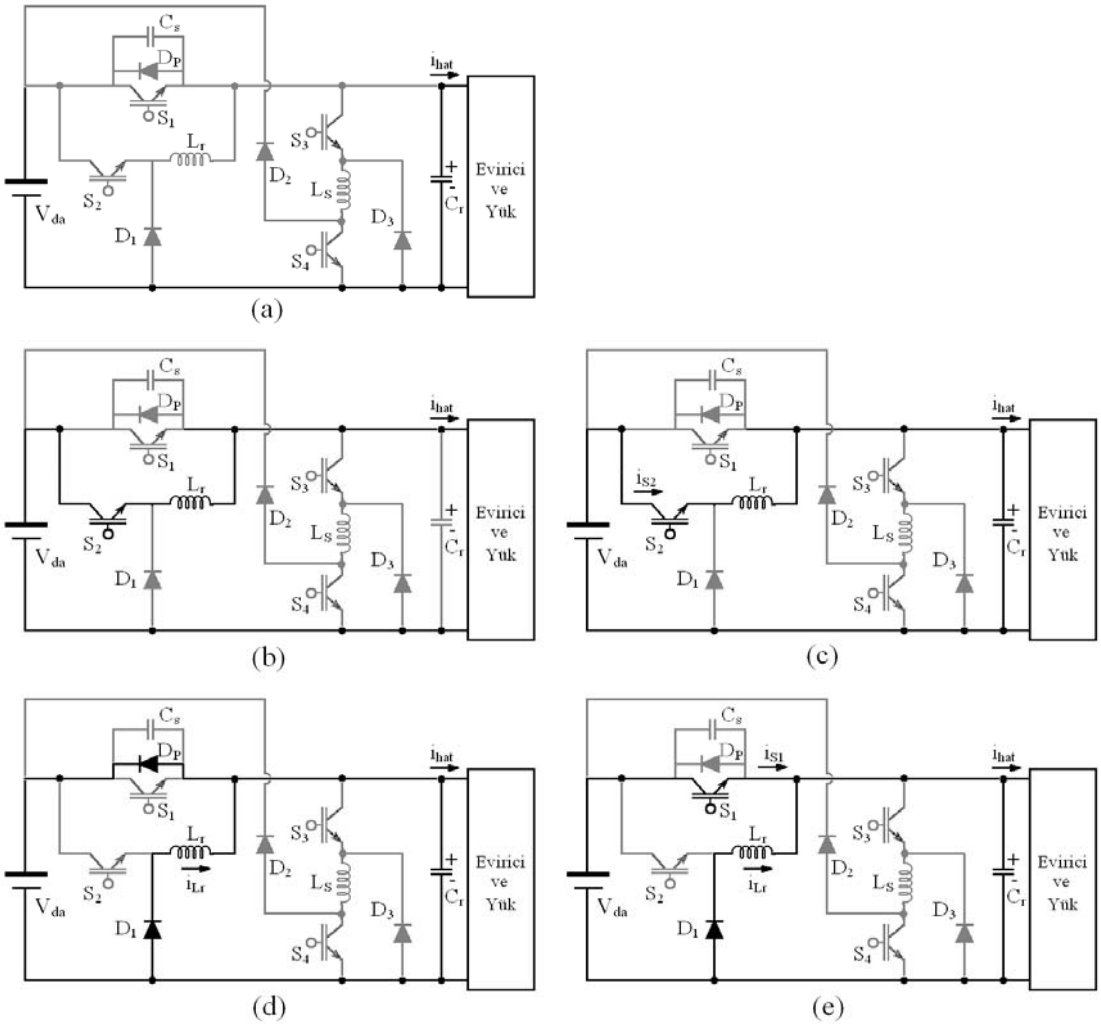
Aralık 2 [t_1, t_2]: Bu aralık Şekil 4.12.(b)'de görüldüğü gibi t_1 anında yardımcı anahtar S_2'nin iletime girmesiyle başlar. Evirici diyotlarından geçen akım azalırken rezonans bobini içerisinden geçen akım doğrusal olarak artar. Yardımcı anahtar S_2, rezonans bobini L_r nedeniyle ZCS altında iletime geçer. Aralık, rezonans bobini içerisinden geçen akım hat akımına eşit olduğunda sona erer.



Şekil 4.11. DA hat akımının pozitif olma durumu için akım ve gerilim dalga şekilleri [46].

Aralık 3 [t_2, t_3]: Bu aralık Şekil 4.12.(c)'de görüldüğü gibi L_r ve C_r elemanları arasındaki rezonansla başlar ve bobin üzerindeki enerji kapasiteye aktarılır. Bobin akımı kapasite şarj akımı ve hat akımının toplamına eşit olur. DA hat gerilimi sıfırdan V_{da} gerilimine yükselir. Rezonans bobini nedeniyle hat geriliminin daha fazla yükselmesi D_P diyotunun ileri yönde iletime girmesine neden olur. Hat gerilimi kaynak gerilimine eşit olduğunda, yardımcı anahtar kesime götürülürken ana anahtar da iletime götürülür. Bu aralık Şekil 4.11'de görüldüğü gibi t_3 anında sona erer.

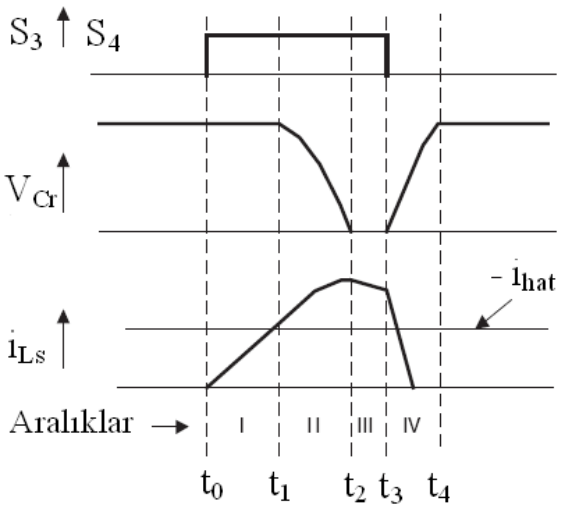
Aralık 4 [t_3, t_4]: Bu aralığın başında t_3 anında ana anahtar iletime geçerken yardımcı anahtar kesime gider. Rezonans bobininin akımı hat akımından daha fazladır. Bu fazlalık akım ana anahtara bağlı olan serbest geçiş diyotu D_p üzerinden iletilir. Aralık bobin akımı hat akımına eşit olduğunda sona erer.



Şekil 4.12. DA hat akımı pozitif olma durumu için çalışma aralıkları [46].

Aralık 5 [t_4, t_5]: Bu aralık, Şekil 4.12.(e)'de görüldüğü gibi t_4 anında D_p diyotu içerisinden geçen akımın sıfıra düşmesi ve ana anahtarın iletime geçmesiyle başlar. Hat akımı, bobin akımı ve ana anahtar içerisinden geçen akımın toplamına eşittir. Bu aralık bobin üzerindeki enerjinin eviriciye aktarılması ve hat akımının ana anahtar içerisinden geçen akıma eşit olmasıyla sona erer.

DA hat akımının negatif olma durumunu ifade eden, anahtarlama işaretleri, kapasite gerilimi paralel bobin akımı Şekil 4.13'te gösterilmektedir. Bu aralıkta hat akımının eviriciden kaynağa doğru iletildiği varsayılır. DA hat gerilimi D_p diyotunun iletimi nedeniyle kaynak gerilimine kenetlenir. Rezonans hattındaki anahtarlar kesim durumundadır. Aşağıdaki aralıklar bu çalışma durumunu açıklamaktadır.

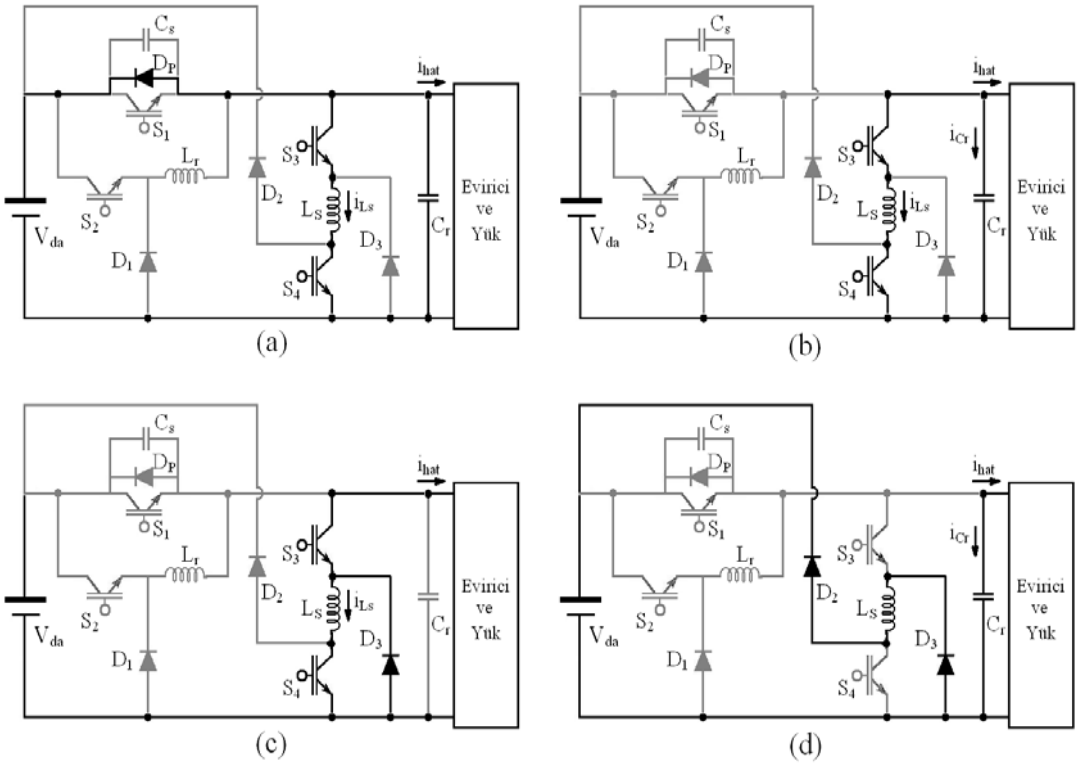


Şekil 4.13. DA hat akımı negatif olma durumu akım ve gerilim dalga şekilleri [46].

Aralık 1 [t_0, t_1]: Bu aralık, Şekil 4.14.(a)'da görüldüğü gibi t_0 anında S_3 ve S_4 anahtarlarının iletime geçirilmesiyle başlar. Hat gerilimi, D_P diyotunun iletimde olması nedeniyle kaynak gerilimine kenetlenmiştir. Hat akımı, D_P diyotundan ve L_S bobininden geçen akımların toplamına eşittir. Bu aralık bobin akımı hat akımına eşit olduğunda sona erer.

Aralık 2 [t_1, t_2]: D_P diyotu kesime gittiğinde rezonans kapasitesi deşarja başlar. Bu aralık Şekil 4.14.(b)'de gösterildiği gibi t_1 anında başlar. L_S bobinindeki akım rezonans kapasitesinden ve hat akımının toplamına eşittir. Bu aralık rezonans kapasitesinin tamamen deşarj olmasıyla sona erer.

Aralık 3 [t_2, t_3]: Şekil 4.14'te görüldüğü gibi rezonans kapasitesi tamamen deşarj olduğunda evirici anahtarları ZVS altında konumlarını değiştirirler. Bu anda rezonans bobinindeki enerjiden dolayı D_3 diyotu iletime geçer. DA hat, S_3 ve D_3 elemanları üzerinden kısa devre olur. S_4 anahtarı bobin içerisinden geçen akımı taşır. Bu aralık S_3 ve S_4 anahtarının kesime götürülmesi ile sona erer.



Şekil 4.14. DA hat akımı negatif olma durumu için çalışma aralıkları.

Aralık 4 [t_3, t_4]: Paralel anahtarın kesime götürülmesiyle L_S bobininde depolanan enerji D_2 ve D_3 diyotları yardımıyla kaynağa iletilir. Bu aralık Şekil 4.14'te görüldüğü gibi D_2 ve D_3 diyotlarının iletime girmesiyle başlar. Bobin içerisinden geçen akım düşerken rezonans kapasitesi de kaynak gerilimine şarj olur. Serbest geçiş diyotu D_P ileri yönde kutuplanır ve hat akımının tamamını üzerinden geçirir. Böylece paralel anahtarlar ZVS altında kesime gitmiş olur.

BÖLÜM 5. YUMUŞAK ANAHTARLAMALI EVİRİCİLER İÇİN YENİ BİR ZVT-ZCT KISMİ REZONANSLI DA HAT

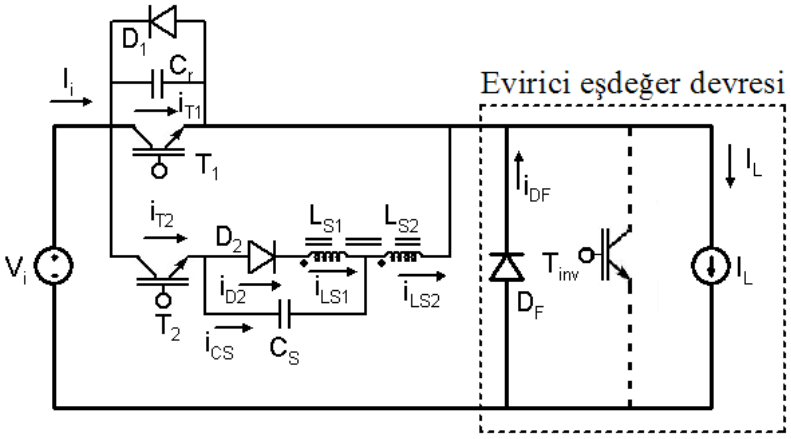
5.1 Giriş

Bu bölümde, yumuşak anahtarlamalı eviriciler için geliştirilen yeni bir ZVT-ZCT kısmi rezonanslı DA hat sunulmuştur.

5.2.Tanımlar ve Kabuller

Yumuşak anahtarlamalı eviriciler için geliştirilen yeni ZVT-ZCT kısmi rezonanslı DA hat ile birlikte evirici devresi Şekil 5.1'de görülmektedir. Sunulan aktif yumuşak anahtarlama hücresi; manyetik kuplajlı L_{S1} ve L_{S2} endüktansları, C_S bastırma kondansatörü, C_r rezonans kondansatörü, T_1 ana anahtarı, T_2 yardımcı anahtarı, D_1 ve D_2 yardımcı diyotlarından oluşmaktadır. D_1 diyotu, tercih edilen anahtara göre, ana anahtarın yapısında bulunabilir. C_r rezonans kondansatörü, T_1, D_1 ve D_F elemanlarının eşdeğer kapasitansıdır.

Şekil 5.1'de verilen devrenin bir anahtarlama periyodu boyunca kararlı durum analizini kolaylaştırmak için, giriş-çıkış gerilimleri ve çıkış akımı sabit, yarı iletken elemanlar ile rezonans devreleri ideal kabul edilmiştir. Ayrıca D_F serbest geçiş diyotu ve diğer diyotların ters toparlanma süreleri dikkate alınmamıştır.



Şekil 5.1. Yeni ZVT-ZCT kısmi rezonanslı DA hatlı evirici.

5.3. Devrenin Çalışma Aralıkları

Sunulan ZVT-ZCT kısmi rezonanslı DA hatlı yumuşak anahtarlama hücresinin kararlı hal çalışmasında, bir anahtarlama periyodu için on farklı çalışma aralığı oluşmaktadır. Çalışma aralıklarının eşdeğer devre şemaları Şekil 5.2(a)-(j)'de ve bu aralıklara karşılık gelen temel dalga şekilleri Şekil 5.3'te verilmiştir.

Aralık 1 [$t_0<t<t_2$: Şekil 5.2.(a)]

Bu aralığın başında, $i_{T1}=0$, $i_{T2}=0$, $i_{DF}=I_L$, $i_{Cs}=i_{LS1}=i_{LS2}=0$ ve $v_{CS}=V_{CSmax2}$ eşitlikleri geçerlidir. $t=t_0$ anında, T_1 ana anahtarı ve T_2 yardımcı anahtarı kesim durumundadır ve D_F serbest geçiş diyotu I_L yük akımını iletmektedir. T_2 yardımcı anahtarının girişine kontrol işaretinin uygulanması ile Vi-T_2-C_S-LS2-D_F yolu üzerinden bir rezonans başlar. T_2 içinden geçen akımı sinüzoidal olarak yükselirken D_F içerisinden geçen akım azalır. Bu aralık için,

$$v_{CS}(t) = \left(V_i + V_{Cs\max 2}\right)\cos\left(\omega_0\left(t-t_0\right)\right) - V_i \tag{5.1}$$

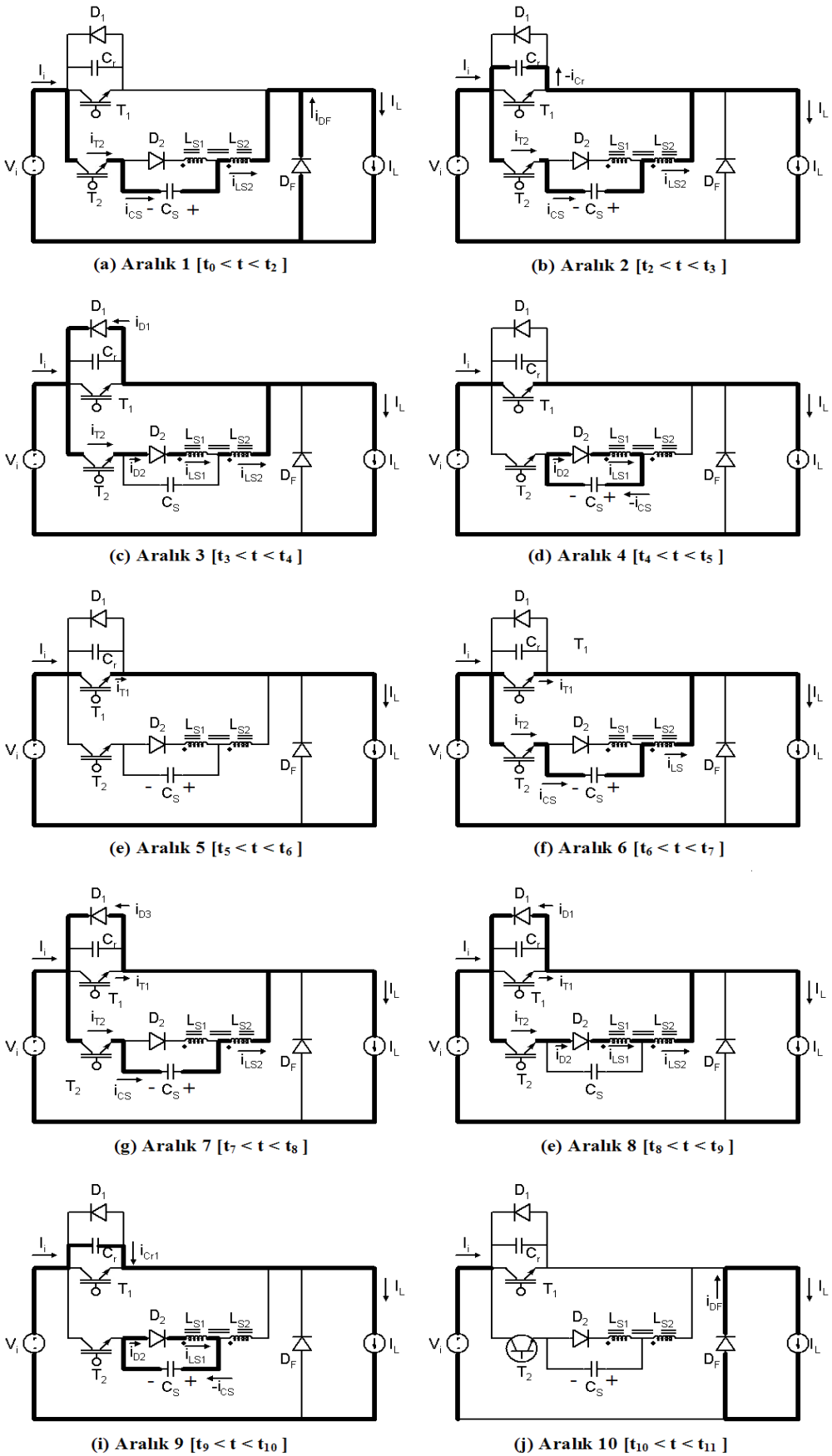
$$i_{LS2}(t) = i_{CS}(t) = i_{T2}(t) = \frac{V_i + V_{Cs\max 2}}{Z_0}\sin\left(\omega_0\left(t-t_0\right)\right) \tag{5.2}$$

$$i_{DF} = I_L - i_{LS2}(t) = I_L - \frac{V_i + V_{Cs\max 2}}{Z_0}\sin\left(\omega_0\left(t-t_0\right)\right) \tag{5.3}$$

$$t_{01} = \frac{1}{\omega_0}\arcsin\left(\frac{I_L Z_0}{V_i + V_{Cs\max 2}}\right) \tag{5.4}$$

$$t_{12} = \frac{1}{\omega_0}\left[\arcsin\left(\frac{\left(I_L + I_{rr}\right)Z_0}{V_i + V_{Cs\max 2}}\right) - \arcsin\left(\frac{I_L Z_0}{V_i + V_{Cs\max 2}}\right)\right] \tag{5.5}$$

denklemleri elde edilir. $t=t_1$ anında, i_{T2} akımı I_L değerine ulaşır ve i_{DF} sıfıra düşer. Daha sonra i_{DF} akımı t_2 anında $-I_{rr}$ değerine ulaşır. Bu aralık, D_F serbest geçiş



Şekil 5.2. Sunulan devrede çalışma aralıklarının eşdeğer devre şemaları.

diyotunun kesime gitmesiyle sona erer. T_2 yardımcı anahtarı L_{S2} bastırma bobini yardımıyla ZCS altında iletime girerken, D_F serbest geçiş diyotu da ZCS ve ZVS altında kesime girmiş olur. Burada,

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{S2} C_S}} \tag{5.6}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_{S2}}{C_S}} \tag{5.7}$$

eşitlikleri geçerlidir. Serbest geçiş diyotu için, I_{rr} ters toparlanma akımını ve t_{rr} ters toparlanma süresini gösterir.

Aralık 2 [$t_2<t<t_3$: Şekil 5.2.(b)]

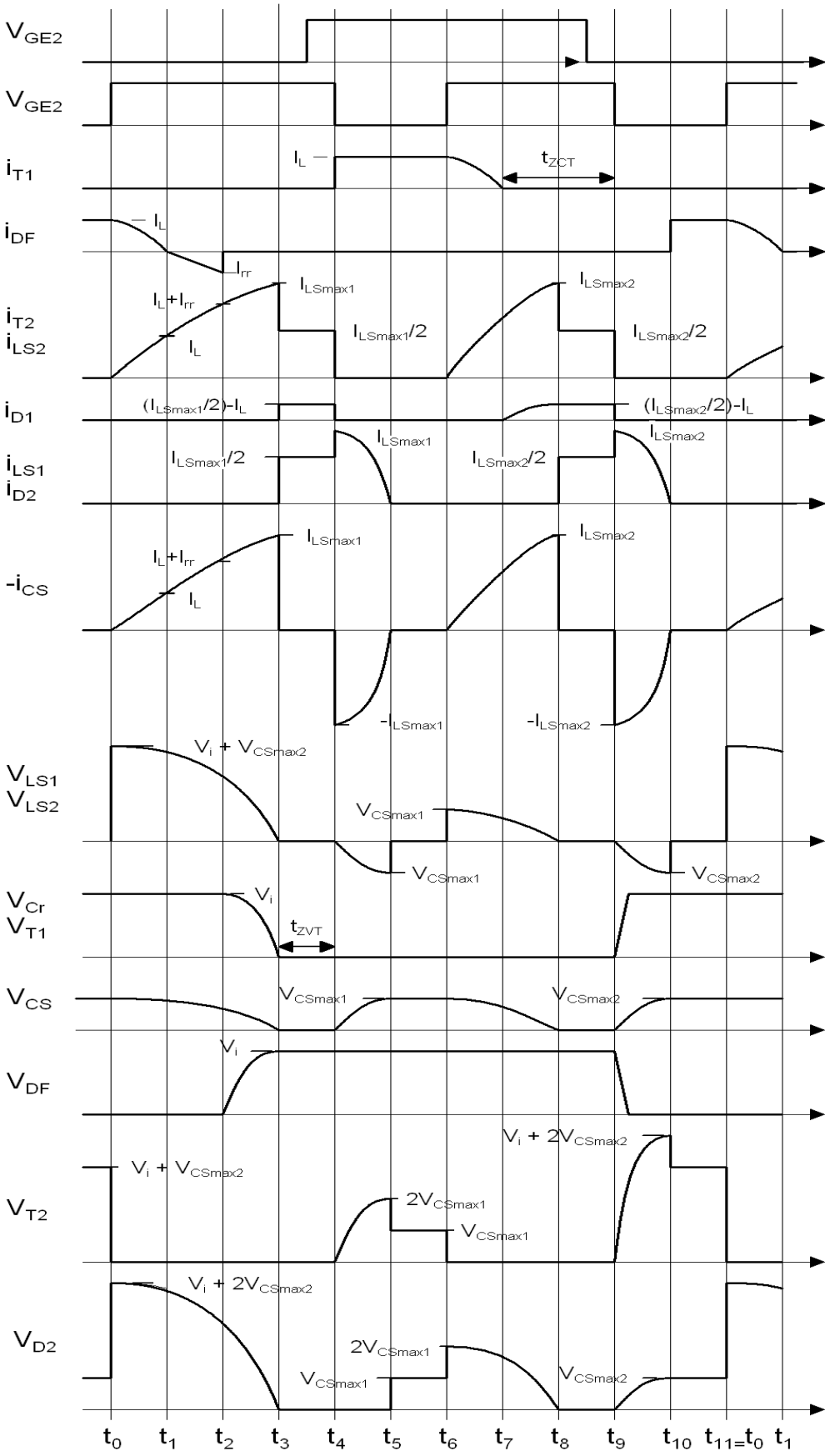
Bu aralığın başında $i_{T1}=0$, $i_{DF}=0$, $i_{T2}=i_{Cs}=i_{LS2}=I_L+I_{rr}$, $v_{CS}=v_{CS2}(t_2)$ ve $v_{Cr}=V_i$ eşitlikleri geçerlidir. $t=t_2$ anında D_F'nin kesime girmesiyle, T_2-C_S-L_{S2}-C_r yolu üzerinden gerilim kaynağı ve yük akımı altında yeni bir rezonans başlar. Bu aralıkta, $C_r<<C_S$ olduğundan C_r ihmal edilir ve hemen D_1'in iletime girdiği kabul edilirse,

$$i_{LS2} = i_{T2} = i_{CS} = \left(I_L + I_{rr}\right)\cos\left(\omega_0\left(t - t_2\right)\right) + \frac{V_{CS2}}{Z_0}\sin\left(\omega_0\left(t - t_2\right)\right) \tag{5.8}$$

$$v_{CS} = V_{CS2}\cos\left(\omega_0\left(t - t_2\right)\right) - Z_0\left(I_L + I_{rr}\right)\sin\left(\omega_0\left(t - t_2\right)\right) \tag{5.9}$$

$$t_{23} = \frac{1}{\omega_0}\cdot\arctan\left(\frac{V_{CS2}}{Z_0\left(I_L + I_{rr}\right)}\right) \tag{5.10}$$

$$I_{LS\max 1} = i_{LS2}(t_3) = \sqrt{\left(I_L + I_{rr}\right)^2 + \left(\frac{V_{CS2}}{Z_0}\right)^2} \tag{5.11}$$



Şekil 5.3. Sunulan devrede çalışma aralıkları ile ilgili temel dalga şekilleri.

$$W_{LS\max 1} = \frac{1}{2} L_{S2} I_{LS\max 1}^2 \tag{5.12}$$

denklemleri elde edilir. $t=t_3$ anında, C_s kondansatör geriliminin sıfır olması ve D_2 diyotunun iletime girmesiyle bu aralık biter. Aralık sonunda gerilimi sıfır olur ve bu aralık biter. Aralık sonunda bobindeki enerji seviyesi maksimuma ulaşır.

Aralık 3 [$t_3<t<t_4$: Şekil 5.2.(c)]

Bu aralığın başında, $i_{T1}=0$, $i_{DF}=0$, $i_{T2}=i_{D2} = i_{LS1} = i_{LS2} = i_{LSmax1}/2$, $v_{CS}=0$ ve $v_{Cr}=0$ durumları geçerlidir. C_r rezonans kapasitesi üzerindeki gerilim sıfır olduktan hemen sonra D_1 diyotu iletime geçer ve bu aralık başlar. D_1 diyotu, $I_{LS2max}/2$ akımının I_L yük akımın fazla kısmını taşır. Bu aralık ana anahtar için sıfır gerilimde geçiş (ZVT) zamanı olarak ifade edilir. Bu aralıkta,

$$i_{LS1} = i_{LS2} = i_{T2} = i_{D2} = I_{LS\max 1}/2 \tag{5.13}$$

$$i_{D1} = i_{LS\max 1}/2 - I_L \tag{5.14}$$

$$t_{34} : \text{seçilir} \tag{5.15}$$

denklemleri geçerlidir. Yardımcı anahtarın kontrol işaretinin kesilmesiyle bu aralık sona erer.

Aralık 4 [$t_4<t<t_5$: Şekil 5.2.(d)]

Bu aralığın başında $i_{T1}=0$, $i_{DF}=0$, $i_{T2}=i_{D2}=i_{LS1}= i_{LS2}=I_{LSmax1}/2$, $v_{Cr}=0$ ve $v_{CS} = 0$ durumları geçerlidir. $t=t_4$ anında kontrol işaretinin kaldırılmasıyla, T_2 yardımcı anahtarı ZVS altında kesime gider ve T_1, I_L yük akımını geçirmeye başlar. Diğer yandan, L_{S1} ve C_S elemanları arasında D_2-L_{S1}-C_S yolu üzerinden rezonans başlar. Bu aralık için,

$$i_{LS1} = i_{D2} = i_{CS} = I_{LS\max 1} \cos\left(\omega_1 \left(t - t_4\right)\right) \tag{5.16}$$

$$v_{CS} = Z_1 I_{LS\max 1} \sin\left(\omega_1 \left(t - t_4\right)\right) \tag{5.17}$$

$$t_{45} = \frac{1}{\omega_1} \frac{\pi}{2} \tag{5.18}$$

denklemleri elde edilir. t_5 anında, I_{LS1} akımı sıfıra düşer. Rezonansın bitmesi ile bu aralık tamamlanır. Böylece, I_{LS1} bobininde depolanmış enerji tamamen C_s bastırma kondansatörüne aktarılmış olur. Bu aralığın sonunda,

$$v_{CS}(t_5) = V_{CS5} = V_{CS\max 1} = Z_1 I_{LS\max 1} \tag{5.19}$$

$$W_{CS}(t_5) = W_{CS5} = W_{CS\max} = W_{LS1\max} = \frac{1}{2} C_S \cdot V_{CS\max 1}^2 = \frac{1}{2} L_{S1} I_{LS\max 1}^2 \tag{5.20}$$

denklemleri geçerli olur. Burada,

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_{S1} C_S}} \tag{5.21}$$

$$Z_1 = \sqrt{\frac{L_{S1}}{C_S}} \tag{5.22}$$

denklemleri geçerlidir. Sonuç olarak, T_1 ana anahtarı mükemmel bir şekilde ZVT altında iletime geçerken, T_2 yardımcı anahtarıda C_s bastırma kondansatörü yardımıyla ZVS altında kesime girer.

Aralık 5 [$t_5<t<t_6$: Şekil 5.2.(e)]

Bu aralık eviricinin ana anahtar üzerinden gerilim kaynağı ile beslendiği aralıktır. Bu aralıkta,

$$i_{T1} = I_L = I_i \tag{5.23}$$

eşitlikleri geçerli olur.

Aralık 6 [$t_6<t<t_7$: Şekil 5.2.(f)]

Bu aralığın başında, $i_{T1}=I_i=I_L$, $i_{T2}=i_{LS2}=i_{LS1}=i_{DF}=0$ ve $v_{CS}=V_{CSmax1}$ eşitlikleri geçerlidir. T_2 yardımcı anahtarına kontrol işaretinin uygulanmasıyla T_2-C_S-L_{S2}-T_1 yolu üzerinden rezonans başlar. Bu aralık boyunca, T_2 akımı sinüzoidal olarak artarken, T_1 akımı da eşzamanlı olarak azalır. Aralığın sonunda, T_2 akımı I_i değerine ulaşır ve T_1 akımı sıfıra düşer. V_{CS} rezonans kondansatör gerilimi $V_{CS}(t_7)$ değerine düşer. Bu aralık için,

$$i_{T1} = I_L - i_{T2} \tag{5.24}$$

$$i_{LS2} = i_{T2} = i_{CS} = \frac{V_{CS\max 1}}{Z_0}\sin\left(\omega_0\left(t-t_7\right)\right) \tag{5.25}$$

$$v_{CS} = V_{CS\max 1}\cos\left(\omega_0\left(t-t_7\right)\right) \tag{5.26}$$

$$t_{67} = \frac{1}{\omega_0}\arcsin\left(\frac{Z_0 I_L}{V_{CS\max 1}}\right) = \frac{1}{\omega_0}\arcsin\left(\frac{I_L}{I_{LS\max 2}}\right) \tag{5.27}$$

denklemleri elde edilir. Bu aralıkta, T_2 anahtarı L_{S2} bobini yardımıyla ZCS altında iletime götürülür.

Aralık 7 [t_7<t<t_8 : Şekil 5.2.(g)]

Bu aralığın başında i_{T1}=0, $i_{T2} = i_{LS2} = i_{CS} = I_L$ ve $v_{CS} = V_{CS}(t_7)$ eşitlikleri geçerlidir. Bu aralık, ana anahtar akımının sıfıra düşmesinden hemen sonra D_1 diyotunun iletime geçmesi ile başlar. Aralık boyunca C_S ve L_{S2} elemanları arasında başlayan rezonans işlemi T_2-C_S-L_{S2}-D_1 yolu üzerinden devam eder. Aralığın sonunda, V_{Cs} gerilimi sıfıra düşer ve L_{S2} bobininden geçen akım ve üzerinde depolanan enerji en yüksek seviyelerine ulaşır. Bu aralık için,

$$i_{LS2} = i_{T2} = i_{CS} = \frac{V_{CS\max 1}}{Z_0}\sin(\omega_0(t + t_{67} - t_7)) \tag{5.28}$$

$$v_{CS} = V_{CS\max 1}\cos(\omega_0(t + t_{67} - t_7)) \tag{5.29}$$

$$t_{78} = \frac{1}{\omega_0}\left(\frac{\pi}{2} - \arcsin\frac{I_L}{I_{LS\max 2}}\right) \tag{5.30}$$

$$I_{LS\max 2} = i_{LS2}(t_8) = \frac{V_{CS\max 1}}{Z_0} \tag{5.31}$$

$$W_{LS\max 2} = \frac{1}{2}L_{S2}I^2_{LS\max 2} \tag{5.32}$$

denklemleri geçerli olur. Bu aralıkta D_1 diyotu, i_{LS2} akımının I_L yük akımından artan kısmını taşır.

Aralık 8 [t_8<t<t_9 : Şekil 5.2.(h)]

Bu aralıktan önce i_{T1}=0, i_{T2}=i_{LS2}=I_{LSmax2}, v_{Cr} =0 ve v_{CS} =0 durumları geçerlidir. V_{Cs} gerilimi t_8 anında sıfıra düştükten hemen sonra D_2 iletime geçer ve bu aralık başlar. Bu aralık boyunca D_1 ve D_2 diyotları i_{LS2} akımının I_L akımından artan kısmını

taşırlar. Aralık 7 ve 8'in toplam süresi, yani D_1'in iletimde olduğu süre, T_1 ana anahtarı için sıfır akımda geçiş süresi (ZCT) olarak ifade edilir. Bu aralıkta,

$$i_{LS2} = i_{LS1} = i_{T2} = i_{D2} = I_{LS\max 2}/2 \tag{5.33}$$

$$i_{D1} = I_{LS\max 2}/2 - I_L \tag{5.34}$$

$$t_{78} + t_{89} = t_{ZCT} \tag{5.35}$$

$$t_{89} : \text{seçilir} \tag{5.36}$$

denklemleri geçerlidir. Bu aralık, t_9 anında T_2 yardımcı anahtarından kontrol işaretinin kesilmesiyle biter.

Aralık 9 [$t_9<t<t_{10}$: Şekil 5.2.(i)]

Bu aralığın başında $i_{T1}=0$, $i_{T2}=i_{LS2}=I_{LSmax2}$, $i_{DF} = 0$, $v_{Cr} =0$ ve $v_{CS}=0$ durumları geçerlidir. Aralık, t_9 anında T_2 yardımcı anahtarından kontrol işaretinin kesilmesiyle başlar. Bu aralıkta iki farklı kapalı devre söz konusudur. İlk devrede C_r kapasitesi I_L akımıyla doğrusal olarak şarj olur. Diğer devrede ise L_{S1} ve C_S elemanları arsında D_2-L_{S1}-C_S yolu üzerinden rezonans başlar. C_r kapasitesinin şarj süresi C_S kapasitesinin şarj süresine göre çok daha küçüktür . L_{S1} bobini içerisinden geçen i_{LS1} akımı sıfıra düştüğünde bu aralık sona erer. C_S kapasitesinin gerilimi V_{CSmax2} değerine ulaşır. Bu aralıkta,

$$i_{LS1} = i_{D2} = i_{CS} = I_{LS\max 2}\cos(\omega_1(t - t_9)) \tag{5.37}$$

$$v_{CS} = Z_1 I_{LS\max 2}\sin(\omega_1(t - t_9)) \tag{5.38}$$

$$v_{CS\max 2} = V_{CS}(t_{10}) = V_{CS10} = Z_1 I_{LS\max 2} \tag{5.39}$$

denklemleri geçerlidir. Bu aralığın süresi,

$$t_{910} = \frac{1}{\omega_1}\frac{\pi}{2} \tag{5.40}$$

denklemi ile ifade edilir. Böylece T_1 ana anahtarı sıfır akımda ZCT altında mükemmel bir şekilde kesime götürülürken, T_2 yardımcı anahtarı da C_S ve C_r kapasiteleri yardımıyla ZVS altında kesime götürülmüş olur.

Aralık 10 [$t_{10}<t<t_{11}$: Şekil 5.2.(j)]

Bu aralık eviricinin gerilim kaynağı tarafından beslenmediği aralıktır. Bu aralıkta,

$$i_{T1} = 0 \tag{5.41}$$

$$i_{DF} = I_L \tag{5.42}$$

eşitlikleri geçerlidir.

5.4. Tasarım Kriterleri

Devredeki yarıiletken elemanların yumuşak anahtarlama şartlarında çalışabilmesi için L_{S1}, L_{S2} ve C_S bastırma hücresi elemanlarının seçiminde, aşağıda sıralanan kriterlerin dikkate alınması gerekmektedir.

1. C_r kondansatörü, T_1 ana anahtarının parazitik kondansatörü ile ona katılan diğer parazitik kondansatörlerin toplamı olarak kabul edilmiştir. Bu kondansatörün değeri 1-2 nF civarındadır.

2. L_{S1} ve L_{S2} kublajlı endüktansları eşit seçilmiştir ($L_{S1}=L_{S2}$).

3. Kararlı çalışma durumunda $V_{CSmax1} = V_{CSmax2}$ olmaktadır.

4. T_2 yardımcı anahtarının yumuşak anahtarlama ile iletime girebilmesi için

$$\frac{V_i + V_{Cs\max}}{L_{S2}} t_{rT2} \le I_{L\max} \tag{5.43}$$

şartının sağlanması gerekir. Burada t_{rT2} T_2 yardımcı anahtarının yükselme süresidir.

5. D_F serbest geçiş diyotunun yumuşak olarak sönmesi için

$$\frac{V_i + V_{Cs\max}}{L_{S2}} t_{rr} \le I_{L\max} \tag{5.44}$$

şartının sağlanması gerekir. Burada t_{rr} D_F diyotunun ters toparlanma süresidir.

6. T_1 ana anahtarının ZCT ile kesime girebilmesi için,

$$t_{ZCT} = t_{67} + t_{78} \ge t_{fT1} \tag{5.45}$$

şartının sağlanması gerekir.

7. T_1 ana transistorünün ZVT ve ZCT ile anahtarlanabilmesi için

$$I_{LS\max} \cong 3 I_{L\max} \tag{5.46}$$

seçilir.

8. T_2 ve D_2 elemanlarının maruz kaldığı gerilimin $2V_i$'de sınırlanabilmesi açısından

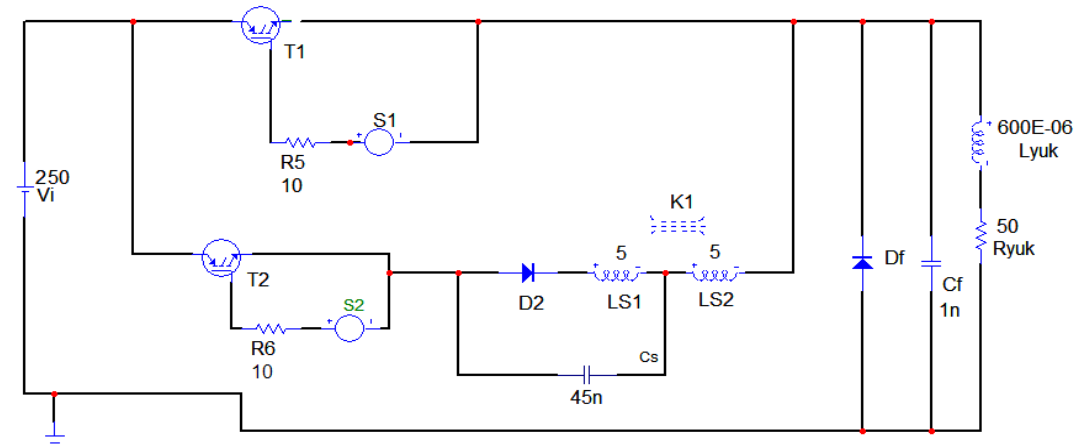
$$V_{CS\max} \le \frac{V_i}{2} \tag{5.47}$$

seçilmelidir.

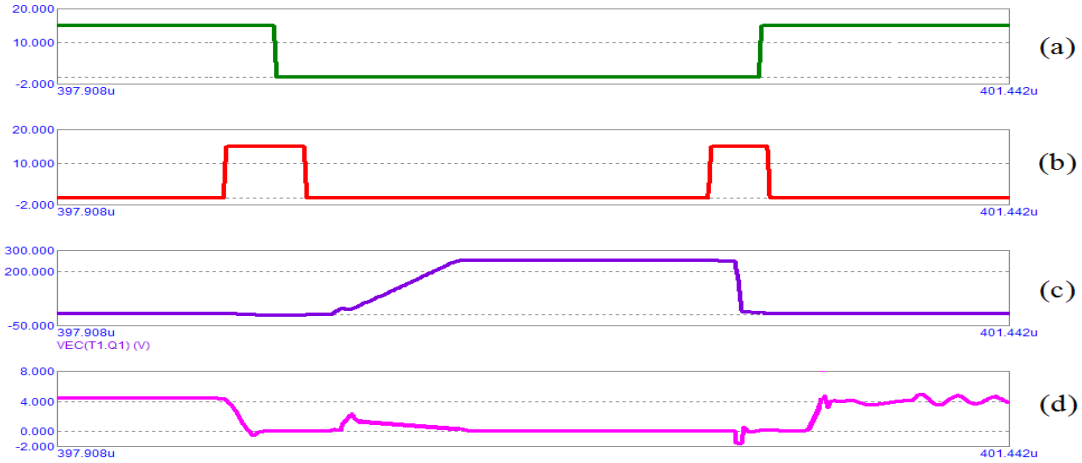
9. Eleman seçiminde geçici rejim aralıklarının minimum olmasına dikkat edilmelidir.

5.5 Sunulan Devrenin Benzeşimi

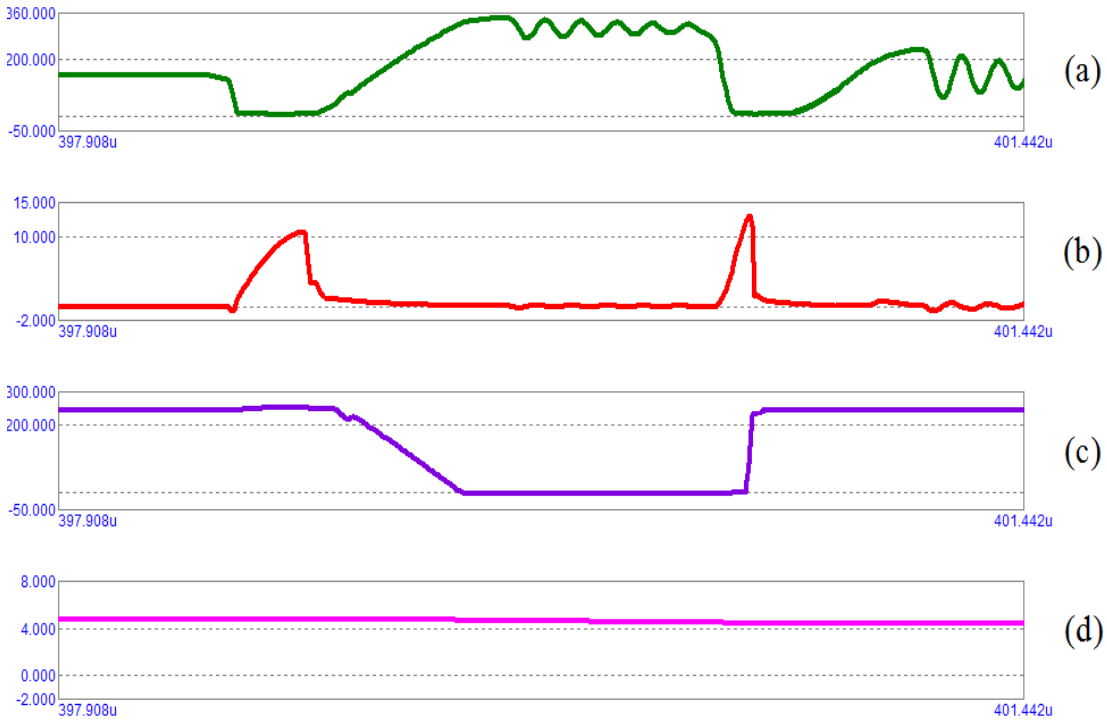
Şekil 5.4'te gösterilen devrenin benzeşimi PSpice tabanlı MICROCAP yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan benzeşimde anahtarlar yerine G4PC40KD elemanına ait SPICE modeli, L_{S1} ve L_{S2} bobinleri yerinede nüve modeli kullanılmıştır. Devrede anahtarlama işaretleri Şekil 5.4'te görüldüğü gibi S1 ve S2 kaynaklarının programlanması ile elde edilmiştir.



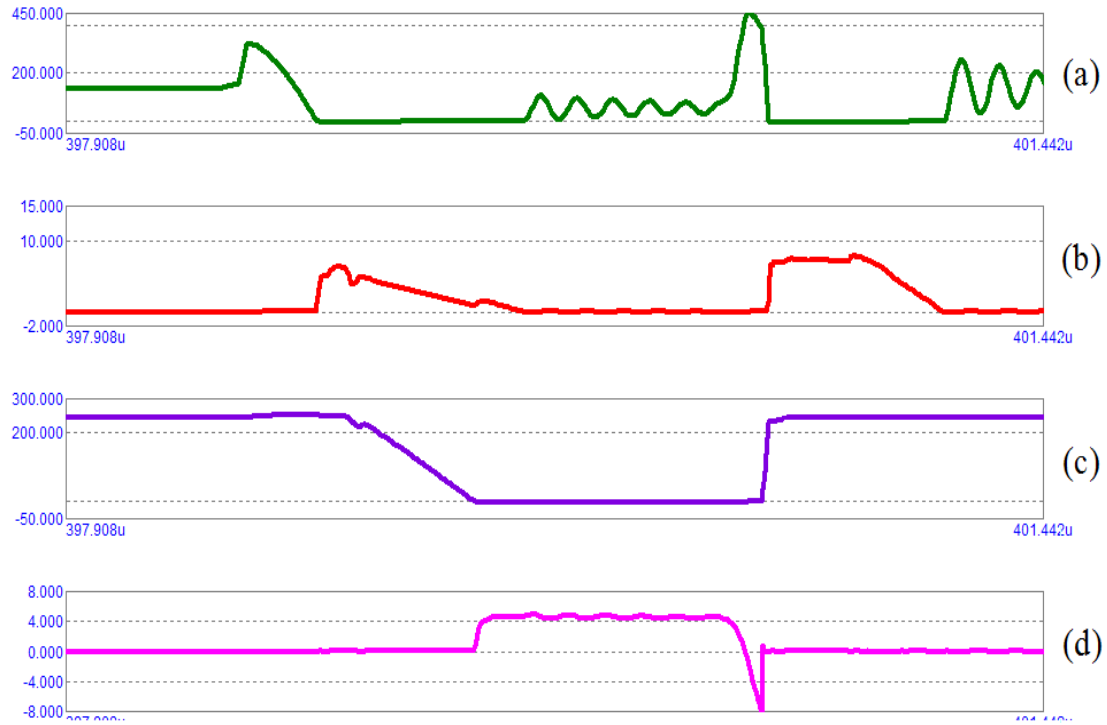
Şekil 5.4 Benzeşimi yapılan evirici devresi.



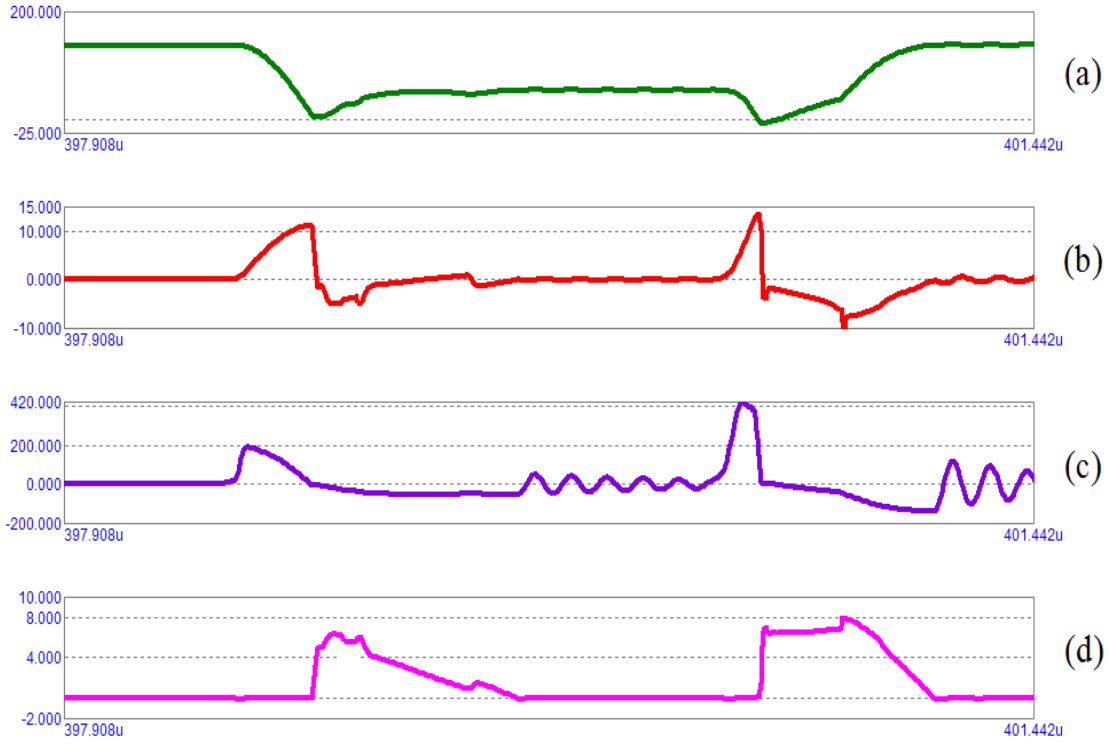
Şekil 5.5. (a) T_1 anahtarlama işareti, (b) T_2 anahtarlama işareti, (c) T_1 anahtarına ait akım, (d) T_1 anahtarına ait gerilim.



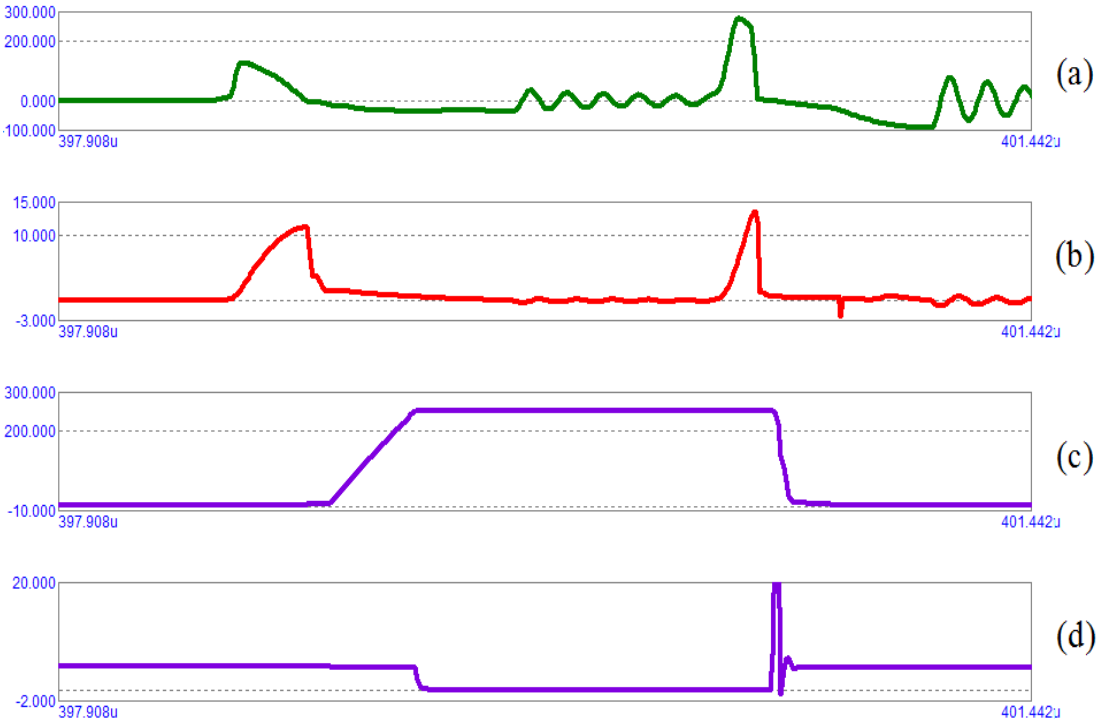
Şekil 5.6. (a) T_2 anahtarına ait gerilim, (b) T_2 anahtarına ait akım, (c) DA hat gerilimi, (d) Yük akımı.



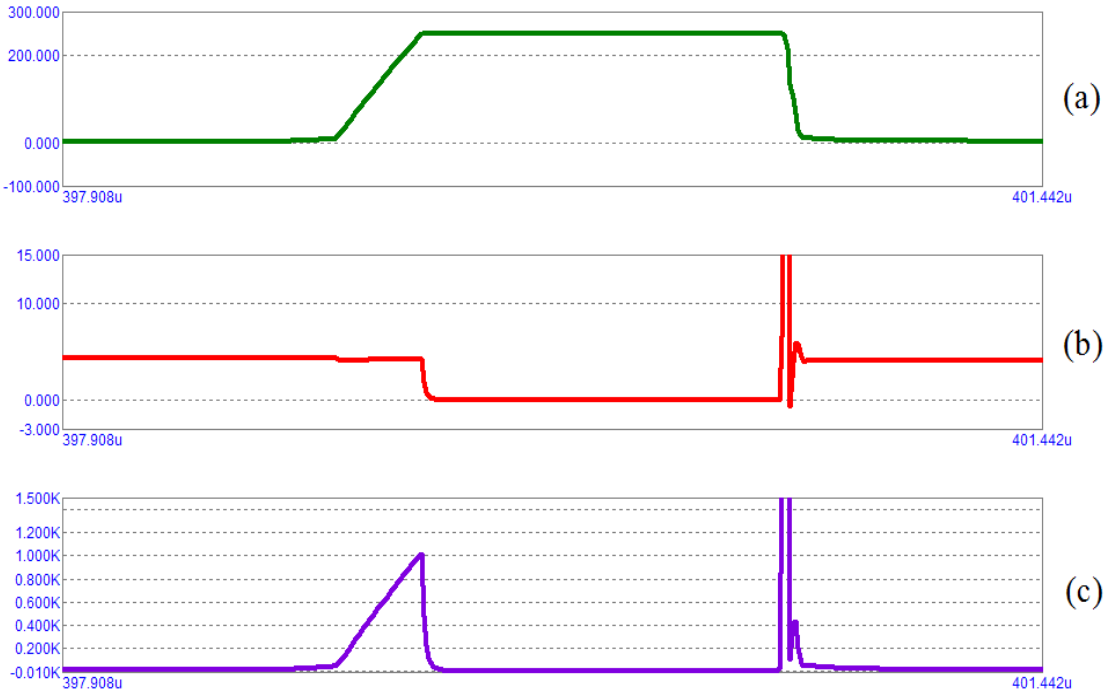
Şekil 5.7. (a) D_2 diyotuna ait gerilim, (b) D_2 diyotuna ait akım, (c) D_F diyotuna ait gerilim, (d) D_F diyotuna ait akım.



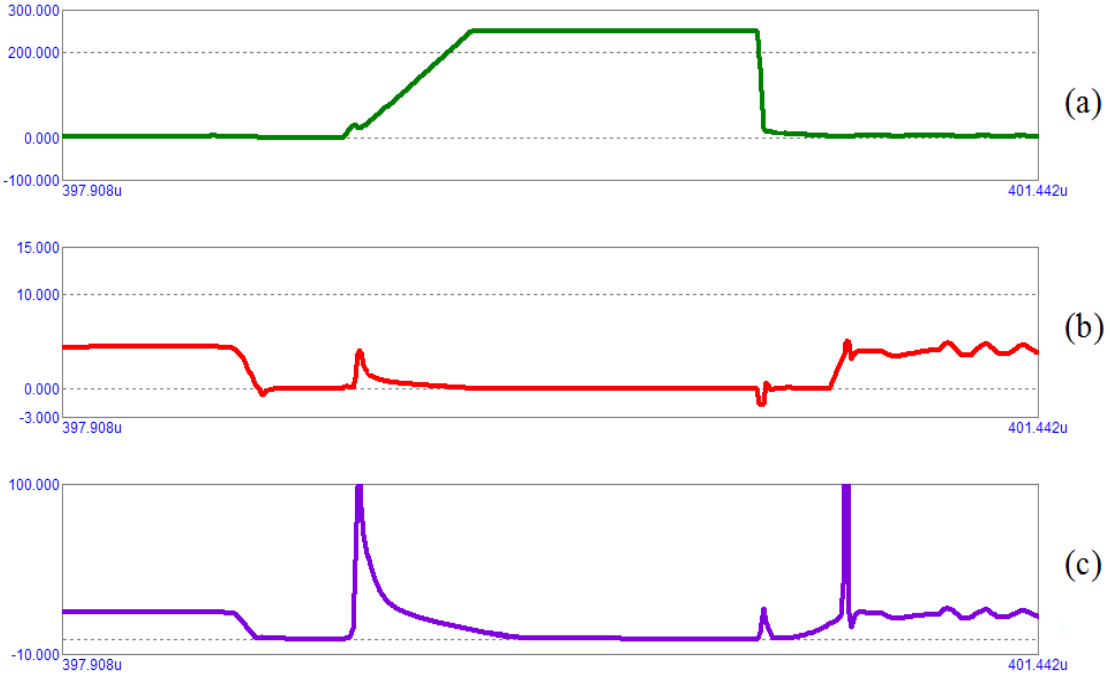
Şekil 5.8. (a) C_S kapasitesine ait gerilim, (b) C_S kapasitesine ait akım, (c) L_{S1} bobinine ait gerilim, (d) L_{S1} bobinine ait akım.



Şekil 5.9. (a) L_{S2} bobinine ait gerilim, (b) L_{S2} bobinine ait akım, (c) sert anahtarlama için T_1 gerilimi (d) sert anahtarlama için T_1 akımı.



Şekil 5.10. (a) Sert anahtarlama için T_1 gerilimi, (b) sert anahtarlama için T_1 akımı, (c) sert anahtarlama için T_1 anahtarı üzerindeki güç kaybı.



Şekil 5.11. (a)Yumuşak anahtarlama için T_1 gerilimi, (b) yumuşak anahtarlama için T_1 akımı, (c) yumuşak anahtarlama için T_1 anahtarı üzerindeki güç kaybı.

Şekil 5.5.(a) ve (b)'de anahtarlama işaretleri görülmektedir. Şekil 5.5.(c) ve (d)'de ise ana anahtara ait akım ve gerilim dalga şekilleri görülmektedir. Görüldüğü gibi ana anahtar ZVT şartlarında iletime ve ZCT şartlarında kesime gitmektedir.

Şekil 5.6.(a) ve (b)'de yardımcı anahtara ait akım ve gerilim dalga şekilleri ve Şekil 5.6.(c) ve (d)'de ise DA hat gerilimi ve akımı görülmektedir. Şekillerden anlaşıldığı gibi yardımcı anahtar yumuşak anahtarlama şartlarında anahtarlanmaktadır. DA hat istenilen süre kadar sıfıra çekilebilir.

Şekil 5.7-5.9'da ise diğer elemanlara ait akım ve gerilim dalga şekilleri görülmektedir. Bütün diyotlarda yumuşak anahtarlama şartları sağlanmıştır.

Şekil 5.10'da ana anahtarın sert anahtarlama koşulları için akım ve gerilim dalga şekilleri verilmiştir. Görüldüğü gibi iletim ve kesim anahtarlama durumlarında akım ve gerilim çakışmakta ve anahtarlama kayıpları meydana gelmektedir. Anahtarlama kaybı özellikle kesim durumunda ortaya çıkmaktadır. Buna göre kesim durumunda yapılacak yumuşak anahtarlama çok önemlidir.

Şekil 5.11'de sunulan yumuşak anahtarlama devresi için ana anahtar üzerindeki akım ve gerilim dalga şekilleri görülmektedir. Şekil 5.11 (a) ve (b)'den görüldüğü gibi ana anahtar ZVT şartlarında iletime girmekte ve ZCT şartlarında kesime gitmektedir. Ana anahtar kesime gittikten sonra, üzerindeki parazitik kapasite şarj olurken küçük bir akım geçmektedir. Sonuç olarak anahtarlama kayıplarının tamamı yaklaşık olarak yok edilmiştir.

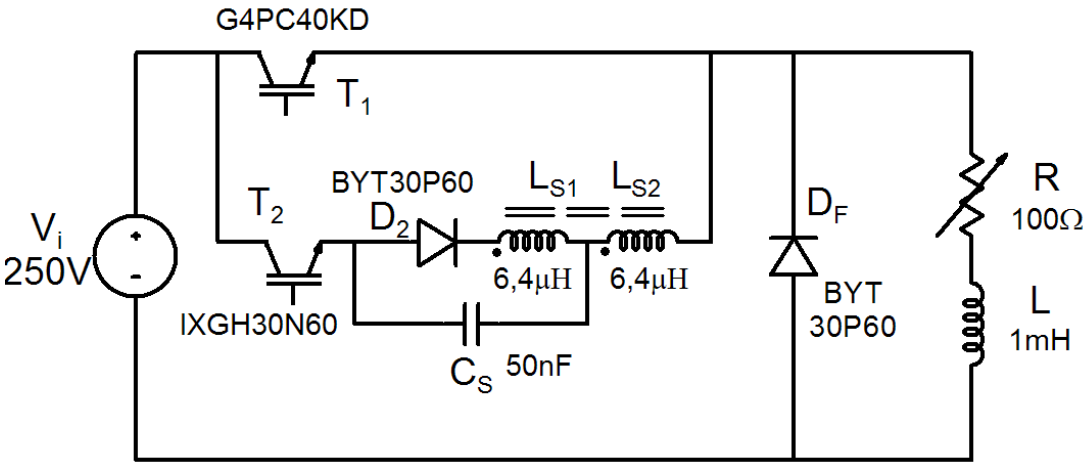
BÖLÜM 6. YENİ ZVT-ZCT KISMİ REZONANSLI DA-HAT DEVRESİNİN UYGULAMASI

6.1 Giriş

Bu bölümde, beşinci bölümde yapılan analizleri doğrulamak için, laboratuvar şartlarında evirici eşdeğer devresi ile yapılan deneysel çalışmalar verilmiştir. Gerçekleştirilen uygulama devresinin şekilleri ve sistemden alınan deneysel sonuçlar ayrıntılı olarak sunulmuştur.

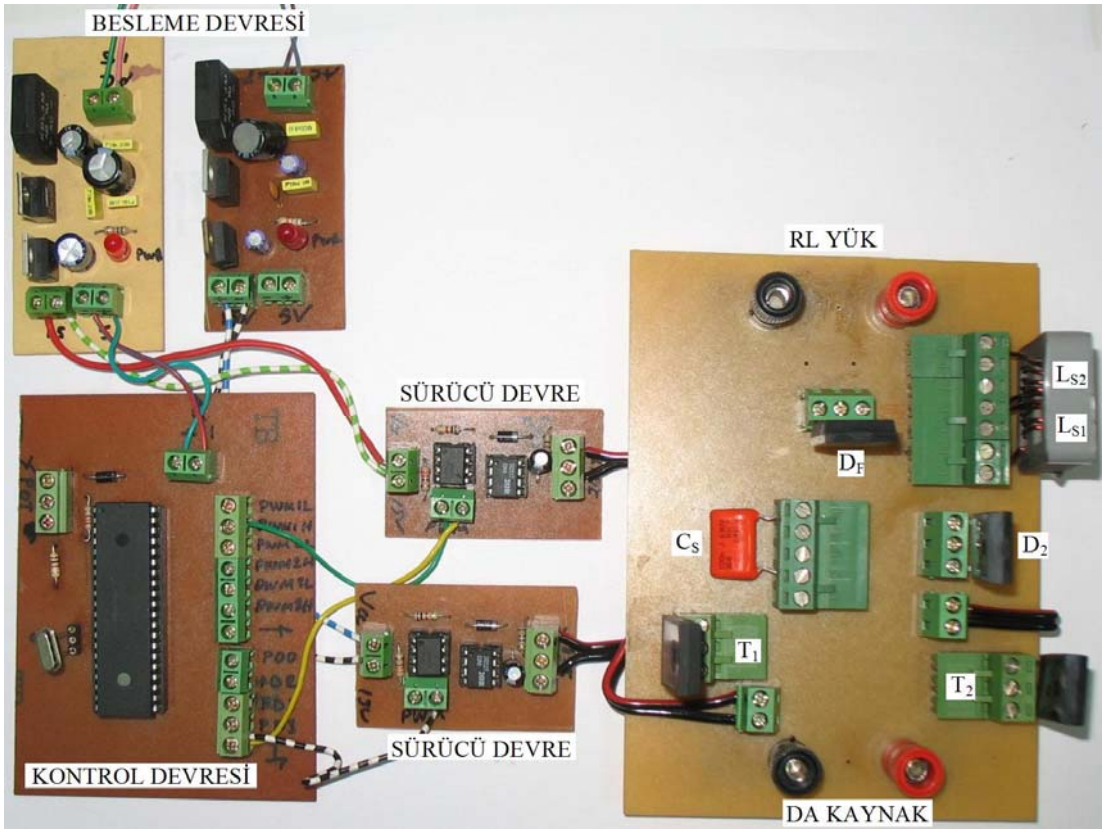
6.2 Devre Şemaları

Yumuşak anahtarlamalı eviriciler için geliştirilen yeni ZVT-ZCT kısmi rezonanslı DA-hat uygulamasının ana devre şeması Şekil 6.1'de verilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi evirici yerine eşdeğer devresi bağlanmış ve geliştirilen yumuşak anahtarlama devresi evirici ve kaynak arasına seri olarak yerleştirilmiştir.



Şekil 6.1 Yeni bir ZVT-ZCT kısmi rezonanslı DA-hat uygulamasının devre şeması.

Devrede kullanılan gerilim kaynağı tek fazlı bir transformatör ile şebekeden yalıtılmakta ve çıkışı köprü diyot ile doğrultulup yüksek değerli bir kondansatör ile filtre edilmektedir. Rezonans DA hat, T_1 ters akım diyotlu yarı iletken ana güç anahtarı, T_2 yardımcı güç anahtarı, D_2 yardımcı diyotu, L_S orta uçlu bastırma bobini ve bir C_s bastırma kapasitesinden oluşmaktadır. Evirici eşdeğer devresi 100Ω'luk ayarlı dirence seri bağlı 1 mH'lik bobin ve bu elemanlara paralel D_F serbest geçiş diyotundan oluşmaktadır. Şekil 6.1'de, ana devrede kullanılan elemanlar ve elemanların bazı nominal değerleri de Tablo 6.1'de verilmektedir.



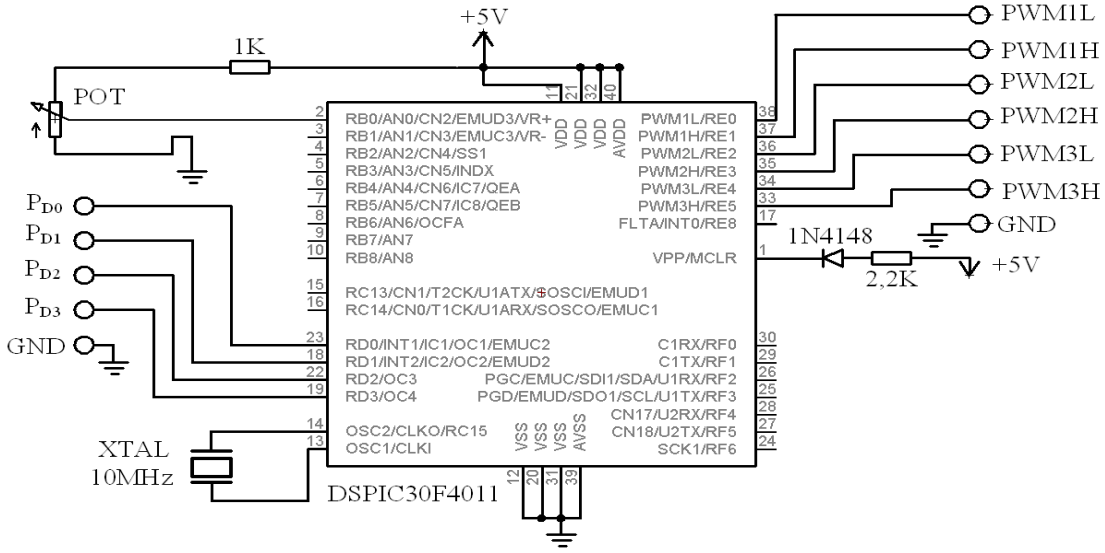
Şekil 6.2 Yeni bir ZVT-ZCT kısmi rezonanslı DA-hat uygulamasının devre resmi.

Şekil 6.2'de ZVT-ZCT kısmi rezonanslı DA-hat uygulamasının devre resmi verilmektedir. Her bir elemanın ismi devre elemanının yanına yazılmıştır. Devreleri besleyen kaynaklar ve R-L yükü gösterilmemiştir. Elemanların devreye montajında kolaylık sağlanması amacıyla konnektörler kullanılmıştır.

Tablo 6.1. Uygulama sisteminde kullanılan yarıiletken elemanların bazı nominal değerleri.

YARI İLETKEN ELEMAN	V (V)	I (A)	t_r (ns)	t_f (ns)	t_{rr} (ns)
T_1	600V	25	33	100	60
T_2	600V	24	20	120	-
D_2	600V	30	-	-	70
D_F	600V	30	-	-	70

Kontrol işaretlerini elde etmek için tasarlanan devre şeması Şekil 6.3'te verilmiştir. Bu devrede MICROCHIP firmasının ürettiği DSPIC30F4011 kodlu mikrodenetleyicisi kullanılmaktadır. Bu mikrodenetleyicinin sahip olduğu bazı özellikler aşağıda verilmektedir.



Şekil 6.3 Kontrol devresi.

• 3 Doluluk-boşluk üreteç içeren 6 PWM çıkış,

• 16 bitlik çözünürlük,

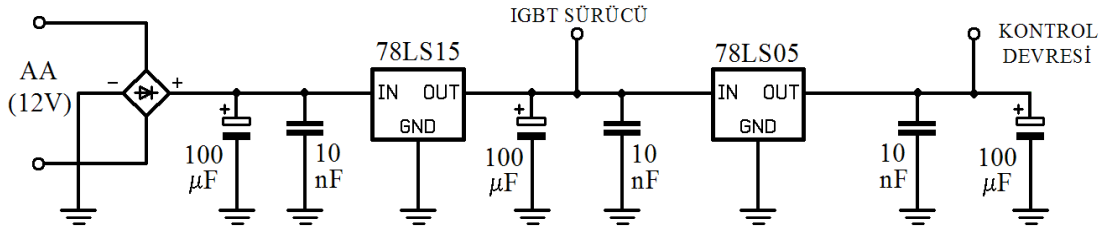
• Çalışma esnasında PWM periyodunun değiştirilebilmesi,

• Kenar veya merkez karşılaştırmalı çıkış seçenekleri,

• Tek darbe üretme seçeneği,

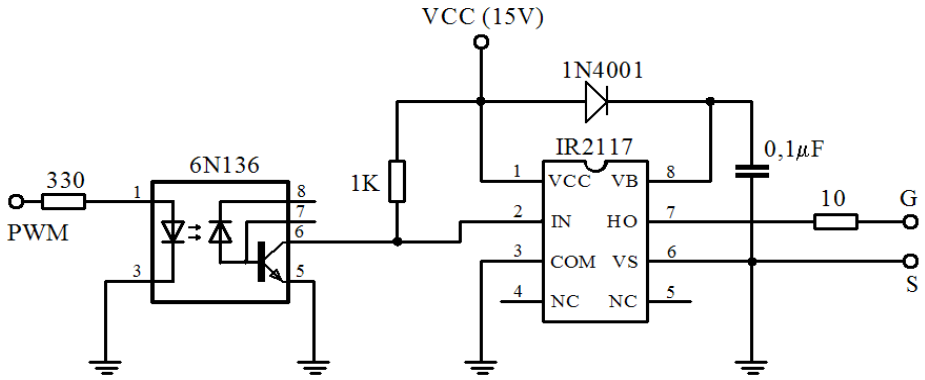
• Tanımlanan duruma göre PWM çıkışlarının her birini FAULT ucu ile sürme.

Kontrol devresi ve sürücü devre için gerekli enerjiyi sağlayan besleme devresi Şekil 6.4'te gösterilmektedir. Kontrol devresi için 5V, sürücü devre için ise 15V gerilim üretilmektedir.



Şekil 6.4 Besleme devresi.

Ana devredeki güç anahtarlarını sürmek için kullanılan sürücü devre şeması Şekil 6.5'te gösterilmektedir. Bu amaçla INTERNATIONAL RECTIFIER firması tarafından üretilen IR2117 kodlu sürücü entegre kullanılmaktadır. Bu sürücü entegrenin sahip olduğu özelliklerden önemli birkaç tanesi Tablo 6.2'de verilmektedir.



Şekil 6.5 Sürücü devre şeması.

Tablo 6.2 Sürücü entegrenin karakteristik özellikleri

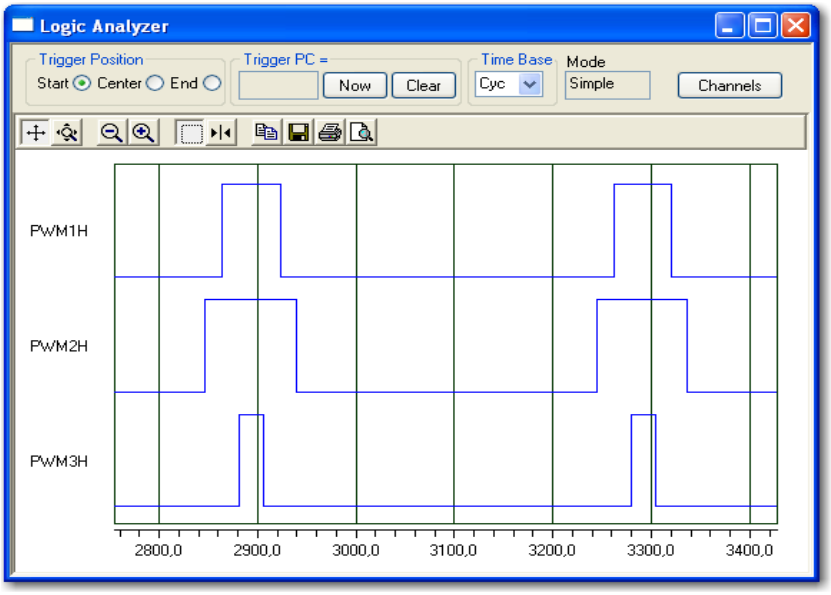
Besleme gerilimi	10-20V
Yükselme zamanı	80-130ns
Düşme zamanı	40-65ns
Açma süresi	125-200ns
Kapama süresi	105-180ns

Mikrodenetleyiciyi güç devresinden yalıtmak amacıyla optik yalıtıcı kullanılmaktadır. Devrenin çalışması kısaca şu şekilde gerçekleşmektedir. Mikrodenetleyiciden gelen PWM işaretleri optik yalıtıcıların girişlerine verilmektedir. Optik yalıtıcının çıkışındaki işaret IR2117'nin girişine uygulanmakta

ve bu elemanın çıkışından da güç anahtarlarını sürmek için gerekli olan anahtarlama işaretleri elde edilmektedir.

6.3 Kontrol Yöntemi

Bu çalışmada PWM işaretlerinin üretilmesi için MICROCHIP firmasının DSpic30f4011 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Bu işlemci 16 bitlik, 30MHz'de çalışabilen, 48kByte program, 2048Byte Ram belleği olan, 9 tane 10-bitlik ve 1000ksps hızında dönüşüm yapabilen ADC ve 3 tane standart PWM kanalına sahiptir. PWM kanalları farklı yöntemlerle çalıştırılabilir. Bu çalışmada merkez yöntemi kullanılmaktadır. PWM1H çıkışı ana anahtarı, PWM2H ve PWM3H çıkışları ise fark alıcı bir lojik devre ile yardımcı anahtarı sürmek için kullanılmaktadır. MICROCHIP işlemcileri için uygulama geliştirici ortam olan MPLAB programında, yumuşak anahtarlama hücresi için elde edilen PWM çıkışları Şekil 6.6'da verilmektedir.



Şekil 6.6 MPLAB yazılımı ile anahtarlama hücreleri için gerekli işaretlerin elde edilmesi.

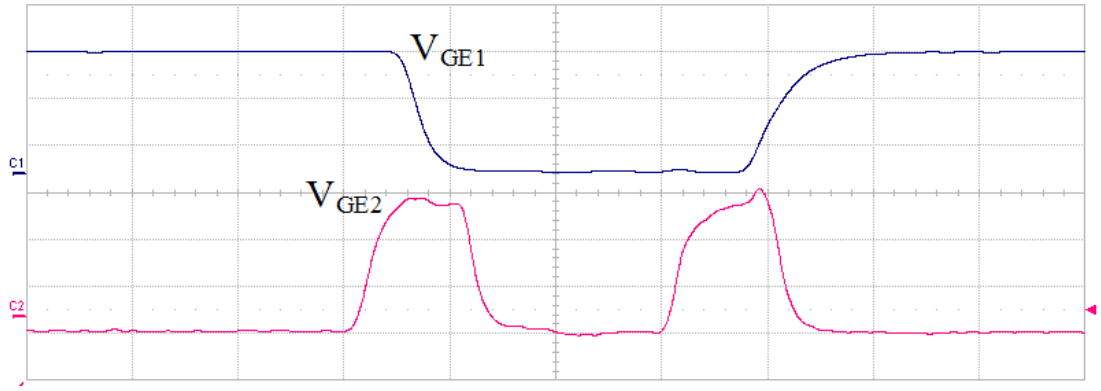
Bu çalışma 50 KHz'lik frekans için gerçekleştiğinden, (F_{CY}=30.000.000 ve F_{PWM}=50.000) PWM modülü, PTPER registeri kullanılarak Eşitlik 6.2 ile ayarlanabilmektedir.

$$PTPER = \left(\frac{20.000.000}{50.000} - 1 \right) \div 2 = 199 \qquad (6.2)$$

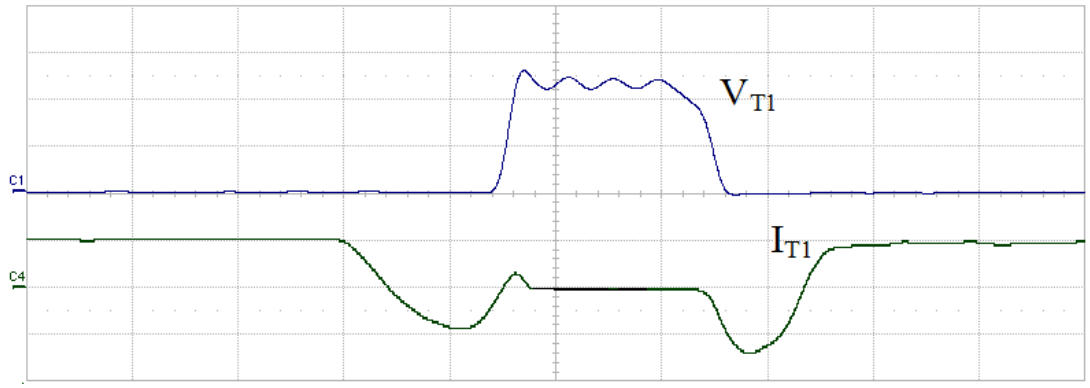
6.4 Uygulama Sonuçları

Şekil 6.7-6.17'de, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen ZVT-ZCT kısmi rezonanslı DA-hat uygulamasından alınan, her bir elemana ait akım ve gerilim dalga şekilleri verilmektedir. Sunulan bütün sonuçlar LECROY WaveRunner 6100 osiloskobu ile elde edilmiştir. Kayıp ve verim eğrileri için cihazda bulunan güç ölçüm yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım, bir anahtar ya da hattaki güç eğrisini ve bu eğriye ait ortalama, maksimum ve minimum gibi değerlerini de ölçebilmektedir.

Şekil 6.7'de ana anahtar ve yardımcı anahtara ait anahtarlama işaretleri gösterilmektedir. Yapılan çalışmada DA hattın kesimde kalma süresi kontrol sinyalleri tarafından ayarlanmaktadır ve şekilden görüldüğü gibi bu süre 2µs olarak belirlenmiştir. Şekil 6.8'de ana anahtara ait akım ve gerilim dalga şekilleri verilmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi ana anahtar ZCT altında kesime girmektedir. Şekil 6.8'den görülen diğer bir sonuçta, yarı iletkenin ZVT altında iletime girmesidir. Ana anahtarın iletim durumunda devreden ortalama 5A akım çekilmektedir. Ana anahtar üzerinde ilave bir gerilim stresi oluşmamaktadır.



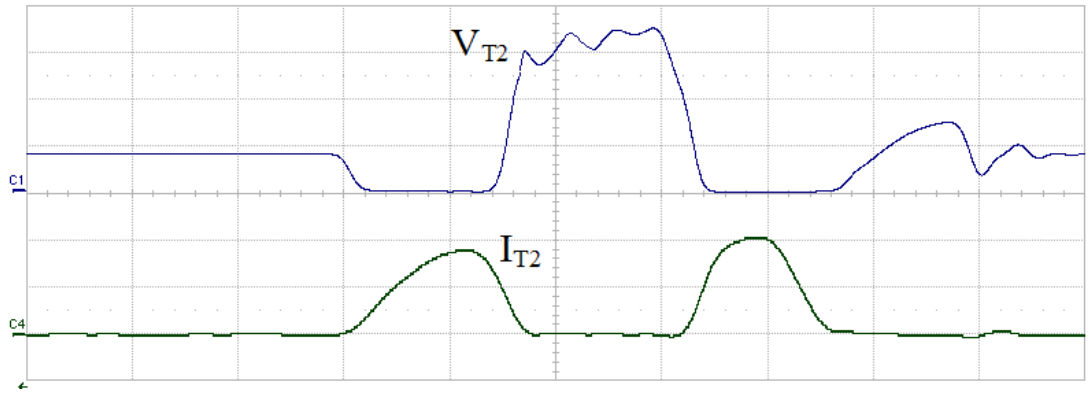
Şekil 6.7 Ana ve yardımcı anahtarların sürme işaretleri. 5V/kare ve 1µs/kare olarak ölçeklidir.



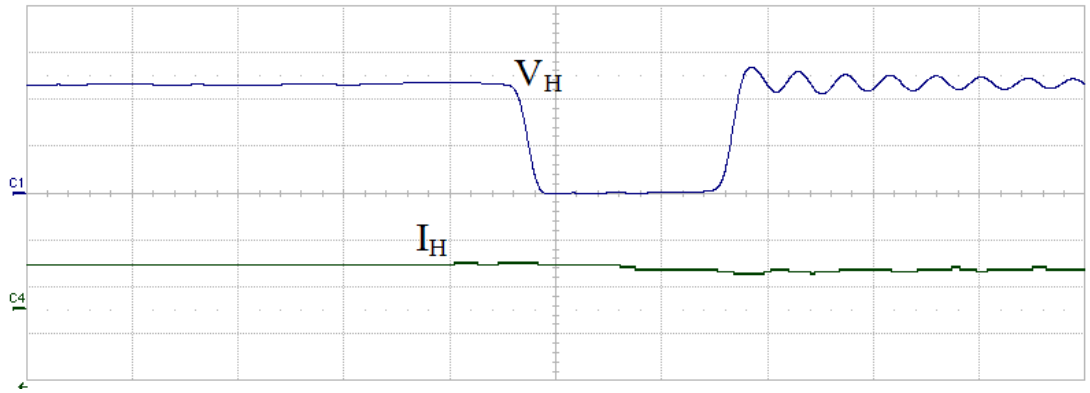
Şekil 6.8 Ana anahtarın gerilim ve akım değişimleri. 100V/kare, 5A/kare ve 1µs/kare olarak ölçeklidir.

Şekil 6.9'da yardımcı anahtara ait akım ve gerilim dalga şekli gösterilmektedir. Görüldüğü gibi yardımcı anahtar ZCS şartları altında iletime girmekte ve ZVS şartları altında kesime gitmektedir. Yardımcı anahtar üzerinde, Aralık 10 süresi buyunca, anahtara seri olarak bağlanan kapasite nedeniyle $2V_{CSmax2}$ kadar ilave bir gerilim stresi oluşmaktadır. Anahtara seri olarak bağlı olan bobin ve kapasite nedeniyle bu ilave stres önlenememektedir.

Şekil 6.10'da DA hatta ait akım ve gerilim dalga şekilleri verilmiştir. Görüldüğü gibi DA hat istenilen süre kadar sıfır gerilimde tutulmakta ve Aralık 10 süresince yük akımı serbest geçiş diyotu üzerinden geçmektedir. Yeterli büyüklükte endüktif yük olduğu durumlarda akım yaklaşık olarak aynı değerde kalmaktadır.

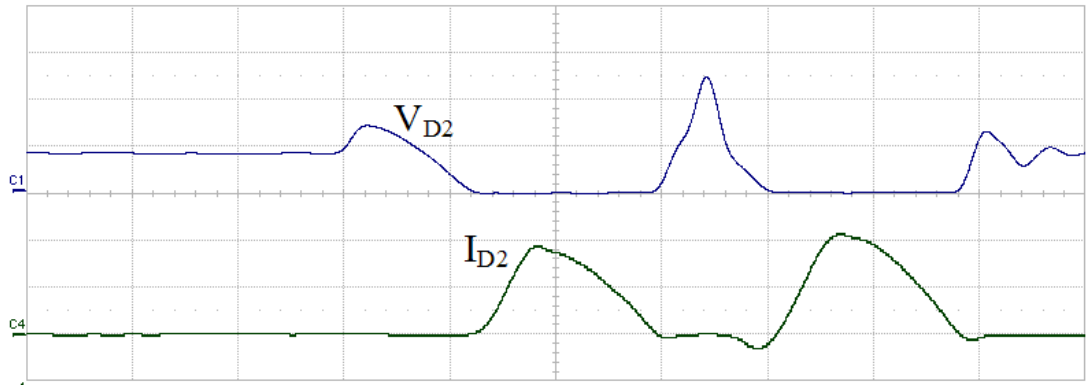


Şekil 6.9 Yardımcı anahtarın gerilim ve akım değişimleri. 100V/kare, 5A/kare ve 1µs/kare olarak ölçeklidir.

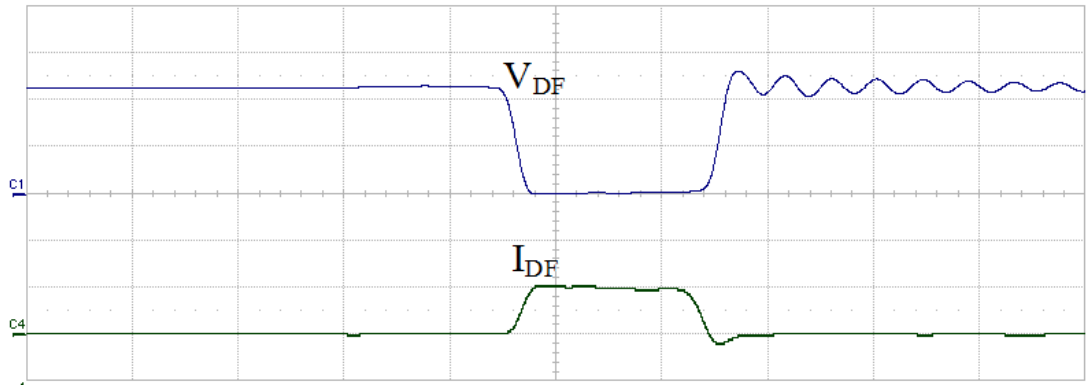


Şekil 6.10 DA hattın gerilim ve akım değişimleri. 100V/kare, 5A/kare ve 1µs/kare olarak ölçeklidir.

Şekil 6.11'de D_2 diyotuna ait akım ve gerilim dalga şekilleri verilmektedir. Görüldüğü gibi Aralık 10 süresince, diyot üzerinde ilave bir gerilim stresi oluşmaktadır. Fakat eleman yaklaşık ZVT altında iletime girmekte ve yaklaşık ZCT altında kesime gitmektedir. Bu nedenle eleman üzerindeki anahtarlama kaybı yaklaşık olarak sıfır olmaktadır. Şekil 6.12'de D_F diyotuna ait akım ve gerilim dalga şekilleri verilmektedir. Buradan da görüldüğü gibi D_F diyotu üzerinde ilave bir gerilim stresi oluşmamakta ve anahtar üzerindeki güç kaybı ihmal edilecek düzeylerde tutulmaktadır.



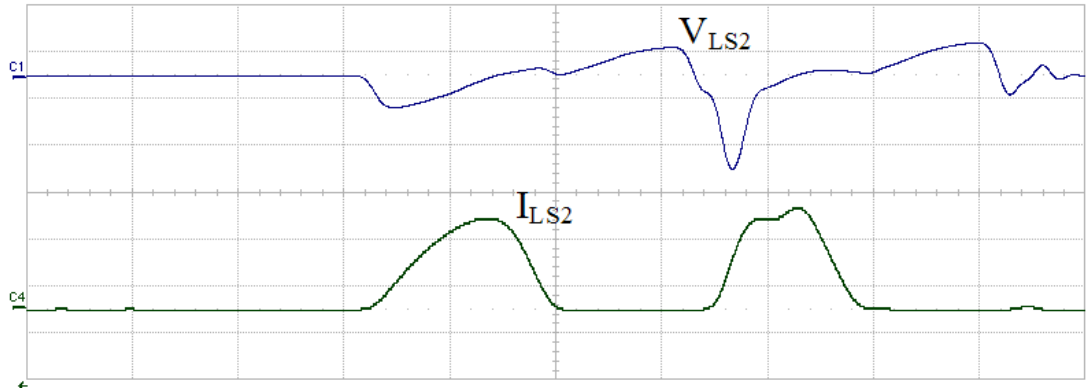
Şekil 6.11 D_2 diyotunun gerilim ve akım değişimleri. 100V/kare, 5A/kare ve 1µs/kare olarak ölçeklidir.



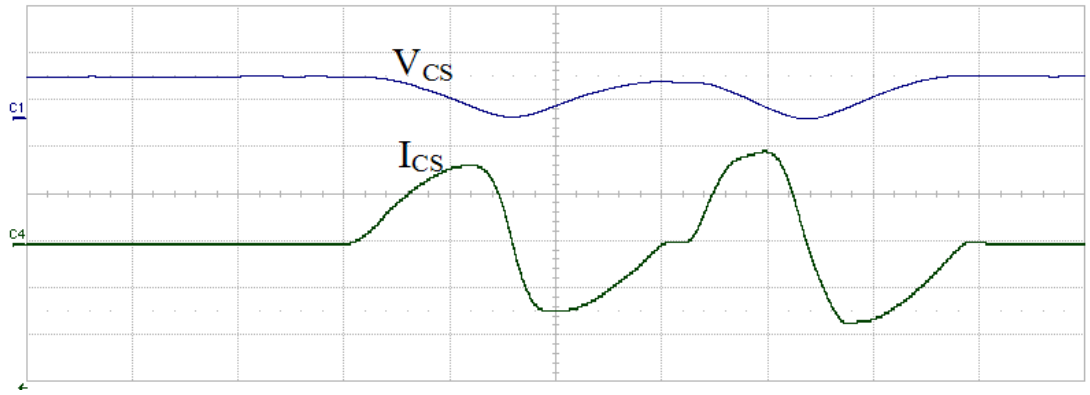
Şekil 6.12 D_F diyotunun gerilim ve akım değişimleri. 100V/kare, 5A/kare ve 1µs/kare olarak ölçeklidir.

Şekil 6.13'de L_{S2} bobinine ait akım ve gerilim dalga şekli verilmektedir. Görüldüğü gibi bu eleman üzerinde ilave bir gerilim stresi oluşmamaktadır. Şekil 6.14'te C_S kapasitesine ait akım ve gerilim dalga şekli verilmektedir. L_{S1} ve L_{S2} bobinlerinin değerlerinin aynı olması nedeniyle kapasitenin Aralık 4 ve Aralık 9'da şarj olduğu gerilimler (V_{CSmax1} ve V_{CSmax2}) yaklaşık olarak aynıdır.

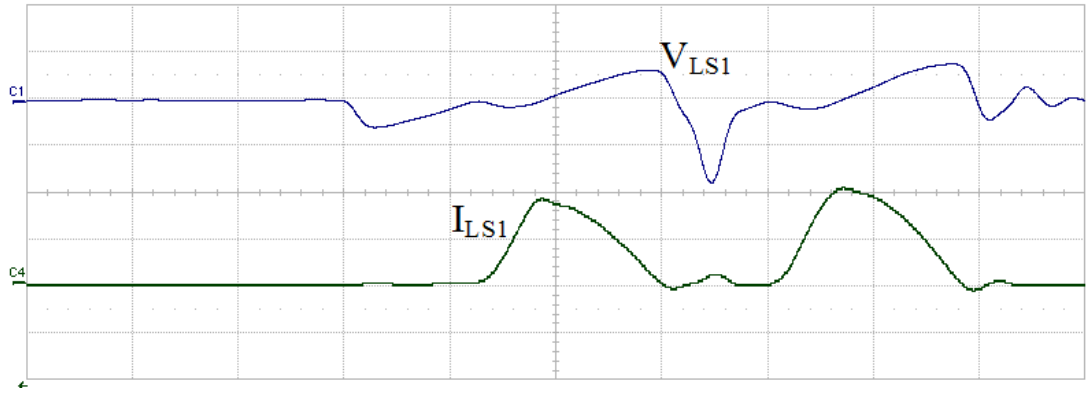
Şekil 6.15'te L_{S1} bobinine ait akım ve gerilim dalga şekli verilmektedir. Görüldüğü gibi bu eleman üzerinde ilave bir gerilim stresi oluşmamaktadır.



Şekil 6.13 L_{S2} bobininin gerilim ve akım değişimleri. 100V/kare, 5A/kare ve 1µs/kare olarak ölçeklidir.



Şekil 6.14 C_S kapasitesinin gerilim ve akım değişimleri. 100V/kare, 5A/kare ve 1µs/kare olarak ölçeklidir.



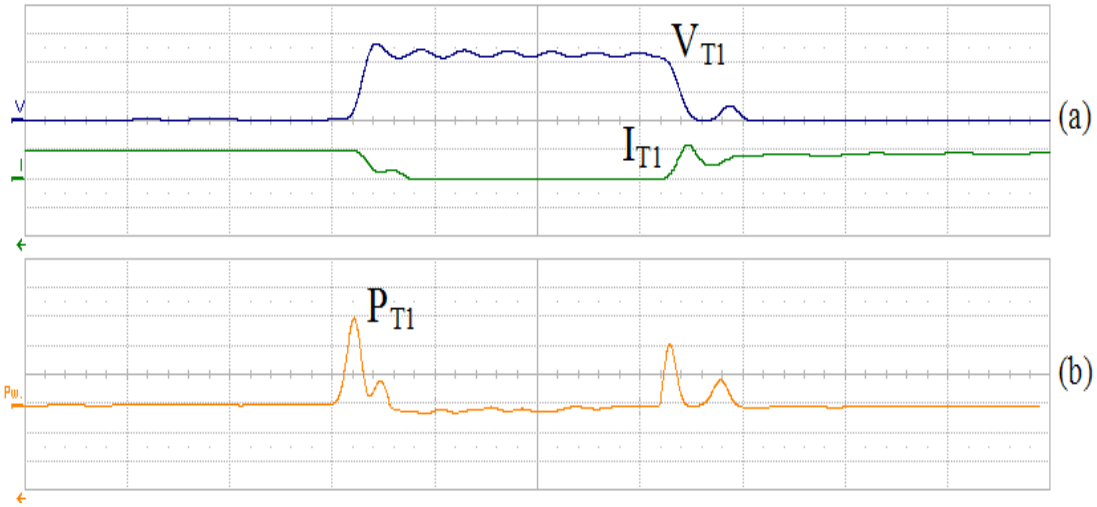
Şekil 6.15 L_{S1} bobininin gerilim ve akım değişimleri. 100V/kare, 5A/kare ve 1µs/kare olarak ölçeklidir.

Şekil 6.16.(a)'da sert anahtarlama için ana anahtara ait akım ve gerilim dalga şekli verilmektedir. Görüldüğü gibi anahtarlama anlarında akım ve gerilimde çakışmalar meydana gelmekte ve bu anlarda anahtarlama kayıpları ortaya çıkmaktadır.

Şekil 6.16.(b)'de sert anahtarlama durumunda ana anahtarda oluşan kayıplar verilmektedir. Görüldüğü gibi hattan 5A çekildiğinde ana anahtar kesime giderken tepe değeri 450W olan bir anahtarlama kaybı oluşmaktadır. Ana anahtarın iletime gitmesi anında ise, tepe değeri yaklaşık 300W olan anahtarlama kaybı oluşmaktadır. Anahtarlama kaybı büyük oranda kesim durumlarında ortaya çıkmaktadır.

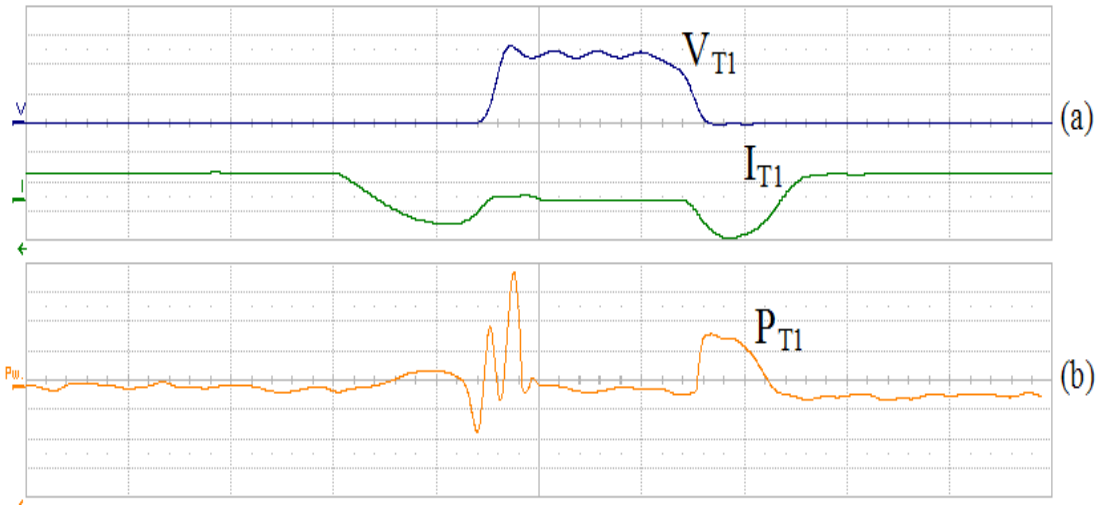
Şekil 6.17.(a)'da yumuşak anahtarlama için ana anahtara ait akım ve gerilim dalga şekli verilmektedir. Görüldüğü gibi ana anahtar kesime giderken, Aralık 1-4'te ZCT işlemi gerçekleştirilerek, akım ve gerilimde meydana gelen çakışmalar

önlenmektedir. İletim anında ise, Aralık 6-9'da ZVT işlemi gerçekleştirilerek akım ve gerilimde meydana gelen çakışmalar önlenmektedir.



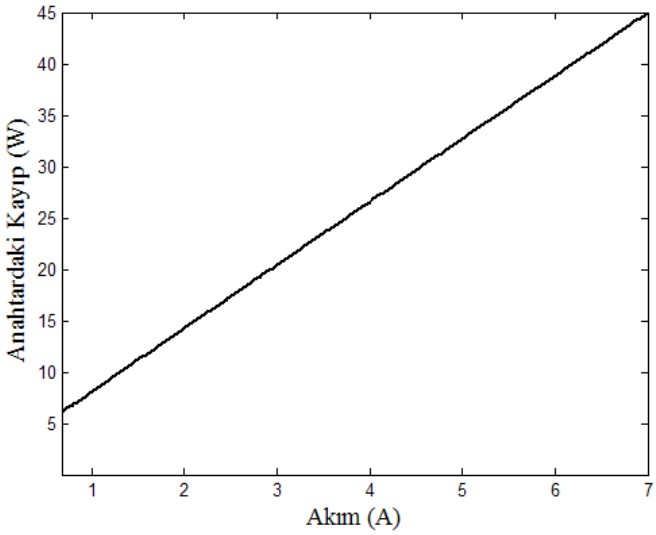
Şekil 6.16.(a) Sert anahtarlama için ana anahtarın gerilim ve akım değişimleri. 100V/kare, 5A/kare ve 1µs/kare olarak ölçeklidir, (b) sert anahtarlamada ortaya çıkan anahtarlama kayıpları. 150W/kare ve 1µs/kare olarak ölçeklidir.

Şekil 6.17.(b)'de yumuşak anahtarlama durumunda ana anahtarda oluşan kayıplar verilmektedir. Görüldüğü gibi anahtar iletime girdiği anda anahtar üzerindeki gücün tepe değeri 60W'tır. Fakat ortalama güç hesabında, eğrinin alanı hesaplandığından meydana gelen ortalama güç kaybı çok küçüktür.



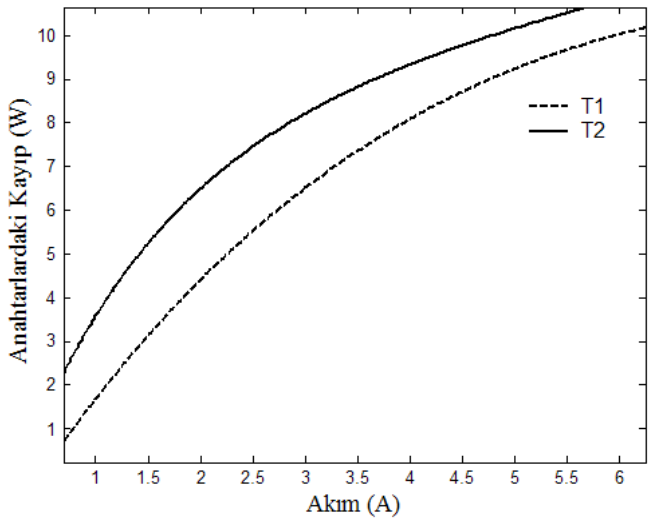
Şekil 6.17.(a) Yumuşak anahtarlama için ana anahtarın gerilim ve akım değişimleri. 100V/kare, 5A/kare ve 1µs/kare olarak ölçeklidir, (b) yumuşak anahtarlamada ortaya çıkan anahtarlama kayıpları. 15W/kare ve 1µs/kare olarak ölçeklidir.

Şekil 6.18'de 1A-12A yük akım aralığı için, ana anahtarda oluşan kayıplar verilmiştir. Anahtardan 12A geçtiğinde 80W'lık bir kayıp söz konusudur.



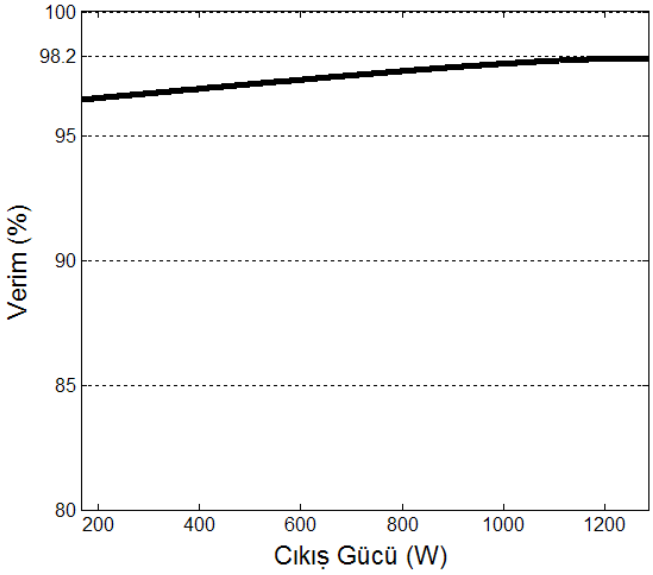
Şekil 6.18. Sert anahtarlama için ana anahtarda oluşan kayıplar.

Şekil 6.19'da yumuşak anahtarlama için T_1 ana anahtarı ve T_2 yardımcı anahtarda meydana gelen kayıplar verilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, ana anahtarda oluşan kayıpların önemli bir kısmı iletim kaybından oluşmaktadır. Yardımcı anahtar periyodun yaklaşık 1/5'inde iletimde olduğundan iletim kayıpları toplam anahtar kaybının küçük bir kısmını oluşturacaktır. Geliştirilen devredeki diğer elemanlarda görülen kayıplar çok küçük olduğundan grafik olarak verilmemiştir.



Şekil 6.19. Yumuşak anahtarlama için ana ve yardımcı anahtarda oluşan kayıplar.

Şekil 6.20'de geliştirilen yumuşak anahtarlama hücresinin verimi gösterilmektedir. Bu eğri, 100W-1200W çıkış gücü için çıkarılmıştır. Görüldüğü gibi en düşük güç değerinde bile sistemin verimi %96'nın üzerindedir. En yüksek çıkış gücünde sistemin verimi %98'in üzerine çıkmaktadır.



Şekil 6.20. Yumuşak anahtarlama durumu için geliştirilen yumuşak anahtarlama hücresinin verimi.

SONUÇ VE ÖNERİLER

DA-DA dönüştürücüler, eviriciler ve kesintisiz güç kaynakları endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu uygulama alanlarında, filtreleme ve enerji depolama amacıyla kullanılan reaktif elemanların boyutlarının azaltılması ve harmoniklerin istenilen düzeye indirilmesinde asıl etken anahtarlama frekansının arttırılmasıdır. Ancak, sert anahtarlamalı çalışmalarda artan frekansla birlikte anahtarlama kayıpları artar ve sistemin verimi azalmaktadır.

Genellikle, bastırma hücreleri, anahtarlama kayıplarını ve elemanların üzerinde oluşabilecek gerilim ve akım streslerini düşürürken sistemin verimini azaltmaktadır. Son yıllarda, anahtarlama kayıplarını ve streslerini azaltmak amacıyla bastırma elemanlarının kullanıldığı birçok yumuşak anahtarlama tekniği üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Böylece sıfır gerilimde anahtarlama ve sıfır akımda anahtarlama olmak üzere iki anahtarlama yöntemi ortaya çıkmıştır.

Yapılan birçok çalışmada, elemanlar üzerindeki streslerin yok edilmesi, düşük akım dalgalanmaları, anahtarlama kayıplarının azaltılması, denetim yönteminin basitleştirilmesi ve toplam verimin arttırılması amacıyla bastırma hücresine bir, iki veya daha fazla anahtarın eklendiği çeşitli yapılar ortaya çıkmıştır.

[42]'de gerçekleştirilen çalışmada ZVS şartları sağlanmıştır. Bu çalışmada ana anahtarda ilave akım stresi oluşmaktadır. Ayrıca yardımcı anahtar da sert anahtarlama ile kesime gitmekte ve giriş gerilimi kadar ilave bir gerilim stresine maruz kalmaktadır.

[49]'da gerçekleştirilen çalışmada ZCS şartları sağlanmıştır. Bu çalışmada ana anahtarda ilave akım stresi oluşmakta ve bu stres evirici anahtarlarına yansımaktadır.

Bu doktora tez çalışmasında, gerilim ara devreli evirici yapıları için geliştirilen yeni bir ZVT-ZCT kısmi rezonanslı DA hat uygulaması sunulmaktadır. Geliştirilen devre oldukça basit yapılı ve denetimi de oldukça kolaydır.

Sunulan ZVT-ZCT kısmi rezonanslı DA hat devresinde, ana anahtar ZVT ve ZCT altında iletime ve kesime gitmekte, yardımcı anahtar ve diyotlar da ZCS ve ZVS altında iletim ve kesime gitmektedir. Eviricinin hiçbir anahtarları üzerinde gerilim stresi oluşmamaktadır.

Eviriciyi besleyen DA hat geriliminin sıfıra düşmesi garanti edilmekte ve sıfırda kalma süresi ayarlanabilmektedir. Ayrıca bastırma hücresinin çalışma aralıklarının neredeyse tamamında yük kaynak tarafından beslenebilmektedir.

Yapılan çalışmalarda anahtarlama işaretlerinin üretilmesi için bilgisayar veya DSP işlemciler kullanılmamaktadır. Bu çözümler sistemin maliyeti ve taşınabilirliği açısından olumsuz oldukları için bu çalışmada, MICROCHIP firmasının DSpic30F4011 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Kontrol sisteminde kullanılan mikrodenetleyici fiyatının aynı işi yapan başka mikrodenetleyicilere göre daha düşük olması sistemin maliyetini önemli ölçüde azaltmaktadır.

Önerilen ZVT-ZCT kısmi rezonanslı DA hat devresinin detaylı kararlı durum analizi yapılmış ve bu analiz, benzeşim sonuçları ile doğrulanmıştır. Laboratuvar ortamında evirici yerine eşdeğer devre bağlanarak farklı yük durumları için deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Uygulama sistemi ile bu sistemden alınan deneysel sonuçlar etraflı bir şekilde sunulmuştur. Öngörülen teorik analiz ile elde edilen deneysel sonuçların tam bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür. DA hat geriliminin tam olarak sıfıra düştüğü, istenilen süre kadar sıfırda tutulabildiği ve bütün anahtarların yumuşak anahtarlama şartları altında iletime ve kesime gittiği görülmektedir.

Gerçekleştirilen bastırma hücresinin üstünlüğünü göstermek için, deneysel olarak sert anahtarlama ve yumuşak anahtarlama kayıplarının eğrileri verilmiştir. Sert anahtarlama durumunda hattan 5A çekildiğinde, ana anahtar kesime giderken tepe değeri 450W olan bir anahtarlama kaybı oluşmaktadır. Ana anahtarın iletime gitmesi

anında ise, tepe değeri yaklaşık 300W olan anahtarlama kaybı oluşmaktadır. Anahtarlama kaybı büyük oranda kesim durumlarında ortaya çıkmaktadır.

Sert anahtarlamada, anahtarda oluşan kayıplar için eğri çıkarılmış ve bu eğriden 12A'de anahtarda ortalama 80W'lık bir kaybın oluştuğu gözlenmiştir. Ayrıca bu eğriden oluşan kaybın akımla doğrusal bir ilişki içerisinde olduğu görülmüştür. Ana anahtar olarak kullanılan IGBT'nin maksimum anahtarlama kaybı $25C^{o}$'de 160W ve $100C^{o}$'de 60W'tır. Dolayısıyla bu kayıpların üzerine çıkıldığında yarı iletken yanacaktır.

Geliştiren anahtarlama hücresi bütün yük değerlerinde yumuşak anahtarlama şartlarını sağlamaktadır. En büyük güç değerinde ana anahtarda yalnızca 10W kayıp oluşmaktadır. Burada göz önünde bulundurulması gereken önemli nokta bu kayıpların içerisinde iletim kayıplarının da bulunmasıdır. Ana anahtarın periyodun 4/5'inde iletimde olduğu düşünülürse, 2V'luk iletim gerilim düşümü ve üzerinden geçen 5A'lik akım için iletim kaybı yaklaşık 8W olacaktır.

Ayrıca bu çalışmada, yardımcı anahtarda oluşan anahtarlama kayıpları da verilmiştir. Yardımcı anahtarda da anahtarlama anlarında ZVS ve ZCS işlemleri gerçekleştirilmektedir. Anahtarlama kaybı, en büyük akım değeri için 10,5W olmaktadır. Yardımcı anahtarın periyodun 1/5 iletimde olduğundan iletim kaybı yaklaşık 2W'tır. Sonuç olarak yardımcı anahtarda toplam 8,5W'lık anahtarlama kaybı oluşmaktadır. Farklı yük şartları altında yumuşak anahtarlama durumları için verim eğrisi çıkarılmış ve sistemin veriminin %98,2'e çıktığı görülmüştür.

Yapılan çalışmanın, daha sonra bu alanda yapılacak çalışmalara iyi bir referans olması beklenmektedir. Anahtarlama frekansının belirlenmesinde kısıtlayıcı etken yarı iletken anahtarların yükselme zamanı, düşme zamanı, iletim süresi ve kesim süresidir. Daha hızlı yarı iletkenler üretildikçe anahtarlama frekansı da artacaktır. Geliştirilen bastırma hücresi aynı yük şartlarına sahip başka uygulama alanlarında da kullanılabilir.

KAYNAKLAR

[1] Bimal K. Bose, "Power Electronics and Motion Control-Technology Status and Recent Trends" ***IEEE Transactions On Industrial Applications***, Vol. 29, NO. 5, September/October, pp. 3-9, 1993

[2] M. D. Bellar, Tzong-Shiann Wu, Aristide Tchamdjou, Javad Mahdavi and M. Ehsani, "A Review of Soft-Switched DC–AC Converters" ***IEEE Transactions On Industry Applications***, Vol. 34, No. 4, July/August, pp. 847-860, 1998

[3] J.D. Van Wyk and Fred C. Lee, "Power Electronics Technology At The Dawn Of the New Millenium - Status And Future" ***IEEE PESC Conf. Rec.*** pp. 3-12 1999.

[4] A. Lidow, "The Power Conversion Process as a Prosperity Machine Part I1 - Power Semiconductor Road Maps" ***IEEE APEC Conf. Rec.*** pp. 10-15, 1999

[5] B. J. Baliga, "An Overview of Smart Power Technology" ***IEEE Transactions On Electronic Devices***, Vol. 38, NO. 7, pp.1568-1575 July 1991.

[6] R. Severn "Circuit Reinvention in Power Electronics and Identification of Prior Work" ***IEEE Transactions On Power Electronics***, Vol. 16, No. 1, pp. 1-7, 2001.

[7] R. J. Kerkman, G. L. Skibinski, D. W. Schlegel, "AC Drives: Year 2000 (Y2K) and Beyond" ***IEEE APEC Conf. Rec.*** pp. 28-29, 1999.

[8] D. Staffere, J. Sarjeant, "Power Technology Roadmap" ***IEEE APEC Conf***. Rec. pp. 3-8, 1998.

[9] J. G. Kassakian, D. J. Perreault, "The Future of Electronics in Automobiles" ***Proceedings of 2001 International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs***, Osaka, 2001.

[10] R. Red1, "Power Electronics and Electromagnetic Compatibility" ***IEEE APEC Conf. Rec.*** pp. 15-21, 1996.

[11] W. McMurray, "Resonant Snubbers with Auxiliary Switches" ***IEEE Transactions On Industrial Applications***, Vol. 29, No. 2. March/April 1993.

[12] D. M. Divan, "The Resonant DC Link Converter-A New Concept in Static Power Conversion" ***IEEE Transactions On Industrial Applications***, Vol. 25 , No. 2, March/April 1989.

[13] D. M. Divan, G. Skibinsky, "Zero-Switching-Loss Inverters for High-Power Applications" ***IEEE Transactions On Industrial Applications***, Vol. 25, No. 4, July/August 1989

[14] R.W. De Doncker and J.P. Lyons "The Auxiliary Resonant Commutated Pole Converter" ***IEEE IAS Conf. Rec.*** pp.1228-1235, 1990.

[15] J. S. Lai, R. W. Young, G. W. Ott, J. W. McKeever, F. Z. Peng, "A Delta-Configured Auxiliary Resonant Snubber Inverter" ***IEEE Transactions On Industrial Applications***, Vol. 32, No. 3, May/June 1996.

[16] W. Vlatkovid , D. Borojevid , F. C. Lee, C. Cuadros, S Gatarid "A New Zero-Voltage Transition, Three-Phase Pwm Rectifier I Inverter Circuit" ***IEEE PESC Conf. Rec.*** pp. 868-873, 1993.

[17] C. Cuadros, D. BorojeviC, S. Gatarik, V. VlatkoviC,H. Mao, and Fred C . Lee, "Space Vector Modulated, Zero-Voltage Transition Three-phase to DC Bidirectional Converter" ***IEEE PESC Conf. Rec.*** pp. 16-23, 1994.

[18] C.C. Chan, K.T. Chau, D.T.W. Chan Jianming Yao Jih-Sheng Lai, Yong Li, "Switching Characteristics and Efficiency Improvement with Auxiliary Resonant Snubber Based Soft-Switching Inverters" ***IEEE PESC Conf. Rec.*** pp. 429-435, 1998

[19] F. Blaabjerg, "Snubber in pwm-vsi-inverter" ***IEEE PESC Conf. Rec.*** pp. 104-111, 1994.

[20] G. Hua, E. X. Yang, Y. Jiang, and F. C. Lee, "Novel Zero-Current-Transition PWM Converters" ***IEEE Transactions On Power Electronics***, Vol. 9, No. 6, November 1994.

[21] Ray L. Lin and Fred C. Lee, "Novel Zero-Current-Switching-Zero-Voltage-Switching Converters" ***IEEE PESC Conf. Rec.*** pp. 438-442, 1996.

[22] H. Mao, F. C. Y. Lee, X. Zhou, H. Dai, M. Cosan, D. Boroyevich, "Improved Zero-Current Transition Converters for High-Power Applications" ***IEEE IAS Conf. Rec.*** pp. 145-1152, 1996.

[23] Y. Li, F. C. Lee, J. Lai, D Boroyevich, " A Novel Three-Phase Zero-Current-Transition and Quasi-Zero-Voltage-Transition (ZCT-QZVT) Inverter/Rectifier with Reduced Stress on Devices and Components," ***IEEE APEC Conf. Rec.*** pp. 1030-1036, 2000.

[24] F. Forrest, J. Gonzalez, F Costa, "Use of soft-switching principles in PWM voltage inverter design" ***IEE EPE Conf. Rec.*** Vol. 3. pp. 5-10. 1993.

[25] S. Bernet, B. Bernet, T. Lipo, “The auxiliary resonant commutated pole matrix converter- a new topology for high power application” ***IEEE IAS Conf. Rec.*** pp. 1242-1249. 1996.

[26] Y. Li, F. C. Lee, J. Lai, D Boroyevich, “A Low Cost Three-Phase Zero-Current Transition with Three Auxiliary Switches”, ***IEEE PESC Conf. Rec.*** p. p. 527-532. 2000.

[27] Z. Yu, Y. Yangguang, “A Three-Phase Four-Line Soft Switched Inverter for UPS Applications”, Industrial Electronics, 1992., ***Proceedings of the IEEE International Symposium***, p.p 696-700, vol.2, 1992

[28] W. Dong, J. Y. Choi, Y. Li, D. Boroyevich, F. C. Lee, J. L. S. Hiti, “Comparative Experimental Evaluation of Soft-Switching Inverter Techniques for Electric Vehicle Drive Applications”, ***Industry Applications Conference***, vol. 3, p.p 1469-1476, 2001

[29] J. S. Lai, R. W. Young, J. W. McKeever, “Efficiency Consideration of DC Link Soft-Switching Inverters for Motor Drive Applications”, ***Power Electronics Specialists Conference***, vol.2, p.p. 1003-1010, 1994

[30] M. Ehsani, K. M. Rahman, M. D. Bellar, A. Severinsky “Evaluation of Soft Switching for EV and HEV Motor Drives” ***Industrial Electronics, IEEE Transactions***, vol. 48, p.p. 82-90, 2001

[31] H. Ogiwara, M. Itoi andM. Nakaoka, " PWM-controlled soft-switching SESN high-frequency inverter for induction-heating applications”, ***IEE Proc.-Electr. Power Appl.***, Vol. 151, No. 4, July 2004.

[32] T.H.Chen, C.M.Liaw, “Soft-Switching Inverter For Electrodynamic Shaker” ***IEE Proc-Electr. Power Appl.***, Vol. 146, No. 5, September 1999.

[33] K.H.Chao, C.M.Liaw, “Three-Phase Soft-Switching Inverter For Induction Motor Drives”, ***IEE Pruc.-Electr. Power Appl.***, Vol. 148, No. 1, January 2001

[34] R. W. D. Doncker, G. Venkataramanan, D. Divan, “Design Methodologies for Soft Switching Inverter” ***IEEE, IAS, Conf. Rec.*** pp. 152-160, 1987.

[35] S. Chen, T. A. Lipo, “A passively Clamped Quasi Resonant DC Link Inverter”, ***IEEE, IAS, Conf. Rec.*** pp. 841-848, 1994.

[36] H. K. Lauw, R. S. Zedwick, “Voltage Clamped Parallel Resonant Converter with Controllable Duty Cycle” United States Patent Number 5,559,685, September 24, 1996.

[37] S. Chen, and T. A. Lipo, "A Novel Soft-Switched PWM Inverter for AC Motor Drives", ***IEEE Trans. Power Electron.***, Vol. 11, No. 4, pp. 653-659, July 1996.

[38] J. Yoshitsugu, Ki Inoue, E. Haraki, and Nakaoka, "Resonant DC Link Snubber-Assisted Soft Switching Inverter Type AC Servo Driver with Low Common Mode Current Characteristics", ***Power Electronics and Drive Systems***, vol. 2, pp. 494–499, Oct. 2001.

[39] M.Kurokawa, Y.Konishi, and M.Nakaoka, "Evaluations of voltage-source soft-switching inverter with single auxiliary resonant snubber" ***IEE Proc.-Electr. Power Appl.***, Vol. 148. No 2. pp. 207-212, March 2001.

[40] S. Behera, S. P. Das, and S. R. Doradla, "Design, Simulation and Implementation of a Quasi-Resonant DC-AC Converter with Improved Performance", ***Power Electronics and Drive Systems***, Vol. 2, pp. 663–668, October 2001.

[41] J. Abu-Qahouq and I. Batarsez, "Unified Steady-State Analysis of Soft-Switching DC–DC Converters", ***IEEE Trans. Power Electron.***, Vol. 17, No. 5, pp. 684–691, September 2002.

[42] R. D. Monteiro and A. V. A. Anunciada, " Switch Input Supply: A load Adaptive Soft Switching Cell Usable in all Bridge DC-DC and DC-AC Converters", ***Industrial Electronics***, Vol.3, pp. 748-753, May 2002.

[43] W. Shireen and R. A. Kulkarni, "A Soft Switching Inverter Module with Modified DC Link Circuit for High Frequency DC-AC Power Conversion" ***Applied Power Electronics Conference and Exposition***, Vol.1, pp. 507-511, February 2003.

[44] R. M. D. Monteiro and A. V. A. Anunciada, "A New Soft-Switching Cell Usable in Bridge Converters", ***Power Electronics Specialist Conference***, vol.4, pp. 1851 - 1856, June 2003.

[45] Q. Li, Jie Wu, and H. Jiang, "Design of Parallel Resonant DC-link Soft-Switching Inverter Based on DSP", ***Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation,*** Vol. 6, pp. 5595–5599, June 2004.

[46] S. Behera, S.P. Das, and S.R. Doradla, "Quasi-resonant soft-switching inverter for low and high power factor loads" ***IEE Proc. Electr. Power Appl.***, Vol. 151, No. 4, pp. 451-459, July 2004.

[47] H. Bodur and A. F. Bakan, "A New ZVT–ZCT–PWM DC–DC Converter" ***IEEE Trans. Power Electron.***, Vol. 19, No. 3, pp. 676-684, May. 2004.

[48] H. Obdan, H. Bodur, I. Aksoy, N. Bekiroglu, and G. Yildirmaz, "A New Parallel Resonant DC Link for Soft Switching Inverters" ***Taylor and Francis Ltd. Electric Power Components and Systems***, Vol. 33, No 2, pp. 159-169, January 2005.

[49] S. Mandrek and P. J. Chrzan, "Quasi-Resonant DC-Link Inverter With a Reduced Number of Active Elements", ***IEEE Trans. Ind. Electron.***, Vol. 54, No. 4, pp. 2088–2094, August 2007.

[50] W. Dong, " Analysis and Evaluation of Soft-Switching Inverter Techniques in Electric Vehicle Application " , ***PhD Dissertation, Virginia University***, 2003.

[51] Obdan, H., "Asenkron Motor Kontrolü İçin Yeni Bir Rezonans DC Hatlı İnverterin Geliştirilmesi ve Bir Uygulama Devresinin Gerçekleştirilmesi", ***Yıldız Teknik Üniversitesi***, 2002.

[52] Bodur, H., "DC- DC Dönüştürücülerde Yumuşak Anahtarlama Teknikleri Ders Notları", ***Yıldız Teknik Üniversitesi***, 2007

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında Tokat'ta doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kocaeli'nde tamamladı. 1997 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümünde Lisans eğitimine başladı. 2001 yılında bu bölümden elektrik mühendisi olarak mezun oldu. Aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2003 yılında Yüksek Lisans eğitimini tamamlayarak aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim dalında Doktora eğitimine başladı. 2004 yılında öğretim görevlisi olarak Kocaeli Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulunda çalışmaya başladı ve halen görevine devam etmektedir.