

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ İÇİN
ÇOK KATLI EVİRİCİ TASARIMI

TÜREV SARIKURT
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2010

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ İÇİN
ÇOK KATLI EVİRİCİ TASARIMI

TÜREV SARIKURT
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
YRD. DOÇ. DR. ABDÜLKADİR BALIKÇI

GEBZE
2010



YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 08.01.2010 tarih ve 2010/01. sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 11.01.2010 tarihinde tez savunma sınavı yapılan T. İsmail... İsmail...'ın tez çalışması Elektronik Müh. Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : YRD. DOÇ. DR. ABDÜLKADİR BALIKÇI

ÜYE

: DOÇ. DR. M. HAKAN HOCAOĞLU

ÜYE

: YRD. DOÇ. DR. ERKAN ZERGEROĞLU

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../20... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI : YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ İÇİN
ÇOK KATLI EVİRİCİ TASARIMI
YAZAR ADI : TÜREV SARIKURT

Gerek ekonomik gerekse çevresel nedenlerden dolayı son yıllarda geleneksel enerji kaynaklarına gösterilen ilgi azalmakta, teknolojik araştırmaların odak noktası yenilenebilir enerji kaynaklarına kaymaktadır. Diğer yandan var olan çok katlı evirici modelleri geliştirilmekte ve endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır.

Bu tezde yakıt hücreleri, güneş pilleri ve rüzgar türbinleri gibi izole DC gerilim kaynağı özelliği gösteren yenilenebilir enerji kaynaklarının kaskat çok katlı eviricilerle gerçekleştirilmesi için bir altyapı hazırlanmıştır. Kaskat çok katlı eviricilerde kat sayısı arttıkça anahtarlama elemanlarının niceliği de artmakta, sistem karmaşılaşmakta ve kontrolü zorlaşmaktadır. Bu nedenle daha az elemandan oluşan ve daha basit bir anahtarlama tekniğine sahip olan yeni bir model tasarlanmış benzetimlerle desteklenmiş, adı geçen enerji kaynaklarını temsilen DC gerilim kaynakları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

SUMMARY

TITLE OF THE THESIS : A MULTILEVEL INVERTER DESIGN
FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS
AUTHOR : TÜREV SARIKURT

In recent years, the interest shown in conventional energy sources is decreasing due to economic and environmental reasons and the focus of technological researches is turning to renewable energy sources. On the other hand the existing multilevel inverter models are being developed and frequently used in industrial applications.

In this study an infrastructure is formed to implement cascaded multilevel inverters with renewable energy sources such as wind turbines, fuel cells and solar cells, which shows the characteristics of DC voltage sources. In cascaded multilevel inverters As the number of levels increases in a cascaded multilevel inverter the quantity of switching elements increases, the system becomes complex and difficult to control. Therefore a new inverter model, which has less number of switching elements and has an easier switching technique is designed, supported with simulations and implemented by using DC voltage sources instead of mentioned renewable sources.

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim süresince desteğini, ilgisini ve zamanını esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Abdulkadir BALIKÇI'ya, bir odadan çok daha fazlasını paylaştığım arkadaşlarım Onur ÖZTÜRK, Dinçer ÖZTÜRK ve Ceyhun SEZENÖĞLU'na, bu süreçte sürekli yardıma hazır olan Umut ÖNDİN, Ahmet YILMAZ, Arda ÜLKÜ ve Erkan SUNAN'a, tecrübelerini ihtiyaç duyduğum her an benimle paylaşan değerli hocam Özgür KARACASU'ya, sadece varlığıyla birçok sorunun çözülmesini sağlayan Derya AYDIN'a ve bugüne bu şekilde gelmemi sağlayan, ilgileri ve dualarıyla her an arkamda olan, her şeyimi borçlu olduğum değerli aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tez Konusu ve Gerekliliği	3
1.2. Tezin İçeriği	4
2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI	6
2.1. Güneş Pilleri	7
2.1.1. Güneş Pilleri'nin Avantajları ve Dezavantajları	10
2.1.1.1 Güneş Pilleri'nin Avantajları	10
2.1.1.2 Güneş Pilleri'nin Dezavantajları	10
2.2. Rüzgar Türbinleri	10
2.2.1. Rüzgar Türbinleri'nin Avantajları ve Dezavantajları	12
2.2.1.1 Rüzgar Türbinleri'nin Avantajları	12
2.2.1.2 Rüzgar Türbinleri'nin Dezavantajları	13
2.3. Yakıt Hücreleri	13
2.3.1. Yakıt Hücreleri'nin Avantajları ve Dezavantajları	14
2.3.1.1 Yakıt Hücreleri'nin Avantajları	14
2.3.1.2 Yakıt Hücreleri'nin Dezavantajları	15
3. EVİRİCİLER	16
3.1. Gerilim Kaynaklı Eviriciler	17
3.1.1. Tek Fazlı İki Seviyeli Gerilim Kaynaklı Evirici	17
3.1.2. Tek Fazlı Üç Seviyeli Gerilim Kaynaklı Evirici	19
3.2. Akım Kaynaklı Eviriciler	21
3.3. Eviricilerde Kullanılan Anahtarlama Elemanları	21

4.	ÇOK KATLI EVİRİCİLER	22
4.1.	Çok Katlı Eviriciler'in Genel Yapısı	23
4.2.	Çok Katlı Eviriciler'in Avantajları ve Dezavantajları	25
5.	ÇOK KATLI EVİRİCİLER'İN ÇEŞİTLERİ	27
5.1.	Diyot Kenetlemeli Çok Katlı Eviriciler	28
5.1.1.	Diyot Kenetlemeli Çok Katlı Evirici'nin Yapısı	28
5.1.2.	Diyot Kenetlemeli Çok Katlı Evirici'nin Avantajları ve Dezavantajları	37
5.1.2.1	Diyot Kenetlemeli Çok Katlı Evirici'nin Avantajları	37
5.1.2.2	Diyot Kenetlemeli Çok Katlı Evirici'nin Dezavantajları	37
5.2.	Kapasitör Kenetlemeli Çok Katlı Eviriciler	37
5.2.1.	Kapasitör Kenetlemeli Çok Katlı Evirici'nin Yapısı	38
5.2.2.	Kapasitör Kenetlemeli Çok Katlı Evirici'nin Avantajları ve Dezavantajları	47
5.2.2.1	Kapasitör Kenetlemeli Çok Katlı Evirici'nin Avantajları	47
5.2.2.2	Kapasitör Kenetlemeli Çok Katlı Evirici'nin Dezavantajları	47
5.3.	Kaskat Çok Katlı Eviriciler	48
5.3.1.	Kaskat Çok Katlı Evirici'nin Yapısı	48
5.3.2.	Kaskat Çok Katlı Evirici'nin Avantajları ve Dezavantajları	54
5.3.2.1	Kaskat Çok Katlı Evirici'nin Avantajları	54
5.3.2.2	Kaskat Çok Katlı Evirici'nin Dezavantajları	55
6.	ÖNERİLEN KASKAT ÇOK KATLI EVİRİCİ MODELİ	56
6.1.	Önerilen Modelin Yapısı	57
6.2.	Geleneksel Kaskat Çok Katlı Evirici ile Önerilen Modelin Karşılaştırılması	60
6.3.	Önerilen Modelin Anahtarlama Açıları	63
6.4.	Gerilim Taşması Sorunu ve Söndürme Devreleri	66
6.4.1.	İletim Söndürme Devreleri	69
6.4.2.	Kesim Söndürme Devreleri	70
6.4.3.	Aşırı Gerilim Söndürme Devreleri	71
7.	ÖNERİLEN MODELİN GERÇEKLENMESİ	74

7.1. Kullanılan Ekipmanlar	74
7.2. Önerilen Modelin Gerçeklenmesi	75
7.2.1. Önerilen Modelin Ohmik Yük ile Gerçeklenmesi	75
7.2.2. Önerilen Modelin Endüktif Yük ile Gerçeklenmesi	78
8. SONUÇLAR VE GELECEĞE YÖNELİK ÇALIŞMALAR	81
KAYNAKLAR	83
ÖZGEÇMİŞ	90

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Güneş Pili'nin eşdeğer devresi.	9
2.2 Fotovoltaik sistem genel şeması.	9
2.3 Rüzgar türbini blok diyagramı.	12
2.4 Yakıt Hücresi Sistemi blok şeması.	14
3.1 Yarım Köprü Evirici devresi	18
3.2 Yarım Köprü Evirici devresi çıkış dalga formu	18
3.3 Tam Köprü Evirici devre şeması	19
3.4 Tam Köprü Evirici devresi çıkış dalga formu.	20
4.1 İki katlı(a), üç katlı(b) ve n katlı(c) bir eviricinin tek faz bacağı.	24
5.1 Üç Katlı Diyot Kenetlemeli Eviricinin tek fazı için devre şeması.	29
5.2 Diyot Kenetlemeli Evirici için iki fazlı devre şeması	31
5.3 Üç fazlı üç katlı Diyot Kenetlemeli Evirici.	32
5.4 Beş katlı Diyot Kenetlemeli Evirici devre şeması	33
5.5 Aynı anahtarlama kombinasyonu durumunda (a) V_{a0} geriliminin (b) Van geriliminin cevabı.	35
5.6 Üç fazlı beş katlı Diyot Kenetlemeli Evirici	35
5.7 Bir fazlı "m" katlı Diyot Kenetlemeli Evirici.	36
5.8 Üç katlı Kapasitör Kenetlemeli Evirici'nin tek faz devre şeması.	38
5.9 Kapasitör Kenetlemeli Evirici için 2 fazlı devre şeması	40
5.10 3 Fazlı 3 Katlı Kapasitör Kenetlemeli Evirici topolojisi.	42
5.11 Tek fazlı beş katlı Kapasitör Kenetlemeli Evirici.	43
5.12 Aynı anahtarlama durumunda (a) V_{an} geriliminin (b) V_{a0} geriliminin cevabı.	47
5.13 Tek fazlı üç Katlı Kaskat Evirici devre yapısı	49
5.14 Tek fazlı beş katlı Kaskat Evirici	50
5.15 Tek fazlı beş katlı Kaskat Evirici'ye ait çıkış gerilimi.	52
5.16 Tek fazlı "n" katlı Kaskat Eviricinin devre şeması.	53
5.17 Üç fazlı beş katlı Kaskat Evirici devre şeması.	54
6.1 Geliştirilmiş beş katlı Kaskat Evirici	57
6.2 Önerilen yapıdaki 5 katlı kaskat eviricinin anahtar pozisyonlarına bağlı olarak çalışma durumları.	58
6.3 Klasik on bir katlı Kaskat Evirici.	61

6.4 Önerilen on bir katlı Kaskat Evirici modeli.	62
6.5 On bir katlı Kaskat Evirici'nin çıkış grafiği.	63
6.6 Beş katlı Kaskat Evirici için anahtarlama durumları.	64
6.7 Endüktif yük durumunda oluşan çıkışın SIMULINK benzetimi.	66
6.8 Saf direnç yük karakteristiğine sahip sistemin (a) gerilim çıkışı, (b) FFT'si.	67
6.9 100 ohm direnç ve 40 mH endüktans yük karakteristiğine sahip sistemin (a) gerilim çıkışı, (b) FFT'si.	68
6.10. Sırasıyla rezistif yük ve endüktif yük karakteristiğine sahip sistemlerin çıkış şekillerinin FFT'lerinin kıyaslanması.	69
6.11 İletim Söndürme devresi.	70
6.12 Kesim Söndürme Devresi	71
6.13 Aşırı Gerilim Söndürme Devresi	71
6.14 Önerilen çok katlı kaskat eviricinin söndürme devresi uygulandıktan sonraki çıkışı.	72
6.15 Aşırı gerilim söndürme devresi uygulanmış 5 katlı kaskat eviricinin FFT çıktısı.	73
7.1 Ohmik yük ile gerçekleşmiş beş katlı Kaskat Evirici'nin çıkış gerilimi.	75
7.2 Beş katlı Kaskat Evirici çıkışının aynı frekansta sinüzoidal bir işaret ile karşılaştırılması.	76
7.3 Beş katlı Kaskat Evirici'nin gerilim ve akım çıkışlarının sinüzoidal bir işaret ile karşılaştırılması	77
7.4 Ohmik yük ile gerçekleşmiş beş katlı Kaskat Evirici'nin FFT analizi sonucu on beşinci harmoniğe kadar elde edilen harmonik gerilimleri.	77
7.5. Ohmik yük ile gerçekleşmiş beş katlı Kaskat Evirici'nin FFT analizi sonucu yüzüncü harmoniğe kadar elde edilen harmonik gerilimleri.	78
7.6 Endüktif yük ile gerçekleşmiş beş katlı Kaskat Evirici'nin çıkış gerilimi.	78
7.7 Endüktif yük ile gerçekleşmiş beş katlı Kaskat Evirici'nin çıkış gerilimi ve akımı.	79
7.8. Endüktif yük ile gerçekleşmiş beş katlı Kaskat Evirici'nin FFT analizi sonucu on beşinci harmoniğe kadar elde edilen harmonik gerilimleri.	79
7.9. Endüktif yük ile gerçekleşmiş beş katlı Kaskat Evirici'nin FFT analizi sonucu yüzüncü harmoniğe kadar elde edilen harmonik gerilimleri.	80

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Tam Köprü Evirici'ye ait anahtarlama durumları	20
5.1 Üç katlı Diyot Kenetlemeli Evirici'nin çıkış gerilim seviyeleri ve bunlara karşılık gelen anahtarlama durumları.	30
5.2. Diyot Kenetlemeli Tam Köprü Eviricinin çıkış gerilimi ve anahtarlama kombinasyonları	31
5.3 Tek fazlı beş katlı Diyot Kenetlemeli Evirici'nin çıkış geriliminin seviyeleri ve bu seviyelere karşılık gelen anahtarlama kombinasyonları.	33
5.4 Beş katlı bir Diyot Kenetlemeli Evirici'nin "a" ve "0" noktaları arasında çıkış gerilim seviyeleri ve bunlara karşılık gelen anahtarlama durumları.	34
5.5 Tek fazlı üç katlı Kapasitör Kenetlemeli Evirici'nin çıkış gerilim seviyeleri ve bunlara karşılık gelen anahtar kombinasyonları.	39
5.6. Üç katlı Kapasitör Kenetlemeli Tam Köprü Evirici çıkış gerilim seviyeleri ve bu seviyelere karşılık gelen anahtarlama kombinasyonları.	41
5.7 Beş katlı Kapasitör Kenetlemeli Evirici'nin çıkış seviyeleri ve bu seviyelere karşılık gelen anahtarlama durumları.	44
5.8 Beş katlı Kapasitör Kenetlemeli Evirici'nin "a" ve "0" noktaları arasındaki çıkış gerilim seviyeleri ile bunlara karşılık gelen anahtarlama kombinasyonları.	46
5.9 Üç katlı Kaskat Evirici'nin anahtarlama durumları	49
5.10 Tek fazlı beş katlı Kaskat Evirici'nin çıkış gerilimleri ve anahtarlama durumları	51
6.1.Önerilen topolojinin anahtarlama durumları ve bu durumlara denk gelen çıkış gerilimi seviyeleri.	60

1. GİRİŞ

Günümüzde insanoğlunun en fazla ihtiyaç duyduğu enerji türü kuşkusuz elektriktir. Bu enerji ısınmak başta olmak üzere yaşamsal ihtiyaçların birçoğunun karşılanmasında büyük önem taşır. Enerjinin Korunumu Yasası olarak da bilinen Termodinamiğin Birinci Kanunu'na göre hiçbir enerji yoktan var edilemez veya varken yok edilemez, sadece birbirlerine dönüştürülebilirler. Tarihte boyunca enerji konusunda insanoğlunun çabası da diğer enerji türlerini mekanik enerjiye çevirmek şeklinde olmuştur. Ancak son yüzyılla beraber bu eğilim yerini diğer enerji türlerinin elektrik enerjisine çevrilmesine bırakmıştır. Çevresel bilincin arttığı son döneme kadar bu eğilimde fosil yakıtlar büyük önem taşımaktaydı. Günümüzde bile Dünya enerji gereksiniminin %80'i kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil yakıtlardan karşılanmaktadır [1].

Bugün tüm dünyada çözülmesi gereken en önemli küresel sorunların başında sınırlı olduğu halde bu kadar yoğun kullanılan bu enerji kaynağının sürdürülebilirliğinin geldiği kabul edilmektedir [2]. Kullanılagelen fosil enerji kaynaklarının sınırlı olması ve üzerinde net bir tarih üzerinde uzlaşılammış olsa da bu kaynakların en geç üç yüzyıl içinde tamamen tükenecek olduğunun bilinmesi bilim dünyasının ilgisini yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Ve yapılan uzun dönem tahminlere göre, yenilenebilir enerji teknolojilerinin gelecekte daha etkin bir rol alması kaçınılmazdır [3].

Fosil yakıtlarla beslenen sistemlerin eleştirildiği diğer bir nokta çevresel zararlarıdır. Küresel ısınma, iklim değişikliği, atmosfer kirliliği veya sera etkisi gibi kaygıların temelinde büyük miktarlarda kullanılan fosil yakıtların atmosfere bıraktıkları zararlı gazların artması yatmaktadır. Küresel elektrik üretim sektörü atmosfere yılda 7700 milyon tonun üzerinde karbon salınımı yapmaktadır ve bu rakam toplam karbon salınımının %37.5'idir [4]. Sera gazlarının atmosfere yığılmasıyla oluşan küresel iklim değişikliği ekosistemlere şimdiden zarar vermeye başlamıştır. Yeryüzü sıcaklığı bu gazlar dolayısıyla her on yılda 0.3°C artmaktadır ve bu nedenle yılda ortalama 150.000 insanın ölümüne sebep olmaktadır. Ortalama

2°C'lik bir ısınma milyonlarca insanı açlık, sıtma, sel felaketleri ve tatlı su kıtlığıyla tehdit etmektedir [5].

Yenilenebilir Enerji Kaynakları ise oldukça temizdir. Bu kaynaklar çok az atık üreten veya hiç üretmeyen yapılar olduğundan sağlık problemleri oluşturacak etkiler bırakmazlar. Bu nedenle atık arıtım tesisleri kurmak benzeri maliyetleri de yoktur [6].

Fosil yakıtların bir başka dezavantajı kaynak yoğunluğunun bölgesel olarak değişmesidir. Fosil yakıtların kontrolünün bazı ülkelerde yoğunlaşmış olması bu yakıtların dağıtımı ve kullanımında adaletsizliklere yol açmaktadır. Bugün dünyada iki milyar insanın hayatında elektrik yoktur. 1990 yılında kırsal alanda hayatını sürdüren insanların %56'sının elektriğe sahip olmadığı bilinmektedir ve bugün de Afrika kıtasında nüfusun %90'ı elektrik kullanmamaktadır [7].

Bu coğrafyalarda Yenilenebilir Enerji Kaynakları çok önemlidir. Hidrojen doğada en fazla bulunan ve homojen olarak dağılmış bir element olduğundan hidrojeni saflaştıracak teknolojilere geçiş yapıldıktan sonra Yakıt Hücreleri için üretimde kullanılan yakıt maliyeti sabittir. Bu maliyet Rüzgar Türbinleri ve Güneş Pilleri için ise sıfırdır. Bu iki sistemin yakıtı tamamen doğal süreçlerdir. Şiddeti ve yoğunluğu farklı olsa da dünyanın genelinde coğrafi farklılıklara bağlı olmadıkları kabul edilmektedir [6].

“Taş devri nasıl taşların bitmesiyle sona ermediyse, petrol çağı da petrolün dünyada tükenmesinden çok daha önce sona erecektir”. Ahmad Zaki Yamani.

Küresel petrol krizinin yaşandığı yıllarda Suudi Arabistan Petrol Bakanlığı görevini yürüten (1962-1986) Şeyh Zaki Yamani'ye ait olan bu söz günümüz enerji eğilimin bir özetidir [8]. Küresel olarak toplam enerji kullanımında yenilenebilir enerji kaynaklarının payı %13.8'dir. Günümüzde Avrupa Birliği ülkeleri enerji tüketiminin %5.6'sını yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlamaktadır. Birliğin gelecek yıl toplam elektrik üretiminin %22.1'ini, toplam enerji tüketiminin ise %12'sini yenilenebilir kaynaklardan karşılaması hedeflenmektedir. Birliğe üye

Ülkelerin bu alandaki en büyük teşviki ise 27.10.2007 tarih 2001/77/EC sayılı yönergesine göre birliğe ye ülkelerin 2010 yılına kadar yıllık tüketilen enerjinin %22'sini yenilenebilir enerji kaynaklarından karılayacaklarını taahhüt etmiş olmalarıdır [9].

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının en büyük dezavantajı değişken ve kesikli olmalarıdır. Bu nedenle enerji depolama ve yedek enerji sistemlerine yatırım yapmak gerekmektedir. Bu ihtiyaç hibrid sistemleri ortaya çıkarmıştır. Bu sistemlerde birden fazla enerji kaynağı beraber kullanılmaktadır. Genelde rüzgar ve güneş enerjisini bağlayan modüller görülmektedir.

Hibrid sistemlerde kullanılmaya aday yöntemlerden birisi çok katlı eviricilerdir. Çok katlı eviriciler birden fazla birbirinden bağımsız doğru girişi tek bir alternatif çıkış verecek şekilde kullanmaya dayalı karmaşık anahtarlama yapıları içeren evirici modelleridir..

Çok katlı eviricilerde kat sayısı ne kadar fazla olursa sistemin çıkış harmonikleri o oranda azalmakta ve çıkış sinüzoidale daha çok benzemektedir. Teoride kat sayısı sonsuz olacak şekilde bir sistemin kurulması durumunda çıkış saf sinüzoidal formda olur. Günümüzde çok katlı eviriciler üzerinde devre yapılarına göre diyot kenetlemeli, kapasitör kenetlemeli ve kaskat olmak üzere üç farklı topoloji geliştirilmiştir.

1.1. Tez Konusu ve Gerekliliği

Yakıt Hücreleri ve Güneş Pilleri gibi Yenilenebilir Enerji Kaynakları küçük genlikte ve gte çıkış veren hücrelerin birbirine bağlanması temeline dayanır. Rüzgar Türbinlerinde ise bu çıkış kullanılan ekipmanların boyutuyla ayarlanabilmektedir. Bu türbinler genelde AC ıkı verir ancak DC ıkı veren yapılar da bulunmaktadır.

Bu çalışmada bu üç Yenilenebilir Enerji Kaynağının ıkı işaretleri DC kabul edilmiş ve bağımsız DC gerilim kaynaklarını bir arada kullanabilmek için çok Katlı

Kaskat Evirici topolojisi tercih edilmiştir. Çok katlı eviricilerin karmaşık yapılar olması ve bu karmaşıklık anahtarları sürmek için kullanılan devre parçaları başta olmak üzere arızalara yol açması sebebiyle için Kaskat Çok Katlı Evirici yapısını basitleştiren yeni bir topoloji geliştirilmiştir.

1.2. Tezin İçeriği

Tez toplamda sekiz bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm giriş bölümü olup konunun öneminden bahsedilmektedir.

İkinci bölümde Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından, Çok Katlı evirici yapılarında DC kaynak olarak kullanılabilecek Güneş Pilleri, Yakıt Hücreleri ve Rüzgar Türbinlerinden bahsedilecektir.

Üçüncü bölümde genel olarak akım ve gerilim eviricilerine değinilecek Çok Katlı Eviricilerin temel mantığını oluşturan Yarım Köprü ve Tam Köprü Eviriciler açıklanacaktır.

Dördüncü bölümde genel olarak Çok Katlı Eviricilerin mantığı anlatılacak çok katlı eviricilerin avantajları ve dezavantajları belirtilecektir.

Beşinci bölümde Çok Katlı Evirici türleri tanıtılacak Diyot Kenetlemeli, Kapasitör Kenetlemeli ve Kaskat Eviricilerin yapıları, topolojileri, anahtarlama durumları, bu yapıların birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları aktarılacaktır.

Altıncı bölümde önerilen Kaskat Evirici modeli tanıtılacak ve geleneksel Kaskat Eviricilerle olan farklılıkları ve bu eviricilere olan üstünlükleri incelenecek, değişik yük karakteristiklerinde bu modelin benzetimleri yapılacaktır. Çıkış işaretinin kalitesini arttırmak için gereken anahtarlama açıları ve algoritma verilecek, endüktif yük kullanımı durumunda çıkış işaretinde oluşan gerilim taşması sorununa bir çözüm yöntemi önerilecek ve elde edilen bilgiler benzetim sonuçlarıyla desteklenecektir.

Yedinci bölümde önerilen model laboratuvar ortamında Yenilenebilir Enerji Kaynaklarını temsilen izole DC gerilim kaynaklarıyla gerçekleştirilecektir. Tüm bu çalışmaların ve deneylerin osiloskop çıktıları da bu bölümde görsel olarak verilecektir.

Son bölümde ise sonuçların değerlendirilmesi yapılacak ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalardan bahsedilecektir.

2. YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI

“Yenilenebilir Enerji Kaynakları doğal ve sürekli yenilenen süreçlerden elde edilir. Farklı formları doğrudan Güneş’ten veya Dünya’nın derinliklerinde oluşmuş ısıdan besleniyor olabilir. Güneş, rüzgar, okyanus, su, biokütle, jeotermal kaynaklardan, biyoyakıtlardan ve yenilenebilir enerji kaynaklarından türevlenen hidrojeninden elde edilen ısı ve elektrik enerjisi yenilenebilir enerjidir” [10]. Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency-IEA) Yenilenebilir Enerji’yi böyle tanımlamıştır. Bu tanımdan yola çıkarsak Güneş var olduğu sürece adı geçen doğa olayları, dolayısıyla bu enerji kaynakları da tükenmeyecektir.

Tarihte Güneş’in bir alev topu ve bir enerji kaynağı olduğunu söyleyen ilk insan Yunanlı doğa filozofu Anaxagoras’tır. Milattan sonra birinci yüzyılda yaşayan coğrafyacı Batlamyus Güneş’in dünyaya olan uzaklığını hesaplamaya çalışan ilk insandır. Ortaçağ Arap düşünürlerinden El Battani ve İbni Yunus Güneş’in yönündeki ve eksenindeki değişimleri inceleyen ilk astronomlardır [11].

Güneş’in Güneş Sistemi’nin merkezinde bulunduğu (Heliosentrizm-Günmerkezlilik) ilk olarak Yunanlı Aristarchus tarafından ortaya atılmıştır. İslam ve Hint gökbilimcileri tarafından geliştirilen bu görüş on altıncı yüzyılda Nicolaus Kopernik tarafından Avrupa’da duyurulmuş, on yedinci yüzyılda teleskopun icadından sonra Thomas Harriot ve Galileo Galilei gibi astronomlar tarafından desteklenmiştir. Yine on yedinci yüzyılın sonunda İsaac Newton prizma yardımıyla ışığın farklı fazlara sahip olduğunu gösterirken 1800’de William Herschel Kızılötesi yayılımı bulmuştur.

Güneşin yaydığı ısı ve ışığın çekirdeğindeki radyoaktif olaylar yüzünden olduğunu öneren ilk bilim adamı Ernest Rutherford’dur [12]. Sonraki yıllarda Albert Einstein’ın meşhur kütle-enerji eşitliği Güneş’in enerji yayılımıyla ilgili önemli bir ipucu olmuş,[13] 1920’lerden sonra Güneş çekirdeğindeki nükleer olayların bu ışıma ve yayınımı neden olduğu bulunurken, 1957’de Margaret Burbidge doğada var olan birçok elementin Güneş gibi yıldızlardaki nükleer reaksiyonlar sonucunda oluştuğunu göstermiştir [14].

Bu gün Güneş Sistemi'nin merkezinde bulunan bu yıldızın çapının 1.392.000 km (Dünya'nın çapının yaklaşık 109 katı), Dünya'ya uzaklığının 149.600.000 km, yüzey sıcaklığının 5.710 Kelvin olduğu ve kendi başına Güneş Sistemi'nin kütlesi %99.86'sını kapladığı bilinmektedir. Güneş'in kendi kütlesinin %75'inden fazlası hidrojenden geri kalan kısmın büyük bir bölümü helyumdan %2'lik kısmından azı ise oksijen, karbon, demir ve neon gibi diğer elementlerden oluşmaktadır [15].

Güneş'in 4.57 milyar yıl önce oluştuğu nükleokozmokronoloji (nucleocosmochronology) adı verilen bir yöntemle hesaplanmıştır [16]. Yıldız evrimi kurallarına göre kütlesi bir süpernova olarak patlaması için küçük olduğundan Güneş yaklaşık 5 milyar yıl sonra kırmızı dev fazına girecek ve yüzey sıcaklığı 100 milyon Kelvin olacaktır yani ısı ve ışık kaynağı olarak tolere edilebilir değerlerin çok daha üstüne çıkacaktır [17]

Güneş'in 5 milyar yıl daha şu andaki durumunda kalacak olması yenilenebilir enerji kaynaklarının tükenmeyeceği anlamına gelmektedir.

Bu çalışmada yenilenebilir enerji kaynaklarından Yakıt Hücreleri, Güneş Pilleri ve Rüzgâr Türbinleri seçilmiş, tanıtılmış ve DC kaynak olarak simüle edilmiştir. Bunun nedeni bu kaynakların yaygın olarak bulunan ve nispeten basit kullanıma sahip kaynaklar olmasıdır.

2.1. Güneş Pilleri

Yapılan ölçümlere göre Güneş'ten Dünya'ya gelen ışınların etkisi ortalama 1,35 kW/m²'dir. Bu elektriksel potansiyeli değerlendirmek için kullanılan bir yapı olan Güneş pili (Solar Cell) Güneş ışığından aldığı enerjiyi fotovoltaiik etki sayesinde doğrudan elektriğe çevirir.

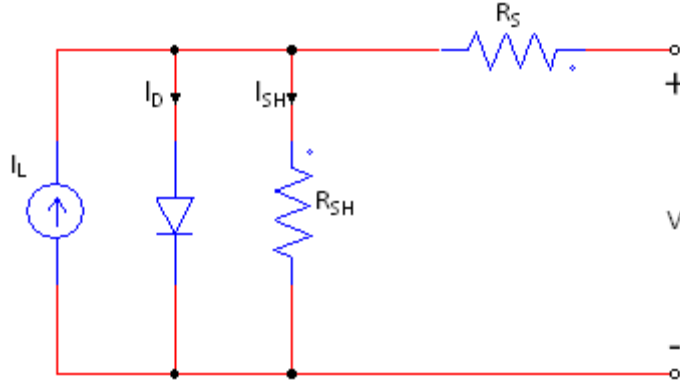
Fotovoltaiik etki bir maddeden elektromanyetik radyasyona maruz kalma yoluyla gerilim veya buna karşılık gelen elektriksel akım elde edilmesidir. İlk olarak 1839'da Fransız fizikçi A. E. Becquerel tarafından tanımlanmıştır. İlk güneş pili

1883'te Charles Fritts tarafından geliştirilmiştir. Jonksiyonlar için yarı iletken selenyumun çok ince bir altın tabakasıyla kaplanmasına dayanan bu ilk pilin verimi sadece %1'dir. Daha sonra Rus fizikçi Aleksandr Stoletov, Heinrich Hertz tarafından 1887'de açıklanan Açık hava Fotovoltaik Etkisi'ni kullanarak ilk kullanılabilir güneş pilini tasarlamıştır. Albert Einstein 1905'te fotoelektrik olayı açıklamış bu çalışmasıyla da 1921'de Nobel Fizik Ödülü'nü almıştır. Son olarak 1946 yılında Russel Ohl modern jonksiyonlu yarı iletken güneş pilinin patentini almıştır.

Güneş ışığındaki fotonlar, elektronları yarı iletken metalik bir yonga plakasının bir katmanından bir diğer katmanına hareket ettiren enerjiyi sağlar. Elektronların bu hareketi bir akım yaratır. Hücrenin üst tabakaları yansımayı önleyici kaplama ve korumalardan oluşur. Güneş hücreleri son derece kırılğan olduklarından böyle bir koruma çatlama ve kırılmaları önlemek açısından gereklidir. Aksi halde hücrenin çalışması sekteye uğrar ve bu da enerji kaybına sebep olur. Işık bu katmanlara nüfuz ettiğinde silisyum veya galyum arsenide çarpar. P ve N tabakaları arasındaki bölümlerin farklılıkları sebebiyle güneşten gelen enerji bunlara çarptığında elektronların P tabakasından N tabakasına akışı sağlanmış olur. P ve N tabakaları arasına tel çekilmek suretiyle güneş hücresi artı ve eksi kutuplara sahip bir pil halini alır ve böylelikle bir araca güç sağlamak için kullanılabilir. Tek tek sayısız hücreler "Güneş Paneli"ni oluşturmak için bir araya getirilir. Kullanılış amacına bağlı olarak bu paneller 12 ile 1000 volt arasında gerilim ve sonsuz watt'a kadar güç sağlayabilirler.

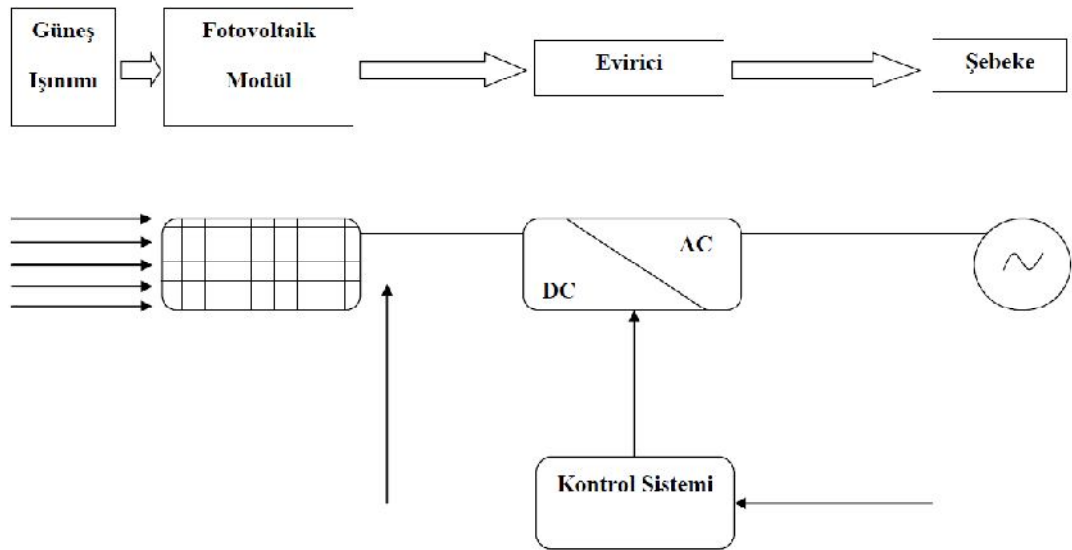
İki tür güneş hücresi kullanılmaktadır: silisyum ve galyum arsenid. Galyum arsenid pillerin geleneksel silisyum pillere oranla boyutları daha küçük ve maliyetleri daha yüksektir. Ancak bunlardan daha verimlidirler. Bu iki hücre arasındaki güç farkı 1000 watt a kadar çıkabilirken maliyet en az 10 kat daha fazladır. Bu nedenle uydu ve benzeri yapılar galyum arsenidi kullanırlarken silisyum piller genellikle yerküredeki uygulamalarda kullanılmaktadır.

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi ideal bir Güneş Pili bir akım kaynağı ve buna bağlı paralel bir diyottan oluşur. Pratikte hiçbir pil ideal olmadığından bu yapıya paralel bir Shunt direnci ve seri olarak bir direnç eklenir [18].



Şekil 2.1 Güneş Pili'nin eşdeğer devresi.

Yüzeyleri kare, dikdörtgen veya daire şeklinde biçimlendirilebilen güneş pillerinin alanları değişken olup kalınlıkları ise 0,2-0,4 mm arasında olmaktadır.



Şekil 2.2 Fotovoltaik sistem genel şeması.

Güneş Pilleri'nin seri veya paralel olarak farklı kombinasyonlarda istenilen gerilim ve güç seviyesine göre bağlanmasıyla Fotovoltaik Modüller oluşturulur. Bu modüllerden yararlanılarak güneş ışınımından elde edilen enerji Şekil 2.2'de görülene benzer bir yapıyla şebekeye verilebilir. Şebekeye bağlanmak için evirici kullanan fotovoltaik sistemlerde gerilim ve frekans kontrolü de evirici sistemler tarafından yapılmaktadır [19].

Bu sistemler dışında günümüzde termofotovoltaik (thermophotovoltaic) olarak adlandırılan güneşten gelen ısı ve kızılötesi yayınımları kullanarak enerji üreten yapılar üzerinde de çalışılmaktadır. Bunların avantajı güneş pilleri gibi hava karardığında devre dışı kalmayacak olmalarıdır [6].

2.1.1. Güneş Pilleri'nin Avantajları ve Dezavantajları

2.1.1.1 Güneş Pilleri'nin Avantajları

- Yapılan çalışmalar güneş'in ömrünün 5 milyar yıldan fazla olduğunu ortaya koymaktadır. Bu gerçek göz önüne alındığında, insanlık var olduğu sürece güneş enerjisi ile ilgili herhangi bir potansiyel sorunu yaşanmayacağı anlaşılmaktadır.
- Güneş pilleri temiz enerji üreteçleridir. Pil teknolojisinde kullanılan silisyumun kanserojen etkisi dışında bir zararı yoktur.
- Güneş Pilleri yerel enerji üretim sistemleridir. Güneş ışınlarının faydalanılabilen her coğrafyada verimi farklı olsa da kurulum uygulanabilir.
- Sistem bir defa kurulduktan sonra bir daha yakıt maliyeti olmayacaktır.

2.1.1.2 Güneş Pilleri'nin Dezavantajları

- Birim yüzeye gelen Güneş ışınımı az olduğundan büyük yüzeylere ihtiyaç duyulmaktadır.
- Kesikli değişken ve dağınık bir özelliğe sahiptir, enerji depolama ve yedek enerji sistemlerine yatırım yapılması gerekir.

2.2. Rüzgar Türbinleri

Rüzgar güneş ışınlarının Dünya'nın oldukça değişken olan yüzeyini farklı oranda ısıtması sonucu oluşan hava hareketleri olarak tanımlanmaktadır. Yeryüzü

homojen olmadığından yüzeye gelen güneş enerjisinin soğurulma oranı konum, zaman ve coğrafi özelliklere göre değişir. Bu durum atmosfer basıncı, sıcaklığı ve yoğunluğunda farklılıklar yaratır. Ortaya çıkan kuvvetler sonucunda hava bir yerden diğerine giderek rüzgar olarak adlandırılan akımları yol açar. Daha basit bir deyişle rüzgar enerjisi doğal yollarla çevrime uğramış güneş enerjisidir. Rüzgar enerjisi güneşten gelen enerjinin %1'ini kullanmaktadır.

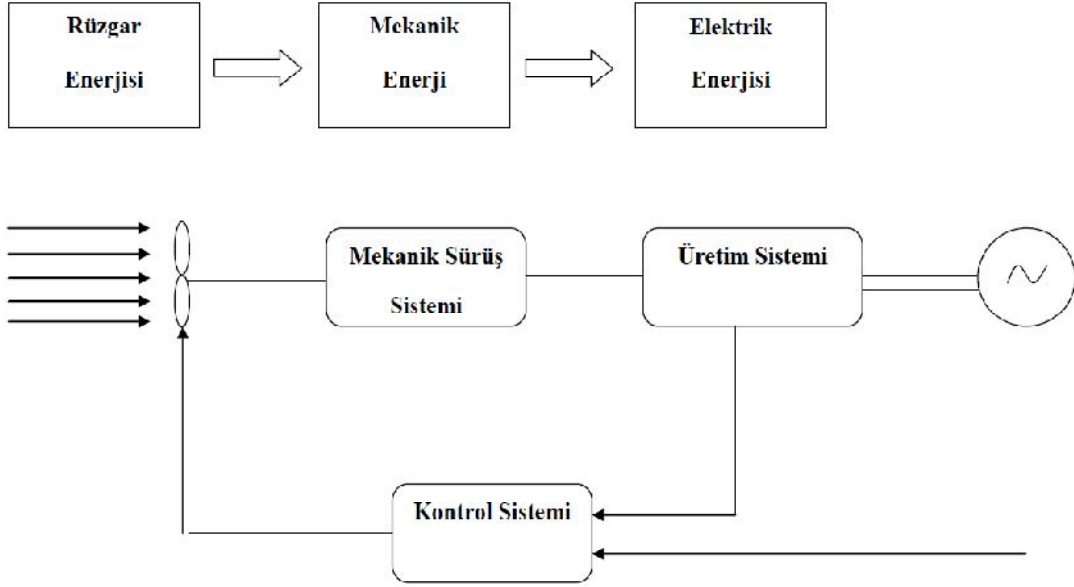
Rüzgar enerjisinin kullanımına dair ilk belgeler M.Ö.2 YY'da Persler'e aittir. Bilimsel ilk kaynaklar ise "Heron'un yel değirmeni" figürüyle de tanınan ünlü antik yunanlı matematikçi İskenderiye'li Heron'a aittir [20].

1930'lara kadar yel değirmeni teknolojisi gelişmekle birlikte elektrik üretimine dair ilk örnek 1930'larda görülmüştür. Modern dikey eksenli rüzgar jeneratörlerinin ilki SSCB nin Yalta şehrinde 1931 yılında kullanılmıştır. Bu 30m'lik bir kulenin üzerinde bulunan, yerel 6.3 kV'luk bir dağıtım sistemine bağlı 100kW'lık bir santraldir. Bu santralin verimin %32 olduğu rapor edilmiştir ki bu günümüz rakamlarından çok da farklı değildir[21]. Güz 1941'de ilk MW mertebesinde enerji üreten rüzgar türbini (Smith-Putnam türbini) Vermont'ta kullanılmıştır.

Günümüz teknik koşullarında 10 metre yükseklikteki ortalama 6 m/s hızda, yılda 2800 saat kullanma süresi ile kurulabilecek ekonomik rüzgar potansiyeli 10000MW yani 28milyar KWh düzeyindedir. Bu potansiyel en kötü rüzgar koşulunda 1400 saate kadar düşer.

Rüzgar türbinleri bu teknoloji içindeki temel yapıyı oluşturmakta olup havanın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren sistemlerdir. Ticari olarak 300W mertebelerinden 3.5 MW mertebelerine kadar çeşitli teknolojileri kullanan rüzgar türbinleri mevcuttur. 4-5 MW mertebelerinde geliştirilmekte olan çeşitli prototipler de vardır. Ticari olarak en uygun olanlar yatay eksen konfigürasyonuna sahip iki veya üç bıçaklı pervanelere sahip, dişli kutusu, jeneratör ve rotoru desteklemesi için bir kuleyle beraber kullanılan yapılardır [6] . Genellikle birkaç MW mertebelerine kadar olan rüzgar türbinleri ve çiftlikleri dağıtım sistemine bağlanırken, yüksek güçlü rüzgar çiftlikleri doğrudan iletim sistemine bağlanmaktadır. Ayrıca yurt dışında bazı uygulamalarda deniz içine kurulan rüzgar çiftlikleri iletim kayıplarını azaltmak için

yüksek gerilim doğru akım (HVDC, örneğin 400kV) sistemleri ile şebekeye bağlanmaktadır.[22] Şekil 2.3'te Rüzgar Türbinleri yoluyla elektrik üreten bir sistemin blok diyagramı görülmektedir [23].



Şekil 2.3 Rüzgar türbini blok diyagramı.

2.2.1. Rüzgar Türbinleri'nin Avantajları ve Dezavantajları

2.2.1.1 Rüzgar Türbinleri'nin Avantajları

- Rüzgar türbinler temiz enerji kaynaklarıdır. Yakıt olarak rüzgarı kullandıklarından atmosfere zehirli gazlar vermezler.
- Rüzgar çiftlikleri kuruldukları alanın sadece % 1'lik bölümünü kullanırlar. Geri kalan kısmı tarımsal faaliyetlerde rahatlıkla kullanılabilir. Ayrıca bu çiftliklerin ömürlerini tamamlamasından sonra türbinlerin kullanıldığı alan eski haline kolayca getirilmektedir.
- Rüzgar çiftliklerinin söküm maliyetleri yoktur. Çünkü sökülen türbinlerin hurda değeri söküm maliyetlerini karşılamaktadır.

2.2.1.2 Rüzgar Türbinleri'nin Dezavantajları

- Bu sistemler gürültülüdür ve kuruldukları alanlarda bulunan kuşlara ait göç yollarının değişmesine yol açar.
- Kesikli değişken ve dağınık bir özelliğe sahiptir, enerji depolama ve yedek enerji sistemlerine yatırım yapılması gerekir.

2.3. Yakıt Hücreleri

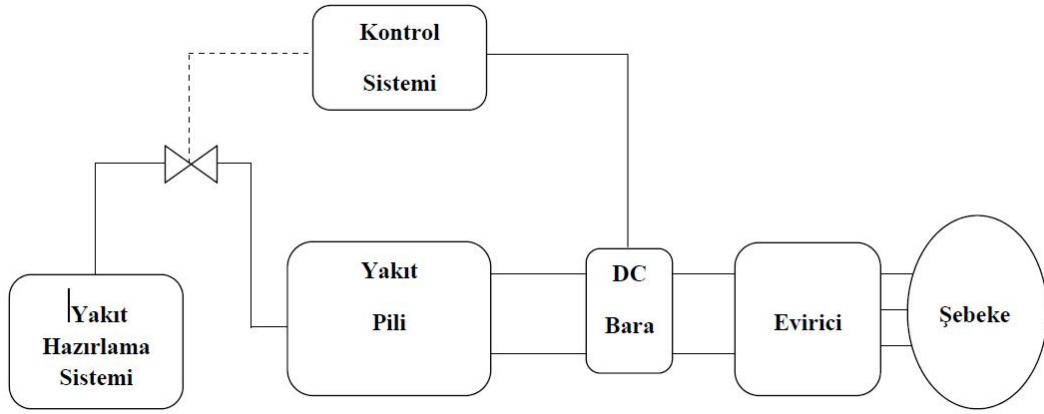
Yakıt Hücresi Sistemleri ters oksidasyon reaksiyonu ile gaz fazında beslenen hidrojen ve oksijen atomlarının tepkimeye girmesiyle su ve elektrik üreten elektrokimyasal sistemlerdir.

Yakıt Hücreleri'nin özellikleri ilk olarak Alman bilim adamı Christian Friedrich Schönbein tarafından 1838 yılında bulunmuştur [24]. Galli bir avukat olan Sir William Robert Grove, Schönbein'in çalışmalarından yola çıkarak Şubat 1839'da bir model önermiş ve 1842'de bunun bir taslağını oluşturmuştur [25]. Dönemin ünlü bilim kurgu yazarı Jules Verne 1874'te yayınlanmış Esrarlı Ada kitabında şöyle bir kehanette bulunmaktadır: “Su geleceğin kömürüdür. Yarının enerjisi hidrojen ve oksijene ayrılan suyun elektrik üretmesidir. Bu elementler dünyanın enerji kaynağını sonsuz bir süre boyunca garanti altında tutacaktır” [26].

1955'ten itibaren General Electric şirketinde çalışan W. Thomas Grubb, Leonard Niedrach gibi bazı kimyagerler membranda kullanılan elektrolit yapısını değiştirme yoluyla orijinal hücreyi geliştirerek günümüzde “Grubb-Niedrach yakıt pili” olarak adlandırılan modeli bulmuştur. Bu gelişmeleri 1959'da İngiliz mühendis Thomas Bacon 5 kW'lık modüler pili ve Harry Ihrig'in 15 kW'lık Yakıt Hücreli traktörü takip etmiştir.

United Technologies Corporation'un bir şirketi olan UTC Power, hastaneler yada geniş ofisler için kullanılabilecek bir Yakıt Hücresi Sistemi'ni üreten ve pazarlayan ilk şirkettir. Günümüzde 200 kW'lık sistemler satın alınabilmekte olup yakın zamanda yerlerini 400 kW'lık sistemlere bırakmaları beklenmektedir [27].

Yakıt Hücresi kullanmanın avantajı, hücrenin sistem kayıpları dahil yaklaşık %40 olan verimidir. Bu ürünün verimi evsel ve alan ısıtması amacıyla, ısıl bir geri besleme yapılarak kullanılması durumunda %80 gibi yüksek bir değere yükseltilebilir [28].



Şekil 2.4 Yakıt Hücresi Sistemi blok şeması.

Yakıt Hücresi Sistemleri yakıt hazırlama, yakıt pili ve güç koşullandırma sistemi olarak şekil 2.4'te gösterildiği gibi üç temel alt sistemden oluşmaktadır [19]. Yakıt hazırlama sistemi Yakıt Hücresi Sistemi'ne beslenecek olan hidrojenin oluşturulmasını sağlarken Yakıt Hücresi Sistemi'nde birbirine seri ve paralel bağlı Yakıt Hücreleri'nden elektrik akımı elde edilmektedir

2.3.1. Yakıt Hücreleri'nin Avantajları ve Dezavantajları

2.3.1.1 Yakıt Hücreleri'nin Avantajları

- Elektrik üretimi anında oluşan atık su, çevreye zarar vermemektedir.
- Fosil yakıtlarına göre daha verimlidir.
- Sistem içten yanmalı motorlardan daha sessiz çalışır.

2.3.1.2 Yakıt Hücreleri'nin Dezavantajları

- Doğada çok bol olmasına karşın enerji üretiminde kullanılan hidrojen gazının son derece saf olması gerekir. Saflaştırma işlemi maliyeti artırır. Günümüzde Fotoelektrokimyasal Piller (Photoelectrochemical Cells) gibi teknolojilerle güneş ışığından doğrudan saf hidrojen oluşturulabilmektedir.
- Enerjinin üretildiği yakıt hücreleri ve hidrojenin depolandığı tankların hacmi geniş yer kaplamaktadır.

3. EVİRİCİLER

Eviriciler DC bir kaynaktan yük üzerine AC kaynak sağlayan güç elektroniği devreleridir. Bu yapılarda temel olarak beklenen, çıkış harmonikleri düşük seviyelerde olan istenilen genlik ve frekansta alternatif kaynak sağlamaktır.

Eviricilerin girişinde aküler, Güneş Pilleri, Yakıt Hücreleri benzeri DC kaynaklar ya da alternatif bir kaynaktan beslenen doğrultucuların çıkışları kullanılabilir.[29] Eviricilerin çıkış gerilimlerinin sinüzoidal dalga formunda olması beklenir. Düşük ve orta güçlü uygulamalarda kare dalgaya yakın çıkış formları kabul edilebilir, fakat büyük güçlerde mümkün olduğu kadar harmoniklerinden arınmış bir sinüs dalga formu gerekmektedir.

Genel olarak eviricilerin kullanım alanları şöyledir:

- Değişken hızlı asenkron motor sürücü devreleri
- Kesintisiz güç kaynakları
- Yüksek gerilimde doğru akım iletim sistemleri
- Endüksiyonla ısıtma sistemleri
- AC gerilim regülatörleri [30]

Eviriciler beslemede kullanılan kaynağın çeşidine göre 2'ye ayrılır.

- Gerilim Kaynaklı Eviriciler
- Akım Kaynaklı Eviriciler

3.1. Gerilim Kaynaklı Eviriciler

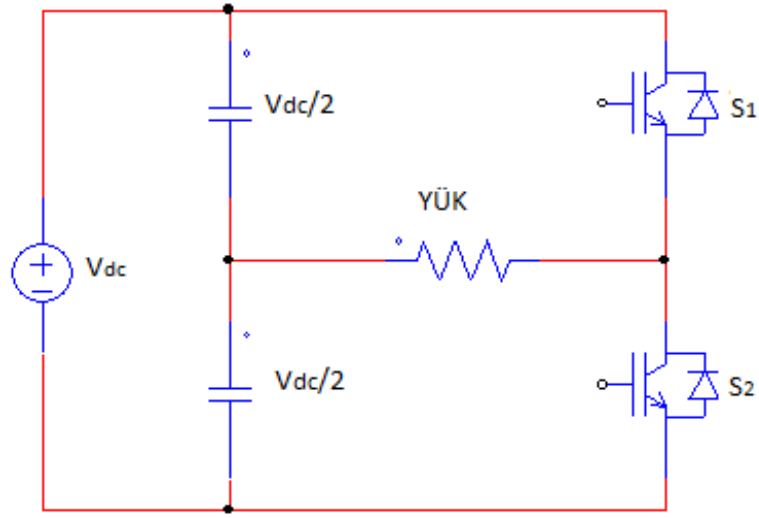
Gerilim kaynaklı eviriciler (Voltage source evirici – VSI) genelde esnek AC iletim sistemlerini (Flexible AC Transmission Systems – FACTS) gerçekleştirmekte kullanılır. FACTS güç elektroniği temelli sistemlerin ve/veya diğer statik ekipmanların, sistem üzerindeki kontrol yeteneğinin ve güç transfer birikiminin artması amacıyla AC elektrik iletim sistem parametresi olarak entegre edilmesidir ve FACTS ekipmanlarının reaktif güç sistemlerini, sistem kararlılığını arttırarak kontrol etmek için yüksek gerilim ve yüksek güç kapasitesindeki VSI'ların kullanılması gerekmektedir.

Bu tip eviricilerde sistemi besleyen bir gerilim kaynağıdır. Eğer yük harmonik akımlara yüksek empedans gösteren bir özellik taşıyorsa bu yükün gerilim kaynaklı bir evirici ile sürülmesi daha uygun olur.

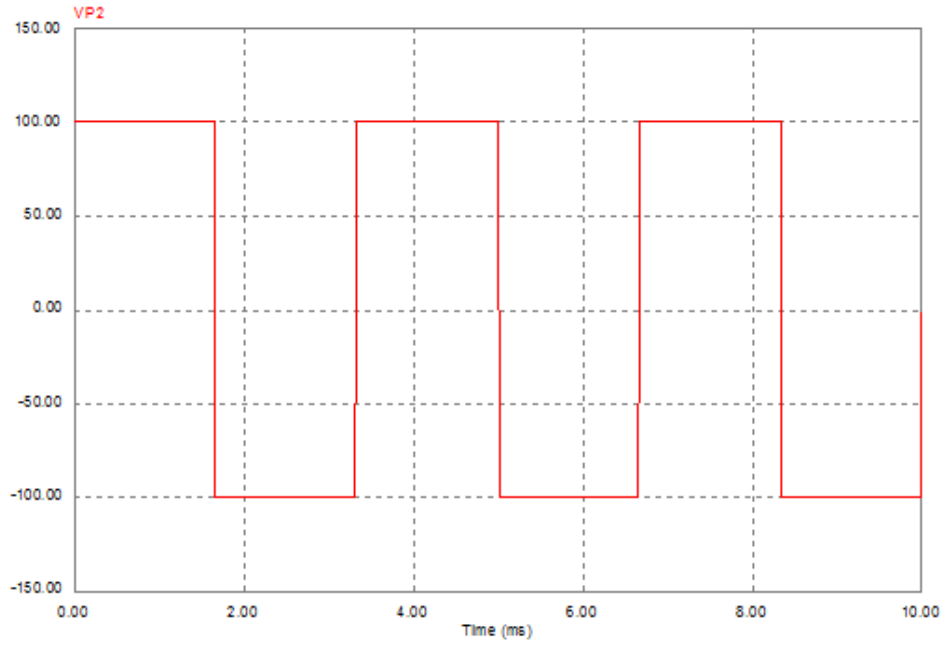
3.1.1. Tek Fazlı İki Seviyeli Gerilim Kaynaklı Evirici

En basit evirici yapısı tek fazlı yarım köprü topolojisidir. Bu devre ile iki seviyeli kare dalga formunda bir çıkış üretilir. Bu tip bir topolojide orta uçlu bir gerilim kaynağı beslemesine ihtiyaç duyulur. Orta ucu oluşturmak için basitçe seri yerleştirilmiş iki kapasite ile DC kaynak beraber kullanılır.[31] Bu iki seviyeli eviriciye ait devre şeması şekil 3.1'de, çıkış geriliminin dalga formu ise şekil 3.2'de verilmiştir.

Tek fazlı Yarım Köprü Eviricide Şekil 3.1'de da görüldüğü gibi yalnızca 2 anahtarlama elemanına ihtiyaç duyulur. Burada her iki anahtarın aynı anda kapatılmamasına dikkat edilmelidir. Yani bu anahtarlama elemanları mutlaka birbiriyle ters çalışmalı, birisi iletimdeyken diğeri mutlaka kesimde olmalıdır. İki eleman da iletimdeyse kaynak kısa devre olur ve evirici zarar görür.



Şekil 3.1 Yarım Köprü Evirici devresi

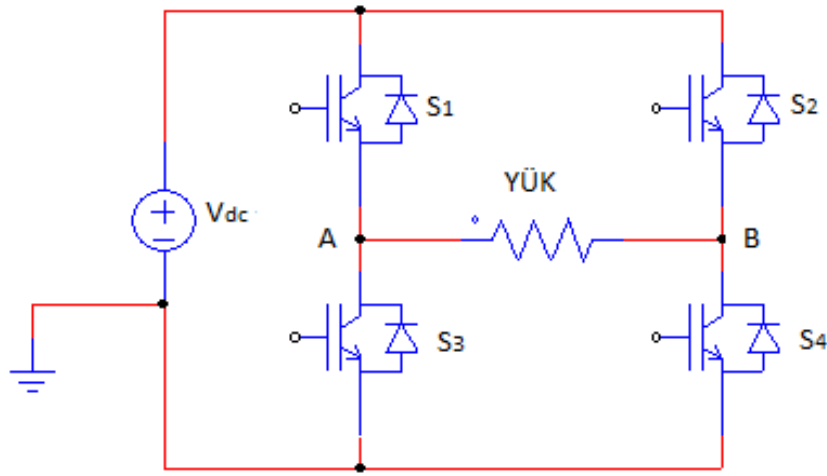


Şekil 3.2 Yarım Köprü Evirici devresi çıkış dalga formu

Devrede çıkış yani yük üzerinden geçen V_{A0} gerilimi S_1 anahtarı ilettime geçirilirse $+V_{dc}/2$, S_2 anahtarı ilettime geçirilirse $-V_{dc}/2$ değerinde olur.

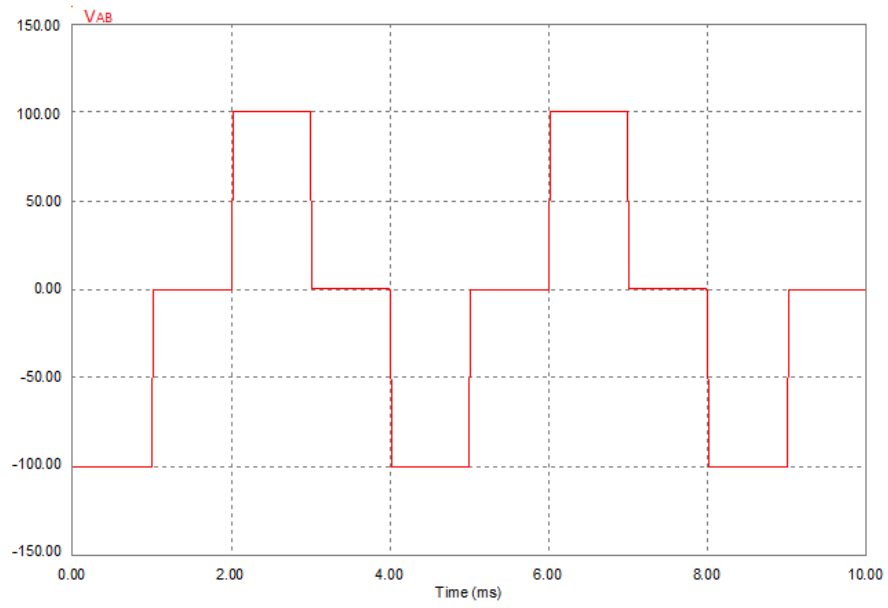
3.1.2. Tek Fazlı Üç Seviyeli Gerilim Kaynaklı Evirici

Üç seviyeli çıkış gerilimi elde etmek için Tam Köprü evirici topolojisi kullanılmaktadır. Bu tip eviricilerde Yarım Köprü yapının aksine çıkış olarak üç seviyeli kare dalga formu elde edilebilir. Yapı basit olarak Yarım Köprü eviriciye bir devre bacağı daha ilave edilmesi ve yükün bu bacaklar arasına yerleştirilmesiyle oluşturulur. [31]. Tek fazlı, gerilim kaynaklı Tam Köprü Evirici devresi Şekil 3.3'de çıkış gerilimin dalga formu ise Şekil 3.4'te görülmektedir.



Şekil 3.3 Tam Köprü Evirici devre şeması

Tam köprü konfigürasyonda 4 adet anahtarlama elemanı ve 4 adet diyot bulunmaktadır. Burada yük üzerindeki gerilim V_{AB} 'yi elde etmek için anahtarların çapraz çiftler halinde ilettime geçmesi ve kesime gitmesi gerekmektedir. S_1 ve S_4 anahtarları iletimde, S_2 ve S_3 kesimde iken A-B noktaları arasındaki gerilim $V_{AB} = V_{DC}$, S_1 ve S_4 anahtarları kesimde, S_2 ve S_3 iletimde iken $V_{AB} = -V_{DC}$ olur. Tam köprü evirici yapısında 0 seviyesini elde etmek için S_1 ve S_2 anahtarları iletimde iken S_3 ve S_4 anahtarları kesime getirilir veya tam tersi kombinasyon uygulanır.



Şekil 3.4 Tam Köprü Evirici devresi çıkış dalga formu.

Tam Köprü Eviricilerde belirli çıkış seviyeleri için gereken anahtar pozisyonları (1-0) tablo 3.1’de özetlenmiştir.

Tablo 3.1 Tam Köprü Evirici’ye ait anahtarlama durumları

Yük üzerindeki gerilim	Anahtarlar Durumları			
V_{AB}	S_1	S_2	S_3	S_4
$V_{DC}/2$	1	0	0	1
$-V_{DC}/2$	0	1	1	0
0	1	0	0	0
0	1	1	0	0
0	0	0	1	0
0	0	0	1	1

3.2. Akım Kaynaklı Eviriciler

Akım kaynaklı eviriciler çok büyük güçlerde tercih edilen ve akımı evirmekte kullanılan yapılardır.

3.3. Eviricilerde Kullanılan Anahtarlama Elemanları

Evirici çeşitli anahtarlama elemanları kullanılır. Bunların en önemlileri Transistör, Tristör, MOSFET, (Metaloksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör - Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) GTO (Gate Turn-off - Kapı sönmümlü transistör) ve IGBT'lerdir (Insulated Gate Bipolar Transistor - Yalıtılmış Kapılı Çift Kutuplu Transistör).

Tristör ve GTO'lar güç gerektiren uygulamalarda kullanılır ancak anahtarlama hızları düşüktür. Düşük ve orta güç uygulamalarında transistörler ve MOSFETler tercih edilir. MOSFET hızlı anahtarlama özelliğine sahip olduğundan yüksek frekans uygulamalarında da kullanılabilir. Yüksek güçlerde kullanılabilen IGBT ise MOSFET gibi gerilimle kontrol edilir ve hızlı anahtarlama yapabilmeye müsaittir. Bu nedenle yüksek güçlü uygulamalarda IGBTler tercih edilir.

IGBT'ler düşük doluluk boşluk oranı (duty cycle), düşük frekans (<20kHz) yüksek gerilim (>1000V) uygulamalarında tercih edilirken MOSFETler yüksek frekans (>200kHz), uzun doluluk boşluk oranları ve alçak gerilim uygulamalarında (<250V) tercih edilmektedir [32]. Bunun dışında IGBTleri sürmek için MOSFETlerin aksine karmaşık devre yapıları ve kart tasarımları gerekmektedir.

Önerilen modelde uygulanılan çalışma değerleri 50 Hz ve tepeden tepeye 120 V'tur. Her iki anahtarlama elemanının kendine göre bir avantajı olacaktır. Ayrıca bu çalışmada kaskat evirici yapısını basitleştirmek amacı güdüldüğünden, devre şemalarında tüm anahtarlama elemanları IGBT olarak gösterilmekle birlikte bölüm 7'de anlatılacak olan önerilen 5 katlı kaskat eviricinin gerçekleştirilmesinde güç katında kullanılan tekli anahtarlama elemanı MOSFET, köprü katında kullanılan anahtarlama elemanları IGBT olarak seçilmiştir.

4. ÇOK KATLI EVİRİCİLER

İki seviyeli gerilim kaynaklı eviricilerde artan anahtarlama frekansı daha kaliteli bir dalga şeklinin oluşmasını sağladığından geleneksel eviricilerde genelde yüksek anahtarlama frekansları ve çeşitli darbe genlik modülasyon (PWM) stratejileri kullanılır. Fakat orta veya yüksek gerilim uygulamalarında geleneksel eviricilerin başlıca anahtarlama kayıpları ve anahtarların anma değerlerindeki kısıtlamadan dolayı yüksek frekansta çalışma için birkaç sınırlama vardır. Ayrıca orta ve yüksek güçlü uygulamalarda geleneksel eviricilerin verimleri düşüktür ve büyük transformatörler kullanılması nedeni ile fiyatın yükselmesi gibi dezavantajlara da sahiptir. Bu nedenle Çok Katlı Eviriciler son yıllarda orta veya yüksek gerilimli uygulamalarda tercih edilmektedir [33].

Çok Katlı Eviriciler dağıtılmış enerji kaynakları alanında ilgi odağıdır çünkü fotovoltaiik piller, yakıt hücreleri, rüzgar türbinleri, mikro türbinler gibi çeşitli farklı bataryalar, Çok Katlı Eviriciler. yoluyla voltaj dengeleme sorunları olmadan bir yükü veya AC sistemi besleyebilir.

Daha önce de belirtildiği üzere Gerilim Kaynağı Eviricileri genelde esnek AC iletim sistemlerini gerçekleştirmekte kullanılır. Çünkü esnek AC iletim sistemlerinde kullanılan ekipmanların reaktif güç sistemlerini, sistem kararlılığını arttırarak kontrol etmek için yüksek gerilim ve yüksek güç kapasitesindeki Gerilim Kaynağı Eviricilerinin kullanılması gerekmektedir.

Bu iki seviyeli bir evirici için mümkün değildir. Bu durumda yarı iletken elemanlar istenilen yüksek gerilim operasyonlarını karşılayabilmek için seri olarak bağlanmalıdır. Bu bir kaç tane dönüştürücülü (with transformer), endüktörlü, doğrudan seri bağlı ya da diyot kenetlemeli (diode clamped) veya kapasitör kenetlemeli (capacitor clamped) yapılar gibi daha kompleks topolojilere sahip iki seviyeli eviricilerin toplanmasıyla elde edilebilir.

Çok Katlı Eviricilerin özgün yapısı transformatörlü yada seri bağlı senkronize anahtarlama elemanları kullanılmadan düşük harmoniklerle yüksek gerilimlere ulaşabilmelerine imkan tanımaktadır.

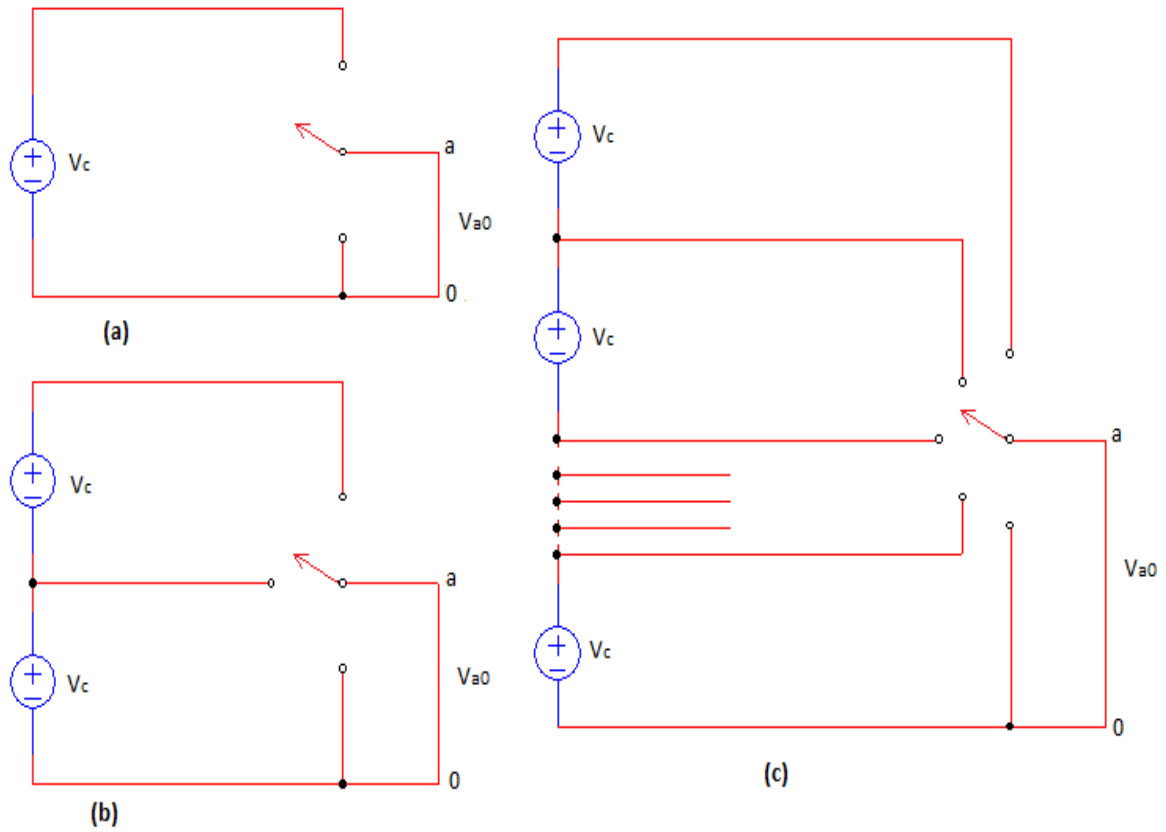
Çok Katlı Evirici tanımı üç seviye eviricilerle beraber başlamıştır [34]. Temel işlevi çeşitli DC gerilim seviyelerinden istenilen AC gerilimi sentezlemektir. Sadece temel frekansta anahtarlamayla sinüsoidal işarete yakın gerilim oluşturabilir.[35] Bu nedenden dolayı Çok Katlı Eviriciler kapasitör veya bataryalar gibi enerji depolama araçları ile seri veya paralel bağlanmak için idealdir.

Eviricinin kat sayısı arttıkça çıkış dalga şeklinde harmonik distorsiyon (HD) azalmaktadır. Kat sayısı sonsuza gittiğinde ise çıkış geriliminin toplam harmonik distorsiyonu (THD) sıfır olmaktadır. Ancak kat sayısı arttıkça eviricinin kontrolünde karmaşıklık ve çıkış gerilimde dengesizlik problemi görülmektedir. Bununla birlikte Çok Katlı Eviricilerde gerçekleştirilebilir kat sayısı; gerilim dengesizlik problemi, anahtarların gerilim tutma kapasitesi, devre dizaynı ve paketleme gibi faktörler ile sınırlanmaktadır.

4.1. Çok Katlı Eviriciler'in Genel Yapısı

Çok Katlı Eviriciler girişlerine uygulanan DC gerilimin birkaç seviyesinden anahtarlama yoluyla çıkışta minimum harmonik distorsiyonlu sinüzoidal dalga şekline benzeyen bir merdiven dalga şekli meydana getirirler. Her bir ilave DC gerilim katı, AC çıkış geriliminin dalga şekline bir basamak ekler.

Çok Katlı Eviriciler bir grup güç yarı iletkenleri ve çıkışları basamak dalga formunda gerilim üreten kapasitif gerilim kaynakları içerir. Belirli bir dayanma gerilimine sahip anahtarlama elemanlarının komütasyonları çıkışta yüksek seviyelere ulaşabilen kapasitör gerilimlerinin toplanmasına izin verir. Çok Katlı Eviricilerin en büyük avantajı düşük anahtarlama frekansında eviricinin çıkış gücünde bir azalma olmadan, çıkış dalga şekillerinde harmoniklerin az olmasıdır.



Şekil 4.1 İki katlı(a), üç katlı(b) ve n katlı(c) bir eviricinin tek faz bacağı.

Şekil 4.1’de güç yarı iletkenleri çok kademeli ideal bir anahtar ile temsil edilen farklı kat sayılarına sahip Çok Katlı Eviricilerin bir faz bacağının şematik diyagramı gösterilmektedir. İki katlı bir evirici, gerilim kaynağının veya kapasitörün negatif terminaline bağlı olarak iki seviyeye ($+V_{DC}$, $-V_{DC}$) sahip olan bir çıkış gerilimi üretir (Şekil 4.1.(a)). Benzer şekilde kat sayısı değiştikçe, çıkış gerilimine ait seviye sayısı da değişir [35]. İki katlı evirici iki farklı çıkış gerilim seviyesi üretirken üç katlı evirici üç farklı çıkış üretir. Çıkış gerilimi basamak değerinin, eviricinin negatif terminali ile ilgili olduğu göz önünde bulundurularak; yükün iki fazı arasındaki gerilimin seviye sayısı hesaplanabilir. Faz geriliminin basamak sayısına “ m ”, yükün iki fazı arasındaki gerilimdeki basamaklara “ k ” ve yıldız bağlı üç fazlı bir yükün faz gerilimindeki basamakların sayısına “ p ” dersek:

$$k = 2m + 1 \quad (4.1)$$

$$p = 2k - 1 \quad (4.2)$$

eşitliklerine ulaşırız. [36][35]

4.2. Çok Katlı Eviriciler'in Avantajları ve Dezavantajları

Çok Katlı Eviricilerin klasik eviricilere göre avantaj ve dezavantajları şunlardır.

Modüler ve basit yapısından dolayı neredeyse sınırsız sayıda kata kadar sayı arttırılabilir. [2] Eğer DC gerilim seviyesi ve eviricinin kat sayısı yeteri kadar yüksek ise sadece temel anahtarlama frekansı ile sinüzoidale yakın çok seviyeli bir çıkış gerilim elde edilebilir. Ancak artan kat sayısı kullanılması gereken anahtarlama elemanlarının sayılarının da artmasını gerektirir. Bu nedenle kat sayısı arttıkça kontrol zorlaşır. Temel anahtarlama frekansı anahtarlama kayıplarını minimize eder. Bu kayıplar çoğu uygulama için tolere edilebilirdir ve meydana gelen harmonikler sayılamayacak kadar küçük olur. Bu anahtarlama kayıplarının az olmasını ve verimliliğin yüksek olmasını sağlar (yaklaşık olarak %98) [36].

Çok Katlı Eviriciler daha küçük ortak mod (CM- common mod) gerilimi üretirler. Böylece motorun davranışındaki stresler azalır. Ek olarak ortak mod gerilimleri gelişmiş modülasyon metotlarıyla elimine edilir bu da motor gibi araçların rulmanlarındaki baskıyı azaltır. Ayrıca gelişmiş modülasyon metodlarıyla ortak mod gerilimleri ihmal edilecek kadar azaltılabilir.

DC taraftaki yüksek gerilimler sadece bir anahtar tarafından tutulmak zorunda değildir. Seçilen Çok Katlı Eviricinin türüne ve seviyesine bağlı olarak bir grup anahtar tarafından tutulabilir. Birkaç gerilim seviyeli dc baranın bölünmesinden dolayı Çok Katlı Eviricideki anahtarlar, tam köprü bir eviricideki anahtarlara uygulanan gerilime kıyasla daha küçük gerilim oranına sahip olur.

Kaskat ve Kapasitör Kenetlemeli Çok Katlı Evirici yapıları birden farklı anahtarlama kombinasyonu imkanı sağlarlar. Bu durum birkaç yönden avantajlıdır. Örneğin farklı gerilim seviyelerini dengelemek, anahtarlama frekansını minimize etmek ve her bir anahtarın eşit olarak çalışması için kullanılır. Ayrıca kat sayısındaki artışa paralel olarak kullanılması gereken izole DC kaynakların artışı bir dezavantaj olarak görülmekle beraber fotovoltatik pil veya yakıt hücresi gibi düşük gerilim seviyeli DC kaynaklar için ideal bir arayüzdür.

5. ÇOK KATLI EVİRİCİLER’İN ÇEŞİTLERİ

Çok seviyeli eviriciler devre topolojileri açısından 3’e ayrılır. Bunlar:

- Diyot Kenetlemeli Çok Katlı Eviriciler (Diode Clamped-Neutral Point)
- Kapasitör Kenetlemeli Çok Katlı Eviriciler (Capacitor Clamped-Flying Capacitors)
- Kaskat Çok Katlı Eviricilerdir [36][37].

İlk olarak 1975’te birbirine seri bağlanmış tam köprü devreleri kullanılarak çok katlı çıkış elde edilmiştir. Daha sonra bu devreye kaynak gerilimini tutan kenetleme diyotları eklenmiş bu yolla Diyot Kenetlemeli Evirici topolojisi ortaya çıkmıştır [38][39]. Üç Katlı Diyot Kenetlemeli Eviricinin orta gerilim seviyesi “nötr noktası” olarak tanımlanmış ve bu topoloji ilk olarak “Nötr Nokta Kenetlemeli” (Neutral Point Clamped - NPC) evirici olarak adlandırılmıştır. Üç seviyeli bir eviricinin her faz ayağı seri bağlı ikişer çift anahtarlama elemanından oluşur. Her çift birbirine kenetleme diyotlarıyla bağlanmıştır. Üç katlı bir eviricinin çıkış dalga formu “quasi-square” dalga formu olarak adlandırılır.[34][35] Bu evirici hassas gerilim uyumu gerektirmeksizin anahtarın dayanma gerilim seviyesini iki katına çıkardığı için devre topolojisi 1980’li yıllarda daha çok kullanılmış ve geliştirilmeye başlanmıştır. Kaskat Çok Katlı Evirici daha önce bulunduğu halde 1990’ların ortasına kadar kullanımı yaygın olmamakla beraber Yenilenebilir Enerji Kaynakları alanında çalışmaların yoğunlaşmasıyla beraber tekrar rağbet görmeye başlamıştır [40]. Çünkü Yenilenebilir Enerji Kaynakları yapısal olarak izole DC kaynakları (Seperated DC Sources) görevi görmektedir.. Çok Katlı Evirici olarak en son ortaya çıkarılan topoloji 1990’ların ortalarında geliştirilen Kapasitör Kenetlemeli Çok Katlı Eviricidir [35][39].

Bunların dışında Çok Katlı Eviriciler için çeşitli modülasyon ve kontrol stratejileri geliştirilmiş veya bilinen yöntemler bu alana uyarlanmıştır. Bunlardan bazıları Darbe Genlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation – PWM) [3], Çok

Katlı Seçilimli Harmonik Eliminasyonu (Multi-level Selective Harmonic Elimination) ve Uzay Vektör Modülasyonudur (Space Vector Modulation - SVM) [41].

Çok Katlı Eviriciler arasında Diyot Kenetlemeli Evirici nispeten diğerlerinden daha popülerdir. Günümüzde yüksek güç uygulamalarında Diyot Kenetlemeli Eviriciler'in konvansiyonel eviricilere tercih edildiği görülmektedir [42].

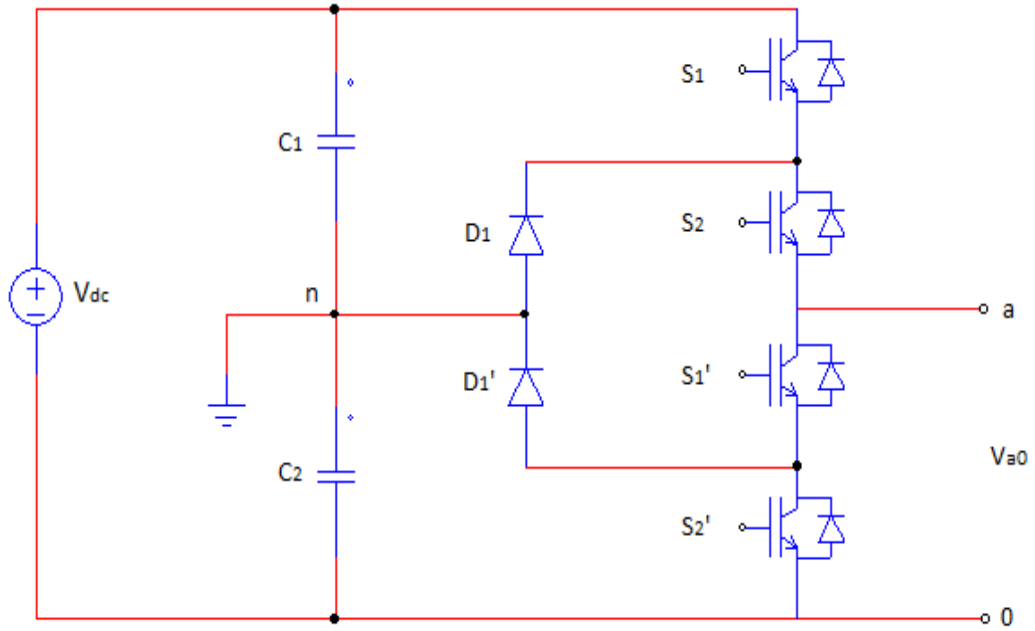
5.1. Diyot Kenetlemeli Çok Katlı Eviriciler

Orijinal patente göre Diyot Kenetlemeli Evirici topolojisi başlarda iki kapasitörün bir DC bara üzerinden ek bir seviye oluşturacak şekilde bağlanması şekliyle üç çıkış seviyesiyle sınırlıydı [43]. Ek seviye DC baranın “nötr noktası”ydı. Dolayısıyla topoloji terminolojide Nötr Nokta Kenetlemeli Evirici (Neutral Point Clamped - NPC) olarak da kullanılır [42]. Konsept, kapasitör sayılarını arttırmak suretiyle istenilen seviyeye kadar arttırılabilir.

Çift sayıda gerilim seviyesi bulunması durumunda yani nötr nokta teriminin kullanılmadığı durumda Çoklu Nokta Kenetlemeli Evirici (Multiple Point Clamped - MPC) şeklinde de adlandırılmaktadır[44]. Kapasitör gerilimi dengeleme konularına bağlı olarak Diyot Kenetlemeli Evirici uygulamaları çoğu zaman üç seviyeyle sınırlıdır. Geçmiş yıllardaki endüstriyel gelişmeler sebebiyle üç seviyeli evirici endüstriyel uygulamalarda yoğun olarak kullanılmaktadır [45].

5.1.1. Diyot Kenetlemeli Çok Katlı Evirici'nin Yapısı

En basit Diyot Kenetlemeli Çok Katlı Evirici yapısında çıkış gerilimini m seviyeli olarak elde etmek için DC barada $(m-1)$ tane seri bağlı kondansatöre ihtiyaç duyulur. Bu seri kondansatörler ana DC gerilimden çok seviyeli çıkış gerilimi elde etmek için kullanılır. Ayrıca her faz için gerekli olan kenetleme diyotlarının sayısı $(m-1)(m-2)$ dir [42].



Şekil 5.1 Üç Katlı Diyot Kenetlemeli Eviricinin tek fazı için devre şeması.

Şekil 5.1’de Üç Katlı Diyot Kenetlemeli Evirici görülmektedir. Bu devrede DC bara gerilimi iki tane seri bağlı bulk kapasitörü C1 ve C2 tarafından üç kademeye ayrılmaktadır. Nötr noktası bu topolojide iki kapasitörün arasındaki “n” noktasıdır.

Çıkış gerilimi “ V_{an} ”nin üç durumu vardır: $V_{dc}/2$, 0, ve $-V_{dc}/2$. Gerilim seviyesini $V_{dc}/2$ yapmak için S_1 ve S_2 anahtarları iletimde olmalıdır. Benzer şekilde $-V_{dc}/2$ için S_1' ve S_2' anahtarları ve 0 için S_2 ve S_1' anahtarları iletime geçirilmelidir. S_1 - S_1' ve S_2 - S_2' anahtarları tümleyen anahtar çiftleridir. S_1 iletimde olduğu zaman S_1' kesimde veya S_1 kesimde olduğu zaman S_1' iletimde olmalıdır. Bu durum S_2 , S_2' anahtar çifti için de geçerlidir.

Çıkış durumları için anahtarların sahip olması gereken pozisyonlar (1-0) tablo 4.1’de özetlenmiştir.

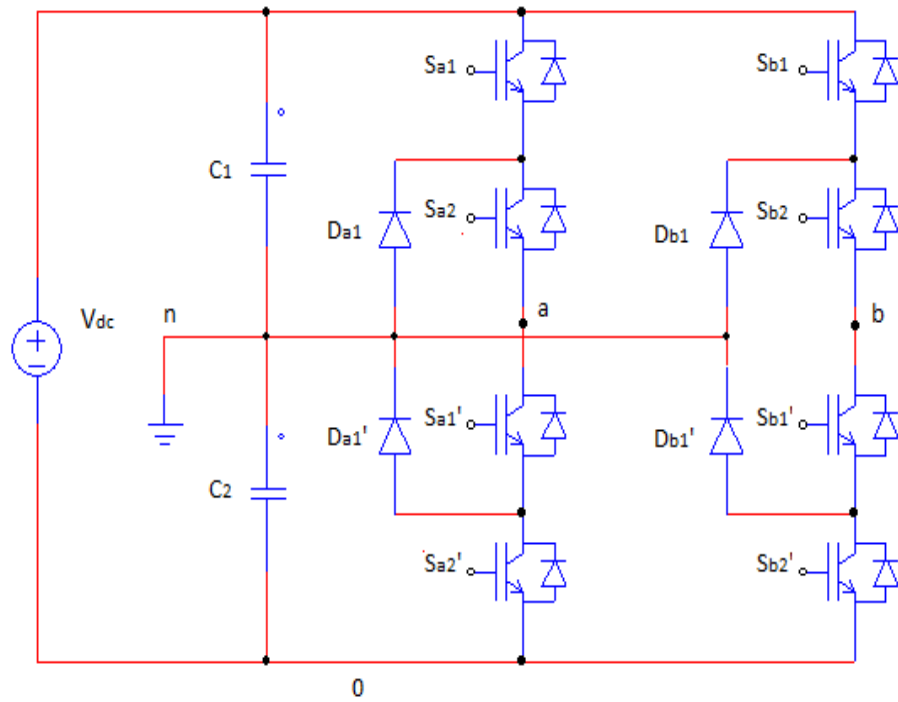
Tablo 5.1 Üç katlı Diyot Kenetlemeli Evirici'nin çıkış gerilim seviyeleri ve bunlara karşılık gelen anahtarlama durumları.

Çıkış Gerilimi	Anahtarlama Durumları			
V_{a0}	S_1	S_2	S_1'	S_2'
$V_{dc}/2$	1	1	0	0
0	0	1	1	0
$-V_{dc}/2$	0	0	1	1

Bu topolojiyi geleneksel bir iki seviyeli eviriciden ayıran elemanlar D_1 ve D_1' diyotlarıdır. Devrede D_1 diyotunun anodu nötr noktasına, katodu ise S_1 - S_2 anahtar çiftinin orta noktasına, D_1' diyotunun ise katodu nötr noktasına, anodu ise S_1' - S_2' anahtar çiftinin orta noktasına bağlıdır. Bu iki diyot, anahtar gerilimini DC bara geriliminin yarı seviyesine ayarlar. S_1 ve S_2 anahtarlarının her ikisi de iletimde olduğu zaman a ve 0 noktaları arasındaki gerilim V_{dc} 'dir. Bu durumda D_1' diyotu C_1 üzerindeki gerilimi tutan S_1' anahtarı ile C_2 üzerindeki gerilimi tutan S_2' anahtarı arasında paylaşılan gerilimi dengeler. Bu devrede çıkış gerilimi V_{an} AC ve V_{a0} DC gerilimdir. V_{an} ve V_{a0} arasındaki fark C_2 üzerinden geçen gerilimdir ve $V_{dc}/2$ kadardır. Eğer a ve 0 noktaları arasından çıkış alınırsa devre V_{dc} , $V_{dc}/2$ ve sıfır (0) çıkış gerilim seviyelerine sahip DC/DC çevirici olur [35].

Şekil 5.1'deki tek faz bacaklı devreye şekil 5.2'deki gibi b faz bacağı da eklenirse 2 faz bacağı arasından 5 seviyeli bir çıkış alınabilir. Bu diyot kenetlemeli evirici için tam köprü evirici devresi olur [46].

Şekil 5.2'deki devrede a ve b fazları arasında V_{dc} , $V_{dc}/2$, 0, $-V_{dc}/2$, $-V_{dc}$ değerlerinde 5 seviyeli bir çıkış alınır. Bu çıkış gerilim seviyelerine karşılık gelen anahtarlama kombinasyonları Tablo3.2'de gösterilmiştir.

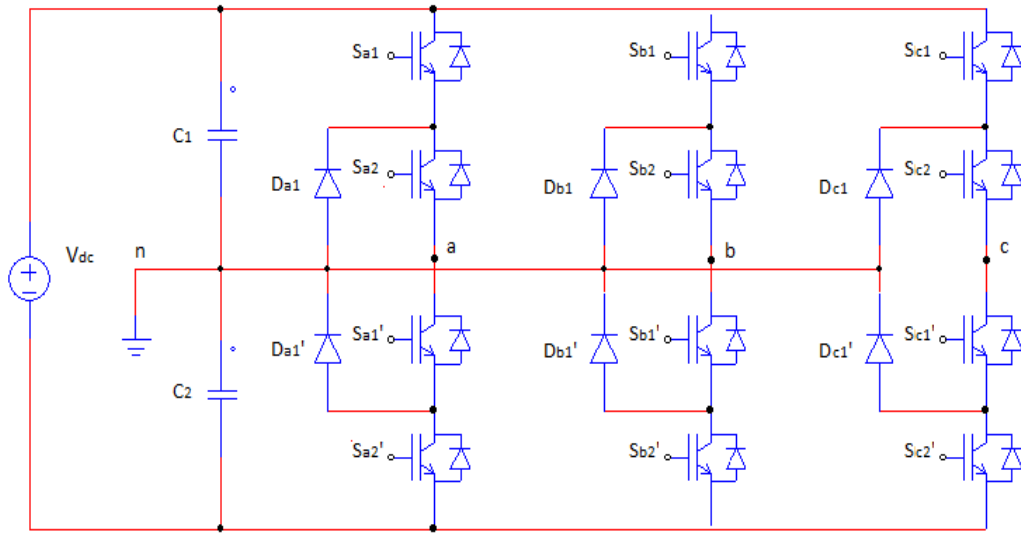


Şekil 5.2 Diyot Kenetlemeli Evirici için iki fazlı devre şeması

Tablo 5.2. Diyot Kenetlemeli Tam Köprü Eviricinin çıkış gerilimi ve anahtarlama kombinasyonları

Fazlar Arası Gerilim	Anahtarlama Durumları							
V_{ab}	S_{a1}	S_{a2}	S_{a1}'	S_{a2}'	S_{b1}	S_{b2}	S_{b1}'	S_{b2}'
V_{dc}	1	1	0	0	0	0	1	1
$V_{dc}/2$	0	1	0	0	0	0	1	1
0	0	0	1	1	0	0	1	1
0	1	1	0	0	1	1	0	0
$-V_{dc}/2$	0	0	1	0	1	1	0	0
$-V_{dc}$	0	0	1	1	1	1	0	0

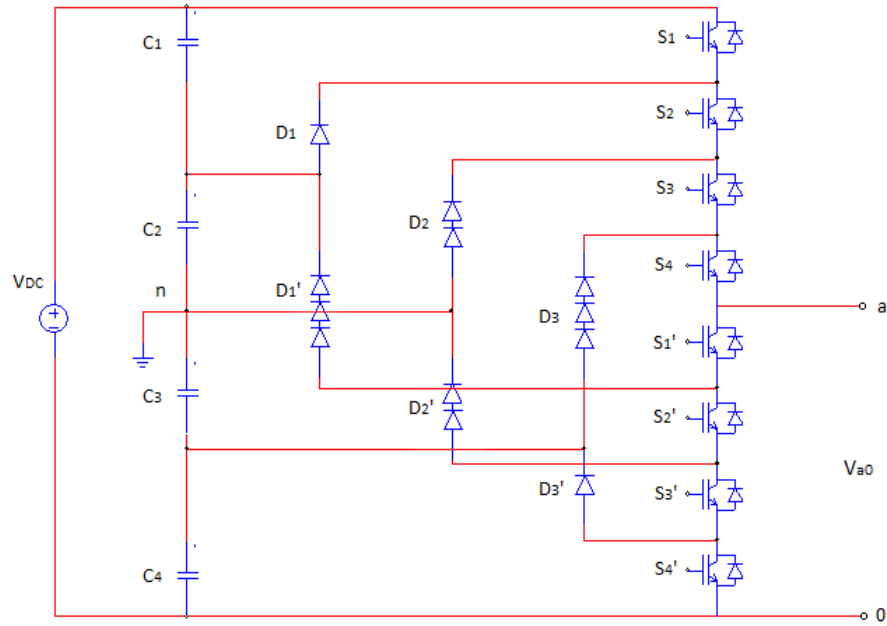
Tek fazlı üç seviyeli evirici yapısı iki faz bacağı daha eklenerek üç fazlı üç seviyeli yapı elde edilebilir. Üç fazlı üç katlı Diyot Kenetlemeli Evirici yapısı şekil 5.3'te görülmektedir. Devrede nötr noktası çıkış gerilimi için referans noktası olarak ele alınır. a, b, c noktaları üç fazın çıkış noktalarıdır. Devrenin anahtarlama durumları ise 3 fazlı bir tam köprü eviricinin anahtarlama durumlarıyla benzerlik göstermektedir.



Şekil 5.3 Üç fazlı üç katlı Diyot Kenetlemeli Evirici.

Diyot Kenetlemeli Çok Katlı Eviricilerde ek bir faz bacağı eklenmeden de 5 seviyeli AC çıkış gerilimi verebilir. Şekil 5.4'te gösterilen DC ana barası C_1 , C_2 , C_3 , C_4 olmak üzere 4 kapasitörden meydana gelen 5 katlı bir diyot kenetlemeli eviricidir.

V_{dc} ana gerilimine göre her kondansatörün gerilimi $V_{dc}/4$ 'tür. Kenetleme diyotları sayesinde her bir anahtar üzerine düşen gerilim bir kapasitör gerilimi yani $V_{dc}/4$ kadardır. Bu devrede çok seviyeli çıkış geriliminin nasıl meydana geldiğini açıklamak için nötr noktası n referans noktası olarak kabul edilir. a ve n noktaları arasında 5 seviyeli çıkış gerilimi oluşması için 5 anahtar kombinasyonu vardır. Bu anahtar kombinasyonları Tablo 5.3'te gösterilmiştir. Tabloda 1 anahtarın iletimde 0 kesimde olduğunu gösterir.



Şekil 5.4 Beş katlı Diyot Kenetlemeli Evirici devre şeması

Tablo 5.3 Tek fazlı beş katlı Diyot Kenetlemeli Evirici'nin çıkış geriliminin seviyeleri ve bu seviyelere karşılık gelen anahtarlama kombinasyonları.

Faz Gerilimi	Anahtarlama Durumları							
V_{an}	S_1	S_2	S_3	S_4	S_1'	S_2'	S_3'	S_4'
$V_{dc}/2$	1	1	1	1	0	0	0	0
$V_{dc}/4$	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	0
$-V_{dc}/4$	0	0	0	1	1	1	1	0
$-V_{dc}/2$	0	0	0	0	1	1	1	1

Bu devrede bir faz bacağında dört eşlenik anahtar çifti mevcuttur. Bunlar S_1 - S_1' , S_2 - S_2' , S_3 - S_3' ve S_4 - S_4' 'dür. Tam Köprü Eviricide olduğu gibi bu eşlenik çiftlerinden biri iletimde iken diğerinin mutlaka kesimde olması gerekir. Örneğin S_1 iletimdeyse S_1' kesimde veya S_1 kesimde ise S_1' iletimde olmalıdır. “m” seviye sayısı olmak üzere iletimde her bir anahtar sadece $V_{dc}/(m-1)$ gerilim seviyesini tutarken, kenetleme diyotları ters gerilimi dengelemek için farklı dayanma gerilimlerine sahip olmalıdırlar. Şekil 5.4'teki devre şemasındaki gösterimde alttaki bütün anahtarlar iletimde olduğu zaman D_1' diyotunun 3 kapasitör gerilimi ($3V_{dc}/4$) tutması gerekir. Benzer şekilde D_2 ve D_2' diyotlarının $2V_{dc}/4$ ve D_3 diyotunun da $3V_{dc}/4$ 'ü tutması gerekir. Burada her faz için gerekli diyotların sayısının $(m-1)(m-2)$

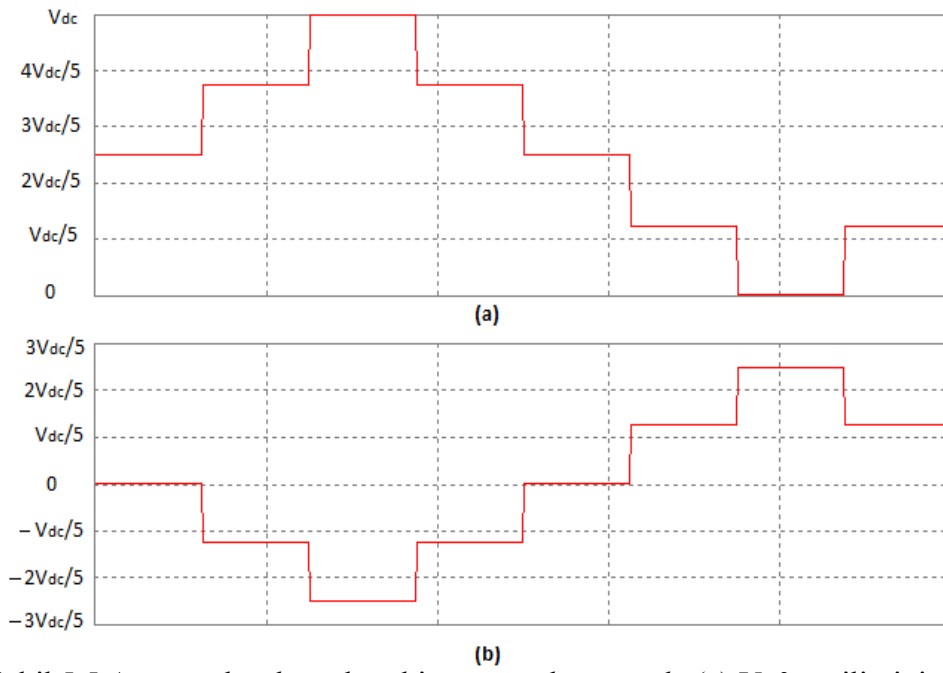
olduğu ve her bir kenetleme diyotu gerilim değerinin iletimdeki anahtar gerilim değeri ile aynı olduğu varsayılır. [35]

Şekil 5.4'te “a” ve “0” noktaları arasında V_{dc} , $3V_{dc}/4$, $V_{dc}/2$, $V_{dc}/4$ ve 0 değerlerinde 5 değişik çıkış alınabilir. Bu durumda devre dc/dc konverter olarak çalışır. Tablo 5.4'te bu gerilim seviyeleri ve bunlara karşılık gelen anahtarlama kombinasyonları gösterilmiştir. [37]

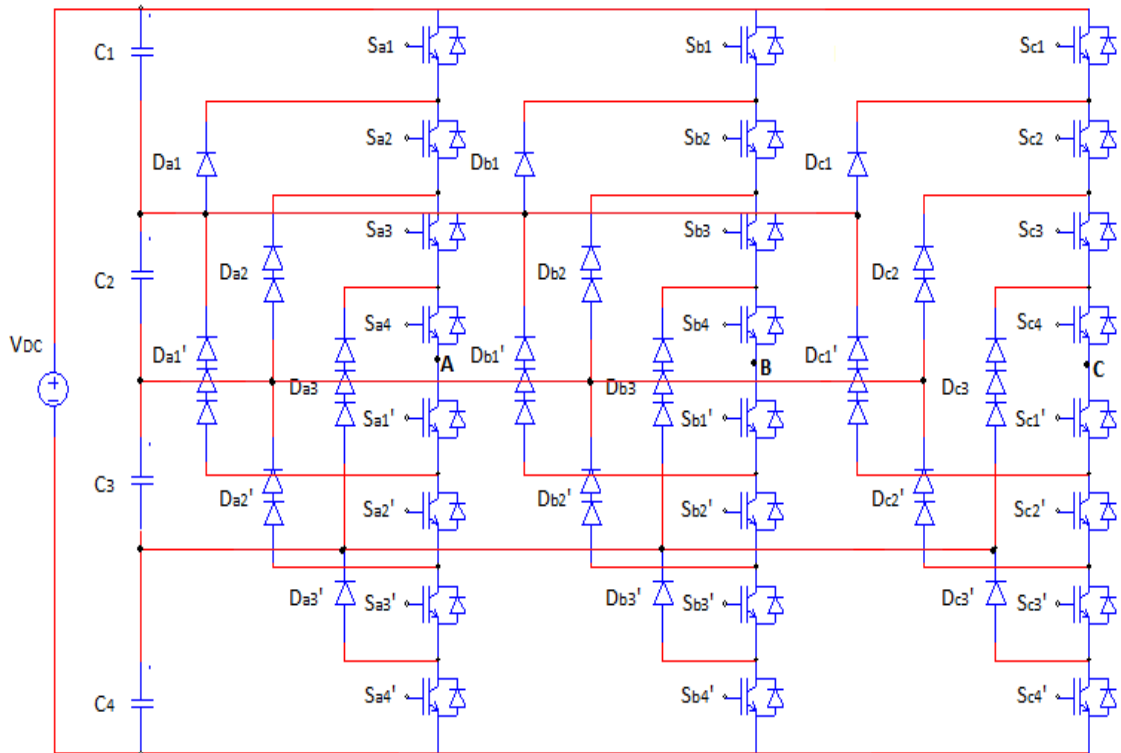
Tablo 5.4 Beş katlı bir Diyot Kenetlemeli Evirici'nin “a” ve “0” noktaları arasında çıkış gerilim seviyeleri ve bunlara karşılık gelen anahtarlama durumları.

Faz Gerilimi	Anahtarlama Durumları							
V_{a0}	S_1	S_2	S_3	S_4	S_1'	S_2'	S_3'	S_4'
V_{dc}	1	1	1	1	0	0	0	0
$3V_{dc}/4$	0	1	1	1	1	0	0	0
$2V_{dc}/4$	0	0	1	1	1	1	0	0
$V_{dc}/4$	0	0	0	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	1	1	1	1

V_{an} ve V_{a0} gerilimlerinin aynı anahtarlama pozisyonlarına verdikleri cevaplar ise şekil 5.5'te görülmektedir.

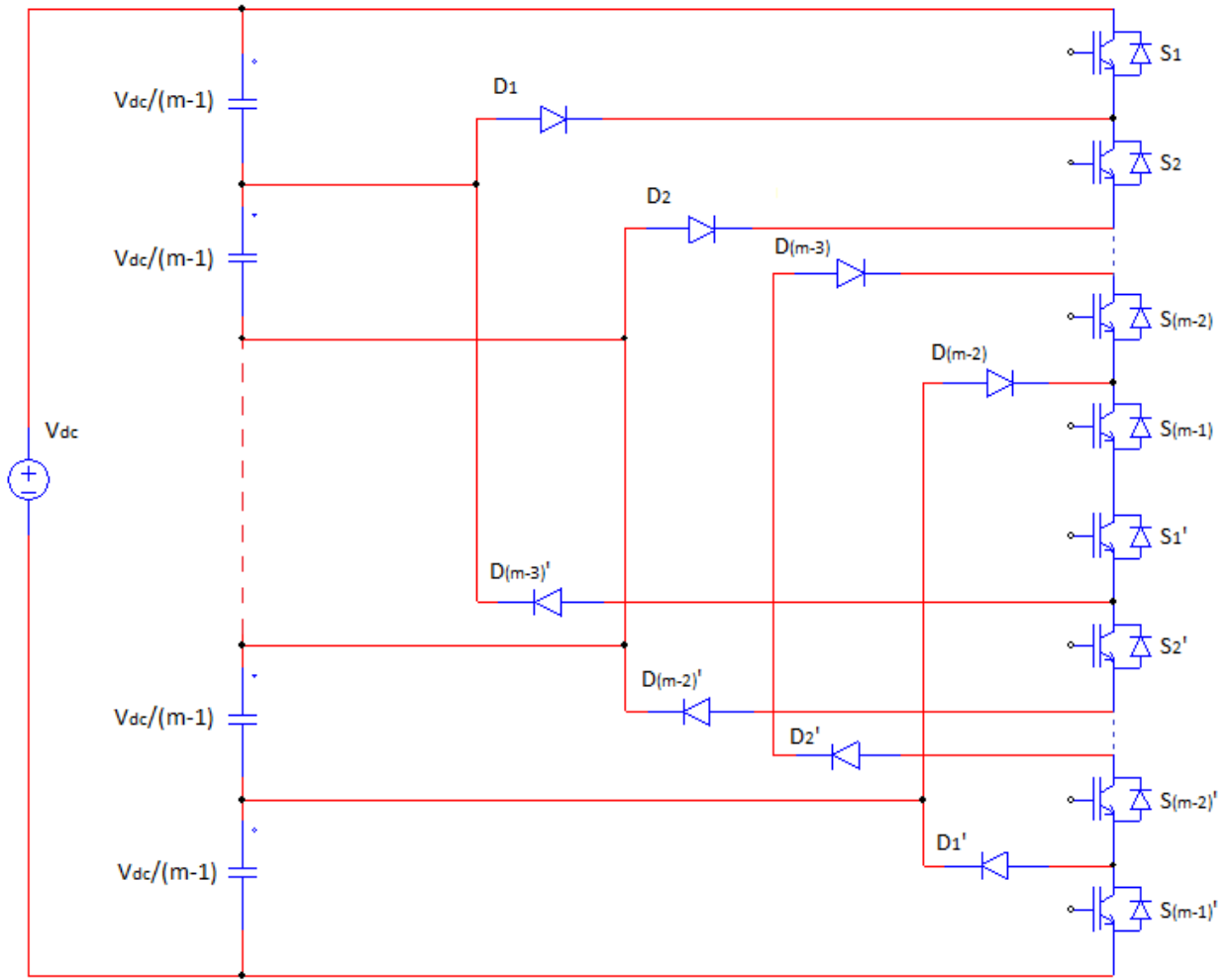


Şekil 5.5 Aynı anahtarlama kombinasyonu durumunda (a) V_{a0} geriliminin (b) V_{an} geriliminin cevabı.



Şekil 5.6 Üç fazlı beş katlı Diyot Kenetlemeli Evirici

Şekil 5.6’da beş katlı Diyot Kenetlemeli Evirici yapısının üç fazlı devre şeması görülmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi Diyot Kenetlemeli Evirici’de kat sayısı ve faz bacağı sayısı arttıkça kullanılan ekstra diyotlardan dolayı evirici devresi elverişsiz hale gelmektedir. Ancak yapı iki seviyeli eviriciden çok daha karmaşık olmasına rağmen uygulama basit ve bilinirdir [44]. Şekil 5.7’ de “m” katlı Diyot Kenetlemeli Eviricinin bir faz bacağı gösterilmiştir [46].



Şekil 5.7 Bir fazlı “m” katlı Diyot Kenetlemeli Evirici.

Şekil 5.7’de D_2 ile gösterilen aslında bir diyot grubudur ve seri bağlı iki diyottan oluşmaktadır. D_2 diyot grubundan her bir diyot bir kondansatör gerilimini tutabilmelidir. $D(m-2)$ diyot grubunda ise seri bağlı (m-2) tane diyot bulunmaktadır. Yine bu diyot grubundan her bir diyot (m-2) tane kondansatörden bir tanesinin

gerilimini tutmalıdır. Ek olarak kondansatörler, seri kondansatörlerin gerilim dengesizliği ile sonuçlanan aynı şarj ve deşarj akımını paylaşmazlar [48].

“m” katlı Diyot Kenetlemeli Eviricinin avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmiştir. [39]

5.1.2. Diyot Kenetlemeli Çok Katlı Evirici’nin Avantajları ve Dezavantajları

5.1.2.1 Diyot Kenetlemeli Çok Katlı Evirici’nin Avantajları

- Seviye sayısını artması harmonik distorsiyonu azaltır
- Bütün fazlar aynı DC barayı paylaşır
- Temel anahtarlama frekansında yüksek verimlilik vardır.
- Kontrol metodu diğer topolojilere nazaran basittir.

5.1.2.2 Diyot Kenetlemeli Çok Katlı Evirici’nin Dezavantajları

- Her faz (m-1) tane DC bara kapasitörü ve (m-1)(m-2) tane kenetleme diyotu gerektirir.
- Aktif güç akışı kondansatörlerin dengesizliğinden dolayı zordur.

5.2. Kapasitör Kenetlemeli Çok Katlı Eviriciler

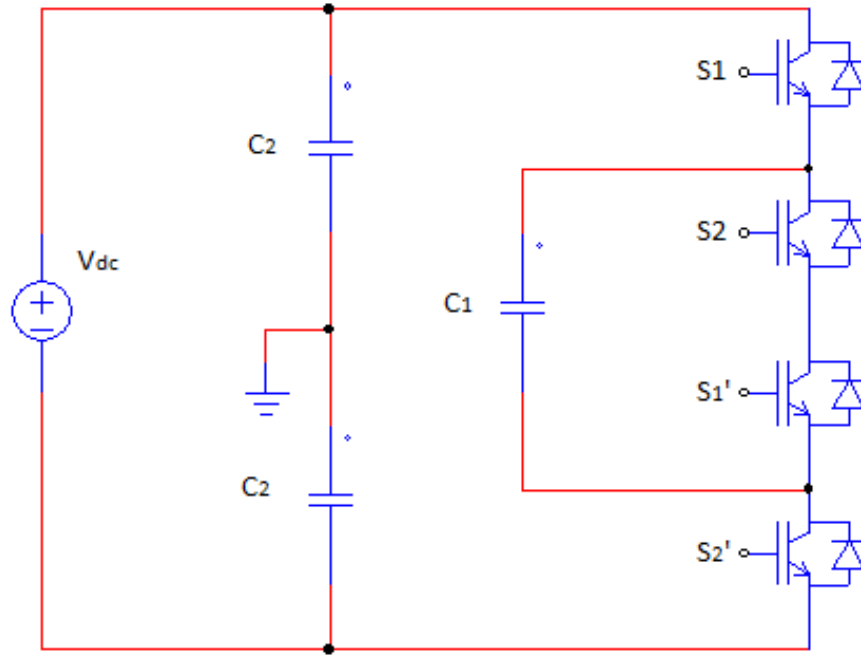
Kapasitör Kenetlemeli Çok Katlı Evirici topolojisi seri bağlanmış kapasitör kenetlenmiş anahtarlama hücreleri gerektirir [42]. Bu topoloji Diyot Kenetlemeli Çok Katlı Evirici ile kıyaslandığında birçok özgün ve etkileyici özelliklere sahiptir. Bu özelliklerin en önemlisi kenetleme diyotlarına ihtiyaç duyulmamasıdır.

Kapasitör Kenetlemeli Evirici Diyot Kenetlemeli Eviriciye benzerdir. Bununla birlikte Kapasitör Kenetlemeli Evirici topoojisi çıkış dalga şeklinin meydana gelmesinde daha fazla esnekliğe sahiptir. Kenetleme kapasitörleri gerilimin dengelenmesine yardımcı olur [39]

Bu evirici bağımsız kapasitörlerin anahtar gerilimini bir kapasitör gerilimine kenetlediği için “flying capacitor” evirici olarak da adlandırılır [36][42].

5.2.1. Kapasitör Kenetlemeli Çok Kath Evirici’nin Yapısı

Şekil 5.8. Üç katlı bir Kapasitör Kenetlemeli Evirici’nin bir faz bacağına temel yapı bloğunu göstermektedir. [39]. “m” seviyeli çıkış gerilimi üretmek için DC barada (m-1) kapasitöre ihtiyaç duyulur. Bu devrede C_1 kapasitörü kenetleme bir diğer deyişle denge kapasitörüdür. Kenetleme kapasitör sayısı faz başına $(m-1)(m-1)/2$ ile belirlenir



Şekil 5.8 Üç katlı Kapasitör Kenetlemeli Evirici’nin tek faz devre şeması.

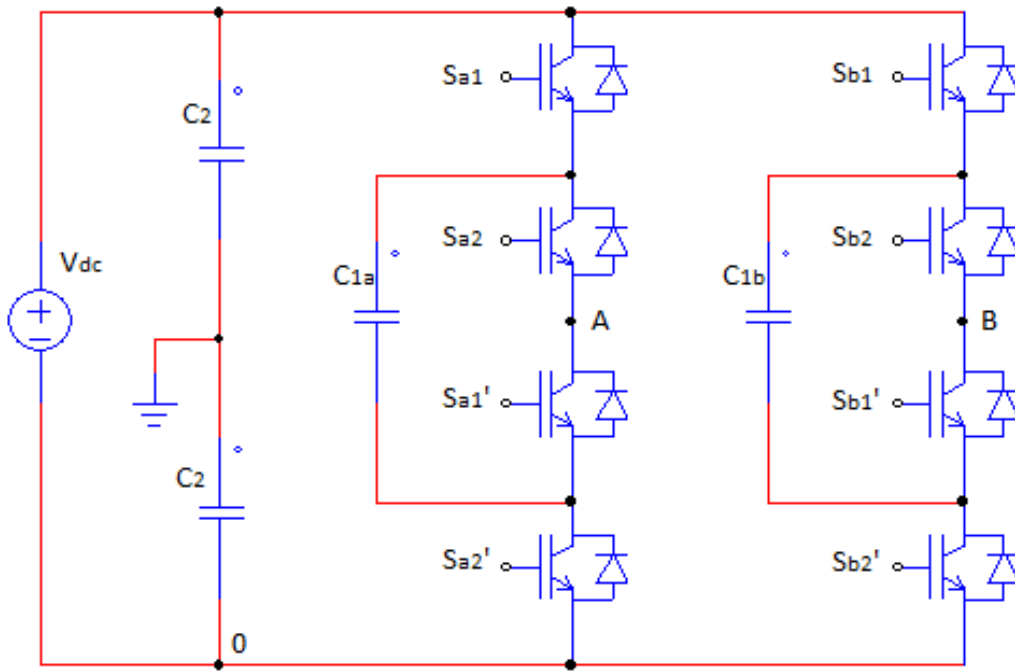
Şekildeki evirici devresinde “a” ve “n” noktaları arasında üç seviyeli bir çıkış elde edilebilir. Örneğin $V_{an} = V_{dc}/2$, 0 ya da $-V_{dc}/2$ olabilir. Gerilim seviyesini $V_{dc}/2$ yapmak için, S_1 ve S_2 anahtarları ilettime geçirilmelidir.. Benzer şekilde $-V_{dc}/2$ için S_1' ve S_2' anahtarları, 0 seviyesi için ise S_1 ve S_1' veya S_2 ve S_2' anahtar çiftlerinden biri iletimde olmalıdır. C_1 kenetleme kapasitörü S_1 ve S_1' anahtarları iletimde olduğunda dolar ve S_2 ve S_2' ilettime geçirildiğinde boşalır. C_1 doluluğu 0 seviyesi için seçilen uygun anahtar kombinasyonu ile dengelenebilir. Eviricinin çıkış gerilim

seviyeleri ve bunlara karşılık gelen anahtar kombinasyonları Tablo 5.5.’de gösterilmiştir [35].

Tablo 5.5 Tek fazlı üç katlı Kapasitör Kenetlemeli Evirici’nin çıkış gerilim seviyeleri ve bunlara karşılık gelen anahtar kombinasyonları.

Çıkış Gerilimi	Anahtarlama Durumları			
V_{an}	S_1	S_2	S_1'	S_2'
$V_{dc}/2$	1	1	0	0
0	1	0	1	0
0	0	1	0	1
$-V_{dc}/2$	0	0	1	1

Şekil 5.8’deki tek faz evirici devresine Şekil 5.9’daki gibi “b” faz bacağı da eklenirse iki faz bacağı arasından 5 seviyeli bir çıkış gerilimi alınabilir. Bu devre Kapasitör Kenetlemeli Evirici için tam köprü devresidir. Şekil 5.9’dan da görüldüğü gibi Kapasitör Kenetlemeli Evirici’de Diyot Kenetlemeli Evirici’de de olduğu gibi tek faz bacağından 0, $V_{dc}/2$, V_{dc} şeklinde 3 farklı pozitif çıkış elde edilebilir



Şekil 5.9 Kapasitör Kenetlemeli Evirici için 2 fazlı devre şeması

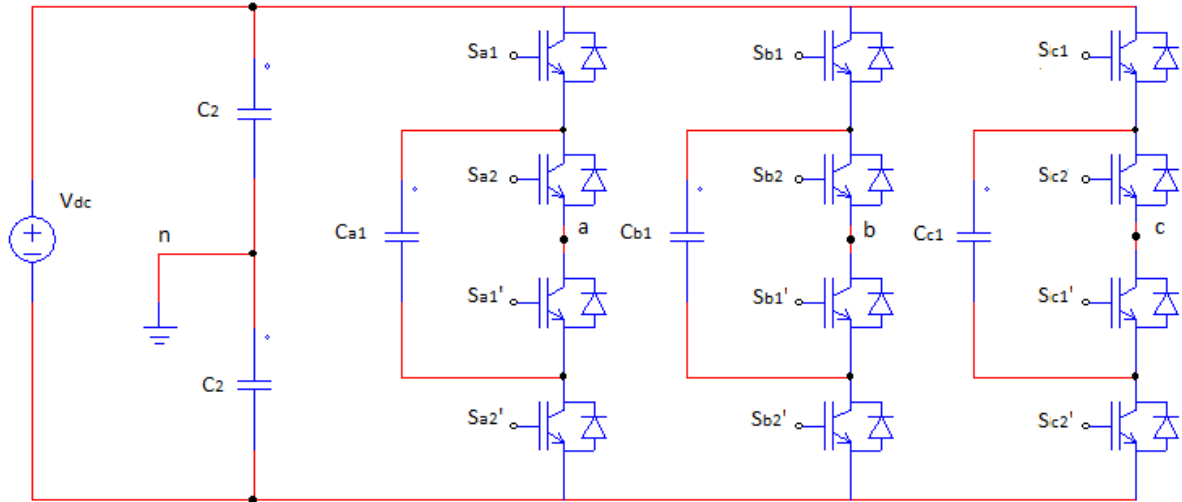
V_{ab} 'nin negatif kısmı $-V_b$ 'yi yani $0, -V_{dc}/2, -V_{dc}$ 'yi üretmek için Diyot Kenetlemeli Evirici'nin iki faz bacağıyla tam köprü devresi durumuna getirilen örneği gibi (Şekil 3.3.)de olduğu gibi b fazı devreye eklenmiştir [46]. Tablo 5.6, iki faz arasında beş seviyeli çıkış üretmek için mümkün olan anahtarlama kombinasyonlarını göstermektedir.

Tablo 5.6. Üç katlı Kapasitör Kenetlemeli Tam Köprü Evirici çıkış gerilim seviyeleri ve bu seviyelere karşılık gelen anahtarlama kombinasyonları.

Çıkış Gerilimi	Anahtarlama Durumları							
V_{ab}	S_{a1}	S_{a2}	S_{a2}'	S_{a1}'	S_{b1}	S_{b2}	S_{b2}'	S_{b1}'
V_{dc}	1	1	0	0	0	0	1	1
$V_{dc}/2$	1	0	1	0	0	0	1	1
	1	1	0	0	0	1	0	1
	0	1	0	1	0	0	1	1
0	0	0	1	1	0	0	1	1
	1	1	0	0	1	1	0	0
$-V_{dc}/2$	0	1	1	1	1	1	0	0
	0	1	0	1	1	1	0	0
	0	0	1	1	0	1	0	1
$-V_{dc}$	0	0	1	1	1	1	0	0

Kapasitör Kenetlemeli Eviricide iç seviye değerleri $V_{dc}/2$, 0, veya $-V_{dc}/2$ elde etmek için kullanılan kombinasyonlar Diyot Kenetlemeli Eviricide olduğu gibi tek bir anahtar durumu ile sınırlı değildir. Yani aynı seviyede çıkış elde etmek için birkaç farklı anahtarlama opsiyonu vardır. Diyot Kenetlemeli Eviricide bir seviye sadece bir grup anahtar durumundan elde edilmektedir. Çıkış gerilimi dalga şekli daha içteki gerilim seviyelerinden farklı anahtarlama kombinasyonları kullanılarak üretilebilir. Bu yapı gerilim seviyelerinin hangi büyüklükte seçileceği konusunda esnekliği arttırmaktadır. Ek olarak, anahtarlama, kondansatör gerilimini dengeleyen kenetleme kondansatörlerinin şarj ve deşarjına göre belirlenebilir.]

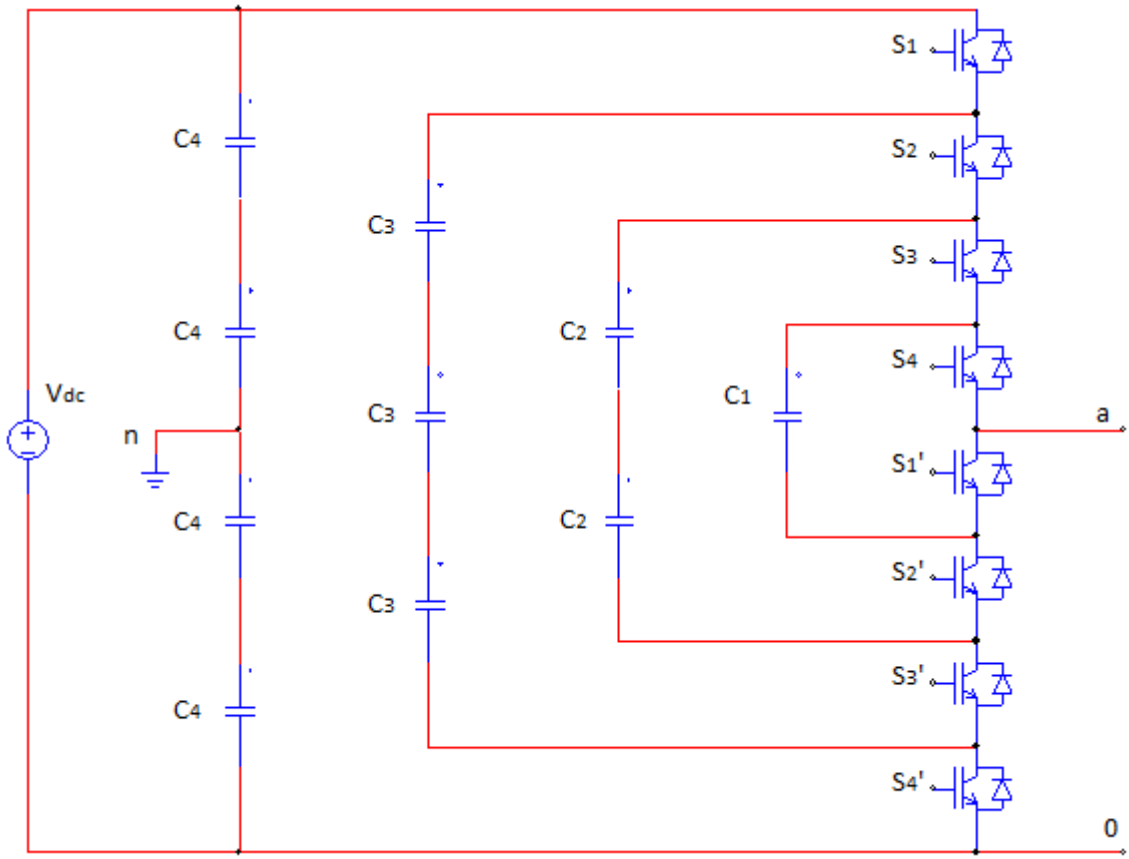
Tek fazlı üç katlı Kapasitör Kenetlemeli Evirici devresine iki faz bacağı daha eklenerek sistem üç fazlı hale getirilebilir. Şekil 5.10'da üç fazlı üç katlı Kapasitör Kenetlemeli Evirici modeli görülmektedir. Devrede nötr noktası çıkış gerilimi için referans noktası olarak ele alınır. "a", "b", "c" noktaları üç fazın çıkış noktalarıdır. Devrenin anahtarlama durumları ise üç fazlı bir tam köprü eviricinin anahtarlama durumlarıyla benzerlik göstermektedir.



Şekil 5.10 3 Fazlı 3 Katlı Kapasitör Kenetlemeli Evirici topolojisi.

Kapasitör Kenetlemeli Çok Katlı Eviricide bir faz bacağından da beş seviyeli AC çıkış gerilimi elde edilebilir. Beş katlı Kapasitör Kenetlemeli Evirici'nin bir faz devresi Şekil 5.11'de gösterilmiştir [35].

Şekil 5.11'de gösterilen eviricide DC tarafta kademeli kapasitörler kullanılır ve her bir kapasitörün gerilimi ondan sonra gelen kapasitörün geriliminden farklıdır. “m” seviyeli çıkış gerilimi üretmek için DC barada (m-1) tane kapasitöre ihtiyaç duyulur. Her bir faz bacağı diğer fazlarla aynı yapıya sahiptir. İki kapasitör arasındaki gerilimde meydana gelen artış çıkış gerilim seviyelerin belirler.



Şekil 5.11 Tek fazlı beş katlı Kapasitör Kenetlemeli Evirici.

Bu devrede çok seviyeli çıkış geriliminin nasıl meydana geldiğini anlamak için nötr noktası “n”, referans nokta olarak düşünülebilir. “a” ve “n” arasında beş seviyeli çıkış gerilimi oluşması için beş adet anahtarlama kombinasyonu vardır. Bu anahtarlama kombinasyonları Tablo 5.7’de gösterilmiştir. Bu devrede de her faz için dört eşlenik anahtar çifti mevcuttur. Bunlar S_1 - S_1' , S_2 - S_2' , S_3 - S_3' ve S_4 - S_4' dür. Eşlenik anahtar çiftlerinden biri iletimde iken diğeri mutlaka kesimde olmalıdır. Örneğin S_1 iletimde ise S_1' kesimde veya S_1' iletimde ise S_1 ’in kesimde olması gerekir.

Tablo 5.7 Beş katlı Kapasitör Kenetlemeli Evirici'nin çıkış seviyeleri ve bu seviyelere karşılık gelen anahtarlama durumları.

Çıkış Gerilimi	Anahtarlama Durumları							
V_{an}	S_1	S_2	S_3	S_4	S_1'	S_2'	S_3'	S_4'
$V_{dc}/2$	1	1	1	1	0	0	0	0
$V_{dc}/4$	1	1	1	0	1	0	0	0
	0	1	1	1	0	0	0	1
	1	0	1	1	0	0	1	0
0	1	1	0	0	1	1	0	0
	0	0	1	1	0	0	1	1
	1	0	1	0	1	0	1	0
	1	0	0	1	0	1	1	0
	0	1	0	1	0	1	0	1
	0	1	1	0	1	0	0	1
- $V_{dc}/4$	1	0	0	0	1	1	1	0
	0	0	0	1	0	1	1	1
	0	0	1	0	1	0	1	1
- $V_{dc}/2$	0	0	0	0	1	1	1	1

Beş katlı Kapasitör Kenetlemeli Evirici'de çıkış gerilimin oluşumu Diyot Kenetlemeli Evirici'ye göre daha esnektir. Yani aynı gerilim seviyesini veren birkaç anahtarlama kombinasyonu vardır. Şekil 5.12'yi bir örnek olarak kullanırsak, beş seviyeli, faz bacağı “a”nın nötr noktası “n” ye göre çıkışı V_{an} şu anahtar kombinasyonlarıyla sentezlenebilir.

1) $V_{an} = V_{dc}/2$ gerilim seviyesi için, S_1, S_2, S_3 ve S_4 anahtarları iletimde diğer anahtarlar kesimdedir.

2) $V_{an} = V_{dc}/4$ gerilim seviyesi için üç farklı anahtarlama kombinasyonu vardır:

a) S_1, S_2, S_3, S_1' anahtarları iletimde iken; $V_{an} = 2V_{c4} - V_{c1} = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{V_{dc}}{4} = \frac{V_{dc}}{4}$,

b) S_2, S_3, S_4, S_4' anahtarları iletimde iken; $V_{an} = 3V_{c3} - 2V_{c4} = \frac{3V_{dc}}{4} - \frac{V_{dc}}{2} = \frac{V_{dc}}{4}$, ve

c) S_1, S_3, S_4, S_3' anahtarları iletimde iken; $V_{an} = 2V_{c4} - 3V_{c3} + 2V_{c2} = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{3V_{dc}}{4} + \frac{V_{dc}}{2} = \frac{V_{dc}}{4}$

3) $V_{an} = 0$ gerilim seviyesi için altı kombinasyon vardır:

a) S_1, S_2, S_1', S_2' anahtarları iletimde iken; $V_{an} = 2V_{c4} - 2V_{c2} = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{V_{dc}}{2} = 0$,

b) S_3, S_4, S_3', S_4' anahtarları iletimde iken; $V_{an} = 2V_{c2} - 2V_{c4} = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{V_{dc}}{2} = 0$,

c) S_1, S_3, S_1', S_3' anahtarları iletimde iken; $V_{an} = 2V_{c4} - 3V_{c3} + 2V_{c2} - V_{c1} = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{3V_{dc}}{4} + \frac{V_{dc}}{2} - \frac{V_{dc}}{4} = 0$,

d) S_1, S_4, S_2', S_3' anahtarları iletimde iken; $V_{an} = 2V_{c4} - 3V_{c3} + V_{c1} = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{3V_{dc}}{4} + \frac{V_{dc}}{4} = 0$,

e) S_2, S_4, S_2', S_4' anahtarları iletimde iken; $V_{an} = -2V_{c4} + 3V_{c3} - 2V_{c2} + V_{c1} = -\frac{V_{dc}}{2} + \frac{3V_{dc}}{4} - \frac{V_{dc}}{2} + \frac{V_{dc}}{4} = 0$, ve

f) S_2, S_3, S_1', S_4' anahtarları iletimde iken; $V_{an} = 3V_{c3} - 2V_{c2} - V_{c1} = \frac{3V_{dc}}{4} - \frac{V_{dc}}{2} - \frac{V_{dc}}{4} = 0$.

4) $V_{an} = -V_{dc}/4$ gerilim seviyesi için üç anahtarlama kombinasyonu vardır:

a) S_1, S_1', S_2', S_3' anahtarları iletimde iken; $V_{an} = 2V_{c4} - 3V_{c3} = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{3V_{dc}}{4} = -\frac{V_{dc}}{4}$

b) S_4, S_2', S_3', S_4' anahtarları iletimde iken; $V_{an} = V_{c1} - 2V_{c2} = \frac{V_{dc}}{4} - \frac{V_{dc}}{2} = -\frac{V_{dc}}{4}$;

ve

c) S_3, S_1', S_3', S_4' anahtarları iletimde iken; $V_{an} = 2V_{c2} - V_{c1} - 2V_{c4} = \frac{V_{dc}}{2} - \frac{V_{dc}}{4} - \frac{V_{dc}}{2} = -\frac{V_{dc}}{4}$

5) $V_{an} = -V_{dc}/2$ gerilim seviyesi için, S_1', S_2', S_3' ve S_4' anahtarları iletimde diğer anahtarlar kesimdedir.

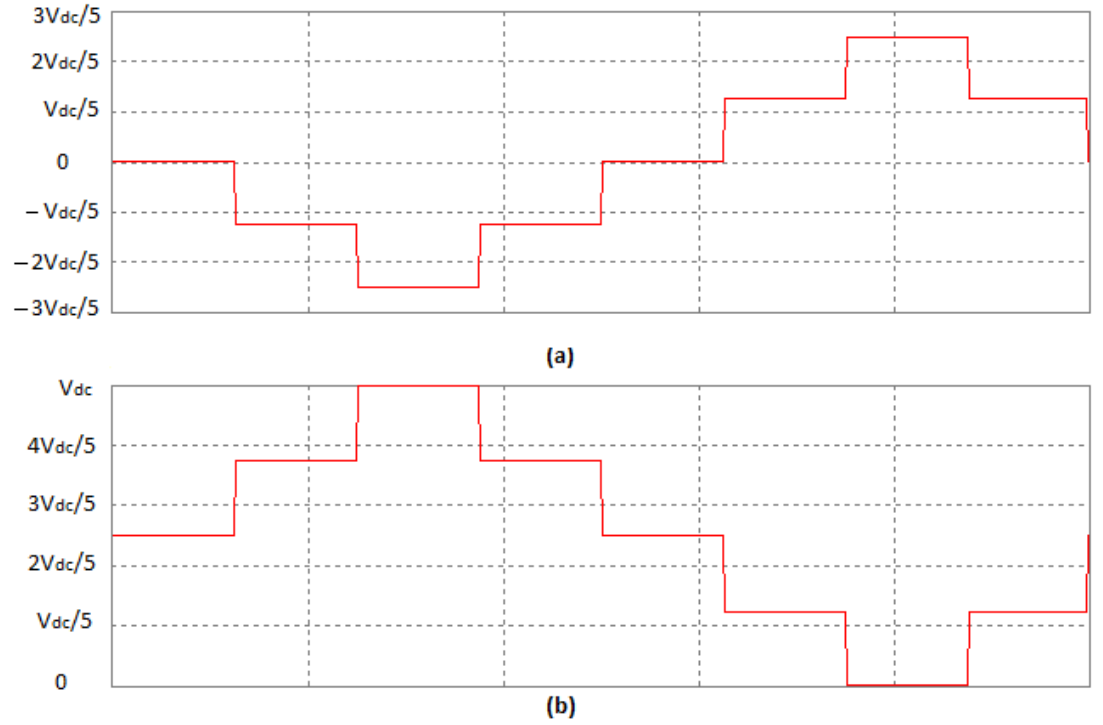
Yukarıda verilen anahtarlama kombinasyonları için pozitif işaretli kondansatörler şarj halinde negatif işaretli kondansatörler deşarj halindedir. Uygun anahtarlama kombinasyonları ile kondansatör gerilimlerinin dengelenmesi mümkündür. Kapasitör Kenetlemeli Evirici'de gerilimi kenetlemek için büyük değerli kapasitörler kullanmak gerekir.

Şekil 5.11'deki devrede “a” ve “0” noktaları arasında $V_{dc}, 3V_{dc}/4, V_{dc}/2, V_{dc}/4, 0$ değerlerinde beş değişik DC çıkış alınabilir. Bu durumda çıkış Y ekseninde ötelenmiş olur. Tablo 5.8'de bu gerilim seviyeleri ve bunlara karşılık gelen anahtarlama kombinasyonları gösterilmiştir [37].

Tablo 5.8 Beş katlı Kapasitör Kenetlemeli Evirici'nin “a” ve “0” noktaları arasındaki çıkış gerilim seviyeleri ile bunlara karşılık gelen anahtarlama kombinasyonları.

Çıkış Gerilimi	Anahtarlama Durumları							
V_{a0}	S_{a1}	S_{a2}	S_{a3}	S_{a4}	S_{a1}'	S_{a2}'	S_{a3}'	S_{a4}'
V_{dc}	1	1	1	1	0	0	0	0
$3V_{dc}/4$	1	1	1	0	1	0	0	0
$V_{dc}/2$	1	1	0	0	1	1	0	0
$V_{dc}/4$	1	0	0	0	1	1	1	0
0	0	0	0	0	1	1	1	1

Şekil 5.12'de ise aynı devrenin aynı anahtarlama durumlarında anahtarlama durumunda V_{an} geriliminin (b) V_{a0} geriliminin çıkış cevabı görülmektedir.



Şekil 5.12 Aynı anahtarlama durumunda (a) V_{an} geriliminin (b) V_{a0} geriliminin cevabı.

5.2.2. Kapasitör Kenetlemeli Çok Katlı Evirici'nin Avantajları ve Dezavantajları

5.2.2.1 Kapasitör Kenetlemeli Çok Katlı Evirici'nin Avantajları

- Kat sayısı arttıkça kapasitörler uzun deşarj süreleri nedeniyle büyük oranda enerji tutarlar.
- Farklı gerilim seviyeleri elde etmek için birden çok anahtarlama kombinasyonu vardır.
- Kat sayısı fazla olduğunda Toplam Harmonik Distorsiyon azalır.

5.2.2.2 Kapasitör Kenetlemeli Çok Katlı Evirici'nin Dezavantajları

- Kapasitörlerin sayısının çok fazla olması maliyeti ve sistemin kapsadığı hacmi artırır.
- Bara kapasitörlerinin başlangıçtaki şarj kontrolü tüm devrenin kontrolünü karmaşık hale getirir.
- Kenetleme kapasitörleri arasında parazitik rezonans riski vardır.[39]

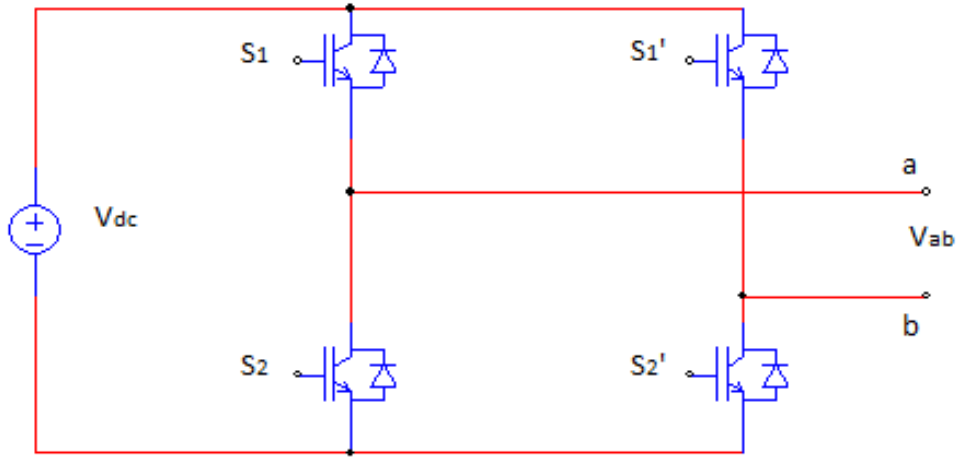
5.3. Kaskat Çok Katlı Eviriciler

Kaskat Çok Katlı Evirici topolojisi için farklı patentler olmasıyla birlikte, seri bağlanmış tam köprü eviriciler ilk olarak 1975'te tanımlanmıştır [36][49][50][51]. Bu evirici topolojisinin temel mantığı tek fazlı Tam Köprü Eviriciler'i izole DC gerilim kaynaklarıyla (SDCS) birleştirmesidir. Bu gereksinim Yakıt Hücreleri, Fotovoltaik Piller gibi yenilenebilir enerji kaynaklarını, Kaskat Çok Katlı Evirici için ihtiyaç duyulan izole DC gerilim kaynakları olarak doğal bir tercih haline getirir. Çok sayıda izole edilmiş, ayrışık gerilim kaynağına ihtiyaç duyması bu topolojinin en önemli dezavantajıdır.

Son zamanlarda bu yapı AC güç kaynaklarında ve sürücü sistemlerinde sıkça kullanılmaya başlanmıştır. Bu evirici topolojisinin diğer çok katlı eviricilere göre en belirgin avantajı ise kenetleme diyot ve kapasitörleri gerektirmemesidir. Ayrıca bu yapıda, DC kaynak gerilimine eşit değerde AC çıkış gerilim seviyesi elde edilebilmektedir [38]. Bunun yanında tasarıma fazladan gerilim katları eklenilebilir. Yedekleme yapabilecek bir yapı tasarlanması ile eviricinin çıkışında bir seviyenin kaybı durumunda bile çalışmaya devam etmesi sağlanır. Bu DC kaynakların veya Tam Köprü Eviriciyi oluşturan anahtarlama elemanlarının birinde bir sorun olması durumunda bile Çok Katlı Kaskat Evirici'nin çalışmaya devam edebileceği anlamına gelir [52].

5.3.1. Kaskat Çok Katlı Evirici'nin Yapısı

Çok katlı Kaskat İnverter için seviye sayısı " m " en az üçtür. Üç seviyelide $+V_{dc}$, 0 , $-V_{dc}$ seviyelerinden oluşan çıkış elde etmek için H- köprü hücre olarak da bilinen Tam Köprü Evirici kullanılır.



Şekil 5.13 Tek fazlı üç Katlı Kaskat Evirici devre yapısı

Tek fazlı izoleli DC kaynaklı Kaskat Çok Katlı Evirici yapısı Şekil 5.13’de gösterilmektedir. Daha önce belirtildiği gibi tam köprü devresi dört anahtarlama elemanı ve dört adet boşluk diyotundan meydana gelmektedir. Şu durumda S_1 ve S_2' anahtarları iletimde S_2 ve S_1' anahtarları kesimde iken çıkış gerilimi V_{ab} V_{dc} ’ye eşitken tersi durumda yani S_1' ve S_2 anahtarları iletimde S_1 ve S_2' anahtarları kesimdeyken ise $V_{ab} - V_{dc}$ ’ye eşit olacaktır. S_1 ve S_1' anahtarları iletimde S_2 ve S_2' anahtarları kesimdeyken veya tersi durumda yani S_2 ve S_2' anahtarları iletimde diğer iki anahtar kesimdeyse çıkış 0’a eşit olacaktır. Anahtarlama durumları Tablo 5.9’da verilmiştir.

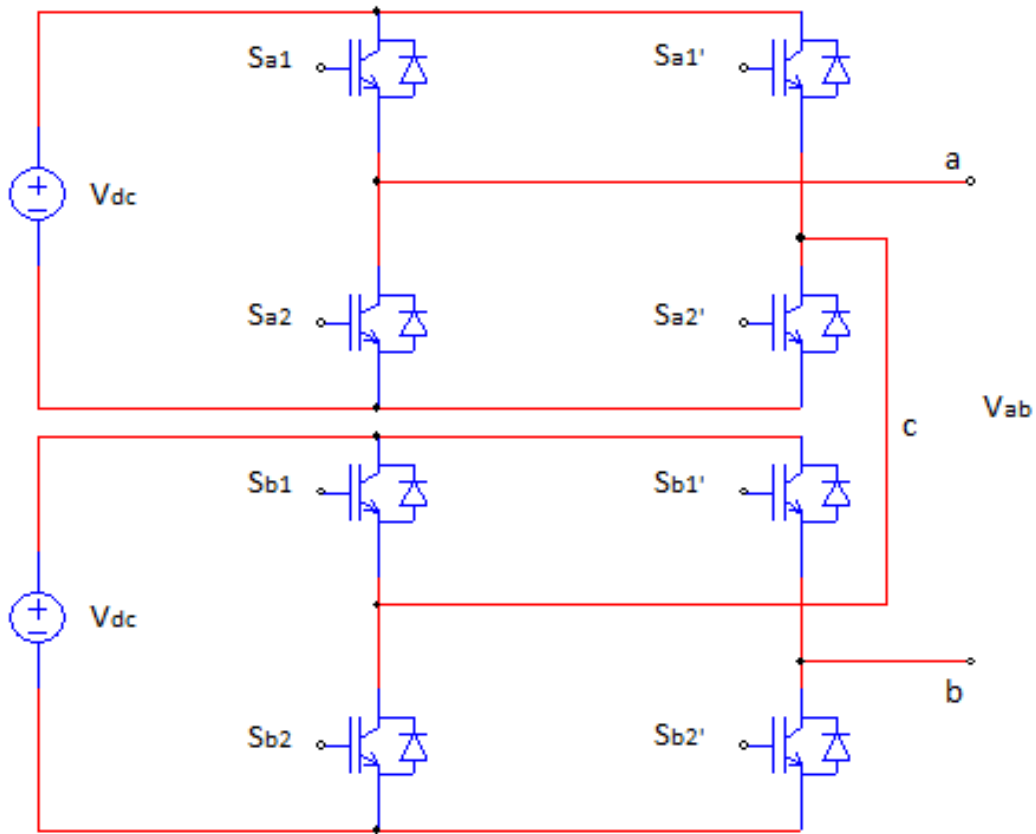
Tablo 5.9 Üç katlı Kaskat Evirici’nin anahtarlama durumları

Çıkış Gerilimi	Anahtarlama Durumları			
V_{ab}	S_1	S_1'	S_2	S_2'
$+V_{dc}$	1	0	0	1
0	1	0	1	0
0	0	1	0	1
$-V_{dc}$	0	1	1	0

Topolojide kenetleme diyot ve kapasitörlerine ihtiyaç duyulmaması bu topolojinin diğer topolojilere kıyasla daha az sayıda eleman bulundurduğu anlamına

gelir. Bunun yanında her bir tam köprü yapısı birbiriyle aynı olduğundan bu seri yapının tasarımı kolaydır ve kolayca paketlenilip bir modül haline getirilebilir.

Kaskat Çok Katlı Eviriciler’de çok seviyeli çıkış gerilimi elde etmek için tam köprü eviricilerin AC çıkışlarının seri bağlanması sonucunda sentezlenen çıkış gerilim dalga şekli inverter çıkışlarının toplamı olur. Her bir köprü devrenin çıkışında üç farklı gerilim seviyesi meydana getirebilmesi çıkışları seri bağlanmış iki tane üç katlı Kaskat Eviricinin toplam beş seviyeli bir AC çıkış geriliminin elde edilmesine neden olur. Formüle edecek olursak “s” DC kaynak sayısı olmak üzere bir Kaskat Çok Katlı Evirici’nin çıkış gerilimlerinin seviyesinin sayısı $m=2s+1$ olur. Beş katlı Kaskat Evirici’nin iki adet tam köprü inverter kullanılarak oluşturulmuş devre şeması Şekil 5.14’de görülmektedir.



Şekil 5.14 Tek fazlı beş katlı Kaskat Evirici

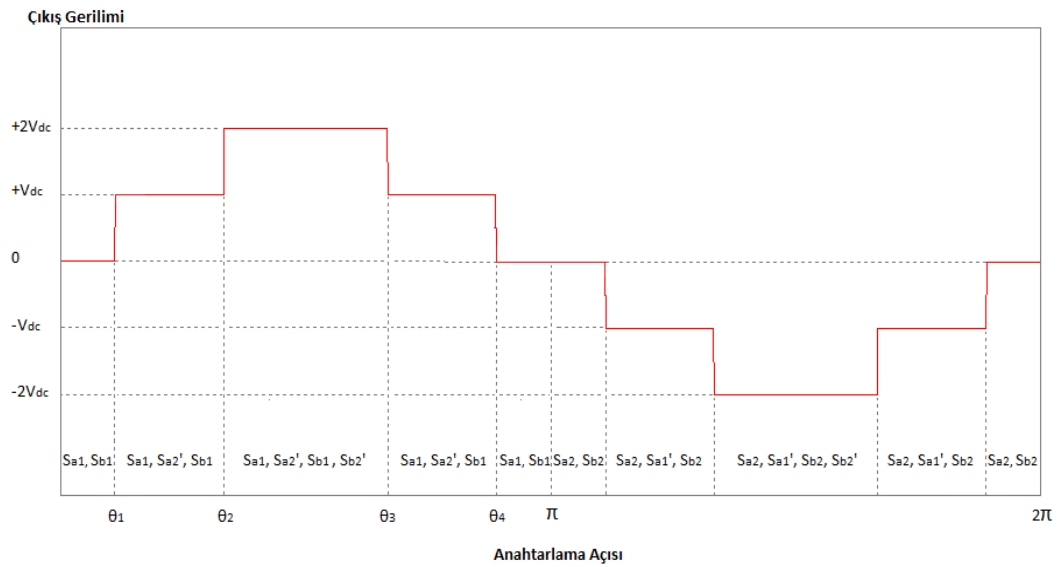
Şekil 5.14'deki devre on altı değişik anahtarlama durumuna sahiptir. Bu anahtarlama durumları ve bunlara karşılık gelen çıkış gerilim seviyeleri ise Tablo 5.10'da gösterilmiştir [33]. Tabloda V_{ac} üstteki V_{cb} ise alttaki Tam Köprü Evirici'nin çıkışı 1-0 durumları ise anahtarlama elemanlarının iletimde veya kesimde oldukları anlamına gelir.

Tablo 5.10 Tek fazlı beş katlı Kaskat Evirici'nin çıkış gerilimleri ve anahtarlama durumları

Çıkış Gerilimleri			Anahtarlama Durumları							
V_{ab}	V_{ac}	V_{cb}	S_{a1}	S_{a1}'	S_{a2}	S_{a2}'	S_{b1}	S_{b1}'	S_{b2}	S_{b2}'
0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0
0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1
0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0
0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1
0	$+V_{dc}$	$-V_{dc}$	1	0	0	1	0	1	1	0
0	$-V_{dc}$	$+V_{dc}$	0	1	1	0	1	0	0	1
$+V_{dc}$	$+V_{dc}$	0	1	0	0	1	1	0	1	0
$+V_{dc}$	$+V_{dc}$	0	1	0	0	1	0	1	0	1
$+V_{dc}$	0	$+V_{dc}$	1	0	1	0	1	0	0	1
$+V_{dc}$	0	$+V_{dc}$	0	1	0	1	1	0	0	1
$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	0	0	1	1	0	1	0	1	0
$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	0	0	1	1	0	0	1	0	1
$-V_{dc}$	0	$-V_{dc}$	1	0	1	0	0	1	1	0
$-V_{dc}$	0	$-V_{dc}$	0	1	0	1	0	1	1	0
$+2V_{dc}$	$+V_{dc}$	$+V_{dc}$	1	0	0	1	1	0	0	1
$-2V_{dc}$	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	0	1	1	0	0	1	1	0

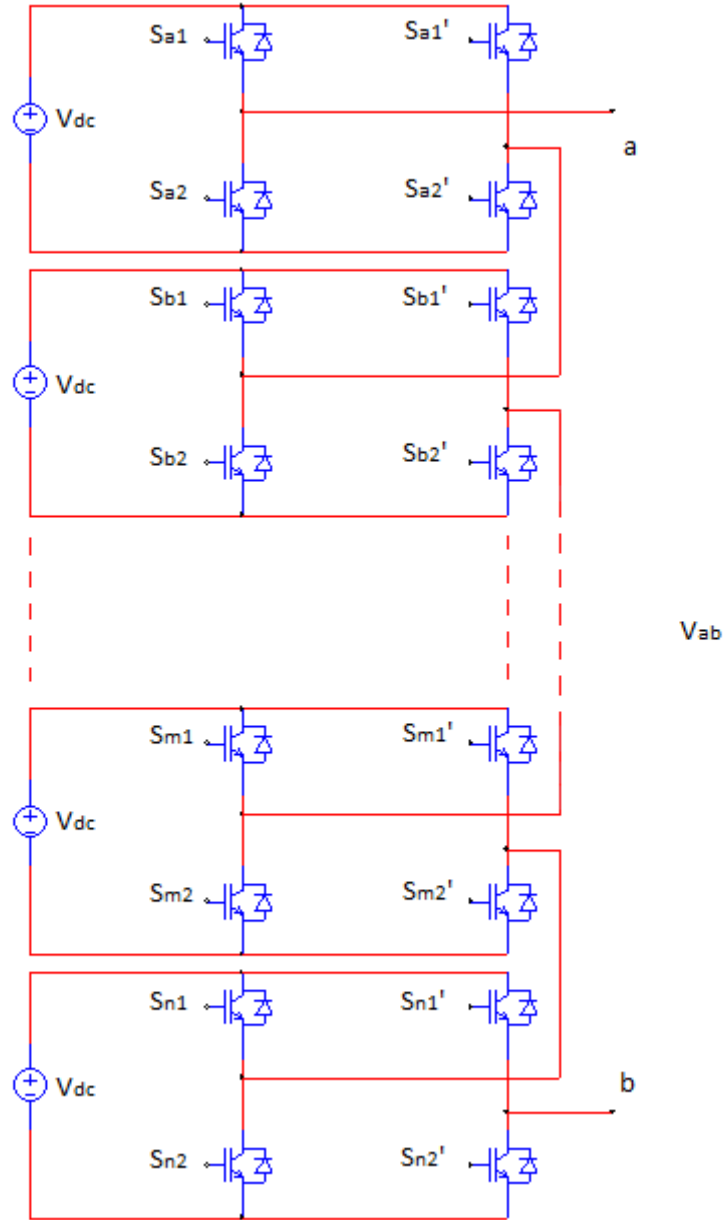
Tablodan da görülebileceği gibi $-2V_{dc}$ ve $2V_{dc}$ çıkış gerilimlerinin elde edilmesi hariç diğer tüm çıkış seviyeleri (V_{dc} , $-V_{dc}$, 0) için farklı kombinasyonlar mümkündür.

Şekil 5.15’da ise tek fazlı beş katlı Kaskat Evirici’nin çıkış grafiği ve bu çıkışların oluşması için gerekli anahtar kombinasyonları belirtilmiştir. Gösterimde belirtilen anahtar isimleri Şekil 5.14’teki devrede görülen ve çıkış seviyesi için o anda iletimde olan anahtarlama elemanını sembolize etmektedir. Belirtilen kombinasyonların Tablo 5.10’da görülen durumlardan belirlenmiş olduğu ve aynı çıkış seviyelerinin farklı kombinasyonlarda da elde edilebileceği unutulmamalıdır.



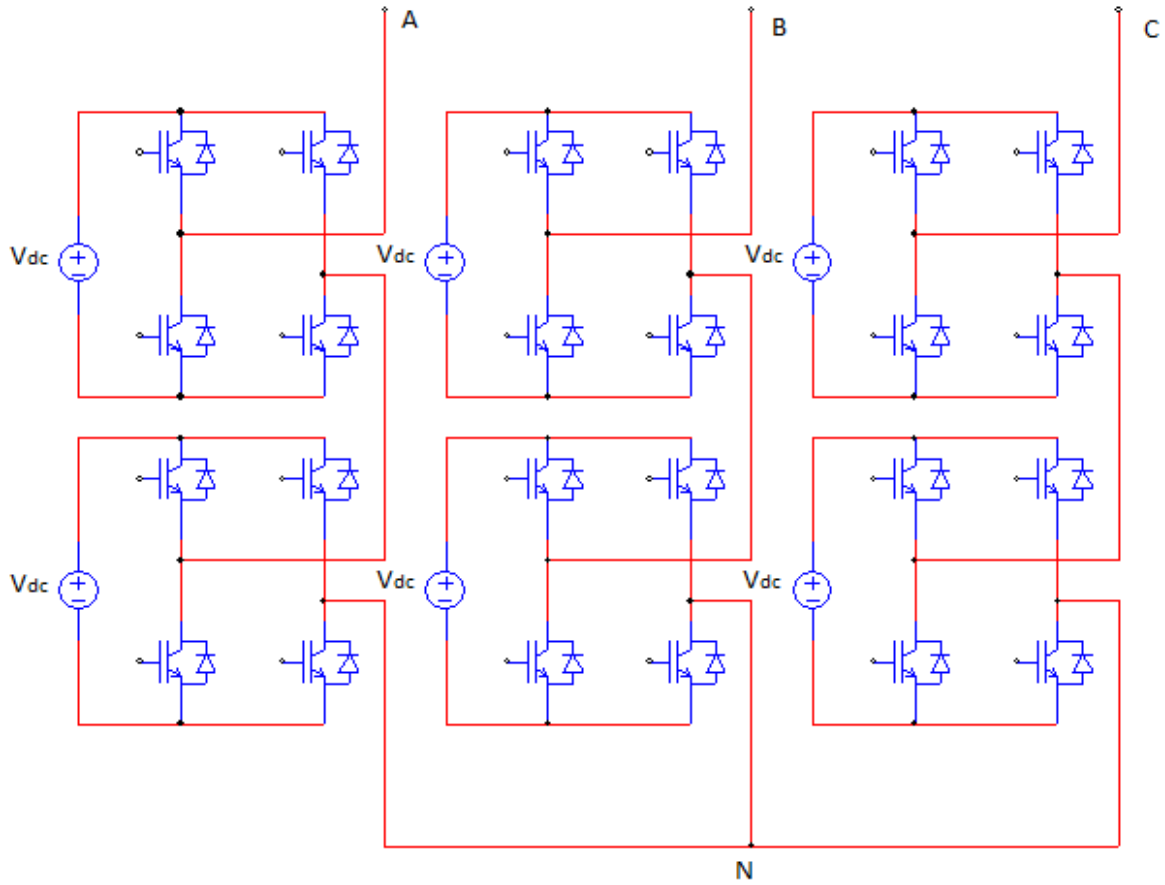
Şekil 5.15 Tek fazlı beş katlı Kaskat Evirici’ye ait çıkış gerilimi.

Beş katlı Kaskat Evirici’de olduğu gibi Tam Köprü Eviriciler’in birbirine seri olarak bağlanmasıyla kat sayısı artırılabilir. Şekil 5.16’da “n” katlı bir Kaskat Evirici görülmektedir.



Şekil 5.16 Tek fazlı “n” katlı Kaskat Eviricinin devre şeması.

Üç fazlı sistem için tek fazlı bir Kaskat Evirici’yle aynı yapıdaki üç çıkışı ya yıldız ya üçgen bağlayabiliriz. Şekil 5.17’de her bir fazında iki tane Tam Köprü Evirici ve iki tane izole DC kaynak kullanılan üç-fazlı beş katlı Kaskat Eviricinin devre şeması gösterilmektedir.



Şekil 5.17 Üç fazlı beş katlı Kaskat Evirici devre şeması.

Şekil 5.18'deki devrede faz gerilimleri V_{AN} , V_{BN} ve V_{CN} 'dir. Her iki faz çıkışının arasında bulunan 120° 'lik faz farkı anahtarlama açılarının kombinasyonlarıyla ayarlanır.

5.3.2. Kaskat Çok Katlı Evirici'nin Avantajları ve Dezavantajları

5.3.2.1 Kaskat Çok Katlı Evirici'nin Avantajları

- Her bir Tam Köprü Evirici devresi aynı yapıda olduğundan dolayı kaskat evirici devresinin dizaynı ve paketlenerek bir modül haline getirilmesi kolay olur.
- Çıkış gerilimi seviyeleri için birden fazla anahtarlama kombinasyonu mümkündür.

- Kenetleme diyotları ve gerilim dengeleme kondansatörlerinin olmadığı göz önüne alınırsa daha az sayıda eleman kullanılır.
- Kat sayısı fazla olduğunda Toplam Harmonik Distorsiyon azalır.

5.3.2.2 Kaskat Çok Katlı Evirici'nin Dezavantajları

- İzole DC kaynakların bulunduğu sınırlı sayıda uygulama alanı vardır.

6. ÖNERİLEN KASKAT ÇOK KATLI EVİRİCİ MODELİ

Geleneksel tam köprü eviriciler ile elde edilen çıkış yük gerilimi ve akımı büyüklüklerindeki harmoniklerin fazla olması sonucu bu inverter yapısı yerine çok katlı inverter teknikleri geliştirilmiş ve tek ve üç fazlı çok katlı inverterler bir çok uygulama için popüler hale gelmeye başlamıştır. Evirici teknolojisine duyulan ilgi artmış ve bu ilgiye paralel olarak bu konuda hızlı bir gelişme gösterilmiş olsa bazı problemler hala devam etmektedirler.

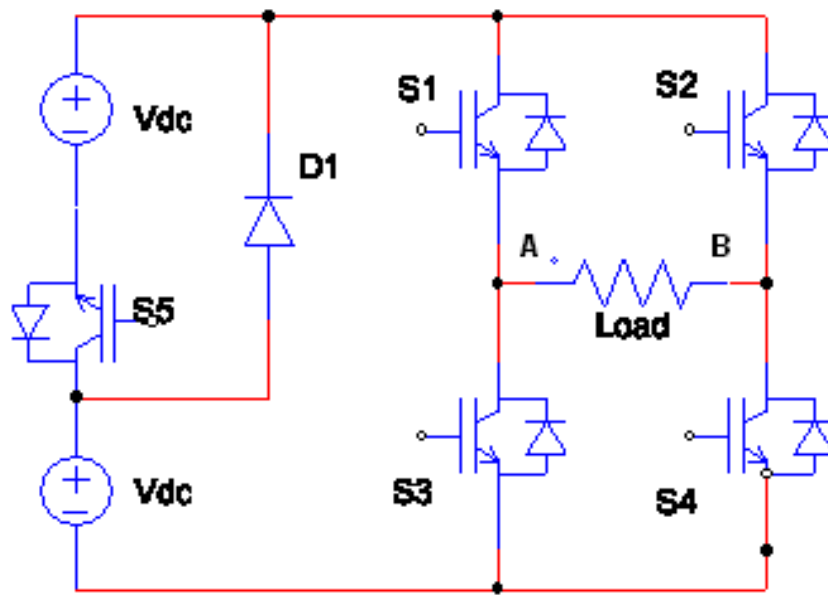
Literatürde çok katlı eviriciler olarak tanımlanmış her üç topolojide klasik köprü eviricilere kıyasla avantaj sağlayan birçok ortak özellik gösterilmektedir. Ayrıca şu bilinmektedir ki çıkış gerilimindeki seviye sayısının artmasına bağlı olarak yük akımı harmoniklerinin azalmakta bu da eviricinin performansını arttırmaktadır. Ancak bu durum çok katlı evirici topolojilerinin en önemli, temel ve ortak dezavantajları olan devrede fazla sayıda anahtarlama elemanlarına gereksinim duyulmasına yol açmaktadır. Bunun yanında bu anahtarlama elemanlarını kesin ve mümkün olduğu kadar hatasız sürmek gerekmektedir ve bu işlevi sağlayan karmaşık bazı devrelere ihtiyaç duyulur [53].

Anahtarlama elemanlarının sayıca fazla olması ve bu elemanlar için kullanılması gereken sürücü kartları, evirici yapılarında anahtarlama stratejilerinin ve anahtarlama açılarının hassasiyetlerinin önemi göz önüne alındığında sistemin kararlılığı açısından zararlıdır. Bu nedenle son zamanlarda devrede kullanılan yarı iletken eleman sayısını azaltarak sistemi basitleştirmek için yapılmış çalışmalara vardır [54].

Bu çalışmada da anahtarlama elemanlarının sayısı azaltılarak geleneksel yapılara nazaran daha az anahtarlama elemanı içeren bir kaskat evirici topolojisi önerilmiş ve önerilen yeni topoloji anahtarlama durumlarıyla beraber gösterilmiştir. Bu anahtarlama elemanlarının sayısı azaltılmış, dolayısıyla temel yapısı basitleşmiş ve maliyeti azalmış bu topoloji tanıtılmış ve geleneksel çok katlı kaskat evirici modeliyle kıyaslanmıştır.

6.1. Önerilen Modelin Yapısı

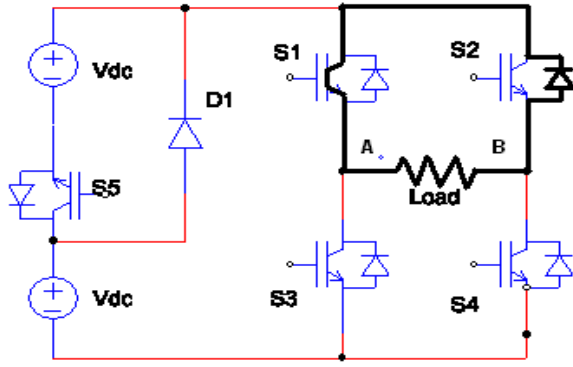
Şekil 5.14’te görülen geleneksel beş katlı Kaskat Evirici, tek fazlı Tam Köprü Evirici devrelerinin seri bağlanması yoluyla kurumuştur. Üç farklı gerilim seviyesinde çıkış verebilen her bir tam köprü evirici yapısında dörder anahtarlama elemanı mevcuttur. Seviye sayısını arttırmak için yapıya daha fazla tam köprü evirici devresinin seri olarak bağlanması gerektiğinden her yeni evirici katı devreye dört anahtarlama elemanının daha ekleneceği anlamına gelmektedir.



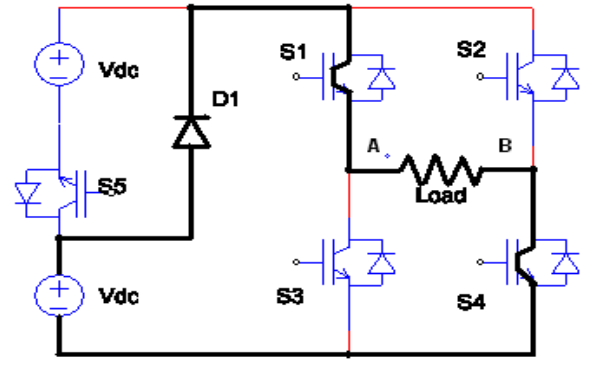
Şekil 6.1 Geliştirilmiş beş katlı Kaskat Evirici

Şekil 6.1.’de önerilen yapı görülebilmektedir. Bu yapı klasik Tam Köprü Evirici’yi iki izole DC gerilim kaynağıyla besleme temeline dayanmaktadır. Köprü devresinin bulunduğu kısım önerilen modelin “Köprü Katı” DC kaynakların ve onları bağlayan anahtarların olduğu bölüm ise “Besleme Katı” olarak bölümlendirilebilir. Devrede Tam Köprü Evirici yapısında kullanılan dört anahtarlama elemanına ek olarak izole DC kaynakların arasına yerleştirilmiş bir adet S_5 anahtarlama elemanı ve ters akım diyotu kullanılmıştır. S_5 anahtarının bu sistemdeki görevi DC kaynaklar arasındaki bağlantıyı sağlayarak veya keserek Tam Köprü Evirici’nin uçlarına uygulanacak besleme geriliminin seviyesini ayarlamaktır. S_5 anahtarı iletimdeyken eş değerdeki (şekilde V_{dc}) iki gerilim kaynağı birbirine seri bağlı duruma gelecek ve Tam Köprü Evirici’nin girişlerine uygulanan toplam gerilim

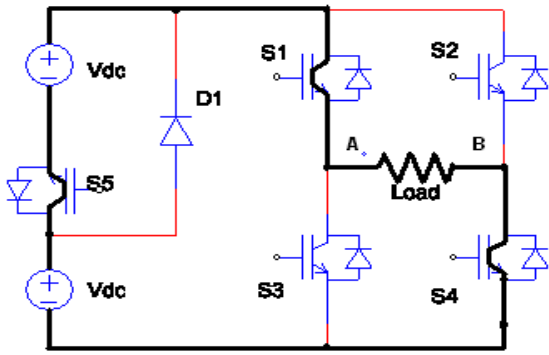
2Vdc olacaktır. S_5 anahtarının kesimde olduğu durumda ise Şekil 6.1.'de üstte görülen doğru gerilim kaynağı devre dışı kalacak tam köprü eviricinin beslemesi Vdc değerinde olacaktır.



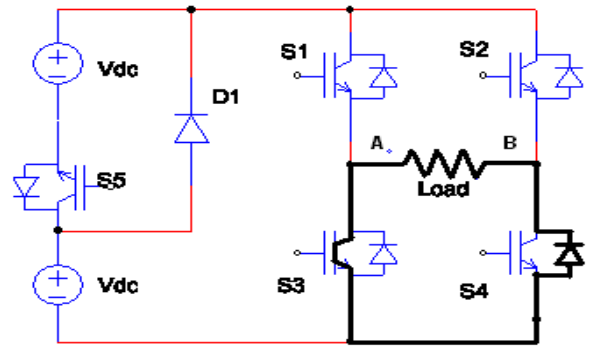
(a)



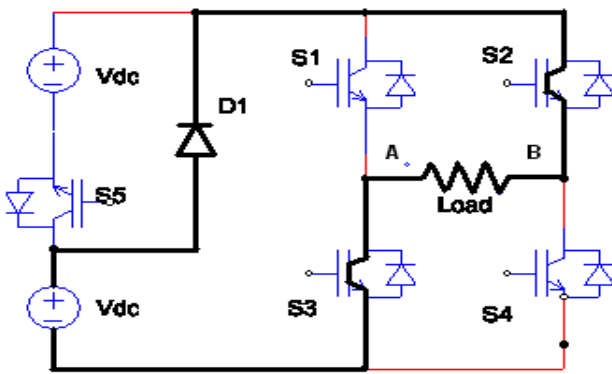
(b)



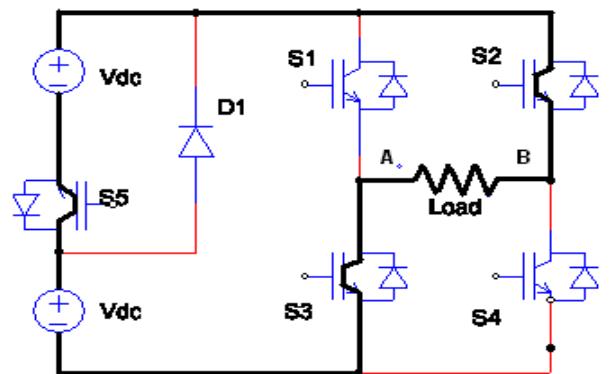
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 6.2 Önerilen yapıdaki 5 katlı kaskat eviricinin anahtar pozisyonlarına bağlı olarak çalışma durumları.

Şu durumda 5 katlı kaskat eviricin çıkış gerilim seviyeleri klasik yapıda da olduğu gibi $+2V_{dc}$, $+V_{dc}$, 0 , $-V_{dc}$, $-2V_{dc}$ olacaktır.

Önerilen evirici modelinin çıkış durumları için anahtarlama kombinasyonları anahtarların iletim ve kesimde oldukları pozisyonlara göre 6 farklı durumda olabilir. Şekil 6.2.'den görülebileceği gibi anahtarlama durumlarının farklı kombinasyonlarında farklı çıkışlar oluşur.

Şekil 6.2.(a) da sadece S_1 anahtarı iletimde diğer anahtarlar kesimdeyken devrenin çıkış geriliminin seviyesi 0 'dır.

Şekil 6.2. (b)'de S_1 ve S_4 anahtarları iletimde diğer anahtarlar kesimdeyken devrenin çıkış geriliminin seviyesi $+V_{dc}$ 'dir.

Şekil 6.2. (c)'de S_1 , S_4 ve S_5 anahtarları iletimde diğer anahtarlar kesimdeyken devrenin çıkış geriliminin seviyesi $+2V_{dc}$ 'dir.

Şekil 6.2. (d)'de sadece S_3 anahtarı iletimde diğer anahtarlar kesimdeyken devrenin çıkış geriliminin seviyesi 0 'dir.

Şekil 6.2. (e)'de S_2 ve S_3 anahtarları iletimde diğer anahtarlar kesimdeyken devrenin çıkış geriliminin seviyesi $-V_{dc}$ 'dir.

Ve son olarak Şekil 6.2. (f)'de S_2 , S_3 ve S_5 anahtarları iletimde diğer anahtarlar kesimdeyken devrenin çıkış geriliminin seviyesi $-2V_{dc}$ 'dir.

Bu durumlar Tablo 6.1'de özetlenmiştir.

Tablo 6.1.Önerilen topolojinin anahtarlama durumları ve bu durumlara denk gelen çıkış gerilimi seviyeleri.

Anahtarlama Durumları	V_A	V_B	Çıkış Gerilimi (V_{AB})
S_1	0	0	0
S_1, S_4	V_{dc}	0	V_{dc}
S_1, S_4, S_5	$2V_{dc}$	0	$2V_{dc}$
S_3	0	0	0
S_3, S_2	0	V_{dc}	$-V_{dc}$
S_3, S_2, S_5	0	$2V_{dc}$	$-2V_{dc}$

6.2. Geleneksel Kaskat Çok Katlı Evirici ile Önerilen Modelin Karşılaştırılması

Geleneksel bir kaskat çok katlı evirici yapısında her bir DC gerilim kaynağı için Tam Köprü Evirici'nin içerdiği 4 anahtarlama elemanı vardır.

Geleneksel bir kaskat eviricide bulunan kat sayısı " m " ve kullanılan anahtarlama elemanlarının sayısı " s " şu şekilde hesaplanabilir.

$$m = 2n + 1 \quad (6.1)$$

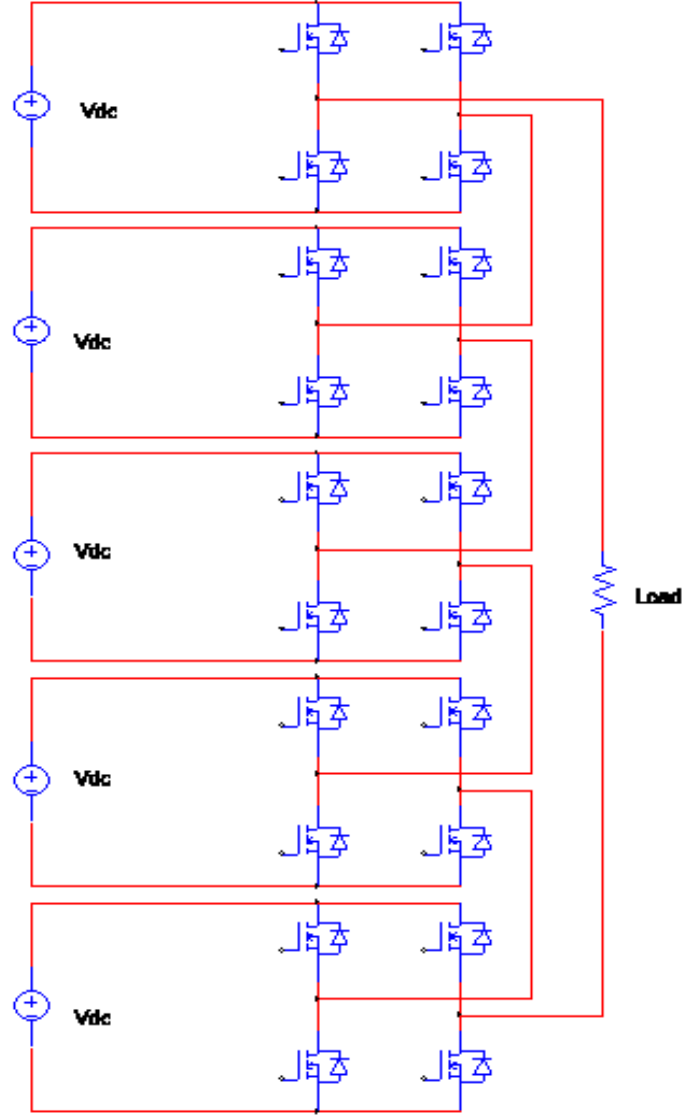
$$s = 4n \quad (6.2)$$

Bu eşitliklerde " n " izole dc kaynaklarının sayısıdır.

Geliştirilmiş topolojide de eviricinin kat sayısı geleneksel evirici modelinde olduğu gibi hesaplanabilir. Anahtarlama elemanlarının sayısı ise kat sayısını arttırmak için devreye eklenen her DC kaynak sayısında bir tane artacağı için geleneksel çok katlı kaskat eviriciden daha az olacaktır. Geliştirilmiş yapıda kullanılan anahtarlama elemanlarının sayısını gösteren formül şöyle gösterilebilir:

$$s = 4 + (n - 1) \quad (6.3)$$

Şekil 5.14'te görülen klasik bir beş Katlı Kaskat Evirici'de iki DC kaynak kullanılmaktadır. Devrede kullanılan anahtarlama elemanlarının sayısı ise (6.2)'den 8 olarak bulunur.

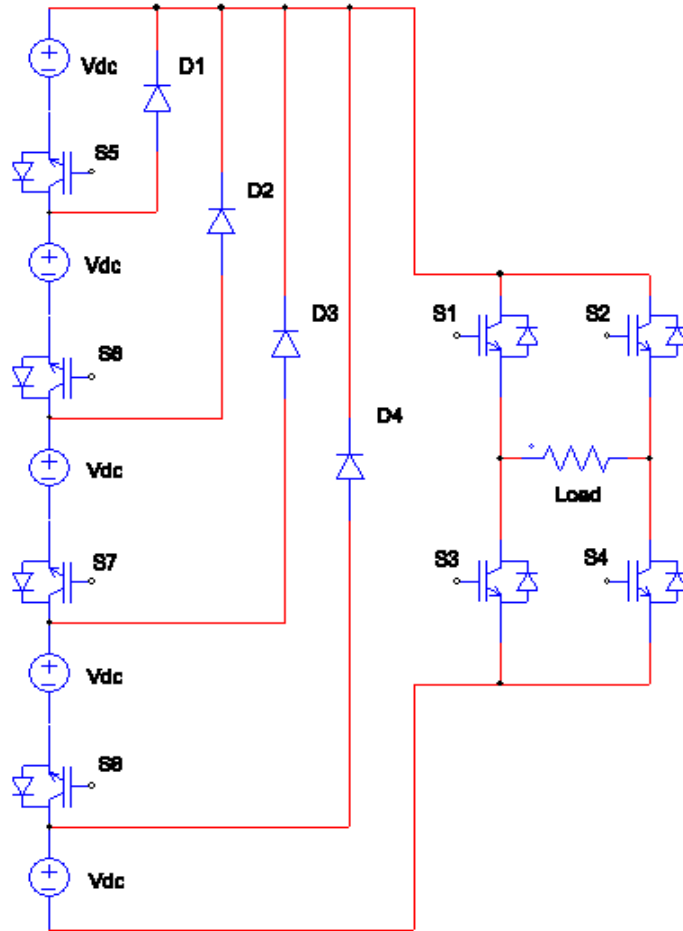


Şekil 6.3 Klasik on bir katlı Kaskat Evirici.

Aynı kat sayısına dolayısıyla aynı çıkış işaretine sahip önerilen beş katlı Kaskat Evirici yapısında ise (6.3)'den beş anahtarlama elemanı kullanılması gerektiği bulunur. Yeni topolojiyle gelen devredeki bu sadeleştirme Kaskat Evirici'nin kat sayısı arttıkça daha belirgin olmaktadır.

Şekil 6.3.'te klasik onbir katlı Kaskat Evirici yapısı görülmektedir. beş izole DC kaynağa ihtiyaç duyan bu yapıda şekilden görülebileceği veya (6.2) formülünden bulunabileceği gibi yirmi anahtarlama elemanı kullanılmıştır.

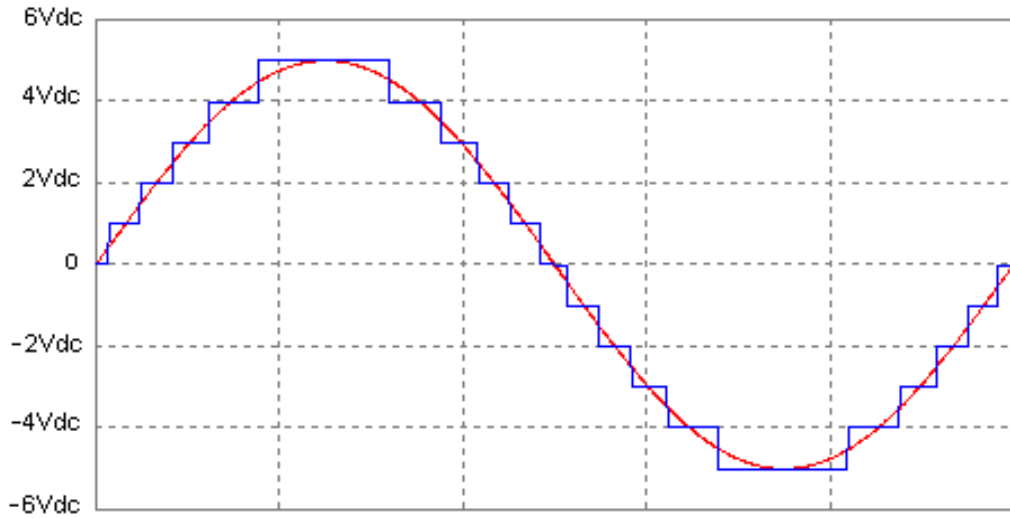
Aynı sayıda DC kaynak kullanarak aynı çıkış işaretini veren önerilen on bir katlı Kaskat Evirici yapısı ise Şekil 6.4'te görülmektedir. Bu yapıda ise (6.3)'ten bulunabileceği gibi sekiz anahtarlama elemanı kullanılmıştır.



Şekil 6.4 Önerilen on bir katlı Kaskat Evirici modeli.

6.3. Önerilen Modelin Anahtarlama Açıları

Geleneksel kaskat Çok Katlı Evirici topolojisinde çıkış geriliminin dalga formundaki basamakların zaman düzlemindeki boyutları çıkış geriliminin sinüsoidal bir forma benzemesinde dolayısıyla harmoniklerin distorsiyonun azalmasındaki en önemli etkindir. Eviricinin kat sayısının fazla olması ve çıkış işaretindeki basamakların doğru açılarla oluşturulmuş olması çıkış işaretinin daha fazla sinüsoidale benzemesini ve harmoniklerinin daha az olmasını sağlar. Şekil 6.5.'te her biri V_{dc} genliğinde beş DC kaynakla beslenmiş onbir katlı Kaskat Evirici'nin doğru anahtarlama açıları kullanılarak sürülmüş devresinin bir periyodluk çıkış gerilimi görülmektedir.



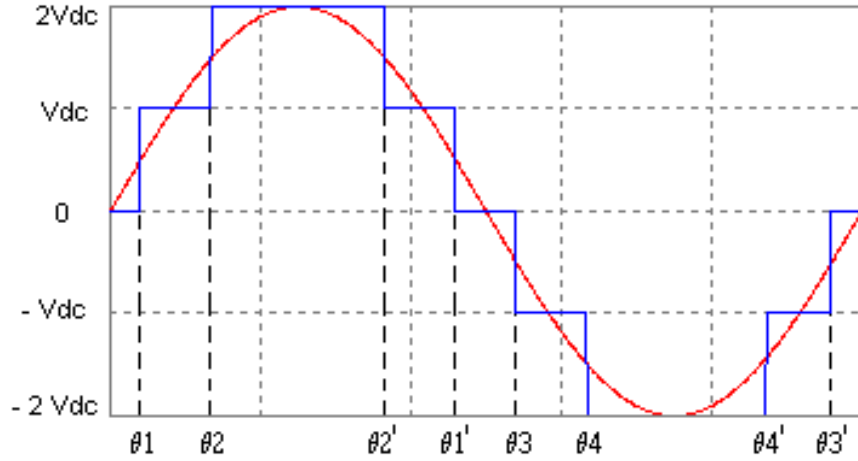
Şekil 6.5 On bir katlı Kaskat Evirici'nin çıkış grafiği.

Eviricinin yapısında da değinildiği üzere çıkış sinyalinde zaman düzlemindeki basamaklar anahtarlama elemanlarının iletimde ve kesimde olma durumlarının kombinasyonlarıyla ilintilidir. Anahtarlama elemanlarının “kapı” sinyallerinin doğru açılarda oluşturulmasıyla çıkış gerilimin seviyesi ve istenilen seviyenin zaman düzlemindeki boyutları ayarlanılabilir. Anahtarlama açılarının hesaplanmasına dair belirlenmiş ve bu tezde de kullanılan bir metot şöyledir:

$$\sin \theta_i = \frac{2i-1}{n-1} \quad (6.4)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, \frac{n-1}{2} \quad (6.5)$$

Burada “ n ” çıkış gerilim seviyesi sayısı, “ θ_i ” ise anahtarlama açısıdır [54].



Şekil 6.6 Beş katlı Kaskat Evirici için anahtarlama durumları.

Bu hesaplama yönteminde dikkat edilmesi gereken iki nokta vardır. Birincisi Şekil 6.6.’da da görülen, basamak işaretlerinin sönümlendiği açılar θ_1' ve θ_2' bu işaretlerin başladığı açılar θ_1 ve θ_2 ’yi 180° ’ye bütünleyen açılar olduğudur. Yani $\theta_1 = 180 - \theta_1'$ ve $\theta_2 = 180 - \theta_2'$ ’dir. İkinci nokta ise şeklin ikinci kısmındaki yani 180° ’den sonraki açıların birinci kısımdaki açılarının 180° ’er derece faz farklı durumları olduğudur. Yani $\theta_3 = 180 + \theta_1$, $\theta_4 = 180 + \theta_2$, $\theta_3' = 180 + \theta_1'$ ve $\theta_4' = 180 + \theta_2'$ ’dir.

Bir algoritma oluşturmak için şekil 6.6’daki genliği V_{dc} olan iki adet eşit DC kaynakla beslenen beş katlı Kaskat Evirici’ye ait çıkış grafiğini incelersek:

“ n ” yani çıkış gerilimindeki seviye sayısı beştir. Dolayısıyla i ’nin alabileceği değerler kümesi (6.5)’ten $\{1, 2\}$ olarak belirlenir. Beş katlı bir Kaskat Evirici’nin çıkış işaretinin sinüsoidale benzemesi için gereken anahtarlama açıları θ_1 ve θ_2 formül (6.4)’e göre $\theta_1 = 14,475^\circ$ ve $\theta_2 = 48,599^\circ$ olarak bulunur.

Bu bulunan açılar zaman beklmelerine çevrilecek olursa $t_1 = 804$ us, $t_2 = 1895$ us ve $t_3 = 4602$ us olacaktır.

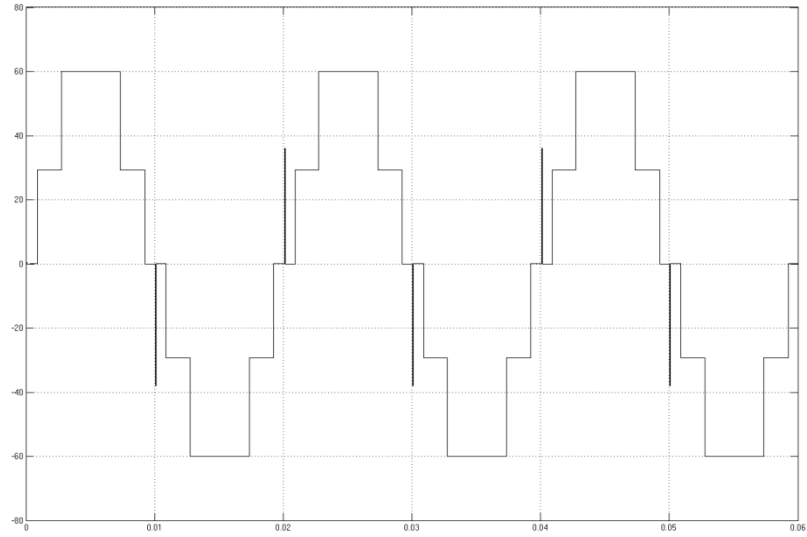
İşareti zaman ekseninde on bölümde incelersek bu değerlere göre anahtarlama açılarının konfigürasyonu ile ilgili algoritma basitçe şu şekildedir.

- 1) S_1 anahtarı iletimde diğer anahtarlar kesimdeyken 804 us bekleme verilir.
- 2) S_1 ve S_4 anahtarları iletimde diğer anahtarlar kesimdeyken 1895 us bekleme verilir.
- 3) S_1 , S_4 ve S_5 anahtarları iletimde diğer anahtarlar kesimdeyken 4602 us bekleme verilir.
- 4) S_1 ve S_4 anahtarları iletimde diğer anahtarlar kesimdeyken 1895 us bekleme verilir.
- 5) S_1 anahtarı iletimde diğer anahtarlar kesimdeyken 804 us bekleme verilir.
- 6) S_3 anahtarı iletimde diğer anahtarlar kesimdeyken 804 us bekleme verilir.
- 7) S_3 ve S_2 anahtarları iletimde diğer anahtarlar kesimdeyken 1895 us bekleme verilir.
- 8) S_3 , S_2 ve S_5 anahtarları iletimde diğer anahtarlar kesimdeyken 4602 us bekleme verilir.
- 9) S_3 ve S_2 anahtarları iletimde diğer anahtarlar kesimdeyken 1895 us bekleme verilir.
- 10) S_3 anahtarı iletimde diğer anahtarlar kesimdeyken 804 us bekleme verilir.

6.4. Gerilim Taşması Sorunu ve Söndürme Devreleri

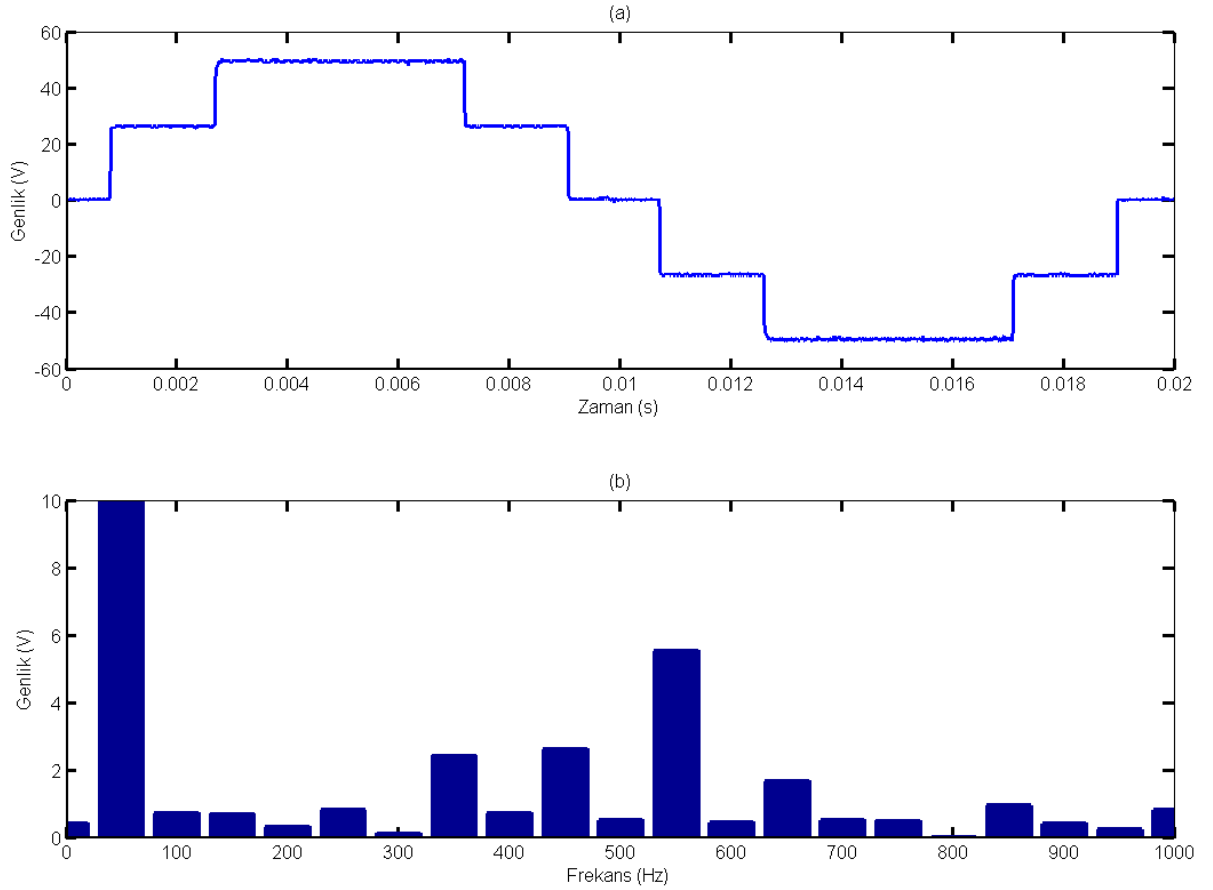
Anahtarlama elemanları kesime girme esnasında anahtar uçlarında hızlı bir gerilim yükselmesine ve iletme girme esnasında hızlı bir akım yükselmesine maruz kalırlar. İletim esnasında sönümlemesiz durumda, akımın yükselmesi çok büyük olabilir. Benzer olarak anahtar, kesim esnasında aşırı gerilimlere maruz kalabilir. Bu durum özellikle hızlı anahtarlama yapan IGBT benzeri modüllerde daha sıklıkla açığa çıkmaktadır [55].

Şekil 6.7’de 30V’luk iki DC kaynakla oluşturulmuş beş katlı Kaskat Evirici’nin karakteristikleri 1000 ohm ve 40 mH olan bir yükle kullanılması durumunda yük üzerinde oluşan gerilim çıkışının SIMULINK programında yapılmış benzetimi gösterilmiştir. Şekilde sıfır geçiş noktalarında meydana gelen gerilim taşmaları görülmektedir.



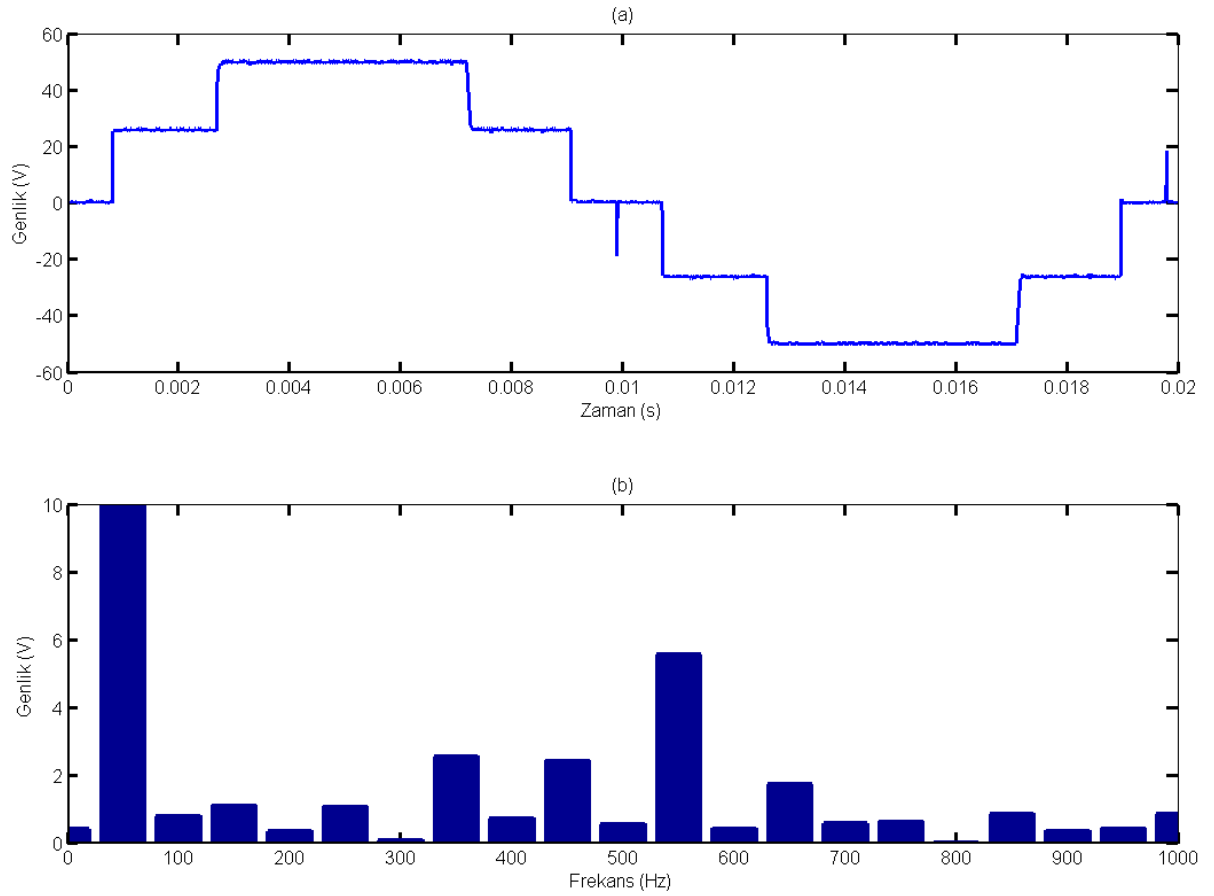
Şekil 6.7 Endüktif yük durumunda oluşan çıkışın SIMULINK benzetimi.

Bu çıkış işareti öncelikle frekans bölgesinde incelenmiştir. Şekil 6.8’de rezistif yük üzerinde görülen bozulmaya sahip olmayan gerilim çıkışının MATLAB kullanılarak oluşturulmuş grafiği ve aynı yordamla alınmış Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform-FFT) gösterilmiştir.



Şekil 6.8 Saf direnç yük karakteristiğine sahip sistemin (a) gerilim çıkışı, (b) FFT’si.

Şekil 6.9 da ise şekil 6.7’deki sistemin gerilim çıkışı ve FFT’si MATLAB yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur.

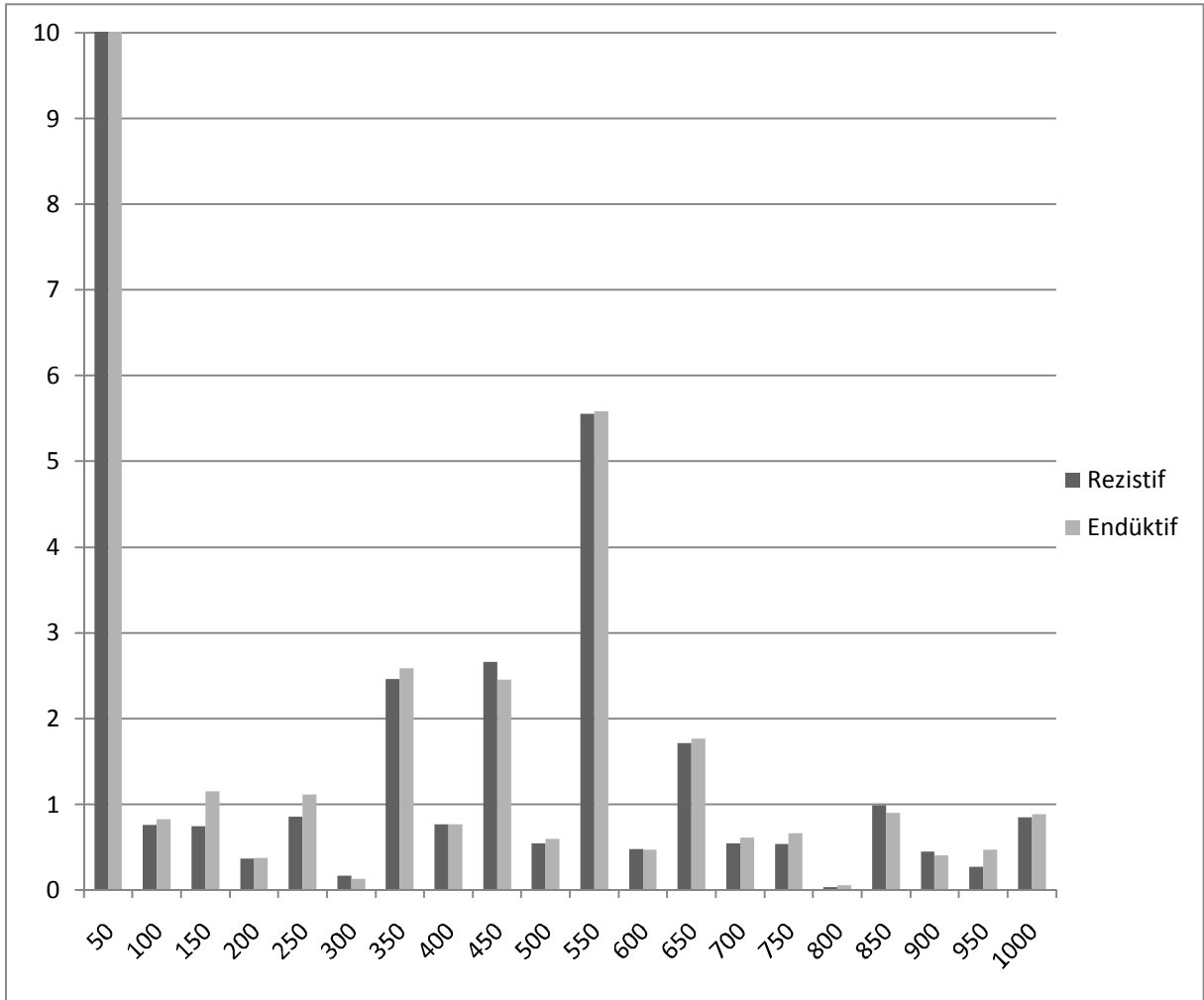


Şekil 6.9 100 ohm direnç ve 40 mH endüktans yük karakteristiğine sahip sistemin
(a) gerilim çıkışı, (b) FFT'si.

Şekil 6.8.(b) ve şekil 6.9.(b)'de gösterilen FFT'ler Şekil 6.10'da karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada iki FFT grafiği arasında büyük farklar olmadığı görülmektedir. Buradan şekil 6.9.(a)'da görülen gerilim taşmasının frekans düzleminde önemli derecede bir etkisinin olmadığı ortaya çıkar. Zaten örnek bazında inceleme yapıldığında 2048 örnekli şekilde gerilim taşması sadece tek örnekte ortaya çıkmaktadır.

Gerilim taşmasının nedeni endüktanstaki biriken enerjinin anahtarlama elemanı üzerinden yayılmasıdır. Bu yük üzerinde gerilimin aşırı yükselmesine neden olur. Devre yüzeylerinde lamine bakır plakalar kullanmak ve kaynak kapasitansını düşük iç endüktanslı seçmek yayılma endüktansını düşürmek için kullanılan donanımsal yöntemlerdir [56]. Bu durumu engellemek için kullanılan bir diğer yöntem sistemde kullanılan anahtarlama elemanlarına paralel olarak sönümleme devreleri eklemektir

[57]. Sönümleme devrelerinin amacı gerilim genliğindeki geçici değişimleri ve dolanımı sınırlamak ve gerilim taşmalarını yok etmektir.



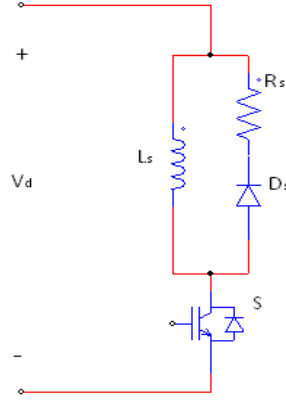
Şekil 6.10. Sırasıyla rezistif yük ve endüktif yük karakteristiğine sahip sistemlerin çıkış şekillerinin FFT'lerinin kıyaslanması.

Anahtarlama elemanlarında kullanılan söndürme devreleri üçe ayrılır:

6.4.1. İletim Söndürme Devreleri

İletim esnasında anahtarlama elemanının üzerinde oluşan aşırı akımları minimize etmek için İletim Söndürme Devresi (Turn-on Snubber) kullanılır. Bu sönümleme devreleri yüksek anahtarlama frekanslarında iletme girme kayıplarını

azaltmak için kullanılır. Bu tip söndürme devreleri anahtarlama elemanına bağlı küçük bir endüktans ve bu endüktansa ters paralel bağlı seri diyot direnç grubundan oluşur. Anahtar kesime girdiğinde endüktansta biriken enerji diyot direnç üzerinde harcanır. Yapının devre şeması şekil 6.11’de görülmektedir [58].



Şekil 6.11 İletim Söndürme devresi.

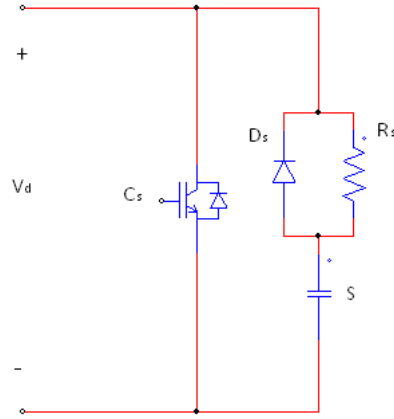
6.4.2. Kesim Söndürme Devreleri

Bu devre kesim esnasındaki problemlerden sakınmak için kullanılır. Amacı anahtarlama elemanın üzerinden geçen akım sıfıra ulaşınca kadar eleman üzerinde sıfır veya çok küçük bir gerilim oluşmasına izin vermektir. Devre bir dekaplaj kapasitörü ve bu kapasitöre seri bağlı bir dirençten oluşmaktadır. Çoğu zaman devrede dirence paralel olarak bir deşarj koruma diyotu da bağlanır. Yapı saf rezistif yüklerle kullanıldığından direnç ve kapasitör değerleri hesaplanırken dolanım endüktansı ihmal edilmiştir. Devre şeması şekil 6.12’de görülmektedir [58].

Kesim Söndürme Devrelerinde söndürme devresinin direnci R_{sn} bara geriliminin anahtar üzerinden akan akıma oranından küçük olacak şekilde seçilir. Söndürme kapasitörü C_{sn} ise:

$$C_{sn} = \frac{1}{V_o^2 f} \quad (6.6)$$

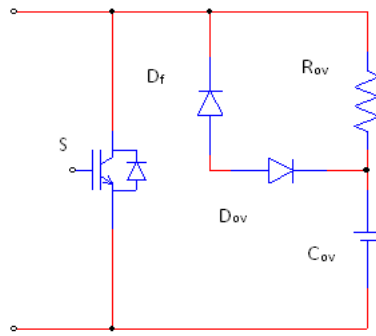
Olacak şekilde belirlenir. Burada V_o DC bara gerilimi, f ise çalışma frekansdır.



Şekil 6.12 Kesim Söndürme Devresi

6.4.3. Aşırı Gerilim Söndürme Devreleri

Kesim Söndürme Devreleri tasarlanırken kaçak endüktanslar ihmal edilir. Eğer kaçak endüktansın etkileri dahil edilirse anahtarlama elemanının kesimi esnasında yük üzerinde bir gerilim taşması oluşur. Bu sorun aşırı gerilim söndürme devresiyle (Overvoltage Snubber Circuit) çözülür. Bu devrenin yapısı Şekil 6.13’de görülmektedir [57][58][59].



Şekil 6.13 Aşırı Gerilim Söndürme Devresi

Bu devredeki söndürme kapasitörünün değeri şöyle hesaplanılabilir.

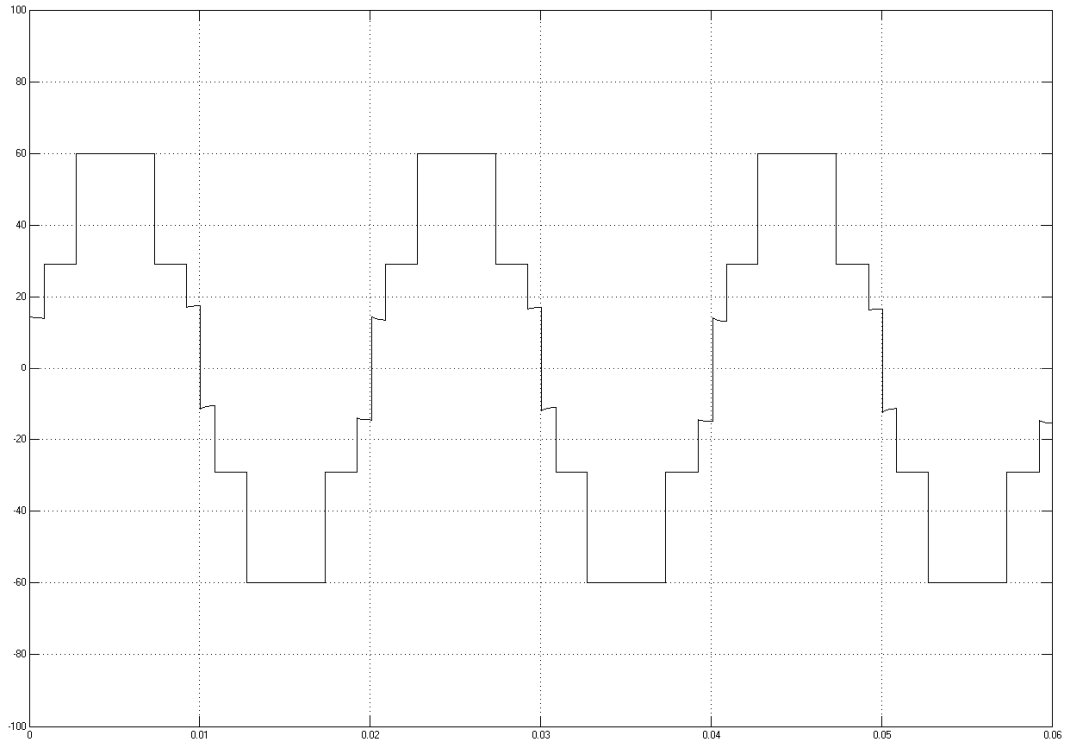
$$C_{ov} = \frac{100k t_{fi} I_o}{V_d} \quad (6.7)$$

Burada “ k ” gerilim taşmasının çıkış genliğine oranı, t_{fi} söndürme yapılacak anahtarlama elemanının akımının düşme zamanı, I_o yük üzerindeki akım, V_d ise bara gerilimidir.

Benzer şekilde söndürme direnci R_{ov} t_{off} anahtarın kapalı kalma süresi olarak alınırsa şöyle hesaplanır [57].

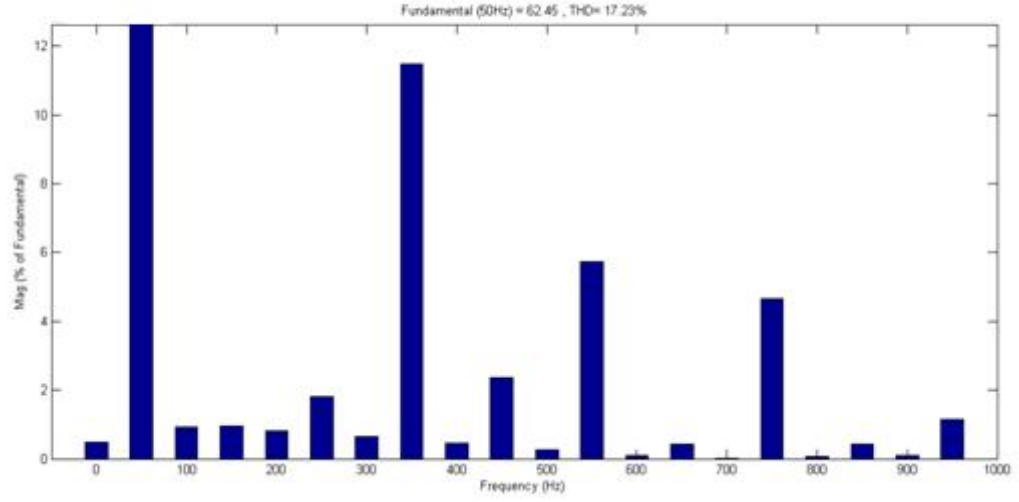
$$R_{ov} \approx \frac{t_{off}}{2.3 C_{ov}} \quad (6.8)$$

Önerilen çok katlı Kaskat Evirici’ye belirlenen değerler doğrultusunda kesim söndürme devresi uygulanırsa oluşan çıkış şekil 6.14’teki gibi olacaktır.



Şekil 6.14 Önerilen çok katlı kaskat eviricinin söndürme devresi uygulandıktan sonraki çıkışı.

Şekil 6.15'te ise şekil 6.14'te çıkış gerilim şekli görülen devrenin FFT'si gösterilmiştir.



Şekil 6.15 Aşırı gerilim söndürme devresi uygulanmış 5 katlı kaskat eviricinin FFT çıktısı.

Aşırı gerilim döndürme devresinin kullanılamamasının nedeni bu devrenin tek anahtarlama elemanının kullanılmasıyla ilgili sorunlara çözüm önermesidir. Bunun yerine kesim söndürme devreleri kullanılmıştır.

7. ÖNERİLEN MODELİN GERÇEKLENMESİ

Tezin bu kısmında daha önce tanımlamaları ve benzetimleri yapılmış olan modele ait topoloji gerçekleştirilmiştir. Önerilen beş katlı Kaskat Evirici yapısı değişik yük tipleriyle denenmiş, elde edilen sonuçlara bağlı olarak devre üzerinde bazı çözüm yolları uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar osiloskop çıktıları olarak eklenmiştir.

7.1. Kullanılan Ekipmanlar

Şekil 6.1’de önerilen beş katlı Kaskat Evirici yapısında birisi besleme dördü köprü katında kullanılmak üzere beş adet anahtarlama elemanı kullanılmıştır. Köprü katının gerçekleştirilmesi için dört adet bağımsız anahtar kullanmak yerine Mitsubishi firmasının PS22A76 model numaralı DIP IPM modülü (Dual In-Line Package Intelligent Power Module) tercih edilmiştir. Bu modülün içinde 3 fazlı bir Tam Köprü Evirici yapısının konfigürasyonuna sahip altı adet IGBT bulunmaktadır.

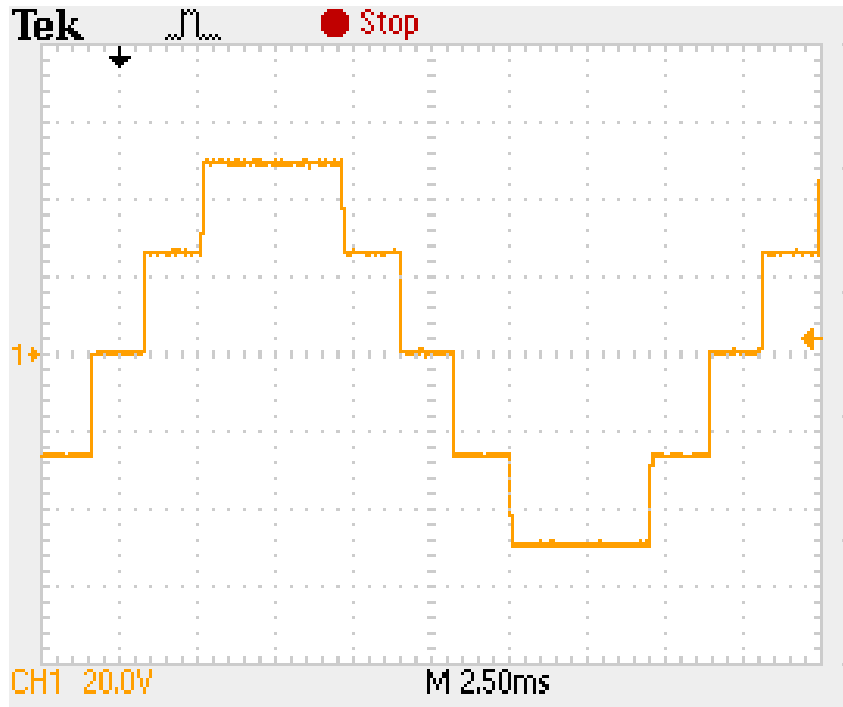
Eviricinin besleme katında yani iki izole kaynak arasında ise önce Mitsubishi firmasının CM3300DY model numaralı IGBT paketi kullanılmıştır. Bu pakette birbiriyle ters-paralel bağlı iki adet IGBT bulunmaktadır. Ancak bu IGBT’yi sürmek için aynı firmanın ürettiği VLA502 model numaralı Hibrid IGBT sürücüsünün (Hybrid IGBT Gate Driver) ve bu sürücüye ait geliştirme kartının kullanılması gerekmektedir. Bu da devreyi karmaşıklaştırmakta ve tezin asıl hedeflerinden birisi olan kaskat evirici sistemini basitleştirme amacından uzaklaştırmaktadır. Bu nedenle güç katında, izole kaynakların arasında anahtarlama elemanı olarak MOSFET tercih edilmiştir. MOSFET’i sürmek için IGBT’deki gibi karmaşık sürücü kartları ve entegreleri yerine sadece bir fotokuplör (photocoupler) entegresine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada International Rectifier firmasının IRFP250N model numaralı güç MOSFET’i kullanılmıştır. Bu MOSFET’in tercih edilmesinin başlıca nedenleri hızlı anahtarlamaı desteklemesi ve 175°C çalışma sıcaklığına dayanabilmesidir. Bu model 200V’luk kaynak-savak gerilimine dayanabilmektedir. Bu çalışmanın şu andaki aşamaları için yeterlidir. Daha yüksek gerilimlerde çalışmak için aynı üreticinin 500V’a kadar dayanabilen IRFP450N modeli tercih edilebilir. Bu MOSFET’leri sürmek için ise Toshiba firmasının TLP250 modeli kullanılmıştır. Bu

model IGBT ve güç MOSFET'leri gibi anahtarlama elemanlarını sürmekte kullanılmaktadır. Devre içerdği fotodetektör (photodetector) sayesinde kaynak izolasyonu da sağlamaktadır.

Sistemde işlemci olarak Microchip firmasının 16F628A mikrodenetleyicisi tercih edilmiştir. Bu tercihin nedeni 16F628A modelinin dahili osilatörünün bulunması ve osilasyon için devreye ekstra donanımsal yük oluşturmamasıdır. Projede PIC16F628A'yı programlamak için C dili ve CCS arayüzü tercih edilmiştir. Koda ait algoritma basit olarak anahtar konfigürasyonun ayarlanıp t_i saniye bekleme verilmesine dayanır. Burada i gerilim seviyelerinin sayısıdır ve uzunluğu anahtarlama açılarına bağlı olarak bulunmaktadır.

7.2. Önerilen Modelin Gerçeklenmesi

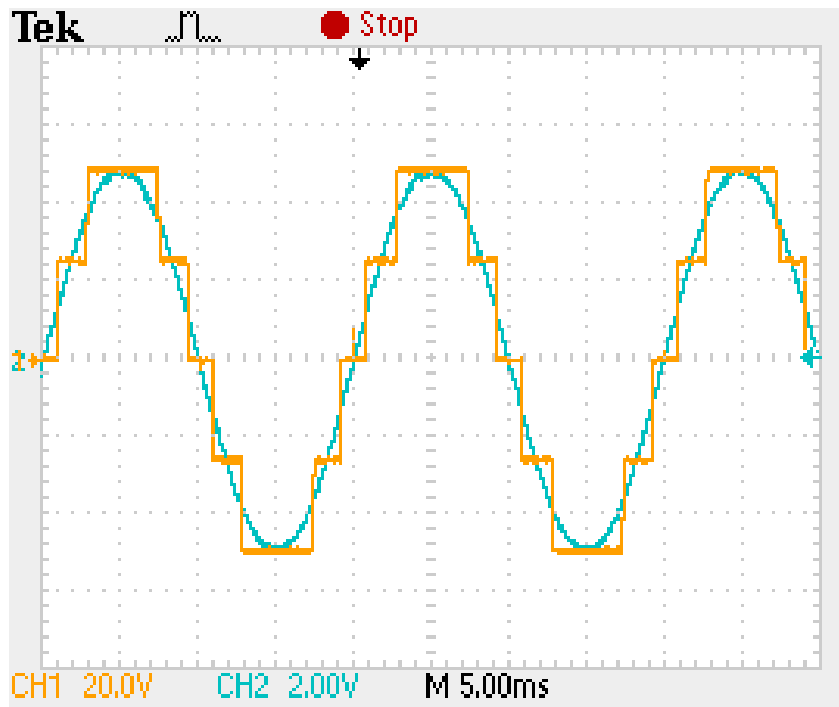
7.2.1. Önerilen Modelin Ohmik Yük ile Gerçeklenmesi



Şekil 7.1 Ohmik yük ile gerçekleştirilmiş beş katlı Kaskat Evirici'nin çıkış gerilimi.

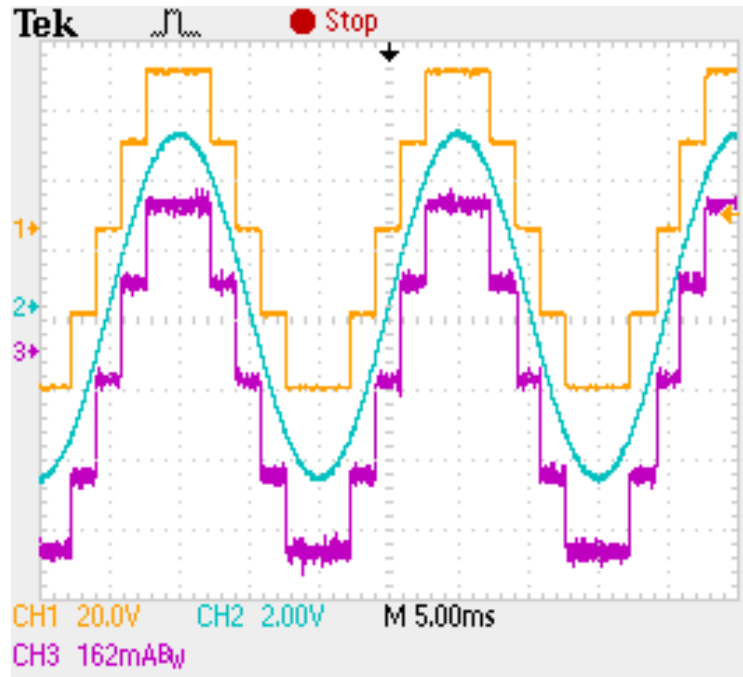
Anahtarları bölüm 6.3'teki algoritma ve anahtarlama açlarına bağlı olarak sürülmüş bir beş katlı Kaskat Evirici'nin çıkış işareti Şekil 7.1'de görülmektedir.

Şekil 7.2'de ise bu işaretin aynı frekansta sinüzoidal bir sinyalle karşılaştırılması gösterilmiştir. Şekildeki her iki işaretin de frekansı 50 Hz'dir. Beş katlı Kaskat Evirici'de kullanılan gerilim kaynaklarının her ikisi de $V_{dc} = 25V$ genliğe sahiptir. Eviriciye ait işaretin tepe değeri $V_p = 50V$ ve fonksiyon jeneratöründen alınan sinüzoidal işaretin tepe değeri ise $V_p = 5V$ 'tur.



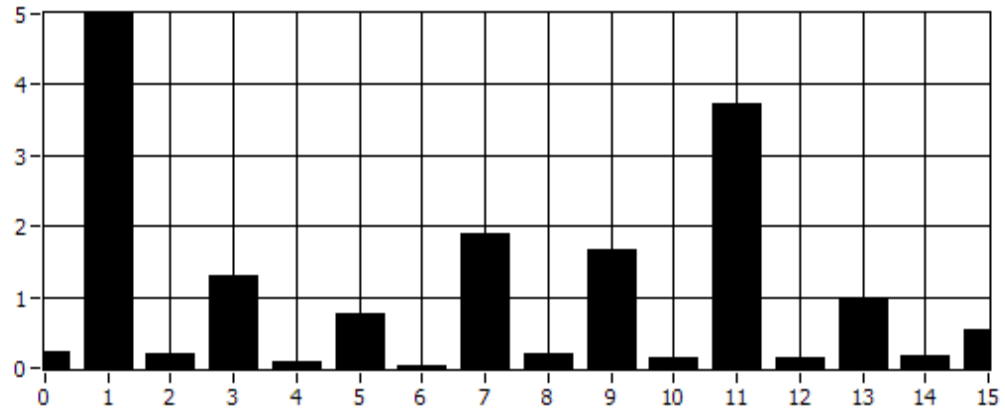
Şekil 7.2 Beş katlı Kaskat Evirici çıkışının aynı frekansta sinüzoidal bir işaretle karşılaştırılması.

Şekil 7.3. ile yukarıdaki gerilimin uygulandığı 100 Ω 'luk bir yük üzerinden akan akım gösterilmiştir. Hem akım hem de gerilim işaretleri sinüzoidal işaretlerle beraber gösterilmiş olup karşılaştırmaya olanak sağlanmıştır.

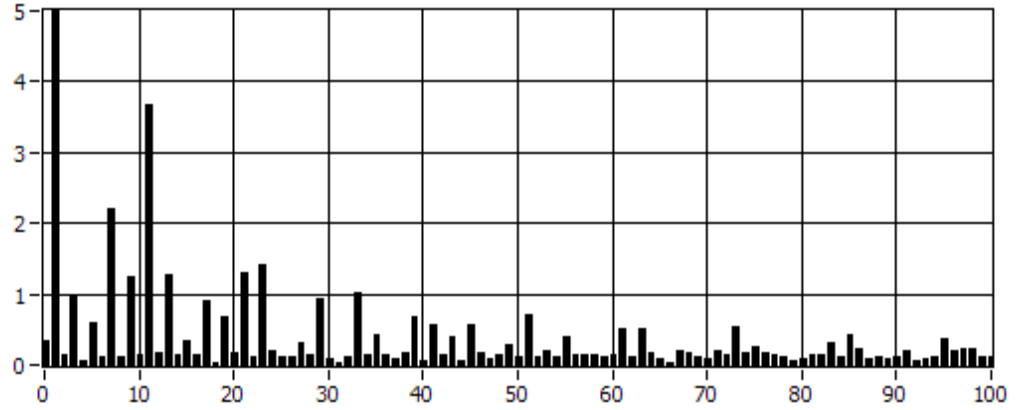


Şekil 7.3 Beş katlı Kaskat Evirici'nin gerilim ve akım çıkışlarının sinüsoidal bir işaret ile karşılaştırılması

Devrenin çıkış geriliminin LABVIEW yazılımıyla gerçekleştirilmiş bir frekans analizörü yardımıyla yapılmış FFT analizi sonucunda elde edilen harmonik gerilimlerine ait 15. Harmoniğe kadar gösteren grafik Şekil 7.4'te, 100. harmoniğe kadar gösteren grafik Şekil 7.5'te verilmiştir.



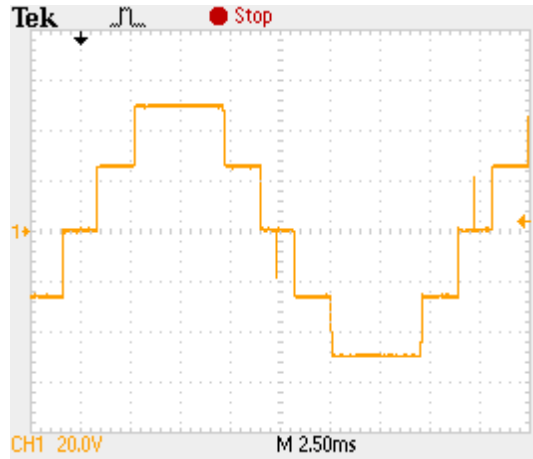
Şekil 7.4 Ohmik yükte gerçekleştirilmiş beş katlı Kaskat Evirici'nin FFT analizi sonucu on beşinci harmoniğe kadar elde edilen harmonik gerilimleri.



Şekil 7.5. Ohmik yük ile gerçekleştirilmiş beş katlı Kaskat Evirici'nin FFT analizi sonucu yüzüncü harmoniğe kadar elde edilen harmonik gerilimleri.

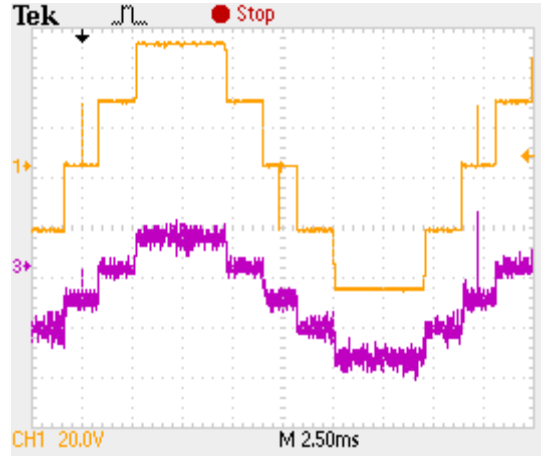
7.2.2. Önerilen Modelin Endüktif Yük ile Gerçeklenmesi

Bölüm 6.4'te önerilen modelin endüktif yük kullanılarak yapılmış benzetimleri oluşan gerilim taşmaları açıklanmıştır. Bu benzetimleri gerçeklemek üzere modelde birbirine seri bağlı 100 Ω 'luk direnç ve 40 mH'lik endüktansa sahip bir yük bloğu oluşturulmuştur.



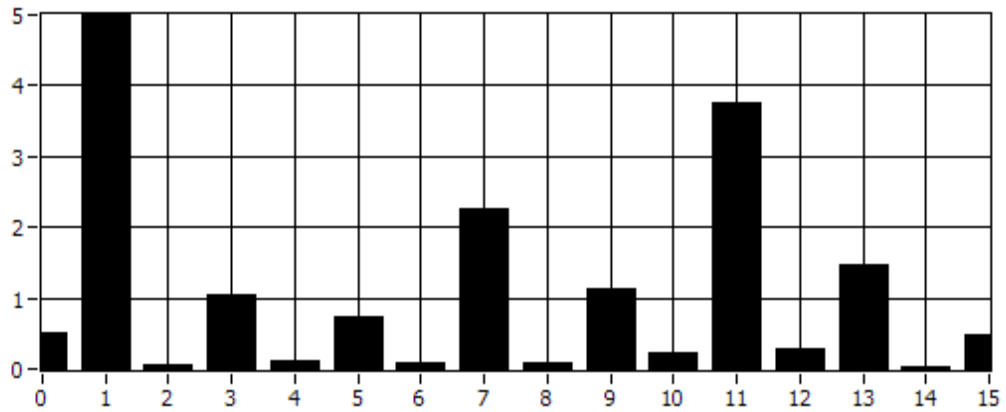
Şekil 7.6 Endüktif yük ile gerçekleştirilmiş beş katlı Kaskat Evirici'nin çıkış gerilimi.

Şekil 7.6'te bu karakteristiklerdeki modelin çıkış gerilimi görülmektedir. Şekil 7.7'de ise yapının gerilim ve akım çıkışlarındaki bozulmalar birlikte gösterilmiştir.

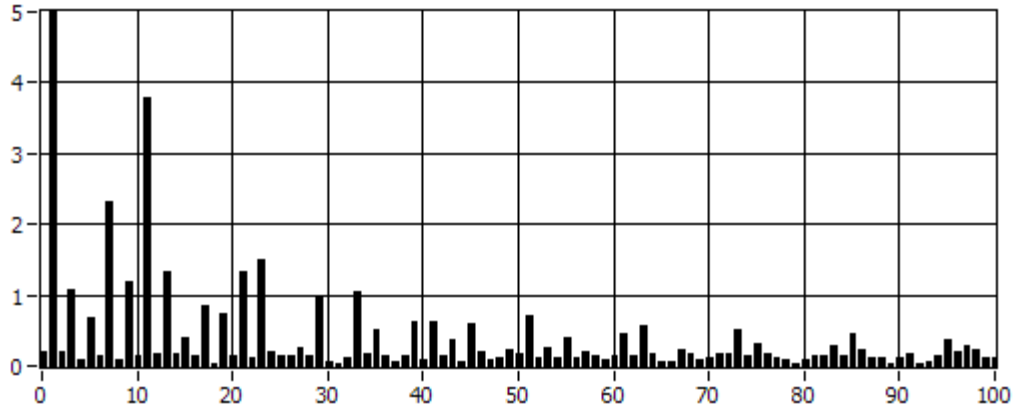


Şekil 7.7 Endüktif yük ile gerçekleştirilmiş beş katlı Kaskat Evirici'nin çıkış gerilimi ve akımı.

Devrenin çıkış geriliminin LABVIEW yazılımıyla gerçekleştirilmiş frekans analizörü yardımıyla yapılmış FFT analizi sonucunda elde edilen harmonik gerilimlerine ait on beşinci harmoniğe kadar gösteren grafik Şekil 7.8'de yüzüncü harmoniğe kadar gösteren grafik ise şekil 7.9'dadır.



Şekil 7.8.Endüktif yükte gerçekleştirilmiş beş katlı Kaskat Evirici'nin FFT analizi sonucu on beşinci harmoniğe kadar elde edilen harmonik gerilimleri.



Şekil 7.9.Endüktif yükte gerçekleşmiş beş katlı Kaskat Evirici'nin FFT analizi sonucu yüzüncü harmoniğe kadar elde edilen harmonik gerilimleri.

8. SONUÇLAR VE GELECEĞE YÖNELİK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada Yakıt hücreleri ve Güneş pilleri gibi küçük genlikte çıkışlara sahip yenilenebilir enerji kaynaklarının karmaşık sistemler kurulmadan kabul edilebilir gerilim seviyelerinde çıkış verebilecek şekilde kullanılabilmesi için varolan bir metod olan çok katlı eviriciler tanıtılmış, bu evirici türlerinden izole doğru gerilim kaynaklarıyla çalışmaya en müsait olanı kaskat eviriciler incelenmiş ve yeni bir kaskat evirici modeli önerilmiştir. Çalışmada bu üç Yenilenebilir Enerji Kaynağı'nın çıkış işaretleri DC kabul edilmiştir ve gerçekleştirilmede eşit genlikte doğru gerilim kaynakları kullanılmıştır..

Var olan sistemlerin en büyük dezavantajlarından birinin tümleşik olan evirici yapısının arıza durumunda devre dışı kalması ve sürecin kesintiye uğramasıdır. Karmaşıklaşan sistem yapıları, sürücü kartları, işlemci birimleri göz önüne alındığında soruna açıktır. Önerilen modelde sistemin yapısı basitleştirilerek hem mali açıdan tasarruf edilmesi hem de sayıca azalan eleman sayısı ile beraber sistemin arıza sıklığının azaltılması hedeflenmiştir.

Önerilen modelin var olan modellerle matematiksel kıyaslaması yapılmış bu kıyaslamalar sonucunda aynı çıkış işaretini elde etmek için kullanılan önerilen modelin geleneksel çok katlı Kaskat Evirici topolojisine göre on bir katlı yapıda %60 daha az anahtarlama elemanına ihtiyaç duyduğu gösterilmiştir.

Önerilen model olanaklar doğrultusunda değişik yük karakteristiklerinde denenmiş geleneksel eviriciyle herhangi bir farkı olmadığı görülmüştür. Endüktif yük uygulanması durumunda ortaya çıkan gerilim taşması gibi sorunlara literatürde yer alan söndürme devreleriyle çözüm bulunmaya çalışılmış, bu yapının devre şemaları ve benzetim sonuçları çalışmaya eklenmiştir. Çalışma frekansı ve genliği nedeniyle meydana gelen gerilim taşmasına engel olmak için benzetimi yapılan söndürme devresinin gerektirdiği elemanların değerleri kapasitör için çok yüksek ve direnç için çok düşüktür. Bu nedenle söndürme devresi gerçekleştirilememiştir.

Yenilenebilir enerji kaynakları fosil yakıtların tükenmeye başladıkları göz önünde bulundurulursa enerji alanında ilgi odağı olmaya ve geliştirilmeye açıktır. Bu çalışmanın devamında, olanaklar doğrultusunda yüksek frekans ve daha yüksek gerilim şartlarında çalışmalar yapılabilir, yüksek endüktansa sahip yükler uygulanarak oluşan gerilim bozulmaları için söndürme devreleri başta olmak üzere farklı çözümler gerçekleştirilip elde edilen yapı motor benzeri makineler sürmekte kullanılabilir.

Ayrıca önerilen modeldeki izole doğru gerilim kaynaklarının eşit genliklerde değil farklı genliklerde olması durumu üzerine çalışılıp, bu durumlar için yeni anahtarlama stratejileri geliştirilip adı geçen yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşan hibrid bir sistem gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Avinç, A, “Değişik Enerji Kaynakları ve Çevreye Etkileri”, Çev-Kor, Cilt 7, Sayı 7, (1998), 19-23.
- [2] Energy [R]evolution, European Renewable Energy Council, Greenpeace International. Jan. 2007.
- [3] Plugging the Gap: A Survey of World Fuel Resources and Its Impact on the Development of Wind Energy, Global Wind Energy Council, Sept. 2006.
- [4] R. E. H. Sims, H. H. Rogner and K. Gregory, “Carbon emission and mitigation cost comparisons between fossil fuel, nuclear and renewable energy resources for electricity generation.” Energy Policy 31 (2003), pp. 1315–1326.
- [5] R. S. Kovats, A. Haines, “Global Climate Change and Health: Recent Findings and Future Steps” CMAJ Feb 2005, 172.
- [6] R. Bull, “Renewable energy today and tomorrow.” Proc. IEEE, vol. 89, no. 8, pp. 1216-1226, Aug. 2001.
- [7] R. L. Ottinger, R. Williams, “Renewable Energy Sources for Deveopment” 32 Envntl. L. 331, 340 (2002).
- [8] C. Kerschner, M. Orta-Martinez, I. O. Olaizola, “Peak-Oil from an ecological economist’s point of view” ESEE 2009, Jul 2009
- [9] [Http://europa.eu/legislation_summaries/energy/renewable_energy/127035_en.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/energy/renewable_energy/127035_en.htm)
- [10] IEA, “Renewable Energy Into the Mainstream”, Netherlands, 2002.

- [11] C. Singer, A Short History of Scientific Ideas to 1900, Oxford University Press, 1959, p. 151
- [12] L. Darden, The Nature of Scientific Inquiry, (1998).
- [13] S. W. Hawking, The Universe in a Nutshell, Bantam Books, (2001).
- [14] E. M. Burbidge, G. R. Burbidge, W. A. Fowler, F. Hoyle, "Synthesis of the Elements in Stars". Reviews of Modern Physics 29 (4) (1957).pp: 547–650
- [15] M. Woolfson, "The origin and evolution of the solar system". Astronomy & Geophysics (2000).41: 1.12
- [16] A. Bonanno, H. Schlattl, L. Paternò, "The Age of the Sun and the Relativistic Corrections in the EOS". Astronomy and Astrophysics (2008), 390: 1115–1118.
- [17] M. A. Zeilik, S. A. Gregory, Introductory Astronomy & Astrophysics (4th ed.). Saunders College Publishing. (1998), p. 322
- [18] E. Lorenzo, Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems (1994).
- [19] Y. T. Tan, Impact on the Power System with a Large Penetration of Photovoltaic Generation, University of Manchester, Feb 2004.
- [20] A.V. Herzog, T.E. Lipman, D.M. Kammen, Renewable Energy Sources, Our fragile world: challenges and opportunities for sustainable development, vol. 1, EOLSS Publishers Co. Ltd. (2001), pp. 505–536
- [21] A. Wyatt, Electric Power: Challenges and Choices. Book Press Ltd., Toronto 1986

- [22] J. G. Slootweg, E. De Vries, Inside Wind Turbines–Fixed vs. Variable Speed, Renewable Energy World, Jan-Feb 2003
- [23] A. Grauers, Efficiency of Three Wind Energy Generation Systems, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.11, No. 3, September 1996, pp. 650-657
- [24] G. Wand, "Fuel Cells History, part 1". Johnson Matthey plc. p. 14.
- [25] W. R. Grove, "On a Gaseous Voltaic Battery", Philosophical Magazine and Journal of Science vol. XXI (1842), pp 417-420.
- [26] Jules Verne, The Mysterious Island, 1874.
- [27] The PureCell 200 - Product Overview". UTC Power. Retrieved 2007-05-27.
- [28] E. Sunan, "Çok Girişli DC/DC Çevirici Tasarımı" Yüksek Lisans Tezi, G.Y.T.E. Ağustos 2009.
- [29] M. H. Rashid, Power Electronics Circuits, Devices, and Applications. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1993.
- [30] B. K. Bose, Power Electronics and AC Drives. Englewd Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1986
- [31] Y. Tadros, S. Salama, R. Höf, "Three level IGBT Inverter". 23rd Ann. Power Electron. Specialists Conf., Toledo, Spain, 1992, pp. 46-52.
- [32] Blake, C., Bull, C.: 'IGBT or MOSFET: Choose wisely' , International Rectifier Application Notes, International Rectifier

- [33] H. L. Liu, N. S. Choi, G. H. Cho, "DSP Based Space Vector PWM for Three-Level Inverter with DC-Link Voltage Balancing", IEEE Industrial Electronics Conference, Vol. 1, pp. 197-203.
- [34] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-20, p. 625, 1984.
- [35] J. Rodriguez, J. S. Lai, and F. Z. Peng, "Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, no. 4, pp. 724–738, Aug. 2002.
- [36] B. Ozpineci, L. M. Tolbert, Z. Du, "Optimum fuel cell utilization with multilevel inverters," IEEE Power Electronics Specialists Conference, 20-25 June 2004, Aachen, Germany.
- [37] S. Sirisukprasert, "Optimized harmonic stepped-waveform for multilevel inverter," M.S. thesis, Dept. Elect. Eng., Virginia Polytechnic Inst. State Univ., Blacksburg, VA, 1999.
- [38] P. M. Bhagwat and V. R. Stefanovic, "Generalized structure of a multilevel PWM inverter," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 19, no 6, pp. 1057-1069, Nov./Dec. 1983.
- [39] J.-S. Lai and F. Z. Peng, "Multilevel converters—A new breed of power converters," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 32, pp. 509–517, May/June 1996.
- [40] F. Z. Peng, J. W. McKeever, D. J. Adams, "Cascade Multilevel Inverters for Utility Applications" *Proc. of the Industrial Electronics, Control and Instrumentation Conference (IECON)*, 1997

- [41] R. Teodorescu, F. Beaabjerg, J. K. Pedersen, E. Cengelci, S. Sulistijo, B. Woo, and P. Enjeti, "Multilevel converters — A survey," in Proc. European Power Electronics Conf. (EPE'99), Lausanne, Switzerland
- [42] A. Nabae, I. Takahashi, H. Akagi, "A new neutral point clamped PWM inverter" IEEE Trans. Ind. Appl., IA-17, no. 5, Sep./Oct. 1981, 509–517.
- [43] R.H. Baker, High-Voltage Converter Circuit, U.S. Patent Number 4,203,151, May 1980.
- [44] M. Fracchia, T. Ghiara, M. Marchesoni, and M. Mazzucchelli, "Optimized Modulation Techniques for the Generalized N-Level Converter", Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialist Conference, volume2, pages 1205-1213, 1992.
- [45] K. Yamanaka, K. Yamada, A. Kumagae, and T. Terada, Three-Level Neutral Point Clamping Type Inverter Circuit, U.S. patent number 06,226,192, assigned to Kabushiki Kaisha Yaskawa Denki, May 2001.
- [46] T. Cunningham, "Cascade multilevel inverters for large hybrid-electric vehicle applications with variant dc sources," M.S. thesis, Univ. Tennessee, Knoxville, 2001.
- [47] W. Shen, I. Maswood, "a novel medium voltage drive system adopting pwm-she technology" IEEE Applications 2000
- [48] L. Tolbert, F.-Z. Peng, and T. Habetler, "Multilevel converters for large electric drives," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 35, pp. 36–44, Jan./Feb. 1999.
- [49] P.W. Hammond, Medium Voltage PWM Drive and Method, U.S. patent number 05,625,545, assigned to Halmar Robicon Group, April 1997.

- [50] G.A. Duba, E.S. Thaxton, and J. Walter, Modular Static Power Converter Connected in a Multi-Level, Multi-Phase, Multi-Circuit Configuration, U.S. patent number 05,933,339, assigned to Electric Boat Corporation, August 1999.
- [51] Y. Khersonsky, *Step Switched PWM Sine Generator*, U.S. patent number 06,556,461, assigned to Power Paragon Incorporated, April 2003.
- [52] L. Tolbert and F. Peng, "Multilevel converters as a utility interface for renewable energy systems," in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Summer Meet., 2000, pp. 1271–1274.
- [53] Ceglia, G.; Guzman, V.; Sanchez, C.; Ibanez, F.; Walter, J.; Gimenez, M.I.; "A New Simplified Multilevel Inverter Topology for DC–AC Conversion". IEEE Trans. On Power Elec. Vol. 21, No. 5, 2006. pp.1311 –1319.
- [54] S. Çamur, B. Arifoğlu, E. Beşer, E. K. Beşer, E, "A Novel Topology for Single-Phase Five-Level Inverter Compared with H-Bridge Inverter" : IEEE Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006.pp. 556-560
- [55] Y. Zhang, S. Sobhani, R. Chokhawala, "Snubber Considerations for IGBT Applications", Application Note International Rectifier, 1995, pp. 1-9
- [56] H. Vetter "High Performance Capacitors for Low-Inductance Circuits" Power Conversion, June, 1991
- [57] R. S. Chokhawala, S. Sobhani, "Switching voltage transient protection schemes for high-current IGBT modules," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 33, pp. 1601–1610, Nov./Dec. 1997.
- [58] W. P. Robbins, Snubbers -1, 1997.

- [59] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications and Design. New York: Wiley, 1996.

ÖZGEÇMİŞ

Türev SARIKURT 1983 yılında İzmir’de doğdu. İlk ve Orta öğrenimini İzmir’de tamamladıktan sonra 2001 yılında İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Elektrik- Elektronik Mühendisliği Bölümünde yükseköğrenimine başladı. 2006 yılında mezun olduktan sonra 2007 Ocak ayında Gebze Yüksek teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda lisansüstü eğitime başladı ve halen devam etmekte.