

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**TEK FAZLI 7 SEVİYELİ KASKATLI YARI EMPEDANS
KAYNAKLI TAM KÖPRÜLÜ EVİRİCİNİN TASARIM VE
ANALİZLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HİDAYET TALHA ULUŞAN

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2024

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**TEK FAZLI 7 SEVİYELİ KASKATLI YARI EMPEDANS
KAYNAKLI TAM KÖPRÜLÜ EVİRİCİNİN TASARIM VE
ANALİZLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HİDAYET TALHA ULUŞAN

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2024

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

HİDAYET TALHA ULUŞAN

ÖZET

TEK FAZLI 7 SEVİYELİ KASKATLI YARI EMPEDANS KAYNAKLI TAM KÖPRÜLÜ EVİRİCİNİN TASARIM VE ANALİZLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HİDAYET TALHA ULUŞAN

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ SADIK ÖZDEMİR)

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2024

Günümüzde enerji, artık her alanda kullanılan önemli ve vazgeçilmez bir kaynaktır. Geçmiş dönemlerde insanlar fosil kaynaklarla üretilen enerjiyi daha çok kullanırlarken artık fosil yakıtların artan fiyatları, çevre kirliliği sonucu çevre bilincinin oluşması, otomotiv sektöründe karbondioksit salınımının azaltılma hedefleri, genel olarak fosil enerji rezervlerinin tükenişi, teknolojik gelişmeler, artan enerji talebi gibi durumlar insanları yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları güneş, jeotermal, rüzgâr, biokütle ve hidroelektrik olarak sıralanabilir. Yenilenebilir enerji üretiminin ve elektrikli taşıtların giderek daha popüler hale gelmesiyle birlikte, çok seviyeli eviricilerin avantajları ve büyük güç ölçeği/yüksek voltajlı şebeke bağlantısı talepleri nedeniyle çok seviyeli evirici tabanlı güç sistemlerinin uygulamaları ve araştırma çalışmaları sürekli artmaktadır. Kaskatlı çok seviyeli evirici (CMLI) güç sistemine uygulandığında birçok avantajlara sahiptir, çünkü sistem verimliliğini artırmak ve transformatör olmadan yüksek voltajlı / yüksek güçlü şebeke çıkış gerilimi elde edilmesini sağlayabilir. Bununla birlikte, geleneksel CMLI tabanlı güç sisteminde, her modül bir buck eviricidir ve dc-link gerilimi giriş gerilimi ile değişir. Z kaynak (ZS)/quasi-Z kaynak (qZS) CMLI'lar (ZS/qZS-CMLI'lar), ZS/qZS eviricilerin (ZSI/qZSI) tek bir aşamada buck/boost ve inversiyonu sayesinde ZS/qZS ağı ve H-köprü modülünü bir araya getirerek geleneksel CMLI'nın yukarıda bahsedilen dezavantajının üstesinden gelebilmek için çözüm üretebilmektedir.

Bu tezde yarı-empedans kaynaklı, tam köprülü kaskatlı 7-seviyeli bir evirici devresinin tasarımı ve Matlab/Simulink ortamında simülasyon analizleri yapılmıştır. Tasarlanan evirici kaskat yapısıyla, modül eklenerek veya çıkarılarak istenilen seviyede çıkış gerilimi üretebilme kapasitesine sahiptir. Yarı-empedans kaynaklı bir evirici olması verimli, düşük maliyetli ve boyut avantajı sağlayan çıkışta gerilimi tek kademede yükseltip/alçaltabilen bir evirici olmasını sağlamıştır. Ayrıca, çok seviyeli bir evirici olması çıkış geriliminin sinüse yakın olmasını, böylece çıkışta kullanılacak filtre boyutunun azaltılmasını sağlayacaktır.

ANAHTAR KELİMELER: YARI-EMPEDANS KAYNAKLI EVİRİCİ, KADEMELİ ÇOK SEVİYELİ EVİRİCİ, YÜKSELTİCİ-DÜŞÜRÜCÜ, DARBE GENİŞLİK MODÜLASYONU

ABSTRACT

DESIGN AND ANALYSIS OF SINGLE PHASE 7-LEVEL CASCADE FULL BRIDGE INVERTER WITH HALF IMPEDANCE SOURCE

MSC THESIS

HIDAYET TALHA ULUSAN

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

MECHANICAL ENGINEERING

(SUPERVISOR: ASSİST. PROF. DR. SADIK OZDEMİR)

DENİZLİ, AUGUST 2024

Energy is an essential and indispensable resource used in every field. While people used the energy produced by fossil resources more in the past, nowadays, the increasing prices of fossil fuels, the emergence of environmental awareness due to environmental pollution, the targets of reducing carbon dioxide emissions in the automotive sector, the depletion of fossil energy reserves in general, technological developments, and increasing energy demand have directed people to renewable energy sources. Renewable energy sources are solar, geothermal, wind, biomass and hydroelectric. With the increasing popularity of renewable energy production and electric vehicles, the applications and research studies of multi-level inverter-based power systems are constantly increasing due to the advantages of multi-level inverters and the demands for significant power scale/high voltage grid connection. Cascade multi-level inverter (CMLI) has many benefits when applied to the power system because it can increase the system efficiency and provide high voltage/high power grid output voltage without a transformer. However, in the traditional CMLI-based power system, each module is a buck inverter, and the DC-link voltage varies with the input voltage. Z source (ZS)/quasi-Z source (qZS) CMLIs (ZS/qZS-CMLIs) can overcome the disadvantages mentioned above of traditional CMLI by combining the ZS/qZS network and the H-bridge module through the buck/boost and inversion of the ZS/qZS inverters (ZSI/qZSI) in a single stage

KEYWORDS: YARI-Z-KAYNAKLI ÇOK SEVİYELİ İNVERTÖR, CASCADED MULTİLEVEL INVERTER (CMLI), BOOST-BUCK, PULSE WIDTH MODULATION (PWM)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	iv
TABLO LİSTESİ	v
SEMBOL LİSTESİ.....	vi
ÖNSÖZ.....	vii
1. GİRİŞ VE LİTERATÜR ÖZETİ.....	1
2. MATERYAL VE YÖNTEM	19
2.1 Önerilen Asimetrik Beslemeli Yarı-Empedans Kaynaklı Yarım-Köprü Çok Seviyeli Evirici Topolojisi	21
3. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI	26
4. TARTIŞMA VE SONUÇ	32
5. KAYNAKLAR.....	33
6. ÖZGEÇMİŞ	36

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Beş seviyeli qzs evirici (Liu ve diğ. 2014 ^a).....	8
Şekil 1.2: Yedi-seviyeli qzs evirici yapısı (Sun ve diğ. 2014).....	9
Şekil 1.3: Yedi seviyeli şebeke bağlı qZS evirici mimarisi (Liu ve diğ. 2014 ^b)10	
Şekil 1.4: PV tabanlı şebeke bağlı yedi-seviye qzs evirici (Sun ve diğ. 2015)	11
Şekil 1.5: Beş-seviye qzs evirici devre (Mohammadi ve Akhavan, 2015).....	12
Şekil 1.6: Asimetrik beş seviyeli qzs evirici devre mimarisi (Umarani ve Seyezhai 2015).....	13
Şekil 1.7: PV tabanlı yedi-seviyeli tam köprülü qZS evirici mimarisi (Zhang ve diğ. 2017)	14
Şekil 1.8: Beş-seviyeli evirici mimarisi (Sharifi ve diğ. 2020)	15
Şekil 1.9: BES tabanlı yedi-seviye qzs evirici mimarisi (Horrillo-Quintero ve diğ. 2023).....	16
Şekil 1.10: Modüler çok seviyeli qzs evirici mimarisi (Lei ve diğ. 2024)	17
Şekil 1.11: PV tabanlı yedi seviyeli qzs evirici mimarisi (Carrasco-González ve diğ. 2024)	18
Şekil 2.1: Önerilen devre mimarisi	19
Şekil 2. 2: Anahtarlama durumları için örnek eşdeğer devreler. (a) $S_{1234} =$ $0\ 1\ 0\ 1$ (b) $S_{1234} = 1\ 0\ 1\ 0$ (c) $S_{1234} = 1\ 0\ 0\ 1$ (d) $S_{1234} =$ $1\ 1\ 1\ 1$ (Shoot-through).....	25
Şekil 3.1: Kontrol blok diyagramı	28
Şekil 3.2: Shoot-through anahtarlama durumunun genel devre davranışı.....	29
Şekil 3.3: Önerilen devrenin akım/gerilim çıkış grafiği	30
Şekil 3.4: Önerilen devrenin çıkış gerilimi grafiği	30
Şekil 3.5: Önerilen devrenin oturma zamanı	31
Şekil 3.6: Önerilen devrenin çıkış gerilimi grafiği-2.....	31

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3. 1: Önerilen devre mimarisinde belirlenen parametreler	26
Tablo 3. 2: Önerilen yedi seviyeli CMLI mimarisi için anahtarlama şeması ..	27

SEMBOL LİSTESİ

EMI	:	Elektromanyetik girişim
DC	:	Doğru akım
AC	:	Alternatif akım
MMC	:	Modüler çok seviyeli dönüştürücü
HVDC	:	Yüksek voltajlı doğru akım sistemleri
THD	:	Toplam harmonik bozunum
ZSI	:	Empedans kaynaklı evirici
qZSI	:	Yarı-empedans kaynaklı evirici
PV	:	Fotovoltaik sistem
PWM	:	Darbe Genişlik Modülasyonu
MPPT	:	Maksimum güç noktası takibi
CMLI	:	Kaskatlı çok seviyeli evirici
PI	:	Oransal+Integral kontrol
APF	:	Aktif güç filtresi
YSA	:	Yapay sinir ağları algoritması
MqZS	:	Modifiye edilmiş yarı-empedans kaynaklı evirici
M	:	Modülasyon indeksi
CHB	:	Kaskatlı H-Köprü evirici
MPC	:	Model öngörülü kontrol
EMS	:	Enerji yönetim sistemi
BESS	:	Batarya enerji depolama sistemi
$V_{PN1,2,3}$:	DC bara gerilimi
$V_{in1,2,3}$:	Giriş gerilimi
C_f	:	Filtre kondansatörü
C_r	:	Rezonans Kondansatörü
D_n	:	n. diyot
f_s	:	Anahtarlama frekansı
I_{in}	:	Giriş akımı
I_o	:	Çıkış akımı
L_f	:	Filtre indüktansı
L_1, L_2, L_3	:	Faz gerilimleri
P_{in}	:	Giriş gücü
P_o	:	Çıkış gücü
R_L	:	Çıkış yükü
S_1, S_2	:	Anahtarlama elemanları
V_o	:	Çıkış gerilimi

ÖNSÖZ

Yüksek lisans dönemimin her anında gerek ders ve tez aşamalarında gerekse de ders harici konularda sonsuz desteğinden dolayı bir danışman sıfatından ziyade kendisini değerli bir ağabeyim olarak gördüğüm değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Sadık ÖZDEMİR'e sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Bu tezde simülasyonu yapılan devrenin kontrol şemasının oluşturulmasında, devrenin genel şablonunun belirlenmesinde ve tez yazım sürecinde diğer hususlarda da sunduğu katkılardan ötürü Doç. Dr. Zafer ORTATEPE'ye sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Hayatımdaki her kararımın arkasında duran, ellerinden gelen maddi ve manevi tüm desteği vererek beni motive eden ve çalışma azmimi her daim artıran annem, babam ve bütün dostlarıma içten teşekkür ederim.

“Zaman, insana iki şey öğretir. İstedğin şeyi kazanmak uğruna emek vermeyi, emek verdiğin şey seninle yetinmiyorsa ondan vazgeçmeyi.”

1. GİRİŞ VE LİTERATÜR ÖZETİ

Çok seviyeli eviriciler (multilevel inverters), güç elektroniği alanında yaygın olarak kullanılan cihazlardır ve ilk olarak Baker ve Bannister (1975) tarafından sunulmuştur. Bu eviriciler, özellikle yüksek güçlü ve yüksek gerilimli uygulamalarda tercih edilirler. Temel olarak, çok seviyeli bir evirici, çıkış dalga formunu iyileştirmek ve harmonik içeriği azaltmak amacıyla daha fazla anahtarlama seviyesi kullanır (Baker 1980). Bu da daha yüksek verimlilik ve daha düşük elektromanyetik girişim (EMI) ile sonuçlanır.

Çok seviyeli eviriciler, genellikle üç ana türe ayrılır:

- **Kademeli H-Köprü Evirici (Cascaded H-Bridge Inverter):** Bu yapı, bağımsız DC kaynaklarına sahip H-köprü modüllerinin seri olarak bağlanmasıyla oluşturulur. Her modül, belirli bir seviyede bir gerilim sağlar ve bu seviyeler birleştirilerek daha yüksek çözünürlüklü bir çıkış gerilimi elde edilir. Bu tür eviriciler, modüler yapısı ve yüksek çıkış kalitesi ile bilinir.

- **Diyot Kıskaçlı (Diyot Kelepçeli) Evirici (Diode-Clamped Inverter):** Diyot kıskaçlı eviriciler, anahtarlama cihazları ile gerilim seviyelerini dengelemek için diyotlar kullanır. Bu yapı, özellikle orta gerilimli uygulamalarda kullanılır. Çok sayıda diyotun kullanılması, devrenin karmaşıklığını artırır ancak çıkış dalga formunu iyileştirir.

-**Kapasitör Kıskaçlı Evirici (Flying Capacitor Inverter):** Kapasitör kıskaçlı eviriciler, gerilim seviyelerini dengelemek için kapasitörleri kullanır. Bu tür eviriciler, çıkış gerilimindeki harmonik içeriği minimuma indirmek için kapasitörlerin stratejik yerleşimi ve dengelemesini sağlar (Bhagwat ve Stefanovic 1983) (Meynard ve Foch 1992) (Nabae ve diğ. 1981)

Çok seviyeli eviriciler, daha fazla gerilim seviyesine sahip oldukları için, çıkış dalga formlarının sinüs dalgasına daha yakın olmasını sağlar, bu da harmonik bozunumu azaltır. Her bir anahtar, sadece belirli bir gerilim farkında çalıştığı için anahtarlama kayıpları azalır. Daha düşük harmonik bozunum ve anahtarlama

kayıpları, daha yüksek toplam verimliliğe yol açar. Çok seviyeli eviriciler, geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılır: Güneş ve rüzgâr enerjisi sistemlerinde, DC'den AC'ye dönüşümde verimliliği artırmak için kullanılır. HVDC sistemlerinde gerilimin AC'ye dönüştürülmesinde tercih edilir. Büyük elektrik motorlarının kontrolünde, özellikle düşük harmonik içerik ve yüksek verimlilik gerektiren uygulamalarda kullanılır. Çok seviyeli evirici teknolojisi, sürekli gelişen bir alandır. Araştırmalar, eviricilerin verimliliğini artırmak, maliyetleri düşürmek ve boyutlarını küçültmek için yeni kontrol yöntemleri ve yarı iletken malzemeler üzerinde yoğunlaşmaktadır. Ayrıca, modüler çok seviyeli eviricilerin (MMC - Modular Multilevel Converter) artan popülaritesi, özellikle HVDC (Yüksek voltajlı doğru akım sistemleri) ve yenilenebilir enerji uygulamalarında dikkate değerdir. Çok seviyeli eviriciler, yüksek güçlü uygulamalar için kritik bir teknolojidir. Sağladıkları yüksek verimlilik, düşük harmonik bozunum ve esnek yapı, onları güç elektroniği alanında vazgeçilmez hale getirmektedir. Gelecekte, bu teknolojinin daha da gelişmesi ve yeni uygulama alanlarının ortaya çıkması beklenmektedir.

Çok seviyeli eviricilerin birçok avantajı olmasına rağmen, bazı dezavantajları da vardır. Bu dezavantajlar, eviricilerin tasarımı, kullanımı ve bakımı açısından dikkate alınması gereken önemli noktalardır: Çok seviyeli eviriciler, geleneksel iki seviyeli eviricilere göre çok daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Daha fazla sayıda yarı iletken anahtar, diyot ve kapasitör kullanılması, tasarımın karmaşıklığını artırır. Bu da hem tasarım sürecini zorlaştırır hem de olası hata yapma riskini yükseltir. Her eklenen seviye, eviricideki bileşen sayısını artırır. Daha fazla anahtar, diyot ve kapasitör, eviricinin daha büyük ve daha ağır olmasına neden olur. Ayrıca, artan bileşen sayısı, maliyeti de yükseltir. Çok seviyeli eviricilerin kontrolü, özellikle yüksek seviyelerde, son derece karmaşık olabilir. Her bir anahtarın doğru zamanda açılıp kapanması ve gerilim seviyelerinin doğru bir şekilde düzenlenmesi için gelişmiş kontrol algoritmaları gereklidir. Bu da kontrol sisteminin tasarımını zorlaştırır ve maliyetini artırır. Diyot kıskaçlı veya kapasitör kıskaçlı eviricilerde, gerilim seviyelerinin dengelenmesi büyük bir zorluktur. Kapasitörlerin düzgün bir şekilde şarj edilmesi ve diyotların gerilimleri doğru bir şekilde kısıpılması gerekir. Aksi takdirde, eviricinin performansı ciddi şekilde düşebilir. Her ne kadar çok seviyeli eviricilerde anahtarlama kayıpları genellikle düşük olsa da bileşen sayısının artması bu kayıpları artırabilir. Daha fazla anahtarlama işlemi, daha fazla ısı üretimine neden olur. Bu nedenle, ısı

yönetimi ve soğutma sistemleri tasarımı daha karmaşık hale gelir. Çok seviyeli eviricilerin tasarımı, bileşen sayısı ve kontrol gereksinimleri nedeniyle daha pahalıdır. Ayrıca, karmaşık kontrol sistemleri ve ek bileşenler, bakım maliyetlerini de artırabilir. Artan bileşen sayısı ve karmaşık yapılar, eviricinin fiziksel boyutunu ve ağırlığını artırır. Bu durum, özellikle sınırlı alanlarda veya ağırlığın önemli olduğu uygulamalarda dezavantaj yaratır. Çok seviyeli eviricilerin karmaşık yapısı, elektromanyetik girişim (EMI) sorunlarını artırabilir. Bu, eviricinin diğer elektronik cihazlarla olan etkileşimini olumsuz yönde etkileyebilir ve ekstra filtreleme çözümleri gerektirebilir. Bu dezavantajlar, çok seviyeli eviricilerin tasarım ve uygulama süreçlerinde dikkate alınması gereken önemli faktörlerdir. Ancak, bu zorluklar genellikle yüksek performanslı ve verimli güç dönüşümüne duyulan ihtiyaçla dengelenir.

Kademeli H-Köprü Eviriciler (Cascaded H-Bridge Inverters), diğer çok seviyeli evirici türlerine göre belirli üstünlüklere sahiptir (Alonso ve diğ. 2003). Kademeli H-köprü eviricilerin en belirgin avantajı, modüler yapısıdır. Her H-köprü modülü, bağımsız bir DC kaynağı ile beslenir ve her modül kendi başına bir evirici olarak çalışabilir. Bu modüler yapı, sistemin esnekliğini ve ölçeklenebilirliğini artırır. Ekstra modüller eklenerek eviricinin gerilim seviyesi ve gücü kolayca artırılabilir. Kademeli H-köprü eviriciler, çok sayıda modülün seri bağlanması sayesinde oldukça yüksek çıkış gerilimleri ve güçleri elde edebilir. Bu, özellikle yüksek güçlü uygulamalarda büyük bir avantaj sağlar. Bu evirici türü, çok sayıda modülün sağladığı gerilim seviyeleri sayesinde daha düzgün bir çıkış dalga formu üretir (Corzine ve diğ. 2004) (Walker ve Sernia 2004). Daha fazla seviye, daha az harmonik bozunum (THD) ile sonuçlanır, bu da sistem performansını ve verimliliğini artırır. Modüler yapı, aynı zamanda sistemin arızalara karşı daha dayanıklı olmasını sağlar. Bir modülde arıza meydana geldiğinde, diğer modüller çalışmaya devam edebilir ve bu da sistemin güvenilirliğini artırır. Ayrıca, modüller kolayca değiştirilebilir ve bu da bakım süreçlerini basitleştirir. Her bir modül, nispeten düşük bir anahtarlama frekansı ile çalıştığından, anahtarlama kayıpları da minimumda tutulur. Bu, sistemin genel verimliliğini artırır ve ısı yönetimi gereksinimlerini azaltır. Kademeli H-köprü eviricilerde, her modül bağımsız olarak kontrol edilebilir. Bu, diğer çok seviyeli evirici türlerine göre daha basit kontrol stratejilerinin uygulanabilmesini sağlar. Ayrıca, modüllerin bağımsız kontrolü sayesinde sistem performansı optimize edilebilir.

Kademeli H-köprü eviriciler, farklı türde DC kaynakları (örneğin, güneş panelleri, bataryalar) ile beslenebilir. Bu, özellikle yenilenebilir enerji sistemlerinde büyük bir avantaj sağlar. Her modül, kendi DC kaynağından beslendiği için, sistemin genel performansı üzerinde büyük bir esneklik sağlar. Bu evirici türü, farklı seviyelerde gerilim ve güç ihtiyaçlarına göre kolayca ölçeklenebilir. Bu da hem küçük hem de büyük ölçekli uygulamalar için uygun olmasını sağlar. Bu üstünlükler, kademeli H-köprü eviricileri, özellikle yüksek güçlü ve esnek yapı gerektiren uygulamalarda tercih edilen bir çözüm haline getirmektedir. Ayrıca, bu yapı hem maliyet etkinliği hem de performans açısından diğer çok seviyeli evirici türlerine göre avantajlar sunar.

Empedans kaynaklı eviriciler ise (Impedance Source Inverter, Z-source inverter, ZSI), geleneksel evirici topolojilerine alternatif olarak geliştirilen bir güç dönüştürücü yapısıdır (Peng 2003). Bu evirici türü, özellikle yenilenebilir enerji sistemleri, motor sürücüleri ve diğer güç elektroniği uygulamalarında verimliliği artırmak ve maliyetleri düşürmek için kullanılır. Empedans kaynaklı eviricilerin en ayırt edici özelliği, "Z-şebeke" adı verilen bir devre topolojisi kullanmalarındadır (Loh ve diğ. 2007) (Rajakaruna ve Jayawickrama 2005). Bu şebeke, tipik olarak iki indüktör ve iki kapasitörden oluşur ve bu bileşenler "X" şeklinde (veya "Z" şeklinde) bağlanır. Z-şebeke, evirici girişine uygulanan DC gerilim seviyesini hem artırabilir hem de azaltabilir, bu da sistemin esnekliğini artırır. Z-şebeke, geleneksel eviricilerde ihtiyaç duyulan DC-DC yükseltici (boost converter) devresini ortadan kaldırarak, doğrudan yüksek gerilim kazancı elde edilmesini sağlar. Bu, sistemin basitleşmesine ve maliyetlerin düşmesine neden olur. Z-source evirici yapısı, özellikle düşük harmonikli ve yüksek verimli güç dönüşümü sağlar. Ayrıca, kısa devre durumlarını önleyerek, anahtarların güvenli çalışmasını sağlar. Empedans kaynaklı eviriciler, kısa devre durumlarına karşı dayanıklıdır. Bu, özellikle anahtarlama sırasında meydana gelebilecek istenmeyen kısa devre akımlarını önler. Geleneksel eviricilerde, kısa devre durumları ciddi hasarlara yol açabilirken, Z-source evirici yapısı bu tür durumlarda daha güvenilir çalışır. Z-source evirici, ters yüklenmiş durumlarda da çalışabilir (Shen ve diğ. 2005). Geleneksel eviricilerde, yükün ters çevrilmesi ciddi sorunlara neden olabilirken, empedans kaynaklı eviriciler bu durumu tolere edebilir. Z-source evirici, güneş panelleri ve rüzgâr türbinleri gibi değişken giriş gerilimlerine sahip sistemlerde sıkça kullanılır. Özellikle elektrikli araçlar ve endüstriyel motor sürücülerinde verimli bir güç dönüşümü sağlar. Mikro şebekeler ve diğer dağıtık enerji sistemlerinde hem

düşük hem de yüksek gerilim seviyelerinde güvenilir güç dönüşümü sağlar. Empedans kaynaklı evirici, geleneksel evirici topolojilerinin sınırlamalarını aşmak için geliştirilmiş yenilikçi bir çözümdür. Z-şebeke yapısı sayesinde hem düşük maliyetli hem de yüksek verimli güç dönüşümü sağlar. Bu özellikler, Z-source evirici yapısını birçok modern uygulamada tercih edilen bir seçenek haline getirir.

Yarı-empedans kaynaklı (Quasi-Z-Source) evirici (kısaca qZSI), klasik Z-source eviricinin (empedans kaynaklı evirici) bir varyantıdır ve güç dönüştürme sistemlerinde kullanılan yenilikçi bir topolojidir (Anderson ve Peng 2008^a) (Anderson ve Peng 2008^b). Quasi-Z-source evirici, klasik Z-source eviricinin avantajlarını korurken, daha yüksek verimlilik, daha düşük gerilim stresleri ve daha basit devre tasarımı gibi ek iyileştirmeler sunar. Quasi-Z-source evirici, klasik Z-source eviricinin Z-şebeke yapısına benzer bir topoloji kullanır, ancak bileşenlerin yerleşimi ve bağlantıları değiştirilmiştir. Bu yapı, genellikle iki indüktör ve iki kapasitörden oluşur, ancak bu bileşenler farklı bir şekilde bağlanır. Quasi-Z-source eviriciler, giriş gerilimini hem artırabilir (boost) hem de azaltabilir (buck). Bu özellik, eviriciyi geniş bir gerilim aralığında esnek bir şekilde çalıştırabilmeye olanak tanır. Giriş gerilimindeki dalgalanmalara karşı dayanıklıdır ve bu sayede daha kararlı bir çıkış sağlar. Klasik Z-source eviriciye kıyasla, quasi-Z-source eviricinin yarı iletken anahtarları üzerindeki gerilim stresi daha düşüktür. Bu, daha düşük maliyetli ve daha dayanıklı anahtarların kullanılmasına imkân tanır, aynı zamanda eviricinin genel verimliliğini artırır. Quasi-Z-source eviriciler, sürekli giriş akımı sağlar. Bu, özellikle PV sistemlerde (güneş enerjisi) veya yakıt hücrelerinde olduğu gibi, giriş akımının sürekli olmasının önemli olduğu uygulamalarda avantajlıdır. Bu evirici türü, daha düşük elektromanyetik girişim (EMI) üretir. Düşük EMI, eviricinin diğer elektronik cihazlarla olan etkileşimini azaltır ve sistemin elektromanyetik uyumluluğunu artırır. Quasi-Z-source eviricinin yapısı, daha kompakt bir tasarım sunar. Bu, devrenin daha küçük boyutlarda olmasını sağlar ve özellikle taşınabilir veya sınırlı alan uygulamalarında avantajlıdır. Anahtarlar üzerindeki gerilim stresi daha düşük olduğundan, eviricinin güvenilirliği artar ve maliyetleri düşer. Giriş akımındaki kesintiler, güç kaynakları için sorun yaratabilecekken, qZSI bu durumu önler. Daha düşük elektromanyetik girişim, daha az parazitle çalışan daha temiz bir güç sağlar. Enerji kayıpları minimize edilmiştir, bu da sistemin genel verimliliğini artırır. Quasi-Z-source eviriciler, özellikle giriş gerilimi dalgalanmalarının yaygın olduğu ve yüksek

verimlilik gerektiren uygulamalarda kullanılır: Güneş enerjisi sistemleri ve rüzgâr türbinlerinde, dalgalanan DC gerilimlerin kararlı AC'ye dönüştürülmesinde kullanılır. Elektrikli araçların motor sürücü sistemlerinde, daha verimli güç yönetimi sağlar. Motor sürücüleri, güç kaynakları ve diğer endüstriyel evirici uygulamalarında kullanılabilir. Quasi-Z-source evirici, klasik Z-source eviricilerin avantajlarını geliştirirken, daha düşük gerilim stresi, daha yüksek verimlilik ve sürekli giriş akımı gibi ek faydalar sunan bir topolojidir. Bu özellikler, qZSI'yi özellikle yenilenebilir enerji ve elektrikli araç uygulamaları gibi modern güç elektroniği alanlarında cazip bir seçenek haline getirir.

Quasi-Z-source tabanlı kaskat tam köprülü çok seviyeli evirici yenilikçi bir güç dönüştürme topolojisidir. Bu yapı, birkaç güçlü kavramı birleştirir: Bu, klasik Z-source eviricinin bir varyantıdır ve giriş gerilimindeki dalgalanmalara karşı daha esnek ve verimli bir yapı sunar. qZSI, sürekli giriş akımı ve düşük gerilim stresi gibi avantajlar sunar. Kaskatlı tam köprülü çok seviyeli evirici, birkaç tam köprü modülünün ardışık (seri) olarak bağlanmasıyla oluşur. Her bir modül, bağımsız bir DC kaynağından beslenir ve bu modüllerin gerilimleri kademeli olarak eklenerek yüksek çıkış gerilimleri elde edilir. Bu yapı, yüksek güç ve gerilim seviyelerine ulaşmayı mümkün kılar. Çok seviyeli eviriciler, çıkış dalga formunu daha fazla seviyeye bölerek elde eder. Bu, daha az harmonik içerikli ve daha düzgün bir AC dalga formu oluşturur, böylece güç kalitesi iyileştirilir.

Quasi-Z-source tabanlı kaskat tam köprülü çok seviyeli evirici, yukarıdaki üç yapı taşını birleştirerek çalışır:

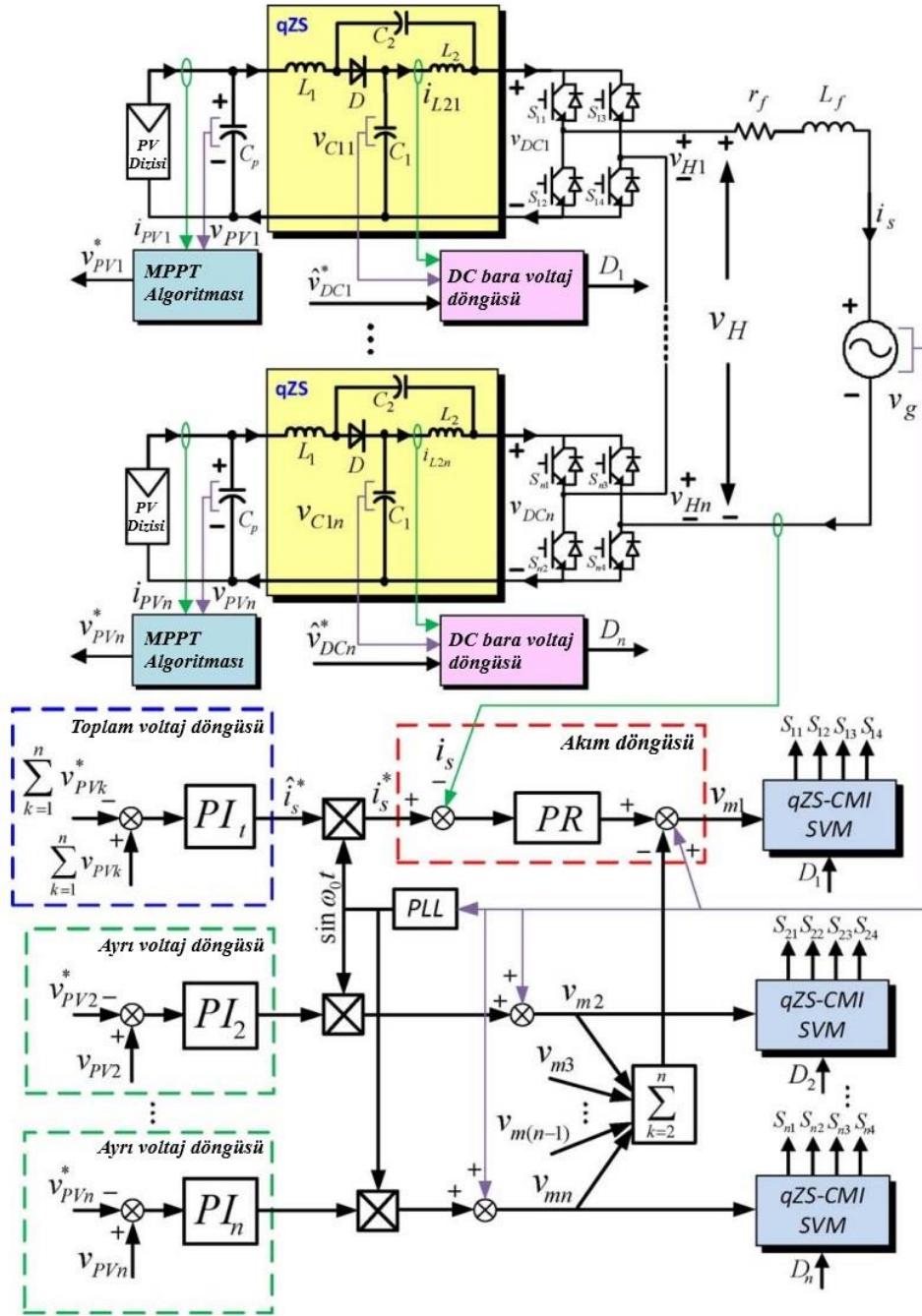
- **Quasi-Z-source Şebekesi:** Her bir tam köprü modülünün girişine, bir quasi-Z-source şebekesi yerleştirilmiştir. Bu şebeke, modülün giriş gerilimini kontrol eder ve gerektiğinde bu gerilimi artırır veya düşürür. qZSI, giriş kaynağından gelen gerilimi hem yükseltebilir hem de düşürebilir, bu da sistemin geniş bir giriş gerilim aralığında çalışmasına olanak tanır.

- **Kaskat Yapı:** Her tam köprü modülü, bir qZSI ve bir tam köprü evirici içerir. Bu modüller, seri olarak bağlanır. Her modülün çıkış gerilimi, bir sonraki modülün çıkışına eklenir, böylece toplam çıkış gerilimi katlanarak artar. Bu yapı, çok seviyeli bir çıkış dalga formu üretir.

- **Çok Seviyeli Çıkış:** Kaskatlı yapı, toplamda çok seviyeli bir AC çıkışı oluşturur. Bu sayede, çıkıştaki harmonik bozunum azalır, güç kalitesi iyileşir ve filtreleme gereksinimleri azalır. Kaskatlı yapı sayesinde, bu evirici çok yüksek gerilim ve güç seviyelerine ulaşabilir, bu da özellikle büyük ölçekli uygulamalarda (örneğin, yüksek güçlü motor sürücüleri, enerji dağıtım sistemleri) büyük avantaj sağlar. Quasi-Z-source yapısı, geniş bir giriş gerilim aralığında çalışmaya izin verir. Bu, özellikle güneş enerjisi gibi değişken kaynaklardan gelen güç dönüşümü için idealdir. Çok seviyeli çıkış dalga formu, harmonik bozunumu minimize eder ve daha az filtreleme gerektirir. Bu da sistemin verimliliğini artırır ve çıkış güç kalitesini iyileştirir. Quasi-Z-source yapısı, düşük gerilim stresine sahip olduğundan, yarı iletkenlerin verimliliğini artırır ve enerji kayıplarını azaltır. Quasi-Z-source şebekesi, kısa devre durumlarına karşı dayanıklıdır, bu da sistem güvenilirliğini artırır. Özellikle güneş ve rüzgâr enerjisi sistemlerinde, değişken DC gerilimlerin sabit ve kaliteli AC'ye dönüştürülmesinde kullanılır. Endüstriyel motor sürücülerinde, yüksek gerilim ve düşük harmonik bozunum gereksinimlerini karşılar. Dağıtık enerji üretiminde, mikro şebeke uygulamalarında kullanılabilir. Quasi-Z-source tabanlı kaskat tam köprülü çok seviyeli evirici, esneklik, yüksek güç ve verimlilik gerektiren modern güç elektroniği uygulamaları için güçlü bir çözüm sunar. Bu topoloji, özellikle değişken giriş gerilimleriyle çalışırken yüksek çıkış kalitesi sağlayarak enerji dönüşümü süreçlerini optimize eder.

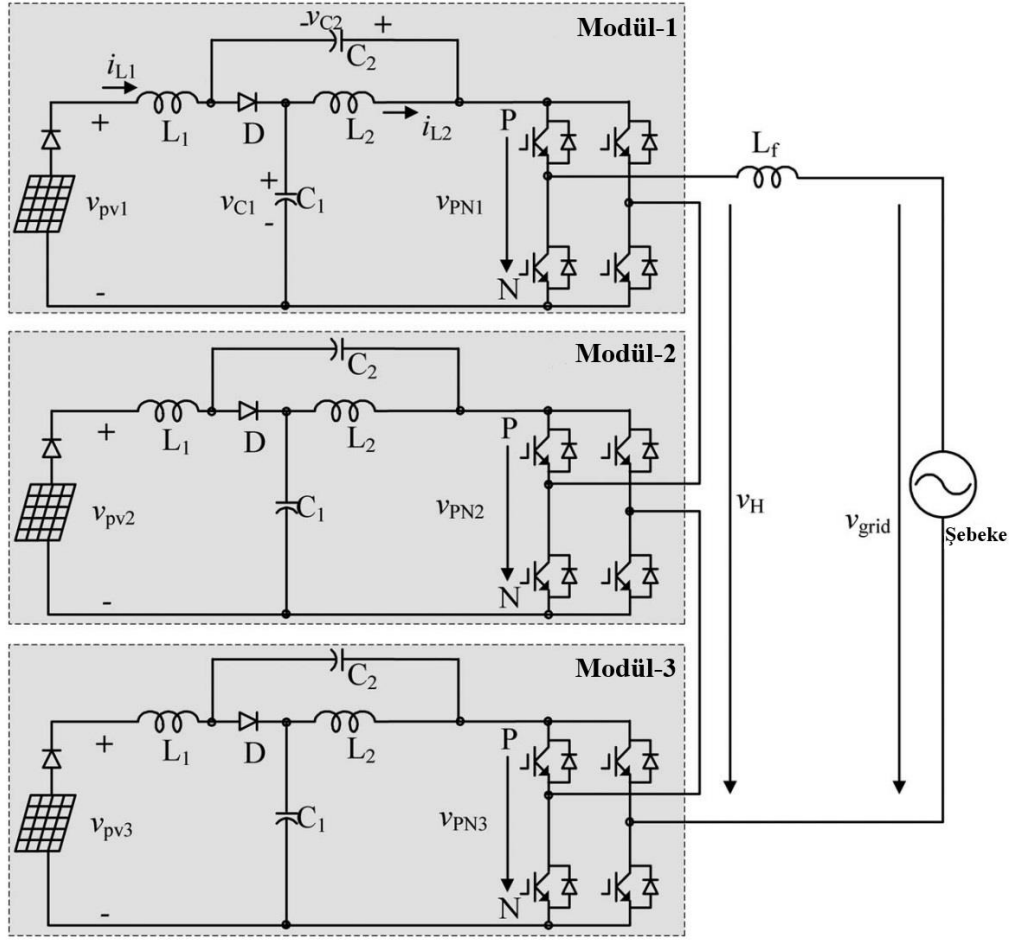
Literatürde kaskat yapıları tam köprülü çok seviyeli evirici ve yarı-empedans kaynaklı evirici yapısını bir araya getiren başlıca çalışmalar aşağıdaki gibidir:

(Liu ve diğ. 2014^a) Bu çalışmada yarı Z-kaynaklı kaskatlı çok seviyeli evirici tabanlı şebeke bağlantılı PV güç sistemi için sistem seviyesinde kontrol ve darbe genişliği modülasyonunu (PWM) içeren etkili bir kontrol yöntemi önerilmiştir. Sistem düzeyinde kontrol, şebekeye bağlı akım enjeksiyonunu, ayrı PV paneller için bağımsız maksimum güç noktası takibini (MPPT) ve tüm yarı Z-kaynaklı H-köprü evirici modülleri için dc-link voltaj dengesini sağlar.



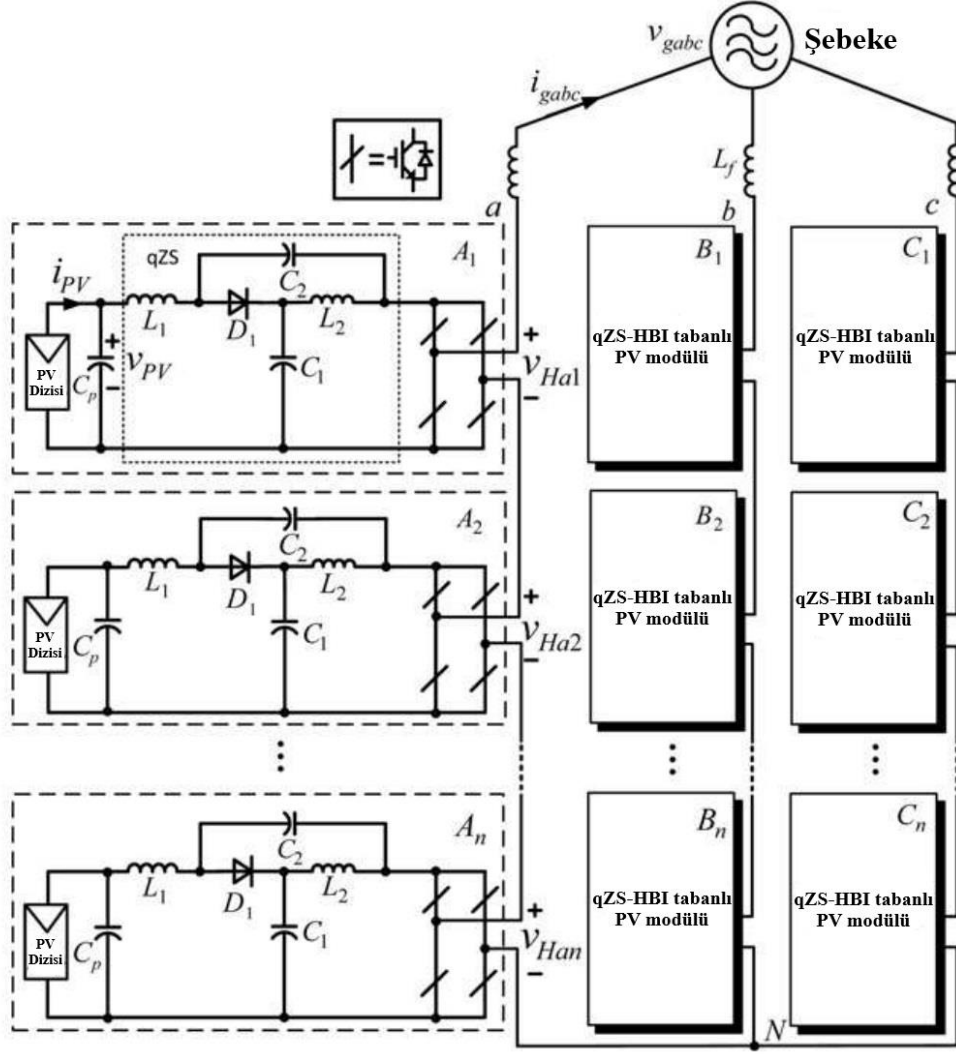
Şekil 1.1: Beş seviyeli qzs evirici (Liu ve diğ. 2014^a)

(Sun ve diğ. 2014) Bu çalışmada yarı Z kaynaklı kademeli çok seviyeli evirici PV güç sistemine uygulamıştır. Her bir PV paneli, bir güç üretim modülü oluşturmak için bir H-köprüsü qZS eviriciye bağlanır. Dağıtılmış maksimum güç noktası takibi ve tüm modüllerin dc-link tepe gerilim dengesi sağlanabilir. Bununla birlikte, her bir qZSI modülünde ikinci harmonik (2ω) gerilim ve akım dalgalanmalarının mevcut olması geleneksel CMLI ile aynıdır.



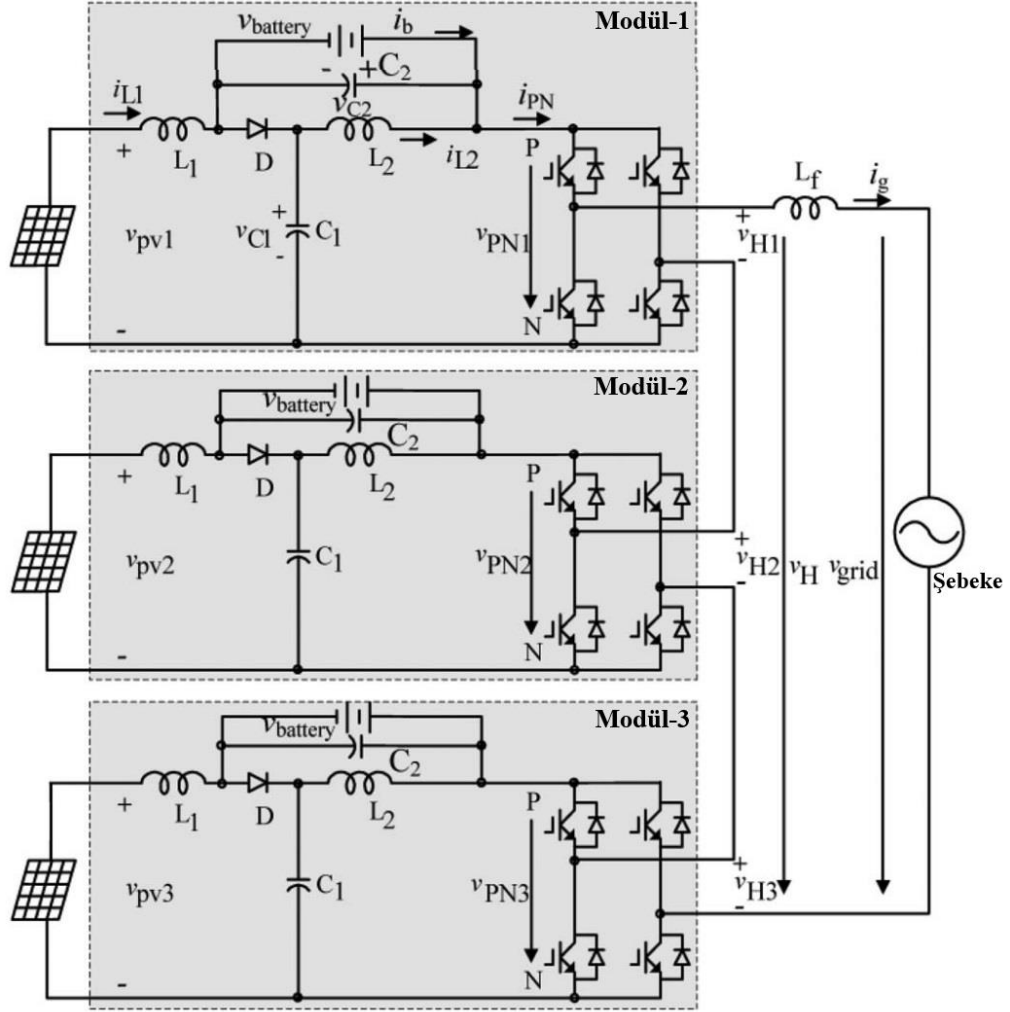
Şekil 1.2: Yedi-seviyeli qzs evirici yapısı (Sun ve diğ. 2014)

(Liu ve diğ. 2014^a) Bu çalışmada Quasi-Z kaynaklı kademeli çok seviyeli evirici fotovoltaik PV güç sistemlerine uygulanan yeni bir topolojidir. Geleneksel CMLI tabanlı PV güç sisteminin dezavantajlarının üstesinden gelebilir, çünkü (yükseltme) boost yeteneğini kullanarak dengeli dc-link voltajı elde eder ve üçte bir modül tasarrufu sağlar. Bu çalışmada, üç fazlı qzs-CMLI tabanlı şebekeye bağlı PV güç sistemi için, dağıtılmış maksimum güç noktası takibi (MPPT) ve sabit dc-link tepe geriliminin tüm qzs H-köprü evirici (qzs-HBI) tabanlı PV modüller için elde edildiği, birlik güç faktöründe şebekeye enjekte edilen güç ile bir kontrol yöntemi önerilmektedir.



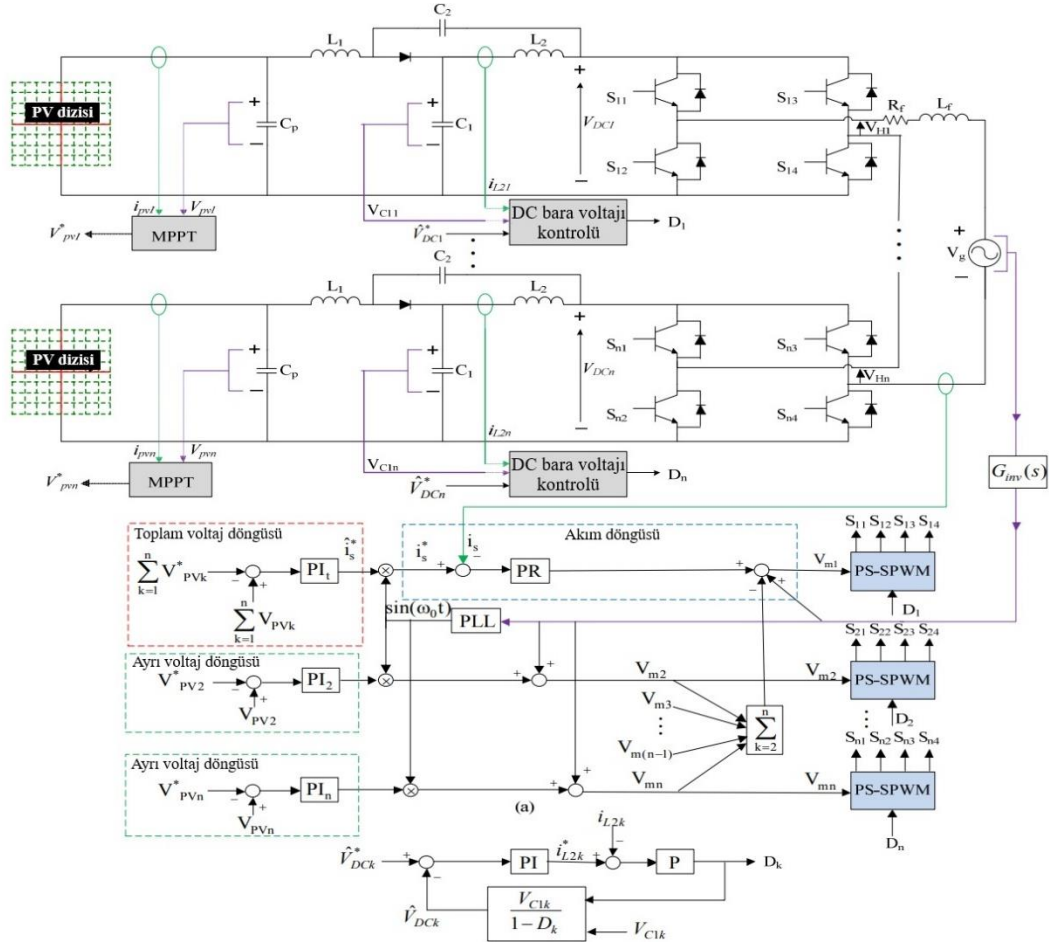
Şekil 1.3: Yedi seviyeli şebeke bağlı qZS evirici mimarisi (Liu ve diğ. 2014^b)

(Sun ve diğ. 2015) Bu çalışmada yarı Z-kaynaklı kademeli çok seviyeli evirici (qZS-CMLI), PV güç sistemlerinde uygulandığında geleneksel CMLI'e göre birçok avantaj sunar. Örneğin, qZS-CMLI dengeli dc-link voltajı ve voltaj yükseltme yeteneği sağlar, üçte bir modül tasarrufu sağlar. Bu makale, enerji depolamalı qZS-CMLI tabanlı bir PV enerji üretim sistemi önermektedir. Sistem, PV gücünün dalgalanmalarını dengelemek için her bir modüle enerji depolayan bir batarya ekleyerek qZS-CMLI ve enerji depolamayı birleştirmektedir.



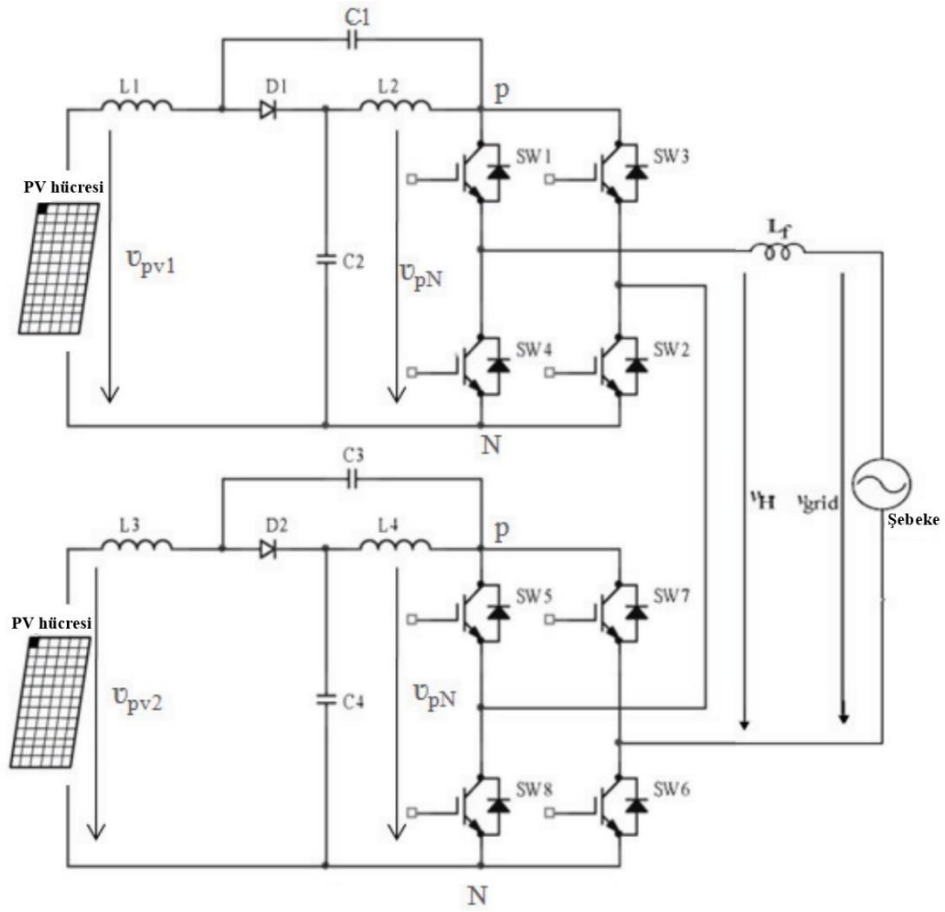
Şekil 1.4: PV tabanlı şebeke bağlı yedi-seviye qzs evirici (Sun ve diğ. 2015)

(Mohammadi ve Akhavan 2015) Bu makalede, yarı Z-kaynaklı kademeli çok seviyeli evirici tabanlı şebekeye bağlı PV sistem için yeni bir kontrol yöntemi önerilmektedir. Önerilen yöntem, PV dizi gerilimini daha yüksek bir seviyeye çıkarabilmekte ve geleneksel kademeli H-köprülü eviricilerdeki DC-bağlantı geriliminin dengesizlik sorununu çözmektedir. Önerilen kontrol sistemi, şebekeye enjekte edilen akımı şebeke gerilimiyle aynı fazda ayarlar ve ayrı PV dizileri için bağımsız maksimum güç noktası takibi (MPPT) sağlar. Bu hedeflere ulaşmak için her bir modül için oransal-integral (PI) kontrolörler kullanılmaktadır. En iyi performansı elde etmek için, parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) kullanarak kontrolör parametrelerini tasarlamak için optimum bir yaklaşım sunmaktadır.



Şekil 1.5: Beş-seviye qzs evirici devre (Mohammadi ve Akhavan, 2015)

(Umarani ve Seyezhai 2015) Bu makale, şebekeye bağlı PV sistemler için Quasi Z-Kaynaklı kademeli H-köprü çok seviyeli eviricilerin modellenmesini ve güç kontrolünü sunmaktadır. Quasi Z-Source evirici, tek bir aşamada DC-AC dönüşümü ile birlikte buck / boost çıkışı sağlayan bir eviricidir. Bu topoloji, onu PV uygulamaları için güvenilir ve uygun kılan çok sayıda avantaja sahiptir. Empedans ağı ve kademeli H-köprüsü yapısı sayesinde PV sistemlerinde yüksek kazanç, düşük toplam harmonik bozulma (THD) ve yüksek güvenilirlik sağlar. Bu çalışmada, empedans ağının tasarlandığı beş seviyeli kademeli bir H-Köprü Yarı Z-kaynaklı evirici ele alınmıştır. Faz Kaydırmalı Ters Sinüs taşıyıcı darbe genişlik modülasyonu, eviricinin anahtarlarını kontrol etmek için shoot-through kontrol ile birlikte uygulanmıştır.

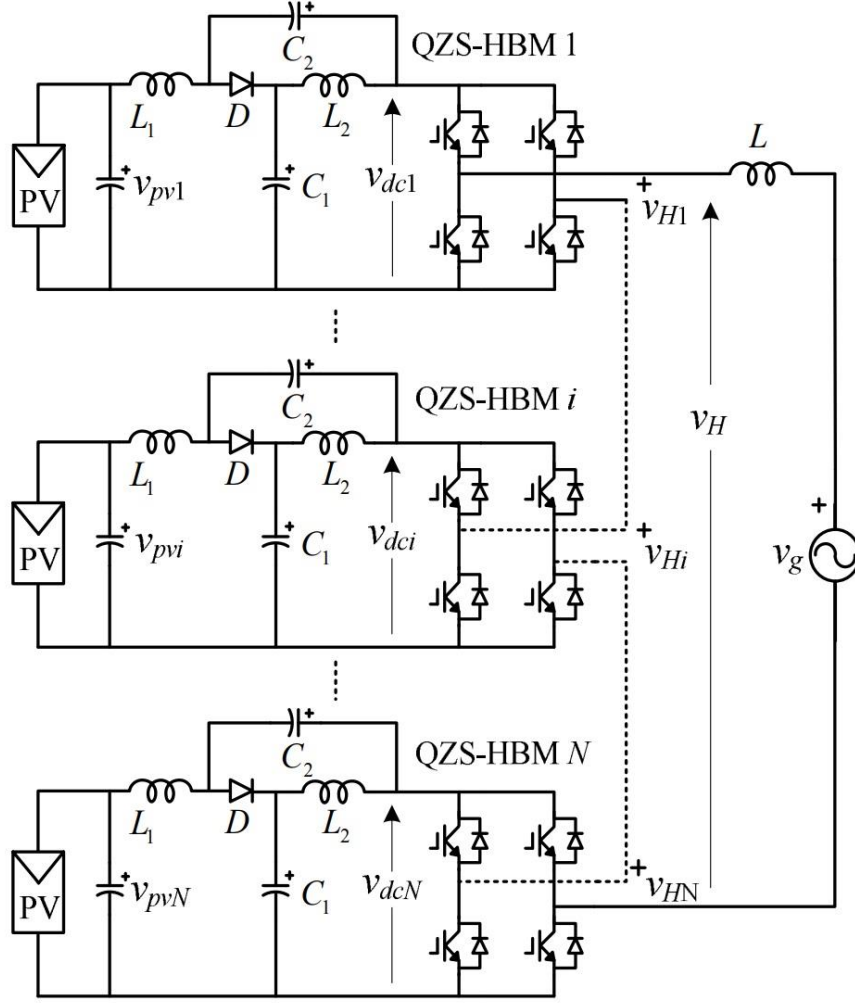


Şekil 1.6: Asimetrik beş seviyeli qzs evirici devre mimarisi (Umarani ve Seyerzhai 2015)

(Liu ve diğ. 2016) Bu makalede bir aktif güç filtresi (APF) entegre yarı Z-kaynaklı kademeli çok seviyeli evirici (qZS-CMLI) önerilmektedir. APF'nin entegre edilmesinin amacı, kademeli tek fazlı yarı Z-kaynaklı evirici (qZSI) modüllerinin her biri için ikinci dereceden harmonik (2ω) gücü dc tarafından APF'nin kapasitörüne bağımsız olarak yönlendirmektir. APF kapasitörü, küçük bir kapasitans ile yüksek dalgalanmalı AC voltaj ve akıma izin verir. Böylece, empedans değerleri üç fazlı bir qZSI kadar küçüktür ve yüksek güçlü uygulamalarda büyük boyutlu indüktör ve kapasitöre gerek kalmaz.

(Zhang ve diğ. 2017) Bu çalışmada yarı Z-kaynaklı kademeli çok seviyeli evirici, tek aşamalı sistemde buck/boost ve DC-AC dönüşümü sağlayabilen ve çok seviyeli gerilim çıkışı verebilen bir evirici topolojisi türüdür. Dağıtılmış şebekeye bağlı üretime uygulandığında, modüller arasındaki büyük çıkış gücü farkı şebekeye bağlı akım bozulmasına ve sistem kararsızlığına yol açacaktır. Bu çalışmada, çıkış

gücü oranı kısıtlaması eşitsizliği çıkarılmış ve önceki sorunun nedeni ortaya konmuştur.

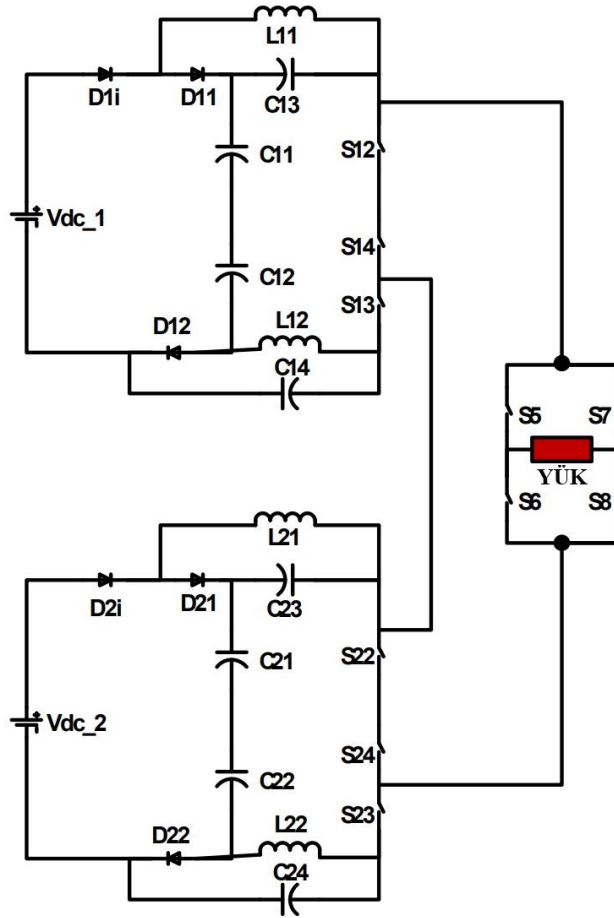


Şekil 1.7: PV tabanlı yedi-seviyeli tam köprülü qZS evirici mimarisi (Zhang ve diğ. 2017)

(Rajasegharan ve diğ. 2018) Bu makalede, quasi-Z kaynaklı kademeli çok seviyeli evirici (QZS-CMLI) tabanlı üç fazlı şebekeye bağlı PV güç sistemi için modelleme ve kontrolör tasarımı sunulmaktadır. Üç fazlı QZS-CMLI'nin kontrol şeması iki fazlı olarak tasarlanmıştır ve kaynak PV voltajını ve çıkış şebeke akımını düzenler. Burada, ilk aşamada toplam PV gerilimini belirlemek için Adaptif Guguk Kuşu Arama (ACS) algoritması ve ikinci aşamada şebekenin referans akımını çıkarmak için yapay sinir ağı (YSA) ile CS algoritması kullanılmıştır. Önerilen yöntemi kullanarak, sunulan tüm QZS-H-köprü İnvertör (HBI) modülleri, sistem seviyesi kontrolü kullanarak şebeke bağlantılı akım enjeksiyonu ve bağımsız maksimum güç noktası takibi (MPPT) elde eder.

(Ho ve Chun 2018) Bu makale, eviricinin üç seviyeli çıkış gerilimini yükseltmek için tek fazlı simetrik hibrit üç seviyeli evirici ile yarı Z-kaynaklı eviricinin kombinasyonunu önermektedir. Ek olarak, iki adet üç seviyeli darbe genişlik modülasyonu anahtarlama hücresini ayrı bir MqZS ve bir dc kaynağı ile basamaklandırarak dokuz seviyeli çıkış voltajı elde etmek için genişletilebilir ve burada tek fazlı MqZS basamaklı hibrit beş seviyeli invertör (MqZS-CHI) olarak tasarlanmıştır.

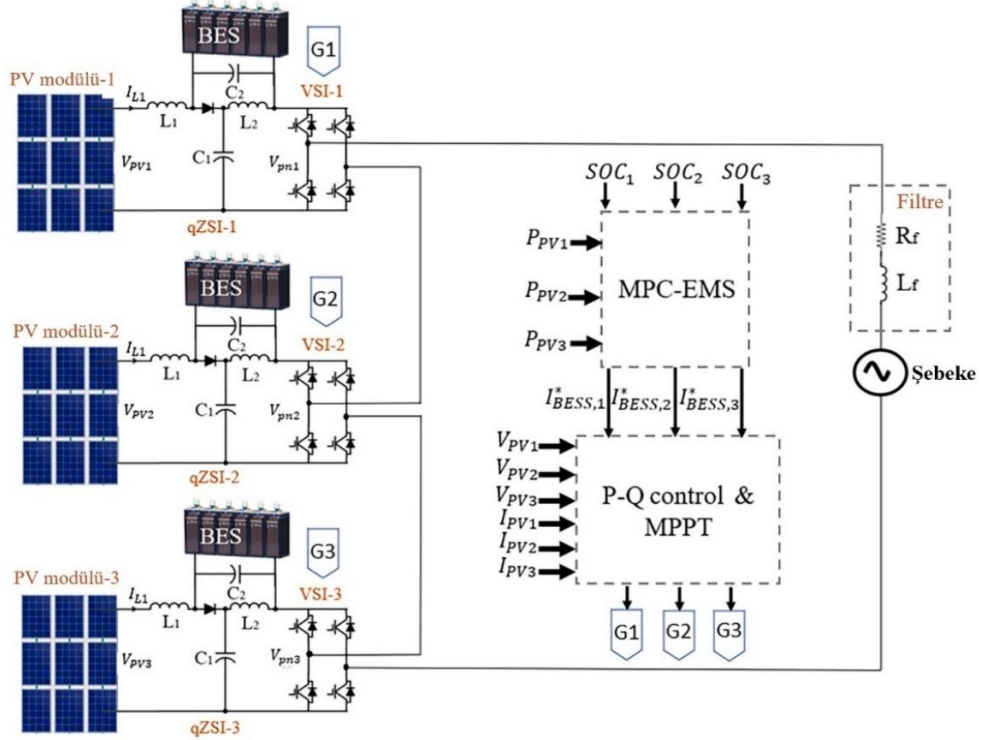
(Sharifi ve diğ. 2020) Bu makale, daha az sayıda anahtarlama elemanına sahip modifiye edilmiş bir quasi Z-kaynaklı evirici sunmaktadır. Geniş bir modülasyon indeksi (M) aralığında, önerilen evirici çıkış gerilimi Quasi-Z kaynaklı kaskat çok seviyeli evirici (qZS-CMLI) ile karşılaştırıldığında daha düşük THD'ye sahiptir. Önerilen topolojinin geleneksel qZS-CMLI'ye göre üstün avantajlarını göstermek için, her iki evirici de aynı koşul için incelenmiştir. Çeşitli modülasyon indeksleri dikkate alınmış ve her iki topolojinin performansı analiz edilmiştir. Her iki eviricide de modülasyon indeksi değiştirilerek farklı gerilim genlikleri elde edilebilmektedir.



Şekil 1.8: Beş-seviyeli evirici mimarisi (Sharifi ve diğ. 2020)

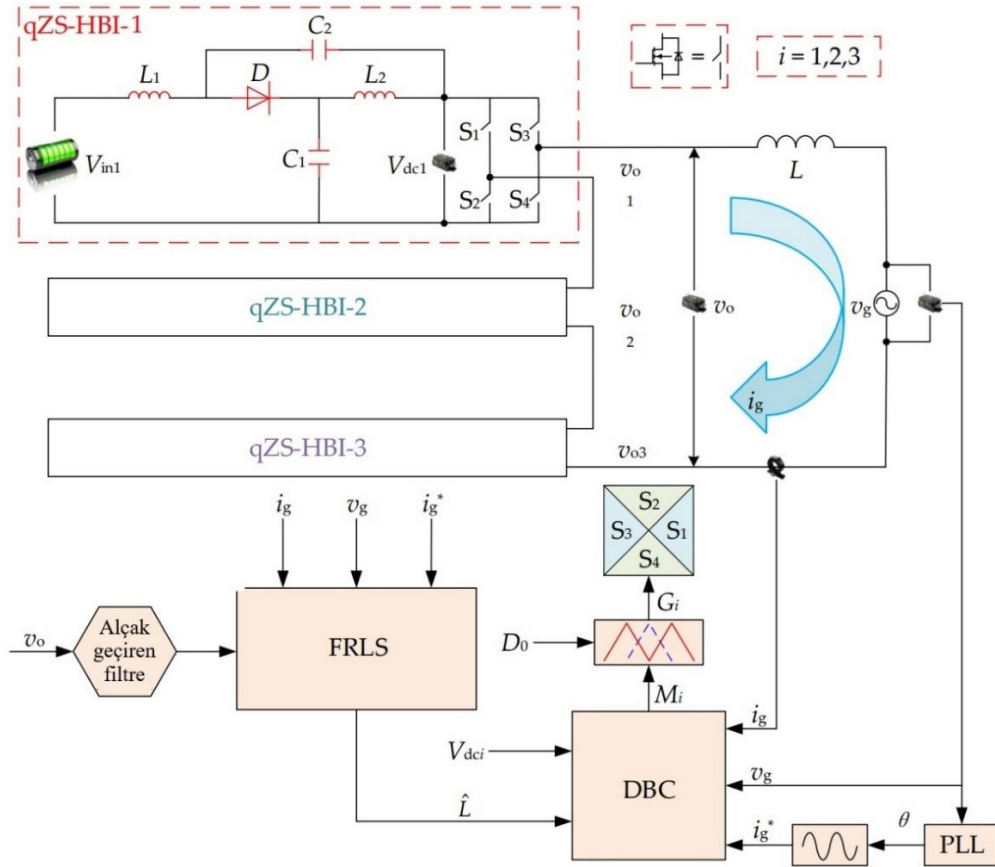
(Meraj ve diğ. 2021) Bu çalışmada, geleneksel faz kaydırmalı darbe genişliği modülasyonu (PS-PWM), Z-kaynak/quasi-Z-Kaynak (qZS) tabanlı kademeli çok seviyeli eviriciler (CMLI'ler) (qZS-CMLI'ler) için olağan bir anahtarlama tekniğidir. PS-PWM şeması daha yüksek anahtarlama kayıplarına neden olur ve daha fazla sayıda kademeli modül için elektromanyetik girişim (EMI) sorunu yaratır. Bu sorunları ele almak için, anormal koşullar altında kademeli modüllerden eşit güç elde etmek amacıyla yeni, değiştirilmiş bir seviye kaydırmalı PWM (LS-PWM) tekniği önerilmiştir. Önerilen yöntem, PV sistemler için kısmi veya tam gölgeleme, sıcaklık değişimi, PV modül arızası ve PV panellerde toz birikmesi sorunlarını ele almak için geliştirilmiştir.

(Horrillo-Quintero ve diğ. 2023) Bu makale, PV enerji santralleri ve bir enerji depolama sistemini (ES-qZS-CHBMLI) entegre eden yarı Z-kaynaklı kademeli H-köprülü çok seviyeli evirici içeren bir mikro şebeke için model öngörülü kontrole (MPC) dayalı yeni bir enerji yönetim sistemi (EMS) sunmaktadır. Sistem, her biri bir PV enerji santrali, yarı empedans ağı, batarya enerji depolama sistemi (BESS) ve voltaj kaynaklı invertör (VSI) içeren üç modülden oluşmaktadır. Geleneksel EMS yöntemleri, şarj veya deşarj modunda çalışan şarj durumlarını (SOC) dengelemek için gücü BESS'ler arasında dağıtmaya odaklanır.



Şekil 1.9: BES tabanlı yedi-seviye qzs evirici mimarisi (Horrillo-Quintero ve diğ. 2023)

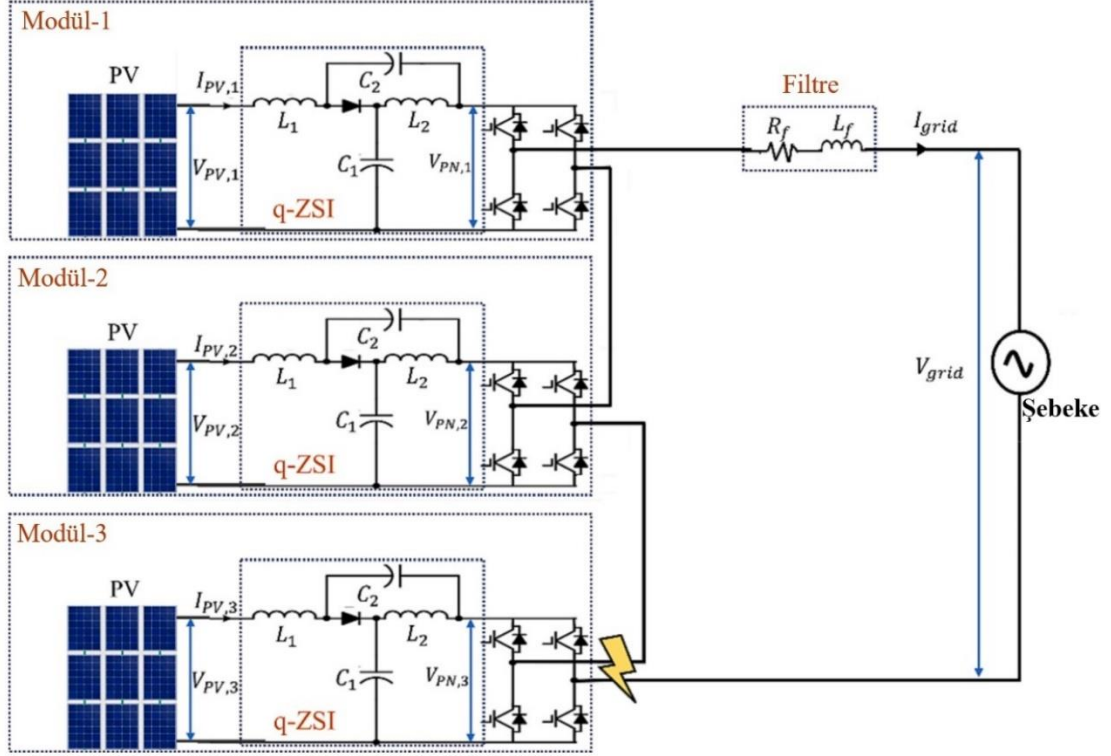
(Lei ve diğ. 2024) Bu çalışmada, geleneksel iki aşamalı eviricilerin yüksek maliyet, düşük verimlilik ve karmaşık kontrol gibi sorunlarını gidermek için bu çalışmada yarı Z-kaynaklı kademeli çok seviyeli evirici kullanılmıştır. İlk olarak, yarı Z kaynaklı invertör, ölü bölge ayarı gerektirmeden tek aşamalı güçlendirme ve ters çevirme elde etmek için benzersiz bir empedans ağı kullanır. Ayrıca, kademeli çok seviyeli yapısı, kondansatör voltaj paylaşımı sorunları olmadan her bir güç ünitesi yapısının bağımsız kontrolünü sağlar. İkinci olarak, bu çalışma şebeke tarafındaki akım harmoniklerini azaltmak için akım öngörülü bir kontrol stratejisi önermektedir. Kontrol doğruluğunu artırmak için şebeke tarafı endüktans parametresi tanımlaması eklenmiştir.



Şekil 1.10: Modüler çok seviyeli qzs evirici mimarisi (Lei ve diğ. 2024)

(Carrasco-González ve diğ. 2024) Bu makale, tek fazlı bir sisteme bağlı bir qZS-CHBMLI için, yarı empedans kaynaklı bir inverterde (qZSI) bir arıza meydana geldiğinde düzgün çalışmayı garanti eden yeni bir kontrol stratejisi geliştirmektedir. Kontrol stratejisi, her biri yarı-empedans ağına sahip üç modül, 4,8 kW'lık bir PV dizisi ve H-köprü topolojisine sahip bir gerilim kaynaklı invertör (VSI) içeren şebekeye bağlı

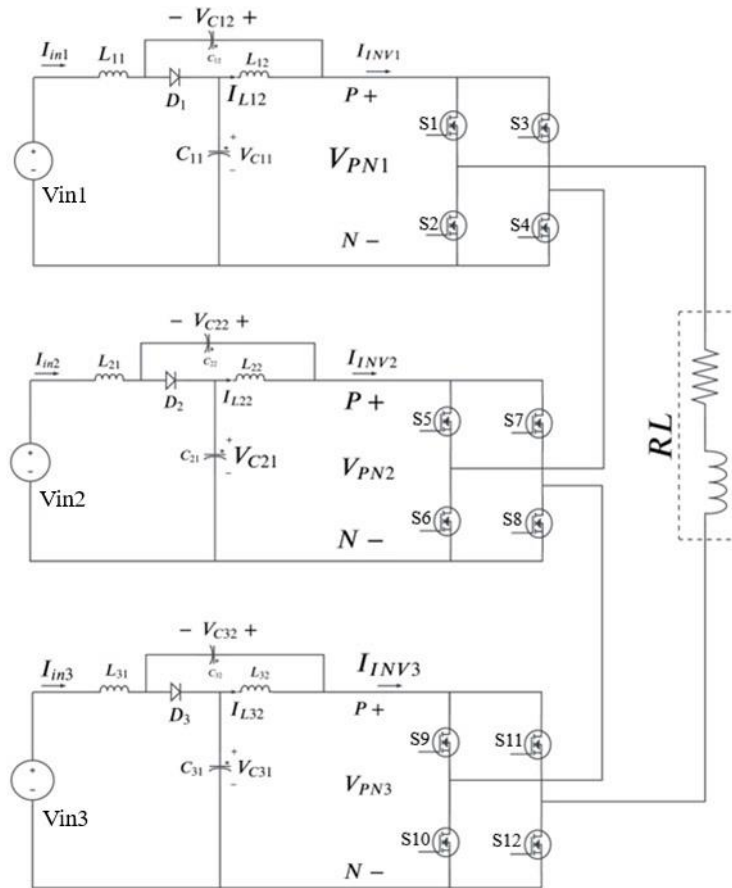
bir qZS-CHBMLI'de kullanılmıştır. Kontrol sisteminin amacı, VSI'nin girişine uygun bir DC gerilimi sağlamak ve bir modüldeki arızadan sonra şebeke güç gereksinimlerini sağlamaktır.



Şekil 1.11: PV tabanlı yedi seviyeli qzs evirici mimarisi (Carrasco-González ve diğ. 2024)

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Yenilenebilir enerji üretiminin ve elektrikli taşıtların giderek daha popüler hale gelmesiyle birlikte, çok seviyeli eviricilerin avantajları ve büyük güç ölçeği/yüksek voltajlı şebeke bağlantısı talepleri nedeniyle çok seviyeli evirici tabanlı güç sistemlerinin uygulamaları ve araştırma çalışmaları sürekli artmaktadır. Kaskatlı çok seviyeli evirici (CMLI-Cascaded Multi level Inverter) güç sistemine uygulandığında birçok avantajlara sahiptir, çünkü sistem verimliliğini artırmak ve transformatör olmadan yüksek voltajlı/yüksek güçlü şebeke çıkış gerilimi elde edilmesini sağlayabilir. Bununla birlikte, geleneksel CMLI tabanlı güç sisteminde, her modül bir buck invertördür ve DC-bara gerilimi ($V_{PN1,2,3}$), giriş gerilimi ($V_{in1,2,3}$) ile birlikte değişir. Z kaynak (ZS)/quasi-Z kaynak (qZS) CMLI'lar (ZS/qZS-CMLI'lar), ZS/qZS inverterin (ZSI/qZSI) tek bir aşamada buck/boost ve inversiyonu sayesinde ZS/qZS ağı ve H-köprü modülünü bir araya getirerek geleneksel CMLI'nın yukarıda bahsedilen dezavantajının üstesinden gelebilmek için çözüm üretebilmektedir.



Şekil 2.1: Önerilen devre mimarisi

Şekil 2.1'deki devre mimarisi, birbirleri ile özdeş ayrı üç adet köprüden ve her bir köprüsünde iki kapasitörden (C_1 ve C_2) ve bölünmüş indüktörlerden (L_1 ve L_2) oluşan tek fazlı Yarı-Z-kaynaklı yedi seviyeli kademeli inverter'in önerilen topolojisini gösterir ve girişler ayrı DC kaynakları (batarya) ile bağlanır. D_1 diyotu, shoot-through durumunda devreyi olası bir hasardan etkili bir şekilde koruyacaktır ve shoot-through durumunu kullanarak, yarı-Z-kaynaklı ağ DC bara voltajını yükseltir (V_{PN}). Normal Z-kaynaklı invertörle karşılaştırıldığında, empedanslar qZSI'nin temsil edilen yapısını oluşturacak şekilde düzenlenmiştir.

Önerilen Yarı-Z-kaynak tabanlı üç köprüden oluşan yedi seviyeli kademeli invertör, AC çıkışlarının yedi ayrı voltaj arasında geçiş yapmasıyla kontrol edilir. Dolayısıyla köprü sayısı ve voltaj seviye sayısı arasında şöyle bir ilişki vardır.

$$2H = n - 1 \quad (2.1)$$

Burada n voltaj seviyesi sayısı, H ise köprü sayısıdır.

Bunlar: $+3V_{dc}, +2V_{dc}, +V_{dc}, 0, -V_{dc}, -2V_{dc}, -3V_{dc}$ 'dir.

Sunulan qZSI'nin daha iyi performans göstermesi beklenmektedir, çünkü genellikle kaçınılan ölü zaman gecikmesiyle ilişkili performans sınırlamaları vardır. qZSI ağı, voltaj artışından (boost) sorumludur. Dönüşüm, çıkışta yedi seviye üretecek şekilde devrenin anahtarlarına belirli bir şekilde PWM sinyalleri sağlanarak gerçekleştirilir. L_1 ve L_2 indüktörleri aynı değerlere ve C_1 ve C_2 kapasitörleri aynı değerlere sahiptir. QZSI ağı simetrik bir ağıdır. Bu önerilen invertörde gereken köprü sayısı 3'tür, dolayısıyla 12 anahtardan oluşur. Devrenin çıkışına ise RL elemanları bağlanmıştır. qZSI'nin anahtarlama durumları shoot-through ve non-shoot-through durumlarıdır. Bu anahtarlama durumlarının çalışma prensiplerinden ve denklemlerinden bahsedilecektir.

2.1 Önerilen Asimetrik Beslemeli Yarı-Empedans Kaynaklı Yarım-Köprü Çok Seviyeli Evirici Topolojisi

Her bir qZSI modülü için iki çalışma durumu vardır. Bunlar shoot-through ve non-shoot-through anahtarlama durumlarıdır. Non-shoot-through durumda, güç DC tarafından AC tarafına iletilirken, shoot-through durumunda dc-bağlantı gerilimi sıfır olduğu için güç iletimi olmaz. Her qZSI modülü aşağıdaki gibi güç dengesine sahiptir.

$$v_{PN} \times i_{PN} \times (1 - D) + 0 \times D = v_o \times i_o \quad (2.2)$$

Burada v_{PN} DC değer artı 2ω artık dalgalanmadan oluşan dc-bağlantı gerilimi, i_{PN} anahtarlama periyodunda ortalama olarak H-köprüsüne giren akımı, D shoot-through görev oranını (duty cycle) ve v_o ve i_o sırasıyla H-köprüsü modülünün çıkış gerilimi ve akımını temsil eder.

qZSI modülünün çıkış gerilimi şu şekilde ifade edilebilir,

$$v_o = m \times v_{PN} \quad (2.3)$$

Burada $m = M \times \sin(\omega t)$ ve M modülasyon indeksidir.

$$i_{PN} = \frac{MI_a}{2(1-D)} (\cos(\phi) - \cos(2\omega t - \phi)) = I_{PN} + \tilde{I}_{PN} \quad (2.4)$$

Akımın DC bileşeni,

$$I_{PN} = \frac{MI_o}{2(1-D)} \cos(\phi) \quad (2.5)$$

2ω bileşeni,

$$\tilde{I}_{PN} = -\frac{MI_o}{2(1-D)} \cos(2\omega t - \phi) \quad (2.6)$$

Hem I_{PN} hem de \tilde{I}_{PN} modülün i_{L1} , i_{L2} , v_{C1} ve v_{C2} durum değişkenlerini etkiler. Sonuç olarak, DC ve 2ω bileşenlerinden de oluşurlar.

$$i_{L1} = I_{L1} + \tilde{i}_{L1} \quad (2.7)$$

$$i_{L2} = I_{L2} + \tilde{i}_{L2} \quad (2.8)$$

$$v_{C1} = V_{C1} + \tilde{v}_{C1} \quad (2.9)$$

$$v_{C2} = V_{C2} + \tilde{v}_{C2} \quad (2.10)$$

$$I_{L1} = I_{L2} = \frac{MI_a}{2(1-2D)} \cos(\phi) \quad (2.11)$$

$$V_{C1} = V_{C2} = \frac{1-D}{1-2D} V_{dc} \quad (2.12)$$

Non-shoot-through durumu için dinamik denklemler,

$$\left\{ \begin{array}{l} L_1 \frac{d\tilde{i}_{L1}}{dt} + \tilde{V}_{C1} = 0 \\ L_2 \frac{d\tilde{i}_{L2}}{dt} + \tilde{V}_{C2} = 0 \\ C_1 \frac{d\tilde{V}_{C1}}{dt} + \tilde{i}_{PN} - \tilde{i}_{L1} = 0 \\ C_2 \frac{d\tilde{V}_{C2}}{dt} + \tilde{i}_{PN} - \tilde{i}_{L2} = 0 \end{array} \right. \quad (2.13)$$

Shoot-through durumu dinamik denklemleri,

$$\left\{ \begin{array}{l} L_1 \frac{d\tilde{i}_{L1}}{dt} - \tilde{V}_{C2} = 0 \\ L_2 \frac{d\tilde{i}_{L2}}{dt} - \tilde{V}_{C1} = 0 \\ C_1 \frac{d\tilde{V}_{C1}}{dt} + \tilde{i}_{L2} = 0 \\ C_2 \frac{d\tilde{V}_{C2}}{dt} + \tilde{i}_{L1} = 0 \end{array} \right. \quad (2.14)$$

2ω frekanslı bileşenleri için, bir anahtar boyunca ortalama indüktör akımları ve ortalama kapasitör gerilimleri sıfır değildir. $L_1 = L_2 = L$ ve $C_1 = C_2 = C$ ile denklem (2.15) elde edilir,

$$\begin{cases} L \frac{d(\tilde{i}_{L1})_T}{dt} + (1-D)\tilde{v}_{C1} - D\tilde{v}_{C2} = 0 \\ L \frac{d(\tilde{i}_{L2})_T}{dt} + (1-D)\tilde{v}_{C2} - D\tilde{v}_{C1} = 0 \\ C \frac{d(\tilde{v}_{C1})_T}{dt} - (1-D)(\tilde{i}_{L1} - \tilde{i}_{PN}) - D(\tilde{i}_{L2}) = 0 \\ C \frac{d(\tilde{v}_{C2})_T}{dt} - (1-D)(\tilde{i}_{L2} - \tilde{i}_{PN}) - D(\tilde{i}_{L1}) = 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

Denklem (2.15) aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir,

$$\begin{cases} L \frac{d(\tilde{i}_{L1})_T}{dt} + (2D-1)\tilde{v}_{C1} - D\tilde{v}_{C2} = 0 \\ C \frac{d(\tilde{v}_{C1})_T}{dt} - (1-2D)(\tilde{i}_{L1}) + (1-D)(\tilde{i}_{PN}) = 0 \end{cases} \quad (2.16)$$

Yukarıdaki denklemler kullanılarak kapasitör gerilimi ve endüktans akımı aşağıdaki gibi elde edilebilir,

$$\begin{cases} \tilde{i}_{L1} = \tilde{i}_{L2} = \frac{(1-2D)}{4LC\omega^2 - (1-2D)^2} \frac{MI_o}{2} \cos(2\omega t - \phi) \\ \tilde{v}_{C1} = \tilde{v}_{C2} = \frac{2\omega L}{4LC\omega^2 - (1-2D)^2} \frac{MI_a}{2} \cos(2\omega t - \phi) \end{cases} \quad (2.17)$$

qZSI ağında empedans tasarımının başlıca amacı, DC giriş geriliminin yüksek frekans bileşenlerinin ve indüktör akımının tolere edilebilir sınırlar içerisinde kalmasını sağlamaktır.

$$v_{PN} = \frac{V_{dc}}{1-2D} + \frac{2\omega LMI_o}{4LC\omega^2 - (1-D)^2} \sin(2\omega t - \phi) \quad (2.18)$$

DC giriş gerilimi üzerindeki dalgalanma oranı aşağıdaki denklem (2.19) ile ifade edilebilir,

$$a = \frac{2\tilde{v}_{PN}}{V_{PN}} = \frac{4\omega LMI_o(1-2D)}{V_{dc}[4LC\omega^2 - (1-2D)^2]} \quad (2.19)$$

Endüktans üzerindeki akım dalgalanması aşağıdaki denklem (2.20) ile ifade edilebilir,

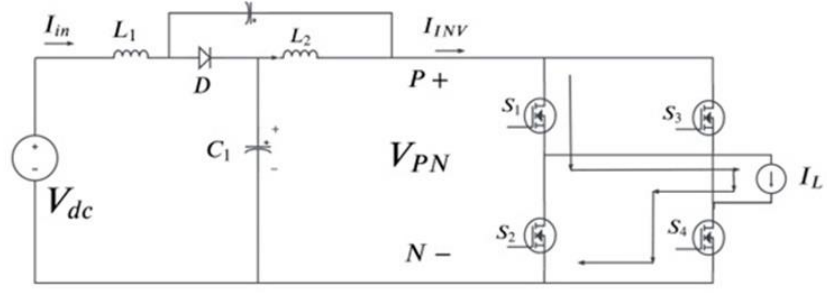
$$b = \frac{\tilde{i}_{L1}}{I_{L1}} = \frac{(1 - 2D)^2}{[4LC\omega^2 - (1 - 2D)^2]\cos(\phi)} \quad (2.20)$$

Devrede kullanılması gereken minimum kondansatör değeri aşağıdaki denklem (2.21) ile hesaplanabilir,

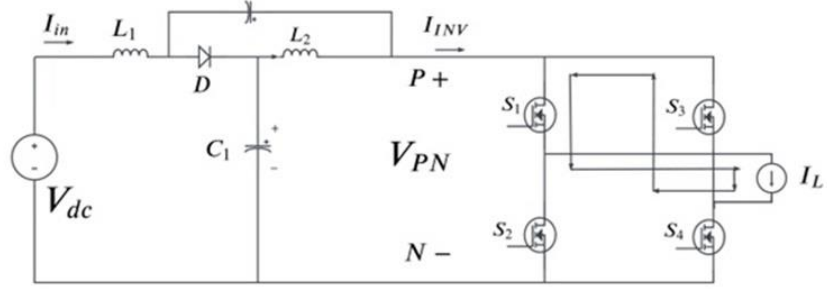
$$C \geq \frac{(1 - 2D)(1 + b\cos\phi)MI_o}{a\omega V_{dc}} \quad (2.21)$$

Ve kullanılması gereken minimum endüktans değeri aşağıdaki denklem (2.22) ile hesaplanabilir,

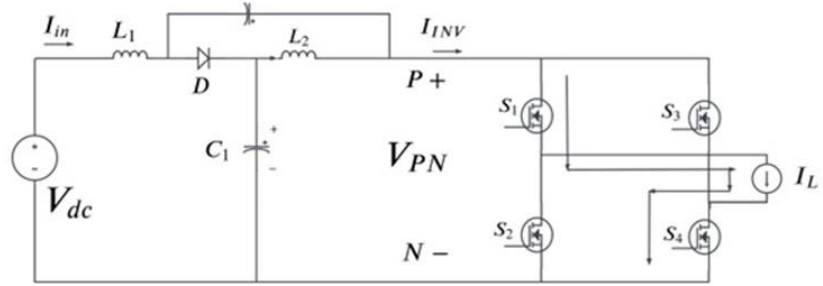
$$L \geq \frac{aV_{dc}(1 - 2D)}{4\omega bMI_o\cos\phi} \quad (2.22)$$



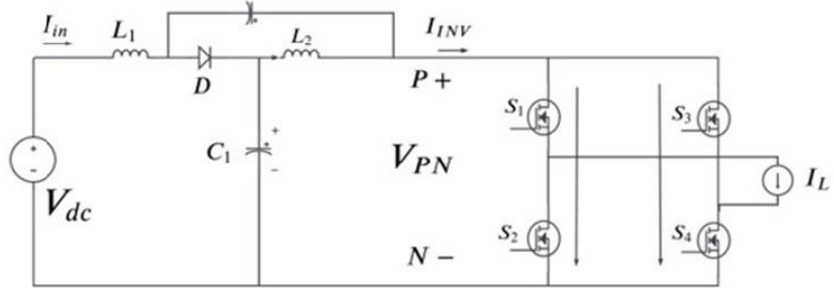
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 2. 2: Anahtarlama durumları için örnek eşdeğer devreler. (a) $S_{1234} = 0 1 0 1$ (b) $S_{1234} = 1 0 1 0$
(c) $S_{1234} = 1 0 0 1$ (d) $S_{1234} = 1 1 1 1$ (Shoot-through)

3. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

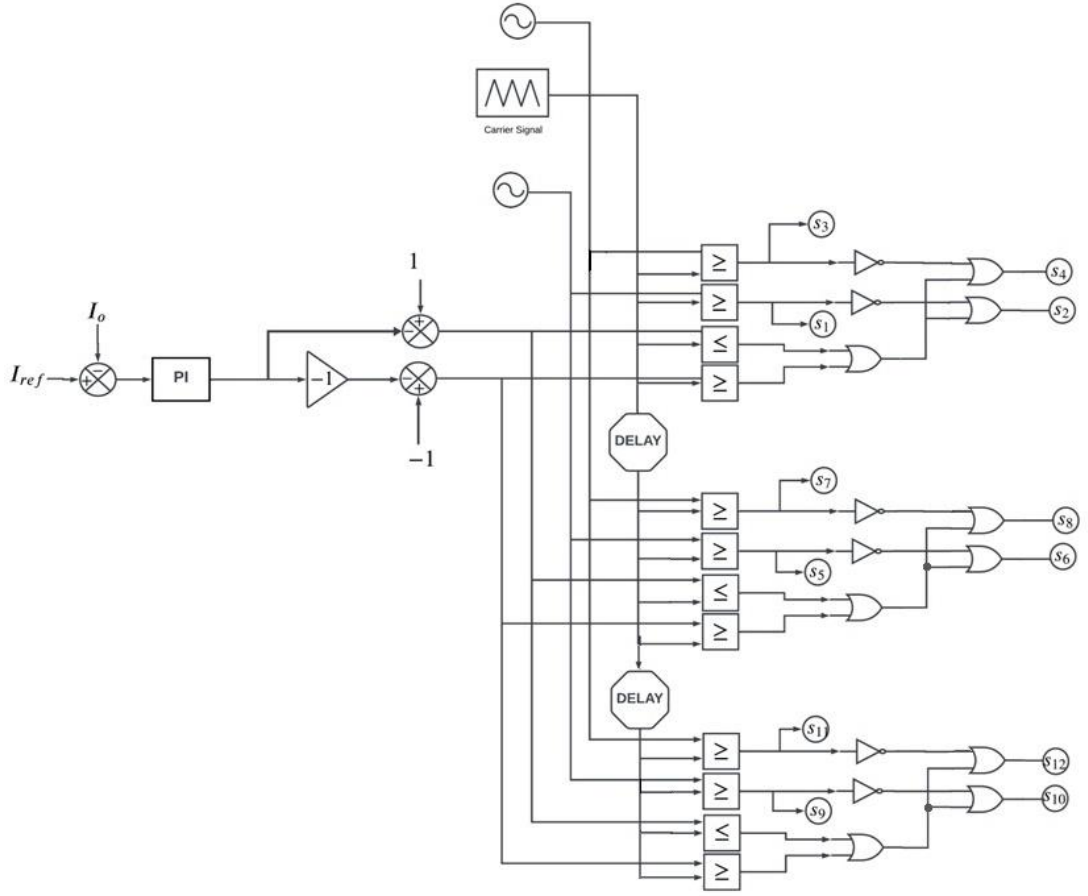
Bu tez çalışması kapsamında önerilen topolojinin teorik altyapısını doğrulamak için simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon MATLAB/Simulink programı ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda kullanılan parametreler, semboller ve değerler Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3. 1: Önerilen devre mimarisinde belirlenen parametreler

Parametreler	Semboller	Değerler
Giriş Gerilimi	$V_{in1,2,3}$	100 V_{dc}
Çıkış Gerilimi	V_o	300 V_{max}
Anahtarlama Frekansı	f_s	2 kHz
İndüktör	L_1, L_2	3 mH
Kapasitör	C_1, C_2	1 mF
Çıkış Filtre İndüktörü	L_{out}	10 mH
Çıkış Direnci (Yük)	R_{out}	100 Ω

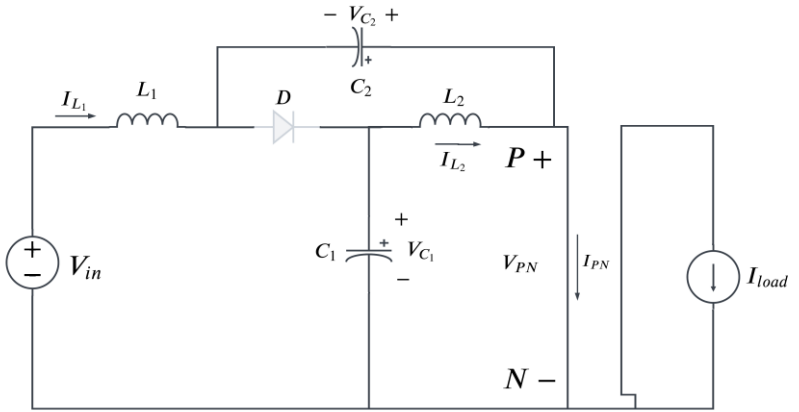
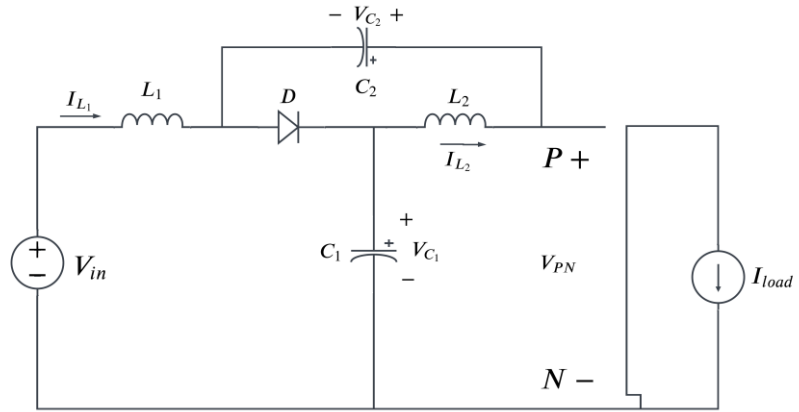
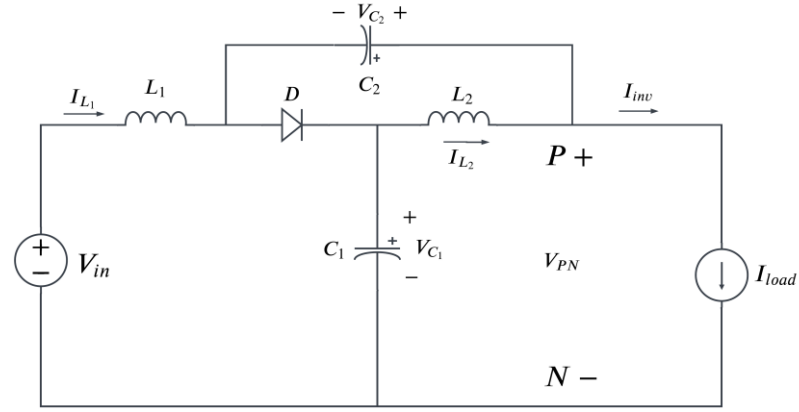
Tablo 3. 2: Önerilen yedi seviyeli CMLI mimarisi için anahtarlama şeması

S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	S_{11}	S_{12}	V_{ac}
1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	$+3V_{dc}$
1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	$+2V_{dc}$
1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	$+1V_{dc}$
1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0
0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	$-1V_{dc}$
0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	$-2V_{dc}$
0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	$-3V_{dc}$



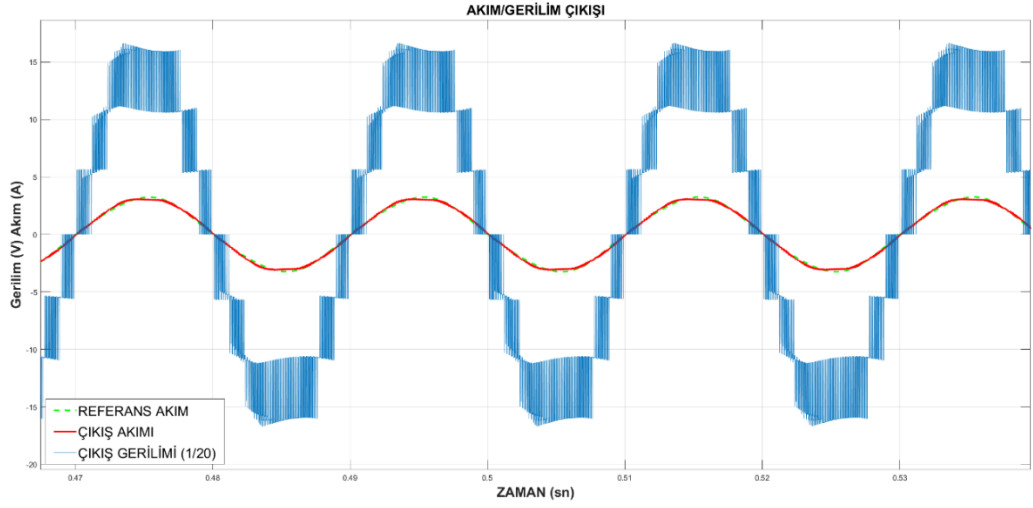
Şekil 3.1: Kontrol blok diyagramı

Şekil 3.1'te blok diyagramı verilen kontrol tekniğinde aralarında faz farkı bulunan (tek fazlı devreler için) iki adet referans sinyali (V_a , V_b), iki düz kısa devre zarf sinyali (V_p , V_n) ve bir üçgen taşıyıcı dalga sinyali uygulanmıştır. Üçgen taşıyıcı dalga sinyalinin genliği, düz kısa devre zarf sinyallerinden büyük olduğu durumlarda inverter kısa devre modunda; diğer durumlarda ise taşıyıcı tabanlı klasik DGM (PWM) inverter gibi çalışacaktır.

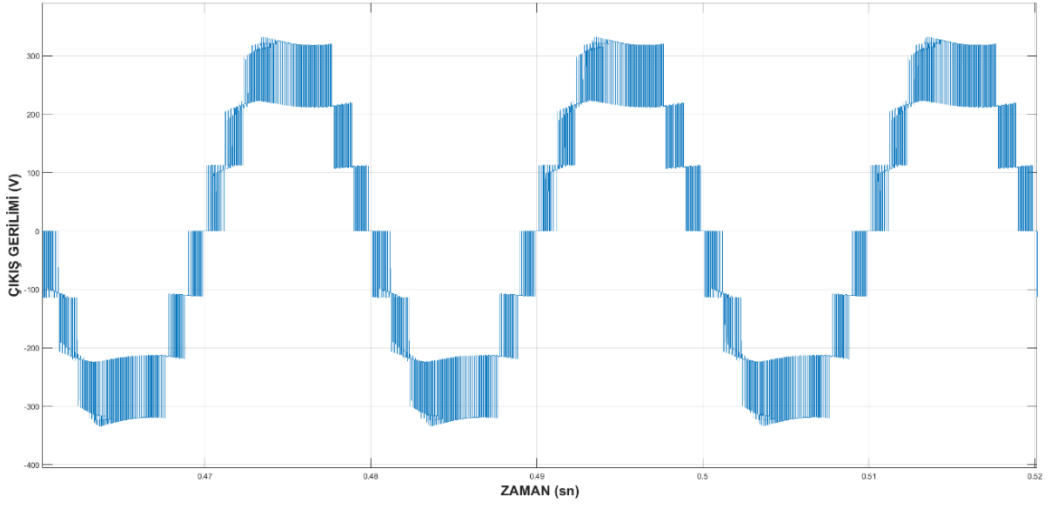


Şekil 3.2: Shoot-through anahtarlama durumunun genel devre davranışı.

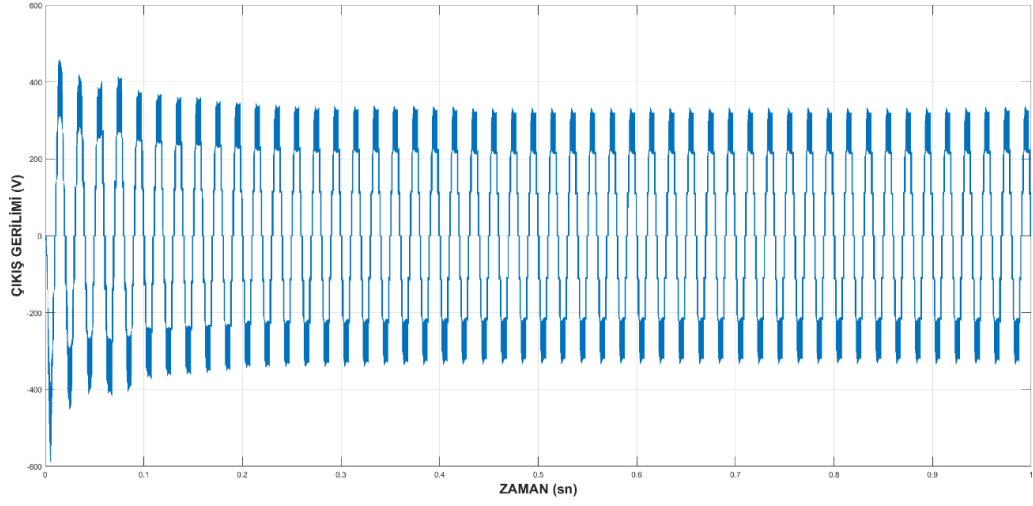
$V_a > V_t$ durumunda S_1 iletimde S_2 kesimde, $V_a < V_t$ durumunda S_1 kesimde S_2 iletimde olurken, $V_b > V_t$ durumunda S_3 iletimde S_4 kesimde, $V_b < V_t$ durumunda S_3 kesimde S_4 iletimde olacaktır. Shoot-through anahtarlama ise; $V_t > V_p$ veya $V_t < V_n$ durumlarında gerçekleşir. Yani taşıyıcı dalga sinyalinin genliği kısa devre zarf sinyallerinden büyük olduğu durumlarda aynı faz bacağındaki yarı iletken anahtarlar kısa devre yapılır.



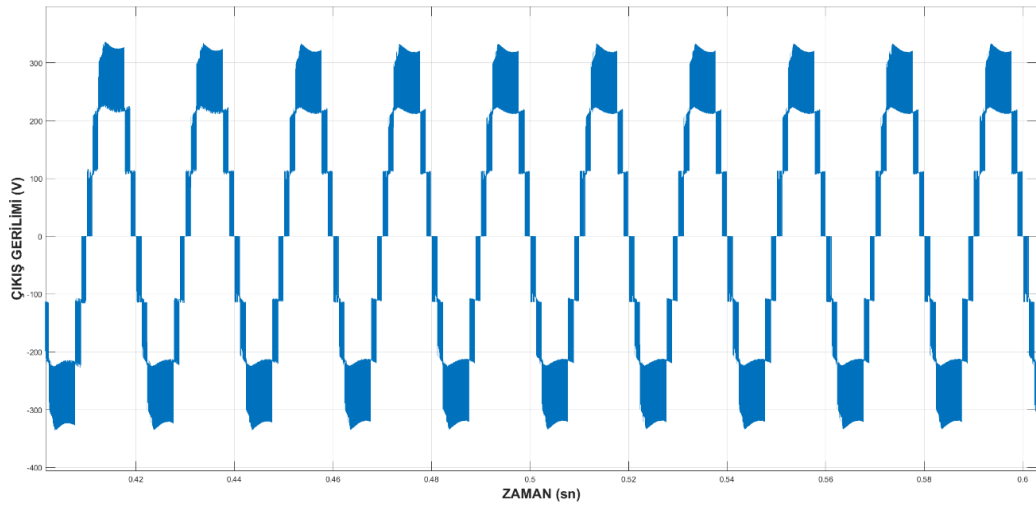
Şekil 3.3: Önerilen devrenin akım/gerilim çıkış grafiği



Şekil 3.4: Önerilen devrenin çıkış gerilimi grafiği



Şekil 3.5: Önerilen devrenin oturma zamanı



Şekil 3.6: Önerilen devrenin çıkış gerilimi grafiği-2

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tezde, yarı Z-kaynak invertöre (qZSI) dayalı ve tek fazlı girişine batarya bağlı bir evirici mimarisi sunulmuştur. qZSI ve kaskatlı çok seviye yapılarının çalışma prensipleri incelenmiş ve tek fazlı yapıda güç düzenleyici olarak qZSI uygulaması için uygun bir kontrol yapısı kullanılmıştır. Bu yapı DC kaynağı tek bir aşamada (ilave bir dönüştürücü kullanılmadan) şebekeye iletir, bu nedenle maliyet azalır ve verimlilik artar. Ayrıca qZSI, geleneksel ZSI ile karşılaştırıldığında, sürekli giriş akımı, azaltılmış gerilim stresi ve daha düşük bileşen derecelendirmeleri avantajlarına sahiptir.

Önerilen mimari, CHB çok seviyeli mimarilerin ve QZS-yarı empedans kaynaklı eviricilerin birleştirilmiş bir halidir ve her ikisinin de avantajlarına sahiptir. Bu tezde tek fazlı yarı empedans kaynaklı tam köprülü kaskatlı 7 katlı evirici mimarisinin avantajlarından ve literatürde bahsedilen diğer mimarilerle olan farklılıklarından bahsedilmiştir.

Sonuçlar, seviye sayısı arttıkça tek fazlı invertörde çıkış dalga formunda iyileşme gözlemlendiğinin, başka bir deyişle gerçek sinüs dalgasına daha çok yaklaşıldığını göstermektedir. Yapılan teorik analizler, önerilen tek fazlı yarı empedans kaynaklı tam köprülü kaskatlı 7 katlı evirici mimarisinin simülasyon sonuçlarını doğrulamaktadır.

5. KAYNAKLAR

Alonso, O., Sanchis, P., Gubía, E., Marroyo, L., “Cascaded H-Bridge Multilevel Converter for Grid Connected Photovoltaic Generators with Independent Maximum Power Point Tracking of Each Solar Array”, *IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist PESC '03*, (2), Mexico, 731-735, (2003).

Anderson, J., and Peng, F. Z., “A Class of Quasi-Z-Source Inverters”, *2008 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Canada, 1-7, (2008^a).

Anderson, J., and Peng, F. Z., “Four Quasi-Z-Source Inverters”, *2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Greece, 2743-2749, (2008^b).

Bhagwat, Pradeep M., and Stefanovic V. R., “Generalized Structure of a Multilevel PWM Inverter”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 19(6), 1057–1069, (1983).

Carrasco-González, D., Horrillo-Quintero, P., García-Triviño, P., Sarrias-Mena, R., Garcia-Vazquez, C. A. and Fernández-Ramírez, L. M., “Control of PV Power Plants with Quasi-Z-Source Cascaded H-Bridge Multilevel Inverters under Failure”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 157(109803), (0142-0615), (2024).

Corzine, K. A., Wielebski, M. W., Peng F. Z. and Wang, J., “Control of Cascaded Multilevel Inverters”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(3), 732-738, (2004).

Ho, A. V. and Chun, T. W. “Single-Phase Modified Quasi-Z-Source Cascaded Hybrid Five-Level Inverter”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(6), 5125-5134, (2018).

Horrillo-Quintero, P., García-Triviño, P., Sarrias-Mena, R., García-Vázquez, G. A. and Fernández-Ramírez L. M., “Model Predictive Control of a Microgrid with Energy-Stored Quasi-Z-Source Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter and PV Systems.” *Applied Energy*, 346:121390, (0306-2619), (2023).

Lei, S., Jin, N. and Jiang, J., “Current-Prediction-Controlled Quasi-Z-Source Cascaded Multilevel Photovoltaic Inverter”, *Electronics*, 13(10), 1824, (2024).

Liu, Y., Ge, B. and Abu-Rub, H., “Modelling and Controller Design of Quasi-Z-Source Cascaded Multilevel Inverter-Based Three-Phase Grid-Tie Photovoltaic Power System”, *IET Renewable Power Generation*, 8(8), 925–936. (2014^b).

Liu, Y., Ge, B. and Abu-Rub, H., “An Active Power Decoupling Quasi-Z-Source Cascaded Multilevel Inverter”, *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, Italy, 6453–6458, (2016).

Liu, Y., Ge, B., Abu-Rub, H. and Peng, F. Z., “An Effective Control Method for Quasi-Z-Source Cascade Multilevel Inverter-Based Grid-Tie Single-Phase Photovoltaic Power System”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(1), 399–407, (2014^a).

Loh, P. C., Vilathgamuwa, D. M., Gajanayake, C. J., Lim, Y. R and Teo, C. W., “Transient Modeling and Analysis of Pulse-Width Modulated Z-Source Inverter”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22(2), 498-507, (2007).

Meraj, M., Rahman, S., Iqbal, A. and Al Emadi, N., “Novel Level Shifted PWM Technique for Unequal and Equal Power Sharing in Quasi Z-Source Cascaded Multilevel Inverter for PV Systems”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 9(1), 937–948, (2021).

Meynard, T. A. and Foch, H., “Multi-Level Conversion: High Voltage Choppers and Voltage-Source Inverters”, *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, (1), Spain, 397-403, (1992).

Mohammadi, H. R. and Akhavan, A., “A New Control Method for Grid-Connected PV System Based on Quasi-Z-Source Cascaded Multilevel Inverter Using Evolutionary Algorithm”, *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, 6(1), 109–120, (2015).

Nabae, A., Takahashi, I. and Akagi, H., “A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-17(5), 518-523, (1981).

Peng, F. Z., “Z-Source Inverter”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39(2), 504-510, (2003).

Rajakaruna, S. and Jayawickrama, Y. R. L., “Designing Impedance Network of Z-Source Inverters”, *7th International Power Engineering Conference*, 2, Singapore, 962-967, (2005).

Rajasegharan, V. V., Premalatha, L. and Rengaraj, R., “Modelling and Controlling of PV Connected Quasi Z-Source Cascaded Multilevel Inverter System: An HACSNN Based Control Approach”, *Electric Power Systems Research*, (162), (0378-7796), 10-22, (2018).

Baker, R. H., “High-Voltage Converter Circuit”, *U.S. Patent No. 4,203,151*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. (1980).

Baker, R. H. and Bannister, L. H., “Electric Power Converter”, *US Patent*, 3(864), 643, (1975).

Sharifi, T., Alibiglo, A.H., Mirsalim, M., Farzamkia, S. and Moghani, J. S., “An Asymmetrical Cascaded Single-Phase Quasi Z-Source Multilevel Inverter with Reduced Number of Switches and Lower THD”, *2020 11th Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference PEDSTC 2020*, Iran, 1-5, (2020).

Shen, M., Joseph, A., Wang, J., Peng, F. Z. and Adams, D. J., “Comparison of Traditional Inverters and Z-Source Inverter”, *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, Germany, 1692-1698, (2005).

Sun, D., Ge, B., Liang, W., Abu-Rub, H. and Peng, F. Z., “An Energy Stored Quasi-Z-Source Cascade Multilevel Inverter-Based Photovoltaic Power Generation System”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(9), 5458-5467, (2015).

Sun, D., Ge, B., Yan, X., Bi, D., Zhang, H., Liu, Y., Abu-Rub, H., Ben-Brahim, L. and Peng, F. Z., “Modeling, Impedance Design, and Efficiency Analysis of Quasi-Z Source Module in Cascaded Multilevel Photovoltaic Power System”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(11), 6108-6117, (2014).

Umarani, D. and Seyezhai, R., “Modeling and Control of Quasi Z-Source Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter for Grid Connected Photovoltaic Systems”, *5th International Conference on Advances in Energy Research*, 90, India-Energy Procedia, 250–259, (2015).

Walker, G. R. and Sernia, P. C., “Cascaded DC-DC Converter Connection of Photovoltaic Modules”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 19(4), 1130-1139, (2004).

Zhang, R., Li, Y. and Liu, Y., “Constraints and Control Strategies of Quasi-Z-Source Cascaded Multilevel Inverter”, *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, China, 4209-4214, (2017).