

Dinamik kompanzasyon cihazlarında kullanılan evirici yapıları: STATCOM ve DSTATCOM topolojileri

Muhammed Mustafa Ertay¹, Melek Dijle^{2*}, İbrahim Yücedağ³

22.12.2015 Geliş/Received, 20.02.2016 Kabul/Accepted

ÖZ

Statik Senkron Kompanzator (STATCOM) iletim hatlarında reaktif güç kompanzasyonu ve güç sistemi kararlılığının artırılması için kullanılmaktadır. STATCOM dağıtım hatlarında kullanılırsa dağıtım STATCOM (DSTATCOM) olarak isimlendirilmektedir. Özel bir güç aygıtı olan DSTATCOM, dağıtım sistemlerinde güç kalitesi sorunlarını çözmek için kullanılan ortak kuplaj noktasına şönt bağlı bir gerilim kaynaklı eviricidir. Evirici STATCOM ve DSTATCOM'un temel yapı birimidir. Literatürde önerilen ve gerçek uygulamalarda kullanılan birçok evirici yapıları mevcuttur. Bu makalede, bugüne kadar STATCOM ve DSTATCOM'da kullanılan evirici yapıları incelenmektedir. Evirici yapılarının avantaj ve dezavantajları ortaya konulmaktadır. Ayrıca literatürden birçok örnek verilmektedir.

Anahtar kelimeler: STATCOM, DSTATCOM, reaktif güç kompanzasyonu, güç kalitesi, eviriciler

The inverter structures used in dynamics compensation devices: STATCOM and DSTATCOM topologies

ABSTRACT

Static Synchronous Compensator (STATCOM) is used for to improve the stability of power system and reactive power compensation of transmission lines. When a STATCOM used in a distribution system it is called Distribution STATCOM (DSTATCOM). As a custom power device DSTATCOM is a shunt connected voltage source inverter to a common coupling point in the distribution system and is used for to improve the power quality problems. The main structural unit of STATCOM and DSTATCOM are inverters. Many inverter topologies are used in the application and a lot of proposed inverter structures are available in the literature. In this study the inverter structures and topologies that are used in STATCOM and DSTATCOM up to now are investigated. The advantages and disadvantages of the inverter structures are presented. Also a lot of examples from the literature have been given.*

Keywords: STATCOM, DSTATCOM, reactive power compensation, power quality, inverters

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

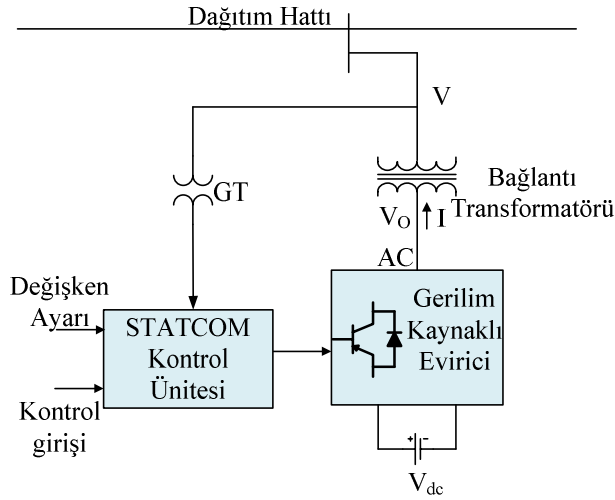
1 Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Düzce- mustafaertay@duzce.edu.tr

2 Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Müh ABD, Düzce- melek_yildir@hotmail.com

3 Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Düzce- ibrahimyucedag@duzce.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik enerjisi ihtiyacı dolayısıyla elektrik tüketimi gün geçtikçe artmaktadır. İlerleyen zamanlarda bu tüketimin daha artması beklenmektedir [1]. Elektrik enerjisi ihtiyacında yaşanan bu artış, enerji sistemlerinde kullanılan kompanzasyon cihazlarının geleneksel yapılarından daha verimli olmalarını sağlayacak teknolojik bir yapıya bürünmelerini zorunlu kılmıştır [2]. Kurulu enerji iletim sistemlerinden yüksek seviyede yararlanmak için şartlar incelendiğinde, güvenilirliği ve kararlılığı yüksek seviyeli olan güç elektroniği teknolojisinin önem kazandığı görülmektedir [3]. Güç elektroniği alanındaki gelişmelere paralel olarak güç kalitesi problemlerini iyileştirmek, iletim ve dağıtım sistemlerinin verimliliğini artırmak için çalışmalar hızlı bir şekilde devam etmektedir. Güç kalitesi ve reaktif güç kompanzasyonu problemleri enerji iletim ve dağıtım hatları için önemli bir sorundur. Son zamanlarda enerji kalitesine duyarlı hassas yüklerin endüstride kullanımının yaygınlaşmasından dolayı reaktif güç kompanzasyonunun önemi giderek artmaktadır [4].



Şekil 1. STATCOM devre şeması (The circuit diagram of STATCOM) [2].

Bundan dolayı son zamanlarda hızlı cevap veren ve bağlı olduğu noktanın geriliminden bağımsız bir şekilde çıkış reaktif gücü verebilen evirici tabanlı kompanzasyon cihazları iletim ve dağıtım sistemlerinde kullanım alanı bulmuştur. FACTS (Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri) cihazları ve Özel Güç (Custom Power) cihazları adı verilen güç elektroniği tabanlı kompanzasyon devreleri hızlı ve güvenilir kompanzasyon için sırasıyla iletim ve dağıtım sistemlerinde kullanım alanı bulmuştur. Bunlardan gerilim kaynaklı eviriciye dayanan STATCOM (Statik Senkron Kompanzator) en çok tercih edilenidir.

STATCOM, iletim sistemlerinde “İletim-STATCOM (TSTATCOM)” veya sadece STATCOM olarak adlandırılırken, dağıtım sistemlerinde ise “Dağıtım-STATCOM (DSTATCOM)” olarak adlandırılmaktadır. STATCOM bugüne kadar ki en hızlı reaktif güç kompanzasyonu cihazı olmakla beraber reaktif akımı sisteme vererek veya sistemden reaktif akım tüketerek bulunduğu yerdeki bara gerilimini düzenler. STATCOM ve DSTATCOM iletim ve dağıtım güç şebekesine paralel bağlanan, hem reaktif güç problemleri hem de güç kalitesi problemlerini düzelteren aygıtlardır. Şekil 1’de gösterildiği gibi STATCOM devresinde bir DC barasının AC şebekeye bağlantısı bir evirici ve bir trafo üzerinden gerçekleşir. Şemada AC sistem gerilimi V, çıkış gerilimi ise V_o ile ifade edilmektedir [2]. Şekil 1’de STATCOM devre şeması verilmiştir, burada evirici DSTATCOM’un en önemli kısmıdır. Literatürde STATCOM ve DSTATCOM evirici kısmı için birçok evirici yapısı önerilmiş ve uygulamada da kullanılmıştır.

Ermiş ve arkadaşları [5,6], reaktif güç kompanzasyonu amacıyla yaptıkları çalışmada 2 seviyeli gerilim kaynaklı evirici (GKE) ve Akım Kaynaklı Evirici (AKE) kullanan 1 kV düzeyinde DSTATCOM sistemleri gerçekleştirmişlerdir. Filizadeh ve Gole [7], STATCOM’un harmonik performansını incelemek için 2 seviyeli bir GKE topolojisinin harmonik performansını araştırmıştır. Muyeen ve arkadaşları [8] ise, iki rüzgâr tarlasındaki rüzgâr generatörlerinin dinamik ve geçici durum analizini yapmışlardır. Çalışmalarında STATCOM evirici yapısı olarak iki seviyeli evirici kullanmışlardır. Ran ve arkadaşları [9], çalışmalarında STATCOM’un AC (Alternatif Akım) ve DC (Doğru Akım) kısımlarında oluşan harmoniklerin birbirleri üzerindeki etkisini araştırmış ve bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemde, 3 seviyeli diyot kenetlemeli evirici (DKE) bir STATCOM’a uygulanmıştır. Saeedifard ve diğerleri [10] ise, 3 seviyeli bir DKE kullanan STATCOM’a ilişkin yük değişimi, üç ve tek faz arızası, reaktif güçte step değişimi gibi çeşitli sistem durumları altında PSCAD yazılımı ortamında benzetimler yapmışlar ve sistemdeki bozulma olaylarına rağmen STATCOM’un reaktif gücü hızlı bir şekilde dengelediği ifade etmişlerdir. Sundararaju ve Kumar [11], çalışmalarında DSTATCOM için birden fazla işlevi yerine getirebilecek bir denetleyici önermişler ve bilgisayar ortamında bunu gerçekleştirmişlerdir. Masdi ve arkadaşları [12], dengesiz bir dağıtım sisteminde yük kompanzasyonu yapmak için 3 seviyeli bir DSTATCOM uygulaması geliştirmiştir. Liang ve Nwankpa [13], çok sayıda özdeş kaskat bağlı tam köprü GKE kullanan bir STATCOM’un geleneksel DKE ve Kapasitör Kenetlemeli Evirici (KKE) ile ilk çok darbeli STATCOM’lara göre daha az sayıda evirici gerektirdiğinden toplam sistem maliyetinin daha uygun

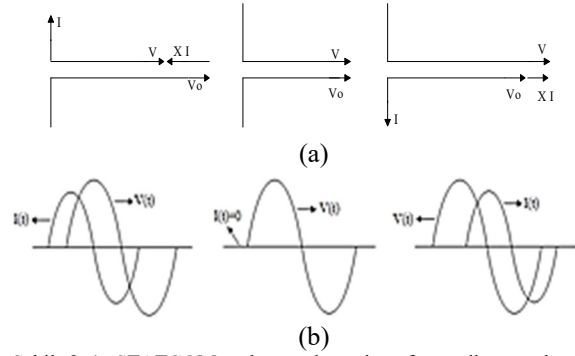
olduğu fakat sistemin dezavantajının yüksek anahtarlama kaybı olduğu bildirilmiştir. Peng ve arkadaşları [14], güç kalitesi, seri ve şönt kompanzasyon, faz kaydırma, FACTS cihazları ve fotovoltaik sistemler gibi yüksek güç uygulamalarında kullanılmak amacıyla tek fazlı tam köprülerden meydana gelen bir Çok Seviyeli Kaskat Evirici (ÇSKE) önermiş ve uygulamasını yapmışlardır. STATCOM'da kullanılan bu evirici yapısı; STATCOM'larda kullanılan transformatörlere ilişkin boyut ve ağırlık problemini çözmüştür. Literatürde çok sayıda ÇSKE tabanlı STATCOM kullanılmıştır [15-23].

Bunların dışında son yıllarda STATCOM ve DSTATCOM yapılarında kullanılmaya başlanan bir diğer evirici yapısı ise Modüler çok seviyeli eviricidir (MÇSE). MÇSE yapısı, üstün karakteristikleri sebebiyle yüksek güç uygulamalarında birçok avantaj sunmaktadır [24]. Xu ve arkadaşları [25], çalışmalarında kapasitör gerilimi dengeleme stratejisi için MÇSE kullanan üç fazlı bir DSTATCOM önerirken, Mohammadi ve Bina [26], şönt kompanzasyon için MÇSE kullanan yeni bir topoloji önermişlerdir. Bu çalışmalara ek olarak, gerçekleştirilen [27-33] çalışmalarda MÇSE tabanlı STATCOM kullanılmıştır.

Bu çalışmada, güç sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu ve güç kalitesi problemlerini çözmek için kullanılan STATCOM ve DSTATCOM aygıtlarında kullanılan evirici yapıları incelenmiştir. İlk önce genel olarak evirici yapıları incelenmiş daha sonra her bir evirici yapısının avantaj ve dezavantajları belirtilerek detaylı olarak ele alınmıştır. Çalışmada STATCOM ve DSTATCOM'da kullanılan bütün evirici yapılarına yer verilmeye gayret edilmiştir. Ayrıca ilgili evirici yapısının literatürde kullanıldığı STATCOM ve DSTATCOM uygulamalarına da yer verilmiştir. Eviricilerin STATCOM ve DSTATCOM çalışma performansına ve karakteristiklerine olan etkileri literatürde yer alan çalışmalar irdelenerek incelenmeye çalışılmıştır.

2. STATCOM ÇALIŞMA PRENSİBİ (STATCOM WORKING PRINCIPLE)

STATCOM genel olarak ifade edilirse evirici tabanlı bir reaktif güç kompanzatörüdür. Genel yapısı Şekil 1'de gösterildiği gibidir. STATCOM'un en önemli yapı taşı eviricidir. Evirici şebeke ile eş zamanlı bir gerilimi oluşturacak bir şekilde kontrol edilir. Evirici ile şebeke arasındaki aktif güç akışını belirleyen etken bu gerilimin şebeke gerilimine göre olan faz farkıdır. Evirici ile şebeke arası reaktif güç akışını belirleyen etken ise evirici geriliminin şebeke gerilimine olan genlik oranıdır. Şekil 2'de STATCOM'un fazör diyagramları ve dalga şekilleri görülmektedir.



Şekil 2.a) STATCOM çalışma durumları fazör diyagramları b) STATCOM çalışma durumları dalga şekilleri (a) The phasor diagram of operating states of STATCOM b) The waveforms of of operating states of STATCOM) [34].

Şekil 2 (a)'da görüldüğü gibi eğer eviricinin ürettiği çıkış geriliminin genliği bara geriliminin genliğinden büyük ise, akım eviriciden sisteme doğru akar ve STATCOM, sisteme kapasitif reaktif güç verir. Eğer eviricinin ürettiği çıkış geriliminin genliği sistem geriliminin genliğinden küçük ise akım sistemden eviriciye doğru akar ve STATCOM sistemden endüktif reaktif güç tüketir. STATCOM çıkış gerilimi (V_0) ve sistem geriliminin genliğinin (V) birbirlerine eşit olduğu durumda herhangi bir reaktif güç alışverişi olmamaktadır. Bu üç çalışma durumuna ilişkin karakteristikler ise Şekil 2 (b)'de verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi STATCOM'un çalışma durumlarını kapasitif, endüktif ve rezistif olmak üzere üçe ayırabiliriz [2,34]. STATCOM çalışma durumunda çıkış akımı olan I akımının eviriciden AC sisteme doğru aktığı kabul edilirse, AC akımın genliği (1) denklemi ile hesaplanabilir ;

$$I = \frac{V_0 - V}{X} \quad (1)$$

Denklem 1'de verilen X ifadesi bağlantı transformatörünün kaçak reaktansıdır. STATCOM'da karşılıklı olarak sistemden çekilen veya sisteme verilen reaktif güç ise denklem (2) 'de görüldüğü gibi ifade edilebilir [34];

$$Q = \frac{V}{X} (V - V_0 \cos \phi) \quad (2)$$

STATCOM'daki aktif güç alışverişi evirici çıkış geriliminin AC sistem gerilimine göre fazının kaydırılması yoluyla denetlenir. Eğer evirici çıkış gerilimi AC sistem gerilimine nazaran ileri fazlı ise, evirici DC baradan sisteme aktif güç verir. Eğer evirici çıkış gerilimi AC sistem gerilimine göre geri fazlı ise, evirici AC sistemden aktif güç çeker. Sürekli durumda alınan-verilen aktif güç değeri genellikle küçüktür. STATCOM ile AC sistem arasındaki aktif güç alışverişi (3) denklemine göre bulunabilir [34].

$$P = \frac{VV_0 \sin \alpha}{X} \quad (3)$$

3. STATCOM'DA VE DSTATCOM'DA KULLANILAN EVİRİCİ YAPILARI (INVERTER STRUCTURES USED STATCOM AND DSTATCOM)

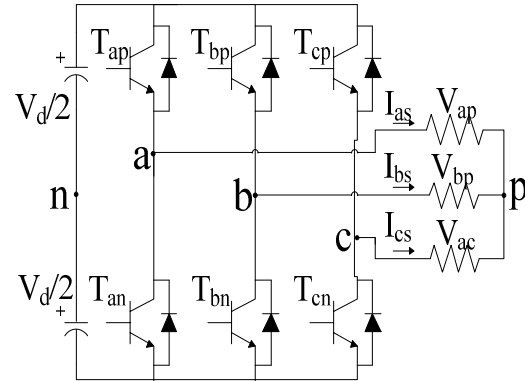
Eviriciler bir DC kaynaktan uygun anahtarlama dizisi ile genliği, frekansı ve faz açısı denetlenebilen alternatif bir gerilim üreten güç elektroniği devreleridir [3]. Bu devreler değişken hızlı motor sürücü devreleri, yüksek gerilim doğru akım iletim sistemleri, fotovoltaik sistemler, kesintisiz güç kaynakları, FACTS ve özel güç cihazları gibi endüstri uygulamalarında kullanılmaktadır. Eviricilerde genel olarak transistör, tristör, GTO (Kapıdan Söndürmeli Tristör), MOSFET (Metal Oksit Yarıiletkenli Alan Etkili Transistör), IGBT (Yalıtılmış Kapılı İki Kutuplu Transistör) ve IGCT (Kapı Devresi İle Söndürülen Tristör) gibi yarı iletken anahtarlar kullanılır. Bu yarıiletkenlerden transistör ve MOSFET düşük ve orta güç uygulamalarında, tristör, GTO, IGBT, IGCT ise yüksek güç uygulamalarında tercih edilmektedir. Eviriciler akım kaynaklı veya gerilim kaynaklı olabilmektedir. Akım kaynaklı eviricide DC tarafta endüktans elemanı, gerilim kaynaklı eviricide ise DC tarafta kondansatör elemanı kullanılır. En temel evirici yapısı iki seviyeli eviricidir. Evirici ailesinin en dikkat çeken üyesi ise çok seviyeli eviricilerdir. Çok seviyeli eviricileri temel olarak üç kısma ayırabiliriz; bunlar, diyot kenetlemeli, kapasitör kenetlemeli ve kaskat eviricilerdir [3,34,35]. Bunların dışında çok seviyeli evirici ailesine 2003 yılında katılan modüler çok seviyeli eviricide bulunmaktadır [36].

3.1. İki seviyeli eviriciler (Two-level inverters)

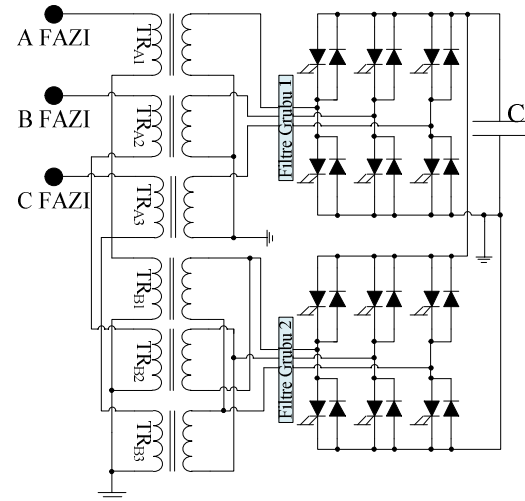
Evirici STATCOM ve DSTATCOM'un en önemli parçasıdır. İlk zamanlarda STATCOM'larda Şekil 3'te gösterilen temel yapı taşı iki seviyeli evirici olan çok darbeli evirici yapısı kullanılmıştır. Bu çok darbeli evirici yapısında büyük yapılı zigzag bağlantılı trafolar mevcuttur. Ortak DC baradan beslenen bir veya daha fazla iki seviyeli evirici, AC tarafta paralel ve seri bağlı olan bu transformatörler yardımıyla şebekeye bağlanırlar. Ancak STATCOM'daki bu evirici yapısında kullanılan transformatörler sistemdeki en pahalı eleman olması sebebiyle maliyeti artırmaktadır. Ayrıca toplam sistem kayıplarının yaklaşık %50'sinin trafolar üzerinde oluşması ve kontrolünde karşılaşılan güçlükler bir diğer dezavantajdır [37].

STATCOM'lar da kullanılan bir diğer iki seviyeli evirici yapısı ise PWM (Sinyal Genişlik Modülasyonu) denetimli iki seviyeli eviricilerdir. Şekil 4'te gösterilen bu eviricilerde birçok PWM metodu

kullanılabilmektedir. Ayrıca STATCOM uygulamalarında yüksek anahtarlama frekansı tercih edilmektedir. Yüksek anahtarlama frekansı güç kalitesini iyileştirmekle beraber, anahtarlama kayıplarını artırmaktadır. Orta ve yüksek güç uygulamalarında yukarıda bahsedilen trafo yapısının, sistem maliyeti ve düşük verim gibi dezavantajları bulunmaktadır. Bu nedenle günümüzde orta ve yüksek güç uygulamalarında genellikle çok seviyeli eviriciler kullanılmaktadır [37].



Şekil 3. Üç fazlı iki seviyeli bir evirici (A two-level three-phase inverter) [38].



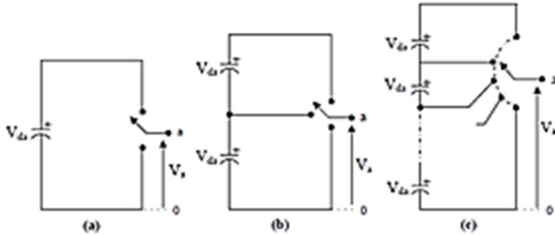
Şekil 4. Çok darbeli STATCOM (Multi-pulse STATCOM) [39].

Bilgin ve arkadaşları tarafından [40-41] yapılan çalışmada, bir kömür madeni makinelerinin kompanzasyonu için iki seviyeli bir DSTATCOM kullanılmıştır. Benzer bir çalışma olan kömür konveyör sürücülerinin kompanzasyonu Çetin ve Ermiş tarafından [42], gerilim kaynaklı iki seviyeli eviricili DSTATCOM kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Chang ve arkadaşları [43], Gurav ve arkadaşları [44], Escobar ve arkadaşları [45] ile Chen ve arkadaşları [46] tarafından ise iki seviyeli evirici kullanan DSTATCOM ile yük kompanzasyonu üzerine çalışmalar yapılmıştır. Doğrusal olmayan yük kompanzasyonu üzerine yapılan çalışmalar Singh ve arkadaşları [47], Rahmati ve arkadaşları [48] ile

Vincent ve arkadaşları [49,50] tarafından gerçekleştirilmiştir. Rajiv ve arkadaşları [51] tarafından güneş tarlası için bir STATCOM uygulaması yapılmıştır. Ayrıca Vikas ve arkadaşları [52], gerilim düşümünü kompanze amaçlı, Pushkar [53] ise gerilim dalgalanması için çalışmalarında iki seviyeli evirici tabanlı DSTATCOM kullanmıştır.

3.2. Çok seviyeli eviriciler (Multilevel inverters)

Çok seviyeli eviriciler günümüzde özellikle yüksek güçlü uygulamalarda tercih edilmektedir. Çok seviyeli eviriciler, girişlerine uygulanan DC hat geriliminin birkaç seviyesinden anahtarlama yoluyla sinüzoidal dalga şekline benzeyen bir merdiven dalga şekli oluştururlar. Çıkıştan elde edilen dalga şekli düşük THD (Toplam Harmonik Bozulum) değerine sahiptir[35,54]. İlave edilen her bir DC gerilim düzeyi, AC çıkış geriliminin dalga şekline bir basamak ilave eder. Şekil 5'te, ideal anahtarlara sahip iki seviyeli ve çok seviyeli eviricinin bir fazı verilmiştir. İki seviyeli evirici kondansatörün negatif ucuna göre iki farklı çıkış üretirken, üç seviyeli evirici üç farklı çıkış üretebilmektedir. Çok seviyeli eviriciler 3 seviyeliden itibaren başlamaktadır [35].



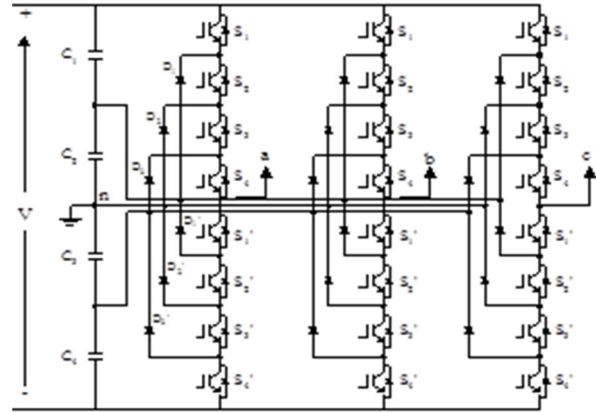
Şekil 5. a) İki seviyeli evirici, b) Üç seviyeli evirici, c) m seviyeli eviricinin bir fazına ait devre ((a) Two-level inverter, (b) Three level inverter, (c) m level inverter circuit of a phase) [35].

Çok seviyeli eviricileri aşağıdaki gibi sınıflandırmak mümkündür;

1. Diyot Kenetlemeli Evirici (DKE)
2. Kapasitör Kenetlemeli Evirici (KKE)
3. Çok Seviyeli Kaskat Evirici (ÇSKE)
4. Modüler Çok Seviyeli Evirici (MÇSE)

3.2.1. Diyot kenetlemeli evirici (Clamping Diode Inverter)

Nötr nokta kenetlemeli evirici olarak bilinen DKE eviriciler, 1981 yılında Nabae ve arkadaşları tarafından ilk önerilen çok seviyeli eviricidir. 1981 yılından bugüne kadar DKE eviricilerle ilgili birçok araştırma yapılmış ve yayınlanmıştır. [54-55]. Şekil 6'da tek faz devresi gösterilen DKE eviricilerde giriş gerilimi birbirine seri bağlı kapasitörler arasında yer alan bağlantı noktaları kullanılarak farklı seviyelere bölünebilir [54].



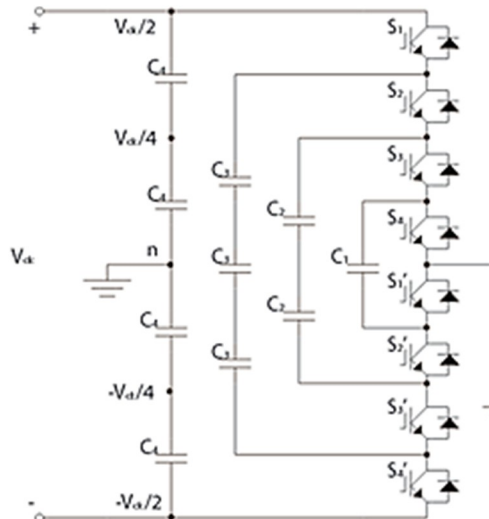
Şekil 6. Beş seviyeli üç faz DKE'nin devre şeması (Five-level three-phase DCI circuit diagram) [54].

DKE'nin avantajları şu şekildedir: Eğer seviye sayısı yeteri kadar yüksek ise harmonik bileşenler filtre kullanımına gerek olmayacak şekilde düşük olur [56]. Evirici verimi yüksektir çünkü anahtarların tamamı temel bileşen frekansında anahtarlanır [57]. Denetimi kolay ve maliyeti ise düşüktür [58]. DKE'nin dezavantajları ise şunlardır: Seviye sayısı arttıkça çok miktarda kenetleme diyotuna ihtiyaç duyulur. Aktif gücün denetimi zordur. Sınırlı çıkış voltajına sahiptir [59]. Literatürde yapılan çalışmalarda STATCOM'un çeşitli karakteristiklerini hedef alan uygulamalar yapılmıştır. Örneğin, Chen ve arkadaşları [60], DC kapasitans gerilimlerini eşitlemek ve düzenlemek amacıyla DSTATCOM'da bir diyot kenetlemeli evirici kullanmıştır. Cheng ve Crow [61] tarafından, STATCOM/BESS uygulamasında diyot kenetlemeli evirici kullanılmış ve gerilim dengeleme sorununa çözüm önerisi olarak bir dengeleme devresi önerilmiştir. Mahajmra ve arkadaşları [62] tarafından, DKE evirici tabanlı DSTATCOM kullanılarak yapılan bir diğer çalışmada ise kompanzasyonun anlık referans akımlarını elde etmek amacıyla kapalı döngü içeren Oransal-Doğrusal (PI) ve Oransal -Türevsel (PD) Kontrolör tasarımı sunulmuştur. Önerilen PD denetleyiciyle birlikte kompanzasyonun hem dengeli ve hem de dengesiz yük şartlarında çok hızlı bir zaman cevabı verdiği ve iyi bir performans sergilediği ifade edilmektedir. Qingru ve arkadaşları [63], dinamik fazörlere dayanılarak 3 seviyeli diyot kenetlemeli evirici tabanlı STATCOM sisteminin modelleme ve simülasyonunu gerçekleştirmiştir. Sharmeela ve arkadaşları [64] tarafından yapılan bir diğer çalışmada, gerilim çökme ve yükselme etkisinin azaltılması için diyot kenetlemeli çok seviyeli DSTATCOM kullanılmıştır. Anormal gerilim koşulları altında Nötr nokta kenetlemeli(NPC) evirici tabanlı DSTATCOM'un analiz ve uygulaması Chiang ve arkadaşları [65] tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada gerilimdeki düşme veya yükselmeye denetim yoluyla gerilim düzenlenmesi uygulaması yapılmıştır. Okou ve

arkadaşları [66] tarafından yapılan çalışmayla DC-bara kapasitör gerilimlerini eşitlemek için yardımcı bir devre kullanan üç seviye üç faz diyot kenetlemeli evirici sunulmuştur. Önerilen STATCOM eviricisi için kontrolör tasarımıda gerçekleştirilmiştir. Bu STATCOM üç seviye üç faz doğrusal olmayan dayanıklı kontrolörleri düzgün olarak kontrol etmek için önerilmiştir.

3.2.2. Kapasitör kenetlemeli evirici (Clamping capacitor inverter)

KKE' nin yapısı diyot kenetlemeli eviriciye benzemektedir. KKE'ler diyot kenetlemeli eviriciye karşı bir seçenek olarak, Meynard ile Foch tarafından 1992 yılında önerilmiştir [67]. KKE'yi diyot kenetlemeli eviriciden ayıran özellik kenetleme diyotları yerine, kenetleme kondansatörlerinin kullanılmasıdır[67,68]. Şekil 7'de tek fazlı, beş seviyeli gösterilen KKE eviricinin çıkış gerilim seviyesi anahtarlama elemanlarının durumlarına göre bağımsız her bir kondansatör geriliminin toplanmasıyla oluşur [69-72].



Şekil 7. Tek fazlı beş seviyeli KKE'nin devre şeması (Single-phase five-level CCI circuit diagram) [68].

Kapasitör kenetlemeli çok seviyeli eviricilerde, DC kondansatörlerin basamak şeklinde sıralanmasındaki amaç, kondansatörlerin her biri üzerindeki gerilimin bir sonraki kondansatörden farklı olması içindir. Eviricide, seviye sayısı m olan bir çıkış üretebilmek için $(m - 1)$ adet kondansatör kullanılır. Ayrıca $(m-1).(m-2)/2$ kadar da yardımcı kondansatör gereklidir. Eviricideki her fazın yapısı aynıdır. Her fazın diğer fazlardan bağımsız olan üç kondansatörü, iç döngüyü dengelemeye kullanılır. Fakat kullanılan DC bara kondansatörleri tüm fazlar için ortaktır [70-72]. Bu eviricin en önemli özelliği, aktif ve reaktif gücü denetleyebilmesi ve filtre kullanımına gerek kalmamasıdır. Ancak çok sayıda kullanılan depolama kondansatörleri maliyeti artırır ve bu kondansatörlerin

şarj ve deşarj denetimlerinin hassas olması kontrolü zorlaştırır [72].

Kapasitör kenetlemeli evirici için öne sürülen en önemli avantajlar şunlardır; Elektrik kesildiğinde çalışmasını sürdürebilir çünkü bu eviricide çok miktarda depolama kondansatörü bulunur. Ayrıca birden fazla anahtar bileşenlerinin kullanımıyla farklı gerilim seviyelerinin dengelenmesi sağlanır. Diyot kenetlemeli eviricilerde olduğu gibi filtre kullanılmadan harmonik bileşen sayısının düşük olması isteniyorsa seviye sayısı yeterince yüksek tutulmalıdır. Bu eviricide aktif ve reaktif güç akışı denetlenebilir. En önemli dezavantajları ise; Eğer seviye sayısı yüksek ise çok fazla sayıda kapasitör kullanılması gerekir. Güç kapasitörlerinin fazla yer kaplaması bu eviricilerin paketlenmesini zorlaştırır. Ayrıca ekonomik değildir. Anahtarlama frekansı ve anahtarlama kayıplarının artmasına sebep olan aktif güç iletiminde denetim çok zor olabilmektedir. [3,68].

Shukla ve arkadaşları [73] tarafından yapılan çalışmada, seri ve şönt kompanzasyon için beş seviyeli kapasitör kenetlemeli eviriciye dayalı bir statik senkron kompanseör (STATCOM) ve statik senkron seri kompanseör (SSSC) önerilmiştir. Önerilen STATCOM düşük harmonik distorsiyon ile çıkış gerilim dalga formu oluşturmada ve yüksek güç işleme yeteneği sağlamaktadır. Rai ve arkadaşları [74] ise gerçekleştirdikleri çalışmada kapasitör kenetlemeli evirici kullanan STATCOM'un yapısı ve kontrol şemasını ele almış ve çalışmalar PSCAD / EMTDC simülasyon yazılımı ile bilgisayar ortamında doğrulanmıştır. Güç sistemlerinde güç osilasyon sönümlenme ve gerilim kontrolü için beş seviyeli kapasitör kenetlemeli eviriciye dayalı STATCOM'un kullanımı açıklanan çalışma ise Viswanathan ve Madumathi [75] tarafından gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada STATCOM'un detaylı analizi yapılmış ve dalga formları incelenmiş ayrıca çeşitli anahtarlama yöntemleri ve modülasyon indeksi çalışılmıştır.

3.2.3.Çok seviyeli kaskat evirici (ÇSKE) (Cascade multilevel inverter)

Çok seviyeli evirici topolojileri ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde ÇSKE en az devre elemanına ihtiyaç duyan gruptur. Son yıllarda AC güç kaynaklarında, büyük güçlü motor sürücülerini, yüksek güç/gerilim iletim ve dağıtım sistemlerinde kompanzasyon uygulamalarında sıkça kullanılmaya başlanmıştır. ÇSKE'ler (Şekil 8), DSTATCOM uygulamaları içinde en umut verici çok seviyeli evirici topolojisi olarak gözükmektedir. Çünkü ÇSKE'ler birbirine seri bağlı ve birbirinden ayrı denetlenebilen H-köprüleri ve çıkış gerilim seviyelerini belirleyen DC kaynak oranlarına sahiptir. Şekil 8'de görüldüğü gibi faz

bacaklarındaki H-köprü evirici miktarının artırılmasıyla kaskat eviricinin çıkıştaki güç ve gerilim kapasitesi kolayca artırılabilir. Aynı zamanda bağlantı trafosuna gerek kalmadan orta gerilim dağıtım hattına direkt bağlanabilir. ÇSKE'lerde, anahtarlama yöntemlerine ek olarak, girişte bulunan DC kaynakların oranları da çıkış gerilimindeki harmonik bozulmayı azaltır [76].

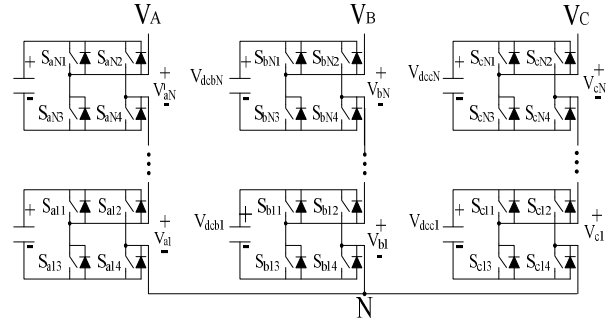
Kaskat şekilde bağlı çok seviyeli eviriciler, AC kısımda seri olarak bağlanan pek çok tek fazlı H köprülerinden oluşur. Her H köprünün DC kısmında ayrı bir DC kondansatör mevcuttur. Her bir fazda seri şekilde bağlı N köprülü devre, $2N + 1$ gerilim seviyesine sahip bir dalga şekli meydana getirir [77].

Kaskat bağlı çok seviyeli evirici, kenetleme diyotlarını ve kondansatörlerini veya büyük boyutlu faz kaydırma transformatörlerini elimine ederek daha az eleman gerektirir. Bu evirici yapısının modüler olması, çok sayıda gerilim seviyesi elde edilebilmesini kolay hale getirir [78].

Bu eviricilerin kondansatörlerinin sayısı dengeli şartlar dikkate alındığında, diyot ve kondansatör kenetlemeli eviriciler ile kıyaslandığında, tek fazlı eviricilerin kondansatör sayısına eşit olmaktadır. Eviricideki her bir kondansatörün kapasitansı, üç fazlı eviricilerle kıyaslanırsa çok daha büyük olmaktadır [79].

Kaskat bağlı evirici, her bir köprünün kendine ait bir kondansatörü olduğu için yük dengesizliği nedeniyle oluşan dengesiz AC sistem gerilimlerinin yeniden dengelenmesi amacıyla her bir fazın bağımsız denetimine olanak sağlar [77].

Kaskat bağlı eviricilerin en önemli avantajları aşağıda özetlenmiştir; Gerilim seviyeleri aynı sayıda tutularak kondansatör kenetlemeli yada diyot kenetlemeli eviriciler ile karşılaştırıldığında, yapı bakımından daha az elemana sahip olduğu görülmektedir. Kaskat bağlı eviricilerde ilave bir dengeleme kondansatörü yada kenetleme diyotu yoktur. Ayrıca her devre katı aynı yapıya sahiptir. Bu özelliklerden dolayı en uygun devre tasarımı ve paketleme yapılabilmektedir. Anahtarlama kayıplarının minimize edilmesi ve anahtarlar üzerindeki zorlanmaların azaltılması amacıyla yumuşak anahtarlama yöntemleri uygulanabilir. Kaskat bağlı eviricinin en önemli dezavantajları aşağıda özetlenmiştir; Kaskat bağlı eviricilerin kullanılabilirdiği alanlar sınırlıdır. Bunun sebebi aktif güç dönüşümü için harici DC kaynaklara ihtiyaç duyulmasındandır [3,25].

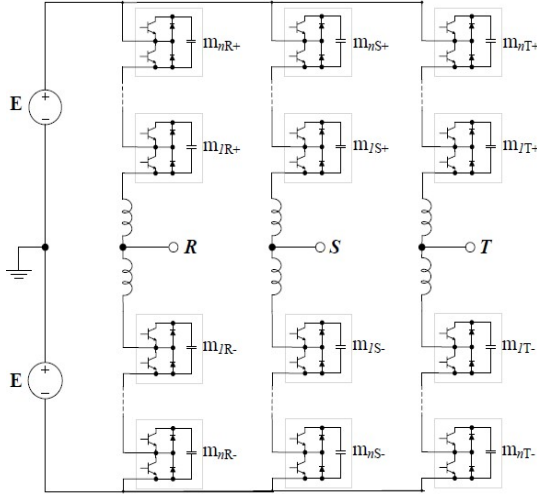


Şekil 8.Üç fazlı, ardışık şekilde bağlı çok seviyeli dönüştürücünün genel yapısı (yıldız bağlı) (General structure of three-phase sequential connected multilevel converter (star connected)) [71].

Deniz ve arkadaşları [80] tarafından, kaskat bağlı evirici kullanan STATCOM'da meydana gelen DC hat gerilim değerlerinin birbirine eşit olmama sorununa çözüm olarak yeni bir HEDGM (Harmonik Eliminasyonu Darbe Genişlik Modülasyonu) yöntemi önerilmiştir. Önerilen HEDGM yönteminin diğer yöntemlere göre üstünlüğü 7 seviyeli kaskat bağlı evirici kullanan 400V/±100kVAR STATCOM modeli kullanılarak sunulmuştur. ±1kVAR gücündeki 11seviyeli kaskat bağlı evirici kullanan STATCOM'un bir laboratuvar modeli ise Peng ve arkadaşları [81] tarafından sunulmuştur. Bu model yüksek gerilim enerji iletim hatlarında reaktif güç kompanzasyonu için kullanılan çok darbeli evirici tabanlı STATCOM'a bir alternatif olarak önerilmiştir. Law ve arkadaşları [82] ise, ortak bağlantı noktasında dinamik olarak değişen reaktif yük sisteminin reaktif güç kompanzasyonu ve şebekenin güç faktörünün düzeltilmesi amacıyla kullanılan 5 seviyeli kaskat evirici tabanlı STATCOM için yeni bir reaktif akım referans algoritması önermiştir. Önerilen algoritma bir laboratuvar prototipinde deneysel olarak uygulanmıştır.

3.2.4. Modüler çok seviyeli evirici (MÇSE) (Modular multi-level inverter (MMI))

Modüler Çok Seviyeli Eviriciler, Lesnicar ve Marquardt tarafından 2003 yılında önerilmiş ve ilk olarak SIEMENS tarafından HVDC (Yüksek Gerilim Doğru Akım) sistemlerinde kullanılmıştır. Literatürde bu evirici için M2LC, M2C gibi kısaltmalarda kullanılmaktadır. Geleneksel evirici topolojilerine göre üstün avantajları nedeniyle popülerlik kazanmaktadır [83]. MÇSE'ler, daha esnek ve yedeklemeli yapıları, çalışma aralıklarının geniş olması, harmonik bozulmalarının düşük olması gibi özellikleri sayesinde çok seviyeli eviriciler arasında öne çıkmaktadır [84,85].



Şekil 9. MÇSE topolojisi (MÇSE topology) [88].

Modüler Çok Seviyeli eviricilerin en önemli avantajları aşağıda özetlenmiştir; AC gerilim ve akım düşük harmoniğe sahiptir. Bu nedenle pasif filtreye gerek yoktur. MÇSE kol akımları sürekli. PWM taşıyıcı frekans düşüktür ve dolayısıyla anahtarlama kayıpları azdır. Alt modül (m) kondansatörlerinden birinin kısa devresi diğerleri üzerinde çok az etkiye sahiptir ve sistem hızlı bir şekilde kendini toparlayabilir bir yapıya sahiptir [86]. Doğru akım bara kondansatörü gibi merkezi bir enerji depolama elemanı bulundurmaz [87]. Elektromanyetik Girişim (EMI)'de çıkış gerilimi azaltarak kademeli değişim gerçekleşir. Üretilen akımın düşük harmonik içeriği nedeniyle maliyet ve alan tasarrufu için AC tarafında büyük filtre yapılarına gerek yoktur. Hatalı olanların yerine bağlanan fazlardan ekstra modüller bulunur. Eviricinin modüllerinde depolanan enerji nedeniyle DC hat kapasitesinin azaltılması veya ortadan kaldırılması sağlanır. Diğer çok seviyeli topolojilerle karşılaştırıldığında basit bir yapıya sahip olduğu görülür. Basit yapısı seviye sayılarının kolayca artırılmasına izin verir. Yarı iletkenler için düşük gerilim değerleri, yüksek gerilim uygulamaları için çok avantajlıdır. Kol endüktansı gerilim aşamalarında akımı sınırlamak için gereklidir. Ayrıca akım filtreleme için kullanılır [88].

Modüler Çok Seviyeli eviricilerin en önemli dezavantajları aşağıda özetlenmiştir; DC bağlantı hatalarına karşı korunmasızdır. Yarı iletken arızası durumunda korumaya ihtiyacı olan bir modüldür. Depolanan enerji modül kondansatöründe hasara sebep olabilir. Eviricinin dahili filtresi, kol endüktansındır. DC akım bileşeni nedeniyle filtre vardır. Modüllerdeki kondansatörlerin gerilim dengelemesi için ekstra kontrol ihtiyacı vardır. Farklı kontrolörlerin ayırımına dikkat edilmelidir. Tüm kapasitörlerin gerilim değerlerini ve voltaj dengeleme yöntemine bağlı olarak

kol akımlarının izlenmesi gereklidir. Sinyalleri dengeleme yöntemine bağlı olarak veri ve iletişim kaynakları için gereken kapasitörlerin sinyalleri ve kol akım ölçümleri bir merkezi işlem birimine gönderilmelidir. Özellikle ikinci harmonikte oluşan faz ayaklarındaki akım sirkülasyonu bileşenlerin kayıplarını artırır. Yüksek akım uygulamaları için gerilim düşümü karşısında kol endüktansı önemli olabilir ve reaktif güç kayıplarına neden olabilir [88].

Thool ve Awate [86] tarafından yapılan çalışmada modüler çok seviyeli evirici topolojisi kullanan transformatörsüz STATCOM uygulaması çalışılmıştır. Grain ve arkadaşları [89] ise yaptıkları çalışmada, modüler seviyeli eviriciye dayalı bir transformatörsüz STATCOM uygulaması sunmuştur. Ayrıca çalışma ilkesi, doğru akım bağlantısı kondansatörlerin gerilim dengeleme tekniği ve kontrol sistemi ayrıntılı olarak tarif edilmiştir. Jingsong ve arkadaşları [90] tarafından yapılan çalışmada, modüler çok seviyeli evirici (MÇSE) tabanlı yeni bir şönt STATCOM incelenmiştir. Çalışmada devre topolojisi, alt modül matematiksel modeli ve çalışma prensibi ayrıntılı olarak analiz edilmektedir. Sotoodeh ve Miller [91], yaptıkları çalışma ile yenilenebilir enerji sistemleri için modüler çok seviyeli evirici topolojisi kullanarak yeni bir çok seviyeli DSTATCOM evirici tasarımı sunmaktadır. Damodara ve arkadaşları [92] tarafından, MMC ve EMMC kullanılan STATCOM için faz kaymalı PWM ile PI and FUZZY kontrolörlerinin performans değerlendirilmesi yapılmıştır. Dahono ve arkadaşları [93] ise, d-ekseni ve q-ekseni akım kontrolörleri arasındaki bağlantıyı çözmek için modüler çok seviyeli eviriciye dayalı STATCOM için bir kontrol önermiştir.

4. BULGULAR (FINDINGS)

Günümüze kadar STATCOM ve DSTAKOM'un güç devresinde birçok evirici yapısı kullanılmıştır. Kullanılan ilk evirici yapısı iki seviyeli eviricilerdir. Eviricilerin temelini oluşturan iki seviyeli eviricilerde, çıkışta oluşan harmoniği azaltmak için STATCOM'da zigzag transformatörler kullanılmıştır. Önceki bölümlerde belirtildiği gibi zigzag trafo ağır bir yapıya sahip olup aynı zamanda sistem maliyetinin önemli bir kısmını oluşturur. Tablo 1'de görüleceği gibi, DC bara kapasitör sayısı bir tanedir ve m seviyeli evirici için temel diyot sayısı $(m-1) \times 2$ 'ye eşdeğerdir. Eviricinin bir fazı için iki yarı iletken güç anahtarı vardır ve iki gerilim seviyesi ($+V/2$ ve $-V/2$ olmak üzere) bulunur. Eğer anahtarlama elemanı sayısı artırılırsa evirici çıkışındaki gerilim seviyeside artar. Ayrıca yarı iletken anahtarlar seri bağlanarak yüksek bir reaktif çıkış gücü elde edilir. Bu anahtarların tüm periyot boyunca sırayla iletme veya kesime geçmesi eviricideki anahtarlama kayıplarının fazla olmasına neden olmaktadır. Bu sebeple bu

eviricilerin anahtarlama frekansının yüksek olması istenir. Buradaki amaç daha iyi çıkış veren akım ve gerilim sinyalinin oluşturulmasıdır. Ancak yüksek frekansta çalıştırıldıklarında bazı zorluklar ortaya çıkmaktadır. İki seviyeli eviricilerdeki bu zorluklar özellikle yüksek güç uygulamalarında oluşan anahtarlama kayıpları ve anahtarların anma değerlerindeki kısıtlamalardan kaynaklanır. Bu olumsuzlukların yanı sıra verimin düşük olması, büyük transformatörlerin kullanılmasından kaynaklanan yüksek maliyet, sistemde meydana gelen toplam kayıpların yarısının bu elemanlar üzerinde oluşması, denetiminde zorluklar gibi dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlara rağmen literatürde belirtildiği gibi [40-53], kömür madeni makinelerinin kompanzasyonu, kömür konveyör sürücülerinin kompanzasyonu, yük kompanzasyonu, doğrusal olmayan yük kompanzasyonu, güneş tarlası, gerilim dalgalanması, gerilim düşümü kompanzasyonu uygulamalarında çözüm olarak önerilmiş ve kullanılmıştır.

Son yıllarda özellikle iki seviyeli eviricilerde karşılaşılan sorunlara çözüm olarak önerilen çok seviyeli eviriciler özellikle yüksek gerilim ve yüksek akım uygulamalarında kullanılmaktadır. Ayrıca şebeke arayüz sistemleri, motor sürücüleri, enerji sektörü, taşımacılık, yenilebilir enerji uygulamaları ve reaktif güç kompanzasyonu uygulamalarında büyük ilgi görmektedir. Harmonik bozulmuş miktarda düşük yüksek gerilim elde edebilmek için iki seviyeli eviricilerde kullanılan transformatör ve seri bağlı anahtarlama cihazlara gerek duyulmaz. Gerilim seviyesi arttıkça çıkış gerilimindeki harmonik bozulmuş miktarı sıfıra yaklaşır, eviricinin çıkış geriliminin değeri artar ve güç değeri yükselir. Bunun için daha yüksek anma değerli eleman kullanmaya gerek yoktur. Eviricideki elemanlar üzerindeki gerilim kontrol edilebilir. Bu avantajı sayesinde kolaylıkla yüksek gerilimli eviriciler üretilebilir.

İlk bilinen çok seviyeli evirici, diyot kenetlemeli eviricidir. DKE'lerde giriş gerilimi seri bağlı kapasitörler arasındaki düğüm noktası ile çeşitli seviyelere bölünür. Bu seviye sayıları artırılarak çıkış gerilimi sinüsoidal forma yaklaştırılır. Tablo 1'de görüldüğü gibi diyot kenetlemeli çok seviyeli eviricilerde (m seviyeli), genellikle DC baraya bağlı kondansatör sayısı (m-1) tanedir ve faz geriliminde oluşan seviye sayısı m'dir. Şekil 6'da verilen Choi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada da görüleceği üzere, DC barada bulunan kondansatörler C1,C2,C3,C4 olmak üzere dört tanedir. Her kondansatör üzerindeki gerilim $V_{dc}/4$ 'e eşittir. Burada kondansatörler tarafından sağlanan akımların farklı olması kondansatör uçlarındaki gerilim değerlerinin farklı olmasından kaynaklanır. Evirici birim güç katsayısında çalışırken, her kondansatör için deşarj

süresi farklıdır. Her yarı periyotta tekrarlayan bu durumu, farklı seviyeler arasında kondansatör gerilimlerinde dengesizlikler oluşturur. Diyot kenetlemeli eviricilerdeki bu kondansatör gerilimi dengesizliği sorunu literatürde bahsedilen [60-66] çalışmalarda incelenmiş, çeşitli çözüm yöntemleri önerilmiş ve uygulanmıştır. Diyot kenetlemeli eviricilerde kenetleme diyotları sayesinde her anahtarlama elemanı üzerindeki gerilimde $V_{dc}/4$ kadardır. Tablo 1'de görüldüğü gibi m seviyeli diyot kenetlemeli bir eviricide (m-1) tane kondansatörün yanı sıra, $2x(m-1)$ tane yarı iletken anahtar ve (m-1)x(m-2) tane kenetleme diyotuna ihtiyaç vardır. Diyot kenetlemeli eviricilerde, DC hat gerilim dengeleme sorunu, kenetleme diyotları sayısındaki artış, DC bağlantı kapasitörleri ve cihazlar arasında gerilimin artması nedeniyle seviye sayısının genişletilmesi zordur.

Bu dezavantajlarından dolayı diyot kenetlemeli eviriciye alternatif olarak, kapasitör kenetlemeli evirici önerilmiştir. Diyot kenetlemeli eviriciye benzeyen yapıya sahip olan kapasitör kenetlemeli eviricideki tek fark gerilim kenetleme diyotları yerine, dengeleme kapasitörlerinin kullanılmasıdır. Filtre kullanımını ortadan kaldırması, aktif ve reaktif güç akışını denetleyebilmesi avantajlarına sahip kapasitör kenetlemeli eviricileri diğer evirici topolojilerine göre gerçekleştirmek daha zordur. Çünkü eviricinin çıkış gerilim seviyesi, anahtarlama elemanlarının durumu dikkate alınarak her bir kapasitör gerilimi toplanarak elde edilir. Eğer çıkış gerilim seviyesi arttırılırsa farklı gerilimlerde her bir kapasitörün şarj edilmesi gerekir ve bu durum devre elemanlarının denetimini zorlaştırır. Bu durum, harmonik bozulmuş açısından diyot kenetlemeli eviriciye göre daha kullanışlı olan kapasitör kenetlemeli evirici topolojisinin STATCOM ve DSTATCOM'da kullanımı sınırlandırır. Bu sınırlamalara rağmen literatürde ilgili çalışmalarda [73-75], belirtildiği gibi şönt kompanzasyon, yenilebilir enerji sistemleri, güç sistemlerinde güvenlik ve performansının geliştirilmesi, yüksek çıkış gerilimi ve düşük elektromanyetik bozulmuş, güç sistemlerinde güç osilasyon sönümlenme ve gerilim kontrolü gibi uygulamalarda önerilmiş ve kullanılmıştır. Tablo 1'de görüldüğü gibi, m seviyeli bir kapasitör kenetlemeli eviricide (m-1) adet ana kapasitör ve (m-1)x(m-2)/2 kadar dayarımcı kapasitör gereklidir. m seviyesi arttırılırsa kapasitör sayısı artar. Artan kapasitör sayısı, maliyeti artırmanın yanı sıra denetimi zorlaştırması açısından ciddi dezavantajlar oluşturur.

Kapasitör kenetlemeli eviriciden sonra önerilen diğer bir evirici topolojisi seri bağlı H köprü bloklarından oluşan kaskat çok seviyeli eviricilerdir. Kaskat eviricinin diğer iki eviriciden farkı, gerilim kenetleme diyotu ve gerilim dengeleme kondansatörünün bulunmaması ve ayrıca diğer çok seviyeli evirici yapıları dikkate alındığında en az sayıda eleman kullanmasıdır.

Tablo 1.Çok seviyeli evirici topolojilerinin faz başına gerekli eleman sayısı bakımından karşılaştırılması (The comparing of inverters according to their number of elements that required per phase)

| Evirici yapısı | İki seviyeli Evirici | DKE | KKE | ÇSKE | MÇSE | |
|---|--|--|---|--|---|---|
| | | | | | Yarım köprü | Tam köprü |
| Temel anahtarlama elemanı sayısı | 2 | $(m-1) \times 2$ | $(m-1) \times 2$ | $(m-1) \times 2$ | $4x(m-1)$ | $8x(m-1)$ |
| Temel diyot | $(m-1) \times 2$ | $(m-1) \times 2$ | $(m-1) \times 2$ | $(m-1) \times 2$ | - | - |
| Kenetleme diyotu | - | $(m-1) \times (m-2)$ | - | - | - | - |
| DC bara kapasitörü | 1 | $(m-1)$ | $(m-1)$ | $(m-1) / 2$ | $2x(m-1)$ | $2x(m-1)$ |
| Dengeleme kapasitörü | - | - | $(m-1) \times (m-2)/2$ | - | - | - |
| Kol endüktansı | - | - | - | - | 2 | 2 |
| 3 seviye için örnek hesap | - | 4 | 4 | 4 | 8 | 16 |
| Kullanım Yeri | Alçak gerilim uygulamaları, aktif güç filtresi | Motor Sürücüleri, STATCOM, aktif güç iltresi, Yakıt hücresi uygulamaları | Motor Sürücüleri, STATCOM, aktif güç filtresi | Bazı orta ve yüksek gerilim uygulamaları, STATCOM, Fotovoltaik sistemler, Motor Sürücüleri, Kesintisiz güç kaynağı | Bazı orta ve yüksek gerilim uygulamaları, STATCOM, HVDC | Bazı orta ve yüksek gerilim uygulamaları, STATCOM, HVDC |

Tablo 1’de görüldüğü gibi, m seviyeli bir kaskat eviricide $2x(m-1)$ adet temel anahtarlama elemanı ve temel diyot elemanı ile $(m-1)/2$ adet ana kapasitöre ihtiyacı vardır. Bu eviricilerde güç dönüşümü için bağımsız DC kaynak kullanılmalıdır. Böylece birkaç bağımsız DC kaynak ile istenen gerilimi üretebilirler. Eviricideki DC kaynakların yapısı yakıt hücrelerinden, bataryalardan, ultra kapasitörlerden veya solar hücrelerden oluşabilir. DC kaynakların bu yapısı, kaskat eviricileri çeşitli yenilebilir enerji kaynaklarının kullanımı için uygun hale getirir. H köprülerin her biri ana frekans gibi düşük bir frekansta anahtarlanır. Bu özellik sayesinde eviricinin daha az toplam harmonik bozulumuna sahip olduğu görülür. Bu eviricide çıkış gerilimi sinüsoidal çok yakındır. Eğer faz akımı sinüsoidal ise bir periyottaki ortalama yük her kondansatör için sıfır olur ve bütün bağımsız DC kaynak kondansatör gerilimleri dengelenebilir. Böylece seviye sayıları kolaylıkla genişletilebilir. Ayrıca modüler devre yerleşimine sahiptir ve kolaylıkla paketlenirler. Bu gibi avantajları sebebiyle kaskat eviriciler yaygın olarak FACTS, HVDC, SVC, stabilizatör ve yüksek güç motor sürücüleri gibi alanlarda uygulanmıştır. Ayrıca literatürde belirtildiği gibi [80-82], STATCOM’da DC gerilim düzeylerinin ve anahtarlama açılarının iyileştirilmesi, şebeke güç faktörünün düzeltilmesi, hızlı bir şekilde reaktif güç kompanzasyonun yapılması, yüksek gerilim enerji iletim hatlarında reaktif güç kompanzasyonu için kaskat bağlı çok seviyeli eviriciler önerilmiş ve kullanılmıştır. Ancak bu eviricilerin

bağımsız DC kaynak gerektirmesi dezavantajıdır. Uygulama alanları literatürde belirtilen [86-93] çalışmalarla desteklenmiştir. Modüler çok seviyeli eviricilerin Tablo 1’de görüldüğü gibi diğer eviricilere oranla eleman sayısı fazladır. Yine Tablo 1’de görüldüğü gibi diğer eviricilerden farklı olarak 2 tane kol endüktansı vardır. Bu endüktörler, eviricinin üst ve alt tarafı arasındaki voltaj farkını dengelemek için gereklidir. Ayrıca, herhangi bir arıza durumunda arıza akımını sınırlama amacıyla kullanılabilir.

Son yıllarda uygulamalardaki yüksek güç gereksinimi giderek artmaktadır. Belirli özellikleriyle bu ihtiyaca cevap verebilen modüler çok seviyeli eviriciler en çok önerilen öncelikli evirici topolojileri arasında yerini almıştır. Diğer evirici topolojilerinden ayıran özellikleri modüler yapıları, girişlerine uygulanan farklı DC gerilim seviyeleri ile sinüsoidal forma çok yakın çıkış gerilimi oluşturmaları, çalışabildikleri güç ve gerilim aralığının geniş olması, sahip oldukları düşük harmonik bozulma gibi özellikleridir. Eviricinin çalışma gerilimleri artırılabilir. Ayrıca trafosuz düzeneği sayesinde eviricinin kapladığı alan ve maliyetinde önemli düşüşler ve sistem yapılandırılmasında ekstra esneklik sağlar. Bu özeliği ile bağlantı transformatörleri kullanılmadan gerçekleştirilen orta veya yüksek gerilim şebeke uygulamaları için çok uygundur. Aynı zamanda yenilenebilir enerji, akıllı şebeke ve güç sistemi uygulamalarında umut veren bir topolojidir.

Çok seviyeli evirici topolojileri, faz başına gerekli eleman sayısı bakımından karşılaştırmalı olarak Tablo 1’de verilmiştir. Tüm elemanların gerilim değeri aynı olarak kabul edilmiştir. Ancak akım değerlerinin aynı olma zorunluluğu yoktur. Diyot kenetlemeli ve kapasitör kenetlemeli eviricide her seviye için yarım köprü, çok seviyeli kaskat eviricide ise her seviye için tam köprü kullanılmaktadır. Modüler çok seviyeli eviricide ise her seviye için hem yarım köprü hemde tam köprü kullanılmaktadır.

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Evirici devreler, motor sürücülerinden, kesintisiz güç kaynaklarına ve reaktif güç kompanzasyonuna kadar oldukça geniş bir uygulama alanında kullanılmıştır. Bu doğrultuda gerçekleştirilen çalışma ile STATCOM ve DSTATCOM’un güç katında kullanılan evirici devreler ile bu evirici devrelerin literatürdeki güncel topolojileri incelenmiştir. Evirici topolojilerinin değerlendirilmesi STATCOM ve DSTATCOM cihazları göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Bu yaklaşımla tanıtılan iki seviyeli evirici ile çok seviyeli evirici topolojileri içerisinde, modüler çok seviyeli evirici topolojisi (Tablo 1) daha belirgin özellikleri sayesinde ön plana çıkmıştır. Bunları iki maddede özetleyecek olursak; 1) Alternatif topolojilere göre yüksek modüleritesi, kullanılabilirliği, ekonomik olması, en fazla elemana sahip olması, esnek bir yapıya sahip olması nedeniyle güç kapasitelerini ve gerilim düzeylerini artırmanın kolay olması. 2) Diğer topolojilerle aynı anahtarlama frekansında çıkış geriliminin harmonik bozulmasının daha az olması, aynı çıkış geriliminin daha düşük DC bara gerilimi ile elde edilmesi MÇSE topolojisini daha kullanılabilir hale getirmektedir. Ayrıca MÇSE kullanılan STATCOM ve DSTATCOM’un talep edilen reaktif akımı oldukça kısa sürede karşılayabildiği yapılan literatür taramaları sonuçlarında görülmektedir. STATCOM ve DSTATCOM uygulamaları için reaktif gücün oldukça hızlı bir şekilde karşılanabilmesi, MÇSE’nin diğer evirici topolojilerinin dezavantajlarını giderecek yeni nesil bir evirici topolojisi olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar doğrultusunda önerilen MÇSE topolojisinin STATCOM ve DSTATCOM uygulamaları için oldukça kullanışlı olduğu gözlemlenmiştir.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

[1] [Çevrimiçi]. Available:Schneider Electric,<http://www.schneider-electric.com.tr/documents/solutions/EV-cozum-EECAT201101TR.pdf>, [Erişildi: 24 Haziran 2015].

[2] M. M. Ertay, Z. Aydoğmuş, “Güç Sistemlerinde FACTS Uygulamaları,” SDU International Techn. Science, 4(2), 2012, pp. 40-58.

[3] R. H. Muhammad, “Power Electronics Devices, Circuits and Applications,” Pearson, Nobel Yayınevi, Türkçe çeviri, 2014.

[4] H. Masdi, N. Mariun, S. Mahmud, A. Mohamed, S. Yusuf, “Design of a Prototype DSTATCOM for Voltage Sag Mitigation,” National Power and Energy Conf., 2004, pp. 61-66.

[5] A. Çetin, M. Ermiş, “VSC Based DSTATCOM with Selective Harmonic Elimination,” IEEE Tran. on Industry Appl., 45(3), 2009, pp. 1000-1015.

[6] H. F. Bilgin, M. Ermiş, “Reactive Power Compensation of Coal Mining Excavators By Using A New Generation STATCOM,” IEEE Trans. on Industrial Appl., 43(1), 2007, pp. 97-110.

[7] S. Filizadeh, A. M. Gole, “Harmonic performance analysis of an OPWM-controlled STATCOM in network appl.,” IEEE Tran. on Power Delivery, 20(2), 2005, pp. 1001-1008.

[8] S. M. Mueen, H. M. Hasaniien, R. Takahashi, T. Murata, J. Tamura, “Integration of space vector pulse width modulation controlled STATCOM with wind farm connected to multi machine power system,” Journal of Renewable Sustainable Energy 1, 01310, 2009.

[9] L. Ran, L. Holdsworth, G. A. Putrus, “Dynamic selective harmonic elimination of a three-level converter used for static var compensation,” IEEE Proc.-Generation, Tran. Distr., 149(1), 2002, pp. 83-89.

[10] M. Saeedifard, H. Nikkhajoei, R. Iravani, “A Space Vector Modulated STATCOM Based on a Three-Level Neutral Point Clamped Converter,” IEEE Tran. On Power Delivery, 22(2), 2007, pp. 1029-1039.

[11] K. Sundararaju, K. A. Nirmal, “Control Analysis of STATCOM with Enhanced Methods for Compensation of Load Variation,” European Journal of Scientific Research, 53(4), 2011, pp. 590-597.

[12] H. Masdi, N. Mariun, S. M. Bashi, A. Mohamed, S. Yusuf, “Construction of a Prototype DStatcom for Voltage Sag Mitigation,” European Journal of Scientific Research, 30(1), 2009, pp. 112-127.

[13] Y. Liang, C. O. Nwankpa, “A New Type Of STATCOM Based On Cascading Voltage Source Inverters With Phase-Shifted Unipolar SPWM,” Industry Appl. Conf., Thirty-Third IAS Annual Meeting IEEE, vol.2, 1998, pp. 1447-1453.

- [14] F. Z. Peng, J. S. Lai, J. W. Mckeever, J. Vancoevering, "A Multilevel Voltage-Source Inverter with Separate DC Sources for Static Var Generation," *IEEE Tran. On Industry Appl.*, 32(5), 1996, pp. 1130-1138.
- [15] S. Guo, D. Liu, "Voltage Oriented Based Control Strategy for Cascaded PWM STATCOM," *Power and Energy Engineering Conf. (APPEEC), 2010 Asia-Pacific, 2010*, pp. 1-4.
- [16] Z. Li, J. Wang, F. Zhang, B. Li, L. Qi, P. Xu, X. Xia, "Study of Harmonic Elimination in Switching Devices in STATCOM," *1st. International Conf. on Electric Power Equipment-Switching Techn.-Xi'an-China, 2011.*, pp. 224-228.
- [17] S. Zhonglai, Z. Guang, Z. Jinggang, "Research on Optimization Carrier Phase-Shifted SPWM of Cascaded STATCOM," *Artificial Intelligence, Management Scienceand Electr. Commerce (AIMSEC), 2nd International Conf. on, 2011*, p. 4252-4255.
- [18] T. S. Yeh, H. F. Jhu, H. W. Sung, "Modeling and Control of Three-Phase Multilevel Inverter-Based STATCOM," *2nd IEEE International Symp. on Power Electr. for Distributed Generation Systems, 2010*, pp. 406-411.
- [19] D. Patel, R. Saravana Kumar, K. K. Ray, R. Ramesh, "Design and Implementation of Three Level CHB Inverter with Phase Shifted SPWM using TMS320F24PQ," *Power Electr. (IICPE), India International Conf. on, 2011*, pp. 1-6.
- [20] X. Xu, Y. Zou, K. Ding, F. Liu, "A STATCOM Based on Cascade Multilevel Inverter with Phase-shift SPWM," *Intematlional Conf.on Power System Techn. - POWERCON Singapore, 2004*, pp. 145-149.
- [21] X. Xu, Y. Zou, K. Ding, F. Liu, "Cascade multilevel inverter with Phase-Shift SPWM and its application in STATCOM," *The 30th Annual Conf.of the IEEE Industrial Elect. Society, Busan-Korea, 2004*, pp. 1139-1143.
- [22] K. H. Law, S. A. Mohamed, D. Georgios, S. Konstantinou, V. G. Agelidis, "SHE-PWM Cascaded Multilevel Converter with Adjustable DC Sources Control for STATCOM Appl.," *Power Elect. Motion Control Conf. (IPEMC), 7th International, 2012*, pp. 330-334.
- [23] L. Gong, Y. Kang, J. Chen, S. He, "Phase-Shifted Space Vector PWM and On-time Correction DC Voltage Balancing Scheme for Cascaded H-Bridge STATCOM," *Power Electr. ECCE Asia (ICPE & ECCE), IEEE 8th International Conf. on, 2011*, pp. 2741-2748.
- [24] M. Hagiwara, H. Akagi, "PWM control and experiment of modular multilevel converters," *Power Elect. Specialists Conf., PESC 2008, IEEE, 2008*, pp. 154-161
- [25] C. Xu, K. Dai, Y. Kang , C. Liu, "Characteristic Analysis and Experimental Verification of a Novel Capacitor Voltage Control Strategy for Three-Phase MMC-DSTATCOM," *Applied Power Elect. Conf. and Exposition (APEC), 2015*, pp. 1528-1533.
- [26] H. P. Mohammadi, M. T. Bina, "A Transformerless Medium-Voltage STATCOM Topology Based on Extended Modular Multilevel Converters Power Elect.," *IEEE Tran. on, 26(5), 2011*, pp. 1534-1545
- [27] M. Pereira, D. Retzmann, J. Lottes, M. Wiesinger, G. Wong, "SVC PLUS: An MMC STATCOM for Network," and *Grid Access Appl., IEEE Trondheim PowerTech, 2011*, pp. 1-5.
- [28] C. Wang, B. T. Ooi, "Elimination of low frequency harmonics of modular multilevel converters (MMC): Implications to MMC HVDC and STATCOM," *Industrial Elect. Society, IECON 2013 - 39th Annual Conf. of the IEEE, 2013*, pp. 730 – 735.
- [29] M. Nieves, J. M. Maza, J. M. Mauricio, R. Teodorescu, M. Bongiorno, P. Rodriguez, "Enhanced control strategy for MMC-based STATCOM for unbalanced load compensation," *Power Electr. Appl. (EPE'14-ECCE Europe), 16th European Conf., 2014*, pp. 1-10
- [30] P. Sotoodeh, R. D. Miller, "A New Multi-level Inverter with FACTS Capabilities for Wind Appl.," *Green Techn. Conf., IEEE, 2013*, pp. 271-276
- [31] X. Yang, J. Li, W. Fan, X. Wang, T. Q. Zheng, "Research on modular multilevel converter based STATCOM," *Industrial Elect. Appl. (ICIEA), 6th IEEE Conf., 2011*, pp. 2569 – 2574.
- [32] J. Zhu, L. Li, M. Pan, "Study of a novel STATCOM based on modular multilevel inverter," *IECON 2012 - 38th Annual Conf. on IEEE Industrial Elect. Society, 2012*, pp. 1428 – 1432.
- [33] H. M. Pirouz, M. T. Bina, "Extended modular multilevel converters suitable for medium-voltage and large-current STATCOM appl.," *IPEC 2010 Conf. Proc., 2010*, pp. 487 – 492.
- [34] R. Çötelı, Z. Aydoğmuş, "DGM-Statcom ile Reaktif Güç Kompanzasyonu," *Politeknik Dergisi Journal of Polytechnic, 10(2), 2007*, pp.123-128
- [35] E. Deniz, "Beş Seviyeli İnverterlerin SDGM İle Kontrolü," *Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Elektrik Elektronik Müh., 2005.*

- [36] R. Marquardt, A. Lesnicar and J. Hildinger, "An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range," IEEE 2003 PowerTech Conf., Bologna, Italy, 2003, pp. 23-26.
- [37] Q. Yu, P. Li, W. Liu, X. Xie, "Overview of STATCOM Techn.," 2004 IEEE International Conf.on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Techn. (DRPT2004), Vol.2, April 2004, pp. 647 - 652
- [38] O. Ojo, "The Generalized Discontinuous PWM Scheme for Three-Phase Voltage Source Inverters," IEEE Tran. On Industrial Electr., 51(6), December 2004.
- [39] A. M. Vural, K. Ç. Bayındır, M. Tümay, "12 Darbeli bir STATCOM için Denetleyici ve Filtre Parametrelerinin Simplex Yöntemi ile Optimizasyonu", Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Ve Biyomedikal Müh. 13. Ulusal Kongresi Ve Fuarı, 2009.
- [40] H. F. Bilgin, M. Ermis, "Design and Implementation of a Current-Source Converter for Use in Industry Appl. of DSTATCOM," IEEE Tran. on Power Elect., 25(8), Ocak 2010, pp. 1943-1957.
- [41] H. F. Bilgin, M. Ermiş, K. N. Köse, A. Cetin, I. Cadirci, A. Acik, T. Demirci, A. Terciyanlı, C. Koçak, M. Yörükoglu, "Reactive-Power Compensation of Coal Mining Excavators by Using a New-Generation STATCOM," IEEE Tran.on Industry, 43(1), Ocak-Şubat 2007, pp. 97-110.
- [42] A. Çetin, M. Ermiş, "Reactive Power Compensation of Coal Conveyor Belt Drives by Using DSTATCOMs," Industry Appl. Conf., 42nd IAS Annual Meeting, Conf. Record of the 2007 IEEE, 23-27 Sept. 2007, pp. 1731-1740.
- [43] W. N. Chang, K. D. Yeh, "Design of DSTATCOM for Fast Load Compensation of Unbalanced Distribution Systems," IEEE, PEDS, 2008, pp. 801-806.
- [44] S. S. Gürav, H. T. Jadhav, "Application of DSTATCOM for load compensation with non-stiff sources," International Conf for Convergence of Technology, 2014, pp.1-5.
- [45] G. Escobar, A. M. Stankovic, P. Mattavelli, "An Adaptive Controller in Stationary Reference Frame for DSTATCOM in Unbalanced Operation," IEEE Tran. On Industrial Electr., 51(2), April 2004, pp.401-409.
- [46] B. S. Chen, Y. Y. Hsu, "A Minimal Harmonic Controller for a STATCOM," IEEE TRAN. ON INDUSTRIAL ELECT., 55(2), FEBRUARY 2008, pp. 655-664.
- [47] B. Singh, S. S. Murthy, S. Gupta, "STATCOM-Based Voltage Regulator for Self-Excited Induction Generator Feeding Nonlinear Loads," IEEE TRAN. ON INDUSTRIAL ELECT., 53(5), OCTOBER 2006, pp. 1437-1452.
- [48] A. Rahmati, A. Abrishamifar, E. Abiri, "Sensorless Direct Power Control For a DSTATCOM" Universities Power Engineering Conf., 2006, UPEC '06, Proceedings of the 41st International, 2006, pp.1001-1005.
- [49] V. George, M. K. Mishra, S. Sridharan, "A Novel Constant Switching Frequency Strategy For A Three-Leg DSTATCOM," Electrical and Computer Engineering, CCECE, 2008, pp. 681-684.
- [50] G. Vincent, M. K. Mishra and K. Rao, "An Improved Switching Strategy for a Three-Phase Three-Leg DSTATCOM," Industrial Elect. Appl., 2008, ICIEA 2008, 3rd IEEE Conf., 2008, pp. 1169-1173.
- [51] R. K. Varma, S. S. Rangarajan, I. Axente, V. Sharma, "Novel application of a PV Solar Plant as STATCOM during Night and Day in a Distribution Utility," Power Systems Conf. and Exposition (PSCE), 2011, pp. 1-8.
- [52] V. Purushothaman, B. K. Mathew, "Voltage Sag Correction in Distribution System Using DSTATCOM with PI and Hysteresis Controllers," International Conf. on Magnetics, Machines & Drives (AICERA-2014 iCMMD) 2014, pp. 1-6.
- [53] P. Chaudhari et. Al, "Design and Implementation of STATCOM for Reactive Power Compensation and Voltage Fluctuation Mitigation in Microgrid," Signal Processing, Informatics, Communication and Energy Systems (SPICES), IEEE International Conf., 2015, pp. 1-5.
- [54] S. Tuncer, "Çok Seviyeli İverterler Ve Dgm Teknikleri," Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, 2004, pp.18-24.
- [55] [Çevrimiçi]. Available:Electrical Engineering Community, <http://engineering.electricalquipments.org/electrical-distribution/diode-clamped-multilevel-inverters.html>, [Erişildi: 13 Eylül 2015].
- [56] S. Özdemir, E. Özdemir, L. M. Tolbert, S. Khomfoi, "Elimination of Harmonics in a Five-Level Diode-Clamped Multilevel Inverter Using Fundamental Modulation," Power Elect. and Drive Systems, PEDS '07, 7th International Conf. on Nov. 2007, pp. 850-854.
- [57] M. Kedaraswari, "Reduction of THD in Diode Clamped Multilevel Inverter employing SPWM technique," International Journal of Scientific and Research Publications, 3(6), June 2013, pp. 1-4

- [58] J. Deepthi, S. N. Saxena, "Study of Variation of THD in a Diode Clamped Multilevel Inverter with respect to Modulation Index and Control Strategy," 2nd International Conf. and workshop on Emerging Trends in Techn. (ICWET) 2011, pp. 37-42
- [59] M. H. Rashid, Power Electronics Handbook third edition, Elsevier Inc., 13 Oca 2011, pp. 459.
- [60] Y. Chen, B. Mwinyiwiwa, Z. Wolanski, Z. B. T. Ooi, "Regulating And Equalizing Dc Capacitance Voltages In Multilevel Statcom," IEEE Tran.on Power Delivery, 12(2), April 1997, pp. 901-907.
- [61] Y. Cheng, M. L. Crow, "Diode-Clamped Multi-level Inverter For the StatCom/BESS," Power Engineering Society Winter Meeting, vol.1, 2002, pp. 470-475.
- [62] K. K. Mahajmra, A. Ghosh and S. R. Doradla, "Simplified model for control design of STATCOM using three-level inverter," TENCON '98, 1998 IEEE Region 10 International Conf. on Global Connectivity in Energy, Computer, Communication and Control, Vol.2, 1998, pp. 536-539.
- [63] Q. Qi, C. Yu, C. K. Wai and Y. Ni, "Modeling and simulation of a STATCOM system based on 3-level NPC inverter using dynamic phasors," Power Engineering Society General Meeting IEEE, Vol.2, 2004, pp. 1559-1564.
- [64] C. Sharmeela, G. Uma, M. R. Mohan and K. Karthikeyan, "Multi-level Distribution STATCOM forreducing the effect of Voltage Sag and Swell," 2004 Intemational Conf. on Power System Techn.,2004, pp. 310.
- [65] H. K. Chiang, B. R. Lin, K. T. Yang and C. C. Yang, "Analysis and implementation of a NPC-based DSTATCOM under the abnormal voltage conditions," Industrial Techn. 2005, ICIT 2005, IEEE International Conf. on 2005, pp. 665 – 670.
- [66] F. A. Okou, D. Dupuis, O. Akhrif, M. Tarbouchi, "A robust nonlinear controller for a STATCOM based on a 3-phase neutral point clamped converter ," Industrial Electr., IECON '09, 35th Annual Conf. of IEEE, 2009, pp. 3623 – 3630.
- [67] T. A. Meynard, H. Foch, "Multi-Level Conversion: High Voltage Choppers and Voltage-Source Inverters," IEEE Power Elect. Specialists Conf., 1992, pp. 397-403.
- [68] A. Nabae, I. Takahashi, H. Akagi, "A New Neutral-Point- Clamped PWM Inverter," IEEE Tran. On Industry Appl., 1981, pp. 518-523.
- [69] A. Nordvall, "Multilevel Inverter Topology Survey," Master of Science Thesis in Electric Power Engineering, Chalmers University Of Techn., 2011, pp.17.
- [70] S. Sirisukprasert, "The Modelling and Control A Cascaded Multilevel Converter Based STATCOM," Thesis of Doctor of Philosophy, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA. 2004.
- [71] M. A. Anadol, "Laboratuar Ölçekli Bir Karma İletim Hattında STATCOM Kullanılarak Sistem Dinamik ve Sürekli Hal Davranışlarının İncelenmesi," Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enst., 2012.
- [72] A. Kazdaloğlu, B. Çakır, M. Demir, A. Güneroğlu, E. Özdemir, M. Uçar, "Fotovoltaik Elektrik Üretim Sistemlerinde Kullanılan Çok Seviyeli Eviricilerin İncelenmesi," 4. Enerji verimliliği ve kalitesi semp., KOCAELİ, 2011, pp. 48-53.
- [73] A. Shukla, A. Ghosh, A. Joshi, "Static shunt and series compensations of an SMIB system using flying capacitor multilevel inverter," Power Delivery, IEEE Tran.,20(4), pp. 2613-2622.
- [74] V. K. Rai, M. Gaharwar, R. Kumar, S. Saraswat, "Synchronous Voltage Source Inverter Using FCMLI," Global Journals Inc., 11(2), 2011, pp.11.
- [75] K. Viswanathan, K.Madumathi, "A Study of Five-Level FCMLI Based STATCOM," International Journal of Research in Advent Techn., 2(3), 2014, pp. 367-374.
- [76] A. Chen ve X. He, "Research on Hybrid-Clamped Multilevel- Inverter Topologies," IEEE Tran. on Ind. Elec., 53(6), 2006, pp. 1898-1907.
- [77] T. An, M. T. Powell, H. L. Thanawala, N. Jenkins, "Assesment of Two Different STATCOM Configurations for FACTS Application in Power Systems," IEEE International Conf. on Power System Techn., POWERCON '98, Beijing, China, Vol. 1, 1998, pp. 307-312.
- [78] Y. Qingguang, L. Pei, L. Wenhua, X. Xiaorong, "Overview of STATCOM Technologies," IEEE International Conf. on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Techn., Vol. 2, 2004, pp. 647-652.
- [79] E. H. Watanabe, M. Aredes, P. G. Barbosa, Jr. G. Santos, J. K. A. Lima, J. K. S. Dias, "Power Electronics Handbook, Second Edition: Devices, Circuits and Applications," Chapter 31 : Flexible AC Tran.Systems, M. H. Rashid, Academic Press An imprint of Elsevier Inc. 2006, pp. 783 - 808.
- [80] M. Deniz, B. Gültekin, C. O. Gerçek, T. Atalik, I. Çadirci, M. Ermis, "A New DC Voltage Balancing Method for Cascaded Multilevel

- Inverter Based STATCOM”, ACEMP'07 International Aegean Conf. on Electrical Machines and Power Elect., Bodrum, 10-12 September 2007, pp. 532-535.
- [81] F. Z. Peng, J. S. Lai, J. W. McKeever and J. A. V. Coerver, “Multilevel Voltage-Source Inverter with Separate DC Sources for Static Var Generation,” IAS '95 Thirtieth IAS Annual Meeting, Orlando, 8-12 October 1995, pp. 2541-2548.
- [82] L. K. Haw, M. S. A. Dahidah, H. A. F. Almurib, “A New Reactive Current Reference Algorithm for the STATCOM System Based on Cascaded Multilevel Inverters,” IEEE Tran. On Power Elect., 30(7), JULY 2015, pp. 3577-3588.
- [83] Z. Melhem, “Electricity Transmission, Distribution and Storage Systems,” Woodhead Publishing, 1st Edition, October 2013, pp. 157.
- [84] R. Marquardt and A. Lesnicar, “A new modular voltage source inverter topology,” in Conf. Rec. Eur. Conf. Power Elect. Appl., 2003, pp. 1-10.
- [85] A. Lesnicar and R. Marquardt, “An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range,” in Proc. IEEE Power and Energy Conf., 2003, pp. 6.
- [86] B. B. Thool, S. P. Awate, “Modular Multilevel Converter Based Statcom,” SSRG International Journal of Electrical and Electr. Engineering (SSRG-IJEEE), 2(1) , 2015, pp. 15-18.
- [87] B. Çiftçi, F. Ertürk, A. M. Hava, “Modüler Çok Seviyeli Dönüştürücülerde Taşıyıcı Temelli DGM ile Anahtarlama ve Kondansatör Gerilimi Dengeleme Yöntemleri,” Eleco 2014 Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Müh. Semp., 27-29 Kasım 2014, pp. 250-256.
- [88] P. Asimakopoulos, “Design and Control of Modular Multilevel Converter in an Active Front End Appl.,” Master of Science Thesis in Electric Power Engineering, Chalmers University Of Technology, 2013, pp. 2-3.
- [89] G. P. A. Miet, O. A. L. Miecee, G. B. Miecee, J. M. Smiecee, “Transformerless STATCOM based on a five-level modular multilevel converter,” Power Elect. and Appl. EPE '09, 13th European Conf. on 2009, pp.1-10.
- [90] J. Zhu, L. Li, M. Pan, “Study of a novel STATCOM based on modular multilevel inverter,” IECON 2012 - 38th Annual Conf. on IEEE Industrial Electr. Society, 25-28 Oct. 2012, pp. 1428-1432.
- [91] P. Sotoodeh and R. D. Miller, “A New Single-Phase Inverter with DSTATCOM Capability for Grid-connected Small Wind Turbines,” Power and Energy Conf. at Illinois (PECI), IEEE 22-23 Feb. 2013, pp. 175-179.
- [92] K. Damodara, N. U. Aheshwar, K. K. Kumar, “MMC and EMMC based STATCOM: A Comparative Study,” International Journal of Computer Applications, 73(12), July 2013, pp. 38-45.
- [93] P. A. Dahono, H. N. Buwana, R. Iswara, “A Control Method for Static VAR Compensator Based On Modular Multilevel Inverter,” School of Electrical Engineering and Informatics, Institute of Technology Bandung, 2009, pp:1-8.