

GÜNEŞ PİLİ İLE BESLENEN ŞEBEKE ETKİLEŞİMLİ EVİRİCİLER – GENEL BİR BAKIŞ

İbrahim SEFA ve Necmi ALTIN

Elektrik Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, 06500, Beşevler/Ankara
isefa@gazi.edu.tr, necmialtin@gmail.com

(Geliş/Received: 10.04.2008 ; Kabul/Accepted: 17.06.2009)

ÖZET

Bu çalışmada güneş enerjisinden üretilen elektrik enerjisinin daha verimli ve etkin bir biçimde kullanılmasını sağlamak amacıyla kullanılan şebeke etkileşimli eviricilere genel bir bakış sunulmaktadır. Evirici yapılarının tarihi gelişimi, günümüz topolojileri, gelecekteki beklenti ve eğilimler araştırılmıştır. Ayrıca, şebeke etkileşimli eviricilerde bulunması gereken özellikler ile şebekeye bağlantı şartlarını belirleyen uluslararası standartlar sunulmuştur. Sonuç olarak geçmişten günümüze incelenen eviriciler verim, maliyet, boyut, güvenilirlik ve güvenlik gibi kriterlere bağlı olarak karşılaştırmalı bir biçimde sunulmuş ve araştırmacıların evirici seçiminde kullanabileceği kapsamlı bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Şebeke etkileşimli evirici, evirici topolojileri, FV.

GRID INTERACTIVE PHOTOVOLTAIC INVERTERS— A REVIEW

ABSTRACT

In this study, a review is proposed about the grid interactive inverters, used to utilize the electrical energy, produced from solar energy, more efficiently and effectively. The historical evolution of the inverters, present topologies and the future trends are investigated. Also the specifications that the inverters have to support and the international standards that specify the needed requirements for grid interactive systems are proposed. Finally the inverters researched up to present are comparatively proposed according to criteria's such as cost, efficiency, reliability and safety, and a comprehensive study has been realized that can be used in inverter selection by the researchers.

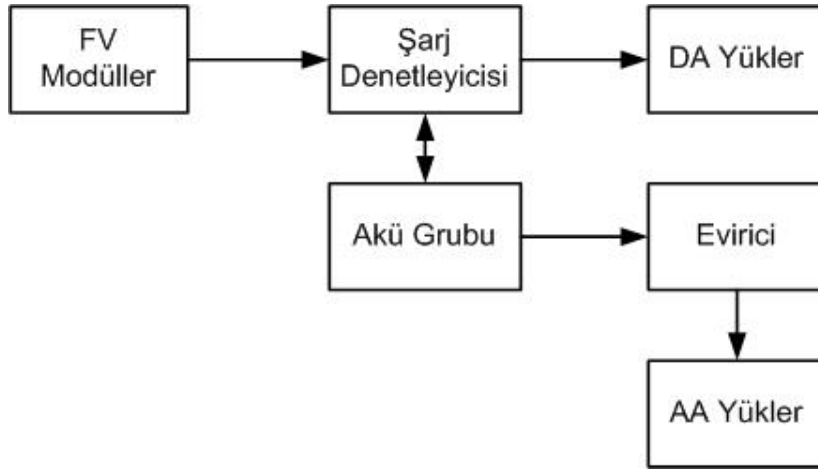
Keywords: Grid interactive inverter, inverter topologies, PV.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde elektrik enerjisi üretiminde ana kaynak olarak kullanılan fosil yakıtların azalması ve yakın zamanda tükeneceğinin bilinmesi, çevre kirliliğine neden olmaları ve ekosisteme zararlar vermeleri gibi nedenlerle yeni enerji kaynaklarına yönelik araştırmalar önem kazanmıştır. Dünyanın artan enerji ihtiyacının temiz, ekonomik ve güvenli bir biçimde karşılanabilmesi için yapılan çalışmalar neticesinde güneş, rüzgâr ve yakıt hücreleri gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) önemi artmıştır. Başlangıçta haberleşme vericileri, otoyol aydınlatması gibi elektrik enerjisinin bulunmadığı uzak bölgelerdeki yükleri beslemek için kullanılan bu kaynakların günümüzdeki kullanımı ve toplam elektrik enerjisi üretimindeki payları gitgide artmaktadır [1,2, 3].

Fotovoltaik (FV) paneller güneş enerjisini DA elektrik enerjisine çevirirler. Şebekenin ve yüklerinin büyük kısmının AA güç talep etmesi nedeniyle üretilen gücün AA'ya dönüştürülmesi gereklidir. Bunun için eviriciler kullanılır. Yenilenebilir enerji uygulamalarında temel olarak ada modlu ve şebeke etkileşimli olmak üzere iki tip evirici kullanılmaktadır [4-6].

Şekil 1'de ada modu çalışan eviricinin blok diyagramı görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi ada modlu evirici FV panel, şarj denetleyicisi, akü grubu ve DA-AA evirici içermektedir. Ayrıca şarj denetleyicisi sistemde bulunan DA yükleri de beslemektedir. Ada modu çalışan eviricilerin kontrolleri daha basit ve maliyetleri daha düşüktür. Bu tip eviricilerde üretilen güç belirli yüklerin beslenmesinde kullanılmaktadır.



Şekil 1. Ada modu çalışan evirici yapısı (Structure of stand-alone mode inverter)

Enerjinin sürekliliği için akü grupları kullanılmasını gerektirir. Ancak bu çalışma durumunda alıcının ihtiyacından fazla enerji üretiminin olması durumunda ihtiyaç fazlası enerjinin şebekeye aktarılması söz konusu olmadığından verimli bir çalışma elde edilememekte ve enerji depolamak için büyük kapasiteli akü gruplarının kullanılması halinde ise sistemin maliyeti artmaktadır [1].

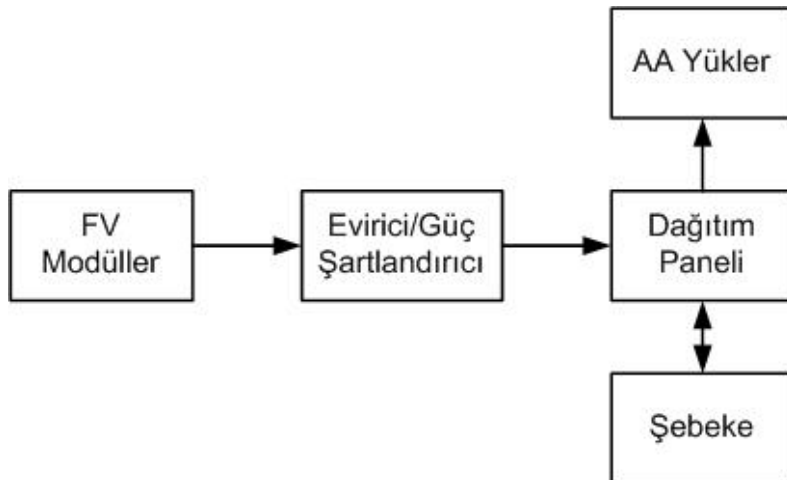
YEK'lerin şebekeye bağlanabilmesi ve böylece daha verimli bir çalışma sağlanabilmesi için şebekeyle paralel çalışabilen ve şebeke etkileşimli adı verilen eviricilere ihtiyaç vardır. Şekil 2'de şebeke etkileşimli çalışan eviricinin blok diyagramı verilmektedir. Görüldüğü gibi şebeke etkileşimli evirici FV enerji kaynağı, güç şartlandırıcı, dağıtım paneli ve evirici katından oluşmaktadır. Şebeke etkileşimli evirici ile FV panellerde üretilen DA elektrik enerjisi AA elektrik enerjisine dönüştürülmekte olup, evirici çıkışı dağıtım tablosuna bağlanmıştır. Sistemdeki yüklerin tamamı veya bir kısmı eviriciden beslenebildiği gibi üretilen enerjinin ihtiyaçtan fazla olması durumunda şebekeye enerji aktarımı da mümkün olmaktadır. Böylece daha verimli bir çalışma sağlanabilmektedir. Bu tip bir evirici ile küçük güçlü bir FV sisteme sahip bir kullanıcının dahi günün belli saatlerinde satıcı durumuna

geçebilmesini mümkün kılar.

YEK'lerin kullanımı dolayısıyla üretici sayısı ve üretim miktarı arttıkça maliyetleri de düşmektedir. Örneğin ABD'de 1992 yılında FV panelin watt başına fiyatı 4,4~7,9 USD iken günümüzde 2,6~3,5 USD'ye düşmüştür. Böylelikle şebeke etkileşimli eviricinin fiyatı toplam sistem maliyeti üzerinde daha etkili olmaya başlamıştır. Bu nedenle eviricinin watt başına maliyetindeki azalma YEK'den üretilen enerjinin daha cazip olabilmesi için önemlidir. Sonuç olarak yeni, ucuz ve yaratıcı evirici çözümleri ve yeni sistem tasarımları üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır [1,6,7].

Bu çalışmada IEEE, Elsevier, EI, Taylor and Francis ve Türkçe veri tabanları taranarak konu ile ilgili toplam 140 yayın incelenmiştir. Bunlardan birbirine benzer olanlar 60 tanesi makaleye dahil edilmemiştir.

Kullanılan makalelerden 50 tanesi eviricinin taşınması gereken özellikleri, 12 tanesi uyması gereken uluslararası standartları, 18 tanesi de kullanılan evirici topolojileri ile ilgilidir. Çalışmanın 2. bölümünde eviricide bulunması gereken özellikler, 3. bölümünde eviricinin uyması gereken uluslararası standartlar ve 4. bölümünde eviricilerin tarihi gelişimi verilmiştir. Sonuç



Şekil 2. Şebeke etkileşimli çalışan evirici yapısı (Structure of grid interactive inverter)

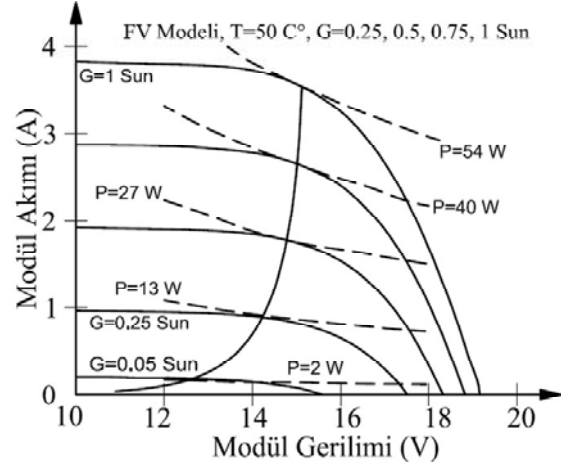
olarak eski ve yeni evirici teknolojilerinin verim, maliyet, boyut, güvenilirlik ve güvenlik gibi kriterlere bağlı olarak araştırmacıların evirici seçiminde ve araştırmalarında kullanabileceği kapsamlı bir çalışma yapılmıştır.

2. BİR EVİRİCİDE BULUNMASI GEREKEN TEMEL ÖZELLİKLER (BASIC SPECIFICATIONS OF A INVERTER)

Tipik bir şebeke etkileşimli eviricinin taşıması gereken özellikler şu şekilde belirlenmiştir;

- Şebekeye sinüs şeklinde akım enjekte etmeli ve bu akımın harmonikleri yönetmeliklerde belirtilen sınırlar içinde olmalıdır.
- Şebeke etkileşimli eviricinin güç faktörü 1 olmalıdır.
- Eviricideki güç elemanlarının yüksek frekanslı anahtarlama nedeniyle oluşan radyo girişimi kontrol altında olmalıdır.
- Şebeke kesildiğinde şebeke etkileşimli evirici şebekeden ayrılmalıdır.
- YEK'in veriminin en yüksek tutulmasını yani FV'lerden her an maksimum güç çekilmesini sağlamalıdır [8-12].

Günümüzde ticari FV panellerin verimi %15-%20 civarındadır [13,14]. FV paneller belirli bir sıcaklık ve ışınım şiddeti için tek bir akım ve gerilim değerinde maksimum güç verebilmektedirler. Bunların dışındaki akım ve gerilim değerleri çıkış gücünün dolayısıyla verimin düşmesine neden olurlar. Şekil 3'de Solarex MSX60 60W FV için farklı ışınım değerlerinde maksimum güç noktasının değişimi gösterilmiştir [15]. FV paneller tarafından beslenen bir şebeke etkileşimli evirici, panelden her an maksimum güç çekilmesini sağlamalıdır ve bu amaçla güneş panellerinin çalışma noktasının sürekli ayarlanması gerekir [16]. Maksimum gücün takip edilmesi için FV panelin maksimum güç noktasını sürekli takip eden aktif ve pasif olarak



Şekil 3. FV panel maksimum güç eğrisi (Maximum power curve of a PV module)

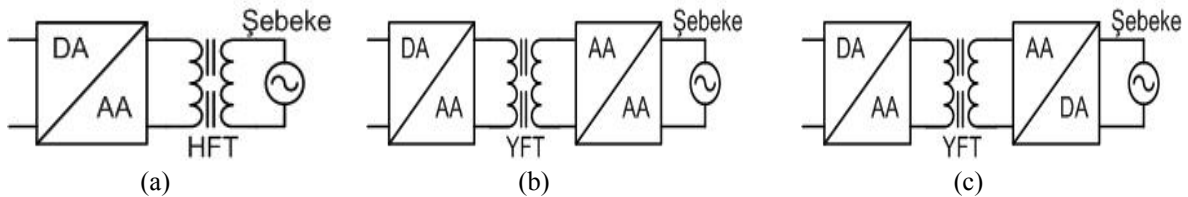
sınıflandırılabilen pek çok algoritma geliştirilmiştir [17-19]. Maksimum güç takibi (MGT) için ayrı bir DA-DA güç dönüştürücüsü kullanılabildiği gibi eviricinin şebekeye enjekte ettiği akımın genliğini kontrol edilerek de kaynaktan her an maksimum gücün çekilmesi sağlanabilmektedir [10,13,20].

Şebeke etkileşimli eviricilerde tek bir güç işleme aşaması bulunabileceği gibi bunların sayısı iki veya daha fazla olabilir [11,21-23]. Şekil 4(a)'da tek aşamalı evirici görülmektedir. Bu evirici MGT, şebeke akımı kontrolü ve eğer gerekli ise gerilim yükseltilmesi gibi bütün görevleri yerine getirmelidir. Şekil 4(b)'de iki aşamalı evirici görülmektedir. Bu sistemde MGT (ve gerekli ise gerilimin yükseltilmesi) DA-DA dönüştürücü tarafından gerçekleştirilmektedir [24].

FV modüllerin toplam geriliminin şebeke geriliminin tepe değerinden düşük olduğu durumlarda evirici çıkış gerilimi de şebeke geriliminden düşük olacağından şebekeye enerji transfer edilemez. Bu durumda evirici çıkış geriliminin yükseltilmesi için dönüştürme oranı gerilim farkına göre belirlenen bir transformatör kullanılabilmektedir. Şekil 5'de görüldüğü gibi bazı



Şekil 4. a) Tek aşamalı güç işleme b) İki aşamalı güç işleme (a) Single stage power processing b) Two stage power processing)



Şekil 5. Transformatörlü evirici örnekleri a) Şebeke ile evirici arasında hat frekanslı transformatör (HFT) bağlı b) YF link şebeke etkileşimli AA-AA eviriciye bütünleşik yüksek frekanslı transformatör (YFT) c) DA-DA güç dönüştürücüsüne gömülü YFT (Transformer-included inverter examples a) Line frequency transformer is connected between the line and the inverter b) High-frequency transformer is embedded in an HF-link grid-connected AC-AC inverter c) High-frequency transformer is embedded in DC-DC converter)

eviriciler DA-DA güç dönüştürücüsü veya DA-AA evirici bünyesinde yüksek frekanslı transformatörler içerirlerken bazıları şebeke tarafında hat frekanslı transformatör kullanırlar.

Hat frekanslı transformatör kullanımı IEEE ve IEC gibi standartların sınırlandırdığı ve dağıtım transformatörlerinde doymaların oluşmasına neden olan DA akım transferini engeller ve aynı zamanda şebeke ile FV kaynak arasında elektriki izolasyon sağlar. Topraklanması gereken sistemlerde eviricilerin çalışabilmesi için DA kaynak ile şebeke arasında elektriki izolasyonun bulunması gerekmektedir. Daha düşük boyutlardaki yüksek frekanslı transformatörler DA akım enjeksiyonu problemini çözmez. Ancak FV panellerin topraklanmasını kolaylaştırır. Hat frekanslı transformatör kullanımının ağırlık, boyut ve fiyatları artırması ve verimi düşürmesi nedeniyle modern eviricilerde yüksek frekanslı transformatörler tercih edilmektedir [25].

Ada modu çalışan eviriciler kesintisiz güç kaynağı (KGK) eviricileri ile benzer yapıda olup genellikle gerilim kontrollüdürler. Şebeke etkileşimli eviriciler ise gerilim kontrollü veya akım kontrollü olarak tasarlanabilmektedir. Ancak gerilim kontrollü eviricide gerçekleşen küçük bir senkronizasyon hatası eviricinin aşırı yüklenmesine neden olmaktadır. Akım kontrollü evirici ise bu duruma karşı daha az duyarlı olduğundan şebeke güç aktarımında önerilmektedir [8, 26,27]. Akım kontrolü için PI, histerezis, deadbeat, bulanık mantık gibi değişik kontrol yöntemleri kullanılmaktadır [5,10,11,24,28,29]. Ayrıca şebeke etkileşimli eviriciler yüke reaktif güç aktaracak (böylece reaktif güç kompanzasyonu yapabilecek) şekilde veya yük uçlarındaki gerilim harmoniklerini azaltacak şekilde de kontrol edilebilmektedir [2,22,30].

Şebeke etkileşimli evirici uygulamalarında farklı tipte evirici yapıları kullanılmaktadır. Pek çok uygulamada gerilim kaynaklı eviriciler kullanılmış olsa da kısa devrelere karşı yüksek direnç göstermeleri ve ters gerilimi bloke etmeleri gibi özellikleri nedeniyle akım kaynaklı evirici üzerine çalışmalar yoğunlaşmaktadır [12,31]. Kullanılan yapılardan biri de çok seviyeli eviricilerdir. İki seviyeli eviriciye göre ideale yakın performansları, uygun maliyetleri ve yüksek güvenilirliği nedeniyle 3 ve 5 seviyeli eviriciler de incelenmişlerdir [8,24,32]. Çok seviyeli eviriciler özellikle DA bara geriliminin yüksek olduğu orta ve yüksek güç uygulamaları için cazip bir çözümdür [8].

Şebeke etkileşimli çalışmada herhangi bir nedenle şebekenin kesilmesi durumunda evirici tarafından beslenen bölgede bir elektrik adası oluşur. Durumdan habersiz bakım personeli için tehlikeli olabilecek bu ada durumunun tespit edilmesi ve eviricinin hemen şebekeden ayrılması gereklidir. Ada modunun tespiti için aktif ve pasif yöntemler geliştirilmiştir [33-38].

Alçak/yüksek gerilim rölesi, alçak/yüksek frekans rölesi, gerilim faz sıçramasının tespiti, gerilim harmoniklerinin tespiti, akım harmoniklerinin tespiti gibi pasif metotlar, sadece şebeke parametrelerini izler, güç kalitesi üzerine etkileri yoktur. Aktif metotlar olarak empedans ölçümü, belirli bir frekanstaki empedansın tespiti, frekans eşiği, frekans kaydırma, gerilim kaydırma gibi yöntemler incelenmiştir. Bunlar şebekedeki bozulmaları ortaya çıkarır ve etkiyi izler. Şebekede ortaya çıkarılan bu bozulmalar güç kalitesini etkiler ve şebekeyle paralel çalışan çeşitli eviricilerde olduğu bilinen problemlerin tetikleyicisi olabilir [39].

Yüksek gerilim rölesi, alçak gerilim rölesi, yüksek frekans rölesi ve alçak gerilim rölesi bulandıran bir evirici temel ada modu tespit yeteneğine sahiptir. Gerilim seviyesi veya frekans normal aralığın dışına çıkarsa şebekenin hatalı olduğu düşünülerek ve evirici şebekeden ayrılır. Bununla beraber bu yöntemler ile kaynak-yük dengeli olma durumunda şebeke kesilse dahi ada modu tespit edilemez [36].

Tespit yeteneğini arttırmak için geliştirilen diğer yöntemlerden biride gerilim harmoniklerinin izlenmesidir. Bu metot dağıtım transformatörlerinin doğrusal olmayan karakteristiklerine dayanır. Güçlü bir gerilim kaynağı (şebeke) olmaz ise evirici tarafından transformatöre enjekte edilen akım büyük gerilim harmoniklerine neden olur [36]. Harmonik seviyesi arttığında verimli biçimde ada modu tespit edilmiş olur. Faz atlama tespit yöntemi adı verilen başka bir yöntem evirici gerilimi ve akımı arasındaki faz farkını izler. Şebeke etkileşimli çalışmada evirici akımı şebeke gerilimi ile aynı fazdadır. Şebeke kesildiğinde ise evirici gerilimi ve akımı arasındaki faz farkı yük tarafından belirlenir. Bu ani faz değişimi koruma devresini tetikler ve evirici durdurulur. Ancak bu yöntem yükün omik olması durumunda ada modunu tespit edemez [37]. Sayılan yöntemlerin hepsi pasif yöntemlerdir. Evirici geriliminin izlenmesini temel alırlar ve her yük durumu için başarılı değildirlir. Bu sınırlılıkları nedeniyle aktif yöntemler geliştirilmiştir [36].

Aktif yöntemlerden birisi evirici çıkış gücünü periyodik olarak değiştirmektir. Bu kaynak-yük dengeli durumunda ada modunun tespitini amaçlar. Ancak bu yöntem güç sistemindeki bütün eviriciler arasında zaman senkronizasyonu gerektirdiğinden kolay uygulanabilir değildir. Son zamanlarda bu problemin çözümü için frekans kaydırma metotları incelenmeye başlanmıştır [36].

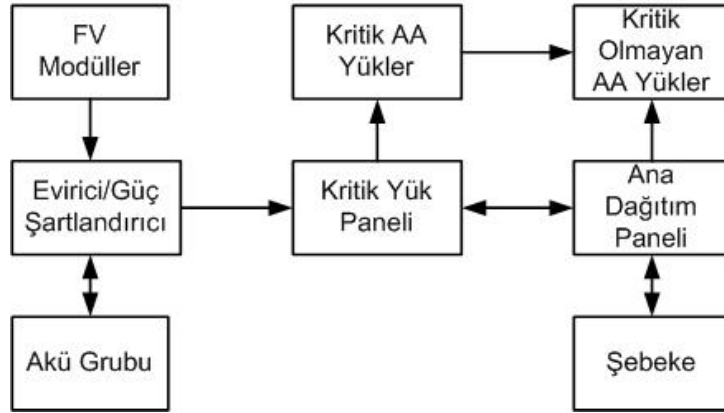
Herhangi bir nedenle şebeke kesildiğinde elektrik adalarının ve neden oldukları problemlerin oluşmasını engellemek için şebeke etkileşimli eviriciler durdururlar. Ancak bazı uygulamalarda yerel yüklere kesintisiz enerji sağlamak için gerekli tedbirler alınarak eviricinin çalışmasına devam etmesi sağlanır. Bunun için eviricinin yükün enerjisini kesmeden şebeke etkileşimli çalışma durumundan ada modu çalışma

durumuna geçmesi gereklidir. Başka bir deyişle akım kontrollü çalışmadan gerilim kontrollü çalışmaya geçmelidir [6,11]. Bu şekilde çalışabilen eviriciler iki durumlu evirici denmektedir. Şekil 6'da iki durumlu bir eviricinin blok diyagramı görülmektedir. Şekil 6'dan da görüldüğü gibi iki durumlu evirici FV paneller, güç şartlandırıcı/evirici, kritik yük paneli, ana dağıtım paneli ve akü grubundan oluşmaktadır. Bu sistemlerde yükler kritik olan ve olmayan şeklinde gruplandırılmakta ve kritik yük olarak belirlenenlere kesintisiz enerji sağlanmaktadır.

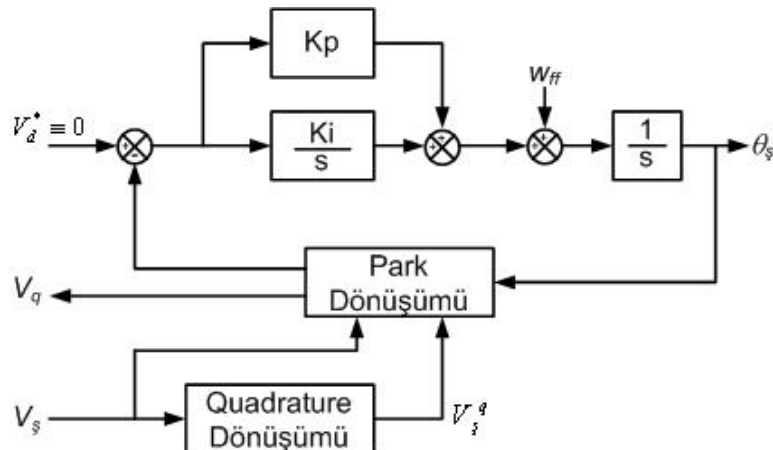
Bu tip uygulamalarda, şebeke kesildiğinde evirici şebekeden ayrılır ve gerilim kontrollü çalışmaya geçerek sadece daha önceden belirlenen yükleri beslemeye devam eder. Bu işlem sırasında yerel yüklerin enerji kesintisini algılamaması gereklidir. Ayrıca eviriciyi şebekeden ayırmak için kullanılan anahtarların açılması sırasında yerel yük uçlarında herhangi bir gerilim yükselmesi de oluşmamalıdır. Şebeke kesintisi ortadan kalktığında eviricinin otomatik olarak tekrar şebekeye bağlanması ve şebeke etkileşimli yani akım kontrollü olarak çalışmasına devam etmesi istenebilir. Bu durumda şebeke kesintisi ortadan kalktığında evirici gerilim kontrollü olarak çalışırken şebeke gerilimine senkron olmalı ve akımın sıfır geçişinde çalışma durumunu değiştirmelidir. Yine bu geçişten yükler etkilenmemelidir [40-46]. Şebeke etkileşimli çalışmada birim güç faktörünün

sağlanabilmesi için şebekeye enjekte edilen akım şebeke gerilimi ile aynı frekansta ve fazda olmalıdır. Bunun için şebeke geriliminin faz ve frekans bilgilerinin bilinmesi gereklidir. Bu bilgileri tespit etmek için elektrik devrelerinde faz ve frekans bilgisinin elde edilmesinde yaygın olarak kullanılan faz kilitleme döngüsü (FKD) devreleri kullanılmaktadır [4,34,46]. FKD devreleri şebeke etkileşimli eviricilerde şebeke gerilimi ile senkronize akım referansı üretmekte kullanılır. Bu nedenle FKD devreleri, şebeke etkileşimli evirici performansı için belirleyici özelliğe sahiptir. Şebeke geriliminin sıfır geçiş noktalarının tespiti kullanılan basit bir FKD yöntemidir [47,49]. Bu yöntemde her yarı saykıl (50Hz için saniyede 100 defa) sıfır geçişi tespit edilse de, bu tespit noktaları arasında faz izleme işlemi mümkün olmadığından hızlı izleme performansı elde etmek mümkün değildir. Ayrıca şebeke gerilimindeki düzensizlikler (gerilim harmonikleri, frekans değişimi ve gerilim çentikleri vb.) sıfır geçişinin tespit edilememesine ve dolayısıyla sistem tepkisinin yavaşlamasına neden olabilir [43]. Bu nedenle daha gelişmiş FKD teknikleri üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Üç fazlı sistemler için geliştirilen, dq dönüşümü ve uygun biçimde tasarlanmış döngü filtresi ile gerçekleştirilen FKD devresi Şekil 7'de gösterilmiştir [47,49-51].

Bu yöntemde faz tespiti dq dönüşümü ile yapılırken filtre parametreleri (sönüm faktörü, doğal frekansı)



Şekil 6. İki durumlu evirici prensip şeması (Principal schema of the bi-mode inverter)



Şekil 7. Üç fazlı FKD yapısı (Three-phase PLL structure)

sistemin dinamik karakteristiğini belirler [11,12]. Ayrıca bir fazlı sistemler için benzer özellikleri taşıyan ve $dq-\alpha\beta$ dönüşümlerinin birlikte kullanıldığı bir FKD devresi geliştirilmiştir [4,52].

3. ULUSLARARASI ŞEBEKE ETKİLEŞİMLİ EVİRİCİ STANDARTLARI (INTERNATIONAL STANDARDS DEALING WITH GRID INTERACTIVE INVERTERS)

Şebeke etkileşimli evirici, şebekeye bağlanacağından kuruluşlarının belirlediği IEC61727, EN61000-3-2, IEEE1547, EN 50330-1, IEEE 929-2000 ve U.S. National Electrical Code (NEC) 690 gibi standartlara uymalıdır. Bu standartlar güç kalitesi (tek tek harmoniklerin seviyesi ve toplam harmonik bozulum-THB-seviyesi, güç faktörü), ada modunun tespiti, topraklama, şebeke empedansının izlenmesi vb. gibi konularla ilgilidir. IEC61727, IEEE1547 ve EN61000-3-2 Tablo 1’de özetlenmiştir [23,53-58].

Tablo 1’de görüldüğü gibi günümüzde uygulanmakta olan IEEE ve IEC standartları, EN standardına göre akım harmonikleri konusunda daha katıdır. Bu durum, büyük güçlü tristörlü şebekeye etkileşimli eviriciler yerine daha küçük güçlü IGBT/Mosfet’li olanların kullanılmasına neden olmuştur [24].

Ayrıca NEC 690 standardı maksimum çıkış geriliminin 50V gibi belirli bir değere ulaşan FV panellerin

topraklı ve toprak arızalarına karşı izlenen bir sistem olmasını gerektirir. Sistem topraklaması, FV panelin negatif (veya pozitif) ucunun toprağa bağlanmasını gerektirir. Bu, şebekenin faz-nötr uçlarına bağlanan bir fazlı eviricinin zaten şebeke tarafında topraklı olması nedeniyle, pek çok transformatörsüz sistem için sorun olabilir. Diğer standartlar elektriği izolasyonun olmaması durumunda sadece donanımın topraklanmasını isterler. Donanımın topraklanması çerçevelerin ve diğer metalik parçaların toprağa bağlanmasıdır [58].

FV sistemler için anti-ada modunu da kapsayan test standartları IEEE 929-2000 (Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic Systems) ile belirtilmiştir [57]. IEEE 929 pek çok konuya işaret etse de en önemli bölümleri normal olmayan şebeke koşullarında FV eviricilerin tepkisini içeren güvenlik ve koruma fonksiyonları ile ilgili olanlardır. Bu normal olmayan koşullar gerilim ve frekans değişimi ile istenmeyen elektrik adalarının oluşmasına neden olan şebekenin kesilmesi durumlarıdır. IEEE 929’a göre hangi durumlarda ve en fazla ne kadar zaman içinde eviricinin şebekeden ayrılması gerektiği Tablo 2’de gösterilmiştir [33,57].

Şebeke empedansındaki değişiklikler şebekeyle paralel çalışan eviricilerin kararsızlığa gitmesine neden olur. Bu nedenle EN50330-1 gibi standartlar şebeke empedansında 0.5Ω değişim meydana geldiğinde 5

Tablo 1. Şebeke etkileşimli sistemler ile ilgili belli başlı standartların özeti (Summary of the most interesting standards dealing with grid interactive systems)

KONU	IEC61727	IEEE1547	EN61000-3-2
Anma gücü	10 kW	30 kW	16A X 230V = 3,7 kW
Derecesine göre harmonik akım limitleri	(3-9) %4,0 (11-15) %2,0 (17-21) %1,5 (23-33) %0,6	(2-10) %4,0 (11-16) %2,0 (17-22) %1,5 (23-34) %0,6 (>35) %0,3	(3) 2,30 A (5) 1,14 A (7) 0,77 A (9) 0,40 A (11) 0,33 A (13) 0,21 A (15-39) 2,25/h
	Bu aralıktaki çift sıralı harmonikler listelenen tek sıralı harmoniklerden %25 daha az olmalıdır.		Tek sıralı harmoniklerin yaklaşık %30'u kadar
Maksimum akımTHB'si	5,00%	5,00%	-
Anma gücünün %50'sinde güç faktörü	0,9	-	-
DA akım enjeksiyonu	Anma çıkış akımının %1,0'ından az	Anma çıkış akımının %0,5'inden az	<0,22 A - 50W yarım dalga doğrultucuya uyan
Normal çalışma için gerilim aralığı	%85 - %110 (196V - 253V)	%88 - %110 (97V - 121V)	-
Normal çalışma için frekans aralığı	50±1 Hz	59,3 Hz - 60,5 Hz	-

Tablo 2. IEEE 929 standartlarına göre şebekeden ayrılma durumları ve zamanları (IEEE 929 Utility disconnect requirements)

Şebeke Etkileşimli Çalışma İçin Gerilim ve Frekans Sınırları			
Durum	Gerilim	Frekans	Max. Açma Zamanı
A	$0,5 V_{nom}$	f_{nom}	6 saykıl
B	$0,5 V_{nom} < V < 0,88 V_{nom}$	f_{nom}	2 saniye
C	$0,88 V_{nom} \leq V \leq 1,10 V_{nom}$	f_{nom}	-
D	$1,10 V_{nom} < V < 1,37 V_{nom}$	f_{nom}	2 saniye
E	$1,37 V_{nom} \leq V$	f_{nom}	2 saykıl
F	V_{nom}	$f < f_{nom} - 0,7 \text{ Hz}$	6 saykıl
G	V_{nom}	$f > f_{nom} + 0,5 \text{ Hz}$	6 saykıl

saniye içinde eviricinin şebekeden ayrılmasını şart koşturmaktadır. Bu amaçla şebeke empedansının sürekli olarak ölçülmesi ve izlenmesi gereklidir. Şebeke empedansını online ölçen çeşitli yöntemler geliştirilmiştir [56,59-63].

4. EVİRİCİLERİN GELİŞİMİ (THE EVOLUTION OF THE INVERTERS)

Güneş enerjisi uygulamalarında kullanılacak olan eviriciler, uygun maliyetli, kolay kurulumlu ve uzun ömürlü olmalıdır. Bununla birlikte kullanıcı, doğal şartlar nedeniyle geniş bir aralıkta değişebilen giriş gerilimi ve güç değerleri için veriminin yüksek olması istenilir [48-52].

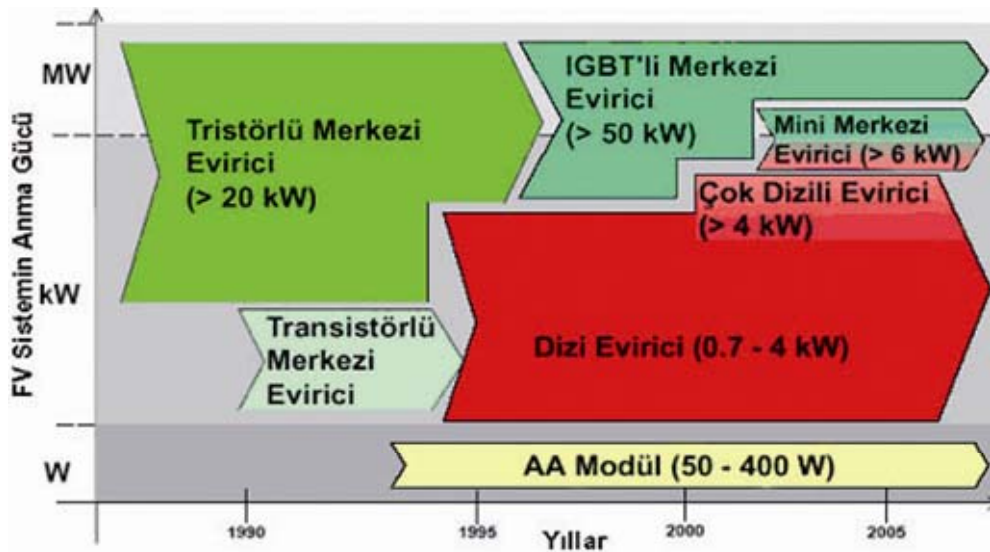
Yarı iletken teknolojisindeki ve yüksek frekanslı nüveler gibi manyetik malzemelerdeki gelişmelerin yanında talebinde artmasıyla daha düşük maliyet ve yüksek verim için farklı evirici topolojileri ve bunların kontrol devreleri geliştirilmiştir. Buna paralel olarak da şebeke etkileşimli eviriciler, araştırmalar sonucu elde edilen verilerin de etkisiyle Şekil 8’de gösterildiği gibi bir gelişim göstermiştir [64].

Geçtiğimiz 10 yıl içinde FV eviricilerin maliyetleri %50 oranında azalırken verimleri de %97’nin üstüne

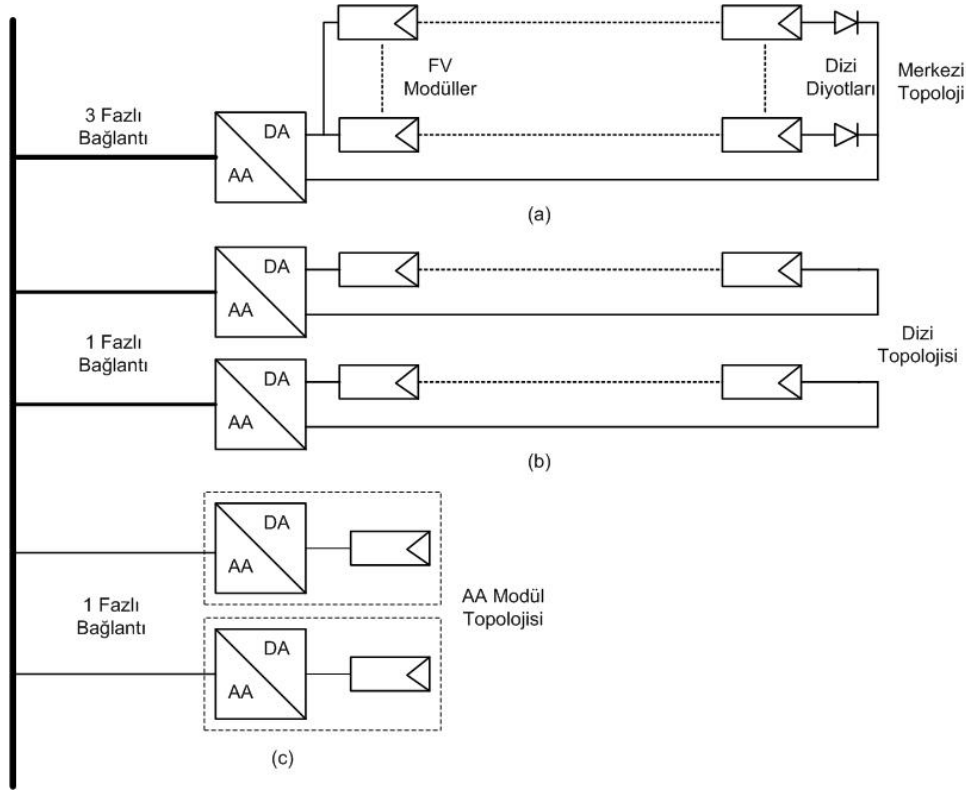
çıkmıştır. Günümüzde maliyet ve verim en önemli değerler olsa da elektromanyetik uyumluluk, güvenlik, güvenilirlik ve izleme fonksiyonlarının da önemi her geçen gün artmaktadır. FV sistemlerde evirici bir panele bağlı olabildiği gibi pek çok panele de bağlanabilir. Eviriciye bağlanan FV panel sayısı evirici yapısındaki pek çok bileşenin tespitinde önemli rol oynamaktadır. Bağlanan FV panel sayısına bağlı olarak eviricileri, merkezi eviriciler, dizi eviricileri ve AA modül eviriciler olarak sınıflandırmak mümkündür.

4.1. Geçmiş Yaklaşımlar—Merkezi eviriciler (The Past Approaches—Centralized Inverters)

1980’lerin ortalarında merkezi eviricilerin kullanıldığı büyük güçlü şebeke etkileşimli güneş enerjili sistemler yaygındı. Bu eviriciler FV uygulamaları için optimize edilmeden sürücülerde kullanılan eviricileri temel alınarak geliştirilmişlerdir. Geçmişteki uygulamalar Şekil 9(a)’da gösterildiği gibi çok sayıdaki FV paneli şebekeye bağlamayı temel alır. Bu uygulamalarda FV paneller dizi olarak adlandırılan seri kollara bölünmüştür. Her kolun gerilimi, yükseltme gereksinimini ortadan kaldıracak kadar yüksek olmalıdır. Bu seri kollar yüksek güç üretebilmek için dizi diyotları üzerinden paralel bağlanmışlardır.



Şekil 8. Eviricilerin tarihi gelişimi (The historical evolution of inverters)



Şekil 9. (a):FV eviricilere tarihsel bakış a) Geçmişte kullanılan merkezi teknoloji b) Günümüzde kullanılan dizi teknoloji c) Günümüzdeki ve gelecekteki AA modül ve AA hücre teknolojileri (Historical overview of PV inverters (a) Past centralized technology (b) Present string technology (c) Present and future ac-module and ac cell technologies)

1990'ların başlarından itibaren yapılan araştırmalar merkezi eviricilerin, FV paneller ve evirici arasındaki yüksek gerilimli bağlantı kabloları, merkezi MGT nedeniyle oluşan güç kayıpları, dizi diyotlarının güç kaybı ve FV panellerin karakteristiklerinin aynı olmaması gibi bazı ciddi teknoloji eksikliklerini ve dezavantajlarını ortaya çıkarmıştır [65].

Ayrıca büyük bir alana yayılmış büyük güçlü bir FV sistemin eşit miktarda ısınım almaması da bir sorun oluşturmaktadır. Üzerine gölge düşen modül yük etkisi yapar ve çıkış gücünün düşmesine neden olur. 160 panelden oluşan bir sistemde normal ısınım alan panellerin hücre sıcaklıkları 22°C artarken gölgelenen modülün hücre sıcaklığının 70°C'den fazla ısındığı tespit edilmiştir. Isınan hücreler modül ömrünü azalttığı için bu durum oldukça önemlidir [65].

Merkezi eviricilerde şebeke bağlantı bölümü genellikle hat komütasyonludur ve tristörlerle kurulur. Bu akım harmoniklerinin artmasına ve güç kalitesinin düşmesine neden olmaktadır. Bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak için kullanılan özel filtre ve kompanzasyon devreleri düşük olan maliyetlerini artırmaktadır [66].

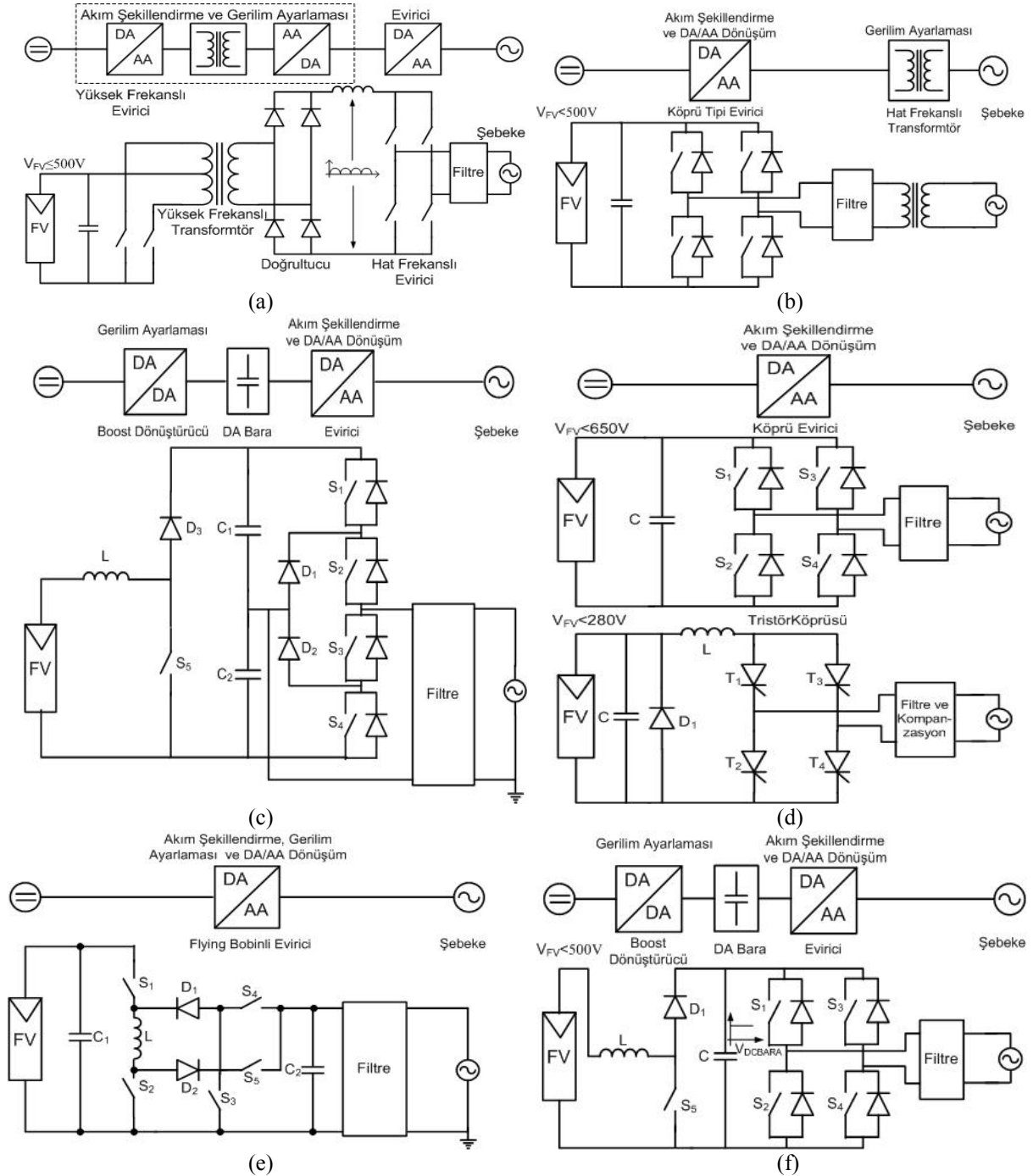
Ayrıca bu eviricilerin müşteri gereksinimlerine göre genişletilebilirlik ve uyarlanabilirliği büyük ölçüde kısıtlıdır.

4.2. Günümüz Yaklaşımları – Dizi Eviriciler ve AA Modüller (The Present Approaches- String Inverters and AC Modules)

Sistem veriminin artırılması ve maliyetlerin düşürülmesi için 1990'ların ortalarında dizi eviriciler geliştirilmiştir. Dizi eviriciler merkezi eviriciler ile modül birleşimli eviricinin arasında bir çözümdür ve bir dizi FV panelden oluşan bir sistem için tasarlanmıştır [25]. Dizi kavramı özellikle Almanya'da yoğun bir şekilde incelenmektedir [66].

Yarı iletken ve filtre elemanlarındaki gelişmeler evirici veriminin artmasını sağlamış olmasına rağmen günümüzde dizi eviricilerin verimleri %94-%97 aralığındadır. Bu alanda bir miktar daha iyileşme beklenmektedir. Evirici üreticileri daha yüksek verim ve daha düşük maliyet için takım kavramı ve ana-uydu kavramı gibi yeni sistem kavramları üzerine yoğunlaşmışlardır. Bu kavramlar dizi teknolojisinin avantajları ile merkezi eviricilerin düşük maliyet özelliğini birleştirmektedir. Bundan başka tüm sistemin verimini arttırmakta, harmonik miktarını azaltmakta ve izleme özelliklerini genişletmektedir [25,67].

Şekil 9(b)'de görünen dizi evirici, merkezi eviricinin küçültülmüştür. 2-3 kW güçlere kadar bir miktar FV panel bir eviriciye bağlanır. Giriş gerilimi genellikle 150-450 V aralığındadır. Bu tip uygulamalarda pek çok farklı topoloji kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları Şekil 10'da gösterilmiştir [19,23,25,68]. Dizi



Şekil 10. Günümüz evirici topolojileri a)Birden çok güç dönüşüm ünitesi ve yüksek frekanslı transformatör kullanılan evirici b)Hat frekanslı transformatörlü evirici c)Nötr noktası bağlantılı evirici d)Transformatörsüz alçaltıcı evirici e)Flying bobinli evirici f)Birden çok güç dönüşüm ünitesi transformatörsüz evirici (Present inverter topologies a)Inverter with several power stages and high frequency transformer b)Inverter with line frequency transformer c)Neutral point clamped inverter d)Transformerless step-down inverter e)Flying inductor inverter f)Transformerless inverter with several power stages)

diyotlarında oluşan kayıpların önlenmiş olması, her dizi için bağımsız MGT yapılabilmesi, en önemli avantajlarından. Bu nedenle verimi merkezi eviriciye göre daha yüksektir [69].

.Merkezi eviricilerin dezavantajlarından kaçınmak için modüler sistem teknolojisi geliştirilmiştir. En küçük güçlü şebeke etkileşimli sistem olan AA modül, Şekil 9(c)'de görüldüğü gibi evirici ve FV panelin bir elektrik aygıtında birleştirilmiş halidir. Güçleri genel-

likle 500 W'dan küçüktür [25]. Her FV panel kendi eviricisine bağlandığı için uygunsuzluk kayıpları önlenmiş, ayrı ayrı MPPT sayesinde en iyi ayar imkanı sağlanmıştır. Modüler yapısı sayesinde kolaylıkla genişletilebilmektedir [17,70,71]. Tak-kullan özellikleri sayesinde kısıtlı elektrik bilgisine sahip personelin dahi kurulumlarını gerçekleştirmesine imkân vermektedir. Ayrıca DA akım taşıyan iletkenler de en aza indirilmiştir. Diğer taraftan gerilim yükseltme ve daha karışık devre topolojilerinin kullanım gereksinimleri

toplam verimlerini azaltırken Watt başına maliyetlerini artırır. Bununla beraber evirici arızalarında değiştirilmelerinin zor ve pahalı olması, Watt başına maliyetlerinin yüksek olması gibi dezavantajları da bulunmaktadır [1, 67].

Günümüz uygulamalarında, standartlara uygun yüksek güç kalitesi sağlayabilmek için güç ve gerilim seviyesine göre anahtarlama frekansı aralığı 16-32 kHz olan IGBT/Mosfet'li DA-AA eviriciler kullanılmaktadır [69].

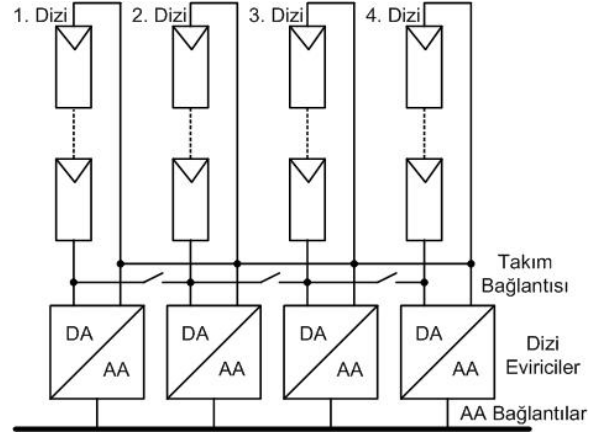
4.3. Gelecek İçin Öngörülen Yaklaşımlar – Çok

Dizili Eviriciler, AA Modüller ve AA

Hücreler(The Future Trends - Multi-String Inverters, AC Modules, and AC Cells)

Özellikle kurulum sürelerinin kısa olması, enerji güvenilirliği, yüksek enerji kalitesi, şebeke güvenliği, esnek yapıları, enerji kaynaklarını çeşitlendirmesi gibi üstün özellikleri ve dağıtılmış enerji üretimine uygunluğunun anlaşılması sonucunda ülkeler YEK'lerin yaygınlaşması konusunda teşvikler uygulayarak yatırımcıya destek sağlamaya başlamışlardır [25,66]. Bu durum büyük güçlü eviriciler olan ilgiyi arttırmış ve bazı üreticiler üretim aralıklarını 100-300 kW ve hatta daha büyük güçlere arttırmışlardır. Pek çoğu 3,4 veya daha fazla eviriciyi ana-uydu yöntemi ile birbirine bağlamaktadır. Bu yöntemde bütün eviriciler DA baraya paralel bağlanır, ana evirici güneş enerjisinin durumuna göre kaç adet uydu eviricinin çalışacağını belirler ve bunları kontrol eder. Bu çalışma ile düşük ışınım durumlarında tüm eviricilerin çalıştığı duruma göre daha yüksek verim elde edilebilmektedir [25].

Takım kavramı bir başka FV sistem kavramıdır [71,72]. Dizi teknolojisi ile ana-uydu teknolojisini birleştirerek çok eviricili FV sistemlerde ayrı ayrı çalışan eviricilere göre sistem verimliliğini artırır. Bir kaç dizi eviricinin takım kavramında çalışması Şekil 11'de gösterilmiştir. Çok düşük ışınım durumlarında tüm FV sistem sadece bir eviriciye bağlanır. Işımanın artması ile her eviricinin anma yüküne yakın bir yük ile çalışması sağlana kadar FV sistem küçük dizilere ayrılır. Bu durumda her hizi kendi MGT denetleyicisi ile beraber çalışır. Düşük güneş ışınması altında eviriciler ana-uydu durumunda çalışmaktadır. Benzetim sonuçları %4 daha fazla enerji elde edildiğini



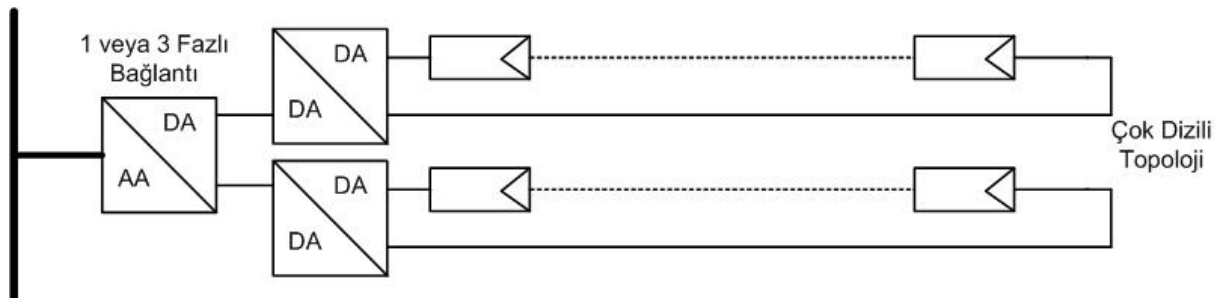
Şekil 11. Takım kavramı (Team concept)

göstermiş, uygulama sonuçları ile de benzetim sonuçlarının aşılabileceğini belirlenmiştir [72].

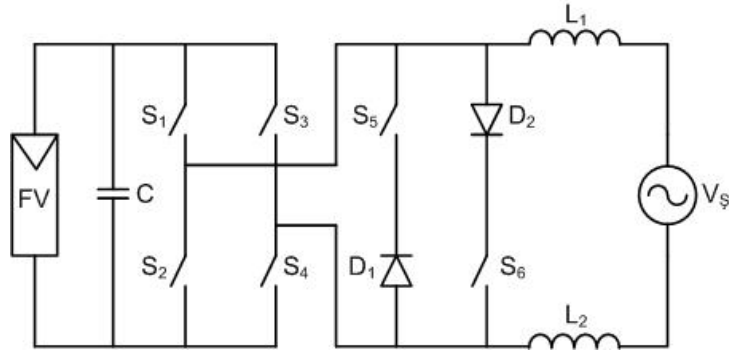
Şekil 12' de gösterilen çok dizili evirici kavramı dizi eviricilerin yüksek verimi ve merkezi eviricilerin düşük maliyet özelliklerini birleştirmek için geliştirilmiştir. Daha düşük güçlü DA-DA güç dönüştürücüleri ayrı ayrı FV dizilere bağlanır. Her FV dizisinde diğer dizilerden bağımsız çalışarak güç çıkışını optimize eden MGT ünitesi bulunmaktadır. Sistem gücünü arttırmak için sadece yeni bir dizi ve o dizi için DA-DA güç dönüştürücüsü eklenmelidir. Bütün DA-DA güç dönüştürücüleri DA bara ile merkezi eviriciye, merkezi evirici ile de şebekeye bağlanmaktadır. Merkezi evirici, her türlü koruma ve denetleme fonksiyonları olan PWM eviricidir [73-76].

İncelenen yeni topolojilerden birisi de High Efficient Reliable Inverter Concept (HERIC)'dir [77,78]. Yaygın kullanılan PWM evirici topolojisi Şekil 13'de gösterildiği gibi iki ek serbest dönüşüm kolu ile genişletilmiştir. Bu kollar sinusoidal çıkış gerilimini polaritesine göre şebeke frekansında anahtarlama yapar. Bu reaktif akımın kısa devre edilmesine ve yük devresinde tutulmasını sağlar. %20'nin altındaki yük koşulları için verimi diğer evirici topolojilerinden %3-4 daha fazladır. Butüm sistemin verimi ve tasarımı üzerinde önemli bir etkisi vardır. 3kW gücündeki bir eviricinin kabul edilebilir maksimum verimi %98 civarındadır.

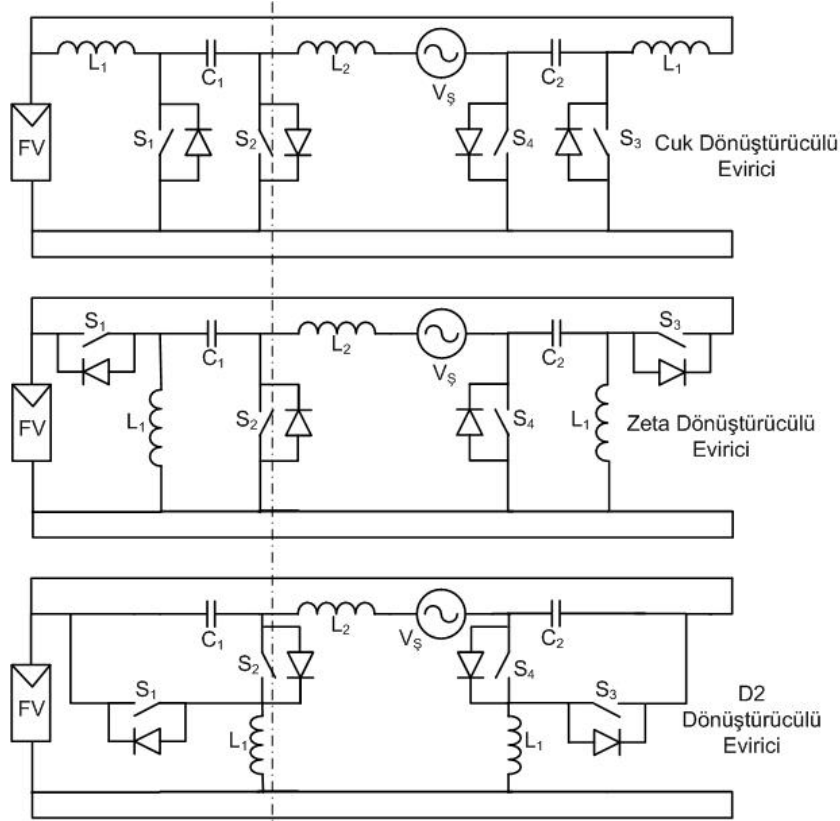
Bu topolojinin diğer bir avantajı ise çift kutuplu anahtarlama methodunun FV uçlarında şebeke frekan-



Şekil 12. Günümüzdeki ve gelecekteki çok dizili evirici teknolojisi (Present and future multi-string technology)



Şekil 13. HERIC Evirici (HERIC inverter)

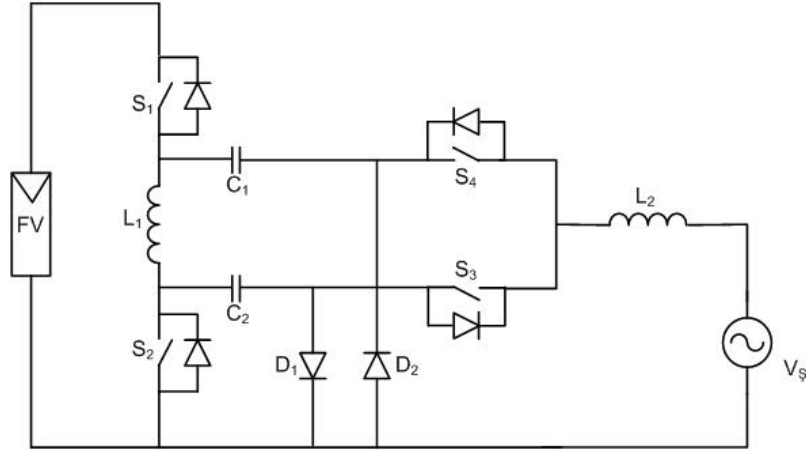


Şekil 14. Cuk, Zeta ve D2 güç dönüştürücülü topolojiler (Topologies with Cuk, Zeta and D2 converters)

sında ve maksimum gerilimi şebeke geriliminin yarısı olan sinusoidal bir gerilime neden olmaktadır.

FV evirici endüstrisindeki en önemli hedeflerinden birisi özellikle watt başına fiyatları hala yüksek olan küçük dizi ve modüle yönelik eviricilerde maliyetlerin düşürülmesidir. Bu eviricilerin verimleri ve maliyetleri kaskat bağlı ikinci güç dönüştürücüsünün bağlanmasından veya düşük FV gerilimini şebeke gerilimi seviyesine yükseltmek için transformatör kullanılmamasından olumsuz etkilenmektedir. Bu bağlantılardan kaçınmak için yeni topolojiler [79]'da sunulmuştur. Bu topolojiler iki azaltan-artıran (cuk, zeta, D2 veya bunların yüksek frekans transformatörlü çeşitleri gibi) güç dönüştürücüsünün paralel-seri bağlantısını temel alır. Örnekler Şekil 14'de gösterilmiştir. Yaygın kullanılan PWM yöntemleri ile anahtarlar kontrol edilebilir. Doğrusal kontrol fonksiyonun gerçekleştirilmesi için çıkış bobini sürekli yük akımını taşıyarak giriş bobininin kesintili iletim modunda çalışması gereklidir. Yarı iletkenler ve giriş bobini üzerindeki yüksek gerilim ve akım nedeniyle bu eviricilerin verimleri dizi eviricilerden yaklaşık %1,5 daha düşüktür. Bu eviricilerin en önemli avantajı manyetik malzemelerin %40 oranında azaltılmasıdır. Bu maliyet üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu topolojiler FV geriliminin şebeke geriliminden düşük olduğu uygulamalar için uygundur.

Diğer transformatörsüz topolojiler gibi bu topolojide şaseye göre FV geriliminde dalgalanmalara neden olur. Şaseye göre FV geriliminin sabit kalmasını sağlayan bir topoloji geliştirilmiştir [80]. Yeni topoloji, aynı güç dönüştürücüsünden iki adet (2 adet Cuk, 2 adet Zeta veya 2 adet D2 güç dönüştürücüsü) bağlamak yerine Şekil 15'de gösterildiği gibi Cuk ve



Şekil 15. Şaseye göre FV geriliminin sabit kalmasını sağlayan topoloji (Topology with fixed potential between PV and the grid)

Zeta güç dönüştürücüsünün seri-paralel bağlanması ile geliştirilmesidir. Çıkış akımının pozitif alternansını üretebilmek için evirici Zeta güç dönüştürücüsü olarak çalışmakta iken çıkış akımının negatif alternansında evirici Cuk güç dönüştürücüsü olarak çalışmakta ve Cuk güç dönüştürücüsünün çıkış gerilimini ters çevirme özelliğinden faydalanılmaktadır. Ayrıca bu topolojinin rezonans anahtarlamaya da imkan sağlayan diğer çeşitlendirmeleri gösterilmiştir[80].

Bunlardan başka büyük güçlü bir FV sistemin bir DA-AA eviriciye bağlandığı AA hücre eviriciler üzerinde de araştırmalar devam etmektedir. Bu sistemle ilgili asıl zorluk, metre kareye 100 W ve 0,5~1,0V gibi çok düşük gerilimi yüksek verimle şebekeye yakın bir değere yükseltmektir. Bunun için tamamen yeni güç dönüştürücüsü tasarımları gereklidir [24,81,82].

Bu noktaya kadar incelenen şebeke etkileşimli evirici topolojilerinin güç seviyesi, güç kalitesi, verim, maliyet, boyut gibi özellikleri Tablo 3'de özetlenmiştir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada FV uygulamalarında kullanılan şebeke etkileşimli eviriciler ile ilgili geniş kapsamlı bir araştırma sunulmuştur. Şebeke etkileşimli eviricinin çalışma durumları, taşınması gereken temel özellikler açıklanmış ve güç kalitesi, ada modunun tespiti ve şebeke empedansının değişimi gibi konularda uyması gereken uluslararası standartlar belirtilmiştir. Bunun yanında FV uygulamalarında kullanılan şebeke etkileşimli eviricilerin tarihi gelişimi özetlenmiş ve geleceğe yönelik beklentiler verilmiştir. Geçmişte kullanılan büyük güçlü sistemlere bağlı merkezi eviriciler, her panelin kendi eviricisi ile şebekeye bağlandığı AA modüller, bir grup panelin bir eviriciye bağlandığı dizi eviriciler, her dizinin kendi DA-DA güç dönüştürücüsü ve kendi MGT'si bulunan ve bir evirici ile şebekeye bağlanan çok dizili eviriciler ile Takım, HERIC gibi yeni evirici yaklaşımları verilmiştir.

Sonuç olarak düşük maliyetli, kolay kurulumlu, uzun

Tablo 3. Evirici topolojilerinin özellikleri (Specifications of the inverter topologies)

Kriterler	Evirici Topolojisi				
	Geçmiş Merkezi Eviriciler	Günümüz		Gelecek	
		Dizi Eviriciler	AA Modüller	AA Hücreler	Çok Dizili Eviriciler
Güç	MW mertebesinde	0,7-4kW	<500W	<500W	100-300kW
Güç Kalitesi	Düşük	Yüksek	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Verim	<90	%94-%97	%95-%98	%95-%98	%94-%97
Maliyet	Düşük	Orta	Yüksek	Orta	Orta
Boyut	Büyük	Orta	Küçük	Küçük	Büyük
Şebeke İle İzolasyon	Orta gerilimli (OG) şebekeye bağlantıda zorunlu	İsteğe ve FV panel sayısına bağlı	Yok	Yok	İsteğe ve FV panel sayısına bağlı
MPPT Yöntemi	Merkezi	Ayrı (FV karakteristiğine daha uygun)	Ayrı (FV karakteristiğine daha uygun)	Ayrı (FV karakteristiğine daha uygun)	Ayrı (FV karakteristiğine daha uygun)
Güç artırımı	Kısıtlı	Kısıtlı	Kolay	Kolay	Kolay

ömürlü doğal şartlar nedeniyle geniş bir aralıkta değişebilen giriş gerilimi ve güç değerlerinde dahi yüksek verimde çalışabilen eviriciler geliştirebilmek amacıyla araştırmalar devam etmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Saha, S., Sundarsingh, V.P., “Novel Grid-Connected Photovoltaic Inverter”, **Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings**-Volume 143, Issue 2, 219–224, 1996.
2. Barbosa, P.G., Rolim, L.G.B., Watanabe, E.H., Hanitsch, R., “Control Strategy for Grid-Connected DC-AC Converters with Load Power Factor Correction”, **Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings**, Volume: 145, Issue: 5, 487-491, 1998.
3. Beck, M. K., “A Comprehensive Solar Electric System for Remote Areas” **The International Journal on The Science and Technology Of Desalting and Water Purification (Desalination)**, Vol. 209, Issue 1-3, 312–318, 2007.
4. Godoy, R.B., Maia, H.Z., Filho, F.J. T., Galotto, L., Pinto, J.O. P, Tatibana, G.S., “Design and Implementation of a Utility Interactive Converter for Small Distributed Generation” **Industry Applications Conference, 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the, IEEE**, Volume 2, Florida, USA, 1032 – 1038, 8-12 Oct. 2006.
5. Shireen, W., Arefeen, M. S., “An utility interactive power electronics interface for alternate/renewable energy systems”, **Energy Conversion, IEEE Transaction on**, Volume 11, Issue 3, 643 – 649, 1996.
6. Gu, H., Yang, Z., Wang, D., Wu, W., “Research on Control Method of Double-Mode Inverter with Grid-Connection and Stand Alone”, **Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC '06, CES/IEEE 5th International**, Vol. 1, Shanghai, China, 1 - 5, Aug. 2006 2006.
7. Li, Q., Wolfs, P., “Recent Developments in the Topologies for Photovoltaic Module Integrated Converters”, **Power Electronics Specialists Conference, PESC '06. 37th IEEE**, Jeju, Korea, 1 – 8, 18-22 June 2006
8. Alepuz, S., Gilabert, A., Arguelles, E., Bordonau, J., Peracaula, J., “A New Approach for the Connection of a Three-Level Inverter to the Power Grid for Applications in Solar Energy Conversion”, **IEEE 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, IECON 02**, Volume 4, Sevilla, Spain, 3285 – 3290, 5-8 Nov. 2002.
9. Calais, M., Myrzik, J., Spooner, T., Agelidis, V. G., “Inverters for Single-Phase Grid Connected Photovoltaic Systems—An Overview” **Proc. IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC'02, IEEE**, Vol. 2, Queensland, Australia, 1995–2000, 23 - 27 June 2002.
10. Rahim, N. A., Selvaraj, J.,Krismanidata, “Hysteresis Current Control and Sensorless MPPT for Grid-Connected Photovoltaic Systems” **Industrial Electronics, ISIE 2007, IEEE International Symposium on**, Vigo, Spain, 572 - 577, 4-7 June 2007.
11. Jung, S., Bae, Y., Choi, S., Kim, H., “A Low Cost Utility Interactive Inverter for Residential Power Generation” **Power Electronics Specialists Conference, PESC '06, 37th IEEE**, Jeju, Korea, 1 – 6, 18-22 June 2006
12. Nonaka, S., Kesamaru, K., Yamasaki, K., Nishi, N., ”Interconnection System with Single Phase IGBT PWM CSI Between Photovoltaic Arrays and the Utility Line” **Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the 1990 IEEE**, Vol.2, Seattle, USA, 1302 – 1307, 7-12 Oct. 1990
13. Zue A.O., Chandra A., “Simulation and Stability Analysis of A 100 KW Grid Connected LCL Photovoltaic Inverter For Industry”, **Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE**, Montréal (Québec) Canada, 1-6, 18-22 June 2006.
14. Hohm, D. P., Ropp, M.E., “Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms”, **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, Vol. 11, Issue 1, 47 – 62, 2002.
15. Walker, G., “Evaluating MPPT Converter Topologies Using a MATLAB PV Model” **Journal of Electrical and Electronics Engineering, Australia**, Vol. 21, No:1, 49-56, 2001.
16. Enslin, J., H. R., Wolf, M. S., Synman, D. B., Swiegers, W.,”Integrated Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Converter”, **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol. 44, No. 6, 769-773, 1997.
17. Calais, M., Hinz, H., “A Ripple-Based Maximum Power Point Tracking Algorithm For A Single-Phase, Grid-Connected Photovoltaic System”, **Solar Energy**, Vol. 63, No. 5, 277–282, 1998.
18. Patcharaprakiti, N., Premrudeepreechacharn, S., Sriuthaisiriwong, Y., “Maximum Power Point Tracking Using Adaptive Fuzzy Logic Control for Grid-Connected Photovoltaic System”, **Renewable Energy**, Vol. 30, 1771–1788, 2005.
19. Yuvarajan, S., Yu D., Xu, S., “A Novel Power Converter for Photovoltaic Applications” **Journal of Power Sources**, Vol. 135, 327–331, 2004.
20. Wang, X., Kazerani, M., “A Novel Maximum Power Point Tracking Method for Photovoltaic Grid-Connected Inverters”, **The 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON '03**, Volume 3, Virginia, USA, 2332 – 2337, 2-6 Nov. 2003.

21. Ahmed, T., Nakaoka, M., Nagai, S., “Utility Grid Interfaced PV Power Conditioner Using Boost Chopper-Four Switch Three Phase Inverter with A Novel Quasi Resonant DC Link Snubber” **Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '06, Twenty-First Annual IEEE**, Dallas, Texas, USA, 1081-1087, 19-23 March 2006.
22. Hojo, M., Ohnishi, T., “Adjustable Harmonic Mitigation for Grid-Connection Photovoltaic System Utilizing Surplus Capacity of Utility Interactive Inverter”, **Power Electronics Specialists Conference, PESC '06, 37 th IEEE**, Jeju, Korea 1 - 6, 18-22 June 2006.
23. Kang, F., Park, S. J., Cho, S. E., Kim, J. M., “Photovoltaic power interface circuit incorporated with a buck-boost converter and a full-bridge inverter”, **Applied Energy**, Vol. 82, 266–283, 2005.
24. Kjaer, S. B., Pederson, J. K., Blaabjerg, F., “A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules”, **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. 41, No.5, 1292-1306, 2005.
25. Myrzik, J. M. A., Calais, M., “String and Module Integrated Inverters for Single-Phase Grid Connected Photovoltaic Systems - A Review” **2003 IEEE Power Tech Conference**, Vol 2, Bologna, Italy, 1-8, 23-26 June 2003.
26. Masoud K., Ledwich G., “Aspects of Grid Interfacing: Current and Voltage Controllers”, **Australasian Universities Power Engineering Conference and IEAust Electric Energy Conference, AUPEC/EECON'99**, Darwin Australia, 260-265, 26-29 September 1999.
27. Sefa, I., Altın, N., “Simulation of Current Controlled Grid Interactive Inverter” **Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering, TPE-2006 3rd**, Ankara, Turkey, 964-968, 29-31 May 2006.
28. Patcharaprakiti, N., Premrudeepreechacharn, S., “Maximum power point tracking using adaptive fuzzy logic control for grid-connected photovoltaic system”, **Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE**, Volume 1, New York, USA, 372 – 377, 27-31 Jan. 2002.
29. Uemara, N., Yokoyama, T., “Current Control Method Using Voltage Deadbeat Control for Single Phase Utility Interactive Inverter”, **Telecommunications Energy Conference, INTELEC '03, The 25th International**, Yokohama, Japan, 40-45, 19-23 Oct. 2003.
30. Yu, H., Pan, J., Xiang, A., “A Multi-Function Grid-Connected PV System with Reactive Power Compensation for the Grid”, **Solar Energy**, Vol. 79, 101–106, 2005.
31. Hirachi, K., Tomokuni, Y., “Improved Control Strategy to Eliminate The Harmonic Current Components for Single Phase PWM Current Source Inverter”, **Telecommunications Energy Conference, 1997. INTELEC 97, 19th International**, Melbourne, Australia, 189 – 194, 19-23 Oct. 1997.
32. Baker, D. M., Agelidis, V. G., Chen, J. Y., “A Five Level Zero Average Current Error Controlled Single-Phase Grid-Interactive Inverter” **Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth, International Conference on, PEDES'98, IEEE**, Volume 1, Perth, Western Australia, 50-55, 1-3 Dec. 1998.
33. Hudson, R.M., Thorne, T., Mekanik, F., Behnke, M.R., Gonzalez, S., Ginn, J., “Implementation And Testing Of Anti-Islanding Algorithms For IEEE 929-2000 Compliance Of Single Phase Photovoltaic Inverters”, **Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference**, New Orleans, Louisiana, 1414 – 1419, 19-24 May 2002.
34. Woyte, A., Belmans, R., Nijs J., “Testing The Islanding Protection Function Of Photovoltaic Inverters” **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Volume 18, Issue 1, 157 – 162, 2003.
35. Tunlasakun, K., Kirtikara, K., Thepa, S., Monyakul, V., “A Microcontroller Based Islanding Detection For Grid Connected Inverter”, **The 47th Midwest Symposium on Circuits and Systems**, Volume 3, Hiroshima, Japan, 267-275, 25-28 July 2004.
36. Hung, G. K., Chang, C. C., Chen, C. L., “Automatic Phase-Shift Method For Islanding Detection Of Grid-Connected Photovoltaic Inverters”, **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Volume 18, Issue 1, 169 – 173, 2003.
37. Jeong, J., B. Kim, H. J., Back, S. H., Ahn, K. S., “An Improved Method for Anti-Islanding by Reactive Power Control” **Electrical Machines and Systems, ICEMS 2005, Proceedings of the Eighth International Conference on**, Volume 2, Nanjing, China, 965 – 970, 27-29 Sept. 2005.
38. Vachtsevanos, G., Kang, H., “Simulation Studies of Islanded Behavior of Grid Connected Photovoltaic Systems” **Energy Conversion, IEEE Transaction on**, Volume 4, Issue 2, 177 – 183, 1989.
39. Enslin, J. H.R., Heskes, P. J. M., “Harmonic between a Large Number of Distributed Power Inverters and the Distribution Network”, **IEEE Transaction On Power Electronics**, Vol. 19, No. 6, 1586-1593, 2004.
40. Tirumala, R., Mohan, N., Henze, C., “Seamless Transfer of Grid Connected PWM Inverters between Utility-Interactive and Stand-Alone Modes” **Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2002, Seventeenth Annual IEEE**, Volume 2, Los Cabos, Mexico, 1081-1086, 10-14 March 2002.
41. Yu, Taesik, Choi, S., Kim, H., “Indirect Current Control Algorithm for Utility Interactive

- Inverters for Seamless Transfer” **Power Electronics Specialists Conference, PESC '06, 37th IEEE**, Jeju, Korea, 1 – 6, 18-22 June 2006.
42. Yao, Z., Wang, L. X., Yan, Y., “A Novel Control Strategy for Grid-Interactive Inverters in Grid-Connected and Stand-Alone Modes” **Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC '06, Twenty-First Annual IEEE**, Dallas, Texas, USA, 779 – 783, 19-23 March 2006.
 43. Tao, H., Duarte, J. L., Hendrix, M. A. M., “Control of Grid-Interactive Inverters as Used in Small Distributed Generators” **Industry Applications Conference, 42nd IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2007 IEEE**, Louisiana, USA 1574 – 1581, 23-27 Sept. 2007.
 44. Li, H., Wang, K., Zhang, D., Ren, W., “Improved Performance and Control Of Hybrid Cascaded H-Bridge Inverter for Utility Interactive Renewable Energy Applications” **Power Electronics Specialists Conference, PESC 2007, IEEE**, Florida, USA, 2465 - 2471, 17-21 June 2007.
 45. Gu, H., Yang, Z., Wang, D., Wu, W., “Research on Control Method of Double-Mode Inverter with Grid-Connection and Stand-Alone” **Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC '06, CES/IEEE 5th International**, Volume 1, Shanghai, China, 1 – 5, 14-16 Aug. 2006.
 46. Yu, T., Choi, S. Kim, H., “Indirect Current Control Algorithm for Utility Interactive Inverters for Seamless Transfer” **Power Electronics Specialists Conference, PESC 2007, IEEE**, Florida, USA, 2465 – 2471, 17-21 June 2007.
 47. Chung S. K., “Phase-Locked Loop For Grid-Connected Three-Phase Power Conversion Systems”, **Electric Power Applications, IEE Proceedings**, Volume 147, Issue 3, 213 – 219, 2000.
 48. Svensson J., “Synchronisation Methods For Grid-Connected Voltage Source Converters”, **Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings**, Volume 148, Issue 3, 229 – 235, 2001.
 49. Kaura, V., Blasko, V., “Operation Of A Phase Locked Loop System Under Distorted Utility Conditions”, **Industry Applications, IEEE Transactions on**, Volume 33, Issue 1, 58 – 63, 1997.
 50. Arruda, L.N., Silva, S.M., Filho, B.J.C., “PI Structures For Utility Connected Systems”, **Thirty-Sixth IAS Annual Meeting, Conference Record of the Industry Applications Conference, IEEE**, Volume 4, Illinois, USA, 2655 – 2660, 30 Sept.-4 Oct. 2001.
 51. Arruda, L.N., Filho, B.J.C., Silva, S.M., Silva, S.R., Diniz, A.S.A.C., “Wide Bandwidth Single And Three-Phase PLL Structures For Grid-Tied PV Systems”, **Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE**, Alaska, USA, 1660 – 1663, 15-22 Sept. 2000.
 52. Silva, S.M., Lopes, B.M., Filho, B.J.C., Campana, R.P., Bosventura, W.C., “Performance Evaluation of PLL Algorithms for Single-Phase Grid-Connected Systems”, **Industry Applications Conference, 39th IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2004 IEEE**, Volume 4, Seattle, USA, 2259 – 2263, 3-7 Oct. 2004.
 53. IEC Standard 61727, "Characteristic of the utility interface for photovoltaic (PV) systems", 2002
 54. EN 61000-3-2, International Standard “Limits For Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current<16A per Phase), 1995.
 55. IEEE Std 1547, IEEE Guide for Monitoring, Information Exchange, and Control of Distributed Resources Interconnected with Electric Power Systems, 2007
 56. EN 50330-1, European Standard, Photovoltaic Semiconductor Converters Part 1: Utility Interactive Fail Safe Protective Interface for PV-Line Commutated Converters—Design Qualification and Type Approval, 1999.
 57. IEEE Std. 929-2000, IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems, Instiute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, NY, 2000.
 58. 2005 National Electrical Code, ANSI/NFPA70, Published by the National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2004.
 59. Asiminoaei, L., Teodorescu, R., Blaabjerg, F., Borup, U., “Implementation and Test of an Online Embedded Grid Impedance Estimation Technique for PV Inverters”, **IEEE Transaction on Industrial Electronics**, Vol. 52, No. 4, 1136 – 1144, 2005.
 60. Liserre, M., Teodorescu, R., Blaabjerg, F., “Stability of Grid-Connected PV Inverters with Large Grid Impedance Variation”, **Power Electronics Specialists Conference, PESC 04, IEEE 35th Annual**, Volume 4, Aachen, Germany, 4773 – 4779, 20-25 June 2004.
 61. Matsui, K., Ishigure, N., Ueda, F., ”On-Line Impedance Meter To Measure The Impedance Of A Distribution Line Using Inverter”, **Industrial Electronics Society, IECON '01, The 27th Annual Conference of the IEEE**, Volume 2, Colorado, USA, 1230 – 1236, 29 Nov.-2 Dec. 2001.
 62. Acharyya, D., Plusquellic, J., “Impedance Profile Of A Commercial Power Grid And Test System”, **International Test Conference Proceedings, ITC 2003**, Volume 1, Charlotte, NC, USA, 709 – 718, Sept. 30-Oct. 2, 2003.
 63. Liserre, M., Blaabjerg, F., Teodorescu, R., “Grid Impedance Detection Via Excitation of LCL-Filter Resonance” **Industry Applications, IEEE**

- Transactions on**, Volume 43, Issue 5, 1401 – 1407, 2007.
64. Engel, B., Meinhardt, M., “State of the Art and Future Trends of PV-System-Technology”, **ECPE Seminar: Renewable Energies**, 9-10 February 2006, Kassel Germany
 65. Kjaer, S. B., Pedersen, J. K., Blaabjerg, F., “Power Inverter Topologies for Photovoltaic Modules – A Review”, **Industry Applications Conference, 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the**, Vol. 2, Pennsylvania, USA, 782-788, 13-18 Oct. 2002.
 66. Al-Nasseri, H., Redfern, M. A., “Solid-State Converter Topologies for Interfacing DC Sources with Utility Power Systems”, **Universities Power Engineering Conference, UPEC 2004, 39th International**, Vol. 1, Bristol, UK., 629-633, 6-8 Sept. 2004.
 67. Maranda, W., Mey, G., Vos, A., “Optimization of the Master-Slave Inverter System for Grid Connected Photovoltaic Plants” **Energy Conversion and Management**,” Vol. 39, No. 3, 1239-1246, 1998.
 68. Calais, M., Agelidis, V. G., Meinhardt, M., “Multilevel Converters For Single-Phase Grid Connected Photovoltaic Systems: An Overview” **Solar Energy**, Vol. 66, No. 5, 325–335, 1999.
 69. Cramer, G., Toenges, K. H., “Einsatz der Modularen Systemtechnik (String-WR) zur Netzkopplung von PV-Anlagen im Leistungsbereich von 100kW-1MW“, **12 Symposium Photovoltaische Sonnenenergie**, Staffelstein, Germany, 1997.
 70. Faiman, D., Bermana D., Helde, E. Oldenkamp, H. “Study of AC-module inverters under extreme desert conditions” **Solar Energy Materials & Solar Cells**, Vol. 75, 629–635, 2003.
 71. Krampitz, I., Kreutzman, A., “From Masterpiece to Team Work, Inverter Market Survey: SMA’s New Circuit Concept Promises Higher Yields”, **Photon**, Vol. 3, 56-67, 2002.
 72. Meinhardt, M., Cramer, G., Greizer, F. “Technische Innovationen im Boomenden Markt der PV Systemtechnik“, **18 Symposium Photovoltaische Sonnenenergie**, Staffelstein, Germany, 2003.
 73. Meinhardt, M., Cramer, G., “Cost Reduction Through New PV System Technology”, **Kasseler Symposium Energie Systemtechnik, ISET**, Kassel, Germany, 152-168, 2000.
 74. Meinhardt, M., Cramer, G., “Multi-String Converter – The Next Step in Evolution of the String Converter Technology”, **9th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2001**, Graz, Austria, 1-9, 27-29 August 2001.
 75. Verhoeven, S. A. M.,” Utility Aspects of Grid Connected Photovoltaic Systems”, **International Energy Agency Photovoltaic Power Systems**, IEA PVPS T5-01, 1998.
 76. Haeblerlin, H., “Evolution of Inverters for Grid Connected PV Systems from 1989 2000”, in **Proc. 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference**, Munich, Germany, 782-788, 22-26 Oct., 2001.
 77. Schmidt, H., Burger, B., Siedle, C., “Gefährdungspotenzial Transformatorloser Wechselrichter - Fakten und Gerüchte“, **18 Symposium Photovoltaische Sonnenenergie**, Staffelstein, Germany, 2003.
 78. Schmidt, H., Burger, B., Siedle, C., “Die HERIC Wechselrichter - Topologie“, **18 Symposium Photovoltaische Sonnenenergie**, Staffelstein, Germany, 2003.
 79. Myrzik, J. M.A., “Novel Inverter Topologies for Single-phase stand-Alone or Grid-Connected Photovoltaic System” **4th IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, IEEE PEDS**, Vol. 1, Bali, Indonesia, 103-108, 22-25 October 2001.
 80. Schekulin, D., Patentschrift DE 197 32 218 C1, Bundesrepublik, **Deutschland, Deutsches Patentamt**, March, 1999.
 81. Wilk, H., Ruoss, D., Toggweiler, P., “Innovative Electrical Concepts”, **International Energy Agency Photovoltaic Power Systems**, IEA PVPS 7-07, 2002.
 82. Riatsch, J., Stemmler, H., Schmidt, R., “Single Cell Module Integrated Converter System For Photovoltaic Energy Generation“, **7th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE’97**, Vol. 1 Trondheim, Norway, 71-77, 1997.