

FOTOVOLTAİK ELEKTRİK ÜRETİM SİSTEMLERİNDE KULLANILAN ÇOK SEVİYELİ EVİRİCİLERİN İNCELENMESİ

Abdülvehhab KAZDALOĞLU¹ Bekir ÇAKIR² Murat DEMİR³
Aziz GÜNEROĞLU⁴ Engin ÖZDEMİR⁵ Mehmet UÇAR⁶

vahap@kocaeli.edu.tr¹, bcakir@kocaeli.edu.tr², muratdmr@kocaeli.edu.tr³, azizguneroglu@yahoo.com.tr⁴,
eozdemir@kocaeli.edu.tr⁵, mehmetucar@duzce.edu.tr⁶

^{1,2,3} Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü

⁴ Kocaeli Atatürk Anadolu Teknik Ve Endüstri Meslek Lisesi

⁵ Kocaeli Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Eğitimi Bölümü

⁶ Düzce Üniversitesi, Düzce Meslek Yüksekokulu, Elektrik Programı

Özet

Yenilenebilir enerji kaynakları denildiğinde ilk aklı gelen rüzgar türbinleri ve güneş panelleridir. Rüzgar türbinleri generatörün tipine bağlı olarak şebekeyle birlikte çalışacak şekilde tasarlanabilirler. Güneş panelleri ise yapıları gereği Doğru Akım (DA) bir kaynak gibi modellendiklerinden şebekeye bağlantılarında mutlaka bir evirici ara elemanına ihtiyaç duymaktadırlar. Bu çalışmada özellikle günümüzde tüm dünyada kullanımı hızla artan şebeke bağlantılı Fotovoltaik (FV) elektrik üretim sistemlerinde kullanılan geleneksel ve son yıllarda geliştirilen Çok Seviyeli Evirici (ÇSE) topolojileri incelenmekte ve en uygun topolojilerin seçimi hakkında önerilerde bulunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik, Elektrik Üretimi, Çok Seviyeli Evirici, Harmonik.

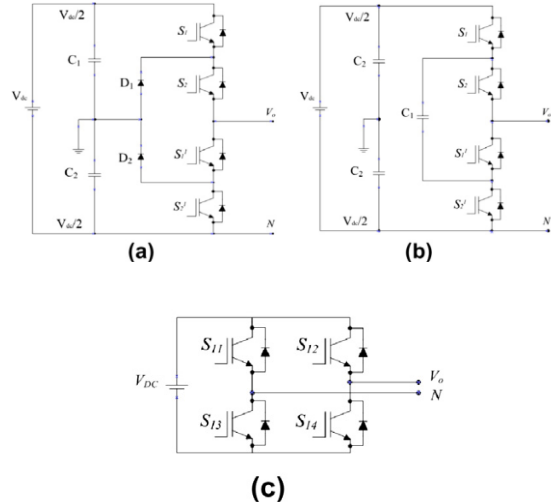
1. Giriş

Dünyamız yaşlandıkça teknoloji gelişmekte, gelişen teknolojiyle birlikte elektrik enerjisi ihtiyacı da artmaktadır. Yakın geçmişe kadar elektrik enerjisi ihtiyacı fosil yakıtlar kullanılarak karşılanmıştır. Fosil yakıtlar bir taraftan enerji ihtiyacını karşılarken diğer taraftan çevresel sorunları da beraberinde getirmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji üretimi yelpazesinde yerini almasıyla artık sadece enerji elde etmek değil temiz enerji elde etmek aranan bir enerji üretim biçimi haline almıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları ile üretilen enerjinin mevcut sisteme aktarılması ise çözülmesi gereken en önemli problemlerden biridir. Hem en verimli şekilde enerji elde edilecek hem de elde edilen enerji sorunsuz bir şekilde mevcut sisteme aktarılacak, işte gelişen teknoloji ile birlikte son yıllarda yapılan tüm çalışmalar bu amaca yönelik olarak devam etmektedir.

Güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretiminde mevcut şebeke sistemi göz önüne alındığında olmazsa olmaz elemanların başında eviriciler gelmektedir. Sistemin verimine etkisi de düşünüldüğünde, güneş panellerinin şebekeyle uyumlu çalışabilmesi için uygun eviricilerin tasarlanmasının ne kadar önemli olduğu görülmektedir.

2. Geleneksel ÇSE Topolojileri

Son yıllarda geliştirilen ve yüksek gücün yanı sıra düşük harmonik bozulumu sağlayan ÇSE'ler, güç elektroniği uygulamalarında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Düşük elektromanyetik (EMI) gürültüsüne sahip olmaları ve düşük frekanslardaki kontrollere yüksek etkinlik sağlamalarından dolayı ÇSE'ler, bir fazlı ve üç fazlı eviriciler için uygun bir topolojidir. Evirici modüllerinin seri bağlantısı tek fazlı tam köprü (H-köprüsü) çalışma modunda, anahtarlama sıçramalarını engelleyerek eviricinin yüksek güç uygulamalarında verimli olarak kullanımına imkan sağlar. Bununla birlikte ÇSE'ler, diğer topolojilere göre çıkış gerilim ve akımlarında düşük harmonik bileşenlerine ve daha düşük dv/dt oranına sahiptir [1,2]. Şekil 1'de 3 seviye için geleneksel ÇSE topolojileri gösterilmektedir.



Şekil 1: 3 seviye için geleneksel ÇSE topolojileri (a) seviyeli Diyot Kenetlemeli (DK) ÇSE (b) Kondansatörlü (FK) ÇSE (c) Kaskat H-Köprü (KHK) ÇSE

Şekil 1'de görüldüğü gibi diyot kenetlemeli eviricilerde DA bara gerilimi seviye sayısına göre kapasitelerle bölünerek değişik seviyelerde gerilimler elde edilmektedir. Bu gerilim seviyeleri

anahtarlanarak çıkışta basamak şeklinde bir gerilim fonksiyonu elde edilir. Seviye sayısı artırılarak çıkış gerilim fonksiyonu sinüs formuna yaklaştırılabilir. N-seviyeli bir eviricide anahtarlama sayısı n^3 ile ifade edilir. Diyot kenetlemeli eviriciler temel frekans uygulamaları için verimlidir fakat çıkış seviyelerinin sayısı kenetlemeli diyot sayısı ile ilgilidir. Bu durumda temel frekans anahtarlama akım ve gerilim Toplam Harmonik Bozulma (THB) değerinde bir artış olacaktır [2].

Kondansatörlü ÇSE devresinde ise bağımsız her bir kondansatör gerilimi anahtarlama elemanlarının durumlarına göre toplanarak eviricinin çıkış gerilim seviyesini belirler. Kondansatörlü eviriciler, diyot kenetli yapıyla karşılaştırılacak olursa, m seviyeli bir evirici için (m-1) adet ana kondansatör ve (m-1).(m-2)/2 kadar da yardımcı kondansatör gereklidir. m seviyesinin artması ile kontrolün zorlaşması ciddi dezavantajlar doğurur. Bu topolojinin en önemli avantajları, filtre ihtiyacını ortadan kaldırması, aktif ve reaktif güç akışını kontrol edebilmesidir. Bununla birlikte artan kondansatör sayısı, şarj ve deşarj durumlarının kontrolünün hassas olması denetimi zorlaştırır. Ayrıca devrede çok kondansatör bulunması maliyeti artırmaktadır.

Kaskad ÇSE devresi H-köprü modüllerinden oluşmaktadır. Burada her bir modülün gerilim seviyesi aynı olabileceği gibi farklı da olabilir. Gerilim seviyeleri farklı olduğu durumda çıkış geriliminin seviye sayısı daha fazla olur. Dolayısıyla aynı sayıda yarı iletken kullanarak daha çok seviyeli bir evirici yapılmış olur. Bu eviricilerin genel özellikleri; bataryalar, güneş panelleri ve ultrakapasitörler gibi kaynaklardan elde edilecek ayrı DA kaynakları kullanabilmeleridir. Bu özelliği ile güneş enerji sistemleri için ideal bir evirici tipi olmaktadır.

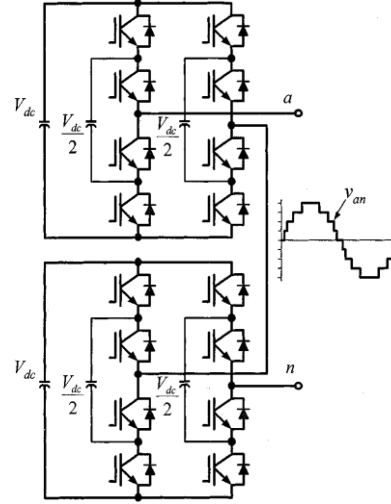
Geleneksel evirici topolojilerinin yanı sıra bu topolojiler kullanılarak türetilen yeni topolojiler mevcuttur. Bunlar mevcut topolojilerin kombinasyonları veya türevleridir. Literatürde aynı isimle anılan fakat farklı devre tiplerine sahip eviricilerde vardır. Aşağıda literatürde yeni tip eviriciler olarak adlandırılan eviricilerden bahsedilmektedir.

3. Çok Seviyeli Eviriciler İçin Son Yıllarda Önerilen Topolojiler

3.1. Karışık Seviye Hibrit ÇSE

Yüksek gerilim için yüksek güç uygulamalarında, diyot veya kapasitör kenetlemeli eviriciler yerine çok düzeyli tam-köprü hücre kaskat evirici seçilmesi daha uygundur. Bunun nedeni farklı dc kaynak sayısını azaltmaktır. 9 seviyeli bir kaskad eviricinin her bir fazı için 4 farklı, 3 faz için 12 doğru akım kaynağı gerekmektedir. Üç seviyeli evirici, tam köprü hücre ile değiştirilirse gerilim seviyesi her bir hücre için iki

katına çıkar. Böylece, her bir fazda aynı 9 gerilim seviyesine ulaşmak için faz başına sadece 2 farklı DA kaynak yeterli olur. Üç faz için 6 kaynak kullanarak aynı işlem yapılabilir. 9 seviyeli kaskad evirici 3 seviyeli kapasite kenetlemeli evirici hücreleri birleştirilerek gerçekleştirilmiştir. Kapasite kenetleme yerine diyot kenetlemede kullanılabilir [3]. Şekil 2’de gerilim seviyelerini artırmak için 3 seviyeli diyot kenetlemeli evirici kaskad bağlanarak oluşturulan karışık seviye hibrit hücre konfigürasyonu görülmektedir.

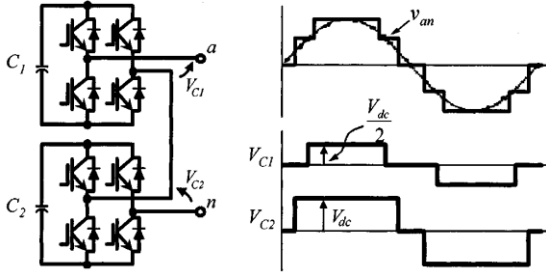


Şekil 2: Gerilim seviyelerini artırmak için 3 seviyeli diyot kenetlemeli evirici kaskad bağlanarak oluşturulan karışık seviye hibrit hücre konfigürasyonu

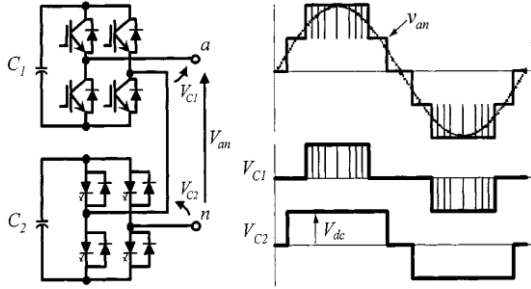
3.2. Asimetrik Hibrit ÇSE

Daha önceki uygulamalarda kaskad eviricinin her hücresinin girişindeki gerilim seviyeleri eşit seçilmiştir. Ancak hücreler arasında farklı gerilim seviyelerinin olması mümkündür. Bu tip eviriciler Asimetrik Hibrit (AH) ÇSE olarak adlandırılır. DA kaynak sayısına bağlı olarak gerilim düzeyi herhangi bir seviyeyle sınırlı değildir. Bu özelliği sayesinde daha az sayıda kaskad hücre ile daha fazla harmonik eliminasyonu sağlanır. Hatta aynı gerilim düzeyi kullanılarak bile asimetrik hibrit çok seviyeli evirici tasarlanabilir. Şekil 3’de farklı gerilim seviyeli asimetrik hibrit kaskad evirici hücre blok diyagramı görülmektedir.

Bir hücre için yüksek frekanslı Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) değeri için daha düşük DGM kullanılarak bu yapılabilir. Şekil 4’te buna örnek bir uygulama gösterilmiştir. Üst (ana) tam köprü evirici için IGBT (insulated gate bipolar transistor), alt hücre içinde GTO (gate turn-off thyristor) kullanılmıştır. GTO tabanlı hücre daha düşük frekansta anahtarlama yapar (genelde temel frekansta) IGBT tabanlı hücre ise dalga formunu düzeltmek için DGM üzerinden anahtarlanır [3].



Şekil 3: Farklı gerilim seviyeli asimetrik hibrit kaskad evirici hücre

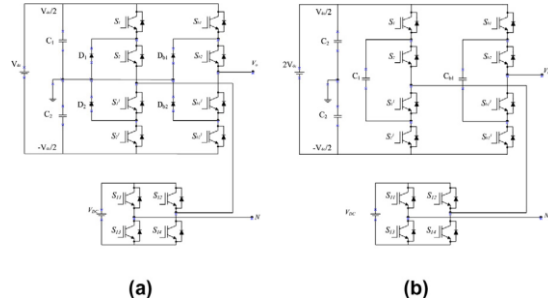


Şekil 4: Farklı anahtarlama frekanslarında asimetrik hibrit kaskad evirici hücre

Bir başka asimetrik hibrit ÇSE topolojisi de DA kaynak sayısını azaltmak için temel topolojilerden ikisinin hibritlenmesi ile elde edilen bir topolojidir. Bu topoloji ile çıkış gerilimi dalga şekli daha düzgün olur ve dalga üzerindeki harmonik etkisi azaltılmış olur. Hibrit çok seviyeli eviricinin her bir modülü için farklı doğru gerilimleri ve farklı anahtarlama frekansları kullanılarak evirici verimi artırılıp THB karakteristiği ayarlanabilir.

Bununla birlikte, geleneksel DGM stratejileri, temel frekansta anahtarlama frekansı ürettiğinden AH-ÇSE için uygun değildir. Buna bağlı olarak, yüksek voltaj modülleri anahtarlama cihazları sadece evirme işleminin bazı anlarında çalışır. Bu kontrol stratejisi, hibrit modülasyon yöntemi ile kullanılarak yüksek güçlü hücreleri düşük frekansta anahtarlama, düşük güç hücreleri de yüksek frekansta anahtarlama sayesinde daha yüksek verim elde ettiği ileri sürülmüştür [3].

En çok kullanılan AH-ÇSE topolojileri Şekil 5'de gösterilmiştir. 7 seviyeli diyot kenetli ve H-köprü hibrit topoloji Şekil 5a'da gösterilmiştir. Diğer 7 seviyeli topolojilerde Şekil 5b ve c'de verilmiştir.



Şekil 5: 3 fazlı AH-ÇSE topolojileri tek faz bacakları: (a) DK-ÇSE ve KHK-ÇSE, (b) FK-ÇSE ve KHK-ÇSE (c) AH-KHK-ÇSE

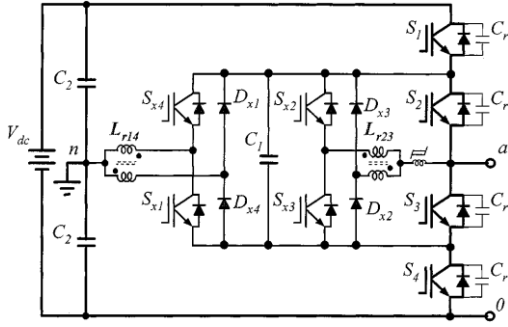
KHK ÇSE mükemmel giriş akımı ve çıkış gerilimi özelliğiyle verimli ve güvenilir bir modüldür. DK-ÇSE basit bir devreye sahiptir fakat motor sürücü uygulamaları için büyük bir LC filtresi gerektirir. Hibrit FK-ÇSE devresi DK-ÇSE eviriciye göre filtre gereksinimlerini ortadan kaldırır. Fakat bu topoloji harmonik içeriğini ve devre tasarımı maliyetlerini azaltmada KHK-ÇSE kadar başarılı değildir. AH-KHK-ÇSE için de Şekil 5c'de olduğu gibi bir IGBT H-köprü modülü ile GTO modülü kullanırsa yüksek gerilimi engelleyen ve düşük frekanslarda anahtarlama yapabilen bir modül oluşturulmaktadır. Bu topoloji gerilim seviyesi sayısını korurken H-köprü modül sayısını azaltmaya olanak sağlar.

Asimetrik ÇSE'ler güç elemanları sayısını artırmadan çıkış gerilimindeki harmonik bileşenleri en aza indirirler. Farklı gerilim seviyeleri kullanılarak oluşturulan Hibrit ÇSE'ler tüm sistemin güç işleme uygulamalarını optimize edebilirler. Ayrıca H-ÇSE'ler esnek ve güvenilir bir yapıya sahiptirler.

3.3. Yumuşak Anahtarlama ÇSE

Çok seviyeli eviricilerde anahtarlama kayıplarını azaltmak ve verimi artırmak için bir çok yumuşak anahtarlama yöntemi vardır. Kaskad eviricide her bir hücre 2 seviyeli devre olduğundan geleneksel eviricilere uygulanan yumuşak anahtarlama yönteminden farklıdır. Diyot veya kondansatör kenetlemeli eviriciler için mevcut seçenekler ancak yumuşak anahtarlama devrelerinin farklı kombinasyonları kullanılarak bulunabilir. Sıfır anahtarlama akımı mümkün olsa da literatürde yardımcı rezonans komütasyon kutuplu (ARCP) sıfır gerilim anahtarlama devreleri daha çoktur.

Birleştirilmiş endüktans ile birlikte sıfır gerilimde iletim (ZVT) ve ARCP çiftli-endüktans ZVT teknikleri birleştirilmiş kondansatör kenetli üç seviyeli evirici blok diyagramı Şekil 6'da gösterilmektedir [3].



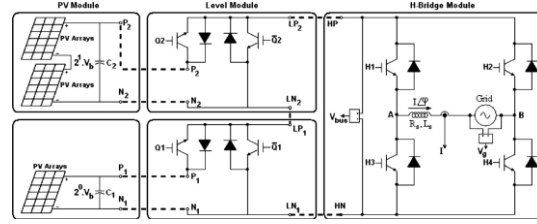
Şekil 6. Sıfır gerilimde anahtarlama yapan kondansatör kenetli evirici devresi

3.4. Anahtarlama Elemanı Sayısını Azaltmak İçin Önerilen Yeni Topolojiler

Çok seviyeli eviricilerin temel sorunlarından biri çok sayıda anahtarlama elemanı içermesi ve bu elemanların kontrol edilmesinin zorluğudur. Bu amaçla anahtarlama elemanı sayısını azaltmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların birinde gerilim ters çeviren (gerilim dönüştüren) adı verilen yeni bir topoloji geliştirilmiştir. Bu topoloji iki farklı bölümden oluşmakta ve birinci modül çıkış gerilim seviye sayısını belirlerken diğer bölüm ise alternatif gerilimin polaritesini belirlemektedir. Dolayısıyla birinci modül yüksek frekansta anahtarlama yaparken ikinci modül şebeke frekansının yarısında anahtarlama yapmaktadır. Ayrıca önerilen topolojinin kontrol yönteminde de daha basit bir Sinüzoidal DGM (SDGM) uygulamasıyla kontrol edilebildiği 5 seviyeli bir ÇSE için 2 taşıyıcı dalga sinyali ile 5 seviyenin elde edilebildiği gösterilmiştir. Kullanılan anahtarlama elemanı ve sistemdeki toplam elemanlar bakımından geleneksel topolojilerle karşılaştırıldığında 5 ve üzeri seviyelerde diğer topolojilere göre daha az eleman kullanarak daha çok seviye elde edilebildiği gösterilmiştir [4].

Anahtarlama elemanı sayısını azaltarak sistemi basitleştirmek amacıyla yapılan bir çalışmada, tek fazlı ÇSE içeren bir şebeke bağlantılı FV güç dönüşüm sistemi önerilmiştir. Önerilen sistem temelde FV diziler ve tek fazlı ÇSE yapısından oluşmaktadır ve Şekil 7'de devre şeması görülmektedir. İlk olarak, FV destekli evirici sistemi parçaları ayrıntılı olarak tanıtılmaktadır. Yeni bir evirici ve bu eviricinin kontrolü için yeni bir algoritma önerilmiştir. Kontrol algoritması ve sunulan sistemin çalışma prensipleri açıklanmıştır. Bu sistem, simülasyonlar ve deneysel çalışma ile doğrulanmıştır. Evirici seviyesinin kolayca artırılacağı, istenilen çıkış dalga şeklinde gerilim üretebileceği, anahtarlama stratejisinin basit olduğu, Maksimum Güç Noktası İzleyici (MGNI)

algoritmasına gerek duyulmadığı ve sistemin bunu kendisinin yapabildiği gibi özellikleri deneysel sonuçlarla ispatlanmıştır [5].



Şekil 7: Anahtarlama elemanı sayısını azaltmak için önerilen yeni topoloji

Literatürde daha farklı topolojiler de mevcuttur. Evirici devreler uygulama alanlarına göre geliştirilebilir. DA gerilim kaynağının durumu, evirme işleminden sonra evirici çıkışındaki istenen gerilimin dalga şekli harmonik içeriği gibi değişkenler evirici tipinin belirlenmesinde etkili olmaktadır. Tablo 1'de evirici tiplerinin kullanım alanlarına göre performanslarının karşılaştırılması verilmiştir.

Tablo 1: Evirici topolojilerinin karşılaştırması [2]

TOPOLOJİ	Kontrol Şeması			Uygulamaları		
	SHE-DGM	SDGM	UVDGM	Motor Sürücü	Aktif Filtre	PV Yakıt Hücresi
DK-ÇSE	✓✓	✓	✓	✓✓	✓	✓
FK-ÇSE	✓	✓	X	✓	✓	X
KHK-ÇSE	X	✓✓	✓	✓✓	✓✓	✓✓
H-ÇSE	X	✓✓	X	✓	✓	✓
AH-ÇSE	X	✓✓	✓	✓✓	✓	✓✓

4. Sonuçlar

Tablo 1'den de anlaşılacağı üzere güneş enerjisi sistemleri için en uygun olan topoloji KHK-ÇSE'ler ve AH-ÇSE'lerdir. Asimetrik ÇSE'ler bir çok topolojiyle elde edilebilmektedir. Herhangi iki topolojinin hibritlenmesi ile elde edilebildiği gibi farklı anahtarlama frekanslarına sahip farklı yarı iletken anahtarlama elemanlarıyla tasarlanabilir.

- Tablo 1'den görüleceği gibi kaskad ÇSE topolojisi kullanılarak elde edilecek bir asimetrik hibrit ÇSE topolojisi FV enerji sistemleri için en uygun topoloji olacaktır.
- Bu topolojinin her bir modülü için farklı gerilim seviyeleri kullanılmasıyla (güneş enerji sistemleri için kolay uygulanabilir bir durum) daha az hücre kullanarak daha çok gerilim seviyesi elde edilebilecektir.
- Ayrıca hibrit eviricinin üst ve alt modülleri için farklı anahtarlama elemanları (IGBT, GTO vb.) seçimiyle eviricinin anahtarlama yeteneği ve çıkış gerilim dalga şekli düzenlenebilir.

- Anahtarlama sayısının azaltmak için önerilen topolojiler asimetrik besleme gerilimleri kullanılarak FV enerji sistemleri için uygun bir topoloji haline getirilebilir.

5. Kaynaklar

- [1] Özdemir E., Özdemir Ş., "Güneş Pilleri ile Dağıtılmış Elektrik Üretim Sistemlerindeki Gelişmeler", VII. **Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu UTES'2008**, 17-19 Aralık 2008, İstanbul.
- [2] Colak İ., Kabalci E., Bayindir R., "Review of multilevel voltage source evirici topologies and control schemes", **Energy Conversion Management 2010**.
- [3] Rodríguez J., Lai J.S., Peng, F.Z., "Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications", **IEEE Transactions On Industrial Electronics**, Vol. 49, No. 4, August 2002.
- [4] Najafi E., Yatim A.H.M., Samosir A.S., "A New Topology -Reversing Voltage (RV)- for Multi Level Inverters", **2nd IEEE International Conference on Power and Energy**, December 1-3 2008, Malaysia.
- [5] Beşer E., Arifoğlu B., Çamur S., Beşer E. K., "A Grid-connected photovoltaic power conversion system with single-phase multilevel inverter", **Solar Energy 2010**.