

GÜNEŞ ENERJİLİ SİSTEMLER İÇİN MİKRODENETLEYİCİ TABANLI DA/DA YÜKSELTEN DÖNÜŞTÜRÜCÜ

Mehmet DEMİRTAŞ, İbrahim SEFA, Erdal IRMAK ve İlhami ÇOLAK

Gazi Elektrik Makineleri ve Enerji Kontrol Grubu (GEMEC), Elektrik Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, mehmetd@gazi.edu.tr, isefa@gazi.edu.tr, erdal@gazi.edu.tr, icolak@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 26.11.2007; Kabul/Accepted: 14.03.2008)

ÖZET

Bu çalışmada güneş enerjili sistemler için mikrodeneleyici tabanlı bir DA/DA yükselten dönüştürücü tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Sistemin çalışması için gerekli anahtarlama sinyalleri mikrodeneleyici tarafından üretilmektedir. Aynı şekilde, dönüştürücünün girişindeki akım ve gerilim bilgileri mikrodeneleyici tarafından okunarak sistemin gücü hesaplanmaktadır. Çalışmada, çıkış gücünün sürekli olarak en yüksek seviyede tutulması için “maksimum güç takibi” uygulaması geliştirilmiştir. Bu uygulama ile giriş gerilim seviyesindeki artış, ya da azalmaya bağlı olarak dönüştürücünün anahtarlama sinyalinin, iletim ve kesim oranları değiştirilmekte ve çıkış akımı hep maksimum gücü elde edecek şekilde ayarlanmaktadır. Uygulama sonucunda dönüştürücü çıkışındaki doğru gerilim üzerinde bulunan dalgalanma değerinin IEC 61204 standardına uygun olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca dönüştürücüde kullanılan maksimum güç takibi uygulaması yardımıyla sistemin normal çalışmaya göre % 36 daha verimli çalıştığı ve yükselten dönüştürücünün veriminin %92 olduğu deneysel çalışmalar sonucunda tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yükselten dönüştürücü, yenilenebilir enerji, maksimum güç takibi.

MICROCONTROLLER BASED DC/DC BOOST CONVERTER FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS

ABSTRACT

In this study, a microcontroller based DC/DC boost converter has been designed and implemented for solar energy systems. The switching signals required to operate the system are generated by the microcontroller. Similarly, the current and the voltage values at the input terminal of the converter are measured by the microcontroller, and then the power of the system is calculated. In the system developed, “maximum power point tracking” (MPPT) application is also developed to keep the output power as the maximum level continuously. On-off times of the switching signals of the converter are modulated in accordance with the variations on the input voltage level and then the output current is automatically adjusted to obtain the maximum output power. The application results have shown that the ripple factor on the DC voltage at the output of the converter corresponds with the limits of the IEC61204 standards. Furthermore, it has been experimentally observed that the system using MPPT application operates as 36% more efficient than the classical operation and efficiency of the boost converter has been determined as 92%.

Keywords: Boost converter, renewable energy, maximum power point tracking.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda enerji elde etmek amacıyla kullanılmakta olan fosil yakıtların tükenmeye başlaması ve oluşturdıkları çevre kirliliği problemlerinden dolayı yenilenebilir enerji kaynakları üzerindeki çalışmalar

artmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları olarak tanımlanan güneş, rüzgâr, hidrojen, biokütle enerjileri ile daha verimli sistemler oluşturmak için araştırmalar devam etmektedir [1]. Uygulamada güneşten elde edilen enerji ısıtma ve elektrik elde etme olarak iki şekilde kullanılmaktadır. Isıtma sistemlerinde

güneşten elde edilen ısı enerjisi ile su ısıtmakta ve kullanılmaktadır. Yarıiletken teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak son yıllarda üretilen güneş panelleri ise güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu amaca yönelik olarak üretilen güneş panellerinin verimleri %18 seviyelerine ulaşmaktadır [2]. Panel kullanılarak oluşturulan sistemlerin daha verimli olması için DA/DA dönüştürücüler kullanılmaktadır. Kullanılan dönüştürücü çeşitleri ise yükselten, alçaltan ve alçaltan-yükselten dönüştürücüler olarak tanımlanabilir. Dönüştürücülerin tasarımı sırasında sistemde kullanılan yarıiletken anahtarlar elemanının çalıştırılma stratejisi, sistemin verimi üzerinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu tür sistemler için en verimli uygulamanın maksimum güç noktası takibi (MPPT) olduğu belirlenmiştir [3]. Maksimum güç noktası takibi işleminde güneş panellerinden elde edilen elektrik enerjisindeki değişimlerin sistemin çıkışında minimum seviyede hissedilmesi ve dönüştürücünün çıkış geriliminin sürekli olarak sabit tutulması amaçlanmaktadır. MPPT işlemi sırasında giriş gerilimi ve akımı değerlendirilerek, dönüştürücü türüne göre anahtarlama işaretinin oranı sürekli olarak değiştirilmekte ve çıkış gerilimi sabit tutulmaktadır. Ancak bu işlemin yapılabilmesi için öncelikle kullanılacak olan güneş panellerinin (PV) yapısı ve çıkış gerilim değeri aralıklarının bilinmesi, ayrıca PV'lerin üretebileceği gerilime göre sistemde kullanılacak olan dönüştürücü tipinin belirlenmesi gerekmektedir. Literatürde dönüştürücülerle ilgili çalışmalarda küçük güçte ve farklı yapıda dönüştürücüler incelenmiştir [4]. Çalışmalarda dönüştürücü yapılarının yanı sıra, farklı MPPT algoritmaları [5, 6] ve bu algoritmaların ek olarak değişken güneşlenme değerlerine sistemlerin tepkileri incelenmiştir [7]. Bu çalışmalarda ise giriş değişkenlerinin değişimini kontrol edebilmek ve verimi artırabilmek için sayısal işaret işleyici (DSP) kullanılmıştır. Sonuçta, sistemin uygulamada kullanılabilirliği azalmış ve maliyeti yükselmiştir. Mikro denetleyicilerde çevresel arabirimler, bir tümleşik aygıt içinde birleştirildiğinden sistem hızının ve güvenilirliğinin arttığı, maliyetin azaldığı, kullanım kolaylığı sağlanmakla birlikte karmaşık yapının ortadan kaldırıldığı rapor edilmektedir [8]. MPPT ile ilgili yapılan çalışmalarda ise gerilim tabanlı kontrol uygulamalarıyla karşılaşılmaktadır [9]. Sadece gerilim kontrollü güç takibinde verimin düşük olduğu belirtilmiştir. Bu tür uygulamalarda hem akım hem de gerilim tabanlı kontrol metotları tercih edilmektedir.

Bu çalışmanın literatürdeki diğer uygulamalardan farkı, yaklaşık 2,6 kW gücünde bir sistem için hem akım, hem de gerilim kontrollü olarak değiştir ve gözle mantığı üzerine kurulmuş bir yükselten dönüştürücü uygulaması olması ve bunun mikro denetleyici (PIC) kontrollü ve PWM denetimli olarak tasarlanmasıdır.

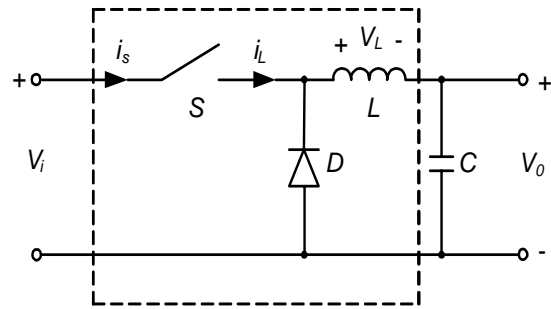
2. DÖNÜŞTÜRÜCÜ ÇEŞİTLERİ VE YAPILARI (TYPES AND STRUCTURES OF THE CONVERTERS)

Güneş panellerinden elde edilen elektrik enerjisi günün değişik zamanlarında farklı gerilim değerleri vermektedir. Oluşturulacak sistemin, yükün türüne bağlı olarak sürekli sabit çıkış gerilimi vermesi istenir. Bunu sağlamak için devreye bir adet dönüştürücü bağlanmaktadır. Sistemde kullanılacak olan dönüştürücünün yapısını, güneş panellerinden elde edilen giriş gerilimi (V_i) ile dönüştürücünün çıkış gerilimi (V_o) arasındaki fark belirlemektedir.

Şekil 1'de alçaltıcı dönüştürücünün yapısı verilmiştir [10]. Bu tür dönüştürücüler çıkış geriliminin, panellerden elde edilen gerilime eşit veya daha az olduğu durumlarda kullanılırlar. Devredeki S anahtarlama elemanı yüksek frekansta anahtarlanarak sistemin güç akışı sağlanır.

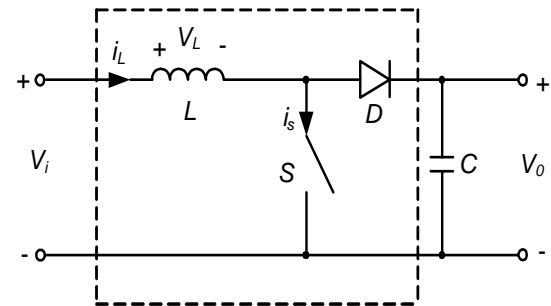
Alçaltan dönüştürücülerde ortalama çıkış gerilimi ile anahtarlama oranı arasındaki ilişki Eşitlik 1'de verilmiştir.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{t_{ON}}{T} = d \quad (1)$$



Şekil 1. Alçaltan dönüştürücünün yapısı (Structure of the buck converter)

Şekil 2'de yükselten dönüştürücünün yapısı verilmiştir. Devrede S anahtarı kapalı olduğu zaman akım endüktans üzerinden geçmektedir. Bu durumda bobin gerilimi giriş gerilimine eşit ($V_L = V_i$) olmaktadır. S anahtarının açık olduğu zaman ise, endüktans üzerindeki gerilim giriş ve çıkış gerilimlerinin farkına ($V_L = V_i - V_o$) eşit olmaktadır.



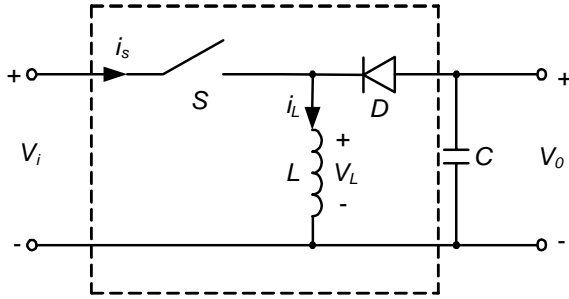
Şekil 2. Yükselten dönüştürücünün yapısı (Structure of the boost converter)

Sonuçta çıkış gerilimi bobin gerilimi ile giriş geriliminin toplamına eşit olmaktadır. Bu tür dönüştürücüler çıkış geriliminin panellerden elde edilen gerilimden daha büyük olması istenilen durumlarda kullanılırlar.

Yükselten dönüştürücülerde ortalama çıkış gerilimi ile anahtarlama oranı arasındaki ilişki Eşitlik 2’de verilmiştir.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-d} \quad (2)$$

Şekil 3’te alçaltan-yükselten dönüştürücünün yapısı verilmiştir. Dönüştürücüde, S anahtarı kapalı olduğu zaman bobin gerilimi, giriş gerilimine eşit ($V_L=V_i$) olmaktadır. Anahtar açık durumda iken bobin gerilimi çıkış gerilimine eşit ($V_L=V_o$) olmaktadır.



Şekil 3. Alçaltan-Yükselten dönüştürücüsün yapısı (Structure of the buck-boost converter)

Alçaltan-Yükselten dönüştürücülerde ortalama çıkış gerilimi ile anahtarlama oranı arasındaki ilişki Eşitlik 3’te verilmiştir.

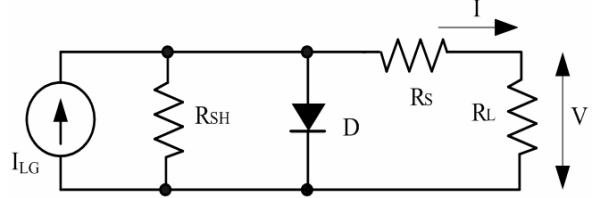
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{d}{1-d} \quad (3)$$

Yapılacak sistemlerde güneş panellerinden elde edilen elektrik enerjisinin, sistemin çıkışında istenilen gerilim değerinden az veya çok olması durumuna göre belirlenecek dönüştürücü tipi değişmektedir. Ayrıca seçilen dönüştürücü tipine bağlı olarak MPPT işlemi için kullanılacak olan anahtarlama stratejisi de değişmektedir [11].

3. MAKSİMUM GÜÇ NOKTASI TAKİBİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ (IMPLEMENTATION OF THE MAXIMUM POWER POINT TRACKING)

Dönüştürücünün çalışması sırasında elde edilen çıkış gücünün sistemin maksimum verimle çalışabilmesi için sürekli olarak en yüksek seviyede olması gerekmektedir. Sistemin çıkış gücünün sürekli olarak en yüksek seviyede tutulması işlemine “maksimum güç noktası takip işlemi” (MPPT) adı verilmektedir. Fotovoltaik panellerde güneş ışıması, çevre sıcaklığı gibi faktörlere bağlı olarak maksimum güç noktası değişmektedir. MPPT işlemini daha iyi

uygulayabilmek için güneş panelinin matematiksel denklemleri ve elektriksel eşdeğer devresi incelenmelidir. Güneş panelinden elde edilen elektrik enerjisini matematiksel olarak ifade edebilmek için öncelikle güneş paneli eşdeğer devresi çıkarılmalıdır. Bu devredeki değerlere bağlı olarak elde edilen formüller incelenirse, panelin enerji üretimi ve verimi ile ilgili daha fazla bilgi sahibi olunabilir. Şekil 4’te güneş paneli elektriksel eşdeğer devresi verilmiştir [12].



Şekil 4. Güneş paneli elektriksel eşdeğer devresi (Electrical equivalent circuit of the solar panel)

Eşdeğer devre üzerindeki R_{SH} akım kaynağına paralel bağlı direnci, D ise kaynak üzerinden geçebilecek ters akımları önleyen diyotu ifade etmektedir. R_S seri direnç, R_L ise yük direnci olarak kullanılmaktadır.

Güneş panelinde üretilen elektrik enerjisine, panel sıcaklığının, panelin güneş alma açısının ve ışıma değerinin direk olarak etkisi vardır. Güneş panelinde elde edilen elektrik enerjisi matematiksel olarak Eşitlik 4’te, ters doyum akımı Eşitlik 5’te ve ışık tarafından üretilen akım Eşitlik 6’da verilmiştir.

$$I = I_{LG} - I_{OS} \left\{ \exp \left[\frac{q}{AkT} (V + IR_S) \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_S}{R_{SH}} \quad (4)$$

$$I_{OS} = I_{OR} \left[\frac{T}{T_R} \right]^3 \exp \left[\frac{qE_{GO}}{Bk} \left(\frac{1}{T_R} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (5)$$

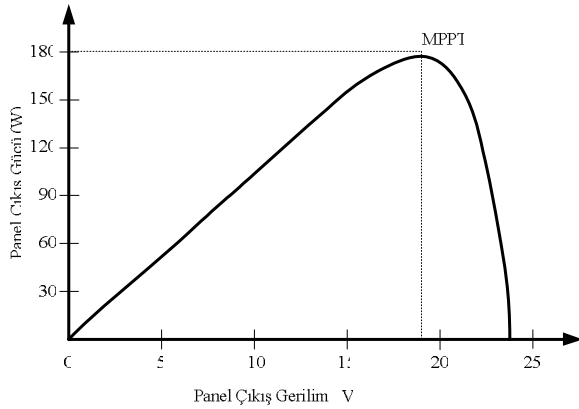
$$I_{LG} = [I_{SCR} + K_I (T - 25)] \lambda / 100 \quad (6)$$

Çok sayıda hücre seri-paralel bağlantılar yolu kullanılarak istenilen akım ve gerilimlerde paneller oluşturulur. Ticari olarak pazarda bulunan güneş panellerinin verimleri % 14 ila %15 gibi oldukça düşük bir değerdedir. Güneşin ışınları ile yeryüzüne ulaşan güç, açık ve güneşli bir bölge için 1000 W /m² civarındadır. Mevcut güneş panellerinin 1 m² için bu ışıma ürettikleri güç 120-150 W civarındadır. Bir güneş panelinin 20-25 yıl boyunca üretiminde çok büyük bir azalma olmadan çalışabilmesi mümkündür [13]. Uygulamada ince film, polikristal, monokristal ve mercekli (yoğunlaştırıcı) olmak üzere dört farklı yapıda güneş paneli bulunmaktadır. Bu panellerden ince film, poli ve monokristal olanları herhangi bir ilave sisteme ihtiyaç duymadan güneş ışığından elektrik üretebilmektedir. Ancak yoğunlaştırıcı model paneller ise bir mercek ile birlikte kullanılırlar. Verimleri diğer panellere göre çok yüksektir, ancak güneşi mutlaka dik açıyla görmeleri gerekmektedir.

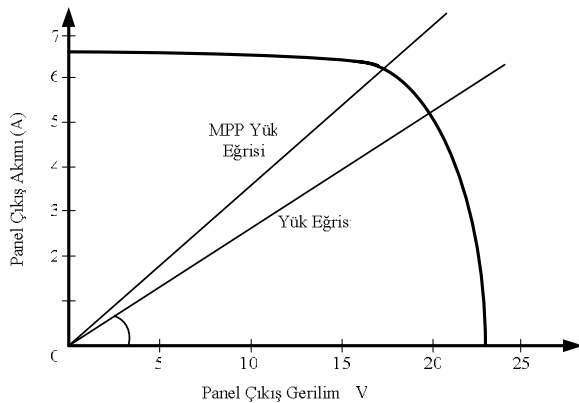
Ayrıca merceklerde ve güneş paneli hücrelerindeki aşırı ısınma bu sistemin kullanılabilirliğini kısıtlamaktadır. Bu çalışmada ise uygulamalarda daha fazla karşılaşılmamasından ve verimi daha iyi olmasından dolayı monokristal güneş paneli kullanılmıştır.

Güneş panelli sistemlerde MPPT yapılmasının amacı, mevcut yatırımdan maksimum enerji sağlayarak verimi yükseltmektir. Bu durum ise ancak panel gerilimi ve panelden çekilen akım değerlerinin sürekli olarak takip edilip, maksimum gücün hesaplanması yolu ile yapılır. Şekil 5'te sistemde kullanılan Sharp NUSOE3E modeli 185 W'lık güneş panelleri için belirli bir değerdeki maksimum güç noktası ve Şekil 6'da ise güneş panelinin MPPT uygulanmayan durumdaki yük eğrileri verilmektedir. Bu şekillerden görüleceği gibi, güneş panelinden elde edilen farklı gerilim ve akım değerlerine karşılık, güç noktası en yüksek seviyede tutulmaya çalışılmaktadır. Böylece sistemin en iyi verimle çalıştırılması sağlanmaktadır. Buradaki amaç güneş panellerinden elde edilen DA gerilimi eviricinin giriş seviyesi sınırları içerisinde tutabilmek, ayrıca sistemin maksimum güç noktası takibi yapılabilmesini sağlamaktır.

Güneş panellerinden elde edilen elektrik enerjisi, güneşlenme ve panel sıcaklığı gibi dış faktörler sayesinde sürekli olarak değişiklik göstermektedir.



Şekil 5. MPPT güç-gerilim karakteristiği (Power-voltage characteristic of the MPPT)



Şekil 6. MPPT akım-gerilim karakteristiği (Current-voltage characteristic of the MPPT)

Ayrıca sistemin çıkışında bulunan yük değişimlerine bağlı olarak, dönüştürücünün sabit bir aralıkta sürekli gerilim üretmesi istenmektedir. Yükselten dönüştürücünün anahtarlama elemanına uygulanan boşluk darbe oranları değiştirilerek, dönüştürücü çıkışındaki gerilim seviyesi değiştirilmektedir.

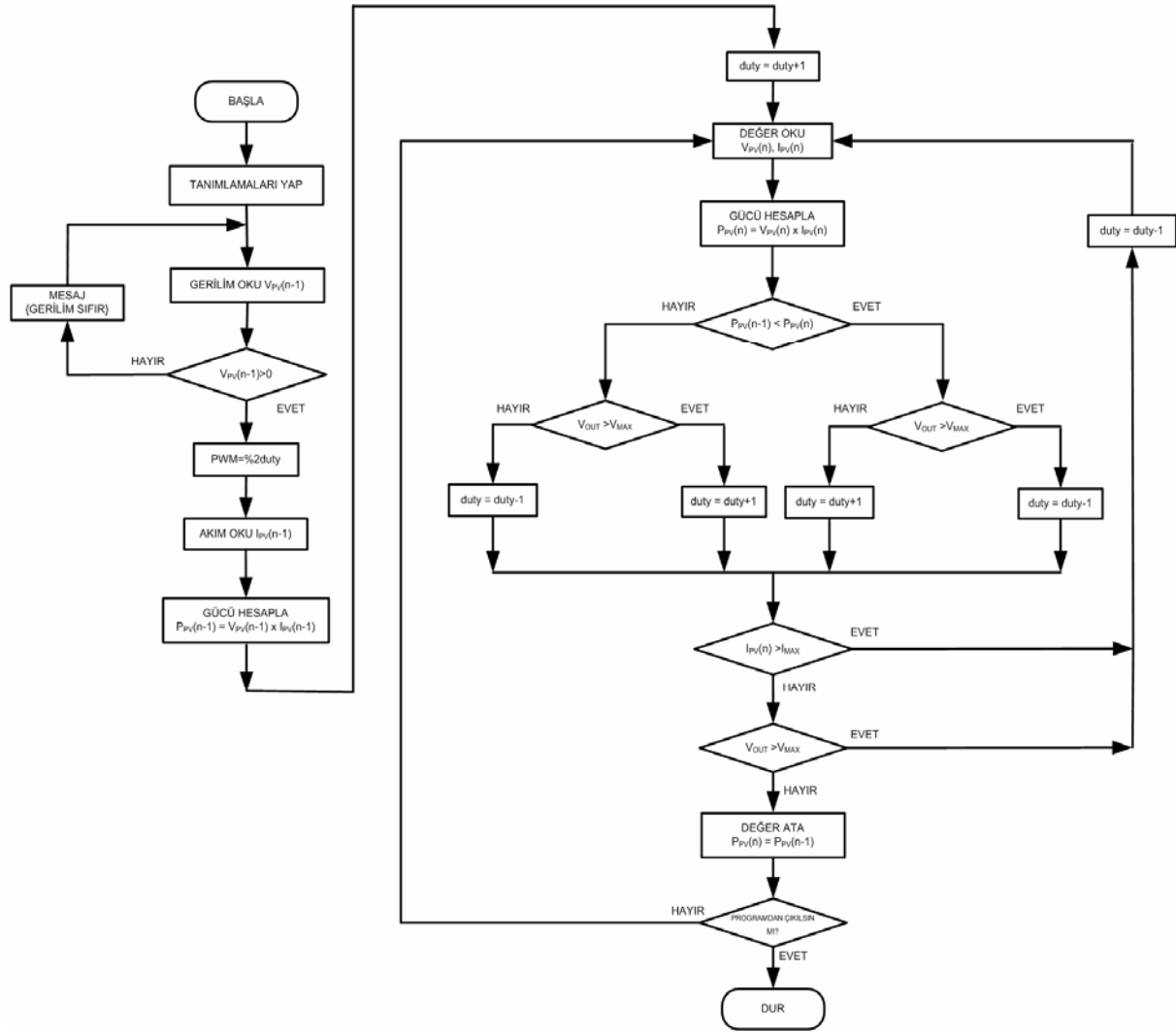
Tasarlanan sistemde MPPT işlemi için giriş ve çıkıştaki akımlar ve gerilimler sensörler yardımıyla okunarak değerlendirilmektedir. Elde edilen akım ve gerilim değerleri mikro denetleyicide işleme sokularak dönüştürücü için gerekli anahtarlama işareti üretilmektedir. Sistemdeki MPPT işlemine ait akış diyagramı Şekil 7'de verilmiştir. Akış diyagramında da görüldüğü gibi sistemde gücün değeri bir önceki değerine göre artış gösteriyor ise, giriş geriliminin de artıp artmadığı kontrol edilmektedir. Eğer gerilim değeri artıyorsa, anahtarlama oranı azaltılmakta, gerilim azalıyorsa oran artırılmaktadır. Güç değerinde bir önceki hesaplanan değere göre azalma var ise tekrar gerilimin artışı kontrol edilmekte, eğer gerilim artıyor ise, anahtarlama oranı bu sefer arttırılmakta, gerilim azalıyor ise oran azaltılarak sistemin gücü ayarlanmaktadır.

Eğer güç değerinde bir artma ya da azalma olmuyorsa, gerilimin bir önceki değerine göre eşit olup olmadığı kontrol edilmektedir. Gerilim eşitse sistem döngüden çıkmaktadır. Maksimum güç noktası takibi uygulamasında dönüştürücünün PWM anahtarlama oranları değiştirilirken kaynağın sağlayacağı maksimum akım değerini geçmesi engellenmektedir. Bu nedenle PWM sinyalin anahtarlama oranı %2 ile %49 arasında sınırlandırılmaktadır. Ayrıca yükselten dönüştürücünün çıkışına bağlanacak olan eviricinin giriş gerilim ve güç değerlerini de aşması istenmeyen bir durumdur. Bu koşullara bağlı kalarak, sistemden sürekli olarak maksimum gücü elde etmek için, dönüştürücünün anahtarlama elemanına uygulanan PWM sinyalin iletim-kesim süreleri değiştirilmektedir.

Panellerde üretilen gerilim belirli bir değer altına düştüğünde ve ayrıca dönüştürücünün çıkış gerilim ve akımı belirlenen sınırın üzerine çıktığı zaman sistem uyarı vermekte ve anahtarlama oranını belirli bir seviyeye kadar düşürmektedir.

4. YÜKSELTEN DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI ve UYGULAMASI (DESIGN AND IMPLEMENTATION OF THE BOOST CONVERTER)

Güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etme amacıyla tasarlanan sistemlerde, panellerden elde edilen enerji; şebeke etkileşimli çalışma, ada modu çalışma, depolayıp sonra kullanma gibi farklı yöntemlerle yüke iletilmektedir. Şebeke etkileşimli çalışmada panellerden elde edilen doğru gerilim bir evirici yardımıyla direkt şebekeye aktarılmaktadır. Ada modu çalışmada ise, şebekenin olmadığı yerde alıcılar doğrudan beslenmektedir. Depolayıp sonra



Şekil 7. MPPT işlemine ait akış şeması (Flowchart of the MPPT operation)

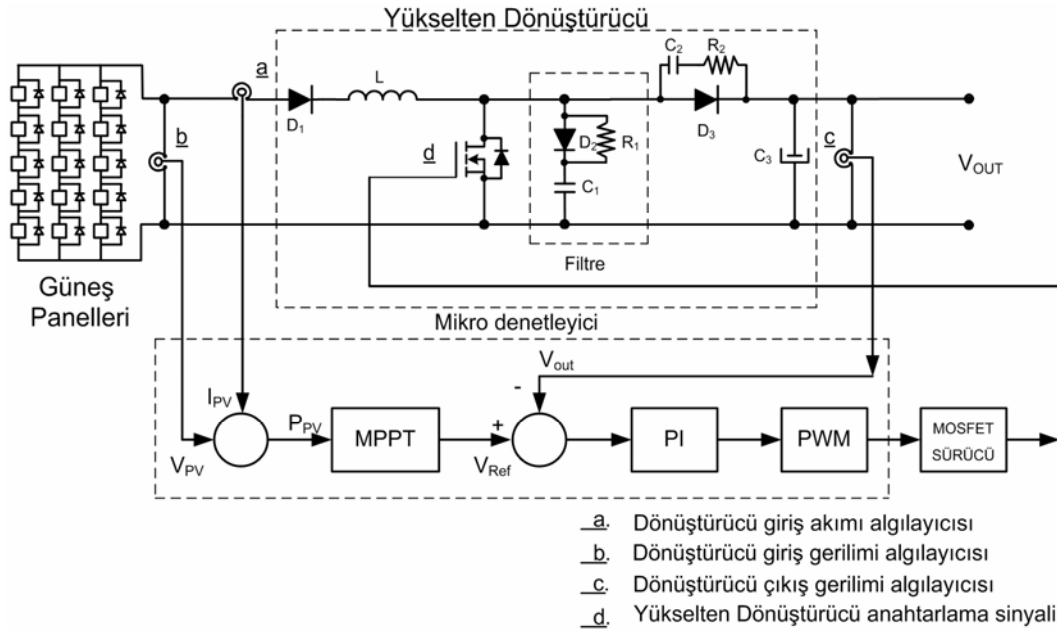
kullanma durumunda ise, bir akü grubu şarj edilerek enerji depolanmakta ve ihtiyaç duyulduğunda kullanılmaktadır [14]. Tasarımı yapılan sistemde ise, panellerden elde edilen doğru gerilim bir yükselten dönüştürücüden geçirilmekte ve dönüştürücünün çıkışındaki gerilim, evirici vasıtasıyla alternatif gerilime çevrilerek kullanıcıya iletilmektedir.

Yükselten dönüştürücü uygulamasında, sistemin çalışması için gerekli anahtarlama sinyali mikrodenetleyici tarafından üretilmektedir. MPPT işlemi sırasında dönüştürücünün girişindeki akım ve gerilim bilgileri mikro denetleyici tarafından okunarak sistemin gücü hesaplanmaktadır. Giriş gerilim seviyesindeki artış ya da azalmaya bağlı olarak dönüştürücünün anahtarlama sinyalinin oranları değiştirilmekte ve çıkış akımı hep maksimum gücü elde edecek şekilde ayarlanmaktadır.

Maksimum güç noktası takip işlemi ve güneş panellerinin güneşi takip etme işlemleri bir arada uygulandığı takdirde sistemin veriminin daha fazla olacağı belirlenmiştir [15]. Sistemin mikro denetleyici programları HI-TEC C dilinde yazılmış ve 18F452

mikro denetleyici kullanılmıştır. Uygulaması yapılan yükselten dönüştürücüye ait sistemin şeması Şekil 8'de verilmiştir.

Sistem güneş panelleri, mikro denetleyici, akım ve gerilim algılayıcıları, yükselten dönüştürücü ve Metal Oksit Yarıiletken Alan-Etkili Transistör (MOSFET) sürücünden oluşmaktadır. Uygulanan sistemde güneş panellerinden elde edilen DA gerilim LEM LA-55 modeli bir akım algılayıcısından (a) ve bir gerilim bölücü (b) üzerinden geçirilip, yükselten dönüştürücüye uygulanmaktadır. (a) ve (b) algılayıcılarından alınan akım ve gerilim sinyalleri mikro denetleyici tarafından MPPT işlemine sokulmakta ve V_{ref} sinyali elde edilmektedir. Aynı zamanda V_{ref} sinyali ile çıkış gerilim algılayıcısı (c) tarafından okunan DA gerilimi (V_{out}) karşılaştırılarak elde edilen hata PI denetleyiciden geçirilmektedir. PI çıkışından elde edilen sinyal mikro denetleyicinin PWM modülü tarafından PWM sinyaline dönüştürülür. Elde edilen PWM sinyali bir MOSFET sürücü aracılığı ile dönüştürücüde bulunan anahtarlama elemanına uygulanır. Böylece PI çıkışından elde edilen PWM sinyaline göre MOSFET

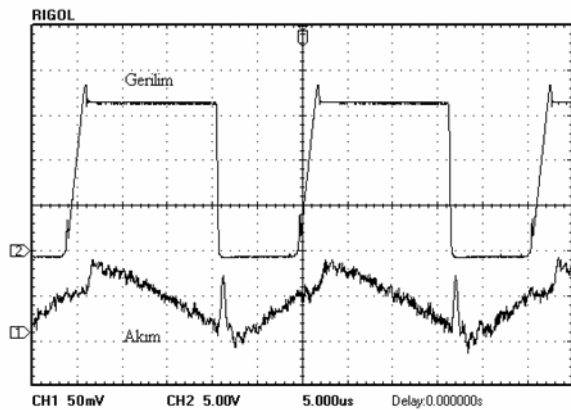


Şekil 8. Yükselten dönüştürücü blok diyagramı (Block diagram of the boost converter)

anahtarlanarak sistemin sürekli olarak MPPT’de çalışması sağlanır.

Uygulaması yapılan yükselten dönüştürücüde anahtarlama elemanı olarak IXFK 73N30 isimli 73A 300V MOSFET ve MOSFET’in anahtarlamasını sağlamak amacıyla TC4429 tipi sürücüsü kullanılmıştır. Sürücüye mikrodenetleyiciden 40 kHz değerinde anahtarlama sinyali uygulanmaktadır.

Yükselten dönüştürücüde akım dalgalanmasını %15’te sınırlandırmak için giriş endüktansına ihtiyaç duyulmuştur. Giriş endüktansı Eşitlik 7’de verilen formül kullanılarak 1 mH olarak hesaplanmıştır [10]. Elde edilen endüktans değeri ferit nüve üzerine sarılarak devrede kullanılmıştır. Giriş endüktansı üzerindeki akım ve endüktansın ucundaki gerilimin dalga şekilleri karşılaştırmalı olarak Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 9. Endüktans uçlarındaki gerilim ve akım eğrisi (Voltage and current waveforms of the inductance)

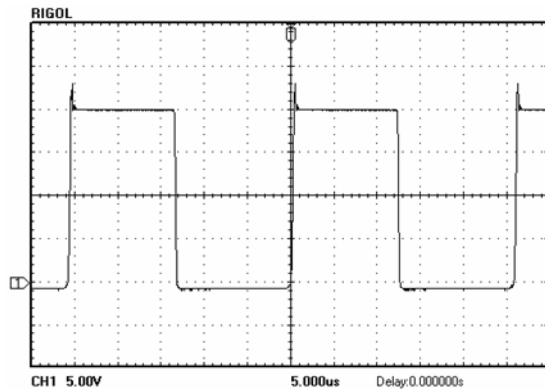
$$L = \frac{T_s V_o}{2I_{ORT}} D(1-D)^2 \quad (7)$$

Anahtarlama elemanı üzerinde, anahtarlama sırasında oluşan yüksek değerli pikleri önlemek amacıyla anahtarlama elemanının uçlarına bir söndürme devresi yerleştirilmiştir. Söndürme devresinde kullanılan kondansatör ve direncin hesaplanmasına ilişkin formüller Eşitlik 8 ve Eşitlik 9’da verilmiştir [16].

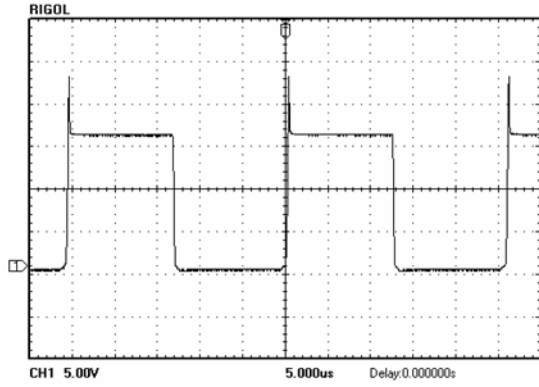
$$C_s = \frac{LI_o^2}{(V_{CEP} - E_D)^2} \quad (8)$$

$$R_s \leq \frac{1}{2,3C_s f} \quad (9)$$

Tasarlanan söndürme devresi sayesinde yükseltici dönüştürücünün anahtarlama elemanı istenilen gerilim ve akım değerlerinde çalıştırılabilmektedir. Söndürme devresi sisteme bağlı değilken ve bağlandıktan sonraki MOSFET’in Drain-Source uçlarındaki



Şekil 10. Söndürmesi devresi bağlı iken MOSFET gerilim eğrisi (Voltage waveform of the MOSFET when the snubber circuit is connected to switch)

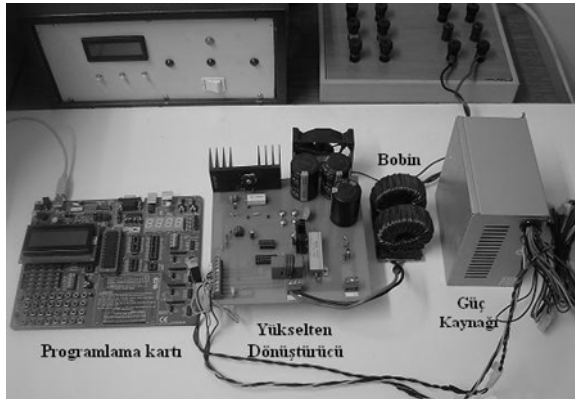


Şekil 11. Söndürmesi devresi bağlı değilken MOSFET gerilim eğrisi (Voltage waveform of the MOSFET when the snubber circuit is not connected to switch)

gerilimlerin eğrileri Şekiller 10 ve 11’de verilmiştir. Ölçümler sırasında 10X oranında zayıflatıcı prob kullanılmıştır.

Söndürme devresinin dönüştürücüden çıkarıldığı durum deneysel olarak gözlenmek istenildiğinde, dönüştürücünün anahtarlama elemanı üzerindeki gerilim Şekil 11’de verilmiştir. Bu durumda, dönüştürücüye 85 V giriş gerilimi uygulandığında, MOSFET’in Drain-Source uçları arasındaki gerilim 160 V seviyesinde iken gerilimin uçlarında oluşan piklerin değeri 70 V seviyesinde olmaktadır. Daha yüksek giriş gerilimi değerlerinde MOSFET’in uçlarındaki pik değeri artmakta ve anahtarlama elemanına zarar vermektedir.

Şekil 12’de gerçekleştirilen yükselten dönüştürücüye ait deney düzeneğinin fotoğrafı verilmiştir. Fotoğrafta mikrodenetleyici programlama ve kontrol kartı, yükselten dönüştürücü, bobin ve güç kaynağı görülmektedir.



Şekil 12. Gerçekleştirilen yükselten dönüştürücüye ait fotoğraf (Photograph of boost converter implemented)

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

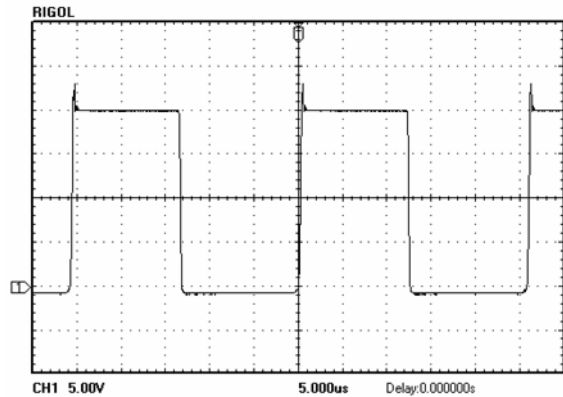
Bu çalışmada, güneş enerjisinden elde edilen elektrik enerjisini MPPT işlemi uygulayarak, devrede bağlı olan eviriciye uygun giriş gerilim aralığında vermek amacıyla bir yükselten dönüştürücü tasarlanmıştır.

Dönüştürücünün giriş gerilimi ve akım bilgisi algılayıcılar yardımıyla okunarak elde edilen bilgiler bir yükselteç devresine uygulanmıştır. Elde edilen yükseltilmiş akım ve gerilim bilgileri mikro denetleyicinin giriş uçlarına uygulanmaktadır. Yapılan yazılım yardımı ile bu bilgiler değerlendirilerek MOSFET’in anahtarlama oranları değiştirilmektedir.

Dönüştürücü ile yapılan deneylerde MOSFET’in yüksek frekanslarda anahtarlama sırasında ısındığı gözlemlenmiştir. Anahtarlama elemanındaki bu ısınma miktarı dönüştürücünün çıkışına uygulanan yük miktarı artırıldığında daha da çoğalmaktadır.

Anahtarlama elemanının ısınmasını ve çıkış gerilimindeki bozulmayı engellemek amacıyla devreye bir söndürme devresi yerleştirilmiştir. Tasarlanan söndürme devresi yardımıyla anahtarlama sırasında yük artsa bile MOSFET’in uçlarındaki sinyalde çok büyük bir değişiklik olmamaktadır.

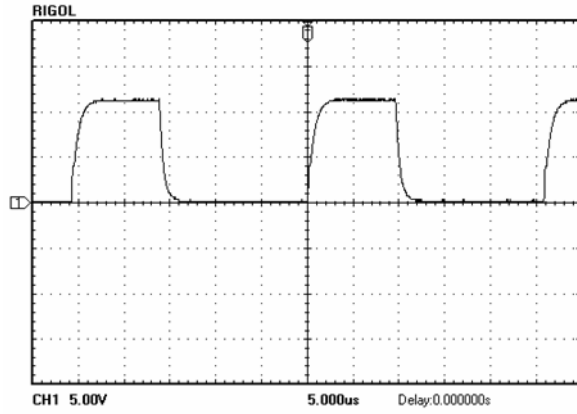
Dönüştürücü maksimum yük altında iken ve MOSFET’in anahtarlama oranı maksimum durumda iken Drain-Source uçlarında oluşan gerilim eğrisi Şekil 13’te verilmiştir. Osiloskop ile yapılan bu ölçüm sırasında 10X oranında zayıflatıcı prob kullanılmıştır.



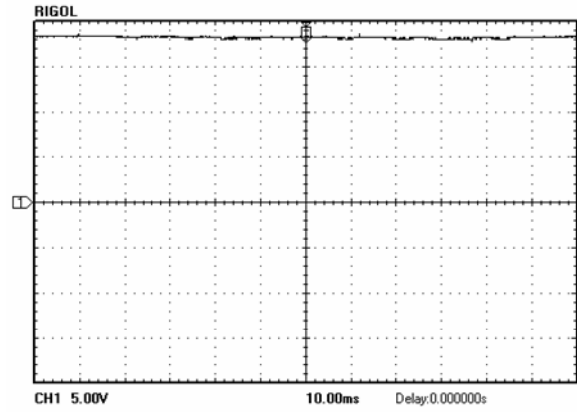
Şekil 13. MOSFET anahtarlama oranı maksimum seviyede iken Drain-Source uçlarındaki gerilim eğrisi (Waveform of the voltage on the Drain-Source points when the MOSFET switching rate is at the maximum level)

Dönüştürücünün çalışması sırasında sistemden çekilen akım arttıkça MOSFET sürücüyü mikro denetleyici tarafından gönderilen anahtarlama sinyali bozulmaktadır. Bu durum dönüştürücünün kararsız çalışmasına neden olmuştur. Kararsız çalışmayı engellemek amacıyla mikro denetleyici ile sürücü devre arasına bir söndürme devresi kullanılmıştır.

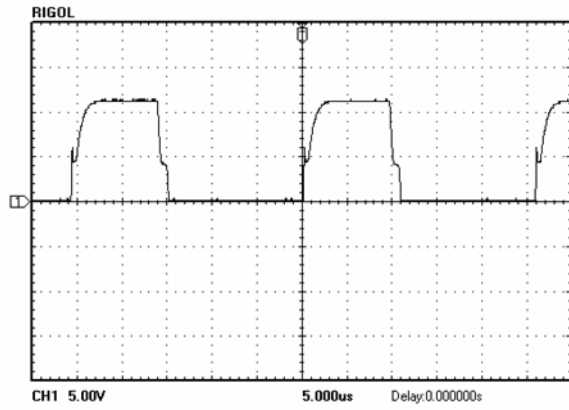
Dönüştürücünün çalışması sırasında minimum ve maksimum yük altında MOSFET’in gate ucuna uygulanan sinyalin eğrileri Şekiller 14 ve 15’te verilmiştir.



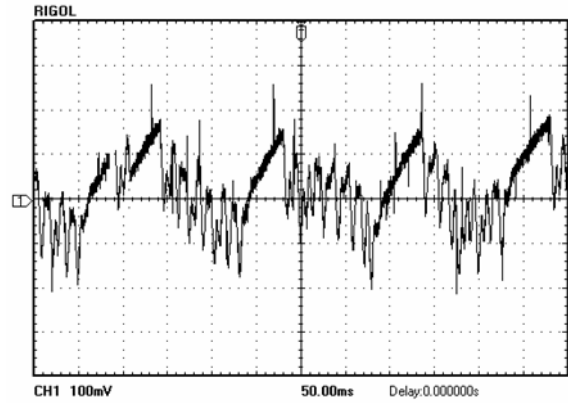
Şekil 14. Minimum yük için MOSFET'in gate ucuna uygulanan sinyal eğrisi (Waveform of the signal applied to the gate point of the MOSFET for minimum load)



Şekil 15. Dönüştürücü çıkış gerilim eğrisi (Waveform of the converter output voltage)



Şekil 15. Maksimum yük için MOSFET'in gate ucuna uygulanan sinyal eğrisi (Waveform of the signal applied to the gate point of the MOSFET for maximum load)



Şekil 16. Dönüştürücü AA dalgalanma gerilim eğrisi (Waveform of the converter AC ripple)

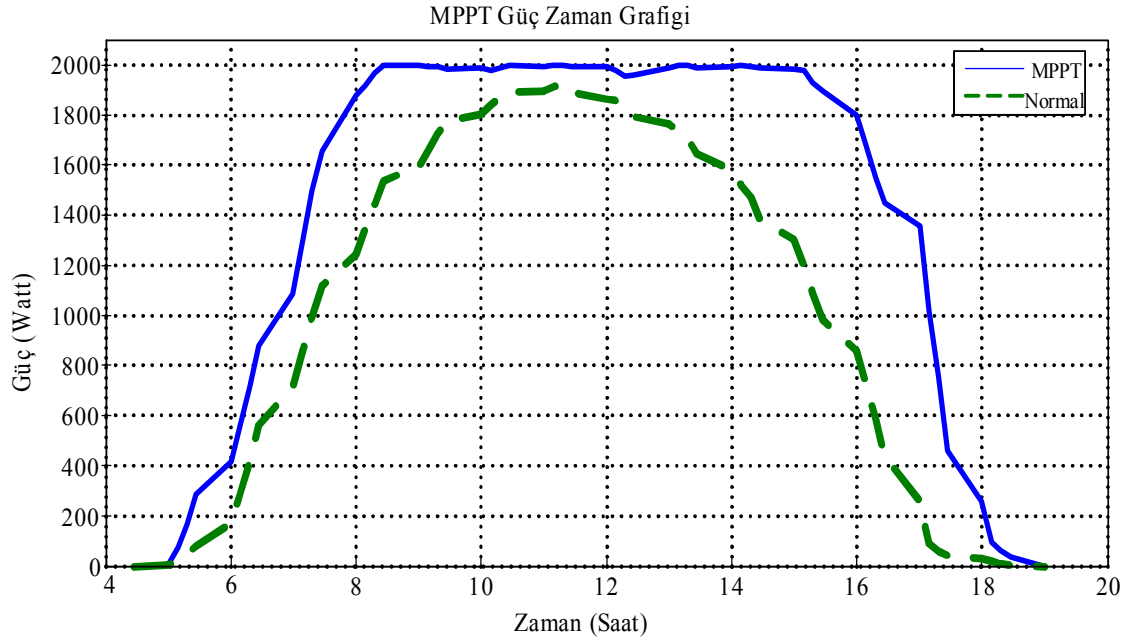
Dönüştürücü girişine deneyler sırasında 110 V DA gerilim uygulanmış ve dönüştürücü çıkışından 180 V gerilim elde edilmiştir. Dönüştürücü çıkışında 2500 W'lık yük varken ve gerilim değeri 180 V iken, gerilimin üzerinde oluşan AA etkin dalgalanma değeri 0,05 V seviyesinde olup, bu değer çıkış geriliminin %0,4'ü kadardır. IEC 61204 güç kaynaklarının çıkış gerilim standardına göre bu değer %1'in altında olmalıdır [17]. Gerçekleştirilen uygulamadaki elde edilen dalgalanma değeri ile standartta belirtilen değer karşılaştırıldığında, dönüştürücü uygulamaları için oldukça kaliteli bir çıkış değeri elde edildiği sonucunu vermektedir. Dönüştürücünün çıkış gerilimindeki dalgalanmayı azaltmak için Eşitlik 8'de verilen denklem yardımıyla bir kapasite hesaplanarak dönüştürücünün çıkışına yerleştirilmiştir. Çıkış gerilimindeki dalgalanma iki tepe değer arasındaki mesafedir. Burada çıkış akımının sabit olduğu varsayılarak, Volt cinsinden gerilim dalgalanması hesaplanacak olursa;

$$\Delta V_o = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I_o DT_s}{C} \quad (8)$$

Verilen denklem doğrultusunda C_3 kondansatörünün değeri 140 μF olarak hesaplanmıştır. Yükselten dönüştürücü üzerine 156 μF 'lık kondansatör yerleştirilmiştir. Dönüştürücü çıkış geriliminin ve oluşan dalgalanma değerinin eğrileri Şekiller 15 ve 16'da verilmiştir. Şekil 15'te yapılan ölçüm sırasında 10X oranında zayıflatıcı prob kullanılmıştır.

Güneş enerjisi sistemleri için tasarlanan yükseltici dönüştürücünün güneşli bir gün içerisinde MPPT işlemi yaparak ve normal çalıştırılması arasındaki farkı göstermek amacıyla bir deney yapılmıştır. Bu deneyde 15'er dakikalık aralıklarla normal çalışma ve MPPT ile çalışmaya ait gerilim ve akım değerleri alınarak güç değerleri hesaplanmıştır. 13.07.2007 tarihinde alınan değerlere ait eğri Şekil 17'de verilmiştir.

Şekil 17'de verilen eğrilerden de görüldüğü gibi, sabahın ilk saatlerinden güneş batıncaya kadar olan aralıkta panellerin güneşlenme değerlerine bağlı olarak güç değerleri artmaktadır. MPPT işlemi yapılırken dönüştürücünün çıkış güç değerleri panel akımlarının izin verdiği ölçüde artmakta ve sürekli olarak en yüksek seviyede tutulmaktadır. Elde edilen değerler yardımıyla yapılan hesaplamada, MPPT'li çalışan sistemin normal çalışmadan %36 daha verimli olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 17. MPPT ve normal çalışma durumunda güç zaman eğrileri (Waveforms of power versus time for MPPT and normal operation condition)

6. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRME (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Güneş ışığından elde edilen enerjiyi, elektrik enerjisine çevirmek amacıyla güneş panelleri kullanılarak yapılan uygulamada, sistemin daha verimli olarak çalıştırılması amacıyla mikro denetleyici kontrollü 2600 W gücünde bir DA/DA yükselten dönüştürücü tasarımı ve uygulaması yapılmıştır. Uygulama sonucunda dönüştürücü çıkışındaki DA gerilim üzerinde ölçülen AA bileşenin etkin değeri 0,05 V seviyesinde olup, bu değer çıkış geriliminin % 0,4'ü oranında olduğu tespit edilmiştir. Bu değer dönüştürücü uygulamaları için kaliteli bir çıkış değeri elde edildiği sonucunu vermektedir. Ayrıca uygulaması yapılan dönüştürücüde kullanılan maksimum güç takibi uygulamasının sistemi % 36 daha verimli çalıştırdığı ayrıca yapılan deneyler sırasında yükseltici dönüştürücünün veriminin % 92 olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmada, MOSFET'in yüksek frekanslarda anahtarlama sırasında ısındığı gözlemlenmiştir. Isınma problemini çözmek amacıyla bir söndürme devresi tasarlanmış ve yüksek akımlardaki çalışmada ısınma sorunu çözülmüştür. Ayrıca, dönüştürücünün çalışması sırasında sistemden çekilen akım arttıkça MOSFET sürücüye mikro denetleyici tarafından gönderilen anahtarlama sinyali bozulmaktadır. Bu sorunu çözmek amacıyla da mikro denetleyici ile MOSFET sürücüsü arasına bir tampon devresi tasarlanarak, sinyalin bozulması engellenmiştir.

Bu makalede sunulan çalışma genel hatlarıyla değerlendirildiğinde, aşağıda belirtilen kazanımlar elde edilmiştir:

- Büyük güçlü sistemler için ekonomik, kayıpların en az düzeyde olduğu ve uygulanabilirliğin artırıldığı mikrodenetleyici tabanlı bir yükselten dönüştürücü tasarlanmıştır.
- Uygulanan maksimum güç takibi işlemi ile güneş enerjisinin daha verimli kullanılması sağlanmıştır.
- Çalışma sonucunda %92 verime sahip bir yükseltici dönüştürücü elde edilmiştir.
- Dönüştürücü çıkış geriliminin her türlü uygulama için uygun ve uluslararası standartları karşılar nitelikte olduğu tespit edilmiştir.
- Güneş enerjisinden elektrik elde etmeye yönelik uygulamaların artırılmasını destekleyici bir örnek çalışma gerçekleştirilmiştir.

SEMBOLLER (Nomenclatures)

ΔV	Çıkış gerilimindeki dalgalanma miktarı (V)
$B=A$	İdealleştirme faktörü =1,92
D	Anahtarlama oranı
E_D	DA kaynak gerilimi (V)
E_{GO}	Silikon için bant genişliği (eV)
F	Anahtarlama frekansı (Hz)
I ve V	Panel çıkış akımı (A) ve gerilimi (V)
I_L	Endüktans akımı (A)
I_{LG}	Işık tarafından üretilen akım (A)
I_O	Maksimum çalışma akımı (A)
I_{OR}	T_R referans sıcaklığında panel doyum akımı (A)
I_{ORT}	Ortalama yük akımının minimum değeri (A)
I_{OS}	Panel ters doyum akımı (A)
I_{SCR}	25°C ve 1000 W/m ² 'deki kısa devre akımı (A)
k	Boltzmann sabiti
K_I	I_{SCR} için kısa devre sıcaklık katsayısı (A ^o C) 0,0017
L	Dönüştürücü endüktansı (H)
q	Elektronik şarj yükü (C)
R_S	Seri direnç (Ω)

R_{SH}	Şönt direnç (Ω)
T	Panel sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_R	Referans sıcaklık = 301,18°K
T_S	Anahtarlama periyodu
V_{CEP}	Söndürme devresi kapasitörü maks. gerilimi (V)
V_o	Çıkış gerilimi
λ	W/m^2 'deki solar aydınlanma

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Evrendilek, F., Ertekin, C. "Assessing The Potential of Renewable Energy Sources in Turkey", **Renewable Energy**, Vol. 28, 2303-2315, 2003.
2. Ralph, E.L., Linder, E.B., "Advanced Solar Panel Designs", **Photovoltaic Specialists Conference, 1996, Conference Record of the Twenty Fifth IEEE**, Washington D.C, U.S.A., 297-300, 13-17 May 1996.
3. Muhidaa, R.B., Parkb, M., Dakkakb, M., Matsurab, K., Tsuyoshic, A., Michirac, M., "A Maximum Power Point Tracking For Photovoltaic-Spe System Using A Maximum Current Controller", **Solar Energy Materials & Solar Cells**, Vol. 75, 697-706, 2003.
4. Mukerjee, A.K., Dasgupta, N., "DC Power Supply Used as Photovoltaic Simulator for Testing MPPT Algorithms", **Renewable Energy**, Vol. 32, 587-592, 2007.
5. Salas, V., Olias, E., Lazaro, A., Barrado, A., "New Algorithm Using Only One Variable Measurement Applied to A Maximum Power Point Tracker", **Solar Energy Materials & Solar Cells**, Vol. 87, 675-684, 2005.
6. Duru, H. T., "A Maximum Power Tracking Algorithm Based on $I_{mpp} = F(P_{max})$ Function for Matching Passive and Active Loads to A Photovoltaic Generator", **Solar Energy**, Vol. 80, 812-822, 2006.
7. Hua, C.A., Lin, B. J., "An On-Line MPPT Algorithm For Rapidly Changing Illuminations of Solar Arrays", **Renewable Energy**, Vol. 28, 1129-1142, 2003.
8. Bayındır, R., Kaplan, O., "PIC Denetimli Reaktif Güç Rölesi Tasarımı", **Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi**, Cilt 22, Sayı 1, 47-56, 2007.
9. Veerachary, M., Senjyu, T., Uezato, K., "Voltage-Based Maximum Power Point Tracking Control of PV System", **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, Vol. 38, No.1, 262-270, 2002.
10. Mohan, N., Undeland, T. M., Robbins, W. P., "Power Electronics: Converters, Applications and Design", 2nd Edition, John Wiley & Sons Inc., England, 1995.
11. Yuvarajan, S.A., Yu, D.A., Xub, S., "A Novel Power Converter for Photovoltaic Applications", **Journal of Power Sources**, Vol. 135, 327-331, 2004.
12. Koutroulis, E., Kalaitzakis, K., Voulgaris, N.C., "Development of a Microcontroller-Based Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Control System", **IEEE Transactions on Power Electronics**, Vol. 16, No. 1, 46-54, 2001.
13. Markvat, T., Castaner, L., "Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications", Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 2006.
14. Munoz, F.J., Almonacid, G., Nofuentes, G., Almonacid, F., "A New Method Based On Charge Parameters to Analyse The Performance of Stand-Alone Photovoltaic Systems", **Solar Energy Materials & Solar Cells**, Vol. 90, 1750-1763, 2006.
15. Demirtaş, M., "Bilgisayar Kontrollü Güneş Takip Mekanizması Tasarımı ve Uygulaması", **Politeknik Dergisi**, Vol. 9, Sayı 4, 247-253, 2006.
16. FUJI ELECTRIC "e-Front Runners Catalog-Protection Circuit Desing", Chapter 5, 11-14, 2007.