



T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJESİ
SONUÇ RAPORU

FOTOVOLTAİK UYGULAMALARI İÇİN DÜŞÜK MALİYETLİ GERİLİM
KAYNAKLI ŞEBEKE BAĞLANTILI İNVERTER TASARIMI
(2014-01.BİL.03-04)

PROJE YÜRÜTÜCÜSÜ: Yrd. Doç. Dr. Gürhan Ertaşgın

ARAŞTIRMACILAR: Arş. Gör. Eralp Şener

BAŞLAMA TARİHİ: 01/08/2014

BİTİŞ TARİHİ: 01/08/2016



T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ SONUÇ RAPORU

**FOTOVOLTAİK UYGULAMALARI İÇİN DÜŞÜK MALİYETLİ GERİLİM
KAYNAKLI ŞEBEKE BAĞLANTILI İNVERTER TASARIMI**

Bu çalışmada Texas Instruments'ın 32-bit Delfino mikroişlemcisi kullanılarak bir fotovoltaiik (FV) inverter tasarımı ve gerçekleştirilmesi planlanmıştır. FV inverter, DSP ile güç anahtarının çalışma oranı değişimlerini AA şebeke gerilimi temel alınarak doğrudan kontrol edebilmektedir. Ayrıca bağımsız çalışma durumu için güç frekansındaki referans bir sinüzoidal dalga şeklinden üretilerek kontrol edilebilmektedir. Burada sinüzoidal darbe genişlik modülasyonundan (PWM) yararlanılmakta ve kapalı çevrim kontrol, mikroişlemci vasıtasıyla gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, şebeke bağlantılı FV sistemler için gerekli olan maksimum güç noktası izleyici algoritması ve anti-islanding koruma özelliği de fazladan donanım kullanılmadan mikroişlemci ile gerçekleştirilebilmektedir. Tasarımı ve benzetim çalışmaları yapılan inverterin denetim özelliklerinin başarımını görmek amacıyla 2 kW, 220-V / 60 Hz değerlerine sahip bir prototip inverter gerçekleştirilecek ve laboratuvar ortamında test edilecektir. Amaç, çıkışında toplam harmonik bozulmanın (THD) %3 veya altında ve daha verimli (%97 veya üzeri) bir inverteri düşük maliyetle geliştirmek olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaiik, inverter, şebeke bağlantılı, boost konverter.

Giriş

İnverter teknolojisi kolay kurulum ve devreye alma avantajları sayesinde güneş paneli dizilerine kolaylıkla bağlanabildiğinden FV enerji dönüşümü sistemlerinde her geçen gün daha fazla kullanım alanı bulmaktadır. Bu alanda yapılmış ve devam eden araştırmalar farklı DA-DA konverter ve inverter topolojilerinin bir arada kullanılması esasına dayanmaktadır [1]. Araştırmaların amacı daha kararlı çalışan, daha az karmaşık devre yapısına sahip ve daha iyi performans veren inverterleri üretmektir. Bu alandaki birçok inverter genellikle iki aşamalı güç devrelerinden oluşsa da tek aşamalı güç dönüşümü sistemleri de literatürde yer almaktadır. Genellikle inverterlerin çoğu yüksek verimli olarak (%95 ve üzeri) tasarlanmaktadır [2].

1. Önerilen İnverter Topolojisi

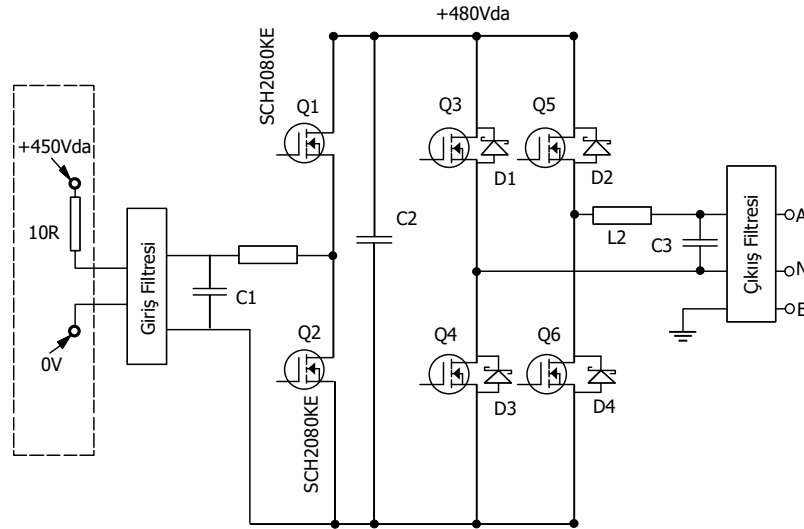
Proje başvurusu sırasında önerilen topoloji değişikliğe uğramış, ve flyback konverter yerine boost konverter kullanılmaya karar verilmiştir. Ayrıca başlangıçta 250W mikroinverter olarak düşünülen topoloji, 2 kW inverter olarak değiştirilmiştir.

1.1. Değişiklikler

Projenin ilk altı aylık periyodunda, ilk iki ay literatür taraması yapılmıştır. Akabinde tasarım aşamasına geçilmiş ve benzetimler gerçekleştirilmiştir. İnverter sistemi modüler olarak tasarlandığından sensör ve sıfır geçiş belirleme devreleri (ZCD) tamamlanmıştır. Sonrasında projede değişikliğe gidilmiştir. Topoloji daha basitleştirilip DA-DA boost ve H-köprü olarak değiştirilmiş ve yarıiletkenler SiC seçilip verimin artırılması tasarlanmıştır.

Topolojide yapılan değişiklik TMS320F28377D [3] mikroişlemci kullanarak daha etkili bir kontrol ve daha verimli bir inverter tasarımı için uygun görülmüştür.

Şekil 1 prototipin devre topolojisini göstermektedir. Thevenin eşdeğeri seri 10 Ω direnç ile verilen 450 V DA kaynağı önce yükselten (boost) konverter vasıtasıyla 525 V'a yükseltilmektedir. Bu hat gerilimi, yalıtımsız tam-köprü inverter ile alternatif gerilime çevrilip şebekeye bağlanmaktadır.



Şekil 1. Tek fazlı şebeke bağlantılı gerilim kaynaklı inverter topolojisi.

2. Tasarım

2.1. DA Hat Kondansatörü

Yeni kompakt tasarım, elektrolitik kondansatörü elimine etmekte ve yerine polipropilen film kapasite kullanmaktadır. Polipropilen teknik olarak, daha yüksek akım değerlerine dayanıklı ve eşdeğer seri direnci (ESR) daha düşüktür. Fakat kapasite değeri fiziksel olarak aynı boyuttaki bir elektrolitik kondansatörden daha düşüktür. Bu da DA hattında genliği daha büyük gerilim dalgalanması anlamına gelmektedir ve dikkatli bir şekilde yeni kontrol algoritması ile azaltılması gerekmektedir [4].

Tablo 1 elektrolitik ve polipropilen kondansatörleri karşılaştırmıştır. Tablodan da anlaşılacağı gibi fiziksel büyüklük dezavantajı dışında polipropilen kondansatör düşük ESR ve akıma dayanıklılık bakımından büyük avantaja sahiptir.

Tablo 1. Elektrolitik ve polipropilen kondansatörlerin karşılaştırılması

Teknoloji	Gerilim Değeri	Kapasite	ESR	I_{RMS}
Elektrolitik	450	110 μ F	1456 m Ω	2 A
Polipropilen	500	100 μ F	2 m Ω	22 A

2.2. DA – DA Konverter

DA – DA boost konverter için bir arada paketlenmiş SiC güç MOSFET'i ve SiC Shottky diyotlardan oluşan SCH2080KE 2. nesil yarıiletken anahtarlar kullanılmıştır. Anahtarlama frekansı 80 kHz'dir. DA – DA konverter için uygulanan kontrol özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

- DA hat geriliminin ortalama değerinin düzenlenmesi, üzerinde büyük genlikli salınımlar bulunan bu değer için çok iyi tahmin edilmesini gerektirmektedir. Bu yüzden durum gözlemci (state observer) kullanılmıştır [5].
- Büyük genlikli hat geriliminin, giriş akımının modülasyonunda herhangi bir probleme sebep olmaması sağlanmıştır.



T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ SONUÇ RAPORU

- Önerilen maksimum güç noktası takip (MPPT) algoritması kaliteli ve yüksek verimlidir [6]. Ayrıca bu algoritma basit PV dizilerde¹ (array), orta büyüklükteki DA – DA konverterlerle kullanılan dizilerde ve akü dâhil edilmiş PV sistemlere uyumludur.

Üzerinde büyük genlikli salınımlar olması nedeniyle DA hat geriliminin regülasyonu kolay değildir [7]. Güç sisteminin frekansı 50 veya 60 Hz olabilir ve üzerinde frekans kayması mevcuttur. Frekanstaki bu belirsizlik çentik (notch) filtresinin kullanılmasını da engellemektedir. DA hat gerilimini belirlemek için durum kestirimcisi yöntemi temel alınarak yeni bir regülasyon yöntemi uygulanmıştır.

Maksimum güç noktası takibi için algoritma, artan iletkenlik (Incremental Conductance) metodundan yola çıkılarak gerçekleştirilmiştir.

2.3. İnverter Kontrolü

Sistemin inverter kısmı CREE C2M0025120D SiC yarıiletken anahtarları kullanılmaktadır. Kontrol algoritmaları aşağıdakileri içermektedir:

- Öngörülü (predictive) akım kontrolü tabanlı iç akım çevrimi;
- Sezi'de [8] olduğu gibi faz belirleme metodu tabanlı faz kilitlemeli döngü (PLL);
- Görünür ve reaktif gücün, güç sistemine akışının tam kontrolü için görünür ve reaktif gücün ayrıştırılmış (decoupled) kontrolü;
- Şebeke bağlantılı inverterler için anti-islanding uygulaması;
- Şebekeden bağlantısı kesilmiş (islanded) inverterin şebekeye tekrar senkronizasyonu için bumbles ve otomatik transfer algoritması.

¹ Dizi (Array): İstenilen akım gerilim değerlerine göre PV modüllerin seri ve/veya paralel bağlanması durumu.



T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ SONUÇ RAPORU

Yakala ve kilitle aşamalarını optimize ederek bu sayede şebeke frekansındaki değişiklikleri çabuk takip edip kompanze edebilen bir PLL sistem geliştirilmiştir. Bu sistem 50 veya 60 Hz'lik frekanslara otomatik olarak adapte olacaktır.

3. Benzetim Sonuçları

Bu bölüm, donanım tasarımı aşamasında 60 Hz frekansta islanded 2 kW rezistif yük kullanılarak kararlı durum çalışması için üretilen bazı benzetim sonuçlarını göstermektedir.

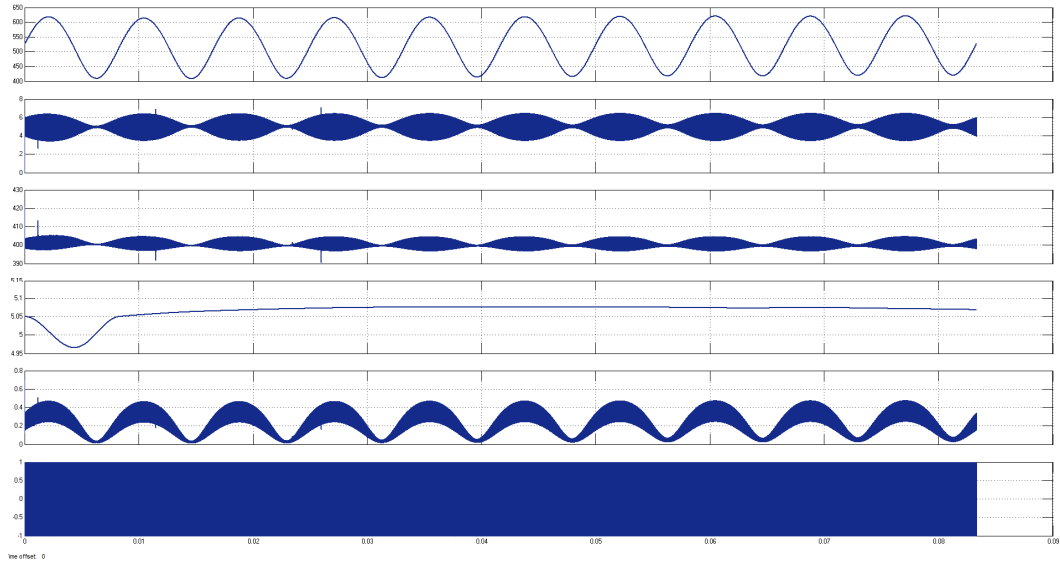
Şekil 2 PV dizi için maksimum güç noktası takibi yapan DA – DA konverterün aşağıdaki genel parametreler doğrultusunda bazı sonuçlarını göstermektedir.

- Hat kondansatör değeri 50 μF ;
- DA hat ayar noktası gerilimi ortalama 525 V;
- Yükselten konverter giriş indüktansı 600 μH ; giriş kapasitesi 0,56 μF ; $f_{sw} = 80$ kHz;
- Inverter yükü 60 Hz'de 2 kW;
- DA giriş PV dizi model kaynağı 10 Ω seri direnç ile 450 V_{DA} . (2 kW'taki giriş şartları 400 V_{DA} ve 5 A_{DA})

Benzetim dalga şekilleri aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

- Birinci dalga şekli DA hat gerilimidir ve inverterin 60 Hz'lik çıkış frekansının sebep olduğu 120 Hz'lik güç dalgalanması DA hat geriliminin 400 ile 600 V_{DA} arasında dalgalanmasına yol açmaktadır.
- İkinci dalga şekli yükselten konverterin indüktör akımıdır. DA akım değeri 80 kHz anahtarlama sebebiyle üzerinde küçük dalgalanmaları da barındırmaktadır. DA akım değeri, ortalama cevap veren gerilim regülatörü tarafından durum gözlemci kullanılarak kontrol edilmekte bu sayede DA hat gerilimi tahmin edilmektedir.

- Üçüncü dalga şekli, yükselten konverter için kullanılan $0,56 \mu\text{F}$ 'lık filtre kondansatörünün gerilimidir. PV dizi üzerinde maksimum güç noktasını olumsuz etkileyen 120 Hz dalgalanmaların gerilim üzerinde olmaması önemlidir. Bu etkinin elimine edilmesi tasarımın birincil amacıdır.
- Dördüncü dalga şekli dizinin giriş akımıdır ve neredeyse saf DA'dır.
- Beşinci dalga ise konverterün çalışma oranını (duty cycle) göstermektedir.
- Son dalga şekli yükselten konverterün kapı sinyallerini ifade etmektedir.



Şekil 2. DA – DA konverter benzetim sonuçları. Sırasıyla; DA hat gerilimi, indüktör akımı, filtre kondansatör gerilimi, PV dizi giriş akımı, çalışma oranı ve anahtarlama sinyalleri.

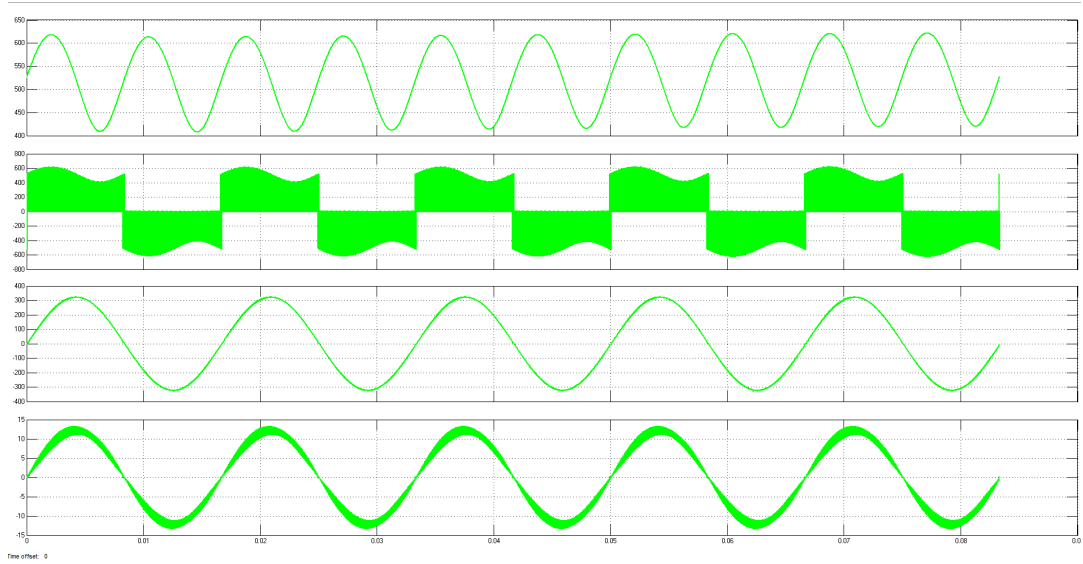
Şekil 3 aşağıdaki parametreler kullanılarak akımı kontrol etmek suretiyle inverterden elde edilen dalga şekillerini göstermektedir.

- 2. filtre $360 \mu\text{H}$ indüktör + $0,56 \mu\text{F}$ kondansatör; $f_{sw} = 80 \text{ kHz}$;
- FET'lere yüksek frekansta anahtarlama frekansı uygulanacak, alttaki FET'ler 60 Hz ile anahtarlama yapacaklar;
- 12,29 A tepe değeri, $26,45 \Omega$ yük ve $227,8 \text{ V}_{\text{RMS}}$ (1962 W) çıkış gerilimi.

Inverter benzetim dalga şekilleri aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

- İlk dalga şekli DA hat gerilimini göstermektedir ve DA konverter tarafından sağlanmaktadır.

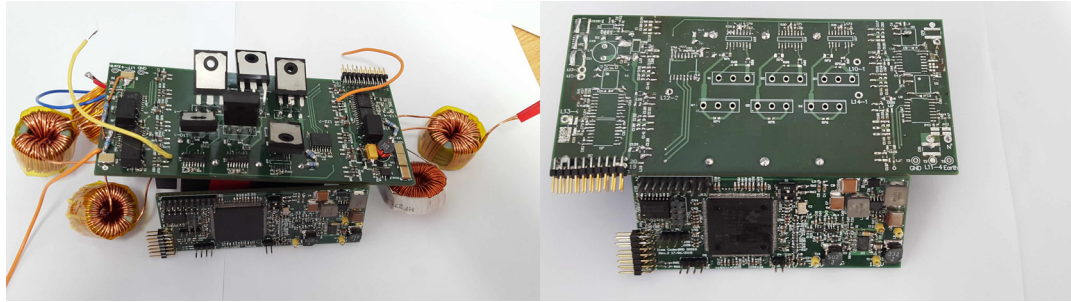
- İkinci dalga şekli inverterin çıkış filtresinden önce PWM dalga şeklini göstermektedir. Dikkat edilirse, DA hattındaki gerilim dalgalanmaları sebebiyle dalgalanmalar olmaktadır.
- Bir sonraki dalga şekli yüke uygulanan gerilimi göstermektedir. Dalga, istenilen kaliteli sinüs görünümündedir çünkü uygulanan öngörülü akım kontrol algoritması sayesinde DA hattındaki dalgalanma etkisi ortadan kaldırılmıştır.
- Son dalga şekli indüktör akımını göstermektedir. Dalga şekli 60 Hz'lik yük akımının ve 80 kHz'lik anahtarlama dalgalanmalarının çakışmasından meydana gelmektedir.



Şekil 3. İnverter sistemi dalga şekli benzetimleri. Sırasıyla; DA hat gerilimi, filtreden önceki PWM çıkış gerilimi, inverter çıkış gerilimi ve indüktör akımı.

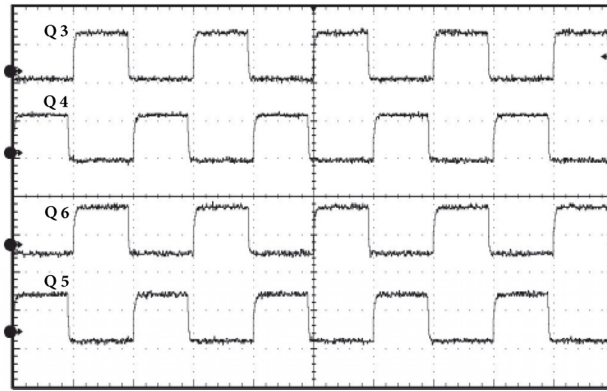
4. Devrenin Gerçekleşmesi

Şekil 4. Altium Designer kullanılarak tasarlanmış inverter devresini göstermektedir. Filtre indüktörler dışında baskı ve elektronik elemanların dizgi işlemleri üniversite dışında gerçekleşmiştir.



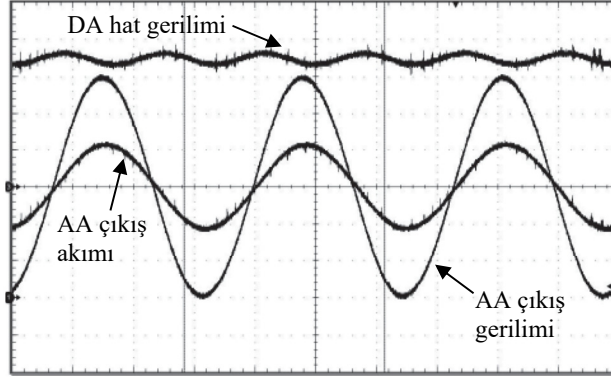
Şekil 4. İnverterin alt ve üstten PCB görünümü.

H-köprü inverterin yarıiletken tetikleme sinyalleri Şekil 5’te görülmektedir. Kontrol TMS320F28377D kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



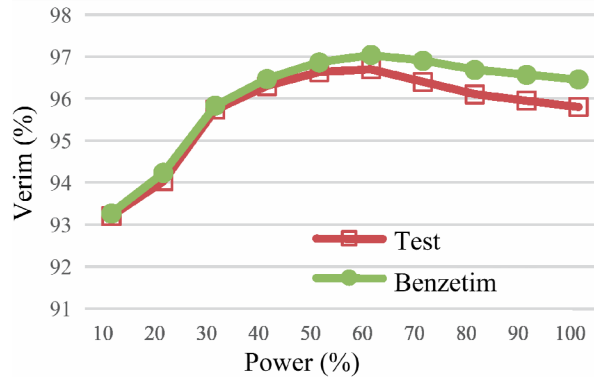
Şekil 5. SiC MOSFET anahtarlama sinyalleri (80 kHz anahtarlama frekansı için).
Zaman ölçeği 6,25 µs/div.

Şekil 6’da yük olarak saf direnç kullanılmış ve DA hat gerilimi ile inverterin çıkış akım ve gerilimlerinin dalga şekilleri verilmiştir. DA hat geriliminden görüldüğü üzere 100 Hz salınımları şu anda kullanımda olan inverterlere oranla %4 daha fazladır. Bu durum, sistemde büyük kayıplara yol açacak seviyelerde değildir. Kontrolün geliştirilmesi ve kondansatörlerin daha etkili seçimi ile bu oran çok daha aşağı çekilecektir. Amaçlanan seviye %3 veya daha az olarak belirlenmiştir.



Şekil 6. DA-hat gerilimi, AA çıkış gerilimi (110 V/div) ve AA çıkış akımı (10 A/div). Zaman ölçeği: 5 ms/div.

Şekil 7, şebeke bağlı olarak tasarlanan inverterin şebeke bağlantısı öncesi saf direnç ile yapılmış testler sonucu elde edilen verim grafiğidir. Verim, istenen değerin biraz altındadır fakat benzetim ile sonuçlar oldukça paraleldir. Benzetimde anahtarlama kayıpları eklenmiş fakat pasif elemanların direnç kayıpları ve bazı kayıplar hesaba katılmadığından daha iyi sonuç alınmıştır. Benzetimde %60 güç seviyesinden sonra verimde daha fazla farklılaşma gözlenmiştir. Bunun sebebi, DA hat salınımlarını gidermek için kullandığımız film kapasitelerin az da olsa yetersiz olmalarından kaynaklanmaktadır. Bu arada verim şu anda piyasada kullanılan inverterler ile aynı seviyededir. Yapılacak olan iyileştirmeler ve kontrol algoritmasındaki değişikliklerle en az %1 artış tahmin edilmektedir.



Şekil 7. Şebeke bağlantılı inverterin veriminin güç ile değişim grafiği.



T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ SONUÇ RAPORU

5. Sonuçlar

Projede sona gelinmiştir. Sadece prototipin tamamlanmasının uzun sürmesi ve bazı aksaklıklar nedeniyle şebeke bağlantılı testler yapılamamıştır. Sistem şebeke bağlantısına hazır tasarlanmış olup en kısa zamanda bu testler gerçekleştirilecektir.

İnverter kontrolünde anlatılan kontrol esasları, PLL ve MPPT başlangıç olarak gayet iyi çalışmaktadırlar. Deney sonuçları benzetimlerle karşılaştırılmış ve amaçlanandan %1 oranında düşük verim gözlenmiştir. THD sonuçları şebeke bağlantısı denenmediği için tam olarak netleşmemiş fakat yük ile alınan sonuçlarda %2,1 gibi iyi bir THD değeri elde edilmiştir.

Kullanılan geniş bandaralıklı SiC yarıiletkenlerin topolojiye katkıları şimdiden gözlenmektedir. İnverter için kullanılan heatsink muadillerine göre oldukça küçük boyutlardadır ve kontrol algoritması henüz tamamlanmadığı halde rahatlıkla %96 verim gözlenmiştir. Gelecekte aynı topolojide silikon MOSFET kullanılıp sonuçlar SiC MOSFET ile karşılaştırılacaktır.

Projenin süresi elvermediği için kısa süreli testler yapılmıştır. İlerleyen zamanlarda gerekli testler yapıp değerlendirmeler doğrultusunda bildiri ve makale yazımı tasarlanmaktadır.

Referanslar

- [1] H. Haeberlin, "Evolution of inverters for grid connected PV-systems from 1989 to 2000," *Proc. of 17th Eur. Photovoltaic Solar Energy Conference*, Munich, Germany, pp. 426-430, Oct. 22-26, 2001.
- [2] Haibing Hu; Harb, S.; Kutkut, N.H.; Shen, Z.J.; Batarseh, I., "A Single-Stage Microinverter Without Using Electrolytic Capacitors," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol.28, pp.2677,2687, June 2013.
- [3] <http://www.ti.com/product/TMS320F28377D/datasheet>
- [4] P.J. Wolfs, F. Yang, Q.-L. Han "Distribution level SiC FACTS devices with reduced DC bus capacitance for improved load capability and solar integration," *Proc. of IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp1-7, Istanbul, 1-4 June 2014.
- [5] M. Pahlevani, P. Jain, "A fast DC-bus voltage controller for bidirectional single phase AC/DC converters," *IEEE Trans. Power Electronics*, vol. 30, Aug. 2015, pp 4536-4547.



T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ SONUÇ RAPORU

- [6] P.J. Wolfs, Q. Li, “Hardware implementation and performance analysis of a current sensor free MPPT for high performance vehicle solar arrays,” *Proc. of IEEE Power Electronics Specialist Conference (PESC)*, Florida USA, pp. 132-138, 17-21 June 2007.
- [7] G. Ertaşgın, D.M. Whaley, N. Ertugrul, and W.L. Soong, “Analysis and design of energy storage for current-source 1-ph grid-connected PV inverters,” *Proc. of IEEE APEC Conf. and Expo.*, Austin, USA, pp. 1229-1234, Feb. 24-28, 2008.
- [8] T. Sezi, “Fast and accurate measurement of power system frequency,” *Proc. IEEE PES General Meeting*, Minneapolis 24-29 July 2010, pp. 1-7.