

Farklı Atmosferik Koşullarda Maksimum Güç Noktasında ve Sabit Gerilimde Çalışan Bir Fotovoltaik Sistemin Tasarımı ve Kontrolü

Design and Control of a Photovoltaic System Operating at Maximum Power Point and Constant Output Voltage under Different Atmospheric Conditions

Onur Deveci, Coşku Kasnakoğlu

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara
onurdeveci@gmail.com, kasnakoglu@gmail.com

Özetçe

Bu makalede, fotovoltaik (PV) panel, DC/DC dönüştürücüler, Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT), lityum-iyon akü ve PID kontrolcüler içeren ve çıkışta sabit bir DC gerilim elde etmek amacı güden bir fotovoltaik sistemin tasarımı ve simülasyonu üzerinde durulmaktadır. İlk olarak genel sistem modellenmiş ve bu tür sistemlerin simülasyonu için geliştirilmiş MATLAB/Simulink-SimPowerSystems aracı ile benzetimleri gerçekleştirilmiştir. MATLAB programında yaygın olarak kullanılan standart doğrusallaştırma yöntemleri, bu şekilde doğrusal olmayan bir sisteme yönelik kontrolcü tasarımında yeterli değildir. Çünkü sistemde DC/DC dönüştürücülerin anahtarlama için PWM sinyalleri kullanılmakta ve bu da MATLAB tarafından doğrusallaştırılmayan bir yapı oluşturmaktadır. Bu nedenle sistem giriş/çıkışlarının simüle edilmesine dayalı alternatif bir yöntem kullanılmıştır. Tasarlanan PV sistemi, değişken sıcaklık ve ışınım düzeyleri ile simüle edilmiş, sistem performansı ve verimliliği değerlendirilmiş ve tasarlanan kontrolcülerin farklı atmosferik koşullarda maksimum güç noktasında PV panelini çalıştırma, sabit bir çıkış DC gerilimi sağlama ve panelin ürettiği ve yükten arta kalan güçle aküyü şarj etme konusunda yeterli olduğu görülmüştür.

Abstract

This paper focuses on the design, modelling and MATLAB simulation of photovoltaic (PV) panel, DC/DC converters, Maximum Power Point Tracker (MPPT), lithium-ion battery, PID controllers and other control algorithms for constant DC voltage output PV system. Overall system is modelled and simulated with MATLAB/Simulink-SimPowerSystems toolbox which is specifically developed to simulate electrical power systems. Commonly used conventional linearization methods are not available for PID controller design for such a system having cascaded pulse width modulation (PWM) switching DC/DC converters causing high nonlinearity, forcing the use of a new alternative technique based on simulated input/output data. PV system is simulated under different atmospheric conditions with variable temperature

and irradiation levels, system performance and efficiency is evaluated and it is observed that the designed controllers are capable to operate PV panel at its maximum power point under different atmospheric conditions and provide constant DC voltage to the load while charging the battery with excess power.

1.Giriş

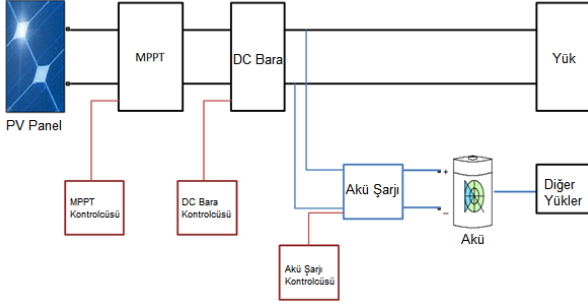
Geleneksel enerji kaynaklarının, artan nüfus ve sanayileşme ihtiyacını tatmin edemeyerek yakın bir gelecekte tükenmesi kaçınılmazdır. Her geçen gün enerji üretim ve tüketimi arasındaki uçurum büyümektedir [1]. Geleneksel enerji kaynaklarının üretimi ve tüketiminden kaynaklanan ilave çevre sorunları, dünya çapında yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmıştır. Fotovoltaik konusundaki araştırma ve geliştirme faaliyetlerinin artması ile PV sistemleri için talep son 20 yıl içinde her yıl ortalama %20-25 oranında yükselmiştir [2, 3].

PV panellerde elde edilen gerilim ve akım değerleri, yük profili ve atmosferik şartlara göre değişir [4, 5]. Sonuç olarak, PV panelinden elde edilebilecek maksimum güç değeri atmosferik koşullara bağlı olarak değişir. MPPT kullanımı sayesinde daha yüksek enerji dönüşüm verimi, daha az ve daha düşük maliyetli PV sistemleri ile sağlanabilir [6]. Maksimum güç noktası takibi ile verimliliği arttırmak ve çıkış gerilimi regülasyonunu sağlamak için DC/DC dönüştürücüler, eviriciler ve aküler kullanılabilir [7].

Bu çalışmada PV panelden maksimum güç elde etmek için bir MPPT kontrolcüsü, alçaltan ve yükselten tipte DC/DC dönüştürücüler ile çıkış gerilimi regülasyonu, sisteme bağlı diğer yükleri de besleyebilmek için bir akü şarj devresi ve PWM anahtarlama için doluluk boşluk oranını belirleyen PID kontrolcüler içeren bir sistem tasarlanmış ve modellenmiştir. Tüm sistem MATLAB/Simulink-SimPowerSystems aracı ile simüle edilmiş, çıkış gerilimi regülasyonu ve akü şarjı ile ilgili sonuçlar tartışılmış ve gelecekte planlanan çalışmalar belirtilmiştir.

2.PV Sistemin Yapısı

Tasarlanan PV sistemin ana bileşenleri Şekil 1'de gösterilmiş olup, bu bölümde detaylandırılacaktır.



Şekil 1: PV sistemin ana bileşenleri.

2.1. PV Panel

PV paneli tasarlamak ve modellemek için kullanılan tasarım parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: PV sistemi için tasarım parametreleri

Parametre	Nümerik Değer	Birim
Rezistif Yük	5 ± %2%	Ω
Gerekli Çıkış Voltajı	12 ± %5	V
Işınım Aralığı	600-1000	W/m ²
Sıcaklık Aralığı	20-30	°C

%20 tolerans ile rezistif yük için gereken minimum ve maksimum güç $P_{yük,max}=39,7W$ ve $P_{yük,min}=21,7W$ şeklindedir.

PV paneli belirlemek için, DC/DC dönüştürücü kayıtları, ters akım koruma diyotu kayıpları ve MOSFET anahtarlar kayıpları dikkate alınmalıdır. PV panelin en olumsuz ışınım ve sıcaklık koşullarında dahi yükün maksimum güç gereksinimini sağlayabilmesi önemlidir. Bu çalışmada SunTech firmasının STP080S 80W PV paneline ait parametreler kullanılmıştır [8].

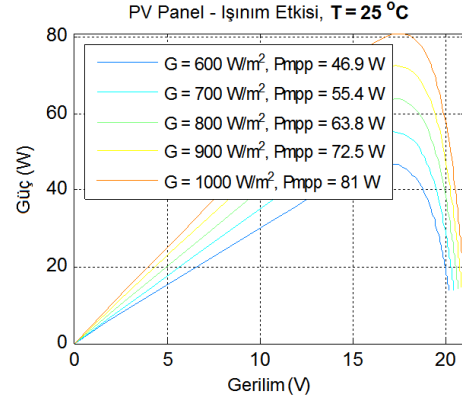
Sıcaklık ve ışınım etkilerini de dikkate alarak PV panelin çıkış akımı (1) denklemi ile hesaplanabilir [9].

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_s \left(e^{\frac{q(V+I_{pv}R_s)}{aKT}} - 1 \right) - \frac{1}{R_{sh}} \left(\frac{V}{N_s} + \frac{I_{pv}R_s}{N_p} \right) \quad (1)$$

R_s hücre modelindeki seri direnç, R_{sh} paralel direnç, I_{ph} ışınım tarafından üretilen akım, I_s diyotun ters satürasyon akımı, q elektron yükü, a diyot idealite faktörü, T Kelvin cinsinden sıcaklık, N_s seri bağlı solar hücre sayısı ve N_p de paralel bağlı solar panel sayısıdır.

Şekil 2'de, seçilen STP080S PV paneli için güç-gerilim grafiği görülmektedir. Yukarıda belirtildiği gibi PV panel, dış

ortamda ışınım ve sıcaklık değerleri düşük olsa dahi yük gereksinimlerini her zaman karşılamalıdır. Tablo-1'de görüldüğü üzere, en düşük ışınım değeri 600 W/m² ve en düşük sıcaklık değeri 20°C şeklindedir. Şekil 2'den, bu koşullarda üretilen maksimum gücün 46,5W olduğu görülmektedir ki bu da yükün maksimum gereksinimi olan 39,7W değerinden %17 daha yüksektir. O halde STP080S PV paneli tüm atmosferik koşullarda yük gereksinimini sağlamak üzere kullanılabilir.



Şekil 2: STP080S için Güç-Gerilim grafikleri.

2.2. Dönüştürücüler

Bu bölümde alçaltan ve yükselten dönüştürücülerden bahsedilecektir.

2.2.1. Alçaltan (Buck) Dönüştürücüler

PV panelden maksimum güç elde edebilmek için panel çıkışı 16-18VDC aralığında olmalıdır fakat yük için çıkışta 12VDC olması gerektiğinden panel gerilimini düşürmek için bir alçaltan dönüştürücü kullanılmalıdır. Akü şarjında ise, bu 12VDC bara gerilimini 6VDC akü gerilimine düşürmek için alçaltan dönüştürücü kullanılmaktadır. L_{min} ve C_{min} değerlerinin belirlenmesi için denklem (2) kullanılır. Seçilen indüktans ve kapasitans değerleri, gerilim/akım dalgalanmalarını ve kayıpları azaltmak ve daha iyi bir kontrol sağlamak için bu minimum değerlerin birkaç katı büyük olacak şekilde seçilmiştir.

$$L_{\min} = \frac{(1-D_{\min})V_{\text{out}}}{2f_s I_{\text{out}}}, \quad C_{\min} = \frac{(1-D_{\min})}{8L_{\min} \frac{\Delta V_0}{V_0} f_s^2} \quad (2)$$

D_{\min} değeri dönüştürücülere verilebilecek minimum anahtarlama sinyali genliği olup bu çalışmada %5 alınmıştır. R rezistif yük direnci (Ω) olup değeri 6Ω 'dır. Ayrıca f_s anahtarlama frekansı (Hz) olup değeri 100kHz 'tir. $\Delta V_0/V_0=0.01$ ise %1 gerilim dalgalanması anlamına gelmektedir.

2.2.2. Yükselten (Boost) Dönüştürücüler

MPPT alçaktan dönüştürücü PV paneli maksimum güç noktasında her zaman çalışmaya zorlar ancak dönüştürücü çıkışı da gerekli 12VDC 'nin altına düşer. Bu nedenle, hem yüke her zaman 12VDC sağlamak hem de aküyü sabit akım veya gerilimle şarj etmek için bir boost dönüştürücü içeren 12VDC 'lik baraya ihtiyaç vardır. Burada Buck-Boost, Cük veya Sepic dönüştürücü kullanılmamasının sebebi Buck ve Boost dönüştürücülere göre verimlerinin düşük olması, Buck-Boost dönüştürücünün çıkışında yüksek akım dalgalanmaları olması ve Cük dönüştürücünün tasarımının karmaşık ve pahalı olmasıdır [11]. Seçilen induktans ve kapasitans değerleri, dalgalanmaları ve kayıpları azaltmak ve daha iyi bir kontrol sağlamak için bu minimum değerlerin birkaç katı büyük olacak şekilde seçilmiştir.

$$L_{\min} = \frac{D_{\text{opt}}(1-D_{\text{opt}})^2 V_{\text{out}}}{2f_s I_{\text{out}}}, \quad C_{\min} = \frac{I_{\text{out}} D_{\text{max}}}{V_{\text{out}} \frac{\Delta V_0}{V_0} f_s} \quad (3)$$

D_{max} maksimum doluluk boşluk oranı %95, D_{opt} minimum induktans değerini veren optimum doluluk boşluk oranı %50, f_s Hz cinsinden örnekleme frekansı 100kHz ve $\Delta V_0/V_0$ da gerilim dalgalanmasıdır $0.01=\%1$.

2.3. Kontrolcüler

Bu bölümde MPPT, DC bara yükselten dönüştürücü ve akü şarj kontrolcülerini anlatılacaktır.

2.3.1. MPPT Kontrolcüsü

Çeşitli sıcaklık ve güneş ışınım değerleri altında PV paneli maksimum güç noktasında çalıştırmak amacıyla, maksimum güç izleme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, iki yaygın MPPT tekniği olan Perturb & Observe (P&O) ve Incremental Conductance (IC) incelenmiştir.

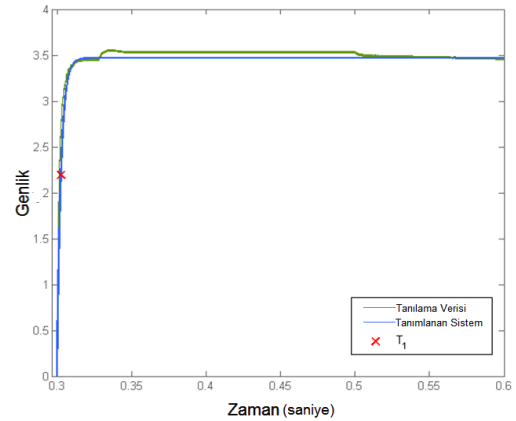
P&O algoritması, her kontrol periyodunda PV panel terminal geriliminde küçük değişiklikler yapıp çıkış gücündeki değişimi (ΔP) gözlemlemeye dayanmaktadır. $\Delta P > 0$ ise panel gerilimi artırılır; $\Delta P < 0$ ise panel gerilimi azaltılır ve panel çalışma noktası maksimum güç noktasına yaklaşır [12]. P&O kolay ve pratik bir yöntemdir ancak her periyotta panel

gerilimi değiştirildiğinden sistem istenilen çalışma noktası $\Delta P=0$ 'da sabitlenemez ve bu nokta etrafında salınır. Düşük güneş ışınım seviyelerinde P-V grafiği daha düz olduğundan P&O algoritması ile maksimum güç noktasının bulunması zorlaşır. P&O algoritmasının bu dezavantajları, hızla değişen hava koşullarında dahi maksimum güç noktasını bulmada daha iyi sonuçlar veren IC yönteminin tercih edilmesine sebep olmaktadır [13]. Bu yöntemde P-V grafiğinin eğimi (dP/dV) incelenir. dP/dV maksimum güç noktasının sol tarafında pozitif, sağ tarafında negatif ve maksimum güç noktasında da sıfırdır.

Bu çalışmada MPPT kontrolcüsü, PV panelden maksimum güç elde etmek için MATLAB/Simulink ortamında Stateflow-Chart bloğu içerisinde bir IC algoritması inşa edilerek gerçekleştirilmiştir.

2.3.2. DC Bara Yükselten Dönüştürücü Kontrolcüsü

PV sistemin çıkışında yük ve akü için 12VDC bara oluşturmaya yönelik daha önce belirtildiği gibi yükselten dönüştürücü kullanılır. Tüm PV sistemde iki seviyeli ve üç seviyeli birbirine bağlı dönüştürücüler ve PWM beslemeli MOSFET anahtarlar olduğundan, teorik olarak PID kontrolörleri tasarlamak oldukça zordur. Bu kontrolcülerini standart doğrusallaştırma yöntemleriyle Simulink ortamında tasarlamak için denemeler yapılmış ancak doğrusal olmayan etkilerin yüksek olmasından dolayı kontrolcü tasarlanamamıştır. Bu nedenle kontrolcü girişini kullanarak sistemi tipik bir çalışma noktasına getiren ve daha sonra bu nokta etrafında bir step değişikliği yaparak veri elde eden, daha sonra da bu verileri doğrusallaştırmada kullanan bir yöntem tercih edilmiştir. MATLAB/Simulink ortamında bu iş şu adımları kullanarak yapılabilir: Plant → Identify New Plant → Plant Identification → Get I/O Data → Simulate Data → Simulate I/O Data ve sonuçlar Şekil 3'te görülebilir. Simulink'te tanımlı kontrol yapılarını kullanarak önceden alınmış olan veriler ile sistem tanımlama grafiği oluşturulmuştur. Bu iki veri uyumlu olduğu zaman, P, I, D ve filtre katsayıları otomatik tasarım yöntemleri ile elde edilmekte, ardından manuel ince ayar yapılarak daha hızlı ve gürbüz bir cevap elde edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 3: Tanılama verisi ve tanımlanmış sistem.

2.3.3. Akü Şarj Kontrolcülere

PV panelden elde edilen ve yük tarafından kullanılmayan fazladan güçle aküyü şarj etmek için akü şarj kontrolcülere kullanılır.

Sistemde DC bara akım üst limiti olan sabit bir gerilim kaynağı gibi davrandığı için PV sistemde söz konusu akım ile beslenecek lityum-iyon akü kullanılmaktadır. Düşük bakım ihtiyacı, düşük kendiliğinden deşarj oranı ve yüksek enerji yoğunluğu da böyle bir güneş sistemi tasarımı için dikkate alınmış akü avantajlarıdır [14]. Tipik bir Li-iyon akü, belli bir noktaya kadar sabit akımda şarj edilir; belirli bir değerden sonra akım düşürülerek sabit gerilimde şarj edilir ve bu sayede akü hep tam şarjda tutulmaya çalışılır. Simülasyonlar için SimPowerSystems altındaki Battery bloğu kullanılmıştır; bu blokta bir akü tipi seçilir, temel bazı veriler girilir (örneğin, kapasite, nominal gerilim, ilk şarj değeri) ve blok otomatik olarak diğer gerekli verileri hesaplar.

Akü şarj devresi akünün sabit akımla mı, sabit gerilimle mi şarj edileceğine veya şarj işleminin kesilerek akünün devrenin geri kalanından izole mi edileceğine karar verir. Sabit gerilim ve sabit akım şarj PID kontrolörleri ayrı ayrı akü şarj kontrolörü içinde oluşturulmuştur. Bunlar benzer yapıya sahip olup, daha önceki bölümde anlatıldığı gibi, gerçek zamanlı benzetim ile tanılama verilerini elde ederek yukarıda anlatılan prosedür ile aynı şekilde tasarlanmıştır.

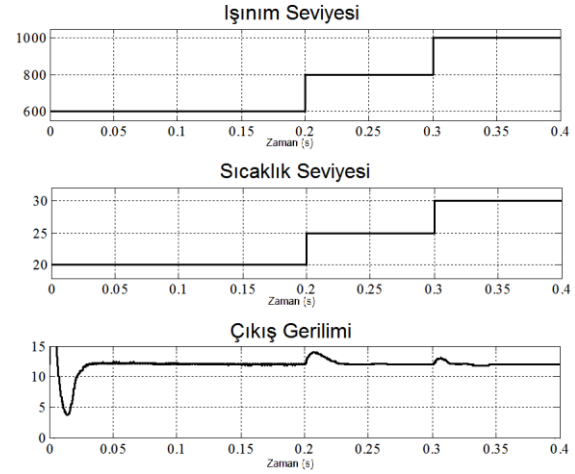
3. Sonuçlar, Tartışmalar ve Gelecekteki Çalışmalar

PV sistemin tüm alt sistemlerinin tasarım ve modellenmesi bitirildikten sonra, tüm sistemi içeren nihai model yine MATLAB/Simulink ile oluşturulmuştur. Güç diyotları, MOSFET'ler ve gerilim/akım dalgalanmalarını filtreleyen kapasitörler/indüktörler için SimPowerSystems blok setinden gerçek modellere ait değerler seçilmiş ve bu şekilde daha gerçekçi bir simülasyon elde edilmeye çalışılmıştır.

Değişken sıcaklık (20-30°C) ve ışınım değerleri (600-1000W/m²) PV panele uygulanmış ve elde edilen kontrol edilmiş çıkış gerilimi Şekil 4'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yükün üzerindeki çıkış gerilimi 600 W/m² ve 20°C için en fazla %1'lik bir sapma ile sabit tutulmaktadır ki bu değer Tablo-1'de belirtilen %5 toleransın oldukça altındadır. Simülasyon sırasında devre bileşenleri için gerçeğe yakın modeller kullanılmış olması nedeniyle t = 0 ve t = 0.03 saniye arasında beklenmedik gerilim değerleri oluştuğu da görülmektedir. Gerçek atmosferik koşullarda sıcaklık ve ışınım değerlerinde Şekil-4'teki gibi ani değişimler olmayacaktır, bu durum sadece simülasyon ortamında sistemi test etmek için yaratılmıştır. Bu nedenle bu ani değişim sonucunda t=0.2 ve t=0.3. saniyelerdeki gerilim

dalgalanmaları da gerçek hayatta çok daha az olacaktır. Ayrıca sistemin diğer bir hedefi olan PV paneli daima maksimum güç noktasında çalıştırma işlevi de gerçekleştirilmekte ve PV panel tarafından üretilen gücün %80'den fazlası yük ve akü tarafından kullanılarak panele gelen güneş enerjisinin maksimum kullanımı sağlanmaktadır.

Sonraki aşamalarda, kazanç ayarlama teknikleri kullanılarak daha geniş bir sıcaklık ve ışınım profili altında çalışılması, çıkış gerilimindeki dalgalanmaların azaltılması, akü tarafından depolanan enerjinin atırılması, farklı MPPT ve kontrol teknikleri kullanılarak sistem performansının karşılaştırılması düşünülmektedir. Ayrıca tasarlanan sistemin fiziksel olarak gerçekleştirilerek simülasyon sonuçları ile karşılaştırılması da planlanmaktadır. Son olarak seri bağlı PID kontrolörlerle akü şarjı için akım ve gerilim referansları üretilerek toplam kullanılabilen güneş enerjisi oranının %90'ın üzerine çekilmesi hedeflenmektedir.



Şekil 4: Sıcaklık/ışınım değişiklikleri ve sistem çıkış gerilimi.

Kaynakça

- [1] S. Kadioğlu ve Z.Tellioğlu: Enerji kaynaklarının kullanımı ve çevreye etkileri, TMMOB Turkish Energy Symposium, s:55-67, 1996.
- [2] L.Linares, R.W.Erickson, S.MacAlpine ve M. Brandemuehl: Improved energy capture in series string photovoltaics via smart distributed power electronics, Proceedings of 24th APEC Exp., s:904-910, 2009.
- [3] J. Selvaraj ve N. A. Rahim: Multilevel Inverter For Grid-Connected PV System Employing Digital PI Controller, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Cilt: 56, No:1, s:149-158, 2009.
- [4] K.H.Hussein, I. Muta, T. Hoshino ve M. Osakada: Maximum Photovoltaic Power Tracking: An Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions, *IEEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, Cilt:142, No:1, s:59-64, 1995.

- [5] X. Liu ve L.A.C. Lopes: An Improved Perturbation and Observation Maximum Power Point Tracking Algorithm for PV Arrays, in IEEE Proceedings of 35th Power Electronics Specialists Conference, Cilt: 3, s:2005-2010, 2004.
- [6] J.M. Enrique, E. Duran, M. Sidrach-de-Cardona ve J.M. Andujar: Theoretical assessment of the maximum power point tracking efficiency of photovoltaic facilities with different converter topologies, *Solar Energy*, Cilt: 81, s:31-38, 2007.
- [7] M. Demirtas, I. Sefa, E. Irmak and I. Colak: Güneş Enerjili Sistemler için Mikrodenetleyici Tabanlı DA/DA Yükselten Dönüştürücü, *Gazi Univ. Muh. Mim. Fak. Der.*, Cilt: 23, No: 3, s:719-728, 2008.
- [8] <http://www.arcmansolar.com> sitesi
- [9] I. Kim, M. Kim ve M. Youn: New Maximum Power Point Tracker Using Sliding-Mode Observer for Estimation of Solar Array Current in the Grid-Connected Photovoltaic System, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Cilt:53, No:4, s:1027-1035, 2006.
- [10] N. Mohan, T. Undeland ve W.P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications and Design*, John Wiley & Sons, 2003.
- [11] G. Walker ve P. Sernia: Cascaded DC-DC Converter Connection of Photovoltaic Modules, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Cilt:19, No:4, s:1130-1139, 2004.
- [12] A. Yafaoui, B. Wu, ve R. Cheung: Implementation of Maximum Power Point Tracking Algorithm for Residential Photovoltaic Systems, 2nd Canadian Solar Building Conference, 2007.
- [13] M. Brito, L. Sampaio, G. Luigi G.A. Melo ve C.A. Canesin: Comparative Analysis of MPPT Techniques for PV Applications, IEEE International Conference on Clean Electrical Power, s: 99-104, 2004.
- [14] H. Park, C. Kim, B. Kim, G. Moon ve J. Lee: Modularized Charge Equalization with High Power Density and Low Voltage Stress for HEV Lithium-ion Battery String, 7th IEEE International Conference on Power Electronics, s: 784-789, 2007.