

Rezonans Dönüştürücü Fotovoltaik Batarya Şarj Sistemi Photovoltaic Battery Charger System With Resonant Converter

Harun ÖZBAY 

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bandırma/Balıkesir, Türkiye

hozbay@bandirma.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

ARTICLE INFO

Article history

Received :14 October 2019

Accepted : 23 October 2019

Keywords:

Photovoltaic Systems, Serial Resonant Converter, Zero Current Switching, Battery Charger, PSIM

ABSTRACT

In this study, high frequency, high efficiency, maximum power point tracking (MPPT) and resonance frequency tracking system is simulated for battery charger systems. Power density of the system is increased by high frequency switching with half bridge series resonance circuit and switching losses are eliminated. An MPPT algorithm with variable frequency and duty ratio control has been developed for effective maximum power point tracking in photovoltaic (PV) systems with resonant converter. With the developed algorithm in the proposed system, the switching frequency is changed between 50 kHz and 100 kHz by using phase locked loop (PLL). Thus, the tracking of the resonance frequency is successfully achieved in all conditions. In addition, in order to obtain maximum power from the panels in the PV system, the duty ratio is changed between 20% and 50% according to the changed frequency. With the developed algorithm, maximum power that can be obtained from PV panels between 400-700-1000 W/m² different solar radiation levels is transferred to the system with high efficiency. In order to evaluate the performance of the proposed system, a 600W battery charger system is simulated and the results are presented comparatively.

© 2020 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri

Gönderim : 14 Ekim 2019

Kabul : 23 Ekim 2019

Anahtar Kelimeler:

Fotovoltaik Sistemler, Seri Rezonans Dönüştürücü, Sıfır Akım Anahtarlama, Batarya Şarj, PSIM

ÖZET

Bu çalışmada, batarya şarj sistemleri için yüksek frekanslı, yüksek verimli, maksimum güç noktası takibi (MPPT) ve rezonans frekans takibi yapabilen sistemin benzetimi yapılmıştır. Yarım köprü seri rezonans devresi ile yüksek frekanslı anahtarlama yapılarak sistemin güç yoğunluğu artırılmış ve aynı zamanda anahtarlama kayıpları ortadan kaldırılmıştır. Rezonans dönüştürücü Fotovoltaik (PV) sistemlerde etkili bir maksimum güç noktası takibi yapılabilmesi için değişken frekans ve görev oranı kontrollü bir MPPT algoritması geliştirilmiştir. Önerilen sistemde geliştirilen algoritma ile faz kilitlemeli döngü (PLL) kullanılarak anahtarlama frekansı 50 kHz ile 100 kHz arasında değiştirilmektedir. Böylece rezonans frekansının takibi her koşulda başarılı bir şekilde sağlanmıştır. Ayrıca PV sistemdeki panellerden maksimum güç elde edilebilmesi için görev döngüsü değiştirilen frekansa uygun olarak %20 ile %50 arasında değiştirilmiştir. Geliştirilen algoritma ile 400-700-1000 W/m² güneş radyasyonu altında PV panellerden elde edilebilecek maksimum güç sisteme yüksek verimlilikle aktarılmıştır. Önerilen sistemin performansını değerlendirmek için 600W'lık batarya şarj sisteminin benzetimi yapılarak sonuçları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

© 2020 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

1. GİRİŞ

Güneş enerjisi, yeşil, temiz ve özgür bir enerji kaynağı olduğu için yenilenebilir enerji kaynakları arasında ana enerji kaynağıdır. Fotovoltaik sistemler güneşten gelen enerjiyi elektrik enerjisine çevirmek için kullanılır. Üretilen elektrik enerjisi şebeke etkileşimli eviriciler ile şebekeye aktarmak için kullanılır. Ayrıca sulama sistemleri, şebekeden bağımsız sistemler, çiftlik evleri, uzay araçları ve askeri uygulamalar gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır [1,2]. Bu nedenle, PV panellerden mevcut maksimum gücün aktarılması önem kazanmaktadır. DC-DC dönüştürücü (MPPT), PV sistem ve yük arasında mümkün olan maksimum gücü aktarmak için kullanılır [3,4].

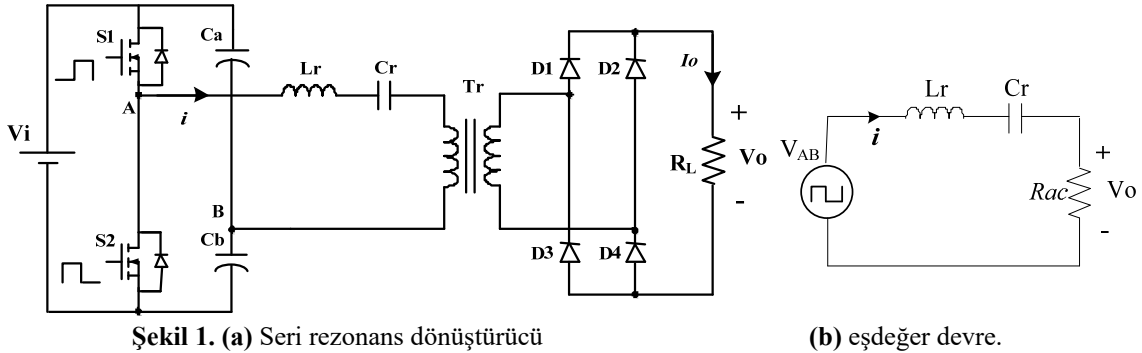
Saptır & Gözle (Perturb&Observe(P&O)) yöntemi sadeliği, pratikliği ve yüksek verimliliği nedeniyle en yaygın kullanılan MPPT yöntemlerinden biridir. Ayrıca, yöntemin en önemli avantajı, MPP elde etmede PV karakteristiği, sıcaklık ve radyasyon seviyesi gibi bazı faktörlerden bağımsız olmasıdır [5,6]. Bununla birlikte, dönüştürücünün MPPT algoritması ile etkinliği, anahtarlama kayıpları nedeniyle azalır. Rezonans dönüştürücüler, bu sakıncaları ortadan kaldırmak için kullanılabilir [7]. Yüksek anahtarlama frekanslarında bir yüke güç aktarıldığında, yüksek frekans kayıpları ve gerilim stresleri meydana gelir. Rezonans anahtarlama devrelerinde, anahtarlama akımı ve/veya gerilimi sıfır yaparak anahtarlama kayıpları azaltılır. Bununla birlikte, rezonans dönüştürücüler bu sorunlardan etkilenmeden yüksek frekanslarda çalışabilmektedirler [8]. Kapasitif ve endüktif bileşenlerde enerji depolama talebi azalmaktadır. Bu nedenle, dönüştürücü boyutu ve maliyetleri azalır [9].

Literatürde, ayarlanabilir frekanslı ve görev oranlı MPPT algoritması kullanılmayan seri rezonans topolojisine sahip batarya şarj cihazı uygulamaları [10], MPPT özelliği olmayan düşük frekans seri rezonans topolojisi [11], MPPT özelliği bulunan yüksek frekans düşük güçlü batarya şarj cihazı uygulaması [12], PWM kontrollü sabit frekanslı batarya şarj sistemleri [13], elektrikli araçlar için batarya şarj sistemleri [14] incelenmiştir. Fakat literatürdeki uygulamaların çoğu MPPT algoritma özelliği olmayan DC-DC dönüştürücüye sahip veya rezonans dönüştürücü özelliği olmayan sistemlerdir.

Bu çalışma, fotovoltaik enerji sistemleri için bir seri rezonans dönüştürücü kullanarak bir batarya şarj sisteminin simülasyon çalışmasını sunmaktadır. Çalışmada, güç yoğunluğu yüksek frekanslı anahtarlama ile artırılmış ve açılma anındaki anahtarlama kayıpları sıfır akım anahtarlama ile elimine edilmiştir. Önerilen sistemin benzetimi PSIM programı ile yapılmıştır. Sistemin çıkış gücü kontrolü MPPT (P&O) tarafından gerçekleştirilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. SERİ REZONANS DÖNÜŞTÜRÜCÜ

Yarım köprü seri rezonans dönüştürücü ve eşdeğer devresi Şekil 1'de gösterilmiştir. Dönüştürücü, birbirine eşit olan C_a ve C_b kondansatör bölmesi, iki adet tek yönlü güç anahtarı S_1 ve S_2 , rezonans kondansatörü C_r , rezonans endüktansı L_r , yüksek frekanslı güç trafosu T_r , doğrultucu diyotlar D_1 - D_4 ve bir yükten oluşmaktadır. Gerilim kaynağı (V_i) bir kare dalga kaynağı olan (V_{AB}) ile temsil edilmektedir. Şekil 1b, kare dalga kaynağıyla eşdeğer devreyi göstermektedir. Çıkış gerilimi, V_{AB} giriş geriliminin frekansı değiştirilerek düzenlenebilir [15].



Şekil 1. (a) Seri rezonans dönüştürücü

(b) eşdeğer devre.

Giriş gerilimi V_{AB} , anahtarlama frekansının (f_s) bir fonksiyonudur. Anahtarlama frekansı rezonans frekansına (f_r) eşit olduğunda maksimum güç aktarımı elde edilebilir [7]. Rezonans frekansı, anahtarlama frekansı ve normalize frekansı aşağıdaki denklemler ile ifade edilmektedir:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} = 2\pi f_r \quad (1)$$

$$\omega_s = 2\pi f_s \quad (2)$$

$$\omega_n = \frac{\omega_s}{\omega_r} \quad (3)$$

Batarya eşdeğer direnci ve AC eşdeğer direnci ise aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır [10];

$$R_L = \frac{V_{bat}}{I_{chg}} \quad (4)$$

$$R_{ac} = \frac{8n^2 R_L}{\pi^2} \quad (5)$$

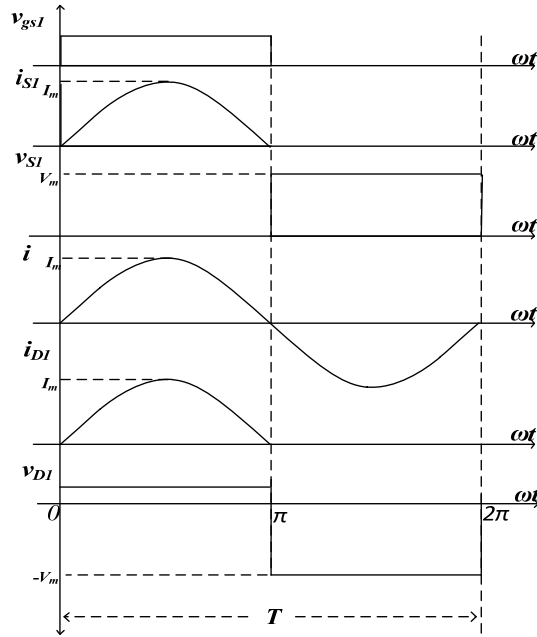
Burada, V_{bat} batarya gerilimi ve I_{chg} ise batarya şarj akımıdır. Seri rezonans devresinin rezonans frekansındaki yüklü kalite faktörü Denklem 6 ile ifade edilir;

$$Q = \frac{\sqrt{\frac{L_r}{C_r}}}{R_{ac}} \quad (6)$$

Rezonans devresi giriş akımı (i) ile çıkış voltajı (V_o) arasındaki faz açısı φ Denklem (7) ile hesaplanabilir;

$$\varphi = \tan^{-1} \left[Q \left(\omega_n - \frac{1}{\omega_n} \right) \right] \quad (7)$$

$\omega_s = \omega_r$ için rezonans devresi tamamen omik dirençli bir yük gibi davranır ve anahtar akımı yük gerilimi ile aynı fazda olmaktadır. Bu nedenle sıfır akım anahtarlama (Zero Current Switching(ZCS)) gerçekleştirilebilir. Şekil 2'de seri rezonans devresinin rezonans çalışma durumu için anahtar ve diyot akım/ gerilim dalga formlarını gösterilmektedir.



Şekil 2. S1 ve D1 akım ve gerilim dalga biçimleri ($\omega_s = \omega_r$).

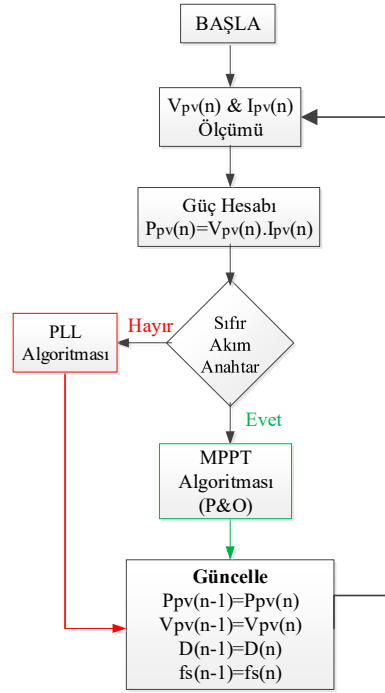
Seri rezonans dönüştürücünün görev oranı ise Denklem 8'de verildiği şekilde ifade edilmektedir [10];

$$D = \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{n\pi V_o}{2\sqrt{2}V_i} \sqrt{1 + Q^2 \left(\omega_n - \frac{1}{\omega_n} \right)^2} \right) \quad (8)$$

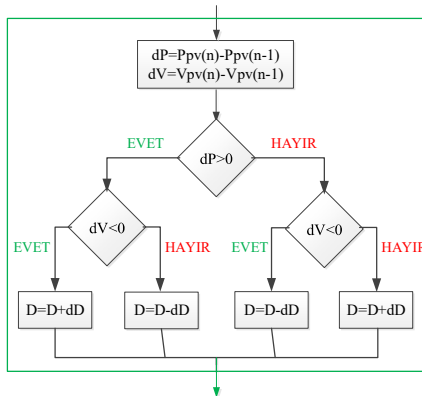
3. FOTOVOLTAİK ÖNERİLEN MPPT KONTROL SİSTEMİ

3.1. Önerilen Kontrol Algoritması

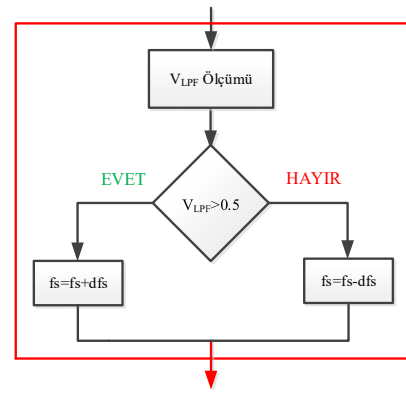
Önerilen kontrol algoritmasının mevcut olanlardan asıl farkı, P&O izleme döngüsünün, MPPT rolüne ek olarak farklı kalite faktörleri ve rezonans parametreleri için rezonans frekansını hatasız bir şekilde izlemek için ekstra bir döngü ile donatılmasıdır. Önerilen algoritmanın akış şeması Şekil 3'te gösterilmektedir. Maksimum güç noktasını (MPP) belirlemek için yakın zamanda birçok MPPT tekniği geliştirilmiştir. MPPT yöntemleri, doğru MPPT, periyodik ayarlama, izleme hızı ve karmaşıklık açısından dört gruba ayrılabilir. Bunlar, akıllı yöntemler, doğrudan hesaplama yöntemleri, artan iletkenlik (Incremental Conductance (IC)) ve Saptır&Gözle (P&O) olarak ifade edilir. P&O, MPP'deki yüksek doğruluk nedeniyle en yaygın kullanılan MPPT tekniklerindedir [16]. P&O yönteminde PV panel gücü ölçülür ve önceki değerlerle karşılaştırılır. Dönüştürücünün çalışma noktası güç ölçümlerinin durumuna göre değişim göstermektedir [17,18]. Değişim sonucu güç artarsa, sapma yönü değiştirilmez. Eğer güç azalır, sapma yönü tersine çevrilir. Bu işlem MPP bulunana kadar uygulanmaktadır. P&O algoritmasının akış şeması, Şekil 4 (a) 'da gösterilmiştir.



Şekil 3. Önerilen algoritmanın akış şeması.



Şekil 4. (a) P&O algoritmasının

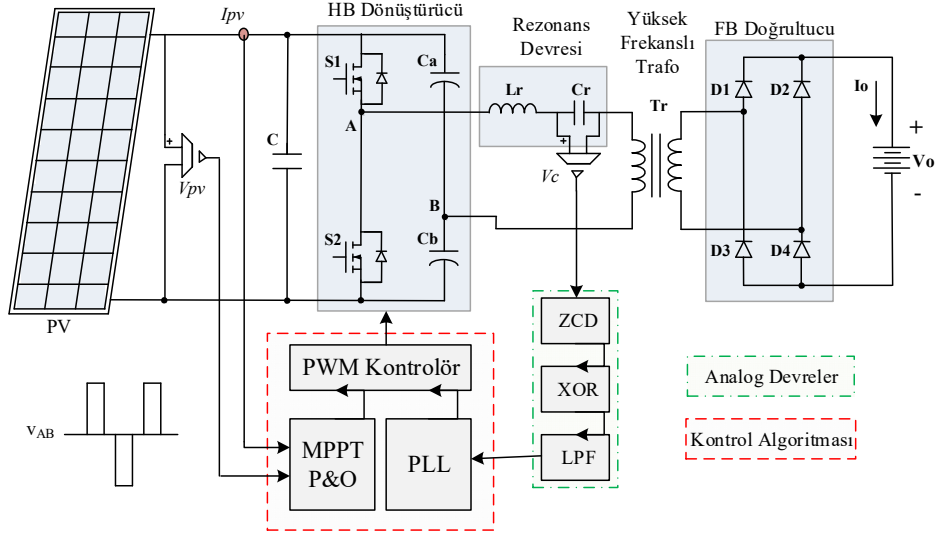


(b) PLL algoritmasının akış şeması.

Rezonans kondansatörü C_r 'nin üzerindeki gerilim bir gerilim sensörü ile tespit edilmektedir. MOSFET gate sinyali kondansatör gerilimi ile karşılaştırılır ve iki sinyal arasındaki faz farkı XOR kapısı ile karşılaştırılır. XOR kapısının lojik çıkışı alçak geçiren filtre (LPF) ile filtre edilerek DC (V_{LPF}) gerilimi elde edilir. Filtrelenen DC değer 0,5 V'tan yüksekse, anahtarlama frekansı artırılır. Filtrelenen DC değeri 0,5 V'tan küçükse, anahtarlama frekansı azaltılmaktadır. Bu işlem, PLL yakalanana kadar uygulanmaktadır. PLL algoritmasının akış şeması, Şekil 4 (b) 'de gösterilmektedir.

3.2. Önerilen Sistem Tanımı

PV panellerden, MPPT & PLL kontrol algoritmasından, rezonans batarya şarj sistemi dönüştürücüsünden ve batarya grubundan oluşan önerilen sistemin genel blok şeması, Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 5. Önerilen batarya şarj sisteminin blok şeması.

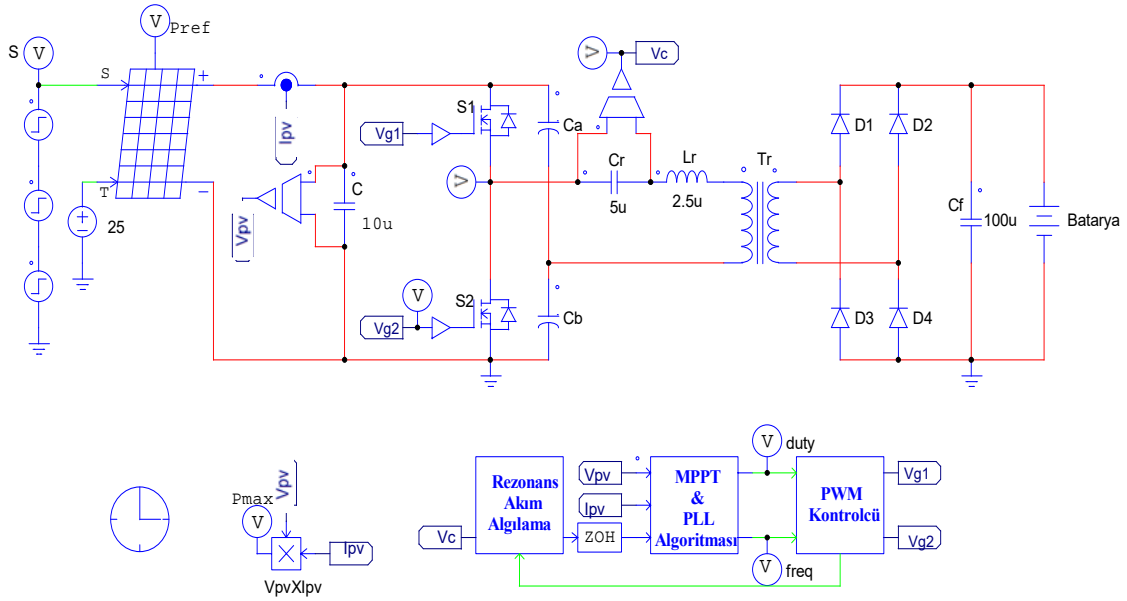
Önerilen sistemde altı adet 100W PLM-100P /12 model özelliklerinde polikristal PV panel seri bağlanmış şekilde benzetim programında kullanılmıştır. Toplam beş adet seri bağlı 12V'luk batarya PV panellerden rezonans dönüştürücü ile şarj edilmektedir.

4. BATARYA ŞARJ SİSTEMİNİN PSIM MODELİ

Seri rezonans dönüştürücü, MPPT bloğu ve PLL bloğu olan batarya şarj sisteminin PSIM benzetim modeli Şekil 6'da verilmiştir. Sistemin ilk frekansı (f_i) ve ilk çalışma oranı (D_i) uygun bir değerde seçilmiştir. Rezonans C_r kondansatörü $5\mu\text{F}$, rezonans bobini $2,5\mu\text{H}$ ve transformator oranı (N_1/N_2) 4: 5'tir. Seri rezonans dönüştürücülü batarya şarj kontrol sisteminin doğruluğunu test etmek için PSIM benzetim programında farklı çıkış gücü değerleri ve farklı batarya gerilim değerleri ile benzetimi yapılmıştır. Benzetim sisteminin başlangıç parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

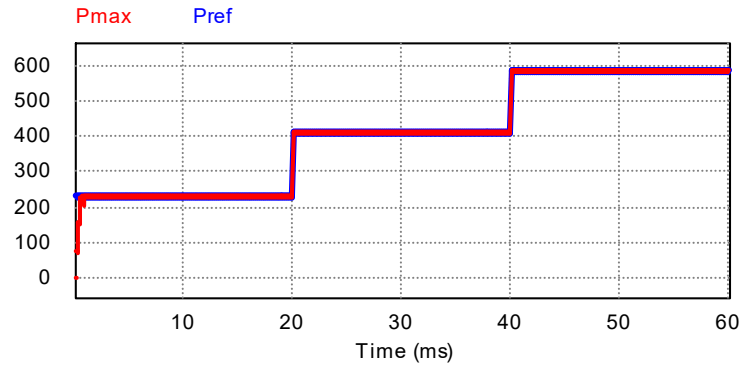
Tablo 1. Sistemin Başlangıç Parametreleri

$P_o(\text{W})$	$V_{\text{bat}}(\text{V})$	$R_L(\Omega)$	$f_i(\text{kHz})$	$D_i(\%)$
235	57	13,825	90	20
415	57	7,828	90	20
585	57	5,55	90	20
235	60	15,32	70	30
415	60	8,674	70	30
585	60	6,15	70	30

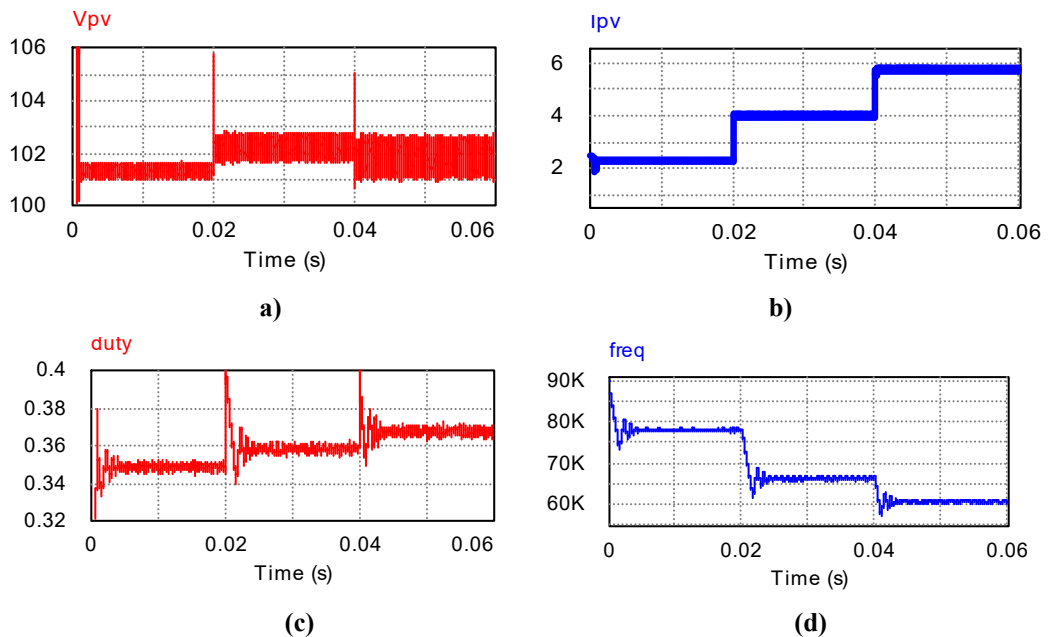


Şekil 6. Önerilen batarya şarj sistemi ve kontrol blokları

400-700-1000 W/m² güneş radyasyonu ve 57V batarya geriliminde yapılan benzetim sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. V_{PV}, I_{PV}, görev oranı ve anahtarlama frekansının 400-700-1000 W/m² güneş radyasyonu seviyesindeki değişimi Şekil 8'de sırasıyla gösterilmiştir.

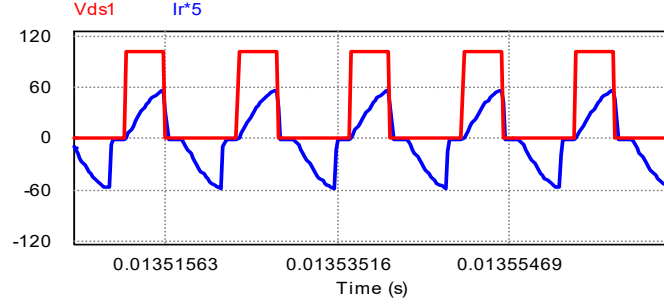


Şekil 7. MPPT'nin 400-700-1000 W/m² güneş radyasyonu altında güç takibi (V_{bat} = 57V).

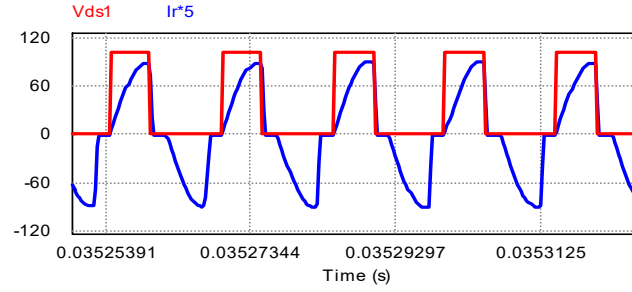


Şekil 8. 400-700-1000 W/m² güneş ışınımı altında a) V_{PV} (b) I_{PV} c) görev oranı d) anahtarlama frekansının değişimi (V_{bat} = 57V).

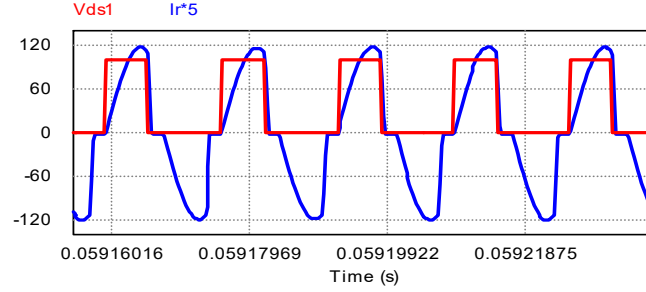
Şekil 7 incelendiğinde ani güneş ışınımı değişimlerinde dahi maksimum güç aktarımı dinamik bir şekilde devam etmektedir. Şekil 8 c’de görüldüğü gibi farklı ışınım seviyelerinde maksimum güç aktarımının sağlanması için anahtarlama oranı hızlı bir şekilde değiştirilmektedir. Buna bağlı olarak değişen kalite faktörü dolayısıyla Şekil 7 d’de görüldüğü gibi çalışma frekansı değiştirilerek rezonans frekansına kilitlenmektedir. 400-700-1000W/m² güneş radyasyonu seviyesi altında MOSFET gerilimi ve rezonans akımı benzetim sonuçları Şekil 8’de gösterilmektedir (V_{bat}=57V). Anahtarlama frekansı rezonans frekansına kilitlendiğinde sıfır akım anahtarlama elde edildiği görülmektedir.



a)



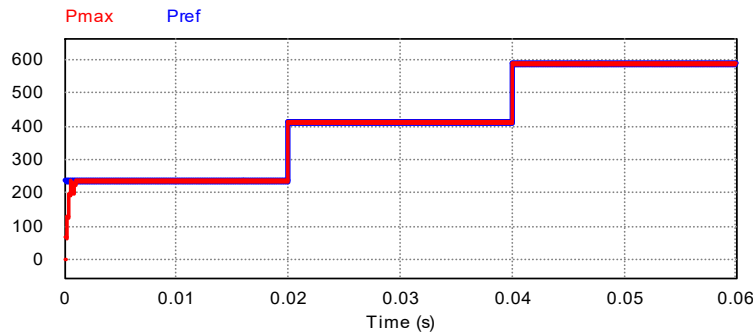
b)



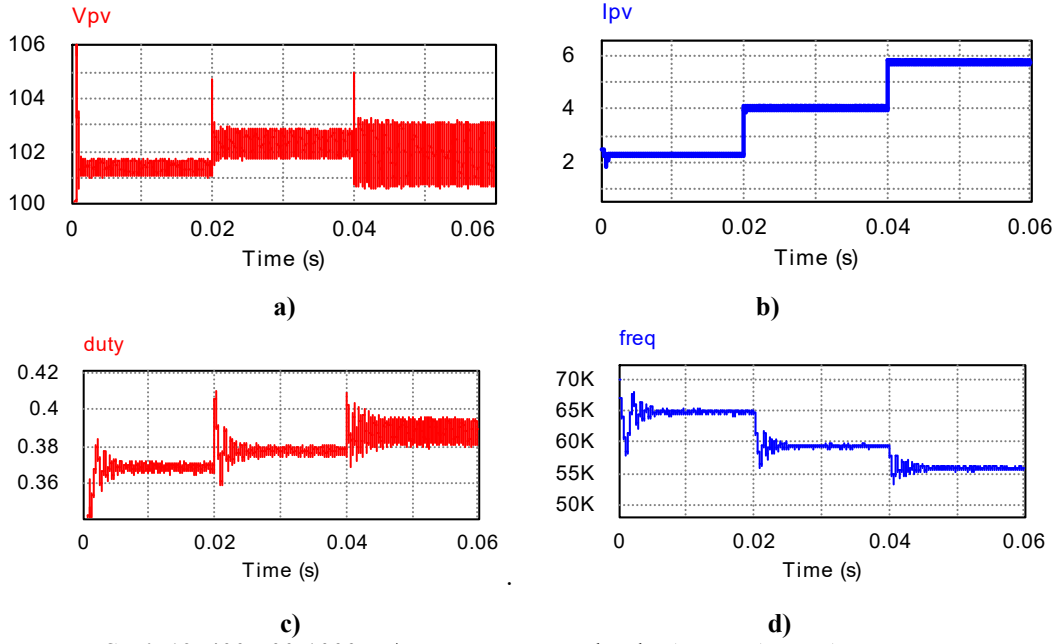
c)

Şekil 8. a) 400W/m² b) 700W/m² c) 1000W/m² güneş radyasyonu seviyesi altında MOSFET gerilimi ve rezonans akımı (x5) dalga biçimleri (V_{bat} = 57V).

60V batarya geriliminde ve 400-700-1000 W/m² güneş radyasyonu altında yapılan benzetim sonuçları Şekil 9’da verilmektedir. V_{PV}, I_{PV}, görev oranı ve anahtarlama frekansının 400-700-1000 W/m² güneş radyasyonu seviyesindeki değişimi sırasıyla Şekil 10’da gösterilmiştir.

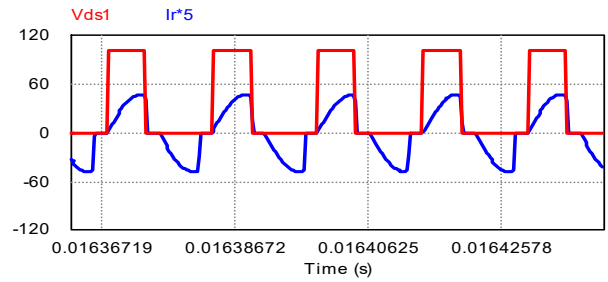


Şekil 9. MPPT'nin 400-700-1000 W/m² güneş radyasyonu altındaki güç takibi (V_{bat} = 60V)

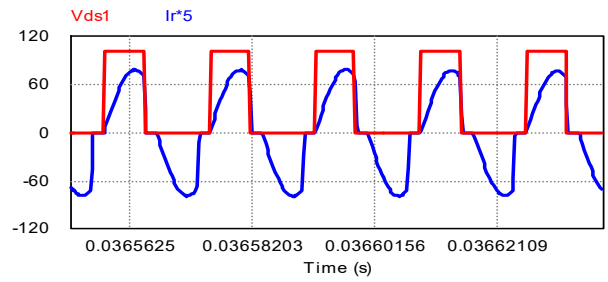


Şekil 10. 400-700-1000 W/m² güneş ışınımı altında a) V_{PV}, b) I_{PV}, c) görev oranı d) anahtarlama frekansının değişimi (V_{bat} = 60V).

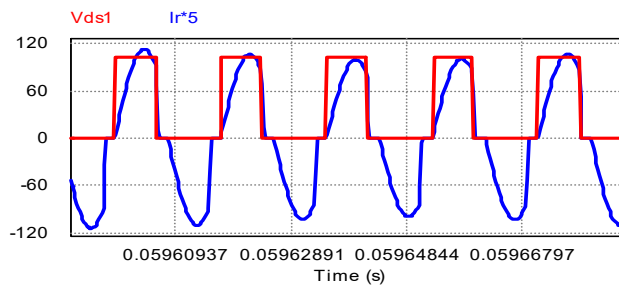
400-700-1000W/m² güneş ışınımı seviyesi altında ve 60V batarya geriliminde yapılan MOSFET gerilimi ve rezonans akımı benzetim sonuçları Şekil 11’de gösterilmektedir (V_{bat} = 60V).



a)



b)



c)

Şekil 11.a) 400W/m² b) 700W/m² c) 1000W/m² güneş radyasyonu seviyesi altında MOSFET gerilimi ve rezonans akımı (x5) dalga biçimleri (V_{bat} = 60V)

Şekillerde gösterildiği gibi, farklı batarya gerilimleri ve güneş ışınımı seviyeleri için sıfır akım anahtarlama (ZCS) elde edilmektedir. Yarım köprü serisi rezonans dönüştürücü için benzetim sonuçları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Farklı güneş radyasyonu altında benzetim sonuçları

Parameters		400 W/m ²	700 W/m ²	1000 W/m ²
Vbat 57V	D(%)	34,5	35,85	36,7
	f _s (kHz)	78,2	67,3	60,5
	φ (°)	0	0	0
Vbat 60V	D(%)	36,9	38,1	39,2
	f _s (kHz)	65,25	58,75	56,1
	φ (°)	0	0	0

5. SONUÇ

Bu çalışmada, MPPT ve PLL kontrol algoritmaları, batarya şarj sistemi için bir yarım köprü seri rezonans dönüştürücüsüne uygulanmıştır. Yarım köprü dönüştürücü ve MPPT & PLL ünitesinin bir PSIM modeli tasarlanmış ve farklı batarya gerilim koşulları için benzetim sonuçları karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçlarına göre, seri rezonans dönüştürücü için tasarlanan MPPT ve PLL algoritmaları, farklı kalite faktörleri için maksimum güç noktasını ve rezonans frekansını başarılı bir şekilde takip etmektedir. Önerilen sistemin performansı farklı güneş radyasyon seviyeleri için test edilmiştir. Tasarlanan PLL kontrollü seri rezonans dönüştürücü algoritması, anahtarlama sinyali ile rezonans kondansatör gerilimi arasındaki faz farkındaki değişiklikleri izlemekte ve otomatik olarak sıfır akım anahtarlama sağlanmaktadır. Benzetim sonuçları, önerilen sistemin 400 ila 1000 W/m² güneş radyasyonu seviyesi arasındaki güneş ışınımı altında 600 W’lık batarya şarj sisteminin yüksek verim (% 97,5) ve yüksek frekans (50-100 kHz arasında) ile başarılı bir şekilde çalıştığını göstermektedir.

KAYNAKÇA

- [1] E. Delihanlar, E.K. Yaylacı, and A. Dalcalı “Solar Energy Potential in the World and Turkey, Current Status, Incentives, Installation Cost Analysis-Karabuk Province Sample”, Elec Lett Sci Eng , vol. 15, no. 1, pp. 12-20 2019.
- [2] A. Karafil, H. Ozbay, and M. Kesler, “Temperature and solar radiation effects on photovoltaic panel power”, Journal of New Results in Science, vol. 5, pp. 48-58, 2016.
- [3] C.H. Chang, E.C. Chang, and H.L. Cheng, “A high-efficiency solar array simulator implemented by an LLC resonant DC-DC converter,” Power Electronics, IEEE Transactions on, vol. 28, no. 6, pp. 3039-3046, 2013.
- [4] M.K. Murthy, N. Sandeep, and P.S. Kulkarni, “Analysis and design of ZVS-PWM active clamping DC-to-DC Cuk converter based PV generation system”, Engineering and Systems (SCES), 2014 Students Conference on. IEEE, pp 1-6, 2014.
- [5] L. Piegari, and R. Rizzo, “Adaptive perturb and observe algorithm for photovoltaic maximum power point tracking”, IET Renewable Power Generation, vol. 4, no. 4, pp. 317-328, 2010.
- [6] T. Esmar, and P.L. Chapman, “Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques”, IEEE Transactions on Energy Conversion EC, vol. 22, no. 2, pp. 439, 2007.
- [7] M.K. Kazimierczuk, and D. Czarkowski, “Resonant power converters”, John Wiley & Sons., 2012.
- [8] A. Karafil, H. Ozbay, and S. Oncu, “Power control of resonant converter MPPT by pulse density modulation,” In IEEE 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO) pp. 360-364, 2017.
- [9] M. Rashid, "Power Electronics Circuits, Devices And Applications," Prentice Hall (Second Edition), 1993.
- [10] S. H. Ryu, D. H. Kim, M. J. Kim, J. S. Kim, and B. K. Lee, “Adjustable Frequency–Duty-Cycle Hybrid Control Strategy for Full-Bridge Series Resonant Converters in Electric Vehicle Chargers,” Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 61 no. 10, pp. 5354-5362, 2014.
- [11] Y.C. Chuang, Y.L. Ke, H.S. Chuang, and H.K. Chen, “Implementation and analysis of an improved series-loaded resonant DC-DC converter operating above resonance for battery chargers”, Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. 45, no. 3, pp. 1052-1059, 2009.
- [12] H.J. Chui, Y.K. Lo, T.P. Lee, Q.S. Chen, W.L. Yu, J. X. Lee, & S.C. Mou, “A battery charger with maximum power point tracking function for low-power photovoltaic system applications,” International Journal of Circuit Theory and Applications, vol. 39 (3), pp. 241-256. Mar. 2011.
- [13] H.I. Hsieh, S.F. Shih, J.H. Hsieh, and G.C. Hsieh, “A study of high-frequency photovoltaic pulse charger for lead-acid battery guided by PI-INC MPPT,” Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2012 International Conference on. IEEE, pp. 1-6, 2012.
- [14] S. Hu, J. Deng, C. Mi, and M. Zhang, “Optimal design of line level control resonant converters in plug-in hybrid electric vehicle battery chargers”, IET

- Electrical Systems in Transportation, vol. 4, no. 1, pp. 21-28, 2013.
- [15] R. L. Steigerward, "Practical Design Methodologies for Load Resonant Converters operating above resonance." IEEE Telecommunication energy conference. pp. 172-179, 1992.
- [16] H. Özbay, S. Öncü, and M. Kesler, "SMC-DPC based active and reactive power control of grid-tied three phase inverter for PV systems," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 42, no. 28, pp. 17713-17722, 2017.
- [17] N. Kumar, B. Singh, and B. K. Panigrahi, "Integration of Solar PV with Low-Voltage Weak Grid System: using Maximize-M Kalman Filter and Self-tuned P&O Algorithm," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 66, no. 11, pp. 9013-9022, 2019.
- [18] S. Oncu, and A. Karafil, "Pulse density modulation controlled converter for PV systems," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 42, no. 28, pp. 17823-17830, 2017.