



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*



# Elektrikli araç batarya aktif dengeleme sistemleri için çift yönlü flyback dönüştürücü tasarımı

## *Design of a bi-directional flyback converter for electric vehicle battery active balancing systems*

*Yazar(lar) (Author(s)): Fatih ŞAHİN<sup>1</sup>, Elif KILINÇ<sup>2</sup>*

*ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-4423-6619*

*ORCID<sup>2</sup>: 0000-0002-7317-7048*

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Şahin F., Kılınç E., “Elektrikli araç batarya aktif dengeleme sistemleri için çift yönlü flyback dönüştürücü tasarımı”, *Politeknik Dergisi*, 25(4): 1487-1494, (2022).

**Erişim linki (To link to this article):** <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

**DOI:**10.2339/politeknik.912393

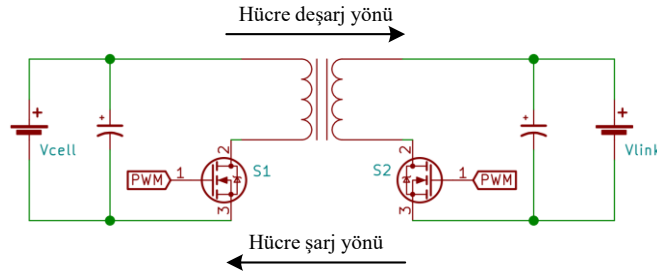
# Elektrikli Araç Batarya Aktif Dengeleme Sistemleri için Çift Yönlü Flyback Dönüştürücü Tasarımı

## Design of a Bi-directional Flyback Converter for Electric Vehicle Battery Active Balancing Systems

### Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Aktif dengeleme sistemleri ile kullanılabilir batarya kapasitesi ve ömür arttırılabilmektedir. / The available capacity and lifecycle of a battery can be increased with active balancing systems.
- ❖ Flyback dönüştürücüler izolasyonlu olmaları açısından aktif dengeleme sistemleri için uygun yapıdadır. / Flyback converters is suitable for active balancing systems in view of their isolated structure.
- ❖ Dönüştürücünün hücre şarj yönündeki verimi hücre deşarj yönündeki veriminden yüksektir. / Cell charge direction efficiency of converter is larger than cell discharge direction efficiency.

### Grafik Özet (Graphical Abstract)



Şekil. Çift yönlü flyback dönüştürücü devresi /Figure. Bi-directional flyback converter circuit

Bu çalışmada bir batarya hücresini hem şarj hem de deşarj edebilecek çift yönlü flyback dönüştürücü devresi tasarlanmıştır. / In this study, a bidirectional flyback converter circuit that can both charge and discharge a battery cell is designed.

### Amaç (Aim)

Bu çalışmanın temel amacı batarya aktif dengeleme sistemlerine yönelik çift yönlü flyback dönüştürücü tasarımının yapılmasıdır. / The main purpose of this study is to design of bi directional flyback converter for battery active balancing systems.

### Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Tasarlanan çift yönlü flyback dönüştürücünün simülasyonu ve uygulaması yapılmıştır. / Simulation and applications of designed bi directional flyback converter were performed.

### Özgünlük (Originality)

Bu çalışmada lityum iyon batarya aktif dengeleme sistemi için çift yönlü flyback dönüştürücü tasarımı yapılmıştır. / In this study a flyback converter design for lithium ion battery active balancing system.

### Bulgular (Findings)

Simülasyon ve test sonuçları geliştirilen çift yönlü flyback dönüştürücü devresinin batarya dengeleme sistemlerine uygulanabilir olduğunu göstermiştir. / The simulation and test results have shown that the designed bi directional flyback converter can be applicable to battery balancing systems.

### Sonuç (Conclusion)

Geliştirilen çift yönlü flyback dönüştürücü devresi batarya dengeleme sistemleri için uygun yapıdadır. / The designed bi directional flyback converter is suitable for battery balancing systems.

### Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarları çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The authors of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

# Elektrikli Taşıt Batarya Aktif Dengeleme Sistemleri için Çift Yönlü Flyback Dönüştürücü Tasarımı

*Araştırma Makalesi / Research Article*

Fatih ŞAHİN\*, Elif KILINÇ

Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 09.04.2021 ; Kabul/Accepted : 17.05.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 15.06.2021)

## ÖZ

Batarya dengeleme sistemleri batarya hücrelerinin dengeli şarj ve deşarjı için gereklidir. Batarya paketlerinin ömrü, verimliliği ve güvenliği dengeleme sistemleri ile artırılabilir. Batarya dengeleme sistemleri pasif ve aktif olarak ikiye ayrılır. Pasif dengeleme sistemlerinde, hücreler arasında dengesizliğe neden olan yük miktarı bir dirençle boşaltılırken, aktif dengeleme sistemlerinde hücreler arası dengesizlik, enerjinin yüksek şarjlı hücreden düşük olana aktarılmasıyla ortadan kaldırılır. Artan hücre sayısı, dengeleme sistemlerinin karmaşıklığına yol açmaktadır. Dönüştürücü tabanlı dengeleme sistemleri, çok sayıda hücreye sahip batarya paketleri için uygun bir çözüm sunar. Bu çalışmada, batarya aktif dengeleme sistemlerinde kullanılmak üzere çift yönlü bir flyback dönüştürücü geliştirilmiştir. Simülasyon ve test sonuçları, geliştirilen çift yönlü flyback dönüştürücünün batarya aktif dengeleme sistemleri için uygun olduğunu ortaya koymuştur. Hücre şarj yönü testinde en yüksek verim %32,5 görev döngüsünde %67,84 olarak ve hücre deşarj yönü testinde %50 görev döngüsünde %66,02 olarak elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Batarya dengeleme sistemi, aktif dengeleme, çift yönlü flyback dönüştürücü.

# Design of a Bi-directional Flyback Converter for Electric Vehicle Battery Active Balancing Systems

## ABSTRACT

The battery balancing systems are essential for balanced charging and discharging the battery cells. Lifecycle, efficiency and safety of battery packs can be increased by balancing systems. Battery balancing systems are divided into two group as passive and active. In passive balancing systems the amount of charge causing imbalance between cells is discharged by a resistor while in active balancing systems imbalance between the cells is eliminated by transferring energy from high state of charge cell to low one. Increasing number of cells is led to complexity of balancing systems. Converter based balancing systems present a feasible solution to battery packs with a large number of cells. In this study, a bidirectional flyback converter in order to use in battery active balancing systems has been developed. Simulation and test results revealed that the developed bidirectional flyback converter is suitable for battery active balancing systems. The highest efficiencies were obtained as 67.84% at 32.5% duty cycle at charge test and 66.02% at 50% duty cycle at discharge test.

**Key Words:** Battery balancing system, active balancing, bi-directional flyback converter.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mobil sistemlerin gün geçtikçe yaygınlaşması enerji kaynağı olarak bataryalara olan ihtiyacın artmasına yol açmıştır. Taşıtlarda güç sistemi olarak hibrit veya tamamı elektrikli tahrik sistemlerinin kullanılması bu alanda da önemli bir batarya ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Artan batarya ihtiyacı, batarya üretimi için gerekli hammaddelerin kısıtlı olması ve batarya maliyetlerinin yüksek olması bataryaların verimli ve uzun ömürlü kullanımını zorunlu hale getirmektedir. Elektrikli taşıtlarda batarya ömrü en önemli problemlerden biridir [1].

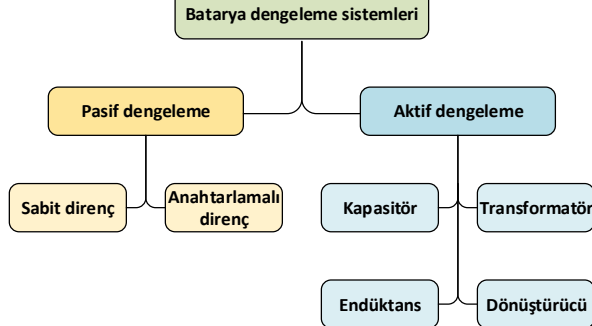
Batarya paketleri eşit kapasiteli batarya hücrelerinin belli bir düzende seri-paralel gruplar halinde bağlanmasıyla oluşturulmaktadır. Eşit kapasiteli batarya hücreleri arasında üretim toleranslarından kaynaklanan yapısal farklılıklar bulunmaktadır. Buna ek olarak hücrelerin çalışma koşullarında da farklılıklar

söz konusudur [2-4]. Bu farklılıklar şarj-deşarj döngüsü boyunca hücrelerin şarj durumlarının değişmesine yol açmaktadır. Şarj esnasında bazı hücreler maksimum şarj seviyesine diğerlerinden erken ulaşmakta, deşarj sırasında tam tersi bir durum ortaya çıkmaktadır. Hücrelerin şarj durumlarının aynı olmaması kullanılabilir batarya kapasitesi ve batarya ömrünü sınırlandırmaktadır [5]. Seri bir batarya grubunda şarj işlemi en yüksek şarj seviyesine sahip hücreye göre, deşarj işlemi ise en düşük şarj seviyesine sahip hücreye göre ayarlanır [6]. Bu durum hücre kapasitelerinin tamamının kullanılamamasına yol açar. Bu problemi ortadan kaldırmak için batarya dengeleme sistemlerine ihtiyaç vardır.

Batarya dengeleme sistemleri pasif ve aktif olarak ikiye ayrılır [2]. Pasif dengeleme sistemleri sabit direnç ve anahtarlamalı direnç olarak ikiye ayrılırken aktif dengeleme sistemleri kapasitör, endüktans, transformator ve dönüştürücü yöntemi olarak dörde ayrılır (Şekil 1). Pasif dengelemede, her bir batarya hücresine bir anahtarlama elemanı yardımıyla paralel

\*Sorumlu Yazar (Corresponding Author):  
e-posta : fasahin@gazi.edu.tr

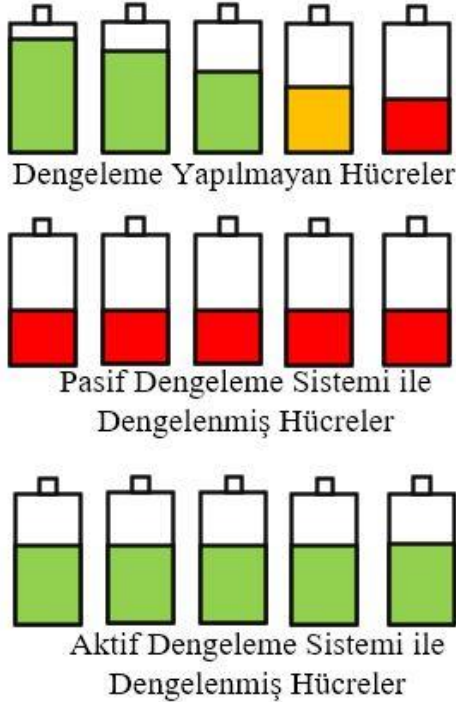
dirençler bağlanır. Bu dirençler ile hücre gerilimi en yüksek batarya hücreleri, en düşük batarya hücresi değerine gelinceye kadar deşarj edilir. Pasif dengeleme yöntemi kolay uygulanabilir ve düşük maliyetli olmasına karşın dengeleme süresinin uzun oluşu ve enerji verimliliği açısından uygun bir yöntem değildir [2].



Şekil 1. Batarya dengeleme sistemleri (Battery balancing systems)

Pasif dengeleme sistemlerinde şarj seviyesi yüksek olan hücrelerden alınan enerji ısıya dönüştürülürken aktif dengeleme sistemlerinde şarj seviyesi yüksek olan hücrelerden düşük olan hücelere enerji transferi yapılmaktadır [3], [7]. Pasif ve aktif dengeleme sistemleri arasındaki fark Şekil 2’de görülmektedir.

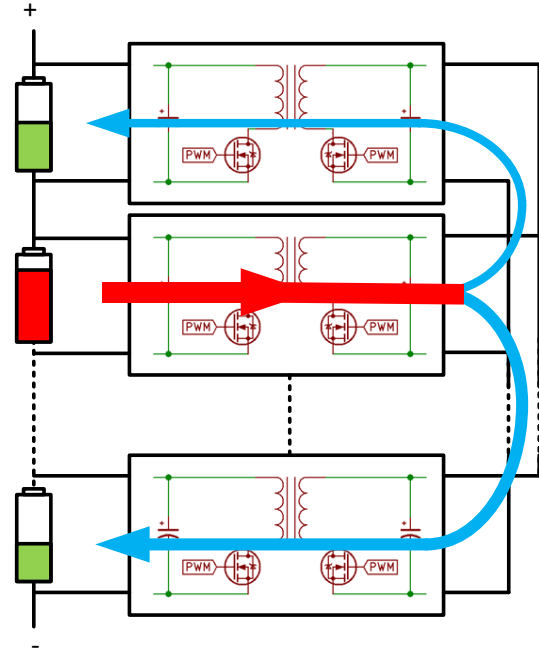
Aktif dengeleme sistemlerinden kapasitör yönteminde, bir hücreden diğerine yük aktarımı söz konusudur. Bu yöntemin dengeleme hızı diğer aktif dengeleme yöntemlerine göre düşüktür. Endüktans yönteminde, şarj seviyesi yüksek olan hücrelerden alınan enerji bir endüktansta depolanarak düşük seviyeli hücelere aktarılır. Endüktans yöntemi karmaşık bir yapıya sahiptir.



Şekil 2. Pasif ve aktif dengeleme sistemlerinde hücrelerin durumu (Condition of cells in passive and active balancing systems)

Transformatör yöntemi, endüktans yöntemine benzer bir yapıda olmakla birlikte endüktans yönteminden daha verimlidir. Dönüştürücü temelli aktif dengeleme sistemlerinde ise şarj seviyesi yüksek olan hücreden alınan enerji DC-DC dönüştürücüler yardımıyla düşük şarj seviyeli hücelere aktarılmaktadır (Şekil 3). Batarya paketindeki hücre sayısı arttıkça, kapasitör, endüktans ve transformator yöntemlerinin topolojisi ve kontrolü zorlaşır [8]. Dönüştürücü yöntemi çok sayıda hücre içeren batarya paketleri için daha kolay uygulanabilen ve yüksek dengeleme hızı sağlayan bir yöntemdir.

Bu çalışmada elektrikli taşıt batarya aktif dengeleme sistemleri için çift yönlü flyback dönüştürücü tasarımı yapılmıştır. Geliştirilen sistem Lityum iyon hücreler için tasarlanmıştır. Bununla birlikte farklı batarya türleri için de uygulanabilir yapıdadır. Dönüştürücü 3000 mAh kapasiteli 18650 lityum iyon hücreler için tasarlanmış olup güç 20W olarak belirlenmiştir. Hücreden deşarj yönünde çalışmada çıkış gerilimi 12V olarak, hücre şarj yönünde çalışmada ise çıkış gerilimi 4,2V olarak belirlenmiştir. Geliştirilen sistemin simülasyon ve test sonuçları ile performansı ortaya konmuştur. Geliştirilen çift yönlü flyback dönüştürücünün batarya aktif dengeleme sistemlerinde kullanılmaya uygun olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

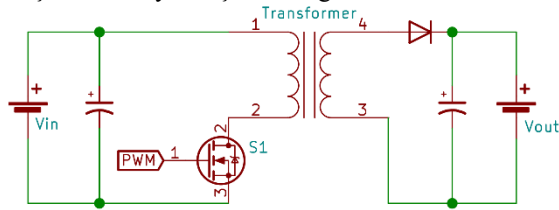


Şekil 3. Dönüştürücü temelli batarya dengeleme (Converter based battery balancing)

## 2. ÇİFT YÖNLÜ FLYBACK DÖNÜŞTÜRÜCÜ TASARIMI (DESIGN OF BI-DIRECTIONAL FLYBACK CONVERTER)

Flyback dönüştürücüler transformator sayesinde çıkıştaki gerilimi artırıp azaltması, primer ve sekonderin yalıtımlı olması, yüksek frekans transformator tasarımının basit olması, devre üzerinde az sayıda eleman bulunması ve ekonomik olmaları nedeniyle düşük ve orta güç uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [9-12]. Dönüştürücü esaslı batarya aktif dengeleme

sistemlerindeki yalıtım ihtiyacı için flyback dönüştürücüler iyi bir çözüm sağlamaktadır.



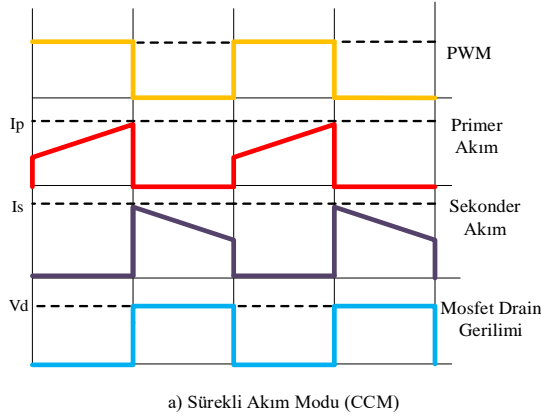
Şekil 4. Tek yönlü flyback dönüştürücü devresi (Unidirectional flyback converter circuit)

Şekil 4'te tek yönlü flyback dönüştürücünün temel devresi gösterilmiştir. Tek yönlü bir flyback dönüştürücü primer tarafından aldığı enerjiyi sekonder tarafına iletmektedir. Flyback dönüştürücülerde transformatör sargılarının polariteleri birinden akım geçerken diğerinden geçmeyecek şekilde ters yönlüdür [13-14]. Buna göre MOSFET iletime geçtiğinde giriş gerilimi primer sargısına uygulanır. Sekonder sargısı primer sargısına göre ters polariteli olduğundan devredeki diyot nedeniyle sekonder tarafında akım geçmez. MOSFET yalıtıma geçtiğinde primer tarafta depolanan enerji sekonder sargı ile diyot üzerinden çıkışa aktarılır [15-16].

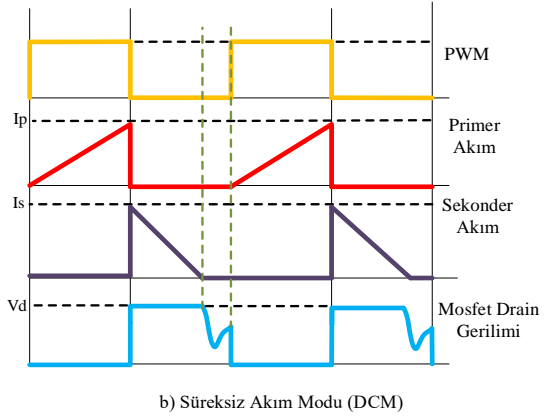


Şekil 5. PWM sinyali (PWM signal)

Flyback dönüştürücü devresinde bulunan MOSFET Şekil 5'te görülen PWM sinyalinin ton süresinde iletimde, toff süresinde ise yalıtımdadır. MOSFET'in iletim ve yalıtım



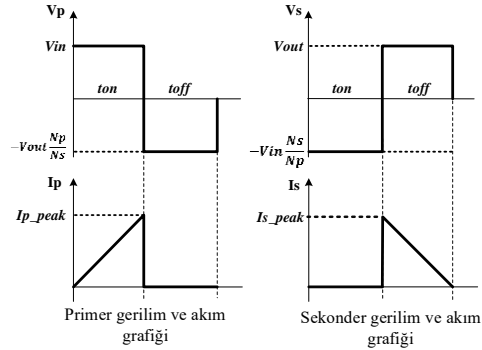
a) Sürekli Akım Modu (CCM)



b) Süreksiz Akım Modu (DCM)

Şekil 7. a) Sürekli akım (CCM) modu (Continuous current mode) ve b) Süreksiz akım (DCM) modu (Discontinuous current mode)

safhalarında devrede iki ayrı durum görülür. MOSFET iletimde iken giriş gerilimi primer sargısına uygulanır ve sabit bir gerilim olduğundan primer endüktansı üzerinde akım artmaya başlar [17-18]. Bu esnada sekonder sargılarından akım geçmez. MOSFET yalıtıma geçtiğinde ise primer sargılarda depolanan enerji sekonder sargılara iletilir ve sekonder sargılarında oluşan akım azalarak sıfıra düşer. ton ve toff sürelerinde primer ve sekonder sargılarının gerilim ve akım grafikleri Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Primer ve Sekonder gerilim-akım grafikleri (Primary and Secondary voltage-current graphs)

Şekil 6'da yer alan grafiklerden flyback dönüştürücünün giriş-çıkış bağıntısı Eşitlik 1'deki gibi elde edilebilir.

$$V_{in} \cdot t_{on} = V_{out} \frac{N_p}{N_s} \cdot t_{off}$$

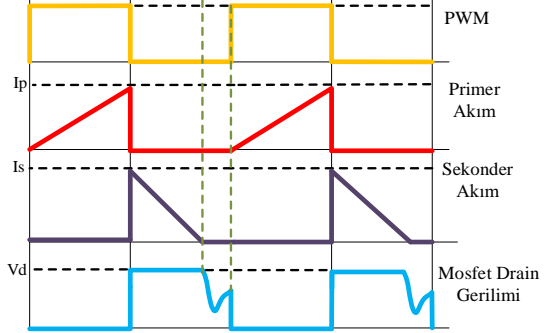
$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N_s}{N_p} \cdot \frac{t_{on}}{t_{off}} = \frac{N_s}{N_p} \cdot \frac{D \cdot T}{T - D \cdot T} \quad (1)$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N_s}{N_p} \cdot \frac{D}{1 - D}$$

Benzer şekilde dönüştürücü hesaplamalarında kayıplar ihmal edildiğinde giriş gücü ile çıkış gücü eşit kabul edilebileceğinden giriş çıkış akımları arasındaki bağıntı da Eşitlik 2'deki gibi elde edilebilir.

$$P_{out} = P_{in}$$

$$V_{out} \cdot I_{out} = V_{in} \cdot I_{in} \quad (2)$$



b) Süreksiz Akım Modu (DCM)

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{V_{in}}{V_{out}} = \frac{N_p}{N_s} \cdot \frac{1 - D}{D}$$

Diğer dönüştürücülerde olduğu gibi flyback dönüştürücülerde de sürekli akım (Continuous Current Mode-CCM) ve süreksiz akım (Discontinuous Current Mode-DCM) çalışma modları vardır [9]. MOSFET iletime geçtiğinde sürekli akım modunda primer akımı

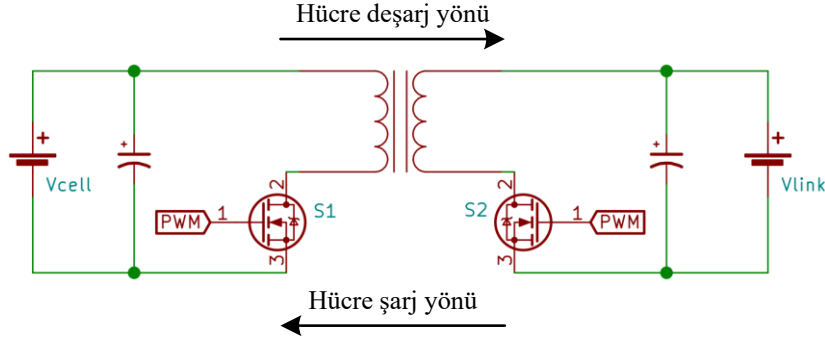
belli bir seviyeden başlarken süreksiz akım modunda ise sıfırdan yükselmeye başlar. Sürekli akım ve süreksiz akım modlarında primer - sekonder akım ve gerilimleri Şekil 7'de gösterilmiştir.

Bu çalışmada önerilen çift yönlü flyback dönüştürücü devresi Şekil 8'de gösterilmiştir. Tek yönlü flyback dönüştürücüde bulunan diyotun görevini MOSFET'lerin gövde diyotu yapmaktadır. Çift yönlü flyback

Sarım oranının belirlenmesi:

$$n = \frac{V_{in}}{V_o'} \cdot \frac{D}{1-D} \quad (3)$$

Burada,  $V_o'$  çıkış gerilimi ve sekonder tarafındaki MOSFET gövde diyotu iletim gerilimlerinin toplamıdır. Çizelge 1'de verilen tasarım parametrelerine göre sarım oranı 2,5 olarak belirlenmiştir.



Şekil 8. Çift yönlü flyback dönüştürücü devresi (Bi-directional flyback converter circuit)

dönüştürücüde primer taraftan sekonder tarafa dönüştürme işlemi sırasında S2 MOSFET'i yalıtımda tutularak S1 MOSFET'ine PWM kontrolü yapılmakta, sekonder taraftan primer tarafa dönüştürme sırasında ise S1 MOSFET'i yalıtımda tutularak S2 MOSFET'ine PWM kontrolü yapılmaktadır [19].

Flyback dönüştürücü transformatörünün tasarımında ilk olarak nüve tipi ve boyutu seçilmektedir. Nüve boyutu, sarım sayısı ve çıkış gücüne bağlıdır. Küçük boyutlu bir nüve ısı radyasyonu, kayıplar ve parazitik kapasitans açısından avantaj sağlamaktadır [20].

Flyback dönüştürücü tasarımında izlenen aşamalar aşağıda adım adım açıklanmıştır [20].

*Tasarım parametrelerinin belirlenmesi:*

Çift yönlü flyback dönüştürücü tasarım parametreleri batarya aktif dengeleme sistemi hücre şarj durumu için (12V giriş 4,2V çıkış) Çizelge 1'de görüldüğü gibi belirlenmiştir.

**Çizelge 1.** Çift yönlü flyback dönüştürücü tasarım parametreleri (Bi-directional flyback converter design parametrs)

Giriş gerilimi ( $V_{link}$ )	12,5 ± 0,5V
Çıkış gerilimi ( $V_{cell}$ )	4,2V
Tam yük akımı ( $I_{FL}$ )	5A
Anahtarlama frekansı ( $f$ )	25 kHz
İstenen görev döngüsü ( $D$ )	0,5
Maksimum akım dalgalanması ( $\Delta I_{pp}$ )	2A
Kısa devre tepe akımı ( $I_{SCp}$ )	8A
Sekonder sargı endüktansı ( $L_s$ )	21µH
Nüve	ETD29

*Nüve maksimum akı yoğunluğu salınımlarının belirlenmesi:* Akı yoğunluğu, bir transformatörün enerji iletim kapasitesini belirler. Yüksek akı yoğunluğu, transformatörün iletebileceği gücün artmasını sağlar ancak çok yüksek akı yoğunluğu güç kayıplarının önemli oranda artmasına yol açar. Maksimum akı yoğunluğunun 300 mT olarak seçilmesi genel bir yaklaşımdır [20-21].

$$\Delta B_{max} = B_{max} \cdot \frac{\Delta I_p}{I_{SCpk}} \quad (4)$$

Maksimum akı yoğunluğu salınımları 75 mT olarak belirlenmiştir.

*Sekonder ve primer sarım sayılarının belirlenmesi:*

$$N = \frac{L \cdot \Delta I_{pp}}{\Delta B_{max} \cdot A_e} \cdot 10^{-2} \quad (5)$$

Burada,  $A_e$ , flyback transformatörü nüve kesit alanıdır.

Sekonder sarım sayısı 7,37 olarak hesaplanmış ve 7 olarak belirlenmiştir.

$$N_p = n \cdot N_s \quad (6)$$

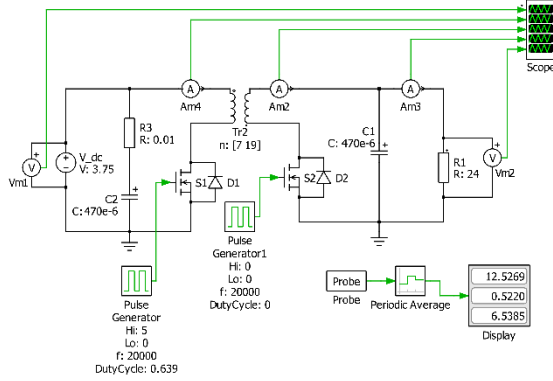
Primer sarım sayısı Eşitlik 6 yardımıyla 19,16 olarak hesaplanmış ve 19 olarak belirlenmiştir.

Hücre şarj durumu için flyback transformatörü hesaplamaları yapıldıktan sonra deşarj durumuna göre hesaplamalar yapılarak transformatörün uygunluğu belirlenmiştir. Transformatör 1 mm çapında emaye kaplı bakır tel ile sarılmış, primer ve sekonder sargı endüktansları sırasıyla 21 µH ve 114 µH olarak ölçülmüştür.

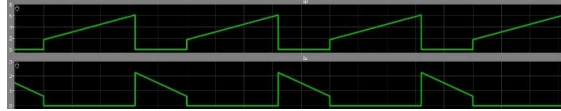
### 3. SİMÜLASYON VE TEST SONUÇLARI (SIMULATION AND TEST RESULTS)

Çift yönlü flyback dönüştürücü devresinin simülasyonu PLECS güç elektroniği simülasyon yazılımında yapılmıştır. Şekil 9'da dönüştürücünün hücre deşarj

yönünde simülasyon devresi, Şekil 10'da ise akım grafikleri görülmektedir.

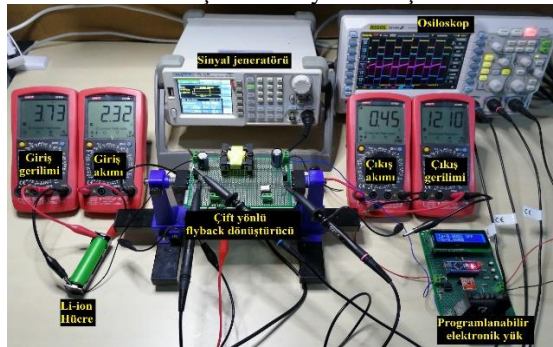


Şekil 9. Simülasyon devresi (Simulation circuit)



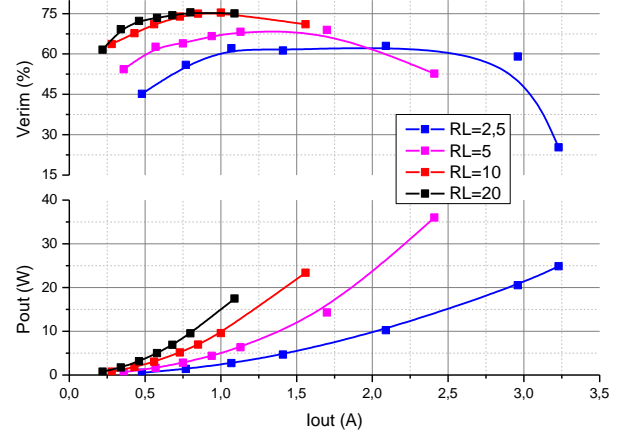
Şekil 10. Simülasyon akım grafikleri (Simulation current graphs)

Geliştirilen çift yönlü flyback dönüştürücünün her iki yönde (hücre şarj ve deşarj yönünde) testleri sabit yük ve sabit çıkış gerilim değerleri için farklı görev döngüsü oranlarında yapılmıştır. Şekil 11'de test düzeneği görülmektedir. Testlerde Sony/Murata VTC6 3000 mAh lityum iyon hücre kullanılmıştır. MOSFET gate sürücüleri için gerekli PWM sinyalleri bir sinyal jeneratöründen sağlanmıştır. Dönüştürücünün her iki yönde testi sırasında çıkış akımının sabit tutulabilmesi amacıyla programlanabilir bir elektronik yük devresi kullanılmıştır. Testler sırasında osiloskop yardımıyla PWM sinyali, MOSFET drain gerilim sinyali, primer ve sekonder akımları ölçülerek kaydedilmiştir.



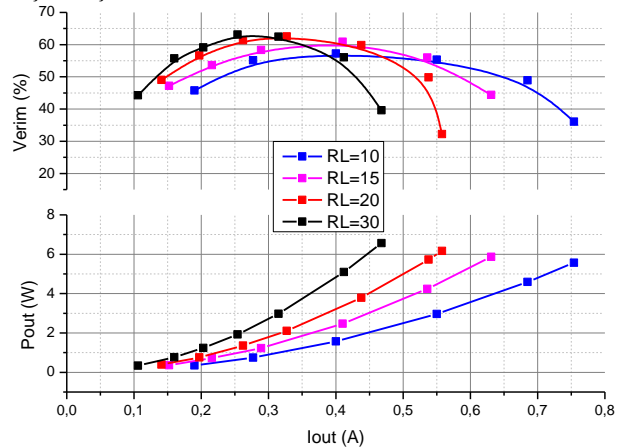
Şekil 11. Test düzeneği (Test setup)

Hücre şarj yönü (sekonderden primere) testlerinde dönüştürücü çıkışına 2,5Ω, 5Ω, 10Ω ve 15Ω değerinde sabit yük dirençleri bağlanarak farklı görev döngülerinde yapılan testlerin sonuçları Şekil 12'de gösterilmiştir. 2,5Ω, 5Ω, 10Ω ve 15Ω'luk yük dirençleri için en yüksek verimler sırasıyla %62,96, %68,92, %75,33, %75,45 olarak ölçülmüştür. En yüksek verim değerleri için çıkış güçleri sırasıyla 10,24W, 14,3W, 9,56W ve 9,54W olarak ölçülmüştür.



Şekil 12. Hücre şarj yönü sabit yük test sonuçları (Cell charge direction constant load test results)

Hücre deşarj yönü (primerden sekondere) testlerinde dönüştürücü çıkışına 10Ω, 15Ω, 20Ω ve 30Ω değerinde sabit yük dirençleri bağlanarak farklı görev döngülerinde yapılan testlerin sonuçları Şekil 13'te gösterilmiştir. 10Ω, 15Ω, 20Ω ve 30Ω'luk yük dirençleri için en yüksek verimler sırasıyla %57,2, %60,91, %62,56, %63,15 olarak ölçülmüştür. En yüksek verim değerleri için çıkış güçleri sırasıyla 1,57W, 2,47W, 2,11W ve 1,93W olarak ölçülmüştür.



Şekil 13. Hücre deşarj yönü sabit yük test sonuçları (Cell discharge direction constant load test results)

Dönüştürücünün batarya dengeleme sisteminde kullanımı sırasında şarj seviyesi yüksek olan hücreden alınan gerilimin 12V'a yükseltilmesi, 12V'tan da şarj seviyesi düşük olan hücre gerilimine indirilmesi hedeflendiğinden dönüştürücünün her iki yönde sabit çıkış gerilimi ile testler yapılmıştır. Testler sırasında çıkış gerilimleri deşarj yönünde 12V, şarj yönünde 4,2V olarak belirlenmiştir. Hücre şarj yönü testleri sırasında elde edilen sonuçlar Çizelge 2'de, hücre deşarj yönü testleri sırasında elde edilen sonuçlar ise Çizelge 3'te verilmiştir.

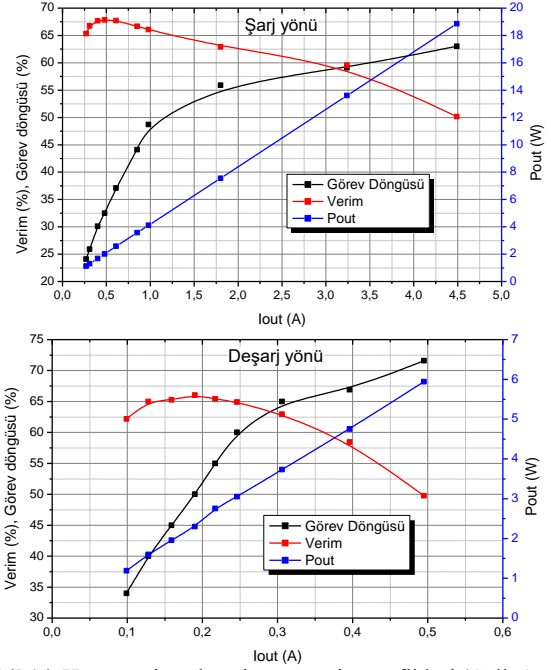
**Çizelge 2.** Hücre şarj yönü test sonuçları (Cell charge direction test result)

Görev Döngüsü (D)	Giriş Gerilimi (V)	Giriş Akımı (I)	Çıkış Gerilimi (V)	Çıkış Akımı (I)	Verim (%)
0,241	12,31	0,141	4,2	0,27	65,33
0,259	12,3	0,159	4,21	0,31	66,73
0,301	12,29	0,202	4,2	0,4	67,67
0,325	12,28	0,242	4,2	0,48	67,84
0,371	12,26	0,31	4,22	0,61	67,73
0,441	12,25	0,438	4,21	0,85	66,69
0,487	12,24	0,509	4,2	0,98	66,07
0,559	12,23	0,98	4,19	1,8	62,93
0,591	12	1,904	4,2	3,24	59,56
0,63	11,8	3,186	4,2	4,49	50,16

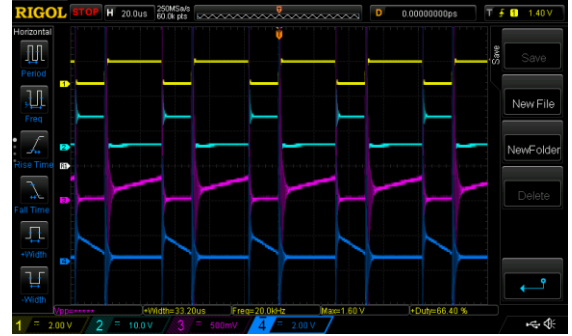
**Çizelge 3.** Hücre deşarj yönü test sonuçları (Cell discharge direction test result)

Görev Döngüsü (D)	Giriş Gerilimi (V)	Giriş Akımı (I)	Çıkış Gerilimi (V)	Çıkış Akımı (I)	Verim (%)
0,34	3,68	0,52	12,02	0,099	62,18
0,40	3,62	0,68	12,5	0,128	64,99
0,45	3,61	0,83	12,3	0,159	65,27
0,50	3,59	0,97	12,1	0,19	66,02
0,55	3,57	1,18	12,7	0,217	65,42
0,60	3,56	1,32	12,4	0,246	64,91
0,65	3,53	1,68	12,2	0,306	62,95
0,67	3,55	2,29	12	0,396	58,45
0,71	3,47	3,44	12	0,495	49,76

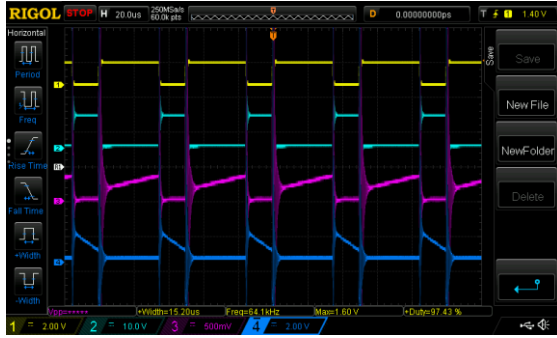
Şekil 14'te hücre şarj ve deşarj yönü için sabit çıkış geriliminde farklı akım değerlerine bağlı elde edilen verim, güç ve görev döngüsü grafikleri gösterilmiştir. Hücre şarj yönü testlerinde elde edilen verimlerin hücre deşarj yönü testi verimlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumun dönüştürücünün hücre şarj yönünde testlerinde giriş akımının hücre deşarj yönü giriş akımından daha düşük olmasından ve buna bağlı olarak iletim kayıplarının daha düşük olmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Hücre şarj yönü testlerinde dönüştürücü çıkış akımı kademeli olarak artırılmış, en yüksek verim %32,5 görev döngüsünde %67,84 olarak belirlenmiştir. Hücre deşarj testlerinde en yüksek verim değeri %50 görev döngüsünde %66,02 olarak belirlenmiştir. Elde edilen verim değerlerinin [6], [22] ve [23] numaralı kaynaklarda belirtilen benzer çalışmalarda verilen sonuçlara yakın olduğu görülmektedir.

**Şekil 14.** Hücre şarj ve deşarj yönü verim grafikleri (Cell charge and discharge directions efficiency graphs)

Şekil 15'de hücre deşarj yönü %58,2 görev döngüsü testi osiloskop ekran görüntüsü, Şekil 16'da ise hücre şarj yönü %53,5 görev döngüsü testi osiloskop ekran görüntüsü verilmiştir. Osiloskop görüntülerinde sarı sinyal PWM sinyali, turkuaz sinyal MOSFET drain gerilimi, pembe sinyal primer akımı ve mavi sinyal sekonder akımıdır. Primer ve sekonder akım grafiklerinden dönüştürücünün sürekli akım modunda çalıştığı görülmektedir.

**Şekil 15.** Hücre deşarj yönü %58,2 görev döngüsü osiloskop ekran görüntüsü (58,2% duty cycle cell discharge test oscilloscope screenshot)





Şekil 16. Hücre şarj yönü %53,5 görev döngüsü osiloskop ekran görüntüsü (53,5% duty cycle cell charge test oscilloscope screenshot)

#### 4.SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada dönüştürücü esaslı aktif dengeleme sistemlerinin bir çeşidi olan çift yönlü flyback dönüştürücü tasarımı, simülasyon ve uygulaması gerçekleştirilmiş, sonuçlar grafik ve çizelgeler halinde verilmiştir. Flyback dönüştürücüler izolasyonlu yapılabilmeleri, devre yapısında büyük bir değişikliğe gidilmesine gerek kalmadan çift yönlü çalıştırılabilmesi nedeniyle batarya aktif dengeleme sistemlerinde kullanılmaya uygun yapıdadır. Geliştirilen sistem lityum iyon bataryalar için yapılmış olup diğer batarya türleri içinde uygulanabilir yapıdadır. Ayrıca simülasyon ve test sonuçları sistemin sürekli akım modunda çalıştığını göstermektedir. Sabit çıkış gerilimi hücre şarj ve deşarj testi sonuçlarına göre en yüksek verim değerleri sırasıyla %32,5 görev döngüsünde %67,84 ve %50 görev döngüsünde %66,02 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar tasarımı yapılan çift yönlü flyback dönüştürücünün batarya aktif dengeleme sistemlerinde kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır.

#### ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

#### YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

**Fatih ŞAHİN:** Deney sonuçlarının analizi, makalenin yazılması

**Elif KILINÇ:** Deneysel çalışmalar, makalenin yazılması.

#### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur..

#### SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu makalede kullanılan simgeler ve kısaltmalar açıklamaları ile aşağıda sunulmuştur.

#### Simgeler

**T**

**$t_{on}$**

**$t_{off}$**

**$f$**

**D**

**$V_{in}$**

**$V_{out}$**

**$I_{in}$**

**$I_{out}$**

**$I_p$**

**$I_{p\_peak}$**

**$I_s$**

**$I_{s\_peak}$**

**L**

**n**

**$N_p$**

**$N_s$**

**$\Delta B_{max}$**

**$B_{max}$**

**$\Delta I_{pp}$**

**$I_{SCpk}$**

**$A_e$**

**Kısaltmalar**

**PWM**

**GD**

**mT**

**$\mu H$**

**mAh**

#### Açıklamalar

Periyot

MOSFET'in iletimde kalma süresi

MOSFET'in yalıtımda kalma süresi

Frekans

Görev döngüsü

Giriş gerilimi

Çıkış gerilimi

Giriş akımı

Çıkış akımı

Primer akımı

Primer tepe akımı

Sekonder akımı

Sekonder tepe akımı

Endüktans

Transformatör sarım oranı

Primer sarım sayısı

Sekonder sarım sayısı

Maksimum akı yoğunluğu

salınımı

Maksimum akı yoğunluğu

Maksimum akım dalgalanması

Kısa devre tepe akımı

Transformatörün nüve kesi alanı

**Açıklamalar**

Darbe genişlik modülasyonu

(Pulse Width Modulation)

Görev döngüsü (Duty Cycle)

Militesla

Mikrohenry

Miliamper saat

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Sarnkurt T. and Balıkcı A., "Tam elektrikli araçlar için özgün bir enerji yönetim sistemi uygulaması", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 2: 323–333, (2017).
- [2] Daowd M., Omar N., Bossche P., and Van Mierlo J., "Passive and active battery balancing comparison based on MATLAB simulation," *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Chicago-USA, 1–7, (2011).
- [3] Tian L., Hong M., He Z., and Gao M., "Active Battery Balancing Circuit Based on Optimized Flyback Converter for Large Lithium-ion Battery Packs," *IEEE 4th International Conference on Control Science and Systems Engineering*, Wuhan-China, 212–216, (2018).
- [4] Wang Y., Wei X., Fang Q., and Zheng B., "Bi-Directional Equalization System for Li-Ion Battery Pack Based on Fly-back Transformer," *World Congress Experience*, Shanghai-China,(2018).
- [5] Bagul Y., Ingale M., Wani K., and Patil S., "Development of Battery Management System for Hybrid Electric Two Wheeler," *World Congress Experience*, Shanghai-China, (2018).
- [6] Nafiz S. and Alcı M. and Yıldız M.N., "Şarj Dengeleme Sistemleri İçin Çift Yönlü Flyback Devresi Tasarımı.", *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı*, Malatya, 472-476, (2013).
- [7] Salem T.E., Tipton W., Porschet D., "Fabrication and Practical Considerations of a Flyback Transformer for Use in High Pulsed-Power Applications," *Proceeding Thirty-Eighth Southeast. Symp.*, Cookeville-TN-USA, 406-409, (2006).

- [8] Lin Y., Hsieh Y., Wang J., Lin J., Chiu H. and Lin K., "Modular Battery Balancing Circuit Based on Bidirectional Flyback Converter," *Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification.*, Singapore, 1-4, (2016).
- [9] Mohammed A.A., and Nafie S.M., "Flyback converter design for low power application," in *2015 International Conference on Computing, Control, Networking, Electronics and Embedded Systems Engineering*, Khartoum-Sudan, 447–450, (2015).
- [10] Dindar. S. and İres. İ., "Investigation of Output Voltages Depending On Load In Multi Output Flyback Converter," *Politeknik*, 21: 693–700, (2018).
- [11] Algül S., "Yüksek Güçlü Flyback Dönüştürücü," *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2008).
- [12] Coruh N., Urgan S., and Erfidan T., "Design and implementation of flyback converters," *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Taichung, Taiwan, 1189–1193, (2010).
- [13] Taneri M.C., Genc N., and Mamizadeh A., "Analyzing and Comparing of Variable and Constant Switching Frequency Flyback DC-DC Converter," *4th International Conference on Power Electronics and their Applications*, Elazığ, 1–5, (2019).
- [14] Köseni H. and Yıldız A.B., "Geri dönüşlü DC-DC dönüştürücünün geliştirilmiş düğüm denklemleri ile analizi," *Politeknik*, 22:1, 179–184, (2019).
- [15] Martin M.B., "A Design of 3.3W Closed Loop Flyback Converter with 3.3V, 1A Output for Low Voltage Applications," *IEEE 8th Conference on Systems, Process and Control*, Melaka- Malaysia, 86–90, (2020).
- [16] Das G., De M., and Mandal K.K., "Design of Flyback Converter by Using an Ideal Switch and a MOSFET Switch," *IEEE Electron Devices Kolkata Conference*, Kolkata- India, 110–114, (2018).
- [17] Fırat F., Yaren T., Süel V., "Gerçek Zamanlı FLYBACK Dönüştürücü Tasarımı ve Kontrolü," *Otomatik Kontrol Ulus. Toplantısı*, İstanbul, (2017).
- [18] T. Ho, M. Chen, C. Lin, and C. Chang, "The design of a flyback converter based on simulation," in *2011 International Conference on Electronics, Communications and Control*, Ningbo- China, 3996–3999, (2011).
- [19] G. Chu, H. Wen, L. Jiang, Y. Hu, and X. Li, "Bidirectional flyback based isolated-port submodule differential power processing optimizer for photovoltaic applications," *Sol. Energy*, 158: 929–940, (2017).
- [20] Dixon H., "Magnetics Design Handbook", *Texas Instruments Incorporated* (2011).
- [21] Picard J., "Under the hood of flyback SMPS design," *Texas Instruments Power Supply Des. Semin.*, (2010).
- [22] Conway T., "An Isolated Active Balancing and Monitoring System for Lithium Ion Battery Stacks Utilizing a Single Transformer Per Cell" in *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36:3727-3734, (2021).
- [23] Stefanov D. D., Todorova T.P. and Valchev V.C., "A Flyback Converter Based System for an Active Charge Balancing of Li-Ion Battery Packs," 2018 IEEE XXVII International Scientific Conference Electronics, *Sozopol-Bulgaria*, 1-4, (2018).