

# Çok Çıkışlı Flyback Dönüştürücünün Tasarımı ve Meta-Sezgisel Yöntemlerle Verim Optimizasyonu

## Design of Multi-Output Flyback Converter and Efficiency Optimization Using Meta-Heuristics

Ömer Said Aydın<sup>1</sup>, Abdulsamed Lordoğlu<sup>1,2</sup>, Mehmet Onur Gülbahçe<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektrik Mühendisliği Bölümü  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
aydin18@itu.edu.tr, ogulbahce@itu.edu.tr

<sup>2</sup>Enerji Enstitüsü  
İstanbul Teknik Üniversitesi  
lordoglu17@itu.edu.tr

### Özet

Flyback dönüştürücüler hacim ve maliyet bakımından üstün olması, giriş ve çıkış arasında elektriksel yalıtım sağlaması, özellikle düşük ve orta seviye güç değerlerinde yüksek verim sağlaması ve birden fazla çıkış alınabilmesi nedeniyle güç elektroniği sistemlerinde tercih edilmektedir. Bu çalışmada doğadan ilham alan optimizasyon yöntemlerinden parçacık sürüsü optimizasyon algoritması kullanılarak verim kısıtı altında, çok çıkışlı flyback dönüştürücü tasarımı ve optimizasyon algoritması önerilmiştir. Önerilen algoritmanın başarımını test etmek için durum çalışması olarak, 230V/50Hz alternatif akım şebekesinden beslenen, 4 çıkışlı ve her bir çıkışı 12V/1A gerilim ve akım değerlerine sahip toplam 48W gücünde flyback dönüştürücü tasarlanmış ve optimize edilmiştir. Dönüştürücüdeki transformator tasarımı ile anahtar ve diyotların seçimi yine var olan veri tabanından önerilen optimizasyon algoritması aracılığıyla yapılmıştır.

### Abstract

Flyback converters are preferred in power electronics systems because they are advantageous in terms of volume and cost, provide electrical isolation between input and output, provide high efficiency especially at low and medium power values, and can have more than one output. In this study, using the particle swarm optimization which is one of the nature-inspired optimization methods, a multi-output flyback converter design and optimization algorithm is proposed under efficiency constraint. As a case study to test the performance of the proposed algorithm, a flyback converter with a total power of 48W, fed from 230V/50Hz grid, with 4 outputs and 12V/1A voltage and current values at each output, was designed and optimized. The transformer design in the converter and the selection of switches and diodes were made through the proposed optimization algorithm from the existing database.

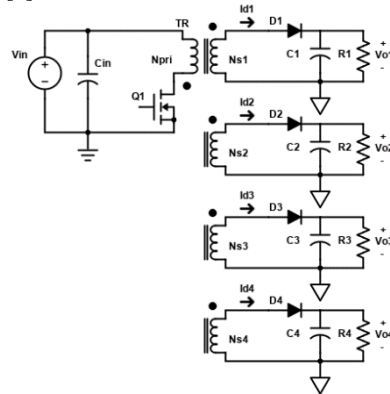
### 1. Giriş

Güç elektroniği uygulamalarındaki iç ihtiyaç beslemeleri için en çok tercih edilen topolojilerden biri flyback dönüştürücülerdir. Girişindeki gerilim değerinin yükseltilerek veya azaltılarak besleme olanağı sağlayabilen flyback dönüştürücüler hacim ve

maliyet bakımından diğer dönüştürücülere göre büyük üstünlüklere sahiptir. Tasarımında diğer dönüştürücülere kıyasla daha az eleman ile üretilebilen flyback dönüştürücüler devrede bulunan transformator sayesinde elektriksel yalıtım imkânı da sağlamaktadır. Buna ek olarak daha az bileşen gereksinimi nedeniyle devre hacminde de önemli ölçüde azalma sağlanmaktadır [1].

Flyback dönüştürücüdeki transformator, güç anahtarı iletimde olduğu durumda enerjiyi depolar, anahtar kesime gittiğinde depolanan enerjiyi yükte aktarır. Bu durum diğer topolojilerden farklı olarak enerjinin depolanması için ek bir endüktans ihtiyacını ortadan kaldırır. Böylece topolojiyi daha basit ve ekonomik hale getirir. Kullanılan transformator sayesinde flyback dönüştürücülerden kolayca birden fazla çıkış alınabilme olanağı bulunmaktadır. Şekil 1'de çok çıkışlı bir flyback dönüştürücü topolojisi verilmiştir.

Literatürde çok çıkışlı flyback dönüştürücü ile alakalı pek çok tasarım ve analiz yaklaşımları mevcuttur. En güncel çalışmalarda motor sürücü ve LED sürücü uygulamaları için kullanılan çok çıkışlı flyback dönüştürücüye ait analiz, modelleme ve benzetim yaklaşımı ele alınmaktadır [2,3]. Bunlara ek olarak iki çıkışlı flyback dönüştürücünün çıkış tarafında senkron anahtarlar kullanılarak sıfır gerilimde anahtarlama (SGA, ZVS) imkânı sağlayan yüksek verimli dönüştürücülerin yer aldığı çalışmalar da mevcuttur [4].



Şekil 1: Çok çıkışlı flyback dönüştürücü topolojisi.

Günümüzde güç elektroniği araştırmalarının eğilimi yeni topolojiler keşfetmek değil, optimizasyon algoritmalarının üstünlüğünü araç olarak kullanarak mevcut topolojileri daha yüksek güç yoğunluğuna ve verime çıkarabilmektedir [5]. Literatürde doğadan ilham alan meta-sezgisel optimizasyon algoritmalarının yüksek frekanslı transformatörlerin ve endüktansların tasarımı ve optimizasyonunda kullanıldığı pek çok çalışma mevcuttur [6]. Transformator hacmi ve ağırlığı dikkate alınarak en uygun frekans seçiminden [7]'de bahsedilmiş ve yüksek frekanslı transformatörlerin genetik algoritmalar kullanılarak çok amaçlı optimizasyonu [8]'da gerçekleştirilmiştir. Genişletilmiş karınca kolonisi optimizasyon algoritması ile düşürücü (buck) dönüştürücü tasarımı ve optimizasyonu ele alınmaktadır [9]. Elde edilen tasarım ile başka optimizasyon algoritması uygulanarak yapılan tasarım verileri karşılaştırılmıştır. [10]'da flyback dönüştürücünün genetik algoritma kullanılarak maliyet optimizasyonu yapılmıştır. Güç elektroniğinde çok amaçlı meta-sezgisel optimizasyonlar hakkında birçok çalışma olmasına rağmen flyback dönüştürücülerin tasarım optimizasyonu konusunda çalışmalar oldukça sınırlıdır.

Bu çalışmada 230V/50Hz alternatif gerilim şebekesinden beslenen, dört çıkışlı ve toplam 48W güce sahip bir flyback dönüştürücünün tasarımı ve parçacık sürüsü yöntemi ile verim optimizasyonu yapılmıştır. Dönüştürücünün her bir çıkışı 12V/1A doğru gerilim ve akım değerlerindedir. Tasarlanan çok çıkışlı flyback dönüştürücüdeki bobin, transformator, yarı iletken anahtar ve diyot elemanları için veri tabanına dayalı verim kısıtı altında sistematik bir tasarım yöntemi önerilmiştir. Elde edilen sonuçların benzetimleri yapılmış ve durumları değerlendirilmiştir.

## 2. Çok Çıkışlı Flyback Dönüştürücünün Tasarımı ve Optimizasyonu

Flyback dönüştürücüler için tasarım optimizasyonu yapılırken verim, güç kaybı, hacim ve maliyet gibi bileşenleri içeren amaç fonksiyonları sayesinde transformatorün ve endüktansın nüve boyutları, sarım sayısı, iletken boyutları, yarı iletken elemanların iletimdeki direnç değerleri belirlenebilir. Bu çalışmada belirlenen giriş ve çıkış büyüklükleri için sadece verim kısıtı altında bir tasarım optimizasyonu yapılmıştır.

### 2.1. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO)

Parçacık sürüsü optimizasyonu, sürü halinde yaşayan hayvanların besin arayışını taklit eden optimizasyon yaklaşımdır. Optimizasyon başlangıcında parçacık sayısı ve en yüksek izin verilen yineleme sayıları belirlenir. Optimize edilecek olan fonksiyon kullanılarak parçacıkların ilk değerlerine ait sonuçlar hesaplanır. İlgili yenilemedeki en uygun değer  $p_{best}$  olarak adlandırılır ve optimizasyona ait en uygun değer ise  $g_{best}$  olarak isimlendirilir. Her yenilemede  $p_{best}$  ve  $g_{best}$  değerleri güncellenerek optimum çözüme ulaşılmaya çalışılır. Bir yenileme tamamlandığında parçacıklara ait değişim hızları hesaplanarak, her parçacığın yeni konumu belirlenir. Parçacıklara ait yeni konumlar ile yeni bir yenilemeye başlanır. En yüksek yenileme sayısına ulaşıncaya kadar yenilemeye devam edilir. Eş. 1, Eş. 2 ve Eş. 3'te verilen PSO denklemlerinde;  $i$  parçacık sayısını,  $x$  parçacık değerini,  $v$  parçacığın değişim hızını,  $c_1$  ile  $c_2$  sabit değerleri,  $rand_1$  ile  $rand_2$  ise rastgele üretilen değerleri göstermektedir [14].

$$v_{i+1} = v_i + a + b \quad (1)$$

$$a = [c_1 \times rand_1 \times (p_{best} - x)] \quad (2)$$

$$b = [c_2 \times rand_2 \times (g_{best} - x)] \quad (3)$$

Eş. 1 ile parçacık kendi en iyi çözümine ve küresel en iyi çözüme yönelirken parçacığı da çözümlen en iyi parçacık ile kendi en iyi durumunun yakınlarında aramaya zorlar.

### 2.2. Çok Çıkışlı Flyback Dönüştürücünün Tasarımı

Tasarım bölümünde, dönüştürücüde kullanılan önemli elemanların tasarım ölçütleri matematiksel denklemlerle verilerek tasarımın hangi koşullar altında yapıldığı açıklanmıştır. Parçacık sürüsü optimizasyonu yöntemiyle verime dayalı tasarım algoritması kullanılarak dönüştürücünün yüksek verimde tasarlanması sağlanmıştır. Algoritma için transformator, anahtar ve diyot elemanlarına ait veri tabanı oluşturularak en uygun tasarım elde edilmiştir. Tasarımda kullanılacak olan algoritmaya ait akış diyagramı Şekil 2'de verilmektedir.

#### 2.2.1. Transformator Tasarımı

##### a) Endüktans ve Akım Değerlerinin Hesaplanması

Flyback dönüştürücü için sürekli iletim durumuna (CCM) ait en küçük endüktans ile giriş ve çıkış akımlarına ait değerler aşağıdaki denklemler kullanılarak bulunmaktadır. Denklemlerde;  $D$  darbe doluluk oranını,  $f_s$  anahtarlama frekansını (Hz),  $P_{çıkış}$  çıkış gücünü (W),  $V_{giriş\_pik}$  giriş geriliminin pik değerini (V),  $V_{çıkış\_1}$  birinci çıkışa ait ortalama gerilim değerini (V),  $P_{çıkış\_1}$  birinci çıkışa ait güç değerini (W) ve  $a$  transformator sarım sayıları oranını göstermektedir. Eş. 4 ile verilen denklem dönüştürücünün sürekli iletim durumunda çalışması için gerekli olan en küçük mıknatıslanma endüktansını vermektedir [12].

$$L_{min} = \frac{v_{giriş\_pik}^2 \times D^2}{P_{çıkış} \times 2 \times f_s} \quad (4)$$

$$I_{1\_ort} = \frac{P_{çıkış}}{D \times v_{giriş\_pik}} \quad (5)$$

Eş. 5'te birincil akımın ortalama değeri ( $I_{1\_ort}$ ) verilmektedir.

$$\Delta I_1 = \frac{v_{giriş\_pik} \times D}{L \times f_s} \quad (6)$$

Eş. 6'daki denklem ile birincil akımın dalgalanma değeri ( $\Delta I_1$ ) hesaplanmaktadır.

$$I_{1\_pik} = I_{1\_ort} + \frac{\Delta I_1}{2} \quad (7)$$

Eş. 7'de birincil akımın tepe değeri ( $I_{1\_pik}$ ) verilmektedir.

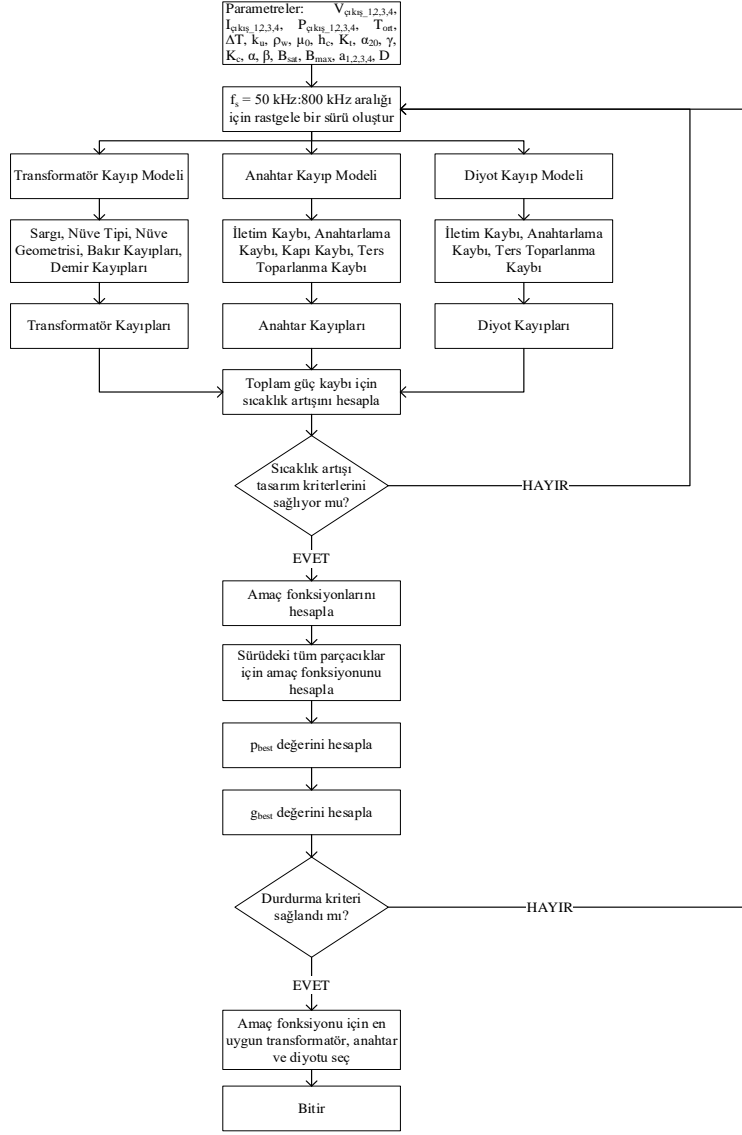
$$y_1 = \frac{\Delta I_1}{I_{1\_pik}} \quad (8)$$

$$K_i = \sqrt{D \times \left( 1 - y_1 + \left( \frac{y_1^2}{3} \right) \right)} \quad (9)$$

Eş. 9'da birincil akımın dalgalılık faktörü ( $K_{i\_1}$ ) verilmektedir.

$$I_{1\_eff} = K_i \times I_{1\_pik} \quad (10)$$

Eş. 10 ile birincil akımın efektif değeri ( $I_{1\_eff}$ ) verilmektedir.



Şekil 2: PSO algoritması akış diyagramı.

$$I_{2_{\text{ort}}} = \frac{P_{\text{çıkış1}}}{(1-D) \times v_{\text{çıkış1}}} \quad (11)$$

Eş. 11 ile ikincil akımın ortalama değeri ( $I_{2_{\text{ort}}}$ ) verilmektedir.

$$\Delta I_2 = a \times \Delta I_1 \quad (12)$$

Eş. 12 ile ikincil akımın dalgalanma değeri ( $\Delta I_2$ ) verilmektedir.

$$I_{2_{\text{pik}}} = I_{2_{\text{ort}}} + \frac{\Delta I_2}{2} \quad (13)$$

Eş. 13 ile ikincil akımın tepe değeri ( $I_{2_{\text{pik}}}$ ) verilmektedir.

$$y_2 = \frac{\Delta I_2}{I_{2_{\text{pik}}}} \quad (14)$$

$$K_{i_2} = \sqrt{(1-D) \times \left(1 - y_2 + \left(\frac{y_2^2}{3}\right)\right)} \quad (15)$$

Eş. 15'de ikincil akımın dalgalılık faktörü ( $K_{i_2}$ ) verilmektedir.

$$I_{2_{\text{eff}}} = K_{i_2} \times I_{2_{\text{pik}}} \quad (16)$$

Eş. 16 ile ikincil akımın efektif değeri ( $I_{2_{\text{eff}}}$ ) verilmektedir.

Çok çıkışlı flyback dönüştürücüsündeki diğer çıkışlara ait akım ifadeleri sekonder akım için verilen ifadelerle aynı olmaktadır.

## b) Transformatör Kayıplarının Hesaplanması

Uygun bir transformatör tasarımında, tasarım başlangıcında sınır koşulu olarak belirlenen sıcaklık artışı ve bu sıcaklık artışına neden olan kayıp değeri aşılmamalıdır. Eş. 17, Eş. 18, Eş. 19 ve Eş. 20 ile transformatörün bakır ve çekirdek kayıplarına ait denklemler verilmektedir. Burada;  $P_{\text{cu}}$  transformatörün bakır kaybını (W), MLT ortalama bir sarım uzunluğunu (m), N sarım sayısını,  $\rho$  öz direnç değerini ( $\Omega/\text{m}$ ),  $\alpha$  ısıl katsayıyı ( $1/^\circ\text{C}$ ),  $T_{\text{max}}$  maksimum sıcaklığı ( $^\circ\text{C}$ ),  $P_{\text{Fe}}$  transformatörün çekirdek kaybını (W),  $K_c$ ,  $\alpha$  ve  $\beta$  Steinmetz katsayılarını ifade etmektedir.

$$P_{\text{cu}} = a \times b \times I^2 \quad (17)$$

$$a = MLT \times N \times \rho_{20} \quad (18)$$

$$b = [1 + \alpha_{20} \times (T_{\max} - 20^\circ\text{C})] \quad (19)$$

$$P_{fe} = K_c \times f^\alpha \times \left(\frac{\Delta B}{2}\right)^\beta \quad (20)$$

Denklemlerde;  $T_{\max}$  maksimum sıcaklığı ( $^\circ\text{C}$ ),  $\rho_{20}$   $20^\circ\text{C}$ 'deki öz direnç değerini ( $\Omega/\text{m}$ ),  $\alpha_{20}$   $20^\circ\text{C}$ 'deki sıcaklık sabitini ( $1/^\circ\text{C}$ ),  $\Delta B$  değeri tepeden tepeye akı yoğunluğu dalgalanmasını (T) ifade etmektedir. Denklemdaki  $K_c$ ,  $\alpha$  ve  $\beta$  terimleri nüve üreticileri tarafından verilen çekirdek kaybı grafiklerinden çıkartılarak elde edilmektedir. Sıcaklık artışına bağlı olarak güç değeri Eş. 21 ve Eş. 22 yardımıyla bulunmaktadır.

$$R_\theta = \frac{0.06}{\sqrt{V_c}} \quad (21)$$

$$P_D = \frac{\Delta T}{R_\theta} \quad (22)$$

Denklemlerde;  $R_\theta$  değeri  $^\circ\text{C}/\text{W}$  olarak ısı direnci,  $V_c$  ise  $\text{m}^3$  olarak nüve hacmini ifade etmektedir.  $P_D$  değeri  $\Delta T$  sıcaklık artışına denk gelen kayıp güç ifadesini (W) vermektedir. Eğer transformatörün toplam güç kaybı ( $P_{cu} + P_{fe}$ ),  $P_D$  değerinden küçükse tasarım uygulanabilir, eğer toplam güç kaybı ( $P_{cu} + P_{fe}$ ),  $P_D$  değerinden büyükse tasarım uygulanamaz. Başka bir tasarıma geçilir.

### 2.2.2. Anahtar Seçimi

Anahtar seçimi günümüzde güç elektroniği uygulamalarında yaygın olarak kullanılan SiC ve MOSFET anahtarlar arasında yapılmıştır. Algoritmada anahtar seçimi anahtar üzerinde meydana gelen toplam güç kayıpları referans alınarak yapılır. Anahtar güç kayıpları ise iletim kaybı, anahtarlama kaybı, kapı kaybı ve ters toparlanma kaybının toplamı olarak ifade edilebilir [14,15].

#### a) İletim Kayıpları

İletim kaybı hesaplanırken anahtarın iletim anındaki direnç değeri ( $R_{dson}$ ,  $\Omega$ ) ve anahtardan geçen akımın etkin değeri ( $I_{dseff}$ , A) kullanılmaktadır. Eş. 23'te iletim kaybının ifadesi verilmiştir.

$$P_{con} = R_{dson} \times I_{dseff}^2 \quad (23)$$

#### b) Anahtarlama Kayıpları

Eş. 24 ile anahtarlama elemanının veri dokümanındaki anahtarlama enerjisi değerleri kullanılarak anahtarlama kaybı hesaplanabilir. Eşitlikte;  $W_{sw}$ , Joule cinsinden anahtarlama enerji kaybını ve  $f_s$ , Hz cinsinden anahtarlama frekansını göstermektedir.

$$P_{sw} = W_{sw} \times f_s \quad (24)$$

Eğer anahtara ait dokümanda anahtarlama enerji kaybı verilmemişse, Eş. 25 kullanılarak yaklaşık güç kaybı bulunabilir [16]. Verilen eşitlikte  $V_{ds}$  anahtarın kesim anındaki gerilim değerini (V),  $I_{ds}$  anahtardan iletim anında geçen akımın ortalama değerini (A),  $t_r$  saniye cinsinden anahtardan geçen akımın iletme girenken meydana gelen yükselme süresini,  $t_f$  saniye cinsinden anahtardan geçen akımın kesime girerken oluşan azalma süresini

göstermektedir.

$$P_{sw} = \left(\frac{1}{2}\right) \times V_{ds} \times I_{ds} \times (t_r + t_f) \times f_s \quad (25)$$

#### c) Kapı Kayıpları

Anahtara kontrol işareti verilirken kapı bacağına bulunan parazitik kapasitelerden dolayı meydana gelen güç kaybı Eş. 26 ile hesaplanabilir. Eşitlikte  $Q_g$  anahtarın Coulomb cinsinden kapı bacağına bulunan yük değerini,  $V_{gs\_max}$  anahtarın iletme girmesi için gereken en yüksek kapı-kaynak gerilimini (V) göstermektedir.

$$P_g = Q_g \times V_{gs\_max} \times f_s = C_g \times V_{gs}^2 \times f_s \quad (26)$$

#### d) Ters Toparlanma Kayıpları

Anahtarın yarı iletken yapısı gereği üzerinde bulunan ve anahtara ters paralel bağlı olan diyottan dolayı oluşan güç kaybıdır ve Eş. 27 ile ifade edilmektedir. Verilen eşitlikte  $Q_{rr}$  Coulomb cinsinden anahtarın ters toparlanma yük değerini,  $V_{sd}$  anahtara ters paralel bağlı olan diyotun üzerindeki gerilim düşümünü (V) göstermektedir.

$$P_{rr} = \left(\frac{1}{2}\right) \times Q_{rr} \times V_{sd} \times f_s \quad (27)$$

Yarı iletken anahtarlama elemanı üzerinde meydana gelen toplam güç kaybı Eş. 28'da verilmiştir.

$$P_{Topanahar} = P_{con} + P_{sw} + P_g + P_{rr} \quad (28)$$

### 2.2.3. Diyotların Seçimi

Diyotlara ait veri tabanı oluşturularak seçim yapılmaktadır. Günümüzde oldukça popüler durumda olan SiC diyotlar da kütüphaneye eklenerek tasarıma dahil edilmektedir. Diyot seçiminde, diyot üzerinde meydana gelen toplam güç kaybı referans alınmaktadır. Diyot üzerinde meydana gelen güç kayıpları iletim kaybı, anahtarlama kaybı ve ters toparlanma kaybından oluşmaktadır. Tasarımda her bir çıkış için 1 adet diyot kullanılmaktadır. 4 çıkışlı flyback dönüştürücü tasarımında her bir çıkışın gerilim ve akım değerleri aynı olduğundan dolayı aynı diyot elemanı kullanılacaktır.

#### a) İletim Kayıpları

İletim kaybı (Eş. 29) hesaplanırken diyotun direnç değeri ( $R_d$ ,  $\Omega$ ), diyotun gerilim düşümü ( $V_f$ , V), diyottan geçen akımın etkin değeri ( $I_{deff}$ , A) ile ortalama değeri ( $I_{dort}$ , A) kullanılmaktadır.

$$P_{con_d} = (R_d \times I_{dort}^2) + (V_f \times I_{deff}) \quad (29)$$

#### b) Anahtarlama Kayıpları

Anahtarlama kayıpları Eş. 30 ile hesaplanabilir. Eşitlikte  $Q_c$  diyotun jonksiyon yük değerini (C),  $V_d$  diyotun maruz kaldığı gerilimi (V) ve  $f_s$  anahtarlama frekansını (Hz) göstermektedir.

$$P_{sw_d} = Q_c \times V_d \times f_s \quad (30)$$

#### c) Ters Toparlanma Kayıpları

Diyotun p-n jonksiyonlu yapısı gereği iletim durumundan kesim durumuna geçerken içerisinde ters yönde bir akım geçmektedir.

Bu akımın neden olduğu güç kaybı Eş. 31 ile tanımlanabilir. Eşitlikte  $Q_{rr}$  diyotun Coulomb cinsinden ters toparlanma yük değerini,  $V_d$  diyotun maruz kaldığı gerilimi (V) ve  $f_s$  anahtarlama frekansını (Hz) göstermektedir.

$$P_{rr_d} = \left(\frac{1}{2}\right) \times Q_{rr} \times V_d \times f_s \quad (31)$$

Diyotta meydana gelen toplam güç kaybı Eş. 32'de belirtilen güç kayıplarının toplamı ile bulunmaktadır.

$$P_{Top_{diyot}} = P_{con} + P_{sw} + P_{rr} \quad (32)$$

#### 2.2.4. Optimizasyon için Amaç Fonksiyonunun Belirlenmesi

Bu çalışmada belirlenen giriş ve çıkış büyüklükleri için flyback dönüştürücüde sadece verim kısıtı altında bir tasarım optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon sırasında kullanılan amaç fonksiyonu dönüştürücüde meydana gelen toplam kayıpları kullanır. Bunlar:

- 1- Transformatörde meydana gelen çekirdek ve bakır kayıpları,
- 2- Anahtarlama elemanında meydana gelen iletim, anahtarlama, ters toparlanma ve kapı kayıpları,
- 3- Diyotlarda meydana gelen iletim, anahtarlama ve ters toparlanma kayıpları

olmak üzere 3 ana başlıkta toplanabilir. Veri tabanında tasarımı yapılan her transformatöre, anahtarlama elemanlarına ve diyotlara toplam kayıpları içeren bir amaç fonksiyonu uygulanır. Optimizasyon için kullanılan amaç fonksiyonu Eş. 33 ile verilmektedir. Amaç fonksiyonunu en küçük yapan değer optimum tasarım olarak belirlenebilir.

$$f_{opt_{trf}} = \left(\frac{P_{trf}}{P_{trf_{best}}}\right) + \left(\frac{P_{anahtar}}{P_{anahtar_{best}}}\right) + \left(\frac{P_{diyot}}{P_{diyot_{best}}}\right) \quad (33)$$

Burada,  $P_{trf}$  seçilen transformatörün ilgili frekans için toplam güç kaybını ve  $P_{trf_{best}}$  veri tabanındaki transformatörlerden ilgili frekans için en yüksek güç kaybını ifade etmektedir.  $P_{anahtar}$  seçilen anahtarın ilgili frekans için toplam güç kaybını ve  $P_{anahtar_{best}}$  veri tabanındaki anahtarlardan ilgili frekans için en yüksek güç kaybını ifade etmektedir.  $P_{diyot}$  ise seçilen diyotun ilgili frekans için toplam güç kaybını ve  $P_{diyot_{best}}$  veri tabanındaki diyotlardan ilgili frekans için en yüksek güç kaybını ifade etmektedir. En düşük güç kaybını sağlayan transformatörü, anahtarlama elemanını ve diyotu seçmek için her hesaplanan kayıp değeri normalize edilerek amaç fonksiyonuna dâhil edilir.

Tasarım optimizasyonu ile optimum amaç fonksiyonu 0.54724 değerinde ve optimum frekans ise 100 kHz değerinde elde edilmektedir. Optimum amaç fonksiyonu için dönüştürücünün verimi %83.91 ve güç yoğunluğu 56 W/in<sup>3</sup> olmaktadır. Çalışma verim kısıtı altında yapıldığı için benzer çözümler sunan firmaların referans tasarım örneklerine göre iki katı hacimde bir devre tasarımı yapılmıştır, fakat referans tasarımlara göre daha yüksek verim elde edilmiştir.

### 3. Optimizasyon Sonucu Elde Edilen Tasarım Değerleri

Parçacık sürüsü optimizasyon yöntemi kullanılarak optimize edilen çok çıkışlı flyback dönüştürücü tasarımına ait sonuçlar incelenmiş ve Çizelge 1'de optimizasyon öncesi tasarım parametrelerine ait veriler verilmiştir.

Çizelge 2'de optimizasyon sonucu elde edilen transformatör tasarımına ait veriler verilirken, Çizelge 3 ve Çizelge 4'te optimizasyon sonucu seçilen anahtar ve diyotlara ait bilgiler verilmektedir. Çizelge 4'te seçilen diyot SiC olduğundan dolayı ters toparlanma güç kaybı 0 W olarak hesaplanmaktadır.

Çizelge 1. Tasarım öncesi optimizasyon parametreleri

Parametre	Nicelik	Değer
$V_{g\_eff}$	Giriş Gerilimi Etkin Değeri	230 V
$I_{g\_eff}$	Giriş Akımı Etkin Değeri	69.5 mA
$V_{çıkış1,2,3,4}$	Çıkış Gerilimleri Ortalama Değeri	12 V
$I_{çıkış1,2,3,4}$	Çıkış Akımları Ortalama Değeri	1 A
$P_{çıkış1,2,3,4}$	Çıkış Güçleri	12 W
$T_{ort}$	Ortam Sıcaklığı	60°C
$\Delta T$	Sıcaklık Değişimi	30°C
$f_s$	Anahtarlama Frekans Aralığı	50-800 kHz
$D_{min}$	En Küçük Doluluk Oranı	%33.4
$L_{mik}$	Mıknatıslanma Endüktansı	8.996 mH
$a_{1,2,3,4}$	Her Bir Çıkış İçin Dönüştürme Oranı	13

Çizelge 2: En uygun transformatör parametreleri

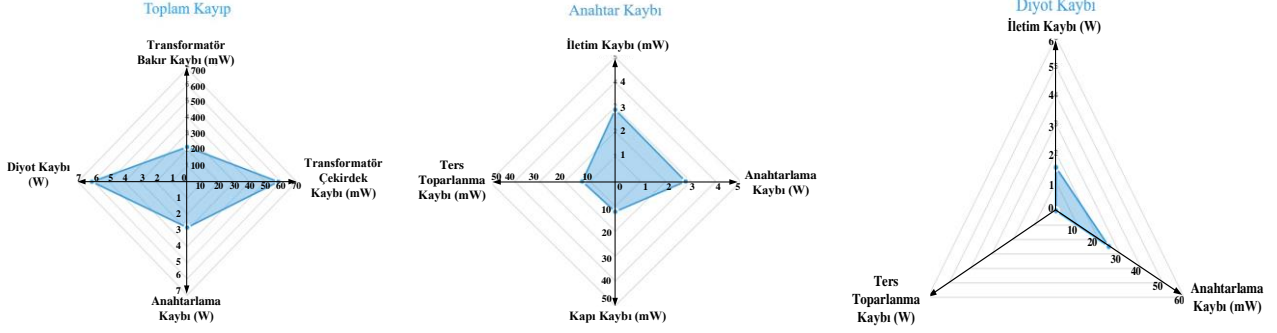
Transformatör Nüvesi	Birincil Sargı Sarım Sayısı	Çıkış Sargıları Sarım Sayıları	Bakır Kaybı (mW)	Çekirdek Kaybı (mW)	Toplam Kayıp (mW)	En yüksek İzin Verilen Kayıp (mW)
3C94, E-25/13/7	150	12	214.797	58.342	273.140	864.6

Çizelge 3: En uygun anahtar parametreleri

Anahtar	İletim Kaybı (mW)	Anahtarlama Kaybı (W)	Kapı Kaybı (mW)	Ters Toparlanma Kaybı (mW)	Toplam Kayıp (W)
IMZ120R350M1H	2.886	2.8	12.190	13.120	2.828

Çizelge 4: En uygun diyot parametreleri

Diyot	İletim Kaybı (W)	Anahtarlama Kaybı (mW)	Ters Toparlanma Kaybı (mW)	1 Diyot İçin Toplam Kayıp (W)	Dönüştürücü İçin Toplam Diyot Kaybı (W)
IDDD04G65C6	1.501	24.793	0	1.525	6.103

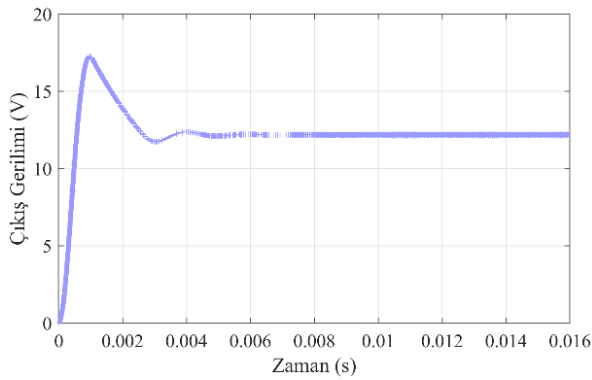


Şekil 3: Optimizasyon sonrası elde edilen flyback dönüştürücüye ait kayıplar.

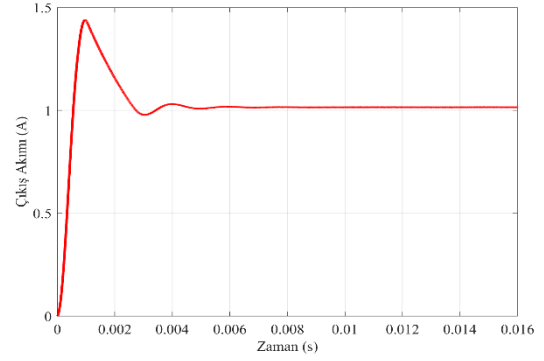
Yapılan tasarımlar içerisinde her bir frekans için ilgili frekanstaki transformator, anahtar ve diyot elemanları güç kayıpları bakımından incelenerek en yüksek verime sahip elemanlar tercih edilmektedir. Her bir frekans değeri için verim karşılaştırması yapılarak, en yüksek verim değerinin sağlandığı frekans değeri optimizasyon algoritması tarafından seçilmektedir. Optimizasyon sonucu transformator olarak 3C94, E-25/13/7 nüvesi, anahtar olarak Infineon firmasına ait IMZ120R350M1H kodlu ürünü ve diyot olarak Infineon firmasına ait IDDD04G65C6 kodlu ürünü seçilmektedir. Şekil 3 ile tasarım optimizasyonu yapılan flyback dönüştürücünün transformator, anahtar ve diyot elemanlarına ait kayıp güç değerlerinin radar tablosu olarak gösterimi verilmektedir. Toplam güç kaybı içerisindeki en büyük kayıp değeri diyotlarda meydana gelmektedir. En küçük kayıp değeri ise transformatorde meydana gelmektedir. Diyot grafiğine bakıldığında, iletim kaybının diğer kayıplara göre daha baskın olduğu görülmektedir. Anahtar için bakıldığında anahtarlama kaybının önemli ölçüde diğer kayıplara baskın olduğu ifade edilebilir.

#### 4. En Uygun Tasarıma Ait Benzetim Sonuçları

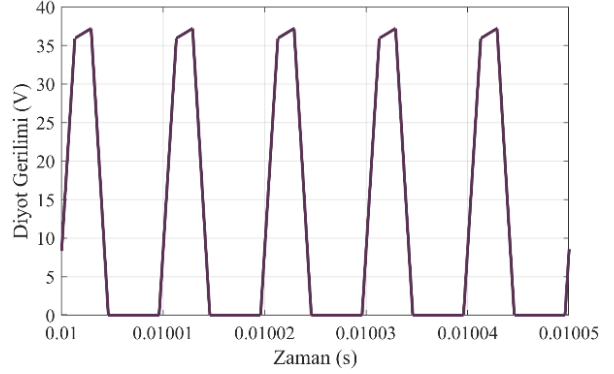
Optimizasyon sonucu önerilen tasarım verileri kullanılarak PSIM programında benzetimler yapılmıştır. Dönüştürücüye ait çıkış gerilimi, çıkış akımı, diyot gerilimi, anahtar gerilimi ve birincil sargı akımı sırasıyla Şekil 4, Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilmektedir. Benzetim sonucu elde edilen değerler, önceki bölümde hesaplanan teorik değerleri destekler niteliktedir.



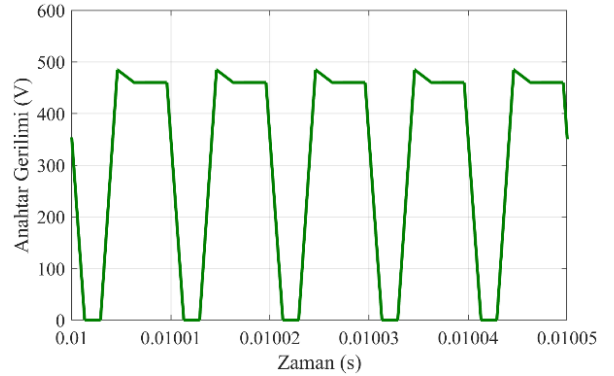
Şekil 4: En uygun tasarıma ait çıkış gerilimi.



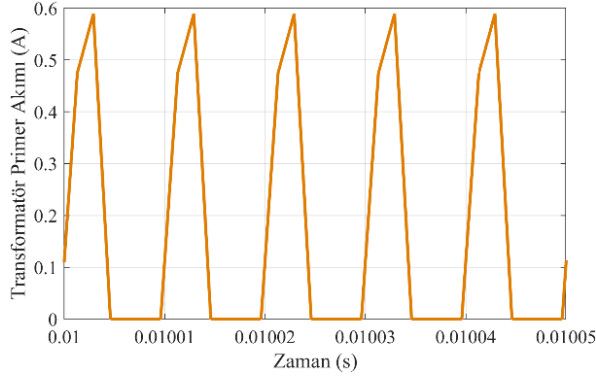
Şekil 5: En uygun tasarıma ait çıkış akımı.



Şekil 6: En uygun tasarıma ait diyot gerilimi.



Şekil 7: En uygun tasarıma ait anahtar gerilimi.



Şekil 8: En uygun tasarıma ait birincil sargı akımı.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışma ile 230V/50Hz alternatif gerilim şebekesinden beslenen, dört çıkışlı ve toplam 48W güce sahip çok çıkışlı flyback dönüştürücünün verim kısıtı altında tasarımı ve optimizasyonu yapılmıştır. Öncelikle flyback dönüştürücünün tasarımına ait matematiksel eşitlikler verilmiştir. Ardından dönüştürücü üzerindeki her bir bileşende meydana gelen kayıpların analitik ifadesi elde edilmiştir. Analitik kayıp ifadeleri optimizasyon algoritmasındaki amaç fonksiyonunu oluşturmaktadır. Bu çalışma kapsamında optimizasyon yöntemi olarak doğadan ilham alan optimizasyon algoritmalarından parçacık sürüsü optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Önerilen optimizasyon algoritması ile flyback dönüştürücüde kayıpları en az yapan transformatörün tasarımı, anahtarın ve diyotların seçimi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar benzetim ortamında doğrulanmıştır. Buna ek olarak belirli bir amaç fonksiyonu doğrultusunda güç elektroniği dönüştürücülerinin tasarımı ve optimizasyonu doğadan ilham alan optimizasyon algoritmaları ile yüksek başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir.

## Tezekkür

Bu çalışma, İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (Proje No: MYL-2022-43630) lisansüstü tez projeleri kapsamında desteklenmiştir. Ancak, çalışmanın tüm sorumluluğu çalışma sahibine aittir. Üniversitenin Bilimsel Araştırma Projeleri biriminden alınan mali destek, yayın içeriğinin bilimsel anlamda Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından onaylandığı anlamına gelmez.

## 6. Kaynaklar

- [1] Bodur, H., "Güç Elektroniği", Birsen Yayınevi, 5. Baskı, 2017.
- [2] Tahmaz, O. ve Yıldız, A. B., "Analysis, Modeling, and Simulation of the Multiple Output Flyback Converter Used in Various Motor Drive Applications", 2021 IEEE 21st International Symposium on Power Electronics, Serbia, 2021.
- [3] Wang, R. ve Zhang, J., "A Simple Current Balancing Method for Multi-Output Flyback LED Driver", 2015 IEEE 2nd International Future Energy Electronics Conference (IFEEC), Taiwan, 2015.
- [4] Kim, J. K., Park, J. E., Kim, D. Y. ve Moon, G. W., "A New ZVS Multi-Output Flyback Converter with Synchronous Switches", 2011 IEEE 8th International Conference on Power Electronics – ECCE, Korea, 2011, pp. 868-875.

- [5] Lordoglu, A., Gulbahce, M. O., Kocabas, D. A. And Dusmez, S., "System-Level Design Approach for LLC Converters," PCIM Europe digital days 2021; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2021, pp. 1-8.
- [6] Lordoglu, A., Gulbahce, M. O., Kocabas, D. A. And Dusmez, S., "Analytical Modelling and Optimization of Gapped Core Magnetics in LLC Converter," PCIM Europe digital days 2021; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2021, pp. 1-8.
- [7] Gu W., Liu R., "A Study of Volume and Weight vs. Frequency for High-Frequency Transformers", Proceedings of IEEE Power Electronics Specialist Conference, Seattle, WA, USA, 1993, pp. 1123-1129.
- [8] Versele C., Deblecker O., Lobry J., "Multiobjective Optimal Design of High Frequency Transformers Using Genetic Algorithm", 13. European Conference on Power Electronics and Applications, Barcelona, Spain, 2009, pp. 1-10.
- [9] Zhang, J., Chung, H. S. H., Lo, A. W. L. ve Huang, T., "Extended Ant Colony Optimization Algorithm for Power Electronic Circuit Design", IEEE Transactions on Power Electronics (Volume: 24, Issue: 1), 2009, pp. 147-162.
- [10] Balcı, G., "Cost Optimization of Flyback Converter Using Genetic Algorithm", İstanbul Technical University, 2019.
- [11] Der, O., Vural, R. A. ve Yıldırım, T., "Parçacık Sürü Optimizasyonu Tabanlı Evirici Tasarımı", 2008 ELECO, 2008.
- [12] Hurley, W. G. ve Wölflle, W. H., "Transformers and Inductors for Power Electronics: Theory, Design and Applications", Wiley, 1st Edition, 2013.
- [13] Calculation of Power Loss (Synchronous), Rohm Application Note, 2016.
- [14] Der, O., Vural, R. A. ve Yıldırım, T., "Parçacık Sürü Optimizasyonu Tabanlı Evirici Tasarımı", 2008 ELECO, 2008.
- [15] Bulut, E. B., Gulbahce M. O., Kocabas, D. A. and Dusmez, S., "Efficiency and Power Density Optimization of Three-Level TP PFC," PCIM Europe digital days 2021; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2021, pp. 1-8.
- [16] Bulut, E. B., Gulbahce M. O., Kocabas, D. A. and Dusmez, S., "Simplified Method to Analyze Drive Strengths for GaN Power Devices," PCIM Europe digital days 2021; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2021, pp. 1-8.