



POLİTEKNİK DERGİSİ

*JOURNAL of POLYTECHNIC*

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/politeknik>



## Geri dönüşlü DC-DC dönüştürücünün genelleştirilmiş düğüm denklemleri ile analizi

### *Analysis of flyback DC-DC converter by modified nodal equations*

*Yazar(lar) (Author(s)):* Hakan KÖSENI<sup>1</sup>, Ali Bekir YILDIZ<sup>2</sup>

ORCID<sup>1</sup>: 0000-0002-4966-6896

ORCID<sup>2</sup>: 0000-0003-4043-7859

**Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):** Köseni H. ve Yıldız A.B., “Geri dönüşlü DC-DC dönüştürücünün genelleştirilmiş düğüm denklemleri ile analizi”, *Politeknik Dergisi*, 22(1): 179-184, (2019).

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

**DOI:** 10.2339/politeknik.403992

# Gerilim Dönüştürücü DC-DC Dönüştürücünün Genelleştirilmiş Düğüm Denklemleri ile Analizi

*Araştırma Makalesi / Research Article*

**Hakan KÖSENİ, Ali Bekir YILDIZ\***

Elektrik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 15.11.2017 ; Kabul/Accepted : 15.02.2018)

## ÖZ

Bu çalışmada, güç elektroniği devrelerinde yaygın olarak kullanılan geri dönüştürücü (Flyback) DC-DC dönüştürücü devresinin analizi için etkili bir yöntem ileri sürülmüştür. Yöntemin etkinliği, dönüştürücü içerisindeki temel elemanların uygun şekilde modellenmesinden kaynaklanmaktadır. Dönüştürücü devresinin en temel parçası olan transformatör bağımlı kaynaklarla, anahtarlama elemanları ise iki değerli eleman yaklaşımı ile modellenmiştir. Anahtarlama elemanlarının konumlarına göre eşdeğer devredeki değişimler incelenmiştir. Analize temel oluşturan sistem denklemlerinin elde edilmesinde, genelleştirilmiş düğüm yöntemi kullanılmıştır. Sayısal sonuçlar, kalıcı hal bölgesindeki geleneksel analitik sonuçlarla karşılaştırılarak, ileri sürülen yöntemin üstünlüğü gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Gerilim dönüştürücü DC-DC dönüştürücü, genelleştirilmiş düğüm analizi, modelleme.

## Analysis of Flyback DC-DC Converter by Modified Nodal Equations

### ABSTRACT

In this study, an efficient method is proposed for analysis of Flyback DC-DC converter circuit, used commonly in power electronic circuits. The efficiency of the method comes from modelling basic components in the converter properly. Transformer, the basic component of the converter, is modelled by dependent sources, switching devices are modelled by the binary valued element approach. Variations in the equivalent circuit according to status of the switching devices are examined. In obtaining system equations, being the basis of the analysis, the modified nodal method is used. Numerical solutions are compared with traditional analytical results in steady-state. The superiority of the proposed method is shown.

**Keywords:** Flyback DC-DC converter, modified nodal analysis, modelling.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

DC-DC dönüştürücüler, bir DC gerilimi farklı genlikte başka bir DC gerilime dönüştüren ve bu gerilimin ortalama değerini kontrol eden devrelerdir. En az bir aktif ve bir pasif eleman kullanılarak gerçekleştirilir. DC-DC dönüştürücülerin çalışma prensibi, bir DC gerilimin yük üzerine anahtarlama dayalıdır [1-2]. Bu anahtarlama süresi değiştirilerek çıkış geriliminin ortalama değeri kontrol edilebilir ve kolaylıkla istenilen çıkış gerilim seviyesi elde edilebilir. Değişik yapılarda DC-DC dönüştürücüler mevcuttur ve bunların birbirine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır.

Endüstride birçok alanda yoğun bir şekilde kullanılan geri dönüştürücü (Flyback) DC-DC dönüştürücü devresinin en önemli avantajlarından biri, giriş ve çıkış gerilimleri

arasında elektriksel izolasyonun olmasıdır. Gerilim dönüştürücü DC-DC dönüştürücü devresi diğer izoleli DC-DC dönüştürücü türlerine göre yapısının basit olması, maliyetinin düşük olması gibi avantajlarından dolayı daha çok tercih edilmektedir [3-6]. Bu avantajların yanında transformatör kullanımındaki sınırlamalar nedeniyle düşük güçlü uygulamalarda kullanılır. Bu dönüştürücü türündeki en önemli problemlerden biri, anahtar iletimde iken primer sargısının kaçak endüktasında depolanan enerjinin anahtarın kesime girmesi durumunda anahtar üzerinden yolunu tamamlaması ve anahtarın üzerinde gerilim stresine neden olmasıdır. Değişik türde bastırma devreleri kullanılarak bu probleme çözüm getirilebilmektedir [7].

Gelişen yarıiletken teknolojisinin güç elektroniği devrelerine uygulanması ile bu devrelerin tasarım ve kontrol aşamalarında önemli ilerlemeler meydana gelmiştir. Buna paralel olarak, bu devrelerin analizi için

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

yeni bilgisayar destekli yöntemler ve paket programlar da kullanılmaya başlanmıştır. Lineer devrelerden farklı olarak anahtarlamalı yapılarından dolayı, güç elektroniği devrelerinin analizi özel durumlar içermektedir. Anahtarların konumuna göre, devreler farklı topolojilere ayrılmaktadır. Her bir topolojinin ayrı ayrı ele alınıp, uygun sırayla analiz edilmesi gerekmektedir. Bu durumlar, güç elektroniği devrelerinin analizi karmaşık hale getirmektedir. Bu devrelerin bilgisayar destekli analizi ile bu zorlukların aşılması amaçlanmaktadır. Bilgisayar destekli analizin temeli, devredeki elemanların modellenmesi, sistem denklemlerinin elde edilmesi ve uygun sayısal yöntemin kullanılmasına dayanır [8]. Geri dönüşlü DC-DC dönüştürücülerin analiz ve modellenmesine ilişkin çeşitli yaklaşımlar [9-13]'te verilmiştir.

Bu çalışmanın temel katkısı, incelenen dönüştürücüdeki devre elemanlarının (transformatör ve anahtarlama elemanları) modellenmesine ilişkin yaklaşımların, uygun ve avantajlı şekilde bir geri dönüşlü (Flyback) DC-DC dönüştürücüde kullanılmış olmasıdır. Dönüştürücü devresindeki anahtarların iletim/kesim durumu için iki değerli direnç yaklaşımı (iletimde çok küçük değerli direnç, kesimde ise çok büyük değerli direnç) ele alınmıştır. Böylece, farklı topolojilerle uğraşmaya gerek kalmamıştır. Sadece, sayısal çözümde, her iterasyonda sistem denklemleri güncellenmiştir. Dönüştürücüde kullanılan transformatör, bir mıknatıslanma endüktansı ve ideal transformatör ile modellenmiştir. Sonuçta elde edilen eşdeğer devrenin sistem denklemleri, genelleştirilmiş düğüm yöntemi ile belirlenmiştir. Elde edilen sistem denklemlerinin sayısal çözümü için kararlı bir yaklaşım olan trapez yöntemi kullanılmış olup, Matlab m-file ortamında benzetim gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlara ait grafiklerden bazıları bu çalışmada verilmiştir.

## 2. SİSTEM DENKLEMLERİ VE ANAHTARLARIN MODELLENMESİ (SYSTEM EQUATIONS AND MODELLING OF SWITCHES)

Sistem analizinde, devre denklemlerinin elde edilmesinde iki temel yöntem vardır: Genelleştirilmiş düğüm denklemleri (GDD) ve durum değişkenleri yöntemidir (DDY) [14]. Bu yöntemlerin birbirine göre avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Durum denklemleri yöntemi, graf teorisine dayalı olan popüler bir yöntemdir. En önemli avantajı, bilinmeyen değişken sayısının min. olmasıdır. Ancak, bu yöntem ile devrelerin denklemlerinin elde edilmesi oldukça zordur. Ayrıca güç elektroniği gibi anahtarlamalı devrelerin analizi için bu yöntem çok uygun değildir. Çünkü bu tür devrelerde anahtarların durumlarına bağlı olarak durum değişkeni sayısı değişebilmektedir. Klasik düğüm yönteminde her

türlü devre elemanı (gerilim kaynağı, kontrollü kaynaklar gibi) sistem denklemlerine dahil edilemezdi. Bu sakıncaların üstesinden gelmek için, Genelleştirilmiş düğüm gerilimleri yöntemi ortaya atılmıştır [15]. Genelleştirilmiş düğüm yönteminin ise bilinmeyen sayısının fazla olması yöntemin dezavantajı iken, denklemlerin elde edilmesindeki kolaylık yöntemin en önemli avantajıdır. Bu yöntemde sistem denklemleri doğrudan devreye bakılarak dahi yazılabilmektedir [16].

Genelleştirilmiş düğüm denklemlerinin s-domenindeki ve t-domenindeki yapısı aşağıda verilmiştir.

$$(G + sC) X(s) = BU \quad (1)$$

$$Gx(t) + C \frac{dx(t)}{dt} = Bu(t) \quad (2)$$

Burada G, C, B katsayı matrisleridir [16-17]. Tüm iletkenlikler ve düğüm denklemlerinin elde edilmesinden kaynaklanan frekanstan bağımsız değerler G matrisini, frekans değişkeni ile ilgili kapasite ve endüktans değerleri C matrisini oluşturur. U matrisi ise bağımsız akım ve gerilim kaynakları ile sıfırdan farklı kapasite ve endüktansların ilk koşullarını içeren vektördür. Bilinmeyen vektörü olan x(t) hem akım hem de gerilim değişkenleri içerir. Değişken tipleri dikkate alınarak x(t) bilinmeyen vektörü denk.(3) de gösterildiği gibi x<sub>1</sub>(t) ve x<sub>2</sub>(t) vektörlerine ayrılabilir.

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Burada x<sub>1</sub>(t) vektörü düğüm gerilimleri değişkenlerini, x<sub>2</sub>(t) vektörü ise endüktansların, bağımsız ve bağımlı gerilim kaynaklarının ve kısa devre elemanı gibi elemanların akım değişkenlerini göstermektedir. Denk.(3) ile ayrıştırılan bilinmeyen vektörü dikkate alınarak, zaman domenindeki genelleştirilmiş düğüm denklemleri yapısı aşağıdaki biçimde yeniden düzenlenebilir.

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

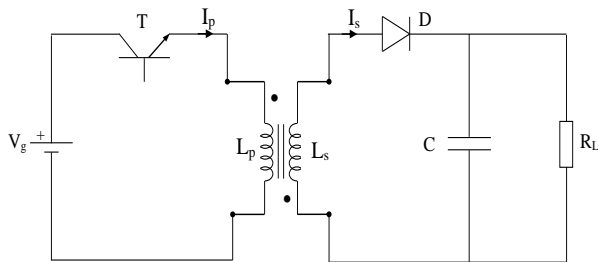
Güç elektroniği devrelerinde yarıiletken anahtarlama elemanlarının modellenmesi ile ilgili pek çok yaklaşım vardır: İdeal anahtar modeli ve iki değerli eleman yaklaşımı en çok kullanılan yöntemlerdir. İdeal anahtar yaklaşımında, anahtarlar iletimde sıfır direnç (kısa devre, sıfır değerli gerilim kaynağı), kesimde sıfır admitans (açık devre, sıfır değerli akım kaynağı) ile modellenirler. Bu yaklaşıma göre, devrede n adet anahtar var ise, 2<sup>n</sup> adet

olası topolojik durumu ele almak gereklidir. İki değerli eleman yaklaşımında ise anahtarlar, iletimde küçük değerli direnç/endüktans, kesimde büyük değerli direnç/endüktans ile modellenirler. Bu yaklaşımda, anahtarların konum değişikliğine bağlı olmaksızın tek bir topoloji ele alınır. Anahtarların değerleri, simülasyon sırasında güncellenir.

Bu çalışmada, açıklanan avantajlarından dolayı (Anahtarların konumları gereği oluşan topolojik değişimlerin denklemlere yansıtılmasındaki zorluğun önüne geçmek amacıyla) iki değerli direnç yaklaşımı kullanılmıştır.

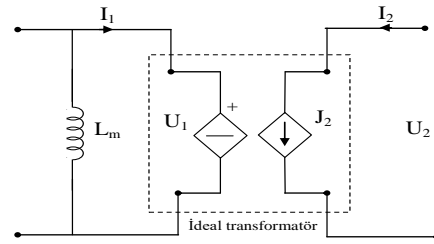
### 3. GERİ DÖNÜŞLÜ DC-DC DÖNÜŞTÜRÜCÜ DEVRESİ (FLYBACK DC-DC CONVERTER CIRCUIT)

Analizi yapılacak olan geri dönüşlü DC-DC dönüştürücünün temel devre şeması Şekil 1'de verilmiştir. Bu dönüştürücü türünde kullanılan transformatörün en temel özelliği primer ve sekonder devresinin aynı anda çalışmamasıdır.

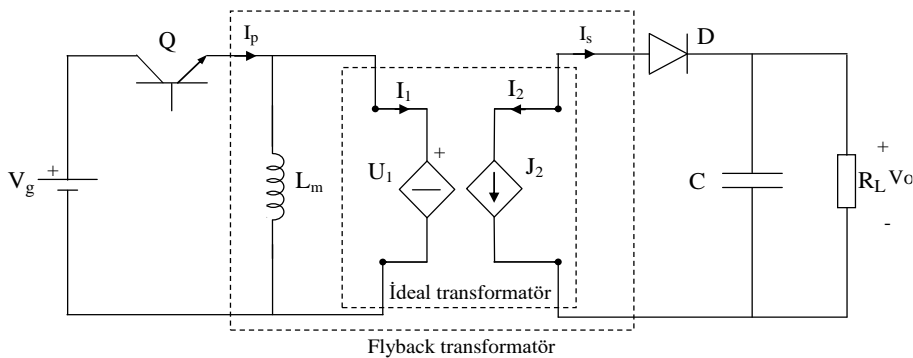


Şekil 1. Geri Dönüşlü DC-DC Dönüştürücü Devresi (Flyback DC-DC Converter Circuit)

esnada D diyotu ters kutuplandığından kesimdedir. Temel anahtar kesime girdiğinde sargı polariteleri yön değiştirir, D diyodu doğru yönde kutuplanır. Temel anahtar iletimde iken nüvede depo edilen enerji, bu anahtar kesime girdiğinde sekonder sargısı üzerinden yükü besler. Burada transformatör enerji depolama görevi görmekte ve elektriksel izolasyonu sağlamaktadır. Şekil 1'deki dönüştürücü devresinin temel elemanı olan transformatör Şekil 2'deki gibi modellenmiştir. Transformatör modelinde, nüvede depo edilen enerjiyi temsil eden bir mıknatıslanma endüktansı ( $L_m$ ), gerilim-akım dönüşümünü ifade eden iki kapılı bir devre elemanı olan bir ideal transformatör görülmektedir. İdeal transformatör, iki bağımlı kaynakla ( $U_1$ ,  $J_2$ ) gösterilmiştir. Bağımlı kaynaklara ilişkin uç denklemler:  $U_1 = -nU_2$ ,  $J_2 = nI_1$ . Burada,  $n$ : ideal transformatörün dönüşüm oranıdır. Primer ve sekonder sargılarının kaçak endüktansları ve sargı dirençleri analizin basitliği açısından bu çalışmada dikkate alınmamıştır. Ancak dikkate alınması, kullanılan yöntemin avantajlarından dolayı, analize herhangi bir zorluk getirmemektedir.



Şekil 2. Geri dönüşlü DC-DC dönüştürücü transformatörünün eşdeğer devresi (Equivalent circuit of Flyback DC-DC converter transformer)



Şekil 3. Geri dönüşlü DC-DC dönüştürücü devresinin tam eşdeğer modeli (Exact equivalent model of Flyback DC-DC converter circuit)

Devrenin genel çalışması şu şekildedir: Temel anahtar (transistör, MOSFET vb.) iletimdeyken  $V_g$  gerilimli DC kaynaktan sadece primer sargısı beslenir, sargıdan geçen akım lineer olarak artar ve nüvede enerji depolanır. Bu

Şekil 2'deki eşdeğer transformatör modeli kullanılarak Şekil 3 ile gösterilen tam eşdeğer devre elde edilir.

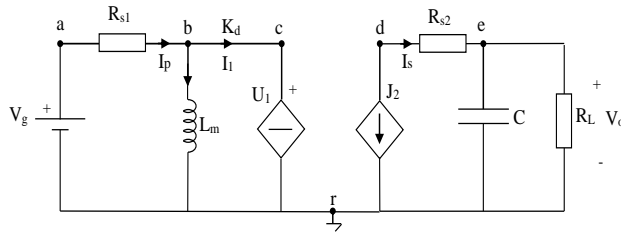
Sürekli durum analizinde, bir periyot süresince  $L_m$  mıknatıslanma endüktansının akımındaki artış ve azalma miktarlarının eşitliğinden (veya endüktans gerilimin pozitif ve negatif alanlarının eşitliğinden) geri dönüşlü DC-DC dönüştürücü devresinin çıkış gerilimi  $V_o$  ile giriş gerilimi  $V_g$  arasında aşağıdaki denklem elde edilir [1-2].

$$V_o = \frac{V_g \cdot D}{n \cdot 1 - D} \quad (5)$$

Burada,  $V_g$  giriş gerilimi,  $D$  ise doluluk oranıdır. Bu denklemden görüleceği gibi bu dönüştürücü ile giriş gerilimine göre daha küçük veya daha büyük çıkış gerilimi elde edilebilir.

**(a) Sistem Denklemlerinin Elde Edilmesi ve Anahtarlama Durumlarının İncelenmesi**

Şekil 3’deki tam eşdeğer devrede temel anahtar (Q) ve yardımcı anahtar (D), iki değerli eleman yaklaşımı ile modellenmiştir. Bu duruma ilişkin devrenin yeni hali Şekil 4’de verilmiştir.



**Şekil 4.** Anahtarların iki değerli direnç yaklaşımı ile modellenmesi sonucu yeni eşdeğer devre (New equivalent circuit related to modelling of switches with two-valued resistance approach)

Bu durumda, devrenin genelleştirilmiş düğüm denklem sistemindeki katsayı matrisleri aşağıda ifade edilmiştir.

$$G = \begin{bmatrix} G_{s1} & -G_{s1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -G_{s1} & G_{s1} & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{s2} & -G_{s2} & 0 & n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -G_{s2} & G_{s2} & +G_L & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -L_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$$

$$X(t) = [V_a \ V_b \ V_c \ V_d \ V_e \ I_{LM} \ I_{Kd} \ I_{V1} \ I_{Vg}]^T$$

$$U(t) = [V_g]$$

Burada;  $G_{s1}=1/R_{s1}$ ,  $G_{s2}=1/R_{s2}$ ,  $G_L=1/R_L$

Temel anahtarın iletimde olması durumunda  $R_{s1}$  direnci çok küçük bir direnç  $R_{smin}$  değerine,  $R_{s2}$  direnci çok büyük bir direnç  $R_{smax}$  değerine sahiptir. Temel anahtar kesime girdiğinde ise  $R_{s1}$  direnci çok büyük bir direnç  $R_{smax}$  değerine  $R_{s2}$  direnci çok küçük bir direnç  $R_{smin}$  değerine sahip olur.

**(b) Trapez Yönteminin Genelleştirilmiş Düğüm Denklem Sistemine Uygulanması**

Şekil 4’deki devrenin genelleştirilmiş düğüm denklem sisteminin yapısı aşağıdaki formdadır.

$$Gx(t) + C \frac{dX(t)}{dt} = BU(t) \quad (6)$$

Trapez yönteminin genel ifadesi, h adım aralığı olmak üzere [18-20];

$$X_{n+1} = X_n + \frac{h}{2} [f(X_{n+1}, t_{n+1}) + f(X_n, t_n)] \quad (7)$$

şekindedir. Denk.(6)’daki yapının denk.(7)’de yerine konmasıyla, benzetimde kullanılacak denk.(8) elde edilir.

$$X_{n+1} = K_A X_n + K_B [U_n + U_{n+1}] \quad (8)$$

Burada  $K_A$  ve  $K_B$  ifadeleri aşağıdaki denklemlerden bulunur.

$$K_A = K_1^{-1} K_2 \quad K_B = K_1^{-1} \frac{h}{2} B$$

$$K_1 = \left[ C + \frac{h}{2} G \right] \quad K_2 = \left[ C - \frac{h}{2} G \right] \quad (9)$$

**(c) Benzetim Sonuçları**

Aşağıdaki tabloda Şekil 4’deki geri dönüşlü DC-DC dönüştürücü devresine ait eleman değerleri ve diğer bilgiler verilmiştir.

**Çizelge 1:** Geri dönüşlü DC-DC dönüştürücüye ilişkin benzetim parametreleri (Simulation parameters related to Flyback DC-DC Converter)

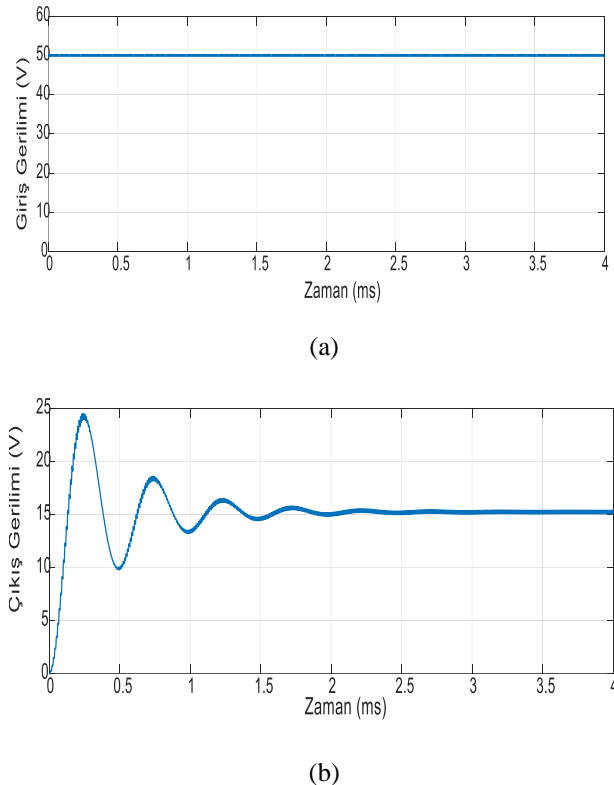
| Parametreler | Değer            |
|--------------|------------------|
| $V_g$        | 50 V             |
| $R_L$        | 5 $\Omega$       |
| $C$          | 470 mikroF       |
| $L_m$        | 5 mH             |
| $n$          | 5                |
| $f_s$        | 10 kHz           |
| $D$          | 0.6              |
| $h$          | $10^{-6}$        |
| $R_{smin}$   | $10^{-6} \Omega$ |
| $R_{smax}$   | $10^6 \Omega$    |

Yukarıdaki benzetim parametreleri, anahtarlama durumlarındaki direnç değişimleri ( $R_{s1}$  ve  $R_{s2}$ ) dikkate

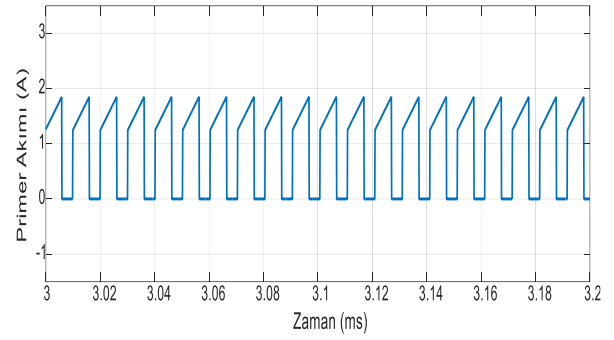
alınarak ve denk.(8)'in çözülmesi ile elde edilen grafikler Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 5'den görüldüğü gibi çıkış gerilimi, kararlı halde denk.(5) ile hesaplanan değer ( $V_o=15V$ ) ile aynı sonucu vermektedir. Şekil 6'da ise transformatörün primer ve sekonder akımları görülmektedir. Bu akımlardaki linear artış ve azalmaların daha iyi görülebilmesi için, değişimlerin kalıcı haldeki değişimleri verilmiştir. Benzetim, Matlab m-file ortamında gerçekleştirilmiştir.

## 6. SONUÇ (CONCLUSION)

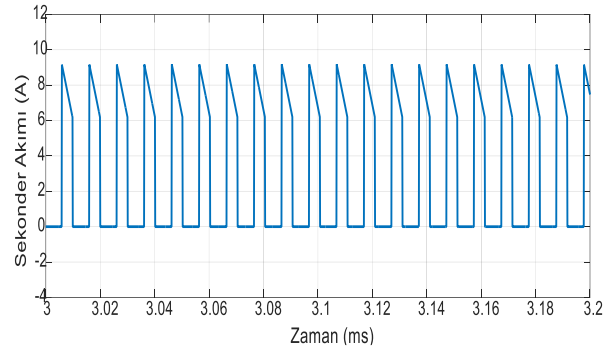
Bu çalışmada genelleştirilmiş düğüm yöntemi kullanılarak, geri dönüşlü (Flyback) DC-DC dönüştürücünün analizi gerçekleştirilmiştir. Sırasıyla, dönüştürücüdeki transformatör ve anahtarlama elemanları modellenerek, tam eşdeğer devre elde edilmiştir. Bu devrenin anahtarların konum değişiminden bağımsız olması ve sadece denklemdeki anahtar değerlerinin simülasyon sırasında değiştiriliyor olması, yöntemin en önemli avantajlarından biridir. Elde edilen sayısal sonuçlar, geleneksel analitik denklemlerdeki değerlerle örtüşmektedir.



Şekil 5. (a) Giriş gerilim, (b) Çıkış Gerilimi (Input and Output Voltage)



(a)



(b)

Şekil 6. Transformatörün (a) Primer akımı, (b) Sekonder Akımı (Primary and secondary currents of transformer)

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Bodur H., “**Güç Elektronik**”, Birsen Yayınevi, İstanbul, (2010).
- [2] Hart D. W., “**Power Electronics**”, McGraw-Hill, New York, (2011).
- [3] Poorali B., Adib E., “Analysis of the integrated SEPIC-Flyback Converter as a single-stage single-switch power-factor correction LED Driver”, **IEEE Trans. on Ind. Elo.**, 63(3): 3562-3570, (2016).
- [4] Huang G.C., Liang T.H., Chen K.H., “Losses analysis and low standby losses quasi-resonant flyback converter design”, **IEEE Int. Symp. on Circuit and System**, Korea, 217-220, (2012).
- [5] Ishihara M., et al., “Analysis and design of passive component for interleaved flyback converter with integrated transformer”, **IEEE Energy Conversion Congress and Exposition**, USA, 5902-5909, (2015).
- [6] Bauabana A., Sourkounis C., “Design and analysis of coreless flyback converter with a planar printed-circuit-board transformer”, **IEEE Int. Conf. On Optimization of Electrical and Electronic Equipment**, Romania, 557-563, (2010).
- [7] Kanthimathi R., Kamala J., “Analysis of different Flyback Converter Topologies”, **Int. Conf. on Industrial Instrumentation and Control (ICIC)**, India, 1248-1252, (2015).
- [8] Yuan F. And Opal A., “Computer Methods for Switched Circuits”, **IEEE Trans. On Circuit and Systems**, 50(8): 1013-1024, (2003).

- [9] Zhang Z.; Tian S.; Khai D.; Ngo T.; “Small-Signal Equivalent Circuit Model of Quasi - Square-Wave Flyback Converter”, **IEEE Transactions on Power Electronics**, 32(8): 5885 – 5888, (2017).
- [10] Yu J.; Xu S.; Qian Q.; Sun W.; Lu S., Yu, “Modeling and analysis of primary side regulated flyback converter with pulse frequency modulation”, **9<sup>th</sup> Int. Conf. on Power Electronics and ECCE Asia**, 429 – 434, (2015).
- [11] Kewei H.; Jie L.; Ningjun F.; Yuebin L.; Xiaolin H.; Luo W., “Modeling analysis and simulation of high-voltage flyback DC-DC converter”, **IEEE Int. Symposium on Industrial Electronics**, 813 – 818, (2009).
- [12] Chen J.; Guo Y.; Zhu J.; “A generalized dynamic model for flyback switching converter based on based on nonlinear finite element analysis”, **Int. Technology and Innovation Conference**, 771- 776, (2006).
- [13] Bakkali A.; Alou P.; Oliver J.A.; Cobos J.A., “Average modeling and analysis of a Flyback with Active Clamp topology based on a very simple transformer”, **APEC 07 - Twenty-Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition**, USA, 500 – 506, (2007).
- [14] Yıldız A.B., ”*Elektrik devrelerinin bilgisayar yardımıyla analizi*”, Yüksek lisans ders notları, Kocaeli Üniversitesi, (2015).
- [15] HO C.-W, et al, “The Modified Nodal Approach to Network Analysis”, **IEEE Trans. on Circuits and Systems**, 22(6): 504-509,1975.
- [16] Natarajan S., “A systematic method for obtaining state equations using MNA”, **IEE proceedings**, 138(3): 341-346, (1991).
- [17] Acar C., “*Elektrik Devrelerinin Analizi*”, İTÜ yayınları, İstanbul, (1995).
- [18] Pal C., “*Numerical methods: principles, analysis and algorithms*”, Oxford higher Educations, England, (2009).
- [19] Greenbaum A., Charier T.P., “*Numerical methods: design, analysis and computer implementation of algorithms*”, Prentice University press, USA, (2012).
- [20] Chapra S., Canale R., “*Mühendisler için Sayısal Yöntemler*”, Literatür Yayıncılık, İstanbul, (2004).