

Belirsiz Katsayılar Metodu ile PWM Kontrollü Buck Tipi Dönüştürücü Devre Analizi

Anıl Kuç^{1*}, Mustafa Nil^{2*}, İlker Kılıç³, Yücel Koçyiğit⁴

¹Celal Bayar Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Manisa, Türkiye, Tel: 05542042986, Fax:+90 236 241 21 43, anil_kuc@hotmail.com¹

²Celal Bayar Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Manisa, Türkiye, Tel: +90 236 201 21 55, Fax: : +90 236 241 21 43, mustafa.nil@cbu.edu.tr^{2*}

³Celal Bayar Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Manisa, Türkiye, Tel:+90 236 201 2153, Fax: +90 236 241 21 43, ilker.kilic@cbu.edu.tr³

⁴Celal Bayar Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Manisa, Türkiye, Tel:+90 236 201 2154, Fax: +90 236 241 21 43, yucel.kocyyigit@cbu.edu.tr⁴

*İletişimden sorumlu yazar / Corresponding author

Geliş / Recieved: 8 Nisan (April) 2015

Kabul / Accepted: 15 Eylül (September) 2015

DOI: <http://dx.doi.org/10.18466/cbujos.25222>

Özet

Bu çalışmada DC-DC Buck dönüştürücü devresinin akım ve çıkış geriliminin diferansiyel denklemleri, devreye ait durum denklemleri kullanılarak elde edilmiştir. Bu denklemler Belirsiz Katsayılar Metodu (BKM) ile çözülerek bir periyot için çıkış gerilim değeri hesaplanmıştır. Farklı PWM kontrol değerleri için hesaplanan çıkış gerilimi sonuçları grafik olarak gösterilmiştir. Önerilen bu çalışma ile Buck dönüştürücü devresine ait Matlab Simulink benzetim sonuçları da gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler - Belirsiz Katsayılar Metodu, Buck Dönüştürücü, Hibrit, PWM

PWM controlled Buck type converter circuit analysis by Method of Undetermined Coefficients

Abstract

In this paper, the differential equations of the current and the output voltage of the DC-DC Buck converter circuit are defined by using the state equations of the circuit. The output voltage is determined by the method of undetermined coefficients for a period. The graphical results of the output voltage for different PWM control values are shown moreover, the MATLAB Simulink analysis results regarding the Buck converter circuit are shown in the proposed work.

Keywords - Buck Converter, Hybrid, Method of Undetermined Coefficients, PWM

1 Giriş

Güç elektroniğinin önemi her geçen gün ilerleyen teknoloji ve denetim teorisinin gelişmesiyle artmaktadır. Güç denetimi başlangıçtan bu güne farklı yöntemlerle yapılmaktadır. İlk zamanlar klasik yöntemler kullanılmasına karşılık yarıiletken teknolojisinin gelişmesiyle yerini güç elektroniği

düzenlerine bırakmıştır [1].

Üretime dayalı endüstrilerde üretim maliyetlerini aşağı çekmek ve kusurlarını en düşük seviyelere indirmek için yüksek kalitede üretim gerçekleştirmek her geçen gün daha fazla önem kazanmaktadır. Bu bağlamda bu hedefleri gerçekleştirmek ve çeşitli ek avantajlar elde

edebilmek için otomasyon sistemlerinin kullanılması kaçınılmazdır. Üretim endüstrisinin otomasyon sistemleri ile buluşturulması sonucunda maliyetler düşmekte verimlilik artmaktadır [2].

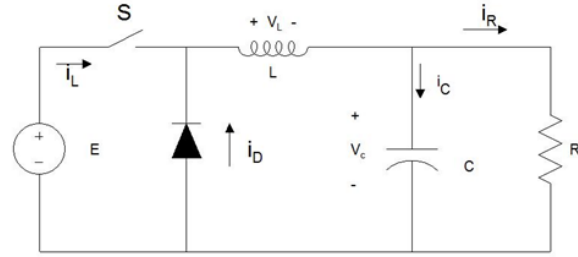
Güç elektroniği devrelerinin bilgisayar ile analizi günümüzde çok önem taşımaktadır. Lineer devrelerden farklı olarak, anahtarlama yapılarından dolayı güç elektroniği devrelerinin analizi oldukça zordur. Temel problemler, yarıiletken anahtarların modellenmesi, anahtarlama sonucu oluşan değişken devre yapılarının belirlenmesi ve geçici durumların analiz edilmesidir. Bu doğrultuda gerçekleştirilen bilgisayarla analizin temeli; devre modellemesi ve sayısal hesaplara dayanmaktadır [3].

Hibrit elektrikli araçlar (HEA), enerjinin iki ya da daha fazla enerji deposundan sağlandığı ve bu enerji depolarından en az bir tanesinin elektrik enerjisi verdiği bir araç olarak tanımlanmıştır. Bu araçlar içten yanmalı motor, batarya, süperkondansatör ve yakıt pili ünitelerinden oluşmaktadır. Hibrit elektrikli araç uygulamalarında genellikle farklı gerilim seviyesine bağlı sistemlerin (yakıt pili, akü grubu veya alçak gerilim beslemesine ihtiyaç duyan elektronik devreler vb.) birbirine bağlanması ve DC motor kontrolü amacıyla DC-DC dönüştürücüler kullanılmaktadır [4].

2 Darbe Genişlik Modülasyonlu PWM Kontrollü Buck Dönüştürücü

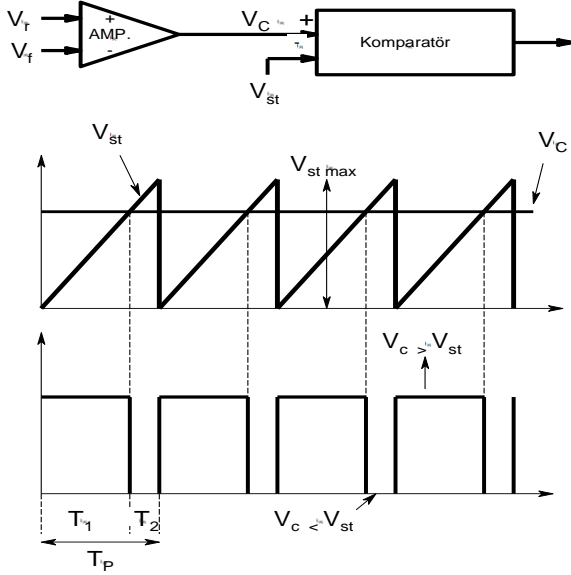
Anahtarlama temel DC - DC dönüştürücülerinde giriş ve çıkış gerilim kaynakları, güç anahtarları ve güç diyotu ile endüktans ve kondansatör ideal, ayrıca endüktanstan geçen akımın kesintisiz olduğu kabul edilmektedir. Kararlı rejimde çalışan temel dönüştürücülerin hepsinde ortalama olarak endüktans akımı daima güç anahtarı ve güç diyotu akımlarının toplamına eşittir. Endüktans gerilimi ve kondansatör akımı ortalama olarak daima sıfırdır. Endüktans akımı ile kondansatör gerilimindeki artma ve azalma miktarları daima birbirine eşittir. DC çıkış gerilimi, ortalama

endüktans geriliminin sıfır olmasından veya endüktans akımındaki artma ve azalma miktarlarının birbirine eşitliğinden bulunabilir [5]. Hibrit araçlarda iki tip DC-DC çeviriciye ihtiyaç vardır. Bunlardan biri batarya gerilimini aracın ihtiyacı olan gerilime indiren DC-DC çevirici, diğeri batarya gerilimini elektrik motorunun çalışma gerilimine çeviren yüksek güçlü DC-DC çeviricilerdir. Batarya sisteminin gerilimi, elektrik motoru için gerekli çalışma gerilimini sağlıyorsa yüksek güçlü DC-DC çeviriciye gerek yoktur. Enerji kaynağı süper kapasitör olan araçlarda gerilim değişimi yüksek olduğu için yüksek güçlü DC-DC çeviriciye ihtiyaç duyulur [6].



Şekil 1. Buck tipi DC-DC dönüştürücü [5]

Düşürücü (Buck) Dönüştürücünün devre şeması Şekil 1'de verilmiştir. Bu dönüştürücüde temel olarak güç anahtarı iletimde iken giriş gerilim kaynağı hem çıkışı besler hem de endüktansa ilave bir enerji enjekte eder ve güç diyotu iletimde iken endüktanstaki bu ilave enerji çıkışa aktarılır [5]. En kolay yöntem olarak bilinen DC darbe genişlik modülasyonu (DC PWM) yönteminin prensip dalga şekilleri Şekil 2'de verilmiştir [5].



Şekil 2 Darbe genişlik modülasyonu [5]

Bu kontrolde, Doluluk oranı, Darbe / Periyot oranı veya Bağlı üretim süresi;

$$\lambda = \frac{T_d}{T_P} = \frac{V_C}{V_{ST}} \quad (1)$$

olarak tanımlanır. Doluluk oranının değiştirilmesi ile güç kontrolü sağlanır. Bu dönüştürücülerde genellikle pozitif sinyal kullanılır. Bazen tersine de ihtiyaç duyulur. Doluluk oranının kontrolü genellikle frekansın sabit tutulması ve darbe genişliğinin değiştirilmesi ile sağlanır ki buna Darbe Genişlik Modülasyonu adı verilir [7].

PWM değerine bağlı olarak çıkış gerilimi aşağıdaki gibidir:

$$V_o = \lambda V_i \quad [7] \quad (2)$$

Yapılan çalışmada çeşitli PWM değerlerinde Matlab ortamında sonuçları Bölüm 4’de verilmiştir.

3 Belirsiz Katsayılar Metodu ve Sisteme Ait Diferansiyel Denklemlerin Elde Edilmesi ve Çözümü

Homojen olmayan bir diferansiyel denklemi çözmenin en basit yolu belirsiz katsayılar metodudur.

$$y'' + P(x)y' + Q(x)y = F(x) \quad (3)$$

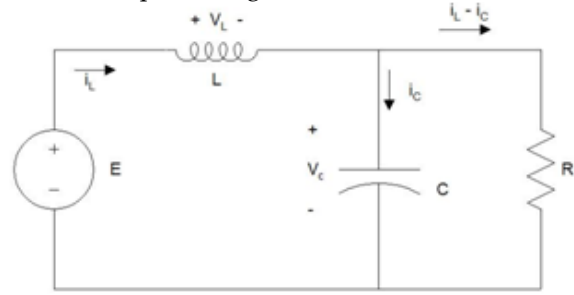
Diferansiyel denklemi sabit katsayı halde yazılırsa,

$$y'' + by' + c = F(x) \quad (4)$$

dir. F(x) teriminin alacağı bazı özel haller için bu yöntem son derece kullanışlıdır.

$F(x) = k \rightarrow$ sabit , $F(x) = P(x) \rightarrow n$ x’e bağlı bir polinom , $F(x) = Ae^{kx} \rightarrow$ üstel fonksiyon , $F(x) = A \sin ax$ veya $B \cos ax$ ’dır [8].

S anahtarı kapalı olduğu durumda;



Şekil 3 S anahtarının kapalı olması durumunda eşdeğer devre [3]

Devreye ait durum denklemleri şu şekildedir[3];

$$\frac{di_L(t)}{dt} = -\frac{V_C(t)}{L} + \frac{E}{L} \quad (5)$$

$$\frac{dV_C(t)}{dt} = -\frac{V_C(t)}{RC} + \frac{i_L(t)}{C} \quad (6)$$

Her iki denklemden $i_L(t)$ ve $V_C(t)$ ye bağlı ifadeler aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\frac{d^2V_C}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{dV_C}{dt} + \frac{1}{LC} V_C(t) = \frac{E}{LC} \quad (7)$$

$$\frac{d^2i_L}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{di_L}{dt} + \frac{1}{LC} i_L(t) = \frac{E}{RLC} \quad (8)$$

Başlangıç koşulları;

$$V_C(0) = 0 \quad V_C'(0) = 0 \quad (9)$$

$$i_L(0) = 0 \quad i_L'(0) = 0 \quad (10)$$

S anahtarı açık olduğu durumda;

Şekil 4 S anahtarının açık olması durumunda eşdeğer devre [3]

Devreye ait durum denklemleri şu şekildedir [3];

Devreye ait durum denklemleri şu şekildedir:

$$\frac{di_L(t)}{dt} = -\frac{V_C(t)}{L} \quad (11) [3]$$

$$\frac{dV_C(t)}{dt} = -\frac{V_C(t)}{RC} + \frac{i_L(t)}{C} \quad (12) [3]$$

Eşitlikleri ile kapasiteye ait diferansiyel denklem bulunur [9].

$$\frac{d^2V_C}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{dV_C}{dt} + \frac{1}{LC} V_C = 0 \quad (13)$$

Başlangıç koşulları;

$$V_C(0) = V \quad V'_C(0) = V' \quad (14)$$

$$i_L(0) = i \quad (15)$$

$V_C(0) = V$ Kapasite geriliminin ulaştığı son değerdir.

$i_L(0) = i$ Bobin akımının ulaştığı son değerdir.

İkinci dereceden bir diferansiyel denklemin Belirsiz Katsayılar Metodu (BKM) ile çözümü için iki adet başlangıç değerine ihtiyaç vardır.

Bilinmeyen $V'_C(0) = V'$ değerinin elde edilmesi için (16)'da $V_C(0) = V$ ve $i_L(0) = i$ yerine koyulur [9].

$$\frac{dV_C(0)}{dt} = -\frac{V_C(0)}{RC} + \frac{i_L(0)}{C} \quad (16) [9]$$

Bu denklemden elde edilen $V'_C(0) = V'$ değeri ve bilinen $V_C(0) = V$ değeri kullanılarak BKM metodu yardımı ile çözümü yapılmış ve Şekil 5 , Şekil 6 ve Şekil 7'de örtüştüğü görülmüştür.

4 Farklı PWM Kontrollü Değerler İçin Benzetim Sonuçları

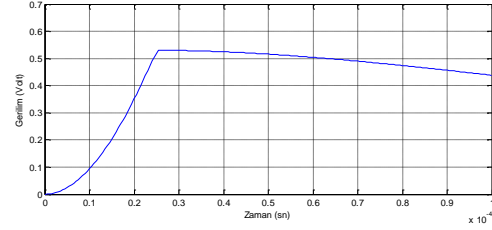
Kullanılan devreye ait eleman değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Buck dönüştürücü devresine ait parametreler

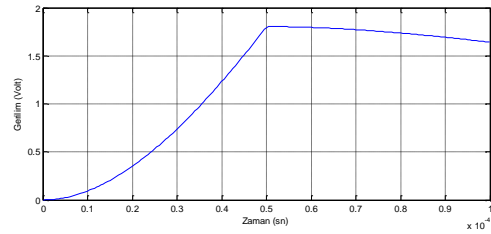
Parametreler	Değer
E	20 V
F _a	10 KHz
D	0.25 0.50 0.75
R	5 Ω
L	1 mH
C	10 μF

Farklı PWM değerlerinde çözümleri ile bir tam periyot için elde edilen çıkış gerilimi değerleri

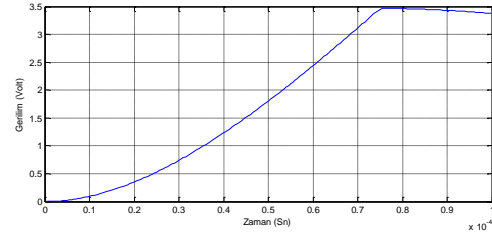
MATLAB ortamında grafiksel olarak Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 5 $\lambda = 0.25$ PWM kontrol değeri için çıkış gerilimi



Şekil 6. $\lambda = 0.50$ PWM kontrol değeri için çıkış gerilimi



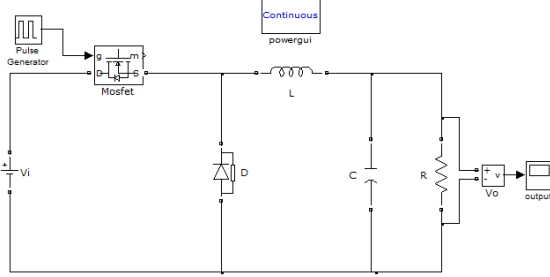
Şekil 7. $\lambda = 0.75$ PWM kontrol değeri için çıkış gerilimi

Elde edilen sonuçlarda görüldüğü üzere PWM değeri arttıkça çıkış gerilimi artmaktadır. Düşük PWM değerlerinde gerilim yükselmesi, gerilim düşmesine göre daha kısa sürmektedir. Aynı süre için gerilim düşmesi, gerilim yükselmesine göre daha az sürede olmaktadır. Bu durumda devrede kapasite ve bobin etkisinin ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.

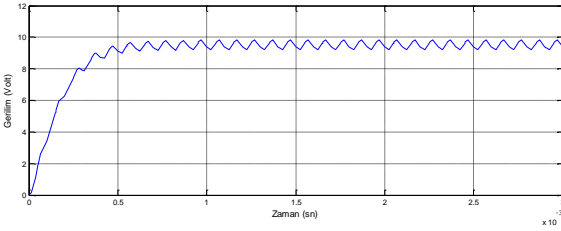
HEA'larda kullanılan DC-DC dönüştürücü yardımcı enerji kaynakları ile araç iletim barasına bağlanarak istenilen gücü karşılamaktadır. DC-DC dönüştürücü içten yanmalı motor ile veya tek başına gücü kontrol ünitesine iletmektedir [10].

Şekil 8'de MATLAB Simulink ortamında çizilmiş hibrit elektrik araçlarında kullanılan Buck

Dönüştürücü devresi görülmektedir. BKM ile yapılan çözümler birden fazla periyot değerleri için tekrarlanırsa elde edilen grafiğin Şekil 8'deki gibi olması beklenir.



Şekil 8 MATLAB Simulink ortamında hibrit elektrikli araçlarda kullanılan Buck dönüştürücü devresi [10]



Şekil 9 MATLAB Simulink ortamında hibrit elektrikli araçlarda kullanılan Buck dönüştürücü devresine ait çıkış gerilimi [10]

5. Sonuçlar

DC dönüştürücüler sabit bir DC gerilimi düşürmek veya yükseltmek amacıyla DC transformatör gibi kullanılırlar. Dönüştürücüler anahtarlamalı regülatörler olarak ve bir DC kaynaktan başka bir DC kaynağa enerji aktarmak amacıyla da kullanılabilir. Ancak, dönüştürücünün giriş ve çıkışlarında harmonikler üretilir. Bu harmonikler giriş ve çıkış süzgeçleriyle azaltılabilir. Dönüştürücüler sabit frekansla veya değişken bir frekansla anahtarlanabilir [11].

DC-DC çeviriciler anahtarlamalı güç kaynakları ve DC motor sürüş sistemlerinde oldukça geniş kullanım alanına sahiptir. Hibrit elektrikli araç uygulamalarında genellikle farklı gerilim seviyesine sahip DC sistemlerin birbirlerine bağlanması amacıyla kullanılırlar [12].

Güç elektroniği terimi çok geniş bir alanda elektronik devreleri içine almaktadır. 1950'lerden bu yana yarıiletken güç elemanlarının icat edilmesiyle güç elektroniği; haberleşme, ulaşım, aydınlatma, otomotiv, ısıtma, uzay sistemleri, kesintisiz güç kaynağı, motor kontrolü gibi birçok alanda uygulama bulmuştur [13]. Hatta bir uzay aracının güneş pilleri çıkışının uzay araçındaki değişik güç sistemlerinde kullanılmak üzere dönüşümü de buna ait bir uygulama olarak düşünülebilir [14]. Pille çalışan cihazların artmasıyla birlikte verimli düşük güçlü DC-DC dönüştürücülere olan ihtiyaç daha önce hiç olmadığı kadar artmıştır [15]. Düşük güçlerde verimli ve anahtarlama frekansı yüksek olan MOSFET teknolojisi DC-DC çeviricilerde kullanılmaktadır. Çeviricilerin verimleri genellikle %90'ların üzerindedir. Hacim, ağırlık ve maliyette kazanç sağlamak için batarya şarj sistemiyle birleştirilerek tek bir yapı haline getirme üzerinde çalışılabilir [6].

Bu çalışmada DC-DC Buck dönüştürücü devresi durum denklemleri kullanılarak bobin akımı ve kapasite gerilimine ait diferansiyel denklemler elde edilmiştir. Kullanılan anahtarlama elemanları ve diyotlar ideal kabul edilmiştir. Bobin akımı ve kapasite gerilimine ait denklemler Belirsiz Katsayılar Metodu ile çözümlenerek çıkış gerilim değeri elde edilmiştir. BKM ile elde edilen çıkış gerilimi değerlerinin grafiksel olarak gösteriminde Matlab programı kullanılmıştır.

Buck dönüştürücü devresinde Tablo 1'deki değerler için BKM sonuçları Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir. PWM kontrol değeri arttıkça çıkış gerilimi yükselmektedir. Düşük PWM değerlerinde gerilim yükselmesi, gerilim düşmesine göre daha kısa olduğu grafiklerden anlaşılmaktadır. Aynı süre için gerilim düşmesi, gerilim yükselmesine göre daha kısa sürmektedir. Bu durum devredeki kapasite ve bobin etkisinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 8'de Matlab Simulink ortamında çizilmiş Buck dönüştürücü devresi görülmektedir. Devreye ait benzetim sonucu Şekil 9'da verilmiştir. BKM ile

yapılan çözüm birden çok periyot için tekrarlanırsa sonucun Şekil 9'daki gibi olması beklenir.

6 Kaynaklar

- [1] Abut, N., Güç Elektroniği; Birsen Yayıncılık, 2004; 2 pp.
- [2] Karaçor M.; Nil M.; Onduk A.; Bir Durum İncelemesi: PLC mi? Micro-Denetleyici mi?, Endüstri Otomasyon Dergisi, Ocak 2013, 14-16.
- [3] Ertay, M. M.; YILDIZ, A. B.; Buck Dönüştürücü Devresinin Durum Değişkenleri Yöntemi ile Analizi, Proceedings of the 6th International Advanced Technologies Symposium, (IATS'11), Elazığ, Turkey, pp. 293-296, May 2011.
- [4] Tuna M.; Ergün A. A.; Ak, M.; Hibrit Elektrikli Araçlarda Kullanılan Yükselten DC-DC Dönüştürücünün Karşılaştırmalı Analizi, Genç Araştırmacılar Sempozyumu (UMES'07), pp. 212-215, 2007.
- [5] Bodur, H., DC - DC Dönüştürücülerde Yumuşak Anahtarlama Teknikleri Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, 2005, 15 pp.
- [6] Yıldız, M.; Topçu, N. T. Hibrit ve Tümü Elektrikli Araçlarda Kontrol ve Enerji Yönetimi Sistemleri, www.melihyildiz.com.tr/wp-content/uploads/2012/10/RAPOR.pdf (Ziyaret Tarihi: 20 Mart 2015).
- [7] Bodur H.; Güç Elektroniği, Birsen Yayıncılık, 2010; Bölüm 5, 181 – 182 pp.
- [8] Engin, T.; Çengel, Y. A., Mühendisler için DiferansiyelDenklemler, http://mim.bilecik.edu.tr/Dosya/Icerik/148/DosyaEki/2_muhendisler_icin_dif_denk_yunus_cengel.pdf, Sakarya Üniversitesi - Mak. Müh. Bölümü, Sakarya, Eylül 2008 (Ziyaret Tarihi: 20 Mart 2015).
- [9] Irwin, J. D., Nelms, R. M; Basic Engineering Circuit Analysis, Chapter 7; pp. 323 – 324.
- [10] Köklükaya E.; Yıldız M.; Bağcı S. Hibrit Araçlarda Güç Elektroniği Sistemlerinin Genelleştirilmiş Durum Uzay Ortalama Yöntemiyle Modellenmesi, Fırat Üniversitesi Elektrik Elektronik Bilgisayar Sempozyumu (FEEB 2011), Elazığ, Türkiye, Cilt 1, pp. 36-41, Ekim 2011.
- [11] Rashid M. H. (Çev: Sünter S.;Aydemir M. T.), Güç Elektroniği, *Nobel Yayıncılık, Pearson, 2015; 211 pp.
- [12] N. Ünlü, Ş. Karahan, O. Tür, H. Uçarol, E. Özsu, A. Yaşar, L. Turhan, F. Akgün, M. Tırıs, “ Elektrikli Araçlar”, http://www.normenerji.com.tr/menus/elektrikli-araclar_190220120138391025288910.pdf (Ziyaret Tarihi: 01 Nisan 2015).

- [13] Aziz Mamur, Yüksek Lisans Tezi, “FPGA Denetimli Düşürücü DA – DA Dönüştürücünün Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi” , Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, s.1, 2012.
- [14] Gürdal, O. Güç Elektroniği; Seçkin Yayıncılık, 2008; 2 pp.
- [15] Nuber, M. K. F.; Bretthauer, G. Variable Frequency Digital PWM Controller for Low-Power Buck Converters, Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), pp. 1227-1231, 2015.