



İki Hücreli DA-DA Yükseltici Dönüştürücü Üzerinde Farklı Akım Kontrol Yöntemlerinin Karşılaştırılması

The Comparison of Different Current Control Methods on the two Cell DC-DC Boost Converter

Fatih Karık¹, İres İskender², Hasan Eroğlu³

¹Enerji Sistemleri Mühendisliği, ²Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Gazi Üniversitesi
fatihkarik@gmail.com, iresis@gazi.edu.tr

³Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Gümüşhane Üniversitesi
hasan.eroglu@gumushane.edu.tr

Özet

Bu çalışmada, iki hücreli (sarmaşık yapı) DA-DA yükselticide sürekli iletim modunda oransal-integral (PI) kontrol ve ortalama kayan kip kontrol (OKKK) yöntemleriyle birim güç faktörü (UPF) ve giriş akımının toplam harmonik bozulumu (THD) incelenmiştir. İki hücreli yükselten güç faktörü düzeltici devrenin yüksek güçlerde kullanılma, giriş akım dalgacığını ve çıkış kapasitörünün etkin akımını azaltma, filtre büyüklüğünü düşürme gibi bir çok avantajı vardır. Dönüştürücünün 1kW güç ve 50 kHz anahtarlama frekansında benzetimleri gerçekleştirilmiş ve kontrol yöntemlerinin analizi yapılmıştır. Analizlerde, dönüştürücünün kontrol yöntemlerinde yük değişimlerinde dayanıklı yapı sergilediği gözlenmiştir. Ayrıca diğer parametre değişimlerinin de THD'ye etkisi araştırılmıştır.

Abstract

In this study, the control of two cell (interleaved) DC-DC boost operating under continuous conduction mode is achieved using proportional-integral control and average sliding mode control methods to obtain unity power factor and lower total harmonic distortion of input current. The two cell power factor correction converters have many advantages in high power applications, reducing input current ripple and RMS current of the boost capacitor, reducing filter volume, and cutting down the cost of materials. The analysis of the converter is presented and verified exactly by simulations carried out on 1 kW power and 50 kHz swithing frequency. In the analysis, it is observed that the control methods showed robust behaviour under the load variations. Moreover it is investigated the effects of parameters to THD.

1. Giriş

Dağıtım sistemlerindeki harmonik akım kirlenmesi problemi ilgi son yıllarda önemli ölçüde artmıştır. Sinüzoidal akım dalga şeklinin bozulmasının negatif etkilerinden dolayı giriş akımının harmoniklerinin azaltılmasına ilişkin çalışmalar yapılmaktadır. Sistemlerin güç faktörünü (PF) düzeltmek için birçok arayüz devre çalışması yapılmaktadır. Genelde A.A. tarafının güç faktörünü düzeltmek için giriş akımının şeklini sinüzoidal forma aktif şekilde ayarlayan güç faktörü düzeltmeli dönüştürücüler kullanılmaktadır. Güç faktörü düzeltmeli dönüştürücüler, güç kaynağı çıkışını düzenleme ve aktif ve görünen güçte kabul edilebilir bir oran sağlamada güç elektroniğinin önemli bir çalışma ve araştırma alanıdır [1-6]. Yükselten, alçaltan, geriuçan, köprüsüz, iki hücreli yapı gibi güç faktörü düzeltmeli dönüştürücülerde farklı topolojiler mevcuttur [7-11].

Yükselten güç faktörü önregülatörleri, basitlikleri (bir anahtar ve diyod), gerilim yükseltme karakteristiği, verim ve performanslarından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Güç seviyesini arttırması bakımından uygun dönüştürücüler sıklıkla paralel veya seri şekilde bağlanarak kullanılırlar. Dönüştürücünün yüksek güçlerde tekli kullanılmasının en belirgin dezavantajı yüksek gerilim ve akım baskısına maruz kalmasıdır. Bu yüzden yüksek güç uygulamalarında klasik yükselten dönüştürücü türevi olan iki veya daha fazla yükselten dönüştürücünün paralel bağlanması akım dalgacığını azaltması bakımından önerilir. Bu teknik aynı anahtarlama frekansında paralel çalışmada birçok hücrenin kontrol sinyalinin faz kaydırma işlemini ihtiva eder. Anahtarlama anları anahtarlama periyodunun eşit parçaları halinde sırayla faz kaydırılır. Bu işlem herhangi bir eleman üzerinde anahtarlama kayıplarını veya akım ve gerilim baskılarını arttırmaksızın tüm dönüştürücünün giriş akımı dalgacık genliğini düşürür ve etkin dalgacık frekansını arttırır. Düşük frekanslı harmoniklerin eliminasyonu filtreleme basamaklarının kayıplarının ve boyutunun azalmasını sağlar. Dönüştürücünün bu avantajları elektromanyetik girişimi

azaltma, geçici tepkiyi arttırmadır [12-15]. THD sınırlarıyla ilgili olarak uluslararası standartlar da bulunmaktadır [16].

Bu çalışmada, klasik tek anahtarlı DA-DA yükselten tip dönüştürücü yapısından türetilmiş iki hücreli yükselten devre mimarisi kullanılarak farklı kontrol yöntemlerinin analizi gerçekleştirilmiştir. Söz konusu devre klasik yükselten devre ile aynı çalışma prensibine sahip olduğundan, devre analizi bu çalışmada aktarılmamıştır.

2. Uygulanan Kontrol Yöntemleri

Yıllardır güç faktörü düzeltme devrelerinin kontrolü için farklı akım kontrol yöntemleri uygulanmaktadır. Bir ve çok hücreli dönüştürücülerin kontrol yöntemleri temelde farklı değildir. Tek fark geri besleme döngüsü adedidir. N-hücreli dönüştürücü için N-adet geri besleme döngüsü mevcuttur. İki hücreli devrede faz kaydırma işlemi sağlamak için ek devreye ihtiyaç duyulur. Bundan dolayı tüm kontrol teknikleri tek hücreli topolojiye göre tasarlanıp görev oranı, $d_2, d=d_1$ 'e göre sadece 180° faz kaydırılmıştır. Bu bölümde giriş geriliminin temel bileşeniyle giriş akımını senkronize eden kontrol yöntemleri anlatılmıştır.

2.1. Oransal-İntegral Kontrol Yöntemi

Güç faktörü düzeltme kontrol yöntemlerinin temel amacı birim güç faktörünü sağlamak için dönüştürücünün direnç yükü gibi davranmasını sağlamaktır. Direnç yükü karakteristiğini elde etmek için giriş akımı giriş gerilimi değişimlerini takip etmelidir. Oransal-integral kontrolör bu işlem için yaygın kullanılan tekniklerden bir tanesidir. Bu yöntemde ortalama endüktör akımı almır ve bu ortalama değer anahtarlama yapılarak kontrol edilir. Ortalama akım modlu oransal-integral kontrol [17-19]'de detaylı analiz edilmiştir. (1) ila (4) nolu eşitlikler bu dönüştürücüde oransal-integral kontrol yönteminin temel denklemlerini ifade etmektedir.

$$I_{ref} = [(V_{ref} - V_o) \cdot V_{EAV}] \cdot |V_{in}| \quad (1)$$

$$d = d_1 = (I_{ref} - |I_{in}|) \cdot V_{EAI} \quad (2)$$

$$V_{EAV} = (K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s}) \quad (3)$$

$$V_{EAI} = (K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s}) \quad (4)$$

Burada,

V_{EAV} : Oransal-integral kontrollü gerilim hata yükselticini,

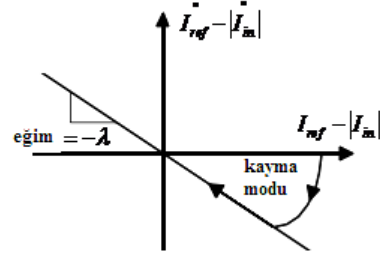
V_{EAI} : Oransal-integral kontrollü akım hata yükselticini

gösterir. Oransal-integral kontrolörde, K_p ve K_i Ziegler-Nichols yöntemine göre seçilir. PI kontrol yönteminde gerçek akım referans akımı takip ederek birim güç faktörü ve düşük THD'yi sağlar.

2.2. Ortalama Kayan Kip Kontrol Yöntemi

Doğrusal olmayan, parametreleri zamanla değişen ve karmaşık dinamiklere sahip sistemlerin kontrolü klasik denetleyicilerle zor olmaktadır. Bu tür sistemlerin denetiminde OKKK etkili bir kontrol yöntemidir. OKKK yönteminin kapalı çevrim kontrol sistemlerine uygulanmasında amaç, hatayı kayma yüzeyi veya diğer adıyla anahtarlama yüzeyine doğru itmek ve bu yüzeyde tutmaktır. Kayma yüzeyi durum değişkenlerinin doğrusal kombinasyonu olan bir fonksiyon olarak tanımlandığı için durum değişkenleri bu yüzey üzerine doğrusal bağımlıdır. Bu durumda, sistemin derecesi bağımsız giriş değişkeni kadar indirgenmiş olur ve sistem indirgenmiş bir kontrol kuralı ile denetlenir.

Kayan kipli denetimin en büyük sorunlarından bir tanesi anahtarlama frekansının değişken olmasıdır. Bu da frekansın çok yüksek değerlere çıkmasına neden olmaktadır. Bu soruna çarptırma problemi denmektedir. Anahtarlama frekansını sabitlemek için OKKK yöntemi kullanılabilir. Şekil 1 tanımlanan kayma yüzeyini göstermektedir.



Şekil 1: Kayma yüzeyi

Kayan kipli denetim aşağıda verilen temel kurala dayanmaktadır.

$$S \cdot \dot{S} < 0 \quad (5)$$

Burada S ve S' in türevi Şekil 1'e göre Eş.6-7'teki gibi tanımlanabilir.

$$S = I_{ref} - |I_{in}| \quad (6)$$

$$\dot{S} = \dot{I}_{ref} - \left| \dot{I}_{in} \right| \quad (7)$$

Düzlem üzerinde seçilen anahtarlama doğrusu Eş. 8'te verilmiştir.

$$\dot{S} = -\lambda \cdot S \quad (8)$$

Tek hücreli yükseltici dönüştürücünün durum uzay ortalaması sonucu elde edilen bobin akımı denklemi -bu değer aynı zamanda doğrultulmuş giriş akımı- Eş.9'da verilmiştir. Eş. 10 ifadesi Eş. (6) ve (7), Eş.8'de yerine konularak elde edilir. Eş. 10'daki bobin akımının türevi yerine Eş.9'daki bobin akımı türevi konulup $L \cdot \dot{I}_{ref} \approx 0$ kabul edilerek d görev oranı yalnız bırakılırsa Eş.11'e ulaşılır.

$$|\dot{I}_{in}| = \left(\frac{d-1}{L}\right)V_o + \left(\frac{1}{L}\right) \cdot |V_{in}| \quad (9)$$

$$(\dot{I}_{ref} - |\dot{I}_{in}|) = -\lambda(I_{ref} - |I_{in}|) \quad (10)$$

$$d = d_1 = \frac{V_o - |V_{in}| + \lambda L(I_{ref} - |I_{in}|)}{V_o} \quad (11)$$

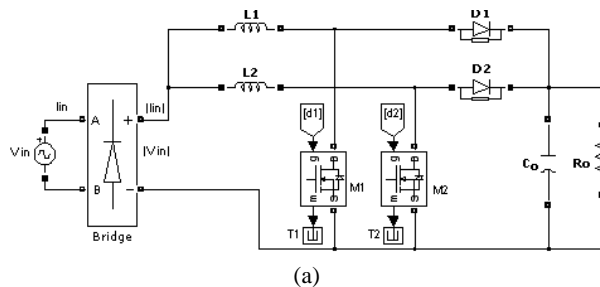
verilen eşitlik incelendiğinde görev oranı değerinin oluşmasında V_{in} ve V_o gerilimi ileri besleme ile değişimini sağlamaktadır. Hata değeri bu değeri etkiler ve uygun d değeri üretilmesini sağlar [20-22].

3. Benzetim Çalışması

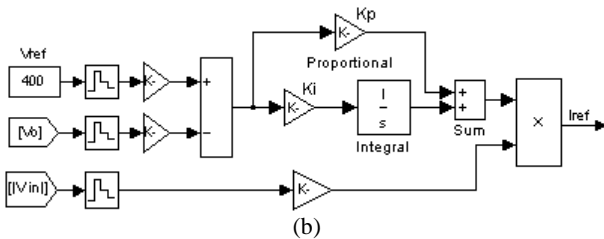
Benzetim çalışmaları MATLAB/Simulink programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarında seçilen parametreler Çizelge 1’de gösterilmiştir. İki hücreli dönüştürücü ve kontrolcüler ise Şekil 2’de gösterilmiştir.

Çizelge 1: Seçilen parametreler

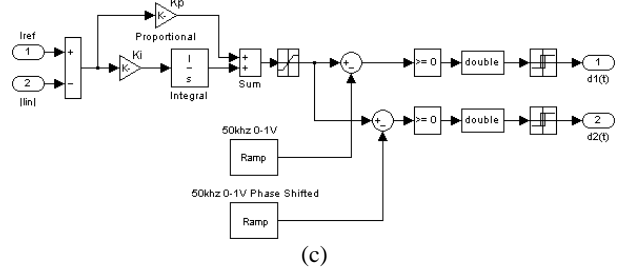
Güç Parametreleri		
Çıkış gücü	P_o	1 [kW]
Çıkış gerilimi	$V_o (V_{ref})$	400 [V]
Giriş gerilimi	$V_{in} f_{line}$	220 [V _{rms} , 50 Hz]
Anahtarlama frekansı	f_s	50 [kHz]
Bobin değerleri	$L_1=L_2$	6,8 [mH]
Çıkış kapasitörü	C_o	500 [µF]
Kontrolcü parametreleri		
K_{pv}	0,1	PI ve OKKK ortak
K_{iv}	1	
K_{pi}	0,125	PI
K_{ii}	1000	
λL	0,0625	OKKK



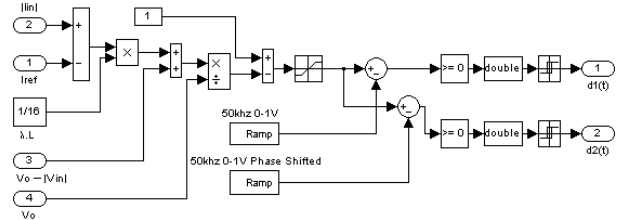
(a)



(b)



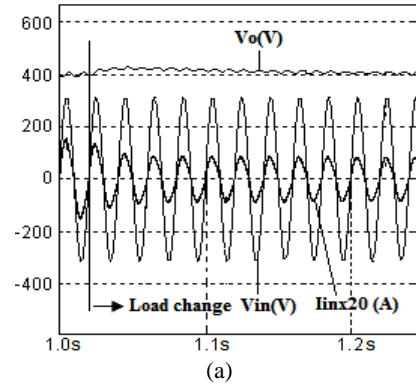
(c)



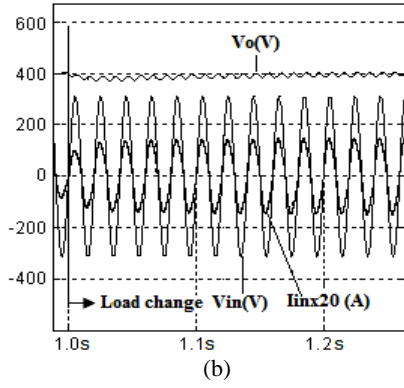
(d)

Şekil 2: İki hücreli yükselten dönüştürücü topolojisi: (a) Güç devresi (b) Gerilim kontrolcüsü (c) Oransal-integral akım kontrolcüsü (d) Ortalama kayan kip akım kontrolcüsü

Şekil 3 oransal-integral yöntemine göre giriş hat akımı, giriş ve çıkış gerilimi değişimini göstermektedir. Bu durum için giriş gerilimi 220 V_{rms}, çıkış gücü 1 kW, giriş gerilim frekansı 50 Hz’dir. Şekil 3(a), (b)’de dönüştürücü gücü 1kW’dan (tam yük) 500 W’a (yarım yük) ve 500W’tan 1 kW’a değiştirilerek sonuçlar gösterilmiştir. Güç katsayısı ve toplam harmonik bozulma 1 kW/500 W değerlerine göre sırasıyla 0,99/0,99 ve %7,1/ %8,3’dir.

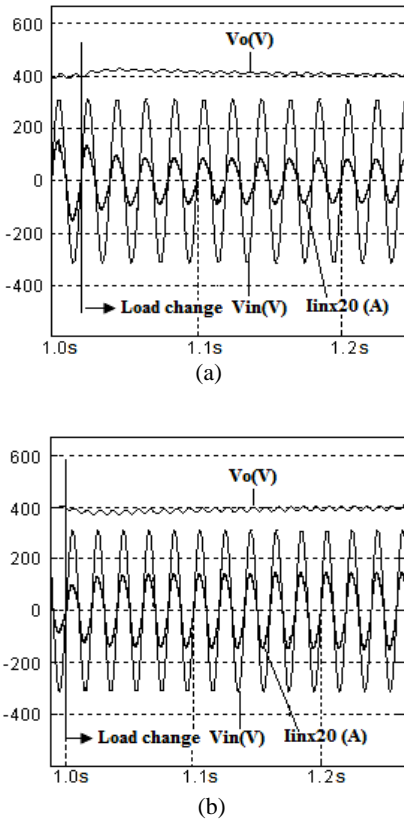


(a)



Şekil 3: Giriş, çıkış gerilimi ve hat akımı değişimi: (a) 1kW'dan 500 W'a, (b) 500W'tan 1 kW'a

Şekil 4 ortalama kayan kip yöntemine göre giriş hat akımı, giriş ve çıkış gerilimi değişimini göstermektedir. Bu durum için giriş gerilimi 220 V_{rms} , çıkış gücü 1 kW, giriş gerilim frekansı 50 Hz'dir. Şekil 4(a), (b)'de dönüştürücü gücü 1kW'dan (tam yük) 500 W'a (yarım yük) ve 500W'tan 1 kW'a değiştirilerek sonuçlar gösterilmiştir. Güç katsayısı ve toplam harmonik bozulma 1 kW/500 W değerlerine göre sırasıyla 0,99/0,99 ve %6,0/%6,2'dir.



Şekil 4: Giriş, çıkış gerilimi ve hat akımı değişimi: (a) 1 kW'dan 500 W'a, (b) 500 W'tan 1 kW'a

Tüm kontrol yöntemleri için güç elektroniği dönüştürücü devresi anahtarlama frekansı 50 kHz alınmıştır. Kontrol tekniklerine göre sonuçlar aşağıdaki Çizelgede sunulmuştur.

Çizelge 2: Detaylı benzetim sonuçları

Güç (kW)	1	1	1	1	0,5	1	1
$L_1=L_2$ (mH)	6,8	6,8	6,8	5,0	6,8	0,8	6,8
C_o (μF)	500	500	500	500	500	500	250
$V_{in}(V_{rms})$	220	110	250	220	220	220	220
V_o (V_{da})	400	400	400	400	400	400	400
Oransal-integral yöntemi							
PF	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
THD (%)	7,1	2,7	9,1	7,3	8,3	35	13,3
Ortalama kayan kip yöntemi							
PF	0,99	1	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
THD (%)	6,0	1,7	8,6	6,5	6,2	10	13,1

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, oransal-integral ve ortalama kayan kip şebeke akımı kontrol metodları iki hücreli yükselten tip güç katsayısı düzeltici devreye uygulanıp Matlab/Simulink programında benzetimleri gerçekleştirilmiştir ve elde edilen sonuçlar sunulmuş olup analizler yapılmıştır. Kullanılan tüm kontrol tekniklerinde sabit anahtarlama frekansı kullanılarak pratik çalışmalar için bir temel teşkil edilmiştir.

Test edilen iki kontrol tekniğinin de grafiklerden görüldüğü üzere çıkış yükü değişimlerine karşı dayanıklı bir yapı sergilediği gözlemlenmiştir. Tasarlanan 1 kW'lık benzetim devresinde oransal-integral kontrol tekniğinin ortalama kayan kip kontrol tekniğine göre endüktör değişimlerine daha hassas olduğu gözlemlenmiştir. Endüktör değeri azaltıldığında oransal-integral kontrolcü katsayı ayarlamalarının tekrar yapılması gerektiği, ortalama kayan kip yönteminin ise performansını koruduğu gözlemlenmiştir. Kapasitör değişimi ise çıkış gerilim dalgalanmasına etki etmektedir.

5. Kaynaklar

- [1] Wolfle, W.H., ve Hurley, W.G., "Quasi-active power factor correction with a variable inductive filter, theory, design and practice", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Cilt 18, 248 – 255, 2003.
- [2] Huai, W., Batarseh, I., Guanyong, Z., ve Kornetzky P., "A single-switch AC-DC converter with power factor correction", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Cilt 15, No 3, 421 – 430, 2000.
- [3] Mather, B.A., ve Maksimović, D., "A Simple Digital Power-Factor Correction Rectifier Controller", *IEEE*

- Transactions on Power Electronics*, Cilt 26, No 1, 9 – 19, 2001.
- [4] Tsai-Fu, W., Chien-Chih, C., Chih-Lung, S., ve Cheng-Nan, W., “Analysis, design, and practical considerations for 500 W power factor correctors”, *Aerospace and Electronic Systems IEEE Transactions*, Cilt 39, No 3, 961 – 975, 2003.
- [5] Genc, N., ve Iskender, I., “An Improved Soft Switched PWM Interleaved Boost AC-DC Converter”, *Energy Conversion and Management*, Cilt 52, No. 1, 403-413, 2011
- [6] Karaarslan, A., ve Iskender, I., “Pure sinusoidal input voltage based bridgeless PFC converter using TMS320F2812 digital signal processor”, *Electrical and Electronics Engineering, ELECO'09 International Conf.*, 2009, 234 – 238.
- [7] Qiao, C., ve Smedley, K.M.,”A topology survey of single-stage power factor corrector with a boost type input-current-shaper”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Cilt 16, No 3, 360 – 368, 2001.
- [8] Po-Wa, L., Yim-Shu, L., Cheng, D.K.W., ve Xiu-Cheng, L., “Steady-state analysis of an interleaved converter with coupled inductors”, *Industrial Electronics IEEE Transactions*, Cilt 47, No 4, 787 – 795, 2000.
- [9] Yao-Ching, H., Te-Chin, H., ve Hau-Chen, Y., “An Interleaved Boost Converter with Zero-Voltage Transition”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Cilt 24, No 4, 973 – 978, 2009.
- [10] Alonso, J.M., Dalla Costa, M.A., ve Ordiz, C., “Integrated Buck-Flyback Converter as a High-Power-Factor Off-Line Power Supply”, *Industrial Electronics IEEE Transactions*, Cilt 55, No 3, 1090 – 1100, 2008.
- [11] Jun, Z., Lu, D.D.-C., ve Ting, S., “Flyback-Based Single-Stage Power-Factor-Correction Scheme with Time-Multiplexing Control”, *Industrial Electronics IEEE Transactions*, Cilt 57, No 3, 1041 – 1049, 2010.
- [12] Yao, G., Chen, A., ve He, X., “Soft Switching Circuit for Interleaved Boost Converters”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Cilt 22, No 1, 80-86, 2007.
- [13] Hsieh, Y.-C., Hsueh T.-C., ve Yen, H.-C., “An Interleaved Boost Converter With Zero-Voltage Transition”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Cilt 24, No 4, 973-978, 2009.
- [14] Yungtae, J., ve Jovanovic M.M., “Interleaved Boost Converter with Intrinsic Voltage-Doubler Characteristic for Universal-Line PFC Front End”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Cilt 22, No 4, 1394-1401, 2007.
- [15] Rezvanyvardom, M., ve All E., “A New Interleaved ZCS PWM Boost Converter”, *IEEE International Conference on Power and Energy*, 2010, Cilt 1, 45-50.
- [16] IEC Standard IEC 61000-3-2,”Electromagnetic Compatibility (EMC), Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment input current $\leq 16A$ per phase)”, 2009.
- [17] Genc, N., ve Iskender, I., “DSP-based Current Sharing of Average Current Controlled Two-Cell Interleaved Boost PFC Converter”, *IET Power Electronics*, Cilt 4, No. 9, 1015-1022, 2011.
- [18] Karaarslan, A., ve Iskender, I., “Güç Katsayısı Düzeltim Devrelerinde Ortalama Akım Kontrol Tekniği ve Sayısal Sinyal İşlemcisi Kullanılarak Yeni bir Yöntemin Uygulanması ”, *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, Cilt 26, No 1, 193-203, 2011.
- [19] Sun, C., ve Lehman, B., “Discussions on Control Loop Design in Average Current Mode Control”, *IEEE Industry Application Conf.*, Cilt 4, 2411-2417, 2000.
- [20] Navarro-López, E.M., Cortés, D., ve Castro, C., “Design of practical sliding-mode controllers with constant switching frequency for power converters”, *Electric Power Systems Research*, Cilt 79, 796–802, 2009.
- [21] Mattavelli, P., Rossetto, L., ve Spiazzi, G.,”Small-Signal Analysis of DC-DC Converters with Sliding Mode Control”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Cilt 12, No 1, 96-102, 1997.
- [22] Navarro-López, E.M., Cortés, D., ve Castro, C., “Design of practical sliding-mode controllers with constant switching frequency for power converters”, *Electric Power Systems Research*, Cilt 79, 796–802, 2009.