Oransal-İntegral Denetleyici Kullanarak Negatif Temel Seri Luo Dönüştürücünün Gerilim Düzenlemesi

Voltage Regulation of Negative Main Series Luo Converter Using Proportional-Integral Controller

Ahmet Gani[1], *Rıdvan Demir*[1]

[1]Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Kayseri Üniversitesi, Kayseri
ahmetgani@kayseri.edu.tr, ridvandemir@kayseri.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada, sürekli iletim modunda çalışan negatif temel seri Luo dönüştürücünün gerilim düzenlemesi için oransal-integral denetleyici önerilmiştir. Çalışmada önerilen gerilim düzenleyici ve integral denetleyici tabanlı gerilim düzenleyicinin dinamik cevaplarının farklı denetim senaryoları ile test edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ilk olarak dönüştürücünün devre modeli analiz edilmiş ve sürekli iletim modunda çalışma için devre eleman sınır değerleri belirlenmiştir. Daha sonra önerilen gerilim düzenleyicinin dinamik performansı referans gerilimi, giriş gerilimi ve yük değişimi gibi bozuculara karşı Matlab/Simulink benzetim ortamında integral denetleyici tabanlı gerilim düzenleyici ile karşılaştırılmıştır. Önerilen gerilim düzenleyici ve integral denetleyici tabanlı gerilim düzenleyicinin dinamik performans karşılaştırması için aşım, yerleşme zamanı ve yenilenme zamanı denetim performans kriterleri kullanılmıştır. Benzetim çalışmasından elde edilen sonuçlar önerilen gerilim düzenleyicinin integral denetleyici tabanlı gerilim düzenleyiciye göre oldukça etkin ve dayanıklı bir dinamik performansa sahip olduğunu göstermiştir.

Abstract

The present study proposes a proportional-integral controller for voltage regulation of a negative main series Luo converter with operating continuous conduction mode. It is aimed to test the dynamic responses of the voltage regulator and integral controller-based voltage regulator proposed in the study with different control scenarios. For this aim, the circuit model of converter was analyzed and circuit element boundary values were calculated for continuous conduction mode. After that, the dynamic performance of the proposed voltage regulator is compared with an integral controller based voltage regulator in Matlab/Simulink simulation environment against disturbances such as reference voltage, input voltage and load change. The control performance criteria such as overshoot, settling time and recovery time were used to compare the dynamic performance of the proposed voltage regulator and an integral controller based voltage regulator. The results obtained from the simulation study showed that the proposed voltage regulator has a remarkably effective and stable performance compared to integral controller based voltage regulator.

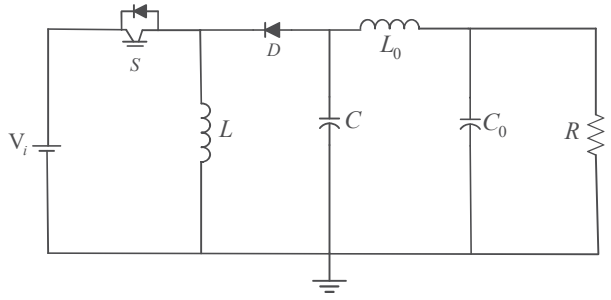
1. Giriş

Doğru akım (DA) dönüştürücüler farklı giriş gerilimi ve yük değerlerinde geniş ve sabit değerli çıkış gerilimi üretmeleri ve geçici zaman tepkilerinin hızlı olması gibi özellikleri ile güç elektroniğinde sıklıkla kullanılmaktadırlar[1]. Son yıllarda, birçok DA dönüştürücü devre topolojisi geliştirilmiştir. Luo DA dönüştürücü devre topolojisi de bunlardan biridir. Luo DA dönüştürücü devre topolojisi gerilim yükseltme yöntemi kullanılarak geliştirilen bir devre topolojisidir. Gerilim yükseltme yöntemi dönüştürücü devresindeki parazitik elemanların etkisini sınırlandırdığından çıkış gerilimi ve verimliliği ile DA dönüştürücü devre özelliklerinin gelişmesine yol açmıştır[2-3]. Negatif çıkışlı Luo dönüştürücüler pozitif doğru akım (DA) giriş geriliminden negatif doğru akım (DA) çıkış gerilimine az gerilim dalgalanmalı ters çıkış gerilimi vermektedirler [4]. Ani gerilim ve yük değişimleri negatif çıkışlı Luo dönüştürücünün kararsız çalışmasına neden olmaktadır. Bu olumsuzluğun üstesinden gelebilmek için dönüştürücü mutlaka kapalı bir çevrime sahip denetim sistemi tarafından denetlenmelidir. Kapalı çevrim denetimde sistem çıkışından yapılan geri besleme ile daha hassas bir denetim gerçekleştirilmektedir[5].Geleneksel denetim türü olan oransal-integral (PI) tipi denetim yapısı ayarlanacak parametre sayısının az olması sebebiyle sıklıkla tercih edilmektedir[6].Negatif çıkışlı temel seri Luo dönüştürücünün çıkış gerilimi düzenlemesi için literatürde aralıklı tip-2 bulanık mantık [4] ve genetik algoritma [7] gibi çeşitli yöntemler kullanılmıştır.Bu çalışmada ise önceki çalışmalardan farklı olarak negatif çıkışlı temel seri Luo dönüştürücünün Matlab/Simulink ortamında benzetim modeli oluşturulmuştur. Dönüştürücünün gerilim düzenlemesi referans gerilimi, giriş gerilimi ve yük direnci gibi bozucu sistemsel parametreler göz önünde bulundurularak PI ve integral (I) denetleyici tabanlı gerilim düzenleyicileriyle gerçekleştirilmiştir. PI denetleyici tabanlı gerilim düzenleyici ayarlanacak parametre sayısının az olması, deneme-yanılma yöntemi ile en uygun denetleyici parametrelerinin belirlenebilmesi ve fiziksel olarak gerçekleme kolaylığı nedeniyle tercih edilmiştir. Çalışmanın devam eden bölümleri şu şekildedir: ikinci bölümde negatif çıkışlı temel seri Luo dönüştürücü devre modeli, üçüncü bölümde önerilen PI denetleyici tabanlı gerilim düzenleyici yapısı, dördüncü bölümde detaylı benzetim çalışmaları ve son olarak

çalışmadan elde edilen temel çıkarımlar sonuçlar bölümünde verilmiştir.

2. Negatif Çıkışlı Temel Seri Luo Dönüştürücü

Gerilim yükseltmeli dönüştürücüler iki alt seriden oluşmaktadır. Birincisi temel seri, diğeri de ek seri olarak isimlendirilmektedir. Bu çalışmada temel seri negatif gerilim yükseltmeli Luo dönüştürücü kullanılmıştır. Temel seri bir yarı iletken anahtarlama elemanı *S*; iki adet indüktör *L* ve L_0; iki adet kapasitör *C*, C_0; bir adet diyot ve yük direncinden (*R*) oluşmaktadır. Temel seri devre Şekil 1'de verilmiştir.



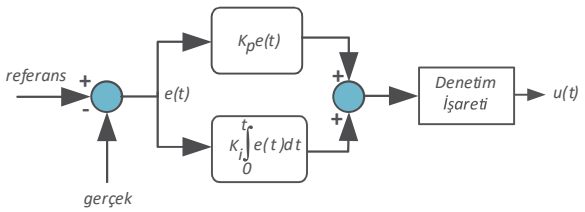
Şekil 1: Temel seri devre [4].

Şekil 1'de verilen temel seri devrede *S* anahtarı kapalı durumda iken indüktör *L*, kaynaktan akım çeker ve indüktör akımı artar. Aynı zamanda *D* diyotu ters yönlü olduğu için kesimde olur. *Lo* indüktörü, çıkış akımını sürekli tutar ve enerjiyi *C* kondansatöründen *R* yük direncine aktarır. *S* yarı iletken anahtarlama elemanı açık durumda iken, *L* indüktöründen akan akım *C* kondansatörünü şarj etmek için *D* diyotu üzerinden akar. *L* indüktörü, depolanan enerjisini *C* kapasitörüne aktarır ve *R* yük direncini indüktör *Lo* aracılığıyla yükler [4,8]. Dönüştürücünün sürekli iletim modu için gerilim transfer kazancı (M_{VTG}) aşağıda verilmiştir:

$$M_{VTG} = \frac{V_0}{V_{in}} = -\frac{D}{1-D} \tag{1}$$

3. Önerilen PI Denetleyici Tabanlı Gerilim Düzenleyici

Basit yapılarından dolayı PI denetleyicilerin kullanım alanları geniştir. Bu denetleyiciler sistemin kalıcı durum hatasını ve yükselme zamanını azaltmakta aynı zamanda sistemin geçici durum cevabını da iyileştirmektedir. Şekil 2'de PI denetim yapısına ait blok şema verilmiştir.



Şekil 2: PI denetim yapısı

Şekil 2'den görüldüğü gibi PI denetleyicinin oransal (K_P) ve integral (K_i) gibi kazanç parametreleri bulunmaktadır. PI denetim yapısına ait denetim işareti eşitliği aşağıda verilmiştir.

$$u(t) = K_p\, e(t) + K_i \int_0^t e(t)\, dt \tag{2}$$

K_p ve K_i kazanç sabitlerinin değerini belirlemek için literatürde deneme-yanılma, Cohen-Coon, Yuwana-Seborg, Ziegler-Nichols gibi çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu çalışmada dönüştürücü matematiksel modeli gerektirmeden kazanç sabiti hesaplayabilen Ziegler-Nichols yöntemi tercih edilmiştir [9]. Kazanç sabitleri bu yöntem ile en iyi denetleyici cevabı oluşturacak şekilde K_p=0.000625 K_i=9 olarak belirlenmiştir. Tablo 1'de ise PI denetleyicinin kazanç sabitlerinin sistem cevabına olan etkileri gösterilmiştir.

Tablo 1. PI denetleyici kazanç sabitlerinin sistem cevabına olan etkileri

Parametre	Yükselme Zamanı	Aşım	Yerleşme Zamanı	Kalıcı durum hatası
$\mathbf{K_p}$	Azalır	Artar	Az değişir	Azalır
$\mathbf{K_i}$	Azalır	Artar	Artar	Yok edilir

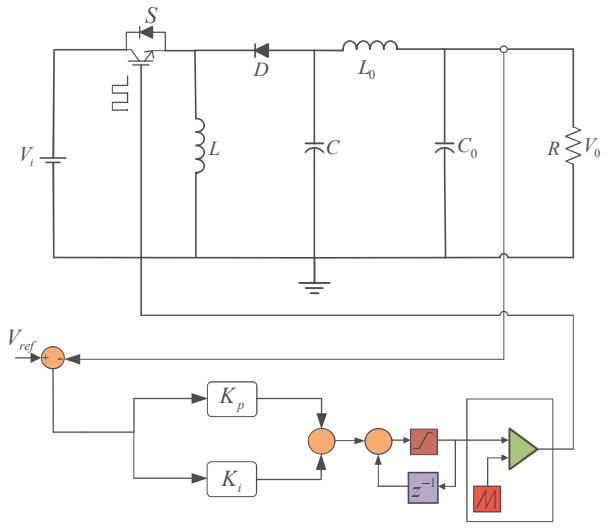
4. Benzetim Çalışmaları

Negatif çıkışlı luo dönüştürücünün gerilim düzenleme performansını incelemek için devrenin anahtarlama frekansının, devrede kullanılan eleman değerlerinin ve devrenin giriş-çıkış gerilim değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Benzetim çalışmaları için kullanılacak olan negatif çıkışlı temel seri Luo dönüştürücüye ait devrenin; giriş gerilimi, çıkış gerilimi, yük ve anahtarlama frekansı değerleri Tablo 2'de belirtilmiştir.

Tablo 2. Negatif çıkışlı temel seri luo dönüştürücünün benzetim çalışması için seçilen değerler

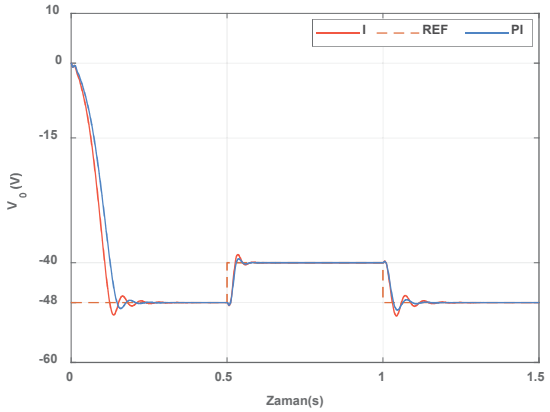
Giriş Gerilimi	V_i	12V
Yük Direnci	R	20Ω
Yük Gerilimi	V_0	48V
Anahtarlama Frekansı	f	50Khz
İndüktör	L	5mH
İndüktör	L_0	15mH
Kapasitör	C	100µF
Kapasitör	C_0	150µF

Önerilen PI denetleyici tabanlı gerilim düzenleyici yapısı ile negatif çıkışlı temel seri Luo dönüştürücünün blok diyagramı Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3: Önerilen PI denetleyici ile negatif çıkışlı temel seri Luo dönüştürücünün blok diyagramı

Şekil 3'te görüldüğü gibi V_{ref} negatif çıkışlı temel seri Luo dönüştürücü çıkışının istenen referans gerilim değeridir. V_0 dönüştürücünün çıkış gerilimi olup u önerilen PI denetleyicinin denetim işaretidir. u denetim işareti darbe genişlik modülasyonu (DGM) bloğu aracılığıyla anahtarlama elemanına uygulanmaktadır. Ayrıca PI denetleyici yapısının çıkışına anti-wind-up integratör bloğu bağlanarak kalıcı durum hatasının minimize edilmesi amaçlanmıştır. Benzetim çalışmalarında ilk olarak önerilen PI denetleyici tabanlı gerilim düzenleyici ve integral denetleyici tabanlı gerilim düzenleyicinin basamak fonksiyonu şeklinde verilen referans gerilimi düzenleme başarımı incelenmiştir. Basamak fonksiyonu şeklindeki referans gerilim değerleri sırasıyla (-48V), (-40V) ve (-48V)'dur. Değişen basamak fonksiyonu şeklindeki referans gerilimi için önerilen PI ve integral denetleyicilerin gerilim düzenleme cevapları Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'ten görüldüğü gibi önerilen PI gerilim düzenleyici (0V)→(-48V) basamak referans gerilim artışında %2.375 alt aşım yaparak 0.24s sonra referans gerilim değerine ulaşırken, integral gerilim düzenleyici ise %5.131 alt aşım yaparak 0.27s sonra referans gerilim değerine ulaşmıştır.(-48V)→(-40V) basamak referans gerilim düşümünde önerilen PI gerilim düzenleyici %2 üst aşım yaparak 0.1s sonra referans gerilimi yakalarken, integral gerilim düzenleyici ise %4.625 üst aşım yaparak 0.12s sonra referans gerilim değerini yakalamıştır. Benzer şekilde (-40V)→(-48V) artan referans gerilim değişiminde önerilen PI gerilim düzenleyici %3.125 alt aşım ile 0.2s sonra istenilen referans gerilim değerini takip ederken, integral gerilim düzenleyici ise %5.541 alt aşım yaparak 0.25s sonra referans gerilim değerini takip etmiştir. Gerilim düzenleyicilerin basamak geçişlerindeki aşım miktarı (%) ve yerleşme zamanları Tablo 2'de verilmiştir.

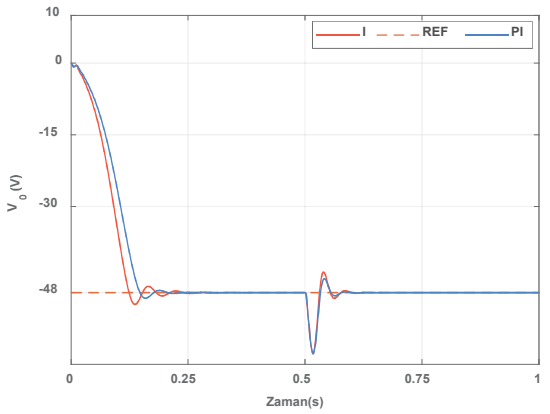


Şekil 4. Değişen basamak fonksiyonu şeklindeki referans gerilimi için denetleyicilerin gerilim düzenleme cevapları

Tablo 2. Gerilim düzenleyicilerin basamak geçişlerindeki aşım miktarı (%M) ve yerleşme zamanları (t_y)

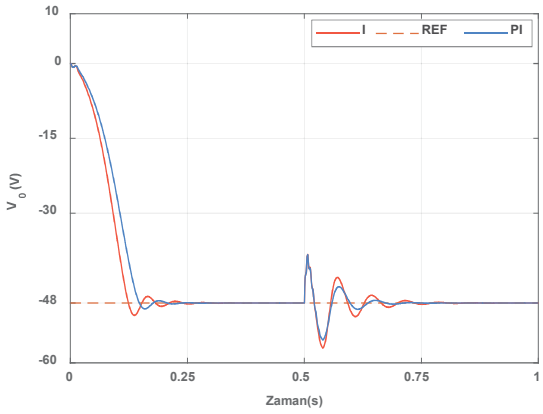
GD	0V→-48V		-48V→-40V		-40V→-48V	
	%M	t_y(s)	%M	t_y(s)	%M	t_y(s)
PI	2.375	0.24	2	0.1s	3.125	0.2s
I	5.131	0.27	4.625	0.12	5.54	0.25s

İkinci olarak önerilen PI gerilim düzenleyici ve integral gerilim düzenleyicinin basamak şeklinde değişen giriş gerilimine karşı gerilim düzenleme performansları incelenmiştir. Bu amaçla basamak fonksiyonu şeklinde değişen giriş gerilimi t=0.5s anında 12V değerinden 15V değerine artırılmıştır. Basamak fonksiyonu şeklindeki giriş gerilim değişimi için önerilen PI gerilim düzenleyicinin ve integral gerilim düzenleyicinin cevapları Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Basamak fonksiyonu şeklindeki giriş gerilim değişimi için gerilim düzenleyicilerin cevapları

Şekil 5'ten görüldüğü gibi giriş geriliminin t=0.5s anında değiştirilmesiyle önerilen PI gerilim düzenleyici sırasıyla %6.06 üst ve %1.38 alt aşımlar yaparak 0.1s yenilenme süresi ile referans gerilimi takip etmeyi başarmıştır. Benzer şekilde, integral gerilim düzenleyici ise %9.02 üst ve %2.5 alt aşımlar yaparak 0.12s yenilenme süresinde referans gerilimi takip etmeyi başarmıştır. Son olarak sabit giriş geriliminde çalışan negatif temel seri Luo dönüştürücünün yük değerinin değişiminde önerilen PI gerilim düzenleyici ve integral gerilim düzenleyicinin performansları incelenmiştir. Yük değeri t= 0.5s anında 20Ω değerinden 15Ω değerine düşürülerek %25 oranında yük değişimi yapılmıştır. Yük değişimi için gerilim düzenleyicilerin cevapları Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Yük değişimi için gerilim düzenleyicilerin cevapları

Şekil 6 incelendiğinde t=0.5s anında %25 oranında yük değişimi yapıldığında her iki gerilim düzenleyicide alt ve üst aşımlar oluşmasına rağmen önerilen gerilim düzenleyici integral gerilim düzenleyiciye göre %59'luk bir yenilenme süresi iyileştirme oranı ve ortalama %54'lük aşım iyileştirme oranı ile referans değeri takip etmeyi başarmıştır. Önerilen PI gerilim düzenleyici ve integral gerilim düzenleyici ile negatif çıkışlı temel seri Luo dönüştürücünün benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçlar incelendiğinde aşağıdaki çıkarımlar yapılabilir:

- Basamak şeklinde oluşturulan referans gerilim değişimlerine karşı önerilen PI gerilim düzenleyici integral gerilim düzenleyiciye göre gerek % aşım gerekse yerleşme zamanı için daha yüksek iyileştirme değerlerine sahiptir.
- Giriş geriliminde basamak şeklinde meydana getirilen değişime karşı önerilen PI gerilim düzenleyicinin yenilenme süresi başarımı integral gerilim düzenleyiciye göre daha yüksektir.
- Yük değerinde %25 oranında meydana getirilen değişime karşı önerilen PI gerilim düzenleyici yenilenme süresi ve ortalama aşım iyileştirme oranı değerlerinde integral gerilim düzenleyiciye göre daha tatmin edici seviyede başarım göstermiştir.

Özetle, önerilen PI gerilim düzenleyici ve integral gerilim düzenleyicinin başarımı negatif çıkışlı temel seri Luo dönüştürücünün farklı çalışma koşulları altında karşılaştırmalı olarak test edilmiş ve önerilen PI gerilim düzenleyicinin başarımı sayısal değerlerle doğrulanmıştır.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada negatif çıkışlı temel seri Luo dönüştürücü tasarlanmış ve dönüştürücünün çıkış gerilim düzenlemesi için PI gerilim düzenleyici önerilmiştir. Önerilen PI gerilim düzenleyicinin referans gerilim takibi ve bozucu girişlere (giriş gerilimi ve yük değişimi gibi) karşı dinamik performansı detaylı benzetim çalışmalarıyla integral gerilim düzenleyici kullanılarak karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Önerilen PI gerilim düzenleyici bütün çalışma durumlarında integral gerilim düzenleyiciye göre daha hızlı ve dayanıklı bir dinamik performans sergilemiştir. PI gerilim düzenleyici yapısı ile negatif çıkışlı temel seri Luo dönüştürücünün gerçek zamanlı testleri gelecek çalışmalar olarak planlanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmayı FKB-2022-1087 numaralı 'Yüksek Kazançlı DA/DA Çevirici için İleri Bulanık Mantık Tabanlı Denetim Yöntemlerinin Geliştirilmesi' isimli proje ile destekleyen Kayseri Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Kaynakça

[1] O. F. Kececioglu, H. Acikgoz, A. Gani ve M. Sekkeli, "Experimental Investigation on Buck Converter Using Neuro-Fuzzy Controller." *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, Cilt: 7, No: 1, s:1-6, 2019.

[2] F. L. Luo ve H. Ye, *Advanced DC/DC Converters*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2016.

[3] F.L. Luo ve H. Ye, *Power electronics: advanced conversion technologies*. 2nd ed CRC Press, 2018.

[4] A. Gani, "Aralık Değerli Tip-2 Bulanık Denetleyici ile Negatif Gerilim Çıkışlı Temel Seri Luo Çeviricinin Denetimi". *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt:11, No:4, s:904-910, 2022.

[5] M. Rigan, Ö.F. Keçecioğlu, A Gani, ve M. Şekkeli, "Negatif Çıkışlı Luo Dönüştürücünün Analizi ve Denetimi".*International Symposium on Advanced Engineering Technologies*, Kahramanmaraş, Türkiye, s:1080-1085, 2019.

[6] S. Bereketoğlu, A. Gani, Ö.F. Keçecioğlu ve M. Şekkeli, "Fırçasız DA Motorun Denetimi için PI Denetleyicinin Performansının İncelenmesi". *International Symposium on Advanced Engineering Technologies*,Kahramanmaraş, Türkiye, s:1059-1064, 2019.

[7] B.Achiammal ve R.Kayalvizhi. "Genetic Algorithm Based PI Controller for Negative Output Elementary Luo Converter". *IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technologies*, Ramanathapuram, India, s:1099-110, 2014.

[8] A. Cocor, A. Baescu, A. Florescu, D. A. Stoichesu. “Elementary and Self-Lift Negative Output Luo Dc-Dc Converters used in Hybrid Cars.” UPB Sci. Bull., Series C, Cilt:77, No:4, s:179-190, 2015.
[9] S. Bereketoğlu, H. Açıkgöz ve M Şekkeli. “Fırçasız Doğru Akım Motorunun Aralıklı Tip-2 Bulanık Mantık Denetleyici Tabanlı Hız Denetimi”. EMO Bilimsel Dergi, Cilt:10, Sayı:2, s:33-42.2020.