

## ORTA FREKANS DOĞRU AKIM DİRENÇ NOKTA KAYNAK SİSTEMLERİ İÇİN AKIM ÖLÇÜM DEVRESİ TASARIMI VE GERÇEKLENMESİ

Can ÖZENSOY\*   
Murat UYAR\*\* 

Alınma: 26.05.2021; düzeltme: 20.06.2021; kabul: 13.07.2021

**Öz:** Direnç nokta kaynağı (DNK), otomotiv, beyaz eşya, mobilya ve sac işleme endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Orta frekans doğru akım (OFDA) ise DNK kalitesini arttıran, yenilikçi bir yöntemdir. Bu çalışmada, OFDA-DNK sistemlerinden kaynak akım bilgisini elde edebilen bir analog integratör devre önerilmiştir. OFDA-DNK sisteminin kontrolü için ihtiyaç duyulan bu akım bilgisi, Rogowski bobininden (RB) elde edilmiştir. Kaynak transformatörünün sekonderine bağlanan RB üzerinden, kaynak akımı ile ilgili gerilim bilgisi alınmıştır. Daha sonra önerilen integratör devre yardımıyla analog sayısal dönüştürücüye veri aktarımı gerçekleştirilmiştir. Önerilen devrenin başarımı, oluşturulan OFDA-DNK sisteminde test edilmiştir. Deneysel sonuçlara göre, önerilen devrenin yaklaşık 30 kA akıma kadar gerilim dönüşümünü hatasız bir şekilde yapabildiği görülmüştür. Ayrıca, önerilen devre için, OFDA-DNK uygulamalarında analog sayısal dönüştürücüye (ASD) doğrusal akım ölçüm verisi gönderebilecek potansiyele sahip olduğu söylenebilir.

**Anahtar Kelimeler:** Orta frekans doğru akım, Direnç nokta kaynağı, Rogowski bobini, İntegrator devre

### Design and Implementation of a Current Measurement Circuit for Medium Frequency Direct Current Resistance Spot Welding Systems

**Abstract:** Resistance spot welding (RSW) is widely used in the automotive, white goods, furniture and sheet metal processing industries. Medium frequency direct current (MFDC) is an innovative method that increases the quality of RSW. In this study, an analog integrator circuit that can obtain the welding current information from MFDC-RSW systems is proposed. This current information required for the control of the OFDA-DNK system was obtained from the Rogowski coil (RB). Voltage information regarding the welding current has been obtained through the RB connected to the secondary of the welding transformer. Then, data transfer to analog-digital converter (ADC) was carried out with the help of the proposed integrator circuit. The performance of the proposed circuit has been tested in the established MFDC-RSW system. According to the experimental results, it has been seen that the proposed circuit can perform the voltage conversion up to 30 kA without error. In addition, it can also be said that the proposed circuit has the potential to send linear current measurement data to ADC in MFDC-RSW applications.

**Keywords:** Medium frequency direct current, Resistance spot welding, Rogowski coil, Integrator circuit

\* Siff Elektromekanik San. Tic. Ltd. Şti, Minareliçavuş, Erguvan Cd. No:16, 16140, Nilüfer, Bursa

\*\* Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh., 16059, Nilüfer, Bursa

İletişim Yazarı: Murat Uyar (muratuyar@uludag.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Direnç kaynağı (DK) yöntemleri, endüstride yaygın olarak uygulanan bir birleştirme teknolojisidir. DK, iş parçasının kaynak akımının akışına karşı direncinden elde edilen ısı ve basınç uygulaması ile faylanma yüzeylerinin birleşmesini sağlayan bir grup işlemi kapsar (Jenney ve O'Brien, 2001). Parça yapısı ve birleştirme biçimine göre farklı DK yöntemleri mevcuttur. Direnç projeksiyon kaynağı, direnç alın kaynağı, direnç dikiş kaynağı ve direnç nokta kaynağı (DNK), DK yöntemlerine örnek olarak gösterilebilir.

DNK, uygulama süreci hızlı olduğu için metal imalat endüstrilerinde, özellikle seri üretimde yaygın olarak kullanılan bir kaynak tekniğidir (Deepati ve diğ., 2021). DNK, düşük gerilimli yüksek elektrik akımı kullanarak birleştirme sağlar (Giaccone ve diğ., 2020). DNK temel olarak, orta frekans doğru akım (OFDA) ve alternatif akım (AA) cihazları olmak üzere iki kategoriye ayrılır (Altun ve Özcan, 2015). Her iki DNK cihazında da besleme AA güç kaynağıyla olmasına rağmen, dönüştürücü ve kontrol yapıları farklıdır (Zhou ve Li, 2020). AA-DNK cihazlarında, tek fazlı AA kaynağından beslenen dönüştürücü yardımıyla, kontrol edilebilen akım elde edilir. Kaynak transformatörünün primerinde gerçekleştirilen bu kontrol, sekonderde de kontrol edilebilir bir kaynak akımı oluşturur. Dönüştürücü olarak, ters paralel bağlı tristör konfigürasyonu kullanılmaktadır. OFDA-DNK cihazlarında ise, besleme üç fazlı AA kaynağından yapılır. Dönüştürücü olarak, AA/DA/AA konfigürasyonu kullanılır. AA-DNK cihazı şebeke frekansında bir gerilim ile kaynak transformatörünü beslerken, OFDA-DNK cihazı yaklaşık 1000 Hz frekanslı bir gerilim ile besleme yapar. Sistemin şebeke gerilimine göre daha yüksek frekanslı bir çıkış gerilimi üretmesi, sistemde manyetik doygunluk, kaynak akımlarında artış gibi problemler oluşturabilir (Zhou ve Cai, 2011). Kontrol frekansının çok yüksek olması nedeniyle, kaynak transformatörü tam olarak simetrik beslenemezse, transformatörde manyetik doygunluk oluşur. Bu durum akımın yükselmesine neden olur ve sistem korumaya geçerek kapanabilir. Sistemde bunun gibi olası sorunlar kontrol altında tutulmalıdır (Zhou ve Yao, 2017). Olumsuz yönlerine rağmen yöntemin önemli avantajları vardır. Literatürde yapılan çalışmalarda, OFDA yöntemi ile toplam enerjiden %10 tasarruf sağlanacağı ifade edilmiştir. Ayrıca, OFDA-DNK cihazlarının, AA-DNK cihazlarına göre daha verimli olduğu ifade edilmiştir (Li ve diğ., 2004). Bu nedenlerle, OFDA yöntemine dayalı kaynak cihazları son dönemlerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

OFDA-DNK, bir giriş doğrultucusu, bir H-köprü eviricisi, tam dalga doğrultucuya sahip bir kaynak transformatörü ve karşılık gelen yükten oluşur. Dolayısıyla bir AA/DA/AA dönüşümü gerçekleştirilerek yük beslenir. Ancak sekonder yük akımını sabit tutmak için dönüştürücü kontrol edilmelidir. Dönüştürücünün kontrolünde, akımın ölçülerek, kontrolöre geri bildirim yapılması esastır. Akım ölçümü, kaynak transformatörünün sekonder bölümünden yapılabileceği gibi, primer bobininden de yapılabilir. Fakat primerden ölçüm yapıldığında kontrol doğruluğu daha düşük olduğundan, sekonder tarafında ölçüm yapılması tercih edilir (Duan ve diğ., 2014). Yapılan kaynak akımı ölçümünün hassas olması gerekir. Rogowski bobini (RB), geniş ölçüm aralığı ve manyetik doygunluğa ulaşmaması gibi özellikleriyle diğer akım sensörlerini geride bırakır. OFDA-DNK cihazlarının yüksek sekonder akım ölçümlerinde kullanılacak tek akım sensörüdür (Liu ve diğ., 2011; Xia ve diğ., 2015). RB, hassas bir örnekleme direnci ve hava boşluklu bir çekirdek etrafına dolanan bobin tellerinden oluşur (Zhang ve diğ., 2012). Ampere ve Faraday'ın elektromanyetik indüksiyon yasalarına göre çalışır. RB, bir ferromanyetik malzemeye sahip olmadığından, primer-sekonder yansıması doğrusaldır. Dolayısıyla, yüksek bant genişliği ile manyetik doygunluk olmadan geniş bir akım aralığını ölçebilir (Ray ve Hewson, 2000). RB'nin temel avantajları, yüksek ölçüm hassasiyeti, geniş ölçüm ve frekans aralıkları, esnek yapı, galvanik izolasyon, düşük gürültü ve düşük maliyettir (Abdi-Jalebi ve McMahan, 2005). Faraday yasasına göre, RB çıkışı, ölçülen akımın türeviyle orantılıdır. Bu nedenle, orijinal akım hakkında bilgi almak için bir integratör devreye ihtiyaç vardır (Xia ve diğ., 2015).

İntegral alıcı devreler analog ve sayısal olarak ikiye ayrılır. Analog integratör devreler daha basit yapıdadır, düşük maliyetlidir ve daha yavaştır. Sistemden bekledikleri gereksinimleri daha az sayıdadır ve yaygın olarak kullanılır. Sayısal integratörler ise, analog integratörlerden daha

karmaşık yapıdadır, yüksek maliyetlidir ve hızlıdır. Sistemden talepleri fazladır ve bu taleplerin yerine getirilemediği durumlarda kullanılamaz. İntegral alıcı devrelerin, elde edilecek akım bilgisini doğru bir biçimde türetmesi ve verinin gönderileceği analog sayısal dönüştürücü (ASD) ile uyumlu olması beklenir. İhtiyaç duyulan integratör devreye, bu çerçevede karar verilmesi gerekir.

Her integratör devre OFDA-DNK için uygun değildir (Xia ve diğ., 2015). Sekonder akımın türevinin dalga formu düzensizdir. Gürültü, harmonik gibi yüksek frekans bileşenleri içerebilir. Yüksek örnekleme hızına, yüksek çözünürlüğe ve gelişmiş algoritmalara sahip sayısal integratörler, dc bileşen içeren ve başlangıç koşulları bilinmeyen sinyal problemlerini çözebilir. Ancak yüksek frekanslı ve düzensiz sinyallerde, ASD'nin gereksinimleri karşılanamadığından, sayısal integratörlerin uygulanabilirliği kısıtlanır. Analog integratör kullanılması durumunda ise, integratör devrenin hızı OFDA-DNK sisteminin hızına (1000 Hz) göre yavaş kalırsa, geri bildirimde gecikmeler yaşanır. Böylece performans düşüşü meydana gelir ve yeterli verim alınmaz (Keller, 2013; Xia ve diğ., 2015).

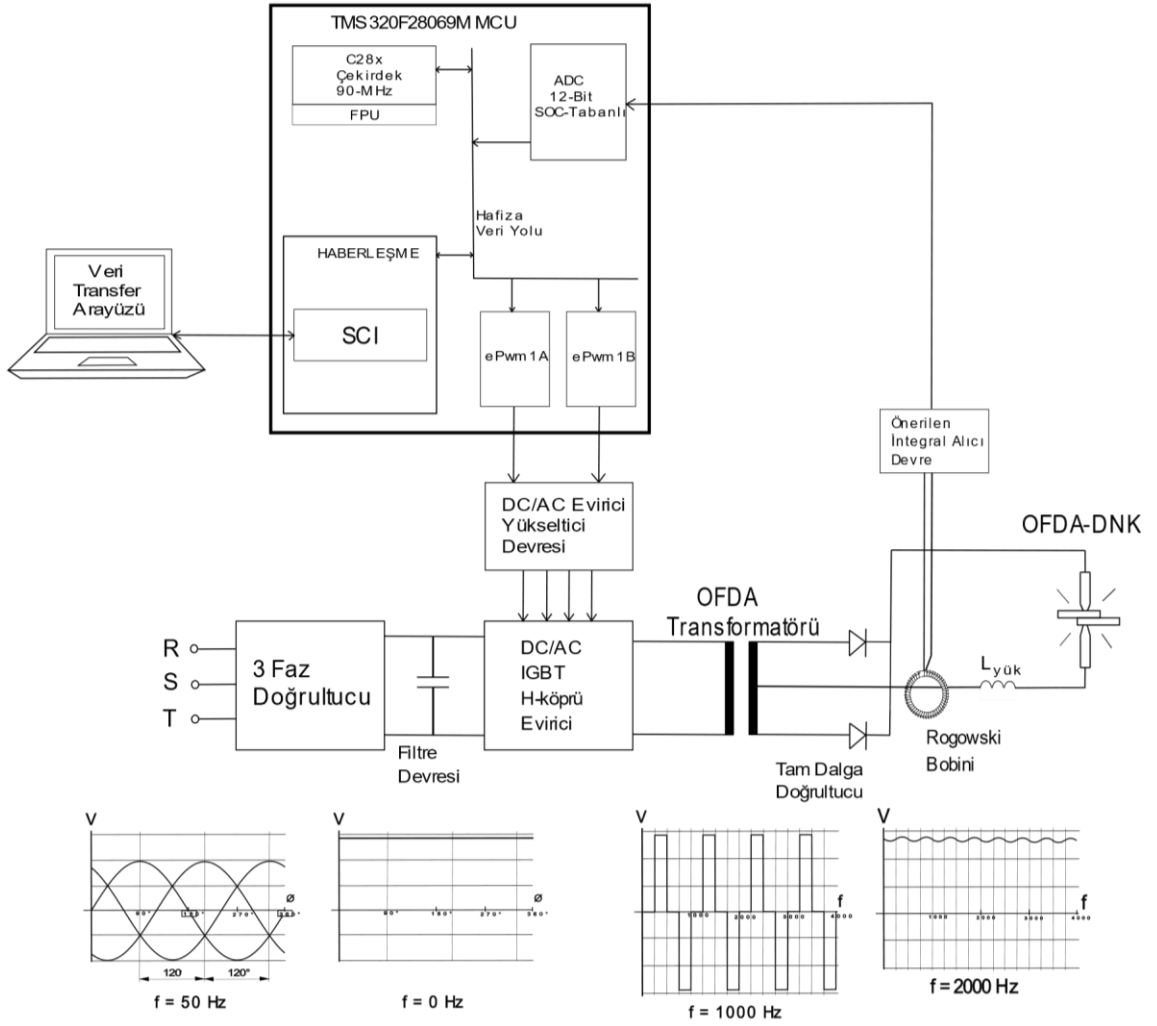
Uygulamalarda kullanılacak LaunchXL-F28069M gibi geliştirme kitlerinin, 12-bit çözünürlüğe sahip ASD girişleri, 0-3,3 V aralığında olmalıdır (Texas Instruments, 2019). Bu aralığın dışına çıkıldığında mikroişlemci zarar görebilir. Bir diğer deyişle, analog integratör her koşulda ASD'nin izin verdiği gerilim sınırlarında çıkışı üretmelidir. Dolayısıyla integratör çıkışı, doğrusal ilişki bozulmadan ölçeklendirilmelidir. Bu problemleri gidermek için, RB ile ASD arasında uygun ölçeklemeyi ve ötelemeyi (ofset) ayarlayabilen bir elektronik devreye ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada, OFDA-DNK sistemleri için, RB'den ASD'ye veri aktarım taleplerini karşılayabilecek yeni bir analog integratör devre tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Önerilen devrede, RB'nin düz ve ters bağlantı durumlarının her ikisinde de RB'den gelen sinyaller, gerilim seviye ötelemesi yapılarak kullanılabilir. Ötelenen bu gerilim, 0-3,3V aralığını iki eşit parçaya bölerek ASD'ye aktarabilecek şekilde ölçeklendirilmiştir. Önerilen devre, gerçekleştirilen OFDA-DNK deney düzeneğinde test edilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar, önerilen devrenin bir OFDA-DNK sisteminin içerisinde bir ara birim olarak kullanılabilirliğini göstermiştir.

## 2. TEORİK TEMELLER

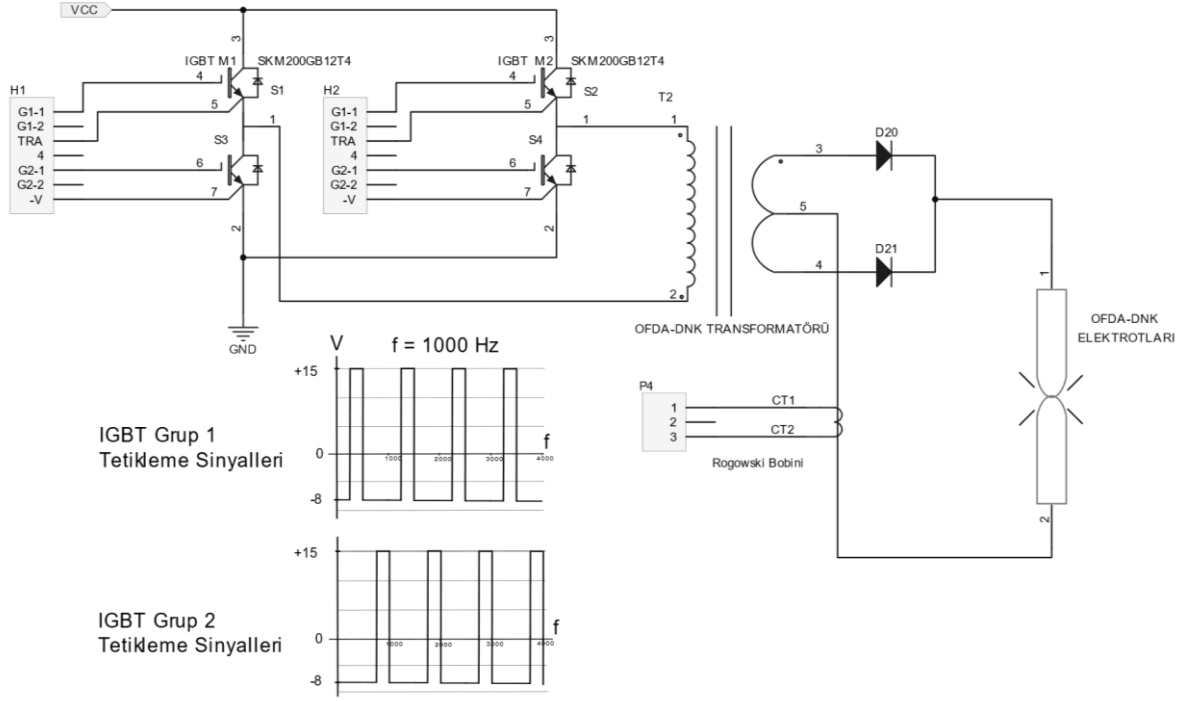
### 2.1. OFDA-DNK Sisteminin Yapısı ve Çalışma Prensibi

OFDA-DNK sistemleri genel olarak AA/DA dönüşümünü yapacak bir giriş doğrultucusu, doğrultulmuş gerilim için farklı frekansta tekrar DA/AA dönüşümü yapacak bir H-köprü eviricisi, çıkışında tam dalga doğrultucuya sahip bir OFDA kaynak transformatörü ve DNK'yı temsil eden bir yükten oluşur (Li ve diğ., 2004; Klopčic ve diğ., 2007; Zhou ve Cai, 2011; Giaccone ve diğ., 2020; Wang ve diğ., 2021). OFDA-DNK sisteminin temsili bir şeması Şekil 1'de gösterilmiştir.



**Şekil 1:**  
OFDA-DNK sisteminin blok şeması

OFDA-DNK sistemlerinde üç faz AA şebeke gerilimi giriş doğrultucusuna uygulanır. Giriş doğrultucusu, üç faz gerilimi doğrultarak DA bara gerilimini H-köprü evircisine gönderir. Bu aşamada doğrultulan gerilim için bir filtre devresi uygulanarak yüksek frekans bileşenleri ve dalgalanmalar önlenir. Böylece, doğrultma kalitesi iyileştirilir. H-köprüsünde bulunan IGBT anahtarlama elemanları bir denetleyici ile tetiklenerek evirici çıkışında 1000 Hz frekanslı kare dalgalar oluşması sağlanır. Denetleyici olarak TMS320F28069M mikrodenetleyici ünitesi örnek verilebilir (Lund ve diğ., 2019). İçerisinde bulunan gelişmiş darbe genişlik modülasyonu birimi, darbe genişliği dalga formları oluşturur. Oluşturulan kare dalga formları, doğrudan IGBT anahtarlama elemanlarına uygulanamaz. IGBT tetikleme geriliminin +15 V, kesme geriliminin -8 V olması gerekir (Semikron, 2013). SKYPER 32 PRO R gibi IGBT sürücü devreler, IGBT modülleri ile denetleyici arasında bir arayüz oluşturarak bu gereksinimi karşılar (Hofstötter ve Krapp, 2018). Şekil 2’de H-Köprü eviricili bir OFDA-DNK sistem şeması verilmiştir.



**Şekil 2:**  
*H-köprü eviricili OFDA-DNK sistem şeması*

H-köprü tetikleme işleminde S1 ve S4 IGBT elemanları bir grup, S2 ve S3 başka bir grup olarak düşünülür. Aynı gruptaki IGBT elemanları aynı anda, iki grup ise 180° faz farkı ile 1 kHz anahtarlama frekansında tetiklenir. IGBT gruplarının tetiklenme süreleri görev çevrimi olarak adlandırılır ve kaynak akımı miktarını belirler. H-Köprüsünün iki IGBT grubu aynı anda tetiklenemez. Bu nedenle görev çevrimleri %50 ve üzeri olmamalıdır.

Evirici çıkışından elde edilen AA kare dalga gerilimi, OFDA kaynak transformatörünün primerine iletilir. Sekonderde ise transformatörün dönüştürme oranında OFDA kaynak akımı elde edilir. Kaynak akımı tam dalga doğrultucu diyotlardan geçirilerek DA yüke uygulanır. Burada yük, kaynak yapılacak iş parçasını da ifade eder. OFDA-DNK sisteminde RB yardımıyla akım okuma işlemi, yükten kaynak transformatörüne geri dönen bağlantıdan yapılabilir. Burada  $L_{yük}$  kaynak yükü endüktansdır. Kaynak akımı ölçüm cihazı ile ölçülen, örnek OFDA-DNK akım grafiği Şekil 3'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi 50 ms süren kaynak işlemi süresince 16 kA'lık kaynak akımı çekilmiştir.

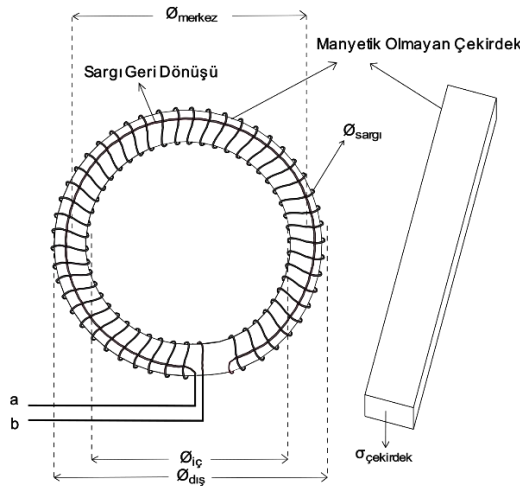


**Şekil 3:**  
*Örnek OFDA-DNK akımı grafiği*

Kaynak akımını ölçerken RB'den alınan geri besleme gerilimi bir integratör devre ile dönüştürülerek kontrolörün ASD girişine uygulanır. ASD'de okunan RB gerilimi kontrolör içerisinde oluşturulmuş algoritmalarda kullanılarak H-köprü tetikleme sinyallerinin darbe genişlikleri güncellenir. Kaynak parametrelerinin bir kontrol arayüzü üzerinden iletişimi sağlanarak, OFDA-DNK sisteminin kapalı çevrim kontrolü oluşturulur.

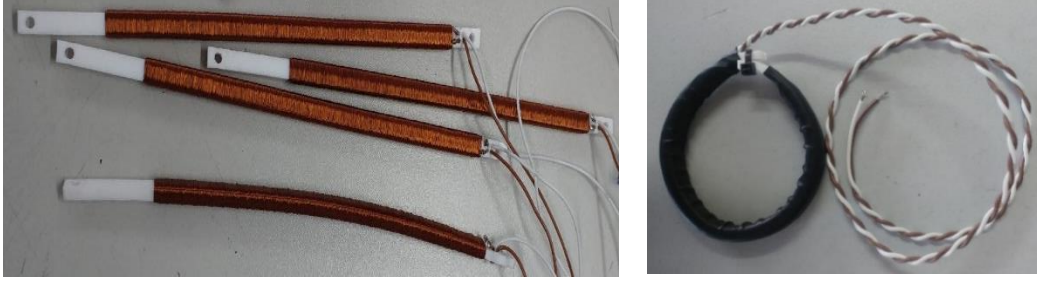
## 2.2. Rogowski Bobini

Hava çekirdekli bobin olarak da adlandırılan RB, Ampere yasasının basit bir uygulamasıdır ve 1912'den beri kullanılmaktadır (Abdi-Jalebi ve McMahon, 2005). En yaygın RB tasarımları, rijit bir toroidal çekirdek formu üzerine sarılanlar ve esnek kayış benzeri bir çekirdek formu üzerine sarılanlar olmak üzere ikiye ayrılır (Ramboz, 1995). Rogowski bobininin yapısı Şekil 4'te verilmiştir (Rezaee ve Heydari, 2010).



**Şekil 4:**  
Rogowski bobin yapısı

Burada,  $\delta_{dış}$ , RB halkasının dış çapını,  $\delta_{iç}$ , halkanın iç çapını,  $\delta_{merkez}$ , halkanın merkez çapını,  $\delta_{sargı}$ , manyetik olmayan çekirdeğe sarılan tel çapını,  $\sigma_{çekirdek}$ , manyetik olmayan çekirdeğin kesitini, a ve b ise, RB'nin iki ucunu temsil eder. RB'nin çekirdeği için manyetik olmayan herhangi bir malzeme kullanılabilir. Çekirdek esnek seçilirse, ölçüm yapılacak iletkenin etrafına kolayca yerleştirilebilir. RB halkasının çapı büyüdükçe hassasiyeti artar. RB'nin en önemli bölümü sargıdır. RB çekirdeğine sargı teli sarılırken, önce halka çevresinden daha uzun tutulacak şekilde sargı geri dönüş teli için pay bırakılır. Sargı geri dönüş teli paraziti de kaldırmak için önemlidir (Abdi-Jalebi ve McMahon, 2005). Ardından pay bırakılan ve RB çekirdeği yüzeyine konumlandırılan sargı geri dönüş teli üzerinden sarım işlemi başlatılır. Sarım işlemi, uzun süren bir işlem olduğundan sıralı olarak manyetik olmayan çekirdek boyunca dikkatle yapılmalıdır. Aksi takdirde, RB'nin ölçüm doğruluğu ve hassasiyeti etkilenir. Sistem gereksinimlerine göre sargılar tek katmanlı olabileceği gibi çok katmanlı da olabilir. RB'nin sargı iç yapısı Şekil 5 (a)'da gösterilmiştir. Sarım işlemi tamamlandığında çıkarılan iki tel ucu için ek kablolar lehimlenir. Bu kablolar RB'nin bir çevre birimi olarak kullanılabilmesi için uçları temsil eder. Tüm bu işlemlerin tamamlanmasının ardından RB'nin mekanik etkilerden korunabilmesi için ısıyla daralan makaron içerisine yerleştirilir. Isıl işlemin ardından toroidal yapıdaki RB, Şekil 5 (b)'de görüldüğü gibi tamamlanır.



(a)

(b)

**Şekil 5:**

*OFDA-DNK sistemleri için Rogowski bobini, a) Tamamlanmamış sargı iç yapısı, b) Toroidal hale getirilmiş kullanıma hazır yapı*

RB, akım taşıyan bir iletken üzerine sarıldığında, Ampere yasasına göre RB sargıları etrafındaki manyetik alan şiddetinin çizgi integrali ile iletken üzerinden geçen akım, eşittir (Ward ve Exon, 1993).

$$\oint H \cos \alpha \, dl = i \quad (1)$$

Denklem (1)'deki  $dl$ , sargıların uzunluğu boyunca alınan küçük bir uzunluk aralığı,  $H$ , manyetik alan şiddetini ve  $\alpha$ , alınan küçük uzunluk aralığının yönü ile manyetik alan yönü arasındaki açıdır. RB üzerinde oluşan manyetik akı,  $\phi$ , her bir sargıda oluşan manyetik akının integrali alınarak Denklem (2)'deki gibi hesaplanır (Ward ve Exon, 1993; Abdi-Jalebi ve McMahan, 2005; Brydak ve Szlachta, 2016).

$$\phi = \int d\phi = \int \mu_0 \frac{N}{l} A H \cos \alpha \, dl = \mu_0 \frac{N}{l} A \int H \cos \alpha \, dl = \mu_0 \frac{N}{l} A i \quad (2)$$

$\mu_0$ , vakum geçirgenliği,  $N$ , bobinin sarım sayısı,  $l$ , bobinin çevre uzunluğu ( $2\pi r$ ),  $A$ , bobinin tek bir sargısının yüzey alanıdır. Akım taşıyan iletken ile çevresini saran RB arasındaki ortak endüktans  $M$  ile ifade edilir.

$$M = \mu_0 \frac{N}{l} A \quad (3)$$

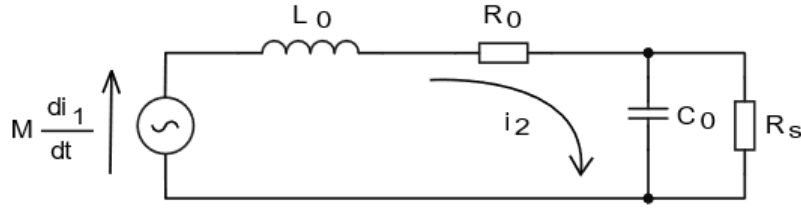
RB, akımın değişim zaman oranı  $di(t)/dt$  ile orantılı bir gerilim  $e_0$ , üretir (Semikron, 2013; Brydak ve Szlachta, 2016):

$$e_0(t) = - \frac{d\phi}{dt} = - M \frac{di(t)}{dt} \quad (4)$$

Denklem (4)'den, akım aşağıdaki gibi türetilir:

$$i(t) = \int di(t) = - \frac{1}{M} \int e_0(t) \, dt \quad (5)$$

RB'nin elektriksel eşdeğer devresi Şekil 6'da verilmiştir (Liu ve diğ., 2011).

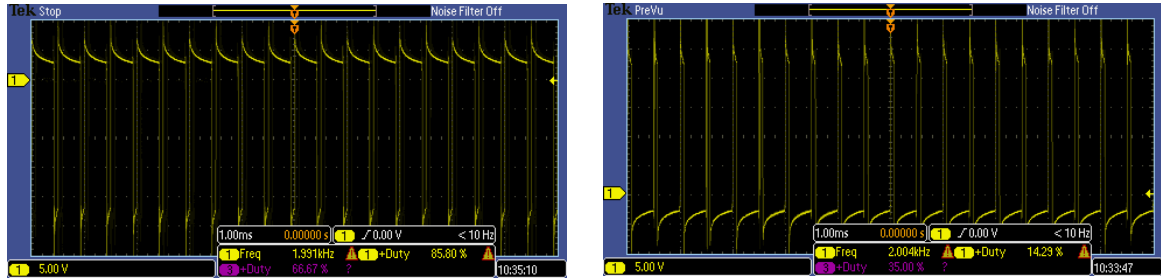


**Şekil 6:**  
RB'nin elektriksel eşdeğer şeması

Burada M, RB'nin ortak endüktansı olmak üzere  $L_0$  bobinin toplu endüktansı,  $R_0$  bobinin direnci,  $C_0$  bobinin kapasitansı,  $R_s$  bobini sonlandıran sönümlenme direncidir.  $i_1$ , ölçülen akım,  $i_2$  ise RB'nin döngü akımıdır (Liu ve diğ., 2011). Sönümlenme direnci, RB'de oluşabilecek yüksek frekanslı bileşenleri bastırmak için kullanılır (Azizoğlu ve Karaca, 2017).

### 2.3. RB Sinyal Dönüşümü

Yüksek güçlü evirici ve OFDA-DNK sistemlerinin endüktif döngüsü nedeniyle, kaynak akımının dalga formu önemli ölçüde bozulur ve bir dc bileşen ile orta frekans (1 kHz ~ 10 kHz) salınımından oluşur (Xia ve diğ., 2015). RB'den alınan gerilim ise, zamana bağlı olarak ölçülen kaynak akımının değişim hızıyla orantılıdır (Abdi-Jalebi ve McMahon, 2005). Akım taşıyan bir iletken üzerinde sarılan RB'nin düz ve ters bağlantısında, ölçülen akımın yönü değiştiğinden RB'nin çıkış gerilimi de değişir. RB'nin düz bağlantısı ile alınan gerilim Şekil 7 (a)'da, ters bağlantısı ile alınan gerilim Şekil 7 (b)'de verilmiştir.



(a)

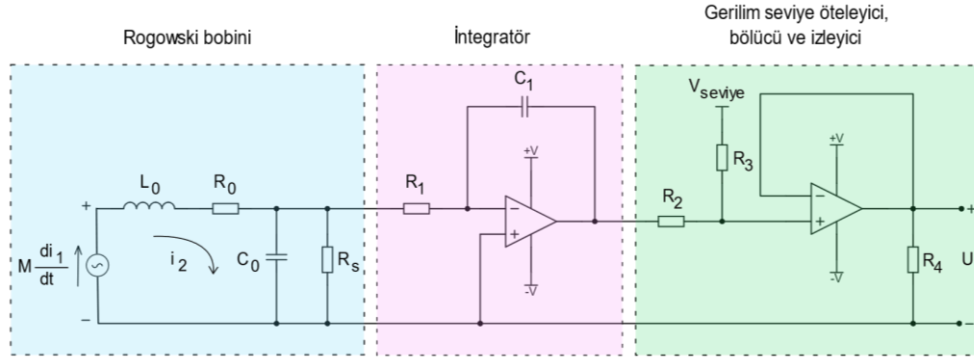
(b)

**Şekil 7:**

OFDA-DNK sisteminin kaynak akımı ölçümünde, a) RB'nin düz bağlantısı ile alınan gerilim, b) RB'nin ters bağlantısı ile alınan gerilim

Bir akım ölçümü elde etmek için, RB'nin çıkış geriliminin integrali alınmalı ve uygun bir şekilde ölçeklendirilmelidir (Ramboz, 1995). Alınan gerilimin bir mikrodenetleyicinin ASD girişine uygulanabilmesi için, ölçeklendirme işlemi ASD'nin çalışma aralığında (0-3.3 V) yapılmalıdır. RB'nin hem düz hem de ters bağlantısında çıkış gerilimi izin verilen sınırlarda kalmalıdır. RB eşdeğer devresiyle birlikte RB sinyalinin dönüşümü için kullanılacak eşdeğer devreler Şekil 8'de verilmiştir.



**Şekil 8:**

*RB sinyali dönüşümünün eşdeğer devreleri*

İntegral alıcı bölümü,  $R_1$ , giriş direnci,  $C_1$ , kondansatörü ve işlemsel kuvvetlendiriciden oluşan bir eviren integratördür. Sistemde giriş direnci, uygulanan giriş gerilimini akıma dönüştürür. Akım, giriş direnci çok yüksek olan işlemsel kuvvetlendiriciye ihmal edilebilecek kadar az geçebildiğinden, doğrudan  $C_1$  kondansatörüne uygulanır. Kondansatör akımı ile integratörün çıkış gerilimi arasındaki bağıntı Denklem (6) ve Denklem (7)'de verilmiştir (Tapashetti ve diğ., 2012; Fiore, 2016; Jun ve diğ., 2016).

$$i = \frac{V_{RB}}{R_1}, \quad V_{integral\ çıkış} = V_{C1} = -\frac{1}{C_1} \int i_{C1} dt \quad (6)$$

$$V_{integral\ çıkış} = -\frac{1}{R_1 C_1} \int V_{RB} dt = -\frac{1}{j \omega R_1 C_1} V_{RB} \quad (7)$$

İntegral alma işlemi için direnç ve kondansatörden oluşan pasif integratör tasarımları yerine işlemsel kuvvetlendirici kullanılan aktif integratörler daha hassastır.  $i = V_{RB}/R_1$ ,  $C_1$  kondansatörünün doğru değerinde şarj akımını sağlar. Bu durum aktif integratörün pasif olandan daha yüksek hassasiyete sahip olmasının önemli bir nedenidir. Buna karşılık, pasif integratörlü kondansatörün şarj akımı, artan kondansatör gerilimi ile azalır ve bu da integral hassasiyetini azaltır (Jun ve diğ., 2016). Denklem (7)'de  $\omega = 2\pi f$  olmak üzere integratörün çıkış gerilimi, giriş geriliminin  $1/\tau$  sabiti kadarlık zaman diliminde integraldir (Tapashetti ve diğ., 2012). OFDA-DNK evirici kontrolünde yeterince hızlı akım bilgisi alabilmek için, integratörün zaman sabiti,  $\tau$ , en az eviricinin frekansına eşit seçilebilir.

Akım ölçümünde RB'nin düz ve ters bağlantı durumlarında integratörden alınan çıkış geriliminin en düşük ve en yüksek değerleri tespit edilmelidir. 0 – 3.3 V çalışma aralığına sahip bir ASD'ye, 3.3 V'un üzerinde veya negatif gerilim değeri gönderilmesi, donanımına zarar verir. Bir başka deyişle, RB düz bağlandığında, kaynak akımı olmadığı durumda integratör, 0 V çıkış verirse veya maksimum akım ölçümü sırasında ve RB'nin ters bağlanması durumunda da 3.3 V üzeri bir gerilim verirse, bu gerilim değerleri ASD için uygun olmayacaktır. Çünkü integratör çıkışı 0 V değerinin altındaki değerlerde azalacaktır. Bu yüzden, her iki bağlantı durumu için geçerli olmak üzere, belirlenen en düşük gerilim değeri negatif ise, 0 V ile farkı,  $V_{seviye}$  kadar pozitif yönde seviye ötelemesi yapılarak, çıkış gerilimi 0 V üzerine taşınır. Önerilen integratör devrede, çıkış gerilimi, 45 kA akım değerine kadar yapılan ölçümlerde, düz bağlantıda 0 ile 3.3 V aralığında artarken, ters bağlantıda 0 ile -3.3 V değer aralığında azalmaktadır. Bu sonuca göre, belirlenen en düşük değer -3.3 V olduğundan,  $V_{seviye}$  değeri, 0 V ile farkı kadar, yani 3.3 V olarak uygulanmıştır. Uygulanan  $V_{seviye}$  değeri, kaynak akım ölçümü yapılmadığı durumda da devrenin çıkış gerilimidir. Yeni durumda, RB'nin düz bağlantısında 3.3-6.6 V, ters bağlantısında 0-3.3 V

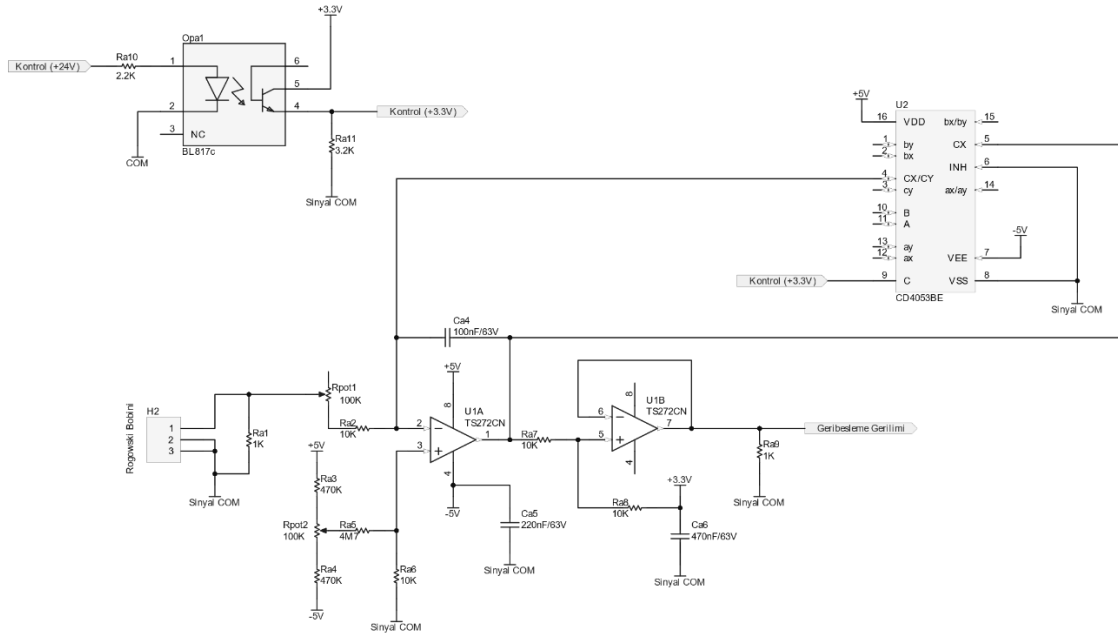
aralığında değişim gerçekleşmektedir. Belirtilen sebeplerden çalışma ölçüm aralığı 0-3.3 V olarak ölçeklenmiştir. Çalışma aralığının 0-3.3 V aralığında ölçeklenmesi gerekir. Seviye ötelemesi yapılan integratör çıkış geriliminin aralığı, gerilim bölücüde Denklem (8)'deki gibi ölçeklenmiştir. Önerilen devre için bu oran  $1/2$ 'dir.

$$U = (V_{integral\ çıkış} + V_{seviye}) \frac{R_2}{R_2 + R_3} \quad (8)$$

ASD'ye gönderilecek gerilimin izolasyonunun sağlanması için gerilim bölücüyle birlikte bir eirmeyen gerilim izleyici devre kullanılır. İşlemsel kuvvetlendiricinin yüksek giriş empedansı ve birim gerilim kazancı, ölçeklenen gerilimi kayıp olmadan çıkışa aktarır (Fiore, 2016). Önerilen devrenin,  $1/2$  oranında ölçeklenmesi sonucunda, 3.3 V olarak uygulanan  $V_{seviye}$  değeri artık 1.65 V olmuştur. Böylece, kaynak akımının olmadığı durumda devrenin çıkışı 1.65 V olur. Böylece de kaynak akımının değerine bağlı olarak düz bağlantıda 1.65-3.3 V aralığında artan, ters bağlantıda 0-1.65 V aralığında azalan bir değişim elde edilir.

### 3. ÖNERİLEN AKIM ÖLÇÜM DEVRESİ

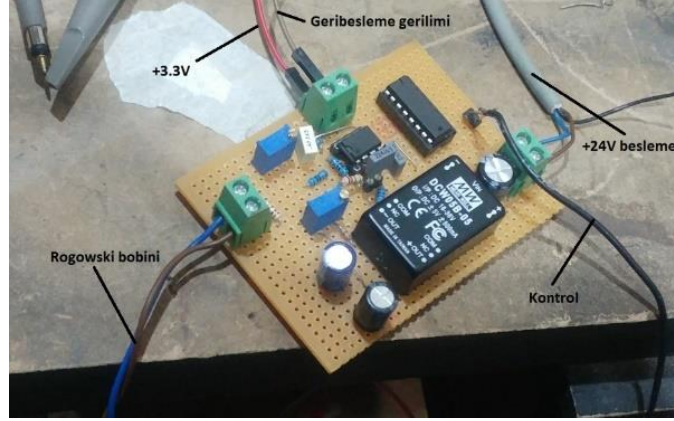
Bu makalede önerilen OFDA-DNK akım ölçüm kartının elektronik devre şeması Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9:

Rogowski bobini ile akım ölçüm kartının devre şeması

Tasarımın çalışma prensibi, bir OFDA-DNK sisteminde kaynak akımı üretimi sırasında, RB'nin düz veya ters bağlantı fark etmeksizin göndereceği gerilimin integralini alıp, 0-3.3 V olarak belirlenen ASD çalışma aralığına doğrusal olarak taşınması üzerinedir. ASD tarafından akım olarak değerlendirilebilecek bir analog gerilim bilgisinin iletimini amaçlar. Ön ayar, integral izni, integratör, gerilim seviye öteleyici, gerilim bölücü ve izleyici bölümlerinden oluşur. Önerilen akım ölçüm devresi, akım ölçüm kartı haline getirilmiştir. Şekil 10'da elektronik devre kartı tasarımı sunulmuştur. Devre kartında RB bağlantıları, besleme bağlantıları,  $V_{seviye}$  bağlantısı, integral izni (kontrol) sinyali ve ASD'ye gönderilmek üzere dönüştürülen geri besleme gerilim çıkışı bulunur.



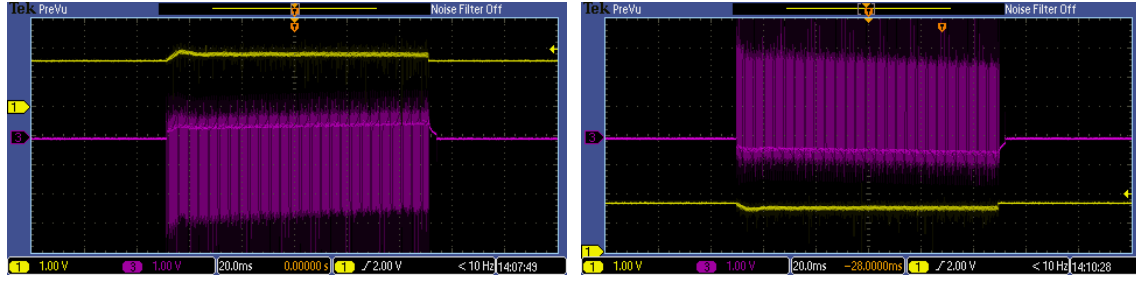
**Şekil 10:**  
Önerilen akım ölçüm tasarımının devre kartı

Akım taşıyan iletken üzerine sarılan RB'nin iki ucunun devreye bağlantısı  $H2$  terminalinden yapılır. RB gerilimi  $R_{a1}$  sonlandırma direncinden geçerek devrenin ön ayar bölümüne gelir. Bu bölüm, kullanılan RB'nin değer farklılıkları sonucu integratöre iletilen gerilim farklılıkları ve integratör için bir ince ayar yapma özelliği sağlar. Gerilim bölücü olarak kullanılan  $R_{pot1}$  trimpotu RB'den integratöre gelen geriliminin genliğini değiştirir,  $R_{pot2}$  ise integratörün sıfır gerilimini ayarlar.

Ön ayarı yapılan RB gerilimi, devrenin integratör bölümüne iletilir. İntegral alıcı, bir integral izin sinyalinin kontrolünde çalışır. Bu sinyal, integral alma işleminin yalnızca kaynak akımı sırasında yapılmasını sağlar. CD4053BE anahtarlama entegresinin 9 numaralı bağlantısına 3-20 V aralığında uygulanabilen sinyal, tasarımda 3.3 V olarak tanımlanmıştır. Otomasyon sistemlerinde 24V ile kontrol edilebilmesi için BL817c optokuplörü üzerinden izole olarak tetiklenir. Sinyal uygulandığında, entegrenin 4 ve 5 numaralı bağlantıları üzerindeki normalde kapalı kontağı açarak,  $C_{a4}$  kondansatörünü etkinleştirir. Böylece, integral alma işlemi başlatılır. Bu sinyal, kaynak çevrimi süresince uygulanmalı, çevrim tamamlandığında kesilmelidir. İntegral izin sinyali kesildiğinde, CD4053BE entegresinin kontağı kapatılarak, devre kendini bu bağlantı üzerinden tamamlar. Devrede  $C_{a4}$  kondansatörü ve integratör devre dışı bırakılır. Bu durumda kondansatör deşarj olur.

İntegral alıcının çıkışına gerilim seviye öteleyici ve gerilim bölücü uygulanır. RB'nin düz veya ters bağlantısında okunacak tüm kaynak akımı aralığı için integratörden alınan gerilimler, gerilim seviye öteleme ile  $V_{seviye}$  kadar pozitif yönde ötelenerek 0 V ve üzerine taşınır.  $R_{a7}$  ve  $R_{a8}$  dirençlerinden oluşan gerilim bölücü ile belirlenen oranda, integratör çıkışı maksimum 3.3 V değeri için  $V_{seviye}$  değeri 1.65 V olarak ölçeklenmiştir. Bu işlemlerden elde edilen gerilim, kayıplara ve aşırı akım çekme durumuna karşı gerilim izleyici bir devre ile izole edilmiştir. Böylece mümkün olduğunca kayıpların azaltılması sağlanarak gerilim verisinin ASD'ye aktarılması sağlanmıştır. Kaynak akımının olmadığı durumlarda yapılan ölçümlerde devrenin çıkış geriliminin  $V_{seviye}$  değeri kadardır. Akım ölçümü durumunda ise devrenin çıkış gerilimi, RB'nin düz bağlantısında 1.65-3.3 V aralığında artarken, ters bağlantısında 0-1.65 V aralığında azalmaktadır.

Devrenin örnek gerilim grafikleri, Şekil 11 (a) RB'nin düz bağlantısı, Şekil 11 (b) RB'nin ters bağlantısı olmak üzere aşağıdaki gibidir. Osiloskobun 1 numaralı probu RB sinyal dönüşümü sonucunda elde edilen gerilim, 3 numaralı probu OFDA-DNK sisteminde kaynak sırasında RB'den ölçülen gerilimdir.



(a)

(b)

**Şekil 11:**

*Önerilen akım ölçüm kartının, a) RB düz bağlantı grafikleri, b) RB ters bağlantı grafikleri*

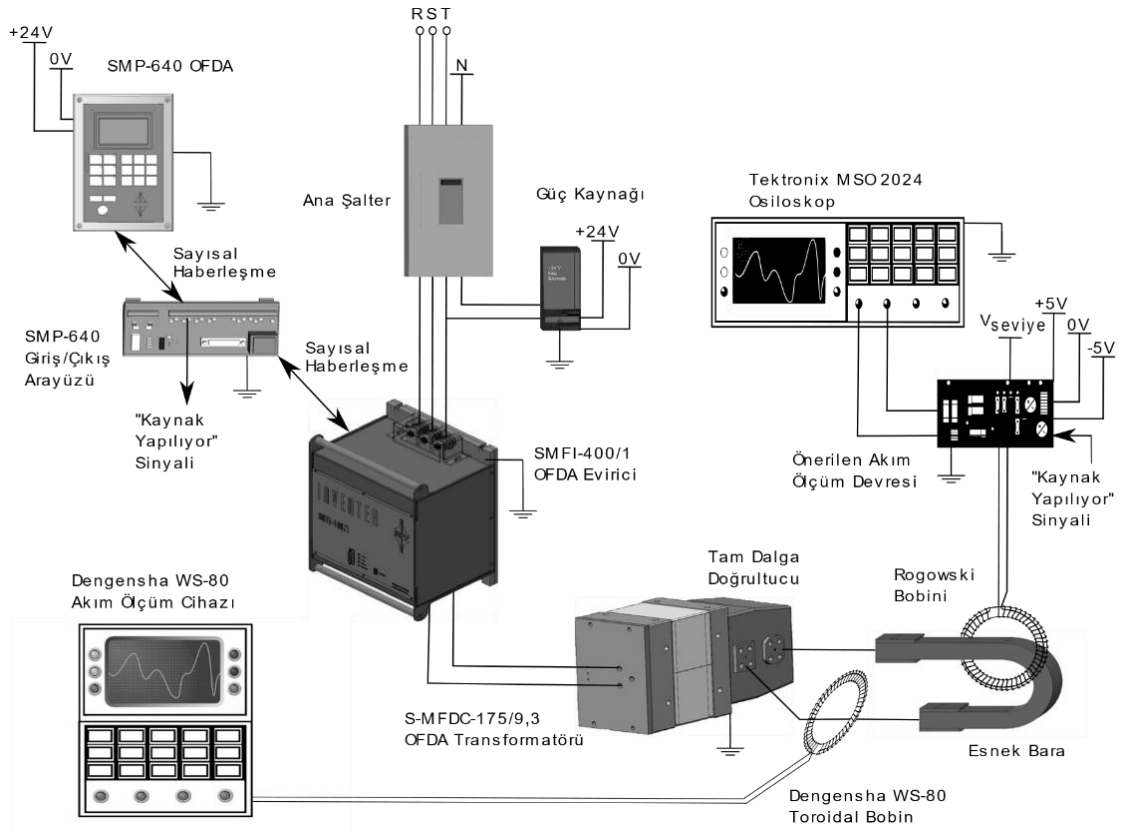
Önerilen devrenin çıkışında akım ölçümü olmadığında verilen 1.65V seviye gerilimi, sistemde kaynak akımı uygulanmamasına rağmen integral izin sinyali uygulandığında, yani akım ölçümü başlatıldığında, yine sabit kalmalıdır. Çünkü kaynak akımı akmadığında, integrali alınacak veri yoktur. Akım olmamasına rağmen değer artıyorsa veya azalıyorsa, integral işlemine istenmeyen gerilim bileşenlerinin dahil olması söz konusudur. İntegratör devresinde  $R_{pot2}$  trimpotu bu gerilim bileşenlerini önlemek için kullanılmıştır. Kaynak akımı olmadan integral izin sinyali uygulandığında, gerilim çıkışı (1.65 V) sabit kalıyorsa, kalibrasyon işleminin uygun şekilde yapılmış olduğu anlaşılabilir. Gerilimde yavaş bir artma veya azalma olması durumunda, integral işlemine katılan gerilim bileşenleri yapılan tasarımla önlenmiştir. Böylece kaynak akımı sırasında ölçülen gerilim değerlerinde uygun olmayan bileşenler olmadan sinyalin integralinin alınması sağlanmıştır.

#### 4. DENEY DÜZENEĞİ

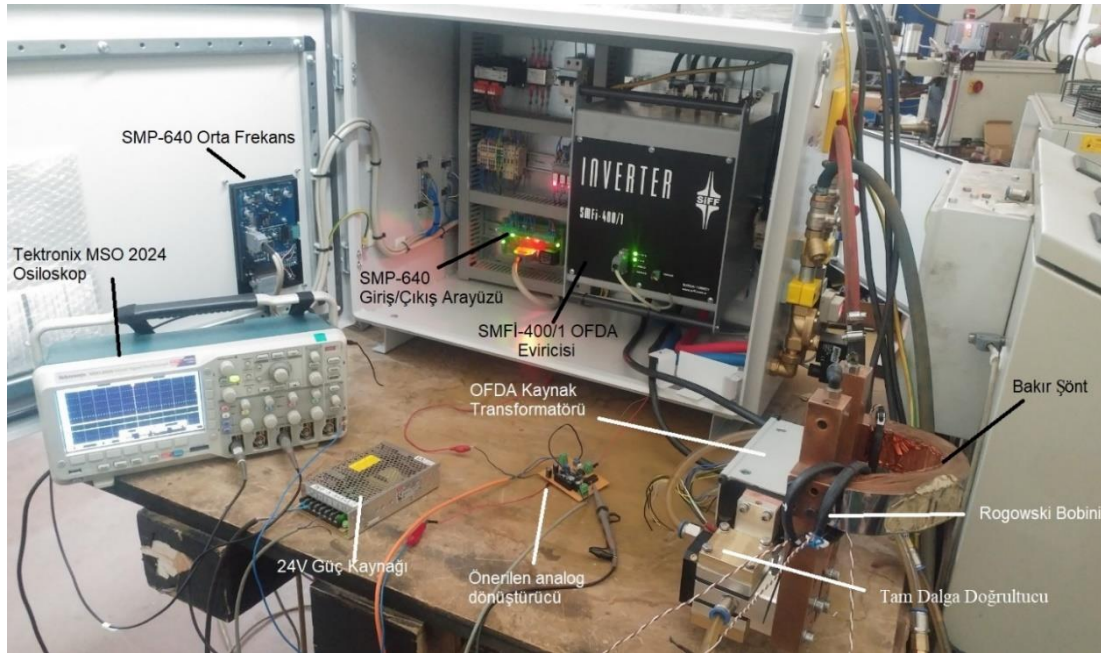
Önerilen akım ölçüm devresinin başarımını test etmek için, Şekil 12’de blok şeması verilen bir OFDA-DNK sistemi oluşturulmuştur.

Burada, güç kaynağı, OFDA kaynak kontrol ünitesi ve önerilen akım ölçüm devresini besler. OFDA-DNK parametrelerinin kontrolünü OFDA kaynak kontrol ünitesi yapar. Kontrol ünitesi, giriş/çıkış arayüz kartı ile 24 V sayısal sinyaller üzerinden çevre birimlerine açılır. Arayüz kartı üzerinden erişilebilen, “kaynak yapılıyor”, sinyali önerilen akım ölçüm devresinin kontrol iznini uygulamak için kullanılmıştır.

Kontrol ünitesi, gönderdiği sayısal sinyallerin yanında analog sinyaller de kullanarak OFDA eviriciyi sürer. OFDA evirici, kaynak çevrimi süresince, tanımlanan parametreler doğrultusunda, 50 Hz frekanslı 3 faz sinüzoidal gerilimi, 1000 Hz frekanslı kare dalga gerilime dönüştürerek OFDA transformatörün primerine iletir. Primerin gerilim ve akımı, transformatörün çevirme oranında sekonder gerilim ve akımına çevrilir. Transformatörün sekonder çıkışında bulunan tam dalga doğrultucu üzerinden sekonder akımı OFDA akımına çevrilerek DNK yüküne uygulanır. Deneyde kullanılan DNK yükü bir esnek bakır baradır. Tasarlanan kartın ölçüm hedefi, esnek bara üzerine sarılan RB’dir. Deney düzeneği Şekil 13’teki kurulum olarak uyarlanmıştır.



**Şekil 12:**  
*Deney düzeneğine genel bir bakış*



**Şekil 13:**  
*Test için oluşturulan OFDA-DNK sistemi*

Kaynak çevriminde aktifleşen “kaynak yapılıyor” sinyali ile akım ölçüm kartı devreye girer. Kartın 0 V bağlantısı ile osiloskopun toprak bağlantısı birleştirilerek, kart girişinde RB’den alınan gerilim ile kart çıkışında ASD’ye gönderilen gerilim, osiloskop ile takip edilir. Kaynak sırasında üretilen akımın ayarlanan değerler için doğruluğunun kontrolü, kaynak akım ölçer ile yapılmıştır. Kaynak akım ölçerin toroidal bobini yine esnek baraya sarılarak, ölçülen akım değerleri ile ayarlanan akım değerleri takip edilmektedir. Ölçülen kaynak akım değerleri ile önerilen akım ölçer devrenin çıkış gerilimleri kaydedilerek değerlendirilmiştir.

## 5. DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Yapılan denemelerde  $L_0 = 1355.9 \mu\text{H}$ ,  $C_0 = 1249.3 \mu\text{F}$ ,  $R_0 = 30.97 \Omega$  değerlerinde bir RB kullanılmıştır. Kullanılan RB için akım ölçüm devresindeki  $R_{pot1} 70 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{pot2} 50 \text{ k}\Omega$  değerine sabitlenmiştir. OFDA transformatörün değerleri,  $U_1$ , primer gerilimi 500V,  $f$ , frekansı 1000 Hz,  $S_{\%20}$ , görünür gücü 175 kVA,  $U_{20}$ , sekonder gerilimi 9.3 V,  $I_{1p}$ , sürekli primer akımı 130 A,  $I_{2p}$ , sürekli sekonder akımı 6,5 kA’dır. Deneyde kullanılan 175 kVA güce sahip OFDA transformatörün maksimum verebileceği akım değeri 30 kA olarak tespit edildiğinden, kaynak akımları 30 kA değerine kadar 1’er kA olarak arttırılmış, elde edilen geri besleme gerilimi değerleri, RB’nin düz ve ters bağlantığı durumlar için incelenmiştir.

### 5.1. RB’nin Düz Bağlantısında Alınan Deney Sonuçları

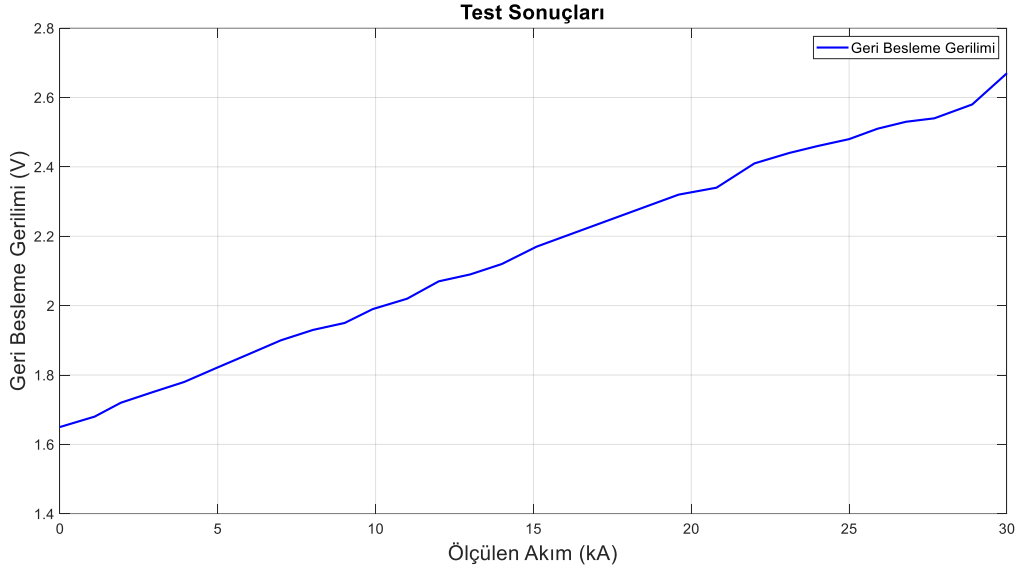
RB’nin esnek baraya düz bağlantısında yapılan denemelerde, 200 ms’lik kaynak zamanında ayarlanan 1-30 kA aralığında akım değerleri uygulanmıştır. Kaynak akımı uygulanırken, ayarlanan kaynak parametrelerinin doğruluğu, Dengensha WS-80 ölçüm cihazı ile takip edilmiştir. Uygulanan akım için, önerilen akım ölçüm devresinin çıkışında elde edilen geri besleme gerilim değerleri Tektronix MSO 2024 osiloskopu ile ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Kaydedilen geri besleme gerilim değerleri, OFDA kaynak kontrol ünitesinde ayarlanan akım (kA) ve kaynak zamanı (ms), kaynak akım ölçerde ölçülen kaynak akımı (kA) ve kaynak zamanı (ms) ile Tablo 1’e aktarılmıştır.

**Tablo 1. Düz bağlantıda ölçülen geri besleme gerilim değerleri**

Ayarlanan kaynak akımı (kA)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ayarlanan kaynak zamanı (ms)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Ölçülen kaynak akımı (kA)	1.10	1.93	2.92	3.94	4.95	5.98	7.00	8.02	9.02	9.91
Ölçülen kaynak zamanı (ms)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Ölçülen geri besleme gerilimi (V)	1.68	1.72	1.75	1.78	1.82	1.86	1.90	1.93	1.95	1.99
Ayarlanan kaynak akımı (kA)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ayarlanan kaynak zamanı (ms)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Ölçülen kaynak akımı (kA)	11.0	12.0	13.0	14.0	15.1	16.0	16.9	17.8	18.7	19.6
Ölçülen kaynak zamanı (ms)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Ölçülen geri besleme gerilimi (V)	2.02	2.07	2.09	2.12	2.17	2.20	2.23	2.26	2.29	2.32
Ayarlanan kaynak akımı (kA)	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Ayarlanan kaynak zamanı (ms)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Ölçülen kaynak akımı (kA)	20.8	22.0	23.1	24.0	25.0	25.9	26.8	27.7	28.9	30.0
Ölçülen kaynak zamanı (ms)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Ölçülen geri besleme gerilimi (V)	2.34	2.41	2.44	2.46	2.48	2.51	2.53	2.54	2.58	2.67

Kaynak akımı uygulanmadığında, 0 A değeri için ölçülen 1.65 V seviye gerilimi, kaynak akımı yükseldikçe daha öncede belirtildiği şekilde arttığı gözlemlenmiştir. Artış miktarında bazı

akım bölgelerinde ise küçük farklılıklar tespit edilmiştir. Akım 30 kA seviyesine kadar arttırıldığında, geri besleme gerilimi 2.67 V değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Çıkış geriliminin 1.65-2.67 V aralığında ölçülen değerleri, daha önce belirtilen sebeplerden ASD için uygundur. Geri besleme geriliminin artışıdaki doğrusallığı daha iyi incelemek için Tablo 1'deki geri besleme gerilimleri ve ölçülen akım değerleri için aşağıdaki grafik oluşturulmuştur.



**Şekil 14:**  
*Düz bağlantıda geri besleme gerilimi-ölçülen akım grafiği*

Şekil 14'den geri besleme gerilimindeki artışın, önemli ölçüde doğrusal olduğu görülmektedir. Artış miktarının bazı bölgelerde değişken olması durumunda, bu akım bölgeleri için ölçülen değerlerinde hafif dalgalanmalara sebep olduğu anlaşılmıştır. Kaynak transformatörünün ölçüm kapasitesinin üst sınırı olan 27 kA değerine yaklaştıkça, transformatörün doyuma gitmesi durumunda ölçülen kaynak akımlarının değeri de olumsuz yönde etkilenecektir.

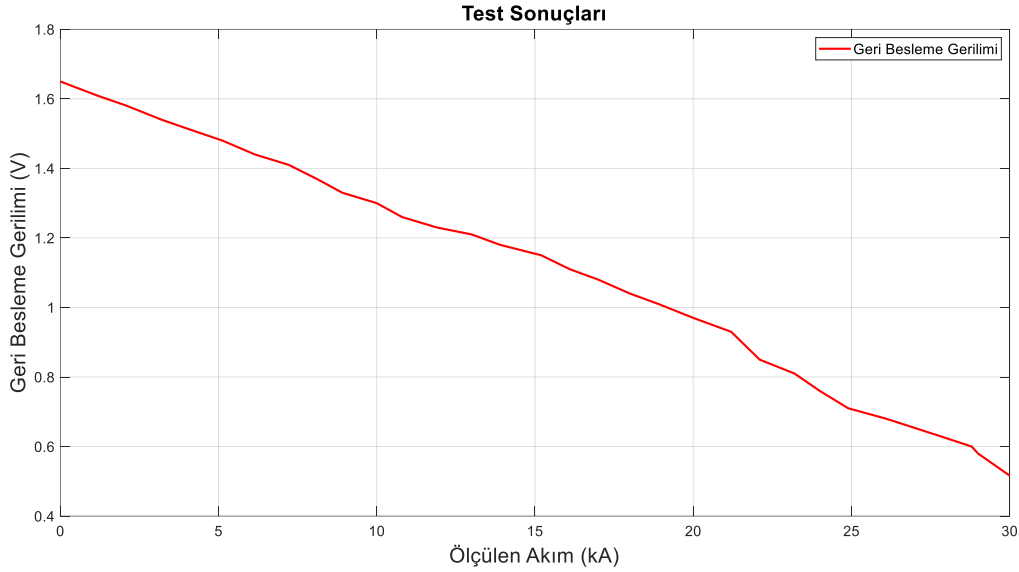
## 5.2.RB'nin Ters Bağlantısında Alınan Deney Sonuçları

Kaynak zamanı 200 ms olarak ayarlanan 1-30 kA aralığındaki akım değerleri, ikinci deneyde RB'nin esnek baraya ters bağlantısında uygulanmıştır. Ayarlanan kaynak parametrelerinin doğruluğu, ölçüm cihazı ile takip edilmiş, uygulanan akım için elde edilen geri besleme gerilim değerleri kaydedilmiştir. Kaydedilen geri besleme gerilim değerleri, OFDA kaynak kontrol ünitesinde ayarlanan akım (kA) ve kaynak zamanı (ms), kaynak akım ölçerde ölçülen kaynak akımı (kA) ve kaynak zamanı (ms) ile Tablo 2'ye aktarılmıştır.

**Tablo 2. Ters bağlantıda ölçülen geri besleme gerilim değerleri**

Ayarlanan kaynak akımı (kA)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ayarlanan kaynak zamanı (ms)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Ölçülen kaynak akımı (kA)	1.15	2.10	3.20	4.15	5.12	6.15	7.22	8.10	8.91	10.0
Ölçülen kaynak zamanı (ms)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Ölçülen geri besleme gerilimi (V)	1.61	1.58	1.54	1.51	1.48	1.44	1.41	1.37	1.33	1.30
Ayarlanan kaynak akımı (kA)	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ayarlanan kaynak zamanı (ms)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Ölçülen kaynak akımı (kA)	10.8	11.9	13.0	13.9	15.2	16.1	17.0	18.0	18.9	20.0
Ölçülen kaynak zamanı (ms)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Ölçülen geri besleme gerilimi (V)	1.26	1.23	1.21	1.18	1.15	1.11	1.08	1.04	1.01	0.97
Ayarlanan kaynak akımı (kA)	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Ayarlanan kaynak zamanı (ms)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Ölçülen kaynak akımı (kA)	21.2	22.1	23.2	24.0	24.9	26.1	27.8	28.8	29.0	30.1
Ölçülen kaynak zamanı (ms)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Ölçülen geri besleme gerilimi (V)	0.93	0.85	0.81	0.76	0.71	0.68	0.63	0.60	0.58	0.51

Denemelerde bu defa 1.65 V olarak ölçülen seviye gerilimi, kaynak akımı yükseldikçe azaldığı gözlenmiştir. Akım 30 kA değerine kadar artırıldığında, geri besleme gerilimi 0.51 V değerine düşmüştür. Çıkış geriliminin 0.51-1.65 V aralığında ölçülen değerleri de ASD için uygun düşmektedir. Bu deneyde de doğrusallık değişimini daha iyi irdelemek için, Tablo 2'deki geri besleme gerilimleri ve ölçülen akım değerleri için aşağıdaki grafik oluşturulmuştur.



**Şekil 15:**

*Ters bağlantıda geri besleme gerilimi-ölçülen akım grafiği*

Benzer şekilde, geri besleme gerilimindeki azalma, Şekil 15'de görüldüğü gibi önemli artış miktarının değişken olduğu bölgelerde yine hafif doğrusallıktan sapmalar olduğu gözlenmiştir. Kaynak akımının 27 kA ve üzeri değerleri için kaynak transformatörünün daha önce de belirtilen şekilde doyuma gitme durumunun olumsuz etkisi bu grafikten de anlaşılmaktadır.



Önerilen akım ölçüm kartında referans gerilimi 1.65 V olarak, RB'nin düz ve ters bağlantısında alınan gerilim değerlerini iki farklı bölgeye ayıracak şekilde uygun grafikler elde edilmiştir. Elde edilen gerilim değerleri, 0-30 kA kaynak akımı değerleri için RB geri besleme devresine doğru yönde bağlandığında 1.65-3.3 V aralığında, ters yönde bağlandığında 0-1.65 V aralığında kalmıştır. İki durumda da grafiklerde doğrusallık söz konusudur. Kaynak akımları karşılığında değişen analog gerilimler ASD için uygundur.

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, OFDA-DNK sistemleri için, RB'den ASD'ye veri aktarım taleplerini karşılayabilecek yeni bir analog integratör devre önerilmiştir. Önerilen akım ölçüm devresinin başarımını test etmek için, bir OFDA-DNK sistemi oluşturulmuştur. OFDA-DNK sisteminde 1-30 kA aralığında kaynak akımları üretilmiştir. Kaynak akımı üretilirken, sistemde bulunan RB'den alınan gerilimler, önerilen devre ile dönüştürülmüştür. RB'nin düz ve ters bağlantısı için dönüştürülen gerilimler kaydedilmiştir. Kaynak akımı üretilmediğinde, önerilen devrede 1.65 V çıkış gerilimi ölçülmüştür. RB'nin düz bağlantısında 1.68-2.67 V, ters bağlantısında 1.61-0.51 V aralığında çıkış gerilimleri elde edilmiştir. Ölçümlerden elde edilen gerilimlerin grafikleri yaklaşık olarak doğrusaldır. Doğrusallık ile ilgili olası bozulmaların sebebi, osiloskop ölçümlerinde insan kaynaklı hatalar ve OFDA transformatörün kapasitesinin tamamının kullanılması olabilir.

Deneylerde RB'nin düz ve ters bağlantısı için 1.65-3.3 V ve 0-1.65 V olarak belirlenen aralığın tamamı kullanılmamıştır. Daha yüksek kapasiteli bir kaynak transformatörü ile, önerilen devrenin yaklaşık 40 kA akıma kadar gerilim dönüşümü yapabileceği tahmin edilmektedir. Önerilen kartın çıkış gerilimi, 0-3.3 V çalışma aralığı olan bir ASD için uygundur. ASD'nin 1.65 V gerilim için ürettiği sayısal değer ile okunan analog gerilim için ürettiği sayısal değer, farkının mutlak değerinin alınması önerilir. Böylece RB'nin bağlantı şekli fark etmeden, kaynak akımı için geri besleme gerilimi elde edilir. Elde edilen gerilim kalibre edilebilir. Önerilen devrenin OFDA-DNK uygulamalarında akım ölçümü yapabilecek, OFDA kontrol sistemlerinin geri besleme döngülerine veri aktarabilecek bir ara birim olarak kullanılabilir potansiyele sahip olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, bu çalışmanın OFDA-DNK sistemlerinde akım ölçümü konusunda farklı çalışmalara katkı sağlayabilecek bir çalışma olması beklenmektedir.

## TEŞEKKÜR

Deneyler, Siff Elektromekanik San. Tic. Ltd. Şti'de gerçekleştirilmiştir. Yazarlar deneysel çalışmadaki destekleri için firma yetkililerine ve Elektrik-Elektronik Departmanı'na teşekkür ediyor.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

## YAZAR KATKISI

Can ÖZENSOY, çalışmanın kavramsal ve/veya tasarım süreçlerinin belirlenmesi, veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması ve son onay ve tam sorumluluk, Murat UYAR, çalışmanın kavramsal ve/veya tasarım süreçlerinin yönetimi, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, fikrinsel içeriğin eleştirel incelemesi ile son onay ve tam sorumluluk, kısımlarına katkı sağlamıştır.

## KAYNAKLAR

1. Abdi-Jalebi, E., McMahon, R. (2005) Simple and practical construction of high-performance, low-cost Rogowski transducers and accompanying circuitry for research applications, *IMTC 2005 - Instrumentation and Measurement Technology Conference, Ottawa, Canada*, 354–358.
2. Altun, Y., Özcan, M. (2015) Ütü masası üretiminde kullanılan elektrik direnç nokta kaynak makinesi tasarım parametrelerinin tespiti, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 3 (2), 85-90.
3. Azizoğlu, B.T, Karaca, H. (2017) Geniş bantlı akım algılayıcı için gerekli aktif entegratör devresi tasarım ve gerçeklemesi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 19(55), 45–51, doi: 10.21205/deufmd.2017195504
4. Brydak K., Szlachta, A. (2016) Measuring methods of welding process parameters, *Measurement Automation Monitoring*, 62(1), 26–29.
5. Deepati, A.K., Alhazmi, W., Benjeer, I. (2021) Mechanical characterization of AA5083 aluminum alloy welded using resistance spot welding for the lightweight automobile body fabrication, *Materials Today: Proceedings*, 1–10, doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.646
6. Duan, B., Zhang, C., Guo, M., Zhang, G. (2014) A new digital control system based on the double closed-loop for the full-bridge inverter, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(1–4), 241–248, doi: 10.1007/s00170-014-6463-6
7. Fiore, J.M. (2016) Operational amplifiers & linear integrated circuits: theory and application, *Independently published*, 1–589, ISBN13: 978–1796856897
8. Giaccone, L., Cirimele, V., Canova, A. (2020) Mitigation solutions for the magnetic field produced by MFDC spot welding guns, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 62(1), 83–92, doi: 10.1109/temc.2018.2877805
9. Hofstötter, N., Krapp, J. (2018). Data sheet skyper 32pro r, Semikron, Erişim Adresi: <https://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-datasheet-skyper-32-pro-r-l6100202.pdf>, (Erişim Tarihi: 07.05.2021)
10. Jenney, C.L., O’Brien, A. (2001) Welding handbook, Vol. 1: *Welding Science and Technology (9th ed.)*, Woodhead Publishing Ltd., 1–985, ISBN–10: 0871716577
11. Jun, Y., Li, G., Liu, H., Yang, G., Ling, G. (2016) Design of a flexible rogowski coil with active integrator applied in lightning current collection. *33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, 1–7, doi: 10.1109/iclp.2016.7791472
12. Keller, P. (2013) Measuring magnetic field transients, *Magn. Tech.Int.*, 57–60.
13. Klopčić, B., Stumberger, G., & Dolinar, D. (2007) Iron core saturation of a welding transformer in a medium frequency resistance spot welding system caused by the asymmetric output rectifier characteristics, *2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting*, 2319–2326, doi: 10.1109/07ias.2007.350
14. Li, W., Feng, E., Cerjanec, D., Grzadzinski, G.A. (2004) Energy consumption in AC and MFDC resistance spot welding, *Sheet Metal Welding Conference XI*, Sterling Heights, MI, 1–12.
15. Liu, Y., Lin, F., Zhang, Q., Zhong, H. (2011) Design and construction of a Rogowski coil for measuring wide pulsed current. *IEEE Sensors Journal*, 11(1), 123–130, doi: 10.1109/jsen.2010.2052034

16. Lund, S.H.J., Billeschou, P., Larsen, L.B. (2019) High-bandwidth active impedance control of the proprioceptive actuator design in dynamic compliant robotics, *Actuators*, 8(4), 71–103, doi: 10.3390/act8040071
17. Ramboz, J.D. (1995) Machinable Rogowski coil, design and calibration, *Proceedings of 1995 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference - IMTC '95*, 329–334, doi: 10.1109/imtc.1995.515151
18. Ray, W.F., Hewson, C.R. (2000) High performance Rogowski coil current transducers, *IEEE Industry Applications Conference*, 5, 3083–3090.
19. Rezaee, M., Heydari, H. (2010) Design modification of Rogowski coil for current measurement in low frequency, *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, Vol. 6, No. 4, 232–238.
20. Semikron (2013). Skm200gb12t4 Fast IGBT Module Data Sheet, Erişim Adresi: <https://www.semikron.com/dl/service-support/downloads/download/semikron-datasheet-skm200gb12t4-22892060.pdf> (Erişim Tarihi: 07.05.2021)
21. Tapashetti, P., Gupta, A., Mithlesh, C., Umesh, A.S. (2012) Design and simulation of op amp integrator and its applications, *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, ISSN: 2249 – 8958, Volume-1, Issue-3, 12–19.
22. Texas Instruments (2019). TMS320x2806x Technical Reference Manual, Erişim Adresi: <https://www.ti.com/lit/ug/spruh18h/spruh18h.pdf>, (Erişim Tarihi: 07.05.2021)
23. Wang, X., Zhou, K., Shen, S. (2021) Intelligent parameters measurement of electrical structure of medium frequency DC resistance spot welding system, *Measurement*, 171, 108795–108806, doi: 10.1016/j.measurement.2020.108795
24. Ward, D.A., Exon, J.L.T. (1993) Using Rogowski coils for transient current measurements, *Engineering Science and Education Journal*, 2(3), 105–113, doi: 10.1049/esej:19930034
25. Xia, Y. J., Zhang, Z. D., Xia, Z. X., Zhu, S. L., & Zhang, R. (2015) A precision analogue integrator system for heavy current measurement in MFDC resistance spot welding, *Measurement Science and Technology*, 27(2), 025104–025114, doi: 10.1088/0957-0233/27/2/025104
26. Zhang, Y., Liu, J., Bai, G., & Feng, J. (2012) Analysis of damping resistor's effects on pulse response of self-integrating Rogowski coil with magnetic core, *Measurement*, 45(5), 1277–1285, doi: 10.1016/j.measurement.2012.01.009
27. Zhou K., Cai, L. (2011) Improvement in control system for the medium frequency direct current resistance spot welding system, *Proceedings of the 2011 American Control Conference*, 2657–2663, doi: 10.1109/acc.2011.5990827
28. Zhou, K., Li, H. (2020) A comparative study of single-phase AC and medium frequency DC resistance spot welding using finite element modeling, *IEEE Access*, 8, 107260–107271, doi: 10.1109/access.2020.3000794
29. Zhou, K., Yao, P. (2017) Review of application of the electrical structure in resistance spot welding, *IEEE Access*, 5, 25741–25749, doi: 10.1109/access.2017.2771310

