

**NİKEL ALAŞIMLI ESNEK FİLAMANT NÜVELİ ROGOWSKI
BOBİNİN TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ**

GİZEM MERVE AYDIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**DANIŞMAN
DOÇ.DR. EMİN YILDIRIZ**

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

NİKEL ALAŞIMLI ESNEK FİLAMANT NÜVELİ ROGOWSKI
BOBİNİN TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ

Gizem Merve AYDIN tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Emin YILDIRIZ

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Emin YILDIRIZ

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Yunus Biçen

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Serdal Arslan

Harran Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 24/07/2023

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

24.07.2023

Gizem Merve AYDIN



TEŐEKKÖR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Doç. Dr. Emin YILDIRIZ'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP-2022.06.03-1349 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir

24.07.2023

Gizem Merve AYDIN

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
KISALTMALAR.....	xi
SİMGELER	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ.....	15
1.1. LİTERATÜR TARAMASI.....	20
2. AKIM ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ VE MATERYALLER	29
2.1. ŞÖNT DİRENÇ İLE AKIM ÖLÇÜMÜ	30
2.1.1. Alçalan Kenar (Low-Side) Ölçüm Yöntemi.....	32
2.1.2. Yükselen Kenar (High-Side) Ölçüm Yöntemi	33
2.2. HALL ETKİLİ SENSÖR İLE ÖLÇÜM YÖNETİMİ	34
2.3. AKIM TRANSFORMATÖRLERİ İLE ÖLÇÜM YÖNTEMİ.....	39
2.3.1. Akım Transformatörlerinin Mıknatıslanma Karakteristiği.....	40
2.3.2. Kullanıldığı Gerilim Seviyesine Göre Akım Ölçü Transformatörleri	41
2.3.3. Soğutma Şekline Göre Akım Ölçü Transformatörleri	43
2.4. ROGOWSKİ BOBİNİ	45
2.4.1. Rogowski Bobin Çeşitleri	49
2.4.1.1. Esnek Rogowski Bobini.....	49
2.4.1.2. Rijit Rogowski Bobini.....	50
2.4.1.3. BDK Rogowski Bobini	50
3. ROGOWSKİ BOBİN TASARIMI.....	53
3.1. DÖRTGEN KESİTLİ.....	53
3.1.1. Endüktans Hesabı	54
3.1.2. Ortak Endüktans Hesabı.....	54
3.1.3. Toplam Empedans	54
3.2. DAİRESEL KESİTLİ.....	55
3.2.1. Endüktans Hesabı	55
3.2.2. Ortak Endüktans Hesabı.....	55
4. ÖNERİLEN ESNEK NÜVELİ ROGOWSKİ BOBİNİ.....	56
4.1. ANALİTİK YAKLAŞIM İLE GERİLİM HESABI.....	65
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	67
5.1. DENEYSEL BULGULAR	67
5.2. ANALİTİK SONUÇLAR.....	70
5.3. SONLU ELEMANLAR ANALİZ SONUÇLAR	76
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	82

6.1. ÖNERİLER.....	82
7. KAYNAKLAR.....	84
8. EKLER	87
8.1. EK- A : WEIGEL MARKA B100A/60MV KODLU ŞÖNT DİRENCİN DATASHEETİ	87
8.2. EK-B : FLUKE i2500-18 iFLEX® ESNEK AKIM PROBU ÖLÇÜLERİ	90
8.3. EK-C DENEYSEL SONUÇLARA GÖRE ELDE EDİLEN SEKONDER GERİLİMİ (ENDÜKLENEN GERİLİM).....	91
ÖZGEÇMİŞ.....	95



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Enterkonnekte elektrifikasyon şeması	15
Şekil 1.2. Elektrik enerjisi iletim, üretim ve dağıtım gerilim seviyeleri	17
Şekil 1.3. [8] 'de yazarların tasarlamış olduğu manyetik nano tozu (solda) ile doldurulmuş bobinin alt kısmı; 10 turlu tamamlanan rogowski bobini (sağda).....	20
Şekil 1.4. [9]'da yazarların tasarladığı RB'nin, (a) ekransız RB, (b) ekranlı RB	21
şekil 1.5. [10]'da yazarların tasarladığı esnek çekirdekler	21
Şekil 1.6. [11]' de yazarların tasarlamış olduğu RB	22
Şekil 1.7. [12]'de tasarlanan rijit rogowski bobini örneği.....	23
Şekil 1.8. [14]'de yazarların tasarlamış rog-1 (sol) ve rog-2 (sağ)	24
Şekil 1.9. [15]'de yazarların tasarlamış olduğu rb akım sensörü	25
Şekil 1.10. [16]'da yazarların toroidal model çizimleri	25
Şekil 1.11. [17]'de yazarların tasarlamış olduğu RB	26
Şekil 1.12. [17]'deki deney düzeneği.....	26
Şekil 1.13. [18]'de tasarlanan RB ile akım döngüsü.....	27
Şekil 1.14. [19]'de gözden geçirilen bölünmüş çekirdekli BDK rogowski bobini	28
Şekil 2.1. Şönt ölçümünün eş değer devresi [20]	30
Şekil 2.2. WEIGEL marka B100A/60MV şönt direnç.....	31
Şekil 2.3. DC analizörün bağlantı şeması	31
Şekil 2.4. Alçalan kenar (low side) ölçüm eş değer devresi [23]	32
Şekil 2.5. Yükselen kenar (high-side) ölçüm eş değer devresi [23]	33

Şekil 2.6. Solda: sıkıca kapanmış yalnızca AC akım ölçen transformatörün pensampermetre nüvesi. Sağda: hall etkili PSA'nın nüve çeneleri arasındaki hava boşluğunda bir sensör	35
Şekil 2.7. [26]'da yazarların hall sensörü kullanılarak akım ölçümü tasarımı.....	36
Şekil 2.8. [27]'de yazarların elektrik kablosu üzerine yerleştirmiş oldukları hall etkili sensörler	37
Şekil 2.9. Dört hall sensörünün düzeni	38
Şekil 2.10. Trafo şeması.....	39
Şekil 2.11. Akım ölçü transformatörünün doyum eğrisi	41
Şekil 2.12. Muhtelif boyutlarda alçak gerilim ölçü transformatörleri [28]	41
Şekil 2.13. Yüksek gerilim akım ölçü transformatörü [30].....	42
Şekil 2.14. Hücre içerisine montajı yapılan akım ölçü trafosu [31].....	42
Şekil 2.15. 154 kV seviyesinde kullanılan akım trafoları [32].....	43
Şekil 2.16. 380 kV gerilim seviyesinde kullanılan akım trafoları [32].....	44
Şekil 2.17. Kuru tip akım ölçü transformatörü [33].....	44
Şekil 2.18. Tipik bir RB	45
Şekil 2.19. Rogowski bobininin eşdeğer devresi	46
Şekil 2.20. Rogowski bobini entegratör devresi	47
Şekil 2.21. RC entegratörlü tek turlu sarımın eşdeğer devresi.....	47
Şekil 2.22. Fluke i2500-18 iflex® esnek akım probu	48
Şekil 2.23. Accuenergy, Acuct Flex Series Rogowski bobini örnekleri	48
Şekil 2.24. Çekirdek içermeyen (air core) ve tel geri dönüş yolu selenoid sargıları içinden olan rogowski bobini ve algılanacak akımın geçtiği iletken [40]	49
Şekil 2.25. Rijit rogowski bobini örneği [53]	50
Şekil 2.26. [14]'de Yazarların tasarlamış olduğu hibrit BDK bobini	50

Şekil 3.1. RB'nin iç ve dış çapı [40]	53
Şekil 3.2. Dikdörtgen kesitli toroidal nüveli RB	54
Şekil 3.3. Dairesel kesitli toroidal nüveli RB [41]	55
Şekil 4.1. İşlenmemiş bir demir cevheri parçası	56
Şekil 4.2. Kobalt cevheri.....	57
Şekil 4.3. Ham nikel cevheri	57
Şekil 4.4. Manyetit kristali	58
Şekil 4.5. 3Devo filament ekstrüzyon ekosistemi üretim aşamaları [50].....	59
Şekil 4.6. Tez çalışmamızda nüve tasarımında kullanılan tek vidalı ekstruder sistemi	59
Şekil 4.7. Üretilen %40 ve %60 nikel alaşımlı filamentler	60
Şekil 4.8. Tasarlanan RB nüvesinin nikel + hava alaşımının eş değer gösterimi.....	60
Şekil 4.9. Elde edilen RB nüvelerinin eş değer gösterimi.....	61
Şekil 4.10. Esnek RB nüvesi	62
Şekil 4.11. 0.4 Mm çapında bakır tel ile sarılan esnek RB nüvesi	63
Şekil 4.12. Elde edilen RB'lerde ekranlama	63
Şekil 4.13. Elde edilen nihai RB	64
Şekil 5.1. Deney düzeneği.....	67
Şekil 5.2. Tasarlanan RB nüvesinin eş değer gösterimi	70
Şekil 5.3. Geliştirilen RB'nin 3D görüntüsü	76
Şekil 5.4. %40 ve %60 nikel alaşımlı filamentin BH eğrisi.....	77
Şekil 5.5. (a) hava nüveli, (b) %40 nikel alaşımlı ve (c) %60 nikel alaşımlı RB'nin 100 A primer akımında manyetik akı yoğunlukları	78
Şekil 5.6. (a) hava nüveli, (b) %40 ve (c) %60 nikel alaşımlı RB'nin 100 a primer akımında kesit akı yoğunlukları.....	80

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. Akım ölçüm çeşitlerinin karşılaştırılması, avantaj dezavantajları, uygulama alanları, bağlantı tipleri ve izolasyon durumları.....	51
Çizelge 4.1. İncelenen ferromanyetik malzemelerin özellikleri.....	58
Çizelge 4.2. Referans alınan ticari RB'nin özellikleri	62
Çizelge 5.1. Deneysel ölçüm sonuçları	68
Çizelge 5.2. Ölçüm sonuçlarına göre elde edilen grafik	69
Çizelge 5.3. Analitik formül ile primer akım değişimine göre %40 nikel alaşımlı rb'de hesaplanan manyetik alan şiddeti, manyetik akı yoğunluğu ve indüklenen gerilimler.....	73
Çizelge 5.4. %40 nikel alaşımlı B-H eğrisi.....	73
Çizelge 5.5. Analitik formül ile primer akım değişimine göre %60 nikel alaşımlı rb'de hesaplanan manyetik alan şiddeti, manyetik akı yoğunluğu ve indüklenen gerilimler.....	74
Çizelge 5.6. %60 nikel alaşımlı nikel alaşımlı B-H eğrisi	74
Çizelge 5.7. Manyetik akı değişiminin %40 ve %60 nikel alaşımındaki %farkı	75
Çizelge 5.8. İletkenden geçen akıma göre tasarlanan rb üzerindeki indüklenen gerilimin %40 ve %60 nikel alaşımındaki %farkı	75
Çizelge 5.9. Deneysel ve nümerik hesaplama sonuçlarının karşılaştırılması.....	80
Çizelge 5.10. deneysel ve nümerik hesaplama sonuçlarının karşılaştırılması ve MAPE (%) değeri.....	81

KISALTMALAR

A	Amper
ADC	Analog-Dijital Dönüştürücü
AAK	Akıllı Akım Kaydedici
ABS	Akrilonitril bütadien stiren
AC	Alternatif Akım
AG	Alçak Gerilim
BDK	Baskı Devre Kartı
CM	Santimetre
CT	Geleneksel Akım Trafosu
DC	Doğru Akım
EAİ	Elektrik Ark Ocağı
EKK	Enerji Kalite Ölçüm Cihazı
EMF	Elektromanyetik Alan
HCT	Hall Etkili Akım Trafosu
HZ	Hertz, Frekans
KA	Kiloamper
KV	Kilovolt
LCD	Liquid Crystal Display/Sıvı Kristal Ekran
LVDT	Lineer Değişken Diferansiyel Transformatörler
MHz	Megahertz
mm	Milimetre
mv	Milivolt
MVA	Megavoltamper
OG	Orta gerilim
PCB	Printed Circuit Board
PD	Kısmi Deşarj
PSA	Pensampermetre
RB	Rogowski Bobini
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
ÜİD	Üretim, İletim, Dağıtım
XLPE	Çapraz Bağlı Polietilen Kablo

SİMGELER

A	Amper
a	RB'nin İç Yarıçapı
b	RB'nin Dış Yarıçapı
B	Manyetik Akı Yoğunluğu
f	Frekans
Fe_2O_4	Manyetit
gr	Gram
H	Manyetik Alan Şiddeti
Hz	Frekans
h	RB Nüvesinin Yüksekliği
K	Kelvin
l	Manyetik Akı Yolunun Uzunluğu
L	Öz Endüktans
M	Metre
M_{21}	İletken Arasındaki Karşılıklı Endüktans
N	Sarım Sayısı
N_2	RB'nin Üzerindeki Sargı
R	Direnç
S	Saniye
T	Tesla
T_c	Curie Sıcaklığından
V	Volt
W	Watt
Wb	Weber
Z_2	Toplam Empedans
Ω	Ohm
μ_0	Boşluğun (Hava) Manyetik Geçirgenliği
$^{\circ}C$	Derece
μ_r	Bağıl Geçirgenlik
$\emptyset$	Manyetik Akı

ÖZET

NİKEL ALAŞIMLI ESNEK FİLAMENT NÜVELİ ROGOWSKI BOBİNİN TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ

Gizem Merve AYDIN

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Emin YILDIRIZ

Temmuz 2023, 94 sayfa

Elektrik sistemlerinde hatlarında akım ölçmek için genelde akım trafoları kullanılır. Akım trafolarında, ölçülen akım büyüklüğüne göre nüve doyumu gözlenebilir. Akım ölçümü için hall etkili sensörler veya hava nüveli Rogowski Bobinler (RB) de kullanılmaktadır. Hall etkili sensörler dış manyetik ortamlardan çok fazla etkilenebilmektedirler. Hava nüvesi kullanan RB'ler ise manyetik olarak doğrusal özelliktedirler. Bu nedenle RB'ler, ölçüm aralığında doğruluğu yüksek ölçümler yapabilmektedirler. Üstelik hava nüveli RB'ler esnek olduklarından her ortamda rahatlıkla kullanılabilen ve söküp takılabilmektedir. Ancak hava nüveli olduklarında RB'lerin sekonder gerilimleri mV seviyesinde ölçülür. Anlamlı değerler elde edebilmek için sekonder tarafında bir indikatör ile birlikte kullanılırlar. Bu nedenle yükseltici ve ADC çözünürlüğü dikkate alındığında akım hassasiyetleri düşük olabilmektedir. Bu çalışmada ticari RB'lerin akım hassasiyetlerini arttırmak için esnek ferromanyetik nüveli bir RB tasarımı geliştirilmiştir. Esnek nüve üretimi için %40 ve %60 nikel alaşımlı filamentler üretilmiştir. Ticari bir referans ürün dikkate alınarak geliştirilen RB'nin hava nüveli ve filament nüveli modeli, laboratuvar ortamında üretilmiş ve deneysel olarak 0-400 A aralığında birbirleriyle MAPE (%) değerleri ile karşılaştırılmıştır. Buna göre önerilen esnek ferromanyetik nüveli RB ile ölçülen gerilim değerleri, hava nüveli RB'e göre ortalama %25 oranında yüksektir. Bu da ölçüm hassasiyetine olumlu katkı sağlayacaktır.

Anahtar Sözcükler: Rogowski Bobini, Ferromanyetik Esnek Manyetik Nüve, Akım Hassasiyeti, Manyetik Geçirgenlik

ABSTRACT

DESIGN AND DEVELOPMENT OF ROGOWSKI COIL WITH NICKEL ALLOY FLEXIBLE FILAMENT CORE

Gizem Merve AYDIN

Duzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical and
Electronics Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Emin YILDIRIZ

July 2023, 94 pages

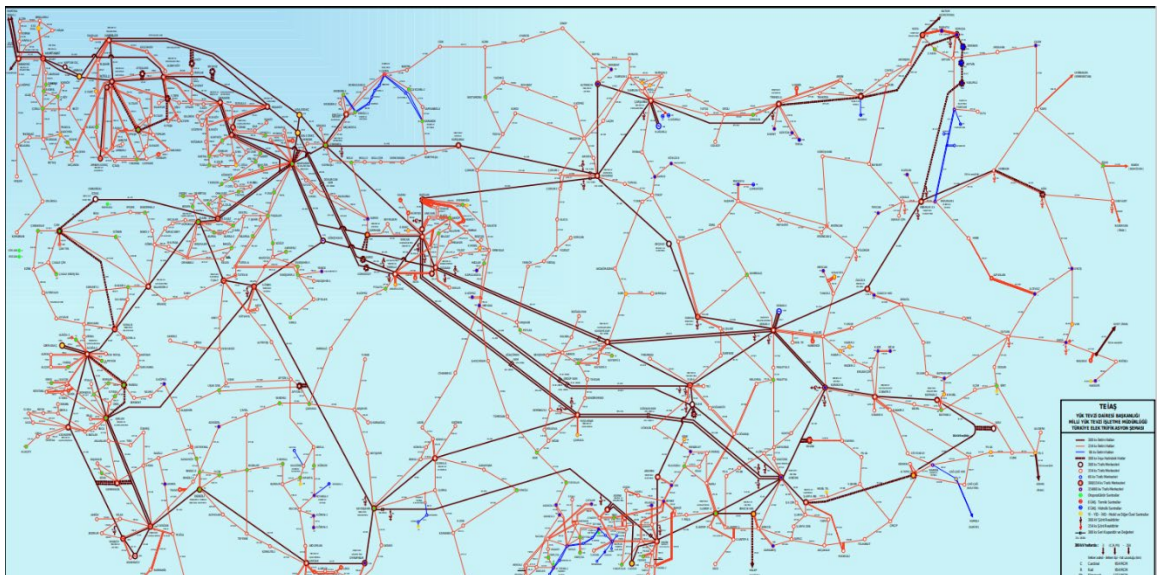
In electrical systems, current transformers are generally used for the generation of current in the lines. In current transformers, core saturation can be observed according to the measured current magnitude. Hall effect sensors or air-core Rogowski Coils (RB) are also used for the current measurement. Hall effect sensors can be greatly affected by external magnetic environments. RBs using an air core are magnetically linear. For this reason, RBs can make high-accuracy measurements in the measuring range. Moreover, RBs are flexible, so they can be used easily in any environment and can be disassembled and reassembled. However, because of air-cored, the secondary voltages of the RBs are measured at mV. They are used with an indicator on the secondary side to obtain meaningful values. Therefore, current sensitivities may be low when amplifier and ADC resolution are taken into account. In this paper, a flexible ferromagnetic core RB design has been developed to increase the current sensitivity of commercial RBs. For the production of flexible core, %40 and %60 nickel alloy filaments have been produced. Air core and filament core model of RB, which was developed considering a commercial reference product, was produced in the laboratory and experimentally compared with each other in the range of 0-400 A with MAPE (%) values. Accordingly, the voltage values measured with the proposed RB are on average 25% higher than that of the air core RB. This will contribute positively to measurement accuracy.

Keywords: Rogowski Coil, Flexible Magnetic Core, Current Sensitivity, Magnetic Permeability

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi; üretim, iletim ve dağıtım olarak üç ana alt sistemden geçerek kullanıcıya ulaşır. Elektrik enerjisi; rüzgâr, güneş, gelgit enerjileri jeotermal, hidrolik gibi yenilenebilir kaynaklarını veya nükleer, termik gibi ısı enerji kaynaklarını elektrik enerjisine dönüştüren elektrik santrallerinde üretilmektedir. Üretimden tüketime doğru üretilen enerjinin iletilmesi ve dağıtılması gerekmektedir. Elektrik santralleriyle tüketim noktaları arasındaki bağlantı, iletim şebekelerinin kullanıldığı enterkonnekte sistemle sağlanır. Enterkonnekte sistemdeki olası bir arızada, sadece arızalı birimin enerjisi kesilir ve diğer birimlerde çalışma devam eder. Enterkonnekte sistemde herhangi bir santral veya transformatör devre dışı kaldığında diğer santral ve transformatörler ilgili bölgeleri beslemeye devam ederler. Böylece enerjinin devamlılığı sağlanır. Ülkelerin tüketicilerini beslediği bir dağıtım şebekesi vardır ve enterkonnekte sistem sayesinde komşu ülkelerin sistemleri birbirine bağlanabilir [1]. Örneğin ülkemiz ile komşu olan Bulgaristan, Yunanistan, Irak, Suriye, İran ve Gürcistan ile elektrik bağlantı şebekemiz vardır.

Şekil 1.1.'de Ülkemize ait 2004 yılında TEİAŞ Milli Yük Tevzi İşletme Müdürlüğü tarafından hazırlanan lejantında iletim hatları, trafo merkezleri, üretim santralleri ve reaktörlerin yer aldığı enterkonnekte elektrifikasyon şeması yer almaktadır [2].



Şekil 1.1. Enterkonnekte elektrifikasyon şeması

Ülkemizdeki elektrik enerjisi iletim hatlarında kullanılan gerilim seviyeleri 380kV, 220kV, 154kV ve 66kV'dir. Enerji Piyasası Denetleme Kurumu tarafından her yıl paylaşılan Elektrik Piyasası Gelişim Raporu incelendiğinde Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) tarafından işletilen elektrik iletim sistemi ülkemizde 2016 yılı sonu itibariyle [3] 61.269 km enerji iletim hattı uzunluğuna sahip olup bu iletim hatlarının %66,7'si 154kV, geri kalan kısmın neredeyse tamamı 380kV gerilim seviyesindedir. 220 ve 66kV gerilim seviyesindeki hatların uzunluğu ise yalnızca 137km'dir. TEİAŞ işletim sorumluluğunda 180.845MVA trafo kapasitesi, 997 trafo merkezi ve komşu ülkelerle toplam 12 adet enterkonnekte hat vardır.

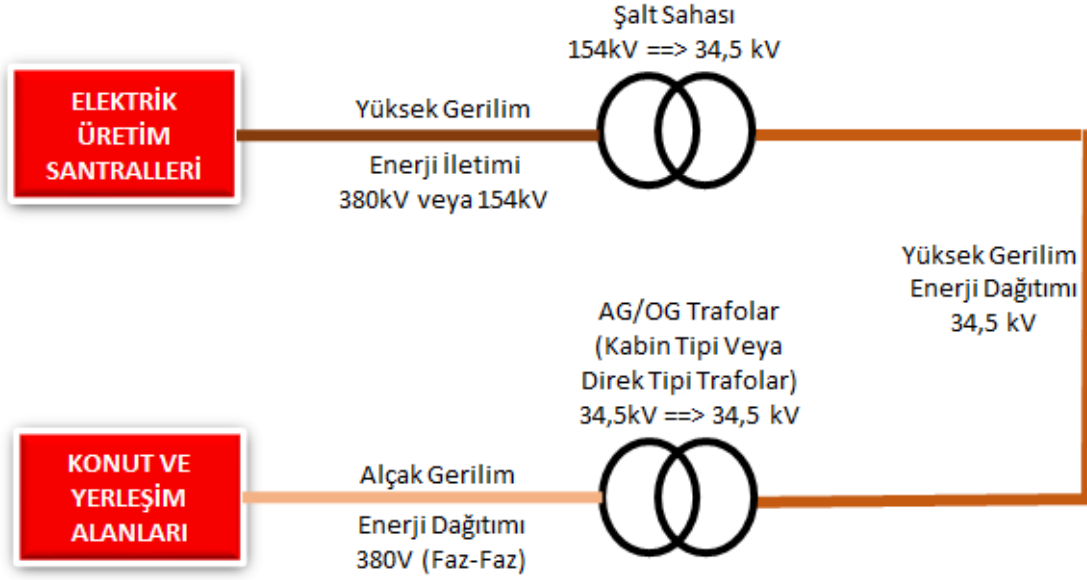
Bu verilere 2022 yılının sonu itibariyle [4] bakıldığında ise iletim hattı uzunluğu 73.634 km ve bu iletim hatlarının %65,06'si 154kV, geri kalan kısmın neredeyse tamamı 380kV gerilim seviyesindedir. 220 ve 66kV gerilim seviyesindeki hatların uzunluğu ise yalnızca 204,88 km'dir. TEİAŞ işletim sorumluluğunda 258.360 MVA trafo kapasitesi 1.330 trafo merkezi bulunmaktadır.

Ülkemizdeki elektrik enerjisi dağıtım sistemi incelendiğinde üretilen ve iletilen 154 kV ve 380kV gerilim seviyesi indirici merkezlerde 34,5kV'a çevrilerek dağıtım hatlarıyla dağıtılır. Belirli noktalarda tesis edilen trafolar ile de 34,5kV gerilim seviyesi 400V'a düşürülerek tüketicilerin kullanması sağlanır. Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. (TEDAŞ) 2013 yılında elektrik dağıtım ve perakende satış sektöründe rekabete dayalı bir ortamın oluşturulması ve gerekli reformların yapılmasını amacıyla Kamu mülkiyetindeki elektrik işletmelerinin yeniden yapılandırılması suretiyle elektrik enerjisi dağıtım hizmetlerinin özelleştirilmesine karar verilmiş ve dağıtım bölgeleri yeniden belirlenerek, Türkiye 21 dağıtım bölgesine ayrılmıştır.

Enerji Piyasası Denetleme Kurumu 2016 Yılı Elektrik Piyasası Gelişim Raporu [3] incelendiğinde ülkemizde 21 dağıtım şirketinin işlettiği toplam dağıtım hattı uzunluğu 1.102.508 km'dir ve elektrik şebekesi istisnalar haricinde Türkiye'nin tamamına ulaşmıştır. Toplam dağıtım hatlarının %84,64'ünü havai hatlar, %15,36'sını yer altı hatları oluşturmaktadır. Bu durum dağıtım hatlarının doğal afetler, iklim veya insan kaynaklı vb. etkilere açık olduğunu göstermektedir. Özellikle aşırı yağışlar ve şiddetli rüzgârlar gibi doğa olayları doğrudan veya dolaylı olarak dağıtım hatlarında hasarlara neden olabilmektedir. Dağıtım sistemimizde 148.368 MVA trafo kapasitesi ve 436.299 adet trafo bulunmaktadır.

Bu verilere 2022 yılının sonu itibariyle [4] bakıldığında ise toplam dağıtım hattı uzunluğu 1.401.218 km ve bu hatlarının %76,83'ünü, %23,17'sini yer altı hatları oluşturmaktadır. Dağıtım sistemimizde toplam 196.741 MVA trafo kapasitesi ve 522.311 adet trafo bulunmaktadır.

Ülkemizdeki elektrik enerjisi iletim, üretim ve dağıtım gerilim seviyeleri ve kabaca şeması Şekil 1.2.'de yer almaktadır.



Şekil 1.2. Elektrik enerjisi iletim, üretim ve dağıtım gerilim seviyeleri

Elektrik enerjisi üretim, iletim ve dağıtım aşamalarında kullanılan ekipman ve sistemler enerjinin kalitesini ve sürekliliğini etkilemektedir. Bu kalite ve sürekliliği sağlamak için, meydana gelen problemler kaynağında çözülmelidir ve bu bozucu problemler üretim, iletim, dağıtım ve tüketici girişlerinde kayıt altına alınmalıdır. Bunun için önemli olan her noktada akım ve gerilimin doğru şekilde ölçülmesi önem arz etmektedir.

Elektrik enerjisinin kalitesini artırmanın en önemli basamaklarından biri, elektriği bir otomasyon sistemi ile izleyerek ve kontrol ederek şebekeyi bir otomasyon sistemine entegre edebilmektedir [5]. Ülkemizdeki birçok dağıtım şirketinde elektrik şebekesi SCADA sistemi üzerinden 7/24 online izlenmekte ve kumanda edilmektedir. Bu sayede dağıtım şebekesinde ortaya çıkabilecek bir arızaya kısa sürede müdahale edilebilir, acil durum ekipleri ve bakım ekiplerinin hareket kabiliyetini arttırabilir, hem çalışanların hem de dağıtım sisteminden enerji alan müşterilerin emniyeti arttırabilmektedir.

Elektrik iletim ve dağıtım şebekelerindeki kayıpların düşük olması beklenmektedir. Yüksek enerji kayıp oranları, şebekelerde teknik ve teknik olmayan önemli sorunları beraberinde getirebilir. Elektrik şebekesindeki toplam kayıp hesaplanırken, şebekeye verilen enerji ile tahakkuk edilen enerji arasındaki fark kullanılır. "Kayıp" teknik kayıpları ifade eder ve elektrik enerjisinin aktarımı esnasında oluşur. Kayıpların en az olması istenir ancak bu noktada maliyet de önemlidir. "Kaçak" olarak belirtilen enerji kayıpları, teknik olmayan kayıplardır. Sosyal, ekonomik, bölgesel, yönetsel, politik, altyapısal, güç kalitesi, güvenlik vb. birçok farklı parametreye bağlı karmaşık bir problemdir. Kayıp ve Kaçak enerji miktarlarını birbirinden ayırtmak zor olduğundan çoğunlukla aynı anlamda kullanılırlar. Suriyamongkol (2002) ve Piercy ve Cress (2007) çalışmalarında iletim ve dağıtım şebekesindeki teknik kayıpları bir sınıflandırma içerisinde sunmuştur [6]. 2015 yılında elektrik şebekesindeki kayıplar, toplam üretimin %14,2'si olarak gerçekleşmiştir. Elektrik dağıtım şebekesinin kayıpları ise elektrik tüketiminin %12,1'i olarak gerçekleşmiştir. Elektrik dağıtım şebekesindeki kayıp ve kaçak oranlarının azaltılmasına yönelik hedefler ilk kez 2006- 2010 yıllarını kapsayan 5 yıllık dönem için belirlenmiş ve hala da her yıl dağıtım şirketlerine bu oranların azaltılmasına yönelik hedefler verilmektedir. 2010 yılında %10,88 olması öngörülen kayıp ve kaçak oranı %15,68 olarak, 2011-2015 yıllarını kapsayan ikinci uygulama dönemi sonunda ise %10 olması hedeflenen kayıp ve kaçak oranı %14,20 olarak gerçekleşmiştir [7] .

Kayıp ve kaçak oranları bölgelere göre önemli değişiklikler göstermektedir. Örneğin, Enerji Piyasası Denetleme Kurumu 2016 Yılı Elektrik Piyasası Gelişim Raporu [3] incelediğinde 21 dağıtım şirketi arasında yer alan Sakarya Elektrik Dağıtım A.Ş'nin 2016 yılındaki hedef kayıp oranı 7,42 iken gerçekleşmesi 6,58'dir. 2022 yılının sonunda ise [4] hedef kayıp oranı %6,82 iken gerçekleşen kayıp oranı %5,75'tir ancak kayıp oranının en yüksek olduğu bölge dağıtım şirketlerinden biri olan DİCLE EDAŞ'ta 2016 yılındaki hedef kayıp oranı %71,62 iken gerçekleşmesi %67,63'tür . 2022 yılının sonunda ise hedef kayıp oranı %49,30 iken gerçekleşen kayıp oranı %43,63'tür. Böylece birçok dağıtım şirketinin kayıp ve kaçak hedefleri bakımından başarılı olduğu ve kayıp, kaçak hedefleri belirlenirken de ekonomik, bölgesel, altyapısal, güç kalitesi, güvenlik vb. birçok farklı parametrenin göz önünde bulundurduğu görülmektedir.

Enerji iletim sisteminde ise kayıp oranları sistemdeki talep, yük akışları, sıcaklık ve yatırıma bağlı olarak değişmektedir.

Dağıtım ve iletim şebekelerinde gerilim seviyesi ve ölçümü önemli olduğu kadar akım ölçümü de enerji üreten üreticiler ve enerji tüketicileri için güç kalitesi, faturalandırma, tüketilen güç miktarının hesabı, gelir amaçlı enerji tüketimi, hattaki kayıp ve kaçakların hesabı, akım değerine göre hatta oluşan arızaya dair bilgi edinebilme, kapasite üstü yüklenme var ise tespiti, koruma sistemlerinin çalışması ve gelecekteki şebeke tasarımları için fikir edinebilmemize olanak sağlamakta olduğundan önemli bir parametredir. Aynı zamanda çekilen akım miktarına göre kritik sistemlerin kontrol edildiği otomatik kapanma fonksiyonlarında, otomobil, tren, roket, uydu gibi hava deniz ve kara taşıtlarında, elektrik motorlarında ve tüm akım tüketen akümülatörlerde çalışma performansını gözlemlemek ve arıza tespiti için akım değerlerinin doğru ve hassas olarak bilinmesi gerekir.

Elektrik dağıtım sistemlerinde elektrik akımları trafo merkezlerinde, direk tipi trafo ölçüm panolarında, bina tipi kabinlerde ölçüm panolarında ve elektrik şebeke sisteminin belirlenen noktalarına takılan enerji kalite ölçüm cihazlarında (EKK) ölçülebilmektedir.

Tezimizde dağıtım ve iletim şebekesindeki akım ölçme teknikleri araştırılarak montajı kolay, geniş akım aralığı ölçebilen ve ölçüm yapılabilmesi için enerji kesilmesine gerek olmayan, esnek olan, arızalandığında değişim maliyetinin düşük olması sebebiyle rogowski bobini üzerinde durulmuştur. RB'nin ticari olan ürünlerinde genellikle nüve olarak hava nüveli olanları tercih edildiği tespit edilmiştir. RB'nin esnekliği kaybolmadan nüve tipi değiştirilerek daha geniş bir akım aralığı elde edilip edilmeyeceğine dair çalışmalar, ölçümler, deneysel çalışmalar ve analitik hesaplamalar yapılmıştır.

Yapılan literatür araştırmaları neticesinde bu tez kapsamında akımı daha hassas ölçebilmek için ölçüm elemanlarından biri olan ve ticari amaçla kullanılan RB'lerin yapıları ve özellikleri ve ayrıca literatürde önerilen birçok RB yapıları incelenmiş ve daha yüksek akım hassasiyetine sahip esnek bir RB tasarımı üzerine çalışılmıştır. Bunun için RB'lerin yapısında yer alan hava nüvesi yerine, %40 ve %60 oranlarında nikel alaşımlı filament kullanımı ile esnek nüveli bir RB geliştirilmiştir.

Aynı zamanda bununla alakalı literatür araştırmaları da yapılmış olup bazı çalışmalar bir sonraki bölümde yer almaktadır.

1.1. LİTERATÜR TARAMASI

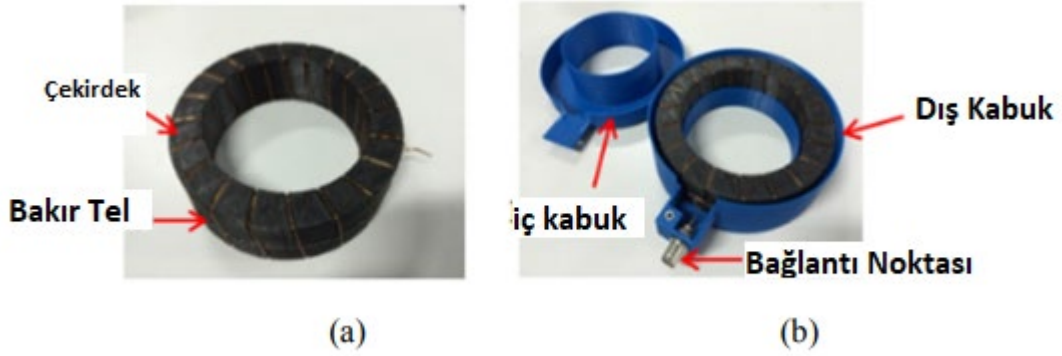
[8]'da yazarlar RB'nin hassasiyetini arttırmak için 3D yazıcı tarafından oluşturulan dikdörtgen kesitli nüvenin içerisine süper paramanyetik nano tozu (Fe_3O_4) koymuşlar ve farklı sarım sayılarında karşılıklı endüktansını hesaplamışlardır. Böylece süper paramanyetik çekirdeğin, çok yüksek akımlara kadar daha yüksek bir hassasiyeti ve doğrusallığını doğrulamışlardır. Ancak üretilen RB'in nüvesi solid olduğundan ticari emsalleri gibi esnek değildir. Şekil 1.3.'de yazarların tasarlamış olduğu RB yer almaktadır.



Şekil 1.3. [8] 'de yazarların tasarlamış olduğu manyetik nano tozu (solda) ile doldurulmuş bobinin alt kısmı; 10 turlu tamamlanan rogowski bobini (sağda).

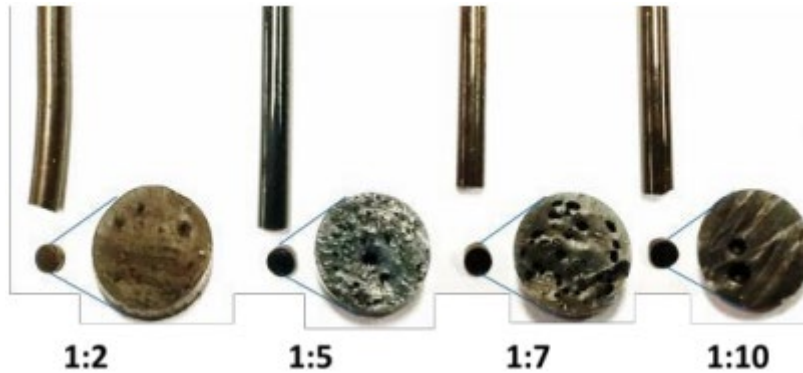
[9]'da yazarlar akım trafosunun doygunluk, boyut, ağırlık ve yüksek maliyeti sebebiyle bu dezavantajların üstesinden gelebilecek yeni bir dikdörtgen kesitli RB tasarlayarak bobinin ekranlı ve ekransız performansını ölçmüşlerdir. RB'nin gövdesi ile birlikte nüvesini tasarlamak için Solidwork 3D CAD yazılımı, tasarım çıktısını almak için Marker Board Replicator 2X 3D yazıcı, bobinin nüvesi ve iç, dış kabuklar için Akrilonitril Bütadien Stiren (ABS) malzemesi kullanmışlardır. Dış kabuğun amacı gürültü girişiminden koruma sağlamak ve toprağa sabit bir kapasitans oluşturmaktır. Deney sonucunda ekransız RB metalik bir nesneye yakın olduğunda çıkış sinyalinin çıkış voltajını etkilediğini ve frekans tepkisinin değiştiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple statik bir çıkış değeri elde etmek için RB'nin ekranlı olması gerektiğini tespit etmişlerdir.

Şekil 1.4.'te yazarların tasarladığı ekranlı ve ekransız RB tasarımları yer almaktadır.



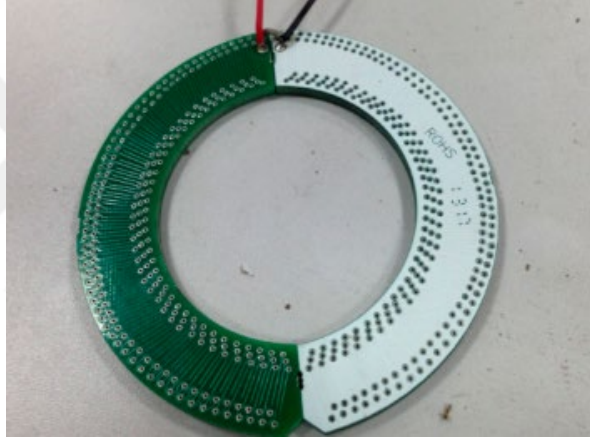
Şekil 1.4. [9]'da yazarların tasarladığı RB'nin, (a) ekransız RB, (b) ekranlı RB

[10]'da yazarlar RB'nin yüksek geçirgenliğe sahip esnek manyetik çekirdek çerçevesini doldurarak algılama hassasiyetini geliştirmek için olası bir yöntem önermektedir. Manganez çinko ferrit, permalloy ve silikon kauçuk içeren esnek bir manyetik çekirdek hazırlanmış ve RB'nin manyetik geçirgenliğini büyük ölçüde geliştirmişlerdir. (100 Hz'de yaklaşık 18 kat daha yüksek), bu da indüklenen voltaj sinyalini etkili bir şekilde büyütür ve RB'nin hassasiyetini artırmışlardır. Şekil 1.5.'te yazarların tasarlamış olduğu farklı oranlarda (kütle oranı) 8 mm olan dört esnek çekirdekler (manyetik toz: silikon kauçuk = 1:2, 1:5, 1:7, 1:10) yer almaktadır.



şekil 1.5. [10]'da yazarların tasarladığı esnek çekirdekler

[11]'de yazarlar, havai iletim hatlarındaki geçici arıza akımlarının tespiti için yeni bir diferansiyel sargı baskılı devre kartı (BDK) Rogowski bobini önermektedir. Bobinin nüvesi iki yarı halkanın birleştirmesi ile elde edilmiş ve her bir yarı halkada eş doğrusal bükümlü çift diferansiyel sargılar kullanılarak simetrik olacak şekilde tasarlanmıştır. Testlerde yakalanan arıza dalga akımının genliğinin 1254 A'dır ve frekans yanıtı, doğrusallık ve parazit önleme performansının yanı sıra ticari sensörlerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, bir BDK Rogowski bobininin iyi bir lineerliğe ve çeşitli harici manyetik alan girişimlerine karşı dirence sahip olduğunu ve böylece arıza akımı toplama cihazlarında yaygın olarak uygulanmasını sağladığını göstermiş ve çalışma frekansı bant genişliği ve doğrusallık açısından ticari olanlarla hemen hemen aynı performansa sahip olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 1.6.'da iki yarı halkadan oluşan fiziksel bir RB göstermektedir.



Şekil 1.6. [11]'de yazarların tasarlamış olduğu RB

[12] 'de yazarlar rijit rogowski bobininde bant genişliğini arttırmayı amaçlayan yeni bir bobin tasarımı önermişlerdir. Yeni bir tasarımının tespit sonuçlarını doğrulamak için laboratuvar yüksek voltaj testleri de yapılmıştır. Testler 20 m XLPE, 35-kV kablo devresi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kablo yalıtımına bir hasar oluşturmak için metal bir çivi çakılmıştır. Bu testte 48 saat geçmiştir. Hasarın neden olduğu kısmi deşarj darbelerini aynı anda rogowski bobini ve geleneksel akım trafosu ile ölçülmüştür. Rogowski bobini tarafından ölçülen büyüklük yaklaşık 200 mV'dir ve geleneksel akım trafosu ile ölçülen büyüklük yaklaşık 250 mV'dir. Böylece test sonuçları, tasarlanan rogowski bobininin kanıtlanmış geleneksel akım trafosu ile neredeyse eşit bir kısmi deşarj miktarına ve dalga şekline sahip olduğunu doğruladı. Bu tasarıma dayanarak, RB'nin bant genişliği etkili bir şekilde artarken, hassasiyet değişmeden kalmaktadır. Geleneksel kapasitans sensörü ve

RB'nin ile karşılaştırıldığında, deneysel sonuçlar, önerilen yeni tasarım tekniğine dayanan RB'nin sadece bant genişliğini artırmakla kalmayıp aynı zamanda kısmi deşarj tespitinin hassasiyetini de artırabildiğini doğrulamıştır. Şekil 1.7.'de tasarlanan rijit RB örneği yer almaktadır.



Şekil 1.7. [12]'de tasarlanan rijit rogowski bobini örneği

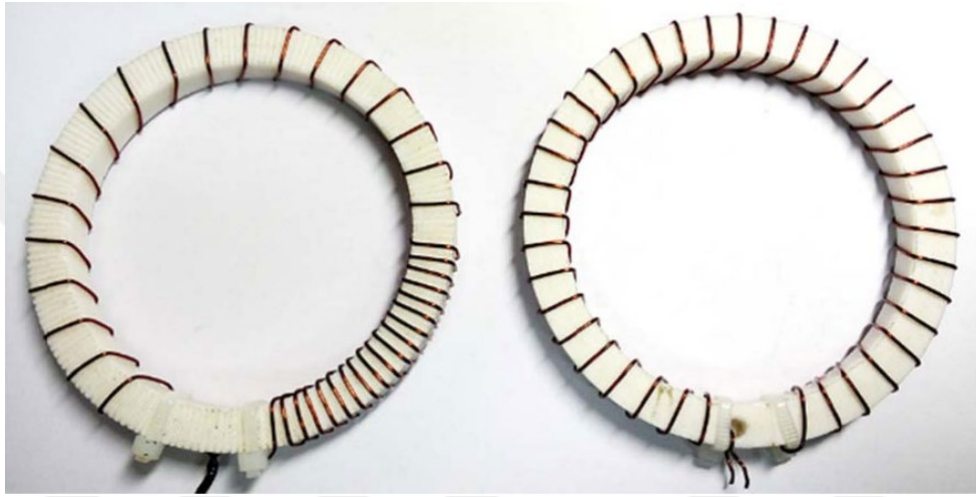
[12]'de belirtilen elektriksel kısmi deşarj (PD), iki iletken elektrot arasındaki dielektrik malzemenin yapısındaki boşluklar ya da devamlılığındaki problemler sebebiyle tam bir köprü oluşturmaması sonucu oluşan elektriksel boşalma ya da kıvılcım olarak tanımlanabilmektedir. Diğer bir deyişle; iki aktif iletken arasındaki izolasyon malzemesindeki kısmi olarak bozulmasıdır [13].

IEEE'nin yaptığı araştırmaya göre; orta gerilim ve yüksek gerilim sistemlerinde meydana gelen yıkıcı arızaların büyük bir oranı (%80'i) elektriksel kısmi deşarj kaynaklı olduğu tespit edilmiştir [13].

[14]'de yazarlar hızlı darbeleri akıma daha iyi bir yanıt sağlamak için yeni bir RB yapısı önermişlerdir. Farklı yapılara sahip dört Rogowski bobini üç farklı platformda test edilmiş ve tasarlanmıştır. Bunlar iki farklı sargı yapısında geleneksel RB, Baskılı Devre Kartı Rogowski bobini ve bir hibrit Baskılı Devre Kartı Rogowski bobinidir. Geleneksel RB'de çekirdeğin malzemesi teflon ve iletkeni vernikli teldir. Çekirdek, nispeten düzgün bir sargı sağlamak için yüzeyinde tekdüze radyal oluklara sahiptir. Tasarlanan ROG-1 ve ROG-2 arasındaki fark, ROG-1'nin yarı sıkı sargıya ve yarı gevşek sargıya sahip olmasıdır ve amaç, düzgün olmayan sargının Rogowski bobinine etkisini araştırmaktır ve iki RB de aynı sayıda tur sayısına sahiptir. Tasarlanan diğer bir Baskı devre kartı RB'de çekirdeğin malzemesi epoksi reçine ve iletken, bakır bant ve baskılı bakır devredir. Hibrit BDK bobini ise, tipik BDK bobinine oldukça benzer fakat aradaki fark, sarım olarak

yalnızca baskılı iletken kullanılan sıradan BDK bobinidir. Çekirdek yalnızca bobinin çekirdeği ve iletkenler arasındaki yalıtım olarak bir kullanılmıştır. Hibrit bobin, bakır tel ve baskılı iletkeni bir sargıya birleştirmiştir. Deneyisel sonuçlar, ~ 2 ns kare dalgalara yanıt verebilen ve 0,585 V/kA hassasiyete sahip hibrit Baskılı Devre Kartı Rogowski bobininin bu çalışmada en iyi performansa sahip olduğunu, daha iyi bir yüksek frekans yanıtına sahip olabileceğini ve nanosaniye yükselme süresi ile darbeli akımların ölçümü için uygun olabileceğini göstermiştir.

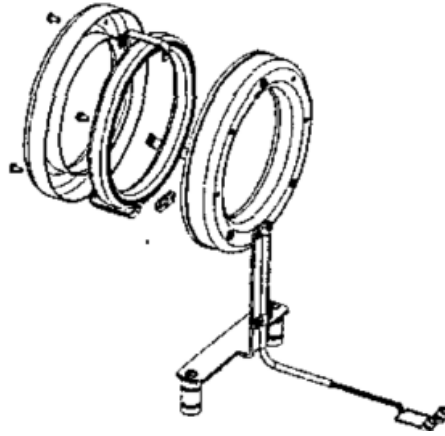
Şekil 1.8.'de yazarların tasarlamış olduğu Hibrit BDK bobini yer almaktadır.



Şekil 1.8. [14]'de yazarların tasarlamış rog-1 (sol) ve rog-2 (sağ)

[15]'de yazarlar dağıtım şebekesi şaltlarında kullanılmak üzere, küçük ve kompakt gerilim sensörü ve akım algılama için RB ve gerilim algılama için dirençli gerilim bölücü geliştirmişlerdir. Algılama özellikleri ve güvenilirlikleri, geleneksel olanlara kıyasla iyileştirilmiştir. Yeni geliştirilen gerilim/akım aparatı, geleneksel ferromanyetik malzemeler kullanmak yerine rogowski bobini akım algılama sistemi ve dirençli gerilim bölücü sistemini benimsemiştir. Akım sensörü, hava çekirdekli sargı kullanan rogowski bobini prensibine dayanmaktadır ve doymamış özelliklere ve kompakt boyuta sahiptir. Ölçüm aralığı 10-2000A, 2000-5000A arasında doğrusaldır ve boyutu ve ağırlığı geleneksel olandan çok daha küçüktür. Tasarımda, RB için dış gürültüyü azaltmak için bir kalkan yapısı türetilmiş ve mekanik bileşenlerin montaj esnekliği ve ekonomik yönleri dikkate alınmıştır.

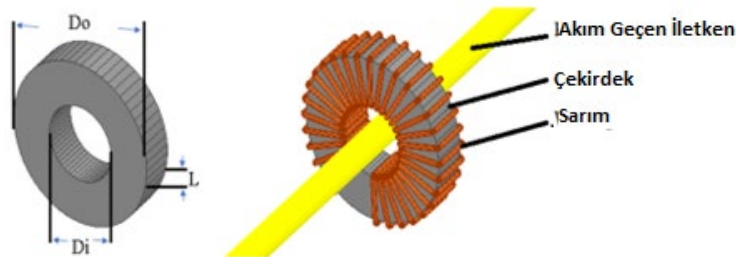
Şekil 1.9.'da RB'yi belirli bir yere sabitlemek ve gürültü azaltma plakası için kalkanlı tasarlanmış RB'nin montaj görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 1.9. [15]'de yazarların tasarlamış olduğu rb akım sensörü

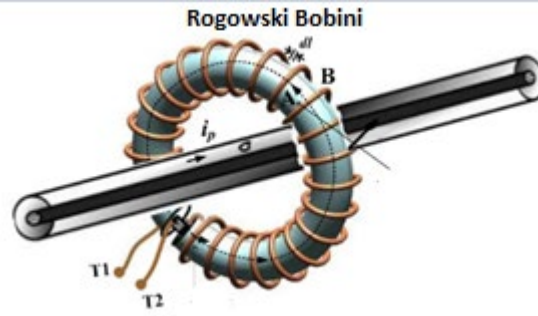
[16]'de yazarlar sensörlerin enerji ihtiyacını karşılanabilmesini amaçlayan toroidal bobinli hasatlayıcının Ansys Maxwell kullanılarak sayısal analizi ve deneysel çalışmaları üzerinde uygulamalar yapmışlardır. Bu deney setinde, hasatlayıcılardan farklı yüklerde toplanan gerilimler ve akımlar multimetrelerle ölçülerek kaydedilmiştir. Elektrik hattının modellendiği deney düzeneğinde amorf yapıya sahip toroidal tip modellerin deneyleri yapılmıştır. Sırasıyla 3 A, 6,2 A ve 9,2 A hat üzerinde geçirilmiş, hasatlayıcı yükü de 11 Ω ile 330 Ω arasında değiştirilmiş ve farklı hat akımlarında ve farklı yüklerde toplanan akım ve gerilim ölçülerek kaydedilmiştir. Bu çalışmadaki toroidal modeller karşılaştırıldığında, aynı çekirdek malzemesine ve aynı hat akımına sahip hasat makinelerinden iç çapı daha düşük olan modelde daha fazla güç yoğunluğu elde edilmiştir. Sonuçlar literatürdeki bazı çalışmalarla karşılaştırılmış, hat akımı ve doygunluk etkileri dikkate alındığında, incelenen toroid modellerin sensör uygulamaları için uygun olduğu görülmüştür.

Şekil 1.10.'da toroidal modelin çizimleri yer almaktadır.



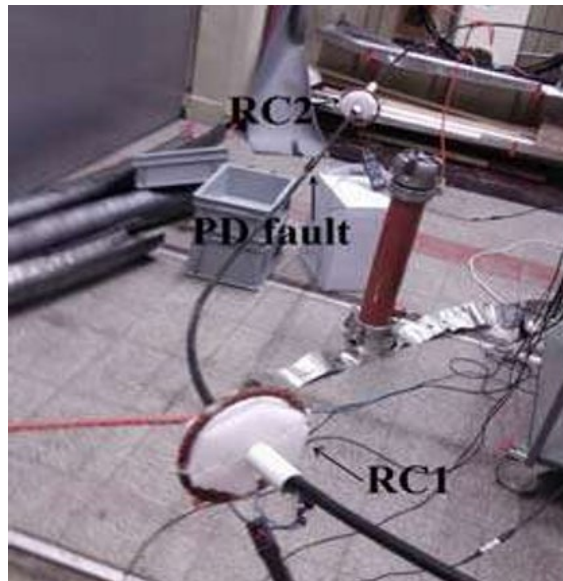
Şekil 1.10. [16]'da yazarların toroidal model çizimleri

[17] 'de yazarlar RB'yi, RB'ye yaklaşan PD akım darbelerinin varış yönüne dayalı olarak PD kusurlarının lokalizasyonu için bir teknik önermek üzere bir PD sensörü olarak kullanılmışlardır. Önerilen tekniğin düz ve kollara ayrılmış tip güç kablosu şebekesi için uygulanması için deneysel bir model sunulmuştur. Önerilen teknik, akıllı bir elektrik dağıtım şebekesi için entegre bir PD izleme sisteminde PD arızalarının yerleştirilmesinin doğruluğunu artırmak için kullanılabilmektedir. RB, bir hava çekirdeği üzerinde eşit şekilde sarılmış n sayıda dönüşten oluşmaktadır ve Şekil 1.11.'de gösterildiği gibi RB, toroidal tarzda kapalı bir döngü ile oluşturulmaktadır.



Şekil 1.11. [17]'de yazarların tasarlamış olduğu RB

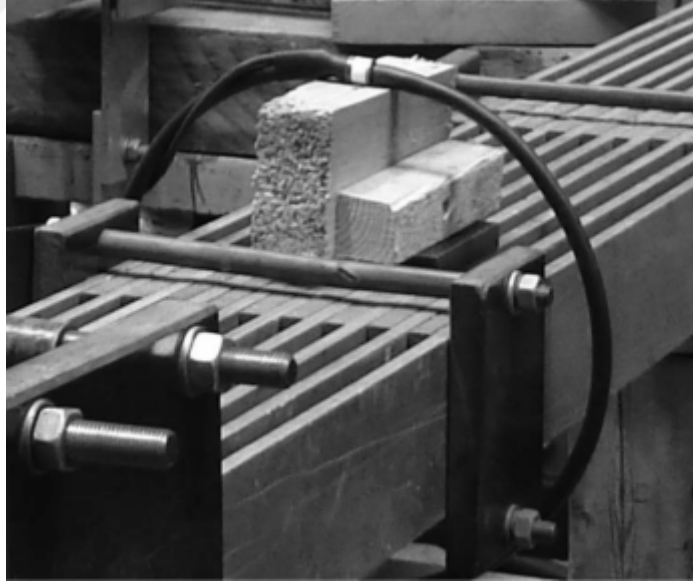
Tasarlanan bobinin, dış çapı 16,08 cm, iç çapı 14,12 cm, sarılan telinin çapı 0,85 mm, çekirdek çapı 1.96 cm'dir ve 30 sarımdan oluşmaktadır. Laboratuvarda yapılan deneysel ölçümlerde 20 m'lik bir havai hat, zemin seviyesinden 1,5 m asılmıştır. PD kaynağı olarak PD kalibratörü kullanılmıştır. Şekil 1.12.'de deney düzeneği yer almaktadır.



Şekil 1.12. [17]'deki deney düzeneği

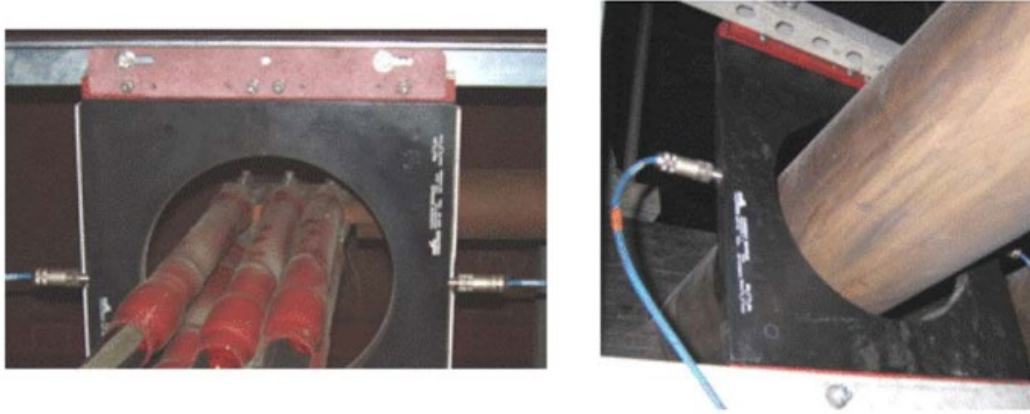
Yapılan deneyler sonucunda düşük maliyetli ve verimli bir yüksek frekanslı akım sensörü olan RB, PD faaliyetlerinin akıllı bir şekilde izlenmesi için çevrimiçi PD izleme işlevini entegre etmek için kullanılabilmekte ve belirli bir bölgeden tüm bobinlerin çıkış verileri, hatalı bölüm hakkında anında bilgi almak için merkezi bir veri toplama merkezinde, yani dağıtım yönetim sisteminde izlenebileceği ön görülmüştür. Fırtınalı havalarda eğilen ağaçlar nedeniyle PD tehdidi altındaki havai hatları, eskimiş kablo ağları, şalt cihazları ve trafo merkezleri önerilen tekniklerin en uygun uygulamaları olabilecektir.

[18]'de yazarlar, şebeke frekansında 30 kA'e kadar akım aralığında akım ölçümü için bir entegratör ile Rogowski bobinlerinin kalibrasyonu üzerinde çalışmışlardır. Kalibrasyon için 3 kA akım ile on turluk bir akım döngüsü kullanılmış ve bu döngü vasıtasıyla daha yüksek akımlar üretilmiştir; 6,5 kA'ya kadar kalibrasyon da RB'nin merkezine yerleştirilmiş bir iletken kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bir iletken döngüsü ve bir iletken kullanılarak yapılan kalibrasyon sonuçlarının ve bunların belirsizliklerinin karşılaştırılması, yüksek akımlar için RB'nin bir akım döngüsünün kalibrasyon için kullanılabileceğini göstermektedir. Şekil 1.13.'de kalibre edilmiş RB ile akım döngüsü yer almaktadır.



Şekil 1.13. [18]'de tasarlanan RB ile akım döngüsü

[19]'de yazarlar Amerika Birleşik Devletleri'nde ve büyük olasılıkla dünyada EAF transformatörlerine uygulanan ilk diferansiyel koruma sistemleri olan yeni röle koruma sistemlerini gözden geçirmişlerdir. Koruma sistemleri yüksek hassasiyetli BDK rogowski bobin akım sensörleri ve çok işlevli rölelerden oluşmaktadır. Koruma çözümünün arızalarının hızlı bir şekilde giderilmesinden bu yana meydana gelen tüm arıza olaylarında, yüksek arıza akımı büyüklüklerine (250kA) rağmen ekipmanda minimum hasar meydana geldiğini ve zamandan tasarruf edildiğini tespit edilmişlerdir. Şekil 1.14. de bölünmüş çekirdekli BDK RB yer almaktadır.



Şekil 1.14. [19]'de gözden geçirilen bölünmüş çekirdekli BDK rogowski bobini

Bu çalışmamızda [8] ve [9]'dan farklı [10]'a benzer olarak tasarladığımız RB'nin nüvesi, esnek ve dairesel kesitlidir. Esnek olmasıyla kolay montajı, dairesel kesitli olmasıyla da sarım yalıtımının zarar görmemesini sağlar. [8]'den farklı olarak RB'nin geliştirilen nüvesinde, maliyet ve kolay temin dikkate alınarak nikel kullanılmıştır. [9]'a benzer şekilde de ekranlama yapılması tercih edilmiştir. Geliştirilen RB'in performansını ve manyetik özelliklerini inceleyebilmek için, deneysel ölçümlerde sekonder gerilim değerleri ve uygulanan primer akımları ölçülmüştür.

2. AKIM ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ VE MATERYALLER

Önceki konularda bahsedildiği gibi Uluslararası Birim Sistemi (SI) terimi Amper'dir. Akım “A” veya “I” olarak sembolize edilir. Akım, alternatif akım (AC) ve doğru akım (DC) olarak ikiye ayrılmaktadır. Ölçüm yapılırken akımlar bazen mikroamper aralığında küçük akımlar olabilir bazen ise kiloamper olarak çok yüksek akımlar olabilir. Bu sebeple ölçüm yöntemlerimizde farklılık meydana gelmektedir.

DC sistemlerde, akım tek yönde, yani “tek yönlü” olarak akar. AC sistemlerde akımın, belirli bir frekansta yönü ve şiddeti değişir. Bu alternatif akım tipik olarak sinüzoidaldir. Akım taşıyan bir iletken her zaman bir manyetik alan üretir ve akım ve manyetik alan arasında doğru orantı vardır yani akım ne kadar fazlaysa oluşacak olan manyetik alan şiddeti de o kadar fazla olacaktır. Çeşitli tekniklerle oluşan bu manyetik alanı, indüksiyonu, manyetik akıyı ve elektrik devresindeki akımı ölçebiliriz [20].

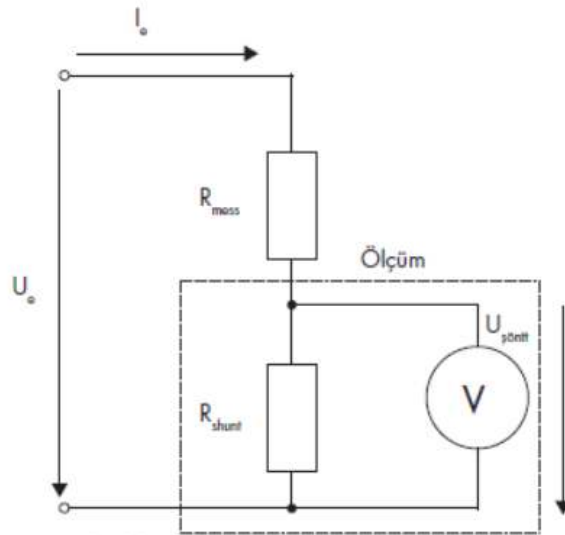
Akım ölçüm tekniklerini temel olarak 4 ana başlıkta birleştirebiliriz. Bunlar; şönt direnci ile ölçüm, akım trafosu prensibi ile ölçüm, hall etkili sensörler ile ölçüm ve rogowski bobini ile ölçümdür. Bu metotlar sayesinde ölçülmek istenen akım değerleri, uygulamaya bağlı olarak farklı şekillerde, hassasiyetlerde, doğrulukta elde edilebilmektedir [21].

2.1. ŞÖNT DİRENÇ İLE AKIM ÖLÇÜMÜ

Akım ölçümünde çoğu ölçüm cihazı, yerleşik bir direnç üzerinden akımı ölçmektedir. Ancak akım seviyesi ölçüm cihazı için çok yüksek olduğunda farklı bir devre kurulumu gereklidir. Bu devre kurulumunda, devreye düşük ohm değerine sahip bir direnç bağlandığında devredeki akım şönt direnci (R) üzerinden akmayı tercih eder. Böylece devrede görece az bir gerilim düşüşü meydana gelir. Bu meydana gelen gerilim düşüşünü Ohm yasasından faydalananak ölçebiliriz. Akım şönt direnci ile ölçüm yapılan cihaz arasında akar ve böylece büyük akımlar ölçülebilir fakat ölçüm cihazının voltaj değeri aşılmamalıdır. Ohm yasası, denklem 1.1 'deki gibidir ve voltaj (V), akım (I) ve direnç (R) arasındaki ilişkiyi tanımlar.

$$V = I * R \quad (1.1)$$

Şönt direnci, devrenin gerilim ve akım aralığı dikkate alınarak seçilmelidir. Çok yüksek şönt direnç seçilirse, devre akımı etkilenecek ve direnç ısındıkça enerji kaybına sebebiyet vererek ölçüm hassasiyetini bozacaktır. Direnç seçiminin doğruluğu önemli bir faktör olup doğrudan ölçümün doğruluğunu etkilemektedir [20]. Yüksek akımlar için tipik bir şönt direnç değil daha özel şönt dirençlerin kullanılması gerekmektedir. Özel dirençlerin kullanımı ise hem boyutu hem de maliyeti arttıracaktır. Şönt ölçüm yöntemi AC ve DC ölçümler için kullanılabilir. Şekil 2.1.'de şönt direnç ile akım ölçümünün eş değer devresi yer almaktadır.



Şekil 2.1. Şönt ölçümünün eş değer devresi [20]

Devreye bağlanabilecek ve ticari bir ürün olan WEIGEL marka B100A/60MV kodlu şönt direncin görseli Şekil 2.2.'deki gibidir ve özellikleri EK-A'da verilmiştir.

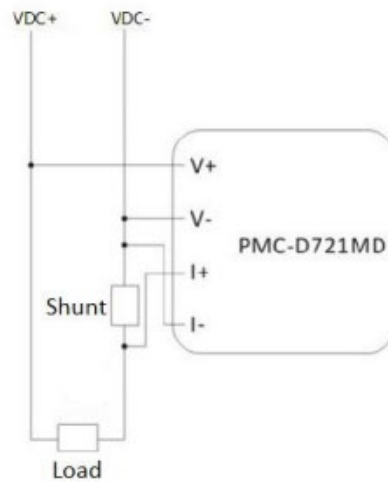
Genellikle ölçmekte oldukları akımı etkilememek için küçük bir dirence değerine sahiptirler. Tipik olarak normal bir dirençten farklıdır, iki büyük terminal arasında bir



Şekil 2.2. WEIGEL marka B100A/60MV şönt direnç

veya daha fazla metal şerit bağlanarak elde edilirler. Bir metalin direncin değeri kesit alanıyla ters orantılıdır. Bu nedenle şönt dirençte daha fazla şerit olursa, direnci değeri düşecektir.

Şekil 2.3.'te şönt direnç ile akım ölçümüne yönelik tasarlanmış olan DC analizörün bağlantı şeması yer almaktadır [22].

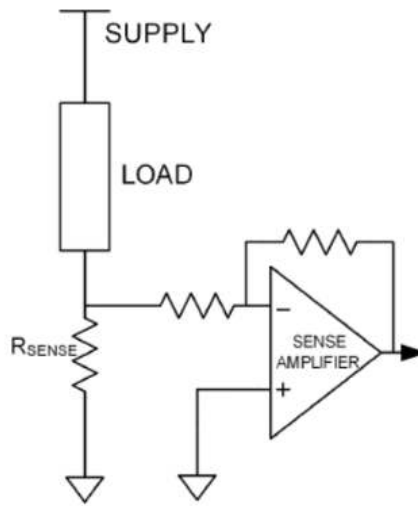


Şekil 2.3. DC analizörün bağlantı şeması

Devrede seçilen küçük değerli şönt direnç ve buna bağlı meydana gelen küçük akımlar, çok küçük gerilimler meydana getirir. Şönt ölçüm yönteminde bu küçük gerilimlerin ölçülmesi zordur. Bu sebeple ölçme işlemi yapılabilmesi için küçük gerilimlerin yükseltilmesi gereklidir. Bu yükseltme işlemini opamplar ile sağlayabiliriz. Fakat bu opamplar, yükseltici olarak kullanılan genel opamlardan farklı olarak düşük giriş ofset (low input offset) değerine sahip olmalıdır. Şönt direnç ile ölçüm High-Side ve Low-Side olarak kendi içerisinde ikiye ayrılmaktadır.

2.1.1. Alçalan Kenar (Low-Side) Ölçüm Yöntemi

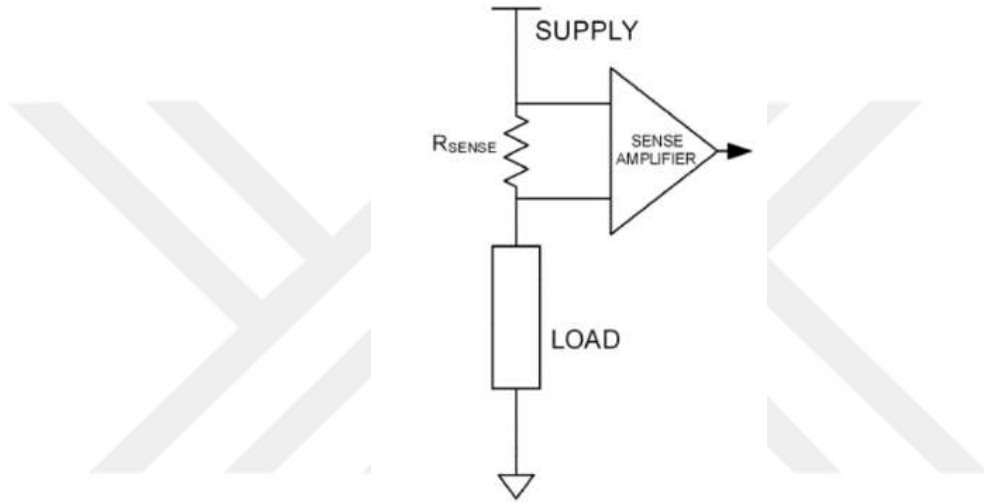
Alçalan kenar (Low-Side) akım ölçümü yönteminde şönt direncin bir ucu toprağa (ground) bağlanır. Yüke bağlanan şönt direncinin üzerindeki gerilim değeri ile şönt direncin bölümü bize yük üzerinden akan akım değerini verir ve şönt direncin diğer ucu da buraya bağlanır. Sistemsel olarak karışık bir yapı olmadığı için birçok uygulamada tercih edilmektedir. Fakat bu yöntemde, şönt direncin bir ucu mutlaka toprakta (ground) olması gerektirir. Bu sebeple devrede belirli noktalarda akım okunması gerektiğinde bu yöntem kullanışlılığını yitirmiş olur. Şekil 2.4'te bu yöntemle yapılmış bir uygulama yer almaktadır. Uygulamada yük, şönt direnç yer almaktadır. Kuvvetlendirici Opamp şönt direnç üzerindeki gerilimi belirli bir seviyede kuvvetlendirir ve devrenin sonunda yer alan katlayıcı ile devreden akan akım değeri bulunur. Bu akım değeri ölçülmek istendiğinde düşük ofset (low offset) değerine sahip opamp tercih edilmelidir. Aksi taktirde okunan değer, ölçülmesi gereken değerden çok farklı olacaktır [23]. Şekil 2.4.'te bu yöntemle yapılmış bir uygulama yer almaktadır.



Şekil 2.4. Alçalan kenar (low side) ölçüm eş değer devresi [23]

2.1.2. Yükselen Kenar (High-Side) Ölçüm Yöntemi

Yükselen kenar (High-Side) ölçüm yönteminde kuvvetlendirici kısmında diferansiyel amplifikatör (differential amplifier) tercih edilir. Böylelikle devrenin herhangi bir noktasından akan herhangi bir akımın rahatlıkla okunması sağlanır. Buradaki tek sorun amplifikatör, alçalan kenar (low-side) ölçüm yöntemine göre biraz daha karmaşık yapıdadır ve arasındaki fark hemen görülebilir; bu yapıda şönt direnç toprağa (ground) bağlı değildir. Yalnız bu yapı bize ayrı ayrı noktaların akım ölçüm yapılabilmesine olanak sağlamaktadır [23]. Şekil 2.5.'te bu yöntemle yapılmış bir uygulama yer almaktadır.



Şekil 2.5. Yükselen kenar (high-side) ölçüm eş değer devresi [23]

Bir şönt direnci kullanarak akım ölçümünün önemli dezavantajı, uzun süreli yüksek akım işlemlerinde güç kaybıdır. Ayrıca direncin boyutu ve ağırlığı ölçülen akımla orantılıdır, ölçülecek akım ne kadar büyükse direnç o kadar büyük olmalıdır.

2.2. HALL ETKİLİ SENSÖR İLE ÖLÇÜM YÖNETİMİ

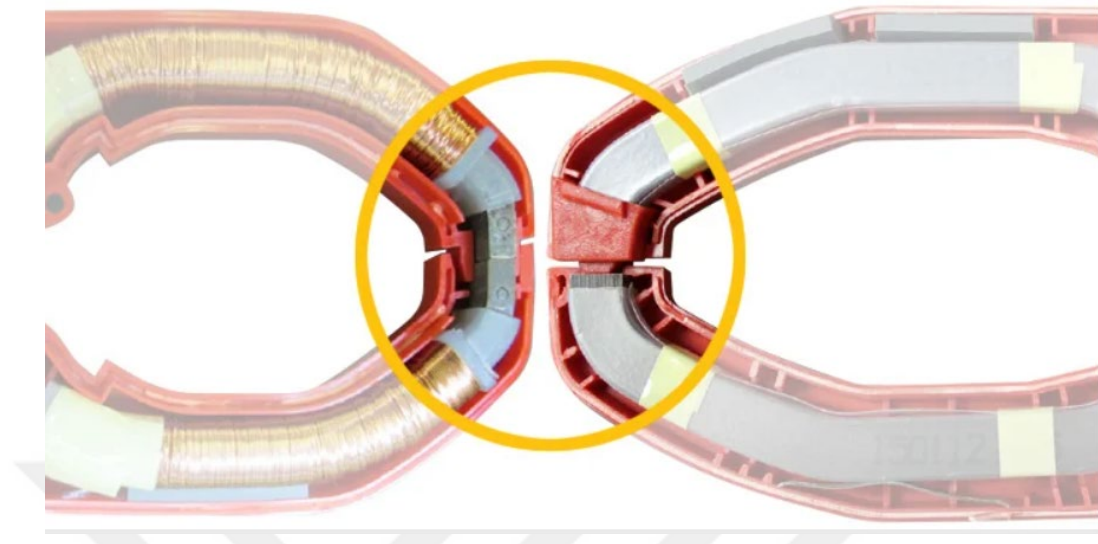
Hall etkili sensörler (Hall Effect) prensip olarak devrede oluşan manyetik alanları ölçer. 1879 yılında bilim adamları akım bir iletkenin geçtiğinde elektronların düz bir çizgide hareket ettiğini gözlemlemiştir. Bununla birlikte, Hollandalı fizikçi Hendrik Lorentz bir iletken bir manyetik alana maruz kaldığında, bir kuvvet ona etki ettiğini, bu kuvvetin elektronların yolunu değiştirdiğini tespit etmiş ve bu kuvvete Lorentz kuvveti adını vermiştir. Ayrıca, elektronlar iletkenin bir tarafına diğerinden daha fazla itildiğinde, iletkenin iki tarafı arasında potansiyel bir fark meydana gelir. Hall, bu potansiyel farkın manyetik alanın gücüyle doğrudan ve doğrusal olarak orantılı olduğunu gözlemlemiştir. İletkenin kenarları (veya “düzlemleri”) arasında ölçülen bu potansiyel gerilim farkına hall gerilimi denir [20]. Hall Effect (etkisi) sensörleri, motor kontrol devrelerinde motor konumlarını ölçmede, takometrelerde, LVDT sensörlerinde ve hatta otomobillerin yakıt seviye sensörlerinde vb. uygulamalarda karşımıza çıkmaktadır. En yaygın uygulama alanlarından biri de akım algılamasıdır.

Akım algılamada kullanılan hall etkili akım transformatörü, üzerinde hava aralığı oluşturulan bir nüveye (ferit veya çelik tercih edilebilir) hall sensörün yerleştirilmesi ile elde edilir. Primer sargısı 1 sipir (akım taşıyan iletkenin doğrudan nüvenin içerisinden geçmesi durumu) olabileceği gibi çoklu sarım yapılarak da kullanılabilir. Toroid içerisinde primer akımının oluşturduğu manyetik akı, hall etkisi sebebi ile sensör uçlarında bu akı yoğunluğuyla orantılı bir gerilim oluşturulur. Bu gerilimin yükseltilip ölçülmesi ile primer akımının ölçümü sağlanır.

Hall sensörün yerleştirileceği nüvenin seçilmesinde malzemenin geçirgenliği ve nüvenin uzunluğu iki önemli ölçüttür. Nüveye oluşturulacak hava aralığının büyüklüğü de hem etkin geçirgenliğin belirlenmesinde hem de hava aralığından geçen akımın homojenliğinin bozulmamasında önemli bir etkidir. Hava aralığında oluşacak maksimum manyetik akı yoğunluğunun, sensörün algılayabileceği maksimum akı yoğunluğundan daha büyük olmamasına dikkat edilmelidir [24].

Hall etkisi ile ölçüm yapabilen pensamperetreler de günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu pensamperetreler, KHz (1.000 Hz) aralığına kadar hem AC hem de DC akımı ölçebilir [20] ve bu ölçümü 0.5% ile 1% arasında bir hassasiyet ile

gerçekleştirir [21]. Hall etkili PSA'ların güç tüketimleri, boyutları ve ağırlıkları küçüktür ve kayıpları azdır. Şekil 2.6.'da Hall etkili pensampermetre örneği yer almaktadır.

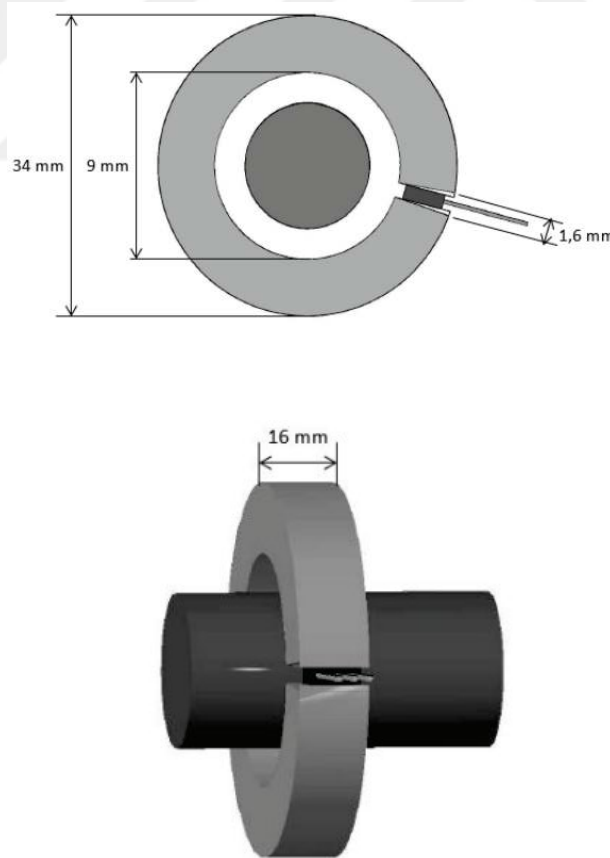


Şekil 2.6. Solda: sıkıca kapanmış yalnızca AC akım ölçen transformatörün pensampermetre nüvesi. Sağda: hall etkili PSA'nın nüve çeneleri arasındaki hava boşluğunda bir sensör

Hall Etkili PSA'larda bir sonraki konuda anlatılacak olan akım transformatör türleri gibi ölçümü yapılmakta olan iletkenin etrafında meydana gelen manyetik alanı yoğunlaştırmak için sert demir nüveler kullanılır. Bu demir nüveler, manyetik alanın daha kolay bir şekilde geçmesine olanak tanır. Hall etkili PSA'larda akım transformatörünün aksine, nüve bakır tel ile sarılmaz [25]. Hall Etkili PSA'nın nüve çene uçlarının birleştiği noktada bir boşluk vardır. Bu boşluk, manyetik alanın sıçraması gereken bir hava boşluğu oluşturur ve çekirdeğin doyuma gitmemesi için manyetik akıyı sınırlamakla görevlidir [25].

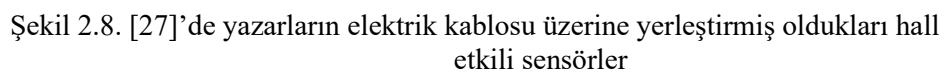
Bu boşluk ince plastik bir kaplama ile kaplanır ve içerisinde yarı iletken olan hall etkisi sensörü vardır. Hall etkili PSA, ölçülen iletkenin veya telin manyetik alanı ölçüm yaparken çıkış gerilimini değiştiren bir transdüser (enerji dönüştürücü) olarak da görev yapar. Amacı, manyetik akıyı doğrudan ölçmektir. Ardından sensörden gelen çıkış gerilimi, pensin nüvesinin içinde bulunan iletkenin geçen akımı gösterecek şekilde yükseltilir ve ölçeklendirilir [25].

[26] 'de yazarlar hall etkisi yöntemi ve ayrıca ölçüm sistemi kullanılarak yeni geliştirilmiş bir yüksek DC akım sensörü üzerinde çalışmışlardır. Alan yoğunlaştırıcıdan gelen manyetik alanı algılamak için bir manyeto dirençli sensör kullanılmış ve manyeto dirençli sensörden alınan voltaj daha sonra analogdan dijitale dönüştürücü (ADC-10 bit) kullanılarak dijitale dönüştürmüşlerdir. Daha sonra mikrodenetleyicide işlenen dijital veriler, LCD ekranda elektrik akımının değeri olarak görüntülenmiştir. Ek olarak ölçüm, bilgisayar ekranında gerçek zamanlı grafik formda görüntülenen RS232'nin iletişim protokolleri kullanılarak bilgisayara arabirim olarak aktarılmıştır. ± 128 Amperde ölçülebilen maksimum akım ile DC yüksek akım ölçüm sistemi başarıyla oluşturulmuş ve ölçüm sonuçları, sistemin %5,26 bağıl hatası olduğunu göstermiştir. Sonuçta sensörlerin ve ölçüm sisteminin tasarıma göre kabul edilebilir doğrulukta çalıştığı sonucuna varılmışlardır. Şekil 2.7.'de yazarların hall sensörü kullanarak akım ölçümü tasarımının ölçüleri yer almaktadır.

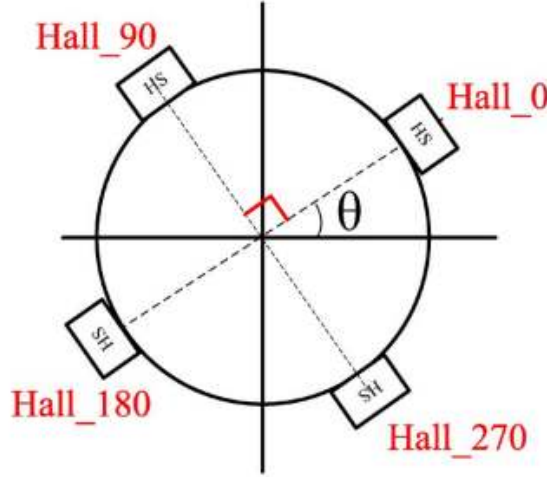


Şekil 2.7. [26]'da yazarların hall sensörü kullanarak akım ölçümü tasarımı

Şekil 2.8.'de iki elektrik iletken kablo yer almaktadır. Hall sensörleri kablolardan birinin yüzeyine yerleştirilir ve hepsi eşit aralıklarla dağıtılır. Böylece, Hall sensörleri $2\pi/N$ 'lik bir açı üzerinden dağıtılmış olur.



Elektrik kablosuna yerleştirilen Hall sensörlerinin düzeni Şekil 2.9. da gösterilmiştir; θ , HCT'nin konum açısını temsil etmektedir. Ayrıca, θ ne kadar büyük olursa olsun, HCT ortam parazitini ortadan kaldırabilmektedir.



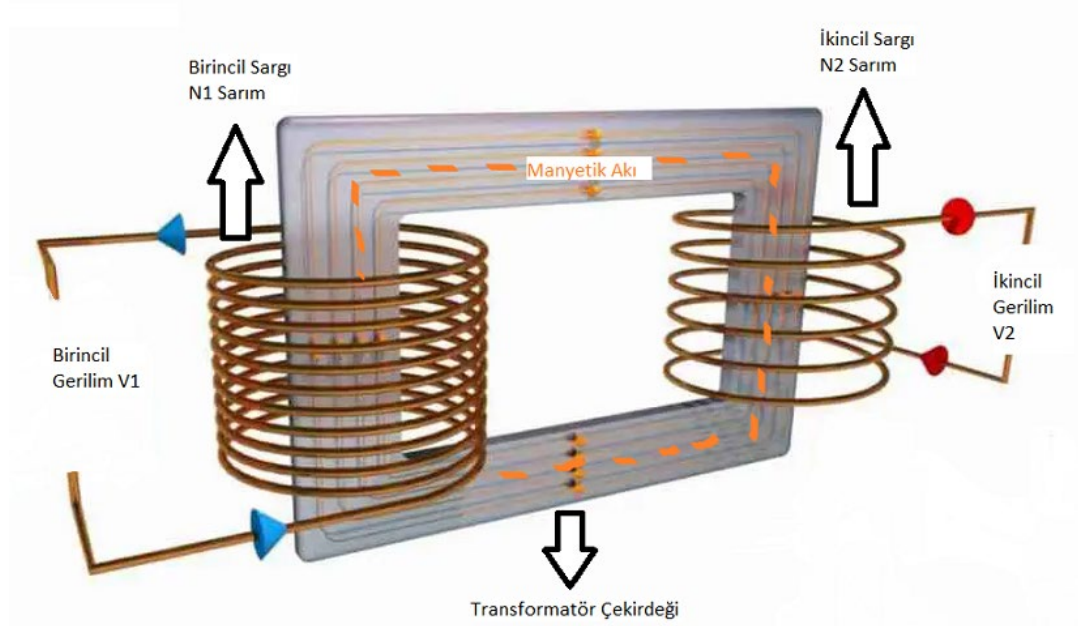
Şekil 2.9. Dört hall sensörünün düzeni

Yazarların yaptığı ölçüm sonuçları, bir HCT'nin akımı, geleneksel CT'lerden daha yüksek doğrulukla ölçebildiğini ve geleneksel CT'lerde tipik olarak karşılaşılan doygunlukla ilgili sorunları yaşamadığını göstermiştir. Ayrıca, hataların varlığında, HCT'ler geleneksel CT'lerde var olan doygunlukla ilgili problemlerle karşılaşmamakta böylece, HCT'ler yalnızca ekipman maliyetini azaltmakla kalmamakta, aynı zamanda bir trafo merkezi veya şalt sahasında gereken alanı da en aza indirebilmekte olduğunu tespit etmişlerdir.

2.3. AKIM TRANSFORMATÖRLERİ İLE ÖLÇÜM YÖNTEMİ

Bir manyetik devre üzerinde sarılı iki farklı sargıdan oluşan düzene transformatör denir.

Akım transformatörleri, literatürde akım değerlerini frekansta değişiklik yapmadan ihtiyaca göre değiştiren/dönüştüren elektrik makinaları olarak tanımlanır. Manyetik bir nüve üzerine elektriksel olarak birbirinden bağımsız primer olarak adlandırılan birincil sargı ve ikincil sargıların sarılması ile elde edilirler. Çalışma prensibi olarak birincil sargısından geçen akımı manyetik bir nüve yardımı ile ikincil sargısı üzerine aktarır ve ikincil sargısı üzerinden geçen akım değerleri ölçü aletlerinin ölçme işlemlerini yapabileceği uygun akım seviyesine dönüştürürler. Şekil 2.10.'da birincil ve ikincil sargıların yer aldığı trafo şeması görülmektedir.



Şekil 2.10. Trafo şeması

Akım ölçü transformatörünün devreye bağlanış şekli olarak birincil sargı uçları akımı ölçülecek devreye seri, ikincil sargı uçları ise ölçü aletinin devresine seri olarak bağlanır. Birincil devreden ne kadar büyüklükte bir akım geçerse geçsin, ikincil devreden bu akımla orantılı olacak küçük bir akım geçer. Birincil sargısından, ölçülecek yüksek akım, ikincil sargısından ise ölçü aletinin ölçebileceği akım geçmektedir [28].

Akım ölçü transformatörlerinde birincil ve ikincil sargısı arasında meydana gelebilecek bir kısa devre arızasında birincil devre gerilimi ikincil sargıya bağlı olan ölçü ve koruma

devrelerine ulaşır ve devre üzerine bağlı olan ölçü ve diğer ekipmanları yüksek gerilime maruz bırakarak izolasyonunu bozma ve çalışmaz hale getirme riski vardır. Bu sebeple bu zarar verici etkiyi minimize etmek amacıyla ikincil sargıları oluşturan uçlardan biri topraklanır ki söz konusu arıza meydana geldiğinde birincil devre gerilimi topraklanan ikincil uç yardımıyla transformatörün nötr noktasına ulaşarak kapalı çevrim devre oluşturulsun.

Ölçüm yapılması amacıyla ölçme devresine bağlanan transformatör ile ölçme devresi enerji devresinden yalıtılır hem de ölçülmek istenen akımı belli bir oranda küçültülerek ölçüm işlemi yapılır [29]. Ölçü ve koruma cihazları bazı noktalarda güvenlik ve teknik sebepler ile devreye doğrudan bağlanamayabilir. Bu noktalarda ölçü transformatörleri tercih edilen cihazlar arasındadır.

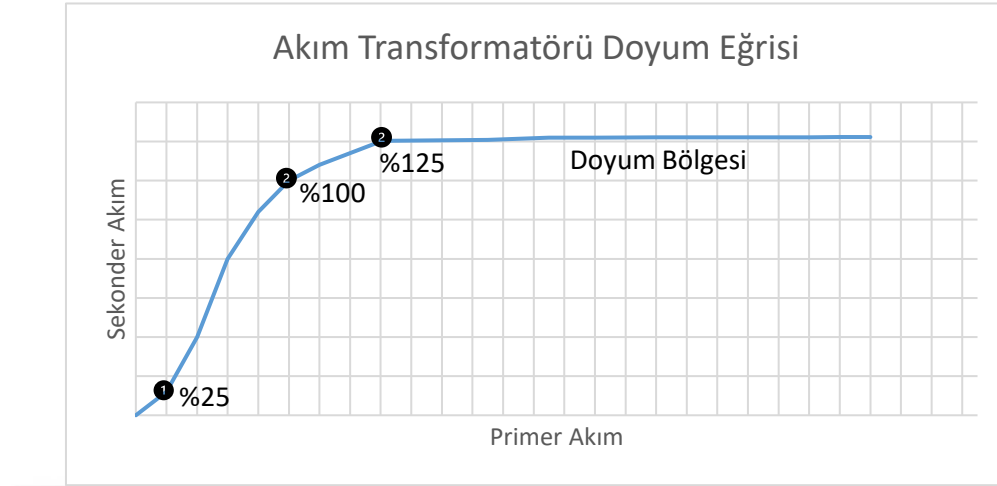
Akım transformatörleri, yüksek gerilimde akımın emniyetli bir şekilde ölçülmesini alçak gerilimde ise ölçüm yapılan akımı ölçü aletlerinin algılayabileceği sınırlara indirmek amacıyla kullanılırlar [29].

2.3.1. Akım Transformatörlerinin Mıknatıslanma Karakteristiği

Akım transformatörleri trafolar, enerji hatları devrelerine bağlı olabilir. Bu noktalarda meydana gelen arızalar da akım transformatörünün birincil devresinden bir önceki konuda anlatıldığı gibi çok yüksek akımlar geçebilir. Ancak kullanım amacına da göre çoğunlukla ikincil sargıdan bu yüksek akımların geçmesi istenmez. Çünkü ikincil sargı genellikle ölçü aletlerine bağlıdır ve ölçü aletleri nominal yüklerde çalıştığından nominal akımın %120 fazlasının geçilmesi istenmez. %120 fazlasının geçtiği durumlarda ölçü aletlerinin arızalanma ve kullanılamaz hale gelme riski vardır.

Koruma röleleri arızalar esnasında çalıştığından seçicilik açısından çok fazla akımın röleden de geçmesi istenmez bu sebeple ikincil devreden geçen akım sınırlandırılır. İkincil devrede yapılan bu sınırlandırılma işlemi akım transformatörünün manyetik nüvesi doyurularak gerçekleştirilir. Bu durum transformatör nüvesinin doyuma gitmesi olarak da adlandırılabilir. Nüve doyuma gittiğinde üzerinden geçen akımın belli bir değerinden sonra indüklenen gerilimdeki değişim azalır ve bir süre sonra sabitlenir. Doyma sınırını aşan bir akım birincil sargıdan geçirilmeye devam ederde ikincil sargıda ölçülen akım tam doğru değeri göstermeyecektir. Doyma ulaştığı için olması gereken değerde akımı akıtacak gerilim indüklenemez.

Şekil 2.11.'de birincil sargı akımına karşılık ikincil sargı akımında meydana gelen değişimi gösteren doyma eğrisi grafiği görülmektedir.



Şekil 2.11. Akım ölçü transformatörünün doyma eğrisi

2.3.2. Kullanıldığı Gerilim Seviyesine Göre Akım Ölçü Transformatörleri

- **Alçak Gerilim Akım Ölçü Transformatörü:** Bu transformatörler genellikle alçak gerilim şebekelerinde kullanılması tercih edilmektedir ve bu transformatörün tipi kuru tip akım ölçü transformatörleridir. Birincil devresi bulunmayan ölçü transformatörlerinde ölçümü yapılacak hat doğrudan akım ölçü transformatörünün merkezinden geçirilerek birincil devrenin oluşturulması sağlanır [28]. Şekil 2.12'de alçak gerilim seviyesinde kullanılan farklı boyutlardaki akım gerilim ölçü trafoları yer almaktadır.



Şekil 2.12. Muhtelif boyutlarda alçak gerilim ölçü transformatörleri [28]

- **Yüksek Gerilim Akım Ölçü Transformatörü:** Bu transformatörler yüksek gerilim şebekelerinde akım ölçümü yapılması amacıyla tasarlanmıştır. Montaj yapılacakları şebekenin frekansı, gerilimi ve akımına uygun olacak şekilde üretilirler. Yüksek gerilim şebekelerinde akım ölçü transformatörleri ölçüm yapılacak devreye baralar vasıtası ile seri bağlanır [28]. Şekil 2.13. ve 2.14.'te sırasıyla yüksek gerilim akım ölçü transformatörü [30] ve hücre içerisinde montajı yapılan akım ölçü trafosu [31] görülmektedir.



Şekil 2.13. Yüksek gerilim akım ölçü transformatörü [30]



Şekil 2.14. Hücre içerisinde montajı yapılan akım ölçü trafosu [31]

2.3.3. Soğutma Şekline Göre Akım Ölçü Transformatörleri

- **Yağlı Tip Akım Ölçü Transformatörü:** Bu tip akım ölçü transformatörlerinde sargılar ve şase arasındaki yalıtkanlığı izolasyon yağı sağlamaktadır. Bir sonraki konuda anlatılacak olan kuru tip akım ölçü transformatörlerine göre, terleme ve yağ sızıntısı gibi dezavantajları vardır. Yüksek gerilimde akım ölçü transformatörleri genelde yağlı tip akım ölçü transformatörlerdir. Bu akım trafoları 66, 154 ve 380 kV yüksek gerilim seviyesine göre üretilirler. Bu trafoların tasarımına göre bazılarının nüveleri üst kısımda bazılarının ise alt kısımda izolatörün içinde bulunur [28]. Şekil 2.15. ve 2.16.'da farklı gerilim seviyelerine göre tercih edilen yağlı tip akım ölçü transformatörü örnekleri yer almaktadır [32].



Şekil 2.15. 154 kV seviyesinde kullanılan akım trafoları [32]



Şekil 2.16. 380 kV gerilim seviyesinde kullanılan akım trafoları [32]

- **Kuru Tip Akım Ölçü Transformatörü:** Akım ölçü transformatörlerinin iletken kısımlarını birbirlerinden ve şaseden ayıran katı yalıtkan malzemelerden oluşmaktadırlar. Bu tip akım ölçü transformatörlerinde yalıtım maddesi olarak genellikle zift, kâğıt, epoksi reçine vb. malzemeler kullanılmaktadır. Alçak gerilim seviyesinde genellikle tercih edilen akım ölçü transformatörleridir. Ekonomik olarak ucuzdurlar fakat transformatörde herhangi bir arıza oluşması durumunda tamiri mümkün olmamaktadır [28]. Şekil 2.15.'te kuru tip akım ölçü transformatörü yer almaktadır [33].

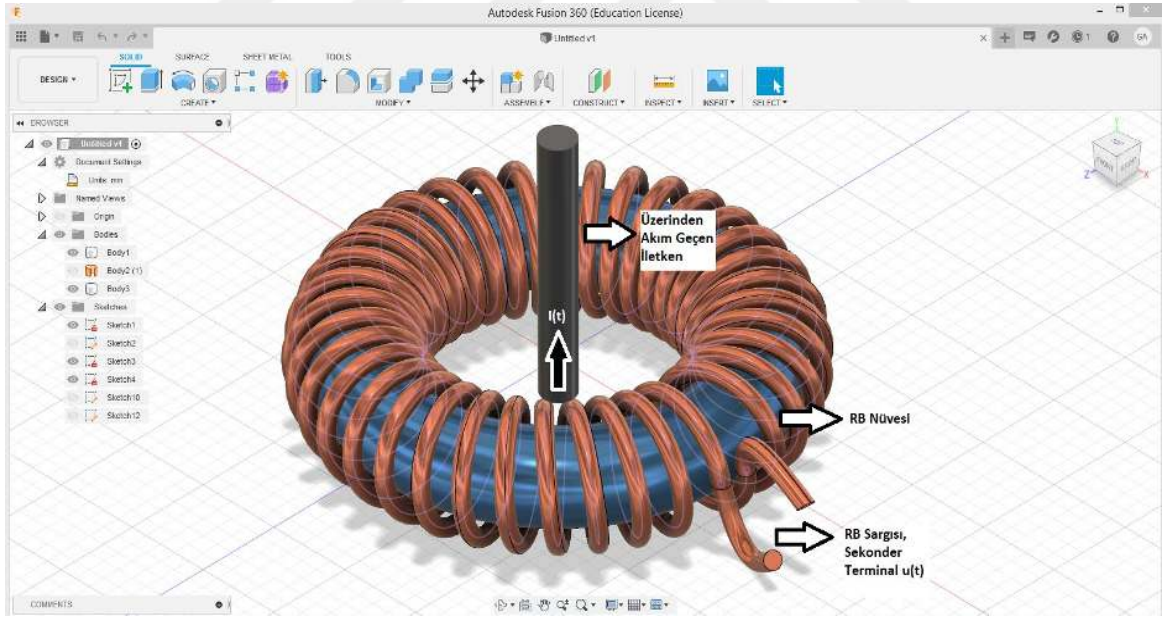


Şekil 2.17. Kuru tip akım ölçü transformatörü [33]

2.4. ROGOWSKİ BOBİNİ

Adını Alman Doktor Walter Rogowski'den alan Rogowski bobini (RB) bu ölçümleri yapabilmemize olanak sağlar ve IEC 60044.8 standardına göre üretilmektedir [34] .

RB'ler, uzun yıllardır elektrik akımlarının tespiti ve ölçümü için kullanılmaktadır. RB, yüksek ve AC hızlı darbe akımlarını hassasiyetle ölçebilen, düşük maliyetli, ana devreden elektriksel olarak izole edilen ve ferromanyetik bir nüvesi olmadığından akımları doygunluk olmadan (lineer özelliğe sahip) geniş aralıklarda ölçmeye yarayan hava çekirdekli bir bobindir. Lineer manyetik özelliği nedeniyle farklı akım değerlerini aynı hassasiyetle ölçebilmektedir. Ancak manyetik geçirgenliğin zayıf olması görece düşük akımları ölçmede zorluk çıkarmaktadır. Bu nedenle enerji iletim hatlarında 1000-5000A aralığındaki akımları ölçmek kolayken, 20-50 A gibi akımları gürültüden ayırarak ölçmek zordur [35]. Şekil 2.18.'de Autodesk Fusion 360 programında modellenmiş hava nüveli örnek bir RB yer almaktadır. Tipik bir RB, Şekil 2.18.'de gösterildiği gibi mevcut yolu çevreleyen toroidal sargılarından oluşur.



Şekil 2.18. Tipik bir RB

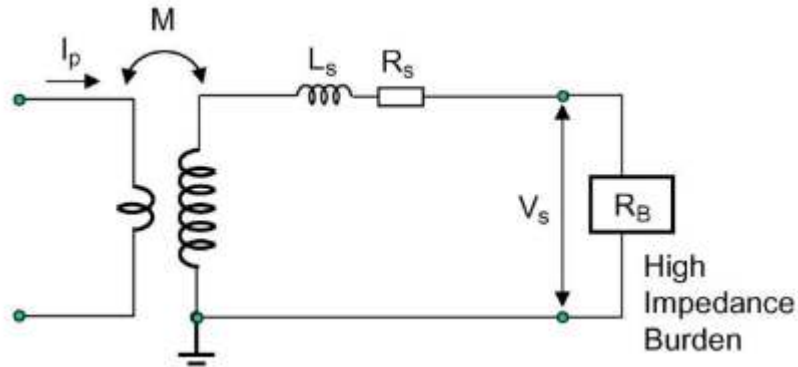
Ampere yasasına göre, RB'den akan akım ile torus eksenı boyunca manyetik akı yoğunluğu arasındaki ilişki denklem 2.1.'deki gibidir [35] .

$$I(t) = \frac{1}{\mu_0} \oint B(t).ds \quad (2.1)$$

Burada s, torus boyunca olan mesafe ve μ_0 havanın manyetik geçirgenliğidir. Faraday kanununa göre manyetik akının zamanla değişimi, sekonder sargıda gerilim indüklenmesine olanak sağlar [35]. İndüklenen gerilim denklem 2.2'deki gibidir ve akım dağılımdan bağımsızdır.

$$u(t) = \frac{d\Phi}{dt} = \int B(t).dA = \frac{A}{s} \mu_0 . I(t) \quad (2.2)$$

Burada A, RB'in nüve kesitidir. Rogowski bobinin eş değer devresi şekil 2.19'da gösterilmiştir.



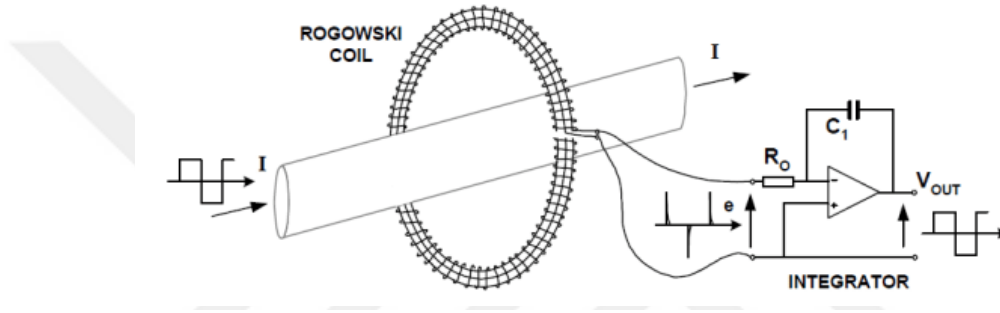
şekil 2.19. Rogowski bobininin eşdeğer devresi

Rogowski bobini primer akımı ile sekonder gerilimi arasındaki faz açısı yaklaşık 90° 'dir (bobin endüktansının neden olduğu küçük bir açıyla 90° 'dan kaydırılır) [19] .

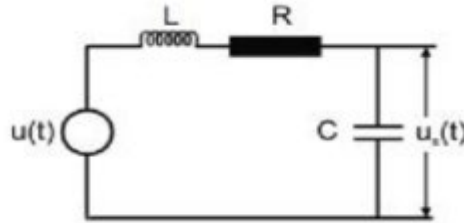
Akım iletkeninden geçtiğinde, akım tarafından üretilen manyetik alan rogowski bobininde bir miktar gerilim oluşturur. Bu gerilim, iletkendeki akımın değişim hızı ve manyetik

alanın değişim hızı ile doğru orantılıdır. RB sekonderinde indüklenen gerilim mV seviyesinde olduğundan Şekil 2.20.’deki gibi bir entegratör ile yükseltilir. Bu entegratör devresi bilgisi, dönüştürücü de işlenerek, çıkış dijital sinyali, akım ölçümü amacıyla kullanılır [36]. Şekil 2.21.’deki L gibi R ve C, sırasıyla entegratör devresinin direnci ve kapasitörüdür. Akım (i) bu devrede akarsa çıkış gerilimi denklem 2.3’teki gibi olur [35];

$$u(t) = \frac{d\phi}{dt} = L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int_0^t i dt \quad (2.3)$$



Şekil 2.21. RC entegratörlü tek turlu sarımın eşdeğer devresi



Şekil 2.20. Rogowski bobini entegratör devresi

Ticari amaç ile de kullanılan rogowski bobinleri hava boşluklu bir çekirdek etrafına sarılan bobin tellerinden oluşur ve ölçüm aralığı 5-50000A aralığındadır. Örneğin Fluke i2500-18 iFlex® Esnek Akım Probu 2500A’e kadar, DS-FLEX-3000-80 3000A’e kadar, Accuenergy’nin AcuCT Flex Serisi Rogowski bobin akım trafoları 50000A’ya kadar ölçüm yapabilmektedir.

Fluke i2500-18 iFlex® Esnek Akım Probusunun ölçü ve teknik özellikleri EK-B’de yer almaktadır.

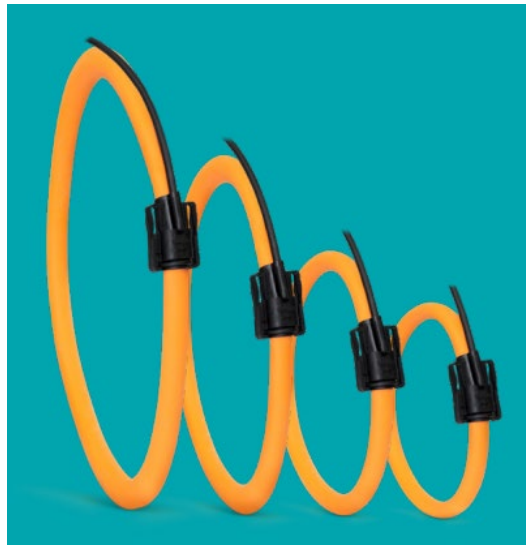
Şekil 2.22.'de Fluke i2500-18 iFlex® Esnek Akım Probu yer almaktadır.



Şekil 2.22. Fluke i2500-18 iflex® esnek akım probu

Accuenergy'nin AcuCT Flex Serisi Rogowski bobini AC akımı ölçmekte ve alanın sınırlı olduğu ve rijit gövdeli RB veya akım trafolarının sığmadığı durumlarda tercih edilmektedir [37].

Halata benzer form faktörü, kalabalık panellerde veya şalt cihazlarında düzensiz şekilli iletkenlerin etrafına sarılabilmektedir [37]. Şekil 2.23.'te AcuCT Flex series RB örnekleri yer almaktadır.



Şekil 2.23. Accuenergy, Acuct Flex Series Rogowski bobini örnekleri

RB'ler, sabit demir bir nüveye bağlı olmadığı için esnek hale gelebilirler ve böylece dar veya sıkışık alanlara daha kolay montaj edilerek ölçüm yapılabilmesine olanak sağlarlar. Ayrıca nüve olarak kullanılan hava çekirdeği doyuma gitmediğinden, RB'ler doğrusal ve geniş bir frekans aralığında çalışabilirler. Bu nedenle yüksek ölçüm hassasiyeti sağlarlar. RB'ler sinyal değişim oranına tepki verebildiği için yalnızca alternatif akımda ölçüm yapabilirler [19].

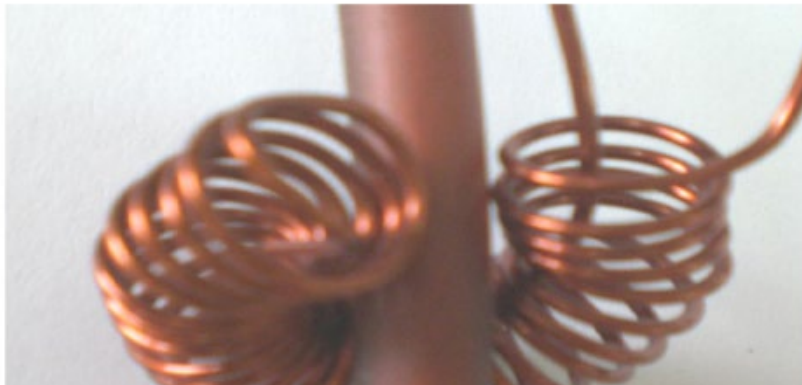
RB'ler, akım ölçümünün yanı sıra hassas kaynak sistemlerinde, ark eritme fırınlarında veya elektromanyetik fırlatıcılarda akım izleme için kullanılır. Ayrıca elektrik jeneratörlerinin kısa devre testlerinde ve elektrik santrallerinin koruma sistemlerinde sensör olarak kullanılırlar. Diğer bir kullanım alanı ise yüksek doğrusalıkları nedeniyle harmonik akım içeriğinin ölçülmesidir [38].

2.4.1. Rogowski Bobin Çeşitleri

RB'ler bağlantı şekli, kullanım alanları, nüvesinde tercih edilen malzemenin çeşitliliğine göre sınıflandırılabilir. Bu tezde RB'ler nüvesine göre sınıflandırılmıştır. Bu çeşitler; esnek rogowski bobini, rijit rogowski bobini ve BDK rogowski bobinidir.

2.4.1.1. Esnek Rogowski Bobini

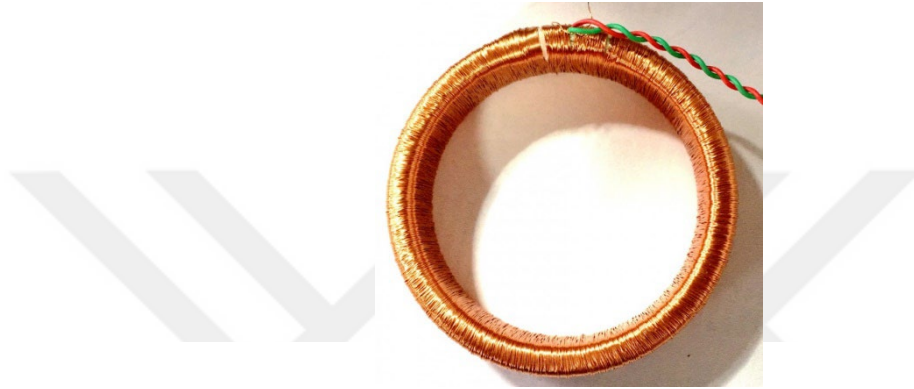
Esnek Rogowski Bobini bobin telinin iskelet üzerine nizamı bir şekilde sarılmasıyla elde edilir. İletken etrafına bir halka şeklinde bükülerek ölçüm alınır. Fakat bu bükülme işlemi, sarımların ölçüm hassasiyetini düşürmektedir. Bu nedenle uygulamalarda kullanılma tercihleri düşüktür [39]. Şekil 2.24.'de esnek rogowski bobini örneği yer almaktadır.



Şekil 2.24. Çekirdek içermeyen (air core) ve tel geri dönüş yolu selenoid sargıları içinden olan rogowski bobini ve algılanacak akımın geçtiği iletken [40]

2.4.1.2. Rijit Rogowski Bobini

Rijit RB'ler, esnek RB'ye göre; daha zor deforme olmaktadır. Bu sebeple ölçümün hassasiyetini ve doğruluğunu arttırmak daha kolaydır. Rijit RB'ler, bobin nüvesi olarak dikdörtgen, dairesel ve elipsel olarak üç şekle ayrılır. Dairesel çerçeveli rijit RB'nin; dikdörtgen ve elipsel nüveli olanlara göre ölçüm hassasiyeti daha yüksektir [39]. Tezimizde yer alan literatür taraması kısmında bahsi geçen [8-10], [12], [15-18] numaralı çalışmalar rijit RB'ye örnek olarak verilebilir. Şekil 2.25.'te rijit RB örneği yer almaktadır.



Şekil 2.25. Rijit rogowski bobini örneği [53]

2.4.1.3. BDK Rogowski Bobini

BDK Rogowski Bobini baskılı devre kartı (BDK) RB olarak bilinir. Ölçüm hassasiyeti esnek ve sert Rogowski bobinlerine göre çok yüksek olmasına rağmen hassas bir yapısının olması ve üretim zorluğu sebebiyle laboratuvar deneyleri dışında kullanılması zordur. Tezimizde yer alan literatür taraması kısmında bahsi geçen [11], [14], [19] numaralı çalışmalar BDK RB'ye örnek olarak verilebilir. Şekil 2.26.'da [14]'de yazarların tasarlamış olduğu Hibrit BDK bobini yer almaktadır.



Şekil 2.26. [14]'de Yazarların tasarlamış olduğu hibrit BDK bobini

Ölçme sırasında meydana gelen gürültüler ölçüm hassasiyetini düşürdüğünden BDK Rogowski bobini, birbirine ters yönde sarılmış iki ayrı RB'nin nüvesinin birleşiminden oluşmaktadır. İletken etrafından geçen bu iki nüveye sahip bobin meydana gelen gürültüleri sönümler. Böylece gürültünün etkisi olmadan doğruluğu yüksek ölçümler alınabilir [39]. Çizelge 2.1.'de akım ölçüm çeşitlerinin karşılaştırılması, avantaj dezavantajları, uygulama alanları, bağlantı tipleri ve izolasyon durumları yer almaktadır.

Çizelge 2.1. Akım ölçüm çeşitlerinin karşılaştırılması, avantaj dezavantajları, uygulama alanları, bağlantı tipleri ve izolasyon durumları

Ölçüm Tipi	Avantaj	Dezavantaj	Uygulama Alanı	Bağlantı Tipi	İzolasyon
Şönt Ölçüm	-DC ve AC akım ölçümü için uygun -Düşük maliyet	-Ohm Yasasına göre devredeki direnç değeri arttıkça, amper başına gerilim düşümü artar, Ancak, dirençteki güç kaybı akımın karesi ile arttığından ilave gerilim düşüşü meydana gelir - $I^2 \times R$ kayıplarından oluşacak sıcaklık etkisi vardır	-Entegrasyon, kontrol ve düzenleme sistemleri -Ürün ve enerji mühendisliği	Doğrudan	Hayır
Akım Trafosu İle Ölçüm	-Yüksek alternatif akım ölçümü için uygun -Gerilime bağlı olmadan ölçüm	-Doygunluk -Yüksek maliyet -boyutlarının büyük olması	-Kurulum ve ürün teknolojisi	Dolaylı	Evet
Hall Sensörü İle Ölçüm	- Gerilime bağlı olmadan ölçüm -Yüksek akımlar için uygun -DC ve AC akım ölçümü için uygun - Güç tüketimleri, boyutları ve ağırlıkları küçük -Kayıpları az ve çok iyi bir yalıtım sağlar	Cihazın ölçüm bölgesine yakını manyetik alanlardan etkilenmesi	-Motorlarda hız ve kontrol devrelerinde, -Takometrelerde, -LVDT sensörlerinde, vb. uygulamalarda	Dolaylı	Evet
Rogowski Bobini İle Ölçüm	-Gerilimden bağımsız ölçüm -Yüksek AC akımlar için uygun - Sabit demir bir nüve etrafına sarılı olmadığından esnek olması böylece dar veya sıkışık alanlarda rahat ölçüm yapabilirler	- Akım dalga formunu elde etmek için bobinin çıkışı bir entegratör devreden geçirilmelidir. - Entegratör kayıplıdır, bu nedenle Rogowski bobininin DC'ye kadar bir yanıtı yoktur; Ancak manyetik geçirgenliğin zayıf olması görece düşük akımları ölçmede zorluk çıkarmaktadır.	-Güç kalitesinin analizi -Şebekede gerilim çökme ve zıplamalarının tespiti -Enerji verimliliği	Dolaylı	Evet

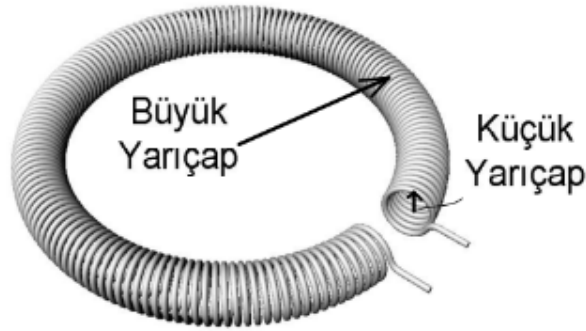
Tez çalışmamızda rogowski bobini üzerinde araştırma ve geliştirme yapmamızın sebepleri arasında; düşük endüktansı nedeniyle birkaç nanosaniyeye kadar hızla değişen akımlara yanıt verebilmesi, doygunluğa sebebiyet verecek demir çekirdeği olmadığı için büyük akımlara maruz kaldığında bile oldukça doğrusal olması, sabit demir bir nüve etrafına sarılı olmadığından esnek olması böylece dar veya sıkışık alanlarda rahat ölçüm yapılabilmesi, sekonder sargısı olmadığı için sargının açılma tehlikesi olmaması (sekonder ucun açık devre kalması patlamaya sebebiyet verilmektedir), daha düşük maliyetli olması sayılabilir. Daha büyük akımların ölçümü için, geleneksel akım trafolarında çıkış akımını sabit tutmak için sekonder sarım sayısının artırılması gereklidir. Bu nedenle, büyük akım için bir Rogowski bobininin boyutu, geleneksel akım trafosu ile karşılaştırıldığında daha küçük olması ve akım trafosunun 40-60 Hz aralığında, RB'nin 3MHz'e kadar geniş aralıklarda ölçüm yapabilmesi de tercih sebepleri arasında yer almaktadır.



3. ROGOWSKI BOBİN TASARIMI

RB tasarımında iç yarıçap, dış yarıçap, nüve kesit alanı ve uzunluğu, bobin sarımında kullanılan telin uzunluğu ve kesit alanı, sarım sayısı, sarımların sarılış şekli (düz, çapraz vb.) gibi birçok parametre RB'nin sekonderinde indüklenerek olan gerilimi değiştirdiğinden dikkat edilmesi gereken hususlardandır. Şekil 3.1.'de RB'nin iç ve dış yarıçapı olarak büyük yarıçap ve küçük yarıçapı görülmektedir [40].

RB'nin sekonderinde indüklenen gerilim aynı zamanda ortak endüktans değerine yani manyetik kublaja bağlıdır. Ayrıca RB'in empedansı da tasarımda dikkate alınmalıdır. Bu nedenle endüktans ve direnç değerleri RB tasarımında hesaplanmalıdır.



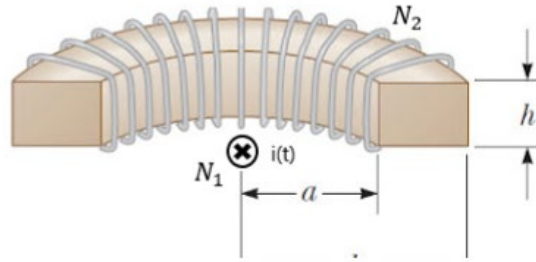
Şekil 3.1. RB'nin iç ve dış çapı [40]

RB'nin kesit alanı, ortak endüktans değerini etkileyen parametrelerden biridir. RB'nin kesit alanı dairesel veya dikdörtgen şekline olabilir.

3.1. DÖRTGEN KESİTLİ

Dikdörtgen kesitli toroidal nüveli RB'nin üzerindeki sargı (N_2) RB'nin iç yarıçapı (a), dış yarıçapı (b) ve yüksekliği (h) ile gösterilirse, iletken arasındaki karşılıklı endüktans (M_{21}) eşitlik 3.1'den, öz endüktansı da eşitlik 3.2'den hesaplanır [27].

Şekil 3.2.'de dikdörtgen kesitli toroidal nüveli RB yer almaktadır.



Şekil 3.2. Dikdörtgen kesitli toroidal nüveli RB

3.1.1. Endüktans Hesabı

Bir indüktörün kendi sarımları etrafında değişen manyetik alanın bir sonucu olarak kendi içinde indüklenen bir elektromanyetik alan (emf) oluşturur. Bu emf, akımın değiştiği aynı devrede indüklendiğinde, bu etki Self-endüksiyon, öz endüktans (L) olarak adlandırılır. Öz endüktansı da denklem 3.1'den hesaplanır [41].

$$L_2 = \frac{\mu_0 N_2^2 \cdot h}{2\pi} \cdot \ln \frac{b}{a} \quad (3.1)$$

Burada μ_0 boşluğun (hava) manyetik geçirgenliği, N_2 ise sarım sayısıdır.

3.1.2. Ortak Endüktans Hesabı

Karşılıklı/ortak endüktansı, bitişik bir bobinde bir gerilime neden olan bir bobin içinde akan akım olarak tanımlayabiliriz. İletken ile bobin arasındaki karşılıklı endüktansı (M_{21}) denklem 3.2'den hesaplayabiliriz [41]:

$$M_{21} = \frac{\mu_0}{2\pi} N_2 \cdot h \cdot \ln \frac{b}{a} \quad (3.2)$$

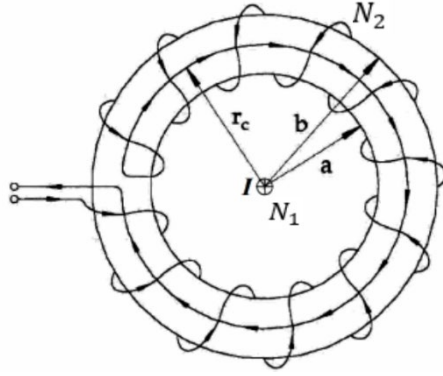
3.1.3. Toplam Empedans

Empedans ise her bir bileşenin ya da elektrik devresinin akıma karşı gösterdiği eşdeğer dirençtir. Empedansın bileşenleri aktif ve pasif olarak ikiye ayrılmaktadır. RB'nin toplam empedansı eşitlik 3.3'teki gibidir [41]:

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \quad (3.3)$$

3.2. DAİRESEL KESİTLİ

Dairesel kesitli toroidal nüveli RB'nin genel görünümü Şekil 3.3.'te gösterilmiştir [41].



Şekil 3.3. Dairesel kesitli toroidal nüveli RB [41]

3.2.1. Endüktans Hesabı

Toroidal nüvenin daireSEL kesitli RB'nin öz endüktansı L_2 , aynı parametreler kullanılarak denklem 3.4'ten hesaplanabilir [41].

$$L_2 = \frac{\mu_0 N_2^2}{2} (a + b - 2\sqrt{ab}) \quad (3.4)$$

3.2.2. Ortak Endüktans Hesabı

RB'nin sekonder sarım sayısı (N_2), RB'nin iç yarıçapı (a), dış yarıçapı (b) ile gösterilirse, iletkenler arasındaki karşılıklı endüktans (M_{21}) denklem 3.5 ile hesaplanır [41]

$$M_{21} = \frac{\mu_0 N_2}{2} (a + b - 2\sqrt{ab}) \quad (3.5)$$

Bu çalışmada daireSEL kesitli RB tasarımı üzerine durulmuştur. Çünkü dikdörtgen kesit alanının temel dezavantajı, sarım yalıtımının zarar görebileceği dikdörtgen enine kesitin keskin kenarlarıdır. Dairesel kesitin genellikle kullanılmasının nedeni budur [41].

4. ÖNERİLEN ESNEK NÜVELİ ROGOWSKİ BOBİNİ

Bu tez kapsamında lineer B-H eğrisine sahip esnek nüveli bir RB geliştirilmiştir. Bu nedenle RB'nin nüvesinde kullanılabilecek ferromanyetik malzemeler incelenmiştir. Ferromanyetik malzemeler herhangi bir mıknatısın manyetik alanı içerisindeyken o mıknatısın manyetik alan çizgileri ile aynı yönde mıknatıslanabilen maddelerdir. Bu maddeler içerisinde Demir, Nikel, Kobalt gibi maddeler ve bu maddelerden oluşan alaşımları (Fe_2O_3 , Fe_2O_4) yer almaktadır. Ayrıca bu maddelerin manyetik alanının dünyanın manyetik alanından 100 milyon kat daha güçlü olduğu ve Curie sıcaklığından sonra (T_c) ferromanyetik özelliklerini kaybettiği bilinmektedir. Örneğin saf demirin Curie noktası $770^{\circ}C$ 'dir

Aşağıda bazı ferromanyetik malzemelerin özellikleri yer almaktadır.

- Demir: Demir, dünya yüzeyinde en yaygın dördüncü mineral ve yer kabuğunda en çok bulunan metaldir. Dünyanın çekirdeğinin de büyük oranda metalik demir-nikel alaşımından meydana geldiği tahmin edilmektedir. Simgesi “Fe”, Atom numarası 26'dır. Kristal yapısı hacim merkezli kübiktir. Yoğunluğu $7,86 \text{ gr/cm}^3$ 'tür. Erime noktası $1538^{\circ}C$, kaynama noktası $2861^{\circ}C$ 'dir [42]. Şekil 4.1.'de işlenmemiş bir demir cevheri parçası yer almaktadır.



Şekil 4.1. İşlenmemiş bir demir cevheri parçası

- Kobalt: Kobalt, dövülgen bir katılığa sahip, gri renkli, metalik parlaklıktadır. Birçok mineralin içinde bulunur ve alaşım yapmada, mürekkep, boya ve vernik imalinde kullanılır. Sembolü “Co”, atom ağırlığı 58,93, atom numarası 27’dir. Kobaltın kristal yapısı genellikle kübik, masif, kompakt ve taneseldir. Sertliği 5-5.5, yoğunluğu 8,90 gr/cm³tür. Erime noktası 1495°C, kaynama noktası 2927°C’dir ve 300°C oksitlenir; oksitlenme kabiliyeti demirden azdır [43]. Şekil 4.2.’de kobalt cevheri yer almaktadır.



Şekil 4.2. Kobalt cevheri

- Nikel: Nikel, periyodik cetvelde geçiş metalleri arasında yer alır. Parlak gümüş beyazı renginde olup bakır, krom, alüminyum, kurşun, kobalt, altın ve gümüş gibi metallerle birlikte alaşımlarda kullanılır. 1751’de, Baron Axel Frederik Cronstedt bakırı nikolitten ayırmaya çalışırken, nikeli elde etmiştir. Sembolü “Ni”, Atom numarası 28, Kristal yapısı yüzey merkezli kübiktir. Yoğunluğu 8,908 gr/cm³tür. Erime noktası 1455°C, kaynama noktası 2913°C’dir. [44] Şekil 4.3.’de ham nikel cevheri yer almaktadır.



Şekil 4.3. Ham nikel cevheri

- Manyetit: Manyetit, Dünya üzerinde doğal olarak bulunan tüm minerallerin en manyetiğidir. Doğal olarak mıknatıslanmış lodestone adı verilen manyetit parçaları, eski insanların ilk olarak manyetizmanın özelliğini keşfettikleri küçük demir parçalarını çekecek durumdadır, günümüzde demir cevheri olarak çıkarılmaktadır. Fe_2O_4 formülüyle gösterilir ve spinal yapıda ferromanyetik bir demir alaşımıdır. Yoğunluğu 5 gr/cm³'tür. Erime noktası 1597°C, kaynama noktası 2623°C'dir [45]. Şekil 4.4.'te manyetit kristali yer almaktadır.



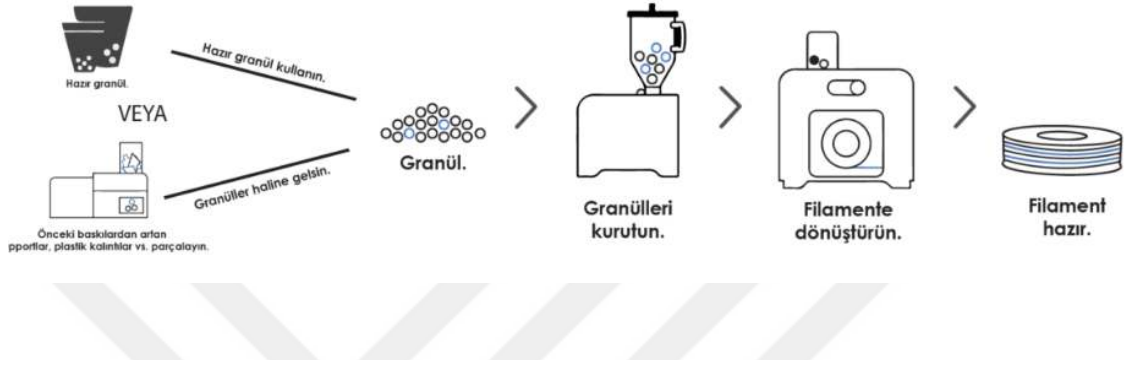
Şekil 4.4. Manyetit kristali

Çizelge 4.1.'de incelenen ferromanyetik malzemelerin özellikleri özet tablo olarak yer almaktadır.

Çizelge 4.1. İncelenen ferromanyetik malzemelerin özellikleri

Ferromanyetik Malzeme Adı	Simgesi	Atom Numarası	Kristal Yapısı	Yoğunluğu (gr/cm ³)	Erime Noktası (°C)	Kaynama Noktası (°C)
Demir	Fe	26	Hacim Merkezli Kübik	7,86	1538	2861
Kobalt	Co	27	Kübik, Masif, Kompakt Ve Taneseli	8,9	1495	2927
Nikel	Ni	28	Yüzey Merkezli Kübik	8,908	1455	2931
Manyetit	Fe_2O_4	*	*	5	1597	2623

Yapılan literatür ve kaynak araştırmalarımız neticesinde kolay temin edilebilirliği ve diğer cevherlere oranla maliyetinin düşük olması dolayısıyla RB'nin nüvesinde kullanılmak üzere nikel maddesi tercih edilmiştir. RB'nin nüvesinde esneklik sağlanabilmesi için %40 ve %60 nikel alaşımlı filamentler, 1.75 mm çaplı null uçlu ekstrüzyon makinesinde üretilmiştir. Şekil 4.5.'te örnek olması açısından 3Devo filament ekstrüzyon ekosistemi ile üretim aşamalarına yer verilmiştir.



Şekil 4.5. 3Devo filament ekstrüzyon ekosistemi üretim aşamaları [50]

Tez çalışmamızda ise nüvelerin üretiminde eriyik proses cihazı olarak tek vidalı filament çekme için tasarlanmış ekstruder kullanılmıştır. Tek vidalı ekstruder olarak FİLAMEX marka FX-plus model tek vidalı ekstruder kullanılmış olup bu sistemde 1.75, 2, 2.85 ve 3 mm filament şeklinde üretim yapılabilmektedir. Çalışma sırasında 2 mm'lik çıkış kafaları kullanılmış olup gerdirme ile sabit 1.75 mm çapında filamentler kesintisiz olarak üretilmiştir. Çalışmalar sırasında polimer faz olarak 80A Shore sertliğine sahip TPU polimer faz olarak kullanılırken Nikel dolgu olarak kullanılmıştır. Çalışmada sıcaklık olarak 210-220 °C değerleri kullanılmıştır. Şekil 4.6.'da kullanılan ekstruder sistemi ve filament üretim bandının fotoğrafı verilmiştir. Çalışma öncesinde hem polimer faz hem de dolgular 80 °C'de vakum etüvünde 6 saat kurutulmuştur.



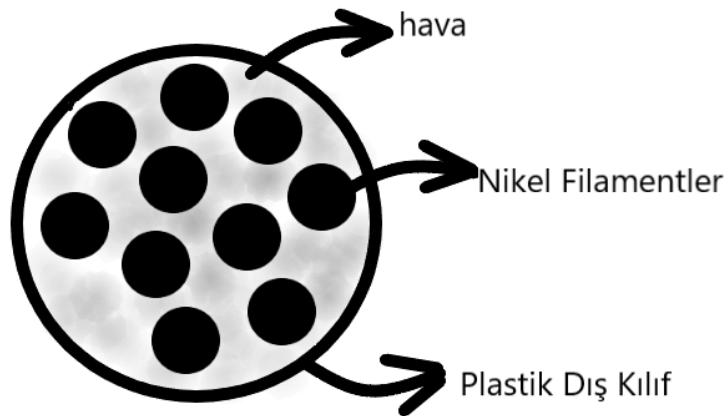
Şekil 4.6. Tez çalışmamızda nüve tasarımında kullanılan tek vidalı ekstruder sistemi

Şekil 4.7.'de ekstrüzyon makinesinde üretilen %40 ve %60 nikel alaşımlı filamentler yer almaktadır.



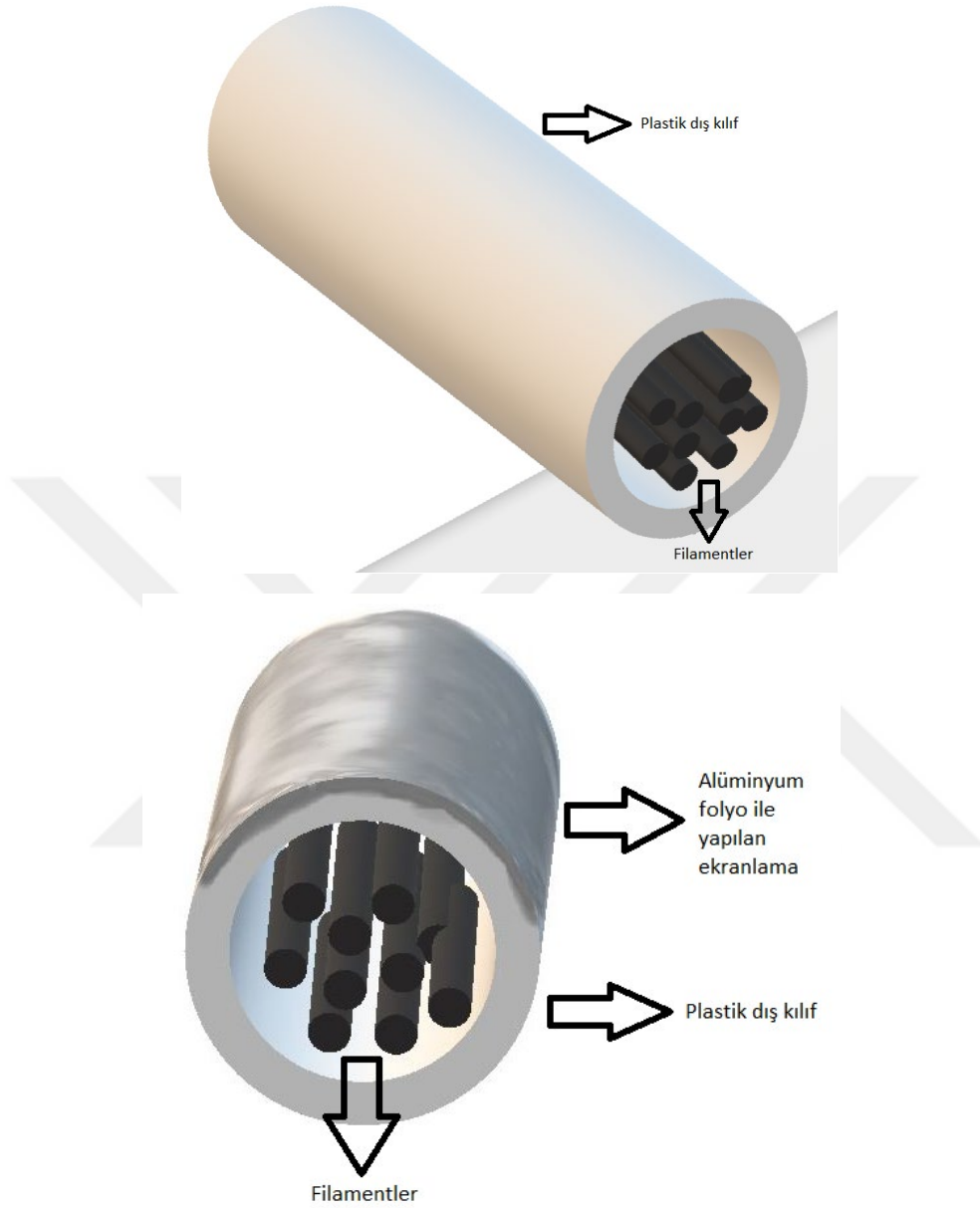
Şekil 4.7. Üretilen %40 ve %60 nikel alaşımlı filamentler

Ardından bu filamentler plastik dış kalıbın içerisinde geçirilerek (her bir nüvede 10 adet filament) esnek RB nüvesi elde edilmiştir. Böylece dairesel kesitli RB nüvesinin yaklaşık %20'inde ferromanyetik alışım kullanılmıştır. Şekil 4.8.'de tasarlanan RB nüvesinin nikel + hava alaşımının eş değer gösterimi görülmektedir.



Şekil 4.8. Tasarlanan RB nüvesinin nikel + hava alaşımının eş değer gösterimi

Elde edilen RB nüvelerinin eş değeri gösterimi şekil 4.9.'da ter almaktadır.



Şekil 4.9. Elde edilen RB nüvelerinin eş değeri gösterimi

Bobinin nüvesinde kullanılan malzemenin önemli olduğu kadar bobinin iç ve dış çapı, kesit alanı, uzunluğu, nüvenin üzerine sarılan bakır telin çapı ve nüve boyunca sarılan sarım sayısı RB'nin çıkışında indüklenen gerilimi azalıp/arttıracak bir etki sağladığı için bu özellikler de tasarımda kritik önem taşımaktadır.

RB tasarlanırken referans alınan ölçüler, ticari amaç ile kullanılan ACCUENERGY marka RCT16 model numaralı RB'nindir. Çizelge 4.2.'de referans alınan ticari RB'nin fiziksel özellikleri ve ölçüm aralığı verilmiştir.

Çizelge 4.2. Referans alınan ticari RB'nin özellikleri

ÜRÜN MARKASI	ACCUENERGY RCT16-1000
AKIM ARALIĞI	5A-1200A
İÇ ÇAP	1,06 Metre
DIŞ ÇAP	1,43 Metre
KESİT ALANI	0,97 mm ²
UZUNLUK	0.4 Metre

Ticari olarak kullanılan RB'ler genellikle kelepçe gibi açınıp kapanır şekildedir ancak bizim tasarımımda üretim kolaylığı olması açısından ilave bir kilit sistemi olmaksızın bir bütün olarak RB nüvesi elde edilmiştir. Üretilen filamentler plastik dış kılıfın içerisinden geçirildikten sonra filamentin iki ucu birleştirilerek kapalı devre elde edilmiştir. Sonrasında plastik dış kılıfta iki ucundan birleştirilmiş ve birleşim noktaları izole bant ile sarılmıştır. Üretilen filamentler ile elde edilen esnek RB nüvesinin nihai hali şekil 4.10.'daki gibidir.



Şekil 4.10. Esnek RB nüvesi

Geliştirilen RB nüvesinin üzerine 0.4 mm çapında bakır tel kullanılarak sekonder sarım yapılmıştır. 0.4 m uzunluğundaki nüve boyunca 825 sarım eşit aralıklarla, düzgün ve simetrik bir şekilde sarılmıştır. Şekil 4.11.' de bakır tel ile sarımı gerçekleştirilen esnek RB nüvesi yer almaktadır.



Şekil 4.11. 0.4 Mm çapında bakır tel ile sarılan esnek RB nüvesi

Ölçülen gerilim seviyeleri çok düşük olduğundan ölçüm gürültülerini azaltmak ve statik bir çıkış elde etmek için sekonder sarımın üzerine alüminyum ekranlama yapılmıştır. Şekil 4.12.'de ekranlama yapılan ve yapılmayan RB'ler yer almaktadır.



Şekil 4.12. Elde edilen RB'lerde ekranlama

Ölçüm alınabilecek hale gelen nihai RB bobinlerin görüntüsü Şekil 4.13.'te verilmiştir.



Şekil 4.13. Elde edilen nihai RB

4.1. ANALİTİK YAKLAŞIM İLE GERİLİM HESABI

Bir nüve etrafına sarılı sargıdan geçen akım tarafından manyetik alanın üretilmesini açıklayan temel kanun Ampere Kanunu'dur. Burada “H”, manyetik alan şiddeti olup akım (I) tarafından üretilir. SI sisteminde “I”, amper (A) ve “H”, amper-tur/metre (At/m) olarak ölçülür. “l”, manyetik akı yolunun uzunluğudur ve birimi metredir. “N”, mevcut döngünün dönüş sayısıdır. Böylelikle uygulanan akım (I) yüzünden nüve içinde üretilen manyetik alan şiddeti (H) denklem 4.1'deki gibidir;

$$H = \frac{N \times I}{l} \quad (4.1)$$

Manyetik akı yoğunluğu manyetik alana dik bir birim alandan geçen akı miktarıdır. Manyetik akı “B” harfi ile gösterilir ve birimi Wb/m^2 veya Tesla'dır (T). Manyetik alan şiddeti “H” ile meydana gelen manyetik akı yoğunluğu “B” arasındaki ilişki denklem 4.2'deki gibidir;

$$B = \mu \times H \quad (4.2)$$

Burada; “ μ ”, malzemenin manyetik geçirgenliği (H/m), “B” manyetik akı yoğunluğudur (Wb/m^2). Manyetik geçirgenlik (μ), malzeme içerisinde manyetik alanın geçişini tanımlayan bir parametredir. Her malzeme bir manyetik geçirgenliğe sahiptir. Doğru orantılı olarak manyetik geçirgenliği yüksek olan malzemelerde daha kolay manyetik alan oluşmaktadır. Boşluğun (hava) manyetik geçirgenliği μ_0 ile temsil edilir ve değeri sabittir. ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m) Herhangi bir malzemenin geçirgenliği ile havanın geçirgenliğinin oranlanması bağıl geçirgenliği μ_r 'yi verir.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (4.3)$$

Bağıl geçirgenliğin yüksek olması malzemenin manyetik özelliğinin yüksek olduğu anlamına gelmektedir.

Denklem 4.1 ve 4.2 birleştirildiğinde manyetik akı yoğunluğu denklem 4.4'teki gibidir;

$$B = \mu \times H = \frac{\mu \times N \times I}{l} \quad (4.4)$$

Toplam manyetik akının değeri:

$$\Phi = B \times A = \frac{\mu \times N \times I \times A}{l} \quad (4.5)$$

Değişken manyetik akıya göre, sargı uçlarındaki toplam endüklenen gerilim 4.6'daki gibidir:

$$E = N \times \left(\frac{d\Phi}{dt} \right) = \frac{N \times 2\pi f}{\sqrt{2}} \times [A \times B] \quad (4.6)$$

Burada “N” sarım sayısı, “B” manyetik akı yoğunluğu, “A” kesit alanıdır.

Denklemlerin elde edilişi ve türetilmiş hali bölüm 5.2 Analitik Sonuçlar kısmında detaylandırılacaktır.

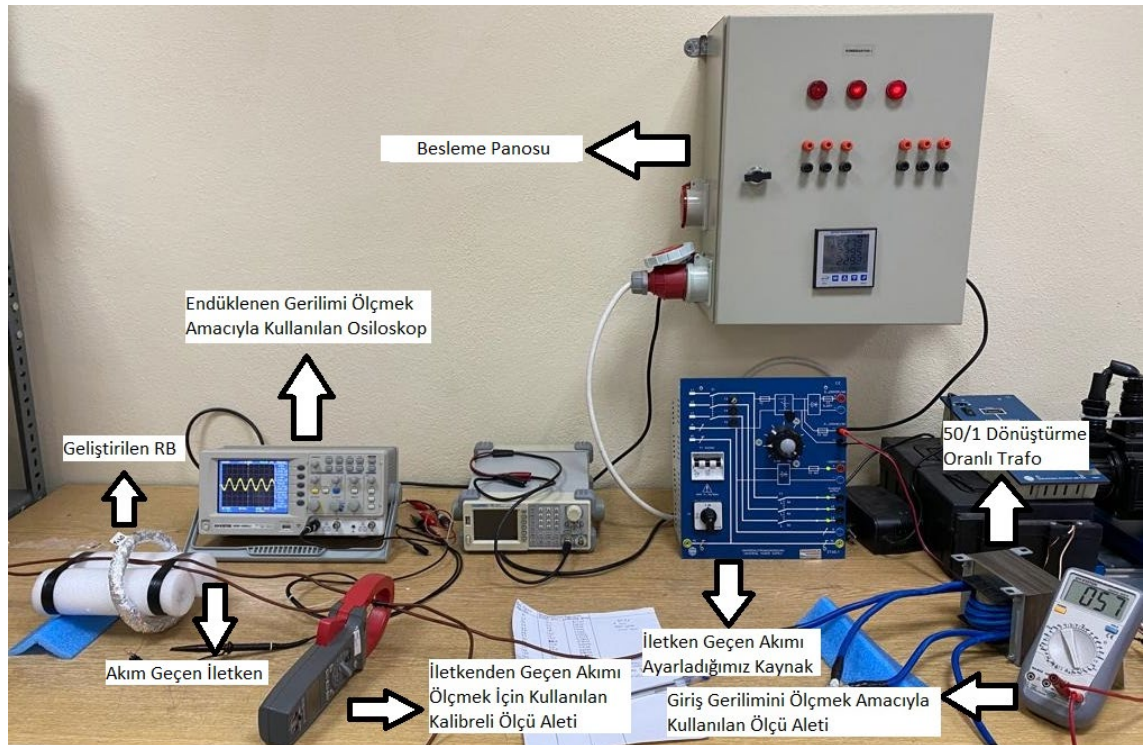


5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tasarlanan RB'nin farklı primer akımlarında sekonder gerilimi hem analitik hem de nümerik olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bulgular deneysel sonuçlarla karşılaştırılarak doğruluğu teyit edilmiştir.

5.1. DENEYSEL BULGULAR

Deneysel sonuçları elde edebilmek için 50Hz frekanslı ayarlı AC kaynaktan beslenen 50/1 dönüştürme oranlı bir trafo kullanılmıştır. Böylece 0-400 A aralığında değişen bir hat akımı elde edilmiştir. Geliştirilen RB'nin performansını görebilmek için aynı boyutlarda ve özelliklerde hava nüveli bir RB de üretilmiştir. Geliştirilen deney düzeneği Şekil 5.1.'de görülmektedir. RB'nin sekonder gerilimleri mV seviyesinde olduğundan osiloskop üzerinden ölçülmüştür. Doğru ölçüm alınması amacıyla primer iletkeni, gerilimi ölçülen tasarlanan RB'nin tam ortasından geçecek şekilde hizalanmış ve sabitlenmiştir.



Şekil 5.1. Deney düzeneği

Çizelge 5.1.'de karşılaştırmalı olarak hava nüveli ve Nikel alaşımlı önerilen RB'lerin sekonder gerilim değerleri verilmiştir. Deneysel sonuçlara göre elde edilen değerler Ek-C'de yer almaktadır.

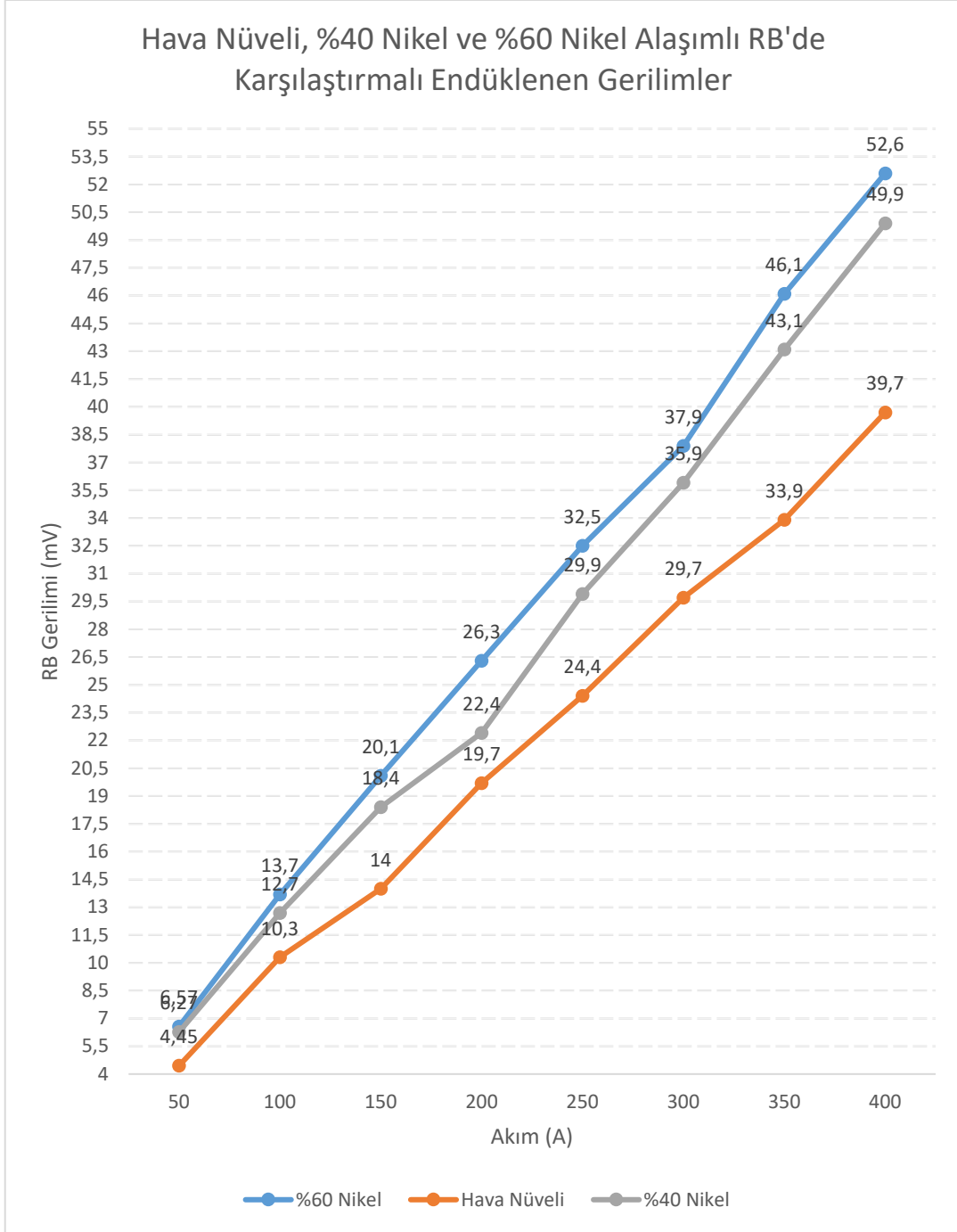
Çizelge 5.1. Deneysel ölçüm sonuçları

RB Sekonder Gerilimi (mV)			
Akım (A)	Hava Nüveli	%40 Nikel	%60 Nikel
50	4,45	6,27	6,57
100	10,3	12,7	13,7
150	14	18,4	20,1
200	19,7	22,4	26,3
250	24,4	29,9	32,5
300	29,7	35,9	37,9
350	33,9	43,1	46,1
400	39,7	49,9	52,6

Deneysel ölçüm sonuçlarından da görüleceği üzere nikel oranı arttıkça RB'nin çıkışındaki endüklenen gerilim doğrusal bir şekilde artmaktadır.

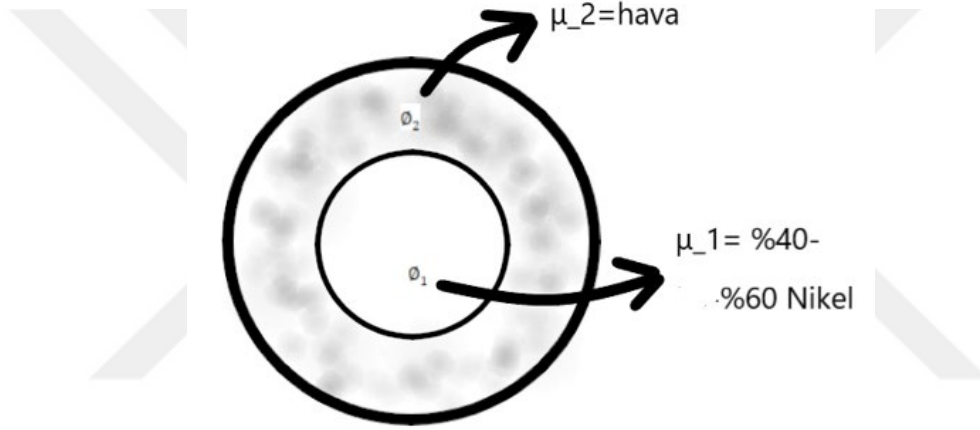
Çizelge 5.2.'de ölçüm sonuçlarına göre elde edilen grafik yer almaktadır.

Çizelge 5.2. Ölçüm sonuçlarına göre elde edilen grafik



5.2. ANALİTİK SONUÇLAR

Manyetik alan şiddetinin değişimi ile manyetik akı yoğunluğu da değişmektedir. Bu değişimi gösteren grafiğe B-H grafiği denilmektedir. Tasarımımızdaki B-H eğrisini analitik sonuçlarla oluşturmak ve indüklenen gerilimi hesaplamak için aşağıdaki analitik işlemler yapılmıştır. Şekil 5.2.'de tasarlanan RB nüvesinin eş değer gösterimi yer almaktadır. Burada ϕ_1 filamentten geçen akıyı, ϕ_2 RB kesitindeki hava bölgesinden geçen akıyı tanımlamaktadır.



Şekil 5.2. Tasarlanan RB nüvesinin eş değer gösterimi

Manyetik akı değişimi denklem 5.1'deki gibidir.

$$\phi(t) = \phi_{max} \times \sin(\omega t) \quad (5.1)$$

Kapalı devrelerdeki akı değişim hızı, indüklenen gerilimi vermektedir;

$$E = \frac{\partial \phi}{\partial t} = \phi_{max} \times 2 \times \pi \times f \times \cos(\omega t) \quad (5.2)$$

Faraday Yasasına göre indüklenen gerilim değeri eşitlik 5.3'teki gibidir;

$$E_{toplam} = N \times \left(\frac{d\phi_1}{dt} + \frac{d\phi_2}{dt} \right) = \frac{N \times 2\pi f}{\sqrt{2}} \times [A_1 \times B_1 + A_2 \times B_2] \quad (5.3)$$

Burada N sarım sayısıdır. Formülün $\sqrt{2}$ 'ye bölünmesinin nedeni RMS değeri bulunması içindir ve tasarımımızın kesit alanı iki farklı malzeme ve iki farklı alandan oluştuğu için indüklenen gerilim A_1 ve A_2 alanında indüklenen gerilimlerin toplamı olacaktır.

- %40 Nikel alaşımlı RB için deneysel sonuçlara göre 20A primer akımında ölçülen indüklenen gerilim $E = 2,95 \text{ mV (RMS)}$ 'dir.

$I = 20 \text{ A}$ olduğunda analitik olarak hesaplanırsa Amper Yasasına göre manyetik alan şiddetinin genliği eşitlik 5.4'teki gibidir:

$$H = \frac{N \times I}{L} = \frac{1 \times 20}{0,4} = 50 \frac{\text{At}}{\text{m}} \quad (5.4)$$

İndüklenen gerilimin hesaplanabilmesi için bölgelerin alanlarında bilinmesi gerekmektedir. Bu sebeple alan denklem 5.5'teki gibi hesaplanır;

$$A = \frac{\pi \times D^2}{4} \quad (5.5)$$

“D” burada olarak ifade edilmekte böylece, A_1 bölgesindeki alan;

$$A_1 = \frac{\pi \times D^2}{4} = \frac{\pi \times 5,62304^2}{4} = 24,8332 \times 10^{-6} \text{m} \quad (5.6)$$

A_2 bölgesindeki alan hesaplanırken ortalama çap alınmıştır ;

$$A_2 = \frac{\pi \times D^2}{4} = \frac{\pi \times (13 - 5,62304)^2}{4} = 107,9 \times 10^{-6} \text{m} \quad (5.7)$$

A_2 bölgesi havadan oluştuğu için manyetik geçirgenliği 1'dir. Dolayısıyla bu alandaki B_2 şu şekilde hesaplanır ;

$$B_2 = \mu_2 = \mu_{\text{hava}} \times H = 4 \times \pi \times 10^{-7} \times 1 \times 50 = 6,283185 \times 10^{-5} \text{ T} \quad (5.8)$$

Böylece hesaplanan B_2 ve kesit alanı üzerinden Φ_2 akısının indüklediği gerilim şu şekildedir;

$$\begin{aligned} E_2 &= \frac{N \times 2\pi f}{\sqrt{2}} \times [A_2 \times B_2] = \frac{825 \times 100 \times \pi}{\sqrt{2}} \times \\ &[107,9 \times 10^{-6} \times 4 \times \pi \times 10^{-7} \times 1 \times 50] \\ &= 1,2424821 \text{mV} \end{aligned} \quad (5.9)$$

Bu değeri deneysel ölçülen indüklenen gerilimden çıkarttığımızda A_1 filament bölgesindeki indüklenen gerilim elde edilir;

$$E_1 = E_{\text{toplam}} - E_2 = 1,7075179 \text{mV} \quad (5.10)$$

Gerilimi bilenen B_1 manyetik akı yoğunluğu bulunmak istenirse;

$$E_1 = \frac{N \times 2\pi f}{\sqrt{2}} \times [A_1 \times B_1] = \frac{825 \times 100 \times \pi}{\sqrt{2}} \times [24,8332 \times 10^{-6} \times B_1]$$

$$B_1 = 3,751835242 \times 10^{-4} T \quad (5.11)$$

➤ %40 Nikel alaşımlı RB için deneysel sonuçlara göre 40,2A primer akımında ölçülen indüklenen gerilim $E = 5,26 \text{ mV (RMS)}$ 'dir ;

I = 40,2 A olduğunda yukarıdaki aynı formüller ile analitik olarak hesaplanırsa;

$$H = \frac{N \times I}{L} = \frac{1 \times 40,2}{0,4} = 100,5 \frac{At}{m} \quad (5.12)$$

$$E_2 = \frac{N \times 2\pi f}{\sqrt{2}} \times [A_2 \times B_2] = 2,497389mV \quad (5.13)$$

$$E_1 = 2,762611mV \quad (5.14)$$

$$E_1 = \frac{N \times 2\pi f}{\sqrt{2}} \times [A_1 \times B_1] = \frac{825 \times 100 \times \pi}{\sqrt{2}} \times [24,8332 \times 10^{-6} \times B_1]$$

$$B_1 = 6,07013329 \times 10^{-4} T \quad (5.15)$$

➤ %40 Nikel alaşımlı RB için deneysel sonuçlara göre 60,2A primer akımında indüklenen gerilim $E = 7,62mV \text{ (RMS)}$ 'dir;

I = 60,2 A olduğunda yukarıdaki aynı formüller ile analitik olarak hesaplanırsa;

$$H = \frac{N \times I}{L} = 150,5 \frac{At}{m} \quad (5.16)$$

$$E_2 = \frac{N \times 2\pi f}{\sqrt{2}} \times [A_2 \times B_2] = 3,73987109mV \quad (5.17)$$

$$E_1 = 3,88012891mV \quad (5.17)$$

$$E_1 = \frac{N \times 2\pi f}{\sqrt{2}} \times [A_1 \times B_1] = \frac{825 \times 100 \times \pi}{\sqrt{2}} \times [24,8332 \times 10^{-6} \times B_1]$$

$$B_1 = 8,525593954 \times 10^{-4} T \quad (5.18)$$

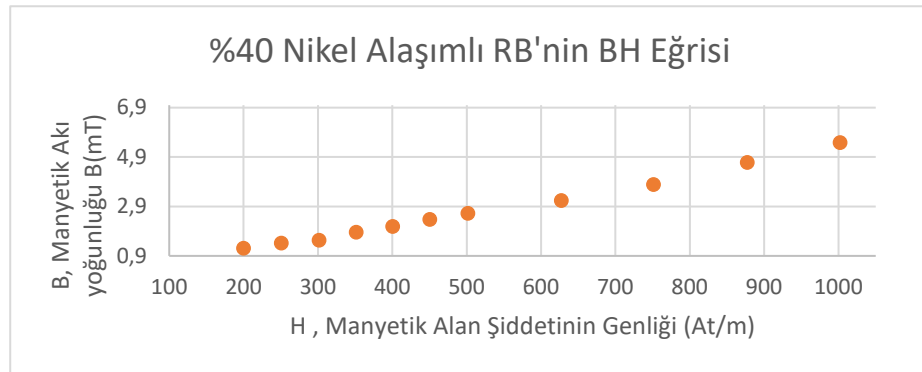
%40 nikel alaşımlı RB için diğer primer akımlarında ölçülen değerler tablo olarak Çizelge 5.3.'te yer almaktadır.

Çizelge 5.3. Analitik formül ile primer akım değişimine göre %40 nikel alaşımlı rb'de hesaplanan manyetik alan şiddeti, manyetik akı yoğunluğu ve indüklenen gerilimler

%40 Nikel Alaşımlı RB					
DeneySEL Sonuçlara Göre Ölçülen End. Gerilim (mV)	Akım (A)	Manyetik Alan Şiddetinin Genliği (At/m)	Endüklenen Gerilim E2 (mV)	Endüklenen Gerilim E1 (mV)	Manyetik Akı Yoğunluğu B1 (mT)
7,62	60,2	150,5	3,73	3,88	0,85
10,5	80	200	4,96	5,53	1,21
12,7	100,2	250,5	6,22	6,47	1,42
14,5	120,6	301,5	7,49	7,00	1,53
17,2	140,5	351,25	8,72	8,47	1,86
19,5	160,1	400,25	9,94	9,55	2,09
22	180,1	450,25	11,18	10,81	2,37
24,4	200,5	501,25	12,45	11,94	2,62
29,9	250,8	627	15,58	14,31	3,14
35,9	300,4	751	18,66	17,23	3,78
43,1	350,8	877	21,79	21,30	4,68
49,9	400,7	1001,75	24,89	25,00	5,49

Hesaplanan değerlere göre tasarlanan %40 nikel alaşımlı RB'nin B-H eğrisi Çizelge 5.4.'teki gibidir.

Çizelge 5.4. %40 nikel alaşımlı B-H eğrisi



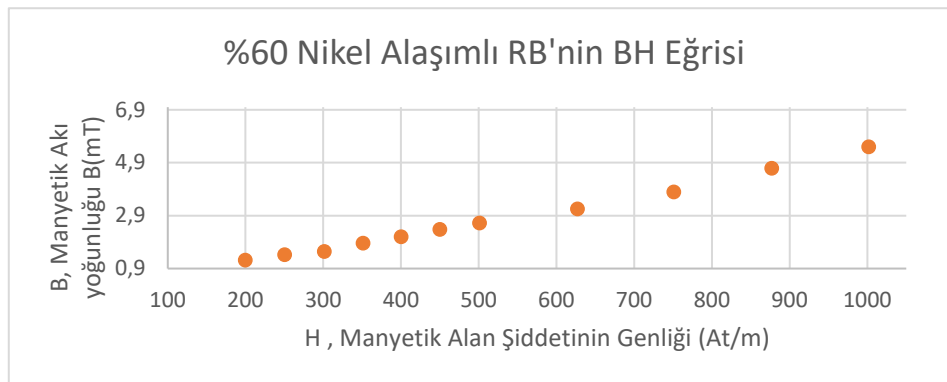
Hesaplanan değerler tablo olarak %60 nikel alaşımlı RB izelge 5.5.’te yer almaktadır.

Çizelge 5.5. Analitik formül ile primer akım değişimine göre %60 nikel alaşımlı rb’de hesaplanan manyetik alan şiddeti, manyetik akı yoğunluğu ve indüklenen gerilimler

%60 Nikel Alaşımlı RB					
Deneysel Sonuçlara Göre llen End. Gerilim (mV)	Akım (A)	Manyetik Alan şiddetinin Genliği (At/m)	Endüklenen Gerilim E2 (mV)	Endüklenen Gerilim E1 (mV)	Manyetik Akı Yoğunluğu B1 (mT)
7,95	60,2	150,5	3,73	4,25	0,93
10,4	80	200	4,99	5,40	1,18
13,7	100,2	250,5	6,23	7,46	1,64
16,1	120,6	301,5	7,47	8,62	1,89
18,8	140,5	351,25	8,71	9,10	2,21
20,9	160,1	400,25	9,95	10,94	2,04
23,4	180,1	450,25	11,19	12,20	2,68
26,2	200,5	501,25	12,45	13,74	3,01
32,3	250,8	627	15,54	16,75	3,68
37,9	300,4	751	18,68	19,21	4,22
46,7	350,8	877	21,79	24,90	5,47
52,6	400,7	1001,75	24,89	27,70	6,08

Hesaplanan değerlere göre tasarlanan %60 nikel alaşımlı RB’nin B-H eğrisi izelge 5.6.’daki gibidir.

Çizelge 5.6. %60 nikel alaşımlı nikel alaşımlı B-H eğrisi



Çizelge 5.7.'de iletken den geçen akıma göre tasarlanan RB zerindeki manyetik akı yoğunluğu değişiminin %40 ve %60 nikel alaşımı arasında %farkı yer almaktadır.

Çizelge 5.7. Manyetik akı değişiminin %40 ve %60 nikel alaşımındaki %farkı

İletkenden Geçen Akım	%40 Nikelde Manyetik Akı Yoğunluğu	%60 Nikelde Manyetik Akı Yoğunluğu	%fark
60,2	0,85	0,93	0,09
80	1,21	1,18	-0,02
100,2	1,42	1,64	0,15
120,6	1,53	1,89	0,23
140,5	1,86	2,21	0,18
160,1	2,09	2,04	-0,02
180,1	2,37	2,68	0,13
200,5	2,62	3,01	0,14
250,8	3,14	3,68	0,17
300,4	3,78	4,22	0,11
350,8	4,68	5,47	0,16
400,7	5,49	6,08	0,10

Çizelge 5.8.'de iletken den geçen akıma göre tasarlanan RB zerindeki indüklenen gerilimin %40 ve %60 nikel alaşımı arasındaki %farkı yer almaktadır.

Çizelge 5.8. İletkenden geçen akıma göre tasarlanan rb üzerindeki indüklenen gerilimin %40 ve %60 nikel alaşımındaki %farkı

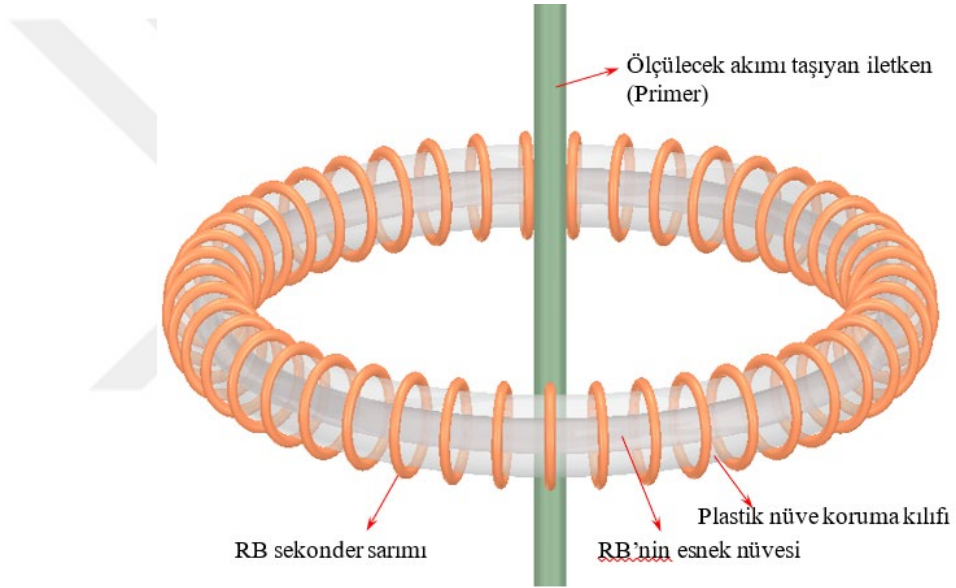
İletkenden Geçen Akım	%40 Nikelde Endüklenen Gerilim	%60 Nikelde Endüklenen Gerilim	%fark
60,2	7,62	7,95	0,04
80	10,5	10,4	-0,009
100,2	12,7	13,7	0,07
120,6	14,5	16,1	0,11
140,5	17,2	18,8	0,09
160,1	19,5	20,9	0,07
180,1	22	23,4	0,06
200,5	24,4	26,2	0,07
250,8	29,9	32,3	0,08
300,4	35,9	37,9	0,05
350,8	43,1	46,7	0,08
400,7	49,9	52,6	0,05

Tablo yer alan %fark hesaplanırken denklem 5.19 kullanılmıştır.

$$\%fark = \left(\frac{\%60 \text{ Nikel Değeri} - \%40 \text{ Nikel Değer}}{\%60 \text{ Nikel Değeri}} \right) \quad (5.19)$$

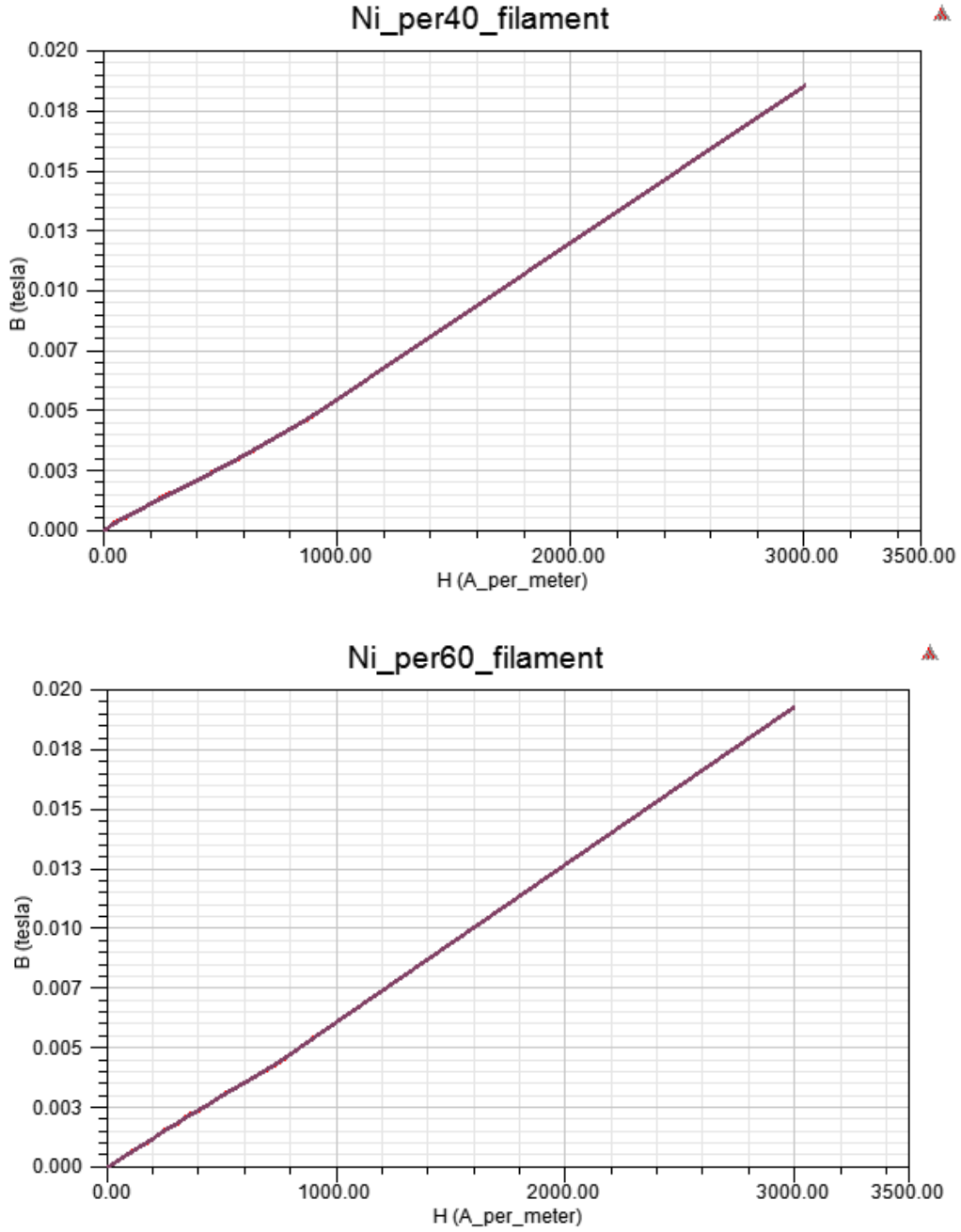
5.3. SONLU ELEMANLAR ANALİZ SONUÇLAR

Deneyssel ölçümler ile elde edilen BH eğrisi ve test amaçlı üretilen RB'lerin boyut ve malzeme özellikleri dikkate alınarak, tez kapsamında önerilen esnek nüveli RB'in 3D modeli sonlu elemanlar analizi ile çözüm yapan paket bir programda oluşturulmuştur. Elde edilen modelin görüntüsü Şekil 6.3'te görülmektedir. Modelde sonuçları daha hızlı alabilmek için RB'nin sekonder sargısı tek sarım olarak düşünülmüş ve sonuçlar sarım sayısı ile çarpılarak elde edilmiştir. Sonlu elemanlar analizinde 3 farklı nüve için analizler yapılmıştır. İlk aşamada geleneksel hava nüveli RB modeli oluşturulmuştur. Bunun için şekil 5.3.'de gösterilen esnek RB esnek nüve malzemesi hava olarak seçilmiştir.



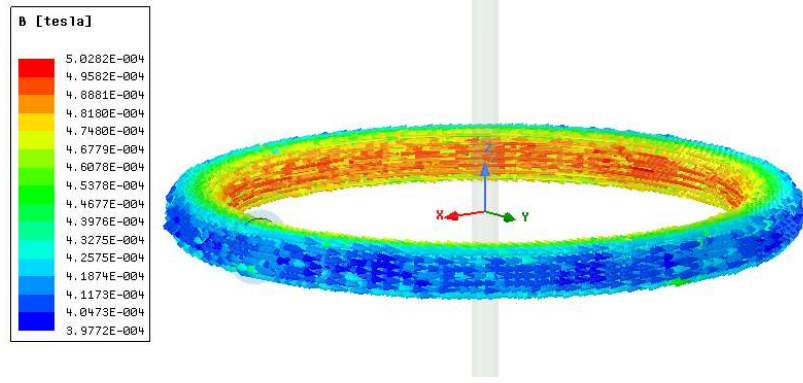
Şekil 5.3. Geliştirilen RB'nin 3D görüntüsü

Ardından esnek nüve %40 nikel alaşımlı ve %60 nikel alaşımlı olacak şekilde deneysel ölçümler ile elde edilen BH eğrileri dikkate alınarak oluşturulmuştur. Oluşturulan BH eğrileri Şekil 5.4.'te görülmektedir.

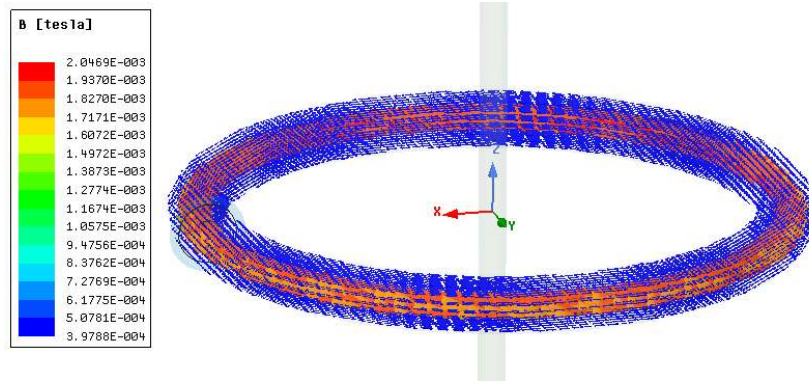


Şekil 5.4. %40 ve %60 nikel alaşımlı filamentin BH eğrisi

Hava nüveli ve nikel oranı değiştirilerek elde edilen esnek nüvelerden oluşturulan RB'lerin üzerinde 100A'lık primer akımının etkisi incelendiğinde Nikel oranı arttıkça manyetik akı yoğunluğunun arttığı görülmüştür. Şekil 5.5. (a)'da görüldüğü üzere, 100A'lık primer akımının hava nüveli RB üzerindeki manyetik akı yoğunluğu en fazla 0.5 mT civarında iken, bu değer (b)'de görüleceği gibi %40 nikel alaşımlı RB'de 2,04 mT ve (c) de görüleceği gibi de %60 nikel alaşımlı RB'de 2,37 mT'a ulaşmıştır.

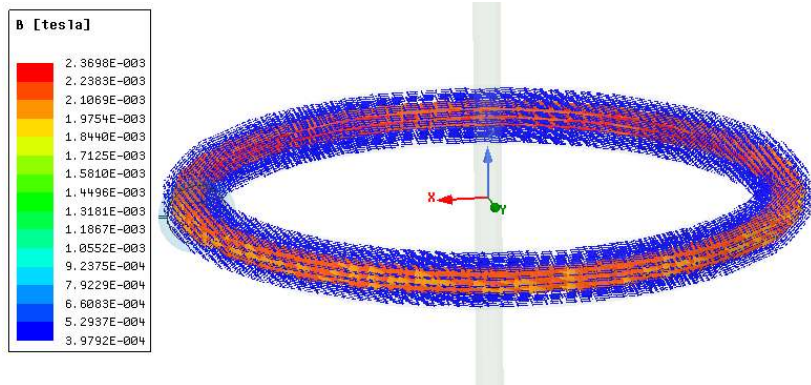


(a) Hava nüveli RB üzerindeki manyetik akı yoğunluğu



(b) %40 nikel alaşım nüveli RB üzerindeki manyetik akı yoğunluğu

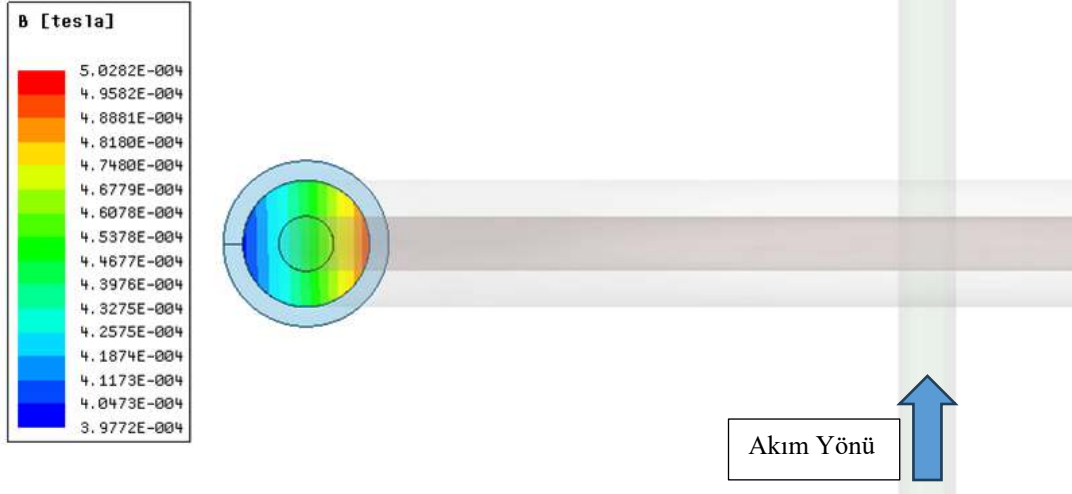
(a)



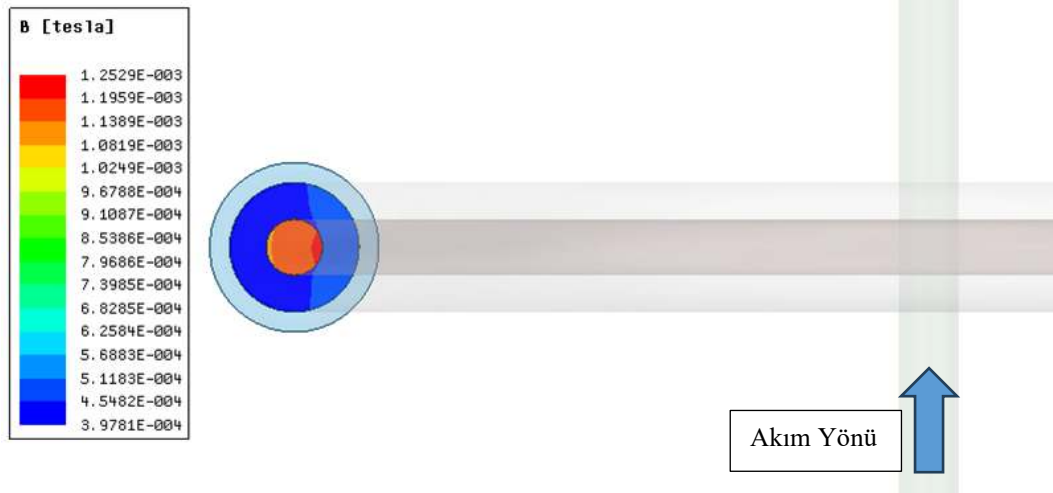
(c) %60 nikel alaşım nüveli RB üzerindeki manyetik akı yoğunluğu

Şekil 5.5. (a) hava nüveli, (b) %40 nikel alaşımlı ve (c) %60 nikel alaşımlı RB'nin 100 A primer akımında manyetik akı yoğunlukları

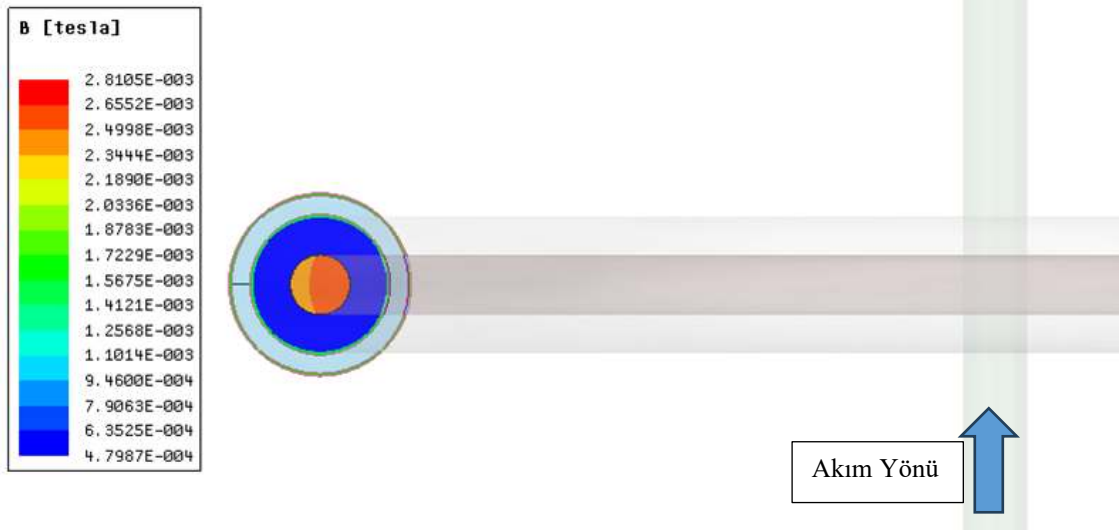
Manyetik akı yoğunluğu arttıkça RB'nin sekonderinde indüklenen gerilim değerleri de artacaktır. Şekil 5.6.'da yine 100A primer akımında RB nüvesinin kesit alanındaki akı yoğunlukları görülmektedir. Faraday kanununa göre bir sargıda indüklenen gerilim sargı içerisindeki zamanla değişen manyetik akı ile ilişkilidir.



(a) Hava nüveli RB



(b) %40 Nikel alaşımlı RB



(c) %60 Nikel alaşımlı RB

Şekil 5.6. (a) hava nüveli, (b) %40 ve (c) %60 nikel alaşımlı RB'nin 100 A primer akımında kesit akı yoğunlukları

Çizelge 5.9.'da Hava Nüveli, %40 ve %60 Nikel alaşımlı RB'nin deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen sekonder gerilim değerlerinin karşılaştırmalı olarak değerleri yer almaktadır.

Çizelge 5.9. Deneysel ve nümerik hesaplama sonuçlarının karşılaştırılması

Primer akımı (A)	Sekonder gerilimi (mV)					
	Hava Nüveli		%40 Nikel		%60 Nikel	
	Deneysel	SEA	Deneysel	SEA	Deneysel	SEA
60,2	6,4	4,6	7,6	7,5	7,9	7,8
100,2	10,2	7,6	12,7	12,1	13,7	13,1
200,5	19,7	15,3	24,4	24,3	26,2	25,6
300,4	29,7	22,9	35,9	36	37,9	38,4
400,7	39,5	30,5	49,9	50	52,6	52,8

Hava nüveli RB'nin ölçüm ve hesaplama sonuçları incelendiğinde, SEA sonuçlarının deney sonuçlarına göre %20-30 oranında daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun birincil nedeni, hava nüveli RB'de kaçak akılar yüksek olduğundan nümerik yaklaşımda istenilen hassasiyeti elde etmek zordur. Mesh ağının çok hassas olması gerekir. Bu farkın ikinci nedeni ise ölçülen gerilim seviyeleri çok düşük olduğundan ölçüm hataları da olabilir. Nitekim deneyde uygulanan gerilim seviyesi arttıkça sonuçlar birbirine yaklaşmaktadır.

Aynı primer akımında daha yüksek gerilimlerin ölçülmesi, analog dijital dönüştürücünün çözüm aralığı düşürdüğünde, ölçüm hassasiyetini arttıracaktır. 400A'e kadar yapılan deneysel ölçümlerde BH eğrisindeki doğrusallık değişmediğinden tasarlanan RB'lerin hava nüveli geleneksel RB ile aynı tepkiyi verdiği tespit edilmiştir.

Tasarlanan modellerin öngörü doğruluklarının karşılaştırılması amacıyla çeşitli istatistikler kullanılmaktadır. Bu bağlamda "Ortalama Mutlak Yüzde Hata" (MAPE) ölçütü, literatürde performans ölçütleri arasında en çok tercih edilen ölçütlerden biridir.

Hava nüveli, %40 ve %60 nikel alaşımlı tasarlanan RB'lerin deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile elde edilen sekonder gerilim değerleri MAPE (%) değerleri incelenmiştir. Çizelge 5.10.'da hava nüveli, %40 ve %60 nikel alaşımlı tasarlanan RB'lerin deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile elde edilen sekonder gerilim değerleri MAPE (%) değerleri yer almaktadır. MAPE (%) değerleri hesaplanırken denklem 6.1 kullanılmıştır;

$$MAPE = \left(\frac{1}{n}\right) \times \sum \left(\frac{|deneysel - SEA|}{|deneysel|}\right) \times 100 \quad (6.1)$$

Burada "n" örneklem büyüklüğü, "deneysel" deneysel ölçülen veri değeri, "SEA" sonlu elemanlar yöntemi ile ölçülen veri değeridir.

Çizelge 5.10. Deneysel ve nümerik hesaplama sonuçlarının karşılaştırılması ve MAPE (%) değeri

Primer akımı (A)	Hava Nüveli			%40 Nikel			%60 Nikel		
	Deneysel	SEA	MAPE (%)	Deneysel	SEA	MAPE (%)	Deneysel	SEA	MAPE (%)
60,2	6,4	4,6	24,32	7,6	7,5	1,38	7,9	7,8	0,4
100,2	10,2	7,6		12,7	12,1		13,7	13,1	
200,5	19,7	15,3		24,4	24,3		26,2	25,6	
300,4	29,7	22,9		35,9	36		37,9	38,4	
400,7	39,5	30,5		49,9	50		52,6	52,8	

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada şönt ölçüm akım transformatörü, hall etkili sensör ve rogowski bobinin avantaj ve dezavantajlarına değinilmiştir. RB diğer ölçüm yöntemleriyle karşılaştırıldığında manyetik bir çekirdeğe sahip olmadığından daha geniş bir bant aralığında ölçüm yapabilmesi, doyuma gitmemesi, lineer olması, arızalandığında değişim maliyetinin düşük olması sebebiyle tercih edilmiştir. Akım transformatörüne göre boyut ve maliyet gibi avantajlara sahip olduğu ve hall etkili sensörlere göre daha esnek bir kullanım sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca literatür taramasında elde edilen bulgulara ülkemizde bu ölçme yöntemine ilişkin çalışmaların az olduğu, ülkemizde de inceleme ve gelişim sağlanması yönünde göz önüne çıkarılması amaçlanmıştır.

Tasarlanan RB nüvesinde %40 ve %60 nikel alaşımlı filament kullanılarak esnek bir ferromanyetik nüve üretilmiştir. Laboratuvar koşullarında 400A'e kadar yapılan deneylerde geliştirilen RB'in doğrusal tepki verdiği ve hava nüveli RB'e göre ölçülen gerilimin ortalama %25 oranında arttırıldığı görülmüştür. Bu da ölçüm hassasiyetine katkı sağlayacaktır. Analitik sonuçlarla elde edilen B-H eğrisinde tasarlanan nüvenin ölçülen amper aralığında doyuma gitmediği gözlemlenmiş ve literatür çalışmalarında yer alan lineerlik özelliği ispatlanmıştır.

Hava nüveli, %40 ve %60 nikel alaşımlı tasarlanan RB'lerin deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile elde edilen sekonder gerilim değerleri MAPE (%) değerleri incelendiğinde, %40 ve %60 nikel alaşımlı RB de bulunan sonuçlar %10'un altında olduğundan dolayı SEA'da oluşturulan modelin "çok iyi" olarak sınıflandırabileceği tespit edilmiştir.

6.1. Öneriler

- Önerilen esnek ferromanyetik nüveli RB pek çok akım ölçüm sistemlerinde farklı akım aralıkları için uygun manyetik geçirgenliği belirlenerek tasarlanıp geliştirilebilir.
- Yüksek akımlarda ölçüm yapıldığında doğrusallığı hususunda daha ispatlayıcı grafik ve değerler elde edilebilir.

- RB nüvesinde farklı ferromanyetik malzemeler kullanılarak elde edilen sekonder gerilimleri kıyaslanabilir ve nüvenin doyuma gidip gitmediği tespit edilebilir.
- Aynı zamanda tez içeriğinde belirtilen bir entegratör devresiyle de daha hassas ölçümler gerçekleştirilebilir.
- Primer sargının RB içerisindeki açısı ve konumunun ölçüm hassasiyetine etkisi hem analitik hem de nümerik olarak incelenebilir.

7. KAYNAKLAR

- [1] D. Ü. C. Gezeğin, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Enerji İletimi Ders Notları*.
- [2] M. Y. Hökelek, “Türkiye Elektrik Ve Enterkonnekte İletim Sistemi,” Kayseri , 2004.
- [3] T. E. P. D. Kurumu, “Elektrik Piyasası 2016 Yılı Piyasa Gelişim Raporu,” 2016.
- [4] T. E. P. D. Kurumu, “Elektrik Piyasası 2022 Yılı Piyasa Gelişim Raporu,” 2022.
- [5] “Enerji Analizörü Şebeke Analizörü Nedir?,” [Çevrimiçi]. Available: <https://www.ent.es.com.tr/enerji-analizoru-sebeke-analizoru-nedir/>. [Erişildi: 2023].
- [6] B. Düzgün, “Türkiye Elektrik İletim Ve Dağıtım Şebekesinin Enerji Verimliliğinin Değerlendirilmesi ve 2023 Projeksiyonları,” *DergiPark Akademik*, cilt 21, no. 3, 2018.
- [7] D. B. ALBAYRAK, “T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, “2017 yılı bütçe sunumu: T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanı Sayın Dr. Berat ALBAYRAK’ın 2017 Yılı Bütçesini TBMM Plan ve Bütçe Komisyonu’na Sunuş Metni”,” Ankara, 2016.
- [8] B. T. E. B. Mirko Marracci, “Study and characterization of a Rogowski coil with superparamagnetic magnetite core,” *IEEE Xplore*, 2017.
- [9] M. N. K. H. Rohani, C. C. Yii, M. Isa, S. I. S. Hassan, A. Mukhtaruddin, N. A. Yusof ve B. Ismail, “Effect of Unshielded and Shielded Rogowski Coil Sensor Performance for Partial Discharge Measurement,” *IEEE Xplore*, 2015.
- [10] C. Wei, Ç. Lin, M. Boyang, G. Yuntao ve Y. Shi, “Development of Magnetic Core Framework for Flexible Rogowski Coil Current Transducer,” %1 içinde *IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Singapore, 2020.
- [11] X. X. Y. H. Y. Q. G. S. a. X. J. Yadong Liu, “A Novel Transient Fault Current Sensor Based on the PCB Rogowski Coil for Overhead Transmission Lines,” *School of Electronic Information and Electrical Engineering*, 2016.
- [12] D. X. Y. L. Z.S. Zhang, “Rogowski air coil sensor technique for on-line partial discharge measurement of power cables,” *Published in IET Science, Measurement and Technology*, 2018.
- [13] E. Şimşek, “Elektriksel Kısmi Deşarj Olayı,” *Türk Prysmian Kablo ve Sistemleri A.Ş.*.
- [14] J.-W. W. W.-D. D. Y. J. H.-B. Z. Q.-J. L. a. A.-C. Q. Ruo-Yu Han, “Hybrid PCB Rogowski Coil for Measurement of Nanosecond-Risetime Pulsed Current,” *IEEE Transactions On Plasma Science*, no. 43, 2015.
- [15] W. J. C. B. W. L. I. S. O. H. S. K. I. J. M. Sohn, “Development of current and voltage sensor for distribution switchgear,” *IEEE*, 2003.
- [16] S. A. Mahmut Kabakulak, “Numerical Analysis Of The Harvester Having Toroidal Structure And Examination Of The Application Results,” *DergiPark Akademik*, 2020.
- [17] L. K. M. I. M. H. Muhammad Shafiq, “Directional Calibration of Rogowski Coil for Localization of Partial Discharges in Smart Distribution Networks,” *ResearchGate*, 2012.
- [18] R. S. J. H. a. R. P. Karel Draxler, “Calibration of Rogowski Coils With an Integrator at High Currents,” *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, 2011.
- [19] M. T. B. a. D. S. Ljubomir A. Kojovic, “Innovative Differential Protection of Power Transformers Using Low Energy Current Sensors,” *Industry Applications Society Annual Meeting*, 2009.
- [20] “akim-sensorleri-ve-donusturuculeri-kullanarak-akim-nasil-olculur,” [Çevrimiçi]. Available: <https://rmc.com.tr/akim-sensorleri-ve-donusturuculeri-kullanarak-akim-nasil-olculur/>. [Erişildi: 2023].

- [21] “Akım Ölçümü İçin Geliştirilmiş Dört Etkin Yöntem,” [Çevrimiçi]. Available: <http://blog.wago.com.tr/akim-olcumu-icin-gelistirilmis-4-etkin-yontem/>. [Erişildi: 2023].
- [22] “PMC-D721MD, DC Analizör,” [Çevrimiçi]. Available: <https://www.sge.com.tr/urundetay-pmc-d721md-dc-analizor-247-531.html>. [Erişildi: 2023].
- [23] “Akım Ölçümü,” [Çevrimiçi]. Available: <https://320volt.com/akim-olcumu/>. [Erişildi: 2023].
- [24] K. T. T. Ç. A. Gökhan Gökmen, “HALL ETKİLİ AKIM TRANSFORMATÖRÜNÜN Hall Etkili Akım Transformatörünün Spektral ve İstatistiksel Analizi,” *e-Journal of New World Sciences Academy*, 2008.
- [25] “Hall Etkili Pensampermetrelerin İç Kısımı,” [Çevrimiçi]. Available: <https://www.fluke.com/tr-tr/bilgi-edinin/blog/pens/hall-etkili-pensampermetrelerin-ic-kism>. [Erişildi: 2023].
- [26] S. D. T. Dewi, C. Panatarani ve I. M. Joni, “Design and development of DC high current sensor using Hall-Effect method,” 2016.
- [27] K.-L. C. a. N. Chen, “A New Method for Power Current Measurement Using a Coreless Hall Effect Current Transformer,” *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, 2011.
- [28] H. Çınar, *Ölçme Esaslı Akım Transformatörlerinde Çalışma Bölgesi Ve Kararlılık Analizi*, 2016.
- [29] D. E. K. B. Dr.Öğr.Üyesi Şule Kuşdoğan, *Elektrik Ölçme Ders Notları*, 2018.
- [30] “Yüksek Gerilim Akım Trafosu,” [Çevrimiçi]. Available: <https://www.trafo-bakim.com/yuksek-gerilim-akim-trafosu/>. [Erişildi: 2023].
- [31] M. E. Bakanlığı, *Elektrik Elektronik Teknolojisi Modüler Ölçüm Hücreleri*, Ankara, 2011.
- [32] E. M. A. Toruş, *Enerji Sistemlerinde Geçici Olayların Korumaya Etkisi/Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
- [33] U. Elektrik, “Kuru Tip Akım Transformatörü,” [Çevrimiçi]. Available: <https://www.ulsoyelektrik.com.tr/tr/urunler/orta-gerilim-dagitim-transformatorleri/kuru-tip-dagitim-transformatoru>. [Erişildi: 2023].
- [34] S. Üzel, “Rogowski Bobini Akım Sensörleri”.
- [35] A. M. M. A. F. a. H. M. Mohammad Hamed Samimi, “The Rogowski Coil Principles and Applications: A Review,” *IEEE SENSORS JOURNAL*, cilt 15, no. 2, p. 8, 2015.
- [36] D. W. Y. David E. Shepard, “An Overview Of Rogowski Coil Current Sensing Technology”.
- [37] *Accuenergy, AcuCT Flex Series Rogowski Coil CT Datasheet*.
- [38] “Rogowski Bobini,” [Çevrimiçi]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Rogowski_coil.
- [39] İ. Durnasuyu, *ELEKTRİKSEL KISMİ BOŞALMALAR Elektriksel Kısmi Boşalmalar*, Kocaeli, 2020.
- [40] Y. D. D. S. K. A. G. B. T. Prof. Dr. Haldun KARACA, “Yüksek Bant Genişliği için Yeni Bir Akım Transformatörü”.
- [41] R. P. Jan Hlavacek, “The Rogowski Coil Design Software,” *ResearchGate*, 2018.
- [42] “Demir,” [Çevrimiçi]. Available: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Demir>. [Erişildi: 2023].
- [43] “MTA Madenler Kobalt,” [Çevrimiçi]. Available: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/metalik-madenler/kobalt#:~:text=Kobalt%C4%B1n%2C%20atom%20a%C4%9F%C4%B1r%C4%B1%C4%9F%C4%B1%2058%2C93,90%20gr%2Fcm3't%C3%BCr..> [Erişildi: 2023].
- [44] “Vikipedi Nikel Nedir,” [Çevrimiçi]. Available: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Nikel>. [Erişildi: 2023].
- [45] “Vikipedi manyetit nedir,” [Çevrimiçi]. Available: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Manyetit>. [Erişildi: 2023].
- [46] D. A. Üniversitesi, *Elektriksel Büyüklüklerin Ölçülmesi Ders Notu*.
- [47] H. Bluhm, *Pulsed power systems*, Springer 2006.

- [48] “3Devo ile Yeni Nesil Filament Üretimi,” [Çevrimiçi]. Available: <https://3d3teknoloji.com/blog/3devo-ile-yeni-nesil-filament-uretimi/>. [Erişildi: 2023].
- [49] J. P. Omid Zandi, “Bearing Fault Detection Using Hall Effect Sensors and a Two-Stage Wavelet Transform,” %1 içinde *26th Iranian Conference on Electrical Engineering*, Tehran, Iran, 2018.
- [50] E. T. Alex Simpkins, “Position Estimation and Control of Compact BLDC Motors Based on Analog Linear Hall Effect Sensors,” %1 içinde *American Control Conference Marriott Waterfront*, USA, 2010.
- [51] “Rigit Rogowski Coil,” 2023. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.zntar.com/rigid-rogowski-coil/844--copper-air-core-coils-rigid-rogowski-coil-ct.html>.
- [52] K. T. T. Ç. A. Gökhan Gökmen, “Natural And Applied Sciences Electric And Electronic Engineering,” %1 içinde *ISSN:1306-3111 e-Journal of New World Sciences Academy 2008*, 2007.
- [53] S. Güldar, *Ölçü Transformatörleri Elektronik Ölçü Trafoları*, 2012.



8. EKLER

8.1. EK- A : WEIGEL marka B100A/60MV Kodlu Şönt Direncin Datasheeti

Application

Shunts provide an accurate DC millivolt signal to drive ammeter indicators, overload protection and control devices, especially for higher amperage. They supply a voltage drop proportional to the DC current which is measured and indicated by a moving-coil meter with the dial calibrated in amps.

In accordance with DIN standard 43 703 shunts are available from 1 A up to 15,000 A with an accuracy of 0.5%. Standard voltage drop is 60 mV or 150 mV. Intermediate current ratings, other voltage outputs, better accuracy and purpose-built shunts can be supplied.

Shunts are manufactured in three different format versions depending on current ratings.

Operating Principle

The current passing through the shunt produces a proportional voltage drop. A moving coil instrument connected to the shunt measures the voltage drop across the shunt terminals.

Shunts are calibrated in such a way that they produce an accurately defined voltage drop (60 mV, 150 mV or other).

General Data

format version A	insulating base mounted shunts clamping to DIN mounting rail or wall mounting (up to 25 A / 60, 100, 150 or 300 mV); without insulating base (30 ... 150 A) ♦
format version B	L-profile end blocks
format version C	T-profile end blocks
material	manganin
resistance bars and blocks	
format version A	high conductivity brass
format version B	high conductivity brass/solid copper
format version C	solid copper
base material	Lexan, black
format version A	self-extinguishing to UL rating 94 V-0
connections	thread screws
current	please refer to "Dimensions"
voltage	M5x8
mounting	screw mounting (M8 max.) or
format version A	clamping to DIN mounting rail (to DIN EN 50 022 - 35)
enclosure code	IP 00
dimensions	please refer to "Dimensions"
weight	please refer to table below
rated current ♦	weight approx. for rated voltage drop ♦
	60 mV 100 mV ¹⁾ 150 mV 300 mV ¹⁾

1 A	0.12 kg	0.12 kg	0.12 kg	0.14 kg
1.5 A	0.13 kg	0.12 kg	0.12 kg	0.14 kg
2 A ^{1) 2)}	0.13 kg	0.12 kg	0.12 kg	0.14 kg
2.5 A	0.12 kg	0.12 kg	0.12 kg	0.14 kg
3 A ^{1) 2)}	0.12 kg	0.12 kg	0.12 kg	0.14 kg
4 A	0.13 kg	0.12 kg	0.12 kg	0.14 kg
5 A ^{1) 2)}	0.12 kg	0.12 kg	0.12 kg	0.14 kg
6 A	0.12 kg	0.12 kg	0.13 kg	0.14 kg
8 A ^{1) 2)}	0.13 kg	0.13 kg	0.13 kg	0.15 kg
10 A	0.13 kg	0.13 kg	0.13 kg	0.15 kg
12 A ^{1) 2)}	0.13 kg	0.13 kg	0.13 kg	0.15 kg
15 A	0.13 kg	0.13 kg	0.13 kg	0.15 kg
20 A ^{1) 2)}	0.13 kg	0.14 kg	0.14 kg	0.16 kg
25 A	0.13 kg	0.14 kg	0.14 kg	0.16 kg
30 A ^{1) 2)}	0.12 kg	0.13 kg	0.15 kg	0.20 kg
40 A	0.12 kg	0.14 kg	0.16 kg	0.20 kg
50 A ^{1) 2)}	0.12 kg	0.14 kg	0.16 kg	0.20 kg

rated current ♦	weight approx. for rated voltage drop ♦			
	60 mV	100 mV ¹⁾	150 mV	300 mV ¹⁾
60 A	0.12 kg	0.14 kg	0.17 kg	0.20 kg
80 A ^{1) 2)}	0.12 kg	0.15 kg	0.18 kg	0.20 kg
100 A	0.12 kg	0.17 kg	0.20 kg	0.25 kg
150 A	0.13 kg	0.20 kg	0.23 kg	0.30 kg
200 A ^{1) 2)}	0.61 kg	0.65 kg	0.68 kg	0.80 kg
250 A	0.61 kg	0.65 kg	0.68 kg	0.80 kg
300 A ^{1) 2)}	0.61 kg	0.68 kg	0.72 kg	0.90 kg
400 A	0.83 kg	1.00 kg	1.05 kg	1.30 kg
500 A ^{1) 2)}	0.83 kg	1.10 kg	1.15 kg	1.40 kg
600 A	0.85 kg	1.11 kg	1.16 kg	1.60 kg
800 A ^{1) 3)}	0.90 kg	1.12 kg	1.30 kg	1.80 kg
1,000 A	1.45 kg	2.00 kg	2.15 kg	2.80 kg
1,200 A ^{1) 2)}	1.45 kg	2.10 kg	2.25 kg	3.10 kg
1,500 A	1.96 kg	2.50 kg	3.10 kg	3.70 kg
2,000 A ¹⁾	2.30 kg ³⁾	2.80 kg ³⁾	5.10 kg ²⁾	6.40 kg ²⁾
2,500 A	2.90 kg	3.20 kg	5.20 kg	6.00 kg
3,000 A ¹⁾	3.00 kg ³⁾	3.50 kg ³⁾	9.80 kg ²⁾	11.7 kg ²⁾
4,000 A	4.25 kg	5.80 kg	10.5 kg	13.1 kg
5,000 A ¹⁾	4.30 kg ³⁾	7.30 kg ³⁾	13.4 kg ²⁾	16.8 kg ²⁾
6,000 A	10.5 kg	12.0 kg	15.0 kg	17.7 kg
8,000 A ¹⁾	12.0 kg ³⁾	—	25.4 kg ²⁾	—
10,000 A	21.0 kg	—	28.0 kg	—
15,000 A	32.0 kg	—	—	—
20,000 A ¹⁾	44.0 kg	—	—	—

1) ratings deviating from DIN standard

2) dimensions equal to next higher current rating

3) dimensions equal to next lower current rating

overload range (according to DIN EN 60 051)

continuously 1.2 times rated current

5 s max. ≤ 2,000 A 5 times rated current

>2,000 ... 10,000 A 2 times rated current

Accuracy at Reference Conditions

accuracy class 0.5 ♦

reference conditions

ambient temperature 23°C ± 1K

Environmental

climatic suitability climatic class 3 acc. to VDE/VDI 3540

operating temperature range -10 ... +55°C

storage temperature range -25 ... +65°C

temperature range

relative humidity ≤ 75% annual average, non-condensing

Rules and Standards

DIN 43 703	Shunts
DIN EN 60 051	direct acting indicating electrical measuring instruments and their accessories
DIN EN 50 022-35	mounting rails

Options

rated voltage drop	on request
rated current	on request
accuracy	class 0.2
insulating base	suitable for shunts 30 ... 150 A / 60 mV others on request
purpose built shunts	on request

♦ for other ratings refer to "Options"



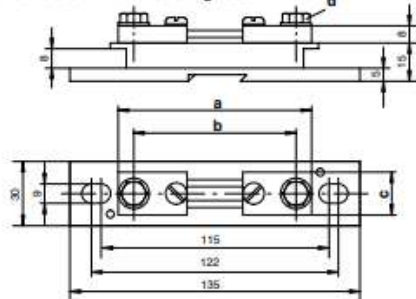
Shunts Class 0.5

Accessory

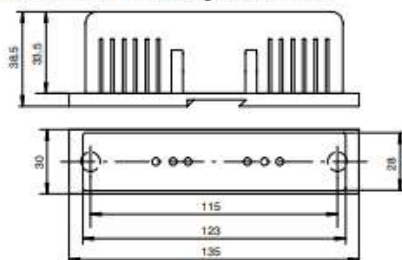
cover for shunts with insulating base
1 ... 25 A / 60 mV – 100 mV – 150 mV
30 ... 150 A / 60 mV

Dimensions

format version A with insulating base



format version A with insulating base and cover



rated voltage drop	60 ... 300 mV	60 mV
dimensions (in mm)	1 ... 25 A	30 ... 150 A
a	90	100
b	78	80
c	20	20
d	M5x12	M8x16

Attaching



Disattaching

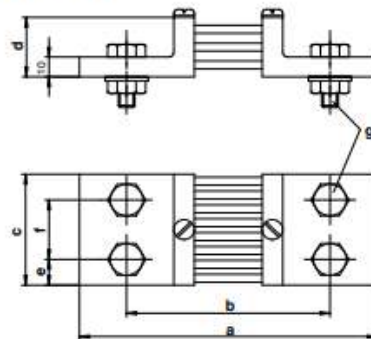


format version A without insulating base

rated voltage drop	100 mV	150 mV	300 mV
dimensions (in mm)	30 ... 150 A	30 ... 150 A	30 ... 150 A
a	145	225	384
b	125	205	364
c	25	25	25
d	M8x16	M8x16	M8x16

Dimensions

format version B



rated voltage drop 60 mV

dimensions (in mm)	200 A 250 A	400 A 600 A	1.000 A	1.500 A	2.500 A
a	145	145	165	165	165
b	105	105	115	115	115
c	30	40	60	90	120
d	30	30	30	30	30
e	15	20	30	21	30
f	—	—	—	48	60
g	M12x40	M16x45	M20x50	M16x45	M20x50
number of current connections	2x 1	2x 1	2x 1	2x 2	2x 2

rated voltage drop 100 mV

dimensions (in mm)	200 A 250 A	400 A 600 A	1.000 A	1.500 A	2.500 A
a	190	190	210	210	210
b	150	150	160	160	160
c	30	40	60	90	120
d	30	30	30	30	30
e	15	20	30	21	30
f	—	—	—	48	60
g	M12x40	M16x45	M20x50	M16x45	M20x50
number of current connections	2x 1	2x 1	2x 1	2x 2	2x 2

rated voltage drop 150 mV

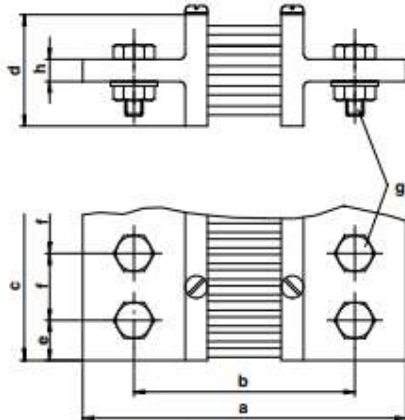
dimensions (in mm)	200 A 250 A	400 A 600 A	1.000 A	1.500 A	2.500 A
a	270	270	290	290	290
b	230	230	240	240	240
c	30	40	60	90	120
d	50	50	60	90	120
e	15	20	30	21	30
f	—	—	—	48	60
g	M12x40	M16x45	M20x50	M16x45	M20x50
number of current connections	2x 1	2x 1	2x 1	2x 2	2x 2

rated voltage drop 300 mV

dimensions (in mm)	200 A 250 A	400 A 600 A	1.000 A	1.500 A	2.500 A
a	429	429	449	449	449
b	389	389	399	399	399
c	30	40	60	90	120
d	50	50	60	90	120
e	15	20	30	21	30
f	—	—	—	48	60
g	M12x40	M16x45	M20x50	M16x45	M20x50
number of current connections	2x 1	2x 1	2x 1	2x 2	2x 2

Dimensions

format version C



rated voltage drop 60 mV

dimensions (in mm)	4,000 A	6,000 A	10,000 A	15,000 A	20,000 A
a	165	175	185	185	185
b	115	125	135	135	135
c	120	154	206	310	362
d	60	130	170	170	170
e	30	25	25	25	25
f	60	52	52	52	52
g	M20x50	M20x75	M20x80	M20x80	M20x80
h	15	25	30	30	30

number of current connections 2x 2 2x 3 2x 4 2x 6 2x 7

rated voltage drop 100 mV

dimensions (in mm)	2,500 A	4,000 A	6,000 A
a	210	220	220
b	160	170	170
c	120	120	154
d	60	130	130
e	30	30	25
f	60	60	52
g	M20x50	M20x50	M20x75
h	15	25	25

number of current connections 2x 2 2x 2 2x 3

rated voltage drop 150 mV

dimensions (in mm)	1,500 A	2,500 A	4,000 A	6,000 A	10,000 A
a	290	290	300	300	310
b	240	240	250	250	260
c	90	120	120	154	206
d	60	60	130	130	170
e	21	30	30	25	25
f	48	60	60	52	52
g	M16x60	M20x60	M20x75	M20x75	M20x80
h	15	15	25	25	30

number of current connections 2x 2 2x 2 2x 2 2x 3 2x 4

rated voltage drop 300 mV

dimensions (in mm)	1,500 A	2,500 A	4,000 A	6,000 A
a	449	449	459	459
b	399	399	409	409
c	90	120	120	154
d	60	60	130	130
e	21	30	30	25
f	48	60	60	52
g	M16x60	M20x60	M20x75	M20x75
h	15	15	25	25

number of current connections 2x 2 2x 2 2x 2 2x 3

Ordering Information

type	shunt
rated voltage drop	60 mV 100 mV 150 mV 300 mV purpose built on request **)
rated current	please refer to table inside purpose built on request **)
accuracy	class 0.5 *) class 0.2
insulating base	included (up to 25 A *) not included (more than 25 A *) included (more than 25 A)
cover	none *) for shunts with insulating base
purpose built	on request **)

*) standard

**) Please clearly add the desired specifications.

ordering example

shunt, rated voltage drop 60 mV, rated current 1,000 A, accuracy class 0.5

WEIGEL – MESSGERÄTE GmbH

P.O.B. 720 154 • D-90241 Nürnberg • Telephone: 0911 / 423 47-0
Erlenstraße 14 • D-90441 Nürnberg • Fax: 0911 / 423 47-39
Internet: <http://www.weigel-messgeraete.de>
e-mail: vertrieb@weigel-messgeraete.de



– specifications subject to change without notice; date of issue 06/07 –

8.2. Ek-B : Fluke i2500-18 iFlex® Esnek Akım Probu Ölçüleri

FLUKE.

Özellikler: i2500-18 iFlex™ Flexible Current Probes

Specifications			
i2500-18 and i2500-10	Range	Resolution	Accuracy
AC Current*	2500 A	0.1 A	3% ± 5 digits**
Frequency*	500 Hz	0.1 Hz	0.5% ± 5 digits
External magnetic field rejection (with cable >10 cm from the coupling)	40 dB		
Inrush*	•		
Safety rating	CAT III 1000 V, CAT IV 600 V		

*When used with compatible Fluke meter. Accuracy stated includes probe and meter accuracy.

** For position accuracy at non-optimum positions, see Position sensitivity specifications table "A"



Position sensitivity specifications

Distance from optimum	i2500-10	i2500-18	Additional iFlex error
A	0.5 in (12.7 mm)	1.4 in (35.6 mm)	± 0.5%
B	0.8 in (20.3 mm)	2.0 in (50.8 mm)	± 1.0%
C	1.4 in (35.6 mm)	2.5 in (63.5 mm)	± 2.0%

Measurement uncertainty assumes centralized primary conductor at optimum position, no external electrical or magnetic field, and within operating temperature.

8.3. Ek-C Deneysel Sonuçlara Göre Elde Edilen Sekonder Gerilimi (Endüklenen Gerilim)

a) Tasarlanan Hava Nüveli RB İçin Elde Edilen Değerler

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
5	22	2,51 mV	50 Hz 1. Tur Max 35A Hava
10	61	2,62 mV	
15,1	60	2,89 mV	
20,1	70	3,12 mV	
25,3	99	3,51	
30	117	3,84	
35,1	136	4,23	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
40,1	78	4,72	50 Hz 2. Tur Max 75A Hava
45,4	88	5,09	
50,3	97	4,45	
55,1	106	5,78	
60,5	117	6,49	
65,2	126	6,97	
70	136	7,34	
75,2	146	7,79	
35	68	3,34	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
80,1	102	8,16	50 Hz 3. Tur Max 115A Hava
85,2	109	9,15	
90,3	116	9,42	
95,14	122	9,91	
100,6	129	10,3	
105,2	136	10,9	
110,1	142	11,3	
115	149	11,8	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Endüklenen Gerilim	
120,1	115	11,4	50 Hz 4. Tur Max 150A Hava
125,3	120	12	
130,2	125	12,3	
135,3	131	12,7	
140,4	136	13,2	
145,1	141	13,9	
150,3	147	14,1	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
155,2	121	15,8	50 Hz 5. Tur Max 185A Hava
160,4	126	16,1	
165,3	130	16,7	
170,3	134	17,1	
175,3	138	17,7	
180,5	143	17,9	
185,6	147	18,7	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
190,3	126	18,7	50 Hz 6. Tur Max 220A Hava
195,4	129	19,3	
200,7	133	19,7	
205,3	137	20,2	
210,9	141	20,8	
215,5	145	21,2	
220,4	148	21,3	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
220,1	126	21,5	50 Hz 7. Tur Max 255A Hava
225,8	130	22,1	
230,5	133	22,5	
235,1	136	22,8	
240,8	140	23,6	
245,3	143	23,9	
250,2	147	24,4	
255,9	151	25,1	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
260,5	135	24,5	50 Hz 8. Tur Max 295A Hava
265,4	138	25,5	
270,2	141	25,9	
275,2	144	26,3	
280,3	147	26,9	
285,4	150	27,4	
290,7	153	27,8	
294,8	155	28	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
300,4	141	29,7	50 Hz 9. Tur Max 335A Hava
305,2	143	30,3	
310,7	146	30,9	
315,6	149	31,5	
320,8	152	31,8	
325,5	155	32,3	
330,8	157	32,9	
335,3	160	33,4	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
340,6	149	33	50 Hz 10. Tur Max 375A Hava
345,8	151	33,4	
350,9	153	33,9	
355,5	156	34,2	
360,4	158	34,9	
365,3	161	35,4	
370,2	164	35,9	
375,9	167	36,2	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
380,9	146	37,8	50 Hz 11. Tur Max 415A Hava
385,7	149	38,2	
390,5	151	38,8	
395,1	153	39,2	
400,6	156	39,7	
405			
410			
415			

b) %40 Nikel Alaşım İçin Elde Edilen Değerler;

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
5	22	2,03	50 Hz 1. Tur Max 35A %40 Nikel
10	42	2,03	
15,2	62	2,29	
20,1	80	2,63	
25,1	99	3,27	
30,2	119	3,83	
35,2	138	4,42	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
40,2	158	4,56	50 Hz 2. Tur Max 75A %40 Nikel
45,4	90	5,86	
50	99	6,27	
55	108	6,84	
60,2	118	7,62	
65	128	8,25	
70,2	138	8,95	
75	147	9,29	
85	168	10,34	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
80	105	10,5	50 Hz 3. Tur Max 115A %40 Nikel
85,2	112	11	
90	118	11,7	
95,2	125	11,8	
100,2	131	12,7	
105,5	138	13,3	
110,5	145	13,9	
115	151	14,2	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
120,6	119	14,5	50 Hz 4. Tur Max 150A %40 Nikel
125	124	15,3	
130,3	129	15,8	
135	133	16,4	
140,5	139	17,2	
145,4	144	17,9	
150,5	149	18,4	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
155,4	125	18,9	50 Hz 5. Tur Max 185A %40 Nikel
160,1	128	19,5	
165,2	132	20,2	
170,6	137	20,6	
175,1	141	21,4	
180,1	145	22	
185,4	149	22,7	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
190,4	1269	23,2	50 Hz 6. Tur Max 220A %40 Nikel
195,8	132	23,7	
200,5	136	24,4	
205,1	139	25,0	
210,6	143	25,6	
215,5	146	26,2	
220,4	150	26,8	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
220,1	125,30	26,2	50 Hz 1. Tur Max 255A %40 Nikel
225,1	134	26,9	
230,6	137	27,4	
235,4	140	28	
240,1	142	28,5	
245,6	146	29,5	
250,8	149	29,9	
255,4	152	30,3	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
260,5	155,139	31,7	50 Hz 8. Tur Max 295A %40 Nikel
265,5	141	32,3	
270,6	144	32,8	
276	147	33,6	
280,8	150	34,2	
285,7	152	34,6	
290,4	155	35,3	
295,2	157	35,9	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
300,4	145	35,9	50 Hz 9. Tur Max 335A %40 Nikel
305,4	147	36,5	
310,9	150	37,1	
315,1	152	37,6	
320,8	155	38,3	
325,7	157	38,9	
330,7	159	39,6	
335,6	162	40,1	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
340,5	163,152	41,3	50 Hz 10. Tur Max 375A %40 Nikel
345,9	155	42,5	
350,8	157	43,1	
355	159	43,5	
360	161	44,2	
365	164	45	
370,1	166	45,6	
375	168	46,1	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
380,2	148,9	47,4	50 Hz 11. Tur Max 415A %40 Nikel
385,5	151	48,1	
390,5	154	48,8	
395,6	156	49,4	
400,7	158	49,9	
405			
410			
415			

c) %60 Nikel Alaşım İçin Elde Edilen Değerler;

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
5,6	25	3,28	50 Hz 1. Tur Max 35A %60 Nikel
10	42	3,35	
15,2	62	3,52	
20,2	82	4,28	
25,2	100	4,62	
30,3	120	4,74	
35,4	139	5,43	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
40,3	80	5,31	50 Hz 2. Tur Max 75A %60 Nikel
45,3	89	6,23	
50	98	6,57	
55,2	108	7,05	
60,2	118	7,99	
65,1	127	8,52	
70,3	137	9,23	
75,2	147	9,75	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
80,4	105	82,0,4	50 Hz 3. Tur Max 115A %60 Nikel
85,1	111	12,1	
90,3	118	12,3	
95	124	13,2	
100,3	131	13,9	
105	137	14,4	
110,2	144	15,1	
115	151	15,5	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
120,3	118	16,1	50 Hz 4. Tur Max 150A %60 Nikel
125,6	123	16,5	
130,2	128	17	
135,4	133	17,8	
140,3	138	18,8	
145	143	19,7	
150,2	148	20,1	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
155,6	124	20,4	50 Hz 5. Tur Max 185A %60 Nikel
160,3	128	20,9	
165,5	132	21,7	
170,3	136	22,4	
175,1	140	21,9	
180,2	144	23,4	
185,3	149	24,1	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
190,2	128	24,7	50 Hz 6. Tur Max 220A %60 Nikel
195,3	132	26,2	
200,5	135	26,2	
205,4	139	27,0	
210,4	142	27,6	
215	146	28,0	
220,7	150	28,9	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
220,2	118,130	25,9,28,5	50 Hz 7. Tur Max 255A %60 Nikel
225,2	133	29	
230,8	136	29,9	
235,4	139	30,3	
240,6	143	31	
245,4	145	31,5	
250,2	148	32,3	
255	151	32,9	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
260,3	137	33,3	50 Hz 8. Tur Max 295A %60 Nikel
265,2	140	33,6	
270,5	144	34,7	
275,6	146	35,3	
280,9	149	35,9	
285,3	151	36,4	
290,6	154	37,1	
295,2	156	37,5	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
300,8	143	37,9	50 Hz 9. Tur Max 335A %60 Nikel
305,3	145	38,3	
310,8	148	38,9	
315,4	151	39,7	
320,2	153	40,4	
325,1	156	41,0	
330,4	158	41,5	
335,6	161	42,2	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
340	151	44,6	50 Hz 10. Tur Max 375A %60 Nikel
345,4	153	45,2	
350,9	156	46,1	
355,8	158	46,7	
360,5	160	47,5	
365,4	162	48,4	
370,2	164	48,6	
375,9	167	49,3	

Pensampermetrenin Ölçtüğü Akım	Giriş Gerilimi Max 150V	Rogowskide Endüklenen Gerilim	
380,7	148	49,9	50 Hz 11. Tur Max 415A %60 Nikel
385,3	150	50,6	
390,4	153	51,3	
395,6	155	52,1	
400,4	157	52,6	
405			
410			
415			

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Gizem Merve Aydın

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2023
Lisans	Elektrik Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2019
Lise		Özel Hafize Okan Anadolu Lisesi	2016

YAYINLAR

[1] G. M. Aydın, “Enerji İletim Ve Dağıtım Hatlarına Uygun Esnek Rogowski Bobin Tasarımı Ve Uygulaması,” *7. International Sciences And Innovation Congress*, Ankara, 2023.