

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**KURU TİP TRANSFORMATÖRLERDE DARBE GERİLİMİ**  
**DAĞILIMININ ÜÇ FARKLI SARGI TİPİ İÇİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MUZAFFER ERDOĞAN**

**BALIKESİR, MAYIS - 2016**

**T.C.**  
**BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**KURU TİP TRANSFORMATÖRLERDE DARBE GERİLİMİ**  
**DAĞILIMININ ÜÇ FARKLI SARGI TİPİ İÇİN İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MUZAFFER ERDOĞAN**

**Jüri Üyeleri: Yrd. Doç. Dr. Mehmet Kubilay EKER (Tez Danışmanı)**

**Doç. Dr. Mutlu BOZTEPE**

**Doç. Dr. Metin DEMİRTAŞ**

**BALIKESİR, MAYIS - 2016**

## KABUL VE ONAY SAYFASI

**Muzaffer ERDOĞAN** tarafından hazırlanan “**KURU TİP TRANSFORMATÖRLERDE DARBE GERİLİMİ DAĞILIMININ ÜÇ FARKLI SARGI TİPİ İÇİN İNCELENMESİ**” adlı tez çalışmasının savunma sınavı 23/05/2016 tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği ile Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Mehmet Kubilay EKER



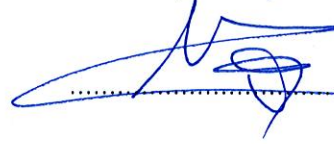
Üye

Doç. Dr. Mutlu BOZTEPE



Üye

Doç. Dr. Metin DEMİRTAŞ



Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Doç. Dr. Necati ÖZDEMİR

.....

**Bu tez çalışması Balıkesir Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından 2014 / 136 ve Balıkesir Elektromekanik Sanayi Tesisleri tarafından 124 proje numarası ile desteklenmiştir.**

## ÖZET

**KURU TİP TRANSFORMATÖRLERDE DARBE GERİLİMİ  
DAĞILIMININ ÜÇ FARKLI SARGI TİPİ İÇİN İNCELENMESİ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MUZAFFER ERDOĞAN  
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI: YRD. DOÇ. DR. M. KUBİLAY EKER)**

**BALIKESİR, MAYIS - 2016**

Anahtarlama olayları ve yıldırım, transformatör sargı uçlarında bir darbe geriliminin oluşmasına neden olmaktadır. Bu darbe geriliminin sargılardaki etkisinin incelenmesi için IEC 60076-3 standartında tanımlanan, 1,2  $\mu$ s'de tepe değerine, 50  $\mu$ s'de ise yarılanma değerine ulaşan bir sinyal, test esnasında transformatörlere uygulanır. Sargılar arasındaki yalıtkan malzemenin kapasitif davranışı ve sargıların endüktif özelliği nedeniyle, bu darbe gerilimi sargılarda yüksek frekanslı akımlar akmasına neden olur.

Anma frekansında çalışan transformatör sargılarındaki gerilim dağılımı doğrusal iken, darbe gerilimi sonucu sargılarda oluşan yüksek frekanslı gerilimlerin dağılımı doğrusal değildir. Doğrusal olmayan gerilim dağılımı nedeniyle sargılar içerisinde öngörülemeyen noktalarda gerilim zorlanmaları meydana gelmesi ve bu nedenle sargı yalıtkanının zarar görmesi mümkündür. Darbe gerilimine karşı dayanımı yüksek transformatörlerin imal edilebilmesi için, tasarım aşamasında aşırı gerilimlere maruz kalan bölgelerin bilinmesi gerekmektedir.

Yağlı tip transformatörlerin darbe gerilimi dağılımına ilişkin yeterince çalışma yapılmasına rağmen, kuru tip transformatörlerin darbe gerilimi dağılımına ilişkin yeterince çalışma bulunmamaktadır. Enerji sektöründe gittikçe büyük bir pazara sahip olmaya başlayan kuru tip transformatörlerin darbe gerilimi dağılımı bu çalışmanın konusunu oluşturmaktadır.

Çalışma kapsamında, her bir fazı, yuvarlak, yassı ve strip olmak üzere, 3 farklı iletken ile sarılmış, 3 fazlı kuru tip transformatörün gerilim dağılımı analizi için sistemin matematiksel modeli oluşturulmuş ve parametreleri hesaplanmıştır. Modeli oluşturulan transformatör prototipi BEST Transformator Tesisleri'nde üretilerek, benzetim sonuçlarının doğruluğu deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Çalışma sonucunda, yassı iletkenli tipin sargıları arasındaki gerilim dağılımının diğer iki tipe göre daha düzgün olduğu ve en düşük aşım değerinin de bu tip tasarımda olduğu gözlemlenmiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Yıldırım darbe gerilimi, kuru tip transformatör, transformatör sargısı modellemesi, geçici durum benzetimi, yığın parametreler, dağınık parametreler.

## **ABSTRACT**

### **INVESTIGATION OF IMPULSE VOLTAGE DISTRIBUTION FOR THESE DIFFERENT WINDINGS TYPE OF DRY TYPE TRANSFORMERS**

**MSC THESIS**

**MUZAFFER ERDOĞAN**

**BALIKESİR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**

**ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

**(SUPERVISOR: ASSIST. PROF. DR. MEHMET KUBİLAY EKER )**

**BALIKESİR, MAY 2016**

Switching operations and lightning cause an impulse voltage on terminal of transformer windings. A signal whose peak time is  $1,2 \mu\text{s}$  and half time is  $50 \mu\text{s}$  according to IEC 60076-3 is applied to transformer windings during a test to investigate the effects of this situation. This impulse voltage causes to flow of current with high frequencies because of capacitive properties of insulation materials and inductive properties of windings.

Although voltage distribution of transformer windings running nominal frequency is linear, voltages distribution for high frequencies is nonlinear when impulse voltage is applied to transformer windings. Because of the nonlinear voltage distribution, there may be unexpected high potential differences between windings, and cause the corruption of insulation material. To produce a transformer having high capability to withstand impulse voltage, which sections of windings occur at high voltage must be known during design of transformer.

Despite many studies have been done about impulse voltage distribution of oil type transformer, there aren't enough studies about dry type transformer. Impulse voltage distribution of dry type transformer which has increasing marketing share in energy industry is the topic of this study.

In this study, dry type transformer having these different types of conductors which are round, flat and strip on high voltage sides is analysed. Mathematical model of the system has been established and parameters of the windings have been calculated for each phase of the transformer. Prototype of the transformer modelling for analysis has been produced by BEST Transformer company. Accuracy of the simulation model has been checked with experimental results.

As a result of this study, the winding with flat conductor has better impulse voltage distribution and lower over voltage values than other two windings.

**KEYWORDS:** Lightning impulse, dry type transformer, transformer winding modeling, transient simulation, lumped parameters, distributed parameters.

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT .....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	i
TABLO LİSTESİ .....	iii
SEMBOL LİSTESİ.....	iv
ÖNSÖZ.....	vii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KURU TİP TRANSFORMATÖRLER.....</b>	<b>4</b>
2.1 Bobin Yapısı.....	4
2.2 Yuvarlak İletken İle Sarım .....	5
2.3 Yassı İletken İle Sarım .....	6
2.4 Strip İletken İle Sarım .....	6
<b>3. MERDİVEN TİPİ AĞ MODELİ.....</b>	<b>8</b>
<b>4. PARAMETRELERİN HESAPLANMASI .....</b>	<b>10</b>
4.1 Endüktans Hesaplamaları .....	10
4.1.1 Endüktans.....	10
4.1.1.1 Ortak endüktans .....	10
4.1.1.2 Öz Endüktans .....	11
4.2 Kapasite Hesaplamaları.....	14
4.2.1 Seri Kapasite .....	14
4.2.1.1 Yuvarlak İletkenle Sarılan Bobinler.....	14
4.2.1.2 Yassı İletkenle Sarılan Bobinler.....	15
4.2.1.3 Strip İletkenle Sarılan Bobinler.....	17
4.2.2 Paralel kapasite .....	18
<b>5. MODELİN KURULMASI.....</b>	<b>19</b>
5.1 Matematiksel Model.....	19
5.2 Matlab Simpower ile Modelleme .....	21
<b>6. YÖNTEM.....</b>	<b>23</b>
6.1 Matematiksel Model Üzerine Yapılan Çalışmalar .....	25
6.2 Prototip Çalışması .....	29
<b>7. BULGULAR .....</b>	<b>34</b>
7.1 A Fazı - Yuvarlak İletkenle Sarılan Bobine Ait Benzetim ve Test Sonuçları.....	34
7.2 B Fazı - Yassı İletkenle Sarılan Bobine Ait Benzetim ve Test Sonuçları ..40	
7.3 C Fazı – Strip İletkenle Sarılan Bobine Ait Benzetim ve Test Sonuçları ..47	
7.4 Genlik ve Frekanslardaki Farklılıkların Etkileri .....	51
<b>8. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>56</b>
<b>9. KAYNAKLAR.....</b>	<b>59</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1: Kuru tip transformatörün bobin yapısı. ....	5
Şekil 2.2: Yuvarlak iletken ile sarılan sargıdan bir kesit. ....	6
Şekil 2.3: Yassı iletken ile sarılan sargıdan bir kesit. ....	6
Şekil 2.4: Strip iletken ile sarılan sargıdan bir kesit. ....	7
Şekil 3.1: Yağlı tip transformatörün bobin yapısı ve merdiven tipi ağ modeli. .	8
Şekil 3.2: Kuru tip transformatörün bobin yapısı ve merdiven tipi ağ modeli. .	9
Şekil 4.1: Eş merkezli iki sarım. ....	11
Şekil 4.2: Yassı iletkenle oluşturulmuş sarım halkası. ....	11
Şekil 4.3: Yuvarlak iletkenle oluşturulmuş sarım halkası. ....	12
Şekil 4.4: Yassı iletken. ....	13
Şekil 4.5: Sonlu elemanlar yöntemi ile yuvarlak iletkenli sargıdaki yalıtkan malzemelerinde depolanan enerjinin analizi. ....	15
Şekil 4.6: Yassı iletkenle sarılan kat sargı. ....	15
Şekil 4.7: Yassı iletkenle sarılan kat sargının kapasite modeli. ....	16
Şekil 4.8: AG-YG sargıları arası bobin yapısı. ....	18
Şekil 5.1: L ve C parametrelerinden oluşan transformatör modeli. ....	19
Şekil 5.2: Yıldırım darbe gerilimi. ....	20
Şekil 5.3: Transformatörün darbe dağılımı analizi için kullanılan yuvarlak iletkenli sargının Matlab Simpower modeli. ....	22
Şekil 6.1: Yüksek gerilim bobinlerinin yapısı. ....	24
Şekil 6.2: 1600 kVA 22/0,4 kV kuru tip transformatör. ....	29
Şekil 6.3: Test Düzeneği. ....	29
Şekil 6.4: Ölçüm devresinde kullanılan elemanlar. ....	30
Şekil 6.5: Haefely marka darbe gerilimi üretici. ....	31
Şekil 6.6: Darbe jeneratörü devre şeması. ....	31
Şekil 6.7: Test sırasında kullanılan osiloskop. ....	32
Şekil 6.8: A, B ve C fazlarına ait bobinlerin 1. terminallerinin ölçümü sırasında osiloskoptan alınan kayıtlar. ....	33
Şekil 7.1: Yuvarlak iletkenli faz sargısı 1 numaralı çıkış ucu (899. sarım). ....	34
Şekil 7.2: Yuvarlak iletkenli faz sargısı 2 numaralı çıkış ucu (749. sarım). ....	35
Şekil 7.3: Yuvarlak iletkenli faz sargısı 3 numaralı çıkış ucu (601. sarım). ....	35
Şekil 7.4: Yuvarlak iletkenli faz sargısı 4 numaralı çıkış ucu (452. sarım). ....	36
Şekil 7.5: Yuvarlak iletkenli faz sargısı 5 numaralı çıkış ucu (303. sarım). ....	37
Şekil 7.6: Yuvarlak iletkenli faz sargısı 6 numaralı çıkış ucu (154. sarım). ....	37
Şekil 7.7: Yuvarlak iletkenli sargının terminallerindeki darbe dağılımları. ....	39
Şekil 7.8: Yassı iletkenli faz sargısı 1 numaralı çıkış ucu (938. sarım). ....	40
Şekil 7.9: Yassı iletkenli faz sargısı 2 numaralı çıkış ucu (828. sarım). ....	41
Şekil 7.10: Yassı iletkenli faz sargısı 3 numaralı çıkış ucu (718. sarım). ....	41
Şekil 7.11: Yassı iletkenli faz sargısı 4 numaralı çıkış ucu (608. sarım). ....	42
Şekil 7.12: Yassı iletkenli faz sargısı 5 numaralı çıkış ucu (498. sarım). ....	42
Şekil 7.13: Yassı iletkenli faz sargısı 6 numaralı çıkış ucu (399. sarım). ....	43
Şekil 7.14: Yassı iletkenli faz sargısı 7 numaralı çıkış ucu (300. sarım). ....	44
Şekil 7.15: Yassı iletkenli faz sargısı 8 numaralı çıkış ucu (201. sarım). ....	44
Şekil 7.16: Yassı iletkenli sargının terminallerindeki darbe dağılımları. ....	46
Şekil 7.17: Strip iletkenli faz sargısı 1 numaralı çıkış ucu (871. sarım). ....	47



<b>Şekil 7.18:</b> Strip iletkenli faz sargısı 2 numaralı çıkış ucu (696. sarım).....	48
<b>Şekil 7.19:</b> Strip iletkenli faz sargısı 3 numaralı çıkış ucu (522. sarım).....	48
<b>Şekil 7.20:</b> Strip iletkenli faz sargısı 4 numaralı çıkış ucu (348. sarım).....	49
<b>Şekil 7.21:</b> Strip iletkenli faz sargısı 5 numaralı çıkış ucu (174. sarım).....	49
<b>Şekil 7.22:</b> Strip iletkenli sargının terminallerindeki darbe dağılımları. ....	51
<b>Şekil 7.23:</b> A fazına ait 1. ve 2. terminaller arasındaki gerilim farkı. ....	53
<b>Şekil 7.24:</b> B fazına ait 1. ve 2. terminaller arasındaki gerilim farkı.....	53
<b>Şekil 7.25:</b> C fazına ait 1. ve 2. terminaller arasındaki gerilim farkı.....	54
<b>Şekil 8.1:</b> Sargı tiplerinin 1 nolu terminallerine ait ölçüm ve benzetim sonuçları. ....	57

## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

<b>Tablo 6.1:</b> Transformatör sargılarının teknik özellikleri .....	23
<b>Tablo 6.2:</b> Sargılarda gerilim dağılımı ölçümü yapılan sarım sayıları.....	24
<b>Tablo 6.3:</b> Yuvarlak iletkenli faz sargısına ait parametre değerleri. ....	25
<b>Tablo 6.4:</b> Yassı iletkenli faz sargısına ait parametre değerleri. ....	26
<b>Tablo 6.5:</b> Strip iletkenli faz sargısına ait parametre değerleri. ....	27
<b>Tablo 6.6:</b> Test sırasında kullanılan osiloskobun teknik değerleri.....	32
<b>Tablo 7.1:</b> Yuvarlak iletkenli bobinde ölçüm ve benzetim sonuçlarına göre darbe gerilimi en yüksek değerlerinin karşılaştırması. ....	38
<b>Tablo 7.2:</b> Yassı iletkenli bobinde ölçüm ve benzetim sonuçlarına göre darbe gerilimi en yüksek değerlerinin karşılaştırması. ....	45
<b>Tablo 7.3:</b> Yassı iletkenli bobinde ölçüm ve benzetim sonuçlarına göre darbe gerilimi en yüksek değerlerinin karşılaştırması. ....	50
<b>Tablo 7.4:</b> Ölçüm ve benzetim sonuçlarına göre darbe gerilimlerinin genliklerinin ilk iki maksimum noktaya ulaşma süreleri farkı açısından karşılaştırmaları.....	52

## SEMBOL LİSTESİ

<b>R</b>	: Direnç
<b>L</b>	: Endüktans
<b>C</b>	: Kapasite
<b>N</b>	: Transformatör bobininin sarım sayısı
<b>d</b>	: Bir sarım ile nokta arasındaki mesafe
<b>I</b>	: İletkenden akan akımın RMS değeri
<b>A</b>	: Manyetik vektör potansiyel
<b><math>\mu</math></b>	: Boşluğun manyetik geçirgenliği
<b><math>\phi</math></b>	: Manyetik akı
<b><math>a_1</math></b>	: Birinci sarımın yarıçapı
<b><math>a_2</math></b>	: İkinci sarımın yarıçapı
<b>h</b>	: z ekseninde iki sarım arasındaki mesafe
<b>P</b>	: İkinci sarım üzerinde herhangi bir nokta
<b><math>M_{12}</math></b>	: Ortak endüktans
<b>k</b>	: Dikdörtgen şeklindeki iletkenin kalınlığı
<b>r</b>	: Sarımın iç yarıçapı
<b><math>L_i</math></b>	: Sarımın kendi oluşturduğu akıya bağlı öz endüktansı
<b>a</b>	: Yuvarlak iletkenin çapı
<b>B</b>	: Manyetik akı yoğunluğu
<b><math>E_r</math></b>	: Yuvarlak iletkenin içerisinde depolanan enerji
<b>H</b>	: İletkenin hacmi
<b><math>L_e</math></b>	: İletken içindeki depolanan enerjiye bağlı öz endüktans
<b>s</b>	: Dikdörtgen şeklindeki iletkenin genişliği
<b><math>E_f</math></b>	: Dikdörtgen şeklindeki iletkenin içerisinde depolanan enerji
<b><math>L_s</math></b>	: Toplam öz endüktans
<b><math>N'</math></b>	: Grup sayısına indirgenmiş endüktans elemanı sayısı
<b><math>L_{11}</math></b>	: Birinci sarımın öz endüktansı
<b><math>L_{12}</math></b>	: Birinci sarım ile ikinci sarım arasındaki ortak endüktans
<b><math>L_{21}</math></b>	: İkinci sarım ile birinci sarım arasındaki ortak endüktans
<b><math>L_{22}</math></b>	: İkinci sarımın öz endüktansı
<b><math>L_{1,n-1}</math></b>	: Birinci sarım ile n-1. sarım arasındaki ortak endüktans
<b><math>L_{1,n}</math></b>	: Birinci sarım ile n. sarım arasındaki ortak endüktans
<b><math>L_{2,n-1}</math></b>	: İkinci sarım ile n-1. sarım arasındaki ortak endüktans
<b><math>L_{2,n}</math></b>	: İkinci sarım ile n. sarım arasındaki ortak endüktans
<b><math>L_{n-1,1}</math></b>	: n-1. sarım ile birinci sarım arasındaki ortak endüktans
<b><math>L_{n,1}</math></b>	: n. sarım ile birinci sarım arasındaki ortak endüktans
<b><math>L_{n-1,2}</math></b>	: n-1. sarım ile ikinci sarım arasındaki ortak endüktans
<b><math>L_{n,2}</math></b>	: n. sarım ile ikinci sarım arasındaki ortak endüktans

$L_{n-1,n-1}$	: n-1. sarımın öz endüktansı
$L_{n-1,n}$	: n-1. sarım ile n. sarım arasındaki ortak endüktans
$L_{n,n-1}$	: n. sarım ile n-1. sarım arasındaki ortak endüktans
$L_{nn}$	: n. sarımın öz endüktansı
$L_{11}'$	: 1. sargı grubunun öz endüktansı
$L_{1n}'$	: 1. sargı grubu ile n. sargı grubunun ortak endüktansı
$L_{n1}'$	: n. sargı grubu ile 1. sargı grubunun ortak endüktansı
$L_{nn}'$	: n. sargı grubunun öz endüktansı
$E$	: Enerji
$V$	: Gerilim
$N_y$	: Yan yana sarılan iletken sayısı
$n$	: Kat sargıdaki kat sayısı
$\epsilon_0$	: Boşluğun dielektrik sabiti
$\epsilon_{il}$	: İletken yalıtkanı bağlı dielektrik sabiti
$d_{il}$	: İletken yalıtkanı kalınlığı
$C_t$	: Yan yana sarılı birer halka oluşturan iki iletkenin kapasitesi
$C_{tr}$	: Sargı içindeki yan yana sarılı iletkenlerin eşdeğer kapasitesi
$V$	: Sargının uçlarına uygulanan gerilim
$\epsilon_{iz}$	: Kat yalıtkanı dielektrik sabiti
$d_{iz}$	: Kat yalıtkanı kalınlığı
$C_d$	: Sargı içindeki üst üste sarılı iki iletkenin kapasitesi
$C_{dr}$	: Sargı içindeki üst üste sarılı iletkenlerin toplam kapasitesi
$C_s$	: Sargı seri kapasitesi
$C_{str}$	: Strip sargının iki katı arasındaki kapasite
$C_{st}$	: Strip sargı grubunun eşdeğer kapasitesi
$C_p$	: Paralel kapasite
$r_{ilAG}$	: Alçak gerilim bobini en dıştaki iletkenin dış çapı
$\epsilon_{izAG}$	: Alçak gerilim bobini dış yalıtkanı bağlı dielektrik sabiti
$r_{izAG}$	: Alçak gerilim bobininin izoleli dış çapı
$r_{AG-YG}$	: Yüksek gerilim bobini iç yalıtkanı iç çapı
$\epsilon_{izYG}$	: Yüksek gerilim bobini iç yalıtkanı bağlı dielektrik sabiti
$r_{izYG}$	: Yüksek gerilim bobininin iç yalıtkanı dış çapı
$\epsilon_{ilYG}$	: Yüksek gerilim bobininin iletken yalıtkanı bağlı dielektrik sabiti
$r_{ilYG}$	: Yüksek gerilim bobininin en alt kat çıplak iletkenin iç çapı
$d_{ilYG}$	: Yüksek gerilim bobininin iletken yalıtkanı kalınlığı
$V_1$	: Yıldırım darbe gerilimi
$t$	: Zaman
$V_2$	: 1. sargı grubu ile 2. sargı grubu arasındaki düğümün gerilimi
$V_3$	: 2. sargı grubu ile 3. sargı grubu arasındaki düğümün gerilimi
$V_4$	: 3. sargı grubu ile 4. sargı grubu arasındaki düğümün gerilimi
$V_n$	: n-1. sargı grubu ile n. sargı grubu arasındaki düğümün gerilimi

$i_1$	: 1. sargı grubundan akan akım
$i_2$	: 2. sargı grubundan akan akım
$i_3$	: 3. sargı grubundan akan akım
$i_n$	: n. sargı grubundan akan akım
$L_{12}'$	: 1. sargı grubu ile 2. sargı grubunun ortak endüktansı
$L_{13}'$	: 1. sargı grubu ile 3. sargı grubunun ortak endüktansı
$L_{21}'$	: 2. sargı grubu ile 1. sargı grubunun ortak endüktansı
$L_{22}'$	: 2. sargı grubunun öz endüktansı
$L_{23}'$	: 2. sargı grubu ile 3. sargı grubunun ortak endüktansı
$L_{2n}'$	: 2. sargı grubu ile n. sargı grubunun ortak endüktansı
$L_{31}'$	: 3. sargı grubu ile 1. sargı grubunun ortak endüktansı
$L_{32}'$	: 3. sargı grubu ile 2. sargı grubunun ortak endüktansı
$L_{33}'$	: 3. sargı grubunun öz endüktansı
$L_{3n}'$	: 3. sargı grubu ile n. sargı grubunun ortak endüktansı
$L_{n2}'$	: n. sargı grubu ile 2. sargı grubunun ortak endüktansı
$L_{n3}'$	: n. sargı grubu ile 3. sargı grubunun ortak endüktansı
$D$	: $V_1$ düğüm geriliminin katsayı matrisi
$K$	: Diğer düğüm gerilimlerinin katsayı matrisi
$Cs_1$	: 1. sargı grubunun eşdeğer seri kapasitesi
$Cs_2$	: 2. sargı grubunun eşdeğer seri kapasitesi
$Cs_3$	: 3. sargı grubunun eşdeğer seri kapasitesi
$Cs_4$	: 4. sargı grubunun eşdeğer seri kapasitesi
$Cs_{n-1}$	: n-1. sargı grubunun eşdeğer seri kapasitesi
$Cs_n$	: n. sargı grubunun eşdeğer seri kapasitesi
$Cp_2$	: 2. düğüme bağlı eşdeğer paralel kapasitesi
$Cp_3$	: 3. düğüme bağlı eşdeğer paralel kapasitesi
$Cp_4$	: 4. düğüme bağlı eşdeğer paralel kapasitesi
$Cp_n$	: n. düğüme bağlı eşdeğer paralel kapasitesi
$G$	: $V_1$ gerilimi dışındaki düğüm gerilimlerine ait kapasite matrisi
$F$	: $V_1$ düğüm geriliminin kapasite matrisi

## ÖNSÖZ

Prototip çalışmalarım sırasında tüm imkanları ile destek veren BEST A.Ş. firmasına; tez çalışmalarım boyunca yol göstericiliği, maddi ve manevi tüm desteğinden dolayı Sayın Yrd. Doç. Dr. Mehmet Kubilay EKER'e; bir an bile olsun desteğini benden esirgemeyen huzur kaynağım eşim Arzu Asu ERDOĞAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## 1. GİRİŞ

Elektrik enerjisinin iletiminde ve dağıtımında anahtar rol oynayan transformatörlerin aşırı gerilimlere karşı da dayanıklı olacak şekilde tasarlanması gerekmektedir. Özellikle transformatörlerin yıldırım darbesi ya da anahtarlama sırasında meydana gelen yüksek frekanslı aşırı gerilimlere karşı dayanıklı olması beklenir. İşletmedeki transformatörün yalıtım yapısı bu aşırı gerilimlere karşı dayanım bakımından çok önemlidir [1].

Büyük güçlü trafoların üretilmesi ile birlikte darbe geriliminin sargılar içerisindeki dağılımı ve darbeye maruz kalmayan sargılardaki etkisinin incelenmesi amacıyla yıldırım darbe geriliminin gerçekçi bir şekilde analiz edilmesi önemli bir hal almıştır. Özellikle darbeye maruz kalmayan sargıların yalıtım yapısı belirlenmelidir. Ayrıca sarımda kullanılan aparatların yalıtım malzemeleriyle olan koordinasyonunun sağlanması gereklidir [2]. İşletme geriliminde çalışan transformatörlerin modeli direnç ve endüktans parametrelerinden oluşur. Ancak transformatörler güç sistemine bağlı iken aşırı gerilime, aşırı akıma, arıza ve kesicilerin açılma ya da kapanma işlemlerinden kaynaklanan darbe gerilimlerine maruz kalırlar. Bu hallerde transformatörün iç kapasite parametreleri baskın hale gelir [3].

Yüksek frekanslı aşırı gerilimlere maruz kalan transformatörün sargılarının iç yapısında baskın hale gelen paralel ve seri kapasitelerin oranlarının farklılığı ve iç rezonanslar nedeniyle sargıların farklı bölgelerinde lineer olmayan gerilim dağılımları meydana gelir [4]. Transformatörün işletmede kullanımı sırasında yüksek frekanslı aşırı gerilimlerden zarar görmeden çalışması için üretilen transformatörler 1,2  $\mu$ s tepe ve 50  $\mu$ s yarılanma süresi olan yıldırım darbe gerilimi ile test edilir [5]. Transformatörün testi geçebilmesi için test sırasında, sargıların içerisinde meydana gelen elektrik alandan zarar görmeyecek şekilde sargı yalıtımının tasarlanması gerekmektedir. Amaç en az üretim ve işletme maliyeti ile aşırı gerilimlere karşı dayanıklı yıllarca çalışan transformatör tasarlamaktır [6]. Bunun başarılabilmesi için yıldırım darbe testi sırasında sargılarda meydana gelen gerilim dağılımı analiz

edilmelidir. Gerilim dağılımının analizi sargıların RLC eşdeğer devresinin çözümü ile elde edilir.

Darbe dağılımının sargı içerisinde önemli olduğunun anlaşılmasıyla, sargı yapısındaki kapasite ve endüktansların düzenli olarak dağıldığını varsayan yaklaşımlarla analitik incelemeler yapılmıştır. Ancak transformatör sargılarına ait kapasite ve endüktansların düzensiz dağılması nedeniyle bu yaklaşımların transformatörler için uygulanması mümkün değildir. Lewis'in [7] amaçladığı merdiven tipi ağ yapısı modeli kullanılarak transformatör sargıları eşit bölmelere ayrılmış ve sargıların analiz edilmesi mümkün olmuştur. Ancak bu model de sargıları düzenli olarak tasarlanmamış transformatörler için uygun değildir. Dent [8] tarafından yapılan çalışmalarda merdiven tipi ağ modelinin düzensiz yapıdaki sargılar için uygulanması mümkün olmuştur. Bu çalışmanın ardından araştırmacılar RLC parametrelerin bulunması üzerine yoğunlaşmışlardır. Fergestad [9] sargılarda öz ve ortak endüktansın, Stein [10] ise sarımlar arasındaki seri ve paralel kapasitenin hesaplama yöntemini sunmuştur. Fergestad [11] bu yöntemi çoklu sargı yapısına uygulamıştır. Miki ve diğ. [2] merdiven tipi ağ modelini darbe geriliminin doğrudan uygulanmadığı, transfer edilen gerilimin etkisi altında kalan sargıları da modele dâhil ederek irdelemişlerdir.

Yüksek frekans altında darbe geriliminin dağılımının incelenmesi üzerine çalışmalar yoğun olarak yağlı tip transformatörler üzerine yapılmıştır [2-3,7-11,13]. Bu konuda, kuru tip transformatörler üzerine yapılan çalışmalar ise sınırlı sayıda gerçekleştirilmiştir [4,6,12,17]. Bu çalışmalarda sargı parametreleri sayısal yöntemlerle elde edilmiş ve strip iletken türü ile sarılmış bobinler incelenmiştir.

Bu çalışmanın temelini 3 bobini de farklı sarım metotları ile imal edilmiş 3 fazlı kuru tip transformatörün incelenmesi oluşturmaktadır. Transformatörün yüksek gerilim fazlarından A fazı yuvarlak, B fazı yassı ve C fazı strip iletken tipi ile sarılacak şekilde tasarlanmıştır. Bu bobinlerin öncelikli olarak endüktans ve kapasite parametreleri hesaplanmıştır. Bu parametreler merdiven tipi ağ modelinde kullanılarak bobinlerin içerisinde yıldırım darbe geriliminin dağılımı benzetim çalışması yapılmıştır.



Test aşamasında ise 1600 kVA 3 fazlı kuru tip transformatör imal edilmiş ve yıldırım darbe dağılımı testi bobinler üzerinde yapılmıştır. Bobinlerin belirli noktalarından okunan gerilim değerleri ile benzetim değerleri karşılaştırılarak irdelenmiştir.

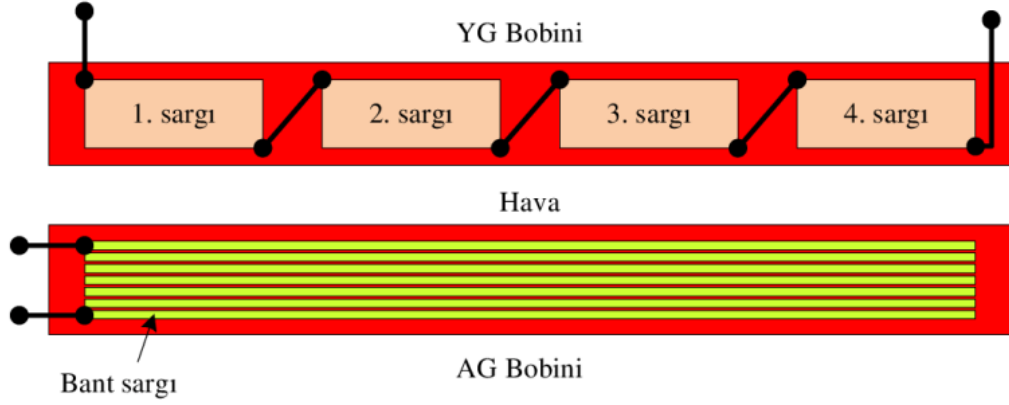
## 2. KURU TİP TRANSFORMATÖRLER

Sargıları epoksi reçine ile örtülmüş kuru tip transformatörler yağlı transformatörlere göre daha güvenli olmaları nedeniyle hastane, yeraltı treni sistemleri, alışveriş merkezleri gibi toplu yaşanan alanlarda kullanılmaktadır. Yapısında yanıcı madde bulundurmaması, kısa devre anında meydana gelen kuvvetlere karşı yüksek mukavemete sahip olması, yalıtkan malzemesi olarak yağ gibi kirlenici malzemelerin kullanılmaması ve bakım gerektirmemesi, kuru tip transformatörlerin tercih edilmesini sağlamıştır [12].

Kuru tip transformatörlerin bobinleri, sarım işlemi tamamlandıktan sonra kalıp içerisine yerleştirilir ve vakum altında reçine döküm işlemi gerçekleştirilir. Döküm sonrası bobinler çekirdeğin bacalarına geçirilir ve alt üst takozlarla sıkıştırma demirlerine sabitlenir. İzolasyon olarak yağ kullanılmaz ve bu nedenle yağı muhafaza edecek tanka ihtiyaç yoktur. Sargı içinde kullanılan yalıtkan malzemesi epoksi reçinedir. Sargılar arasında ise epoksi reçine ve hava vardır. İzolasyon malzemesi olarak havanın kullanılması nedeniyle zorlanmanın en çok gerçekleştiği yer sargılar arasındaki hava boşluklarıdır [12].

### 2.1 Bobin Yapısı

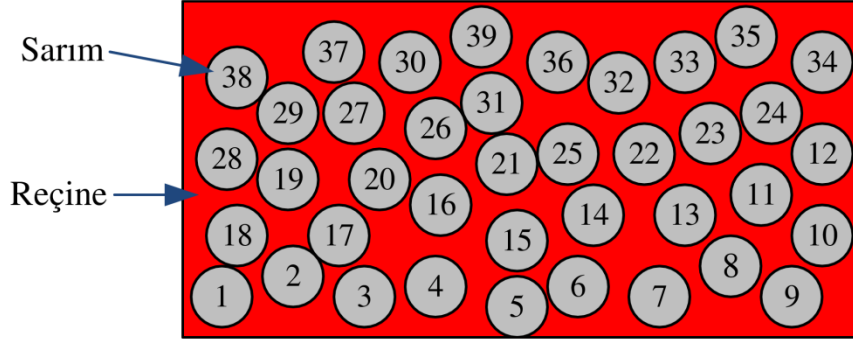
Kuru tip transformatörlerin genel olarak dağıtım tipi transformatörler olmaları nedeniyle 400 V gibi çıkışında alçak gerilim verecek şekilde tasarlanırlar. Alçak gerilim sargısından akan akımların çok yüksek olması nedeniyle iletken kesiti büyüktür bu nedenle alçak gerilim bobinlerinin sarımında sargı boyu kadar genişliği olan bant iletkenler kullanılır. Yüksek gerilim bobininde ise iletken kesitleri küçüktür ve yüksek gerilim bobini çok sayıda iletkenden oluşur. Şekil 2.1’de verildiği gibi yüksek gerilim bobininde sarımlar arası gerilim farkları nedeniyle bobin sargı gruplarına bölünmüştür. Yüksek gerilim bobini yuvarlak, yassı ve strip iletken olmak üzere 3 farklı iletken tipi ile sarılır.



Şekil 2.1: Kuru tip transformatörün bobin yapısı.

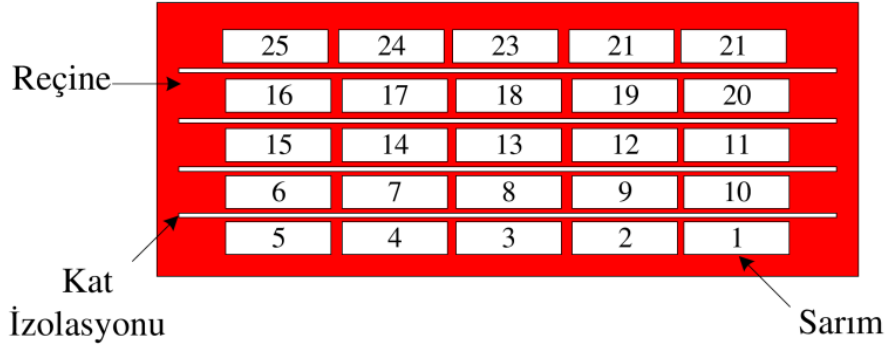
## 2.2 Yuvarlak İletken İle Sarım

Yuvarlak iletken ile sarılan bobinler dikey olarak sarılır. Kuru tip transformatörlerin dökme reçine yapısı nedeniyle döküm öncesi bobin iç ve dış olmak üzere kalıplar arasına yerleştirilir. Sarım işleminden önce iç kalıp ve gerekli mekanik tertibat hazırlanır ve sarım işlemi kalıbın üzerine yapılır. Dikey sarım makinesi sargıdan daha yüksek bir noktada iletkeni halka şeklinde bükerek ve bırakır. Bırakılan iletken iç kalıbın etrafında yığılmaya başlar. Sarımlar düzensiz bir şekilde iç kalıbın etrafında birikirler. Makine her bir sarımın çapını sargının iç çapı alt limit, dış çapı üst limit olacak şekilde limitler arasında gidip gelerek herhangi bir çapta bükerek. Şekil 2.2’de verildiği gibi makineden serbest kalan iletkenin yığılırken tam olarak hangi konumda kalacağını kestirmek mümkün değildir. Sarımlar arası yalıtımı, iletken yalıtkanı olan mylar üzeri cam elyaf ve iletkenler arası boşluğu dolduran epoksi reçine sağlar. Mylar kalınlığı 10-12  $\mu\text{m}$  kalınlığında, delinme dayanımı 3,5 kV/mm olan pet filmidir. İletkenin üzeri iki kat mylar ile kaplanır. Daha sonra cam elyaf lifleri ile mylar kaplı iletkenin üzeri örülür. Vernikleme ve kurutma işlemlerinden mylar ve cam izoleli iletken kullanıma hazır hale gelir.



**Şekil 2.2:** Yuvarlak iletken ile sarılan sargıdan bir kesit.

### 2.3 Yassı İletken İle Sarım



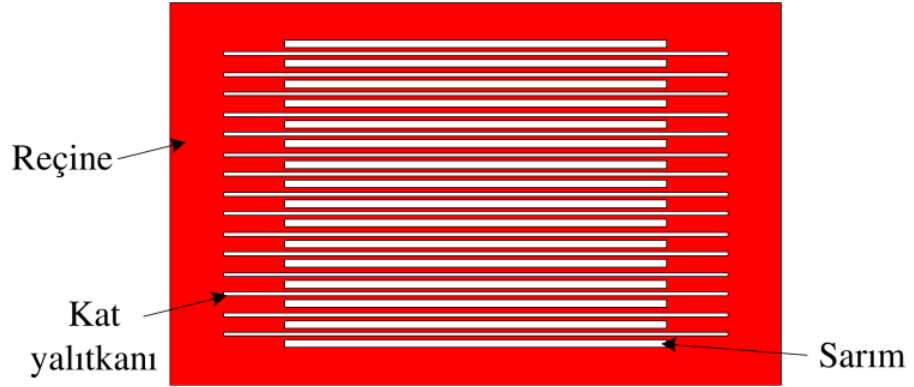
**Şekil 2.3:** Yassı iletken ile sarılan sargıdan bir kesit.

Yassı iletken dikdörtgen şeklindedir ve küçük bir kesit alanına sahiptir. Şekli nedeniyle bobin içerisindeki iletkenin konumu nettir ve hesaplanabilir. Aksiyal ya da paralel sarımlara elverişlidir. Kat sargı yöntemi ile sarıma uygun yapıdadır. Yassı iletkenle sarılan bobinler katlar arası gerilim farkına bağlı olarak birçok sargı grubundan meydana gelebilir. Yassı iletken kuru tip transformatörlerde kullanılmak üzere iletken yalıtkanı olarak mylar ve cam elyaf ile kaplanır. Aksiyal yönde sarımda iki sarım arasında yalıtım malzemesi olarak sadece iletken yalıtkanı bulunurken radyal yönde sarımda iletken yalıtkanı ve kat yalıtkanı bulunur (Şekil 2.3).

### 2.4 Strip İletken İle Sarım

Strip iletken de dikdörtgen şeklindedir. Ancak yassı iletkene göre çok geniş ve çok ince şeritler halinde imal edilir. Şekli nedeniyle bobin içerisindeki iletkenin

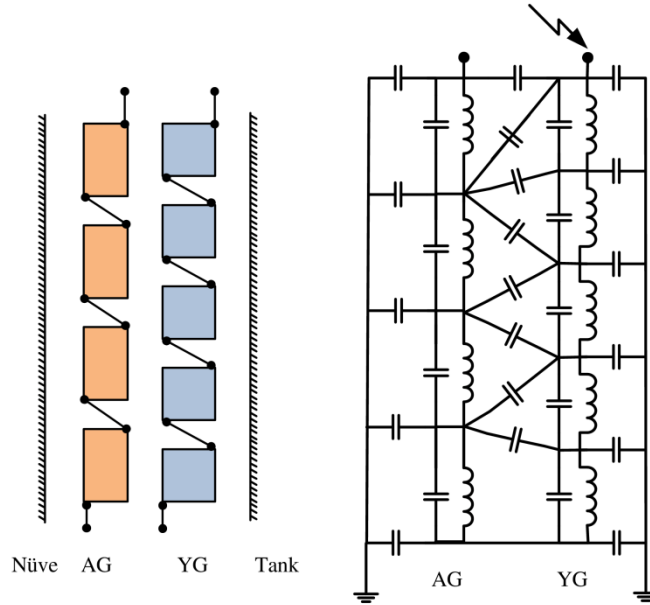
konumu nettir ve hesaplanabilir. İletkeni saran yalıtkan yoktur. Bu nedenle aksiyal ya da paralel sarımlara uygun değildir. Şekil 2.4'te verildiği gibi sadece radyal yönde üst üste sarılırlar. İletkenler arasında epoksi emdirilmiş kâğıt, yalıtkan olarak kullanılır. Strip sargılar kat sargı sarım tekniğine uygundur. Tasarıma bağlı olarak strip iletken ile sarılan bobinler pek çok sargı grubundan oluşabilir. Strip iletken ile sarılan sargılar yalıtım açısından diğer sarım tekniklerine göre daha uygundur. Nedeni ise iletkenler arasındaki gerilim farkı bir sarımın gerilimi kadardır.



**Şekil 2.4:** Strip iletken ile sarılan sargıdan bir kesit.

### 3. MERDİVEN TİPİ AĞ MODELİ

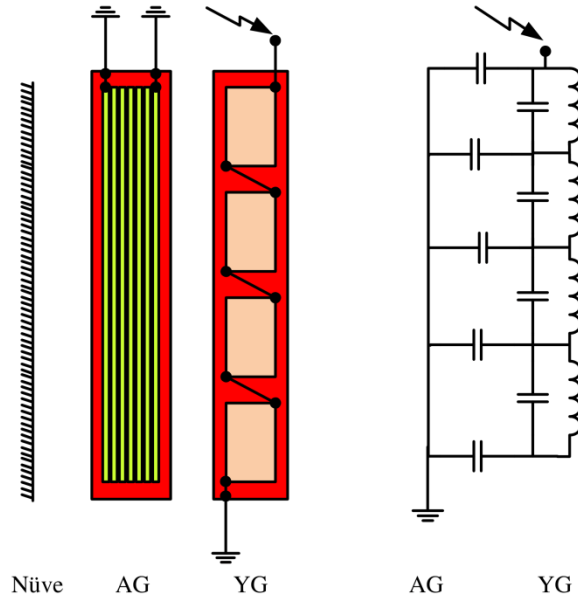
Merdiven tipi ağ modelinde her bir sarım bir  $L$  endüktans parametresi olarak kabul edilir. Öz ve diğer sarımlara göre ortak endüktansı hesaplanarak  $N$  sarımlı bir transformatörün bobininin  $N \times N$  endüktans matrisi elde edilir. İletken yalıtkanı, kat arası yalıtkanı ve diskler arasındaki yağ gibi dielektrik malzemeler nedeniyle her bir sarım bitişiğindeki sarımla birlikte bir seri kapasite ve tank ya da diğer sargılara karşıda paralel kapasite oluşturur. Sargıların sarım sayısının fazla olması nedeniyle parametreler sarım için değil, bir grup için çıkarılır. Disk sargı tekniğine göre sarılmış bir bobin için bir disk çifti ya da kat sargı tekniğine göre bir kat sarım, bir eleman olarak gruplanır. Bu şekilde işlemler basit hale getirilerek çözüm kolaylaştırılır. Şekil 3.1’de yağlı tip transformatöre ait merdiven tipi ağ modeli verilmiştir. Merdiven tipi ağ modeli ile sargılar gerilim bilgisi elde edilmek istenen düğümlere göre gruplanabilir. Böylelikle transformatör sargılarının herhangi bir noktasının analizini yapmak mümkündür [13]. R parametresini oluşturan kayıplar sargı içerisinde darbe gerilimi dağılımına çok az sönümleme etkisi yaptığından analitik hesaplamalarda ihmal edilebilir. [14]. Böylece model sadece  $L$  ve  $C$  parametrelerinden oluşur.



Şekil 3.1: Yağlı tip transformatörün bobin yapısı ve merdiven tipi ağ modeli.

Yıldırım darbe testinin uygulanması sırasında test edilecek yüksek gerilim bobinin giriş terminaline gerilim verilirken yüksek gerilim bobinin çıkış terminali ve alçak gerilim bobinleri de dahil olmak üzere diğer bobinlerin hepsi topraklanır. Alçak gerilim bobininin giriş ve çıkış terminalleri topraklı iken, nötr ucu topraklı bir yüksek gerilim bobinine yıldırım darbe gerilimi uygulanır. Alçak gerilim bobininin topraklı olması nedeniyle çekirdeğin içinden akı geçmez. Sadece bobinler arasında kaçak akılar dolanır ve endüktans parametresinin oluşmasını sağlayan bu akılardır. Bobinin içerisindeki yıldırım darbe dağılımı transformatörün çekirdekli ya da çekirdeksiz olması durumunda aynı şekilde olur [15].

Kuru tip transformatörlerde yalıtım malzemesi olarak havanın kullanılması nedeniyle tank bulunmaz. Paralel kapasite sadece sargılar arasında meydana gelir. Ayrıca dağıtım tipi kuru tip transformatörlerde alçak gerilim sargısı bant sargıdır. Yıldırım darbe testi sırasında alçak gerilim sargısının topraklanması nedeniyle, alçak gerilim dış çapı toprak geriliminde bir silindir gibi davranır. Bunun sonucunda Şekil 3.2’de verildiği gibi yüksek gerilim sargısı ile toprak arasında kapasiteler meydana gelir.



**Şekil 3.2:** Kuru tip transformatörün bobin yapısı ve merdiven tipi ağ modeli.

## 4. PARAMETRELERİN HESAPLANMASI

### 4.1 Endüktans Hesaplamaları

#### 4.1.1 Endüktans

Yüksek gerilim bobinleri çok sayıda sarımdan oluşur. Bu sarımların kendisinden kaynaklanan öz endüktansı ve diğer sarımlardan kaynaklanan ortak endüktansı vardır. Silindirik yapıdaki sargıların analitik olarak endüktans hesaplamalarında her bir sarım bir eleman olarak alınarak, bu elemanların öz ve ortak endüktansları hesaplanmıştır. Üzerinden  $I$  akımı akan iletkenin  $d$  uzaklığındaki noktada meydana getirdiği  $A$  manyetik vektör potansiyeli (4.1) eşitliği yardımıyla hesaplanır [16].

$$A = \frac{\mu}{4\pi} \int \frac{I}{d} dl \quad (4.1)$$

$L$  endüktans ifadesi (4.2) eşitliği ile hesaplanır.

$$L = \frac{\phi}{I} \quad (4.2)$$

$A$ 'nın çizgi integralinin  $\phi$  değerini veren ifadesi ise (4.3) eşitliği ile hesaplanır. Böylece bir iletkenin akan akımının uzak bir noktadaki başka bir iletkenin bir noktasında oluşturduğu vektör potansiyelinin çizgi integrali hesaplanarak akı değeri elde edilir ve akım değerine oranlanarak endüktans parametresi elde edilir.

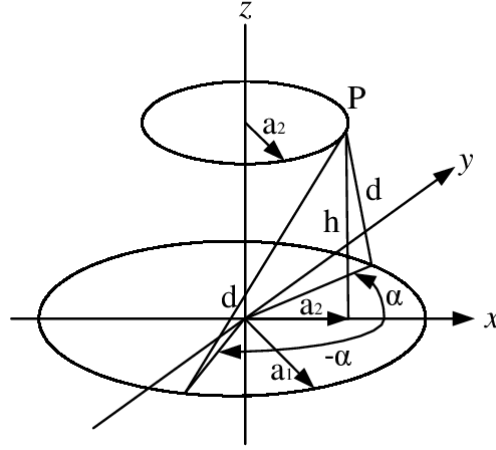
$$\phi = \oint A dl \quad (4.3)$$

#### 4.1.1.1 Ortak endüktans

Yarı çapları  $a_1$  ve  $a_2$  olan  $z$  ekseninde aralarındaki mesafe  $h$  olan iki sarımın ortak endüktans ifadesi Şekil 4.1'deki gibi birinci sargıdan akan akımının ikinci



sargının  $P$  noktasında oluşturduğu manyetik alan vektörü ifadesi (4.4) eşitliğinde verilmiştir [17].



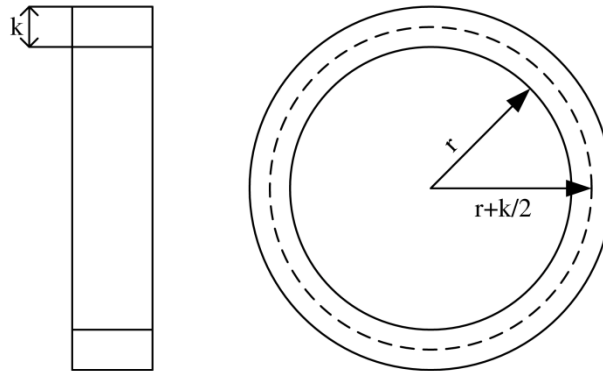
Şekil 4.1: Eş merkezli iki sarım.

$$A = \frac{\mu I}{2\pi} \frac{a_1 \cos(\alpha) d\alpha}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + h^2 - 2a_1a_2 \cos(\alpha)}} \quad (4.4)$$

(4.2), (4.3) ve (4.4) eşitliklerinden yararlanarak  $M_{12}$  ortak endüktans ifadesi (4.5) eşitliğinde verilmiştir.

$$M_{12} = \mu a_1 a_2 \int_0^\pi \frac{\cos(\alpha) d\alpha}{\sqrt{a_1^2 + a_2^2 + h^2 - 2a_1a_2 \cos(\alpha)}} \quad (4.5)$$

#### 4.1.1.2 Öz Endüktans



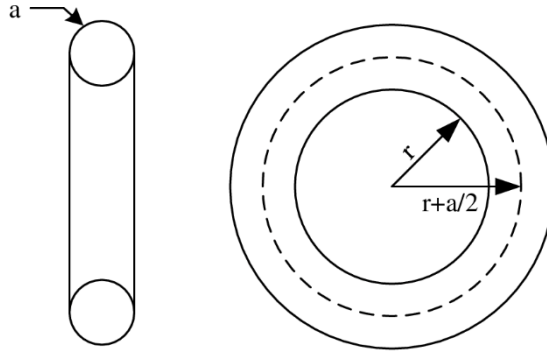
Şekil 4.2: Yassı iletkenle oluşturulmuş sarım halkası.

Öz endüktansın hesaplanması iki bölümden oluşmaktadır. Birincisi, iletkenin içinden geçen akımın oluşturduğu akının sarım halkasından geçerek meydana getirdiği endüktans, ikincisi ise iletkenin içerisinde depolanan enerjidir. Akıdan kaynaklı endüktans hesaplaması (4.5) eşitliğinde verilen ifadenin basitleştirilmiş halidir. Akım kaynağı olan ve etkilenen sarım aynı olması nedeniyle  $h$  ifadesi 0 olur. Şekil 4.2’de  $k$  kalınlığında  $r+k/2$  ortalama çapa sahip bir sarım verilmiştir. Bu sarıma ait  $L_i$  öz endüktans ifadesi (4.6) eşitliğinde verilmiştir.

$$L_i = \mu r \left( r + \frac{k}{2} \right) \int_0^\pi \frac{\cos(\alpha) d\alpha}{\sqrt{\left( r + \frac{k}{2} \right)^2 + r^2 - 2 \left( r + \frac{k}{2} \right) r \cos(\alpha)}} \quad (4.6)$$

İletkenin içine depolanan enerjiden kaynaklı öz endüktans ise iletkenin şekline bağlı olarak değişir. Yuvarlak iletken için hesaplamalar yassı ve strip iletkenlerden farklıdır. Şekil 4.3’de  $a$  çaplı iletkenin içinden geçen akımın iletkenin içerisinde  $a$  çapına bağlı olarak oluşturduğu  $B$  manyetik alan yoğunluğu ifadesi (4.7) eşitliğinde verilmiştir.

$$B(r) = \mu I r / 2\pi a^2 \quad (4.7)$$



**Şekil 4.3:** Yuvarlak iletkenle oluşturulmuş sarım halkası.

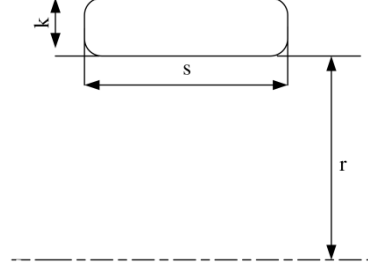
İletkenin içerisindeki toplam  $E_r$  enerjisi ise (4.8) eşitliğinde verilmiştir.

$$E_r = \frac{1}{2\mu} \int B^2 dH = \frac{\mu I^2 (r + a/2)}{8\pi^2 a^4} \int_0^a 2\pi r^3 dr = \frac{1}{2} L_e I^2 \quad (4.8)$$

(4.8) eşitliği kullanılarak elde edilen  $L_e$  öz endüktans ifadesi (4.9) eşitliğinde verilmiştir.

$$L_e = \mu (r + a/2) / 8 \quad (4.9)$$

Yuvarlak olmayan iletkenle yapılan sarımda, iletkenin içerisinde depolanan enerjiden kaynaklı öz endüktans hesaplaması farklılık göstermektedir. Şekil 4.4’de  $k$  kalınlığında ve  $s$  genişliğinde olan yassı iletken verilmiştir. İletkenden akan  $i$  akımının iletkenin içerisinde herhangi bir  $x$  noktasına bağlı olarak oluşturduğu  $B$  manyetik alan yoğunluğu ifadesi (4.10) eşitliğinde verilmiştir.



Şekil 4.4: Yassı iletken.

$$B(x) = \frac{\mu I x}{2k(k + s)} \quad (4.10)$$

İletkenin içerisindeki toplam  $E_f$  enerjisi ise (4.11) eşitliğinde verilmiştir.

$$E_f = \frac{1}{2\mu} \int B^2 dH = \frac{\mu I^2 \pi r w}{2(k + s)^2 k^3} \int_0^k x^3 dx = \frac{1}{2} L_e I^2 \quad (4.11)$$

Toplam öz endüktans ifadesi ise (4.12) eşitliğinde verilmiştir.

$$L_s = L_e + L_i \quad (4.12)$$

$N$  sarımdan oluşan transformatörün sargısının her bir sarımın öz ve diğer  $N-I$  sarım ile olan ortak endüktansı  $N \times N$  endüktans matrisini oluşturur. Örneğin 1000 sarımdan oluşan bir sargının  $1000 \times 1000$  boyutunda endüktans matrisinin çözümü çok zahmetlidir. Bu nedenle gruplara ayrılmış sargıların toplamından bir endüktans değeri elde edilir. Grup sayısı kadar endüktans matrisi elde edilir. (4.13) eşitliğinde verildiği gibi  $N$  sarımdan oluşan bir  $N \times N$  matrisi alt gruplamalar ile (4.14) eşitliğinde verildiği gibi  $N' \times N'$  matrisine indirgenir.

$$\begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1,n-1} & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2,n-1} & L_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ L_{n-1,1} & L_{n-1,2} & \dots & L_{n-1,n-1} & L_{n-1,n} \\ L_{n1} & L_{n2} & \dots & L_{n,n-1} & L_{nn} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$\begin{bmatrix} L_{11}' & \cdots & L_{1n}' \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{n1}' & \cdots & L_{nn}' \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

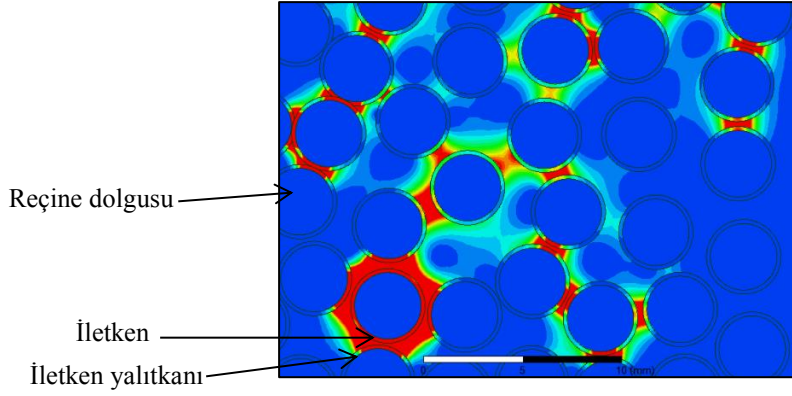
## 4.2 Kapasite Hesaplamaları

Transformatörün yüksek gerilim bobini sargı gruplarına bölünür. Her bir sargı grubunu oluşturan iletkenlerin birbirlerine göre kapasiteleri eşdeğer seri kapasiteleri meydana getirir. Bu sargı grupları ile alçak gerilim bobini arasında da paralel kapasiteler meydana gelir. Transformatörün LC modelinin elde edilebilmesi için her bir kapasitenin bulunması gerekir.

### 4.2.1 Seri Kapasite

#### 4.2.1.1 Yuvarlak İletkenle Sarılan Bobinler

Her bir yuvarlak iletkenle elde edilen sarım bir çok komşu sarıma sahiptir (bkz. Şekil 2.2). Konumları tam olarak belli olmayan rasgele sarılmış iletkenlerin kapasitesini analitik olarak hesaplamak çok karmaşık bir hal almakta ve gerçekçi sonuçlar vermemektedir. Bunun yerine sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan herhangi bir yazılım kullanılarak kapasite hesaplamaları kolay ve gerçekçi bir şekilde yapılabilir. Yazılımının çizim alanına bobindeki sarım dağılımında olduğu gibi iletkenler rasgele yerleştirilir. Bobinin başlangıç noktasından itibaren ardışık olarak artmak ve birbirlerine komşu olmak şartı ile her bir sarıma sarım geriliminin katları gerilimler atanır. İletkenlerin dışında kalan alanlara yalıtkan malzemesi atanır ve alanın enerjisi hesaplanır (Şekil 4.5).



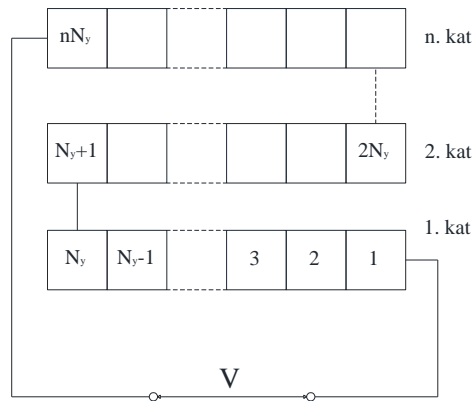
**Şekil 4.5:** Sonlu elemanlar yöntemi ile yuvarlak iletkenli sargıdaki yalıtkan malzemelerinde depolanan enerjinin analizi.

(4.15) eşitliğinde  $C$  kapasitesi yalnız bırakılarak seri kapasite hesaplanır.

$$E = \frac{1}{2} C V^2 \quad (4.15)$$

#### 4.2.1.2 Yassı İletkenle Sarılan Bobinler

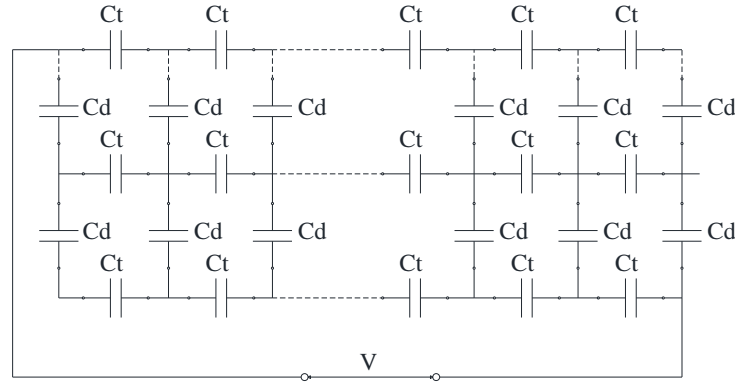
Şekil 4.6'da verildiği gibi kat sargı yöntemi ile sarılmış transformatör sargılarında iletkenler aksiyal yönde  $N_y$  adet sarılarak bir üst kata geçilir ve  $n$  kat sarıldıktan sonra sarım tamamlanır.



**Şekil 4.6:** Yassı iletkenle sarılan kat sargı.

Her bir iletkenin izoleli olması ve kat arasında yalıtkan kullanılması nedeniyle, her bir sarım ile bitişiğindeki sarım arasında ve bir üst ya da alt katındaki

iletken arasında kapasiteler meydana gelir. Şekil 4.7’de verildiği gibi komşu olmayan sarımlar arasındaki kapasiteler ihmal edilmiştir.



**Şekil 4.7:** Yassı iletkenle sarılan kat sargının kapasite modeli.

Her bir kapasitenin enerjilerinden yola çıkılarak  $n$  kattan oluşan bobinin toplam kapasitesi iki aşamada hesaplanır. Birinci aşamada yan yana sarılan iletkenler arası toplam kapasite enerji yöntemi ile elde edilir [18]. (4.16) eşitliğinde yan yana sarılan iki iletkenin  $C_t$  kapasitesi verilmiştir.

$$C_t = \frac{\epsilon_{il} \epsilon_0 2\pi r k}{d_{il}} \quad (4.16)$$

Uçlarına  $V$  gerilimi uygulanan  $n$  katlı bir sargıdaki toplam kapasite bulunur ve  $C_{tr}$  eşdeğer kapasite değeri (4.17) ve (4.18) eşitliklerinde verildiği gibi hesaplanır.

$$\frac{1}{2} C_t \left( \frac{V}{2N_y} \right)^2 n(N_y - 1) = \frac{1}{2} C_{tr} V^2 \quad (4.17)$$

$$C_{tr} = \frac{C_t}{2N_y^2} n(N_y - 1) \quad (4.18)$$

Kat sargının kapasite hesabının ikinci aşamasında, sargının katları arasında meydana gelen kapasiteler hesaplanır. (4.19) eşitliğinde verildiği üst üste gelen iki iletkenin arasında bulunan iletken yalıtkanı ve kat yalıtkanı  $C_d$  kapasitesini oluşturur.

$$C_d = \frac{\epsilon_0 2\pi r k}{\frac{d_{il}}{\epsilon_{il}} + \frac{d_{iz}}{\epsilon_{iz}}} \quad (4.19)$$

(4.20) eşitliğinde verildiği gibi katlar arası sarımlardaki gerilim farkları doğrusal olarak artar.

$$\left( \frac{2V}{nN_y} \right), \left( \frac{4V}{nN_y} \right), \left( \frac{6V}{nN_y} \right) \dots \dots \left( \frac{2(N_y - 1)V}{nN_y} \right) \quad (4.20)$$

(4.21) eşitliğinde katlar arasında bulunan yalıtkan malzemeler içerisinde depolanan toplam enerji verilmiştir.

$$E = (n - 1) \frac{1}{2} C_d \left[ \left( \frac{2V}{nN_y} \right)^2 + \left( \frac{4V}{nN_y} \right)^2 + \left( \frac{6V}{nN_y} \right)^2 + \dots + \left( \frac{2(N_y - 1)V}{nN_y} \right)^2 \right] \quad (4.21)$$

(4.22) eşitliğinde ardışık sayıların karelerinin toplamı ifadesi verilmiştir.

$$1^2 + 2^2 + 3^2 + \dots + (k - 1)^2 = \frac{k(k - 1)(2k - 1)}{6} \quad (4.22)$$

Kat arası iletkenlerin kapasitelerinden meydana gelen toplam enerji (4.23) eşitliğinde verilmiştir.

$$E = (n - 1) \frac{1}{\sqrt{2}} C_d \frac{V^2}{n^2 N_y^2} \left[ \left( \frac{2}{2} \right)^2 + \left( \frac{4}{2} \right)^2 + \left( \frac{6}{2} \right)^2 + \dots + \left( \frac{2(N_y - 1)}{2} \right)^2 \right] \quad (4.23)$$

(4.23) eşitliğinin (4.22) eşitliği kullanılarak sadeleştirilmiş hali (4.24) eşitliğinde verilmiştir.

$$E = \frac{(n - 1)(N_y - 1)(2N_y - 1)C_d V^2}{6\sqrt{2}n^2 N_y} = \frac{1}{2} C_{dr} V^2 \quad (4.24)$$

$C_{dr}$  kat arası eşdeğer kapasite (4.25) eşitliğinde verilmiştir.

$$C_{dr} = \frac{(n - 1)(N_y - 1)(2N_y - 1)C_d}{3\sqrt{2}n^2 N_y} \quad (4.25)$$

(4.18) ve (4.25) eşitliklerinin toplamından elde edilen kat sargının toplam eşdeğer kapasitesi (4.26) eşitliğinde verilmiştir.

$$C_s = \frac{C_t}{2N_y^2} n(N_y - 1) + \frac{(N_y - 1)(2N_y - 1)C_d}{3\sqrt{2}n^2 N_y} \quad (4.26)$$

#### 4.2.1.3 Strip İletkenle Sarılan Bobinler

Strip iletkenle sarılan bobinler iletken yalıtkanının olmaması nedeniyle sadece radyal yönde sarılırlar (bkz. Şekil 2.4).  $n$  kattan oluşan bir sargı  $n-1$  adet seri

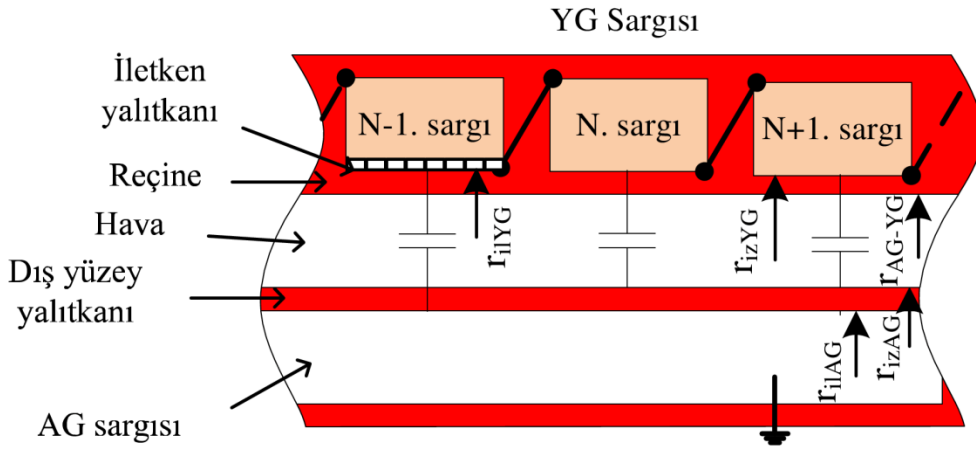
kapasite meydana getirir. Tek bir katın meydana getirdiği kapasite (4.27) eşitliğinde verilmiştir.

$$C_{str} = \frac{\epsilon_0 2\pi r s}{\frac{d_{iz}}{\epsilon_{iz}}} \quad (4.27)$$

Eşdeğer kapasite ise (4.28) eşitliğinde verilmiştir.

$$C_{st} = \frac{C_{str}}{n - 1} \quad (4.28)$$

#### 4.2.2 Paralel kapasite



Şekil 4.8: AG-YG sargıları arası bobin yapısı.

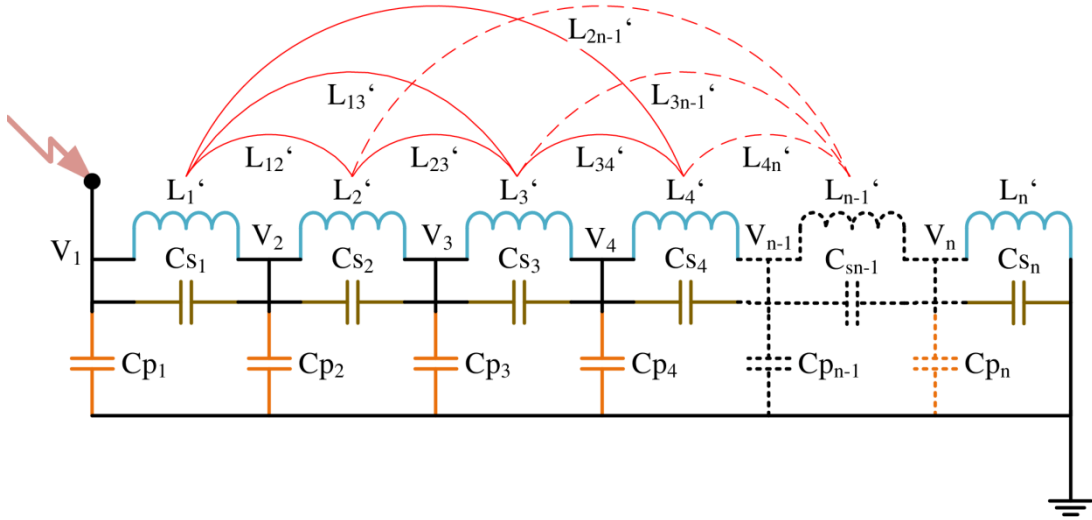
Paralel kapasite yüksek gerilim bobini ile içte kalan alçak gerilim bobini arasında meydana gelir. Eş merkezli iki silindirin oluşturduğu kapasitenin plaka alanı yüksek gerilim bobinini oluşturan sargı gruplarının en alt katındaki iletkenlerin alçak gerilim bobinine bakan yüzeyi kadardır. Şekil 4.8’de yüksek gerilim bobini ile alçak gerilim bobini arası yapı verilmiştir. Paralel kapasitenin hesaplama yöntemi (4.29) eşitliğindeki gibidir [18].

$$C_p = \frac{\epsilon_0 2\pi N_y (s + d_{iLYG})}{\frac{1}{\epsilon_{izAG}} \frac{r_{izAG}}{r_{ilAG}} + \frac{r_{AG-YG}}{r_{izAG}} + \frac{1}{\epsilon_{izYG}} \frac{r_{izYG}}{r_{AG-YG}} + \frac{1}{\epsilon_{iLYG}} \frac{r_{iLYG}}{r_{izAG}}} \quad (4.29)$$



## 5. MODELİN KURULMASI

### 5.1 Matematiksel Model



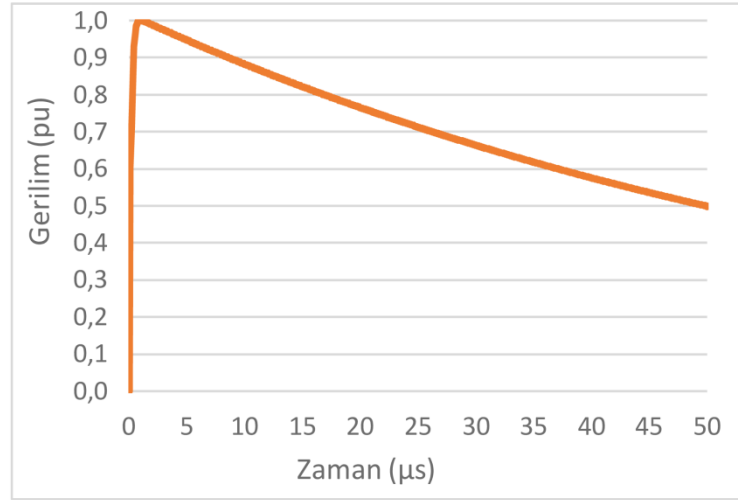
Şekil 5.1: L ve C parametrelerinden oluşan transformatör modeli.

Bakır kayıpları çok az bir sönümlenme meydana getirdiği için direnç; yıldırım darbe gerilimi testi sırasında alçak gerilim sargısının kısa devre edilmesinden dolayı manyetik çekirdeğin bir etkisi olmaması nedeniyle nüve modele dahil edilmez [2]. Kuru tip transformatörlerde alçak gerilim sargısı bant sargı olması ve topraklanması nedeniyle sadece yüksek gerilim bobine ait parametrelerden oluşan transformatör modeli yıldırım darbe geriliminin dağılımını modellemek için yeterlidir. Şekil 5.1'de yüksek gerilim bobinini oluşturan sargı gruplarının birbirileri ile olan  $L$  endüktansı, her bir sargı grubunu oluşturan sarımların meydana getirdiği  $C_s$  seri kapasitesi ve her bir sargı grubunun toprağa karşı  $C_p$  paralel kapasitesinden oluşan kuru tip transformatöre ait yıldırım darbe geriliminin dağılımının analizinde kullanılacak  $LC$  devresi verilmiştir. Düğüm gerilimlerinden ve endüktans üzerinden akan akımlardan yola çıkılarak elde edilen denklemlerin çözümü ile gerilim dağılımı analizi yapılır [2].

Şekil 5.1'deki modelde,  $V_I$  transformatöre uygulanan yıldırım darbe testinin gerilimidir. Standartta [5] belirtilen darbe geriliminin matematiksel ifadesi (5.1) eşitliğinde verilmiştir.

$$V_1 = 1.0167 (e^{-14230t} - e^{-6069100t}) \quad (5.1)$$

Şekil 5.2'de verildiği gibi yıldırım darbe gerilimi tepe değerine 1,2  $\mu$ s içerisinde, yarılanma süresine ise 50  $\mu$ s içerisinde ulaşır.



Şekil 5.2: Yıldırım darbe gerilimi.

Model, düğümlerdeki akım ve gerilim ifadelerinden yola çıkılarak çözümlenir. (5.2) eşitliğinde endüktansların üzerinden akan akımlara bağlı olarak düğüm gerilimleri verilmiştir [2].

$$\begin{aligned} V_1 - V_2 &= L_{11}' i_1 + L_{12}' i_2 + L_{13}' i_3 + \dots + L_{1n}' i_n \\ V_2 - V_3 &= L_{21}' i_1 + L_{22}' i_2 + L_{23}' i_3 + \dots + L_{2n}' i_n \\ V_3 - V_4 &= L_{31}' i_1 + L_{32}' i_2 + L_{33}' i_3 + \dots + L_{3n}' i_n \\ &\vdots \\ V_n - 0 &= L_{n1}' i_1 + L_{n2}' i_2 + L_{n3}' i_3 + \dots + L_{nn}' i_n \end{aligned} \quad (5.2)$$

(5.3) eşitliğinde ise denklem takımı matris halinde verilmiştir.

$$[D] V_1 + [K] [V] = [L][I] \quad (5.3)$$

Düğüm noktalarında akımların toplamının 0 olması ilkesine dayanılarak kapasiteler üzerinden akan akımların ifadesi (5.4) eşitliğinde verilmiştir.

$$\begin{aligned} I_1 - I_2 &= C s_1 (\dot{V}_2 - \dot{V}_1) + C p_2 \dot{V}_2 + C s_2 (\dot{V}_2 - \dot{V}_3) \\ I_2 - I_3 &= C s_2 (\dot{V}_3 - \dot{V}_2) + C p_3 \dot{V}_3 + C s_3 (\dot{V}_3 - \dot{V}_4) \\ I_3 - I_4 &= C s_3 (\dot{V}_4 - \dot{V}_3) + C p_4 \dot{V}_4 + C s_4 (\dot{V}_4 - \dot{V}_5) \\ &\vdots \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$I_{n-1} - I_n = C S_{n-1} (\dot{V}_n - \dot{V}_{n-1}) + C p_n \dot{V}_n + C S_n \dot{V}_n$$

(5.5) eşitliğinde ise denklem takımı matris halinde verilmiştir.

$$[-K^T] [I] = [G] [\dot{V}] + [F] \dot{V}_1 \quad (5.5)$$

(5.5) eşitliğindeki matrisin türevi alınarak  $[I]$  matrisinin yalnız bırakılmış hali (5.6) eşitliğinde verilmiştir.

$$[I] = -[K^T]^{-1} [G] [\dot{V}] - [K^T]^{-1} [F] \dot{V}_1 \quad (5.6)$$

(5.6) eşitliği (5.3) eşitliğindeki yerine konularak (5.7) eşitliği elde edilir.

$$[D] V_1 + [K] [V] = [L] \left( [-K^T]^{-1} [G] [\dot{V}] + [-K^T]^{-1} [F] \dot{V}_1 \right) \quad (5.7)$$

$[\dot{V}]$  matrisi yalnız bırakılarak LC devresinin çözümü (5.8) eşitliğindeki gibi elde edilir. Bu denklem Runge-Kutta-Nystrom yöntemi ile kolaylıkla çözülebilir.

$$[\dot{V}] = -[G]^{-1} [K^T] [L]^{-1} [D] V_1 - [G]^{-1} [K^T] [L]^{-1} [K] [V] - [G]^{-1} [F] \dot{V}_1 \quad (5.8)$$

$t=0$  anında  $[I]$  denklemin başlangıç değeri (5.9) eşitliğinde verilmiştir.

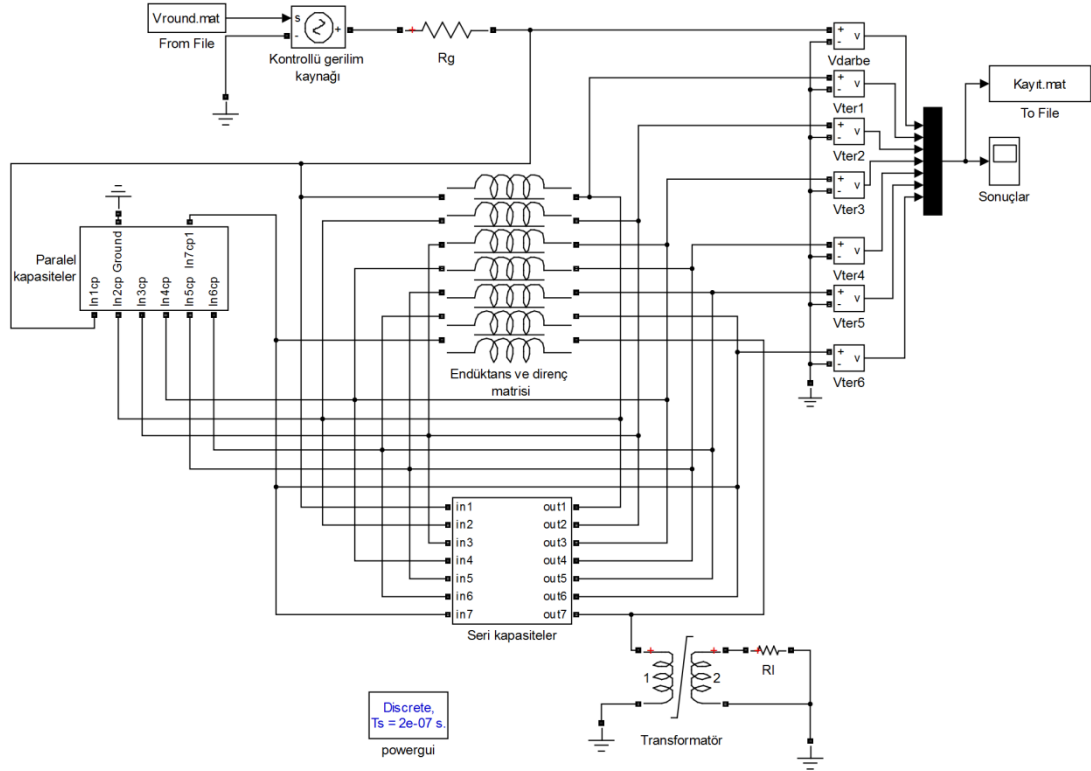
$$[\dot{V}]_{t=0} = [G]^{-1} [F] \dot{V}_{1t=0} \quad (5.9)$$

## 5.2 Matlab Simpower ile Modelleme

Yıldırım darbe dayanımı analizi için transformatör modellenmesinde kullanılacak diğer bir yöntem ise Matlab Simpower yazılımının kullanılmasıdır. Matlab Simpower, kütüphanesindeki elemanların her birini gerçek hayattaki devre elemanları gibi kurgular. Bu nedenle matematiksel denklemlere girilmeden devrenin elemanlarla modellenmesi yeterlidir.

Matlab Simpower ortamında transformatörü tüm elemanları ile modellemek mümkündür. Model oluştururken transformatöre ait sargı parametrelerinin hepsi modele eklenebilmektedir. Yazılımının sağladığı kolaylıklar transformatör çekirdeğini de modele dahil etme imkanı vermektedir. Sargı parametrelerinden oluşan model YG bobinini oluşturduğu için transformatör elemanının direnç ve kaçak akı parametrelerine 0 değeri verilerek tüm model kurulur. Deney setine uygun

olarak alçak gerilim çıkışı topraklanmaktadır. Transformatörün doğrudan toprağa bağlanmasına yazılım izin vermediği için direnç üzerinden topraklamak gerekmektedir. Çalışmalar sırasında kullanılan yuvarlak iletkenli sargıya ait model Şekil 5.3'te verilmiştir.



**Şekil 5.3:** Transformatörün darbe dağılımı analizi için kullanılan yuvarlak iletkenli sargının Matlab Simpower modeli.

Deneyler sırasında darbe jeneratöründen elde edilen darbe gerilimi verileri Matlab Simpower modelinde gerilim kaynağı elemanın kontrolünde kullanılmaya yazılım imkan sağlar. Böylece ideal darbe gerilimi ile darbe jeneratöründen elde edilen gerilim dağılımının arasındaki fark izole edilerek benzetim ve deney sonuçları aynı giriş gerilimine göre elde edilebilmektedir. Ayrıca Matlab Simpower ortamında benzetim sonuçlarını hem yazılım ortamındaki osiloskop yardımı ile hem de harici dosyaya kaydedilerek, deney ve benzetim sonuçlarının kolaylıkla ve hızlı bir şekilde kıyaslanabilmektedir.

Matlab Simpower modelinin transformatöre ait tüm elemanları barındırması ve hızlı olması nedeniyle çalışmalar sırasında bu model tercih edilmiştir.

## 6. YÖNTEM

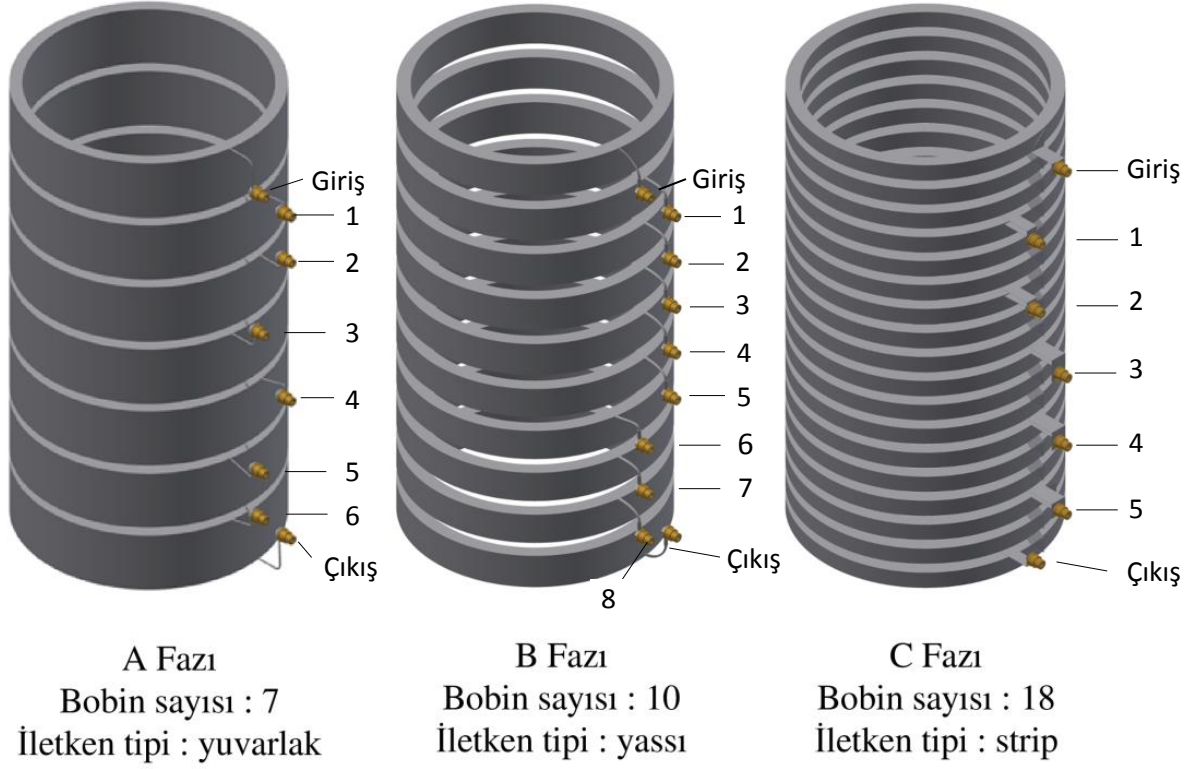
Yapılan çalışmalarda BEST marka 1600 kVA 3 fazlı çekirdek tipi nüvesi olan kuru tip transformatör projesi kullanılmıştır. Transformatörün gerilim oranı 22/0,4 kV'tur. Transformatörün alçak gerilim sargılarında 1200 mm genişliğinde bant iletken kullanılmıştır. Yüksek gerilim bobini sarım sayısı 1048'dir. Sargılarının her bir fazı farklı tipte iletkenlerden imal edilmiştir. Bobinlerinde kullanılan malzemelere ait bilgiler Tablo 6.1'de verilmiştir.

**Tablo 6.1:** Transformatör sargılarının teknik özellikleri.

Tanım	Yüksek Gerilim	Yüksek Gerilim	Yüksek Gerilim	Alçak Gerilim
	A Fazı	B Fazı	C Fazı	Bobini A-B-C
İletken tipi	Yuvarlak	Yassı	Strip	Bant
İletken yalıtkan kalınlığı	0,15 mm	0,2 mm	-	-
İletken ölçüsü	Ø4,2 mm	7 mm x 2 mm	40 mm x 0,4 mm	1200 mm x 1,2 mm
İletken malzemesi	Alüminyum			
Kat yalıtkanı kalınlığı	-	0,31	0,10	0,17

Yüksek gerilim bobini A fazı 7 alt sargı grubunda oluşmaktadır. Şekil 6.1'de verildiği gibi sargıdan toplam 8 adet terminal bağlantısı elde edilmiştir. Bobinin en üstünde ve en altında bulunan 2 terminal sırasıyla, yıldırım darbe geriliminin uygulandığı giriş terminali ve bobinin topraklandığı çıkış terminali olarak kullanılmıştır. Diğer terminallerden gerilim dağılımı bilgisi alınmıştır. Tablo 6.2'de bobin üzerinde gerilim dağılımı ölçümü yapılan sarım sayıları verilmiştir.

Yüksek gerilim bobini B fazında 10 alt sargı grubunda oluşmaktadır. Sargı üzerinde 10 adet terminal bağlantısı oluşturulmuştur. 2 terminal sırasıyla giriş ve çıkış terminali olarak kullanılmış, diğer terminallerden ise gerilim dağılımı bilgisi alınmıştır (Şekil 6.1). Bobin üzerinde gerilim dağılımı ölçümü yapılan sarım sayıları Tablo 6.2'de verilmiştir.



**Şekil 6.1:** Yüksek gerilim bobinlerinin yapısı.

Yüksek gerilim bobini C fazında 18 alt sargı grubundan oluşmaktadır. Sargı üzerinde 7 adet terminal bağlantısı oluşturulmuştur. 2 terminal sırasıyla giriş ve çıkış terminali olarak kullanılmış, diğer terminallerden ise gerilim dağılımı bilgisi alınmıştır. Prototip bobinin ön kapak yapısı nedeniyle her bir alt bobinden terminal elde edilememiştir. Gerilim dağılımı için 3., 6., 9., 12. ve 15. bobinler seçilmiştir (Şekil 6.1). Bobin üzerinde gerilim dağılımı ölçümü yapılan sarım sayıları Tablo 6.2’de verilmiştir.

**Tablo 6.2:** Sargılarda gerilim dağılımı ölçümü yapılan sarım sayıları.

Terminal No	Bobin Sarım Sayıları		
	Yuvarlak İletken - A Fazı	Yassı İletkenli B fazı	Strip İletkenli C Fazı
1	899. sarım	938. sarım	871. sarım
2	749. sarım	828. sarım	696. sarım
3	601. sarım	718. sarım	522. sarım
4	452. sarım	608. sarım	348. sarım
5	303. sarım	498. sarım	174. sarım
6	154. sarım	399. sarım	-
7	-	300. sarım	-
8	-	201. sarım	-

## 6.1 Matematiksel Model Üzerine Yapılan Çalışmalar

Kuru tip transformatörün her üç yüksek gerilim sargısı için ayrı ayrı sargı parametreleri hesaplanmış ve matematiksel modelleri oluşturulmuştur. Yuvarlak iletkenli A fazına ait yüksek gerilim bobininin parametre değerleri Tablo 6.3 verilmiştir. Tablo 6.3 a'da verilen tablo endüktans matrisidir. Her bir satır ve sütun bir sargıyı ifade etmektedir. Herhangi iki sütunun kesişim noktası eğer satır ve sütun numaraları aynı ise ilgili sargıya ait öz endüktans değerini, farklı ise iki sargı arasındaki ortak endüktans değerini vermektedir.

**Tablo 6.3:** Yuvarlak iletkenli faz sargısına ait parametre değerleri.

### a) Endüktans değerleri (H)

Sargı No	1	2	3	4	5	6	7
1	1,67E-02	6,93E-03	2,69E-03	1,24E-03	6,10E-04	2,83E-04	1,33E-04
2	6,93E-03	1,73E-02	6,89E-03	2,71E-03	1,25E-03	5,65E-04	2,67E-04
3	2,69E-03	6,89E-03	1,64E-02	6,94E-03	2,74E-03	1,17E-03	5,43E-04
4	1,24E-03	2,71E-03	6,94E-03	1,73E-02	6,98E-03	2,55E-03	1,11E-03
5	6,10E-04	1,25E-03	2,74E-03	6,98E-03	1,66E-02	6,37E-03	2,38E-03
6	2,83E-04	5,65E-04	1,17E-03	2,55E-03	6,37E-03	1,76E-02	6,15E-03
7	1,33E-04	2,67E-04	5,43E-04	1,11E-03	2,38E-03	6,15E-03	1,71E-02

### b) Kapasite değerleri (pF)

[pF]	1. sargı	2. sargı	3. sargı	4. sargı	5. sargı	6. sargı	7. sargı
Seri	104	104	104	104	104	104	104
Paralel	25,54	22,9	24,7	22,02	24,7	21,1	27,3

### c) Direnç değerleri (mΩ)

1. sargı	2. sargı	3. sargı	4. sargı	5. sargı	6. sargı	7. sargı
540	540	540	540	540	540	540

B fazına ait yüksek gerilim bobininin parametre değerleri Tablo 6.4'te verilmiştir. Tablo 6.4 a'da verilen tablo endüktans matrisidir. Her bir satır ve sütun bir sargıyı ifade etmektedir. Herhangi iki sütunun kesişim noktası eğer satır ve sütun numaraları aynı ise ilgili sargıya ait öz endüktans değerini, farklı ise iki sargı arasındaki ortak endüktans değerini vermektedir.

**Tablo 6.4:** Yassı iletkenli faz sargısına ait parametre değerleri.

**a) Endüktans değerleri (H)**

Sargı No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1,13E-02	4,90E-03	2,43E-03	1,37E-03	8,30E-04	4,84E-04	3,31E-04	2,35E-04	1,71E-04	1,28E-04
2	4,90E-03	1,13E-02	4,90E-03	2,43E-03	1,37E-03	7,58E-04	4,98E-04	3,40E-04	2,41E-04	1,75E-04
3	2,43E-03	4,90E-03	1,13E-02	4,90E-03	2,43E-03	1,25E-03	7,83E-04	5,12E-04	3,49E-04	2,46E-04
4	1,37E-03	2,43E-03	4,90E-03	1,13E-02	4,90E-03	2,23E-03	1,30E-03	8,08E-04	5,27E-04	3,58E-04
5	8,30E-04	1,37E-03	2,43E-03	4,90E-03	1,13E-02	4,52E-03	2,32E-03	1,35E-03	8,35E-04	5,42E-04
6	4,84E-04	7,58E-04	1,25E-03	2,23E-03	4,52E-03	9,38E-03	4,17E-03	2,13E-03	1,23E-03	7,61E-04
7	3,31E-04	4,98E-04	7,83E-04	1,30E-03	2,32E-03	4,17E-03	9,38E-03	4,17E-03	2,13E-03	1,23E-03
8	2,35E-04	3,40E-04	5,12E-04	8,08E-04	1,35E-03	2,13E-03	4,17E-03	9,38E-03	4,17E-03	2,13E-03
9	1,71E-04	2,41E-04	3,49E-04	5,27E-04	8,35E-04	1,23E-03	2,13E-03	4,17E-03	9,38E-03	4,16E-03
10	1,28E-04	1,75E-04	2,46E-04	3,58E-04	5,42E-04	7,61E-04	1,23E-03	2,13E-03	4,16E-03	9,34E-03

**b) Kapasite değerleri (pF)**

	1. Sargı	2. sargı	3. sargı	4. sargı	5. sargı	6. sargı	7. sargı	8. sargı	9. sargı	10. sargı
Seri	523,96	523,96	523,96	523,96	523,96	463,60	463,60	463,60	463,60	567,88
Paralel	13,505	13,505	13,505	13,505	13,505	12,155	12,155	12,155	12,155	13,505

**c) Direnç değerleri (mΩ)**

1. sargı	2. sargı	3. sargı	4. sargı	5. sargı	6. sargı	7. sargı	8. sargı	9. sargı	10. sargı
395,8	395,8	395,8	395,8	395,8	356,2	356,2	356,2	356,2	358,2

C fazına ait yüksek gerilim bobininin parametre değerleri Tablo 6.5'te verilmiştir. Tablo 6.5 Tablo 6.3 a b'de verilen tablolar endüktans matrisidir. Her bir satır ve sütun bir sargıyı ifade etmektedir. Herhangi iki sütunun kesişim noktası eğer satır ve sütun numaraları aynı ise ilgili sargıya ait öz endüktans değerini, farklı ise iki sargı arasındaki ortak endüktans değerini vermektedir.



**Tablo 6.5:** Strip iletkenli faz sargısına ait parametre değerleri.**a) Endüktans değerleri-1 (H)**

Sargı No	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	4,70E-03	1,97E-03	1,21E-03	8,08E-04	5,56E-04	4,02E-04	2,97E-04	2,24E-04	1,72E-04
2	1,97E-03	4,70E-03	1,95E-03	1,20E-03	7,89E-04	5,53E-04	4,00E-04	2,96E-04	2,23E-04
3	1,21E-03	1,95E-03	4,70E-03	1,95E-03	1,18E-03	7,89E-04	5,53E-04	4,00E-04	2,96E-04
4	8,08E-04	1,20E-03	1,95E-03	4,70E-03	1,92E-03	1,18E-03	7,89E-04	5,53E-04	4,00E-04
5	5,56E-04	7,89E-04	1,18E-03	1,92E-03	4,56E-03	1,89E-03	1,15E-03	7,74E-04	5,43E-04
6	4,02E-04	5,53E-04	7,89E-04	1,18E-03	1,89E-03	4,56E-03	1,89E-03	1,15E-03	7,74E-04
7	2,97E-04	4,00E-04	5,53E-04	7,89E-04	1,15E-03	1,89E-03	4,56E-03	1,89E-03	1,15E-03
8	2,24E-04	2,96E-04	4,00E-04	5,53E-04	7,74E-04	1,15E-03	1,89E-03	4,56E-03	1,89E-03
9	1,72E-04	2,23E-04	2,96E-04	4,00E-04	5,43E-04	7,74E-04	1,15E-03	1,89E-03	4,56E-03
10	1,34E-04	1,72E-04	2,23E-04	2,96E-04	3,93E-04	5,43E-04	7,74E-04	1,15E-03	1,89E-03
11	1,07E-04	1,34E-04	1,72E-04	2,23E-04	2,90E-04	3,93E-04	5,43E-04	7,74E-04	1,15E-03
12	8,55E-05	1,06E-04	1,34E-04	1,72E-04	2,19E-04	2,90E-04	3,93E-04	5,43E-04	7,74E-04
13	6,95E-05	8,52E-05	1,06E-04	1,34E-04	1,68E-04	2,19E-04	2,90E-04	3,93E-04	5,43E-04
14	5,71E-05	6,92E-05	8,52E-05	1,06E-04	1,32E-04	1,68E-04	2,19E-04	2,90E-04	3,93E-04
15	4,74E-05	5,69E-05	6,92E-05	8,52E-05	1,04E-04	1,32E-04	1,68E-04	2,19E-04	2,90E-04
16	3,97E-05	4,72E-05	5,69E-05	6,92E-05	8,36E-05	1,04E-04	1,32E-04	1,68E-04	2,19E-04
17	3,35E-05	3,96E-05	4,72E-05	5,69E-05	6,80E-05	8,36E-05	1,04E-04	1,32E-04	1,68E-04
18	2,86E-05	3,35E-05	3,96E-05	4,72E-05	5,58E-05	6,80E-05	8,36E-05	1,04E-04	1,32E-04

**b) Endüktans değerleri-2 (H)**

Sargı No	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1,34E-04	1,07E-04	8,55E-05	6,95E-05	5,71E-05	4,74E-05	3,97E-05	3,35E-05	2,86E-05
2	1,72E-04	1,34E-04	1,06E-04	8,52E-05	6,92E-05	5,69E-05	4,72E-05	3,96E-05	3,35E-05
3	2,23E-04	1,72E-04	1,34E-04	1,06E-04	8,52E-05	6,92E-05	5,69E-05	4,72E-05	3,96E-05
4	2,96E-04	2,23E-04	1,72E-04	1,34E-04	1,06E-04	8,52E-05	6,92E-05	5,69E-05	4,72E-05
5	3,93E-04	2,90E-04	2,19E-04	1,68E-04	1,32E-04	1,04E-04	8,36E-05	6,80E-05	5,58E-05
6	5,43E-04	3,93E-04	2,90E-04	2,19E-04	1,68E-04	1,32E-04	1,04E-04	8,36E-05	6,80E-05
7	7,74E-04	5,43E-04	3,93E-04	2,90E-04	2,19E-04	1,68E-04	1,32E-04	1,04E-04	8,36E-05
8	1,15E-03	7,74E-04	5,43E-04	3,93E-04	2,90E-04	2,19E-04	1,68E-04	1,32E-04	1,04E-04
9	1,89E-03	1,15E-03	7,74E-04	5,43E-04	3,93E-04	2,90E-04	2,19E-04	1,68E-04	1,32E-04
10	4,56E-03	1,89E-03	1,15E-03	7,74E-04	5,43E-04	3,93E-04	2,90E-04	2,19E-04	1,68E-04
11	1,89E-03	4,56E-03	1,89E-03	1,15E-03	7,74E-04	5,43E-04	3,93E-04	2,90E-04	2,19E-04
12	1,15E-03	1,89E-03	4,56E-03	1,89E-03	1,15E-03	7,74E-04	5,43E-04	3,93E-04	2,90E-04
13	7,74E-04	1,15E-03	1,89E-03	4,56E-03	1,89E-03	1,15E-03	7,74E-04	5,43E-04	3,93E-04
14	5,43E-04	7,74E-04	1,15E-03	1,89E-03	4,56E-03	1,89E-03	1,15E-03	7,74E-04	5,43E-04
15	3,93E-04	5,43E-04	7,74E-04	1,15E-03	1,89E-03	4,56E-03	1,89E-03	1,15E-03	7,74E-04
16	2,90E-04	3,93E-04	5,43E-04	7,74E-04	1,15E-03	1,89E-03	4,56E-03	1,89E-03	1,15E-03
17	2,19E-04	2,90E-04	3,93E-04	5,43E-04	7,74E-04	1,15E-03	1,89E-03	4,56E-03	1,89E-03
18	1,68E-04	2,19E-04	2,90E-04	3,93E-04	5,43E-04	7,74E-04	1,15E-03	1,89E-03	4,56E-03

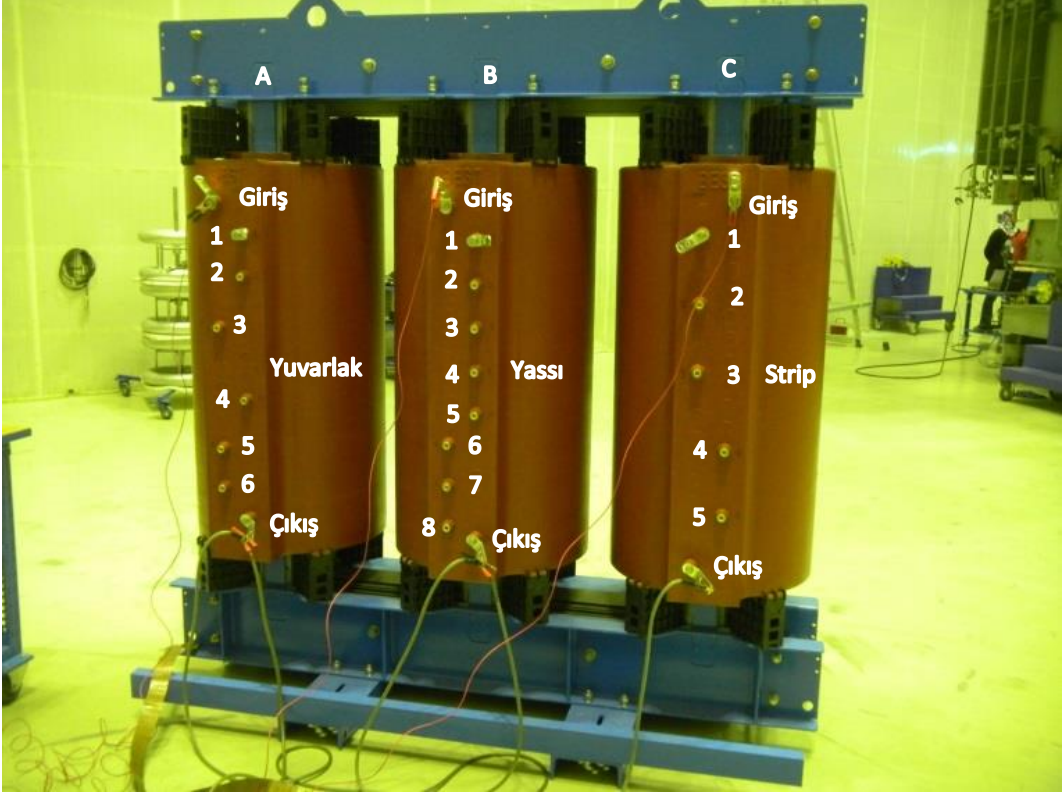
c) Kapasite değerleri (pF)

	1. sargı	2. sargı	3. sargı	4. sargı	5. sargı	6. sargı
<b>Seri</b>	312,3	312,3	312,3	312,3	317,3	317,3
<b>Paralel</b>	7,266	7,266	7,266	7,266	7,266	7,266
	7. sargı	8. sargı	9. sargı	10. sargı	11. sargı	12. sargı
<b>Seri</b>	317,3	317,3	317,3	317,3	317,3	317,3
<b>Paralel</b>	7,266	7,266	7,266	7,266	7,266	7,266
	13. sargı	14. sargı	15. sargı	16. sargı	17. sargı	18. sargı
<b>Seri</b>	317,3	317,3	317,3	317,3	317,3	317,3
<b>Paralel</b>	7,266	7,266	7,266	7,266	7,266	7,266

d) Direnç değerleri (m $\Omega$ )

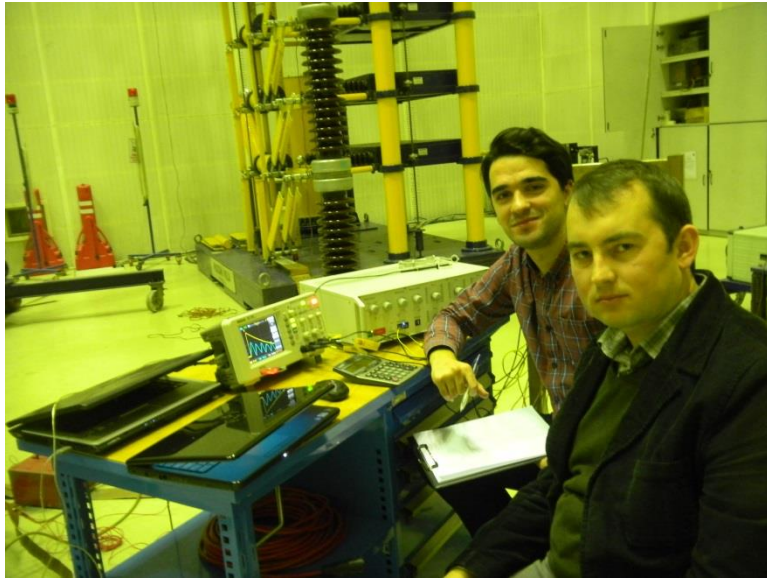
1. sargı	2. sargı	3. sargı	4. sargı	5. sargı	6. sargı
181	181	181	181	178,8	178,8
7. sargı	8. sargı	9. sargı	10. sargı	11. sargı	12. sargı
178,8	178,8	178,8	178,8	178,8	178,8
13. sargı	14. sargı	15. sargı	16. sargı	17. sargı	18. sargı
178,8	178,8	178,8	178,8	178,8	178,8

## 6.2 Prototip Çalışması



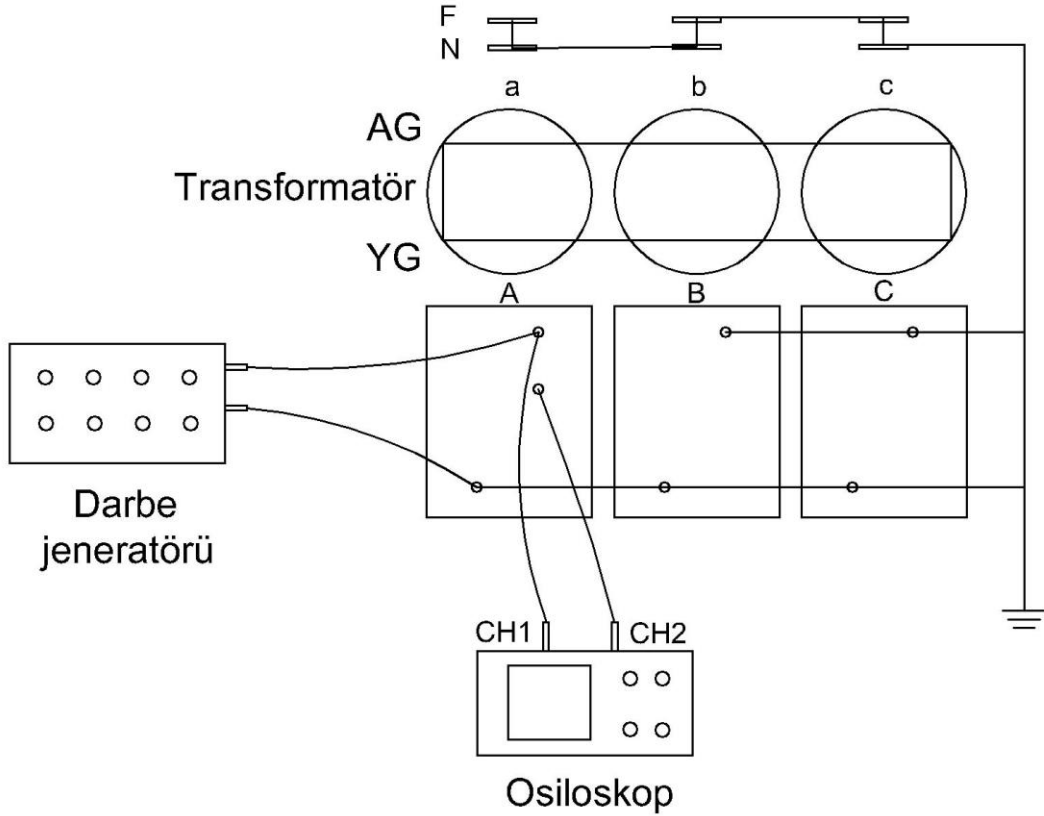
Şekil 6.2: 1600 kVA 22/0,4 kV kuru tip transformatör.

Şekil 6.2’de gösterildiği gibi yıldırım darbe geriliminin dağılımının incelenmesi için BALIKESİR ELEKTROMEKANİK SANAYİ TESİSLERİ kuru trafo fabrikasında 1600kVA gücünde kuru tip transformatör imal edilmiştir.



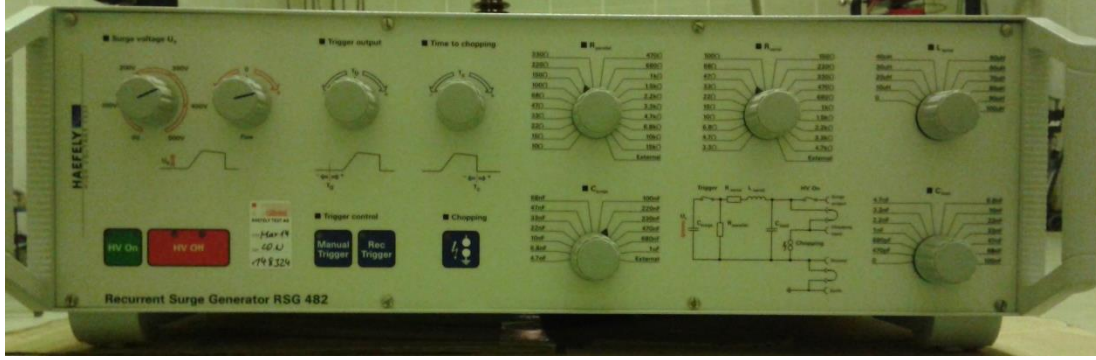
Şekil 6.3: Test Düzeneği.

Tepe noktası 1,2  $\mu$ s ve yarılanma süresi 50  $\mu$ s olan darbe gerilimi standartlara uygun olarak Şekil 6.3'te verildiği gibi yıldırım darbe jeneratörü yardımı ile üretilmiş ve osiloskop yardımı ile üretilen darbe gerilimi ve bobin içerisindeki dağılım izlenmiş ve kaydedilmiştir (Şekil 6.4).



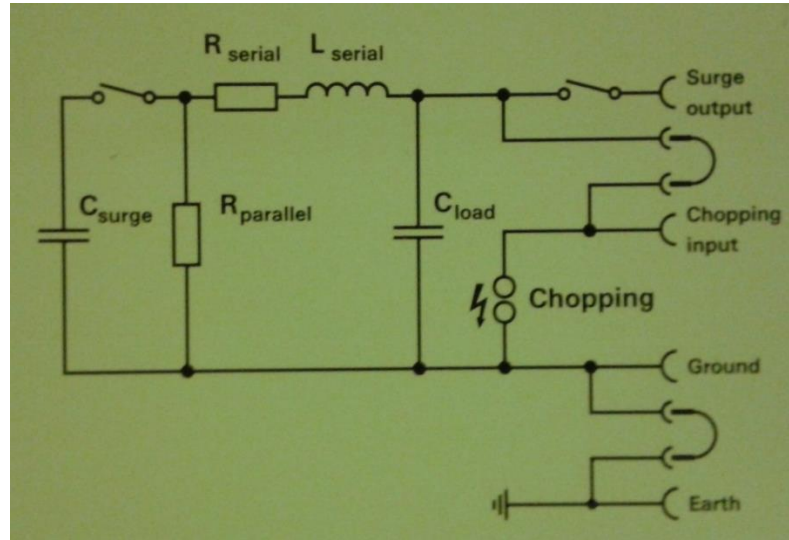
**Şekil 6.4:** Ölçüm devresinde kullanılan elemanlar.

Darbe gerilimi üretilmesinde Haefely Hipotronics markasının RSG482 modeli kullanılmıştır (Şekil 6.5).



Şekil 6.5: Haefely marka darbe gerilimi üretici.

Darbe jeneratöründen darbe geriliminin elde edilmesi için cihazın içerisindeki RLC parametrelerinin uygun değerlere ayarlanması gerekmektedir. RLC parametreleri  $C_{surge}$ ,  $C_{load}$ ,  $R_{serial}$ ,  $R_{parallel}$ , ve  $L_{serial}$  parametrelerinden oluşmaktadır (Şekil 6.6). Anahtarlama noktaları cihazın kontrol devresi tarafından kumanda edilerek istenen darbe gerilimi üretilebilmektedir. Deneyler sırasında üretilen darbe geriliminin tepe değeri 292 V'tur.

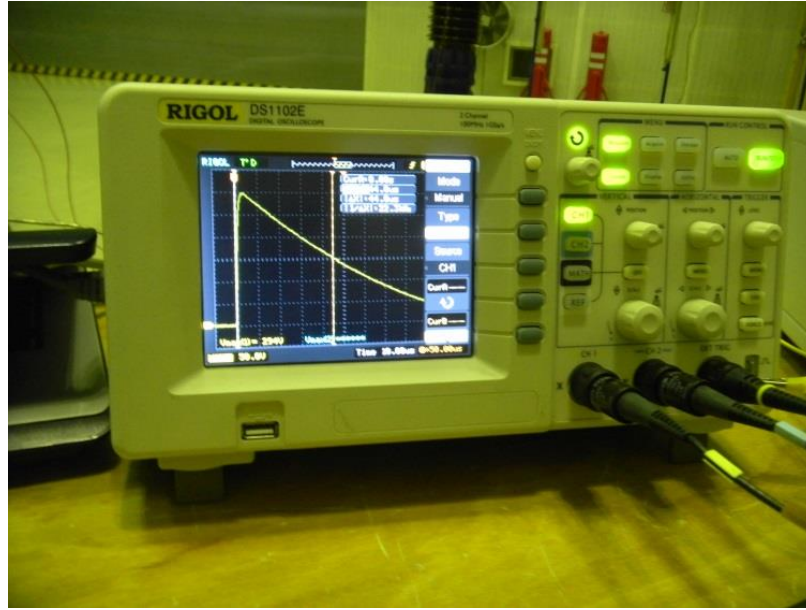


Şekil 6.6: Darbe jeneratörü devre şeması.

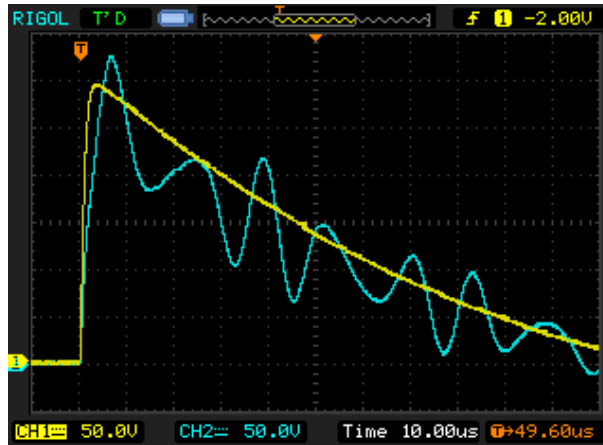
Darbe gerilimi transformatörün giriş ve çıkış terminallerine uygulanmış ara terminal bağlantılarından okunan gerilimler Şekil 6.7’te verilen RİGOL markasının DS1102E modeli osiloskop vasıtasıyla kaydedilmiştir. Osiloskobun teknik değerleri Tablo 6.6’de verilmiştir.

**Tablo 6.6:** Test sırasında kullanılan osiloskobun teknik değerleri.

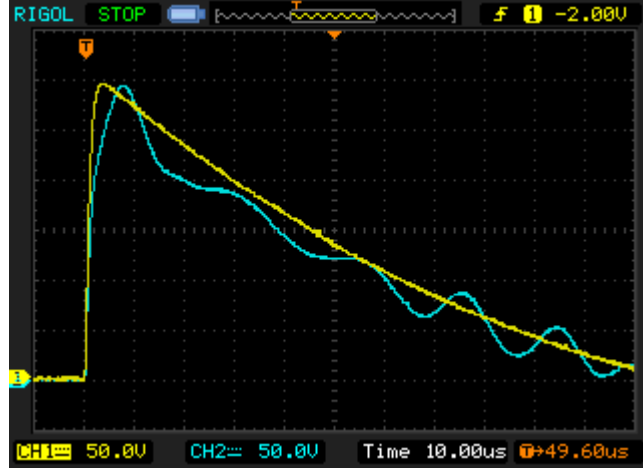
<u>Özellik</u>	<u>Deęer</u>
Kanal sayısı	2
En yüksek bant genişliği	100 MHz
Gerçek zamanlı örnekleme aralığı	1 GSa/s
En yüksek örnekleme aralığı	25 GSa/s
Test sırasındaki örnekleme aralığı	0,5 GSa/s
Giriş parametreleri	Empedans : $1M\Omega \pm 2\%$ , kapasite : $18pF \pm 3pF$ ,



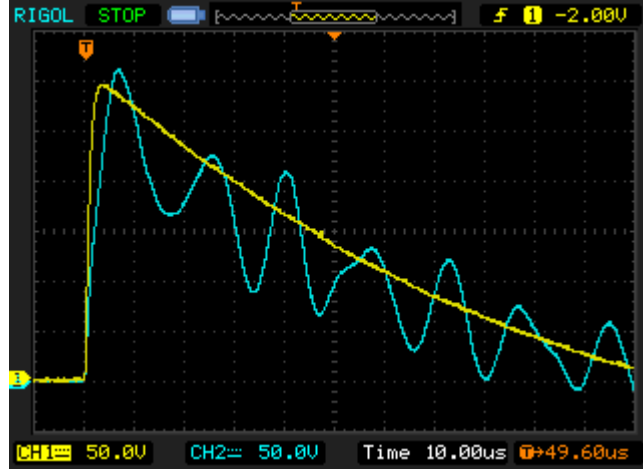
**Şekil 6.7:** Test sırasında kullanılan osiloskop.



a) A fazı



b) B Fazı



c) C fazı

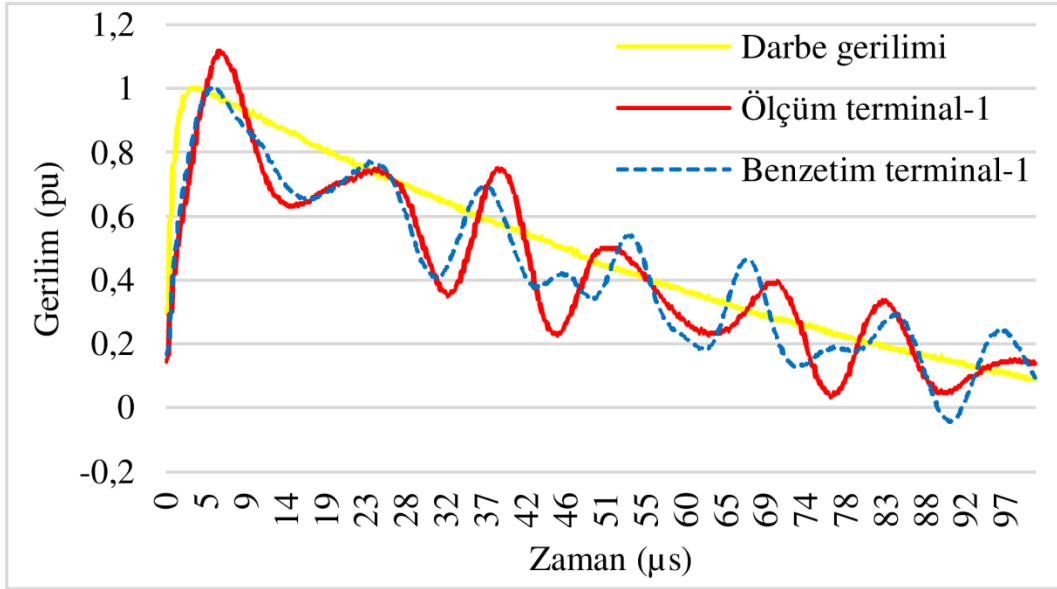
**Şekil 6.8:** A, B ve C fazlarına ait bobinlerin 1. terminallerinin ölçümü sırasında osiloskoptan alınan kayıtlar.

Test sırasında her bir faza ait bobin tek tek ölçülmüştür. Bir bobin test edilirken diğer bobinler topraklanmıştır. Osiloskop aynı anda iki adet gerilim bilgisini okuyabilmektedir. Osiloskobun 1. gerilim girişi her zaman darbe jeneratörünün çıkışından transformatörün giriş terminaline uygulanan darbe gerilimini gösterecek şekilde sabit halde bırakılmıştır. 2. gerilim girişi ise gerilim bilgisi alınmak istenen diğer terminallere sırası ile bağlanmıştır. Her bir bobinin terminaline ait gerilim grafiklerinin resimleri kaydedilmiştir (Şekil 6.8). Test çalışmaları BALIKESİR ELEKTROMEKANİK SANAYİ TESİSLERİ firmasının ağır sanayi bölgesinde yer alan yerleşkesindeki yüksek gerilim test laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

## 7. BULGULAR

### 7.1 A Fazı - Yuvarlak İletkenle Sarılan Bobine Ait Benzetim ve Test Sonuçları

Test çalışmasına A fazında yer alan yüksek gerilim bobininde darbe dağılımının ölçülmesi ile başlanmıştır. A fazı yuvarlak iletken ile sarılmıştır. 6 ara terminalden gerilim kaydı alınmıştır. Gerilim bilgisinin alınmasına giriş terminaline en yakın 1 nolu ara terminalden başlanmıştır.



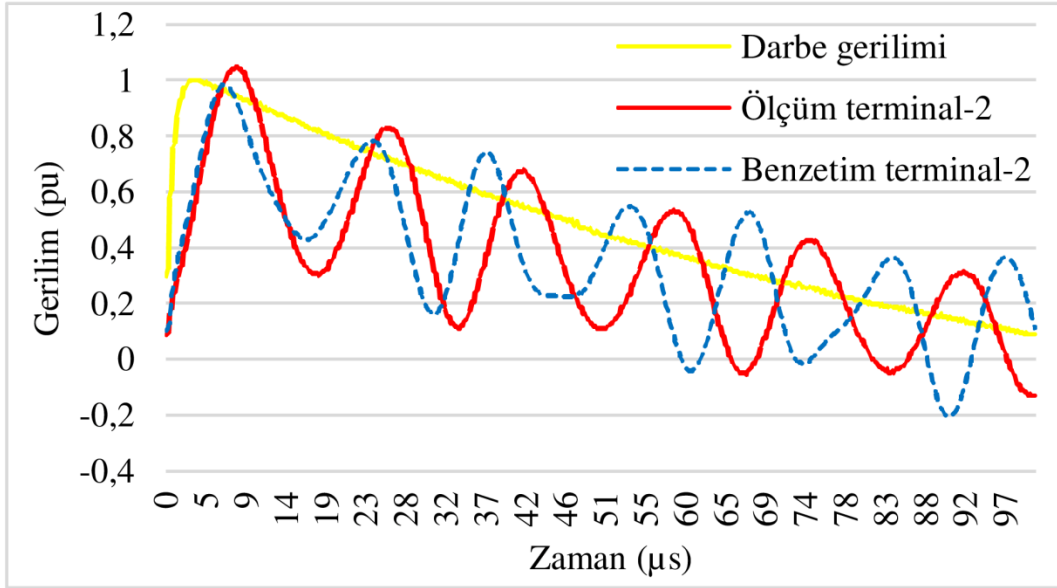
Şekil 7.1: Yuvarlak iletkenli faz sargısı 1 numaralı çıkış ucu (899. sarım).

1 nolu ara terminal, bobinin 1. ve 2. sargı grubunu birbirine bağlayan iletkene bağlıdır. Bu noktadaki bobinin sarım sayısı 899'dur. 1 nolu terminalden test ve benzetim çalışmaları sırasında elde edilen gerilimler Şekil 7.1'de verilmiştir. Test sonuçlarına göre en yüksek darbe gerilimi 1,12 p.u. iken benzetim sonuçlarına göre 0,98 p.u.'dur. Her iki yöntemle elde edilen gerilim grafikleri birebir örtüşmektedir.

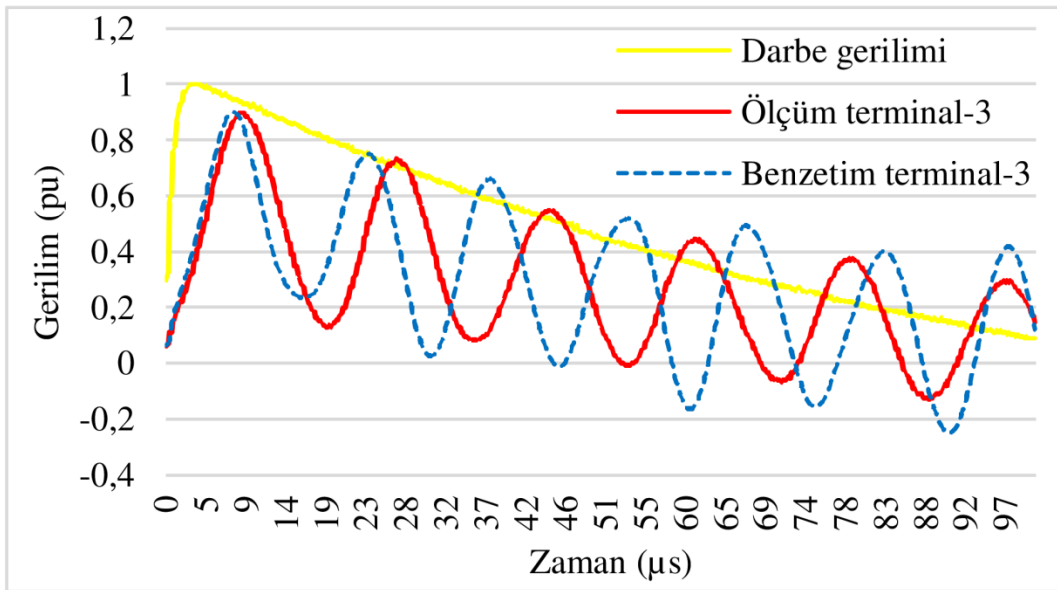
2 nolu ara terminal bobinin 2. ve 3. sargı grubunu birbirine bağlayan iletkene bağlıdır. Bu noktadaki bobinin sarım sayısı 749'dur. 2 nolu terminalden test ve benzetim çalışmaları sırasında elde edilen gerilimler Şekil 7.2'de verilmiştir. Test



sonuçlarına göre en yüksek darbe gerilimi 1,05 p.u. iken benzetim sonuçlarına göre 0,9 p.u.'dur.



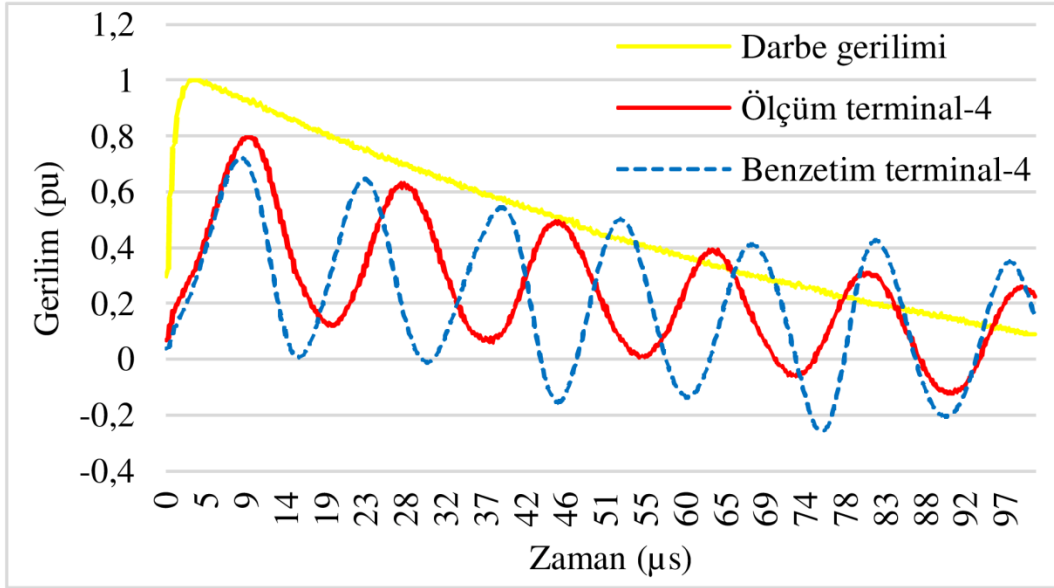
Şekil 7.2: Yuvarlak iletkenli faz sargısı 2 numaralı çıkış ucu (749. sarım).



Şekil 7.3: Yuvarlak iletkenli faz sargısı 3 numaralı çıkış ucu (601. sarım).

3 nolu ara terminal bobinin 3. ve 4. sargı grubunu birbirine bağlayan iletkene bağlıdır. Bu noktadaki bobinin sarım sayısı 601'dir. 3 nolu terminalden test ve benzetim çalışmaları sırasında elde edilen gerilimler Şekil 7.3'te verilmiştir. Test

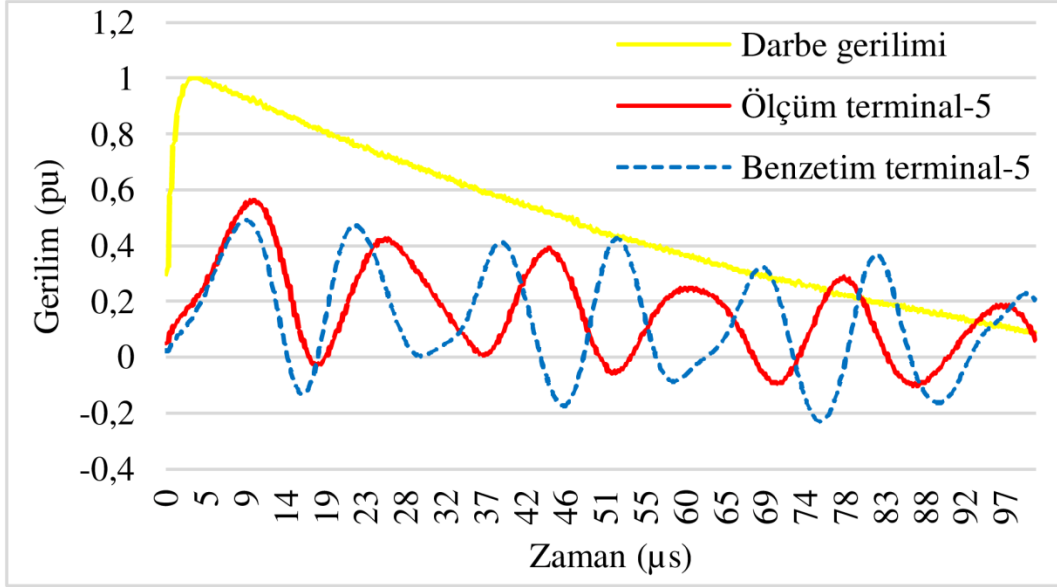
sonuçlarına göre en yüksek darbe gerilimi 0,90 p.u. iken benzetim sonuçlarına göre 0,90 p.u.'dur.



**Şekil 7.4:** Yuvarlak iletkenli faz sargısı 4 numaralı çıkış ucu (452. sarım).

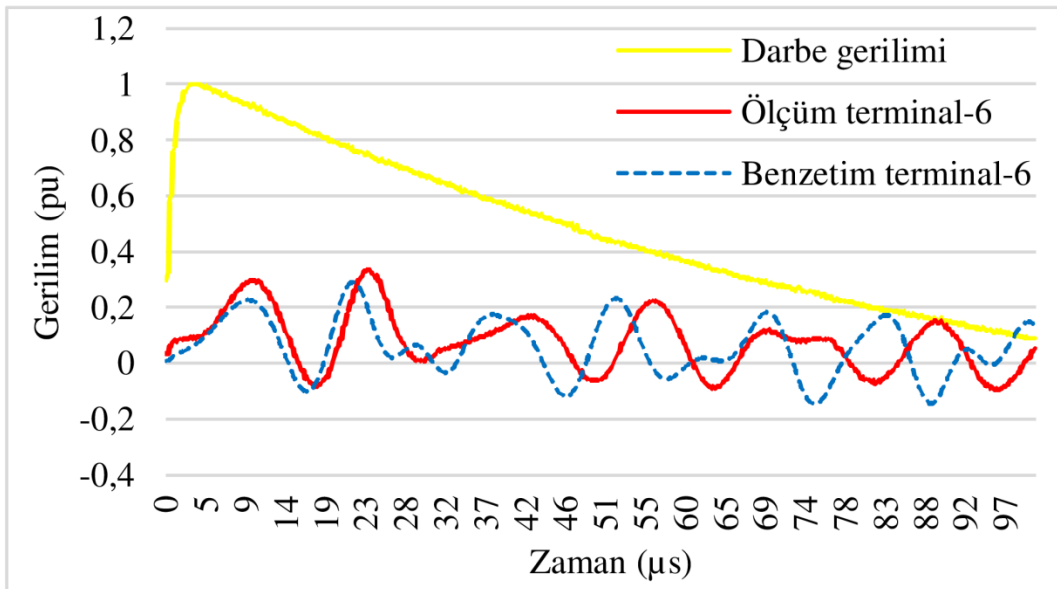
4 nolu ara terminal bobinin 4. ve 5. sargı grubunu birbirine bağlayan iletkene bağlıdır. Bu noktadaki bobinin sarım sayısı 452'dir. 4 nolu terminalden test ve benzetim çalışmaları sırasında elde edilen gerilimler Şekil 7.4'te verilmiştir. Test sonuçlarına göre en yüksek darbe gerilimi 0,79 p.u. iken benzetim sonuçlarına göre 0,72 p.u.'dur.

5 nolu ara terminal bobinin 5. ve 6. sargı grubunu birbirine bağlayan iletkene bağlıdır. Bu noktadaki bobinin sarım sayısı 303'tür. 5 nolu terminalden test ve benzetim çalışmaları sırasında elde edilen gerilimler Şekil 7.5'te verilmiştir. Test sonuçlarına göre en yüksek darbe gerilimi 0,56 p.u. iken benzetim sonuçlarına göre 0,49 p.u.'dur.



**Şekil 7.5:** Yuvarlak iletkenli faz sargısı 5 numaralı çıkış ucu (303. sarım).

6 nolu ara terminal bobinin 6. ve 7. sargı grubunu bağlayan iletkene bağlıdır. Bu noktadaki bobinin sarım sayısı 154'tür. 6 nolu terminalden test ve benzetim çalışmaları sırasında elde edilen gerilimler Şekil 7.6'da verilmiştir. Test sonuçlarına göre en yüksek darbe gerilimi 0,34 p.u. iken benzetim sonuçlarına göre 0,29 p.u.'dur.



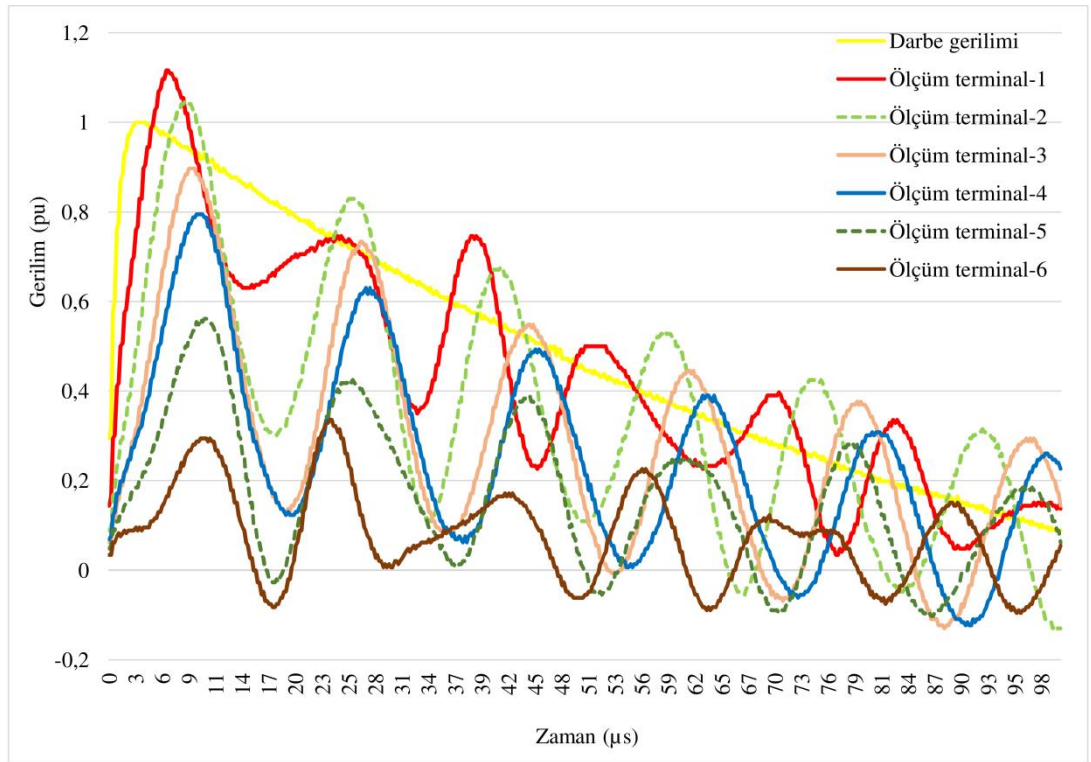
**Şekil 7.6:** Yuvarlak iletkenli faz sargısı 6 numaralı çıkış ucu (154. sarım).

Tüm terminallerde ölçüm ve benzetim sonuçlarına göre darbe dağılımının en yüksek genliklerinin karşılaştırması Tablo 7.1’de verilmiştir. Sapmanın en fazla %13,48 olduğu gözlenmiştir.

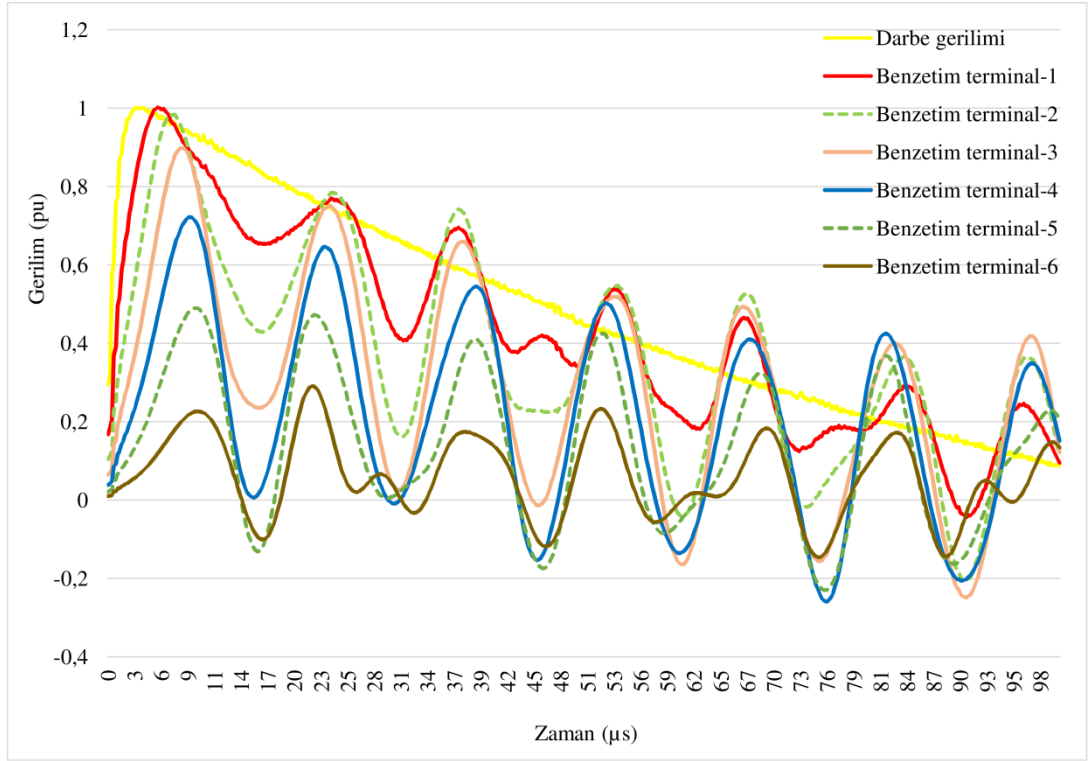
**Tablo 7.1:** Yuvarlak iletkenli bobinde ölçüm ve benzetim sonuçlarına göre darbe gerilimi en yüksek değerlerinin karşılaştırması.

<u>Terminal</u>	<u>Ölçülen (pu)</u>	<u>Benzetim (pu)</u>	<u>% Fark</u>
1	1,12	1,00	10,22
2	1,05	0,98	6,11
3	0,90	0,90	-0,09
4	0,79	0,72	9,13
5	0,56	0,49	12,74
6	0,34	0,29	13,48

Yuvarlak iletkenli sargıya ait ölçüm ve benzetim sonuçlarının toplu grafiği Şekil 7.7’de verilmiştir.



a) Ölçüm sonuçları

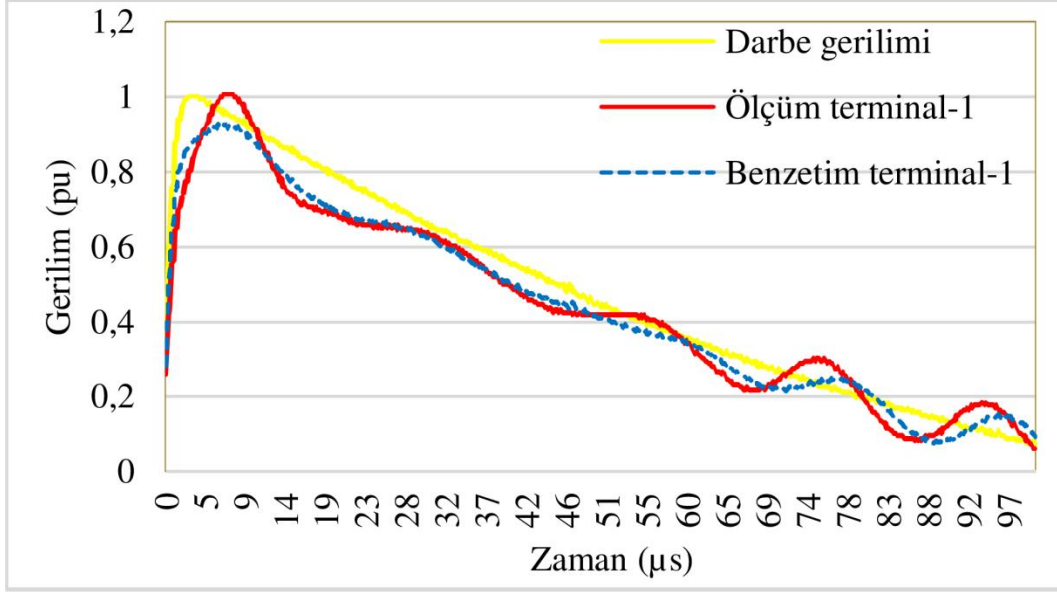


**b) Benzetim sonuçları**

**Şekil 7.7:** Yuvarlak iletkenli sargının terminallerindeki darbe dağılımları.

## 7.2 B Fazı - Yassı İletkenle Sarılan Bobine Ait Benzetim ve Test Sonuçları

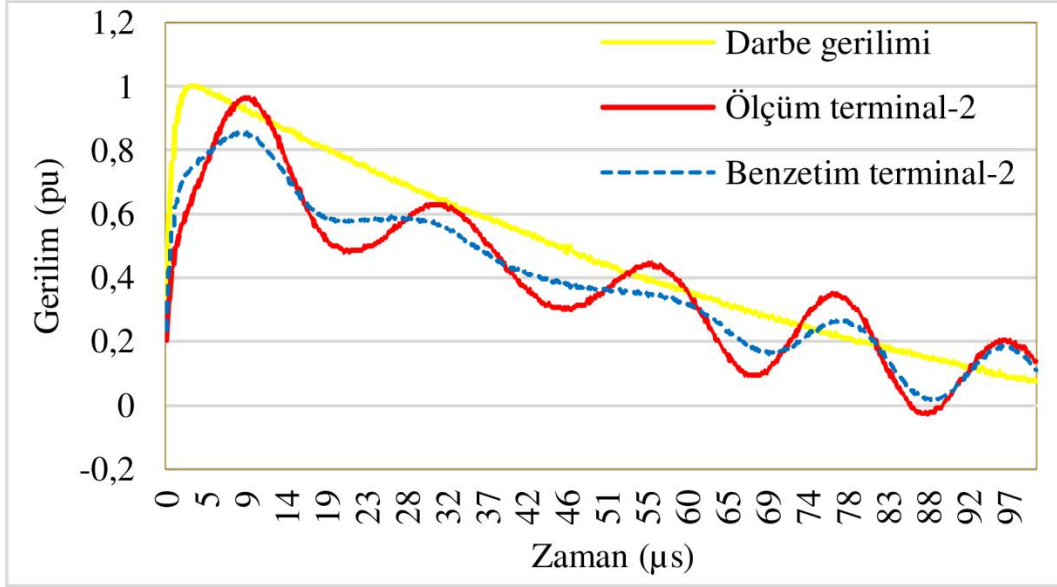
B fazı yassı iletken ile sarılmıştır ve darbe dağılımı ölçümü için 8 ara terminal çıkışı mevcuttur.



**Şekil 7.8:** Yassı iletkenli faz sargısı 1 numaralı çıkış ucu (938. sarım).

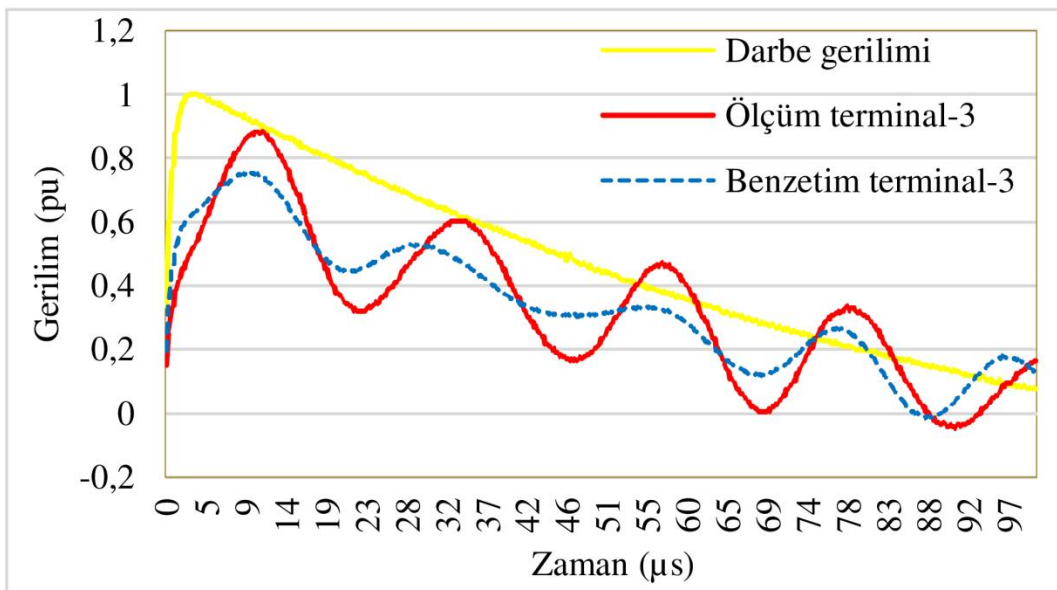
1 nolu ara terminal, bobinin 1. ve 2. sargı grubunu birbirine bağlayan iletkene bağlıdır. Bu noktadaki bobinin sarım sayısı 938'dir. 1 nolu terminalden test ve benzetim çalışmaları sırasında elde edilen gerilimler Şekil 7.8'de verilmiştir. Test sonuçlarına göre en yüksek darbe gerilimi 1,01 p.u. iken benzetim sonuçlarına göre 0,93 p.u.'dur. Dalga şekilleri birebir örtüşmektedir.

2 nolu ara terminal, bobinin 2. ve 3. sargı grubunu birbirine bağlayan iletkene bağlıdır. Bu noktadaki bobinin sarım sayısı 828'dir. 2 nolu terminalden test ve benzetim çalışmaları sırasında elde edilen gerilimler Şekil 7.9'de verilmiştir. Test sonuçlarına göre en yüksek darbe gerilimi 0,97 p.u. iken benzetim sonuçlarına göre 0,86 p.u.'dur.

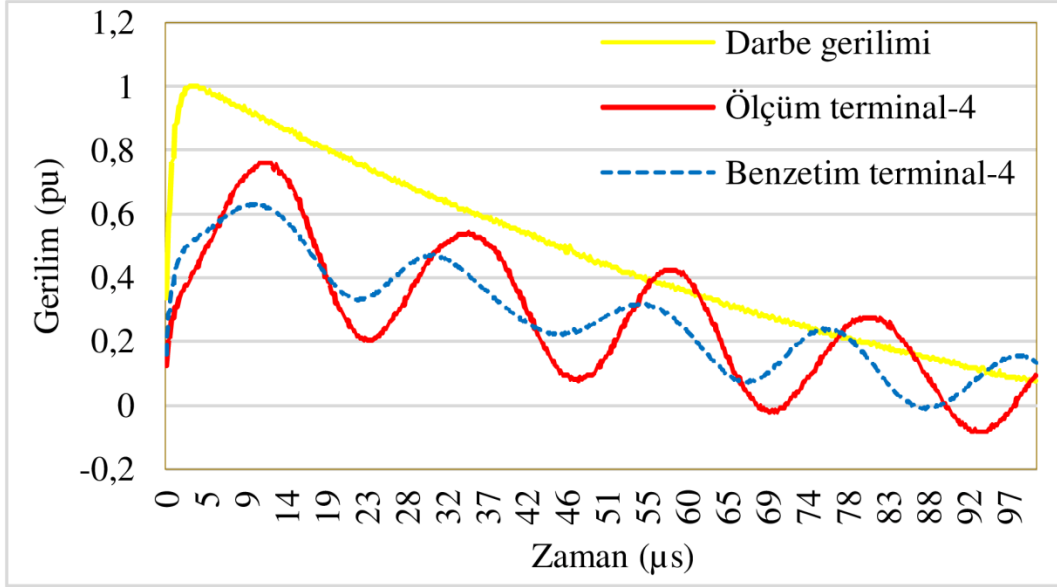


**Şekil 7.9:** Yassı iletkenli faz sargısı 2 numaralı çıkış ucu (828. sarım).

3 nolu ara terminal, bobinin 3. ve 4. sargı grubunu birbirine bağlayan iletkenle bağlıdır. Bu noktadaki bobinin sarım 718. 3 nolu terminalden test ve benzetim çalışmaları sırasında elde edilen gerilimler Şekil 7.10'da verilmiştir. Test sonuçlarına göre en yüksek darbe gerilimi 0,88 p.u. iken benzetim sonuçlarına göre 0,75 p.u.'dur. Dalga şekillerinin alternatif akım bileşenlerinin frekansları benzerdir ancak benzetim sonuçlarına ait gerilim grafiğinin alternatif akım bileşeninin genliği daha düşük kalmıştır.

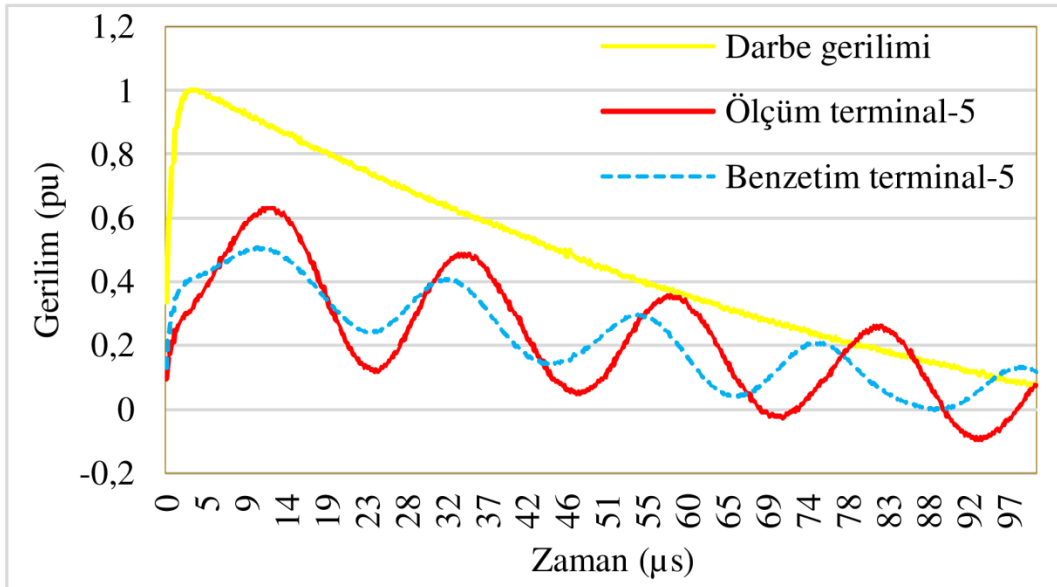


**Şekil 7.10:** Yassı iletkenli faz sargısı 3 numaralı çıkış ucu (718. sarım).



**Şekil 7.11:** Yassı iletkenli faz sargısı 4 numaralı çıkış ucu (608. sarım).

4 nolu ara terminal, bobinin 4. ve 5. sargı grubunu birbirine bağlayan iletkene bağlıdır. Bu noktadaki bobinin sarım 608'dir. 4 nolu terminalden test ve benzetim çalışmaları sırasında elde edilen gerilimler Şekil 7.11'da verilmiştir. Test sonuçlarına göre en yüksek darbe gerilimi 0,76 p.u. iken benzetim sonuçlarına göre 0,63 p.u.'dur.

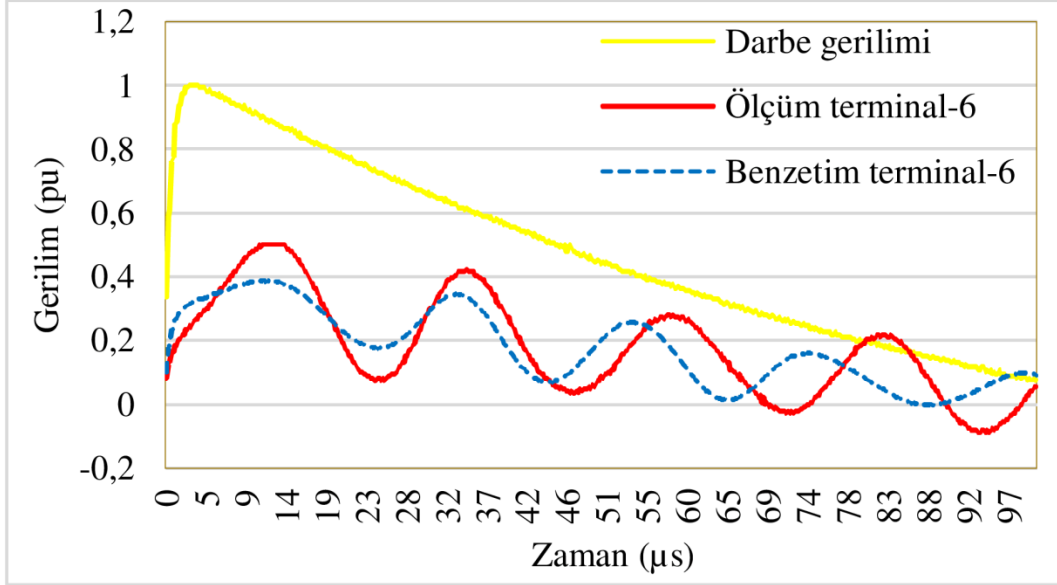


**Şekil 7.12:** Yassı iletkenli faz sargısı 5 numaralı çıkış ucu (498. sarım).

5 nolu ara terminal, bobinin 5. ve 6. sargı grubunu birbirine bağlayan iletkene bağlıdır. Bu noktadaki bobinin sarım sayısı 498'dir. 5 nolu terminalden test ve



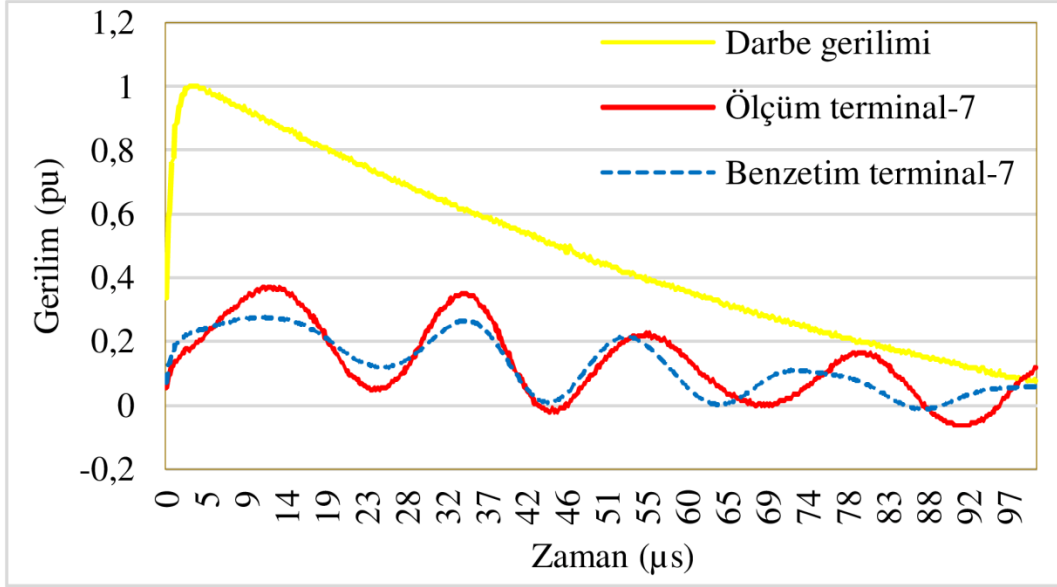
benzetim çalışmaları sırasında elde edilen gerilimler Şekil 7.12’de verilmiştir. Test sonuçlarına göre en yüksek darbe gerilimi 0,63 p.u. iken benzetim sonuçlarına göre 0,51 p.u.’dur.



Şekil 7.13: Yassı iletkenli faz sargısı 6 numaralı çıkış ucu (399. sarım).

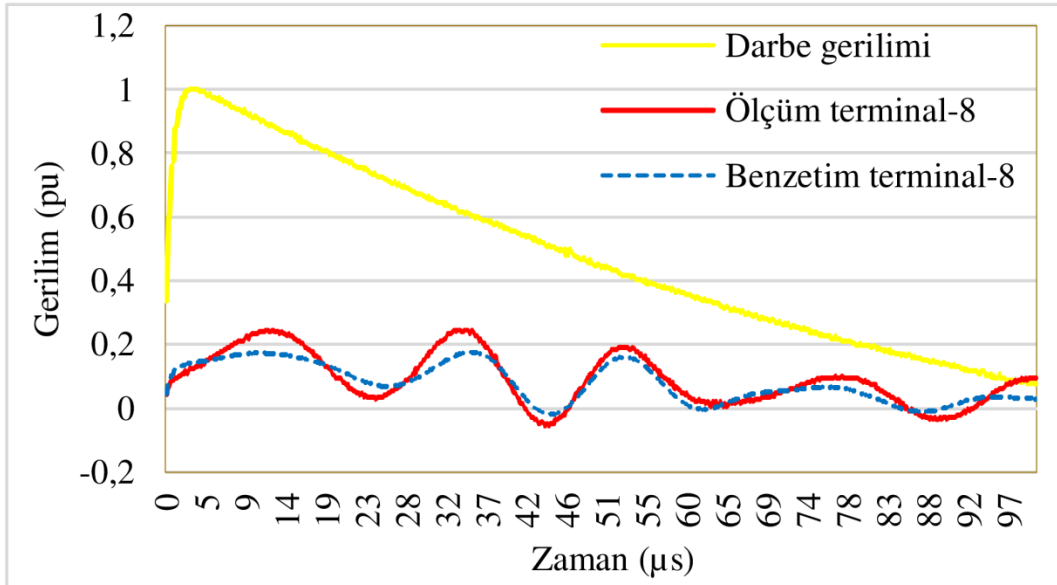
6 nolu ara terminal, bobinin 6. ve 7. sargı gruplarını birbirine bağlayan iletkene bağlıdır. Bu noktadaki bobinin sarım sayısı 399’dur. 6 nolu terminalden test ve benzetim çalışmaları sırasında elde edilen gerilimler Şekil 7.13’de verilmiştir. Test sonuçlarına göre en yüksek darbe gerilimi 0,50 p.u. iken benzetim sonuçlarına göre 0,39 p.u.’dur.

7 nolu ara terminal, bobinin 7. ve 8. sargı gruplarını birbirine bağlayan iletkene bağlıdır. Bu noktadaki bobinin sarım sayısı 300’dür. 7 nolu terminalden test ve benzetim çalışmaları sırasında elde edilen gerilimler Şekil 7.14’de verilmiştir. Test sonuçlarına göre en yüksek darbe gerilimi 0,37 p.u. iken benzetim sonuçlarına göre 0,28 p.u.’dur. Dalga şekilleri büyük oranda örtüşmektedir.



Şekil 7.14: Yassı iletkenli faz sargısı 7 numaralı çıkış ucu (300. sarım).

8 nolu ara terminal, bobinin 8. ve 9. sargı gruplarını birbirine bağlayan iletkene bağlıdır. Bu noktadaki bobinin sarım sayısı 201'dir. 8 nolu terminalden test ve benzetim çalışmaları sırasında elde edilen gerilimler Şekil 7.15'te verilmiştir. Test sonuçlarına göre en yüksek darbe gerilimi 0,25 p.u. iken benzetim sonuçlarına göre 0,18 p.u.'dur. Dalga şekillerin birbiri ile örtüşmektedir.



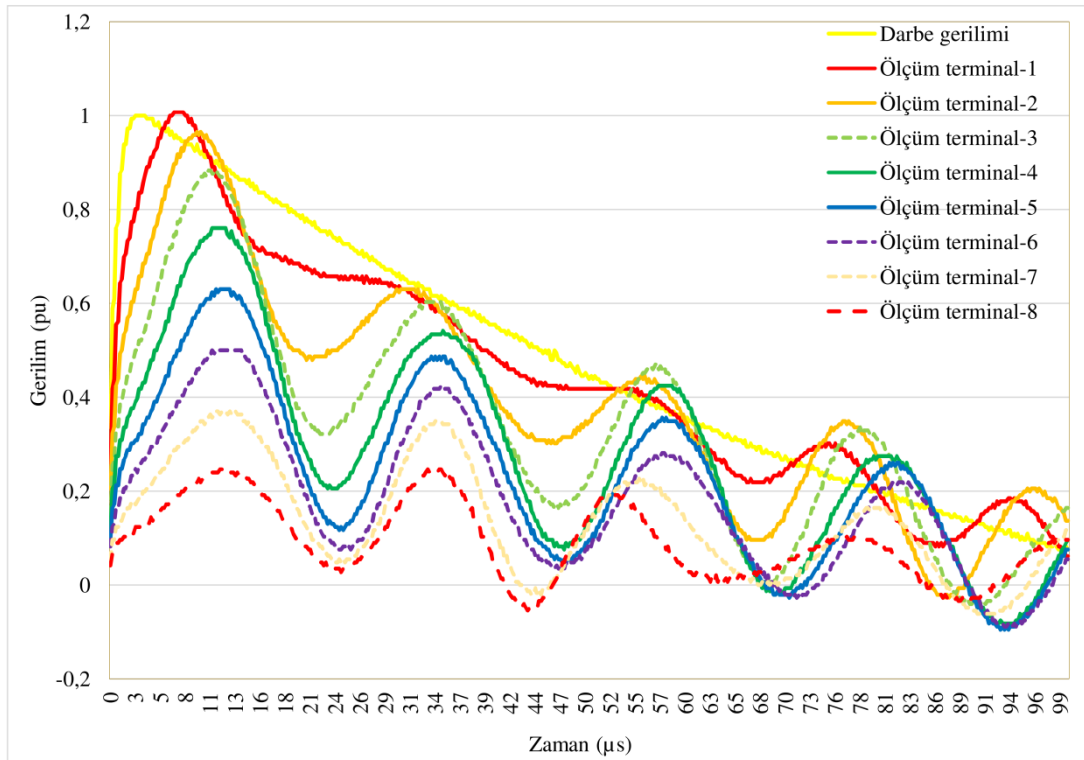
Şekil 7.15: Yassı iletkenli faz sargısı 8 numaralı çıkış ucu (201. sarım).

Tüm terminallerde ölçüm ve benzetim sonuçlarına göre darbe dağılımının en yüksek genliklerinin karşılaştırması Tablo 7.2’de verilmiştir. Genliğinin en yüksek ve en önemli olduğu 1. terminalde fark %8.05 iken darbe gerilimi genliğinin düştüğü diğer terminallerde fark giderek artmıştır.

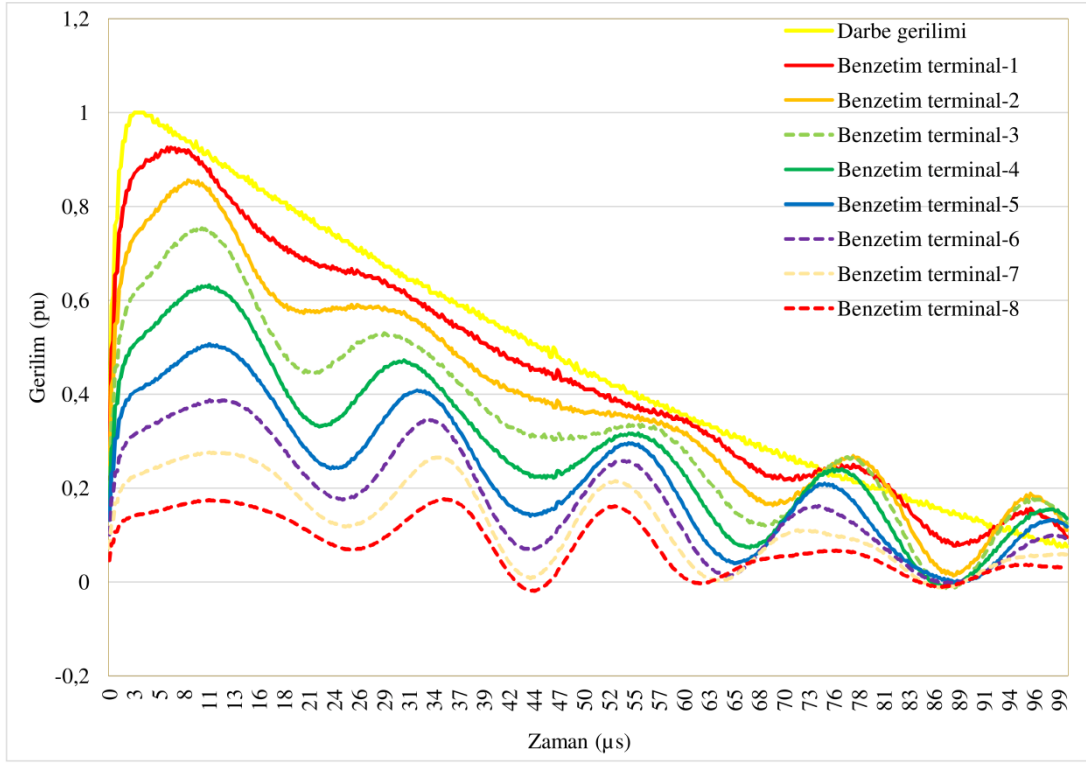
**Tablo 7.2:** Yassı iletkenli bobinde ölçüm ve benzetim sonuçlarına göre darbe gerilimi en yüksek değerlerinin karşılaştırması.

<u>Terminal</u>	<u>Ölçülen (pu)</u>	<u>Benzetim (pu)</u>	<u>% Fark</u>
1	1,01	0,93	8,05
2	0,97	0,86	11,34
3	0,88	0,75	14,58
4	0,76	0,63	16,81
5	0,63	0,51	19,54
6	0,50	0,39	22,36
7	0,37	0,28	25,29
8	0,25	0,18	28,41

Yassı iletkenli sargıya ait ölçüm ve benzetim sonuçlarının toplu grafiği Şekil 7.16’da verilmiştir.



a) Ölçüm sonuçları

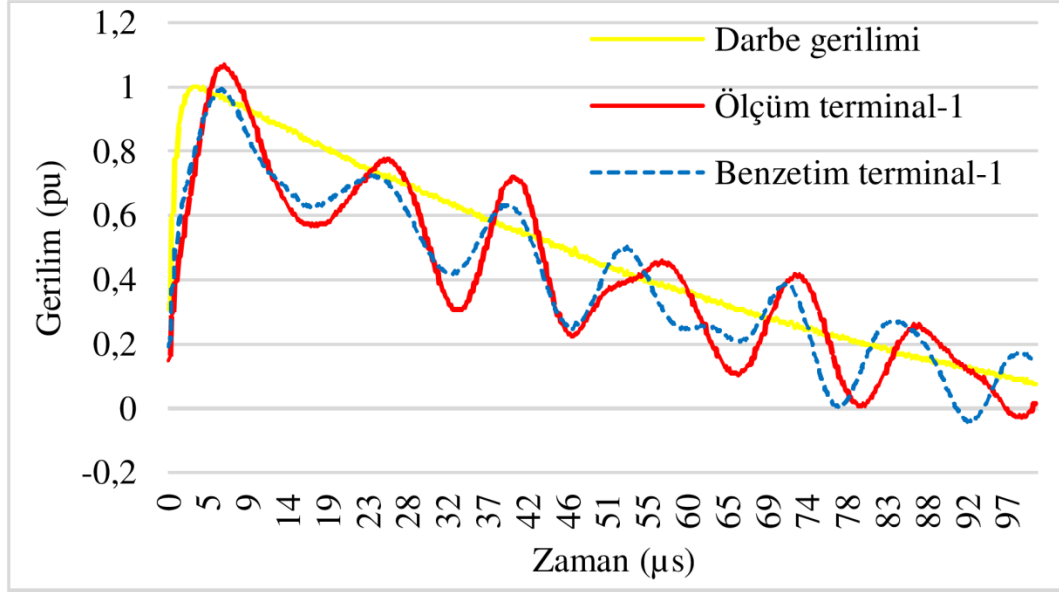


**b) Benzetim sonuçları**

**Şekil 7.16:** Yassı iletkenli sargının terminallerindeki darbe dağılımları.

### 7.3 C Fazı – Strip İletkenle Sarılan Bobine Ait Benzetim ve Test Sonuçları

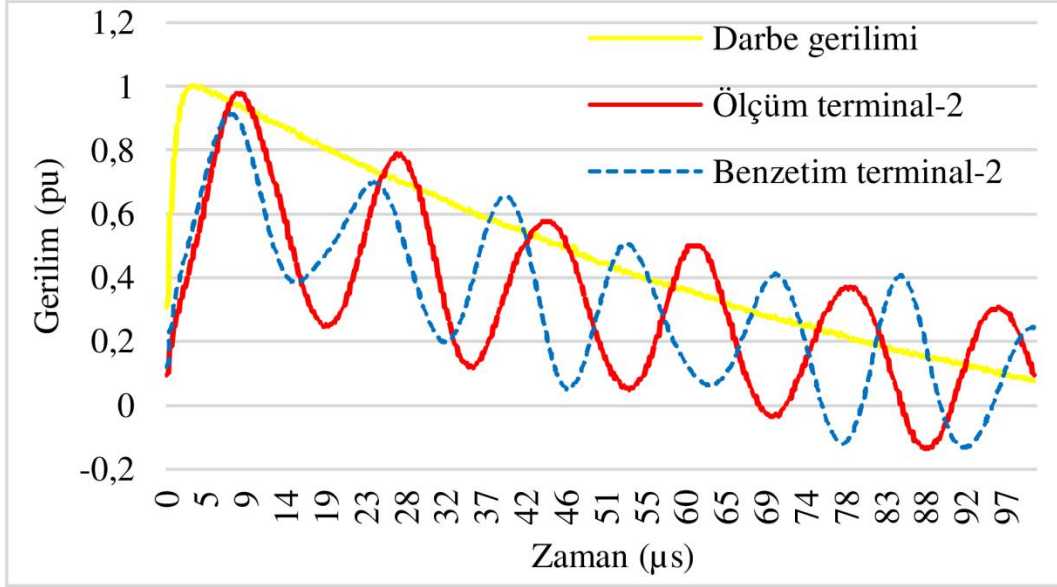
C fazı strip iletken ile sarılmıştır ve 18 sargı grubundan oluşmaktadır. Bobinin ön yüzey yapısı nedeniyle giriş ve çıkış terminalleri haricinde 5 ara uç bobin dışına taşınabilmiştir.



Şekil 7.17: Strip iletkenli faz sargısı 1 numaralı çıkış ucu (871. sarım).

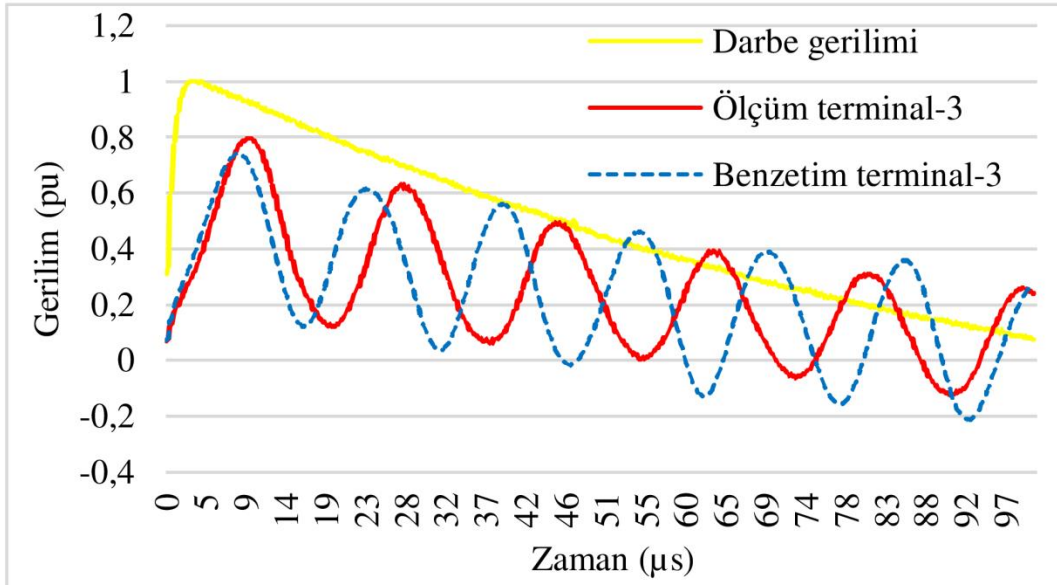
1 nolu ara terminal, bobinin 3. ve 4. sargı gruplarını birbirine bağlayan iletkene bağlıdır. Bu noktadaki bobinin sarım sayısı 871'dir. 1 nolu terminalden test ve benzetim çalışmaları sırasında elde edilen gerilimler Şekil 7.17'te verilmiştir. Test sonuçlarına göre en yüksek darbe gerilimi 1,07 p.u. iken benzetim sonuçlarına göre 0,99 p.u.'dur. Dalga şekilleri büyük oranda örtüşmektedir.

2 nolu ara terminal, bobinin 6. ve 7. sargı gruplarını birbirine bağlayan iletkene bağlıdır. Bu noktadaki bobinin sarım sayısı 696'dır. 2 nolu terminalden test ve benzetim çalışmaları sırasında elde edilen gerilimler Şekil 7.18'da verilmiştir. Test sonuçlarına göre en yüksek darbe gerilimi 0,98 p.u. iken benzetim sonuçlarına göre 0,91 p.u.'dur.

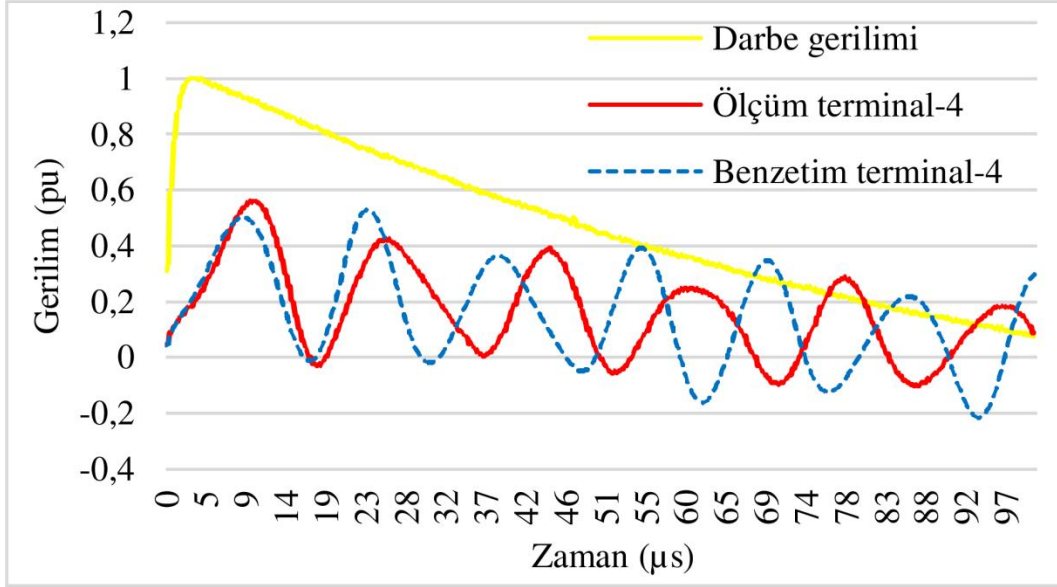


**Şekil 7.18:** Strip iletkenli faz sargısı 2 numaralı çıkış ucu (696. sarım).

3 nolu ara terminal, bobinin 9. ve 10. sargı gruplarını birbirine bağlayan iletkene bağlıdır. Bu noktadaki bobinin sarım sayısı 522'dir. 3 nolu terminalden test ve benzetim çalışmaları sırasında elde edilen gerilimler Şekil 7.19'de verilmiştir. Test sonuçlarına göre en yüksek darbe gerilimi 0,79 p.u. iken benzetim sonuçlarına göre 0,74 p.u.'dur.

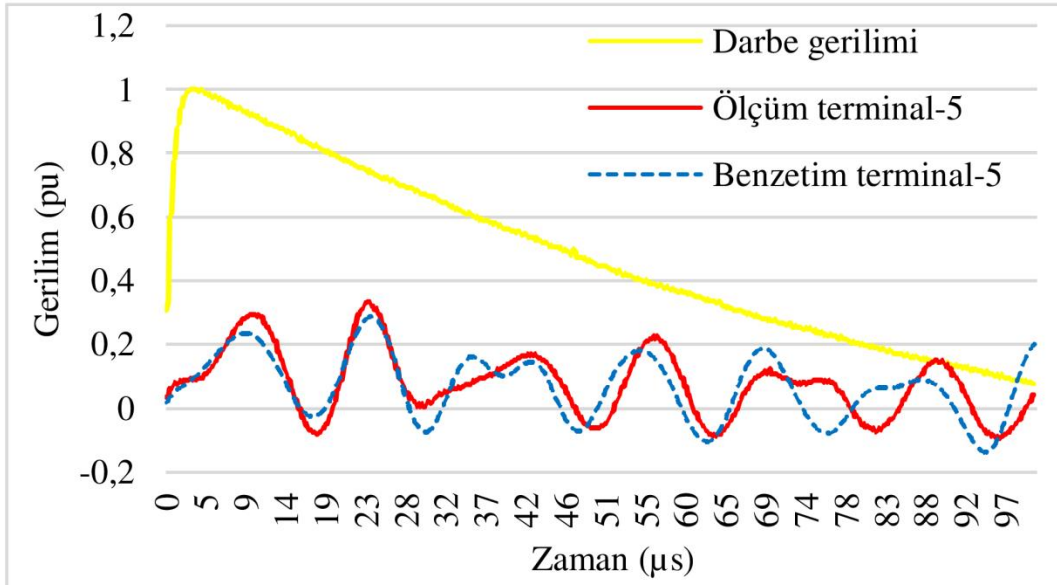


**Şekil 7.19:** Strip iletkenli faz sargısı 3 numaralı çıkış ucu (522. sarım).



**Şekil 7.20:** Strip iletkenli faz sargısı 4 numaralı çıkış ucu (348. sarım).

4 nolu ara terminal, bobinin 12. ve 13. sargı gruplarını birbirine bağlayan iletkene bağlıdır. Bu noktadaki bobinin sarım sayısı 348'dir. 4 nolu terminalden test ve benzetim çalışmaları sırasında elde edilen gerilimler Şekil 7.20'de verilmiştir. Test sonuçlarına göre en yüksek darbe gerilimi 0,56 p.u. iken benzetim sonuçlarına göre 0,53 p.u.'dur.



**Şekil 7.21:** Strip iletkenli faz sargısı 5 numaralı çıkış ucu (174. sarım).

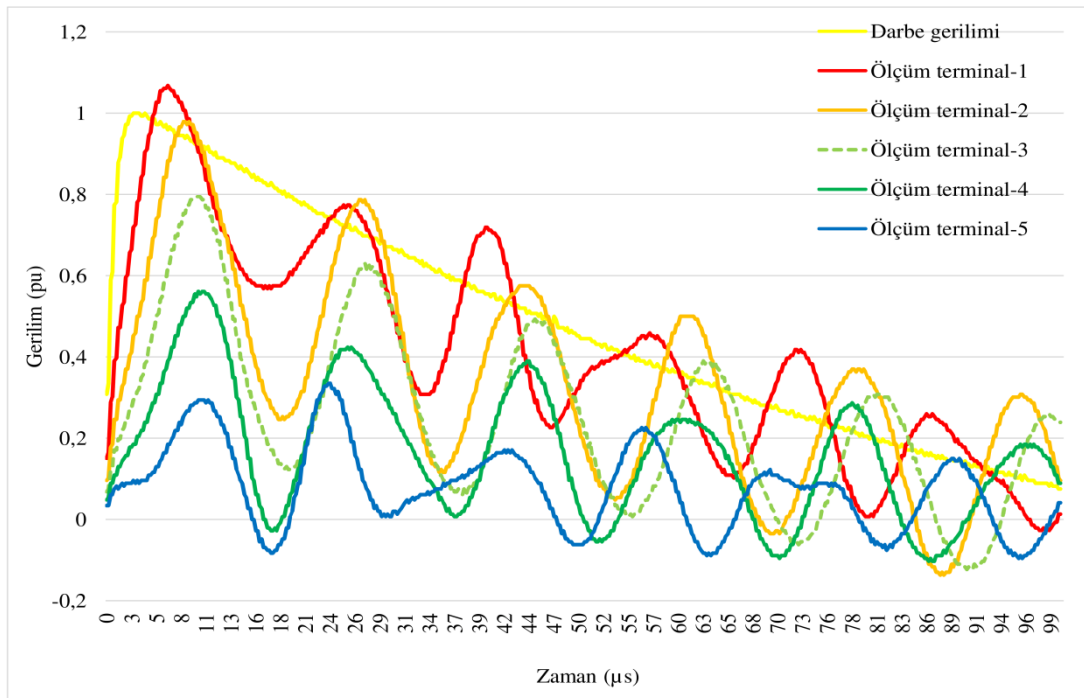
5 nolu ara terminal, bobinin 15. ve 16. sargı gruplarını birbirine bağlayan iletkene bağlıdır. Bu noktadaki bobinin sarım sayısı 174'tür. 5 nolu terminalden test ve benzetim çalışmaları sırasında elde edilen gerilimler Şekil 7.21'de verilmiştir. Test sonuçlarına göre en yüksek darbe gerilimi 0,34 p.u. iken benzetim sonuçlarına göre 0,29 p.u.'dur. Dalga şekilleri büyük oranda benzemektedir.

Tüm terminallerde ölçüm ve benzetim sonuçlarına göre darbe dağılımının en yüksek genliklerinin karşılaştırması Tablo 7.3'de verilmiştir. Sapmanın en fazla genliğin en düşük olduğu 5. terminalde %14,14 olduğu gözlenmiştir. Diğer terminallerde oranlar %7 ya da daha azdır.

**Tablo 7.3:** Yassı iletkenli bobinde ölçüm ve benzetim sonuçlarına göre darbe gerilimi en yüksek değerlerinin karşılaştırması.

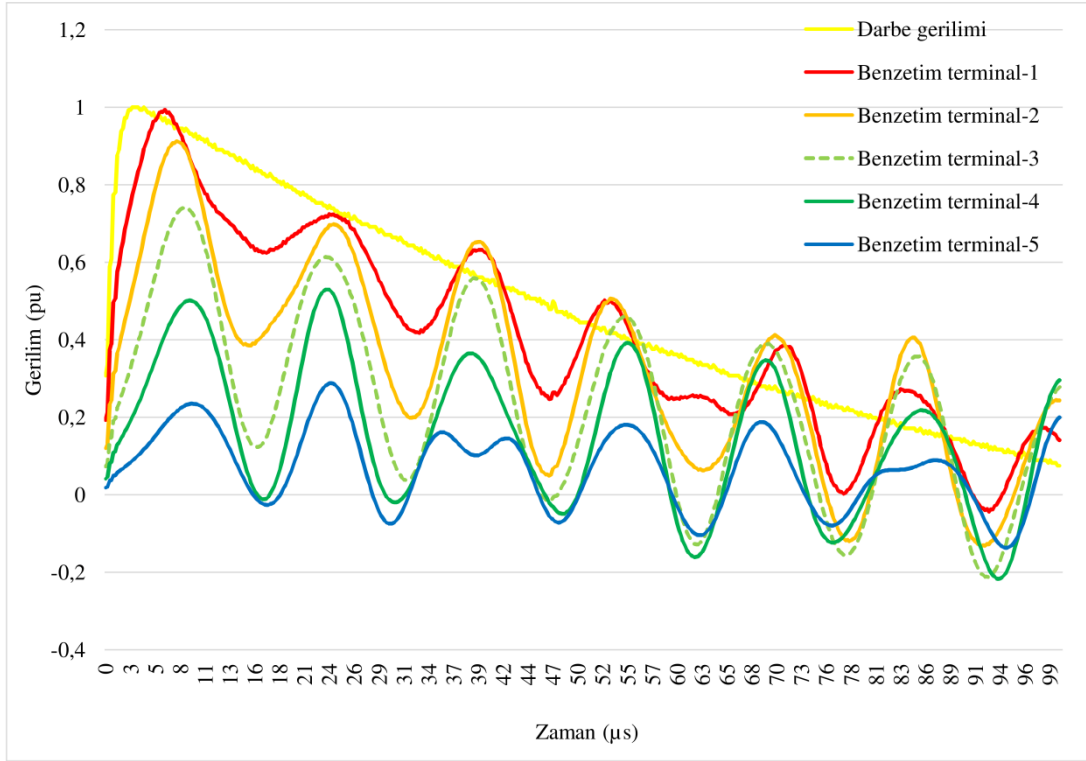
Terminal	Ölçülen (pu)	Benzetim (pu)	% Fark
1	1,07	0,99	7,00
2	0,98	0,91	6,82
3	0,79	0,74	6,56
4	0,56	0,53	5,64
5	0,34	0,29	14,14

Strip iletkenli sargıya ait ölçüm ve benzetim sonuçlarının toplu grafiği Şekil 7.22'de verilmiştir.



a) Ölçüm sonuçları





**b) Benzetim sonuçları**

**Şekil 7.22:** Strip iletkenli sargının terminallerindeki darbe dağılımları.

#### 7.4 Genlik ve Frekanslardaki Farklılıkların Etkileri

Her 3 bobine ait grafiklerde test ve benzetim sonuçları ya birebir örtüşmekte ya da genlik ve frekans olarak farklılıklar göstermektedir. Frekanslardaki farklılıklar genlikleri aynı olsa bile komşu sargı grupları arasında büyük gerilim farklarının meydana gelmesine neden olabilir. Ölçüm ve benzetim sonuçlarına göre her bir terminalden elde edilen gerilimlerin genliklerinin ilk iki maksimum noktaya ulaşma süreleri farkı açısından karşılaştırmaları Tablo 7.4’de verilmiştir.

Deneyler ve benzetim sonuçlarından elde edilen gerilim bilgileri ile komşu sargı grupları arasında da karşılaştırmalar yapılmıştır. Tüm komşu sargı gruplarında benzer davranışlar meydana geldiği için her bir bobinde darbe geriliminin genliğinin en yüksek olduğu 1. ve 2. terminaller arasındaki gerilim farkları incelenmiştir. Standartta [5] verilen yıldırım darbe gerilimi süresi 50  $\mu$ s olduğu için karşılaştırmalarda bu süre dikkate alınmıştır.

**Tablo 7.4:** Ölçüm ve benzetim sonuçlarına göre darbe gerilimlerinin genliklerinin ilk iki maksimum noktaya ulaşma süreleri farkı açısından karşılaştırmaları

**a) Yuvarlak iletkenle sarılan bobin**

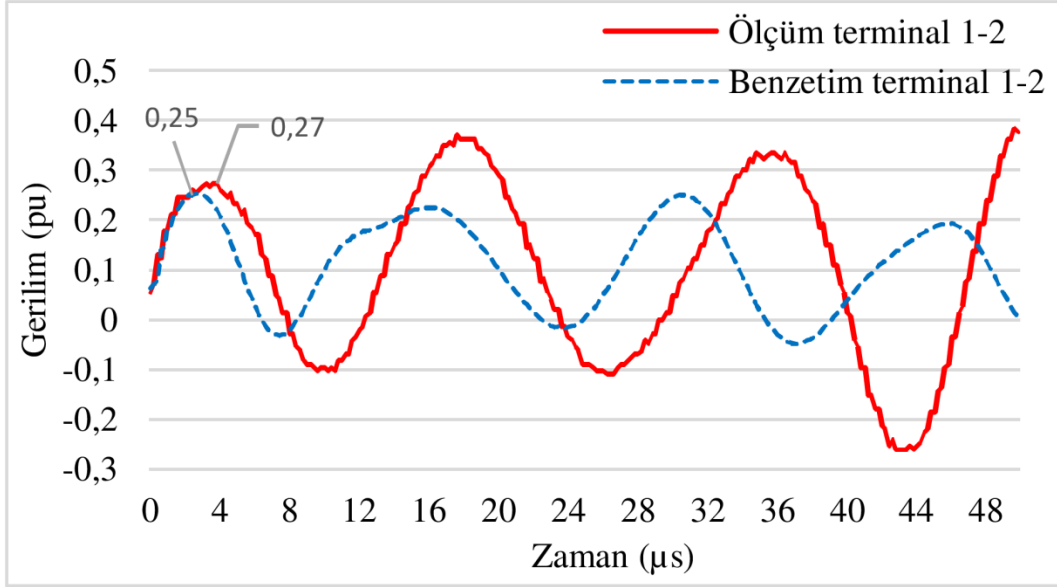
<u>Terminal</u>	<u>Ölçülen (<math>\mu</math>s)</u>	<u>Hesaplanan (<math>\mu</math>s)</u>	<u>% Fark</u>
1	17,8	18,6	-4,5
2	17,6	16,8	4,5
3	17,8	15,4	13,5
4	18,0	14,2	21,1
5	15,4	12,4	19,5
6	14,0	12,2	12,9

**b) Yassı iletkenle sarılan bobin**

<u>Terminal</u>	<u>Ölçülen (<math>\mu</math>s)</u>	<u>Hesaplanan (<math>\mu</math>s)</u>	<u>% Fark</u>
1	-	-	-
2	22,0	20,8	5,5
3	22,4	18,4	17,9
4	23,2	19,8	14,7
5	22,6	20,2	10,6
6	22,2	23,2	-4,5
7	22,6	24,0	-6,2
8	21,6	22,4	-3,7

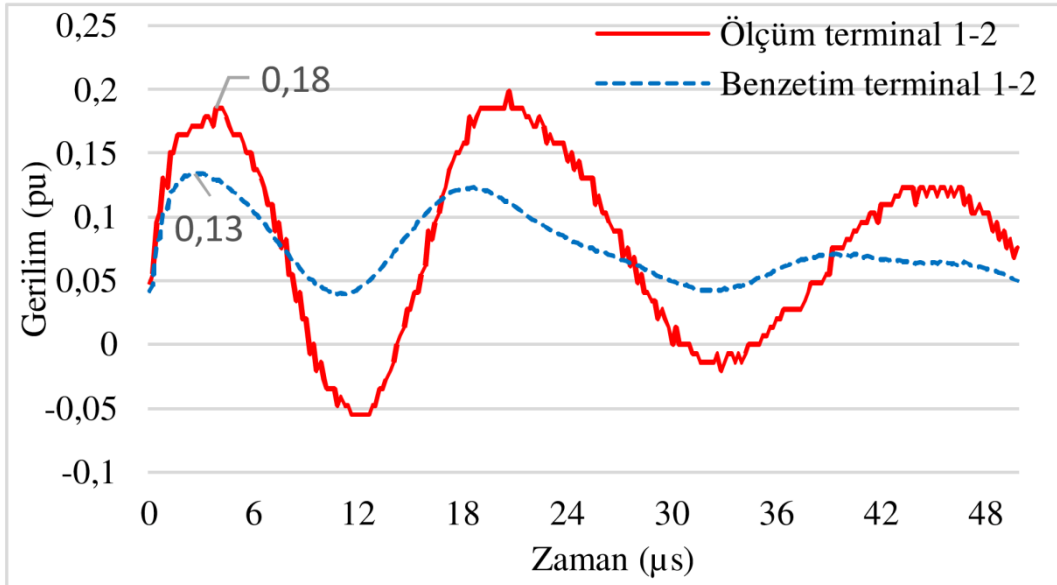
**c) Strip iletkenle sarılan bobin**

<u>Terminal</u>	<u>Ölçülen(<math>\mu</math>s)</u>	<u>Hesaplanan(<math>\mu</math>s)</u>	<u>% Fark</u>
1	19,4	16,2	16,5
2	18,4	16,2	12,0
3	18,6	15,0	19,4
4	15,6	14,6	6,4
5	13,0	14,4	-10,8



**Şekil 7.23:** A fazına ait 1. ve 2. terminaller arasındaki gerilim farkı.

Yuvarlak iletkenle sarılan A fazına ait bobinin 1. ve 2. sargı grupları arasındaki gerilim farkı Şekil 7.23'de verilmiştir. Darbe geriliminin başlangıcında test ve benzetim sonuçları birbiri ile örtüşürken daha sonra giderek aradaki fark artmıştır. Test sonuçlarına göre 1. ve 2. sargı grupları arasındaki gerilim farkı en yüksek 0,38 p.u. gerilim değerine ulaşmaktadır.

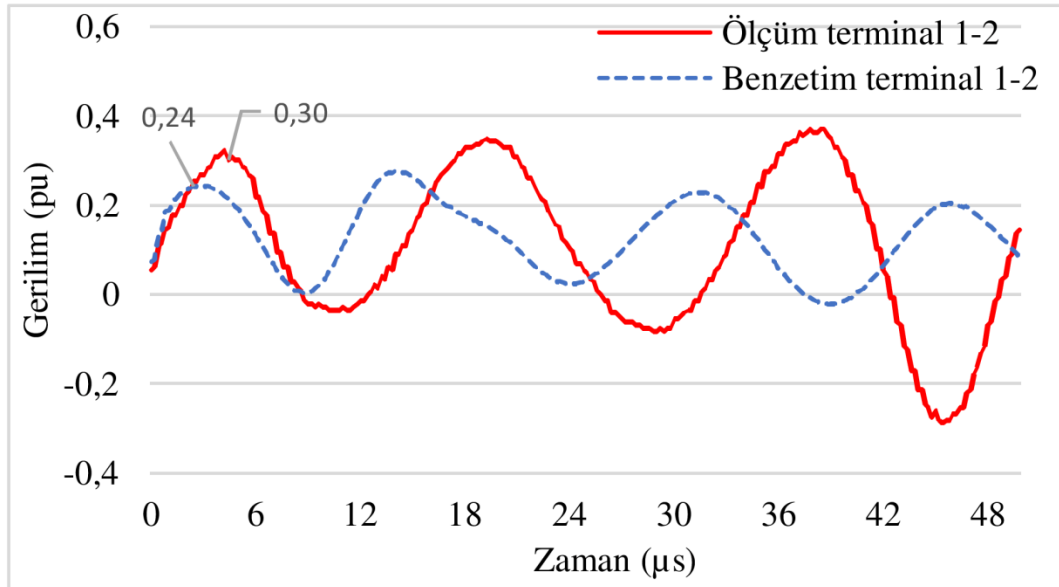


**Şekil 7.24:** B fazına ait 1. ve 2. terminaller arasındaki gerilim farkı.

Yassı iletkenle sarılan B fazına ait bobinin 1. ve 2. sargı grupları arasındaki gerilim farkı Şekil 7.24'de verilmiştir. Darbe geriliminin başlangıcında test ve benzetim sonuçları birbiri ile örtüşmekte ancak fark 20  $\mu$ s anında açılmaktadır. Ancak bu fark 0,1 p.u.'dan daha azdır.

Strip iletkenle sarılan C fazına ait bobinin 1. ve 2. sargı grupları arasındaki gerilim farkı Şekil 7.24'de verilmiştir. Darbe geriliminin başlangıcında test ve benzetim sonuçları birbiri ile örtüşmekte ancak giderek aradaki fark açılmaktadır.

Her 3 bobin tipinde de ilk anlarda test ve benzetim sonuçları benzer davranışlar sergilerken 15.  $\mu$ s'den sonra tutarsızlıklar meydana gelmektedir. Grafikler incelendiğinde önemli olan başlangıçtaki değerlerdir. Bunun nedeni ise zaman ilerledikçe darbe geriliminin genliği azaldığı için komşu sargılar arasındaki gerilim farkı da azalmaktadır [5]. Test sonuçlarına göre 1. ve 2. sargı grupları arasındaki fark 49.  $\mu$ s'de 0,38 p.u.'ya ulaşan A fazında 4.  $\mu$ s'de fark 0,27 p.u. değerindedir. Yıldırım darbe geriliminin genliği ise 4.  $\mu$ s'de 0,99 p.u. değerinde iken 49.  $\mu$ s'de 0,5 p.u. değerindedir. Örneğin 125 kV darbe gerilimi uygulanan A fazının sargı grupları arasında meydana gelecek gerilimler 4.  $\mu$ s'de 33.4 kV iken 49.  $\mu$ s'de 23.75 kV'tur. Bu nedenle darbe geriliminin uygulandığı ilk anlar daha önemlidir.



Şekil 7.25: C fazına ait 1. ve 2. terminaller arasındaki gerilim farkı.

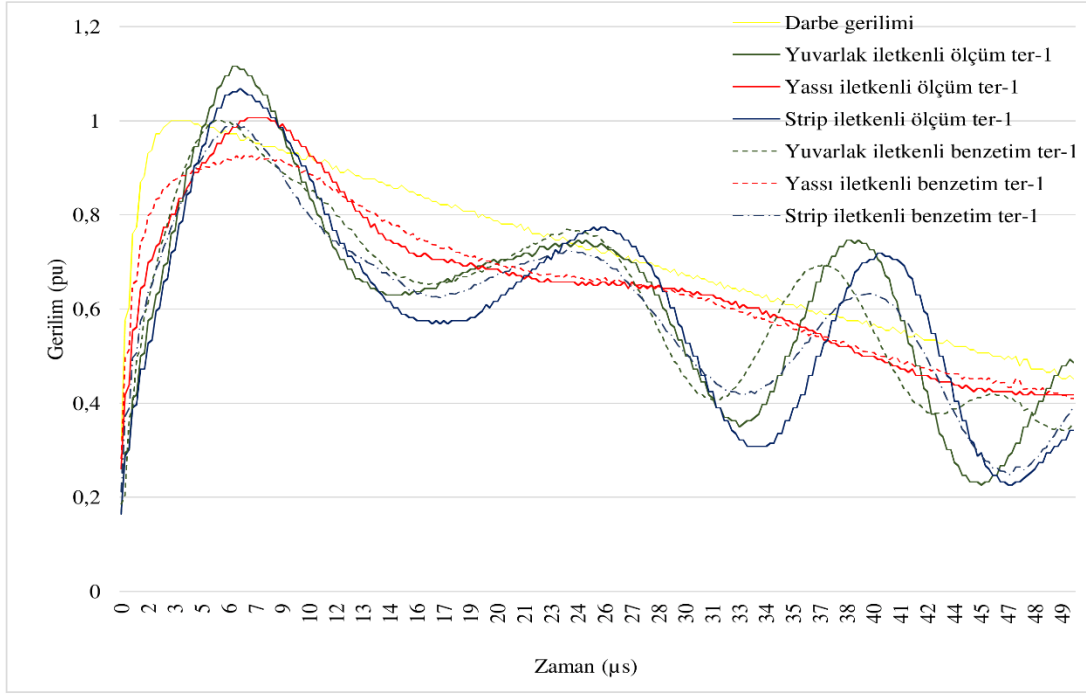
Tüm yapılan analizle incelendiğinde yassı iletkenle sarılan bobinin toprağa karşı ve sargı gruplarındaki gerilim farklarının diğer fazlara nazaran daha az olduğu göze çarpmaktadır. Özellikleri sargı grupları arasındaki farklar ilk anlarda yuvarlak iletkenle sarılan A fazında test sonuçlarına göre 0,27 pu iken yassı iletkenle sarılan bobinde 0,18 pu değerindedir. Yassı iletken sarılan bobinin sargılarındaki darbe dağılımı daha düzenlidir. Strip ile sarılan C fazında sargı grupları komşu olmadığı için bu açıdan karşılaştırmak sağlıklı sonuç vermese de bu faza ait gerilimlerin alternatif akım bileşeninin frekanslarındaki büyük farklılıklar nedeniyle komşu sargı grupları arasında da büyük farklar gelmesi söz konusudur.

## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada sargıları yuvarlak, yassı ve strip iletkenlerle sarılmış 3 fazlı kuru tip transformatörün her bir bobine ait endüktans, seri kapasite ve paralel kapasite parametreleri analitik ve sayısal metotlarla hesaplanmıştır. Yıldırım darbe benzetimi için her bir bobine özel hazırlanan modellerde hesaplanan parametreler kullanılarak benzetim çalışması yapılmıştır. Ayrıca 1600 kVA prototip kuru tip transformatör bobinleri üzerinde yapılan darbe dağılımı testleri ile benzetim ve ölçüm sonuçları karşılaştırılmıştır.

Yuvarlak iletkenli sargının benzetim ve ölçüm sonuçlarından elde edilen gerilim dalgalarının tepe noktalarının farkları % 0 ile % 13,48 arasında değişmektedir. Gerilim dalgalarının ilk iki tepe noktası arasındaki geçen süreler arasındaki farklar ise % 4,5 ile % 21,1 arasında değişmektedir. Yassı iletkenli sargının benzetim ve ölçüm sonuçlarından elde edilen gerilim dalgalarının tepe noktalarının farkları % 8,05 ile % 28,41 arasında değişmektedir. Gerilim dalgalarının ilk iki tepe noktası arasındaki geçen süreler arasındaki farklar ise % 3,7 ile % 17,9 arasında değişmektedir. Strip iletkenli sargının benzetim ve ölçüm sonuçlarından elde edilen gerilim dalgalarının tepe noktalarının farkları % 5,64 ile % 14,14 arasında değişmektedir. Gerilim dalgalarının ilk iki tepe noktası arasındaki geçen süreler arasındaki farklar ise % 6,4 ile % 19,4 arasında değişmektedir. Elde edilen sonuçlar ile prototip transformatörün darbe analizi testine tabi tutulması sonucunda kaydedilen gerilim dağılımı grafikleri tutarlıdır. Parametrelerin hesaplama kolaylığı nedeniyle yuvarlak ve strip iletkenli sargılarda benzetim sonuçları ölçüm sonuçlarına daha yakın çıkmıştır.

Bu çalışma yıllarca yağlı tip transformatörlerin yıldırım darbe modelinin elde edilmesinde kullanılan merdiven tipi ağ modelinin yalıtımı ve sarım teknikleri tamamen yağlı tip transformatörlerden farklı olan kuru tip transformatörler için de kullanılabilceğini göstermektedir. Modelin doğru sonuçlar vermesini sağlayan en büyük etken parametrelerin doğru hesaplanmasıdır. Bu çalışmada endüktans ve kapasite hesaplamaları için kullanılan analitik ve sayısal yöntemlerin sonuçları itibari ile tutarlı ve gerçekçi yöntemler olduğu test sonuçları ile kanıtlanmıştır (Şekil 8.1).



**Şekil 8.1:** Sargı tiplerinin 1 nolu terminallerine ait ölçüm ve benzetim sonuçları.

Bu çalışma da aynı zamanda kuru tip transformatörlerin sarımında kullanılan 3 farklı iletken tipinin yıldırım darbe gerilimi dağılımı analizi için karşılaştırması yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde yuvarlak ve strip iletkenle sarılan bobinlerde terminal bağlantılarından alınan ölçümlerde ve benzetim sonuçlarında elde edilen gerilim grafiklerinin alternatif akım bileşenlerinin genliğinin ve frekansının yüksek olduğu ve uygulanan yıldırım darbe gerilimini büyük genlik farkları ile ve daha sık aralıklarla aştığı görülmektedir. Ölçüm sonuçlarına göre sargılardan elde edilen gerilim dalgaları bobinin girişine uygulanan darbe gerilimini, yuvarlak iletkenli sargıda en fazla % 12, yassı iletkenli sargıda en fazla % 1 ve strip iletkenli sargıda en fazla % 7 aşmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre gerilim dalgalarının ilk iki tepe noktaları arasında geçen süre yuvarlak iletkenli sargıda 14 µs ile 17,8 µs arasında, yassı iletkenli sargıda 21,6 µs ile 23,2 µs arasında, strip iletkenli sargıda ise 13 µs ile 19,4 µs arasında değişmektedir. Ayrıca yassı iletkenle sarılan bobinlerde darbe dağılımı eğrilerinin alternatif akım bileşenlerinin genliğinin diğer iletken tiplerine kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür.

Bobinin girişine uygulanan test geriliminin bobinin herhangi bir noktasında aşılması bobinin toprağa karşı, test geriliminden daha fazlası ile zorlanmayacağını göstergesidir. Dalgaların tepe noktaları arasında geçen sürelerin

birbirine yakın olması ise komşu iki nokta arasındaki gerilim dalgasının faz farkının sifira yakın olması ve bunun sonucu olarak bu noktalar arasındaki gerilim farkının da az olmasına neden olur. Yukarıda sayılan nedenler doğrultusunda kuru tip transformatörler için yıldırım darbe dağılımı açısından yassı iletken ile sarılan bobinlerin yuvarlak ve strip iletken sarılan bobinlere nazaran daha dayanıklı olacağı açıktır (Şekil 8.1).



## 9. KAYNAKLAR

- [1] Tsili, M. A., Amoiralis, E. I. and Kladas A. G., “Transformer Design and Optimization: A Literature Survey”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 24( 4), (2009).
- [2] Miki A., Hosoya T. and Okuyama K., “A Calculation Method For Impulse Voltage Distribution and Transferred Voltage in Transformer Windings”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 3, (1978).
- [3] Ang S.P. and S. M., “Modelling of High Frequency Characteristic of a 6.6 kV Transformer”, *Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, London, 1-6, (2012).
- [4] Smajic, J., Steinmetz, T., M. Rüegg, Tanasic, Z., Obrist, R., Tepper, J., Weber, B. and Carlen, M., “Simulation and Measurement of Lightning-Impulse Voltage Distributions Over Transformer Windings.” *IEEE Transactions on Magnetics*, 50( 2), 553-556, (2014).
- [5] IEC International Standard, IEC 60076-3, “Power Transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air”, *International Electrotechnical Commission (IEC)*, Geneva, Switzerland, (2004).
- [6] Smajic J., Obrist R., Rüegg M., Cranganu-Cretu B., Roy C., Weber B. and Rahimpour E. “Lightning impulse modeling and simulation of dry-type and oil-immersed power and distribution transformers” (2014).
- [7] Lewis, T., “The Transient Behavior of Ladder Networks of the Type Representing Transformer and Machine Windings”, *Proc. IEEE*, 101(II), 541-553, (1954).
- [8] Dent BM and H. E., “A Method of Analysis of Transformer Impulse Voltage Distribution Using a Digital Computer”, *IEEE Proceedings*, 445-459, (1958).
- [9] Fergestad PI and H. T., “Inductances for Calculation of Transient Oscillations in Transformers”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 500-509,(1974).

- [10] Stein, M., "A Study of the Initial Surge Distribution in Concentric Transformer Windings", *AIEE Transactions*, 877-892, (1964).
- [11] Fergestad P.I. and H. T., "Transient Oscillations in Multiwinding Transformers", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 500-509, (1974).
- [12] Vahdi B. and E. M., "Transient Simulation of Cast Resin Dry Type Transformers Using FEM", *European Transactions on Electrical Power*, 363-379, (2011),
- [13] Alexandru B.M. and M. M., "Calculation methods for lightning impulse voltage distribution in power transformers", *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, 71-76, (2014).
- [14] Bharat Heavy Electricals Limited, Transformers, McGraw-Hill, 116-125, (1987).
- [15] Bhuyan K. and C. S., "Surge Modelling of Transformer Using Matlab-Simulink", *India Conference (INDICON)*, 1-4, (2009).
- [16] O'Loughlin, J. P., "Calculation of the Inductance of a Circular Coil Consisting of any Number of Coaxial Turns, Each Individual Turn being of any Wire Size Located in Parallel Planes and of any Spacing to the Other Turns.", *Circuit and Electromagnetic System Design Notes*. Kirtland, ABD. (1998).
- [17] M. Erdoğan ve M. K. Eker, "Yıldırım darbe geriliminin kuru tip transformatör sargılarındaki dağılımının incelenmesi", *Politeknik*, 19 (1), 21-30, (2016).
- [18] Kulkarni S.V. and Khaparde S.A. "Transformer engineering", Cilt No:1, *CRC Press*, New York, 277-325, (2004).