

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TRANSFORMATÖRLERDE KALKANLI SARGI
UYGULAMASI VE YANSIYAN GERİLİMLERİN İNCELENMESİ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Kerem KÖSEOĞLU

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TRANSFORMATÖRLERDE KALKANLI SARGI
UYGULAMASI VE YANSIYAN GERİLİMLERİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ahmet Kerem KÖSEOĞLU
504111046**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Güven KÖMÜRGÖZ KIRIŞ

HAZİRAN 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504111046 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ahmet Kerem KÖSEOĞLU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “TRANSFORMATÖRLERDE KALKANLI SARGI UYGULAMASI VE YANSIYAN GERİLİMLERİN İNCELENMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Güven KÖMÜRGÖZ KIRIŞ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Suat İLHAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Recep YUMURTACI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 05 Mayıs 2017
Savunma Tarihi : 13 Haziran 2017





Eşim, ailem ve Best AŞ'ye...



ÖNSÖZ

Özel sektör kariyerim ile birlikte yürütmeye çalıştığım yüksek lisans eğitimim ve tez yazım çalışmalarında bana desteğini esirgemeyen firmam Balıkesir Elektromekanik Sanayi Tesisleri AŞ'ye (BEST) ve firmadaki yöneticilerime teşekkürler. Tüm yoğunluğuna rağmen her fırsatta bana yardımcı olan hocam Doç. Dr. Güven KÖMÜRGÖZ KIRIŞ'a, tez yazmam konusunda beni sürekli teşvik eden eşim Nurdan KÖSEOĞLU'na ve her zaman yanımda olup, bana her konuda destek olan aileme teşekkürlerimi sunuyorum...

Mayıs 2017

Ahmet Kerem KÖSEOĞLU
Elektrik Mühendisi



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. TRANSFORMATÖRLERDE AŞIRI GERİLİMLER.....	3
2.1 Transformatörler.....	6
2.2 Aşırı Gerilim, Yıldırım Darbe, Delinme Tanımları ve Transformatör Testleri	7
2.2.1 Belirli bir frekans ile uygulanan testler.....	11
2.2.2 Darbe testleri:	11
2.3 Aşırı Gerilimden Korunma Çalışmaları.....	16
2.3.1 Dış yöntemler	16
2.3.2 İç yöntemler	18
3. AŞIRI GERİLİMLERİN SARGILAR ÜZERİNDEKİ DAĞILIMININ İNCELENMESİ	27
3.1 Transformatör Toplu Parametrelili Eşdeğer Devresi.....	27
3.2 Tezde Önerilen Kalkanlı Sargı Eşdeğer Devresinin Modellenmesi	39
3.3 Kalkanlı Sargı Darbe Dağılımının Deneysel Olarak İncelenmesi.....	40
4. TRANSFER EDİLEN DARBE GERİLİMLERİ İNCELENMESİ	49
4.1 Uçları Topraklanmış AG Sargısı Durumu.....	57
4.2 Farklı YG Darbe Geriliminde AG'ye Yansıyan Darbe Gerilimi İncelenmesi	59
4.3 Uçların Salınımında Olduğu AG Sargısı Durumu.....	60
4.4 Endüktif ve Kapasitif Yansıyan Darbeler.....	63
4.5 Sarım Yönünün Yansıyan Darbeye Etkisi.....	65
4.6 Bağlantı Grubunun Yansıyan Darbeye Etkisi	67

4.7 AG ile YG Arası Mesafenin Yansıyan Gerilime Etkisi,.....	69
4.8 AG İle Çekirdek Arası Artan Mesafeye Göre Yansıyan Darbenin Değişimi	71
4.9 Değişen Kat Başına Sarım Sayısına Göre Yansıyan Darbelerin İncelenmesi	73
4.10 Kat Başına Sarım Sayısı Referansla Yansıyan Darbenin Dağılımı	76
4.11 Değişen Kat Adetine Göre Yansıyan Darbenin İncelenmesi.....	78
4.12 Kalkanlı Sargıdan Yansıyan Gerilimin İncelenmesi	79
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	83
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	95
KAYNAKLAR.....	99
EKLER.....	101
ÖZGEÇMİŞ.....	106

KISALTMALAR

AC	: En Yüksek Toprağa Karşı AC Dayanım Seviyesi [IEC 60076-3:2013 Tanımına Göre]
AG	: Alçak Gerilim
LI	: Yıldırım Darbe Testi [IEC 60076-3:2013 Tanımına Göre]
FAT	: Fabrika Kabul Testi
HV	: Yüksek Gerilim
LV	: Alçak Gerilim
OLTC	: Yük Altında Kademe DEğiştirici
SI	: Anahtarlama Darbe Testi
uk	: Bağlı Kısa Devre Gerilimi
YG	: Yüksek Gerilim



SEMBOLLER

α	: Darbe dağılımı incelemek için toprağa karşı kapasitenin, seri kapasiteye oranının karekökü.
α_1	: AG sargısı darbe dağılımı
α_2	: YG sargısı darbe dağılımı
A	: Toplam iletken kesiti
b	: İletkenin bakır kısmının toplam genişliği
d	: İki iletken arasındaki mesafe
$d_{dış}$	: İletken dış izolasyonu
$d_{iç}$	: İletken iç izolasyonu
C_1	: AG sargısı iletkeni ile aynı seviyedeki toprağa karşı olan kapasite
C_2	: YG sargısı iletkeni ile aynı seviyedeki toprağa karşı olan kapasite
C_{12}	: AG ile YG sargısı karşılıklı iki iletken arası kapasite
C_d	: Diskin kapasite değeri
C_H	: YG sargısı toprağa karşı kapasitesi
C_{HL}	: Sargılar arası kapasite
C_{iz}	: İzolasyon kağıdı kapasite değeri
C_L	: AG sargısı toprağa karşı kapasitesi
C_s	: Seri kapasite
C_t	: Toprağa karşı olan kapasite
$C_{yağ}$	: Yağ kanalı kapasite değeri
ΔV	: İki sarım arası gerilim farkı
$D_{iç}$	: Sargının iç çapı
ϵ	: Bağıl dielektrik değeri
ϵ_0	: Vakum bağıl dielektrik değeri
$\epsilon_{dış}$	: Dış izolasyon dielektrik sabiti
$\epsilon_{eş}$	: Eşdeğer dielektrik sabiti
$\epsilon_{iç}$	: İç izolasyon dielektrik sabiti
ϵ_{iz}	: İzolasyon bağıl dielektrik değeri
ϵ_r	: Göreceli bağıl dielektrik değeri
f, f_1, f_2	: Frekans
h	: İletkenin bakır kısmının toplam yüksekliği
i_c	: C kapasitesi üzerindeki akım değeri
i_l	: L uzaklığındaki akım değeri
i_L	: L endüktansı üzerindeki akım değeri
i_s	: C_s seri kapasitesi üzerindeki akım değeri
K	: Kaçak akılar sabit katsayısı
K_1	: AG sargısı ile bir sonraki sarımı arasındaki kapasite
K_2	: YG sargısı ile bir sonraki disk arasındaki kapasite
L	: Birim uzunluğun endüktansı
p	: İki disk arasındaki, bakırların orta noktaları arası mesafe
s	: Sargıda kullanılacak kalkan adedi
SI	: Tek taraflı izolasyon kağıdı kalınlığı
T_1	: Darbenin ilk tepe değere ulaşma süresi
T_2	: Darbenin tepe değerinin yarı değerine ulaştığı süre

T_p	: Darbenin en yüksek tepe değere ulaşma süresi
T_t	: Test süresi
u	: Yansıyan darbe gerilimi
U_d	: Endüklenmiş Gerilim Testi Gerilimi
U_N	: Sekonder Tarafı Anma Gerilimi
U_p	: Yıldırım Darbe Testi Gerilimi
U_r	: Nominal Çalışma Gerilim
v	: Bir noktadaki gerilim değeri
V	: Kalkanın yerleştirildiği sarımn gerilimi
v_0	: Başlangıç anındaki gerilim değeri (test veya darbe)
$V_{geçiş}$	: Kalkanın alındığı sarımn gerilimi
z	: AG sargısı dışından, YG sargısı en dış iletkenin radyal orta noktasına olan mesafe



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Aşırı gerilim tipleri ve açıklamaları.	9
Çizelge 2.2 : IEC60076-1’de tanımlanan gerilim test seviyeleri.	10
Çizelge 2.3 : Transformatör hataları ve karşılaşıldığı durumlar.	14
Çizelge 2.4 : Kalkanlı sargı ile iç içe geçmiş sargı disk başına işçilik karşılaştırılması.	24
Çizelge 3.1 : Darbe Analiz Yazılımı Giriş Parametreleri.	37
Çizelge 3.2 : Kıyaslama yapılan sargı ortak değerleri.	41
Çizelge 3.3 : Deneme bobini parametre değerleri.	44
Çizelge 3.4 : Kalkanlı sargı test sonuçları.	45
Çizelge 3.5 : Kalkanlı sargı testinde kullanılan buşinglerin kapasite ölçüm değerleri.	46
Çizelge 3.6 : Test sonuçlarında elde edilen kapasite değerleri.	46
Çizelge 3.7 : Kalkanlı sargı testinde kullanılan buşinglerin kapasite ölçüm değerleri.	47
Çizelge 3.8 : Ölçülen sargı direnci değerleri.	48
Çizelge 4.1 : Ölçülen sargı direnci değerleri.	53
Çizelge 4.2 : Darbe analiz yazılımına girilen 50MVA transformatör parametreleri.	55
Çizelge 4.3 : Darbe analiz yazılımına girilen 50MVA transformatör parametreleri.	56
Çizelge 4.4 : Düşüm noktası gerilim değerleri.	59
Çizelge 4.5 : 2. Analiz düşüm noktası gerilim değerleri.	61
Çizelge 4.6 : AG-YG arası ekranlanmış durumda gerilim değeri.	64
Çizelge 4.6 : AG’nin sarım yönü ters olması durumunda yansıyan gerilim değerleri.	66
Çizelge 4.8 : AG’nin sarım yönü ters olması durumunda yansıyan gerilim değerleri.	67
Çizelge 4.9 : Bağlantı grubunun değişmesinin yansıyan darbeye etkisi.	70
Çizelge 4.10 : AG-Çekirdek arası mesafenin yansıyan darbeye etkisi.	71
Çizelge 4.11 : AG sarım sayısına göre değişen yansıyan darbe gerilimleri.	74
Çizelge 4.12 : Aynı fiziğe dağıtılmış AG sargı parametreleri.	75
Çizelge 4.13 : Aynı fiziğe sığdırılmış, farklı sarım sayılarına göre yansıyan gerilimler.	75
Çizelge 4.14 : AG sarım sayısına göre değişen yansıyan darbe gerilimleri.	77
Çizelge 4.15 : AG kat sayısına göre değişen yansıyan darbe gerilimleri.	78
Çizelge 5.1 : İmal edilen transformatör plaka değerleri.	83



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Yıldırım düşmesi kaynaklı transformatör arızaları [10].	7
Şekil 2.2 : Düşen yıldırımlar ile paralel değişen transformatör arızaları [1-2].	8
Şekil 2.3 : Aşırı gerilim sınıfları ve şekilleri (standart isimleri ile birlikte).	12
Şekil 2.4 : Transformatörün ömrü süresince karşılaştığı gerilimler.	13
Şekil 2.5 : Süresine göre sınıflandırılmış aşırı gerilimler.	15
Şekil 2.6 : Yağdaki müsaade edilen darbe dayanımı.	16
Şekil 2.7 : Parafudrun yerleştirildiği yere göre yansıyan gerilimin incelenmesi.	17
Şekil 2.8 : Parafudr kullanımı ile transformatör arızaları değişim grafiği. [18].	18
Şekil 2.9 : Güç transformatörlerinde kullanılan bazı sargı tipleri.	19
Şekil 2.10 : Radyal kanallı kat sargı sarım makinesinde	20
Şekil 2.11 : Çoklu iletkenli disk sargı fotoğraf, geçiş noktası gösterilmiştir.	21
Şekil 2.12 : İç içe geçmiş disk sargı şematik gösterimi ve fotoğrafı. Geçiş yerleri işçiliği ilk diskte gösterilmiştir.	22
Şekil 2.13 : Kalkanlı sargı uygulaması, iletkenlerin gösterimi.	24
Şekil 3.2 : Wagner eşdeğer devresi (a) ve sargılardaki kapasitelerin isimlendirilmesi (b).	29
Şekil 3.3 : İkiz bakır iletken izolasyon katmanları.	33
Şekil 3.4 : İzolasyon ve yağ için kapasitelerin şematik gösterimi.	34
Şekil 3.5 : Bir transformatörün yandan kesiti ve formülasyonda kullanılan mesafeler.	34
Şekil 3.6 : Darbe Dağılım Hesap Programı İş Akış Grafiği	36
Şekil 3.7 : 100V test gerilimi verilerek a. Ölçülen eğri, b. Hesaplanan eğri [30]	38
Şekil 3.8 : Kalkanlı sargı şematik gösterimi. Yeşil renkli numaralı kutucuklar sarımları, siyah kutucuklar kalkan iletkenini, mavi kutucuklar ise aksiyel soğutma kanallarını göstermektedir.	40
Şekil 3.9 : Düz diskte sargı boyunca gerilim dağılımı.	42
Şekil 3.10 : Kalkanlı diskte sargı boyunca darbe dağılımı.	43
Şekil 3.11 : Sargı tiplerine göre darbe dağılımının karşılaştırılması (Mavi = kalkanlı, Turuncu = düz diskli sargı).	44
Şekil 3.12 : Ölçülen kapasitelerin şematik gösterimi.	46
Şekil 3.13 : İzolasyon direnci ölçüm düzeneği.	47
Şekil 4.1 : Darbe uygulanan ve yansıyan gerilim modelinde kapasite tanımları.	50
Şekil 4.2 : Referans transformatör fiziksel yapısı.	54
Şekil 4.3 : AG sargısı darbe değerinin incelendiği noktalar.	56
Şekil 4.4 : Topraklanmış ve darbe uygulanan sargı uçları.	57
Şekil 4.5 : AG uçları topraklı sargısıyla yansıyan darbe şekli.	58
Şekil 4.6 : Değişen darbeye göre yansıyan gerilimin incelenmesi.	60
Şekil 4.7 : 2. Analizde salınımda bırakılan ve darbe uygulanan uçlar.	61
Şekil 4.8 : 2. Analiz yansıyan darbe şekli.	62
Şekil 4.9 : AG-YG arası ekranlanmış sargılar ve darbe uygulanan uç.	63
Şekil 4.10 : AG-YG arası ekranlanmış durumda yansıyan darbe şekli (Yeşil = AG_A, Mor = AG_E, Turkuaz = AG_D, Turuncu = AG_C, Lacivert = AG_B).	64

Şekil 4.11 : Endüktif ve toplam yansıyan gerilimlerin grafik gösterimi.	65
Şekil 4.12 : Sarım yönünün yansıyan darbeye etkisini incelemek için kurulan yapı.	65
Şekil 4.13 : AG'nin sarım yönü ters olması durumunda yansıyan gerilim grafikleri (Yeşil = AG_A, Mor = AG_E, Turkuaz = AG_D, Turuncu = AG_C, Lacivert = AG_B).	66
Şekil 4.14 : YNd5 bağlantı grubunda yansıyan darbeler (Yeşil = AG_A, Mor = AG_E, Turkuaz = AG_D, Turuncu = AG_C, Lacivert = AG_B).	67
Şekil 4.15 : YNd7 (a) ve YNd11 (b) bağlantı grubunda yansıyan darbeler.	68
Şekil 4.16 : YG-AG Arası mesafeye göre yansıyan darbenin değişimi (Kırmızı = YG-Nötr Gerilimi, Mor = AG-Üst, Turuncu = AG_Alt Gerilimi).	69
Şekil 4.17 : YG-AG arası artan mesafeye göre yansıyan darbenin değişimi.	70
Şekil 4.18 : AG-Çekirdek arası mesafeye göre yansıyan darbe değişimi (Kırmızı = YG-Nötr, Mor = AG-Üst ve Turuncu = AG-Alt gerilimi).	71
Şekil 4.19 : Çekirdek arası mesafeye bağlı yansıyan gerilimlerin değişimi.	72
Şekil 4.20 : Sargılar arası ve çekirdek arası mesafenin şematik gösterimi.	73
Şekil 4.21 : AG kat başına sarım sayısına göre yansıyan darbe değişimi (Kırmızı = YG-Nötr, Mor = AG-Üst ve Turuncu = AG-Alt gerilimi).	74
Şekil 4.22 : Aynı fiziğe sığdırılmış, farklı sayım sayılarına göre yansıyan gerilimler grafiği. (Kırmızı = YG-Nötr, Mor = AG-Üst ve Turuncu = AG-Alt gerilimi).	76
Şekil 4.23 : Aynı fiziğe sığdırılmış, farklı sayım sayılarına göre yansıyan gerilimler grafiği. (Kırmızı = YG-Nötr, Mor = AG-Üst ve Turuncu = AG-Alt gerilimi).	77
Şekil 4.24 : Sabit aksiyel boyda, kat adeti artırılarak yapılan analiz. (Kırmızı = YG-Nötr, Mor = AG-Üst ve Turuncu = AG-Alt gerilimi).	79
Şekil 4.25 : Kalkanlı sargı ve düz disk sargının darbe dağılımlarının karşılaştırılması.	81
Şekil 4.26 : Kalkanlı sargıdan AG sargısına yansıyan darbe grafikleri.	80
Şekil 5.1 : Test edilen transformatör fotoğrafı.	84
Şekil 5.2 : Best A.Ş. OSB Test Laboratuvarı fotoğrafı.	85
Şekil 5.3 : YG'den uygulanan darbe (sarı), faz-toprak AG darbe gerilimi (mor).	85
Şekil 5.4 : YG'den uygulanan darbe (sarı), faz-nötr AG darbe gerilimi (mor).	86
Şekil 5.5 : Transformatör analiz sonuçları. Turkuaz: Uygulanan darbe, Turuncu, Mavi: Diğer fazlardaki etkisi, Yeşil: İncelenen sargı çıkışı (Turkuaz = HV-R fazı, Yeşil LV-R fazı ile Nötr arasındaki gerilim farkı, Mavi = HV-Y fazı).	86
Şekil 5.6 : Analiz sonucu sadece yansıyan darbenin incelenmesi.	87
Şekil 5.7 : YG'den uygulanan darbe (sarı), faz-toprak AG darbe gerilimi (mor).	88
Şekil 5.8 : YG'den uygulanan darbe (sarı), faz-nötr AG darbe gerilimi (mor).	88
Şekil 5.9 : Darbenin diğer faza etkisinin analiz üzerinde incelenmesi (Turkuaz = HV-R fazı uygulanan darbe, Mavi = HV-Y fazı endüklenen, Yeşil = LV-B fazı ile toprak arası referans gerilim).	89
Şekil 5.10 : 2. Analizin yakınlaştırılmış hali. LV-B faz ile toprak arasındaki gerilim farkı.	90
Şekil 5.11 : Ym fazına yansıyan darbenin test değerleri, Ym-Nm.	90
Şekil 5.12 : Ym fazına yansıyan darbenin test değerleri, Ym-Toprak.	91
Şekil 5.13 : Ym fazına uygulanan ve yansıyan darbe analizi (Turkuaz = HV-R fazından uygulanan darbe, Turuncu = HV-B fazına darbenin etkisi, Yeşil = LV-Y fazı ile toprak arasındaki gerilim farkı).	91

- Şekil 5.14 :** Sadece yansıyan darbenin incelenmesi. LV-Y fazı ile LV-Nötr noktası arasındaki gerilim farkı, YG'den AG'ye yansıyan darbenin etkisi. **92**
- Şekil 5.15 :** Düz disk YG sargısı durumunda yansıyan darbelerin incelenmesi..... **92**





TRANSFORMATÖRLERDE KALKANLI SARGI UYGULAMASI VE YANSIYAN GERİLİMLERİN İNCELENMESİ

ÖZET

Şebekede üretimi en uzun süren ve en maliyetli ekipmanlardan birisi transformatördür. Transformatörün kapasitesi (gücü) ve gerilimi arttıkça; üretim süresi, maliyeti ve boyutları büyümektedir. Bu sebeple; transformatörlerin uzun ömürlü olması ve korunması, şebeke sağlığı açısından büyük önem taşımaktadır.

Güç transformatörlerinin işletmede sıklıkla karşılaştığı arızalardan birisi de aşırı gerilimlerden dolayı arızalanan sargılardır. Bu aşırı gerilimlerin transformatörde oluşmasının en sık nedeni; transformatör ekipmanlarına ya da yüksek iletim hatlarına düşen yıldırım darbeleridir.

Oluşacak yıldırım darbelerin sargıda daha iyi dağılmasını sağlamak için, sargı kapasitelerinin uygun şekilde dağıtılması gerekmektedir. Bunu sağlamak için gerilim seviyelerine göre farklı sargı tipleri kullanılmaktadır. Fakat genel olarak; gerilim arttıkça işçilik artmaktadır.

Bu tezde önerilen sargı tipi olan kalkanlı sargı ve bu sargının getirdiği avantajlar incelenmiştir. Önerilen sargı tipine ait hesaplamalar aktarılmıştır.

Darbelerin etkileri sadece darbenin düştüğü sargıda değil, manyetik olarak birbirine bağlı olan devrede, diğer sargıda da gözlemlenmektedir. Bu gerilim etkilerine transfer edilen (yansıyan) gerilimler denmektedir. Tezde yansıyan darbelerin etkileri de incelenmiştir ve bağlı olduğu değişkenlere göre etkisi gözlemlenmiştir. Önerilen kalkanlı sargı çözümünün yansıyan gerilimlere etkisi de ayrıca irdelenmiştir.

Son olarak tezde önerilen kalkanlı sargıya ait deneysel çalışmalar yapılmış, yansıyan darbe geriliminin, en etkili parametre göz önünde bulundurularak düşürülmesi sağlanmıştır.

Türkiye’de artan güç transformatörü imal eden firma sayısı ile birlikte tez konusu daha çok önem kazanacak ve bu alanda geliştirilecek yenilikler ile transformatörlerin kalitesi ve şebeke ömrü arttırılacak, maliyetleri de azaltılacaktır.



SHIELDED WINDING APPLICATION IN TRANSFORMERS AND TRANSFERRED VOLTAGES

SUMMARY

Transformers are an essential element of power systems. Among other equipment; transformers are very costly and hard to manufacture (takes longer time). With increasing power and voltage levels; manufacturing time, cost and dimensions of transformer increases. For this reason, it is very important to make transformer life as long as possible and protect the equipment from hazardous effects in operation.

One of the most common and dangerous damage to transformer windings in operation is overvoltages. Most common overvoltage situation is the lightning impulses effected to transformer terminals or transmission lines.

There are couple of protection method from overvoltage. Some of them are at outside of transformers; like surge arresters. Other method is inside the transformers; to absorb the voltage or increase the withstand ability. Both could be made with adjusting the equivalent circuit of transformer according to.

In order to distribute lightning impulse in transformer windings better; winding turn to turn and turn to earth capacitances must be distributed according to best option. To give best capacitance distribution, different winding types are used depending on voltage level of winding.

In this thesis, shielded winding is suggested to give best capacitance distribution for high voltage windings. Advantages on lightning distribution and labor cost is explained. Calculations depending on this winding is also explained with details.

Effects of impulses are not damaging only the winding which lightning stroke, it also damages the other windings, which are magnetically connected to primary winding via core. Not only magnetic effects, also capacitive effect for transferring the voltage from effected winding to other winding is essential. These transferring voltage situations are called as transferred surges (voltages). Transferred surges are also inspected in this thesis, dependencies to design parameters are measured with simulation. Shielded winding performance in transferred voltages are also simulated.

Firstly observation made on high voltage terminal neutral side and it's dependency with applied voltage to main terminal. In order to compare shielded winding with disc winding, lightning distribution through winding is essential.

After that, effect of earthing the low voltage side is inspected. Of course, on LV terminals, earthed voltage levels are 0kV and non-earthed simulation results were a lot higher but in order to compare low voltage winding completely, inside turns of low voltage winding (voltage levels) are important. It is observed that voltage induced in middle part of the winding and it could not be ignored.

In order to perform real tests on transformers without damaging the winding, relationship between applied voltage and transferred voltage is observed. If the equal

circuit is same for two applied voltage, no change should occur. For this purpose; lightning impulse voltage raised systematically and transferred voltage is observed.

It is proposed that there are two types of transferred voltages from high voltage winding to low voltage winding. First one is capacitive effect, which takes low voltage and high voltage winding together as capacitance and transfers voltage from one to another. Other is the magnetically transferred effect via core of transformer. Even the core is earthed, for very fast voltage changes on high voltage terminal, very low voltages will be induced on low voltage winding.

Direction of turns of low voltage winding is also simulated. Right wounded high voltage winding and right wounded low voltage winding simulation is compared with right wounded high voltage winding and left wounded low voltage winding.

With a three-phase simulation; effect of connection symbol of transformer is observed. In order not to confuse the situation with winding direction, only same high voltage and low voltage winding direction connection groups are checked. It is observed that the effect is minimal.

After that; capacitance network of model is changed by switching the winding parameters. For this reason, multiple variance of distances are made on:

High voltage and low voltage winding distance is changed

Low voltage and core distance is changed

Number of turns per layer of low voltage winding is changed

Effect of winding copper dimension ins observed by changing the axial length of winding. Also some simulations made to see total dimension effect by changing only winding or only copper dimensions.

Number of layers in low voltage winding and effect to transferred voltage is observed

Changing the high voltage winding type effect is also observed.

Simulation results shows that for transferred voltage effect; most effective way is to add a shield between high voltage winding and low voltage winding. This will limit all capacitance-transferred voltages; only induced transferred voltages will affect the low voltage winding.

For a transferred voltage from a 1050kV high voltage winding to low voltage top terminal approximately 275kV; only 76.5kV of it is induced voltage, rest is capacitive effect. The result shows to focus on capacitive network, more than induced network.

Changing the distance between windings is an easy solution to change capacitive network. For this purpose; distance between high voltage and low voltage winding is changed from 38mm to 758mm step by step. Increasing the distance is positively affect on parallel capacitance so transferred voltage is reduced. But increasing distance to abnormal values is not reasonable since cost of transformer will increase too much. The logic behind increasing the distance is carrying capacitive effect further from winding. Changing the distance 20mm reduces the transferred voltage at low voltage top terminal approximately 8%.

In next simulation; distance between low voltage winding and core is changed. This is also an interference to capacitive network, but this time a negative effect is

observed. Form 10mm to 160mm, 6 simulations performed. Change on transferred voltage is not huge but increasing distance between core and low voltage winding, increases the transferred voltage. Changing this distance 20mm increases the transferred voltage around 6%.

Number of turn at low voltage winding is one of the key parameter in design. First analysis made without changing the overall low voltage winding dimensions. Total height of winding is kept constants and only number of turn is changed by adjusting height of the copper inside winding. This result lead to very small change in transferred voltage, only radical change is observed after 1.5 times the actual turn is created.

Number of turn per layer effect is simulated. Without changing the copper dimensions, number of turn per layer at low voltage winding has very limited effect on transferred voltage. With keeping volt/turn ratio constant and changing the number of turn per layer and adjusting copper length accordingly (changing both HV and LV side number of turn), increasing the turn per layer decreases the transferred voltage. Adding 20 turns to low voltage side reduces transferred voltage at 10% level.

Last simulation made with changing capacitive network of high voltage winding. This made by converting high voltage winding to inter-shielded winding. This change leads both to lightning voltage distribution better on high voltage winding and also reduces the transferred voltage accordingly. Inter-shielded winding reduced the transferred voltage more than half value.

All simulations together; most effective way to reduce transferred voltage effect is to place an earthed shield between high voltage winding and low voltage winding. After that; turning high voltage winding to shielded winding is more effective than any other simulation. Increasing distance between high voltage winding and low voltage winding is also have positive effect but since it increases the cost a lot, it is not preferable. To make small changes in transferred voltage; increasing number of low voltage turns is also a solution.

In last chapter; experimental tests are performed on a manufactured transformer. Shielded winding distribution is tested and transferred voltages are observed. It shows the accuracy of simulations and advantages of shielded winding.

With increasing number of power transformer manufacturers in Turkey, this thesis will improve overall quality and know-how of companies. Also it will reduce costs and increase lifetime of a transformer.



1. GİRİŞ

Dünyadaki enerji ihtiyacı arttıkça, enerjinin üretimi yapıldığı yerler olan santraller büyümektedir. Daha büyük barajlar, daha büyük rüzgar türbinleri, güneş panelleri ve benzeri büyük ölçekli enerji santralleri kurulmaktadır. Bu kurulan santraller; öz kaynaklarına olan yakınlığı, kapladığı alan ve de şehirlerin içinde bulunmasının risk ve maliyetleri dolayısı ile genellikle büyük şehirlere uzak yerlerde bulunmaktadır. Bu sebeple üretim merkezlerinden şehirlere uzun iletim hatları kurulmaktadır. Bu iletim hatları genellikle havai hat olarak oldukları için, atmosferik etkilere açıktırlar.

Enerji üretim santrallerinde, enerji transfer sahalarında, dağıtımda veya binalarda kullanılan ve enerji transferinde gerilim değiştiren şebeke elemanı transformatördür. Transformatörlerin tüm kullanım alanlarında; en maliyetli ve üretimi en uzun süren ekipmanlardan birisi olması sebebi ile de korunması ve standart dışı şebeke koşullarında dayanıklı olması anahtar bir parametresidir. Güç transformatörleri; şebekedeki en pahalı ekipmanlarından birisidir. Sadece maliyeti değil, hata anında şebekenin güçsüz kalması; maliyeti belirlenemeyecek şekilde hasarlara sebebiyet vermektedir.

Transformatörler üzerine yazılan bu tezde; öncelikle transformatörler genel olarak anlatılmış, transformatörlerin karşılaştıkları aşırı gerilimler tanımlanmış ve aşırı gerilimlere karşı alınan mevcut önlemler tanımlanmıştır. İç önlemlerden olan sargı içinde alınan önlemlere ek olarak; kalkanlı sargı önermesi yapılmıştır. Bu önermeyi simülasyon ve deneysel olarak incelemek için transformatör eşdeğer devresi çıkartılmıştır.

Tezde; yüksek gerilim sargılarından alçak gerilim sargılarına yansıyan darbe gerilimleri incelenmiştir. Yansıyan darbelerin dizayn aşamasında göz önüne alınabilmesi için değişen parametreler üzerinden yansıyan darbe gerilimleri incelenmiştir.

Son kısımda da yansıyan darbelerin etkilerini ölçmek için deneysel çalışmalar yapılmış ve simülasyonlar ile karşılaştırılmıştır.



2. TRANSFORMATÖRLERDE AŞIRI GERİLİMLER

Transformatörlerin güvenilir olarak işletilebilmesi ve beklenen kullanım ömrünü doldurabilmesi birçok etkene bağlıdır. Aşırı gerilimler bu etkenlerden biridir. Transformatörler uzak mesafelere enerji ileten hatlara bağlı olduklarından dolayı, şebekelerde meydana gelen devre açma kapamadan kaynaklı iç aşırı gerilimlere, atmosferik etkenlerden kaynaklı dış aşırı gerilimlere ve alternatif akım tesislerinde işletme sırasında toprak kısa devresinden oluşan aşırı gerilimlere maruz kalırlar. Transformatör sargılarında meydana gelen bu aşırı gerilimler yüksek maliyetli ve ciddi transformatör arızalarına neden olabilmektedir. Gerilim dağılımını transformatör sargılarını nasıl etkilediği incelenerek tasarımda ona göre iyileştirmeler yapılabilir.

Transformatörde aşırı gerilimlerin ve sargılara etkilerinin incelendiği birçok çalışma vardır. Ağırlıklı olarak matematiksel olarak kapasitelerin hesaplanması, bu kapasiteler doğrultusunda gerilimin dağılması ve deneysel ölçümlerle bu hesaplanan gerilimlerin karşılaştırılması şeklinde çalışmalar mevcuttur. İlk olarak arızanın sebebi araştırılmış ve şebekelerde meydana gelen aşırı gerilimlerin sebepleri incelenmiştir. Bunlar; devre açma kapamadan ve yıldırım düşmelerinden kaynaklandığını düşünülmüştür. En büyük genlikli etki (en büyük zarar veren) dış kaynaklı aşırı gerilim olan yıldırım darbe gerilimidir. Yıldırım darbe; transformatörün terminalinden sargılarına aktarıldığı zaman transformatörün etkin sargısını aşırı yüksek genlikli gerilim etkiler. Bu ani aşırı gerilim, transformatörün izolasyonunu delerek sargılarının toprağa veya birbirine karşı kısa devre olmasına neden olur. Yıldırım darbelerinin sargılara etkilediği frekanslar çok yüksek Hz mertebelerinde olduğu için, sargı kapasitelerinin etkisi göz ardı edilemez ve sargı kapasiteleri darbe geriliminin sargı üzerinde dağılımı analizinde ve sargıların toprağa ve diğer sargılara karşı maruz kaldığı zorlanmaları bulmayı sağlar [1]. Transformatör modelini çıkartma amaçlı erken çalışmalar; transformatör modeli üzerinden elde edilen eşdeğer devrenin direnç, kapasite ve endüktans değerlerinin hesaplanmasından başlamaktadır. Bu eşdeğer devre için merdiven ağı önermeleri yapılmıştır [2]. M. Heidarzadeh ve M.R. Besmi'nin araştırmalarına göre; sargıların seri ve paralel

kapasite büyüklükleri, sargı parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Doğrusal bir gerilim dağılımı elde etmek için sargının seri kapasite değerlerini artırmak gerektiği bulunmuş ve her bir sargıya ait parametrenin bu başlangıç dağılımına etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda, Matlab programı ile disk sargı için sargı parametrelerinin darbe gerilim dağılımını nasıl değiştirdiği hesaplanmıştır. Yapılan simülasyonda 20 sarımlı bir izolasyonsuz iletken ile hesaplamalar yapılmış. Alınan iletken boyu 9.5mm, kesiti 6.5 mm, iki sarım arası tek taraflı kâğıt izolasyonu 0.5mm, çekirdek dış çapı 500mm, çekirdek çapı ile sargı arasındaki mesafe 30mm olarak kabul edilmiş ve iki disk arasındaki aksiyel uzaklık 4.5 mm olan bir dilimli sargı kullanılmıştır. Bu simülasyon ile darbe dağılımına etkileyen faktörler incelenmiş, çekirdek dış yüzeyi ile sargı arasındaki mesafeyi artırmak seri kapasite değerini arttırdığı ve dolayısı ile paralel kapasite değerini azalttığı, bu durumun da lineere en yakın değişimi sağladığı görülmüştür. Sarımlar arasındaki adım mesafesini azaltmak, sargı paralel kapasitesini değiştirmezken seri kapasitesini artırdığı için darbe giriş dağılımını lineere yaklaştırır. Kâğıt izolasyon kalınlığının (sarımlar arasındaki) paralel kapasite değerini etkilemediği, seri kapasite değerini ise çok az etkilediğinden dolayı dağılıma etkisinin çok az olduğu tespit edilmiştir [3]. Diğer bir çalışmada, sonlu sayıdaki benzer yapıları elemanların ağ yapısında eklenmesi ile eşdeğer devre oluşturulmuştur. Transformatör güçleri ve gerilimleri arttıkça, modeller daha da kompleksleşmiştir. Bu sebeple tüm transformatör modeli ile sargılar ve daha detayda sargıyı oluşturan kat, disk gibi parçalar modellenmiştir [4]. Bir kattaki modelden daha detaya inip, sarım başına kapasite değerlerinin hesaplandığı modellerin daha tutarlı olduğu ilerleyen yıllardaki araştırmalarda ispatlanmıştır. Bu çalışmalarda; birim sarım üzerinden seri ve paralel kapasite değerleri hesaplanabilmektedir. Bu kapasitelerden de sargıda darbe dağılımına geçilmiştir [5]. Gelişen elektrik şebekeleri ve bu şebekelere bağlanan aktif ve reaktif güç çeken sistem elemanları, şebekenin gerilim kalitesini etkilediği için; sadece doğal dış etkenler (yıldırım darbeleri vb.) ile değil, şebeke içi etkilerin de sargılara vereceği zararların incelenmesi gerekmiştir. Ayrıca bu gerilim etkilerinden korunma metodları incelenmeye başlanmıştır. Bir sargıya olan etkinin, manyetik devre ve kapasitif olarak diğer sargıya etkisi incelenmeye başlanmıştır. Transformatör modelleri, koruma elemanları ile birlikte modellenmeye çalışılmıştır [6]. Alçak gerilim sargılarında oluşan arızaların engellenmesinde dış koruma ekipmanlarının yetersiz olduğu arıza istatistiklerinden görülmüş ve arızaların iç etkilerden dolayı

olduğu kanısına varılmıştır. Arızaların yansıyan gerilimler üzerinde daha detaylı araştırmalar yapılmaya başlanmıştır. Yansıyan gerilimi detaylı inceleme amaçlı modeller oluşturmaya çalışılmıştır. Bu modellerde yansıyan gerilimi doğru incelemek için çekirdek de modele eklenmiş ve endüktif etki daha tutarlı olarak ortaya koyulmuştur. Seri ve paralel RL modelleri üzerinden kaçak akılar ve faydalı akılar modellenmiş, yansıyan gerilimin tutarlı hesaplamaları yapılmıştır [7]. Kısa süreli gerilimlerin, frekans bazlı etkileri ile daha tutarlı modeller oluşturmak mümkün kılınmıştır. Bu kapsamda yüksek frekanslı modeller oluşturulmuş ve 1kHz'den 1000kHz'e kadar frekans aralıkları taranarak kapasitelere etkileri göz önünde bulundurulmuştur. Bu modellerin; gelişen bilgisayar teknolojisi ile hızlı çözülebilmesi mümkün kılınmıştır [6]. Bu konuyla ilgili yapılan deneysel çalışmalarda; Hendri Masdi ve arkadaşları tarafından 100kVA gücünde 20/04kV'luk bir dağıtım transformatöründe darbe dağılımı deneysel olarak ve PSCAD adlı programla elde edilmiştir. Deneyde; Schaffner NSG 857 jeneratörü ile 8×20 mikro saniyede 7.5kA darbe akımı gözlemlenmiştir. Diğer bir deneyde, transformatöre 5kA akım uygulanmıştır. Daha sonra yüksek gerilim terminalleri ve toprak arasındaki gerilim ve transformatör sargı dilimlerinin toprağa karşı (0V) gerilimi ölçülmüştür. Yapılan ölçümlerde; uygulanan sargı boyunca gerilim dağılımı tespit edilmiştir. Aynı darbe akımı simülasyonda da uygulanmıştır ve deney doğrulama yapılmıştır. Transformatör tasarım parametrelerinden elde edilen transformatör parametreleri simülasyona girilmiştir. Simülasyonlarda birden fazla model kullanılmıştır. Bir modelde; transformatörün sadece kapasite değerleri kullanılırken diğer modelde transformatörün direnç, endüktans ve kapasite değerleri kullanılarak eşdeğer devre ortaya çıkartılmıştır. Analiz sonuçlarının her iki modelde de çok yakın olduğu ve simülasyon güvenilirliğinin, gerçek dağılımlara kıyasla daha düşük sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Deneysel ve simülasyon çalışmaları sonucu olarak darbe dağılımı hesaplamalarında ana kriterin transformatörün sargılarının seri ve paralel kapasite değerleri olduğu ısıpat edilmiştir [8]. Darbe dağılımı ile ilgili en güncel olarak nümerik çalışmalar mevcuttur. Best A.Ş. personeli olan Muzaffer ERDOĞAN ve Balıkesir Üniversitesi mensubu Mehmet Kubilay EKER'in birlikte yaptığı çalışmada, kat sargılı bir kuru transformatörün nümerik olarak darbe dağılımı elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca transformatöre ait endüktans ve kapasite parametrelerinin çıkarılması için gerekli matematiksel hesaplama yöntemleri verilmiştir. Bir sonlu elemanlar analiz programıyla ve teyit amaçlı sayısal olarak, transformatöre ait LC

parametreleri hesaplanmış ve sonuçlardan analitik hesaplamaların sayısal hesaplamalarla yakın olduğu gözlemlenmiştir. Literatürde yer alan düğüm denklemlerinden elde edilen matrisin çözümü yapılmış ve yıldırım darbe geriliminin transformatör bobinindeki dağılımı elde edilmiştir [9].

2.1 Transformatörler

Sürekli artan enerji ihtiyacı ile transformatör sayısı artmakta, bu vesile ile karşılaşılan hata oranları da artmaktadır. Daha fazla gücü daha ekonomik olarak taşımak için gerilim seviyeleri yükselmekte ve gerilim bazlı transformatör hataları daha sık görülmektedir. Transformatördeki sargıların yapısı bu yüksek gerilimi sağlıklı taşıyabilmek için daha karmaşık hale gelmektedir.

Tasarım olarak transformatörlerin daha da optimum noktada tasarlanması, maliyet açısından önemli olmaktadır. Rekabet için olmazsa olmaz bu koşulu sağlamak için mesafelerden sargı yapılarına kadar en optimum tasarım hedeflenmektedir.

Yaklaşık 150 yıldır üretilmekte olan transformatör teknolojisinde yaşanan sorunların sadece darbenin düştüğü sargılarda değil, düşen darbenin etkisinin aktarıldığı alçak gerilim sargılarında da olduğu gözlemlenmiştir.

Transformatöre etki eden arıza durumları; dış etkenli ve iç etkenli olarak gruplandırılabilir. Dış etkenler; yıldırım düşmesi, deprem gibi tüm şebeke elemanlarını etkileyen afet durumlarıdır. İç etkenler ise şebeke içinde gerçekleşen yük atma, devreye alma, anahtarlama gibi geçici durumlardan kaynaklanan etkilerdir. İç ve dış etkenler transformatörün bulunacağı ülkeye, bölgeye ve yere göre değişiklik gösterecektir.

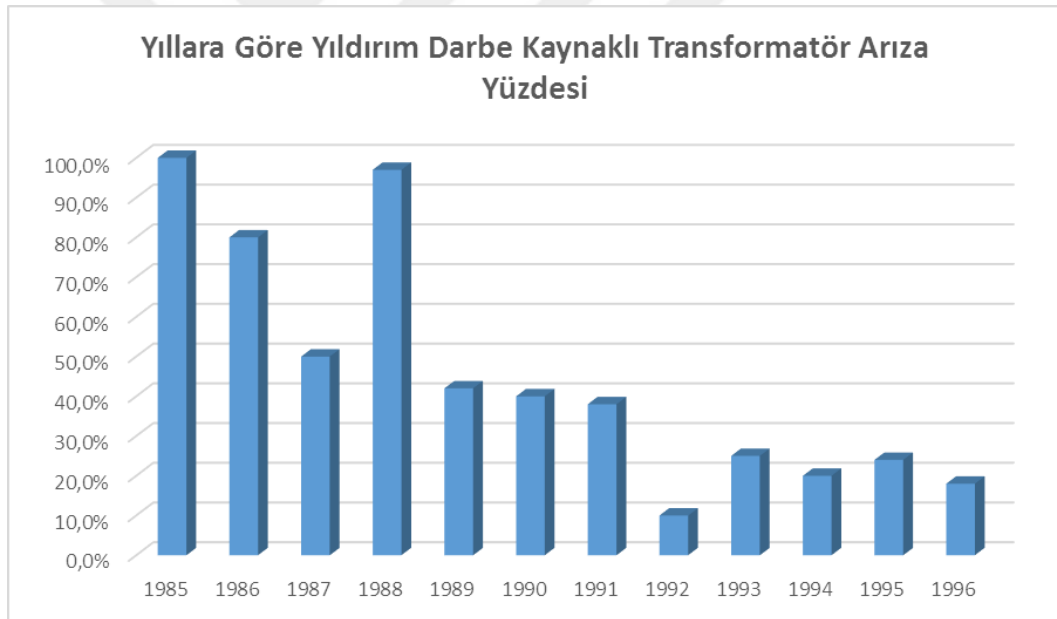
Tüm şebeke transformatörlerinin şebekeye bağlanabilmesi için ilgili şebekenin uluslararası ve ulusal standartlardaki gereksinimleri karşılaması gerekmektedir. Bu gereksinimlerden bazıları; geçici aşırı gerilimlere, aşırı yüklenmelere dayanıklılık, frekans değişimlerine dayanıklılık gibi koşullardır. Standart dışı durumlara dayanıklılık için transformatör içinde ve dışında koruma önlemleri alınsa da en etkili çözüm tasarımı alınan önlemlerdir. Her ülkenin kendi lokalinde standartları değişiklik gösterebilir. En genel olarak IEC, IEEE, GOST, TEİAŞ gibi elektrik şebekeleri yöneticilerinin yayımladığı standartlarda, şebekeye bağlanmanın gereklilikleri aktarılır.

2.2 Aşırı Gerilim, Yıldırım Darbe, Delinme Tanımları ve Transformatör Testleri

Transformatörlere en fazla zarar veren atmosferik etkilerden birisi de yıldırım darbe gerilimidir. Bu aşırı yüksek geriliminin hatlara düşmesi, transformatöre olan hattın uzaklığı ve hattaki koruma elemanları bulunması gibi faktörlerden etkilenecek transformatör sargılarına zarar verebilir. Bu sebeple transformatörler tasarım aşamasında iken, bu aşırı gerilimlere dayanıklı tasarlanmak zorundadırlar.

Yapılan araştırmalar [10], yıldırım darbelerinin transformatör arızaları üzerindeki etkisinin çok yüksek olduğunu göstermektedir (Şekil 2.1, 2.2).

Hindistan’da 2010-2012 yılları arasında yapılan, yeryüzüne düşen yıldırım miktarı ve transformatörlerin arıza miktarları incelendiğinde, doğru orantılı bir bağıntı elde edilmektedir.

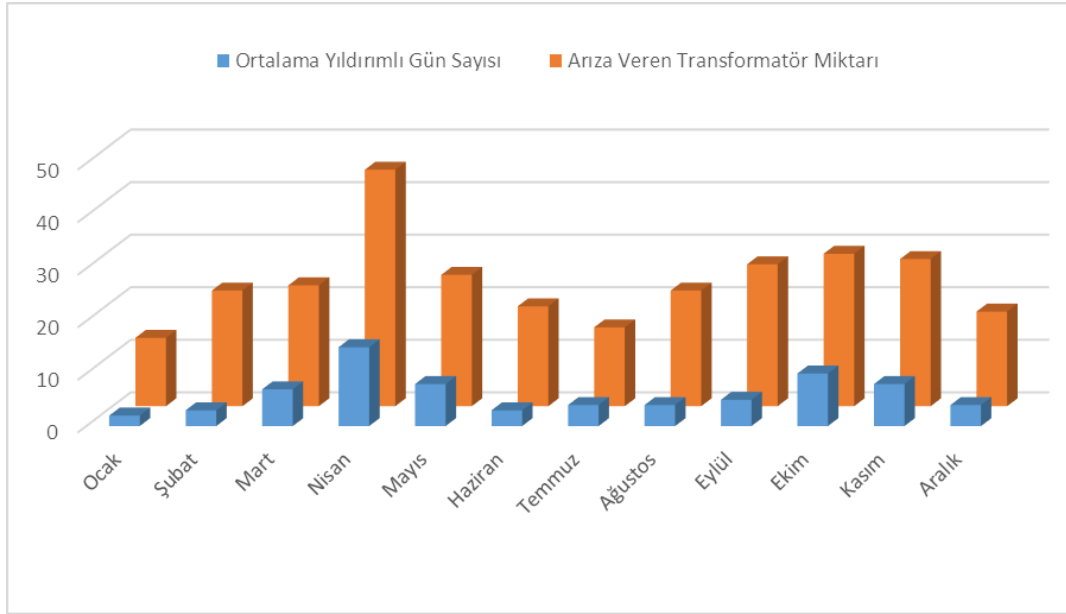


Şekil 2.1 : Yıldırım düşmesi kaynaklı transformatör arızaları [10].

Düşen yıldırımların sıklığının sonucu olarak yıldırım darbelerinin etkilerinden korunmanın transformatörler için kritik olduğu anlaşılmaktadır.

Beklenildiği gibi; yağış olan aylarda düşen yıldırım sayısı, diğer aylara oranla daha fazladır. Düşen yıldırımlara paralel olarak transformatörlerdeki arıza sayısında artış gözlemlenmektedir. Dış etkenli darbe etkilerinin en büyük etkeni düşen yıldırımlar olduğu anlaşılmaktadır. Türkiye; düşen yıldırımların daha nadir olduğu bir ülke

olduğu için, doğrudan transformatör üzerine düşen yıldırım bazlı arızalara rastlanmamıştır.



Şekil 2.2 : Düşen yıldırımlar ile paralel değişen transformatör arızaları [10-11].

Dış etkenli yıldırım darbe gerilimleri dışında, şebeke içi etkenler sebebi ile de transformatörlere aşırı gerilimler etkiyebilir. Ani yük atma durumları, arıza kaynaklı devre açma/kapama vb. durumlarda da transformatör terminalleri ve sargılarındaki gerilimler yükselerek, kısmi boşalmalara sebebiyet verebilir. Burada transformatörün dış etkilere açık kısmı terminalleridir. Faz terminali denilen; ana besleyici hatta bağlanan terminal, nötr terminal olarak adlandırılan; faz-nötr gerilimi için ya da sistemin nötr noktasına bağlanan terminal, toprak terminali; doğrudan ya da direnç üzerinden transformatörün ve üç fazlı sistemin topraklandığı terminaldir. Bu terminallerden faz ve havaya açık nötr en çok risk altındaki terminallerdir. Bu terminallerde oluşacak bir etki, transformatöre ulaşmadan sönmümlendirilemez ise terminallerden geçerek transformatörün içine taşınacaktır. Transformatörün sargılarında ve çekirdekte de arızaya sebep olacaktır ve transformatörün devreden çıkartılmasına kadar gidebilecektir.

IEC 60071-1 uluslararası standardında aşırı gerilimler; bir faz ve toprak ya da izole edilmiş kısımlarda; gerilimin tepe değerini aşan tüm gerilimler olarak tanımlanmıştır. Türleri ise aşırı gerilimlerin dalga şekillerine ve sürelerine göre ayrılmaktadır, aşırı gerilim tiplerine ilişkin detaylar Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Transformatörlerin terminallerine gelen aşırı gerilimlerin frekans değerleri arttıkça, endüktif komponentlerin empedans değeri artarken, kapasitif komponentlerin endüktans değeri azalmaktadır. Bu da transformatör modelinin endüktif ağırlıklı olmasından çok kapasitif ağırlıklı olmasına sebebiyet verir. İlerleyen kısımlarda daha detaylı olarak aşırı gerilimlerin ve test gerilimlerinin tiplerinden bahsedilmiştir.

Çizelge 2.1 : Aşırı gerilim tipleri ve açıklamaları [12].

Aşırı Gerilim Tipleri	Açıklama
Sürekli güç frekanslı aşırı gerilimler	Sabit bir ortalama değere sahip, sürekli olarak terminallere uygulanan aşırı gerilimler
Kısa süreli aşır gerilimler	Uzun süreli güç frekanslı aşırı gerilimlerdir
Geçici aşırı gerilimler	Kısa süreli (birkaç milisaniye ya da daha az), titreşimli veya titreşimli, genellikle ani yükselişli gerilimlerdir.
Geçici aşırı gerilimler	Yavaş cepheli Tepe yükseliş değeri $20\mu s$ - $5000\mu s$ ve kuyruk süresi $<20\mu s$
	Hızlı cepheli Tepe yükseliş değeri $0.1\mu s$ - $20\mu s$ ve kuyruk süresi $<300\mu s$
	Aşırı hızlı cepheli Tepe yükseliş değeri $<0.1\mu s$, titreşim frekansı 30kHz ile 100MHz arasında olan
	Kombine Aynı anda iki gerilim tipini kombine olarak içeren aşırı gerilimler

Transformatörlerin müşteri taleplerine uygun, yani müşterinin sahada trafonun başına gelebilecek durumları öngördüğü test değerleri; elektriksel ve mekanik tasarımda büyük rol oynamaktadır. Primer ve sekonder tarafın nominal çalışma gerilimleri dışında, trafo sargılarının tasarımlarını büyük ölçüde etkileyen gerilim testleri Çizelge 2.2’de belirtilmiştir. Bu şekilde; transformatör terminalinin gerilim değerine en yakın bir üst sargı nominal gerilimi baz alınarak, bu gerilim değeri için belirlenmiş olan LI ve AC test gerilimlerine transformatörün terminal ve sargılarının dayanması beklenir.

Transformatör sektörü, terzi usulü denilen, müşteri taleplerine uygun transformatör tasarımı ile işlemektedir. Bu da, uluslararası standartların sadece müşteri talebi ile aranması anlamına gelmektedir. Eğer müşteri test gerilimleri olarak daha yüksek veya daha düşük gerilimler talep ederse, transformatör imalatçısı bu gerilimleri sağlamak zorundadır. Genellikle müşteri daha düşük gerilimler talep ettiğinde, standarttaki gerilimin atlına inilmemektedir. Bunun sebebi, standartlar; şebekenin çalışma koşullarını ve uzun yıllar toplanan pratik verileri kapsayarak hazırlanmıştır. Müşteri daha düşük test gerilimleri talep etse de, transformatörün şebekede

karşılaşılabileceği aşırı gerilimlere karşı dayanıklı olması, imalatçının referansı anlamına gelmektedir.

Çizelge 2.2 : IEC60076-1’de tanımlanan gerilim test seviyeleri [12].

Nominal Gerilim (U_r) *	İndüklenmiş Gerilim Testi (AC) (U_d) *	Yıldırım Darbe Testi (LI) (U_p) *
3.5	10	20
7.2	20	40
12	28	75
17.5	38	95
24	50	125
36	70	170
52	95	250
72.5	140	325
100	185	450
123	230	550
145	275	650
170	325	750
245	460	1050
300	520	1175
362	575	1300
420	630	1425
550	685	1550
800	930	2100
1100	1120	2550
1200	1195	2700

* U_r : Sargı nominal gerilimi, U_d : Kısa süreli endüklenmiş gerilim testi (AC), U_p : Yıldırım darbe testi (LI).

Tasarım aşamasından sonra üretim ve peşi sıra yapılan fabrika kabul testlerinde (Factory Acceptance Test - FAT); standartlarda belirlenen testler ile, transformatörlerin saha koşullarına benzer zorluklara karşı dayanımı ölçülmektedir. Bu testlerin en belirleyici ve zorlayıcı olanlarından Yıldırım Darbe Testi (LI – Lightning Impulse) için de benzer şekilde darbe modellenerek transformatör terminallerine uygulanır.

Gerilim bazlı en belirleyici iki test de belirli bir frekans ile uygulanan testler ve darbe testleridir. Tüm fabrika kabul testlerinde, rutin olarak gerilim testlerine uygunluk beklenir. Darbe testleri ise tip testlerdir, yani birkaç adet aynı tip transformatör test edileceği zaman, sadece bir adetine yapmak yeterli olmaktadır. Testlerde müşteri kendisi katılım gösterir ya da temsilcisi bir danışman görevlendirir, testler müşteri ile birlikte yapılır.

2.2.1 Belirli bir frekans ile uygulanan testler

İndüklenmiş gerilim (AC) testi: Bu test ile sargıların kısa süreli (1 dakika gibi) gerilim yükselmelerine dayanımları ölçülür. Sargının nominal gerilimin yaklaşık 2 katı kadar gerilim, 1 dakika süre ile sargılara uygulanır. IEC 600076-1 standartlarına göre şebeke frekansında ya da katları şeklinde uygulanarak süresi ayarlanabilir.

Test sonrasında atlama ya da delinme var mı diye trafo kontrol edilir. Genellikle trafonun sargılar arası ya da sargı-toprak arası mesafeleri etkileyecek değerdir.

2.2.2 Darbe testleri

Yıldırım darbe testi (LI): Trafo ya da iletim hattına yıldırım düşmesinin test edilmesidir. Çok kısa süreli (50 mikro saniye) aşırı gerilimler (nominal gerilimin 4 katı veya daha fazlası) trafo sargılarına uygulanır. IEC 60076-2’de tanımlandığı şekilde bir darbe tüm sargılara sırası ile uygulanır ve delinme var mı kontrol edilir.

Bu test sayesinde sargıların izolasyonları, iletkenler arası mesafeler kontrol edilir.

Anahtarlama darbe testi (SI): LI testinde uygulanan darbenin şekli değiştirilerek trafoya uygulanır. Süresi daha uzundur fakat uygulanan darbe seviyesi daha düşüktür.

Standart isimleri ile birlikte; şebekede rastlanan ve bu doğrultuda testlerde uygulanan düşük frekanslı ve kısa süreli (geçici) darbe gerilimleri Şekil 2.3’de belirtilmiştir.

Transformatörlerin sargılarının ve terminallerinin bu gerilimlere dayanması beklenir. Tasarım aşamasında bu gerilimlere dayanıklılıkları; Weidmann adlı İsveç’li bir izolasyon malzemesi imalatçısının yaptığı deneyler sonucu elde ettiği katı malzemelerin delinimi eğrileri ile transformatör darbe dağılımı ve gerilim tepe değeri karşılaştırılarak, olasılıksal delinmesi ölçülür. Townsend ve Rather’in havada delinmeye ait teorisi, delinme olayını teorik olarak incelemiş olsa da, bu ve bunun gibi tüm incelemeler; yağdaki geniş ölçekli dağılımı doğru modelleyememektedir [13].

Diğer metotlar, Gauss dağılımı ile standart sapmalar göz önünde bulunarak hesaplanmak üzerine kurulmuştur. Hava boşlukları değerlendirildiğinde, standart sapma %6’yı geçmezken, yağ için bu değer %60 olarak hesaplandığı için model güvenle kullanılamaz olmaktadır.

Sınıf	Düşük Frekans		Kısa Süreli, Geçici		
	Sürekli	Geçici	Yavaş Cepheli	Hızlı Yükselen Cep.	Aşırı Hızlı Yük. Cep.
Gerilim Şekilleri					
Aşırı Gerilim şekilleri	$f = 50 \text{ Hz}$ 60 Hz $T_t \geq 3 \text{ 600 s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_t \leq 3 \text{ 600 s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5 \text{ 000 } \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_t \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Standart gerilim şekilleri	 $f = 50 \text{ Hz}$ 60 Hz T_t	 $48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	 $T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2 \text{ 500 } \mu\text{s}$	 $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	
Gerilim Tipi Adı		Kısa Süreli AC Frekans Testi	Anahtarlam Darbe Testi	Yıldırım Darbe Testi	

Şekil 2.3 : Aşırı gerilim sınıfları ve şekilleri (standart isimleri ile birlikte) [12].

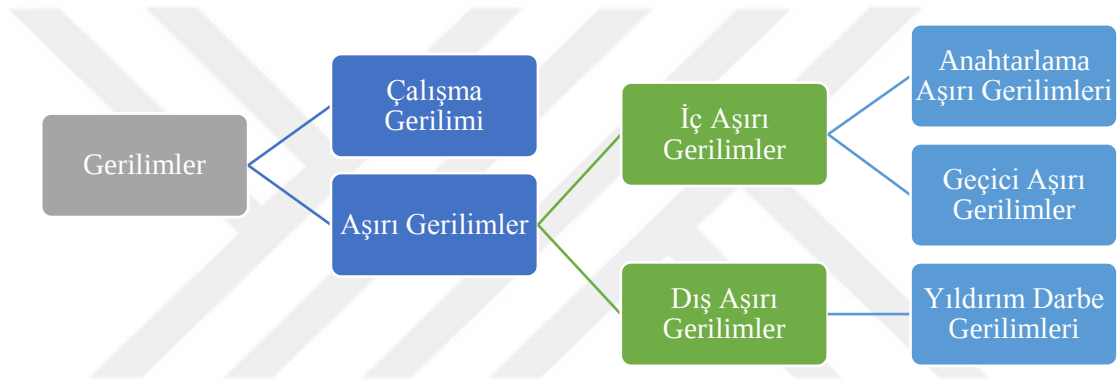
Dağılım üzerinden gitmek yerine; mikro baloncuk delinmesi mekanizması ile daha tutarlı sonuçlar elde edilebilmektedir. Bu teoremden delinmeler yağda değil, yağın içindeki küçük hava baloncuklarında meydana geldiği öngörülür. Kısmi deşarjlar mikro baloncuklar içinde, gaz içinde oluştuğu varsayımı ile; yağ delinmesinde en zayıf halka olarak gazın bulunduğu ve Weibull dağılımı ile de delinme olasılığı hesabı yapılmaktadır. Bu dağılım ile %0 delinme olasılığı elde etmek çok zordur, fakat %1 gibi ihtimaller de dayanıklılık limitinde sayılmakta ve kabul edilebilir delinme riski olarak alınmaktadır.

Transformatörde delinme; elektrik alan şiddetinin yoğunlaştığı bölgede elektronların daha yoğun hareketi sonrası izolasyon malzemelerinin aşınması yani “delinmesi” olarak adlandırılmaktadır. Delinen malzeme artık bariyer olma özelliğini korumamakta ve daha çok izolasyon malzemesi yağ gibi davranmaktadır.

Güç transformatörlerinde; nominal sargı geriliminin %110 katına kadar olan gerilimlere maksimum gerilim, bu gerilim değerinin üzerindeki gerilimlerde aşırı gerilim denir [14]. Örneğin 110kV bir sargı için maksimum gerilim 121kV olarak

hesaplanabilir. IEC 60076-2 ve IEEE C57.98.2011 standartlarında bu gerilim 123kV U_{max} olarak alınmaktadır. Transformatörlerin bu gerilime sürekli sinüs olarak dayanması beklenir.

Şebekede tüm atmosferik etkilere açık ekipmanlar, çok daha yüksek gerilimler ile karşılaşabilir. Bu gerilimlerin etkisi göz önünde bulundurularak tasarımlar yapılır. Yıldırım darbe gerilimler de bu gerilimlerdenidir. Hatlara düşen yüksek yıldırım darbe gerilimleri 2100kV'lara kadar çıkabilmektedir. Transformatörlerin sadece bu yıldırımlara dayanması için değil, transformatör içindeki aşırı gerilim yükselmelerine ve sargı izolasyonunun yeterliliğini kontrol etmek için de yıldırım darbe testi transformatöre uygulanır. Geçici süreli aşırı yükselmeler Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4 : Transformatörün ömrü süresince karşılaştığı gerilimler.

Transformatörün en çok etkilendiği aşırı gerilimlerden ilki iç aşırı gerilimlerden olan geçici aşırı gerilimlerdir. Daha nadir olarak oluşurlar ve rastgele karakterde oluşumlardır. Kısa sürerler ve yüksek frekanslarda etki ederler. Hızlı değişen (oscillating) veya yürüyen (travelling), yüksek tepe değerli aşırı gerilimlerdir. Bu gerilimlerin risk oluşturmasının sebebi de normal sinüzoidal gerilimin üzerine çıkarak, tepe noktasını daha da yukarı taşımasıdır. Oluşmasının sebebi ise; nominal çalışma koşullarından ani değişikliklerdir. Ani endüktif veya kapasitif yüklerin devreye girmesi ve enerji değişiminin çok hızlı olması ve benzeri etkiler geçici aşırı gerilimlere yol açar.

Yıldırım darbe gibi rastlantısal hatalar, karşılaşıldığı zamanlara ve sürelerine göre Çizelge 2.3'de gösterilmiştir. En fazla etkinin geçici aşırı gerilimler sonucu olduğu çizelgeden anlaşılmaktadır. Bu sebeple her tip aşırı gerilimden korunmak gerekmektedir. Her aşırı gerilimin meydana çıkışı farklı olduğu gibi, transformatör üzerine etkileri de farklıdır.

Çizelge 2.3 : Transformatör hataları ve karşılaşıldığı durumlar.

	Yavaş Cepheli Aşırı Gerilimler	Hızlı Cepheli Aşırı Gerilimler	Aşırı Hızlı Cepheli Aşırı Gerilimler	Geçici Aşırı Gerilimler
Yük Atma				X
Transformatör Enerjilendirme	X			X
Paralel Hat Rezonans Durumu				X
Homojen Olmayan Ayırıcı Kutupları				X
Ters Besleme				X
Hat Arıza Durumu	X			X
Arıza Giderme Durumu	X			X
Hat Enerjilendirme	X			X
Hat Arızası Sonrası Enerjilendirme	X			X
Hat Kopması	X			X
Havai İzoleli Ayırıcı İle Ayrılma		X	X	
Endüktif ve Kapasitif Akım Değişimi	X	X		X
Parlama (Bağlantıda Kısa Devre)		X		
Doğrudan Yıldırım Düşmesi		X		
Gaz İzoleli Ayırıcı İle Ayrılma			X	
SF₆ Gazlı Ayırıcı İle Endüktif ve Kapasitif Akım Geçişi	X	X	X	X
Gaz İzoleli Ayırıcıda Parlama			X	
Vakumlu Ayırıcı Çalışması Durumu		X	X	

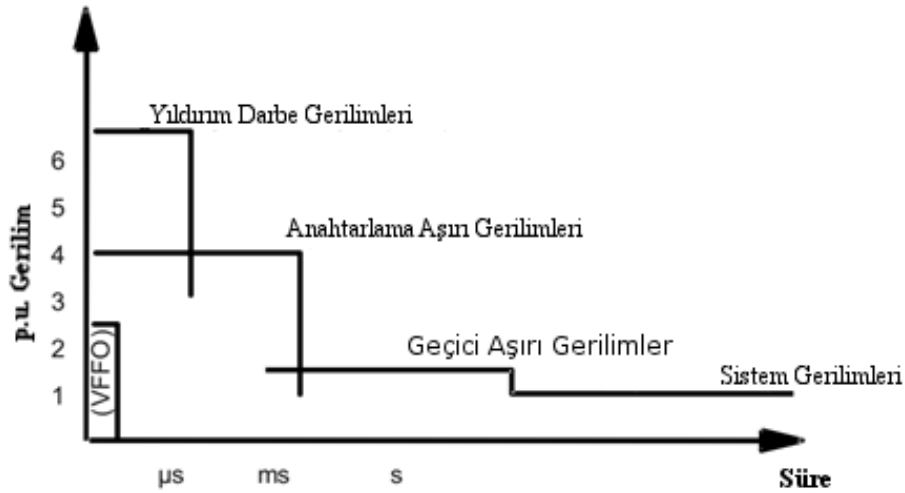
Anahtarlama aşırı gerilimleri ise transformatör ve reaktörler devreye alınırken; yük atılırken veya alınırken, hat geçişlerinde oluşan hatalardan dolayı oluşabilmektedir. Bu aşırı gerilimler; 50/60Hz nominal frekanstan 10kHz'e kadar değişebilmektedir. Yıldırım darbe gerilimleri ise doğrudan veya hat üzerinden taşınarak, yeryüzüne düşen yıldırımların hatlara veya ekipmanlara zarar vermesinden dolayı oluşur. Frekansları ise 10kHz'den 3MHz'e kadar çıkabilmektedir. Taşınan gerilimler ise frekansı daha da yüksek 100kHz'den 100MHz'e kadar etki edebilmektedir.

Transformatörün içindeki izolasyon malzemeleri temel olarak ağaç malzemeler (kp, psp), transformatör yağı (katkılı, katkısız) ve izolasyon kağıdıdır. Transformatörün içindeki canlı uçları ile toprak uçlarının arasında bu izolasyon malzemeleri farklı

oranda bulunmaktadır. Transformatörlerin de darbelere dayanmasını bu malzemeler sağlamaktadır. Kağıdın dielektrik dayanım değeri, orijinal değerinin %50 altına düştüğünde; trafo ömrünün sonuna gelmiş demektir [14]. Bunun sebep; dayanımı %50'nin altına inen izolasyon malzemesi delinmeye çok müsait olmasıdır. Aşırı gerilim sonucunda hızla deforme olacak ve transformatörü servis dışı bırakabilecektir.

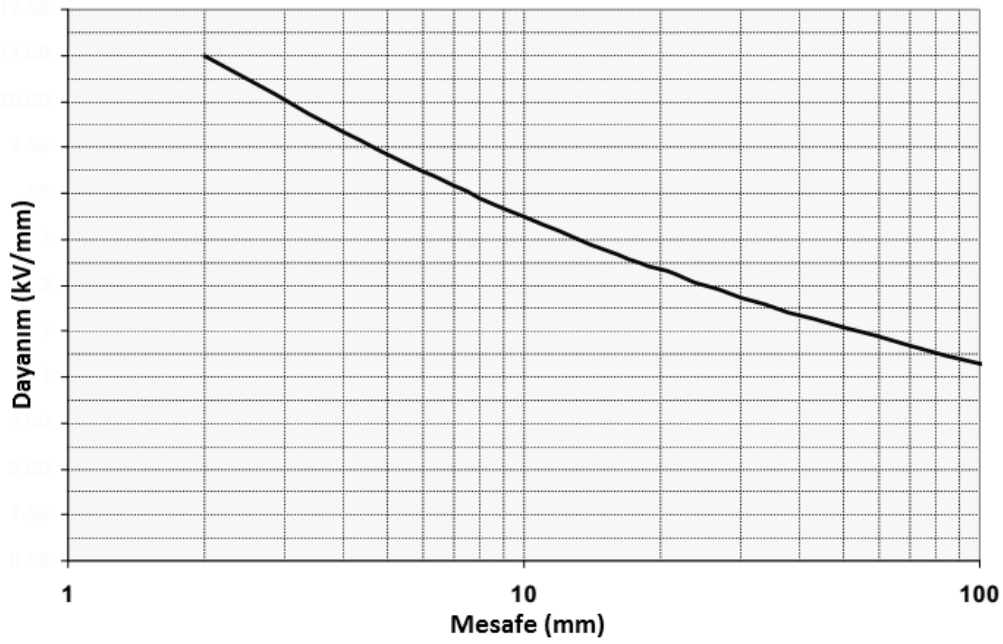
Şekil 2.5'de; geçici aşırı gerilimlerin seviye olarak sistem gerilimlerinden çok uzak olmadığı ancak süresinin uzun olduğu belirtilmiştir.

Transformerboard olarak adlandırılan selüloz bazlı karton gibi malzemeler, 5mm kalınlıkta, 40kV/mm gerilime kadar dayanabildiği belirtilmiştir [15]. Yağın ise darbe gerilimine dayanımı 7.5kV/mm olarak kabul edilebilir. Bu değer, içinde hiç gaz olmayan yağ için baz olarak alınabilir. Bu sınır değerinde tasarım yapmak risklidir çünkü transformatör ömrü 20 yıldan fazla olarak beklenmektedir ve bu süreçte yağın eskimesi ve küçük kısmi deşarjlardan ötürü gaz oluşması mümkündür. Gaza doymuş yağın delinmesi ise, gazsız yağa göre %12 daha kolaydır [15]. Bu sebeple transformatörde aşırı gerilimler sonrası bir gaz çıkması, daha fazla gerilim arızasını peşinde getirecektir.



Şekil 2.5 : Süresine göre sınıflandırılmış aşırı gerilimler.

Gazsız bir yağ kanalının dayanımı Şekil 2.6'de gösterilmiştir. Mesafe bazlı olarak mm/kV cinsinden dayanım değeri eğrisi göstermektedir ki; uzunluğu yüksek yağ kanallarından çok, bariyer sistemi ile (yağ kanalı + yalıtkan malzeme + yağ kanalı yapısı) transformatörlerin aşırı gerilim performansı daha da artmaktadır.



Şekil 2.6 : Yağdaki müsaade edilen darbe dayanımı.

Literatürde trafonun %20 fazla gerilimde 1 dk. Dayanabileceğini söyler [14]. Şekil 2.6'yı yorumlarsak; mesafe arttıkça dayanım artmamaktadır, bu da aşırı gerilimlere karşı alınacak iç önlemlerde, tasarımda yağ-izolasyon-yağ yapısının kullanılması gerektiğini göstermektedir.

2.3 Aşırı Gerilimden Korunma Çalışmaları

2.3.1 Dış yöntemler

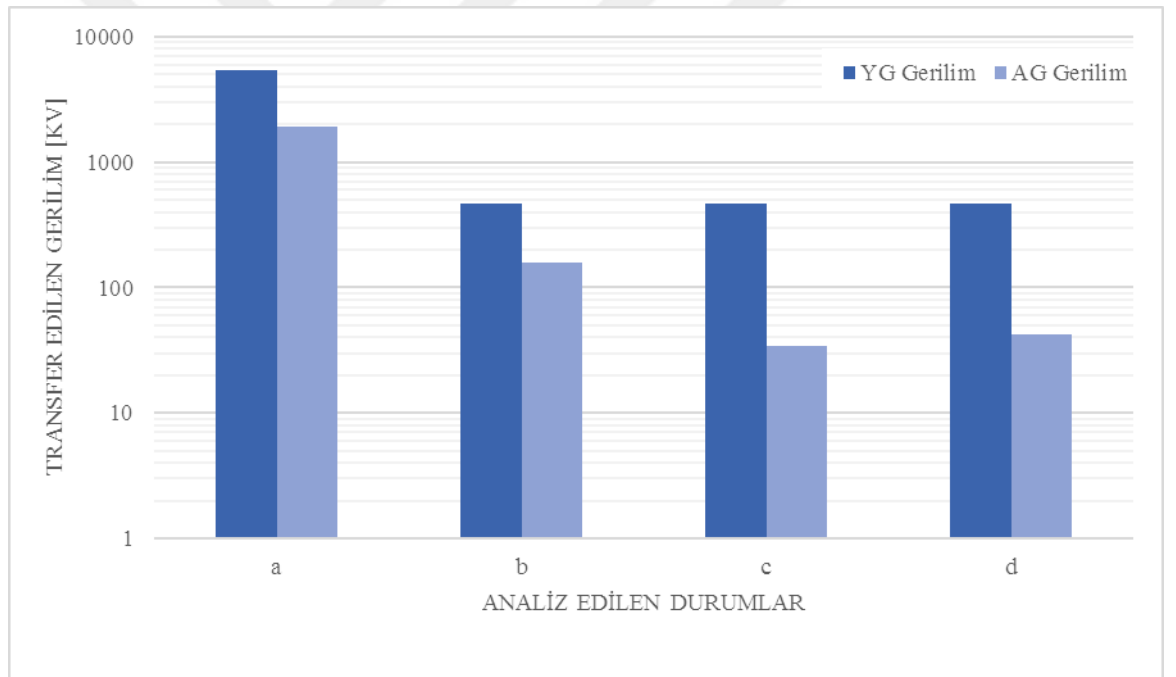
Aşırı gerilimlerden korunma metotları 1890'lı yıllara dayanmaktadır. İlk olarak demir yollarında, radyo kulelerinde vb. sistemlerdeki yıldırımlardan korunmak için geliştirilmeye başlanmıştır. Elektrik şebekesinin yaygınlaşması ile iletim hatlarında da kullanma ihtiyacı doğmaya 19. Yüzyılda başlamıştır. İlk darbe koruyucular hava boşlukları (spark gap) yapısı ile sağlanmaya çalışıldıysa da gerilim yükseldikçe koruma performansı yetersiz görülüp, AC ve yıldırım darbe aşırı gerilim yükselmelerinde daha efektif koruma sağlayacak olan içi yağ dolu ve alüminyum tabakaların üst üste dizilmesi ile sağlanan parafudr önerisi yapılmıştır [16].

Yıldırım darbelerinden korunmak için iki tip standart koruma cihazı bulunmaktadır: seri boşluklu, lineer olmayan direnç tipi parafudr ve boşluksuz metal oksit parafudrlar. Bunlar dışında atlama boşlukları denilen “spark gaps” yapılar da darbe

limitleyici cihaz olarak kullanılabilir ama performansları diğer iki koruyucu kadar efektif değildir [17]. Koruma cihazları seçilirken; transformatörün ya da korunmak istenilen ekipmanın uğrayacağı aşırı gerilimler de dikkate alınmalıdır.

Das'ın yaptığı çalışmada, parafudrların bulunup bulunmaması durumları değerlendirilmiştir. 40MVA üçgen-yıldız bağlı bir transformatör, 400A'lık bir direnç üzerinden topraklanmıştır. 230/13.8kV gerilimlere sahip transformatörün empedans değeri %9'dur. Bu örnek transformatör için;

- YG ve AG'de parafudr olmaması durumu
- Sadece YG tarafında parafudr durumu
- YG ve AG'de parafudr olması durumu
- YG'de parafudr, AG'de yıldırım kapasitörü olması durumu incelenmiştir.



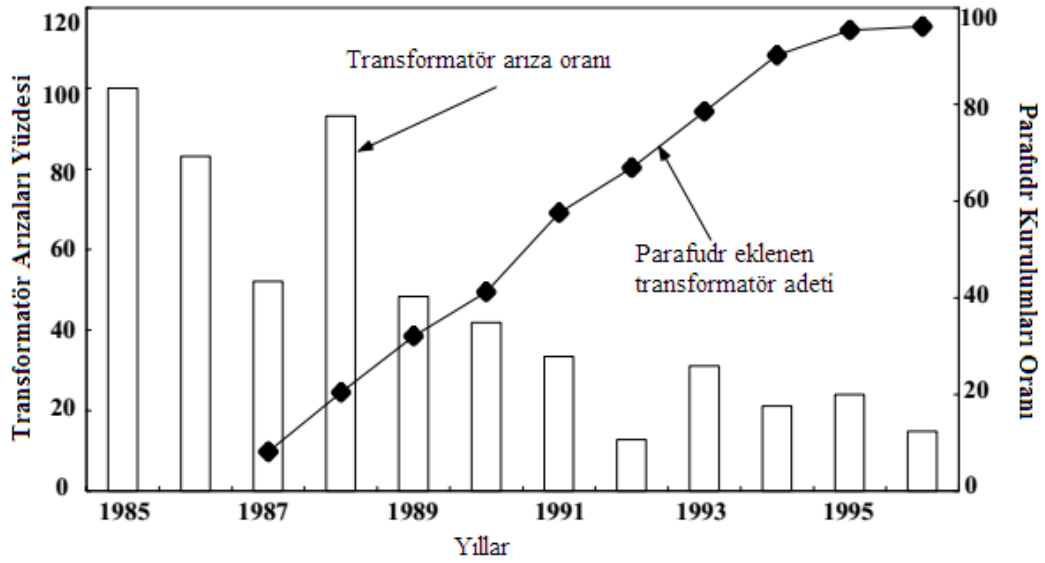
Şekil 2.7 : Parafudrun yerleştirildiği yere göre yansıyan gerilimin incelenmesi.

Bu dört durum incelendiğinde, yansıyan gerilim en az c durumunda yani hem YG hem de AG parafudrlu iken oluşmuştur. İkincil durum olarak d durumu, üçüncül iyi durum b durumudur. En kötü durum ise hiç parafudr olmaması durumudur. Sonuçlar Şekil 2.7'de gösterilmiştir [6].

ZnO elementleri tank içinde kullanmak bazı durumlarda mecburidir. Yük altında kademe değiştiren (OLTC – On Load Tap Changer) elemanların, gerilim değiştirdiği

kademe farkı iki kontak arası mesafe ile limitlenmektedir. Bu mesafe fiziksel olarak da belirli bir limittir, aksi halde kademe değıştirici çok büyük alan kaplamak zorundadır. ZnO elementler; bu limitli mesafede kontaklar arasına yerleştirilerek, bu mesafelerin maksimum dayanabildiğı gerilimi arttırarak, daha yüksek gerilimlerde gerilim değışimini mümkün kılar.

Şekil 2.8’de gözlemlendiğı üzere, parafudr kullanma oranı ile arıza sayısı azalmış fakat sıfırlanamamıştır. Bunun sebebi de iç etkenler olarak yorumlanabilir.



Şekil 2.8 : Parafudr kullanımı ile transformatör arızaları değışim grafiğı. [18].

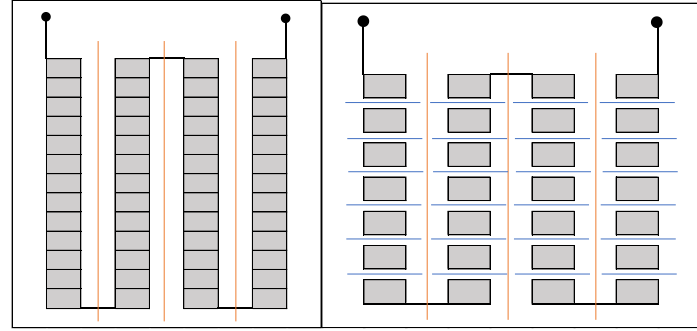
ZnO element kullanıma alternatif olarak sönümleyici devreler de kullanılabilir. Bir direnç ve kapasite yardımıyla aşırı gerilimler osilasyon şeklinde sönümlendirilebilir. ZnO elementlerin kullanımından sonra yıldırım darbe kaynaklı transformatör arızaları oldukça azalmıştır. Şekil 2.8’de bu arızalara ait araştırma bulunmaktadır.

2.3.2 İç yöntemler

Aşırı gerilimlerden korunmak için transformatörün içinde alınabilecek önlemler de bulunmaktadır. Gerilime göre sargı tiplerinin değışmesi bu yöntemlerin en basiti ve ilk kullanılanıdır.

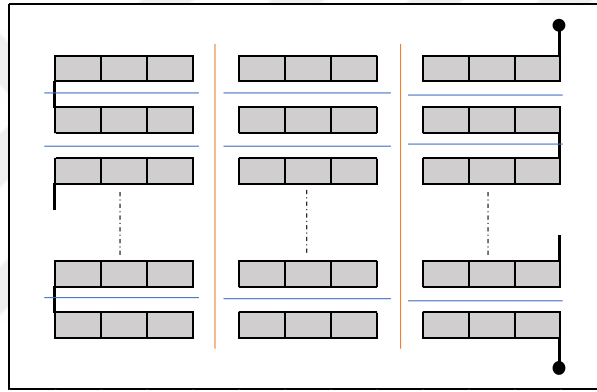
Güç transformatörlerinde kullanılan birçok sargı tipi vardır. Sargı tipleri, fiziksel yapılarına göre farklı çeşitlere ayrılrsa da temelde 2 tip sargı tipinden değıştirilerek elde edilmişlerdir. Bunlar kat sargı ve disk sargıdır. İletken tipleri ise sargıdan geçecek akıma göre belirlenmektedir.

Kat sargılar; Sargı nominal gerilimi 52kV'a kadar tercih edilen sargılardır. Bu gerilimden sonra ekstra önlemler alınması ve izolasyon mesafelerini arttırılması gerektiği için avantajsız duruma gelirler. İşçilik açısından en hızlı, en kolay sarılabilen sargı tipidir.



Kat Sargı

Radyal Kanallı Kat Sargı



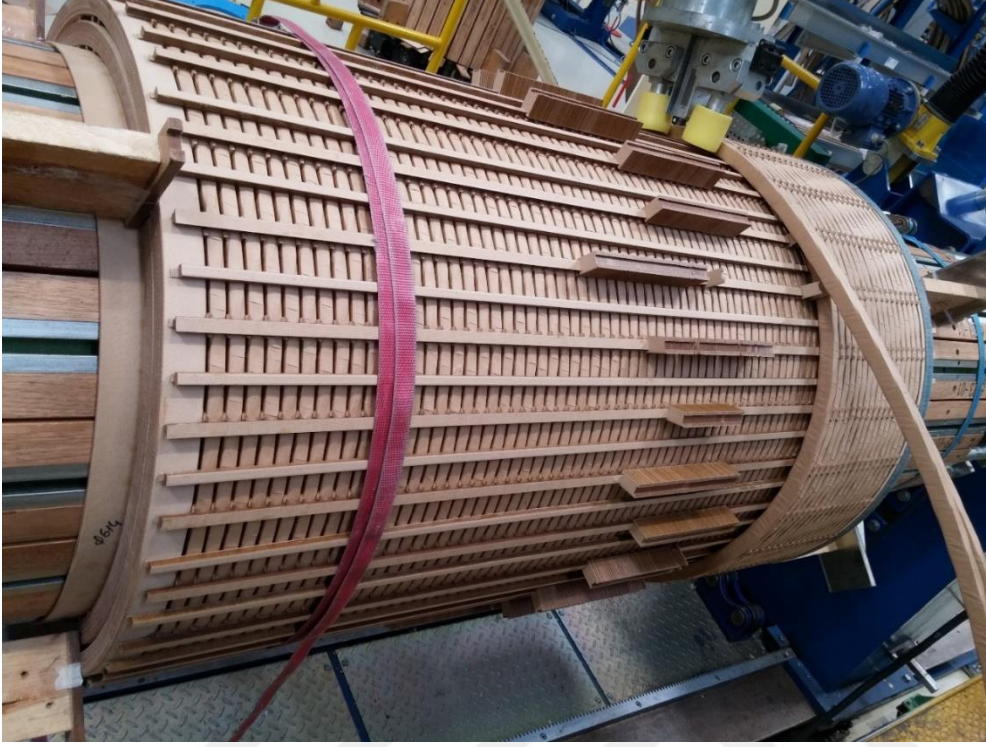
Disk Sargı

Şekil 2.9 : Güç transformatörlerinde kullanılan bazı sargı tipleri.

Radyal kanallı kat sargılar; kat sargı tipinin değiştirilmiş halidir. Avantajlı olduğu gerilim seviyeleri aynıdır. Yüksek akımlı sargılar çok ısınacaktır, kat sargı olarak sardıktan sonra bu sargıyı soğutmak zor olduğu için; kat sargıda katlar arasında bulunan aksiyel kanala ek olarak, radyal yönde kanallar da eklenerek sargıdaki iletkenlerin daha fazla açıdan soğumasını sağlar. Soğutma performansı arttırılmış bu sargı tipinin işçiliği kat sargıya göre biraz daha fazladır. Şekil 2.9'da sargı tipleri örneklenmiştir.

Transformatörlerde sıklıkla kullanılan kat sargı ve disk sargı sembolik gösterimi Şekil 2.9'de verilmiştir, burada siyah yuvarlaklar sargı çıkışlarını, turuncu renkli çizgiler aksiyel kanalları, mavi renkli çizgiler radyal kanalları, gri kutucuklar da bakırları temsil etmektedir.

Sarım makinesinde bulunan ve henüz başlangıç aşamasında bulunan bir radyal kanallı kat sargı fotoğrafı Şekil 2.10’da verilmiştir.

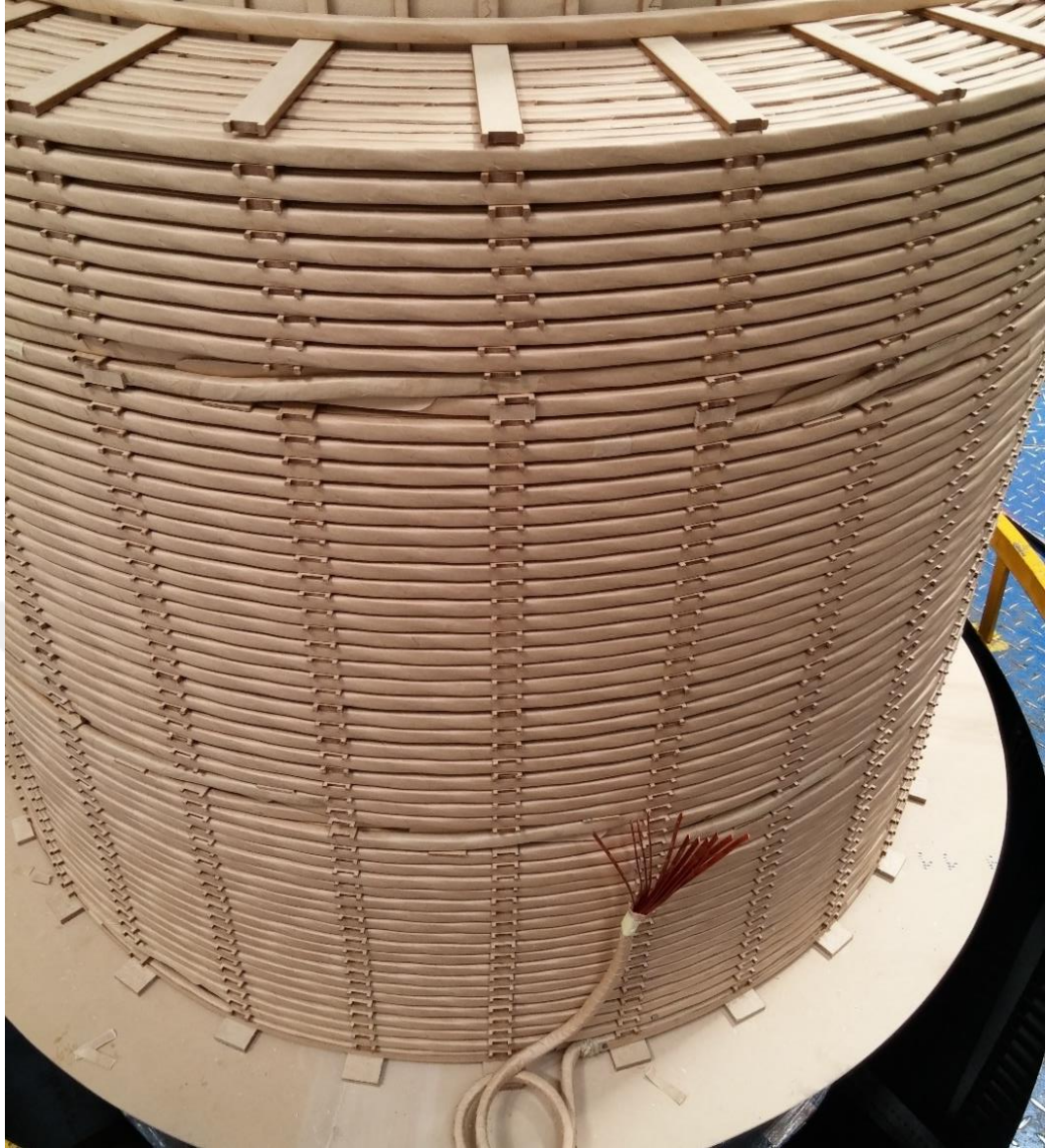


Şekil 2.10 : Radyal kanallı kat sargı sarım makinesinde

Disk sargılar; 52kV üzerinde sıklıkla kullanılan sargılardır. Darbe dağılımları kat sargılara göre daha doğrusaldır, bu sebeple yüksek gerilimlerde daha iyi avantaj sağlamaktadırlar. Sarımları kat sargılara nazaran daha zahmetlidir. Soğutmaları için aksiyel kanal eklenebilmektedir. Disklerin arasında radyal kanallar bulunmaktadır. Bu hem soğutma için, hem de iki disk arasındaki gerilim farkı belirli seviyelere çıktığı zaman mesafe arttırıcı izolasyon malzemesi olarak görev yaparlar.

Sargı tiplerinin değişmesi yetersiz olduğu durumlarda, sargı tipi üzerinde yapılacak değişiklikler ile sargının kapasitesinin düzeltilmesi sağlanabilir. İç içe geçmiş sargılar bu önlemlerdendir.

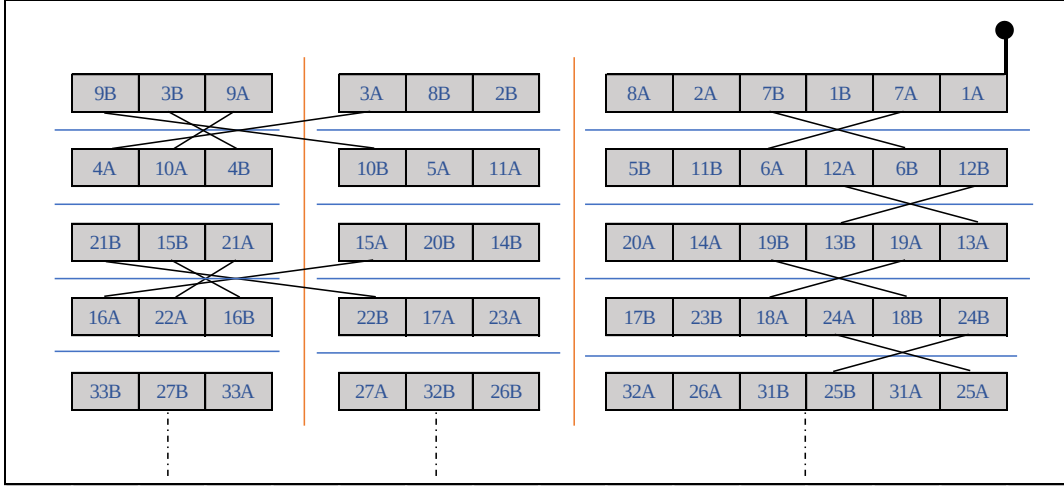
Dikey sarım makinesinde tamamlanmış bulunan bir disk sargı fotoğrafı Şekil 2.11’de verilmiştir. Fotoğrafın en üst tarafında radyal kanallar gözükmemektedir. Sürekli transpoze edilmiş iletken ile sarılmış olan bu sargıda geçiş noktaları ekstra izolasyonlar ile güçlendirilmiştir. Bu gibi sargılarda en riskli noktalar, geçiş noktalarıdır. İletkende geçiş yaparken bükümle meydana gelmesi, izolasyonunun zayıflaması anlamına gelecektir.



Şekil 2.11 : Çoklu iletkenli disk sargı fotoğraf, geçiş noktası gösterilmiştir.

İç içe geçmiş devrik sargılar; 200kV'un üzerindeki sargı gerilimlerinde disk sargılarda; disk-disk arasında atlamalar olabilmektedir. Bu sebeple sargıyı fiziksel olarak büyötmek yerine iç içe geçmiş sargılar kullanılır. İç içe geçmiş sargının taraklı ve taraksız olarak iki tipi vardır. En az iki paralel iletken disk boyunca sarılır ve alt diske geçildiğinde, disk başlarındaki radyal paralel iletkenler çaprazlanarak, sarımlar arası gerilim farklı açılır. Yüksek gerilimlerde bu sargıların dezavantajlı duruma düşmesine bile neden olur.

Sargıda iç içe geçirilen kısımlarda; iletkenlerin sıralaması değiştirilerek düzgün ve dengeli bir darbe dağılımı elde edilmeye çalışılır, sembolik olarak bu diziliş Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12 : İç içe geçmiş disk sargı şematik gösterimi ve fotoğrafı. Geçiş yerleri işçiliği ilk diskte gösterilmiştir.

4 tane radyal paralel iletken beraber sarılmaktadır (1A ve 1B asıl iletkenler, 2 adet te 7A ve 7B diye adlandırılan yan iletkenler). Bu iletkenler sargı boyunca sarıldıktan sonra alt diske geçilir (3A ve 3B’den 4A ve 4B’ye geçiş). Alt diskte sarım bitene

kadar devam edilir (6A ve 6B). Disk bitiminde, ilk diskteki yardımcı (yan) iletkenlerin uçları açılır. Aynı şekilde 6A ve 6B iletkenlerinin uçları da açılır (kesilir). Bundan sonra 6A ve 6B iletkeni ile 7A ve 7B iletkenleri kaynaklanır. Kaynak işleminden sonra ek izolasyon yapılır. Sonuç olarak, 7A ve 7B iletkeni de kendi içinde devam edecektir (7-8-9...). Bu sayede standart diski değiştirerek, iç içe geçmiş sargı yapılır ve bu sargının seri kapasite dağılımı, düz diske göre daha yüksek olur. Bu da darbenin sargı başlarında daha iyi sönümlenmesini sağlar. Dezavantaj olarak işçilik çok daha fazla sürer ve yapılan ekstra kaynak işçiliği, doğru yapılmaz ise sargı kalitesini düşürebilir.

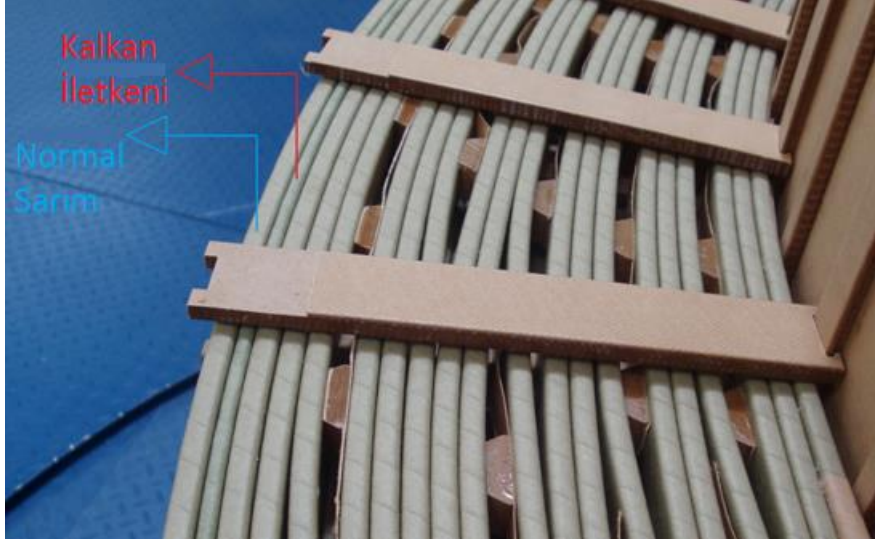
İç içe geçmiş sargıların işçiliği çok fazladır. Disk başlarındaki üst-alt disklere geçişler, iletkenlerin kağıt izolasyonlarının soyulup, iletkenler kesilip, diğer diskteki değişim yapılacak iletken ile kaynatılarak yapılır. Bu kaynatma işleminden sonra tekrar kağıt izolasyon ile iletken sarılır. Bu süreçteki kaynak işleminin kaliteli olması gerekir. Kaynak kuvvetli olmaz ise, operasyon sırasında aşırı ısınmalara yol açabilir. Kaynaklanan kısmın üzerine sarılacak olan izolasyon miktarı da yeterli olmalıdır. Az olması kısmi deşarjlara yol açar, fazla olması ise disk kalınlığının tutarsız olmasına sebebiyet verir.

Disk sargının diğer bir değiştirilmiş hali olan Smith tip sargı, düşük gerilim ve akımlarda ve disk başına sarım sayısının az olduğu durumlarda kullanılabilir. Disk sargıdaki radyal kanalların çıkartılmış hali olarak tasvir edilebilir.

Şekil 2.12’de iç içe geçmiş sargının sembolik gösterimi ve fiziksel görünüşleri verilmiştir. Sargıların iç ve dış önlemlerinin etkilerinin incelenmesi için transformatörün eşdeğer devresinin modellenmesi gerekmektedir.

Kalkanlı sargılar; yukarıda belirtilen sargı yapılarına alternatif bir çözüm olarak kalkanlı sargı uygulaması yapılmaktadır. Kalkanlı sargılar; aşırı darbelere karşı alınabilecek en efektif iç önlemlerden bir tanesidir. Kalkanlı sargı; değiştirilmiş bir disk sargı tipidir.

Kalkanlı sargılar darbe dağılımı açısından avantajlı olmasının yanında, asıl avantaj işçilikte sağlanmaktadır. 200kV üzerinde diskler arası gerilimi dengelemek için, sarımlar arası kapasiteler arttırılır. Bu değişimi ancak iki sarım arasına bir diğer sarım sokularak yapılır. Şekil 2.13’de fiziksel olarak uygulanmış bir kalkan örneği verilmiştir.



Şekil 2.13 : Kalkanlı sargı uygulaması, iletkenlerin gösterimi.

Kalkanlı sargı uygulaması hakkında patent taraması da yapılmıştır. Amerika’da 1977 yılında yapılan bir önerme, kalkanlı sargının temellerini oluşturmaktadır [26]. Bu yapı daha da mükemmelleştirilerek ve en tutarlı kapasite dağılımı elde edilecek şekilde değişiklikler yapılmıştır. Patent dokümanında tek kalkan kullanılmış iken, birden fazla sarım arasına aynı kalkan iletkenini kullanarak sağlanan, alternatif kalkan yapıları kullanımı daha yüksek performans sağlamaktadır. Sadece kalkanlı sargı yapısının teorisi değil, uygulamasında da geliştirmeler yapılmıştır. Kalkanlı sargı iletkeninin izolasyonu ve sargı içindeki yerleşimi de geliştirilmiştir.

Kalkanlı sargı sadece darbe dağılımının daha uygun olması açısından değil, transformatör imalatında en değerli parametrelerden birisi olan işçilik açısından avantajlı olduğu için de tercih edilmektedir. Bu sargının alternatifi olan iç içe geçmiş devrik sargıya kıyasla yaklaşık %30 oranında işçilikten tasarruf sağlamaktadır. İşçilik karşılaştırma için yapılan ölçümler Çizelge 2.4’de belirtilmiştir.

Çizelge 2.4 : Kalkanlı sargı ile iç içe geçmiş sargı disk başına işçilik karşılaştırılması.

Ölçüm Yapılan Disk	Kalkanlı Sargı Sarım Süresi Farkı [dk]	Yüzde Oranı [%]
250MVA 380kV	- 112	32
120MVA 220kV	- 56	17
167MVA 500kV	- 146	38

Best Transformatör Balıkesir fabrikasında Ar-Ge departmanı tarafından yapılan 2013 yılındaki ölçümlerde, kalkanlı sargının işçiliğinin %17 ile %38 arasında daha hızlı

olduğu gözlemlenmiştir. Transformatör imalatında artan rekabette en büyük kozlardan birisi olan imalat süresi, bu alternatif sargı tipi sayesinde daha da hızlanmaktadır.





3. AŞIRI GERİLİMLERİN SARGILAR ÜZERİNDEKİ DAĞILIMININ İNCELENMESİ

Yıldırım darbelerinin ve geçici aşırı gerilimlerin sargı üzerindeki dağılımları, sargının hangi kısmına ne kadar etki edeceğini göstermektedir. Sargının en zayıf noktasının tespiti ve o kısmın ek izolasyonlar ile güçlendirilebilmesi için, tasarım aşamasında gerekli analizler ile darbe dağılımı incelenmelidir. Diskler arası ve sarımlar arası gerilim farkına sargının dayanıp dayanmayacağı, aşırı gerilim durumlarında kontrol edilmelidir.

Önceki kısımlarda tüm sargı tipleri aktarılmıştır. Güç transformatörlerinde, en sık kullanılan yüksek gerilim sargısı ve iletkeni tipi çoklu iletkenli devrik sargıdır. Bu sebeple yıldırım darbesi dağılımı, bu sargı tipinde incelenecektir. Alçak gerilim sargılarında ise kat sargı en yaygın tiptir. Transformatörün güç değeri arttıkça, kat sargıdan çok radyal kanallı kat sargı yapısına geçilir.

3.1 Transformatör Toplu Parametrelili Eşdeğer Devresi

Disk sargılı bir transformatör için eşdeğer devre modellemesi K.W. Wagner tarafından 1915 yılında yapılmıştır. Wagner modeli; Eddy kayıplarının gerilim söndürücü özelliğini, darbedeki salınımlara etkisini ve sargı içindeki ortak endüktansları ihmal eden bir modeldir [19]. Bu modelin kuvvetli olduğu hesaplar, cephesi dik basamak şeklindeki aşırı gerilimlerin etkisiyle oluşan olaylardır. Ek olarak; paralel ve seri kapasitelerin eşdeğer olarak çözülmesinden hesaplanan α faktörünün sargı içindeki dağılımının düzgünlüğü hakkında bilgi verir. Bu modelde dirençler ihmal edilmektedir, bu da darbelerde dirençlerin söndürücü etkisinin göz ardı edildiği anlamına gelmektedir.

Tezde incelenecek olan yansıyan gerilimlere çekirdeğin etkisi de bulunduğu düşünülmektedir. Bu sebeple öncelikle darbe dağılımına çekirdeğin etkisi incelenmelidir. Miki ve iş arkadaşlarının yaptığı inceleme ile yıldırım darbeye çekirdeğin etkisi incelenmiştir ve hesaplamaların daha tutarlı olması için formüller üzerinde geliştirmeler yapılmıştır [4]. Normal bir yıldırım darbe anında, çekirdekteki

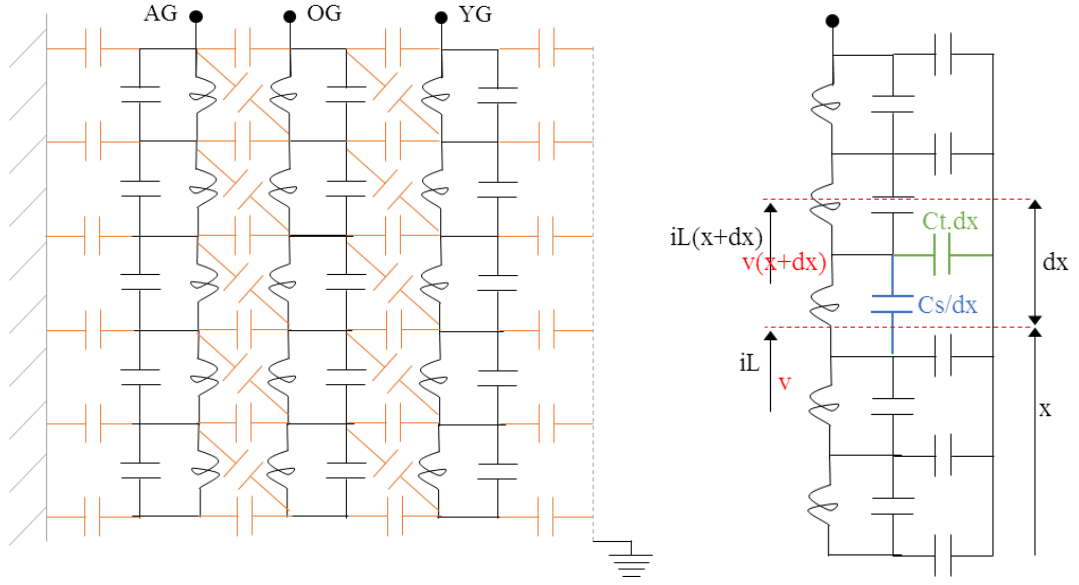
ana akı oluşumu kısa devre edilmiş ve topraklanmış sargı sayesinde sönümlenecektir. Sadece oluşan kaçak akının etkileri gözlemlenecektir. Bu sayede transformatörün endüktanslı ve endüktans göz ardı edilmiş eşdeğer devre modeli yaklaşık olarak aynı olduğu kabul edilmiştir. Bunu karşılaştırmak için de aşağıdaki testler yapılmıştır:

- a. Nötr noktası topraklı sargıya darbe uygulanması: Bu durumda çekirdek dikkate alındığında ve alınmadığında, darbe şekilleri arasında fark gözlemlenmemiştir.
- b. Nötr noktası salınımda olan sargıya darbe uygulanması: Sargı nötr noktası salınımda olduğunda, çekirdek göz önüne alındığında bu kapalı demir devrenin sönümleyicisi etkisi gözlemlenmiştir. Çekirdek olmaması durumunda gerilim çok daha üst değerlere çıkabilmektedir.
- c. Kısa devre edilmiş AG sargı bulunması durumunda salınımdaki sargıya darbe uygulanması: Bir önceki test durumunda çok yakın sonuçlar alınmıştır. Buradan çıkartılacak sonuç, kısa devre edilen AG sargısının çekirdeğin etkisini yok ettiğidir.

Bu testler sonucunda; darbe dağılımına çekirdeğin etkisi incelenmiştir. Bu doğrultuda hava endüktansı göz önünde bulundurulması yeterli bulunmuştur ve çekirdeğin etkisi ihmal edilebilir kabul edilmiştir [4].

Tüm geçici veya daha uzun süreli gerilim yükselmeleri transformatörler için tehlike arz etmektedir. Bu gerilimlerden en zorlayıcı olan dik cephe aşırı gerilimlerdir. Dik cephe aşırı gerilimler, transformatör sargılarına en fazla zarar veren gerilimlerdir. Bu gerilimleri testte uygulayarak, sargıların izolasyonlarının yeterli olup, olmadığı denetlenmiş olur. Testlerde en fazla başarısızlık belirtisi ve arıza sebebi olan gerilim tipleri de yıldırım darbe gerilimleridir. Bu gerilimi modellemek için Şekil 3.1’de belirtilen Wagner tipi transformatör eşdeğer modelinin bir ucuna U gerilimi uygulanıp, nötr çıkışı şebekede olduğu gibi topraklanmıştır.

Transformatörün yüksek gerilim fazlarından birisine bir aşırı gerilim darbesi geldiğinde, sargı boyunca darbe dağılımı ilk başlarda lineer değildir. İlk transient geçtikten sonra bu gerilim dağılımı lineere yakınsar. İlk gerilim dağılımından son gerilim dağılımına geçene kadar sargının fiziksel yapısından ötürü oluşacak olan eşdeğer devre parametre dağılımları (kapasite ve endüktanslar) sebebi ile osilasyonlar ile bir geçiş olacaktır [1].



Şekil 3.1 : Wagner eşdeğer devresi solda ve sargılardaki kapasitelerin isimlendirilmesi sağda gösterilmiştir.

Wagner modelinde; sargının endüktans değerinin ihmal edildiğini belirtmiştik. Şebeke frekansında (50 ya da 60Hz), sargılar arası endüktans ve sargı direnci yanında, toprağa karşı kapasite ihmal edilebilir. Fakat toprağa karşı kapasiteler, yıldırım darbe durumlarında gerilimin zamana bağlı değişiminin çok yüksek olmasından dolayı ihmal edilemez. Darbe gerilim dağılımında sargının endüktansı sonsuz olarak kabul edilir ve aşırı gerilim dağılımının yalnız kapasiteler üzerinde meydana geldiği kabul edilir.

Dirençleri ihmal edilmiş bir sargıdaki birim uzunluğa ait eşdeğer devre hesabında; C_s seri kapasite, C_t toprağa karşı kapasite, L birim uzunluğun endüktansı olarak ifade edilsin. Kapasitelerin birim uzunluktaki birimleri, seri kapasite için Faraday-metre, toprağa karşı kapasite Faraday/metre, endüktans ise Henry/metre'dir.

Şekil 3.2'de gösterilen. Ldx , dx uzunluğundaki sargının öz endüktansı; $C_t dx$, dx uzunluğundaki sargının toprağa karşı kapasitesi; C_s/dx , dx uzunluğundaki sargının sargımlar arası seri kapasitesidir. Bu parametreler üzerinden akım ve gerilim değerleri; x mesafesinde gerilim $v(x,t)$, akım $i(x,t)$ olarak belirtilir. Buradan giderek, değişken $x + dx$ mesafesinde; gerilim $v(x + dx, t)$ ve akım $i(x + dx, t)$ olacaktır.

Darbe dağılımını seri ve paralel kapasiteye göre inceleyebilmek için yukarıda belirtilen ifadelerden bir bağıntı elde etmemiz gerekmektedir. Bu sebeple; $x + dx$ mesafesindeki $i_l(x + dx, t)$ akımını x civarında Taylor serisine açarsak;

$$i_L(x + dx, t) = i_L(x, t) + \frac{1}{1!} * \frac{di_L}{dx} + \frac{1}{2!} * \frac{d^2 i_L}{dx^2} + \frac{1}{3!} * \frac{d^3 i_L}{dx^3} + \dots \quad (3.1)$$

İlk iki terimden sonrası ihmal edilerek açılım sadeleştirilir ise;

$$i_L(x + dx, t) = i_L(x, t) + \frac{1}{1!} * \frac{di_L}{dx} \quad (3.2)$$

Denklemleri elde edilir. Endüktans üzerinden geçen akımdan sonra seri kapasitelerden geçen akım ve gerilim de Taylor serisine açılırsa;

$$i_s(x + dx, t) = i_s(x, t) + \frac{di_s}{dx} dx \quad (3.3)$$

$$v(x + dx, t) = v(x, t) + \frac{dv}{dx} dx \quad (3.4)$$

Endüktansta meydana gelecek gerilim düşümü hesaba katılarak, x+dx mesafedeki gerilim ile x mesafedeki gerilim arasındaki bağıntı denklem 3.5'deki gibi bulunabilir.

$$v(x, t) = v(x + dx, t) + L \frac{di_L}{dt} dx \quad (3.5)$$

Denklem 4.5'de $v(x + dx, t)$ yerine 3.4'deki ifade yerine koyulursa;

$$\frac{dv}{dx} = -L \frac{di_L}{dt} \quad (3.6)$$

Endüktans üzerindeki gerilim ve akım değerleri denklemleri elde edildikten sonra, C_s üzerindeki gerilim ve akım değerleri elde edilecektir.

$$v(x, t) = 1/\left(\frac{C_s}{dx}\right) \int i_s dt + v(x + dx, t) \quad (3.7)$$

Denklem 4.5, denklem 3.7'de yerine koyulursa $\frac{dv}{dx}$ aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$\frac{dv}{dx} = -\frac{1}{C_s} \int i_s dt \quad (3.8)$$

Karşılıklı t'ye göre türev alınarak i_s ifadesi denklem 3.9'daki gibi elde edilecektir.

$$i_s = -C_s * \frac{d^2 v}{dx * dt} \quad (3.9)$$

Şekil 3.6'de belirtilen kapalı devreden akan x mesafesindeki akımlar eşdeğer devre üzerinde çözülür ise;

$$i_L(x, t) + i_s(x, t) = \frac{dv}{dt} C_t dx + i_L(x + dx, t) + i_s(x + dx, t) \quad (3.10)$$

$$i_L(x, t) + i_s(x, t) = \frac{dv}{dt} C_t dx + i_L(x, t) + \frac{di_L}{dx} dx + i_s(x, t) + \frac{di_s}{dx} dx \quad (3.11)$$

Bu iki denklem, birbirleri içinde yerlerine koyularak sadeleştirilir ve 3.12 elde edilir.

$$\frac{d(i_L+i_s)}{dx} * C_t = -\frac{dv}{dt} \quad (3.12)$$

Bu eşitliğin önce t 'ye göre, sonra x 'e göre türevini alarak C_t ve C_s 'ye bağımlı olarak darbenin dağılım denklemi elde edilir.

$$\frac{d^2(i_L+i_s)}{dx*dt} = -C_t \frac{d^2v}{dt^2} \quad (3.12)$$

$$-\frac{1}{L} * \frac{d^2}{dx^2} = \frac{d^2 i_L}{dx dt} \quad (3.13)$$

Bu denklemlerden elde edilecek son denklem;

$$C_s \frac{d^4 v}{dx^2 dt^2} + \frac{1}{L} \frac{d^2 v}{dx^2} - C_t \frac{d^2 v}{dt^2} = 0 \quad (3.14)$$

Olacaktır.

Aynı denklemler; sonu topraklanacak bir sargı için de hesaplanabilir. Bu denklemlerde değişecek tek veri, sargı bitiş noktasının toprak potansiyelinde yani 0kV olarak alınması olacaktır. Sargı girişine $v = v_0(x, 0) = 1$ olarak kabul edilen bir gerilim uygulandığında, $t = 0$ anında $\frac{dv}{dt}$ değeri çok büyük olacaktır (darbenin tepe değeri). Buradan endüktans değeri sonsuz olarak kabul edilecek ve etkisi yok sayılacaktır. Bu da bize sadece kapasitelerden oluşan bir eşdeğer devre sağlayacaktır. Bu varsayım önceki kısımlarda da anlatılmış idi. Denklem 3.14'de $L = \infty$ değeri yerine koyulur ise denklem 3.15 elde edilecektir.

$$C_s \frac{d^4 v}{dx^2 dt^2} - C_t \frac{d^2 v}{dt^2} = 0 \quad (3.15)$$

$v = v_0(x, 0)$ başlangıç değerine göre denklem 3.15'in zaman ve mesafeye göre türevi alınır ise;

$$\frac{d^4 v}{dx^2 dt^2} = \frac{d^2 v_0}{dx^2} \quad (3.16)$$

Bu denklem de 3.15'de yerine konduğunda, kapasitelere bağımlı bir gerilim dağılımı elde edilir.

$$\frac{d^2 v_0}{dx^2} - \frac{C_t}{C_s} v_0 = 0 \quad (3.17)$$

Darbe dağılımını inceleme kolaylığı için $\sqrt{\frac{C_t}{C_s}} = \alpha$ olarak genel kabul yapılırsa, darbe değeri denklem 3.18 ile ifade edilecektir.

$$v_0 = Ae^{\alpha x} + Be^{-\alpha x} \quad (3.18)$$

Bu denklem eşitliği, sınır koşulları olan $x = 0$ 'da $v_0 = 1$ olarak alınarak, sargı sonundaki gerilim değeri de; $x = l$ uzunluğunda, $v_0 = 0V$ olarak yazıldığında, sargı düğüm noktasına göre gerilim değeri denklem 3.19'daki gibi elde edilecektir.

$$v_0 = \frac{\sinh \alpha(l-x)}{\sinh \alpha l} \quad (3.19)$$

Bu denklem sayesinde; alfaya bağımlı olarak yani sargının seri ve toprağa karşı eşdeğer kapasitesine bağlı olarak düğüm noktaları gerilimi yani sargıdaki darbe dağılımı elde edilebilmiş olur.

Aynı hesapları, sonu topraklanmayan (yüzen) sargılar için de yapabiliriz. Burada değişecek tek şey sınır koşulları olacaktır. Denklem 4.18'de olan $x = 0$ 'da $v_0 = 1$ olarak alınarak, sargı sonundaki gerilim değeri de; $x = l$ uzunluğunda $(\frac{dv_0}{dx})_{x=l} = 0V$ yani $i_s + i_l = 0A$ olacaktır. Bu değerler yerine koyulup, x 'e göre türev alındığında;

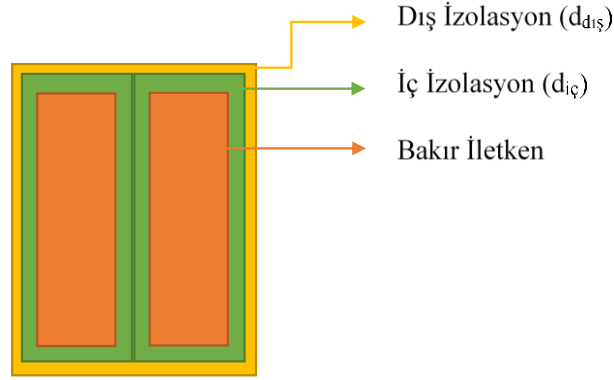
$$v_0 = \frac{\cosh \alpha(l-x)}{\cosh \alpha l} \quad (3.20)$$

denklemini elde edilecektir.

Darbe dağılımı denklemleri oluşturulduktan sonra kapasite hesapları incelenecektir. Kapasite hesaplarının doğru olması, darbe dağılımının doğru incelenmesi anlamına gelmektedir. Sarım-sarım arası, kat-kat arası, sargı-çekirdek arası, sargı-ekranlama arası kapasiteler ayrı ayrı bulunarak; seri, paralel ve toprağa karşı kapasitelerin hesaplanmasını sağlayacaktır.

Kapasite hesabı için birçok metot önerilmiştir [18, 19, 20], bu kaynaklar en temel kapasite hesabı kaynaklarıdır. Enerji metodu, toplam kapasitenin hesaplanıp, sarımlara bölünmesi metodu, benzetim metodu gibi birçok metot ile kapasite hesabı yapılabilir de; birebir test sonuçları ile tutarlı kapasite hesabı ortaya çıkartmak oldukça güçtür. Yapılan tasarımlar ve analizler, ideal duruma göre yapılmakta, oysa ki imalat ve malzeme tedarikinde daima toleranslar bulunmaktadır. Çevre koşulları ve imalat koşulları bu toleransları minimize etmek üzerine düzenlese de toleransları yok etmek mümkün değildir.

Hesaplama için yüksek gerilim sargılarında sıklıkla kullanılan yassı ikiz iletken baz alınacaktır, şematik gösterimi Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2 : İkiz bakır iletken izolasyon katmanları.

İkiz iletkenler; tekli yassı iletkenlerin ayrı ayrı izole edildikten sonra ortak bir izolasyon kağıdı ile izole edilmesinden oluşur. Şekil 3.2’den eşdeğer dielektrik sabiti formül 3.21 ile hesaplanabilir.

$$\epsilon_{eş} = \frac{\epsilon_{dış}\epsilon_{iç}(d_{dış}+d_{iç})}{\epsilon_{iç}d_{dış}+\epsilon_{dış}d_{iç}} \quad (3.21)$$

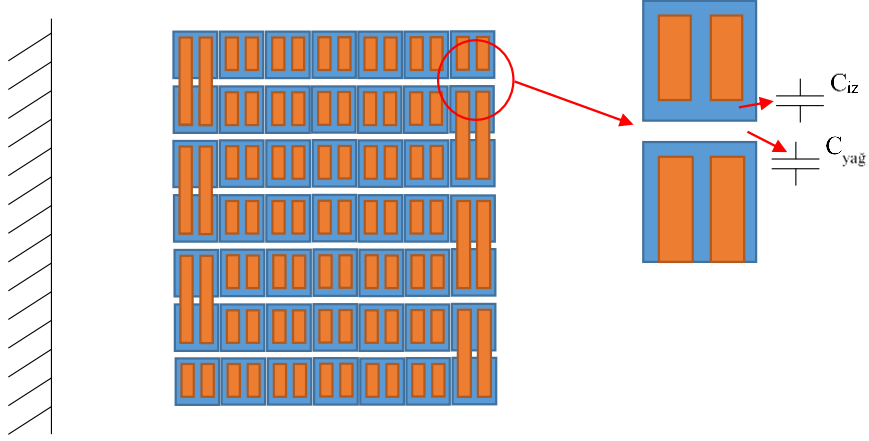
Dielektrik sabitlerinin ayrı ayrı verilmesinin sebebi, bazı iletken tiplerinde iç izolasyon enamel denilen cilamsı madde ile kaplanabilir. Verilen formül ile bu şekildeki iletkenler de hesaplanabilir. Ya da iç iletken standart izoleli, dış izolasyon “satiniert” denilen yaşlanması geciktirilmiş, termal dayanımı arttırılmış izolasyon kağıtları da kullanılabilir. Bu kağıtların dielektrik sabitleri, standart kağıtlara göre farklıdır ve denklem 3.21 ile eşdeğer dielektrik sabiti hesaplanabilir [23].

Kaynaklarda belirtilen metotlar incelenmiş ve karşılaştırılmış; seri kapasite hesabı için ölçülen sonuçlara en yakın hesaplamayı sunan metot Stein’in formülasyonu olduğu bulunmuştur [22]. Bu metotta seri kapasite; her sarım ve bobinler arası depolanan enerjiden gidilerek hesaplanmaktadır. Seri kapasite hesabı için genel denklem 3.22’dir.

$$C = K * \epsilon_0 * \frac{A}{d} \quad (3.22)$$

Bu denklemde A iletkenin toplam kesiti, d iki iletken arasındaki mesafe, ϵ bağıl dielektrik değeri (ϵ_0 vakumdaki bağıl dielektrik değeri), K kaçak akılar için alınan sabit katsayıdır.

Bir disk sargının, ardışık diske göre olan kapasite tanımları Şekil 3.3’de ifade edilmiştir.



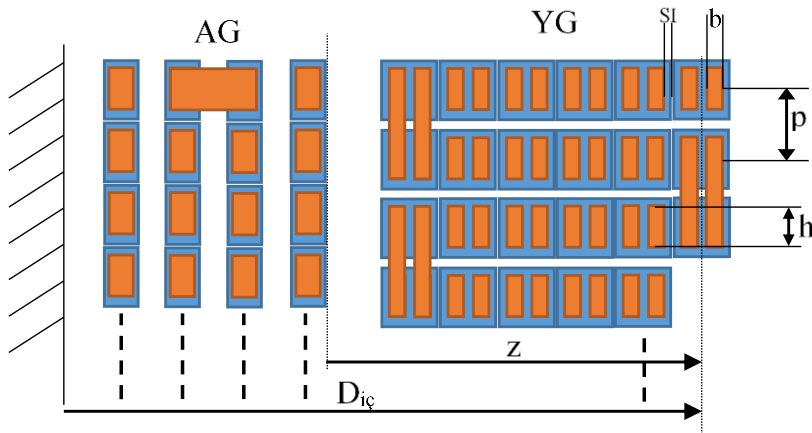
Şekil 3.3 : İzolasyon ve yağ için kapasitelerin şematik gösterimi.

Bu denklemin daha tutarlı olması için sargı farklı bağıl dielektrik değeri olan yerlerde parçalara bölünerek, kapasitelerin etkisi ayrı ayrı hesaplanıp, tekrar birleştirilecektir.

$$C_{iz} = \epsilon_{r(iz)} * \epsilon_0 * \frac{D_{iç} * \pi * b}{SI} \quad (3.23)$$

$D_{iç}$ sargının iç çapı, b iletkenin bakır kısmının toplam genişliği, SI tek taraflı izolasyon kalınlığı ve ϵ boşluğun (vakumun ve izolasyonun) permitivesidir. Farklı izolasyonlar için eşdeğer bağıl dielektrik değeri denklem 3.21'den hesaplanabilir. Bu parametreler Şekil 3.4'de gösterilmiştir. İkiz iletkenli bir disk sargı, çekirdekten uzağa yerleştirilmiştir. Alt diske geçişler de sembolize edilmeye çalışılmıştır.

Denklemlerde kullanılan mesafeler, şematik olarak Şekil 3.5'de verilmiştir.



Şekil 3.4 : Bir transformatörün yandan kesiti ve formülasyonda kullanılan mesafeler.

Denklem 3.23 değiştirilerek, iletkenler arasındaki yağ boşluğunun elektriksel kapasitesi de hesaplanabilir. Burada denklem 3.22 baz alınarak, mesafe yerine yağ boşluğunun mesafesi ve permittivite olarak da yağın bağıl dielektrik değeri alınacaktır.

$$C_{yağ} = \epsilon_{r(yağ)} * \epsilon_0 * \frac{D_{iç} * \pi * b}{p - h - 2SI} \quad (3.24)$$

Bu denklemde de; $D_{iç}$ sargının iç çapı, b iletkenin bakır kısmının toplam genişliği, SI tek taraflı izolasyon kalınlığı, p iki iletkenin merkezinin aksiyel uzaklığı, h iletkenin bakır kısmının yüksekliği ve ϵ boşluğun (vakumun ve yağın) permitivesidir. Şekil 4.9'da alçak gerilimi kat sargı, yüksek gerilimi disk sargı olan bir transformatör modeli örnek olarak verilmiştir. AG kısmı yassı iletkenli, dört katlı bir sargıdır. YG kısmı ise bobin başına 6 sarımlı bir ikiz iletkenli devrik sargıdır. Aşağı doğru bobinler devam etmektedir, sadece üst kısmı (AG 4 ilk sarım, YG 4 ilk disk olarak) modellenmiştir. Kesikli çizgiler bobinin ve sarımların devam ettiğini ifade etmek için kullanılmıştır. En solda kalan taralı yapı ise toprak potansiyelindeki çekirdeği ifade etmektedir.

Belirtilen kapasiteler ayrı ayrı hesaplandıktan sonra eşdeğer kapasite devresi çıkartılacaktır. Bunun için basit eşdeğer kapasite formülü denklem 3.25'de verilmiştir.

$$C_{toplam} = \frac{C_{yağ} * C_{iz}}{C_{iç} + 2 * C_{yağ}} \quad (3.25)$$

Aksiyelde n adet iletken bulunan bir sargı için seri kapasite hesabı genel olarak denklem 4.26'daki şekliyle yazılabilir.

$$C_{seri_toplam} = \frac{C_{yağ} * C_{iz}}{(n-1) * C_{iç} + n * C_{yağ}} \quad (3.26)$$

Paralel kapasite; iletken-iletken arasındaki kapasite ve/veya iletken ile çekirdek (topak) potansiyeli arasındaki kapasitedir.

Burada da denklem 3.22 baz alınarak; mesafeler uygun şekilde yazılır.

$$C_{iz} = \epsilon_{r(iz)} * \epsilon_0 * \frac{D_{iç} * \pi * h}{SI} \quad (3.27)$$

$$C_{yağ} = \epsilon_{r(yağ)} * \epsilon_0 * \frac{D_{iç} * \pi * h}{z - \frac{b}{2} - SI} \quad (3.28)$$

Denklem 3.28’de tek bilinmeyen z değeridir. Bu değer iç çaptan iletkenin orta noktasına olan mesafedir. Seri hesaplamalara benzer şekilde, paralel kapasite de eşdeğer kapasitenin hesaplanması ile bulunur.

$$C_{paralel_toplam} = \frac{C_{yağ} * C_{iz}}{C_{iç} + C_{yağ}} \quad (3.29)$$

Bir yıldırım darbesi transformatörün sargılarına ulaştığında, hızlı yükselen ön cephesi lineer olmayan bir darbe dağılımına sebebiyet verir. Darbenin dağılımı sargının kapasitif eşdeğer devresi ile sargıya özgü şeklini alacaktır. BEST AŞ’nin ARGE departmanında geliştirdiği darbe analiz programı da bu formüller üzerinden çalışmaktadır. Programın akış şematığı Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.5 : Darbe Dağılım Hesap Programı İş Akış Grafiği

Programın daha hızlı kullanabilmesi için örnek (benzer) transformatör dataları üzerinden değiştirilerek gidilmesi daha uygundur. Bu modellere ait bir veritabanı da mevcuttur. Tipik değişen parametrelere göre (bağlantı grubu, sargı adeti ve tipi) uygun model ile çalışmalara başlanabilir. Burada girilen temel veriler; tanımları ile birlikte Çizelge 3.1’de verilmiştir. Bu parametreler sadece tanımlardır. Her sargı için bu parametreleri tekrar girmek gerekecektir.

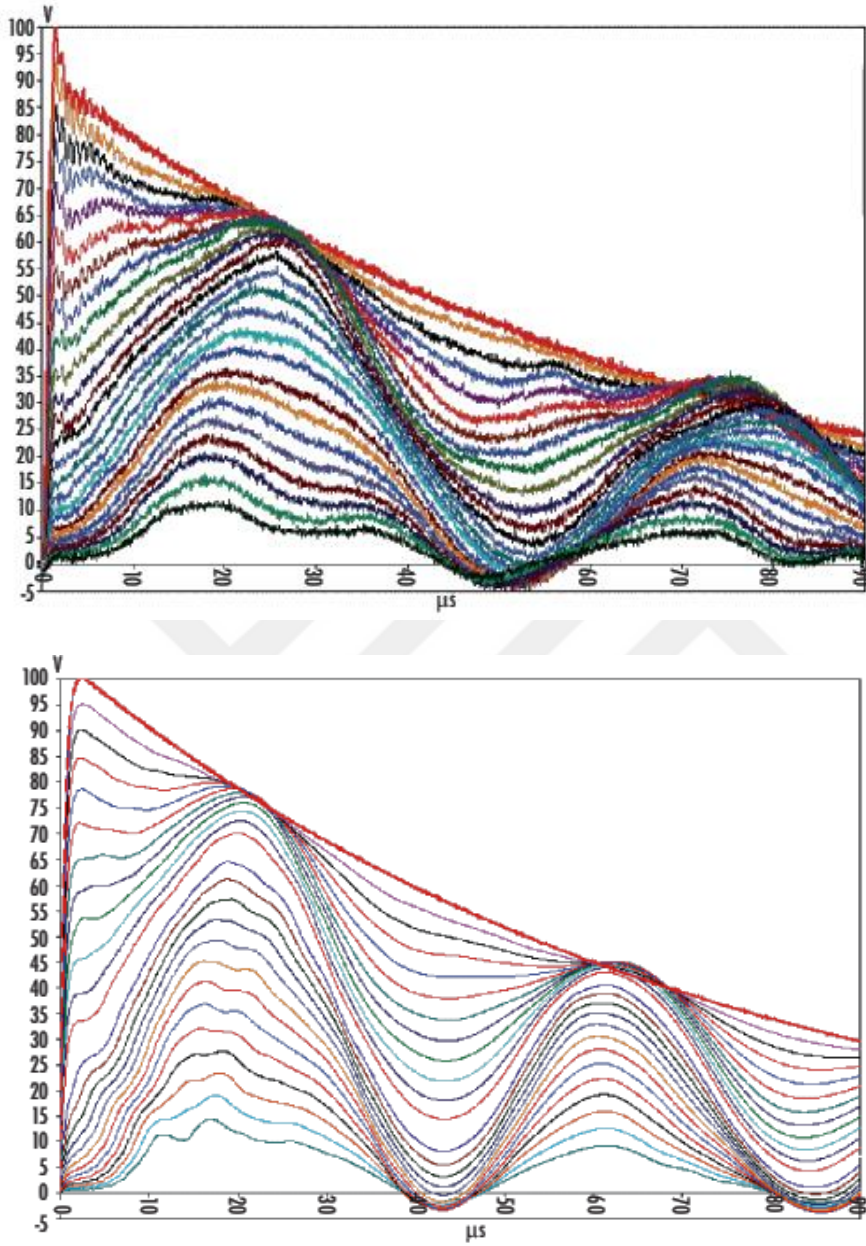
Program; sayısal veriler üzerinden eşdeğer devre oluşturmaya çalıştığından, girilen parametrelerin doğruluğu kritik değer sağlamaktadır. Bunu test etmek amacıyla; kayıp, kısa devre empedans hesabı gibi analitik yollarla da hızlıca bulunabilen değerleri hesaplatıp, modelin tutarlılığını kontrol etmek gerekir.

Çizelge 3.1 : Darbe Analiz Yazılımı Giriş Parametreleri.

Küçük Veri Tabanı Girişleri	
Tanım	Açıklama
Frekans	Transformatör çalışma frekansı
Sıcaklık	Bakırların içinde bulunduğu ortam referans sıcaklığı
Faz sayısı	Analizin 3 faz ya da tek fazlı transformatör üzerinde yapılacağı
Sargı sistemi tanımlaması	Bağlantı grubuna göre adet ve bağlantı grubu girilmesi
Test gerilimleri	Yıldırım darbe, sırtta kesik darbe veya AC test dayanım gerilimleri
Sargı gücü	Sargının sürekli yükleneceği güç değeri
Sargı gerilimi	Sürekli çalışmada sargı gerilimi
Adım gerilimi	Eğer ayar sargısı varsa, kademe başına değişen gerilim
Çekirdek yapısı	Sargılı ve boşta bacaların tanımlanması
Çekirdek çapı	Çekirdeğin dış çapı
Çekirdek pencere genişliği	Üst boyunduruk ile alt boyunduruk arasındaki mesafe
Çekirdekdeki çıta sayısı	Çekirdeğin etrafındaki destek elemanı sayısı
Sargılara ait iç çap	Sargının sarılmaya başlandığı iç çap değeri
Sargının yüksekliği	Sarımı biten sargının aksiyel yüksekliği
Sargının genişliği	Sarımı biten sargının radyal genişliği
İletken tipi	Yassı, çoklu veya CTC iletken tanımlanması
Bir iletken yüksekliği	Sargıda kullanılan iletkenin yüksekliği
Bir iletken genişliği	Sargıda kullanılan iletkenin genişliği
İletken izolasyonu	Tek taraflı kağıt izolasyon kalınlığı
Kısmi iletken adeti	İletken tipine göre birlikte sarılmış iletken adeti
İletken yapısı	Aksiyel ve radyalde sarılan paralel iletken adeti
Sarım sayısı	Kattaki veya diskteki sarım sayıları
Kayıp sarım sayısı	Sargıdaki eğimden ve eksiltmeden dolayı oluşan kayıp sarımlar
Sarım yönü	Sağ veya sol yönde sarılmış sargı detayı
Katlar arası mesafe	Kat sargıdaki katlar arasındaki mesafe
Diskler arası mesafe	Soğutma amacı ile yerleştirilmiş aksiyel ve radyal kanal mesafesi
Ayar sargısı bağlantıları	Ayar sargısı uçlarının ve kademe değiştirici pozisyonlarının tanımlanması
Sarım sayısı	Kattaki veya diskteki sarım sayıları
Büyük Veri Tabanı Girişleri	
Tanım	Açıklama
Kısa devre faktörü	Sargı asimetriklik faktörü
Analiz süresi	Farklı çözüm metodlarına göre yakınsama süresi
İterasyon sayısı	Yakınsayana kadar maksimum iterasyon sayısı
Darbe gerilim şekli tanımlanması	Eğer standart şekillerden uzak bir aşırı gerilim tanımlanınca ise, özel olarak girilmelidir (tepe değeri, yükselme süresi, sönümlenme süresi, periyot, kesilme süresi, toplam süresi, düşme süresi...)
PSP malzeme dielektrik katsayısı	Dielektrik analizler için PSP malzeme delinme dayanımı
Kağıt malzeme dielektrik katsayısı	Dielektrik analizler için kağıt malzeme delinme dayanımı
Yağ dielektrik katsayısı	Dielektrik analizler için yağ delinme dayanımı
PSP çökme katsayısı	Sargı preslendikten sonra PSP malzemede meydana gelecek çökme yüzdesi
Kağıt çökme katsayısı	Sargı preslendikten sonra kağıt malzemede meydana gelecek çökme yüzdesi

Yazılımın tutarlılığını ölçme amacı ile, ortadan girişli bir transformatör üzerinde darbe dağılımı incelenmiş, aynı transformatör programda simüle edilmiş ve elde

edilen grafik daha sonradan 100V baz gerilimi ile karşılaştırılmış ve sonuçlar Şekil 3.6'de paylaşılmıştır.



Şekil 3.6 : 100V test gerilimi verilerek üstte ölçülen eğri, altta hesaplanan eğri [30]

Şekil 3.6 gösteriyor ki modelleme oldukça tutarlıdır. Bu hesaplamalar uzun yıllardır kullanılmaktadır. Hem arıza sebeplerini araştırmada, hem de tasarım aşamasında tasarım mühendisinin hesaplamalarına yardımcı olmaktadır.

Program temel olarak; girilen fiziksel parametrelerden bir eşdeğer devre modeli oluşturmaktadır. Sargılar arası kapasite, direnç ve endüktans değerlerini

oluşturduktan sonra birden fazla matematiksel çözüm ile darbenin model üzerinde dağılımını iterasyonlar ile yapabilmektedir. Frekans bazlı ve zaman bazlı çözümler ile incelenecek aşırı gerilim türüne göre metot değiştirme kolaylığı sayesinde tutarlı çözümler verebilmektedir.

Hem formülasyonlar, hem de program ile yapılmış analizler gösteriyor ki; darbe dağılımını daha doğrusal elde edebilmek için; alfa'nın değişiminin fazla olması ve bunun için paralel kapasitenin azaltılması ve seri kapasitenin artırılması gerekmektedir. Parametrik olarak incelendiğinde, en fazla çekirdek ile sargı arasındaki mesafe artırılarak seri kapasitenin artırıldığı gözlemlenmiştir. Sargıya yerleştirilen aksiyel kanal genişlikleri ise seri kapasiteyi azaltmaktadır fakat paralel kapasitede değişime yol açmadığı için, darbe dağılımına etkisi düşüktür [30].

3.2 Tezde Önerilen Kalkanlı Sargı Eşdeğer Devresinin Modellenmesi

Kalkanlı sargıda, sarımlar arasına elektrostatik ekranlama elemanları yerleştirilir. Bakır veya alüminyumdan yapılabilirler. Bu yapıda seri kapasite hesabı Denklem 3.30'deki gibi olacaktır [24].

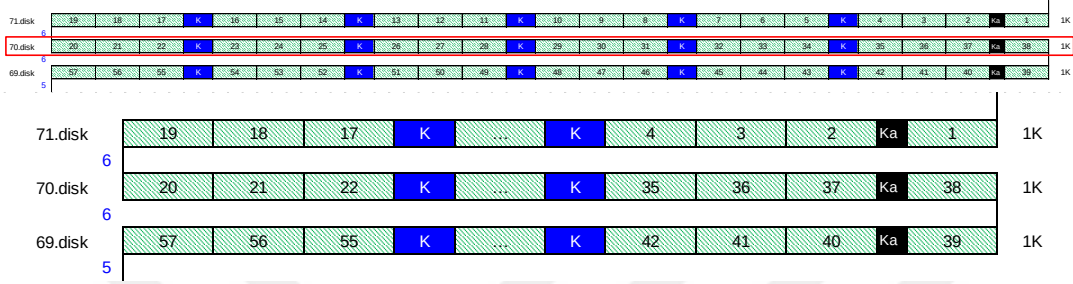
$$C_s = \frac{n}{6} C_d + \frac{n^2 - n - 2}{n^2} C_t \quad (3.30)$$

Kalkanlı sargı ile, sargı seri kapasitesi değeri disk sargıya kıyasla daha yüksek olur. Bu da darbe dağılımının diskler arasında daha düzenli olmasını sağlar. Kullanılacak olan kalkan adedi, kapasitelerin doğru dağıtılması ile ayarlanır ve en optimum kalkan yerleşimi elde edilmeye çalışılır. Kullanılacak olan kalkan adedi s olarak ifade edilirse, kalkan adedine göre disk seri kapasitesi denklem 3.31'deki gibi hesaplanacaktır [24].

$$C_s = \frac{n}{6} C_d + \frac{2(n-s-1)}{4n^2} C_t + \frac{s}{4n^2} C_t \left[\frac{V-V_{geçiş}}{\Delta V} + \left(\frac{V-V_{geçiş}}{\Delta V} - 1 \right)^2 + \left(\frac{V-V_{geçiş}}{\Delta V} - 2n \right)^2 + \left(\frac{V-V_{geçiş}}{\Delta V} - 2n + 1 \right)^2 \right] \quad (3.31)$$

Burada $V, V_{geçiş}, \Delta V$ sırası ile; kalkanın yerleştirildiği sarımın gerilimi, kalkanın alındığı sarımın gerilimi ve iki sarım arası gerilim olarak kullanılmıştır (V/n). Bu denklem analiz edildiğinde, seri kapasitenin en yüksek değeri, kalkan iletkeni son sarım ile bir önceki arasında kullanıldığında elde edilmektedir [25]. Bundan dolayı da ilk eklenen kalkanın etkisi en büyük olmaktadır.

Şekil 2.13'un şematik gösterimi Şekil 3.7'de verilmiştir. Kalkanların optimum yerleşimine, sargılar arası kapasiteler deneme yanılma metodu ile hesaplanarak yerleştirilir. Şekil 3.7'de, siyahlar kalkan iletkeni, yeşiller normal sarımlar, mavi ile ifade edilen şematik de aksiyel soğutma kanallarının yerini göstermektedir. Şeklin sol tarafında disk numaraları ve altında radyal kanalların yükseklikleri verilmiştir, sağ tarafta ise diskteki kalkan adetini gösteren “1K” ifadesi yer almaktadır.



Şekil 3.7 : Kalkanlı sargı şematik gösterimi. Yeşil renkli numaralı kutucuklar sarımları, siyah kutucuklar kalkan iletkenini, mavi kutucuklar ise aksiyel soğutma kanallarını göstermektedir.

3.3 Kalkanlı Sargı Darbe Dağılımının Deneysel Olarak İncelenmesi

Kalkanlı sargının, standart disk sargıya kıyasla avantajlarını inceleme amacı ile Best A.Ş. Ar-Ge Merkezi'nde 2013 yılında deneysel karşılaştırmalı çalışma yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda elde edilen bilgi ile kalkanlı sargı ve sargı kapasitelerini hesaplamaya ait norm oluşturulup, firma know-how'una eklenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmada; seri disk sayısı 2, disk başına seri sarım sayısı 10, disk başına düşen aksiyel yağ kanalı sayısı 0 (yani yok), disk başına dış kalkan adeti 3 ve iç kalkan kullanılmıyor olarak analitik hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplanan seri kapasite değeri 2617pF olarak bulunmaktadır. Üretilen deneme bobini sonucu ölçülen kapasite değeri de 2319pF olarak hesaplanmıştır. Piko faradlar mertebesinde elde edilen hata miktarı, üretim ile teyit edilerek yapılan hesaplamaların tutarlılığını sağlamlaştırmaktadır.

Diğer bir deneysel çalışmada ise kalkanlı ve kalkansız iki disk analitik olarak kapasite dağılımları üzerinden karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, kalkansız sargının önerilen pozitif etkisi daha doğru gözlemlenebilecektir. Kalkan yerleşimi, darbe etkisinin daha yüksek olduğu üst diskleri minimize edecek şekilde yapılmıştır. Kullanılan sargının parametre değerleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2 : Kıyaslama yapılan sargı ortak değerleri.

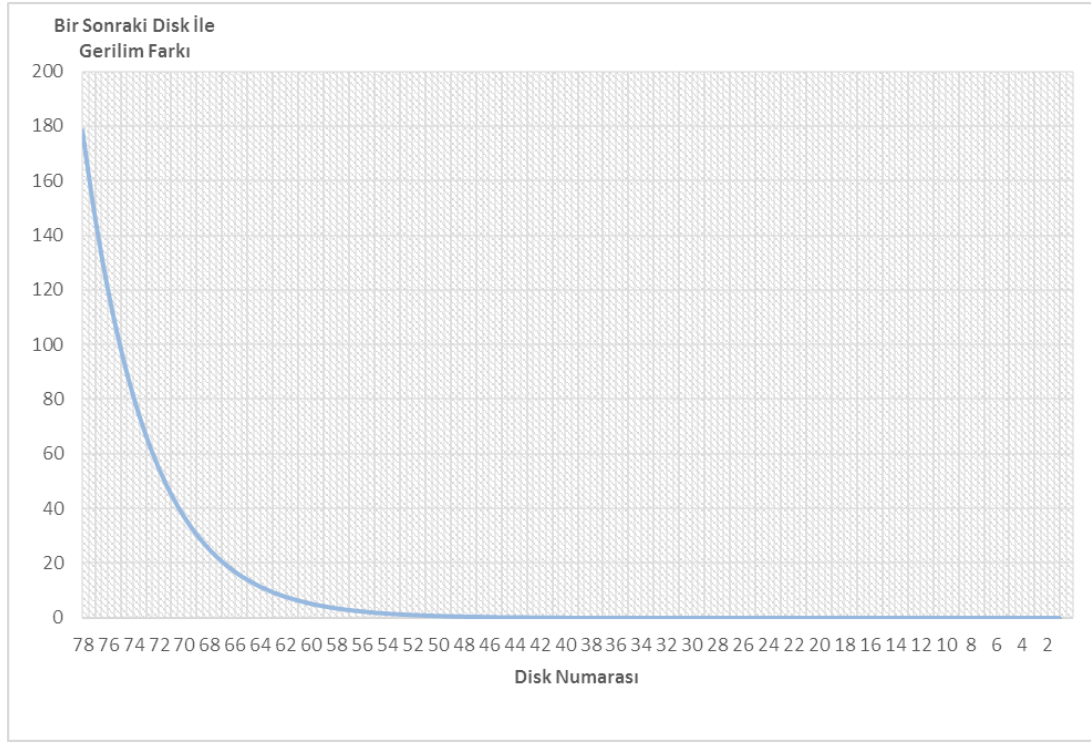
Parametre	Değer
Uygulanan yıldırım darbe	550kV LI
Toplam disk adeti	78 ad.
Yağın dielektrik delinme dayanımı	8.9×10^{-12}
PSP malzeme dielektrik delinme dayanımı	4.2×10^{-12}
Kağıdın dielektrik delinme dayanımı	4×10^{-12}
Sargı radyal genişliği	111 mm
İçteki sargının dış çapı	833 mm
Dıştaki sargının iç çapı	1189 mm
İletken aksiyel yüksekliği	13.2 mm
Soğutma kanalı genişliği	8 mm
Disk başına sarım sayısı	8 ad
Paralel iletken adeti	1 ad
İletken izolasyonu	1.3 mm

Çizelge 3.2'deki parametreler ile yapılan hesaplamada, 8'lik kanal ve 3 kalkan iletkeni kullanılır ise, iki sarım arası kapasite 1141pF, disk-toprak_dış arası kapasite 82.1pF, disk-toprak_iç arası kapasite 47pF, iki komşu disk arası kapasite 1493pF, bir sarımın dışındaki kalkan iletkenine karşı kapasitesi 1265pF, bir sarım içindeki kalkan iletkenine karşı kapasitesi 1017pF, tüm diskin seri kapasitesi 2153pF ve kalkanlı diskin seri kapasitesi 9865pF olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.2'deki parametreler ile 8'lik kanal ile birlikte 2 kalkan iletkeni kullanılır ise; iki sarım arası kapasite, disk-toprak_dış arası kapasite, disk-toprak_iç arası kapasite, iki komşu disk arası kapasite, bir sarımın dışındaki kalkan iletkenine karşı kapasite, bir sarım içindeki kalkan iletkenine karşı kapasitesi ve tüm diskin seri kapasitesi değişmeyecektir. Sadece kullanılan kalkan adetinin azalmasına bağlı olarak kalkanlı diskin seri kapasitesi azalacak ve 7278pF olarak hesaplanacaktır. Benzer şekilde eğer 1 adet kalkan kullanılır ise, kalkanlı diskin seri kapasitesi 4710pF olarak hesaplanmıştır.

Sargıda hiçbir kalkan kullanılmaması durumundaki kapasite değerleri ile oluşturulan darbe dağılım eğrisi Şekil 3.9'da verilmiştir. Belirtilen düz diskte sargı boyunca darbe dağılımı yumuşak geçişli olsa da ilk disklerdeki gerilim seviyesi, iki disk arası karşılaştırıldığında oldukça yüksek kalmaktadır (78-77 arası gerilim farkı yaklaşık 40kV'dur). Düz diskte (5mm'lik radyal kanal yükseklikli) iki sarım arası kapasite 1141pF, disk-toprak_dış arası kapasite 75.3pF, disk-toprak_iç arası kapasite 43.1pF olarak hesaplanmıştır. İki komşu disk arası kapasite 2185pF, bir sarımın dışındaki

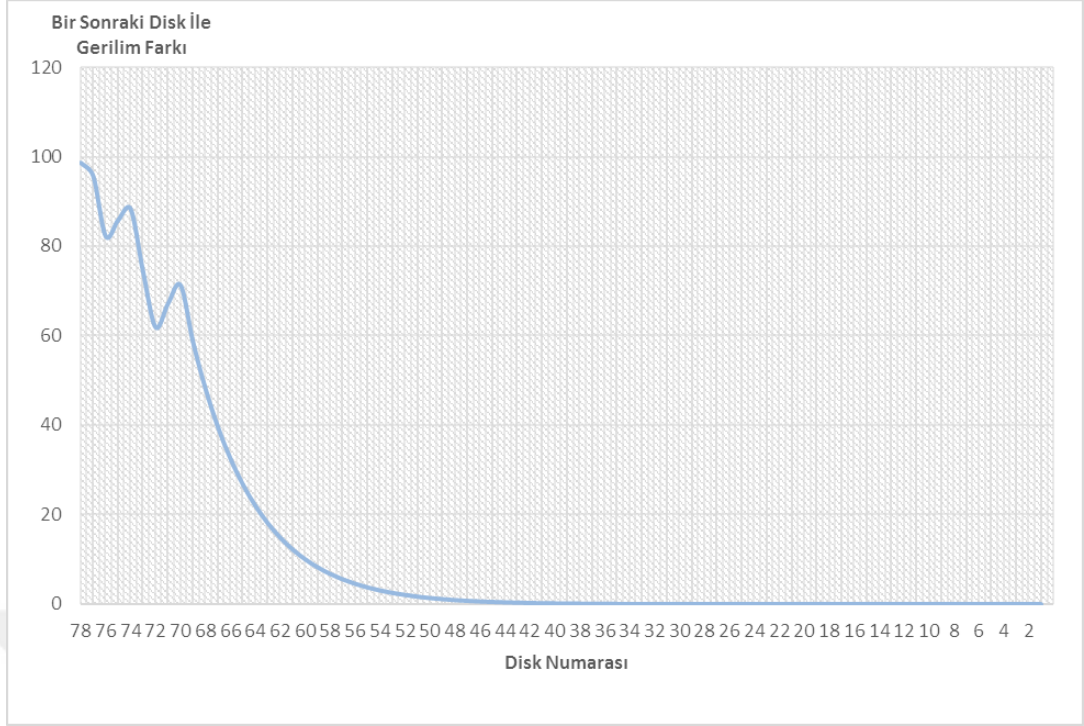
kalkan iletkenine karşı kapasitesi 1265pF, bir sarım içindeki kalkan iletkenine karşı kapasitesi 1017pF, tüm diskin seri kapasitesi 3076pF olarak bulunmuştur.



Şekil 3.8 : Düz diskte sargı boyunca gerilim dağılımı.

8'lik kanal kullanılması soğutma ve kapasite açısından avantaj olsa da, sargı boyunu çok yükselteceğinden çok fazla tercih edilmez. Daha homojenik bir dağılım ile 8'lik, 6'lık ve 5'lik hatta 4'lük radyal kanallar kullanımı tercih edilir. 8'lik kanallar sadece sargı giriş ve çıkışlarında, hem ısınmanın hem de elektriksel zorlanmanın yüksek olduğu yerlerde tercih edilir. Aynı hesaplar 6'lık kanal kullanıldığında da yapılmalıdır. Tüm kapasiteler hesaplandıktan sonra eşdeğer devre çıkartılıp, kullanım opsiyonuna göre doğru devre şeması elde edilecek ve darbe dağılımı ile birlikte yansıyan hesabı yapılacaktır.

Çizelge 3.2'de verilen parametreler kullanılarak, sadece radyal kanal yüksekliği değiştirilip 6mm olduğu zaman; 3 kalkan iletkeni kullanılır ise, iki sarım arası kapasite 1141pF, disk-toprak_dış arası kapasite 77.6pF, disk-toprak_iç arası kapasite 44.4pF, iki komşu disk arası kapasite 1892pF, bir sarımın dışındaki kalkan iletkenine karşı kapasitesi 1265pF, bir sarım içindeki kalkan iletkenine karşı kapasitesi 1017pF, tüm diskin seri kapasitesi 2686pF ve kalkanlı diskin seri kapasitesi 10398pF olarak hesaplanmıştır. 2 kalkanlı durumda disk seri kapasitesi 7811pF, tek kalkanlı durumda ise 5243pF olarak bulunmuştur.

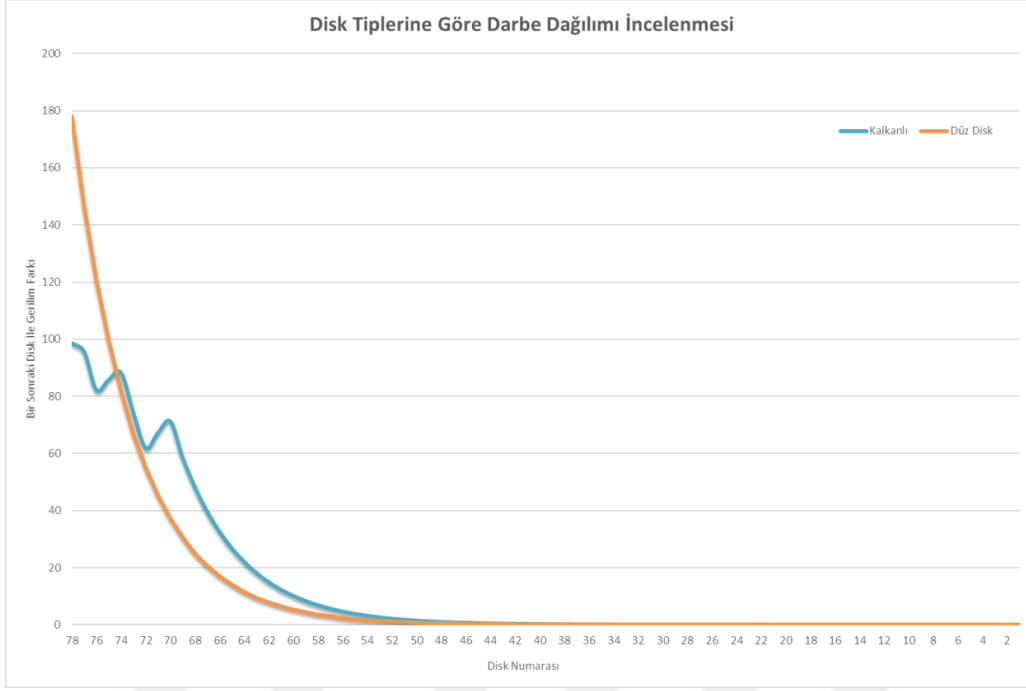


Şekil 3.9 : Kalkanlı diskte sargı boyunca darbe dağılımı.

Bu durumda oluşturulan ve kalkanların optimum yerleştirilmesi yapıldığı bir sargıdaki darbe dağılımı Şekil 3.9'da belirtilmiştir. Burada diskler arası kapasite değişiminin düşük olmasına özen gösterilmiştir. Deneme-yanılma metodu ile analitik hesaplamalar iteratif tekrarlanarak, en uygun darbe dağılımı elde edilmeye çalışılmıştır. Düz diske kıyasla, diskler arasında gerilim olarak ufak sıçramalar olsa da gerilim değişimi düşük olduğu için daha yüksek performanslı bir sargı tipi olmaktadır.

Analiz için alınan ve özellikleri Çizelge 3.2'de verilen transformatörün, kalkanlı olması durumundaki darbe dağılımı Şekil 3.9'da çıkartılmıştır. Kalkansız durumundaki darbe dağılımı (Şekil 3.8) baz alınarak, dağılım şekli bozulmadan kalkanlar eklenmiştir. Her eklenen kalkan sargı seri kapasitesini arttırdığı için gerilim sıçramaları olacaktır. Bu sıçramaların limit değerleri aşılmadan, kalkansız duruma en yakın darbe dağılımını elde edilerek, sargı boyunca da dalganın homojene yakın şekilde dağılması sağlanmıştır. Şekil 3.8'deki kalkansız sargının ve Şekil 3.9'daki kalkanlı sargı grafikleri, Şekil 3.10'de üst üste bindirilerek gösterilmiştir.

İki grafik karşılaştırmalı olarak incelendiğinde (Şekil 3.10); kalkan iletkin kullanımının, ilk disklerdeki gerilim farkını 180kV mertebelerinden 100kV mertebelerine düşürdüğü görülmüştür.



Şekil 3.10 : Sarıg tiplerine göre darbe dağılımının karşılaştırılması (Mavi = kalkanlı, Turuncu = düz diskli sargı).

İki disk arası kanal mesafesi 8mm alındığında elektriksel dayanım 144kV olarak hesaplanabilir, bu da bize düz disk olarak kullanmak istediğimizde, 180kV mertebesinin delineceğini gösterir. Kalkanlı sargı kullanılarak bu risk ortadan kaldırılmıştır.

Çizelge 3.3 : Deneme bobini parametre değerleri.

Parametre	Değer
Uygulanan yıldırım darbe	1425kV LI
Toplam disk adeti	2x46 ad.
Yağın dielektrik delinme dayanımı	8.9×10^{-12}
PSP malzeme dielektrik delinme dayanımı	4.2×10^{-12}
Kağıdın dielektrik delinme dayanımı	4×10^{-12}
Sargı radyal genişliği	152 mm
İçteki sargının dış çapı	1202 mm
Dıştaki sargının iç çapı	1992 mm
İletken aksiyel yüksekliği	14.62 mm
Soğutma kanalı genişliği	8 mm
Disk başına sarım sayısı	19 ad
Paralel iletken adeti	2 ad
İletken izolasyonu	1.8 mm

Gereğinden fazla kalan kullanımı, gerilim sıçraması miktarını arttıracak gibi, bobin işçiliğini de arttıracaktır ve kalkanlı sargı, taraklı sargıya göre sahip olduğu işçilik

avantajını kaybedecektir. Kalkan adeti belirlenirken, limitte de bırakılmamalıdır. Kapasite hesapları yaklaşık olduğu için ve işçilik vb. sebepler ile çok kolay etkilendiği için, çok hassas bir hesap değildir.

Kalkanlı sargının avantajı, karşılaştırmalı olarak incelendikten sonra imalat yapılarak deneysel ölçümlerin yapılması kararlaştırılmıştır. Bu kapsamda bir TEYDEB çalışması yapılarak, TÜBİTAK destekli bir araştırma projesi kapsamında deneme bobini imal edilmiştir. Teorik olarak elde edilen darbe şeklindeki iyileştirme, deneme bobinin yıldırım darbeye dayanımının test edilmesi ile teyit edilmiştir. Bu kapsamda kalkanlı bir sargıda kapasite ölçmek ve bobinin delinme dayanımını kontrol etmek amacı ile örnek bobin imal edilmiş ve darbe testine maruz bırakılmıştır. Mono faz 400kV'luk bir transformatör bobini bu amaçla hazırlanmıştır AG sargısı gerilim seviyesi 13.8kV olarak alınmıştır. İmal edilen transformatörün kalkanlı YG sargısına ait parametreler Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Test laboratuvarında 10kV ile yapılan kapasite ölçümlerinin sonuçları Çizelge 3.4'de verilmiştir.

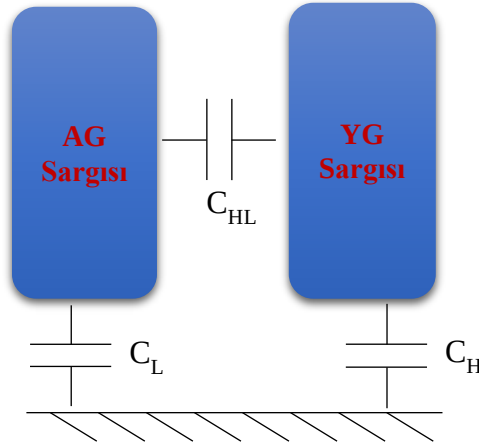
Çizelge 3.4 : Kalkanlı sargı test sonuçları.

Deney No	Test Bağlantıları			Test Gerilimi [kV]	Akım [mA]	Güç [W]	Güç Faktörü [%]	
	Enerjili	Topraklı	Ekranlı				Ölçülen	20°C Ötellenmiş
1	YG	AG		10	14.92	0.293	0.19	0.163
2	YG		AG	10	7.63	0.158	0.2	0.172
3	AG	YG		10	33.1	0.702	0.21	0.176
4	AG		YG	10	25.78	0.561	0.21	0.181
5	YG+AG		AG Çıkış	10	33.45	0.722	0.21	0.179

Çizelge 3.4'deki değerlerden test koşullarının ana parametreleri ve uygunluğu kontrol edilmiştir. Enerji metodu ile ölçülen kapasiteler de Çizelge 3.4'de aktarılmıştır.

Burada laboratuvar sıcaklığı 23 derece santigrat ve bağıl nem yüzde 32 civarında ölçülmüştür. Test sırasında transformatörün sıcaklığı ise 24 derecedir. IEC standartlarından çıkartılacak kapasite ölçümleri için güç faktörü ölçümleri 20 derece santigrada ötelenmelidir. IEC'de garanti edilen tüm değerlerin 20 derece santigratta olması beklenir.

Şekil 3.11'de test sonuçları doğrultusunda hesaplanacak kapasite değerleri şematik olarak gösterilmiştir. Bu değerler ile hesaplanan değerler oldukça yakın çıkmıştır.



Şekil 3.11 : Ölçülen kapasitelerin şematik gösterimi.

Ayrıca testte kullanılan izolatörlerin kapasiteleri de ölçülmüştür. Bu kapasiteler transformatöre seri kapasite gibi bağlı olacağı için, toplam ölçümlere etki edecektir. Ölçülen buşing kapasiteleri Çizelge 3.5’de verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Kalkanlı sargı testinde kullanılan buşinglerin kapasite ölçüm değerleri.

Deney No	Test Edilen Terminal	Test Gerilimi [kV]	Akım [mA]	Güç [W]	Güç Faktörü [%]	Kapasite [pF]
1	YG	10	1.440	0.053	0.37	458.9
2	YG-N	10	0.541	0.021	0.39	172.1
3	AG Giriş	10	1.218	0.034	0.27	387.5
4	AG Çıkış	10	1.230	0.036	0.28	390.9

Buşing kapasiteleri ihmal edilemeyecek büyüklükte olduğu için güç denklemlerinden çıkartılarak, sadece sargı kapasiteleri elde edilecektir.

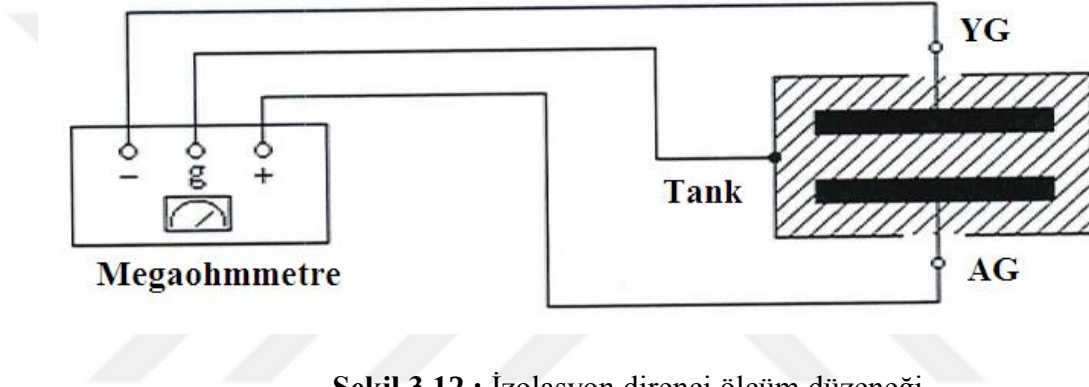
Çizelge 3.6 : Test sonuçlarında elde edilen kapasite değerleri.

Kapasite Tanımları	Kapasite [pF]
CH+CHL	4751
CH	2431
CL+CHL	10534
CL	8215
CHL	2320
CHL	2319
CHL direkt	2318
CH+CL	10648

Sargıların ölçülen ve ölçülenlerden hesaplanan kapasite sonuçları da Çizelge 3.6’de gösterilmiştir. Bu hesaplamalarda ikili ölçülen kapasitelerden ve toprağa karşı elde

edilen kapasitelerden, sargıların kapasite değeri elde edilmiştir. Basitçe birbiri içinden çıkartarak tüm kapasitelere ulaşılmıştır.

Önceki bölümlerde anlatıldığı üzere, yıldırım darbe modeli kapasiteler üzerinden çıkartılıp, dağılım doğru şekilde yapıldığında; transformatörün darbe durumundaki modeli hazırlanabilmektedir. Fakat bu şekildeki bir modelleme, tüm darbe şekillerine göre uygun sonuç vermeyecektir. Bu sebeple direnç ölçümleri de yapılarak modele adapte edilmelidir. İzolasyon direnci ölçümünde megaohmmetre ile terminallere ve toprağa gerilim verilerek direnç değeri ölçülür. Şekil 3.12'deki düzenek kurularak ölçümler alınır.



Şekil 3.12 : İzolasyon direnci ölçüm düzeneği.

Ölçüm sonuçları Çizelge 3.7’de verilmiştir. Tabloda PI değeri; 600sn ölçümünün 60sn ölçümüne bölümünden elde edilen değerdir ve direncin değişimini göstermektedir.

Çizelge 3.7 : Kalkanlı sargı testinde kullanılan buşinglerin kapasite ölçüm değerleri.

Deney No	Test Edilen Terminal	Test Gerilimi [kV]	15 sn [MOhm]	30 sn [MOhm]	45 sn [MOhm]	60 sn [MOhm]	600 sn [MOhm]	PI
1	YG/Tank	5	33800	38600	43300	47700	152000	3.19
2	AG/Tank	5	33400	52500	76200	93000	198000	2.13
3	YG/AG	5	37200	39200	43700	49000	145000	2.96
4	Çekirdek/Tank	2.5	4740	6270	7610	8580	-	-

Test edilen transformatör boşa ayarlıdır ve 5 kademeye sahiptir. Bu kademelere göre devreye girecek olan ayar sargısı sarımları da sargı direncinde değişime sebebiyet verecektir. YG’den uygulanacak 10A’lık test akımı ile dirençler ölçülmüştür. AG için ise tek kademe vardır, gerilimi değişmemektedir ve 90A test akımı ile direnci ölçülmüştür. Bu test transformatörün aktif kısmı dışarıda iken, yani sargı uçları açıkta yapılmaktadır. Bu sadece buşing dirençleri ya da bağlantı dirençleri devre

içinde yoktur. Doğrudan sargı direnci ölçümü yapılabilmektedir. Sargının girişi ve çıkışı arasına bağlanan direnç ölçer ile dirençler elde edilmiş ve Çizelge 3.6'de paylaşılmıştır. 1. Kademe en yüksek gerilimin olduğu, 5. Kademe de en düşük gerilimin olduğu kademedir. Transformatörün nominal kademesi 3. Kademedir. 400kV faz-faz arası, mono faz olduğu için faz-nötr olarak 230.93kV bulunacaktır. Maksimum kademedeki faz-faz arası 420kV, minimum kademedeki de 380kV olacaktır.

Çizelge 3.8 : Ölçülen sargı direnci değerleri.

Ölçülen Kademe	Direnç Değeri [mOhm]
YG-1	800.15
YG-2	822.05
YG-3	844.15
YG-4	866.3
YG-5	888.5
AG	2313

Çizelge 3.8'de sarım eklenmesine göre direnç değerinin değişimi gözlemlenebilmektedir. Beklenildiği gibi en fazla sarım olan kademedeki, en yüksek direnç değeri gözlemlenmiştir.

Yapılan ölçümler sonrası transformatöre yıldırım darbe testi uygulanmıştır. Testte darbe şekilleri ve gaz analizleri incelenerek, transformatörde test sırasında bir delinme veya yürüme var mı kontrol edilir. Yapılan test sonuçları EK-1'de paylaşılmıştır. Herhangi bir delinme gözlemlenmediği için bu sargıya yapılan kalkanlı sargı uygulaması başarılı sonucuna varılabilir. Darbe dayanımı performansının yanında işçilik açısından kalkanlı sargının avantajı Çizelge 2.4'de, önceki bölümde belirtilmiş idi.

4. TRANSFER EDİLEN DARBE GERİLİMLERİ İNCELENMESİ

Önceki bölümlerde anlatılan yıldırım darbelerin etkileri; yüksek gerilim sargılarından alçak gerilim sargılarına transfer edilen (yansıyan) geçici aşırı gerilimler sonucunda da, sargılara benzer şekilde zararlar verebilir. Bu durumdan korunmak için, yansıyan gerilimler hesaplanmalı ve koruyucu önlemler alınmalıdır. Sadece alçak gerilim sargısına uygulanacak yıldırım darbe gerilimi dikkate alınması, sargıyı tüm aşırı gerilimlerin etkilerinden korumaya yeterli olmayacaktır.

Bu bölümde; yansıyan darbe gerilimlerinin hesaplanması için transformatör eşdeğer modelinden faydalanılacaktır. Sargılar arası kapasite değerleri bulunduktan sonra, yansıyan darbenin tepe değerini bulmak mümkün olacaktır.

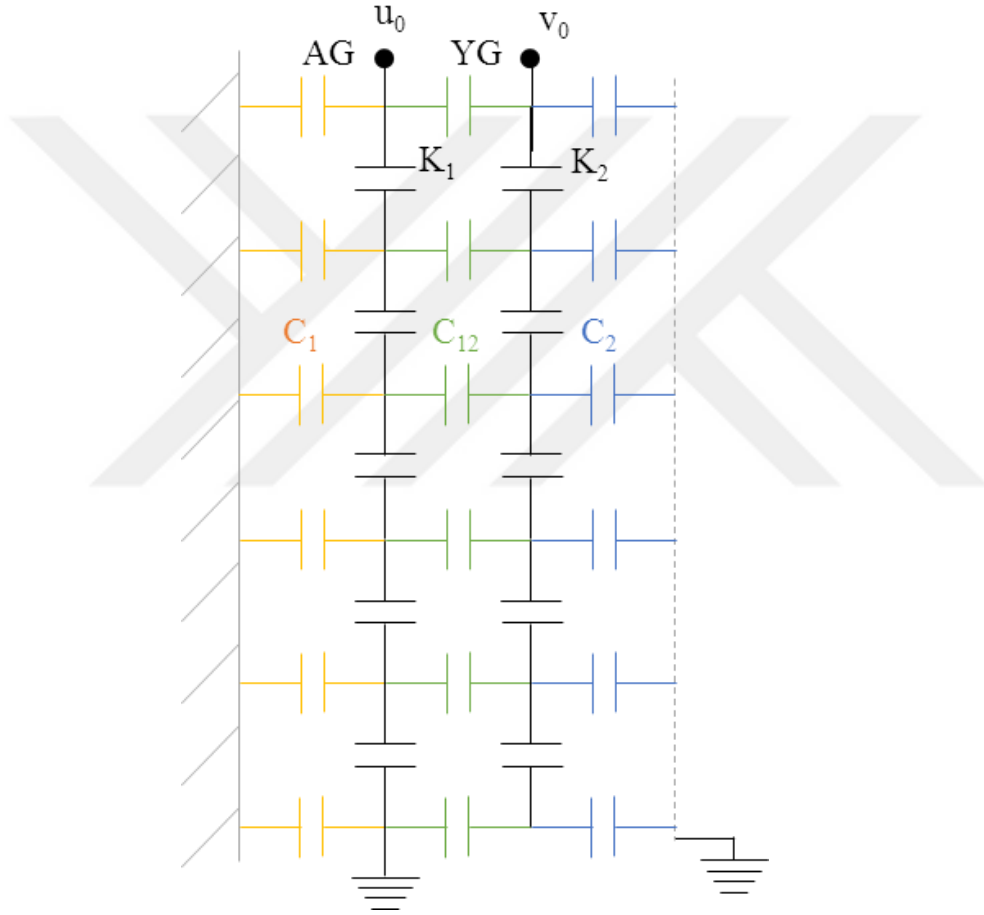
Yansıyan darbe gerilimleri, darbenin uygulandığı yüksek gerilim sargısından, alçak gerilim veya tersiyer sargılarına birkaç şekilde etki edebilir. İlk olarak elektrostatik veya kapasitif transfer denilen etki ile, ikinci olarak primer ve sekonder sargıların toprağa karşı kapasiteleri ve öz endüktansları sebebi ile doğal frekansları doğrultusunda aktarılan titreşimli gerilim transferi (oscillatory transfer) ve son olarak çekirdek üzerinden elektromanyetik olarak yansıyan gerilimler olarak üç şekilde etkisi incelenebilir.

Bu etkilerden titreşim etkisi, en düşük etkili olandır. Genellikle bu etki, elektromanyetik olarak yansıyan gerilim içinde kabul edilir ve etkisi ihmal edilebilir. Kapasitif yansıyan kısım MHz mertebelerinde titreşimlerdir ve ilk görülen, en etkili aşırı gerilimlerdir. Endüktif olarak yansıyan etki ikincil olarak gelir. Zamanla değişken bir şekil gösterir, bunun sebebi terminallere uygulanan gerilimin de zaman bazlı değişken olmasıdır [27].

Normal test koşullarında; darbe testi sırasında tüm açık terminaller topraklanır. AG'nin açıkta olan faz çıkışları ve YG sargısının nötr ucu, örnek transformatörümüzde topraklanacaktır. Bu yapıya alternatif olarak, tüm uçların açıkta olduğu durum da incelenecektir. Bunun amacı; işletme sırasında oluşacak bir aşırı gerilim (yıldırım darbesi), AG sargılarının nominal çalışma geriliminin üstüne binerek etkileyecektir. Yansıyan gerilimler için daha farklı durumlar (iç uç topraklı –

dış uç açık, iç uç açık – dış uç topraklı, AG uçlarının kısa devre edilmesi fakat topraklanmaması) da Şenol ve arkadaşları tarafından incelenmiştir [28]. Ekstrem iki durum; uçların açık olduğu ve topraklanmış olduğu durumlar olduğu tespit edilmiştir.

Bir ucun topraklı olması, hesaplamalarda da sıfır potansiyele sahip nokta olacağı için kolaylık sağlamaktadır. Kapasitelerin dağılımı ile bağlantı noktaları gerilim çözümü ile yansıyan gerilim bulunabilir. Şekil 4.1’de düğüm noktaları şematik üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Darbe uygulanan ve yansıyan gerilim modelinde kapasite tanımları.

Şekil 4.1’deki değerler, yansıyan gerilimler üzerine yapılan çalışmalar baz alınarak oluşturulan transfer matrisi parametrik değerleri aşağıdaki gibi (denklem 4.1 ve 4.2) olacaktır [28];

$$K_u u - T^* v = \beta u_0 \theta_u \quad (4.1)$$

$$K_v v - T u = u_0 \theta_v \quad (4.2)$$

Matris olarak ifade edilince;

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ \vdots \\ u_{n-1} \end{bmatrix} \rightarrow (n-1) \text{ eleman için} \quad (4.3)$$

$$e_u = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow (n-1) \text{ eleman için} \quad (4.4)$$

$$K_u = \begin{bmatrix} 2\beta + \gamma + 1 & -\beta & 0 & \cdot & \cdot & 0 & 0 & 0 \\ -\beta & 2\beta + \gamma + 1 & -\beta & \cdot & \cdot & 0 & 0 & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & -\beta & 2\beta + \gamma + 1 & -\beta \\ 0 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & 0 & -\beta & 2\beta + \gamma + 1 \end{bmatrix} \rightarrow (n-1) \times (n-1) \text{ eleman için} \quad (4.5)$$

Bütün durumlarda v , K_v , e_v ve T bağlantı şekline göre belirlenmektedir. Bunlar dışındaki bağıntılar denklem 4.5 ile ifade edilir. K ve indis ile ifade edilen değerler seri kapasite, C ve indis ile ifade edilen değerler ise sargılar arası paralel kapasite değerleridir. Bu değerlerden türetilen diğer değerler Denklem 4.6'de verilmiştir.

$$\beta = K_1/C_{12}, \gamma = C_1/C_{12}, \delta = K_2/C_{12}, \varepsilon = C_2/C_{12} \quad (4.6)$$

T^* , T matrisinin transpozesidir.

Düğüm gerilimleri; yukarıda belirtilen sütun matrisleri çözülerek elde edilir.

$$u = u_0 [K_u^{-1} T^* (K_v - T K_u^{-1} T^*)^{-1} * (\beta T K_u^{-1} e_u + e_v) + \beta K_u^{-1} e_u] \quad (4.7)$$

$$v = u_0 (K_v - T K_u^{-1} T^*)^{-1} * (\beta T K_u^{-1} e_u + e_v) \quad (4.8)$$

Denklem 4.7 ve 4.8'den hem uygulanan darbe gerilimi için düğüm noktaları gerilimleri, hem de YG sargısından AG sargısına transfer edilecek darbe gerilimi hesaplanabilir.

Sargıların tek başlarına düşünüldüklerinde, başlangıç darbe gerilim dağılımları α katsayısı ile belirlenir [30]. Fakat bu değer; doğrudan darbe uygulanan YG sargısında farklı, yansıyan AG sargısında farklıdır. α_1 (Denklem 4.9) ve α_2 (Denklem 4.10) sırası ile doğrudan darbe ve yansıyan darbe katsayılarını ifade etmektedir [30].

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{C_{1r}+C_{12r}}{K_{1r}}} = n \sqrt{\frac{\gamma+1}{\beta}} \quad (4.9)$$

$$\alpha_2 = \sqrt{\frac{C_{2r}+C_{12r}}{K_{2r}}} = n \sqrt{\frac{\varepsilon+1}{\delta}} \quad (4.10)$$

Geçici aşırı gerilimlerin transferi daha basit bir şekilde IEC 60071-2 standartında aşağıdaki şekilde verilmiştir:

$$U_0 = \frac{C_{12}}{C_{12}+C_2} V_0 + \frac{U_N}{\sqrt{3}} \quad (4.11)$$

Burada U_N sekonder tarafın anma gerilimidir.

Sargılar arası kapasite hesabı ve darbenin sargı boyunca dağılması Bölüm 3’de detaylı olarak hesaplanmıştır. Bu bölümde tekrardan hesaplanmayacak, doğrudan darbenin dağılımına ve yansıyan gerilim hesabına geçilecektir. Hesaplamada ise Bölüm 3’de aktarılan hesap programı kullanılacaktır. Transformatörün fiziksel ve elektriksel yapısındaki tasarım parametreleri değiştirilerek, yansıyan gerilime bu parametrelerin etkileri incelenecektir. Ayrıca bulunan gerilimlerin zaman bazlı çözülmesi ile oluşacak bir darbe şekli modellenecektir. Sırası ile yapılan analizler aşağıda verilmiştir:

- Öncelikle YG’ye uygulanan gerilim ve YG-N’de (sargı çıkışında) gözlemlenen etki (darbe dağılımı) verilecek,
- Darbe uygulandığında AG sargısı uçlarının topraklı ve salınımda olması durumu incelenecek,
- YG’ye uygulanan darbenin genliğinin değişiminin, AG’deki etkisi incelenecek,
- Yansıyan darbenin kapasitif ve endüktif etkileri, sargılar arasına yerleştirilen bir ekranlama ile belirlenecek,
- AG ve YG sargılarının birbirine kıyasla sarım yönlerinin aynı ve ters olması durumu incelenecek,
- AG’nin bağlantı grubunun değiştirilmesinin, yansıyan gerilime etkisi incelenecek,
- AG-YG arası mesafenin yansıyan darbe gerilimine etkisi incelenecek,

- AG ile çekirdek arasındaki mesafenin yansıyan darbe gerilimine etkisi incelenecek,
- AG sargısının kat başına sarım sayısının yansıyan darbelere etkisi analiz edilecek,
- İletken boyutlarının değişiminin etkisi, aynı fiziğe farklı sarım sayısı sığdırılarak incelenecek,
- AG sargısının kat sayısının, yansıyan darbeye etkisi incelenecek,
- Son olarak; YG sargısının disk tipinden kalkanlı tipe geçirilmesi durumunda yansıyan gerilime etkisini incelemek üzere darbe analizi çalışmaları yapılacaktır.

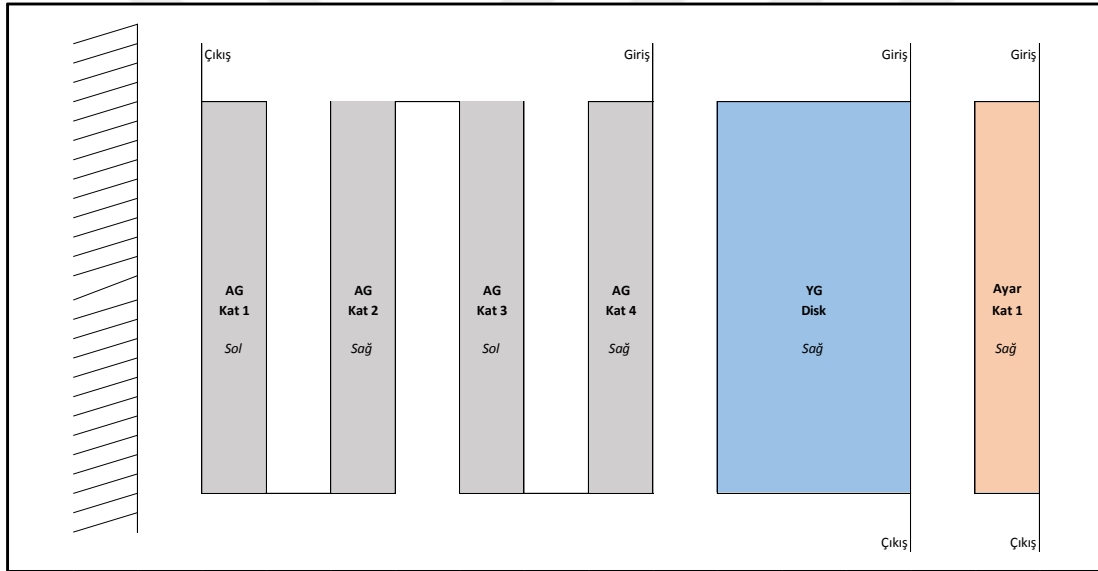
Yansıyan darbe gerilimi, kapasitelerle ilişik olduğundan; en riskli transformatörler YG ile AG arasındaki gerilim farkı yani çevirme oranı yüksek olan jeneratör transformatörleri ve/veya tersiyer sargılı transformatörlerdir. Bunun sebebi, Çekirdeğin darbe dağılımına etkisi Bölüm 3’de aktarılmış idi. Okuyama ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalar ile yansıyan darbeye çekirdeğin etkisi deneysel ve hesaplamalarla detaylı olarak incelenmiş ve testler ile doğrulanmıştır. Bu testlerden elde edilen sonuç; çekirdeğin etkisinin ihmal edilebilir derecede olduğu, kaçak reaktansların eşdeğer devrede göz önüne alınmasının yeterli olacağıdır [27].

Çizelge 4.1 : Ölçülen sargı direnci değerleri.

Parametre	Değer
Güç	50MVA
Gerilim (YG/AG)	110/21kV
Bağlantı grubu	YNd5
Ayar aralığı	±5% (±2 adımda)
Ayar sargısı tipi	Lineer ayarlı
Test Gerilimi LI HV	550kV
Test Gerilimi LI HV-N	250kV
Test Gerilimi LI LV	125kV
Test Gerilimi AC HV	230kV
Test Gerilimi AC HV-N	95kV
Test Gerilimi AC LV	50kV
uk	12%
Soğutma Tipi	ONAN
Çevre Sıcaklığı	40°C
Maksimum Endüktans	1.7T
Sarım Gerilimi	98.59V/sarım

Çizelge 4.1’de yansıyan darbe geriliminin incelenmesi için örnek olarak belirlenen 50MVA’lık bir transformatörün parametreleri verilmiştir.

Transformatörün fiziksel yapısı, sarım yönleri, sargı tipleri ve sargı giriş-çıkışlarını belirtecek şekilde Şekil 4.2’de verilmiştir. Sargılar üstten girilmiştir. AG sargısı ise çıkış ucu ile sarılmaya başlanmış, bu sebeple çıkış içeride, giriş dışarıda kalmıştır. Her kat aynı yönde de sarılabilir. Bu durumda iletken bittikten sonra üst tarafa taşınıp, tekrar sağ sarım ile sarmak gerekecektir. Bu hem malzeme kaybına, hem de canlı ucun uzun mesafe doğrudan taşınmasına sebebiyet verecektir. Endüstride daha sık tercih edildiği şekli ile sağ-sol sarım çiftleri olarak yapılması hem ekonomik açıdan, hem de kalite açısından daha uygundur. Ayrıca sargılar arası ampersarım dengesi de sağlanmış olmaktadır.



Şekil 4.2 : Referans transformatör fiziksel yapısı.

Bu transformatöre karar verilirken; güç ve gerilimler olarak yaygın olarak üretilen transformatörlerin gerilimleri ve güç değeri seçilmiştir. Bunun dışında sargı dizilimi de en sık rastlanılan AG/YG/Ayar yapısına uygun olarak belirlenmiştir. Ayar sargısı tipi, talep edilen ayar aralığına göre değişiklik gösterebilmektedir.

Yansıyan darbe gerilimine etkileyen parametrelerin bulunabilmesi için, yansıyan darbe gerilimi detaylı olarak incelenmelidir. Yansıyan gerilimlerde baz alınan sargı tasarım parametreleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Önceki kısımlarda belirtildiği gibi, her sargı için parametreler ayrı ayrı verilmekte, bu da toplam girdi sayısını arttırmaktadır.

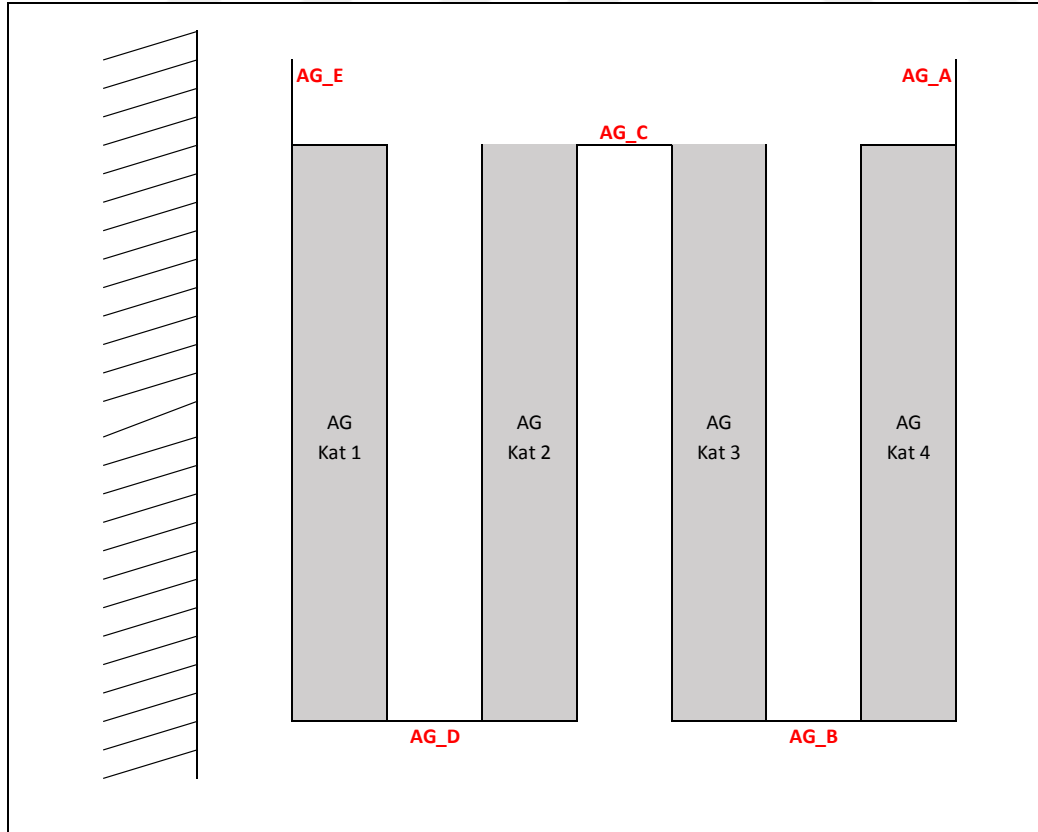
Çizelge 4.2 : Darbe analiz yazılımına girilen 50MVA transformatör parametreleri.

Küçük Veri Tabanı Girişleri	
Tanım	Açıklama
Frekans	50 Hz
Sıcaklık	75°C
Faz sayısı	3
Sargı sistemi tanımlaması	YNd11
YG-Uçlar	
Test gerilimleri	Faz: 550kV LI / Nötr: 250kV LI
Sargı gücü	50MVA
Sargı gerilimi	110kV
Adım gerilimi	2750V
AG-Uçlar	
Test gerilimleri	Faz: 125kV LI
Sargı gücü	50MVA
Sargı gerilimi	21kV
Adım gerilimi	-
Çekirdek	
Çekirdek yapısı	3/0
Çekirdek çapı	613mm
Çekirdek pencere genişliği	1755mm
Çekirdekteki çıta sayısı	32
AG-Sargısı	
Sargılara ait iç çap	651mm
Sargının yüksekliği	1590mm
Sargının genişliği	4 kat, her bir kat 13.75mm
İletken tipi	CTC
Bir iletken yüksekliği	14.8mm
Bir iletken genişliği	12.7mm
İletken izolasyonu	0.8mm
Kısmi iletken adeti	13
İletken yapısı	1x1
Sarım sayısı	53.25/kat
Kayıp sarım sayısı	0.5/kat
Sarım yönü	Sağ
Katlar arası mesafe	12
YG-Sargısı	
Sargılara ait iç çap	909mm
Sargının yüksekliği	1550mm
Sargının genişliği	111mm
İletken tipi	İkiz İletken
Bir iletken yüksekliği	14.52mm
Bir iletken genişliği	5.04mm
İletken izolasyonu	1mm
Kısmi iletken adeti	2
İletken yapısı	1x1
Sarım sayısı	78 Disk, 8 Disk başına sarım
Kayıp sarım sayısı	12
Sarım yönü	Sağ
Diskler arası mesafe	6mm
Ayar-Sargısı	
Sargılara ait iç çap	1189mm
Sargının yüksekliği	1461mm
Sargının genişliği	7mm
İletken tipi	Yassı
Bir iletken yüksekliği	21.3mm
Bir iletken genişliği	6.3mm
İletken izolasyonu	1.3mm
Kısmi iletken adeti	1
İletken yapısı	1x1
Sarım sayısı	68
Kayıp sarım sayısı	4
Sarım yönü	Sağ

Çizelge 4.3 : Darbe analiz yazılımına girilen 50MVA transformatör parametreleri.

Büyük Veri Tabanı Girişleri	
Tanım	Açıklama
Kısa devre faktörü	1.8
Analiz süresi	100 μ s
İterasyon sayısı	1024
Darbe gerilim şekli tanımlanması	Standart LI
PSP malzeme dielektrik katsayısı	4.6
Kağıt malzeme dielektrik katsayısı	3.2
Yağ dielektrik katsayısı	2.3
PSP çökme katsayısı	%6
Kağıt çökme katsayısı	%10

Çizelge 4.1, 4.2 ve 4.3’de özellikleri ve fiziksel yapısı verilen transformatörün sargılar arası kapasite değeri; çekirdek-AG arası 3669pF, AG-YG arası 2924pF ve YG-ayar arası 3875pF olarak hesaplanmıştır. AG’deki bir sarımın seri kapasitesi 2.03nF, paralel kapasitesi 71.8pF’dir.



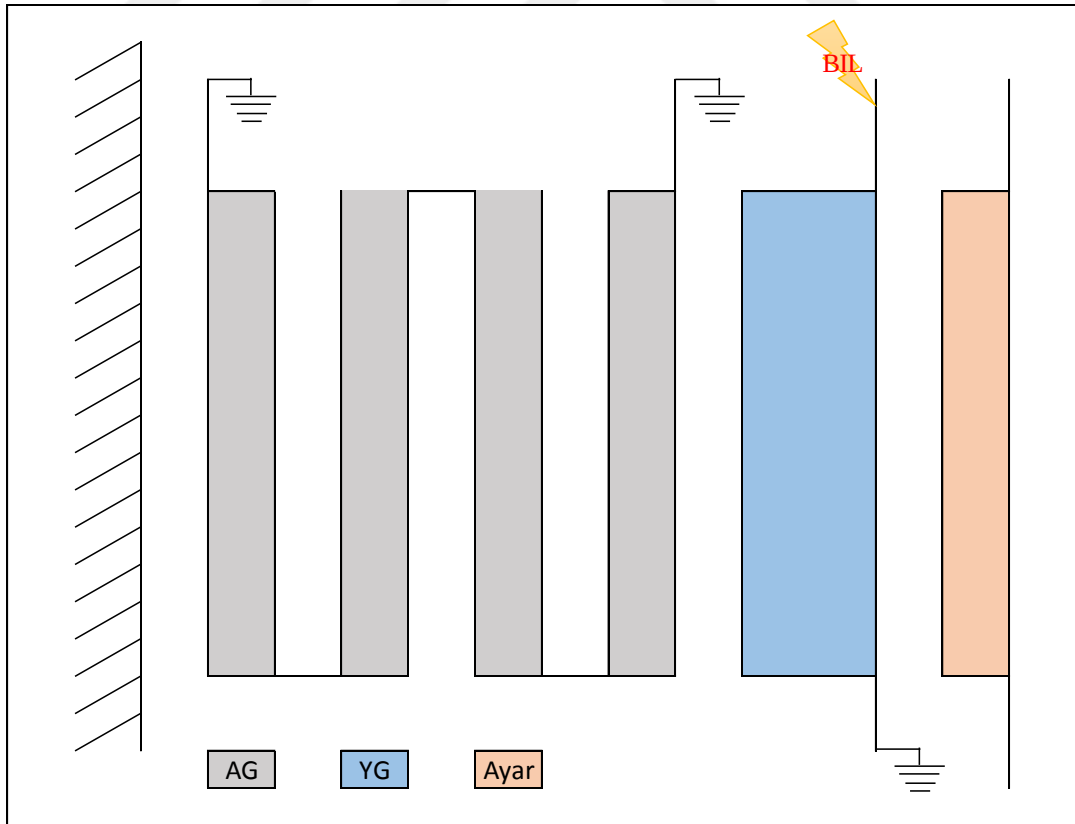
Şekil 4.3 : AG sargısı darbe değerinin incelendiği noktalar.

Yansıyan darbenin tepe değerleri hesaplamalarda verilen α katsayıları ile kolaylıkla bulunabilir. Sargıdaki sadece maksimum noktadaki gerilim değeri yerine, daha detaylı hesaplamalar ile sargı başlarında ve sonlarındaki gerilim tespit edilebilir. Bu noktaları incelemek için Şekil-4.3'deki referans isimler kullanılacaktır. Burada AG_A sargının girişi, AG_E sargının çıkışıdır. AG_B son katın yani YG sargısına en yakın katın alt noktası gerilimidir. AG_C orta katların üst ucudur ve son olarak AG_D en içteki katın alt noktası gerilimidir.

Yansıyan gerilimin en yüksek olmasının beklendiği nokta AG_A ve AG_B noktalarıdır. Darbe sönümlenerek AG_E noktasına doğru dağılacaktır.

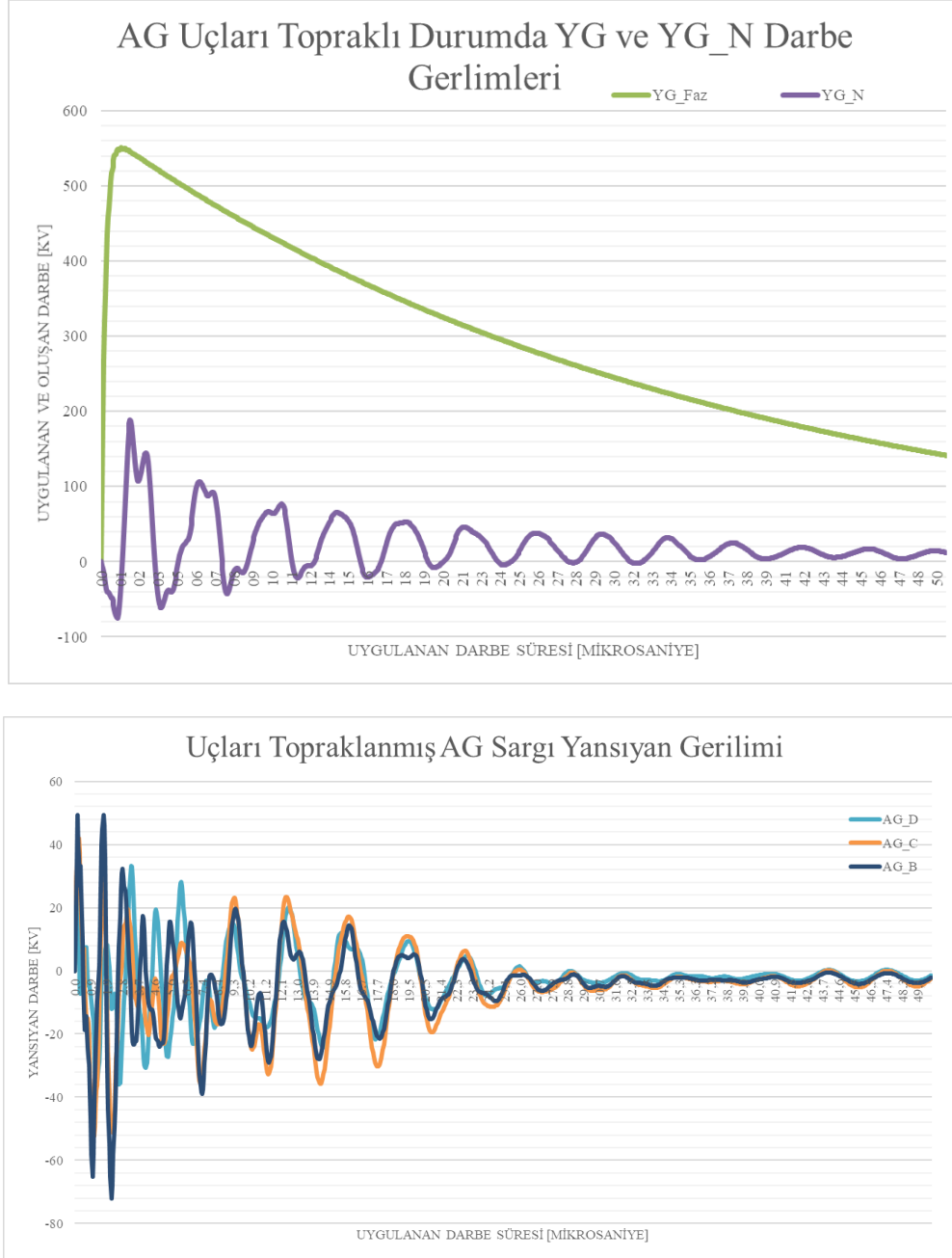
4.1 Uçları Topraklanmış AG Sargısı Durumu

AG sargıları, normal çalışma koşullarında doğrudan şebekeye bağlanabilirler. Bu durumda oluşacak aşırı gerilimler, faz-faz arası gerilimleri, arıza durumunda iki katına kadar çıkartabilmektedir. Bu duruma karşı dayanıklılık, uygulanan darbe testleri ile ölçülmektedir. Bu testlerde ise darbe uygulanan sargı



Şekil 4.4 : Topraklanmış ve darbe uygulanan sargı uçları.

Yansıyan gerilim tepe değeri, AG sargı uçları topraklanmış iken (AG_E ve $AG_A = 0V$) yansıyan darbe şekli, Şekil 4.5'deki gibi olmaktadır. AG sargısı şematik gösterim Şekil 4.3de yapılmıştır. Ayrıca Şekil 4.2'de genel transformatör sargıları dizilimi verilmiştir, baz alınan durumda AG_E ve AG_A uçları topraklanarak YG'den darbe gerilimi uygulanmıştır (Şekil 4.4).



Şekil 4.5 : AG uçları topraklı sargısıyla yansıyan darbe şekli. Üstte: YG sargı girişinde (Yeşil) ve YG sargısı çıkışında (Mor) darbe şekilleri. Altta: AG sargısında endüklenen darbe şekilleri (Mavi = AG_D , Turuncu = AG_C , Lacivert = AG_B noktaları).

Çizelge 4.4’de, Şekil 4.5’de verilen grafiklerin tepe değerleri verilmiştir. Yapılan dayanım hesaplamaları, tepe değeri baz alınarak yapılmaktadır.

Çizelge 4.4 : Düğüm noktası gerilim değerleri.

Düğüm Noktası	Gerilim Değeri [kV]
AG_A	0
AG_B	87.9
AG_C	67.3
AG_D	31.3
AG_E	0

Beklendiği gibi, YG sargısına en yakın katın salınımda olan alt ucunda (üst ucu topraklı) darbe en yüksek çıkmıştır ve 87.9kV olarak hesaplanmıştır. Bu değer bir risk teşkil etmemektedir çünkü 21kV’luk AG sargısının IEC standartlarına belirtilen yıldırım darbe test değeri (LI) 125kV olarak kabul edilir ve sargı standartta bu gerilime dayanacak şekilde tasarlanır [12].

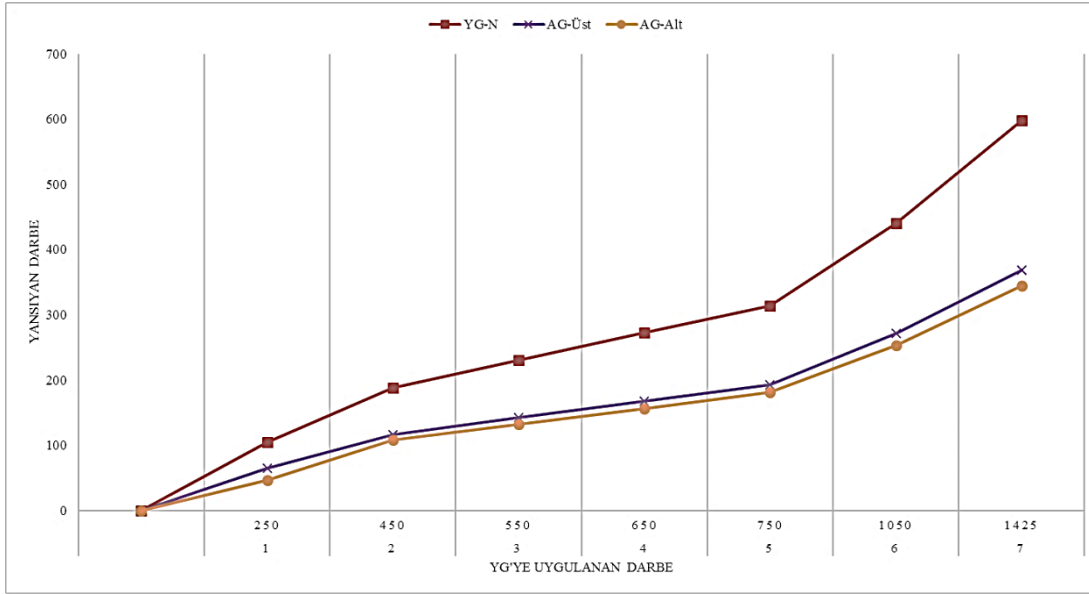
4.2 Farklı YG Darbe Geriliminde AG’ye Yansıyan Darbe Gerilimi İncelenmesi

Denklemler incelendiğinde, yansıyan darbenin sargının fiziksel değerlerinden gelen kapasiteler doğrultusunda dağıldığı görülebilir. Bu da yansıyan darbenin tepe değerinin, aynı transformatörler için uygulanacak farklı darbe tepe değerlerine göre değişeceğini ifade eder. Yani 550kV uygulanan darbeye hesaplanan değer AG_B noktası için 87.9kV oluyor ise; aynı noktaya uygulanacak 650kV darbe geriliminden yansıyan 103.88kV olacaktır. Tüm gerilimlerde öteleme bu şekilde yapılabilir. Ayrıca bu durum, transformatör sargılarına zarar vermeden deneysel çalışmaların yapılmasına da olanak sağlar.

Sargının fiziksel özelliklerine müdahale edilmediği sürece kapasitesi değişmeyecek, kapasitesi değişmediği sürece de yansıyan gerilim aynı kalacaktır. Tabi ki bu durum teoride bu şekildedir. Pratikte transformatör imalatında saatlerce işçilik olduğu için ve seri imalatla birden fazla işçi aynı iş üzerinde çalıştığından, parametreler milimetrik olarak değişmektedir. Bu da kapasitelerin çok ufak da olsa farklı olacağı anlamına gelir.

Farklı YG darbelerinde AG’nin değişiminin karşılaştırılmasının yapılması için uygulanan darbe gerilimi değiştirilerek, en dıştaki AG katının üst ve alt

noktalarındaki gerilim incelenmiştir. Buna ek olarak, YG'nin nötr noktasının da salınımdaki değeri Şekil 4.6'de karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.6 : Değişen darbeye göre yansıyan gerilimin incelenmesi.

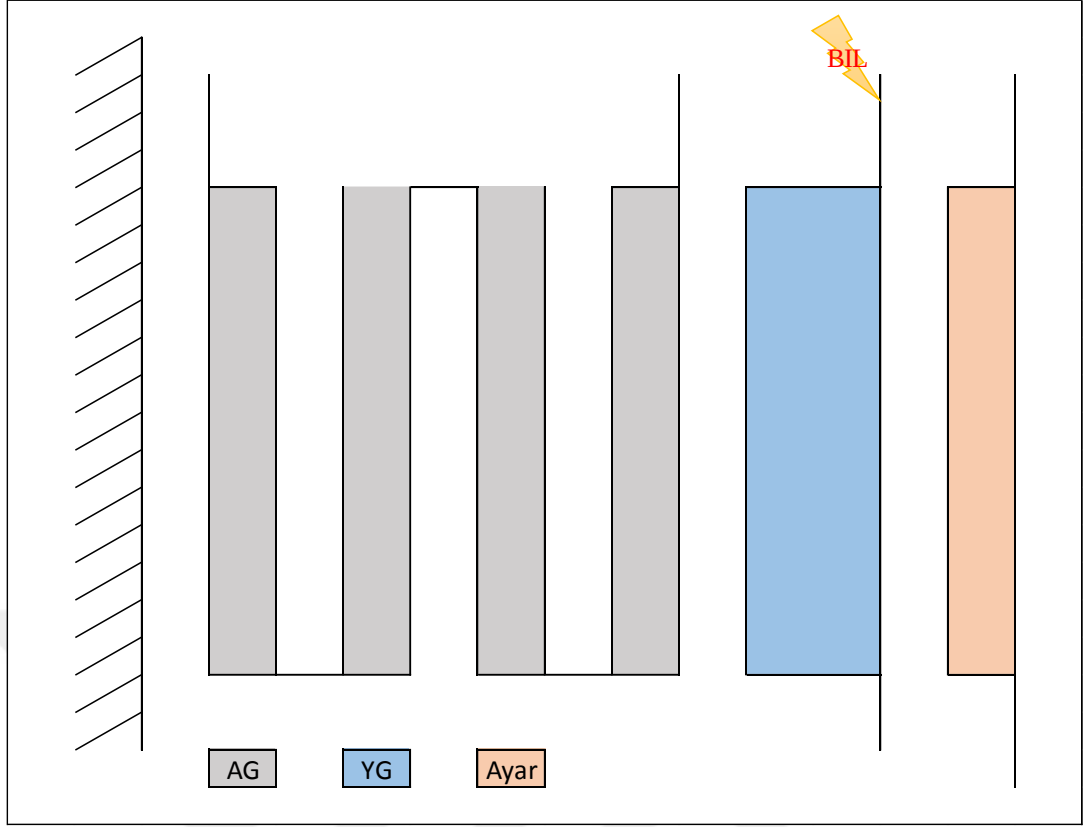
Şekil 4.6'da görüleceği gibi, yansıyan gerilimler, uygulanan gerilim ile doğrusal değişmektedir. YG-N noktası gerilim ise, diskin üzerinde dağılma kapasitesi azaldığı için doğrusala yakın ama darbe arttıkça uzaklaşan bir yapı oluşturmaktadır.

4.3 Uçların Salınımda Olduğu AG Sargısı Durumu

Tüm uçların açık olduğu durum da incelenmelidir. Bu durumun incelenmesinin önemi, darbenin geldiği varsayılan yüksek gerilim sargısının nötr ucunun toprak arızası sırasında veya asimetrik durumlarda karşılaşılabilecek yükselmeye karşı da dayanıklı olmasını öngörmektir. Şekil 4.7'da bu durum görselleştirilmiştir.

Uçların salınımda bırakılması durumu yansıyan gerilimler için büyük risk taşımaktadır. Bu sebeple bu gibi bir durumun olası olması halinde, analizler bu duruma göre yapılarak izolasyon değerleri gerektiği şekilde alınmalıdır, izolasyon seviyeleri üst seviyeden seçilmelidir.

Özellikle AG sargısının iç tarafında uçları açık tersiyer olması durumunda, çok yüksek yansıyan darbe gerilimlerine maruz kalacaktır. Bu veriler aynı zamanda topraklamanın önemini de aktarmaktadır.



Şekil 4.7 : 2. Analizde salınımda bırakılan ve darbe uygulanan uçlar.

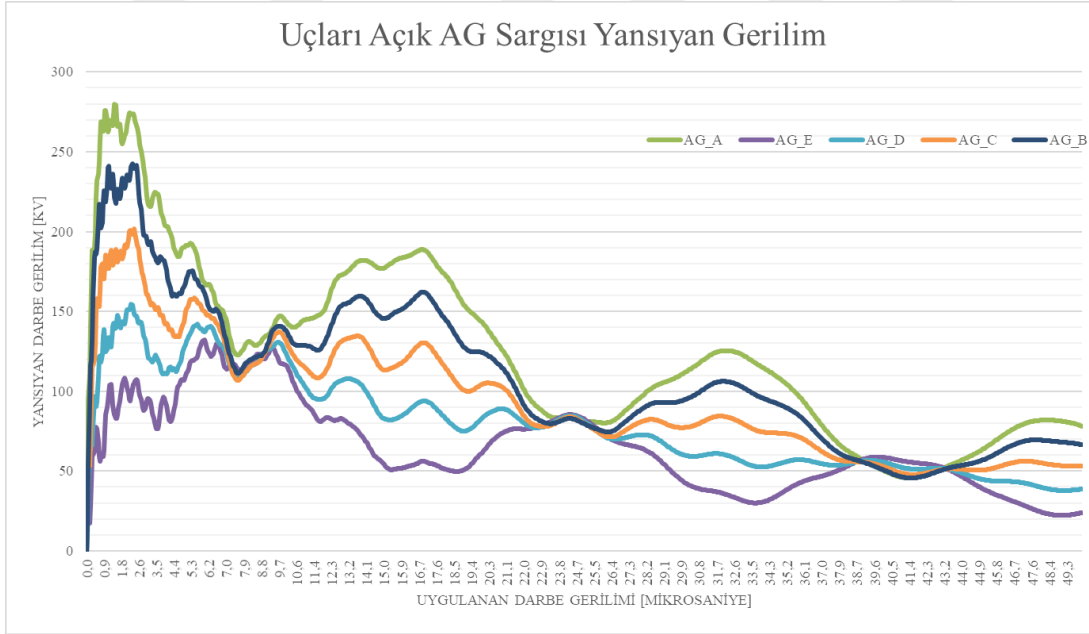
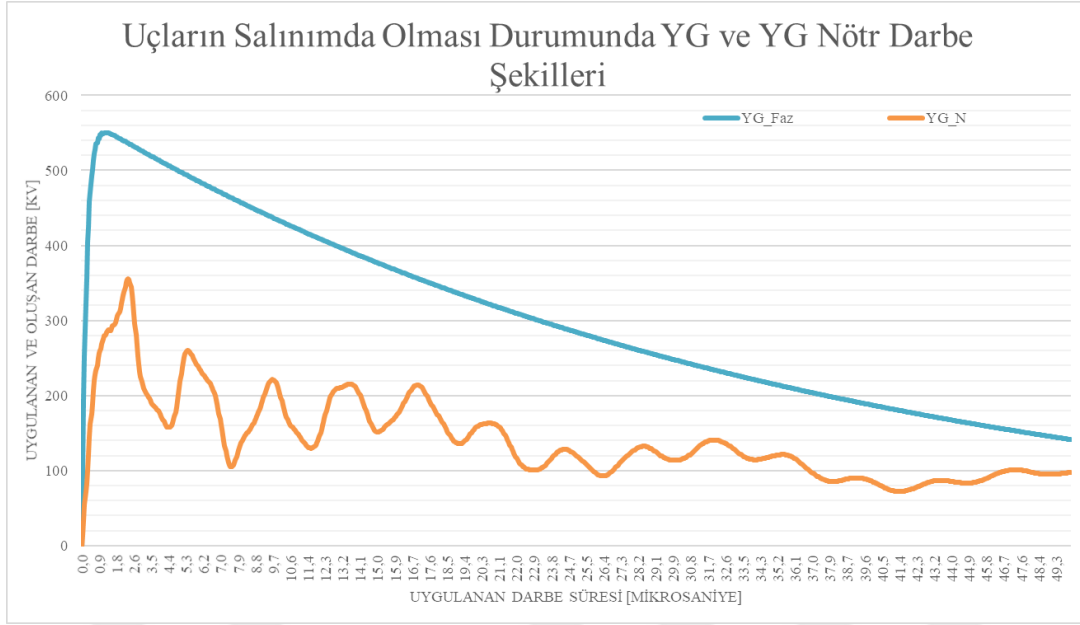
Bu durumda, AG'nin uçları ve YG sargısının nötr ucu salınımda bırakıldığı için, sargı boyunca gerilim daha yüksek değerlere çıkacaktır. Bu durumdaki sonuçlar da Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5 : 2. Analiz düğüm noktası gerilim değerleri.

Düğüm Noktası	Gerilim Değeri [kV]
YG_N	331
AG_A	289
AG_B	250
AG_C	199
AG_D	151
AG_E	127

Çizelge 4.5'de görüldüğü gibi uçlar salınımda bırakıldığında, gerilim değerleri sargının nominal dayanabileceği değerlerden çok daha yüksek çıkmıştır. Çok az rastlanan arızalar olsa dahi, doğrudan transformatörün devre dışı kalmasına sebebiyet vereceğinden, bu tip aşırı gerilimlere karşı önlem alınması zorunlu olmaktadır.

Şekil 4.8'de bu analize ait eğriler verilmiştir.



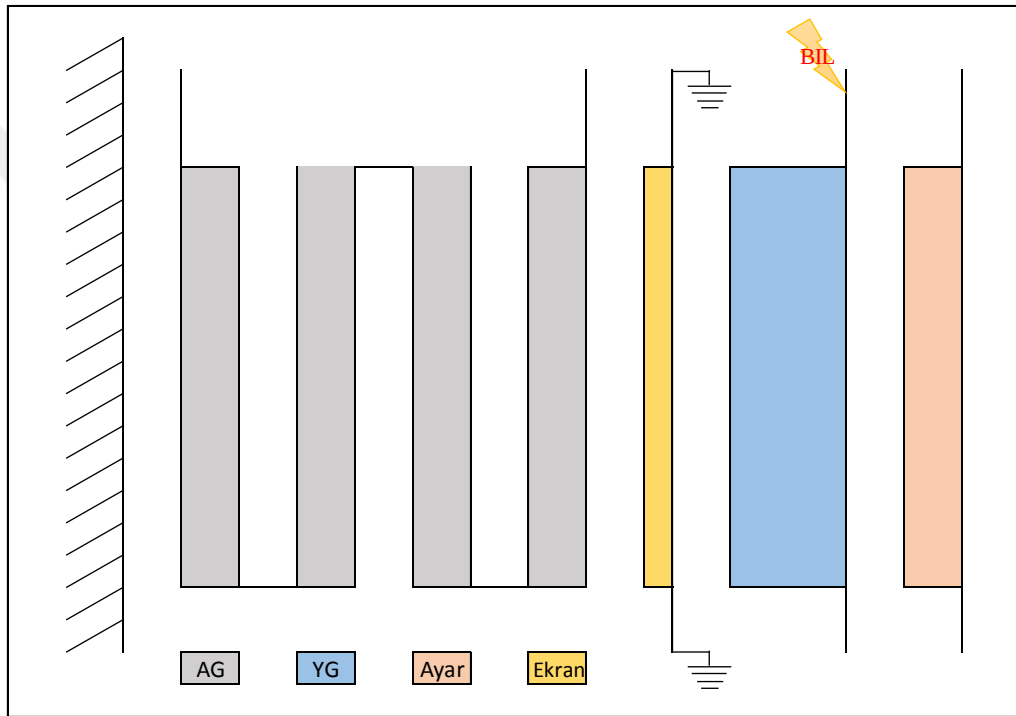
Şekil 4.8 : 2. Analiz yansıyan darbe şekli. Üstte: AG uçları salınımında bırakıldığında YG Giriş (Turkuaz) ve YG-nötr (Turuncu). Altta: AG uçları salınımında olduğu durumda, AG sargısı referans noktalarına yansıyan gerilimler (Yeşil = AG_A, Mor = AG_E, Turkuaz = AG_D, Turuncu = AG_C, Lacivert = AG_B)

Şekil 4.8 yorumlandığında, uçların salınımında olması durumu çok daha riskli bir durum oluşturmaktadır.

Uçların açık ve kapalı olma durumu incelendikten sonra, yansıyan darbe gerilimini etkileyen faktörler belirlenecek ve bu durumların yansıyan darbe gerilimlerini nasıl etkilediği açıklanacaktır.

4.4 Endüktif ve Kapasitif Yansıyan Darbeler

Yansıyan darbe gerilimi, temel olarak endüktif ve kapasitif olarak ikiye ayrılır [28]. Yansıyan kapasitif ve endüktif darbeleri analiz etmek için; sargıların arasına topraklanmış bir ekran yerleştirilecektir. Analiz programına 3. Bir sargı eklenerek ve bu sargı topraklanarak bu etki incelenebilir. Bu sayede kapasitif etki yok sayılarak, sadece endüktif etki ölçülebilir. Burada eşdeğer devre kapasite olarak değil, endüktif olarak etkilenecektir. Endüktif etki daha net görülebilmesi için AG uçları açık bırakılmıştır. Şekil 4.9’da şematik gösterim yapılmıştır.



Şekil 4.9 : AG-YG arası ekranlanmış sargılar ve darbe uygulanan uç.

Çizelge 4.2’de verilen parametrelerden; YG sargısı iç çap değeri 949mm ve ayar sargısı iç çap değeri 1229mm olarak değiştirilmiş ve ek bir ekranlama sargısı AG sargısından 12mm dışarıya eklenmiştir.

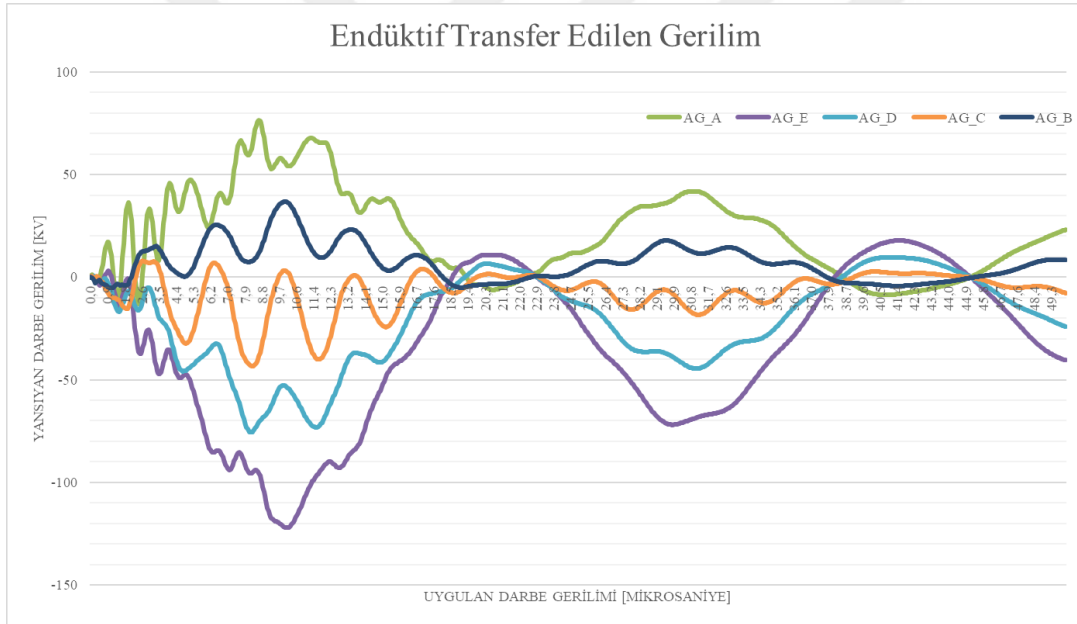
Bu durumda hem darbe şekli normalden farklı olmuş, daha fazla bozulmuş ve endüktif etkiden dolayı normal darbenin tepe değeri süresinden kaymış şekilde bulunmaktadır. Daha çok salınım şeklinde etki etmektedir, belirli bir frekansı olan gerilime benzemiştir. Sonuçlar Çizelge 4.6’de verilmiştir.

Grafik çıktısı ise Şekil 4.10’da paylaşılmıştır.

Çizelge 4.6 : AG-YG arası ekranlanmış durumda gerilim değeri.

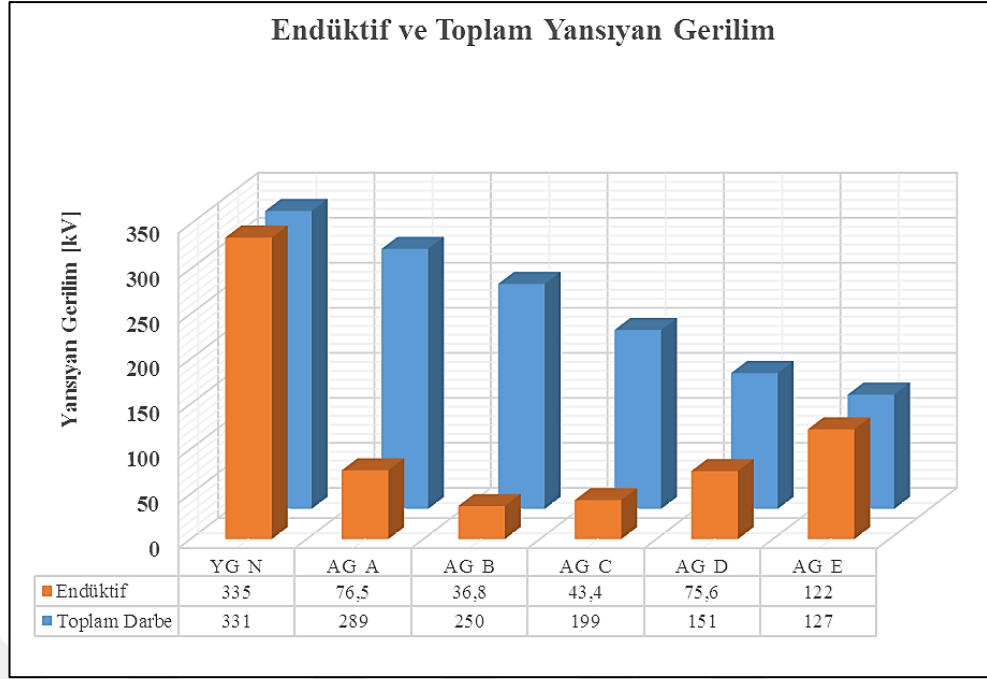
Düğüm Noktası	Gerilim Değeri [kV]
YG_N	335
AG_A	76.5
AG_B	36.8
AG_C	43.3
AG_D	75.6
AG_E	122

YG-N değeri değişmeyecektir, ekranın nötr ucuna herhangi bir etkisi yoktur. YG sargısında darbe dağılımı olduğu gibi kalacak ve uçlar açık olan durumla yaklaşık olarak aynı olacaktır. Burada farklılık, salınım etkisinden dolayı AG sargının YG'ye en uzak kısmında darbenin etkisi artarak ilerlemiş ve büyümüştür. Diğer analizlerde sargı sonuna doğru sönümlenme gözlemlenmiştir.



Şekil 4.10 : AG-YG arası ekranlanmış durumda yansıyan darbe şekli (Yeşil = AG_A, Mor = AG_E, Turkuaz = AG_D, Turuncu = AG_C, Lacivert = AG_B).

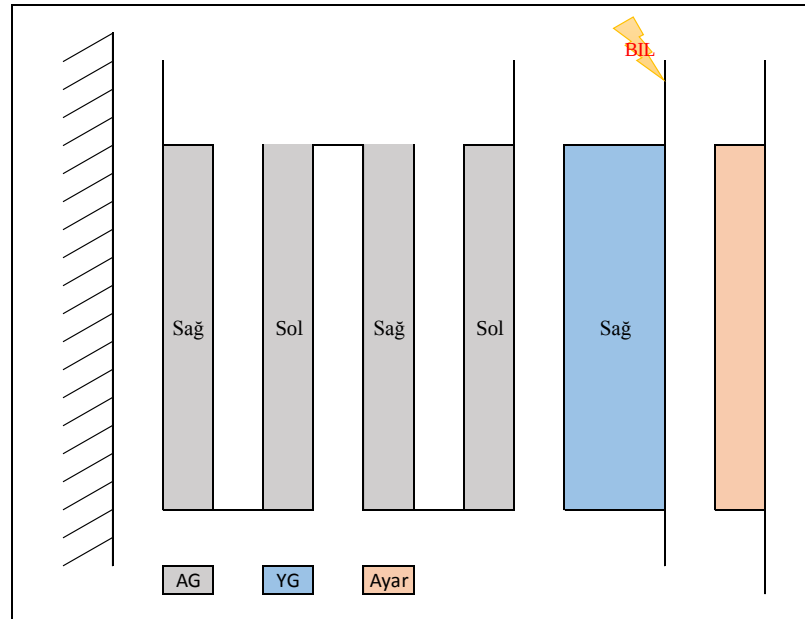
Endüktif etki ile toplam yansıyan darbeyi aynı grafikte incelediğimizde (Şekil 4.11); açıkça yansıyan etkinin büyük kısmının kapasitif etkiden geldiği gözlemlenmektedir. Bu sebeple tezin önceki kısımlarında endüktif etkinin çoğu kaynakta ihmal edilmesinin tutarlı olduğu bu örnekle açıklanmıştır. Aynı şekilde, endüktif etkiye kıyasla kapasitif etkiye karşı önlem almak, yansıyan gerilimler için daha etkili olacaktır sonucuna varılabilir.



Şekil 4.11 : Endüktif ve toplam yansıyan gerilimlerin grafik gösterimi.

4.5 Sarım Yönünün Yansıyan Darbeye Etkisi

İlk yapılan analizde, YG sargısı ile AG sargısının dış katı sağ sarım yönünde yani aynı sarım yönünde verilmiştir. Bu analizde de sarım yönünün tersine çevrilmesinin yansıyan darbeye etkisi incelenecektir. Hazırlanan model Şekil 4.12’de gösterilmiştir.



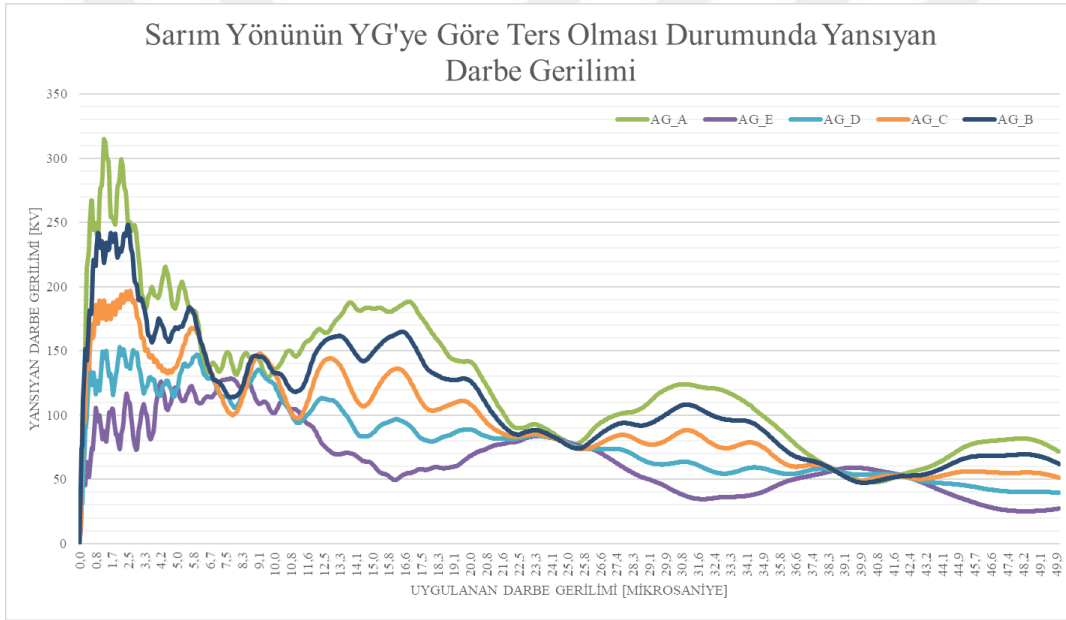
Şekil 4.12 : Sarım yönünün yansıyan darbeye etkisini incelemek için kurulan yapı.

Yapılan yıldırım darbe analizleri sonucu Çizelge 4.6'de ve Şekil 4.13'de belirtilmiştir. YG_N'e sarım yönünün bir etkisi yoktur.

Çizelge 4.6 : AG'nin sarım yönü ters olması durumunda yansıyan gerilim değerleri.

Düğüm Noktası	Gerilim Değeri [kV]
YG_N	337
AG_A	314
AG_B	248
AG_C	196
AG_D	153
AG_E	128

Analiz sonuçlarına göre YG_N ucuna sarım yönünün bir etkisi yoktur.



Şekil 4.13 : AG'nin sarım yönü ters olması durumunda yansıyan gerilim grafikleri (Yeşil = AG_A, Mor = AG_E, Turkuaz = AG_D, Turuncu = AG_C, Lacivert = AG_B).

Çizelge 4.7 ve Şekil 4.13'den anlaşılan, yansıyan darbenin AG üzerindeki dağılımında büyük farklılıklar yoktur fakat YG'ye en yakın olan en dış kattaki sarımın tepe noktasında, yani AG_A'da darbe değeri çok daha riskli üst değerlere çıkmıştır. U_m değeri 72.5kV'luk bir sargı gibi davranmaktadır, bu da 325kV yıldırım darbe, 140kV AC darbeye dayanıklı olmak anlamına gelmektedir. Özellikle en dış katta ek önlemler alınmazsa delinme riski çok yüksektir. Bu önlemler yaka eklemek, ekran eklemek ya da ara yapı izolasyonunu değiştirmek gibi, darbe etkisini düşürücü önlemler olabilir.

4.6 Bağlantı Grubunun Yansıyan Darbeye Etkisi

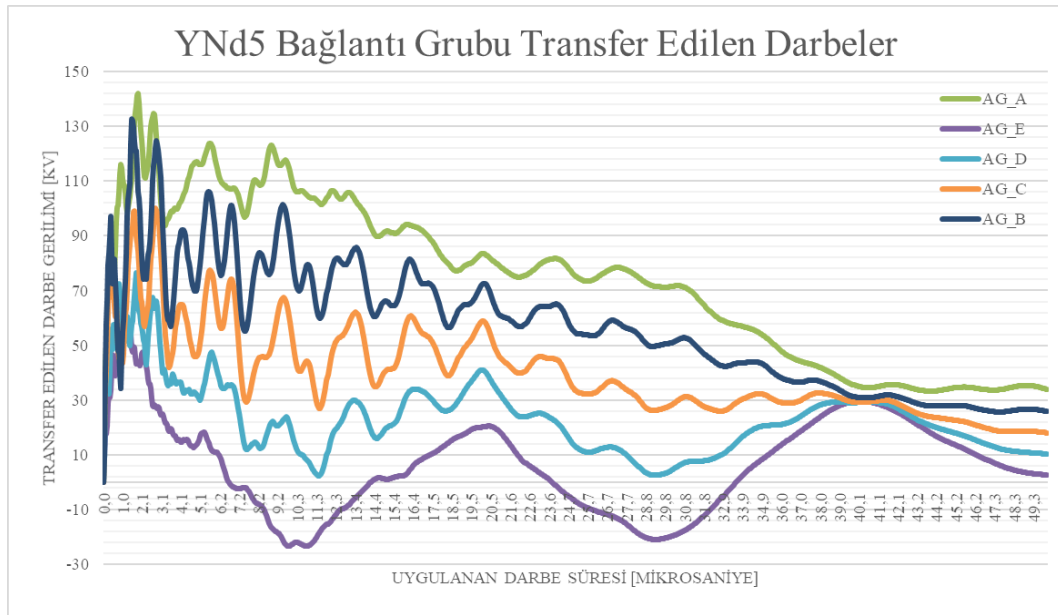
Temelinde sarım yönünün değişmesi ile aynı olarak düşünülen bağlantı grubu değişimi, sistem üç fazlı olarak incelendiğinde farklı sonuçlar ortaya çıkartabileceğinden tezde incelenmiştir. Bağlantı uçlarının değişimi, aktif kısım içindeki sargılar arası bağlantının değişmesi ile sağlanır. Uçların bağlantıları değiştiği zaman, elektriksel olarak taşınan darbelerin etkiledikleri noktalar da değişecektir.

Standart olarak alınan transformatörün bağlantı grubu YNd11'dir. Alternatif bağlantı grupları YNd5 ve YNd7 de denenmiştir.

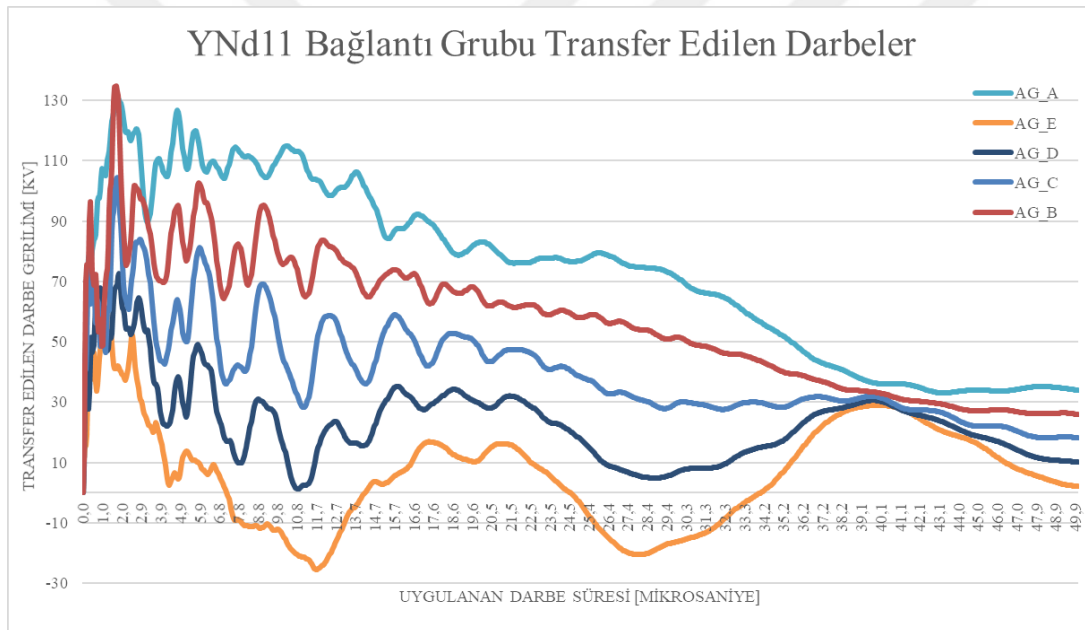
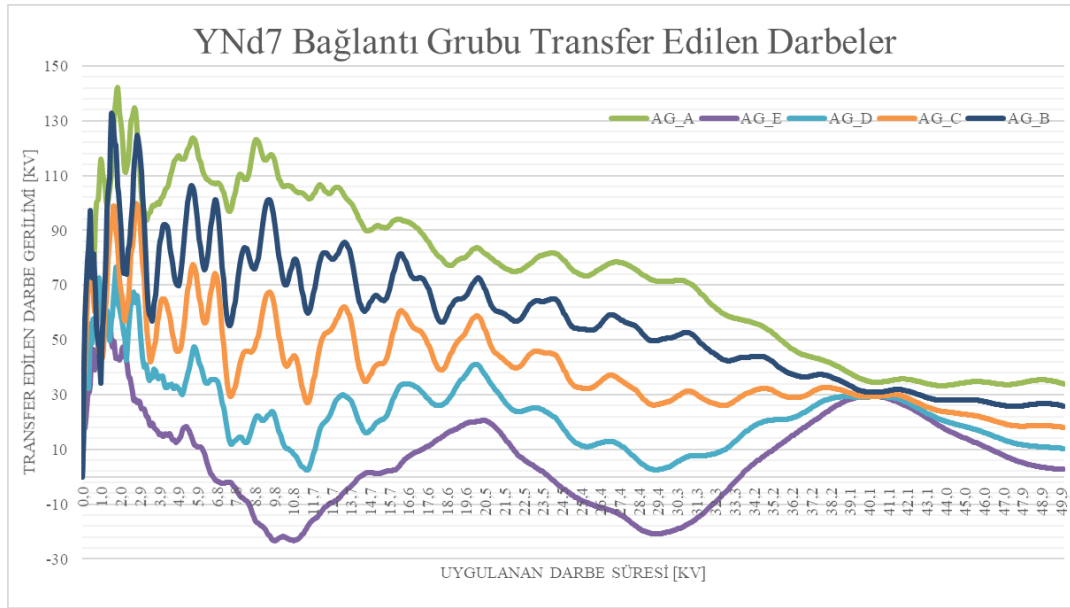
Çizelge 4.8 : AG'nin sarım yönü ters olması durumunda yansıyan gerilim değerleri.

Düğüm Noktası	YNd5 Gerilim Değeri [kV]	YNd7 Gerilim Değeri [kV]	YNd11 Gerilim Değeri [kV]
YG_N	335	335	331
AG_A	291	291	289
AG_B	250	250	250
AG_C	204	204	199
AG_D	157	157	151
AG_E	129	129	127

Analizlerden elde edilen sonuçlar Çizelge 4.8 ve Şekil 4.14 ve 4.15'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.14 : YNd5 bağlantı grubunda yansıyan darbeler (Yeşil = AG_A, Mor = AG_E, Turkuaz = AG_D, Turuncu = AG_C, Lacivert = AG_B).

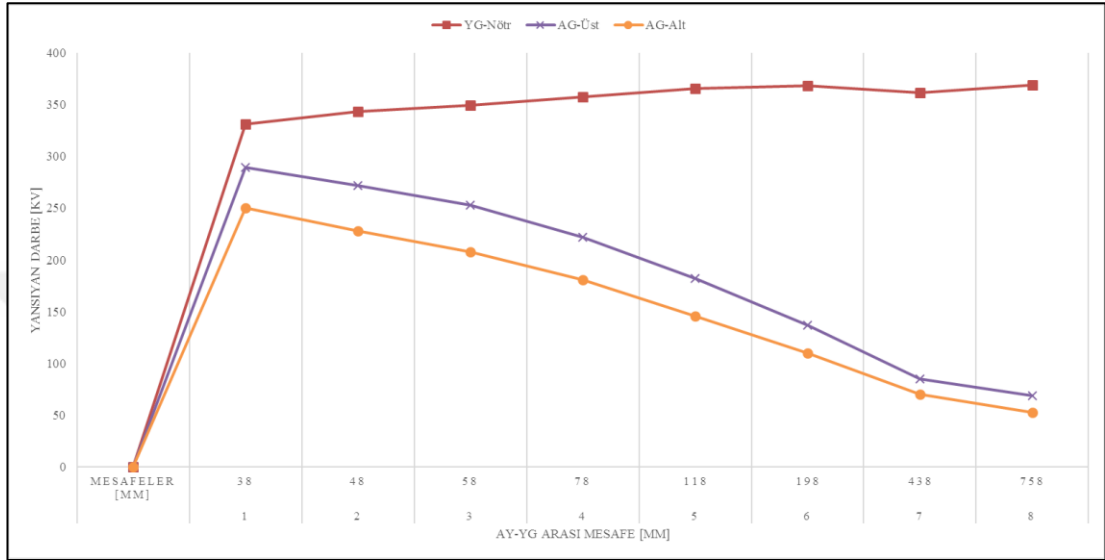


Şekil 4.15 : YNd7 (a) ve YNd11 (b) bağlantı grubunda yansıyan darbeler. Üstte: YNd7 AG bağlantı grubu durumunda yansıyan darbeler (Yeşil = AG_A, Mor = AG_E, Turkuaz = AG_D, Turuncu = AG_C, Lacivert = AG_B), Altta: YNd11 AG bağlantı grubu olması durumunda yansıyan darbeler (Turkuaz = AG_A, Turuncu = AG_E, Lacivert = AG_D, Mavi = AG_C, Kırmızı = AG_B)

Çizelge 4.8 yorumlandığında, tek sayılı bağlantı grubu değişimlerinin darbe değerine bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir. Eğer çift sayılı bağlantı grupları denense idi, bir önceki analizdeki gibi YG ile AG'nin sarım yönü değişeceği için yansıyan darbeye etkisi çok olacaktı. Tek bağlantı gruplarında ise; AG en dış kat sarım yönü ile YG sarım yönü aynı olduğundan darbeye bir etkisi ihmal edilebilecek seviyede gözlemlenmiştir (~2kV).

4.7 AG ile YG Arası Mesafenin Yansıyan Gerilime Etkisi,

Kapasitif eşdeğer devrede, yansıyan gerilim için en önemli parametrelerden birisi sargılar arası mesafedir. Bu mesafenin yansıyan gerilimi nasıl etkilediği, kademeli olarak YG sargısı ile AG sargısı arasındaki mesafe açılarak denenmiştir. Şekil 4.16 yansıyan darbelerin mesafeye göre etkisini göstermektedir.



Şekil 4.16 : YG-AG Arası mesafeye göre yansıyan darbenin değişimi (Kırmızı = YG-Nötr Gerilimi, Mor = AG-Üst, Turuncu = AG_Alt Gerilimi).

YG-N ucunun gerilimi mesafeden etkilenmeyecektir. Bu gerilim, YG sargısının seri kapasitesine göre değişmektedir. Oysaki mesafe arttırımı YG-AG arasında yapıldığı için, paralel kapasiteler değiştirilmiştir ve dolayısı ile sadece yansıyan gerilim değiştirilmiştir. Artan mesafe ile yansıyan darbeye lineere yakın bir düşüş elde edilmektedir. Belirli bir mesafeden sonra (400mm) düşüş iyice azalmaktadır.

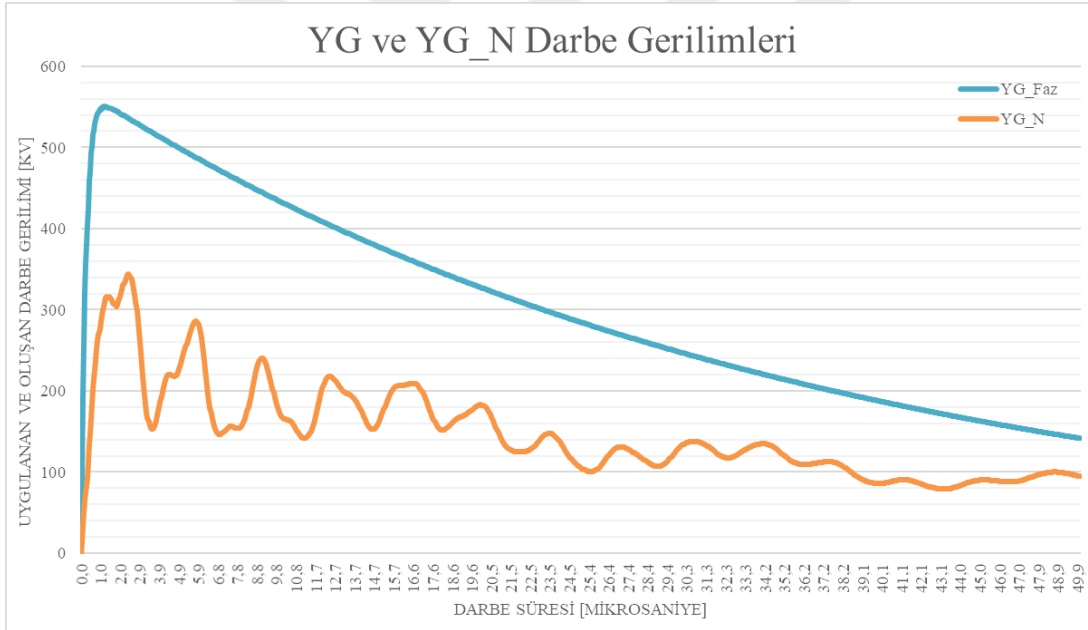
Yansıyan darbe gerilimini düşürmek için sargılar arası mesafeyi arttırmak mantıklı bir çözüm değildir. Çünkü mesafenin açılması demek, transformatörün büyümesi anlamına gelecektir ve bu da maliyet ve hacim olarak transformatörü büyütecektir. Bu da yağ ve kazan miktarında artış anlamına gelmektedir. Toplam ağırlık da artacaktır.

İç çap ve sargılar arası mesafeye göre yansıyan darbelerin değişimi Çizelge 4.9'de özetlenmiştir. İkinci sütundaki değerler, Çizelge 4.2'den değiştirilen değerlerdir, diğer tüm fiziksel parametreler aynıdır.

Çizelge 4.9 : AG ile YG arasındaki mesafenin değişmesinin yansıyan darbeye etkisi.

AG-YG Arası Mesafe	YG İç Çap [mm]	YG-N Gerilim Değeri [kV]	AG-Üst Yansıyan Gerilim [kV]	AG-Alt Yansıyan Gerilim [kV]
38	909	331	289	250
48	929	343	272	228
58	949	349	253	208
78	989	357	222	181
118	1069	365	182	146
198	1229	368	137	110
438	1709	361	85	70
758	2349	369	69	53

Artan mesafe ile darbe şekli de bozulmaktadır. Bunun sebebi mesafe ile endüktif devrenin de değişmesidir. Şekil 4.17’de YG-N’deki değişimin olmadığı görülmektedir. Tüm mesafelere göre yansıyan darbe grafikleri EK-2’de ayrı ayrı verilmiştir.



Şekil 4.17 : YG-AG arası artan mesafeye göre yansıyan darbenin değişimi. YG ve YG-N darbe gerilimleri (AG mesafesine göre değişmemektedir). Turkuaz = YG_Faz, Turuncu = YG_N

Şekil 4.17 ve EK-B incelendiğinde; artan mesafe ile birlikte yansıyan gerilimin düştüğü gözlemlenmektedir. Bu yöntem, yansıyan darbeyi düşürmede kullanılabilir ama etki miktarı zayıftır.

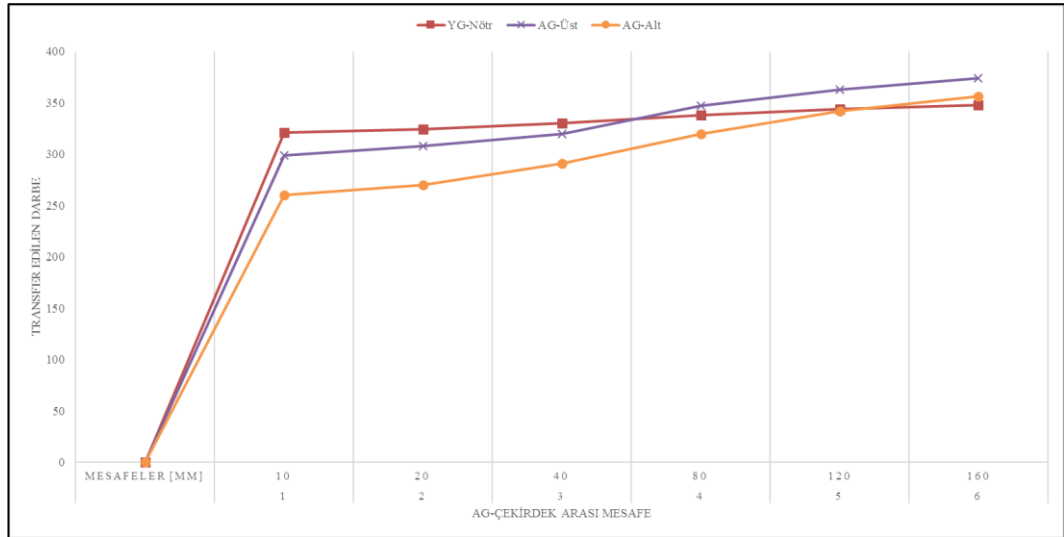
4.8 AG İle Çekirdek Arası Artan Mesafeye Göre Yansıyan Darbenin Değişimi

Bir sonraki simülasyonda; AG-YG arası mesafe değişiminin yansıyan darbeye etkisi incelenmiştir. Temel olarak kapasitif devre değiştirilerek, yansıyan darbenin şekli ve genliği değişmektedir.

Çizelge 4.10 : AG-Çekirdek arası mesafenin yansıyan darbeye etkisi.

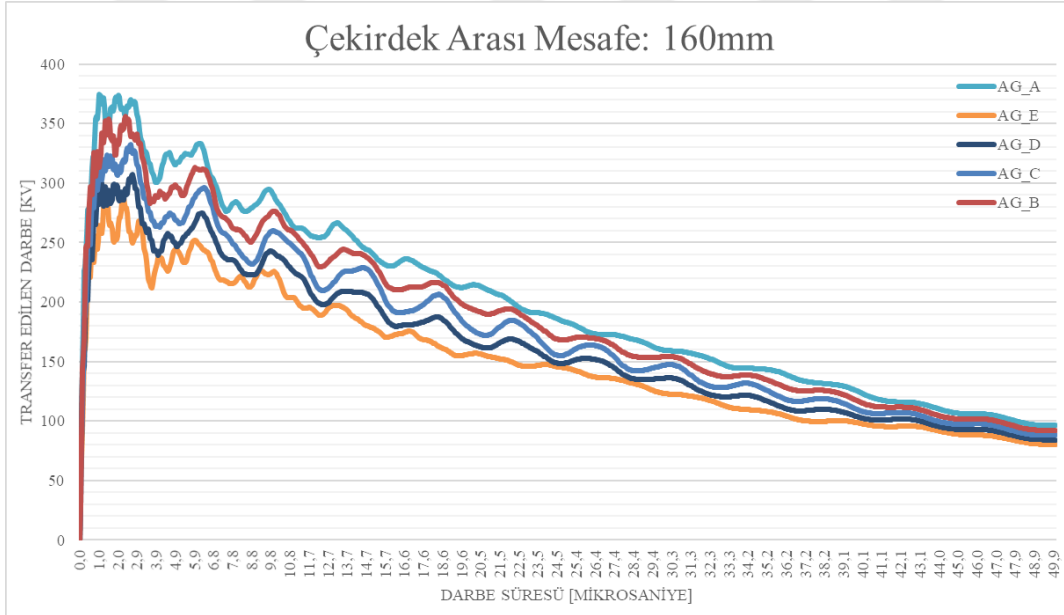
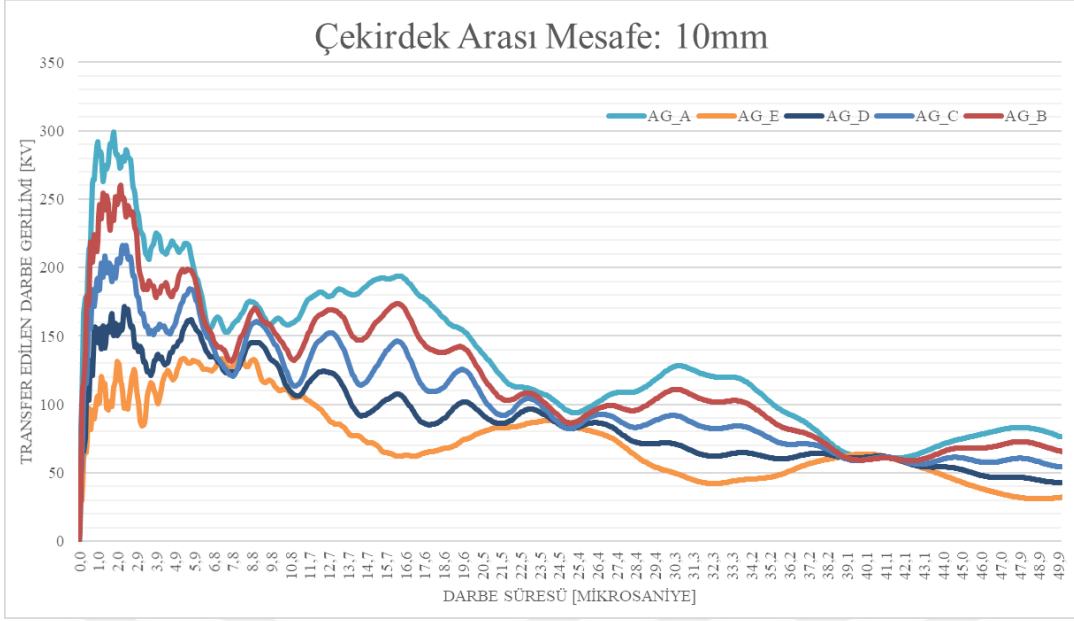
AG-Çekirdek Arası Mesafe	AG İç Çap [mm]	YG-N Gerilim Değeri [kV]	AG-Üst Yansıyan Gerilim [kV]	AG-Alt Yansıyan Gerilim [kV]
10	661	321	299	260
20	671	324	308	270
40	691	330	320	291
80	731	338	347	320
120	771	344	363	342
160	811	348	374	356

Çizelge 4.10’da tüm değiştirilen değerler verilmiştir. Değişmeyen YG sargısı seri kapasitesi, YG-N noktasının gerilim değerini sabit tutmuştur. Çizelge 4.10’da ikinci sütunda verilen değerler, Çizelge 4.2’deki referans değerlerden değiştirilmiş parametrelerdir.



Şekil 4.18 : AG-Çekirdek arası mesafeye göre yansıyan darbe değişimi (Kırmızı = YG-Nötr, Mor = AG-Üst ve Turuncu = AG-Alt gerilimi).

Yansıyan darbe büyük oranda YG-AG arası mesafeye bağlı olduğu önermesi yapılmış idi, bu analizde ise AG ile toprak arası kapasite değiştirilerek yansıyan darbenin değişimi gözlemlenecektir.



Şekil 4.19 : Çekirdek arası mesafeye bağlı en büyük ve en küçük mesafede yansıyan gerilimlerin değişimi. Üstte: AG-Çekirdek arası mesafe 10mm iken darbe şekilleri
Alta: AG-Çekirdek arası mesafe 160mm iken darbe şekilleri (Turkuaz = AG_A, Turuncu = AG_E, Lacivert = AG_D, Mavi = AG_C, Kırmızı = AG_B)

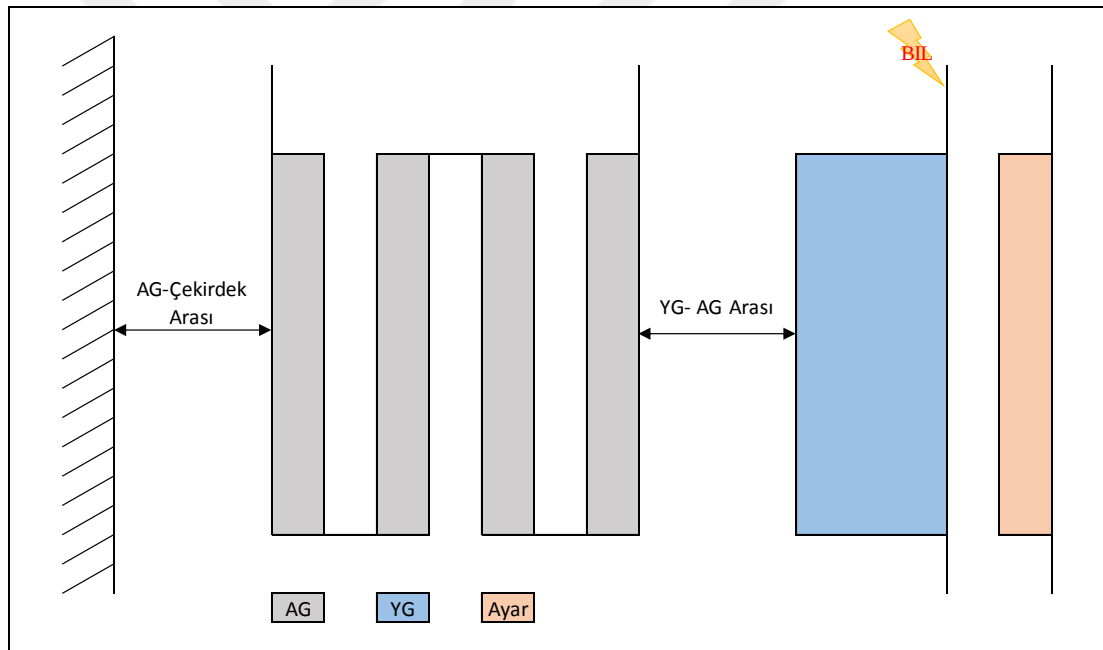
AG-YG arası mesafe değişmese de, AG-çekirdek arası mesafe değişince sargıların iç çapları değişeceği için, AG-YG arası paralel kapasite değerleri bundan etkilenecektir.

Sonuçlar incelendiğinde ise çekirdek ile AG sargısı arasındaki mesafenin değişiminin ters etki yaptığı anlaşılmaktadır. Darbe şekli ise çok değişmemektedir, EK-C’de tüm darbe şekilleri verilmiştir. EK-C’deki grafiklerde; AG’nin alt ve üst sargı gerilimleri ise artan mesafe ile birlikte artmıştır. Bunun sebebi AG sargısının toprağa karşı

kapasitesinin, artan çekirdek arası mesafe ile büyümesidir. C_1 kapasitesi arttığı için, AG'nin üzerine aldığı yansıyan gerilim de artmaktadır.

4.9 Değişen Kat Başına Sarım Sayısına Göre Yansıyan Darbelerin İncelenmesi

Kapasitif eşdeğer devreye sarım sayısının etkisi çok büyük olacaktır. Bu değişimi incelemek için AG sargısının kat başına sarım sayısı değiştirilmiştir. Bu üst üste daha fazla sarım elde edileceği anlamına gelmektedir. Kat sayısı sabit tutulmuştur, sadece iletkenin fiziksel boyutları değiştirilerek (aksiyel yükseklik) gerilim sabit tutulmuştur. Sargı boyu da değiştirilmemeye çalışılmıştır fakat belirli sarımdan sonra bunu sağlama çok zordur. Bu sebeple sargı boyu deneysel olarak mantıksız değerlere (350mm gibi) düşürülmüştür. Şekil 4.20'de analizlerde değiştirilen mesafeler aktarılmıştır.



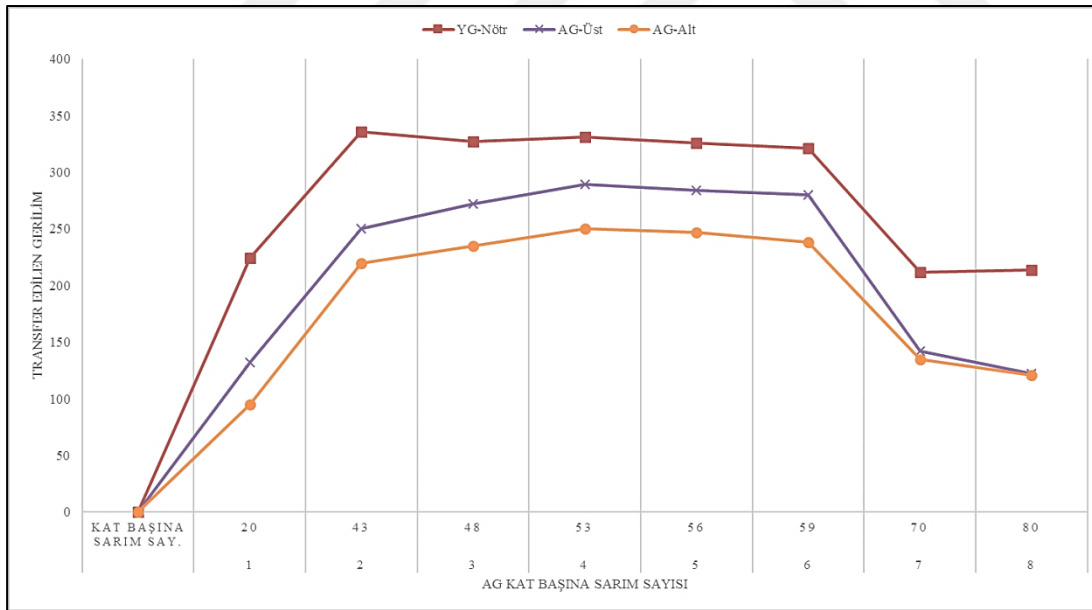
Şekil 4.20 : Sargılar arası ve çekirdek arası mesafenin şematik gösterimi.

Alçak gerilim sargısında CTC iletken kullanılmıştır. 400A ve üstü akımlarda CTC iletken, girdap kayıplarından dolayı daha avantajlı olmaktadır. Bir sarımda 2 adet aksiyel paralel iletken kullanılmıştır. Çoklu CTC kullanmak yerine, CTC demetlerini de parçalara bölmek işçilik ve iletken maliyeti açısından daha avantajlı olmaktadır. Yekpare çoklu iletken üretimi zorlaştığı için maliyeti de artmaktadır. Çizelge 4.11'da analiz için alınan değerler verilmiştir. İlk sütundaki değerler, Çizelge 4.2'de değiştirilen AG sargı parametreleridir.

Çizelge 4.11 : AG sarım sayısına göre değişen yansıyan darbe gerilimleri.

AG Kat Başına Sarım Sayısı	AG Sargı Yüksekliği [mm]	AG İletken Aksiyel Yüksekliği (h) [mm]	YG-N Gerilim Değeri [kV]	AG-Üst Yansıyan Gerilim [kV]	AG-Alt Yansıyan Gerilim [kV]
20	354	3,8	224	132	95,2
43	1130	5,6	336	250	220
48	1350	6,3	327	272	235
53	1600	6,7	331	289	250
56	1670	6,7	326	284	247
59	1845	7,1	321	280	238
70	2390	7,5	212	142	135
80	2900	8,5	214	122	121

Bu analizde eşdeğer devrede hem AG hem de YG sarım sayısı değiştiği için, değişimlerin büyük olduğu yerlerde (örneğin 59'dan 70'e geçişlerde ve 20'den 43'e geçişte), yansıyan darbeye de değişiklik büyük olmuştur. Şekil 4.21 tüm sonuçları toparlanmış olarak göstermektedir. Eşdeğer devrenin çok fazla parametresi değiştiği için, doğrudan bir yorum yapmak zordur. Fakat kat başına sarım sayısının ufak değişimlerinin, yansıyan darbeye etkisinin düşük olduğu söylenebilir.



Şekil 4.21 : AG kat başına sarım sayısına göre yansıyan darbe değişimi (Kırmızı = YG-Nötr, Mor = AG-Üst ve Turuncu = AG-Alt gerilimi).

Bir önceki analizde aynı anda birden fazla parametre değiştiği için tutarlı bir çalışma olmamıştır. Bu sebeple; aynı fiziğe daha fazla sarım sığdırılarak bir analiz yapılması uygun görülmüştür. Bu analiz için sargı boyu 1580mm civarlarında tutulmuştur. Sarım gerilimi sabit tutulmuş (98.13V/sarım) ve bu sayede YG kapasitif eşdeğer

devresi tamamen aynı elde edilmiştir. Sadece AG değiştirilmiş, bu da AG'nin sarım sayısı ile birlikte gerilimi de değiştirilerek elde edilmiştir. Alınan değerler ve sonuçlar Çizelge 4.12'de verilmiştir. Bu parametreler, Çizelge 4.2'deki parametreler üzerinden değiştirilen AG sargı büyüklüklerini ifade etmektedir.

Çizelge 4.12 : Aynı fiziğe dağıtılmış AG sargı parametreleri.

AG Kat Başına Sarım Sayısı	AG İletken Yüksekliği [mm]	AG Sargı Gerilimi [kV]
40	9.2	15.7
45	8.1	17.7
50	7.2	19.7
53	6.7	21.0
60	5.9	23.6
65	5.4	25.6
70	5	27.5

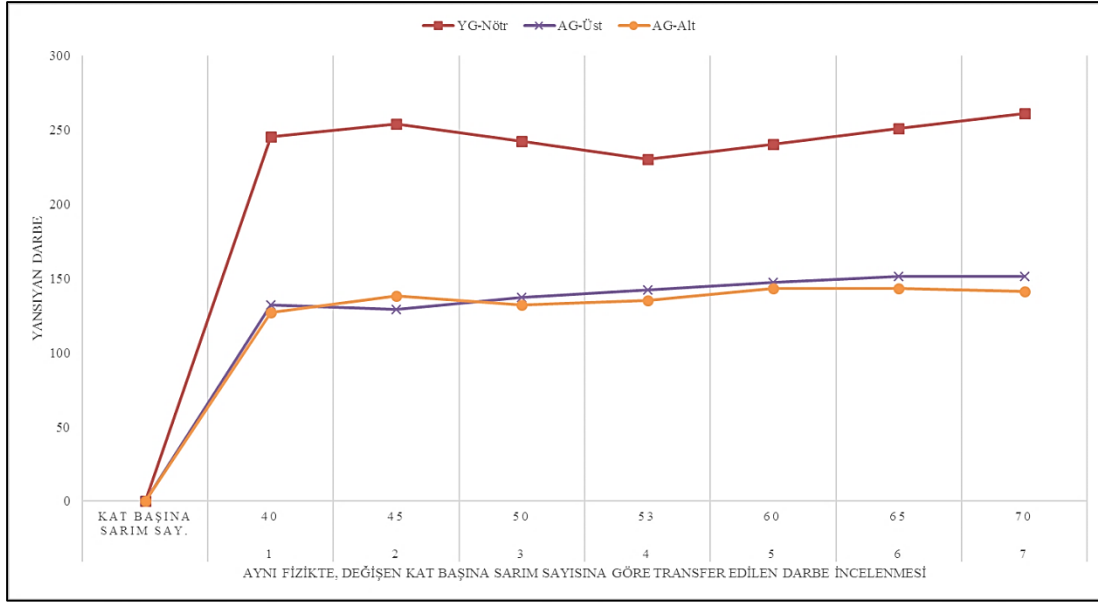
Çizelge 4.12'daki değerler ile yapılan analizler ile elde edilen grafik ve yansıyan gerilimler Çizelge 4.13 ve grafik Şekil 4.22'de paylaşılmıştır.

Çizelge 4.13 : Aynı fiziğe sığdırılmış, farklı sarım sayılarına göre yansıyan gerilimler.

AG Kat Başına Sarım Sayısı	YG-N Gerilim Değeri [kV]	AG-Üst Yansıyan Gerilim [kV]	AG-Alt Yansıyan Gerilim [kV]
40	245	132	127
45	254	129	138
50	242	137	132
53	230	142	135
60	240	147	143
65	251	151	143
70	261	151	141

Grafik ve değerler incelendiğinde; aynı fizikteki yapıda yansıyan gerilimin sarım sayısı ile arttığı gözlemlenmiştir. Artış çok yavaş olmaktadır bu sebeple sarım sayısı bağımlı olarak yansıyan darbeye müdahale etmek çok mantıklı değildir.

AG_Alt ucunda ise yansıyan gerilim doğrusal olmayan şekilde değişmektedir. Bu sargının kapasitif eşdeğer devresinin, sarım sayısına değişme oranı dolayısı ile uca göre daha farklı değişmektedir.



Şekil 4.22 : Aynı fiziğe sığdırılmış, farklı sayım sayılarına göre yansıyan gerilimler grafiği. (Kırmızı = YG-Nötr, Mor = AG-Üst ve Turuncu = AG-Alt gerilimi).

Bu grafikte YG-N noktası incelendiğinde; 53. Sarımda darbe dağılımının en düşük değerine ulaştığı görülmüştür. Bu da aslında sargının kapasite dağılımının en optimum olduğu anlamına gelebilir. Sadece buradan bir yorum yapmak zor, çünkü sargının optimum değerinde olması demek; hem darbe dağılımı olarak, hem maliyet ve ağırlık olarak optimum değerinde olması anlamına gelir. Aynı zamanda yeterli güvenlik faktörleri ile aşırı gerilim ve kısa devrelere karşı korunması gerekmektedir.

4.10 Kat Başına Sarım Sayısı Referansla Yansıyan Darbenin Dağılımı

Bu analizde sarım gerilimi sabit tutulmuş, AG sarım sayısı ile birlikte kat başına sarım sayısı değiştirilmiştir. YG sargısı sabit bırakılırken, AG sargısı boyu, gerilimi, iletken aksiyel uzunluğu ve sarım sayısı değişmiştir.

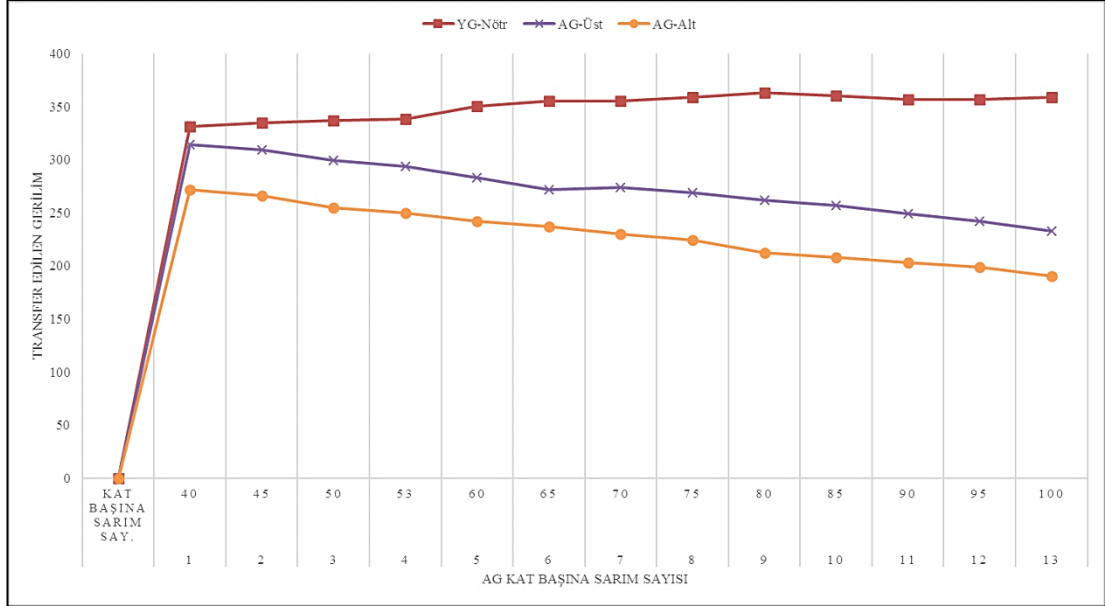
Bu analiz; fiziksel olarak, yansıyan darbeye dağılması için daha çok alan bırakma anlamına gelir. Bu yüzden artan sarım sayısı ile birlikte yansıyan darbenin azalması beklenecektir. Kat başına sarım sayısını arttırmak, işçiliğe de negatif etki yapacaktır. Bu sebeple çok tercih edilmesi beklenen bir metot olmayacaktır.

Çizelge 4.14’de giriş parametreleri ve analiz sonuçları verilmiştir. Bu çizelgedeki ilk ve ikinci sütun değerleri, Çizelge 4.2’de değiştirilen parametrelerdir. Diğer tüm parametreler sabit bırakılmıştır.

Çizelge 4.14 : AG sarım sayısına göre değişen yansıyan darbe gerilimleri.

AG Kat Başına Sarım Sayısı	AG Sargı Yüksekliği [mm]	YG-N Gerilim Değeri [kV]	AG-Üst Yansıyan Gerilim [kV]	AG-Alt Yansıyan Gerilim [kV]
40	1190	331	314	272
45	1338	335	309	266
50	1486	337	299	255
53	1590	338	294	250
60	1782	350	283	242
65	1930	355	272	237
70	2078	355	274	230
75	2226	359	269	224
80	2374	363	262	212
85	2522	360	257	208
90	2670	357	249	203
95	2818	357	242	199
100	2966	359	233	190

Bu analizde de çok uç değerlerde imalat mantıksızdır. İki sargı arası manyetik boy farkının çok açılması, kısa devrelere karşı transformatörü korunmasız bırakacaktır. Şekil 4.23 sonuçları göstermektedir.



Şekil 4.23 : Aynı fiziğe sığdırılmış, farklı sayım sayılarına göre yansıyan gerilimler grafiği. (Kırmızı = YG-Nötr, Mor = AG-Üst ve Turuncu = AG-Alt gerilimi).

Bu grafiğe göre kat başına sarım sayısı artması, yansıyan darbeyi lineere yakın şekilde azaltmaktadır. Fakat değişim çok küçük olduğu için, transformatörün optimum noktasından uzaklaşarak yansıyan darbeyi azaltmayı denemek mantıksızdır.

4.11 Değişen Kat Adetine Göre Yansıyan Darbenin İncelenmesi

AG sargısının kat sayısı sabit tutularak birçok opsiyon denenmiş ve yansıyan darbeye etkileri açıklanmıştır. Bu analizde de AG sargısı kat başına sarım sayısı sabit tutularak, kat adeti arttırılacaktır ve yansıyan darbeye etkisi incelenecektir.

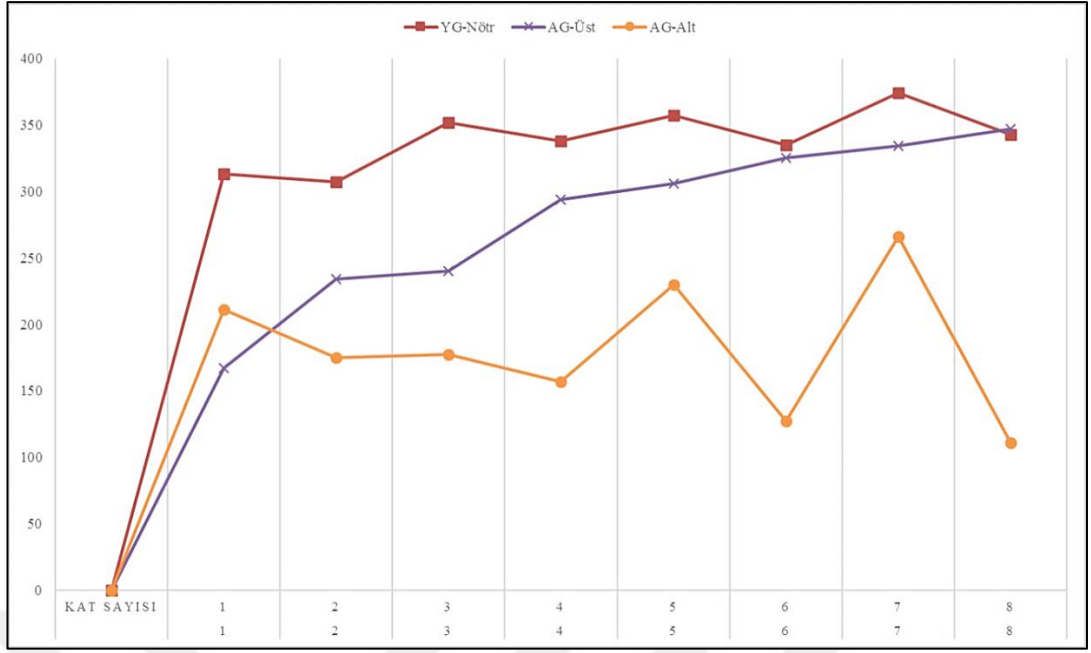
Kat adetini arttırmak için aynı zamanda gerilimi ayarlamak, yani AG toplam sarım sayısını arttırmak ya da azaltmak gerekmektedir. Bu değişim de kapasite dağılımına etki etmektedir. YG'nin sarım sayısı sabit bırakılmıştır. Farklı kat adetlerine göre yapılan yansıyan gerilim değerleri Şekil 4.24'de verilmiştir. Tablo olarak da Çizelge 4.14'de ifade edilmiştir. Çizelge 4.2 ile karşılaştırıldığında, AG sargısında değiştirilen değerler Çizelge 4.15'ün ilk ve 2. Sütundaki değerlerdir.

Çizelge 4.15 : AG kat sayısına göre değişen yansıyan darbe gerilimleri.

AG Kat Sayısı	AG Sargı Gerilimi [kV]	YG-N Gerilim Değeri [kV]	AG-Üst Yansıyan Gerilim [kV]	AG-Alt Yansıyan Gerilim [kV]
1	5.25	313	167	211
2	10.5	307	234	175
3	15.75	352	240	177
4	21	338	294	157
5	26.25	357	306	230
6	31.5	335	325	127
7	36.75	374	334	266
8	42	343	347	111

Grafiği yorumladığımızda; YG-nötr noktası geriliminin çok fazla değişmediğini gözlemliyoruz. Yine de AG'de toplanan enerjinin YG'ye geri aktarılmasından dolayı, YG nötr noktasının toplanan enerji miktarına göre arttığı gözlemlenir. Benzer bir gerilim artışı, tek katlarda AG'de de gözlemlenmektedir. Bunun sebebi ise tek kat adetinden gelmektedir. Çünkü tek katlarda, yalnız kalan kat kapasitif etki ile sönümlenememektedir.

AG'nin alt noktası, kat adetinin artması ile tepe değerlerine ulaşmaktadır. Çift katlarda ise aksi yönde azalmaktadır. Bunun sebebi, çift katların kompanzasyon etkisidir. Yani sarım olarak yukarıdan aşağı doğru sarılan bir sargıyı, ikinci kata geçildiğinde aşağıdan yukarı doğru sarılır ise; bir önceki ters yönde sarılmış katın etkisini sönümleyecektir. Bu etki; ampersarım etkisine benzer bir etkidir, fakat darbe testinde akım çok düşüktür.



Şekil 4.24 : Sabit aksiyel boyda, kat adeti artırılarak yapılan analiz. (Kırmızı = YG-Nötr, Mor = AG-Üst ve Turuncu = AG-Alt gerilimi).

YG-Nötr ile AG'nin alt kısmının paralel şekilde değiştiğini gözlemlenmektedir. Bu da kompanze edilmemiş katın etkisinin YG sargısına da paralel şekilde yansıdığını göstermektedir. AG'nin üst tarafında ise artan kat sayısına göre yansıyan gerilim artmaktadır.

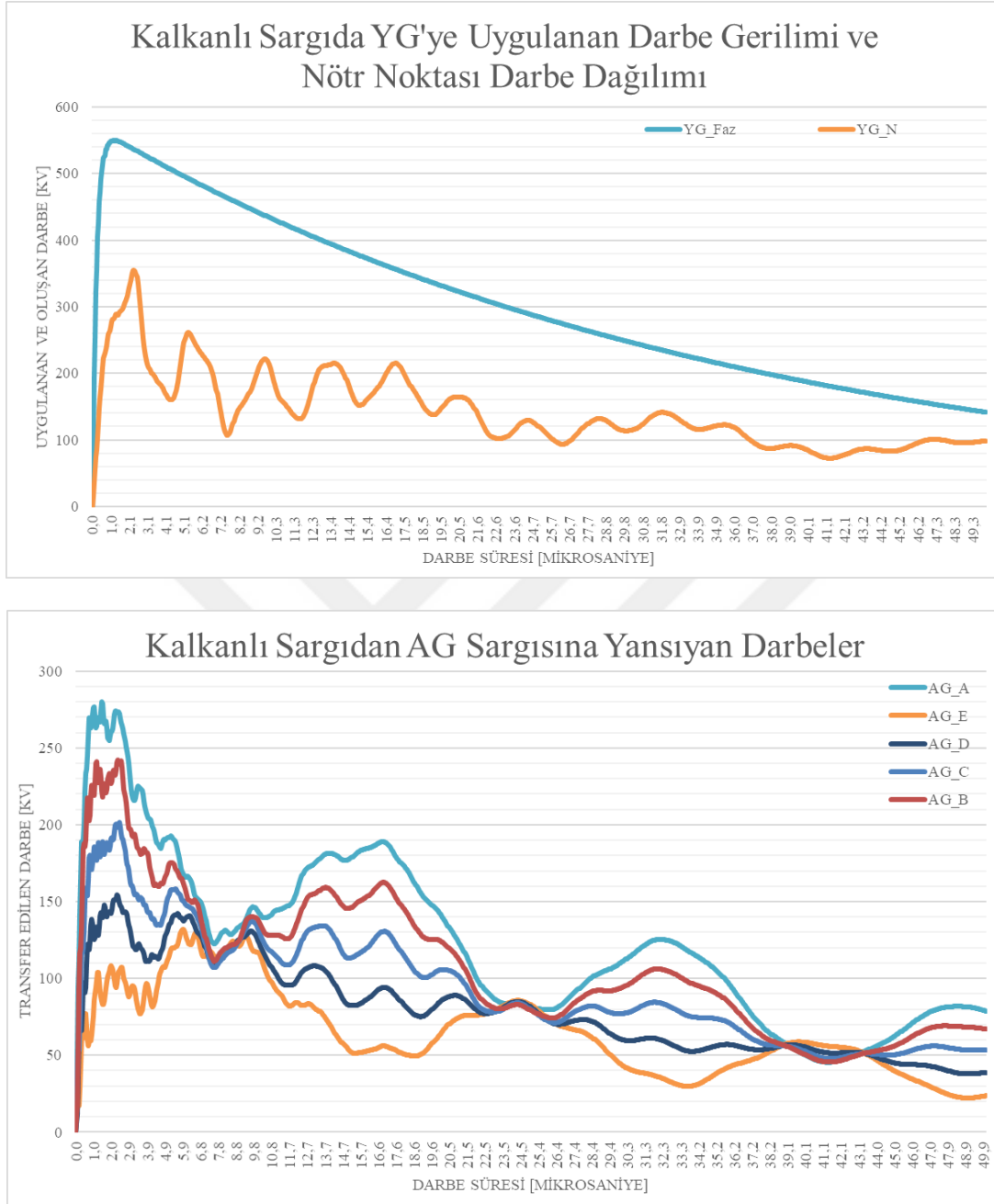
4.12 Kalkanlı Sargıdan Yansıyan Gerilimin İncelenmesi

Önceki kısımlarda avantajlı ve uygulaması belirtilen kalkanlı sargının, yansıyan gerilimdeki avantajını da incelemek üzere analizler yapılmıştır. İlk analizde yapılan örnek model ile aynı yapının kalkanlı yapılması durumunda yansıyan darbenin ne kadar değişeceği karşılaştırılacaktır.

Çizelge 4.16 : Kalkanlı ve kalkan kullanılmamış sargının yansıyan gerilim karşılaştırması.

Düğüm Noktası	Düz Disk Gerilim Değeri [kV]	Kalkanlı Disk Gerilim Değeri [kV]
YG_N	331	231
AG_A	289	131
AG_B	250	134
AG_C	199	104
AG_D	151	72.2
AG_E	127	59

Kalkanlı sargıdan yansıyan darbelere ait grafikler de Şekil 4.26’da belirtilmiştir.

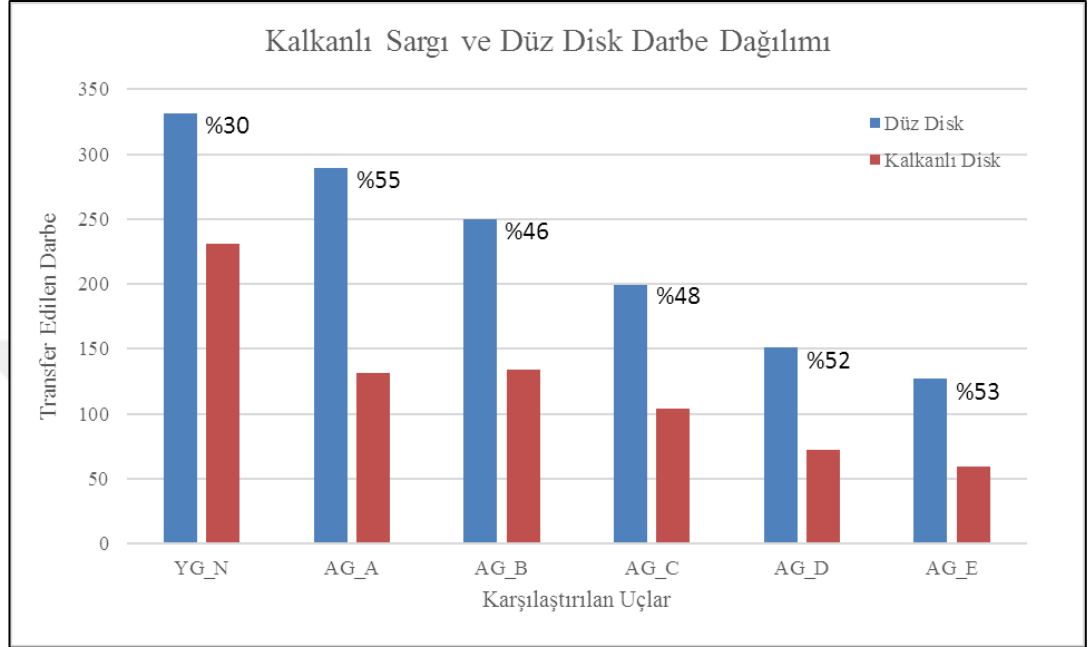


Şekil 4.26 : Kalkanlı sargıdan AG sargısına yansıyan darbe grafikleri. Üstte: YG'nin kalkanlı sargı olması durumunda YG-Giriş ve YG-Çıkış darbe şekilleri, Altta: YG'nin kalkanlı sargı olması durumunda AG'ye yansıyan darbe şekli (Turkuaz = AG_A, Turuncu = AG_E, Lacivert = AG_D, Mavi = AG_C, Kırmızı = AG_B)

Çizelge 4.16'deki karşılaştırmada açıkça gözükmemektedir ki kalkanlı sargıdaki darbe dağılımının daha optimize edilmiş olduğundan dolayı yansıyana da pozitif etkisi vardır. 289kV olan yansıyan gerilim, kalkanlı sargıda 131kV'a kadar düşmüştür.

Çizelge 4.2'deki değerler sabit tutulmuş, sadece YG sargı içine ek sarımlar modellenerek, kalkan yapısı işlenmiştir.

Grafik olarak kalkanlı sargı ile standart sargı karşılaştırmaları Şekil 4.25'de verilmiştir. Ortalama %47.5 avantaj sağlamaktadır.



Şekil 4.25 : Kalkanlı sargı ve düz disk sargının darbe dağılımlarının karşılaştırılması.

Şekil 4.26'daki grafikler incelendiğinde gözükmektedir ki kalkanlı sargıdaki darbe dağılımının daha optimize edilmiştir. Bundan dolayı yansıyan darbeyi de azaltıcı etkisi vardır.



5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4. Bölümdeki referans değerler göz önünde bulundurularak, yansıyan darbenin minimum olacağı ve YG sargısı darbe dağılımının kalkanlar ile iyileştirileceği, optimum kalkan yerleşimi belirlenen bir transformatör imal edilmiştir. İmal edilen transformatörün plaka değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 : İmal edilen transformatör plaka değerleri.

Parametre	Değer
Güç	100MVA
Gerilim (YG/AG)	220/33kV
Bağlantı grubu	YNyn0d11
Ayar aralığı	±10% (±8 adımda)
Ayar sargısı tipi	Reversing ayarlı
Test Gerilimi LI HV	1050kV
Test Gerilimi LI HV-N	450kV
Test Gerilimi LI LV	200kV
Test Gerilimi AC HV	460kV
Test Gerilimi AC HV-N	185kV
Test Gerilimi AC LV	85kV
İk	13.4%
Soğutma Tipi	ONAN/ONAF
Çevre Sıcaklığı	50°C
Maksimum Endüktans	1.67T
Sarım Gerilimi	164.25V/sarım

İncelenen yansıyan darbe gerilimleri, modelin tutarlılığını test etmek ve kalkanlı sargının yansıyan darbeye iyileştirici etkisini incelemek için, bir güç transformatöründe incelemeler yapılmıştır. Transformatöre (T1) 100MVA gücünde, sargı gerilimleri 220/33kV olan bir transformatördür. YG sargısında ayar vardır ve $\pm 8 \times 1.25\%$ ayar yapılabilir. YG sargısı nominal akımı 262.43A’dır, AG sargısı için akım değeri 1749.55A’dır. YG ve AG sargısı yıldız bağlı ve bağlantı grubu YNyn0d11’dir.

3 bacaklı çekirdek bulunmaktadır. Toplam demir ağırlığı yaklaşık 49 tondur. Sargılarda ise 17 tondan fazla bakır kullanılmıştır. Sargı yapısı olarak Şekil 4.12’ye benzemektedir.



Şekil 5.1 : Test edilen transformatör fotoğrafı.

AG sargısı 4 katlıdır ve toplam 116 sarıma sahiptir. Sargının izolasyon seviyesi IEC standartlarına göre 200kV LI değeri, 85kV AC değeri olarak baz alınmıştır.

YG sargısı disk sargıdır. Önceki bölümlerde darbe dağılımı performansını arttırmak için önerilen kalkanlı sargı yapısındadır. Bu deney sayesinde kalkanlı sargı için hesaplanan eşdeğer devre hesabı da kontrol edilmiş olacaktır.

Sargıda 773 sarım bulunmaktadır. Sargının izolasyon seviyesi LI: 1050kV, AC: 460kV'dur.

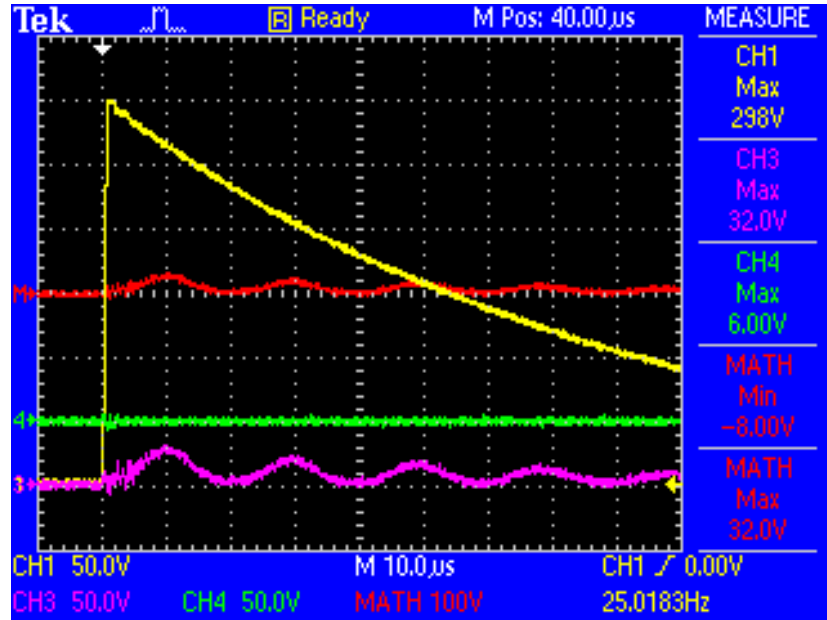
Yapılan hesaplamalar ile YG sargısına uygulanan gerilimden AG sargısında oluşacak yansıma, darbe şekilleri üzerinde incelenmiştir ve Şekil 5.3 ve 5.4'de verilmiştir. Test sırasında tam darbe gerilimi (1050kV) uygulanmamıştır. Bunun yerine düşük gerilim ile test edilmiştir. Uygulanan gerilime göre yansıyan gerilimin incelenmesi bölüm 4.2'de yapıldığı için, uygulanan gerilim seviyesi ile yansıyan gerilim arasındaki bağıntı tespit edildikten sonra doğrusal olarak öteleme yapılabilir. Bu sebeple YG sargısına yaklaşık 300V uygulanmıştır. Bu değer, AG'de yansıyan darbe şeklini net görebilmek için seçilmiştir.

Şekil 5.2’de darbe gerilimlerinin yapıldığı, Best A.Ş. OSB fabrikasına ait güç transformatörleri fabrikasının bir fotoğrafı verilmiştir.

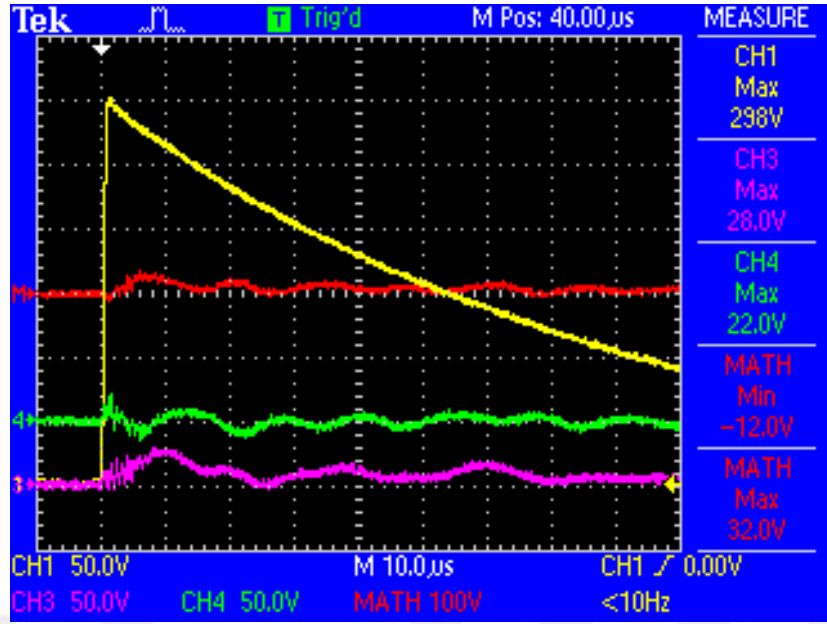


Şekil 5.2 : Best A.Ş. OSB Test Laboratuvarı fotoğrafı.

Doğrusal olarak test değeri ötelendiğinde; 3523.49 katı oranında ötelenmelidir.

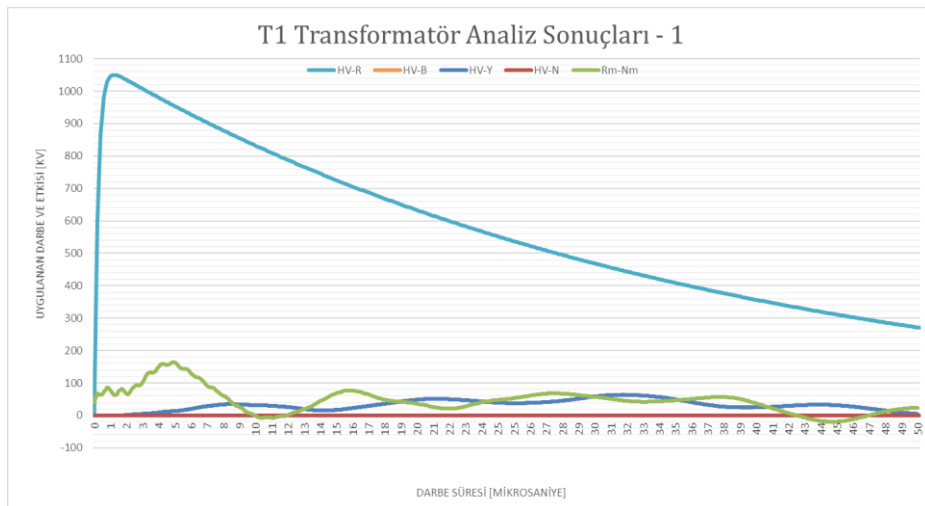


Şekil 5.3 : YG’den uygulanan darbe (sarı), faz-toprak AG darbe gerilimi (mor).



Şekil 5.4 : YG'den uygulanan darbe (sarı), faz-nötr AG darbe gerilimi (mor).

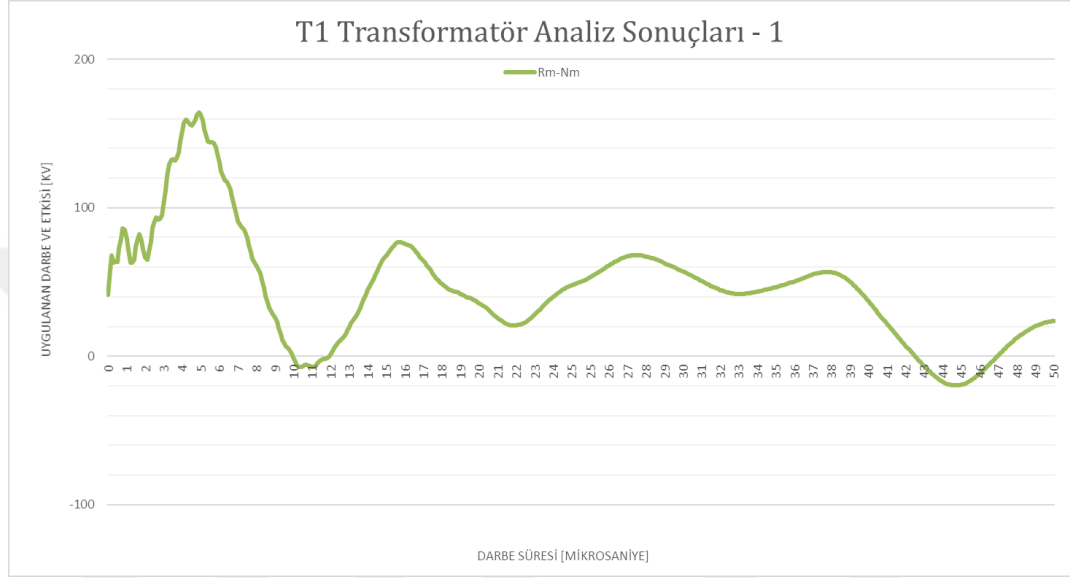
Analizde; faz toprak ile faz nötr arasında bir fark yoktur. Bunun sebebi; eşdeğer devredeki ideal koşullardır. Tezde bu iki gerilim ayrı ayrı ölçülmüştür ve gerilim farkı tespit edilmiştir. Nötr kısmındaki bağlantı bakırları ve transformatör iç yapısı bu farkı oluşturmaktadır. Bu fark yaklaşık 4V'luk bir farktır, eşlenik değeri olarak bakıldığında yaklaşık 14kV'a denk gelmektedir. Bu değer kabul edilebilir bir toleranstır çünkü efektif darbe olan 1050kV'da yüzde 1.3lük bir orana denk gelmektedir. Ayrıca test düzeneğinin ölçme hassasiyeti de bu değerleri etkilemektedir.



Şekil 5.5 : Transformatör analiz sonuçları. Turkuaz: Uygulanan darbe, Turuncu, Mavi: Diğer fazlardaki etkisi, Yeşil: İncelenen sargı çıkışı (Turkuaz = HV-R fazı, Yeşil LV-R fazı ile Nötr arasındaki gerilim farkı, Mavi = HV-Y fazı).

AG'ye yansıyan gerilim tepe değeri ise 112.75kV'dur. Darbe şekli de, önceki kısımlarda incelediğimiz gibi yansıyan yürüyen dalga şeklindedir.

Analiz programı ile yapılan analiz sonuçları Şekil 5.5'de paylaşılmıştır. Simülasyon sonuçları ile test sonuçları karşılaştırıldığında, darbe şekli olarak çok büyük benzerlik bulunmaktadır. Şekil 5.6'de yansıyan darbe şekli ortaya çıkması için yakınlaştırılmış halde sunulmuştur.

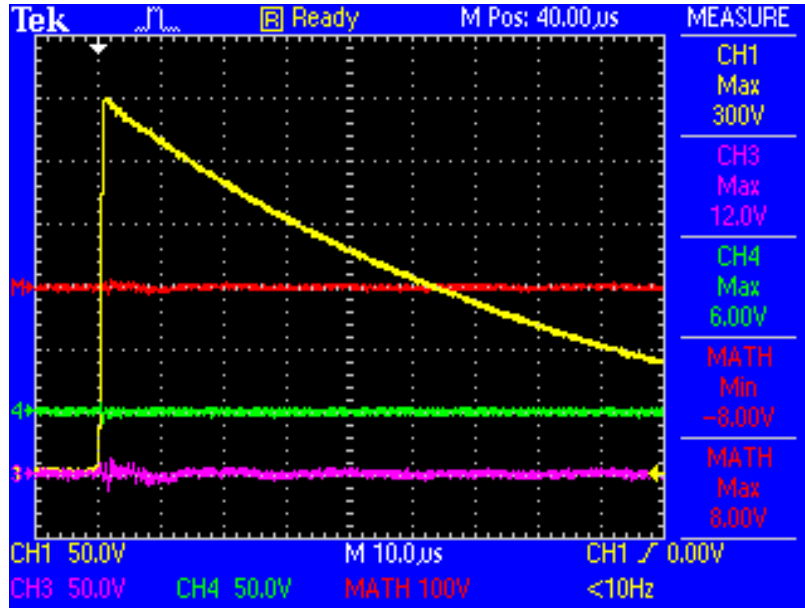


Şekil 5.6 : Analiz sonucu sadece yansıyan darbenin incelenmesi.

Analiz sonucu tepe değeri yaklaşık olarak 165kV olarak hesaplanmıştır. Gerçekleşen test sonucunun daha düşük olması beklendik bir durumdur. Simülasyon yazılımı, daha kötü durumlara göre analiz yapmaktadır (worst-case tasarım). Örneğin, yağın dielektrik dayanımı değişkenlik gösterebilmektedir, simülasyona ise garanti edilen minimum değeri girilmektedir.

Bunun yanında darbe şekillerinin benzer olması, simülasyonun tutarlılığını göstermektedir. İki gerilim arasında yaklaşık 50kV fark vardır. Bu fark %5'lik bir farktır ve IEC 60076-1 toleranslarına göre darbe testlerinde de bu fark tolere edilebilir olarak belirtilmektedir. Analize göre tasarım aşamasında önlem alınması, test durumunda daha iyi çıkacağı düşünülür ise, transformatör güvenliği için uygun bir durum olmaktadır.

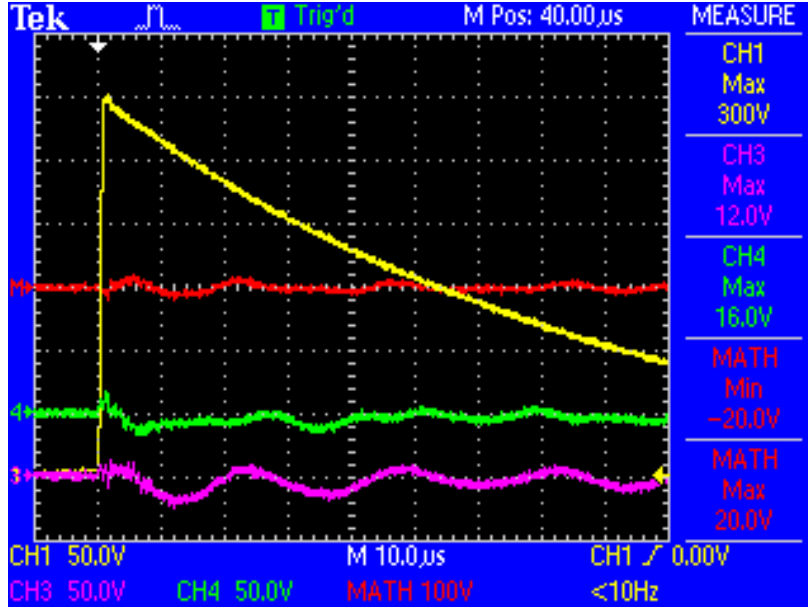
Şekil 5.7 ve 5.8'da osiloskop çıktıları paylaşılmıştır.



Şekil 5.7 : YG'den uygulanan darbe (sarı), faz-toprak AG darbe gerilimi (mor).

Yansıyan darbe incelendiğinde; hem analizde hem de osiloskop çıktılarına göre, sargının tasarlandığı gerilim olan 200kV değerinin altında kalmaktadır. Bu da yansıyan darbelere sargının dayanıklı olduğunu göstermektedir.

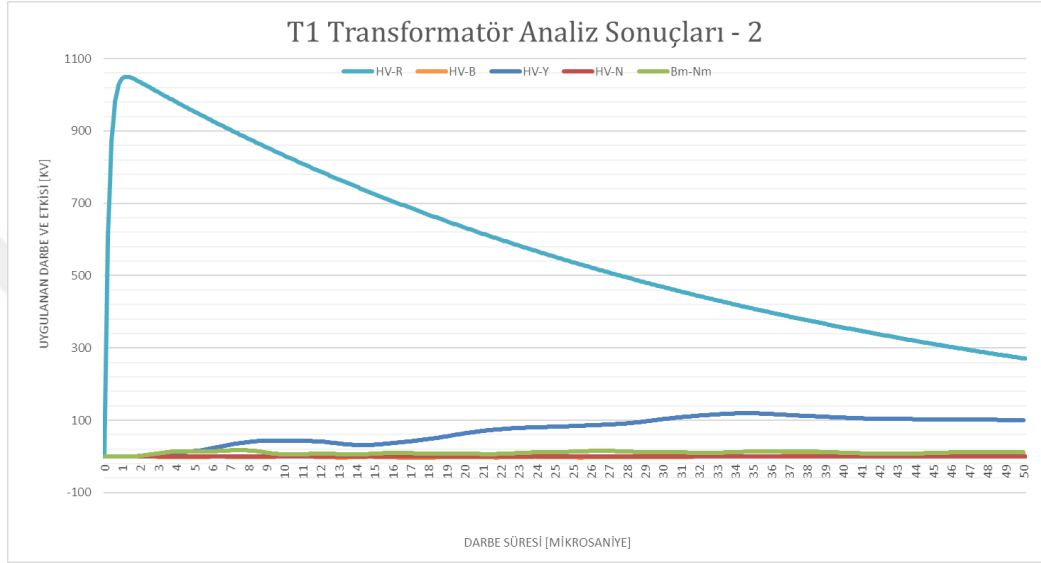
Diğer fazlara da aynı test uygulanmıştır ve analiz ile karşılaştırılmıştır. Doğrusal olarak test değeri ötelendiğinde; yaklaşık 3500 katı oranında ötelenmelidir.



Şekil 5.8 : YG'den uygulanan darbe (sarı), faz-nötr AG darbe gerilimi (mor).

Nötr ile toprak arasındaki test farkı negatif polaritede olduğu için maksimum ölçüm değerinde gözükmemektedir. Fark yaklaşık 14V'luk bir farktır, eşlenik değeri olarak bakıldığında yaklaşık 49kV'a denk gelmektedir. Efektif darbe olan 1050kV'da yüzde 4.6'lık bir orana denk gelmektedir. AG'y yansıyan gerilim tepe değeri, ters polaritede 87.5kV'dur.

Ölçüme dair analiz programı ile yapılan analiz sonuçları Şekil 5.9'de paylaşılmıştır.

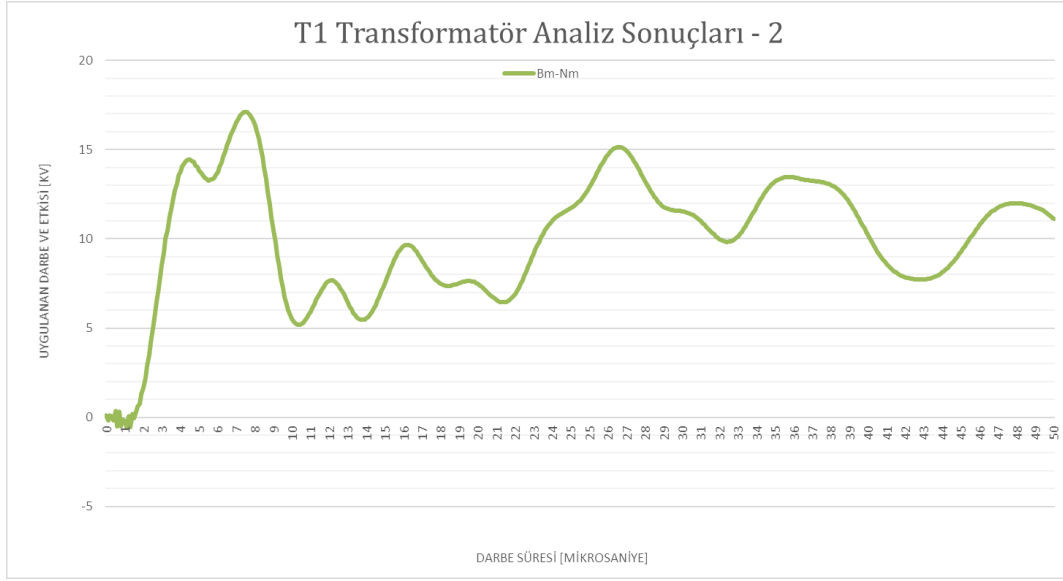


Şekil 5.9 : Darbenin diğer faza etkisinin analiz üzerinde incelemesi (Turkuaz = HV-R fazı uygulanan darbe, Mavi = HV-Y fazı endüklenen, Yeşil = LV-B fazı ile toprak arası referans gerilim).

Simülasyon sonuçları ile test sonuçları karşılaştırıldığında (Şekil 5.10 daha detaylı transfer edilen gerilim şekli), darbe şekli negatif polariteye çok inmediği gözlemlenmiştir. Burada simülasyonu topraklamasının ideal olduğu göz önünde bulundurulmalıdır. Oysa ki gerçek durumda ideal topraklama yoktur, inilen negatif değerler düşük olduğu için yok sayılabilir.

Tepe değerleri arasında 70kV'a yakın fark bulunmaktadır. Bu fark beklenenden yüksek bir farktır fakat analizde tek faz değerleri çoklanarak modellenirken (ideal olarak tüm fazlar birbirinin kopyası), gerçek hayatta etkisinin farklı olması beklenir bir durumdur. Farklı makinelerde, çekirdekte farklı bacalarda bulunan fazlara etkiler farklı olabilecektir.

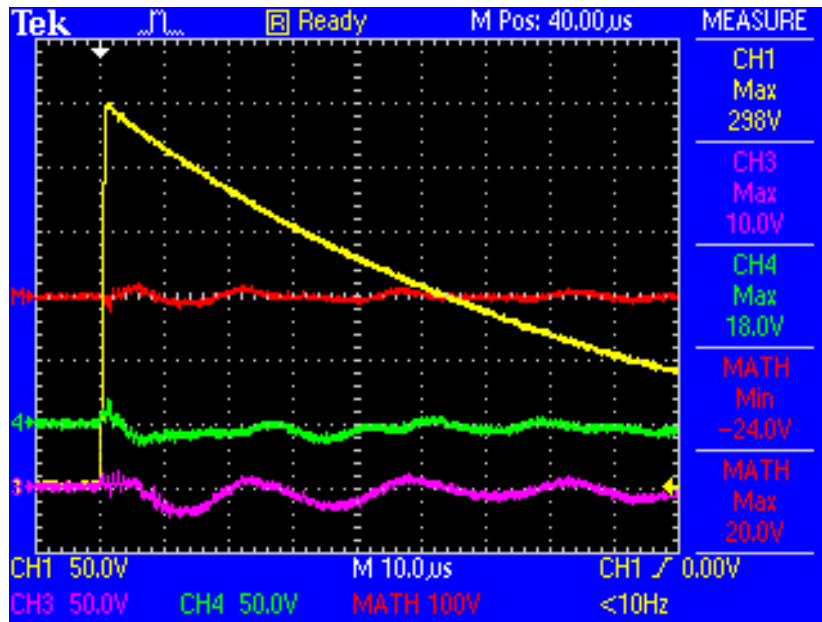
Darbe şekilleri ise simülasyon ile test arasında oldukça benzerdir. Yapılan analizin tutarlılığı açısından bu önemli bir sonuçtur.



Şekil 5.10 : 2. Analizin yakınlaştırılmış hali. LV-B faz ile toprak arasındaki gerilim farkı.

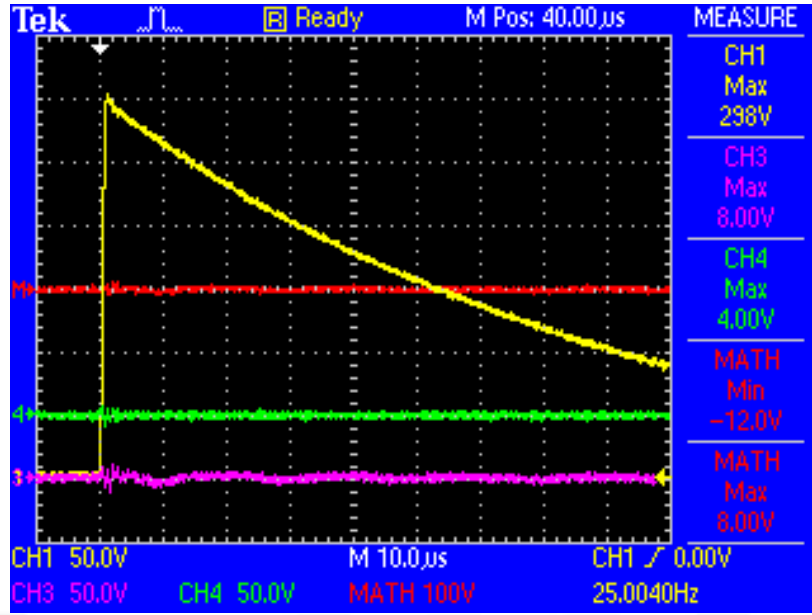
Burada bir diğer ihtimal de ihmal edilen çekirdek etkisinin, bunun gibi diğer faza olan yansıyan darbe etkileri incelendiğinde, etkisinin göz ardı edilebilenden fazla olabilmesidir. Gelecek çalışmalarda bu konuya da yer verilmesi planlanmıştır.

Son olarak Ym fazına (HV-Y fazı), yani darbenin uygulandığı fazın karşında olmayan diğer AG fazına etkisi incelenmiştir. Osiloskop çıktıları Şekil 5.11 ve 5.12’de sunulmuştur.



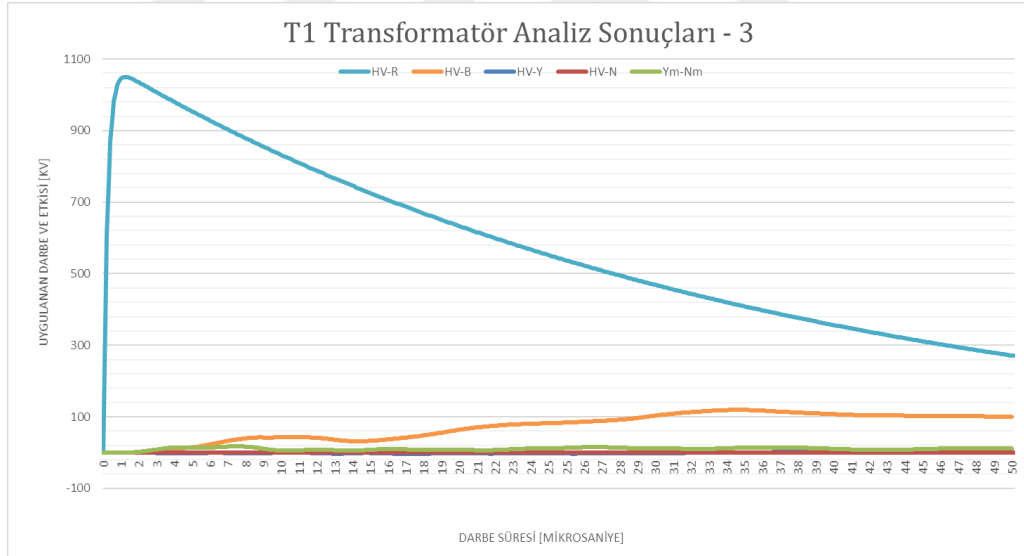
Şekil 5.11 : Ym fazına yansıyan darbenin test değerleri, Ym-Nm.

Tepe değeri yaklaşık 35kV olarak ölçülmüştür.



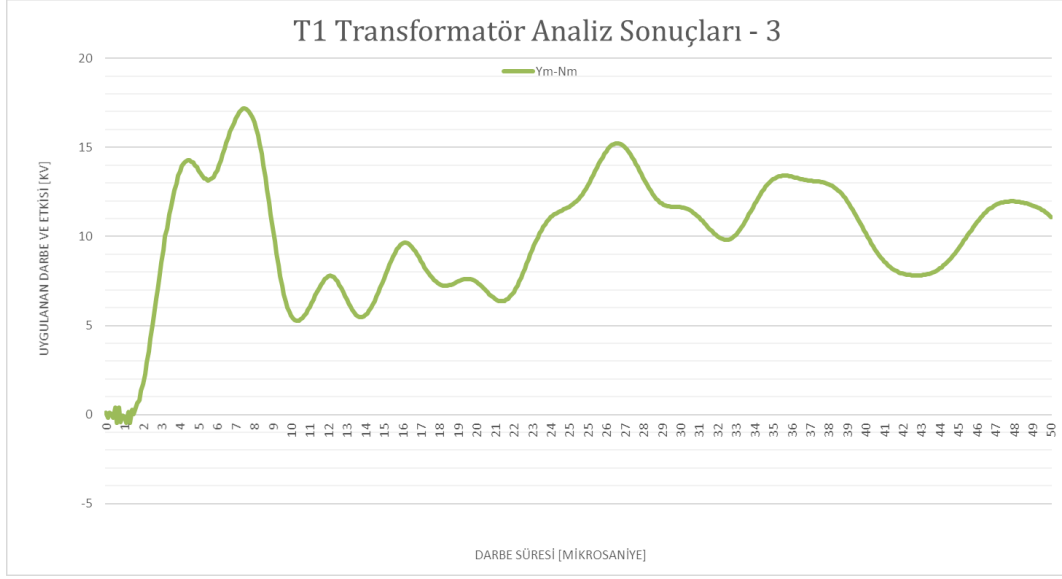
Şekil 5.12 : Ym fazına yansıyan darbenin test değerleri, Ym-Toprak.

Test sonuçları hemen hemen darbe uygulanmayan diğer faz ile aynıdır. Analiz sonuçları da bir önceki analiz ile aynı olarak hesaplanmıştır (Şekil 5.13 ve 5.14).



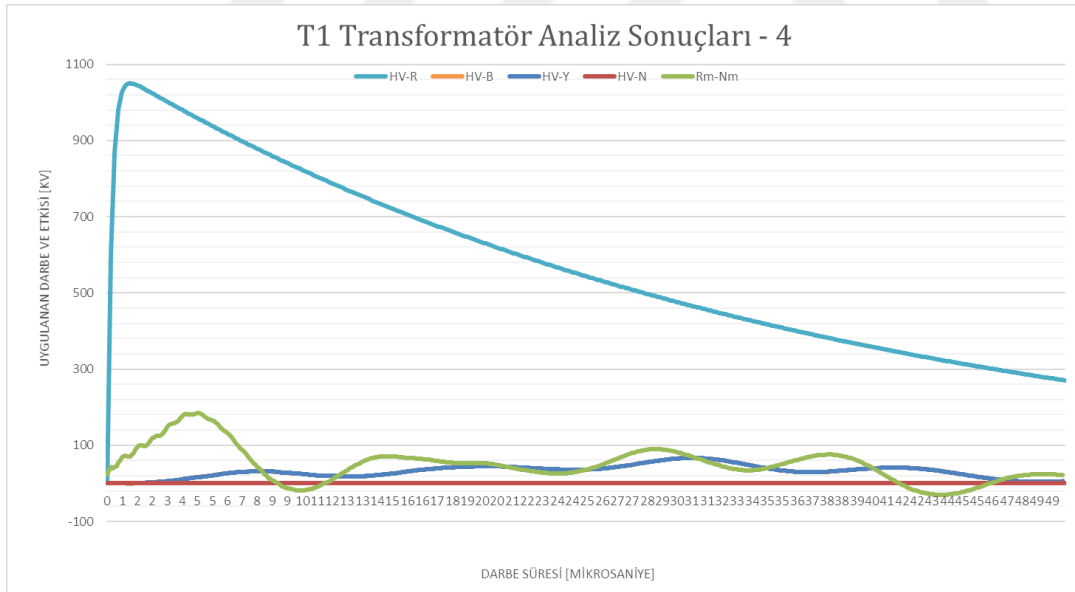
Şekil 5.13 : Ym fazına uygulanan ve yansıyan darbe analizi (Turkuaz = HV-R fazından uygulanan darbe, Turuncu = HV-B fazına darbenin etkisi, Yeşil = LV-Y fazı ile toprak arasındaki gerilim farkı).

Şekil 5.13’de 1050kV YG terminaline uygulanan darbenin, yan fazdaki endüklediği etki 100kV mertebelerine ulaşmaktadır. Üç faz analizlerde, diğer tüm fazlar testteki gibi topraklanmalıdır. Diğer fazın durumu incelenmesi adına faz salınımda bırakılmıştır.



Şekil 5.14 : Sadece yansıyan darbenin incelenmesi. LV-Y fazı ile LV-Nötr noktası arasındaki gerilim farkı, YG'den AG'ye yansıyan darbenin etkisi.

Analizler ve test sonuçlarının karşılaştırılması; hazırlanan modelin oldukça tutarlı olduğunu göstermektedir. Ayrıca standart disk sargıya göre kalkanlı sargının darbe dağılım performansı Şekil 5.15'de incelenmiştir.



Şekil 5.15 : Düz disk YG sargısı durumunda yansıyan darbelerin incelenmesi.

Şekil 5.5 ile karşılaştırıldığında, kalkanlı sargının avantajı ortaya koyulmuştur. Kalkanlı sargıda yansıyan darbenin tepe değeri 165kV mertebelerinde iken, düz disk sargıda 185kV mertebelerindedir.

Analizler ve imalat sonrası ölçüm sonuçları incelendiğinde; yapılan hesaplamaların ve ölçümlerin önceki bölümdeki analizler ile paralel olduğu görülmüştür. Yansıyan gerilim, kalkan yapısı ve YG sargısındaki darbe dağılımı göz önünde bulundurularak, yansıyan gerilimin güvenli limitler içinde tutulduğu ve YG’de ekstra işçiliğe gerek kalmayacak şekilde, düzgün darbe dağılımlı bir sargı tasarlanmıştır. İmalat sonrası yapılan ölçümlerde, transformatörün geçici aşırı gerilimlere sorunsuz dayanabildiği gözlemlenmiştir.





6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Transformatörlerde kalkanlı sargı uygulaması ve yansıyan gerilimlerin incelenmesi için yapılan araştırmalar, analizler ve deneysel çalışmalar bu tezde aktarılmıştır. Transformatör arızalarına yüksek etkisi olan geçici aşırı gerilimlere karşı transformatörün dayanıklılığı, izolasyon malzemelerinin dayanıklılığı anlamına gelmektedir. İzolasyon malzemeleri kullanımı veya konstrüktif önlemler ile sargı yapısı, uygun şekilde düzenlenerek aşırı gerilimlere transformatörlerin dayanıklılığı artırılabilir. Bu dayanıklılığın; işçilik gibi maliyet faktörleri göz önünde bulundurularak farklı bir çözüm olan kalkanlı sargı uygulaması ile artırılması önerilmiştir.

Geçici aşırı gerilimler sadece etkilediği sargıya değil, elektromanyetik olarak bağlı olduğu diğer sargının da izolasyonunu zorlamaktadır. Bu sebeple ana sargı tasarımı kadar, ikinci sargı tasarımında ve sargılar arası etkileşimde aşırı gerilimlere dikkat edilmesi konusu tezde analizler ile belirtilmiştir. Bu konu, detaylamasına incelenerek, sargılar arası etkileşimin parametrik olarak değişimi incelenmiş, Best A.Ş. firmasına aktarılmıştır.

Tez kapsamında öncelikli olarak tezin konusu olan transformatörler ve şebekede transformatörlerin öneminden bahsedilmiştir. Gittikçe artan ülkemizdeki transformatör imalatçısı sayısı ile, bu alanda yapılacak araştırmalar ile ülkemize katkıda bulunulması da hedeflenmiştir. İlerleyen kısımlarda transformatör arızalarından bahsedilmiştir. Çalışma koşullarında transformatörlerin karşılaştığı aşırı gerilimler, uluslararası standartlarda tanımlandıkları şekli ile belirtilmiştir. Bu aşırı gerilimler üzerine yapılan çalışmalar, detaylı bir literatür taraması yapılarak aktarılmıştır. Bu taramada, oluşturulan modeller, modellerin avantajlı yönleri, hangi tip arıza incelemesi için hangi tip modellerin kullanılması gerektiği ve modellerin detay miktarı incelenmiştir. Literatür taraması sonrası, günümüzde aşırı gerilimlerden korunmak için kullanılan iç ve dış önlemler incelenmiş ve avantajları araştırılmıştır. İç önlemlerden sargı tipini gerilime göre değiştirilmesi detaylı incelenmiş ve yüksek gerilimli sargılar için kalkanlı sargı yapısının avantajları aktarılmıştır. Bu sargının işçilik avantajları deneysel çalışmalar ile ispatlanmıştır.

Tezde modelleme kısmında, parametrik olarak sargı boyunca darbe dağılımının elde edilmesi için gerekli denklemler verilmiştir. Bu değerler ile eşdeğer devre oluşturulması metotları incelenmiştir. Eşdeğer devre oluşturmadaki parametreler, kullanılan simülasyon yapısı altyapısı ile birlikte verilmiştir. Tezde kullanılan simülasyon programının tutarlılığı deneysel çalışmalar ile incelenmiştir. Daha önce simülasyon programı ile yapılmayan kalkanlı sargılara ait darbe dağılımı modellenmesi aktarılmış, model ile kalkanlı sargıya ait darbe dağılımı oluşturulmuştur. Kalkanlı sargının darbe dağılımındaki avantajını göstermek amaçlı, standart disk sargı ile kalkanlı sargı karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Oluşturulan modelin tutarlılığını kontrol amaçlı deneme bobini imalatı ve bu bobin ile yapılan kapasite ölçümleri, hesaplanan değerler ile karşılaştırılmıştır ve modelin tutarlılığı incelenmiştir.

Detaylı yapılan darbenin etkilediği bobinde, aşırı gerilimin dağılımı incelemeleri sonrası, yansıyan darbe gerilimi incelenmiştir. Bu kapsamda, yansıyan darbe gerilimine etkileyen tasarım parametreleri araştırılmıştır. Diğer tüm tasarım değerleri sabit tutularak, parametrik olarak belirlenmiş tasarım kriterleri değiştirilmiş ve bu değişim doğrultusunda yansıyan darbeye etkiler araştırılmıştır. Sırası ile; AG uçlarının topraklı olması ve salınımda olması durumu, YG'ye uygulanan darbenin tepe değerinin değişimine göre AG'ye etkisinin değişimi, yansıyan darbenin kapasitif ve endüktif etkileri incelenmiştir. Daha sonra tasarım kriterleri değiştirilmiştir ve bu kriterlerin yansıyan darbeye etkisi kontrol edilmiştir. Bu kapsamda; AG ve YG sarım yönlerinin etkisi, AG'nin bağlantı grubunun etkisi, AG-YG sargılar arası mesafenin etkisi, AG-Çekirdek arası mesafenin etkisi, AG'deki kat başına sarım sayısının yansıyan darbeye etkisi, aynı fiziğe sığdırılacak sarım sayısının değişiminin etkisi, AG'deki kat sayısının değişiminin etkisi ve son olarak da YG'de kalkanlı olmasının yansıyan darbeye etkisi incelenmiştir.

Yansıyan gerilime en büyük limitleme; AG-YG arasına yerleştirilecek ekranlama ile sağlanacağı gözlemlenmiş fakat bunun mali olarak ve imalat olarak etkisi göz önünde bulundurularak, AG-YG arası mesafenin bir miktar açılarak ve kat adetinin arttırılıp, kattaki sarım sayısının düşürülerek de optimum noktanın yakalanabileceği gözlemlenmiştir.

Yapılan analizlerin tutarlılığını test etme amacı ile deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda bir transformatör imal edilmiş ve normalde AG yıldırım darbe

dayanımı 200kV olarak tasarlanan transformatör, keşfedilen yansıyan darbe etkileri göz önünde bulundurularak 112kV seviyelerinde tutulmuştur.

Yapılan test sonrasında karşılaştırılan analiz ve test sonuçları arasındaki fark oldukça küçüktür. Çıkan değerlerin yakınlığı; yapılan analizlerin tutarlılığının oldukça yüksek olduğunu göstermektedir. Bu da oluşturulan eşdeğer devre modelinin doğruluğunun, modelin kullanılmasının uygunluğunu belirtmektedir. Ayrıca kalkanlı sargının eşdeğer devre modelinin de tutarlı olduğu ve düz disk sargı ile karşılaştırıldığında, kalkanlı sargının yansıyan darbeye pozitif etkisini göstermektedir.

Tez kapsamında yapılan çalışmadan; yüksek gerilimli sargılarda uygulanacak kalkanlı sargı uygulamasının, işçilik avantajlarının yanında, yansıyan darbedeki pozitif etkileri de ortaya koyulmuştur. İç içe geçmiş sargı yerine kalkanlı sargı kullanımı, işçilik avantajı sağlamaktadır. Ayrıca bu gerilimlerde kalkan uygulaması ile, düz diske kıyasla daha düzgün bir darbe dağılımının etkisi olarak, daha düşük bir yansıyan darbe gerilimi elde edilmiştir.

Gelecek çalışmalarda; daha fazla deney ile modelin doğruluğu ve geliştirilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca tersiyerli transformatörlerde, ikinci sargıya yansıyan darbe gerilimi de incelenmesi planlanmıştır.

Daha yüksek gerilimlerde denemeler yapılması planlanmıştır, farklı bir kalkan yapısı tasarlanması ve bu tasarıma patent alınması da öngörüler arasındadır.

Kalkan dağılımını optimize edecek ve ideal çözümü sunacak bir yazılım geliştirilmesi de planlanmaktadır.



KAYNAKLAR

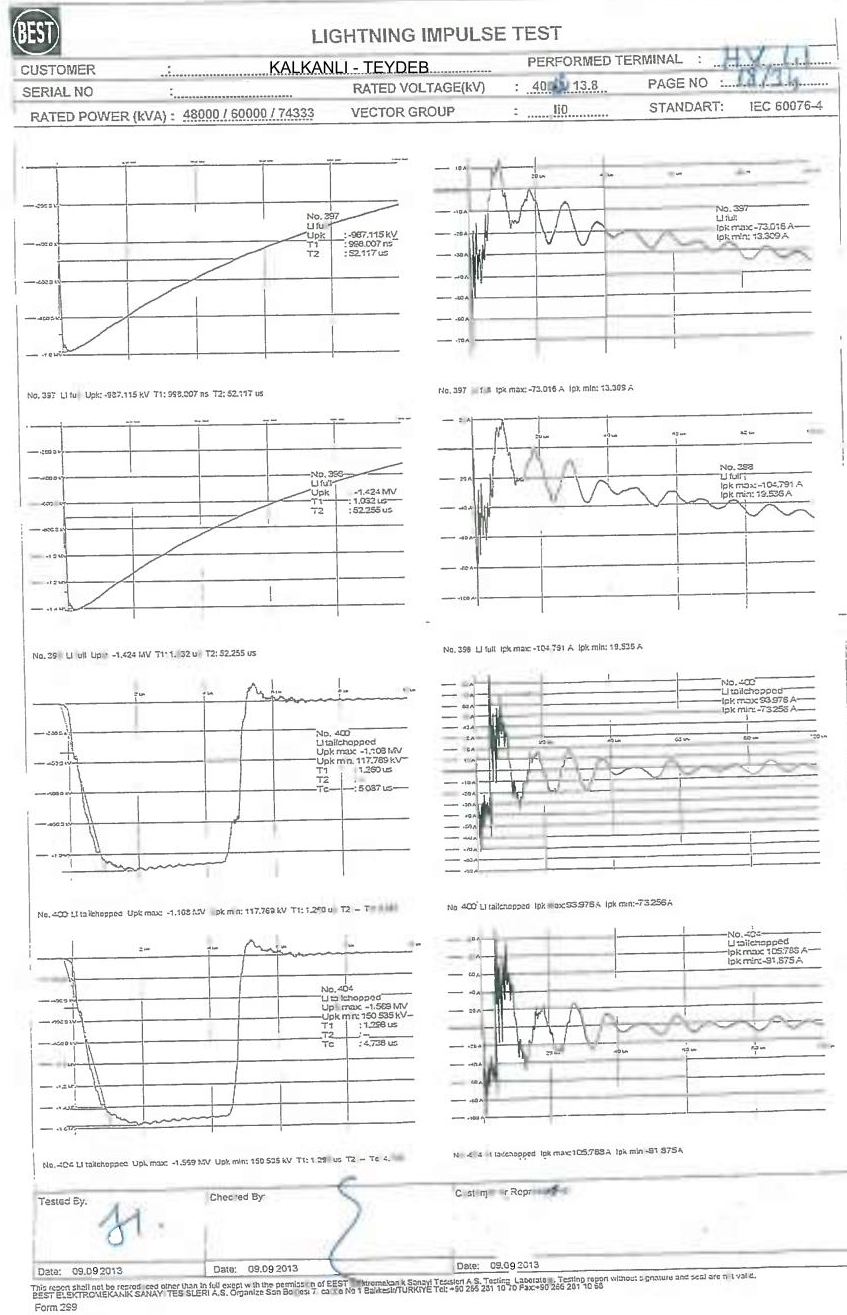
- [1] **Greenwood, A.** (1991). *Electrical Transient in power system*. New York, NY (USA): John Wiley and Sons Inc.
- [2] **Lewis, T. J.** (1954). The Transient Behavior of Ladder Networks of the Type Representing Transformer and Machine Windings, *Proc. IEE*, Vol. 11, Pt. II, pp. 541-553
- [3] **Heidarzadeh, M. & Besmi, M. R.** (2013). Influence of transformer layer winding parameters on the capacitive characteristic coefficient. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering* (pp.22-28). June.
- [4] **Miki, A., Hosoya, T. & Okuyama, K.** (1978). A Calculation Method for Impulse Voltage Distribution and Transferred Voltage in Transformer Windings, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, PAS-97, 930-939.
- [5] **Karsai, K., Kerenyi, D., Kiss, L.** (1987). *Large Power Transformers*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- [6] **Das, J.C.** (2003). Surge transference through transformers, *IEEE Industry Applications Magazine*, 9 (5) , 24-32.
- [7] **Bachega, R. J., Martinez, M. L. B.,** (2004). Transformer Modeling for Transferred Voltages. *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition*, Latin America.
- [8] **H. Masdi, N. Mariun, A. Mohamed,** "Study of Impulse Voltage Distribution in Transformer Windings", *Power and Energy, IEEE Intl. Conf. on Power and Energy*, 2010, pp.379-383.
- [9] **M. Erdoğan, M. K. EKER,** "Yıldırım Darbe Geriliminin Kuru Tip Transformatör Sargılarındaki Dağılımının İncelenmesi", *Journal of Polytechnic*, 2015, pp.21-30.
- [10] **Wijayapala, W. D. A. S. & Karunananda, H. S. C.** (2015). Mitigation of lightning surge stresses in the high voltage windings of distribution transformers by introducing an electrostatic shield. *The Institution of Engine*, XLVIII (03) , 1-11.
- [11] **Borghetti, A., Morched, A., Napolitano, F., Nucci, C. A., Palone, M.,** (2009). Lightning-Induced Overvoltages Transferred Through Distribution Power Transformers, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24, No. 1, 360-372.
- [12] **IEC 60071-1**, 2006. Insulation co-ordination. Definitions, principles and rules-Part 1
- [13] **Tschudi, D. J., Krause, C., Kirch, H. J., Francheck, M. A., & Malewski, R.** (1994). Strength Of Transformer Paper Oil Insulation Expressed By The Weidmann Oil Curves. *CIGRE International Conference on*

Large High Voltage Electric Systems, 1994 Session, (WG 33.03). Paris.

- [14] **İlkkahraman, M.** (2008). *Güç transformatör arızalarının incelenmesi* (Yüksek lisans tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Ankara.
- [15] **Krause, Ch.** (1996). Dielectric Strength of Transformer Oil, *Proc. of WICOR Insulation Conference*, Rapperswil, Switzerland, Sept.
- [16] **Woodworth, J. J.** (1890-1930). *History of arresters on power systems*. Retrieved from [http:// www.arresterworks.com/history](http://www.arresterworks.com/history)
- [17] **IEC 60071-2**, 1997. Insulation co-ordination. Application guide- Part 2
- [18] **Ishii, M., Hongo, Y., Imai, Y., Morooka, Y., Sugimoto, H. & Yokoyama, S.** (2004). Lightning Protection of Pole-mounted Transformer on Japanese Mv Lines. *CIGRE International Conference, 2004 Session, (C4-305)*, Paris.
- [19] **Güzelbeyoğlu, N.** (1976). *Transformatör sargılarında aşırı gerilim dağılımı sorununa katkılar* (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- [20] **Waldvogel, P. & Rouxel, R.** (1956). A new method of calculating the electric stresses in a winding subjected to a surge voltage. *Brown Boveri Review*, 43 (6), 206-213.
- [21] **Jayaram, B. N.** (1961). Bestimmung der stossspannungsverte lung in transformatoren mit digitalrechner. *ETZ-A*, 1, 1-9.
- [22] **Stein, G. M.** (1964). A study of Initial Surge Distribution in Concentric Transformer Windings, *IEEE Trans.*, OAS-83, 877-893.
- [23] **Dalessandro, L., Cavalcante, F.D.S. & Kolar J.W.** (2007). Self capacitance of high voltage transformers, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22 (5), 2081-2092.
- [24] **Bagheri, M., Hekmati, A. & Vakilian M.** (2008). Simulation and Comparison of Impulse Voltage Distribution in Continuous, Intershield and Interleaved Disc Winding in Power Transformer. *The International Conference on Electrical Engineering*, Japan, January.
- [25] **Jayaratchagan, R., Shriram, B., Guruprasath, J. & Sudha, R.** (2013). Impulse voltage distribution. *International Journal of Engineering Research & Technology* (pp.1203-1207). April 04.
- [26] **Sauer, G. E.** (1977). U.S. Patent No. 4,017,815. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [27] **Miki, A., Hosoya, T. and Okuyama, K.** (1978). A calculation method for impulse voltage distribution and transferred voltage in transformer windings, *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, PAS-97, 930-939.
- [28] **Şenol, S.** (1993). *Güç transformatörlerinde aşırı gerilim dağılımı sorunu ve alınan önlemler* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
- [29] **TS EN 60071-2**, 2009. Yalıtım koordinasyonu- Bölüm 2.
- [30] **Areva T&D Book**, “Power Transformers – Vol. 2 – Expertise”, August 2008

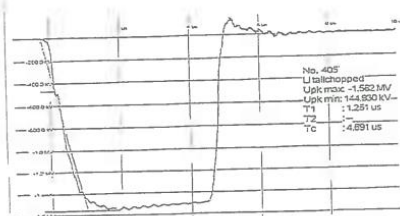
EKLER

EK A: Kalkanlı sargı üzerinde yapılan darbe dayanımı test sonuçları

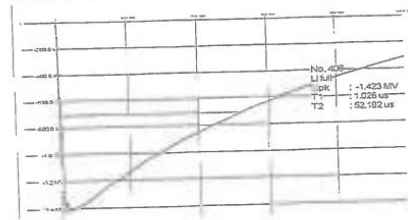




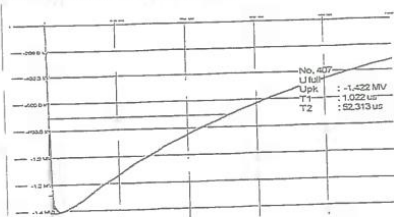
CUSTOMER	KALKANLI - TEYDEB		PERFORMED TERMINAL	
SERIAL NO		RATED VOLTAGE(kV)	: 40	PAGE NO : 13.8
RATED POWER (kVA) : 48000 / 60000 / 74333		VECTOR GROUP	: 110	STANDART: IEC 60076-4



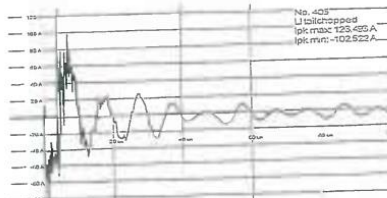
No. 405 U int chopped Upk max: -1.562 kV pk min: 144.920 kV T1: 1.251 us T2: - Tc: 4.891



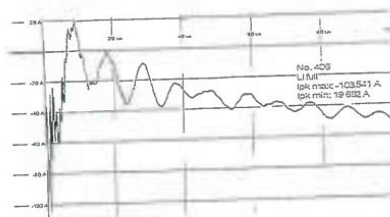
No. 405 L full Upk: -1.423 MV T1: 1.056 us T2: 52.182 us



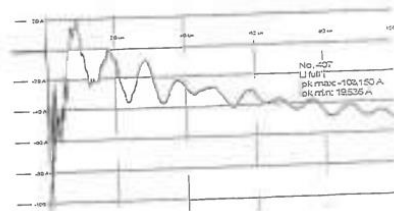
No. 427 LI full Upk -1.422 MV T1=1.022 us T2=52.313 us



No. 405' LI 121' dropped (pk max: 123.493Å (pk min: -102.522Å)



No. 406 Li ref Ip: max: -103.541 A Ip: min: 19.092 A



No. 407 full ipk max: -03.150 A ipk min: 19.535 A

Tested By:

Checked By:

Customer or Representative:

Date: 09.09.2013

Date: 09.09.2013

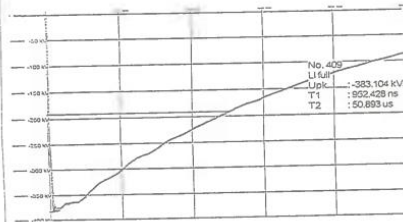
Date: 09.09.2013

Date: 09.09.2013 Date: 09.09.2013 Date: 09.09.2013
This report shall not be reproduced other than in full except with the permission of BEST ELEKTROMEKANİK SANAYİ TEŞKİLLERİ A.Ş. Organize San Bölgeleri 7. Etage No 68 Kat: 6 TURKIYE Tel: +90 266 231 10 70 Fax: +90 266 231 10 63
Form 269

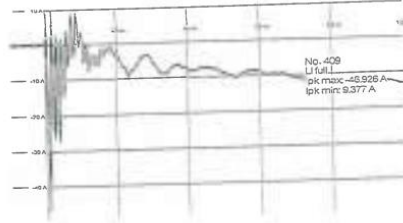


LIGHTNING IMPULSE TEST

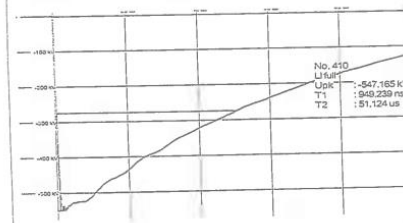
CUSTOMER : KALKANLI - TEYDEB PERFORMED TERMINAL : LV 1.2
SERIAL NO : RATED VOLTAGE(kV) : 400 kV 13.8 PAGE NO : 20.134
RATED POWER (kVA) : 48000 / 60000 / 74333 VECTOR GROUP : II0 STANDART: IEC 60076-4



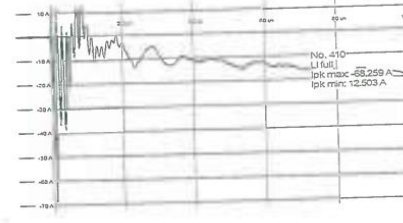
No. 409 U full Upk: -353.104 kV T1: 952.428 ns T2: 50.893 us



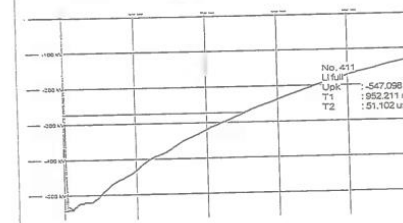
No. 409 U full Ipk max: -6.926 A Ipk min: 9.377 A



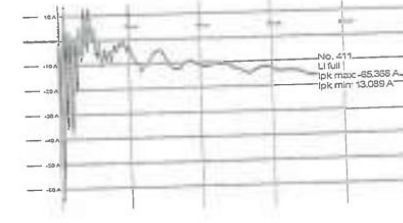
No. 410 U full Upk: -547.165 kV T1: 949.239 ns T2: 51.124 us



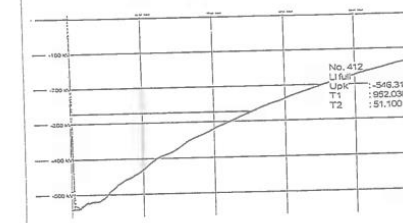
No. 410 U full Ipk max: -6.259 A Ipk min: 12.503 A



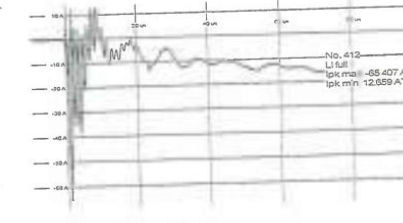
No. 411 U full Upk: -547.099 kV T1: 952.211 ns T2: 51.102 us



No. 411 U full Ipk max: -6.366 A Ipk min: 13.089 A



No. 412 U full Upk: -546.311 kV T1: 952.036 ns T2: 51.100 us



No. 412 U full Ipk max: -6.407 A Ipk min: 12.669 A

Tested By:

Checked By:

Customer or Representative:

Date: 07.09.2013

Date: 07.09.2013

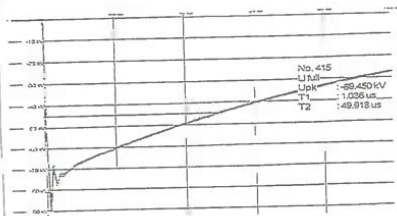
Date: 07.09.2013

This report shall not be reproduced other than in full except with the permission of BEST Elektronik Sanayi Testleri A.Ş. Testing Laboratory. Testing report without signature and seal are not valid.
BEST Elektronik Sanayi Testleri A.Ş. Organize San Bölgesi 7. cadde No 13 Balıkesir/TURKEYE Tel: +90 266 281 10 70 Fax: +90 266 281 10 68

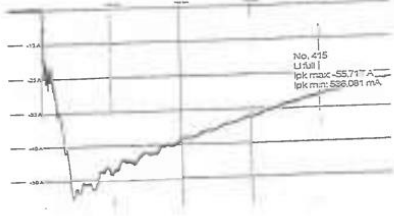


LIGHTNING IMPULSE TEST

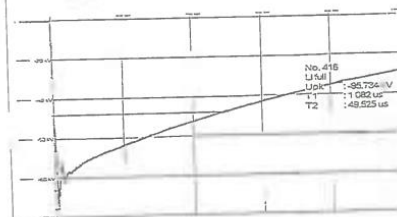
CUSTOMER : KALKANLI - TEYDEB PERFORMED TERMINAL : LV 2.1
SERIAL NO : RATED VOLTAGE(kV) : 400 V 13.8 PAGE NO : 21/34
RATED POWER (kVA) : 48000 / 60000 / 74333 VECTOR GROUP : 00 STANDART: IEC 60076-4



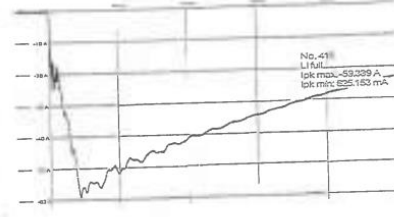
No. 415 LI full U pk: -59.450 kV T1: 1.035 us T2: 49.918 us



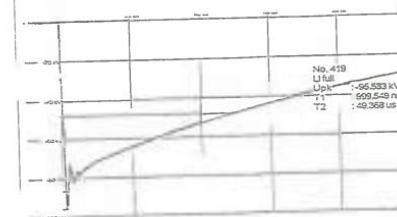
No. 415 LI full I pk max: -59.450 A Ipk min: 558.081 mA



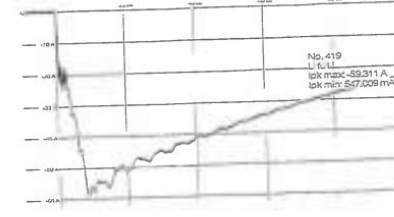
No. 416 LI full U pk: -59.734 kV T1: 1.082 us T2: 49.525 us



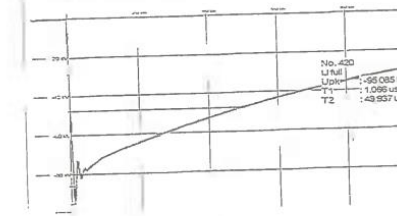
No. 416 LI full I pk max: -59.734 A Ipk min: 625.151 mA



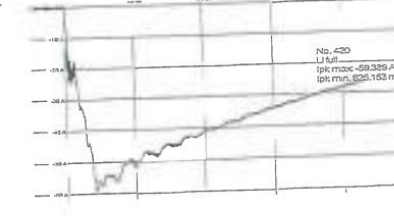
No. 419 LI full U pk: -59.593 kV T1: 999.549 us T2: 49.368 us



No. 419 LI full I pk max: -59.593 A Ipk min: 547.029 mA



No. 420 LI full U pk: -59.085 kV T1: 1.096 us T2: 49.507 us



No. 420 LI full I pk max: -59.085 A Ipk min: 625.153 mA

Tested By:

Checked By:

Customer or Representative

Date: 07.09.2013

Date: 07.09.2013

Date: 07.09.2013

This report shall not be reproduced (either in full or in part) without the permission of BEST Elektrik Elektronik Sanayi Tesisleri A.Ş. Testing Laboratory. Testing report without signature and seal are not valid.
BEST ELEKTRİK ELEKTRONİK SANAYİ TESİSLERİ A.Ş. Organize Sanayi Bölgesi 7. Cadde No:1 Beşiktaş/İSTANBUL Tel: +90 212 251 10 70 Fax: +90 212 251 10 65
Form 259

BEST

LIGHTNING IMPULSE TEST

CUSTOMER: **KALKANLI - TEYDER** PERFORMED TERMINAL : **LV 31**
 SERIAL NO: **7214** RATED VOLTAGE(kV) : **400 / 13.8** PAGE NO: **7214**
 RATED POWER (kVA) : **48000 / 60000 / 74333** VECTOR GROUP : **00** STANDART: **IEC 60076-4**

No. 421
U to full
U pk: 49.398 kV
T1: 1.041 us
T2: 49.743 us

No. 421 U to full U pk: 49.398 kV T1: 1.041 us T2: 49.743 us

No. 421
I to full
I pk max: 59.325 A
I pk min: 743.389 mA

No. 421 I to full I pk max: 59.325 A I pk min: 743.389 mA

No. 422
U to full
U pk: 94.360 kV
T1: 1.001 us
T2: 59.550 us

No. 422 U to full U pk: 94.360 kV T1: 1.001 us T2: 59.550 us

No. 422
I to full
I pk max: 59.858 A
I pk min: 793.397 mA

No. 422 I to full I pk max: 59.858 A I pk min: 793.397 mA

No. 423
U to full
U pk: 94.454 kV
T1: 1.038 us
T2: 59.584 us

No. 423 U to full U pk: 94.454 kV T1: 1.038 us T2: 59.584 us

No. 423
I to full
I pk max: 59.819 A
I pk min: 820.513 mA

No. 423 I to full I pk max: 59.819 A I pk min: 820.513 mA

No. 424
U to full
U pk: 94.468 kV
T1: 1.027 us
T2: 59.593 us

No. 424 U to full U pk: 94.468 kV T1: 1.027 us T2: 59.593 us

No. 424
I to full
I pk max: 59.976 A
I pk min: 829.752 mA

No. 424 I to full I pk max: 59.976 A I pk min: 829.752 mA

Tested By:

Checked By:

Customer or Representative:

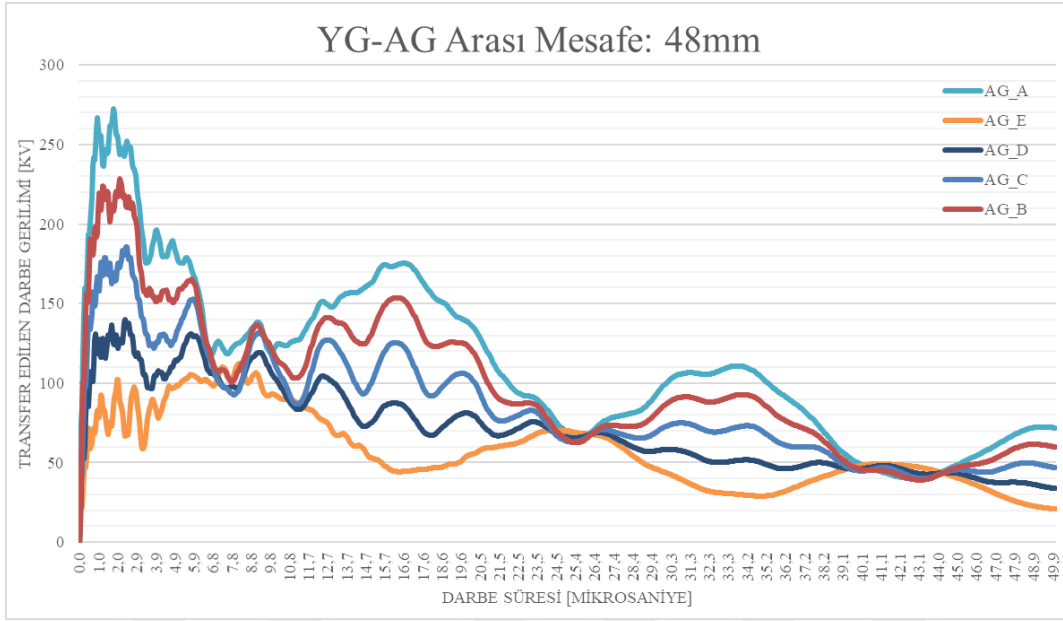
Date: 07.09.2013

Date: 07.09.2013

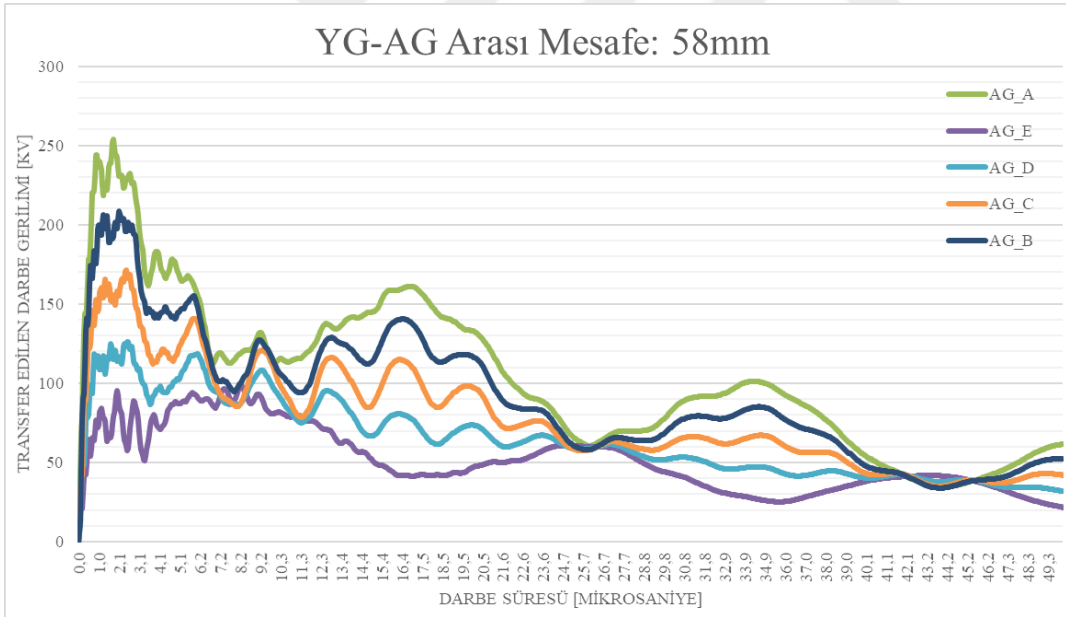
Date: 07.09.2013

This report shall not be reproduced or used in any way without the permission of BEST Elektrikcilik Sanayi Tesisleri A.Ş. Testing Laboratory. Test report without signature and seal is not valid.
 BEST Elektrikcilik Sanayi Tesisleri A.Ş. Organize San Bölgesi 7, 33090 No 1 Bulvarı/TURKEY Tel: +90 266 281 10 10 Fax: +90 266 281 10 88
 E-posta: info@besttr.com.tr

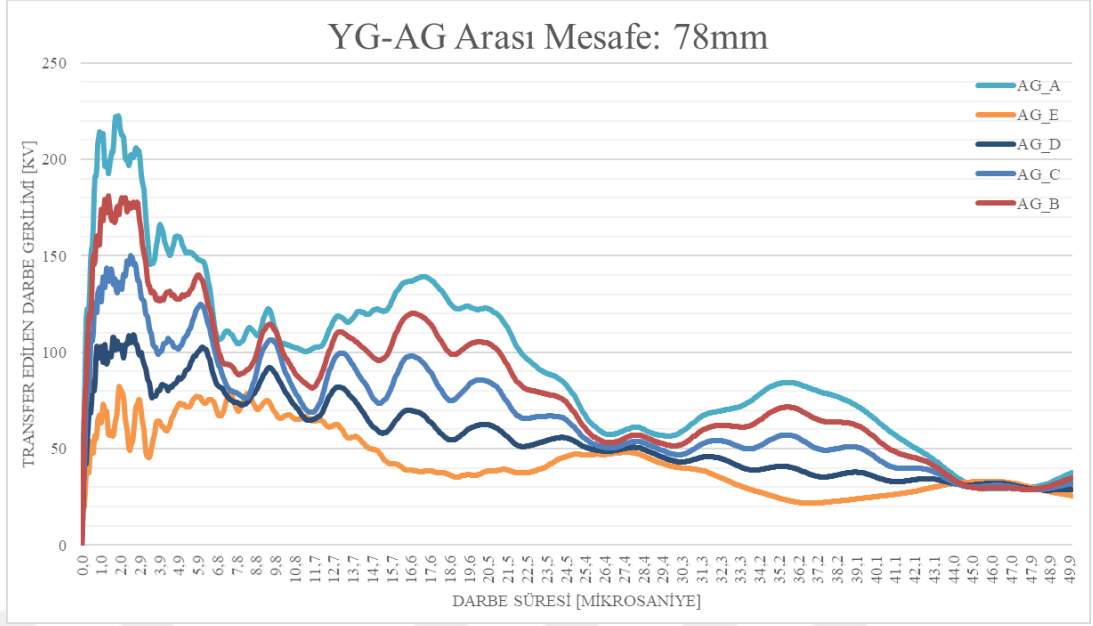
EK B: AG mesafesinin değişimine göre transfe edilen darbe çıktıları



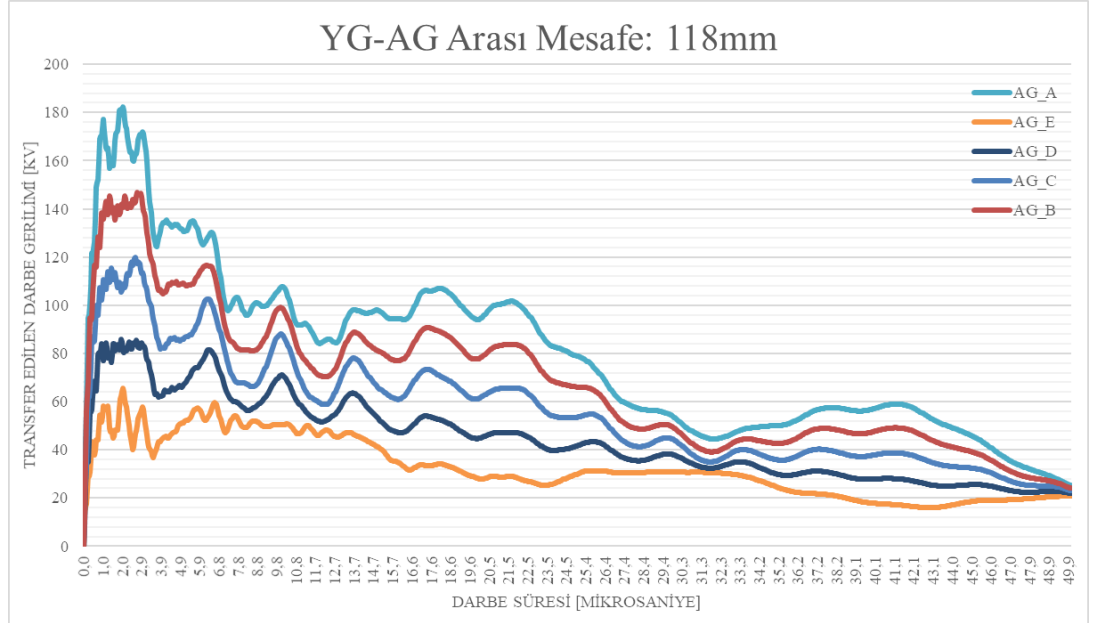
- a.** YG-AG arası mesafe 48mm iken darbe şekilleri (Turkuaz = AG_A, Turuncu = AG_E, Lacivert = AG_D, Mavi = AG_C, Kırmızı = AG_B)



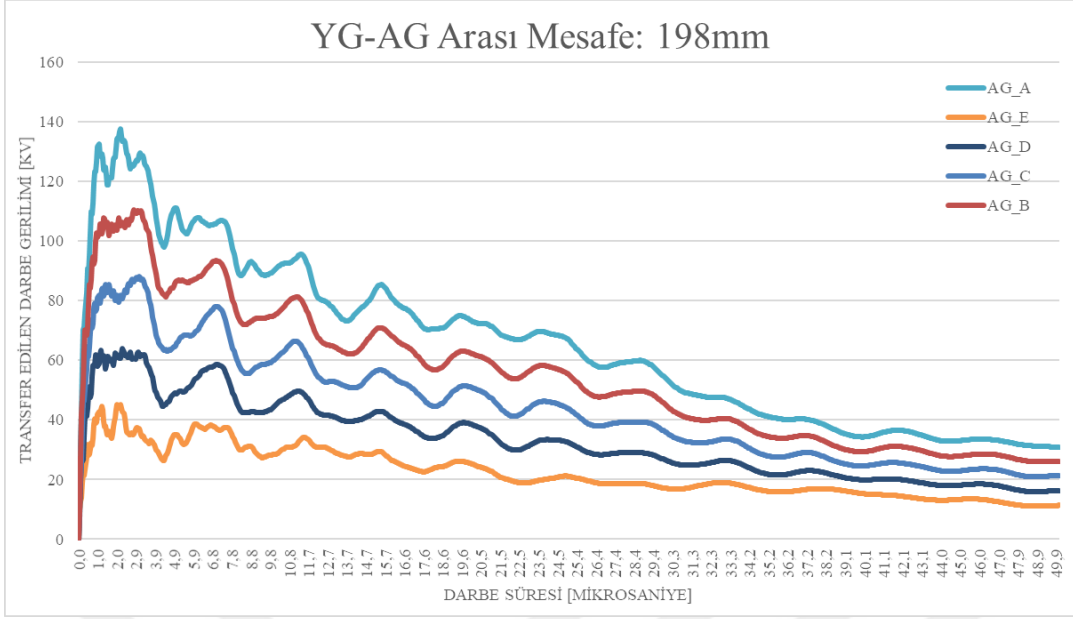
- b.** YG-AG arası mesafe 58mm iken darbe şekilleri (Yeşil= AG_A, Mor= AG_E, Mavi= AG_D, Turuncu = AG_C, Lacivert= AG_B)



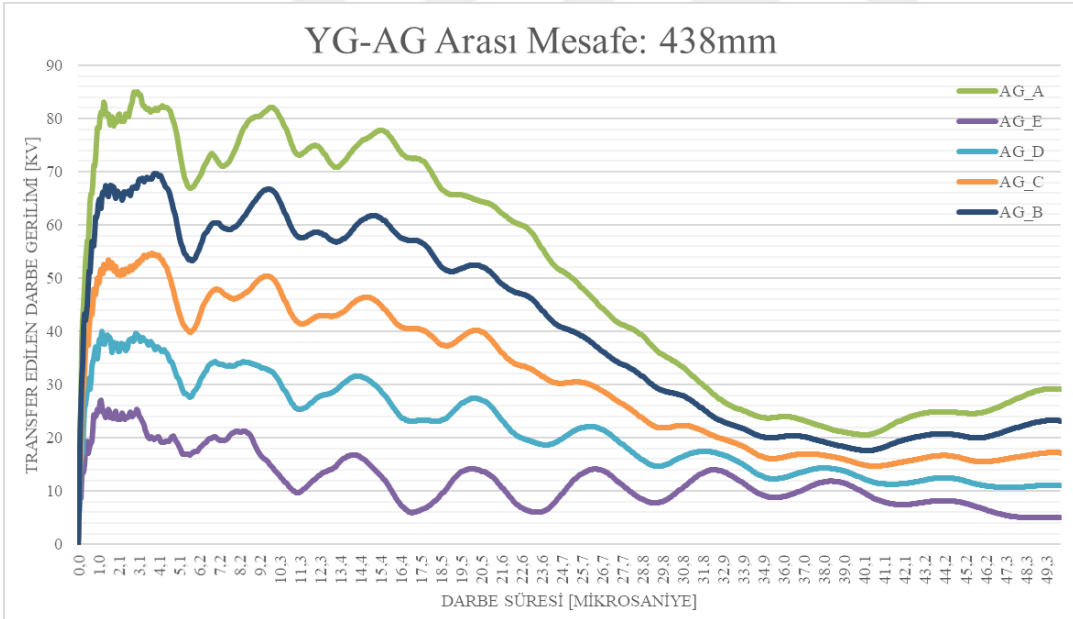
- c.** YG-AG arası mesafe 78mm iken darbe şekilleri (Turkuaz = AG_A, Turuncu = AG_E, Lacivert = AG_D, Mavi = AG_C, Kırmızı = AG_B)



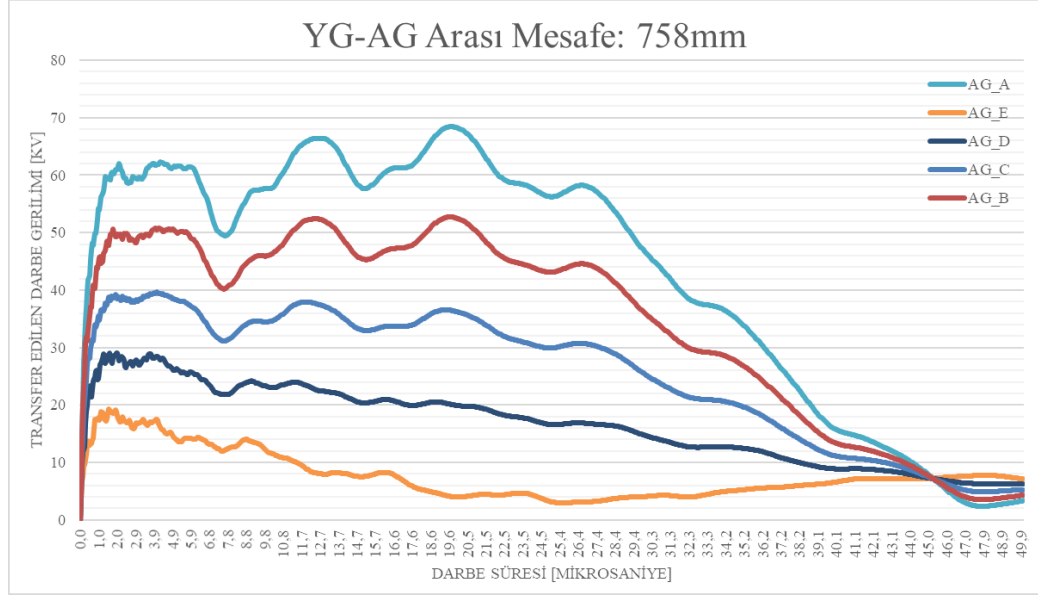
- d.** YG-AG arası mesafe 118mm iken darbe şekilleri (Turkuaz = AG_A, Turuncu = AG_E, Lacivert = AG_D, Mavi = AG_C, Kırmızı = AG_B)



- e. YG-AG arası mesafe 198mm iken darbe şekilleri (Turkuaz = AG_A, Turuncu = AG_E, Lacivert = AG_D, Mavi = AG_C, Kırmızı = AG_B)



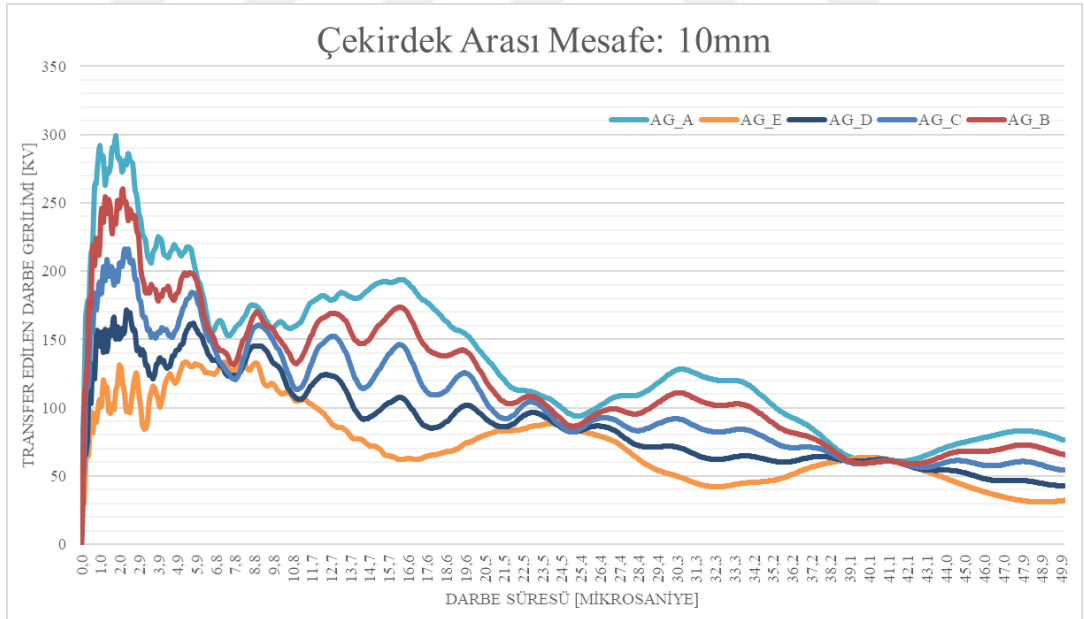
- f. YG-AG arası mesafe 438mm iken darbe şekilleri (Yeşil= AG_A, Mor= AG_E, Mavi= AG_D, Turuncu = AG_C, Lacivert= AG_B)



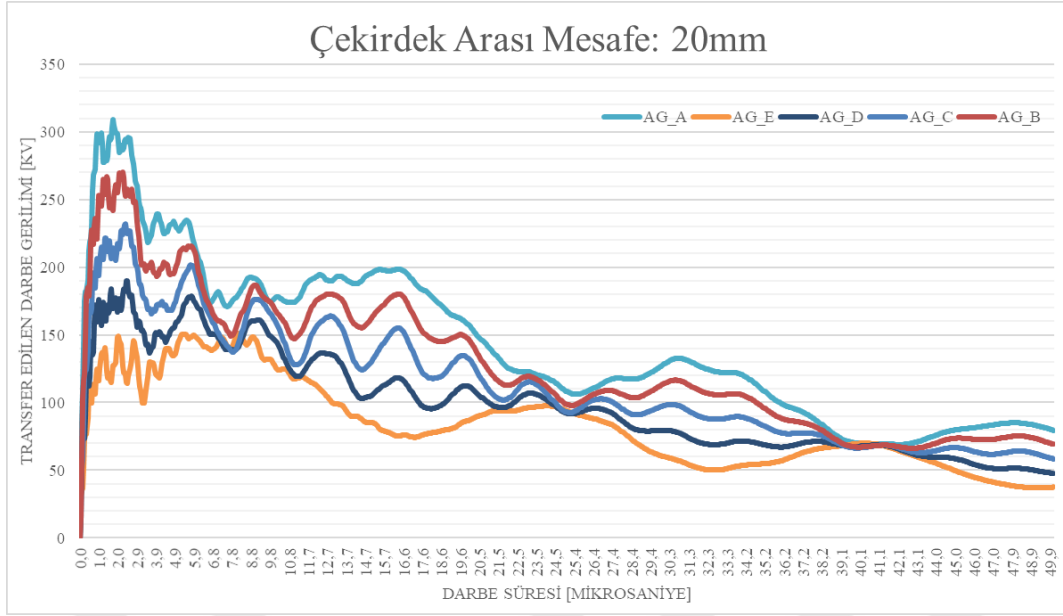
- g. YG-AG arası mesafe 758mm iken darbe şekilleri (Turkuaz = AG_A, Turuncu = AG_E, Lacivert = AG_D, Mavi = AG_C, Kırmızı = AG_B)

Şekil B.1 : YG-AG arası mesafenin değiştirilerek yansıyan darbenin incelenmesi.

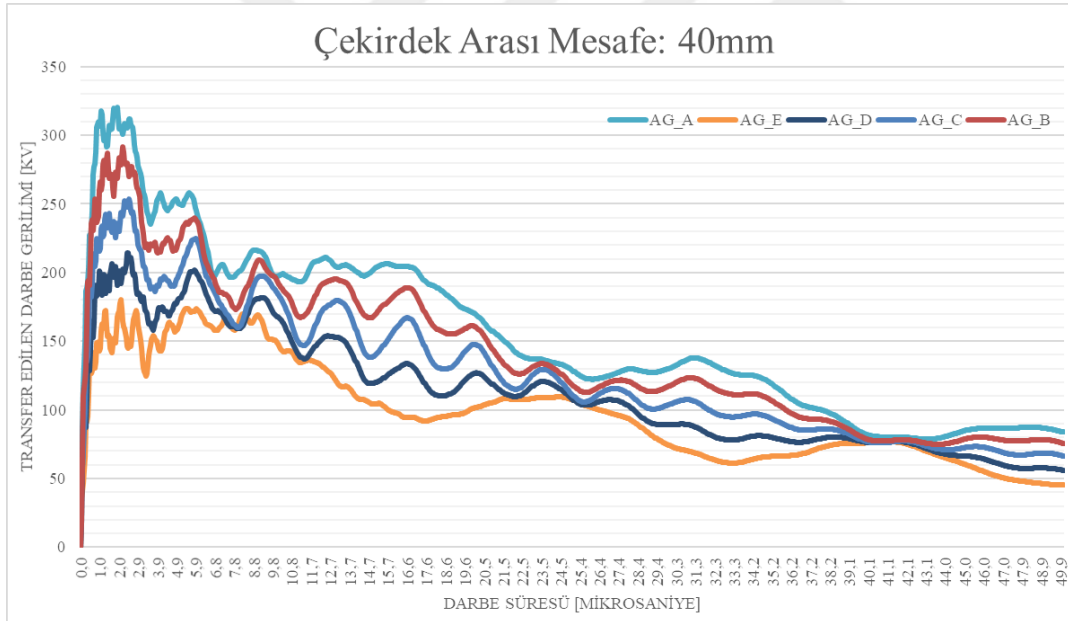
EK C: Çekirdek ile AG sargısı arasındaki mesafesinin değişimine göre transfe edilen darbe çıktıları



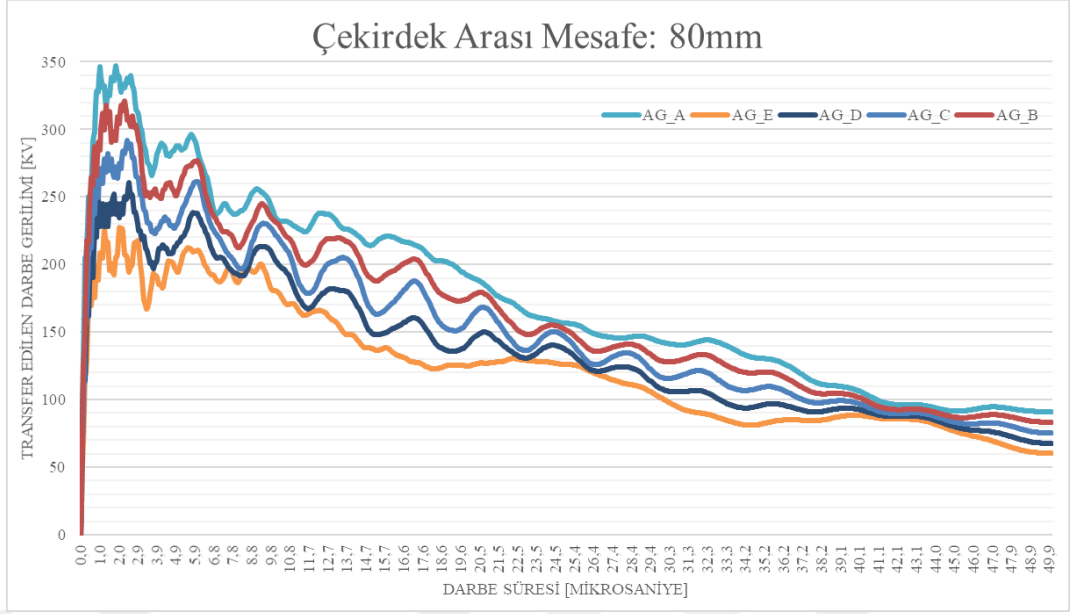
- a. AG-Çekirdek arası mesafe 10mm iken darbe şekilleri (Turkuaz = AG_A, Turuncu = AG_E, Lacivert = AG_D, Mavi = AG_C, Kırmızı = AG_B)



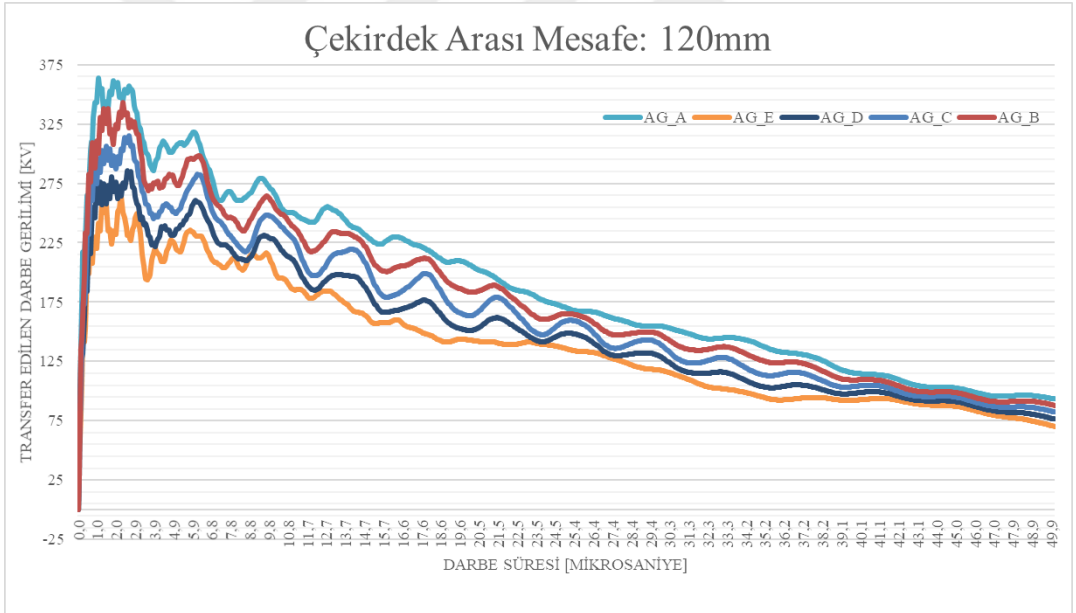
- b.** AG-Çekirdek arası mesafe 20mm iken darbe şekilleri (Turkuaz = AG_A, Turuncu = AG_E, Lacivert = AG_D, Mavi = AG_C, Kırmızı = AG_B)



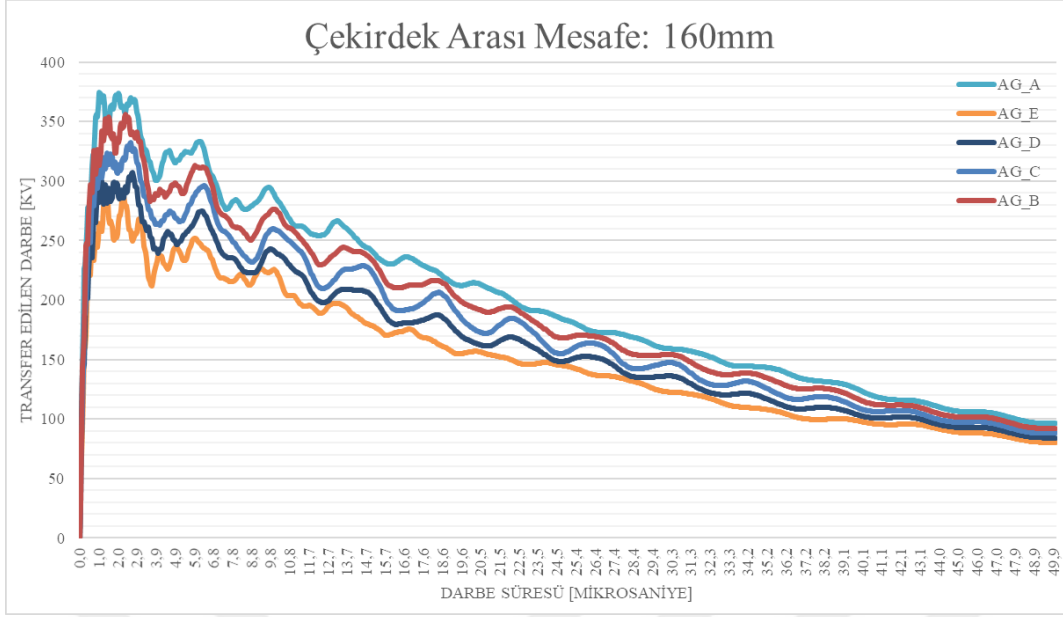
- c.** AG-Çekirdek arası mesafe 40mm iken darbe şekilleri (Turkuaz = AG_A, Turuncu = AG_E, Lacivert = AG_D, Mavi = AG_C, Kırmızı = AG_B)



- d.** AG-Çekirdek arası mesafe 80mm iken darbe şekilleri (Turkuaz = AG_A, Turuncu = AG_E, Lacivert = AG_D, Mavi = AG_C, Kırmızı = AG_B)



- e.** AG-Çekirdek arası mesafe 120mm iken darbe şekilleri (Turkuaz = AG_A, Turuncu = AG_E, Lacivert = AG_D, Mavi = AG_C, Kırmızı = AG_B)



- f. AG-Çekirdek arası mesafe 160mm iken darbe şekilleri (Turkuaz = AG_A, Turuncu = AG_E, Lacivert = AG_D, Mavi = AG_C, Kırmızı = AG_B)

Şekil C.1 : AG-Çekirdek arası mesafenin değiştirilerek yansıyan darbenin incelenmesi.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Ahmet Kerem KÖSEOĞLU

Doğum Tarihi ve Yeri : 25.08.1987 - İstanbul

E-posta : akkoseoglu@outlook.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2009, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2011'den beri Best Transformatör'de çeşitli görevler aldı, şu anda Ar-Ge Müdürü pozisyonunda çalışıyor.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

4th International Conference on Advanced Technology & Sciences. (Kasım 2016).

Phase Shifting Transformers: A Survey on Control and Optimization Strategies

Güç Sistemleri konferansı. (Kasım 2016). *Faz Kaydırıcı Transformatörlerin*

Dünyadaki Durumu ve Uygulama Alanlarının Literatür İncelemesi