

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**MESAFE KORUMA RÖLELERİNİN GÜÇ SALINIMLARINDA**  
**ÇALIŞMA BAŞARIMLARININ YÜKSELTİLMESİ**

**İBRAHİM GÜRSU TEKDEMİR**

**KOCAELİ 2017**

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

MESAFE KORUMA RÖLELERİNİN GÜÇ SALINIMLARINDA  
ÇALIŞMA BAŞARIMLARININ YÜKSELTİLMESİ

İBRAHİM GÜRSU TEKDEMİR

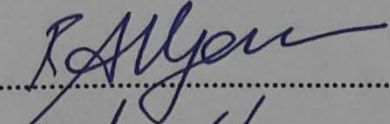


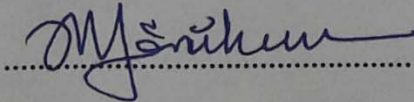
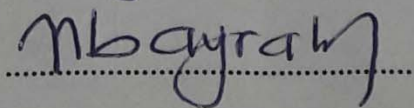
Doç.Dr. Bora ALBOYACI  
Danışman, Kocaeli Üniv.

Doç.Dr. Ayşen BASA ARSOY  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. M. Hakan HOCAOĞLU  
Jüri Üyesi, Gebze Teknik Üniv.

Doç.Dr. Nuran YÖRÜKEREN  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Mehmet BAYRAK  
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.

  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 23.05.2017

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Beş yılı aşkın süre önce başladığım doktora eğitimimi, mesafe röleleri ile ilgili önemli bir konuyu ele alan ve ilgilendiği probleme yeni bir çözüm getiren bu tez çalışması ile sonlandırmanın heyecanını duyuyorum. Ben doktora sürecinin deneyimleri arasına moralsiz günleri ve uykusuz geceleri katarken bilim insanı olmak gayretinde olan kişilerin yüzleşmesi gereken türlü zorluklar olduğunu ve insanın bu zorluklar karşısında yılgınlık göstermemesi gerektiğini de öğrenmiş bulundum.

Hayatta insanın en iyiyi araması ve en güzeli meydana getirmek için çalışması gerektiğine inanıyorum. Öyle inanmasaydık, bilimsel merakımız tükenseydi, ruhumuz ölü, heveslerimiz kayıp olsaydı, sanırım bu ipi bugünkü gibi göğüsleyemeyecektik.

Bana sevginin, emeğin, dürüstlüğün, bilginin ve eğitimin yüksek değerler olduğunu öğreten ve bunlara sahip çıkma iradesini aşıl原因an annem Naime Tekdemir ve babam Mehmet Tekdemir başta olmak üzere aileme ve tüm sevdiklerime destekleri için teşekkür etmek istiyorum. Bu süreçte yitirdiğim anneannem Ayşe Sebahat Değirmenci'yi hiçbir zaman unutmayacağım, onu da şükranla ve rahmetle anıyorum.

Bana inancımı hiçbir zaman kaybetmeyen danışman hocam Doç. Dr. Bora Alboyacı'ya en çok bunun için teşekkür etmem gerekir. Son olarak, Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'ndeki hocalarıma, üniversite içindeki tüm mesai arkadaşlarıma, dostlarıma, içtenlikleri, destekleri ve iyi niyetleri için teşekkür ediyorum.

Mayıs – 2017

İbrahim Gürsu TEKDEMİR

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR .....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLolar DİZİNİ .....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ÖZET .....	x
ABSTRACT.....	xi
GİRİŞ .....	1
1. MESAFE KORUMANIN TEMELLERİ .....	12
2. MEVCUT GÜÇ SALINIMI TESPİTİ YÖNTEMLERİ .....	17
2.1. Azalan Empedans Yöntemi.....	17
2.2. Salınım Merkez Gerilimi (SMG) Yöntemi .....	18
2.3. Bindirilmiş Akım Yöntemi .....	19
2.4. Azalan Direnç Yöntemi .....	19
2.5. Klasik Güç Salınımı Tespiti Yöntemlerine Genel Bir Bakış.....	20
3. GÜÇ SALINIMI TESPİTİ İÇİN ÖNERİLEN YÖNTEM.....	21
4. YÖNTEMLERİN BAŞARIMINA İLİŞKİN TEMEL ANALİZLER.....	33
4.1. Tek Makina Sonsuz Bara (TMSB) Test Sisteminde Yapılan Analizler .....	34
4.1.1. Kısa devre arızası senaryoları.....	35
4.1.2. Güç salınımı senaryoları.....	42
4.1.3. Güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları .....	46
4.1.4. Genel değerlendirme .....	51
4.2. 68 Baralı (NETS-NYGS) Test Sisteminde Yapılan Analizler.....	52
4.2.1. Kısa devre arızası senaryoları.....	54
4.2.2. Güç salınımı senaryoları.....	60
4.2.3. Güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları .....	64
4.2.4. Genel değerlendirme .....	68
5. ÖNERİLEN YÖNTEMİN DETAYLI DEĞERLENDİRİLMESİ .....	70
5.1. Parametre Değişimleri .....	70
5.2. Algoritmanın Gerçek Zamanlı İşletilme Hızı .....	76
5.3. Akım Ölçü Transformatörlerinin Doyma Etkisi .....	78
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	83
KAYNAKLAR .....	89
EKLER.....	93
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER .....	98
ÖZGEÇMİŞ .....	99

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Mesafe koruma uygulaması yapılan örnek bir sistemin tek hat gösterimi.....	13
Şekil 1.2.	R-X diyagramında mesafe korumada temel koruma bölgesi.....	14
Şekil 1.3.	Empedans karakteristiğinde yönlü korumanın gösterilmesi.....	15
Şekil 1.4.	Mho karakteristiği ve elde edilen yönlü ve seçici koruma.....	15
Şekil 1.5.	Mho karakteristiğinde tanımlanan 1., 2. ve 3. mesafe koruma bölgeleri.....	16
Şekil 2.1.	Hesaplanan empedans değerlerinin ( $Z_{h1}, Z_{h2}, Z_{h3}, \dots Z_{hn}$ ) güç salınımlarında koruma bölgesinin içine girmesinin R-X diyagramında mho karakteristiği için gösterimi.....	18
Şekil 3.1.	Örnek bir sistemden alınan, normal ve arızalı durum akım işaretleri için hesaplanan tahmin hatalarının birlikte gösterimi.....	25
Şekil 3.2.	Örnek bir sistemden alınan normal durum akım işareti için hesaplanan tahmin hatasının gösterimi.....	26
Şekil 3.3.	Örnek bir sistemden alınan arızalı durum akım işareti için hesaplanan tahmin hatasının gösterimi.....	26
Şekil 3.4.	Örnek bir sistemden alınan güç salınımı durumundaki akım işareti için hesaplanan tahmin hatasının gösterimi.....	27
Şekil 3.5.	Örnek bir sistemden alınan güç salınımı durumundaki akım işareti için hesaplanan tahmin hatasının detaylı gösterimi.....	27
Şekil 3.6.	Örnek bir sistemden alınan güç salınımı esnasında kısa devre arızası durumundaki akım işareti için hesaplanan tahmin hatasının gösterimi.....	28
Şekil 3.7.	Örnek bir sistemden alınan güç salınımı esnasında kısa devre arızası durumundaki akım işareti için hesaplanan tahmin hatasının detaylı gösterimi.....	28
Şekil 3.8.	Akım işaretinin sürekliliğinin bozulmadığı örnek bir kısa devre arızası.....	30
Şekil 3.9.	Tezde önerilen ve güç salınımı durumunda mesafe koruma başarımını yükselten yöntemle ilişkin akış diyagramı.....	32
Şekil 4.1.	TMSB test sisteminin tek hat şeması.....	34
Şekil 4.2.	TMSB test sisteminin PSCAD modeline ilişkin ekran görüntüsü.....	37
Şekil 4.3.	Kısa devre arızası senaryolarının ilki için tek faz gerilim işaretinin değişimi.....	38
Şekil 4.4.	Kısa devre arızası senaryolarının ilki için tek faz akım işaretinin değişimi.....	38
Şekil 4.5.	Kısa devre arızası senaryolarının ilki için röle tarafından hesaplanan empedans değerinin değişimi.....	39
Şekil 4.6.	Kısa devre arızası senaryolarının ilki için röle tarafından üretilen anahtarlama cevabının incelenen aralıktaki değişimi.....	39
Şekil 4.7.	Kısa devre arızası senaryolarının ilki için röle tarafından hesaplanan empedans değerinin R-X diyagramdaki değişimi.....	40

Şekil 4.8. Güç salınımı senaryolarının ilki için tek faz gerilim işaretinin değişimi .....	43
Şekil 4.9. Güç salınımı senaryolarının ilki için tek faz akım işaretinin değişimi .....	43
Şekil 4.10. Güç salınımı senaryolarının ilki için röle tarafından hesaplanan empedans değerinin değişimi .....	44
Şekil 4.11. Güç salınımı senaryolarının ilki için röle tarafından üretilen anahtarlama cevabının incelenen aralıktaki değişimi.....	44
Şekil 4.12. Güç salınımı senaryolarının ilki için röle tarafından hesaplanan empedans değerinin R-X diyagramdaki değişimi (1,37 – 1,53 s aralığında) .....	45
Şekil 4.13. Güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryolarının ilki için tek faz gerilim işaretinin değişimi.....	48
Şekil 4.14. Güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryolarının ilki için tek faz akım işaretinin değişimi .....	48
Şekil 4.15. Güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryolarının ilki için röle tarafından hesaplanan empedans değerinin değişimi.....	49
Şekil 4.16. Güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryolarının ilki için röle tarafından üretilen anahtarlama cevabının incelenen aralıktaki değişimi .....	49
Şekil 4.17. 68 baralı NETS-NYGS'nin tek hat şeması .....	53
Şekil 4.18. Seçilen kısa devre arızası senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için tek faz gerilim işaretinin değişimi.....	56
Şekil 4.19. Seçilen kısa devre arızası senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için tek faz akım işaretinin değişimi .....	56
Şekil 4.20. Seçilen kısa devre arızası senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için röle tarafından hesaplanan empedans değerinin değişimi.....	57
Şekil 4.21. Seçilen kısa devre arızası senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için röle tarafından üretilen anahtarlama cevabının incelenen aralıktaki değişimi .....	57
Şekil 4.22. Seçilen kısa devre arızası senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için arıza öncesinden arıza sonrasına geçiş esnasında empedans değerlerinin R-X diyagramındaki değişimleri.....	58
Şekil 4.23. Seçilen güç salınımı senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için tek faz gerilim işaretinin değişimi.....	61
Şekil 4.24. Seçilen güç salınımı senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için tek faz akım işaretinin değişimi .....	61
Şekil 4.25. Seçilen güç salınımı senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için röle tarafından hesaplanan empedans değerinin değişimi.....	62
Şekil 4.26. Seçilen güç salınımı senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için röle tarafından üretilen anahtarlama cevabının incelenen aralıktaki değişimi .....	62
Şekil 4.27. Seçilen güç salınımı senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için röle tarafından hesaplanan empedans değerinin R-X diyagramdaki değişiminden kesit.....	63
Şekil 4.28. Seçilen güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için tek faz gerilim işaretinin değişimi.....	65
Şekil 4.29. Seçilen güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için tek faz akım işaretinin değişimi .....	65

Şekil 4.30. Seçilen güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için röle tarafından hesaplanan empedans değerinin değişimi .....	66
Şekil 4.31. Seçilen güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için röle tarafından üretilen anahtarlama cevabının incelenen aralıktaki değişimi .....	66
Şekil 5.1. TMSB test sisteminde seçilen kısa devre arızası (A), güç salınımı (S) ve güç salınımı esnasında kısa devre arızası (SA) senaryolarında, Klasik Yöntem 2, 3 ve 4'e ilişkin parametrelerin (P2, P3 ve P4 satırları) değişimleri .....	72
Şekil 5.2. TMSB test sisteminde seçilen kısa devre arızası (A), güç salınımı (S) ve güç salınımı esnasında kısa devre arızası (SA) senaryolarında, incelenen güncel yönteme [25] ve tezde önerilen yönteme ilişkin parametrelerin (TMİ ve Aİ satırları) değişimleri.....	73
Şekil 5.3. 68 baralı NETS-NYGS'nde seçilen kısa devre arızası (A), güç salınımı (S) ve güç salınımı esnasında kısa devre arızası (SA) senaryolarında, Klasik Yöntem 2, 3 ve 4'e ilişkin parametrelerin (P2, P3 ve P4 satırları) değişimleri .....	75
Şekil 5.4. 68 baralı NETS-NYGS'nde seçilen kısa devre arızası (A), güç salınımı (S) ve güç salınımı esnasında kısa devre arızası (SA) senaryolarında, incelenen güncel yönteme [25] ve tezde önerilen yönteme ilişkin parametrelerin (TMİ ve Aİ satırları) değişimleri.....	76
Şekil 5.5. PSCAD'te Lucas akım transformatörü modeli için kullanılan parametre giriş ekranı.....	79
Şekil 5.6. TMSB test sisteminde oluşturulan 4. kısa devre arızası senaryosuna ait akım işaretinin akım ölçü transformatöründe doyması yokken ve varken değişimi .....	80

## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 4.1. TMSB test sisteminde güç salınımı tespiti için kullanılan yöntemlere ait parametreler.....	35
Tablo 4.2. TMSB test sisteminde üretilen kısa devre arızası senaryoları.....	36
Tablo 4.3. TMSB test sistemi için mho karakteristiğinde tanımlanan mesafe koruma bölgesi ayar parametreleri.....	40
Tablo 4.4. İncelenen yöntemlerin TMSB test sisteminde oluşturulan kısa devre arızası senaryoları için elde edilen anahtarlama başarımları.....	41
Tablo 4.5. İncelenen yöntemlerin TMSB test sisteminde oluşturulan kısa devre arızası senaryoları için algoritma temelinde ortalama cevap verme hızları.....	41
Tablo 4.6. İncelenen yöntemlerin TMSB test sisteminde oluşturulan güç salınımı senaryoları için elde edilen anahtarlama başarımları .....	46
Tablo 4.7. TMSB test sisteminde üretilen güç salınımı esnasında kısa devre arızası (ikinci kısa devre arızası) senaryoları .....	47
Tablo 4.8. İncelenen yöntemlerin TMSB test sisteminde oluşturulan güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları için elde edilen anahtarlama başarımları .....	50
Tablo 4.9. İncelenen yöntemlerin TMSB test sisteminde oluşturulan güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları için algoritma temelinde ortalama cevap verme hızları.....	51
Tablo 4.10. İncelenen yöntemlerin TMSB test sisteminde oluşturulan tüm senaryolar için elde edilen toplam anahtarlama başarımları .....	52
Tablo 4.11. 68 baralı NETS-NYGS'NDE güç salınımı tespiti için kullanılan yöntemlere ait parametreler.....	54
Tablo 4.12. 68 baralı NETS-NYGS'nde üretilen kısa devre arızası senaryoları .....	55
Tablo 4.13. 68 baralı NETS-NYGS'nde Hat 1 için mho karakteristiğinde tanımlanan mesafe koruma bölgesi ayar parametreleri.....	57
Tablo 4.14. 68 baralı NETS-NYGS'nde Hat 2 için mho karakteristiğinde tanımlanan mesafe koruma bölgesi ayar parametreleri.....	58
Tablo 4.15. 68 baralı NETS-NYGS'nde Hat 3 için mho karakteristiğinde tanımlanan mesafe koruma bölgesi ayar parametreleri.....	58
Tablo 4.16. İncelenen yöntemlerin 68 baralı NETS-NYGS'nde oluşturulan kısa devre arızası senaryoları için elde edilen anahtarlama başarımları .....	59
Tablo 4.17. İncelenen yöntemlerin 68 baralı NETS-NYGS'nde oluşturulan kısa devre arızası senaryoları için algoritma temelinde ortalama cevap verme hızları .....	59
Tablo 4.18. İncelenen yöntemlerin 68 baralı NETS-NYGS'nde oluşturulan güç salınımı senaryoları için elde edilen anahtarlama başarımları .....	63
Tablo 4.19. 68 baralı NETS-NYGS'nde üretilen güç salınımı esnasında kısa devre arızası (ikinci kısa devre arızası) senaryoları .....	64



Tablo 4.20. İncelenen yöntemlerin 68 baralı NETS-NYGS'nde oluşturulan güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları için elde edilen anahtarlama başarımları .....	67
Tablo 4.21. İncelenen yöntemlerin 68 baralı NETS-NYGS'nde oluşturulan güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları için algoritma temelinde ortalama cevap verme hızları .....	68
Tablo 4.22. İncelenen yöntemlerin 68 baralı NETS-NYGS'nde oluşturulan tüm senaryolar için elde edilen toplam anahtarlama başarımları.....	69
Tablo 5.1. Güncel bir yöntemin ve tezde önerilen yöntemin iki farklı işlemci mimarisinde çalıştırılmaları için geçen ortalama süreler .....	78
Tablo 5.2. Test sistemlerinde kullanılan akım ölçü transformatörlerinin dönüştürme oranları .....	80
Tablo 5.3. TMSB test sisteminde akım ölçü transformatörlerinin doyması durumunda incelenen yöntemlere ilişkin anahtarlama başarımları.....	81
Tablo 5.4. 68 baralı NETS-NYGS'nde akım ölçü transformatörlerinin doyması durumunda incelenen yöntemlere ilişkin anahtarlama başarımları.....	81

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$A, B$	: Elektriksel işaretin genlik değerleri
$d_n$	: $n$ 'inci mertebeden sayısal türev ifadesi
$f(t)$	: Elektriksel işaretin zaman domeninde tanımlanmış fonksiyonu
$f_1$	: Elektriksel şebeke frekansı
$f_2$	: Güç salınımının frekansı
$f_s$	: Örnekleme frekansı
$g(t)$	: Elektriksel işaretin tam doğrulukla zamana bağlı ifadesini verdiği varsayılan sanal bir fonksiyon
$h$	: Örnekleme zaman adımı
$I_b$	: Bindirilmiş akım (Superimposed current)
$I_k$	: Akım işaretinin $k$ 'inci örnekleme değeri
$N$	: Bir periyottan alınan örnek sayısı (örnekleme penceresinin genişliği)
$s_m$	: $m$ 'inci örnekleme parametresi
$s_m^*$	: $m$ 'inci örnekleme parametresi (düzeltme uygulanmış)
$t$	: Zaman
$\alpha$	: Gerilim fazörünün açısı
$\beta$	: Akım fazörünün açısı
$\Delta t$	: Herhangi bir $t_0$ anı ile tahmini yapılan gelecek nokta arasındaki zaman farkı
$\epsilon_m$	: $m$ 'inci hata değeri
$\varphi$	: Faz açısı, ( $^\circ$ )
$\tau$	: Zaman sabiti

## Kısaltmalar

$A_I$	: Ayrım İndeksi
ANFIS	: Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (Uyarlamalı Sinirsel-Bulanık Çıkarım Sistemi)
DT	: Decision Tree (Karar Ağacı)
EMD	: Empirical Mode Decomposition (Deneysel Mod Ayırıştırma)
FPGA	: Field Programmable Gate Array (Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri)
IEEE	: The Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
NETS-NYPS	: New England Test System – New York Power System (New England Test Sistemi – New York Güç Sistemi)
OST	: Out-Of-Step Tripping (Ayak Uyduramama Açtırması)
PS	: Phase Space (Faz Uzayı)
PSB	: Power Swing Blocking (Güç Salınımı Perdeleme)
PSD	: Power Swing Deblocking (Güç Salınımı Geri Perdeleme)
RF	: Random Forest (Rastgele Orman)

SCV	:	Swing Center Voltage (Salınım Merkez Gerilimi)
SMIB	:	Single Machine – Infinite Bus (Tek Makina – Sonsuz (Güçlü) Bara)
SVM	:	Support Vector Machines (Destek Vektör Makinaları)
TMI	:	Transient Monitor Index (Transiyent Monitör İndeksi)
WAMS	:	Wide Area Measurement System (Geniş Alan Ölçüm Sistemi)
WSCC	:	Western Electricity Coordinating Council (Batı Elektrik Koordinasyon Konseyi)
WSE	:	Wavelet Singular Entropy (Dalgacık Tekil Entropi)



## MESAFE KORUMA RÖLELERİNİN GÜÇ SALINIMLARINDA ÇALIŞMA BAŞARIMLARININ YÜKSELTİLMESİ

### ÖZET

Bu çalışmada, enerji iletim hatlarının korunmasında kullanılan mesafe rölelerinin güç salınımlarında yanlış kesici anahtarlama yaptırmalarının önlenmesi üzerinde durulmaktadır. Böylesi yanlış anahtarlama enerji sürekliliğini aksatabileceği ve sistemi kararsızlığa götürebileceği için rölelerin kısa devre arızası ve güç salınımı durumlarını birbirinden yüksek doğrula ayırt etmesi gerekmektedir. Bunun için rölede güç salınımı perdeleme ve güç salınımı geri perdeleme fonksiyonları kullanılmaktadır. Literatürde söz edilen klasik ve güncel bazı yöntemlerin bu fonksiyonları iyileştirmede bazı eksik ve yetersiz kalan noktaları bulunduğu görülmektedir. Bu tez çalışmasında, bazı mevcut yöntemlerin başarısız olduğu durumlar olduğu gösterilmiş ve Taylor serisi açılımına ve tahmin hatasını izlemeye dayanan yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntemlerin başarımını değerlendirmek için PSCAD’te çeşitli analizler gerçekleştirilmiş; tek makina sonsuz güçlü bara test sistemi ve 68 baralı New England test sistemi – New York güç sisteminde farklı kısa devre arızası, güç salınımı ve güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları oluşturulmuştur. MATLAB’te gerçekleştirilen analizler, tezde önerilen yöntemin yüksek başarımla gösterdiğine işaret etmektedir. Yapılan analizlere göre, yöntemin doğru anahtarlama cevabı vermeyi sağladığı, algoritma ve işlemci temelinde cevap verme hızının yüksek olduğu ve parametre çıkışının kısa devre arızası ve güç salınımı durumlarının ayırımı yapmayı kolaylaştıracak yapıda olduğu görülmektedir. Ayrıca, yöntemin akım ölçü transformatörlerinin doyması durumundaki tepkisi de incelenmekte ve başarımının yine yüksek düzeylerde olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, tezde önerilen yöntem basit ve uygulanabilir bir yapıdadır ve sistemin güvenilirliğini arttırmaktadır. Yapılan çalışma ile mesafe rölesinin güç salınımı perdeleme ve güç salınımı geri perdeleme fonksiyonları iyileştirilmektedir.

**Anahtar kelimeler:** Güç Salınımı, Güç Salınımı Geri Perdeleme, Güç Salınımı Perdeleme, Mesafe Koruma, Mesafe Koruma Rölesi.

## **IMPROVEMENT OF DISTANCE PROTECTION RELAY PERFORMANCE DURING POWER SWING**

### **ABSTRACT**

In this study, prevention of wrong breaker action of distance relays during power swing is focused on. Because such wrong actions may disturb continuity of power supply and lead to system instability, it is necessary for relays to distinguish power swing and short circuit fault cases with high accuracy. Power swing blocking and power swing deblocking functions are employed in the relay for that purpose. There seems some missing and insufficient points of conventional and some latest methods mentioned in literature for enhancing these functions. In this thesis study, it is shown that there are cases in which some current methods are unsuccessful and a novel method is developed which is based on Taylor series expansion and tracking of estimation error. Various analyses are carried out in PSCAD for evaluating performances of methods; different short circuit fault, power swing and short circuit fault during power swing scenarios are constituted in single machine infinite bus test system and 68-bus New England test system – New York power system. Analyses carried out in MATLAB points out that the proposed method has high performance. According to the analyses, it is shown that the method ensures correct breaker action, speed of it is high when algorithm and processor execution times are considered and structure of its parameter output makes discrimination of short circuit fault and power swing cases easier. Moreover, reaction of the method in current transformer saturation case is also examined and it is shown that performance of it is in high level again. As a conclusion, structure of the proposed method is simple and applicable and it improves system reliability. Power swing blocking and power swing deblocking functions are improved as a result of this work.

**Key words:** Power Swing, Power Swing Deblocking, Power Swing Blocking, Distance Protection, Distance Protection Relay.

## GİRİŞ

Günümüzde enerji iletim hatlarının korunmasında yaygın olarak mesafe koruma röleleri kullanılmaktadır. Mesafe röleleri, temel olarak empedans değeri hesaplayarak kısa devre arızası tespiti yapmaktadır. Rölenin gerilim ve akım ölçü trafolarından alarak hesapladığı empedans değeri, daha önceden sistem için ayarlanmış olan empedans değerleri ile karşılaştırılarak anahtarlama cevabı üretilebilmektedir. Fakat bazı durumlarda, mesafe rölelerinin gerçek bir arıza olmasa bile kesicilere anahtarlama işareti verdiği görülmüştür. Aşırı yüklenme ya da güç salınımı gibi durumlar, mesafe rölelerinin koruma bölgesine girmesine ve yanlış açtırma yapmasına sebep olabilmektedir.

Bu çalışmada, mesafe rölelerinin güç salınımı durumlarında çalışma başarımları detaylı olarak incelenmiş ve olası yanlış açma işleminin nasıl engellenebileceği ve en doğru anahtarlama cevabının nasıl elde edilebileceği sorusu üzerinde durulmuştur. Güç salınımları, şebekede ciddi bir üretim ya da tüketim biriminin devreden çıkması ya da devreye alınması sonucu oluşabilir. Ayrıca sistemde kritik bir iletim hattının devreden çıkması da sistemin geri kalanını güç salınımı durumuyla karşı karşıya bırakabilir. Bu gibi gerekçeler, sistemde güç aktarımını güçleştirmeye başlar, generatörlerin rotor açıları birbirlerine göre kayar, sonuçta güç salınımı yaşanır. Güç salınımları genellikle 1-10 Hz arasındaki bir zarfı izler. Sistemin dinamik yapısına ve yaşanan anormalliğin ciddiyetine bağlı olarak bu salınım ya sönümlenir ya da daha da büyür. Yani güç salınımları kararlı ya da kararsız güç salınımları olarak sınıflandırılabilir.

Mesafe rölelerinin güç salınımı durumunda yanlış açtırma vermelerini önlemek için bugün rölelerde güç salınımı perdeleme (GSP / power swing blocking) fonksiyonları kullanılmaktadır. Bu yöntemler çeşitli büyüklükleri izleyerek sistemdeki durum hakkında kaniya varmaya ve doğru karar verdirmeye çalışırlar. Güç salınımlarının kararlı ya da kararsız olması, mesafe rölesinin güç salınımı durumunda alacağı anahtarlama tavrını değiştirmemelidir. Çünkü sistemde kararsız bir güç salınımı yaşanıyor olsa dahi kontrolsüz bir hat kaybı sistemde daha ciddi kararlılık sorunları

yaşanmasına neden olabilir. Bu da enerji kaybının daha büyük olması ve/veya daha uzun sürmesi anlamına gelecektir.

Literatür incelendiği zaman, son yıllara gelindikçe, mesafe rölelerinin güç salınımında yanlış açma yapmasının önlenmesi (perdeleme) ve güç salınımı esnasında gerçekleşen kısa devre arızalarının doğru bir şekilde tespit edilebilmesi (geri-perdeleme) konularında yapılan araştırmaların sayısında artış olduğu görülmektedir. Konunun önemli bir araştırma konusu olduğu ve farklı açılardan ele alınarak farklı çözüm önerileri geliştirildiği anlaşılmaktadır.

Bugün hem klasik hale gelmiş GSP yöntemleri kullanılmakta hem de bu yöntemlerin eksik ve yetersiz kaldıkları görüldüğü için araştırmacılar tarafından yeni perdeleme yöntemleri geliştirilmektedir. Bu çalışmada hem klasik hem de yeni yöntemler göz önüne serilerek iyileştirme yapılması gerekliliği ortaya konulmuş ve yeni bir iyileştirme önerisi getirilmiştir.

Mesafe rölesinin güç salınımı esnasında yanlış açtırma vermesi olasılığının yanında, rölenin GSP yapıldığı esnada (yani bir güç salınımı esnasında) gerçekten bir kısa devre arızası yaşanması olasılığı da mevcuttur. Her şeyden önce bu durumun iyi bir şekilde anlaşılabilmesi ve o noktada GSP'nin sonlandırılması ve kesicilere anahtarlama işaretinin gönderilmesi gerekmektedir. Bu işlev de güç salınımı geri-perdelemesi (GSGP / power swing deblocking) olarak isimlendirilebilir. Bu tez çalışmasında, mesafe rölelerinin hem GSP hem de GSGP fonksiyonlarının iyileştirilmesi üzerinde durulmuş ve her iki işlevi de iyileştiren yeni bir yöntem geliştirilmiştir.

Mesafe rölelerinin güç salınımını kısa devre arızası olarak algılayarak yanlış açtırma vermesi ve GSP esnasında yaşanan kısa devre arızalarının (özellikle simetrik kısa devre arızalarının) tespit edilmesinin güçleşmesi problemleri literatürde şimdiye dek çeşitli açılardan incelenmiştir. 1995 yılında yapılan bir çalışmada, yüksek frekanslı yani hızlı güç salınımları üzerinde durulmuş ve hem yanlış açmanın önlenilebileceği ve hem de bu esnada yaşanacak bir kısa devre arızası için anahtarlama yapılabileceği belirtilmiştir [1]. Bu amaçla gerilimin faz açısı kullanılmaktadır. Aynı yazarların diğer bir çalışmasında da benzer şekilde, hızlı güç salınımları üzerinde durulmuş, yine gerilimin faz açıları göz önüne alınmış ve bu kez yüksek arıza direnci

durumunda rölenin çalışma başarımının iyileştirilebildiği gösterilmiştir [2].

Bugün işletme halinde olan ticari mesafe rölelerinde kullanılan belli başlı klasik GSP fonksiyonları bulunmaktadır. Bunlar röle tarafından ölçümü alınan belli başlı elektriksel parametrelere bağlı olarak çalışmaktadır. Bu yöntemler kullanılarak güç salınımı tespiti yapılabilmektedir; fakat bunların bazı dezavantajları da bulunmakta ve yanlış karar vermeye neden olabilmektedirler. [3,4] çalışmalarında belirtildiği üzere, bu yöntemler konsantrik empedans karakteristiğini kullanan bir yöntem (azalan empedans yöntemi), salınım merkez gerilimi (SMG) yöntemi (ya da  $V_{\cos\phi}$  algoritması), bindirilmiş akım yöntemi ve azalan direnç yöntemidir. Bu kapsamda ya süre ya da incelenen parametrenin değişim hızı izlenmekte ve önceden belirlenen bir eşik değer ile karşılaştırma yapılarak karar verilmektedir. [4]'te de belirtildiği gibi, bu klasik yaklaşımların çeşitli dezavantajları bulunmaktadır; bu yöntemler kullanılarak her zaman doğru anahtarlama cevabı almak mümkün değildir. Bu da korumanın güvenilirliğini azaltan bir sonuçtur. Buna benzer sonuçlar, doktora tezi çalışması kapsamında yapılan detaylı analizlerde bizim tarafımızdan da elde edilmiştir.

[5] ve [6] çalışmalarında SMG'ye dayalı GSP fonksiyonları üzerinde durulmuştur. [5]'te kararsız güç salınımı durumunda sistemi stratejik noktalardan ayıracak olan ayak uyduramama açtırması (AUA / out-of-step tripping, OST) fonksiyonuna değinilmiş ve klasik GSP fonksiyonlarını ayarlamamanın güç olduğundan söz edilmiştir. Bunun nedeninin, detaylı sistem parametrelerine ve kararlılık analizlerine ihtiyaç duyulması olduğu açıklanmıştır. Kullanım zorluğu nedeniyle pratikte bu fonksiyonun kullanılmayabildiği belirtilmektedir. [6] çalışmasında da, SMG'nin değişim hızına dayanan bir yöntem sunulmuş ve sonuçlar bir test sistemi üzerinde gösterilmiştir.

Bir diğer çalışmada [7], hem GSP hem de GSGP fonksiyonlarının iyileştirilmesi için dalgacık dönüşümüne dayanan bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemin başarımının sınanması için tek makina sonsuz (güçlü) bara (TMSB) test sistemi kullanılmıştır. [8] çalışmasında, makine öğrenmesi temelli bir yöntem kullanılarak aynı problemin çözülmesi amaçlanmıştır. Burada, mesafe rölesindeki GSP fonksiyonunun uyarlamalı sinirsel-bulanık çıkarım sistemi (USBÇS / adaptive neuro-fuzzy inference system, ANFIS) yöntemi kullanılarak iyileştirilmesi önerilmektedir. Öğrenme sürecinde giriş



verisi olarak pozitif dizin empedansı, pozitif ve negatif dizin akımlar ve SMG kullanılmaktadır. Bu yöntemin GSP'nin yanı sıra GSGP işlevinin de iyileşmesini sağladığı söylenmekte, ayrıca yöntemin yüksek arıza direnci durumunda da yüksek başarımla çalışabildiği gösterilmektedir.

[9] çalışmasında özellikle güç salınımı esnasında yaşanacak simetrik kısa devre arızası durumları üzerinde durulmuş ve GSGP işlevinin başarımı söz konusu edilmiştir. Bu çalışmada, üç faz aktif ve reaktif güçlerinin değişim hızı değeri kullanılarak yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Yine benzer şekilde, [10] çalışmasında da GSGP işlevinin başarımının iyileştirilmesi üzerinde durulmuştur. Prony yöntemi kullanılarak akım dalga şeklinin bileşenleri elde edilmiş ve yeni bir yaklaşım ortaya çıkarılmıştır.

[11] çalışmasında mesafe rölesinin GSP fonksiyonunun iyileştirilebilmesi için matematiksel morfoloji yönteminin kullanılması önerilmiştir. Çalışmada, özellikle güç salınımı esnasında yaşanacak simetrik kısa devre arızalarının tespitinin zor olduğu vurgulanmakta ve geliştirilen yöntemin bu noktada, literatürde önerilen diğer yöntemlerden üstün olduğu aktarılmaktadır. Bütün bu olumlu özelliklerine rağmen, çalışmada önerilen yöntemin karmaşıklığı nedeniyle uygulama zorluğu yaşanabileceği eleştirisi başka bazı çalışmalar tarafından getirilmiştir.

[12] çalışmasında da, üç faz aktif gücün anlık değerinin frekans bileşenleri kullanılarak salınım esnasında simetrik arızaların tespiti yapılabildiği gösterilmektedir. Bu yöntem kullanılarak, güç salınım esnasında yaşanacak simetrik bir kısa devre arızasının bir periyottan önce tespit edilebildiği belirtilmektedir. Benzetim çalışmaları MATLAB/Simulink'te gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın eksiklerinden birisi başarımlı değerlendirilmesinin farklı test sistemlerinde gerçekleştirilmemiş olmasıdır, denebilir.

[13] çalışmasında, Dalgacık Tekil Entropi'ye (DTE / wavelet singular entropy, WSE) dayanan bir yöntem geliştirildiği gösterilmiş ve bu yöntem kullanılarak iki farklı ayırt etme işlevinin iyileştirildiği açıklanmıştır. Bunlardan biri kararlı ve kararsız güç salınımlarını birbirinden ayırmak, diğeri ise güç salınımı ile kısa devre arızalarını birbirinden ayırmaktır. Doktora tez çalışması kapsamında ilgilenilen kısım ikincisi olmaktadır. Çalışmada, paralel iletim hatlarına sahip bir test sisteminin

Matlab/Simulink'te benzetiminin yapıldığı ve özellikle üretilen güç salınımı esnasında simetrik kısa devre arızası senaryoları üzerinden perdeleme fonksiyonlarının başarımının iyileştirildiği gösterilmektedir.

Aynı problemin çözümü için makine öğrenmesine dayanan bir yaklaşım önerilen çalışmalardan birisi de [14]'tür. Bu çalışmada kullanılan yöntem, destek vektör makinalarıdır (DVM). Yöntemin başarım değerlendirilmesi için hem öğrenme hem de test veritabanları PSCAD'te üretilmiş ve bu amaçla Hindistan şebekesinin bir kesiti alınarak çeşitli kısa devre, güç salınımı ve salınım esnasında kısa devre senaryoları oluşturulmuştur. Kritik bir hattın devre dışı kalması, elektriksel yükün ya da mekanik gücün büyük miktarda ve ani olarak değişmesi gibi koşullar yaratılarak farklı salınım senaryoları üretilmiştir. Üretilen çok sayıda senaryonun ardından yapılan analizler sonunda perdeleme fonksiyonlarına temel oluşturacak ayırım işlevinin iyileştirildiği belirtilmektedir.

Yeri gelmişken, makine öğrenmesine dayanan yöntemler için kısa bir değerlendirme yapmak faydalı olacaktır. Bu yöntemlere dayanan çalışmalarda, salınım perdeleme fonksiyonlarının başarımının oldukça iyileştiği görülmektedir. Ancak, bu yöntemlerin uygulanması için detaylı ve çok sayıda sistem analizleri yapmak gerekecektir. Günümüzde hatların her birinde mesafe rölesi ile koruma yapıldığı düşünüldüğü zaman, makine öğrenmesine dayanan yöntemleri kullanmanın uygulamada pratik olmayacağı çıkarımı yapılabilir. Yalnızca analizler bile oldukça zahmetlidir, çünkü sistem detaylı ve doğru bir şekilde modellenmeli ve sistem için çok farklı koşullar göz önünde bulundurularak zengin senaryolar üretilmelidir.

[15] çalışmasında özel olarak seri kompanze edilmiş hatların korunması ele alınmış ve hem GSP fonksiyonuna hem de güç salınımı esnasında kısa devre arızası tespitine değinilerek seri kompanze edilmiş hatlar içeren test sistemleri kullanılarak çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, bu sistemlerde kullanılabilecek bir salınım perdeleme yaklaşımı önerilmiştir. Bu yöntem, negatif dizin akım hesabına dayanmaktadır. Analizler PSCAD'te gerçekleştirilmiş; simetrik, asimetric ve yüksek dirençli arızalar dikkate alınmıştır.

[16] çalışmasında, salınım tespiti (ve perdelemesi) için kullanılan klasik yöntemlerin sistem parametrelerinin değişim hızına dayandığı ve bunun dış arızalara ve kararlı

salınım durumlarına doğru cevap veremediği belirtilmektedir. Bu bağlamda, bu çalışmada geliştirilen ve admitans değişiminin geometrik yerine dayandırılan yöntemin, sistem parametrelerinin değişim hızından bağımsız olduğu özellikle vurgulanmaktadır. Çalışmada, PSCAD'te incelenen bir test sisteminde hem asimetrik hem de simetrik arıza durumları üretilmiş; arıza, salınım ve salınım esnasında arıza tespitinin yapılabildiği gösterilmiştir. Ayrıca, 10 Hz'lik yüksek salınım frekansı durumlarında da yüksek başarımlar elde edilebileceği belirtilmiştir.

[17] çalışmasında, güç sistemindeki çeşitli olumsuz koşullar ile kısa devre arızası durumlarının birbirinden doğru bir şekilde ayırt edilebilmesi için senkrofazör cihazlardan gelen bilgilerin kullanıldığı bir yöntem önerilmiştir. Çalışmada söz konusu edilen olumsuz koşullardan birisi de güç salınımı durumudur. Önerilen yöntem, sistemdeki stratejik noktalara yerleştirilen senkrofazör cihazlardan alınan gerilim ve akım bilgilerini kullanarak empedans hesaplamaya dayanmaktadır. IEEE 39 baralı (New England) test sisteminde üretilen güç salınımı (ve salınım esnasında çeşitli kısa devre arızası) senaryolarına dayanan analizlerin, önerilen yöntemin doğruluğunu gösterdiği belirtilmektedir. [18] çalışmasında da çok benzer durumlar üzerinde durulmuş ve yine aynı test sistemi üzerinde senaryolar üretilmiştir. Burada önerilen yöntem, şu iki parametre kullanılarak geliştirilmiştir: 1) üç faz akımından elde edilen transiyent monitör fonksiyonunun maksimum değeri, 2) pozitif dizin empedansının faz açısı. Bu çalışmada da, geliştirilen yöntemin mesafe rölesinin üç faz kısa devre arızası ile diğer olumsuz koşullar arasındaki ayrımı başarıyla gerçekleştirdiği belirtilmektedir. Yine bu çalışmada da, söz edilen olumsuz koşullardan birisi güç salınımı esnasında kısa devre arızası durumudur. Her iki çalışmada da [17,18] üzerinde durulan özellikle mesafe rölesinin 3. koruma bölgesinde yapılabilecek yanlış açtırma olaylarının önlenmesidir.

[19] çalışmasında aynı problem Geniş Alan Ölçüm Sistemi (GAÖS / wide area measurement system, WAMS) cihazlarından alınan parametreler kullanılarak çözümlenmeye çalışılmıştır. Buna göre bulanık mantık temelli bir algoritma kullanılmakta, ayrıca Deneysel Mod Ayırıştırma (DMA / Empirical Mode Decomposition, EMD), Hilbert-Huang Dönüşümü gibi yöntemlere de başvurulmaktadır. Çalışmada, Hindistan şebekesinden bir kesit alınarak modelleme ve benzetim çalışmaları yapılmış, geliştirilen yöntem sayesinde güç salınımı

esnasında yanlış açmanın önlenemediği ve hatta durumun ciddiyeti algılanarak AUA rölelerine açtırma komutunun verilebileceği belirtilmiştir.

[20] çalışmasında, güç salınımı esnasında kısa devre arızası tespiti üzerinde durulmuş ve çözüm için matematiksel morfolojiye dayanan bir yöntem önerilmiştir. Yöntemin dayandırıldığı bir tespite göre, doğru akım kısa devre bileşeni güç salınımı esnasında farklı bir dalga şekline sahip hale gelmektedir. Çalışmada ATP/EMTP programı kullanılarak farklı arızalar ve farklı hızlardaki güç salınımları üretilmiş ve yöntemin hızlı cevap verdiği gösterilmiştir.

[21] çalışmasında, yine güç salınımı tespitinin daha yüksek bir başarıyla gerçekleştirilmesi için yeni bir yöntem önerilmekte ve yöntemin üstünlüğü PSCAD'te iki farklı test sistemi için yapılan çeşitli analizlerle gösterilmektedir. Geliştirilen yöntem, akımın hareketli pencere ortalama değerinin izlenmesine dayanmaktadır. Yapılan analizlerde salınım esnasında kısa devre arızası durumları da incelenmiş, sonuçlar bazı klasik yöntemler ile karşılaştırılmıştır. Böylece GSP fonksiyonunun (aynı zamanda isim verilmeden GSGP fonksiyonunun da) iyileştirildiği gösterilmiş ve yöntemin hem hızlı hem de yavaş salınımları başarıyla tespit edebildiği belirtilmiştir.

[22] çalışmasında, söz konusu problem, gerilim kararlılığı üst başlığı altında ele alınmış ve aynı [17] ve [18] çalışmalarında olduğu gibi mesafe rölesinin 3. koruma bölgesinde yanlış açmanın önlenemediği vurgusu yapılmıştır. Geliştirilen yöntem, gerilim ve akım büyüklüklerinin değişim hızına dayanmakta; yöntemin başarımı, DIgSILENT Power Factory programında oluşturulan test sistemleri (32 baralı bir sistem ve Nordic32 isimli başka bir sistem) için yapılan analizler ile gösterilmiştir. Çalışmada, yöntemin yüksek arıza direnci durumundaki başarımının dahi iyi olduğu belirtilmektedir.

[23] çalışmasında da makine öğrenmesine dayanan bir yöntem geliştirilmiş ve bu sayede güç salınımı esnasında yaşanacak simetrik arızaların doğru bir şekilde tespit edilebileceği gösterilmiştir. Bu yöntem, yarım dalga akım işaretinden S-dönüşümü aracılığıyla elde edilen özelliklerin olasılıksal yapay sinir ağları yöntemine giriş bilgisi olarak aktarılmasına dayandırılmaktadır. Doğrulama için TMSB test sistemi Matlab/Simulink programında modellenmiş ve incelenen problem kapsamında farklı

arıza, farklı salınım senaryoları üretilerek çeşitli analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bazı güncel yöntemler ile karşılaştırmalar yapılmıştır.

Bazı çalışmalarda, tahmin ve hata hesabına dayanan yöntemlerin kullanıldığı gözlenmektedir. Bunlardan birinde [24], otoregresyon yöntemi kullanılarak gerilim ve akım işaretinin tahmin değerleri elde edilmekte, gerçek değerler de kullanılarak güç işaretinin farkı değeri hesaplanmaktadır. Bu hesaba dayanarak geliştirilen yöntem sayesinde güç salınımı esnasında yaşanacak simetrik kısa devre arızalarının başarıyla tespit edilebildiği gösterilmektedir. Analizler PSCAD'te; 400 kV gerilimde, paralel hatlı bir sistemde ve WSCC-9 baralı test sisteminde üretilen senaryolar için gerçekleştirilmektedir. Çalışmada, seri kompanzasyon, yüksek arıza direnci, hızlı ve yavaş salınım gibi durumlar dahil olmak üzere çeşitli senaryolar üretilmiş, farklı arıza ve salınım durumları oluşturulmuştur. Sonuçlar bindirilmiş akım yöntemi ile de karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada önerilen yöntemde, parametre belirlemenin karmaşık olabileceği ve zaman alabileceği endişesi oluşmaktadır.

Tahmin ve hata hesabına dayanan yöntemlerin bir diğerinde [25], güç salınımı esnasında üç faz kısa devre arızası tespiti yapılmaya çalışılmış, bunun için transiyent monitör isiminde bir indeks (TMİ) tanımlanmıştır. Bu indeks, akım işaretinin dinamik fazör değerlerinden elde edilen tahminler ile gerçek değerler arasındaki fark olarak ifade edilmektedir. Buna göre, ayarlanan bir eşik değeri, güç salınımı ile kısa devre arızası arasında istenen ayrımın yapılmasını sağlayacaktır. Yöntemin doğrulanması için, hem sayısal test işaretleri hem de WSCC-9 baralı test sistemi için MATLAB'te elde edilen benzetim sonuçları kullanılmış, diğer bazı güncel yöntemler ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Tez çalışmasında bu yöntem, çeşitli açılardan incelenmiş ve başarımlı sonuçları elde edilmiştir. Bizim tarafımızdan yapılan analizlerde, dinamik fazör hesabı için yapılan matris hesaplarının bu yöntemin hızını oldukça düşürdüğü ve hafıza ihtiyacı doğurduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yöntemin, hızlı salınım yaşayan paralel hatlı bir test sisteminde bazı senaryolarda hatalı anahtarlama işareti üretilmesine neden olduğu da ortaya çıkmıştır.

[26] çalışmasında, GSGP işlemi için Faz Uzayı (FU / Phase Space, PS) isiminde bir dönüşüm uygulanmakta ve bu dönüşüm sonrası arıza ve salınım durumlarının farklı olduğundan yola çıkılarak bir eşik değeri seçilerek karşılaştırmaya dayalı bir ayrım

yapılmaktadır. [27] çalışmasında Karar Ağacı (KA / Decision Tree, DT) yöntemi kullanılarak güç salınımı esnasında yaşanacak kısa devre arızaları tespit edilmeye çalışılmış, geliştirilen tek uçlu yöntem, paralel hat sisteminde denenmiştir. [28] çalışmasında hat başı ve hat sonundan ölçüm almaya ihtiyaç duyan, makine öğrenmesi yöntemlerine dayanan bir yaklaşım önerilmektedir. KA ve Rastgele Orman (RO / Random Forest, RF) yöntemleri kullanılarak temel olarak arıza ve salınım ayırımı, özel olarak arıza ise arıza tipi, salınımsa kararlılık durumu belirlenmektedir. Bu çalışmayı farklı kılan özelliklerden birisi de FPGA sistemi kullanılarak fiziksel (deneysel) uygulamanın da gerçekleştirilmiş olmasıdır. [29] çalışmasında kararlı ve kararsız salınım durumları birbirinden ayırt edilmeye çalışılmaktadır. Salınım durumunu ayırt etmek ve doğru anahtarlama işareti üretebilmek için incelenen sistem ne kadar karmaşık olursa olsun, sistem sanal bir (tek) makina sonsuz bara sistemine indirgenmekte ve bu sistemdeki eşdeğer hesaplanmaktadır. Tek uçtan ölçüm alınması ve özellikle eşik değer seçimine ihtiyaç duymaması, pratik ve avantajlı bir izlenim vermektedir. [30] çalışmasında problem özel olarak üç uçlu iletim hattı durumu için incelenmiş ve çözüm aranmıştır. Çalışmada önerilen yöntem kullanılarak, yapılması istenen ayırımın farklı olumsuz koşullar altında yapılabildiği açıklanmaktadır. Önerilen yöntem kullanılarak hattın içindeki (internal) bir kısa devre arızasının, kararlı güç salınımı bulunduğu durumda dahi tespit edilebildiği belirtilmektedir. Bunun için birden çok noktadan gerilim ölçümü alınması gerektiği belirtilmektedir. Bu durum yöntemin pratikliğini azaltmaktadır.

Literatürdeki güncel çalışmalar incelendiği zaman, GSGP fonksiyonunun üzerinde en az GSP fonksiyonu kadar durulduğu görülmektedir. Korumanın güvenilirliği açısından hem yanlış açtırma engellenmeli, hem de gerçek bir arıza durumunda açtırma verilmelidir. Bu açıdan bakıldığı zaman GSP fonksiyonunun ancak GSGP fonksiyonu ile tamamlanabileceği çıkarımında bulunulabilir. Aksi takdirde, eğer perdeleme yapıldıktan sonra (yani GSP yapıldıktan sonra) kısa devre arızası kontrolü yapılmazsa (yani herhangi bir GSGP fonksiyonu bulunmazsa), sistem kısa devre arızasına karşı korumasız kalabilir. Doktora tezi çalışması kapsamında yapılan tüm analizlerde hem GSP, hem de GSGP fonksiyonunun iyileşmesi üzerinde durulmuştur ve her ikisi için katkı sağlanmıştır.

Mevcut durumda kullanılmakta olan klasik yöntemlerin sıkıntılı noktaları olduğu ve bazı senaryolarda doğru cevap verilmesini sağlayamadıkları görülmektedir. Literatürde problemin çözümü için önerilen bazı güncel yöntemlerin dahi bazı açılardan dezavantajlı olduğu değerlendirilmektedir. Doktora tez çalışmasında, mevcut yöntemlerin eksiklerini gideren ve hem GSP hem de GSGP fonksiyonlarını iyileştiren yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Yapılan analizlerde, her şeyden önce mevcut yöntemlerin eksikleri tespit edilmiş, ardından geliştirilen yöntemin aynı yetersizliği göstermediği ve incelenen farklı koşullarda yüksek başarımlar gösterdiği ortaya konulmuştur.

Tezde önerilen yöntem, yapısal anlamda özellikle [24] ve [25] gibi çalışmalarda uygulananlara benzer şekilde tahmin ve hata hesabına dayanmaktadır. Önemli olduğu ve zaman içinde daha fazla üzerinde durulduğu görülen problemin çözümü için Taylor serisine dayanan ve son üç örnek değer kullanılarak yapılan tahminin hatasının bir periyot içindeki kareleri toplamının izlenmesi önerilmektedir.

Tezde ele alınan problemin, literatürde yıllar geçtikçe daha yoğun bir şekilde ele alınarak çözülmeye çalışıldığı görülmektedir. Buna ilişkin olarak Scopus veritabanından alınan ve yıllara göre konuyla ilgili yayın sayısını gösteren grafik dikkat çekicidir (Şekil A.1).

Tezin birinci bölümünde, mesafe rölesinin çalışma ilkeleri açıklanmış, güç salınımı durumunda yanlış anahtarlama işareti üretmesine neden olan durumun anlaşılabilmesi için teknik altyapı sağlanmıştır.

Tezin ikinci bölümünde, güç salınımının kısa devre arızasından ayırt edilmesini sağlayan klasik yöntemler kısaca açıklanmıştır. Güç salınımı tespitinin nasıl yapıldığı konusunda temel bilgiler verilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde, GSP (ve GSGP) fonksiyonlarını hayata geçirmek için kullanılan mevcut yöntemlerin eksik kalan yönleri ve literatürde problemin çözümü için önerilen güncel yöntemler göz önünde bulundurularak geliştirilen yeni yöntem açıklanmaktadır. Tezde önerilen bu yeni yöntemin, güç salınımı durumunda yanlış anahtarlama önleyen ve aynı zamanda güç salınımı esnasında kısa devre arızası yaşanırsa tekrardan doğru anahtarlama işareti üretmeyi sağlayabilen bir yapıda

olduğuna ilişkin çıkarımlar matematiksel ve grafiksel olarak ortaya konulmuştur.

Tezin dördüncü bölümünde, hem tezde önerilen yöntemin, hem problemin çözümü için kullanılan klasik yöntemlerin, hem de güncel bir yöntemin farklı koşullardaki anahtarlama cevapları incelenmiştir. Bu amaçla kullanılan iki test sistemi için bilgisayar ortamında PSCAD ile üretilen benzetim sonuçları, farklı güç salınımı, kısa devre arızası ve güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları için ortaya konulmuştur. Böylece eldeki altı yöntemin mesafe korumanın güvenilirliğini nasıl etkilediği karşılaştırmalı olarak açığa çıkarılmıştır. Bu karşılaştırmalar, tezde önerilen yöntemin diğer yöntemlere göre üstünlüğünü ortaya koymasından önemlidir.

Tezin beşinci bölümünde, tezde önerilen yöntemin üstünlüğü daha detaylı şekilde ortaya konulmaktadır. Bu noktada, anahtarlama cevabının üretilmesini sağlayan parametre değişimleri grafiksel olarak incelenmiş ve elde edilen çıkarımlar ortaya konulmuştur. Ayrıca, algoritmanın işlemcide çalışma hızı incelenmiş, güncel bir yöntemle yapılan karşılaştırmada büyük bir üstünlük elde edildiği gösterilmiştir. Bu bölümde son olarak, akım transformatörlerinin doyuma girmesi durumu da ele alınmış, yöntemlerin başarımlarında genel bir düşme olmakla birlikte, tezde önerilen yöntemin göreceli üstünlüğünü koruduğu gösterilmiştir.

Tezin altıncı bölümünde, yapılan analizlerde elde edilen tüm sonuçlar için genel bir değerlendirme yapılmış ve tezde önerilen yöntemin mesafe koruma rölelerinde güç salınımı ile ilişkili anahtarlama problemlerini çözmek için yeni bir alternatif olabileceğine ilişkin görüş ve düşünceler gerekçeleriyle birlikte ortaya konulmuştur.



## 1. MESAFE KORUMANIN TEMELLERİ

Enerji iletim hatlarının kısa devre arızalarına karşı korunması amacıyla, günümüzde yaygın olarak mesafe koruma yaklaşımı ve bunu gerçekleştiren mesafe röleleri kullanılmaktadır. Korunmak istenen kısa devre arızalarının akım işaretine bakılarak kolaylıkla tespit edilebileceği düşünülebilir. Bu durumda, hat korumasının aşırı akım röleleri ile gerçekleştirilmesi olanaklıdır. Fakat bu noktada, uygulamada çeşitli sıkıntılarla karşı karşıya kalınmaktadır. Zaman gecikmeli aşırı akım rölelerinin koordine edilmesi, bazı sistem yapıları için zor olmakta; ayrıca, sistemde çok sayıda kaynak bulunacağı düşünülürse yönlü korumanın gerçekleştirilmesinde çeşitli güçlükler yaşanabilmektedir. Bu gibi sorunların aşılabilmesi için, yalnızca akım işaretine bakmak yerine gerilimin akıma oranına bakmanın arıza durumlarına karşı daha hassas bir algılama getireceği görülmüştür; mesafe rölesindeki temel ilke budur [31]. Gerilimin akıma oranını yani empedans değerini hesaplamaya dayandığı için bu röleye empedans rölesi de denilmektedir.

Mesafe röleleri, buldukları noktadaki gerilim ve akım bilgilerini ölçü transformatörlerinden alarak bir empedans değeri hesaplamakta ve bu değeri, hat için önceden belirlenmiş olan değer (ve değerler) ile karşılaştırarak kısa devre arızası bulunup bulunmadığına karar vermektedir. Röle tarafından örneklenen gerilim ve akım işaretleri kullanılarak gerilim ve akım fazörleri sırasıyla aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanabilir.

$$Ve^{j\alpha} = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=0}^{N-1} v(kh) e^{\frac{jk2\pi}{N}} \quad (1.1)$$

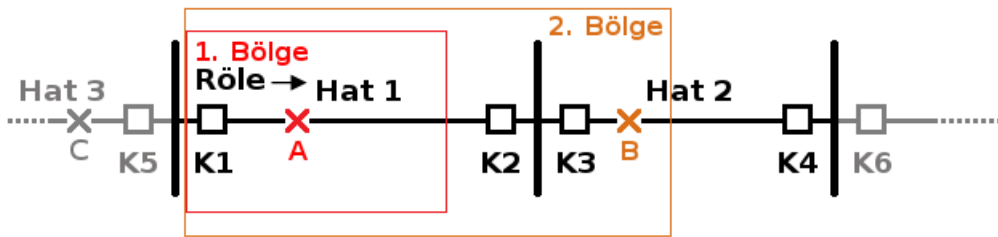
$$Ie^{j\beta} = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i(kh) e^{\frac{jk2\pi}{N}} \quad (1.2)$$

Burada;  $\alpha$ , gerilim fazörünün açısı,  $\beta$ , akım fazörünün açısı,  $N$ , bir periyottan alınan örnek sayısı,  $h$  örnekleme zaman adımı,  $v$  zamana bağlı gerilim,  $i$  ise zamana bağlı akım ifadesidir. Gerilim ve akım fazörleri kullanılarak empedans değeri,

$$Z_h = \frac{V \angle \alpha}{I \angle \beta} \quad (1.3)$$

Eşitliği ile hesaplanabilir; burada  $Z_h$  fazörel olarak hesaplanan empedans değerini göstermektedir. Röle tarafından hesaplanan bu empedans değeri ile karşılaştırması yapılan empedans değeri, ana koruma için temel olarak hattın empedans değerine eşit olmakla birlikte, pratik uygulamada hatalı işletimi önlemek amacıyla hattın %85-90 gibi bir değerine ayarlanmaktadır [32]. Bu değer tanımladığı bölge, mesafe korumada 1. koruma bölgesi olarak tanımlanmaktadır. Devamındaki hattın korunması, yedek koruma olarak gerçekleştirilmekte ve mesafe korumada 2. koruma bölgesi olarak tanımlanmaktadır. Bu bölge için karşılaştırma yapılan empedans değeri, hattın %120'si gibi bir değere ayarlanmakta ve bu kez 200-300 ms gibi bir zaman gecikmesi bırakılmaktadır [31]. Genellikle, bunun ötesinde bir 3. koruma bölgesi de tanımlanmakta, bunun için karşılaştırma yapılan empedans değeri, ana koruma yapılan hattın empedansının tamamına komşu hattının %120'si eklenerek bulunmakta ve 1 saniye civarında bir zaman gecikmesi belirlenmektedir.

Şekil 1.1'de mesafe koruma gerçekleştirilen bir sistem görülmektedir. Bu sistemdeki röle (mesafe koruma rölesi), asıl olarak Hat 1'i korumaktadır (1. koruma bölgesi). Hat 2'nin bir kısmı ise bu rölenin yedek koruma bölgesi (2. koruma bölgesi) içine girmektedir.

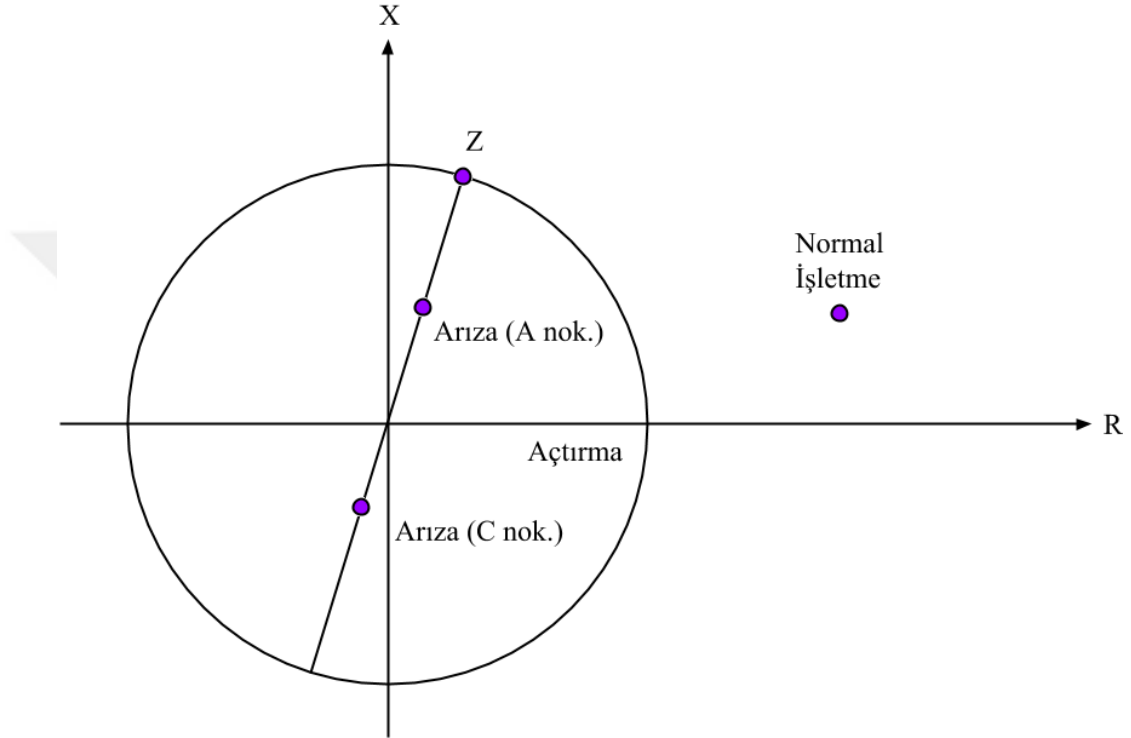


Şekil 1.1. Mesafe koruma uygulaması yapılan örnek bir sistemin tek hat gösterimi

Şekil 1.1'de, eğer Hat 1 üzerindeki A noktasında bir kısa devre arızası meydana gelirse röle asıl korumasını yerine getirecek ve K1 kesicisine açma işareti gönderecektir. Eğer Hat 2 üzerindeki B noktasında bir kısa devre arızası meydana gelirse, öncelikle Hat 2'yi koruyan rölenin koruması beklenecek, bu amaçla bir zaman gecikmesi işletilecektir. Eğer bu süre sonunda arıza hala temizlenmezse, 2.

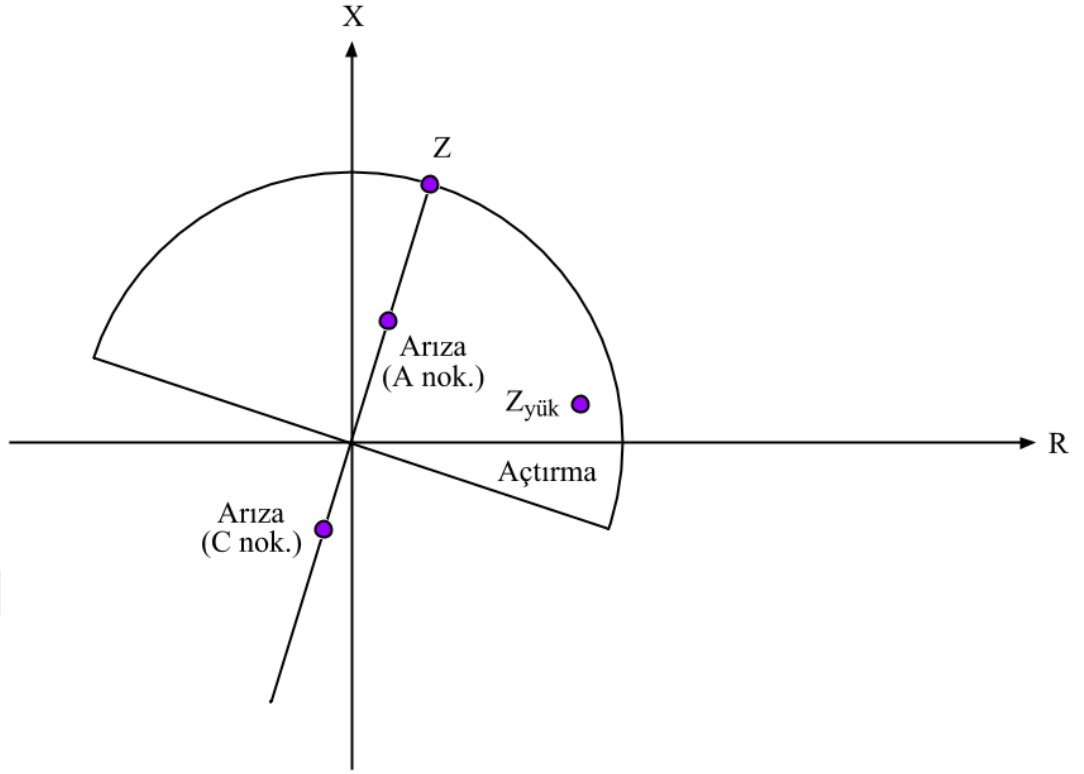
bölgede olduğu için rölenin yedek koruması devreye girecek ve bölge içindeki tüm kesicilere (K1, K2 ve K3) açma işareti gönderilecektir.

Mesafe rölesinin empedans değeri hesaplayarak koruma bölgesinin içinde olup olmadığını değerlendirerek karar vermesi, Şekil 1.2'deki R-X diyagramında daha anlaşılır olarak gösterilmektedir.

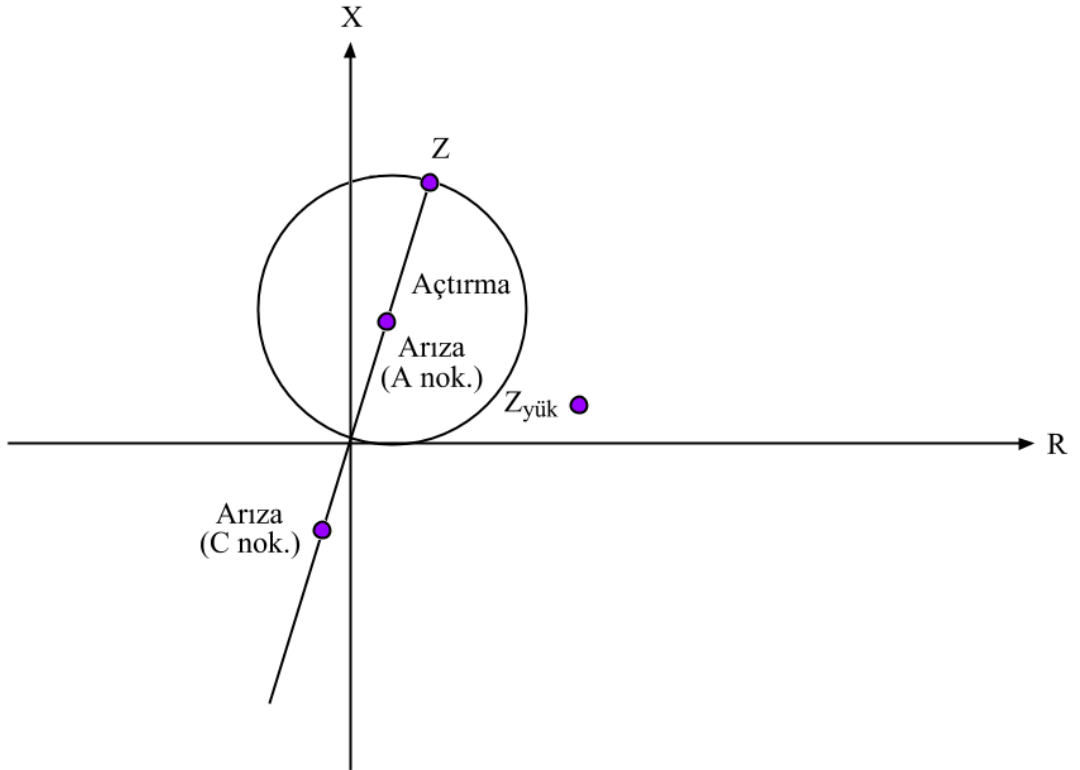


Şekil 1.2. R-X diyagramında mesafe korumada temel koruma bölgesi [31]

Herhangi özel bir işlem yapılmazsa, açıklanan prosedürü takip eden ve Şekil 1.1'de Hat 1'i korumakta olan mesafe rölesinin Hat 3'teki (geri yöndeki) kısa devre arızalarına karşı da açtırma yapması beklenmelidir. Fakat, yönlü koruma yaparak bunun önlenmesi istenir. Mesafe korumada bunun gerçekleştirilebilmesi için, ya empedans çemberinde bir düzenleme yapılacak, ya da diyagramda yeni bir düzenleme yapılarak mho adı verilen bir karakteristik kullanılacaktır. Her iki yaklaşım sırasıyla Şekil 1.3 ve Şekil 1.4'te görülmektedir.



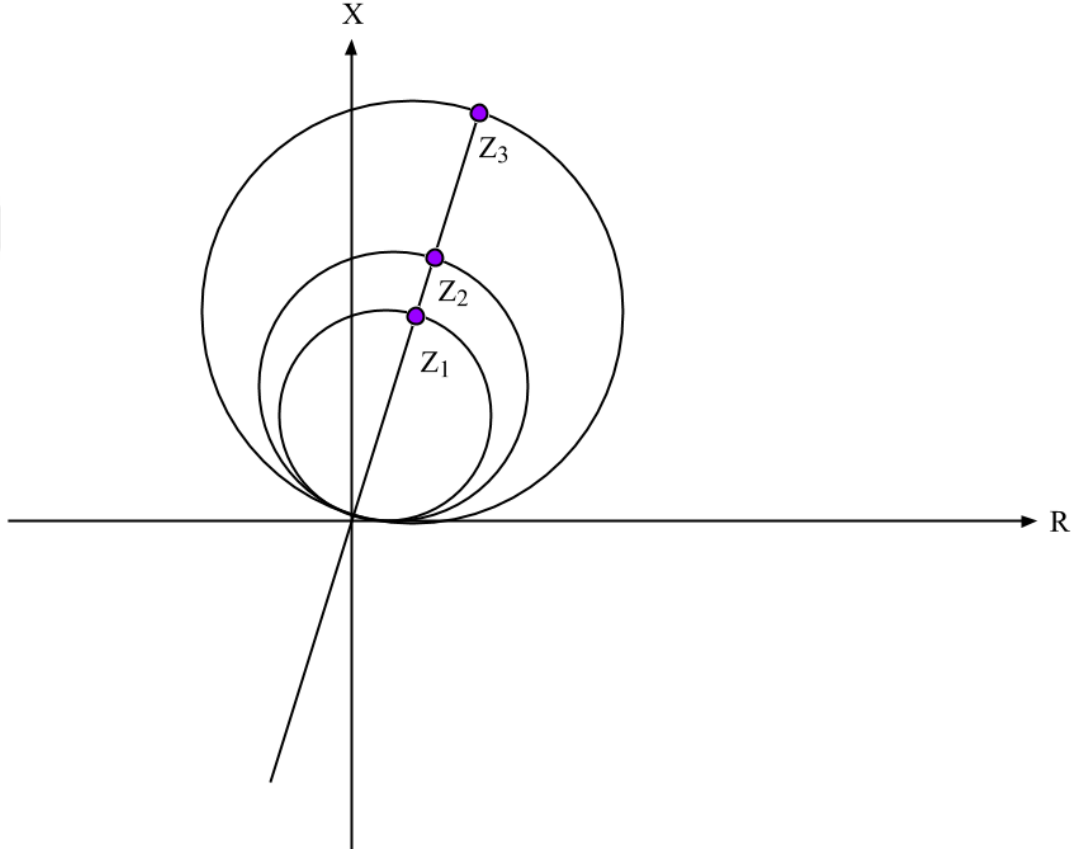
Şekil 1.3. Empedans karakteristiğinde yönlü korumanın gösterilmesi [31]



Şekil 1.4. Mho karakteristiği ve elde edilen yönlü ve seçici koruma [31]

Mho karakteristiğini kullanmak hem yönlü koruma sağlamak açısından, hem de bazı

yüklerin kısa devre arızası gibi algılanmasını önlemek açısından avantajlıdır. Şekil 1.3 ve Şekil 1.4'te görülen ve yüksek güç faktörüne denk düşen  $Z_{yük}$  empedansının konumu incelendiği zaman mho karakteristiğinin bu yük için yanlış açmayı önleyeceği açıkça görülmektedir. Tez çalışmasında yapılan analizlerde mho karakteristiği kullanılmıştır. Tanımlanan koruma bölgeleri Şekil 1.5'te mho karakteristiğinde gösterilmiştir.



Şekil 1.5. Mho karakteristiğinde tanımlanan 1., 2. ve 3. mesafe koruma bölgeleri [31]

## **2. MEVCUT GÜÇ SALINIMI TESPİTİ YÖNTEMLERİ**

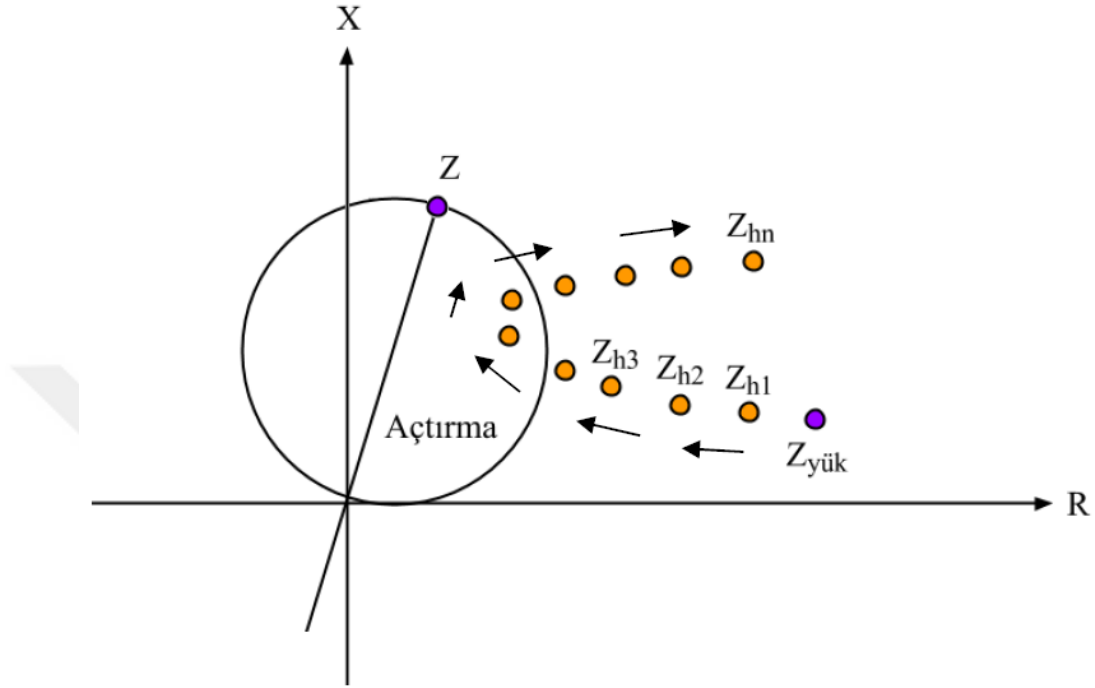
Mesafe rölelerinin, korudukları hatta oluşabilecek kısa devre arızalarını tespit edebilmek için kullandıkları empedans yaklaşımı bazı durumlarda hatalı tespit yapılmasına neden olmaktadır. Aşırı yüklenme ya da güç salınımı gibi durumlar, röle tarafından hesaplanan empedansın daha önce söz edilen koruma bölgelerinin içinde değerlendirilmesine neden olabilmektedir. Bu yanlış ve istenmeyen bir durumdur.

Uygulamada aşırı yüklenmenin ya da güç salınıminin arıza gibi algılanmaması ve bu yüzden yanlış anahtarlama yapılmaması için kullanılan çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. Bu çalışmada üzerinde durulan güç salınımlarının tespiti için de çeşitli klasik yöntemler kullanılmaktadır. Bunların en önemli dayanak noktalarından birisi şudur: uygulamada yapılan analizler göstermektedir ki, güç salınımı esnasında empedans değeri, kısa devre arızası durumundakine göre belirgin şekilde daha yavaş şekilde düşmektedir. Bu ve buna benzer tespitler kullanılarak geliştirilen klasik yaklaşımlarda bir eşik değer tanımlanarak sistem için hesaplanan değer bu eşik değer ile karşılaştırılmakta ve böylece güç salınımı ya da kısa devre arızası tespiti yapılmaktadır [3, 4]. Kullanılan yöntemin çıkarımına göre eğer karşı karşıya kalınan durum gerçekten bir kısa devre arızası gibi görünüyorsa anahtarlama yapılmakta, eğer bir güç salınımı gibi görünüyorsa o zaman anahtarlama engellenmektedir; işte bu ikinci durum bu çalışmada güç salınımı perdelemesi olarak isimlendirilen işlevi tanımlar ve çalışmanın temel odak noktasını oluşturur.

### **2.1. Azalan Empedans Yöntemi**

Bu yöntem, günümüzde mesafe rölelerinde kullanılan en yaygın güç salınımı perdeleme yöntemlerinden birisidir; tez çalışması içinde “Klasik Yöntem 1” olarak anılmaktadır. Burada kullanılan temel düşünceye göre, kısa devre arızası esnasında röle tarafından hesaplanan empedans değerinin çok hızlı bir şekilde düşeceği ve koruma bölgelerine hızlı bir giriş yapılacaktır. O halde, bu süre izlenebilirse, koruma bölgesine yapılan yavaş bir girişin kısa devre arızası değil güç salınımı olarak tanımlanması gerçekleştirilebilir. Bu sayede yanlış açma önlenmiş olur.

Şekil 2.1'deki görüldüğü gibi, herhangi bir yüklenme durumunda işletilen bir sistemde güç salınımı gerçekleştiği zaman hesaplanan empedans değerleri koruma bölgesinin içine girecek şekilde değişim gösterebilmektedir [33].



Şekil 2.1. Hesaplanan empedans değerlerinin ( $Z_{h1}$ ,  $Z_{h2}$ ,  $Z_{h3}$ , ...  $Z_{hn}$ ) güç salınımında koruma bölgesinin içine girmesinin R-X diyagramında mho karakteristiği için gösterimi [33]

Bu yöntemde, hesaplanan empedans değerlerinin koruma bölgesi dışında tanımlanan bir bölge içinden geçiş süresi izlenerek, durumun gerçek bir kısa devre arızası olup olmadığı anlaşılmasına çalışılır. Bu sayede güç salınımı ve kısa devre arızası arasında bir süre eşiği konularak güç salınımı perdelemesi gerçekleştirilebilir.

Günümüzde kullanılan mesafe rölelerinin pek çoğunda, güç salınımı tespiti yapmak ve GSP fonksiyonunu yerine getirmek amacıyla bu yöntem kullanılmaktadır (Ek-B).

## 2.2. Salınım Merkez Gerilimi (SMG) Yöntemi

Salınım merkez gerilimi (SMG), eşdeğer iki güç kaynağına indirgenmiş bir sistemde, bu iki güç kaynağı gerilimleri arasında  $180^\circ$ 'lik açısal fark bulunduğu gerilim değeri 0'a eşit olan noktanın gerilimi olarak tanımlanmaktadır [33]. Bu değer, yaklaşık olarak,

$$SMG = |V| \cdot \cos \varphi \quad (2.1)$$

Burada; V, ölçüm alınan hat başı gerilimini,  $\varphi$  ise V ile hat akımı arasındaki faz açısını göstermektedir. Bu tanım itibariyle, literatürde SMG yönteminden  $V \cos \varphi$  algoritması olarak da söz edilmektedir. Bu yöntem, tez çalışması içinde “Klasik Yöntem 2” olarak anılmaktadır.

SMG değerinin güç salınımı durumunda yavaş, kısa devre arızası durumunda ise hızlı bir şekilde değiştiği gözlemi kullanılarak bir eşik değer tanımlanarak yine güç salınımı ve kısa devre arızası ayırımı yapılabilmektedir. Bu yöntemde güç salınımı perdelemesi bu şekilde gerçekleştirilmektedir.

### 2.3. Bindirilmiş Akım Yöntemi

Diğer bir güç salınımı perdeleme yönteminde de, akım işaretinin bir periyot önceki örnek değeri ile farkı izlenmektedir. Buna göre, bindirilmiş akım olarak isimlendirilen bu değer,

$$I_b = |I_k - I_{k-N}| \quad (2.2)$$

olarak ifade edilebilir. Burada;  $I_b$ , bindirilmiş akım,  $I_k$ , eldeki (k'inci) akım örneği,  $I_{k-N}$  ise N örnek (bir periyot) önceki akım örneğidir. Bindirilmiş akım ( $I_b$ ) değerinin kısa devre arızası durumlarında yüksek, güç salınımı durumlarında düşük seyrettiği gözlenerek eşik değer tanımının ardından sistem güç salınımı - ya da kısa devre arızası - yapmak üzere izlenebilir. Böylece doğru eşik değer seçildikten sonra, sistem için kısa devre arızası ya da güç salınımı tespiti yapmak mümkün olacaktır. Bu yöntem de tez çalışması içinde “Klasik Yöntem 3” olarak anılmaktadır.

### 2.4. Azalan Direnç Yöntemi

Bu yöntem, azalan empedans yöntemine benzerdir. Yine benzer şekilde, kısa devre arızalarında empedansın (direnç) daha yavaş bir düşme yaşadığı kabul edilerek güç salınımı perdelemesi yapılmaktadır. Bu kez, hesaplanan empedansın yalnızca gerçel bileşeni, yani direnç değeri göz önünde bulundurulmakta ve bu direnç değerinin zamanla değişim hızı takip edilmektedir. Bu hız için bir eşik değer tanımlandıktan sonra, uygulama esnasında yapılacak basit bir karşılaştırma sonrası



olayın gerçekten kısa devre arızası olup olmadığı anlaşılacaktır. Böylece güç salınımı perdelemesi gerçekleştirilmiş olur. Tez çalışması içinde bu yöntem, “Klasik Yöntem 4” olarak anılmaktadır. Yaptığımız incelemelerde bu yöntemin endüstriyel rölelerde uygulaması olduğu görülmüştür (Ek-B).

## **2.5. Klasik Güç Salınımı Tespiti Yöntemlerine Genel Bir Bakış**

Bu çalışmada söz konusu edilen dört klasik güç salınımı tespiti (bir anlamda, güç salınımı perdelemesi) yönteminin olumlu yönleri olmakla birlikte olumsuz yönleri de bulunmaktadır. Her şeyden önce, bu yöntemlerin en önemli avantajları basit bir mantığa dayanmaları ve hem yazılımsal uygulama hem de donanımsal cevap alma süresi bakımından pratik ve tercih edilebilir özellikte olmalarıdır. Ama bunun yanında, hemen hepsinde bir eşik değeri seçilmesi gerekir. Bu eşik değeri, yöntemlerin bel kemiğini oluşturmaktadır ve seçimi için sistemin iyi tanınması gerekmektedir. Sistem bağımlılıkları yüksek olan bu yöntemlerin farklı çalışma durumlarında, farklı tipte kısa devre arızaları ve farklı tipteki güç salınımı durumlarında istenildiği gibi cevap veremedikleri tespit edilmiştir. Bu çalışmada da, klasik yöntemlerin farklı durumlarda başarılı ve başarısız cevapları irdelenmiş ve güç sisteminin güvenilir şekilde korunmasının bu yöntemler kullanılarak tam anlamıyla mümkün olamayacağı gösterilmiştir. Detayları ileride verilecek olan bu olumsuz sonuçlar, literatürde açıklandığı üzere, başarıyı klasik yöntemlerden daha iyi olan yeni bir güç salınımı tespiti/perdelemesi yönteminin geliştirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

### 3. GÜÇ SALINIMI TESPİTİ İÇİN ÖNERİLEN YÖNTEM

Doktora tez çalışmasında üzerinde durulan güç salınımı tespiti probleminin, literatürdeki çeşitli çalışmalarda bir ayırt etme problemine indirgendiği görülmektedir. Bu ayırt etmenin özellikle “kısa devre arızası ve diğerleri” şeklinde gerçekleştirildiği söylenebilir. Bu çalışmada da özellikle kısa devre arızası durumunun doğru bir şekilde algılanabilmesi ön plana gelmektedir. Geliştirilecek yöntem, bir yandan kısa devre arızasını doğru bir şekilde tespit edebilmeli, öte yandan güç salınımı da dahil olmak üzere diğer bozucu etkiler altında kısa devre arızası durumlarına verdiği tepkiyi vermemelidir. Böylece, hem güç salınımı durumunda yanlış açma önlenir hem de güç salınımı esnasında yaşanacak kısa devre arızası durumunda doğru bir anahtarlama işareti üretilebilir.

Bu bilgiler ışığında ve literatürde bazı tahmin ve hata hesabına dayanan yöntemlerin bulunmasından yola çıkılarak, bu çalışmada yeni bir ayırt etme yöntemi geliştirilmiştir. Kabaca söylemek gerekirse bu yaklaşım, akım işaretinin gerçek ve tahmin değerlerinin karşılaştırılmasına dayandırılmakta, tahmin için Taylor serisi açılımına başvurulmakta ve bir örnek değeri düzeltme işlemi uygulanmaktadır.

Problemin “kısa devre arızası ve diğerleri” ayırımına indirgenmesinden yola çıkılarak yeni bir yaklaşım geliştirilecek ve buradan yola çıkılarak bir indeks değeri hesaplanacak ve sistem işletmesi süresince izlenmesi önerilecektir. Ayrıca yöntemin olabildiğince basit ve aynı zamanda etkili olması amaçlanacaktır; çünkü korumada hızlı olmak için yöntemin karmaşık olmaması önemlidir ama aynı zamanda yüksek doğrulukla çıkış elde edilebilmelidir.

Güç sisteminde izlenecek bir elektriksel sistem parametresini zaman domeninde matematiksel bir fonksiyon olarak tanımlamak mümkündür. Akım ya da gerilim gibi bir sistem parametresi, normal işletme koşullarında aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$f(t) = A \cdot \sin(2\pi f_1 t + \varphi) \quad (3.1)$$

Burada; A, işaretin genliği,  $f_1$ , şebeke frekansı,  $\varphi$ , faz açısı, t zamanı göstermektedir.

Geliştirilecek tahmin yöntemi için bu eşitlikteki fonksiyonu kullanmak çeşitli açılardan sıkıntılı olacaktır. Sistem parametresinin mükemmel bir şekilde bu fonksiyonu izleyeceğini düşünmek doğru olmayacaktır. Çünkü her şeyden önce işaretinin genliğinde değişimler olma olasılığı mevcuttur. Sistemde açısal değişimler yaşanabilir (yüklenme değişebilir), frekansta oluşacak az miktardaki değişim uzun süre sonunda izlemede kaymaya neden olabilir. İşarete gürültü varsa bu da eşitlikteki fonksiyonun izlenmesini güçleştirecektir. Ayrıca, sistemde bir kısa devre ya da güç salınımı durumu yaşanabilir, bu da bu fonksiyonu bu noktada başarısız kılar. Oysa ki elde edilmek istenen son nokta şudur: kısa devre arızaları dışında kalan sistem işletme durumlarında az hatayla izlenebilecek bir fonksiyon üretilmelidir.

[25] çalışmasında, sistem parametresinin sistemde bir kısa devre arızası yaşanmadan önce ve yaşandıktan sonra sırasıyla aşağıdaki fonksiyonlar ile tanımlanabileceği ifade edilmektedir.

$$f(t) = A \cdot \cos(2\pi f_2 t) \cdot \cos(2\pi f_1 t + \varphi) \quad (3.2)$$

$$f(t) = B \cdot e^{f_2 t \cdot e^{-\frac{t}{\tau f_s}}} \cdot \cos(2\pi f_1 t + \varphi) \quad (3.3)$$

Burada,  $f_2$ , varsa güç salınımının frekansı,  $f_s$ , örnekleme frekansı ve  $\tau$ , zaman sabitidir. Eşitlik (3.2) ve (3.3) arıza ve diğer durumlar için sistem parametresinin zamanla değişimi hakkında fonksiyonel bir fikir vermesi açısından anlamlıdır. Ama, yine söz konusu “tahmin ve hata hesabı” yaklaşımı açısından değerlendirildiği zaman, bu fonksiyonların da istenen sonucu veremeyeceği düşünülebilir. Burada tahmin edilmesi çok zor olan parametreler vardır ve bu nedenle bu fonksiyonları sürekli olarak izlemek pratikte oldukça güçtür.

Bu noktada, yeni bir fonksiyon yaklaşımı getirilecektir. Tez çalışmasında akım işareti olarak seçilen sistem parametresinin zamanda bir  $g(t)$  fonksiyonu ile tanımlandığı varsayımı yapılmaktadır. Varsayıma göre, bu  $g(t)$  fonksiyonu izlenen sistem parametresinin herhangi bir  $t$  anındaki değerini tam bir doğrulukla versin. Eğer herhangi bir  $t_0$  anında bu  $g(t)$  fonksiyonunun ve tüm türevlerinin değerleri bilinebilseydi, gelecekteki herhangi bir zaman için bu fonksiyonun değerini tam doğrulukla tahmin etmek mümkün olabilirdi. Böylesi bir tahmin elde etmek için

aşağıdaki gösterildiği gibi  $g(t)$  fonksiyonu Taylor serisine açılabilir:

$$g(t_0 + \Delta t) = g(t_0) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{g^{(n)}(t_0) \cdot (\Delta t)^n}{n!} \quad (3.4)$$

Bu ifadedeki  $\Delta t$ ,  $t_0$  anı ile tahmini yapılan gelecek nokta arasındaki zaman farkını göstermektedir. Bu eşitliğin analitik ifadesini elde etmek mümkün olmasa da, bu ifadeye sayısal yöntemlerle yaklaşılabilir. Yine Taylor serisi kullanılır ve bu kez türevlerin analitik değil sayısal değerleri hesaplanırsa gelecek bir nokta için  $g(t)$  fonksiyonu belli bir hata ile tahmin edilebilir. Elektriksel sistem parametresinin sayısal örnekler alınarak izlendiği bir senaryoda, tahmin edilmek istenen değer genellikle eldeki son örnekten bir sonra elde edilecek örnek değeri olacaktır. Eğer tahmin eşitliğini kurmak ve  $g(t_0)$  değerini hesaplamak için tahmin edilmesi istenen bu gelecek değerden  $k$  örnek öncesi temel alınırsa,

$$\Delta t = k \cdot h \quad (3.5)$$

$$g(t_0 + kh) = g(t_0) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{d_n(t_0) \cdot (kh)^n}{n!} \quad (3.6)$$

eşitlikleri yazılabilir. Burada,  $d_n(t_0)$ , fonksiyonun  $t_0$  noktasındaki  $n$ 'inci mertebeden sayısal türevini,  $h$  örnekleme zaman adımını,  $k$  ise  $h$  zaman adımı aralıklarla örnekleme yapılan işaret üzerinde tahmin edilmek istenen değerden kaç adım geriden işleme başlandığını göstermektedir. Bu noktada,

$$d_0(t_m) = s(t_m) = s_m \quad (3.7)$$

Yazılabilir. Burada,  $s_m$ ,  $m$ 'inci örneklenmiş parametreyi göstermektedir. Devamında birinci sayısal türev aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$d_1(t_m) = \frac{s_{m+1} - s_{m-1}}{2h} \quad (3.8)$$

Daha yüksek mertebeden sayısal türev değerlerinin benzer yapıda olacağı bilindiğinden,  $n$ 'inci mertebeden sayısal türev için aşağıdaki genelleme yapılabilir:

$$d_n(t_m) = \frac{d_{n-1}(t_{m+1}) - d_{n-1}(t_{m-1})}{2h} \quad (3.9)$$

Burada, salınım tespiti yapılması amacıyla, süreç boyunca sürekli olarak izlenecek, tahmin ve hata hesabı yapılacak işaret olarak akım işaretinin kullanılmasının daha uygun olacağı görülmüştür. Çünkü gerilim işareti şebekenin zayıf ya da güçlü olmasına bağlı olarak az ya da çok değişim geçirebilecekken, akım işareti hatta oluşacak kısa devre durumlarında daha ciddi değişim gösterecek ve böylece tespit işlemi kolaylaşacaktır. Benzer şekilde, güç salınımı tespiti için “tahmin ve hata hesabına” dayanan bir yöntem kullanılan [25] çalışmasında da bu amaçla akım işareti kullanılmıştır.

Yapılan analizlerde  $k=2$  olarak kabul edilmesinin yeterli olacağı gözlenmiştir. Bu durumda Taylor serisi açılımı aşağıdaki hale gelir:

$$g(t_{m+1}) = g(t_{m-1}) + d_1(t_{m-1})\Delta t + \frac{d_2(t_{m-1})(\Delta t)^2}{2!} \quad (3.10)$$

Burada;  $m$ , örneklenen son örneği,  $m+1$  ise değeri tahmin edilecek örnek değerini temsil etmektedir.  $k=2$  olarak seçildiği zaman, söz edilen eşitlikler kullanılarak ikinci türev hesabını yapmak mümkün olmayacağı için işlemlerde bir basitleştirme yapılmıştır. İkinci türev için bir örnek sonra ve bir örnek önceki birinci türevleri kullanmak yerine, örneklememiş ara değerlerin birinci türev değerleri elde edilebileceği için bu ara değerlerin değişim hızı hesaplanmıştır. Yani,

$$d_1(t_{m-1} + \frac{h}{2}) = \frac{s_m - s_{m-1}}{h} \quad (3.11)$$

$$d_1(t_{m-1} - \frac{h}{2}) = \frac{s_{m-1} - s_{m-2}}{h} \quad (3.12)$$

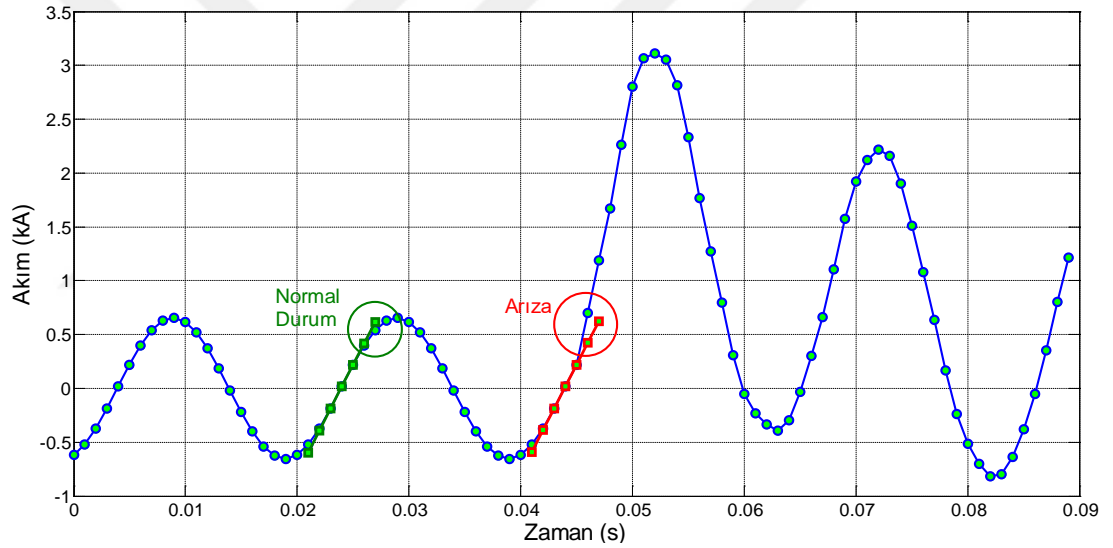
$$d_2(t_{m-1}) = \frac{d_1(t_{m-1} + \frac{h}{2}) - d_1(t_{m-1} - \frac{h}{2})}{h} \quad (3.13)$$

İşlemleri yapılır ve elde edilen  $d_2(t_{m-1})$  değeri, Eşitlik (3.13)'de yerine konulursa o zaman, tahmin eşitliği aşağıdaki yapıya kavuşur.

$$g(t_{m+1}) = s_{m-2} - 3s_{m-1} + 3s_m \quad (3.14)$$

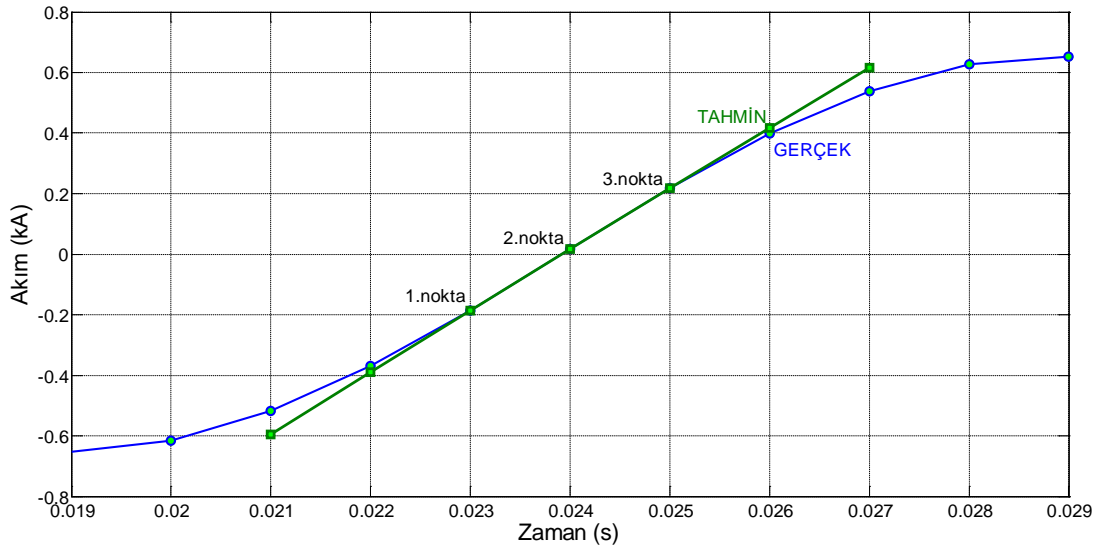
Böylece, yalnızca örnekleme son üç değeri kullanarak bir sonraki değerin tahmin işlemi gerçekleştirilebilir. Eşitlik (3.14), geliştirilen yöntemin temel tahmin yapısını oluşturacaktır; tahmin işleminde bu eşitliğe başvurulacaktır.

Bu noktada, yapılan işlemin güç sistemindeki kısa devre arızası, güç salınımı ya da salınım esnasında arıza gibi durumlarda ne anlama geldiği üzerinde durmak faydalı olacaktır. Detayları ilerleyen bölümlerde açıklanacak olan ve PSCAD’te gerçekleştirilen benzetim çalışmalarından birkaç kesit alınarak (3.14) eşitliğinin farklı durumlardaki değişimi gösterilecektir. Şekil 3.1’de örnek bir sistemin tek faz akımına ait değişim görülmektedir.

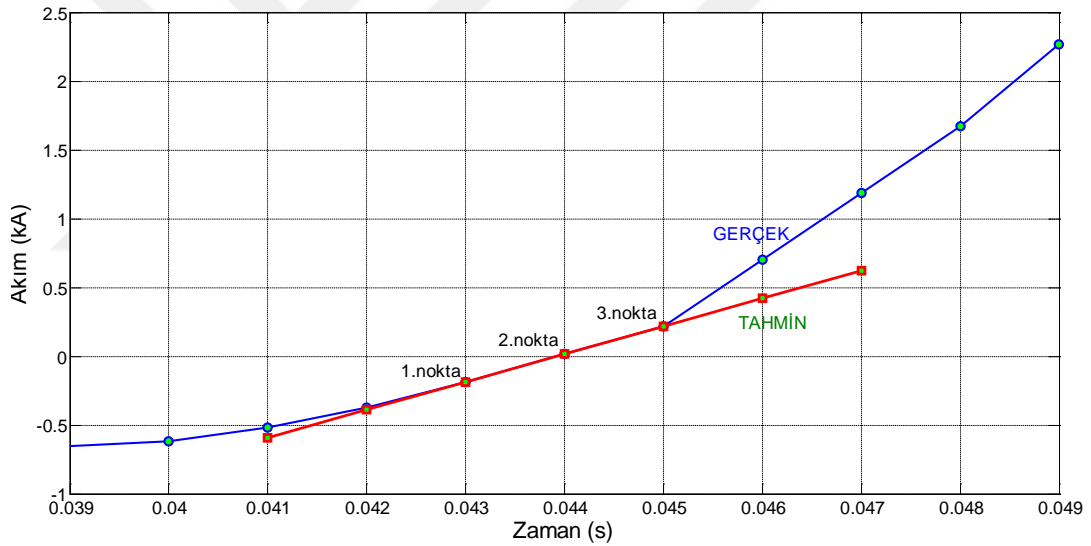


Şekil 3.1. Örnek bir sistemden alınan, normal ve arızalı durum akım işaretleri için hesaplanan tahmin hatalarının birlikte gösterimi

Bu sistem, normal işletme koşullarında iken yaklaşık  $t=0,045$  s’de bir kısa devre arızası meydana gelmektedir. Bu durumda tahmin eşitliği ile tanımlanan eğrinin akım işareti üzerindeki genel değişimi bu şekilde gösterilmektedir. Durumun daha detaylı olarak ortaya konulabilmesi açısından, normal ve kısa devre arızası durumlarına ilişkin tahmin değerleri, gerçek değerleri ile beraber sırasıyla Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’te gösterilmiştir.



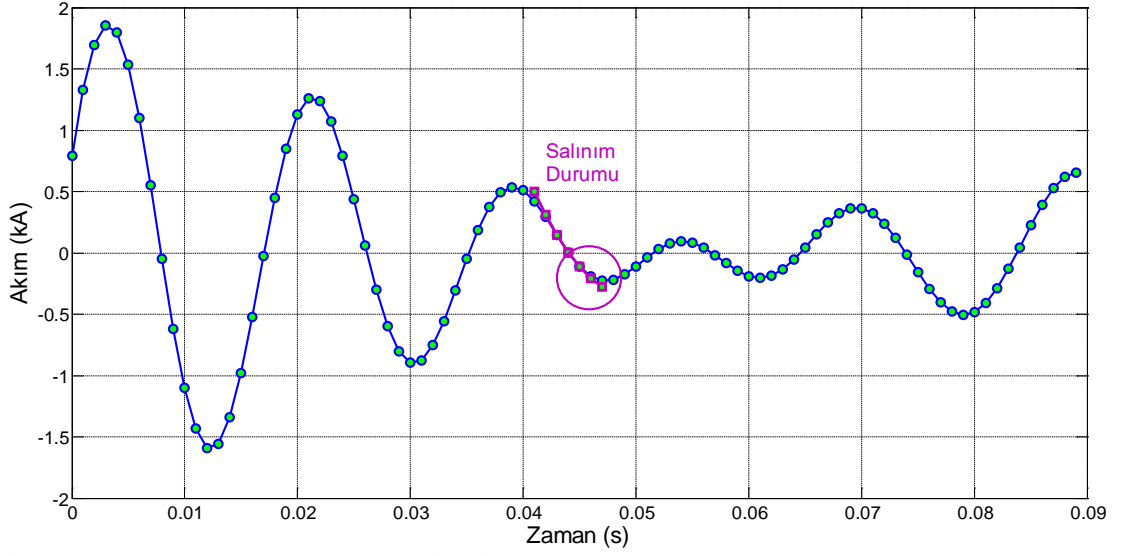
Şekil 3.2. Örnek bir sistemden alınan normal durum akım işareti için hesaplanan tahmin hatasının gösterimi



Şekil 3.3. Örnek bir sistemden alınan arızalı durum akım işareti için hesaplanan tahmin hatasının gösterimi

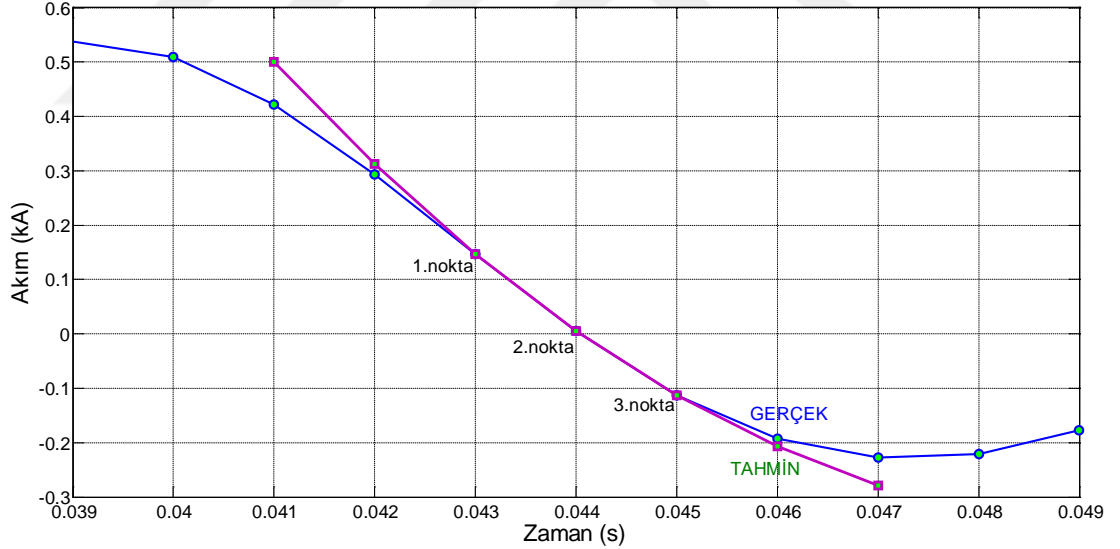
Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'teki değişimler incelendiği zaman, normal işletme durumundaki tahmin değerinin kısa devre arızasındakine göre daha tutarlı olduğu gözlenecektir. Kısa devre arızası durumunda hesaplanan tahmin değeri ile gerçek değer arasındaki hata çok daha büyük çıkmıştır.

İncelenen problem kapsamında, güç salınımı esnasındaki tahmin değişimini incelemek anlamlı olacaktır. Güç salınımı durumunda izlenen bir akım işaretinin değişimi Şekil 3.4'teki gibidir. Burada tahmin eğrisi de çizdirilmiştir.



Şekil 3.4. Örnek bir sistemden alınan güç salınımı durumundaki akım işareti için hesaplanan tahmin hatasının gösterimi

Salınımın herhangi bir anında hesaplanan tahmin değeri ve gerçek değerle karşılaştırması daha detaylı olarak Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



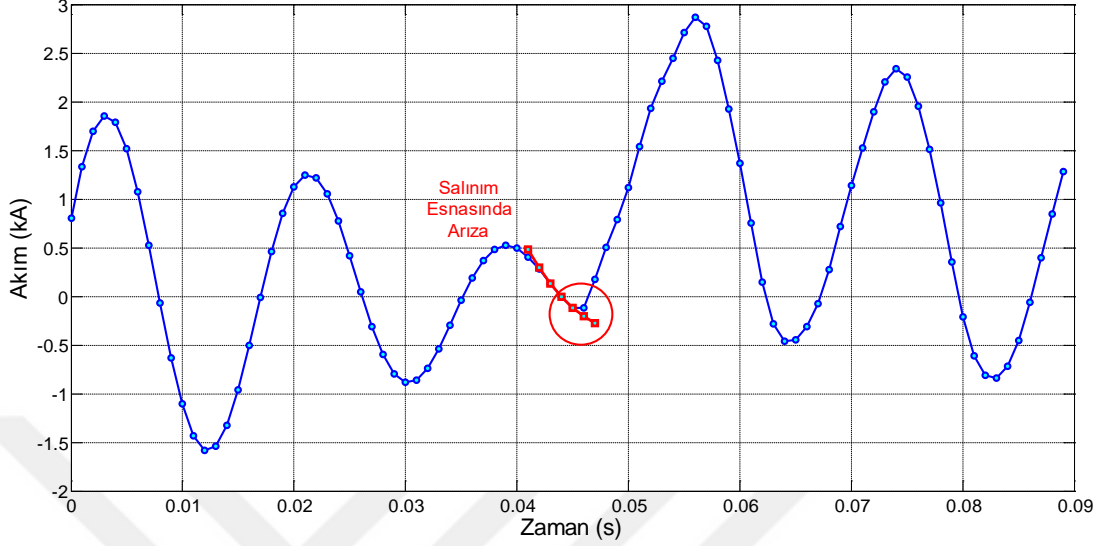
Şekil 3.5. Örnek bir sistemden alınan güç salınımı durumundaki akım işareti için hesaplanan tahmin hatasının detaylı gösterimi

Şekil 3.5'te, tahmin değerinin normal işletme durumundakine benzer şekilde, gerçek değere oldukça yakın hesaplandığı görülmektedir. Bu durum, “kısa devre arızası ve diğerleri” ayrımı için umut verecek bir sonuçtur.

Analizler kapsamında, GSP kadar önemli olan bir fonksiyon da GSGP olduğu için güç salınımı esnasında yaşanacak bir kısa devre arızası için tahmin değerinin nasıl

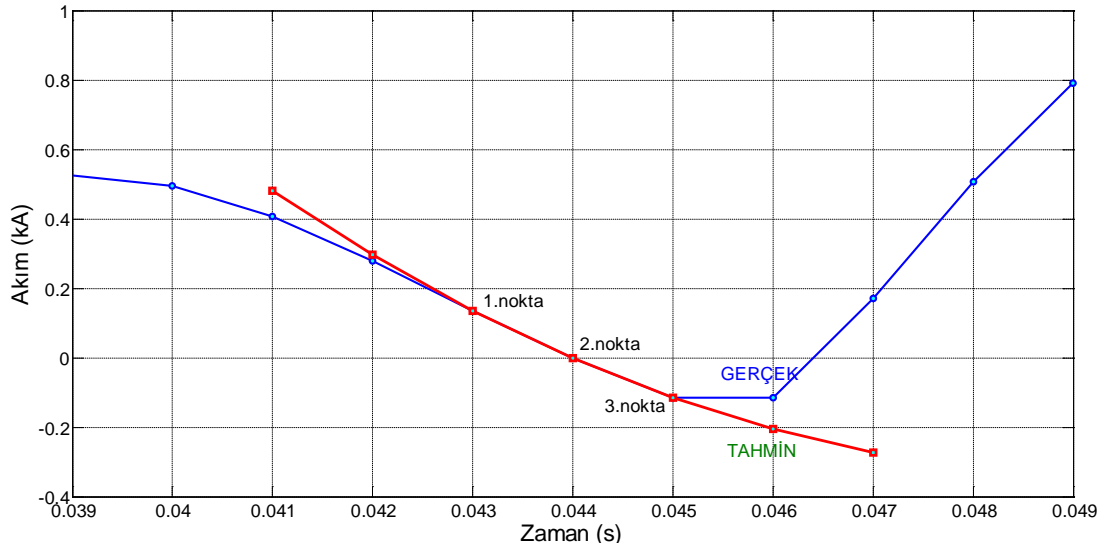


bir değerde hesaplanacağını incelemek de önemlidir. Bu inceleme için Şekil 3.6'daki akım değişimi kullanılabilir.



Şekil 3.6. Örnek bir sistemden alınan güç salınımı esnasında kısa devre arızası durumundaki akım işareti için hesaplanan tahmin hatasının gösterimi

Şekil 3.6'da, güç salınımı yaşanan bir güç sisteminde yine yaklaşık  $t=0,045$  s'de bir kısa devre arızası meydana gelmiştir. Bu durumda hesaplanan tahmin değeri ve gerçek değerle karşılaştırması Şekil 3.7'de daha detaylı olarak görülebilir.



Şekil 3.7. Örnek bir sistemden alınan güç salınımı esnasında kısa devre arızası durumundaki akım işareti için hesaplanan tahmin hatasının detaylı gösterimi

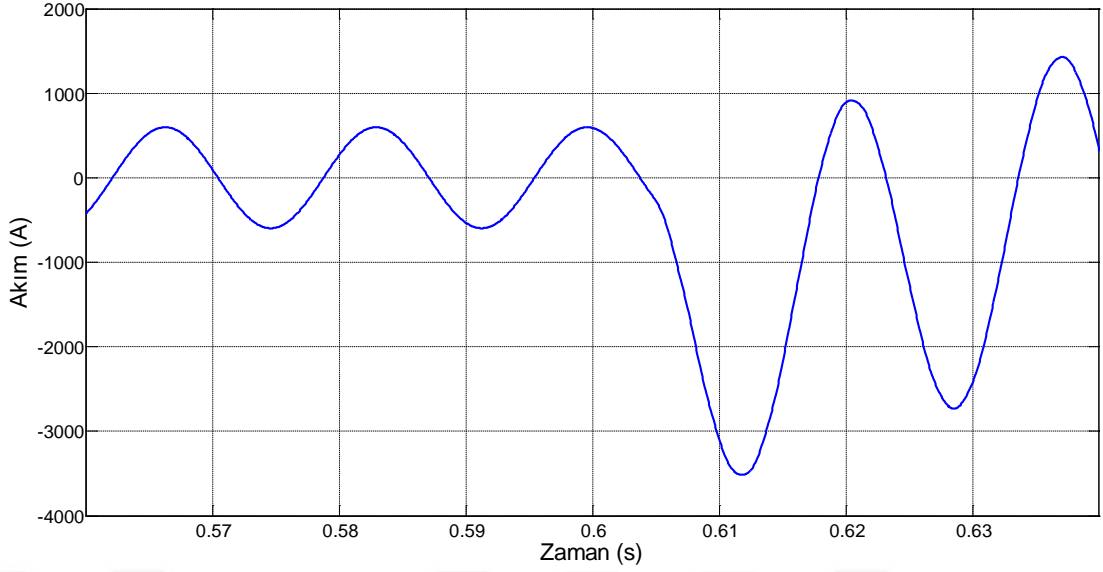
Şekil 3.7'de görüldüğü gibi, tahmin değeri ile gerçek değer arasında yine kısa devre arızası durumundakine benzer bir fark (hata) vardır. Bu da gerçekleştirilmek istenen

fonksiyon açısından istenen bir sonuçtur. Çünkü eğer sistemdeki bir güç salınımı esnasında gerçekten bir kısa devre arızası olursa o zaman doğru ayırım işlemi gerçekleştirilebilmeli ve arıza uyarısı alınabilmelidir.

İncelenen sistem senaryoları ve elde edilen tahmin değerlerinin gerçek değerler ile karşılaştırması yapıldığı zaman, (3.14) eşitliğinin geliştirilmek istenen GSP ve GSGP fonksiyonlarında kullanmaya elverişli olabileceği çıkarımı yapılmaktadır. Çünkü bu eşitlik kullanılarak yapılan tahmin işlemi, incelenen senaryolar içerisinde yalnızca kısa devre durumlarında hatalı çıkmakta, diğer durumlarda yaklaşık olarak doğru sonuç vermektedir.

Bu noktada, geliştirilmek istenen fikir hakkında şu noktaya değinmek doğru olacaktır: Tahmin ve hata hesabına dayalı bir parametreyi izleyerek güç salınımı tespit etmekteki temel yaklaşım, kısa devre arızası ve diğer durumlarda dalga şeklinin öngörülmesi zor şekilde bozulmakta ya da değişmekte olduğuna dair gözlemlere dayanmaktadır. Yani kısa devre arızası gerçekleşirse, sistem parametresinin sonraki değer ya da değerlerini tahmin etmek o noktada zorlaşmaktadır. Oysa, normal işletme durumlarında işaretin seyri daha tahmin edilebilir yapıdadır, ciddi değişim yaşanmamaktadır ve yaşanan değişim daha yavaş kalmaktadır. Bu bilginin, geliştirilen yöntemle temel olarak alınabileceği değerlendirilmektedir.

Bu fikrin geliştirilebilmesi amacıyla, tüm kısa devre arızası durumlarında aynı tepkiyi verecek bir yapı üzerinde durulmalıdır. Bu noktada, yapılan bazı analizlerde karşılaşılan bir durumdan söz etmek gerekecektir. Bazı arıza durumlarında akım işaretinin fonksiyon olarak sürekliliğini çok kaybetmeden genlik olarak büyüdüğü ve devamında arıza değerine gelerek seyrini sürdürdüğü gözlenmiştir. Buna benzer bir durum Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Akım işaretinin sürekliliğinin bozulmadığı örnek bir kısa devre arızası

Şekil 3.8’de görüleceği gibi, normal işletme koşullarında çalışan sistemde  $t=0,6045$  s anında bir kısa devre arızası meydana gelmektedir ve buna karşılık akım işaretinin sürekliliği çok fazla bozulmamaktadır. Bu durumun, bazı arıza durumlarında tahmin değerinin gerçek değerden fazla uzaklaşmayacağı anlamına gelmektedir. En nihayetinde, geliştirilecek yöntem bu tip arızaları tespit edemeyecek ve korumanın güvenilirliği sarsılacaktır. İşte bu tip sıkıntıların aşılabilmesi ve yöntemin bu tip arıza koşullarına da doğru tepki verecek biçimde geliştirilebilmesi için bir yaklaşım önerilmektedir. Buna göre, her ne kadar arıza durumunda süreklilik bozulmasa da işaretin genlik değerinde ani bir değişme söz konusudur. Eğer işaretin kayan pencere boyunca (yani sürekli, eldeki son bir periyotun örnek değerleri için) izlendiği ve pencere içindeki ortalama değer hesaplandığı düşünülürse, bu değer normal durumda sıfıra eşit olacağı fakat arızaya geçiş esnasında sıfırdan farklı değerler alacağı öngörülebilir. İşte, bu değerlendirme geliştirilecek yöntemde bir ölçüt olarak eklenmiş ve yöntemin hata hesabında bu doğrultuda bir değişiklik yapılmıştır. Buna göre, tahmin değeri ile farkına bakılan gerçek değer kullanılarak düzeltilmiş bir değer hesaplanmaktadır. Buna göre, izlenen akım işaretinin eldeki mevcut değerine aşağıdaki düzeltme işlemi uygulanması önerilmektedir.

$$s_{m+1}^* = s_{m+1} - \sum_{p=0}^{N-1} s_{m-p+1} \quad (3.15)$$

Burada söz edilen düzeltme işlemi, örneklenmiş mevcut değer ile mevcut pencere

içindeki ortalama değerin farkını alarak gerçekleştirilmektedir. Böylece, işaretin genliğinde ani bir değişme yoksa gerçek değer çok fazla düzeltmeye uğramayacaktır. Ama kısa devre arızası durumunda olduğu gibi ani ve ciddi bir değişim varsa örnek değerinde büyük bir düzeltme yapılmış olacak ve bu durum tahmin işleminin arızalı durumda daha büyük hata yapmasına neden olacaktır, ki istenen budur. Normal işletme durumunda ya da güç salınımı durumunda bu değer fazla olmayacak, örnek değerinde ciddi bir değişim görülmeyecektir.

Böylece son durumda hata değeri aşağıdaki gibi hesaplanacaktır.

$$\varepsilon_{m+1} = \left| g(t_{m+1}) - s_{m+1}^* \right| \quad (3.16)$$

Bütün bu işlemler sonunda düzeltilmiş değer ve tahmin değeri ile hata hesabı yapıldıktan sonra yeni bir indeks değeri tanımlanacaktır. Bu indeks değeri sürekli izlenerek belli bir eşik değeri aşp aşmadığına bakılacak, böylece söz konusu edilen “arıza ve diğerleri” (arıza ve normal durum, arıza ve salınım) ayrımı başarıyla gerçekleştirilecektir.

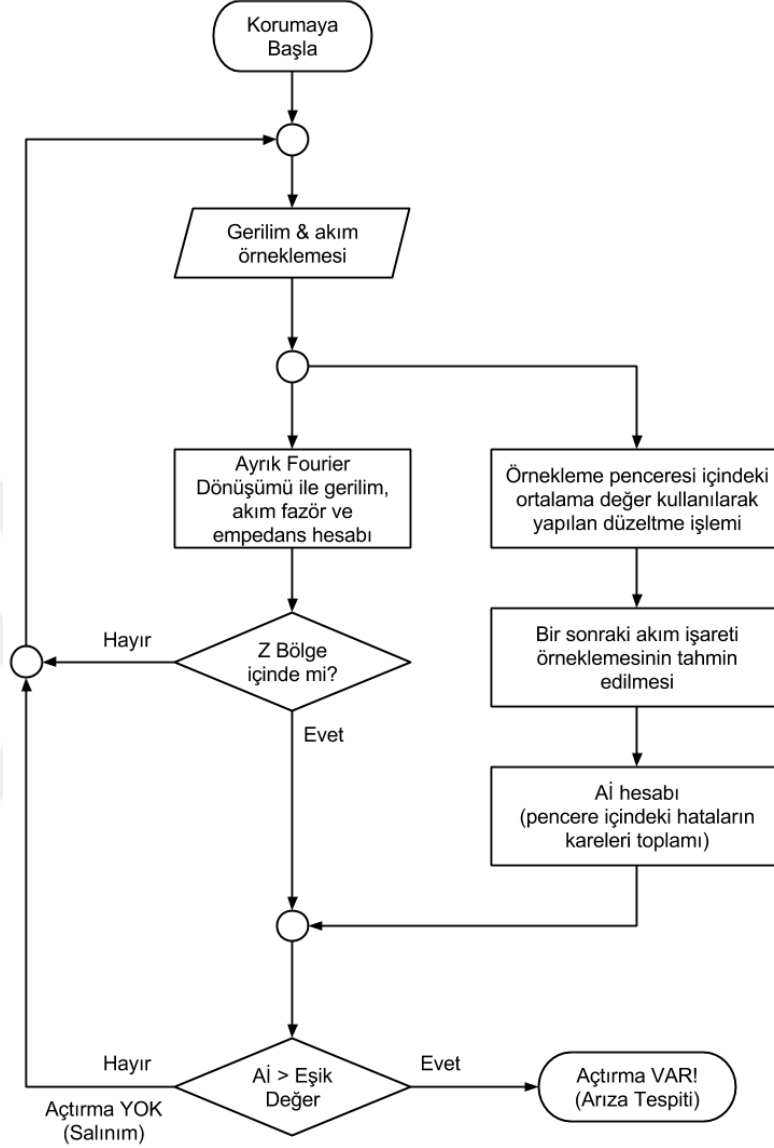
Tanımlanacak indeks değerinin anlık hatalara dayanmaması ve yöntemin güvenilirliğinin azalmaması için son bir periyot içindeki hataların karelerinin toplamının alınarak bir indeks değeri haline getirilmesi düşünülmüştür. O halde Ayrım İndeksi (Aİ) ismi verilen bu indeks değeri aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$AI = \sum_{p=0}^{N-1} \varepsilon_{m-p+1}^2 \quad (3.17)$$

Burada; N, eldeki örnekleme penceresindeki örnek sayısıdır, yani başka bir ifadeyle bir periyodun kaç örnek değer kullanılarak örneklendiğine ait parametre bilgisidir.

Aİ indeksi tanımlanarak yapılan koruma yapısı, eşik değer tanımlamaya dayanmakta, koruma yapılan sisteme özel eşik değer seçimi yapılması gerekmektedir. Aİ'nin sürekli olarak izlendiği ve buna bağlı karar aldırılan bu yaklaşımın, mesafe rölesinin hem GSP hem de GSGP fonksiyonlarının iyileştirilmesi için kullanılması önerilmektedir. Bu indeksin kullanılması ile birlikte mesafe koruma yaklaşımının güç salınımı durumundaki doğru tepki üretmesini sağlayacak bu yaklaşım, Şekil 3.9'daki

akış diyagramında detaylandırılmaktadır.



Şekil 3.9. Tezde önerilen ve güç salınımı durumunda mesafe koruma başarımını yükselten yönteme ilişkin akış diyagramı

#### 4. YÖNTEMLERİN BAŞARIMINA İLİŞKİN TEMEL ANALİZLER

Önceki bölümlerde güç sisteminde oluşabilecek bir kısa devre arızası ya da güç salınımı durumunun birbirinden ayırt edilmesinin önemli olduğuna ve bu ayrımı gerçekleştirmek için kullanılan bazı klasik ve güncel yöntemlere değinilmişti. Bu bölümde ise, tez çalışması kapsamında geliştirilmiş olan ve mesafe rölelerinin GSP ve GSGP fonksiyonlarında iyileştirme yapacağı öngörülen yeni yöntemin sınanması ve diğer yöntemlerle karşılaştırılması amacıyla gerçekleştirilen çeşitli analizlerden söz edilecektir.

Başarım değerlendirmesi amacıyla, bu kapsamda, iki farklı test sistemi ele alınmış ve bu sistemlerde koruması söz konusu olacak çeşitli iletim hatları izlenerek farklı kısa devre arızası ve güç salınımı senaryoları üretilmiştir. Ayrıca güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları da üretilmiş, böylece hem GSP hem de GSGP fonksiyonlarının doğruluk düzeyi belirlenmiştir.

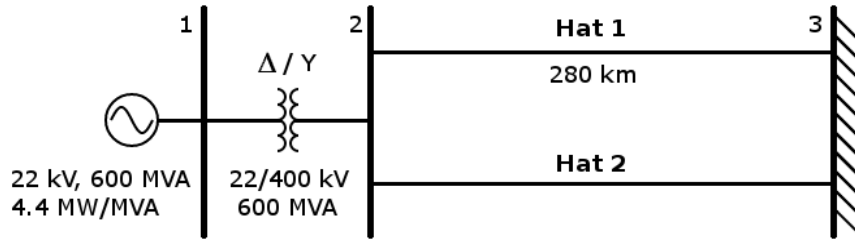
Çalışmada analizi gerçekleştirilen sistemler; tek makina sonsuz bara (TMSB) test sistemi ile 68 baralı ve New England Test Sistemi – New York Güç Sistemi (NETS-NYGS) olarak isimlendirilen test sistemidir.

Detayları aktarılacak analizler, üç ana başlıkta toplanabilecek olan senaryolar için gerçekleştirilmiştir: 1) Kısa devre arızası senaryoları, 2) Güç salınımı senaryoları, 3) Güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları.

Üretilen senaryolar ve gerçekleştirilen analizler; ikinci bölümde de söz edilen dört klasik yöntemin, TMİ hesabına dayanan literatürdeki güncel yöntemlerden birisinin [25] ve tez çalışması kapsamında geliştirilmiş olan ve AI hesabına dayanan yöntemin başarım değerlendirmesi için kullanılacaktır. Böylece toplamda altı yöntem için başarım ortaya konacak ve yapılacak karşılaştırma ile yöntemlerin üstün ve zayıf yönleri hakkında net çıkarımlar yapılabilecektir.

#### 4.1. Tek Makina Sonsuz Bara (TMSB) Test Sisteminde Yapılan Analizler

Güç salınımı ve kısa devre arızası senaryolarının üretileceği ilk sistem TMSB test sistemidir. Literatürde bu sistemin, söz konusu problemin incelenmesi amacıyla çeşitli çalışmalarda kullanıldığı görülmektedir [1, 7, 10]. Çalışmalarda kullanılan test sistemleri arasında çeşitli farklılıklar vardır. Tez çalışmamızda özellikle [7]'de verilen sistem parametreleri referans alınmış olmakla birlikte sistem frekansı 50 Hz olarak alınmış ve analizler bu şekilde gerçekleştirilmiştir. Kullanılan sistemin tek hat şeması Şekil 4.1'deki gibidir.



Şekil 4.1. TMSB test sisteminin tek hat şeması

Bu sistem kullanılarak, söz edilen farklı yöntemlerin hem paralel hatlardaki hem de hızlı salınım durumundaki koruma başarımı incelenebilecektir.

Şekil 4.1'de görülen Hat 1'i koruyan mesafe rölesi, eğer aynı hatta kısa devre arızası gelirse açma vermelidir. Eğer Hat 2'de bir arıza olur ve hat devre dışı kalırsa, sistemde bir güç salınımı yaşanacaktır. Çünkü generatörün gücünü sonsuz güçlü baraya aktarmak için Hat 1 tek başına yeterli olamayacaktır. Bu bilgi göz önüne alınarak Hat 2'de farklı kısa devre arızaları üretilmiş ve Hat 2'nin devre dışı kalması sonucu Hat 1'i koruyan mesafe rölesinin güç salınımı ile karşılaşması sağlanmıştır. Son olarak da, güç salınımı izlenirken Hat 1'de kısa devre arızaları meydana getirilmiş ve böylece “güç salınımı esnasında kısa devre arızası” senaryoları üretilebilmiştir.

Tez çalışmamızda geliştirilen yöntem de dahil olmak üzere, incelenen altı yöntemin tamamı parametre bağımlıdır, yani sistem korumasına başlamadan önce eşik değer seçmek gerekmektedir. Başarım değerlendirmesi yapmadan önce, gerçekleştirilen analizlere bağlı olarak optimum parametre seçimleri Tablo 4.1'deki gibi önerilmiştir. Bu test sisteminde bundan sonra üretilen tüm senaryolar için yapılacak tüm başarım

değerlendirmeleri Tablo 4.1’deki parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.1. TMSB test sisteminde güç salınımı tespiti için kullanılan yöntemlere ait parametreler

Yöntem	Parametre	Birim	Salınım Tespiti
Klasik Yöntem 1	$\Delta t$	ms	> 2,5
Klasik Yöntem 3	$I_k - I_{k-N}$	kA	< 1,85
Klasik Yöntem 4	$dR/dt$	$k\Omega/s$	< 250
Güncel bir yöntem [25]	TMI	kA	< 15
Tezde Önerilen Yöntem	$A\dot{I}$	$MA^2$	< 0,8

Tablo 4.1’den görüleceği gibi, TMSB test sistemi için yapılan analizlere Klasik Yöntem 2 (Salınım Merkez Gerilimi (SMG) Yöntemi) dahil edilmemiştir. Çünkü alınan sonuçlar oldukça kötüdür ve bu nedenle başarımlar listesinde yer almasına gerek görülmemiştir.

#### 4.1.1. Kısa devre arızası senaryoları

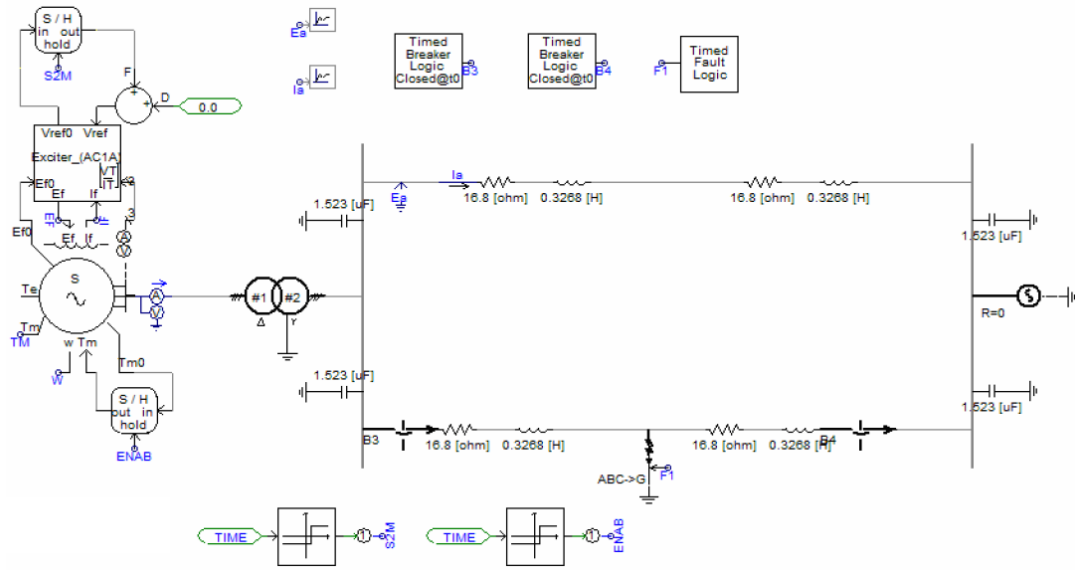
Şekil 4.1’deki Hat 1’i koruyan mesafe rölesinin başarımlarını farklı güç salınımı izleme yöntemleri kullanıldığı durumda sınamak amacıyla Tablo 4.2’deki gibi 24 farklı kısa devre arızası üretilmiştir. Arızaların tümü Hat 1’de, yani incelenen mesafe rölesinin korumakta olduğu hatta meydana gelmektedir.

Tablo 4.2’den görüleceği gibi bu sistemde, arıza tipi, arızanın hat başına uzaklığı ve arıza başlangıç açısı değiştirilerek farklı senaryolar üretilmiştir. Tabloda görülen tüm kısa devre durumları için geçerli olmak üzere, söz edilen simetrik arızalar üç faz – toprak, asimetrik arızalar da faz – toprak arızalarıdır. Senaryoların üretilmesi ve güç sistemi benzetimlerinin yapılabilmesi için PSCAD kullanılmıştır. Güç salınımı benzetimi yapabilmek için sistemin dinamik modellenmesinin yapılması önemlidir. Bu noktada, özellikle generatörün dinamik parametrelerinin modele girilmesi ve makinanın farklı koşullara karşı verdiği dinamik cevabın gözlenebilmesi gerekir. Şekil 4.2’de, sistemin PSCAD’te oluşturulan modeline ilişkin ekran görüntüsü görülebilir.



Tablo 4.2. TMSB test sisteminde üretilen kısa devre arızası senaryoları

<b>Senaryo Numarası</b>	<b>Arıza Uzaklığı (%)</b>	<b>Arıza Başlangıç Açısı (°)</b>	<b>Arıza Başlangıcı (s)</b>	<b>Arıza Süresi (ms)</b>	<b>Arıza Tipi</b>
1	15	0	0,6	100	Simetrik
2	45	0	0,6	100	Simetrik
3	75	0	0,6	100	Simetrik
4	15	45	0,6025	100	Simetrik
5	45	45	0,6025	100	Simetrik
6	75	45	0,6025	100	Simetrik
7	15	90	0,605	100	Simetrik
8	45	90	0,605	100	Simetrik
9	75	90	0,605	100	Simetrik
10	15	135	0,6075	100	Simetrik
11	45	135	0,6075	100	Simetrik
12	75	135	0,6075	100	Simetrik
13	15	0	0,6	350	Asimetrik
14	45	0	0,6	350	Asimetrik
15	75	0	0,6	350	Asimetrik
16	15	45	0,6025	350	Asimetrik
17	45	45	0,6025	350	Asimetrik
18	75	45	0,6025	350	Asimetrik
19	15	90	0,605	350	Asimetrik
20	45	90	0,605	350	Asimetrik
21	75	90	0,605	350	Asimetrik
22	15	135	0,6075	350	Asimetrik
23	45	135	0,6075	350	Asimetrik
24	75	135	0,6075	350	Asimetrik

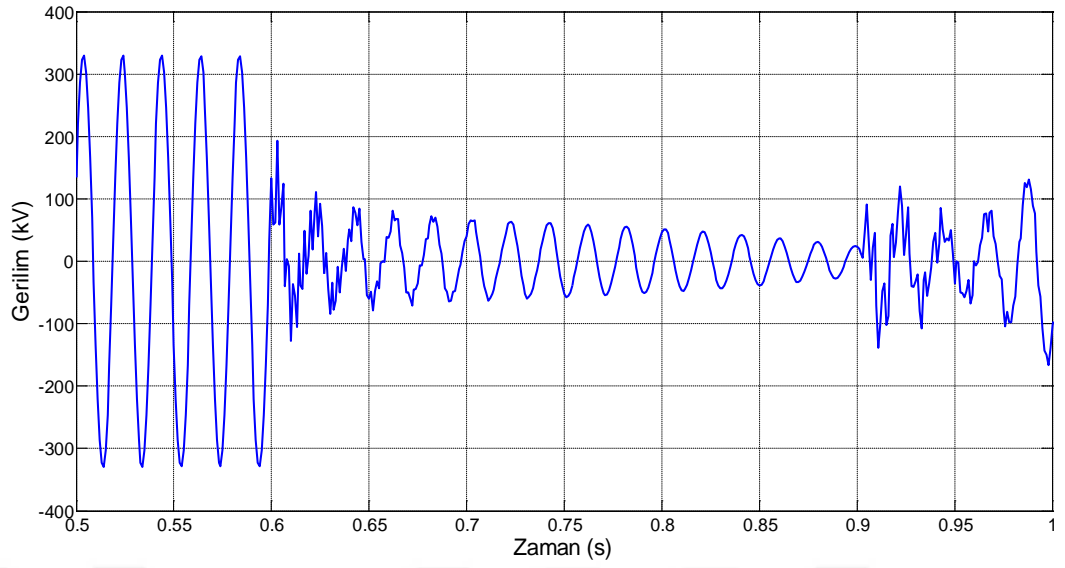


Şekil 4.2. TMSB test sisteminin PSCAD modeline ilişkin ekran görüntüsü

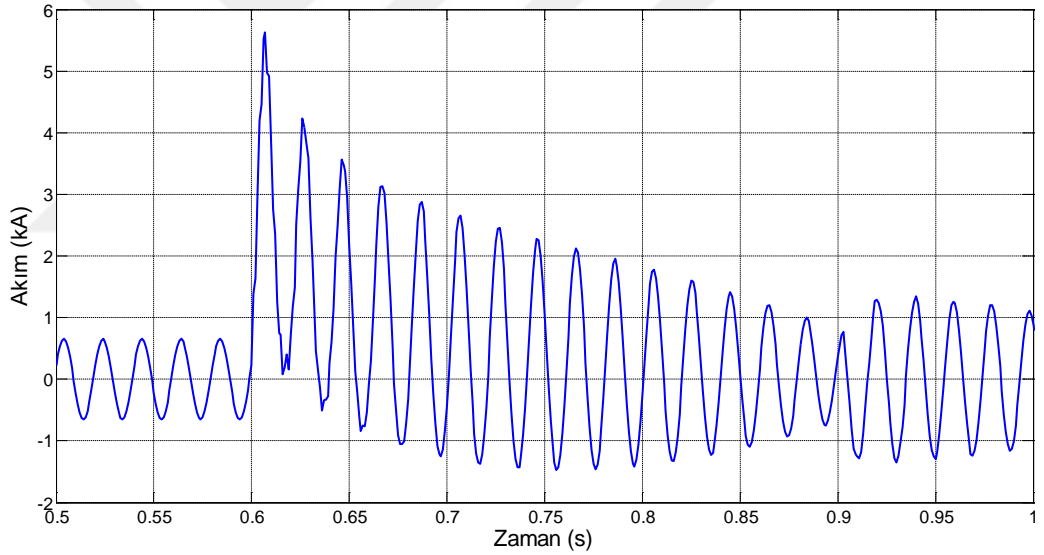
Modelleme yapılırken, paralel iletim hatları (Şekil 4.1’deki Hat 1 ve Hat 2) için pi modeli, generatör için “Master Library” içindeki senkron makine modeli, generatör uyarım devresi için IEEE AC1A modeli kullanılmıştır. Türbin (governor) için modelleme yapılmamıştır.

Benzetimde üretilen simetrik arızalar üç faz – toprak, tüm asimetrik arızalar ise tek faz – toprak arızalarıdır. Kısa devre arızalarının tipi, arıza bloğu içinde, asimetrik arızada yalnızca tek fazın, simetrik arızalarda ise her üç fazın da arızaya katıldığı gösterilerek tanımlanmıştır. Arızanın uzaklığını tanımlamak için kaçak kapasite grubu ihmal edilerek yalnızca seri direnç ve endüktans değerleri değiştirilerek uzaklık bilgisi girilmiştir. Arıza süresi doğrudan arıza üretilen blok içinden tanımlanmaktadır. Arıza başlangıç açısı ise, açısız değer uygun zaman karşılığı hesaplanarak zaman karşılığı olarak girilmiştir.

PSCAD’te yapılan benzetimlerin tümü 3 saniye sürdürülmüştür. 24 farklı benzetim sonucunda elde edilen gerilim ve akım bilgileri çıkış dosyalarına kaydedilmiş, ardından bu bilgiler MATLAB’e aktararak mat uzantılı veritabanı dosyaları durumuna getirilmiştir. Kısa devre senaryolarının ilki için elde edilen tek faza ait hat başı gerilimi ve hat akımının dalga şekilleri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’te gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.3. Kısa devre arızası senaryolarının ilki için tek faz gerilim işaretinin değişimi

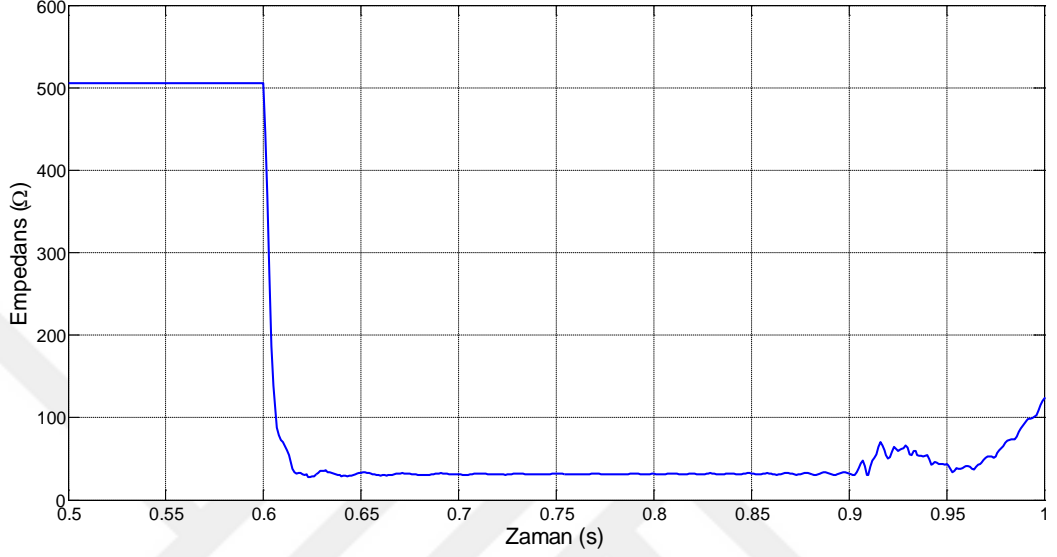


Şekil 4.4. Kısa devre arızası senaryolarının ilki için tek faz akım işaretinin değişimi

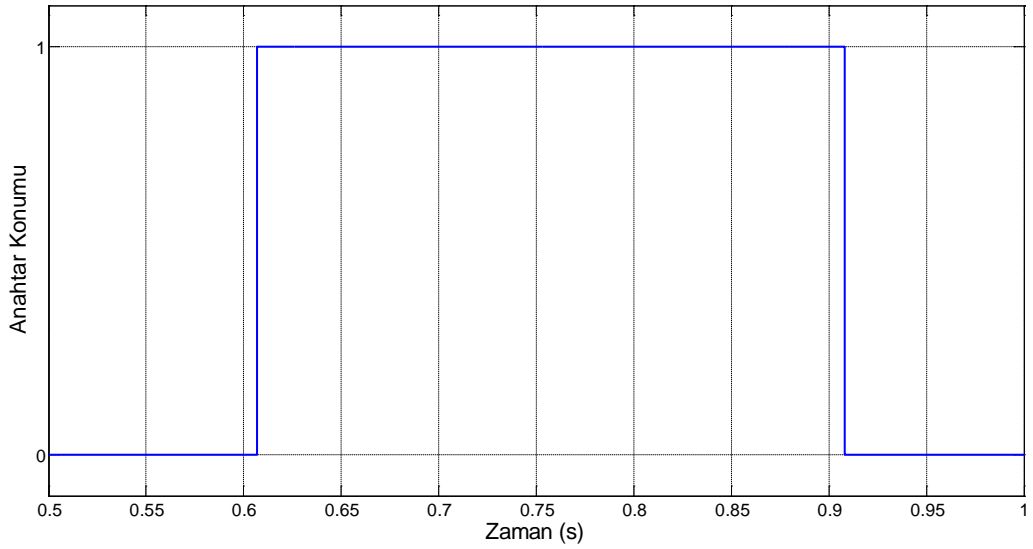
Her üç fazın gerilim ve akım işaretlerine ilişkin veritabanları söz edildiği gibi üretildikten sonra, tüm yöntemlerin bu işaretlere vereceği cevabı elde etmek için MATLAB fonksiyon ve komut dosyaları oluşturulmuştur. Röle algoritmalarının benzetimi bu dosyalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. TMSB test sisteminde koruma gerçekleştiren röle için örnekleme frekansı 1 kHz olarak alınmıştır. Bu da 50 Hz sistem için bir periyotta 20 örnekleme alınacağı anlamına gelmektedir.

Mesafe rölesi, Hat 1'in başında, yani gönderici tarafında konuşlanmış durumdadır.

Gerilim ve akım işaretleri, gerilim ve akım ölçü transformatörleri kullanılarak röleye düşürülerek aktarılmaktadır. Birinci kısa devre senaryosu için, rölenin hesapladığı empedans değerinin ve bu senaryoda üretilen anahtarlama cevabının değişimi sırasıyla Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da görüldüğü elde edilmektedir.



Şekil 4.5. Kısa devre arızası senaryolarının ilki için röle tarafından hesaplanan empedans değerinin değişimi



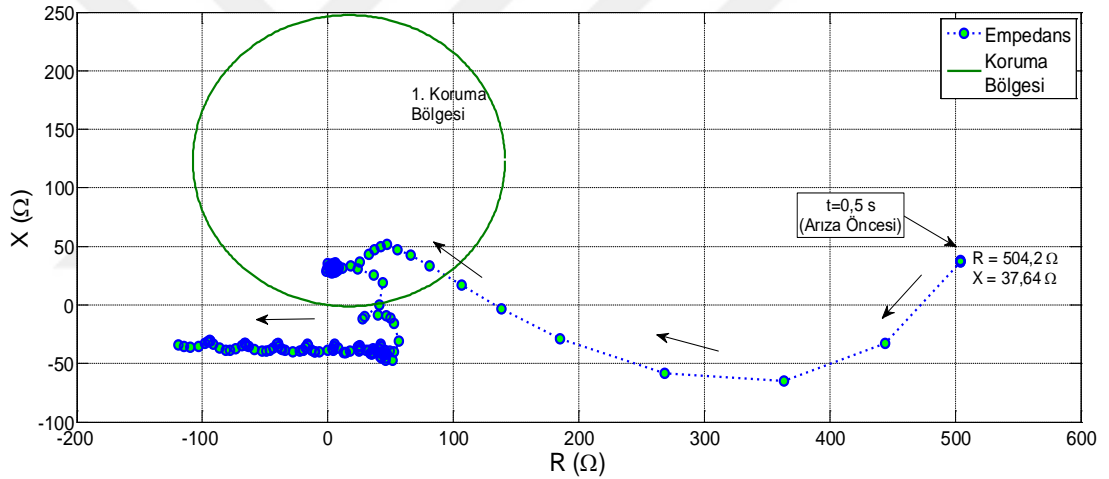
Şekil 4.6. Kısa devre arızası senaryolarının ilki için röle tarafından üretilen anahtarlama cevabının incelenen aralıktaki değişimi

Mesafe koruma için bu çalışmada mho karakteristiği tercih edilmiştir. Buna göre, koruma bölgelerinin ve ayar sürelerinin tanımı Tablo 4.3'teki gibi yapılmıştır ( $Z_{Hat} = 33,6 + j246,4 \Omega$ ,  $|Z_{Hat}| = 248,68 \Omega$ ).

Tablo 4.3. TMSB test sistemi için mho karakteristiğinde tanımlanan mesafe koruma bölgesi ayar parametreleri

Koruma Bölgesi	Koruma Çemberinin Merkez Koordinatı ( $\Omega$ )	Zaman Gecikmesi (s)
1	16,8 + j123,2	Yok
2	20,16 + j147,84	0,3
3	26,96 + j271,04	1

Empedansın 0,5 – 1 saniye aralığında R-X diyagramındaki değişimi de Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Arıza öncesinde, tanımı Tablo 4.3’te verilen koruma bölgesinin dışında kalan empedansın, arıza yaşandıktan sonra aynı koruma bölgesinin içine girerek anahtarlama cevabı üretilmesine neden olduğu gözlemlenebilir.



Şekil 4.7. Kısa devre arızası senaryolarının ilki için röle tarafından hesaplanan empedans değerinin R-X diyagramdaki değişimi

MATLAB’te yazılan kodlarda hem fazör hesapları, hem de temel mesafe rölesi fonksiyonları bulunmaktadır. Fazör hesapları için Ayrık Fourier Dönüşümü kullanılmıştır. Bunların dışında GSP ve GSGP fonksiyonlarını yerine getirecek komutlar da bulunmaktadır. Bu sayede uygun anahtarlama cevapları elde edilebilmiştir. İncelenen yöntemlerin başarımlarını değerlendirmesi için de yine MATLAB kodları kullanılmıştır. Arızanın başlangıç ve bitiş süreleri arasında anahtarlama yapılıp yapılmadığı, yapıldıysa kaç ms sonra cevap alındığı tespit edilmiştir. Böylece farklı yöntemler için hem anahtarlama cevabının doğruluğuna, hem de algoritmik temelde cevap hızına ilişkin değerlendirme yapılabilmektedir. Farklı yöntemler için anahtarlama başarımları Tablo 4.4’te verilmiştir.

Tablo 4.4. İncelenen yöntemlerin TMSB test sisteminde oluşturulan kısa devre arızası senaryoları için elde edilen anahtarlama başarımları

Yöntem	Anahtarlama Yapılan Senaryo Sayısı (Doğru)	Anahtarlama Yapılmayan Senaryo Sayısı (Yanlış)	Başarım (%)
Klasik Yönt. 1	23	1	95,8
Klasik Yönt. 3	18	6	75
Klasik Yönt. 4	21	3	87,5
Güncel bir yöntem [25]	22	2	91,7
Tezde Önerilen Yöntem	24	0	100

Tablo 4.4'te elde edilen sonuçlar, tezde önerilen yöntemin başarımını göstermesi açısından oldukça önemlidir. Çünkü, kısa devre arızası senaryolarının tamamında istenildiği gibi çalışan tek yöntem, geliştirilen yöntemdir. Bundan sonraki en iyi sonuç, azalan empedans yöntemi (Klasik yöntem 1) ile elde edilmiştir. Güncel yöntemin [25] analiz edilen iki kısa devre senaryosunda başarısız kaldığı görülmektedir.

Yöntemlerin başarımının yanı sıra, cevap süreleri yani hızları da önemli bir parametredir. Çünkü kısa devre arızasının mümkün olan en kısa sürede tespit edilmesi ve gerekli önlemin alınarak temizlenmesi istenmektedir. Bu noktada, yöntemler karşılaştırılırken sağlıklı bir değerlendirme yapabilmek için, her yöntemin doğru anahtarlama alınan senaryolarında anahtarlama cevabının üretilme sürelerinin ortalaması alınmıştır. Bu bir yerde, algoritmaların kaç örnekleme adımı sonra cevap vereceğine ilişkin bilgileri içermektedir. Cevap verme hızına ilişkin bu değerlendirme Tablo 4.5'te görüldüğü gibidir.

Tablo 4.5. İncelenen yöntemlerin TMSB test sisteminde oluşturulan kısa devre arızası senaryoları için algoritma temelinde ortalama cevap verme hızları

Yöntem	Değerlendirilen Senaryo Sayısı	Ortalama Cevap Hızı (ms)
Klasik Yöntem 1	23	9,00
Klasik Yöntem 3	18	8,58
Klasik Yöntem 4	21	80,57
Güncel bir yöntem [25]	22	11,09
Tezde Önerilen Yöntem	24	9,21

Örnekleme frekansı 1 kHz olduğu için, rölenin her örnekleme arasındaki zaman farkı (h) 1 ms olmaktadır. Bu nedenle, Tablo 4.5'te ortalama cevap hızı olarak görülen değerler aynı zamanda algoritmanın cevap vermek için geçirdiği örnekleme adımı sayısına eşittir.

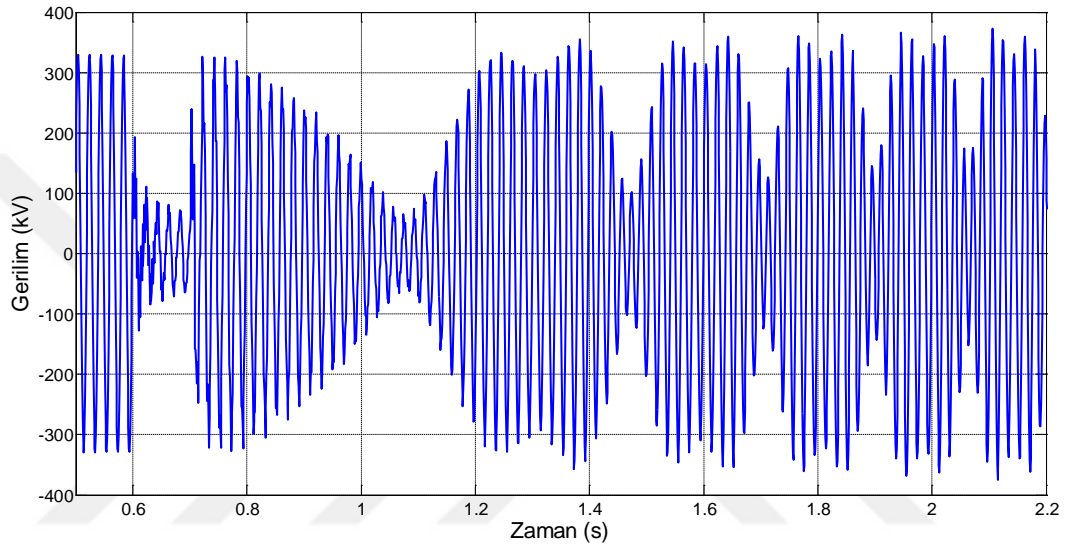
Tablo 4.5'ten görüldüğü gibi, bindirilmiş akım yönteminin (Klasik yöntem 3) en hızlı cevap süresine sahip olduğu görülmektedir. Fakat bu durum, anahtarlama başarımının %75 olduğu göz önüne alınarak değerlendirilmelidir. Öte yandan, azalan direnç yönteminin (Klasik yöntem 4) %87,5'lik başarımının da 80,57 ms gibi uzun bir cevap süresi ile birlikte değerlendirilmesi gerekir; bu süre diğer yöntemlerin ortalama cevap sürelerine göre oldukça fazladır. Tezde önerilen yöntemin anahtarlama cevabının oldukça hızlı gerçekleşeceği görülmektedir. Bu da geliştirilen yöntemin üstünlüklerinden biridir. Bu yöntem, kısa devre senaryolarında %100 başarılı sonuç vermesinin yanı sıra aynı zamanda hızlı cevap da vermiştir.

#### **4.1.2. Güç salınımı senaryoları**

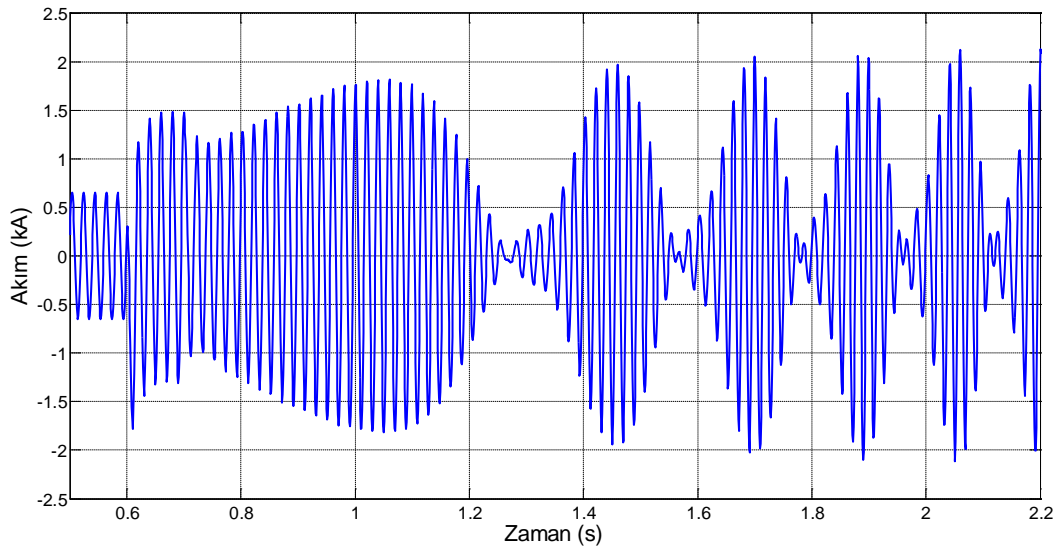
Aynı test sisteminde, GSP fonksiyonunun nasıl cevap vereceğini incelemek amacıyla çeşitli güç salınımı senaryoları oluşturulmuştur. Salınım durumu, sistemde ciddi oranda yük alma/atma, generatörün mekanik giriş gücünde yaşanan bir değişim ya da kritik öneme sahip bir enerji iletim hattının devreden çıkması sonucu oluşabilir. PSCAD'te yapılan analizlerde, salınım oluşturmak amacıyla TMSB test sistemindeki paralel hatlardan biri devre dışı bırakılmış ve ardından röle tarafından korunmakta olan diğer hattaki gerilim ve akım işaretleri izlenmiştir. Sistemde, generatörün sonsuz güçlü baraya güç aktarması gerektiği görülmektedir. Fakat hatlardan birinin devre dışı kalmasından sonra diğer hat bu gücün aktarımı için yetersiz kalacak ve sistemde güç salınımı meydana gelecektir.

Güç salınımı için 24 farklı senaryo üretilmiştir. Senaryoların yapısı kısa devre arızalarınınkindi ile birebir aynıdır. Yani Tablo 4.2'de söz konusu edilen arızaların aynıları üretilmiş, fakat bu kez arızaların tamamı Hat 2'de oluşturulmuştur. Senaryoların tamamında arızalar Hat 2'nin devre dışı bırakılması, yani hat başı ve hat sonundaki kesicilerin anahtarlanması sonucu temizlenmektedir. Böylece, bu kez Hat 2 için üretilen kısa devre senaryoları, Hat 1'de farklı yapıda güç salınımı senaryolarına dönüşmüştür.

Mesafe rölesi yine Hat 1'in başında (gönderici tarafında) konuşlanmıştır. İlk senaryo değerlendirilecek olursa, izlenecek gerilim işaretinin Şekil 4.3'teki ile birebir aynı olacağı görülecektir. Çünkü her iki durumda da aynı baradan gerilim bilgisi alınmıştır. Gerilim ve akım ölçü transformatörleri tarafından düşürülerek gönderilecek olan gerilim ve akım işaretlerinin tek faz için değişimleri sırasıyla Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'daki gibi gerçekleşmektedir. Güç salınımını izlemek için zaman eksenini bu kez daha geniş tutulmuştur.



Şekil 4.8. Güç salınımı senaryolarının ilki için tek faz gerilim işaretinin değişimi



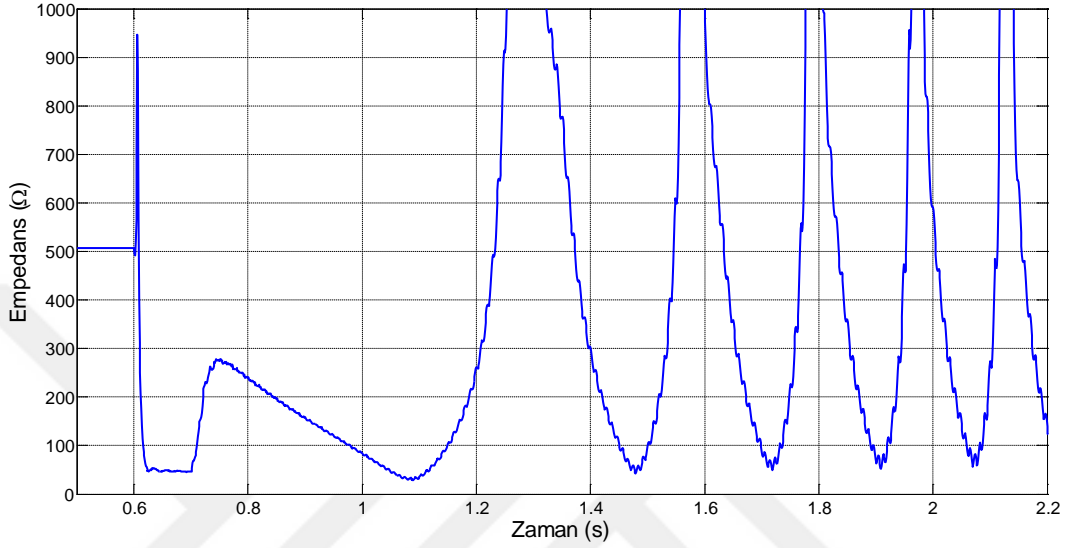
Şekil 4.9. Güç salınımı senaryolarının ilki için tek faz akım işaretinin değişimi

Yapılan analizlerde, güç salınımının frekansının yüksek olduğu görülmektedir. Benzetim süresince salınım frekansı daha da artmaktadır ve 10 Hz seviyelerine

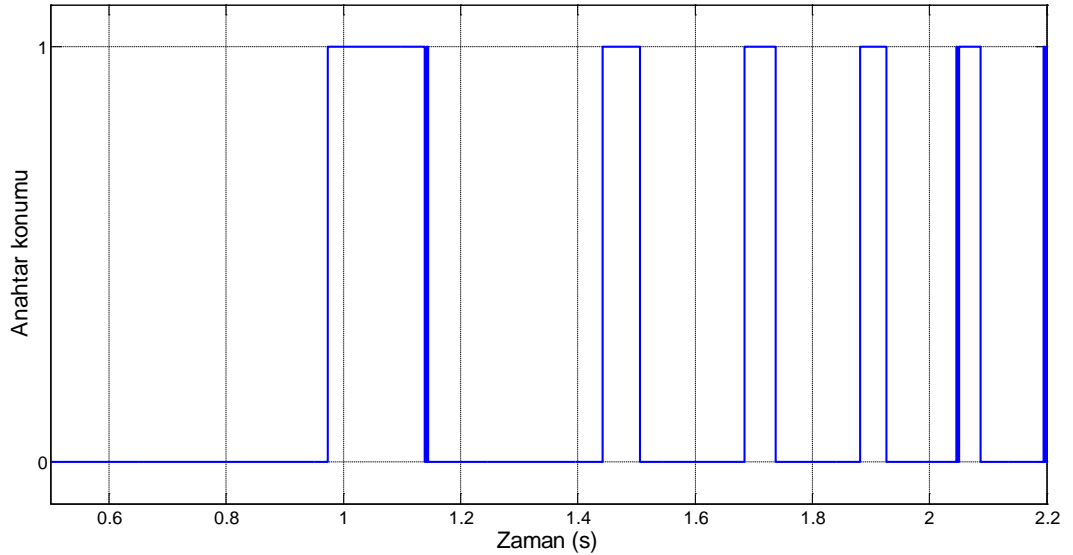


gelmektedir.

Sistemde salınım yaşandıktan sonra rölenin hesapladığı empedans değerinin ve anahtarlama cevabının değişimi sırasıyla Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'deki gibi olmaktadır.



Şekil 4.10. Güç salınımı senaryolarının ilki için röle tarafından hesaplanan empedans değerinin değişimi

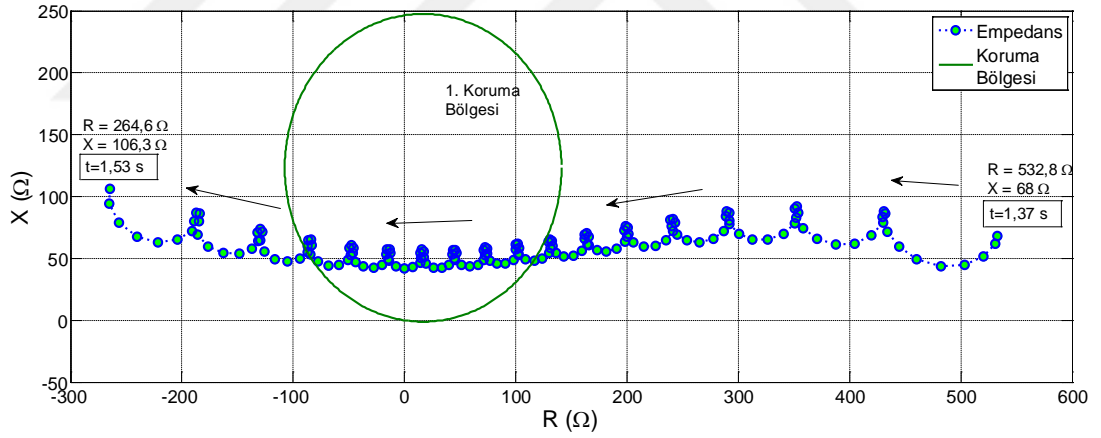


Şekil 4.11. Güç salınımı senaryolarının ilki için röle tarafından üretilen anahtarlama cevabının incelenen aralıktaki değişimi

Şekil 4.10'da görüleceği gibi, hesaplanan empedans değeri, arızadan sonra da, yani güç salınımı yaşandığı süre boyunca da düşük değerlere gelmiştir. Empedans değeri,

güç salınımı esnasında koruma bölgesi için tanımlanan sınır değerinin tekrar tekrar altına inmiştir. Bu durum, Şekil 4.11’de görüleceği gibi, rölenin kesiciye yanlış anahtarlama işareti göndermesine sebep olacaktır. Bu durumun, tez kapsamında incelenen durumun güzel bir özeti olduğu söylenebilir. Çünkü eğer bu tez çalışmasında da geliştirilmeye çalışılan GSP fonksiyonları hiç kullanılmazsa, gerçek bir arıza olmamasına rağmen sistemin enerjisi kesilebilmektedir. Bu da koruma sisteminin güvenilirliğini azaltan bir sonuçtur.

Benzetim süresince, empedansın R-X diyagramında izlediği yol Şekil 4.12’de gösterildiği gibi gerçekleşmiştir. Değişimin daha iyi anlaşılabilmesi için empedans değerleri, yalnızca güç salınımı yaşanan dar bir zaman bandı için çizdirilmiştir. Buradan da görüleceği üzere, empedans değeri R-X diyagramında koruma bölgesinin içine girmektedir. Bu da, eğer herhangi bir önlem alınmadıysa (yani herhangi bir GSP fonksiyonu işletilmiyorsa) Şekil 4.11’de görülen yanlış anahtarlamanın yaşanacağını başka bir göstergesidir.



Şekil 4.12. Güç salınımı senaryolarının ilki için röle tarafından hesaplanan empedans değerinin R-X diyagramdaki değişimi (1,37 – 1,53 s aralığında)

Bu noktada, incelenen yöntemlerin güç salınımı durumları için anahtarlama başarımları ve algoritma temelinde çalışma hızları değerlendirilmelidir. PSCAD’ten MATLAB’e aktarılan benzetim dosyaları ve incelenen algoritmalar için yazılan program dosyaları kullanılarak Tablo 4.6’da görülen güç salınımı için başarımlar çizelgesi oluşturulmuştur.

Tablo 4.6. İncelenen yöntemlerin TMSB test sisteminde oluşturulan güç salınımı senaryoları için elde edilen anahtarlama başarımları

<b>Yöntem</b>	<b>Anahtarlama Yapılan Senaryo Sayısı (Yanlış)</b>	<b>Anahtarlama Yapılmayan Senaryo Sayısı (Doğru)</b>	<b>Başarım (%)</b>
Klasik Yönt. 1	11	13	54,2
Klasik Yönt. 3	0	24	100
Klasik Yönt. 4	6	18	75
Güncel bir yöntem [25]	0	24	100
Tezde Önerilen Yöntem	0	24	100

Hiçbir yöntem kullanılmadığı zaman mesafe rölesi 24 senaryonun tamamında hatalı açma vermektedir (%0 başarımları). Tablo 4.6'dan görüleceği gibi; bindirilmiş akım yöntemi (Klasik Yöntem 3), incelenen güncel yöntem [25] ve tezde önerilen yöntem, hiçbir güç salınımı senaryosunda hatalı sonuç verilmemiştir. Azalan empedans yönteminin (Klasik yöntem 1) düşük bir başarıma sahip olduğu görülmektedir.

#### 4.1.3. Güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları

TMSB test sisteminde son olarak, güç salınımı esnasında bir kısa devre arızası meydana gelirse rölenin doğru tepki verme başarımları test edilmiştir. Bu noktada, doğru başarımları elde etmek için GSP yöntemlerinin GSGP işlevleriyle desteklenmeleri gerektiği söylenmelidir. Sistemin güvenilirliği açısından, yapılması gerekmeyen anahtarlama önlenmesi kadar, yapılması gereken anahtarlama hayata geçirilmesi de oldukça önemli olacaktır. Bu nedenle, “arıza ve güç salınımı” ayrımı için yapılan sistem izlemesi, güç salınımı tespiti yapıldıktan sonra da sürdürülmelidir. Böylece, güç salınımı esnasında bir kısa devre olursa bunun kısa devre olduğu bilgisi elde edilebilir ve GSP geri çekilerek, kesici anahtarlama gerçekleştirilebilir.

Daha önce, Hat 2'nin farklı kısa devre arızaları sonrası devre dışı kalması sonucu, Hat 1'de çeşitli güç salınımı senaryoları üretilmişti. Şimdi bu kez, yine aynı senaryolar üretilmiş ve bu esnada Hat 1'de çeşitli kısa devre arızaları üretilmiştir. Böylece güç salınımı esnasındaki kısa devre durumunun tespit edilip edilemediği

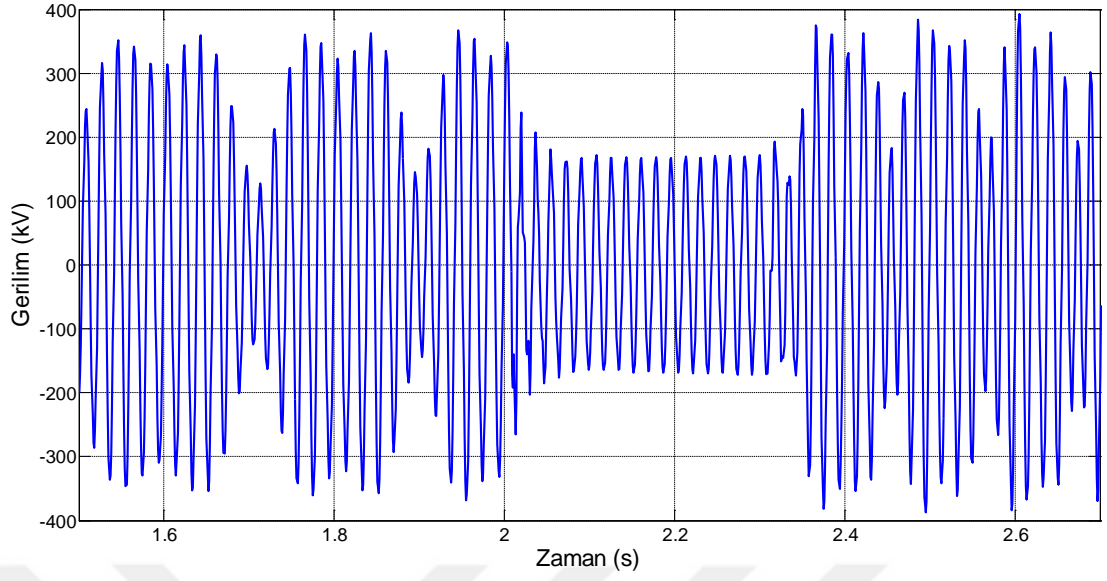
araştırılmıştır. Üretilen 24 farklı güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryosuna ilişkin detaylar Tablo 4.7’de görüldüğü gibidir. Hatırlatmak gerekirse, tüm kısa devre durumları için söz konusu simetrik arızalar üç faz – toprak, asimetrik arızalar da faz – toprak arızalarıdır. Tüm arızalar 300 ms sürdürülmüştür.

Tablo 4.7’de söz edilen kısa devre arızaları, ikinci arıza olarak tanımlanmıştır. Çünkü benzetimde, güç salınımı üretmek için ilk arıza Hat 2’de üretilmişti. Böylece, güç salınımı esnasında oluşturulan kısa devre, benzetimin ikinci arızası olmaktadır; bu nedenle böyle bir isimlendirme yapılmıştır.

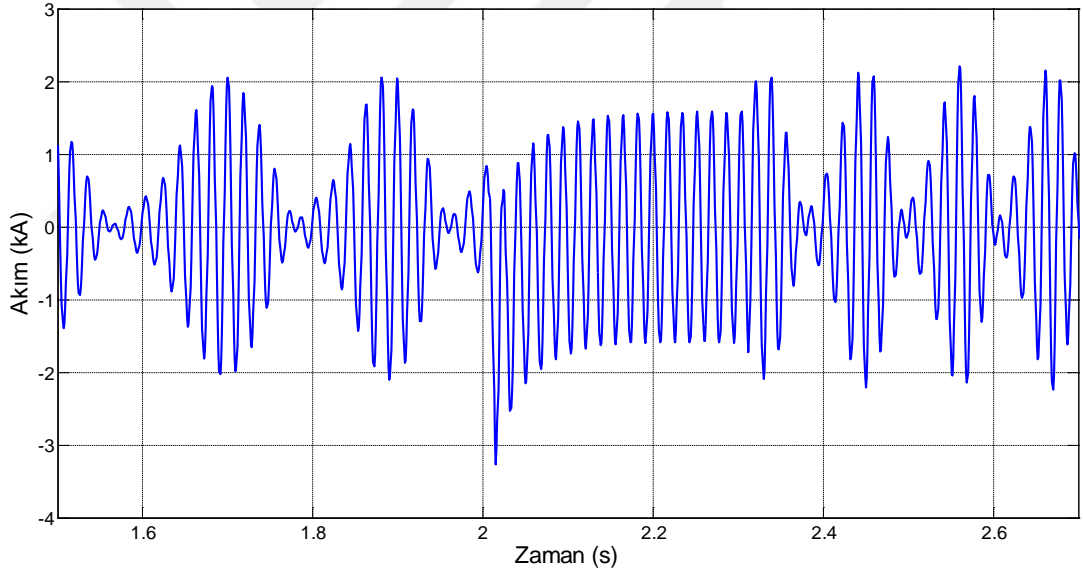
İlk senaryo için, Hat 1’in gönderici tarafında konuşlanmış olan mesafe rölesine ölçü transformatörleri aracılığıyla aktarılacak olan gerilim ve akım işaretlerinin değişimleri sırasıyla Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’teki gibidir.

Tablo 4.7. TMSB test sisteminde üretilen güç salınımı esnasında kısa devre arızası (ikinci kısa devre arızası) senaryoları

Senaryo Numarası	İkinci Arızanın Uzaklığı (%)	İkinci Arıza Başlangıç Açısı (°)	İkinci Arıza Başlangıcı (s)	İkinci Arızanın Tipi
1	45	135	2,0075	Simetrik
2	75	90	2,005	Simetrik
3	15	45	2,0025	Simetrik
4	45	0	2	Simetrik
5	75	90	2,005	Simetrik
6	15	135	2,0075	Simetrik
7	45	0	2	Asimetrik
8	75	45	2,0025	Asimetrik
9	15	45	2,0025	Asimetrik
10	45	0	2	Asimetrik
11	75	135	2,0075	Asimetrik
12	15	90	2,005	Asimetrik
13	45	0	2	Simetrik
14	75	135	2,0075	Simetrik
15	15	90	2,005	Simetrik
16	45	45	2,0025	Simetrik
17	75	135	2,0075	Simetrik
18	15	90	2,005	Simetrik
19	45	45	2,0025	Asimetrik
20	75	0	2	Asimetrik
21	15	90	2,005	Asimetrik
22	45	135	2,0075	Asimetrik
23	75	0	2	Asimetrik
24	15	45	2,0025	Asimetrik

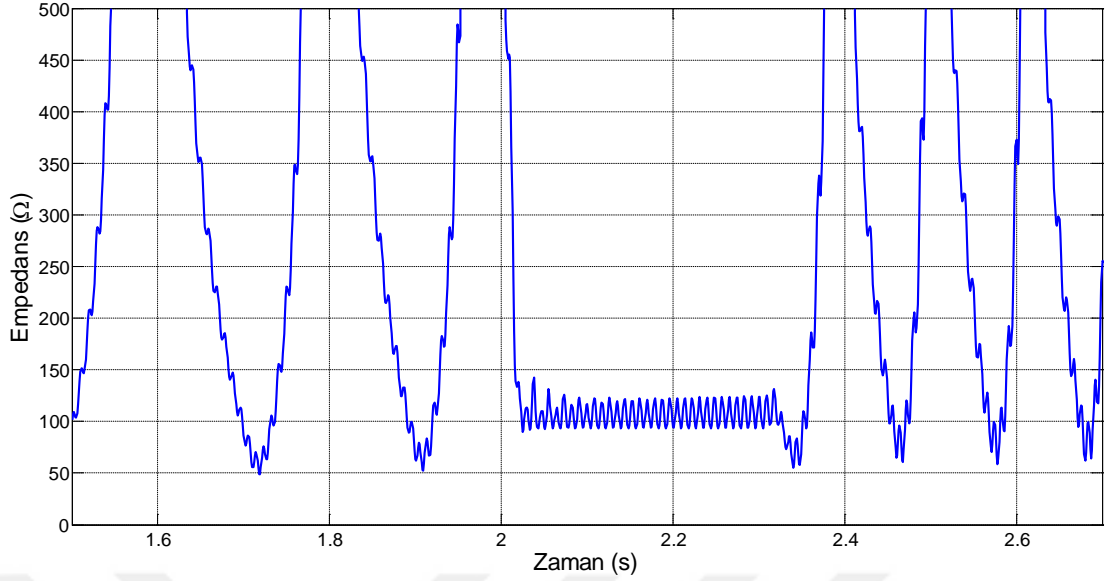


Şekil 4.13. Güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryolarının ilki için tek faz gerilim işaretinin değişimi

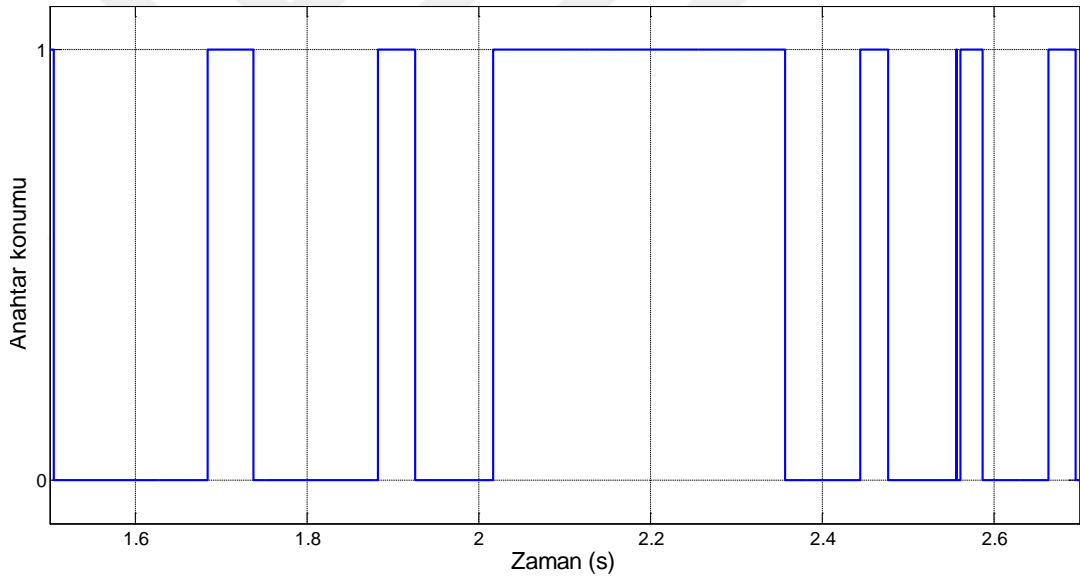


Şekil 4.14. Güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryolarının ilki için tek faz akım işaretinin değişimi

İzlenen güç salınımı esnasında kısa devre arızası meydana geldiği zaman, mesafe rölesinin hesapladığı empedans değerinin ve anahtarlama cevabının değişimleri sırasıyla Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'daki gibi gerçekleşmiştir.



Şekil 4.15. Güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryolarının ilki için röle tarafından hesaplanan empedans değerinin değişimi



Şekil 4.16. Güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryolarının ilki için röle tarafından üretilen anahtarlama cevabının incelenen aralıktaki değişimi

Şekil 4.15'te görülen empedans değişiminin işaret ettiği ve Şekil 4.16'da görülen anahtarlama cevabı, beklenen bir sonuçtur. Röle normal çalışma şartlarında, bir güç salınımı tespiti yapmaz ise, zaten öncesinde bir perdeleme yapılmadığı için böyle bir kısa devre durumuna karşı doğru bir tepki verecektir. Ama, buradaki asıl sorun, hem güç salınımı durumunda anahtarlamanın doğru bir şekilde geri bırakılabilmesi, hem de bu geri bırakma esnasında yaşanacak kısa devreye karşı tekrar anahtarlama cevabının üretilerek sistemin doğru bir şekilde korunabilmesidir. Geliştirilen farklı

yöntemlerin GSGP başarımları değerlendirilirken konuya bu çerçeveden bakılması gerekmektedir.

PSCAD’te üretilen senaryolar MATLAB’e aktarıldıktan sonra algoritma ve başarımlar değerlendirme programları işletilmiş ve incelenen yöntemler için elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları için başarımlar sonuçları Tablo 4.8’deki gibi elde edilmiştir.

Tablo 4.8. İncelenen yöntemlerin TMSB test sisteminde oluşturulan güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları için elde edilen anahtarlama başarımları

<b>Yöntem</b>	<b>Anahtarlama Yapılan Senaryo Sayısı (Doğru)</b>	<b>Anahtarlama Yapılmayan Senaryo Sayısı (Yanlış)</b>	<b>Başarımlar (%)</b>
Klasik Yönt. 1	20	4	83,3
Klasik Yönt. 3	21	3	87,5
Klasik Yönt. 4	17	7	70,8
Güncel bir yöntem [25]	20	4	83,3
Tezde Önerilen Yöntem	24	0	100

Tablo 4.8 oluşturulurken, yöntemlerin güç salınımı tespiti için yaptıkları parametre izlemesinin sürekli devam ettiği kabul edilmiştir. Böylece, güç salınımı esnasında kısa devre arızası yaşandığı zaman salınım bilgisi alınmıyorsa, doğru anahtarlama yapılabilecektir. Tablodan görüleceği gibi, incelenen senaryolar içinde en başarılı yöntem, tezde önerilen yöntemdir; bütün senaryolarda doğru anahtarlama elde edilmiştir, başarımlar %100’dür. En yakın takipçinin başarımlarını %87,5’te kalmaktadır.

Anahtarlama başarımlarının yanında, doğru yapılan anahtarlama algoritmaları temelinde ne kadar hızlı olduğu da incelenmektedir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, incelenen yöntemler kullanılarak kısa devre arızası tespitinin yapıldığı sürelerin ortalama değerleri Tablo 4.9’deki gibi elde edilmiştir.

Tablo 4.9’da görülen ortalama cevap süreleri, aynı zamanda algoritmaların kısa devre cevabını vermesi için geçen adım sayıları olarak değerlendirilebilir; çünkü örnekleme adımını 1 ms’dir. Tablodan görüldüğü üzere, tezde önerilen yöntemin cevap verme hızı

açısından ciddi bir üstünlüğü söz konusu olmaktadır. Klasik yöntemlerin geç cevabının yanı sıra, incelenen güncel yöntemin de daha yavaş kaldığı görülmektedir. Üstelik, tüm senaryolarda başarılı sonuç alınmış olması ve bu nedenle hesaplanan sürenin en çok sayıda senaryo kullanılarak elde edilmiş olması, bu üstünlüğü daha anlamlı hale getirmektedir.

Tablo 4.9. İncelenen yöntemlerin TMSB test sisteminde oluşturulan güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları için algoritma temelinde ortalama cevap verme hızları

Yöntem	Değerlendirilen Senaryo Sayısı	Ortalama Cevap Hızı (ms)
Klasik Yöntem 1	20	216,15
Klasik Yöntem 3	21	201,02
Klasik Yöntem 4	17	186,15
Güncel bir yöntem [25]	20	13,55
Tezde Önerilen Yöntem	24	10,58

#### 4.1.4. Genel değerlendirme

Korumanın güvenilirliği açısından, kısa devre arızasının gerçekleştiği ve gerçekleşmediği durumlar en doğru şekilde tespit edilebilmelidir. Bizim incelediğimiz sorun açısından bakıldığında, bu durumu iki açıdan değerlendirebiliriz. İlk bakış açısı şudur: eğer sistemde bir güç salınımı gerçekleşir ve hesaplanan empedans değeri koruma bölgesinin içine düşerse, bu durumda kısa devre tespiti yapılmamalı, anahtarlama işlemi önlenmelidir. Mesafe rölesinde bunun gerçekleşmesini GSP fonksiyonu saplar. İkinci bakış açısı da şöyledir: ister normal işletmede isterse bir güç salınımı esnasında yaşansın, rölenin koruma bölgeleri içine düşen bir hatta bir kısa devre arızası gerçekleşirse, bu durum, doğru ve hızlı bir şekilde tespit edilerek arızanın temizlenmesi sağlanmalıdır. Röledeki GSGP desteğinin bu ikinci bakış açısına katkı sağlayacağı açıktır.

TMSB test sisteminde 24 kısa devre, 24 güç salınımı, 24 güç salınımı esnasında kısa devre olmak üzere toplam 72 tane senaryo üretilmiştir. İncelenen yöntemlerin başarımı hakkında bilgi verebilmek için, tüm senaryolardaki başarımları birlikte değerlendirilmelidir. Böylece, rölenin hem GSP hem de GSGP fonksiyonlarını doğru



bir şekilde yerine getirip getirmediği açığa çıkarılmış olur.

İncelenen yöntemlerin toplam başarımları Tablo 4.10'da görüldüğü gibi elde edilmiştir.

Tablo 4.10. İncelenen yöntemlerin TMSB test sisteminde oluşturulan tüm senaryolar için elde edilen toplam anahtarlama başarımları

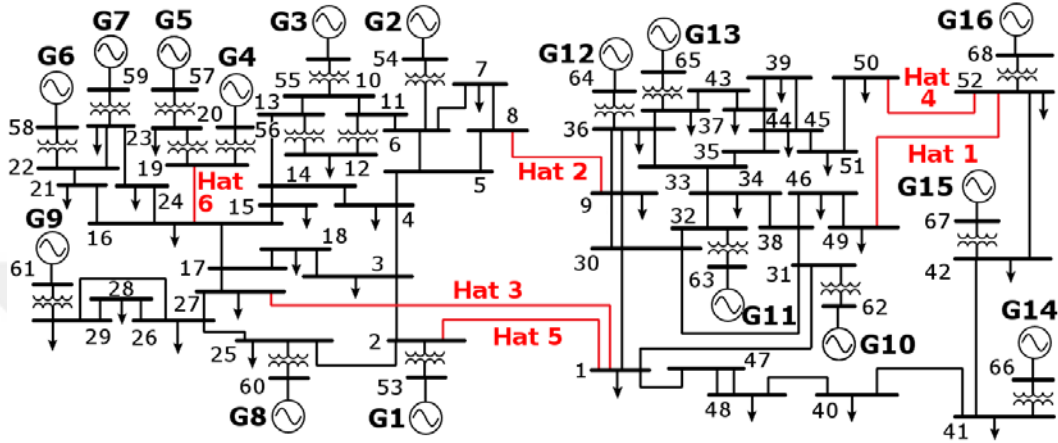
Yöntem	Doğru İşlem Yapılan Senaryo Sayısı	Yanlış İşlem Yapılan Senaryo Sayısı	Toplam Başarım (%)
Klasik Yönt. 1	56	16	77,8
Klasik Yönt. 3	63	9	87,5
Klasik Yönt. 4	56	16	77,8
Güncel bir yöntem [25]	66	6	91,7
Tezde Önerilen Yöntem	72	0	100

TMSB test sistemi için alınan ve Tablo 4.10'da gösterilen sonuçlar dikkate alındığı zaman, tezde önerilen yöntemin, güç salınımı söz konusu olduğu zaman mesafe korumanın güvenilirliğini iyileştirdiği görülmektedir. Bu çıkarımı, üretilen tüm senaryolarda hem GSP hem de GSGP fonksiyonlarını eksiksiz şekilde yerine getirmesi nedeniyle yapabiliriz. Önerilen yöntemin başarımları, problemin çözümü için önerilen klasik yöntemlerin yanı sıra, literatürdeki güncel bir yöntemin de önünde çıkmıştır. Üstelik, kısa devre tespiti yapılması gereken senaryolardaki anahtarlama cevabının oldukça hızlı olduğu tespitleri de dikkate alındığı zaman, yöntemin başarımları, uygulanabilirlik açısından da anlam kazanmaktadır. İlerleyen bölümde, yöntemin yalnızca algoritma temelinde (yazılımsal) değil, bir işlemci ya da kontrolörde çalışma temelinde (donanımsal) cevap verme hızı da ölçülecek ve güncel bir diğer yöntem ile [25] karşılaştırılacaktır.

#### 4.2. 68 Baralı (NETS-NYGS) Test Sisteminde Yapılan Analizler

Farklı koşullarda sınanan yöntemler için daha genel çıkarımlarda bulunabilmek amacıyla, tüm benzer senaryolar bir test sisteminde daha üretilmiş ve başarımları değerlendirilmeleri gerçekleştirilmiştir. Bu sistem, literatürde çeşitli çalışmalarda

[34:Tez, 35:Baone] kararlılıkla ilintili problemlerin incelenmesi amacıyla kullanılan, 68 baralı New England Test Sistemi – New York Güç Sistemi (NETS-NYGS) ismi verilen test sistemidir. Bu sistem; beş bölge, 16 makine, 68 bara ve sistem dinamiği açısından bakıldığında dört adet zayıf sönümlü bölgeler arası salınım modu içermektedir. NETS-NYGS'nin tek hat şeması Şekil 4.17'de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. 68 baralı NETS-NYGS'nin tek hat şeması

Yapılacak analizlerde söz konusu edilecek 6 hat, şekil üzerine gösterilmiştir. Bu hatlar farklı kısa devre, güç salınımı ve güç salınımı esnasında kısa devre senaryolarına dahil edilecektir. NETS-NYGS'in benzetimi, 60 Hz frekansta ve 400 kV gerilimle gerçekleştirilecektir. Modelleme ve benzetim için, diğer sistemde olduğu gibi yine PSCAD kullanılmıştır. Hem generatörler, hem uyarım devreleri, hem de Güç Sistemi Kararlı Kılıcı (GSKK) sistemleri PSCAD'te modellenmiştir. Programda, generatörler için senkron makine modeli, uyarım devreleri için IEEE AC1A tipi uyarım modeli, GSKK için Tek Girişli GSKK (PSS1A) modeli tercih edilmiştir.

Bu sistem için modelleme ve benzetim çalışmaları yapılırken MATLAB için Power System Toolbox (PST) eklentisinden yararlanılmıştır [36]. PST veritabanı içinde bu sistemin hat, yüklenme ve dinamik parametreleri mevcuttur; tez çalışmasında PST içindeki sistem parametreleri temel alınmıştır. PSCAD modeline geçiş yaparken öncelikle sistemin güç akışı, MATLAB'te PST kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ardından, her generatörün uç geriliminin mutlak değer ve açı bilgileri PSCAD'e aktarılmış ve böylece normal işletme durumu elde edilmiştir. Bundan sonra, istenen senaryoları üretmek için kullanılacak temel analizler gerçekleştirilmiş, uygun

yerlerden gerilim ve akım ölçümleri alınarak mesafe rölesinin tepkisi incelenmiştir.

NETS-NYGS'de kısa devre, güç salınımı ve güç salınımı esnasında kısa devre senaryoları oluşturulmuştur. Bu amaçla, üç hat seçilmiş ve oluşturulan tüm senaryolarda, bu hatları koruyan mesafe rölelerinin başarımı değerlendirmeye alınmıştır. Bu hatlar, Şekil 4.17'de gösterilen Hat 1 (52-49. baralar arası), Hat 2 (8-9. baralar arası) ve Hat 3'tür (27-1. baralar arası). Rölelerin örnekleme frekansı 1,2 kHz'tir; yani başka bir ifadeyle, sistem frekansı 60 Hz olduğu için her periyotta 20 örnek alınmaktadır.

Mesafe rölelerinin (3 adet) bu test sistemindeki çalışma başarımları; dört klasik yöntem, bir güncel yöntem [25] ve tezde önerilen yöntem için elde edilecek ve karşılaştırma yapılacaktır. Kısa devre, güç salınımı ve güç salınımı esnasında kısa devre senaryolarını üretmeden önce, söz konusu yöntemlerin parametre ayarları yapılmalıdır. İncelenen yöntemler eşik değeri kontrolüne dayandığı için, her sistem (hat) için bir ayar değeri girilmelidir. Üç farklı hat söz konusu olduğu için, benzetim çalışmalarında her yöntemin üç farklı değeri söz konusu olacaktır. İncelenen altı farklı yöntem için seçilen optimum parametre değerleri Tablo 4.11'deki gibidir. Bundan sonraki tüm analizler, bu tablodaki parametre değerleri kullanılarak gerçekleştirilecektir.

#### 4.2.1. Kısa devre arızası senaryoları

İncelenen test sisteminde, seçilen üç farklı hatta (Hat 1, Hat2 ve Hat 3) çeşitli kısa devre arızası durumları oluşturularak rölenin cevabı araştırılmıştır. Toplam 24 kısa devre arızasının 8'i Hat 1'de, 8'i Hat 2'de, 8'i de Hat 3'te meydana getirilmiştir. Oluşturulan arıza senaryolarına ilişkin detaylar Tablo 4.12'deki gibidir.

Tablo 4.11. 68 baralı NETS-NYGS'nde güç salınımı tespiti için kullanılan yöntemlere ait parametreler

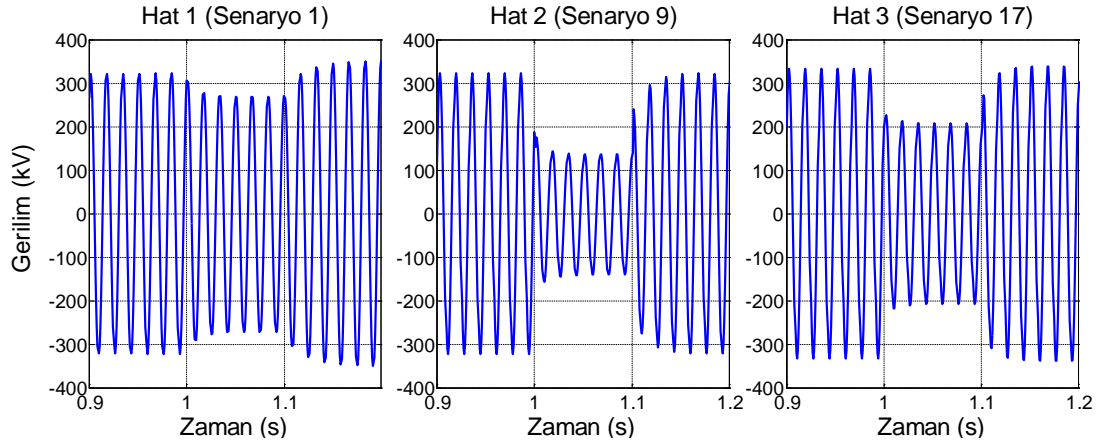
Yöntem	Parametre	Birim	Salınım Tespiti (Hat 1)	Salınım Tespiti (Hat 2)	Salınım Tespiti (Hat 3)
Klasik Yöntem 1	$\Delta t$	ms	$> 1,25$	$> 3,33$	$> 0,83$
Klasik Yöntem 2	$d(V\cos\phi)/dt$	MV/s	$< 22,5$	$< 3,7$	$< 13,5$
Klasik Yöntem 3	$I_k - I_{k-N}$	kA	$< 2,5$	$< 1,4$	$< 0,7$
Klasik Yöntem 4	$dR/dt$	k $\Omega$ /s	$< 20$	$< 1,7$	$< 41$
Güncel bir yöntem [25]	TMI	kA	$< 20$	$< 20$	$< 6$
Tezde Önerilen Yöntem	Aİ	MA <sup>2</sup>	$< 4$	$< 3$	$< 0,4$

TMSB test sisteminde olduğu gibi, söz konusu edilen simetrik arızalar üç faz – toprak, asimetrik arızalar ise faz – toprak arızalarıdır. PSCAD’te oluşturulan sistem modeli üzerinde ilgili değişiklikler yapılarak istenen senaryo üretilmiştir. 24 senaryo için gerçekleştirilen benzetimlerin tamamı 1,5 s sürdürülmüştür. Tablo 4.12’de gösterilen zamanlarda kısa devre arızası gerçekleştirilerek, planlanan arıza başlangıç açısının elde edilmesi sağlanmıştır. Arızanın uzaklığı, pi eşdeğer modeli ortadan ikiye bölünerek ve bölünen seri direnç ve reaktans değerleri uygun oranda değiştirilerek ayarlanmıştır. Arıza süresi ve arıza tipi bilgileri, PSCAD içindeki uygun bloklardan girilmiştir.

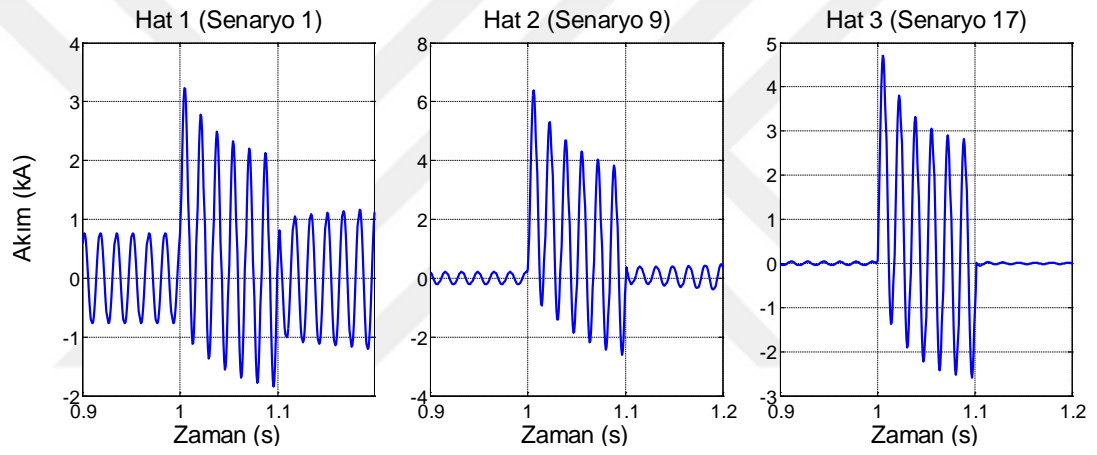
Ölçü transformatörleri kullanılarak mesafe rölesine aktarılacak olan gerilim ve akım işaretleri, her hattın ilk senaryosu için (Senaryo 1, 9 ve 17) tez fazdan alınan kesitler şeklinde sırasıyla Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’daki gibidir.

Tablo 4.12. 68 baralı NETS-NYGS’nde üretilen kısa devre arızası senaryoları

Senaryo Numarası	Arıza Yeri	Arıza Uzaklığı (%)	Arıza Başlangıç Açısı (°)	Arıza Başlangıcı (s)	Arıza Süresi (ms)	Arıza Tipi
1	Hat 1	15	0	1,00000	100	Simetrik
2	Hat 1	45	45	1,00208	350	Simetrik
3	Hat 1	75	90	1,00417	100	Simetrik
4	Hat 1	15	135	1,00625	350	Simetrik
5	Hat 1	45	0	1,00000	100	Asimetrik
6	Hat 1	75	45	1,00208	350	Asimetrik
7	Hat 1	15	90	1,00417	100	Asimetrik
8	Hat 1	45	135	1,00625	350	Asimetrik
9	Hat 2	75	0	1,00000	100	Simetrik
10	Hat 2	15	45	1,00208	350	Simetrik
11	Hat 2	45	90	1,00417	100	Simetrik
12	Hat 2	75	135	1,00625	350	Simetrik
13	Hat 2	15	0	1,00000	100	Asimetrik
14	Hat 2	45	45	1,00208	350	Asimetrik
15	Hat 2	75	90	1,00417	100	Asimetrik
16	Hat 2	15	135	1,00625	350	Asimetrik
17	Hat 3	45	0	1,00000	100	Simetrik
18	Hat 3	75	45	1,00208	350	Simetrik
19	Hat 3	15	90	1,00417	100	Simetrik
20	Hat 3	45	135	1,00625	350	Simetrik
21	Hat 3	75	0	1,00000	100	Asimetrik
22	Hat 3	15	45	1,00208	350	Asimetrik
23	Hat 3	45	90	1,00417	100	Asimetrik
24	Hat 3	75	135	1,00625	350	Asimetrik

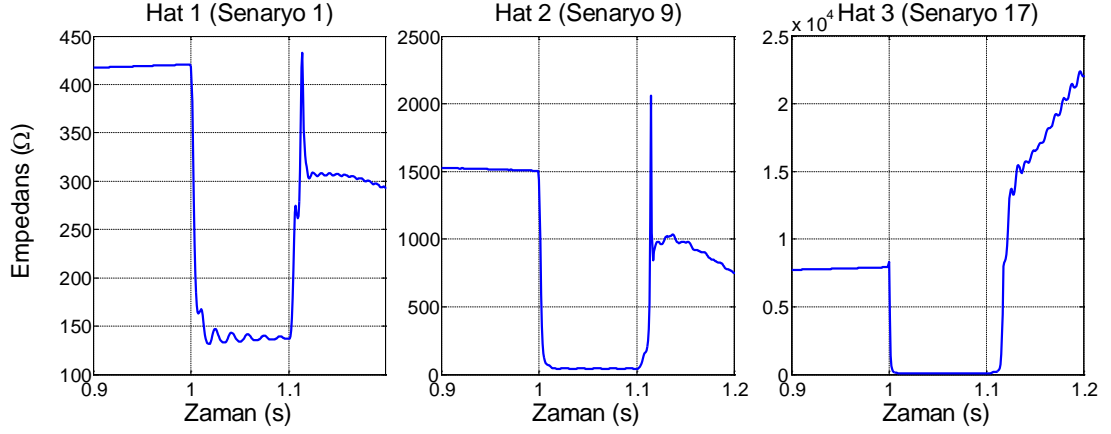


Şekil 4.18. Seçilen kısa devre arızası senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için tek faz gerilim işaretinin değişimi

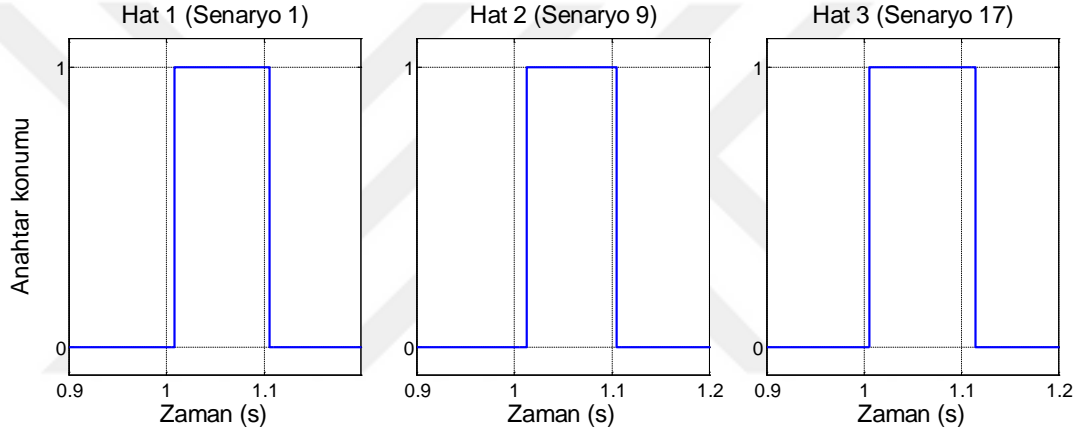


Şekil 4.19. Seçilen kısa devre arızası senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için tek faz akım işaretinin değişimi

Mesafe rölesi, ölçü transformatörlerinden gerilim ve akım bilgileri aldıktan sonra empedans değeri hesaplayacak, bu değeri ve ayar değerlerini kullanarak bir anahtarlama cevabı üretecektir. Her üç röle için, ilgili senaryolarda hesaplanan empedans değerinin ve anahtarlama cevabının (henüz herhangi bir GSP fonksiyonu kullanılmadığı durumdaki) değişimi sırasıyla Şekil 4.20 ve Şekil 4.21'deki gibi elde edilmektedir.



Şekil 4.20. Seçilen kısa devre arızası senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için röle tarafından hesaplanan empedans değerinin değişimi



Şekil 4.21. Seçilen kısa devre arızası senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için röle tarafından üretilen anahtarlama cevabının incelenen aralıktaki değişimi

Şekil 4.21'den görüldüğü gibi, mesafe rölesi kısa devre arızası durumlarına karşı beklendiği gibi doğru anahtarlama üretmiştir. Empedans değeri kullanılarak anahtarlama cevabı üretilirken, her üç hattaki mesafe rölesinin de mho karakteristiğine göre anahtarlama cevabı ürettiğini hatırlatmak yerine olacaktır. Hat 1, Hat 2 ve Hat 3 için koruma yapan röleler için tanımlanan mho karakteristiklerine ilişkin detaylar, sırasıyla Tablo 4.13, Tablo 4.14 ve Tablo 4.15'te verilmiştir.

Tablo 4.13. 68 baralı NETS-NYGS'nde Hat 1 için mho karakteristiğinde tanımlanan mesafe koruma bölgesi ayar parametreleri

Koruma Bölgesi	Koruma Çemberinin Merkez Koordinatı ( $\Omega$ )	Zaman Gecikmesi (s)
1	6,08+j91,2884	Yok
2	7,296+j109,546	0,3
3	7,808+j117,592	1

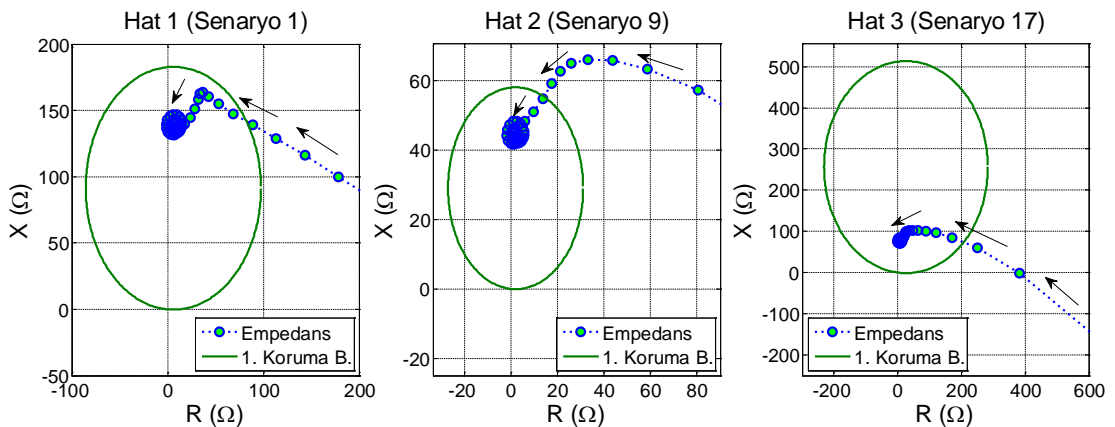
Tablo 4.14. 68 baralı NETS-NYGS'nde Hat 2 için mho karakteristiğinde tanımlanan mesafe koruma bölgesi ayar parametreleri

Koruma Bölgesi	Koruma Çemberinin Merkez Koordinatı ( $\Omega$ )	Zaman Gecikmesi (s)
1	1,84+j29,0472	Yok
2	2,208+j34,8566	0,3
3	3,952+j47,8632	1

Tablo 4.15. 68 baralı NETS-NYGS'nde Hat 3 için mho karakteristiğinde tanımlanan mesafe koruma bölgesi ayar parametreleri

Koruma Bölgesi	Koruma Çemberinin Merkez Koordinatı ( $\Omega$ )	Zaman Gecikmesi (s)
1	25,6+j255,996	Yok
2	30,72+j307,195	0,3
3	28,96+j295,452	1

Söz konusu mho karakteristik eğrilerine göre, her üç röle tarafından hesaplanan empedans değerlerinin R-X diyagramındaki değişimleri Şekil 4.22'deki gibi gerçekleşmektedir. Nitekim, Şekil 4.21'deki anahtarlama cevapları da bu Tablo 4.13, Tablo 4.14 ve Tablo 4.15'teki bilgiler ve R-X diyagramdaki bu değişimler göz önüne alınarak elde edilmiştir. Rahat izlenebilmesi amacıyla değişim her üç durumda da  $t=1,0417$  s'ye kadar çizdirilmiş durumdadır.



Şekil 4.22. Seçilen kısa devre arızası senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için arıza öncesinden arıza sonrasına geçiş esnasında empedans değerlerinin R-X diyagramındaki değişimleri

Mesafe rölesinin temel durumda, yani herhangi bir GSP fonksiyonu (yöntemi) kullanılmadığı durumdaki tepkileri MATLAB'te elde edildikten sonra, yine

MATLAB komutları kullanılarak incelenen altı yöntemin başarımları ve tepki süreleri elde edilmiştir. 24 senaryo için elde edilen başarımlar Tablo 4.16'da verilmiştir.

Tablo 4.16. İncelenen yöntemlerin 68 baralı NETS-NYGS'nde oluşturulan kısa devre arızası senaryoları için elde edilen anahtarlama başarımları

<b>Yöntem</b>	<b>Anahtarlama Yapılan Senaryo Sayısı (Doğru)</b>	<b>Anahtarlama Yapılmayan Senaryo Sayısı (Yanlış)</b>	<b>Başarımlar (%)</b>
Klasik Yönt. 1	23	1	95,8
Klasik Yönt. 2	24	0	100
Klasik Yönt. 3	23	1	95,8
Klasik Yönt. 4	24	0	100
Güncel bir yöntem [25]	24	0	100
Tezde Önerilen Yöntem	24	0	100

Tablodaki başarımlar sonuçları genel olarak oldukça iyi görünmektedir. Bunun bir nedeni şudur: başarımlar değerlendirmesine başlamadan önce seçilen parametreler mümkün olan en iyi sonucu verecek şekilde seçilmiş, elde edilebilen en uygun durum için özellikle arıza durumlarına doğru tepki verme önceliği tanınmıştır. Yani, yöntemlerin gerçek başarımları güç salınımı ve güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryolarında belirgin hale gelecektir. Yöntemlerin doğru cevap alınan senaryolar için algoritma temelinde ortalama cevap verme süreleri de Tablo 4.17'deki gibi hesaplanmıştır.

Tablo 4.17. İncelenen yöntemlerin 68 baralı NETS-NYGS'nde oluşturulan kısa devre arızası senaryoları için algoritma temelinde ortalama cevap verme hızları

<b>Yöntem</b>	<b>Değerlendirilen Senaryo Sayısı</b>	<b>Ortalama Cevap Hızı (ms)</b>	<b>Ortalama Algoritma Adım Sayısı</b>
Klasik Yöntem 1	23	8,97	10,76
Klasik Yöntem 2	24	23,65	28,38
Klasik Yöntem 3	23	12,92	15,50
Klasik Yöntem 4	24	23,30	27,96
Güncel bir yöntem [25]	24	10,24	12,29
Tezde Önerilen Yöntem	24	10,00	12,00

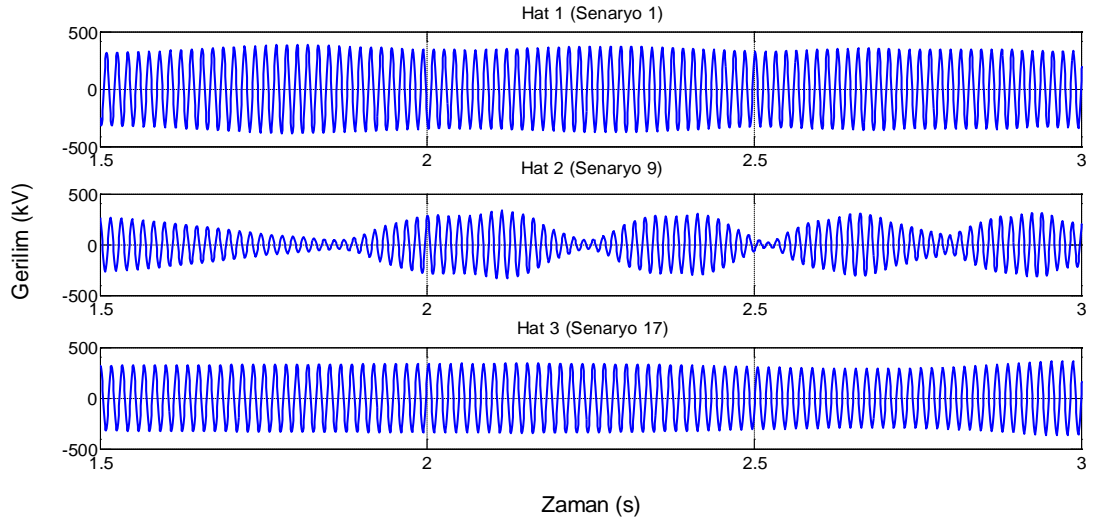


Bu kez, adım süresi 1 ms olmadığı için adım sayısı ortalama cevap hızına sayısal olarak eşit değildir. Bu nedenle, adım sayısı (h) yaklaşık 833,33  $\mu$ s alınarak hesaplanan algoritma adım sayısı da tabloda ayrıca gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiği zaman, SMG ve azalan direnç yöntemlerinin görece daha uzun sürede cevap verdikleri, diğer yöntemler için hesaplanan sürelerin ise yakın olduğu görülmektedir. En hızlı yöntem bir senaryoda hata veren azalan empedans yöntemidir. Hiç hata vermeyen yöntemler içinde en hızlısı, tezde önerilen yöntemdir.

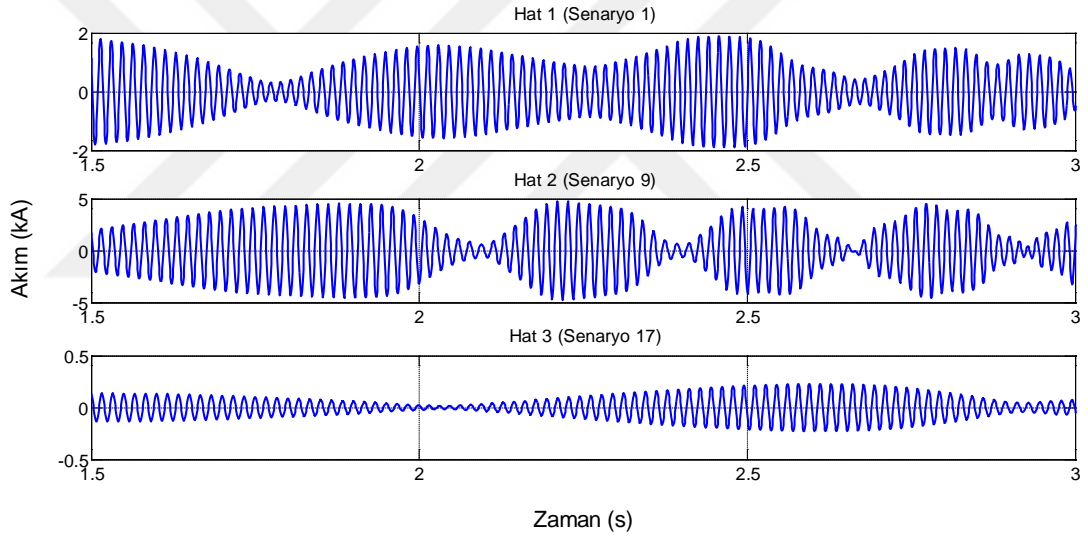
#### **4.2.2. Güç salınımı senaryoları**

İncelenen üç hattın güç salınımı durumunda nasıl tepki vereceğini anlayabilmek için 24 farklı güç salınımı durumu üretilmiş ve yöntemlerin bu durumlarda verdikleri anahtarlama tepkileri gözlenmiştir. Güç salınımı üretmek amacıyla, izlenen bir hattın başka bir hatta bir kısa devre arızası meydana getirilerek hat devre dışı bırakılmıştır. Bu durumda hassas durumda çalışan sistemde bir salınım meydana gelmiş ve mesafe rölesi tarafından korunmakta olan hatta bir güç salınımı izlenmiştir. Hat 1, Hat 2 ve Hat 3'te güç salınımı durumları üretmek için sırasıyla Şekil 4.17'de görülen Hat 4, Hat 5 ve Hat 6'te kısa devre arızaları meydana getirilerek hatlar devre dışı bırakılmıştır. Oluşturulan güç salınımı senaryolarının detayları Tablo 4.12'deki gibidir. Tek değişiklik şudur: Tablo 4.12'de görülen ve kısa devre arızası meydana getirilen hatlar Hat 1, Hat 2 ve Hat 3 yerine sırasıyla Hat 4, Hat 5 ve Hat 6 olacaktır. Sırasıyla; Hat 4, 52. ve 50. Baralar, Hat 5, 2. ve 1. baralar, Hat 6 ise 16. ve 19. baralar arasındaki hatlar olarak tanımlanmıştır.

Tüm güç salınımı senaryoları için benzetim süresi 3 s olarak ayarlanmıştır. Salınımla karşı karşıya bırakılan her üç hattın (Hat 1, Hat 2 ve Hat 3) ilk senaryoları için (Senaryo 1, 9 ve 17) izlenen gerilim ve akım işaretinin tek fazından alınan kesitler Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'teki gibi elde edilmektedir.

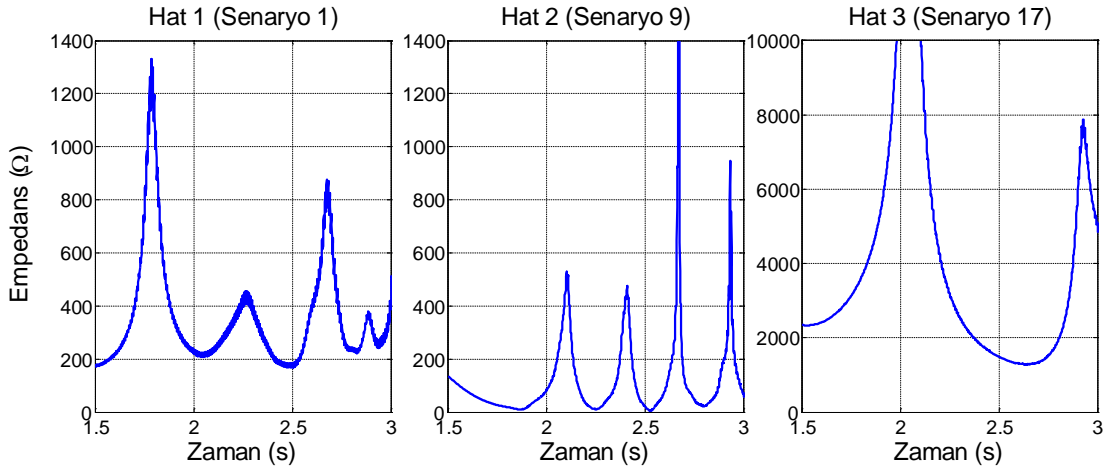


Şekil 4.23. Seçilen güç salınımı senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için tek faz gerilim işaretinin değişimi

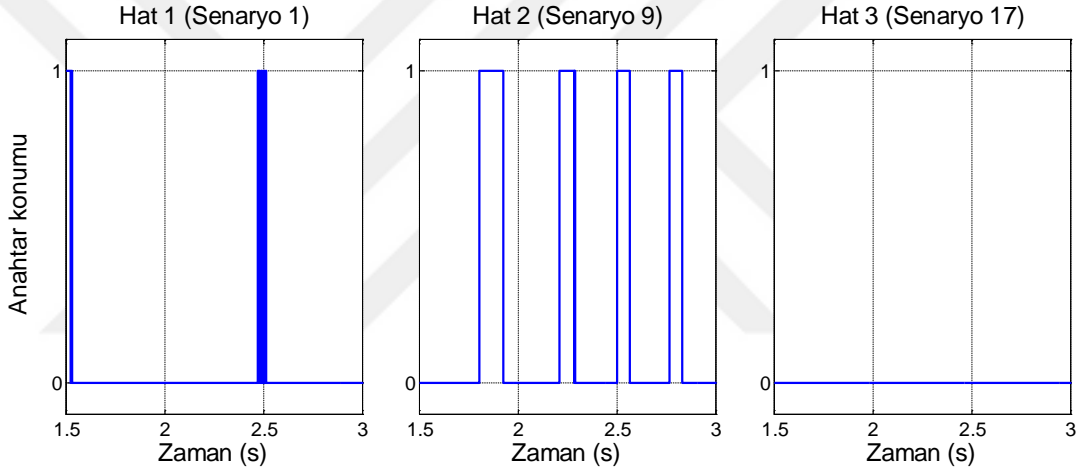


Şekil 4.24. Seçilen güç salınımı senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için tek faz akım işaretinin değişimi

Bu sistemde üretilen güç salınımlarının frekansı ortalama 3 Hz olarak gözlenmektedir. Rölelerin bir önceki durumda verilen senaryolar için hesapladığı empedans değerinin ve anahtarlama cevabının değişimi sırasıyla Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'daki gibi elde edilmektedir.



Şekil 4.25. Seçilen güç salınımı senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için röle tarafından hesaplanan empedans değerinin değişimi

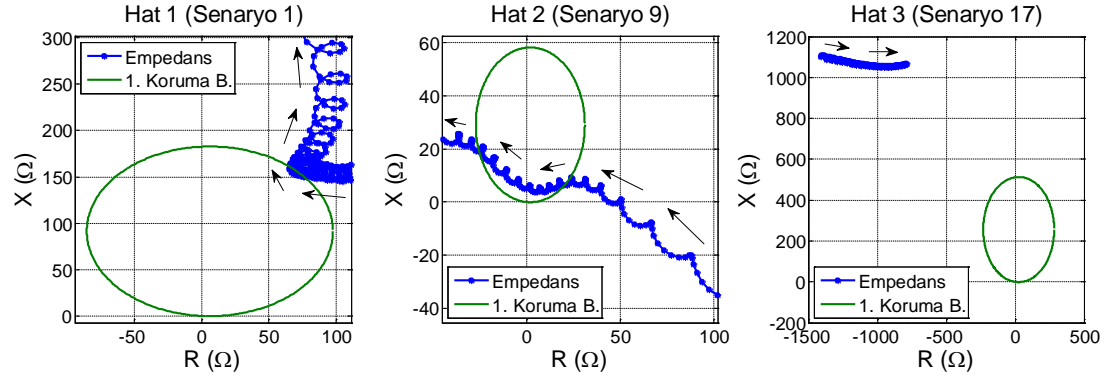


Şekil 4.26. Seçilen güç salınımı senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için röle tarafından üretilen anahtarlama cevabının incelenen aralıktaki değişimi

Şekil 4.26'da, güç salınımı esnasında, anahtarlama cevabı çizdirilen üç senaryonun ikisinde yanlış açtırma yapıldığı görülmektedir. Herhangi bir GSP fonksiyonunun (yönteminin) kullanılmadığı durumda, Hat 1 ve Hat 2 ilgili güç salınımı senaryolarında yanlış şekilde enerjisiz bırakılacaktır. İncelenen senaryo için Hat 3'te yanlış açma gerçekleşmemiştir.

Mesafe rölesinin empedans hesabına ve ayar parametrelerine bağlı olarak Şekil 4.26'daki anahtarlama cevabını üretirken izlediği R-X diyagramındaki değişimler Şekil 4.27'de gösterilmiştir. Hat 1 ve Hat 2 için incelenen senaryolarda, empedans değerlerinin koruma bölgesinin içine düştüğü görülmektedir. Bu noktada, güç salınımı tespiti yapacak herhangi bir yöntem kullanılmadığı için neden yanlış

anahtarlama yapılacağı daha rahat anlaşılabilir.



Şekil 4.27. Seçilen güç salınımı senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için röle tarafından hesaplanan empedans değerinin R-X diyagramdaki değişiminden kesit

Hiçbir yöntem kullanılmadığı zaman mesafe rölesi 24 senaryonun 20'sinde, yani tamamına yakın hatalı açma vermektedir (%16,7 başarımlı). İncelenen yöntemler kullanıldığı zaman elde edilen başarımlı sonuçları Tablo 4.18'deki gibidir.

Tablo 4.18. İncelenen yöntemlerin 68 baralı NETS-NYGS'nde oluşturulan güç salınımı senaryoları için elde edilen anahtarlama başarımları

Yöntem	Anahtarlama Yapılan Senaryo Sayısı (Yanlış)	Anahtarlama Yapılmayan Senaryo Sayısı	Başarımlı (%)
Klasik Yönt. 1	5	19	79,2
Klasik Yönt. 2	10	14	58,3
Klasik Yönt. 3	0	24	100
Klasik Yönt. 4	10	14	58,3
Güncel bir yöntem [25]	0	24	100
Tezde Önerilen Yöntem	0	24	100

Tablodan görüldüğü gibi, incelenen güncel yöntemin ve tezde önerilen yöntemin yanı sıra bindirilmiş akım yöntemi (Klasik Yöntem 3) de yüksek başarımlı göstermiştir. Diğer klasik yöntemlerin başarısız kaldıkları görülmektedir. Tezde önerilen yöntem, NETS-NYGS'de üretilen güç salınımı senaryolarında da hiç hata vermemiş, tüm salınım durumlarını tespit etmeyi ve doğru perdeleme yapmayı başarmıştır.

#### 4.2.3. Güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları

Son olarak, incelenen test sisteminde güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları üretilmiştir. Böylece, GSGP fonksiyonunun işlerliği sınanmış, farklı yöntemlerin başarımları elde edilmiştir.

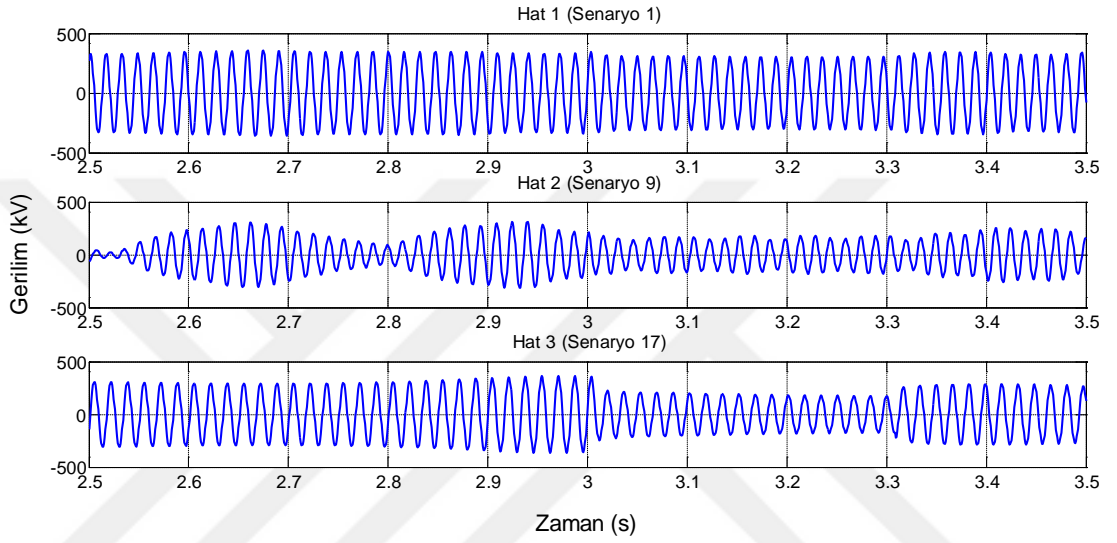
Bu durum için senaryoların üretilmesi amacıyla, daha önce üretilmiş olan güç salınımı senaryoları kullanılmış ve güç salınımları sürerken Hat 1, Hat 2 ve Hat 3'te çeşitli kısa devre arızaları meydana getirilmiştir. Salınım esnasında kısa devre arızası durumlarını ve rölenin tepkisini gözlemleyebilmek için tüm senaryolar için benzetim süresi 3,5 s olarak belirlenmiştir, yani süre öncekine göre bir miktar uzatılmıştır. Üretilen senaryoların detayları Tablo 4.19'da verilmiştir. Söz konusu tüm kısa devre arızalarının süresi 300 ms'dir.

Tablo 4.19. 68 baralı NETS-NYGS'nde üretilen güç salınımı esnasında kısa devre arızası (ikinci kısa devre arızası) senaryoları

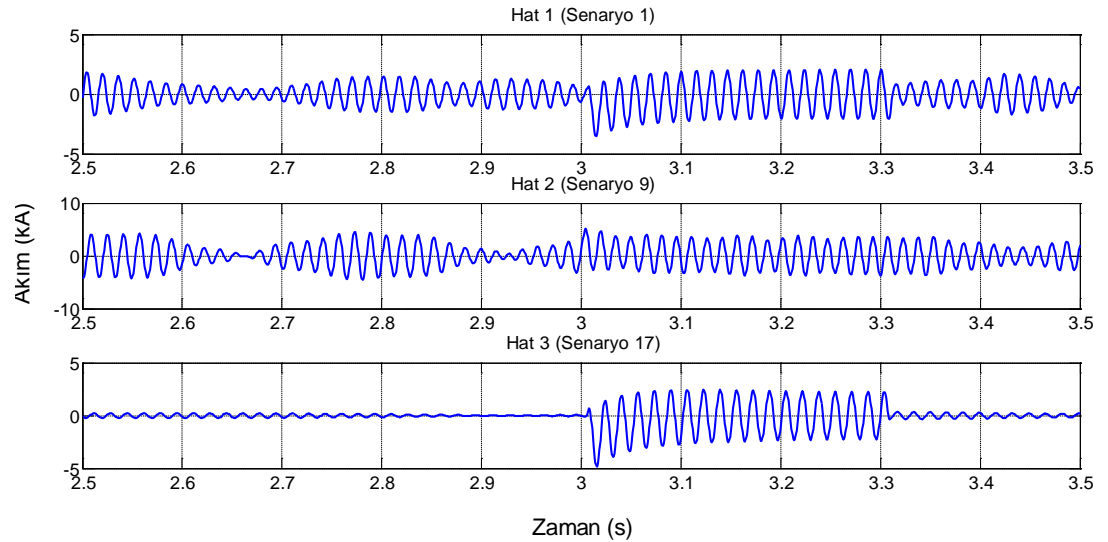
Senaryo Numarası	Arıza Yeri	İkinci Arızanın Uzaklığı (%)	İkinci Arıza Başlangıç Açısı (°)	İkinci Arıza Başlangıcı (s)	İkinci Arızanın Tipi
1	Hat 1	15	135	3,00625	Simetrik
2	Hat 1	45	90	3,004167	Simetrik
3	Hat 1	75	45	3,002083	Simetrik
4	Hat 1	15	0	3	Simetrik
5	Hat 1	45	90	3,004167	Simetrik
6	Hat 1	75	135	3,00625	Asimetrik
7	Hat 1	15	0	3	Asimetrik
8	Hat 1	45	45	3,002083	Asimetrik
9	Hat 2	75	45	3,002083	Simetrik
10	Hat 2	15	0	3	Simetrik
11	Hat 2	45	135	3,00625	Simetrik
12	Hat 2	75	90	3,004167	Simetrik
13	Hat 2	15	0	3	Simetrik
14	Hat 2	45	135	3,00625	Asimetrik
15	Hat 2	75	90	3,004167	Asimetrik
16	Hat 2	15	45	3,002083	Asimetrik
17	Hat 3	45	135	3,00625	Simetrik
18	Hat 3	75	90	3,004167	Simetrik
19	Hat 3	15	45	3,002083	Simetrik
20	Hat 3	45	0	3	Simetrik
21	Hat 3	75	90	3,004167	Simetrik
22	Hat 3	15	135	3,00625	Asimetrik
23	Hat 3	45	0	3	Asimetrik
24	Hat 3	75	45	3,002083	Asimetrik

Hat 1, Hat 2 ve Hat 3'te meydana getirilen güç salınımlarının üretilmesi için sırasıyla Hat 4, Hat 5 ve Hat 6'da kısa devre arızaları meydana getirildiği için, salınım esnasında oluşturulanlara ikinci arıza ismi verilmiştir. Bu arızalar, güç salınıminin izlenmekte olduğu Hat 1, Hat 2 ve Hat 3'te oluşturulmuştur.

Senaryo 1, 9 ve 17 için tek fazdan alınan gerilim ve akım kesitleri sırasıyla Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'daki gibi elde edilmektedir.



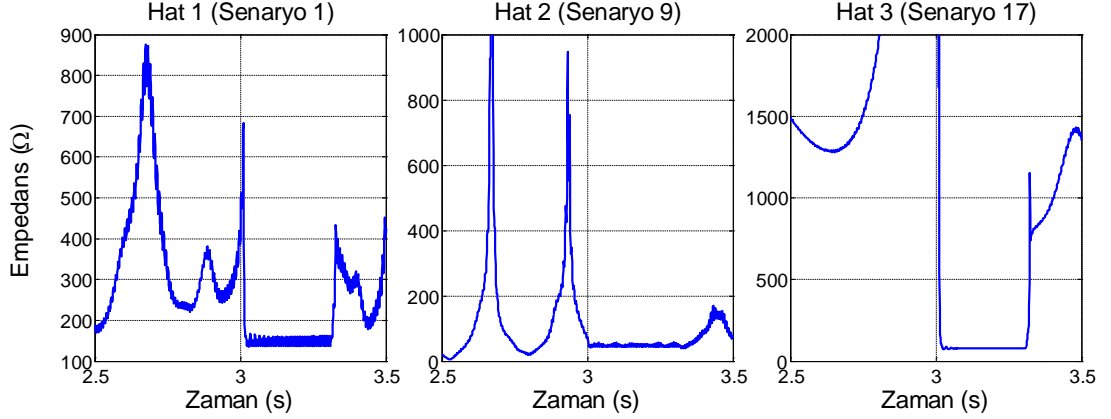
Şekil 4.28. Seçilen güç salınımi esnasında kısa devre arızası senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için tek faz gerilim işaretinin değişimi



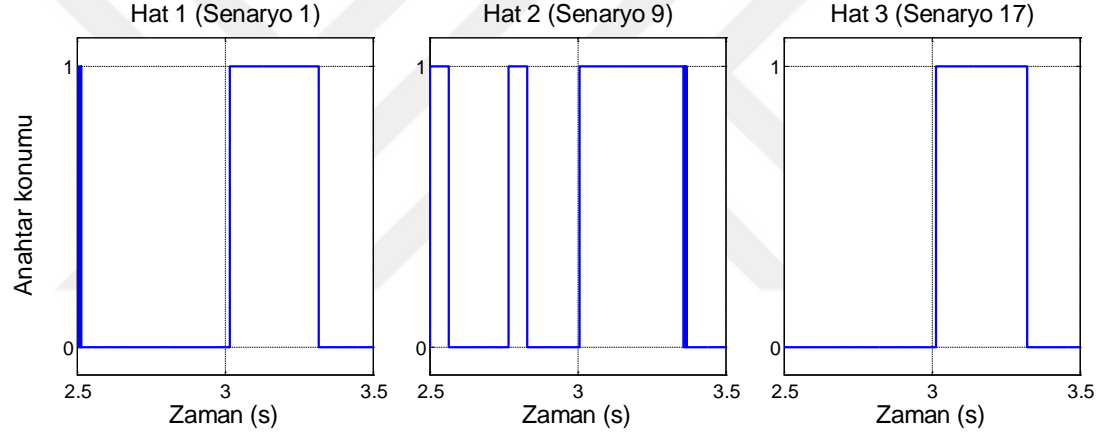
Şekil 4.29. Seçilen güç salınımi esnasında kısa devre arızası senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için tek faz akım işaretinin değişimi

Mesafe rölelerinin hesapladığı empedans değeri ile anahtarlama cevaplarının

değişimleri Şekil 4.30 ve Şekil 4.31'deki gibi elde edilmiştir.



Şekil 4.30. Seçilen güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için röle tarafından hesaplanan empedans değerinin değişimi



Şekil 4.31. Seçilen güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları (1., 9. ve 17. senaryolar) için röle tarafından üretilen anahtarlama cevabının incelenen aralıktaki değişimi

Şekil 4.31'de görülen anahtarlama cevabı doğrudur; mesafe rölesinin kısa devre durumunda beklenen normal tepkisidir. Ancak, çalışmada da söz konusu edilen problem, güç salınımı durumunda yapılan perdeleme işleminin gerçek bir arıza durumunda kalkıp kalkmayacağı, yani geri-perdeleme yapılıp yapılmayacağıdır. Bu nedenle, yöntemlerin bu kısa devre arızası durumunu güç salınımı durumundan en doğru ve en hızlı şekilde ayırt edip etmediğinin incelenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, incelenen yöntemlerin söz konusu senaryolardaki başarımların değerleri Tablo 4.20'deki gibi elde edilmiştir.

Tablo 4.20. İncelenen yöntemlerin 68 baralı NETS-NYGS'nde oluşturulan güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları için elde edilen anahtarlama başarımları

Yöntem	Anahtarlama Yapılan Senaryo Sayısı (Doğru)	Anahtarlama Yapılmayan Senaryo Sayısı (Yanlış)	Başarım (%)
Klasik Yönt. 1	14	10	58,3
Klasik Yönt. 2	23	1	95,8
Klasik Yönt. 3	24	0	100
Klasik Yönt. 4	23	1	95,8
Güncel bir yöntem [25]	24	0	100
Tezde Önerilen Yöntem	24	0	100

Tabloda elde edilen değerlere göre, incelenen güncel yöntemin [25] ve tezde önerilen yöntemin yanı sıra, bindirilmiş akım yöntemi (Klasik Yöntem 3) de hiçbir senaryoda hatalı sonuç vermemiş ve yüksek başarımlar göstermiştir. SMG yöntemi ile azalan direnç yöntemlerinin sonuçları iyi görünmektedir, her iki yöntem de birer senaryoda hatalı cevap vermiştir. Azalan empedans yönteminin başarımları ise bu test sistemi ve girilen ayar parametreleri için oldukça kötü çıkmaktadır.

Güç salınımı esnasında kısa devre arızası durumunun tespitinin yanında, bu tespit ne kadar hızlı gerçekleştiği de önemli bir çıkarımdır. Bir yöntemden hem doğru tespit yapması, hem de bu tespiti olabildiğince hızlı yapması istenmelidir. İncelenen yöntemlerin, doğru bir şekilde kısa devre arızası tespiti yaptıkları senaryolar dikkate alınarak hesaplanan algoritma temelindeki ortalama cevap süreleri Tablo 4.21'deki gibi elde edilmiştir.



Tablo 4.21. İncelenen yöntemlerin 68 baralı NETS-NYGS'nde oluşturulan güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları için algoritma temelinde ortalama cevap verme hızları

Yöntem	Değerlendirilen Senaryo Sayısı	Ortalama Cevap Hızı (ms)	Ortalama Algoritma Adım Sayısı
Klasik Yöntem 1	14	93,96	112,75
Klasik Yöntem 2	23	6,36	7,63
Klasik Yöntem 3	24	6,40	7,68
Klasik Yöntem 4	23	19,51	23,41
Güncel bir yöntem [25]	24	8,82	10,58
Tezde Önerilen Yöntem	24	8,75	10,50

Bu test sisteminde, adım sayısı (h) yaklaşık 833,33  $\mu$ s olduğu için, yöntemlerin ortalama algoritma adım sayıları da tabloda ayrıca gösterilmiştir. Sonuçlara bakıldığı zaman, en iyi sonuçların SMG yöntemi ile bindirilmiş akım yöntemlerine ait olduğu görülmektedir. Bindirilmiş akım yöntemi, senaryoların tamamında doğru sonuç vermesi açısından ayrıca dikkat çekicidir. Azalan empedans yöntemi ile bu sistemde ve girilen ayar parametreleri ile çok geç cevap alınabildiği görülmektedir. İncelenen güncel yöntemin [25] ve tezde önerilen yöntemin cevapları birbirine çok yakındır ve sonuçlar tatmin edicidir.

#### 4.2.4. Genel değerlendirme

GSP (ve GSGP) için farklı yöntemler kullanıldığı zaman, mesafe korumanın güvenilirliğinin nasıl etkileneceğini anlamak için, NETS-NYGS'de üretilen tüm senaryoların genel bir değerlendirmesi yapılmalıdır. Böylece, hem kısa devre arızası, hem güç salınımı, hem de güç salınımı esnasında kısa devre arızası durumlarında doğru cevap verdiği görülen yöntemin hangisi olduğu belirlenebilir. Bu noktada, elde edilen sonuçlar, yöntemlerin genel bir karşılaştırmasının yapılması açısından da değerli olacaktır.

NETS-NYGS'de toplam 24 kısa devre arızası, 24 güç salınımı, 24 güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryosu olmak üzere toplam 72 senaryo üretilmiş ve yöntemlerin cevapları elde edilmiştir. Ulaşılan sonuçlar Tablo 4.22'deki gibidir.

Tablo 4.22. İncelenen yöntemlerin 68 baralı NETS-NYGS'nde oluşturulan tüm senaryolar için elde edilen toplam anahtarlama başarımları

<b>Yöntem</b>	<b>Doğru İşlem Yapılan Senaryo Sayısı</b>	<b>Yanlış İşlem Yapılan Senaryo Sayısı</b>	<b>Toplam Başarım (%)</b>
Klasik Yönt. 1	56	16	77,8
Klasik Yönt. 2	61	11	84,7
Klasik Yönt. 3	71	1	98,6
Klasik Yönt. 4	61	11	84,7
Güncel bir yöntem [25]	72	0	100
Tezde Önerilen Yöntem	72	0	100

Tablo incelendiği zaman, çalışmada incelenen güncel yöntem [25] ile tezde önerilen yöntemin en iyi başarıma sahip olduğu görülmektedir. İki yöntem de aynı oranda başarılıdır, hiçbir senaryoda hatalı cevap verdirmemiştir. Diğer yöntemler (klasik yöntemler), daha düşük başarıma sahip olmakla birlikte bindirilmiş akım yöntemi (Klasik Yöntem 3) yüksek başarıma değeriyle dikkat çekmektedir; bu yöntem kullanıldığında 72 senaryonun yalnızca bir tanesinde hatalı cevap alınmıştır. Tezde önerilen yöntem açısından bakıldığı zaman, TMSB sisteminin ardından NETS-NYGS'de de en yüksek başarıma elde edildiği görülmektedir. Bu sonuç, tez çalışmasının çözmeyi amaçladığı problem açısından kayda değer ve anlamlı bir sonuçtur. Beşinci bölümde gösterildiği üzere, yöntemin başarıma, NETS-NYGS'de, parametre düzgünlüğü ve algoritmanın işlemcide çalışma hızı açısından da incelenecek ve sonuçlar incelenen güncel yöntem [25] ile karşılaştırılacaktır.

## 5. ÖNERİLEN YÖNTEMİN DETAYLI DEĞERLENDİRİLMESİ

Önceki bölümde, dört klasik yöntemin, incelenen güncel bir yöntemin [25] ve tezde önerilen yöntemin anahtarlama cevapları izlenerek genel başarımlar değerlendirilmiştir. Bu bölümde ise, elde edilen başarımlar sonuçları daha detaylı olarak irdelenmiştir. Bu amaçla, yöntemlere ilişkin parametre çıktılarının farklı senaryolardaki değişimleri izlenmiş, akım ölçü transformatörlerinin doyması durumundaki başarımlar tablosu ortaya konulmuş ve otomatik tekrar kapama durumunda görülen ölü zaman ya da iletim hattının yanlışlıkla devre dışı kalması gibi diğer bazı bozucu durumlar için başarımlar durumu incelenmiştir. Ayrıca, incelenen güncel yöntem [25] ve tezde önerilen yöntem için C programlama dilinde yazılan kodlar derlenmiş, elde edilen programların iki farklı işlemci mimarisinde çalışma hızları karşılaştırılmıştır. Bütün bu analizler, yöntemlerin çalışma başarımları hakkında daha iyi fikir verecek ve özellikle tezde önerilen yöntemin koruma güvenilirliğini ispatlayabilmek için dayanak olacaktır.

### 5.1. Parametre Değişimleri

Bu çalışmada incelenen ve kısa devre arızası ile güç salınımı arasında ayırım yaptıracak olan yöntemlerin hemen hemen hepsi, parametre hesabına ve hesaplanan bu değerlerin önceden belirlenen bir eşik değeri ile karşılaştırılmasına dayanmaktadır. Bu açıdan bakıldığında zaman, hesaplanan bu parametre değerinin zamana bağlı olarak değişimini incelemek oldukça anlamlıdır. Çünkü incelenen bu yöntemlerin başarımlarını belirleyecek olan şey bu parametre çıktılarının ne kadar düzgün ve istenen durum için ne kadar ayırt edici olduklarıdır.

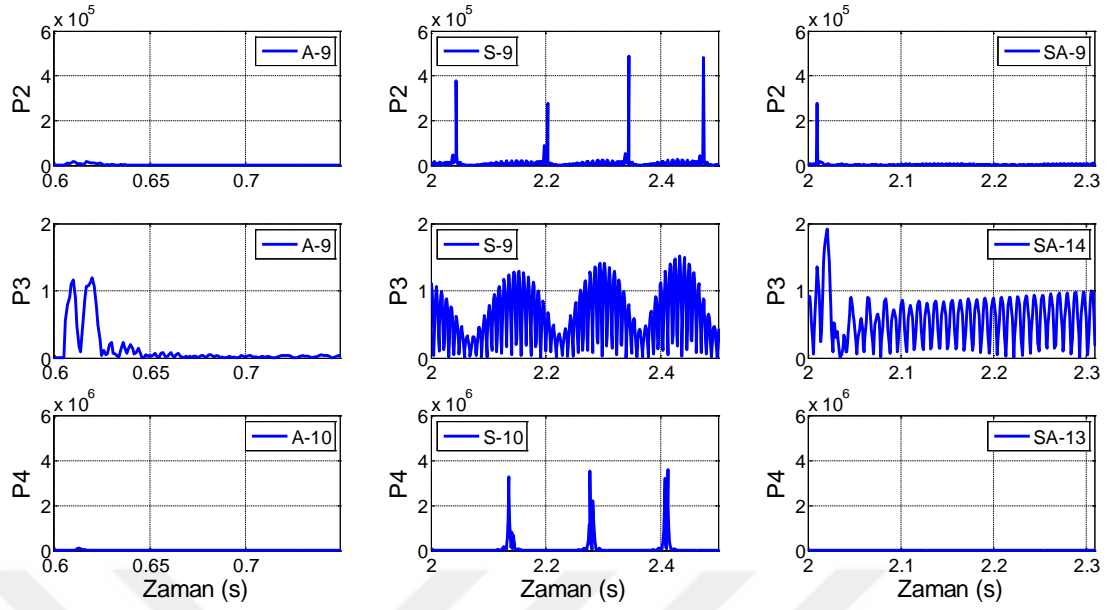
Hem TMSB test sisteminde, hem de NETS-NYGS'de yapılan analizler tekrar ele alınarak, her senaryo grubu için geçerli olmak üzere üç klasik yöntem, incelenen güncel yöntem [25] ve tezde önerilen yöntem için parametre değişimleri elde edilmiştir. Azalan empedans yöntemi (Klasik Yöntem 1) tam olarak parametre bağımlı değildir, bu nedenle bu yöntem için, ayırım yapabilmek için kullanılan zamanlayıcı süreleri hakkında yorum yapılmış ve böylece daha detaylı bir

değerlendirmeye ulaşılmıştır.

Öncelikle, söz konusu yöntemlerin TMSB test sisteminde elde edilen sonuçlardan söz edilecektir. İlk olarak, azalan empedans yönteminde (Klasik Yöntem 1) elde edilen zamanlama süreleri hakkında kısa bir değerlendirme yapmak yerinde olacaktır. Bu yöntem için, güç salınımı tespiti yapılacak bölge, R-X diyagramında 3. koruma bölgesinin sınırı ile bunun % 25 üstü arası olarak tanımlanmıştır. Güç salınımı durumunda bu bölgeden geçişin daha uzun süreceği kabulüne dayanan bu yöntemde, uygun bir eşik değeri belirleyebilmek için, en kısa süren güç salınımı ve en uzun süren kısa devre arızası süreleri tespit edilebilmelidir. TMSB test sisteminde, tanımlanan bölgeden geçişin, güç salınımları için en kısa 3 ms, kısa devre arızaları içinse en uzun 4 ms sürdüğü tespit edilmiştir. Bu sonuç, yapılan analizler sonucunda azalan empedans yönteminde bu sistem için sağlıklı bir eşik değeri seçilemeyeceği anlamına gelmektedir. 3'ten küçük ve 4'ten büyük bir sayı olamayacağı için, seçilecek hiçbir parametrenin tam anlamıyla doğru sonuç veremeyeceği açıktır.

Parametre çıkışlarının değişimlerinin izlendiği diğer yöntemler için ortak bir özellik şudur: yöntemlerde hesaplanan parametreler, belli bir eşik değerden büyükse kısa devre arızası, değilse güç salınımı tespiti yapılmaktadır. Bu bağlamda, yapılan analizler değerlendirilirken şu nokta dikkate alınmıştır: parametre değişimleri güç salınımı için mümkün olduğunca küçük (idealde sıfır), kısa devre arızası için mümkün olduğunca büyük olmalıdır. Parametre değişimlerinin zamana bağlı grafik çizimleri incelenirken bu nokta dikkate alınmış ve bu durumun ihlal edilip edilmediği üzerinde durulmuştur. Ayrıca, hesaplanan parametre değerleri, güç salınımı ve kısa devre arızası durumları için belirgin bir farklılık göstermeli ve temiz bir çıkış elde edilebilmelidir.

Parametre çıkışları incelenen üç klasik yöntem için, seçilen senaryolarda Şekil 5.1'de gösterilen sonuçlar elde edilmiştir. Seçilen senaryoların, izlenen parametre değişimlerinin rahat bir şekilde değerlendirilebilmesine olanak tanıyacak yapıda olmasına dikkat edilmiştir.

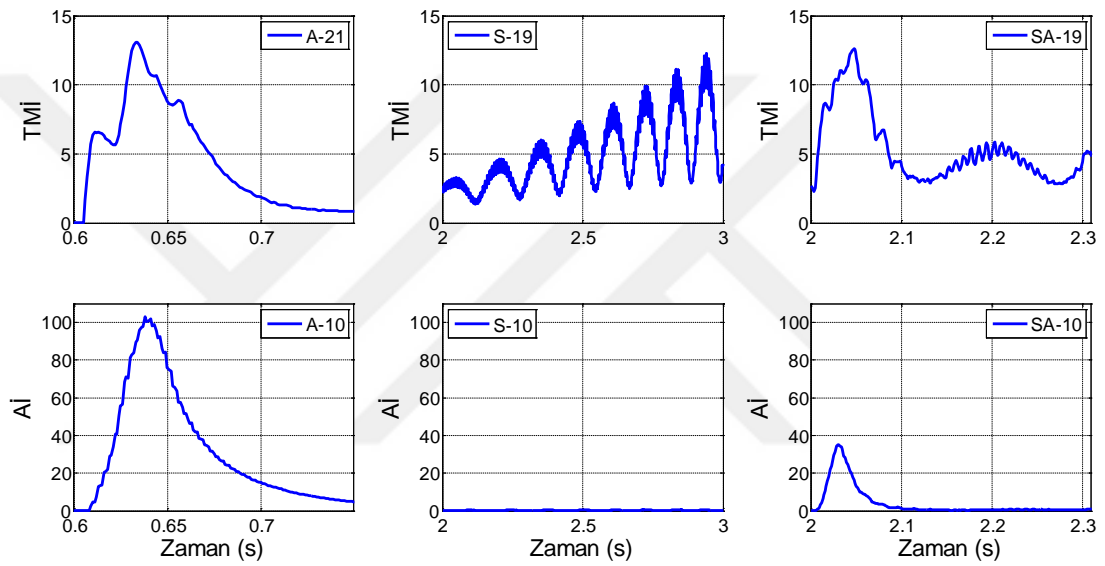


Şekil 5.1. TMSB test sisteminde seçilen kısa devre arızası (A), güç salınımı (S) ve güç salınımı esnasında kısa devre arızası (SA) senaryolarında, Klasik Yöntem 2, 3 ve 4'e ilişkin parametrelerin (P2, P3 ve P4 satırları) değişimleri

Şekil 5.1'de, her üç yönteme ilişkin parametrelerin (P2, P3 ve P4), güç salınımı, kısa devre arızası ve güç salınımı esnasında kısa devre arızası durumları için değişimleri görülmektedir. Her parametre için yan yana çizdirilen üç grafiğin eksen takımları aynıdır. Buradaki amaç, aynı eksen üzerinde güç salınımı durumlarının maksimum, kısa devre durumlarının minimum olduğu durumları karşılaştırmalı olarak göstermektir. Her üç yöntem için, orta sütundaki grafiklerdeki değerlerin sol ve sağ sütunda gösterilen değerlerden büyük olması parametre değişiminin uygunsuzluğuna işaret etmektedir. Sol ve sağ sütundaki grafikler, kısa devre içeren senaryolar olduğu için bu değerlerin orta sütunda görülen güç salınımına ilişkin değerlerden küçük kalması, eşik değer seçiminin sağlıklı yapılamayacağı anlamına gelmektedir. Her üç klasik yöntem için de, kısa devre ve güç salınımı ayırımı yapmayı olanaksız hale getiren senaryolara rastlanmıştır. Daha önceki bölümde yöntemlerin başarımlarını düşüren ve bazı senaryolarda hatalı cevap alınmasına neden olan durum, bu gibi istenmeyen parametre cevaplarıdır. Yapılan analizler, eşik değerinin hatasız değilse bile, en az hatayla cevap alınabilecek bir noktaya çekilmesinin mantıklı olacağını göstermektedir. Bu da, ya bazı kısa devre arızası durumlarının anlaşılabilmesi ya da bazı güç salınımı durumlarının tespit edilememesi anlamına gelecektir. Bu denge, ancak bir Pareto optimal çözüm kümesinin elemanları gibi ifade edilebilir. Yani hem kısa devre arızası hem de güç salınımı durumlarında

başarılı olma imkanı yoktur, yalnızca daha yüksek başarımlı ağırlığının hangi tarafa verileceği belirlenebilir. Bunu belirleyen, yöntemlerin her biri için seçilen eşik değeridir.

Benzer analizler, incelenen güncel yöntem [25] ve tezde önerilen yöntem için de gerçekleştirilmiştir. Böylece, bu yöntemler için de parametre çıktıları karşılaştırılmıştır. Seçilen senaryolar için elde edilen parametre çıktıları, kısa devre arızası, güç salınımı ve güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları için Şekil 5.2’de görüldüğü gibi elde edilmiştir.



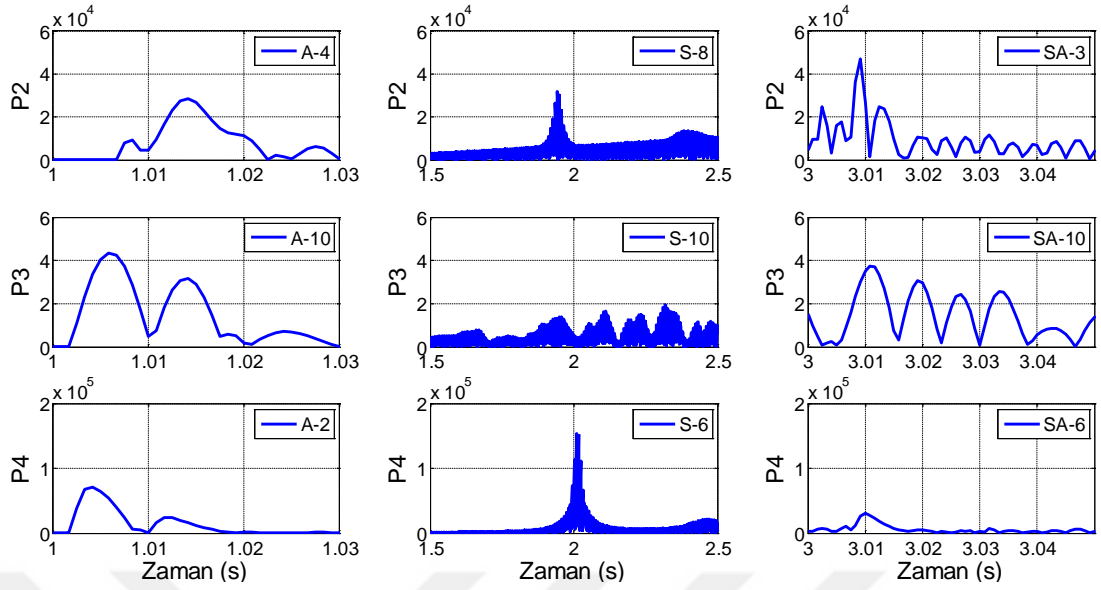
Şekil 5.2. TMSB test sisteminde seçilen kısa devre arızası (A), güç salınımı (S) ve güç salınımı esnasında kısa devre arızası (SA) senaryolarında, incelenen güncel yöntem [25] ve tezde önerilen yöntemle ilişkin parametrelerin (TMI ve AI satırları) değişimleri

Şekil 5.2’de görülen TMI ve AI parametreleri, sırasıyla incelenen güncel yöntem [25] ve tezde önerilen yöntemle ait parametrelerdir. Yine her sütun, arıza (A), salınım (S) ve salınım esnasında arıza (SA) senaryolarını göstermektedir ve yan yana çizdirilen her grafiğin y eksenini karşılaştırma yapabilmek amacıyla aynı ölçekte ayarlanmıştır. Bu grafik, tezde önerilen yöntemin üstünlüğünü ortaya koyması açısından oldukça anlamlı bir sonuç ortaya koymaktadır. Çünkü; incelenen güncel yöntemin [25] önerdiği parametrenin değişimi TMSB test sisteminde oluşturulan bazı senaryoların da gösterdiği gibi, sağlıklı bir eşik değeri seçimini olanaksız hale getirmektedir. Bu yöntemin izlemekte olduğu TMI parametresinin, 19. güç salınımı (S-19) senaryosunda aldığı değeri ile 21. kısa devre arızası (A-21) senaryosunda

aldığı değerler birbirine yakındır. Bu iki değişim yan yana konulduğu zaman, kısa devre ve güç salınımı ayırımı yapacak bir eşik değer tanımlamanın o noktada olanaksız olacağı görülecektir. Bu sonuç güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryolarının 19.'su (SA-19) ile gerçekleştirildiği zaman da aynıdır. Yine kısa devre ve güç salınımı ayırımı için doğru bir ayırım değeri tanımlanamamaktadır. Öte yandan, tezde önerilen yöntem kullanıldığı zaman TMSB test sisteminde üretilen hiçbir senaryoda buna benzer bir durumla karşılaşılmamış ve her durumda, Şekil 5.2'de görüldüğü gibi bir manzara ortaya çıkmıştır. Şekil 5.2'de tezde önerilen yönteme ait Aİ parametresinin güç salınımı (S) durumunda çok küçük değerler aldığı, ama hem kısa devre arızası (A) hem de güç salınımı esnasında kısa devre arızası (SA) durumunda yüksek ve belirgin değerler aldığı görülmektedir. Bu sonuç, tezde önerilen yöntem kullanıldığı zaman, sağlıklı bir eşik değeri seçilebileceği anlamına gelmektedir. Bu sayede, önceki bölümde gösterildiği gibi, önerilen yöntem kullanıldığı zaman her senaryoda başarılı sonuç alınabilmektedir. Bu oldukça anlamlı bir sonuçtur.

Parametre değerlerinin farklı senaryolardaki değişimi, 68 baralı NETS-NYGS'de de incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle azalan empedans yöntemi (Klasik Yöntem 1) için değişim süreleri açısından bir karşılaştırma yapmak anlamlı olacaktır. Empedans değerinin, daha önce söz edilen ve güç salınımı tespiti için kullanılan bölgeden geçiş süreleri için elde edilen sonuçlara bakıldığı zaman, NETS-NYGS'de en kısa güç salınımı senaryosunun 0,8333 ms, en uzun kısa devre senaryosunun ise 1,667 ms sürdüğü tespit edilmektedir. Bu sonuçlar, bu yöntemde süre için bir eşik değeri seçmeyi sağlıksız hale getirmektedir. 0,8333'ten küçük ve 1,667'den büyük bir sayı seçilemeyeceği için başarısız sonuç alınacak senaryoların var olacağı kesindir. Bu yüzden azalan empedans yönteminin başarımı düşük kalmaktadır.

Klasik yöntemlerin parametre değişimleri bu kez 68 baralı NETS-NYGS'nde izlendiği zaman ise, ölçüt olarak seçilen bazı senaryolardaki parametre değişimleri Şekil 5.3'teki gibi gerçekleşmektedir. Burada, klasik üç yönteme ait parametrelerin (P2, P3 ve P4) yine kısa devre arızası, güç salınımı ve güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları için değişimleri görülmektedir.

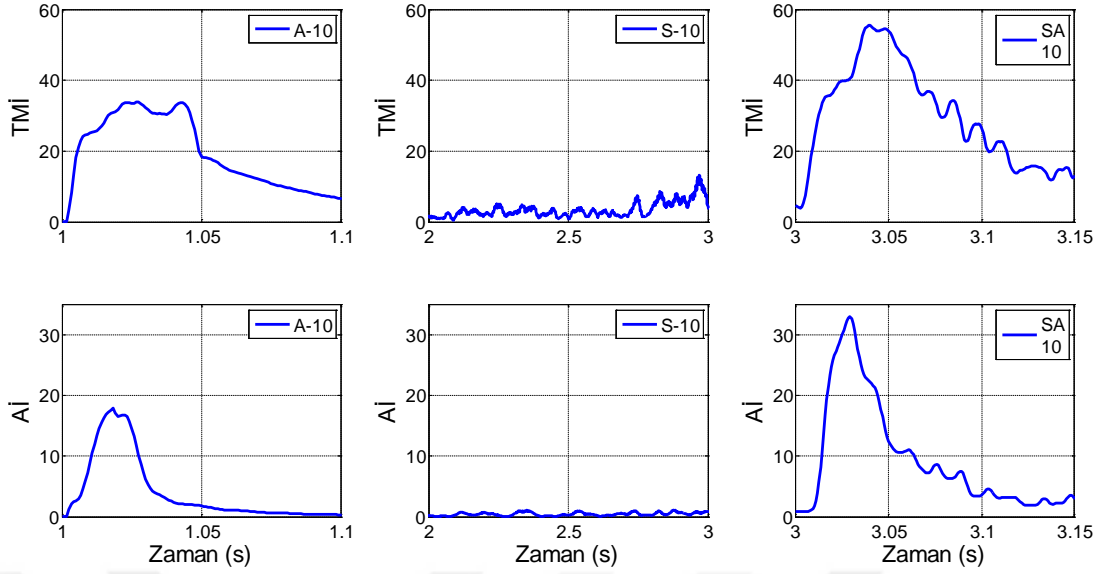


Şekil 5.3. 68 baralı NETS-NYGS'nde seçilen kısa devre arızası (A), güç salınımı (S) ve güç salınımı esnasında kısa devre arızası (SA) senaryolarında, Klasik Yöntem 2, 3 ve 4'e ilişkin parametrelerin (P2, P3 ve P4 satırları) değişimleri

Farklı senaryolarda, parametre değişimleri incelenen üç klasik yöntemin cevaplarını incelerken, orta sütundaki değerlerin sol ve sağ sütundaki değerlerden daha küçük olması gerekeceği göz önüne alınmalıdır. Bunun anlamı, güç salınımı (S) için hesaplanan değerlerin, kısa devre arızası (A) ve güç salınımı esnasında kısa devre arızası (SA) senaryolarında hesaplanan değerlerden daha düşük çıkması gerektiğidir. Çünkü ancak bu sayede güç salınımı ve kısa devre arızası ayırımı gerçekleştirilebilir. Fakat, Şekil 5.3'ten görüleceği gibi, üç klasik yöntem de bazı senaryolarda aksi sonuç vermektedir. Örneğin, SMG yöntemine ait P2 ile gösterilen parametre değerlerinin, salınım senaryolarının 8.'sinde, kısa devre arızası senaryolarının 4.'sündekilere yakın seyrettiği görülmektedir. Benzer durum, bindirilmiş akım (P3) ve azalan direnç (P4) için de geçerlidir. Bu sonuçlar, güç salınımı ve kısa devre arızası durumları arasında ayırım yapmayı sağlayacak bir eşik değerini seçimini sağlıklı hale getirmekte ve yöntemlerin bazı durumlarda yanlış karar alınmasına neden olacağını kesinleştirmektedir.

Benzer bir inceleme, 68 baralı NETS-NYGS'de güncel yöntem [25] ve tezde önerilen yöntem arasında da gerçekleştirilmiştir. Seçilmiş senaryolar için elde edilen sonuçlar Şekil 5.4'teki gibi elde edilmiştir.





Şekil 5.4. 68 baralı NETS-NYGS'nde seçilen kısa devre arızası (A), güç salınımı (S) ve güç salınımı esnasında kısa devre arızası (SA) senaryolarında, incelenen güncel yöntem [25] ve tezde önerilen yöntemle ilişkin parametrelerin (TMİ ve AI satırları) değişimleri

Şekil 5.4'teki TMİ ve AI parametreleri için çizilen değişim grafiklerinin y eksenleri kendi içlerinde aynı şekilde ölçeklenmiştir. Bu sayede güç salınımı ve kısa devre arızası durumlarına ilişkin değerlerin rahat karşılaştırılabilmesi amaçlanmıştır. Bu kez, klasik yöntemlerin aksine değerlerin istenen değişimler gösterdiği görülmektedir. Her iki parametrenin de güç salınımı (S) durumunda aldığı değerler, kısa devre arızası (A) ve güç salınımı esnasında kısa devre arızası (SA) durumlarında aldığı değerlerden daha düşüktür. Bu sonuç, her iki yöntem için sağlıklı bir eşik değer seçimi yapılabileceği anlamına gelmektedir. İzlenen parametre değişimlerinin Şekil 5.4'te işaret ettiği gibi, 68 baralı NETS-NYGS'de her iki yöntem kullandığında da, güç salınımı ve kısa devre arızası ayrımı tam anlamıyla başarılı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Tezde önerilen yöntem açısından bakıldığında zaman, yöntemin bu test sisteminde de GSP ve GSGP fonksiyonlarını eksiksiz olarak yerine getirdiği anlaşılmaktadır.

## 5.2. Algoritmanın Gerçek Zamanlı İşletilme Hızı

Önceki bölümde hız açısından karşılaştırma yaparken yalnızca algoritma temelinde bir bakış açısı ile yaklaşılmıştır. Oysa gerçek uygulamada, kullanılan yöntem bir işlemcide çalıştırılacak ve algoritmanın işlemsel basitliğine ya da karmaşıklığına bağlı olarak işlemcide çalıştırılması için bir miktar süre geçecektir. Algoritma

temelinde çabuk cevap alınacağı öngörülen bir yöntemin, eğer bu sonucu almak için yoğun ve karmaşık işlemler yapması gerekiyorsa, gerçekte işlemcide çalıştırılması sonucunda cevap alınması oldukça uzun sürebilir. Bu açıdan bakıldığı zaman, yöntemlerin çalıştırılma hızının da yüksek olması gerekmektedir.

Yöntemlere ait algoritmaların gerçek zamanlı işletilme hızının, yani işlemcide çalıştırılma hızının değerlendirilmesi amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla, incelenen güncel yöntem [25] ve tezde önerilen yöntem ele alınmış ve bu iki yöntemin karşılaştırması yapılmıştır. Öncelikle, daha önce MATLAB'te kodlaması yapılan algoritmalar, C programlama diliyle tekrar yazılmış ve bu kodlar GNU Compiler Collection (GCC) [37:GCC] programı kullanılarak derlenmiştir. Derleme işlemi sonucunda her iki yöntem için bağımsız olarak çalıştırılabilir program (stand-alone) dosyaları elde edilmiştir. Ardından, elde edilen programlar 3,5 saniyelik benzetim verisi kullanılarak çalıştırılmış ve bu benzetimin çalıştırılması için geçen süre tespit edilmiştir. Sürenin ölçülmesi için C program kodu içinden sys/time kütüphanesi çağırılmış, programın başına ve sonuna zamanlayıcılar yerleştirilmiştir.

Benzetim bilgileri 60 Hz frekansta çalıştırılan 68 baralı NETS-NYGS'nden alınan gerilim ve akım örneklemeleridir. 3,5 s için tek fazdan 4201'er tane gerilim ve akım örneği, program kodunun içine yerleştirilmiştir. Böylece programın, bu gerilim ve akım bilgilerini alırken verdiği cevap için geçen işlemci süresi tespit edilmiştir.

İşlemcinin programları çalıştırması için geçen süreler, her iki yöntem için de iki farklı işlemci mimarisi için denenmiştir. Bunlardan ilki 32 bit (i386), diğeri 64 bit (x86\_64) işlemcilerdir. Bunlardan 32 bit olanı, Oracle VirtualBox [38] programı içinde sanal makine olarak modellenmiş, programın çalıştırıldığı işletim sistemi platformu olarak da Ubuntu 12.04 LTS tercih edilmiştir. Bu ortamda her iki yönteme ait programlar 10'ar kez çalıştırılmış, tespit edilen sürelerin ortalaması alınmıştır. Diğer analiz, 64 bit işlemcide gerçekleştirilmiş ve bu kez platform olarak bilgisayarda ikinci işletim sistemi olarak kurulu olan Ubuntu 14.04 LTS tercih edilmiştir. Aynı işlem burada da tekrarlanmış, her iki yönteme ait programlar 10'ar kez çalıştırılarak, ortalama çalışma süreleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5.1'deki gibidir.

Tablo 5.1. Güncel bir yöntemin ve tezde önerilen yöntemin iki farklı işlemci mimarisinde çalıştırılmaları için geçen ortalama süreler

İşlemci Hızı	Hafıza	İşletim Sistemi	İşlemci Mimarisi	Güncel Yöntem [25] İçin Süre	Tezde Önerilen Yöntem İçin Süre
2,5 GHz (%70'e sınırlanmış)	1024 MB	Ubuntu 12.04 LTS (sanal) [38]	32 bit (i386) (sanal [38])	31 104 $\mu$ s	728,5 $\mu$ s
3,3 GHz	4096 MB	Ubuntu 14.04 LTS	64 bit (x86_64)	27 234 $\mu$ s	612,3 $\mu$ s

Tablo 5.1'deki değerler değerlendirildiği zaman, tezde önerilen yöntem açısından büyük bir üstünlük ortaya çıktığı anlaşılmaktadır. İşlemcide çalıştırılma açısından; tezde önerilen yöntem, incelenen güncel yöntemden [25] ilk durumda (32 bit işlemcide) yaklaşık 42,7 kat, ikinci durumda ise (64 bit işlemcide) yaklaşık 44,5 kat daha hızlıdır. Bu sonuç, tezde önerilen yönteme ciddi bir üstünlük kazandırmaktadır. Çünkü yöntem, hem incelenen iki test sisteminde yüksek başarımla anahtarlama cevabı üretmekte hem de bunu yüksek hızda yerine getirmektedir. Bu sonuç, pratik mühendislik uygulaması ve sayısal koruma açısından ciddi bir kazanım olarak değerlendirilmelidir.

Yeri gelmişken, sayısal işlem yapan birimin hafızasında GSP ve GSGP fonksiyonlarını yerine getiren yöntemler için ne kadar hafıza ihtiyacı olacağına da değinmek anlamlı olacaktır. İncelenen güncel yöntem [25] hafızada 12 916 bayt yer kaplarken, tezde önerilen yöntem hafızada 64 bayt yer kaplamaktadır, yani diğerinin 200'de 1'inden bile daha azdır. Bu da yine, tezde önerilen yöntem için ciddi bir üstünlüktür.

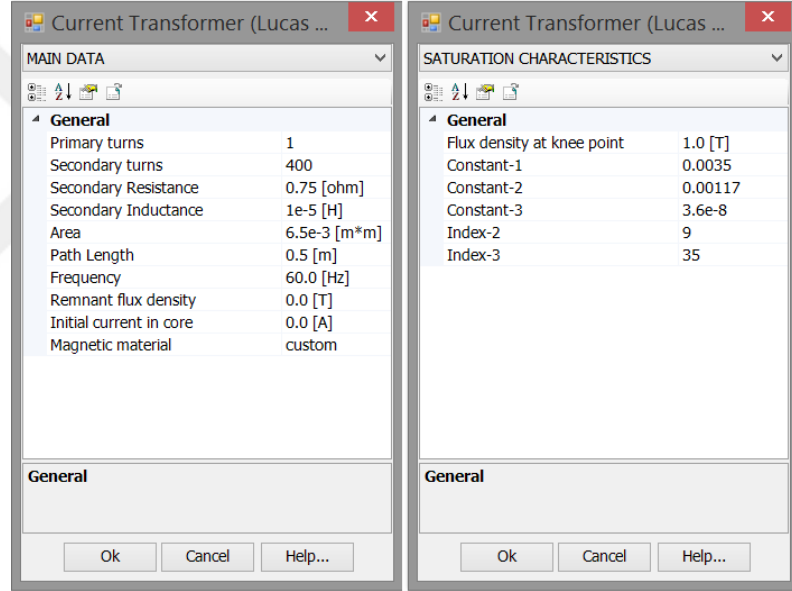
### 5.3. Akım Ölçü Transformatörlerinin Doyma Etkisi

Doktora tez çalışmasında bu noktaya kadar söz edilen analizlerin tamamında, gerilim ve akım işaretlerinin mesafe rölesine, ölçü transformatörleri tarafından hiçbir bozulmaya uğratılmadan aktarıldığı kabul edilmiştir. Oysa gerçek uygulamada, ya uç senaryolar yaşandığı için, ya da ölçü transformatörü yanlış seçildiği için doyma olayı

nedeniyle işarette bozulmalar gerçekleşebilmektedir. Böylesi bir bozulmanın, ilgilenilen probleme nasıl bir etkisi olacağı, akım ölçü transformatörlerinin doyması modellenerek incelenmiştir.

Hem TMSB, hem de NETS-NYGS’de gerçekleştirilen kısa devre arızası, güç salınımı ve güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryolarının tamamı, akım ölçü transformatörleri doymaya girecek şekilde ayarlandıktan sonra tekrar analiz edilmiş ve yeni durumdaki başarımlar sonuçları elde edilmiştir.

Akım ölçü transformatörleri için PSCAD’te Lucas Modelini kullanan blok kullanılmıştır. Modelin parametrelerinin ayarı ise program içinde Şekil 5.5’te gösterilen giriş ekranından yapılmıştır.



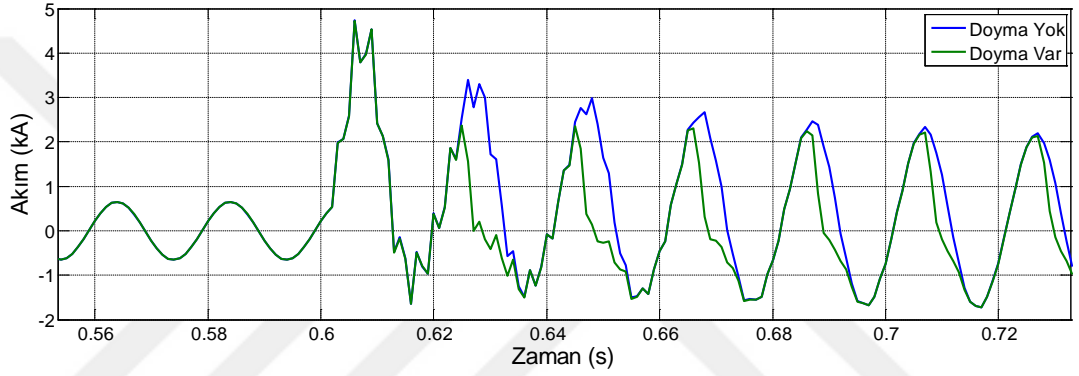
Şekil 5.5. PSCAD’te Lucas akım transformatörü modeli için kullanılan parametre giriş ekranı

İncelenen senaryolarda, akım ölçü transformatörlerinin primer nominal akım değerleri ve çevirme oranları değiştirilerek doymaya girmeleri sağlanmaktadır. Test sistemlerindeki hatlardaki akım işaretlerini alan ve çekirdekleri doymaya girecek şekilde ayarlanan akım ölçü transformatörlerinin çevirme oranları Tablo 5.2’deki gibidir. Farklı senaryolarda, bu çevirme oranlarında herhangi bir değişiklik yapılmamıştır.

Tablo 5.2. Test sistemlerinde kullanılan akım ölçü transformatörlerinin dönüştürme oranları

TMSB test sistemi	68 baralı NETS-NYGS		
Hat 1	Hat 1	Hat 2	Hat 3
300/5	200/5	150/5	100/5

Akım ölçü transformatörünün doymaya girmesi sonucunda akım işaretinin ne kadar bozulacağını göstermesi açısından TMSB test sistemine ait 4. kısa devre arızası senaryosu ele alınmış, doymanın dikkate alınmadığı ve dikkate alındığı durumlar Şekil 5.6’da bir arada çizdirilmiştir.



Şekil 5.6. TMSB test sisteminde oluşturulan 4. kısa devre arızası senaryosuna ait akım işaretinin akım ölçü transformatöründe doyması yokken ve varken değişimi

Şekil 5.6’da görüleceği gibi, kısa devre arızası öncesi doyma olmadığı için işaretle herhangi bir bozulma yok iken, arıza sonrası doyma gerçekleşmiş ve işaretle bozulmalar meydana gelmiştir. Bu şekil, doymanın, GSP ve GSGP fonksiyonları açısından incelenen yöntemlerin başarımlarına neden olumsuz etki yapabileceği hakkında fikir vermektedir. Doymanın, incelenen tüm yöntemlerin başarımlarına etkileri incelenmiş ve sonuçta TMSB test sistemi ve NETS-NYGS için sırasıyla Tablo 5.3 ve Tablo 5.4’teki yeni başarımlar elde edilmiştir.

Tablo 5.3. TMSB test sisteminde akım ölçü transformatörlerinin doyması durumunda incelenen yöntemlere ilişkin anahtarlama başarımları

Yöntem	Kısa Devre Arızası	Güç Salınımı	Güç Salınımı Esnasında Kısa Devre Arızası	Toplam
Klasik Yönt. 1	% 83,3	% 58,3	% 70,8	% 70,8
Klasik Yönt. 3	% 66,7	% 100	% 87,5	% 84,7
Klasik Yönt. 4	% 75	% 79,2	% 79,2	% 77,8
Güncel bir yöntem [25]	% 79,2	% 100	% 83,3	% 87,5
Tezde Önerilen Yöntem	% 87,5	% 100	% 100	% 95,8

Tablo 5.4. 68 baralı NETS-NYGS'nde akım ölçü transformatörlerinin doyması durumunda incelenen yöntemlere ilişkin anahtarlama başarımları

Yöntem	Kısa Devre Arızası	Güç Salınımı	Güç Salınımı Esnasında Kısa Devre Arızası	Toplam
Klasik Yönt. 1	% 75	% 66,7	% 58,3	% 66,7
Klasik Yönt. 2	% 75	% 62,5	% 83,3	% 73,6
Klasik Yönt. 3	% 75	% 66,7	% 83,3	% 75
Klasik Yönt. 4	% 79,2	% 62,5	% 87,5	% 76,4
Güncel bir yöntem [25]	% 95,8	% 66,7	% 100	% 87,5
Tezde Önerilen Yöntem	% 95,8	% 66,7	% 100	% 87,5

Tablo 5.3 ve Tablo 5.4'te, akım ölçü transformatörünün doymasının, yöntemlerin tümünün başarımını düşürdüğü görülmektedir. Akım ölçü transformatörlerinin doyduğu durumda, senaryoların tamamında doğru cevap veren bir yöntem olmamıştır. Elde edilen sonuçlar göz önüne alındığı zaman, tezde önerilen yöntemin yine yöntemler arasında en yüksek başarıma sahip olduğu görülmektedir. Doyma koşullarında yöntemin, TMSB sistemine ait 72 senaryonun %95,8'inde, NETS-

NYGS'ne ait 72 senaryonun ise %87,5'inde doğru cevap alınmasını sağladığı görülmüştür. Bu koşullarda TMSB sistemine ait senaryolardaki en iyi cevap tezde önerilen yönetime aittir. NETS-NYGS'nde ise en iyi sonuç, incelenen güncel yönetime [25] ve yine tezde önerilen yönetime aittir; bu test sisteminde her iki yöntem de en iyi başarımla değerine sahiptir.



## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, enerji iletim hatlarının korunmasında kullanılan mesafe rölelerinin sistemde gerçekleşen güç salınımlarında yanlış anahtarlama cevabı üretmesinin önlenmesi üzerinde durulmuştur. Güç salınımını kısa devre arızasından ayırt edebilmek için kullanılan klasik ve güncel yöntemler göz önünde bulundurularak, mevcut yöntemlerin eksik ve yetersiz kaldıkları noktalar tespit edilmiş, bunların giderilmesi ve mesafe rölesinin güç salınımı durumunda çalışma başarımının yükseltilmesi için yeni ve etkili bir yöntem geliştirilmiştir. Tezde önerilen yöntemin, farklı sistem ve koşullarda mesafe korumanın güvenilirliğini arttırdığı görülmektedir.

Güç salınımının röle tarafından bir kısa devre arızası gibi algılanmasına neden olan durum, empedans değerinin güç salınımı esnasında çok düşük değerler alabilmesidir. Bu durumu kısa devre arızasından doğru bir şekilde ayırt edebilmek için kullanılan klasik yöntemler, bazı kabullere dayanmaktadır. Güç salınımı durumunda, azalan empedans yönteminde, empedans değerindeki düşmenin daha uzun süreceği, salınım merkez gerilimi (SMG) ve azalan direnç yöntemlerinde izlenen parametrenin değişim hızının daha düşük olacağı kabul edilmektedir. Bindirilmiş akım yönteminde ise, güç salınımı durumunda, önceki periyottaki akım işaretinde kısa devre arızası durumundakine kıyasla daha az değişme (bozulma) yaşanacağı kabul edilmektedir. Böylece seçilen eşik değerler, güç salınımı ile kısa devre arızası durumlarının ayırt edilmesini sağlamaktadır.

Problemin çözümü için kullanılan klasik yöntemlerin çeşitli açılardan olumsuz yönleri olduğu görüldüğü için literatürde problemin çözümü için güncel bazı yöntem ve yaklaşımlar önerilmiştir. Bunlar içinde bir grup, gelecek örnek değer tahmini ve tahmin hatasının hesaplanmasına dayanan yaklaşımları içermektedir. Doktora tezinde, aynı şekilde tahmin ve hata hesabına dayanan bir yöntem geliştirilmiştir. Tahmin için son üç akım örnek değerini, Taylor serisini ve sayısal türevi kullanan yöntem geliştirilirken şu iki temel kabul yapılmaktadır: 1) Güç salınımı esnasında akım işaretindeki bozulma, kısa devre arızası durumundakine göre daha azdır, 2) kısa devre arızası esnasında, akım işaretinin etkin değeri ani olarak artmaktadır. Bu



kabullere dayalı olarak elde edilen matematiksel eşitlikler yardımıyla, karşılaştırması yapılan diğer yöntemlerden daha üstün bir yöntem elde etmek mümkün olmuştur.

Tezde önerilen yöntemin problemin çözümüne ve korumanın güvenilirliğine olan katkısını tatmin edici bir şekilde inceleyebilmek amacıyla paralel hat içeren tek makine sonsuz bara (TMSB) ve 68 baralı New England Test Sistemi – New York Güç Sistemi (NETS-NYGS) kullanılmıştır. Sistemlerin modellenmesi PSCAD’te gerçekleştirilmiş, farklı güç salınımı, kısa devre arızası ve güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryoları üretilerek geçici durum analizleri gerçekleştirilmiştir. Her iki sistemde de senaryo çeşitliliği yaratmak amacıyla kısa devre arızalarının yeri, hat başına uzaklığı, arıza başlangıç açısı ve arıza süreleri değiştirilmiştir. Böylece her test sistemi için 24’ü güç salınımı, 24’ü kısa devre arızası, 24’ü güç salınımı esnasında kısa devre arızası olmak üzere 72 senaryo üretilmiştir. İki test sistemi için toplam 144 senaryo üretilmiş, bu senaryolarda problemin çözümü için kullanılan klasik yöntemlerin dördü, güncel bir yöntem ve tezde önerilen yöntem için anahtarlama cevapları elde edilmiştir. TMSB test sisteminde en yüksek başarıyı tezde önerilen yöntem göstermiş, NETS-NYGS’nde ise en yüksek başarıyı incelenen güncel yöntem ve tezde önerilen yöntem paylaşmıştır. Bu sonuç, tezde önerilen yöntem açısından bir üstünlük ortaya koymaktadır. Tezde önerilen yöntem, güç salınımı perdeleme (GSP) ve güç salınımı geri perdeleme (GSGP) fonksiyonlarını eksiksiz şekilde yerine getiren ve 144 senaryonun tamamında doğru anahtarlama cevabı üreten tek yöntem olmuştur.

Çalışmada, anahtarlama başarımları ortaya konulan yöntemlerin, bu sonuçların elde edilmesini sağlayan parametrelerinin değişimleri de değerlendirilmiştir. Üretilen senaryolarda farklı parametrelerin değişimleri izlendiği zaman, yanlış anahtarlama cevabı üreten yöntemlerin hangi durumlarda bu yanlışa düştükleri daha net şekilde ortaya çıkmaktadır. Azalan empedans yönteminde, güç salınımı tespiti için tanımlanan bölgeden geçiş süresinin, güç salınımı esnasında fazla, kısa devre arızası esnasında az olması beklenmektedir. Hâlbuki tüm senaryolar göz önünde bulundurulduğu zaman, en hızlı geçiş yaşanan güç salınımı senaryosunun, en yavaş geçiş yaşanan kısa devre arızası senaryosundan daha hızlı olduğu görülmektedir. Buna göre, bu yöntem için hiçbir zaman tam olarak doğru anahtarlama cevabını elde etmenin mümkün olmayacağı anlaşılmaktadır. Çünkü kısa devre arızası ve güç

salınımı durumları arasında net bir geçiş süresi eşiği tanımlanamamaktadır.

İncelenen diğer klasik yöntemler olan SMG, bindirilmiş akım ve azalan direnç yöntemlerinde ise, güç salınımı esnasında düşük, kısa devre arızası esnasında yüksek seyretmesi gereken bir parametre değeri söz konusudur. Fakat üretilen tüm senaryolar göz önünde bulundurulduğu zaman, her üç yöntem için de güç salınımı için elde edilen en yüksek değerin, kısa devre arızası için elde edilen en düşük değerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum da, aynı azalan empedans yönteminde olduğu gibi güç salınımı ile kısa devre arızası durumları arasında kesin ve güvenilir bir eşik değeri belirlemeyi olanaksız kılmaktadır. Böylece, bu üç klasik yöntem için de tüm senaryolarda doğru anahtarlama cevabı elde etmenin olanaksız olduğu çıkarımı yapılmıştır.

Literatürde problemin çözümü için önerilmiş güncel yöntemlerden, yine tahmin hatası hesabına dayanan bir tanesinde, koruma süresince izlenen TMİ ismindeki parametrenin, güç salınımı durumunda düşük, kısa devre arızası esnasında yüksek seyretmesi beklenmekte ve bu kabule göre koruma gerçekleştirilmektedir. TMİ parametresinin değişimleri incelendiği zaman, 68 baralı NETS-NYGS'nde üretilen senaryoların hiçbirisinde başarısız sonuç bulunmadığı, güç salınımı ile kısa devre arızası durumlarının birbirinden net bir şekilde ayrılabilirdiği görülmektedir. Öte yandan, hızlı güç salınımı oluşturulan paralel hatlı TMSB test sisteminde, güç salınımı için elde edilen en yüksek değerin, kısa devre arızası için elde edilen en düşük değere yakın seyrettiği görülmektedir. Buna göre TMSB test sisteminde, bu yöntem kullanıldığı zaman bazı durumlarda yanlış anahtarlama yapılabileceği görülmektedir; bu yöntem kullanıldığında korumanın güvenilirliği istenenden düşük çıkmaktadır.

Tezde önerilen yöntemin parametre değişimleri incelendiği zaman, iki test sisteminde üretilen 144 senaryonun tamamında, güç salınımı ve kısa devre arızası ayırımı yapmayı kolaylaştıracak bir yapı olduğu ortaya çıkmaktadır. İzlenmesi önerilen ayırım indeksinin (Aİ) güç salınımı için düşük, kısa devre arızası için yüksek seyretmesi öngörülmektedir. Üretilen senaryoların tamamında bu öngörü doğrulanmış ve hem TMSB test sisteminde hem de 68 baralı NETS-NYGS'nde korunan iletim hatları için kesin bir eşik değeri belirlemek olanaklı olmuştur. Böylece,

tezde önerilen yöntem sayesinde güç salınımıyla ilintili durumlarda korumanın güvenilirliği istenen en yüksek düzeye getirilmiştir.

Tez çalışmasında söz konusu edilen ve güç salınımı ile kısa devre arızası ayırımını yapabilme başarımı incelenen herhangi bir yöntemin, mühendislik uygulamasında düzgün bir parametre çıkışı vermesi ve dolayısıyla doğru anahtarlama cevabı elde edilmesini sağlayabilmesi kadar bunu hızlı bir şekilde gerçekleştirebilmesi de önemlidir. Korumada hız konusu, iki açıdan ele alınmalıdır: 1) yöntemin algoritma temelinde cevap verme hızı, 2) yöntemin donanım (mikroişlemci) temelinde gerçek zamanlı cevap verme hızı. Çalışmada öncelikle tüm yöntemlerin algoritma temelinde cevap verme hızları incelenmiş, bu noktada kısa devre arızası durumlarının tespit edilme hızı üzerinde durulmuş, kısa devre arızasının yöntem tarafından kaç algoritma işlem adımı sonunda tespit edildiğine bakılmıştır. Tüm yöntemlerin algoritma temelinde cevap verme hızları karşılaştırıldığı zaman, tezde önerilen yöntemin en hızlı cevap veren yöntemlerden birisi olduğu görülmektedir.

Gerçek zamanlı cevap verme hızları, güncel bir yöntem ve tezde önerilen yöntem için incelenmiş ve elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Bunun için, daha önce anahtarlama cevaplarının elde edilmesi için MATLAB'te kodlanan algoritmalar, bu kez C programlama dilinde kodlanmıştır. İki farklı işlemci mimarisi için yapılan derleme işleminin ardından, iki yöntemin işlemcide gerçek zamanlı çalıştırılma süreleri elde edilmiştir. Sonuçlara göre, tezde önerilen yöntemin matematiksel olarak basit bir yapıda olmasının ona hız açısından ciddi bir üstünlük sağladığı görülmektedir. Tezde önerilen yöntem, incelenen güncel yöntemle göre yaklaşık 40 kat daha hızlı çalışmaktadır. Ayrıca, yöntemin hafıza ihtiyacı diğerine göre çok daha azdır. Bu sonuçlar, tezde önerilen yöntemin gerçek zamanlı mühendislik uygulaması açısından ciddi artıları olarak öne çıkmaktadır.

Mesafe rölesinin gerilim ve akım işaretlerini ölçü transformatörlerinden alması nedeniyle, işletilen tüm koruma prosedürlerinin başarımı, aynı zamanda ölçü transformatörlerinden gelen bilginin doğru olmasına bağlıdır. Akım ölçü transformatörlerinin yanlış seçilmesi sonucu doyuma girmeye hazır durumda çalıştırılması, incelenebilecek senaryolardan birisidir. Tez çalışması kapsamında, iki test sistemi için üretilen tüm senaryolar, kullanılan akım ölçü transformatörleri

doymaya sokularak tekrarlanmıştır. Bu durumda, hem klasik dört yöntemin, hem incelenen güncel yöntemin, hem de tezde önerilen yöntemin başarımında düşüş yaşanmıştır. Fakat, azalan başarım değerleri içinde TMSB test sisteminde en yüksek olan tezde önerilen yöntem olmakta, NETS-NYGS'nde ise incelenen güncel yöntem ve tezde önerilen yöntem en yüksek başarım değerini paylaşmaktadır. Genel tabloya bakıldığında zaman, akım ölçü transformatörlerinin doyması durumunda dahi mesafe rölesinin güç salınımında en güvenilir şekilde çalışmasını sağlayan yöntem, tezde önerilen yöntem olmaktadır.

Güç sisteminde, ciddi bir yükün devreye alınması ya da devreden çıkarılması, kritik bir iletim hattının enerjisiz bırakılması ya da bir kararlılık probleminin yaşanması gibi durumların sonucunda güç salınımı yaşanabilmekte ve bu durumda mesafe röleleri yanlış anahtarlama işareti üretebilmektedir. Bu durum, enerji sürekliliğinin gereksiz yere kesintiye uğratılmasına ya da sistemde ciddi kararlılık problemlerine ve çökmelere yol açabileceği için önlenmelidir. Bu tez çalışmasında, bu olumsuz durumun giderilmesi için güç salınımı ile kısa devre arızasını birbirinden yüksek doğrulukla ayırt edebilen hızlı ve güvenilir bir yöntem geliştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, Taylor Serisi ile örnek tahmini ve tahmin hatası hesabına dayanan ve örnek düzeltme tekniği ile desteklenen bu yöntemin incelenen iki test sisteminde de (TMSB ve NETS-NYGS) en yüksek başarımla anahtarlama cevabı üretilmesini sağladığı görülmektedir. Önerilen yöntem, çalışmada üretilen tüm güç salınımı, kısa devre arızası ve güç salınımı esnasında kısa devre arızası senaryolarında doğru anahtarlama cevabı üretilmesini sağlayarak mesafe korumanın güvenilirliğini güç salınımı ile ilintili tüm koşullar için en yüksek düzeye taşımıştır. Bunun yanında, hem algoritma temelinde, hem de donanım (işlemci) temelinde (gerçek zamanlı olarak) yapılan hız değerlendirmeleri sonucunda, tezde önerilen yöntemin hız açısından da ciddi bir üstünlüğü olduğu ortaya çıkmaktadır. Parametre çıkışları, anahtarlama cevabının doğruluğu, algoritma ve işlemci hızları, akım ölçü transformatörünün doymaya girmesi gibi başlıklar altında incelenen bu yeni yöntemin, pratik mühendislik uygulamasına uygun ve güç salınımında mesafe koruma gerçekleştirilmesi için yeni bir alternatif olabileceği değerlendirilmektedir.

Hem klasik yöntemlerin, hem de tezde önerilen yöntem dahil olmak üzere literatürde önerilen yöntemlerin çoğunun eşik değer seçimine dayanıyor olması, bu yöntemler

kullanıldığı zaman sistem işletmecini sistemi iyi tanıma ve analiz etme zorunluluğu ile karşı karşıya bırakmaktadır. Çünkü güç salınımında mesafe koruma başarımını en üst düzeye taşıyan yöntemler dahi sisteme ve uygun eşik değer parametresine bağlıdır. Sistemde yanlış seçilen bir parametre, koruma güvenilirliğini alt üst etme potansiyeli taşımaktadır. Bu nedenle, tezde önerilen yöntemin yüksek güvenilirlikle uygulamaya geçirilebilmesi için sistem analizlerinin doğru ve kapsamlı bir şekilde yapılması yerinde olacaktır. Bundan sonraki çalışmalarda, güç sisteminde koruma fonksiyonları için sisteme bağımlı olmayan, tüm sistemler için genelleştirilebilen yaklaşımların geliştirilmesi önerilmektedir. Tak-çalıştır mantığıyla işletilecek böylesi yöntemlerin bulunması, güç sistemlerinde korumayı daha pratik ve güvenilir hale getirecektir.

## KAYNAKLAR

- [1] Mechraoui A., Thomas D. W. P., A new blocking principle with phase and earth fault detection during fast power swings for distance protection, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 1995, **10**(3), 1242–1248.
- [2] Mechraoui A., Thomas D. W. P., A new principle for high resistance earth fault detection during fast power swings for distance protection, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 1997, **12**(4), 1452–1457.
- [3] Khorashadi-Zadeh H., Evaluation and performance comparison of power swing detection algorithms, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, San Francisco, USA, 24 January 2005.
- [4] Nayak P. K., Ganeswara Rao J., Kundu P., Pradhan A. K., Bajpai P., A comparative assessment of power swing detection techniques, *Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems & 2010 Power India*, New Delhi, India, 20 - 23 December 2010.
- [5] Hou D., Zero-setting power-swing blocking protection, *3rd IEE International Conference on Reliability of Transmission and Distribution Networks (RTDN 2005)*, London, England, 15-17 February 2005.
- [6] Su B., Dong X. Z., Bo Z. Q., Sun Y. Z., Counce B. R. J., Tholomier D., Apostolov A., Fast detector of symmetrical fault during power swing for distance relay, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, San Francisco, USA, 24 January 2005.
- [7] Brahma S. M., Distance Relay With Out-of-Step Blocking Function Using Wavelet Transform, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2007, **22**(3), 1360–1366.
- [8] Zadeh H. K., Li Z., A novel power swing blocking scheme using adaptive neuro-fuzzy inference system, *Electr. Power Syst. Res.*, 2008, **78**(7), 1138–1146.
- [9] Lin X., Gao Y., Liu P., A Novel Scheme to Identify Symmetrical Faults Occurring During Power Swings, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2008, **23**(1), 73–78.
- [10] Lotfifard S., Faiz J., Kezunovic M., Detection of Symmetrical Faults by Distance Relays During Power Swings, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2010, **25**(1), 81–87.
- [11] Gautam S., Brahma S. M., Out-of-step blocking function in distance relay using mathematical morphology, *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2012, **6**(4), 313.

- [12] Mahamedi B., Zhu J. G., A Novel Approach to Detect Symmetrical Faults Occurring During Power Swings by Using Frequency Components of Instantaneous Three-Phase Active Power, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2012, **27**(3), 1368–1376.
- [13] Samantaray S. R., Dubey R., Wavelet singular entropy-based symmetrical fault-detection and out-of-step protection during power swing, *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2013, **7**(10), 1123–1134.
- [14] Parikh U. B., Chothani N. G., Bhalja B. R., New support vector machine-based digital relaying scheme for discrimination between power swing and fault, *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2014, **8**(1), 17–25.
- [15] Nayak P. K., Pradhan A. K., Bajpai P., A Fault Detection Technique for the Series-Compensated Line During Power Swing, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2013, **28**(2), 714–722.
- [16] Jafari R., Moaddabi N., Eskandari-Nasab M., Gharehpetian G. B., Naderi M. S., A Novel Power Swing Detection Scheme Independent of the Rate of Change of Power System Parameters, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2014, **29**(3), 1192–1202.
- [17] Kundu P., Pradhan A. K., Synchrophasor-Assisted Zone 3 Operation, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2014, **29**(2), 660–667.
- [18] Nayak P. K., Pradhan A. K., Bajpai P., Secured Zone 3 Protection During Stressed Condition, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2015, **30**(1), 89–96.
- [19] Kundu P., Pradhan A. K., Wide area measurement based protection support during power swing, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2014, **63**, 546–554.
- [20] Morais A. P., Cardoso G., Mariotto L., Marchesan G., A morphological filtering algorithm for fault detection in transmission lines during power swings, *Electr. Power Syst. Res.*, 2015, **122**, 10–18.
- [21] Rao J. G., Pradhan A. K., Power-Swing Detection Using Moving Window Averaging of Current Signals, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2015, **30**(1), 368–376.
- [22] Sharifzadeh M., Lesani H., Sanaye-Pasand M., A New Algorithm to Stabilize Distance Relay Operation During Voltage-Degraded Conditions, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2014, **29**(4), 1639–1647.
- [23] Moravej Z., Ashkezari J. D., Pazoki M., An effective combined method for symmetrical faults identification during power swing, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2015, **64**, 24–34.
- [24] Rao J. G., Pradhan A. K., Differential Power-Based Symmetrical Fault Detection During Power Swing, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2012, **27**(3), 1557–1564.

- [25] Khodaparast J., Khederzadeh M., Three-Phase Fault Detection During Power Swing by Transient Monitor, *IEEE Trans. Power Syst.*, 2015, **30**(5), 2558–2565.
- [26] Samantaray S. R., Panigrahi B. K., Venkoparao V. G., Dubey R., Phase-space-based symmetrical fault detection during power swing, *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2016, **10**(8), 1947–1956.
- [27] Swetapadma A., Yadav A., Data-mining-based fault during power swing identification in power transmission system, *IET Sci. Meas. Technol.*, 2016, **10**(2), 130–139.
- [28] Dubey R., Samantaray S. R., Panigrahi B. K., Venkoparao V. G., Data-mining model based adaptive protection scheme to enhance distance relay performance during power swing, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 2016, **81**, 361–370.
- [29] Kang D., Gokaraju R., A New Method for Blocking Third-Zone Distance Relays During Stable Power Swings, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2016, **31**(4), 1836–1843.
- [30] Nayak P. K., Pradhan A. K., Bajpai P., A Three-Terminal Line Protection Scheme Immune to Power Swing, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2016, **31**(3), 999–1006.
- [31] Glover J. D., Sarma M. S., Overbye T. J., *Power System Analysis & Design*, 5. Edition, Cengage Learning, Stamford, 2012.
- [32] Ziegler G., *Numerical Distance Protection – Principles and Applications*, 4. Edition, Publicis Corporate Publishing, Almany, 2011.
- [33] IEEE Power System Relaying Committee (Komite), Power swing and out-of-step considerations on transmission lines, *IEEE PSRC*, WG D6, 1-59, 2005.
- [34] Preece R., Improving the Stability of Meshed Power Networks, PhD Thesis, The University of Manchester, Faculty of Engineering and Physical Sciences, Manchester, 2013.
- [35] Baone C. A., Acharya N., Veda S., Chaudhuri N. R., Fast contingency screening and ranking for small signal stability assessment, *IEEE PES General Meeting Conference & Exposition*, National Harbor, USA, 27-31 July 2014.
- [36] Chow J. H., Cheung K. W., A toolbox for power system dynamics and control engineering education and research, *IEEE Trans. Power Syst.*, 1992, **7**(4), 1559–1564.
- [37] <https://gcc.gnu.org/>, (Ziyaret tarihi: 1 Mayıs 2017).
- [38] <https://www.virtualbox.org/>, (Ziyaret tarihi: 1 Mayıs 2017).
- [39] ABB, *Line distance protection REL650 Technical manual*, ABB, Sweden, 2016.



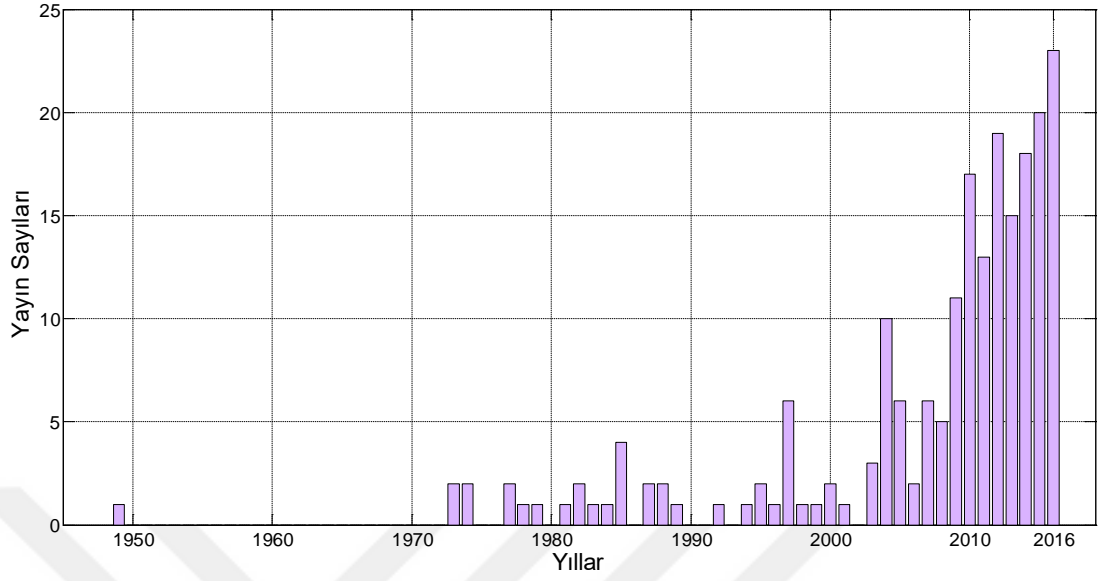
- [40] GE Grid Solutions, *D60 Line Distance Relay Instruction Manual*, GE, Canada, 2017.
- [41] Schneider Electric, *MiCOM P437 Distance Protection Device P437/EN M/Am8 Technical Manual*, Schneider Electric, France, 2011.
- [42] Schweitzer Engineering Laboratories, Inc, *SEL-421 Relay Protection and Automation System Instruction Manual Applications Handbook*, SEL, USA, 2011.
- [43] Siemens, *SIPROTEC Distance Protection 7SA6 V4.3 Manual*, Siemens, Germany, 2003.





**EKLER**

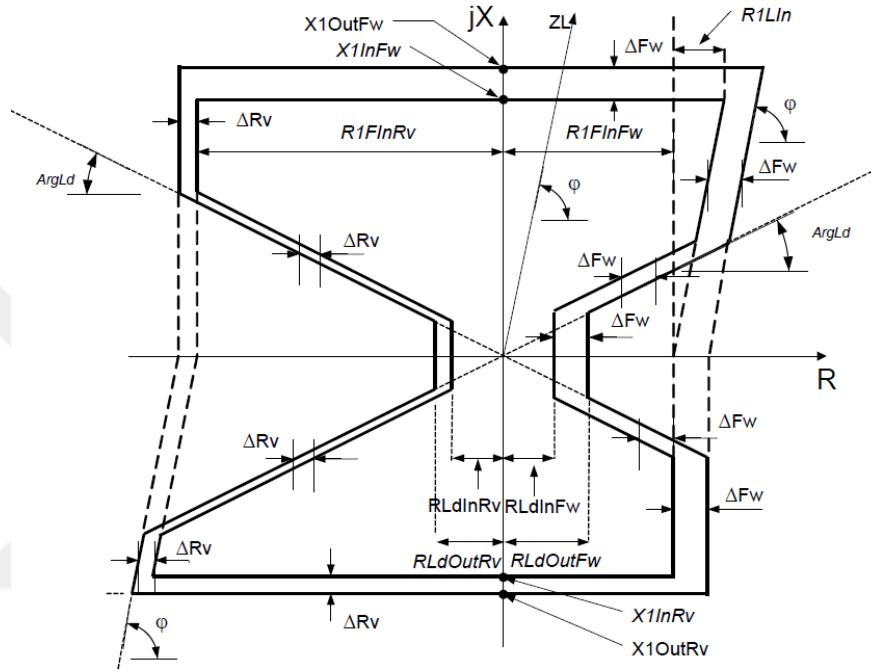
## EK-A



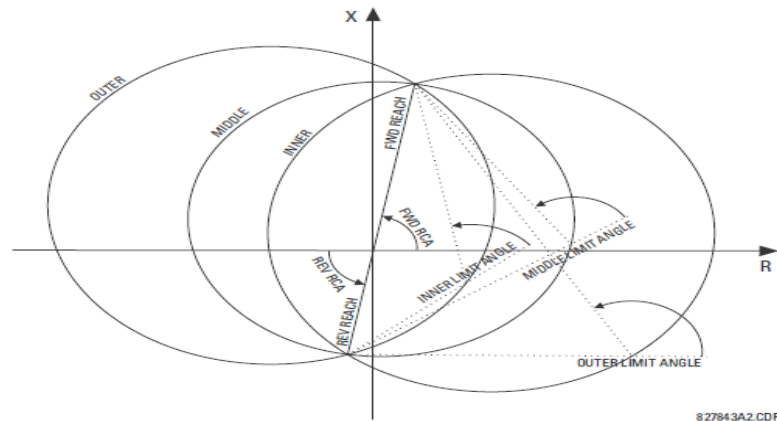
Şekil A.1 Yıllara göre, power (güç), swing (salınım), mesafe (distance) ve röle (relay) anahtar kelimeleri ile yapılan aramada ulaşılan yayın sayıları

## EK-B

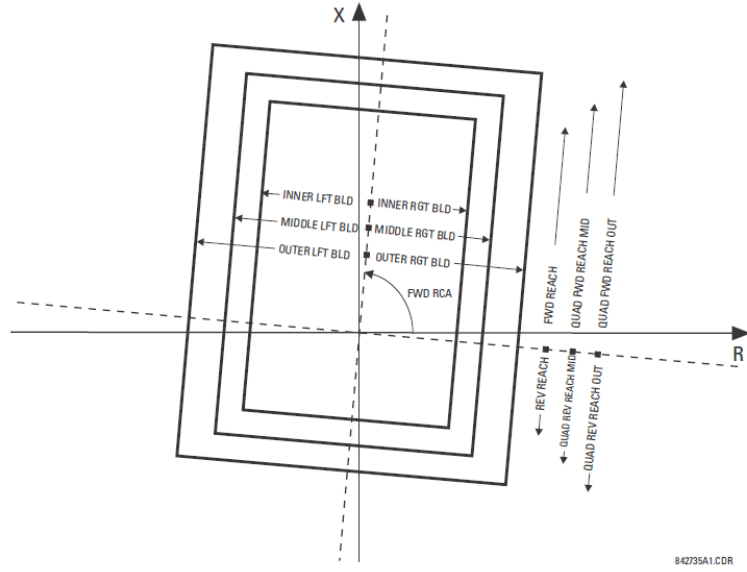
Günümüzde endüstriyel üretimi yapılan ve yaygın olarak kullanılan belli başlı endüstriyel mesafe rölelerinde, güç salınımı tespiti ve GSP fonksiyonunun yerine getirilebilmesi amacıyla özellikle azalan empedans ve azalan direnç yöntemlerinin kullanıldığı görülmektedir. Buna ilişkin bazı örnekler aşağıdaki şekilde sıralanmıştır.



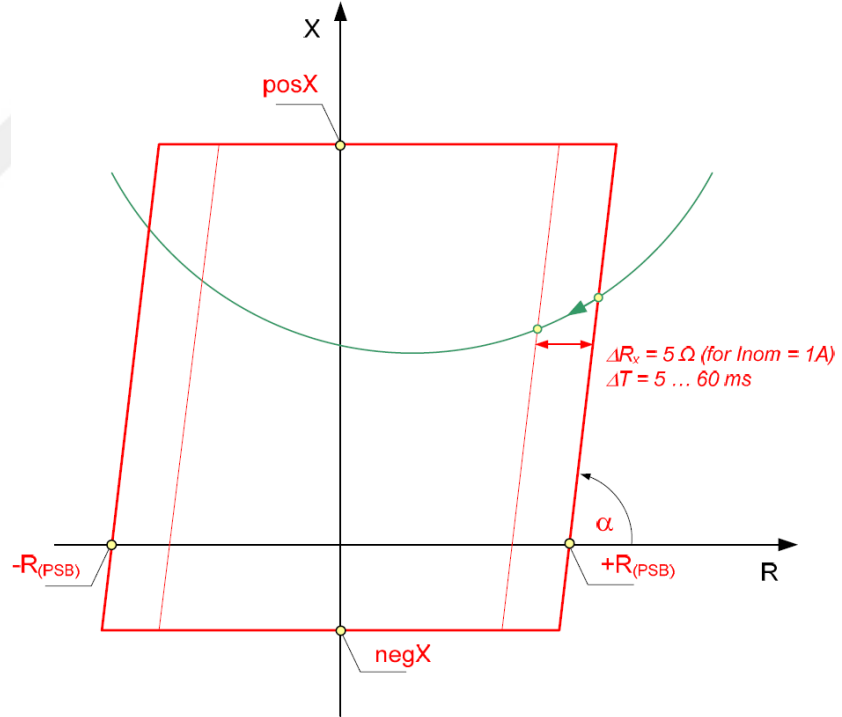
Şekil B.1 GSP fonksiyonunun azalan empedans yöntemiyle gerçekleştirilmesi (ABB REL650) [39]



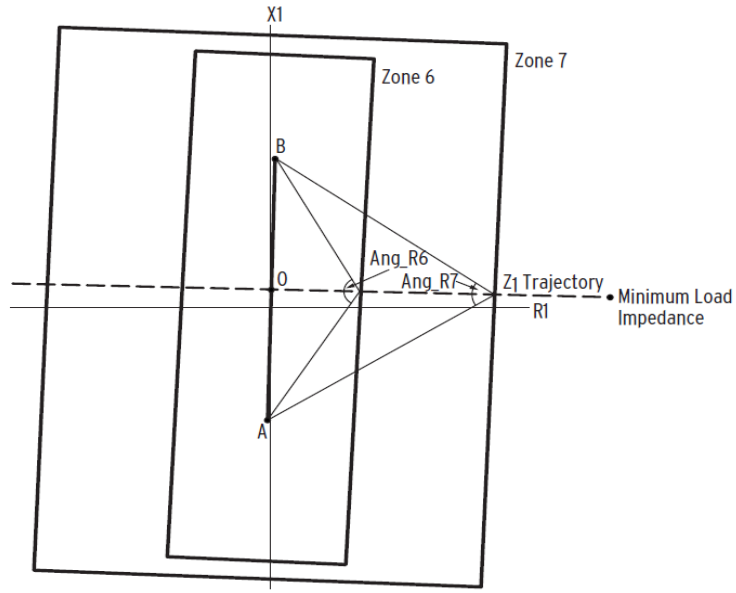
Şekil B.2 Güç salınımı tespitinin mho karakteristiğinde gerçekleştirilmesine ilişkin diyagram (GE-D60) [40]



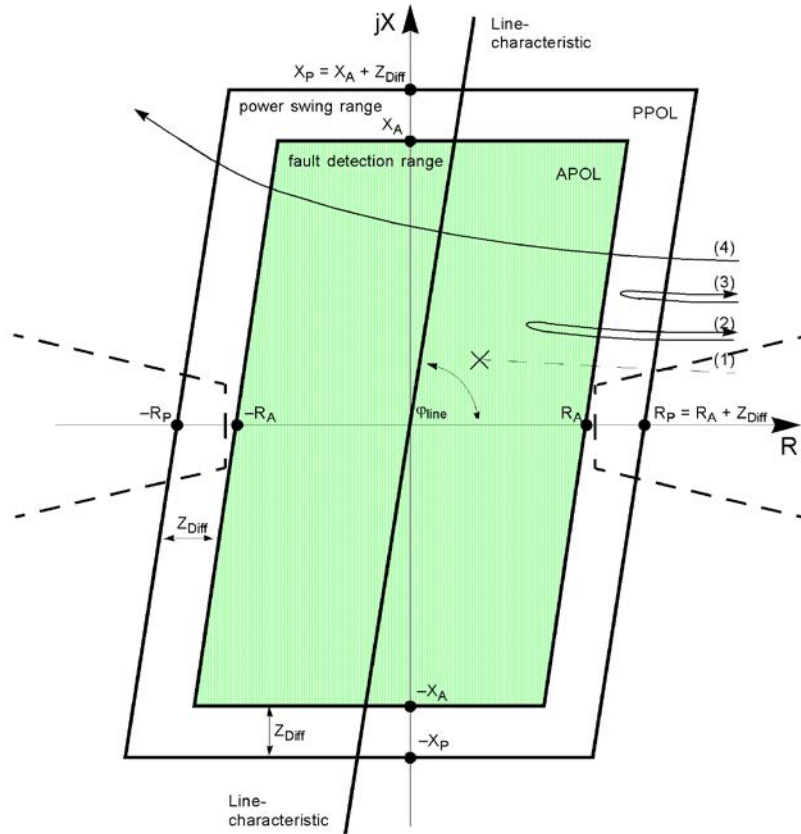
Şekil B.3 Güç salınımı tespitinin dörtgen karakteristikte gerçekleştirilmesine ilişkin diyagram (GE-D60) [40]



Şekil B.4 Güç salınımı tespiti bölgesinin diyagramda gösterilmesi (azalan direnç yöntemi kullanılıyor, MiCOM P437) [41]



Şekil B.5 Karakteristik üzerinde güç salınımı tespiti ayarının yapılması (azalan empedans yöntemi kullanılıyor, SEL-421) [42]



Şekil B.6 Poligon karakteristiği üzerinde güç salınımı tespiti- nin yapılması (azalan empedans yöntemi kullanılıyor, Siemens SIPROTEC 7SA6) [43]

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Tekdemir İ. G.**, Alboyacı B., A Novel Approach for Improvement of Power Swing Blocking and Deblocking Functions in Distance Relays, *Power Deliv IEEE Trans*, DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2600638
- [2] Dawood K., Alboyacı B., Şengül M., **Tekdemir İ. G.**, Light Wavelength and Power Quality Characteristics of CFL and LED Lamps under Different Voltage Harmonic Levels, *International Journal of Engineering Technologies, IJET*, 2017, 3(1), 19–26.
- [3] **Tekdemir İ. G.**, Güneş D., Alboyacı B., Şengül M., A Probabilistic Approach For Evaluation Of Electric Vehicles' Effects On Distribution Systems, *4th International Conference On Electrical And Electronics Engineering (ICEEE 2017)*, Ankara, Türkiye, 08-10 Nisan 2017.
- [4] Ünverdi Ağlar E., **Tekdemir İ. G.**, Basa Arsoy A., Assessment of Integral Based Fault Detection Methods for a Power System Application, *The 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO 2015*, Bursa, Türkiye, 26-28 Kasım 2015.
- [5] **Tekdemir İ. G.**, Alboyacı B., Improvement of Power Swing Detection Performance of a Distance Relay by using k-NN Algorithm, *The 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO 2015*, Bursa, Türkiye, 26-28 Kasım 2015.
- [6] **Tekdemir İ. G.**, Genç V. M. İ., A Small-Signal Stability Related Probabilistic Security Assessment of Wind Power Integration into Power Systems, *7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, ELECO 2011*, Bursa, Türkiye, 01-04 Aralık 2011.
- [7] Güneş D., **Tekdemir İ. G.**, Şengül M., Alboyacı B., Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Yüklerinin Olasılıksal Olarak Modellenmesi, *CIGRE TÜRKİYE Güç Sistemleri Konferansı*, İstanbul, Türkiye, 15 Kasım 2016.
- [8] **Tekdemir İ. G.**, Alboyacı B., Güç Salınımı Tespiti Yöntemlerinin Mesafe Koruma Rölesinin Çalışma Başarımı Açısından Karşılaştırılması, *Elektrik-Elektronik, Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, ELECO*, Bursa, Türkiye, 27 Kasım 2014.
- [9] **Tekdemir İ. G.**, Basa Arsoy A., Alboyacı B., Keskin Y. E., Uyarlamalı Medyan Filtresi ve Birikimli Toplam Yöntemleri ile Bir Güç Sisteminde Arıza Tespitinin İncelenmesi, *5. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, Kocaeli, Türkiye, 23 Mayıs 2013.

## ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Kocaeli'de tamamladı. 2005 yılında girdiği Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden 2009 yılında Bölüm Birincisi olarak mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Yüksek Lisans Programına başladı ve bu programı 2012 yılında "Güç Sistemlerinde Rüzgar Enerjisi ile Üretimin Küçük İşaret Kararlılığına Etkilerinin Deterministik ve Olasılıksal Olarak İncelenmesi" isimli tezi ile başarıyla tamamladı. 2010 yılından bu yana Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.