

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TÜRKİYE ENERJİ İLETİM SİSTEMİ ÜZERİNDE GERİLİM
ÇUKURU ANALİZLERİ**

DOKTORA TEZİ

Elektrik Yük. Müh. Elif İNAN

**AnaBilim Dalı: Elektrik Mühendisliği
Danışman: Yrd. Doç Dr. Bora ALBOYACI**

KOCAELİ, 2011

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TÜRKİYE ENERJİ İLETİM SİSTEMİ ÜZERİNDE GERİLİM
ÇUKURU ANALİZLERİ**

DOKTORA TEZİ

Elif İNAN

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 22 Nisan 2011

Tezin Savunulduğu Tarih: 17 Mayıs 2011

**Tez Danışmanı
Yrd.Doç.Dr.Bora ALBOYACI**

(..B. Alboyacı...)

**Üye
Doç.Dr.Mehmet BAYRAK**

(..Mbayrak...)

**Üye
Yrd.Doç.Dr.Nuran YÖRÜKEREN**

(..N. Yörükere...)

**Üye
Prof.Dr. Semra ÖZTÜRK**

(..S. Öztürk...)

**Üye
Prof.Dr. Ertan YANIKOĞLU**

(..E. Yanikoğlu...)

KOCAELİ, 2011

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Elektrik enerjisi hayatımızın vazgeçilmez bir parçasıdır. Sürekli ihtiyaç duyduğumuz elektrik enerjisi, üretim-iletim-dağıtım yapısıyla konut, ticarethane ve sanayi bölgelerine iletilmektedir. Güç iletimi olarak ifade edilen bu yapıda iletilen gücün dolayısıyla elektrik enerjisinin sürekliliği, güvenilirliği ve kalitesi önem taşımaktadır. Teknolojik gelişmelerin hayatımıza kattığı rahatlık ve kolaylık beraberinde güç kalitesini hem iletim hem de dağıtım seviyesinde zorunlu hale getirerek sistem operatörleri, dağıtım firmaları ve tüketicilere güç sistem yapısını geliştirme ve var olan sorunlara karşı tepkisini iyileştirme konularında ciddi sorumluluklar yüklemektedir. Bu bilinçle yapılan Doktora Tez çalışmasıyla, Türkiye Sistemi'nin 1.İletim Bölgesi için, güç sistemlerinde en sık rastlanılan güç kalitesi sorunlarından biri olan gerilim çukur değerlendirmesi sunulmuştur. Hem tahmini yaklaşım yöntemlerinden arıza durum yöntemine dayalı bilgisayar destekli çukur olay analizi hem de sistemde 250 noktaya yerleştirilen güç kalitesi monitörleriyle yapılan değerlendirme gerilim çukur olayının boyutunu bara bazlı incelemelerle ortaya koymakla birlikte, olay etkisini azaltma yöntem uygulamalarının teknik ve ekonomik anlamda doğru şekilde gerçekleşmesini de sağlar. Türkiye Sistemi için çukur değerlendirmesinin kaynakçada henüz yer almaması olayın standartlaştırılmasının gereğini ortaya çıkardığından monitörlerden alınan verilerden elde edilen çukur genliğinin zaman-sayı değişimine ait indekslerle dağıtım firmaları ve tüketicilere yarar sağlamak hedeflenmiştir.

Doktora Tez çalışmam sırasında her konuda beni destekleyen ve yol gösteren, akademisyenliği bana sevdiren ve yaptığım işten keyif almamı sağlayan, gerek iş disiplini gerekse sosyal hayatta örnek alacağım ve yolundan gitmeyi çok arzuladığım danışmanım Sayın Yrd.Doç.Dr. Bora ALBOYACI'ya, Türkiye İletim Sistemi'ne ait verilerin elde edilmesinde destek sağlayan Sayın Ercüment ÖZDEMİRCİ ve Sayın Yener AKKAYA'ya, güç kalitesi monitörlerinin tanıtılmasındaki yardımlarından dolayı Sayın Özgül SALOR'a ve yardımlarını benden asla esirgemeyen Yrd.Doç.Dr. Mehlika ŞENGÜL, Sayın Dr. Hasan Basri ÇETİNKAYA ve Arş.Gör. Korhan KARAARSLAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca beni bu günlere getiren, her zaman yanımda olan ve bana güvenen canım aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	viii
ÖZET.....	xii
ABSTRACT	xiii

BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
---------------------	---

BÖLÜM 2. GERİLİM ÇUKURU KARAKTERİSTİĞİ	15
2.1. Giriş.....	15
2.2. Kısa Süreli Gerilim Çukuru	15
2.2.1. Gerilim çukur tipleri.....	18
2.2.2. Transformatör bağlantı şeklinin gerilim çukur tipine etkisi.....	19
2.2.2.1. Transformatör bağlantı grupları	20
2.2.2.2. Transformatörün birincil ve ikincil tarafındaki faz değişimi	21
2.3. Kısa Süreli Gerilim Çukurunun Değerlendirilmesi	22
2.3.1. Kritik mesafe yöntemi.....	23
2.3.2. Arıza durum yöntemi	24
2.4. Hattın Herhangi Bir Noktasında Arıza Oluşması Durumu	26
2.4.1. Hattın herhangi bir noktasında oluşan arıza için gerilim çukur genliğinin hesaplanması	26
2.4.2. 1. İletim Bölgesi'nde yeralan bir hattın herhangi bir noktasında oluşan arızanın başka bir noktaya etkisi.....	30

BÖLÜM 3. KISA SÜRELİ GERİLİM ÇUKURUNUN ETKİSİNİ AZALTMA YÖNTEMLERİ.....	33
3.1. Giriş.....	33
3.2. Güç Sisteminin İyileştirilmesi.....	33
3.2.1. Arıza sayısının azaltılması	33
3.2.2. Arıza temizleme zamanının azaltılması	34
3.2.3. Sistem yapısının değiştirilmesi	36
3.2.4. Cihazın gerilim değişimine duyarlılığının geliştirilmesi	37
3.3. Gerilim Çukurunun Etkisini Azaltıcı Cihaz Bağlanması	39
3.3.1. Gerilim kontrol yöntemleri	41
3.3.1.1. Geleneksel iletim hattı dengeleyicisi ve güç akış kontrolü.....	41
3.3.1.1.1. İdeal paralel dengeleyici	42
3.3.1.1.2. Seri dengeleyici	43
3.3.1.1.3. Faz aç kontrolü.....	45
3.3.2. FACTS (Esnek AC iletim düzeneği)'in amaçları	48
3.3.2.1. Tristör kontrollü FACTS kontrol cihazları	48
3.3.2.1.1. SVC (Sabit reaktif güç dengeleyici)	49

3.3.2.1.2. TCSC (Tristör kontrollü seri kapasitör)	51
3.3.2.1.3. Faz kaydırıcı.....	52
3.3.2.2. Dönüştürücü tabanlı FACTS kontrol cihazları	53
3.3.2.2.1. STATCOM (Sabit senkron dengeleyici).....	55
3.3.2.2.2. SSSC (Sabit seri senkron düzenleyici).....	57
3.3.2.2.3 UPFC (Birleştirilmiş güç akış kontrolörü).....	58
3.3.2.2.4. IPFC (Hatlar arası güç akış kontrolörü).....	59

BÖLÜM 4. TÜRKİYE SİSTEMİ'NDE YERALAN GÜÇ KALİTESİ MONİTÖR NOKTALARI VE ÖLÇÜM SONUÇLARI.....	61
4.1. Giriş.....	61
4.2. Türkiye Sistemi'nde Güç Kalitesi Monitörleri	62
4.3. Standartlarda Yeralan Çukur Değerlendirme Tekniklerinin 1. İletim Bölgesi'ne Uygulanması	64
4.3.1. Gerilim çukur indeksleri	64
4.3.2. 1. İletim Bölgesi'nde havai hatlar için gerilim çukur tablosunun oluşturulması	68
4.4. 400kV ve 154kV Gerilim Seviyelerindeki Havai Hat Tiplerine Göre Çukur Değerlendirmesi	74
4.4.1. Türkiye Sistemi'nde havai hatlarda gerilim çukur değerlendirme	74
4.4.2. 1. İletim Bölgesi'ndeki havai hatlarda gerilim çukur değerlendirme	79

BÖLÜM 5. TÜRKİYE SİSTEMİ VE SİSTEME AİT GERİLİM ÇUKUR ANALİZİ SONUÇLARI.....	83
5.1. Giriş.....	83
5.2. Türkiye Sistemi'nin 1. İletim Bölgesi'ne Ait Analiz Sonuçları.....	84
5.2.1. Türkiye Sistemi'nin 1. İletim Bölgesi'ne ait gerilim çukur değerlendirme ..	85
5.2.2. Korunmasız alanın 1. İletim Bölgesi'nde analizi.....	89
5.2.2.1. 400kV gerilim seviyesine ait korunmasız alan	89
5.2.2.2. 154kV gerilim seviyesine ait korunmasız alan	91
5.3. Türkiye Sistemi 1. İletim Bölgesi'ne Gerilim Çukur Etkisini Azaltma Yöntemlerinin Uygulanması	95
5.3.1. Arıza sayısının azaltılması	95
5.3.1.1. Farklı yüklenme durumları.....	95
5.3.2. Sistem yapısında değişiklik yapılması	97
5.3.2.1. Generatör ilavesi	97
5.3.2.2. Hat ilavesi	103
5.3.3. Sistemde zayıf noktalara cihaz yerleştirilmesi	105
5.3.3.1. SVC (Sabit reaktif güç dengeleyici)	106
5.3.3.2. STATCOM (Sabit senkron dengeleyici).....	107

BÖLÜM 6. SONUÇLAR.....	111
------------------------	-----

KAYNAKLAR	117
-----------------	-----

EKLER.....	123
------------	-----

ÖZGEÇMİŞ	129
----------------	-----

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: Alibeyköy Barası'nda a fazında oluşan çukur olayı	16
Şekil 2.2: Çukur gerilim genliğinin efektif ve temel değerlerinden hesaplandığı durumlardaki değeri.	17
Şekil 2.3: Karakteristik gerilim (KG) yaklaşımına göre çukur genliği ve PN-faktörü	18
Şekil 2.4: Arıza öncesi (kesikli çizgi) ve arıza sırasında (düz çizgi) her bir çukur tipi için gerilim fazörleri.....	19
Şekil 2.5: Gerilim çukuru için gerilim bölücü modeli.	23
Şekil 2.6: Arıza sırasındaki gerilim hesabını açıklama da kullanılan örnek sistem. ...	25
Şekil 2.7: Hesaplama için örnek sistem	26
Şekil 2.8: 1. İletim Bölgesi'nde teoremin uygulandığı bara noktaları	30
Şekil 2.9: Kısa devre hesabı ve analizle elde edilen eğriler	32
Şekil 3.1: a) Tüm hattın tek devre kesicisiyle korunduğu sistem yapısı, b) Seçici koruma	35
Şekil 3.2: Gerilim çukuru sırasında sürücünün davranışı	38
Şekil 3.3: Destekleyici dönüştürücülü evirici devresi.....	39
Şekil 3.4: İdeal paralel dengeleyici.	43
Şekil 3.5: Seri dengeleyici.	44
Şekil 3.6: Faz aç düzenleyici	46
Şekil 3.7: Geleneksel tip faz kaydırıcı.	47
Şekil 3.8: Geleneksel tristör tabanlı FACTS kontrol cihazları.	49
Şekil 3.9: Sabit Reaktif Güç Dengeleyici (SVC).	50
Şekil 3.10: SVC'nin V-I karakteristiği	51
Şekil 3.11: Hattın orta noktasına bağlanan SVC ile güç iletim kapasitesindeki artış	51
Şekil 3.12: Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC)'e ait temel şema	52
Şekil 3.13: Tristör kontrollü faz kaydırıcı transformatör şeması	53
Şekil 3.14: Anahtarlama dönüştürücü tabanlı, eş zamanlı gerilim kaynağı.....	54
Şekil 3.15: Anahtarlama dönüştürücü tabanlı FACTS kontrol cihazları	55
Şekil 3.16: a) STATCOM yapısı, b) Kararlı halde güç değişim diyagramı.....	56
Şekil 3.17: STATCOM'un V-I karakteristiği.	57
Şekil 3.18: Sabit eş zamanlı seri dengeleyici gibi çalışan gerilim kaynağı	58
Şekil 3.19: Seri dengeleme geriliminin farklı değerlerine göre $P - \delta$ değişimi	58
Şekil 3.20: UPFC'nin temel yapısı	59
Şekil 3.21: UPFC kontrollü iletim hattında $P - \delta$ değişimi	60
Şekil 4.1: Güç kalitesi monitör sistem yapısı.....	63
Şekil 4.2: Türkiye İletim Sistemi'nde yer alan güç kalitesi monitör noktaları.	63
Şekil 4.3: Alibeyköy-Beykoz (400kV) hattında gerilim çukuru olayı.....	64
Şekil 4.4: Alibeyköy-Beykoz hattına ait zamana bağlı çukur genlik-sayı değişimi ..	71
Şekil 4.5: Alibeyköy-Beykoz hattının analiz ve monitörden elde edilen çukur genlik ve kümülatif sıklık değişimi.....	71
Şekil 4.6: Habibler-Zekeriya köy hattının zamana bağlı çukur genlik-sayı değişimi. 72	

Şekil 4.7: Habibler-Zekeriyaköy hattının analiz ve monitörden elde edilen çukur genlik ve kümülatif sıklık değişimi.....	72
Şekil 4.8: Zekeriyaköy-Paşaköy hattının zamana bağlı çukur genlik-sayı değişimi .	73
Şekil 4.9: Zekeriyaköy-Paşaköy hattının analiz ve monitörden elde edilen çukur genlik ve kümülatif sıklık değişimi.....	73
Şekil 4.10: 400kV’da, a) Tip 3C, b) Tip 2R, c) Tip 3Ph hatlarda çukur sıklık değişimi	76
Şekil 4.10(Devamı): 400kV’da, a) Tip 3C, b) Tip 2R, c) Tip 3Ph hatlarda çukur sıklık değişimi	77
Şekil 4.11: 154kV’da, a) Tip 477MCM, b) Tip 795MCM, c) Tip 1272 hatlarda çukur sıklık değişimi.....	78
Şekil 4.11(Devamı): 154kV’da, a) Tip 477MCM, b) Tip 795MCM, c) Tip 1272 hatlarda çukur sıklık değişimi.....	79
Şekil 4.12: 400kV’da a) Tip 3C, b) Tip 2R hatlarda çukur sıklık değişimi.....	81
Şekil 4.13: 154kV’da Tip 1272 hattında çukur sıklık değişimi.....	82
Şekil 5.1: Kullanılan yazılım programının akış şeması.	85
Şekil 5.2: Türkiye Sistemi 1. İletim Bölgesi’ne ait iletim sistem haritası.....	85
Şekil 5.3: 400kV’daki baralara ait karakteristik gerilim-çukur sıklığı değişimi.....	87
Şekil 5.4: 154kV’daki baralara ait karakteristik gerilim-çukur sıklığı değişimi.....	88
Şekil 5.5: Tüm sisteme ait karakteristik gerilim-çukur sıklığı değişimi	89
Şekil 5.6: Alibeyköy barasının üç faz arızasına göre korunmasız alan şekli	90
Şekil 5.7: Alibeyköy barasının tek faz toprak arızasına göre korunmasız alan şekli.	91
Şekil 5.8: Davutpaşa_A barasının üç faz arızasına göre korunmasız alan şekli	92
Şekil 5.9: Davutpaşa_A barasının tek faz toprak arızasına göre korunmasız alan şekli	93
Şekil 5.10: Zekeriyaköy_A barasının üç faz arızasına göre korunmasız alan şekli...	94
Şekil 5.11: Zekeriyaköy_A barasının tek faz toprak arızasına göre korunmasız alan şekli	94
Şekil 5.12: Alibeyköy barasında farklı yüklenme durumlarında çukur sıklığı-karakteristik gerilim değişimi	96
Şekil 5.13: Davutpaşa_A barasında farklı yüklenme durumlarında çukur sıklığı-karakteristik gerilim değişimi	96
Şekil 5.14: Zekeriyaköy_A ve Davutpaşa_A baralarına eklenen 82.4MVA’lık generatörün Davutpaşa_A barasına etkisi.....	97
Şekil 5.15: Zekeriyaköy_A ve Davutpaşa_A baralarına eklenen 82.4MVA’lık generatörün Zekeriyaköy_A barasına etkisi.....	98
Şekil 5.16: Zekeriyaköy_A ve Davutpaşa_A baralarına eklenen 82.4MVA’lık generatörün Alibeyköy barasına etkisi.....	99
Şekil 5.17: Zekeriyaköy_A ve Davutpaşa_A baralarına eklenen 133.689MVA’lık generatörün Davutpaşa_A barasına etkisi.....	100
Şekil 5.18: Zekeriyaköy_A ve Davutpaşa_A baralarına eklenen 133.689MVA’lık generatörün Zekeriyaköy_A barasına etkisi.....	100
Şekil 5.19: Zekeriyaköy_A ve Davutpaşa_A baralarına eklenen 133.689MVA’lık generatörün Alibeyköy barasına etkisi.....	101
Şekil 5.20: 17 ve 27 noktaya 11.25MVA gücünde generatör yerleştirildiğinde, Davutpaşa_A barasında sıklık değişimi	102
Şekil 5.21: 17 ve 27 noktaya 11.25MVA gücünde generatör yerleştirildiğinde, Zekeriyaköy_A barasında sıklık değişimi.....	102

Şekil 5.22: 17 ve 27 noktaya 11.25MVA gücünde generatör yerleştirildiğinde Alibeyköy barasında sıklık değişimi.....	103
Şekil 5.23: Alibeyköy barasında, hat ilavesiyle gerilim çukur sıklığındaki değişim	104
Şekil 5.24: Davutpaşa_A barasında, hat ilavesiyle gerilim çukur sıklığındaki değişim	104
Şekil 5.25: Zekeriyaköy_A barasında, hat ilavesiyle gerilim çukur sıklığındaki değişim	105
Şekil 5.26: Atışalanı_A barasındaki (yakın nokta) üç faz arızası sırasında, Davutpaşa_A noktasında yeralan SVC'nin farklı güçleri için çukur genlikleri	108
Şekil 5.27: Aksaray_A barasında (uzak nokta) üç faz arızası sırasında, Davutpaşa_A noktasında yeralan SVC'nin farklı güçleri için çukur genlikleri	108
Şekil 5.28: Atışalanı_A barasında (yakın nokta) üç faz arızası sırasında, Davutpaşa_A noktasında yeralan STATCOM'un farklı güçleri için çukur genlikleri	110
Şekil 5.29: Aksaray_A barasında (uzak nokta) üç faz arızası sırasında, Davutpaşa_A noktasında yeralan STATCOM'un farklı güçleri için çukur genlikleri	110

TABLolar DİZİNİ

Tablo 2.1: Karakteristik gerilim ve PN-Faktörü tanımı.....	18
Tablo 2.2: Çukur tipinin transformatör bağlantı şekline göre değişimi.....	21
Tablo 2.3: Simetri değıştiricisi ile fazlardaki değışimin gerilim çukur tipine etkisi.....	22
Tablo 2.4: Tek faz toprak arızası için gerekli dizin empedansları.....	30
Tablo 2.5: Arıza öncesi gerilim değeri.....	31
Tablo 4.1: 400kV gerilim seviyesi için indeksler	67
Tablo 4.2: 154kV gerilim seviyesi için indeksler	67
Tablo 4.3: 36kV gerilim seviyesi için indeksler	68
Tablo 4.4: Alibeyköy-Beykoz hattında bir yıl süresinde oluşan çukur sayısının genlik-zaman değeri.....	69
Tablo 4.5: Alibeyköy-Beykoz hattında bir yılda kilometre başına oluşan çukur sıklığının genlik-zaman değeri.....	69
Tablo 4.6: Alibeyköy-Beykoz hattının bir yıllık kümülatif çukur dağılımı.....	70
Tablo 4.7: 400kV gerilim seviyesindeki hat tipleri ve güç-akım taşıma kapasiteleri	74
Tablo 4.8: 154kV gerilim seviyesindeki hat tipleri ve güç-akım taşıma kapasiteleri	74
Tablo 4.9: 1. İletim Bölgesi'nde monitörlerin bulunduğu hatlar, tipleri, uzunlukları ve bir yıllık sürecin yaz ve kış dönemlerine ait gerilim çukur sıklıkları.....	80
Tablo 5.1: Türkiye Sistemi 1. bölgesine ait iletim bileşenleri (2008).....	86
Tablo 5.2: Türkiye Sistemi 1. bölgesine ait hat uzunlukları (2008).....	86
Tablo 5.3: Yakın noktada oluşturulan 3 faz arızasında SVC'nin bağlı olduğu ve olmadığı durumlara ait gerilim çukur genliği sonuçları.....	106
Tablo 5.4: Uzak noktada oluşturulan 3 faz arızasında SVC'nin bağlı olduğu ve olmadığı durumlara ait gerilim çukur genliği sonuçları.....	107
Tablo 5.5: Yakın noktada oluşturulan 3 faz arızasına ait STATCOM'un olduğu ve olmadığı durumlardaki gerilim çukur genliği sonuçları.....	109
Tablo 5.6: Uzak noktada oluşturulan 3 faz arızasına ait STATCOM un olduğu ve olmadığı durumlardaki gerilim çukur genliği sonuçları.....	109

SİMGELER DİZİNİ

0, 1, 2:	Simetrik bileşenler –sırasıyla sıfır, pozitif ve negatif-
α :	Empedans açısı
δ :	İletim açısı
Ψ :	Faz geriliminin açısı
a :	e^{j120}
A Tipi:	Üç faz arızasının neden olduğu çukur tipi
B, D Tipi:	Tek faz toprak arızasının neden olduğu çukur tipi
B_{Cmax} :	En yüksek kapasitör admitans değeri
C Tipi:	İki faz ve iki faz toprak arızalarının neden olduğu çukur tipi
$C_1, \dots, C_n$:	Tristör kontrollü seri kapasitörde seri bağlı kapasitör grupları
E:	Bara gerilimi
I :	Hat akımı
I_{Cmax} :	STATCOM'un en yüksek kapasitif akımı
I_{dc} :	DC akım
I_{mr} :	Hattın orta noktasına paralel dengeleyici bağlandığı durumda alıcı uçtaki hattın akımı
I_{sm} :	Hattın orta noktasına paralel dengeleyici bağlandığı durumda verici uçtaki hattın akımı
I_q :	STATCOM'da sisteme verilen veya sistemden çekilen reaktif güç akımı
k :	Seri dengeleyici derecesi
ℓ_{kri} :	Kritik mesafe
P :	İletilen aktif güç
P_0 :	$\delta=90^\circ$ olduğunda iletilen en yüksek güç değeri
P_a :	Faz açısı kontrolünde iletilen aktif güç
P_{max} :	İletilen maksimum aktif güç
P_p :	Paralel dengeleyici bağlandığı durumda iletilen aktif güç
P_{pq} :	UPFC'nin sisteme verdiği veya sistemden çektiği aktif güç değeri
P_{ref} :	Kontrol için gerekli referans aktif güç
P_s :	Seri dengeleyici bağlandığı durumda iletilen aktif güç
PN-Faktörü:	Pozitif Negatif Faktörü (Positive-Negative Factor)
Q :	Reaktif güç
Q_p :	Paralel dengeleyicinin reaktif gücü
Q_{pq} :	UPFC'nin sisteme verdiği veya sistemden çektiği reaktif güç değeri
Q_{ref} :	Kontrol için gerekli referans reaktif güç
Q_{SC} :	Seri dengeleyicinin reaktif gücü
R:	Hat direnci
S_1 :	Simetri faz değişiminin saat yönüyle aynı olduğu durumdaki matris
S_2 :	Simetri faz değişiminin saat yönüyle zıt olduğu durumdaki matris
S_3 :	Simetri faz değişiminin olmadığı durumdaki matris
S_k'' :	Kısa devre kesme gücü

T_1 :	Fazör değişimlerine neden olmayan transformatör tipi
T_2 :	Sıfır dizi fazörünü yok eden transformatör tipi
T_3 :	Fazör değişimlerine neden olan transformatör tipi
U_1 :	Pozitif dizi gerilimi
U_2 :	Negatif dizi gerilimi
U_0 :	Sıfır dizi gerilimi
Δv :	Arıza öncesi gerilimleri arasındaki fark
$v_{aö}$:	Arıza öncesi gerilim
v_{as} :	Arıza sırasındaki gerilim
V :	Gerilim genliği
V :	Tristör kontrollü faz kaydırıcının olduğu durumdaki sistemin faz gerilimi
V_a :	Tristör kontrollü faz kaydırıcının olmadığı durumda sistemin a fazının gerilimi
V_A :	Faz kaydırıcının görünür gücü
$V\sigma$:	Faz aç kontrolü yapıldığında faz kaydırıcı gerilimi
σ :	Faz aç kontrolünde istenilen faz kaymasının derecesi
$V_{aö}$:	Arıza noktalarının sayısı kadar satır ve sütun içeren arıza öncesi matris
V_{as} :	Arıza sırasında her bir baraya ait gerilimi içeren çukur matrisi
$V_{aM}^{önce}$:	M barasının arıza öncesi gerilim genliği
V_{azl} :	Gerilim çukuru sırasında arta kalan gerilim
V_C :	Seri kapasitörün gerilimi
V_{dc} :	STATCOM'da kondansatörün DC gerilim değeri
V_{eff} :	Verici uç gerilimi ile UPFC'nin sisteme verdiği gerilimin fazörel toplamı
$V_F^{önce}$:	F barasının arıza öncesi gerilim genliği
V_g :	Generatör gerilimi
V_m :	Orta nokta gerilimi
V_{mr} :	Alıcı uç ile orta nokta arasındaki gerilim
V_q :	SSSC'nin sisteme verdiği veya sistemden aldığı reaktif gerilim
$V_q(\xi)$:	SSSC için verilen dengeleme gerilimi
ξ :	SSSC için kontrol parametresi
V_{pq} :	UPFC'nin sisteme verdiği veya sistemden aldığı gerilim
V_r :	Alıcı uç gerilimi
V_s :	Verici uç gerilimi
V_{self} :	Verici uç gerilimi
V_{sm} :	Verici uç ile orta nokta arasındaki gerilim
$V_T^{önce}$:	T barasının arıza öncesi gerilim genliği
V_{xmax} :	Hat reaktansının en yüksek gerilim değeri
V_{xmin} :	Hat reaktansının en düşük gerilim değeri
V_{Xeff} :	Hat reaktansının gerilimi ile UPFC'nin sisteme verdiği gerilimin fazörel toplamı
X :	Hat reaktansı
X_C :	Seri dengeleyicinin değeri
X_{eff} :	Etkin iletim reaktansı
z_{jj} :	j barasında köşe empedansı

z_{kj} :	k ve j baraları arasındaki geçiş empedansı
Z_A :	PCC ile arıza noktası arasındaki empedans
Z_C^{012} :	F ve T baraları arasındaki hattın sıfır, pozitif ve negatif dizin empedansları
$Z_{FF}^{012}/Z_{TT}^{012}$:	F ve T baralarının sıfır, pozitif ve negatif dizin köşegen empedansları
Z_{MF}^{012} :	M ve F noktaları arasındaki geçiş dizin empedansları
Z_{MT}^{012} :	M ve T noktaları arasındaki geçiş dizin empedansları
Z_K :	PCC noktasındaki kaynak empedansı

KISALTMALAR DİZİNİ

1FT:	Bir faz toprak arızası
3F:	Üç faz arızası
95%:	Sistemde 0.9-0.1pu.'lik karakteristik gerilim aralığında %95 oranında rastlanılan çukur sıklık indeksi
ASDs:	Ayarlanabilir Hız Sürücüler (Adjustable Speed Drivers)
AT :	Akım transformatörü (Current Transformer)
CBEMA:	Bilgisayar İşletim Cihazı İmalat Ortaklığı (Computer and Business Equipment Manufacturers' Association)
C:	Cardinal (Havai hat tipi)
CS:	Güç kalitesi monitörü yazılım programı (Client Software)
DG:	Dağıtılmış Üretim (Distributed Generation)
DVR:	Dinamik Gerilim Düzenleyici (Dynamic Voltage Restorer)
EDF:	Fransa Elektrik Şirketi (Electric de France)
EMTP :	Elektromanyetik geçici rejim analizi programı
EPRI :	Elektrik Güç Araştırma Enstitüsü (Electric Power Research Institute)
FACTS:	Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri
GT:	Gerilim transformatörü
IEC:	Uluslar arası Elektroteknik Birliği (International Electrotechnical Commission)
IEEE:	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (The Institute of Electrical and Electronics Engineers)
IPFC:	Hatlararası güç akış kontrolörü (Interline Power Flow Controller)
ITIC:	Bilgi Teknolojisi Endüstri Kurulu (Information Technology Industry Council)
LDC:	Yükte oluşan Çukurun Maliyet İndeksi (Load Dip Cost)
LDI:	Yük Çukur İndeksi (Load Dip Index)
LPQI:	Leonardo Güç Kalitesi Projesi
MCM:	Havai hat tipi
MGKP:	Milli Güç Kalitesi Projesi
MVSVS:	Orta Gerilim Sabit Gerilim Anahtarlama Sistemi (Medium Voltage Static Voltage Switch)
NPL:	Ulusal Güç Laboratuvarı (National Power Laboratory)
Ortalama:	Sistemin 0.9-0.1pu.'lik karakteristik gerilim aralığındaki ortalama çukur sıklık indeksi
PCC:	Ortak bağlantı noktası (Point of Common Coupling)
Ph:	Pheasant (Havai hat tipi)
PLC:	Programlanabilir Lojik Kontrolör (Programmable Logic Control)

PMU:	Fazör Ölçüm Ünitesi (Phasor Measurement Unit)
PSCAD	
/EMTDC:	Elektromanyetik Güç İletim Yazılım Programı
R:	Rail (Havai hat tipi)
SAIFI	: Sistemin Ortalama Kesinti İndeksi (System Average Interruption Frequency Index)
SARFI-X:	Sistemin X gerilim genliğinde ortalama sıklık indeksi (System Average RMS Frequency Index)
SIARFI-X:	Sistem Ani Ortalama RMS Sıklık İndeksi
SIMPOW	
DIPS:	Güç Sistemlerinde gerilim çukur analizi yapmakta kullanılan yazılım programı (SIMulation of POWER systems)
SMARFI-X:	Sistem Geçici Ortalama RMS Sıklık İndeksi
SSR:	Alt senkron rezonans
SSSC:	Sabit senkron düzenleyici
STARFI-X:	Sistem Anlık Ortalama RMS Sıklık İndeksi
STATCOM:	Sabit Senkron Dengeleyici (STATic Synchronous COMPensator)
SVC:	Sabit Reaktif Güç Dengeleyici (Static Var Compensator)
SVS:	Senkron gerilim kaynağı (Synchronous Voltage Source)
TCR:	Tristör anahtarlama reaktör (Thyristor Switching Reactor)
TCSC:	Tristör kontrollü seri kapasitör (Thyristor Controlled
TEİAŞ :	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TSC:	Tristör anahtarlama kapasitör (Thyristor Switching Capacitor)
TÜBİTAK:	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
TVR:	Tristörlü Gerilim Düzenleyici (Thyristor Voltage Restorer)
UGKMG:	Ulusal Güç Kalitesi Monitörleme Merkezi
UPFC :	Birleştirilmiş güç akış kontrolörü (Unified Power Flow Controller)
VCC:	Vektör Akım Kontrolörü (Vector Current Controller)
VSC:	Gerilim Kaynağı Dönüştürücüsü (Voltage Source Converter)

TÜRKİYE ENERJİ İLETİM SİSTEMİ ÜZERİNDE GERİLİM ÇUKURU ANALİZLERİ

Elif İNAN

Anahtar Kelimeler: Gerilim Çukuru, Güç Kalitesi Monitörü, Tahmini Yaklaşım Yöntemleri, Gerilim Çukur Sıklığı

Özet: 21 Elektrik Bölgesi'nden oluşan Türkiye İletim ve Dağıtım Sistemi'nin tamamı 2011 yılı itibariyle dağıtım seviyesinde özelleşmiştir. Özelleşen dağıtım firmalarının artan rekabet alanında kendilerine yer edinebilmesi tüketiciye sağladıkları gücün kaliteli ve ekonomik olmasına bağlıdır. Bu öngörülerek başlatılan tez çalışmasıyla dağıtım firmaları, sistem planlayıcıları ve tüketicilere, gerilim çukurunun Türkiye Sistemi'ndeki boyutu hakkında değerlendirmeler yapılmıştır.

Gerilim çukuruna ve çukur sıklığına ait değerlendirme Türkiye'nin hem endüstriyel hem de nüfus olarak en yoğun bölgelerinden biri olan, İstanbul ve çevresini içeren 1. İletim Bölgesi'nin, 400kV ve 154kV gerilim seviyeleri için gerçekleştirilmiştir. Yapılan değerlendirme hem tahmini yaklaşım yöntemlerinden biri olan arıza durum yöntemini kullanan SIMPOW DIPS yazılım programı ile gerçekleştirilmiş; hem de 2006'da başlatılan Milli Güç Kalitesi Projesi (MGKP) kapsamında 250 noktaya yerleştirilen güç kalitesi monitörlerinin Nisan 2009-Mart 2010 süresince bir yıl izlenmesiyle elde edilen verilerle doğrulanmıştır.

Monitörlerden kaydedilen verilerden IEEE P1564 Taslağı'nda etkin gerilim genliği ve zaman karakteristikleriyle tanımlanan çukur indeksleri ve tablosu, incelenen sistem için ilk kez elde edilerek kaynakçaya kazandırılmıştır. Bu çalışmayla ilk defa gerçekleştirilen diğer bir değerlendirme ise çukur sıklığının, Türkiye İletim Sistemi'nde monitörlerin bulunduğu 400kV ve 154kV gerilim seviyelerindeki havai hatlarda uzunluk, tip ve akım taşıma kapasitelerine göre değişiminin incelenmesidir. Bilgisayar analizinde kullanılan hat, transformatör, generatör, arıza oranı vb. veriler gerçek sistem verileri olup TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim A.Ş.)'dan temin edilmiştir.

Hem analiz hem de güç kalitesi monitör sonuçları gerilim çukurunun Türkiye Sistemi'nde çok sık rastlanılan bir sorun olduğunu, iletim, orta gerilim dağıtım ve son tüketiciyi ciddi boyutta etkilediğini ortaya koymuştur.

SHORT DURATION VOLTAGE DIP ANALYSIS ON TURKISH TRANSMISSION SYSTEM

Elif İNAN

Key Words: Voltage Dip, Power Quality Monitoring, Stochastic Approach Methods, Voltage Dip Frequency

Abstract: Turkey Transmission and Distribution System, which has 21 Electricity Region, is privatized in distribution level in 2011. The primary objective is to ensure the delivery of electricity to consumers in an adequate, quality, continuous and low-cost manner. Privatization increases the importance of continuity and quality of electricity. The aim of this thesis is to evaluate voltage dip of Turkey System in order to provide information about the dip event to system operators, utilities and customers.

The voltage dip evaluation has been implemented for 1st Transmission Region of Turkey System, which is the most heavily loaded area in both industrial and population meanings and also includes İstanbul city, at 400kV and 154kV voltage levels. The assessment is implemented computer simulation by SIMPOW DIPS program based on fault position method for calculation of voltage dip frequency and confirmed by measurements which are obtained from power quality monitors located to 250 points as a part of National Power Quality Project (NPQP). The measured data are collected for one year, between april 2009 and march 2010.

Suggested dip evaluation techniques based on RMS variation and duration such that dip indices and cumulative dip table according to IEEE 1564 draft are applied to the chosen area by using measured data. Literature does not contain any evaluation obtained from dip indices or dip tables for Turkey System. Therefore, the table and indices results can be labeled as the most important part of the thesis originality. Real system data of transformers, overhead lines, generators, fault rates etc. for computer analysis are obtained from TEİAŞ (Turkey Electricity Transmission Co Inc.).

Both computer simulation and power quality monitoring results are shown the importance of the dip event and necessity of implement the study all over the system.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Giriş

Elektrik güç sistemleri, elektrik enerjisini ekonomik ve çevresel etkilerden en az etkilenecek şekilde üretilip, üretilen enerjiyi son tüketiciye yüksek verim ve güvenilirlikle, sabit bir frekans ve gerilim de iletebilecek şekilde tasarlanmalıdır. Bir güç sisteminin en iyi işletimi, tasarım aşamasında gerçekleştirilecek güvenilirlik ve maliyet analizleriyle sağlanabilir. Enerji piyasasındaki gelişmeler sistem tasarım ve işletiminde yeni düzenlemelere gidilmesini gerektirir.

Elektrik endüstrisinin tekrar yapılandırılması nedeniyle, günümüzde elektrik dağıtım işletimi tek bir firmadan ziyade birbiriyle sürekli rekabet halinde olan birçok bağımsız firma tarafından sağlanır. Dağıtım firmaları tüketiciye kaliteli güç sağlamakla yükümlüdür. Dağıtım seviyesinde güç kalitesinin sağlanması ve devamlılığı, iletim seviyesindeki olayların dağıtım sistemine intikal etmesinden dolayı, büyük oranda iletim sistem davranışına bağlıdır. Sistem bozukluklarının güvenilirlik ve güç kalitesi üzerindeki etkilerinin detaylı olarak değerlendirilmesi ve değerlendirme sonuçlarının sistem planlamasında hesaba katılması önemlidir. Bu değerlendirmeler, hem iletim hem de dağıtım sisteminin, güç iletiminde istenilen seviyeye ulaşmasına ve kayıplardan kaynaklı maddi zararların ülke bazında aşağı çekilmesine yardımcı olur. Anlık iyileştirmeler yerine uzun dönemli, uygunluğu ve faydası sistemde olabilecek ileriye yönelik değişiklikler hesaba katılarak yapılan analizlerle belirlenmiş çözüm yöntemleri güç kalitesinde sürekliliği sağlar.

Endüstriyel tüketicilere kaliteli güç sağlanamaması, üretim sürecinin etkilenmesinden dolayı ciddi maddi zararlara yol açar. Her geçen gün kullanım alanı artan yarı iletken teknolojisiyle, cihazların gerilim değişimine duyarlılığı artmakta bu durum tüketicileri de olumsuz etkileyerek rekabet ortamını sınırlamaktadır. Hassas yüklere sahip tüketicilerin en fazla karşılaştıkları güç kalitesi problemleri kesinti ve

kısa süreli gerilim çukurudur. Bu bozulmaların olasılık, tip, genlik ve şekillerinin bilinmesi tüketiciye sahip oldukları ayarlanabilir hız sürücüsü, bilgisayar, programlanabilir lojik kontrolör vb. cihazlarının yılda kaç defa bu bozulmalara maruz kalacağı bilgisinin sağlanmasında ve bu bilgiye sahip tüketicinin en uygun çukur azaltma yöntemini seçmesinde fayda sağlar. Bu bilgi dağıtım firmaları tarafından, tüketicilerin tiplerine ve güç taleplerine göre en az zararla hangi indirici merkezden, hangi zaman diliminde beslenmesinin daha uygun olacağının belirlenmesinde ve güç sistem performansının iyileştirilmesinde de kullanılabilir.

Günümüzde güç sistem yapısında akıllı şebeke denilen farklı enerji kaynaklarıyla elektrik üretiminin gerçekleştirildiği, tüketicinin de üretime katılıp gerektiğinde enerji fazlasını şebekeye verdiği yapıya geçiş söz konusudur. 21 Elektrik Bölgesi'nden oluşan Türkiye İletim ve Dağıtım Sistemi'nde henüz akıllı şebeke yapısına geçiş olmamakla birlikte artan güç talebi ve azalan birincil enerji kaynakları gidişatın bu yönde olduğunu göstermektedir. 2002 yılında başlayan 21 Dağıtım Bölgesi'nin özelleşme süreci son bölgenin de 2011 yılı başında özelleşmesi ile son bulmuştur. Yapılan tez çalışmasıyla dağıtım firmaları ve sistem planlayıcılarına, Türkiye Sistemi'ne ait gerilim çukuru değerlendirmesi sunularak, olası çözüm yöntemleri değerlendirilmiştir.

Son zamanlarda, kısa süreli gerilim çukuru, tüketiciler ve cihaz imalatçıları için en önemli güç kalitesi sorunlarından biri haline gelmiştir. Başlangıçta gerilim çukuru ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalar motorun yol alması sırasında oluşan çukur etkisini içerirken 1990'lardan itibaren gerilim çukur zamanı ve sıklığı konularının önemi anlaşılacak yapılan çalışmalarda bu konulara ağırlık verilmiştir. 1990 yılında güç kalitesini değerlendirme amacıyla üç büyük monitörleme çalışması Amerika ve Kanada'da uygulanmıştır[1]. 120V AC prizlerde rastlanabilecek güç bozulmalarının yapı ve genlikleri hakkında az bilgiye sahip olunması nedeniyle NPL (Ulusal Güç Laboratuvarı), 1990 yılında bu alanda güç kalitesi çalışması başlatmıştır. Aynı yıl Wagner ve grubu tarafından, çukurun olma sıklığı ve neden olduğu zararlarla ilgili endüstriyel alanda güç kalitesi odaklı bir çalışmanın yapılmasıyla imalatçı ve tüketicilerin bu konulara daha fazla ağırlık vermeleri gerektiği, gerilim çukur

probleminin üretim alanında en sık rastlanılan sorunlardan biri olduğu ortaya çıkmıştır[2].

1990'ların başında EDF (Fransa Elektrik Şirketi) gerilim çukuru seviyesini belirleyen kesinti ve tekrar kapama verileri tabanlı CREUTENSI yazılım programını geliştirmiştir. Bu çalışmada gerilim çukur genliği için istatistiksel dağılım modeli sunulmuştur[3].

Conrad ve grubunun 1991 yılında gerçekleştirdikleri çalışma, gerilim çukurunun kestirim yöntemleriyle değerlendirilmesine öncülük etmiştir. Aynı çalışmayla ortaya çıkan diğer bir konu ise üçgen-yıldız bağlı transformatörün gerilim çukuruna etkisi olmuştur. Transformatörün bağlantı şeklinin arıza tipine göre gerilim çukurunu değiştirdiği, faz-toprak arızasının üçgen-yıldız bağlı transformatörden sonra faz-faz arızasına dönüştüğü belirlenmiştir[4,5]. McGranaghan ve grubu Conrad'ın makalesini takip eden bir çalışma gerçekleştirerek arıza oranı ve şebekenin arıza cevabının birleşimiyle tahmini değerlendirme yapmıştır. Bu çalışma kaynakçaya yeni bir ifade olan, yük hassasiyetini ve şiddetli gerilim çukuruna neden olan potansiyel alanı ifade eden korunmasız alan tanımını kazandırmıştır[6].

Dorr 1990 yılında Amerika ve Kanada'da başlatılan monitörleme çalışmasından elde edilen verileri kullanarak 120V AC yüklerde kaydedilen bozulmaları CBEMA (Bilgisayar-İşletim Cihazı İmalat Ortaklığı) eğrisiyle karşılaştırmıştır. Görülen bozulmaların genellikle bilgisayarlar ve gerilim değişimine duyarlı elektronik cihazlarda devre dışı kalmalarına neden olduğu sonucuna varmıştır[7].

EPRI'nin (Elektrik Güç Araştırma Enstitüsü) gerçekleştirdiği "Dağıtım Seviyesinde Güç Kalitesinin Değerlendirilmesi" çalışması kapsamında 1993 ile 1996 yılları arasında, 4.16kV ile 34.5kV gerilim seviyelerinde toplamda 227 noktaya monitör yerleştirilmiştir. Yapılan ölçümlerle dağıtım seviyesinde monitörlemenin önemi vurgulanmış ancak iletim seviyesinde değerlendirme yapılmamıştır[8].

Bollen 1993 yılında endüstriyel alanda, kısa ve uzun süreli kesintiler ile kısa süreli gerilim çukuru etkisini Monte Carlo yöntemiyle inceleyerek güvenilirlik analizi

gerçekleştirmiştir. 1995 yılında radyal sistemlerde çukur genliğinin hesaplanmasında kullanılabilen basit bir gerilim bölücü modeli geliştirmiş, belirli bir gerilim genliğindeki çukura neden olan arıza uzaklığını hesaplayan kritik mesafe yöntemini basit eşitliklerle tanımlamıştır. İlerleyen yıllarda gerçekleştirdiği diğer bir çalışmasıyla, gerilim bölücü modelini alt iletim ring sistemine uygulamış, arıza sırasında oluşan gerilim genliğini arıza oranıyla birleştirerek çukur sıklığını elde etmiştir. Ayrıca belirli çukur genliğinin neden olduğu devre dışı kalmalarında, faz aç kaymasını ifade eden kritik faz aç atlaması değerini belirlemiştir[9,10,11].

1994 senesinde Becker ve grubunun yaptığı çalışmayla güvenilirlik açısından gerilim çukurunun önemini ve güvenilirlik ile gerilim değişimine duyarlı cihazın maliyeti arasında en iyi seçimin yapılabilmesi için sistem çukur değerlendirmesinin gerekliliğini vurgulanmıştır[12]. Schwartzberg ve Doncker 1995 senesinde üç fazlı orta gerilim sabit geçiş anahtarlı (MVSVS) sistemin iki bağımsız kaynak arasında aktarım sağlayarak kritik bir yükte çukur etkisini önlemesine ilişkin bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu sistem ATP/EMTDC programında modellenerek gerilim çukur etkisini azalttığı görülmüştür[13].

Koval ve Hughes 1996 yılında nominal gerilimin 90%'ını eşik değeri olarak Kanada'nın endüstriyel ve ticari bölgelerinde oluşan gerilim çukur sıklıklarını kaydetmişlerdir. Kayıtlar, çukur olayının yüksek oranda endüstriyel bölgelerde kullanılan cihazlardan kaynaklandığını ortaya çıkartmıştır[14]. Ortmeyer ve Hiyama 1996 yılında radyal şebeke için gerilim çukur eğrileriyle aşırı akım korumasının zaman koordinasyonunu gerçekleştirmiştir. Mevcut kısa devre akım seviyeleri yük noktasındaki çukur genliğiyle birleştirilerek, yük noktası için bir gerilim-akım karakteristiği elde edilmiştir. Daha sonra bu karakteristik gerilim değişimine duyarlı yükün, gerilim tolerans eğrisiyle değerlendirilerek koruma cihazının akım-zaman grafiği tanımlanmıştır. Ayrıca arızaların neden olduğu tüm potansiyel çukurları gösteren gerilim-zaman grafiğini ifade eden kapsama alan haritası oluşturulmuştur[15,16].

Bollen ve grubu 1997 senesinde daha önce geliştirdiği kritik mesafe yöntemi eşitliklerini kompleks olarak ifade ederek yenilemiş ve daha gerçekçi sonuçlar elde

etmiştir[17]. 1998 yılında kritik mesafe yöntemini diğer bir gerilim çukur kestirim yöntemi olan arıza durum yöntemiyle kıyaslayarak arıza durum yönteminin gözlü sistemler için daha uygun olduğu sonucu elde edilmiştir[18,19].

Qader 1999 yılında arıza durum yöntemini bir güç sistemine uygulayarak baralarda oluşacak olası çukur sayısını belirlemiştir. Makalede tahmini değerlendirmeden elde edilen sonuçlar grafik olarak verilmiş, güç sisteminin gerilim çukur kalitesini gösteren çukur haritası oluşturulmuştur. Bu çalışmayla olası çukur sayısının sistemin her noktasında farklılık gösterdiği, tek bir noktaya ait gerilim çukurunu karakterize etmede ortalama sayının kullanılamayacağı ve üretim planlamasında olası çukur sayılarının belirlenebilmesi için monitörlemenin gerekli olduğu sonuçlarına varılmıştır[20].

Güç kalitesi monitörü ve tahmini sonuçlarla monitörlerden elde edilen verilerin karşılaştırılması ilk olarak 2000 yılında Sike ve ardından da Carvalho ve grubu tarafından 2002 yıllarında gerçekleştirilmiştir. Sike gerçek ölçüm verilerini kullanarak arıza oran sonuçlarını ölçeklendirmiş bu değerleri kestirim yöntemine uygulayarak gerilim çukur karakteristiklerini elde etmiştir[21]. Carvalho ve grubu, Sike'ın elde ettiği sonuçları doğrulayan çalışmayla Brezilya iletim şebekesinin gerilim çukur analizini kestirim yöntemiyle gerçekleştirmiştir[22].

Arıza sonrası gerilim etkisi, şebeke yapıları, dağıtılmış üretim ve motor yükleri 2000 ve 2001 yıllarında Milanovic ve Gnativ tarafından incelenmiştir. Birbirini takip eden kısa devrelerde gerilim çukurundan etkilenen alanın, karmaşık yapılı sistemde arttığı görülmüştür. Ayrıca dağıtılmış üretimin çukur genliğini azalttığı sonucu elde edilmiştir[23,24]. Heine ve grubunun 2001 senesinde dağıtım sistem yapısının gerilim çukuruna etkisini incelediği çalışmada, kırsal ve kentsel yerleşim bölgelerindeki şebekelerde gerilim çukur sayısı incelenmiştir. Yapılan çalışmayla kent tüketicilerinin, kırsal bölgedekilere oranla daha az gerilim çukuruyla karşılaştığı görülmüştür[25].

McGranaghan'nın 2001 senesindeki çalışmasıyla güç kalitesi problemlerinin sistem operatörleri ve tüketiciler için önemi vurgulanarak güç kalitesi monitörünün bu

problemlerin belirlenmesindeki rolü ve gerekliliği irdelenmiştir. Ayrıca monitörleme cihaz tipleri, veri kayıt ve aktarım aşamaları ve farklı güç kalitesi problemleri için monitör uygulamaları açıklanmıştır[26].

Nielsen ve grubunun 2001 yılındaki çalışmasında örnek bir DVR (dinamik gerilim düzenleyici) tasarlanarak çalışma ve kontrol prensibinin daha iyi anlaşılması için üzerinde gerekli testler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çalışmada faz aç atlamalı gerilim çukur olayının etkisinin azaltılabilmesi için iki yöntemden bahsedilmiştir. Prototip DVR üzerinde yapılan testlerle iki yönteminde DVR kontrolü için uygulanabilir olduğu sonucuna varılmıştır[27].

Fonseca 2002’de gerçekleştirdiği çalışmasında Monte Carlo yöntemini ölçümlerden elde edilen arıza sırasındaki gerilim verileriyle analiz ederek gerilim çukur değerlendirmesi gerçekleştirmiştir. Monte Carlo uygulaması aynı yıl Martinez tarafından zaman domeninde EMTP yazılım programıyla da analiz edilmiştir[28,29].

Milanovic ve grubu 2004 senesinde tamamı tanımlanan korunmasız alan içerisine girmeyen, yani tüm hat boyunca oluşan arızanın tek bir nokta için aynı etki oluşturmadığı, hatları sınır geçiş hattı olarak adlandırarak bu hatların arıza dağılımının gerilim çukuruna etkisini incelemiştir. Sınır geçiş hatlarında toplam arıza sayısının değişmediği, gerilim çukur karakteristik ve sayısının farklı arıza dağılımları için değiştiği ve korunmasız alan şeklinin cihazın duyarlılık seviyesi dışında arızalı faz ile çalışılan faz arasındaki ilişkiye de bağlı olduğu sonuçları elde edilmiştir[30].

2004 yılında Perna ve grubu, gerilim çukur değerlendirilmesinde kullanılan ve önceki çalışmalarda tek bir nokta için ifade edilen indekslerin tüm sisteme ait genel indekslerin elde edilmesinde nasıl kullanılacağını açıklayan bir çalışma gerçekleştirmiştir. Gerilim çukur değerlendirmesinde hangi indekslerin kullanılmasının gerektiğine karar verilirken olayların ayrı olarak nasıl karakterize edileceği, tek bir noktaya ait çukur değerlendirilmesi yapmada en uygun yolun ne olduğu soruları da cevaplandırılmıştır[31]. Brezilya şebekesine ait gerilim çukur indekslerinin analiz edildiği bir çalışma aynı yıl Leborgne tarafından gerçekleştirilmiştir. Tek nokta ve sistem için gerilim çukur sayısının önemli oranda

arıza oranına bağılı olduğu, arıza tipinin çukur sıklık indeksini etkilediği sonuçları çıkartılmıştır[32].

Wang ve grubu tarafından 2004 senesinde gerçekleştirilen çalışmayla gerilim çukur indeksleri tanımlanmıştır. Belirli bir nokta veya hatta ait servis kalitesinin daha anlaşılabilir ve genel terimlerle değerlendirilmesine yardımcı olan çukur indeksleri; SARFI-X (Sistemin X Gerilim Genliğindeki Ortalama Sıklık İndeksi) ve SAIFI (Sistem Ortalama Kesinti Sıklık İndeksi) tanımlanmıştır. Yöntemin tüm arıza tiplerine uygulanması gerektiği ve motor yüklerinin etkilerinin ayrıca ele alınması gerekliliği belirtilmiştir[33]. Bu çalışma aynı yıl, Lee ve grubu tarafından gerilim çukur indeksleri açısından detaylandırılmıştır. Ayrıca cihazın gerilim çukur duyarlılığını grafiksel olarak gösteren, ana sistem bilgisayarlarının çalışma koşullarından elde edilen CBEMA eğrisinde yenilemeler yapılarak ITIC (Bilgi Teknoloji Endüstri Konseyi) eğrisi oluşturulmuştur. Gerilim çukurunun belirli bir noktadaki yüke etkisini ifade eden LDI (Yük Çukur İndeksi) ve bu çukurun neden olduğu ekonomik kayıp anlamına gelen LDC (Yük Çukur Maliyet İndeksi) ifadeleri ilk defa bu çalışmada kullanılmıştır[34].

Chang ve Yu 2004 senesinde, dağıtım sisteminde gerilim çukur etkisini azaltan cihazların, en ekonomik yerleşim noktalarının belirlenmesinde kullanılabilen bir algoritma geliştirmiştir. Algoritma her biri farklı çukur eşik değeri ve maliyet/bozulma karakteristiğine sahip tüketicilere uygulanmıştır[35]. 2004 yılında Macken ve ekibi gerilim değişimine duyarlı cihazı gerilim çukur etkisinden korumak için iki yöntem önermiştir. Yöntemlerden biri şebekeye bağılı dağıtılmış üretim sistemine seri kondansatörlü dönüştürücü ilave edilmesi, diğeri ise çukur sırasında hassas cihazın bulunduğu bölgenin mikro şebeke çalışma moduna aktarılmasıdır. Çalışmada bu iki yöntemin geçici olay performansları karşılaştırılmış, her iki yöntemin çukur etkisini yok etmede etkili olduğu ancak seri kondansatörlü dönüştürücü düzeneğinin diğeri bozulmalarda da gerilim kontrolü sağlarken mikro şebekenin sadece gerilim çukuru ve kesintilerde etkili olduğu gözlenmiştir[36].

Huweg ve grubu aynı yıl indüksiyon motorlarında gerilim çukur etkisinin azaltılmasında tristör tabanlı STATCOM (Sabit Senkron Dengeleyici) cihazının

kullanılmasını önermiştir. MATLAB programında gerçekleştirilen analizlerle STATCOM un diğer yöntemlerden daha hızlı cevap verdiği ve etki seviyesinin daha yüksek olduğu sonuçlarına varılmıştır[37].

Olguin ve grubu 2005 yılında IEEE'nin 24 baralı test sistemi üzerinde hem arıza durum yöntemi hem de Monte Carlo yaklaşımını kullanarak olası çukur sıklık değerlendirmesi yapmıştır. Bu çalışmayla SARFI-X indeksi hem her bir nokta hem de tüm sistem için hesaplanmıştır. Monte Carlo yaklaşımının çukur performansının değerlendirilmesinde tek bir yıla bağlı olmamasından dolayı arıza durum yönteminden daha kapsamlı olduğu sonucuna varılmıştır[38].

Park ve Jang 2005'te gözlü sistemde gerilim değişimlerine duyarlı yükler için korunmasız alanın oluşturulmasında yeni bir yöntem tanımlamışlardır. Önceki çalışmalarda kısa devre analiziyle elde edilen korunmasız alan bu çalışmada empedans matrisinden elde edilen gerilim çukur genliği ve faz açısı atlaması eşitlikleri kullanılarak oluşturulan bir algoritmayla biçimlendirilmiştir. Yöntem, IEEE'nin 30 baralı test sistemine uygulanmıştır[39].

Thasananutariya ve Chatratana'nın gerçekleştirdiği 2005 yılındaki çalışmada bir endüstriyel bölge için çukur sıklık tahmini yapılmıştır. İletim ve dağıtım seviyelerine arıza durum yöntemi uygulanarak bu bölgede 3 faz arızasının neden olduğu gerilim çukur sayıları hesaplanmıştır[40]. Leborgne ve Chen 2006 yılında farklı ölçme tekniğine sahip cihazlardan alınan verilerin çukur sınıflandırma algoritmalarının seçimini ve doğruluğunu etkilediğini belirterek aynı test sisteminden PMU (Fazör Ölçüm Ünitesi) ve güç kalitesi monitör ile alınan verileri karşılaştırmıştır. Ayrıca aynı test sisteminin analizini PSCAD/EMTDC programında gerçekleştirerek analiz sonuçlarıyla da kıyaslama yapmıştır. Hem pasif yük hem de dinamik yüklerin olduğu durum için yapılan değerlendirmede fazör ölçüm ünitesinin sadece pozitif dizi gerilim verisini almasından ve veri alma hızının güç kalitesi monitörüne göre düşük olmasından dolayı özellikle dengesiz gerilim çukurlarının değerlendirilmesinde yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır[41].

Gupta ve grubu tarafından 2006 senesinde yapılan çalışmada ilk olarak modern endüstride kullanılan PLC (Programlanabilir Lojik Kontrolör), ASD (Ayarlanabilir Hız Sürücüsü), bilgisayar ve kontaktörün gerilim hassasiyet aralıkları elde edilerek bu cihazların belirlenen aralıklardaki gerilim çukur davranışları incelenmiştir. Çalışmada 295 baralı bir sistemde rastgele seçilen 10 baraya bu dört cihazdan herhangi birinin bağlı olduğu varsayılarak analizler gerçekleştirilmiştir[42].

Aynı yıl Munoz ve ekibi, sistemle aynı fazlı, çukur öncesi ve ileri fazlı kompanzasyon tekniklerinin karşılaştırmalı analizini içeren bir çalışma gerçekleştirmiştir. Her bir yöntemin etkisinin daha detaylı anlaşılabilmesi için gerilim çukuru ve yükün güç faktörüne ilişkin analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda güç kalitesi açısından, çukur öncesi kompanzasyonun en etkili uygulama olduğu, sistemin aktif enerjisi azaltılmak isteniyorsa ileri faz kompanzasyon yönteminin kullanılması gerektiği belirtilmiştir[43].

Bongiorno ve Svensson'un 2007 senesinde VSC (Gerilim Kaynak Kontrolörü) kullanarak gerilim çukur etkisini azaltmaya yönelik çalışmasında VSC, VCC (İç Vektör Akım Kontrolörü) ve VCC için referans akımları hesaplayan dış gerilim kontrolöründen oluşan katlı kontrol mekanizmasından oluşturulmuştur. Bu yapıyla daha yüksek performans ve güç sağlayan kontrolörün elde edilebileceği belirtilmiştir. Kontrol sisteminin cevabının anlaşılması için PSCAD/EMTDC programında yapılan analizlerle, önerilen kontrol yönteminin dengesiz gerilim çukur etkisini azalttığı görülmüştür[44].

Pilo ve ekibi 2007 yılında dağıtım şebekesinde tasarım aşamasında gerilim çukurunun önlenmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada çukur azaltma yöntemleri, bozulmaların nedenleri üzerine yoğunlaşan, arıza sayısını azaltan aktif yöntemler ile arızanın neden olduğu gerilim çukur genliğine müdahale etmeye yönelik pasif önlemler olarak gruplandırılmıştır. Çalışma dağıtım sistem operatörü açısından çukur etkisini azaltma uygulamalarının seçimine odaklanmıştır. Bu nedenle arıza etki alanının sınırlandırılması, arıza oranını azaltmak için havai hat yerine yer altı kablolu tercih edilmesi veya uygun noktalara cihaz yerleştirilmesi önerileri uygunluk ve maliyet açısından değerlendirilmiştir[45].

Yine aynı yıl Velasco ve Arnedo, dağıtım sisteminde arızaların neden olduğu gerilim çukurunun koruma cihazlarının yerleşimi ve birbirleri arasındaki koordinasyona büyük oranda bağlı olduğunu belirterek DG(dağıtılmış üretim) ünitelerinin gerilim karakteristikleri üzerine etkisini koruma cihaz tiplerini dikkate alarak değerlendirmiştir. Cihazın devre dışı kalma olasılığını hesaba katan koruma sistemine ait çalışma değerlendirilmesi yapılarak karşılaştırma için basit bir model oluşturulmuştur[46].

Oliveira ve ekibi 2008 senesinde kısa süreli yapılan monitörlemeden elde edilen çukur indekslerinin geçerliliğini belirlemede kullanılabilecek bir olasılık yöntemi sunmuşlardır. Yöntem hat ve baraların arıza oranları, arıza öncesi gerilim değeri, arıza tipinin yayılımı, arıza noktası ve arıza direncini giriş verisi olarak almaktadır. Yöntem Brezilya sisteminin 230kV, 138kV, 34.5kV ve 13.8kV gerilim seviyelerine yük dağılımı, ana üretim merkezleri, kısa devre kesme gücü ve transformatör bağlantı grubuna dikkat edilerek yerleştirilen 12 monitörden 6 aylık sürede alınan çukur verilerine uygulanmıştır[47].

Nikolovski ve grubu 2008 yılında Avrupa’da gerçekleştirilen LPQI (Leonardo Güç Kalitesi Girişim Projesi) kapsamında Osijek şehrinde yer alan 110/35kV gerilim seviyelerindeki transformatörlere yerleştirilen güç kalitesi monitörlerinden 35kV’luk noktasından gerilim çukur verilerini değerlendirmiştir. Yer altı kablolarını besleyen bu gerilim seviyesi için alınan verilerle SARFI-X, SIARFI-X (Sistemin X Gerilim Genliğindeki 0.5-30 periyot Süreli Ortalama Sıklık İndeksi), SMARFI-X (Sistemin X Gerilim Genliğindeki 30 periyot-3 saniye Süreli Ortalama Sıklık İndeksi) ve STARFI-X (Sistemin X Gerilim Genliğindeki 3 saniye-1 dakika Süreli Ortalama Sıklık İndeksi) indekslerinin değerleri 30 günlük süre için elde edilmiştir. Elde edilen SARFI-X indeks değerleri ITIC tolerans eğrisine göre yorumlanmıştır[48].

2008’de Renders ve grubunun yaptıkları çalışmayla alçak gerilimde gerilim çukuru sırasında şebeke kuplajlı dağıtılmış üretim (DG) ünitelerinin davranışı değerlendirilmiştir. Asenkron generatör, senkron generatör ve dönüştürücü bağlı üniteler olmak üzere üç tip DG ünitesi ele alınmıştır. MATLAB/Simulink de gerçekleştirilen analizlerden yüksek ve orta gerilim seviyelerinin aksine alçak

gerilimde asenkron ve senkron generatörlü DG tipinin gerilim çukuruna etkisinin oldukça küçük olduğu, dönüştürücülü ünitelerinin dağıtım seviyesinde daha etkili olduğu sonuçları elde edilmiştir[49].

Ele alınan çalışmalardan anlaşıldığı gibi 1990'lardan önce kısa süreli gerilim çukurunun karakterize edilmesi, sistemdeki etkilerinin ve öneminin anlaşılmasına yönelik olan çalışmalar, günümüzde çukur etkisinin hem tüketiciler hem de sistem operatörleri açısından azaltılması alanına kaymıştır. Bunda her geçen yıl kullanım alanı artan güç elektroniği tabanlı, gerilim değişimine duyarlı cihazların ve bu cihazlarda gerilim çukurunun neden olduğu olumsuz etkilerin önemi büyüktür. Konu ile ilgili yapılan çalışmalar, kısa süreli gerilim çukur karakteristiklerinin elde edilmesinde, güç sistemindeki etkisinin kestirim yöntemleri ve güç kalitesi monitörleri ile değerlendirilmesinde ve azaltılmasında farklı birçok yöntem uygulamasının, yazılım programları kullanımının yaygın olduğunu göstermiştir.

Avrupa'nın en büyük iletim sistemlerinden biri olan Türkiye Sistemi'ne ait kısa süreli gerilim çukur değerlendirmesinin henüz kaynakçada yer almamış olması, TEİAŞ'dan (Türkiye Elektrik İletim A.Ş.) alınan bilgiler doğrultusunda özellikle endüstriyel alandaki tüketicilerden konuyla ilgili gün geçtikçe artan şikayetler ve önlenmesine yönelik taleplerin olması Türkiye Sistemi'nde kısa süreli gerilim çukurunun genlik, zaman ve sıklık değerlendirmesinin önemini ortaya çıkartmıştır. İletim seviyesindeki her olayın çoğunlukla dağıtım seviyelerinde de hissedilmesi gerilim çukurunun ilk aşamada iletim seviyesinde değerlendirilmesi gereğini ortaya koymaktadır. Bu amaçla gerçekleştirilen Doktora Tez çalışmasında 21 bölgeden oluşan Türkiye Sistemi'nde gerilim çukur değerlendirmesi için 1. İletim Bölgesi seçilmiştir. Bu bölgenin seçilmesinin nedenleri;

1. İstanbul ve çevresini kapsayan 1. İletim Bölgesi'nin, nüfus ve endüstriyel tesis yoğunluğunun en fazla olduğu bölge olması,
2. Gerçek sistem verileriyle yapılan analiz için TEİAŞ'dan alınan gerekli hat, transformatör, generatör vb. verilerinin en doğru ve detaylı olanlarının bu bölgeye ait olması,

3. TÜBİTAK, TEİAŞ ve bazı üniversitelerin katılımıyla 2006 yılında başlatılan MGKP (Milli Güç Kalitesi Projesi) kapsamında, Türkiye Sistemi'nin 250 noktasına yerleştirilen güç kalitesi monitörlerinin çoğunlukla bu bölgede konumlanmış olmasıdır.

Birinci Bölüm'de gerilim çukuru ile ilgili kapsamlı bir kaynakça taraması yapılmıştır. Yapılan kaynak taraması sonucunda, gerilim çukuru probleminin tüm dünyada hem üretim hem de tüketim aşamasında ciddi kayıplara yol açtığı görülmüştür. Bu nedenle, sistem iyileştirilmesinin sağlanabilmesi için, öncelikle sistemdeki gerilim çukur sıklık ve şiddetinin belirlenerek hem ekonomik hem de teknik anlamda en uygun çukur etkisini azaltma yönteminin belirlenmesinin önemi ortaya çıkmaktadır.

İkinci Bölümde, kaynakça taramasıyla önemi ortaya konulan gerilim çukuru problemi ile ilgili temel tanımlamalar yapılmıştır. Bunlar çukur karakteristiği, oluşma nedenleri ve tipleri, transformatör bağlantı grubunun çukur tipine ve şiddetine etkisi konularını içermektedir. Güç sistemlerinde gerilim çukurunun bilgisayar destekli değerlendirilmesini sağlayan, çukur kestirim yöntemleri ve buna alternatif diğer bir değerlendirme tekniği olan monitörleme konuları ele alınmıştır.

Sistemdeki çukur değerlendirmesi, çukur parametrelerinin ve sıklığının belirlenmesi, sistemin ilgilenilen noktasının ne kadar güçlü/zayıf olduğunun tanımlanmasını sağlar. Bu tespit, çukur azaltma yoluna gidip gidilmemesi kararını ve gidilecekse azaltma yöntemlerinin ekonomik ve etkinlik boyutunda ele alınarak en uygununun seçilebilmesi için gereklidir. Bu nedenle Üçüncü Bölüm'de, çukur azaltma yöntemlerinden detaylı olarak bahsedilmiştir.

Türkiye Sistemi üzerinde, kısa süreli gerilim çukuruyla ilgili değerlendirme yapabilmek için gerekli teorik altyapının oluşturulmasının ardından, Dördüncü Bölüm'de ilk olarak Türkiye Sistemi tanıtılarak MGKP kapsamında sistemin transformatör noktaları ve hatlarının 400kV, 154kV ve 36kV gerilim seviyelerine yerleştirilen güç kalitesi monitörlerinden bahsedilmiştir. Uzun süreli monitör izlemesi sonucunda, özellikle tek faz arızası kaynaklı gerilim çukurunun en sık

rastlanılan güç kalitesi sorunu olduğu görülmüştür. Tüketicilerin çukur olayı kaynaklı üretim kayıplarının artması, sorunun dağıtım seviyesinde uzun dönemli çözümünün iletim seviyesindeki çukur değerlendirilmesiyle mümkün olacağının anlaşılmasını sağlamıştır. Sistemdeki her noktada monitör olmaması, en doğru çukur değerlendirmesinin yapılmasını hedefleyen çalışmanın içeriğinin, tüm sistemden ziyade hem endüstriyel ve nüfus yoğunluğunun hem de monitör sayısının en fazla olduğu 1. İletim Bölgesi ile sınırlandırılmasına neden olmuştur. Bu bölgedeki monitörlerden 400kV ve 154kV gerilim seviyelerinde, Nisan09-Mart10 aralığını kapsayan bir yıllık veri alınarak çukur sıklığının hat tipine, uzunluğuna ve atmosferik koşullara göre değişimi incelenmiştir. Hatlara ait süre-genlik-sıklık tabloları oluşturularak, çukur sıklığının hattaki, kilometre başına kümülatif dağılımı elde edilmiştir.

Süre-genlik-sıklık tabloları kullanılarak, standartlara göre çukur indeksleri SARFI-X, SIARFI-X, SMARFI-X ve STARFI-X Türkiye Sistemi 1. İletim Bölgesi'nin 400kV, 154kV ve 36kV gerilim seviyeleri için aylık bazda hesaplanmıştır. Türkiye Sistemi'ne ait bu çalışma, kaynakçada çukur indeks değerlendirmesinin yer almadığı olmasından dolayı önem kazanmaktadır.

Çukur değerlendirmesinin sadece güç kalitesi monitörleri veya sadece bilgisayar destekli analiz programları ile yapılması her zaman yeterli olmayabilir. Bu nedenle tez çalışmasında sadece monitörlenmeyle yetinilmemiş, TEİAŞ'dan alınan sistem verileriyle, 1. İletim Bölgesi'ne ait çukur sıklık değerlendirmesi, çukur kestirim yöntemlerinden arıza durum yöntemine göre sıklık hesaplamasını gerçekleştiren SIMPOW DIPS yazılım programıyla yapılmıştır. Beşinci Bölüm'ü oluşturan bu değerlendirme sonucunda ilk olarak ilgili bölgede 400kV ve 154kV gerilim seviyelerindeki çukur olayından en fazla etkilenen nokta ve/veya noktalar belirlenerek bu noktalara diğer baraların etkisini gösteren korunmasız alanlar üç faz ve tek faz toprak arızaları için oluşturulmuştur. Bölüm 3'de teorik olarak bahsedilen çukur etkisini azaltma yöntemlerinden generatör eklenmesi, hat ilave edilmesi, yüklenme durumunun değerlendirilmesi ve cihaz bağlanması -Sabit Reaktif Güç Dengeleyici (SVC) ve Sabit Dengeleyici (STATCOM)- yöntemleri, belirlenen zayıf noktalar için analiz edilerek sonuçlar yorumlanmıştır.

Altıncı Bölüm’de, Doktora Tez çalışmasıyla elde edilen sonuçlar açıklanmıştır. 21 Elektrik Bölgesi’nden oluşan Türkiye Sistemi’nin dağıtım seviyesinde 2002 yılından itibaren bölgesel olarak özelleşme başlamıştır. 2011 yılının başlarında özelleşmesi tamamlanmış olan sistem de artan rekabet ortamıyla birlikte tüketiciye kaliteli ve ekonomik enerjinin sağlanmasının gerekliliği de artacaktır. Bu öngörüyle başlatılan Doktora Tez çalışması sistem operatörlerine, dağıtım firmalarına, tüketicilere Türkiye Sistemi’nin 1. İletim Bölgesi’ne ait en önemli güç kalitesi sorunlarından biri olan gerilim çukurunun sayı ve sıklık değerlendirmesini sunmaktadır. Hem bilgisayar analiz programından elde edilen sonuçlarla hem de güç kalitesi monitörlerinden elde edilen verilerle yapılan değerlendirmeye gerilim çukur sorununun sistemimizdeki boyutu ortaya konulmuştur. Bu çalışmadan elde edilen bilgiler, sistemde hangi baraya çukur önleme yönteminin uygulanmasının daha etkin sonuç vereceğine karar verilmesine yardımcı olarak uygulanan yöntemin maliyet ve güvenilirlik açısından da değerlendirilmesine olanak sağlar.

BÖLÜM 2. GERİLİM ÇUKURU KARAKTERİSTİĞİ

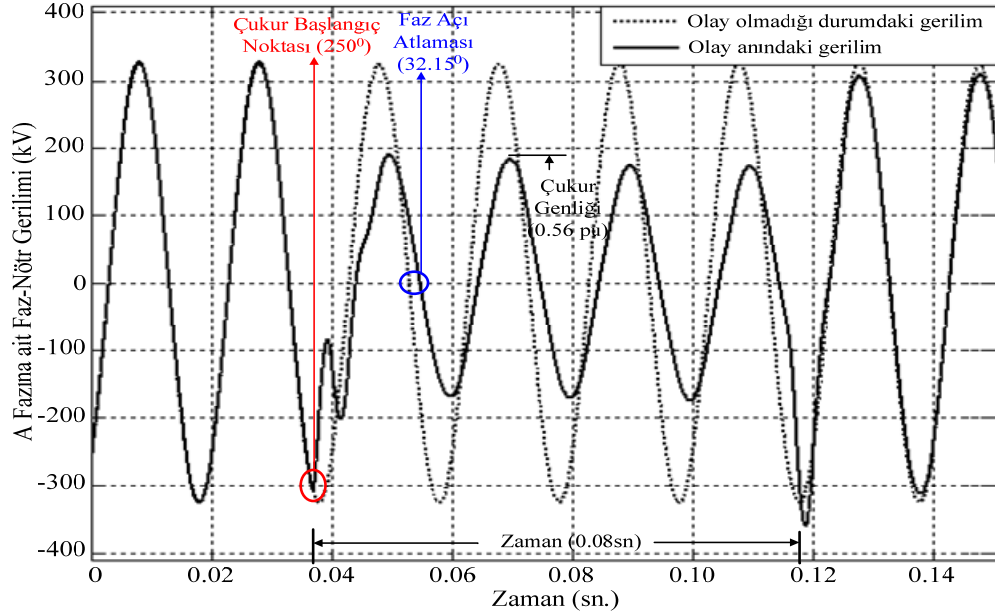
2.1. Giriş

Elektrik enerjisini üretim birimlerinden son kullanıcıya kadar güvenli ve kaliteli bir şekilde ulaştırmak elektrik güç sisteminin öncelikli amacıdır. Kullanıcıya ulaşan enerjinin kaliteli yani gerilimin genlik ve frekansının izin verilen aralıkta olması önem taşır. 80’li yıllara kadar sadece enerjinin bir noktadan diğerine iletimi ön plandayken 80’lerden sonra güç sistemlerinde güç kalitesi ifadesi önem kazanmaya başlamıştır. Akım ve gerilim dalga şeklinde oluşan bozulmalara maruz kalan cihazların sürekli olarak arıza yapmaları veya devre dışı kalmalarına bağlı olarak güç kalitesinin elektrik güç sistemlerinde önemi daha iyi anlaşılmıştır. Güç kalitesi ve gerilim çukuru ile ilgili tüm tanımlar EK-1’de verilmiştir [50].

2.2. Kısa Süreli Gerilim Çukuru

Kısa süreli gerilim çukuru, güç sistemindeki en önemli güç kalitesi problemlerinden biridir. Gerilim çukuru, sistem arızaları, aşırı yüklenme, büyük güçlü motorların devreye alınması, transformatörlerin enerjilendirilmesinden dolayı, gerilimin genlik değerinde 10%-90% aralığındaki, yarım periyot ile 1 dakika zaman dilimini kapsayan azalma olarak tanımlanır. Kısa süreli gerilim çukuru temel olarak, çukur sırasında arta kalan gerilimin genliği ve çukur zamanı ile ifade edilir. Şekil 2.1 Türkiye Sistemi’nin 1. İletim Bölgesi’nde yer alan 400kV gerilim seviyesindeki, Alibeyköy Barası’nda iki faz arızasının neden olduğu çukur olayını gösterir. Arıza a ve b fazlarında ve her iki fazda yaklaşık aynı genlikte olduğundan Şekil 2.1’de a fazına ait faz-nötr geriliminin dalga şekilleri verilmiştir. Gerilim çukur karakteristiklerini açıklamak için kullanılan olayda gerilim çukur genliği 0.56 pu ve zamanı 80 milisaniyedir. Şekil 2.1 incelendiğinde, çukur olayı sırasında arızalı faz geriliminin sıfır geçişinde arıza olmadığı duruma göre 32.15° ’lik bir kayma olduğu görülür. Sistemin X/R oranına bağlı olan ve faz açısı atlaması olarak adlandırılan bu

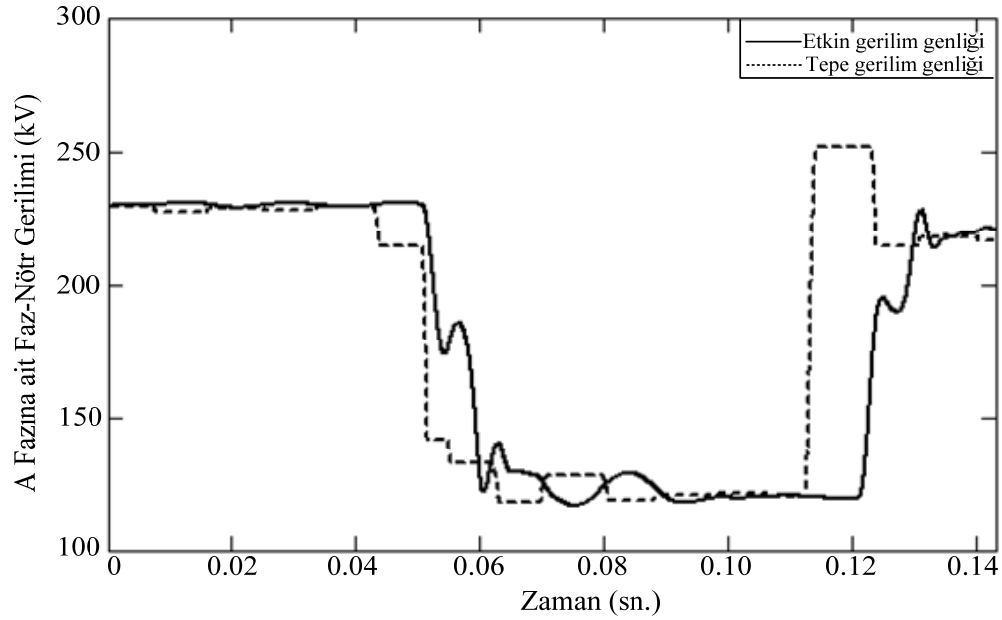
durum özellikle tetikleme elemanlarının yanlış zamanlarda ilettime geçmesine neden olabildiği için incelenmesi gereken önemli bir karakteristiktir. Çukur sırasında ortaya çıkan diğer bir karakteristik ise olayın başladığı ve bittiği anın dalga şekli üzerindeki açı değeridir[51].



Şekil 2.1: Alibeyköy Barası'nda a fazında oluşan çukur olayı

Çukur sonrası arta kalan gerilim genliği, faz gerilimlerinin etkin, temel veya tepe değerinden elde edilen genlik değeriyle ifade edilebilir[51]. Şekil 2.2, Şekil 2.1'deki çukura ait gerilimin yarım dalga periyotlu örneklemeye, etkin ve tepe değeri olmak üzere farklı iki hesaplama yönteminden elde edilen, gerilim çukur genliğini gösterir. Gerilim genlik değeri olarak iki durum arasında ciddi bir fark olmamakla beraber çukur zamanını ifade eden, gerilim genliğinin 0.9 pu.'in altına düştüğü an ile 0.9 pu.'in üzerine çıktığı an arasındaki süre iki durum için farklıdır. Bu durum da gerilim çukur genliğini hesaplamada kullanılan yöntem önem kazanır. Dengeli arızada her üç fazdaki çukur genliği aynı olacağından bu yaklaşımlar yeterli olur. Dengesiz arızalarda çukur genliği her bir faz için farklı değer alacağından olayın simetrik bileşenlerle değerlendirilmesi daha doğrudur. Bu tip arızaların neden olduğu çukur, en düşük genlik ve katlı çukurun -olay sırasında başka bir olayın oluşması zaman da artmaya neden olur- neden olduğu en uzun zamanla karakterize edilir. Ancak bu yaklaşım her zaman doğru olmayabilir. Örnek olarak, üç fazlı cihaz, şiddetli tek fazlı

çukur olayını sorunsuz atlatabilirken üç fazlı şiddetli olmayan çukura maruz kaldığında devre dışı kalabilir[52].



Şekil 2.2: Çukur gerilim genliğinin efektif ve temel değerlerinden hesaplandığı durumlardaki değeri

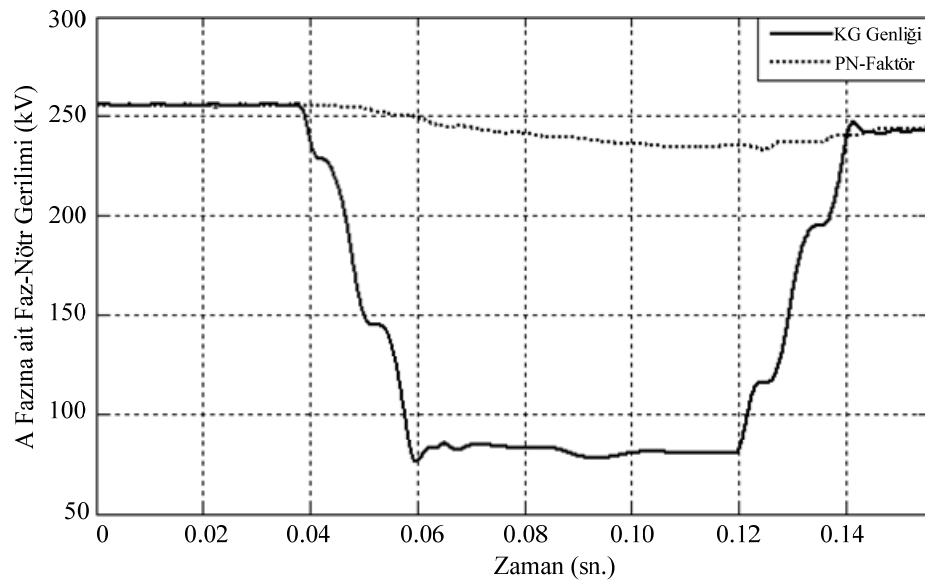
Tez çalışmasında kullanılacak olan yaklaşım ilk olarak Zhang tarafından kullanılan ve çukur genliğini karakteristik gerilim(KG) genliği olarak ifade eden yöntemdir[53]. Bu yöntem dengesiz çukurları tek bir karakteristikle ifade etmek için kullanılmıştır. Yöntem pozitif ve negatif bileşen empedanslarının eşit olması varsayımına dayanır. Sıfır bileşen ayrı olarak ele alınır. Eğer gözlemlenen k barası ile arızanın olduğu f barası arasında üçgen veya yıldız noktası topraklanmamış yıldız bağlı transformatör varsa sıfır dizi bileşeni iptal edilir. Pozitif ve negatif dizi empedanslarının her zaman eşit olmaması durumunda ikinci bir karakteristik tanımlanır, bu da PN-Faktörüdür (Pozitif Negatif Faktör). Çukur genliği simetrik bileşenler kullanılarak hesaplanabilir. Simetrik çukur için karakteristik gerilim genliği arıza sırasında artı kalan gerilim genliğine eşittir ancak asimetrik çukurlar için yöntem, genliği hesaplarken, dengesizlik derecesini hesaba katar. Tablo 2.1 karakteristik gerilim genliği ve PN-Faktörüne ait formülleri vermektedir[54].

Şekil 2.3, Şekil 2.1'deki olay için tam dalga periyotlu örneklemeyle hesaplanan karakteristik gerilim genliği ve PN-faktörünü vermektedir. Şekil 2.1'deki olay tipi C_c 'dir. Bu tip, karakteristik gerilim hesabında Tablo 2.1.'e göre pozitif-negatif dizi

gerilimlerinin farkı, PN-Faktörü için ise toplamı şeklindedir. Karakteristik gerilim genliği fark işleminden dolayı etkin gerilim genliğinden düşüktür. Bu yöntemin avantajı üç faz için ayrı ayrı hesap gerektirmemesi ve elde edilen çukur genliğinin farklı gerilim seviyelerinde yaklaşık eşit olmasıdır[55].

Tablo 2.1: Karakteristik gerilim ve PN-Faktörü tanımı

ÇukurTipi	Çukurun olduğu faz	Karakteristik Gerilim	PN-Faktör
C_a	bc	$U_1 - U_2$	$U_1 + U_2$
C_b	ac	$U_1 - a^2 U_2$	$U_1 + a^2 U_2$
C_c	ab	$U_1 - a U_2$	$U_1 + a U_2$
D_a	a	$U_1 + U_2$	$U_1 - U_2$
D_b	b	$U_1 + a^2 U_2$	$U_1 - a^2 U_2$
D_c	c	$U_1 + a U_2$	$U_1 - a U_2$



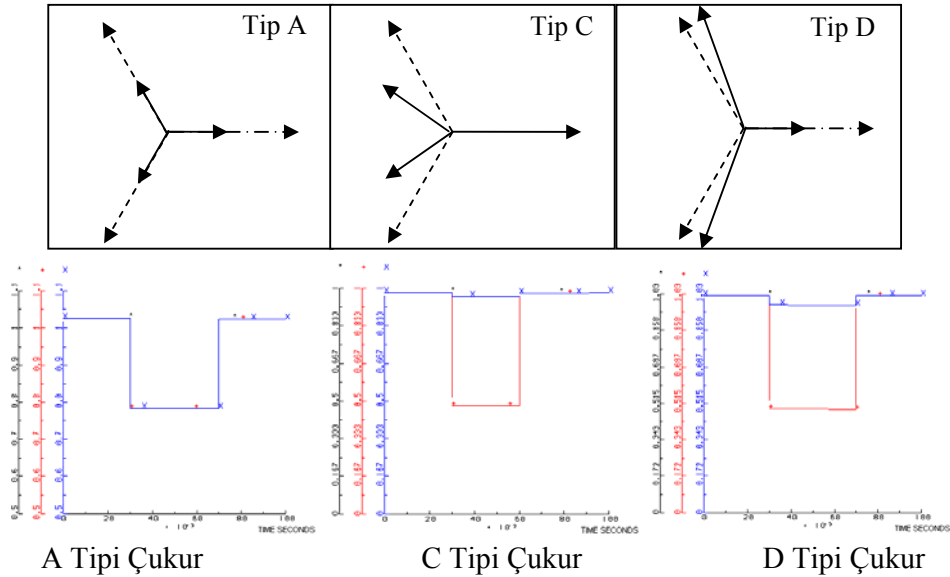
Şekil 2.3: Karakteristik gerilim(KG) yaklaşımına göre çukur genliği ve PN-Faktörü

2.2.1. Gerilim çukur tipleri

Arıza tipine bağlı olarak olay sırasındaki çukur gerilimi üç fazda eşit veya farklı olabilir. Simetrik bileşen sınıflandırmasına göre 4 farklı çukur tipinden bahsedilebilir; A, B, C ve D. Üç faz arızası A tipi çukura neden olur. Bu çukur tipi dengeli, her fazda gerilim çukur genliğinin eşit olduğu, çukur şeklindedir. Simetrik olmayan arıza, B, C veya D tipi çukura neden olur. D tipi çukurda asıl düşme

fazlardan sadece birinde görülür. D_a , asıl azalmanın a fazında olduğunu ifade eder. C tipi çukurda asıl düşme iki fazda görülür, alt indis arızasız fazı ifade eder. Buna göre C_a , b ve c fazlarında çukur olduğunu gösterir. B tipi çukur D tipi çukurun özel bir halidir. B tipi çukurda sıfır dizi empedansı pozitif dizi empedansına eşit varsayılmıştır. Bu varsayım güç sistemlerinde geçerli olmadığından sadece A, C ve D tipi çukurdan söz edilebilir.

Şekil 2.4, her bir çukur tipi için arıza öncesi ve arıza sırasındaki gerilim fazörlerini gösterir. 3 faz arızası hem üçgen hem de yıldız bağlı yükte A tipi çukurla sonuçlanırken, tek faz toprak arızası yıldız bağlı yükte D tipi, üçgen bağlı yükte C tipi çukura neden olur. Faz faz ve iki faz toprak arızaları yıldız bağlı yükte C tipi üçgen bağlı yükte ise D tipi çukura yol açar[51].



Şekil 2.4: Arıza öncesi (kesikli çizgi) ve arıza sırasında (düz çizgi) her bir çukur tipi için gerilim fazörleri

2.2.2. Transformatör bağlantı şeklinin gerilim çukur tipine etkisi

Sistemdeki arızanın neden olduğu herhangi bir gerilim çukuruna transformatörün etkisi incelendiğinde, transformatörün ikincil tarafındaki çukur fazör ilişkisi transformatörün birincil tarafından farklı olabilir. Çukur sınıflandırılmasında, çukur tipi değişebilir.

Bu değişimi modelleme işlemi iki adımda gerçekleştirilir;

1. Gerilim fazörlerinin transformatör ile değişimine ait matris modeli: temel transformatör modelleri
2. Simetri faz değiştirici matris modelleri

2.2.2.1. Transformatör bağlantı grupları

Tip 1. Fazör değişimine neden olmayan transformatörler: Bu tip transformatörlerde ikincil tarafın gerilim değeri birincil tarafın değerine eşittir. Birincil ve ikincil tarafı direkt topraklanmış yıldız-yıldız bağlı transformatörler bu tiptir. Dönüştürme matrisi (2.1) denkleminde verilmiştir.

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Bu tip transformatörler simetrik bileşenlerde de herhangi bir değişime neden olmazlar. ($T_1 * U_1 = U_1$, $T_1 * U_2 = U_2$, $T_1 * U_0 = U_0$)

Tip 2. Sıfır fazrn yok eden transformatörler: Bu tip transformatörlerde, transformatörün ikincil gerilimi, birincil geriliminden sıfır dizi geriliminin çıkartılmasıyla elde edilen değere eşittir. Birincil veya ikincil taraftan biri ya da her ikisi topraklanmamış yıldız-yıldız bağlı transformatörler ve üçgen-üçgen bağlı transformatörler bu tiptir. Ayrıca gen-zigzag bağlı transformatörler de bu gruba girer. Dönüştürme matrisi (2.2) denkleminde verilmiştir.

$$T_2 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Bu tip transformatörlerde ne pozitif ne de negatif dizi geriliminde değişme olur. Sadece sıfır dizi gerilimi yok edilmiştir. ($T_2 * U_1 = U_1$, $T_2 * U_2 = U_2$, $T_2 * U_0 = 0$)

Tip 3. Fazör değişimine neden olan transformatörler: İkincil gerilimin her biri birincil tarafın iki faz gerilimi arasındaki farka eşittir. Üçgen-yıldız, yıldız-üçgen ve

yıldız-zigzag transformatörler bu tiptir. Dönüştürme matrisi (2.3) denkleminde verilmiştir.

$$T_3 = \frac{j}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Bu tip transformatörlerde pozitif dizi gerilimi değişmezken negatif dizi gerilimi yön değiştirir. Bu nedenle C tipi çukur D tipine dönüşür. Sıfır dizi gerilimi yok olur. ($T_3 \cdot U_1 = U_1$, $T_3 \cdot U_2 = -U_2$, $T_3 \cdot U_0 = 0$).

Tablo 2.2 transformatör bağlantı şekline göre çukur tipi değişimlerini vermektedir.

Tablo 2.2: Çukur tipinin transformatör bağlantı şekline göre değişimi

Transformatörün Bağlantı Şekli	A Tipi Çukur	C Tipi Çukur			D Tipi Çukur		
	A	C _a	C _b	C _c	D _a	D _b	D _c
T₁: YNyn	A	C _a	C _b	C _c	D _a	D _b	D _c
T₂: Yy, Dd, Dz	A	C _a	C _b	C _c	D _a	D _b	D _c
T₃: Yd, Dy, Yz	A	D _a	D _b	D _c	C _a	C _b	C _c

2.2.2.2. Transformatörün birincil ve ikincil tarafındaki faz değişimi

Gerilim çukuru, fazların simetrisinden dolayı transformatörün ikincil tarafında simetri fazı (genelde saat yönüyle aynı yönde) değiştirebilir. Örnek olarak Yy bağlı transformatörün birincil tarafındaki a fazı ikincil tarafta b, Dy bağlı transformatörde b-c olabilir. Bu nedenle simetri faz değiştirici matrisi kullanılır. Simetri değiştirici matris üç şekilde tanımlanabilir[53].

1. Simetri faz dönüşümünün saat yönüyle aynı yönde olduğu durum; a, b ve c fazları sırasıyla b, c ve a fazlarına dönüşür. Bunu sağlayan matris (2.4) denkleminde verilmiştir.

$$S_1 = a^2 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2. Simetri faz dönüşümünün saat yönüne zıt yönde olduğu durum; a, b ve c fazları sırasıyla c, a ve b fazlarına dönüşür. Buna ait matris (2.5) denkleminde verilmiştir.

$$S_2 = a \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

3. Fazlarda hiçbir değişimin olmadığı durum; Matrisel ifadesi (2.6) denklemindeki gibidir.

$$S_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Tablo 2.3'te farklı gerilim çukur tipleri için simetri değişimleri görülmektedir.

Tablo 2.3: Simetri değiştiricisi ile fazlardaki değişimin gerilim çukur tipine etkisi

Simetri Değiştirici Tipi	A Tipi Çukur	C Tipi Çukur			D Tipi Çukur		
	A	C _a	C _b	C _c	D _a	D _b	D _c
S ₁	A	C _b	C _c	C _a	D _b	D _c	D _a
S ₂	A	C _c	C _a	C _b	D _c	D _a	D _b
S ₃	A	C _a	C _b	C _c	D _a	D _b	D _c

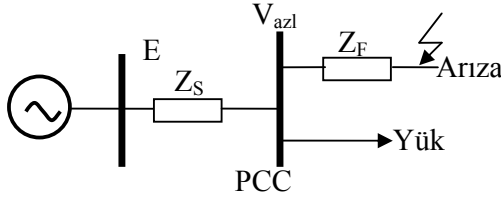
2.3. Kısa Süreli Gerilim Çukurunun Değerlendirilmesi

Bir güç sistemine ait kısa süreli gerilim çukuru değerlendirmesi sistemin her noktasına veya gerekli görülen noktalara güç kalitesi monitörleme cihazlarının yerleştirilmesi veya bilgisayar destekli kestirim yöntemlerinin kullanılmasıyla gerçekleştirilebilir. Monitörleme, kaynak hakkında ortalama bir bilgi edinilmesine yardımcı olur. Monitörlemede ideal olan, daha gerçekçi sonuçların elde edilmesi için, tüm baraların uzun süreli gözlenmesidir. Gerilim çukurunda kestirimler, gerçek verilere dayanarak çukur sıklıklarının değerlendirilmesi ile güç sisteminin planlama ve tasarımında gerilim çukurunun izlenmesine bir alternatiftir. Monitörleme ile kıyaslandığında kestirim yöntemlerinin avantajı henüz var olmayan bir sisteme ait değerlendirmeye izin vermesi ve sonuçların hemen elde edilebilmesidir. En geniş

uygulama alanına sahip gerilim çukuru kestirim yöntemleri: kritik mesafe yöntemi ve arıza durum yöntemidir[54]. En doğru değerlendirme hem kestirim yöntemlerinden biri hem de izleme yönteminin kullanılmasıyla gerçekleştirilebilir. Bu, sonuçların karşılaştırılmasına ve daha doğru değerlendirme ve ileriye yönelik iyileştirmelere olanak sağlar.

2.3.1. Kritik mesafe yöntemi

Kritik mesafe yöntemi, verilen kritik bir gerilim genliği için arızanın mesafesini hesaplar. Yöntem yük ve arıza noktası arasında PCC (ortak bağlantı noktası) noktası varsayımına dayanır. Şekil 2.5, PCC noktasını tanımlayan ve yük akımını ihmal eden basit bir gerilim bölücü modelini verir. PCC noktası arızanın ve yükün beslendiği noktadır. Diğer bir ifadeyle, yük akımının arıza akımına dallandığı noktadır. Gerilim bölücü modelinde yük akımı arıza sırasında ihmal edilir. Bu nedenle yük ve PCC arasında gerilim düşümü yoktur[51].



Şekil 2.5: Gerilim çukuru için gerilim bölücü modeli

Gerilim çukur genliğinin hesabını gösteren (2.7) denklemi kullanılarak belirli bir gerilim genliğine ait arıza mesafesi denklemi elde edilir.

$$\overline{V_{azl}} = \frac{\overline{Z_F}}{\overline{Z_F} + \overline{Z_S}} \quad (2.7)$$

$$\overline{Z_S} = R_S + jX_S, \quad \overline{Z_F} = (r + jx)\ell$$

$\overline{Z_S}$: PCC noktasındaki kaynak empedansı

$\overline{Z_F}$: PCC ile arıza noktası arasındaki empedans

$\overline{V_{azl}}$: Çukur gerilimi

(2.7) denklemi, (2.8) eşitliğindeki gibi yazılabilir.

$$V_{azl} = \frac{\lambda}{1+\lambda} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2\lambda(1-\cos\alpha)}{(1+\lambda)^2}}} \quad (2.8)$$

$$\lambda = \frac{Z_F}{Z_S} = \frac{z \times \ell}{Z_S} \quad (2.9)$$

α : kaynak ve besleme empedansı arasında kompleks alandaki açı, empedans açısı.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{X_S}{R_S}\right) - \arctan\left(\frac{X_F}{R_F}\right) \quad (2.10)$$

Bilinen V gerilimi için (2.10) eşitliği ikinci düzen polinom eşitliğinde tekrar yazılırsa (2.11) denklemi elde edilir.

$$\lambda^2(V^2 - 1) + 2\lambda V^2 \cos\alpha + V^2 = 0 \quad (2.11)$$

(2.11) eşitliğinin pozitif sonucu (2.12) denklemindeki gibidir.

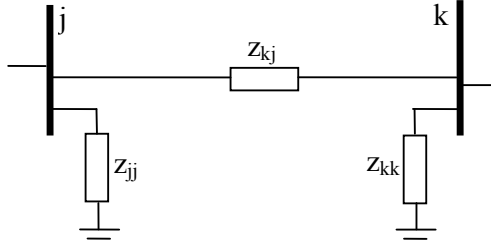
$$\lambda = \frac{V}{1-V} \left(\frac{V \cos\alpha + \sqrt{1 - V^2 \sin^2 \alpha}}{V + 1} \right) \quad (2.12)$$

(2.13) eşitliğiyle beraber gerekli kritik mesafe denklemi elde edilir.

$$\ell_{cri} = \frac{Z_S}{z} \times \frac{V}{1-V} \left(\frac{V \cos\alpha + \sqrt{1 - V^2 \sin^2 \alpha}}{V + 1} \right) \quad (2.13)$$

2.3.2. Arıza durum yöntemi

Arıza durum yöntemi güç sisteminde her bir baraya ait gerilim çukur sayısı ve karakteristiklerini (genlik, zaman vb.) tanımlar. Gerçekçi sonuçlar için arıza noktalarının sayısı mümkün olduğunca artırılmalıdır. Arıza durum yöntemi arıza oranıyla verilen tahmini bilgi ile kısa devre teorisini birleştirir. Şekil 2.6'daki basit sistemde j barasında arıza oluştuğunda k barasında arıza sırasındaki gerilim (2.14) denkleminde verilmiştir[54].



Şekil 2.6: Arıza sırasındaki gerilim hesabını açıklamada kullanılan örnek sistem

$$v_{as}(k) = v_{ao}(k) + \Delta v_{kj} \quad (2.14)$$

$$\Delta v_{kj} = -z_{kj} \frac{v_{ao}(j)}{z_{jj}} \quad (2.15)$$

z_{kj} : k ve j baraları arasındaki geçiş empedansı

z_{jj} : j barasının köşe empedansı

Gerçek güç sistemi birçok bara ve hattan meydana geldiğinden (2.15) denklemi dikkate alınarak, (2.14) eşitliği matrissel formda yazıldığında (2.16) eşitliği elde edilir.

$$V_{as} = V_{ao} - Z \cdot \text{inv}(\text{diag}Z) \cdot V_{ao}^T \quad (2.16)$$

V_{ao} : arıza noktalarının sayısı kadar satır ve sütun içeren arıza öncesi matris

V_{as} : arıza sırasında her bir baraya ait gerilimi içeren çukur matrisi

k satırı, herhangi bir barada (1, 2, 3, ..., N) arıza oluştuğunda k barasında artı kalan gerilimi, j sütunu ise herhangi bir k barasında oluşan arıza sırasında 1, 2, 3, ..., j, ..N baralarında arıza sırasındaki gerilimi ifade eder[54].

Benzer şekilde bu yöntem dengesiz arızalara da uygulanabilir. Bu durumda simetrik bileşenler kullanılır. (2.14) ve (2.15) eşitlikleri pozitif, negatif ve sıfır bileşenler için yazılarak arıza oranları çukur matrisiyle birleştirilir.

Benzer karakteristikte gerilim çukuruna sahip arızalı noktalar bir alanda gruplanır. Bu alana korunmasız alan adı verilir. Korunmasız alan ifadesi aslında cihaz davranışında tanımlanır. Örnek olarak, cihaz 70%'lik gerilim çukuruyla

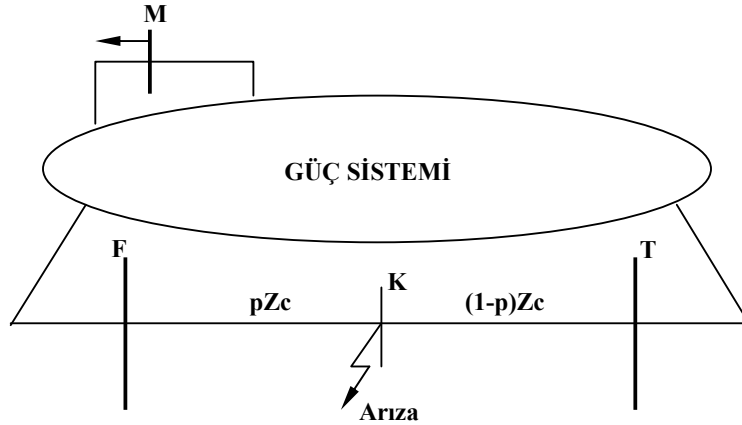
karşılaştığında devre dışı kalıyorsa, bu durumda cihaz 70% çukura neden olan arızaların hepsine karşı korunmasızdır.

2.4. Hattın Herhangi Bir Noktasında Arıza Oluşması Durumu

Güç sisteminde arıza baralarda olduğu gibi hattın herhangi bir noktasında da oluşabilir. Bu durumda sistem parametrelerine ve hat uzunluğuna bağlı olarak arızanın etki alanı, buna bağlı olarak da gerilim çukur genliği değişir.

2.4.1. Hattın herhangi bir noktasında oluşan arıza için gerilim çukur genliğinin hesaplanması

Herhangi bir hat üzerinde oluşan arızanın, hattın bağlantısı olan baralara ve sistemdeki diğer noktalara etkisi kısa devre analizi formüllerinden hesaplanabilir. Bir hatta oluşan dengeli veya dengesiz arızanın sistemdeki herhangi bir noktada yol açtığı çukur genliğinin hesaplanması Şekil 2.6'da görülen örnek sistem üzerinden açıklanmıştır. Şekil 2.7'de FT hattında oluşan arıza noktası K, hat üzerinde herhangi bir uzunluğa karşılık gelmektedir. Hattın toplam uzunluğu 1 pu alındığında K noktasının hattın bağlı olduğu baralara mesafesi FK için p , KT için ise $(1-p)$ şeklinde tanımlanmıştır.



Şekil 2.7: Hesaplama için örnek sistem

M noktası ile K noktası arasındaki pozitif, negatif ve sıfır dizin empedansları ve K noktasının köşegen dizin empedansları sırasıyla (2.17) ve (2.18) denklemlerinden hesaplanabilir[56].

$$\begin{aligned}
Z_{MK}^0 &= Z_{MF}^0 + (Z_{MT}^0 - Z_{MF}^0)p \\
Z_{MK}^1 &= Z_{MF}^1 + (Z_{MT}^1 - Z_{MF}^1)p \\
Z_{MK}^2 &= Z_{MF}^2 + (Z_{MT}^2 - Z_{MF}^2)p
\end{aligned} \tag{2.17}$$

$$\begin{aligned}
Z_{KK}^0 &= (Z_{FF}^0 + Z_{TT}^0 - 2Z_{FT}^0 - Z_C^0)p^2 + (Z_C^0 - 2(Z_{FF}^0 - Z_{FT}^0))p + Z_{FF}^0 \\
Z_{KK}^1 &= (Z_{FF}^1 + Z_{TT}^1 - 2Z_{FT}^1 - Z_C^1)p^2 + (Z_C^1 - 2(Z_{FF}^1 - Z_{FT}^1))p + Z_{FF}^1 \\
Z_{KK}^2 &= (Z_{FF}^2 + Z_{TT}^2 - 2Z_{FT}^2 - Z_C^2)p^2 + (Z_C^2 - 2(Z_{FF}^2 - Z_{FT}^2))p + Z_{FF}^2
\end{aligned} \tag{2.18}$$

$0,1,2$:sırasıyla sıfır, pozitif ve negative dizin indisleri
 Z_{MF}^{012} :M ve F noktaları arasındaki geçiş dizin empedansları
 Z_{MT}^{012} :M ve T noktaları arasındaki geçiş dizin empedansları
 $Z_{FF}^{012}/Z_{TT}^{012}$:F ve T baralarının sıfır, pozitif ve negatif dizin köşegen empedansları
 Z_C^{012} :F ve T baraları arasındaki hattın sıfır, pozitif ve negatif dizin empedansları

K noktasının arıza öncesi gerilim değeri (2.19) eşitliğindeki gibidir.

$$V_K^{\text{önce}} = V_F^{\text{önce}} + (V_T^{\text{önce}} - V_F^{\text{önce}})p \tag{2.19}$$

$V_F^{\text{önce}}/V_T^{\text{önce}}$:F ve T baralarının arıza öncesi gerilim genliği

Dengeli ve dengesiz arıza durumları için hattın K noktasında oluşan arızasının M noktasında neden olduğu çukur genliğine ilişkin denklemler herbir tip arıza için ayrı ayrı verilmiştir.

a) Tek Faz Toprak Arızası

K noktasında, a fazında oluşan tek faz toprak arızası sırasında, M noktasının çukur genlik denklemleri (2.20) eşitliğinde verilmiştir.

$$\begin{aligned}
V_{aM}^{\text{arızı}} &= V_{aM}^{\text{önce}} - \frac{Z_{MK}^0 + Z_{MK}^1 + Z_{MK}^2}{Z_{KK}^0 + Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} V_K^{\text{önce}} \\
V_{bM}^{\text{arızı}} &= a^2 V_{aM}^{\text{önce}} - \frac{Z_{MK}^0 + a^2 Z_{MK}^1 + a Z_{MK}^2}{Z_{KK}^0 + Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} V_K^{\text{önce}}
\end{aligned} \tag{2.20}$$

$$V_{cM}^{arızı} = aV_{aM}^{\text{önce}} - \frac{Z_{MK}^0 + aZ_{MK}^1 + a^2Z_{MK}^2}{Z_{KK}^0 + Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} V_K^{\text{önce}}$$

$V_{aM}^{\text{önce}}$:M barasının a fazının arıza öncesi gerilim genliği

$$a = e^{j120^\circ}$$

b) Faz-Faz Arızası

K noktasında, b ve c fazlarında oluşan faz-faz arızasının M noktasında oluşturduğu çukur etkisi (2.21) eşitliğinden elde edilebilir.

$$\begin{aligned} V_{aM}^{arızı} &= V_{aM}^{\text{önce}} - \frac{Z_{MK}^1 - Z_{MK}^2}{Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} V_K^{\text{önce}} \\ V_{bM}^{arızı} &= a^2 V_{aM}^{\text{önce}} - \frac{a^2 Z_{MK}^1 - aZ_{MK}^2}{Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} V_K^{\text{önce}} \\ V_{cM}^{arızı} &= aV_{aM}^{\text{önce}} - \frac{aZ_{MK}^1 - a^2 Z_{MK}^2}{Z_{KK}^1 + Z_{KK}^2} V_K^{\text{önce}} \end{aligned} \quad (2.21)$$

c) Faz-Faz Toprak Arızası

K noktasında, b ve c fazlarında oluşan faz-faz toprak arızasının M noktasında oluşturduğu çukur sırasında M noktasına ait çukur genliği denklemi (2.22) eşitliğinde verilmiştir.

$$\begin{aligned} V_{aM}^{arızı} &= V_{aM}^{\text{önce}} - \frac{(Z_{MK}^1 - Z_{MK}^0)Z_{KK}^2 + (Z_{MK}^1 - Z_{MK}^2)Z_{KK}^0}{Z_{KK}^0 Z_{KK}^1 + Z_{KK}^1 Z_{KK}^2 + Z_{KK}^2 Z_{KK}^0} V_K^{\text{önce}} \\ V_{bM}^{arızı} &= a^2 V_{aM}^{\text{önce}} - \frac{(a^2 Z_{MK}^1 - Z_{MK}^0)Z_{KK}^2 + (a^2 Z_{MK}^1 - aZ_{MK}^2)Z_{KK}^0}{Z_{KK}^0 Z_{KK}^1 + Z_{KK}^1 Z_{KK}^2 + Z_{KK}^2 Z_{KK}^0} V_K^{\text{önce}} \\ V_{cM}^{arızı} &= aV_{aM}^{\text{önce}} - \frac{(aZ_{MK}^1 - Z_{MK}^0)Z_{KK}^2 + (aZ_{MK}^1 - a^2 Z_{MK}^2)Z_{KK}^0}{Z_{KK}^0 Z_{KK}^1 + Z_{KK}^1 Z_{KK}^2 + Z_{KK}^2 Z_{KK}^0} V_K^{\text{önce}} \end{aligned} \quad (2.22)$$

d) Üç Faz Arızası

K noktasında üç faz arızası sırasında M noktasındaki çukur genliği denklem (2.23)'deki gibidir.

$$V_{aM}^{arazi} = V_{aM}^{önce} - \frac{Z_{MK}^1}{Z_{KK}^1} V_K^{önce} \quad (2.23)$$

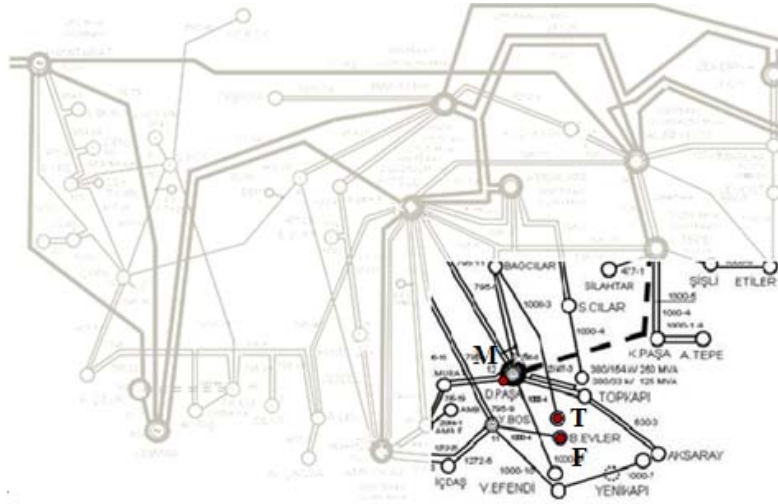
Belirli kritik çukur genlik değeri, diğer bir ifadeyle cihazın çalışmasını sürdürebileceği en küçük gerilim genlik değeri, için bir F-T hattında oluşan arızanın uzaklığı yukarıdaki denklemler kullanılarak hesaplanabilir. Denklemlerde çözüm kolaylığı sağlamak amacıyla bir hatta en fazla iki kritik mesafe olabileceği ve hattaki çukur genliğinin hattın bağlı olduğu baralarda oluşan arızanın neden olduğu çukur genlik değerleri arasında veya bunlardan küçük olduğu varsayılmıştır. Bu varsayımlara göre M noktasındaki çukur genliği, $0 \leq p \leq 1$ için ikinci dereceden bir eğridir[56]. Buna göre;

- M noktasındaki cihazın veya bu noktada istenen kritik gerilim değeri $p=0$ ve $p=1$ olduğunda elde edilen gerilim değerinden küçük ise hat tamamen M noktası için korunmasız alanın dışındadır.
- Kritik gerilim değeri, $0 \leq p \leq 1$ için elde edilen çukur genliğinden yüksek ise hat tamamen korunmasız alanın içindedir.
- Kritik gerilim değeri, $p=0$ ve $p=1$ için elde edilen gerilim değerlerinin arasında ise hattın sadece bir bölümü korunmasız alanın içindedir yani belirtilen kritik gerilim için hatta bir tane kritik nokta vardır.
- Kritik gerilim değeri, $0 \leq p \leq 1$ için elde edilen değerden küçük ve $p=0$, $p=1$ noktalarındaki değerden yüksek ise hatta iki tane kritik nokta mevcuttur. Hattın iki bölümü korunmasız alanın içindedir.

2.4.2. 1. İletim Bölgesi'nde yeralan bir hattın herhangi bir noktasında oluşan arızanın başka bir noktaya etkisi

Bölüm 2.4.1'de verilen yöntem Türkiye Sistemi 1. İletim Bölgesi'ndeki Bahçeli_A-Bahçeli_B hattında tek faz toprak arızası oluşması durumunda Davutpaşa_A barasında, eşik gerilim değeri 0.7 pu. olan hassas yük için uygulanmıştır. Şekil 2.8, yöntemin uygulandığı noktaları göstermektedir. M noktası Davutpaşa_A, F noktası

Bahçeli_A ve T noktası Bahçeli_B baralarını ifade etmektedir. Gerekli dizin empedans ve arıza öncesi gerilim değerleri SIMPOW yazılım programından güç akışı analiziyle elde edilmiştir. Uygulanan yöntem, yazılım programında gerçekleştirilen arıza analizinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak, analiz sonuçlarının doğruluğunun belirlenmesine imkan sağlamaktadır. Bu durumda tek faz toprak arızası hesabı için gerekli dizin empedans değerleri ve arıza öncesi gerilim değerleri sırasıyla Tablo 2.4 ve Tablo 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2.8: 1. İletim Bölgesi'nde teoremin uygulandığı bara noktaları

Tablo 2.4: Tek faz toprak arızası için gerekli dizin empedans değerleri

	Pozitif (pu)	Negatif (pu)	Sıfır (pu)
Z_{FF}	$0,3595.10^{-2}+j0,2075.10^{-1}$	$0,3566.10^{-2}+j0,2065.10^{-1}$	$0,6416.10^{-2}-j0,2109$
Z_{TT}	$0,4599.10^{-2}+j0,2865.10^{-1}$	$0,4569.10^{-2}+j0,2855.10^{-1}$	$0,8613.10^{-2}-j0,1876$
Z_{MF}	$0,1495.10^{-2}+j0,5571.10^{-2}$	$0,1469.10^{-2}+j0,5503.10^{-2}$	$0,1898.10^{-2}-j0,2487$
Z_{MT}	$0,1524.10^{-2}+j0,5556.10^{-2}$	$0,1498.10^{-2}+j0,5489.10^{-2}$	$0,1861.10^{-2}-j0,2491$
Z_{FT}	$0,3702.10^{-2}+j0,2070.10^{-1}$	$0,3674.10^{-2}+j0,2061.10^{-1}$	$0,6393.10^{-2}-j0,2113$
HAT	$0,00007463+j0,00080115$	$0,00007463+j0,00080115$	$0,00124810+j0,00029094$

Tablo 2.5: Arıza öncesi gerilim değerleri

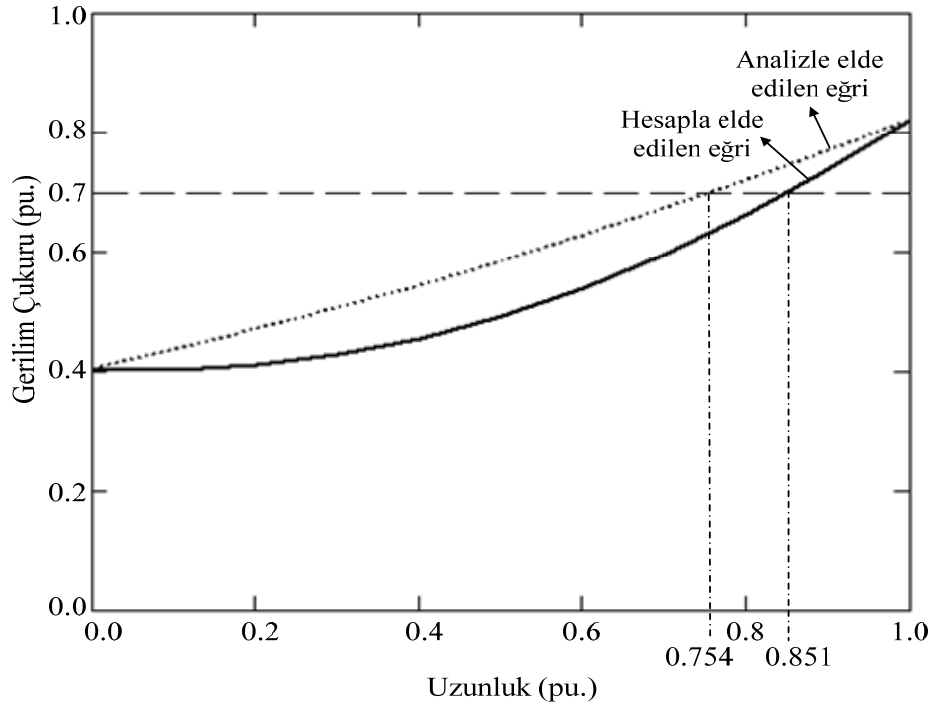
$V_F^{\text{önce}}$	$0,9956596-j0,1373977$
$V_T^{\text{önce}}$	$0,9944274-j0,1428327$
$V_M^{\text{önce}}$	$0,9894018-j0,1649671$

Tablo 2.4 ve Tablo 2.5’de verilen değerler Bölüm 2.4.1’de yer alan (2.17)-(2.20) denklemlerinde yerine yazılıp, $p=0$, $p=1$ ve $p=0.5$ için ikinci dereceden denklem

çözümü yapıldığında elde edilen değerler sırasıyla 0,404, 0,825 ve 0,493'tür. Bu durumda, Bahçeşehir_A-Bahçeşehir_B hattında oluşabilecek tek faz toprak arızası sırasında, Davutpaşa_A noktasında 0.7 pu'lık kritik gerilim için bu hattın bir bölümü korunmasız alanın içinde yer alır. Hattın ne kadarlık bölümünün korunmasız alan içinde yer alacağının belirlenebilmesi için ikinci dereceden fonksiyon (2.24) eşitliğinde elde edilmiştir.

$$0.7 = 0.486p^2 - 0.065p + 0.404 \quad (2.24)$$

(2.24) denkleminin çözülmesiyle p uzunluğu 0.851 olarak elde edilmektedir. Yani hattın 0.851. kilometresinde oluşan tek faz toprak arızası Davutpaşa_A barasında 0.7 pu'lık gerilim çukuruna neden olmaktadır. Hesapla elde edilen bu sonuç aynı noktalar ve tip arıza için SIMPOW analiz programında da gerçekleştirilmiştir. Hem hesapla hem de analizle elde edilen eğriler Şekil 2.9'da verilmiştir. Şekil 2.9'dan görüldüğü gibi hesaplanan nokta ile analiz sonucu elde edilen nokta birbirine çok yakındır. Bu, yazılım programıyla yapılan değerlendirmelerin doğruluğunu göstermekle birlikte hatta oluşan arıza değerlendirmesine alternatif bir yöntem sunmaktadır. SIMPOW yazılım programıyla karşılaştırıldığında, kısa devre analizi formülizasyonunu kullanan bu yöntemde sonuçların elde edilmesi daha uzun sürmektedir. Ayrıca tüm arıza durumlarını içeren bir değerlendirmeye imkan vermeyen bu yöntem sadece Doktora Tez çalışmasında kullanılan analiz programının sonuçlarının doğruluğundan emin olmak için kullanılmış tez çalışmasına ait analizler hem cevap vermedeki hızı hem de arızaların tek tek değerlendirilmesi dışında bir toplam olarak irdelenmesine de imkan sağlayan SIMPOW programıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.9: Kısa devre hesabı ve analizle elde edilen eğriler

BÖLÜM 3. KISA SÜRELİ GERİLİM ÇUKURUNUN ETKİSİNİ AZALTMA YÖNTEMLERİ

3.1. Giriş

Gerilim değişimine duyarlı cihazların devre dışı kalması, kısa süreli gerilim çukuruyla ilgili asıl güç kalitesi problemidir. Cihazın devre dışı kalmasının en sık karşılaşılan nedeni, güç sistemindeki arızalardır. Arıza, sistemin radyal kısmında ise koruma sistemi kesintiye sebep olabilir. Kısa süreli ve şiddetli olmayan gerilim çukuru cihazın gerilim değişimine duyarlılığının iyileştirilmesiyle önlenabilir. Şiddetli gerilim çukurunun engellenebilmesi, güç sistem yapısında ve çalışmasında değişikliklere gidilmesini gerektirir. Sistem veya cihaz iyileştirilmesinin mümkün olmadığı endüstriyel tüketicilerde istenilen enerji kalitesinin sağlanması için tek çözüm sisteme gerilim çukurunun etkisini azaltabilecek cihaz bağlanmasıdır.

Kısa süreli gerilim çukurunu yok etme yöntemleri iki grupta toplanabilir.

1. Güç sisteminin iyileştirilmesi
2. Uygun noktaya gerilim çukurunun etkisini azaltıcı cihaz bağlanması

3.2. Güç Sisteminin İyileştirilmesi

Güç sistemi iyileştirilerek sistemdeki gerilim çukur etkisi azaltılabilir. Yapılabilecek iyileştirmeler arıza sayısının azaltılması, arıza temizleme zamanının azaltılması, sistem yapısının değiştirilmesi ve cihaz gerilim duyarlılığının geliştirilmesidir.

3.2.1. Arıza sayısının azaltılması

Güç sisteminde kısa devre arızalarının sayısının azaltılması, gerilim çukur sıklığıyla birlikte kesinti sıklığının azaltılmasını da sağlar. Bundan dolayı kaynak kalitesini arttırmada etkili bir yöntemdir ancak çözüm her zaman çok belirgin değildir. Sistemdeki arıza sayısını azaltıcı yöntemlerden bazıları aşağıda sıralanmıştır[54].

- Havai hatların yer altı kablolarıyla değiştirilmesi: Kısa devre arızalarının büyük bölümü atmosferik olaylar ve çevre koşullarının neden olduğu etkilerden kaynaklanmaktadır. Yer altı kablolarına çevre koşullarının etkisi az olmakla birlikte onarım zamanlarının uzun sürmesi dezavantaj olarak söylenebilir.
- Sistemin yüklenme durumunun değerlendirilmesi: Aşırı yüklenmeden kaynaklı ısınmalar sistemde arıza riskini arttırmaktadır. Bundan dolayı sistemde aşırı yüklenmenin olmayacağı şekilde yük dağılımının gerçekleştirilmesi çukur sıklığının hafifletilmesinde önem taşır.
- Koruma telinin yerleştirilmesi: Bir veya iki koruma teli yerleştirmek yıldırımın neden olduğu arıza riskini azaltır. Koruma teli, yıldırım darbesini üzerine çekip bunu toprağa akıtacak şekilde yerleştirilmelidir.
- Yalıtım seviyesinin artırılması
- Onarım ve bakım sıklıklarının artırılması

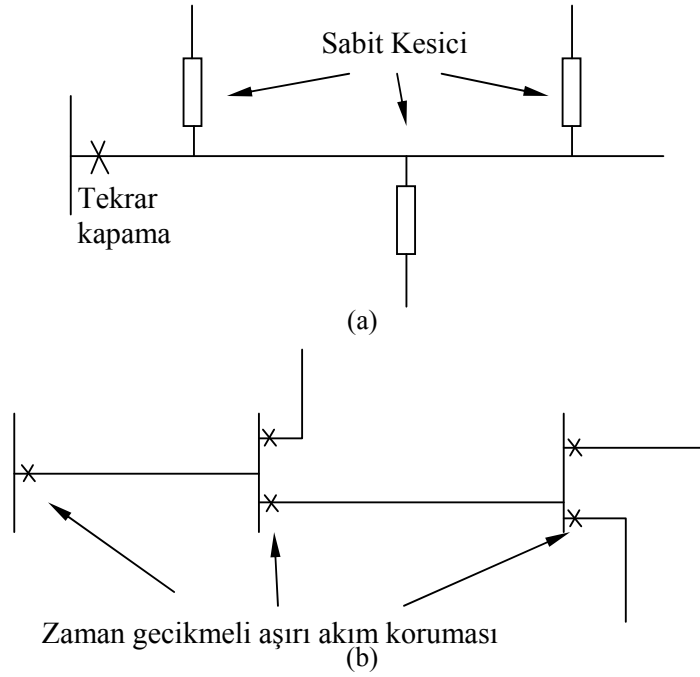
3.2.2. Arıza temizleme zamanının azaltılması

Arıza temizleme zamanının yani çukur süresinin azaltılması olay sıklığında değişime neden olmamakla birlikte olayın şiddetinde azaltıcı bir etkidir. Başka bir ifadeyle hızlı arıza giderme çukur sayısını azaltmaz, zamanını sınırlar. Kesintiler açısından ise ne kesinti süresine ne de kesinti sıklığına etkir. Kesinti süresi kaynak değişim hızıyla tanımlanır.

Alçak ve orta gerilim sistemlerinde kullanılan, yarım periyotta arızayı temizleme özelliğine sahip akım sınırlayıcı sigortalarla arıza zamanı sınırlanabilir. Hem orta gerilim hem de yüksek gerilim de kullanılabilen devre kesicileri, akım sınırlayıcı sigortalardan daha maliyetli olmakla birlikte aynı sürede arızayı giderebilir. Arıza temizleme zamanının sadece kesicinin açma zamanını değil rölenin karar verme süresini de içerdiği unutulmamalıdır.

Şekil 3.1’de iki farklı dağıtım sistem yapısı mevcuttur. Şekil 3.1a’daki sistemde tüm hatlarda bir devre kesicisi vardır. Bu yapıda, belirli bir akım-zaman karakteristiğine sahip olan röle sadece bağlı olduğu hat için koruma yapar. Tüketicilerde uzun süreli kesintilerin sıklığını sınırlamak için tekrar kapama hatta yer alan kesicilerin ya da

yan dallardaki sigortaların uyumuyla sağlanır. Bu yapı genelde havai hatlarda uygulanır. Arıza temizleme zamanının azaltılması daha hızlı kesiciler gerektirir. Akım sınırlayıcı sigorta, hızlı tekrar kapaması karmaşık olduğundan ve yanların korumasında ana kesici açmadan önce atlama yapacağından, bu tip yapılarda uygun değildir. Şekil 3.1b'deki sistem, kaskat yapıda alt sistemler içermektedir. Seçiciliğin sağlanabilmesi için, aşırı akım rölelerinin zaman düzenlemeleri kullanılır. Kaynağa en uzak olan röle aşırı akım durumunda hemen açar. Kaynağa yaklaştıkça açma gecikmesi tipik 500 milisaniye aralıklarla artar. Yapıda açma gecikme zamanı, kaynaktan uca doğru, 1000 milisaniye, 500 milisaniye ve sıfır milisaniyedir. Bu yapı genelde yer altı sistemlerinde kullanılır[51].



Şekil 3.1: a) Tümü hattın tek devre kesicisiyle korunduğu sistem yapısı b) Seçici koruma

Arıza temizleme zamanı ters zamanlı aşırı akım rölesiyle azaltılabilir. Ters zamanlı aşırı akım rölelerinde, gecikme zamanı artan arıza akımı için azdır. Bu durumda dahi arıza giderme zamanı 1 saniyenin üzerinde olabilir. Koruma uyumunda, açma gecikmesinin azaltılması çukur süresinde ciddi bir azalmaya neden olmakla birlikte seçicilik açısından dezavantajdır. Seçicilikte önemli olan yanlış açmaların önüne geçmektir. Bu da bir anlamda açma gecikmesinde artma anlamına gelir.

İletim sisteminde arıza giderme zamanı geçici hal kararlılığıyla sınırlandırılır. Bu sınırlar ısı etkiden dolayı dağıtım sistemine göre daha katıdır ve kısa arıza giderme zamanları gerektirir (200 milisaniyeyi nadiren aşan). Bu durum arıza giderme zamanının daha da azaltılmasını güçleştirir.

İletim sisteminde arıza temizleme zamanının azaltılması:

- Bazı durumlarda, daha hızlı devre kesicileri faydalı olabilir. Bu arıza temizleme zamanı dışında mesafe korumasında röle seçicilik ayar değerlerinde de sınırlama getirir. Ayrıca bu kesicilerin maliyeti yüksektir.
- Seçicilikte, gecikme ayarlarında belirli bir azalma mümkündür. Ancak bu normal koşullarda arıza giderme zamanını azaltmada fazla etkili olmayabilir.

3.2.3. Sistem yapısının değiştirilmesi

Dağıtım sisteminin yapısında değişiklikler yapılarak arıza sırasında oluşan gerilim çukurunun şiddeti azaltılabilir. İletim ve alt iletim de bu maliyetli olacağından pek tercih edilen bir yöntem değildir[54].

Bazı hafifletme yöntemleri:

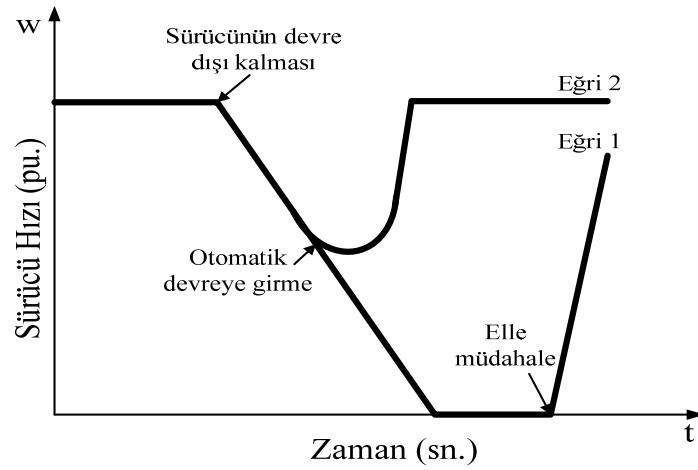
- Gerilim değişimlerine duyarlı yük noktasına generatör yerleştirilmesi: Sistemde, yerleştirilen generatör noktasına uzak bir yerde oluşan arızanın neden olduğu çukur sırasında, generatör bağlı olduğu noktadaki gerilimi destekleyici etki gösterir. Gerilim çukurunun genliğindeki artma, generatörün arıza akımına desteğinin yüzdesine bağlıdır.
- Sistemde kritik noktalara akım sınırlayıcı bobinler yerleştirilmesi: Bu arızaya olan elektriksel mesafenin arttırılmasını sağlar. (Bu yöntemin gerilim çukurunu diğer tüketiciler için daha da şiddetli hale getirebileceği unutulmamalı, bu dikkate alınarak sistem analizi gerçekleştirilip en uygun nokta seçilmelidir).
- Gerilim değişimine hassas olan cihazın bulunduğu baranın iki veya daha fazla noktadan beslemesinin yapılması: Bu durumda bir alt istasyondaki çukur, diğer alt istasyondan besleme sonucunda hafifletilebilir. En etkili yol iki farklı noktadan beslemektir. İkinci nokta gerilim çukur sıklığını arttırmakla birlikte çukur genliğinin şiddetini azaltır.

Kısa süreli kesintilerin sayısı daha az tüketicinin aynı tekrar kapamaya bağlanmasıyla azaltılabilir. Bu daha fazla tekrar kapama sisteminin yerleştirilmesi demektir. Ayrıca sistemde yedekleme yapılarak kesintilerin sıklığı önemli derecede azaltılabilir.

3.2.4. Cihazın gerilim değişimine duyarlılığının geliştirilmesi

Günümüzde birçok endüstriyel işlem, AC ayarlanabilir hız sürücülerine bağımlıdır. Bu cihazların çalışması yüksek kaliteli AC besleme gerektirir. Bu gereklilik, tüketicinin kaliteli güç talebini arttırmakla beraber cihaz üreticileri ve sistem mühendislerine de, kaynak kalitesinin sağlanamadığı durumlar göz önüne alınarak, sürücü sisteminin davranışını geliştirme sorumluluğunu yükler. Doğru uygulama, tasarım ve parametre ayarlarıyla gerilim çukurunun sürücüye etkisi en aza indirgenebilir. Ancak işletimin doğru kontrol edilmemesi veya eviricinin devre dışı kalması üretimde ciddi zararlara neden olabilir. Özellikle çelik, kağıt ve lif üretim sanayilerinde yaşanan sorunlar bunun kanıtıdır. Gerilim çukuru, sürücünün DC bara geriliminin azalmasına neden olur. Şiddetli olmayan çukur sırasında, gücün DC bara kondansatöründen sağlanması mümkün olabilir fakat şiddetli çukur eviricinin devre dışı kalmasına yol açabilir. Şekil 3.2, gerilim çukuru sırasında sürücünün davranışını göstermektedir. 1 nolu eğriye göre, devre dışı kalan sürücü elle müdahale edilerek tekrar devreye alınır. 2 nolu eğride ise sürücünün hızı sıfıra düşmeden gerilim değeri çukur öncesi değerine ulaştığından, sürücü otomatik olarak devreye girer[57].

Gerilim çukuru, cihazı ve devre koruma elemanlarını en fazla gerilimin arıza öncesi değerine ulaşmaya başladığı anda etkiler. Bu esnada sistem normal çalışmasına dönerken, DC bara gerilimi düşüktür ve AC gerilimin oluşmasıyla DC bara kondansatörü şarj olmaya başlar. Bu durumda da çok yüksek akımlar meydana gelir. Sürücü ilk devreye alındığında oluşan başlangıç akımını sınırlayan şarj öncesi devreler genellikle ilk şarjdan sonra devre dışı kaldığından bu tekrar şarj akımı, giriş devre koruması açmazsa doğrultucu devresindeki diyotların yanmasına neden olabilir.



Şekil 3.2: Gerilim çukuru sırasında sürücünün davranışı[57]

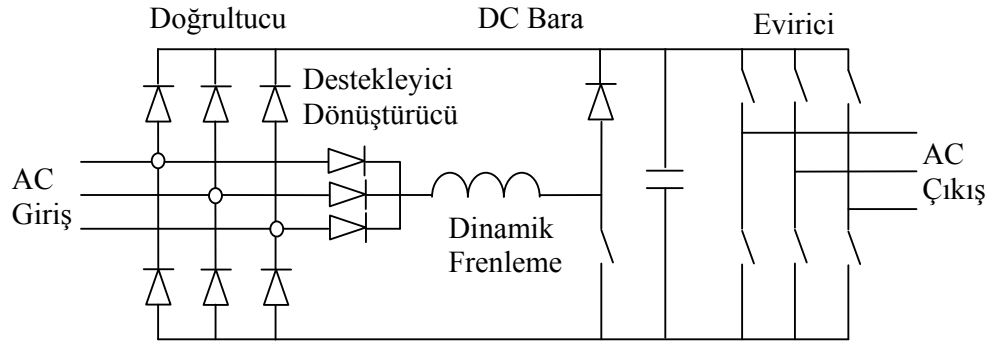
Bir sürücüde çukurun etkisi kinetik ve mıknatıslanma enerjilerinin sağlanması, DC bara kondansatörü değerinin artırılması ve destekleyici dönüştürücü eklenmesiyle azaltılabilir.

1. Kinetik ve mıknatıslanma enerjilerinin sürdürülebilirliği: Çukur sırasında kinetik enerjinin devamlılığı, DC bara gerilimini, olay öncesi değerinde tutmak için rotorda depolanan enerjiden gücün tekrar üretilmesiyle sağlanır. Bunu sağlayan yapıya sahip sürücü sistemi sürücü hızındaki azalmaya bağlı olarak şiddetli ve uzun süreli gerilim çukurlarına daha dayanıklıdır. Sürücüde bu sayede kontrollü durma sağlanabilir. Ancak bu esnada üretilen ürünün düşük kaliteli olma olasılığı vardır. Motordaki mıknatıslanma akımlarından az da olsa enerji sağlamak mümkündür. Motor sargılarının endüktansı akım kaynağı gibi çalışmaya zorlanarak, DC baraya gerilim sağlar. Motorun generatör olarak çalışabilmesi için akıya gereksinimi vardır bu ancak kinetik enerji sağlandıktan sonra olabilir.

2. DC Bara kondansatörünün değerinin artırılması: Sürücülerin çalışma sürekliliklerinin sağlanmasında en basit yöntem kondansatör değerini arttırmaktır. Modern sürücüler kilowatt güç başına 75-360 μF aralığında kondansatörlerden oluşur. Gerilim çukuru sırasında daha yüksek değerli kondansatörlerin daha uzun süreli gerilim sağladıkları kaynakçada ispatlanmıştır[58]. Yüksek güçlü süper kondansatör teknolojisi, DC bara uygulamalarında normal kondansatörlerin yerine

kullanılmak için geliştirilen yeni bir uygulamadır. Ancak bu düzen çok maliyetlidir. Ek kondansatör yerleştirilmesi, diğer bir çözüm önerisi olmakla birlikte şarj vedeşarjın tekrar tasarlanmasını ve ek maliyet gerektirir.

3. Destekleyici dönüştürücü eklenmesi: Şekil 3.3 destekleyici dönüştürücü devreli evirici yapısını göstermektedir. Şekil 3.3'den görüldüğü gibi ek eleman 4 diyot, bir bobin ve faydalı dinamik frenleme yarı iletkeninden oluşmaktadır. Çukur tespit edildiğinde kontrol devresi dinamik frenleme yarı iletkenini devreye sokar. Bu DC bara geriliminden geri besleme alınmasına benzeyen, değişken doluluk-boşluk oranında sabit frekansta çalışma yapısındadır. İletim sırasında, depolama görevi gören bobin kesim sırasında depoladığı enerjiyi DC baraya aktarır. Mevcut sürücü ünitelerine eklenmesi kolay olan bu yapının maliyeti diğer cihazı gerilim değişimlerine duyarlılığını geliştirme yöntemlerinden daha düşüktür. Ancak faydalı dinamik frenleme ve kaynak kodlu uyarlamalar gerektirir.



3.3. Gerilim Çukurunun Etkisini Azaltıcı Cihaz Bağlanması

Güç sistemlerinin verimli ve güvenilir çalışabilmesi için gerilim ve reaktif güç kontrolünün aşağıda belirtilen maddelere uygun olması gerekir.

1. Tüm sistemde yer alan cihazların uç gerilimleri kabul edilebilir sınırlarda olmalıdır. Cihazın uzun süre belirtilen sınırlar dışında çalışmaya maruz bırakılması, cihazda arızalara neden olabilir.

2. Reaktif güç akışı, kayıpları azaltmak için en aza indirgenmelidir. İletilen aktif güç değerinin ve gerilim ayarının sağlanabilmesi için reaktif güç akışının belli sınırlar arasında tutulması gereklidir.

Gerilim genliğini belirtilen sınırlarda tutmak güç sistemlerinin karmaşıklığından dolayı kolay değildir. Yük değişimi ile iletim sisteminin reaktif güç talebi değişir. Uzun mesafelerde, kayıpları arttırarak iletilebilen en yüksek aktif güç değerinde azalmaya neden olacağından reaktif güç iletimi gerçekleştirilmez. Bu durumda sistemin reaktif güç talebi bazı özel cihazlarla sağlanır.

Senkron generatörler, uyarımlarına bağlı olarak reaktif güç üretir veya tüketirler. Aşırı uyarım durumunda senkron generatörler reaktif güç kaynağıdır, tersi durumda ise reaktif güç tüketirler.

Havai hatlar, yük akımına bağlı olarak reaktif güç üretir veya tüketirler. Yüklenme hat kapasitesinin altında ise hat reaktif güç üretir, üzerinde ise reaktif güç tüketir. Yeraltı kabloları yüksek kapasitif etkileri nedeniyle tüm çalışma koşullarında reaktif güç üretirler.

Transformatörlerde yüklenme durumunun reaktif güce etkisi yoktur, her koşulda reaktif güç tüketirler. Boşta çalışmada paralel mıknatıslanma reaktansı baskın olarak etkilidir, tam yükte çalışmada ise seri kaçak akı endüktansı birinci derecede baskındır.

Yükler normalde reaktif güç tüketirler. Güç sistemi tarafından beslenen bir yük barasına pek çok sayıda cihaz bağlıdır. Bu cihazların çalışma koşulları gün, mevsim ve hava koşullarına göre değişir. Normal çalışmada yük barası reaktif güç tüketir. Yüklerin aktif ve reaktif güçlerinin değişimi gerilim genliğine ve açısına bağlıdır. Aşırı endüktif yükler iletim şebeke geriliminin genliğinde aşırı azalmalara neden olur. Dengeleme sistemi ile güç faktörü ayarı yapılarak bunun önüne geçilmeye çalışılır[59].

3.3.1. Gerilim kontrol yöntemleri

Kayıpsız bir hatta iletilen en büyük elektrik gücü $P_{\max} = \frac{V^2}{X}$ eşitliğinden elde edilir.

Bu durumda bu değer kararlı hal güç iletimi için teorik sınırdır. Pratikte iletkende ısınmalara neden olan I^2R kayıplarını hesaba katmak gereklidir. İletkenin fiziksel karakteristiği her bir sıcaklık için farklıdır. Bu en fazla iletilen aktif güç için ısı sınırı koyulmasını gerektirir. Genellikle uzun hatlarda X , kısa hatlarda ise R temel iletim sınırını belirler.

AC yükler, AC gerilimin genliği veya frekansındaki değişimlerden etkilenir. AC güç sistemleri çoğunlukla sabit frekansta çalışırken gerilim genliği kararlı halde tanımlanan sınırları aşmadan, sürekli değişim halindedir. Bu gerilim genlik toleransı uzun radyal sistemlerde güç iletiminde ilk sınırlamadır. Ayrıca kararlı halde güç iletimi için paralel hatlar ve düğüm güç akışları da sınırlama oluşturur. Bu genellikle akım akışının hattın akım kapasitesinden ziyade empedansı ile tanımlandığı hatlardan oluşan güç sistemlerinde söz konusudur.

3.3.1.1. Geleneksel iletim hattı dengeleyicisi ve güç akış kontrolü

Uygun reaktif dengeleyici ile iletilen aktif güç arttırılabilir. Reaktif dengeleyici iletim hattının elektriksel karakteristiğini yük talebiyle daha uyumlu hale getirir. Az yüklenmenin olduğu durumlarda aşırı gerilimleri engellemek için sisteme paralel sabit veya mekanik anahtarlama reaktörler, aşırı yüklenme söz konusu olduğunda gerilim desteği sağlayan paralel bağlı sabit veya anahtarlama kapasitörler devreye alınır. Uzun iletim hatlarında, endüktif hat empedansını ve böylece elektriksel mesafeyi, azaltmak için seri kapasitif dengeleyici uygulanır. Katlı hat sistem yapılarında, sistemin iletim açısının derecesinden bağımsız olarak bağlı olduğu hattın iletim açısı derecesini kontrol eden, faz kaydırıcılar güç iletim planlamasında uygulanır[60].

3.3.1.1.1. İdeal paralel dengeleyici

Şekil 3.4a da görülen iletim hattının orta noktasına paralel bağlanmış reaktif güç dengeleyicili basit iki makineli model devresinde, dengeleyici temel frekansta, alıcı ve verici uç gerilimlerine eşit gerilim genliğinde ve aynı fazda sinüzoidal AC gerilim kaynağı gibi modellenir[61]. Orta nokta dengeleyicisi iletim hattını birbirinden bağımsız iki parçaya ayırır. İlk parça, $X/2$ empedanslı, gücü verici uçtan orta noktaya, ikinci parça ise yine $X/2$ empedanslı, gücü orta noktadan alıcı uca taşır. Orta nokta dengeleyicisi sadece reaktif güç değişimini sağlar. Gerilim ve akım ilişkilerinin fazör diyagramları Şekil 3.4b’de verilmiştir.

Aktif güç, reaktif güç ve iletim açısına, δ , ait paralel dengeleyici durumundaki değişimler Şekil 3.4c’de görüldüğü gibidir. Orta nokta paralel dengeleyici iletilen gücü önemli derecede artırır. İletim hattına eşit mesafelerde katlı paralel dengeleyiciler yerleştirilebilir. Teorik olarak iletilen güç aynı hat boyunca her bir çift parça için ikiye katlanır. Ayrıca parça sayısındaki artışla hattaki gerilim değişimi hızla azalarak ideal durumdaki sabit gerilim genliğine ulaşılır. Sonuç olarak, iletim güç sınırı olmayan, her bir yüklenmede düzgün gerilim dağılımı sağlayabilecek şekilde yeterli sayıda, hat boyunca dağıtılmış dengeleyici sistemi en verimli durumdur. Denklem (3.1) ve (3.2)’de sırasıyla gerilim ve akım eşitlikleri verilmiştir.

$$V_{sm} = V_{mr} = V \cos \frac{\delta}{4} \quad (3.1)$$

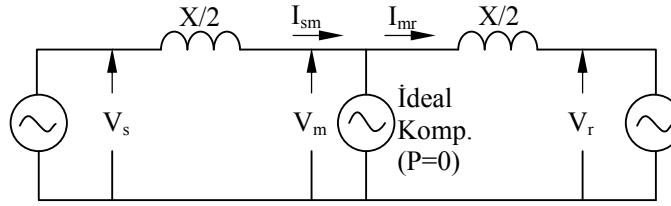
$$I_{sm} = I_{mr} = I = \frac{4V}{X} \sin \frac{\delta}{4} \quad (3.2)$$

İletilen aktif güç (3.3) denkleminde verilmiştir.

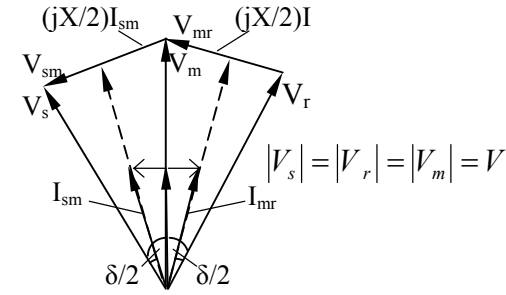
$$P_p = V_{sm} I_{sm} = V_{mr} I_{mr} = V_m I_m \cos \frac{\delta}{4} \quad \text{veya} \quad P_p = 2 \frac{V^2}{X} \sin \frac{\delta}{2} \quad (3.3)$$

Paralel dengeleyiciye ait reaktif güç (3.4) denklemindeki gibidir.

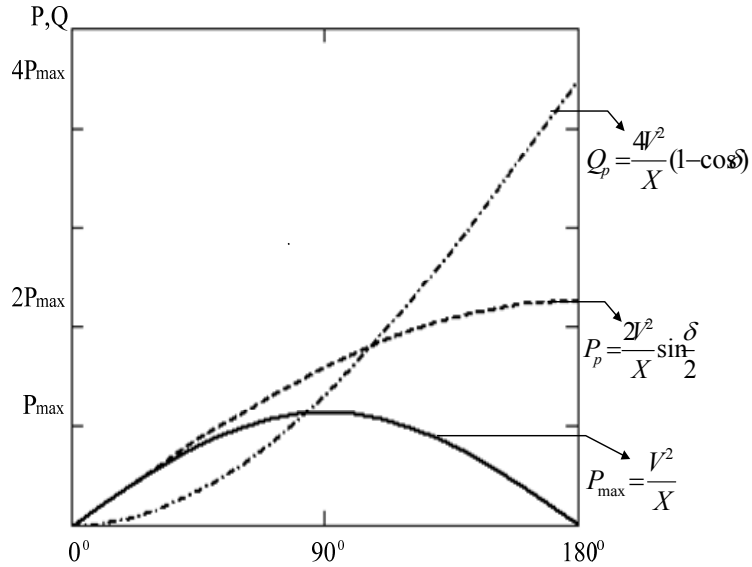
$$Q_p = VI \sin \frac{\delta}{4} = 2 \frac{V^2}{X} (1 - \cos \frac{\delta}{2}) \quad (3.4)$$



(a) İki makineli sistem



(b) Sisteme ait fazör diyagramları



(c) İletilen güç ile açı karakteristiği

Şekil 3.4: İdeal paralel dengeleyici

3.3.1.1.2. Seri dengeleyici

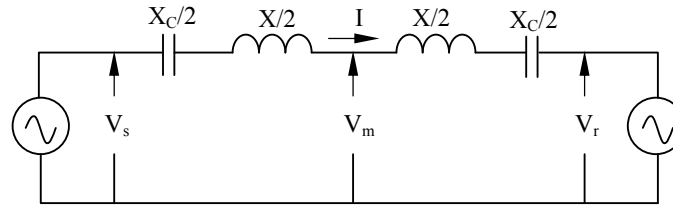
Seri kapasitif dengeleyici alıcı uçtan verici uca etkin seri hat empedans değerini azaltır. Genel ifadeyle seri bağlı dengeleyici kapasite değeri, gerçek hat reaktans değerini, hat fiziksel olarak kısa hatmış gibi azaltır. Bir hattın seri empedans akımını, buna bağlı olarak iletilen gücü arttırmak için, empedans üzerine düşen gerilim arttırılmalıdır. Bu seri hat reaktansına ters yönde gerilim üreten seri bağlı bir devre elemanıdır. Bunu sağlayabilen en basit eleman kapasitördür.

Şekil 3.5a’da seri kapasitör dengeleyicili iki makine modeli görülmektedir. Akım ve gerilim fazörleri Şekil 3.5b’de verilmiştir. Seri hat reaktansının toplam geriliminin genliği, $V_x = 2V_{x/2}$ seri kapasitörün meydana getirdiği ters gerilimin genliğiyle artar, $V_c[62]$.

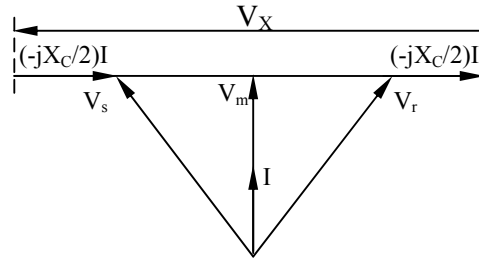
Etkin iletim empedansı (3.5) eşitliğinde verilmiştir.

$$X_{eff} = X - X_c \quad \text{ya da} \quad X_{eff} = (1 - k)X \quad (3.5)$$

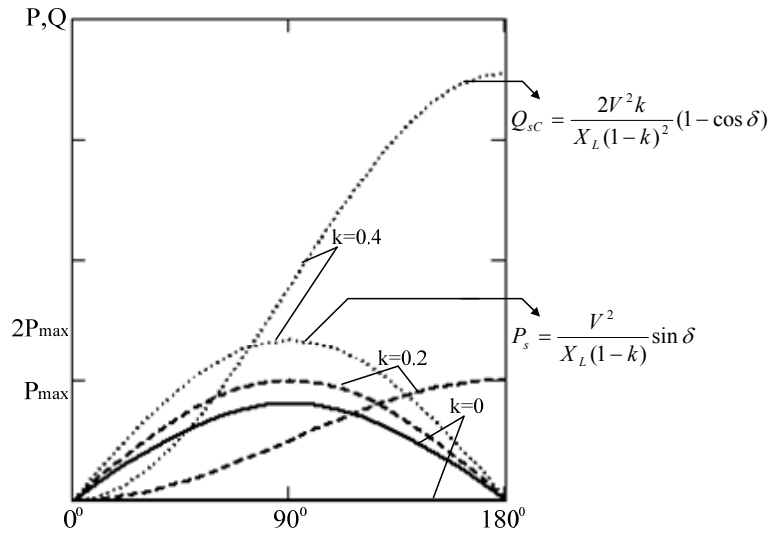
k: seri dengeleyici derecesi



(a) İki makineli sistem



(b) Sisteme ait fazör diyagramları



(c) İletilen güç ve yük açısı karakteristiği

Şekil 3.5: Seri dengeleyici

Dengelenmiş hattın akımı ve iletilen aktif güç (3.6) ve (3.7) denklemlerinde görüldüğü gibidir.

$$I = \frac{2V}{(1-k)X} \sin \delta \quad (3.6)$$

$$P_s = V_m I \frac{V^2}{(1-k)X} \sin \delta \quad (3.7)$$

Seri kapasitörün ürettiği reaktif güç ise (3.8) eşitliğinde görülmektedir.

$$Q_{sc} = I^2 X_c = \frac{2V^2}{X} \frac{k}{(1-k)^2} (1 - \cos \delta) \quad (3.8)$$

Aktif güç, seri kapasitörün reaktif gücü ve δ iletim açısına ait değişimler farklı seri dengeleyici dereceleri için Şekil 3.5c’de verilmiştir. Şekil 3.5c’den iletilen gücün seri dengeleyici derecesiyle hızla arttığı görülür. Benzer şekilde seri dengeleyicinin reaktif gücü k derecesi ile keskin bir artış gösterir.

3.3.1.1.3. Faz açısı kontrolü

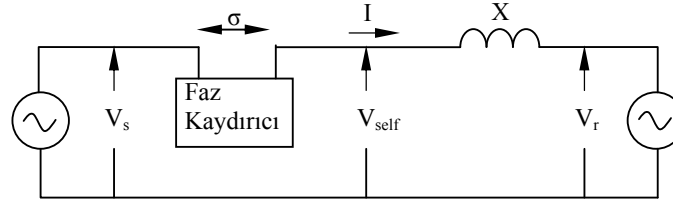
Bir hatta uygun aktif güç iletiminin sağlanabilmesi için gereken iletim açısı, tüm iletim sisteminin çalışmasıyla uyumlu olmayabilir. Bu durumlar, farklı uzunluklara sahip hatlarla kapalı çevrim oluşturan baralar arasında veya iki bara gerilimleri arasındaki açı farkının gerekli güç akışını gerçekleştirmede yeterli olmadığında oluşur. Faz kaydırıcı veya faz açısı düzenleyici bağlanarak güç akışının yönünün değiştirilmesi bunun için bir çözüm yöntemidir[63].

Şekil 3.6a’da görülen, verici uçtaki bara ile iletim hattı arasına yerleştirilmiş, faz kaydırıcının temel prensibi yine iki makine modeliyle açıklanabilir. Faz kaydırıcı, kontrol edilebilir genlik ve faz açılı sinüzoidal bir gerilim kaynağı gibi düşünülebilir. Diğer bir ifadeyle verici uç gerilimi V_s , makine gerilimi V_g ile faz kaydırıcı gerilimi V_σ ’nin toplamına eşittir. Şekil 3.6b, bu durumun fazör diyagramlarını gösterir. Faz kaydırıcı da temel amaç δ iletim açısından bağımsız olarak iletilen gücü önceden tanımlanan çalışma aralığında istenilen seviyede tutmaktır. Buna göre güç, δ açısı

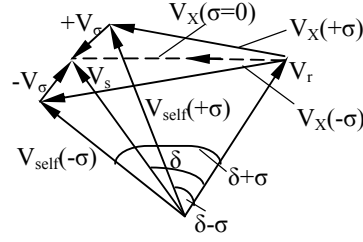
90^0 'yi aştığında da $V\sigma$ geriliminin genlik kontrolüyle, tepe değerinde tutulabilir. Bu durumda, faz kaydırıcı tek başına kararlı hal güç iletim sınırını arttırmamasına karşın, iletilen gücün en yüksek değerinde uzun süre kalmasını sağlar.

Alıcı ve verici uç arasındaki etkin faz açısı $(\delta - \sigma)$ 'dir, bu durumda iletilen aktif güç ifadesi (3.9) denklemindeki gibidir.

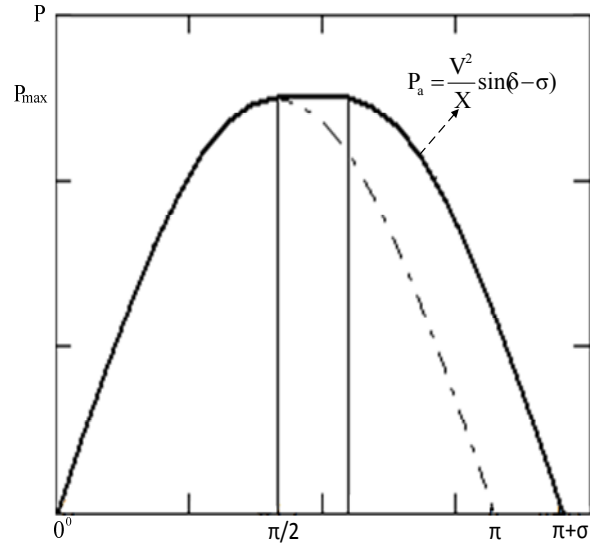
$$P = \frac{V^2}{X} \sin(\delta - \sigma) \quad (3.9)$$



(a) Faz kaydırıcılı iki makine sistemi



(b) Sisteme ait fazör diyagramları



(c) İletilen güç ve açı karakteristiği

Şekil 3.6: Faz aç düzenleyici

Aktif güç, reaktif güç ve δ - σ açılarının değişimi Şekil 3.6c'deki gibidir. Her ne kadar faz kaydırıcı dengelenmemiş hatta iletilen güç değerini arttırmasa da, teorik olarak herhangi bir δ açısında, $\pi/2 < \delta < \pi/2 + \sigma$ açı aralığında P gücünü δ açısına göre sağa kaydırarak gücün en büyük değerinde korunmasını sağlar. $P-\delta$ eğrisi faz kaydırıcının geriliminin zıt yönlü olması sonucunda sola da kaydırılabilir. Bu durumda en büyük güce makine açısı $\pi/2$ 'den az olduğunda ulaşılır ($\delta = \pi/2 - \sigma$). Faz kaydırıcı hem aktif hem de reaktif güçlerde değişime neden olur. Faz kaydırıcının VA değeri (3.10) eşitliğinde verilmiştir.

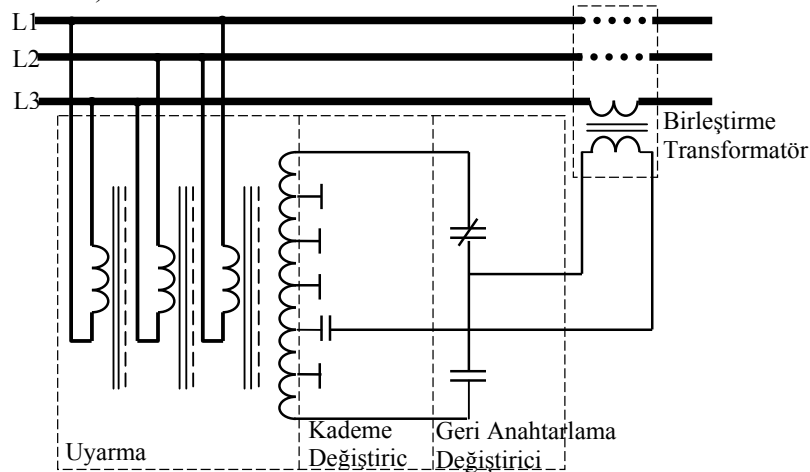
$$VA = |V_g - V_s| |I| = |V_\sigma| |I| = V_\sigma I \quad (3.10)$$

Makine gerilim genliği ve verici uç geriliminin eşit olduğu varsayılırsa (3.10) denklemi (3.11) eşitliğindeki gibi yazılabilir.

$$VA = \frac{4V^2}{X} \sin \frac{(\delta - \sigma)}{2} \sin \frac{\sigma}{2} \quad (3.11)$$

(3.11) denklemindeki $\sin \frac{(\delta - \sigma)}{2}$ ifadesi, sistem gerilim ve hat empedansında faz

kaydırıcıdan akan akımı ve $\sin \frac{\sigma}{2}$ ifadesi faz kaydırıcı tarafından verilen gerilim genliğini tanımlar. Faz kaydırıcı, mekanik kademe değiştiricili paralel uyarma transformatörü ve seri gerilim ayarını sağlayarak kararlı hal güç akış kontrolü ve istenmeyen paralel güç akışlarını ortadan kaldıran seri bağlı bir transformatörden oluşur (Şekil 3.7).



Şekil 3.7: Geleneksel tip faz kaydırıcı

3.3.2. FACTS (Esnek AC iletim düzeneği)'in amaçları

FACTS, kontrol edilebilirliği geliştirmek ve güç iletim kapasitesini arttırmak için güç elektroniği tabanlı kontrolörlü alternatif akım iletim sistemlerini ifade eder, açılımı “Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri”dir. İletim hattı yapısındaki sınırlamalar, artan güç talebi gibi, acil sistem problemlerinin aşılmasında FACTS cihazları kullanılabilir. Amaç güç akışını dengeleyerek hattın ilettiği gücü arttırmaktır. Yerleştirildiği sistemde, belirlenen kararlılık sınırları aşılmayacak şekilde zorlamalı olarak seri hat empedans akımını ısı sınırlara kadar yükselterek güç akışına müdahale eder. FACTS kontrolörleriyle gerekli gerilim ve/veya faz kararlılığı sağlanarak güç iletimi 50%'ye kadar arttırılabilir.

Hat akımının kontrol edilmesiyle yani etkin hat empedansının değişimiyle, güç akışı seçilen iletim yolunda sınırlandırılarak paralel hat ve düğüm akışları dengelenebilir. Bu yüksek güçlü kontrolör ve dengeleyicilerin geliştirilmesini gerektirir. Ayrıca bu kontrolör ve dengeleyicilerin hatta uygun şekilde yerleştirilmesiyle farklı sistem yapılarında oluşabilecek istenmeyen etkileşimler de engellenmiş olur.

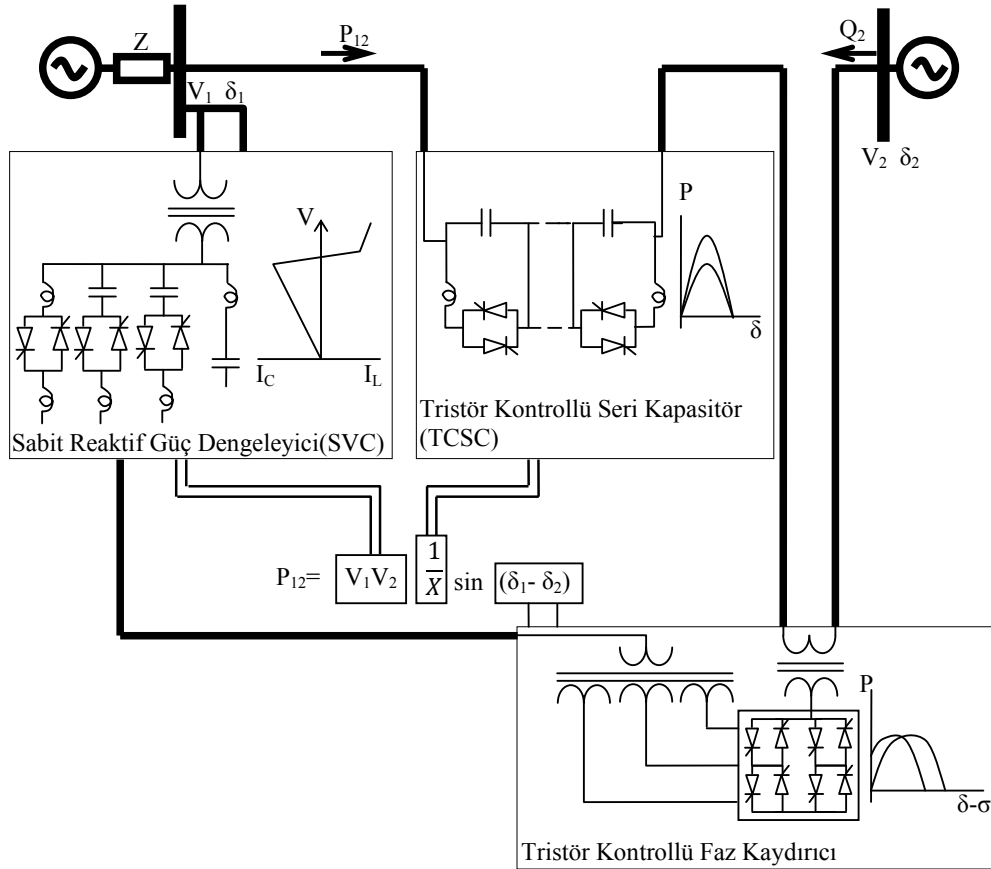
FACTS kontrol cihazları iki farklı teknikte yapılandırılabilir. Yapılardan biri, tristör anahtarlama kademeli değişirici transformatörler, diğeri ise gerilim kaynağı kontrollü kendinden iletimli sabit dönüştürücülerdir[63].

3.3.2.1. Tristör kontrollü FACTS kontrol cihazları

Bu gruptaki cihazlar, geleneksel tristörlerin kullanıldığı sabit reaktif güç dengeleyicisi (SVC), tristör kontrollü seri kapasitör (TCSC) ve faz kaydırıcıdır. Bu kontrol cihazlarının her biri güç iletimini tanımlayan parametrelerden birini kontrol eder. SVC gerilimi; TCSC iletim empedansını ve faz kaydırıcı ise iletim açısını kontrol eder (Şekil 3.8).

Tristör kontrollü faz kaydırıcı dışındakiler, dengeleme için gerekli reaktif gücü üreten, fazla olduğunda da reaktif gücü tüketebilen geleneksel kapasitör veya reaktör gruplarından ve bu gruplarla birleştirilmiş reaktif empedans kontrolü için

kullanılan tristör anahtarlarından oluşur. Kısacası reaktif kontrol cihazları iletim şebekesinde farklı reaktif admitanslar oluşturarak sistem empedans karakteristiğini değiştirirler. SVC’de kapasitif paralel dengeleyici endüktif sistem empedansı ile temel frekansın üzerindeki frekanslarda rezonansa girebilir. Seri kapasitif dengeleyici temel frekansın altında elektriksel rezonansa neden olabilir. Bu hattı besleyen türbin-generatörde mekaniksel rezonans oluşturarak tüm sistemde alt senkron rezonansa (SSR) yol açabilir. SVC’de oluşabilecek rezonansı engellemek için LC filtreler kullanılır. Alt harmonik rezonansının önlenmesi tristör valflerinin kontrolüyle mümkündür.

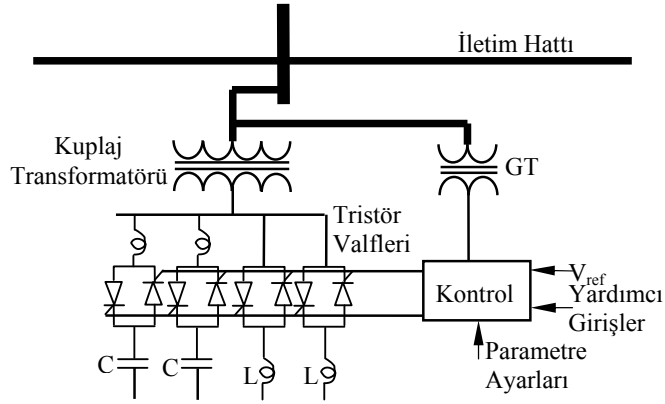


Şekil 3.8: Geleneksel tristör tabanlı FACTS kontrol cihazları

3.3.2.1.1. SVC (Sabit reaktif güç dengeleyici)

1970’lerde ark ocaklarında reaktif güç akışını dengelemek için geliştirilen SVC’ler daha sonraları iletim sistemi uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. Tipik paralel bağlı SVC, Şekil 3.9’da görüldüğü gibi, tristör anahtarlama kapasitör (TSC)

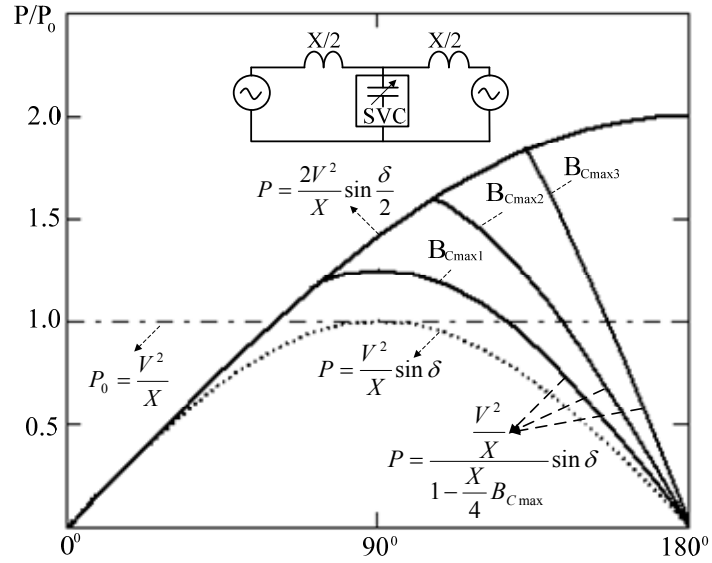
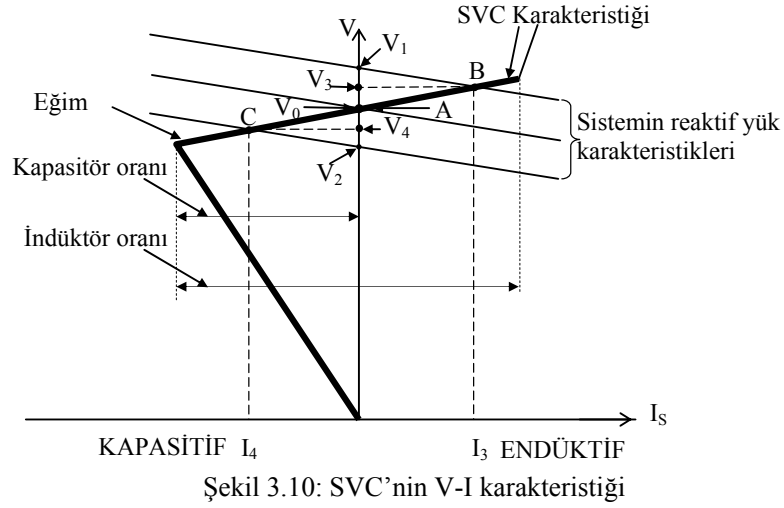
ve tristör kontrollü reaktör (TCR)'ün birleşimidir. Kapasitör ve reaktörlerin uygun koordinasyonla anahtarlanmasıyla reaktif güç çıkışı cihazın kapasitif ve endüktif aralığında sürekli değiştirilebilir. Dengeleyici, seçilen noktada iletim sisteminin gerilimini düzenleyici olarak çalıştırılır. Şekil 3.10'da SVC karakteristiği verilmiştir. Karakteristik aralığı, nominal gerilimin izin verilen tolerans değerlerinde oluşturulan eğime bağlı olarak belirlenen ayarla, SVC'nin en yüksek kapasitif ve en yüksek endüktif akımları ile tanımlanır.



Şekil 3.9: Sabit Reaktif Güç Dengeleyici (SVC)

En yüksek kapasitif çıkışa ulaşıldığında SVC sabit bir kapasitör gibi çalışır. Bu durumda çıkış reaktif akımı, sistem gerilimine bağlı olarak azalır. Azalan sistem gerilimiyle SVC'nin gerilim destek yeteneği hızlı bir şekilde kötüleşir. Gerilim desteğine ek olarak SVC'ler geçici hal ve dinamik kararlılığın geliştirilmesini de sağlar. Şekil 3.11'de iletilen güce SVC'nin etkisi görülür. İletilen güç P 'nin iletim açısı δ 'ya bağlı olarak değişimi, en yüksek kapasitör admitansın, B_{Cmax} , farklı kapasitif oranları için verilmiştir[64].

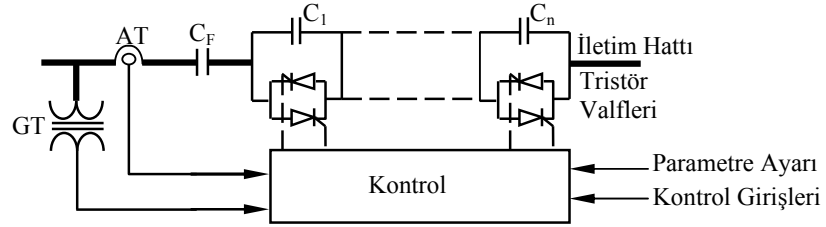
SVC'nin maksimum kapasitif admitansa ulaşana kadar orta nokta dengeleyicisi gibi davrandığı (3.3) eşitliğinde verilen $P-\delta$ ilişkisinden anlaşılabilir. Bu noktadan sonra güç iletim eğrisi, admitansı B_{Cmax} olan sabit orta nokta kapasitörü gibidir. Dinamik kararlılık, makinenin açılma hızlanma ve yavaşlamasına zıt uygun kapasitif ve endüktif değerler arasında SVC çıkışının değişimiyle elde edilebilir.



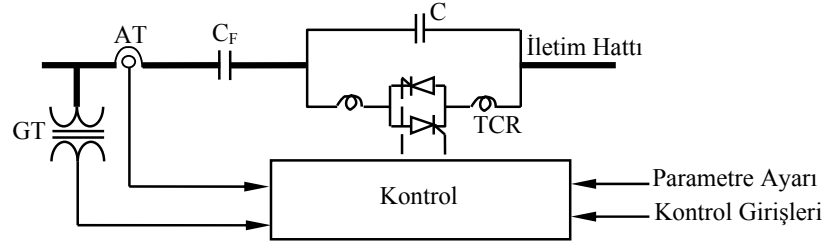
3.3.2.1.2. TCSC (Tristör kontrollü seri kapasitör)

Şekil 3.12a ve b, tristör kontrollü seri kapasitör ve tristör kontrollü reaktöre paralel sabit kapasitörden oluşan TCSC'ye ait temel iki şemayı gösterir. Tristör anahtarlama kapasitör şemasında, Şekil 3.12a, seri dengeleyici derecesi, seri bağlı kapasitör gruplarının sayısındaki artma ve azalmayla kontrol edilir. Bunu sağlamak için her bir kapasitör grubu tristör valfiyle anahtarlınır. Anahtarlama sırasındaki salınımları azaltmak ve tristör valfleri arasında doğal geçiş sağlamak için tristör

valflerinin çalışması gerilim ve akımın sıfır geçişleriyle koordine edilir. TCR'a paralel bağlı sabit kapasitörde kapasitif çalışma bölgesinde seri dengeleyicinin derecesi (TCR'ın admitans değeri kapasitörün altında tutulur) artan/azalan tristör iletim periyoduyla artar/azalır ve böylece TCR'ın akımı da artar/azalır. TCR sistemde değilken en düşük seri dengeleme gerçekleşir. TCR kapasitördeki gerilimi arızalar sırasında sınırlayabilecek şekilde tasarlanır.



(a) Tristör kontrollü seri kapasitörlü seri dengeleme



(b) Tristör kontrollü reaktöre paralel sabit kapasitörlü seri dengeleme

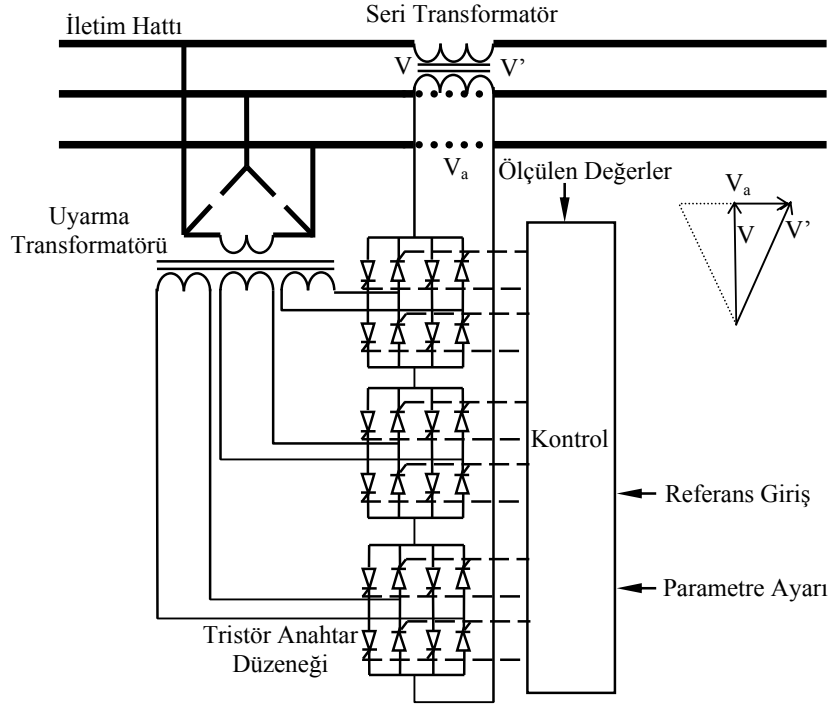
Şekil 3.12: Tristör Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC)'e ait temel şema

3.3.2.1.3. Faz kaydırıcı

Geleneksel mekanik kademe değiştiricili faz kaydırıcılar tristör kontrollü diğer cihazlar gibi $0-90^\circ$ aralığında gerilim ilavesi sağlar. Bir tristör kontrollü faz kaydırıcı transformator düzeneği Şekil 3.13'de örneklenmiştir. Bu düzenek paralel bağlı uyarma transformatörü, seri bağlı ek transformatör ve bu transformatörün ikincil kısmına bağlı tristör anahtar düzeneğinden oluşur.

Güç akış kontrolü için gerekli faz açısı bilgileri güç veya faz açısı ölçümlerinden elde edilebilir. Faz kaydırıcı, seri bağlı transformatör yardımıyla, AC sistemde hem aktif hem de reaktif güç değişimi sağlar. Kademe değiştiricili transformatör aktif veya reaktif güç üretip/tüketmeyip $0-90^\circ$ aralığında gerilim verildiğinde bunun hat tarafından tüketilip tüketilmediğini takip eder. Uyarma ve ilave transformatörün MVA oranları birbirine eşit olmalıdır. Sisteme eklenen, sistem gerilimiyle arasında

90°'lik faz farkı olan faz kaydırıcı gerilimi ile gerçekleşen alışverişte, reaktif güç sisteme kontrol edilmeden verilirse önemli gerilim çukuru meydana gelir, sistemdeki şiddetli gerilim çukurlarından kaçınmak için kademe değıştircili transformatör ile kontrol sağlanır. Reaktif paralel dengeleyici eklenerek veya generatöre yakın noktaya ilave edilerek gerektiğinde reaktif güç desteği yapması sağlanır.

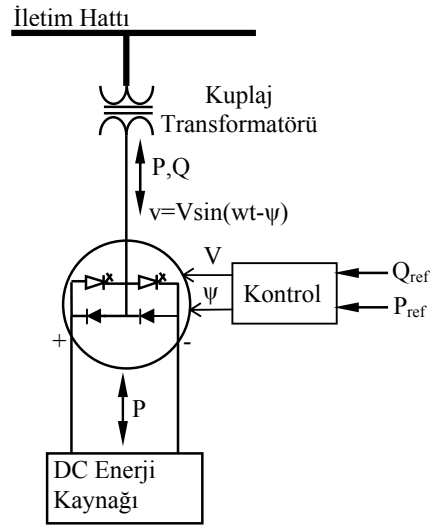


Şekil 3.13: Tristör kontrollü faz kaydırıcı transformatör şeması

3.3.2.2. Dönüştürücü tabanlı FACTS kontrol cihazları

Bu gruptaki FACTS kontrol cihazları kendinden iletimli, hızlı kontrol sağlayan sabit, eşzamanlı AC gerilim veya akım kaynaklarıdır. Geleneksel dengeleyici yöntemlerinden olan tristör anahtarlama kapasitör ve tristör kontrollü reaktörlerle kıyaslandığında bu yaklaşımın daha iyi V-I karakteristiği ve iletim gerilimi, etkin hat empedansı ve aç kontrolünde düzgün uygulanabilirlik sağladığı görülür. SVS (Senkron Gerilim Kaynağı), temel frekansta kontrol edilebilir genlik ve faz açılı dengeli üç faz gerilimi üreten döner senkron makine gibidir. Bu ideal makinenin eylemsizliğinin olmadığı varsayılır, anlık cevap vererek var olan sistem empedansına etki etmeden reaktif güç üretir. Ayrıca uygun enerji kaynağı ile birleştirilirse AC sistemle aktif güç değişimi yapabilir.

Şekil 3.14’de anahtarlama dönüştürücü tabanlı senkron gerilim kaynağının şeması görülür. Referans sinyaller, P_{ref} ve Q_{ref} üretilen çıkış geriliminin ψ faz açısını ve V gerilim genliğini, böylece gerilim kaynağı ve AC sistem arasında aktif-reaktif güç değişimini tanımlar. Aktif güç değişimi istenmiyorsa ($P_{ref}=0$), SVS ideal eş zamanlı dengeleyici gibi kendi kendini idare eden reaktif güç kaynağı olarak çalışır.



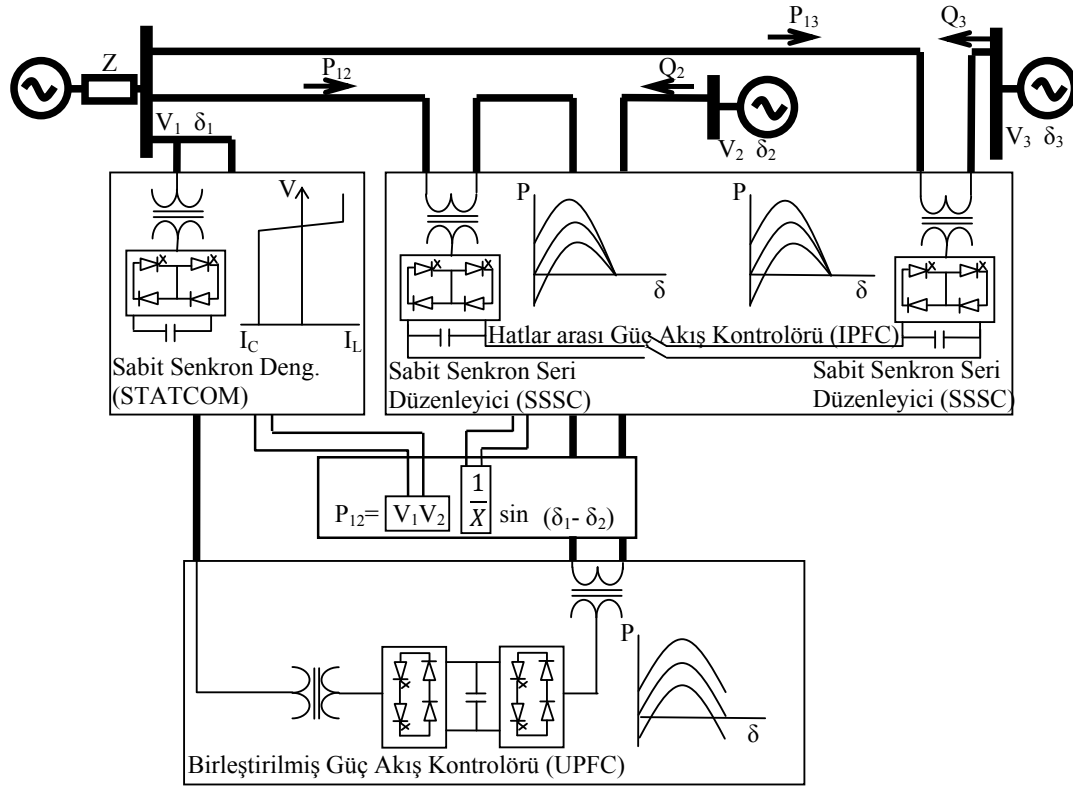
Şekil 3.14: Anahtarlama dönüştürücü tabanlı, eş zamanlı gerilim kaynağı

SVS iletim hattı dengeleyicisine ve güç akış kontrolüne zorlamalı fonksiyon yaklaşımını uygular. Bu SVS'nin istenilen hat akımını zorlayan gerilim uygulaması demektir. Kontrol edilebilir empedans yaklaşımına zıt olarak, SVS'nin sağladığı dengeleme şebeke değişkenlerinden (hat akımı, gerilimi veya açısı) bağımsızdır. Bundan dolayı sistem bozulmalarından etkilenmez. Teorik olarak temel frekans dışındaki frekanslarda empedans değeri sıfırdır, pratikte birleştirildiği transformatörün kaçak akı endüktansından dolayı küçük bir empedans söz konusudur. Sonuç olarak SVS, empedans tip dengeleyiciler gibi AC iletim sistemiyle paralel veya seri rezonansa girmez.

SVS ayrıca AC ve DC uçları arasında iki yönlü aktif güç akışını idare etme yeteneğine de sahiptir. Böylece DC uçlara iki veya daha fazla SVS bağlanarak iletim şebekesinde seçilen hat veya baralar arasında aktif güç değişimi gerçekleştirilebilir. Dönüştürücü tabanlı eş zamanlı gerilim kaynaklarıyla çalıştırılan FACTS kontrol cihazları, sabit eş zamanlı dengeleyici (STATCOM), sabit eş zamanlı düzenleyici

(SSSC), birleştirilmiş güç akış kontrolörü (UPFC), hatlar arası güç akış kontrolörü (IPFC)'dür. Şekil 3.15 bu cihazların kontrol şekillerini gösterir[64].

STATCOM, reaktif paralel dengelemeyle iletim gerilimini kontrol eder. SSSC, iletim hattının seri empedans gerilimini kontrol ederek seri dengeleme sağlar, böylece etkin iletim empedansı kontrol edilir. UPFC, gerilim, empedans ve açıyı veya direkt olarak hattın aktif-reaktif güç akışını kontrol eder. IPFC, reaktif seri dengelemeye ek olarak hatlar arası aktif güç akışı sağlar.



Şekil 3.15: Anahtarlama tabanlı dönüştürücü tabanlı FACTS kontrol cihazları

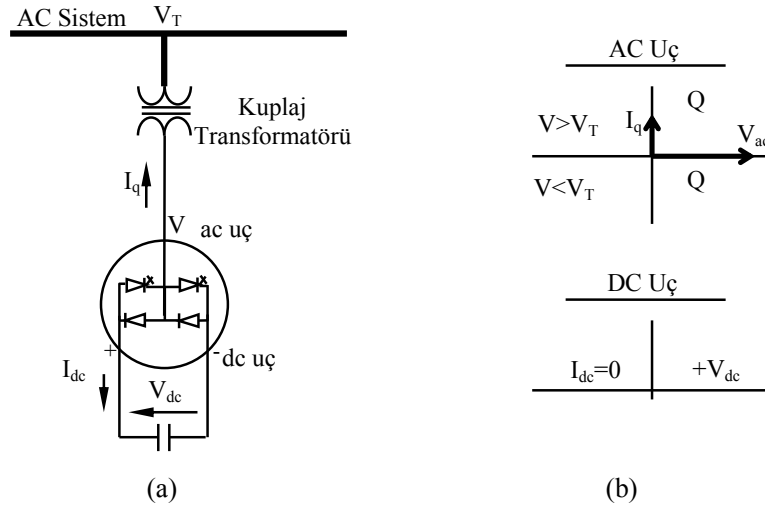
3.3.2.2.1. STATCOM (Sabit senkron dengeleyici)

Şekil 3.16a'da görüldüğü gibi, geleneksel SVS'de DC kaynak yerine küçük değerli DC bir kapasitör bağlanabilir. Bu durumda AC sistem ile SVS arasındaki kararlı hal güç etkileşimi sadece reaktif olur (Şekil 3.16b).

SVS, reaktif güç üretimi için kullanıldığında, dönüştürücünün kendisi istenilen gerilim seviyesini sağlaması için kapasitörü şarj eder. Bu, dönüştürücünün çıkış

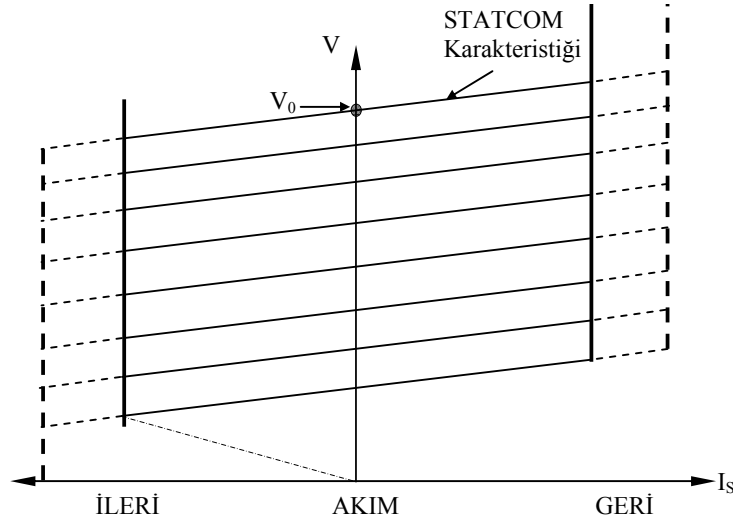
geriliminin AC sistem geriliminden geri kalması demektir. Dönüştürücünün sistemden az miktarda reaktif güç çektiği durumdur. Aynı kontrol mekanizması kondansatör gerilimini arttırmak veya azaltmak içinde kullanılabilir. SVS, reaktif paralel dengeleyici gibi çalışır. Çalışma ve performans karakteristikleri ideal döner senkron dengeleyiciye benzer. Bundan dolayı bu yapı Sabit Senkron Dengeleyici (STATic Synchronous COMPensator) olarak adlandırılır. STATCOM karakteristikleri geleneksel tristör kontrollü SVC'den daha üstündür.

Şekil 3.17 STATCOM'un V/I karakteristiğini gösterir. STATCOM hem kapasitif hem de endüktif dengeleme sağlar ve AC sistem geriliminden bağımsız olarak çıkış akımını en yüksek kapasitif veya en yüksek endüktif sınırın üzerinde kontrol edebilme yeteneğine sahiptir[64]. Yani STATCOM sistem geriliminin azaldığı durumda da kapasitif çıkış akımı sağlayabilir (en yüksek eşdeğer kapasitif admitansının değerine bağlı olarak).



Şekil 3.16: a) STATCOM yapısı, b) Kararlı halde güç değişim diyagramı

Şekil 3.17'de görüldüğü gibi STATCOM, en yüksek kapasitif ve endüktif çalışma aralığını kullanan yarı iletkenlerin karakteristiklerine bağlı olarak arttırabilir. Geleneksel SVC'de en yüksek kapasitif akım sistem gerilim genliği ve kapasitör boyutuna bağlı olduğundan reaktif güç üretim sınırını arttıramaz.



Şekil 3.17: STATCOM'un V-I karakteristiği

3.3.2.2.2. SSSC (Sabit seri senkron düzenleyici)

Seri düzenleyiciye zıt olarak SVS, değişken hat akımına karşı sabit dengeleme gerilimi sağlar. Yani dengeleme geriliminin genliği hat akımından bağımsız olarak kontrol edilir. Normal kapasitif dengeleme için çıkış gerilimi hat akımının 90° gerisindedir. SVS kontrol ünitesiyle gerilim akımın 90° ilerisine ayarlanabilir. Bu durumda sisteme verilen gerilim, endüktif hat empedans gerilimini azaltır. Sisteme verilen gerilim (3.12) denklemindeki gibidir. (3.13) denklemi iletilen aktif gücü göstermektedir[62].

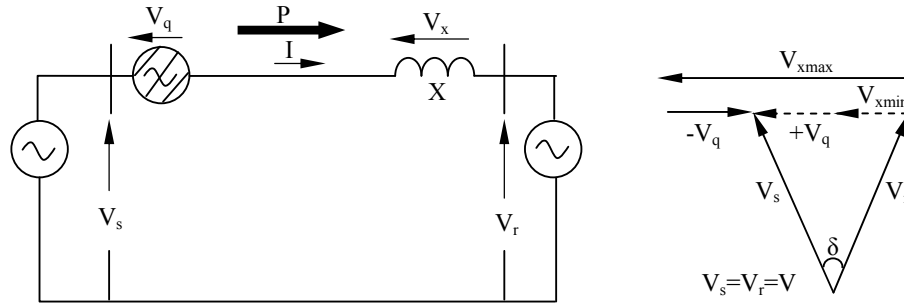
$$V_q = \pm jV_q(\xi) \frac{I}{I} \quad (3.12)$$

$$P = \frac{V^2}{X} \sin \delta + \frac{V}{X} V_q \cos \frac{\delta}{2} \quad (3.13)$$

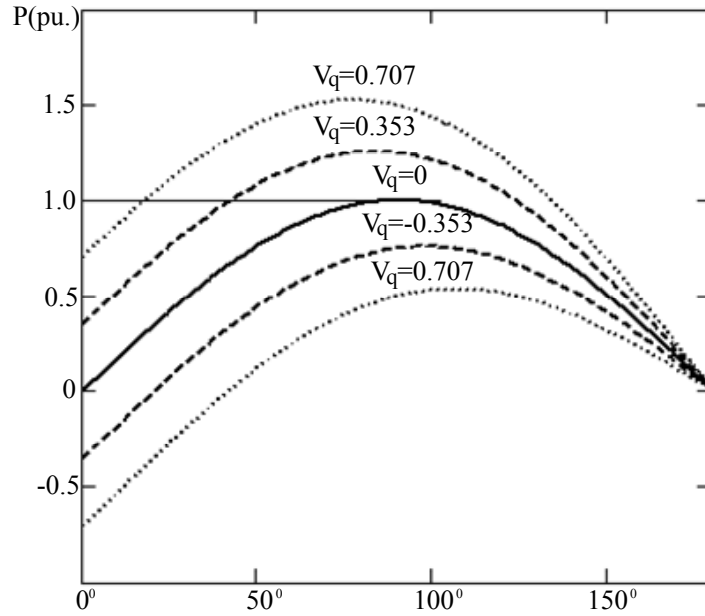
$V_q(\xi)$ Dengeleme geriliminin genliği $0 \leq V_q(\xi) \leq V_{q \max}$

ξ : Kontrol parametresi

Şekil 3.18, (3.12) denkleminde göre seri reaktif dengeleme yapısını gösterir. Bu tip seri dengeleme SSSC (Sabit Senkron Seri Düzenleyici) olarak adlandırılır. Şekil 3.19 ise farklı V_q değerleri için $P - \delta$ değişimini verir.



Şekil 3.18: Sabit eş zamanlı seri dengeleyici gibi çalışan gerilim kaynağı



Şekil 3.19: Seri dengeleme geriliminin farklı değerlerine göre $P - \delta$ değişimi

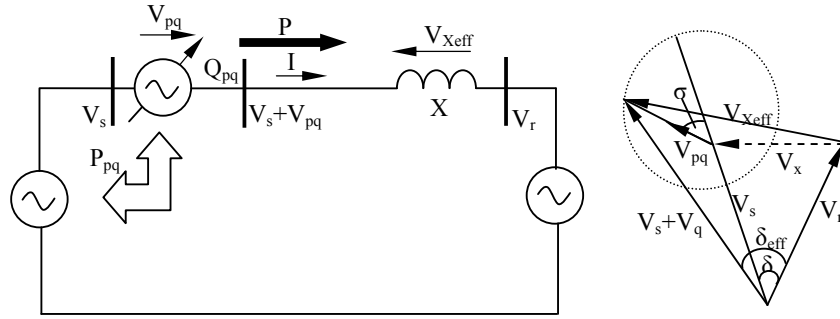
3.3.2.2.3. UPFC (Birleştirilmiş güç akış kontrolörü)

UPFC, hat akımına bağlı olarak sisteme verilen gerilim ilişkisi dikkate alınmaksızın değiştirilmiş SSSC gibi düşünülebilir. SVS'nin hat akımına seri olarak eklediği V_{pq} geriliminin, sınırlandırmalar olmadan kontrol edildiği varsayılmaktadır. Bu, V_{pq} 'nin faz açısının hat akımından bağımsız olarak $0-2\pi$ aralığında istenilen değerde ve genliğinin 0 ile V_{pqmax} arasında seçilebileceğini ifade etmektedir. V_{pq} iletim hattıyla hem aktif hem de reaktif güç değişimi yapabilmektedir. SVS ile iletim hattı arasındaki, sistemde istenilen güç akışını sağlamak için, gerekli aktif güç, verici uçtaki makine tarafından sağlanır. Şekil 3.20, verici uç ve SVS arasında iki yönlü

kenetlemeli aktif güç akışını sembolik olarak gösterir. Pratik olarak bunu olası kılan ard-arda dönüştürücü düzenekleridir. Paralel bağlı dönüştürücü verici uç barasından aktif gücü sağlar, seri bağlı dönüştürücü bunu hatta verir. Şekil 3.20'deki yapı UPFC olarak adlandırılır[64].

Güç iletiminin geleneksel ifadesinden, UPFC, verici uç gerilim, V_s , fazörüne uygun genlik ve faz açılı gerilim fazörü ekleyerek çoklu güç akış kontrol fonksiyonu sağlar. Şekil 3.21, UPFC'ye ait $P-\delta$ ilişkisini verir. UPFC, istenilen aktif-reaktif güç akışını, seçilen gerilime bağlı olarak sisteme eklediği gerilim genlik ve açıyla sağlar. İletilen aktif güç denklem (3.14)'deki gibidir.

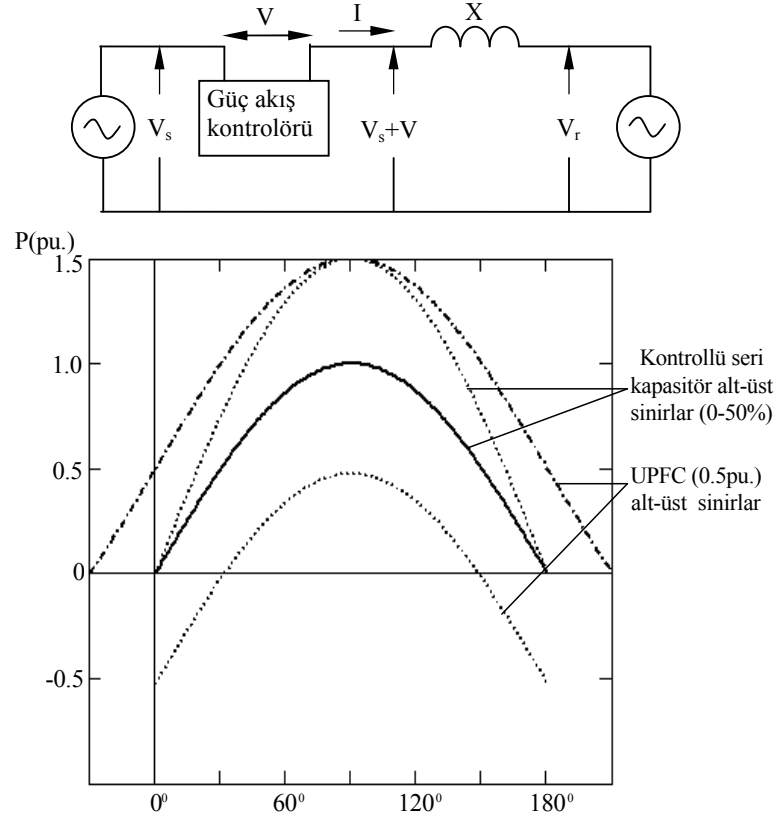
$$P = \frac{V_{eff} V}{X} \sin \delta_{eff} \quad (P = \frac{V^2}{X} \sin \delta \quad V_{pq} = 0) \quad (3.14)$$



Şekil 3.20: UPFC'nin temel yapısı

3.3.2.2.4. IPFC (Hatlar arası güç akış kontrolörü)

Hatlar arası güç akış kontrol cihazı (IPFC), seri dengeleyici (SSSC) için esnek güç akış kontrolü sağlar. IPFC, her bir hattın reaktif dengelemesinin bağımsız kontrolünü ve dengeleyicinin olmadığı hatlar arasında aktif güç iletimini aynı anda gerçekleştirir. Bu durum, hatlar arasında aktif-reaktif güç akışının eşitlenmesini, aşırı yüklenmeden az yüklenme durumuna kadar istenilen güç iletimini, hattın direncinden kaynaklı gerilim düşümlerine karşı dengeleme ile bunun için gerekli reaktif hat gücünü ve dinamik bozulmalarda dengeleme sisteminin etkisinin arttırılmasını sağlar[64].



Şekil 3.21: UPFC kontrollü iletim hattında $P - \delta$ değişimi

BÖLÜM 4. TÜRKİYE SİSTEMİ'NDE YER ALAN GÜÇ KALİTESİ MONİTÖR NOKTALARI ve ÖLÇÜM SONUÇLARI

4.1. Giriş

Günümüzde gereklilik haline gelen güç elektroniği tabanlı cihaz kullanımı ile önemi her geçen gün artan güç kalitesi problemleri güç sisteminde belirli noktalara monitörler yerleştirilerek daha gerçekçi bir alt yapıyla değerlendirilebilir. Güç kalitesi monitörü endüstriyel, ticari ve konut bölgelerinde problem çözümünde kullanılarak sistemdeki olası sorunların tanımlanmasına yardımcı olur. Monitörlemenin yararları aşağıdaki gibi açıklanabilir[65].

1. Güç Kalitesi ve güvenilirliğin anlaşılması: Tüketiciler cihazlarında arızaya neden olan her durumu güvenilirlik problemi olarak tanımlar. Monitör sistemi, güç kalitesi değerlendirmesini tüketici cihazındaki etkileri açısından karakterize etmeye olanak sağlar.
2. Sistemde öncelikli yöntemin belirlenmesi: İletim ve dağıtım firmaları, artan enerji talebiyle baş etmek ve sistemde oluşan sorunları çözerek tüketicilere kaliteli enerji sunmakla mükelleftir. Bu sorumluluk ciddi harcamaları gerektirir. Bu harcamalar sistem güvenilirliğinin belirli bir seviyede korunması amaçlıdır. Tüketici tabanlı harcamalar bozulmaların tüketicilerdeki maliyetini temel alır. Bu maliyetin boyutunun belirlenmesi problemlerin detaylı değerlendirilmesini gerektirdiğinden güç kalitesi monitörleri ile gerçekleştirilen analizlerle harcamaları en aza indireyecek aynı zamanda kaliteli enerji sağlayacak çözüm yönteminin bulunmasını sağlar.
3. Problem sınırlarının tanımlanması: İzleme, sistemde oluşan sorun tüketiciye ulaşmadan, cihaz aksaklık veya arızalarına yol açmadan, belirlenmesine yardımcı olur.

4.2. Türkiye Sistemi'nde Güç Kalitesi Monitörleri

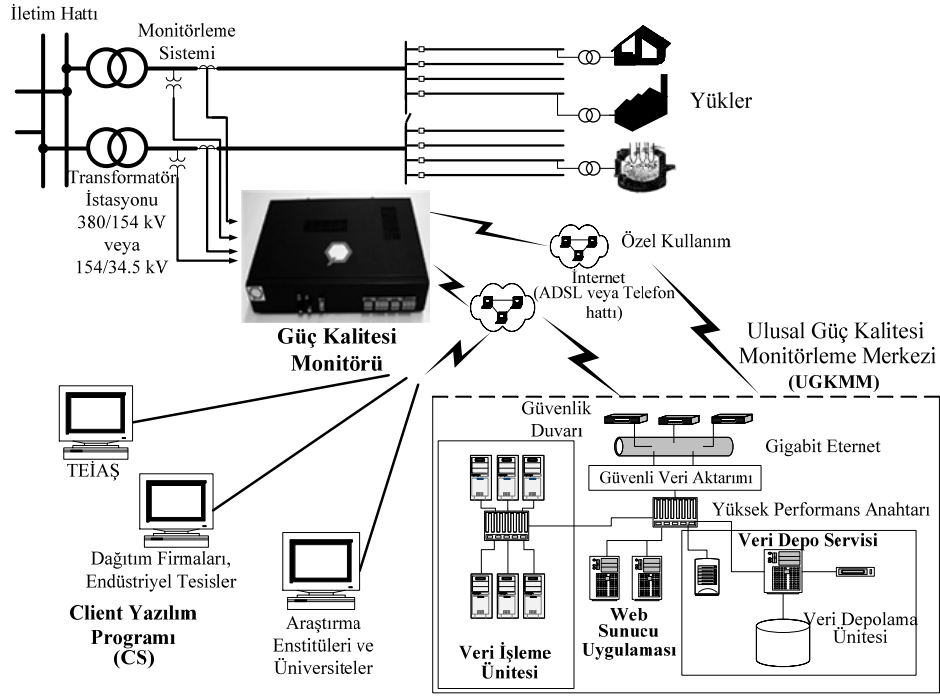
2006 yılında TEİAŞ, TÜBİTAK ve Türkiye'deki üç üniversitenin katılımıyla başlatılan MGKP (Milli Güç Kalitesi Projesi) kapsamında Türkiye Sistemi'nde 250 noktaya güç kalitesi izleme ünitesi yerleştirilmiştir. İzleme ünitelerinin sürekli olarak gözlemlenebilmesi için Ankara'da TEİAŞ Genel Müdürlüğü'nde kurulan merkezde monitörlerden elde edilen verilerin toplanması ve depolanması mümkündür. Ayrıca dışardan bir araştırmacının internet üzerinden kullanıcı adı ve şifresi ile monitörleri izlemesi, verileri, dalga şekillerini excel veya word formatında kaydetmesi olasıdır. Monitörlerden, oluşan tüm güç kalitesi olaylarını -kısa süreli gerilim çukuru, artması, kesinti, harmonikler, kırışma vb.- izlemek mümkündür. Ayrıca monitörler gerilim çukur sıklıklarının her nokta için rapor şeklinde elde edilerek gerilim çukur genliğine göre sıklık değişimlerinin incelenmesine de olanak sağlar. Monitörlerde, güç kalitesi olaylarının sınırları IEC-61000- Standardı'na göre belirlenmiştir[66].

Türkiye Sistemi'nde yer alan monitörleme sistemi üç temel üniteden oluşur;

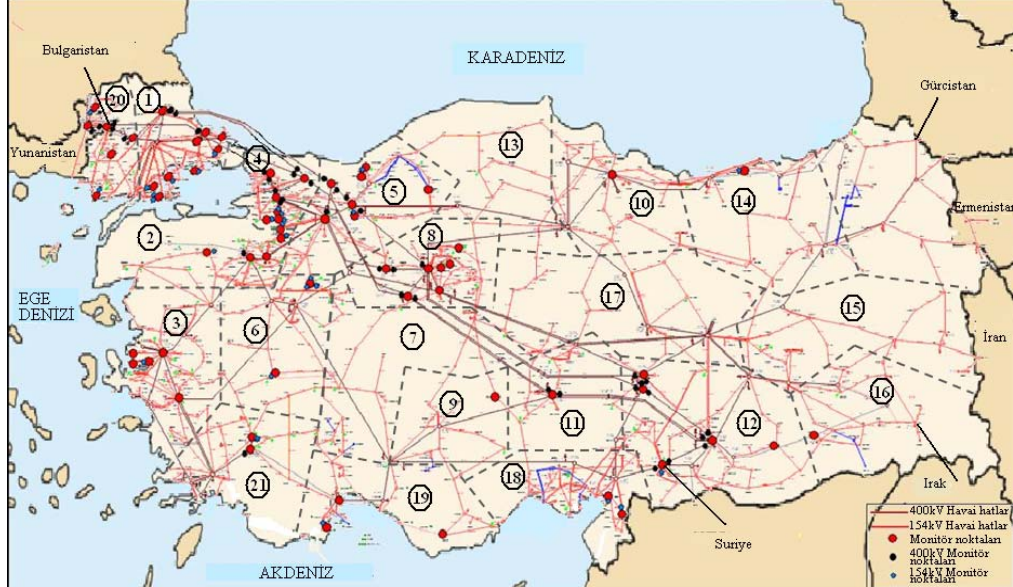
1. Tüm verilerin toplandığı Güç Kalitesi Monitörleri
2. Verilerin depolandığı Ulusal Güç Kalitesi Monitörleme Merkezi (UGKMM)
3. TEİAŞ, dağıtım firmaları, araştırma enstitüleri ve üniversitelerde, monitörlerin uzaktan izlenmesine imkan veren yazılım programı

Şekil 4.1, güç kalitesi monitör sisteminin çalışmasını gösterir. Monitörler güç kalitesi parametrelerini 10 dakikada bir kaydederek bu verileri UGKMM'ye aktarır. Herhangi bir olay anında bir periyotta 512 örneklemeyle olay verilerinin işlenmesi mümkündür.

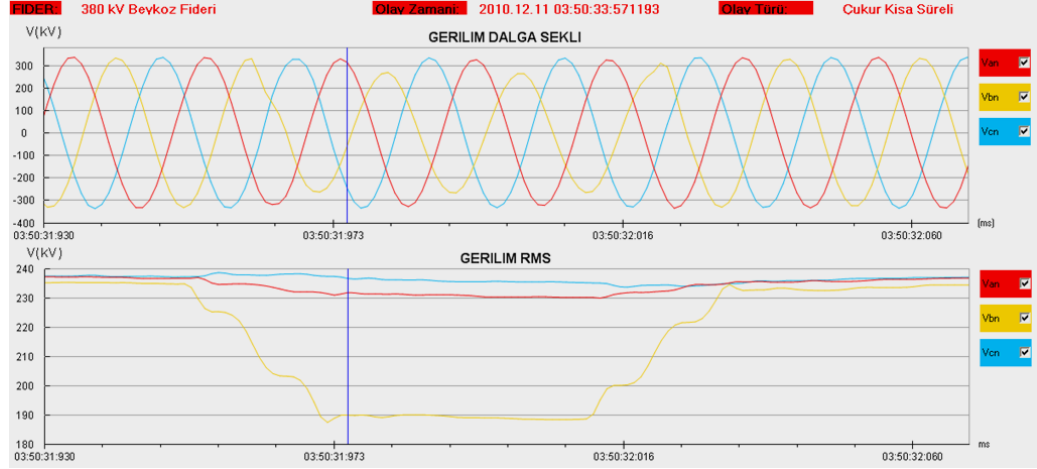
Şekil 4.2'de, Türkiye İletim Sistemi haritası ve sistemde monitörlerin yer aldığı baralar gerilim seviyeleri ile birlikte gösterilmiştir. Şekil 4.3, 1. İletim Bölgesi'nde yer alan Alibeyköy-Beykoz hattında gerilim çukur olayı sırasında üç fazın faz-nötr gerilim dalga şekli ve etkin geriliminin zamana bağlı değişimini verir.



Şekil 4.1: Güç kalitesi monitör sistem yapısı[67]



Şekil 4.2: Türkiye İletim Sistemi'nde yer alan güç kalitesi monitör noktaları



Şekil 4.3: Alibeyköy-Beykoz (400kV) hattında gerilim çukuru olayı

4.3. Standartlarda Yeralan Çukur Değerlendirme Tekniklerinin 1. İletim Bölgesi'ne Uygulanması

Standartlar, ilgilenilen konunun belirli bir bölgeyle sınırlı kalmayıp tüm diğer alanlar veya ülkelerce de anlaşılabilir paylaşım alanını artırarak konu hakkında yapılan değerlendirmenin kabul görmesini ve ileri aşamalara geçilmesini sağlar. Bu anlamda gerilim çukuruyla ilgili oluşturulan standartlar araştırılarak çukur değerlendirmesinde kullanılan teknikler Türkiye Sistemi 1. İletim Bölgesi'ne, elde edilen ölçüm verileri yardımıyla uygulanmıştır. Gerilim çukur indeksi ve gerilim çukur sıklık tablosu standartlarda yer alan çukur değerlendirmesinde kullanılan tekniklerdir. Kaynakçada Türkiye Sistemi'ne ait böyle bir değerlendirmenin henüz yapılmamış olması Doktora tez çalışmasının özgünlüğünü ortaya koymaktadır. Çukur değerlendirmesinde standartlara göre bir alt yapının oluşturulması uluslararası çukur değerlendirme kıyaslamasına olanak sağlar. Ayrıca konunun önemi ve boyutunun daha net anlaşılmasını sağlayarak bu yöndeki çalışmaların yönünü belirlemede faydalı olur.

4.3.1. Gerilim çukur indeksleri

Kısa süreli gerilim çukurunun herhangi bir güç sistemindeki şiddetinin bilinmesi sistemin daha kaliteli ve güvenilir olması açısından büyük önem taşır. Bu amaçla standartlarda belirli bir bölgede veya tüketicide çukur değerlendirmesine olanak sağlayan etkin gerilim değişim indeksleri tanımlanmıştır. Gerilim değişimine duyarlı

cihazların tasarımı aşamasında, cihaz üreticilerine yarar sağlayan bu indekslere ait hesaplamalar IEEE P1564 Taslağında tüketiciler ve elektrik firmaları için verilmiştir[68]. Bu indeksler oluşturulurken etkin gerilim değişiminin genlik ve zamanı ile çukur olayının oluşma sıklığı dikkate alınır.

Bölüm 2’de tanımlandığı gibi gerilim çukuru, zaman (etkin gerilim genliğinin eşik gerilim değerinin altında olduğu süre) ve olay sırasında arta kalan gerilim genliğiyle karakterize edilir. Sistemde istenen en düşük gerilim genliği, diğer bir ifadeyle gerilim değişimine duyarlı cihazın çalışmasını sürdürebileceği veya sistem kararlılığının devam edebileceği en düşük gerilim genliği, olay süresinin ve sayısının belirlenmesinde önemlidir.

Çukur indeks ve tablosu bir ay veya yıl süresince, belirli bir bölgede kaydedilen olaylardan hesaplanabilir. Etkin gerilim değişiminin genlik veya genlik-zaman değerlendirmesine ilişkin indeksler, SARFI-X (Sistem Ortalama Etkin Gerilim Sıklık İndeksi), SIARFI-X (Sistem Ani Ortalama Etkin Gerilim Sıklık İndeksi), SMARI-X (Sistem Anlık Ortalama Etkin Gerilim Sıklık İndeksi) ve STARFI-X (Sistem Geçici Ortalama Etkin Gerilim Sıklık İndeksi)’dir.

SARFI-X

Tek bir nokta için, değerlendirme zamanı süresince yani ölçüm alınan zaman boyunca, X ve X etkin gerilim genliğinden daha az genlikli çukurun ortalama sayısını ifade eder. Örnek olarak SARFI.-90, 0.9 pu gerilim genliği ve altındaki ortalama çukur sayıları anlamına gelmektedir. SARFI-X, X eşik gerilim değerini temel almaktadır. Olası X gerilim genlik değerleri, 90, 80, 70, 50 ve 10’dur. Bu değerler standartlaşmamakla birlikte, 90, 80 ve 70 Bilgi Teknolojisi Cihaz kullanma kılavuzunda önerilen düşük gerilim sınırları, 50 motor kontaktörleri için tipik kesme genliği ve 10% IEEE Standart 1159’daki tanımıyla kesinti, olduğundan, değerlere göre yapılan bir değerlendirmenin yeterli doğruluğu sağlayacağı düşünülmektedir[69].

SIARFI-X

X ve X genliğinden daha az genlikli ve zamanı 100-500 milisaniye aralığında olan çukur olaylarının ortalama sayısıdır. SIARFI-X, $X=10$ için tanımlanmaz. Bunun nedeni I.E.E.E. Std. 1159'da kesinti için anlık zaman kategorisinin tanımlanmamış olmasıdır.

SMARFI-X

X ve X genliğinden daha az genlikli, zamanı 0.5-3 saniye aralığında olan çukur ve 0.1-3 saniye süreli kesinti olaylarının ortalama sayısıdır.

STARFI-X

X ve X genliğinden daha az genlikli, zamanı 3-60 saniye aralığında olan çukurların ortalama sayısıdır.

Sistem çukur değerlendirmesinin özellikle tüketici için anlaşılmasında ve yapılan değerlendirmenin standartlaştırılmasında yarar sağlayan bu indeksler Türkiye Sistemi 1. İletim Bölgesi için güç kalitesi monitörlerinden elde edilen bir yıllık çukur sayılarından 400kV, 154kV ve 36kV gerilim seviyeleri için süre ve genliklerine bağlı olarak elde edilmiştir. Örnek olarak Alibeyköy noktası için 90% ve altı genlikli bir yıllık arıza sayısı 144'tür. Bu sayının 365'e bölünüp 30 ile çarpılmasıyla bir ay için Alibeyköy noktasına ait SARFI-90 indeksi elde edilmiştir. Monitörlerden istenilen tarih için arıza sayılarının genlik ve sürelerinin elde edilmesi mümkündür. Tablo 4.1, Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'de sırasıyla 400kV, 154kV ve 36kV için yıllık verilerden hesaplanarak bir aya indirgenmiş olan indeks değerleri verilmiştir. Tablo 4.1, Tablo 4.2 ve Tablo 4.3'den görüldüğü gibi azalan gerilim seviyesiyle indeks değerleri diğer bir ifadeyle çukur sıklık sayıları artmıştır. Bunun nedeni iletim seviyesinden orta gerilim dağıtım seviyesine doğru karmaşıklaşan sistemdeki noktaların birbiriyle etkileşiminin artması, yüksek gerilimdeki birçok olayın daha alçak gerilim seviyelerinde etkili olurken tersinin her zaman mümkün olmaması ve dağıtım sistemindeki tüketicilerin arıza oranını arttırmasıdır.

Tablo 4.1: 400kV gerilim seviyesi için indeksler

	X	SARFI-X	SIARFI-X	SMARFI-X	STARFI-X
ALİBEYKÖY	90	11,84	11,08	0,23	0,54
	80	7,31	6,77	0,00	0,54
	70	4,85	4,31	0,00	0,54
	50	1,69	1,23	0,00	0,46
	10	0,46	---	0,00	0,46
ZEKERİYAKÖY	90	11,31	10,92	0,08	0,31
	80	6,46	6,15	0,00	0,31
	70	4,46	4,15	0,00	0,31
	50	1,62	1,31	0,00	0,31
	10	0,08	---	0,00	0,08

Tablo 4.2: 154kV gerilim seviyesi için indeksler

	X	SARFI-X	SIARFI-X	SMARFI-X	STARFI-X
MASLAK	90	12,85	12,54	0,23	0,08
	80	7,77	7,46	0,23	0,08
	70	4,54	4,31	0,15	0,08
	50	2,23	2,08	0,08	0,08
	10	0,08	---	0,00	0,08
DAVUTPAŞA	90	13,15	12,23	0,54	0,38
	80	6,54	5,92	0,23	0,38
	70	3,00	2,46	0,23	0,31
	50	1,62	1,23	0,15	0,23
	10	0,46	---	0,23	0,23
ZEKERİYAKÖY	90	13,92	12,77	0,69	0,46
	80	7,92	6,85	0,62	0,46
	70	4,46	3,46	0,54	0,46
	50	1,77	1,31	0,23	0,23
	10	0,46	---	0,23	0,23

Tablo 4.3: 36kV gerilim seviyesi için indeksler

	X	SARFI-X	SIARFI-X	SMARFI-X	STARFI-X
DAVUTPAŞA TRFA	90	19,62	17,92	1,00	0,69
	80	9,92	8,54	0,77	0,62
	70	6,23	5,00	0,62	0,62
	50	3,38	2,54	0,31	0,54
	10	1,31	---	0,85	0,46
MASLAK TRFB	90	17,77	16,46	0,69	0,62
	80	9,77	8,85	0,38	0,54
	70	5,92	5,23	0,23	0,46
	50	3,23	2,85	0,08	0,31
	10	0,85	---	0,62	0,23
ZEKERİYAKÖY TRF1	90	21,15	16,85	4,08	0,23
	80	8,08	6,85	1,00	0,23
	70	5,54	4,38	0,92	0,23
	50	2,08	1,46	0,38	0,23
	10	0,31	---	0,08	0,23

4.3.2. 1. İletim Bölgesi'nde havai hatlar için gerilim çukur tablosunun oluşturulması

Türkiye Sistemi'ne yerleştirilen monitörlerden, belirlenen ölçüm süresince meydana gelen çukurların süre, genlik ve sayılarını gösteren kümülatif ve yoğunluk çukur tabloların elde edilmesi mümkündür[68]. IEEE P1564 Taslağı'na göre çukur değerlendirilmesinde tanımlanan bu tablolar 1. İletim Bölgesi'nde yer alan Alibeyköy-Beykoz, Habibler-Zekeriya köy ve Zekeriya köy-Paşaköy hatları için Nisan2009-Mart2010 zaman aralığını kapsayan bir yıllık zaman diliminde aylık olarak alınan rapor verilerinden oluşturulmuştur. Alibeyköy-Beykoz hattı 30 kilometre, Habibler-Zekeriya köy 20 kilometre ve Zekeriya köy-Paşaköy hattı 32 kilometre uzunluğundadır.

Alınan veriler ilk olarak Tablo 4.4'deki formata getirilmiştir. Tablo 4.4'deki çukur sayıları, belirtilen genlik ve süreye ait tüm hat için çukur sayılarını içermektedir. Ancak çukur değerlendirmesinin hattın kilometresi başına yapılmasının daha doğru sonuçlar verdiği kaynakça taramasından tespit edildiğinden Tablo 4.4'deki değerler ilgili hattın kilometresine bölünerek Tablo 4.5 elde edilmiştir. Tablo 4.4'deki değerler gerilimin düşme miktarına diğer bir ifadeyle eksik gerilim genliğine karşılık

gelmektedir. Ancak Bölüm 2’de bahsedildiği gibi çukur genliği olay anında gerilimin düşme miktarı ile değil arta kalan gerilim genliği ile karakterize edildiğinden Tablo 4.5 nominal gerilimden eksik gerilim genliğini çıkartarak oluşturulmuştur. Buna göre Tablo 4.5 çukur genlik değerlerini vermektedir. 0-10% eksik gerilim aralığı, 90-100% genlik anlamına geldiğinden ve çukur tanımlaması bu aralığı kapsamadığından, dikkate alınmamıştır. Örnek olarak sadece Alibeyköy-Beykoz hattı için verilen çukur yoğunluk tablosu diğer iki hat içinde oluşturulmuş ve sonuçlar Şekil 4.4, Şekil 4.6 ve Şekil 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4.4: Alibeyköy-Beykoz hattında bir yıl süresinde oluşan çukur sayısının genlik-zaman değerleri

TOPLAM	≤ 0.1 s	$> 0.1-0.5$ s	$> 0.5-1$ s	$> 1-1.5$ s	$> 1.5-2$ s	$> 2-2.5$ s	$> 2.5-3$ s	> 3 s
0-10%	2	0	0	0	0	0	0	0
10-20%	45	11	3	0	0	0	0	0
20-30%	30	2	0	0	0	0	0	0
30-40%	20	7	0	0	0	0	0	0
40-50%	9	4	0	0	0	0	0	1
50-60%	7	1	0	0	0	0	0	0
60-70%	3	1	0	0	0	0	0	0
70-80%	2	0	0	0	0	0	0	0
80-90%	0	2	0	0	0	0	0	0
$\geq 90\%$	0	0	0	0	0	0	0	6

Tablo 4.5: Alibeyköy-Beykoz hattında bir yılda kilometre başına oluşan çukur sıklığının genlik-zaman değerleri

TOPLAM	≤ 0.1 s	$> 0.1-0.5$ s	$> 0.5-1$ s	$> 1-1.5$ s	$> 1.5-2$ s	$> 2-2.5$ s	$> 2.5-3$ s	> 3 s
80-90%	1,50	0,37	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
70-80%	1,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
60-70%	0,67	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50-60%	0,30	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
40-50%	0,23	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30-40%	0,10	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20-30%	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10-20%	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0-10%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20

Tablo 4.5 belirtilen hattaki çukur sayılarının en yoğun olarak hangi sürelerde ve genliklerde gerçekleştiği bilgisini vermektedir. Şekil 4.4, Şekil 4.6 ve Şekil 4.8 incelendiğinde gerilim çukurunun en çok 80-90% genlik ve ≤ 0.1 ile $0.1-0.5$ saniye

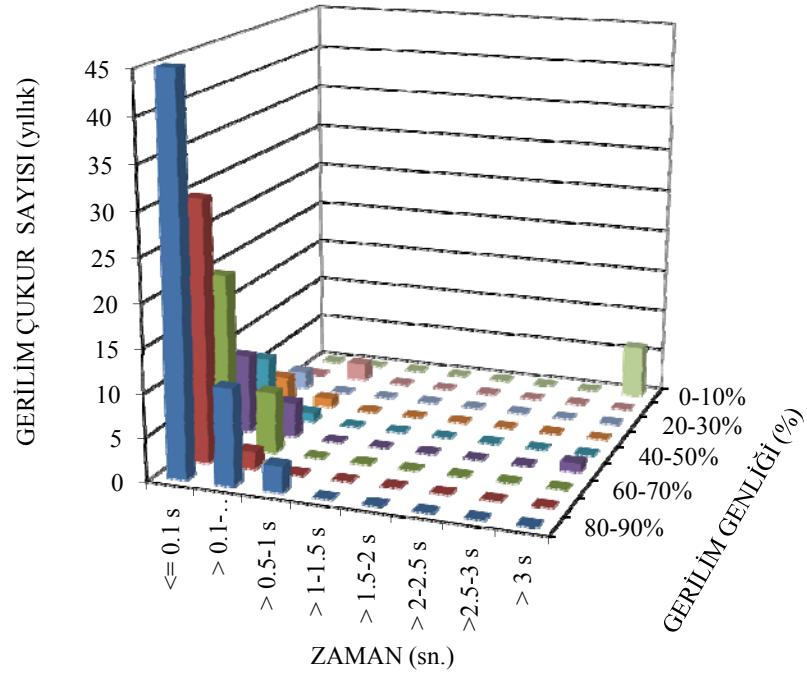
sürelerinde gerçekleştiği, bu genlik ve süreli sayının en fazla olduğu hattın Zekeriyaköy-Paşaköy hattı olduğu görülmektedir.

Gerilim çukur sıklık, süre ve genlik dağılımından kümülatif sıklık tablosunun elde edilmesi mümkündür. Tablo 4.6 Alibeyköy-Beykoz hattının kümülatif çukur tablosunu vermektedir. Kümülatif tablodan elde edilen çukur sıklıkları, analiz programından elde edilen hatlara ait çukur sıklıklarıyla karşılaştırılmıştır.

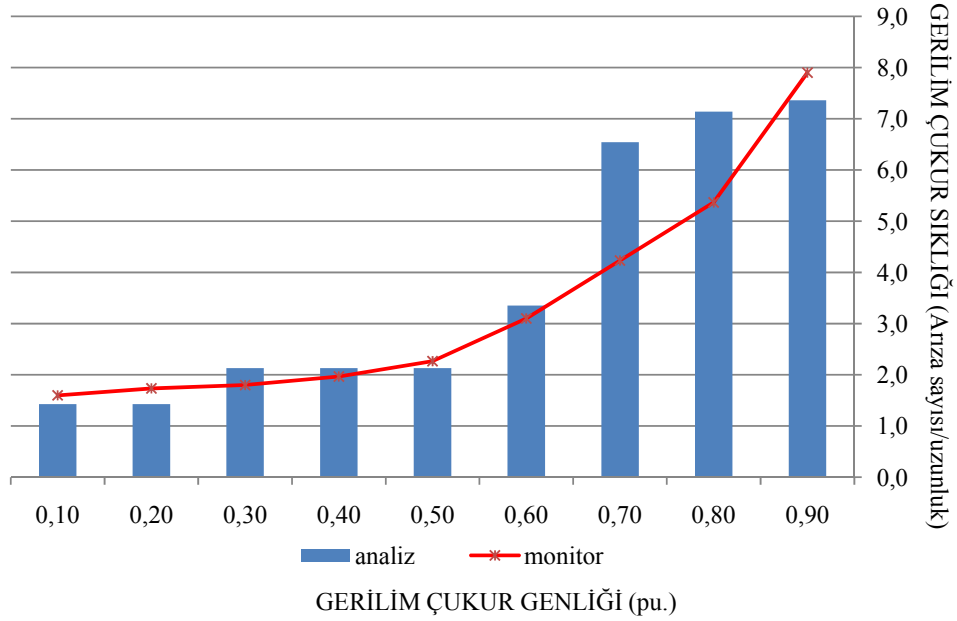
Tablo 4.6: Alibeyköy-Beykoz hattının bir yıllık kümülatif çukur dağılımı

TOPLAM	≤ 0.1 s	$> 0.1-0.5$ s	$> 0.5-1$ s	$> 1-1.5$ s	$> 1.5-2$ s	$> 2-2.5$ s	$> 2.5-3$ s	> 3 s
90%	5,13	1,27	0,33	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
80%	3,17	0,80	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
70%	2,10	0,73	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
60%	1,20	0,50	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23
50%	0,73	0,33	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
40%	0,47	0,30	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
30%	0,33	0,27	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
20%	0,27	0,27	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
10%	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

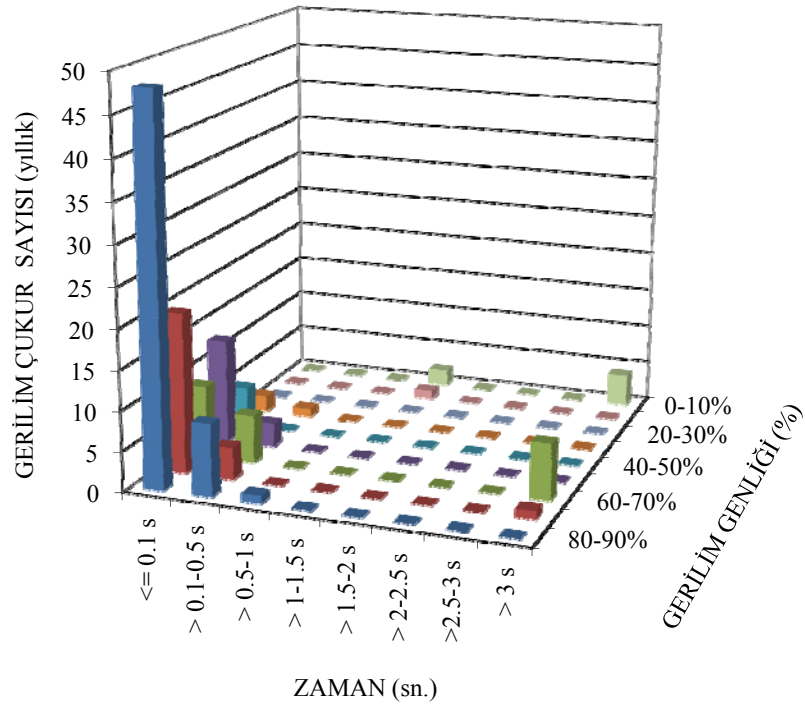
Şekil 4.5, Şekil 4.7 ve Şekil 4.9 aynı hatlar için monitörlerden elde edilen çukur genlik ve kümülatif sıklık dağılımının, SIMPOW DIPS analiz programından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmasını göstermektedir. Şekil 4.5, Şekil 4.7 ve Şekil 4.9'dan görüldüğü gibi monitör ve bilgisayar analizi sonuçları bire bir örtüşmese de yaklaşık olarak benzerdir. Bu sonuçlar iletim hatları için monitör verisine ihtiyaç duymadan bilgisayar analiz programıyla yaklaşık olarak gerilim çukur sıklığının genlikle değişimi hakkında bir değerlendirme yapılabileceğini ve bu değerlendirmeye detaylı olmamakla birlikte genel olarak sistemdeki çukur sıklık durumu hakkında bilgi sahibi olunabileceğini göstermektedir. Burada gerçekleştirilen değerlendirmenin hatlara ait olduğu noktasal tabanlı olmadığı unutulmamalıdır.



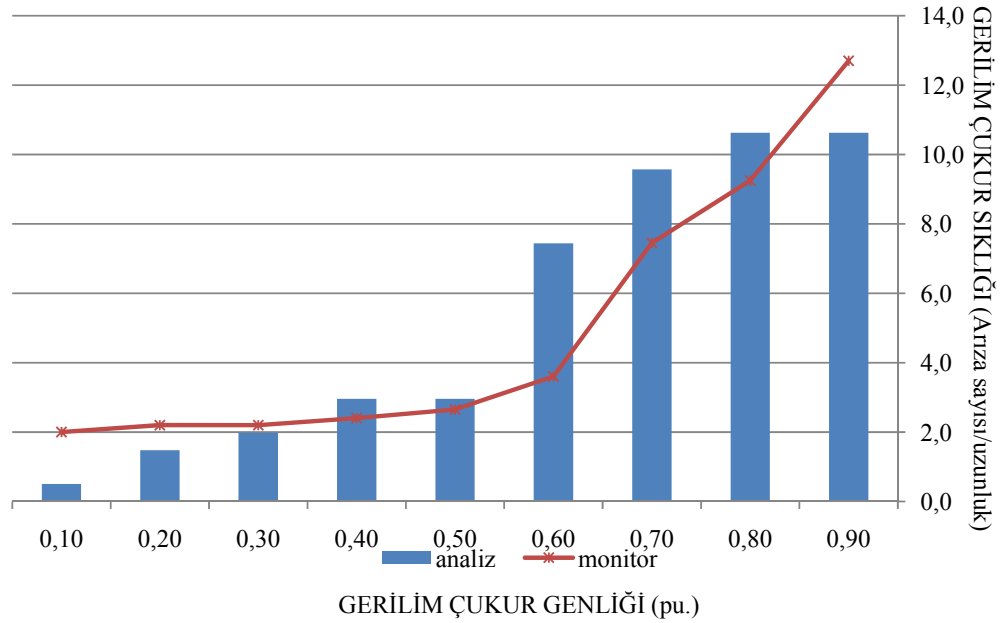
Şekil 4.4: Alibeyköy-Beykoz hattına ait zamana bağlı çukur genlik-sayı değişimi



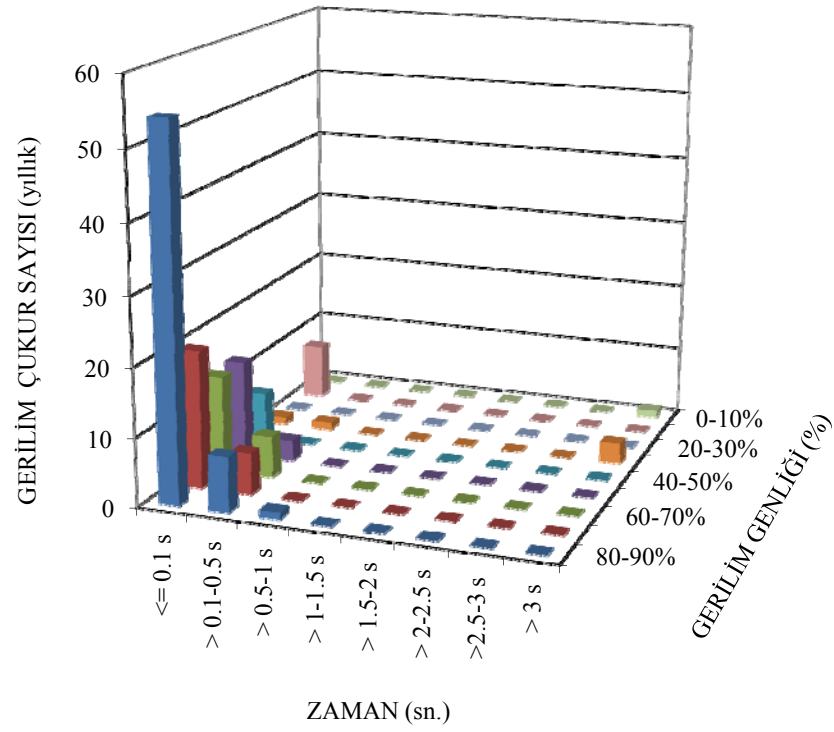
Şekil 4.5: Alibeyköy-Beykoz hattının analiz ve monitörden elde edilen çukur genlik ve kümülatif sıklık değişimi



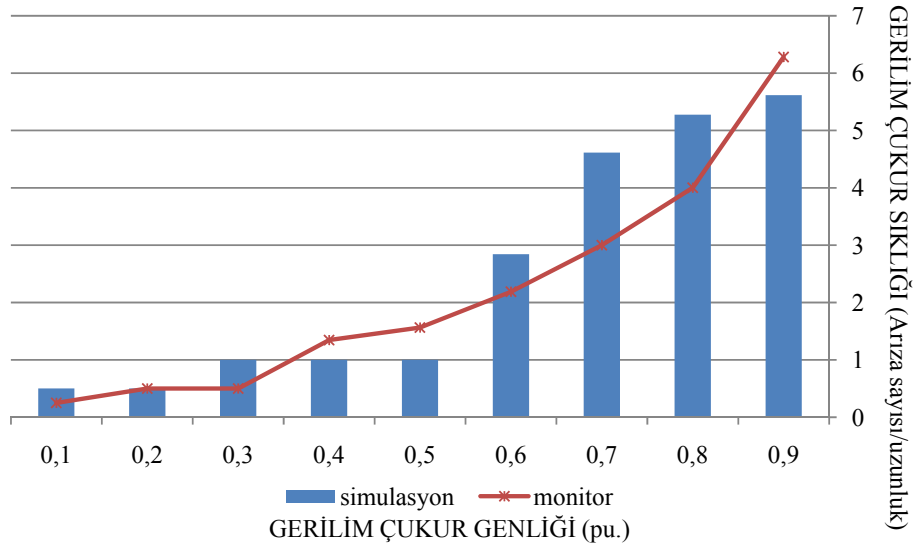
Şekil 4.6: Habibler-Zekeriya köy hattına ait zamana bağlı çukur genlik-sayı değişimi



Şekil 4.7: Habibler-Zekeriya köy hattının analiz ve monitörden elde edilen çukur genlik ve kümülatif sıklık değişimi



Şekil 4.8: Zekeriyaköy-Paşaköy hattına ait zamana bağlı çukur genlik-sayı değişimi



Şekil 4.9: Zekeriyaköy-Paşaköy hattının analiz ve monitörden elde edilen çukur genlik ve kümülatif sıklık değişimi

4.4. 400kV ve 154kV Gerilim Seviyelerindeki Havai Hat Tiplerine Göre Çukur Değerlendirmesi

Türkiye Sistemi'nde 400kV ve 154kV gerilim seviyelerinde farklı tip buna bağlı olarak farklı güç iletmeye kapasitelerine sahip havai hatlar mevcuttur. Çukur olayının bu çeşitlilik karşısındaki davranışı öncelikle tüm sistem daha sonra da sadece 1. İletim Bölgesi'ndeki havai hatlara ait bir yıllık olay verileriyle incelenmiştir.

4.4.1. Türkiye Sistemi'nde havai hatlarda gerilim çukur değerlendirilmesi

Tablo 4.7 ve Tablo 4.8 sırasıyla 400kV ve 154kV gerilim seviyelerinde Türkiye Sistemi'nde kullanılan havai hatların tipleri ve bunların güç-akım taşıma kapasitelerini verir. Ağırlıklı olarak kullanılan hat tipi 400kV'da 3C (954MCM), 154kV ise 477MCM ve 795MCM'dir[70].

Tablo 4.7: 400kV gerilim seviyesindeki hat tipleri ve güç-akım taşıma kapasiteleri

Tip	Kapasite (MVA)			Kapasite (A)		
	Min	Yaz	Max	Min	Yaz	Max
2000	1116	1116	1116	1611	1611	1611
2R	1047	875	1431	1511	1263	2065
2C	1057	889	1431	1526	1283	2065
3C	1589	1334	2178	2294	1925	3144
3Ph	1921	1604	2610	2773	2315	3767

R: Rail. C: Cardinal Ph: Pheasant

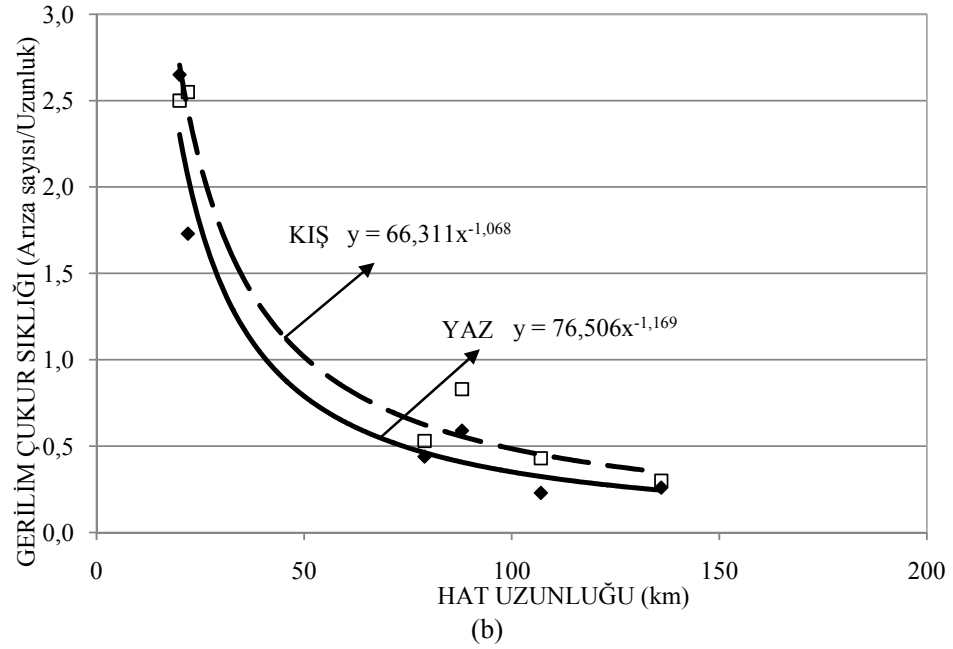
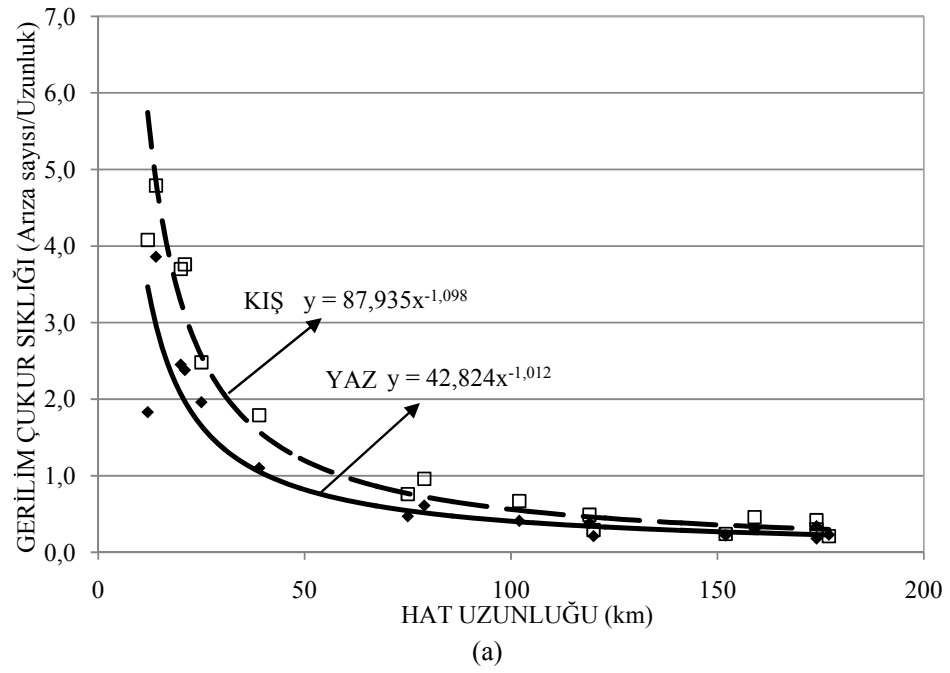
Tablo 4.8: 154kV gerilim seviyesindeki hat tipleri ve güç-akım taşıma kapasiteleri

Tip	Kapasite (MVA)			Kapasite (A)		
	Min	Yaz	Max	Min	Yaz	Max
266.8	130	108	177	487	405	664
477	132	110	180	495	412	675
795	182	153	250	682	574	937
954	204	171	280	765	641	1050
1272	247	206	336	926	772	1260
630	175	175	175	656	656	656
1000	250	250	250	937	937	937
1600	360	360	360	1350	1350	1350
2B954	408	342	560	1530	1282	2099

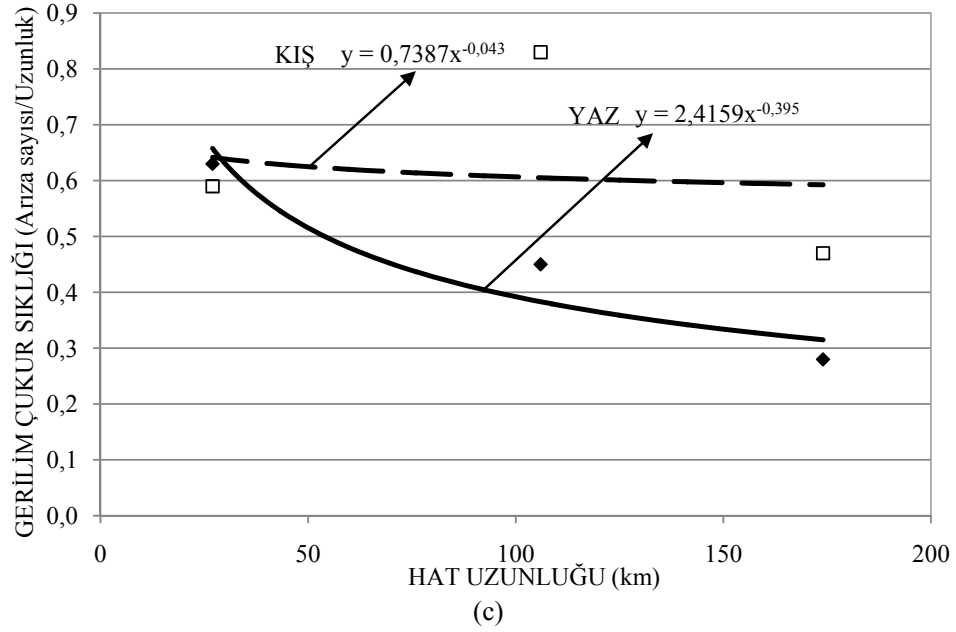
Türkiye İletim Sistemi hatlarında gerilim çukuru değerlendirilmesi yapabilmek amacıyla, sistemde yer alan monitörlerden her iki gerilim seviyesindeki havai hat

için -400kV'da 26 nokta, 154kV'da 29 nokta- toplam 55 noktadan Nisan 2009-Mart 2010 aralığını kapsayan bir yıllık gerilim çukur sıklığı verileri alınmıştır. Alınan veriler yaz ve kış dönemlerine göre ayrı ayrı incelenmiştir. Noktaların seçiminde, hatların sistemde farklı bölgelerde -coğrafik, iletim bölgesi ve buz yükü olarak- bulunmasına, mümkün olduğunca farklı iletken tipi olmasına dikkat edilmiştir.

Elde edilen çukur sayılarından her bir hat için uzunluğa bağlı yıllık gerilim çukur sıklığı hesaplanmıştır. Şekil 4.10'da 400kV da (a) 3C, (b) 2R ve (c) 3Ph tipi havai hatlara ait gerilim çukur sıklığının hat uzunluğuna bağlı değişimi yaz ve kış dönemleri için ayrı ayrı gösterilmiştir. Şekil 4.10'dan görüldüğü gibi tüm hat tiplerinde artan uzunlukla beraber gerilim çukur sıklığı azalmaktadır. Ayrıca kış dönemine ait gerilim çukur sıklığı yaz dönemine göre daha fazladır. Bunun nedeni kış aylarında atmosferik olayların, buz yükü, rüzgar vb., havai hatlardaki etkisinin yaz aylarına göre daha fazla olması, bunun da hatlardaki arıza sayısını ve dolayısıyla çukur sıklığını artırmasıdır. Monitörlerin yoğun olarak 3C tipi hatlara yerleştirilmiş olmasından dolayı elde edilen en fazla veri bu tipe aittir. 3Ph hat tipine ait fazla veri olmamasına rağmen varolan verilerden elde edilen sonuçlar diğer hat tipleriyle benzerdir. Bu da 3Ph tip hat için de bir genelleme yapılmasını sağlamaktadır. 400kV'da en fazla akım taşıma ve güç iletme kapasitesine sahip hatlar 3Ph tip hatlardır. Her üç tip hat için aynı uzunluklar baz alındığında 3Ph hat tipindeki çukur sıklığının diğerlerinden daha az olduğu görülebilir.

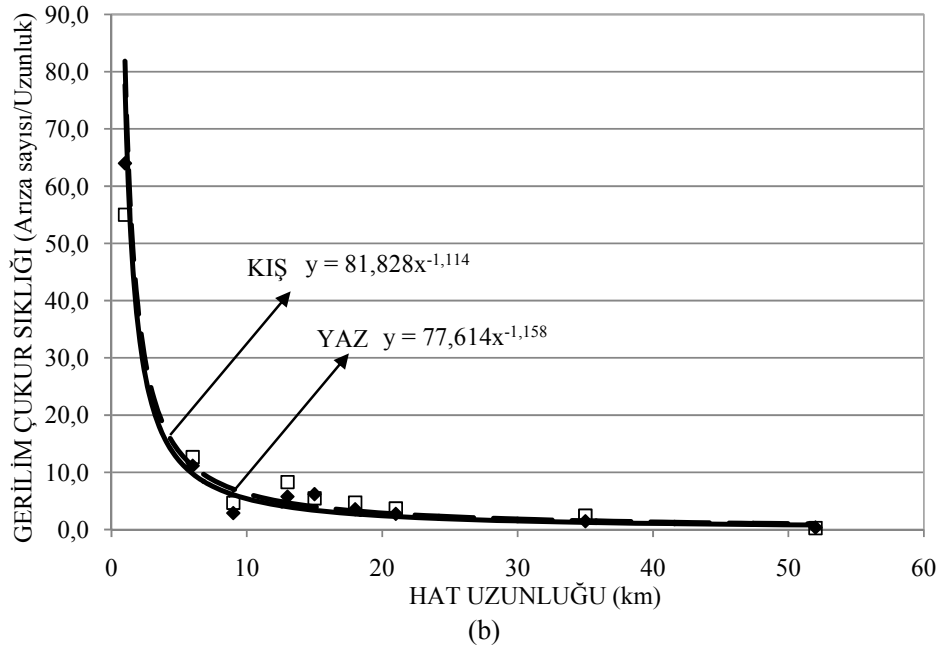
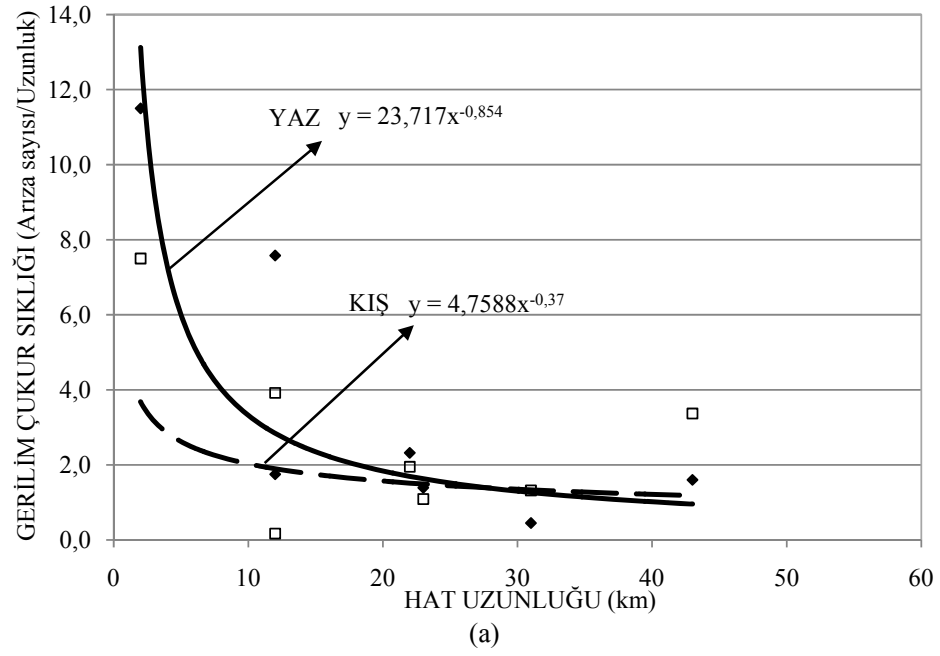


Şekil 4.10: 400kV'da, a) Tip 3C, b) Tip 2R c) Tip3Ph hatlarda çukur sıklık değişimi

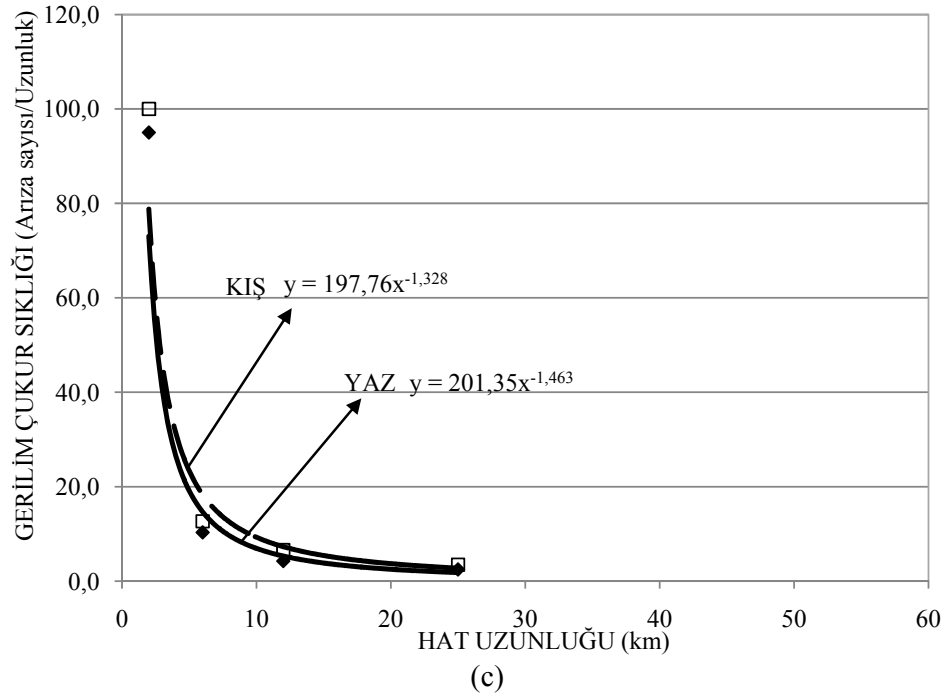


Şekil 4.10(Devamı): 400kV’da , a) Tip 3C, b) Tip 2R c) Tip3Ph hatlarda çukur sıklık değişimi

Şekil 4.11, 154kV havai hatlar için yaz-kış dönemlerine ait gerilim çukur sıklığı-uzunluk değişimini (a) 477 MCM, (b) 795 MCM ve (c) 1272 tipleri için gösterir. Şekil 4.10 ile karşılaştırıldığında 154kV hatlarda gerilim çukur sıklık değerinin daha fazla olduğu yani 154kV gerilim seviyesindeki hatlarda arıza sayısının 400kV’luk hatlardan daha fazla olduğu Şekil 4.11’den ilk elde edilen sonuçtur. Genel olarak kış aylarında rastlanılan çukur olayı daha fazla olmakla birlikte 477 MCM tipi hatta durum tam tersidir. Burdan bu tip hattın yerleştirildiği bölgede kış dönemine ait atmosferik olayların etkili olmadığı sonucuna varılabilir. Bu bölgede yazın artan sıcaklıkla beraber klima kullanımının artmasıyla hatlara daha çok yüklenildiği bununla paralel olarak da yazın arıza ve sıklığın arttığı anlaşılabılır. 154kV gerilim seviyesinde en çok güç iletme kapasitesine sahip olan hat 1272 tipidir. Şekil 4.11 incelendiğinde aynı uzunluk için en az çukur sıklığının bu tip hatta ait olduğu görülebilir.



Şekil 4.11: 154kV'da , a) Tip 477 MCM, b) Tip 795 MCM, c) Tip 1272 hatlarda çukur sıklık değişimi



Şekil 4.11(Devamı): 154kV’da, a) Tip 477 MCM, b) Tip 795 MCM, c) Tip 1272 hatlarda çukur sıklık değişimi

4.4.2. 1. İletim Bölgesi’ndeki havai hatlarda gerilim çukur değerlendirmesi

Bölüm 4.4.1’de tüm Türkiye Sistemi için monitörlerin yerleştirildiği noktalardan elde edilen verilerle her iki gerilim seviyesinde gerçekleştirilen analiz bu bölümde sadece 1. İletim Bölgesi’ndeki havai hatlar için yapılmıştır. 1. İletim Bölgesi’nde monitörlerin bulunduğu hatlar, tipleri, uzunlukları ve Nisan2009-Mart2010 aralığını kapsayan bir yıllık sürecin yaz ve kış dönemlerine ait gerilim çukur sıklıkları Tablo 4.9’de verilmiştir.

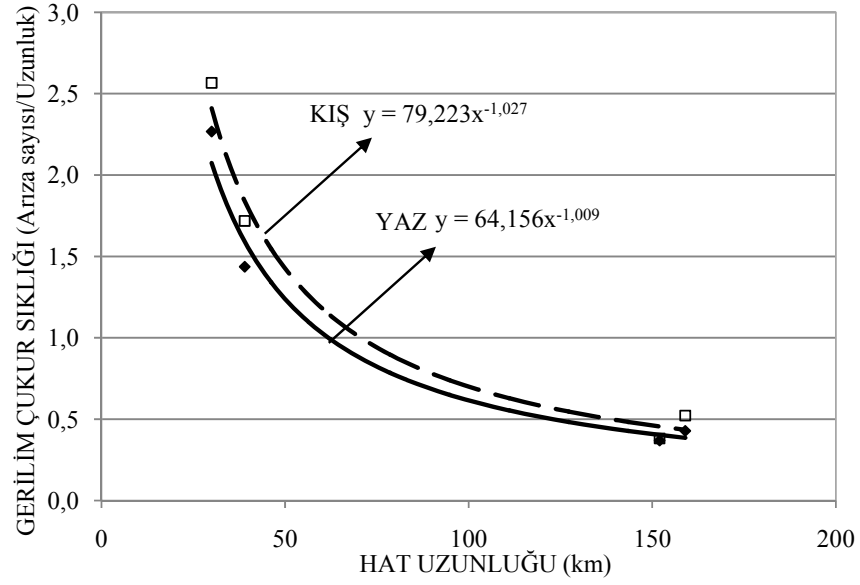
Şekil 4.12 a)3C ve b)2R, 400kV gerilim seviyesindeki hatların, yaz-kış dönemlerinde çukur sıklığının uzunlukla değişimini gösterir. 1. İletim Bölgesi’nde 400kV gerilim seviyesinde monitörün yerleştirildiği hat tipleri 3C ve 2R olduğundan Şekil 4.12 sadece bu hat tiplerine aittir. Şekil 4.12’den, Bölüm 4.4.1’de elde edilen sonuçların, artan hat uzunluğuyla çukur sıklığının azalması ve yaz aylarında rastlanılan çukur sıklığının kış aylarına göre daha az olması sonuçları, burada da geçerli olduğu görülmüştür. 2R hat tipine ait grafikte başlangıçta kış aylarında yaz dönemine göre daha az olan sıklık artan uzunlukla tersine dönmüştür. Burada monitörün bulunduğu

2R tipi hat sayısının az olmasının doğru değerlendirme yapılmasını etkilediği, daha gerçekçi analiz için bu hat tipindeki daha fazla noktaya monitor yerleşiminin gerekliliği sonucu ortaya çıkmıştır.

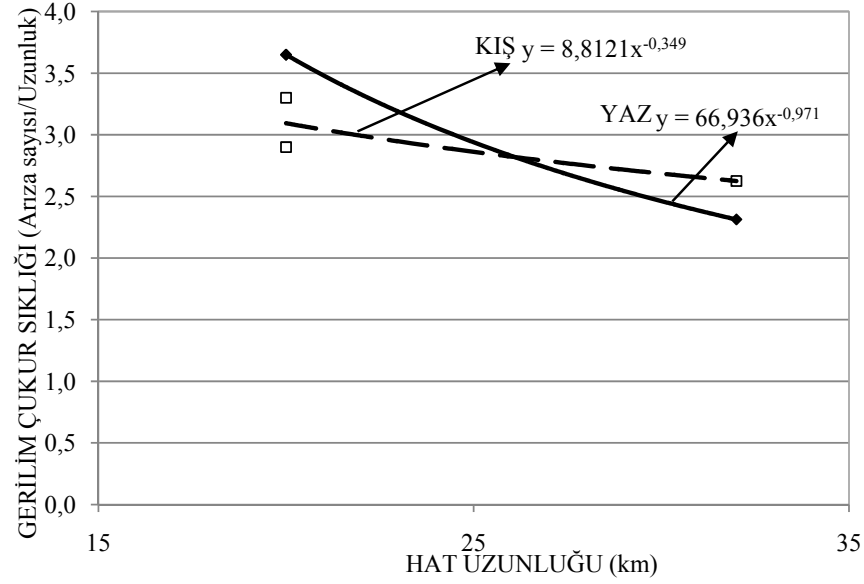
Tablo 4.9: 1. İletim Bölgesi'nde monitörlerin bulunduğu hatlar, tipleri, uzunlukları ve bir yıllık sürecin yaz-kış dönemlerine ait gerilim çukur sıklıkları

	Gerilim (kV)	İletken Tipi	Sk" (Kış)	Sk" (Yaz)	Kış Sıklık	Yaz Sıklık	Kış Ort. Yük(%)	Yaz Ort. Yük(%)	Hat Uzunluğu (km)
HABİBLER-ZEKERİYAKÖY	380	2R	22699	23051	2,90	3,65	12	18	20
ZEKERİYAKÖY-HABİBLER	380	2R	18738	19076	3,30	3,65	12	17	20
ZEKERİYAKÖY-PAŞAKÖY	380	2R	18738	19076	2,63	2,31	17	15	32
ALİBEYKÖY-BEYKOZ	380	3C	21316	21783	2,57	2,27	16	14	30
ALİBEYKÖY-ÜMRANİYE	380	3C	21316	21783	1,72	1,44	11	13	39
ALİBEYKÖY-HAMİTABAT	380	3C	21316	21783	0,38	0,37	15	23	152
HABİBLER-ADA2DGKÇ	380	3C	22699	23051	0,52	0,43	25	21	159
DAVUTPAŞA-TOPKAPI KABLO	154	477	2143	3845	28,67	23,33	43	40	3
KASIMPAŞA-ALTINTEPEGİS	154	1000	6954	6737	51,43	52,14	2	2	1,4
LEVENT-ETİLER	154	1000	6399	6113	20,75	17,50	7	6	4
YENİBOSNA-İÇDAŞ	154	1272	2368.61	3452.09	7,67	5,75	28	25	6
MASLAK-ZEKERİYAKÖY	154	1272	6830.3	6507.9	4,80	3,83	23	24	12
YENİBOSNA-AMBARLI	154	1272	2368.61	3452.09	3,33	3,44	27	27	25

Tablo 4.9'dan 154kV gerilim seviyesinde en fazla monitörün yer aldığı hat tipinin 1272 olduğu görülür. Şekil 4.13, 1272 hat tipi için yaz ve kış dönemlerine ait çukur sıklığının uzunluğa bağlı değişimini verir. Şekil 4.13 ile Şekil 4.12 karşılaştırıldığında 154kV gerilim seviyesinde çukur sıklık değerlerinin daha yüksek olduğu görülür. Yine çukur sıklığının artan uzunlukla azaldığı ve kış aylarında görülen sıklık değerlerinin yaz dönemine göre daha fazla olduğu Şekil 4.13'den anlaşılabılır. Bu gerilim seviyesinde 477MCM ve 1000 tipleri için değerlendirme yapılabilmesi bu tip daha fazla hatta monitör yerleşimiyle mümkündür.



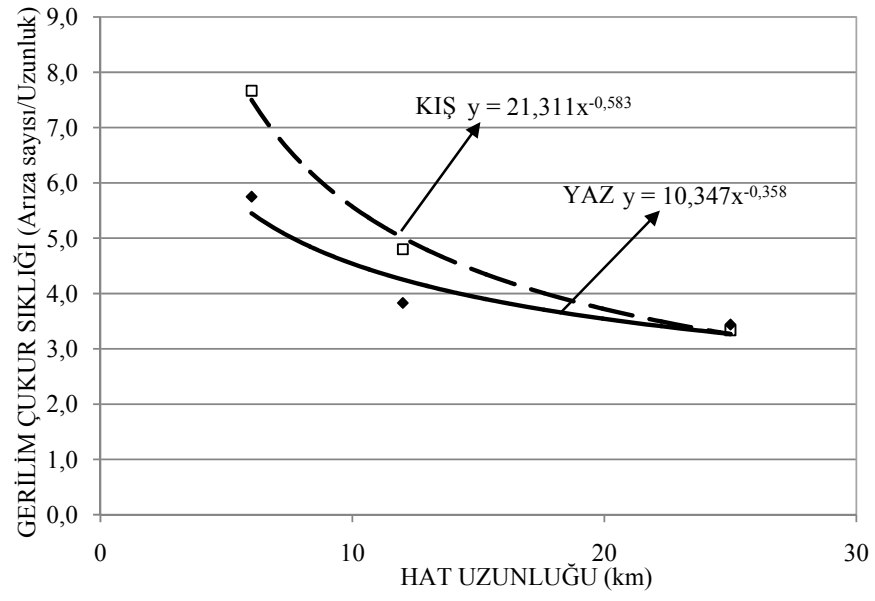
(a)



(b)

Şekil 4.12: 400kV’da, a) Tip 3C, b) Tip 2R hatlarda çukur sıklık değişimi

Kaynakçada Türkiye Sistemi’nin iletim seviyesinde yer alan havai hatların tiplerine, uzunluklarına ve akım taşıma kapasitelerine bağlı gerilim çukur sıklık değerlendirmesi yer almamaktadır. Gerçekleştirilen çalışma ile ilk defa kaynakçaya girecek olan bu değerlendirmenin, belirtilen gerilim seviyesi için hangi hat tipinin çukur olayından nasıl etkilendiği, bu etkinin nelere bağlı olduğu bilgilerini sunularak tasarım aşamasında yarar sağlanması hedeflenmiştir.



Şekil 4.13: 154kV’da Tip 1272 hattında çukur sıklık değişimi

BÖLÜM 5. TÜRKİYE SİSTEMİ ve SİSTEME AİT GERİLİM ÇUKUR ANALİZİ SONUÇLARI

5.1. Giriş

Türkiye Sistemi Avrupa'nın en büyük güç sistemlerinden birisidir. Enterkonnekte yapıya sahip olan sistemin iletim seviyesi 400kV üst iletim ve 154kV alt iletim gerilim değerlerinden oluşur. İletim seviyesi arıza öncesi planlama gerilim sınırları; 400kV için 380kV ile 420kV, 154kV için 146kV ile 162kV arasındadır. 400kV'luk sistemin mevcut olmadığı bölgelerde 154kV'luk sistem için bu limitlerin 140 ile 170kV olduğu kabul edilir. Sistemin nominal frekansı TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim A.Ş.) tarafından 50Hz etrafında 49.8-50.2Hz aralığında kontrol edilir[71].

İletim hat güzergahlarının ve transformatör merkez yerlerinin seçiminde, teknik, ekonomik, sosyal ve çevrenin korunmasına yönelik hususlar dikkate alınır. Nüfusun yoğun olduğu yerleşim merkezlerinde ve sanayi bölgelerinde, şartlar göz önünde bulundurularak düşük kapasiteli iletim hatları aynı güzergah üzerinde yüksek kapasiteli çok devreli iletim hatları ile yenilenir. Transformatör merkezleri, elektrik sistemi tesis ve teçhizatı için geliştirilen, onaylanan ve kullanılan uluslararası tasarım, tesis, imalat ve performans standartlarına uygun olarak uzaktan insansız çalıştırılabilecek şekilde gerekli altyapı ile tesis edilir.

21 bölgeden oluşan sistemin, Eylül 2010'da 20. bölgesinde yer alan Hamitabat Barası ile Bulgaristan/Yunanistan üzerinden Avrupa Enterkonnekte Şebekesi'ne bağlantısı gerçekleştirilmiştir[72].

Hat bağlantısı olmasına rağmen henüz Türkiye Sistemi ile arasında güç akışı olmayan ülkeler ve hat bağlantısının olduğu gerilim seviyeleri aşağıda verilmiştir.

- Azerbaycan (34.5kV and 154kV)
- Ermenistan (220kV)

- İran(154kV)
- Irak(400kV)
- Suriye(66kV)

2006 yılında TÜBİTAK, TEİAŞ ve Türkiye üniversitelerinden öğretim üyeleri ve araştırmacıların katılımıyla başlatılan MGKP kapsamında sistemin 400kV-154kV-36kV gerilim seviyelerindeki toplamda 250 noktasına güç kalitesi monitörü yerleştirilmiştir[67]. Bu monitörler sayesinde güç kalitesi problemlerinin sürekli olarak izlenerek oluşan olaylara ait verilerin alınması ve incelenmesi mümkündür.

Monitörlerin en yoğun olarak yerleştirildiği ve en doğru generatör verilerinin elde edildiği bölge 1. İletim Bölgesi'dir. Bu bölge İstanbul ve civarını kapsadığından aynı zamanda hem nüfus hem de endüstriyel tesis anlamında en yoğun olan bölgelerden biridir. Bundan dolayı Doktora Tez çalışmasında gerilim çukur değerlendirmesi için bu bölge seçilmiştir. Başlangıçta tüm sistem için gerilim çukur değerlendirmesinin yapılması planlanmış olsa da tüm sisteme ait özellikle generatör verilerinin elde edilmesinde yaşanan sıkıntılar değerlendirmenin verilerin en doğru elde edildiği bölgeyle sınırlandırılmasına neden olmuştur.

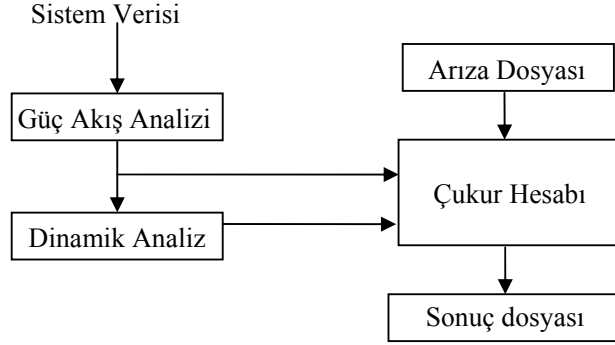
5.2. Türkiye Sistemi'nin 1. İletim Bölgesi'ne Ait Analiz Sonuçları

Türkiye Sisteminin 1. İletim Bölgesi'nin 2008 yılına ait, güç akışı ve dinamik analizi için gerekli hat, transformatör, generatör vb. gerçek verileri TEİAŞ'dan temin edilmiştir. Sistemin gerilim çukur analizi SIMPOW DIPS yazılım programında gerçekleştirilmiştir. Program, tüm arıza tiplerini güç sistemin her bir barası için analiz etmektedir. Sistemde gerilim çukuruna ait tüm baralarda her bir arıza tipi için aşağıdaki bilgiler yer almaktadır[73]:

1. Üç faz, iki faz toprak, faz-faz ve tek faz toprak arızaları için ayrı ayrı yıla bağlı olarak arızaların sayısı,
2. Her bir arıza tipi için, çukur tipi, karakteristik gerilim, PN-Faktörü ve sıfır dizi gerilimin kompleks formu.

SIMPOW DIPS programı gerilim çukuru hesabı için üç dosyaya ihtiyaç duymaktadır. Bunlar güç akış analizi çıkış dosyası, dinamik analiz dosyası ve bara ve

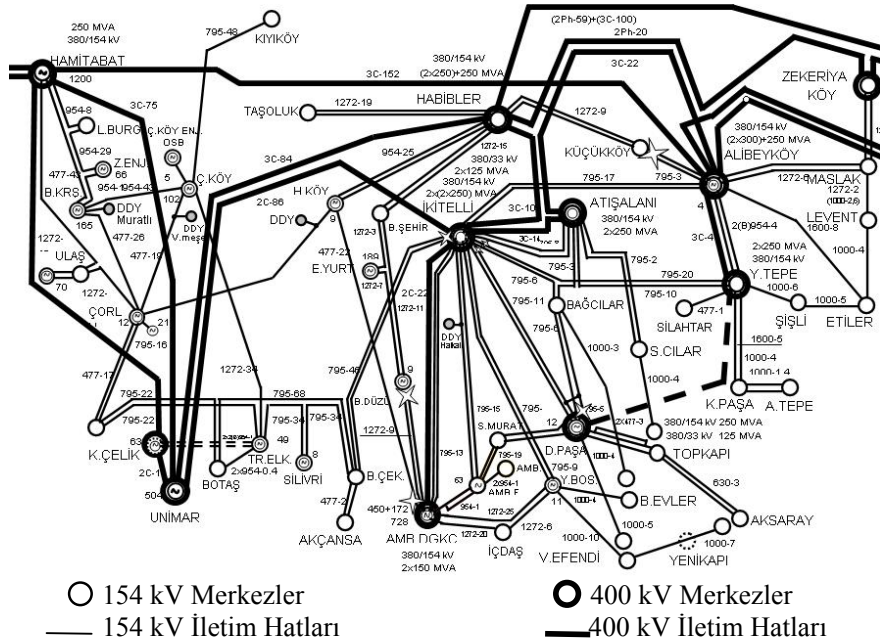
hatlara ait yıllık arıza oranlarını veren arıza dosyadır. Şekil 5.1 programa ait akış şemasını göstermektedir.



Şekil 5.1: Kullanılan yazılım programının akış şeması

5.2.1. Türkiye Sistemi 1. İletim Bölgesi'ne ait gerilim çukur değerlendirmesi

Şekil 5.2, Türkiye Sistemi'nin 1. İletim Bölgesi'ne ait 400kV ve 154kV'luk bara ve hatları göstermektedir. Sistem bileşenleri ve hat uzunlukları Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'de verilmiştir[74].



Şekil 5.2: Türkiye Sistemi 1. İletim Bölgesi'ne ait iletim sistem haritası

Tablo 5.1: Türkiye Sistemi 1. İletim Bölgesi'ne ait iletim bileşenleri (2008)

1. Bölge'ye ait Sistem Parametreleri	Sayı
400 kV Bara	8
154 kV Bara	47
Generatör Bara	17
Hat	75
Transformatör	35

Tablo 5.2: Türkiye Sistemi 1. İletim Bölgesi'ne ait hat uzunlukları (2008)

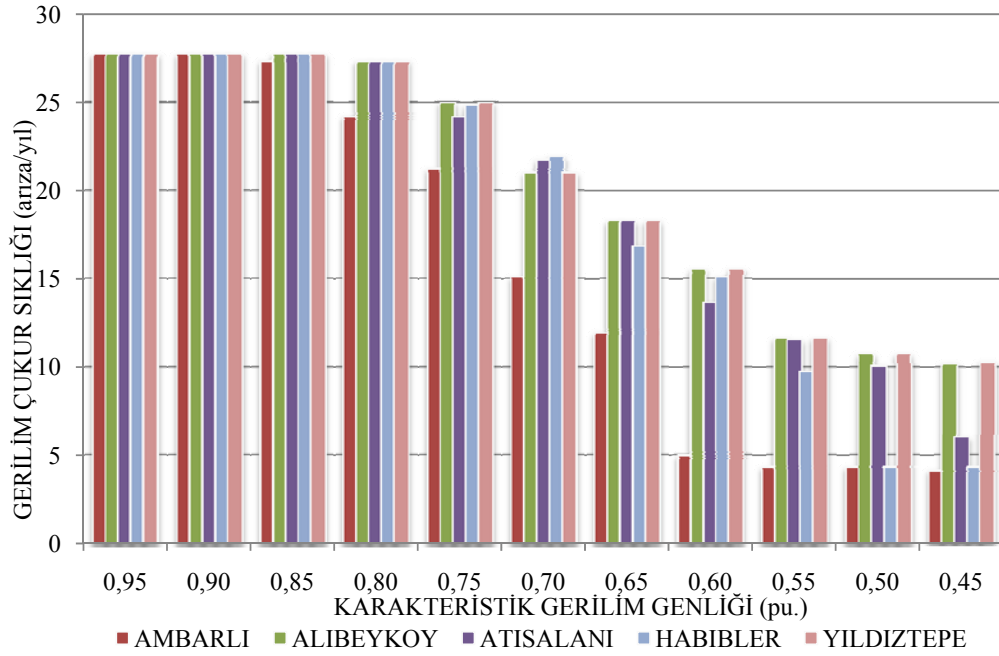
Gerilim Seviyesi (kV)	Uzunluk (km)
400	92
154	602.4
TOPLAM	694.4

Sistemde yer alan transformatör bağlantı şekilleri YNd11 veya YNyn0'dır. 400/154kV yıldız-yıldız bağlı ototransformatörlerin primer ve sekonder sargılarının nötr noktaları direkt topraklıdır[70].

İlk olarak, TEİAŞ'dan alınan 1. İletim Bölgesi'nin 2008 yılına ait sistem verileri kullanılarak gerilim çukur değerlendirmesi için gerekli tüm dosyalar oluşturulmuş ve sistemin güç akış analizi gerçekleştirilmiştir. Güç akış analizinin sonuç dosyası, dinamik analizin giriş dosyası olarak kullanılmıştır. Son olarak çukur analizi için gerekli arıza analizi yapılmıştır. Arıza dosyası hatlar için, bir yıllık toplam arıza sayısının hat uzunluğuna bölünmesiyle elde edilen kilometre başına yıllık arıza oranı değerlerini; bara için, bir yıllık arıza sayılarını içerir. TEİAŞ'dan elde edilen 2004 yılı arıza verilerinden yararlanılarak arıza dosyası oluşturulup gerilim çukur analizi yapılmıştır.

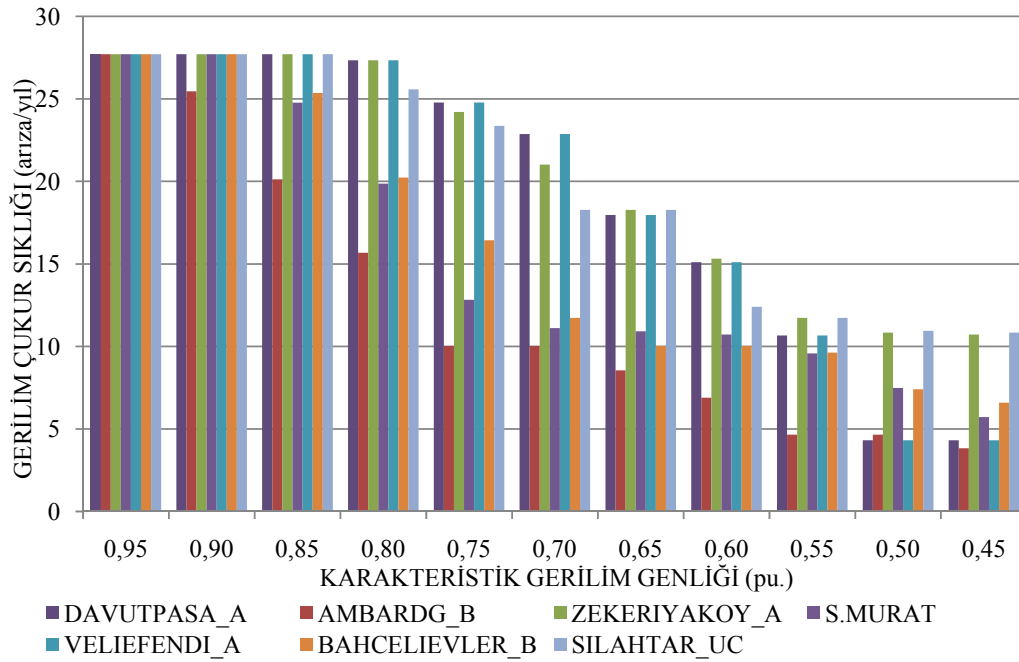
Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 sırasıyla 400kV ve 154kV gerilim seviyelerine ait gerilim çukur analiz sonuçlarını gösterir. Bara sayısının fazla olmasından dolayı gerilim çukurunun en fazla etkili olduğu baralara ait sonuçlar sunulmuştur. Şekil 5.3 incelendiğinde 0.85-0.95pu.'lik karakteristik gerilim değerlerinde çukur sıklığının 25-30 aralığında ve tüm baralarda aynı değerde olduğu görülür. Azalan karakteristik gerilim değerleri için çukur sıklığı da azalmakta ve sıklık değerinin Yıldıztepe ve Alibeyköy Baraları için yüksek olduğu Şekil 5.3'den görülmektedir. Ambarlı barasında 0.7 pu. lik karakteristik gerilimde yılda 15 gerilim çukuru oluşmakta iken

diğer baralarda bu değer aynı karakteristik gerilimde 20 den fazladır. 400kV gerilim seviyesindeki baralardan Yıldıztepe ve Alibeyköy baralarında 0.75 pu. ve altındaki karakteristik gerilim değerlerinde yılda daha fazla gerilim çukuruna dolayısıyla arızaya rastlanmıştır. Bu, bu baraların diğer baralara göre daha zayıf olduğu anlamına gelir. Ambarlı Barası ise sistemdeki en güçlü baradır. Bu baranın arızaya dayanımının diğer noktalardan daha fazla olduğu azalan karakteristik gerilimle sıklıkta dolayısıyla arıza sayısındaki keskin azalmadan anlaşılmaktadır.



Şekil 5.3: 400kV'daki baralarda karakteristik gerilim-çukur sıklığı değişimi

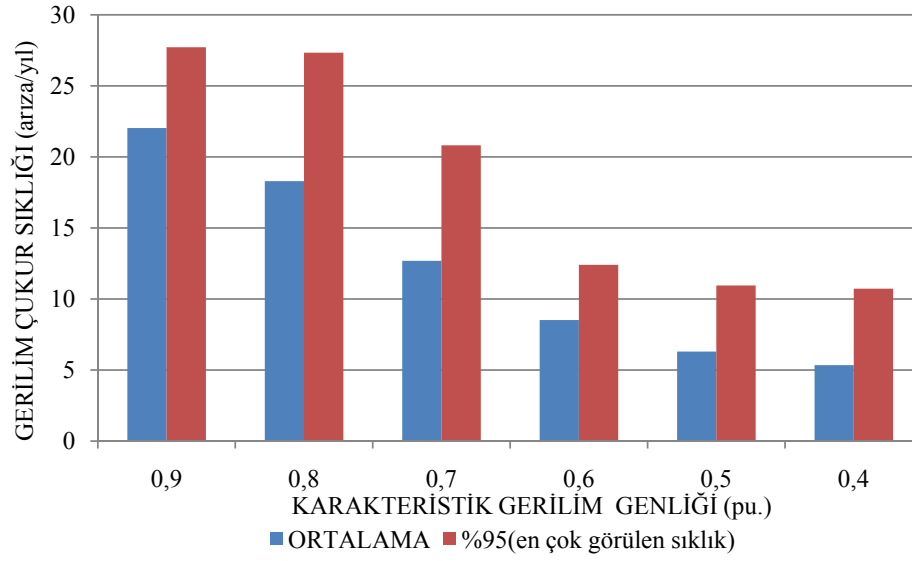
Şekil 5.4, 154kV gerilim seviyesindeki baralarda zayıf ve güçlü noktaların belirlenmesine yardımcı olur. AmbarDG Barasında azalan karakteristik gerilimle beraber yıllık çukur sayısındaki azalma önemli derecededir. Bunda bu baraya bağlı noktada generatör barasının olmasının etkisi büyüktür. Generatör, arıza bağlı olduğu barada değilse, arıza sırasında bağlı olduğu noktadaki gerilimi destekleyici etki gösterir. 154kV gerilim seviyesinde Davutpaşa_A, Zekeriyaköy_A ve Silahtar_Uc Baraları zayıf noktalardır çünkü Şekil 5.4 incelendiğinde bu baralarda genel olarak yıllık çukur sayısının fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 5.4: 154kV'daki baralara ait karakteristik gerilim-çukur sıklığı değişimi

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4, her bir bara için ayrı olarak çukur sıklığının karakteristik gerilim genliğiyle değişimini göstermektedir. Standartlarda bunun için kullanılan ifade; arta kalan X gerilim genliğine karşılık gelen yıllık çukur sıklığını ifade eden SARFI-X (Sistem Ortalama RMS Değişimi Sıklık İndeksi) indeksidir[73]. Örnek olarak SARFI-0.75 AmbarDG barası için 10'a eşittir.

Tüm sistemin gerilim çukur değerlendirilmesi için kaynakçada kullanılan ifadeler ise %95 (%95 percentile) ve ortalama (Average) indeksleridir. Bunlar tüm baraların hesaba katılmasıyla sistemde belirli bir gerilim genliğinde yıllık %95 oranında rastlanılan gerilim çukur sıklığını ve ortalama gerilim çukur sıklığını ifade eder. Şekil 5.5 tüm sisteme ait %95 ve ortalama değerlendirmesini gösterir. Ortalama olarak tüm sistemde 0.6 pu. lik karakteristik gerilime ait çukur sıklığı yılda 8.51 dir. Bu her iki gerilim seviyesini ve tüm arıza tiplerini içerir.



Şekil 5.5: Tüm sisteme ait karakteristik gerilim-çukur sıklığı değişimi

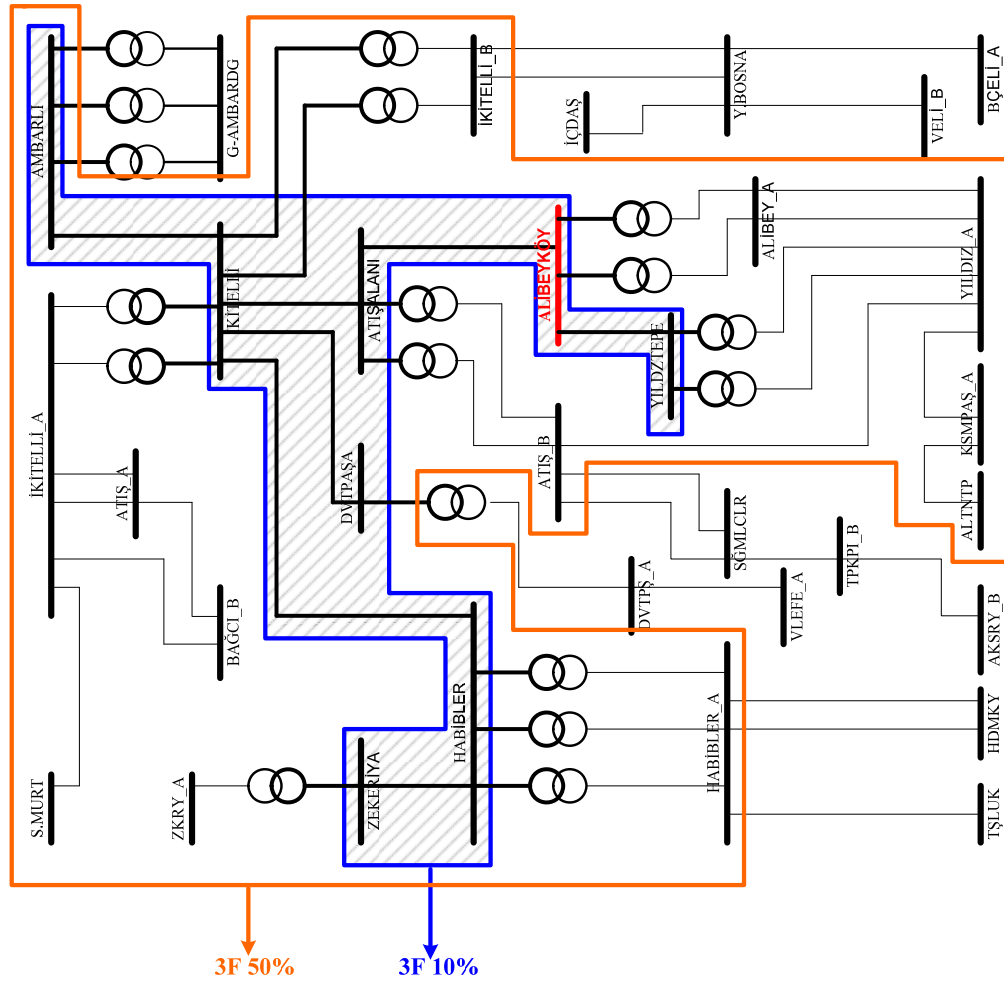
5.2.2. Korunmasız alanın 1. İletim Bölgesi'nde analizi

Korunmasız veya kritik alan bir güç sisteminde dengeli ve dengesiz arıza durumlarında baralar arası etkileşimi gerilim çukur genliği haritası şeklinde belirten bölgedir. Türkiye Sistemi 1. İletim Bölgesi'ne ait 400kV ve 154kV gerilim seviyelerinde, gerilim çukur değerlendirilmesinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda korunmasız alanlar oluşturulabilir. Korunmasız alan şekilleri oluşturulurken sisteme ait tüm baralar, etkinin anlaşılmasını güçleştirdiği ve SIMPOW DIPS programında oluşturulan sistem haritasını karmaşıktırdığından dolayı alınmamış sadece ilgili baralar alanda belirtilmiştir.

5.2.2.1. 400kV gerilim seviyesine ait korunmasız alan

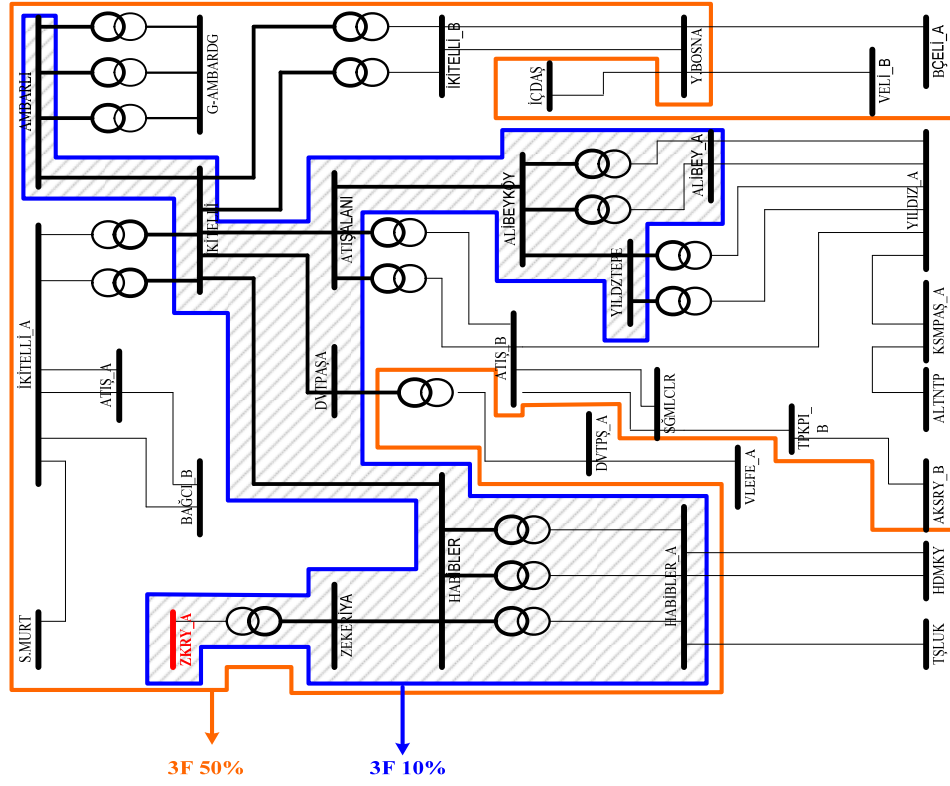
400kV gerilim seviyesindeki baralarda gerilim çukuru değerlendirmesi, zayıf noktaların Alibeyköy ve Yıldıztepe olduğunu göstermiştir. Tüm sistem baralarında üç faz ve tek faz toprak arızaları oluşturulup zayıf olan iki baranın gerilimlerine bakıldığında benzer karakteristik gösterdikleri görüldüğünden korunmasız alanın oluşumu için Alibeyköy Barası seçilmiştir. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de Alibeyköy Barasına ait, sırasıyla üç faz ve tek faz toprak arızası durumlarındaki korunmasız alan şekilleri verilmiştir. Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 değerlendirildiğinde diğer baralarda

oluşan arızanın bu barayı ciddi oranda etkilediği anlaşılmaktadır. 10% ve 50% alanları, sırasıyla bu alana giren baralarda oluşan üç faz ve tek faz toprak arızalarının Alibeyköy barasında 10% ve 50%'ye eşit ve bu değerlerin altında çukur genliği oluşturduğu anlamına gelmektedir. Alibeyköy barasından elektriksel mesafesi uzak olan baraların bu barada oluşturacağı etkinin, yakın olanlara göre daha az olduğu elde edilen korunmasız alan genliklerinden ortaya çıkmaktadır. Ayrıca aynı çukur genliğinde sistem baralarında oluşan üç faz arızasının Alibeyköy barasına etkisini gösteren korunmasız alan, tek faz arızasının oluşturduğu alandan daha geniştir. Bunun nedeni üç faz arızasının arıza akımının ve buna bağlı olarak kısa devre kesme gücünün tek faz arızasına göre daha yüksek olmasıdır. Bu nedenle arızanın olduğu noktayı daha güçlü hale getirerek sistemdeki diğer baralara olan etkisinin tek faz toprak arızasına göre daha fazla olmasına neden olmaktadır.

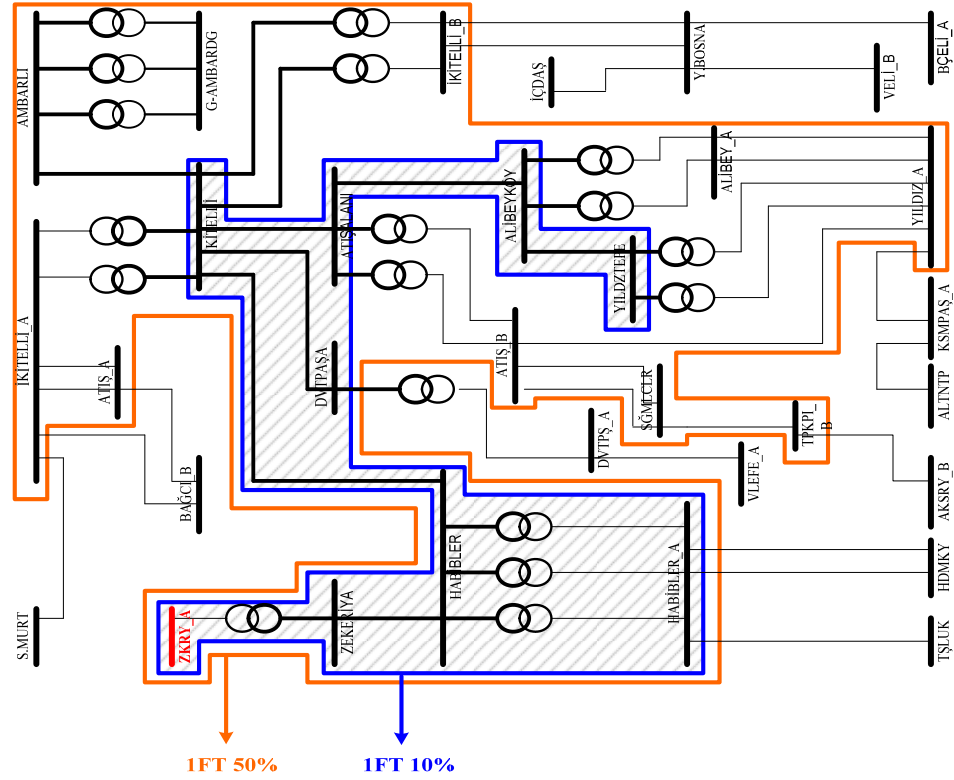


Şekil 5.6: Alibeyköy barasının üç faz arızasına göre korunmasız alan şekli

92



Şekil 5.10: Zekeriya_köy_A barasının üç faz arızasına göre korunmasız alan şekli



Şekil 5.11: Zekeriya_köy_A barasında tek faz toprak arızasına göre korunmasız alan şekli

5.2. Türkiye Sistemi 1. İletim Bölgesi'ne Gerilim Çukur Etkisini Azaltma Yöntemlerinin Uygulanması

Bölüm 3'te teorik olarak açıklanan gerilim çukur etkisini azaltma yöntemlerinden bazıları, SIMPOW DIPS yazılım programı kullanılarak, bilgisayar ortamında 1. İletim Bölgesi için değerlendirilmiştir.

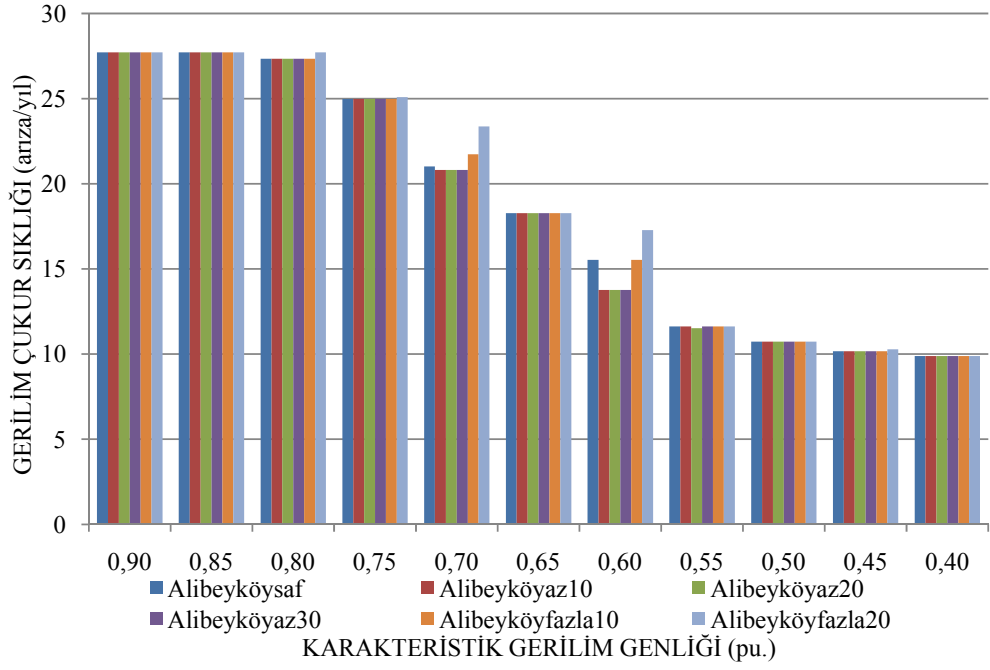
5.3.1. Arıza sayısının azaltılması

Arıza sayısını etkileyen faktörlerden biri sistemdeki yüklenme durumudur. Sistemin dengeli yüklenmemesi, bazı noktaların aşırı yüklenmesi arıza sayısında artışa neden olabilmektedir. 1. İletim Bölgesi'nde çukur sıklığının yüklenmeyle değişiminin incelendiği bu bölümde farklı yüklenme durumlarında çukur sıklığı değerlendirilmiştir.

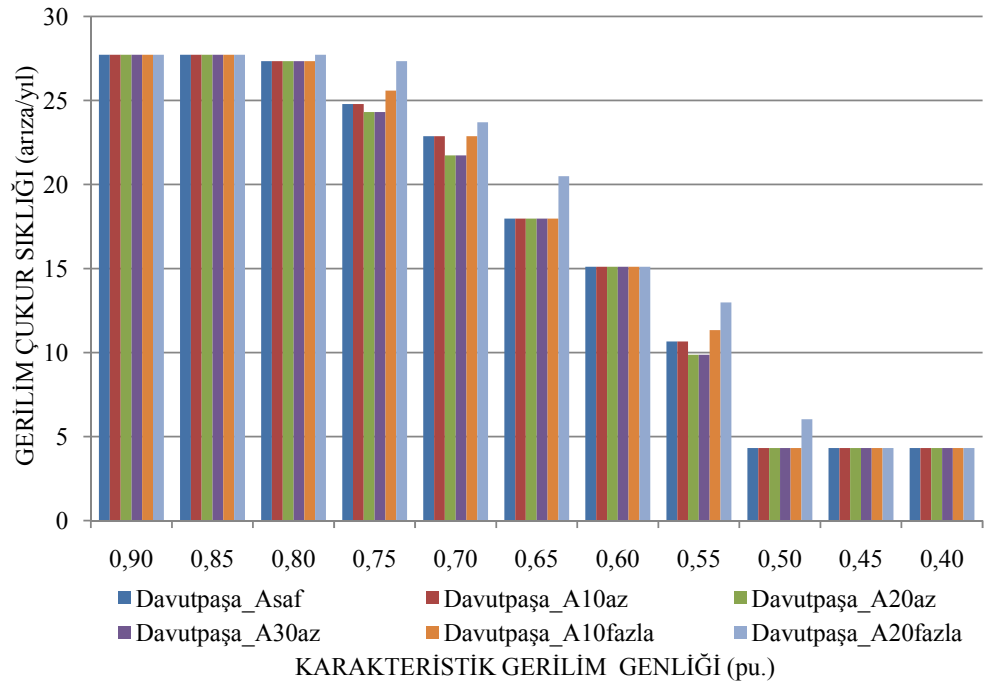
5.3.1.1. Farklı yüklenme durumları

1. İletim Bölgesi için farklı yüklenme durumlarında sistemdeki baralarda gerilim çukur sıklık değişimleri incelenmiştir. Yüklenme durumunun etkisi incelenirken, toplam sistem yükünün 30% düşük olduğu durumdan, 20% fazla olduğu duruma kadar, yük 10% adımlarla arttırılarak incelemeler yapılmıştır. Yüklenme durumlarına karşılık düşen tüm baralarda karakteristik gerilime göre çukur sıklık değerleri elde edilmiş ancak değerlendirme kolaylığı sağlaması için sadece zayıf noktalara ait sonuçlar sunulmuştur. Şekil 5.12, Alibeyköy barasına ait sonuçları göstermektedir. Özellikle 0.6 pu.'lik karakteristik gerilimde bu bara için, yüklenmedeki azalmayla çukur sıklığında azalma ve 20% lik yük artışıyla da ciddi bir artma görülmektedir.

Şekil 5.13'de 154kV gerilim seviyesindeki Davutpaşa_A barasına ait sonuçlar verilmiştir. Davutpaşa_A barası 0.8-0.5pu. karakteristik gerilim aralığında yük değişiminden fazlasıyla etkilenmektedir. Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'den elde edilen sonuçlara göre yüklenme gerilim çukur sıklığı değerinde etkili faktörlerden birisidir. Sistem tasarımı sırasında bunun göz ardı edilmeyip değerlendirmeye katılması güç kalitesinin sağlanması açısından önem taşımaktadır.



Şekil 5.12: Alibeyköy barasında farklı yüklenme durumlarında çukur sıklığı-karakteristik gerilim değişimi



Şekil 5.13: Davutpaşa_A barasında farklı yüklenme durumlarında çukur sıklığı-karakteristik gerilim değişimi

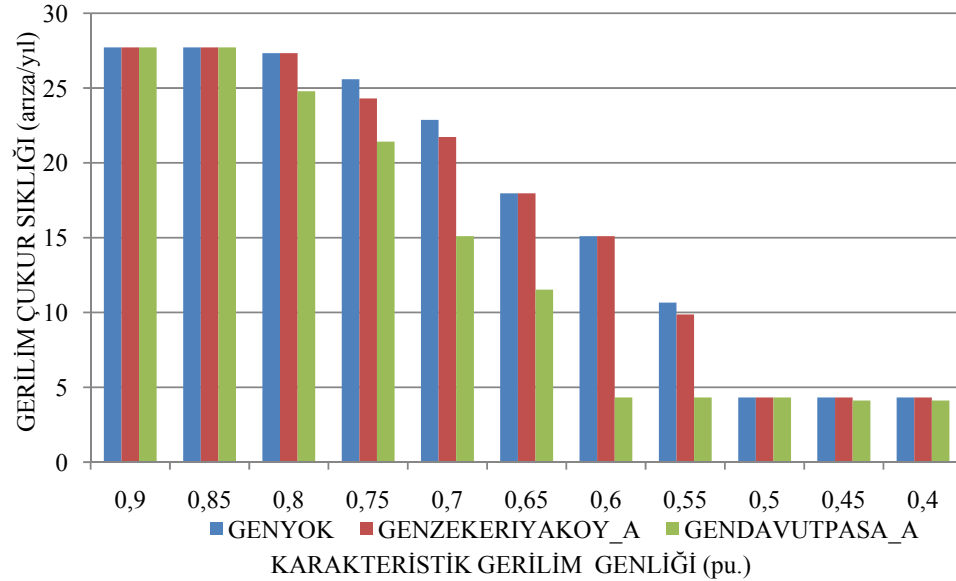
5.3.2. Sistem yapısında değişiklik yapılması

Türkiye Sistemi 1. İletim Bölgesi'nde zayıf noktalarda çukur olayının etkisini azaltma yöntemlerinden biri sistemin yapısında iyileştirmeler yapılmasıdır. Bu amaçla analizlerle belirlenen çukur olayından en çok etkilenen nokta veya noktalara yakın baralara generatör ve hat ilavesi yapılarak sıklık değişimleri gözlenmiştir.

5.3.2.1. Generatör ilavesi

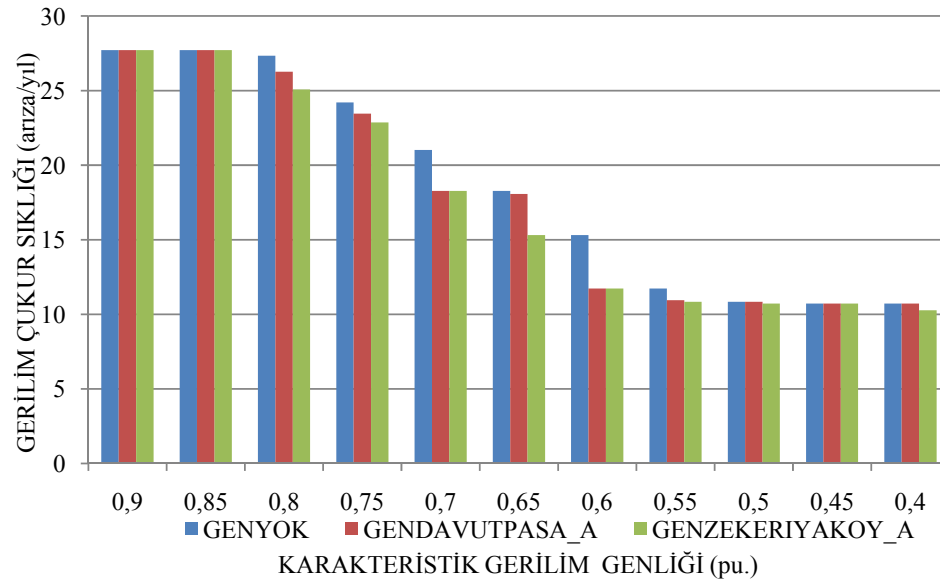
Bölüm 5.2'de gerçekleştirilen 1. İletim Bölgesi'ne ait çukur sıklık analizleriyle 154kV gerilim seviyesinde zayıf noktaların Davutpaşa_A ve Zekeriyaköy_A olduğu belirlenmiştir. Bundan dolayı sistem yapısındaki iyileştirmelerden biri olan sisteme ek generatör yerleştirilmesi yöntemi bu baralara uygulanmıştır.

İlk olarak hem Davutpaşa_A hem de Zekeriyaköy_A baralarına 82.4 MVA gücünde generatör yerleştirilerek bunun hem bu baralarda hem de 400kV gerilim seviyesinde zayıf nokta olarak belirlenen Alibeyköy barasında çukur sıklığını nasıl etkilediği gözlenmiştir. Sistemde generatörün olmadığı ve generatörün sırasıyla Davutpaşa_A ve Zekeriyaköy_A baralarına bağlandığındaki üç barada oluşturduğu etkiyi gösteren grafikler Şekil 5.14, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da sunulmuştur.



Şekil 5.14: Zekeriyaköy_A ve Davutpaşa_A baralarına eklenen 82.4MVA'lık generatörün Davutpaşa_A barasına etkisi

Şekil 5.14’de görüldüğü gibi Davutpaşa_A barasına yerleştirilen generatör bu baradaki çukur sıklığını ciddi oranda azaltmıştır. 0.7 pu.lik karakteristik gerilim genliğinde sistemde generatör olmadığı durumdaki çukur sıklığı yılda 20-25 aralığında iken generatör olduğu durumda 15’e düşmüştür. Zekeriya köy_A barasına bağlanan aynı güçteki generatör ise 0.7 pu. için Davutpaşa_A Barası’nda çukur sıklığını azaltmış ancak etkisi bu baraya generatör bağlı olduğu durumdaki kadar baskın olmamıştır.

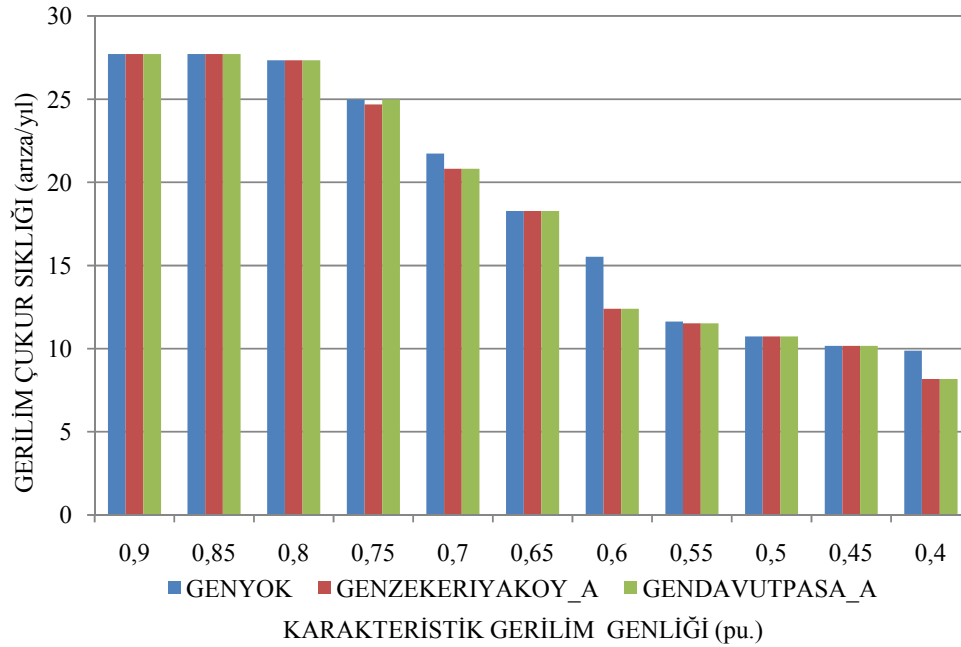


Şekil 5.15: Zekeriya köy_A ve Davutpaşa_A baralarına eklenen 82.4MVA’lık generatörün Zekeriya köy_A barasına etkisi

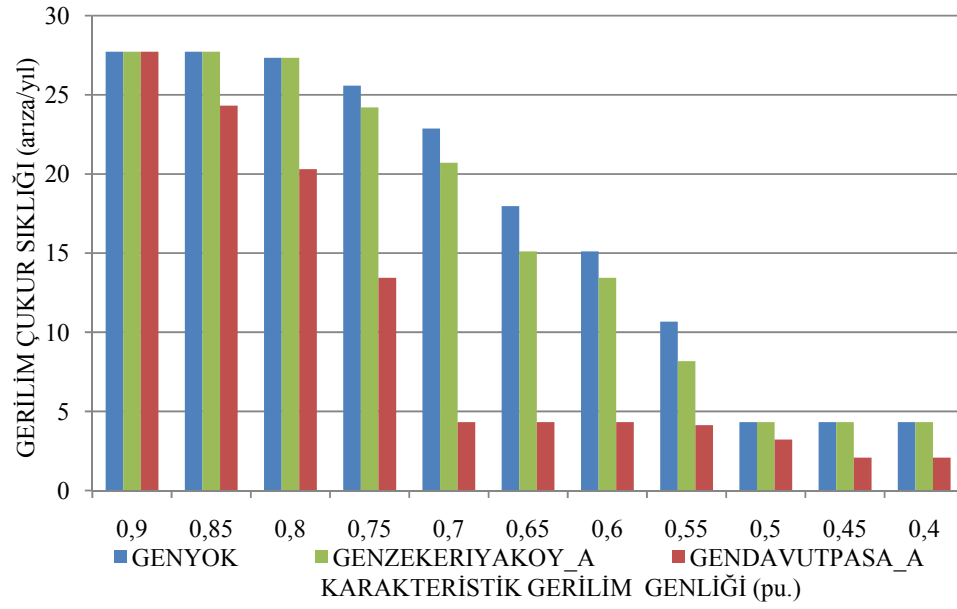
Şekil 5.15’den, Zekeriya köy_A barasına generatör bağlanması durumunda bu baradaki çukur sıklığının azaldığı ancak etkinin Davutpaşa_A noktası kadar baskın olmadığı görülmektedir. Davutpaşa_A barasına bağlanan generatörün, bu baradaki etkisi, generatörün Zekeriya köy_A barasına bağlanması durumuyla benzerlik göstermektedir.

Davutpaşa_A veya Zekeriya köy_A baralarına bağlanan generatörün Alibeyköy barasında çukur sıklığını en çok 0.7, 0.6 ve 0.4 pu. karakteristik gerilim genliklerinde azalttığı Şekil 5.16’dan anlaşılmaktadır. Ancak genel olarak 154kV gerilim seviyesindeki generatör ilavesi, 400kV gerilim seviyesindeki baranın çukur sıklığında ciddi bir değişimine neden olmamaktadır.

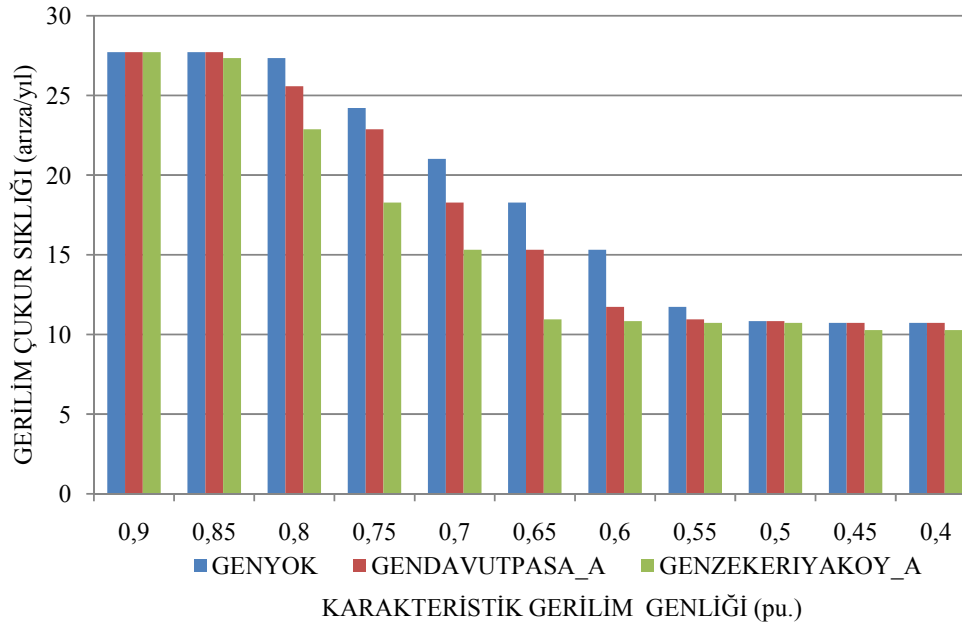
Aynı noktalara 133.689 MVA gücünde generatör ilave edilerek generatör gücündeki artışın bu üç baradaki çukur sıklığına etkisi değerlendirilmiştir. Davutpaşa_A, Zekeriya köy_A ve Alibeyköy baralarına ait genaratörün bağlı olduğu ve olmadığı durumdaki karakteristik gerilim genlik-çukur sıklığı değişimleri sırasıyla Şekil 5.17, Şekil 5.18 ve Şekil 5.19’da verilmiştir. Şekil 5.14, Şekil 5.17 ile karşılaştırıldığında, generatör gücündeki artışla çukur sıklığındaki azalmanın arttığı gözlenmektedir. 82.4MVA’lık generatör gücünde, 0.7 pu karakteristik gerilimde, yıllık çukur sıklığı 15 iken, 133.689MVA’lık güç için aynı genlikte çukur sıklığı 0-5 aralığına kadar düşmüştür. Benzer durum diğer baralar için de söz konusudur.



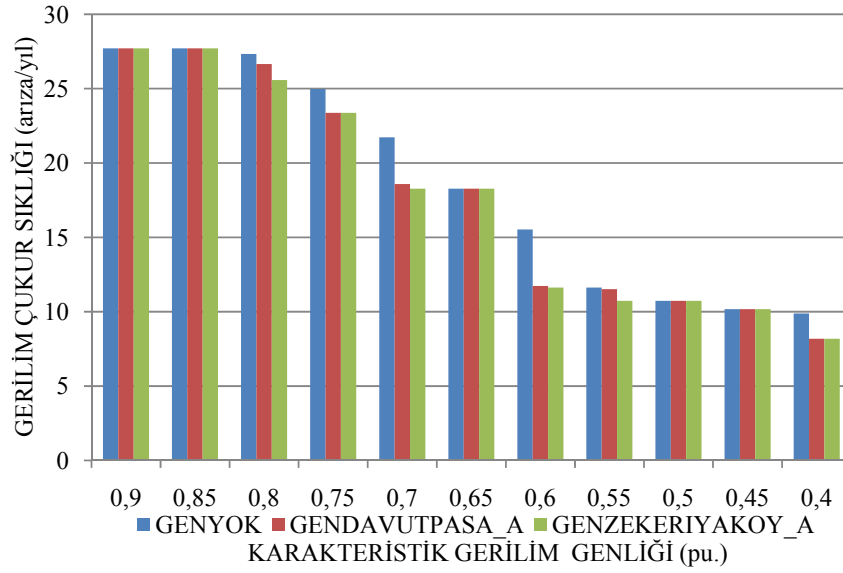
Şekil 5.16: Zekeriya köy_A ve Davutpaşa_A baralarına eklenen 82.4MVA’lık generatörün Alibeyköy barasına etkisi



Şekil 5.17: Zekeriyaköy_A ve Davutpaşa_A baralarına eklenen 133.689MVA'lık generatörün Davutpaşa_A barasına etkisi

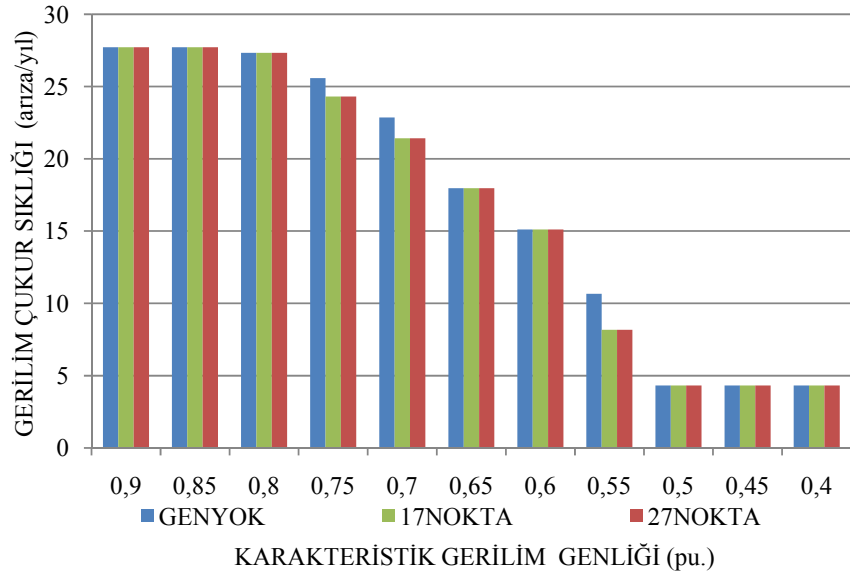


Şekil 5.18: Zekeriyaköy_A ve Davutpaşa_A baralarına eklenen 133.689MVA'lık generatörün Zekeriyaköy_A barasına etkisi

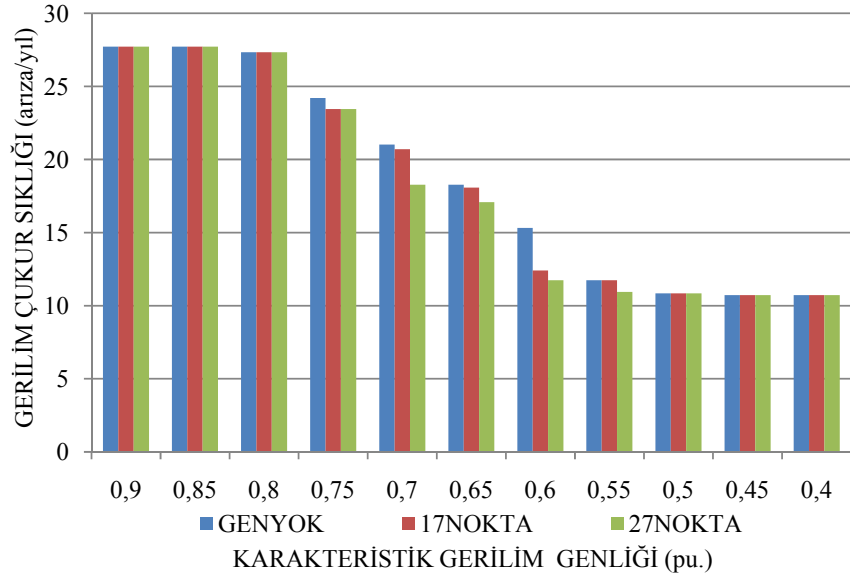


Şekil 5.19: Zekeriyaköy_A ve Davutpaşa_A baralarına eklenen 133.689MVA'lık generatörün Alibeyköy barasına etkisi

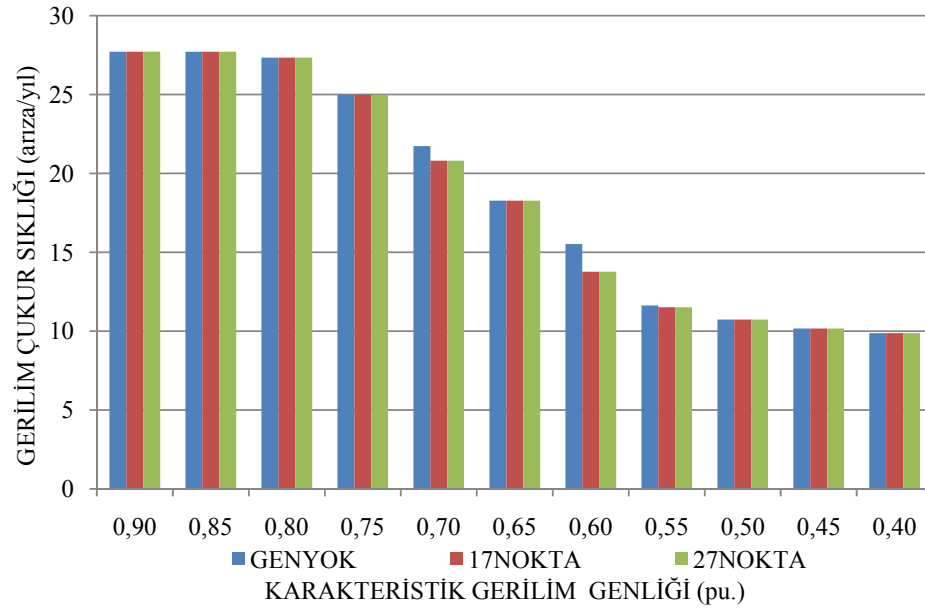
Generatör eklenmesiyle ilgili farklı bir değerlendirme büyük güçlü bir generatörün tek bir noktaya yerleştirilmesi yerine küçük güçlü generatörlerin sistemdeki baralara rastgele yerleştirilmesiyle yapılmıştır. 72 baradan oluşan Türkiye Sistemi 1. İletim Bölgesi'nde, 17 noktaya 11.25MVA'lık generatör ilave edilerek zayıf noktalara ait çukur sıklık analiz sonuçları Şekil 5.20, Şekil 5.21 ve Şekil 5.22'de verilmiştir. Diğer bir değerlendirme ise, aynı güçteki generatörün 27 noktaya eklenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.20, Şekil 5.21 ve Şekil 5.22 bu değerlendirmeyi de içermektedir. Şekil 5.20, Şekil 5.21 ve Şekil 5.22'den anlaşıldığı gibi generatörün ilave edildiği nokta sayısındaki artışın çukur sıklığı değişiminde genel olarak bir etkisi olmamaktadır. Küçük güçlü çok sayıda generatör ilavesi üç barada da 0.8 pu.'in altındaki karakteristik gerilim genliklerinde çukur sıklığını azaltmakla beraber, etkisi tek noktaya büyük güçlü generatör eklendiği durum kadar olmamaktadır. Bu, artan güçle beraber generatörün bağlı olduğu noktadaki kısa devre kesme gücünü artırarak o noktayı daha güçlü hale, yani arızalardan daha az etkilenir hale, getirmesiyle açıklanabilir. Ancak kısa devre kesme gücündeki artışın ilgili noktadaki kısa devre akımındaki artıştan kaynaklandığı unutulmamalı, koruma elemanları buna göre boyutlandırılmalıdır.



Şekil 5.20: 17 ve 27 noktaya 11.25MVA gücünde generatör yerleştirildiğinde, Davutpaşa_A barasında sıklık değişimi



Şekil 5.21: 17 ve 27 noktaya 11.25MVA gücünde generatör yerleştirildiğinde, Zekeriya köy_A barasında sıklık değişimi



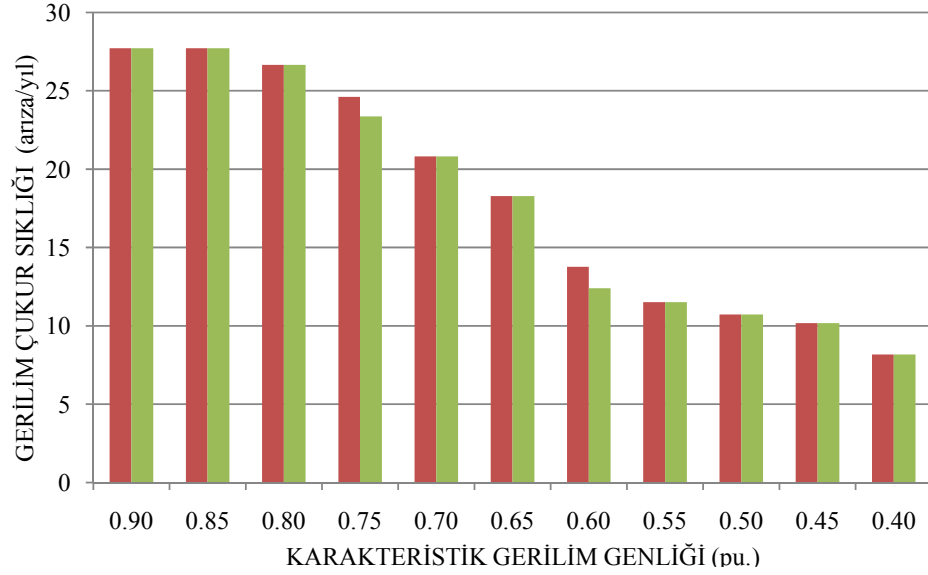
Şekil 5.22: 17 ve 27 noktaya 11.25MVA gücünde generatör yerleştirildiğinde Alibeyköy barasında sıklık değişimi

5.3.2.2. Hat ilavesi

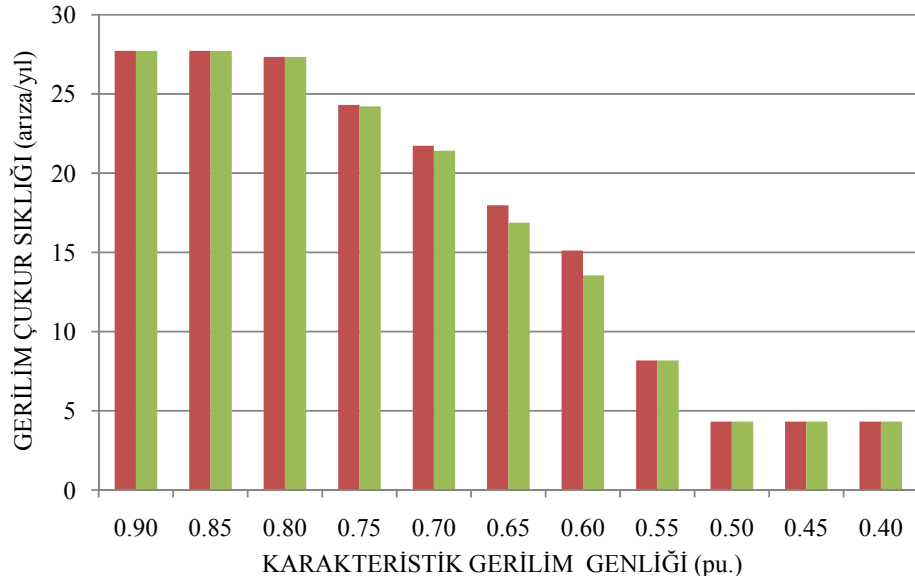
Sistemde yapılabilecek diğer bir değişiklik hat ilave ederek yük paylaşımının sağlanmasıdır. Genel olarak Türkiye Sistemi 1. İletim Bölgesi'nde 400kV ve 154kV gerilim seviyesindeki hatların yüklenmesi 5% ile 35% arasındadır. Bu, hatların kapasitelerinin çok altında yüklendiği anlamına gelmektedir. Bu durumda pratikte sisteme hat ilavesine gerek yoktur. Ancak bilgisayar analizi aracılığıyla hat ilavesinin 1. İletim Bölgesi'nde gerekliliği/gereksizliğinin değerlendirilmesi için her iki gerilim seviyesindeki zayıf noktalar ile bunların bağlı olduğu aynı gerilim seviyesindeki noktalar arasına aynı tip paralel hatlar ilave edilmiştir. Hat ilave edilirken sistemin güç akış analizi sonuçlarına bakılarak, yüklenmenin fazla olduğu hatlara paralel hat ilavesi gerçekleştirilmiştir. Buna ait analiz sonuçları, Alibeyköy için Şekil 5.23, Davutpaşa_A için Şekil 5.24 ve Zekeriyaköy_A için Şekil 5.25'de verilmiştir.

Şekil 5.23'den görüldüğü gibi hat ilavesi Alibeyköy barası için 0.75 pu.'lık karakteristik gerilimi için yıllık çukur sıklığını 24,61'den 23,37'ye, 0.6 pu. için ise 13,76'dan 12,40 değerine düşürmüştür. Davutpaşa_A ve Zekeriköy_A baralarında hat ilavesiyle çukur sıklığındaki düşme daha belirgin görülmektedir. Bunun nedeni

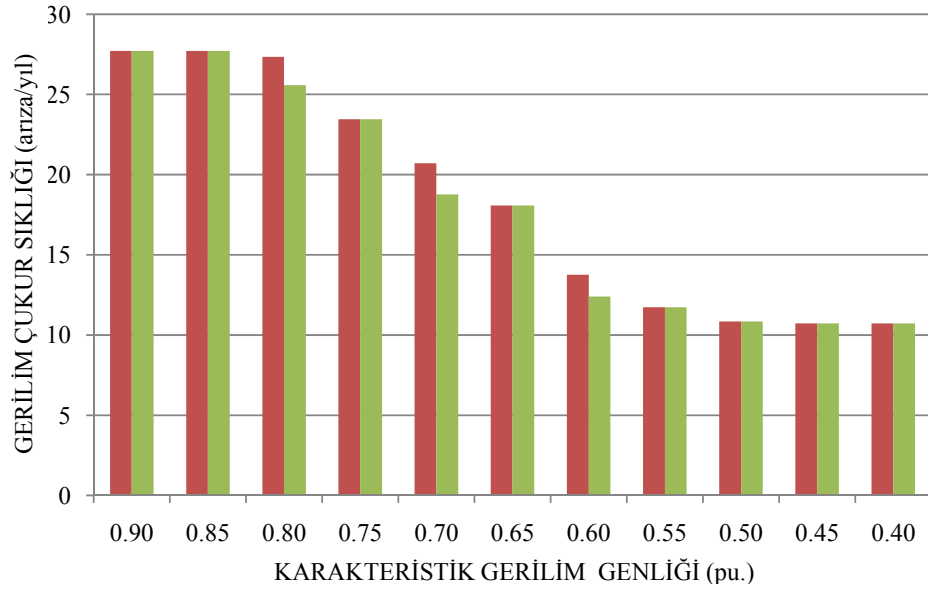
154kV gerilim seviyesinde daha fazla nokta arasında hat ilavesinin yapılmış olmasıdır. Ancak genel olarak bir değerlendirme yapıldığında hat ilavesinin çukur sıklığında dikkate alınacak boyutta bir değişime neden olmadığı söylenebilir. Bunun nedeni hatların değerlendirmenin yapıldığı zaman aralığında nominal kapasitelerinin çok altında yükleniyor olmasıdır.



Şekil 5.23: Alibeyköy barasında, hat ilavesiyle gerilim çukur sıklığındaki değişim



Şekil 5.24: Davutpaşa_A barasında, hat ilavesiyle gerilim çukur sıklığındaki değişim



Şekil 5.25: Zekeriyaköy_A barasında, hat ilavesiyle gerilim çukur sıklığındaki değişim

5.3.3. Sistemde zayıf noktalara cihaz yerleştirilmesi

Türkiye Sistemi'nin 1. İletim Bölgesi'nde 154kV gerilim seviyesindeki zayıf noktalardan Davutpaşa_A ve Zekeriyaköy_A'ya ayrı ayrı ilk olarak SVC daha sonra da STATCOM bağlanarak bu baralara uzak ve yakın noktalarda 0.25 saniye süreli dengeli arıza oluşturulmuş, arıza sırasında STATCOM ve SVC'nin olduğu ve olmadığı durumlar için gerilim genlikleri ve dalga şekilleri incelenmiştir. SVC ve STATCOM bağlantıları sırasıyla 154/10kV ve 154/13.8kV gerilim seviyelerindeki transformatörler üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Amaçlanan ilk olarak bu cihazların olay sırasındaki gerilim genliğine katkısının olup olmadığını, var ise bu katkının cihaz güçlerine göre değişiminin nasıl olduğunu görmek ve doğru cihaz bağlantı noktasının seçiminde nelerin etkili olduğunu belirlemektir. Gerilim genlikleri cihazların bağlı olduğu baralar ve bu baraların çevresinde yeralan bazı noktalara ait sonuçlar tablo olarak verilmiştir. Ayrıca her iki cihazın gücü 50MVAR'den 300MVAR'e kadar arttırılarak bağlı olduğu noktanın gerilimine katkısındaki değişim gözlenmiştir. Tablolar, bağlandığı nokta gerilimine en fazla desteğin sağlandığı, 300MVAR gücündeki SVC ve STATCOM durumlarına göre oluşturulmuştur. Hem SVC hem de STATCOM için artan cihaz gücüyle bağlandığı noktaya yaptığı gerilim desteğinin arttığı gözlenmiştir. Ayrıca

STATCOM'un gerilim desteğinin aynı güçlü SVC'den daha fazla olduğu, arttırılan güç değeriyle gerilimi arıza öncesi genlik değerine yükseltebildiği sonucu ortaya çıkmaktadır. Buna göre gerilim çukur etkisini azaltmada STATCOM SVC daha etkili bir yöntemdir.

5.3.3.1. SVC (Sabit reaktif güç dengeleyici)

SVC'nin arıza sırasında gerilim çukur genliğini nasıl değiştirdiğini daha net kavrayabilmek amacıyla 154kV gerilim seviyesindeki Davutpaşa_A(120521 kodlu bara) ve Zekeriya köy_A(120921 kodlu bara) baralarına SVC bağlanarak bu noktalara uzak ve yakın baralarda üç faz arızası oluşturulmuştur. Sonuçlar Tablo 5.3 ve Tablo 5.4'de verilmiştir. Tablo 5.3'den görüldüğü gibi yakın baradaki arıza durumunda en fazla gerilim desteği SVC'nin bağlı olduğu noktada gerçekleşmektedir, 0.1pu. Uzak arıza için de durum aynıdır. Genel olarak SVC'nin gerilim genliğine katkısı ciddi oranda değildir. Bunun SVC'nin gücüne ne kadar bağlı olduğunu anlaşılabilmesi amacıyla farklı SVC güçleri için gerilim çukur genliği sonuçları incelenmiştir.

Tablo 5.3: Yakın noktada oluşturulan 3 faz arızasında SVC'nin bağlı olduğu ve olmadığı durumlara ait gerilim çukur genliği sonuçları

Bara Kodu (Bara Adı)	120421(Atışalanı_A da 3F arızası)		
	SVC yok	SVC(120521)	SVC(120921)
120422(Atışalanı_B)	0,6868	0,7047	0,7711
120510(Davutpaşa)	0,6679	0,6874	0,7166
120521(Davutpaşa_A)	0,6529	0,7691	0,7006
120522(Davutpaşa_B)	0,17004	0,1715	0,174
120621(İkitelli_A)	0,2243	0,2271	0,6999
120622(İkitelli_B)	0,8024	0,812	0,8336
120921(Zekeriya köy_A)	0,6861	0,7047	0,8479
121421(Silahtar_Uc)	0,6955	0,7157	0,7988
121521(Yeni Bosna)	0,8088	0,8178	0,8379
121621(Veliefendi_A)	0,6521	0,7682	0,6999
121622(Veliefendi_B)	0,8063	0,8154	0,8355

Tablo 5.4: Uzak noktada oluşturulan 3 faz arızası sırasında SVC'nin bağlı olduğu ve olmadığı durumlara ait gerilim çukur genliği sonuçları

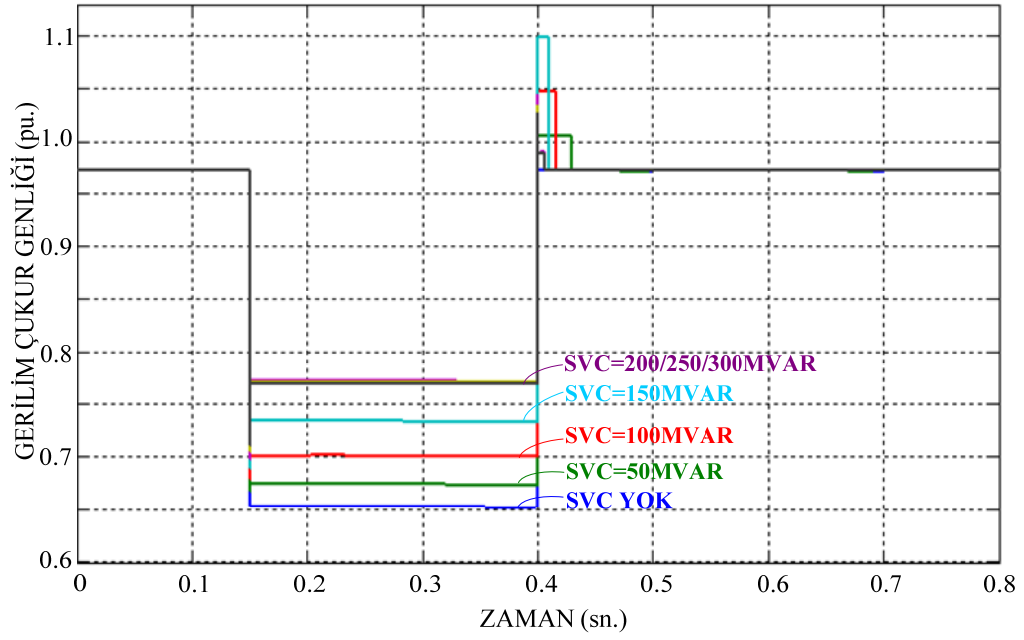
	122422(AksarayA 3F arızası)		122621(TasolukA 3F arızası)		122422(AksarayA 3F arızası)		121321(BağcılarA 3F arızası)	
Bara Kodu	SVC yok	SVC (120521)	SVC yok	SVC (120521)	SVC yok	SVC (120921)	SVC yok	SVC (120921)
120421	0,8805	0,8868	0,8408	0,8483	0,8806	0,8888	0,3726	0,3766
120422	0,8269	0,8383	0,7658	0,7791	0,8271	0,8497	0,7902	0,8168
120510	0,8231	0,8362	0,7508	0,7664	0,8232	0,8385	0,7704	0,7878
120521	0,8054	0,8745	0,7343	0,8253	0,8052	0,8206	0,7534	0,7703
120522	0,8797	0,8857	0,8418	0,849	0,8797	0,8876	0,3674	0,371
120621	0,8822	0,8885	0,8421	0,8495	0,8822	0,8905	0,4636	0,4689
120622	0,6087	0,6131	0,8511	0,8591	0,6083	0,6153	0,8629	0,8741
120921	0,8272	0,8385	0,7553	0,7686	0,8271	0,8696	0,7898	0,8392
121421	0,8346	0,8461	0,7746	0,7881	0,8346	0,8611	0,8012	0,8321
121521	0,5033	0,5073	0,8541	0,8613	0,5033	0,5089	0,8653	0,8757
121621	0,8044	0,8734	0,7333	0,8242	0,804	0,8192	0,7523	0,7693
121622	0,2731	0,275	0,8517	0,8591	0,2731	0,276	0,8627	0,8733

Şekil 5.26 ve Şekil 5.27 uzak ve yakın baralardaki üç faz arızası durumunda farklı SVC güçleri için gerilim çukur genliği sonuçlarını gösterir. Burada sadece bir nokta için incelemenin yeterli olacağı düşünüldüğünden SVC Davutpaşa_A barasına bağlanmış, Zekeriyaköy_A için inceleme yapılmamıştır. Sonuçlar gücün arttıkça genlikte artma olduğunu gösterir. Ancak belirli bir güç değerinden sonra ne kadar artma olursa olsun gerilim genliğinin sabitlendiği, çukur genliğinde artma olmadığı görülür. Bu durumda SVC parametreleri baskın hale gelmekte, daha fazla genlik artışı için güç artımından ziyade parametre ayarının gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

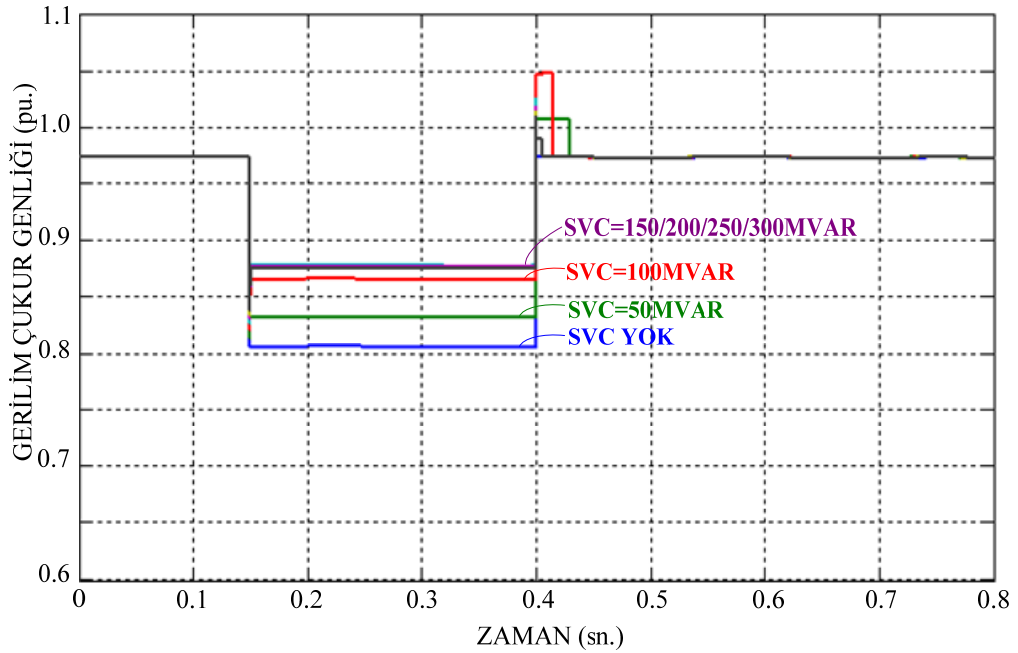
5.3.3.2. STATCOM (Sabit senkron dengeleyici)

Sisteme SVC bağlanarak gerçekleştirilen analizler STATCOM bağlanarak gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.5 Atışalanı_A barasında dengeli arıza oluşturulması durumunda Davutpaşa_A ve Zekeriyaköy_A baralarına STATCOM bağlı iken ve bağlı olmadığı durumlara ait sonuçları vermektedir. Tablo 5.6 aynı sonuçları uzak arıza noktaları için gösterir. SVC ile karşılaştırıldığında STATCOM'un gerilim çukur genliğine desteğinin daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Davutpaşa_A'da STATCOM bağlı iken gerilim çukur genliğinde yaklaşık 0.3pu.'lik bir artma

gözlenmiştir. Ayrıca STATCOM'un Veliefendi_A barasının genliğine desteği de ciddi orandadır.



Şekil 5.26: Atışalanı_A barasındaki (yakın nokta) üç faz arızası sırasında, Davutpaşa_A noktasında yeralan SVC'nin farklı güçleri için çukur genlikleri



Şekil 5.27: Aksaray_A barasında (uzak nokta) üç faz arızası sırasında, Davutpaşa_A noktasında yeralan SVC'nin farklı güçleri için çukur genlikleri

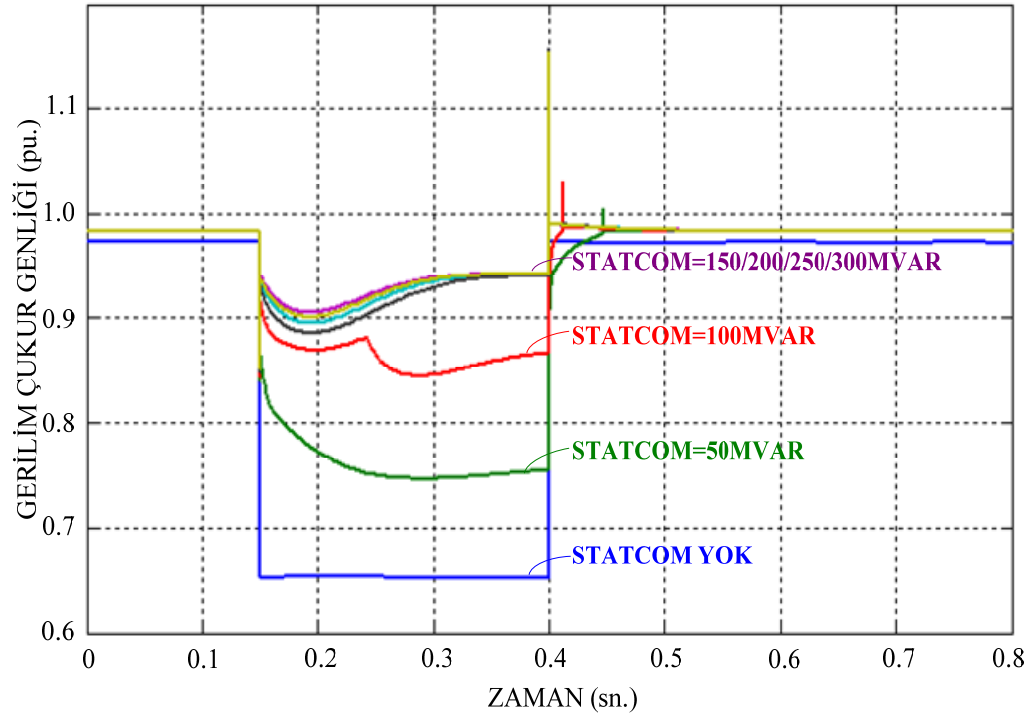
Farklı STATCOM güçlerine ait sonuçlar Şekil 5.28 ve Şekil 5.29’da verilmiştir. SVC’de olduğu gibi belirli bir güç değerinden sonra genlik sabitlenerek artan STATCOM gücüne rağmen gerilim genliği değişmemektedir. Uzak barada oluşan arızada gerilim genliği yakın noktadaki arızaya göre çok daha düşük STATCOM güç değerinde artış göstererek arıza öncesi gerilim değerine oturmuştur.

Tablo 5.5: Yakın noktada oluşturulan 3 faz arızasına ait STATCOM’un olduğu ve olmadığı durumlardaki gerilim çukur genliği sonuçları

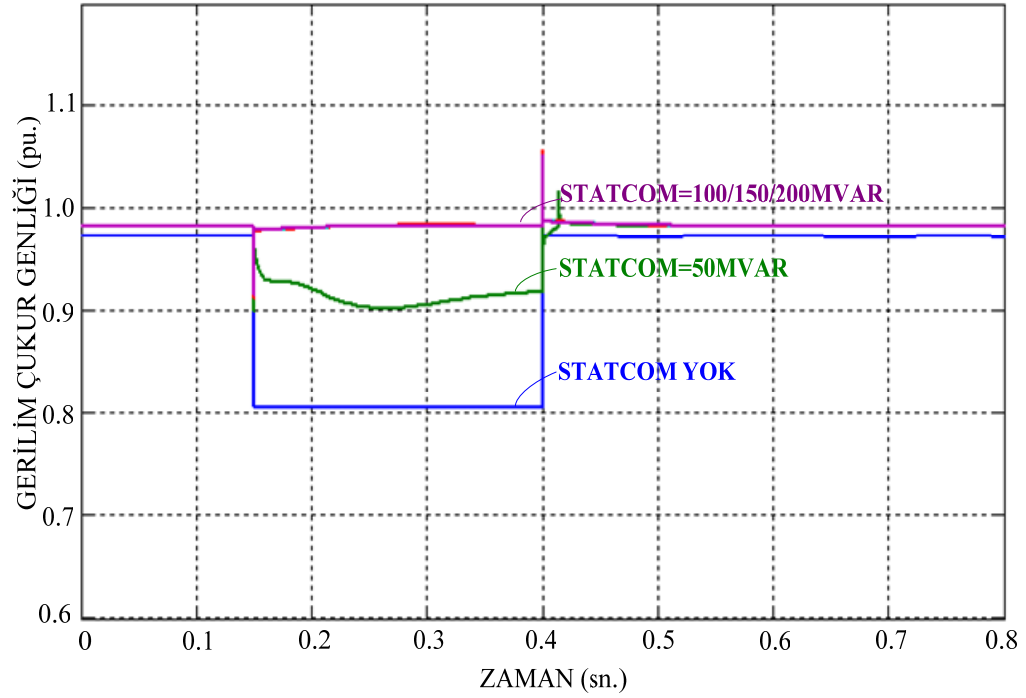
	120421(Atışalanı_A da 3F arızası)		
Bara Kodu (Bara Adı)	STATCOM yok	STATCOM (120521)	STATCOM (120921)
120422(Atışalanı_B)	0,6868	0,7172	0,7711
120510(Davutpaşa)	0,6679	0,715	0,7166
120521(Davutpaşa_A)	0,6529	0,9422	0,7006
120522(Davutpaşa_B)	0,17004	0,1735	0,174
120621(İkitelli_A)	0,2243	0,2294	0,6999
120622(İkitelli_B)	0,8024	0,8198	0,8336
120921(Zekeriya köy_A)	0,6861	0,7285	0,8479
121421(Silahtar_Uc)	0,6955	0,7389	0,7988
121521(Yeni Bosna)	0,8088	0,8315	0,8379
121621(Veliefendi_A)	0,6521	0,941	0,6999
121622(Veliefendi_B)	0,8063	0,8288	0,8355

Tablo 5.6: Uzak noktada oluşturulan 3 faz arızasına ait STATCOM’un olduğu ve olmadığı durumlardaki gerilim çukur genliği sonuçları

	122422(AksarayA da 3F arızası)		122621(TasolukA 3F arızası)		122422(AksarayA 3F arızası)		121321(BağcılarA 3F arızası)	
Bara Kodu (Bara Adı)	Statcom yok	Statcom (120521)	Statcom yok	Statcom (120521)	Statcom yok	Statcom (120921)	Statcom yok	Statcom (120921)
120421	0,8805	0,8964	0,8408	0,8607	0,8806	0,9047	0,3726	0,383
120422	0,8269	0,8547	0,7658	0,8011	0,8271	0,8996	0,7902	0,8662
120510	0,8231	0,8562	0,7508	0,7928	0,8232	0,8685	0,7704	0,8171
120521	0,8054	0,9835	0,7343	0,984	0,8052	0,8493	0,7534	0,799
120522	0,8797	0,8948	0,8418	0,8608	0,8797	0,9029	0,3674	0,3769
120621	0,8822	0,898	0,8421	0,8621	0,8822	0,9069	0,4636	0,4772
120622	0,6087	0,6203	0,8511	0,8727	0,6083	0,628	0,8629	0,8927
120921	0,8272	0,8546	0,7553	0,7901	0,8271	0,9625	0,7898	0,9323
121421	0,8346	0,8617	0,7746	0,8095	0,8346	0,9215	0,8012	0,8926
121521	0,5033	0,5126	0,8541	0,8743	0,5033	0,5182	0,8653	0,8933
121621	0,8044	0,9823	0,7333	0,9828	0,804	0,8483	0,7523	0,7981
121622	0,2731	0,2779	0,8517	0,8719	0,2731	0,2811	0,8627	0,8906



Şekil 5.28: Atışalanı_A barasında (yakın nokta) üç faz arızası sırasında, Davutpaşa_A noktasında yer alan STATCOM'un farklı güçleri için çukur genlikleri



Şekil 5.29: Aksaray_A barasında (uzak nokta) üç faz arızası sırasında, Davutpaşa_A noktasında yer alan STATCOM'un farklı güçleri için çukur genlikleri

BÖLÜM 6. SONUÇLAR

Gün geçtikçe önemi artan güç kalitesi problemlerinden biri olan kısa süreli gerilim çukuru değerlendirmesi, güç sistemlerine yerleştirilen güç kalitesi monitörleri ve bilgisayar destekli programlar kullanılarak kestirim yöntemleriyle mümkündür. Gerilim çukur değerlendirmesi hem tüketiciler hem de sistem operatörleri açısından, en verimli ve ekonomik çukur etkisini azaltma yönteminin belirlenmesinde yarar sağlar. Son yıllarda kaliteli ve temiz enerji kavramları ön plana çıkmakta, enerji sisteminde yer alan tüm tüketici ve üreticiler daha bilinçli hareket etme ve sistemde oluşan problemleri değerlendirerek, ilerde oluşabilecek sorunlarda en doğru çözüm yöntemine sahip olabilmek için gerekli yatırımları gerçekleştirme çabasındadır.

Gelişmiş ülkelerin sistemlerine ait olay değerlendirmelerinin, geniş ölçüde kaynakçada yer almasına rağmen; Türkiye Sistemi'ne ait bir çalışmanın bulunmamış olması, öncelikli olarak sistemde çukur olayının boyutunun belirlenerek gerçekte sorun olup olmadığı sorusuna cevap aranmasını gerektirir. Olayın özellikle ağır sanayide ciddi üretim kayıplarına neden olması ve sistem arızalarından kaynaklı çukurun çok sık yaşandığının güç kalitesi monitörleriyle tesbiti Türkiye Sistemi'ne ait gerilim çukur değerlendirmesinin önemini ortaya çıkartır. Bu amaçla başlatılan Doktora Tez çalışması, 400kV ve 154kV gerilim seviyelerindeki Türkiye Sistemi'nin 1. İletim Bölgesi için, hem kestirim yöntemlerinden arıza durum yöntemini kullanan SIMPOW DIPS yazılım programıyla hem de sistemde bazı noktalara yerleştirilen güç kalitesi monitörlerinden elde edilen bir yıllık verilerle gerilim çukur sıklık değerlendirmesini kapsar.

Türkiye İletim Sisteminin yapısı ve program analiz sonuçları verilmeden önce gerilim çukur olayının standartlara göre tanımı, karakteristikleri, değerlendirme teknikleri ve etkisini azaltma yöntemleri teorik olarak sunulmuştur.

İletim sistemi üzerinde bulunan güç kalitesi monitörlerinin Nisan2009-Mart2010 ayları aralığında kaydedilen ölçüm sonuçlarına göre bir yıllık çukur olay

değerlendirmesi yapılmıştır. IEEE P1564 Taslağı tabanlı değerlendirme iki aşamalı gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada etkin gerilimin genlik-zaman değişimine göre SARFI-X, SIARFI-X, SMARFI-X ve STARFI-X çukur indeksleri 1. İletim Bölgesi'ndeki bazı noktalar için 400kV-154kV-36kV gerilim seviyelerinde yıllık olarak elde edilip bir aya indirgenmiştir. İlgilenilen noktada bir aylık belirli genlik ve zamandaki olay sıklığını veren bu indeks değerlerinin yüksek gerilim seviyesinden daha alçak gerilim seviyelerine doğru karmaşıklaşan sistem yapısıyla artan arıza sayısından dolayı arttığı oluşturulan tablolardan görülmüştür. Türkiye Sistemi için ilk kez bu tez çalışmasıyla kaynakçaya girecek olan indeks değerleri;

154/36kV indirici merkezlerden direkt olarak beslenen tüketiciye, maruz kalacağı çukur sıklık-genlik-zaman karakteristiklerini sunarak yapısında yer alan gerilim değişimine duyarlı cihazların bir ayda kaç defa ve ne kadar süreyle devre dışı kalma olasılığı olduğunu bilgisini sunar. Buna göre yapılan maliyet analizi, tüketicinin devre dışı kalmalarını engellemek veya en aza indirmek için gerekli önlemleri alabilmesini ve bu önlemlerin maliyetini, önlem alınmaması durumundaki maliyetle kıyaslayarak önlemin gerekli/gereksizliğine karar verebilmesini sağlar.

Dağıtım firmasının, bölgesindeki çukur olay sıklığını bilmesi, duruma göre kendi önlemlerini almasını ve böylece tüketicilerine daha kaliteli güç sunarak tamamı özelleşen Türkiye Dağıtım Sistemi'nde artan rekabet ortamında ön plana çıkmasını sağlar. Bu sayede güç kalitesinin yeterli/yetersizliği konusunda daha bilinçli olacak olan dağıtım firması tüketiciyle işbirliği yaparak yapılabilecek iyileştirmelerle sistemin en son kullanıcıya kadar geniş bir yelpaze de güçlendirilmesine katkıda bulunabilir.

Eylül2010'da Türkiye Sistemi, Bulgaristan/Yunanistan hattı üzerinden Avrupa Enterkonnekte Sistemi'ne bağlanmıştır. Bu bağlantı, özellikle iletim seviyesinde güç kalitesinin önemini arttırmıştır. Güç kalitesinin alt başlıklarından biri olan çukur olayına ait indekslerin hem iletim hem de OG dağıtım seviyelerinde bilinmesi sistem operatörlerine tüm sistemde arıza durumunu değerlendirme olanağı sunar. Sistemin ne kadar güçlü/zayıf olduğunu gösteren bu indeksler ileriye yönelik çukur sıklık tahminlerinin yapılıp sistem yapısındaki iyileştirmelere yön verebilir. Ayrıca

sistemdeki hatların, transformatörlerin yüklenme oranlarını bilen operatörler zayıf noktaların beslemesini aldığı noktalarda güç akışı tabanlı iyileştirmeler de sağlayabilir ve her zayıf noktaya yerleştirilmesi maliyetli olan çukur etkisini azaltma cihazlarının en doğru hangi gerilim seviyesinde ve noktada olması gerektiğine karar verebilir.

Değerlendirmenin ikinci aşaması indekslerle aynı amaca hizmet eden genlik-zaman-sıklık kümülatif çukur tablolarının oluşturulmasıdır. Bu tablolar, bir yıl için 10%'luk genlik artışları ve 100 milisaniye 3 saniye zaman aralığını içerdiğinden indekslerden daha detaylıdır ve sıklık takibi daha kolaydır. Oluşturulmasının daha uzun süreli ölçüm gerektirmesi tek dezavantajıdır. Kümülatif çukur tablosu 1. İletim Bölgesi'nde yer alan Alibeyköy-Beykoz, Habibler-Zekariyaköy ve Zekariyaköy-Paşaköy hatları için aynı ölçüm süresince elde edilerek Bölüm 4'te sunulmuştur. Ayrıca SIMPOW DIPS yazılım programında yapılan analizlerle aynı hatlar için elde edilen tablo sonuçları monitörle elde edilenle karşılaştırılmıştır. Monitörden elde edilen ve bilgisayar analizi sonuçları karşılaştırıldığında, 0.9–0.8pu gerilim genlik aralığındaki sıklık değerlerinin 8%, 0.8-0.6pu gerilim genlik aralığında 15% ve 0.6pu gerilim genlik oranından düşük olduğu durumlarda da %20 oranında fark olduğu görülmüştür. Bu sonuç, özellikle çukur olayının en sık rastlanıldığı 0.8-0.9pu. genlik aralığında, iletim hatları için monitör verisine ihtiyaç duymadan bilgisayar analiz programıyla gerilim çukur sıklığının genlikle değişimi hakkında bir değerlendirme yapılabilmesini ve bu değerlendirmeye detaylı olmamakla birlikte genel olarak sistemdeki çukur sıklık durumu hakkında bilgi sahibi olunmasını sağlar.

Diğer bir değerlendirme hem tüm sistemde hem de 1. İletim Bölgesi'nde 400kV-154kV gerilim seviyelerinde monitörlerin yer aldığı hatlardan Nisan2009-Mart2010 ayları aralığında alınan sıklık verilerinin, hattın kilometresi başına hat tipi ve yaz-kış dönemlerine göre incelenmesini içerir. Bu inceleme, artan hat uzunluğuyla çukur sıklık değerinin azaldığını göstermiştir. Ayrıca yaz-kış dönemlerine ait sıklık değerleri karşılaştırıldığında kış döneminde daha fazla olayın olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, buz-rüzgar yükü gibi atmosferik olayların arızayı dolayısıyla çukur olayını arttırıcı etkisidir. Her hat tipinde monitörün olmaması, bazı hat tiplerinde ise yeterli sayıda olmaması değerlendirmenin sınırlandırılmasına neden olmuştur.

İnceleme yapılan hat tiplerinin sistemde en çok kullanılan tiplere ait olması varılan sonuçların geliştirilebilmesini sağlar.

Güç kalitesi monitörlerinin bir yıllık izlenmesiyle sistemde, çukur oluşma sıklığı daha net anlaşılan çukur olayı analizi 1. İletim Bölgesi için SIMPOW DIPS yazılım programıyla, TEİAŞ'dan elde edilen gerçek sistem verileriyle de gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucu, 400kV gerilim seviyesinde Alibeyköy barasının, 154kV gerilim seviyesinde ise Davutpaşa_A ve Zekeriyaköy_A baralarının bir yılda en fazla gerilim çukur sayısına sahip olduğunu göstermiştir. 1. İletim Bölgesi'nde adı geçen noktaların zayıf noktalar olduğu sonucu elde edilir. Doktora Tezi'nde gerçekleştirilen tüm analizler zayıf noktaların güçlendirilmesi odaklıdır. Bu üç baraya ait üç faz ve tek faz toprak arızaları için oluşturulan korunmasız alanlar, üç faz arızası alanının tek faz toprak arızası alanından daha geniş olduğunu göstermiştir. 10% ve 50% çukur genlikleri için elde edilen korunmasız alanlardan, Alibeyköy barasında üç faz ve tek faz toprak arızalarının Davutpaşa_A barasında 50% genlikli çukur meydana getirirken, Zekeriyaköy_A noktasında 10% genlikli çukura yol açtığı görülmüştür. Bu, arıza noktasının ilgilenilen noktaya olan elektriksel mesafesiyle ilgilidir. İlgilenilen noktaya yakın olan baralar şiddetli çukura yol açarken uzak olanlar şiddetli olmayan çukura neden olur. Bu durum her arıza tipi için geçerlidir. Ayrıca Zekeriyaköy_A noktasına ait üç faz arızası durumundaki korunmasız alan, her iki çukur genliği için Davutpaşa_A barasından daha geniştir. Bu, Zekeriyaköy_A noktasının dayanımının Davutpaşa_A'dan daha az olduğunu diğer bir ifadeyle kısa devre kesme gücünün daha düşük olduğunu göstermektedir.

Teorik olarak bahsedilen çukur sıklığını azaltma yöntemleri analiz programı yardımıyla 1. İletim Bölgesi'nde zayıf nokta olarak belirlenen baralara uygulanarak gerilim çukurunun ve buna bağlı olarak çukur sıklığının azaltılması için en uygun yöntemin belirlenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak arıza sayısının azaltılması alt başlığında verilen yüklenme etkisi 1. İletim Bölgesi'nde 30% düşük yüklenmeden 20% fazla yüklenmeye 10%'luk yük artışlarıyla incelenmiştir. Davutpaşa_A barasının 0.8-0.5pu. karakteristik gerilim aralığında yük değişiminden fazlasıyla etkilendiği ve genel olarak yüklenmenin gerilim çukur sıklığı değerinde etkili faktörlerden biri olduğu görülmüştür.

Diğer bir çukur etkisini azaltma yöntemi güç sisteminde değişiklikler yapılmasıdır. İlk olarak, her iki gerilim seviyesindeki zayıf noktalar ile bunların bağlı olduğu aynı gerilim seviyesindeki noktalar arasına sistemin güç akışı sonuçları göz önüne alınarak aynı tip paralel hatlar ilave edilmiştir. Genel olarak Türkiye Sistemi'nin 1. İletim Bölgesi'nde 400kV ve 154kV gerilim seviyelerindeki havai hatlar kapasitelerinin çok altında yüklendiklerinden hat ilavesinin çukur sıklığında ciddi bir değişime neden olmadığı görülmüştür. İkinci olarak, sisteme generatör ilave edilerek yapılan sistem yapısındaki değişiklik durumu incelenmiştir. 1. İletim Bölgesi'ne generatör ilave edilmesine ait analizler, küçük güçlü birçok noktaya dağıtılmış olarak generatör eklenmesinden ziyade büyük güçlü bir generatörün zayıf baraya eklenmesinin çukur sıklığını azaltmada daha etkili olduğunu göstermiştir.

Sistem yapısında değişikliğe gitmek yerine zayıf noktalara çukur etkisini azaltıcı cihaz yerleştirilebilir. Bu amaçla 154kV gerilim seviyesindeki Davutpaşa_A ve Zekeriya köy_A baralarına farklı güçlerde FACTS cihazlarından olan SVC ve STATCOM yerleştirilmiştir. Bu baralara uzak ve yakın noktalarda dengeli arıza oluşturularak gerilim genlikleri cihazın olduğu ve olmadığı durumlar değerlendirilmiştir. Ayrıca eklenen cihazın gücü 50-300MVAR aralığında değiştirilerek Davutpaşa_A ve Zekeriya köy_A baralarına ait her bir güç değeri ve yakın-uzak noktada dengeli arıza durumunu içeren çıkış gerilimleri sunulmuştur. Her iki tip cihazın bağlı olduğu noktaya gerilim katkısının artan güç değeriyle arttığı analiz sonuçlarından görülmüştür. Ayrıca STATCOM'un gerilim desteğinin aynı güçlü SVC'den daha fazla olduğu, gerilimi gücü yükseltildiğinde arıza öncesi genlik değerine kadar yükseltebildiği sonucuna varılmıştır.

Doktora Tez çalışmasıyla;

- Türkiye Sistemi'nin 1. İletim Bölgesi'nde dengeli ve dengesiz arızaların neden olduğu gerilim çukuruna ilişkin ilk kez bir değerlendirme yapılarak, çukur sıklığının farklı gerilim seviyelerinde yayılımı değerlendirilmiştir.
- Standartlarda tanımlanan etkin gerilim değişimine göre çukur sıklık indeksleri 400kV, 154kV ve 36kV gerilim seviyelerinde bara bazlı elde edilerek 36kV'dan direkt beslemesini alan tüketiciye, dağıtım firmalarına ve sistem tasarımcılarına bir

yılda karşılaşılabacakları çukur olay sayıları bilgisi genlik ve zaman karakteristiklerine göre sunulmuştur.

- Türkiye Sistemi'nin hem 1. İletim Bölgesi hem de tüm sistem için iletim hat tipi ve uzunluğuna bağlı sıklık değerlendirmesi ilk defa gerçekleştirilerek, sistemde yer alan hatların çukur olayı ve dolayısıyla arıza durumlarındaki davranışlarına ait genel bir değerlendirme oluşturulmuştur. Bu değerlendirmeyle, sistem planlamasında özellikle artan yük yoğunluğu nedeniyle ilave hat gerektiren durumlarda hat tipi seçiminde yarar sağlanması hedeflenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Koval, D.O. and Hughes, B.M., “Frequency of Voltage Sags at Industrial and Commercial Sites in Canada”, ***Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering***, CCEC’96, Canada (1996).
- [2] Wagner, V.E., Andreshak, A.A., Staniak, J.P., “Power quality and factory automation”, ***IEEE Transactions on Industry Applications***, vol. 26, Issue:4, pp. 620-626, July-Aug. (1990).
- [3] “CREUTENSI: Software for Determination of Depth, Duration and Number of Voltage Dips (Sags) on Medium Voltage Networks”, ***Electricite de France***, (1992).
- [4] Conrad, L., Little, K., Grigg, C., “Predicting and Preventing Problems Associated with Remote Fault-clearing Voltage Dips”, ***IEEE Transactions on Industry Applications***, vol. 27 Issue:1, Part:1, pp. 167 –172, Jan.-Feb. (1991).
- [5] ***IEEE Standard 493***, “Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems; Gold Book”, (1997).
- [6] McGranaghan, M., Mueller, D., Samotyj, M., “Voltage Sags in Industrial Systems”, ***Technical Conference on Industrial and Commercial Power Systems***, pp. 18-24, (1991).
- [7] Dorr, D.S., “National Power Laboratory Power Quality Study Results Based on 600 Site-months”, ***Telecommunications Energy 14th International Conference***, 1992. INTELEC '92. pp. 378–383 (1992).
- [8] Dorr, D.S. et al, “Interpreting Recent Power Quality Surveys to Define the Electrical Environment”, ***IEEE Industry Applications Conference Record***, Thirty-first IAS Annual Meeting, vol. 4, pp. 2251 -2258 (1996).
- [9] Bollen, M.H.J., “Method for Reliability Analysis of Industrial Distribution Systems”, ***IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution***, vol. 140 Issue: 6 pp. 497–502, Nov. (1993).
- [10] Bollen, M.H.J., Masee, P., “Reliability Analysis Of Industrial Power Systems Taking Into Account Voltage Sags”, ***Proceedings of Joint International Conference Athens Power Tech***, vol. 2 pp. 856 –860, Athens, Greece (1993).
- [11] Bollen, M.H.J., “Fast Assessment Methods for Voltage Sags in Distribution Systems”, ***Thirtieth IEEE Industry Applications Conference***, IAS, Annual Meeting vol. 3, pp. 2282 – 2289, (1995).

- [12] Becker C., et al., "Proposed Chapter 9 for Predicting Voltage Sags (Dips) in Revision to IEEE Std. 493, the Gold Book", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, no. 3, May/June (1994),
- [13] Schwartzberg J.W., Doncker R.W. D., "15kV Medium Voltage Static Transfer Switch", *Industry Applications Conference*, vol. 3, pp. 2515-2520, 8-12 October (1995).
- [14] Koval, D.O., Hughes, B.M., "Frequency of Voltage Sags at Industrial and Commercial Sites in Canada", *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, CCEC'96, (1996).
- [15] Ortmeyer, T.H., Hiyama, T., "Coordination of Time Over-current Devices with Voltage Sag Capability Curves", *IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power*, ICHQP'96, Las Vegas, (1996).
- [16] Ortmeyer, T.H., Hiyama, T., Salehfar, H., "Power Quality Effects of Distribution System Faults", *Electric Power&Energy Systems*, vol. 18, no.5, pp. 323-329, (1996).
- [17] Bollen, M.H.J., Tayjasanant, T., Yalcinkaya, G., "Assessment of the Number of Voltage Sags Experienced by a Large Industrial Customer", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33 Issue: 6, pp. 1465 –1471, Nov.-Dec. (1997).
- [18] Bollen, M.H.J., "Additions to the Method of Critical Distances for Stochastic Assessment of Voltage Sags", *Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 2, pp. 1241-1246, 31 Jan.-4 Feb. (1999).
- [19] Bollen, M.H.J., "Method of Critical Distances for Stochastic Assessment of Voltage Sags", *IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol. 145 Issue: 1, pp. 70 –76, Jan. (1998).
- [20] Qader, M.R., Bollen, M.H.J., Allan, R.N., "Stochastic Prediction of Voltage Sags in a Large Transmission System", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35 Issue: 1, pp. 152 -162, Jan.-Feb. (1999).
- [21] Sikes, D.L., "Comparison Between Power Quality Monitoring Results and Predicted Stochastic Assessment of Voltage Sags- "Real" 105 Reliability for the Customer", *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 36, no 2, March/April (2000).
- [22] Carvalho J.M. et al., "Comparative Analysis between Measurements and Simulations of Voltage Sags", *Proceedings of 10th International Conference of Harmonics and Quality of Power*, vol.2, pp. 435, Rio de Janeiro Brazil, 6-9 Oct. (2002).
- [23] Milanovic, J.V., Gnativ, R., Chow, K.W.M., "The Influence of Loading Conditions and Network Topology on Voltage Sags", *International Conference on Harmonics and Quality of Power*, vol. 2, pp. 757, Orlando Florida (2000).

- [24] Gnativ, R. Milanovic, J.V., "Voltage Sag Propagation in Systems with Embedded Generation and Induction Motors", ***Power Engineering Society Summer Meeting***, vol. 1, pp. 474, Vancouver, (2001)
- [25] Heine, P., Lehtonen, M., Lakervi, E., "Voltage Sag Analysis Taken into Account in Distribution Network Design", ***IEEE Power Tech Conference***, vol. 3, 6 pp., Porto, (2001).
- [26] McGranaghan, M., "Trends in Power Quality Monitoring", ***IEEE Power Engineering Review***, vol. 21, Issue: 10, Oct. (2001).
- [27] Nielsen, J.G., Bloabjerg, F.B., Mohan, N., "Control Strategies for Dynamic Voltage Restorer Compensating Voltage Sags with Phase-Jump", ***Applied Power Electronics Conference and Exposition***, APEC'01, vol.2, pp. 1267, 04-08 March (2001).
- [28] Fonseca, V.R.C., Alves, M.F., "A Dedicated Software for Voltage Sag Stochastic Estimate", ***International Conference on Harmonics and Quality of Power***, ICHQP'02, vol. 1, pp. 99, Brazil (2002).
- [29] Martinez, J., Martin-Arnedo, J., "Voltage Sags Analysis Using an Electromagnetic Transient Program", ***IEEE Power Engineering Society Winter Meeting***, vol. 2, pp. 1135-1140, August (2002).
- [30] Milanovic, J.V, Aung, T.M., Gupta, C.P., "The Influence of Fault Distribution on Stochastic Prediction of Voltage Sags", ***IEEE Transactions on Power Delivery***, vol. 20, Issue: 1, pp. 278, (2004).
- [31] Perna, C.D., Olguin, G., Verde, P., Bollen, M.H.J., "Probabilistic System Indices for Voltage Dips", ***8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems***, pp. 796, Ames Iowa, Sep. 12-16, (2004).
- [32] Leborgne, R.C., Olguin, G., Bollen, M.H.J., "Sensitivity Analysis of Stochastic Assessment of Voltage Dips", ***International Conference on Power System Technology-POWERCON***, vol. 1, pp. 69, Singapore, 21-24 Nov., (2004).
- [33] Wang, B., Xu, W., Pan, Z., "A Method of Estimate Voltage Sag Profile for Power Distribution Systems", ***International Conference on Power System Technology-POWERCON***, vol. 2, pp. 1763, Singapore, 21-24 Nov. (2004).
- [34] Lee, G.J., Albu, M.M., Heydt, G.T., "A Power Quality Index Based on Equipment Sensitivity, Cost and Network Vulnerability", ***IEEE Transactions on Power Delivery***, vol.19, no.3, July (2004).
- [35] Chang, C.S., Yu, Z., "Distributed Mitigation of Voltage Sag by Optimal Placement of Series Compensation Devices Based on Stochastic Assessment", ***IEEE Transactions on Power Systems***, vol.19, no.2, May (2004).

- [36] Macken, K.J.P., Bollen, M.H.J., Belmons, R.J.M., "Mitigation of Voltage Dips through Distributed Generation Systems", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.40, no.6 Nov/Dec. (2004).
- [37] Huweg, A.F., Bashi, S.M., Mariun, N., "A STATCOM Simulation Model to Improve Voltage Sag Due to Starting of High Power Induction Motor", *National Power&Energy Conference* (PeCon), pp. 148, Malaysia (2004).
- [38] Olguin, G., Vuinovich, F., Bollen, M.H.J., "A Monte Carlo Simulation Approach to the Method of Fault Positions for Stochastic Assessment of Voltage Dips (Sags)", *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference&Exhibition*, Asia and Pacific Dalian, China (2005).
- [39] Park, C.H., Jang, G., "Fast Method to Determine an Area of Vulnerability for Stochastic Prediction of Voltage Sags", *IEEE Proceedings Generation Transmission Distribution*, vol. 152, no. 6, Nov. (2005).
- [40] Thasananutariya, T., Chatratana, S., "Stochastic Prediction of Voltage Sags in an Industrial Estate", *Industry Applications Conference*, IAS'05, vol. 2, pp. 1489, (2005).
- [41] Leborgne, R.C., Chen, P., "Using P-Q Monitor and PMU for Voltage Sag Extended-Characterization", *Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, Latin America, (2006).
- [42] Gupta, C.P., Milanovic J.V., "Probabilistic Assessment of Equipment Trips Due to Voltage Sags", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, Issue: 2, pp. 711, (2006).
- [43] Munoz, A.M., Miguel, D.O., Rosa, J.J.G., "Study of Sag Compensation with DVR", *Electrotechnical Conference*, MELECON'06, pp. 990, Spain 16-19 May, (2006).
- [44] Bongiorno, M., Svensson, J., Sannino, A., "An Advanced Cascade Controller for Series-Connected VSC for Voltage Dip Mitigation", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, no. 1 Jan/Feb (2007).
- [45] Pilo, F., Pisano, G., Soma, G.G., "Considering Voltage Dips Mitigation in Distribution Network Planning", *Power Tech*, pp. 1528-1533, (2007).
- [46] Velasco, J.M., Arnedo, J.M., "Distributed Generation Impact on Voltage Sags in Distribution Networks", *Electrical Power Quality and Utilisation, 9th International Conference*, , Barcelona, 9-11 October (2007).
- [47] Oliveira C.D., Carvalho T., Filho, J.M., Leborgne, R.C., Gonçalves de Abreu J.P., "Validation of Voltage Sags Short Term Measurements Based on Predicted Stochastic Simulation", *Proceedings of 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, pp.1-8, 25-29 May (2008).

- [48] Nikolovski, S., Klaic, Z., Kraus, Z., Slipac, G., "Online Power Quality Measurements and Voltage Sag Analysis", **Universities Power Engineering Conference**, pp.1-5, Padova, 1-4 September (2008).
- [49] Renders, B. et al, "Distributed Generation for Mitigating Voltage Dips in Low-Voltage Distribution Grids", **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol-23, no:3, July (2008).
- [50] Inan, E., "Ulusal Elektrik Şebekesinde Kısa Süreli Gerilim Düşümlerinin İncelenmesi için Bir Uygulama", Yüksek Lisans Tezi, **Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, (2005).
- [51] Bollen M.H.J., "Understanding Power Quality Problems: Voltage Dips and Interruptions", **IEEE Press**, (2000).
- [52] Zhang, L.D., Bollen, M.H.J., "A Method for Characterizing Unbalanced Voltage Dips (Sags) with Symmetrical Components", **IEEE Power Engineering Letters**, pp.50-52, July, (1998).
- [53] Zhang, L.D., "Three Phase Unbalanced Voltage Dips", Doctorate Thesis, **Chalmers University of Technology**, (1999).
- [54] "Voltage Dip Evaluation and Prediction Tools", **Task Force, CIGRE**, February (2009).
- [55] Olguin, G., "Stochastic Assessment of Voltage Dips Caused by Faults in Large Transmission System", Master Thesis, **Chalmers University of Technology**, Göteborg, Sweden, (2003).
- [56] Park, C.H., Jang, G., "Stochastic Estimation of Voltage Sags in a Large Meshed Network", **IEEE Transactions on Power Delivery**, vol. 22, no.3, July (2007).
- [57] Newman, G., Perera, S., Gosbell, V., Smith, V., "Voltage Sag Ride through Behaviour of AC Induction Motor Drives", ECTE457 Final Year Thesis, **University of Wollongong**, (2000).
- [58] Bollen M.H.J., Zhang L.D., "Analysis of Voltage Tolerance of AC Adjustable-Speed Drives for Three-phase Balanced and Unbalanced Sags", **IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference**, pp. 1-8, (1999).
- [59] Kundur, P., "Power System Stability and Control", Chapter 11, pp. 581-638, (1994).
- [60] Hadda K., Joos G., "A Fast Algorithm for Voltage Unbalance Compensation and Regulation in Faulted Distribution Systems", **IEEE Thirteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition**, vol.2, pp.986-993, New York, (1998).

- [61] Song, Y.H., Johns, A.T., “Flexible AC Transmission Systems (FACTS)”, *The Institution of Electrical Engineers*, Londra (1999).
- [62] Acha, E., Fuerte-Esquivel, C.R., Ambriz-Perez, H., Angeles-Camacho, C., “FACTS Modelling and Simulation in Power Networks”, *Wiley Press*, Chapter 2, pp. 11-20, Chapter 5, pp. 153-228, (2004).
- [63] Sood, V.K., “HVDC and FACTS Controllers Applications of Static Converters in Power Systems”, *Kluwer Academic Publishers*, (2004).
- [64] Tkaczewski G., Kos A., “Static FC/TCR Compensator for Arc Furnace Compensation”, *Guide for Electrical Design Engineers*, Leonardo&Energy, www.leonardo-energy.org (2007).
- [65] Baran, M., Pundlik, S., Peele, S., “Trend Capture in Power Quality Monitoring”, *IEEE Power Engineering Society*, Winter Meeting, pp.1075-1077, vol.1, 31 January-4 February (1999).
- [66] *Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-30*: “Testing and Measurement Techniques-Power Quality Measurement Methods”, IEC-6100-4-30 ed.1.0 (2008).
- [67] Ulusal Güç Kalitesi Projesi (UGKP), www.guckalitesi.gen.tr, TUBITAK, Türkiye, (2007-2010).
- [68] *IEEE 1564 Draft*, “Voltage Sag Indices Task Force Meeting”, July (2010).
- [69] *IEEE Std. 1159*-“Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”, (1995).
- [70] “Mevcut Enterkonneksiyon Hatların Net Transfer Kapasiteleri Duyurusu”, Türkiye Elektrik İletim A.Ş., <http://www.teias.gov.tr> (Ziyaret Tarihi: 22/03/2010).
- [71] “Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği”, *Tarih: 22/01/2003, Sayı: 25001*.
- [72] “Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği”, *Tarih: 10/11/2004 Sayı: 25639*.
- [73] SIMPOW DIPS Kullanım Kılavuzu (2005).
- [74] “Türkiye Ulusal Elektrik Ağındaki Havai Hatların Trafoların ve Generatörlerin Elektriksel Karakteristikleri”, *Türkiye Elektrik İletim A.Ş.*, (2009).

EKLER

E1. Güç Kalitesi İle İlgili Standartlarda Yer Alan Tanımlamalar

Güç kalitesi terimleri ayrıntılı olarak IEC ve IEEE Standartlarında belirtilmiştir. Standartlar sayesinde güç kalitesi ortak bir payda da toplanarak tüm dünyada önemi gelişen teknolojiyle birlikte her geçen gün artan gerilim çukuru sorununun değerlendirilmesi ve anlaşılması kolaylaştırılmıştır.

Tablo 1.1 konularına göre güç kalitesi ile ilgili günümüzde geçerli olan standartları vermektedir.

Tablo 1.1: Konularına göre güç kalitesi standartları

KONU	İLGİLİ STANDARTLAR
TOPRAKLAMA	IEEE Std 446 /IEEE Std 141/IEEE Std 142/IEEE Std 1100
GÜÇ	IEEE Std 141/IEEE Std 446/IEEE Std 1100/IEEE Std 1250
DALGALANMA KORUMASI	IEEE C62 serisi/IEEE Std 141/IEEE Std 142/NFPA 78
HARMONİKLER	IEEE Std 519/IEEE P519/IEEE Std 929/IEEE Std 1001
BOZULMALAR	ANSI C62.41/IEEE Std 1100/IEEE Std 1159/IEEE Std 1250
HAFİFLETİCİ CİHAZ	IEEE Std 446/IEEE Std 1035/IEEE Std 1100/IEEE Std 1250
GÜRÜLTÜ KONTROLÜ	FIPS PUB94/IEEE Std 518/IEEE Std 1050
KULLANICI ARABİRİMİ	IEEE Std 446/IEEE Std 929/IEEE Std 1001/IEEE Std 1035
MONİTÖRLEME	IEEE Std 1100/IEEE Std 1159/IEC 61000-4-30
YÜK HASSASİYETİ	IEEE Std 141/IEEE Std 446/IEEE Std 1100/IEEE P1346/ IEC 61000-4-11
SİSTEM GÜVENİLİRLİĞİ	IEEE Std 493/IEC 61000-2-4

IEEE Standart P1346

Gerilim çukuruyla ilgili olarak, güç sistemiyle hassas cihaz uyumluluğunun teknik ve finansal analizi için yöntem içeren bir standarttır. Hassas cihaz işletimi, dağıtım sistemi ve kullanıcı için elde edilen verilen nasıl değerlendirileceği hakkında bilgi verir. Standartta önerilen yöntem;

1. Endüstriyel alanda, gerilim çukurunun neden olduğu zarar ile en uygun hafifletme yönteminin maliyeti arasında karşılaştırma yapılmasını sağlar.
2. Cihaz ile kaynak arasındaki uyumluluğun anlaşılması için çukur karakteristikleri, genlik-zaman-sıklık ve cihazın çukur tepkisi çizelge olarak elde edilir.

IEEE Standart 493

Elektrik güç sistemlerinde, planlama veya tasarım aşamasında güç kesintileriyle ilgili güvenilirlik analizine ait bir standarttır. Önerilen yöntemeye göre;

1. Hassas yüke ait gerilim çukur genliğinin hesaplanması için gerekli bilgiler, şebeke empedansı, arıza empedansı ve arıza noktasıdır. Bu hesaplama iletim ve orta gerilim dağıtım sistemlerine de uygulanmalıdır.
2. Gerilim çukur zamanını koruma cihazının arıza temizleme zamanı belirler.
3. Gerilim çukur sıklığı için hat, transformatör gibi tüm şebeke elemanlarının empedans modeli ve güvenilirlik verileri bilinmelidir.

IEEE Standart 1250

Gerilim çukurunun hassas cihaza olan etkilerinin incelendiği standarttır. Amaç cihaz üreticilerine yol göstermektir. CBEMA eğrisinin kullanılması önerilir. Bu eğri ilk olarak 1987’de IEEE Standart 446’da sunulmuş ilerleyen yıllarda ITIC eğrisi olarak daha kapsamlı hale getirilmiştir. Her cihazın çukura tepkisi farklı olacağından eğrinin cihazda gerçekleştirilecek testler doğrultusunda oluşturulması gereklidir.

IEEE Standart 1159

Elektromanyetik olayların doğru yorumlanabilmesi için ölçme ve uygulama tekniklerini içeren bir standarttır.

IEC Standart 61000-4-11

Bu standartta alçak gerilim şebekelerine bağlı elektrik ve elektronik cihazlar için test teknikleri ve tercih edilen test seviyelerini sunar.

E1.1. Standartlarda Yeralan Güç Kalitesi Tanımları

Güç Kalitesi: IEEE 1159-1995 standardına göre güç kalitesi: cihazların uygun çalışma koşullarında işletilmesidir. Elektrik mühendisliğinde uluslararası standartlarda ise elektromanyetik uyumluluk olarak ifade edilir. Güç sisteminin çalıştığı gerilim dalga şeklinin genliğinde, frekansında oluşabilecek önemli derecedeki sapma bir güç kalitesi problemidir. Güç kalitesini sadece gerilimi ele alarak incelemek yanlış olur. Generatörler saf sinüse yakın bir gerilim üretseler de akım gerilimde bozucu etkiler yaratabilir.

RMS (Etkin Değer): Akım veya gerilimin, temel frekansta bir veya yarım periyodunun etkin değeridir.

Elektromanyetik Uyumluluk: bir cihaz veya sistemin elektromanyetik çevresinde herhangi bir tolere edilemez bozulmaya neden olmadan çalışmasını sürdürebilme yeteneğidir.

Elektromanyetik Çevre: belirtilen sistem veya cihaz bölgesinde var olan elektromanyetik olayları kapsar.

Aşırı Gerilim: Gerilimin RMS değerindeki, 1 dakikadan uzun süreli, 1.1 pu.'den fazla olan artmadır. Gerilim tepesi teriminden ayırt etmek için uzun süreli aşırı gerilim olarak da ifade edilebilir. Normal çalışmada gerilim sınırı 0.9-1.1 pu. aralığında değil ise terimdeki 1.1 pu yerine izin verilen en yüksek gerilim sınırı geçerli olur.

Düşük Gerilim: Gerilimin RMS değerindeki, 1 dakikadan uzun süreli, 0.9 pu.'den az olan azalmadır. Kısa süreli gerilim çukuru teriminden ayırabilmek için uzun süreli düşük gerilim ifadesi kullanılabilir.

Alt Periyot Aşırı Gerilim: Yarım periyottan daha az süreli tek yönlü polariteli gerilimdeki ani artmadır.

Alt Periyot Düşük Gerilim: Yarım periyottan daha az süreli tek yönlü polariteli gerilimdeki ani azalmadır.

Kısa Süreli Kesinti: 1 dakikadan fazla olmayan, gerilimin RMS değerinde 0.1 pu.'den az olan azalmadır. Neden-sonuç ilişkisi açısından, devre dışı kalan kaynağın otomatik yeniden devreye alınması olarak ifade edilebilir.

Uzun Süreli Kesinti: 1 dakikadan uzun süren, gerilimin RMS değeriindeki 0.1 pu.'den az olan azalmadır. Neden-sonuç ilişkisi açısından ifade edilirse, devre dışı kalan kaynağın elle yeniden devreye alınmasıdır.

Anlık Kesinti: gerilim genliğinde 0.1 pu.'den az 0.5 periyot ile 3 sn. zaman aralığındaki azalma olarak tanımlanır.

Geçici Kesinti: gerilim genliğinde 0.1 pu.'den az 3sn. ile 1dk. zaman aralığındaki azalmadır.

Gerilim Çukuru: büyük güçlü yüklerin devreye alınması, motorun enerjilendirilmesi veya arızalardan dolayı gerilimin RMS değeriinde 1 dakikadan az süren azalmadır.

Gerilim Tepesi: sistemdeki anahtarlama olayı, arızalar veya yük atmalarının neden olduğu gerilimin RMS değeriinde 1 dakikadan az süren artmadır.

Kıprışma: parlaklığı veya ışın dağılımı zamanla dalgalanan ışık uyarıcısının neden olduğu görsel algının değişmezlik etkisidir.

Frekanstaki Sapma: temel sistem frekansındaki artma veya azalmadır. Frekans saptmasının zamanı birkaç periyottan birkaç saate kadar olabilir.

Temel Bileşen: Fourier Serisi'ne açılan periyodik fonksiyonun 1. bileşenidir.

Harmonik Bileşeni: Fourier Serisi'ne açılan periyodik fonksiyonun 1. bileşenden büyük olan bileşen veya bileşenleri ifade eder.

Bağışıklık: herhangi bir elektromanyetik bozulma sırasında bir cihaz veya sistemin bu bozulmadan etkilenmeyip normal çalışmasına devam etmesidir.

Geçici Darbe: gerilim veya akımdaki kararlı halde tek yön polariteli ani değişimdir.

Ara Harmonik Bileşeni: temel frekansın tam sayı katı olmayan frekanslardaki periyodik fonksiyona ait bileşendir.

Gürültü: kontrol sistemi devrelerinde istenmeyen etkilere sebep olan elektriksel sinyallerdir.

Çentik: normal gerilim dalga şeklinde 0.5 periyottan az süreli, başlangıcı dalga şekline zıt polariteli anahtarlamaların neden olduğu bozulmadır. Dalga şekline zıt polariteli olduğundan normal dalga şeklinden çıkartılır yani gerilimde azalmaya yol açar.

Salınım: akım veya gerilimde kararlı halde pozitif ve negatif polariteli ani frekans değişimidir.

Alt Periyot Salınım Bozukluğu: gerilim salınıminin ardından oluşan, gerilimdeki artma veya azalmadır. Salınım frekansı sistem frekansının çok üzerindedir.

Potansiyel Transformatörü: birincil sargısı gerilimi ölçülen veya kontrol edilen güç kaynak devresine paralel bağlanan transformatördür.

Güç Bozulması: giriş AC güç karakteristiklerinin nominal değerlerindeki (veya yük toleransına bağlı olarak belirlenen eşik değerindeki) herhangi bir sapma olarak tanımlanır.

Dalga Şeklinde Bozulma: temel frekanstaki sinüs dalga şeklinde kararlı halde oluşan sapmadır.

Gerilim Dengesizliği: gerilimin üç fazının genliğindeki dengesizlik veya normal 120° ’lik faz ilişkisindeki yer değişimidir. Negatif veya sıfır dizi geriliminin pozitif dizi gerilimine oranıdır. Genelde %’de olarak ifade edilir.

Negatif Dizi Dengesizlik Oranı: negatif dizi bileşeninin pozitif dizi bileşenine oranıdır, genelde % de olarak ifade edilir.

Sıfır Dizi Dengesizlik Oranı: sıfır dizi bileşeninin pozitif dizi bileşenine oranıdır, % de olarak ifade edilir.

Gerilim Ayarı: yükte RMS geriliminin kontrol veya kararlılık derecesidir. Giriş gerilimi, sıcaklık veya yük değişimi gibi parametrelere bağlıdır.

E1.2. Standartlarda Yer Alan Gerilim Çukuru Tanımları

IEC Standardına göre gerilim çukuru, elektrik sisteminde bir noktada gerilim değerindeki, 0.5 periyot ile birkaç saniyelik zaman aralığındaki, ani azalmadır. IEEE Standardına göre ise sistemin temel frekansında gerilimin RMS değerinde 0.1-0.9 pu. genlik aralığında, zamanı 0.5 periyot ile 1 dakika arasında olan azalmadır.

Çukur Genliği: IEC Standardına göre çukur genliği sistemin nominal gerilimi ile çukur sırasındaki en düşük gerilimi arasındaki farktır. %’de veya pu. olarak ifade edilir.

Arta Kalan Kompleks Gerilim: bir fazdaki gerilim çukurunun kompleks ifadesidir, mutlak değeri gerilim çukur genliğini, argümanı faz açığı kaymasını verir.

En Düşük Genlik: Çukur başlangıcı ve bitişi arasındaki çukur genliğinin en düşük değerini verir.

En Yüksek Gerilim Düşümü: çukur başlangıcı ve bitişi arasında gerilim düşümünün en yüksek değeridir.

Eksik Gerilim: olay olmaması durumunda gerilimin alacağı değer ile olay sırasındaki gerçek gerilim arasındaki farktır.

Kompleks Eksik Gerilim: bir fazdaki gerilim çukuruna ait eksik gerilimin kompleks değeridir. Olay öncesi gerilim ve çukur sırasındaki gerilim arasında kompleks alandaki farkla tanımlanır.

Eksik Gerilim Genliği: eksik gerilimin RMS değeridir.

Faz Açık Kayması: arızadan kaynaklı bir gerilim çukurunda gerilim genliğindeki düşmenin dışında gerilimin faz açısında kayma da gözlenebilir. Kaynak ve arızalı hat arasındaki X/R oranındaki fark, arıza ve yük arasındaki ortak bağlantı noktasında faz açık kaymasına yol açar. Ayrıca dengesiz arızaların neden olduğu faz dengesizliği de faz açık kayması oluşturur.

Dalga Şekli Üzerindeki Çukur Başlangıç Noktası: gerilim dalga şekli üzerinde çukurun başladığı ana tekabül eden faz açık değeridir. Faz açısı gerilim dalga şeklinin çukur başlangıç öncesindeki sıfır geçişi temel alınarak ölçülebilir.

Dalga Şekli Üzerindeki Çukur Bitiş Noktası: gerilim dalga şeklinin arızanın temizlenmesinden sonra normale döndüğü noktanın başlangıcını ifade eder.

Çukur Zamanı: gerilim çukurunun dalga şekli üzerinde başladığı ve bittiği nokta arasındaki zamandır.

Arıza Sonrası Çukur: arıza giderildikten sonra bile gerilim genliğinin normal çalışma aralığının altında kalmasıdır. Motorun tekrar enerjilendirilmesi, motor gücü arıza giderildikten sonra sistem empedansına göre büyük ise, çukur süresinin uzamasına yol açabilir. Arıza sonrası çukur birkaç saniye sürebilir ve çukur genliği 0.6 pu. ile 0.9 pu. arasındadır. Arıza sonrası çukur, asıl çukur olayı sırasında olaydan etkilenmemiş olan cihazın devre dışı kalmasına neden olabilir.

Dikdörtgen Olmayan Çukur: Çukur genliğinin zamanla uyumlu olmadığı durumda oluşur. Dinamik yükler, indüksiyon motoru vb. başlıca sebebidir.

ÖZGEÇMİŞ

Elif İNAN, 1980 yılında Tekirdağ/Hayrabolu’da doğdu. İlkokul ve ortaokulu Hayrabolu’da okudu. 1998 yılında Kabataş Erkek Lisesi’nden mezun oldu. Aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nü kazandı. 2002 yılında bu bölümden mezun oldu. Mezun olduğu yıl Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü’nde Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda yüksek lisans programına başladı. Yine aynı yıl Kocaeli Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2005 yılında Elektrik Mühendisliği Bölümü Elektrik Tesisleri Ana Bilim Dalı yüksek lisans programından mezun oldu. Eylül 2008-Eylül 2009 tarihleri arasında Erasmus Öğrenim Hareketliliği kapsamında Danimarka, Aalborg Üniversitesi Yüksek Gerilim Teknoloji Enstitüsü’nde araştırmacı olarak görev alarak doktora tez çalışması dışında, güç sistem kararlılığı ve harmonik analizi konuları üzerinde çalıştı. Akademik ilgi alanları; güç sistemleri (iletim-dağıtım), güç kalitesi, sistem kararlılığıdır.