

168851

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ULUSAL ELEKTRİK ŞEBEKESİNDE KISA SÜRELİ GERİLİM  
DÜŞÜMLERİNİN İNCELENMESİ İÇİN BİR UYGULAMA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elektrik Müh. Elif İNAN**

**Ana Bilim Dalı: Elektrik Mühendisliği**

**Danışman: Yrd. Doç Dr. Bora ALBOYACI**

**Mayıs 2005**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ \* FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ULUSAL ELEKTRİK ŞEBEKESİNDE KISA SÜRELİ GERİLİM  
DÜŞÜMLERİNİN İNCELENMESİ İÇİN BİR UYGULAMA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Elektrik Müh. Elif İNAN**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 27 Mayıs 2005**

**Tezin Savunulduğu Tarih: 12 Temmuz 2005**

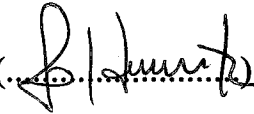
**Tez Danışmanı**

**Yrd.Doç.Dr.Bora ALBOYACI**

(.....)

**Üye**

**Prof.Dr.Semra ÖZTÜRK**

(.....)

**Üye**

**Prof.Dr.Ertan YANIKOĞLU**

(.....)

**Mayıs 2005**

# ULUSAL ELEKTRİK ŞEBEKESİNDE KISA SÜRELİ GERİLİM DÜŞÜMLERİNİN İNCELENMESİ İÇİN BİR UYGULAMA

Elif İNAN

**Anahtar Kelimeler:** Güç Kalitesi, Gerilim Düşmesi, Faz Açı Atlaması.

**Özet:** Kaliteli ve kesintisiz elektrik enerjisinin zaman içerisinde süreklilik sağlayabilmesinin en temel yolu dizayn aşamasında yeterli araştırmaların yapılmasıdır. Bu tezde öncelikle güç kalitesi konusunda bilgi verilerek gün geçtikçe artan öneminden ve güç kalitesi problemlerinden kısaca bahsedilmiştir. Daha sonrada en önemli güç kalitesi sorunlarından biri olan kısa süreli gerilim düşümleri, karakteristik değerleri ve düşme tipleri hakkında teorik bilgi verilerek, bu teorik bilgiler Mathcad Programından elde edilen eğrilerle desteklenmiştir.

Ayrıca kısa süreli gerilim düşmeleri sırasında indüksiyon motor davranışı gerçek sistem verilerine göre oluşturulan test sistemi üzerinde incelenmiştir. İzmit bölgesindeki bir kağıt firmasına ait iletim sistemi gerçek verilerle SIMPOW simülasyon programında analiz edilmiş ve sistemin farklı baralarında oluşturulan dengesiz arızalara karşı fabrikanın giriş barasında oluşan gerilim düşmelerine ait grafikler elde edilerek fabrikanın enerji analizörüyle giriş barasından belirli zaman aralıklarıyla aldığı ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Türkiye sisteminin gerçek verileri kullanılarak yapılan analizlerle bu sistem üzerinde alınan ölçümlerin benzer özelliklerde olduğu belirlenmiştir.

## **A CASE STUDY OF VOLTAGE SAG EVALUATION IN NATIONAL GRID**

**Elif INAN**

**Keywords:** Power Quality, Voltage Sag, Phase Angle Jump.

**Abstract:** Reliability and quality of supply were rarely an issue, the argument being that the reliability was sooner too high than too low. Starting in industrial and commercial power systems and spreading to the public supply, the power quality virus appread. This thesis concentrates on the power quality phenomena that primarily affect the customer: voltage sags. How voltage sags characterize and voltage sag magnitude and duration can be determined. Also type of voltage sags are determined. For better understanding voltage sag magnitude-duration plots are occured with Mathcad Programme.

Effect of voltage sags on induction motors and sags due to starting of induction motors are also described with simulation of an example system. Lastly for a transmission system which belongs to a paper company is introduced. System's data are taken from Türkiye Electrical Transmission A.Ş. and with SIMPOW simulation programme, balanced and unbalanced faults are occured in the system. Simulation results are compared with measured results.

## ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Gelişen teknolojiyle birlikte kullanılan cihazların hassasiyeti de artmaktadır. Hassasiyetin artması cihazların sistemde oluşabilecek gerilim değişimlerinden etkilenme olasılığını arttırmıştır. Bundan dolayı çalışmalar bu konu üzerinde yoğunluk kazanmıştır. Gerilim değişimleri konusunda yapılan çalışmalar sorunun ciddiyetinin daha net anlaşılmasını sağlamıştır. Bu çalışma konunun boyutunu belirtmekle birlikte Türkiye iletim sisteminin bir kısmının değerlendirilmesine de imkan tanımaktadır.

Tez çalışmam sırasında her konuda beni destekleyen ve yol gösteren danışmanım Sayın Yrd.Doç.Dr.Bora ALBOYACI'ya, verilerin alınmasında yardımcı olan KARTONSAN A.Ş.'den Sayın Ahmet SÖZEN beye, Simpow simülasyon programının üniversitemize kazandırılmasında emeği geçen ve çalışmalarımızın her safhasında destek veren ABB Türkiye Genel Müdürü Sayın Levent ALHAN beye desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca yardımlarından dolayı mesai arkadaşlarım Arş.Gör.Ö. Özgür GENCER, Arş.Gör.Mehlika ŞENGÜL, Arş.Gör.Turhan TÜRKER, Arş.Gör.Esra KANDEMİR ve Arş.Gör.Ersoy BEŞER'e ve desteklerinden dolayı aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

|  |      |
|--|------|
| ÖZET.....                                    | ii   |
| ABSTRACT.....                                | iii  |
| ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....                       | iv   |
| İÇİNDEKİLER .....                            | v    |
| SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR .....         | ix   |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                         | xi   |
| TABLolar DİZİNİ .....                        | xvii |
| <br>   |      |
| BÖLÜM 1. GİRİŞ.....                          | 1    |
| <br>   |      |
| BÖLÜM 2. GÜÇ KALİTESİ.....                   | 5    |
| 2.1. Giriş.....                              | 5    |
| 2.2. Güç Kalitesi .....                      | 5    |
| 2.3. Güç Kalitesinin Değerlendirilmesi ..... | 7    |
| 2.4. Güç Kalitesini Bozucu Etkenler .....    | 8    |
| 2.4.1. Süreksizlikler .....                  | 8    |
| 2.4.1.1. Darbe süreksizliği .....            | 8    |
| 2.4.1.2. Salınım süreksizliği.....           | 9    |
| 2.4.2. Uzun süreli gerilim değişimleri ..... | 12   |
| 2.4.2.1. Aşırı gerilim .....                 | 12   |
| 2.4.2.2. Düşük gerilim.....                  | 13   |
| 2.4.2.3. Sürekli kesintiler .....            | 14   |
| 2.4.3. Kısa süreli gerilim değişimleri.....  | 14   |
| 2.4.3.1. Kesinti .....                       | 14   |
| 2.4.3.2. Gerilim düşmesi .....               | 15   |
| 2.4.3.3. Gerilim artması .....               | 17   |
| 2.4.4. Gerilim dengesizliği .....            | 17   |
| 2.4.5. Dalga şeklinde bozulma.....           | 18   |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.4.5.1. Dc-sapma .....  | 18        |
| 2.4.5.2. Harmonikler .....   | 18        |
| 2.4.5.3. İnter Harmonikler.....  | 20        |
| 2.4.5.4. Kıpırışma.....  | 21        |
| 2.4.5.5. Gürültü.....  | 22        |
| 2.4.6. Gerilim dalgalanması.....   | 22        |
| 2.4.7. Güç frekans değişimleri.....  | 23        |
| <b>BÖLÜM 3. KISA SÜRELİ GERİLİM DÜŞMELERİ VE SINIFLANDIRILMALARI.....</b>  | <b>24</b> |
| 3.1. Giriş.....  | 24        |
| 3.2. Düşme Sonrası Gerilim Genliği .....                                   | 26        |
| 3.2.1. Gerilimin efektif değeri .....                                      | 26        |
| 3.2.2. Temel gerilim bileşeni .....  | 27        |
| 3.2.3. Gerilimin tepe değeri .....   | 28        |
| 3.3. Teorik Hesaplamalar .....   | 29        |
| 3.3.1. Kullanılan iletkenin etkisi.....                                    | 32        |
| 3.3.2. Trafodan sonra oluşan arıza etkisi .....                            | 33        |
| 3.3.3. Arıza seviyeleri.....   | 34        |
| 3.3.4. Kritik mesafe .....   | 35        |
| 3.4. Düşme Sonrası Gerilim Genliğinin Hesaplanmasına Örnek.....            | 36        |
| 3.5. Radyal Olmayan Sistemlerde Düşme Sonrası Gerilim Genliği .....        | 39        |
| 3.5.1. Yerel generatörler .....  | 39        |
| 3.5.2. Kapalı ring çevrimleri.....   | 42        |
| 3.5.3. Kapalı ringden beslenen radyal kısımlar .....                       | 44        |
| 3.6. Gözlü Sistemlerde Düşme Sonrası Gerilim Genliğinin Hesaplanması ..... | 45        |
| 3.7. Gerilim Düşme Zamanı .....  | 47        |
| 3.7.1. Arızanın giderilme süresi.....                                      | 47        |
| 3.7.2. Genlik-zaman eğrileri .....   | 48        |
| <b>BÖLÜM 4. ÜÇ FAZ DENGESİZLİğİ.....</b>                                   | <b>50</b> |
| 4.1. Tek Faz Arızası .....   | 50        |
| 4.1.1. Direkt topraklanmış sistemler.....                                  | 53        |

|   |     |
|---|-----|
| 4.1.2. Empedans üzerinden topraklanmış sistemler.....                           | 54  |
| 4.2. Faz-Faz Arızası.....   | 57  |
| 4.3. İki Faz Toprak Arızası.....  | 60  |
| 4.4. Üç Fazlı Dengesiz Kısa Süreli Gerilim Düşümlerinin Tipleri .....           | 64  |
| 4.4.1. Tek faz arızası.....   | 64  |
| 4.4.2. Faz-faz arızası.....   | 66  |
| 4.4.3. Transformatörün bağlantı şekli.....                                      | 67  |
| 4.4.4. Transformatörlerde kısa süreli gerilim düşümlerinin dönüşümü.....        | 68  |
| 4.4.5. Kısa süreli gerilim düşümlerinin temel çeşitleri.....                    | 71  |
| 4.4.6. İki faz toprak arızası .....   | 74  |
| 4.5. Faz Açığı Atlaması .....   | 76  |
| 4.5.1. Teorik hesaplamalar.....   | 80  |
| 4.5.1.1. Faz açığı atlamalarının başlangıcı.....                                | 80  |
| 4.5.1.2. Kaynak gücünün etkisi.....   | 80  |
| 4.5.1.3. Kullanılan iletkenin etkisi.....                                       | 81  |
| 4.5.1.4. Uzaklığa bağlı genlik ve faz açığı atlama oranı.....                   | 82  |
| 4.6. Üç Fazlı Dengesiz Gerilim Düşümlerinde Genlik Ve Faz Açığı Atlamaları .... | 84  |
| 4.6.1. Düşme sonrası gerilim genliği ve faz açığı atlama oranının tanımı .....  | 84  |
| 4.6.1.1. Üç farklı genlik ve faz açığı atlama oranı.....                        | 84  |
| 4.6.1.2. Karakteristik genliğin elde edilmesi.....                              | 85  |
| 4.6.2. Tek faz arızası.....   | 86  |
| 4.6.2.1. Başlangıç genliği ve karakteristik genlik.....                         | 86  |
| 4.6.3. Faz-faz arızası.....   | 90  |
| 4.6.3.1. C tipi gerilim düşmesi.....  | 90  |
| 4.6.3.2. D tipi gerilim düşmesi.....  | 93  |
| 4.6.3.3 Düşme sonrası gerilim genliği ve faz açığı atlama oranı.....            | 97  |
| 4.6.4. İki faz toprak arızası .....   | 97  |
| 4.6.4.1 F tipi gerilim düşmesi.....   | 98  |
| 4.6.4.2 G tipi gerilim düşmesi.....   | 100 |
| 4.6.4.3 Düşme sonrası gerilimin genliği ve faz açığı atlama oranı.....          | 102 |



|  |         |
|--|---------|
| BÖLÜM 5. KISA SÜRELİ GERİLİM DÜŞÜMLERİNE YÜKÜN ETKİSİ.....   | 103     |
| 5.1. Giriş.....  | 103     |
| 5.2. İndüksiyon Motorları Ve Üç Fazlı Arızalar.....  | 103     |
| 5.3. İndüksiyon Motorları ve Dengesiz Arızalar.....  | 106     |
| 5.3.1 İndüksiyon motorunun davranışına örnek.....  | 106     |
| 5.3.2 Sadeleştirilmiş analizler.....   | 111     |
| 5.4 Güç Elektroniği Yükleri.....   | 113     |
| 5.5 İndüksiyon Motorunun Devreye Alınmasının Neden Olduğu Gerilim Azalmaları.....                      | 113     |
| <br>BÖLÜM 6. SIMPOW PROGRAMINDA GERÇEK VERİLERLE SİSTEM ANALİZİ.....                                   | <br>117 |
| 6.1. Sistemin Tanıtımı.....  | 117     |
| 6.2. Dengesiz Arızalar.....  | 118     |
| 6.2.1. Tek faz toprak ve iki faz arızaları.....  | 118     |
| 6.2.2. İki faz toprak arızası.....   | 128     |
| 6.3. Uzaklığa Bağlı Olarak Gerilim Azalma Genliğinin Değişimi.....                                     | 129     |
| <br>BÖLÜM 7. SONUÇLAR.....   | <br>132 |
| <br>KAYNAKLAR.....   | <br>134 |
| <br>EK-1.....  | <br>136 |
| SİMETRİLİ BİLEŞENLER.....  | 136     |
| EK-2.....  | 142     |
| GÜÇ KALİTESİ TERİMLERİ.....  | 142     |
| EK-3.....  | 146     |
| GERİLİM AZALMALARININ İNDÜKSİYON MOTORU ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ İÇİN ALINAN TEST SİSTEMİ..... | 146     |
| EK-4.....  | 149     |
| İNCELENEN SİSTEMİN TEK HAT ŞEMASI.....   | 149     |
| EK-5 TRANSFORMATÖR VE HAT VERİLERİ.....  | 160     |
| EK-6 STRİ SIMPOW PROGRAMININ TANITIMI.....   | 161     |
| ÖZGEÇMİŞ.....  | 163     |

## SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

|                          |  |
|--------------------------|--|
| $U(t)$                   | : Bozuk periyodik dalga.                                     |
| $U_{ns}$                 | : Gerilimin tek sayılı bileşeni.                             |
| $U_{nc}$                 | : Gerilimin çift sayılı harmonikleri.                        |
| $U_{dc}$                 | : Gerilimin sıfır bileşeni.                                  |
| $THD_U$                  | : Gerilimdeki toplam harmonik bozulma.                       |
| $THD_I$                  | : Akımdaki toplam harmonik bozulma.                          |
| $U_{rms}$                | : Gerilimin efektif değeri.                                  |
| $I_{rms}$                | : Akımın efektif değeri.                                     |
| ASD                      | : Ayarlanabilir hız sürücüleri.                              |
| $V_{eff}$                | : Gerilimin efektif değeri.                                  |
| $N$                      | : Örnekleme sayısı.  |
| $v$                      | : Örneklenmiş gerilim.                                       |
| $V_{tem}$                | : Temel gerilim bileşeni.                                    |
| $\omega_o$               | : Açısız hız.  |
| $T$                      | : Temel frekansın bir periyodu.                              |
| $V_{tepe}$               | : Tepe gerilim bileşeni.                                     |
| $V_{azlm}$               | : Gerilim azalma genliği.                                    |
| $Z_F$                    | : Arıza empedansı.   |
| $Z_S$                    | : Kaynak empedansı.  |
| PCC                      | : Ortak bağlantı noktası.                                    |
| $S_{ARZ}$                | : Arıza seviyesi.  |
| $l_{kri}$                | : Kritik mesafe.   |
| $V_k$                    | : k. Düşüm gerilimi.   |
| $\Delta V_k$             | : Arızanın neden olduğu k. Düşümdeki gerilim değişimi.       |
| $Z_{S1}, Z_{S2}, Z_{S0}$ | : Kaynak empedansının pozitif, negatif ve sıfır bileşenleri. |
| $Z_{F1}, Z_{F2}, Z_{F0}$ | : Arıza empedansının pozitif, negatif ve sıfır bileşenleri.  |
| $V_a, V_b, V_c$          | : Faz gerilimleri.   |
| $V_{FN}$                 | : Faz-nötr gerilimleri.                                      |
| $V$                      | : Arta kalan gerilim değeri.                                 |

- $T_1, T_2, T_3$  : Transformator tipleri.  
 $X_1, X_2, X_3$  : Azalma tipleri.  
 $\phi$  : Faz açısı atlama.  
 $\alpha$  : Kaynak empedansı ile besleyici empedansı arasındaki açı.  
 $\phi_{kar}$  : Karakteristik azalma genişliği.  
 $V_{kar}$  : Karakteristik azalma genişliği.  
 $Z_M$  : Motor empedansı.  
 $R_R$  : Rotor direnci.  
 $R_S$  : Stator direnci.  
 $\beta$  : Motorun yol alma akımı ile nominal akımı arasındaki oran.



## ŞEKİLLER DİZİNİ

|   |    |
|---|----|
| Şekil 2.1. Güç kalitesi değerlendirilmesi .....   | 8  |
| Şekil 2.2. Yıldırım darbe akımı.....  | 9  |
| Şekil 2.3. Ard arda kondansatör gruplarının enerjilendirilmesi sonucu oluşan salınım süreksizlik akımı. ....  | 11 |
| Şekil 2.4. Kondansatör bankının enerjilendirilmesinin neden olduğu düşük frekanslı salınım süreksizliği. ....   | 12 |
| Şekil 2.5. Aşırı gerilim.....   | 13 |
| Şekil 2.6. Düşük gerilim. ....  | 13 |
| Şekil 2.7. Bir faz toprak arızasının neden olduğu gerilim kesintisi. ....   | 15 |
| Şekil 2.8. Bir faz toprak arızasının neden olduğu gerilim düşümü.....   | 16 |
| Şekil 2.9. Motorun devreye alınmasıyla oluşan geçici gerilim düşmesi.....   | 16 |
| Şekil 2.10. Tek faz toprak arızasıyla oluşan ani gerilim artışı.....  | 17 |
| Şekil 2.11. Ayarlanabilir hız sürücüsünün giriş akımına ait dalga şekli ve harmonik spektrum.....   | 21 |
| Şekil 2.12. Üç fazlı dönüştürücünün neden olduğu gerilim kırışması.....   | 21 |
| Şekil 2.13. Ark fırınının oluşturduğu gerilim titreşimi .....   | 22 |
| Şekil 2.14. Güç frekans değişimi .....  | 23 |
| <br>  |    |
| Şekil 3.1. İki faz toprak arızasının neden olduğu düşme. ....   | 25 |
| Şekil 3.2. Bir indüksiyon motorunun devreye alınmasıyla oluşan gerilim düşümü. .  | 25 |
| Şekil 3.3. Şekil 3.1’de görülen gerilim düşümüne ait örnekleme uzunluğunun bir periyot olduğu durum için efektif gerilim eğrisi. ....                               | 27 |
| Şekil 3.4. Şekil 3.1’de görülen gerilim düşümüne ait örnekleme uzunluğunun yarım periyot olduğu durum için efektif gerilim eğrisi. ....                             | 27 |
| Şekil 3.5. Şekil 3.1’deki gerilim düşümüne ait örnekleme uzunluğunun yarım periyot olduğu durumda tepe gerilim ile efektif gerilim değerinin karşılaştırılması..... | 28 |
| Şekil 3.6. Örnek bir iletim ve dağıtım şebekesi. ....   | 30 |
| Şekil 3.7. Gerilim düşümü için gerilim bölücü modeli.....   | 31 |

|  |    |
|--|----|
| Şekil 3.8. Uzaklığa bağlı olarak farklı arıza seviyelerinde 380kV'luk havai hat için düşme sonrası gerilim genliği. .... | 32 |
| Şekil 3.9. (a)154 kV'da havai hat kablolarında kesite göre gerilim düşme eğrileri... 33                                  | 33 |
| Şekil 3.10. 380kV ve 154kV gerilim seviyelerindeki bir güç sistemi. ....   | 34 |
| Şekil 3.11. 380 ve 154 kV gerilim seviyelerindeki arıza durumundaki düşme sonrası gerilim genliği. ....                  | 35 |
| Şekil 3.12. Gerilim düşümlerinde kullanılacak örnek sistem. ....   | 36 |
| Şekil 3.13. 34.5 kV'da arıza olduğunda oluşan gerilim düşmesi.....   | 37 |
| Şekil 3.14. 154 kV'da arıza olması durumunda oluşan gerilim düşmesi.....   | 38 |
| Şekil 3.15. 380 kV'da oluşan arızanın neden olduğu gerilim düşmesi.....  | 38 |
| Şekil 3.16. Yerel generatörün dağıtım şebekesine bağlantısı. ....  | 39 |
| Şekil 3.17. Yerel generatörlü sisteme ait eşdeğer devre. ....  | 40 |
| Şekil 3.18. Endüstriyel dağıtım sistemi. ....  | 41 |
| Şekil 3.19. Uzaklığa bağlı olarak generatörlü ve generatörsüz durumda düşme sonrası gerilim genliği.....                 | 42 |
| Şekil 3.20. Alt iletim çevrim örneği.....  | 42 |
| Şekil 3.21. Kapalı ring çevrimi için eşdeğer devre. ....   | 43 |
| Şekil 3.22. 154 kV'luk çevrim sistemi.....   | 43 |
| Şekil 3.23. 154 kV'luk çevrimde arızalar için düşme sonrası gerilim genlikleri.....                                      | 44 |
| Şekil 3.24. İletim ve alt iletim sistemlerinin paralel çalışması. ....   | 45 |
| Şekil 3.25. Şekil 3.24 için eşdeğer devre. ....  | 45 |
| Şekil 3.26. Farklı durumlar için düşmelerin Genlik-Zaman eğrisi. ....  | 49 |
| Şekil 3.27. Dağıtım ve iletim şebekeleriyle güç sisteminin genel durumu. ....  | 49 |
| <br>   |    |
| Şekil 4.1. Gerilim bölücü modeli için pozitif (üst), negatif (orta) ve sıfır (alt) dizi bileşenleri. ....                | 51 |
| Şekil 4.2. Tek faz arızası için eşdeğer devre. ....  | 51 |
| Şekil 4.3. Bir faz arızası sırasında faz-toprak gerilimleri.....   | 53 |
| Şekil 4.4. 154 kV'luk besleyicide tek faz ve üç faz arızası durumları için arızalı fazdaki gerilim değeri. ....          | 56 |
| <br>   |    |
| Şekil 4.5. 34.5 kV'luk besleyicide tek faz arızası sırasında arızalı ve arızasız faz gerilimlerinin durumu. ....         | 57 |

|  |    |
|--|----|
| Şekil 4.6. Faz-faz arızası için eşdeğer devre. ....  | 58 |
| Şekil 4.7. Faz-faz arızasının neden olduğu $V_b$ ve $V_c$ fazlarına ait kompleks gerilimler.....   | 59 |
| Şekil 4.8. İki faz toprak arızası için eşdeğer devre. ....   | 61 |
| Şekil 4.9. İki faz toprak arızası sırasında arızalı fazda gerilim düşümleri. ....  | 62 |
| Şekil 4.10. İki faz toprak arızası için üç fazlı gerilim bölücü modeli. ....   | 63 |
| Şekil 4.11. İki faz toprak arızası için arızalı fazda faz-nötr gerilimleri. ....   | 63 |
| Şekil 4.12. Bir faz toprak arızası sırasında (düz çizgiler) ve sonrasında (noktalı kesikli çizgi) faz-nötr gerilimleri. ....   | 65 |
| Şekil 4.13. Bir faz toprak arızası sırasında (düz çizgiler) ve sonrasında (noktalı kesikli çizgi) faz-faz gerilimleri. ....  | 66 |
| Şekil 4.14. (a) Faz-faz arızası sırasında (düz çizgi) ve sonrasında (kesikli çizgi) faz-nötr gerilimleri. (b) Faz-faz arızası sırasında (düz çizgi) ve sonrasında (kesikli çizgi) faz-faz gerilimleri..... | 67 |
| Şekil 4.15. Kısa süreli gerilim düşümünün dört tipinin fazör formu. ....   | 73 |
| Şekil 4.16. İki faz-toprak arızalarının neden olduğu üç faz dengesizliği.....  | 75 |
| Şekil 4.17. İki faz toprak arızalarının neden olduğu üç faz dengesizliğinin faz-faz arızalarının ve tek faz toprak arızalarının neden olduğu üç faz dengesizlikleriyle karşılaştırılması. ....             | 76 |
| Şekil 4.18. +45°'lik faz aç atlamalı %30'luk gerilim düşmesi. ....   | 77 |
| Şekil 4.19. -45°'lik faz aç atlamalı %30'luk gerilim düşmesi. ....   | 77 |
| Şekil 4.20. Şekil 3.1 için düşme sonrası zamana bağlı temel gerilim genliği.....   | 79 |
| Şekil 4.21. Şekil 3.1 için zamana bağlı temel gerilimin faz aç atlaması.....   | 79 |
| Şekil 4.22. 477 ve 795 MCM kesitli yeraltı kabloları için uzaklığa bağlı faz aç atlaması. ....   | 81 |
| Şekil 4.23. 477 ve 795 MCM kesitli yeraltı kabloları için düşme sonrası gerilim genliği-faz aç atlaması grafiği.....   | 82 |
| Şekil 4.24. Düşme sonrası gerilm genliği ve faz aç atlamasının hesaplanabilmesi için fazör diyagramı. ....   | 83 |
| Şekil 4.25. Tek faz arızalarının neden olduğu gerilim düşmelerinin dönüştürümü, -60° ve -40° olan empedans açıları için karakteristik genlik ifadesinin yaklaşık hatası. ..                                | 88 |

|   |     |
|---|-----|
| Şekil 4.26. Tek faz arızalarının neden olduğu gerilim düşümlerinin dönüşümü, $-60^\circ$ ve $-40^\circ$ olan empedans açıları için karakteristik faz açısı atlaması ifadesinin yaklaşık hatası. ....  | 89  |
| Şekil 4.27. Tek faz arızalarının neden olduğu gerilim düşmesi için genlik ve faz açısı atlaması arasındaki ilişki. Düz çizgi karakteristik değerler, noktalı çizgi ise başlangıç değerleri için.....  | 89  |
| Şekil 4.28. C tipi gerilim düşmesi için fazör diyagramı. ....   | 91  |
| Şekil 4.29. Faz-faz arızalarının neden olduğu C tipi gerilim düşmesi için empedans açısının $-60^\circ$ olduğu durumda uzaklığa bağlı düşme sonrası gerilim genliği (Düz çizgi b fazına, noktalı çizgi ise c fazına aittir).. ....              | 92  |
| Şekil 4.30. Faz-faz arızalarının neden olduğu C tipi gerilim düşmesi için empedans açısının $-60^\circ$ olduğu durumda uzaklığa bağlı faz açısı atlaması (Düz çizgi b fazına, noktalı çizgi ise c fazına aittir).....                           | 93  |
| Şekil 4.31. Faz-faz arızalarının neden olduğu C tipi gerilim düşmesi için empedans açısının $-60^\circ$ olduğu durumda düşme sonrası gerilim genliği ve faz açısı atlaması grafiği (Düz çizgi b fazına, noktalı çizgi ise c fazına aittir)..... | 94  |
| Şekil 4.32. D tipi gerilim düşmesi için fazör diyagramı. ....   | 95  |
| Şekil 4.33. Faz-faz arızasının neden olduğu D tipi düşme için empedans açısının $-60^\circ$ olduğu durumda uzaklığa bağlı düşme sonrası gerilim genliği (Düz çizgi b fazına, noktalı çizgi c fazına aittir). ....                               | 96  |
| Şekil 4.34. Faz-faz arızasının neden olduğu D tipi düşme için empedans açısının $-60^\circ$ olduğu durumda uzaklığa bağlı faz açısı atlaması (Düz çizgi b fazına, noktalı çizgi c fazına aittir). ....  | 96  |
| Şekil 4.35. Faz-faz arızasının neden olduğu D tipi düşme için empedans açısının $-60^\circ$ olduğu durumda düşme sonrası gerilim genliği-faz açısı atlaması grafiği (Düz çizgi b fazına, noktalı çizgi c fazına aittir).....                    | 97  |
| Şekil 4.36. F tipi üç fazlı dengesiz düşmenin fazör diyagramı. ....   | 98  |
| Şekil 4.37. F tipi gerilim düşmesine ait empedans değerinin $-60^\circ$ olduğu durumda düşme sonrası gerilim genlik ve faz açısı atlaması (Düz çizgi b fazına, noktalı kesikli çizgi c fazına aittir).....                                      | 100 |
| Şekil 4.38. G tipi üç fazlı dengesiz düşme için fazör diyagramı.....  | 101 |

Şekil 4.39. G tipi gerilim düşmesine ait empedans değerinin  $-60^\circ$  olduğu durumda düşme sonrası gerilim genlik ve faz açısı atlaması (Düz çizgi a fazına, kesikli çizgi b fazına, noktalı kesikli çizgi c fazına aittir). ..... 102

Şekil 5.1. İndüksiyon motor yüklü bir sistemde üç faz toprak arızası sırasında motor uçlarındaki gerilim. .... 105

Şekil 5.2. Şekil 5.1'deki indüksiyon motorunun kayma grafiği. .... 105

Şekil 5.3. İndüksiyon motor davranışını incelemek için alınan test sistemi. .... 107

Şekil 5.4. Tek faz toprak arızası sırasında motor uçlarında her bir faza ait gerilimler. .... 109

Şekil 5.5. Tek faz toprak arızası sırasında motor uçlarında her bir faza ait akımlar. 110

Şekil 5.6. Şekil 5.5'de görülen gerilimlerin simetrik bileşenleri. .... 111

Şekil 5.7. Şekil 5.6'da görülen akımların simetrik bileşenleri. .... 111

Şekil 5.8. İndüksiyon motorunun devreye alınmasıyla oluşan gerilim düşmesinin eşdeğer devresi. .... 114

Şekil 5.9. İndüksiyon motorunun devreye alınmasıyla oluşan gerilim düşmesi. .... 116

Şekil 5.10. Şekil 5.7'deki sistem için kaynak gücü yarıya düşürüldüğünde motorun devreye alınmasıyla oluşan gerilim düşmesi. .... 116

Şekil 6.1. Çayırhan barasında oluşan (a) tek faz toprak ve (b) iki faz arızalarının Anabara barasındaki etkisi. .... 120

Şekil 6.2. Anabara barasından enerji analizörüyle alınan ölçüm sonucu. .... 120

Şekil 6.3. Şekil 6.2'deki 1 noktasının büyütülmüş hali. .... 120

Şekil 6.4. Anabara barasından enerji analizörüyle alınan ölçüm sonucu. .... 121

Şekil 6.5. Şekil 6.4'deki 2 noktasının büyütülmüş hali. .... 121

Şekil 6.6. Adapazarı2 barasında oluşan (a) tek faz toprak ve (b) iki faz arızalarının Anabara barasındaki etkisi. .... 122

Şekil 6.7. Yalova barasında oluşan (a) tek faz toprak ve (b) iki faz arızalarının Anabara barasındaki etkisi. .... 123

Şekil 6.8. Anabara barasından enerji analizörüyle alınan ölçüm sonucu. .... 123

Şekil 6.9. Köseköy barasında oluşan (a) tek faz toprak ve (b) iki faz arızalarının Anabara barasındaki etkisi. .... 124



|  |     |
|--|-----|
| Şekil 6.10. Kullar barasında oluşan (a) tek faz toprak ve (b) iki faz arızalarının Anabara barasındaki etkisi. ....                                  | 125 |
| Şekil 6.11. Enerji analizörüyle alınan ölçüm sonucu. ....  | 125 |
| Şekil 6.12. Anabara barasında oluşan (a) tek faz toprak ve (b) iki faz arızalarının Anabara barasındaki etkisi. ....                                 | 126 |
| Şekil 6.13. Anabara barasında olduğu düşünülen tek faz toprak arızasının bu baradaki etkisini gösteren ölçüm sonucu. ....                            | 127 |
| Şekil 6.14. Besleme barasında oluşan (a) tek faz toprak ve (b) iki faz arızalarının Anabara barasındaki etkisi. ....                                 | 127 |
| Şekil 6.15. MIT1 barasında oluşan (a) tek faz toprak ve (b) iki faz arızalarının Anabara barasındaki etkisi. ....                                    | 128 |
| Şekil 6.16. (a) Çayırhan barasında oluşan iki faz toprak, (b) Adapazarı2 barasında oluşan iki faz toprak arızasının Anabara barasındaki etkisi. .... | 129 |
| Şekil 6.18. (a) 500 m. ve (b) 1 km. uzaklıkta oluşan üç faz toprak arızasının Anabara barasına etkisi. ....  | 130 |
| Şekil 6.19. (a) 5 km. ve (b) 10 km. uzaklıkta oluşan üç faz toprak arızasının Anabara barasına etkisi. ....  | 131 |
| Şekil 6.20. Anabara barasından uzak bir noktada olduğu düşünülen üç faz toprak arızasının tesise etkisini gösteren ölçüm sonucu. ....                | 132 |
| Şekil 6.21. Anabara barasından uzak bir noktada olduğu düşünülen üç faz toprak arızasının tesise etkisini gösteren ölçüm sonucu. ....                | 132 |

## TABLULAR DİZİNİ

|   |    |
|---|----|
| Tablo 2.1. IEC standardında güç sistemi karakteristikleri.....                  | 10 |
| Tablo 3.1. 154kV'da hat ve kablo kesit değerleri.....                           | 32 |
| Tablo 3.2. 100MVA'lık baz gücünde Şekil 3.12 için kaynak empedans değerleri.... | 36 |
| Tablo 3.3. Şekil 3.12'de kullanılan iletken empedans değerleri.....             | 37 |
| Tablo 4.1. Gerilim düşümlerinde ikinci transformatör etkisi.....                | 71 |
| Tablo 4.2. Kısa süreli gerilim düşümünün dört tipi. ....                        | 73 |
| Tablo 4.3. Arıza tipi, düşme tipi ve yük bağlantı şekli. ....                   | 73 |
| Tablo 4.4. Düşme tipinin alçak gerilim seviyelerine dönüşümü.....               | 74 |
| Tablo 4.5. İki faz toprak arızalarının neden olduğu gerilim düşmeleri.....      | 76 |

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Elektrik güç sisteminin amacı, elektrik enerjisini üretim birimlerinden son kullanıcıya kadar güvenli ve kaliteli bir şekilde ulaştırmaktır. Kullanıcıya ulaşan enerjinin kaliteli yani gerilimin genlik ve frekansının izin verilen aralıkta olması önem taşımaktadır. 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 enerji sistemlerinde önemi daha iyi anlaşılmıştır.

Özellikle elektronik, kağıt, lastik sanayi gibi, cihazların bir saniye dahi devre dışı kalmasıyla milyarlarca liralık zarara uğrayarak sektörde rekabet şanslarının azalmasından dolayı, güç kalitesi konusunda çalışmalarını yoğunlaştırmıştır.

1993 yılında, Jeff Lamoree, Dave Mueller, Paul Vinett ve William Jones tarafından yapılan çalışmada gerilim düşümü tanımlanarak, tüketiciye ait gerilim düşümü karakterize edilmiş ve farklı gerilim düşme genliği ve zamanları için cihaz hassasiyeti değerlendirilmiştir. Arıza uzaklığının düşme genliğine etkisi de ele alınarak dc sürücü, programlanabilir lojik kontrolör, robot veya kesme, sıkma gibi işlemlerde kullanılan cihazların gerilim düşmelerine karşı önemli boyutta duyarlı olduğu ve düşmeden dolayı devre dışı kalabilecekleri değerlendirilmiştir [1].

1994 yılında, Hector G. Sarmiento ve Eduardo Estrada tarafından gerçekleştirilen çalışmada gerilim düşmesi ve nedenleri ele alınarak, devre dışı kalmaları sistemde önemli ekonomik kayıplara neden olan ayarlanabilir hız sürücülerinin(ASD) gerilim düşmelerinden nasıl etkilendiği iki ayrı tesisten 17 aylık bir süre zarfında alınan ölçümlerle değerlendirilmiştir [2].

Yine 1994 senesinde, Math H. J. Bollen'in çalışmasında örnek bir sistem ele alınarak farklı arıza noktaları için gerilim düşme şekilleri incelenerek bir tablo oluşturulmuştur. Motorların sistemde oluşacak arıza durumlarındaki davranışları detaylı olarak incelenmiştir [3].

1999 senesinde Math H. J. Bollen ve Lidong Zhang'ın kaydedilen gerilim dalga şekillerinden üç fazlı dengesiz düşmelerin karakterize edilmesi için önerdiği yöntem iyi geliştirilmiş simetrik bileşenler teoremine dayanmaktadır. Gerilim düşmesini karakterize ederken faz açısı atlaması, PN-faktörü ve arıza sonrası gerilim değerinin de hesaba katılması gerekliliği ele alınmaktadır [4].

1999'da, Muhammed R. Qader, Math H. J. Bollen ve Ron N. Allan tarafından gerçekleştirilen çalışmada 400 kV'luk 97 baralı bir sisteme uygulanan iki stokastik tahmin yöntemi incelenmiştir. Bu yöntemler, arıza noktaları ve kritik mesafe yöntemleri, tanımlanarak her iki yöntem iletim sistemine uygulanmıştır. Bu yöntemler şebekeden ayrılan sekiz farklı alt iletim seviyesi için karşılaştırılmıştır [5].

Yine 1999 senesinde, R. Wilkins ve H. C. Cline yaptıkları çalışmada gerilim düşmesinin etkilerini azaltmanın en ekonomik yolu olan akım sınırlayıcı sigortalar incelenmiştir. Bu sigortalar gerilim düşmelerinin zamanını sınırlayarak etkisini azaltmaktadırlar [6].

2000 yılında, Ambra Sannino ve Math H. J. Bollen tarafından gerçekleştirilen çalışmada hassas yükler için gerilim düşmeleri ve kesintilerin etkilerini azaltarak güç sistem performansını geliştirecek farklı çözümler tanımlanmaktadır. Arıza giderilme zamanının azaltılması bunlardan biridir [7].

2002'de Lauri Kumpulainen, Jukka Hautola ve Kimma Kauhaniemi'nin yaptıkları çalışmada bir endüstriyel alanın yerel orta gerilim şebekesinde oluşan kısa devrelerin neden olduğu gerilim düşmeleri incelenmiştir. Amaç modern koruma teknolojisiyle düşme geriliminin negatif bileşeninin elimine edilip edilemeyeceğinin anlaşılmasıdır. Çalışmada PSCAD/EMTDC simülasyon programında Rautaruukki Çelik

Fabrikası'nın dağıtım şebekesi modellenerek gerilim düşmelerinde cihaz davranışları incelenmiştir [8].

2003'de Pirjo Heine ve Matti Lehtonen farklı gerilim seviyelerinde arızaların neden olduğu gerilim düşmelerini incelemiştir. Her bir gerilim seviyesinde farklı arıza tipleri ve güç sisteminde düşme dağılımı da hesaba katılmıştır. Sonuçlar, kentlerde ve kırsal alanlarda gerilim düşmelerinin farklı olduğunu göstermiştir. Bu veriler, güç sisteminin farklı bölgelerinde düşmelerin önüne geçmek için yapılan ölçüm planlamasında kullanılabilir [9].

2003 yılında, Brij N. Singh, Marin Simina ve Ambrish Chandra tarafından yapılan çalışmada gerilimdeki artma ve düşme problemleri için destekleyici ac-dc dönüştürücüler önermektedir [10].

2004'de, Luis Guasch, Felipe Corcoles ve Joaquin Pedra'nın gerçekleştirdiği çalışmada gerilim düşmelerinin indüksiyon motorunun akım, torque ve hız bileşenleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu etkiler düşmenin genliğine, zamanına ve gerilim dalga şekli üzerinde düşmenin başladığı noktaya bağlı olduğu sonucuna varılmıştır [11]

Mark McGranaghan ve Dave Mueller'in çalışmasında proses endüstrisinde gerilim düşmelerinin nedenleri ve cihaz çalışmasındaki etkileri incelenerek gerilim düşmesinin olası çözümleri ele alınmıştır [12].

Detaylı literatür çalışmasından sonra Türkiye iletim sistemi verileri kullanılarak uzun dönem ölçümü alınan gerilim değişimlerine oldukça duyarlı bir endüstriyel tesis için gerilim düşme ve artmaları değerlendirilmiş ve sonuçlar sunulmuştur. Bu amaçla ikinci bölümde temel güç kalitesi kavramları tanımlanmıştır.

Üçüncü bölümde güç sisteminde oluşabilecek dengeli gerilim düşmeleri detaylı olarak tanımlanarak hesaplama yöntemleri verilmiştir. Gerilim düşmelerinin değerleri TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim A.Ş.) verileri kullanılarak analiz edilmiş ve simülasyonlarla desteklenmiştir.

Güç sistemlerinde oluşan tüm arızalar dengeli arızalar değildir. Bu nedenle dördüncü bölümde güç sistemlerinde oluşan dengesiz arızaların meydana getirdiği gerilim düşmeleri incelenmiştir.

Beşinci bölümde ise gerilim düşmelerinin indüksiyon motoru üzerine olan etkisi incelenmiştir. Gerçek sistem verileri kullanılan test sistemi üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir.

Altıncı bölüm'de İzmit bölgesinde yer alan kağıt fabrikalarından biri olan Kartonsan A.Ş.'nin giriş beslemesinden alınan üç yıllık ölçüm sonuçlarına bağlı olarak ABB firması tarafından geliştirilen SIMPOW simülasyon programında analiz edilmiştir. Çalışmada Kartonsan A.Ş.'nin enterkonnekte şebekeye bağlandığı barada ve daha yüksek gerilim seviyelerinde arıza durumları oluşturularak etkileri incelenmiştir.

Sonuç bölümünde ise gerilim düşmesinin önemi tekrar vurgulanarak tüketicilerde neden olduğu ekonomik zarardan bahsedilmiştir.

Ülkemizde bu tür bir çalışma gerçek sistem verileri üzerinde gerçekleştirilmemiştir. Alınan gerçek ölçümlerle analiz sonuçlarının büyük çoğunlukla birbirine çok yakın olduğu gözlenmiştir.

## **BÖLÜM 2. GÜÇ KALİTESİ**

### **2.1. Giriş**

Hem işletmeler hem de tüketiciler için elektrik enerjisinin kalitesi konusu gün geçtikçe artan bir sorun haline gelmiştir. 1980'lerin sonundan beri güç kalitesi ifadesi endüstride en çok bahsedilen terimlerden biridir. Bu güç sisteminde oluşabilecek bir çok sorunu içerir. Yeni ortaya çıkmamakla beraber bu sorunlar yeni yeni sistem yaklaşımı şeklinde değerlendirilmeye çalışılmaktadır. Bu konuya olan ilginin artmasının nedenleri aşağıda belirtilmiştir.

- Mikroişlemci tabanlı kontrol ve güç elektroniği cihazlarının gerilim değişimlerine geçmişte kullanılan cihazlara oranla daha hassas olması.
- Tüm sistemin verimini artırma çalışmaları sonucu kullanımı artan güç faktörünü düzelterek kayıpları azaltan şönt kapasitörler, ayarlanabilir hız motor sürücüler gibi cihazların sistemdeki harmonik seviyeyi artırması.
- Tüketicilerin bu konudan haberdar edilerek dağıtım kalitesinin geliştirilmesinin amaçlanması.
- Sistemin enterkonnekte olması nedeniyle her hangi bir noktada oluşan arızanın öneminin artması.

### **2.2. Güç Kalitesi**

Güç kalitesi kullanıcıyı etkiler ve son kullanıcı referansı öncelik taşır. Bu nedenle tanım olarak güç kalitesi 'Gerilim akım ya da frekans ayarıyla ilgili her hangi bir güç problemi sonucunda kullanıcıya ait cihazların zarar görüp işlemez hale gelmesi'

şeklinde ifade edilebilir. Güç kalitesi problemlerinin nedenleri ile ilgili anlaşılamayan pek çok nokta vardır. Üreticiye nazaran tüketici, güç kalitesi problemlerinin doğal nedenlerle(yıldırım çarpması v.s.) meydana geldiği düşünmektedir [13].

Cihazların bazılarında sorun olması durumunda bundan etkilenen son kullanıcı üretimde meydana gelen geçici bir gerilim artışından dolayı problemin oluştuğunu düşünür ve şikayette bulunur. Buna karşılık üretim raporları kullanıcıya her hangi anormal bir etkinin oluşmadığını ortaya koymuştur. Son zamanlarda yapılan bir arıza araştırması, son kullanıcıya ait bir cihazın 9 ayda 30 kez devreden çıktığını, buna karşılık iletim hattındaki kesicinin 5 kez açma verdiğini göstermiştir [13]. Bu durumda son kullanıcıyı etkileyen bir arızanın pek çok farklı nedeni olabilir ve bunlar üretici tarafından kayıt altına alınamayabilir. Örneğin; kapasitelerin devreye alınıp devreden çıkarılması enerji üretim sistemi için normal bir durum olmasına rağmen kullanıcı tarafında geçici aşırı gerilimlere neden olabilir. Yine aynı şekilde sistemin her hangi bir yerinde oluşan anlık bir arıza kullanıcıda gerilim bozulmalarına neden olabilir. Bu durumda besleyicilere bağlı bir güç kalitesi izleme ve raporlama cihazı yoksa sistem uyarılamaz.

Elektronik cihazlar tekrarlanan geçici gerilimlerin etkilerini azaltabilir ve sistemin daha düşük şiddette bir etkiye maruz kalmasını sağlayabilir. Sistem tasarımcıları için mikroişlemci tabanlı kontrol sistemleri kullanmak daha yaygın bir hal almıştır. Bu kontrol sistemleri her yeni tip arızaya göre kendilerini güncelleyebilirler. Varolan programlar elektrik güç kalitesinin korunmasındaki sorumluluğa yardımcı olur ve tüketici endişelerini azaltırlar. Bu programın temel düşüncesi elektrik üreticisinin tüketici şikayetlerini yanıtlayabilme, tüketiciyi eğitebilme ve bu sayede güç kalitesi problemlerinin çözümünde kolaylık sağlamaktır.

Güç kalitesi problemi ekonomik açıdan da analiz edilmelidir. Problemlerin elimine edilmesi, besleme tarafında her zaman ekonomik olmayabilir. Kaliteli güç için kabul edilen tek bir tanımlama yoktur. Gerilim ve ölçülen diğer teknik kriterler için standartlar bulunmaktadır, ancak genel ifadeyle, son kullanıcının performansı ve üretim verimliliği güç kalitesi olarak tanımlanabilir.



Güç kaynağı sadece sistemdeki gerilimi kontrol edebilir, yükler göre çekilen akımı kontrol edemez. Güç kalitesi standartları kaynak gerilimini istenilen değerde sabit tutmayı amaçlar. IEEE 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.

- Kısa devrenin neden olduğu akım gerilimin düşmesine ya da tamamen kesilmesine neden olur.
- Güç sisteminde akan darbe akımları yüksek gerilimlere sebep olur ve bu kısa devreye dönüşebilir.
- Harmonik üreten yüklerin oluşturduğu bozuk akımlar gerilimi etkiler.

### **2.3. Güç Kalitesinin Değerlendirilmesi**

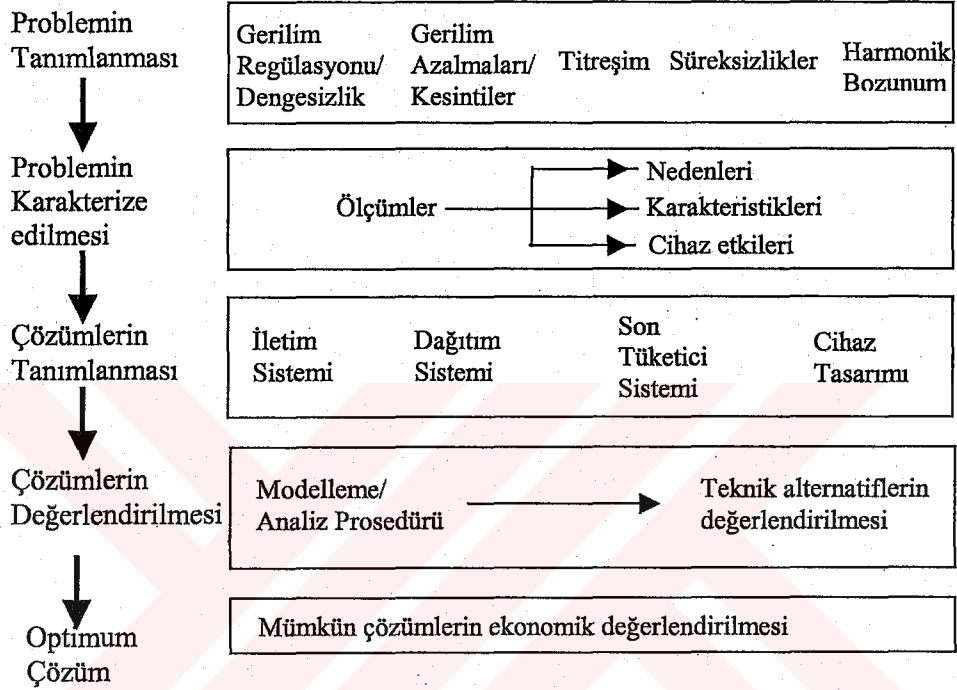
Her bir güç kalitesi problemi farklı nedenlere ve cihaz performansını geliştirebilecek farklı çözümlere sahiptir. Şekil 2.1 güç kalitesinin değerlendirilmesine ait genel adımları vermektedir [13].

Ölçümler her bir güç kalitesi sorununda önemli role sahiptir. Çözümler değerlendirilirken hem ekonomik hem de teknik limitler belirlenmelidir. Mümkün çözümler sistemin her seviyesinde şebeke kaynağından son kullanıcıya kadar değerlendirilmelidir.

## 2.4. Güç Kalitesini Bozucu Etkenler

Elektrik güç sistemlerinde güç kalitesini bozucu etkiler bulunmaktadır. Bunlar aşağıda ayrıntılı olarak incelenmiştir [14].

### GÜÇ KALİTESİ PROBLEMİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ



Şekil 2.1. Güç kalitesi değerlendirilmesi.

### 2.4.1. Süreksizlikler

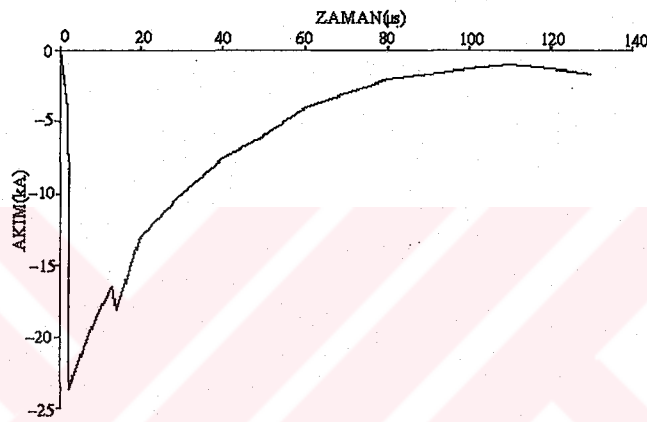
Süreksizlik ifadesi bir güç sisteminin analizinde istenmeyen ve anlık bir olayı belirtmek için kullanılmıştır. Bu tanımlama güç sisteminde normal olmayan herhangi bir durum için de kullanılabilir. Genel olarak süreksizlikler darbe ve salınım olmak üzere iki şekilde incelenir.

#### 2.4.1.1. Darbe süreksizliği

Kararlı halde gerilim ya da akımdaki ani değişim olarak tanımlanır, pozitif ya da negatif polariteli olabilir. Darbe süreksizliği, artma-azalma zamanları ve temel frekans değeri ile karakterize edilir. Örnek olarak  $1.2 \times 50\text{-}\mu\text{s}$  2000V darbe

süreksizliği sıfırdan tepe değeri olan 2000V'a 1.2 $\mu$ s'de yükselir, daha sonrada 50 $\mu$ s'de tepe değerinin yarısına düşer. Darbe süreksizliklerinin en genel nedeni yıldırımdır. Şekil 2.2'de yıldırımın neden olduğu tipik bir akım darbe örneği görülmektedir.

Yüksek frekanslı güç sistemlerinde farklı karakteristiklere sahiptirler ve devre elemanlarına bağlı olarak şekilleri değişir. Darbe süreksizlikleri güç sistemi devrelerini temel frekansta etkileyerek salınım süreksizliklerine neden olurlar.



Şekil 2.2. Yıldırım darbe akımı.

#### 2.4.1.2. Salınım süreksizliği

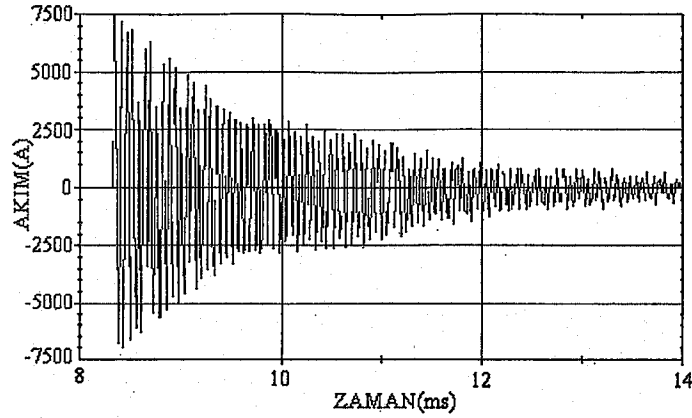
Salınım süreksizliği akım ya da gerilimin kararlı durumda ani değişimi şeklinde tanımlanır, pozitif ve negatif polariteli olabilir. Polariteyle hızla değişen anlık değerler içerir. Zaman, büyüklük ve temel frekansla karakterize edilir.

Frekans değeri 500kHz'den yüksek ve zamanı mikro saniye olarak ifade edilen salınım süreksizlikleri yüksek frekanslıdır. Bunlar lokal sistemdeki darbe süreksizlikleri sonucu oluşur. Frekans değeri 5kHz ile 500kHz arasında ve zamanı mikro saniyenin 10 katları şeklinde olanlar orta frekanslı salınım süreksizlikleridir. Yük çeşidine bağlı olarak oluşan gerilim atlamaları sistemin bazı noktalarında yalıtımı bozar. Tablo 2.1'de frekansa göre salınım süreksizliklerinin sınıflandırılması görülmektedir. Şekil 2.3'de ard arda enerjilendirilen kondansatör gruplarının neden olduğu orta frekanslı salınım süreksizlik akımları görülmektedir [14].

Tablo 2.1. IEC standardında güç sistemi karakteristikleri.

| Kategoriler             | İsim                                  | Zaman           | Gerilim değeri |
|-------------------------|---------------------------------------|-----------------|----------------|
| Kısa süreli değişimler  | Ani;<br>Kesinti                       | 0.5-30 cycles   | <0.1 pu.       |
|                         | Düşme                                 | 0.5-30 cycles   | 0.1 – 0.9 pu.  |
|                         | Artış                                 | 0.5-30 cycles   | 1.1 – 1.8 pu.  |
| Uzun süreli değişimler  | Anlık;<br>Kesinti                     | 0.5-3 sn.       | <0.1 pu        |
|                         | Düşme                                 | 30 cycles-3 sn. | 0.1 – 0.9 pu.  |
|                         | Artış                                 | 30 cycles-3 sn. | 1.1 – 1.4 pu.  |
| Süreksizlikler          | Geçici;<br>Kesinti                    | 3 sn.-1 dak.    | <0.1 pu.       |
|                         | Düşme                                 | 3 sn.-1 dak.    | 0.1 - 0.9 pu.  |
|                         | Artış                                 | 3 sn -1 dak.    | 1.1 - 1.4 pu.  |
| Süreksizlikler          | Sürekli kesinti                       | >1 dak.         | 0.0 pu.        |
|                         | Düşük gerilim                         | >1 dak.         | 0.8 - 0.9 pu.  |
|                         | Aşırı gerilim                         | >1 dak.         | 1.1 - 1.2 pu.  |
| Süreksizlikler          | Darbe süreksizliği<br>nanosaniye      | <50 ns          |                |
|                         | mikrosaniye                           | 50ns - 1ms      |                |
|                         | milisaniye                            | >1 ms           |                |
| Süreksizlikler          | Salınım süreksizliği<br>düşük frekans | 0.2 - 50 ms     | 0 - 4 pu.      |
|                         | orta frekans                          | 20 $\mu$ s      | 0 - 8 pu.      |
|                         | yüksek frekans                        | 5 $\mu$ s       | 0 - 4 pu.      |
| Gerilim dengesizliği    | NA                                    | Kararlı hal     | 0.5 - 2 %      |
| Dalga şekli bozulmaları | DC offset                             | Kararlı hal     | 0.5 - 2 %      |
|                         | Harmonikler                           | Kararlı hal     | 0 - 20 %       |
|                         | İnterharmonikler                      | Kararlı hal     | 0 - 2 %        |
|                         | Kıprışma                              | Kararlı hal     | 0 - 1 %        |
| Gerilim dalgalanmaları  | Gürültü                               | Kararlı hal     | 0.1 - 7 %      |
|                         | NA                                    |                 |                |
| Güç frekans değişimleri | NA                                    | < 10 sn         | NA             |

Bilindiği gibi kondansatör anahtarlama güç faktörünün düzeltilmesi amacıyla yapılmaktadır. Bir çok ağır endüstri yükleri, indüksiyon motorları, fırınlar vb., küçük güç faktöründe çalışırlar. Ağır endüktif yükler hatlarda kayıpların artmasına neden olur.



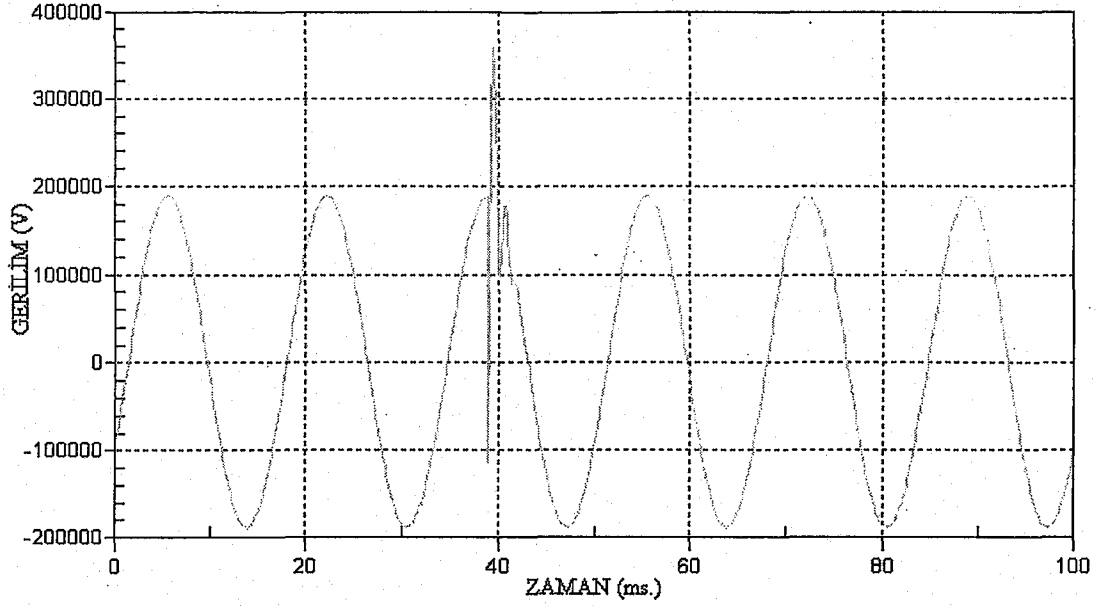
Şekil 2.3. Ard arda kondansatör gruplarının enerjilendirilmesi sonucu oluşan salınım süreksizlik akımı.

Sistemde kondansatör bankının varlığı enerjinin korunmasını ve sistem güvenliğini sağlar. Kondansatörler yük değişimlerini dinamik olarak kontrol edebildiklerinde güç kaybındaki artış engellenerek daha kaliteli gerilim elde edilebilir. Genelde bir güç dağıtım sisteminde kondansatörlerin kapasitesi toplam üretilen kapasitenin yaklaşık olarak %50'si kadardır. Süreksizlik karakteristiklerini etkileyen faktörler kaynağın gücü, iletim hatları, diğer iletim hatlarının kondansatör grupları ve anahtarlamalı cihazlardır. Ön ek dirençler ve kondansatörlerin sıralı devreye girmesi süreksizliği azaltan tekniklerden bazılarıdır.

Frekans değeri 5kHz'den az ve zamanı 0.3 ile 50ms arasında olanlar ise düşük frekanslı salınım süreksizlikleridir. Kondansatör bankının enerjilendirilmesi bu frekans değerinde salınımlara sebebiyet verir (Şekil 2.4).

Dağıtım sistemlerinde frekansı 300Hz'den az salınımlar da olabilir. Bunlar genelde ferromanyetik rezonans ve trafonun enerjilendirilmesiyle oluşur. Seri kapasitörlerin neden olduğu süreksizliklerde bu gruba girmektedir.

Süreksizlikleri modlarına göre de sınıflandırmak mümkündür. Temelde nötr noktası iletkenle ayrılmış üç fazlı bir sistem normal mod olarak isimlendirilir. Süreksizlikleri sınırlamak için dağıtım sistemlerinde statik anahtarlamalı kompanzasyon yapılabilir.



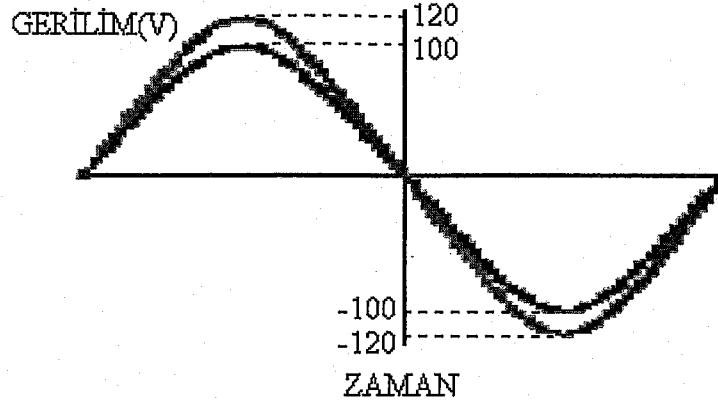
Şekil 2.4. Kondansatör bankının enerjilendirilmesinin neden olduğu düşük frekanslı salınım süreksizliği.

## 2.4.2. Uzun süreli gerilim değişimleri

Çalışma frekansında gerilimin efektif değerinde bir dakikadan uzun süreli sapma olarak tanımlanır. Uzun süreli değişimler aşırı gerilim ya da düşük gerilim olabilir. Aşırı veya düşük gerilim sistem arızalarından çok sistemdeki yük değişimleri ya da sistem anahtarlamaları sonucu oluşur [14].

### 2.4.2.1. Aşırı gerilim

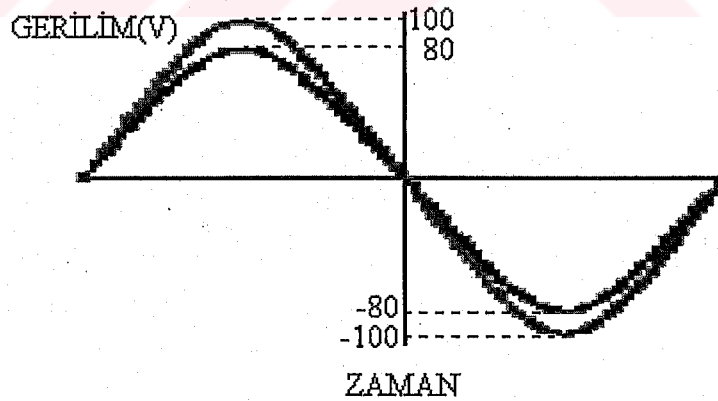
Gerilimin efektif değerinde, 1 dakikadan daha uzun süreli %110'dan daha büyük artış olarak tanımlanır. Büyük yüklerin devreden çıkması ya da kondansatör grubunun enerjilendirilmesi sonucu sistemdeki gerilim kontrolünün yetersiz olması durumunda meydana gelir. Trafolardaki yanlış kademe ayarları da aşırı gerilimlere neden olabilir. Şekil 2.5 aşırı gerilime bir örnektir.



Şekil 2.5. Aşırı gerilim.

#### 2.4.2.2. Düşük gerilim

Çalışma frekansında, gerilimin efektif değerinde bir dakikadan daha uzun süreli, %90'dan daha az azalma olarak tanımlanır. Büyük yüklerin devreye alınması, kondansatör grubunun devreden çıkarılması ya da aşırı yüklenme nedeniyle sistemdeki gerilim regülatörü gerilimi eski değerine getirene yani gerilim değerini iyileştirene kadar gerilimde düşme meydana gelir. Şekil 2.6'da düşük gerilime bir örnek görülmektedir.



Şekil 2.6. Düşük gerilim.

Problemin etkin çözümleri;

- Sisteme gerilim regülatörleri eklemek.
- Şönt kapasite veya statik anahtarlama kompanzasyon yapılarak hat akımını azaltmak.

- Sistem empedansını azaltmak için seri kondansatörler eklemek ya da hat iletkeninin kesitini arttırmak.

### **2.4.2.3. Sürekli kesintiler**

IEC Standardına göre kaynak gerilimi 1 dakikadan fazla sürede sıfıra düşerse uzun süreli gerilim değişimi sürekli kesinti olarak değerlendirilir. 1 dakikadan uzun süren gerilim değişimleri genelde kalıcıdır ve sistemin onarımı için insan müdahalesi gerektirir.

### **2.4.3. Kısa süreli gerilim değişimleri**

IEC'ye göre kısa süreli gerilim değişimleri gerilim artması, düşmesi ve kesintilerdir. Değişimin her bir tipi Tablo 2.1'de görüldüğü gibi zamana bağlı olarak ani, anlık ve geçici olarak tanımlanır.

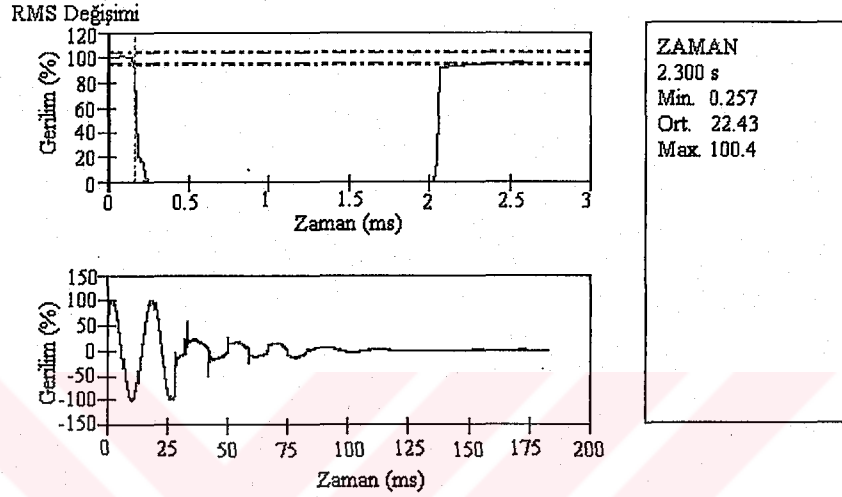
Arıza durumları, büyük yüklerin devreye alınması ya da sistemdeki gevşek bağlantılar sonucu oluşur. Sistemin durumuna ve arıza yerine göre, arıza sistemde geçici gerilim düşmelerine, yükselmelerine ya da kesintilere neden olabilir. Koruma cihazları arızayı giderene kadar arızanın gerilimde oluşturduğu etki kısa süreli değişim şeklindedir.

#### **2.4.3.1. Kesinti**

Bir dakikayı aşmayan sürede kaynak gerilimi ya da yük akımındaki 0.1pu.'den az olan düşmedir. Güç sistemindeki arızalar, kontrol hataları ve cihaz arızaları kesintilere neden olur. Gerilim büyüklüğü nominal değerinin %10'undan az olduğundan zamanla karakterize edilirler. Arızanın neden olduğu kesintinin süresini sistemdeki koruma cihazının devreye girme süresi belirler. Koruma cihazının tekrar kapanmasının gecikmesi geçici veya anlık kesinti oluşturur. Cihaz arızaları ya da gevşek bağlantıların neden olduğu kesintilerin süresi belirsizdir.



Sistemdeki kaynağın neden olduğu arızaların oluşturduğu kesintilerden önce gerilim çökmesi oluşur. Gerilim çökmesi arızanın başlangıcıyla koruma cihazının devreye girmesi arasındaki sürede gerçekleşir. Şekil 2.7 arızanın neden olduğu ani kesintiye göstermektedir. EN Standardında kesinti ifadesi yerine 'Kaynak Kesintisi' terimi kullanılmaktadır.



Şekil 2.7. Bir faz toprak arızasının neden olduğu gerilim kesintisi.

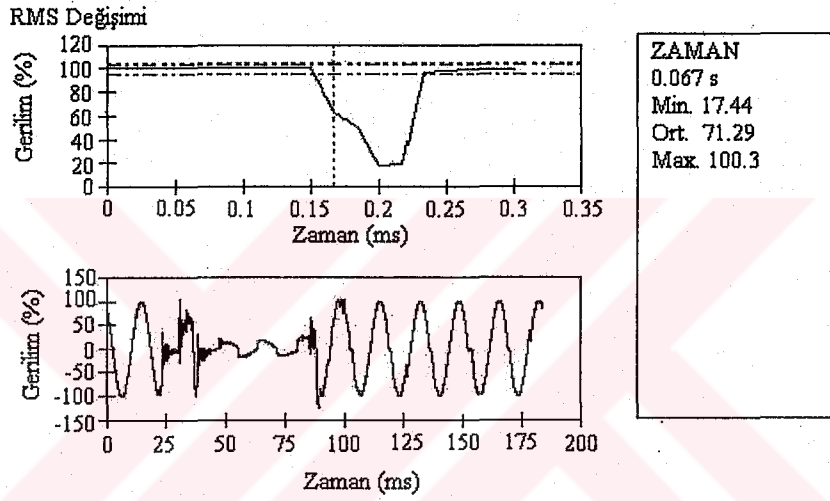
#### 2.4.3.2. Gerilim Düşmesi

Gerilim ya da akımın efektif değerinde, yarım periyot ile 1 dakika zaman aralıklarında, 0.1pu. ile 0.9pu. arasındaki düşme olarak tanımlanır. Gerilim düşümleri en önemli güç kalitesi problemlerinden biridir.

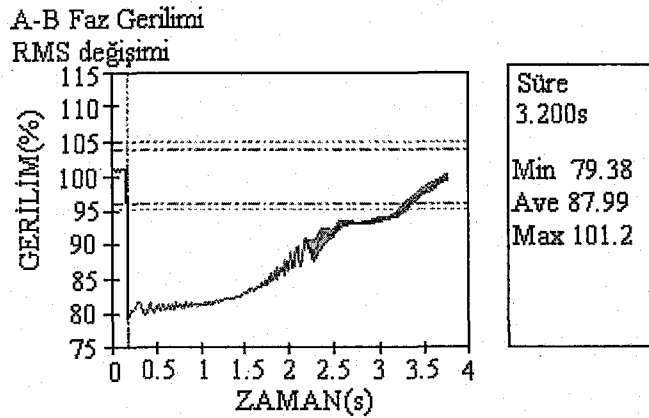
Dağıtım sistemindeki arızalar, sistem yüklerindeki ani artış, yıldırım darbesi ya da indüksiyon motoru gibi büyük yüklerin devreye alınması düşmelere neden olur. En genel sebebi yüksek gerilim iletim sistemlerindeki yıldırım darbesidir. Bunun oluşturduğu arıza ile gerilim değeri normal değerinin %50'si kadar azalır ve 4-7 periyot sürer. Bu gerilim seviyesinde bir çok yük devre dışı kalır. Gerilim düşümleri elektrik cihazlarının, özellikle motorların, ömrünü ve verimini azaltır, ayrıca sistemi de devre dışı bırakabilir.

Şekil 2.8’de iletim ve dağıtım sistemlerinde en çok rastlanılan arızalardan biri olan tek faz toprak arızasının neden olduğu gerilim düşümü görülmektedir. Bir fazdaki gerilim düşmesi arızasız fazlarda artışa neden olabilir.

Şekil 2.9 bir indüksiyon motorunun devreye alınması sırasında oluşan düşmeye bir örnektir. Motor devreye alınması sırasında nominal akımının 6 ile 10 katı arasında akım çeker, bu akım değeri uygun arıza akım değerinden büyükse önemli boyutta düşme ve buna bağlı olarak da arızayla karşılaşılır.



Şekil 2.8. Bir faz toprak arızasının neden olduğu gerilim düşümü.



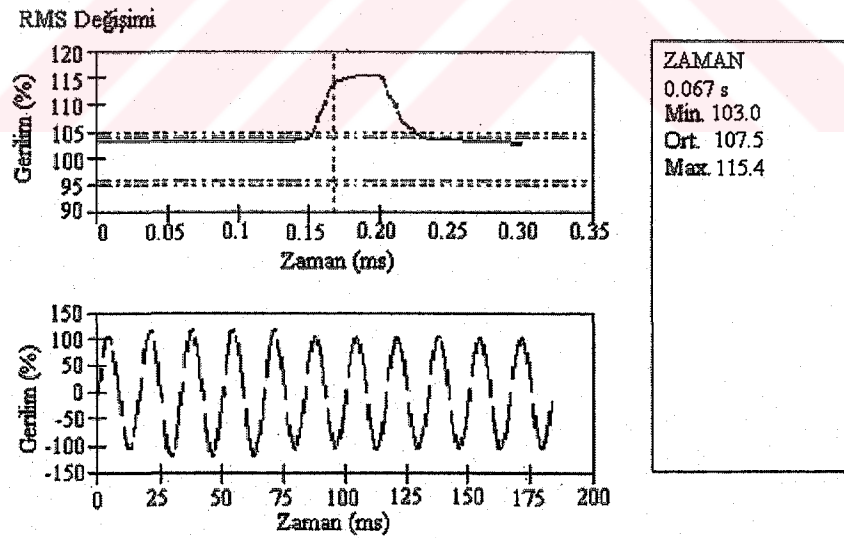
Şekil 2.9. Motorun devreye alınmasıyla oluşan geçici gerilim düşmesi.

Gerilim düşümleri, düşme sonrası gerilim genliği ve zamanla karakterize edilir. Düşme sonrası gerilim genliği kaynağın gücüne, şebeke empedansına ve trafonun

dönüştürme oranına bağlıdır. Azalma zamanları ani, anlık ve geçici olmak üzere üç kategoride incelenir. Bu koruma cihazlarının çalışma zamanlarında da geçerlidir. Röleler yerine devre kesicileri ve hızlı sigortalar kullanılarak gerilim azalmasının sisteme etkisi azaltılabilir.

#### 2.4.3.3. Gerilim Artması

Yarım periyot ile 1 dakikalık sürede akım ya da gerilimin efektif değerinde 1.1 ve 1.8 pu.lik artma olarak tanımlanır. Gerilim düşmesine benzer şekilde artışlarda sistem arızalarından kaynaklanır fakat gerilim artışlarına gerilim düşümleri kadar sık rastlanmaz. Genlik ve zamanla karakterize edilirler. Şekil 2.10'da tek faz toprak arızasının neden olduğu gerilim artışına ait bir örnek görülmektedir. Büyük yüklerin devreden çıkması ya da kondansatör grubunun devreye alınması artışlara neden olur. Arıza sırasında gerilim artışının şiddeti arıza yeri, sistem empedansı ve topraklamaya bağlıdır. Topraklanmamış bir sistemde trafo merkezine yakın bir yerdeki arıza sırasında arızasız fazlardaki artışın değeri ya çok küçüktür ya da sıfırdır.



Şekil 2.10. Tek faz toprak arızasıyla oluşan ani gerilim artışı.

#### 2.4.4. Gerilim dengesizliği

Üç faz gerilim ya da akımın ortalamasındaki maksimum sapma olarak tanımlanır ve %'de şeklinde gösterilir. %5'den daha yüksek olduğunda hassas cihazlarda arızaya

neden olur. Üç fazlı bir sistemde gerilim dengesizliğinin şiddeti negatif ve pozitif dizi gerilimlerinin oranına, en yüksek ve en düşük gerilim değişimi arasındaki farka bağlıdır. %2'den az olan gerilim dengesizliğinin kaynağı üç fazlı devredeki tek fazlı yüklerdir. Gerilim dengesizliği üç fazlı kondansatör grubunun bir fazındaki sigorta yanması sonucu da oluşabilir.

#### **2.4.5. Dalga şeklinde bozulma**

Güç frekansının ideal sinüs dalga şeklinden sapmasıdır. 5 çeşidi vardır [14].

##### **2.4.5.1. Dc-sapma**

AC güç sisteminde DC gerilim ya da akımın varolmasıdır. Elektronik güç dönüştürücülerin asimetrliliği ya da geomanyetik bozukluktan dolayı oluşur. Sıcaklık artışına ve trafonun zarar görmesine neden olur.

##### **2.4.5.2. Harmonikler**

Sistem çalışma frekansının tam katları şeklinde frekans değerlerine sahip sinüzoidal akım ya da gerilimlerdir. Güç sistemindeki lineer olmayan elemanlar veya yüklerden dolayı oluşur. Akımdaki bozulmanın miktarı yükün gücüne, yükün çeşidine, yükün bağlandığı noktadaki güç sisteminin dengesine bağlıdır.

Harmonikleri tamamen yok etmek imkansızdır sadece problemin etkileri azaltılabilir. Akım harmonikleri dağıtım sisteminde ortaya çıkarlar ve sistem gerilimine etkiyerek besleme şebekesine yayılırlar. Harmonik akımlarının ürettiği ek ısınma kayıpları yüzünden dağıtım sisteminin veriminde azalma olur.

Deşarj lambaları ve elektrik ark fırınları gibi endüstriyel yükler harmonik bozulmalara neden olur. Bu bozulma şekilleri; güç sistemlerinde veri kayıpları ve verilerde bozulma, hassas cihazlarda aşırı ısınma veya arıza ve kapasite gruplarının aşırı yüklenmesi şeklindedir.

Verilen bozulmuş periyodik dalga şeklinden harmonik bileşenleri ve ana frekanstaki bozulma Fourier analizi ile tanımlanır. Bu tekniğin kullanılmasıyla, bozulan dalganın bileşenini hesaba katabiliriz. Fourier serisinin kullanımının yaygınlaşmasıyla bozuk periyodik bir dalga şeklini onun temel bileşeni ve harmonikli bileşen ile tanımlayabiliriz.

$$U(t)=U_{dc}+\sum_{n=1}^{\infty}(U_{ns} \sin nw + U_{nc} \cos nwt) \quad (2.1)$$

Katsayılar (2.2) denklemleriyle ifade edilir.

$$U_{ns}=\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} U(t) \sin nwt dt \quad \text{ve} \quad U_{nc}=\frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} U(t) \cos nwt dt \quad (2.2)$$

Harmonik bozulmanın etkisinin ölçüsü olan toplam harmonik bozulma (THD) denklem (2.3)'de verilmiştir.

$$THD_U=\frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_{(1)}} \quad \text{ve} \quad THD_I=\frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_{(1)}} \quad (2.3)$$

Efektif akım ve gerilim değerleri (2.4) denkleminde verilmiştir.

$$U_{rms}=\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U(t)^2 dt} = U_{(1)} \sqrt{1 + THD_U^2} \quad (2.4)$$

$$I_{rms}=\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt} = I_{(1)} \sqrt{1 + THD_I^2} \quad (2.5)$$

$U_{ns}$ : gerilimin tek sayılı harmonikleri.

$U_{nc}$ : gerilimin çift sayılı harmonikleri.

$U_{dc}$ : gerilimin sıfır bileşeni.

$THD_U$ : gerilimdeki toplam harmonik bozulma.

$THD_I$ : akımdaki toplam harmonik bozulma.

$U_{rms}$ : gerilimin efektif değeri.

$I_{rms}$ : akımın efektif değeri.

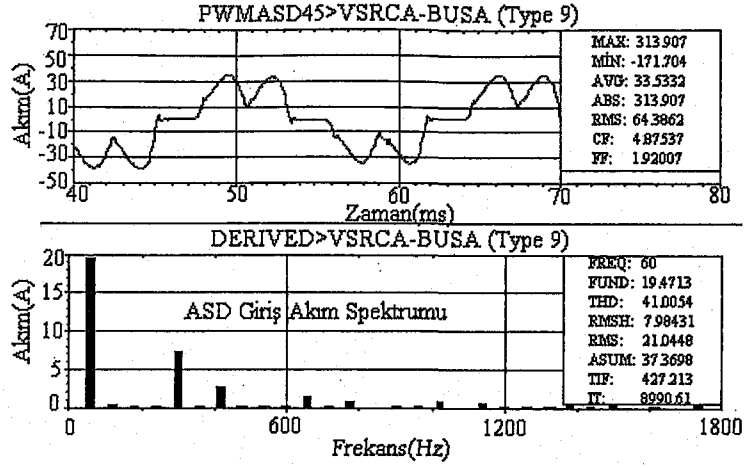
Şekil 2.11'de ayarlanabilir hız sürücüsünün(ASD) giriş akımının dalga şekli ve harmonik spektrumu görülmektedir. ASD'ler küçük yüklerde çalıştıklarında giriş akımına ait yüksek THB değerleri görülür. Ancak oransal bozukluk yüksek olsa bile harmonik akım değeri çok küçüktür. IEEE Standart 519-1992 harmonik akımının karakterize edilmesi için toplam talep bozukluğu (TDD) ifadesini kullanmaktadır [15].

Harmoniklerin etkilerinin sınırlandırılmasında kullanılan bazı teknikler aşağıdaki gibi maddelenmiştir.

- Gerilim bozukluğunu minimize edecek düşük çıkış empedanslı güç kaynakları seçmek.
- Mümkün olduğunca yüklere yakın izolasyon trafoları seçmek.
- Harmonik filtre kullanmak.

### 2.4.5.3. İnter Harmonikler

Sistem çalışma frekansının tam katları olmayan frekans bileşenlerine sahip akım ya da gerilimlerdir. İnter harmonik dalga şekli bozukluğunun kaynakları, statik frekans dönüştürücüleri, değişken frekanslı AC güç girişinden sabit veya kontrol edilebilir çıkış frekansı üreten frekans dönüştürücüler, indüksiyon motorlarıdır. Frekans dönüştürücülerin neden olduğu inter harmonikler sabit olmayıp yükte değişirler.

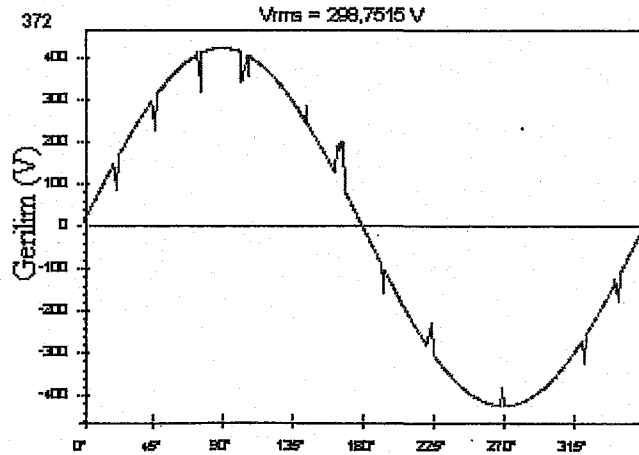


Şekil 2.11. Ayarlanabilir hız sürücüsünün giriş akımına ait dalga şekli ve harmonik spektrum.

#### 2.4.5.4. Kırışma

Akımın bir fazdan diğerine atlaması sonucu oluşan periyodik gerilim bozukluğudur. Etkilenen gerilimin harmonik spektrumuyla karakterize edilebilir. Kırışmaya ait frekans bileşenleri fazlasıyla yüksektir, bu nedenle normalde kullanılan harmonik analizörü ile ölçülüp karakterize edilemeyebilir.

Şekil 2.12 sürekli DC akım üreten üç fazlı dönüştürücüden dolayı oluşan kırışma gerilimine bir örnektir. Akım bir fazdan diğerine atlarken iki faz arasında anlık bir kısa devre oluşur. Bu esnada gerilim sistem empedansına bağlı olarak sıfıra yakın bir değer alır.



Şekil 2.12. Üç fazlı dönüştürücünün neden olduğu gerilim kırışması.

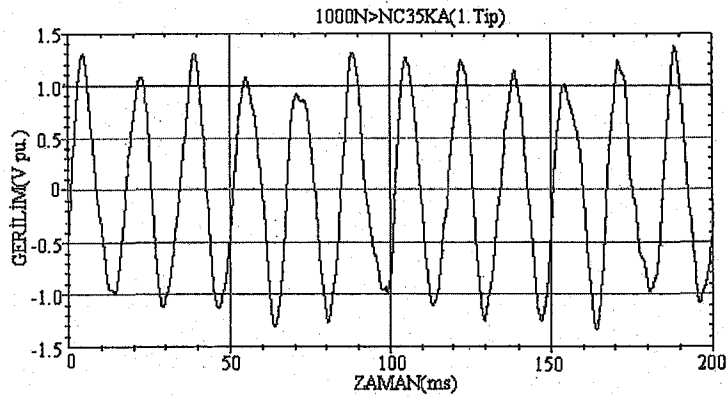
#### 2.4.5.5. Gürültü

Elektrik güç sinyallerinde ana dalganın üstüne binen 200kHz'den küçük frekanslı dalga şeklinin neden olduğu bozulma olarak tanımlanır. Güç sistemlerinde güç elektroniği cihazları, kontrol devreleri, anahtarlamalı güç kaynakları gürültüye neden olur. Sistemin yanlış topraklanması, sisteme uzak bir yerde oluşan gürültünün neden olduğu arızayı şiddetlendirir. Gürültünün içerdiği güç sinyalinin bozukluğu, harmonik bozukluk ya da süreksizlikler gibi sınıflandırılmaz. Gürültü programlanabilir kontrol cihazlarını ve mikro bilgisayar gibi elektronik cihazları bozar. Sistemde filtre, izolasyon trafoları kullanılmasıyla problem giderilebilir.

#### 2.4.6. Gerilim dalgalanması

Gerilimde 0.9-1.1 pu. arasındaki rastgele değişim olarak tanımlanır. IEC 61000-2-1 gerilim dalgalanmasının değişik tiplerini tanımlar. Burada gelişigüzel veya sürekli gerilim dalgalanmalar serisi şeklinde karakterize edilen d tipi gerilim dalgalanması ele alınmıştır [16].

Şekil 2.13'de ark fırınının çalışmasıyla oluşan gerilim dalgalanmasına bir örnek görülmektedir. Titreme sinyalleri temelin yüzdesi şeklindeki efektif büyüklüğüyle tanımlanır. Gerilim titreşimi insan gözünün duyarlılığıyla ölçülür.



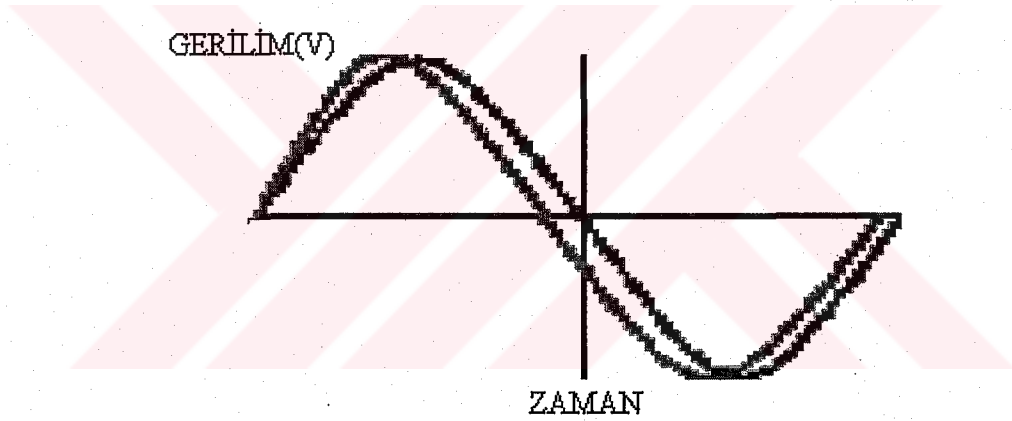
Şekil 2.13. Ark fırınının oluşturduğu gerilim değişimi.



Yük akımındaki hızlı değişimler gerilimde titrete olarak isimlendirilen değişimlere neden olur. Titrete gerilim dalgalanmasının lambalar üzerindeki etkisinden ortaya çıkmıştır. Gerilim dalgalanması insan gözüne lambanın hızlı biçimde yanıp sönmeye yani titrete şeklinde yansımıştır.

#### 2.4.7. Güç frekans değişimleri

Güç sisteminin temel frekansının normal değerinden sapması şeklinde tanımlanır. Güç sistem frekansı direkt olarak generatörün dönüş hızıyla ilgilidir. Frekans kaymasının büyüklüğü ve zamanı yük karakteristiklerine ve yük değişimlerine karşı üretim kontrol sisteminin tepkisine bağlıdır. Etkileri veri kaybı ve cihaz arızalarıdır. Şekil 2.14 frekans değişimine bir örnektir.



Şekil 2.14. Güç frekans değişimi.

## BÖLÜM 3. KISA SÜRELİ GERİLİM DÜŞMELERİ VE SINIFLANDIRILMALARI

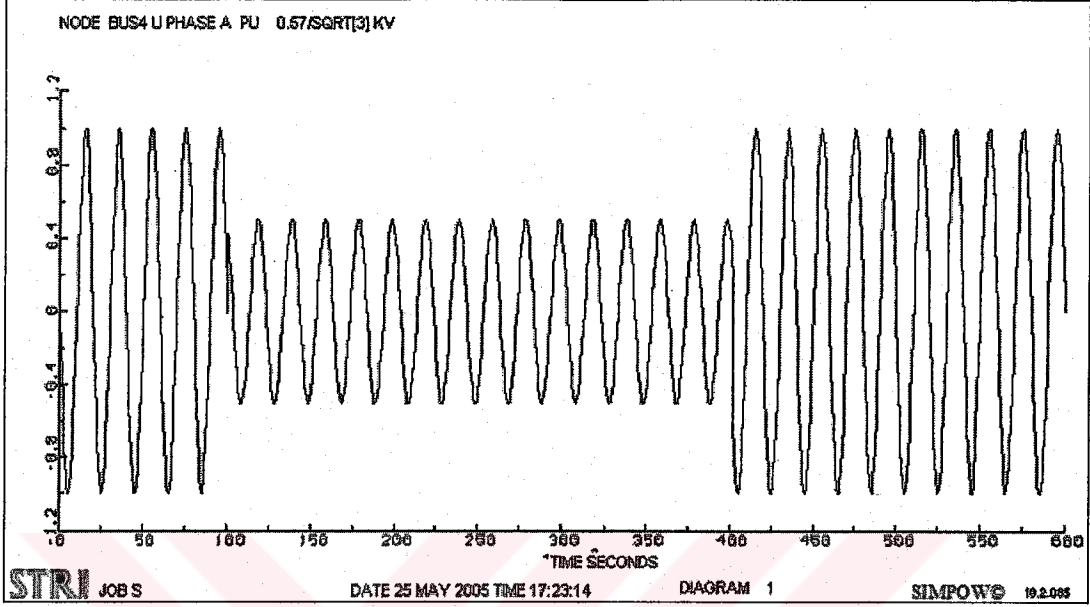
### 3.1. Giriş

Gerilim düşümleri kısa devre, aşırı yüklenme ve büyük güçlü motorların devreye alınmasından dolayı gerilimin efektif değerindeki kısa süreli azalmalar olarak tanımlanır. 50Hz'lik şebekede 20 veya 40ms'den daha uzun süreyle gerilimin efektif değerinin %90'ın altına düşmesi bazı cihazların devre dışı kalmalarına neden olur. Gerilim düşümleri endüstriye kesintiler kadar zarar vermez fakat kesintilerden daha sık yaşandıklarından toplam zararı kesintilerden daha fazladır. Kısa süreli kesintiler ve uzun süreli kesintilerin bir çoğu yerel dağıtım şebekesinde oluşur. Cihaz uçlarındaki gerilim düşümü iletim sisteminde kilometrelerce uzakta oluşan kısa devre nedeniyle olabilir. Bu nedenle gerilim düşümleri kesintilerden daha genel bir problemdir [17].

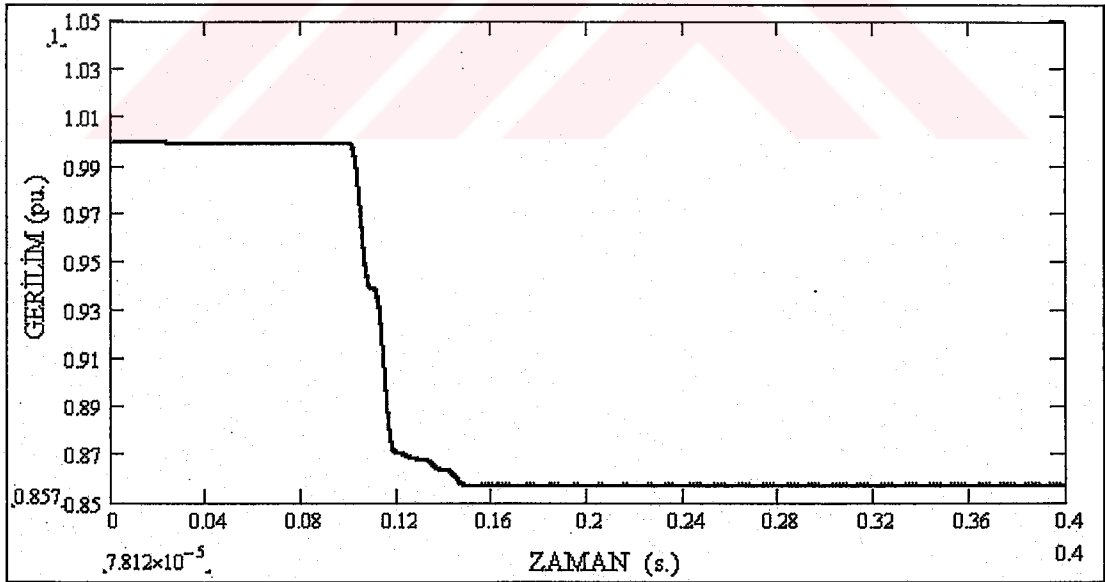
Şekil 3.1 iki faz arızasının neden olduğu gerilim düşümüne bir örnektir. Şekil 3.1'den on üç periyotluk bir süre zarfında gerilimin arıza öncesi değerinin %40'ına düştüğü görülmektedir. On üç periyot sonra arıza giderildiğinde gerilim değeri düşme öncesi gerilim değerine ulaşmaktadır. Gerilim düşümlerini değerlendirmede, düşmeden sonra oluşan gerilimin genliği ve azalma süresi temel bileşenlerdir. Her iki değerde ilerleyen bölümlerde ayrıntılarıyla ele alınacaktır. Şekil 3.1'den, genlik ve zamanın gerilim düşümlerini karakterize etmede yeterli olmadığı görülmektedir. Arıza öncesi ve arıza giderildikten sonra ki gerilim değerleri arasında genlik olarak bir fark olmamasına rağmen bir açı farkı olduğu görülebilir.

Şekil 3.2 bir indüksiyon motorunun devreye alınmasının neden olduğu gerilim düşümüne örnek görülmektedir. Efektif değeri güç sistem frekansının her bir periyot ya da yarım periyodunda hesaplanmıştır. İndüksiyon motorların devreye alınmasıyla

oluşan gerilim düşümleri, kısa devre durumunda oluşan gerilim düşümlerinden daha uzun sürelidir.



Şekil 3.1. İki faz toprak arızasının neden olduğu düşme.



Şekil 3.2. Bir indüksiyon motorunun devreye alınmasıyla oluşan gerilim düşümü.

## 3.2. Düşme Sonrası Gerilim Genliği

Düşme sonrası gerilim genliğini belirlemede bir çok yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan en çok kullanılanı efektif gerilim değerinden elde edilen gerilim düşme genliğidir. Gerilim seviyesini tanımlamada bir çok alternatif yol vardır. Gerilim sinüzoidal olduğu sürece düşme sonrası gerilim genliğini elde etmede gerilimin efektif değeri, temel değeri ya da tepe değeri kullanılabilir [18].

### 3.2.1. Gerilimin efektif değeri

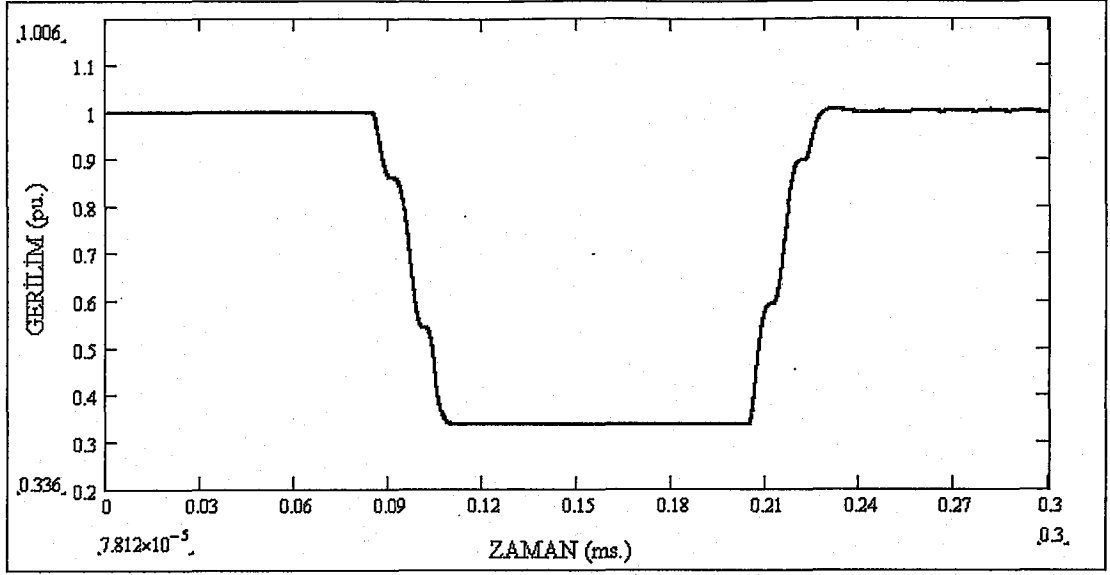
Gerilimin efektif değeri zamana bağlı gerilim örneklemelerinden hesaplanabilir. Denklem 3.1'de gerilimin efektif değeri ifadesi verilmiştir.

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i^2} \quad (3.1)$$

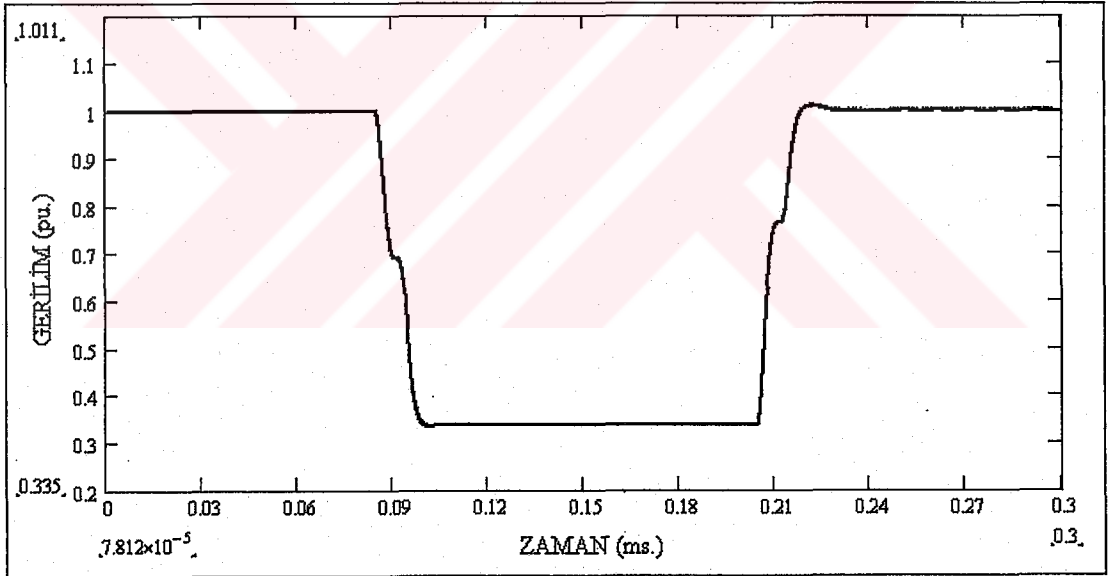
N: örnekleme sayısı,  $v_i$  örneklenmiş gerilim değerleridir.

(3.1)'de tanımlanan algoritma Şekil 3.1'e uygulanırsa Şekil 3.3 ve Şekil 3.4 elde edilir. Burada bir periyot için 256 örnekleme alınmıştır. Şekil 3.4 yarım periyotluk olduğundan örnekleme sayısı 128'dir.

Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'de gerilimin efektif değerinin hemen düşmediği, düşme sırasında efektif değer sabit kalmadığı ve arızadan sonra da gerilimin hemen eski değerine ulaşmadığı görülmektedir. Tam periyotluk örneklemede gerilimin düşme değerine ulaşmasının bir periyot sürdüğü, yarım periyotluk örneklemede ise bunun yarım periyot olduğu görülmektedir. Örnekleme uzunluğunun yarım periyodun tam katları şeklinde olması gerekmektedir. Daha küçük örnekleme uzunluğu temel frekansın iki katına eşit frekanslarda salınımlara neden olabilir.



Şekil 3.3. Şekil 3.1’de görülen gerilim düşümüne ait örnekleme uzunluğunun bir periyot olduğu durum için efektif gerilim eğrisi.



Şekil 3.4. Şekil 3.1’de görülen gerilim düşümüne ait örnekleme uzunluğunun yarım periyot olduğu durum için efektif gerilim eğrisi.

### 3.2.2. Temel gerilim bileşeni

Gerilimin temel bileşeninin kullanılması, aynı yolla faz açısı atlamasının hesaplanmasına izin verdiği için avantajlıdır. Zamanın bir fonksiyonu olarak temel gerilim bileşeni (3.2) denkleminde verilmiştir.

$$V_{\text{tem.}}(t) = \frac{2}{T} \int_{t-T}^t v(\tau) \cdot e^{j\omega_0 \tau} d\tau \quad (3.2)$$

$\omega_0 : \frac{2\pi}{T}$  ve T:temel frekansın bir periyodudur.

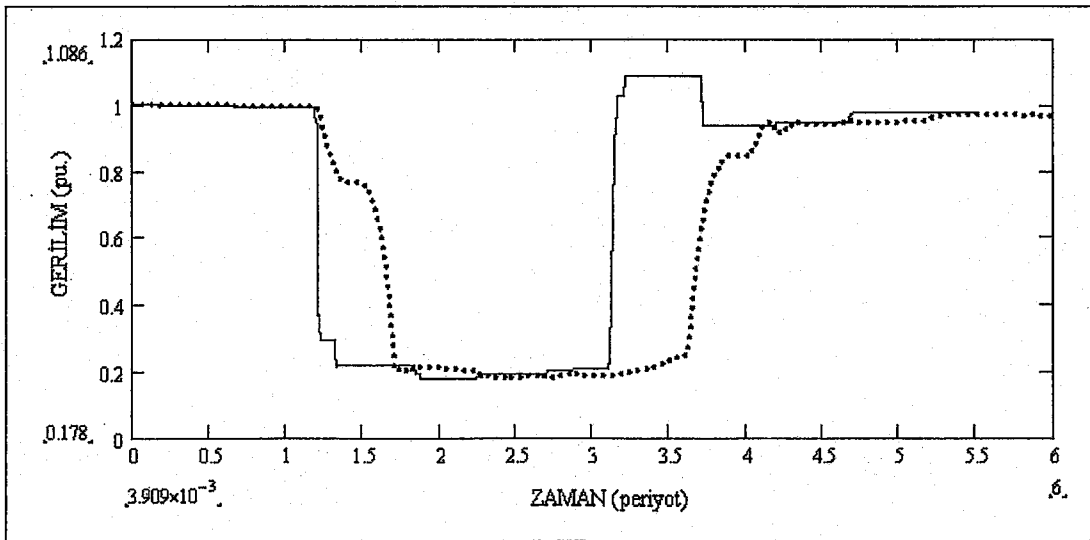
(3.2) ifadesi zamana bağlı kompleks gerilim olarak sonuçlanır, bunun mutlak değeri zamana bağlı olarak düşme sonrası gerilim genliğini, açısı ise faz açısını verir. Aynı şekilde harmonik gerilim bileşeni elde edilebilir.

### 3.2.3. Gerilimin tepe değeri

Zamana bağlı olarak tepe gerilim değeri (3.3) denkleminde elde edilebilir.

$$V_{\text{tepe}} = \max_{0 < \tau < T} |v(t-\tau)| \quad (3.3)$$

$v(t)$  örneklenen gerilim dalga şekli, T ise yarım periyodun tam katıdır. Burada gerilim keskin bir şekilde düşmekte ve yükselmektedir, ancak bunun düşmenin başlangıç ve bitişiyle aynı zamanda olmadığı ilerleyen bölümlerde görülecektir. Efektif gerilim değerine zıt olarak, tepe gerilim değeri gerilim düşümünden sonra ani bir artma gösterir. Şekil 3.5’de iki yöntemin karşılaştırılması görülmektedir.



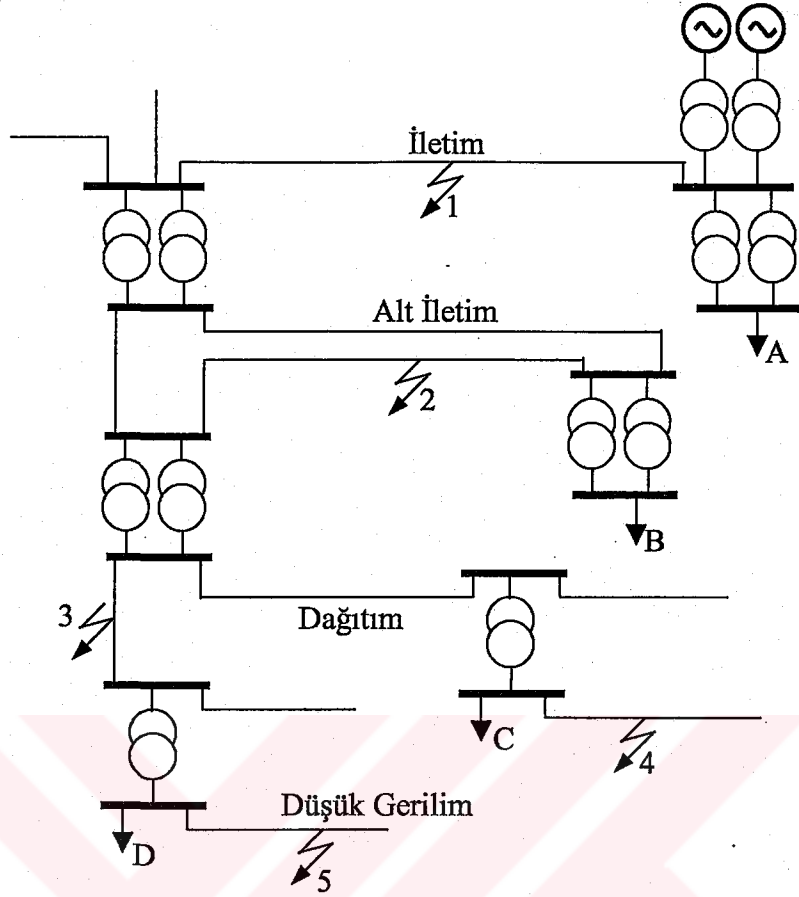
Şekil 3.5. Şekil 3.1’deki gerilim düşümüne ait örnekleme uzunluğunun yarım periyot olduğu durumda tepe gerilim ile efektif gerilim değerinin karşılaştırılması.

### 3.3. Teorik Hesaplamalar

Şekil 3.6 yük ve arıza durumlarını gösteren bir güç sistemidir. Burada A, B, C, D yükleri, 1-5 arıza yerlerini göstermektedir. 1 nolu arıza durumu arızalı hatta yakın olan alt iletim hatlarında gerilimde şiddetli düşümlere neden olacaktır. Bu düşme, buradan beslenen bütün tüketicilere aktarılacaktır. Generatör olmaması durumunda alçak gerilim seviyelerinde gerilim düşmesi engellenemeyecektir. Sonuç olarak bütün tüketicilerde ciddi boyutta bir düşme görülür. A'da hissedilen düşme sonrası gerilim genliği daha küçüktür bunun nedeni bu yükün bağlı olduğu baraya gerilim değerini arttıracak generatörlerin bağlı olmasıdır.

İkinci durumdaki arıza A tüketicisinde düşüme neden olmayacaktır. İletim ile alt iletim arasındaki trafonun empedansı trafonun yüksek gerilim tarafında gerilim düşümünü sınırlayacak kadar yüksektir. 2. durumdaki arıza buradan beslenen B, C ve D tüketicilerinde, alt iletimlerde ciddi gerilim düşümlerine sebep olacaktır.

Üçüncü durumdaki arıza D tüketicisinde koruma cihazı arızayı giderene kadar kısa veya uzun süreli kesinti oluşturacak aşırı bir düşmeye neden olur. Tüketici C sadece gerilim düşmesine maruz kalır. Dağıtım sistemini korumada hızlı tekrar kapama kullanılmışsa, C tüketicisi diğer kalıcı arızalardan sonra iki ya da daha fazla kısa süreli düşüme maruz kalır. 3. noktadaki arıza B tüketicisinde, trafo empedansından dolayı, ciddi olmayan bir düşmeye neden olur. A tüketicisi muhtemelen hiç etkilenmez. Son olarak 4 nolu arıza C tüketicisinde ciddi bir gerilim düşümü yaratırken D tüketicisinde hafif bir düşmeye neden olur. A ve B tüketicileri 4 ve 5. arızalardan etkilenmez.



Şekil 3.6. Örnek bir iletim ve dağıtım şebekesi.

Radyal sistemde gerilim düşümlerini tanımlamak için Şekil 3.7’de görülen gerilim bölücü modeli kullanılabilir. Bu modelde  $Z_F$ , arıza ve PCC (ortak bağlantı noktası) arasındaki empedanstır,  $Z_S$  ise PCC’deki kaynak empedansdır. PCC noktası arızanın ve yükün beslendiği noktadır. Diğer bir ifadeyle yük akımıyla arıza akımının ayrıldığı noktadır. Gerilim bölücü modelinde yük akımı arıza sırasında ihmal edilir. Bu nedenle yük ve PCC noktası arasında gerilim düşümü yoktur. PCC’deki gerilim, aynı zamanda cihaz uçlarındaki gerilim, (3.4) denkleminde elde edilebilir.

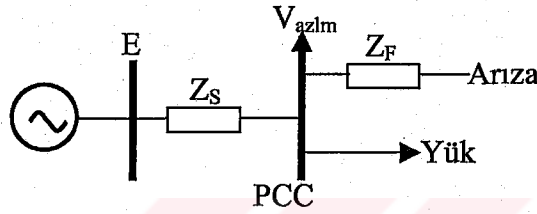
$$V_{azlm} = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F} \cdot E \quad (3.4)$$

Arıza öncesi gerilim 1 pu. olarak kabul edilip ( $E=1$ ) (3.4) ifadesinin tekrar yazılmasıyla (3.5) denklemini elde edilir.



$$V_{azlm} = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F} \quad (3.5)$$

Bu ifadeden, arıza tüketiciye yakınsa ( $Z_F$  küçükse) ve arıza seviyesi düşük bir sistemse ( $Z_S$  büyükse) gerilim düşmesinin ciddi boyutta olduğu görülmektedir. Burada tek faz modeli kullanılmıştır, fakat gerçek bir sistem üç fazlıdır. Bunun anlamı bu eşitlik sadece üç faz arızalarında kullanılabilir. Diğer arızalar için kullanılan gerilim bölücü modeli ilerleyen bölümlerde açıklanacaktır.

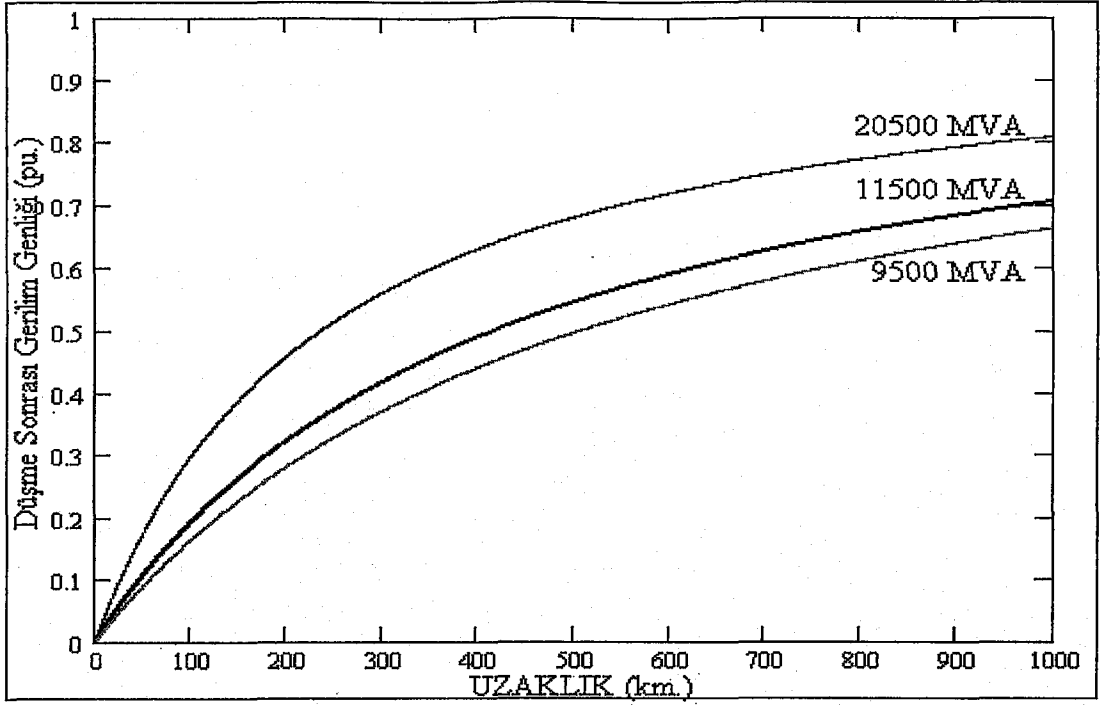


Şekil 3.7. Gerilim düşümü için gerilim bölücü modeli.

(3.5) eşitliği arıza mesafesine bağlı olarak düşme sonrası gerilim genliğini hesaplamada kullanılabilir. Burada  $Z_F = z\ell$  şeklinde yazılabilir.  $z$  besleyici empedansı,  $\ell$  arıza ve PCC arasındaki mesafeyi ifade etmektedir.

$$V_{azlm} = \frac{z.\ell}{z.\ell + Z_S} \quad (3.6)$$

380 kV'luk tipik bir havai hat için arıza uzaklığına bağlı olarak düşme sonrası gerilim genliği hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.8'de belirtilmiştir. Hesaplamalarda 2x954 MCM havai hat kullanılmış ve arıza seviyeleri 20500MVA, 11500MVA ve 9500MVA olarak alınmıştır. Gerilim düşümünün şiddeti artan arıza seviyesi ve arızaya olan uzaklıkla azalmaktadır. Buradan kilometrelerce uzakta oluşan bir arızanın şiddetli bir düşmeye neden olabileceği de görülmektedir.



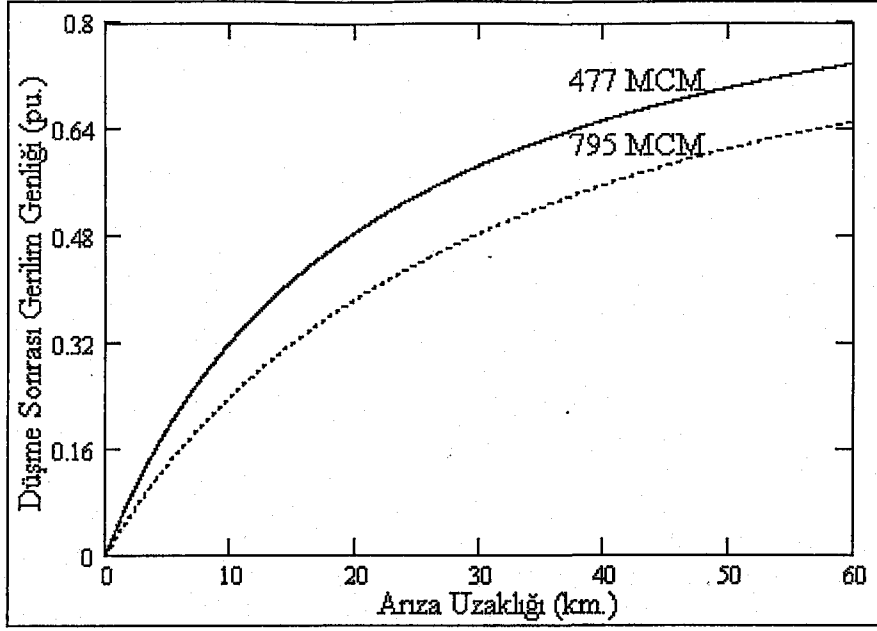
Şekil 3.8. Uzaklığa bağlı olarak farklı arıza seviyelerinde 380kV'luk havai hat için düşme sonrası gerilim genliği.

### 3.3.1. Kullanılan iletkenin etkisi

Farklı kesit değerlerinde havai hat ve yeraltı kablolarının farklı empedans değerleri vardır. Tablo 3.1'de havai hat ve yeraltı kablo empedansları verilmiştir [19]. Şekil 3.9 (a), 154kV'da 795 ve 477 MCM kesitli havai hatlar için arıza seviyesi 2210MVA alınarak PCC ve arıza noktası arasındaki mesafeye bağlı olarak elde edilen sonuçları göstermektedir. Havai hatlarda empedans baskındır ve kesit etkisi küçüktür, yeraltı kablolarında ise etki daha belirgindir.

Tablo 3.1. 154kV'da hat ve kablo kesit değerleri.

| Kesit (MCM) | Havai Hat<br>Empedansı( $\Omega$ /km.) | Yeraltı Kablo<br>Empedansı( $\Omega$ /km.) |
|-------------|--|--|
| 477         | 0.363+j0.351                           | 0.492+j0.116                               |
| 795         | 0.117+j0.315                           | 0.159+j0.097                               |



Şekil 3.9. (a) 154 kV'da havai hat kablolarında kesite göre gerilim düşme eğrileri.

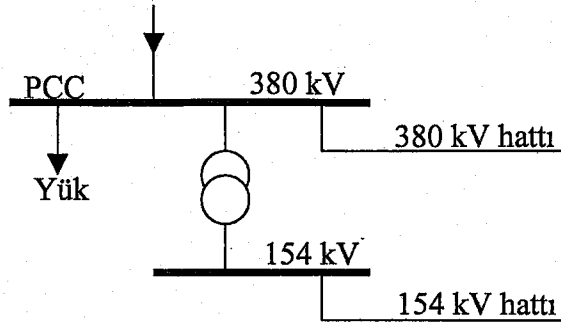
Her iki şekilden de görüldüğü gibi, artan kesitle birlikte gerilim düşme şiddeti artmaktadır.

### 3.3.2. Trafodan sonra oluşan arıza etkisi

Şekil 3.7'de arıza noktası ve PCC arasındaki empedansı, kablolar ve hatlar dışında güç trafoları da oluşturabilir. Trafo empedansının büyük olması, alçak gerilim tarafında oluşan arızanın neden olduğu gerilim düşmesini sınırlar.

Transformatörlerin gerilim düşümüne etkisinin incelenmesi için Şekil 3.10'daki sistem incelenmiştir. Trafonun yüksek gerilim ve alçak gerilim seviyelerinde arıza durumunda elde edilen gerilim düşme genlikleri Şekil 3.11'de verilmiştir.

Şekil 3.11'den de görüldüğü gibi 154kV seviyesinde oluşan arızanın neden olduğu düşmenin şiddeti 380kV'da oluşandan daha azdır. Trafo empedansı nedeniyle 154kV eğrisi sıfırdan değil trafonun empedans değerine bağlı olarak yüksek bir değerden başlar ve diğer eğriye oranla daha hızlı yükselir.



Şekil 3.10. 380kV ve 154kV gerilim seviyelerindeki bir güç sistemi.

### 3.3.3. Arıza seviyeleri

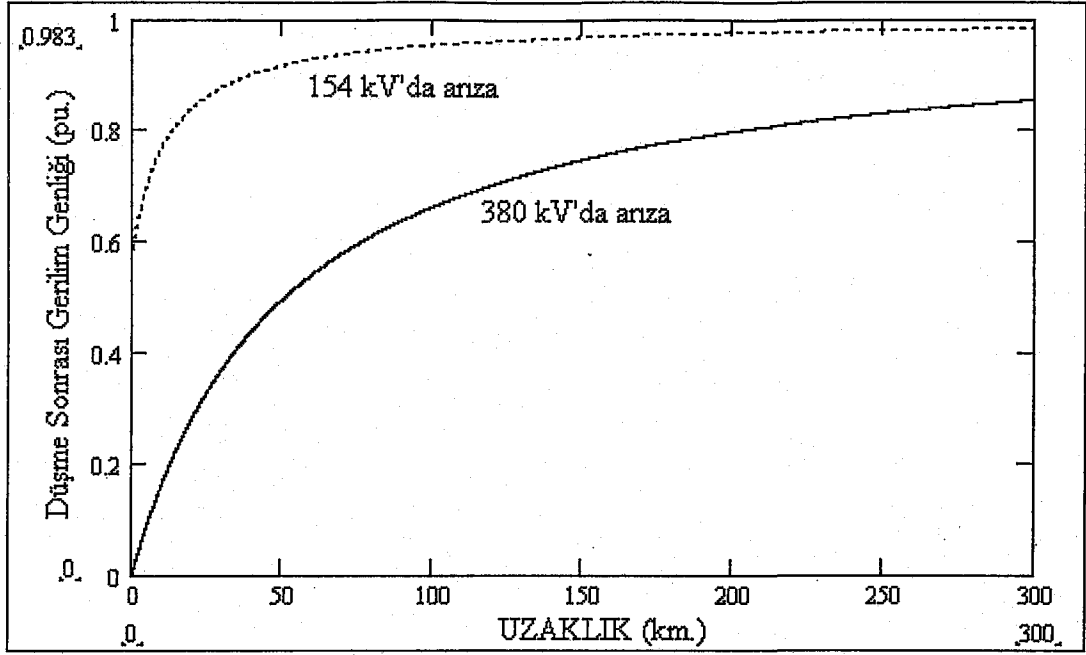
PCC noktasında ve arıza yerindeki arıza seviyeleri biliniyorsa düşme sonrası gerilim genliği direkt olarak hesaplanabilir.  $S_{ARZ}$  arıza yerindeki arıza gücü,  $S_{PCC}$  PCC noktasındaki arıza gücü ve  $V_n$  arıza gerilim seviyesini göstermektedir. Bu durumda  $S_{ARZ}$  ve  $S_{PCC}$  güçleri:

$$S_{ARZ} = \frac{V_n^2}{Z_S + Z_F} \quad S_{PCC} = \frac{V_n^2}{Z_S} \quad (3.7)$$

(3.5) denkleminde PCC noktasındaki gerilim düşmesi denklem (3.8)'deki gibi olur.

$$V_{azlm} = 1 - \frac{S_{ARZ}}{S_{PCC}} \quad (3.8)$$

(3.8) ifadesi kullanılarak transformatörden sonraki düşme sonrası gerilim genliği hesaplanabilir.



Şekil 3.11. 380 ve 154 kV gerilim seviyelerindeki arıza durumundaki düşme sonrası gerilim genlikleri.

### 3.3.4. Kritik mesafe

(3.6) eşitliği düşme sonrası gerilim genliğini arıza uzaklığının bir fonksiyonu şeklinde verir. Bu eşitlikten, belirli büyüklükte azalmaya neden olacak olan arızanın uzaklığı hesaplanabilir. Kaynak ve besleyicinin X/R oranlarının eşit olduğu varsayılırsa aşağıdaki (3.9) denklemini elde edilir.

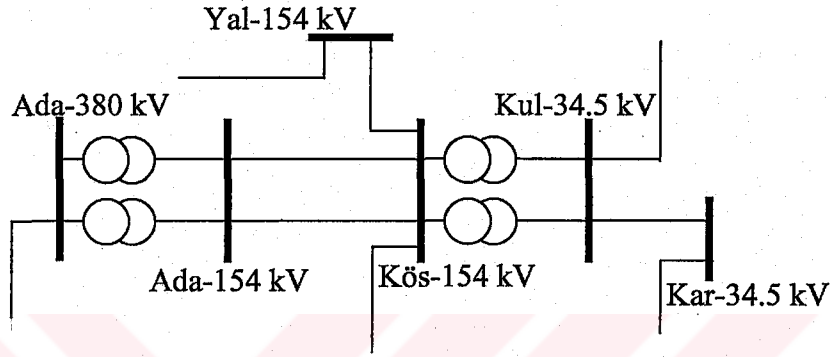
$$l_{kri} = \frac{Z_S}{Z} \times \frac{V}{1-V} \quad (3.9)$$

$l_{kri}$ , V gerilimi için kritik mesafe olarak tanımlanır.

Nasıl gerilim seviyesi kritik gerilimin (belirli bir gerilim seviyesi) altına düştüğünde bazı cihazlar devre dışı kalıyorsa aynı olay arıza mesafesinin kritik mesafeden az olması durumunda da geçerlidir.

### 3.4. Düşme Sonrası Gerilim Genliğinin Hesaplanmasına Örnek

Şekil 3.12’de gerilim düşümlerinin hesaplamasında kullanılacak örnek bir sistem görülmektedir. İlerleyen bölümlerde de aynı örnek kullanılacaktır. Şekil 3.12’deki sistem İzmit’teki Kartonsan A.Ş.’ye aittir. Hesaplamalarda kullanılan verilerin çoğu yerel şebekeden elde edilmiştir.



Şekil 3.12. Gerilim düşümlerinde kullanılacak örnek sistem.

Gerilim düşümü analizinde ilk adım olası mümkün PCC noktalarını tanımlamaktır. 34.5 kV’luk besleyicilerin birinde oluşan herhangi bir arıza için arıza akımı Kar-34.5 kV barasından akacaktır. Bu nedenle Kar-34.5 kV barası 34.5 kV’luk baralar için PCC noktasıdır. Benzer şekilde Kös-154 barası 154kV’luk besleyicilerde oluşan bir arıza için PCC noktasıdır. Diğer PCC noktası Ada-380 kV barasıdır. Gerilim düşümünün değerini hesaplamak için besleyici ve kaynak empedans değerlerini bilmemiz gerekir. Kaynak empedans değerleri Tablo 3.2’de ve besleyici empedans değerleri Tablo 3.3’de verilmiştir [19,20].

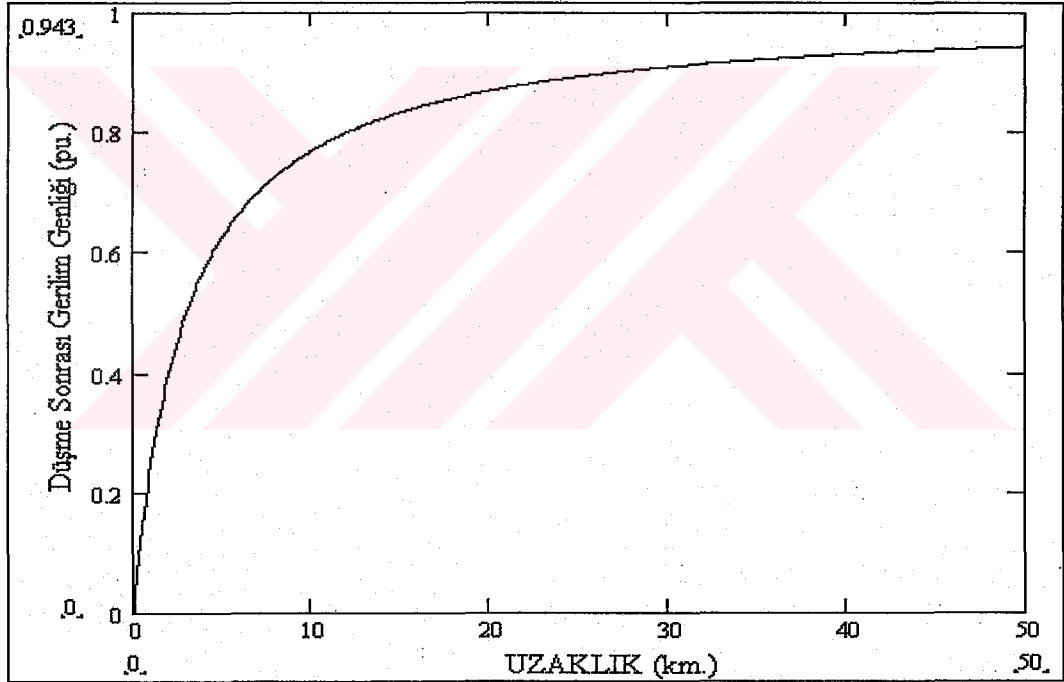
Tablo 3.2. 100MVA’lık baz gücünde Şekil 3.12 için kaynak empedans değerleri.

| Gerilim Seviyeleri | Pozitif ve Negatif Dizi Emp.<br>( $\Omega$ /km.) |
|--------------------|--|
| 34.5 kV            | 0.119025+j1.1366                                 |
| 154 kV             | 1.073+j10.2471                                   |
| 380 kV             | 1.25565+j11.9914                                 |

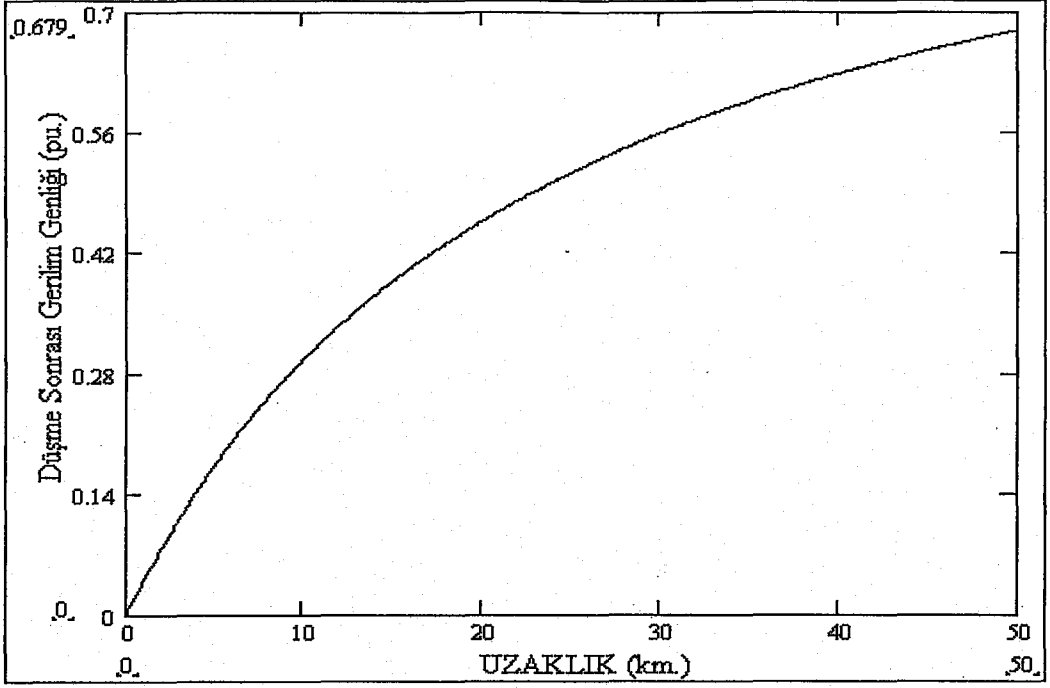
Tablo 3.3. Şekil 3.13’de kullanılan iletken empedans değerleri.

| Gerilim Seviyeleri | Sıfır Dizi Empedansları( $\Omega$ /km.) | Pozitif ve Negatif Dizi Empedansları( $\Omega$ /km.) |
|--------------------|---|--|
| 34.5 kV            | 0.404745+j1.11954                       | 0.134915+j0.373180                                   |
| 154kV              | 0.42+j1.21333                           | 0.13333+j0.43333                                     |
| 380kV              | 0.29344+j1.0544                         | 0.034746+j0.316641                                   |

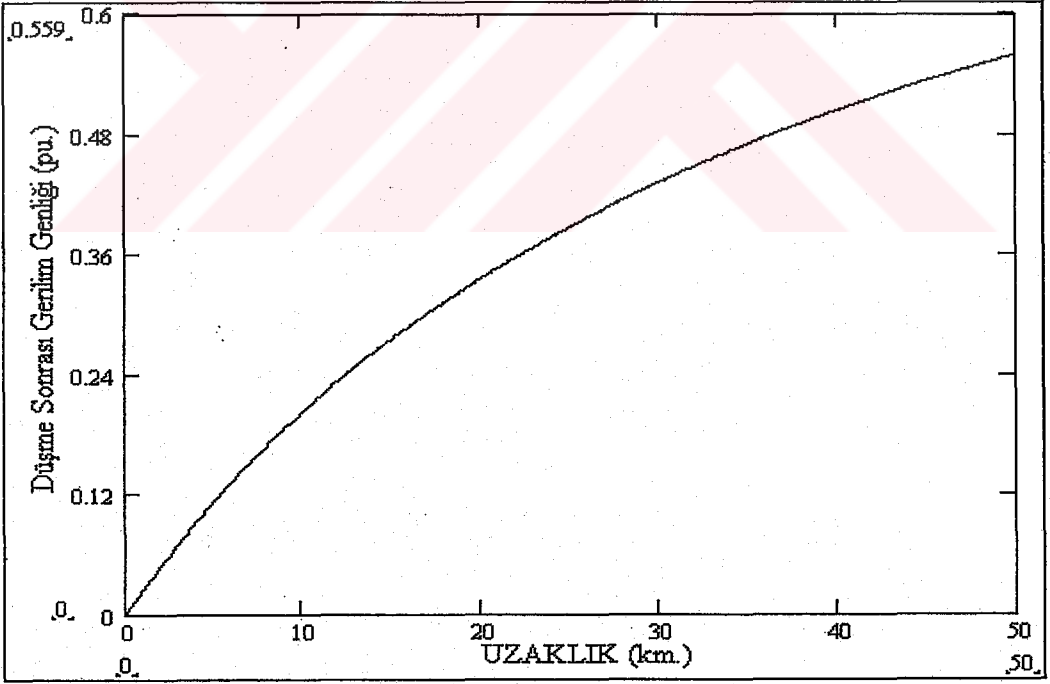
Şekil 3.13, Şekil 3.14 ve Şekil 3.15 sırasıyla 34.5 kV, 154 kV ve 380 kV gerilim seviyeleri için uzaklığa bağlı olarak düşme sonrası gerilim genliklerini göstermektedir.



Şekil 3.13. 34.5 kV’da arıza olduğunda oluşan gerilim düşmesi.



Şekil 3.14. 154 kV'da arıza olması durumunda oluşan gerilim düşmesi.



Şekil 3.15. 380 kV'da oluşan arızanın neden olduğu gerilim düşmesi.

Şekil 3.13, Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'den görüldüğü gibi en şiddetli düşme 380 kV gerilim seviyesindeki arıza sonucu oluşmuştur.

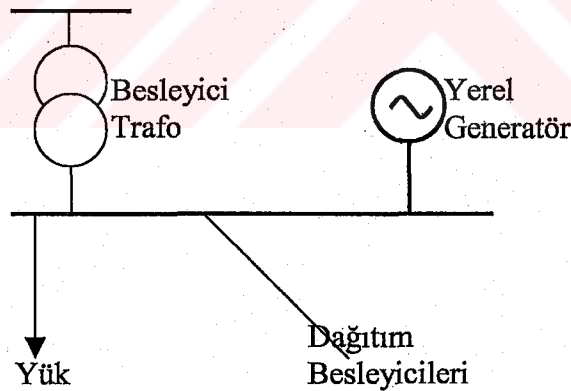


### 3.5. Radyal Olmayan Sistemlerde Düşme Sonrası Gerilim Genliği

Düşük ve orta gerilim seviyeli sistemler genelde radyal sistemdir. Yüksek gerilim seviyelerindeki sistemler daha farklıdır. Burada bu sistemlerin bazı tiplerinden bahsedilecek ve gözlü sistemlerde düşme sonrası gerilim genliğinin hesaplanması için genel bir yöntem sunulacaktır [18].

#### 3.5.1. Yerel generatörler

Şekil 3.16'da görüldüğü gibi yerel generatörün dağıtım şebekesine bağlanması ilgili yükteki düşme sonrası gerilim genliğini iki farklı şekilde hafifletebilir. Generatör dağıtım barasında arıza seviyesini artırarak dağıtım besleyicilerinde arızaların neden olduğu gerilim düşümlerinin şiddetini azaltır. Bu özellikle zayıf bir sistem için geçerlidir. Güçlü bir sistemde arıza seviyesi, kesicinin izin verdiği maksimum kısa devre akımını aşma riski olmadan artırılmaz. Yerel generatör besleyici trafonun empedansının büyük olmasını gerektirir.

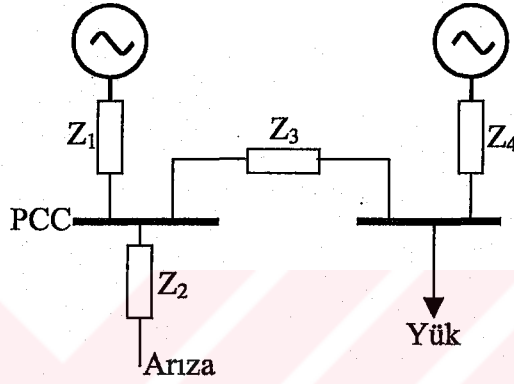


Şekil 3.16. Yerel generatörün dağıtım şebekesine bağlantısı.

Yerel generatör, sistemin genelinde oluşan arızaların neden olduğu düşme genliklerini azaltır. Bu tip arızalar sırasında generatör, arızayı beslemek suretiyle gerilimi yerel bara seviyesinde tutar. Şekil 3.17'de bu etkiye ait bir eşdeğer devre görülmektedir. Burada  $Z_4$  arıza sırasında yerel generatörün empedansı,  $Z_1$  PCC noktasındaki kaynak empedansı,  $Z_2$  arıza ve PCC noktası arasındaki empedans ve  $Z_3$  generatör barası ile PCC noktası arasındaki empedanstır. Yerel generatör

olmadığında cihaz uçlarındaki gerilim PCC noktasındaki gerilime eşit olacaktır. Yerel generatör olduğunda ise gerilim düşümü sırasında uçlardaki gerilim generatör barasındaki gerilime eşit olacaktır. Bu gerilim değeri de (3.10) eşitliğinden elde edilen gerilime bağlıdır [18].

$$(1 - V_{azlm}) = \frac{Z_4}{Z_3 + Z_4} (1 - V_{PCC}) \quad (3.10)$$



Şekil 3.17. Yerel generatörlü sisteme ait eşdeğer devre.

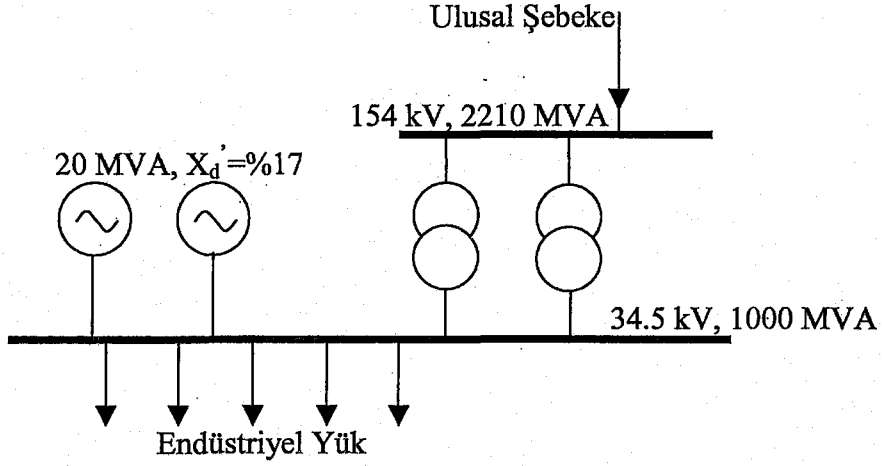
(3.10) ifadesinden minimum düşme sonrası gerilim genliğinin asla sıfır olamayacağı görülmektedir. Buna göre düşme sonrası gerilim genliği (3.11) denklemindeki gibidir.

$$V_{\min} = \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \quad (V_{PCC}=0 \text{ ise}) \quad (3.11)$$

$Z_3=Z_4$  koşulunda maksimum düşme sonrası gerilim genliği %50'dir. Oluşan arızaya yerel generatörlerin dışında indüksiyon motorları da katkıda bulunur.

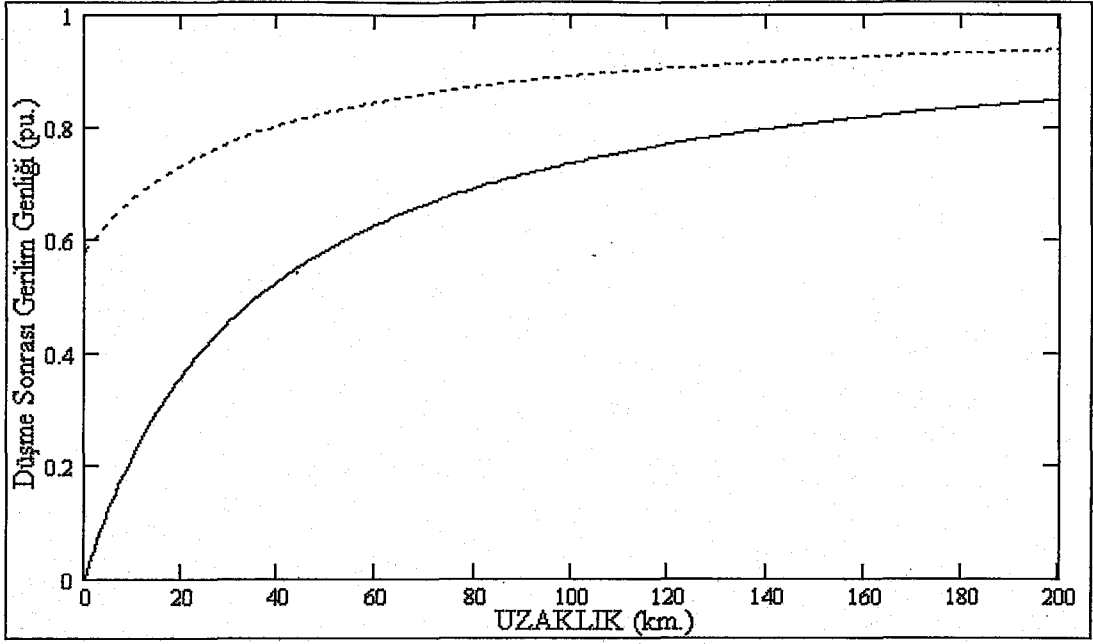
Şekil 3.18'de bir endüstriyel dağıtım sistemi görülmektedir. Sistem 154 kV'dan beslenmektedir ve sistemde iki adet 154/34.5 kV'luk paralel transformatör yer almaktadır.

Denklem (3.10) ve Şekil 3.17'nin referansı ile bu sistem için empedans değerleri  $Z_1=10.731\Omega$ ,  $Z_2=0.3\Omega/\text{km}$ ,  $Z_3=25.77\Omega$ ,  $Z_4=18.5\Omega$  şeklindedir.



Şekil 3.18. Endüstriyel dağıtım sistemi.

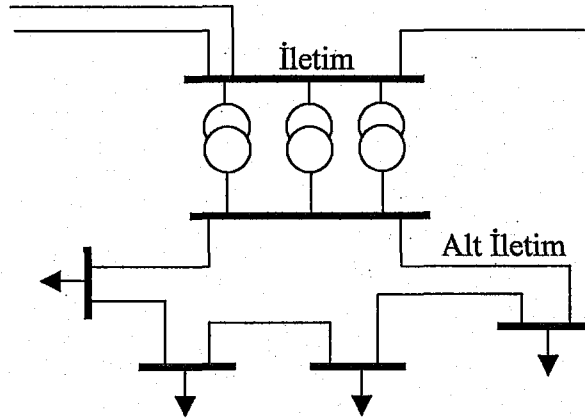
Hesaplama sonuçları Şekil 3.19'da görülmektedir. Alt eğri 34.5 kV barasındaki generatör devrede olmadığına, arızanın 154 kV barasında oluşması durumunda 34.5 kV'daki düşme sonrası gerilim genliğini vermektedir. Bu durumda, bütün yük akımları ihmal edildiğinden, 154 kV'daki düşme sonrası gerilim genliği 34.5 kV'dakine eşittir. Üst eğri generatör devredeyken 34.5 kV'daki düşme sonrası gerilim genliğini verir. Generatör bu baradaki gerilimi koruyacağı için sonrası gerilim genliği hiç bir zaman %58'in altına düşmez. Kaynağı geliştirmek için iki yöntem vardır, bunlardan birincisi generatörlerin sayısını arttırmak, diğeri ise 34.5 kV'da düşük arıza seviyeleri oluşturmak için  $Z_3$ 'ü arttırmaktır.



Şekil 3.19. Uzaklığa bağlı olarak generatörlü ve generatörsüz durumda düşme sonrası gerilim genliği.

### 3.5.2. Kapalı ring çevrimleri

Şekil 3.20'de alt iletim sistemine ait bir örnek görülmektedir. İletim sistemi kapalı ring sistemine iki ya da üç transformatörle bağlanır.



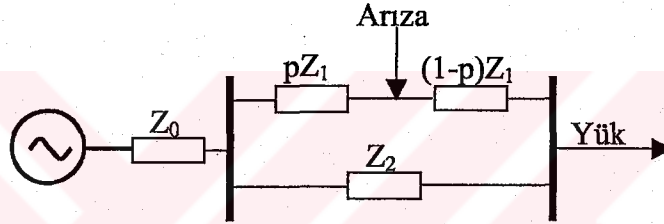
Şekil 3.20. Alt iletim çevrim örneği.

Aşağıda bahsedilecek olan matematiksel ifadeler paralel besleyicilerdeki arızaların neden olduğu gerilim düşümlerinin hesaplanmasında kullanılır. Düşmeden sonrası gerilim genliğini hesaplamak için yük barası, arızasız ve arızalı kolun tanımlanması

gerekmektedir. Şekil 3.21’de alt iletim çevrimine ait eşdeğer devre görülmektedir.  $Z_0$  kaynak empedansı,  $Z_1$  arızalı kol empedansı,  $Z_2$  arızasız kol empedansı ve  $p$  arıza pozisyonudur ( $p=0$  ise arıza yükün beslendiği baradadır,  $p=1$  ise arıza yük barasıdır).

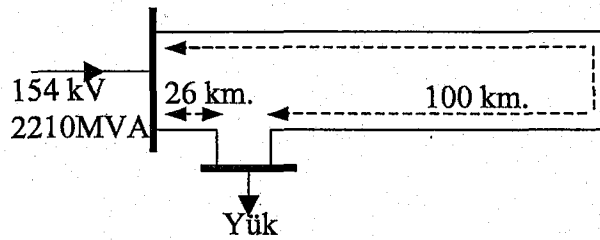
Şekil 3.21’de yük barasındaki düşme sonrası gerilim genliği (3.12) denkleminde hesaplanabilir.

$$V_{azlm} = \frac{p(1-p)Z_1^2}{Z_0(Z_1 + Z_2) + pZ_1Z_2 + p(1-p)Z_1^2} \quad (3.12)$$



Şekil 3.21. Kapalı ring çevrimi için eşdeğer devre.

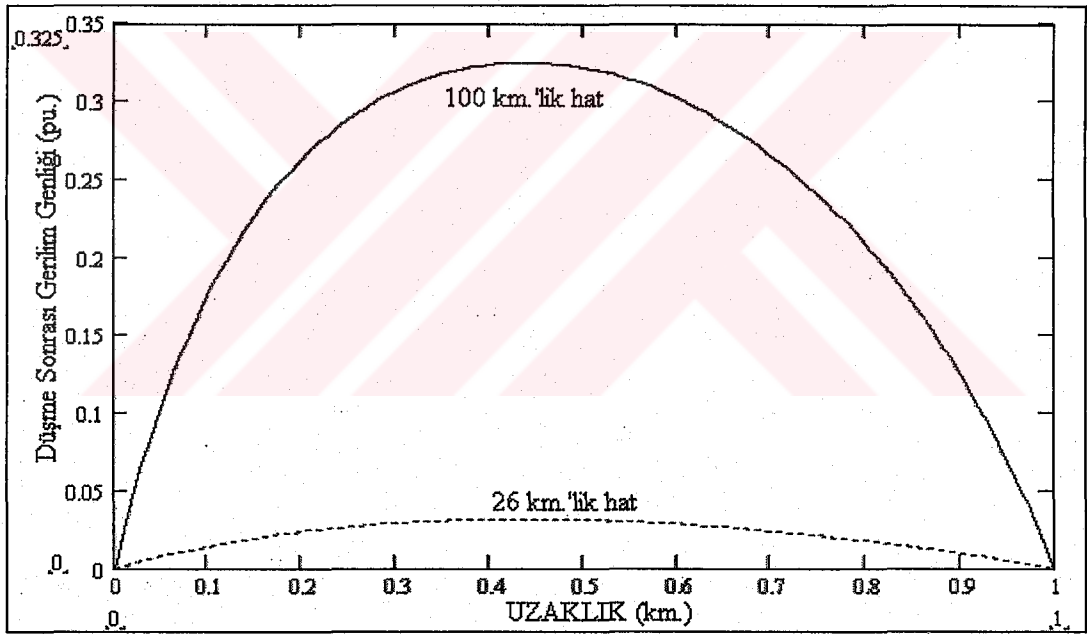
Düşme sonrası gerilim genliği  $p=0$  ve  $p=1$  için sıfırdır ve ikisi arasında bir yerde maksimum değere sahiptir. Şekil 3.22’deki sistem 126 km. Uzunluğunda 154 kV’luk bir kapalı ring çevrimidir. Bu alt istasyon ana istasyondan 26 km. uzaktadır. Arıza çevrimin hem 26 km.’lik hem de 100 km.’lik dalında oluşturulmuştur. 26 km.’lik daldaki arıza için  $Z_1=26z$  ve  $Z_2=100z$ , 100 km.’lik daldaki arıza için  $Z_1=100z$  ve  $Z_2=26z$ ’dir. Burada  $z$  km. başına besleyici empedansıdır.



Şekil 3.22. 154 kV’luk çevrim sistemi.

Şekil 3.23, Şekil 3.22'deki sistemde arızanın neden olduğu gerilim düşümlerini göstermektedir. Üst eğri 100 km.'lik dalda alt eğri ise 26 km.'lik dalda arıza olması durumundaki düşme sonrası gerilim genliğini arıza noktasına bağlı olarak gösterir. Yatay eksen üst eğri için 100 km., alt eğri için 26 km.'dir.

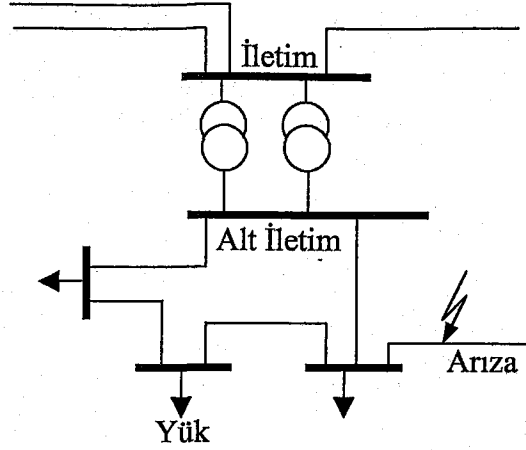
Şekil 3.23'den dalda oluşan her bir arızanın gerilimde %50'den fazla düşmeye neden olduğu görülmektedir. Alt iletim çevriminde arızanın neden olduğu düşme radyal besleyicide oluşan arızanın neden olduğu düşme kadar şiddetli değildir. Kaynağa ve yüke yakın arızalar şiddetli gerilim düşümlerine neden olur. Kaynak ve yük arasında gerilimdeki düşmenin minimum olduğu bir yer vardır. Uzun hatta bu değer daha yüksektir.



Şekil 3.23. 154 kV'luk çevrimde oluşan arızalar için düşme sonrası gerilim genlikleri.

### 3.5.3. Kapalı ringden beslenen radyal kısımlar

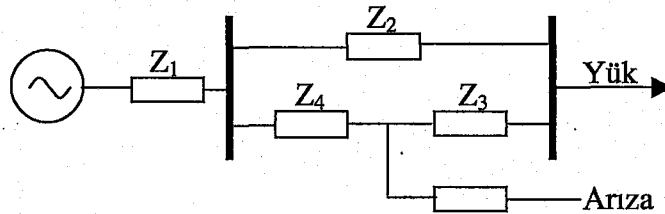
Bir yük çevrimden beslendiğinde, çevrimden çok uzaktaki dalda oluşan arıza yük geriliminde düşmeye neden olabilir. Bu durumda sistemi Şekil 3.24'deki gibi modellemek mümkündür.



Şekil 3.24. İletim ve alt iletim sistemlerinin paralel çalışması.

Sistemin eşdeğer devresi Şekil 3.25’de gösterilmektedir. Eşdeğer devrede  $Z_1$  ana alt iletim barasındaki kaynak empedansı,  $Z_2$  yük barası ile ana alt iletim barası arasındaki empedans,  $Z_3$  yük barası ile arızanın olduğu bara arasındaki empedans,  $Z_4$  ve  $Z_5$  sırasıyla son bara ve ana alt iletim barası ve arıza noktası arasındaki empedanslardır.

$$V_{arizm} = \frac{Z_5 Z_2 + Z_5 Z_3 + Z_5 Z_4 + Z_4 Z_3}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_1 Z_4 + Z_5 Z_2 + Z_5 Z_3 + Z_5 Z_4 + Z_4 Z_2 + Z_4 Z_3} \quad (3.13)$$



Şekil 3.25. Şekil 3.24 için eşdeğer devre.

### 3.6. Gözlü Sistemlerde Düşme Sonrası Gerilim Genliğinin Hesaplanması

Bahsedilen sistemlerden daha karmaşık bir sistemle karşılaşıldığında düşme sonrası gerilim ifadeleri de karmaşık bir hal alır ve elle çözüm imkansızdır. Gözlü sistemlerde matris hesaplamaları bilgisayar temelli analizlerini kolaylaştırır. Arıza sırasında gerilimlerin hesaplanması devre teorisinden iki prensibe dayanır: Thevenin

Süperpozisyon Teoremi ve Düğüm Empedansları matrisi. Burada bunlarla ilgili kısa açıklamalar verilecektir [18].

- Thevenin süperpozisyon teoremine göre bir gerilim düşümü esnasında gerilim ve akımlar, arıza öncesi gerilim ve akımlarla arıza noktasındaki gerilim değişiminin neden olduğu gerilim ve akımların toplamına eşittir. Arıza öncesinde gerilim ve akımların kaynağı sistemdeki tüm generatörlerdir. Arızanın neden olduğu gerilim ve akımlar arıza noktasında gerilim kaynağı oluşturur. Bütün diğer gerilim kaynakları kısa devre kabul edilir.

- Düğüm empedans matrisi  $Z$ , düğüm gerilimleri ve akımlarıyla bağıntılıdır.

$$[V] = [Z][I] \quad (3.14)$$

$V$  düğüm gerilimleri vektörü ve  $I$  düğüm akımları vektörüdür. Düğüm gerilimi bir düğüm ile referans düğümü arasındaki gerilimdir. Düğüm akımı ise o düğüme giren bütün akımların toplamıdır. Bir çok düğüm için düğüm akımı Kirchoff'un akım teoremine göre sıfırdır (generatör düğümleri hariç).

$N$  düğümlü ve artı bir tane referans düğümü olan bir sistem ele alınmıştır. Arıza öncesi gerilimleri  $V_k^{(0)}$  şeklinde ifade edilmiştir.  $f$ . düğümde arıza olduğunda Thevenin süperpozisyon teoremine göre  $k$ . düğümünün gerilimi (3.15) denkleminde verilmiştir.

$$V_k = V_k^{(0)} + \Delta V_k \quad (3.15)$$

$\Delta V_k$  arızanın neden olduğu  $k$ . düğümündeki gerilim değişimidir.

Bunun nedeni arıza noktasındaki  $-V_f^{(0)}$  değerli gerilim kaynağıdır.  $\Delta V_k$  hesaplanırken diğer bütün gerilim kaynakları kısa devre kabul edilir. Bu durumda  $f$ . düğüm akımı sıfır olmayan tek düğümdür. Verilen bilgiler ışığında (3.12) denklemi (3.16) denklemine dönüşür.



$$\Delta V_k = Z_{kf} I_f \quad (3.16)$$

Arıza noktasında ( $k=f$ )  $\Delta V_f = -V_f^{(0)}$  olduğu bilinmektedir.

$$I_f = -\frac{V_f^{(0)}}{Z_{ff}} \quad (3.17)$$

$$V_k = V_k^{(0)} - \frac{Z_{kf}}{Z_{ff}} V_f^{(0)} \quad (3.18)$$

Arıza öncesi gerilimler normalde 1'e yakındır. Bu nedenle (3.16) denklemi (3.19) denklemiyle ifade edilebilir.

$$V_k = 1 - \frac{Z_{kf}}{Z_{ff}} \quad (3.19)$$

Düğüm empedans matrisleri bilindiğinde düşme sonrası oluşan gerilim genliklerini hesaplamak çok kolaydır. Buna göre öncelikle düğüm empedans matrisi hesaplanmalıdır. Dal empedanslarından düğüm admitans matrisi hesaplanıp tersi alındığında empedans matrisi elde edilir.

### 3.7. Gerilim Düşme Zamanı

#### 3.7.1. Arızanın giderilme süresi

Kısa devre arızasının giderilme zamanını, koruma cihazının devreye girme süresi belirler. Düşme zamanı da temel olarak arıza giderilme zamanı şeklinde tanımlanabilir. Ancak bu süreden daha uzun da sürebilir.

Genelde iletim sisteminde oluşan arızalar dağıtım sisteminde oluşanlardan daha hızlı giderilir. İletim sistemlerinde kritik arıza giderme zamanı oldukça kısadır. Bu nedenle hızlı çalışan mesafe koruması ve hızlı devre kesicileri gereklidir. Dağıtım sistemlerinde koruma prensibi aşırı akım koruması şeklindedir. Bu çoğu zaman

arızanın giderilme zamanını arttırır. Bazı sistemlerde arızayı yarım periyotta gideren akım sınırlamalı sigortalar kullanılır.

Değişik tip koruma cihazlarının arıza giderme zamanları:

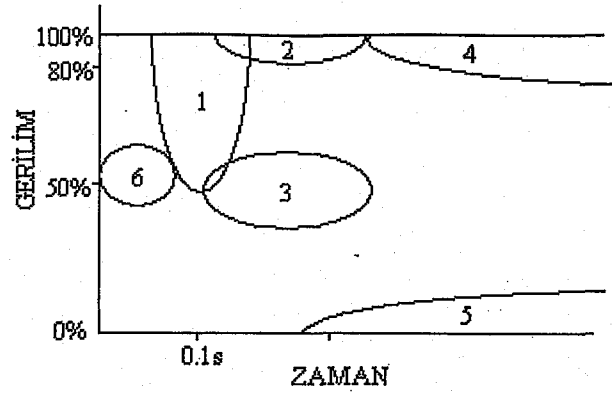
- Akım-sınırlı sigortalar: 1 periyottan az
- Sigortalar: 10-1000 ms
- Hızlı kesicili mesafe rölesi: 50-100 ms
- Bölge 1'de mesafe rölesi: 100-200 ms
- Bölge 2'de mesafe rölesi: 200-500 ms
- Diferansiyel röle: 100-300 ms
- Aşırı akım rölesi: 200-2000 ms

### 3.7.2. Genlik-zaman eğrileri

Genliği ve zamanı bilinen gerilim düşümü genlik-zaman alanında tanımlanabilir. Düşmenin bu şekilde karakterize edilmesi değişik tip çalışmalarda oldukça faydalı olabilmektedir. Şekil 3.25'de genlik-zaman eğrisine bir örnek görülmektedir. Şekil 3.26'da

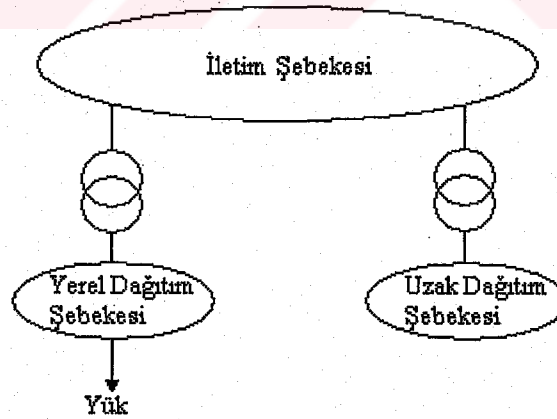
1. İletim sistem arızaları
2. Uzakta oluşan dağıtım sistemi arızaları
3. Yerel dağıtım sistemi arızaları
4. Büyük motorların devreye alınması
5. Kısa kesintiler
6. Sigortalar

arızayı ortadan kaldırmaları durumunda geçen zamanı ve gerilim genliğini göstermektedir.



Şekil 3.26. Farklı durumlar için düşmelerin Genlik-Zaman eğrisi [18].

Şekil 3.27’de dağıtım ve iletim şebekeleriyle güç sisteminin genel durumu görülmektedir. Yerel dağıtım şebekesinde oluşan bir kısa devre gerilimde oldukça şiddetli bir düşmeye neden olacaktır. Bu düşme besleyicilerinin mesafelerine bağlıdır. Arıza uzak bir dağıtım şebekesinde oluşursa, düşme PCC noktası ve arıza arasındaki transformatörün empedansına bağlı olarak daha hafif olacaktır. Herhangi bir dağıtım şebekesindeki arızanın oluşturduğu gerilim düşümünün zamanı bir kaç saniyeden fazla olabilir. İletim sisteminde oluşan arızalar 50 ila 100ms. arasında değişen sürede giderilebilir.



Şekil 3.27. Dağıtım ve iletim şebekeleriyle güç sisteminin genel durumu [18].

## BÖLÜM 4. ÜÇ FAZ DENGESİZLİĞİ

Önceki bölümlerde düşme sonrası gerilim genliği sadece dengeli sistemler için incelenmişti. Şekil 3.7'deki gerilim bölücü modeli üç faz arızalar için tanımlandığında, kullanılan empedanslar pozitif dizi değerleridir. Ancak güç sistemlerindeki çoğu kısa devreler tek faz veya iki fazdır. Bu durumda her dizin empedansın hesaba katılması veya simetrik bileşenler teorisinin kullanılması gerekmektedir.

Simetrik olmayan arızalar için de Şekil 3.7'deki gerilim bölücü modeli kullanılabilir. Ancak bu kez pozitif bileşenin yanında negatif ve sıfır dizi bileşenlerinin de göz önüne alınması gerekmektedir. Şekil 4.1'de bu üç bileşen görülmektedir.  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_0$  sırasıyla PCC noktasındaki pozitif, negatif ve sıfır dizi gerilimleri;  $Z_{S1}$ ,  $Z_{S2}$ ,  $Z_{S0}$  kaynak empedans değerleri ve  $Z_{F1}$ ,  $Z_{F2}$ ,  $Z_{F0}$  arıza empedans değerleridir. Arıza akımına ait üç bileşen  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_0$  şeklinde ifade edilmiştir. Pozitif dizi kaynağı E ile tanımlanmıştır. Negatif ve sıfır dizi bileşenlerinde kaynak yoktur. Bileşenlerin bağlantıları arıza tipine bağlıdır.

### 4.1. Tek Faz Arızası

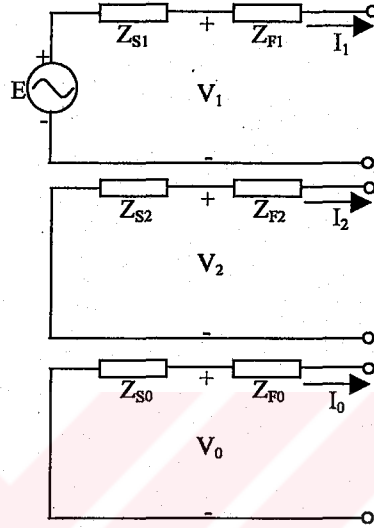
Bir tek faz arızasında Şekil 4.1'de görüldüğü gibi üç bileşen birbirine seri şekilde bağlanmalıdır. a fazında arıza olduğu varsayılmıştır.

a fazındaki tek faz arızasına ait sonuç devresi Şekil 4.2'de görülmektedir. Eğer bir önceki bölümde olduğu gibi E=1 olarak kabul edilirse, PCC noktasında, bileşenlere ait (4.1), (4.2) ve (4.3) denklemleri elde edilir.

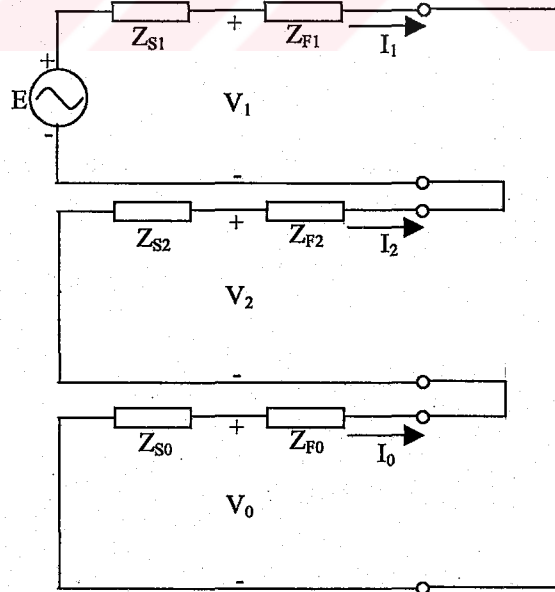
$$V_1 = \frac{Z_{F1} + Z_{S2} + Z_{F2} + Z_{S0} + Z_{F0}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})} \quad (4.1)$$

$$V_2 = \frac{Z_{S2}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})} \quad (4.2)$$

$$V_0 = \frac{Z_{S0}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})} \quad (4.3)$$



Şekil 4.1. Gerilim bölücü modeli için pozitif (üst), negatif (orta) ve sıfır (alt) dizi bileşenleri.



Şekil 4.2. Tek faz arızası için eşdeğer devre.

Arıza sırasında PCC noktasındaki faz gerilimlerini elde etmek için simetrik bileşenlerden (4.4) denklemiyle faz büyüklüklerine geçilebilir.

$$V_a = V_1 + V_2 + V_0$$

$$V_b = a^2 V_1 + a V_2 + V_0 \quad (4.4)$$

$$V_c = a V_1 + a^2 V_2 + V_0$$

Arızalı faz gerilimi,  $V_a$ , için (4.5) denklemi elde edilir.

$$V_a = \frac{Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})} \quad (4.5)$$

Orjinal gerilim bölücü eşitliği,  $Z_F$  yerine  $Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}$  ve  $Z_S$  yerine  $Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0}$  yazılarak elde edilebilir. Böylece Şekil 3.7'deki gerilim bölücü modeli ve (3.5) denklemi tek faz arızalarında da geçerlidir. (4.1)'den (4.5)'e kadar olan denklemleri kullanarak (4.6) eşitliği elde edilir.

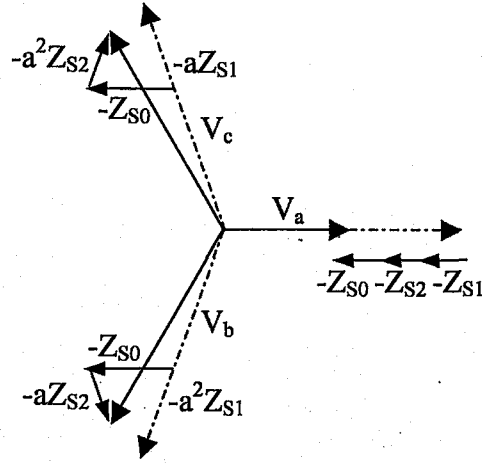
$$V_a = 1 - \frac{Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})}$$

$$V_b = a^2 - \frac{a^2 Z_{S1} + a Z_{S2} + Z_{S0}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})} \quad (4.6)$$

$$V_c = a - \frac{a Z_{S1} + a^2 Z_{S2} + Z_{S0}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})}$$

Şekil 4.3'de bu gerilimlerin fazör diyagramları görülmektedir. Arızasız fazlardaki gerilim düşmesi üç ifadeyi içerir.

- Arızasız fazlardan birinde, arıza öncesi gerilimle aynı yönde, pozitif dizi kaynak empedansı ile orantılı bir gerilim düşmesi.
- Diğer arızasız fazda, arıza öncesi gerilimle aynı yönde, negatif dizi kaynak empedansı ile orantılı gerilim düşmesi.
- Arızalı fazda, arıza öncesi gerilimle aynı yönde, sıfır dizi kaynak empedansı ile orantılı gerilim düşmesi.



Şekil 4.3. Bir faz arızası sırasında faz-toprak gerilimleri.

İki arızasız faz arasındaki gerilim (4.7) denklemiyle elde edilebilir.

$$V_b - V_c = (a^2 - a) \left\{ 1 - \frac{Z_{S1} - Z_{S2}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})} \right\} \quad (4.7)$$

Denklem (4.7)'den görüldüğü gibi, fark geriliminin değişimi pozitif ve negatif dizi kaynak empedanslarının arasındaki farka bağlıdır. Eğer bu iki değer birbirine eşitse arızasız fazlar arasındaki gerilimde değişim olmaz. (4.6) ve (4.7) denklemleri iki durum için incelendiğinde;

- Pozitif, negatif ve sıfır dizi kaynak empedanslarının eşit olduğu durum.
- Pozitif, negatif dizi kaynak ve besleyici empedanslarının eşit olduğu durum.

#### 4.1.1. Direkt topraklanmış sistemler

Direkt topraklanmış bir sistemde üç dizi bileşenlerine ait kaynak empedansları yaklaşık eşittir. Arıza sırasındaki gerilimler (4.8) denklemindeki gibidir.

$$V_a = - \frac{Z_{S1}}{\frac{1}{3}(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + Z_{S1}}$$

$$V_b = a^2 \quad (4.8)$$

$$V_c = a$$

Arızalı faz gerilimi, üç faz arızası sırasındaki gerilimle aynı değerdedir, arızasız faz gerilimlerinde değişme olmaz [18].

#### 4.1.2. Empedans üzerinden topraklanmış sistemler

Bir direnç ya da yüksek değerli empedans üzerinden topraklanmış bir sistemde, sıfır dizi kaynak empedansı negatif ve pozitif dizi kaynak empedanslarından farklıdır. Pozitif ve negatif dizi kaynak empedansları yaklaşık eşit kabul edilir. Ancak kaynak empedansının büyük kısmını havai hat ya da yer altı kablo empedanslarının oluşturduğu sistemlerde (iletim hatları v.s.) pozitif ve negatif dizi empedans değerleri önemli derecede farklı olabilir.  $Z_{S1}=Z_{S2}$  ve  $Z_{F1}=Z_{F2}$  olduğunda, tek faz arızası sırasında PCC noktasındaki gerilim değerleri (4.9) denklemindeki gibidir.

$$\begin{aligned} V_a &= 1 - \frac{Z_{S0} + 2Z_{S1}}{(2Z_{F1} + Z_{F0}) + (2Z_{S1} + Z_{S0})} \\ V_b &= a^2 - \frac{Z_{S0} - Z_{S1}}{(2Z_{F1} + Z_{F0}) + (2Z_{S1} + Z_{S0})} \\ V_c &= a - \frac{Z_{S0} - Z_{S1}}{(2Z_{F1} + Z_{F0}) + (2Z_{S1} + Z_{S0})} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Arızasız fazlardaki gerilim düşmesi sadece sıfır dizi bileşeni içerir. Cihaz uçlarındaki gerilim seviyesiyle aynı gerilim düşmelerine sık rastlanmaz. Gerilim düşmesinin daha düşük gerilim seviyelerine dönüşümü sırasında transformatörler sıfır dizi gerilimini sınırlar. Arıza cihaz uçlarındaki gerilimle aynı seviyede olsa da, cihaz genelde üçgen bağlı olduğundan gerilimin sıfır dizi bileşeni olmayacaktır. (4.9) denkleminde arızasız fazlarda gerilim düşümünü engellemek için sıfır dizi gerilimi eklenirse, (4.9) denkleminde (4.10) denklemi elde edilir.

$$V_a' = V_a + \frac{Z_{S0} - Z_{S1}}{(2Z_{F1} + Z_{F0}) + (2Z_{S1} + Z_{S0})} = 1 - \frac{3Z_{S1}}{(2Z_{F1} + Z_{F0}) + (2Z_{S1} + Z_{S0})}$$



$$V_b' = V_b + \frac{Z_{S0} - Z_{S1}}{(2Z_{F1} + Z_{F0}) + (2Z_{S1} + Z_{S0})} = a^2 \quad (4.10)$$

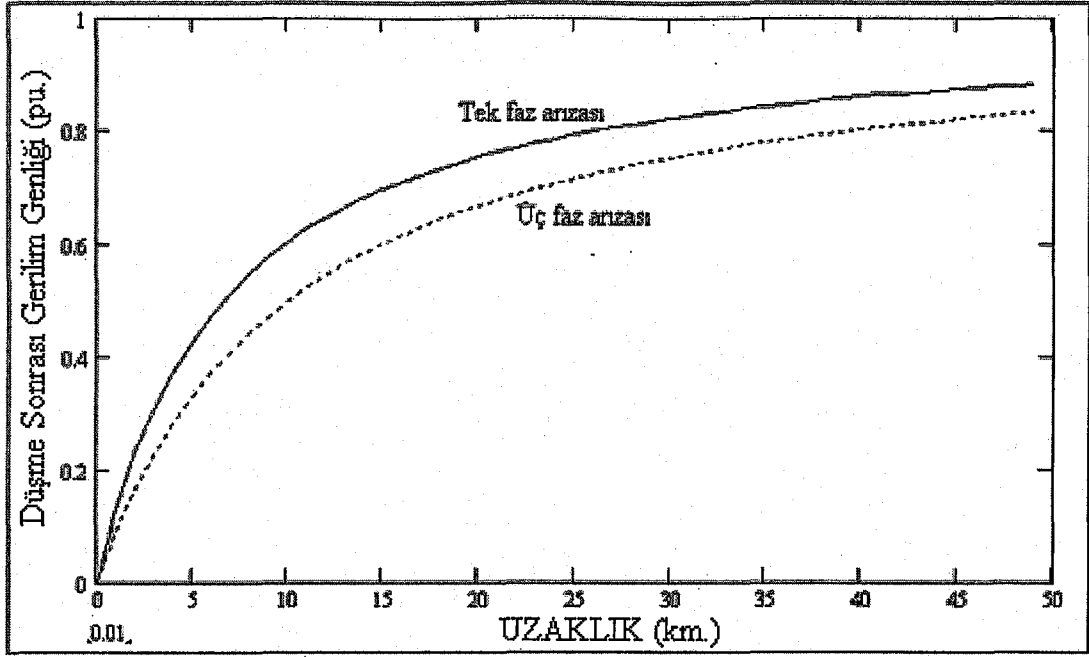
$$V_c' = V_c + \frac{Z_{S0} - Z_{S1}}{(2Z_{F1} + Z_{F0}) + (2Z_{S1} + Z_{S0})} = a$$

Arızalı faz gerilimine ait eşitlik, (4.8) denklemiyle karşılaştırabilmek amacıyla tekrar yazılırsa denklem (4.11)'e dönüşür.

$$V_a' = 1 - \frac{Z_{S1}}{\frac{1}{3}(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + \frac{1}{3}(Z_{S0} - Z_{S1}) + Z_{S2}} \quad (4.11)$$

(4.11) denklemi (4.8) denklemiyle karşılaştırıldığında payda da farklı olarak  $\frac{1}{3}(Z_{S0} - Z_{S1})$  teriminin varolduğu görülür. Bu, PCC noktası ve arıza arasında ek bir empedans şeklinde yorumlanabilir. Bu empedans değeri pozitifse, yani  $Z_{S0} > Z_{S1}$  ise, gerilim düşümü çok hafiftir. Direkt topraklanmış bir sistemde  $Z_{S0} < Z_{S1}$  olabilir, yani ek empedans değeri negatiftir. Bu duruma yakın arızalar için  $V_a'$  negatif olur.

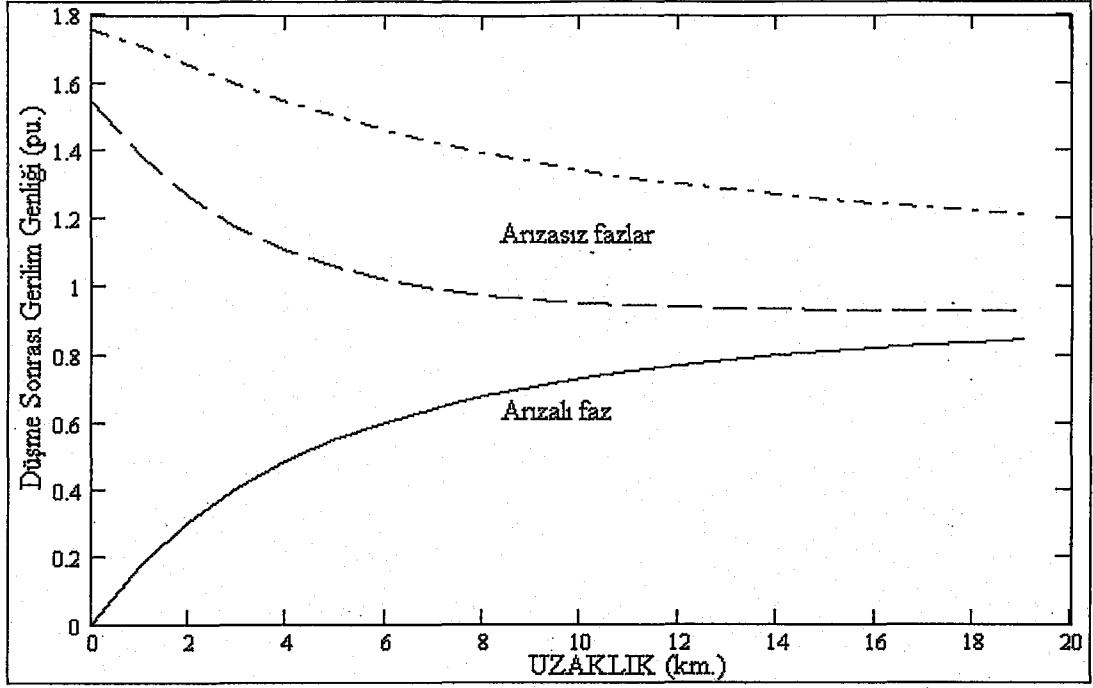
Şekil 3.13'deki aynı sistem için, 154 kV'luk besleyicisinde tek faz arızasının oluşması durumunda, 154 kV'luk sistem direkt topraklandığı için, pozitif ve negatif dizi kaynak empedansları eşittir. Besleyiciler içinde yine pozitif ve negatif dizi empedansları eşit, sıfır dizi empedansı ise bunun yaklaşık iki katıdır. Pozitif ve negatif kaynak empedansları:  $Z_{S1} = Z_{S2} = 1.073 + j10.2471\Omega$ , arıza empedansının pozitif ve negatif dizi empedansları:  $Z_{F1} = Z_{F2} = 0.1333 + j0.43333\Omega/\text{km}$  ve sıfır dizi empedansı:  $Z_{F0} = 0.42 + j1.21333\Omega/\text{km}$ 'dir.



Şekil 4.4. 154 kV'luk besleyicide tek faz ve üç faz arızası durumları için arızalı fazdaki gerilim değeri.

Yukarıda verilen eşitlikler kullanılarak tek faz arızası için üç faz gerilimleri hesaplanabilir. Arızalı faza ait sonuçlar Şekil 4.4'de görülmektedir. Üç faz arıza eğrisi ve tek faz arıza eğrisi arasındaki farkın nedeni arıza empedansıdır. Arızaya olan uzaklığın artmasıyla sıfır dizi besleyici empedansı pozitif dizi empedansından daha hızlı artar. Şekil 4.4'den de görüldüğü gibi tek faz arızaları üç faz arızalarından daha küçük genlikli gerilim düşümlerine neden olur. Tek faz arızasından dolayı arızasız fazlarda çok küçük değişimler görülür.

Direkt topraklanmış sistemde tek faz arızası sırasında arızasız fazlardan birinin gerilimi arıza önceki değerinde kalır. Direnç üzerinden topraklanmış bir sistemde ise tek faz arızasında arızasız faz gerilimlerinde artma görülür. Bu etki Şekil 4.5'de görülmektedir. Arızalı faz geriliminde düşme görülürken arızasız fazlarda gerilim artmaktadır. Arızasız fazlardan birinin gerilimi nominalin %170'ine artmıştır.



Şekil 4.5. 34.5 kV'luk besleyicide tek faz arızası sırasında arızalı ve arızasız faz gerilimlerinin durumu.

#### 4.2. Faz-Faz Arızası

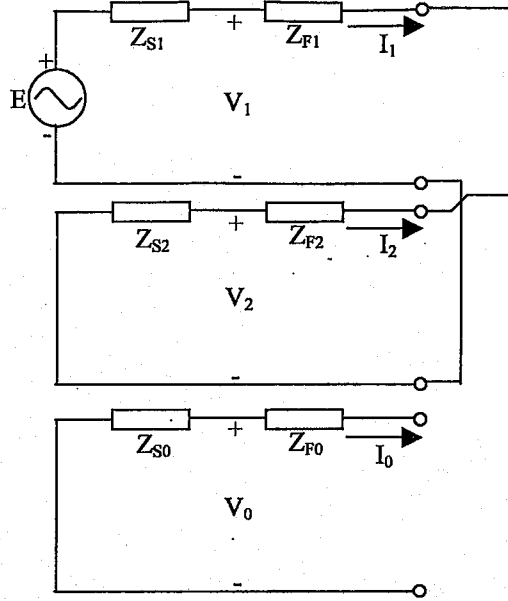
Faz-faz arızalarında, Şekil 4.6'da görüldüğü gibi pozitif ve negatif dizi bileşenleri paralel bağlanır. Faz-faz arızasında sıfır dizi gerilim ve akımları sıfırdır.

PCC noktasında dizi gerilimleri (4.12) denkleminde verilmiştir.

$$V_1 = E - E \frac{Z_{S1}}{(Z_{S1} + Z_{S2}) + (Z_{F1} + Z_{F2})}$$

$$V_2 = \frac{Z_{S2}}{(Z_{S1} + Z_{S2}) + (Z_{F1} + Z_{F2})} \quad (4.12)$$

$$V_0 = 0$$



Şekil 4.6. Faz-faz arızası için eşdeğer devre.

Faz gerilimleri (4.4) denklemini kullanarak (4.12)'den elde edilebilir.

$$\begin{aligned}
 V_a &= 1 - \frac{Z_{S1} - Z_{S2}}{(Z_{S1} + Z_{S2}) + (Z_{F1} + Z_{F2})} \\
 V_b &= a^2 - \frac{a^2 Z_{S1} - a Z_{S2}}{(Z_{S1} + Z_{S2}) + (Z_{F1} + Z_{F2})} \\
 V_c &= a - \frac{a Z_{S1} - a^2 Z_{S2}}{(Z_{S1} + Z_{S2}) + (Z_{F1} + Z_{F2})}
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

Bileşen gerilim ve akımlar hesaplanırken arızanın b ve c fazları arasında olduğu kabul edilmiştir. Bu durumda a fazı arızasız faz, b ve c ise arızalı fazlardır. (4.13) denkleminde arızasız fazdaki gerilim düşmesinin kaynak empedansının pozitif ve negatif dizi bileşenleri arasındaki farka bağlı olduğu görülmektedir.  $Z_{S1} = Z_{S2}$  olduğu varsayılırsa (4.13) denklemi (4.14) denklemine dönüşür.

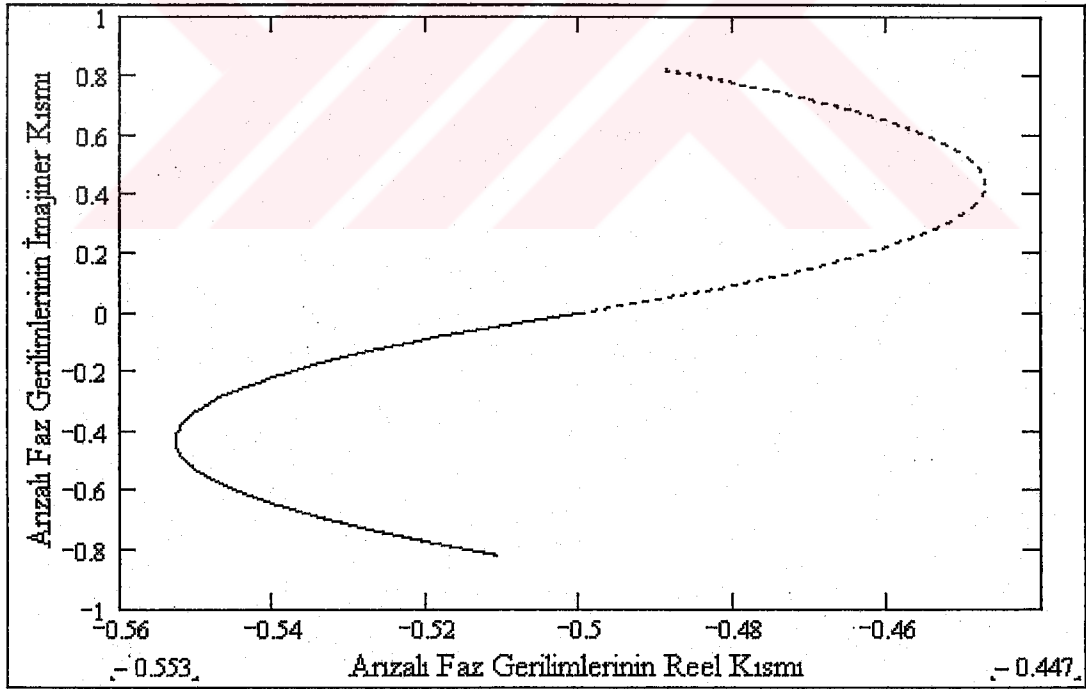
$$\begin{aligned}
 V_a &= 1 \\
 V_b &= a^2 - \frac{(a^2 - a)Z_{S1}}{2Z_{S1} + 2Z_{F1}} \\
 V_c &= a + \frac{(a^2 - a)Z_{S1}}{2Z_{S1} + 2Z_{F1}}
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

Arızasız fazlar arasındaki gerilim denklem (4.15)'deki gibidir.

$$V_b - V_c = \frac{Z_{F1} + Z_{F2}}{(Z_{S1} + Z_{S2}) + (Z_{F1} + Z_{F2})} (a^2 - a) \quad (4.15)$$

$(a^2 - a)$  ifadesinin iki arızalı faz arasındaki arıza öncesi gerilim değeri olduğu düşünülürse, Şekil 3.7 ve denklem (3.5)'e olan benzerlik görülebilir. Aynı ifadeler üç faz arızası içinde kullanılabilir fakat arızasız fazlar arasındaki gerilimler için empedanslar pozitif ve negatif dizi değerlerinin toplamıdır.

Şekil 3.13'deki sistemde 34.5 kV'luk besleyicilerin birinde faz-faz arızası oluşması durumunda kompleks gerilimler Şekil 4.7'de görüldüğü gibidir. Gerilimleri hesaplamak için gerekli olan empedans değerleri:  $Z_{S1}=Z_{S2}=0.119025+j1.1366\Omega$ ,  $Z_{F1}=Z_{F2}=0.134915+j0.373180\Omega/\text{km}$ ,  $Z_{F0}=0.404745+j1.11954\Omega$ .



Şekil 4.7. Faz-faz arızasının neden olduğu  $V_b$  ve  $V_c$  fazlarına ait kompleks gerilimler.

### 4.3. İki Faz Toprak Arızası

İki faz toprak arızasında üç dizi bileşeni Şekil 4.8'de görüldüğü gibi paralel bağlanır. b ve c fazları ve toprak arasındaki bir arıza durumunda PCC noktasındaki dizi gerilimleri (4.16) denkleminde verilmiştir.

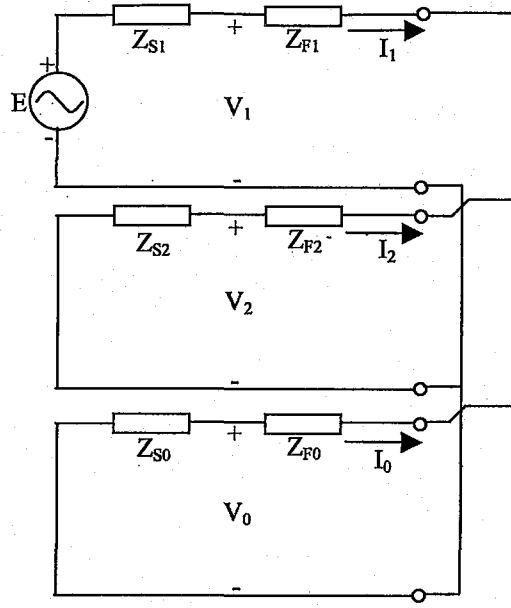
$$\begin{aligned}V_1 &= 1 - \frac{Z_{S1}(Z_{S0} + Z_{F0} + Z_{S2} + Z_{F2})}{D} \\V_2 &= \frac{Z_{S2}(Z_{S0} + Z_{F0})}{D} \\V_0 &= \frac{Z_{S0}(Z_{S2} + Z_{F2})}{D}\end{aligned}\quad (4.16)$$

(4.16) denkleminde D (4.17) denklemindeki gibi ifade edilir.

$$D = (Z_{S0} + Z_{F0})(Z_{S1} + Z_{F1} + Z_{S2} + Z_{F2}) + (Z_{S1} + Z_{F1})(Z_{S2} + Z_{F2}) \quad (4.17)$$

(4.16) denkleminde üç faz için faz-toprak gerilimleri (4.18) denklemini yardımıyla hesaplanabilir.

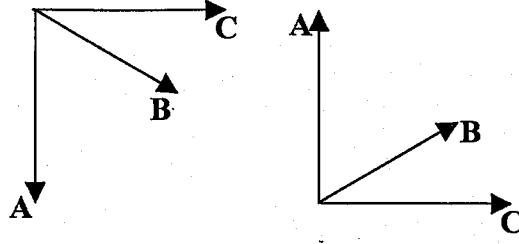
$$\begin{aligned}V_a &= 1 + \frac{(Z_{S2} - Z_{S1})(Z_{S0} + Z_{F0})}{D} + \frac{(Z_{S0} - Z_{S1})(Z_{S2} + Z_{F2})}{D} \\V_b &= a^2 + \frac{(aZ_{S2} - a^2Z_{S1})Z_0}{D} + \frac{(Z_{S0} - a^2Z_{S1})Z_2}{D} \\V_c &= a + \frac{(a^2Z_{S2} - aZ_{S1})Z_0}{D} + \frac{(Z_{S0} - aZ_{S1})Z_2}{D}\end{aligned}\quad (4.18)$$



Şekil 4.8. İki faz toprak arızası için eşdeğer devre.

Arızasız faz gerilimi pozitif ve negatif dizi kaynak empedansları arasındaki farka ve pozitif ve sıfır dizi kaynak empedansları arasındaki farka bağlıdır. Her iki durumda da pozitif dizi empedansı arttığında arızasız faz gerilimi düşer. Negatif ve pozitif dizi empedans değerleri birbirine çok yakın olduğundan (4.18) denkleminde ikinci terim ihmal edilebilir. (4.18) denkleminde sıfır ve pozitif dizi kaynak empedansı arasındaki farka bağlı olan üçüncü terim gerilimde ciddi değişime neden olur. Sıfır dizi kaynak empedansı pozitif dizi empedansından genelde büyük olduğundan arızasız faz geriliminde yükselme beklenir.

Arızalı faz gerilimleri incelendiğinde,  $Z_{S1}$  ve  $Z_{S2}$  değerleri birbirine yakın olduğundan, ikinci terim diğer arızalı faza zıt yönde bir gerilim düşümünü ifade eder,  $(a-a^2)$  arızalı fazlar arasındaki arıza öncesi gerilim değeridir.  $Z_{S0}=Z_{S1}$  için (4.18) denkleminde üçüncü terim arızasız fazda arıza öncesi gerilimi için gerilim düşümünü ifade eder,  $Z_{S0} \ll Z_{S1}$  için üçüncü terim Şekil 4.9'da görüldüğü gibi pozitif reel ekseninde bir düşümedir.



Şekil 4.9. İki faz toprak arızası sırasında arızalı fazda gerilim düşümleri.

Pozitif ve negatif dizi empedans değerleri yaklaşık eşit değerlerde olduğundan  $Z_{S1}=Z_{S2}$  ve  $Z_{F1}=Z_{F2}$  yazılarak denklemler kolaylaştırılabilir. İki faz toprak arızaları için tekrar oluşturulan eşdeğer devre Şekil 4.10'dadır.

Şekil 4.10'dan arızasız faza ait faz-nötr geriliminin, iki faz toprak arızasından etkilenmediği görülür. Arıza noktasındaki faz nötr gerilimi, arıza noktasına Kirchhoff teoreminin uygulanmasıyla bulunur.

$$\frac{a^2 - V_{FN}}{Z_{S1} + Z_{F1}} + \frac{a - V_{FN}}{Z_{S1} - Z_{F1}} = \frac{V_{FN}}{\frac{1}{3}(Z_{S0} - Z_{S1}) + \frac{1}{3}(Z_{F0} - Z_{F1})} \quad (4.19)$$

Denklem (4.19) düzenlendiğinde (4.20) eşitliği elde edilir.

$$V_{FN} = -\frac{(Z_{S0} + Z_{F0}) - (Z_{S1} + Z_{F1})}{2(Z_{S0} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{F1})} \quad (4.20)$$

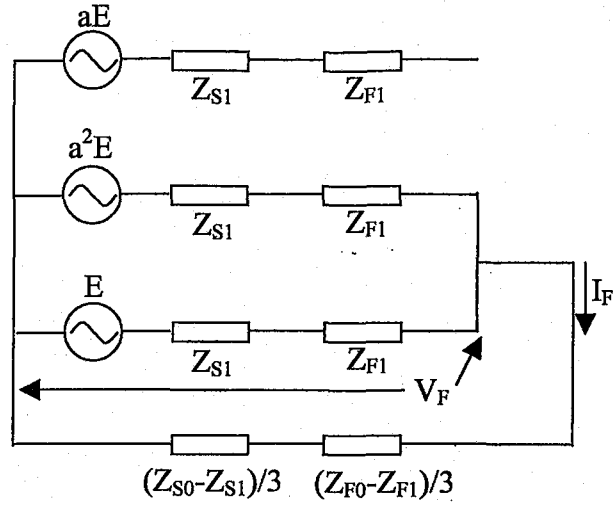
Sıfır dizi ve pozitif dizi empedansları eşitse,  $Z_{S0}=Z_{S1}$  ve  $Z_{F0}=Z_{F1}$ .

$$V_{FN} = 0 \quad (4.21)$$

Sıfır dizi empedansı büyük olursa, direnç üzerinden topraklanmış bir sistemde, arıza noktasındaki gerilim denklemi (4.22)'de verilmiştir.

$$V_{FN} = \frac{1}{2} \quad (4.22)$$



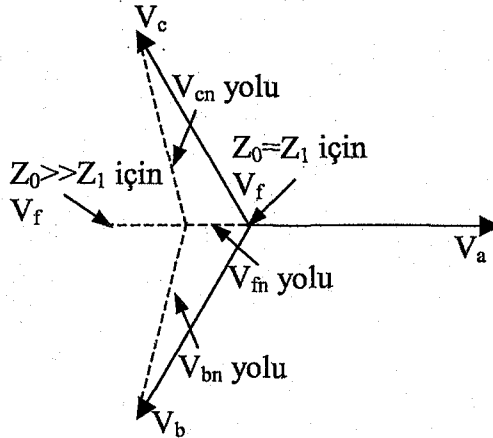


Şekil 4.10. İki faz toprak arızası için üç fazlı gerilim bölücü modeli.

$Z_{S1} < Z_{S0} < \infty$  durumu, denklem (4.23)'de belirtilen iki uç arasında bir yerde oluşan arıza noktasının gerilimini verir.

$$-\frac{1}{2} \leq V_{FN} \leq 0 \quad (4.23)$$

Bu gerilim ve PCC noktasındaki gerilimler Şekil 4.11'den elde edilebilir. Arıza noktasındaki gerilim orijin ve  $-\frac{1}{2}$  noktası arasında sınırlanmıştır. Bir arızalı faz için PCC noktasındaki gerilim bu fazda arıza sırasındaki gerilim ve arıza öncesi gerilim arasındaki bir değerdedir. Bu bilgi üç fazlı dengesiz gerilim düşümlerinin sınıflandırılmasında kullanılacaktır.



Şekil 4.11. İki faz toprak arızası için arızalı fazda faz-nötr gerilimleri.

#### 4.4. Üç Fazlı Dengesiz Kısa Süreli Gerilim Düşümlerinin Tipleri

Arızanın her bir çeşidinde, PCC noktasındaki gerilimler için ifadeler çıkartılmıştır. Ancak daha öncede belirtildiği gibi, bu gerilim cihaz uç gerilimlerine eşit değildir. Cihaz genelde arızanın olduğu gerilim seviyesinden daha düşük bir gerilim seviyesine bağlanmıştır. Cihaz uç gerilimleri PCC noktasındaki gerilimlerin dışında PCC noktası ile cihaz ucu arasındaki trafonun sarım bağlantı şekline de bağlıdır.

Buna ek olarak cihaz uç gerilimleri yükün bağlantı şekline de bağlıdır. Üç fazlı yük genelde üçgen bağlıdır, yıldız bağlı yükler de kullanılabilir. Tek fazlı yükler genelde yıldız bağlıdır. Aşağıdaki varsayımlara bağlı olarak üç fazlı dengesiz azalmalar için sınıflandırma yapılabilir.

- Pozitif ve negatif dizi empedansları eşittir.
- Gerilimin sıfır dizi bileşeni cihaz uçlarında oluşmaz, bu nedenle faz nötr gerilimleri alınabilir.
- Arızadan önce, sonra ve arıza sırasında yük akımları ihmal edilir.

##### 4.4.1. Tek faz arızası

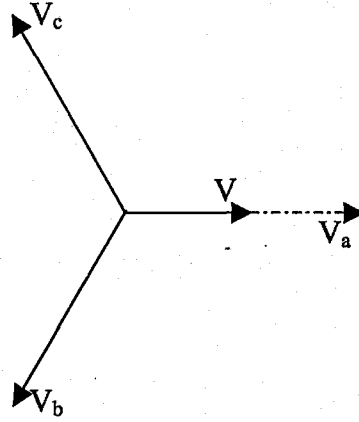
Tek faz toprak arızası sırasında faz-nötr gerilimleri (4.24) denkleminde verilmiştir.

$$V_a = V$$

$$V_b = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}j\sqrt{3} \quad (4.24)$$

$$V_c = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}j\sqrt{3}$$

Şekil 4.12'de arıza öncesi ve arıza sırasındaki faz-nötr gerilimleri görülmektedir. Yük yıldız bağlıysa bunlar cihaz uç gerilimleridir.



Şekil 4.12. Bir faz toprak arızası sırasında (düz çizgiler) ve sonrasında (noktalı kesikli çizgi) faz-nötr gerilimleri.

Yük üçgen bağlıysa, cihaz uç gerilimleri faz-faz gerilimleridir. Faz-faz gerilimleri (4.24) denkleminde elde edilebilir.

$$\begin{aligned}
 V_a' &= j \frac{V_b - V_c}{\sqrt{3}} \\
 V_b' &= \frac{V_c - V_a}{\sqrt{3}} \\
 V_c' &= \frac{V_a - V_b}{\sqrt{3}}
 \end{aligned} \tag{4.25}$$

(4.25) denkleminde dönüşüm uygulandığında tek faz toprak arızası sırasında, üçgen bağlı bir yük için üç fazlı dengesiz gerilim düşme ifadeleri (4.26) denkleminde elde edilir.

$$\begin{aligned}
 V_a &= V \\
 V_b &= -\frac{1}{2} - \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{3}j\right)V \\
 V_c &= -\frac{1}{2} + \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{3}j\right)V
 \end{aligned} \tag{4.26}$$

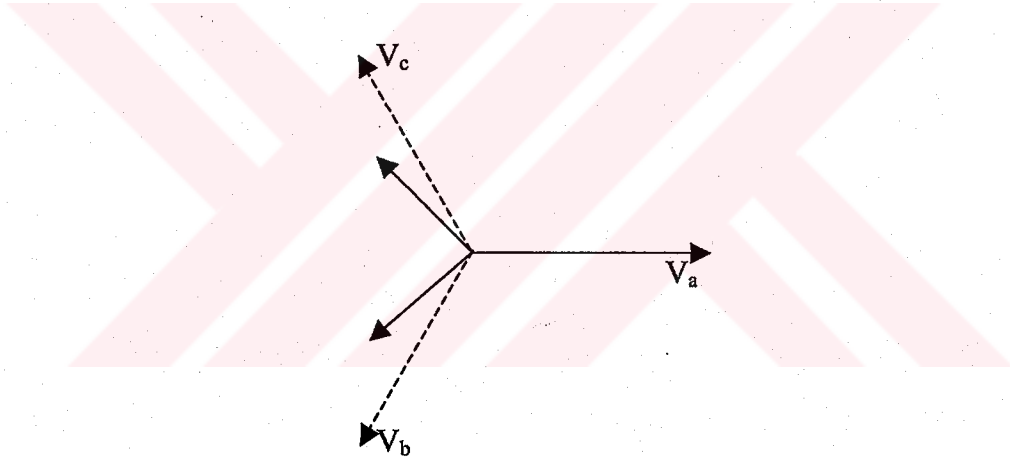
Şekil 4.13'de cihaz uç gerilimleri için fazör diyagramı görülmektedir. İki faza ait gerilim değerlerinde düşme ve faz açısında değişim söz konusudur. Üçüncü faz

gerilimi arızadan etkilenmemektedir. Üçgen bağlı cihazda tek faz arızası nedeniyle iki faz geriliminde düşme görülür.

#### 4.4.2. Faz-faz arızası

Faz-faz arızasında iki arızalı faz gerilimleri birbirlerine doğru hareket eder. Bu durumdaki faz-nötr gerilimleri (4.27) denkleminde verilmiştir.

$$\begin{aligned} V_a &= 1 \\ V_b &= -\frac{1}{2} - \frac{1}{2} V_j \sqrt{3} \\ V_c &= -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} V_j \sqrt{3} \end{aligned} \quad (4.27)$$



Şekil 4.13. Bir faz toprak arızası sırasında (düz çizgiler) ve sonrasında (noktalı kesikli çizgi) faz-faz gerilimleri.

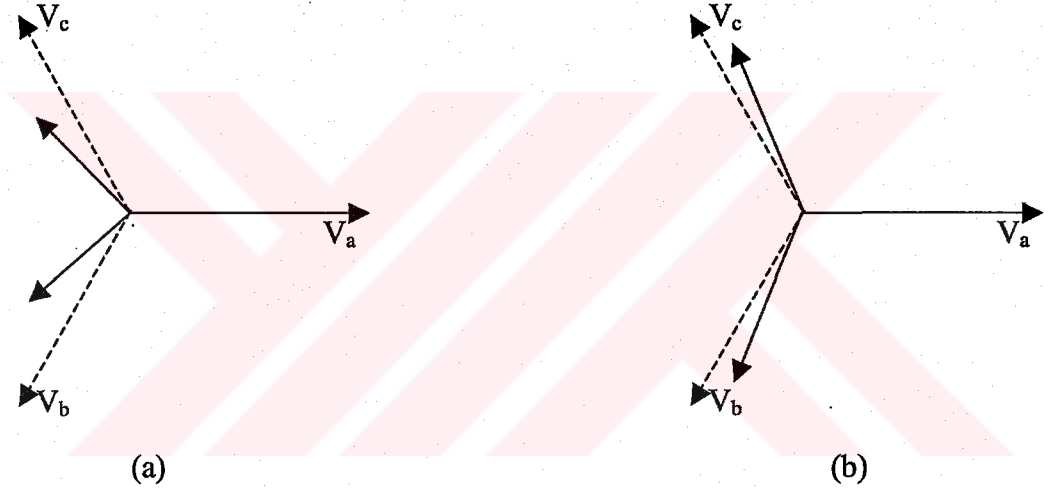
(4.25) denklemini kullanarak faz-faz arasına bağlı bir yük için gerilimler hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} V_a &= V \\ V_b &= -\frac{1}{2} V - \frac{1}{2} j \sqrt{3} V \\ V_c &= -\frac{1}{2} V + \frac{1}{2} j \sqrt{3} V \end{aligned} \quad (4.28)$$

İlgili fazör diyagramları Şekil 4.14'de görülmektedir. Faz-faz arızası nedeniyle yıldız bağlı bir yükün iki faz geriliminde düşme gözlenir, maksimum düşme sonrası gerilim genliği  $V=0$  için %50'dir. Üçgen bağlı bir yükün üç faz geriliminde düşme görülür, bir fazın gerilim değeri sıfıra kadar düşebilir.

#### 4.4.3. Transformatörün bağlantı şekli

Trafo lar bir çok farklı bağlantı şekillerine sahiptir. Burada bir gerilim seviyesinden diğerine üç faz dengesiz azalmanın aktarımının açıklanması için sadece üç tip bağlantı şeklinden bahsedilecektir.



Şekil 4.14. (a) Faz-faz arızası sırasında (düz çizgi) ve sonrasında (kesikli çizgi) faz-nötr gerilimleri. (b) Faz-faz arızası sırasında (düz çizgi) ve sonrasında (kesikli çizgi) faz-faz gerilimleri.

Tip 1. Gerilim değerlerinde değişime neden olmayan transformatörler: bu tip transformatörlerde sekonder tarafın gerilim değeri primer tarafın değerine eşittir. Primer ve sekonderi direkt topraklanmış yıldız-yıldız bağlı transformatörler bu tiptir.

Tip 2. Sıfır dizi gerilimini yok eden transformatörler: bu tip transformatörlerde sekonder gerilimi, primer geriliminden sıfır dizi geriliminin çıkartılmasıyla elde edilen değere eşittir. Primer veya sekonderinden biri ya da her ikisi topraklanmamış yıldız-yıldız bağlı transformatörler ve üçgen-üçgen bağlı transformatörler bu tiptir. Ayrıca üçgen-zigzag bağlı transformatörler de bu gruba girer.

Tip 3. Hat ve faz gerilimlerini değiş tokuş eden transformatörler: sekonder geriliminin her biri primerin iki faz gerilimi arasındaki farka eşittir. Üçgen-yıldız, yıldız-üçgen ve yıldız-zigzag transformatörler bu tiptir.

Arıza öncesi ve arıza sırasında elde edilen fazörler cihaz üzerinde hiç bir etki yaratmadan döndürülebilir. Bu dönüş zaman ekseninin sıfır noktasında kayma şeklinde görülür. Üç transformatör tipi aşağıdaki dönüştürme matrisleriyle matematiksel olarak tanımlanabilir [18].

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

$$T_2 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

$$T_3 = \frac{j}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

(4.29) denklemi gerilimin sıfır dizi bileşenini yok eder.  $T_2$  matrisinden sıfır dizi geriliminin  $\frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c)$  'ye eşit olduğu kolaylıkla anlaşılabilir.  $T_3$  matrisi (4.31) denklemiyle aynı dönüşümleri verir. Aynı zamanda iki defa  $T_3$  matrisinin uygulanması sonucu  $T_2$  matrisi elde edilir. Yani  $T_3^2 = T_2$ 'dir.

#### 4.4.4. Transformatörlerde kısa süreli gerilim düşümlerinin dönüşümü

Transformatörlerin üç tipi de faz-faz ve tek faz-toprak arızalarının neden olduğu gerilim düşümlerine uygulanabilir. Gerilim düşümleri için genel bir tanımlama yapmak için aşağıda sistematik bir şekilde farklı kombinasyonlar oluşturulmuştur.

- Tek faz arızası, yıldız bağlı yük, transformatör yok.

Şekil 4.12 ve (4.24) denklemi bu durumu tanımlar. Bu düşme X1 tipi gerilim düşmesi olarak tanımlanmıştır. 1. tip transformatör de aynı sonuçları vermektedir.

- Tek faz arızası, üçgen bağlı yük, transformatör yok.

Şekil 4.13 ve denklem (4.26) bu durumu içerir. Bu tip düşme X2 olarak ifade edilmiştir.

- Tek faz arızası, yıldız bağlı yük, transformatör tipi 2.

İkinci tip transformatör sıfır dizi gerilimlerini yok eder. Tek faz arızası yüzünden faz gerilimlerinin sıfır dizi bileşeni (4.24) denkleminde bulunmuştur ve  $\frac{1}{3}(V-1)$ 'e eşittir. Bu gerilimler için (4.32) denklemi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{1}{3} + \frac{2}{3}V \\ V_b &= -\frac{1}{6} - \frac{1}{3}V - \frac{1}{2}j\sqrt{3} \\ V_c &= -\frac{1}{6} - \frac{1}{3}V + \frac{1}{2}j\sqrt{3} \end{aligned} \quad (4.32)$$

Bu yeni tip bir gerilim düşmesi gibi görülmektedir ancak ilerleyen kısımda faz-faz arızası sırasında yıldız bağlı yükte oluşan düşmeyle aynı olduğu görülecektir. Fakat şimdilik X3 tipi azalma olarak isimlendirilecektir.

- Tek faz arızası, üçgen bağlı yük, transformatör tipi 2.

Üçgen bağlı yükte faz-faz gerilimleri sıfır dizi bileşeni içermez. Bu nedenle 2. tip transformatörünün gerilimlerin düşmesi üzerinde herhangi bir etkisi yoktur. Bu X2 tipi düşmeye girer.

- Tek faz arızası, yıldız bağlı yük, transformatör tipi 3.

Transformatör tipi 3, faz gerilimlerini hat gerilimlerine dönüştürür. Böylece sekonder taraftaki yıldız bağlı yük, primer tarafta üçgen bağlı yükle aynı gerilim düşmesini gösterir. Bu X2 tipi düşmeyle aynıdır.

- Tek faz arızası, üçgen bağlı yük, transformatör tipi 3.

Burada iki dönüşüm söz konusudur: 1. Yıldızda üçgen bağlı yüke dönüşüm 2. Trafonun primerinden sekonderine dönüşüm. Bu dönüşümlerin her biri  $T_3$  matrisiyle tanımlanabilir.  $T_3$  matrisinin iki dönüşümü  $T_2$  matris dönüşümüyle aynı etkiye sahiptir. Bu durumda üçgen bağlı yükteki azalma 2. tip transformatörden sonraki yıldız bağlı yükü aynıdır. Böylece düşme tipi X3'tür.

- Faz-faz arızası, yıldız bağlı yük, transformatör yok.

Bu durum denklem (4.22) ve Şekil 4.14 (a)'da belirtilmiştir. Bu X4 tipi gerilim düşmesi olarak isimlendirilmiştir.

- Faz-faz arızası, üçgen bağlı yük, transformatör yok.

Bu durum denklem (4.28) ve Şekil 4.14 (b)'de belirtilmiştir. Bu X5 tipi düşme olarak isimlendirilmiştir.

- Faz-faz arızası, yıldız bağlı yük, transformatör tipi 2

Faz-faz arızaları sıfır dizi gerilimi içermez, 2. tip transformatörün bu durumda bir etkisi yoktur. Bu X4 tipi gerilim düşmesiyle aynıdır.

- Faz-faz arızası, üçgen bağlı yük, transformatör tipi 2.

X5 tipi düşmeye girer.

- Faz-faz arızası, yıldız bağlı yük, transformatör tipi 3.

X5 tipi gerilim düşmesidir.

- Faz-faz arızası, üçgen bağlı yük, transformatör tipi 3.

X4 tipi kısa süreli gerilim düşmesidir.

Tablo 4.1'de her bir gerilim düşme tipi üzerinde ikinci transformatörün etkisi görülmektedir.



Tablo 4.1. Gerilim düşümlerinde ikinci transformatör etkisi.

| Düşme Tipi | Trf. Tipi 1 | Trf. Tipi 2 | Trf. Tipi 3 |
|------------|-------------|-------------|-------------|
| X1         | X1          | X3          | X2          |
| X2         | X2          | X2          | X3          |
| X3         | X3          | X3          | X2          |
| X4         | X4          | X4          | X5          |
| X5         | X5          | X5          | X4          |

#### 4.4.5. Kısa süreli gerilim düşümlerinin temel çeşitleri

Yukarda tek faz arızalarının üç tip gerilim düşmesine neden olacağı görülmüştür (X1, X2, X3 tipi). Faz-faz arızaları ise iki tip düşmeye sebebiyet vermektedir (X4 ve X5 tipi). X2 tipi düşme için düşme sonrası gerilim genlikleri denklem (4.33)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 V_a &= 1 \\
 V_b &= -\frac{1}{2} - \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{3}V\right)j\sqrt{3} \\
 V_c &= -\frac{1}{2} + \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{3}V\right)j\sqrt{3}
 \end{aligned} \tag{4.33}$$

X4 tipi düşme için gerilimler (4.34) denklemindeki gibidir.

$$\begin{aligned}
 V_a &= 1 \\
 V_b &= -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}Vj\sqrt{3} \\
 V_c &= -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}Vj\sqrt{3}
 \end{aligned} \tag{4.34}$$

(4.34) denklemine V yerine  $\frac{1}{3} + \frac{2}{3}V$  yazılmasıyla (4.33) denklemi elde edilir. Aynı yolla X3 ve X5 tip gerilim düşmeleri karşılaştırılırsa: X3 tip düşmeye ait gerilimler denklem (4.35)'deki gibi olur.

$$V_a = \frac{1}{3} + \frac{2}{3}V$$

$$V_b = -\frac{1}{6} - \frac{1}{3}V - \frac{1}{2}j\sqrt{3} \quad (4.35)$$

$$V_c = -\frac{1}{6} - \frac{1}{3}V + \frac{1}{2}j\sqrt{3}$$

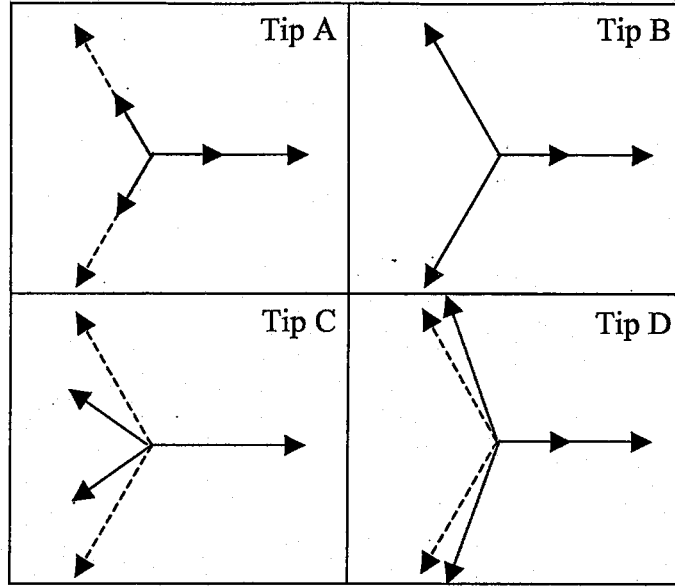
X5 tip düşmeye ait gerilimler (4.36) eşitliğiyle ifade edilmiştir.

$$V_a = V$$

$$V_b = -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}j\sqrt{3} \quad (4.36)$$

$$V_c = -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}j\sqrt{3}$$

(4.36) denkleminde V yerine  $\frac{1}{3} + \frac{2}{3}V$  yazılmasıyla (4.35) denklemi elde edilir. Aynı şekilde X4 tipi düşme gerilimlerinde V yerine  $\frac{1}{3} + \frac{2}{3}V$  yazılmasıyla X2 tipi düşme gerilimleri elde edilir. Bu durumda sadece üç tip gerilim düşmesinden söz edilebilir, X1, X4 ve X5. Diğerleri onların tipleri şeklindedir. Dördüncü tip düşme üç faz arızalarının neden olduğu, her üç fazda aynı genlikte oluşan gerilim düşmesidir. Sınıflandırmanın son hali Tablo 4.2'de ve fazör formu Şekil 4.15'de görülmektedir. Şekil 4.15'deki bütün düşme sonrası gerilim genlikleri %50 olarak alınmıştır. Tek faz ve faz-faz arızalarının tipi, düşme tipleri ve yük bağlantı şekillerine göre dönüşümler Tablo 4.3'de özetlenmiştir. Tablo 4.4'de ise düşmelerin alçak gerilim seviyelerinde hangi tiplerde olabileceğini göstermektedir. (\*) işareti düşme sonrası gerilim genliğinin V'ye değil  $\frac{1}{3} + \frac{2}{3}V$ 'ye eşit olduğunu ifade etmektedir [17,18].



Şekil 4.15. Kısa süreli gerilim düşümünün dört tipinin fazör formu.

Tablo 4.2. Kısa süreli gerilim düşümünün dört tipi.

| A Tipi Düşme                                 | B Tipi Düşme                               | C Tipi Düşme                                | D Tipi Düşme                                |
|--|--|---|---|
| $V_a = V$                                    | $V_a = V$                                  | $V_a = 1$                                   | $V_a = V$                                   |
| $V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V$ | $V_b = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ | $V_b = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}V$ | $V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ |
| $V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$ | $V_c = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ | $V_c = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$ | $V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ |

Tablo 4.3. Arıza tipi, düşme tipi ve yük bağlantı şekli.

| Arıza Tipi      | Yıldız bağlı yük | Üçgen bağlı yük |
|-----------------|------------------|-----------------|
| Üç faz arızası  | A tipi düşme     | A tipi düşme    |
| Faz-faz arızası | C tipi düşme     | D tipi düşme    |
| Tek faz arızası | B tipi düşme     | C* tipi düşme   |

Tablo 4.4. Düşme tipinin alçak gerilim seviyelerine dönüşümü.

| Transformatörün Bağlantı Şekli | A Tipi Düşme | B Tipi Düşme | C Tipi Düşme | D Tipi Düşme |
|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| YNyn                           | A            | B            | C            | D            |
| Yy, Dd, Dz                     | A            | D*           | C            | D            |
| Yd, Dy, Yz                     | A            | C*           | D            | C            |

#### 4.4.6. İki faz toprak arızası

İki faz toprak arızası, faz-faz ve tek faz-toprak arızalarıyla aynı şekilde tanımlanabilir. Arızasız faz geriliminin arızadan etkilenmediği varsayılır. Önceki bölümlerde görüldüğü gibi bu durum pozitif, negatif ve sıfır dizi empedanslarının eşit olması anlamına gelmektedir.

İki faz toprak arızası yüzünden PCC noktasındaki faz-toprak gerilimleri denklem (4.37)'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 V_a &= 1 \\
 V_b &= -\frac{1}{2}V - \frac{1}{2}Vj\sqrt{3} \\
 V_c &= -\frac{1}{2}V + \frac{1}{2}Vj\sqrt{3}
 \end{aligned} \tag{4.37}$$

Üçgen-yıldız transformatöründen ya da 3. tip transformatörlerin her hangi birinden sonra gerilim değerleri (4.38) denklemindeki gibidir.

$$\begin{aligned}
 V_a &= V \\
 V_b &= -\frac{1}{3}j\sqrt{3} - \frac{1}{2}V - \frac{1}{6}Vj\sqrt{3} \\
 V_c &= +\frac{1}{3}j\sqrt{3} - \frac{1}{2}V + \frac{1}{6}Vj\sqrt{3}
 \end{aligned} \tag{4.38}$$

3. tip iki transformatör veya 2. tip bir transformatörden sonra gerilim değerleri (4.39) eşitliğindeki gibidir.

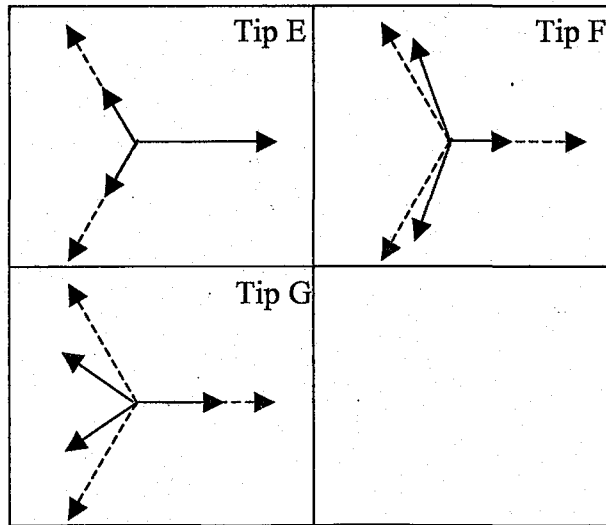
$$V_a = \frac{2}{3} + \frac{1}{3}V$$

$$V_b = -\frac{1}{3} - \frac{1}{6}V - \frac{1}{2}V_j\sqrt{3} \quad (4.39)$$

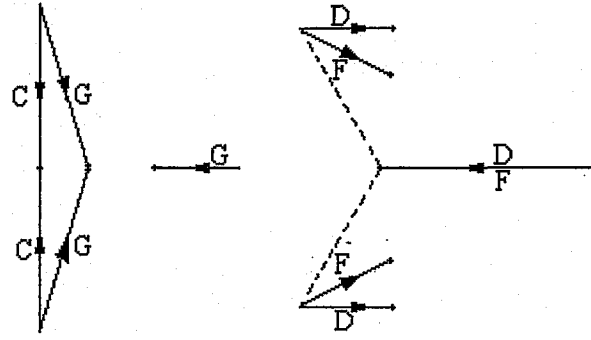
$$V_c = -\frac{1}{3} - \frac{1}{6}V + \frac{1}{2}V_j\sqrt{3}$$

Bu üç gerilim düşmesi daha önce belirlenen dört tip değişmeden farklıdır ve herhangi birinin diğerine dönüşümü mümkün değildir. Üç yeni tipin fazör diyagramları Şekil 4.16'da ve eşitlikleri Tablo 4.5'de görülmektedir. Şekil 4.17'de iki faz toprak arızalarının ve faz- faz arızalarının neden olduğu gerilim düşmeleri karşılaştırılmıştır. C tipi bir düşmede gerilimler sadece imajiner eksen boyunca değişir, D tipi bir düşmede reel eksen boyunca değişme görülür. F ve G tiplerinde her iki eksen gerilimlerde düşme gözlenir. İki faz toprak arızası sırasında cihaz uç gerilimleri düşüktür. D ve F tipi azalmalar için en kötü etkilenen fazdaki düşme ile C ve G tipi düşmelerde en kötü etkilenen iki faz arasındaki gerilimde düşme aynıdır. Bu özellik ölçülen üç faz dengesiz düşme sonrası gerilim genlikleri tanımlanırken kullanılmıştır.

F ve G tipi arızalar pozitif, negatif ve sıfır dizi empedanslarının eşit olduğu varsayılarak oluşturulmuştur. Sıfır dizi empedansı pozitif dizi empedansından daha büyükse oluşan düşme C ve G tipi ya da D ve F tipi gerilim düşmeleri arasında olacaktır [17,18].



Şekil 4.16. İki faz-toprak arızalarının neden olduğu üç faz dengesizliği.



Şekil 4.17. İki faz toprak arızalarının neden olduğu üç faz dengesizliğinin faz-faz arızalarının ve tek faz toprak arızalarının neden olduğu üç faz dengesizlikleriyle karşılaştırılması.

Tablo 4.5. İki faz toprak arızalarının neden olduğu gerilim düşmeleri.

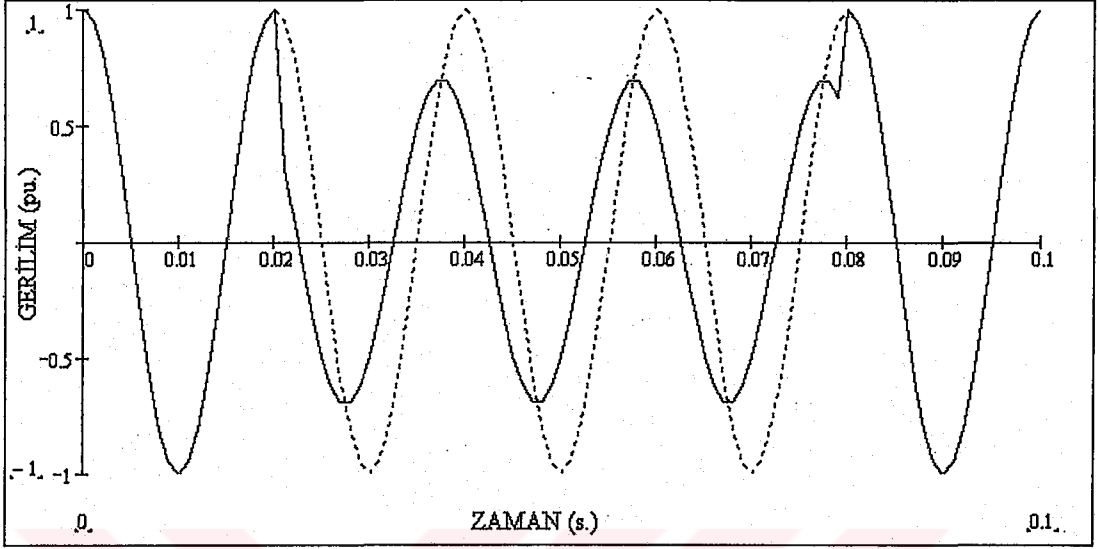
| E Tipi Düşme                                 | F Tipi Düşme   | G Tipi Düşme   |
|--|--|--|
| $V_a = 1$                                    | $V_a = V$  | $V_a = \frac{2}{3} + \frac{1}{3}V$                         |
| $V_b = -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V$ | $V_b = -j\frac{\sqrt{3}}{3} - \frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{6}V$ | $V_b = -\frac{1}{3} - \frac{1}{6}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V$ |
| $V_c = -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$ | $V_c = +j\frac{\sqrt{3}}{3} - \frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{6}V$ | $V_c = -\frac{1}{3} - \frac{1}{6}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$ |

#### 4.5. Faz Açı Atlaması

Güç sistemindeki bir kısa devre, gerilim genliği dışında gerilimin faz açısında da değişime neden olur. 50Hz veya 60Hz'lik bir sistemde gerilim, genliği ve faz açısı olan kompleks bir değerdir. Sistemdeki bir arıza gerilimde de değişime neden olur. Bu değişim fazörün genliğiyle sınırlı kalmaz, faz açısında da değişim oluşturur. Faz açısı atlaması, anlık gerilimin sıfır geçişinde kayma olarak tanımlanır. Bir çok cihaz için sorun oluşturmamakla beraber faz açısı bilgisini kullanarak çalışan güç elektroniği cihazları açı kaymasından etkilenebilir.

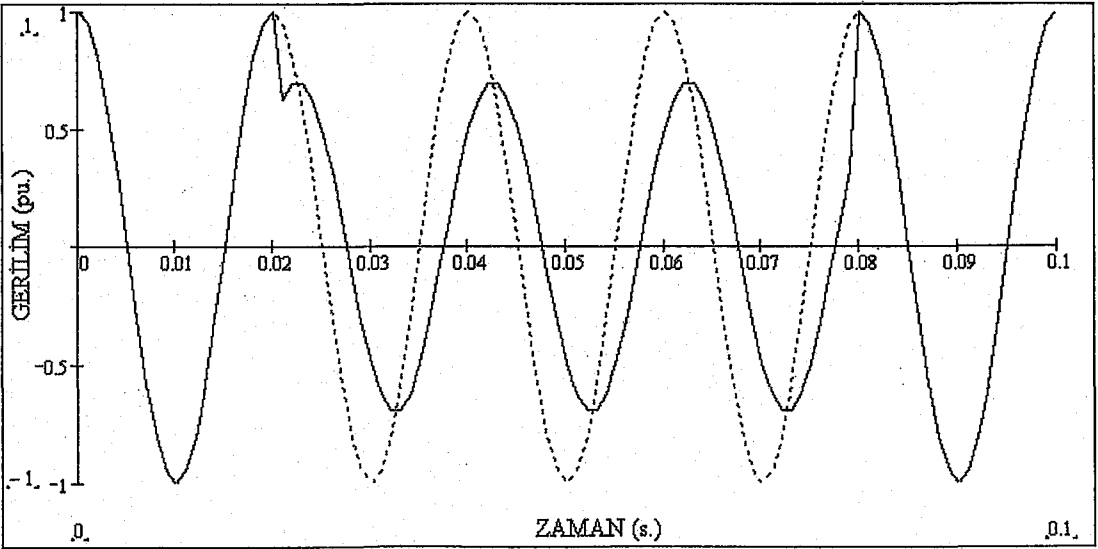
Şekil 4.18, bir faz açısı atlaması  $+45^\circ$  olan bir gerilim düşmesini gösterir. Burada arıza sırasındaki gerilim, arıza öncesi gerilimin önündedir. Şekil 4.19'da,  $-45^\circ$ 'lik faz açısı atlamalı gerilim azalması görülmektedir. Burada arıza öncesi gerilim arıza

arasındaki gerilimden öndedir. Her iki düşmenin genliği %30'dur ve her iki şekilde arıza öncesi gerilim noktalı eğriyle gösterilmiştir.



Şekil 4.18. +45°'lik faz aç atlamaalı %30'luk gerilim düşmesi.

Faz aç atlamalarının başlangıcı tek faz modelinin kullanılmasını sağlayan üç faz arızası için açıklanmıştır. Üç faz arızalarının neden olduğu faz aç atlamaları, kaynak ve besleyici arasındaki  $\frac{X}{R}$  oran farkından dolayıdır. Diğer bir neden ise gerilim düşmelerini düşük gerilim seviyelerine dönüşümüdür.



Şekil 4.19. -45°'lik faz aç atlamaalı %30'luk gerilim düşmesi.

Ölçülen bir düşmenin faz açısı atlamasını elde etmek için, düşme sırasındaki gerilimin faz açısı düşme öncesi gerilimin faz açısıyla karşılaştırılmalıdır. Gerilimin faz açısı sıfır geçişlerinden ya da gerilimin temel bileşen açısından elde edilebilir. Kompleks temel gerilim, sinyal üzerinde Fourier Dönüşümü yapılmasıyla oluşturulabilir. Bu Fast-Fourier Dönüşümü algoritmalarının kullanılmasını gerektirir.

Alternatif bir yöntemin açıklanması için (4.40) denklemindeki gerilim sinyali ele alınmıştır.

$$v(t) = X \cos(\omega_0 t) - Y \sin(\omega_0 t) = \text{Re}\{(X + jY)e^{j\omega_0 t}\} \quad (4.40)$$

$\omega_0$  temel frekansı ifade eder.

Bu sinyalden iki yeni sinyal elde edilebilir.

$$v_d(t) = 2v(t) \cdot \cos(\omega_0 t) \quad (4.41)$$

$$v_q(t) = 2v(t) \cdot \sin(\omega_0 t) \quad (4.42)$$

Bu iki yeni sinyal (4.43) ve (4.44) denklemleri gibi yazılabilir.

$$v_d(t) = X + X \cos(2\omega_0 t) + Y \sin(2\omega_0 t) \quad (4.43)$$

$$v_q(t) = -Y + Y \cos(2\omega_0 t) + X \sin(2\omega_0 t) \quad (4.44)$$

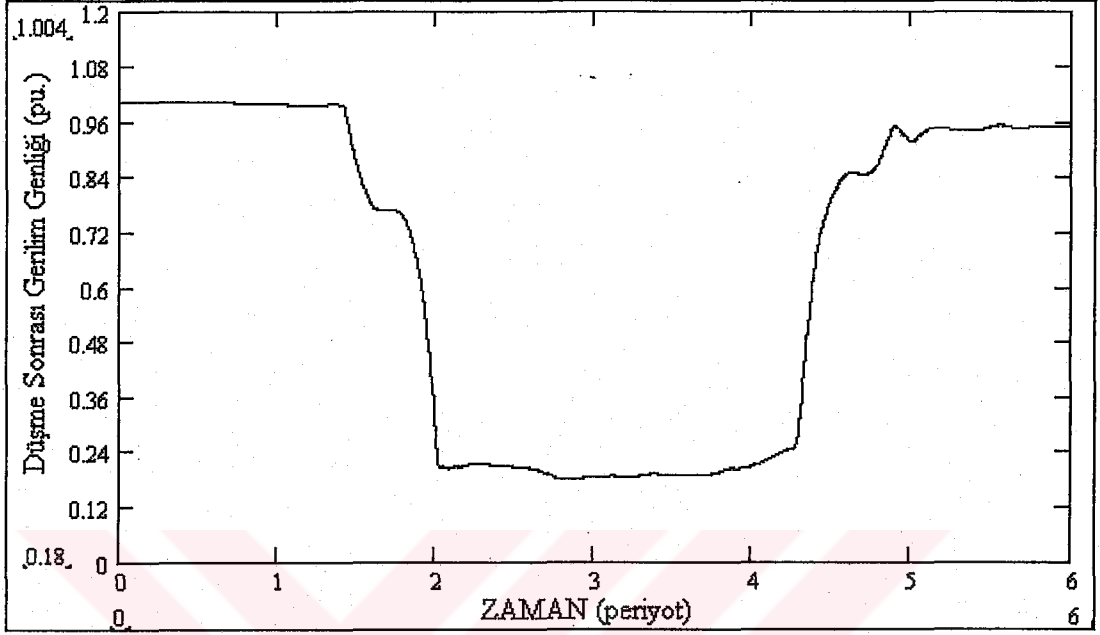
Bu sinyallerin yarım periyottan daha büyük zaman aralığı için ortalaması istenilen temel gerilimi verir.

$$X + jY = \overline{v_d(t)} - j\overline{v_q(t)} \quad (4.45)$$

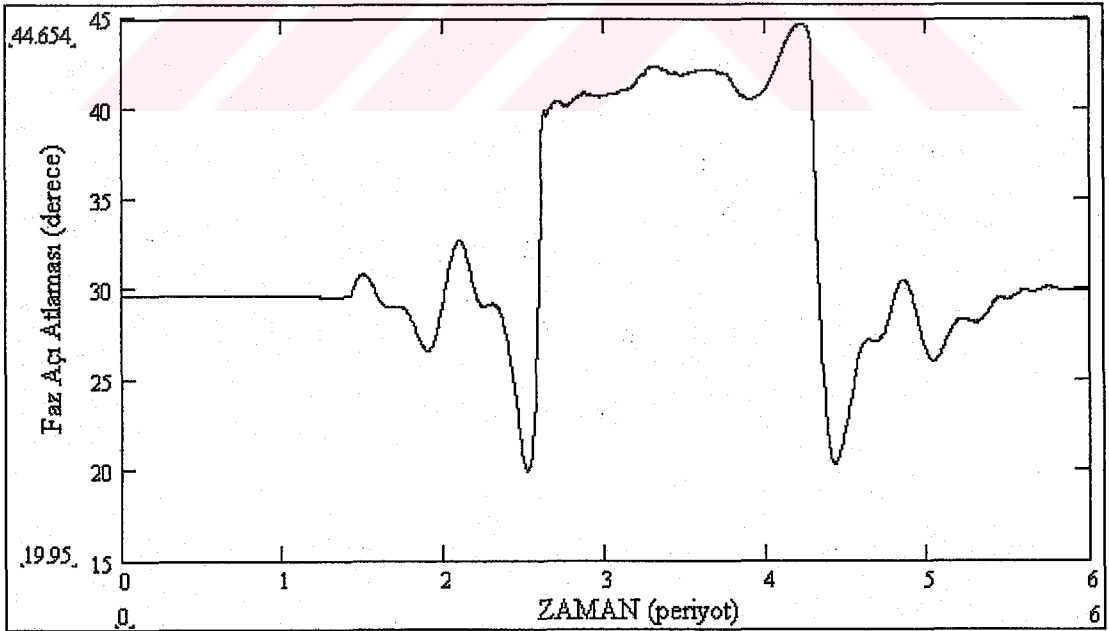
X ve Y değerlerinin bilinmesiyle düşme sonrası gerilim genliği  $\sqrt{X^2 + Y^2}$  ve faz açısı  $\arctan\left(\frac{Y}{X}\right)$  şeklinde hesaplanabilir. Bu algoritmanın Şekil 3.1'e



uygulanmasıyla elde edilen düşme sonrası gerilim genliği Şekil 4.20'de ve faz açısı Şekil 4.21'de görülmektedir.



Şekil 4.20. Şekil 3.1 için düşme sonrası zamana bağlı temel gerilim genliği.



Şekil 4.21. Şekil 3.1 için zamana bağlı temel gerilimin faz açısı atlaması.

#### 4.5.1. Teorik hesaplamalar

##### 4.5.1.1. Faz aç\u0131 atlamalarının ba\u015flang\u0131cı

Gerilim d\u00fc\u015fmeleriyle ilgili faz aç\u0131 atlamalarının anlaşılması için Şekil 3.7'deki tek faz gerilim bölücü modeli kullanılabilir. Ancak burada  $Z_F$  ve  $Z_S$  kompleks olarak ifade edilmelidir.  $Z_F$  ve  $Z_S$ 'in kompleks ifadeleri  $\overline{Z_S}$  ve  $\overline{Z_F}$  şeklinde gösterilmiştir. Yük akımları ihmal edilerek  $E=1$  varsayılır. Bu durumda PCC noktasındaki gerilim (4.46) denklemindeki gibidir.

$$\overline{V_{azlm}} = \frac{\overline{Z_F}}{\overline{Z_F} + \overline{Z_S}} \quad (4.46)$$

$$\overline{Z_S} = R_S + jX_S \text{ ve } \overline{Z_F} = R_F + jX_F$$

$\overline{V_{azlm}}$ 'in açısı, aynı zamanda gerilimin faz aç\u0131 atlaması, a\u015fağıdaki denklemden elde edilir.

$$\Delta\phi = \arg(\overline{V_{azlm}}) = \arctan\left(\frac{X_F}{R_F}\right) - \arctan\left(\frac{X_S + X_F}{R_S + R_F}\right) \quad (4.47)$$

(4.47) denkleminde  $\frac{X_S}{R_S} = \frac{X_F}{R_F}$  ise faz aç\u0131 atlamasından söz edilemez.

##### 4.5.1.2. Kaynak gücünün etkisi

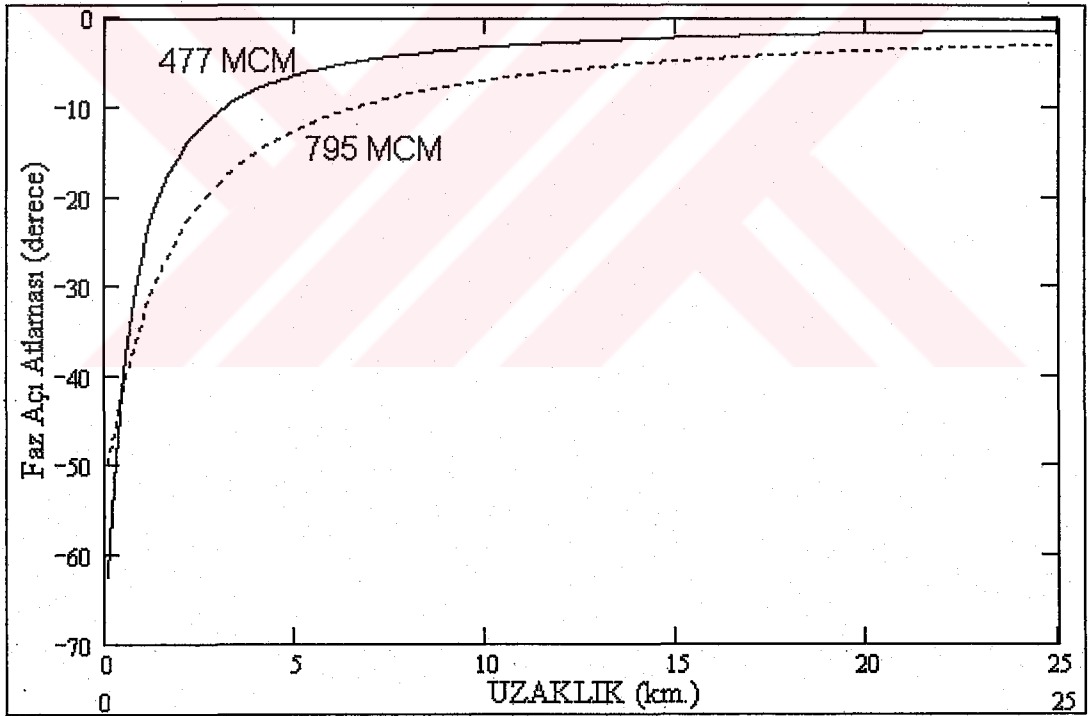
Kaynak gücünün yüksek olması düşme şiddetini azaltmaktadır. Bu daha küçük faz aç\u0131 atlaması anlamına da gelmektedir. Sadece uç arızalar için farklılık söz konusudur. Arızaya sıfır mesafe için faz aç\u0131 atlaması kaynak gücünden bağımsızdır. Arızaya sıfır mesafe ifadesi sadece teorik bir değerdir, bu nedenle sıfır gerilim genliğinin bir anlamı yoktur.

#### 4.5.1.3. Kullanılan iletkenin etkisi

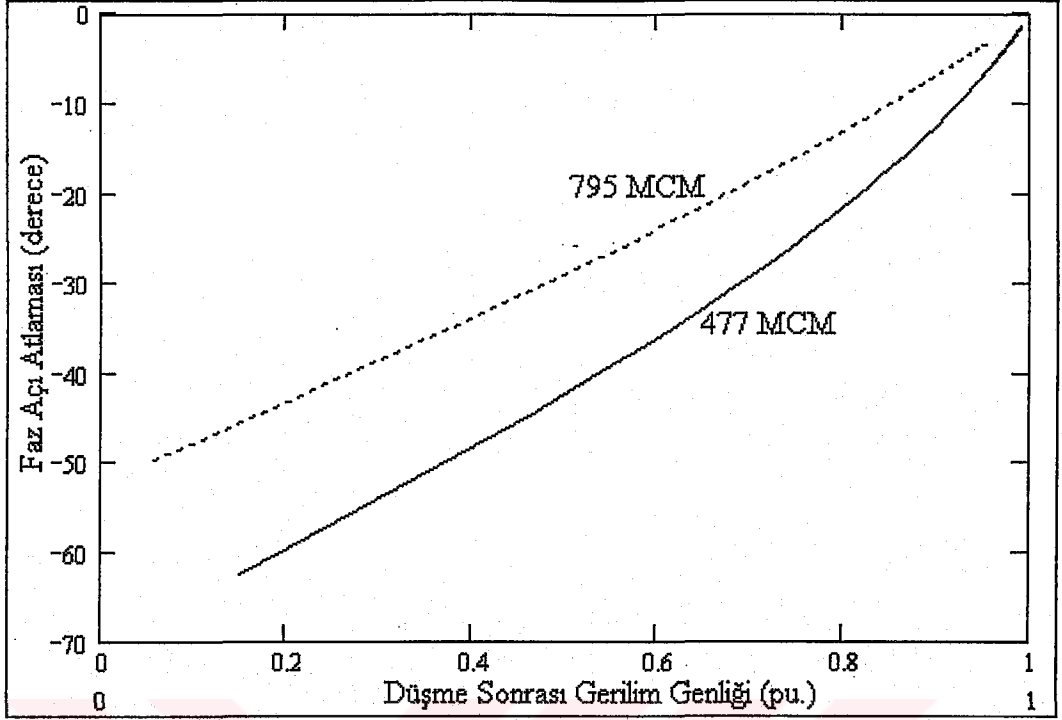
Şekil 4.22, 380kV'luk havai hat için farklı kesitlerde uzaklığa bağlı faz açısı atlamalarını göstermektedir. Kaynak direnci bu hesaplamalarda ihmal edilmiştir. Şekil 3.9'da düşme sonrası gerilim genlikleri için benzer bir şekil görülmektedir.

Tablo 3.1'deki havai hat empedanslarından besleyici empedansın  $\frac{X}{R}$  oranı hesaplanabilir.

Şekil 4.23'den de görüldüğü gibi gerilimde düşme arttıkça (arızadan sonra arta kalan gerilim azaldıkça) faz açısı atlaması artmaktadır. Faz açısı atlamasında artış ve düşme sonrası gerilim genliğinin azalması şiddetli olmayan bir olay olarak tanımlanabilir.



Şekil 4.22. 477 ve 795 MCM kesitli havai hatlar için uzaklığa bağlı faz açısı atlaması.



Şekil 4.23. 477 ve 795 MCM kesitli havai hatlar için düşme sonrası gerilim genliği-faz açısı atlama grafiği.

#### 4.5.1.4. Uzaklığa bağlı genlik ve faz açısı atlama

Düşme sonrası gerilim genlik ve faz açısı atlama, arıza uzaklığının bir fonksiyonu şeklindeki ifadelerini elde etmek için (4.46) denkleminde  $\bar{Z}_F$  yerine  $\bar{z}_l$  yazılır. Burada  $\bar{z}$  uzaklığa bağlı kompleks besleyici empedansdır. Bu durumda (4.46) denklemi (4.48) denklemi gibi yazılır.

$$\overline{V_{azlm}} = \frac{\bar{z}_l}{\bar{z}_l + \bar{Z}_S} \quad (4.48)$$

Faz açısı atlama ise (4.49) denklemiyle ifade edilir.

$$\arg(\overline{V_{azlm}}) = \arg(\bar{z}_l) - \arg(\bar{Z}_S + \bar{z}_l) \quad (4.49)$$

Faz açısı atlama kompleks alanda  $\bar{z}_l$  ve  $\bar{Z}_S + \bar{z}_l$  arasındaki açıya eşittir. Bu durum Şekil 4.24'de gösterilmiştir.  $\phi$  faz açısı atlama,  $\alpha$  ise kaynak empedansı ve besleyici

empedansı arasındaki açıdır ve empedans açısı şeklinde (4.50) denkleminde ifade edilmiştir.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{X_F}{R_F}\right) - \arctan\left(\frac{X_S}{R_S}\right) \quad (4.50)$$

$\alpha$ , besleyicinin  $\frac{X}{R}$  oranı kaynağinkinden büyükse pozitifdir. Bu sık rastlanan bir durum değildir, bu nedenle empedans açısı genelde negatiftir. Şekil 4.24'e iki kez kosinüs teoreminin uygulanmasıyla aşağıdaki denklemler elde edilir.

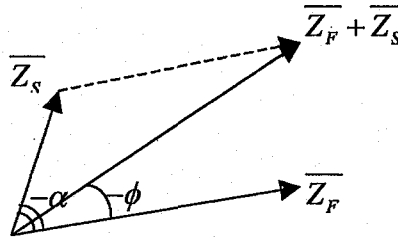
$$|\overline{Z_S + z\ell}|^2 = |z\ell|^2 + |\overline{Z_S}|^2 - 2|z\ell||\overline{Z_S}| \cos(180^\circ + \alpha) \quad (4.51)$$

$$|\overline{Z_S}|^2 = |\overline{Z_S + z\ell}|^2 + |z\ell|^2 - 2|z\ell||\overline{Z_S + z\ell}| \cos(-\phi) \quad (4.52)$$

(4.51) denklemini (4.52)'de yerine yazılırsa faz açısı atlaması uzaklığın fonksiyonu şeklinde elde edilir.

$$\cos(\phi) = \frac{\lambda + \cos \alpha}{\sqrt{1 + \lambda^2 + \cos \alpha(2\lambda)}} \quad (4.53)$$

$$\lambda = \frac{z\ell}{Z_S}$$



Şekil 4.24. Düşme sonrası gerilim genliği ve faz açısı atlamasının hesaplanabilmesi için fazör diyagramı.

Maksimum açı fark dağıtım sistemlerinde yeraltı kablolarında oluşur. Kaynağın  $\frac{X}{R}$  oranı 10 ve kablounki 0.5 iken elde edilen empedans açısı  $-60^\circ$ 'dir. İlerleyen

bölümlerde bu en kötü durum olarak kabul edilmiştir. Ancak bu sık rastlanan bir durum değildir. Kaynak ve besleyicinin  $\frac{X}{R}$  oranı birbirine çok yakın olan iletim sistemlerinde küçük pozitif faz açısı atlamaları oluşabilir.

(4.53) denkleminde maksimum faz açısı atlamasının  $\ell=0$  ve  $\lambda=0$  iken oluştuğu görülür. Bu durumda maksimum faz açısı atlaması empedans açısı  $\alpha$ 'ya eşittir. Düşme sonrası gerilim genliği denklem (4.54)'de verilmiştir.

$$V_{azlm} = \frac{|z \cdot \ell|}{|z \cdot \ell + Z_S|} \quad (4.54)$$

(4.51) denkleminde, arıza uzaklığına bağlı olarak düşme sonrası gerilim genliği ifadesi denklem (4.55)'deki gibidir.

$$V_{azlm} = \frac{\lambda}{1 + \lambda} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2\lambda(1 - \cos \alpha)}{(1 + \lambda)^2}}} \quad (4.55)$$

#### 4.6. Üç Fazlı Dengesiz Gerilim Düşümlerinde Genlik Ve Faz Açısı Atlamaları

Bu bölümde üç fazlı dengesiz gerilim düşümlerinde genlik ve faz açısı atlamasının nasıl belirlenebileceğinden bahsedilmiştir.

##### 4.6.1. Düşme sonrası gerilim genliği ve faz açısı atlamasının tanımı

###### 4.6.1.1. Üç farklı genlik ve faz açısı atlaması

Üç fazlı dengesiz gerilim düşme genliği üç faz geriliminde en küçük efektif değeri olan fazın genliğidir. Alternatif olarak üç efektif değerlerin ortalaması da alınabilir. Burada üç fazlı dengesiz düşmelerin analizi temeline dayanan bir genlik tanımlamasından bahsedilecektir [18].

Öncelikle üç farklı genlik ve faz açısı atlaması tanımlanmalıdır. Tüm koşullarda genlik kompleks gerilimin mutlak değeri, faz açısı atlaması da kompleks gerilimin açısıdır.

- Başlangıç kompleks gerilimi, arıza gerilimi değerinde PCC noktasındaki gerilimdir. Tek faz toprak arızası için başlangıç kompleks gerilimi PCC noktasında arızalı faz ve toprak arasındaki gerilimdir. Faz-faz arızası için iki faz arasındaki gerilimdir. İki faz toprak ya da üç faz arızası için başlangıç kompleks gerilimi ya arızalı fazlardan birinin gerilimi ya da iki arızalı faz arasındaki gerilimdir.
- Üç fazlı dengesiz gerilim düşümünün karakteristik kompleks gerilimi Tablo 4.2 ve Tablo 4.5'de tanımlanan  $V$ 'nin değeridir. Karakteristik düşme genliği karakteristik kompleks gerilimin mutlak değeri, karakteristik faz açısı ise karakteristik kompleks gerilimin açısıdır.
- Cihaz uçlarındaki kompleks gerilimler Tablo 4.2 ve Tablo 4.5'de  $V_a$ ,  $V_b$  ve  $V_c$  değerleridir.

#### 4.6.1.2. Karakteristik genliğin elde edilmesi

D tipi ve F tipi düşme için genlik üç gerilimden en küçük efektif değeridir. C tipi ve G tipi azalmalar için en küçük iki gerilim arasındaki farktır. Üç fazlı düşmenin karakteristik genliği:

- Üç faz geriliminin efektif değerinin tanımlanması.
- Üç gerilim farkının efektif değerinin tanımlanması.
- Üç faz düşme genliği bu altı değerden en küçük olandır.

#### 4.6.2. Tek faz arızası

Tek faz arızalarında durum diğer arıza tiplerinden daha karmaşıktır. (4.53) ve (4.55) denklemleri PCC noktasında düşme sonrasında arızalı faz gerilim genliğinin ve faz açısı atlamasının hesaplanmasında kullanılabilir. Arızanın meydana geldiği gerilim

seviyesiyle aynı gerilim seviyesinde yıldız bağlı cihazda B tipi azalma görülür. Daha öncede bahsedildiği gibi bu sık rastlanan bir durum değildir. Genelde tek faz arızasında oluşan düşme C ya da D tipidir. Üç faz dengesiz düşmelerin karakteristik genliği başlangıç genliğine uzun süre eşit olmaz. Aynı durum faz açısı atlaması içinde geçerlidir.

#### 4.6.2.1. Başlangıç genliği ve karakteristik genlik

Karakteristik genlik ve faz açısı atlamasına ait ifadeyi elde etmek için B tipi gerilim düşmesine ait gerilim denklemleri kullanılır.

$$V_a = V \cos \phi + jV \sin \phi$$

$$V_b = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}j\sqrt{3} \quad (4.56)$$

$$V_c = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}j\sqrt{3}$$

$V$  başlangıç genliği,  $\phi$  başlangıç faz açısı atlamasıdır.

Üç fazlı dengesiz düşme alçak gerilim seviyelerine indirildiğinde sıfır dizi gerilimi kaybolur. (4.56) denklemi için sıfır dizi bileşeni denklem (4.57)'de verilmiştir.

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) = \frac{1}{3}(V \cos \phi + jV \sin \phi - 1) \quad (4.57)$$

(4.68) denkleminden sıfır dizi geriliminin çıkarılması sonucu elde edilen ifade üç faz dengesiz düşmenin D tipine aittir. D tipi düşmenin karakteristik genliği ve faz açısı atlaması arızadan en çok etkilenen fazın kompleks geriliminin açısı ve mutlak değerine eşittir. Bu durumda  $V_a$  gerilimi denklem (4.58)'deki gibi olur.

$$V_a = \frac{1}{3} + \frac{2}{3}(V \cos \phi + jV \sin \phi) \quad (4.58)$$



Bu ifade (4.32) denkleminde  $V = V \cos \phi + jV \sin \phi$  eklenmesiyle de elde edilebilir. Tek faz arızalarının neden olduğu üç fazlı dengesiz gerilim düşmeleri için karakteristik genlik (4.59) denkleminde verilmiştir.

$$V_{kar} = |V_a| = \frac{2}{3} \sqrt{V^2 + V \cos \phi + \frac{1}{4}} \quad (4.59)$$

Karakteristik faz açısı atlaması (4.60) denkleminde gösterilmiştir.

$$\phi_{kar} = \arg(V_a) = \arctan\left(\frac{2V \sin \phi}{1 + 2V \cos \phi}\right) \quad (4.60)$$

$\phi$ 'nin küçük değerleri için yukarıdaki ifadeler aşağıdaki yaklaşımlar göz önüne alınarak tekrar yazılabilir.

$$\sin \phi \approx \phi$$

$$\cos \phi \approx 1$$

$$\arctan(x\phi) \approx x\phi \quad x < 1$$

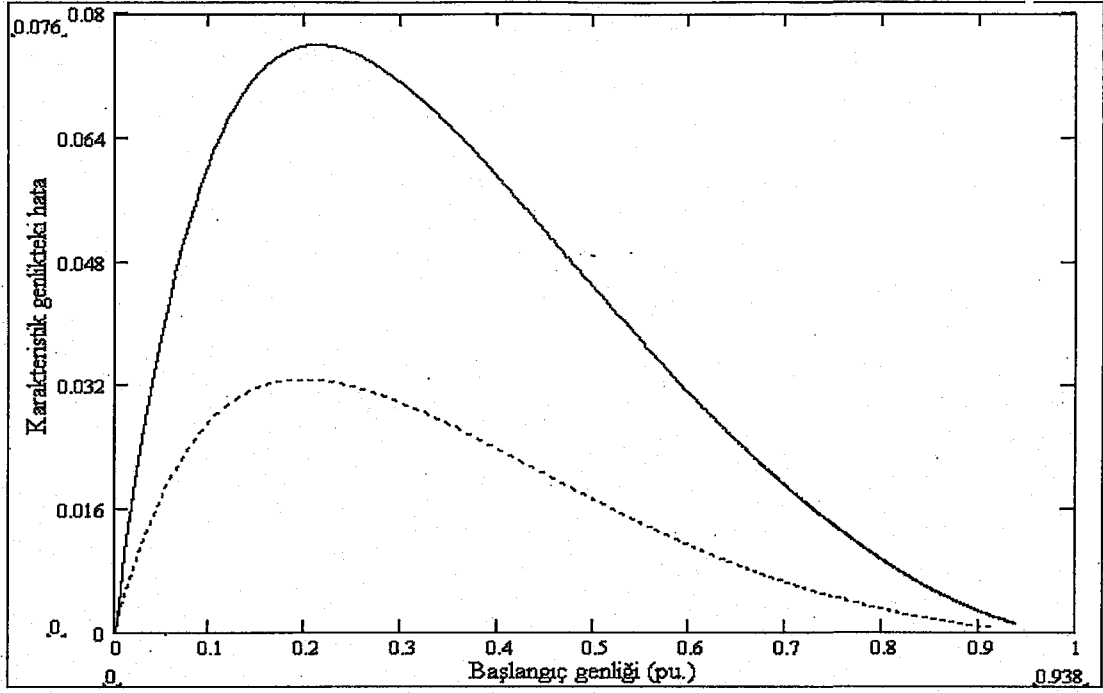
$$V'_{kar} = \frac{1}{3} + \frac{2}{3} V \quad (4.61)$$

$$\phi'_{kar} = \frac{2V\phi}{1 + 2V} \quad (4.62)$$

Şekil 4.25 ve 4.26, (4.61) ve (4.62) denklemleriyle gerilimin karakteristik genlik ve faz açısı atlamasının yaklaşık olarak ifade edilmesiyle oluşan hatayı göstermektedir.

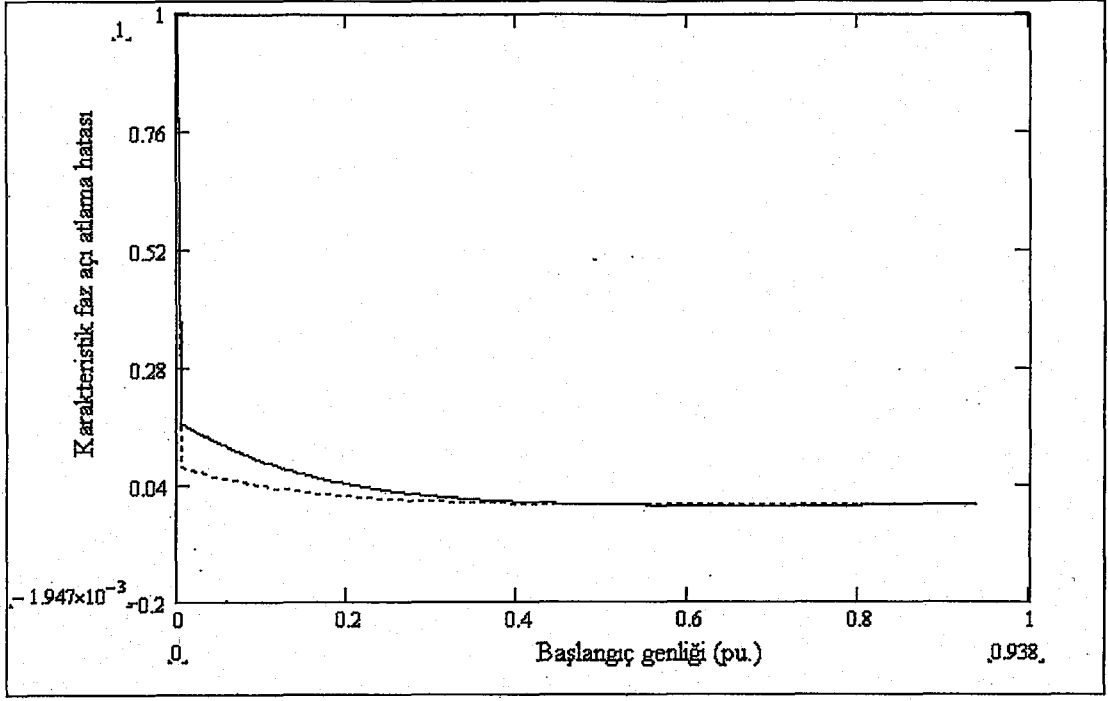
Hata  $1 - \frac{V_{kar}}{V'_{kar}}$  olarak tanımlanmıştır. Hesaplamalar  $-60^\circ$ ,  $-40^\circ$  ve  $-20^\circ$ 'lik empedans

açıları için gerçekleştirilmiştir.  $-60^\circ$ 'lik empedans açısıyla yüksek değerli faz açısı atlaması için hata değeri çok büyük değildir. Küçük değerli başlangıç genlikli tek faz arızalarında karakteristik faz açısı atlaması sifira yakındır, denklem (4.61)'de görüldüğü gibi.  $-60^\circ$  empedans açısıyla mutlak hata 1'den azdır.

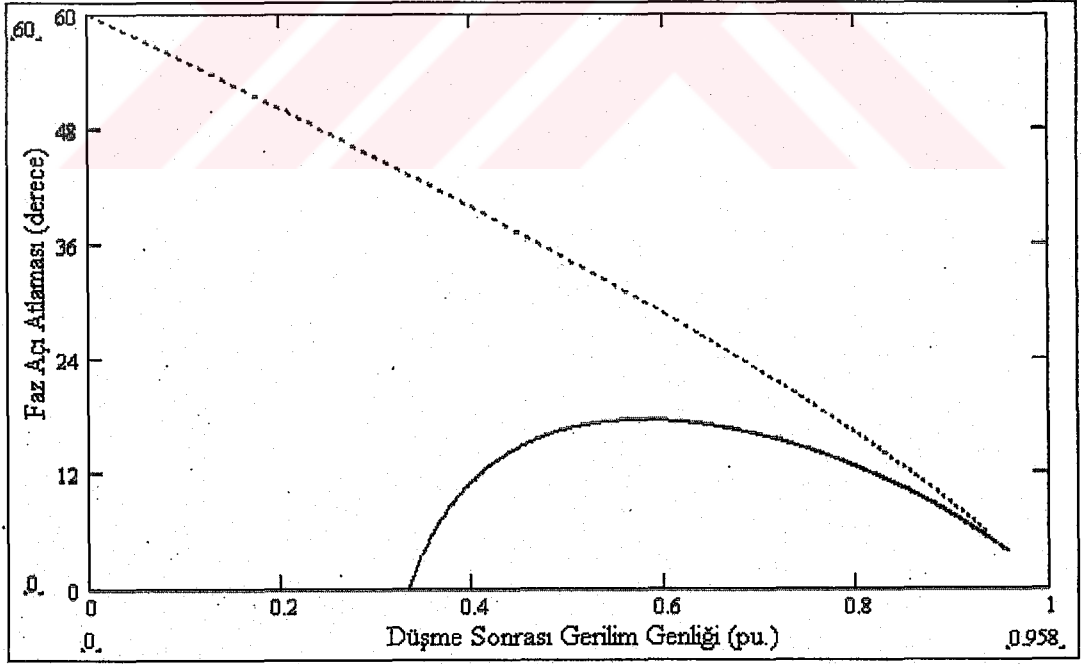


Şekil 4.25. Tek faz arızalarının neden olduğu gerilim düşmelerinin dönüşümü,  $-60^\circ$  (düz çizgi) ve  $-40^\circ$  (noktalı çizgi) olan empedans açıları için karakteristik genlik ifadesinin yaklaşık hatası.

Şekil 4.27 karakteristik değerlerle başlangıç genliği ve faz açısı atlamasını karşılaştırır. Empedans açısı  $-60^\circ$  olarak alınmıştır. Şekil 4.27'deki kesikli eğri faz faz ve üç faz arızalarının neden olduğu karakteristik genlik ve faz açısı atlaması arasındaki ilişkiyi verir.



Şekil 4.26. Tek faz arızalarının neden olduğu gerilim düşümlerinin dönüşümü,  $-60^\circ$  (düz çizgi) ve  $-40^\circ$  (noktalı çizgi) olan empedans açıları için karakteristik faz açısı atlaması ifadesinin yaklaşık hatası.



Şekil 4.27. Tek faz arızalarının neden olduğu gerilim düşmesi için genlik ve faz açısı atlaması arasındaki ilişki. Düz çizgi karakteristik değerler, noktalı çizgi ise başlangıç değerlerine ait eğrileri göstermektedir.

### 4.6.3. Faz-faz arızası

Faz-faz arızalarının etkisi arıza noktası ve cihaz arasında bulunan transformatörün bağlantı şekline bağlıdır. Bölüm 4.4'de görüldüğü gibi arıza sonucu C tipi ya da D tipi gerilim düşmesi oluşur. Bölüm 4.4.2'de arızalı fazlardaki gerilim, üç fazlı düşme için kullanılan gerilim bölücü modeli temel alınarak elde edilebilir. Daha sonrada gerilimin mesafeye bağlı faz açısı atlaması ve düşme sonrası gerilim genlik değerinin elde edilmesi için 4.53 ve 4.55 denklemleri kullanılabilir. Bunlar PCC noktasında arızalı fazlardaki gerilimin mutlak değeri ve açısının, başlangıç genliği ve faz açısı atlamasının hesaplanmasında kullanılır.

Bölüm 4.4'de bahsedilen üç fazlı dengesiz düşmeler faz açısında hiç bir değişim olmaksızın başlangıç gerilimin genliğindeki düşme olarak değerlendirilmiştir. Gerilimdeki faz açısı atlaması hesaba katıldığında PCC noktasında üç fazlı dengesiz düşmenin karakteristik gerilimi kompleks yapıdadır.

#### 4.6.3.1. C tipi gerilim düşmesi

Şekil 4.28'de C tipi düşmeye ait fazör diyagramı görülmektedir. Burada  $\phi$  karakteristik faz açısı atlaması ve V düşme sonrası karakteristik gerilim genliğidir. Tek fazlı cihaz, bağlı olduğu faza göre ya genliği  $V_b$ , faz açısı atlaması  $\phi_b$  olan bir gerilim düşmesine ya da genliği  $V_c$ , faz açısı atlaması  $\phi_c$  olan bir düşmeye maruz kalır. Cihaz arızasız faza bağlıysa hiç bir gerilim düşümüne maruz kalmaz. Başlangıç faz açısı atlamasından dolayı iki arızalı fazdaki gerilim genlikleri eşit olmaz. Şekil 4.28'de  $\phi < 0$ ,  $\phi_b < 0$  ve  $\phi_c > 0$ 'dır.

Şekil 4.28'den düşme sonrası cihaz uçlarında oluşan gerilimin genlik ve faz açısı atlamasına ait denklemler elde edilebilir. Öncelikle sinüs ve kosinüs teoremleri Şekil 4.28'den elde edilen iki üçgene uygulanırsa:

$$V_b^2 = \frac{1}{4} + \frac{3}{4} V^2 - 2 \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot V \sqrt{3} \cos(90^\circ - \phi) \right) \quad (4.63)$$

$$\frac{\sin(60^\circ + \phi_b)}{\frac{1}{2}V\sqrt{3}} = \frac{\sin(90^\circ - \phi)}{V_b} \quad (4.64)$$

$$V_c^2 = \frac{1}{4} + \frac{3}{4}V^2 - 2\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot V\sqrt{3} \cos(90^\circ + \phi)\right) \quad (4.65)$$

$$\frac{\sin(60^\circ - \phi_c)}{\frac{1}{2}V\sqrt{3}} = \frac{\sin(90^\circ + \phi)}{V_c} \quad (4.66)$$

Bu denklemlerden (4.67) ve (4.68) denklemleri elde edilir.

$$V_a = 1$$

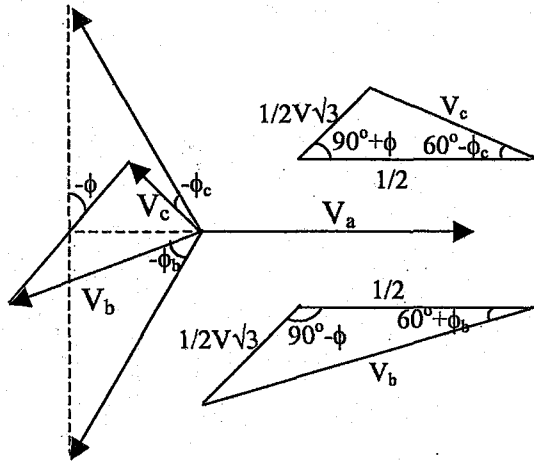
$$V_b = \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{3}{4}V^2 - \frac{1}{2}V\sqrt{3} \sin(\phi)} \quad (4.67)$$

$$V_c = \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{3}{4}V^2 + \frac{1}{2}V\sqrt{3} \sin(\phi)}$$

$$\phi_a = 0$$

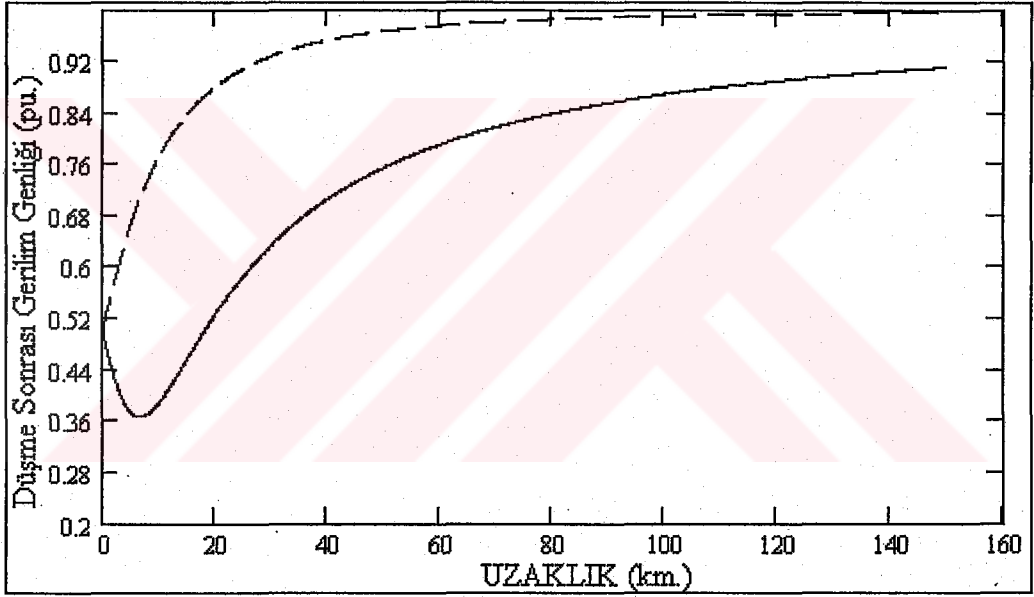
$$\phi_b = -60^\circ + \arcsin\left(\frac{1}{2}\sqrt{3} \frac{V}{V_b} \cos(\phi)\right) \quad (4.68)$$

$$\phi_c = 60^\circ - \arcsin\left(\frac{1}{2}\sqrt{3} \frac{V}{V_c} \cos(\phi)\right)$$

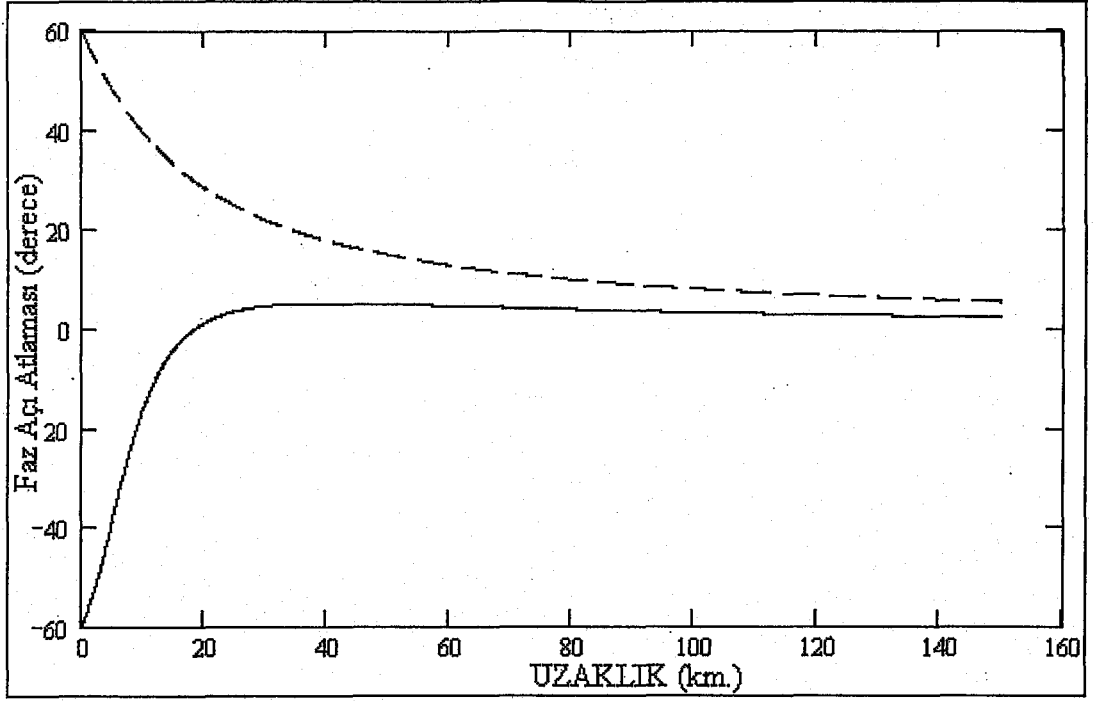


Şekil 4.28. C tipi gerilim düşmesi için fazör diyagramı.

(4.67) ve (4.68) ile (4.53) ve (4.55) denklemlerinin birleşimi, üç fazda düşme sonrası gerilim genliği ve faz açısı atlamasını uzaklığın bir fonksiyonu şeklinde verir. Buna ait eğriler sırasıyla Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da görülmektedir. Burada empedans açısı olarak  $-60^\circ$  ve  $0^\circ$  alınmıştır. Karakteristik faz açısı atlaması olmadığından, artan uzaklıkla gerilim genliği ters orantılı olduğundan, genliğin azaldığı görülmektedir. Karakteristik faz açısı atlamasının varlığı arızalı fazlar arasında asimetriye neden olur. Başlangıçta fazların birindeki gerilimin, arıza noktasına olan uzaklığın artmasıyla, düştüğü görülmektedir. Fazlardan birinde, faz açısı atlaması oldukça hızlı bir şekilde sıfıra düşer, bununla birlikte diğer fazda faz açısı atlaması uzun süre yüksek değerdedir.



Şekil 4.29. Faz-faz arızalarının neden olduğu C tipi gerilim düşmesi için empedans açısının  $-60^\circ$  olduğu durumda uzaklığa bağlı düşme sonrası gerilim genliği (Düz çizgi b fazına, noktali çizgi c fazına aittir.).

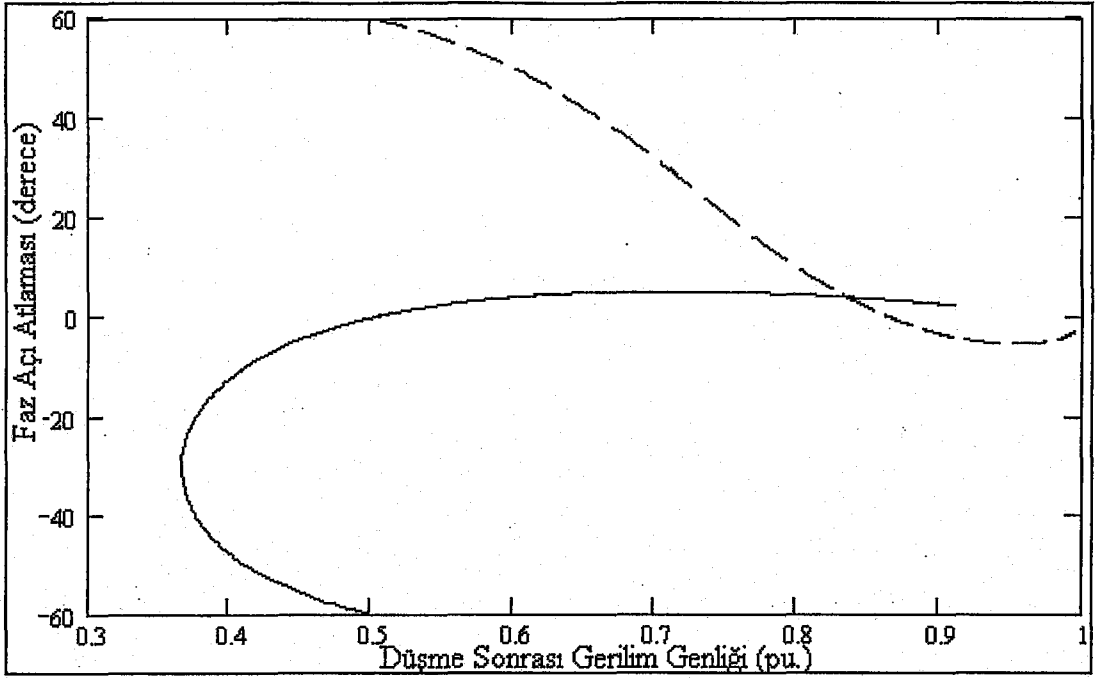


Şekil 4.30. Faz-faz arızalarının neden olduğu C tipi düşme için empedans açısının -60° olduğu durumda uzaklığa bağlı faz açısı atlama grafiği (Düz çizgi b fazına, noktalı çizgi c fazına aittir).

Şekil 4.31 empedans açısının dört farklı değeri için düşme sonrası gerilimin faz açısı atlama ve genliğine ait grafiği gösterir. Karakteristik faz açısı atlama iki arızalı faz arasındaki simetriyi önemli derecede bozar. Aynı zamanda gerilim %50'nin altına düşer.

#### 4.6.3.2. D tipi gerilim düşmesi

Şekil 4.32'de D tipi düşmeye ait fazör diyagram görülmektedir.  $\phi$  karakteristik faz açısı atlama. Arızalı iki fazdan birine bağlanan cihaz geriliminde küçük bir düşme ve 30°'den fazla açısı atlama görülür. Şekil 4.32'den D tipi düşme için üç faza ait düşme sonrası gerilimin genlik ve faz açısı atlama hesaplanabilir. Buradan elde edilen iki üçgene sinüs ve kosinüs teoremlerinin uygulanmasıyla aşağıdaki denklemler elde edilir.



Şekil 4.31. Faz-faz arızalarının neden olduğu C tipi gerilim düşmesi için empedans açısının  $-60^\circ$  olduğu durumda düşme sonrası gerilim genliği ve faz açısı atlaması grafiği (Düz çizgi b fazına, noktalı çizgi c fazına aittir).

$$V_b^2 = \frac{1}{4}V^2 + \frac{3}{4} - 2\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot V\sqrt{3} \cos(90^\circ + \phi)\right) \quad (4.69)$$

$$\frac{\sin(30^\circ - \phi_b)}{\frac{1}{2}V} = \frac{\sin(90^\circ + \phi)}{V_b} \quad (4.70)$$

$$V_c^2 = \frac{1}{4}V^2 + \frac{3}{4} - 2\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot V\sqrt{3} \cos(90^\circ - \phi)\right) \quad (4.71)$$

$$\frac{\sin(30^\circ + \phi_c)}{\frac{1}{2}V} = \frac{\sin(90^\circ - \phi)}{V_c} \quad (4.72)$$

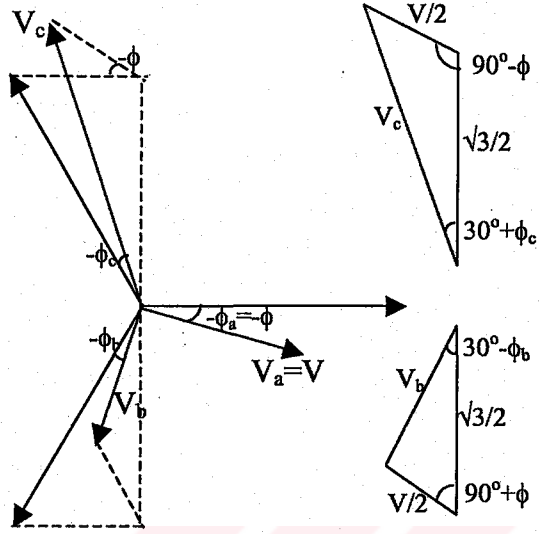
Yukarıdaki denklemlerin tekrar yazılmasıyla (4.74) ve (4.74) denklemleri elde edilir.

$$V_a = V$$

$$V_b = \sqrt{\frac{3}{4} + \frac{1}{4}V^2 + \frac{1}{2}V\sqrt{3} \sin(\phi)} \quad (4.73)$$



$$V_c = \sqrt{\frac{3}{4} + \frac{1}{4} V^2 - \frac{1}{2} V \sqrt{3} \sin(\phi)}$$



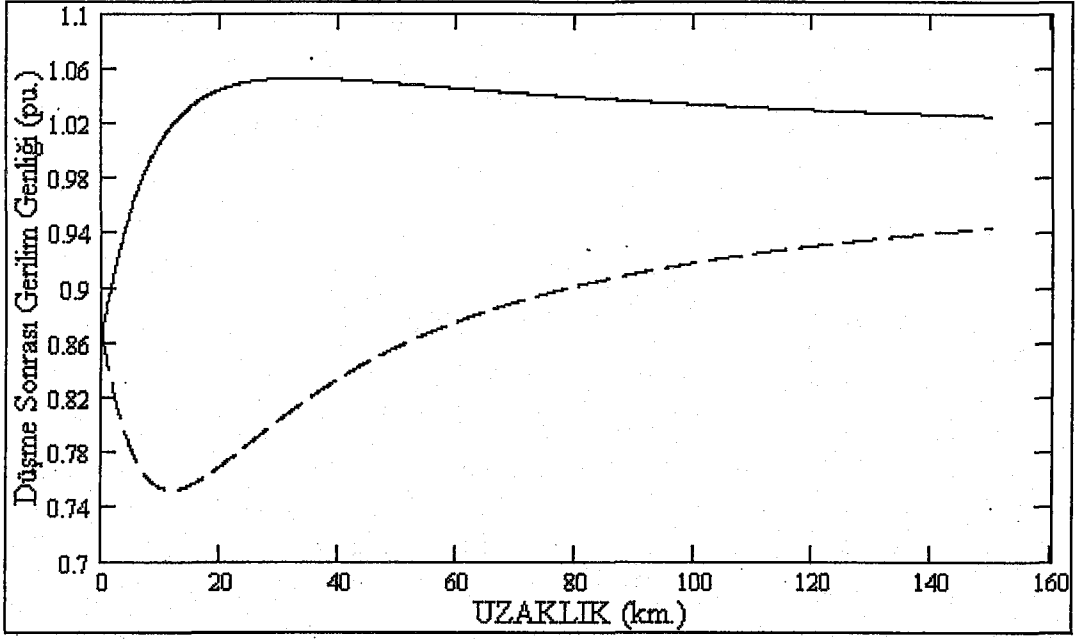
Şekil 4.32. D tipi gerilim düşmesi için fazör diyagramı.

$$\phi_a = 0$$

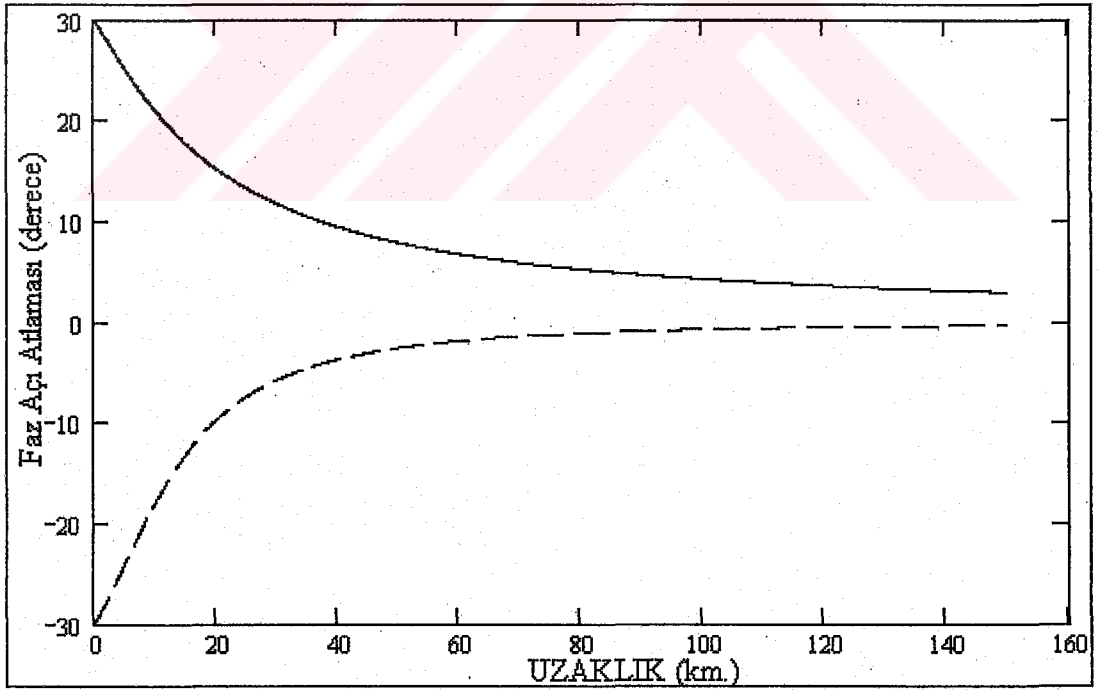
$$\phi_b = 30^\circ - \arcsin\left(\frac{1}{2} \frac{V}{V_b} \cos(\phi)\right) \quad (4.74)$$

$$\phi_c = -30^\circ + \arcsin\left(\frac{1}{2} \frac{V}{V_c} \cos(\phi)\right)$$

Bu denklemlerden düşme sonrası gerilimin faz açısı atlaması ve genliğinin uzaklığa bağlı grafikleri elde edilebilir. Sırasıyla Şekil 4.33 ve Şekil 4.34'de uzaklığa bağlı olarak genlik ve faz açısı atlaması grafikleri görülmektedir. Empedans açıları  $0^\circ$  ve  $-60^\circ$  alınmıştır. Arızasız fazlarda gerilim düşümü oldukça küçüktür. Karakteristik faz açısı atlaması cihaz uçlarındaki gerilimde ek bir düşmeye neden olur.



Şekil 4.33. Faz-faz arızasının neden olduğu D tipi düşme için empedans açısının  $-60^\circ$  olduğu durumda uzaklığa bağlı düşme sonrası gerilim genliği (Düz çizgi b fazına, noktalı çizgi c fazına aittir).



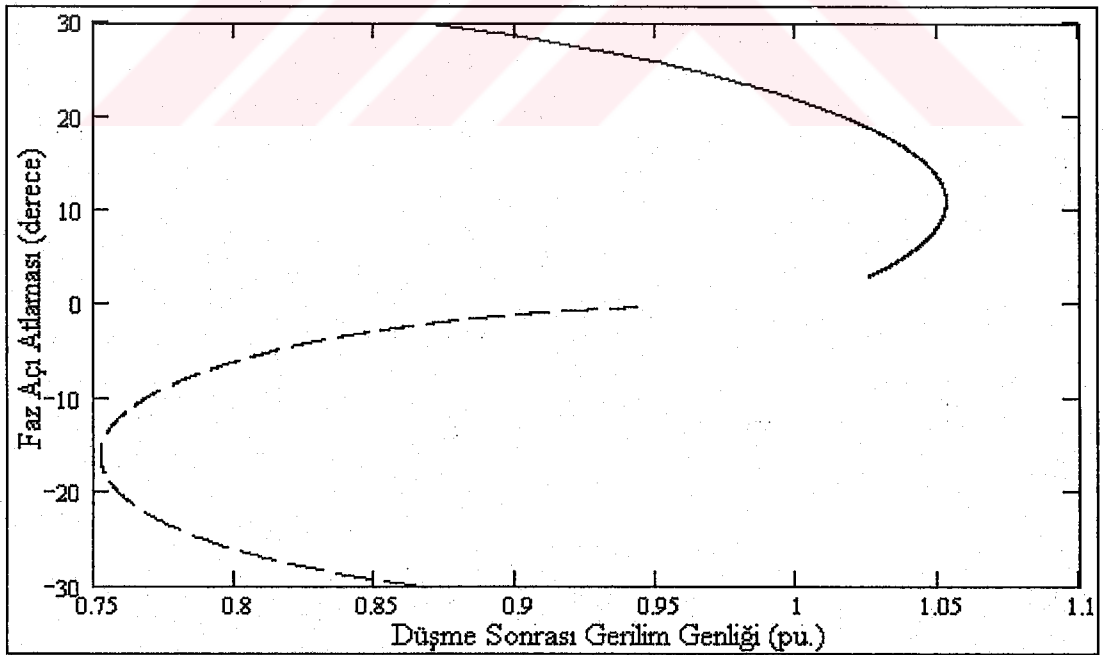
Şekil 4.34. Faz-faz arızasının neden olduğu D tipi düşme için empedans açısının  $-60^\circ$  olduğu durumda uzaklığa bağlı faz açısı atlama (Düz çizgi b fazına, noktalı çizgi c fazına aittir).

#### 4.6.3.3 Düşme sonrası gerilim genliği ile faz aç atlama oranı

Bahsedildiği gibi faz-faz arızaları C tipi veya D tipi gerilim düşmelerine neden olur. Şekil 4.35 D tipi düşme için düşme sonrası gerilim genliği ve faz aç atlama grafiğini göstermektedir. Bir üç fazlı arıza, bütün üç fazlarda, başlangıç genliği ve faz aç atlama oranı olan bir arıza oluşturur. Bu tip bir arıza, faz-faz arızasının neden olduğu D tipi bir düşmede fazlardan birinde görülebilir.

#### 4.6.4. İki faz toprak arızası

İki faz toprak arızalarının analizi faz-faz arızalarından farklı değildir. Bölüm 4.4.4'de iki faz toprak arızalarının üç fazlı dengesiz gerilim düşümlerinin E, F ve G tiplerine dönüştüğü görüldü. E tipi düşmeye çok sık rastlanılmadığı için burada ele alınmamıştır. Tek faz toprak arızasında E tipi düşme B tipi düşme gibi şebeke gerilimine verilmeyen ve üçgen bağlı cihazda asla ortaya çıkmayan sıfır dizi bileşeni içerir.



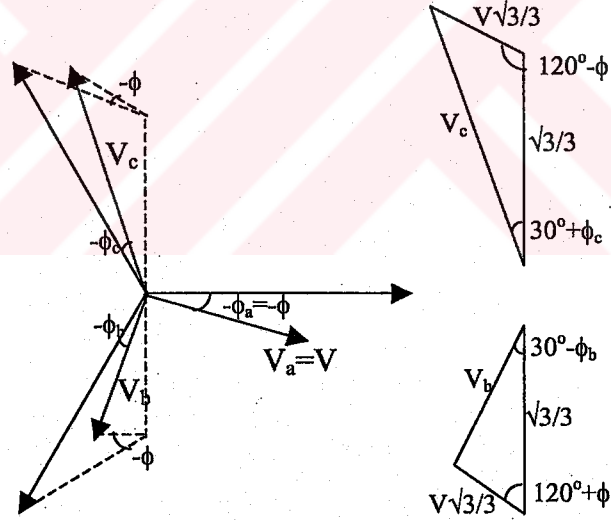
Şekil 4.35. Faz-faz arızasının neden olduğu D tipi düşme için empedans açısının  $-60^\circ$  olduğu durumda düşme sonrası gerilim genliği-faz aç atlama grafiği (Düz çizgi b fazına, noktalı çizgi c fazına aittir).

F ve G tipi düşmeler için faz açısı atlamasına karşı karakteristik genlik eğrisi oluşturulabilir. Dengesiz üç fazlı düşmelerin karakteristik genlik ve faz açısı atlaması arasındaki ilişki başlangıç genliği ve faz açısı atlaması arasındaki ilişkiye benzerdir. Bu ilişki (4.53) ve (4.55) denklemleriyle tanımlanmıştır.

#### 4.6.4.1 F tipi gerilim düşmesi

Şekil 4.36'da F tipi gerilim düşmesine ait fazör diyagramı görülmektedir. D tipi düşmedeki gibi bir fazdaki gerilim genliği önemli derecede düşerken diğer iki fazdaki düşme daha azdır.

Şekil 4.36'da büyük açılı üçgene, düşme sonrası cihaz uçlarındaki gerilimin genlik ve faz açısı atlamasını elde etmek için, sırasıyla kosinüs ve sinüs teoremleri uygulanırsa aşağıdaki denklemler elde edilir.



Şekil 4.36. F tipi üç fazlı dengesiz düşmenin fazör diyagramı.

$$V_c^2 = \left(\frac{1}{3}\sqrt{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}V\sqrt{3}\right)^2 - 2 \cdot \frac{1}{3}\sqrt{3} \cdot \frac{1}{3}V\sqrt{3} \cos(120^\circ - \phi) \quad (4.75)$$

$$V_c = \sqrt{\frac{1}{3} + \frac{1}{3}V^2 - \frac{2}{3}V \cos(120^\circ - \phi)} \quad (4.76)$$

$$\frac{\sin(30^\circ + \phi_c)}{\frac{1}{3}V\sqrt{3}} = \frac{\sin(120^\circ - \phi)}{V_c} \quad (4.77)$$

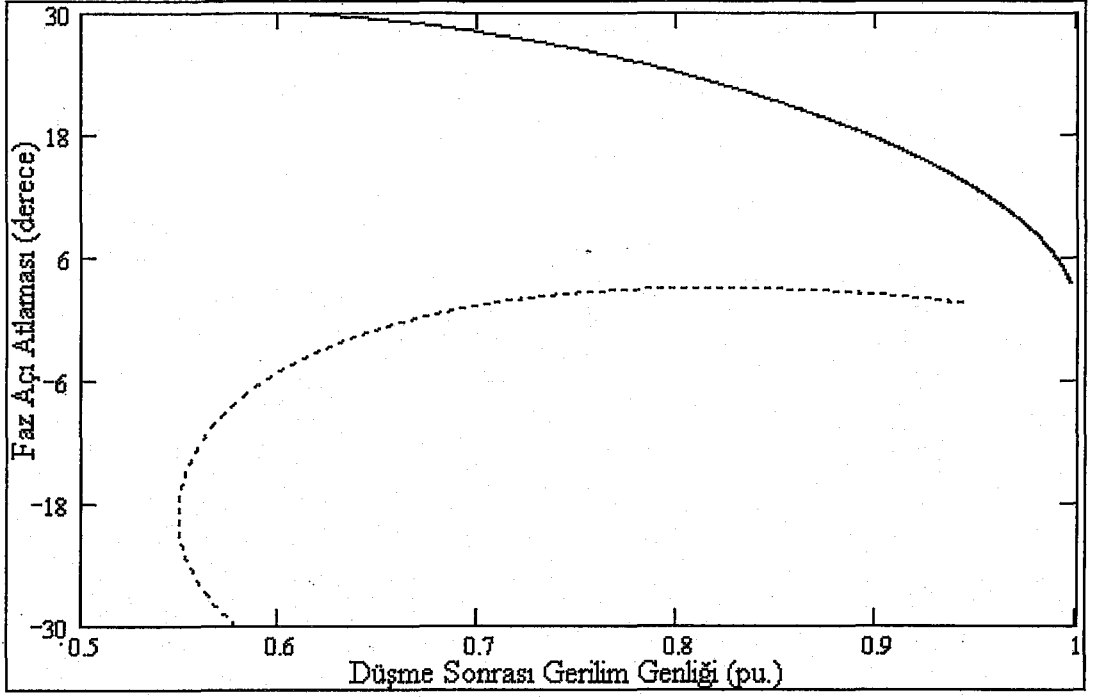
$$\phi_c = -30^\circ + \arcsin\left\{\frac{V}{V_c\sqrt{3}} \sin(120^\circ - \phi)\right\} \quad (4.78)$$

Aynı kurallar küçük açılı üçgen içinde tekrarlanırsa  $V_b$  genliği ve  $\phi_b$  faz açısı atlamasına ait ifadeler aşağıdaki gibi elde edilir.

$$V_b = \sqrt{\frac{1}{3} + \frac{1}{3}V^2 - \frac{2}{3}V \cos(120^\circ + \phi)} \quad (4.79)$$

$$\phi_b = 30^\circ - \arcsin\left\{\frac{V}{V_b\sqrt{3}} \sin(120^\circ + \phi)\right\} \quad (4.80)$$

Bu eşitliklerden düşme sonrası cihaz uçlarındaki gerilimin genlik ve faz açısı atlaması hesaplanabilir. Şekil 4.37 iki faz toprak arızasının neden olduğu F tipi gerilim düşmesine ait genlik ve faz açısı atlaması eğrisini göstermektedir. Şekil 4.3'den fazlardan birinin üç fazlı arızadaki düşme gibi davrandığı görülmektedir. F tipi düşmede gerilim genliklerinde büyük azalma görülür. Bu iki faz için maksimum faz açısı atlaması  $30^\circ$  dir.



Şekil 4.37. F tipi gerilim düşmesine ait empedans değerinin  $-60^\circ$  durumda düşme sonrası gerilimin genlik ve faz açısı atlaması (Düz çizgi b fazına, noktalı çizgi c fazına aittir).

#### 4.6.4.2 G tipi gerilim düşmesi

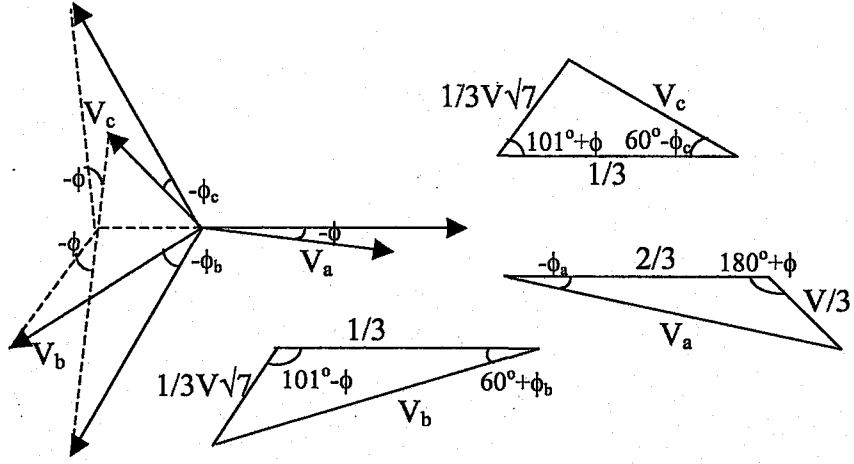
Şekil 4.38'de G tipi düşmeye ait fazör diyagram görülmektedir. a fazındaki kompleks gerilim  $\frac{2}{3}$  kadar (C tipi azalmada düşme olmaz), b ve c fazlarındaki kompleks gerilimler ise  $-\frac{1}{3}$  kadar (C tipi düşmede  $-\frac{1}{2}$  kadar) düşmektedir.

Şekil 4.38'de sağdaki üçgene sinüs ve kosinüs teoremleri uygulandığında aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$V_a^2 = \frac{4}{9} + \frac{1}{9}V^2 - 2 \times \frac{2}{3} \times \frac{V}{3} \cos(180^\circ + \phi) \quad (4.81)$$

$$V_a = \sqrt{\frac{4}{9} + \frac{1}{9}V^2 + \frac{4}{9}V \cos \phi} \quad (4.82)$$

$$\frac{\sin(180^\circ + \phi)}{V_a} = \frac{\sin(-\phi_a)}{\frac{1}{3}V} \quad (4.83)$$



Şekil 4.38. G tipi üç fazlı dengesiz düşme için fazör diyagramı.

$$\phi_a = \arcsin\left(\frac{V}{3V_a} \sin \phi\right) \quad (4.84)$$

Diğer üçgenler için aynı işlemler yapılırsa diğer iki faz geriliminin düşme sonrası genlik ve faz açısı atlaması elde edilir.

$$V_b = \frac{1}{3} \sqrt{1 + 7V^2 - 2V\sqrt{7} \cos(101^\circ - \phi)} \quad (4.85)$$

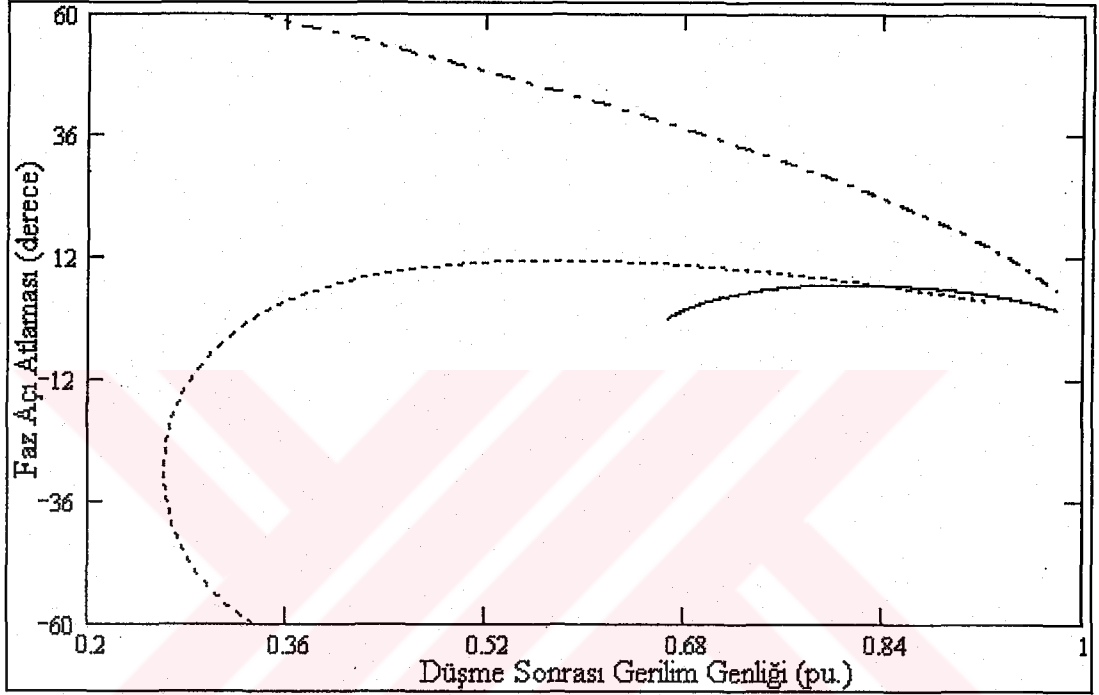
$$\phi_b = -60^\circ + \arcsin\left(\frac{V}{3V_b} \sqrt{7} \sin(101^\circ - \phi)\right) \quad (4.86)$$

$$V_c = \frac{1}{3} \sqrt{1 + 7V^2 - 2V\sqrt{7} \cos(101^\circ + \phi)} \quad (4.87)$$

$$\phi_c = 60^\circ - \arcsin\left(\frac{V}{3V_c} \sqrt{7} \sin(101^\circ + \phi)\right) \quad (4.88)$$

Şekil 4.39'da G tipi gerilim düşmesine ait sonuçlar görülmektedir. Önceki bölümlerde de görüldüğü gibi G tipi düşme C tipi düşmeye benzemektedir. Faz-faz kısa devresinden farklı olarak iki faz-toprak arızasında arızalı faz gerilimindeki

düşme %50 yerine %33'tür. PCC noktasından uzak mesafedeki arızalar için düşme sonrası gerilim genliği başlangıç faz açısı atlamasından dolayı %33'den daha az olabilir. Faz-faz kısa devresiyle arasındaki diğer bir fark tüm faz gerilimlerinde düşme gözlenmesidir. Arızasız faz faz-faz kısa devresinden etkilenmezken, iki faz toprak arızasında bu fazda %67 düşme gözlenebilir.



Şekil 4.39. G tipi düşmeye ait empedans değerinin  $-60^\circ$  olduğu durumda düşme sonrası gerilimin genlik ve faz açısı atlaması (Düz çizgi a fazına, kesikli çizgi b fazına ve noktalı kesikli çizgi c fazına aittir).

#### 4.6.4.3 Düşme sonrası gerilim genliği ile faz açısı atlaması oranı

Şekil 4.38 ve 4.39 iki faz toprak arızası sırasında, düşme sonrası tek fazlı bir yüke ait tüm faz açısı atlaması ve genlik oranlarını göstermektedir. Faz-faz arızaları sırasında, genlik ve faz açısı atlamasına ait belirli kombinasyonların olduğu görülmektedir. Ancak aynı şey iki faz toprak arızaları için geçerli değildir. Bu eğriler sıfır dizi ve pozitif dizi empedanslarının eşit varsayılmasıyla elde edilmiştir.



## BÖLÜM 5. KISA SÜRELİ GERİLİM DÜŞÜMLERİNE YÜKÜN ETKİSİ

### 5.1. Giriş

Değişik sistem dizaynları için önceki bölümlerde düşme sonrası gerilim genliğinin hesaplanmasında yük akımları sıfır kabul edilmişti. Bu bölümde arıza sırasında yük akımlarının gerilim üzerinde önemli etkilere sahip olduğu durumlardan bahsedilecektir. Gerilim düşmesi sırasında ve düşmeden sonra gerilim üzerinde etkisi olan yükler, kısa devreden sonra büyük akımlara sahip olan senkron makinalar ve indüksiyon motorlarıdır.

### 5.2. İndüksiyon Motorları Ve Üç Fazlı Arızalar

Üç fazlı arızalarda motor uçlarındaki gerilimin genliği düşer. Bu düşme iki şekilde açıklanabilir.

- Hava aralığındaki manyetik akı stator gerilimiyle uzun süre dengede kalmaz. Akı bir kaç periyotluk süre için, zaman sabitiyle bozulmaya başlar. Bozulma sırasında indüksiyon motoru arızayı besler ve motor uçlarında gerilim düşmesini engellemeye çalışır.
- Gerilimdeki bozulma elektriksel momentin de düşmesine neden olur. Elektriksel moment gerilimin efektif değerinin karesiyle orantılıdır. Mekanik moment değişmeden kalır. Sonuçta motor yavaşlar. Motor yavaşlarken küçük bir güç faktörüyle büyük akım çeker. Küçük değerli gerilim düşümleri için düşük hızda, mekanik yükün hız-moment davranışına bağlı olarak, yeni bir kararlı hale ulaşılabilir. Şiddetli azalmalarda, motor kararlı hale gelene veya gerilim iyileşene kadar yavaşlamaya devam eder.

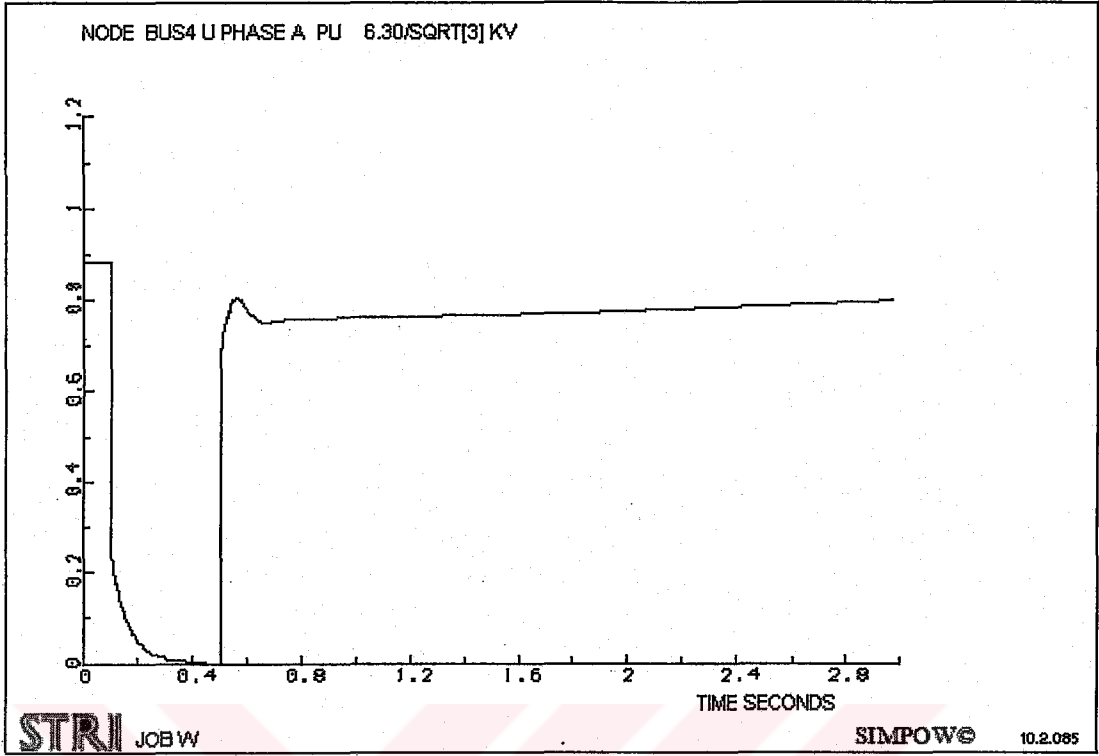
Gerilim iyileştiği an yukarıda bahsedilene zıt bir olay gerçekleşir. Hava aralığındaki akı tekrar meydana gelir. Bu gerilimin iyileşmesini yavaşlatan büyük inrush akımlarına neden olur. Bundan sonra, motor olay öncesi hızına ulaşana kadar tekrar enerjilendirilecektir. Motor tekrar enerjilendirilirken küçük güç faktörlü büyük akım çeker. Bu bazen bir kaç saniye süren arıza sonrası gerilim düşmesine neden olur [18].

İndüksiyon motor yükünün arızaya katkısı, reaktansın arkasında bir gerilim kaynağı gibi modellenebilir. Gerilim kaynağı arıza başlangıcında yaklaşık 1 pu. değerindedir ve subtransient zaman sabitiyle bozulabilir (0.5 ve 2 periyot arasında). Reaktans motorun kaçak reaktansıdır ve motor bazında %10-%20 arasındadır. Bu başlangıç akımını tanımlayan kaçak reaktans değil nominal hızdaki kaçak reaktanstır. Çift kafesli indüksiyon makinaları için bu ikisi önemli derecede farklıdır.

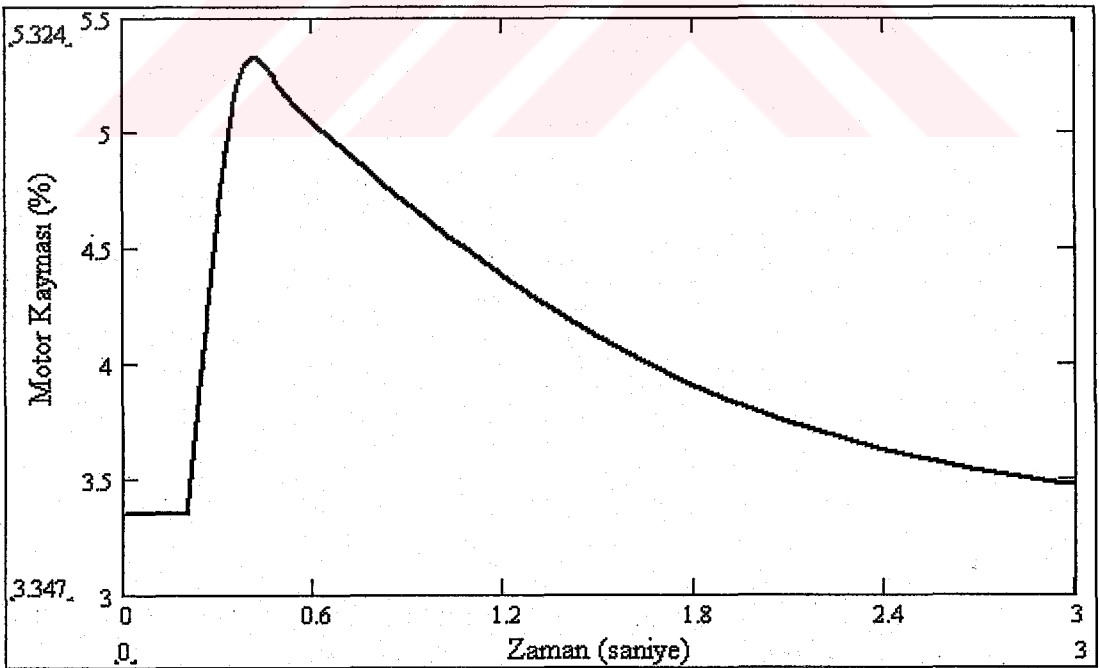
Arızadan sonra motor akımındaki artışı tanımlamak için, seri bağlı stator direnci  $R_S$ , kaçak reaktans  $X_L$  ve rotor direncine bağlı kayma  $\frac{R_R}{s}$  ile kayması  $s$  içeren genel denklem devresi kullanılır. Motor empedansı (5.1) denkleminde gibi hesaplanabilir.

$$Z_M = R_S + jX_L + \frac{R_R}{s} \quad (5.1)$$

Şekil 5.1'de indüksiyon motor yüklü bir endüstriyel sistemde üç faz arızasının motorun bağlı olduğu barada neden olduğu gerilim düşmesi ve Şekil 5.2'de ise aynı durum için motor kaymasına ait eğri görülmektedir. İndüksiyon motor yükünün olmadığı bir sistemde gerilim, düşme sırasında sıfır ve düşmeden sonra 1 pu. olabilmektedir. Tüm motorlarda kayma gerilim düşmesi sırasında hızla artar, arıza giderildikten sonra da bir süre daha artmaya devam eder. Arıza giderildikten sonra gerilimde 1 s. boyunca ek bir düşme görülür. Bu motorun tekrar devreye alınma anına benzer ve şebekeden büyük akımlar çekilir.



Şekil 5.1. İndüksiyon motor yüklü bir sistemde üç faz toprak arızası sırasında motor uçlarındaki gerilim.



Şekil 5.2. Şekil 5.1'deki indüksiyon motorunun kayma grafiği.

Arıza sonrası gerilim düşmesine katkıda bulunan diğer bir olay iki paralel transformatörden birinde arızanın oluşmasıdır. Koruma, arızalı transformatörü devre dışı bırakacağından sadece bir transformatör arıza giderildikten sonra kaynak için uygun olacaktır. Bundan dolayı arıza sonrası arıza seviyesi arıza öncesi değerinden daha azdır. Benzer etki iki paralel besleyiciden birinde arıza oluşması durumunda da gözlenir.

### 5.3. İndüksiyon Motorları ve Dengesiz Arızalar

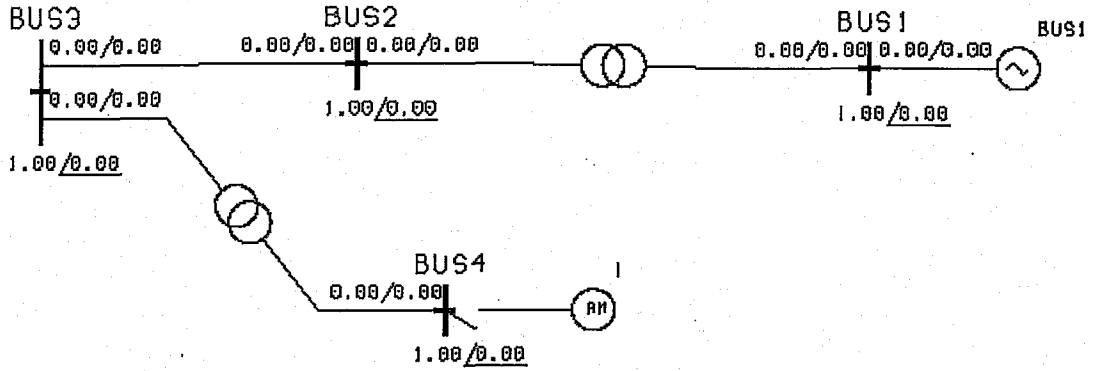
Dengesiz bir arıza sırasında indüksiyon motorunun davranışı fazlasıyla karışıktır. Ancak bir şebeke analiz programı sistemin büyük parçasını simüle ederek doğru sonuca ulaşılabilir. Aşağıdaki olay dengesiz arızalar sırasında indüksiyon motoru ve sistem arasındaki etkiden bahsetmektedir.

- Arıza başlangıcından sonra, ilk bir ya da iki periyot indüksiyon motoru arızaya katkıda bulunur. Bu pozitif dizi geriliminde artışa neden olur. Negatif ve sıfır dizi bileşenleri etkilenmez.
- İndüksiyon motoru yavaşlar ve pozitif dizi empedansında bir düşmeye neden olur. Bu empedanstaki düşme akımda artışa neden olur ve böylece pozitif dizi geriliminde bir düşme gözlenir.
- Motorun negatif dizi empedansı küçüktür, nominal pozitif dizi empedansının yaklaşık %10-20'si kadardır. Negatif dizi empedansı kaymadan bağımsızdır. Bundan dolayı negatif dizi gerilimi olay sırasında sabit kalacaktır.
- İndüksiyon motoru sıfır dizi akımına sahip değildir. Bu yüzden indüksiyon motoru sıfır dizi gerilimini etkilemez.

#### 5.3.1 İndüksiyon motorunun davranışına örnek

İndüksiyon motorunun dengesiz arızalardaki davranışını incelemek amacıyla Şekil 5.3'de görülen 4 baralı bir sistem ele alınmıştır. Sisteme ait veriler ve sistemin tek

hat şeması Ek 3’de verilmektedir. Sistemin gerilim ve akım değerleri Simpow Analiz Programı’nda hesaplanarak, 3 nolu barada bir faz toprak arızası oluşturulmuş ve indüksiyon motorunun uç gerilim ve akımları elde edilmiştir. Buna ait grafikler sırasıyla Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’de görülmektedir.



Şekil 5.3. İndüksiyon motor davranışını incelemek için alınan test sistemi.

İndüksiyon motorunun etkisi olmadan düşme B tipidir. Arızadan dolayı a fazında gerilim sıfıra düşerken, b ve c fazlarında her hangi bir değişme olmamıştır. Bunun yerine a fazında küçük bir değerde sıfırdan farklı gerilim ve iki arızasız fazda artışta görülebilir. Arıza giderildikten sonra sistem tekrar dengeli duruma döner ve üç fazın gerilim genliği eşitlenir. Motorun tekrar devreye alınması arıza sonrası düşmeye neden olur.

Arızalı fazda gerilimin tam sıfır değerinde olmamasının nedeni negatif dizi gerilimindeki düşmedir. (4.32) ve (4.34) denklemlerinde bir faz toprak arızası sırasında arızalı faz geriliminin (5.2) denklemindeki gibi olduğu görülmüştür.

$$V_a = V_1 + V_2 + V_0 = |V_1| - |V_2| - |V_0| \quad (5.2)$$

İndüksiyon motorunun etkisi,  $V_2$ 'nin mutlak değerinin düşmesi ve arızalı faz geriliminde artış şeklindedir.

Gerilim düşmesi sırasında, ayrıca pozitif dizi gerilimi düşer. Arızasız faz gerilimlerinde başlangıçta artış görülür. Tek faz arızası sırasında arızasız faz

gerilimleri pozitif, negatif ve sıfır dizi bileşenlerinden oluşur. c fazı için kompleks alanda indüksiyon motor yükünün olmadığı sistem içindir.

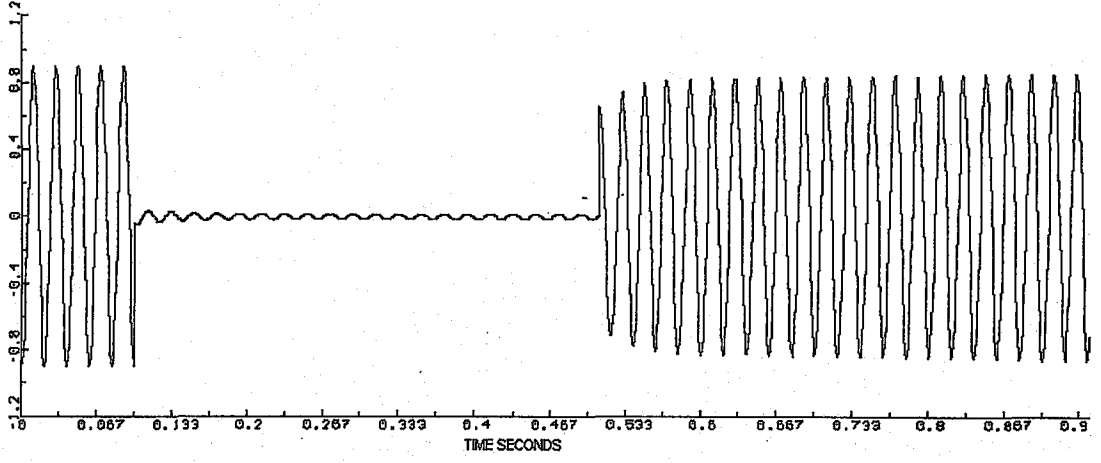
$$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} = \frac{2}{3}a - \frac{1}{3} - \frac{1}{3}a^2 = a \quad (5.3)$$

İndüksiyon motor yükünden dolayı, pozitif dizi gerilimi direkt düşmez. Negatif dizi gerilimi sıfırdan yeni değerine aniden yükselir. Sonuç olarak düşme sonrası gerilim genliği olay öncesi değerini aşacaktır. Bir kaç periyottan sonra indüksiyon motoru pozitif dizi gerilimini tutamaz.

Şekil 5.4'de indüksiyon motoruna ait akımlar görülmektedir. Motorun kayması gerilim düşmesi sırasında %2'den %6'ya artar. Bunu simetrik bileşenler olmadan açıklamak zordur. Ancak genelde, arızalı fazda başlangıçta akım artar, arızasız fazların birinde daha yüksek bir değere artarken diğer arızasız fazda başlangıçta düşme gözlenir. Belli bir süreden sonra ikinci arızasız fazda akım tekrar yükselir, bu motorun yavaşlaması olarak tanımlanır.

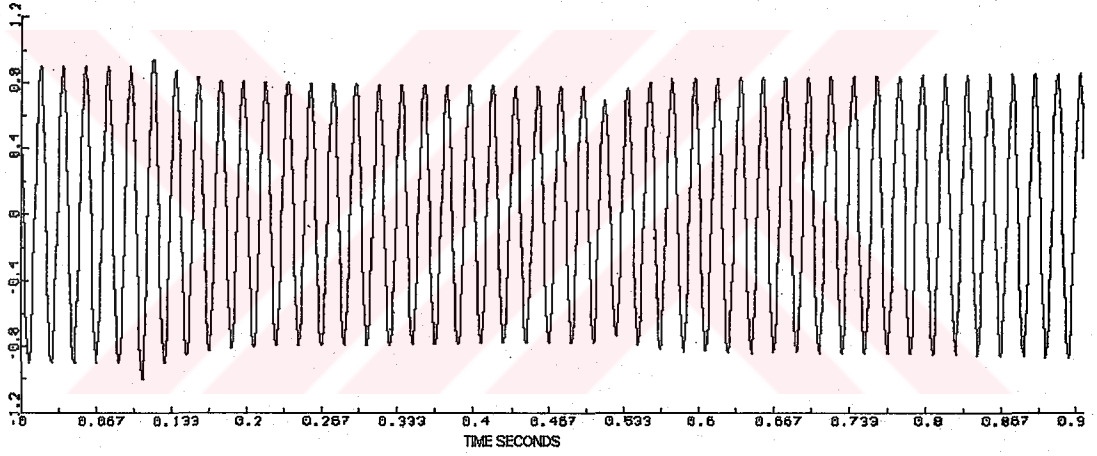
Şekil 5.4 ve Şekil 5.5'de görülen motora ait, akım ve gerilimin simetrik bileşenleri Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de çizilmiştir. Şekil 5.6'dan negatif ve sıfır dizi geriliminin sabit kaldığı, motor yavaşlarken pozitif dizi empedansındaki düşmeden dolayı pozitif dizi geriliminde düşme gözlemlendiği görülmektedir. Sıfır dizi akımı motor sargıları üçgen bağlandığında sıfırdır.

ASYNC1 UPHASE A PU 8.91/SQRT[3] KV



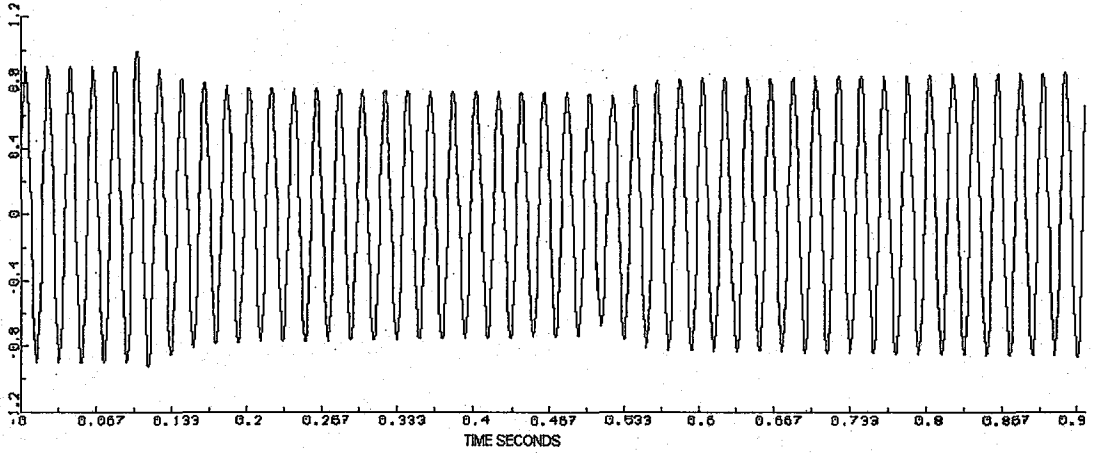
a fazı

ASYNC1 UPHASE B PU 8.91/SQRT[3] KV



b fazı

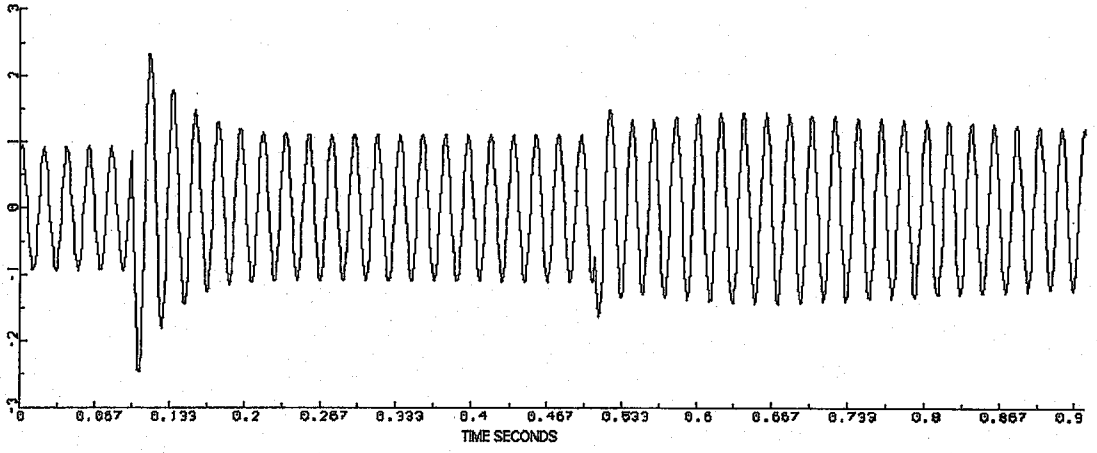
ASYNC1 UPHASE C PU 8.91/SQRT[3] KV



c fazı

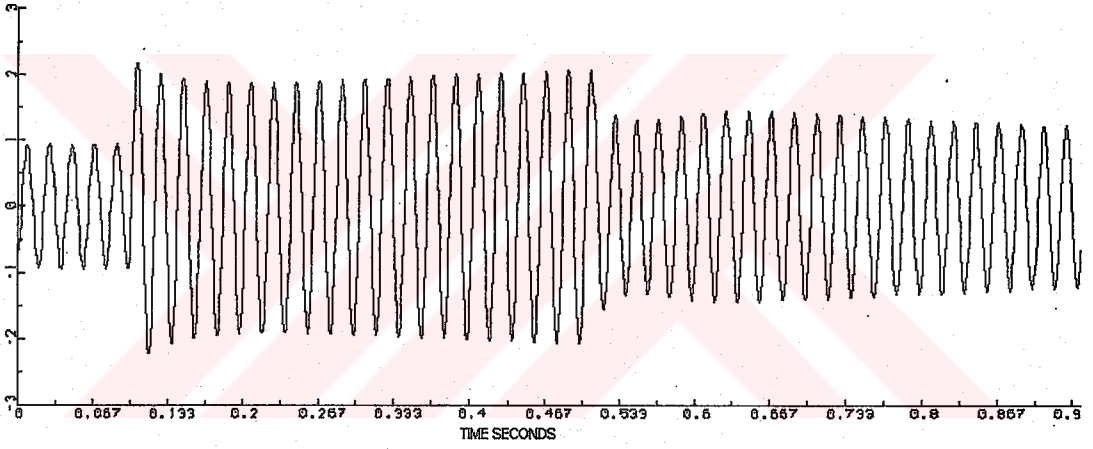
Şekil 5.4. Tek faz toprak arızası sırasında motor uçlarında her bir faza ait gerilimler.

ASYNC1 | PHASE A PU 1.30 KA



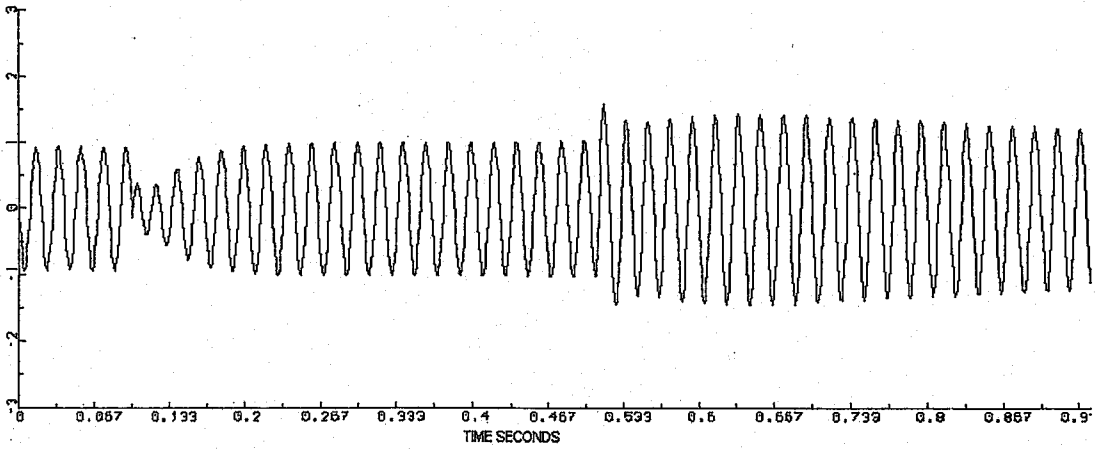
a fazı

ASYNC1 | PHASE B PU 1.30 KA



b fazı

ASYNC1 | PHASE C PU 1.30 KA

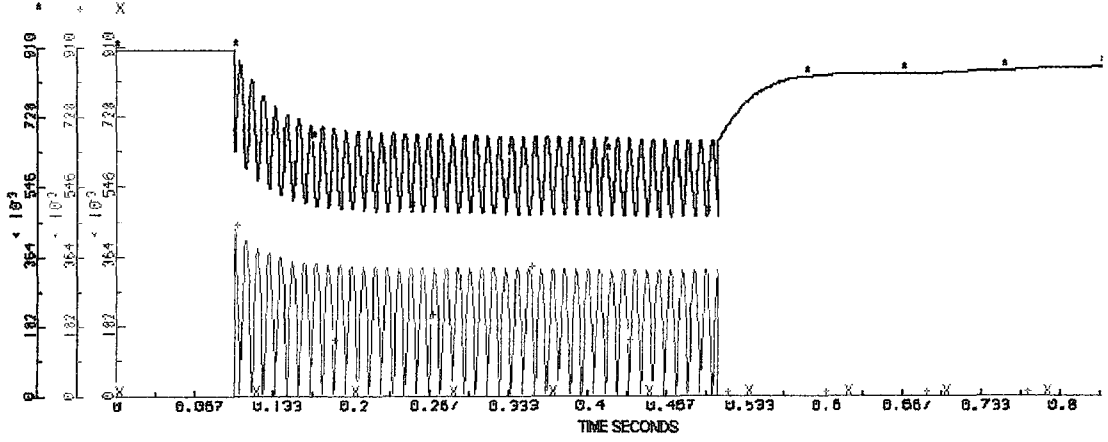


c fazı

Şekil 5.5. Tek faz toprak arızası sırasında motor uçlarında her bir faza ait akımlar.

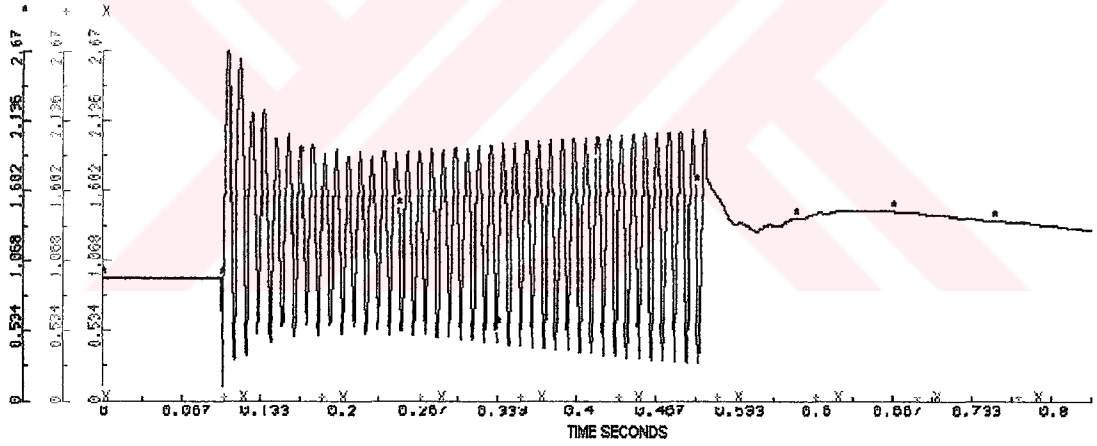


\*=ASYNC1 U PU 8.91/SQRT[3]KV  
+=ASYNC1 U NEG. PU 8.91/SQRT[3]KV  
X=ASYNC1 U ZERO PU 8.91/SQRT[3]KV



Şekil 5.6. Şekil 5.5’de görülen gerilimlerin simetrik bileşenleri.

\*=ASYNC1 I PU 1.30 KA  
+=ASYNC1 I NEG. PU 1.30 KA  
X=ASYNC1 I ZERO PU 1.30 KA



Şekil 5.7. Şekil 5.4’de görülen akımların simetrik bileşenleri.

### 5.3.2 Sadeleştirilmiş analizler

Simülasyon sonuçlarından gerilim düşmesi için üç sonuç çıkartılabilir.

1. İndüksiyon motorları arızadan beslenir, pozitif dizi geriliminde artmaya neden olur.
2. Pozitif dizi gerilimi indüksiyon motor yükünün olmadığı durumla aynıdır.

3. İndüksiyon motorunun yavaşlamasıyla ek bir pozitif dizi akımı oluşur, bu nedenle pozitif dizi geriliminde düşme görülür.

Negatif dizi gerilimi arıza sırasında sabittir ancak indüksiyon motor yükünün olmadığı durumda daha düşük değerdedir. İndüksiyon motorlarının etkisini tanımlamak için iki adımda hesaplama prosedürü kullanılır. İlk olarak yüksüz durum için negatif dizi gerilimleri hesaplanır. Daha öncede belirtildiği gibi bu durum farklı karakteristik genlikleriyle gerilim düşmesinin B veya C tipi şeklinde olacaktır. Karakteristik faz açısı atlaması sıfır kabul edilmiştir. Bunun için kaynak, sonsuz empedanslı D ya da C tipi düşme üreten kaynak gibi modellenmiştir. İndüksiyon motor yükünün etkisi motor uçlarındaki gerilim ve kaynak gerilimleri arasındaki fark şeklindedir. Motor uçlarındaki gerilim  $V_1^{(yük)}$  ve  $V_2^{(yük)}$  şeklinde ifade edilir. Yukarıda bahsedilen üç durum için ilişkiler aşağıdaki gibidir.

1. Pozitif dizi gerilimindeki düşme %15 azaltılmıştır. Negatif dizi gerilimi %30 düşmüştür.

$$V_1^{(yük)} = 0.15 + 0.85 V_1^{(no)}$$

$$V_2^{(yük)} = 0.7 V_2^{(no)}$$

2. Negatif dizi gerilimi %30 düşer.

$$V_1^{(yük)} = V_1^{(no)}$$

$$V_2^{(yük)} = 0.7 V_2^{(no)}$$

3. Pozitif dizi gerilimi %10, negatif dizi gerilimi ise %30 düşer.

$$V_1^{(yük)} = 0.9 V_1^{(no)}$$

$$V_2^{(yük)} = 0.7 V_2^{(no)}$$

Motor uç gerilimleri, pozitif ve negatif dizi gerilimlerinden hesaplanmıştır ( $V_1^{(yük)}$  ve  $V_2^{(yük)}$ ). C tipi düşmede fazlardan birinin geriliminde şiddetli bir düşme görülürken diğer fazda oluşan gerilim düşmesi şiddetli değildir. Motor yavaşladıkça düşmenin şiddetli olmadığı fazdaki gerilim düşmesinin arttığı görülür. En kötü etkilenen fazdaki gerilim indüksiyon motor etkisinden dolayı başlangıçta yüksektir fakat motor yavaşladığında ve pozitif dizi gerilimi düştüğünde azalır. D tipi düşmede ise en az

etkilenen fazlarda gerilim düşer. En çok etkilenen fazda başlangıçta gerilim artar ancak daha sonra azalır.

Bu teorik bilgilerden iki sonuç çıkartılabilir.

- En düşük gerilim artar en yüksek gerilim ise azalır böylece dengesizlik daha az olur.
- Uzun süreli gerilim düşmelerinde bütün gerilimler düşer. Bunun nedeni pozitif dizi gerilimindeki düşmedir.

#### **5.4 Güç Elektroniği Yükleri**

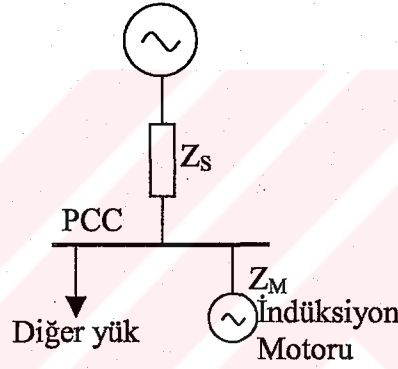
- Özellikle uzun süreli ve şiddetli gerilim düşmelerinde elektronik yüklerinin büyük bir kısmı devre dışı kalacaktır. Bu yük akımını azaltacak ve böylece gerilimi artacaktır.
- Devre dışı kalmayan cihaz başlangıçta sıfıra yakın akım çeker çünkü dc bara gerilimi ac gerilimin tepe değerinden daha yüksek bir değerdedir. Normalde yükün çektiği toplam güç sabittir bu nedenle ac akım daha yüksek olacaktır. Bu akım yüksek harmonik bileşenleri içermektedir bundan dolayı düşme sırasında gerilimin harmonik distorsiyonu artacaktır.
- Üç fazlı doğrultucularda dengesiz düşmeler sırasında en yüksek gerilim, en yüksek gerilim farkının olduğu iki faz arasında akar. Bu iki fazdaki gerilim düşer ve diğer fazdaki artar. Böylece üç fazlı doğrultucu fazlar arasındaki dengesizliği azaltır. Bu indüksiyon motorunun davranışına benzemektedir.

#### **5.5 İndüksiyon Motorunun Devreye Alınmasının Neden Olduğu Kısa Süreli Gerilim Düşümleri**

Önceki bölümlerde kısa devre arızalarının neden olduğu gerilim düşümlerinden bahsedilmişti. Bu gerilim düşmelerinin temel nedeni cihaz arızaları veya tüketiciden

kaynaklanan arızalardı. Gerilim düşmelerinin diğer önemli nedeni büyük indüksiyon motorlarının devreye alınmasıdır. Ayrıca yüklerin anahtarlanması da gerilim düşmelerine neden olabilir. Ancak bu durumdaki düşmeler oldukça küçük genliktedir ve sonradan gerilim iyileşmez.

İndüksiyon motorları devreye alındıkları sırada normalden beş ya da altı kat fazla akım çekerler. Bu motor nominal hızına ulaşana kadar sürer (genelde bir kaç saniye ile bir dakika arasında). Gerilimdeki düşme sistem parametrelerine bağlıdır.  $Z_S$ 'in kaynak empedansı,  $Z_M$ 'nin kalkış anındaki motor empedansı olduğu Şekil 5.8'deki sistem indüksiyon motorunun eşdeğer devresidir.



Şekil 5.8. İndüksiyon motorunun devreye alınmasıyla oluşan gerilim düşmesinin eşdeğer devresi.

Motorla aynı baradan beslenen bir yükün gerilimi gerilim bölücü eşitliğinden bulunabilir.

$$V_{azlm} = \frac{Z_M}{Z_S + Z_M} \quad (5.4)$$

Önceki hesaplamalarda olduğu gibi burada da kaynak gerilimi 1 pu. varsayılmıştır. Kalkış anındaki motor empedansı (5.5) denklemindeki gibidir.

$$Z_M = \frac{V_n^2}{\beta S_{motor}} \quad (5.5)$$

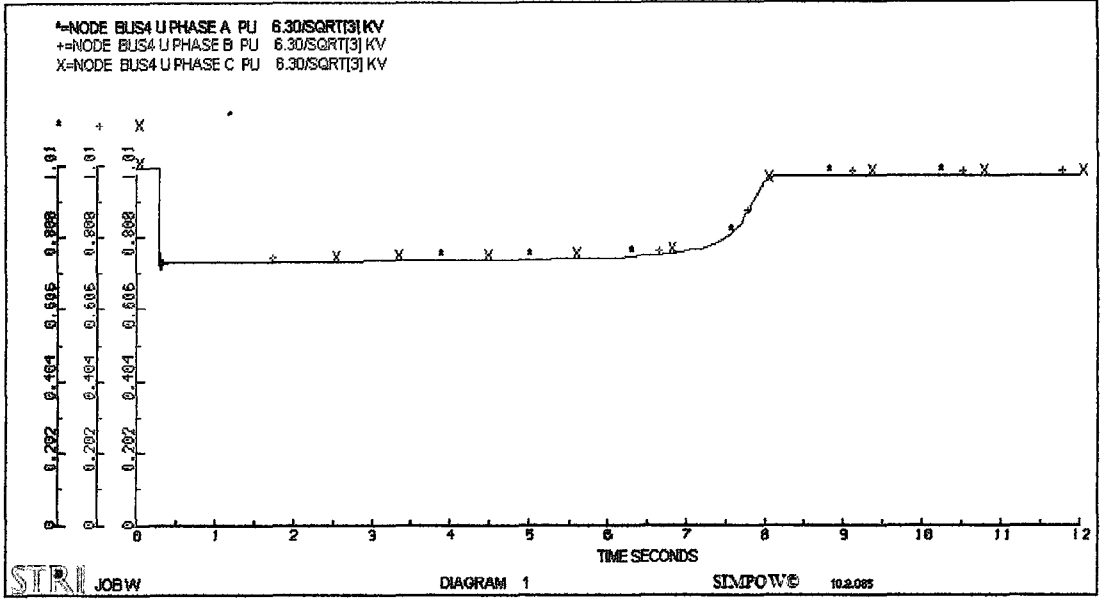
$\beta$  başlangıç akımı ile nominal akım arasındaki orandır. (5.4) denklemini tekrar yazılırsa (5.6) denklemini elde edilir.

$$V_{azlm} = \frac{S_{kaynak}}{S_{kaynak} + \beta S_{motor}} \quad (5.6)$$

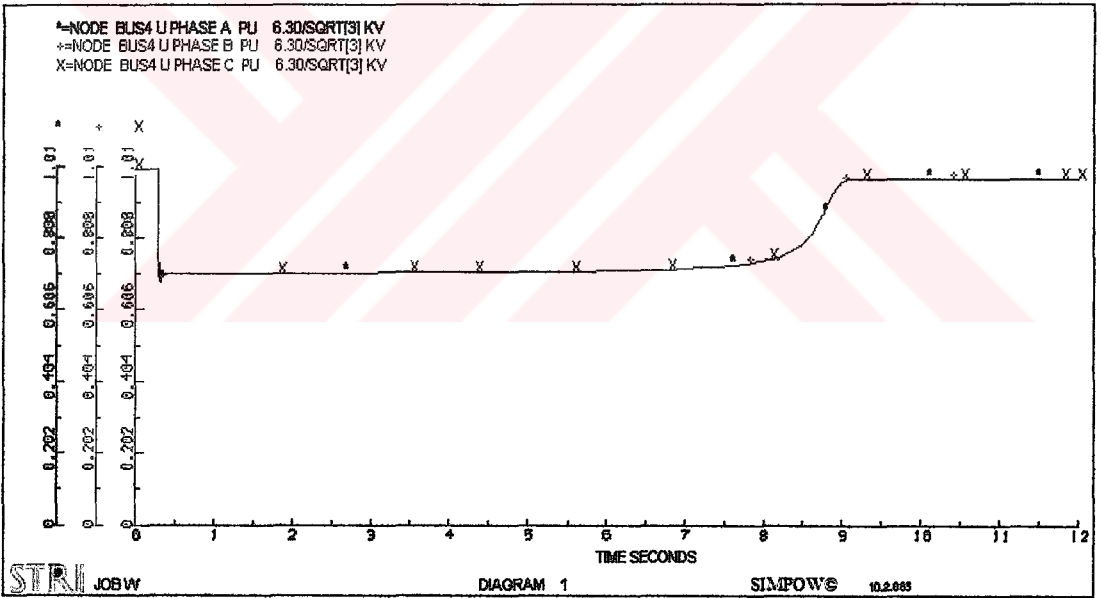
Bunun sadece bir yaklaşım olduğu unutulmamalıdır. Buradan elde edilen sonuç bir indüksiyon motorunun devreye alınmasının neden olduğu gerilim düşmesi hakkında yaklaşık bir bilgi verebilir. Bir motorun devreye alınması sistemdeki diğer motor uç gerilimlerinin düşmesine ve onların yavaşlamasına neden olacaktır. Böylece yük akımında ek bir artış ve buna bağlı olarak gerilimde ek bir düşme görülecektir.

Motorun devreye alınmasının neden olduğu gerilim düşmesinin zamanı bir çok motor parametresine bağlıdır. Bunlardan en temeli eylemsizlik momentidir. Yol alma zamanı tanımlanırken motor uçlarındaki düşme sonrası gerilim genliğinin de hesaba katılması gerekir. Motorun momenti uç gerilimin karesiyle orantılıdır. Yani %90'nın altındaki bir düşme momentte %81'in altında bir düşmeye neden olur. Bu motorun ivmesini tanımlayan elektriksel moment ile mekanik moment arasındaki farktır. Uç gerilimi nominal ise yol alma sırasında mekanik moment elektriksel momentin yarısıdır. Şekil 5.9'da Ek 3'de verilen sistem için indüksiyon motorunun devreye alınmasıyla oluşan gerilim düşmesine ait bir örnek görülmektedir.

Aynı sistem için kaynak gücü değiştirilerek elde edilen sonuçlar Şekil 5.9 ve Şekil 5.10'da görülmektedir. Şekil 5.10 için kaynak gücü yarıya indirilerek motorun devreye alınmasıyla oluşan gerilim düşmesi incelendiğinde, kaynak gücü azaldıkça düşme sonrası gerilim genliğinin arttığı görülmektedir. Ancak bu artış şiddetli bir artma değildir.



Şekil 5.9. İndüksiyon motorunun devreye alınmasıyla oluşan gerilim düşmesi.



Şekil 5.10. Şekil 5.3'deki sistem için kaynak gücü yarıya düşürüldüğünde motorun devreye alınmasıyla oluşan gerilim düşmesi.

## **BÖLÜM 6. SIMPOW PROGRAMINDA GERÇEK VERİLERLE SİSTEM ANALİZİ**

Önceki bölümlerde en önemli güç kalitesi problemlerinden biri olan kısa süreli gerilim düşümleri ve karakteristik değerlerinden bahsedilmişti. Özellikle lastik, kağıt ve elektronik sektörleri, üretim bantlarındaki, yerel dağıtım şebekesinde oluşan arızaların neden olduğu gerilim düşmelerinden dolayı yılda milyarlarca liralık zarara uğramaktadırlar. Bu bölümde İzmit bölgesinde yer alan kağıt fabrikalarından biri olan Kartonsan A.Ş.'nin iletim sistemi incelenmiştir.

Sistem ABB Güç Sistemleri Analiz Departmanı tarafından geliştirilen ve daha sonra STRI grubuna geçen SIMPOW, güç sistemleri simülasyon ve analiz programında gerçekleştirilmiştir. SIMPOW Program zaman ve frekans domeninde dinamik simülasyon yapılabilecek geniş bir uygulama alanı mevcuttur.

İletim sistemine ait hat ve transformatör verileri TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim A.Ş.)'dan alınmıştır. Bu veriler EK 5'de verilmiştir.

### **6.1. Sistemin Tanıtımı**

Günümüzde sıklığı artan gerilim düşmeleri, tesislerde bir çok probleme neden olmaktadır. Kartonsan A.Ş de bu tip sorunlarla yüzyüze kalan kuruluşlardan biridir. Sorunun giderilmesi amacıyla LEM NORMA tarafından üretilmiş olan enerji analizörüyle işletmeye ait giriş barası olan 34.5 kV'luk Anabara Bara'sından belirli zaman aralıklarında ölçümler alınmıştır.

Bu baranın diğer baralarda arıza oluşması durumunda nasıl etkilendiğini belirlemek için SIMPOW analiz programında sistem tasarlanmıştır. Sistemin güç akış analizi SIMPOW Programının optpow bölümünde yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar

kaydedilerek dynpow bölümünde arıza analizi gerçekleştirilmiştir. Anabara barasındaki grafikler analiz sonucu olarak kaydedilmiştir.

Anabara Barası, 154/34.5 kV Köseköy indirici merkezi üzerinden beslenmektedir. Köseköy 154/34.5 kV indirici merkezini besleyen noktalar Yalova indirici merkezi, Nuh Çimento indirici merkezi ve Adapazarı indirici merkezidir. Köseköy indirici merkezi Adapazarı şalt sahasından 154/380 kV'luk transformatörle enterkonnekte şebekeye bağlanmaktadır. Sistemin tek hat şeması ve SIMPOW Programında yazılan program EK 4'de verilmiştir.

## **6.2. Dengesiz Arızalar**

### **6.2.1. Tek faz toprak ve iki faz arızaları**

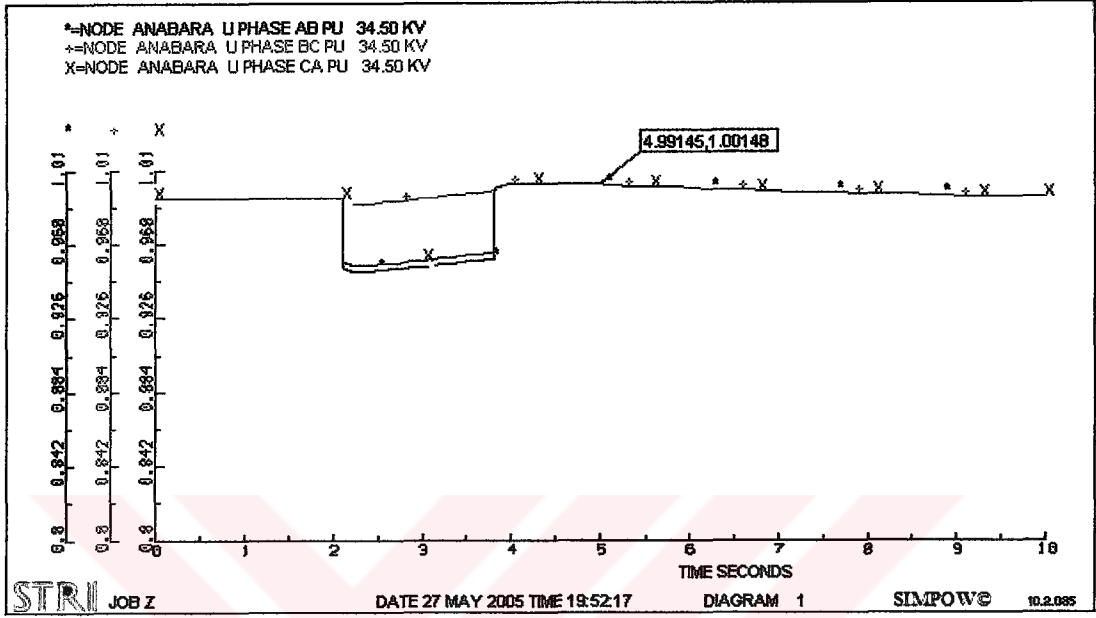
Anabara barası dahil sistemdeki tüm baralarda 2.1-1.8 zaman aralığında tek faz toprak, iki faz ve iki faz toprak arızaları oluşturulmuştur. Her bir arızadan sonra Anabara barasına ait gerilim-zaman eğrileri elde edilmiştir. Arıza tiplerine göre düşme gerilimlerinin farklılığının daha net anlaşılabilmesi için elde edilen eğriler birlikte verilmiştir.

Şekil 6.1'de Çayırhan barasında oluşan tek faz toprak ve iki faz arızasının Anabara barasındaki etkisini göstermektedir. Şekil 6.1'den görüldüğü gibi Çayırhan barasında oluşan arıza tesiste şiddetli bir gerilim düşmesine neden olmamaktadır. Gerilimler faz-faz gerilimleridir. B tipi düşmeye neden olan tek faz toprak arızası yıldız-yıldız bağlı transformatör ve ardından üçgen-yıldız bağlı transformatörden sonra Anabara barasında C tipi düşmeye neden olmaktadır.

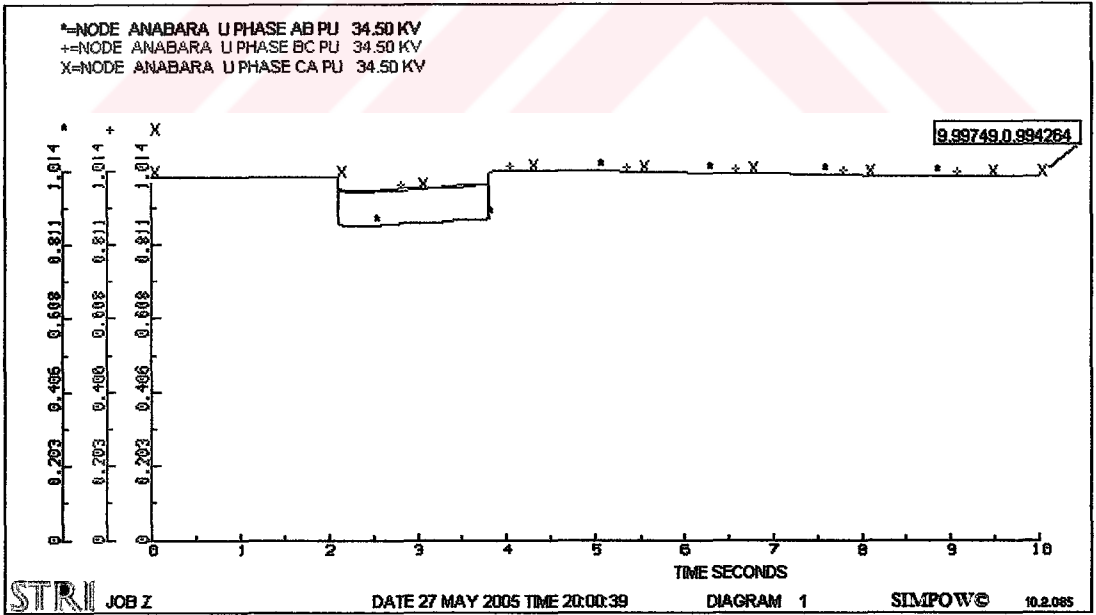
Bundan dolayı fazlardan birinin gerilimi düşmezken diğer iki fazın gerilimi hemen hemen aynı oranda azalmaktadır. C tipi düşmeye neden olan iki faz arızası Anabara barasında D tipi düşmeye dönüşmüştür. Transformatöre ek olarak Adapazarı barası ile Köseköy barası arasındaki iletim hattının uzaklığı da azalmayı etkilemektedir. Şekil 6.2'de enerji analizörüyle alınan ölçüm sonuçlarından biri görülmektedir. 28.03.2002 tarihinde alınan ölçüm sonucu incelendiğinde 1 işaretli noktada oluşan



gerilim düşmesinin nedeni Çayırhan barasında oluşan tek faz toprak arızası olduğu söylenebilir. Değerlerin daha net görülmesi açısından Şekil 6.3'de 1 noktası büyütülmüş şekilde verilmektedir.

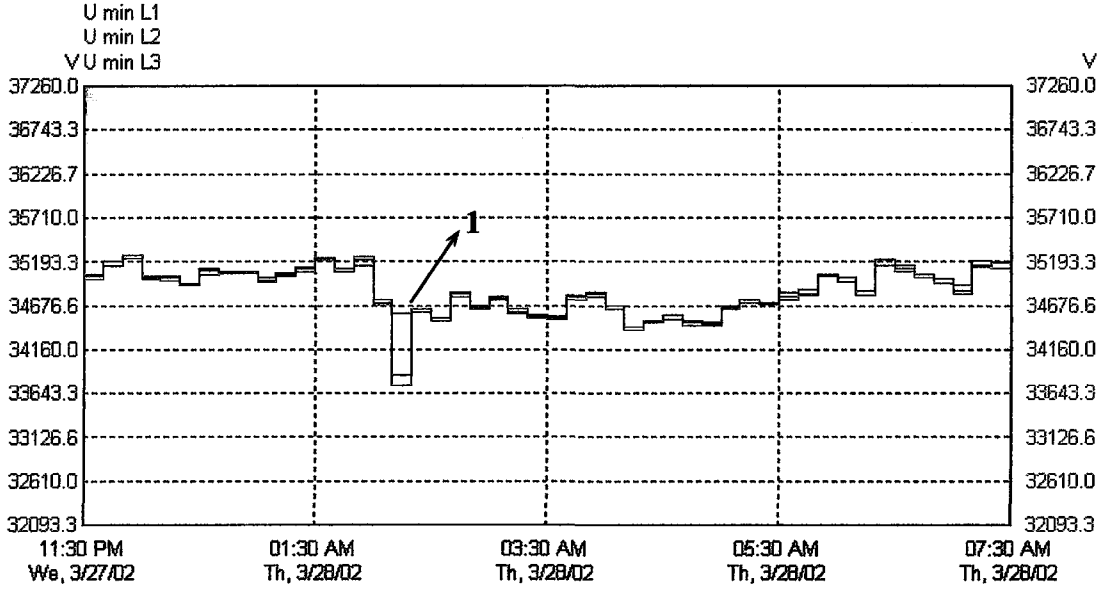


(a)

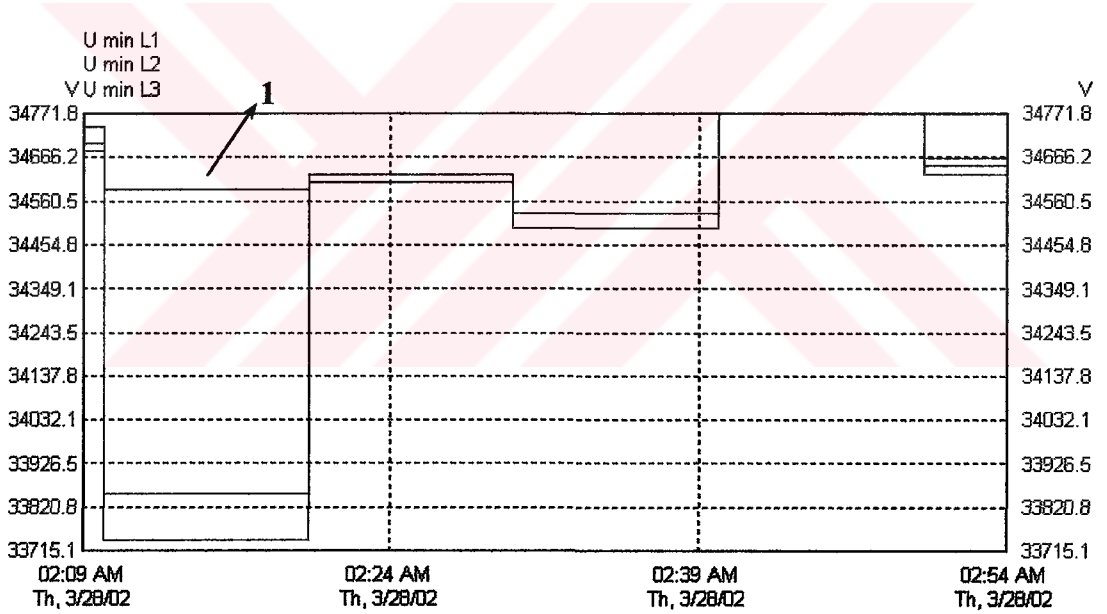


(b)

Şekil 6.1. Çayırhan barasında oluşan (a) tek faz toprak ve (b) iki faz arızalarının Anabara barasındaki etkisi.

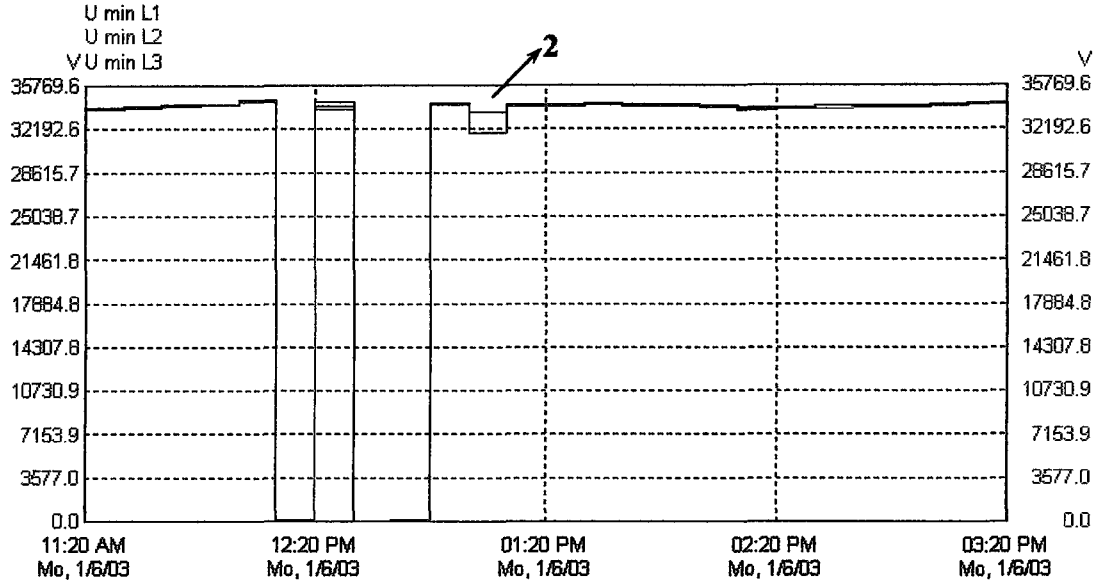


Şekil 6.2. Anabara barasından enerji analizörüyle alınan ölçüm sonucu.

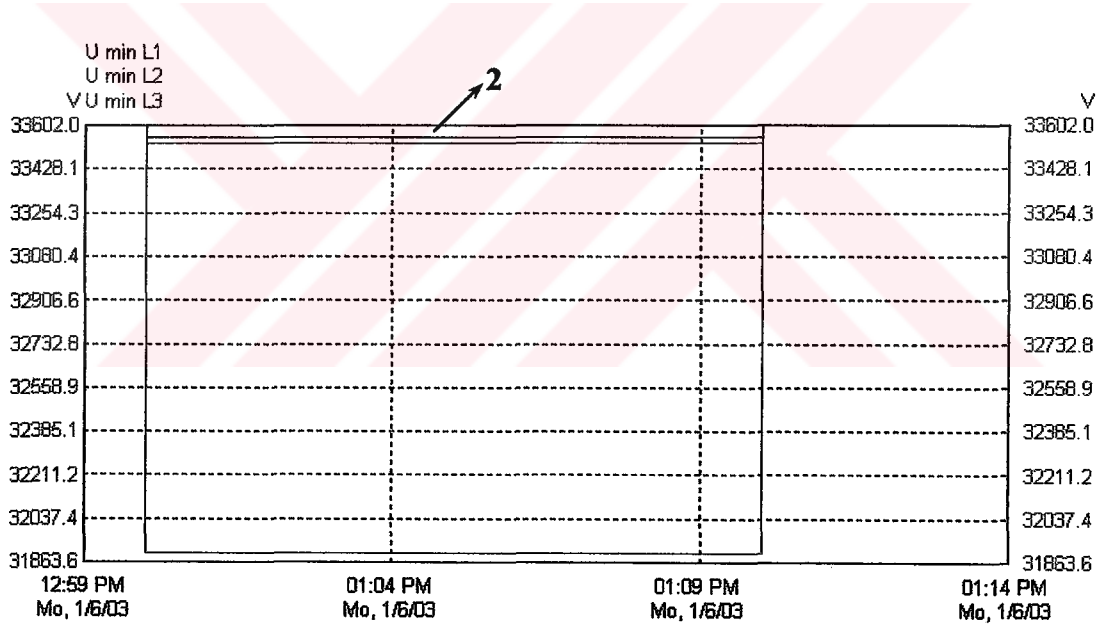


Şekil 6.3. Şekil 6.2'deki 1 noktasının büyütülmüş hali.

Şekil 6.4'de 06.01.2003 tarihine ait ölçüm sonucu görülmektedir. Kesinlik taşımamakla birlikte Şekil 6.4'de 2 ile ifade edilen noktadaki gerilim düşmesine Çayırhan barasında oluşan iki faz arızasının neden olduğu söylenebilir. Şekil 6.4, 2 noktasına ait değerlerin net okunması amacıyla büyütülmüştür (Şekil 6.5).



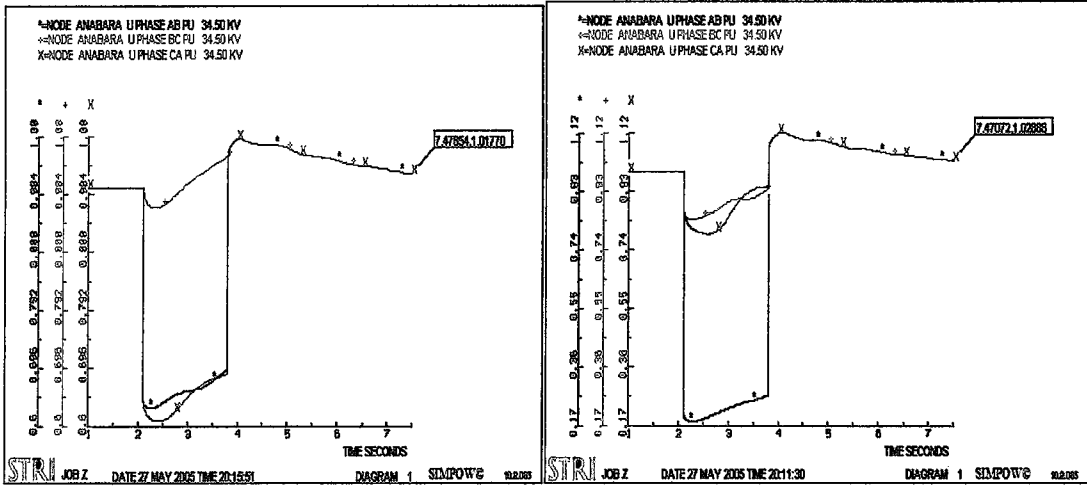
Şekil 6.4. Anabara barasından enerji analizörüyle alınan ölçüm sonucu.



Şekil 6.5. Şekil 6.4'deki 2 noktasının büyütülmüş hali.

Şekil 6.6'da Adapazarı2 barasında oluşan tek faz toprak ve iki faz arızalarının tesise etkisini vermektedir. Çayırhan barası ile Adapazarı2 barası arasında 380/154 kV'luk Yy bağlı transformatör yer almaktadır. Bu nedenle 380 kV ile 154 kV gerilim seviyelerinde oluşan arızanın Anabara barasına etkisi Çayırhan barasında oluşan arızaların etkileriyle aynı olmaktadır. Arıza giderildikten sonraki artışın nedeni bu baraya yakın barada varolan generatördür. Belli bir süre sonra gerilim tekrar

başlangıç değerine ulaşmaktadır. Şekil 6.6 ve sonrası için elde edilen eğriler küçültülmüştür.



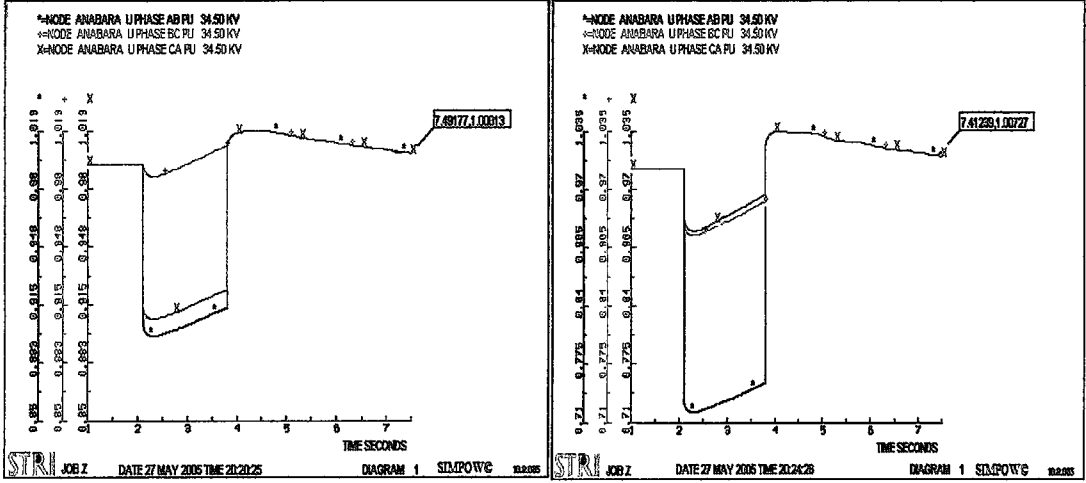
(a)

(b)

Şekil 6.6. Adapazarı2 barasında oluşan (a) tek faz toprak ve (b) iki faz arızalarının Anabara barasındaki etkisi.

Şekil 6.7 (a)'da Yalova barasında oluşan tek faz toprak arızasının neden olduğu gerilim düşmesi görülmektedir. Bu baranın etkisi Çayırhan ve Adapazarı2 barasıyla hemen hemen aynıdır. Bu bara Anabaraya barasına, Adapazarı2 barasından daha uzak olduğu için oluşan arızadanın neden olduğu düşme şiddeti azdır. Şekil 6.7 (b)'de ise bu barada oluşan iki faz arızasının tesise etkisi görülmektedir. Arızasız fazdaki düşme arızalı fazlardan daha şiddetlidir.

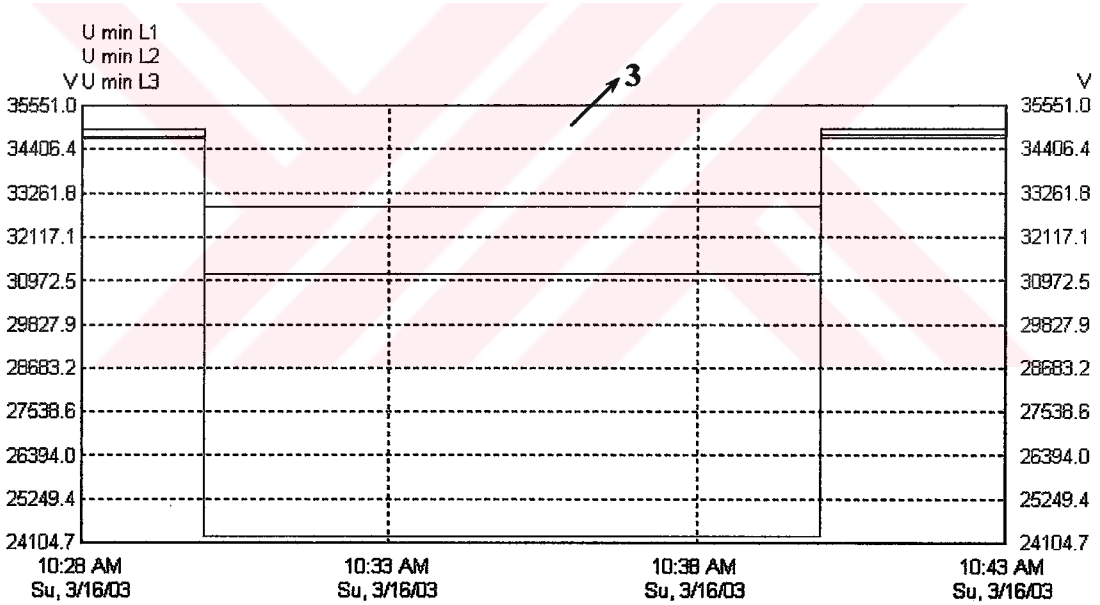
Şekil 6.8'de Adapazarı2 barasında oluştuğu düşünülen iki faz arızasının neden olduğu düşmeye ait ölçüm sonucu görülmektedir. Ölçüm alınırken arıza tipi ve arızanın oluştuğu bölgenin kaydedilmesine olanak olmadığından simülasyon sonuçları ile ölçüm sonuçları karşılaştırılarak düşme tipi ve yeri hakkında tahmin yürütülmektedir. Bundan dolayı kesinlikten bahsedilememektedir.



(a)

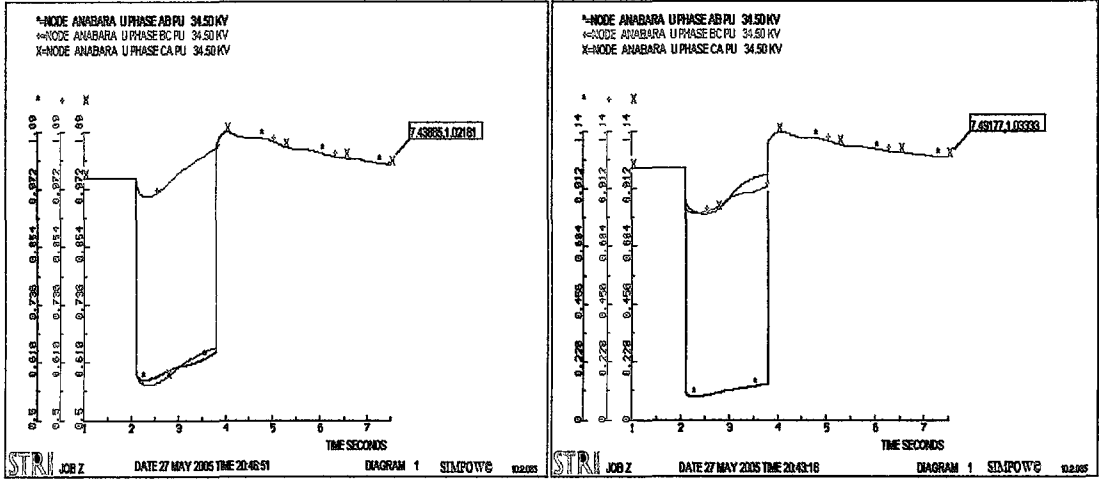
(b)

Şekil 6.7. Yalova barasında oluşan (a) tek faz toprak ve (b) iki faz arızalarının Anabara barasındaki etkisi.



Şekil 6.8. Anabara barasından enerji analizörüyle alınan ölçüm sonucu.

Şekil 6.9 Köseköy barasında oluşan tek faz toprak ve iki faz arızalarının Anabara barasında neden olduğu gerilim düşmesini göstermektedir. Buradaki arıza yine C tipi düşmeye neden olmuştur ancak gerilimdeki düşme daha şiddetlidir. Yine generatörlerin varlığından dolayı düşmeden sonra gerilim artmış ve regülatör tasarıma bağlı olarak belirli bir süre sonra başlangıç değerine oturmuştur.

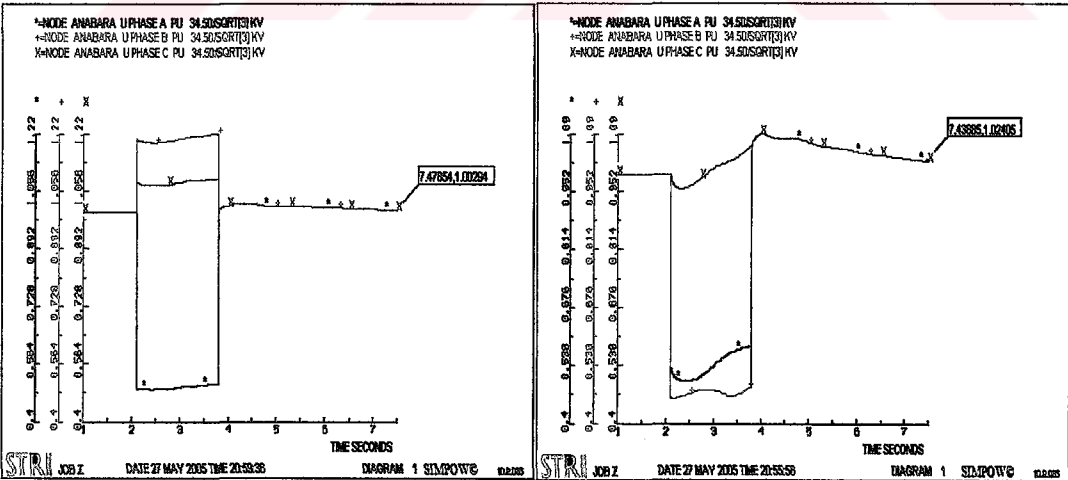


(a)

(b)

Şekil 6.9. Köseköy barasında oluşan (a) tek faz toprak ve (b) iki faz arızalarının Anabara barasındaki etkisi.

Şekil 6.10'da ise Kullar barasında aynı arızaların neden olduğu gerilim düşmeleri görülmektedir. Köseköy ile Kullar barası arasında  $Dy$  ve yıldız noktası  $20\Omega$ 'luk direnç üzerinden topraklanmış transformatör bulunmaktadır. Kullar ile Anabara barasının gerilim seviyeleri aynıdır. Bundan dolayı tek faz toprak arızası sırasında arızalı faz geriliminde şiddetli düşme olurken arızasız fazlarda gerilim artmıştır.

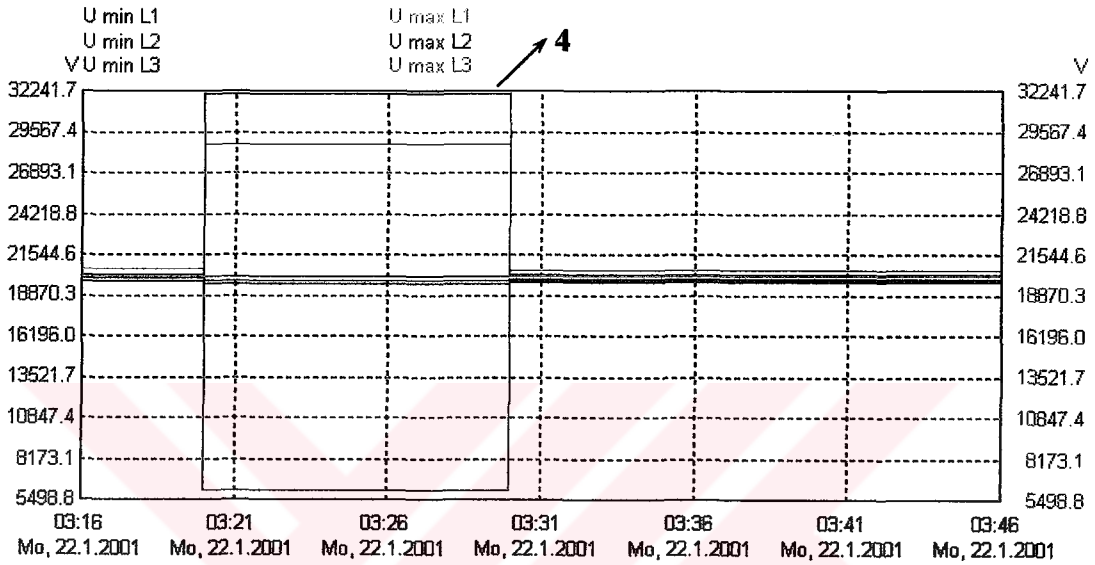


(a)

(b)

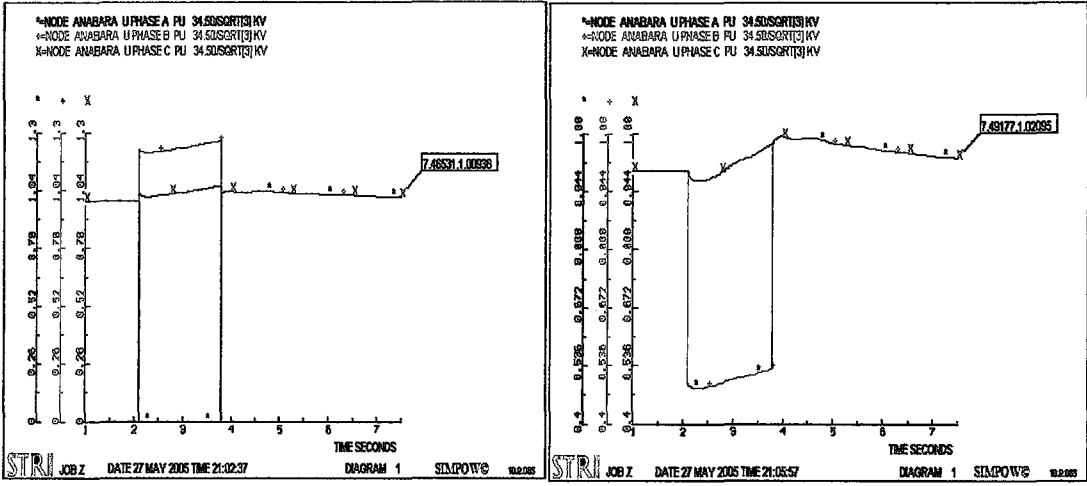
Şekil 6.10. Kullar barasında oluşan (a) tek faz toprak ve (b) iki faz arızalarının Anabara barasındaki etkisi.

Şekil 6.11’de ise 2001 senesinin ocak ayına ait ölçüm sonuçları görülmektedir. Şekil 6.11’deki gerilimler faz-nötr gerilimleri olduğundan simülasyon sonuçları da faz-nötr gerilimleri için elde edilmiştir. Fazlardan ikisinin gerilimi artarken arızalı faz gerilimi 0.48 pu.’e düşmektedir. Bu durumda Şekil 6.11’de 4 noktasındaki düşmenin nedeni Kullar barasında oluşan tek faz toprak arızası olduğu söylenebilir.



Şekil 6.11. Enerji analizörüyle alınan ölçüm sonucu.

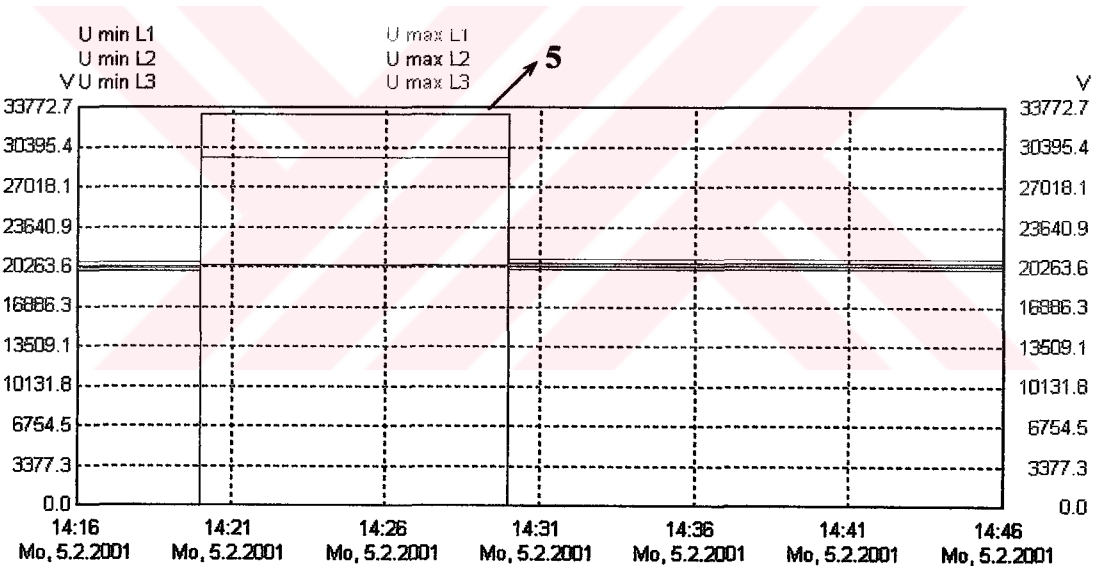
Şekil 6.12’de Anabara barasında oluşturulan tek faz toprak ve iki faz arızalarının neden olduğu gerilim düşmeleri görülmektedir. Arızalı faz gerilimi sıfıra düşerken yukarıda bahsedilen nedenden dolayı arızasız faz gerilimlerinde artma görülmektedir. Şekil 6.13 alınan ölçümlerden Anabara barasında oluşan tek faz toprak arızasının bu baraya etkisine benzeyen sonuçları göstermektedir.



(a)

(b)

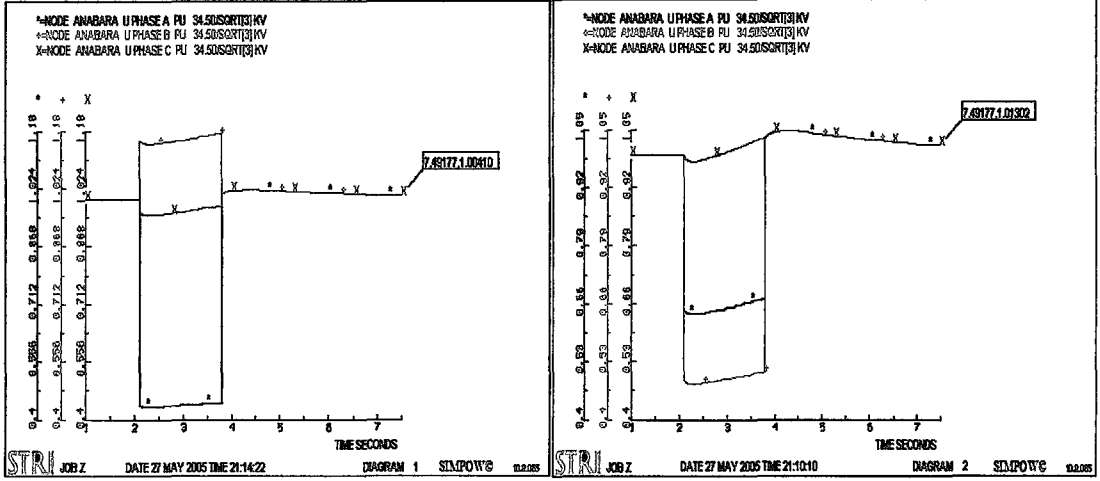
Şekil 6.12. Anabara barasında oluşan (a) tek faz toprak ve (b) iki faz arızalarının Anabara barasındaki etkisi.



Şekil 6.13. Anabara barasında olduğu düşünülen tek faz toprak arızasının bu baradaki etkisini gösteren ölçüm sonucu.

Şekil 6.14'de ise aynı arızaların Besleme barasında oluşması durumunda oluşan gerilim düşmeleri görülmektedir. Bu bara ile Anabara barası aynı gerilim seviyesindedir ve bu baradaki arıza şiddetli düşmelere neden olur. Şekil 6.14'den görüldüğü gibi arızasız fazlardan birinin gerilimi daha öncede bahsedilen nedenden dolayı artmaktadır ancak bu artma Kullar ve Anabara baralarındaki tek faz toprak arızalarının neden olduğu kadar şiddetli değildir.



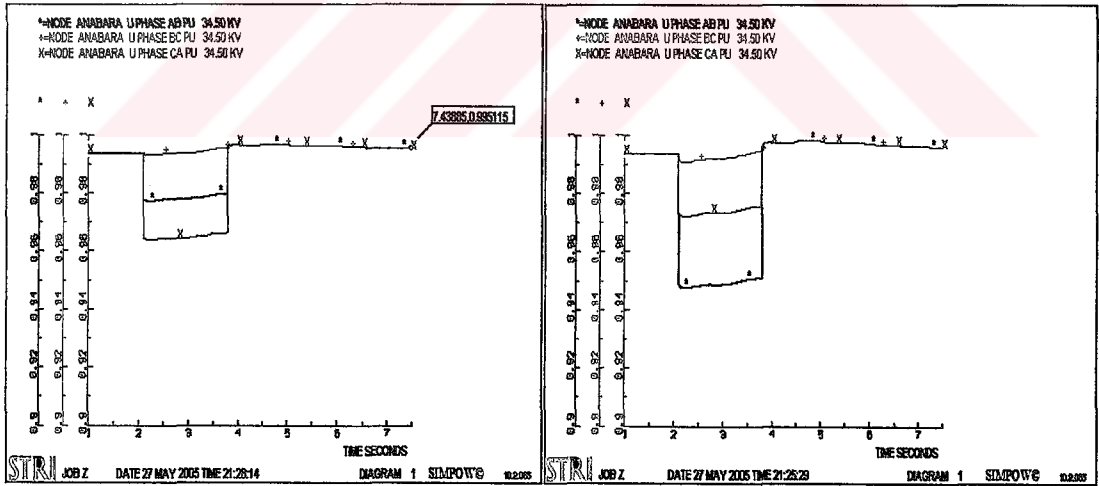


(a)

(b)

Şekil 6.14. Besleme barasında oluşan (a) tek faz toprak ve (b) iki faz arızalarının Anabara barasındaki etkisi.

Şekil 6.15’de ise sistemdeki 400V ‘luk yüklerden birinde aynı tip arızaların oluşması durumunda oluşan düşmeler görülmektedir. M1T1 barasında oluşan tek faz toprak arızası Anabarada C tipi, iki faz arızası ise D tipi düşmeye neden olmuştur.



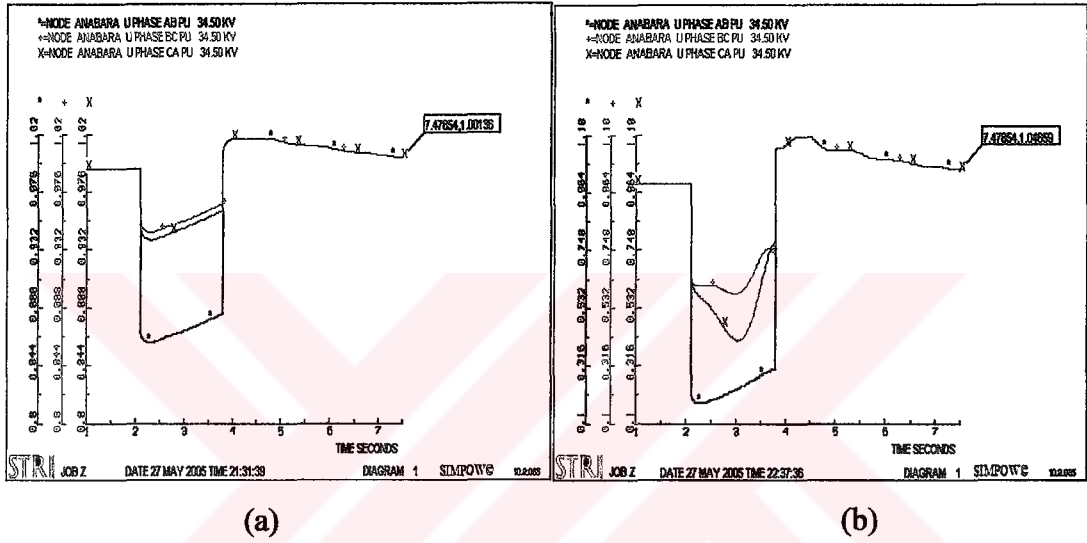
(a)

(b)

Şekil 6.15. M1T1 barasında oluşan (a) tek faz toprak ve (b) iki faz arızalarının Anabara barasındaki etkisi.

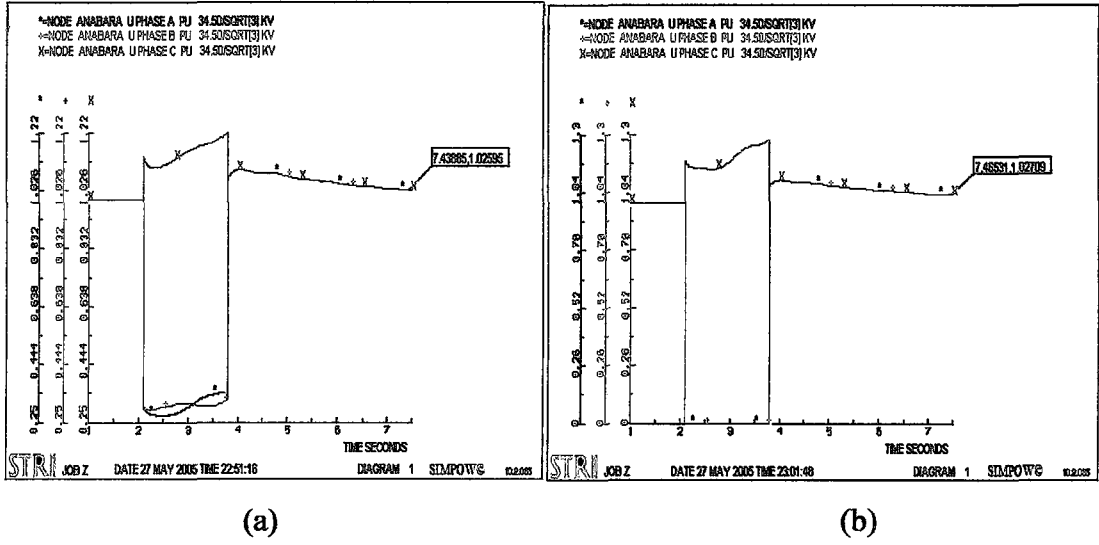
## 6.2.2. İki faz toprak arızası

Şekil 6.16'da Çayırhan ve Adapazarı2 baralarında iki faz toprak arızasının tesisin giriş barasında neden olduğu gerilim düşmeleri görülmektedir. Adapazarı2 barasındaki arıza şiddetli bir düşmeye neden olmuştur. Ayrıca generatörden dolayı gerilimde salınımlar ve düşmeden sonra artış görülmektedir. Her iki şekildeki düşme F tipidir.



Şekil 6.16. (a) Çayırhan barasında oluşan iki faz toprak, (b) Adapazarı2 barasında oluşan iki faz toprak arızasının Anabara barasındaki etkisi.

Şekil 6.17'de ise Kullar ve Anabara baralarında aynı arıza tipinden dolayı oluşan gerilim düşmeleri görülmektedir. Arızalı faz gerilimleri düşerken transformatörün bağlantı şekline bağlı olarak arızasız faz geriliminde artış görülmektedir.

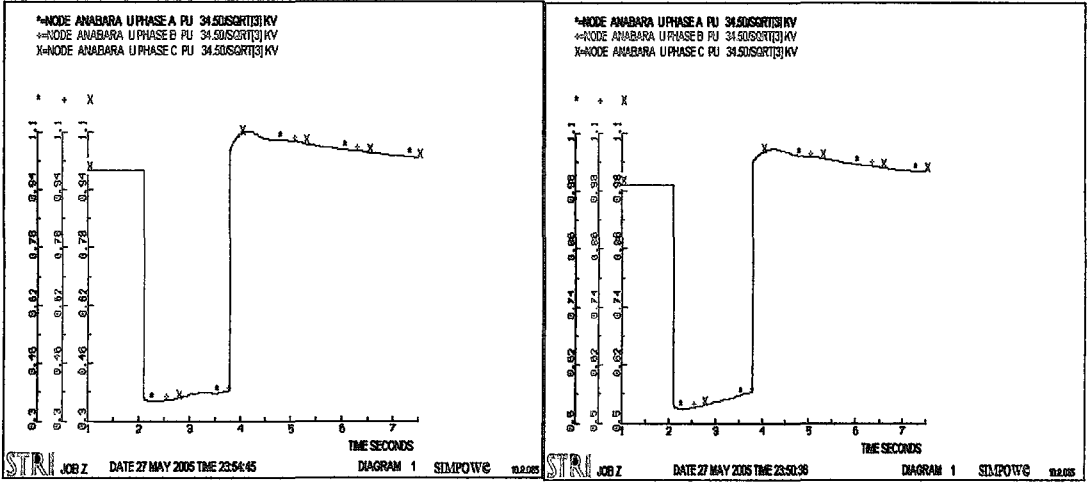


Şekil 6.17. (a) Kullar barasında oluşan iki faz toprak (b) Anabara barasında oluşan iki faz toprak arızasının Anabara barasındaki etkisi.

### 6.3. Uzaklığa Bağlı Olarak Düşme Sonrası Gerilim Genliğinin Değişimi

Önceki bölümlerde arıza uzaklığının düşme sonrası gerilim genliğini etkilediğinden bahsedilmişti. Bu bölümde ele alınan örnek sistemde Anabara barasına farklı uzaklıklarda üç faz toprak kısa devresi oluşturularak bu baradaki etkisi incelenmiştir.

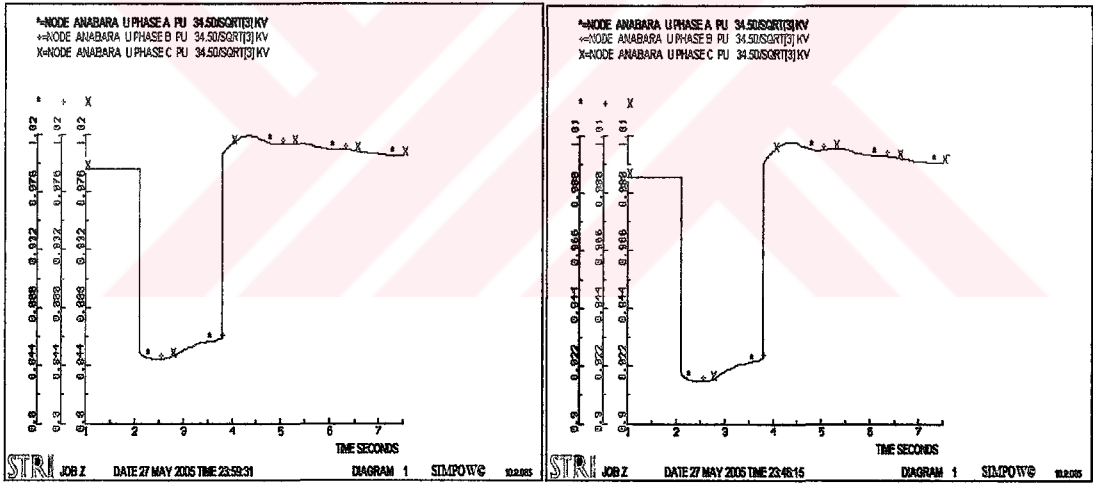
Şekil 6.18’de Anabara barasına 500 m. ve 1 km. uzaklıklarda oluşan üç faz toprak arızasının bu baraya etkisi görülmektedir. Şekil 6.18’den de görüldüğü gibi yakın mesafede oluşan arızanın neden olduğu gerilim düşmesi daha şiddetlidir. Şekil 6.19’da ise 5 km. ve 10 km. uzakta oluşan arızanın Anabara barasına etkisi görülmektedir.



(a)

(b)

Şekil 6.18. (a) 500 m. ve (b) 1 km. uzaklıkta oluşan üç faz toprak arızasının Anabara barasına etkisi.

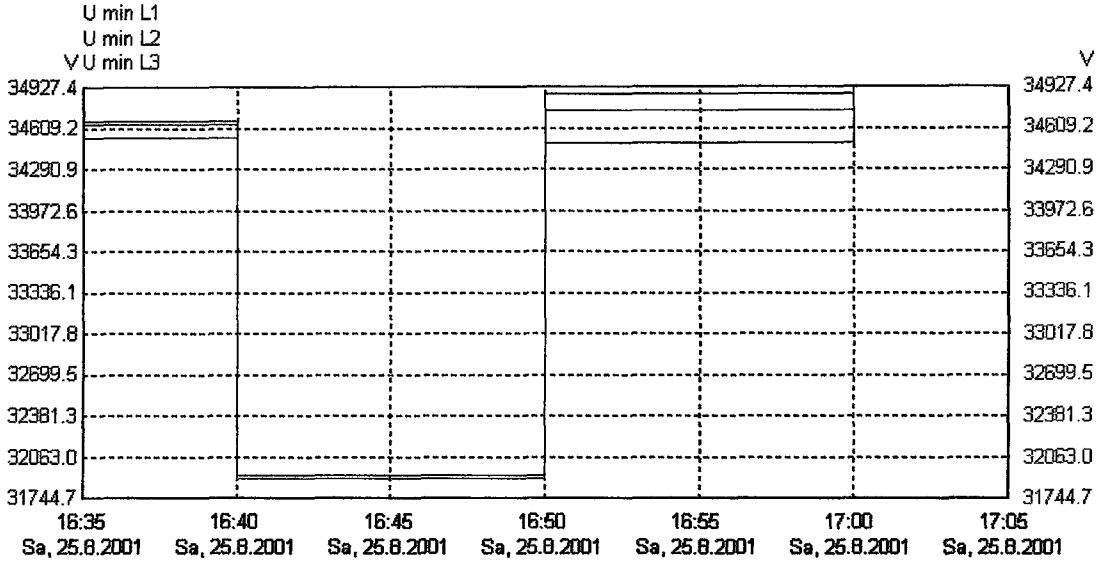


(a)

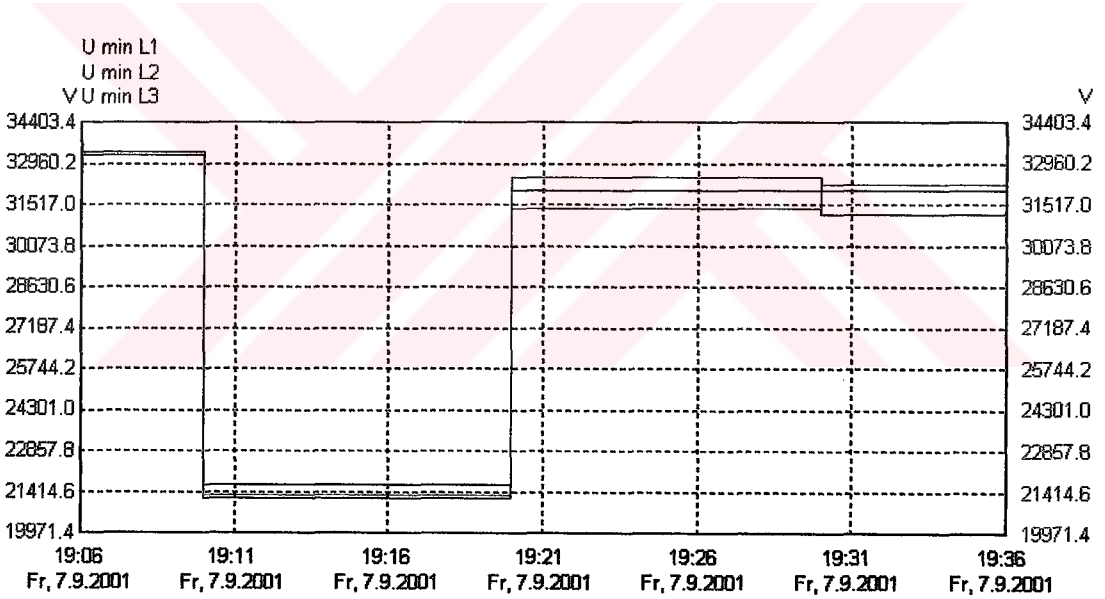
(b)

Şekil 6.19. (a) 5 km. ve (b) 10 km. uzaklıkta oluşan üç faz toprak arızasının Anabara barasına etkisi.

Şekil 6.20 ve Şekil 6.21 ölçüm sonuçlarından farklı uzaklıklarda olduğu düşünülen üç faz toprak arızasının testteki etkisini göstermektedir. Arıza uzaklığı hakkında kesin bir şey söylemek çok zordur. Ancak arızanın neden olduğu düşme sonrası gerilim genliklerine bakıldığında Şekil 6.20'deki arızanın daha yakın mesafede olduğu söylenebilir.



Şekil 6.20. Anabara barasından uzak bir noktada olduğu düşünülen üç faz toprak arızasının tesise etkisini gösteren ölçüm sonucu.



Şekil 6.21. Anabara barasından uzak bir noktada olduğu düşünülen üç faz toprak arızasının tesise etkisini gösteren ölçüm sonucu.

## BÖLÜM 7. SONUÇLAR

Kaliteli ve kesintisiz elektrik enerjisine duyulan ihtiyaç her geçen gün daha da önem kazanmaktadır. Sistem tasarımcıları ve kullanıcıları her zaman yukarıdaki iki temel ilkeyi ekonomikliği de dikkate alarak hedeflemektedirler. Kaliteli ve kesintisiz elektrik enerjisinin zaman içerisinde süreklilik sağlayabilmesinin en temel yolu dizayn aşamasında yeterli araştırmaların yapılmasıdır. Bu çalışmada Türkiye sisteminde gerilim seviyelerine bağlı olarak kısa devre kesme güçleri belirlenmiş ve bu gerilim seviyelerine ilişkin oluşabilecek maksimum kısa süreli gerilim düşme değerlerinin grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafiklerin kullanılması sistem tasarımcılarına büyük kolaylık sağlayacaktır.

Çalışmada, kaliteli enerjiden bahsedildiğinde karşılaşılan en büyük problemlerden biri olan kısa süreli gerilim düşümleri incelenmiştir. Gerilim düşümlerinin karakteristiklerinden, düşme sonrası gerilim genliği, zaman ve faz açısı atlaması, ve dengeli ve dengesiz arıza tiplerinin etkilerinden bahsedilmiştir. Asıl amaç bu etkileri gerçek bir sistemde değerlendirmek olduğundan İzmit bölgesindeki kağıt fabrikalarından biri olan Kartonsan A.Ş.'nin iletim sistemi örnek sistem olarak alınmıştır. Örnek sistem gerçek verilerle Simpow simülasyon programında analiz edilerek, fabrikanın giriş barasından alınan üç yıllık ölçüm sonuçları simülasyondan elde edilen grafiklerle karşılaştırılmıştır. Türkiye sisteminin gerçek verileri kullanılarak yapılan analizlerle bu sistem üzerinde alınan ölçümlerin benzer özelliklerde olduğu belirlenmiştir.

Gerilim düşmelerinin indüksiyon motorlarına etkisinden ve indüksiyon motorlarının devreye alınmasıyla oluşan gerilim düşmelerinden de bahsedilerek kaynak gücünün azalmasıyla düşme sonrası gerilim genliğinin arttığı tespit edilmiştir.

Örnek sistemin bağılı olduğu enterkonnekte şebeke üzerinde bir çok dengeli ve dengesiz arıza durumları oluşturularak sistem davranışı incelenmiştir. Tüm enterkonnekte sistem SCADA sistemine bağılı olmadığı için hangi zamanda nerede arıza olduğu tam olarak bilinmemektedir. Ancak ölçüm alınan noktadan bu arızanın tipini belirleme yoluna gidilmiştir. Tüm şebekenin SCADA sistemiyle arıza kayıtlarının tutulup ölçümlerinin alınmasıyla oluşturulan simülasyon modelinin uygunluğu daha kolay irdelenebilecektir. Enterkonnekte şebekemizde bu konuyla ilgili çalışmalar devam etmektedir.

Sistem dizayn aşamasında iken bu tür kapsamlı analizlerin yapılması hangi bölgelerin güç kalitesi problemlerine daha duyarlı veya hangi bölgelerde acil ihtiyaçların karşılanması gerekliliğini ortaya koyacaktır. Buna göre alınacak olan önlemlerde ekonomik kayıpları bir nebze olsun azaltacaktır.

Bu tür analizler yapılmadığı ve yasal zorunluluklar henüz sistemimize yerleşmediği için endüstriyel tesisler bu açıklarını kendileri kapatma yoluna gitmektedirler. Bu tür sistemlerin maliyetleri özelliklerine bağılı olarak 200\$/kVA ile 500\$/kVA arasında değişmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] LAMOREE, J., MUELLER D., VINETT P., JONES W., Voltage Sag Analysis Case Studies. 1993 IEEE, pp.55 – 61.
- [2] SARMIENTO, H.G., ESTRADA, E., A Voltage Sag Study in an Industry with Adjustable Speed Drives. 1994 IEEE, pp.85 – 89.
- [3] BOLLEN, M.H.J., The Influence of Motor Re-acceleration on Voltage Sags. 1994 IEEE, pp.2235 – 2242.
- [4] BOLLEN, M.H.J., ZHANG, L. A Method for Characterizing Unbalanced Voltage Dips (sags) with Symmetrical Components. IEEE Power Engineering Letters, pp. 50-52, July 1998.
- [5] 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, no.1 january/february 1999, pp. 152 – 162.
- [6] WILKINS, R., CLINE, H.C., Current – limiting Fuses Improve Power Quality. Power quality magazine, Sep.1999 and PCIM magazine Feb.2000.
- [7] SANNINO, A., BOLLEN, M.H.J., Mitigation of Voltage Sags and Short Interruptions through Distribution System Design. EPTM Conferance, May 2000.
- [8] KUMPULAINEN, L., HAUTALA, J., KAUHANIEMI, K., Voltage Dip Mitigation Possibilities in Industrial Distribution Systems. Tesla interim report, 2002.
- [9] HEINE, P., LEHTONEN, M., Voltage Sag Distributions Caused by Power System Faults. IEEE Transactions on power systems, vol 18, no.4, November 2003.
- [10] SINGH, B.N., SIMINA, M., CHANDRA, A., Solid State Voltage Restorer (SSVR) for Voltage Swells/Sags and Harmonics. CCEC 2003 – CCGEI 2003, Montreal May 2003.
- [11] GUASCH, L., CORCOLES, F., PEDRA, J. Effects of Symmetrical and Unsymmetrical Voltage Sags on Induction Machines. IEEE Transactions on power delivery, vol 19, no.2, April 2004.
- [12] MCGRANAGHAN, M., MUELLER, D., Effects of Voltage Sags in Process Industry Applications.
- [13] DUGAN, R.C., MCGRANAGHAN, M.F., SANTOSO, S., BEATY H.W., Electrical Power Systems Quality. 2002.



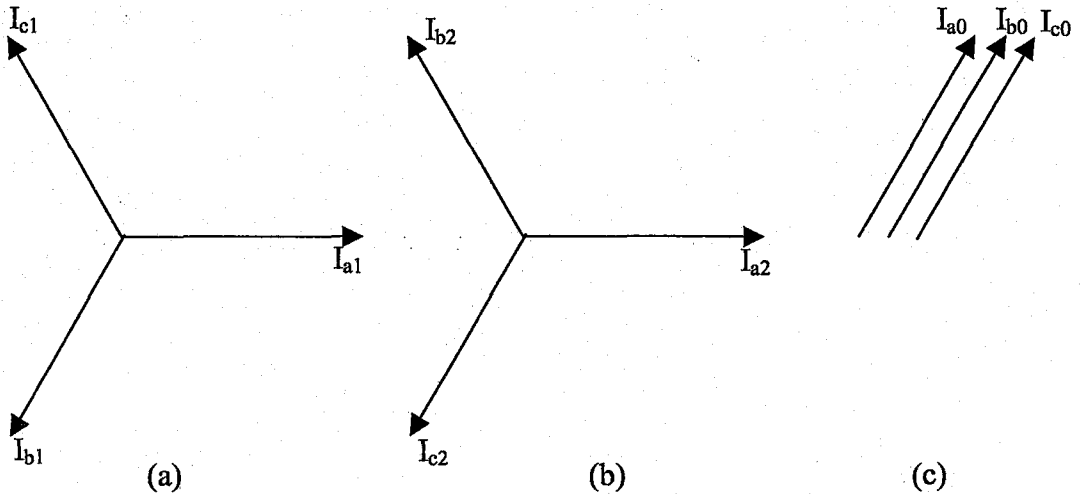
- [14] LENG, O.S., Simulating Power Quality Problems. School of Information Technology And Electrical Engineering University Of Queensland, October 2001.
- [15] IEEE Standart 519-1992: Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. IEEE, New York,1993.
- [16] IEC 61000-2-1, Electromagnetic Compatibility (EMC). Part 2:Environment, Section 1: Description of the environment- Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signalling in power supply systems. February 1999.
- [17] ZHANG, L.D., BOLLEN, M.H.J., Characteristics of Voltage Dips(sags) in Power Systems, 8<sup>th</sup> Int. Conf. On Harmonics and Quality of Power, Athens, Greece. October 1998. pp 555-560.
- [18] BOLLEN, M.H.J., Understanding Power Quality Problems. IEEE Press, New York, 2000.
- [19] TEİAŞ (Türkiye Elektrik İletim A.Ş.), 2005 Puant Yük Şartlarında Yük Akışı, Üç Faz ve Toprak Faz Kısa Devre Etüdü. 2005.
- [20] TEİAŞ, Türkiye Elektrik Ağındaki Havai Hatların, Transformatörlerin ve Generatörlerin Elektrik Karakteristikleri. 2002.
- [21] SAADAT, H., Power System Analysis. International Editions, 1999.

## SİMETRİLİ BİLEŞENLER

Tek faz toprak, faz-faz, iki faz toprak arızaları dengesiz arızaların farklı tipleridir. Dengesiz arızaların çözümü için farklı metodlar geliştirilmiştir. Üç fazlı dengeli arızaların çözümü için tek hat diyagramı yeterli olurken, dengesiz arızalarda, dengesiz devreleri dengeli hale getirerek çözülmesini mümkün kılan, simetrik bileşenlerin kullanılması gerekir. simetrik bileşenlere dönüşüm için iki fonksiyon geliştirilmiştir. Bunlardan ilki faz bileşenlerinden simetrik bileşenlere dönüşümü sağlayan  $abc2sc$ , ikincisi ise simetrik bileşenlerden faz bileşenlere dönüşümü sağlayan  $sc2abc$ 'dir [21].

### Simetrik Bileşenlerin Temeli

Simetrik bileşenler dengesiz faz gerilim ve akımlarını üç ayrı dengeli bileşene dönüşümünü sağlar. Şekil 2.1'de görülen üç fazlı dengeli akımın pozitif, negatif ve sıfır bileşen fazörleri ele alınırsa:



Şekil 1.1. Simetrik bileşenler.

Fazörlerin dönüş yönü saat yönüyle aynı alınmıştır. Üç fazör denklem (2.1) gibi yazılır.

$$\begin{aligned} I_{a1} &= I_{a1} \angle 0^\circ = I_{a1} \\ I_{b1} &= I_{a1} \angle 240^\circ = a^2 I_{a1} \\ I_{c1} &= I_{a1} \angle 120^\circ = a I_{a1} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Burada  $a$   $120^\circ$ 'nin saat yönüyle aynı yönde döndüğünü ifade eden bir operatördür.

$$\begin{aligned} a &= 1 \angle 120^\circ = -0.5 + j0.866 \\ a^2 &= 1 \angle 240^\circ = -0.5 - j0.866 \\ a^3 &= 1 \angle 360^\circ = 1 + j0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

(2.2) denkleminde  $1+a+a^2=0$  olduğu açıkça görülmektedir

Fazörlerin sırası abc şeklindedir. Bu pozitif faz bileşeni olarak isimlendirilir. Fazörlerin sırası acb olduğunda, Şekil 1.b'de görüldüğü gibi, bu negatif faz bileşenidir. Negatif faz dizisi (2.3) denkleminde verilmiştir.

$$\begin{aligned} I_{a2} &= I_{a2} \angle 0^\circ = I_{a2} \\ I_{b2} &= I_{a2} \angle 120^\circ = a I_{a2} \\ I_{c2} &= I_{a2} \angle 240^\circ = a^2 I_{a2} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Toprak arızalarında üçüncü bir bileşene daha gereksinim vardır, bu sıfır faz bileşenidir. Sıfır faz bileşen akımları denklem (2.4)'de verilmiştir.

$$I_{a0} = I_{b0} = I_{c0} \quad (2.4)$$

1,2 ve 0 alt indisleri sırasıyla pozitif, negatif ve sıfır bileşenlerini ifade etmek için kullanılmıştır. Bazı kaynaklarda 1,2 ve 0 yerine +,- ve 0 kullanılmaktadır. Simetrik bileşenler yöntemi ilk kez Dr. C. L. Fortescue tarafından 1918 yılında ifade

edilmiştir. Bu yöntem üç fazlı bir sistemin üç fazlı dengesiz fazörlerinin üç fazlı dengeli sisteme dönüşümü temeline dayanmaktadır.

1. Pozitif dizi bileşeni aralarında faz farkı  $120^\circ$  olan üç eşit büyüklükteki fazörden meydana gelir ve fazörlerin sırası abc şeklindedir.
2. Negatif dizi bileşeni aralarında faz farkı  $120^\circ$  olan üç eşit büyüklükteki fazörden meydana gelir ve fazörlerin sırası acb şeklindedir.
3. Sıfır dizi bileşeni aralarındaki faz farkı  $0^\circ$  olan üç eşit büyüklükteki fazörden meydana gelir.

Üç faz dengesiz  $I_a$ ,  $I_b$  ve  $I_c$  akımları ele alınırsa, faz akımlarının simetrik bileşenlerle ifadesi denklem (2.5)'deki gibi olur.

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \\ I_b &= I_{b0} + I_{b1} + I_{b2} \\ I_c &= I_{c0} + I_{c1} + I_{c2} \end{aligned} \quad (2.5)$$

(2.1), (2.3) ve (2.4) denklemlerine göre (2.5) denkleminin tekrar yazılmasıyla denklem (2.6) elde edilir.

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \\ I_b &= I_{a0} + a^2 I_{a1} + a I_{a2} \\ I_c &= I_{a0} + a I_{a1} + a^2 I_{a2} \end{aligned} \quad (2.6)$$

ya da

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

(2.7) denklemindeki matris (2.8) denklemindeki gibi tekrar yazılabilir.

$$I_{abc} = A I_{a012} \quad (2.8)$$

A simetrikli bileşenler dönüşüm matrisidir.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Akımın simetrikli bileşenleri için (2.8) denklemi çözülürse (2.10) denklemi elde edilir.

$$I_{a012} = A^{-1}I_{abc} \quad (2.10)$$

A matrisinin tersi ise (2.11) denklemdeki gibidir.

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

(2.9) ve (2.11) denklemlerinden (2.12) denklemi elde edilir.

$$A^{-1} = \frac{1}{3}A^* \quad (2.12)$$

$A^{-1}$  (2.10) denklemde yerine yazılmasıyla:

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$I_{a0} = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3}(I_a + aI_b + a^2I_c) \quad (2.14)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c)$$

(2.14) denklemden akımın sıfır dizi bileşeninin faz akımlarının toplamının  $\frac{1}{3}$  üne eşit olduğu görülmektedir. faz akımlarının toplamı sıfırsa sistemin nötr noktası

topraklanmamıştır ve sistem sıfır dizi akımı içermez. Benzer ifadeler gerilim içinde elde edilebilir. Dengesiz faz gerilimlerinin simetrik bileşenlerle ifadesi (2.15) denklemindeki gibidir.

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \\ V_b &= V_{a0} + a^2 V_{a1} + a V_{a2} \\ V_c &= V_{a0} + a V_{a1} + a^2 V_{a2} \end{aligned} \quad (2.15)$$

veya

$$V_{abc} = AV_{a012} \quad (2.16)$$

Simetrik bileşenlerin dengesiz gerilimler cinsinden ifadesi denklem (2.17)'deki gibidir.

$$\begin{aligned} V_{a0} &= \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \\ V_{a1} &= \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \\ V_{a2} &= \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Görünen güç de simetrik bileşenler cinsinden ifade edilebilir. Üç faz kompleks güç ise (2.18) denkleminde verilmiştir.

$$S_{(3\phi)} = V_{abc}^T I_{abc}^* \quad (2.18)$$

(2.) ve (2.16) denklemleri (2.18) denkleminde yerine yazılırsa:

$$S_{(3\phi)} = (AV_{a012})^T (AI_{a012})^* = (V_{a012})^T A^T A^* (I_{a012})^* \quad (2.19)$$

$A^T = A$  olduğundan, (2.11) denkleminde  $A^T A^* = 3$  olur ve kompleks güç (2.20) denklemindeki hale dönüşür.

$$S_{(3\phi)} = 3(V_{a012})^T (I_{a012})^* = 3V_{a0}I_{a0}^* + 3V_{a1}I_{a1}^* + 3V_{a2}I_{a2}^* \quad (2.20)$$

(2.20) denklemini toplam dengesiz gücün simetrik bileşen güçlerinin toplamından elde edildiğini göstermektedir.



## EK-2

### GÜÇ KALİTESİ TERİMLERİ

**aktif filtre:** İstenilen harmoniği yok etmek için, o harmonikle aynı seviyede fakat zıt yönde dalga üreten bir sistem.

**CBEMA eğrisi:** Gerilim bozukluğunu genlik ve zaman terimlerinde bilgisayarın kapasitesine bağlı olarak oluşturan eğrilerdir. CBEMA tarafından geliştirilmiş ve güç sistemlerin, cihazların performans ölçümü için bir standart haline gelmiştir. Bu eğri Bilgi Teknoloji Endüstri Konseyi (ITI) tarafında tekrar oluşturulmuştur.

**tepe faktörü:** Güç kalitesi izleme cihazının, ölçülen dalga şeklinin kare kökünün temel alınmasıyla oluşturulan değerdir.

**kritik yük:** Cihaz arıza sırasında, çalışanın sağlığını ve güvenliğini tehlikeye atacak şekilde işletilmesi durumunda işlevini kaybedebilir. Bu durumda ekonomik kayıplar oluşur. Bu zarar kritik olarak kullanıcı tarafından göz önünde bulundurulmalıdır.

**diferansiyel mod gerilimi:** Açıkça tanımlanmış iki iletken seti arasındaki gerilimdir.

**dağıtılmış üretim (DG):** Bir güç sisteminde merkezi büyük bir ünite yerine dağınık üretim birimlerinin bulunmasıdır. Burada bahsedilen DG terimi gücü 10MW'dan küçük birbirlerine enterkonnekte sistem ile bağlı üniteler için kullanılmıştır.

**gerilim düşmesi:** Güç kalitesi komitesi 'sag' ifadesini kısa süreli gerilim düşmelerini belirtmek için kullanmıştır. IEC bunu belirtmek için 'dip' ifadesini kullanmaktadır. Gerilim düşmeleri en önemli güç kalitesi problemlerinden biridir.



**elektromanyetik uyumluluk:** Bir cihazın ya da sistemin tolere edilemeyen kendi elektromanyetik ortamı içerisinde çalışma kabiliyetidir.

**cihaz topraklama iletkeni:** Bu iletken, cihazın akım taşımayan kısımlarını topraklanmış iletkene (nötr) ve ana panoda bulunan topraklama elektroduna ya da bir izolasyon transformatörünün sekonderine bağlamak için kullanılır.

**arıza modu:** Gözlemlenen hatanın, arızanın etkisidir.

**hızlı devreden çıkarma:** Devre kesicileri ya da hattaki tekrar kapayıcılar gibi koruma röleleri sigortalardan daha hızlı çalışırlar. Bunlar sigorta koruması olarak da isimlendirilebilir.

**ferrerezonans:** Demir çekirdekli indüktörlerin lineer olmayan karakteristiklerinden dolayı rezonansın düzensiz tipidir. Güç dağıtım sistemlerinde oluşan bu istenmeyen durum sabit gerilim transformatörleriyle giderilebilir.

**frekans değişimi:** Güç frekansındaki artma ya da azalmadır.

**temel bileşen:** Periyodik bir büyüklüğün Fourier serisindeki 1. bileşenidir (50-60 Hz.).

**toprak elektrodu:** Toprak teması için kullanılan iletkenidir.

**topraklama ızgarası:** Topraklama ızgarasının amacı geniş sahalarda oluşabilecek toprak potansiyelindeki farkları ortadan kaldırarak çalışanların güvenliğini sağlamaktır.

**toprak döngüsü:** Bir elektrik sisteminin iki farklı yerindeki toprak potansiyellerinin farklı olması durumunda zarar verici bir toprak döngüsü oluşur.

**harmonik bozulma:** Sinüs dalgasındaki periyodik bozulma.

**harmonik filtre:** Güç sisteminden bir ya da fazla harmoniği filtre eden cihazdır. Çoğu indüktans, kapasite ve rezistansın pasif kombinasyonu şeklindedir.

**harmonik sayısı:** Harmonik frekansının temel frekansa oranıdır.

**harmonik rezonans:** Güç sisteminde lineer olmayan elemanların neden olduğu en büyük harmoniklerden birine yakın bir değerde sistemin rezonansa gelme durumudur. Harmonik distorsiyonu şiddetlendirir.

**ITI eğrisi:** Bilgi Teknolojisi Endüstri Konseyi'nin geliştirdiği, 120V'la güç sistemine bağlanan bilgisayarların gerilim bozukluğunda genliğe ve zamana bağlı olarak gösterdikleri çalışma performansını belirten eğridir.

**normal mod gerilimi:** Devre kontaktörlerinin çalışması sırasında görülen gerilimdir.

**güç faktörü (displacement):** Gerilim ve akım dalga şekillerinin temel frekansının güç faktörüdür.

**güç faktörü (true):** Aktif gücün görünen güce oranıdır.

**gerilim yükseltme:** Bir transformatörün sekonder tarafındaki kondansatörlerle primer taraftaki geçici gerilimin yükselmesidir.

**gerilim ayarı:** Yükteki efektif gerilimin kontrol ya da kararlılık derecesidir. Giriş gerilim değişimi, yük değişimi ya da sıcaklık değişimi gibi parametrelerle ilgilidir.

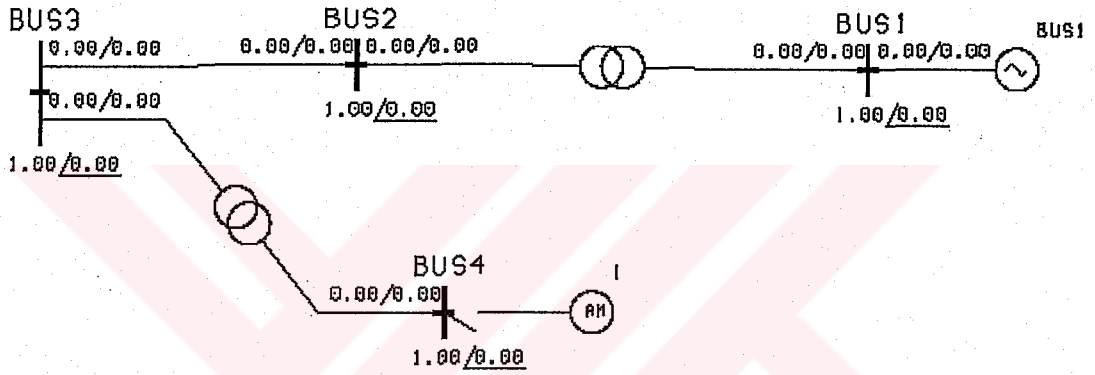
**düşme başlangıç noktası:** Düşme zamanı için daha gerçekçi bir sonuç elde etmek amacıyla en doğru şekilde gerilim düşmesinin başlangıç ve bitiş zamanlarının tanımlanabilmesi gerekmektedir. Bu nedenle 'düşme başlangıç noktası' ve 'gerilimin iyileşme noktası' tanımlamaları kullanılmaktadır. Düşme başlangıç noktası, gerilimdeki düşmenin başladığı andaki temel gerilim dalga şeklinin faz açısıdır. Bu açı kısa devre arızasının olduğu açıyla aynıdır. Başlangıç yeri tanımlanırken bir referans noktasına ihtiyaç vardır. Referans olarak temel gerilimin yukarıya doğru en

son sıfır geçiş noktası kullanılabilir. Gerilimdeki temel iyileşmenin gerçekleştiği andaki dalga şeklinin faz açıdır. Gerilimin iyileşmesi, arızanın giderilmesine benzemektedir. Arızanın giderilmesi akım dalga şeklinin sıfır geçişinde gerçekleşir, temelde endüktif olan güç sisteminde akımın sıfır geçişi gerilimin maksimum değerine karşılık gelir bu nedenle gerilimin iyileştiği nokta  $90^\circ$  ve  $270^\circ$  civarındadır. Bu da düşme sırasındaki değil düşme öncesi temel gerilimin referans olarak alındığını kanıtlar. Arıza akımıyla karşılaştırıldığında  $90^\circ$  kaymış olan ve arıza akımını oluşturan düşme öncesi gerilimdir.

**eksik gerilim:** Diğer bir düşme karakteristiğidir. Cihazda görölen anlık gerilim değişimini tanımlar. Konsept, arızanın neden olduğu gerilim düşmesini kompanze edecek, seri bağlı gerilim kaynağı dönüştürücüleriyle önemli hale gelmektedir. Gerilimdeki düşme öncesi ve düşme sırasındaki gerilim arasındaki fark olarak tanımlanabilir.

### EK-3

## KISA SÜRELİ GERİLİM DÜŞÜMLERİNİN İNDÜKSİYON MOTORU ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ İÇİN ALINAN TEST SİSTEMİ



Şekil 3.1. Test sistemi.

İndüksiyon motor parametreleri:

Motor tipi: AMB 560L2L B

Çıkış gücü: 2800 kW

Gerilimi: 6300 V

Hızı: 2982 rpm

Akımı: 286 A

Güç faktörü: 0.93

Stator direnci R1 (120°C): 0.0943Ω

Stator reaktansı X1: 2.0182Ω

Mıknatıslanma reaktansı  $X_m$ : 86.67Ω

Rotor direnci R2' (100°C): 0.0757Ω

Rotor reaktansı X2': 1.0053Ω

Demir kayıp direnci:  $3.09\Omega$

SIMPOW Programında yazılan program aşağıda verilmiştir.

CONTROL

LONG=0

END

GENERAL

SN=500

END

NODES

BUS1 UB=154

BUS2 UB=34.5

BUS3 UB=34.5

BUS4 UB=6.3

END

TRANSFORMERS

BUS1 BUS2 SN=100 UN1=154 UN2=34.5 ER12=0.012 EX12=0.25

BUS3 BUS4 SN=20 UN1=34.5 UN2=6.3 ER12=0.012 EX12=0.31

END

ASYNCHRONOUS MACHINES

1 BUS4 SN=10 UN=10 H=3 TYPE=1A

R1=0.0043 X1S=0.092 X2S=0.046

XM=3.934 RTAB=1 LOAD=1 NCON=1

END

MLOADS

1 TYPE=0 K=0.8 N=1

END

TABLES

1 TYPE=2 F 0.0 0.00970

0.2 0.01500

0.3 0.01600

0.4 0.01900

0.6 0.02200

0.8 0.02600

1.0 0.03000

END

LINES

BUS2 BUS3 TYPE=11 R=0.2165 X=0.524 L=1.42

END

POWER CONTROL

BUS1 TYPE=NODE RTYP=SW U=154 FI=0

END

END

Sistemin dinamik analiz programı aşağıdadır.

CONTROL

EDIT=0 TEND=0.8 LOADM=YES

END

NODES

BUS1 TYPE=1 R=0.01813 X=0.1813

END

LINES

BUS2 BUS3 R0=0.006 X0=0.003

END

TRANSFORMERS

BUS1 BUS2 CP1=Y CP2=Y

BUS3 BUS4 CP1=D CP2=Y

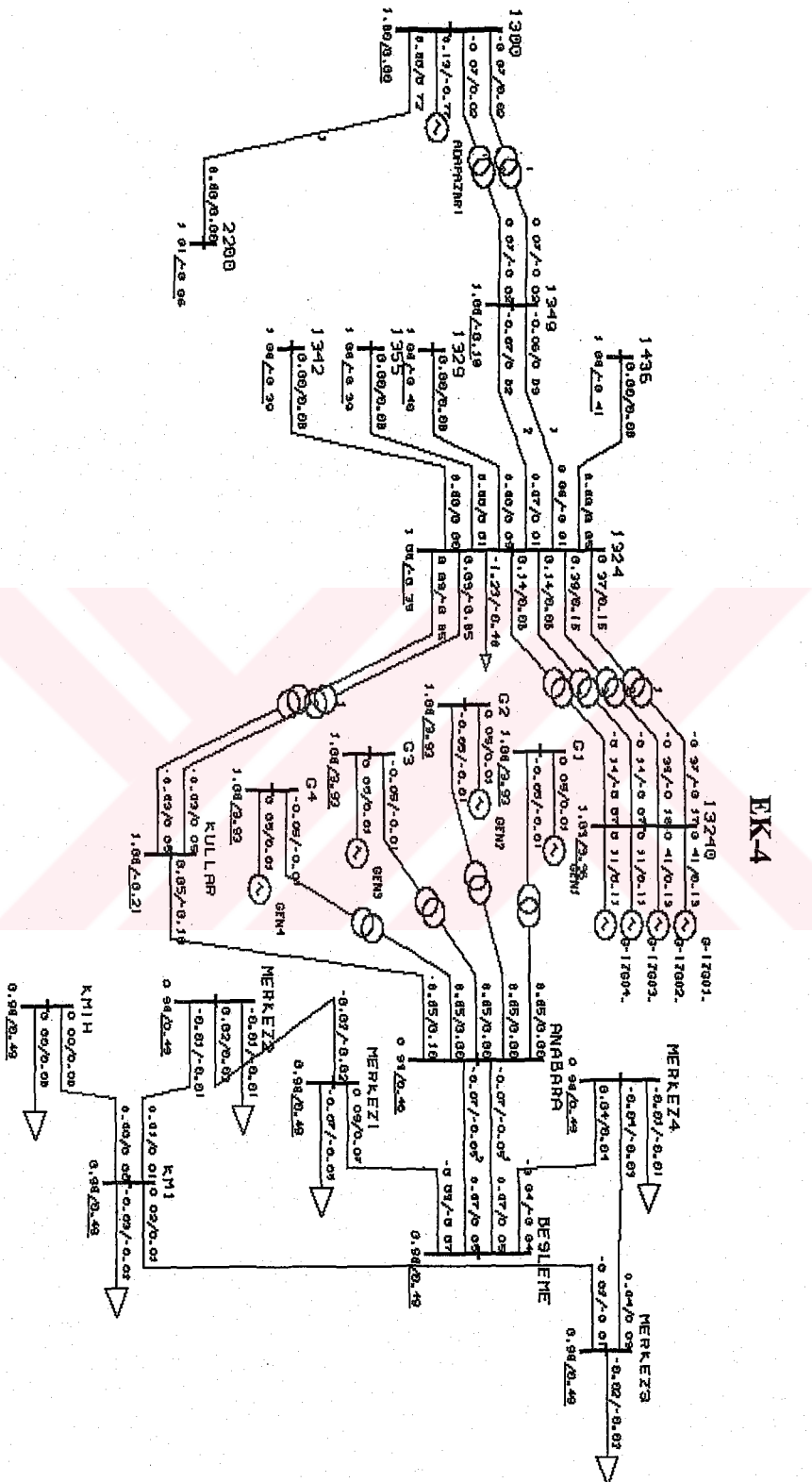
END

RUN INSTRUCTION

AT 0.1 INST CONNECT ASYNC 1

END

END



EK-4

ACTIVE/REACTIVE POWER IN PER UNIT  
 VOLTAGES MAGNITUDE AND ANGLE IN PER UNIT AND DEGREES  
**STR**  
 DATE 27 MAY 2005 TIME 19:50:19

JOB: TEZ  
 ORF:

Test System - "Power System Stability and Control", P. Kundur, page 813.  
 Shunt capacitors at buses # 7, 8 and 9

Şekil 4.1. Bölüm 6'da incelenen sistemin tek hat şeması.

Sistemin SIMPOW programında yazılan güç akış analiz programı aşağıdaki gibidir.

CONTROL

LONG=0

POWC=A

END

GENERAL

SN=100

END

NODES

1300 UB=380

1324 UB=154

1329 UB=154

1342 UB=154

1349 UB=154

1355 UB=154

1436 UB=154

2200 UB=380

13240 UB=13.8

KULLAR UB=34.5

ANABARA UB=34.5

BESLEME UB=34.5

MERKEZ1 UB=34.5

MERKEZ2 UB=34.5

KM1 UB=34.5

KM1H UB=34.5

MERKEZ3 UB=34.5

MERKEZ4 UB=34.5

G1 UB=11

G2 UB=11

G3 UB=11

G4 UB=11

M1T1 UB=0.4



M1T2 UB=0.4  
M1T3 UB=0.4  
M1T4 UB=0.4  
M1T11 UB=0.4  
M1T13 UB=0.4  
M1T12 UB=0.4  
M2T5 UB=0.4  
M2T6 UB=0.4  
KM1T1 UB=0.4  
KM1T2 UB=0.4  
KM1T3 UB=0.4  
KM1T4 UB=0.4  
M3T7 UB=0.4  
M3T8 UB=0.4  
M3T9 UB=0.4  
M4T10 UB=0.4  
BUSA UB=34.5

END

LINES

1324 1329 TYPE=12 R=0.012679 X=0.060438 B=0.026030  
1324 1342 TYPE=12 R=0.002237 X=0.010666 B=0.004594  
1324 1349 NO=1 TYPE=12 R=0.011696 X=0.055752 B=0.024012  
1324 1349 NO=2 TYPE=12 R=0.0011696 X=0.055752 B=0.024012  
1324 1355 TYPE=12 R=0.006643 X=0.021334 B=0.007351  
1324 1436 TYPE=12 R=0.01393 X=0.10983 B=0.05236  
1300 2200 NO=1 TYPE=12 R=0.002944 X=0.029812 B=0.714622  
ANABARA BUSA TYPE=11 R=0.1484 X=0.1107 L=5  
KULLAR ANABARA TYPE=11 R=0.1484 X=0.1107 L=0.580  
ANABARA BESLEME NO=1 TYPE=11 R=0.1792 X=0.1337 L=0.700  
ANABARA BESLEME NO=2 TYPE=11 R=0.1792 X=0.1337 L=0.700  
BESLEME MERKEZ1 TYPE=11 R=0.0154 X=0.0115 L=0.060  
BESLEME MERKEZ4 TYPE=11 R=0.0154 X=0.0115 L=0.060  
MERKEZ1 MERKEZ2 TYPE=11 R=0.0248 X=0.0200 L=0.105

|                 |                                    |
|-----------------|------------------------------------|
| MERKEZ2 KM1     | TYPE=11 R=0.0354 X=0.0287 L=0.150  |
| KM1 MERKEZ3     | TYPE=11 R=0.0508 X=0.0409 L=0.214  |
| MERKEZ3 MERKEZ4 | TYPE=11 R=0.00896 X=0.0067 L=0.035 |
| KM1 KM1H        | TYPE=11 R=0.00896 X=0.0067 L=0.035 |

END

### TRANSFORMERS

|               |  |
|---------------|--|
| 1324 KULLAR   | NO=1 UN1=154 UN2=34.5 SN=100 EX12=0.12   |
| 1324 KULLAR   | NO=2 UN1=154 UN2=34.5 SN=100 EX12=0.1189 |
| 1324 13240    | NO=1 UN1=154 UN2=13.8 SN=45 EX12=0.082   |
| 1324 13240    | NO=2 UN1=154 UN2=13.8 SN=45 EX12=0.078   |
| 1324 13240    | NO=3 UN1=154 UN2=13.8 SN=22 EX12=0.105   |
| 1324 13240    | NO=4 UN1=154 UN2=13.8 SN=22 EX12=0.105   |
| 1349 1300     | NO=1 UN1=154 UN2=380 SN=250 EX12=0.12    |
| 1349 1300     | NO=2 UN1=154 UN2=380 SN=250 EX12=0.12    |
| ANABARA G1    | UN1=34.5 UN2=11 SN=6.3 EX12=0.08         |
| ANABARA G2    | UN1=34.5 UN2=11 SN=6.3 EX12=0.08         |
| ANABARA G3    | UN1=34.5 UN2=11 SN=6.3 EX12=0.08         |
| ANABARA G4    | UN1=34.5 UN2=11 SN=6.3 EX12=0.08         |
| MERKEZ1 M1T1  | UN1=34.5 UN2=0.4 SN=2 EX12=0.059         |
| MERKEZ1 M1T2  | UN1=34.5 UN2=0.4 SN=2 EX12=0.059         |
| MERKEZ1 M1T3  | UN1=34.5 UN2=0.4 SN=2 EX12=0.059         |
| MERKEZ1 M1T4  | UN1=34.5 UN2=0.4 SN=2 EX12=0.059         |
| MERKEZ1 M1T11 | UN1=34.5 UN2=0.4 SN=2.5 EX12=0.0721      |
| MERKEZ1 M1T13 | UN1=34.5 UN2=0.4 SN=2.5 EX12=0.0721      |
| MERKEZ1 M1T12 | UN1=34.5 UN2=0.4 SN=2.5 EX12=0.0721      |
| MERKEZ2 M2T5  | UN1=34.5 UN2=0.4 SN=1.6 EX12=0.0627      |
| MERKEZ2 M2T6  | UN1=34.5 UN2=0.4 SN=1.6 EX12=0.0627      |
| KM1 KM1T1     | UN1=34.5 UN2=0.4 SN=2.5 EX12=0.0721      |
| KM1 KM1T2     | UN1=34.5 UN2=0.4 SN=2 EX12=0.059         |
| KM1 KM1T3     | UN1=34.5 UN2=0.4 SN=1.6 EX12=0.0627      |
| KM1H KM1T4    | UN1=34.5 UN2=0.4 SN=0.4 EX12=0.045       |
| MERKEZ3 M3T7  | UN1=34.5 UN2=0.4 SN=2 EX12=0.059         |
| MERKEZ3 M3T8  | UN1=34.5 UN2=0.4 SN=2 EX12=0.059         |

MERKEZ3 M3T9            UN1=34.5 UN2=0.4 SN=2    EX12=0.059  
MERKEZ4 M4T10           UN1=34.5 UN2=0.4 SN=2    EX12=0.059

END

LOADS

1324            P=122.7 Q=40.3  
M1T1           P=1.040 COSFI=0.8  
M1T2           P=0.560 COSFI=0.8  
M1T3           P=0.672 COSFI=0.8  
M1T4           P=0.832 COSFI=0.8  
M1T11          P=0.900 COSFI=0.8  
M1T13          P=1.840 COSFI=0.8  
M1T12          P=0.800 COSFI=0.8  
M2T5           P=0.448 COSFI=0.8  
M2T6           P=0.448 COSFI=0.8  
KM1T1          P=1.400 COSFI=0.8  
KM1T2          P=0.640 COSFI=0.8  
KM1T3          P=0.640 COSFI=0.8  
KM1T4          P=0.250 COSFI=0.8  
M3T7           P=0.768 COSFI=0.8  
M3T8           P=0.752 COSFI=0.8  
M3T9           P=0.752 COSFI=0.8  
M4T10          P=0.672 COSFI=0.8

END

POWER CONTROL

1300            TYPE=NODE NAME=ADAPAZARI RTYP=SW U=380 FI=0  
G1              TYPE=NODE NAME=GEN1    RTYP=UP U=11 P=4.741  
G2              TYPE=NODE NAME=GEN2    RTYP=UP U=11 P=4.741  
G3              TYPE=NODE NAME=GEN3    RTYP=UP U=11 P=4.741  
G4              TYPE=NODE NAME=GEN4    RTYP=UP U=11 P=4.741  
13240           TYPE=NODE NAME=G-IZGG1\_ RTYP=UP U=14.214 P=41.1  
QMIN=-19 QMAX=33  
13240           TYPE=NODE NAME=G-IZGG2\_ RTYP=UP U=14.214 P=41.1  
QMIN=-19 QMAX=33

```

13240      TYPE=NODE  NAME=G-IZGG3_  RTYP=UP  U=14.214 P=11.1
QMIN=-13 QMAX=11
13240      TYPE=NODE  NAME=G-IZGG4_  RTYP=UP  U=14.214 P=11.1
QMIN=-13 QMAX=11
MERKEZ1   M1T1  TYPE=TREG RTYP=TAU  TAU=1.05
MERKEZ1   M1T2  TYPE=TREG RTYP=TAU  TAU=1.05
MERKEZ1   M1T3  TYPE=TREG RTYP=TAU  TAU=1.05
MERKEZ1   M1T4  TYPE=TREG RTYP=TAU  TAU=1.05
MERKEZ1   M1T11 TYPE=TREG RTYP=TAU  TAU=1.05
MERKEZ1   M1T13 TYPE=TREG RTYP=TAU  TAU=1.05
MERKEZ1   M1T12 TYPE=TREG RTYP=TAU  TAU=1.05
MERKEZ2   M2T5  TYPE=TREG RTYP=TAU  TAU=1.05
MERKEZ2   M2T6  TYPE=TREG RTYP=TAU  TAU=1.05
KM1       KM1T1 TYPE=TREG RTYP=TAU  TAU=1.05
KM1       KM1T2 TYPE=TREG RTYP=TAU  TAU=1.05
KM1       KM1T3 TYPE=TREG RTYP=TAU  TAU=1.05
KM1H     KM1T4 TYPE=TREG RTYP=TAU  TAU=1.05
MERKEZ3   M3T7  TYPE=TREG RTYP=TAU  TAU=1.05
MERKEZ3   M3T8  TYPE=TREG RTYP=TAU  TAU=1.05
MERKEZ3   M3T9  TYPE=TREG RTYP=TAU  TAU=1.05
MERKEZ4   M4T10 TYPE=TREG RTYP=TAU  TAU=1.05
END
END

```

Sistemin SIMPOW Programında yazılan arıza analizi programı aşağıdaki gibidir.

CONTROL DATA

TEND=10 EDIT=-1 TETL=1000 LOADM=YES

END

GENERAL

FN=50

END

NODES

1300 TYPE=1 R=0.9188 X=9.188 R0=1.3365 X0=13.365

END

LINES

1324 1329 R0=0.04526403 X0=0.20609358 B0=0.0135356  
1324 1342 R0=0.00798609 X0=0.03637106 B0=0.00238888  
1324 1349 NO=1 R0=0.04175472 X0=0.19011432 B0=0.01248624  
1324 1349 NO=2 R0=0.04175472 X0=0.19011432 B0=0.01248624  
1324 1355 R0=0.02072616 X0=0.06016188 B0=0.00573378  
1324 1436 R0=0.0895699 X0=0.3338832 B0=0.0376992  
1300 2200 NO=1 R0=0.028044267 X0=0.095362566 B0=0.484520862

KULLAR ANABARA R0=0.5811 X0=0.3341

ANABARA BESLEME NO=1 R0=0.7014 X0=0.4032

ANABARA BESLEME NO=2 R0=0.7014 X0=0.4032

BESLEME MERKEZ1 R0=0.0601 X0=0.0345

BESLEME MERKEZ4 R0=0.0601 X0=0.0345

MERKEZ1 MERKEZ2 R0=0.1052 X0=0.0605

MERKEZ2 KM1 R0=0.1503 X0=0.0864

KM1 MERKEZ3 R0=0.2144 X0=0.1233

MERKEZ3 MERKEZ4 R0=0.03507 X0=0.0202

KM1 KM1H R0=0.3507 X0=0.0202

END

TRANSFORMERS

1324 KULLAR NO=1 CP1=D CP2=Y RN2=1.68

1324 KULLAR NO=2 CP1=D CP2=Y RN2=1.68

1324 13240 NO=1 CP1=Y CP2=D

1324 13240 NO=2 CP1=Y CP2=D

1324 13240 NO=3 CP1=Y CP2=D

1324 13240 NO=4 CP1=Y CP2=D

1349 1300 NO=1 CP1=Y CP2=Y

1349 1300 NO=2 CP1=Y CP2=Y

ANABARA G1 CP1=Y CP2=D

ANABARA G2 CP1=Y CP2=D

ANABARA G3 CP1=Y CP2=D

|               |             |
|---------------|-------------|
| ANABARA G4    | CP1=Y CP2=D |
| MERKEZ1 M1T1  | CP1=D CP2=Y |
| MERKEZ1 M1T2  | CP1=D CP2=Y |
| MERKEZ1 M1T3  | CP1=D CP2=Y |
| MERKEZ1 M1T4  | CP1=D CP2=Y |
| MERKEZ1 M1T11 | CP1=D CP2=Y |
| MERKEZ1 M1T13 | CP1=D CP2=Y |
| MERKEZ1 M1T12 | CP1=D CP2=Y |
| MERKEZ2 M2T5  | CP1=D CP2=Y |
| MERKEZ2 M2T6  | CP1=D CP2=Y |
| KM1 KM1T1     | CP1=D CP2=Y |
| KM1 KM1T2     | CP1=D CP2=Y |
| KM1 KM1T3     | CP1=D CP2=Y |
| KM1H KM1T4    | CP1=D CP2=Y |
| MERKEZ3 M3T7  | CP1=D CP2=Y |
| MERKEZ3 M3T8  | CP1=D CP2=Y |
| MERKEZ3 M3T9  | CP1=D CP2=Y |
| MERKEZ4 M4T10 | CP1=D CP2=Y |

END

#### SYNCHRONOUS MACHINES

GEN1 G1 TYPE=1 SN=6.3 UN=11 H=8.2 D=2.0

RA=0.0025 XA=0.2

XD=2.86 XQ=1.72

XDP=0.276 XQP=0.55

XDB=0.25 XQB=0.25

TD0P=8.0 TQ0P=0.4

TD0B=0.03 TQ0B=0.05 VREG=1 TURB=1

V1D=1.0 V2D=1.2 SE1D=0.0392 SE2D=0.2227

GEN2 G2 TYPE=1 SN=6.3 UN=11 H=8.2 D=2.0

RA=0.0025 XA=0.2

XD=1.8 XQ=1.7

XDP=0.276 XQP=0.55

XDB=0.25 XQB=0.25

TD0P=8.0 TQ0P=0.4  
TD0B=0.03 TQ0B=0.05 VREG=1 TURB=1  
V1D=1.0 V2D=1.2 SE1D=0.0392 SE2D=0.2227

GEN3 G3 TYPE=1 SN=6.3 UN=11 H=8.2 D=2.0

RA=0.0025 XA=0.2

XD=1.8 XQ=1.7

XDP=0.276 XQP=0.55

XDB=0.25 XQB=0.25

TD0P=8.0 TQ0P=0.4

TD0B=0.03 TQ0B=0.05 VREG=1 TURB=1

V1D=1.0 V2D=1.2 SE1D=0.0392 SE2D=0.2227

GEN4 G4 TYPE=1 SN=6.3 UN=11 H=8.2 D=2.0

RA=0.0025 XA=0.2

XD=1.8 XQ=1.7

XDP=0.276 XQP=0.55

XDB=0.25 XQB=0.25

TD0P=8.0 TQ0P=0.4

TD0B=0.03 TQ0B=0.05 VREG=1 TURB=1

V1D=1.0 V2D=1.2 SE1D=0.0392 SE2D=0.2227

G-IZGG1\_13240 TYPE=1 SN=45.4 UN=13.8 H=8.2 D=2.0

RA=0.0025 XA=0.2

XD=1.8 XQ=1.7

XDP=0.276 XQP=0.55

XDB=0.25 XQB=0.25

TD0P=8.0 TQ0P=0.4

TD0B=0.03 TQ0B=0.05 VREG=1 TURB=1

V1D=1.0 V2D=1.2 SE1D=0.0392 SE2D=0.2227

G-IZGG2\_13240 TYPE=1 SN=45.4 UN=13.8 H=8.2 D=2.0

RA=0.0025 XA=0.2

XD=1.8 XQ=1.7

XDP=0.276 XQP=0.55

XDB=0.25 XQB=0.25

TD0P=8.0 TQ0P=0.4

TD0B=0.03 TQ0B=0.05 VREG=1 TURB=1  
 V1D=1.0 V2D=1.2 SE1D=0.0392 SE2D=0.2227  
 G-IZGG3\_13240 TYPE=1 SN=14.0 UN=13.8 H=8.2 D=2.0  
 RA=0.0025 XA=0.2  
 XD=1.8 XQ=1.7  
 XDP=0.3 XQP=0.55  
 XDB=0.25 XQB=0.25  
 TD0P=8.0 TQ0P=0.4  
 TD0B=0.03 TQ0B=0.05 VREG=1 TURB=1  
 V1D=1.0 V2D=1.2 SE1D=0.0392 SE2D=0.2227  
 G-IZGG4\_13240 TYPE=1 SN=14.0 UN=13.8 H=8.2 D=2.0  
 RA=0.0025 XA=0.2  
 XD=1.8 XQ=1.7  
 XDP=0.276 XQP=0.55  
 XDB=0.25 XQB=0.25  
 TD0P=8.0 TQ0P=0.4  
 TD0B=0.03 TQ0B=0.05 VREG=1 TURB=1  
 V1D=1.0 V2D=1.2 SE1D=0.0392 SE2D=0.222

END

TURBINES

1 TYPE = ST1 GOV = 10 TC = 0.3 KH = 0.3 TR = 7.0  
 10 TYPE = SGC YMAX = 1 YMIN = -1 K = 20 T1 = 0.1

END

REGULATORS

1 TYPE=1 KA=20 TA=0.055 VR=0  
 TE=0.36 KF=0.125 TF=1.8  
 UEMAX=40.0 UEMIN=-40.0  
 SEMAX=0.4127188 SE75=0.1408600

END

FAULTS

F1 TYPE=3PSG NODE=BUSA

END

RUN INSTRUCTION



AT 2.1 INST=CONNECT FAULT=F1

AT 3.8 INST=DISCONNECT FAULT=F1

END

END



## EK-5

### TRANSFORMATÖR VE HAT VERİLERİ

| BARA1      | BARA2      | HATTIN NİTELİĞİ |                  | HATTIN GERİLİMİ |
|------------|------------|-----------------|------------------|-----------------|
| Adapazarı  | Çayırhan   | 2x954 MCM/136km |                  | 380 kV          |
| Adapazarı2 | Köseköy    | 795 MCM/36km    |                  | 154 kV          |
| Köseköy    | Yalova     | 477 MCM/150km   |                  | 154 kV          |
| Köseköy    | Nuhçim     | 477 MCM/60km    |                  | 154 kV          |
| Kullar     | Anabara    | 477 MCM/3km     |                  | 34.5 kV         |
| BARA1      | BARA2      | TRAFO GÜCÜ      | % U <sub>k</sub> | Bağlantı        |
| Adapazarı  | Adapazarı2 | 2x250 MVA       | 0.12             | Y-Y             |
| Köseköy    | Kullar     | 2x100 MVA       | 0.11             | Δ-Yt            |
| Köseköy    | Köseköy2   | 4x45 MVA        | 0.10             | Y-Δ             |
| Anabara    | G1         | 4x6.3 MVA       | 0.08             | Yd-Δ            |

Hat uzunlukları ve empedans değerleri yazılan programda (EK 4) yer almaktadır.

## EK 6

### STRI SIMPOW PROGRAMININ TANITIMI

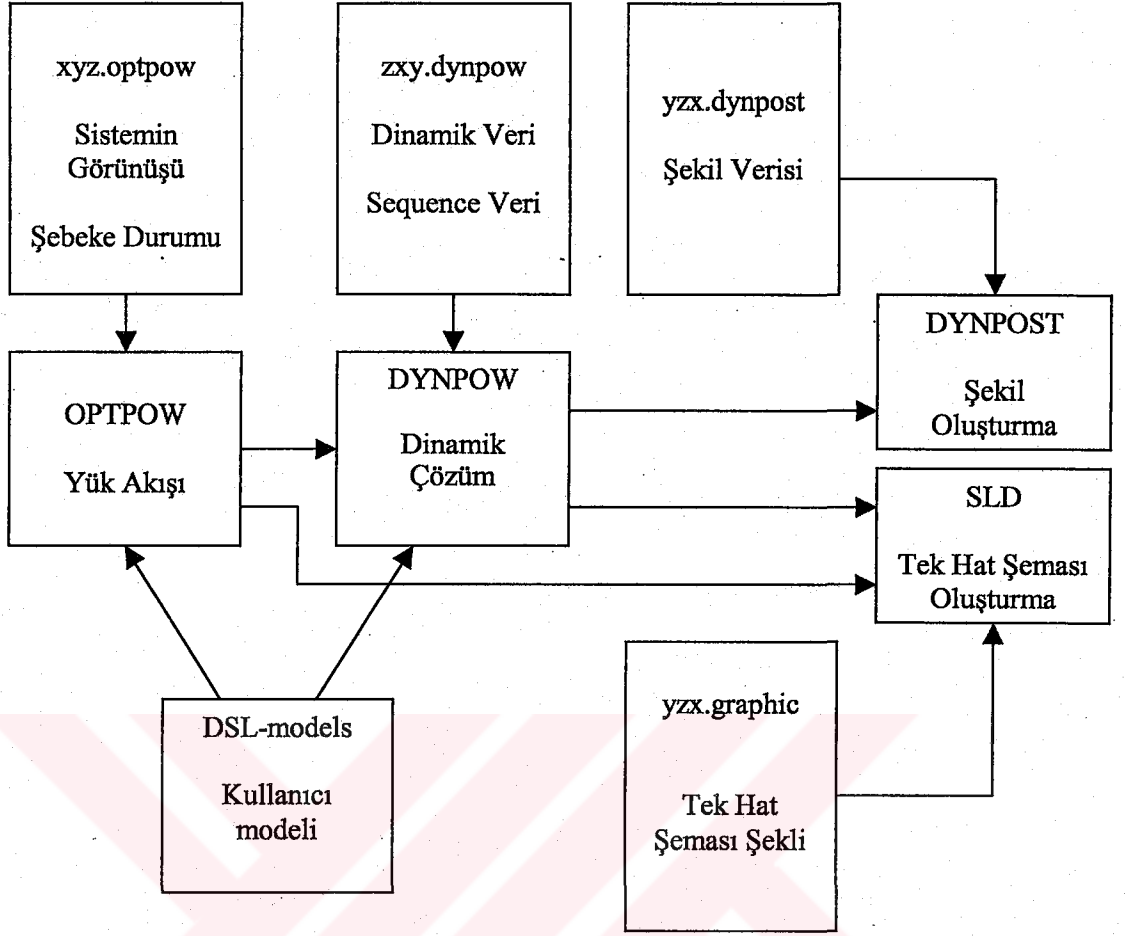
SIMPOW (SIMulation and analysis of POWER systems) güç sistemleri simülasyonu ve analizi için ABB Güç Sistemleri Analiz Departmanı tarafından geliştirilmiş bir yazılımdır. SIMPOW'un kullanım amaçları şunlardır:

- Yenilik, ihtiyaçların değişmesinden dolayı mevcut sistemin yenilenmesi,
- Projelendirme, gelecekte uygulanacak projelerin simülasyonu ile zaman ve paradan tasarruf,
- Araştırma, elektrik güç sistemlerinin analizinde çok gerekli olan uygulama,
- Eğitim, elektrik güç sistemlerinin anlaşılmasının ve uygulanmasının kolaylaştırılması.

SIMPOW 'un temel fonksiyonları (OPTPOW, DYNPOW, STAPOW) sayesinde

- Yük akışı,
- Hata (kısa devre) analizi (IEC909'ye uygun olarak),
- Kararlılık analizi (Senkron kararlılık, Geçici Hal kararlılığı, Gerilim kararlılığı, Yük paylaşımı, Yük dalgalılığı)
- Makine dinamikleri,
- Senkronaltı rezonans frekansı analizi,
- Harmonik analizi yapılabilir.

SIMPOW'un fonksiyonlarını ve içeriğini gösteren diyagram Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. SIMPOW Programı Modüllerin Çalışma Şeması.

## 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. Halen bu görevi sürdürmektedir.

