

**T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE KISA DEVRE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yılmaz YILDIRIM

Enstitü Anabilim Dalı : MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Faruk YALÇIN

Mayıs 2019

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE KISA DEVRE ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yılmaz YILDIRIM

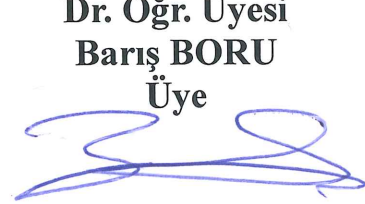
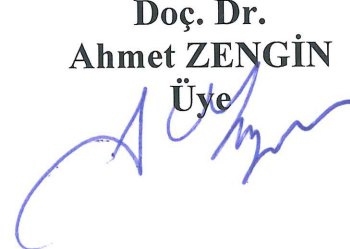
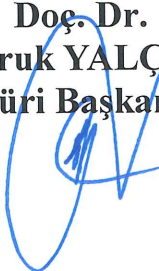
Enstitü Anabilim Dalı : **MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

Bu tez ^{29.05}.../.../2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından
oybirliği/~~oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr.
Faruk YALÇIN
Jüri Başkanı

Doç. Dr.
Ahmet ZENGİN
Üye

Dr. Öğr. Üyesi
Barış BORU
Üye



BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Yılmaz YILDIRIM
29/05/2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda desteğini esirgemeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Faruk YALÇIN'a teşekkürlerimi bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

| | |
|---|------|
| TEŞEKKÜR | i |
| İÇİNDEKİLER | ii |
| SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ..... | iv |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | x |
| TABLolar LİSTESİ | xiii |
| ÖZET | xiv |
| SUMMARY | xv |
| BÖLÜM 1. | |
| GİRİŞ | 1 |
| BÖLÜM 2. | |
| SİMETRİLİ BİLEŞENLER YÖNTEMİ..... | 4 |
| 2.1. Empedans Yüklerin Simetrik Bileşen Devreleri | 8 |
| 2.2. Dönen Makinaların Simetrik Bileşen Devreleri..... | 13 |
| 2.3. Seri Empedansların Simetrik Bileşen Devreleri | 16 |
| 2.4. Birim Değerler Cinsinden Üç Fazlı İki Sargılı Transformatörün Simetrik Bileşen Devreleri..... | 19 |
| BÖLÜM 3. | |
| ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE KISA DEVRE HATA MODELİ | 22 |
| 3.1. Kısa Devre Hesaplamalarında Kullanılan Kabuller | 22 |
| 3.2. Kısa Devre Hata Modeli Eşdeğer Devresi | 23 |
| BÖLÜM 4. | |
| GÜÇ SİSTEMLERİNDE KISA DEVRE HATA TÜRLERİ..... | 33 |
| 4.1. Simetrik Arızalar | 33 |

| | |
|--|----|
| 4.1.1. Üç faz kısa devre arızası | 33 |
| 4.2. Simetrik Olmayan Arızalar..... | 36 |
| 4.2.1. Faz-faz kısa devresi (arıza empedanslı)..... | 36 |
| 4.2.2. Faz-faz kısa devresi (metalik)..... | 39 |
| 4.2.3. İki faz-toprak kısa devresi (arıza empedanslı)..... | 41 |
| 4.2.4. İki faz-toprak kısa devresi (metalik)..... | 45 |
| 4.2.5. Faz-toprak kısa devresi (arıza empedanslı) | 48 |
| 4.2.6. Faz-toprak kısa devresi (metalik) | 50 |
| | |
| BÖLÜM 5. | |
| KISA DEVRE ANALİZİ ALGORİTMASI VE UYGULAMASI..... | 54 |
| 5.1. Algoritma..... | 54 |
| 5.2. Uygulama | 57 |
| | |
| BÖLÜM 6. | |
| SONUÇLAR VE ÖNERİLER | 64 |
| KAYNAKLAR | 65 |
| EKLER | 68 |
| ÖZGEÇMİŞ | 72 |

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

| | |
|----------|--|
| a | : Üç fazlı sisteme ait faz |
| a | : Genliği bir olan açısı 120° olan kompleks operatör |
| A | : Simetrik bileşen dönüşüm matrisi |
| abc | : Doğru faz sıralaması |
| acb | : Ters faz sıralaması |
| b | : Üç fazlı sisteme ait faz |
| c | : Üç fazlı sisteme ait faz |
| E_a | : Senkron jeneratör a fazı iç gerilimi |
| E_b | : Senkron jeneratör b fazı iç gerilimi |
| E_c | : Senkron jeneratör c fazı iç gerilimi |
| e_{g1} | : 1 nolu senkron jeneratörde üretilen iç gerilim |
| E_{g1} | : 1 nolu senkron jeneratörde üretilen iç gerilim genliği |
| E_{G1} | : Senkron jeneratör doğru bileşen devre kaynak gerilimi |
| e_{g2} | : 2 nolu senkron jeneratörde üretilen iç gerilim |
| E_{g2} | : 2 nolu senkron jeneratörde üretilen iç gerilim genliği |
| E_{h0} | : Yıldız-yıldız bağlı ideal üç fazlı iki sargılı transformatör sıfır bileşen devreye ait birim değer sekonder gerilimi |
| E_{H0} | : Yıldız-yıldız bağlı ideal üç fazlı iki sargılı transformatör sıfır bileşen devreye ait birim değer primer gerilimi |
| E_{h1} | : Yıldız-yıldız bağlı ideal üç fazlı iki sargılı transformatör doğru bileşen devreye ait birim değer sekonder gerilimi |
| E_{H1} | : Yıldız-yıldız bağlı ideal üç fazlı iki sargılı transformatör doğru bileşen devreye ait birim değer primer gerilimi |
| E_{h2} | : Yıldız-yıldız bağlı ideal üç fazlı iki sargılı transformatör ters bileşen devreye ait birim değer sekonder gerilimi |
| E_{H2} | : Yıldız-yıldız bağlı ideal üç fazlı iki sargılı transformatör ters bileşen devreye ait birim değer primer gerilimi |

| | |
|-----------|---|
| | : devreye ait birim değer primer gerilimi |
| E_{m1} | : Senkron motor doğru bileşen devre kaynak gerilimi |
| h_1 | : Yıldız-yıldız bağlı üç fazlı iki sargılı transformatör sekonder tarafına ait a fazı sargısı |
| H_1 | : Yıldız-yıldız bağlı üç fazlı iki sargılı transformatör primer tarafına ait a fazı sargısı |
| h_2 | : Yıldız-yıldız bağlı üç fazlı iki sargılı transformatör sekonder tarafına ait b fazı sargısı |
| H_2 | : Yıldız-yıldız bağlı üç fazlı iki sargılı transformatör primer tarafına ait b fazı sargısı |
| h_3 | : Yıldız-yıldız bağlı üç fazlı iki sargılı transformatör sekonder tarafına ait c fazı sargısı |
| H_3 | : Yıldız-yıldız bağlı üç fazlı iki sargılı transformatör primer tarafına ait c fazı sargısı |
| I_0 | : a fazına ait sıfır bileşen akımı |
| I_1 | : a fazına ait doğru bileşen akımı |
| I_2 | : a fazına ait ters bileşen akımı |
| I_n | : Nötr hattı gerçek akımı |
| I_a | : a fazına ait gerçek faz akımı |
| I_b | : b fazına ait gerçek faz akımı |
| I_c | : c fazına ait gerçek faz akımı |
| I_F | : I_a , I_b ve I_c ' den oluşan sütun vektör matrisi |
| I_G | : I_a , I_b ve I_c ' den oluşan sütun vektör matrisi |
| I_S | : I_0 , I_1 ve I_2 ' den oluşan sütun vektör matrisi |
| t | : Toprak noktası |
| V_0 | : Referans alınan faza ait sıfır bileşen gerilimi |
| V_1 | : Referans alınan faza ait doğru bileşen gerilimi |
| V_2 | : Referans alınan faza ait ters bileşen gerilimi |
| V_{0-k} | : k barasına ait referans alınan faza ait sıfır bileşen gerilimi |
| V_{1-k} | : k barasına ait referans alınan faza ait doğru bileşen gerilimi |
| V_{2-k} | : k barasına ait referans alınan faza ait ters bileşen gerilimi |
| V_a | : a fazına ait gerçek faz gerilimi |

- V_{a-k} : k barasında a fazına ait gerçek faz gerilimi
 V_{aa}' : Seri iletim hattı a fazına ait self empedansı üzerindeki gerilim düşümü
 V_{at} : a fazı ile toprak arasında görülen gerçek gerilim
 V_{at}' : İletim hattı a fazı uç noktası ile toprak arasında görülen gerçek gerilim
 V_b : b fazına ait gerçek faz gerilimi
 V_{bb}' : Seri iletim hattı b fazına ait self empedansı üzerindeki gerilim düşümü
 V_{b-k} : k barasında b fazına ait gerçek faz gerilimi
 V_{bt} : b fazı ile toprak arasında görülen gerçek gerilim
 V_{bt}' : İletim hattı b fazı uç noktası ile toprak arasında görülen gerçek gerilim
 V_c : c fazına ait gerçek faz gerilimi
 V_{cc}' : Seri iletim hattı c fazına ait self empedansı üzerindeki gerilim düşümü
 V_{c-k} : k barasında c fazına ait gerçek faz gerilimi
 V_{ct} : c fazı ile toprak arasında görülen gerçek gerilim
 V_{ct}' : İletim hattı c fazı uç noktası ile toprak arasında görülen gerçek gerilim
 V_F : V_{at} , V_{bt} ve V_{ct}' den oluşan sütun vektör matrisi
 V_G : V_{at} , V_{bt} ve V_{ct}' den oluşan sütun vektör matrisi
 V_G' : V_{at}' , V_{bt}' ve V_{ct}' den oluşan sütun vektör matrisi
 V_H : Kısa devre arızasının olduğu hata noktasından görülen Thevenin eşdeğer gerilimi
 V_{ho} : Yıldız-yıldız bağlı gerçek üç fazlı iki sargılı transformatör sıfır bileşen devreye ait birim değer sekonder gerilimi
 V_{Ho} : Yıldız-yıldız bağlı gerçek üç fazlı iki sargılı transformatör sıfır bileşen devreye ait birim değer primer gerilimi
 V_{h1} : Yıldız-yıldız bağlı gerçek üç fazlı iki sargılı transformatör doğru bileşen devreye ait birim değer sekonder gerilimi
 V_{H1} : Yıldız-yıldız bağlı gerçek üç fazlı iki sargılı transformatör doğru bileşen devreye ait birim değer primer gerilimi
 V_{h2} : Yıldız-yıldız bağlı gerçek üç fazlı iki sargılı transformatör ters bileşen devreye ait birim değer sekonder gerilimi
 V_{H2} : Yıldız-yıldız bağlı gerçek üç fazlı iki sargılı transformatör ters bileşen devreye ait birim değer primer gerilimi
 V_S : V_{at} gerçek gerilimine ait simetrik bileşen değerleri V_0 , V_1 ve V_2' den

- oluşan sütun vektör matrisi
- V_S' : V_{at}' gerçek gerilimine ait simetrik bileşen değerleri V_0 , V_1 ve V_2' den oluşmuş sütun vektör matrisi
- X_0 : Sıfır bileşen reaktansı
- X_1 : Doğru bileşen reaktansı
- X_2 : Ters bileşen reaktansı
- X_{g1-0} : 1 nolu senkron jeneratör sıfır bileşen reaktansı
- X_{g1-1} : 1 nolu senkron jeneratör doğru bileşen reaktansı
- X_{g1-2} : 1 nolu senkron jeneratör ters bileşen reaktansı
- X_{g2-0} : 2 nolu senkron jeneratör sıfır bileşen reaktansı
- X_{g2-1} : 2 nolu senkron jeneratör doğru bileşen reaktansı
- X_{g2-2} : 2 nolu senkron jeneratör ters bileşen reaktansı
- X_{h1-0} : 1 nolu iletim hattı sıfır bileşen reaktansı
- X_{h1-1} : 1 nolu iletim hattı doğru bileşen reaktansı
- X_{h1-2} : 1 nolu iletim hattı ters bileşen reaktansı
- X_{h2-0} : 2 nolu iletim hattı sıfır bileşen reaktansı
- X_{h2-1} : 2 nolu iletim hattı doğru bileşen reaktansı
- X_{h2-2} : 2 nolu iletim hattı ters bileşen reaktansı
- X_{h3-0} : 3 nolu iletim hattı sıfır bileşen reaktansı
- X_{h3-1} : 3 nolu iletim hattı doğru bileşen reaktansı
- X_{h3-2} : 3 nolu iletim hattı ters bileşen reaktansı
- X_{t1-0} : 1 nolu transformatör sıfır bileşen reaktansı
- X_{t1-1} : 1 nolu transformatör doğru bileşen reaktansı
- X_{t1-2} : 1 nolu transformatör ters bileşen reaktansı
- X_{th-0} : Hata noktasından görülen sıfır bileşen devre Thevenin eşdeğer reaktansı
- X_{th-1} : Hata noktasından görülen doğru bileşen devre Thevenin eşdeğer reaktansı
- X_{th-2} : Hata noktasından görülen ters bileşen devre Thevenin eşdeğer reaktansı
- X_{t2-0} : 2 nolu transformatör sıfır bileşen reaktansı
- X_{t2-1} : 2 nolu transformatör doğru bileşen reaktansı
- X_{t2-2} : 2 nolu transformatör ters bileşen reaktansı
- y_{bara-0} : Güç sistemine ait sıfır bileşen bara admitans matrisi

| | |
|---------------------|--|
| $Y_{\text{bara-1}}$ | : Güç sistemine ait doğru bileşen bara admitans matrisi |
| $Y_{\text{bara-2}}$ | : Güç sistemine ait ters bileşen bara admitans matrisi |
| Z_0 | : Sıfır bileşen devre eşdeğer empedansı |
| Z_{0-kn} | : Sıfır bileşen bara empedans matrisi (k,n) elemanı |
| Z_1 | : Doğru bileşen devre eşdeğer empedansı |
| Z_{1-kn} | : Doğru bileşen bara empedans matrisi (k,n) elemanı |
| Z_2 | : Ters bileşen devre eşdeğer empedansı |
| Z_{2-kn} | : Ters bileşen bara empedans matrisi (k,n) elemanı |
| Z_{Δ} | : Üçgen bağlı empedans |
| Z_{aa} | : Seri iletim hattı a fazına ait self empedans |
| Z_{ab} | : Seri iletim hattı a ve b fazı arasında oluşan ortak empedans |
| Z_{ac} | : Seri iletim hattı a ve c fazı arasında oluşan ortak empedans |
| $Z_{\text{bara-o}}$ | : Güç sistemine ait sıfır bileşen bara empedans matrisi |
| $Z_{\text{bara-1}}$ | : Güç sistemine ait doğru bileşen bara empedans matrisi |
| $Z_{\text{bara-2}}$ | : Güç sistemine ait ters bileşen bara empedans matrisi |
| Z_{bb} | : Seri iletim hattı b fazına ait self empedans |
| Z_{bc} | : Seri iletim hattı b ve c fazı arasında oluşan ortak empedans |
| Z_{cc} | : Seri iletim hattı c fazına ait self empedans |
| Z_F | : Dengeli yıldız bağlı empedans yükü empedans matrisi |
| Z_G | : Yıldız bağlı seri iletim hattı empedans matrisi |
| Z_g | : Senkron jeneratör sargı empedansı |
| Z_{go} | : Senkron jeneratör sıfır bileşen devre eşdeğer empedansı |
| Z_{g1} | : Senkron jeneratör doğru bileşen devre eşdeğer empedansı |
| Z_{g2} | : Senkron jeneratör ters bileşen devre eşdeğer empedansı |
| Z_{mo} | : Senkroasenkron motor sıfır bileşen devre eşdeğer empedansı |
| Z_{m1} | : Senkroasenkron motor doğru bileşen devre eşdeğer empedansı |
| Z_{m2} | : Senkroasenkron motor ters bileşen devre eşdeğer empedansı |
| Z_n | : Yıldız-yıldız bağlı üç fazlı iki sargılı transformatör sekonder tarafına ait nötr-toprak empedansı |
| Z_N | : Yıldız-yıldız bağlı üç fazlı iki sargılı transformatör primer tarafına ait nötr-toprak empedansı |
| Z_S | : Dengeli yıldız bağlı empedans yükü/seri iletim hattı simetrik bileşen |

empedans matrisi

z_t : Topraklama/kısa devre empedansı

z_y : Yıldız bağlı empedans



ŞEKİLLER LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Şekil 2.1. Simetrik bileşen devrelere ait gerilim ve akım fazörü gösterimi..... | 5 |
| Şekil 2.2. Dengeli yıldız bağlı empedans yükü gösterimi..... | 8 |
| Şekil 2.3. Dengeli yıldız bağlı empedans yükünün simetrik bileşen devreleri: (a) sıfır bileşen devre, (b) doğru bileşen devre, (c) ters bileşen devre | 12 |
| Şekil 2.4. Dengeli üçgen bağlı empedans yükünün simetrik bileşen devreleri: (a) sıfır bileşen devre, (b) doğru bileşen devre, (c) ters bileşen devre | 13 |
| Şekil 2.5. Yıldız bağlı senkron jeneratör eşdeğer devresi..... | 14 |
| Şekil 2.6. Yıldız bağlı senkron jeneratör eşdeğer simetrik bileşen devreleri: (a) sıfır bileşen devre, (b) doğru bileşen devre, (c) ters bileşen devre | 14 |
| Şekil 2.7. Üç fazlı senkron motor eşdeğer simetrik bileşen devreleri: (a) sıfır bileşen devre, (b) doğru bileşen devre, (c) ters bileşen devre | 15 |
| Şekil 2.8. Üç fazlı asenkron motor eşdeğer simetrik bileşen devreleri: (a) sıfır bileşen devre, (b) doğru bileşen devre, (c) ters bileşen devre | 15 |
| Şekil 2.9. Üç fazlı iletim hattının eşdeğer devresi. | 16 |
| Şekil 2.10. Dengeli iletim hattının simetrik bileşen devreleri: (a) sıfır bileşen devre, (b) doğru bileşen devre, (c) ters bileşen devre..... | 19 |
| Şekil 2.11. İdeal üç fazlı iki sargılı transformatörün birim değerler cinsinden simetrik bileşen eşdeğer devreleri: (a) şematik gösterim, (b) sıfır bileşen devre, (c) doğru bileşen devre, (d) ters bileşen devre | 20 |
| Şekil 2.12. Farklı bağlantı türleri için gerçek üç fazlı iki sargılı transformatörün birim değerler cinsinden simetrik bileşen eşdeğer devreleri..... | 21 |
| Şekil 3.1. Elektrik güç sistemi genel kısa devre hata modeli..... | 24 |
| Şekil 3.2. Üç fazlı dengeli sistemde simetrik bileşen Thevenin eşdeğer devre gösterimi | 25 |
| Şekil 3.3. Üç fazlı dengeli örnek bir sistem | 26 |

| | |
|--|----|
| Şekil 3.4. Şekil 3.3'te verilen üç fazlı dengeli örnek sisteme ait simetrik bileşen devreleri: (a) sıfır bileşen devre, (b) doğru bileşen devre, (c) ters bileşen devre | 26 |
| Şekil 3.5. Şekil 3.4'te verilen 2 nolu baradan görülen simetrik bileşen devrelerinden elde edilen simetrik Thevenin eşdeğer devreleri: (a) Thevenin sıfır bileşen eşdeğer devresi, (b) Thevenin doğru bileşen eşdeğer devresi, (c) Thevenin ters bileşen eşdeğer devre | 27 |
| Şekil 3.6. Şekil 3.3'te verilen örnek üç faz dengeli güç sistemine ait sayısal bir örnek sistem..... | 28 |
| Şekil 3.7. Şekil 3.6'da verilen örnek sayısal sisteme ait simetrik bileşen devreleri: (a) sıfır bileşen devre, (b) doğru bileşen devre, (c) ters bileşen devre | 29 |
| Şekil 3.8. Şekil 3.6'da verilen 2 nolu baradan görülen simetrik bileşen devrelerinden elde edilen simetrik Thevenin eşdeğer devreleri: (a) Thevenin sıfır bileşen eşdeğer devresi, (b) Thevenin doğru bileşen eşdeğer devresi, (c) Thevenin ters bileşen eşdeğer devre | 32 |
| Şekil 4.1. Güç sisteminde üç faz kısa devre arızası gösterimi | 33 |
| Şekil 4.2. Güç sisteminde üç faz kısa devre arızası simetrik bileşen devre bağlantıları..... | 35 |
| Şekil 4.3. Güç sisteminde arıza empedanslı faz-faz kısa devre arızası gösterimi..... | 36 |
| Şekil 4.4. Güç sisteminde arıza empedanslı faz-faz kısa devre arızası simetrik bileşen devre bağlantıları..... | 38 |
| Şekil 4.5. Güç sisteminde metalik faz-faz kısa devre arızası gösterimi..... | 39 |
| Şekil 4.6. Güç sisteminde metalik faz-faz kısa devre arızası simetrik bileşen devre bağlantıları | 40 |
| Şekil 4.7. Güç sisteminde arıza empedanslı iki faz-toprak kısa devre arızası gösterimi | 42 |
| Şekil 4.8. Güç sisteminde arıza empedanslı iki faz-toprak kısa devre arızası simetrik bileşen devre bağlantıları | 43 |
| Şekil 4.9. Güç sisteminde metalik iki faz-toprak kısa devre arızası gösterimi | 45 |
| Şekil 4.10. Güç sisteminde metalik iki faz-toprak kısa devre arızası simetrik bileşen devre bağlantıları..... | 47 |

| | |
|---|----|
| Şekil 4.11. Güç sisteminde arıza empedanslı faz-toprak kısa devre arızası gösterimi | 48 |
| Şekil 4.12. Güç sisteminde arıza empedanslı faz-toprak kısa devre arızası simetrik bileşen devre bağlantıları | 50 |
| Şekil 4.13. Güç sisteminde metalik faz-toprak kısa devre arızası gösterimi | 51 |
| Şekil 4.14. Güç sisteminde metalik faz-toprak kısa devre arızası simetrik bileşen devre bağlantıları | 52 |
| Şekil 5.1. Tüm kısa devre analizleri için önerilen algoritma | 55 |
| Şekil 5.2. Kısa devre algoritmasının uygulandığı örnek 14 baralı güç sistemi..... | 57 |



TABLolar LİSTESİ

| | |
|--|----|
| Tablo 5.1. Örnek 14 baralı güç sistemine ait dönen makine parametreleri..... | 58 |
| Tablo 5.2. Örnek 14 baralı güç sistemine ait transformatör parametreleri | 58 |
| Tablo 5.3. Örnek 14 baralı güç sistemine ait iletim hattı parametreleri..... | 58 |
| Tablo 5.4. Üç faz kısa devre arızası için yapılan analiz sonuçları | 59 |
| Tablo 5.5. Arıza empedanslı faz-faz kısa devre arızası için yapılan analiz sonuçları | 59 |
| Tablo 5.6. Metalik faz-faz kısa devre arızası için yapılan analiz sonuçları | 60 |
| Tablo 5.7. Arıza empedanslı iki faz-toprak kısa devre arızası için yapılan analiz sonuçları | 61 |
| Tablo 5.8. Metalik iki faz-toprak kısa devre arızası için yapılan analiz sonuçları..... | 61 |
| Tablo 5.9. Arıza empedanslı faz-toprak kısa devre arızası için yapılan analiz sonuçları | 62 |
| Tablo 5.10. Metalik faz-toprak kısa devre arızası için yapılan analiz sonuçları..... | 63 |

ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE KISA DEVRE ANALİZİ

ÖZET

Bu çalışmada, elektrik güç sistemlerinde karşılaşılan kısa devre arızalarının analizi amaçlanmıştır. Güç sistemlerinde karşılaşılan arıza türlerinde, kısa devre arıza akımları ile sistem bara gerilimlerinin aldığı değerleri hesaplayan bir algoritma ve bu algoritmaya ait MATLAB programında hazırlanmış bir yazılım oluşturulmuştur.

Çalışmada, güç sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan simetrik ve simetrik olmayan arıza türlerinin tamamı ele alınmıştır. Simetrik arıza olarak üç faz kısa devresi ve simetrik olmayan (metalik ve arıza empedanslı) faz-faz kısa devresi, iki faz-toprak kısa devresi ve faz-toprak kısa devresi için simetrik bileşenler yöntemi ile analiz yapılmıştır. Bu kısa devre analizleri, arıza türlerinin üç faz dengeli çalışma koşullarında olduğu kabulü altında yapılmıştır. Ayrıca literatürde kısa devre analizlerinde genel olarak göz önüne alınan kabuller bu çalışmada göz önüne alınmıştır.

Tüm kısa devre türlerini analiz edebilecek şekilde oluşturulan algoritma, örnek bir güç sistemi modeli oluşturularak bu sistemde test edilmiş ve sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Elektrik güç sistemi, kısa devre analizi, simetrik bileşenler, simetrik arızalar, simetrik olmayan arızalar

SHORT CIRCUIT ANALYSIS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS

SUMMARY

In this study, the analysis of the encountered short circuit faults in electric power systems is aimed. An algorithm that calculates the short circuit fault currents and the system bus voltages during the encountered short circuit faults in electric power systems is built and a software of this algorithm is done in MATLAB.

In the study, all of the symmetrical and unsymmetrical fault types frequently encountered in power systems are discussed. Symmetrical fault of three phase short circuit and unsymmetrical faults of (metallic and through fault impedance) line-to-line short circuit, double line-to-ground short circuit and line-to-ground short circuit are analyzed through symmetrical components. These analyses are done under the assumption that the fault types occur during the three phase balanced operation. Also the general assumptions of the short circuit analyses in the literature are considered in this study.

The obtained algorithm that can analyze all of the short circuit types is tested on a created sample power system model and the results are obtained.

Keywords: Electric power system, short circuit analysis, symmetrical components, symmetrical faults, unsymmetrical faults

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Elektrik enerjisinin olan talep, teknolojik gelişmelerdeki ve dolayısıyla bu enerji türünün kullanılması gereken uygulamalardaki artış sebebiyle her geçen gün önemli bir hale gelmektedir. Elektrik enerjisi, üretim merkezleri olan santrallerde üretilerek transformatörler ve iletim hatları ile tüketici merkezlerine ulaştırılmaktadır. En genel manada, elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve tüketimini kapsayan tüm yapılar ile bunların oluşturduğu sistem elektrik güç sistemi ya da kısaca güç sistemi olarak adlandırılmaktadır (Kundur, 1993).

Enerjinin sürekli ve sağlıklı bir şekilde sağlanması hem tüketici hem de sistem açısından büyük önem arz etmektedir. Bu durum ise güç sisteminin normal çalışma koşullarında çalışmasının sürekliliğine bağlıdır (Shu ve Tang, 2017). Güç sistemini normal olmayan çalışma koşuluna getirecek her türlü etkenin sistemden en kısa sürede uzaklaştırılması oldukça önemlidir (Du et al, 2018). Bir güç sistemini normal olmayan çalışma koşullarına zorlayan birçok durum söz konusudur. Bunların belki de en önemlisi güç sisteminde oluşan kısa devre hatalarıdır (Huang et al, 2018). Güç sisteminde oluşabilecek herhangi bir kısa devre hatası, sistem elemanlarında termal-mekanik zorlamalardan güç sistemi kararsızlığına kadar birçok istenmeyen duruma sebep olur (Ma et al, 2017). Bu sebeple güç sisteminde oluşacak bir kısa devre hatasının en kısa sürede sistemden uzaklaştırılması gerekmektedir. Güç sistemlerinde kısa devre hatalarının sistemden uzaklaştırılması kesicilerle sağlanır. Kesiciler röleler vasıtasıyla açılarak kısa devre esnasında oluşan kısa devre akımını sistemden uzaklaştırırlar (Anderson, 1999). Bir güç sisteminin herhangi bir noktasında oluşan kısa devre hatası sonucu ortaya çıkacak kısa devre akımının değeri, sistem parametrelerine, hata noktasına ve hata türüne göre farklı değerler alır (Teng, 2005). Güç sistemine yerleştirilecek kesicilerin kısa devre açma gücünün belirlenebilmesi için, güç sisteminde kısa devre hesaplamalarının yapılması büyük önem arz etmektedir (Ciric et al, 2005).

Bununla beraber, kısa devre esnasında, hata olmayan sistem noktalarında da gerilim değerlerinin ne olacağını bilmesi gerekmektedir. Bu nedenlerle, güç sistemlerinde kısa devre analizlerinin yapılması sistem güvenliği ve kontrolü açısından elzemdir (Kjolle et al, 2006; J. Zhang et al, 2009; Ciontea et al, 2016).

Üç fazlı enterkonnekte güç sistemlerinde birçok farklı kısa devre arızası oluşmaktadır. Bunlar temelde simetrik arızalar ve simetrik olmayan arızalar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Mahamedi ve Zhu, 2012; Badawy et al, 1991). Bir güç sisteminde oluşan üç faz kısa devre hatası simetrik arıza olarak ele alınmaktadır (Dufournet ve Montillet, 2000). Metalik ya da arıza empedanslı faz-faz kısa devresi, iki faz-toprak kısa devresi ve faz-toprak kısa devresi hataları ise simetrik olmayan arızalardır (Wang et al, 2018; Korab ve Siwy, 2006; Shimizu et al, 1992). Literatürde kısa devre hesaplamaları, güç sisteminin arıza öncesinde dengeli çalışma koşulları altında çalıştığı kabulü altında yapılmaktadır. Dengeli normal çalışma esnasında sistemde doğru, ters ve sıfır bileşen devreler bağımsız olmasına rağmen, arıza esnasında, daha doğrusu simetrik olayın arızalarda dengesiz çalışma koşulları olduğundan, doğru, ters ve sıfır bileşen devreler arıza noktasında birbirine bağlanırlar (Shi et al, 2011). Bu sebeple kısa devre analizlerinde simetrik bileşenler yöntemi oldukça yararlı ve gereklidir (Kulkarni et al, 2017).

Bu tez çalışmasında, elektrik güç sistemlerinde oluşabilecek kısa devre hata analizi çalışması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, simetrik ve simetrik olmayan tüm hata türlerini analiz ederek güç sisteminde meydana gelecek kısa devre akımlarının hesabını ve kısa devre hatası esnasında hata olmayan sistem baralarının gerilim değerlerinin hesabını yapan bir algoritma oluşturulmuştur. Bu algoritmaya ait MATLAB programında bir yazılım oluşturulmuştur. Elde edilen algoritma ve buna ait yazılım ile örnek bir güç sistemi modeli üzerinde kısa devre hata analizleri yapılmıştır.

Tez giriş bölümü (birinci bölüm) dahil altı bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde simetrik bileşenler yöntemi sunulmuştur. Üçüncü bölümde elektrik güç sistemlerinde kısa devre hata modeli verilmiştir. Dördüncü bölümde güç sistemlerinde karşılaşılan kısa devre hata türleri ve analizleri sunulmuştur. Beşinci bölümde güç sistemlerinde

karşılaşılan kısa devre hata analizlerini yapan algoritma ile beraber bu algoritmanın örnek güç sistemi modeline uygulanması verilmiştir. Altıncı bölümde ise sonuçlar ve tartışma sunulmuştur.



BÖLÜM 2. SİMETRİLİ BİLEŞENLER YÖNTEMİ

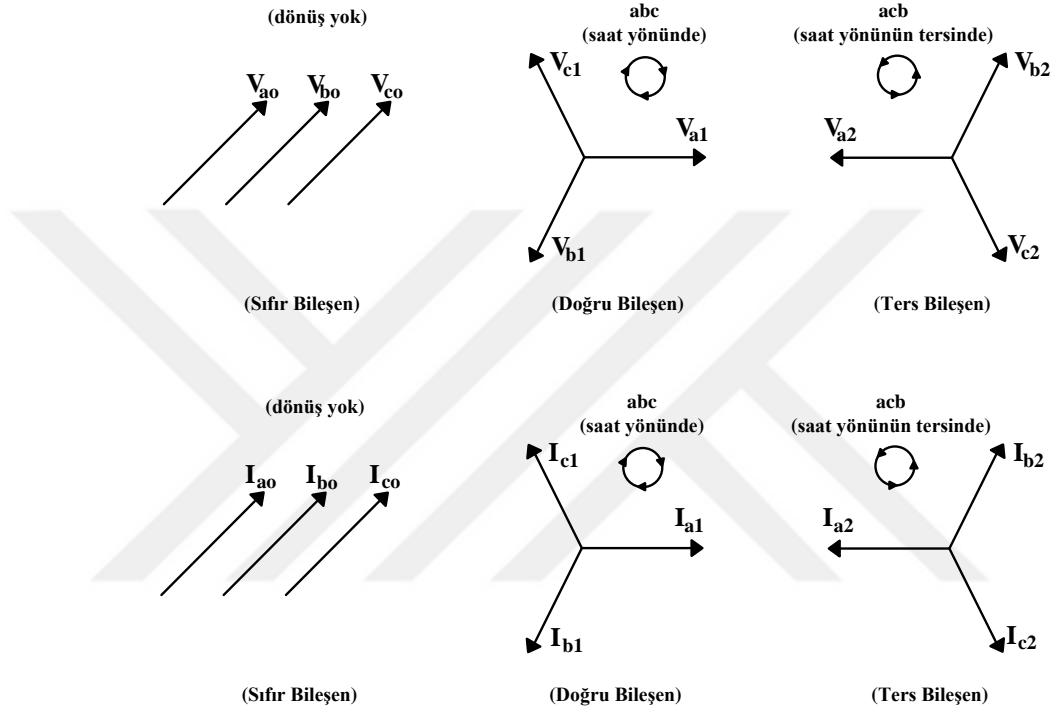
Bu bölümde, elektrik güç sistemlerinde kısa devre analizinde oldukça yararlı olan simetrik bileşenler yöntemi verilmiştir.

Fortescue tarafından bulunan ve literatüre Fortescue'nun simetrik bileşenler metodu olarak geçen yöntem çok fazlı sistemlerin basitleştirilerek incelenmesi için geliştirilmiştir ve genellikle kısaca “simetrik bileşenler” yöntemi olarak adlandırılmaktadır (Furfari ve Brittain, 2002). Bu yöntem özellikle uygulamada üç fazlı sistemlerin bulunması sebebiyle üç fazlı sistemlere uygulanarak elektrik güç sistemlerinin analizinde oldukça kolaylık sağlamaktadır.

Simetrik bileşenler yöntemi üç fazlı sistemlere uygulandığında üç adet bileşen (sıfır, doğru ve ters) devre elde edilir. Üç fazlı sistem dengeli ise elde edilen bileşen devreler arasında kuplaj bulunmaz, birbirinden bağımsızdır. Şayet üç fazlı sistem dengesiz ise, bileşen devreler birbirinden bağımsız olamazlar. Fakat yine de tüm sistem üç adet bileşen devreye ayrıştırıldığından sistemin analizi kolaylaşır (Huang et al, 2015; Seiphethlo ve Rens, 2012; Kang ve Liao, 2012).

Sıfır bileşen devreye ait vektörler arasında faz farkı bulunmaz (Costa et al, 2011). Doğru (pozitif) ve ters (negatif) bileşen devrelere ait vektörler arasında 120° faz farkı bulunur. Doğru bileşen devre vektörlerinin dönüş yönü pozitifdir. Ters bileşen devre vektörlerinin dönüş yönü ise doğru bileşen devre vektörlerinden farklı olarak dönüş yönü negatiftir (Costa et al, 2011; Xiaoning et al, 2008). Literatürdeki genel gösterime uyarak sıfır bileşen “0”, doğru bileşen “1” ve ters bileşen “2” indisi ile gösterilebilir. Şekil 2.1.'de sıfır, doğru ve ters bileşen devrelere ait gerilim ve akım fazörleri gösterimi verilmiştir. Şekil 2.1.'de a, b ve c üç fazlı sisteme ait fazları göstermektedir.

Simetrik bileşen gösteriminde üç fazlı gerçek sisteme ilişkin a, b ve c fazlarına ait gerilim ve akım fazörleri, Şekil 2.1.'de (Paap, 2000) verilen sıfır, doğru ve ters bileşen fazörleri kullanılarak elde edilebilir. "a" fazı referans alındığında, gösterim kolaylığı açısından V_{ao} , V_{a1} , V_{a2} gerilim fazörleri yerine V_o , V_1 , V_2 fazörleri, I_{ao} , I_{a1} , I_{a2} gerilim fazörleri yerine I_o , I_1 , I_2 fazörleri yazılabilir.



Şekil 2.1. Simetrik bileşen devrelere ait gerilim ve akım fazörü gösterimi

$$a = 1 \angle 120^\circ \quad (2.1)$$

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ \quad (2.2)$$

Eşitlik (2.1) ve (2.2) verilen operatörlerden ve Şekil 2.1.'deki simetrik bileşen fazör gösterimlerinden faydalanarak a, b ve c fazlarına ait gerilim fazörleri için aşağıdaki eşitlik elde edilir (Han, 1982):

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_o \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

(2.3)

Eşitlik (2.3) açılırsa aşağıdaki eşitlikler elde edilir:

$$V_a = V_o + V_1 + V_2 \quad (2.4)$$

$$V_b = V_o + a^2V_1 + aV_2 \quad (2.5)$$

$$V_c = V_o + aV_1 + a^2V_2 \quad (2.6)$$

Eşitlik (2.3)'ten referans alınan “a” fazına ait sıfır, doğru ve ters bileşen gerilim fazörleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{bmatrix} V_o \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Eşitlik (2.7) açılırsa aşağıdaki eşitlikler elde edilir:

$$V_o = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \quad (2.8)$$

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (2.9)$$

$$V_2 = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (2.10)$$

Benzer şekilde Eşitlik (2.1) ve (2.2) verilen operatörlerden ve Şekil 2.1.'deki simetrik bileşen fazör gösterimlerinden faydalanarak a, b ve c fazlarına ait akım fazörleri için aşağıdaki eşitlik elde edilir (Krause, 1985):

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_o \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Eşitlik (2.11) açılırsa aşağıdaki eşitlikler elde edilir:

$$I_a = I_o + I_1 + I_2 \quad (2.12)$$

$$I_b = I_o + a^2 I_1 + a I_2 \quad (2.13)$$

$$I_c = I_o + a I_1 + a^2 I_2 \quad (2.14)$$

Eşitlik (2.11)'den referans alınan “a” fazına ait sıfır, doğru ve ters bileşen akım fazörleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{bmatrix} I_o \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Eşitlik (2.15) açılırsa aşağıdaki eşitlikler elde edilir:

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

(2.16)

$$I_1 = \frac{1}{3}(I_a + a I_b + a^2 I_c) \quad (2.17)$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(I_a + a^2 I_b + a I_c) \quad (2.18)$$

Yıldız bağıli sistemlerde nötrden akan akımın tüm faz akımlarının toplamı olduğu hatırlanırsa, nötr akımı için Eşitlik (2.16)-(2.18) kullanılarak;

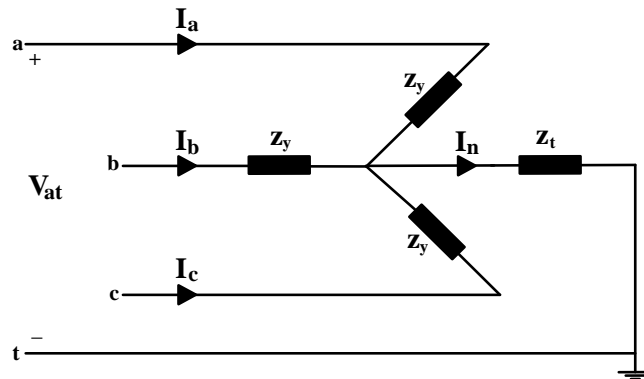
$$I_n = I_a + I_b + I_c = 3I_o \quad (2.19)$$

eşitliği elde edilir.

Eşitlik (2.19) dan görüldüğü üzere, yıldız bağıli sistemlerde nötr hattından akan akım sıfır bileşen akan akım değeriğinin üç katıdır. Dengeli üç fazlı yıldız bağıli sistemlerde I_n nötr akımı sıfır olduğuna göre, dengeli yıldız bağıli sistemlerde sıfır bileşen devrelerde akım akmayacağı açıktır. Benzer mantıkla, yıldız noktası direk ya da empedans üzerinden toprakla teması olmayan yıldız bağıli sistemlerde ve üçgen bağıli sistemlerde I_n nötr akımı olmadığından, bu tür sistemlere ait sıfır bileşen devrelerinden akım akmaz.

2.1. Empedans Yüklere Simetrik Bileşen Devreleri

Nötr noktası bir z_t empedansı üzerinden topraklanmış dengeli yıldız bağıli bir yük empedansı Şekil 2.2.'de verilmiştir (Glover et al, 2012).



Şekil 2.2. Dengeli yıldız bağıli empedans yükü gösterimi

Şekil 2.2.'den yüke ait fazlar ile toprak arasındaki faz-toprak gerilimleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$V_{at} = z_y I_a + z_t I_n = z_y I_a + z_t (I_a + I_b + I_c) = (z_y + z_t) I_a + z_t I_b + z_t I_c \quad (2.20)$$

$$V_{bt} = z_y I_b + z_t I_n = z_y I_b + z_t (I_a + I_b + I_c) = z_t I_a + (z_y + z_t) I_b + z_t I_c \quad (2.21)$$

$$V_{ct} = z_y I_c + z_t I_n = z_y I_c + z_t (I_a + I_b + I_c) = z_t I_a + z_t I_b + (z_y + z_t) I_c \quad (2.22)$$

Eşitlik (2.20)-(2.22)'deki ifadeler matris formunda aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} V_{at} \\ V_{bt} \\ V_{ct} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (z_y + z_t) & z_t & z_t \\ z_t & (z_y + z_t) & z_t \\ z_t & z_t & (z_y + z_t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Eşitlik (2.23) ile gerçek faz gerilimleri ve faz akımları arasındaki ilişki genel olarak aşağıdaki gibi matrisel formda gösterilebilir:

$$[V_F] = [z_F][I_F] \quad (2.24)$$

Benzer mantıkla gerçek faz gerilimleri ve faz akımlarına ait simetrik bileşen değerleri arasındaki ilişki genel olarak aşağıdaki gibi matrisel formda yazılabilir:

$$[V_S] = [z_S][I_S] \quad (2.25)$$

Daha önce detayları verilen simetrik bileşenler yönteminde kullanılan gerçek değerler ile simetrik bileşen değerleri arasındaki dönüşüm eşitliklerinden aşağıdaki dönüşüm matrisleri elde edilir:

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$[A]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Eşitlik (2.3), (2.7), (2.24) ve (2.25) ile verilen denklemler kullanılarak gerçek faz gerilim ve akımları ile simetrik bileşen faz akım ve gerilimleri arasındaki ilişki aşağıdaki gibi elde edilir:

$$[A][V_s] = [z_F][A][I_s] \quad (2.28)$$

Eşitlik (2.28)'in her iki tarafı Eşitlik (2.27) ile çarpılırsa, faz gerilim ve akımlarına ait simetrik bileşenler arasındaki ilişki aşağıdaki gibi elde edilir:

$$[V_s] = ([A]^{-1}[z_F][A])[I_s] \quad (2.29)$$

Eşitlik (2.25) ve (2.29)'dan dengeli yıldız bağlı empedans yüküne ait simetrik bileşen değerleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$[z_s] = [A]^{-1}[z_F][A] \quad (2.30)$$

Eşitlik (2.30) açılırsa;

$$[z_s] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (z_y + z_t) & z_t & z_t \\ z_t & (z_y + z_t) & z_t \\ z_t & z_t & (z_y + z_t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$[z_S] = \begin{bmatrix} (z_y + 3z_t) & 0 & 0 \\ 0 & z_y & 0 \\ 0 & 0 & z_y \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

dengeli yıldız bağlı empedans yükünün simetrik bileşen değerleri matrisi $[z_S]$ elde edilir. Eşitlik (2.32) deki matrisin ana köşegen dışındaki elemanların sıfır değerinde olması, dengeli yıldız bağlı empedans yüküne ait sıfır, doğru ve ters bileşen devreleri arasında bir kuplaj olmadığını dolayısıyla simetrik bileşen devrelerinin birbirinden bağımsız olduğunu göstermektedir. Eşitlik (2.32), Eşitlik (2.25)'te kullanılırsa gerçek faz gerilim ve akımlarına ait simetrik bileşen değerleri arasındaki ilişki aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{bmatrix} V_o \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (z_y + 3z_t) & 0 & 0 \\ 0 & z_y & 0 \\ 0 & 0 & z_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_o \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Eşitlik (2.33) açılırsa aşağıdaki eşitlikler elde edilir:

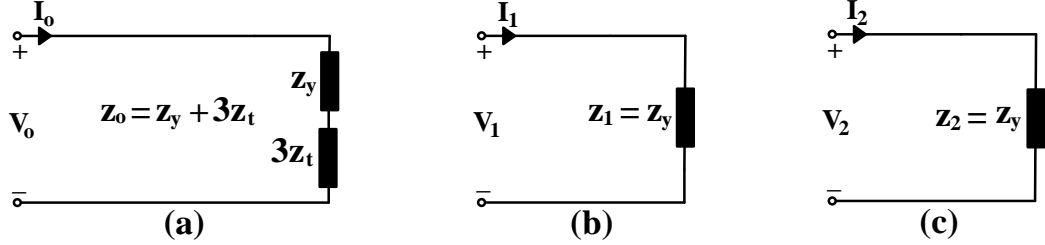
$$V_o = (z_y + 3z_t)I_o = z_o I_o \quad (2.34)$$

$$V_1 = z_y I_1 = z_1 I_1 \quad (2.35)$$

$$V_2 = z_y I_2 = z_2 I_2 \quad (2.36)$$

Eşitlik (2.34)-(2.36)'dan görüldüğü üzere sıfır, doğru ve ters bileşen devreleri arasında hiç bir bağlantı yoktur. Bununla beraber, doğru ve ters bileşen devrelerinde toprak noktasına bağlı z_t empedansının hiçbir etkisi yoktur. Sıfır bileşen devrede ise, z_o eşdeğer sıfır bileşen devre empedansı, z_y yıldız bağlı empedans yüküne ilaveten toprak

noktasına bağlı z_t empedansının 3 katından oluşmaktadır. Dengeli yıldız bağlı empedans yükünün simetrik bileşen devreleri Şekil 2.3.'te verilmiştir (Arifoglu, 2002).

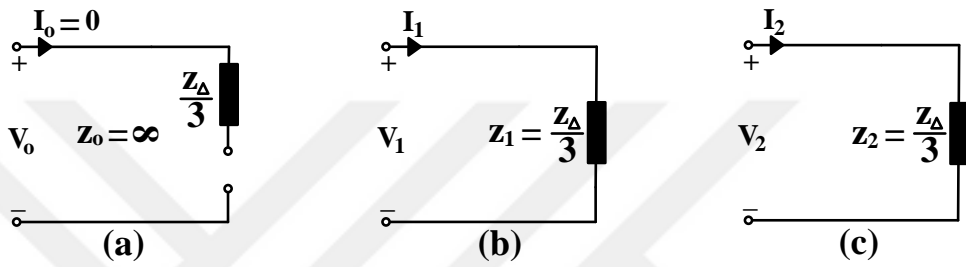


Şekil 2.3. Dengeli yıldız bağlı empedans yükünün simetrik bileşen devreleri: (a) sıfır bileşen devre, (b) doğru bileşen devre, (c) ters bileşen devre

Şekil 2.3.(a)'dan görüldüğü üzere sıfır bileşen devredeki eşdeğer toprak empedansı olan $3z_t$ empedansı üzerindeki gerilim düşümü $I_o(3z_t)$ değerindedir. Şekil 2.2.'deki gerçek sistemden görüleceği toprak empedansı z_t üzerindeki gerilim düşümü $I_n z_t$ değerindedir. Eşitlik (2.19)'da ispatlandığı üzere $I_n = 3I_o$ olduğu için toprak empedansı z_t üzerindeki gerilim düşümü $3I_o z_t$ değerine eşit olur ve böylelikle Şekil 2.3.(a)'daki eşdeğer toprak empedansı üzerindeki gerilim düşümünün doğruluğu ispatlanmış olmaktadır.

Dengeli yıldız bağlı empedans yükü için yapılan yukarıdaki analizlerden, nötr noktasının toprak ile teması olmayan veya nötr noktası direk topraklanmış dengeli yıldız bağlı empedans yükü ile dengeli üçgen bağlı empedans yükü için simetrik bileşen devreler kolayca elde edilebilir. Dengeli yıldız bağlı empedans yükünün nötr noktasının toprak ile bağlantısı olmadığına $z_t = \infty$ değerini alır, dolayısıyla 2.3(a)'daki $3z_t$ empedansı açık devre olur. Bu durumda sıfır bileşen devreden akım akmaz. Şayet nötr noktası direk topraklanırsa $z_t = 0$ olacağından 2.3(a)'daki $3z_t$ empedansı sıfır değerini alır, yani bu empedans kısa devre olur. Doğru ve ters bileşen devrelerde nötr noktası ile toprak noktası arasındaki empedans durumunun bir etkisi bulunmadığından, Şekil 2.3.(b) ve 2.3.(c)'deki doğru ve ters bileşen devre yapıları, nötr noktası toprakla teması olmayan ya da direk temaslı yıldız bağlı empedans yükü için aynen geçerli olmaktadır.

Dengeli üçgen bağlı empedans yükü için üçgen-yıldız dönüşümü yaparak yıldız bağlantı için yapılan analizden faydalanılabilir. z_{Δ} empedans yükü üçgen-yıldız dönüşümü sonunda $z_{\Delta}/3$ değerini alır. Üçgen bağlantıda nötr noktası olmadığından nötr-toprak arası eşdeğeri açık devre olur. Dolayısıyla üçgen bağlantıda sıfır bileşen devre açık devre olur ve sıfır bileşen akım akamaz. Şekil 2.4.'te dengeli üçgen bağlı empedans yükünün simetrik bileşen eşdeğer devreleri verilmiştir (Glover et al, 2012).

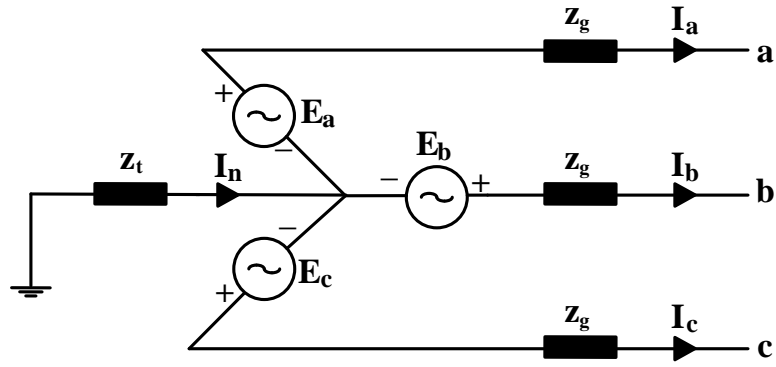


Şekil 2.4. Dengeli üçgen bağlı empedans yükünün simetrik bileşen devreleri: (a) sıfır bileşen devre, (b) doğru bileşen devre, (c) ters bileşen devre

2.2. Dönen Makinaların Simetrik Bileşen Devreleri

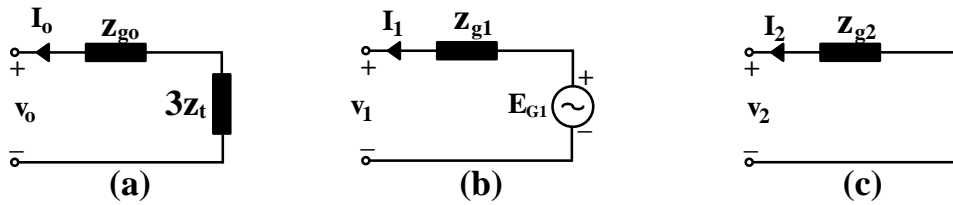
Elektrik güç sistemlerinde sistemi besleyen senkron jeneratörler ile yük olarak kullanılan senkron ve asenkron motorlar, güç sisteminin analizinde önemli yer teşkil eden dönen makinalardır.

Senkron jeneratörler yıldız bağlı olarak üretilirler. Nötr noktası bir empedans üzerinden topraklanmış yıldız bağlı bir senkron jeneratörün eşdeğer devresi Şekil 2.5.'te verilmiştir (Arifoglu, 2002).



Şekil 2.5. Yıldız bağlı senkron jeneratör eşdeğer devresi

Şekil 2.5.'te, E_a , E_b ve E_c jeneratörde endüklenen iç gerilimleri, I_a , I_b ve I_c jeneratör faz akımlarını, z_t topraklama empedansını ve z_g ise jeneratöre ait stator sargı empedansını göstermektedir. Senkron jeneratörler dengeli gerilim üretecek şekilde tasarlandıklarından E_a , E_b ve E_c faz gerilimleri dengelidir. Dolayısıyla senkron jeneratör simetrik bileşen devrelerinde sadece doğru bileşen devresinde kaynak bulunur ve bu kaynak gerilim değeri jeneratör iç gerilim değerine eşittir (Glover et al, 2012). Yıldız bağlı senkron jeneratöre ait eşdeğer simetrik bileşen devreleri Şekil 2.6.'da verilmiştir (Arifoglu, 2002).



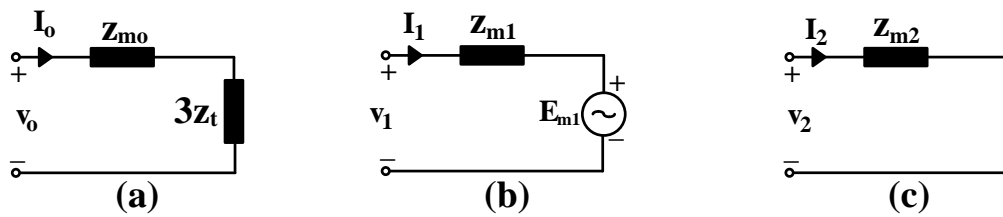
Şekil 2.6. Yıldız bağlı senkron jeneratör eşdeğer simetrik bileşen devreleri: (a) sıfır bileşen devre, (b) doğru bileşen devre, (c) ters bileşen devre

Senkron jeneratörün statorunda akan doğru bileşen devre üç fazlı dengeli akımları pozitif yönlü yani doğru olduğundan, bu akımların ürettiği manyetik alanın yönü rotor ile aynı yöndedir, ayrıca rotor hızında olduğundan rotora göre rölatif hızı sıfırdır. Bu sebeple stator akısının büyük kısmı rotora ulaştığından doğru bileşen devre eşdeğer empedansı z_{g1} büyük bir değer sahiptir. Bu empedans sürekli çalışmada senkron empedans olarak adlandırılır.

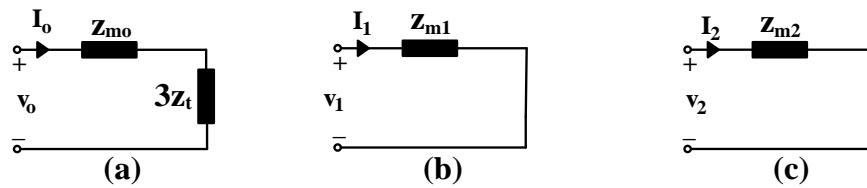
Senkron jeneratörün statorunda ters yönlü yani negatif yönlü akan ters bileşen devre üç fazlı dengeli akımların oluşturduğu manyetik alanın yönü rotor yönüne terstir. Bu ters yönlü ve hızı rotor hızında oluşan manyetik alanın rotora göre rölatif hızının iki katı olur. Bu sebeple stator akısının büyük bir kısmı rotora ulaşamadığından ters bileşen devre eşdeğer empedansı z_{g2} değeri z_{g1} değerine göre daha küçük olur.

Senkron jeneratörün statorunda akan sıfır bileşen devre akımları aynı genlik ve açıda olduğundan, bu akımlar tarafından statorda üretilen manyetik alan değeri sıfır olmaktadır. Bu sebeple sıfır bileşen devre eşdeğer empedansı z_{g0} değeri çok küçüktür ve bu değer z_{g1} ve z_{g2} değerinden daha küçüktür.

Senkron jeneratöre ait simetrik bileşen devre analizinden faydalanarak senkron motor ve asenkron motor için simetrik bileşen devreler elde edilebilir. Senkron motor ile senkron jeneratör temelde aynı yapıya sahip olup aralarındaki tek fark enerji yönünün ters olmasıdır. Dolayısıyla Şekil 2.5.'te senkron jeneratör için verilen eşdeğer devredeki faz akım yönleri senkron motorda makinaya doğru olmaktadır. Asenkron motorda ise rotorda manyetik akı üreten bir doğru akım kaynağı bulunmadığından, asenkron motor doğru bileşen devresinde kaynak bulunmaz. Senkron motor ve asenkron motor simetrik bileşen devreleri sırasıyla Şekil 2.7. ve Şekil 2.8.'de verilmiştir (Glover et al, 2012).



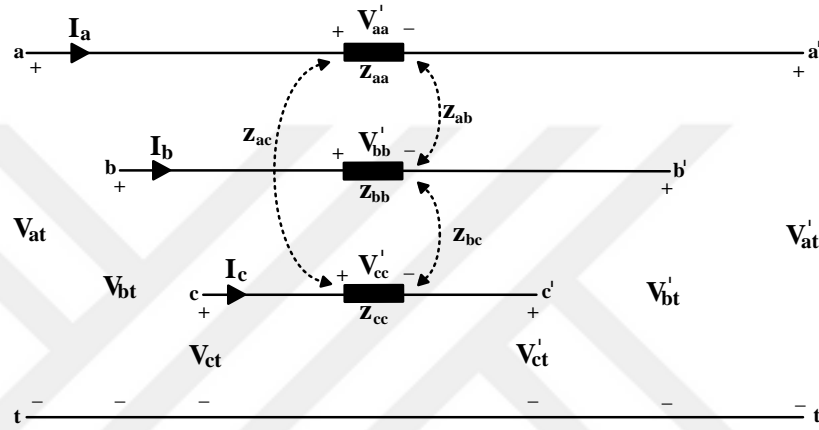
Şekil 2.7. Üç fazlı senkron motor eşdeğer simetrik bileşen devreleri: (a) sıfır bileşen devre, (b) doğru bileşen devre, (c) ters bileşen devre



Şekil 2.8. Üç fazlı asenkron motor eşdeğer simetrik bileşen devreleri: (a) sıfır bileşen devre, (b) doğru bileşen devre, (c) ters bileşen devre

2.3. Seri Empedansların Simetrik Bileşen Devreleri

Üç fazlı bir elektrik güç sistemine ait üç fazlı bir iletim hattının genel eşdeğer devresi Şekil 2.9.'da verilmiştir (Arifoglu, 2002). Şekil 2.9.'da verilen devre gösteriminde faz-toprak gerilimleri ve hat parametrelerinden yararlanılarak iletim hattının simetrik bileşen devreleri elde edilebilir.



Şekil 2.9. Üç fazlı iletim hattının eşdeğer devresi.

Şekil 2.9.'da verilen z_{aa} , z_{bb} ve z_{cc} empedansları sırasıyla a, b ve c fazlarına ait seri iletim hattının self empedans değerlerini göstermektedir. z_{ab} , z_{bc} ve z_{ac} empedansları ise a, b ve c fazları arasında manyetik etki sebebiyle oluşan kuplaj (ortak) empedanslarını göstermektedir. Şekil 2.9.'dan gerilim, akım ve hat parametreleri arasındaki ilişki aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{bmatrix} V_{at} - V'_{at} \\ V_{bt} - V'_{bt} \\ V_{ct} - V'_{ct} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V'_{aa} \\ V'_{bb} \\ V'_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ab} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ac} & z_{bc} & z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Eşitlik (2.37) matrisel formda daha genel olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$[V_G] - [V'_G] = [z_G][I_G] \quad (2.38)$$

Eşitlik (2.38)'de "G" indisi Şekil 2.9.'da verilen gerçek eşdeğer devre büyüklüklerini ifade etmektedir. Şekil 2.9.'daki gerçek eşdeğer devre büyüklüklerine ait simetrik bileşen değerleri Eşitlik (2.38)'deki formattan faydalanarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$[V_s] - [V'_s] = [z_s][I_s] \quad (2.39)$$

Eşitlik (2.39)'da "S" indisi Şekil 2.9.'da verilen gerçek eşdeğer devre büyüklüklerinin simetrik bileşen eşdeğerlerini ifade etmektedir. Gerilim ve akım büyüklüklerinin gerçek ve simetrik bileşen değerleri arasındaki ilişkiyi veren Eşitlik (2.7), (2.11) ve (2.26) kullanılarak, Eşitlik (2.38) aşağıdaki gibi düzenlenebilir:

$$[A][V_s] - [A][V'_s] = [z_G][A][I_s] \quad (2.40)$$

Eşitlik (2.40) her iki taraftan $[A]^{-1}$ ile çarpılarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$[V_s] - [V'_s] = [A]^{-1}[z_G][A][I_s] \quad (2.41)$$

Eşitlik (2.39) ve (2.41)'den üç fazlı iletim hattı simetrik bileşen değerlerine ait matris aşağıdaki gibi elde edilir:

$$[z_s] = [A]^{-1}[z_G][A] \quad (2.42)$$

Üç fazlı iletim hattının dengeli olması durumunda;

$$(z_{aa} = z_{aa} = z_{aa}) \quad \& \quad (z_{ab} = z_{bc} = z_{ac}) \quad (2.43)$$

eşitliği elde edilir. Bu durumda Eşitlik (2.42) ile verilen ifade aşağıdaki gibi olur:

$$[z_s] = \begin{bmatrix} z_o & 0 & 0 \\ 0 & z_1 & 0 \\ 0 & 0 & z_2 \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

Eşitlik (2.44)'ten dengeli üç fazlı iletim hattı için elde edilen simetrik bileşen değerden görüldüğü üzere, ana köşegen dışındaki elemanlar sıfır değerindedir. Bu durum dengeli üç fazlı iletim hattına ait simetrik bileşen devrelerinin birbirinden bağımsız olduğunu göstermektedir. Eşitlik (2.44)'te verilen simetrik bileşen eşdeğer empedans matrisinde, dengeli üç fazlı iletim hattına ait simetrik bileşen empedans değerleri aşağıdaki gibidir:

$$z_o = z_{aa} + 2z_{ab} \quad (2.45)$$

$$z_1 = z_2 = z_{aa} - z_{bb} \quad (2.46)$$

Eşitlik (2.45) ve (2.46)'dan görüldüğü üzere, dengeli üç fazlı bir iletim hattında doğru ve ters bileşen empedans değerleri eşit, sıfır bileşen empedans değeri ise farklıdır. Ayrıca sıfır bileşen empedans değerinin doğru ve ters bileşen değerinden daha büyük olduğu görülmektedir. Eşitlik (2.39), dengeli üç fazlı iletim hattı için açılırsa, sıfır, doğru ve ters bileşen devrelere ait aşağıdaki eşitlikler elde edilir:

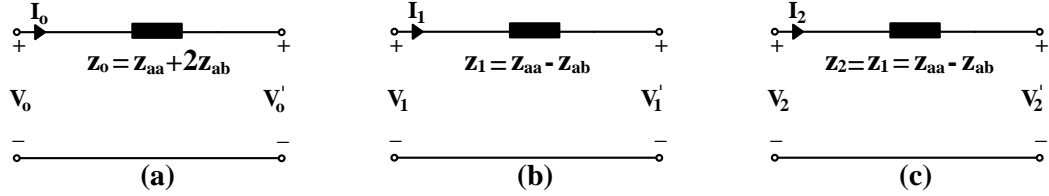
$$V_o - V_o' = z_o I_o \quad (2.47)$$

$$V_1 - V_1' = z_1 I_1 \quad (2.48)$$

$$V_2 - V_2' = z_2 I_2 \quad (2.49)$$

Eşitlik (2.47)-(2.49)'dan da görüleceği üzere dengeli üç fazlı iletim hattına ait simetrik bileşen devrelerinin birbirinden bağımsız olduğu görülmektedir. İletim hattı

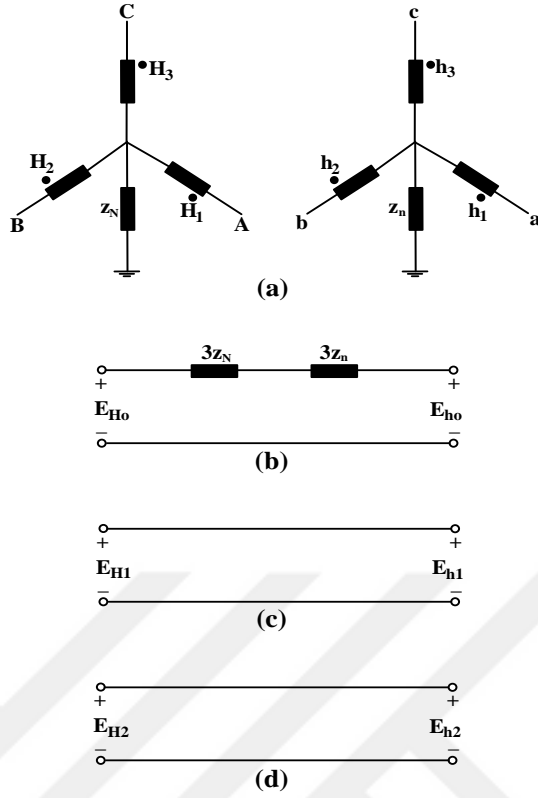
parametrelerinin dengeli olmaması durumunda simetrik bileşen devrelerinin birbirinden bağımsız olmasının mümkün olmadığı açıktır. Eşitlik (2.47)-(2.49)'dan dengeli üç fazlı iletim hattına ait simetrik bileşen devreleri Şekil 2.10.'daki gibi verilebilir (Glover et al, 2012):



Şekil 2.10. Dengeli iletim hattının simetrik bileşen devreleri: (a) sıfır bileşen devre, (b) doğru bileşen devre, (c) ters bileşen devre

2.4. Birim Değerler Cinsinden Üç Fazlı İki Sargılı Transformatörün Simetrik Bileşen Devreleri

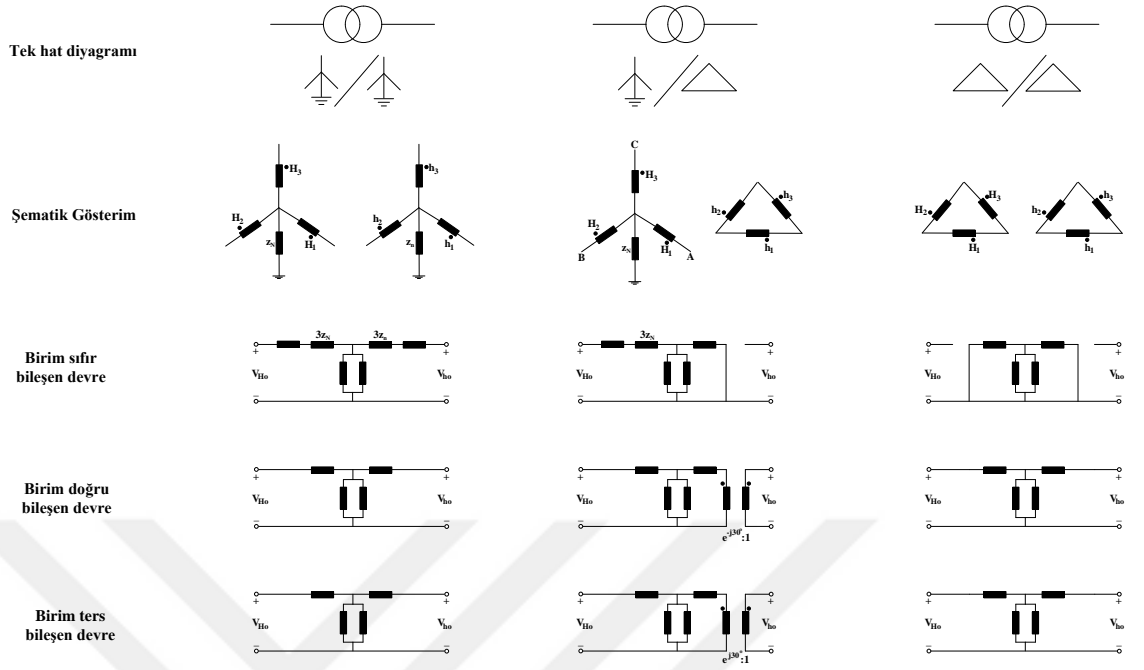
Elektrik güç sistemlerinde transformatörler dönmeyen makinalar olarak önemli bir yer teşkil eder. Üç fazlı elektrik güç sistemlerinde farklı bağlama türlerinde iki sargılı transformatörler kullanılır. Şekil 2.11.(a)'da yıldız-yıldız bağlı üç fazlı iki sargılı ideal bir transformatörün şematik gösterimi verilmiştir. Bu transformatöre ait sıfır, doğru ve ters bileşen devreleri Şekil 2.11.(b), (c) ve (d)'de gösterilmiştir (Arifoglu, 2002).



Şekil 2.11. İdeal üç fazlı iki sargılı transformatörün birim değerler cinsinden simetrik bileşen eşdeğer devreleri: (a) şematik gösterim, (b) sıfır bileşen devre, (c) doğru bileşen devre, (d) ters bileşen devre

Şekil 2.11.'de "H" primer tarafı, "h" ise sekonder tarafı temsil etmektedir. Daha önceden yapılan analizlerde ispatlandığı üzere sıfır bileşen akım sadece nötr hattından aktığından, nötr-toprak arasında bulunan empedans değerleri sadece sıfır bileşen devrede bulunur ve bu empedans değerlerinin üç katı eşdeğer olarak sıfır bileşen devrede yer almaktadır. Birim değerler açısından primer ve sekonder akımları eşit olduğundan, primer ya da sekonder tarafta nötr noktalarından bir tanesinin toprakla bağlantısı olmaması durumunda sıfır bileşen akımı sıfır olacaktır ve sıfır bileşen devre toprak temassız nötr noktasından açık devre olmaktadır. İdeal transformatörde transformatör seri sargı empedansları ve şönt empedanslar ihmal edildiğinden Şekil 2.11.(b), (c) ve (d)'de verilen simetrik bileşen devrelerinde bu empedanslar gösterilmemiştir.

Yukarıda yapılan açıklamardan farklı bağlama yapılarında ve ideal olmayan gerçek üç fazlı iki sargılı transformatörler için şematik gösterim ve simetrik bileşen devreleri Şekil 2.12.'deki gibi gösterilebilir (Glover et al, 2012).



Şekil 2.12. Farklı bağlantı türleri için gerçek üç fazlı iki sargılı transformatörün birim değerler cinsinden simetrikli bileşen eşdeğer devreleri

BÖLÜM 3. ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE KISA DEVRE HATA MODELİ

Elektrik güç sistemlerinde karşılaşılabilecek her türlü kısa devre hata analizinin yapılabilmesi için, öncelikle güç sistemi için bir kısa devre hata modelinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu tespit genel olarak, güç sisteminin arıza öncesi çalışma koşulları ve arıza esnasında sistem parametrelerinde nelerin dikkate alınacağına bağlıdır. Bu bölümde, elektrik güç sistemlerinde yapılacak kısa devre analizinde göz önüne alınacak kısa devre hata modelinin detayları verilmiştir.

3.1. Kısa Devre Hesaplamalarında Kullanılan Kabuller

Literatürde elektrik güç sistemlerinde (enerji iletim sistemleri) yapılan kısa devre analizinde göz önüne alınan kabuller bu tez çalışmasında da kabul edilmiştir. Bu kabuller aşağıdaki gibi verilebilir (Glover et al, 2012):

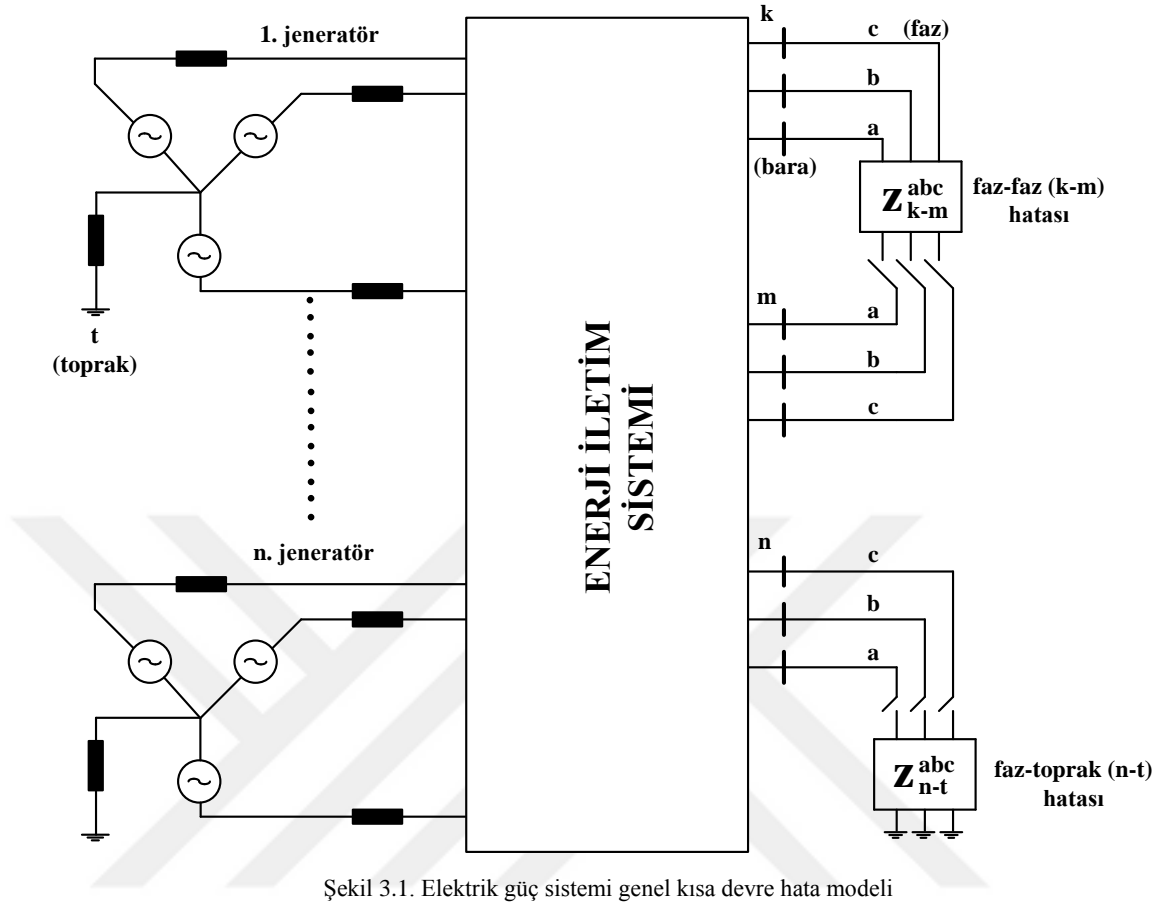
- İnceleme yapılan güç sistemi üç fazlı bir sistemdir.
- Kısa devre hatası öncesinde güç sistemi kararlı ve üç faz dengeli olarak çalışmaktadır. Bu sebeple kısa devre hatası öncesi sisteme ait simetrik bileşen devreleri (sıfır, doğru ve ters bileşen devreleri) birbirinden bağımsızdır. Üç faz kısa devre hatası gibi simetrik bir hata durumunda bileşen devreleri bağımsız olmaya devam eder. Ancak faz-faz kısa devresi, iki faz-toprak kısa devresi ve faz-toprak kısa devresi gibi simetrik olmayan hatalarda bileşen devreler hata noktasında birbirine bağlanırlar.
- Kısa devre hatası öncesi yük akımları oluşacak kısa devre akımlarına göre oldukça küçük olacağından, hata öncesi yük akımları kısa devre analizinde ihmal edilmiştir. Bu sebeple, hata öncesi tüm baralardaki gerilimler bütün makinaların iç gerilimlerine eşittir.

- Transformatörlerin sadece sargı reaktansları göz önüne alınmıştır. Bunlara ait sargı dirençleri ve şönt admitansları ihmal edilmiştir.
- İletim hatlarının sadece seri reaktans değerleri göz önüne alınmıştır. Bunlara ait seri dirençleri ve şönt admitansları ihmal edilmiştir.
- Senkron makinelerde stator direnci, kutup çıkıklığı ve doyma etkisi ihmal edilmiştir.
- Dönmeyen yüklerin empedansları ihmal edilmiştir.
- Yıldız-üçgen bağlı transformatörlerdeki faz kayması ihmal edilmiştir.
- 40 kW veya daha düşük endüksiyon makinaları göz önüne alınmamış veya senkron makinalar gibi gösterilmiştir.

Literatürde yapılan ve bu tezde kabul edilen yukarıdaki kabuller, kısa devre arıza analizinin yapılmasında kolaylık sağladığı için tercih edilmiştir. Bu kabullerin her zaman geçerli olamayacağı aşikardır. Örneğin, kısa devre hatası öncesi hatlardan akan yük akımları, dağıtım sistemlerinde ortaya çıkacak kısa devre akımlarına kıyasla ihmal edilemeyecek büyüklükte olabilir. Dolayısıyla dağıtım sistemlerinde yapılacak kısa devre hata analizinde hata öncesi yük akımlarının ihmal edilmesi görece olarak imkansız olabilir. Benzer şekilde dağıtım sistemlerindeki gerilim düzeyleri göz önüne alındığında, dağıtım hattı dirençleri ve dağıtım transformatörü sargı dirençleri, kısa devre akımlarını sınırlamada oldukça etkili olabilir. Bu sebeple dağıtım sistemlerinde yapılacak kısa devre hesaplamalarında bu direç değerlerinin ihmal edilmemesi yaklaşımına gidilebilir.

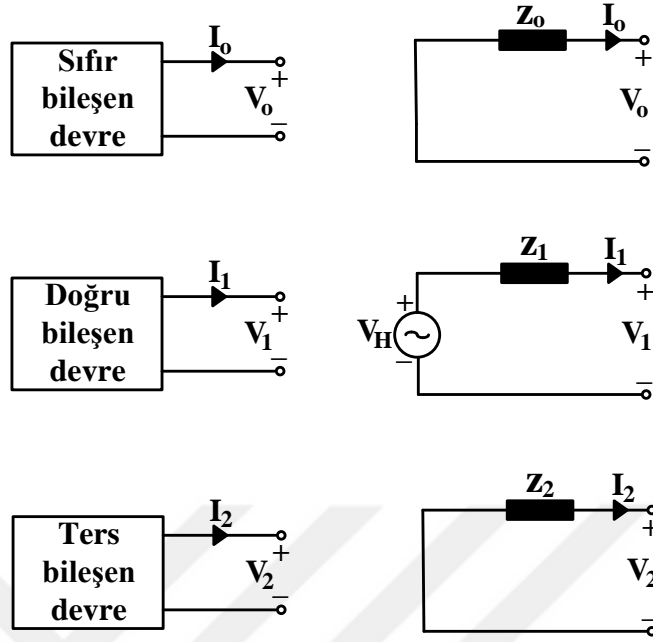
3.2. Kısa Devre Hata Modeli Eşdeğer Devresi

Elektrik güç sistemlerinin herhangi bir barasında oluşacak simetrik ya da simetrik olmayan bir kısa devre arızasının incelenebilmesi için, hata noktasından görülen Thevenin eşdeğer hata devresinin elde edilmesi analiz açısından oldukça önemlidir. Şekil 3.1.'de üç fazlı bir güç sisteminde oluşabilecek tüm hata türleri için genel hata modeli verilmiştir (Arifoglu, 2002).



Şekil 3.1. Elektrik güç sistemi genel kısa devre hata modeli

Güç sistemine ait herhangi bir barada kısa devre arızası olduğunda, bu baraya ait Şekil 3.2.'de simetrik bileşen devreleri olarak verilen Thevenin eşdeğer devreleri kullanılır. Bölüm 3.1'de bahsedildiği üzere, bu tez çalışmasında, üç faz dengeli güç sisteminde hata öncesi yük akımları ihmal edildiği için tüm baralardaki gerilimlerin değerleri senkron makinelerin iç gerilim değerlerine eşittir. Dolayısıyla hata noktasından görülen Thevenin eşdeğer gerilimi V_H , senkron makina iç gerilim değerine eşittir. Bununla beraber, güç sistemini besleyen senkron jeneratörler, üç faz dengeli gerilimler üretmek üzere tasarlandıklarından, senkron jeneratör üç faz gerilimlerine ait sıfır ve ters bileşen değerleri sıfırdır. Dolayısıyla, Şekil 3.2.'de verilen simetrik bileşen devrelerden görüldüğü üzere, hata noktasında sadece doğru bileşen eşdeğer devrede değeri senkron makina iç gerilim değerine eşit olan V_H değerinde kaynak bulunmakta, sıfır ve ters bileşen eşdeğer devrelerde kaynak bulunmamaktadır.



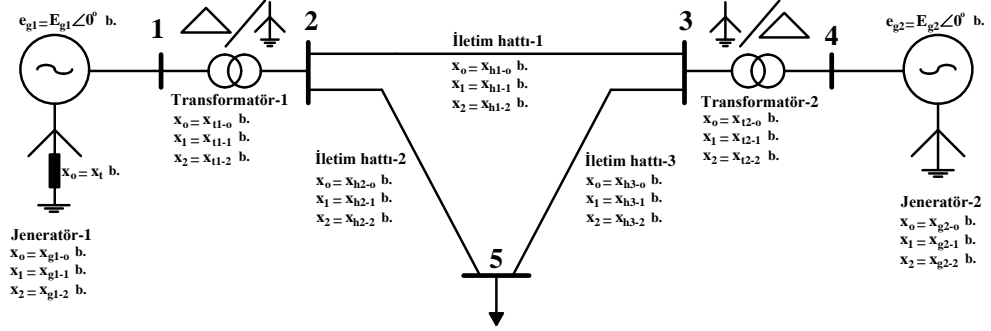
Şekil 3.2. Üç fazlı dengeli sistemde simetrik bileşen Thevenin eşdeğer devre gösterimi

Şekil 3.2.'de verilen simetrik Thevenin eşdeğer devrelerinde bulunan z_0 , z_1 ve z_2 empedansları sırasıyla kısa devre noktasından görülen Thevenin eşdeğer sıfır, doğru ve ters bileşen empedanslarını göstermektedir.

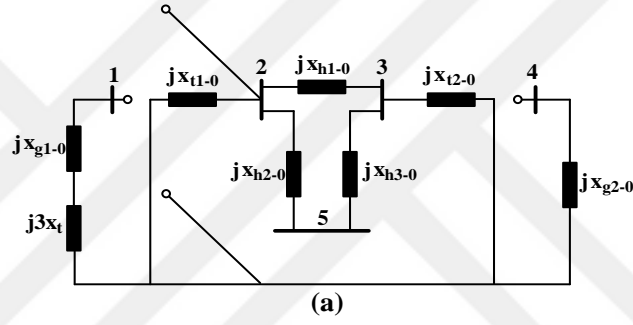
Şekil 3.2.'de verilen Thevenin eşdeğer devreleri, üç faz dengeli güç sistemlerinde herhangi bir baradan Bölüm 3.1'de kısa devre hata analizindeki kabuller göz önüne alındığında görülen kısa devre hatası öncesindeki Thevenin eşdeğer devreleridir. Kısa devre hatası öncesi güç sistemi dengeli çalıştığından bu simetrik bileşen devreleri birbirinden Şekil 3.2.'de gösterildiği gibi bağımsızdır. Herhangi bir barada simetrik kısa devre arızası olduğunda, simetrik eşdeğer devreler bağımsız olma durumunu korurlar. Ancak simetrik olmayan kısa devre hatalarında bu bileşen devreler hata noktasında arıza tipine göre birbirine bağlanırlar.

Şekil 3.3.'te verilen örnek bir güç sisteminin 2 nolu barasında bir hata olması durumunda, kısa devre analizinde kullanılacak 2 nolu baradan bakıldığında görülen simetrik bileşen devreleri Şekil 3.4.'te verilmiştir. Şekil 3.3. ve 3.4.'te verilen reaktans değerlerinde bulunan 0, 1 ve 2 indisleri sistemde bulunan elemanlara (jeneratör,

transformatör, iletim hattı, topraklama empedansı) ait sırasıyla sıfır, doğru ve ters bileşen reaktans değerlerini göstermektedir.

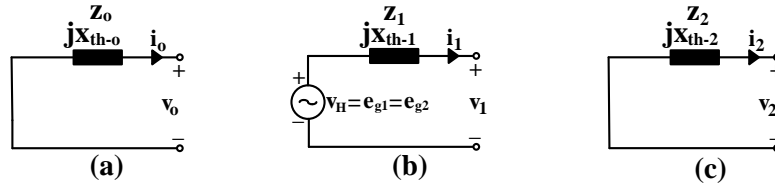


Şekil 3.3. Üç fazlı dengeli örnek bir sistem



Şekil 3.4. Şekil 3.3'te verilen üç fazlı dengeli örnek sisteme ait simetrik bileşen devreleri: (a) sıfır bileşen devre, (b) doğru bileşen devre, (c) ters bileşen devre

Şekil 3.4.'te verilen simetrlili bileşen devreleri, hatanın olduğu 2 nolu baradan bakıldığında görülen simetrlili Thevenin eşdeğer devrelerinin elde edilmesinde kullanılarak, Şekil 3.5.'te verilen simetrlili Thevenin eşdeğer devreleri elde edilir.



Şekil 3.5. Şekil 3.4'te verilen 2 nolu baradan görülen simetrlili bileşen devrelerinden elde edilen simetrlili Thevenin eşdeğer devreleri: (a) Thevenin sıfır bileşen eşdeğer devresi, (b) Thevenin doğru bileşen eşdeğer devresi, (c) Thevenin ters bileşen eşdeğer devre

Şekil 3.5.'te $z_0 = jx_{th-0}$, $z_1 = jx_{th-1}$ ve $z_2 = jx_{th-2}$ sırasıyla Şekil 3.4. (a), (b) ve (c)'de verilen simetrlili bileşen devrelerinde hatanın olduğu 2 nolu baradan görülen Thevenin eşdeğer empedans değerleridir. Bu Thevenin eşdeğer empedansları devreye bakarak kağıt üzerinde hesaplamak kolay olsada bilgisayar ortamında yazılım olarak hesaplama yapmak pek de pratik değildir. Çünkü kısa devre hatasının olduğu her farklı bara için eşdeğer empedans hesaplama için karşılaştırmalı bir algoritma oluşturulması gerekir. Gerçek uygulamalarda kısa devre analiz programlarının en kısa zamanda ve en az program boyutu ile kısa devre analizi tamamlamasının oldukça önemli olduğu göz önüne alınırsa, bu eşdeğer empedanslarının en kolay ve hızlı yoldan belirlenmesi gerekir.

Şekil 3.5.'te görülen sıfır, doğru ve ters bileşen Thevenin eşdeğer empedans değerleri, Şekil 3.4.'te verilen simetrlili bileşen devrelerine ait bara empedans matrislerine ait 2. köşegen eleman değerine, yani 2. satır 2. sütun eleman değerine eşittir. Dolayısıyla simetrlili bileşen devrelerine ait bara empedans matrisleri bir kere oluşturulduktan sonra arızanın olduğu herhangi bir baraya ait Thevenin eşdeğer empedans matrisleri hızlı ve kolay bir şekilde simetrlili bileşen bara empedans matrislerinden çekilebilir. Literatürde bara empedans matrisinin oluşturulması için farklı yöntemler bulunmaktadır. Bunlardan birincisi bara empedans matrisinin adım adım oluşturulma yöntemidir. İkinci yöntem ise bara admitans matrisinin tersinin alınarak bara empedans matrisinin oluşturulmasıdır. Bilindiği üzere, güç sistemlerinin her türlü analizinde bara admitans matrisleri oldukça

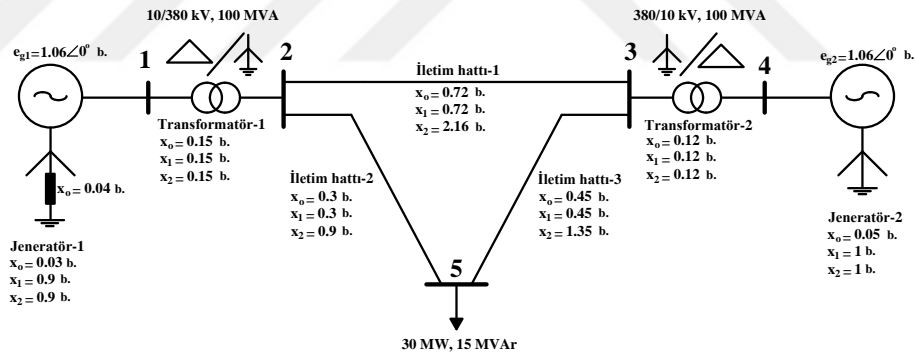
kullanışlı bir materyaldir ve kolay bir şekilde oluşturulabilir. Dolayısıyla, bir güç sistemine ait simetrik bileşen devrelere ait bara empedans matrisleri aşağıdaki gibi verilebilir:

$$z_{bara-o} = y_{bara-o}^{-1} \quad (3.1)$$

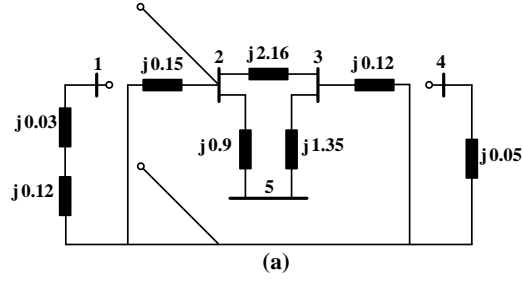
$$z_{bara-1} = y_{bara-1}^{-1} \quad (3.2)$$

$$z_{bara-2} = y_{bara-2}^{-1} \quad (3.3)$$

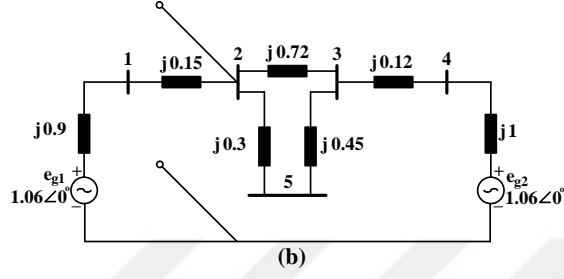
Şekil 3.3.'te verilen örnek güç sistemine ait sayısal bir örnek sistem Şekil 3.6.'da verilmiştir.



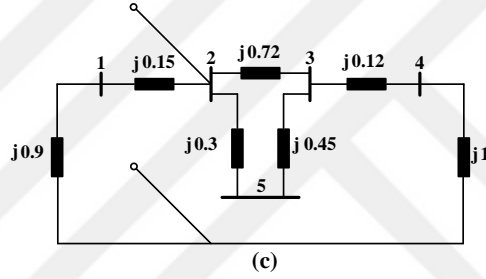
Şekil 3.6.'da verilen güç sistemine ait simetrik bileşen devreler Şekil 3.7.'de verildiği gibi olmaktadır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3.7. Şekil 3.6'da verilen örnek sayısal sisteme ait simetrik bileşen devreleri: (a) sıfır bileşen devre, (b) doğru bileşen devre, (c) ters bileşen devre

Şekil 3.6.'da verilen örnek sayısal güç sisteminin 2 nolu barasında bir kısa devre arızası olduğu kabul edilmektedir. 2 nolu baradan bakıldığında görülen Thevenin eşdeğer simetrik bileşen empedans değerleri Şekil 3.7.'deki simetrik bileşen devrelerinden aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$z_o = jx_{th-o} = \left\{ \left[(j0.9 + j1.35) // j2.16 \right] + j0.12 \right\} // j0.15 = j0.1336 \quad (3.4)$$

$$z_1 = jx_{th-1} = \left\{ \left[(j0.3 + j0.45) // j0.72 \right] + j0.12 + j1 \right\} // (j0.15 + j0.9) = j0.6155 \quad (3.5)$$

$$z_2 = jx_{th-2} = \left\{ \left[(j0.3 + j0.45) // j0.72 \right] + j0.12 + j1 \right\} // (j0.15 + j0.9) = j0.6155 \quad (3.6)$$

Eşitlik (3.4)-(3.6) ile elde edilen Thevenin eşdeğer empedans değerleri simetrik bileşen bara empedans matrislerinden de elde edilebilir. Şekil 3.7.'de verilen simetrik bileşen bara admitans matrisleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$y_{bara-o} = \begin{bmatrix} -j6.6667 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -j8.2407 & j0.4630 & 0 & j1.1111 \\ 0 & j0.4630 & -j9.5370 & 0 & j0.7407 \\ 0 & 0 & 0 & -j20 & 0 \\ 0 & j1.1111 & j0.7407 & 0 & -j1.8519 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$y_{bara-1} = \begin{bmatrix} -j7.7778 & j6.6667 & 0 & 0 & 0 \\ j6.6667 & -j11.3889 & j1.3889 & 0 & j3.3333 \\ 0 & j1.3889 & -j11.9444 & j8.3333 & j2.2222 \\ 0 & 0 & j8.3333 & -j9.3333 & 0 \\ 0 & j3.3333 & j2.2222 & 0 & -j5.5556 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$y_{bara-2} = \begin{bmatrix} -j7.7778 & j6.6667 & 0 & 0 & 0 \\ j6.6667 & -j11.3889 & j1.3889 & 0 & j3.3333 \\ 0 & j1.3889 & -j11.9444 & j8.3333 & j2.2222 \\ 0 & 0 & j8.3333 & -j9.3333 & 0 \\ 0 & j3.3333 & j2.2222 & 0 & -j5.5556 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Eşitlik (3.7)-(3.9)'dan Şekil 3.7.'de verilen simetrik bileşen devrelerine ait simetrik bileşen bara empedans matrisleri aşağıdaki gibi elde edilir:

$$z_{bara-o} = y_{bara-o}^{-1} \begin{bmatrix} j0.1500 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & j0.1336 & j0.0131 & 0 & j0.0854 \\ 0 & j0.0131 & j0.1095 & 0 & j0.0517 \\ 0 & 0 & 0 & j0.0500 & 0 \\ 0 & j0.0854 & j0.0517 & 0 & j0.6119 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$z_{bara-1} = y_{bara-1}^{-1} \begin{bmatrix} j0.5808 & j0.5276 & j0.3973 & j0.3547 & j0.4754 \\ j0.5276 & j0.6155 & j0.4635 & j0.4138 & j0.5547 \\ j0.3973 & j0.4635 & j0.6256 & j0.5586 & j0.5283 \\ j0.3547 & j0.4138 & j0.5586 & j0.6059 & j0.4717 \\ j0.4754 & j0.5547 & j0.5283 & j0.4717 & j0.7241 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$z_{bara-2} = y_{bara-2}^{-1} \begin{bmatrix} j0.5808 & j0.5276 & j0.3973 & j0.3547 & j0.4754 \\ j0.5276 & j0.6155 & j0.4635 & j0.4138 & j0.5547 \\ j0.3973 & j0.4635 & j0.6256 & j0.5586 & j0.5283 \\ j0.3547 & j0.4138 & j0.5586 & j0.6059 & j0.4717 \\ j0.4754 & j0.5547 & j0.5283 & j0.4717 & j0.7241 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

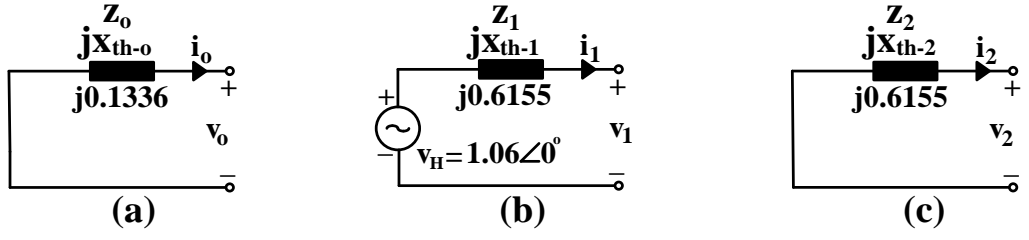
Eşitlik (3.10)-(3.12)'den 2 nolu baradan görülen simetrik bileşen Thevenin eşdeğer devresinde kullanılacak Thevenin eşdeğer simetrik bileşen empedans değerleri aşağıdaki gibi çekilebilir:

$$z_o = jx_{th-o} = z_{bara-o}(2,2) = j0.1336 \quad (3.13)$$

$$z_1 = jx_{th-1} = z_{bara-1}(2,2) = j0.6155 \quad (3.14)$$

$$z_2 = jx_{th-2} = z_{bara-2}(2,2) = j0.6155 \quad (3.15)$$

Eşitlik (3.4)-(3.6) ile elde edilen değerler ile Eşitlik (3.13)-(3.15) ile elde edilen değerlerin aynı olduğu, dolayısıyla güç sistemlerinde kısa devre hata analizi yapılacak baradan bakıldığında görülen eşdeğer simetrik bileşen empedans değerlerinin elde edilen bara empedans matrisi bara numarasına ait köşegen elemanına eşit olduğu ispatlanmıştır. Böylelikle Şekil 3.6.'da verilen örnek sayısal güç sisteminin 2 numaralı barasında bir kısa devre hatasında kullanılacak Thevenin eşdeğer simetrik bileşen devreleri Şekil 3.8.'deki gibi verilebilir.



Şekil 3.8. Şekil 3.6'da verilen 2 nolu baradan görülen simetrik bileşen devrelerinden elde edilen simetrik Thevenin eşdeğer devreleri: (a) Thevenin sıfır bileşen eşdeğer devresi, (b) Thevenin doğru bileşen eşdeğer devresi, (c) Thevenin ters bileşen eşdeğer devre

BÖLÜM 4. GÜÇ SİSTEMLERİNDE KISA DEVRE HATA TÜRLERİ

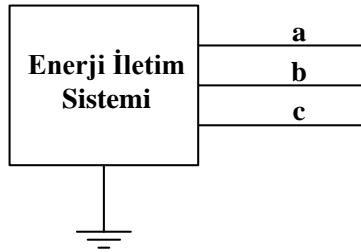
Bu bölümde elektrik güç sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan kısa devre hatalarının analizi yapılmıştır. Literatürde, arızanın oluşuna göre kısa devre hataları temelde simetrik ve simetrik olmayan arızalar olarak ikiye ayrılmaktadır. Simetrik ve simetrik olmayan arızaların analizinde bölüm 2’de detayları verilen simetrik bileşenler yöntemi ve bölüm 3’te verilen güç sistemi hata modelinden yararlanılmıştır.

4.1. Simetrik Arızalar

Üç fazlı bir güç sisteminde üç faz metalik kısa devre arızası simetrik bir arızadır. Üç faz kısa devresi simetrik olmasına rağmen, bu arızanın analizinde simetrik bileşenler yönteminin kullanılması oldukça yararlıdır.

4.1.1. Üç faz kısa devre arızası

Şekil 4.1.’de bir güç sisteminde oluşan metalik üç faz kısa devre arızası şematik olarak gösterilmiştir (Sallam, Malik, 2019, s. 1-624).



Şekil 4.1. Güç sisteminde üç faz kısa devre arızası gösterimi

Şekil 4.1.’de görüldüğü üzere güç sisteminin herhangi bir noktasında üç faz (a, b, c) arasında direk metalik bağlı bir kısa devre hatası olduğunda, bu noktadan bakıldığında

oluşan kısa devre arızası simetrik olmaktadır. Bu sebeple hata noktasında faz gerilimleri birbirine eşit ve sıfır olmaktadır.

$$V_a = V_b = V_c = 0 \quad (4.1)$$

Bölüm 2’de simetrik bileşenler yöntemi açıklanırken kullanılan yaklaşımlar burada uygulanarak “a” fazı referans alındığında bu faza ait simetrik bileşen gerilimleri Eşitlik (2.7) ve (4.1)’den aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{bmatrix} V_o \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

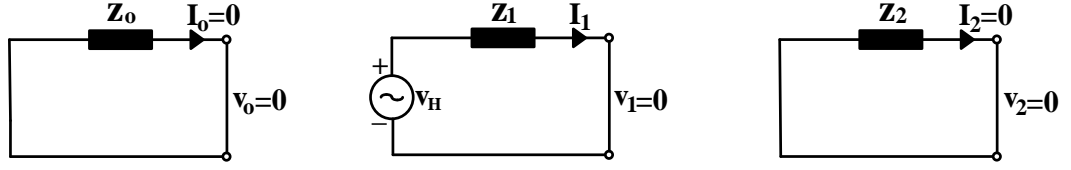
Güç sistemlerinde karşılanacak her türlü arıza durumunda kullanılabilen Şekil 3.2.’deki simetrik bileşen devre gösterimlerinden faydalanılabilir. Şekil 3.2.’den arıza noktasında simetrik bileşen değerler arasındaki genel ifade aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} V_o \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_H \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z_o & 0 & 0 \\ 0 & z_1 & 0 \\ 0 & 0 & z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_o \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Eşitlik (4.2)’deki sonuçlar Eşitlik (4.3)’te kullanılırsa simetrik bileşen akımlar aşağıdaki gibi bulunur:

$$\begin{bmatrix} I_o \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{V_H}{z_1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Eşitlik (4.4) ile elde edilen sonuçlar Şekil 3.2.’de kullanılırsa, üç faz kısa devresi için hata noktasında Şekil 4.2.’de verilen simetrik bileşen devre bağlantıları elde edilir (Arifoglu, 2002).



Şekil 4.2. Güç sisteminde üç faz kısa devre arızası simetrik bileşen devre bağlantıları

Eşitlik (4.4) ile Eşitlik (2.11) kullanılarak hata noktasında oluşan fazlara ait kısa devre akımları aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 0 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_o \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_H}{z_1} \\ a^2 \frac{V_H}{z_1} \\ a \frac{V_H}{z_1} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Güç sisteminde herhangi bir noktada oluşan arıza durumunda, arıza noktası dışındaki herhangi bir barada oluşan gerilimlere ait simetrik bileşen değerleri, Şekil 3.2.'den ve güç sistemi için elde edilen simetrik bileşen bara empedans matrislerinden faydalanılarak aşağıdaki gibi elde edilir (Arifoglu, 2002):

$$\begin{bmatrix} V_{o-k} \\ V_{1-k} \\ V_{2-k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ V_H \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z_{o-kn} & 0 & 0 \\ 0 & z_{1-kn} & 0 \\ 0 & 0 & z_{2-kn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{o-n} \\ I_{1-n} \\ I_{2-n} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Eşitlik (4.6)'da, "n" hatanın olduğu bara numarasını, "k" incelenmek istenen hata noktası haricindeki bara numarasını, z_{o-kn} güç sistemine ait sıfır bileşen bara empedans matrisinin k. satır n. sütun empedans elemanını, z_{1-kn} güç sistemine ait doğru bileşen bara empedans matrisinin k. satır n. sütun empedans elemanını ve z_{2-kn} güç sistemine ait ters bileşen bara empedans matrisinin k. satır n. sütun empedans elemanını

göstermektedir. Hata noktası haricindeki baraya ait gerçek faz gerilimleri, Eşitlik (4.6)'dan elde edilen simetrik bileşen gerilimleri Eşitlik (2.3)'te kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

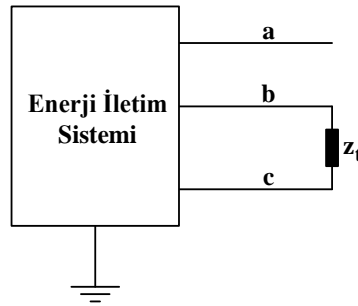
$$\begin{bmatrix} V_{a-k} \\ V_{b-k} \\ V_{c-k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{o-k} \\ V_{1-k} \\ V_{2-k} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

4.2. Simetrik Olmayan Arızalar

Üç fazlı bir güç sisteminde meydana gelen metalik veya arıza empedanslı faz-faz kısa devresi, iki faz-toprak kısa devresi ve faz-toprak kısa devresi simetrik olmayan arızalardır. Dengeli üç fazlı güç sisteminde oluşan simetrik olmayan bir arızanın oluşması durumunda kısa devre analizinde elde edilen simetrik bileşen devreleri bağımsız olamazlar ve hatanın türüne bağlı olarak arıza noktasında birbirine bağlanırlar.

4.2.1. Faz-faz kısa devresi (arıza empedanslı)

Şekil 4.3.'te bir güç sisteminde oluşan arıza empedanslı faz-faz kısa devre arızası şematik olarak gösterilmiştir (Choi et al, 2007).



Şekil 4.3. Güç sisteminde arıza empedanslı faz-faz kısa devre arızası gösterimi

Şekil 4.3.'teki şematik gösterimden kısa devre noktasında fazlara ait gerçek gerilim ve akım değerleri için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$V_b - V_c = z_t I_b \quad (4.8)$$

$$I_c = -I_b \quad (4.9)$$

$$I_a = 0 \quad (4.10)$$

“a” fazı referans alındığında bu faza ait simetrik bileşen akım değerleri Eşitlik (4.9) ve (4.10)’da verilen gerçek akım eşitliklerinden ve Eşitlik (2.13)-(2.15)’ten faydalanılarak aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{bmatrix} I_o \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{3}(a-a^2)I_b \\ \frac{1}{3}(a^2-a)I_b \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Eşitlik (4.11)’den simetrik bileşen akım değerleri için aşağıdaki eşitlikler elde edilir:

$$I_o = 0, \quad I_2 = -I_1 \quad (4.12)$$

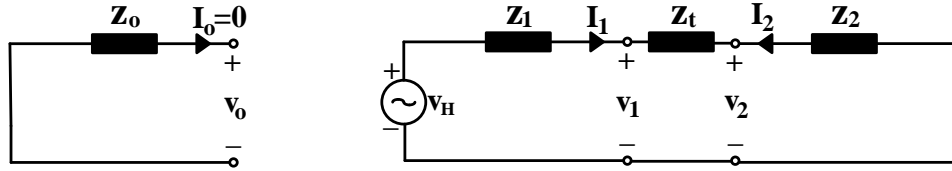
“a” fazı referans alındığında bu faza ait simetrik bileşen gerilim değerleri Eşitlik (4.8)’de verilen gerçek gerilim eşitliğinden ve Eşitlik (2.5)-(2.6)’dan faydalanılarak aşağıdaki gibi elde edilir:

$$(V_o + a^2V_1 + aV_2) - (V_o + aV_1 + a^2V_2) = z_t (I_o + a^2I_1 + aI_2) \quad (4.13)$$

Eşitlik (4.13), Eşitlik (4.12)’den yararlanarak düzenlenirse aşağıdaki ifade elde edilir:

$$V_1 - V_2 = z_t I_1 \quad (4.14)$$

Eşitlik (4.12) ve (4.14)'ten arıza empedanslı faz-faz kısa devre arızası durumunda hata noktasından görülen simetrik bileşen devre bağlantıları Şekil 4.4.'teki gibi elde edilir (Alwash et al, 2017).



Şekil 4.4. Güç sisteminde arıza empedanslı faz-faz kısa devre arızası simetrik bileşen devre bağlantıları

Şekil 4.4.'ten hata noktasında oluşan simetrik bileşen akım değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$I_o = 0 \quad (4.15)$$

$$I_1 = -I_2 = \frac{V_H}{(z_1 + z_2 + z_t)} \quad (4.16)$$

Eşitlik (4.15) ve (4.16)'daki simetrik bileşen akım değerleri Eşitlik (2.13) ve (2.14)'te yerine konulursa hata noktasında "b" ve "c" fazından akan gerçek kısa devre akımları aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$I_b = I_o + a^2 I_1 + a I_2 = (a^2 - a) I_1 = -\frac{j\sqrt{3}V_H}{(z_1 + z_2 + z_t)} \quad (4.17)$$

$$I_c = I_o + a I_1 + a^2 I_2 = (a - a^2) I_1 = -I_b = \frac{j\sqrt{3}V_H}{(z_1 + z_2 + z_t)} \quad (4.18)$$

Arıza noktasından görülen simetrik bileşen gerilim değerleri daha önce verilen Eşitlik (4.3) ile hesaplanır. Daha sonra elde edilen bu simetrik bileşen değerleri Eşitlik (2.3)'te kullanılarak hata noktasında fazlara ait gerçek gerilim değerleri hesaplanabilir.

Hata noktası haricindeki baralardaki gerçek gerilim değerleri ise daha önce verilen Eşitlik (4.6) ve (4.7)'den hesaplanır.

4.2.2. Faz-faz kısa devresi (metalik)

Şekil 4.5.'te bir güç sisteminde oluşan metalik yani arıza empedansı olmayan direk temaslı faz-faz kısa devre arızası şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Güç sisteminde metalik faz-faz kısa devre arızası gösterimi

Şekil 4.5.'teki şematik gösterimden kısa devre noktasında fazlara ait gerçek gerilim ve akım değerleri için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$V_b = V_c \quad (4.19)$$

$$I_c = -I_b \quad (4.20)$$

$$I_a = 0 \quad (4.21)$$

“a” fazı referans alındığında bu faza ait simetrik bileşen akım değerleri Eşitlik (4.20) ve (4.21)'de verilen gerçek akım eşitliklerinden ve Eşitlik (2.13)-(2.15)'ten faydalanılarak aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{bmatrix} I_o \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{3}(a-a^2)I_b \\ \frac{1}{3}(a^2-a)I_b \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Eşitlik (4.22)'den simetrik bileşen akım değerleri için aşağıdaki eşitlikler elde edilir:

$$I_o = 0, \quad I_2 = -I_1 \quad (4.23)$$

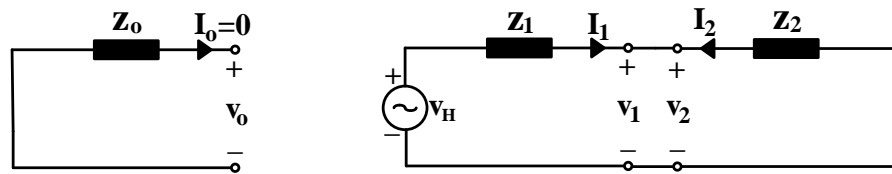
“a” fazı referans alındığında bu faza ait simetrik bileşen gerilim değerleri Eşitlik (4.19)'da verilen gerçek gerilim eşitliğinden ve Eşitlik (2.5)-(2.6)'dan faydalanılarak aşağıdaki gibi elde edilir:

$$(V_o + a^2V_1 + aV_2) = (V_o + aV_1 + a^2V_2) \implies (a^2 - a)V_1 = (a^2 - a)V_2 \implies V_1 = V_2 \quad (4.24)$$

Eşitlik (4.24) düzenlenirse aşağıdaki ifade elde edilir:

$$V_1 - V_2 = 0 \quad (4.25)$$

Eşitlik (4.23) ve (4.25)'ten metalik faz-faz kısa devre arızası durumunda hata noktasından görülen simetrik bileşen devre bağlantıları Şekil 4.6.'daki gibi elde edilir.



Şekil 4.6. Güç sisteminde metalik faz-faz kısa devre arızası simetrik bileşen devre bağlantıları

Şekil 4.6.'dan hata noktasında oluşan simetrik bileşen akım değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$I_o = 0 \quad (4.26)$$

$$I_1 = -I_2 = \frac{V_H}{(z_1 + z_2)} \quad (4.27)$$

Eşitlik (4.26) ve (4.27)'deki simetrik bileşen akım değerleri Eşitlik (2.13) ve (2.14)'te yerine konulursa hata noktasında "b" ve "c" fazından akan gerçek kısa devre akımları aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$I_b = I_o + a^2 I_1 + a I_2 = (a^2 - a) I_1 = -\frac{j\sqrt{3}V_H}{(z_1 + z_2)} \quad (4.28)$$

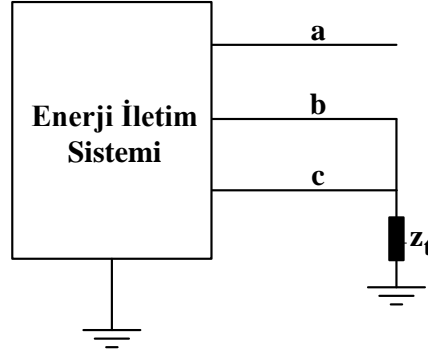
$$I_c = I_o + a I_1 + a^2 I_2 = (a - a^2) I_1 = -I_b = \frac{j\sqrt{3}V_H}{(z_1 + z_2)} \quad (4.29)$$

Arıza noktasından görülen simetrik bileşen gerilim değerleri daha önce verilen Eşitlik (4.3) ile hesaplanır. Daha sonra elde edilen bu simetrik bileşen değerleri Eşitlik (2.3)'te kullanılarak hata noktasında fazlara ait gerçek gerilim değerleri hesaplanabilir.

Hata noktası haricindeki baralardaki gerçek gerilim değerleri ise daha önce verilen Eşitlik (4.6) ve (4.7)'den hesaplanır.

4.2.3. İki faz-toprak kısa devresi (arıza empedanslı)

Şekil 4.7.'de bir güç sisteminde oluşan arıza empedanslı iki faz-toprak kısa devre arızası şematik olarak gösterilmiştir (Pashkovskiy et al, 2016).



Şekil 4.7. Güç sisteminde arıza empedanslı iki faz-toprak kısa devre arızası gösterimi

Şekil 4.7.'deki şematik gösterimden kısa devre noktasında fazlara ait gerçek gerilim ve akım değerleri için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$V_b = V_c = z_t (I_b + I_c) \quad (4.30)$$

$$I_a = 0 \quad (4.31)$$

“a” fazı referans alındığında bu faza ait simetrik bileşen akım değerleri arasındaki ilişki, Eşitlik (4.31), Eşitlik (2.12)'de yerine konularak aşağıdaki gibi bulunur:

$$I_a = I_o + I_1 + I_2 = 0 \implies -I_1 - I_2 = I_o \quad (4.32)$$

“a” fazı referans alındığında bu faza ait simetrik bileşen gerilim değerleri Eşitlik (4.30)'da verilen gerçek gerilim eşitliğinden ve Eşitlik (2.5)-(2.6)'dan faydalanılarak aşağıdaki gibi elde edilir:

$$(V_o + a^2 V_1 + a V_2) = (V_o + a V_1 + a^2 V_2) \implies (a^2 - a) V_1 = (a^2 - a) V_2 \implies V_1 = V_2 \quad (4.33)$$

Eşitlik (4.33) düzenlenirse aşağıdaki ifade elde edilir:

$$V_1 - V_2 = 0 \quad (4.34)$$

Ayrıca Eşitlik (4.30)'da verilen gerçek gerilim eşitliğinden, Eşitlik (2.5), (2.6), (2.13) ve (2.14) ile verilen eşitlikler kullanılarak aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$(V_o + a^2V_1 + aV_2) = z_t (I_o + a^2I_1 + aI_2 + I_o + aI_1 + a^2I_2) \quad (4.35)$$

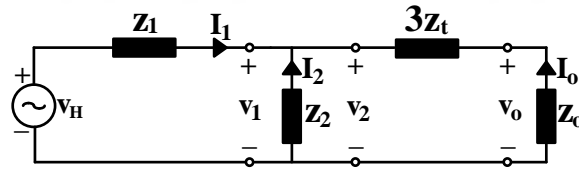
Eşitlik (4.35), Eşitlik (4.33)'den faydalanarak düzenlenirse aşağıdaki ifade elde edilir:

$$(V_o - V_1) = z_t (2I_o - I_1 - I_2) \quad (4.36)$$

Eşitlik (4.32), Eşitlik (4.36)'da kullanılırsa aşağıdaki ifade bulunur:

$$(V_o - V_1) = 3z_t I_o \quad (4.37)$$

Eşitlik (4.32), (4.33) ve (4.37)'den arıza empedanslı iki faz-toprak kısa devre arızası durumunda hata noktasından görülen simetrik bileşen devre bağlantıları Şekil 4.8.'deki gibi elde edilir (Dubey et al, 2015).



Şekil 4.8. Güç sisteminde arıza empedanslı iki faz-toprak kısa devre arızası simetrik bileşen devre bağlantıları

Şekil 4.8.'den hata noktasında oluşan doğru bileşen akım değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$I_1 = \frac{V_H}{z_1 + [z_2 // (z_o + 3z_t)]} = \frac{V_H}{z_1 + \left[\frac{z_2 (z_o + 3z_t)}{z_2 + z_o + 3z_t} \right]} \quad (4.38)$$

Şekil 4.8.'de verilen devreye akım bölücü formülü uygulanarak sıfır ve ters bileşen akım değerleri aşağıdaki eşitliklerle bulunur:

$$I_o = (-I_1) \left(\frac{z_2}{z_2 + z_o + 3z_t} \right) = - \frac{V_H}{\left[z_1 + \left(\frac{z_2 (z_o + 3z_t)}{z_2 + z_o + 3z_t} \right) \right] \left(\frac{z_2 + z_o + 3z_t}{z_2} \right)} \quad (4.39)$$

$$I_2 = (-I_1) \left(\frac{z_o + 3z_t}{z_2 + z_o + 3z_t} \right) = - \frac{V_H}{\left[z_1 + \left(\frac{z_2 (z_o + 3z_t)}{z_2 + z_o + 3z_t} \right) \right] \left(\frac{z_2 + z_o + 3z_t}{z_o + 3z_t} \right)} \quad (4.40)$$

Eşitlik (4.38)-(4.40)'daki simetrik bileşen akım değerleri Eşitlik (2.13) ve (2.14)'te yerine konulursa hata noktasında “b” ve “c” fazından akan gerçek kısa devre akımları aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\begin{aligned} I_b = & - \frac{V_H}{\left[z_1 + \left(\frac{z_2 (z_o + 3z_t)}{z_2 + z_o + 3z_t} \right) \right] \left(\frac{z_2 + z_o + 3z_t}{z_2} \right)} \\ & + a^2 \frac{V_H}{z_1 + \left[\frac{z_2 (z_o + 3z_t)}{z_2 + z_o + 3z_t} \right]} \\ & - a \frac{V_H}{\left[z_1 + \left(\frac{z_2 (z_o + 3z_t)}{z_2 + z_o + 3z_t} \right) \right] \left(\frac{z_2 + z_o + 3z_t}{z_o + 3z_t} \right)} \end{aligned} \quad (4.41)$$

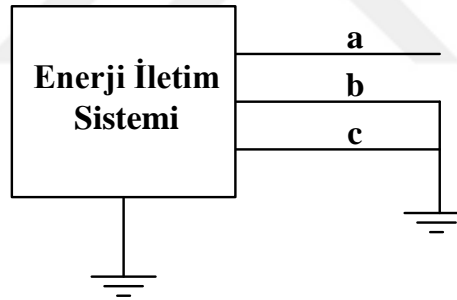
$$\begin{aligned} I_c = & - \frac{V_H}{\left[z_1 + \left(\frac{z_2 (z_o + 3z_t)}{z_2 + z_o + 3z_t} \right) \right] \left(\frac{z_2 + z_o + 3z_t}{z_2} \right)} \\ & + a \frac{V_H}{z_1 + \left[\frac{z_2 (z_o + 3z_t)}{z_2 + z_o + 3z_t} \right]} \\ & - a^2 \frac{V_H}{\left[z_1 + \left(\frac{z_2 (z_o + 3z_t)}{z_2 + z_o + 3z_t} \right) \right] \left(\frac{z_2 + z_o + 3z_t}{z_o + 3z_t} \right)} \end{aligned} \quad (4.42)$$

Arıza noktasından görülen simetrik bileşen gerilim değerleri daha önce verilen Eşitlik (4.3) ile hesaplanır. Daha sonra elde edilen bu simetrik bileşen değerleri Eşitlik (2.3)'te kullanılarak hata noktasında fazlara ait gerçek gerilim değerleri hesaplanabilir.

Hata noktası haricindeki baralardaki gerçek gerilim değerleri ise daha önce verilen Eşitlik (4.6) ve (4.7)'den hesaplanır.

4.2.4. İki faz-toprak kısa devresi (metalik)

Şekil 4.9.'da bir güç sisteminde oluşan metalik direk temaslı iki faz-toprak kısa devre arızası şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Güç sisteminde metalik iki faz-toprak kısa devre arızası gösterimi

Şekil 4.9.'daki şematik gösterimden kısa devre noktasında fazlara ait gerçek gerilim ve akım değerleri için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$V_b = V_c = 0 \quad (4.43)$$

$$I_a = 0 \quad (4.44)$$

“a” fazı referans alındığında bu faza ait simetrik bileşen akım değerleri arasındaki ilişki, Eşitlik (4.44), Eşitlik (2.12)’de yerine konularak aşağıdaki gibi bulunur:

$$I_a = I_o + I_1 + I_2 = 0 \quad (4.45)$$

“a” fazı referans alındığında bu faza ait simetrik bileşen gerilim değerleri Eşitlik (4.43)’te verilen gerçek gerilim eşitliğinden ve Eşitlik (2.5)-(2.6)’dan faydalanılarak aşağıdaki gibi elde edilir:

$$(V_o + a^2V_1 + aV_2) = (V_o + aV_1 + a^2V_2) \implies (a^2 - a)V_1 = (a^2 - a)V_2 \implies V_1 = V_2 \quad (4.46)$$

Eşitlik (4.46) düzenlenirse aşağıdaki ifade elde edilir:

$$V_1 - V_2 = 0 \quad (4.47)$$

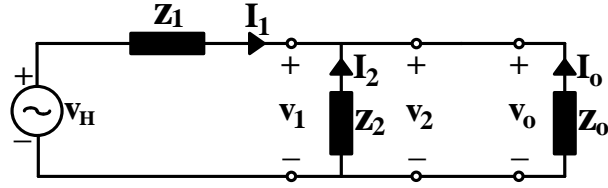
Eşitlik (4.43), Eşitlik (2.5)’te yerine koyularak açılır ve Eşitlik (4.46)’daki eşitlik göz önüne alınırsa aşağıdaki ifade bulunur:

$$(V_o + a^2V_1 + aV_2) = V_o + (a^2V_1 + aV_2) = V_o - V_1 = 0 \implies V_o = V_1 \quad (4.48)$$

Eşitlik (4.46) ve (4.48) birlikte değerlendirilirse simetrik bileşen gerilim değerleri arasında aşağıda verilen ilişki elde edilir:

$$V_o = V_1 = V_2 \quad (4.49)$$

Eşitlik (4.45) ve (4.49)’dan metalik iki faz-toprak kısa devre arızası durumunda hata noktasından görülen simetrik bileşen devre bağlantıları Şekil 4.10.’daki gibi elde edilir.



Şekil 4.10. Güç sisteminde metalik iki faz-toprak kısa devre arızası simetrlili bileşen devre bağlantıları

Şekil 4.10.'dan hata noktasında oluşan doğru bileşen akım değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$I_1 = \frac{V_H}{z_1 + (z_2 // z_o)} = \frac{V_H}{z_1 + \frac{z_2 z_o}{z_2 + z_o}} \quad (4.50)$$

Şekil 4.10.'da verilen devreye akım bölücü formülü uygulanarak sıfır ve ters bileşen akım değerleri aşağıdaki eşitliklerle bulunur:

$$I_o = (-I_1) \left(\frac{z_2}{z_2 + z_o} \right) = - \frac{V_H}{\left(z_1 + \frac{z_2 z_o}{z_2 + z_o} \right) \left(\frac{z_2 + z_o}{z_2} \right)} \quad (4.51)$$

$$I_2 = (-I_1) \left(\frac{z_o}{z_2 + z_o} \right) = - \frac{V_H}{\left(z_1 + \frac{z_2 z_o}{z_2 + z_o} \right) \left(\frac{z_2 + z_o}{z_o} \right)} \quad (4.52)$$

Eşitlik (4.50)-(4.52)'deki simetrlili bileşen akım değerleri Eşitlik (2.13) ve (2.14)'te yerine konulursa hata noktasında "b" ve "c" fazından akan gerçek kısa devre akımları aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$I_b = - \frac{V_H}{\left(z_1 + \frac{z_2 z_o}{z_2 + z_o} \right) \left(\frac{z_2 + z_o}{z_2} \right)} + a^2 \frac{V_H}{z_1 + \frac{z_2 z_o}{z_2 + z_o}} - a \frac{V_H}{\left(z_1 + \frac{z_2 z_o}{z_2 + z_o} \right) \left(\frac{z_2 + z_o}{z_o} \right)} \quad (4.53)$$

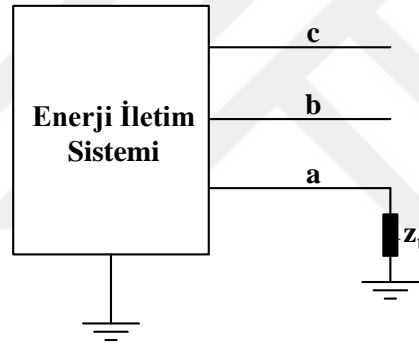
$$I_c = - \frac{V_H}{\left(z_1 + \frac{z_2 z_o}{z_2 + z_o} \right) \left(\frac{z_2 + z_o}{z_2} \right)} + a \frac{V_H}{z_1 + \frac{z_2 z_o}{z_2 + z_o}} - a^2 \frac{V_H}{\left(z_1 + \frac{z_2 z_o}{z_2 + z_o} \right) \left(\frac{z_2 + z_o}{z_o} \right)} \quad (4.54)$$

Arıza noktasından görülen simetrik bileşen gerilim değerleri daha önce verilen Eşitlik (4.3) ile hesaplanır. Daha sonra elde edilen bu simetrik bileşen değerleri Eşitlik (2.3)'te kullanılarak hata noktasında fazlara ait gerçek gerilim değerleri hesaplanabilir.

Hata noktası haricindeki baralardaki gerçek gerilim değerleri ise daha önce verilen Eşitlik (4.6) ve (4.7)'den hesaplanır.

4.2.5. Faz-toprak kısa devresi (arıza empedanslı)

Şekil 4.11.'de bir güç sisteminde oluşan arıza empedanslı faz-toprak kısa devre arızası şematik olarak gösterilmiştir (Birajdar ve Tajane, 2016).



Şekil 4.11. Güç sisteminde arıza empedanslı faz-toprak kısa devre arızası gösterimi

Şekil 4.9.'daki şematik gösterimden kısa devre noktasında fazlara ait gerçek gerilim ve akım değerleri için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$V_a = z_t I_a \quad (4.55)$$

$$I_b = I_c = 0 \quad (4.56)$$

“a” fazı referans alındığında bu faza ait simetrik bileşen akım değerleri, Eşitlik (4.56)'da verilen değerler Eşitlik (2.15)'te yerine konularak aşağıdaki gibi bulunur:

$$\begin{bmatrix} I_o \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_a \\ I_a \\ I_a \end{bmatrix} \quad (4.57)$$

Eşitlik (4.57)'den simetrik bileşen akım değerleri arasındaki ilişki aşağıdaki gibi elde edilir:

$$I_o = I_1 = I_2 \quad (4.58)$$

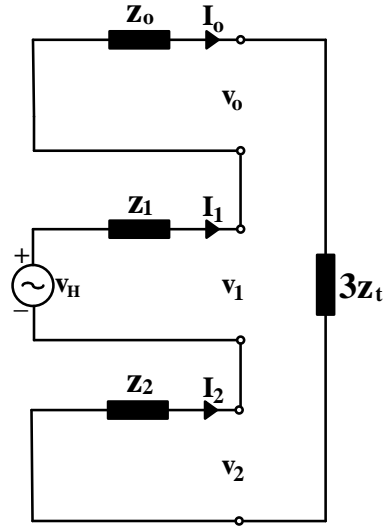
Eşitlik (4.55), Eşitlik (2.4) ve (2.12) kullanılarak açılırsa aşağıdaki ifade bulunur:

$$(V_o + V_1 + V_2) = z_t (I_o + I_1 + I_2) \quad (4.59)$$

Eşitlik (4.58) ile elde edilen simetrik bileşen akımlar arasındaki ilişki Eşitlik (4.59)'da kullanılırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir:

$$(V_o + V_1 + V_2) = 3z_t I_1 \quad (4.60)$$

Eşitlik (4.58) ve (4.60)'tan arıza empedanslı faz-toprak kısa devre arızası durumunda hata noktasından görülen simetrik bileşen devre bağlantıları Şekil 4.12.'deki gibi elde edilir (Liang et al, 2011).



Şekil 4.12. Güç sisteminde arıza empedanslı faz-toprak kısa devre arızası simetrlili bileşen devre bağlantıları

Şekil 4.12.'den hata noktasında oluşan simetrlili bileşen akım değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$I_o = I_1 = I_2 = \frac{V_H}{z_o + z_1 + z_2 + 3z_t} \quad (4.61)$$

Eşitlik (4.61), Eşitlik (2.12)'de yerine konulursa hata noktasında “a” fazından akan gerçek kısa devre akımı aşağıdaki gibi hesaplanır:

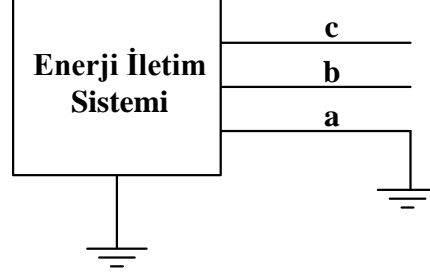
$$I_a = \frac{3V_H}{z_o + z_1 + z_2 + 3z_t} \quad (4.62)$$

Arıza noktasından görülen simetrlili bileşen gerilim değerleri daha önce verilen Eşitlik (4.3) ile hesaplanır. Daha sonra elde edilen bu simetrlili bileşen değerleri Eşitlik (2.3)'te kullanılarak hata noktasında fazlara ait gerçek gerilim değerleri hesaplanabilir.

Hata noktası haricindeki baralardaki gerçek gerilim değerleri ise daha önce verilen Eşitlik (4.6) ve (4.7)'den hesaplanır.

4.2.6. Faz-toprak kısa devresi (metalik)

Şekil 4.13.'te bir güç sisteminde oluşan metalik direk temaslı faz-toprak kısa devre arızası şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Güç sisteminde metalik faz-toprak kısa devre arızası gösterimi

Şekil 4.13.'teki şematik gösterimden kısa devre noktasında fazlara ait gerçek gerilim ve akım değerleri için aşağıdaki eşitlikler yazılabilir:

$$V_a = 0 \quad (4.63)$$

$$I_b = I_c = 0 \quad (4.64)$$

“a” fazı referans alındığında bu faza ait simetrik bileşen akım değerleri, Eşitlik (4.64)'te verilen değerler Eşitlik (2.15)'te yerine konularak aşağıdaki gibi bulunur:

$$\begin{bmatrix} I_o \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_a \\ I_a \\ I_a \end{bmatrix} \quad (4.65)$$

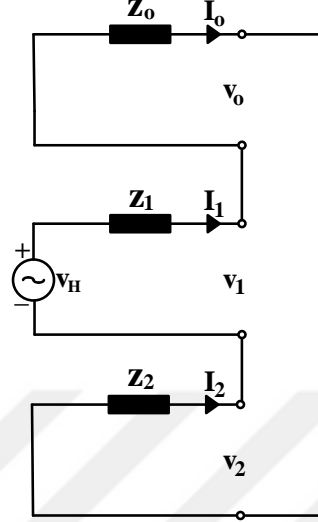
Eşitlik (4.65)'ten simetrik bileşen akım değerleri arasındaki ilişki aşağıdaki gibi elde edilir:

$$I_o = I_1 = I_2 \quad (4.66)$$

Eşitlik (4.63), Eşitlik (2.4) kullanılarak açılırsa aşağıdaki ifade bulunur:

$$(V_o + V_1 + V_2) = 0 \quad (4.67)$$

Eşitlik (4.66) ve (4.67)'den metalik faz-toprak kısa devre arızası durumunda hata noktasından görülen simetrlili bileşen devre bağlantıları Şekil 4.14.'teki gibi elde edilir.



Şekil 4.14. Güç sisteminde metalik faz-toprak kısa devre arızası simetrlili bileşen devre bağlantıları

Şekil 4.14.'ten hata noktasında oluşan simetrlili bileşen akım değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$I_o = I_1 = I_2 = \frac{V_H}{z_o + z_1 + z_2} \quad (4.68)$$

Eşitlik (4.68), Eşitlik (2.12)'de yerine konulursa hata noktasında “a” fazından akan gerçek kısa devre akımı aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$I_a = \frac{3V_H}{z_o + z_1 + z_2} \quad (4.69)$$

Arıza noktasından görülen simetrlili bileşen gerilim değerleri daha önce verilen Eşitlik (4.3) ile hesaplanır. Daha sonra elde edilen bu simetrlili bileşen değerleri Eşitlik (2.3)'te kullanılarak hata noktasında fazlara ait gerçek gerilim değerleri hesaplanabilir.

Hata noktası haricindeki baralardaki gerçek gerilim değerleri ise daha önce verilen Eşitlik (4.6) ve (4.7)'den hesaplanır.

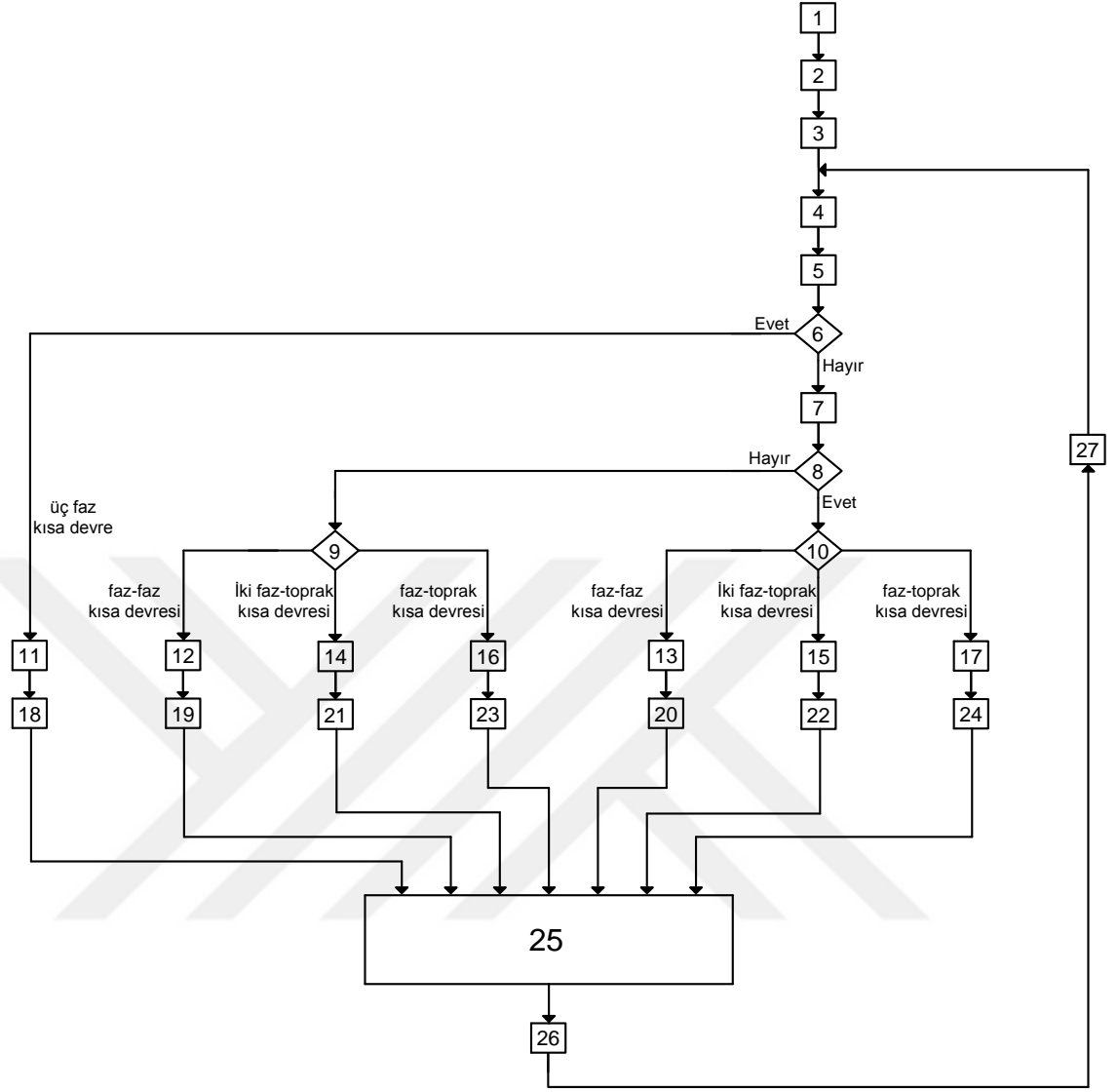


BÖLÜM 5. KISA DEVRE ANALİZİ ALGORİTMASI VE UYGULAMASI

Bu bölümde, güç sistemlerinde karşılaşılan ve bölüm 4'te verilen kısa devre analizlerinin tamamını yapan bir algoritma önerilmiştir. Önerilen algoritma için MATLAB programında bir yazılım hazırlanmıştır. Örnek bir güç sistemi oluşturularak önerilen algoritma bu güç sistemine hazırlanan MATLAB yazılımı ile uygulanmıştır. Tüm kısa devre türlerine ait analizler yapılarak, hata noktalarına ait kısa devre akımları ve hata noktası haricindeki baralara ait gerilim değerleri tespit edilmiştir.

5.1. Algoritma

Bölüm 3'te verilen kabuller altında elektrik güç sistemlerinde karşılaşılan ve detaylı analizleri bölüm 4'te verilen kısa devre türlerinin tamamının analizini yapan algoritma şematik olarak Şekil 5.1.'de verilmiştir. Şekil 5.1.'e ait adımların açıklaması şeklin devamında sunulmuştur. Önerilen algoritma için MATLAB programında hazırlanan yazılım tezin ekler bölümünde verilmiştir.



Şekil 5.1. Tüm kısa devre analizleri için önerilen algoritma

Adım 1: Kısa devre analizinde kullanılacak güç sistemine ait birim değerler cinsinden sistem parametrelerini oku (Kısa devre noktasındaki Thevenin eşdeğer gerilimi v_H değerini, tüm senkron jeneratörlerin bileşen empedanslarını, 40 kW'tan büyük senkron ve asenkron motorların bileşen empedanslarını, transformatörlerin birim değer seri bileşen empedanslarını ve yıldız bağlı taraflarında bulunan nötr-toprak empedanslarını, iletim hatlarının seri bileşen empedanslarını oku. Okunan empedans değerlerinin sadece reaktans değerlerini göz önüne al, varsa direnç değerlerini ihmal et).

Adım 2: Adım 1’de okunan değerlerden simetrik bileşen bara admitans matrisleri y_{bara-0} , y_{bara-1} ve y_{bara-2} ’yi oluştur.

Adım 3: Adım 2’de oluşturulan simetrik bileşen bara admitans matrislerinin tersini alarak simetrik bileşen bara empedans matrisleri z_{bara-0} , z_{bara-1} ve z_{bara-2} ’yi oluştur.

Adım 4: Kısa devre arızasının olduğu bara numarasını gir.

Adım 5: Analizi yapılmak istenen kısa devre arıza türünü seç (üç faz kısa devre arızası? faz-faz kısa devre arızası? iki faz-toprak kısa devre arızası? faz-toprak kısa devre arızası?).

Adım 6: Adım 5’te seçilen kısa devre arıza türü üç fazlı kısa devre arızası mı?

Adım 7: Kısa devre arıza empedansı z_t değerini gir.

Adım 8: Adım 7’de girilen kısa devre arıza empedansı değeri $z_t = 0$?

Adım 9: Seçilen kısa devre arızası türü faz-faz kısa devre arızası mı, iki faz-toprak kısa devre arızası mı, faz-toprak kısa devre arızası mı?

Adım 10: Seçilen kısa devre arızası türü faz-faz kısa devre arızası mı, iki faz-toprak kısa devre arızası mı, faz-toprak kısa devre arızası mı?

Adım 11: Eşitlik (4.5) ile hata noktasında oluşan I_a , I_b ve I_c kısa devre akımlarını hesapla.

Adım 12: Eşitlik (4.17) ve (4.18) ile hata noktasında oluşan I_b ve I_c kısa devre akımlarını hesapla.

Adım 13: Eşitlik (4.28) ve (4.29) ile hata noktasında oluşan I_b ve I_c kısa devre akımlarını hesapla.

Adım 14: Eşitlik (4.41) ve (4.42) ile hata noktasında oluşan I_b ve I_c kısa devre akımlarını hesapla.

Adım 15: Eşitlik (4.53) ve (4.54) ile hata noktasında oluşan I_b ve I_c kısa devre akımlarını hesapla.

Adım 16: Eşitlik (4.62) ile hata noktasında oluşan I_a kısa devre akımını hesapla.

Adım 17: Eşitlik (4.69) ile hata noktasında oluşan I_a kısa devre akımını hesapla.

Adım 18: Eşitlik (4.4) ile hata noktasındaki simetrik bileşen akım değerlerini hesapla.

Adım 19: Eşitlik (4.11) ile hata noktasındaki simetrik bileşen akım değerlerini hesapla.

Adım 20: Eşitlik (4.22) ile hata noktasındaki simetrik bileşen akım değerlerini hesapla.

Adım 21: Eşitlik (4.38)-(4.40) ile hata noktasındaki simetrik bileşen akım değerlerini hesapla.

Adım 22: Eşitlik (4.50)-(4.52) ile hata noktasındaki simetrik bileşen akım değerlerini hesapla.

Adım 23: Eşitlik (4.57) ile hata noktasındaki simetrik bileşen akım değerlerini hesapla.

Adım 24: Eşitlik (4.65) ile hata noktasındaki simetrik bileşen akım değerlerini hesapla.

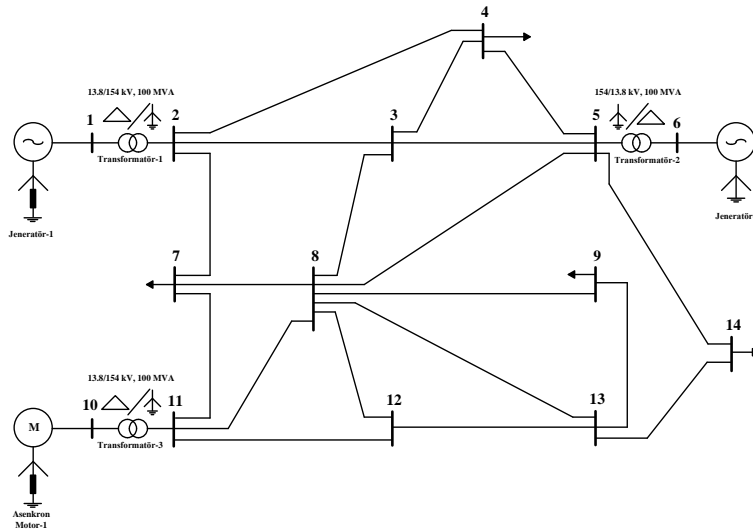
Adım 25: Eşitlik (4.6) ve (4.7) ile hata noktası haricindeki baralara ait gerilim değerlerini hesapla.

Adım 26: Birim değerler cinsinden hesaplanan kısa devre akımları ve hata noktası haricindeki baralara ait gerilimlerin gerçek değerlerini hesapla ve sonuç olarak çıkışa aktar.

Adım 27: Yeni bir kısa devre analizi için adım 4'e dön.

5.2. Uygulama

Bölüm 5.1'de detaylı olarak verilen algoritma, Şekil 5.2.'de oluşturulan örnek 14 baralı güç sistemine uygulanmıştır. Şekil 5.2.'de verilen güç sistemine ait sistem parametreleri Tablo 5.1., Tablo 5.2. ve Tablo 5.3.'te verilmiştir.



Şekil 5.2. Kısa devre algoritmasının uygulandığı örnek 14 baralı güç sistemi

Tablo 5.1. Örnek 14 baralı güç sistemine ait dönen makine parametreleri

| Döner Makina | x_{g-o} (b.) | x_{g-1} (b.) | x_{g-2} (b.) | x_t (b.) |
|------------------|----------------|----------------|----------------|------------|
| Jeneratör-1 | 0.035 | 0.95 | 0.95 | 0.045 |
| Jeneratör-2 | 0.045 | 0.98 | 0.98 | 0 |
| Asenkron Motor-1 | 0.04 | 1.00 | 1.00 | 0.05 |

Tablo 5.2. Örnek 14 baralı güç sistemine ait transformatör parametreleri

| Transformatör | x_{t-o} (b.) | x_{t-1} (b.) | x_{t-2} (b.) |
|------------------|----------------|----------------|----------------|
| Transformatör -1 | 0.14 | 0.14 | 0.14 |
| Transformatör -2 | 0.12 | 0.12 | 0.12 |
| Transformatör -3 | 0.13 | 0.13 | 0.13 |

Tablo 5.3. Örnek 14 baralı güç sistemine ait iletim hattı parametreleri

| İletim Hattı | | | x_{h-o} (b.) | x_{h-1} (b.) | x_{h-2} (b.) |
|--------------|---|---------|----------------|----------------|----------------|
| i. bara | – | j. bara | | | |
| 2 | | 3 | 0.69 | 0.23 | 0.23 |
| 2 | | 4 | 2.13 | 0.71 | 0.71 |
| 2 | | 7 | 1.74 | 0.58 | 0.58 |
| 3 | | 4 | 2.52 | 0.84 | 0.84 |
| 3 | | 5 | 1.08 | 0.36 | 0.36 |
| 3 | | 8 | 1.41 | 0.47 | 0.47 |
| 4 | | 5 | 2.79 | 0.93 | 0.93 |
| 5 | | 8 | 1.98 | 0.66 | 0.66 |
| 5 | | 14 | 2.07 | 0.69 | 0.69 |
| 7 | | 8 | 0.87 | 0.29 | 0.29 |
| 7 | | 11 | 2.70 | 0.90 | 0.90 |
| 8 | | 9 | 2.31 | 0.77 | 0.77 |
| 8 | | 11 | 2.43 | 0.81 | 0.81 |
| 8 | | 12 | 1.77 | 0.59 | 0.59 |
| 8 | | 13 | 1.26 | 0.42 | 0.42 |
| 9 | | 13 | 1.17 | 0.39 | 0.39 |
| 11 | | 12 | 1.95 | 0.65 | 0.65 |
| 12 | | 13 | 0.87 | 0.29 | 0.29 |
| 13 | | 14 | 1.05 | 0.35 | 0.35 |

Şekil 5.2.'de verilen örnek 14 baralı güç sisteminin 4 nolu barasında simetrik üç faz kısa devre arızası olması durumunda, önerilen algoritma ile elde edilen hata noktasında oluşan kısa devre akımları I_a , I_b ve I_c değerleri ile hata noktası haricindeki baralardaki gerilimler V_a , V_b ve V_c değerleri Tablo 5.4.'te verilmiştir. Hata noktasında Thevenin eşdeğer gerilim değeri $v_H=1.02\angle 0^\circ$ olarak alınmıştır. Baz görünür güç $S_{baz}=100$ MVA olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.4. Üç faz kısa devre arızası için yapılan analiz sonuçları

| Bara No. | Kısa Devre Akımları (kA) | | | Bara Gerilimleri (kV) | | |
|------------------|--------------------------|--------|--------|-----------------------|---------|---------|
| | I_a | I_b | I_c | V_a | V_b | V_c |
| 4 (hata noktası) | 0.5574 | 0.5574 | 0.5574 | - | - | - |
| 1 | - | - | - | 6.6659 | 6.6659 | 6.6659 |
| 2 | - | - | - | 62.2017 | 62.2017 | 62.2017 |
| 3 | - | - | - | 58.3281 | 58.3281 | 58.3281 |
| 5 | - | - | - | 66.9003 | 66.9003 | 66.9003 |
| 6 | - | - | - | 6.8765 | 6.8765 | 6.8765 |
| 7 | - | - | - | 72.2971 | 72.2971 | 72.2971 |
| 8 | - | - | - | 71.8567 | 71.8567 | 71.8567 |
| 9 | - | - | - | 72.8860 | 72.8860 | 72.8860 |
| 10 | - | - | - | 8.7033 | 8.7033 | 8.7033 |
| 11 | - | - | - | 89.3293 | 89.3293 | 89.3293 |
| 12 | - | - | - | 76.6800 | 76.6800 | 76.6800 |
| 13 | - | - | - | 73.4073 | 73.4073 | 73.4073 |
| 14 | - | - | - | 71.2174 | 71.2174 | 71.2174 |

Şekil 5.2.'de verilen örnek 14 baralı güç sisteminin 7 nolu barasında simetrik olmayan arıza empedanslı faz-faz kısa devre arızası olması durumunda, önerilen algoritma ile elde edilen hata noktasında oluşan kısa devre akımları I_b ve I_c değerleri ile hata noktası haricindeki baralardaki gerilimler V_a , V_b ve V_c değerleri Tablo 5.5.'te verilmiştir. Hata noktasında Thevenin eşdeğer gerilim değeri $v_H=1.05\angle 0^\circ$ olarak alınmıştır. Baz görünür güç $S_{baz}=100$ MVA olarak belirlenmiştir. Hata noktasında oluşan arıza empedansı $z_t=(0.01+j0.025)$ b. değerindedir.

Tablo 5.5. Arıza empedanslı faz-faz kısa devre arızası için yapılan analiz sonuçları

| Bara No. | Kısa Devre Akımları (kA) | | | Bara Gerilimleri (kV) | | |
|------------------|--------------------------|--------|--------|-----------------------|---------|---------|
| | I_a | I_b | I_c | V_a | V_b | V_c |
| 7 (hata noktası) | 0 | 0.5838 | 0.5838 | - | - | - |
| 1 | - | - | - | 14.4900 | 9.1372 | 9.0408 |
| 2 | - | - | - | 161.7000 | 95.5293 | 94.2098 |
| 3 | - | - | - | 161.7000 | 94.9664 | 93.6225 |
| 4 | - | - | - | 161.7000 | 96.3633 | 95.0788 |
| 5 | - | - | - | 161.7000 | 99.1421 | 97.9664 |
| 6 | - | - | - | 14.4900 | 9.3679 | 9.2790 |
| 8 | - | - | - | 161.7000 | 88.7399 | 87.0778 |
| 9 | - | - | - | 161.7000 | 90.1935 | 88.6157 |
| 10 | - | - | - | 14.4900 | 9.0312 | 8.9312 |
| 11 | - | - | - | 161.7000 | 95.0676 | 93.7282 |
| 12 | - | - | - | 161.7000 | 91.2428 | 89.7214 |
| 13 | - | - | - | 161.7000 | 90.9767 | 89.4413 |
| 14 | - | - | - | 161.7000 | 93.4855 | 92.0748 |

Yukarıda yapılan arıza empedanslı faz-faz kısa devre analizi sonuçları ile karşılaştırma yapabilmek amacıyla, aynı noktada ve aynı parametreler için Şekil 5.2.'de verilen örnek

14 baralı güç sisteminde metalik faz-faz kısa devre analizi yapılmıştır. Şekil 5.2.'de verilen örnek 14 baralı güç sisteminin 7 nolu barasında simetrik olmayan metalik faz-faz kısa devre arızası olması durumunda, önerilen algoritma ile elde edilen hata noktasında oluşan kısa devre akımları I_b ve I_c değerleri ile hata noktası haricindeki baralardaki gerilimler V_a , V_b ve V_c değerleri Tablo 5.6.'de verilmiştir. Hata noktasında Thevenin eşdeğer gerilim değeri $v_H=1.05\angle 0^\circ$ olarak alınmıştır. Baz görünür güç $S_{\text{baz}}=100$ MVA olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.6. Metalik faz-faz kısa devre arızası için yapılan analiz sonuçları

| Bara No. | Kısa Devre Akımları (kA) | | | Bara Gerilimleri (kV) | | |
|------------------|--------------------------|--------|--------|-----------------------|---------|---------|
| | I_a | I_b | I_c | V_a | V_b | V_c |
| 7 (hata noktası) | 0 | 0.5966 | 0.5966 | - | - | - |
| 1 | - | - | - | 14.4900 | 8.9962 | 8.9962 |
| 2 | - | - | - | 161.7000 | 93.8457 | 93.8457 |
| 3 | - | - | - | 161.7000 | 93.2757 | 93.2757 |
| 4 | - | - | - | 161.7000 | 94.6911 | 94.6911 |
| 5 | - | - | - | 161.7000 | 97.5146 | 97.5146 |
| 6 | - | - | - | 14.4900 | 9.2318 | 9.2318 |
| 8 | - | - | - | 161.7000 | 87.0248 | 87.0248 |
| 9 | - | - | - | 161.7000 | 88.4724 | 88.4724 |
| 10 | - | - | - | 14.4900 | 8.8881 | 8.8881 |
| 11 | - | - | - | 161.7000 | 93.3782 | 93.3782 |
| 12 | - | - | - | 161.7000 | 89.5228 | 89.5228 |
| 13 | - | - | - | 161.7000 | 89.2560 | 89.2560 |
| 14 | - | - | - | 161.7000 | 91.7792 | 91.7792 |

Şekil 5.2.'de verilen örnek 14 baralı güç sisteminin 10 nolu barasında simetrik olmayan arıza empedanslı iki faz-toprak kısa devre arızası olması durumunda, önerilen algoritma ile elde edilen hata noktasında oluşan kısa devre akımları I_b ve I_c değerleri ile hata noktası haricindeki baralardaki gerilimler V_a , V_b ve V_c değerleri Tablo 5.7.'de verilmiştir. Hata noktasında Thevenin eşdeğer gerilim değeri $v_H=1.03\angle 0^\circ$ olarak alınmıştır. Baz görünür güç $S_{\text{baz}}=100$ MVA olarak belirlenmiştir. Hata noktasında oluşan arıza empedansı $z_t=(j0.03)$ b. değerindedir.

Tablo 5.7. Arıza empedanslı iki faz-toprak kısa devre arızası için yapılan analiz sonuçları

| Bara No. | Kısa Devre Akımları (kA) | | | Bara Gerilimleri (kV) | | |
|-------------------|--------------------------|--------|--------|-----------------------|---------|---------|
| | I_a | I_b | I_c | V_a | V_b | V_c |
| 10 (hata noktası) | 0 | 9.1924 | 9.1924 | - | - | - |
| 1 | - | - | - | 11.3247 | 9.1351 | 9.1351 |
| 2 | - | - | - | 121.6260 | 93.8962 | 93.8962 |
| 3 | - | - | - | 118.9253 | 89.3844 | 89.3844 |
| 4 | - | - | - | 120.5505 | 92.0936 | 92.0936 |
| 5 | - | - | - | 120.9413 | 92.7477 | 92.7477 |
| 6 | - | - | - | 11.2059 | 8.9328 | 8.9328 |
| 7 | - | - | - | 109.6299 | 74.3261 | 74.3261 |
| 8 | - | - | - | 109.8653 | 74.6960 | 74.6960 |
| 9 | - | - | - | 109.3119 | 73.8273 | 73.8273 |
| 11 | - | - | - | 90.2851 | 47.8193 | 47.8193 |
| 12 | - | - | - | 104.9267 | 67.0965 | 67.0965 |
| 13 | - | - | - | 109.0316 | 73.3888 | 73.3888 |
| 14 | - | - | - | 113.0397 | 79.7503 | 79.7503 |

Yukarıda yapılan arıza empedanslı iki faz-toprak kısa devre analizi sonuçları ile karşılaştırma yapabilmek amacıyla, aynı noktada ve aynı parametreler için Şekil 5.2.'de verilen örnek 14 baralı güç sisteminde metalik iki faz-toprak kısa devre analizi yapılmıştır. Şekil 5.2.'de verilen örnek 14 baralı güç sisteminin 10 nolu barasında simetrik olmayan metalik iki faz-toprak kısa devre arızası olması durumunda, önerilen algoritma ile elde edilen hata noktasında oluşan kısa devre akımları I_b ve I_c değerleri ile hata noktası haricindeki baralardaki gerilimler V_a , V_b ve V_c değerleri Tablo 5.8.'de verilmiştir. Hata noktasında Thevenin eşdeğer gerilim değeri $v_H=1.03\angle 0^\circ$ olarak alınmıştır. Baz görünür güç $S_{baz}=100$ MVA olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.8. Metalik iki faz-toprak kısa devre arızası için yapılan analiz sonuçları

| Bara No. | Kısa Devre Akımları (kA) | | | Bara Gerilimleri (kV) | | |
|-------------------|--------------------------|--------|--------|-----------------------|---------|---------|
| | I_a | I_b | I_c | V_a | V_b | V_c |
| 10 (hata noktası) | 0 | 9.9872 | 9.9872 | - | - | - |
| 1 | - | - | - | 10.7538 | 8.9610 | 8.9610 |
| 2 | - | - | - | 114.3163 | 91.5714 | 91.5714 |
| 3 | - | - | - | 111.0820 | 86.8250 | 86.8250 |
| 4 | - | - | - | 113.0284 | 89.6771 | 89.6771 |
| 5 | - | - | - | 113.4963 | 90.3647 | 90.3647 |
| 6 | - | - | - | 10.6116 | 8.7495 | 8.7495 |
| 7 | - | - | - | 99.9500 | 70.8321 | 70.8321 |
| 8 | - | - | - | 100.2318 | 71.2285 | 71.2285 |
| 9 | - | - | - | 99.5691 | 70.2972 | 70.2972 |
| 11 | - | - | - | 76.7828 | 41.5058 | 41.5058 |
| 12 | - | - | - | 94.3174 | 63.0356 | 63.0356 |
| 13 | - | - | - | 99.2334 | 69.8266 | 69.8266 |
| 14 | - | - | - | 104.0334 | 76.6247 | 76.6247 |

Şekil 5.2.'de verilen örnek 14 baralı güç sisteminin 13 nolu barasında simetrik olmayan arıza empedanslı faz-toprak kısa devre arızası olması durumunda, önerilen algoritma ile elde edilen hata noktasında oluşan kısa devre akımı I_a değeri ile hata noktası haricindeki baralardaki gerilimler V_a , V_b ve V_c değerleri Tablo 5.9.'da verilmiştir. Hata noktasında Thevenin eşdeğer gerilim değeri $v_H=1.04\angle 0^\circ$ olarak alınmıştır. Baz görünür güç $S_{baz}=100$ MVA olarak belirlenmiştir. Hata noktasında oluşan arıza empedansı $z_t=(0.012+j0.035)$ b. değerindedir.

Tablo 5.9. Arıza empedanslı faz-toprak kısa devre arızası için yapılan analiz sonuçları

| Bara No. | Kısa Devre Akımları (kA) | | | Bara Gerilimleri (kV) | | |
|-------------------|--------------------------|-------|-------|-----------------------|----------|----------|
| | I_a | I_b | I_c | V_a | V_b | V_c |
| 13 (hata noktası) | 0.5637 | 0 | 0 | - | - | - |
| 1 | - | - | - | 10.2111 | 13.4037 | 13.4701 |
| 2 | - | - | - | 104.9152 | 149.1129 | 149.8948 |
| 3 | - | - | - | 94.0718 | 150.0880 | 150.7865 |
| 4 | - | - | - | 99.3828 | 149.2976 | 150.0634 |
| 5 | - | - | - | 98.0165 | 148.6847 | 149.5045 |
| 6 | - | - | - | 9.6931 | 13.3030 | 13.3783 |
| 7 | - | - | - | 80.9176 | 151.9723 | 152.5195 |
| 8 | - | - | - | 63.7993 | 154.7565 | 155.0999 |
| 9 | - | - | - | 26.9525 | 161.9901 | 161.8861 |
| 10 | - | - | - | 9.6352 | 13.2920 | 13.3683 |
| 11 | - | - | - | 96.8210 | 148.4980 | 149.3345 |
| 12 | - | - | - | 42.7253 | 158.5593 | 158.6549 |
| 14 | - | - | - | 38.4504 | 159.4778 | 159.5180 |

Yukarıda yapılan arıza empedanslı faz-toprak kısa devre analizi sonuçları ile karşılaştırma yapabilmek amacıyla, aynı noktada ve aynı parametreler için Şekil 5.2.'de verilen örnek 14 baralı güç sisteminde metalik faz-toprak kısa devre analizi yapılmıştır. Şekil 5.2.'de verilen örnek 14 baralı güç sisteminin 13 nolu barasında simetrik olmayan metalik faz-toprak kısa devre arızası olması durumunda, önerilen algoritma ile elde edilen hata noktasında oluşan kısa devre akımı I_a değeri ile hata noktası haricindeki baralardaki gerilimler V_a , V_b ve V_c değerleri Tablo 5.10.'da verilmiştir. Hata noktasında Thevenin eşdeğer gerilim değeri $v_H=1.04\angle 0^\circ$ olarak alınmıştır. Baz görünür güç $S_{baz}=100$ MVA olarak belirlenmiştir.

Tablo 5.10. Metalik faz-toprak kısa devre arızası için yapılan analiz sonuçları

| Bara No. | Kısa Devre Akımları (kA) | | | Bara Gerilimleri (kV) | | |
|-------------------|--------------------------|----------------|----------------|-----------------------|----------------|----------------|
| | I _a | I _b | I _c | V _a | V _b | V _c |
| 13 (hata noktası) | 0.5938 | 0 | 0 | - | - | - |
| 1 | - | - | - | 9.9888 | 13.3951 | 13.3951 |
| 2 | - | - | - | 101.9482 | 149.0227 | 149.0227 |
| 3 | - | - | - | 90.5206 | 149.9878 | 149.9878 |
| 4 | - | - | - | 96.1178 | 149.2051 | 149.2051 |
| 5 | - | - | - | 94.6779 | 148.6004 | 148.6004 |
| 6 | - | - | - | 9.4429 | 13.2958 | 13.2958 |
| 7 | - | - | - | 76.6561 | 151.8655 | 151.8655 |
| 8 | - | - | - | 58.6090 | 154.6650 | 154.6650 |
| 9 | - | - | - | 19.7048 | 162.0350 | 162.0350 |
| 10 | - | - | - | 9.3819 | 13.2850 | 13.2850 |
| 11 | - | - | - | 93.4180 | 148.4167 | 148.4167 |
| 12 | - | - | - | 36.3768 | 158.5252 | 158.5252 |
| 14 | - | - | - | 31.8628 | 159.4626 | 159.4626 |

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada elektrik güç sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan kısa devre arızalarının analizi yapılmıştır. Bu amaçla öncelikle kısa devre analizinde etkin şekilde faydalı olan güç sistem elemanlarının simetrik bileşen analizleri yapılmıştır. Literatürde kabul edilen kısa devre analiz koşulları kullanılarak hata analizinde kullanılacak kısa devre hata modeli belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen hata modelini kullanarak literatürde iyi bilinen ve güç sistemlerinde karşılaşılan simetrik ve simetrik olmayan kısa devre arıza türleri detaylı olarak incelenmiştir. Literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak simetrik olmayan metalik kısa devre hataları da detaylı olarak analiz edilmiştir. İncelenen tüm kısa devre arıza türlerini analiz edebilen bir algoritma ve bu algoritmaya ait yazılım oluşturularak örnek bir güç sistemi üzerinde uygulanmış ve tüm arıza türlerinin sayısal analizleri yapılmıştır.

Tez çalışmasındaki kısa devre analizinde kullanılan kabuller, literatürde yapılan kısa devre analiz çalışmalarında genellikle kabul edilen güç sistem kabulleridir. Bölüm 3.1’de verilen bu kabuller, genellikle gerçek sistem çalışma koşullarının etkilerinin ya da sistem parametrelerinin ihmal edilmesi şeklindedir. Genellikle bu ihmaller, kısa devre etkilerinin yanında oldukça etkisiz olduklarından gerçek kısa devre analiz sonuçlarını etkilememekle beraber kısa devre analizinde kolaylık sağlar. Ancak bazı çalışma koşullarında bu kabuller gerçek kısa devre hesaplama sonuçlarından uzak sonuçlar verebilir. Bazen de tam kısa devre analiz sonuçlarına gerek duyulabilir. Bu durumlarda, tezde ve literatürdeki kabullerin aksine yapılan tüm ihmaller kaldırılarak gerçek sistem parametrelerinin tamamının göz önüne alındığı kısa devre analizlerinin geliştirilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Alwash, M., Sweet, M., Narayanan, E. M. S., (2017), Analysis of voltage source converters under DC line-to-line short-circuit fault conditions. IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics, Edinburgh, s. 1801-1806.
- Anderson, P. M., (1999), Power System Protection. IEEE Press Marketing, s. 97-147.
- Arifoglu, U., (2002), Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi. Alfa Yayınları, s.57-210
- Badawy, E. H., El-Sherbiny, M. K., Ibrahim, A. A., Farghaly, M. S., (1991), A method of analyzing unsymmetrical faults on six-phase power systems. IEEE Transactions on Power Delivery, 6(3): s. 1139-1145.
- Birajdar, A., Tajane, S., (2016), Modelling and simulation of transmission line to detect single line to ground fault location. IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems, Delhi, s. 1-4.
- Choi, M. S., Lee, S. J., Lim, S. I., Lee, D. S., Yang, X., (2007), A direct three-phase circuit analysis-based fault location for line-to-line fault. IEEE Transactions on Power Delivery, 22(4): s. 2541-2547.
- Ciontea, C. I., Leth Bak, C., Blaabjerg, F., Madsen, K. K., Sterregaard, C. H., (2016), Fault analysis for protection purposes in maritime applications. 13th International Conference on Development in Power System Protection, Edinburgh, s. 1-6.
- Ciric, R. M., Ochoa, L. F., Padilla-Feltrin, A., Nouri, H., (2005), Fault analysis in four-wire distribution networks. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 152(6): s. 977-982.
- Costa, L. L. H., Serni, P. J. A., Marafão, F. P., (2011), An analysis of generalized symmetrical components in non sinusoidal three phase systems. XI Brazilian Power Electronics Conference, Praiamar, s. 502-507.
- Du, W., Fu, Q., Wang, Y., (2018), Small-signal stability of an AC/MTDC power system as affected by open-loop modal coupling between the VSCs. IEEE Transactions on Power Systems, 33(3): s. 3143-3152.
- Dubey, A., Sun, H., Nikovski, D., Takano, T., Kojima, Y., Ohno, T., (2015), Locating double-line-to-ground faults using hybrid current profile approach. IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference, Washington, s. 1-5.
- Dufournet, D., Montillet, G., (2000), Three-phase short circuit testing of high-voltage circuit breakers using synthetic circuits. IEEE Transactions on Power Delivery, 15(1): s. 142-147.

- Furfari, F. A., Brittain, J., (2002), Charles LeGeyt Fortescue and the method of symmetrical components. *IEEE Industry Applications Magazine*, 8(3): s. 7-9.
- Glover, J. D., Sarma, M. S., Overbye, T. J., (2012), *Power System Analysis and Design*. Cengage Learning, s. 433-474.
- Han, Z. X., (1982), Generalized method of analysis of simultaneous faults in electric power system. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101(10): s. 3933-3942.
- Huang, C., Zhang, B., Ma, Y., Zhou, F., He, J., (2018), Analysis of short-circuit current characteristics and its distribution of artificial grounding faults on DC transmission lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(1): s. 520-528.
- Huang, W., Tai, N., Li, K., Zheng, X., Chen, S., (2015), Protection scheme for active distribution networks using positive-sequence components. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Denver, s. 1-5.
- Kang, N., Liao, Y., (2012), Equivalent PI circuit for zero-sequence double circuit transmission lines. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, s. 1-6.
- Kjolle, G. H., Gjerde, O., Hjartsjo, B. T., Engen, H., Haarla, L., Koivisto, L., Lindblad, P., (2006), Protection system faults -- a comparative review of fault statistics. *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Stockholm, s. 1-7.
- Korab, R., Siwy, E., (2006), Statistical analysis of the double line-to-ground short-circuit current in MV urban network for the power cable metallic screen rating. *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Stockholm, s. 1-6.
- Krause, P. C., (1985), The method of symmetrical components derived by reference frame theory. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-104(6): s. 1492-1499.
- Kulkarni, S., Parit, A. B., Pulavarthi, V R S V B., Patil, S. S., (2017), Comparative analysis of three phase, five phase and six phase symmetrical components with MATLAB. *International Conference on Data Management, Analytics and Innovation*, Pune, s. 182-186.
- Kundur, P., (1993), *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, Inc., s. 3-5.
- Liang, X., Wallace, S. A., Zhao, X., (2011), A technique for detecting wide-area single-line-to-ground faults. *IEEE Conference on Technologies for Sustainability*, Portland, s. 121-124.
- Ma, J., Wang, S., Qiu, Y., Li, Y., Wang, Z., Thorp, J. S., (2017), Angle stability analysis of power system with multiple operating conditions considering cascading failure. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(2): s. 873-882.

- Mahamedi, B., Zhu, J. G., (2012), A novel approach to detect symmetrical faults occurring during power swings by using frequency components of instantaneous three-phase active power. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(3): s. 1368-1376.
- Paap, G. C., (2000), Symmetrical components in the time domain and their application to power network calculations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 15(2): s. 522-528.
- Pashkovskiy, S. N., Vainstein, R. A., Yudin, S. M., (2016), Transformation of zero-sequence electric quantities for protection against line-to-ground fault in the networks with various neutral grounding modes. *2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, Chelyabinsk*, s. 1-5.
- Sallam, A. A., Malik, O. P., (2019), *Electric Distribution Systems*. Wiley-IEEE Press, s. 1-624.
- Seiphethlo, T. E., Rens, A. P. J., (2012), The analysis of voltage and current unbalance by application of active and reactive power in the fundamental frequency negative-sequence components. *IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Hong Kong*, s. 420-426.
- Shi, L., Shan, C., Wu, X., Wang, H., (2011), Short circuit current calculation and analysis of shipboard medium frequency power system. *International Conference on Electrical Machines and Systems, Beijing*, s. 1-5.
- Shimizu, S., Kado, H., Uriu, Y., Ishigohka, T., (1992), Single-line-to-ground fault test of a 3-phase superconducting fault current limiting reactor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 28(1): s. 442-445.
- Shu, Y., Tang, Y., (2017), Analysis and recommendations for the adaptability of China's power system security and stability relevant standards. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 3(4): s. 334-339.
- Teng, J., (2005), Systematic short-circuit-analysis method for unbalanced distribution systems. *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, 152(4): s. 549-555.
- Wang, S., Sun, Y., Huang, Z., Mu, S., (2018), Analysis of stator internal phase-to-phase short circuit in the 12-phase synchronous generator with rectifier-load system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33(1): s. 299-311.
- Xiaoning, K., Jiale, S., Guobing, S., Wei, F., Bo, Z., (2008), A novel three phase load flow algorithm based on symmetrical components for distribution systems. *43rd International Universities Power Engineering Conference, Padova*, s. 1-4.
- Zhang, Y., Zhang, J., Ma, J., Wang, Z., (2009), Fault detection based on discriminant analysis theory in electric power system. *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, Nanjing*, s. 1-5.

EKLER

EK. A.

MATLAB programında m.file olarak hazırlanan kısa devre analiz algoritmasına ait yazılım aşağıda verilmiştir.

```
clc
clear all

a=cos(120*pi/180)+i*sin(120*pi/180);
vh=1.02;
sbase=100;
vbase1=13.8;
vbase2=154;

[ybara0, ybara1, ybara2]=ybara();
zbara0=inv(ybara0);
zbara1=inv(ybara1);
zbara2=inv(ybara2);

[n_bara, xxx]=size(zbara0);

n=input('Kısa devre arızasının olduğu bara numarasını giriniz: ');
disp(' ')

hata_sec_dongu=1;
while(hata_sec_dongu==1)
    disp('Kısa devre arızasının türünü seçiniz ')
    hata=input('(üç faz kısa devre=1, faz-faz kısa devresi=2, iki faz-
toprak kısa devresi=3, faz-toprak kısa devresi=4): ');
    disp(' ')
    if (hata~=1 && hata~=2 && hata~=3 && hata~=4)
        disp('Hatalı giriş yaptınız... ')
        disp(' ')
    else
        hata_sec_dongu=2;
    end
end

if (hata==1)
    %=====
    Ia=(vh/zbara1(n,n));
    Ib=a*a*(vh/zbara1(n,n));
    Ic=a*(vh/zbara1(n,n));

    I0=0;
    I1=(vh/zbara1(n,n));
    I2=0;
```

```

%=====
else
    zt=input('Kısa devre empedansını birim değer cinsinden giriniz:
');
    disp(' ')
    if (zt~=0)
        if (hata==2)
            %=====
            Ia=0;
            Ib=-(i*sqrt(3)*vh)/(zbaral(n,n)+zbara2(n,n)+zt);
            Ic=-Ib;

            I0=0;
            I1=(1/3)*(a-a*a)*Ib;
            I2=-I1;
            %=====
            elseif (hata==3)
                %=====
                Ia=0;

p1=((zbara0(n,n)+3*zt)*zbara2(n,n))/(zbara2(n,n)+zbara0(n,n)+3*zt)+z
baral(n,n);
            p2=(zbara0(n,n)+zbara2(n,n)+3*zt)/zbara2(n,n);
            p3=p1;
            p4=p1;
            p5=(zbara0(n,n)+zbara2(n,n)+3*zt)/(zbara0(n,n)+3*zt);

            Ib=(-vh/(p1*p2))+((a*a*vh)/p3)-((a*vh)/(p4*p5));
            Ic=(-vh/(p1*p2))+((a*vh)/p3)-((a*a*vh)/(p4*p5));

            I0=(-vh/(p1*p2));
            I1=vh/p3;
            I2=(-vh/(p4*p5));
            %=====
            elseif (hata==4)
                %=====
                Ib=0;
                Ic=0;
                Ia=(3*vh)/(zbara0(n,n)+zbaral(n,n)+zbara2(n,n)+3*zt);

                I0=(1/3)*Ia;
                I1=I0;
                I2=I0;
                %=====
            end
        else
            if (hata==2)
                %=====
                Ia=0;
                Ib=-(i*sqrt(3)*vh)/(zbaral(n,n)+zbara2(n,n));
                Ic=-Ib;

                I0=0;
                I1=(1/3)*(a-a*a)*Ib;
                I2=-I1;
                %=====
            elseif (hata==3)
                %=====

```

```

Ia=0;

p1=( (zbara0(n,n)*zbara2(n,n)) / (zbara0(n,n)+zbara2(n,n)) )+zbaral(n,n);
p2=(zbara0(n,n)+zbara2(n,n)) /zbara2(n,n);
p3=p1;
p4=p1;
p5=(zbara0(n,n)+zbara2(n,n)) / (zbara0(n,n));

Ib=(-vh/(p1*p2))+((a*a*vh)/p3)-((a*vh)/(p4*p5));
Ic=(-vh/(p1*p2))+((a*vh)/p3)-((a*a*vh)/(p4*p5));

I0=(-vh/(p1*p2));
I1=vh/p3;
I2=(-vh/(p4*p5));
%=====
elseif (hata==4)
%=====
Ib=0;
Ic=0;
Ia=(3*vh) / (zbara0(n,n)+zbaral(n,n)+zbara2(n,n));

I0=(1/3)*Ia;
I1=I0;
I2=I0;
%=====
end
end
end

disp('=====')
disp(2), disp(' . bara (hata noktası) kısa devre akımları (kA) (sırasıyla
Ia, Ib, Ic):')
disp(' ')
if (n==1 || n==6 || n==10)
Ibase=sbase/(sqrt(3)*vbase1);
Iabc(1)=abs(Ia)*Ibase;
Iabc(2)=abs(Ib)*Ibase;
Iabc(3)=abs(Ic)*Ibase;
else
Ibase=sbase/(sqrt(3)*vbase2);
Iabc(1)=abs(Ia)*Ibase;
Iabc(2)=abs(Ib)*Ibase;
Iabc(3)=abs(Ic)*Ibase;
end
Iabc

for (k=1:n_bara)
if (k==n)
bos=0;
else

disp('=====')
disp(k), disp(' . bara gerilimleri (kV) (sırasıyla Va, Vb,
Vc):')
disp(' ')
v012=[0;vh;0]-[zbara0(k,n) 0 0;0 zbaral(k,n) 0;0 0
zbara2(k,n)]*[I0;I1;I2];
vabc=[1 1 1;1 a*a a;1 a a*a]*v012;

```



```
if (k==1 || k==6 || k==10)
    Vabc(1)=abs(vabc(1))*13.8;
    Vabc(2)=abs(vabc(2))*13.8;
    Vabc(3)=abs(vabc(3))*13.8;
else
    Vabc(1)=abs(vabc(1))*154;
    Vabc(2)=abs(vabc(2))*154;
    Vabc(3)=abs(vabc(3))*154;
end
Vabc
end
end
```



ÖZGEÇMİŞ

Yılmaz YILDIRIM, 11/09/1987'de Karaçoban-Erzurum'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 2004 yılında Silivri Lisesi'nden mezun oldu. 2004 yılında Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. Daha sonra 2005 yılında yatay geçişle devam ettiği Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nü 2008 yılında bitirdi. Aynı yıl Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2009 yılında Sakarya Elektrik Dağıtım A.Ş.'de (SEDAŞ) elektrik mühendisi olarak çalışmaya başladı ve bu görevi 2012 yılına kadar devam ettirdi. 2012 yılında yedek subay olarak askerlik görevine başladı ve 2013 yılında bu görevi tamamladı. 2013 yılında Boğaziçi Elektrik Dağıtım A.Ş.'de (BEDAŞ) elektrik mühendisi olarak çalışmaya başladı ve bu görevi 2015 yılına kadar sürdürdü. 2015 yılında kendi taahhüt ve mimarlık firması olan YILDIRIMLAR Mimarlık Mühendislik Elektrik İnşaat Makine ve Sanayi Tic. Ltd. Şti. firmasını kurarak genel müdürlük görevini üstlendi. Halen bu görevi sürdürmektedir.