



Sakarya ili elektrik iletim şebekesinin matlab/simulink programı kullanılarak modellenmesi ve analiz edilmesi

Nihat PAMUK

TEİAŞ 5. İletim Tesis ve İşletme Grup Müdürlüğü Maltepe mah. Orhangazi cad. No:74 SAKARYA

Anahtar

Kelimeler

Enerji iletim hatları,
Kısa devre analizi,
Güç akışı analizi,
Modelleme

ÖZET

Dünyadaki ekonomik ve sosyal kalkınmanın en temel verilerinden birisi enerjidir. Hızlı bir sanayileşme ve şehirleşme ortamının olması, nüfusun hızla artması, enerji tüketiminin vazgeçilmez bir şekilde büyümesi, teknolojinin yaygınlaşmasını ve mevcut enerji kaynaklarının ekonomik ve güvenli bir şekilde kullanılmasını sağlar. Ülkemizde, kullanılan teçhizatlar farklı standartlar olduğu için elektrik enerjisinin üretim, iletim, dağıtım, tüketim ve kontrolünde sıkıntılar yaşanmaktadır. Bu sıkıntıları gidermenin en etkili yolu, elektrik tesislerinde ileri teknoloji yazılımlı otomasyon sistemlerinin kurulması ve geliştirilmesini sağlamaktır. Bu amaçla, ileri teknoloji yazılımı olan Matlab, temel matematik ve mühendislik dallarında kullanıcıya ciddi imkanlar sunmaktadır. Bu çalışmada, Sakarya iline ait 380/154 kV elektrik iletim şebekesi, Simulink araç kutusu kullanılarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Bu modelleme ile Sakarya bölgesi elektrik sisteminin güç akışı analizi, çeşitli baralardaki akım ve gerilim değerleri ve kısa devre akım değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalara dayanılarak, mevcut sistemin yük taşıma kapasitesi, röle koordinasyonu, gerilim yalıtım seviyelerinin kontrolü ve muhtemel akım kaçaklarına yönelik sonuçlara ulaşılmıştır.

Modeling and analyzing electricity transmission network in the province of Sakarya using matlab/simulink software

ABSTRACT

One of the most basic data of economic and social development in the world is energy. Rapid industrialization and urbanization of environment, population growth, energy consumption growing in an essential way provides the diffusion of technology and the use of exiting energy sources economically and safely. As there are different standards in the equipment used in our country, problems are encountered in electricity generation, transmission, distribution, consumption and control. The most effective ways to get rid of these problems, are establishing and developing automation systems with high-tech software in power facilities. For that purpose, Matlab- high-tech software- offers serious opportunities in the fields of mathematics and engineering. In this study, 380/154 kV electricity transmission network belonging to the province of Sakarya was modeled and analyzed by using the Simulink toolbox. The power flow analysis of electrical system in Sakarya region, current and voltage values of various dams and short-circuit current values were calculated with this modeling. Based on these calculations, load- carrying capacity of the existinig system, relay coordination, control of the voltage levels of voltage insulation and results about possible stray fluxes have been reached.

* Sorumlu yazar (Corresponding author) e-posta: nihatpamuk@gmail.com

1. Giriş

Elektrik enerjisi üretim, iletim, dağıtım ve tüketim safhalarından geçerek kullanılmaktadır. Termik, doğalgaz ve hidrolik santrallerde üretilen elektrik enerjisi 380 kV ve 154 kV enerji iletim hatları ile enterkonnekte sisteme bağlanır. Belirli noktalardaki ototrafolarile 154 kV gerilim seviyesinden tüketim noktalarına daha yakın trafomerkezlerine nakledilir. Trafo merkezlerinde 34.5 kV, 31.5 kV ve 15 kV gerilim seviyelerine düşürülür ve dağıtım hatları ile tüketim noktalarına ulaştırılır. Buralarda 34.5/6.3 kV ve 34.5/0.4 kV'luk dağıtım trafoları yardımı ile gerilim seviyeleri tekrar düşürülerek fabrika, işyeri, ticarethane ve evlerde kullanılır. Bu çalışmada, Sakarya iline ait Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi'ne (Teias) bağlı 380/154 kV iletim şebekesini oluşturan yedi tane TM'nin (trafo merkezi) yük durumları incelenmiş olup, Matlab yazılımına ait Simulink araç kutusu kullanılarak güç akışı neticesinde gözlenen akım-gerilim değişimleri, kısa devre akımları ve gerilim düşümü sonuçları analiz edilmiştir. Bu analizlerde Teias'dan alınan gerçek veri ve parametreler kullanılmış olup, veri ve parametresi bulunmayan elemanlar için ise gerçeğe en yakın değerler seçilmiştir.

2. Enterkonnekte Sistemin Yapısı

Geçmiş yıllarda, dünyada ve ülkemizde elektrik enerjisi üretimi için çeşitli enerji kaynakları ile çalışan elektrik santralleri kurulmuştur. Tüketicinin daha az olduğu zamanlarda, santraller mahalli olarak çalışmakta ve belli bölgeyi beslemekteydi. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte, sanayi tesislerinin kurulması neticesinde enerji ihtiyaçları artmış ve mahalli üretimler bunu karşılayamaz hale gelmiştir. Generatör güçleri artırılmış, santrallerin üretimlerini birleştirme amacıyla uzun iletim hatları tesis edilmiş ve kayıpların azaltılması için de gerilim değerleri artırılmıştır. Enerji sektöründeki gelişmelere bağlı olarak her bir bölge için üretilen elektrik enerjisinin tüketim için uygun olmadığı görülmüştür. Buna bağlı olarak üretim için kurulan santrallerinin yerleri ve üretimde kullandıkları yer altı kaynaklarının ekonomik olması istenmektedir. Bu nedenle hidroelektrik santralleri su kuvvetinin ve inşaatının en müsait olduğu yerlere, termik santraller ise kömür rezervinin yüksek olduğu yerlere kurulması gerekir [1]. Aynı şekilde taşkömürü, doğalgaz, petrol, rüzgar ve jeotermal santraller içinde benzer özellikler bulunmaktadır. Enerji nakil hatları, bütün bölgenin elektrikleştirilmesini temin edecek şekilde tertip ve tesis edilirler.

Bir memleketin tamamının veya belli bölgelerinin elektrik enerji ihtiyacını karşılayacak üretim ve tüketim merkezleri arasındaki enerji alışverişini temine yarayan enerji nakil hatlarının teşkil ettiği sisteme enterkonnekte sistem denir [2]. Enterkonnekte sistemi besleyen santraller, muhtelif tip ve kapasitede termik, taşkömürü, doğalgaz, petrol, rüzgar, jeotermal ve hidroelektrik santraller olabilirler. Bu santrallerdeki alternatörlerin çıkış gerilimleri ise 6.3, 6.9, 10.5, 10.8, 13.8 ve 14.4 kV' tan biri olmaktadır [3]. Bu nedenle alternatör çıkış gerilimleri, yükseltici trafolar yardımı ile yükseltılarak enterkonnekte sisteme bağlanmaktadır. Enterkonnekte sistemin üretim ve tüketim yönünden emniyetli, kaliteli ve ekonomik olarak işletilmesine devamlı olarak nezaret eden, işletme manevralarının koordinasyon ve kumandasını yapan işletme merkezine, yük tevzi merkezi adı verilir [4]. Böylece bölge santrallerinin gücü, kendi bölgelerini beslemeye yeterli gelmediği zaman, bağlı bulunduğu enterkonnekte sistemden istenilen kadar enerji çekebilmesi ekonomik olarak sağlanmaktadır.

3. Güç Sistemlerinde Kısa Devre Hesaplamaları

Enerji sisteminde yıldırım düşmesi, açma kapama olayları, mekanik hatalar, buz yükü, toprak kayması, deprem, kuş, haşarat, nem, kir ve benzer sebebi ile meydana gelen aşırı gerilimler, üzerinde gerilim bulunan sistem parçalarını elektriksiz olarak zorlar. Zorlama, gerilim yalıtım seviyesini aşarsa kısa devre oluşur. Kısa devre akımının değeri, hata noktasından sistemi besleyen kaynağa doğru bakıldığında görülen Thevenin eşdeğer devresi tarafından belirlenerek, hesaplanır [5].

Kısa devre olayları dengeli ve dengesiz kısa devre olarak iki şekilde incelenir. Hata öncesi hat akımları birbirine eşit olan bir sistemde, hatadan sonra da hat akımları genlik olarak birbirlerine eşit değer alıyorsa, oluşan hata türü dengeli kısa devre olarak isimlendirilir. Eğer hata sonrası hat akımları ve genlik değerleri kendi aralarında birbirlerinden farklı değerler alıyorsa, hata türü dengesiz kısa devre olarak adlandırılır [6].

Dengesiz kısa devreye ilişkin akım ve gerilim hesaplamaları dengeli sisteme göre daha uzun ve zordur. Fazların yapısı birbirlerine göre simetrik olan güç sistemlerinde kısa devre akım hesaplamaları, simetrik hatalar ve simetrik olmayan hatalar olarak iki ayrı bölümde incelenmektedir. Üç fazlı kısa devre simetrik bir hatadır. Bir faz-toprak kısa devresi, iki fazlı toprak temassız kısa devre ve iki fazlı toprak

temaslı kısa devre hataları ise simetrik olmayan hatalardır.

Hata esnasında sistemde dolaşan akımların fazlara göre genliklerinin değişmemesi nedeniyle hata simetrik olarak isimlendirilirken, hata akımlarının genliklerinin fazlara göre değişenleri ise simetrik olmayan olarak adlandırılmaktadır. Simetrik olmayan hatanın incelenmesinde ise dengesiz akım ve gerilim değerlerinden dolayı, sisteme ilişkin ters ve sıfır bileşen devre bara empedans ve admitans matrislerine ihtiyaç duyulmaktadır [7].

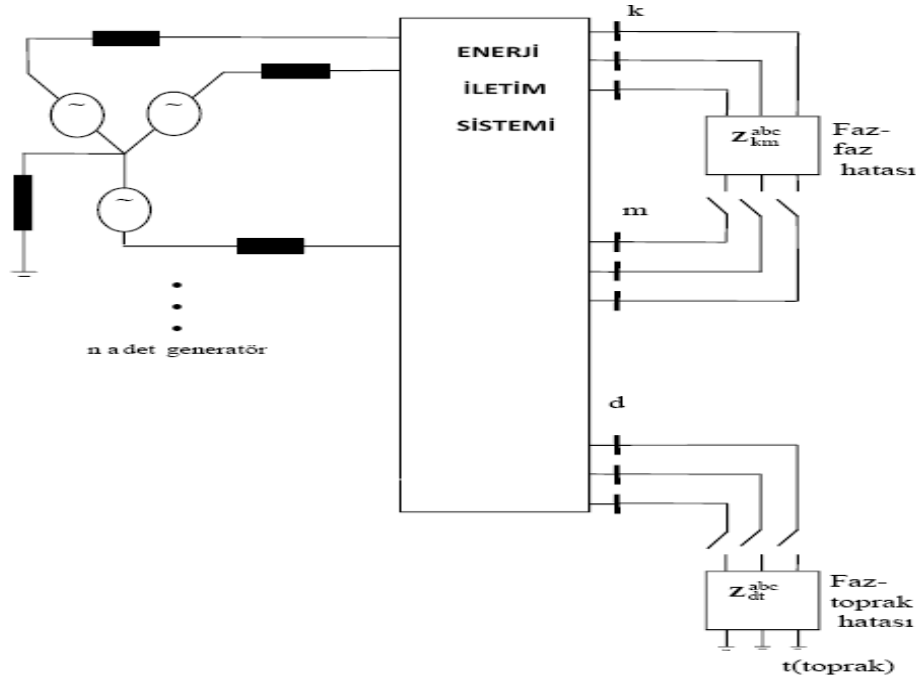
3.1. Kısa devre akımı hesaplama yöntemi

Büyük boyutlu veya çok devreli enerji sistemlerine ilişkin kısa devre hesaplamalarında sistemin doğru, ters ve sıfır bara empedans ile bara admitans matrislerinin oluşturulması gerekir. Bara empedans

matrisi $[Z_{\text{bara}}]$ oluşturulması için ise iki ayrı yaklaşım göze çarpmaktadır. Birinci yaklaşımda tüm sisteme ilişkin bara admitans matrisi $[Y_{\text{bara}}]$ oluşturularak, sonra bunun tersi $[Z_{\text{bara}}]$ elde edilmektedir. İkincisinde ise adım adım $[Z_{\text{bara}}]$ oluşturularak, $[Y_{\text{bara}}]$ matrisine gerek duyulmamaktadır [7].

3.2. Enerji sistemi hata modeli

Dengeli hatalarda sisteme ilişkin empedansların doğru bileşen değeri kullanılırken, simetrik olmayan hatalarda ise sistemdeki empedansların doğru bileşen değerlerine ilaveten ters ve sıfır bileşen değerleri de dikkate alınmaktadır. Şekil 1.'de enerji sistemine ilişkin genel hata modeli gösterimi bulunmaktadır. Hata öncesi sistem dengeli olduğu için doğru, ters ve sıfır bileşen devreler arasında kuplaj bulunmamakta olup, dolayısıyla bu devrelere ilişkin I_1 , I_2 ve I_0 akımları da sıfırdır.



Şekil 1. Enerji sistemi hata modeli gösterimi

3.3. Üç faz kısa devre hesaplamaları

Şebekenin bir noktasında üç fazlı bir kısa devre durumunda a, b ve c fazlarına sahip gerçek sistemin faz-nötr gerilim değerleri;

$$V_a = 0, V_b = 0, V_c = 0 \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} \text{ Volt} \quad (2)$$

olur. (1) eşitliği ile verilen ilk koşullar (2) eşitliğinde kullanılırsa;

$$\begin{pmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} * \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ Volt (3)}$$

elde edilmektedir. Bunlar matrisel formda,

$$\begin{pmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ V_H \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} \text{ Volt (4)}$$

olarak yazılır. Buradan (3) eşitliğinin sonuçları (4) eşitliğinde yerine konulursa bileşen devre akımları;

$$\begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ V_H / Z_1 \\ 0 \end{pmatrix} \text{ Amper (5)}$$

ifadesine eşit olur. Buradan;

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 \quad (6)$$

$$I_b = I_0 + a^2 I_1 + a I_2 \quad (7)$$

$$I_c = I_0 + a I_1 + a^2 I_2 \quad (8)$$

(6), (7) ve (8) eşitlikleri (5) ifadesi ile birlikte ele alınırsa, gerçek sisteme ilişkin üç fazlı kısa devre akım değerleri bulunur.

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{V_H}{Z_1} \\ a^2 * \frac{V_H}{Z_1} \\ a * \frac{V_H}{Z_1} \end{pmatrix} \quad (9)$$

Son eşitlikte V_H , kısa devre barasına ilişkin hata öncesi kısa devre noktasındaki gerilim vektörü, Z_1 ise hatalı baradan devreye bakıldığında görülen Thevenin empedans değeridir [8].

4. Enerji Sistemlerinde Güç Akışı Hesaplamaları

Güç akışı bir sistemin sürekli hal koşullarını karakterize eder. Tipik güç akışı sonuçları bara

gerilimleri ve hata akımlarıdır. Güç akışı hesaplaması güçsistem tasarımı ve analizinde temel bir çalışmadır. Güç akışı probleminin amacı; bara gerilimleri, hat, transformatör, kablo güç akışları, empedansları ve yükleri hesaplayarak, üretimleri belirleyerek enerji arzını karşılamaktır [9]. Sürekli hal koşulu altında, dengeli ve üç fazlı enerji sistemlerinde kullanılan güç akışı algoritmasında kullanılan kabuller [10];

- Generatörler sisteme bağlı tüm yük taleplerini ve iletim hatlarındaki toplam güç kaybını karşılar.
- Tüm bara gerilim genlikleri nominal gerilim sınırları civarındadır.
- Generatörler kendilerine ait aktif ve reaktif güç sınırlarını aşmazlar.
- İletim hatları ve transformatörler aşırı yüklenmezler.

Algoritma bitirildiğinde sistemdeki tüm bara gerilim genlik ve açıları, gerilim düşümleri, iletim hatları üzerinden akan aktif ve reaktif güçler ve sisteme ilişkin toplam güç kaybı hesaplanmış olur.

4.1. Güç akışı hesaplama yöntemleri

Bara sayısı n adet olan simetrik ve dengeli bir enerji sisteminde i. baradan alternatif akım hattına verilen kompleks güç birim değeri olarak (bir faz için);

$$S_i = p_i + jq_i = v_i i_i^* \quad (10)$$

ifadesi ile yazılır. Yukarıda verilen akım fazörü eşlenik değeri, bara gerilimleri ve sistem elemanlarının admitansları cinsinden yazılırsa;

$$i_i^* = \sum_{j=1}^n y_{ij}^* v_j^* \quad (i. \text{ bara için}) \quad (11)$$

olur. (10) ifadesindeki v_i yerine,

$$v_i = v_i^* (\cos \delta_i + j \sin \delta_i) \quad (12)$$

ifadesi kullanılabilir. v_i ; i. baraya ilişkin kompleks değerdir. v_j^* ise j. baraya ilişkin eşlenik bara gerilim değeridir. δ_i ; verilen bir referansa (genellikle salınım barasına) göre i. baranın gerilim faz açısıdır. y_{ij} admitansı, $[y_{\text{bara}}]$ admitans matrisinin (i,j) elemanı olup,

$$y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij} \quad \text{ifadesi olarak yazılır. (13)}$$

(11), (12) ve (13) eşitlikleri (10) ifadesinde yerine konularak, ifade düzenlenirse;

$$S_i = v_i \sum_{j=1}^n v_j (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) + jv_i \sum_{j=1}^n v_j (g_{ij} \sin \delta_{ij} + b_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (i = 1, \dots, n) \quad (14)$$

olur. (14) eşitliğinde kullanılan δ_{ij} ,

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j \quad (15)$$

değerinde olup, i. ve j. bara gerilim fazörlerinin açıları arasındaki faz farkıdır. i. baradan alternatif akım hattına verilen aktif ve reaktif güç değerleri;

$$p_i = v_i \sum_{j=1}^n v_j (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (16)$$

$$q_i = v_i \sum_{j=1}^n v_j (g_{ij} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (17)$$

$$p_i - (p_{gi} - p_{yi}) = p_i - p_{hati} = g_{pi} = 0 \quad (i = 2, \dots, n) \quad (18)$$

$$q_i - (q_{ci} - q_{yi}) = q_i - q_{hati} = g_{qi} = 0 \quad (i = ng+1, \dots, n) \quad (19)$$

denklemlerini sağlaması durumunda son bulur. Enerji iletim sistemlerinde her bir baranın tüm özellikleri aşağıdaki dört değişken yardımı ile belirlenmektedir. Bunlar; p_{hati} , q_{hati} , v_i ve δ_i değerleridir. Güç akışı hesaplamalarında bu değişkenlerden her bir bara için iki tanesinin bilindiği kabul edilerek, bilinmeyen diğer ikisi hesaplanmaya çalışılır.

4.2. Güç sistemlerindeki bara çeşitleri

Güç sistemlerindeki baralar;

- Salınım (Slack) bara olarak bilinen bara türünde v_i ve δ_i değerleri bilinir. Diğer bir ifade ile bu iki değer sabit tutulmaya çalışarak, p_{hati} , q_{hati} değişkenleri hesaplanır.
- Diğer bara türü p_{hati} ve v_i değerlerinin bilindiği için, q_{hati} ve δ_i değerlerinin arandığı PV olarak sembolize edilen gerilim kontrollü bara veya generatör barasıdır.
- Üçüncü bara türü ise p_{hati} ve q_{hati} değerlerinin bilinip v_i ve δ_i değerlerinin arandığı PQ yük barasıdır [12].

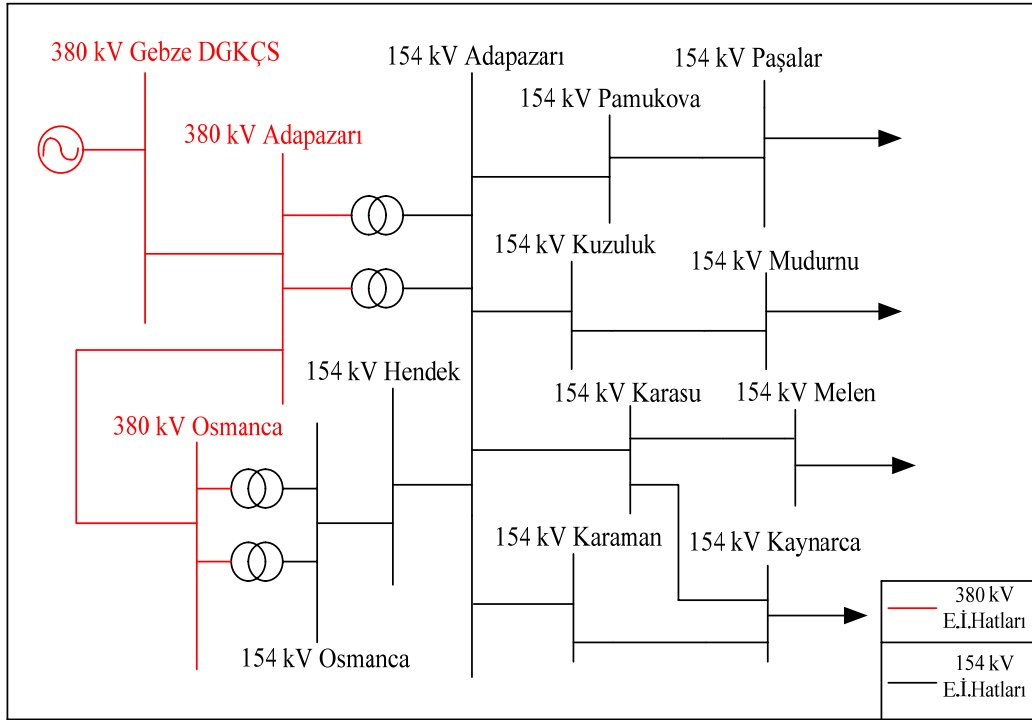
Güç akışı hesaplamalarında kontrol değişkenleri sabit kabul edilerek bu değişkenler yardımı ile durum

olur [11]. i. baraya bağlı generatör aktif gücü p_{gi} , i. baraya bağlı yükün aktif bileşeni p_{yi} ve i. baraya bağlı tüm hatlara verilen aktif güç değeri p_i ise, i. baradaki aktif güç dengesinden, $p_{gi} = p_{yi} + p_i$ ifadesi yazılır. i. baraya bağlı generatör reaktif gücü q_{gi} , i. baraya bağlı kontrol edilebilen şönt reaktif üreteç güç değeri q_{ci} , i. baraya bağlı yükün reaktif bileşeni q_{yi} ve i. baraya bağlı tüm hatlara verilen reaktif güç değeri q_i ise, i. baradaki reaktif güç dengesinden, $q_{gi} + q_{ci} = q_{yi} + q_i$ ifadesi yazılır. Güç akışı algoritması,

değişkenleri bulunur. Durum değişkenleri olarak tüm baralara ilişkin δ_i gerilim açısı değerleri (salınım barası hariç) ve yük bara gerilimlerinin v_i gerilim genlik değerleri seçilir. Kontrol değişkenleri olarak ise generatör baralarına ilişkin v_{gi} gerilim genlik değerleri, ayarlanabilir reaktörlerin q_{ci} reaktif güç değerleri ve sürekli ayarın yapılabildiği transformatörlerin t_i kademe ayar değerleri alınır [13].

5. Sakarya İli İletim Şebekesinin Modellenmesi

Sakarya ili 380/154 kV elektrik iletim şebekesi Adapazarı, Hendek, Karaman, Kaynarca, Karasu, Kuzuluk ve Pamukova TM'leri ile 380 ve 154 kV enerji iletim hatlarından oluşmaktadır. Matlab yazılım programından simulink araç kutusu kullanılarak, güç akışı sonucunda oluşan akım-gerilim değişimleri, kısa devre akımları ve gerilim düşümü grafikleri incelenmiştir. Şekil 2.'de Sakarya ili 380/154 kV iletim şebekesi haritası görülmektedir [14].

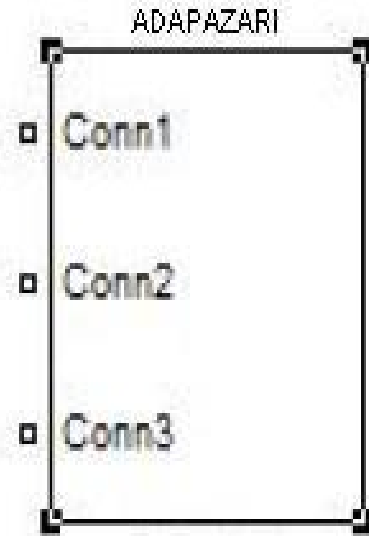


Şekil 2. Sakarya ili 380/154 kV iletim şebekesi prensip şeması

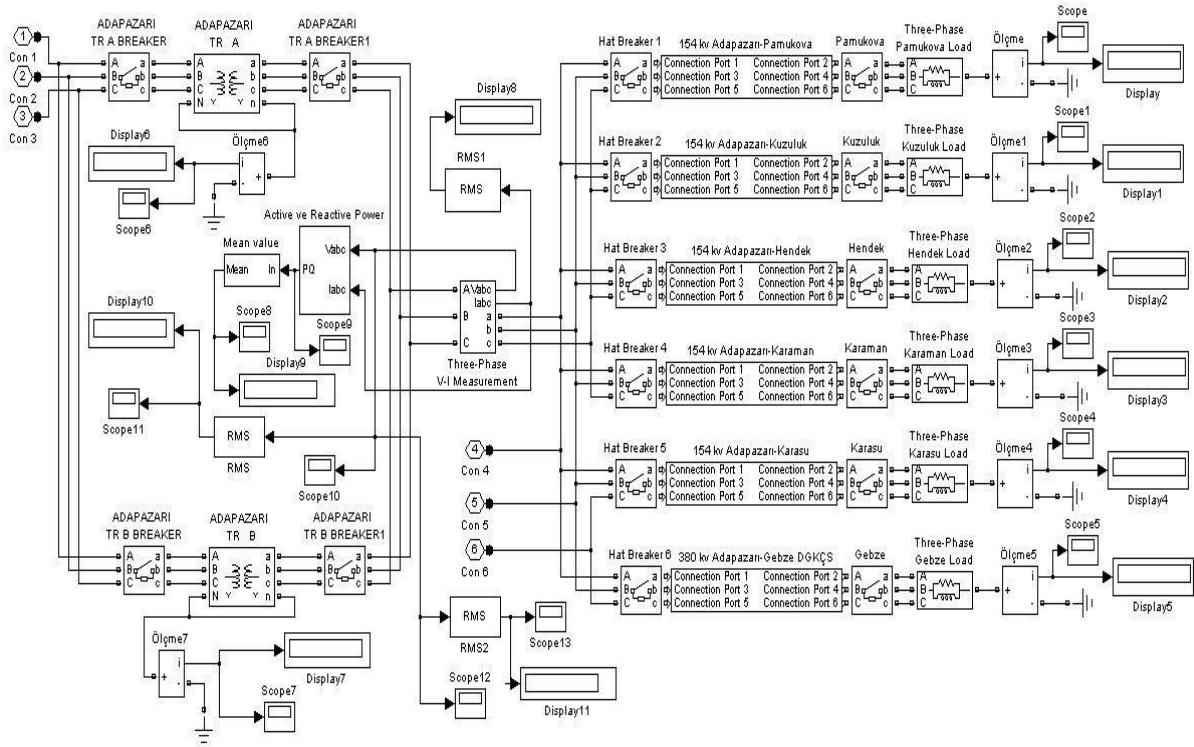
Şekil 2.'deki prensip şemasında, Sakarya ili 380/154 kV iletim şebekesini oluşturan enerji üretim santrali, trafo merkezleri ve enerji iletim hatları arasındaki bağlantı görülmektedir. Bu prensip şemasından hangi trafo merkezinin hangi üretim kaynağından beslendiği, trafo merkezlerinin hangi bölgeleri beslediği ve aralarındaki enerji iletim bağlantı noktaları görülmektedir. Şekil 2.'deki prensip şemasında 380 kV enerji iletim hatları kırmızı renkli olarak, 154 kV enerji iletim hatları ise siyah renkli olarak verilmiştir.

5.1. Trafo merkezlerinin modellenmesi

Trafo merkezi modellemelerinde, Matlab yazılım programının Simulink araç kutusunun "Subsystem" fonksiyonundan yararlanılmıştır [15]. Bu fonksiyon sayesinde, istenilen sayıda uygulama iç içe kutucuklar halinde modellenerek, çok karmaşık olan sistemler çok basit bir hale dönüştürülebilmektedir [16]. Şekil 3.'de Adapazarı T.M'nin alt sistem modellenmesi, şekil 4.'de ise Adapazarı T.M'nin alt sistem modelinin iç yapısı verilmiştir.



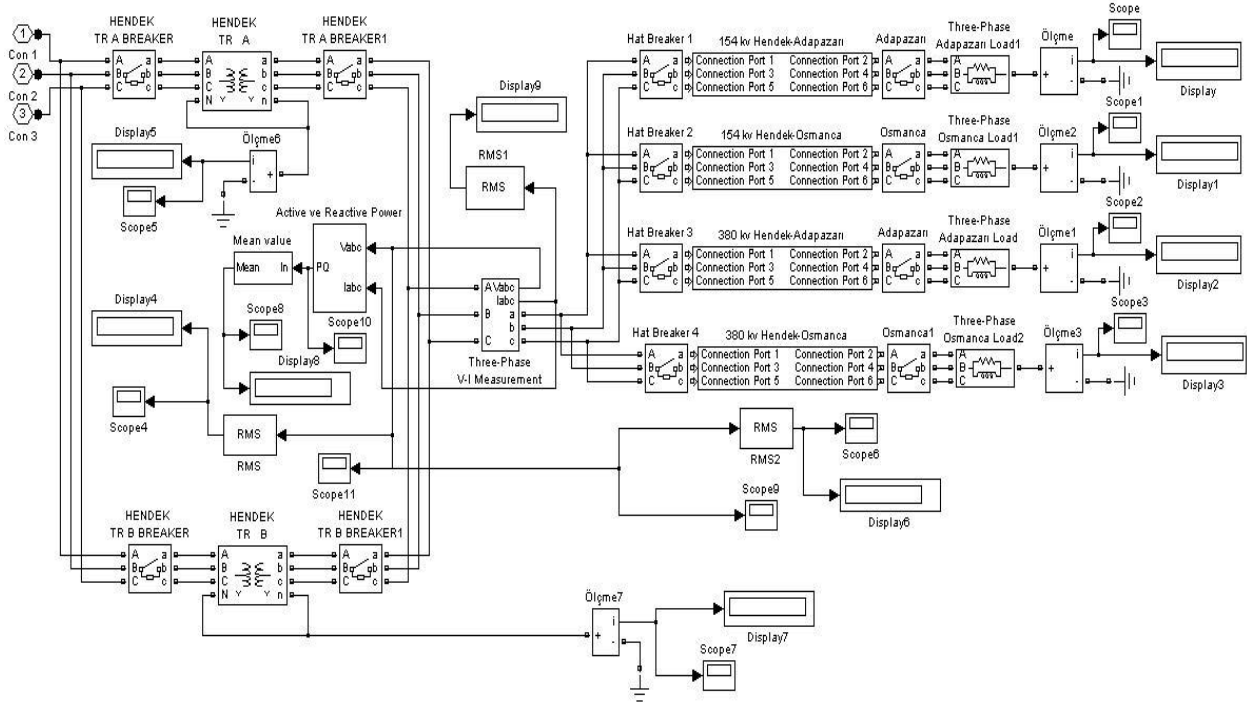
Şekil 3. Adapazarı TM alt sistem modellenmesi



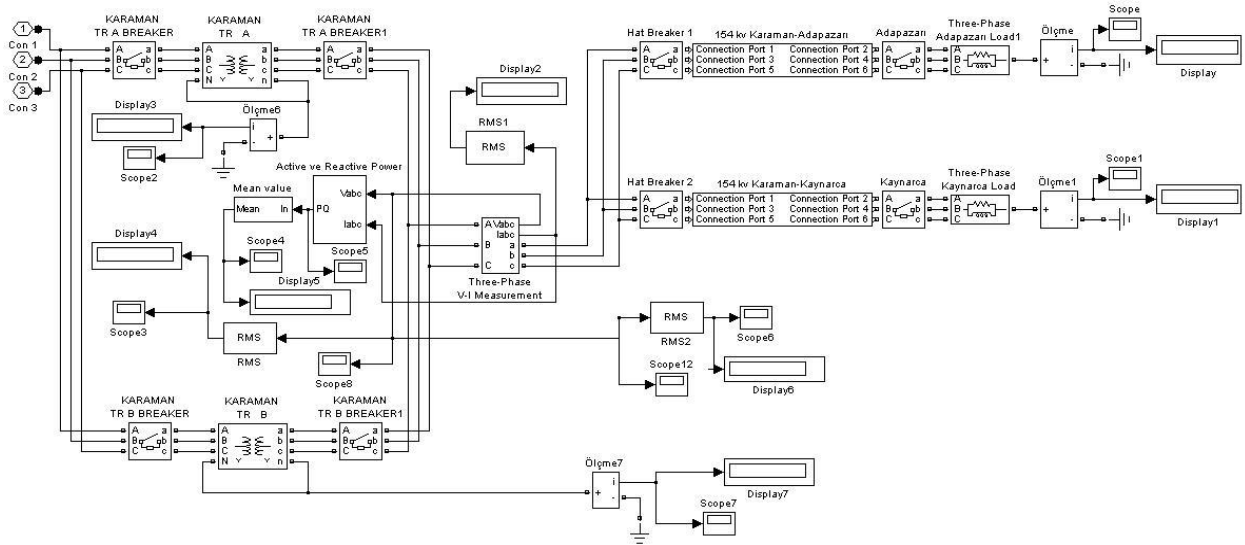
Şekil 4. Adapazarı TM alt sistem modelinin iç yapısı

Şekil 5.'de Hendek T.M'nin alt sistem modelinin iç yapısı, Şekil 6.'da Karaman T.M'nin alt sistem modelinin iç yapısı, Şekil 7.'de Karasu T.M'nin alt sistem modelinin iç yapısı, Şekil 8.'de Kaynarca T.M'nin alt sistem modelinin iç

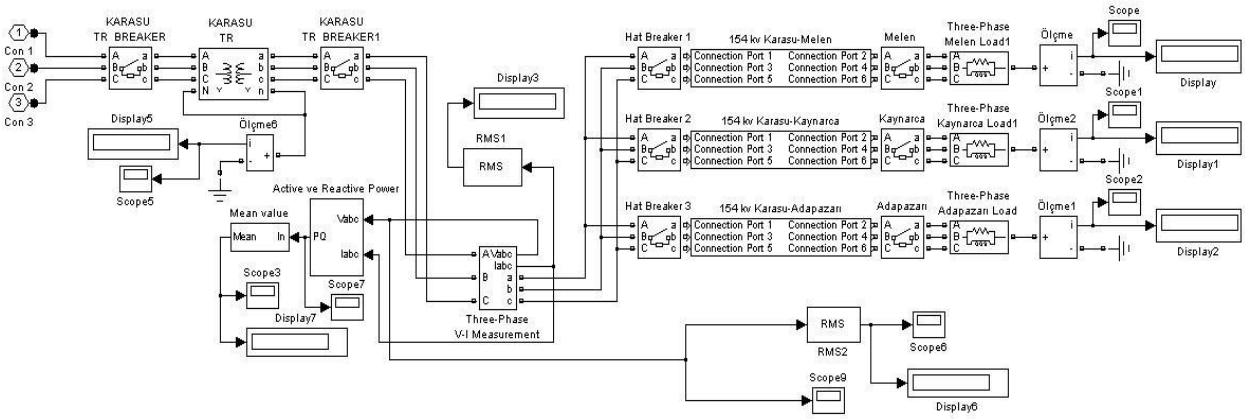
yapısı, Şekil 9.'da Kuzuluk T.M'nin alt sistem modelinin iç yapısı, Şekil 10.'da ise Pamukova T.M'nin alt sistem modelinin iç yapısı verilmiştir.



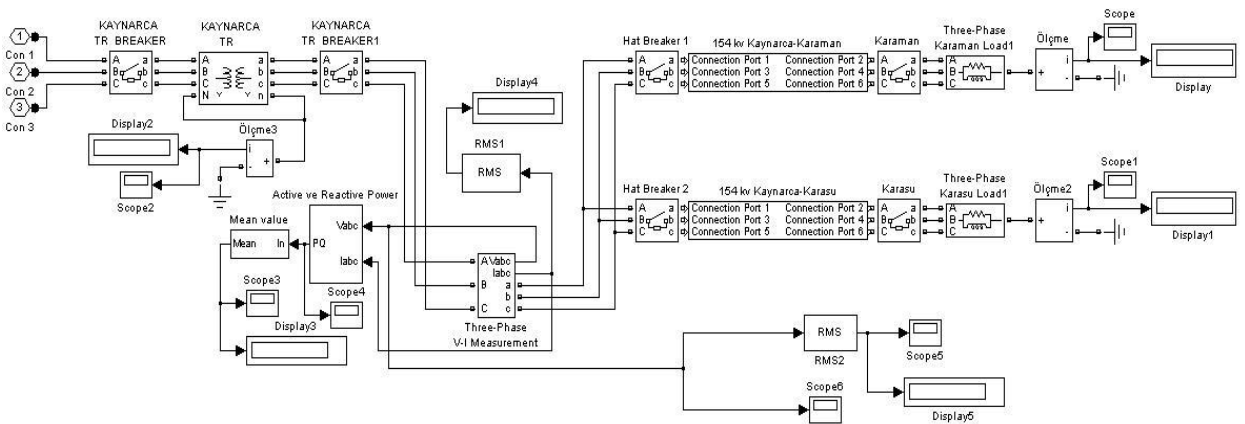
Şekil 5. Hendek TM alt sistem modelinin iç yapısı



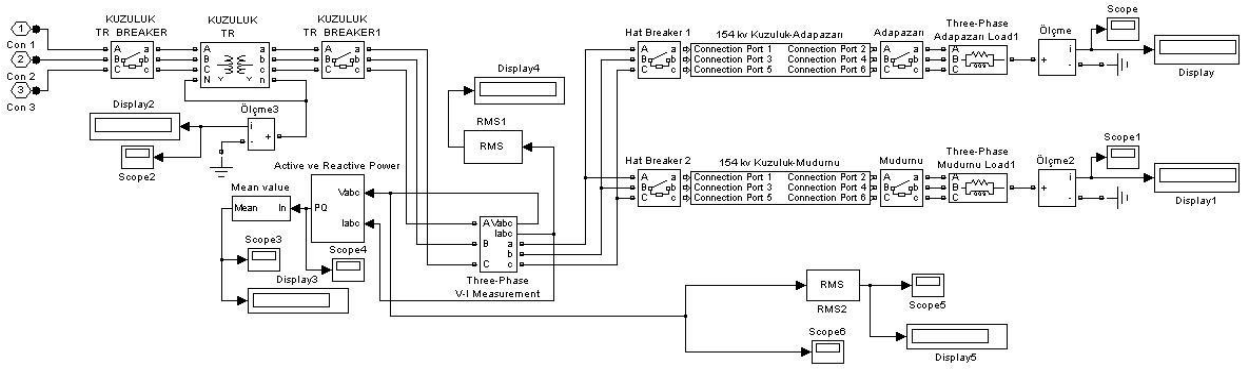
Şekil 6. Karaman TM alt sistem modelinin iç yapısı



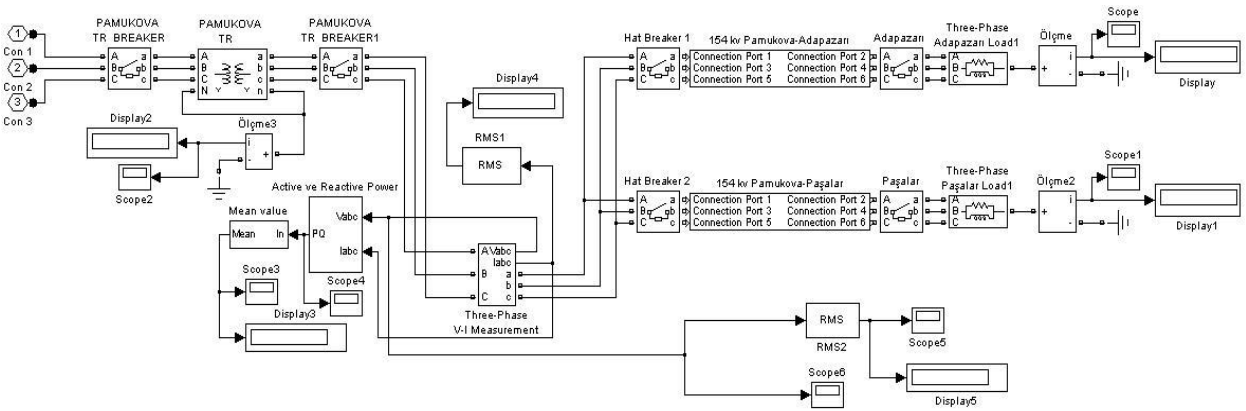
Şekil 7. Karasu TM alt sistem modelinin iç yapısı



Şekil 8. Kaynarca TM alt sistem modelinin iç yapısı



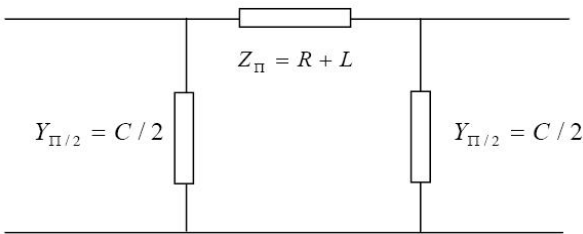
Şekil 9. Kuzuluk TM alt sistem modelinin iç yapısı



Şekil 10. Pamukova TM alt sistem modelinin iç yapısı

5.2. Enerji iletim hatlarının modellenmesi

Şekil 11.'de enerji iletim hatlarında kullanılan π (π) eşdeğer devresi bulunmaktadır. Devre sistem empedansı ile paralel yarım iki admittanstan oluşmaktadır. Devre empedansı iletenin direnç ile reaktans değerleri toplamına, admittans (Y) ise kapasitans değerine eşittir [17].

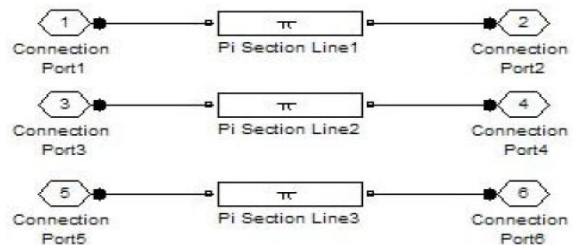
Şekil 11. Enerji nakil hattının π (π) eşdeğer devresi

Şekil 12.'de Sakarya ili 380/154 kV iletim şebekesi modellenmesinin ana şemasında kullanılan enerji nakil hattı sembolü, şekil 13.'de ise π (π) eşdeğer

devresine ilişkin alt sistem modelinin iç şeması verilmiştir.



Şekil 12. Enerji nakil hattı sembolü



Şekil 13. Enerji nakil hattının alt sistem modelinin iç şeması

π (pi) eşdeğer devresine ilişkin blok diyagramında frekans, direnç, endüktans ve kapasitans bileşenleri ile hattın uzunluğu gibi parametreler bulunmaktadır. Enerji iletim hattına ait parametre değerleri, ilgili alana birimleriyle birlikte girilmiştir. Parametre değerleri her bir faz için ayrı ayrı olarak simülasyon çalışmasına girilmiştir. Enerji iletim hattının uzunluğu, iletken kesiti, kilometre başına direnç, endüktans ve kapasitans değerleri Teiaş'dan alınmıştır [18].

5.3. Trafoların modellenmesi

Y-Y, Δ -Y ve zigzag bağlantı gruplarında üretilerek, enerji iletim sisteminin özelliklerine göre bağlanırlar [19].

5.3.1. Y-Y bağlantılı trafo

Birincil ve ikincil sargısı yıldız bağlı olan trafolardır. Yıldız bağlantının avantajı, şebekede faz-faz geriliminden, faz-nötr geriliminin elde edilmesini sağlar. Sadece yıldız sargı içeren transformatörlerde simetrik olmayan yüklerde olumsuz bir durum söz konusudur. Sinüs şeklinde bir akının meydana gelmesi için, üç ve üçün katı harmonikler oldukça önemlidir. Yıldız bağlı trafolar bu akılar aynı fazda olduklarından sıfır noktasında yığılırlar [20]. Y-Y bağlı transformatör sembolü Matlab'ın simulink araç kutusunda şekil 14.'de görüldüğü gibidir.



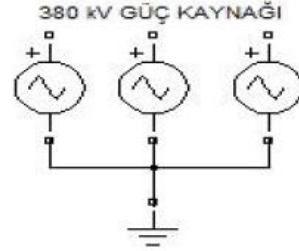
Şekil 14. YN-YN bağlantılı trafo sembolü

5.3.2. Δ - Y bağlantılı trafo

Sargılardan biri üçgen, diğeri yıldız bağlı olan trafolardır. Üç fazlı transformatörler en çok görülen bağlantı şekillerindedir. Üçgen sargıda akılar sargıların üzerinden geçtiğinden sinüs formunu elde etmede sorun yaşanmaz. Fakat üçgen sargıda sarımlar arası faz gerilimine maruz kaldığı için yıldız sargıya göre eşit değerlerde bir faz-faz gerilimi meydana getirilmek istenirse, %73 daha fazla sarım kullanılması gerekir. Ayrıca sargının her iki ucu da faz-faz arası gerilime maruz kaldığı için yalıtım maliyeti yıldız sargıya göre daha fazla olacaktır. Bu yüzden yüksek gerilimlerde üçgen sargıdan kaçınılmaya çalışılmaktadır [21].

5.4. Gerilim kaynaklarının modellenmesi

Gerilim kaynakları kullanılarak, iletim sisteminin modellenmesi basitleştirilmiştir. Modelleme esnasında 380 ve 154 kV' luk gerilim kaynakları kullanılmıştır. Şekil 15.'de Matlab'da kullanılan 380 kV gerilim kaynağı sembolü gösterilmektedir.

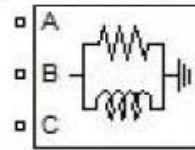


Şekil 15. 380 kV kaynak sembolü

380 kV gerilim kaynağının blok parametre diyagramında tepe gerilim, frekans ve faz açısı değerleri yer almaktadır. Faz açıları 0° , 120° ve 240° olarak simulink programında kullanılmıştır. Sistemde kullanılan diğer gerilim kaynakları içinde aynı durum gerçekleştirilerek, faz sırası dikkate alınmıştır.

5.5. Yüklerin modellenmesi

İletim sistemleri üç fazlı sistemler olduğu için, üç fazlı paralel RLC yükü kullanılarak modelleme yapılmıştır. Şekil 16.'da Matlab programı simulink araç kutusunda kullanılan üç fazlı paralel RLC yükü verilmiştir. Blok diyagram parametrelerinde yükün gerilim, aktif, indüktif reaktif ve kapasitif reaktif yük bileşenleri bulunmaktadır. Bu değerler trafo merkezinde bulunan mevcut fider sayaçlarından alınmıştır.



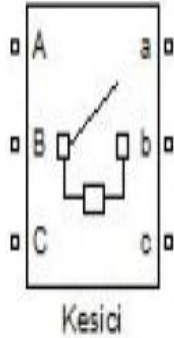
Şekil 16. Üç Fazlı Paralel RLC Yük

Şekil 16. Yük sembolü

5.6. Kesicilerin modellenmesi

Kesiciler yük akımlarını ve kısa devre akımlarını kesmeye yarayan cihazlardır [22]. Enerji iletim hatlarında ve trafolarında zaman zaman çeşitli arızalar meydana gelmektedir. Arızalanan elektrik teçhizatının en kısa zamanda gerilimsiz hale getirilmesi gerekir. Elektrik şebekesindeki arızalar röleler vasıtasıyla tespit edilerek, kesicilere açma

kumandası verilir. Bunun için sistemde kesicilerin önemi büyüktür.



Şekil 17. Kesici sembolü

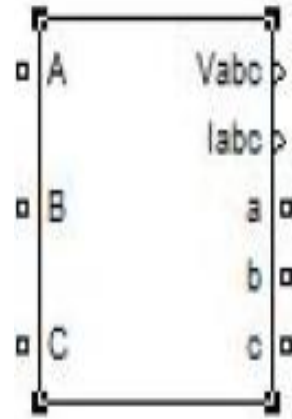
Şekil 17.'de Matlab yazılım programının simulink araç kutusunda kullanılan kesicinin sembolü verilmiştir. Kesicinin blok parametre diyagramında kesicinin zaman ayarları yapılmıştır.

5.7. Ölçü sisteminin modellenmesi

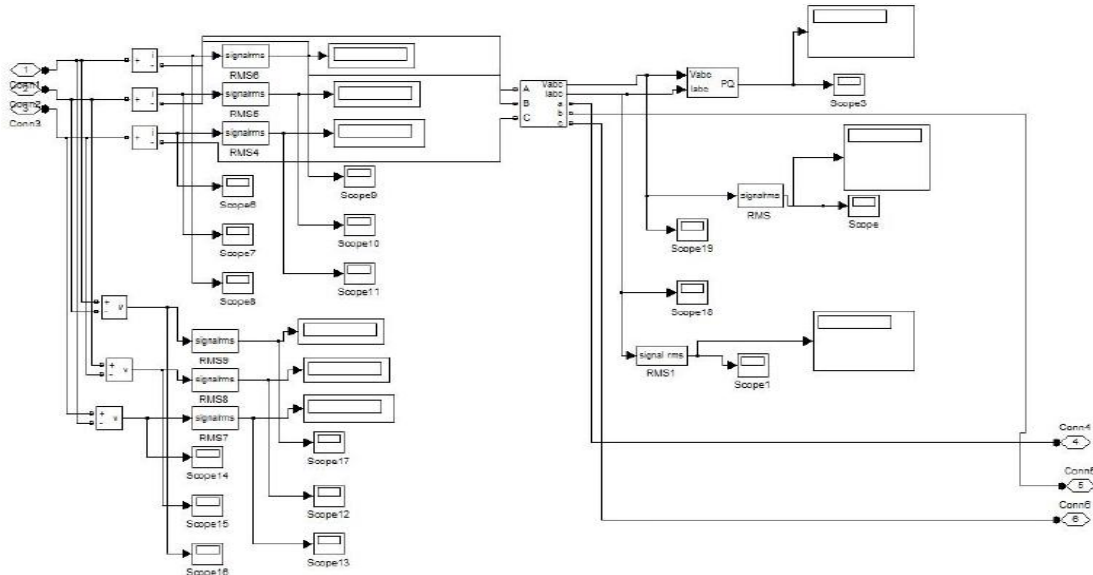
Ölçü elemanları iletim şebekesinin bilgisayar ortamında analiz edilmesinde kullanılan en önemli görsel elemanlardır. Şekil 18.'de kullanılan ölçü metre sembolü verilirken, şekil 19.'da Matlab yazılım programının simulink araç kutusunda kullanılan üç fazlı ölçü metre sembolü, şekil 20.'de ise ölçü metre sembolüne ait alt sistem modelinin iç şeması verilmiştir. Şekil 19.'da ki sembol ile devredeki üç fazlı akım ve gerilim ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 18. Ölçü metre sembolü



Şekil 19. Üç fazlı ölçü metre sembolü



Şekil 20. Ölçü metre alt sistem modelinin iç şeması

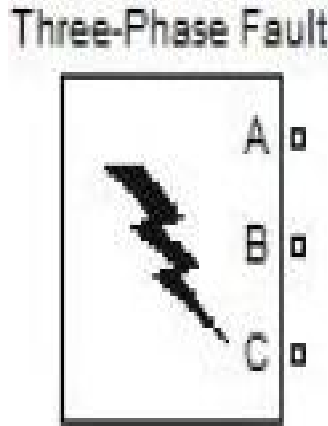
Şekil 21.'de Matlab yazılım programının simulink araç kutusunda kullanılan üç fazlı watt metre sembolü verilmiştir. Bu sembol ile devredeki üç fazlı güç ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 21. Üç fazlı watt metre sembolü

5.8. Arızanın modellenmesi

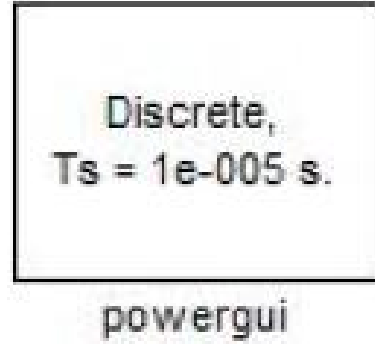
Trafo ve enerji nakil hatlarında çeşitli arızalar oluşmaktadır. Bu arızalar sonucunda şebekede kısa devre, açma ve enerji kayıpları meydana gelmektedir. Mevcut enerji şebekelerinde oluşan arızalar hata olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 22. Üç faz hata sembolü

Şekil 22.'de üç faz hata sembolü verilmiştir. Üç faz hata sembolünde açılma ve kapanma zamanları dış simulink sinyali yada iç kontrol zamanlayıcısı olan üç faz devre anahtarı ile yürütülür [15].

5.9. Grafikselle kullanıcı ara yüzü (Powergui)



Şekil 23. Powergui blok sembolü

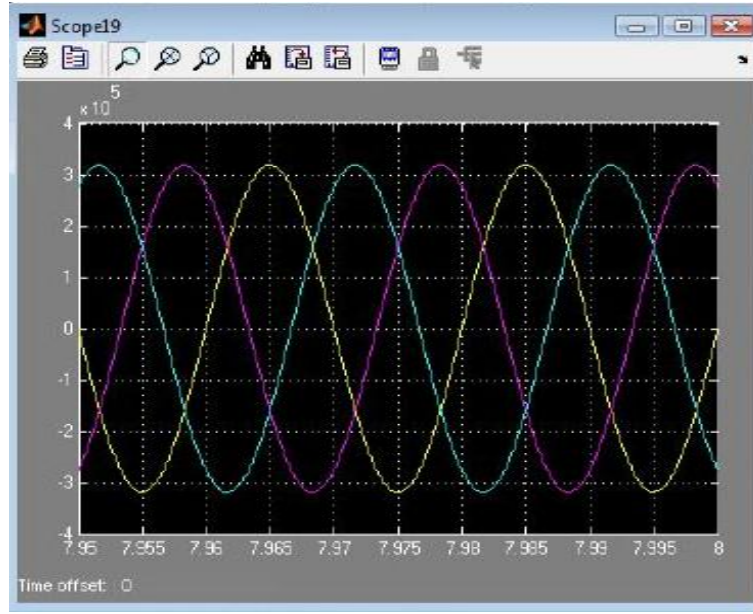
Şekil 23.'de grafikselle kullanıcı ara yüzü sembolü verilmiştir. Powergui bloğu, güç simülasyonu içeren her simulink araç kutusu modelinde gereklidir. Sistem modelinin durum boşluk denklemlerini ifade eden eşdeğer simulink devrelerini depolamak için kullanılır [16]. En iyi performans için powergui bloğunu diyagramın üst seviyesine yerleştirir. Fakat alt sistemlerde uygun olan istenilen yere yerleştirilmesi çalışmasını etkilemez. Her model için en fazla bir blok kullanılabilir.

6. Modellenen Sistemde Güç Akışı ve Kısa Devre Analiz Grafikleri

Sakarya ili 380/154 kV iletim şebekesinin bilgisayar ortamında modellenmesinin simülasyon sonuçlarından elde edilen güç akışı ve kısa devre grafikleri aşağıda verilmiştir. Göstergelerde (Display) etkin (efektif) değerler görülmektedir. Bu durum alternatif akımla çalışan ölçü aletlerinin tasarımından kaynaklanmaktadır. Buna karşın osiloskop (Scope) çıkışlarında sinüs dalgasının tepe değerleri görülmektedir.

6.1. Güç akışı grafikleri

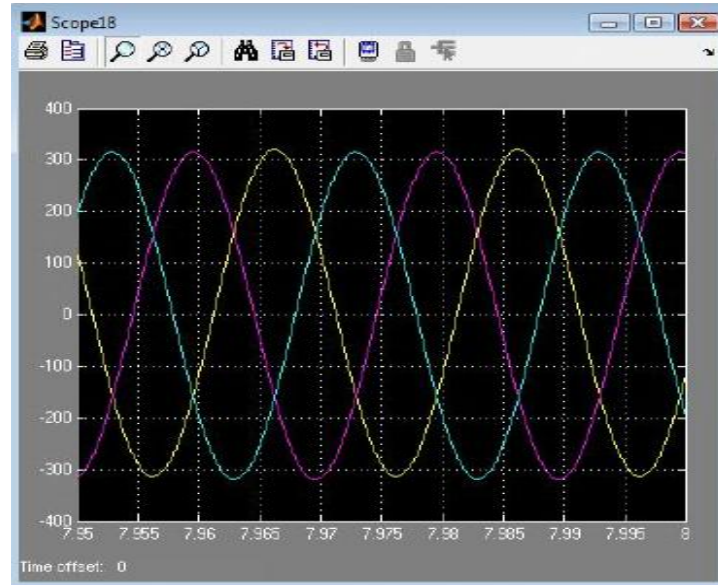
Şekil 24.'de Adapazarı T.M.'nin 380 kV kaynaktan beslenen ana gerilim değerlerinin değişimi görülmektedir. Güç akışı sonunda elde edilen gerilim değişim değerlerinin osiloskop görüntüsü bulunmaktadır. Göstergede 2.253×10^5 V olarak okunan değer, osiloskopda 3.186×10^5 V tepe değerine sahip sinüs dalgası olarak görülmektedir.



Şekil 24. Adapazarı trafo merkezi 380 kV ana bara gerilim değerleri

Şekil 25.'de Adapazarı T.M.'nin 380 kV kaynaktan beslenen ana bara akım değerlerinin değişimi görülmektedir. Göstergede 224.2 A olarak okunan

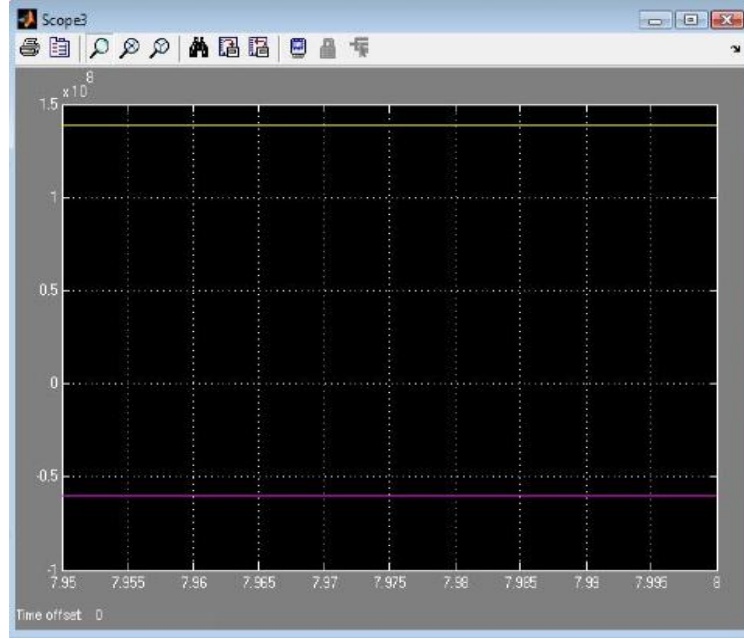
değer, osiloskopda 317 A tepe değerine sahip sinüs dalgası olarak görülmektedir.



Şekil 25. Adapazarı trafo merkezi 380 kV ana bara akım değerleri

Şekil 26.'da Adapazarı T.M.'nin 380 kV kaynaktan beslenen ana bara aktif ve reaktif güç değerlerinin değişimi görülmektedir. Osiloskop çıkışı 380 kV kaynaktan beslenen iletim şebekesinin çektiği ortalama aktif ve reaktif güç değerleridir. Ekran

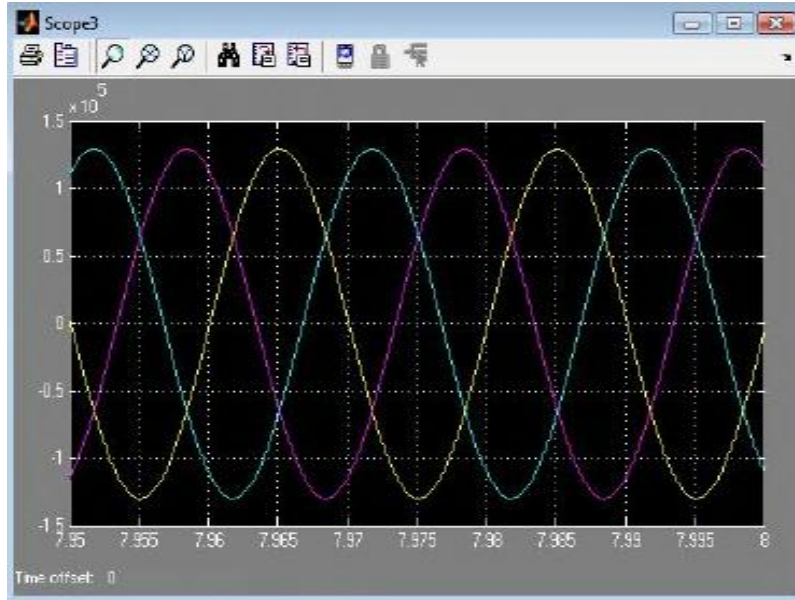
görüntüsünün yukarı kısımda kalan sarı renkli değişim grafiği aktif gücü gösterirken, aşağı kısımda kalan bordo renkli değişim reaktif gücü göstermektedir.



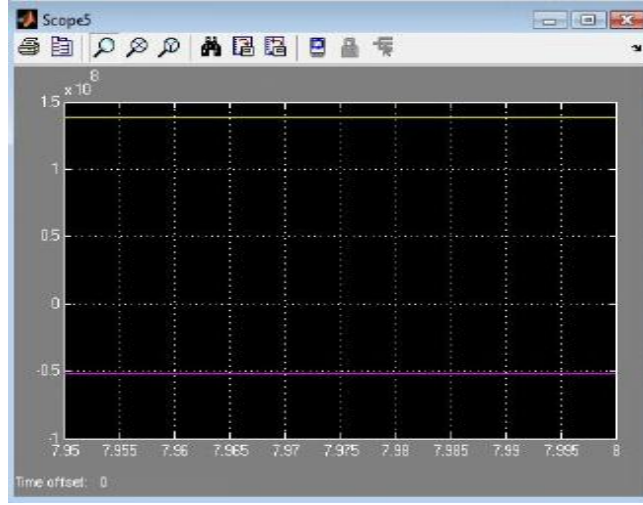
Şekil 26. Adapazarı trafo merkezi 380 kV ana bara aktif ve reaktif güç değerleri

Şekil 27. ve Şekil 28.'de Adapazarı T.M.'nde paralel olarak çalışan 2x250 MVA (Mega Volt-Amper) trafoların ikinci sargı çıkışından elde edilen

gerilim, aktif ve reaktif güç değişim grafikleri görülmektedir.



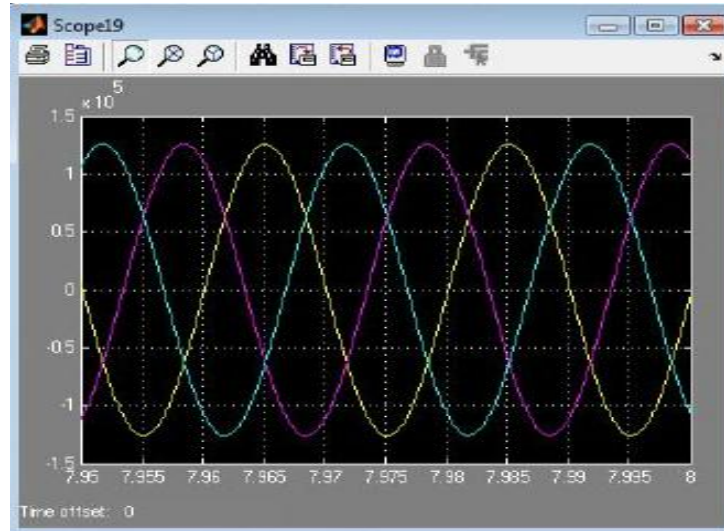
Şekil 27. Adapazarı trafo merkezi 154 kV çıkış barası gerilim değerleri



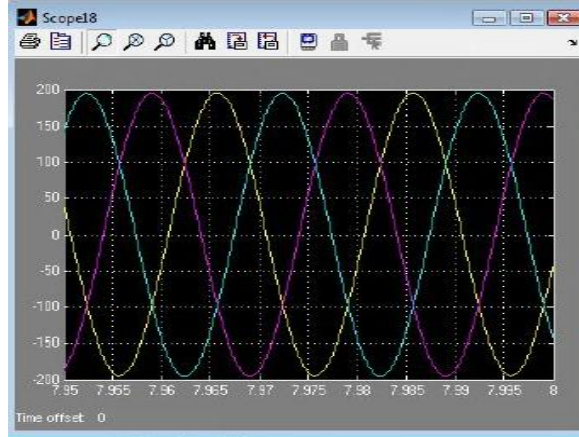
Şekil 28. Adapazarı trafo merkezi 154 kV çıkış barası aktif ve reaktif güç değerleri

Şekil 29.'da Hendek T.M.'nin 154 kV iletim şebekesine bağlı birinci sargı ana bara gerilim değerlerinin değişimi görülmektedir. Göstergede 8.895×10^4 V olarak okunan ana bara giriş gerilim değeri osiloskopda 1.258×10^5 V tepe değerine sahip sinüs dalgası olarak görülmektedir. Göstergede 8.895×10^4 V olarak okunan gerilim değeri faz-nötr gerilimidir. Şekil 29.'da güç akışı sonucunda göstergede bulunan faz-nötr gerilim değerini $\sqrt{3}$ ile çarptığımız zaman faz-faz gerilim değerini 1.54×10^5 V olarak buluruz. Hendek T.M. giriş ana bara gerilimleri arasındaki faz açısı Şekil 29.'da ki osiloskop çıkışında bulunan renkli sinüs dalga eğrilerinden görülmektedir. Şekil 30.'da ise Hendek

T.M.'nin 154 kV iletim şebekesine bağlı birinci sargı taraf giriş ana bara akım değerlerinin değişimi görülmektedir. Göstergede 137.7 A olarak okunan etkin ana bara giriş akım değeri osiloskopda 194.7 A tepe değerine sahip sinüs dalgası olarak görülmektedir. Güç akışı sonucunda göstergede bulunan akım değerini $\sqrt{2}$ ile çarptığımız zaman akım değerini 194.7 A olarak buluruz. Bu durum alternatif akım ile çalışan ölçü cihazların tasarımından kaynaklanmaktadır.



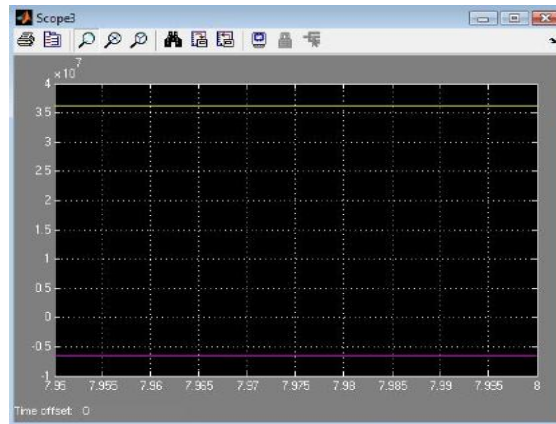
Şekil 29. Hendek trafo merkezi 154 kV giriş ana bara gerilim değerleri



Şekil 30. Hendek trafo merkezi 154 kV giriş ana bara akım değerleri

Şekil 31.'de Hendek T.M.'nin 154 kV iletim şebekesine bağlı giriş ana bara aktif ve reaktif güç değerlerinin değişimi görülmektedir. Güç akışı sonucunda elde edilen ortalama aktif ve reaktif güçler bulunmaktadır. Grafikteki sarı renkli değişim ortalama aktif gücü, bordo renk ise ortalama reaktif gücü göstermektedir. Güç akışı sonucu elde edilen aktif ve reaktif güç değerleri karşılaştırılarak, ilgili trafo merkezinin reaktif ceza oranına girmemesi için gerekli kondansatör ilavesi gerçekleştirilir [23]. Güç akışı sonunda aktif ve reaktif yükler takip edilmekte mevcut trafoya ilave edilebilecek güç bilgisine ulaşarak, enerji planlaması yapılmaktadır. Bununla birlikte trafonun yüklenme sınırına ulaşması durumunda, trafodan beslenen yüklerin mevcut ring dağıtım hatları vasıtasıyla kapasitesi uygun olan trafolarla aktarımı gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca dağıtım fiderlerine takılacak olan sayaçlar vasıtası ile de reaktif güç takibi yapılarak, gerekli yerlere kondansatör ilavesi ile enerji kalitesinin yükseltilmesi

sağlanmaktadır. Güç akışı sonucunda Hendek T.M.'nde ki 154/34.5 kV, 25 MVA TR B'den beslenen yükler tarafından çekilen ortalama aktif ve reaktif güçler bulunmuştur. TR B'den 18.31 MW (MegaWatt) aktif, 3.354 MVAR (Mega Volt Amper Reaktif) reaktif gücün tüketiciler tarafından çekildiği görülmektedir. Trafonun görünür gücü $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ olduğundan TR B'nin kullanılan görünür gücü $\sqrt{(18.31)^2 + (3.354)^2} = 18.61$ MVA olarak hesaplanır. Buradan mevcut 25 MVA trafonun 18.61 MVA 'sı kullanıldığından 6.39 MVA ilave yük verilebileceği tespit edilmiştir. Güç akışı sonucunda trafoların optimum bir şekilde yüklenmesi sağlanacaktır. Diğer trafo merkezleri içinde benzer şekilde simülasyonlar yapılarak güç akışı grafikleri elde edilmiştir.

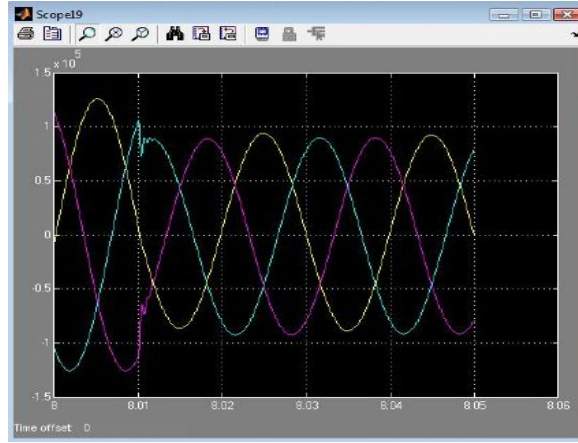


Şekil 31. Hendek trafo merkezi 154 kV giriş ana bara aktif ve reaktif güç değerleri

6.2. Kısa devre grafikleri

Söz konusu iletim sisteminde üç fazlı kısa devre arızası oluşturularak incelenmiştir. Bunun nedeni üç fazlı kısa devre durumunda devreden en büyük akımın geçmesidir. Şebekedeki en büyük akım üç

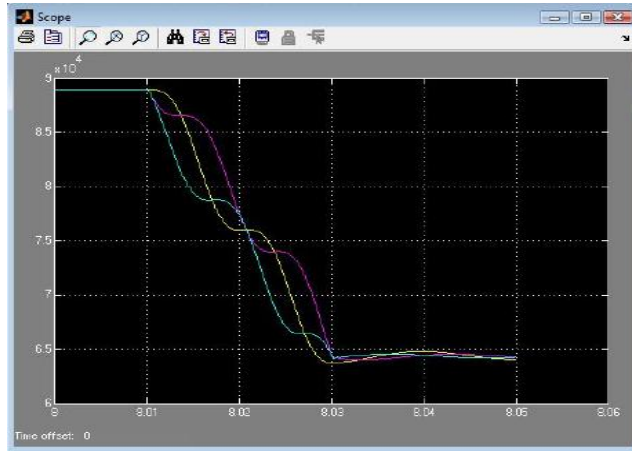
fazlı kısa devre esnasında oluşur. Kısa devre analizi yapılmasının amacı kesicilerin açma gücünü hesaplayarak, ilgili bölgedeki röle koordinasyonunu sağlamaktır [7].



Şekil 32. Hendek trafo merkezi 154 kV giriş ana bara kısa devre gerilim değerleri

Şekil 32.'de Hendek T.M. giriş ana barası kısa devre sonucundaki gerilimdeğişim değerleri görülmektedir. Hendek T.M. TRA Fider 3 enerji nakil hattınınsonunda oluşan kısa devrede Hendek T.M.'nin giriş kısmındaki gerilim grafiğindeki gerilim çökmesinin olduğunu şekil 32.'den rahatlıkla görmekteyiz. Kısa devreninşebekede gerçekleşmesi 8.01 saniyede başlamaktadır. Bu zaman dilimine kadarşebekede güç akışı sonucundaki gerilim

değişimleri 154 kV seviyesinde iken, busüreden sonra 111.3 kV seviyesine düşmektedir. Şekil 32.'de bulunangöstergede kısa devre sonundaki gerilim değerleri 6.425×10^4 V olarak görülmektedir. Şekil 33.'de kısa devre sonucundaki gerilim değişiminin ortalama değerleri görülmektedir. Kısa devre öncesinde 8.895×10^4 V olan ortalama gerilim değeri kısa devre sonunda 6.425×10^4 V olarak görülmektedir.

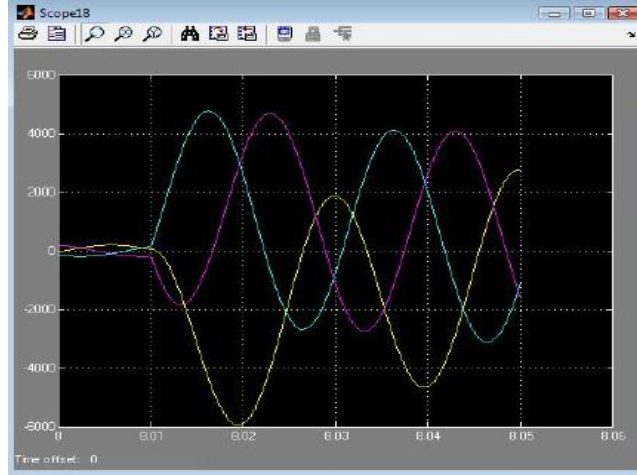


Şekil 33. Hendek trafo merkezi 154 kV giriş ana bara kısa devre ortalama gerilim değerleri

Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 27(1): 19-39 (2011)

Şekil 34.'de Hendek T.M.'nin giriş ana barasında üç faz hata sonucundaki akım değişim grafiği görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere kısa devreden önce akımlar dengeli iken, hatanın olduğu

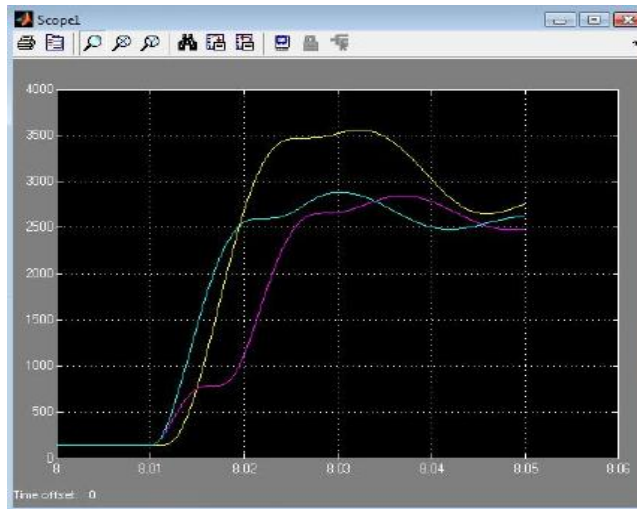
8.01 sn ile 8.05 sn arasında dengenin bozulduğu ve akım değerlerinin yükseldiği görülmektedir. Kısa devreden önce göstergede 137.7 A olarak okunan değer, hata sonunda 2500 A seviyesine ulaşmıştır.



Şekil 34. Hendek trafo merkezi 154 kV giriş ana bara kısa devre akım değerleri

Şekil 35.'de Hendek T.M.'nin giriş ana barasında üç faz hata sonucundaki ortalama akım değişimi görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi kısa devre öncesi ortalama akım değerleri dengeli iken, hatanın olduğu 8.01 sn ile 8.05 sn arasında dengenin bozulduğu ve ortalama akım değerlerinin değiştiği

görülmektedir. Kısa devre sonucunda akım değerinin 20 kat yükseldiği görülmüştür. Bir trafodaki kısa devre gerilim değeri ne kadar küçük ise, o trafodan geçebilecek nominal kısa devre akım değeri o derece büyük olur. Bu sonuç $I_k = I_n / u_k$ bağıntısından elde edilmektedir [8].

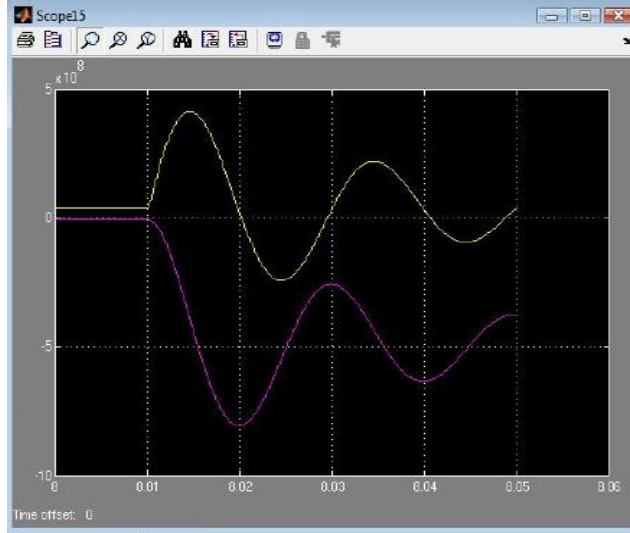


Şekil 35. Hendek trafo merkezi 154 kV giriş ana bara kısa devre ortalama akım değerleri

Şekil 36.'da Hendek T.M.'nin giriş ana barasında üç faz hata sonucundaki aktif ve reaktif güç değişimi

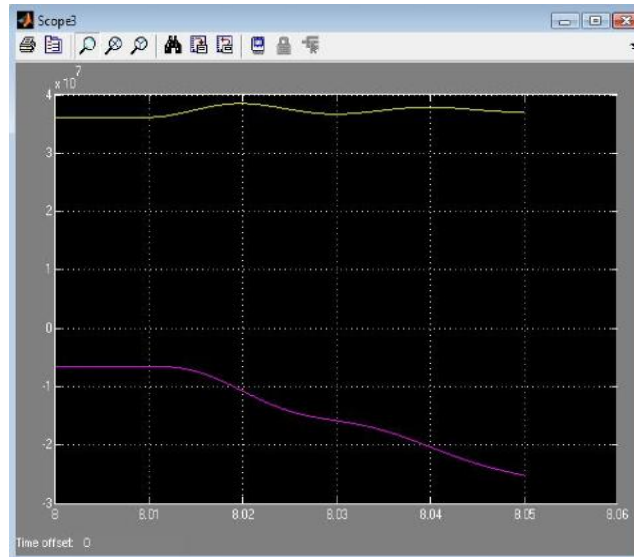
görülmektedir. Hendek T.M. kısa devreden önce 3.616×10^7 W aktif, 6.543×10^6 VAR reaktif güç

çekerken, kısa devrenin sona erdiği 8.05 saniyede çekilmektedir. Bu durum kıs 3.754x10⁷ W aktif, 2.522x10⁷ VAR reaktif güç a devre sonucunda oluşan gerilim çökmesi ve akım değerlerinin artması nedeniyle meydana gelmektedir.



Şekil 36. Hendek trafo merkezi 154 kV giriş ana bara kısa devre aktif ve reaktif güç değerleri

Şekil 37.'de Hendek T.M. giriş ana bara kısa devre sonucunda oluşan giriş ana bara güç değişimleri daha ayrıntılı olarak verilmiştir. Şekil 36. ve şekil 37.'de kısa devre



Şekil 37. Hendek trafo merkezi 154 kV giriş ana bara kısa devre ortalama aktif ve reaktif güç değerleri

Aynı kaynaktan beslenen iletim ve dağıtım şebekesinde kısa devre sonucunda oluşan gerilim çökmesi, akım değerlerinin artması veya azalması nedeniyle meydana gelmektedir. Oluşan kısa devre

hatası enterkonnekte iletim hatlarına bağlı tüm tüketicileri etkilemektedir. Kısa devre hatasında devreden akan en büyük değerli akım ile sistem anma gerilim değeri kullanılarak güç hesabından kesicinin

Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 27(1): 19-39 (2011)

açma gücü hesaplanır [22]. Diğer trafo merkezleri içinde benzer şekilde simülasyonlar yapılarak kısa devre grafikleri elde edilmiştir.

7. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada Matlab yazılım programının simulink araç kutusu kullanılarak Sakarya ili 380/154 kV iletim şebekesinin güç akışı ve kısa devre olayları bilgisayar ortamında incelenmiştir. Güç akışı sonucunda söz konusu iletim şebekesinde bulunan trafo, enerji nakil hatları ve yüklerde akım, gerilim, aktif ve reaktif güç değişimleri elde edilmiştir. Trafo merkezlerinde trafoların aktif ve reaktif yükleri takip edilerek ilave edilecek olan güç miktarı tespit edilmiştir. Bu veriler doğrultusunda enerji alanında ilgili bölgeye yapılacak yatırım planlamasının önceden sağlanması hedeflenmiştir. Güç akışı sonucunda bölgedeki trafoların kullanım kapasiteleri tespit edilerek, trafoların maksimum kapasite sınırına ulaşması durumunda ilgili trafodan beslenen yüklerin mevcut ring hatları vasıtasıyla kapasitesi uygun olan trafo merkezlerine aktarımı gerçekleştirilerek, enerjinin sürekliliği sağlanmaktadır. İlgili trafo merkezlerinde müşterilerden kaynaklanan reaktif kullanım miktarı mevcut şebekenin kullanım kapasitesini sınırladığından enerjinin iletim kalitesinin bozulmasına neden olarak enerji kayıplarına yol açmaktadır. Bu nedenle trafo merkezi fiderlerine takılacak olan sayaçlar vasıtasıyla reaktif güç takibi yapılarak, gerekli yerlere kondansatör ilavesinin gerçekleştirilmesi ile mevcut teçhizatın kapasite kullanımı artırılarak güç kalitesi yükseltilecektir. Güç akışı sonunda ana bara gerilim değerleri karşılaştırılarak, enerji iletim hatlarında oluşan gerilim düşümü ve hat kayıpları tespit edilmektedir. Bu tespitlere göre iletken kesitlerinin yükseltilmesi ve ilave iletim hatlarının yapılması planlanmaktadır. Sakarya ili 380/154 kV iletim şebekesinin bilgisayar ortamında modellenmesinde uygulanan kısa devre analizi sonucunda sistemdeki trafo merkezlerinin giriş ve çıkış akım seviyelerinin normal çalışma durumlarına göre değiştiği grafiklerden görülmüştür. Kısa devrenin olduğu yerdeki akımların normal çalışma akımlarından çok daha büyük değerlere ulaştığı görülmektedir. Bu akımlar şebeke üzerinde yer alan teçhizatlarda aşırı ısınma ve büyük manyetik kuvvetler meydana getirerek, mekanik kayıplara sebep olmaktadır. Sistemde oluşan bu akım ile sistem anma gerilim değeri kullanılarak güç hesabından kesicinin açma gücü hesaplanır. Kısa devre analizi sonucunda şebekede bulunan, yenilenmesi gereken ve ilave edilecek kesicilerin açma gücü tespit edilebilmektedir. Bunun sonucunda kesicilerin açma güçleri tespit edilerek üretim, iletim ve dağıtım

şebekesinde kullanılan röle ayarları yapılarak, sistemde röle koordinasyonu sağlanmaktadır. İletim şebekesinin bilgisayar ortamında modellenmesinin en önemli faydası gerçek sistemdeki manevra ve kumanda ayarlarını ekrandaki verilerden hesaplabilmek, sorunları grafiklerden ve analiz sonuçlarından muhakeme ederek gerçek sistemdeki problemlere önceden müdahale edilebilmesidir. Ayrıca geliştirilecek yeni tasarımların bilgisayar ortamında modellenmesi ile zaman, iş gücü, enerji ve malzemenin tasarruf edilmektedir.

9. Kaynaklar

1. Demirkurt, B., Elektrikle Enerji Taşınması, 23-42, İstanbul Devlet Mühendislik Mimarlık Akademisi, 1971.
2. Çakır, H., Enerji İletimi, 3-19, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1989.
3. Gönen, T., Modern Power Systems Analysis, 43-71, John-Wiley, 1988.
4. Bergen, A. R., Power System Analysis, 191-203, Prentice Hall, 1986.
5. Saner, Y., Güç Dağıtım Kısa Devre Hesapları, 4(1), 41-48, 2000.
6. Hewitson L.G., Brown M., Balakrishnan R., Simple calculation of short-circuit currents, Practical Power System Protection, 4, 11-25, 2005.
7. Kaşıkçı, İ., Elektrik Tesislerinde Kısa Devre Hesapları ve Uygulamaları IEC 60909, 27-39, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2010.
8. Ford G. L., Srivastava K. D., The probabilistic approach to substation bus short-circuit design, Electric Power Systems Research, 4(3), 191-200, 1981.
9. Costa, V. M., Oliveira, L. O., Guedes, M. R., Developments in the Analysis of Unbalanced Three-Phase Power Flow Solutions, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 29(2), 175-182, 2007.
10. Belati, E. A., Costa, G. R. M., Transmission Loss Allocation Based on Optimal Power Flow and Sensitivity Analysis, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 30(4), 291-295, 2008.
11. Gwang, S. J., Don, H., Park, J. K., Sang, H. L., A Modified Power Flow Analysis to Remove a Slack Bus with a Sense of Economic Load Dispatch, Electric Power Systems Research, 73(2), 137-142, 2005.
12. Arifoğlu, U., Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi, Alfa Yayınevi, İstanbul, 2002.
13. Saadat, H., Power System Analysis, Mcgraw-Hill BookCompany, 2002.

Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 27(1): 19-39 (2011)

14. TEİAŞ, 2010 Yılı Puant (Yaz) Yük Şartlarında Yük Akışı Üç Faz ve Faz Toprak Kısa Devre Etüdü, Yük Tevzii Dairesi Başkanlığı Etüt ve Raporlama Müdürlüğü, Ankara, 2010.
15. Doğan, İ., A'dan Z'ye Matlab ile Çalışmak, Bileşim Yayınevi, İstanbul, 2004.
16. Arifoğlu, U., Matlab 7.06 Simulink ve Mühendislik Uygulamaları, Alfa Yayınevi, İstanbul, 2008.
17. Gönen, T., Electric Power Transmission System Engineering: Analysis and Design, 43-51, JohnWiley, 1988.
18. TEİAŞ, Türkiye Ulusal Elektrik Ağındaki Havai Hatların Trafoların ve Generatörlerin Elektrik Karakteristiği, Sistem Araştırma ve Kontrol Müdürlüğü, Ankara, 2006.
19. Hochart, B., Power Transformer Handbook, 392-403, Alstom Butterworths, 1992.
20. Sağıroğlu, K., Yile, Ş., Power Transformer Company of Alstom's Maneuver Related to Instant-On Report, 7-15, Alstom, 2007.
21. Kuffel, E., Zaengl, W. S., Yüksek Gerilim Mühendisliğinin Temelleri, Emo Yayınevi, İstanbul, 2008.
22. El-Alaily A. A., Mandour M. M., A comprehensive form for the protection of very short transmission lines, Electric Power Systems Research, 14(3), 227-232, 1988.
23. Türkiye Elektrik Kurumu, Elektrik Tesislerinde Koruma ve Kontrol, 13-25, Elektrik Üretim İletim Müessesesi Röle ve Ölçü Aletleri Grup Müdürlüğü, Ankara, 1990.