


Güç Akışı Analizini Öğrenmede PowerWorld Simülator Kullanımı: Bilgisayar Destekli Bir Görselleştirme Aracı

Ahmet ÇİFCİ Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü,
Burdur

Geliş Tarihi (Received): 02.08.2022, Kabul Tarihi (Accepted): 29.09.2022

✉ Sorumlu Yazar (Corresponding author*): acifci@mehmetakif.edu.tr

☎ +90 248 2132777 📠 +90 248 2132704

ÖZ

Yenilenebilir enerji kaynaklarının hızlı gelişimi, dağıtık üretim tesislerinin entegrasyonu ve dijitalleşmedeki ilerlemeler dünya genelindeki güç sistemlerinde karmaşık bir değişime neden olmaktadır. Güç sistemlerinin karmaşıklığı hem lisans hem de lisansüstü öğrencilerinin güç sistemleri ile ilgili çalışmalarını sıkıcı, zor ve zaman alıcı hale getirmektedir. Bununla birlikte, simülasyon araçlarının kullanılması, güç sistemleri çalışmalarıyla ilgili hesaplama işlemlerini büyük ölçüde basitleştirmiştir. Yalnızca güç sisteminin mevcut çalışma koşulları altında çalışmasını değil, aynı zamanda gelecekteki genişlemelerin planını ve tasarımını da değerlendirmek için güç akışı çalışmaları giderek daha gerekli hale gelmektedir. Bu makale, öğrencilerin güç sistemlerindeki karmaşık olayları daha iyi anlamalarına yardımcı olmak için gelişmiş görselleştirme teknikleri kullanan PowerWorld Simülator ile güç akışı analizinin bir incelemesini sunmaktadır. Bu amaçla, Stevenson'ın 5 baralı güç sisteminin güç akışı analizi Newton-Raphson, Gauss-Seidel ve Hızlı Ayrık metotları ile incelenmiştir. Simülasyon sonuçları hem görsel olarak hem de tablo olarak verilmiştir. Sonuç olarak, PowerWorld Simülator ile öğrencilerin geleneksel çözümlere ek olarak güç sistemi analiz problemlerini daha iyi anlayacağı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Eğitim, güç akış analizi, güç sistemleri, PowerWorld

Use of PowerWorld Simulator in Learning Power Flow Analysis: A Computer-Aided Visualization Tool

ABSTRACT

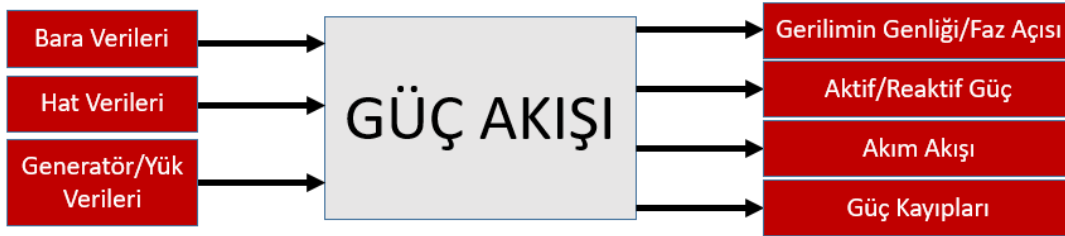
The rapid development of renewable energy sources, the integration of distributed generation facilities, and advances in digitalization are causing a complex transformation in power systems around the world. The complexity of power systems makes power systems studies tedious, difficult and time-consuming for both undergraduate and graduate students. However, the use of simulation tools has greatly simplified the computational operations associated with power systems studies. Power flow studies are becoming increasingly necessary to evaluate not only the operation of the power system under current operating conditions but also the plan and design of future expansions. This paper provides a review of power flow analysis with PowerWorld Simulator, which uses advanced visualization techniques to assist students in better understanding complex phenomena in power systems. For this purpose, power flow analysis of Stevenson's 5 bus power system was investigated by Newton-Raphson, Gauss-Seidel and Fast Decoupled methods. The simulation results are given both visually and as a table. As a result, it has been seen that with PowerWorld Simulator, students will better understand power system analysis problems in addition to traditional solutions.

Keywords: Education, power flow analysis, power systems, PowerWorld

GİRİŞ

Mevcut güç sistemleri, artan iletim hattı sayısı, büyük üretim santrallerinin ve ekstra yüksek gerilimli bağlantı hatlarının kurulması, mikro şebekelerin, akıllı şebekelerin ve akıllı şehirlerin geliştirilmesi, elektrikli araç ve enerji depolama sistemlerinin entegrasyonu nedeniyle hızlı ve karmaşık bir dönüşüm geçirmektedir (Honrubia-Escribano ve ark., 2021). Bu nedenle güç akışı analizi veya yük akışı analizi güç sisteminde gelecekte olabilecek genişlemelerin tasarımını değerlendirmek için giderek daha gerekli hale gelmektedir. Herhangi bir güç sistemindeki güç akışının sayısal bir analizi

olan güç akışı analizi enterkonnekte güç sistemlerinde çok temel ve önemli bir araçtır. Güç akışı analizi sonuçları, güç sistemine yapılacak eklemelerin veya genişletmelerin planlanmasında ve güç sisteminin kontrolü ve ekonomik programı için kilit bir rol oynar. Güç akışı, belirli yük koşulları altında bir sistemdeki gerilim, akım, aktif güç ve reaktif güç akışlarını belirlemeyi hedefleyen bir kararlı durum analizidir. Bu bilgilere sahip olduğunda, güç kayıpları ile birlikte tüm hatlardaki aktif ve reaktif güç akışı kolayca hesaplanabilir. Şekil 1'de güç akışı analizi şematik olarak gösterilmiştir (Sharma ve Dhillon, 2021).



Şekil 1. Güç akışı analizi

Her bara ile ilgili dört değişken vardır: Aktif güç (P), reaktif güç (Q), gerilimin genliği ($|V|$) ve gerilimin faz açısı (δ) (Grigsby, 2006; Kothari ve Nagrath, 2007; Saadat, 2010; Elgerd, 2012). Güç sisteminin her barasında bu dört değişkenden ikisi belirtilir ve kalan ikisi de bilinmeyen olur. Belirtilen iki değişkene bağlı olarak, baralar Tablo 1'de gösterildiği gibi salınım, üretim (gerilim kontrollü, PV) ve yük (PQ) baraları olmak üzere üç tipte sınıflandırılır (Kothari ve Nagrath, 2003; Glover ve ark., 2012).

Tablo 1. Bara tipleri

Bara Tipi	Değişkenler			
	P	Q	$ V $	δ
Salınım Barası	Bilinmeyen	Bilinmeyen	Bilinen	Bilinen
Üretim Barası (PV)	Bilinen	Bilinmeyen	Bilinen	Bilinmeyen
Yük Barası (PQ)	Bilinen	Bilinen	Bilinmeyen	Bilinmeyen

Salınım barası – Herhangi bir güç sisteminde yalnızca bir salınım barası vardır. Referans bara olarak alınır ve diğer baralar onunla salınır. Bu barada bilinen değişkenler $|V|$ ve δ , bilinmeyen değişkenler ise P ve Q 'dir.

Üretim barası (PV barası) – Gerilim kontrollü bara olarak da adlandırılan bu bara tipinde gerilimin kontrol

edilebilmesinde veya sabit tutulmasında bu baradaki reaktif güç limitleri kullanılır. Bu barada P ve $|V|$ biliniyorken, Q ve δ güç akış analizleri ile bulunması gereken değişkenlerdir.

Yük barası (PQ barası) – Bu barada P ve Q değişkenleri biliniyorken, $|V|$ ve δ hesaplanması gereken değişkenlerdir. Generatörü olmayan tüm baralar yük baralıdır.

Geçtiğimiz yüzyılda güç akışı analizi problemlerinin çözümünde çeşitli sayısal analiz metodları uygulanmıştır. En yaygın kullanılan metodlar Gauss-Seidel (Oliveira, 2019), Newton-Raphson (Tinney ve Hart, 1967; Schneider ve ark., 2017) ve Hızlı Ayrık (Stott ve Alsac, 1974; Iwamoto ve Tamura, 1978) metodudur. Ancak, güç sistemindeki genişlemelerin her geçen gün devam etmesi, güç akış denklemlerinin boyutunun da artmasına neden olmaktadır. Bu artışlarla, herhangi bir sayısal analiz metodu doğru bir çözüme yakınsayamaz.

Elle hesaplamalar, birkaç bağımsız devrenin çalışma özelliklerinin belirlenmesi için uygundur, ancak güç akışlarının veya kısa devre analizlerinin doğru hesaplanması, bilgisayar programları kullanılmadan pratik olmayacaktır (Afolabi ve ark., 2015). Küçük sistemler dışında, elle hesaplamayı zorlaştıran, denklemleri çözmenin yinelemeli olmasıdır. Bu da güç akışı çalışmalarını çok sıkıcı ve zaman alıcı yapmaktadır. Güç akışını simüle etmek için bilgisayar programlarını kullanmak

zamandan tasarruf sağlar ve daha doğru sonuçlar verir.

Elektrik güç sistemlerindeki mevcut ve gelecek zorlukların (yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili güç kaynakları için tasarlanmamış bir sisteme entegre edilmesi gibi) üstesinden gelmek için araştırmacılar ve endüstri uygulayıcıları güç sistemini, bileşen cihazlarını ve işleyişini simüle edebilmelidir (Thayer ve ark., 2020). Ayrıca, lisans öğrencileri ders kitaplarından öğrendikleri güç sisteminin çalışmasını pekiştirmelerini sağlayan yük akışını çeşitli simülasyon araçları ile analiz edebilmelidir. Kullanıcı dostu ve etkileşimli bir simülasyon yazılımı olan PowerWorld Simülâtör yazılımı kullanılabilir birçok yük akışı simülâtöründen biridir. PowerWorld, güç akışı simülasyonu, beklenmedik durum analizi, geçici kararlılık simülasyonu ve daha fazlasını içeren bir dizi modelleme ve simülasyon özelliği içeren ticari bir güç sistemleri simülasyon aracıdır. Kolay hesaplama teknikleriyle güç sistemi kesintilerini tahmin etmek ve azaltmak için de kullanılır (Shaikh ve ark., 2007) Simülâtör, tam renkli animasyonlu tek hat şemalarından yararlanır. Ayrıca, kullanıcının anlayışını geliştiren yakınlaştırma ve kaydırma özelliklerine de sahiptir. PowerWorld, güç akışının analizini işlemek için etkili bir araçtır ve aynı zamanda 250000 barayı işleme kapasitesine sahiptir (PowerWorld Corporation, 2022). PowerWorld, tüm bu özellikleri ile öğrencilere bir güç sistemindeki güç akışına kapsamlı bir bakış sağlamak için kullanılabilir. Programın öğrenci sürümü www.powerworld.com adresinde mevcuttur. Öğrenci sürümü ile 13 baraya kadar çalışılabilmektedir.

PowerWorld Simülâtör, güç sistemleri üzerine araştırma yapmak ve güç sistemlerinin çalışmasını ve analizini öğretmek için idealdir. Simülâtör, güç sistemlerini öğretmek ve güç sistemleri analiz sonuçlarını hem teknik hem de teknik olmayan kitlelere sunmak için bir araç olarak oluşturulmuştur (Nasiruzzaman, 2010). Simülâtör, güç sistemleri işletimi, kontrolü ve analizi konularında lisans ve lisansüstü sınıflarda etkin bir şekilde kullanılmıştır ve kullanılmaya devam etmektedir (Carbajal ve ark., 2005; Pietryga, 2006; Lim, 2013; Zhang ve Jiang, 2015). Kavramlar basit bir şekilde sunulsa da, PowerWorld ileri mühendislik öğrencileri için de yeterli ayrıntıya sahiptir (Tamali ve ark., 2013). Bu makalede, PowerWorld Simülâtör kullanılarak Stevenson'ın 5 baralı güç sisteminin güç akışı analizi Newton-Raphson, Gauss-Seidel ve Hızlı Ayrık metotları ile incelenecektir. PowerWorld yazılımının kullanılmasının nedeni; yazılımla öğrencilere basit güç sistemlerini ve hatta karmaşık güç sistemlerini öğretmenin nispeten kolay olması ve güç sistemi akışı animasyonu, 3-D görüntüleme, harita projeksiyonu gibi güç sistemi görselleştirme tekniklerini desteklemesidir. Analizlerden elde

edilen sonuçlar, bu aracın yeteneklerinin anlaşılması için sunulacak ve güç sisteminin çalışmasının görselleştirilmesi yapılacaktır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Güç Akış Analizi Metotları

Güç akış analizinde ilk adım, Y_{Bara} admitans matrisini oluşturmaktır. Bara admitans matrisi bir güç sisteminin topolojisinin uygun bir temsilini sunar. Hem hatların hem de baraların giriş değerlerinden oluşur. Y_{Bara} , boyutları baraların sayısına eşit olan kare bir matristir. Aktarılan düğüm akımları ve düğüm gerilimleri arasındaki ilişki (1) denklemi ile verilir:

$$I = Y_{Bara}V \quad (1)$$

Herhangi bir baradaki net aktarılan güç, Şekil 2'de gösterildiği gibi bara gerilimi (V_i), komşu bara gerilimleri (V_1, V_2, \dots, V_n) ve bara ile komşu baralar arasındaki admitanslar ($y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in}$) kullanılarak hesaplanabilir.

$$I_i = V_i y_{i0} + (V_i - V_1) y_{i1} + (V_i - V_2) y_{i2} + \dots + (V_i - V_n) y_{in} \quad (2)$$

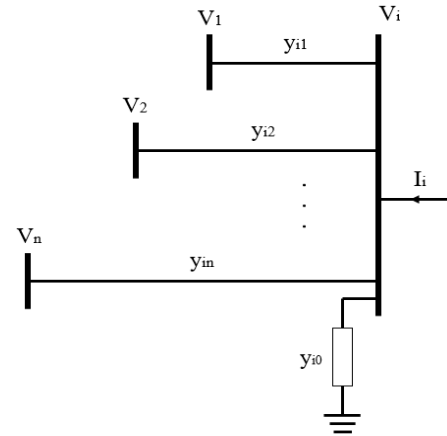
(2) denklemi gerilimin bir fonksiyonu olarak tekrar düzenlersek, akım denklemi (3) denklemi gibi olur:

$$I_i = V_i (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in}) - V_1 y_{i1} - V_2 y_{i2} - \dots - V_n y_{in} \quad (3)$$

veya (4) denklemi ile

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq i \quad (4)$$

şeklinde yazılır.



Şekil 2. Net aktarılan güç (Saadat, 2010)

Güç Akışı Analizini Öğrenmede PowerWorld Simülator Kullanımı: Bilgisayar Destekli Bir Görselleştirme Aracı

i . baradaki aktif ve reaktif güç (5) denklemi ile,

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (5)$$

veya (6) denklemi ile,

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (6)$$

şeklinde hesaplanır. I_i , P_i ve Q_i cinsinden yazılırsa (7) denklemi,

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n Y_{ij} - \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad j \neq i \quad (7)$$

bulunur. Yukarıdaki ilişkiden görüldüğü gibi, güç akışı probleminin matematiksel formülasyonu, yinelemeli metotlarla çözülmesi gereken doğrusal olmayan cebirsel denklemler sisteminden oluşmaktadır.

Gauss-Seidel Metodu

Bu yöntem Gauss yöntemine dayalı olarak geliştirilmiştir. Doğrusal olmayan cebirsel denklemleri çözmek için kullanılan yinelemeli bir yöntemdir (Moradia ve ark., 2017). Yöntem, belirli bir değişkenin hesaplanmış bir değerini elde etmek için gerilimin değeri için bir ilk tahminden yararlanır. İlk tahmin değeri, hesaplanan bir değerle değiştirilir. Daha sonra işlem, yineleme çözümlü yakınsayana kadar tekrarlanır. Yakınsama, varsayılan başlangıç değerlerince oldukça duyarlıdır. Ancak bu yöntem, zayıf yakınsama özellikleri göstermektedir.

Gauss-Seidel metodunda (7) nolu denklem V_i için çözümlü ve yinelemeli dizi (8) denklemi gibi,

$$V_i^{(k+1)} = \frac{\frac{P_i - jQ_i}{V_i^{*(k)}} + \sum Y_{ij} V_j^{(k)}}{\sum Y_{ij}} \quad j \neq i \quad (8)$$

olur. Kirchhoff'un Akımlar Yasası kullanılarak i barasına aktarılan akımın pozitif olduğu varsayılır. Böylelikle, üretim baraları gibi baraya aktif ve reaktif güçlerin aktarıldığı baralar için P_i ve Q_i pozitif değerlere sahip olur. Aktif ve reaktif güçlerin baradan uzağa aktarıldığı yük baraları için P_i ve Q_i negatif değerlere sahip olur. (7) nolu denklem P_i ve Q_i için çözümlürse denklem (9) ve (10),

$$P_i^{(k+1)} = \Re \left\{ V_i^{*(k)} \left[V_i^{(k)} \sum_{j=0}^n Y_{ij} - \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j^{(k)} \right] \right\} \quad j \neq i \quad (9)$$

$$Q_i^{(k+1)} = -\Im \left\{ V_i^{*(k)} \left[V_i^{(k)} \sum_{j=0}^n Y_{ij} - \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j^{(k)} \right] \right\} \quad j \neq i \quad (10)$$

elde edilir. Güç akışı denklemi genellikle bara admittans matrisinin elemanları cinsinden ifade edilir. Büyük harflerle gösterilen bara admittans matrisinin köşegen olmayan elemanları $Y_{ij} = -y_{ij}$ ve köşegen elemanları ise $Y_{ii} = \sum y_{ij}$ olduğundan, denklem (8), denklem (11) gibi ifade edilir:

$$V_i^{(k+1)} = \frac{\frac{P_i - jQ_i}{V_i^{*(k)}} - \sum_{j \neq i} Y_{ij} V_j^{(k)}}{Y_{ii}} \quad (11)$$

ve P_i ve Q_i denklem (11) ve (12),

$$P_i^{(k+1)} = \Re \left\{ V_i^{*(k)} \left[V_i^{(k)} Y_{ii} + \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j^{(k)} \right] \right\} \quad j \neq i \quad (12)$$

$$Q_i^{(k+1)} = -\Im \left\{ V_i^{*(k)} \left[V_i^{(k)} Y_{ii} + \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j^{(k)} \right] \right\} \quad j \neq i \quad (13)$$

olarak bulunur.

Newton-Raphson Metodu

Isaac Newton ve Joseph Raphson'dan ismini alan Newton-Raphson metodu, Taylor serisi açılımı kullanılarak bir dizi doğrusal olmayan eşanlı denklemi bir dizi doğrusal eşanlı denkleme yaklaştıran yinelemeli bir yöntemdir. Yakınsama özellikleri diğer alternatif metotlara göre daha güçlüdür. Newton-Raphson metodunun, büyük güç sistemlerinde daha verimli ve kullanışlı olduğu saptanmıştır. Şekil 2'de verilen güç sistemi için, i barasındaki akım kutupsal formda aşağıdaki gibi yazılabilir (Saadat, 2010):

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (14)$$

i barasındaki karmaşık güç ifadesi aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (15)$$

(14) denkleminde I_i , (15) denkleminde yerine konulursa,

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (16)$$

denklem (16) elde edilir. Gerçek ve sanal kısımları ayırdığında aşağıdaki (17) ve (18) nolu denklemler bulunur:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (17)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (18)$$

Güç Akışı Analizini Öğrenmede PowerWorld Simülâtör Kullanımı: Bilgisayar Destekli Bir Görselleştirme Aracı

(17) ve (18) nolu denklemler başlangıç tahminleri civarında Taylor serilerine açılırsa ve yüksek dereceli terimler ihmal edilirse, denklem (19)'daki gibi lineer denklem takımları elde edilir (Saadat, 2010):

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \hline \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (19)$$

Yukarıdaki denklemde, 1 nolu bara salınım barası olarak kabul edilmiştir. Jakoben matris, gerilimin açısındaki $\Delta \delta_i^{(k)}$ ve gerilimin genliğindeki $\Delta |V_i^{(k)}|$ küçük değişimleri ile aktif güçteki $\Delta P_i^{(k)}$ ve reaktif güçteki $\Delta Q_i^{(k)}$ küçük değişimleri arasındaki doğrusallaştırılmış ilişkiyi vermektedir. Jakoben matrisinin elemanları (17) ve (18) denklemlerinin $\Delta \delta_i^{(k)}$ ve $\Delta |V_i^{(k)}|$ 'deki değerlerinin kısmi türevleridir ve kısaca denklem (20)'deki gibi yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (20)$$

Üretim baraları için gerilim büyüklükleri bilinmektedir. Bu nedenle üretim barası sayısı kadar, ΔQ ve ΔV 'nin dahil olduğu denklem ve jakoben matriste karşılık düşen sütunlar silinir. J_1 matrisinin köşegen ve köşegen olmayan elemanları (21) ve (22) nolu denklemlerde görülmektedir.

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (21)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (22)$$

J_2 matrisinin köşegen ve köşegen olmayan elemanları (23) ve (24) nolu denklemlerde görülmektedir.

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (23)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (24)$$

J_3 matrisinin köşegen ve köşegen olmayan elemanları (25) ve (26) nolu denklemlerde görülmektedir.

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (25)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (26)$$

J_4 matrisinin köşegen ve köşegen olmayan elemanları (27) ve (28) nolu denklemlerde görülmektedir.

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i| |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} - \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (27)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (28)$$

$\Delta P_i^{(k)}$ ve $\Delta Q_i^{(k)}$ terimleri belirlenen ve hesaplanan değerler arasındaki farklar olup, güç kalanları olarak bilinir ve denklem (29) ve (30)'daki gibi gösterilirler.

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{tahirmin} - P_i^{(k)} \quad (29)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{tahirmin} - Q_i^{(k)} \quad (30)$$

Bara gerilimleri için yeni tahmini değerler denklem (31) ve (32)'de verilmiştir.

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (31)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (32)$$

Hızlı Ayrık Metodu

Hızlı Ayrık metodu, 1974 yılında Stott ve Alsac tarafından önerilen ve Newton-Raphson metodunun sadeleştirilmesiyle elde edilen bir metottur (Stott ve Alsac, 1974). Hızlı yakınsama ve güvenilir sonuçlar sunma gibi özellikleri nedeniyle güç akışı analizinde yaygın olarak kullanılan bir metod haline gelmiştir. Bununla birlikte, bazı baralarda yüksek R/X oranlarının veya aşırı yüklemenin (düşük gerilim) mevcut olduğu bazı durumlarda Hızlı Ayrık metodu iyi bir şekilde yakınsamamaktadır. Bu yakınsama engellerini aşmak için metod üzerinde birçok geliştirme yapılmıştır (Rajicic ve Bose, 1988).

(20) denklemiyle verilen jakoben matris içinde, $Q-\delta$ ve $P-|V|$ arasındaki zayıf ilişki nedeniyle, hızlı ayrışık metodunda J_2 ve J_3 alt matrisleri ihmal edilmektedir. Böylece, (20) denklemi denklem (33)'teki gibi sadeleştirilir (Saadat, 2010):

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (33)$$

Matris eşitliği, denklem (34) ve (35)'te verildiği gibi iki ayrışık denkleme ayrılır. Böylece, güç akışı hızlandırılmış olur. Ayrıca, her bir yinelemede J_1 ve J_4 alt matrislerini yeniden hesaplama gereğini ortadan kaldırarak önemli bir sadeleştirme yapılabilir.

$$\Delta P = J_1 \Delta \delta = \left[\frac{\partial P}{\partial \delta} \right] \Delta \delta \quad (34)$$

$$\Delta Q = J_4 \Delta |V| = \left[\frac{\partial Q}{\partial |V|} \right] \Delta |V| \quad (35)$$

Denklem (21)'de verilen J_1 'in köşegen olan elemanları denklem (36) verildiği gibi yeniden yazılabilir.

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) - |V_i|^2 |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} \quad (36)$$

Denklem (36)'nın ilk terimi, denklem (18)'de verildiği gibi, $-Q_i$ ile değiştirildiğinde denklem (37) elde edilir.

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -Q_i - |V_i|^2 |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} = -Q_i - |V_i|^2 B_{ii} \quad (37)$$

Denklem (37)'de verilen B_{ii} , $|Y_{ii}| \sin \theta_{ii}$ 'ye eşittir ve Y_{Bara} 'nın köşegen olan elemanlarının sanal kısmıdır. Güç sistemlerinde öz-süseptans $B_{ii} \gg Q_i$ olduğundan Q_i ihmal edilebilir. $|V_i|^2 \approx |V_i|$ olarak kabul edilirse, denklem (37) sadeleştirilerek denklem (38) elde edilir.

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| B_{ii} \quad (38)$$

Normal işletme koşullarında $\delta_j - \delta_i$ değeri çok küçüktür. Bu yüzden, denklem (22)'de verilen $\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j \approx \theta_{ii}$ olarak alınır ve $|V_j| \approx 1$ olarak kabul edilirse J_1 'in köşegen olmayan elemanları denklem (39)'da gösterildiği gibi elde edilir (Saadat, 2010).

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| B_{ij} \quad (39)$$

J_1 için yapılan işlemler J_4 için yapılacak olursa, denklem (27)'de verilen J_4 'ün köşegen olan elemanları aşağıda verilen (40) denklemi ile elde edilir.

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -|V_i| B_{ii} \quad (40)$$

Denklem (28)'de verilen J_4 'ün köşegen olmayan elemanları ise denklem (41)'de verilen denklemle elde edilir.

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| B_{ij} \quad (41)$$

Böylece, denklem (34) ve (35) aşağıdaki (42) ve (43) denklemleri haline alır.

$$\frac{\Delta P}{|V_i|} = -B' \Delta \delta \quad (42)$$

$$\frac{\Delta Q}{|V_i|} = -B'' \Delta |V| \quad (43)$$

Denklem (42) ve (43)'te verilen B' ve B'' , Y_{Bara} 'nın sanal kısımlarıdır. Hızlı Ayrık metodunda gerilimin genliği ve faz açısı aşağıdaki (44) ve (45) denklemleri ile verilmektedir (Saadat, 2010).

$$\Delta \delta = -[B']^{-1} \frac{\Delta P}{|V|} \quad (44)$$

$$\Delta |V| = -[B'']^{-1} \frac{\Delta Q}{|V|} \quad (45)$$

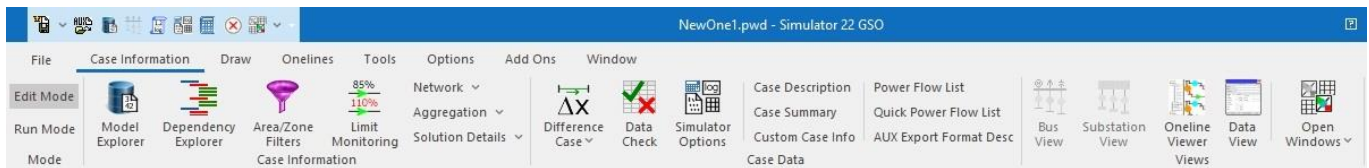
BULGULAR VE TARTIŞMA

Güç Akış Analizi Uygulamaları

Bu bölümde, PowerWorld yazılımı ile ilgili bilgiler verildikten sonra, Stevenson'ın 5 baralı güç sisteminin güç akışı analizi PowerWorld Simülâtör programı kullanılarak ele alınacaktır.

PowerWorld Simülâtör

Grafik kullanıcı arayüzleri, kolay ve görsel bir yaklaşım sağlamak için bilgisayar destekli eğitimde giderek daha fazla kullanılmaktadır ve kullanıcıların öğrenme deneyimini geliştirmeye yardımcı olmaktadır (Depcik ve Assanis, 2005). PowerWorld yazılım aracı ile öğrenciler, analiz edilecek güç sistemini çizmek için sağlanan grafik kullanıcı arayüzünü kullanırlar. PowerWorld Simülâtör, Şekil 3'te görüldüğü gibi, Düzenleme Modu (Edit Mode) ve Çalıştırma Modu (Run Mode) olmak üzere iki farklı moda sahiptir. Düzenleme modu, yeni güç akışı durumları oluşturmak veya mevcut durumlarda değişiklik yapmak için kullanılırken, Çalıştırma modu güç sistemi simülasyonunu gerçekleştirmek ve birçok güç akış analiz aracını kullanmak için kullanılır.



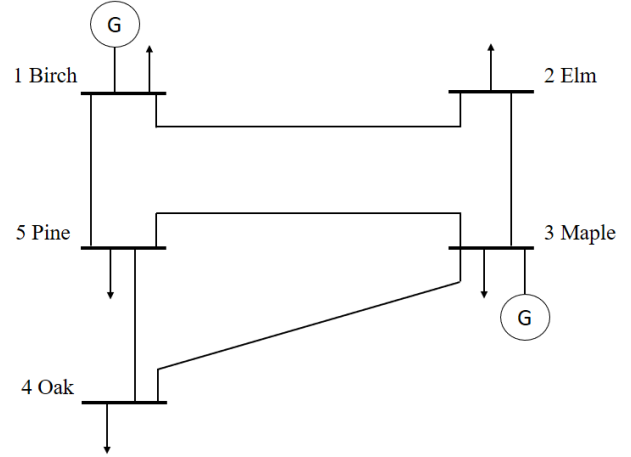
Şekil 3. PowerWorld ribbon menüsü

Güç Akışı Analizini Öğrenmede PowerWorld Simülâtör Kullanımı: Bilgisayar Destekli Bir Görselleştirme Aracı

Öğrenciler, Şekil 3'te görülen Dosya (File) sekmesi yardımıyla yeni bir durum (New Case) oluşturabilir ya da mevcut bir durum (Open Case) üzerinde çalışabilirler. Düzenleme modunda güç sistemine yeni hatlar, baralar, yükler, generatörler ve diğer bileşenler eklenebilir. Ayrıca Düzenleme modunda bazı bileşenler sistemden kaldırılabilir. Varsayılan olarak, tek hat şemasına yeni bir bileşen ekleneceği zaman, bileşenin her iki ucuna gerekli devre kesiciler otomatik olarak eklenir. Yine varsayılan olarak, kapalı devre kesiciler düz kırmızı kareler olarak gösterilirken açık devre kesiciler yeşil kare şeklinde gösterilir. Devre kesicileri açmak veya kapatmak için farenin sol tuşuna tıklanır. Güç sisteminin tek hat şeması tamamlandıktan sonra öğrenciler, Araçlar (Tools) sekmesi ile Gauss-Seidel, DC Güç Akışı, Newton-Raphson ve Hızlı Ayrık gibi güç akışı metotlarını güç sistemine uygulayabilirler. Diğer metoda geçileceği zaman Sabit Başlangıca Sıfırla (Reset to Flat Start) sekmesinin kullanılması tavsiye edilir. Böylece, gerilim genlikleri 1,0 pu olur ve bütün generatörlerin reaktif güç üretimleri sıfırlanır. Uygun güç akışı metodu ile analiz yapılır ve her bir bara için gerilimlerin genlikleri ve faz açıları bulunur. Güç akışları üçgenler ile gösterilir. Üçgenlerin iletim hatları boyunca hareketi, güç akışının gerçek yönünü gösterir. Üçgenler, her bir iletim hattında akan güçlerin büyüklüğünü gösterecek şekilde ölçeklendirilir.

Stevenson'ın 5 Baralı Güç Sistemi

Şekil 4'te Stevenson'ın 5 baralı güç sisteminin tek hat şeması gösterilmektedir (Stevenson, 1982). Örnek güç sistemi 5 bara, 2 generatör, 6 iletim hattı ve 5 yükten oluşmaktadır. Bu örnek güç sisteminde 1-Birch salınım barası, 3-Maple üretim barası, 2-Elm, 4-Oak ve 5-Pine ise yük baralarıdır.



Şekil 4. Stevenson'ın 5 baralı güç sisteminin tek hat şeması (Stevenson, 1982)

Stevenson'ın 5 baralı güç sistemine ait bara verileri ve hat verileri sırasıyla Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 2. 5 baralı örnek güç sistemine ait bara verileri

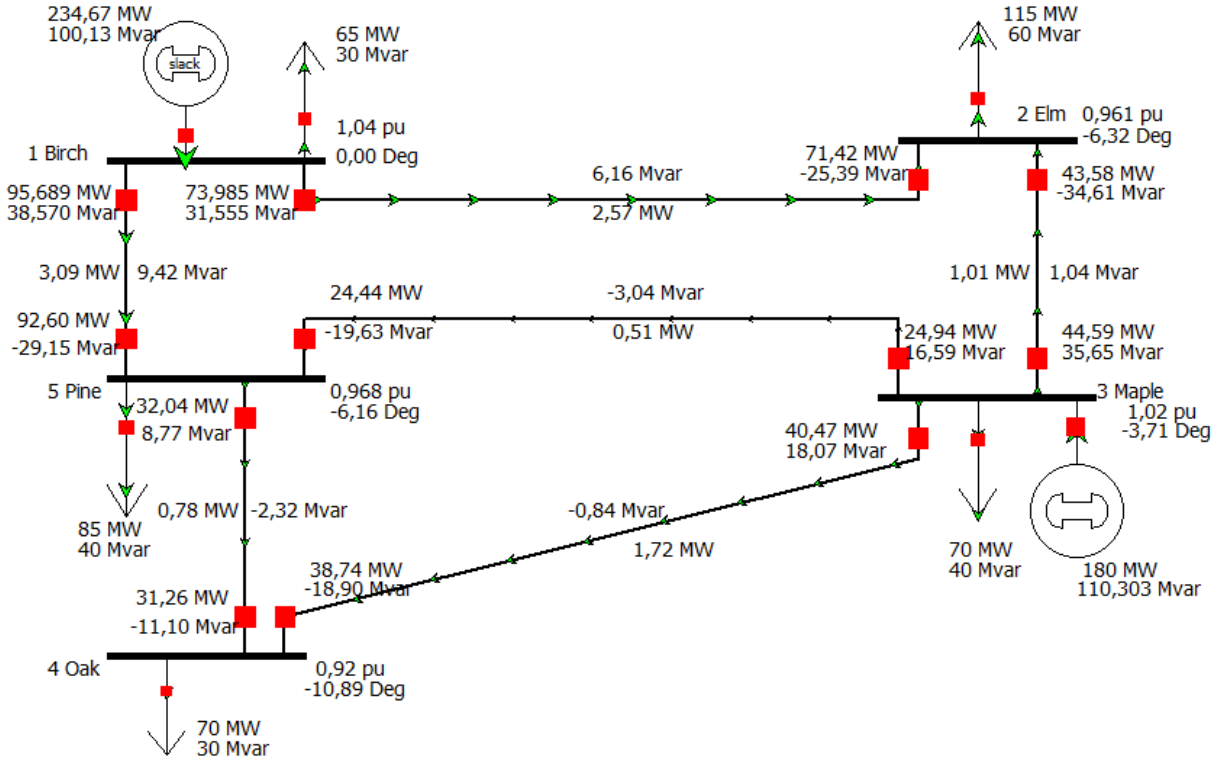
Bara Numarası	Bara Gerilimi (pu)	Generatör		Yük	
		MW	MVA _r	MW	MVA _r
1	1,04 + j0,0	-	-	65	30
2	1,00 + j0,0	0	0	115	60
3	1,02 + j0,0	180	-	70	40
4	1,00 + j0,0	0	0	70	30
5	1,00 + j0,0	0	0	85	40

Tablo 3. 5 baralı örnek güç sistemine ait hat verileri

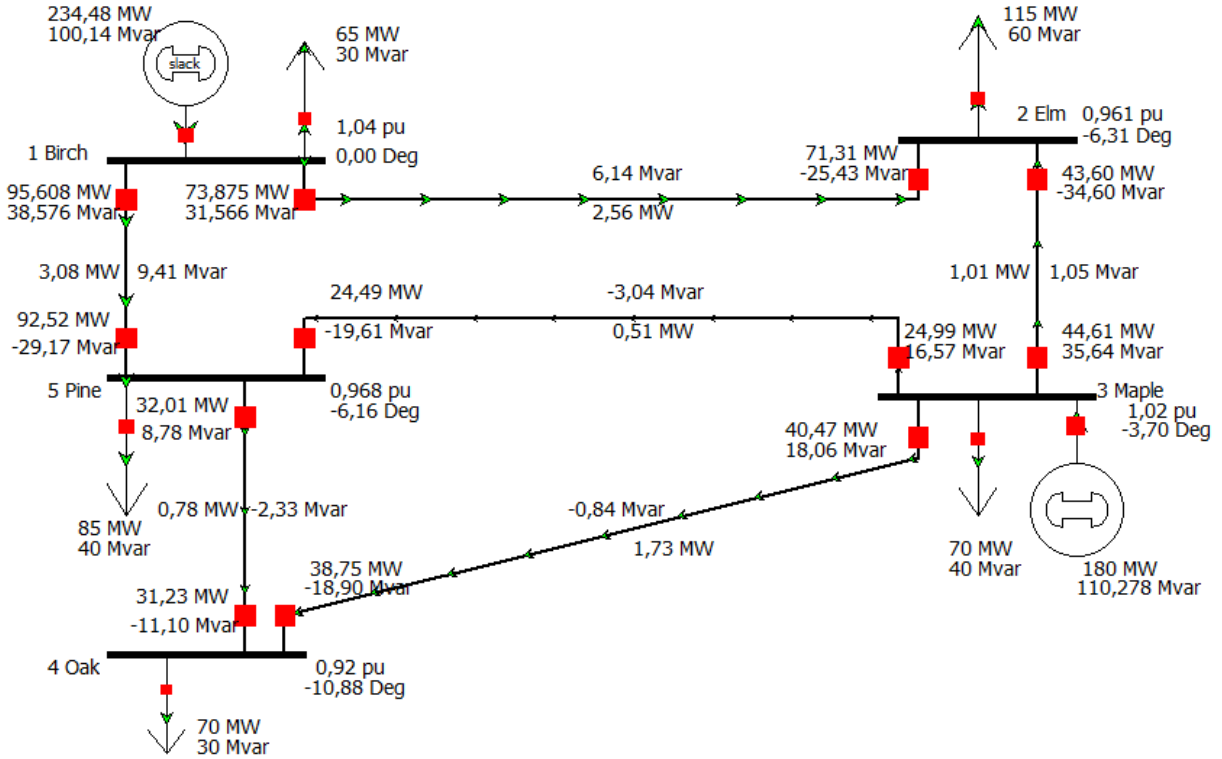
Hat (Baradan Baraya)	R (pu)	X (pu)	B (pu)
1 2	0,042	0,168	0,041
1 5	0,031	0,126	0,031
2 3	0,031	0,126	0,031
3 4	0,084	0,336	0,082
3 5	0,053	0,210	0,051
4 5	0,063	0,252	0,061

PowerWorld programında modellenen Stevenson'ın 5 baralı güç sisteminin, Newton-Raphson, Gauss-Seidel ve Hızlı Ayrık metotları kullanılarak gerçekleştirilen güç akışı analizleri sırasıyla Şekil 5, 6 ve 7'de gösterilmektedir.

Güç Akışı Analizini Öğrenmede PowerWorld Simülâtör Kullanımı: Bilgisayar Destekli Bir Görselleştirme Aracı

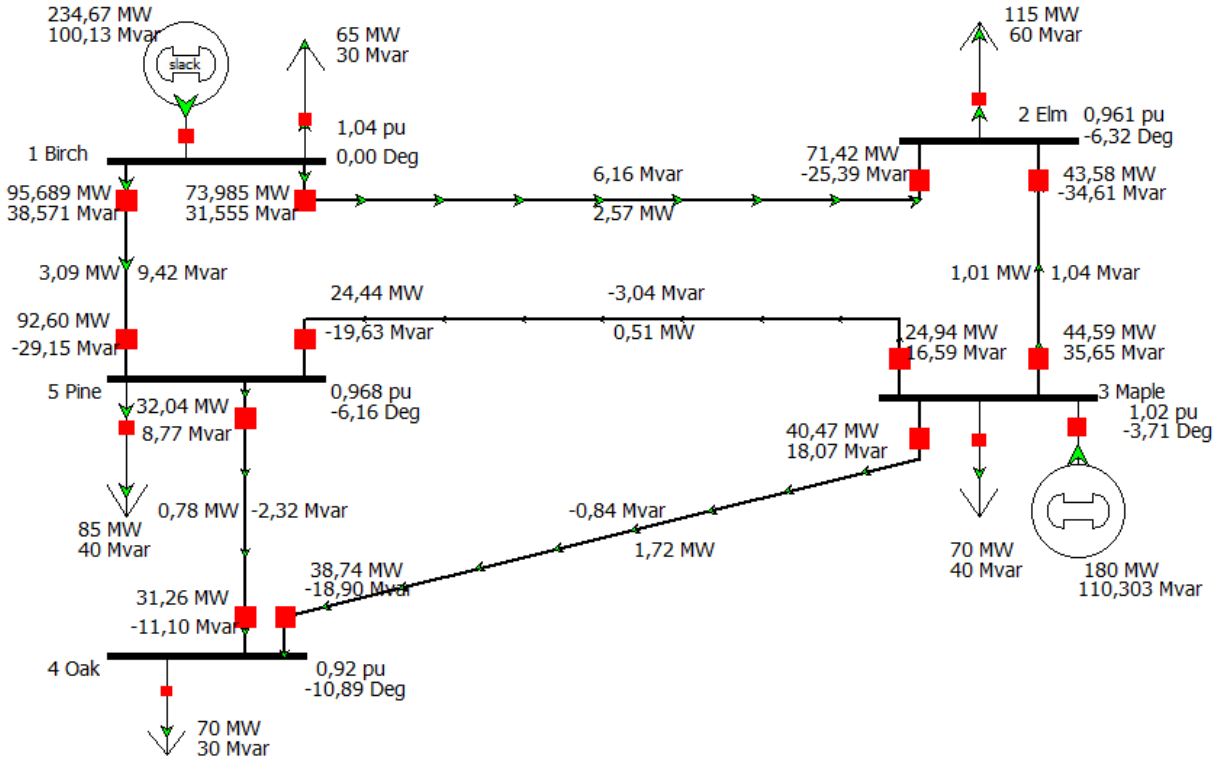


Şekil 5. Newton-Raphson metodu ile güç akışı analizi simülasyon sonuçları



Şekil 6. Gauss-Seidel metodu ile güç akışı analizi simülasyon sonuçları

Güç Akışı Analizini Öğrenmede PowerWorld Simülâtör Kullanımı: Bilgisayar Destekli Bir Görselleştirme Aracı



Şekil 7. Hızlı Ayrık metodu ile güç akışı analizi simülasyonu sonuçları

PowerWorld programı Şekil 5, 6 ve 7'de görüldüğü gibi, kullanıcılara/öğrencilere bara gerilimlerini ve faz açılarını, her bir hatta ait güç akışlarını ve kayıpları

aynı anda gösterebilmektedir. Simülasyon ile elde edilen her bir metoda ait güç akışı sonuçları Tablo 4, 5 ve 6'da verilmektedir.

Tablo 4. Newton-Raphson metodu kullanılarak elde edilen güç akışı sonuçları

Bara	V	δ	Generatör		Hat (Baradan Baraya)	Hat Akışları		Hat Kayıpları		
			MW	MVAr		MW	MVAr	MW	MVAr	
1	1,04	0,0	234,67	100,13	1	2	73,985	31,555	2,57	6,16
						5	95,608	38,570	3,09	9,42
2	0,96 1	-6,32	0,0	0,0	2	1	-71,42	-25,39	2,57	6,16
						3	-43,58	-34,61	1,01	1,04
3	1,02	-3,71	180	110,303	3	2	44,59	35,65	1,01	1,04
						4	40,47	18,07	1,72	-0,84
						5	24,99	16,59	0,51	-3,04
4	0,92	-10,89	0,0	0,0	4	3	-38,74	-18,90	1,72	-0,84
						5	-31,26	-11,10	0,78	-2,32
5	0,96 8	-6,16	0,0	0,0	5	1	-92,60	-29,15	3,09	9,42
						3	-24,44	-19,63	0,51	-3,04
						4	32,04	8,77	0,78	-2,32

Tablo 5. Gauss-Seidel metodu kullanılarak elde edilen güç akışı sonuçları

Bara	V	δ	Generatör		Hat (Baradan Baraya)	Hat Akışları		Hat Kayıpları		
			MW	MVAr		MW	MVAr	MW	MVAr	
1	1,04	0,0	234,48	100,14	1	2	73,875	31,566	2,56	6,14
						5	95,608	38,576	3,08	9,41
2	0,96 1	-6,31	0,0	0,0	2	1	-71,31	-25,43	2,56	6,14
						3	-43,60	-34,60	1,01	1,05
3	1,02	-3,70	180	110,278	3	2	44,61	35,64	1,01	1,05
						4	40,47	18,06	1,73	-0,84
						5	24,99	16,57	0,51	-3,04
4	0,92	-10,88	0,0	0,0	4	3	-38,75	-18,90	1,73	-0,84
						5	-31,23	-11,10	0,78	-2,33
5	0,96 8	-6,16	0,0	0,0	5	1	-92,52	-29,17	3,08	9,41
						3	-24,49	-19,61	0,51	-3,04
						4	32,01	8,78	0,78	-2,33

Tablo 6. Hızlı Ayrık metodu kullanılarak elde edilen güç akışı sonuçları

Bara	V	δ	Generatör		Hat (Baradan Baraya)	Hat Akışları		Hat Kayıpları		
			MW	MVAr		MW	MVAr	MW	MVAr	
1	1,04	0,0	234,67	100,13	1	2	73,985	31,555	2,57	6,16
						5	95,689	38,571	3,09	9,42
2	0,96 1	-6,32	0,0	0,0	2	1	-71,42	-25,39	2,57	6,16
						3	-43,58	-34,61	1,01	1,04
3	1,02	-3,71	180	110,303	3	2	44,59	35,65	1,01	1,04
						4	40,47	18,07	1,72	-0,84
						5	24,94	16,59	0,51	-3,04
4	0,92	-10,89	0,0	0,0	4	3	-38,74	-18,90	1,72	-0,84
						5	-31,26	-11,10	0,78	-2,32
5	0,96 8	-6,16	0,0	0,0	5	1	-92,60	-29,15	3,09	9,42
						3	-24,44	-19,63	0,51	-3,04
						4	32,04	8,77	0,78	-2,32

SONUÇ

Bu çalışma ile öğrencilerin güç akışı hesaplama metodlarını anlamalarını kolaylaştırmak için bilgisayar destekli bir yöntem sunulması hedeflenmiştir. Bu amaçla, 5 baralı örnek bir güç sisteminin güç akışı kullanıcı dostu bir yazılım olan PowerWorld Simülâtör ile oluşturulmuştur. Analizler PowerWorld yazılımının 13 bara ile sınırlı öğrenci sürümü ile yapılmıştır. Yazılımın tam sürümü ile çok daha büyük ve karmaşık güç sistemleri modellenebilir.

PowerWorld Simülâtör, geleneksel ders yaklaşımlarına ek olarak kullanıldığında, öğrencilerin güç sistemi analiz problemlerini ayrıntılı bir şekilde anlamalarına yardımcı olur. Bu nedenle, bir lisans müfredatının sınırlı süresi içinde diğer zorlu konuların anlatımına izin verir. Bununla birlikte, öğrencileri kendi tasarımlarına,

modellerine ve analizlerine sahip olmaya teşvik eder. Animasyon tabanlı simülasyon ile kullanıcıların, özellikle de öğrencilerin, karmaşık güç sistemi içinde meydana gelen gerçek durumu hayal etmelerini sağlar.

KAYNAKLAR

- Acha, E., Agelidis, V., Anaya-Lara, O., Miller, T.J.E. (2002). *Power electronic control in electrical systems*. Oxford, UK: Newnes.
- Afolabi, O.A., Ali, W.H., Cofie, P., Fuller, J., Obiomon, P., Kolawole, E.S. (2015). Analysis of the load flow problem in power system planning studies. *Energy and Power Engineering*, 7(10): 509–523.
- Carbajal, C., Gast, A., Fleck, M., Podolsky, S.P., Berry, F., Dinkelaker, J., Patel, K., Jha, A., Grigg, C. (2005). The use of powerworld to conduct load flow analysis and power factor correction on Stevenson's 5 bus system. *Computers in Education Journal*, 15: 95–98.

Güç Akışı Analizini Öğrenmede PowerWorld Simülator Kullanımı: Bilgisayar Destekli Bir Görselleştirme Aracı

- Depcik, C., Assanis, D.N. (2005). Graphical user interfaces in an engineering educational environment. *Computer Applications in Engineering Education*, 13(1): 48–59.
- Elgerd, O.I. (2012). *Electric energy systems theory: An introduction*. (2nd ed.). New Delhi: Tata McGraw Hill.
- Glover, J.D., Sarma, M.S., Overbye, T. (2012). *Power system analysis & design*, 5th ed., Stamford, USA: Cengage Learning.
- Grigsby, L.L. (2006). *Electric power engineering handbook*. London: CRC Press LLC.
- Honrubia-Escribano, A., Villena-Ruiz, R., Artigao, E., Gómez-Lázaro, E., Morales, A. (2021). Advanced teaching method for learning power system operation based on load flow simulations. *Computer Applications in Engineering Education*, 29(6): 1743–1756.
- Iwamoto, S., Tamura, Y. (1978). A fast load flow method retaining nonlinearity. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 5: 1586–1599.
- Kothari, I.J., Nagrath, D.P. (2007). *Modern power system analysis*, 3rd ed., New Delhi: Tata McGraw Hill.
- Lim, J.U. (2013). An enhanced approach for the power system course using a computer-based visualization tool for steady-state power system simulation. *2013 ASEE International Forum*, 11–21.
- Moradia, M.H., Foroutana, V.B., Abedinib, M. (2017). Power flow analysis in islanded Micro-Grids via modeling different operational modes of DGs: A review and a new approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69: 248–262.
- Nasiruzzaman, A.B.M. (2010). A student friendly toolbox for power system analysis using MATLAB. *Matlab-Modeling, Programming and Simulations*, 67–86.
- Oliveira, T.L., Guimarães, G.C., Silva, L.R., Rezende, J.O. (2019). Power system education and research applications using free and open-source, graphical and multiplatform PSP-UFU software. *The International Journal of Electrical Engineering & Education*, 1–25.
- Pietryga, F. (2006). Animation of a power system using PowerWorld Simulator. *2006 Annual Conference & Exposition*, 211–216.
- PowerWorld Corporation (2022). PowerWorld Simulator. <https://www.powerworld.com/> (Erişim Tarihi: 22.07.2022)
- Rajcic, D., Bose, A. (1988). A modification to the fast-decoupled power flow for networks with high R/X ratios. *IEEE Transactions on Power Systems*, 3(2): 743–746.
- Saadat, H. (2010). *Power system analysis*, 3rd ed., Alexandria: PSA Publishing LLC, Chapter 6.
- Schneider, K.P., Mather, B.A., Pal, B.C., Ten, C.-W., Shirek, G.J., Zhu, H., Fuller, J.C., Pereira J.L.R., Ochoa, L.F., de Araujo, L.R., Dugan, R.C., Matthias, S., Paudyal, S., McDermott, T.E., Kersting, W. (2017). Analytic considerations and design basis for the IEEE distribution test feeders. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(3): 3181–3188.
- Shaikh, F. A., Zaheeruddin, Z., Asghar, M.J., Singh, G. (2007). Soft computing techniques and role of PowerWorld® simulator for forecasting and mitigation of power system blackout. *International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications (ICCIMA 2007)*, 1: 341-346.
- Sharma, R., Dhillon, J. (2021). PyPSA: Open source Python tool for load flow study. *Journal of Physics: Conference Series*, 1854(1):012-036.
- Stevenson, W.D. (1982). *Elements of power system analysis*, 4th ed., New York: McGraw-Hill.
- Stott, B., Alsac, O. (1974). Fast decoupled load flow. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 3: 859–869.
- Tamali, M., Allali, M., Bouzidi, B., Toumi, T. (2013). Electrical network's modeling & simulation tools: The state of the art. *Journal of Electrical and Control Engineering*, 3(5): 1–12.
- Thayer, B. L., Mao, Z., Liu, Y., Davis, K., Overbye, T. (2020). Easy simauto (esa): A python package that simplifies interacting with powerworld simulator. *Journal of Open Source Software*, 5(50): 2289.
- Tinney, W.F., Hart, C.E. (1967). Power flow solution by Newton's method. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 11: 1449–1460.
- Zhang, W.H., Jiang, H.Y. (2015). Computer-assisted interactive learning for teaching power flow problem. *Journal of Information Technology and Application in Education*, 4: 30–33.