



ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE GÜÇ AKIŞI ANALİZİ VE BİR EĞİTİM ARACININ GELİŞTİRİLMESİ

İbrahim ŞENGÖR^{1,2*}, Mehmet Cenk KAYA¹

¹ İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

² University College Cork, Environmental Research Institute, MaREI Centre, Cork, Ireland

Anahtar Kelimeler Öz

Güç Akışı Analizi,
Newton-Raphson
Yöntemi,
Python,
Qt Designer.

Gelişen teknoloji ve artan çevresel kaygılar, elektrik enerjisine olan talebi her geçen gün artırmaktadır. Ayrıca, elektrik güç sistemlerinin (EGS) işletimi sırasında en çok zorlanılan konulardan biri de sürdürülebilir ve kaliteli elektrik enerjisi sağlamaktır. Diğer yandan, üretim tarafında rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları dahil edilirken tüketim tarafında da elektrikli araçlar gibi yeni yüklerin sayısı artmaktadır. Bahsedilen gelişmeler, EGS'lerde çözülmesi gereken önemli operasyonel sorunlara neden olmaktadır. Uygulama sürecinde oluşabilecek sorunları önceden tespit edilebilmesi için güç akışı analizi önem kazanmıştır. Güç akışı, hatlardaki aktif ve reaktif güç akışını, baraların voltajını ve faz açısını, hatlardan geçen akımı ve buna bağlı olarak sistemde meydana gelen güç kayıplarını belirlemek için kullanılmaktadır. Bu çalışmada EGS'lerde güç akışı analizi incelenmiş ve ilgili alanda eğitim gören mühendislik öğrencilerinin güç akışını daha iyi anlamaları için bir eğitim aracı geliştirilmiştir. IEEE 14 baralı test sistemi kullanılarak QtDesigner üzerinden arayüz tasarımı sağlanmış ve Python programlama dilinin NumPy kitaplığında Newton-Raphson yöntemi kullanılarak güç akışı analizi yapılmıştır. Geliştirilen model ve arayüzün test edilebilmesi için farklı durum çalışmaları oluşturulmuştur.

POWER FLOW ANALYSIS IN ELECTRIC POWER SYSTEMS AND DEVELOPMENT OF AN EDUCATION TOOL

Keywords

Power Flow Analysis,
Newton-Raphson
Method,
Python,
Qt Designer.

Abstract

The recent development of technology and the increased environmental concern give rise to the demand for electrical energy. Furthermore, one of the most challenging tasks during the operating of EPSs is to provide sustainable and quality electric power. On the other hand, renewable energy sources such as wind and solar are integrated into the electric power systems (EPSs) on the supply side, while the penetration of new loads such as electric vehicles has been raising on the demand side as well. The mentioned changes on EPSs cause significant operational issues to figure out. To foresee the problems that may occur during the application process, the power flow analysis (PFA) has gained importance. PFA is used to determine the active and reactive power flow on the lines, the voltage and the phase angle of the buses, the current flowing through the lines, and accordingly the energy losses of the system. In this study, power flow analysis in EPSs has been examined and an educational tool has been developed for engineering students studying in the related field to provide a better understanding of power flow. Using the IEEE 14 bus test system, the interface design has been provided via QtDesigner, and the power flow analysis has been performed by using the Newton-Raphson method in the NumPy library of the Python programming language. To test the developed model and interface, various case studies have been evaluated.

Alıntı / Cite

Sengor, I., Kaya, M. C., (2022). Elektrik Güç Sistemlerinde Güç Akışı Analizi ve Bir Eğitim Aracının Geliştirilmesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 10(1), 257-271.

* İlgili yazar / Corresponding author: ibrahim.sengor@ikcu.edu.tr, +90-232-329-3758

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)	Makale Süreci / Article Process	
İ. Şengör, 0000-0002-9451-4218	Başvuru Tarihi / Submission Date	30.09.2021
M. C. Kaya, 0000-0002-2714-830X	Revizyon Tarihi / Revision Date	11.11.2021
	Kabul Tarihi / Accepted Date	23.11.2021
	Yayın Tarihi / Published Date	23.03.2022

1. Giriş (Introduction)

1.1. Motivasyon (Motivation)

Günümüzdeki teknolojik gelişmelere ek olarak, maliyetlerin düşmesi, karar koyucuların sıfır karbon emisyonu hedeflerine yönelik yeni politikalar uygulaması nedeniyle elektrik enerjisine olan talep hızlı bir şekilde artmaktadır. Buna bağlı olarak üretim tarafına rüzgâr gibi doğası gereği kesintili üretim gerçekleştiren yenilenebilir tabanlı enerji santralleri devreye alınırken, tüketim tarafında da artan geleneksel tüketim talebine ek olarak elektrikli araçlar gibi yeni yükler de sisteme dahil olmaktadır. Ayrıca, mevcut sistemde var olan enerji kaynaklarının ekonomik ve güvenli şekilde kullanılması gerekliliği unutulmamalıdır (Levi vd., 2001). IRENA'nın sunduğu verilere göre, Türkiye'de toplam yenilenebilir enerji üretim kapasitesi 2010 yılında 17 bin 369 MW iken, 2019 yılında bu değer 44 bin 587 MW'a yükselmiştir (IRENA, 2020). Ayrıca düzenli olarak yayınlanan Global Elektrikli Araçlar raporuna göre 2030 yılına gelindiğinde yollarda olan elektrikli araç sayısının dünya çapında 130 milyon ile 250 milyon arasında olacağı öngörülmektedir (International Energy Agency, 2019). Saygın vd. (2019) hazırladığı rapora göre Türkiye'de ise aynı yıllarda 300 bin ile 800 bin arasında elektrikli araç satışının gerçekleşmesi tahmin edilmektedir. Son yıllarda gittikçe daha da karmaşık hale gelen birbirine bağlı ve bağımsız şebekeleri planlarken ve işletirken mühendislerin detaylı çalışmalar yapması gerekmektedir. Şebekeye dahil edilen yenilenebilir enerji sistemleri ve elektrikli araç sayılarındaki artış bu karmaşıklığa neden olan etmenler olarak gösterilebilir. Enerji sistemleri, enerji iletim ve dağıtım hatları, elektrik makineleri ve koruyucu elemanlardan oluşmaktadır. Bu sistemler elektrik enerjisinin üretilmesini, iletilmesini, dağıtılmasını ve kullanılmasını sağlar. Enerji sistemlerinin planlanması, işletilmesi ve kontrolünde bilgisayar destekli çözüm teknikleri kullanılmaktadır. Elektrik güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılan analizlerden biri de güç akış analizidir. Bu nedenle ilgili alanda eğitim alan mühendislik öğrencilerinin, bu konuda özel olarak uzmanlaşmaları sürdürülebilir bir güç sistemi için oldukça önemlidir.

1.2. Literatür Taraması (Literature Review)

Literatürde elektrik güç sistemlerinde güç akışı analizini ele alan birçok çalışma bulunmaktadır. Son yıllarda bu çalışmalar optimal güç akışı yönüne evrilmiş olup sezgisel yöntemlerin çözüm süresinde sağladığı avantaj nedeniyle öne çıktığı görülmektedir. Ayrıca giderek dijitalleşen dünyaya eğitim sektörü de hızlı bir şekilde uyum sağlamış olup eğitim amaçlı güç akışı analizi irdelemek üzere literatüre kullanıcı dostu arayüzler sunulmaktadır. Levi vd. (2001) iletim kayıplarının neredeyse sıfır olduğu ve Newton-Raphson yöntemini kullanarak bir yük akış modeli üzerine çalışmışlardır. Dzafic vd. (2004) enerji sistemlerini analiz etmek için, Windows tabanlı görselleştirilmiş ve anlaşılır bir paket üzerinde çalışmışlardır. Liu vd. (2002) birden fazla üretim sistemine sahip dağıtım sistemlerinde güç akışı problemlerini çözmek için bir güç akışı analizi geliştirmişlerdir. Chow ve Cheung (1992) güç akışı analizi için enerji sistemlerinde lineer sistem analizini kullanmışlardır. Yu vd. (1994) santrallere katkı sağlamak için baralardaki aktif ve reaktif gücü grafik olarak gösteren bir çalışma yapmışlardır. Böylece sistemdeki güç dengesini gözlemlemeyi amaçlamışlardır. Islam ve Chowdhury (2001) sistem operatörleri ve mühendisler için baralardaki gerilim ve faz açılarına ek olarak iletim hatlarındaki güç akışlarını gösteren bir simülasyon üzerinde çalışmışlardır. Vournas vd. (2004) elektrik güç sistemlerinde eğitim amacıyla asenkron motorlar, regülatörler, statik VAR kompensatörlerin yanı sıra hidroelektrik santralleri, rüzgâr türbinleri ve jeneratörleri içeren simülasyon platformu geliştirmişlerdir. Ekinci vd. (2017) yük akış için Newton-Raphson yöntemini kullanan, çeşitli baraların gerilimlerini ve açıları ve ayrıca aktif ve reaktif güç akışını belirlemek için bir şebeke analizi üzerine eğitim kiti geliştirmişlerdir. Shin vd. (1999) kullanıcı dostu bir grafik kullanıcı arayüzü ile enerji sistemlerinin modellenmesi, analizi ve işletilmesi konusunda eğitim ve öğretim için geliştirilen Windows tabanlı bir etkileşimli grafik paketi üzerinde çalışmışlardır. Thurner vd. (2018) Python tabanlı, matematik analizi ve veri işlemek için NumPy ve SciPy kütüphanelerini kullanan bir güç sistemi analiz aracı üzerine çalışmışlardır. Milano (2013), MATLAB dilinin aksine modüler nesne yönelimli kod oluşturmayı ve yeniden kullanmayı kolaylaştıran, güç sistemlerini analiz etmek için Python tabanlı bir yazılım aracı üzerinde çalışmıştır. Ayrıca, Hakim vd. (2016) Python dilini kullanarak dikkörtgen gerilim koordinatları tabanlı çalışan bir güç akışı yazılım aracı geliştirmişlerdir. Dikkörtgen koordinatların kutupsal koordinatlara göre hesaplama esnasında daha verimli olduğunu öne sürmüşlerdir. Ayrıca güç akışı analizi esnasında çözüm yöntemi olarak Newton-Raphson yöntemi kullanılmış ve bir kullanıcı arayüzü geliştirilmiştir. Overbye vd. (1995) elektrik şebekesi işletimi ve kontrolünü öğretmek için kullanımı kolay, 13 baralı bir sistemi içeren bir güç sistemi simülasyon programı üzerinde çalışmışlardır. Srikanth vd. (2013) IEEE-14 baralı test sisteminde güç akışı analizi gerçekleştirmişlerdir. Buna bağlı

olarak iletim hatları üzerinde akan aktif/reaktif güçler hesaplanmış ve baraların gerilimlerini ve faz açıları da belirlemiştir. Sidea vd. (2017) güç mühendisliği öğrencilerinin, güç şebekesinin kararlı durum çalışmasını daha iyi anlamaları için bir arayüze sahip ve yük akış hesaplamaları gerçekleştirebilen bir araç kutusu üzerinde çalışmışlardır. Lai vd. (2014) öğrencilerin mikro şebekeleri anlayabilmeleri için çeşitli parametrelerin kullanıcı tarafından belirlenebildiği, güç akışı analizi ve geçici kararlılık analizini yapabilen bir simülasyon programı üzerinde çalışmışlardır. Fernandes vd. (2018) Python programlama dilinin enerji sistemleri analizi alanında eğitim ve araştırma için nasıl uygun olabileceğini tartışmışlardır. Elektrik güç mühendisliği öğrencilerinin bilgisayar mühendisliği anlayışına sahip olmasının ve programlamayı öğrenmeleri gerektiğinin büyük önem taşıdığını düşünmektedirler. Ayrıca literatürde elektrik güç sistemlerinde güç akışı analizi ve buna bağlı olarak geliştirilen çalışmaları kapsamlı şekilde ele alan birçok derleme makale çalışması da mevcuttur. Bunlara bir örnek olarak, Turner vd. (2014) elektrik mühendisliği uygulamalarında kullanılmaya hazır simülasyon yazılımının etkinliğini açıklayan mevcut literatürü incelemişler ve bu tür araçların eğitim için kullanılmasının etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca, bahsi geçen çalışmada görsel grafiklerin kullanılmasının mühendislik eğitimi üzerinde olumlu etkileri olduğu öne sürülmüştür.

Yukarıda bahsi geçen çalışmalar ve tamamına bu çalışmada değinilemeyecek pek çok başka çalışma elektrik güç sistemlerinde güç akışı analizinin önemine vurgu yapmışlar ve bu konunun ilgili alandaki mühendislik öğrencileri tarafından anlaşılması gerektiğini ortaya koymuşlardır. Literatürdeki yazarların katkıları sonucunda bu çalışmada basit, anlaşılır, iyi bir görsellik sunan yük akışı analizi incelenmiş ve kullanıcı dostu bir eğitim aracı geliştirilmesi hedeflenmiştir.

1.3. Çalışmanın Katkıları ve Organizasyonu (Contributions and Organisation of Studies)

Bu çalışmada, mühendislik öğrencilerinin kullanımı için güç akış çözümü ve analizini gerçekleştirebilmek amacıyla, kullanıcı odaklı arayüze sahip güç akış eğitim platformu geliştirilmiştir. Tasarlanan güç sistemi analiz programında amaç kurulan sistem üzerinde farklı senaryoların gerçekleşmesi durumunda hat akış değişimlerini ve baralardaki değişimleri gözlemlemektir. Çalışmanın katkıları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- 1) Geliştirilen platformda kullanıcıya hitap etmek için PyQt eklentisi ile çeşitli komponentler görselleştirilerek arayüz tasarlanmıştır.
- 2) IEEE 14 baralı test sistemine farklı yük ve güç kaynağı eklediğinde meydana gelen değişimler gösterilmiştir. Baralardaki güç, gerilim, açı değişimleri ve hat akışlarının değişimleri incelenmiştir.

Önerilen modelde kullanılan güç akışına ait matematiksel formülasyonun adımları, sistemin çalışma mantığı, Python programında PyQt eklentisinden aktarılan arayüzde görülen sonuçları Bölüm 2'de detaylandırılmıştır. Sonrasında Python programlama dili kullanılarak oluşturulan farklı durum çalışmalarına ait test ve analizlerin sonuçları Bölüm 3'te değerlendirilmiştir. Sonuç olarak Bölüm 4'te çalışma özetlenmiş ve gelecek çalışmaya ait planlar belirtilmiştir.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. Matematiksel Model (Mathematical Model)

Yük akışı analizi için veriler; baraların, iletim hatlarının ve trafo bilgilerinin toplanmasından oluşmaktadır. Bir güç sisteminde her bara gerilim genliği ($|V|$), faz açısı (δ), aktif güç (P) ve reaktif güç (Q) olmak üzere dört büyüklük ile tanımlanmaktadır. Her bir barada bu değerlerden son ikisi giriş olarak tanımlanmaktadır. İlk iki bilinmeyen yük akışı analizinden sonra hesaplanmaktadır. Bir güç sisteminin modellenmesi sırasında baralar salınım baraları, yük baraları ve gerilim kontrollü baralar olarak tanımlanmaktadır. Herhangi bir sistemde yalnızca bir salınım barası bulunmakta ve bu bara genellikle bir numaralı bara olarak tanımlanmaktadır. Bu baraya ilişkin gerilimin ($V \angle \delta_1$) genliği ve açısı belirtilmekte ve yük akışından sonra net aktif ve reaktif güç değerleri (P_1, Q_1) hesaplanmaktadır. Yük baraları için giriş bilgileri P_k ve Q_k biçiminde gösterilmektedir. V_k ve δ_k değerleri analiz sonucunda hesaplanarak elde edilmektedir. Gerilim kontrollü baralarda ise giriş bilgileri P_k ve V_k şeklinde olup, analiz sonucunda Q_k ve δ_k değerleri hesaplanmaktadır. P_k ve Q_k değerleri (1) ve (2) numaralı denklemlerde verilen eşitlikler ile hesaplanmaktadır (Glover vd., 2012; Saadat, 2002).

$$P_k = P_{Gk} - P_{Lk}, \quad \forall k \quad (1)$$

$$Q_k = Q_{Gk} - Q_{Lk}, \quad \forall k \quad (2)$$

Denklemden P_{Gk} ve Q_{Gk} ifadelerindeki k değeri ilgili bara numarasını belirtmektedir. P_{Gk} ve Q_{Gk} , bu baraya bağlı generatörün aktif ve reaktif gücünü, P_{Lk} ve Q_{Lk} ise baraya bağlı yükün aktif ve reaktif gücünü göstermektedir. İlgili k barasındaki karmaşık güç ifadesi denklem (3)'te ifade edilmiştir (Saadat, 2002).

$$S_k = P_k + jQ_k = V_k I_k^*, \quad \forall k \quad (3)$$

Reel ve imajiner kısımları sırasıyla (4) ve (5) denklemlerinde görülmektedir. Güç akışı için Newton-Raphson çözümleri (4) ve (5) denklemlerinde verilen doğrusal olmayan güç akışı denklemlerine dayanmaktadır.

$$P_k = V_k \sum_{n=1}^N V_n [G_{kn} \cos(\delta_k - \delta_n) + B_{kn} \sin(\delta_k - \delta_n)], \quad \forall k, \forall n \quad (4)$$

$$Q_k = V_k \sum_{n=1}^N V_n [G_{kn} \sin(\delta_k - \delta_n) - B_{kn} \cos(\delta_k - \delta_n)], \quad \forall k, \forall n \quad (5)$$

$V_n = n$. baranın gerilimi

$V_k = k$. baranın gerilimi

$\delta_{kn} = k$. ve n . baraların faz açıları

$P_k = k$. baranın aktif gücü

$Q_k = k$. baranın reaktif gücü

$G_{kn}, B_{kn} = k$ barasından n barasına bara admitans matrisinin gerçekte ve sanal kısmı

$k = \{1, 2, 3, \dots, N\}$

$N =$ Sistemdeki baraların toplam sayısı

Yukarıdaki denklemlerin başlangıç tahminleri civarında Taylor serilerine açarsak ve yüksek dereceli terimleri ihmal edersek, denklem (6) gibi denklem takımları oluşmaktadır.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2(i) \\ \vdots \\ \Delta Q_N(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_2^n}{\partial \delta_2} \right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2^n}{\partial \delta_N} \right)^{(0)} & \left| & \left(\frac{\partial P_2^n}{\partial V_2} \right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2^n}{\partial V_N} \right)^{(0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_N^n}{\partial \delta_2} \right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial P_N^n}{\partial \delta_N} \right)^{(0)} & \left| & \left(\frac{\partial P_N^n}{\partial V_2} \right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial P_N^n}{\partial V_N} \right)^{(0)} \\ \hline \left(\frac{\partial Q_2^n}{\partial \delta_2} \right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2^n}{\partial \delta_N} \right)^{(0)} & \left| & \left(\frac{\partial Q_2^n}{\partial \delta_2} \right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2^n}{\partial \delta_N} \right)^{(0)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_N^n}{\partial \delta_2} \right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_N^n}{\partial \delta_N} \right)^{(0)} & \left| & \left(\frac{\partial Q_N^n}{\partial \delta_2} \right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_N^n}{\partial \delta_N} \right)^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta(i) \\ \vdots \\ \Delta V(i) \end{bmatrix}, \quad \forall k, \forall n \quad (6)$$

Yukarıdaki denklemde 1 numaralı bara salınım barası olmasından dolayı yer almamıştır. Jakoben matris, gerilim açısındaki $\Delta \delta(i)$ ve gerilim genliğindeki $\Delta V(i)$ küçük değişimleri ile aktif güçlerdeki $\Delta P_k(i)$ ve reaktif güçlerdeki $\Delta Q_k(i)$ küçük değişimleri arasındaki lineerleştirilmiş ilişkiyi vermektedir. Jakoben matrisinin elemanları (4) ve (5) denklemlerinin $\Delta \delta_k(i)$ ve $\Delta V_k(i)$ 'deki değerlerinin kısmi türevleridir. Denklem (7)'de özet ifadesi görülmektedir.

$$\begin{bmatrix} \Delta P(i) \\ \vdots \\ \Delta Q(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J1 & & J3 \\ - & - & - \\ J2 & & J4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta(i) \\ \vdots \\ \Delta V(i) \end{bmatrix} \quad (7)$$

Gerilim kontrollü baralar için gerilim büyüklükleri bilinmektedir. Bu sebeple gerilim kontrollü bara sayısı kadar, $\Delta \delta$ ve ΔV 'nin dahil olduğu denklem ve jakoben matriste karşılık düşen sütunlar silinmiştir. J_1 matrisinin köşegen ve köşegen olmayan elemanları (8) ve (9) denklemlerinde görülmektedir.

$$J1_{kn} = \frac{\partial P_k}{\partial \delta_n} = V_k Y_{kn} V_n + \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}), \quad \forall k, \forall n \quad (8)$$

$$J1_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial \delta_n} = - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^N Y_{kn} V_n + \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}), \quad \forall k, \forall n \quad (9)$$

Ayrıca, J_2 matrisinin köşegen ve köşegen olmayan elemanları (10) ve (11) denklemlerinde görülmektedir.

$$J2_{kn} = \frac{\partial P_k}{\partial V_n} = V_k Y_{kn} \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}), \quad \forall k, \forall n \quad (10)$$

$$J2_{kk} = \frac{\partial P_k}{\partial V_k} = V_k Y_{kk} \cos \theta_{kk} + \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}), \quad \forall k, \forall n \quad (11)$$

J_3 matrisinin köşegen ve köşegen olmayan elemanları (12) ve (13) denklemlerinde görülmektedir.

$$J3_{kn} = \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_n} = -V_k Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}), \quad \forall k, \forall n \quad (12)$$

$$J3_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} = V_k \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^N Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}), \quad \forall k, \forall n \quad (13)$$

J_4 matrisinin köşegen ve köşegen olmayan elemanları (14) ve (15) denklemlerinde görülmektedir.

$$J4_{kn} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_n} = V_k Y_{kn} \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}), \quad \forall k, \forall n \quad (14)$$

$$J4_{kk} = \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = -V_k Y_{kk} \sin \theta_{kk} + \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn}), \quad \forall k, \forall n \quad (15)$$

$\Delta P_k(i)$ ve $\Delta Q_k(i)$ terimleri belirlenen ve hesaplanan değerler arasındaki fark olup, güç kalanları olarak bilinir. Denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\Delta P_k(i) = P_k^{tahmin} - P_k(i), \quad \forall k \quad (16)$$

$$\Delta Q_k(i) = Q_k^{tahmin} - Q_k(i), \quad \forall k \quad (17)$$

Gerilim baraları için yeni tahmini değerler aşağıdaki denklemlerde verilmiştir.

$$\delta_k(i+1) = \delta_k(i) + \Delta \delta_k(i), \quad \forall k \quad (18)$$

$$V_k(i+1) = V_k(i) + \Delta V_k(i), \quad \forall k \quad (19)$$

Bu çalışmada geliştirilen güç akış eğitim platformun çözümü için yukarıdaki denklemlerden faydalanılmıştır. Yük akış çözümü için gerekli prosedür sırasıyla bu kısımda anlatılmıştır. Yük baralarında P_k^{tahmin} ve Q_k^{tahmin} bilinmektedir. Gerilim büyüklükleri ve faz açıları ise salınım barası değerlerine eşitlenmiş ve $V_k(0)=1$ p.u ve $\delta_k(0) = 0$ olmuştur. Gerilim kontrollü baraların V_k ve P_k^{tahmin} değerleri bilinmektedir. Faz açıları ise salınım barası değerlerine eşitlenmiştir. Böylece $\delta_k(0) = 0$ olmuştur. Yük baralarında ise, $P_k(i)$ ve $Q_k(i)$ değerleri sırasıyla

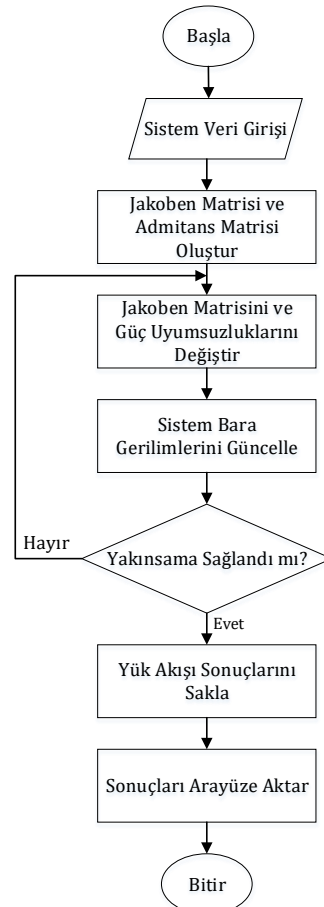
(4) ve (5) denklemlerinden hesaplanmaktadır. Yine yük baralarında $\Delta P_k(i)$ ve $\Delta Q_k(i)$ değerleri ise sırasıyla (16) ve (17) denklemlerinden hesaplanmaktadır. Gerilim kontrollü baralarda ise, $P_k(i)$ ve $\Delta P_k(i)$ değerleri sırasıyla (4) ve (16) denklemlerinden hesaplanmaktadır. Jakoben matrisinin $J1, J2, J3$ ve $J4$ elemanları sırasıyla (8)-(15) denklemlerinden hesaplanmaktadır. Eşitlik (7) lineer denklemi çözüldükten sonra yeni faz açıları ve gerilim büyüklük değerleri sırasıyla (18) ve (19) denklemlerinden çözülmektedir. İşlem $\Delta P_k(i)$ ve $\Delta Q_k(i)$ kalanlarının belirli bir hassasiyete kadar devam etmesinden sonra ϵ toleransı elde edilene kadar devam etmektedir. ϵ toleransı elde edilince yük akış iterasyonu durdurulmaktadır. Sonuç olarak, bara gerilimleri ve faz açılarıyla, baralardaki güç değerleri elde edilmiştir. Son olarak baralar arasındaki aktif güç akış ve reaktif güç akış hesaplamaları sırasıyla (20) ve (21) denklemlerinden bulunmuştur. Böylece, hatlardaki güç akış değerleri de elde edilmiştir.

$$P_{kn} = |V_k|^2 G_{kn} - |V_k||V_n|(G_{kn} \cos \delta_{kn} + B_{kn} \sin \delta_{kn}), \quad \forall k, \forall n \quad (20)$$

$$Q_{kn} = -|V_k|^2 B_{kn} - |V_k||V_n|(G_{kn} \sin \delta_{kn} - B_{kn} \cos \delta_{kn}), \quad \forall k, \forall n \quad (21)$$

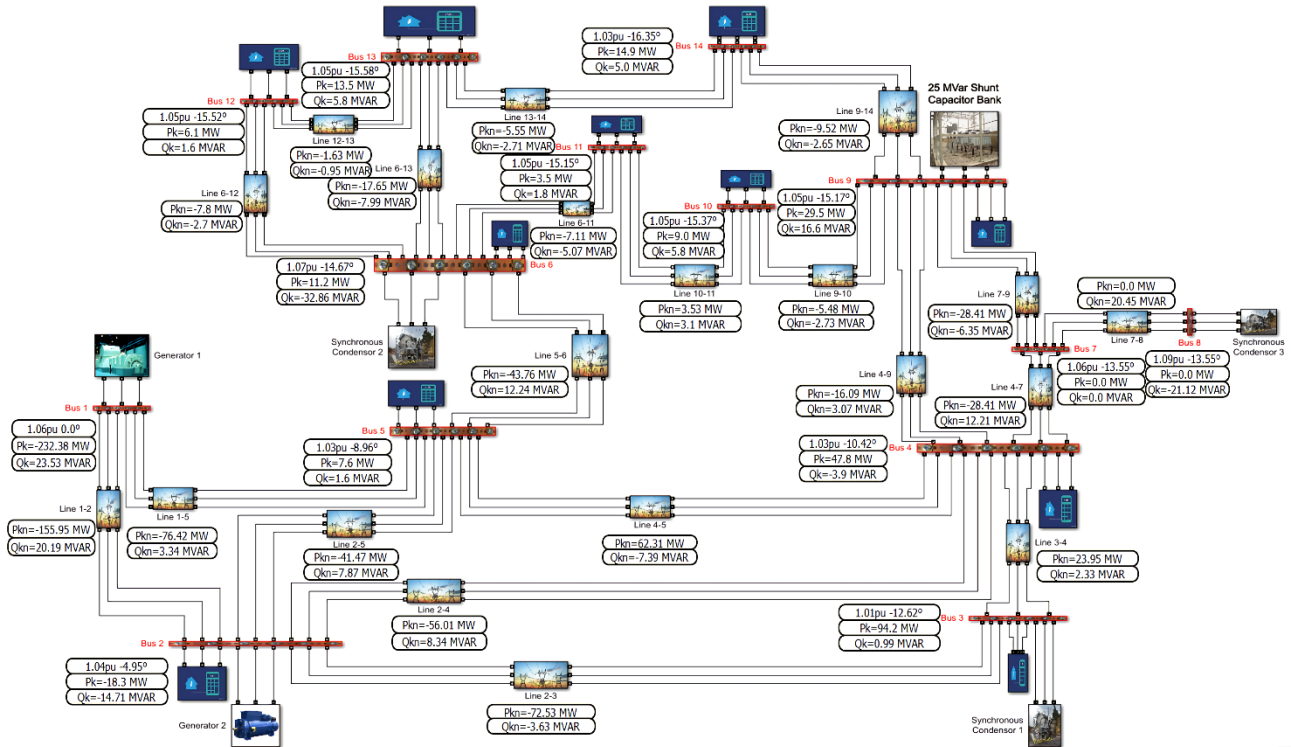
2.2. Önerilen Yöntem (Proposed Method)

Güç akış eğitim aracı olarak tasarlanan modelde, dizi benzeri hesaplamalar yapmak için Python yazılım dilinin NumPy kütüphanesi kullanılmıştır [19]. NumPy kütüphanesi ile matematik ifadeler kolayca dizilere dönüştürülmekte ve hesaplanmaktadır. Programın geliştirme aşamasında şebeke bileşenleri bir generatör, bara, senkron kompansatörler, kapasitör grubu, hat ve yükten oluşmaktadır. Kompansatörler şebekedeki reaktif gücü dengelemek için çok önemlidir. Reaktif güç gerilim dengesini sağlamak için belli bir seviyede tutulmaktadır. Geliştirilen modelin hızlı çalışması için gereksiz kütüphane kullanımından kaçınılmıştır. Algoritmayı özetlemek gerekirse; ilk önce modele veri girişi sağlanmaktadır. Daha sonra, sistemin admitans matrisi ve jakoben matrisi oluşturulmaktadır. Ardından jakoben matrisini ve güç uyumsuzlukları değiştirilmektedir. Bara gerilimleri sisteme yüklendikten sonra yakınsamanın sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmektedir. Eğer yakınsama sağlanırsa bara gerilimi, gerilim faz açıları ve hatlarda meydana gelen güç akışı bilgileri çıktı olarak alınmaktadır. Eğer yakınsama sağlanmazsa jakoben matrisi ve güç denklem uyumsuzlukları tekrar değiştirilmektedir. Algoritma akış diyagramı Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Güç Akış Eğitim Platformu Algoritma Akış Diyagramı (Power Flow Education Platform Algorithm Flowchart)

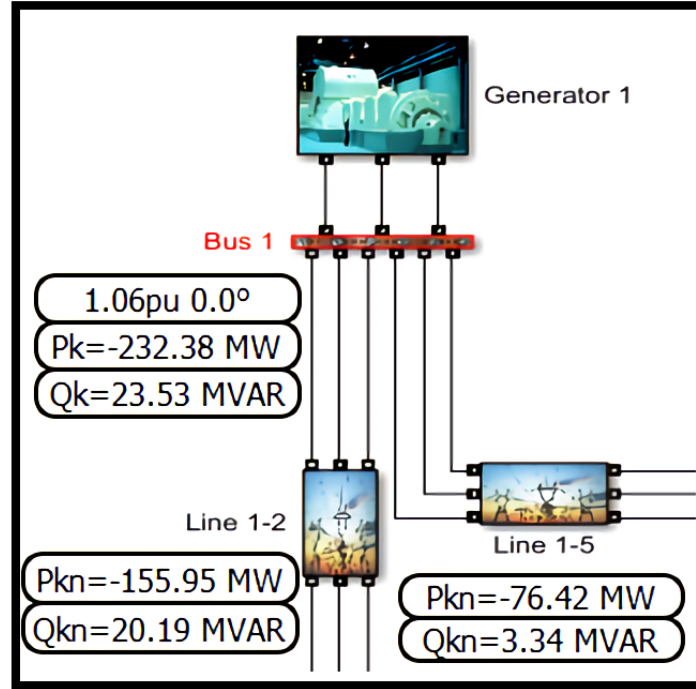
Bu çalışma kapsamında IEEE 14 baralı test sistemi genel güç sistemi olarak ele alınmıştır. Test verileri ile güç akışı analizi yapılarak modellenen eğitim platformu test edilmiştir. Bir diğer önemli nokta olan durma koşulları bu bölümde anlatılmıştır. Son olarak arayüz uygulamasından bahsedilmiştir. Program oluşturulduktan sonra baralar ve iletim hatları üzerindeki görsel okuma sayaçları sayesinde elde edilen veriler arayüzde görüntülenmiştir. IEEE 14 baralı test sistemi verileri Python’da işlenmiş ve ilgili veriler, IEEE Ortak Veri Formatına göre değerlendirilmiştir [20]. Bu veri formatı, bara verileri ve iletim hattı verileri olarak ikiye ayrılır ve sütunlar, güç akışı analizi için gereken veri türlerini temsil etmektedir. TXT formatındaki dosyada saklanan veriler yazılım çalışmasında kullanılmıştır. Yazılım dosyasının bulunduğu klasörde olan veriler programa aktarılmıştır. Ardından listelere dönüştürülmüştür. Aktarılan veriler, karşılık gelen matematiksel ifadelerle ilişkilendirilerek güç akışı çözümleri elde edilmiştir. Durdurma koşulunu kontrol etmek için tolerans değeri 10^{-5} olarak girilmiştir. Bir sonraki kökten önceki kök çıkarılarak mutlak değeri alınmıştır. Bu değer tolerans değerinden küçük olduğunda işlem durmaktadır. Algoritmanın başlangıcında iterasyon sayısı sıfır olarak tanımlanmış olup sonunda ise iterasyon sayısı bir artmaktadır. Böylece, program sonuca ulaşmak için her sondan başa dönüşte iterasyon sayısını bir arttırmaktadır. IEEE 14 baralı test sistemi 21 iterasyon sonra sonlandırılmıştır. Sonuca ulaşılan bu iterasyon sayısı modelin hızlı ve etkili çalıştığını göstermektedir.



Şekil 2. Güç Akışı Eğitim Platformu Genel Görünümü (Overview of the Power Flow Education Platform)

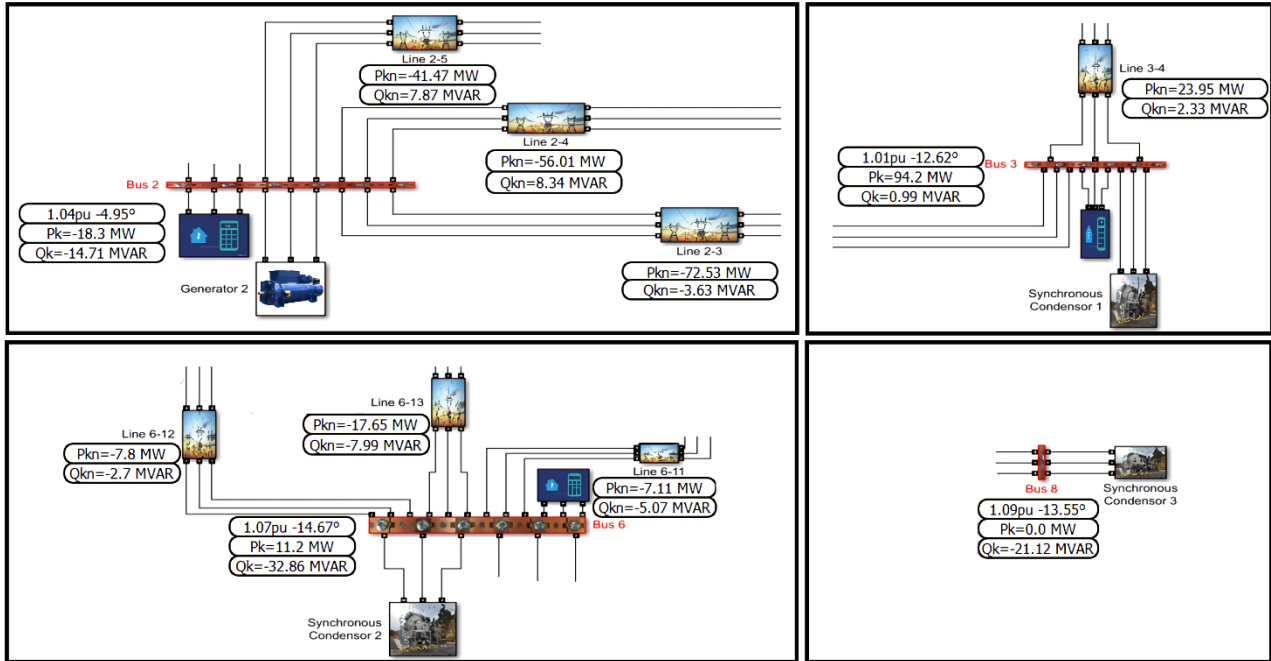
Güç akışı eğitim aracı arayüzü PyQt bileşeni ile oluşturulmuştur. Program, baraların aktif gücünü, reaktif gücünü, açısını, gerilimini ve baralar arasındaki güç akışlarını göstermektedir. Arayüzün arkasında 14 baralı sistemin MATLAB üzerinde çizilmiş halinin bir resmi yer almaktadır. Baraların ve iletim hatlarının yanında veya üzerinde satır düzenlemeler (LineEdits) oluşturulmuştur. Bu şekilde, yazılımdan gelen bilgiler burada kolayca görüntülenebilmektedir. Bu adım kullanılabilirlik açısından önemlidir. Arayüz, yazılım tarafında kolayca değiştirilebilmekte ve bu modele kolayca aktarılabilir. Test sisteminin arka plan görüntüsü, program kodu ve Python üzerindeki arayüz kodu ayrı ayrı şablonlarda ele alınmıştır. Diğer şablonlar, arayüz şablonuna kod ile aktarılarak nihai sonuç alınmıştır. Arkada koşan programın ardından arayüz ekranında güç akışları, aktif ve reaktif güçler, gerilimler ve açılar görülmektedir. Aktif güç ve reaktif güç sırasıyla P_k ve Q_k ile gösterilmiştir. Baralar arası aktif güç akışı ise sırasıyla P_{kn} ve Q_{kn} ile gösterilmiştir. Gerilim ve açı ise baraların yanında en üstte yer almaktadır. Geliştirilen eğitim platformunun genel görünümü Şekil 2’de görülmektedir.

İlk olarak IEEE 14 baralı test sisteminin sonuçları burada yer almaktadır. Salınım barası sistem üzerinde tüketilen (kayıp) aktif ve reaktif gücü bulmak için kullanılmaktadır. Modeldeki salınım barası Şekil 3’te görüntülenmektedir.

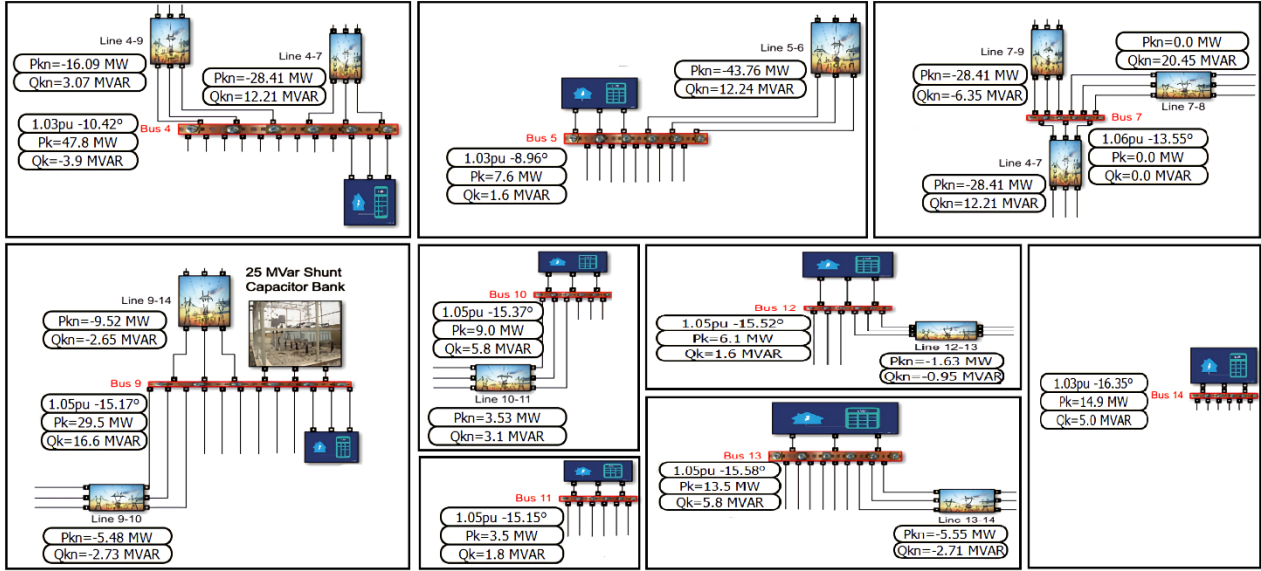


Şekil 3. Salınım Barası (Slack Bus)

Gerilim kontrollü baralar, baranın reaktif gücünü ve açısını bulmak için kullanılmaktadır. Gerilimi ve aktif gücü bilinmektedir. Platformdaki 14 baralı sistemde 4 adet gerilim kontrollü bara bulunmakta olup Şekil 4'te gerilim baraları ve test sisteminde elde edilen sonuçlar görülmektedir. Yük baralarında ise gerilim ve açı değerleri hesaplanmaktadır. Bahsi geçen baralardaki aktif ve reaktif güçler bilinmektedir. Platformdaki 14 baralı sistemde 9 adet yük barası bulunmakta olup ilgili yük baraları ve test sisteminde elde edilen sonuçları Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Gerilim Kontrollü Baralar (Voltage-Controlled Buses)



Şekil 5 Yük Baraları (Load Buses)

3. Simülasyon Sonuçları (Simulation Results)

Geliştirilen güç akışı eğitim aracının test edilmesi için farklı durum çalışmaları analiz edilmiş ve modelin ayrıca arayüzün doğru çalıştığının ispatlanması amaçlanmıştır. Oluşturulan durum çalışmalarının detayları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- **Temel Durum:** IEEE 14 baralı test sisteminin doğrudan güç akışı analizi
- **Durum-1:** IEEE 14 baralı test sisteminin 3 numaralı barasına Rüzgâr türbini ve yeni bir yük bağlanması
- **Durum-2:** IEEE 14 baralı test sisteminin 13 numaralı barasına Mikronize Öğütme tesisi bağlanması

Öncelikle Temel Durum analizi olan IEEE 14 baralı test sisteminde var olan yük, generatör, kompanstatör ve iletim hatları kullanılarak güç akışı gerçekleştirilmiştir. Bunun sonucunda her bir baranın gerilim ve açı değerleri, aktif ve reaktif güçleri elde edilmiştir. Tablo 1'de her bir bara için güç akışı analiz sonuçları görülmektedir. Ayrıca Tablo 1'deki sonuçlardan iletim kaybının 13,38 MW olduğu saptanmıştır. İletim kayıpları, sistemin kalitesine bağlı teknik kayıplardan ve son kullanıcıya bağlı teknik olmayan kayıplardan kaynaklanabilmektedir. Tablo 2'de ise Temel Durum analizinde elde edilen baralar arasındaki iletim hatlarında meydana gelen aktif ve reaktif güç akışları gösterilmektedir. İlgili tabloda güç akışları numarası küçük baradan büyük numaralı baraya doğru gösterilmiştir (tersi yönde akış olması durumunda güç değeri "+" ile ifade edilmektedir).

Tablo 1. IEEE 14 Baralı Test Sistemi Bara Değerleri (IEEE 14-Bus Test System Bus Values)

Bara #	Gerilim [p.u.]	Faz Açısı	Aktif Güç [MW]	Reaktif Güç [MVAR]
1	1,06	0,0	-232,38	23,53
2	1,04	-4,95	-18,3	-14,71
3	1,01	-12,62	94,2	0,99
4	1,03	-10,42	47,8	-3,9
5	1,03	-8,96	7,6	1,6
6	1,07	-14,67	11,2	-32,86
7	1,06	-13,55	0,0	0,0
8	1,09	-13,55	0,0	-21,12
9	1,05	-15,17	29,5	16,6
10	1,05	-15,37	9,0	5,8
11	1,05	-15,15	3,5	1,8
12	1,05	-15,52	6,1	1,6
13	1,05	-15,58	13,5	5,8
14	1,03	-16,35	14,9	5,0

Tablo 2 IEEE 14 Baralı Test Sistemi Hat Akışları (IEEE 14-Bus Test System Line Flows)

Akış Hattı (...baradan ...baraya)		Aktif Güç [MW]	Reaktif Güç [MVar]
1	2	-155,95	20,19
1	5	-76,42	3,34
2	3	-72,53	-3,63
2	4	-56,01	8,34
2	5	-41,47	7,87
3	4	23,95	2,33
4	5	62,31	-7,39
4	7	-28,41	12,21
7	9	-28,41	-6,35
9	10	-5,48	-2,73
9	14	-9,52	-2,65
10	11	3,53	3,1
12	13	-1,63	-0,95
13	14	-5,55	-2,71
4	9	-16,09	3,07
5	6	-43,76	12,24
6	11	-7,11	-5,07
6	12	-7,8	-2,7
6	13	-17,65	-7,99
7	8	0,0	20,45

Geliştirilen modelin ve arayüzün test edilmesi için ele alınan bir diğer durum çalışması Durum-1'dir. Durum-1'de IEEE 14 baralı test sisteminin 3 numaralı gerilim kontrollü barasındaki bileşenler çıkarılarak yerine üretim birimi olarak rüzgâr türbini ve ayrıca bir yük eklenmiştir. Tablo 3'te eklenen yük talebi ve rüzgâr türbinine ait üretim değerleri görülmektedir.

Tablo 3. Rüzgâr Türbini Bara Değerleri (Wind Turbine Bus Values)

Bara#	Gerilim [p.u.]	Yük [MW]	Üretim [MW]
3	1.0	181	-184

Durum-1'in güç akışı analizine ait baralar ve iletim hatlarına dair sonuçlar sırasıyla Tablo 4 ve Tablo 5'te verilmiştir. İlgili tablolar incelendiğinde güç akışı sonucunda rüzgâr türbininin çok fazla reaktif güç tükettiği görülmektedir. Tablo 4'te 3 numaralı barada 44.37 MVar reaktif güç çekildiği görülmektedir. Rüzgâr türbinleri çift beslemeli asenkron generatörlere sahip oldukları için çok fazla reaktif güç talebinde bulunmaktadır. Bunun nedeni, asenkron generatörün devreye girmesi sırasında ihtiyaç duyulan elektromanyetik alanı oluşturmak için reaktif güç talebinin olmasıdır. Ayrıca sonuçlardan da anlaşıldığı gibi rüzgâr türbini tarafından üretilen aktif güç nedeniyle salınım barasından temin edilen aktif gücün de azaldığı gözlemlenmiştir. Yük baralarındaki güç tüketimi yüklerin sabit kalmasından dolayı değişmemektedir.

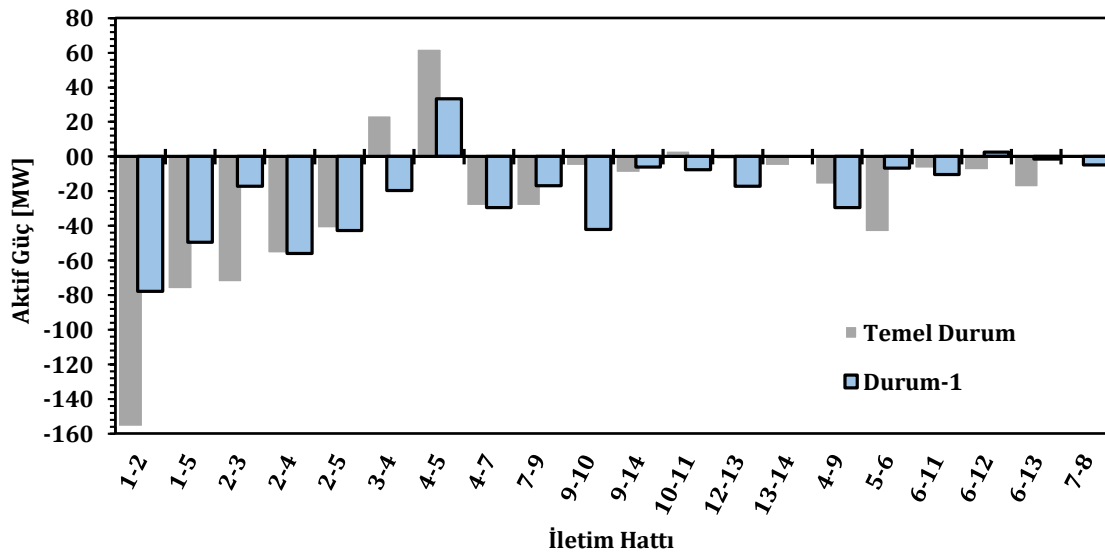
Tablo 4. 14 Baralı Test Sistemine Rüzgâr Türbini Ekledikten Sonra Bara Değerleri (Bus Values after after integrating a Wind Turbine into the IEEE 14-Bus Test System)

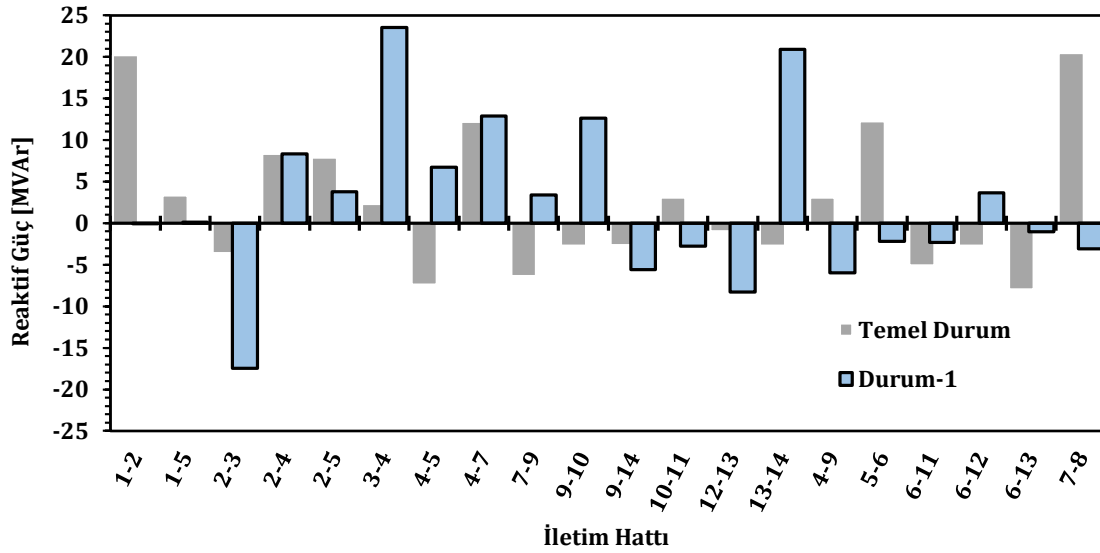
Bara #	Gerilim [p.u.]	Faz Açısı	Aktif Güç [MW]	Reaktif Güç [MVar]
1	1,06	0,0	-127,26	0,09
2	1,04	-2,35	-18,3	-5,02
3	1,0	-3,68	-3,0	44,37
4	1,03	-6,42	47,8	-3,9
5	1,03	-5,72	7,6	1,6
6	1,07	-11,2	11,2	-33,82
7	1,06	-9,69	0,0	0,0
8	1,09	-9,69	0,0	-21,59
9	1,05	-11,37	29,5	16,6
10	1,05	-11,63	9,0	5,8
11	1,05	-11,54	3,5	1,8
12	1,05	-12,03	6,1	1,6
13	1,05	-12,06	13,5	5,8
14	1,03	-12,68	14,9	5,0

Tablo 5. 14 Baralı Test Sistemine Rüzgâr Türbini Eklemeden Sonra Hat Akışları (Line Flows after integrating a Wind Turbine into the IEEE 14-Bus Test System)

Akış Hattı (...baradan ...baraya)		Aktif Güç [MW]	Reaktif Güç [MVar]
1	2	-77,95	-0,04
1	5	-49,61	0,13
2	3	-17,03	-17,46
2	4	-56,01	8,34
2	5	-42,65	3,8
3	4	-19,74	23,56
4	5	33,27	6,74
4	7	-29,54	12,89
4	9	-16,72	3,38
5	6	-41,98	12,63
6	11	-6,01	-5,61
6	12	-7,67	-2,79
6	13	-17,1	-8,26
7	8	0,0	20,9
7	9	-29,54	-5,95
9	10	-6,57	-2,18
9	14	-10,2	-2,29
10	11	2,44	3,66
12	13	-1,5	-1,05
13	14	-4,88	-3,09

Elde edilen sonuçların daha anlamlı olması amacıyla Temel Durum ve Durum-1'e ait güç akışı sonucu iletim hatlarında meydana gelen aktif ve reaktif güç akışları karşılaştırmaları Şekil 6 ve Şekil 7'de sağlanmıştır. Şekil 6'da görüldüğü üzere 3 numaralı barada rüzgâr türbini devreye alınmasından sonra hatlarda akmakta olan aktif güçte özellikle 3 numaralı bara ile ilişkili olan baralarda önemli değişimler görülmektedir. Hatta Temel Durum'da Bara 4'ten Bara 3'e güç akışı gerçekleşirken, Durum-1'de güç akışı Bara 3'ten Bara 4'e doğru daha yüksek miktarda gerçekleştiği görülmektedir. Hatlar üzerinde meydana gelen reaktif güç akışları da Şekil 7'de gösterilmiş olup rüzgâr türbinin reaktif güç etkisi nedeniyle yine iki durum arasında önemli farklar göze çarpmaktadır. Bu analizler sayesinde sistem üzerinde meydana gelen değişimlerde iletim hatlarının kapasitesine göre ne kadarlık gücün devreye alınması gerektiği ya da devreden çıkarılması gerektiği tespit edilebilmekte ya da buna bağlı olarak sistem üzerinde kapasitesinin artırılması gereken bileşenlerin neler olabileceği belirlenebilmektedir.

**Şekil 6.** Temel Durum ve Durum-1 için güç akışı sonucunda iletim hatlarında meydana gelen aktif güç akışlarının karşılaştırılması (Comparison of active power flows in transmission lines as a result of power flow for Base Case and Case-1)



Şekil 7. Temel Durum ve Durum-1 için güç akışı sonucunda iletim hatlarında meydana gelen reaktif güç akışlarının karşılaştırılması (Comparison of reactive power flows in transmission lines as a result of power flow for Base Case and Case-1)

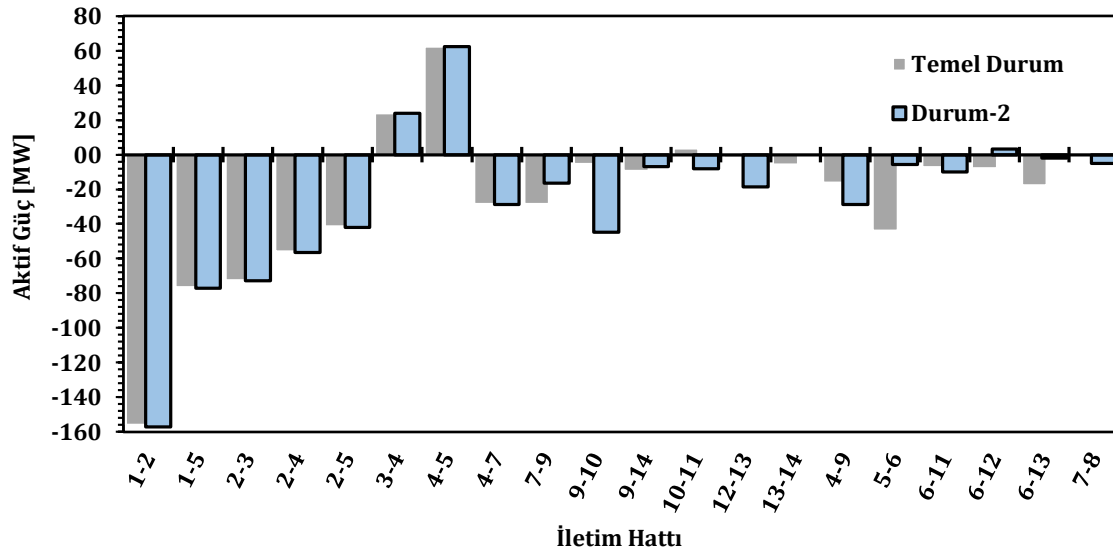
Tablo 6. 14 Baralı Test Sistemine Mikronize Öğütme Tesisi Eklendikten Sonra Bara Değerleri (Bus Values after Adding a Micronised Grinder to the IEEE 14-Bus Test System)

Bara #	Gerilim [p.u.]	Faz Açısı	Aktif Güç [MW]	Reaktif Güç [MVar]
1	1,06	0,0	-234,17	23,72
2	1,04	-4,99	-18,3	-15,26
3	1,01	-12,68	94,2	0,85
4	1,03	-10,5	47,8	-3,9
5	1,03	-9,03	7,6	1,6
6	1,07	-14,89	11,2	-33,76
7	1,06	-13,68	0,0	0,0
8	1,09	-13,68	0,0	-21,19
9	1,05	-15,31	29,5	16,6
10	1,05	-15,52	9,0	5,8
11	1,05	-15,33	3,5	1,8
12	1,05	-15,76	6,1	1,6
13	1,05	-15,84	15,1	6,3
14	1,03	-16,55	14,9	5,0

Gerçekleştirilen bir diğer durum analizi Durum-2'de ise 13 numaralı baradaki yük üzerine mikronize öğütme tesis yükü devreye alınmıştır. Bünyesinde 58 adet elektrikli motor bulunan bu tesis 0.95 güç faktörü ile işletilmekte olup 1.6 MW aktif güç ve 0.52 MVar reaktif güç tüketimi talep etmektedir. Bu veriler ışığında IEEE 14 baralı test sisteme 13 numaralı baraya yük olarak 1.6 MW aktif güç ve 0.52 MVar reaktif güç eklenmiştir. Sistemdeki yük değerinin artmasına bağlı olarak hatlarda meydana gelen kayıplardaki artıştan dolayı salınım barasından çekilen aktif güç de artmıştır. Sonuç olarak küçük ölçüde bir tesis eklendiğinde sistemde kritik değer değişimleri meydana gelmektedir. Bara değerleri ve hatlar üzerinde meydana gelen güç akışları sırasıyla Tablo 6 ve Tablo 7'de görülmektedir. Şekil 8 ve Şekil 9 yardımıyla 13 numaralı barada devreye alınan mikronize öğütme tesisinin hatlardaki aktif ve reaktif güç akışına nasıl etki ettiği yorumlanabilmektedir. Aktif güç akışları Şekil 8'den gözlemlendiğinde 13 numaralı bara ile ilişkili olan baralar ve bu baralar ile komşu baralar arasındaki aktif güç akışı artmıştır. Yine hatlar üzerinde dolaşımda olan reaktif güç değerleri 13 numaralı baraya eklenen yük nedeniyle özellikle ilgili baralar arasında bulunan hatlarda gözle görülür değişimler meydana getirmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak güç sistemi bileşenleri (transformatör, iletim hatları, kesiciler ve diğer koruma ekipmanları) üzerinde meydana gelen stresi azaltma amacıyla uygun bölgelere kompanseörler yerleştirilebilir ve güç kalitesi artırılabilir.

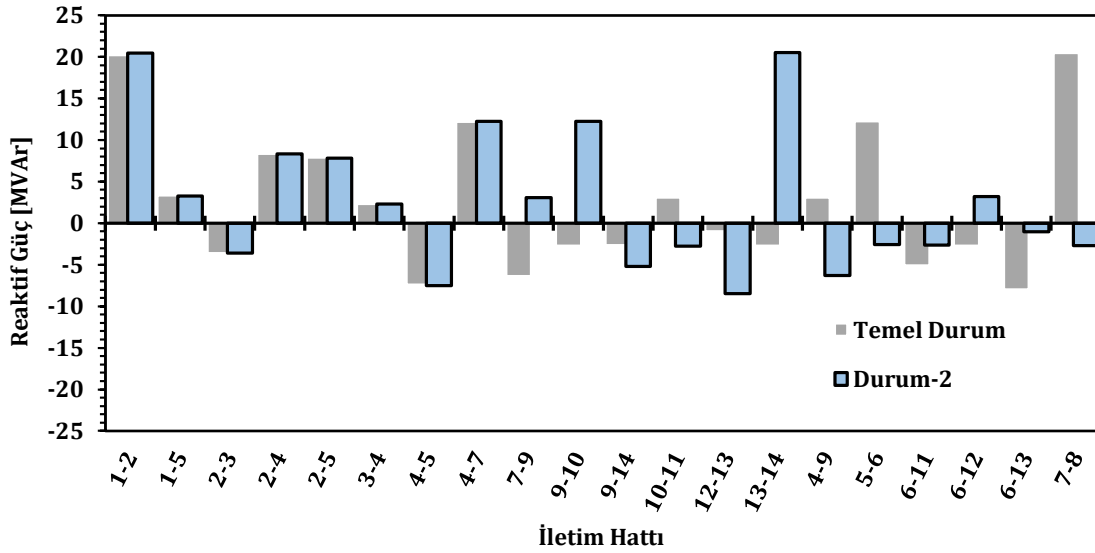
Tablo 7. 14 Baralı Test Sistemine Mikronize Öğütme Tesisi Ekledikten Sonra Hat Akışları (Line Flows after Adding a Micronised Grinder to the IEEE 14-Bus Test System)

Akış Hattı (...baradan ...baraya)		Aktif Güç [MW]	Reaktif Güç [MVar]
1	2	-157,1	20,45
1	5	-77,08	3,26
2	3	-72,75	-3,61
2	4	-56,44	8,3
2	5	-41,9	7,81
3	4	23,75	2,27
4	5	62,3	-7,5
4	7	-28,8	12,26
4	9	-16,3	3,08
5	6	-44,79	12,25
6	11	-6,88	-5,19
6	12	-8,07	-2,78
6	13	-18,64	-8,47
7	8	0,0	20,52
7	9	-28,8	-6,33
9	10	-5,71	-2,61
9	14	-9,89	-2,67
10	11	3,3	3,22
12	13	-1,89	-1,02
13	14	-5,18	-2,7

**Şekil 8.** Temel Durum ve Durum-1 için güç akışı sonucunda iletim hatlarında meydana gelen aktif güç akışlarının karşılaştırılması (Comparison of active power flows in transmission lines as a result of power flow for Base Case and Case-1)

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışma kapsamında elektrik güç sistemlerinde güç akışı analizi incelenmiş ve bu doğrultuda ilgili alandaki mühendislik öğrencileri için bir eğitim aracı sunulmuştur. Önerilen model için ayrıca kullanıcı dostu arayüz tasarlanmıştır. IEEE 14 baralı test sistemi temel alınarak güç akışı analizi gerçekleştirilmiş ve sonuçlar arayüz ekranında ilgili kısımda yer alan kutucuklar üzerinde bara gerilim ve açıları, aktif/reaktif güç değerleri ve iletim hatlarında meydana gelen aktif/reaktif güç akışları gösterilmiştir. İlgili modelin ve arayüzün işlevselliğini test etmek amacıyla IEEE 14 baralı test sistemi üzerinde iki farklı baraya farklı üretim ve tüketim birimleri eklenerek durum analizleri gerçekleştirilmiş ve sonuçlar irdelenmiştir. Bu kapsamda Durum-1'de sisteme 3 numaralı bara üzerinden bir rüzgar türbini ve yeni bir yük dahil edilmiştir. Bu durumda beklenildiği gibi baranın güç değerleri ve ilintili baralar arasındaki hatlar üzerinde akmakta olan güç değerleri ve yönleri değişmiştir. Ayrıca, rüzgar türbini generatörü nedeniyle Bara 3'ün reaktif güç talebi artmıştır. Bir sonraki durum çalışmasında ise 13 numaralı baraya bir mikronize öğütme tesisi yük olarak dahil edilmiş ve güç akışı tekrarlanmıştır. Beklendiği gibi ilgili baranın yük talebinin artmasıyla birlikte ilintili baralardan ilgili baraya aktif güç akışı gerçekleşmiştir. Sonuçlar bu model ve arayüzün doğru bir şekilde çalıştığını ispatlamaktadır.



Şekil 9. Temel Durum ve Durum-2 için güç akışı sonucunda iletim hatlarında meydana gelen reaktif güç akışlarının karşılaştırılması (Comparison of reactive power flows in transmission lines as a result of power flow for Base Case and Case-2)

Geliştirilen bu arayüz sayesinde farklı baralar üzerinden sisteme dahil edilebilecek yükler ve üretim birimlerinin sistem üzerinde nasıl bir etkisi olacağı gözlemlenebilecektir. Bu nedenle geliştirilen bu eğitim aracının teknoloji odaklı yetişen günümüz mühendislik öğrencilerinin güç akışı gibi önemli bir konuyu kavrama ve ilgi duyma noktasında önemli katkısı olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmanın devamı niteliğindeki çalışmada, hatlar üzerindeki güç akışlarının hareketli görsel ile akış yönleri gösterilmesi hedeflenmekte ayrıca iletim hat kapasiteleri, bara gelirim limitleri, sistem kayıp limitleri gibi güç sistemine ait kısıtlar tanımlanarak ve güç akışı gerçekleştirildikten sonra limit aşımalarında arayüzün ilgili bölgede uyarı vermesi sağlanacaktır.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Chow, J. H., & Cheung, K. W., 1992, A toolbox for power system dynamics and control engineering education and research. IEEE transactions on Power Systems, 7(4), 1559-1564.
- Dzafic, I., Glavic, M., & Tesnjak, S., 2004, An object-oriented graphical package for power system simulation and analysis. In Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (IEEE Cat. No. 04CH37521) (Vol. 3, pp. 835-839). IEEE.
- Ekinci, S., Demiroren, A., & Zeynelgil, H. L., 2017, PowSysGUI: A new educational software package for power system stability studies using MATLAB/Simulink. International Journal of Electrical Engineering Education, 54(4), 283-298.
- Fernandes, T. R., Fernandes, L. R., Ricciardi, T. R., Ugarte, L. F., & de Almeida, M. C. (2018, September). Python Programming Language for Power System Analysis Education and Research. In 2018 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition-Latin America (T&D-LA) (pp. 1-5). IEEE.
- Glover, J. D., Sarma, M. S., & Overbye, T., 2012, Power system analysis & design, Fifth Edition, Stamford.
- Group, W., 1973, "Common Format for Exchange of Solved Load Flow Data" IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems (Volume: PAS-92, Issue: 6, Nov. 1973)
- Hakim, L., Wahidi, M., Handoko, T., Gusmedi, H., Soedjarwanto, N., & Milano, F., 2014, Development of a power flow software for distribution system analysis based on rectangular voltage using python software package. In 2014 6th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE) (pp. 1-5). IEEE.
- Harris, C.R., Millman, K.J., van der Walt, S.J. et al. Array programming with NumPy. Nature 585, 357-362 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
- IRENA, 2020, Renewable Energy Statistics 2020 The International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Islam, S., & Chowdhury, N., 2001, A case-based windows graphic package for the education and training of power system restoration. IEEE Transactions on Power Systems, 16(2), 181-187.
- Lai, H. Y., Mai, W., & Chung, C. Y. (2014, December). Educational simulation platform for micro-grid. In 2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC) (pp. 1-7). IEEE.
- Levi, V. A., & Nedic, D. P., 2001, Application of the optimal power flow model in power system education. IEEE Transactions on power systems, 16(4), 572-580.

- Liu, J., Salama, M. M. A., & Mansour, R. R., 2002, An efficient power flow algorithm for distribution systems with polynomial load. *International Journal of Electrical Engineering Education*, 39(4), 371-386.
- Milano, F., 2013, A Python-based software tool for power system analysis. In 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting (pp. 1-5). IEEE.
- Overbye, T. J., Sauer, P. W., Marzinzik, C. M., & Gross, G., 1995, A user-friendly simulation program for teaching power system operations. *IEEE Transactions on Power Systems*, 10(4), 1725-1733.
- Saadat, H., 2002, *Power System Analysis*. Tata McGraw-Hill, New Delhi.
- Saygın, D., Bülent Tör, O., Teimourzadeh, S., Koç, M., Hildermeier, J., & Kolokathis, C., 2019, Transport sector transformation : Integrating electric vehicles into Turkey's distribution grids, [Online]. Available: <https://www.shura.org.tr/wp-content/uploads/2019/12/Transport-sector-transformation.Integrating-electric-vehicles-into-Turkey's-distribution-grids.pdf>.
- Shin, J. R., Lee, W. H., & Im, D. H., 1999, A windows-based interactive and graphic package for the education and training of power system analysis and operation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(4), 1193-1199.
- Sidea, D. O., Bulac, C., & Boicea, V. A. (2017, May). Power engineering education toolbox for active power flow control using the phase-shifting transformer. In 2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) (pp. 177-183). IEEE.
- Srikanth, P., Rajendra, O., Yesuraj, A., Tilak, M., & Raja, K. (2013). Load flow analysis of IEEE 14 bus system using matlab. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2(5), 149-155.
- T.E. Oliphant, "Python for Scientific Computing," *IEEE Computing in Science and Engineering*, Vol. 9, No. 3, May 2007, pp. 10-20
- Thurner, L., Scheidler, A., Schäfer, F., Menke, J. H., Dollichon, J., Meier, F., ... & Braun, M., 2018, pandapower—an open-source python tool for convenient modeling, analysis, and optimization of electric power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(6), 6510-6521.
- Till Bunsen et al., 2019, Global EV Outlook 2019 to electric mobility, OECD iea.org, p. 232, 2019, [Online]. Available: www.iea.org/publications/reports/globalevoutlook2019.
- Turner, M., Foreman, C., & Sundararajan, R., 2014, Computer Simulation Tools to Enhance Undergraduate Power Systems Education. In 2014 ASEE Annual Conference & Exposition (pp. 24-307).
- Vournas, C. D., Potamianakis, E. G., Moors, C., & Van Cutsem, T., 2004, An educational simulation tool for power system control and stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(1), 48-55.
- Yu, D. C., Jarnal, N., Wang, W., Zang, X. G., & Brandt, J. R., 1994, A graphical user interface for design, simulation and analysis of power plant electrical auxiliary systems. *IEEE transactions on energy conversion*, 9(2), 263-269.