

Determination of Maximum Load Levels That Can Be Connected to IEEE 14 Bus System

Uğur FESLİ^{1*}  M.Bahadır ÖZDEMİR²  Şaban ÖZDEMİR³ 

¹Gazi University, Technical Sciences Vocational School, Department of Electronics and Automation, 06374, Yenimahalle/ANKARA

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Energy Systems Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

³Gazi University, Faculty of Technology, Department of Electrical-Electronics Engineering, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Research article

Received: 12.12.2022

Revision: 29.12.2022

Accepted: 03.01.2023

Highlights

- Digsilent
- PowerFactory
- Loadability
- Newton Raphson
- Python

Keywords

Power Systems,
Voltage Stability,
Load Flow Analysis

In this study, the maximum loading levels of each bus in IEEE 14 bus system are determined by changing the load values in the system. Line loading levels, bus voltages and generator loading parameters were used to determine the maximum loading level.

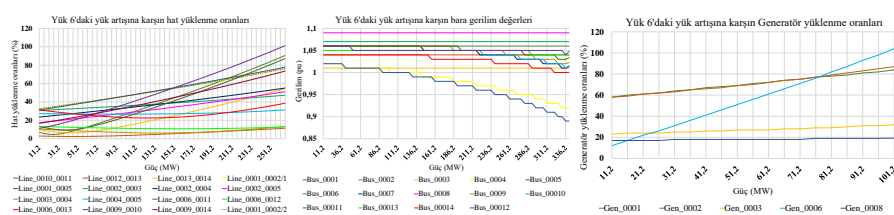


Figure A. The effect of the increase in the loading values (Load_0006) connected to Bus 6 (Bus_0006) on system parameters, a: Line loading rates, b: Bus voltage values, c: Generator loading rates

Purpose: In this study, the effects of newly connected loads to the power systems were investigated by considering the line loading levels, bus voltages and generator loading parameters. The main aim is to determine the maximum loading values of each bus.

Theory and Methods: A Python code sequence is used to change the value of the loads. In this concept, the standard values of the loads defined in the IEEE 14 bus system are taken from the model in the Digsilent PowerFactory program. Thereafter, the code sequence increases the values of all loads step by step. The value of the load is increased by 5 MW in each step. Also, it is tested whether the bus voltage value, line loading ratio and generator loading ratio are within the limits. When one of the considered parameters is out of the desired limits, the simulation is stopped and the data are recorded.

Results: As a result of the simulation studies the maximum loading value for each bus has been determined. Each newly added load affects the three considered parameters. The results show that adding new loads more affects the voltage drop in some buses, while it affects generator and line loading in some buses.

Conclusion: This paper presents the determination of the maximum loading levels of each bus in IEEE 14 bus system to use in the planning process of power systems. Since the load values affect the bus voltages, line loading ratio and generator loading ratio, these three parameters are considered as the limitations in simulation studies. The maximum loading value of each bus is determined by simulation studies.



Determination of Maximum Load Levels That Can Be Connected to IEEE 14 Bus System

Uğur FESLİ^{1,*} M.Bahadır ÖZDEMİR² Şaban ÖZDEMİR³

¹Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 06374, Yenimahalle/ANKARA

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, 06500, Yenimahalle/ANKARA

³Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, 06500, Yenimahalle/ANKARA

Abstract

The generators in power systems are operated at maximum capacity to use energy sources efficiently. Therefore, the fluctuations in power systems may cause stability problems in terms of rotor angle, voltage and frequency. Especially, new loads are added to power systems when planning to install new industrial or residential areas. In this study, the maximum loading level of IEEE 14 bus system is determined by changing the load values in the system. Line loading levels, bus voltages and generator loading parameters are used in determining the maximum loading level. The system is simulated in DIGSILENT PowerFactory software. The value of a load is increased step by step until exceeds the limits of line loading. The load value is increased by using Python script which works interactively with the DIGSILENT PowerFactory. Similarly, the same analyzes are repeated for bus voltages and generator loading. The maximum loading level is determined depending on the load value which causes exceeds the line loading level, bus voltage limit, or loading limit of generators. Thus, the attainable maximum loading level of the IEEE 14 bus system is achieved by considering three parameters that affect the voltage stability. Simulation results show that the restrictive parameter for loading is dependent on the place of new loads in the power system.

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 12.12.2022
Düzeltilme: 29.12.2022
Kabul: 03.01.2023

Keywords

Power Systems,
Voltage Stability,
Load Flow Analysis

Anahtar Kelimeler

Güç Sistemleri,
Gerilim Kararlılığı,
Yük Akış Analizi

IEEE 14 Bara Sistemine Bağlanabilecek Maksimum Yük Seviyelerinin Belirlenmesi

Öz

Güç sistemlerindeki generatörler, enerji kaynaklarını verimli kullanmak için maksimum kapasitede çalıştırılır. Bu nedenle, güç sistemlerindeki dalgalanmalar rotor açısı, gerilim ve frekans açısından kararlılık sorunlarına neden olmaktadır. Özellikle yeni endüstriyel veya yerleşim alanlarının kurulması planlanırken güç sistemlerine yeni yükler eklenir. Bu çalışmada, sistemdeki yük değerleri değiştirilerek IEEE 14 bara sisteminin maksimum yük seviyesi belirlenmiştir. Maksimum yüklenme seviyesinin belirlenmesinde hat yüklenme seviyeleri, bara gerilimleri ve generatör yüklenme parametreleri kullanılmıştır. Sistem benzetimi DIGSILENT PowerFactory yazılımında yapılmıştır. Bir yükün değeri, hat yüklenme limitlerini aşınca kadar adım adım artırılmıştır. Yük değeri, DIGSILENT PowerFactory ile etkileşimli çalışan Python kod dizimi kullanılarak artırılmıştır. Benzer şekilde bara gerilimleri ve generatör yüklenmeleri için de aynı analizler tekrarlanmıştır. Maksimum yüklenme seviyesi, hat yüklenme seviyeleri, bara gerilimleri veya generatör yüklenmesinin maksimum sınırını aşan yük değerine bağlı olarak belirlenmiştir. Böylece, IEEE 14 bara sisteminin ulaşılabilecek maksimum yüklenme seviyeleri, gerilim kararlılığını etkileyen üç parametre dikkate alınarak elde edilmiştir. Simülasyon sonuçları, yüklenme için kısıtlayıcı parametrenin, güç sistemindeki yeni yüklerin yerine bağlı olduğunu göstermektedir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüz güç sistemleri, yük artışı ve iletim hattı kapasitesinin maksimum verimde kullanılması nedeniyle mevcut sınırlara daha yakın çalışmaktadır. Güç sisteminin bu koşullarda çalıştırılması, şebekenin gerilim kararlılığını tehlikeye atabilir ve gerilim düşmelerine neden olabilir [1]. Gerilim kararlılığı, normal

koşullarda çalışan bir güç sisteminin bir bozulma meydana geldikten sonra tüm baralarda kabul edilebilir seviyelerde gerilimleri sürdürme yeteneğidir [2]. Dünya genelinde elektrik güç sistemlerindeki yük ile birlikte üretim ihtiyacın artması; mevcut sistemlerin işletmesi ve yeni sistemlerin planlanmasında çok yönlü analizlerin yapılmasını zorunlu kılmaktadır. Güç sistemleri, değişken parametrelerde çalışan doğrusal olmayan sistemlerdir. Sistemde bulunan üretim birimleri ve yüklerin devreye alınıp çıkarılmasına bağlı olarak sistem parametreleri değişkenlik gösterir. Bu nedenle, lineer olmayan, zamana bağlı olarak değişen yük miktarı güç sistemlerinin işletilmesinde ve gerilim kararlılığını analiz etmede önemli bir ölçüt olmaktadır. Bu sebeple bir sisteminin yanlış planlanması ve analizi sistemde kararsızlıklara yol açabilmektedir. Meydana gelen gerilim kararsızlığı ile güç sistemlerinde kesintiler ve bu kesintilerden meydana gelen ekonomik kayıplar olmaktadır [3]. Güç sistemlerinin analizi için kullanılan klasik hesaplamalar yerini günümüzde teknolojik gelişmelerde bağlı olarak yazılımlar ve benzetim programları kullanımı almıştır. Özellikle, güç sistemleri üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde yük akışı analizlerinde nümerik yöntemlerin kullanılması dikkat çekmektedir [4].

Bir güç sisteminin kararlılığının incelenmesinde sistemin kabul edilebilir çalışma şartları altında bulunması, en yüksek verimlilikte çalışması ve herhangi bir bozucu etki olması durumunda yeniden dengeli, kararlı duruma gelebilmesi değerlendirilir. Bu inceleme ve değerlendirmelerin gerçekleştirilmesi için IEEE tarafından belirlenen standartlara uygun olarak yapılması gerekmektedir. Bu standartlar, elektrik şebekesinin yük dengesizliği, yük akışı, enerji akışı, güç kalitesi, hat yüklenme oranı, gerilim dalgalanması vb. parametrelerinin teorik olarak olması gereken alt ve üst limitlerini tayin etmektedir. Güç sistemlerinde referans olarak alınan IEEE bara sistemleri, küresel teknolojilerin ihtiyaçlarını karşılar, geliştirir ve iletir. Böylece, geniş bir teknoloji yelpazesinde endüstri standartlarının işlevselliğini, yeteneklerini, güvenliğini ve birlikte çalışabilirliğini yönlendirerek sistemlerin kararlı ve uyum içinde çalışmasını sağlar. Minimum güvenlik marjının değerlendirilmesi için güç sistemi maksimum yükleme koşulunun hesaplanması gereklidir. Minimum güvenlik marjı, sistem operatörleri tarafından güç sistemi güvenliğini sürdürmek için düzeltici eylemler sağlamak üzere uygulanan temel bir kriterdir [5].

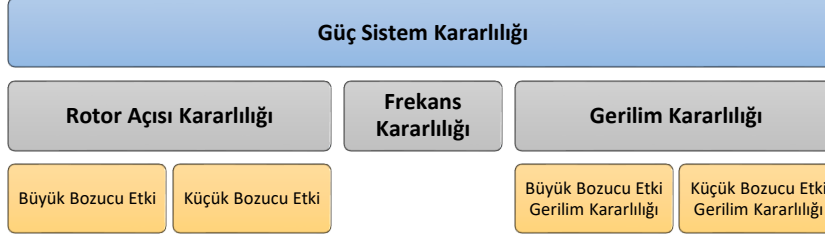
Güç sistemlerine entegre edilen yenilenebilir enerji ve diğer üretim kaynaklarından dolayı güç akışı ve gerilim profilleri önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. Bu durum gerilim kararlılığı problemlerine yol açmaktadır [6]–[8]. Güç sistemlerinde maksimum yükleme durumunun değerlendirilmesi için iki temel yaklaşım vardır. Bunlar doğrudan yöntemler ve dolaylı yöntemleridir [9]. Güç sisteminin lineer dinamik model analizi ile birlikte güç akış hesaplamaları da yaygın olarak uygulanmaktadır [9], [10]. Dolaylı yöntemlerde güç akış hesaplamaları gerilim kararlılığı için yaygın kullanılmakla birlikte dinamik sistemlerde hesaplamalar oldukça fazladır [11]. IEEE'nin farklı sayılarda bara test sistemleri için Gauss-Seidel ve Newton-Raphson metotlarını gerilim genlikleri ve açı değerleri göz önünde bulundurularak yapılmıştır [12]. Buna benzer diğer çalışmalarda genel olarak farklı metotlar, bu metotların iterasyon süreleri ve sayıları karşılaştırılmıştır [13]. Gerilim kararlılığını değerlendirmek için başka bir yaklaşım, bir bara veya hatta bağlı bulunan donanımlarla gerilim kararlılık indeksini belirlemektir. Gerilim kararlılık indeksleri, sistem baralarının çalışma esnasında davranışı hakkında bilgi sağlar [14].

Yapılan literatür araştırmaları sonucunda, güç sistemlerinde herhangi bir bozucu etki veya değişiklik meydana geldiğinde sistem kararlılığının etkilendiği tespit edilmiştir. Literatürde mevcut çalışmalarda özel senaryolar kullanılarak tek yüklenme durumu için sonuçlar elde edilmiştir. Bu makalede, IEEE 14 bara sisteminin gerilim kararlılığı, üretim kapasitesi ve hat yüklenme kapasiteleri göz önünde bulundurularak maksimum yükleme değerleri belirlenmiştir. Benzetim ortamında oluşturulan model ile mevcut yüklerin değeri adım adım artırılarak etkileri gözlemlenmiştir. Benzetim çalışmaları sonucunda elde edilen sonuçlar üzerinden hangi bara veya hattın yüklenmelerden olumsuz etkilendiği veya sınırların dışına çıktığı bulunmuştur. Literatürde mevcut çalışmalardan farklı olarak, IEEE 14 bara sisteminde yer alan tüm yükler için aynı testler yapılmış ve olabilecek maksimum seviyeleri tespit edilmiştir. Böylece, bölgesel olarak eklenecek yüklerin sistem kararlılığını nasıl etkileyeceği üzerine bir ön çalışma yapılmıştır.

Makalenin ikinci bölümünde güç sistemlerinin kararlılık unsurları ve bunların tespitinde kullanılan analiz yöntemleri açıklanmıştır. Üçüncü bölümde ise yük akışının analizi yük akış analizi yöntemleri, bara türleri ve IEEE 14 bara sistemi hakkında bilgiler verilmiştir. Benzetim çalışmalarından elde edilen sonuçların verildiği dördüncü bölümde, sistem kararlılığının yük değişimlerinden nasıl etkilendiği elde edilen veriler kullanılarak açıklanmıştır.

2. SİSTEM KARARLILIĞI UNSURLARI VE ANALİZ YÖNTEMLERİ(SYSTEM STABILITY ELEMENTS AND ANALYSIS METHODS)

Güç sistemlerinin sürekliliği ve değişen çalışma koşulları altında güç akışını düzenli bir şekilde sürdürmesi genel bir kararlılık ifadesi olarak belirtilebilir. Bu sistemlerde gerilim kararlılığı esas problem olsa da gerçek sistemlerde farklı birçok problem meydana gelmektedir. Geniş bir alanda düşünülecek olursa güç sistemlerinin kararsızlığı farklı sebeplerden ve bunların etkisiyle geniş alanlarda daha farklı bozucu etkiler ortaya çıkmaktadır. Güç sistemlerinde kararlılık sınıflandırılıp alt başlıklara Şekil 2.1'deki gibi ayrılabilir [1], [2].



Şekil 1. Güç sistem kararlılığı sınıflandırması

Rotor Açısı Kararlılığı: Birbirine bağlı sistemlerde (enterkonnekte) generatörlerin, herhangi bir bozucu etki sonrasında senkronizasyonda kalabilme becerileridir [1].

Frekans Kararlılığı: Üretilen güç ve sistemdeki yüklerin gücü arasında dengesizlik meydana gelmesi durumunda, güç sisteminin mevcut frekansı sabit tutabilmesidir. Çoğu zaman frekans kararlılığı sorunları, koruma ve kontrol donanımlarının zamanında tepki verememesi veya yeteri kadar üretim yapılamamasından oluşmaktadır.

Gerilim Kararlılığı: Bu kararlılık güç sistemlerde planlanma yapılırken ve sonrasında işletilmesi esnasında dikkat edilmesi gereken en önemli unsurlardan biridir. Bu kararlılık bir sisteminin yük talebi ile orantılı olarak güç sisteminde üretilen güç ve yük merkezlerine ulaştırılan güç dengelerinin sağlanması durumudur. Mevcut güç sistemlerine sürekli olarak yeni ve farklı değerlerdeki yükler ve bu yükleri karşılayabilecek üreteçler ilave edilmektedir. Buna bağlı olarak güç sistemlerinin çalışma şartları sürekli değişmektedir. Sisteme dâhil olan yeni üretim birimleri ve yüklerle rağmen güç sistemindeki gerilim düşümü veya yükselmesi referans alınan sınır değerleri arasında kalıyorsa gerilim kararlılığı sağlanmaktadır. Sistemde bulunan bileşenlerin (bara, generatörler, iletim hatları, trafolar, yükler vb.) bazı durumlarda devre dışı olması, yüklenmedeki artma ile ya da bunlardan farklı olarak gerilim kontrolünün yeterli olmayışıyla gerilim düşümü meydana gelirse sistem kararsız duruma geçecektir. Baralarda ihtiyaç duyulan yük değerindeki artış zamanla değişmektedir. Bu değişkenlikte yük artışına bağlı olarak da bara gerilimi düşme eğilimi gösterir. Baralardaki gerilim değerinin yük artışına bağlı olarak belli bir değerin altına düşmesi sistemin kararlı çalışması açısından büyük önem arz etmektedir. Bu değer bara geriliminin alt sınırıdır. Bu kritik değerin aşılması durumunda sistemde bazı bölgelerin, iletim hatlarının aşırı yüklenmesi, üretimin yetersiz kalması, sistemde bazı elemanların devre dışı kalması gibi durumlar yaşanır. Bu kararsızlık çoğu zaman aşırı yüklenen, yeterli reaktif güce sahip olmayan sistemlerde meydana gelmektedir.

Güç sistemlerinde gerilim kararlılığına etki eden faktörler, yük talebinin artması, iletim hatlarının kapasitesi ve üretilen güç değerleri olarak sıralanabilir. Güç sisteminde kararlılık analizlerinin yapılabilmesi için kararlılığa etki edebilecek değişkenlerin her birinin dikkate alınması gerekmektedir. Gerilim kararsızlığının olduğu sistemlerde sorunun kaynağı genel olarak baralara aşırı yüklerin bağlanması, sistemde üretim yapan generatörlerin yetersiz kalması ve taşıma hatlarının kapasitesinden fazla yüklenmesidir. Gerilim kararlılığını etkileyen ve sistemin kararsızlığa düşmesine sebep olan diğer faktörler:

1. Sistemde üretilen gücün, yük talebine karşılık verememesi,
2. Üretim merkezleri ile yük birimleri arasındaki mesafelerin fazla olması,
3. Gerilimin düşmesi durumunda trafolarla kademelerin değişmesi,
4. Kontrol mekanizmalarının düzgün çalışmaması,
5. Yetersiz reaktif yük dengelemesi

olarak sıralanabilir. Birinci, maddede belirtilen sebeplerden dolayı güç talebi karşılanmadığında aşırı yüklenmeden kaynaklı enerji kaynaklarında gerilim azalmaları meydana gelmektedir. Dolayısıyla güç sisteminin gerilimi de azalmaktadır. Ayrıca ekonomik sebeplerden dolayı, enerji sistemleri maksimum yüklenebilirlik sınırlarında veya yakın değerlerde işletilmektedirler ve her zaman yeni kaynak eklemek mümkün olmamaktadır. Bunun bir sonucu olarak, sistemde kararsızlık meydana gelmektedir. Bu makalede yapılan analizler 14 Baralı bir güç sisteminin gerilim kararlılığı açısından yapılmıştır. Böylelikle sistemde üretilen güç ve yük talebi dengesi incelenmiştir.

2.1. Gerilim Kararlılığı Analizlerinde Kullanılan Metotlar (Methods Used in Stress Stability Analysis)

Gerilim kararlılığı dinamik bir olaydır. Bunun yanında birçok uygulamada sürekli hal çalışma analizleri kullanılmaktadır. Sürekli hal gerilim kararlılığı incelemelerinde, yük akışı denklemleri güç sistemlerini açıklamak amacı ile kullanılır. Literatürde farklı gerilim kararlılığı analiz yöntemleri bulunmakla beraber, bu çalışmalarda bazı yöntemler kullanılarak gerilim kararlılığı için kritik değerlere doğrudan ulaşılmış, bazıları ise değer olarak değil yaklaşımsal olarak referans noktalarına ulaşmıştır. Tablo 1'de gerilim kararlılık analizlerinde kullanılan statik yöntemler gösterilmiştir [15].

Tablo 1. Gerilim kararlılık analizi uygulamalarında statik yöntem çeşitleri ve kullanım amaçları [15]

Metot/Yöntem	Kullanım amacı
Yük akışı analizi	Yük akış analizi ile güç sistemlerinde bulunan bütün baraların gerilim açısı değerleri, gerilim genlik değerleri, iletim hatlarında akan aktif güçleri ve reaktif güçleri, ayrıca hatlar üzerindeki meydana gelen kayıplar bulunabilir.
P-V Eğrileri Q-V Eğrileri	Güç sistemlerinde meydana gelen/gelebilecek gerilim çökmesi olaylarının tespit edilmesinde ve bu gerilim çökme noktasından önce baralar arasında iletilen maksimum gücün hesaplanması için kullanılmaktadır. İhtiyaç duyulan kompanzasyon sistemlerinin hesaplanmasında ve sistem üzerine etkilerinin incelenmesinde kullanılır.
Sürekli yük akışı analizi	Sürekli yük akışı analizi güç sistemlerinde işletme noktalarının belirlenmesidir. Sürekli yük akışında çözüm bu işletme noktalarının oluşturduğu dizidir. Yük akışı tekniğinde tahmin düzeltme basamağı esas alınmıştır.
L İndisi	Güç sisteminin gerilim kararlılığı ve kararsızlık kritik değerine olan yakınlığı incelenmektedir.
Çatallaşma analizi	Yük artışıyla sistemin denge noktalarının çatallaşması ile güç sisteminde kararlılığın kaybolması durumlarını inceler.
Bara indirgeme analizi	Bara indirgeme analizi ile ayırık yük akışı yapılır ve tüm baralar için gerilim ve güç değerleri tanımlanır. Bunun için generatörlerin reaktif güç sınırları göz önünde bulundurulur.

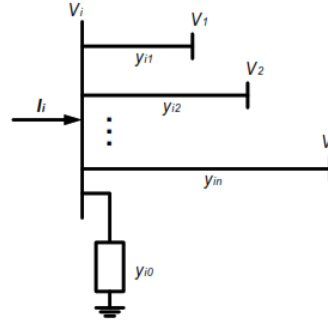
2.1.1. Yük Akış Analizi (Load Flow Analysis)

Bir güç sisteminde yapılan yük akış analizi ile sistemin o andaki genel durumu incelenir. Yük akışı analizi sonucunda sistemde bulunan tüm baraların gerilim genlik değerleri ve gerilim açısı değerleri, baralar arasındaki iletim hatları üzerinden akan aktif ve reaktif güçler ile birlikte hatlar üzerindeki kayıpları belirlenebilmektedir. Bu analize bazı kabuller yapılarak başlanır. Buna kabuller;

1. Güç sistemindeki generatörler ihtiyaç tüm yükleri ve hatlarda meydana gelen kayıpları karşılar.
2. Sürekli hal koşulları altında çalışan güç sistemi üç fazlı ve dengeli yüklenmiştir.

Burada kullanılan güç ifadeleri doğrusal olmayan eşitliklerdir ve bu yüzden eşitliklerin çözümünde en fazla iki yaklaşım kullanılmaktadır. Bu yaklaşımdan ilki Gauss-Seidel, ikincis ise Newton Raphson

algoritmalarıdır. Newton Raphson algoritmasına göre akış denklemlerini çıkartabilmek için bara sayısı i olan örnek bir güç sistemi Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. i adet baraya sahip örnek bir güç sistemi

Kirshoff akımlar kanununa göre baraya giren akımlar yazılırsa;

$$I_i = y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \quad (1)$$

şeklinde olur. Burada admitans değerleri,

$$Y_{ii} = y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in} \quad (2)$$

$$Y_{i1} = -y_{i1} \quad (3)$$

$$Y_{i2} = -y_{i2} \quad (4)$$

$$Y_{in} = -y_{in} \quad (5)$$

olarak elde edilir. Akım değerini aşağıdaki denklemlerle buluruz.

$$I_i = Y_{ii}V_i + Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{in}V_n \quad (6)$$

veya

$$I_i = Y_{ii}V_i + \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq 1}}^n Y_{ik}V_k \quad (7)$$

i . baradan hatta verilen aktif ve reaktif güçler yazılırsa

$$P_i - Q_i = V_i I_i$$

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (8)$$

Denklem 7 ve denklem 8 birleştirildiğinde

$$I_i = Y_{ii}V_i + \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq 1}}^n Y_{ik}V_k = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (9)$$

Bu eşitlikten de baraya ait gerilim değeri bulunmaktadır.

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq 1}}^n Y_{ik}V_k \right] \quad (10)$$

Denklem 8’den verilen güçler bulunursa aşağıdaki eşitlik elde edilecektir.

$$P_i - jQ_i = |V_i|^2 |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + j |V_i|^2 |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} + \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq 1}}^n |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) + j \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq 1}}^n |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (11)$$

Bu denklemlerde

$$Y_{ii} = |Y_{ii}| \angle \theta_{ii}, \quad Y_{ik} = |Y_{ik}| \angle \theta_{ik}, \quad V_i = |V_i| \angle \delta_i, \quad V_i^* = |V_i| \angle -\delta_i, \quad V_k = |V_k| \angle \delta_k$$

Reel ve sanal kısımlar ayrıldığında güç sisteminde baraya giren veya çıkan aktif güçler ve reaktif güçler elde edilmiş olur [16].

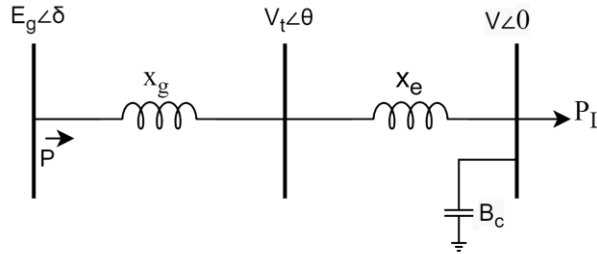
$$P_i = \sum_{k=1}^n |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (12)$$

$$Q_i = - \sum_{k=1}^n |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (13)$$

Bu denklemler kullanılarak tüm güçler bulunup, aynı zamanda sistemdeki kayıplarda hesaplanabilir.

2.1.2. P-V Eğrileri (P-V Curves)

Güç sistemlerinde fazla yüklenme durumuna geçildiğinde veya generatör üretim kapasitesi azaldığında bu bir kararlılık sorununu birlikte getirecektir. Sabit bir güç katsayısı altında hat başı gerilimi belirli bir değerde sabit tutulmak şartıyla, hat sonunda yük barasına bağlı yük ile baradan çekilen aktif güç değeri kademeli olarak artırılır. Bu şekilde hat sonundaki yük barasının gerilim genlik değerinin değişimi gözlemlenir. Bu yöntemle güç sisteminde P-V eğrilerini elde edilmektedir. Sistemin kritik değerlerinden olan yük barasının aktif gücü ve gerilim genlik değeri bulunur. Şekil 3’de tek generatörlü bir yük barası modeli görülmektedir.



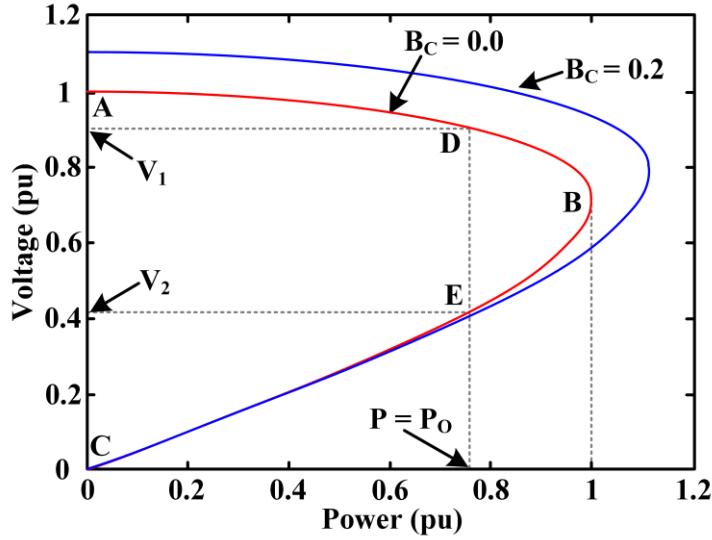
Şekil 3. Tek generatörlü yük barası eşdeğer devresi

Şekil 3’te yer alan eşdeğer devrede, giriş barasının gerilim değeri (E_g), çıkış barasında P_L aktif güç değerine sahip bir yük ve hattın toplam seri reaktansı ($X = X_e + X_g$) görülmektedir. Ayrıca şönt kapasitörü B_c ile ifade edilmiştir. Bu eşdeğer devreden giriş gücü ve yük gerilimi sırasıyla,

$$P = \frac{E_g^2 \sin 2\delta}{2x(1-B_c X)} = P_L \quad (14)$$

$$V = \frac{E_g \cos \delta}{(1-B_c X)} \quad (15)$$

ile hesaplanabilir. B_c nin olmadığı ve 0.2 olduğu durumlar için bir P-V grafiği Şekil 4’te görülmektedir. Burada $E_g=1.0$ pu ve $X=0.5$ pu kabul edilmektedir. $P=P_0$ sabit bir yük gücü için V_1 ve V_2 gerilimleri uygulanmıştır. Literatürde, genellikle yüksek voltajlı çözüm V_1 ’in kararlı olduğu, düşük voltajlı çözüm ise V_2 ’nin kararsız olduğunu belirtilir. Bu ifade, sistem dinamiklerine dayalı bir açıklama gerektirir. P-V eğrisinin (B-C) alt kısmının kararsız olduğunu söylemek yanlış olur. Gerçekte, B-C bölgesi “güç kontrolsüzlüğüne” karşılık gelir ve maksimum yüklenebilirlik B noktası tarafından belirlenir. Güç sisteminde yük barasının aktif güç değeri (B noktası), düzenli olarak kademeli bir şekilde artırılmasıyla belirlenir. Bu nokta sistemin maksimum yüklenebilirlik seviyesini ifade etmektedir.



Şekil 4. P-V grafiği

Bu makalede, Şekil 4'teki P-V grafiği göz önünde bulundurularak maksimum yüklenme oranları her bir güç barası için ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Böylece, sistemin bara yük değerlerine bağlı olarak maksimum çalışma kapasiteleri tespit edilmiştir.

3. YÜK AKIŞI ANALİZİ VE IEEE 14 BARA SİSTEMİ (LOAD FLOW ANALYSIS AND IEEE 14 BUS SYSTEM)

Güç akışı hesaplaması, tüm baralardaki gerilim genliğini, açısını ve tüm kollardaki güç akışını hesaplamak için elektrik güç sisteminin kararlı durum analizidir. Yük akış analizi, farklı çalışma koşulları ve ekipman konfigürasyonu altında güç sistemlerinin planlanması, tasarımı ve çalıştırılması sürecinde önemli bir araçtır. Yük akışı hesaplamalarına dayanarak;

- i. Hat yüklenmeleri ve kayıpları
- ii. Generatör yüklenmeleri
- iii. Bara gerilim düşümleri
- iv. İki veya daha fazla şebeke arasındaki güç alışverişi,
- v. Bara ve generatörlerin kararlı çalışma aralığı

gibi farklı sonuçlar tahmin edilebilir. Yük akışı sonuçları genellikle, RMS simülasyonu ve harmonik analizi gibi diğer hesaplamalar için başlangıç durumu olarak gereklidir; ayrıca beklenmedik durum ve güvenilirlik analizi için çoklu yük akışı hesaplaması gereklidir. Güç sistemi üzerinde yapılacak bu analizler için baralar en kritik noktalar olarak tanımlanabilir. Çünkü üreteçlerde üretilen güçler veya yükler baralar üzerinde birleştirilmektedir.

3.1. Bara Tipleri (Busbar Types)

Bir güç sisteminin analiz etmek için ağ baraları üç tipe ayrılarak bilinmeyen değişkenlerin sayısı denklem sayısına indirgenmiştir. Bunlar, Yük baraları (PQ bara), Üretim baraları (PV bara) ve Salınım/Gevşek bara (SL bara) olarak adlandırılır. Bu baralarla ilgili bilinen ve bilinmeyen parametreler Tablo 2'de tanımlanmıştır. Salınım barası (SL), gerilim büyüklüğü ve açısının belirlenen değerde sabit tutulduğu baralardır. Aynı zamanda gevşek bara olarak da adlandırılır. Salınım barasının açısı, şebekede bir referans açısı görevi görür.

Gerilim büyüklüğünün kontrol edildiği veya sabit tutulduğu bara üretim barası veya generatör barası (PV) olarak adlandırılır. Generatör barasında sadece aktif güç ve gerilim büyüklüğü bilinen miktar olarak verilir;

böylece gerilim açısı ve reaktif güç için güç denklemi çözülür. Aktif güç üretimi yapan bir enerji kaynağına bağlı bara genellikle PV bara olarak tanımlanır.

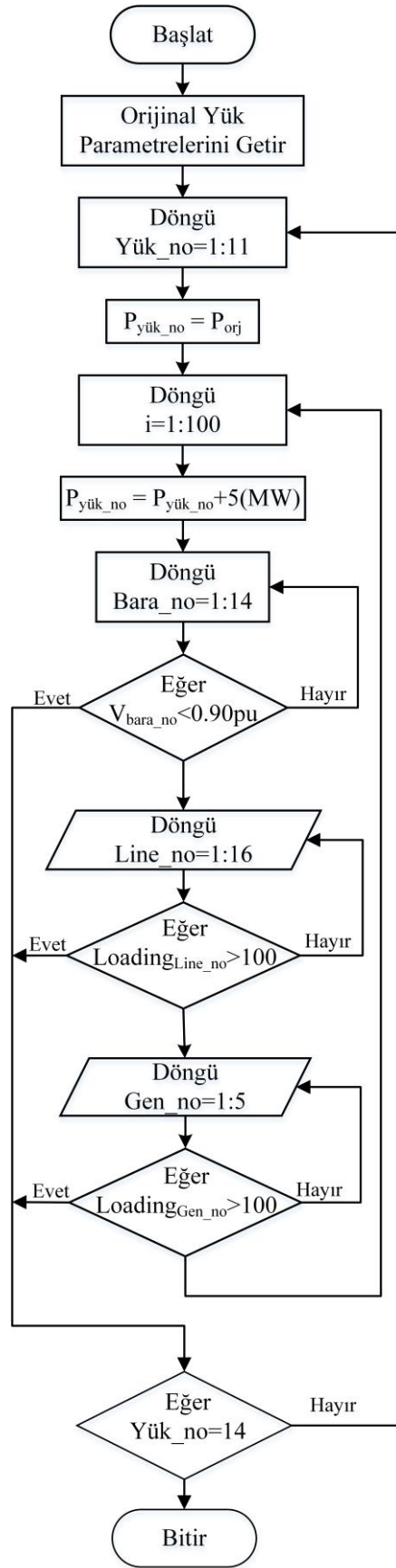
Gerilim büyüklüğü ve açısının kontrol edilmediği veya tanımsız olduğu tüm baralara yük barası (PQ bara) denir. Yük barasına enjekte edilecek veya tüketilecek olan sabit güç verilir; bilinmeyen miktarda gerilim büyüklüğü ve açısı daha sonra hesaplanır.

Tablo 2. Bara tipleri ve ilgili parametreler

Bara Tipi	Bilinen Parametreler	Bilinmeyen Parametreler
Salınım Barası /Gevşek Bara (Slack Bus)	U, δ (Gerilim ve faz açısı)	P, Q (Aktif ve reaktif güç)
Üretim Barası (Genarator Bus)	P, U (Gerilim ve aktif güç)	Q, δ (Reaktif güç ve faz açısı)
Yük Barası (Load Bus)	P, Q (Aktif ve reaktif güç)	U, δ (Gerilim ve faz açısı)

Tanımlarından anlaşılacağı üzere baralarda güç akışının hesaplanması ve analiz edilmesi en önemli unsurdur. Güç akışı Denklemleri (12) ve (13) doğrusal olmayan fonksiyonlardır; bu nedenle, çözümü bulmak için sayısal yineleme yöntemi gereklidir. Doğrusal olmayan denklemi çözmek için farklı yöntemler mevcuttur, ancak yük akışı hesaplaması benzetim ortamında DIgSILENT PowerFactory programında, yük akışı çözümünü hesaplamak için Newton–Raphson yöntemi kullanılmaktadır. Böylece güç sistemi üzerindeki hat yüklenmeleri, generatör yüklenmeleri, bara gerilim değerleri düşmeleri ve yüklenmeleri görülmektedir.

Bu çalışmada, güç akışının yüklerin değerine bağlı olarak incelenmesi için bir Python kod dizimi kullanılmıştır. Kod dizimine ait akış diyagramı Şekil 5'te verilmiştir. Öncelikle, IEEE 14 bara sisteminde tanımlı yüklerin standart değerleri DIgSILENT PowerFactory programında yer alan modelden alınmaktadır. Tüm yüklerin (Bkz. Tablo 5) değerlerini sırayla artırmak için yazılım ilk döngüye girmektedir. Devamında, yük değerini artırmadan önce standart değer $P_{yük_no}$ değişkenine atanarak başlangıç yüklenme seviyesi belirlenmektedir. İkinci döngüde ise yükün değeri 5'er MW artırılmaktadır. Yük değerinin her artışı için bara gerilim değeri (V_{bara_no}), hat yüklenme oranı ($Loading_{Line_no}$) ve generatör yüklenme ($Loading_{Gen_no}$) oranlarının sınırların içerisinde olup olmadığı sınanmaktadır. Eşik değerinin dışına çıkan bir parametre olduğunda sonraki yük için aynı işlemler yapılmak üzere kod dizimi ilk döngüye geçiş yapmaktadır. Böylece, tüm yükler için kritik seviyeler belirlenmektedir.



Şekil 5. Python kod dizimi akış şeması

Tablo 4. IEEE 14 bara hat bilgileri

Hat adı	Hat no		R (mΩ/m)	X (mΩ/m)	Z (mΩ/m)
	Hat başı bara no	Hat sonu bara no			
Line_0001_0002/1	1	2	6.753	20.619	21.697
Line_0001_0002/2	1	2	6.753	20.619	21.697
Line_0001_0005	1	5	9.414	38.862	39.986
Line_0002_0003	2	3	8.187	34.494	35.452
Line_0002_0004	2	4	10.125	30.722	32.347
Line_0002_0005	2	5	9.922	30.296	31.880
Line_0003_0004	3	4	11.675	29.800	32.005
Line_0004_0005	4	5	2.326	7.337	7.697
Line_0006_0011	6	11	1.034	2.166	2.400
Line_0006_0012	6	12	1.338	2.785	3.090
Line_0006_0013	6	13	0.720	1.418	1.591
Line_0009_0010	9	10	0.346	0.920	0.983
Line_0009_0014	9	14	1.384	2.944	3.253
Line_0010_0011	10	11	0.893	2.091	2.274
Line_0012_0013	12	13	2.405	2.176	3.244
Line_0013_0014	13	14	1.861	3.789	4.222

Tablo 5. IEEE 14 bara yük bilgileri

Yük Bilgileri			
Bağlı olduğu bara No	Yük adı	Aktif gücü (MW)	Reaktif gücü (Mvar)
2	Load_0002	21.7	12.7
3	Load_0003	94.2	19
4	Load_0004	47.8	-3.9
5	Load_0005	7.6	1.6
6	Load_0006	11.2	7.5
9	Load_0009	29.5	16.6
10	Load_0010	9	5.8
11	Load_0011	3.5	18
12	Load_0012	6.1	1.6
13	Load_0013	13.5	5.8
14	Load_0014	14.9	5

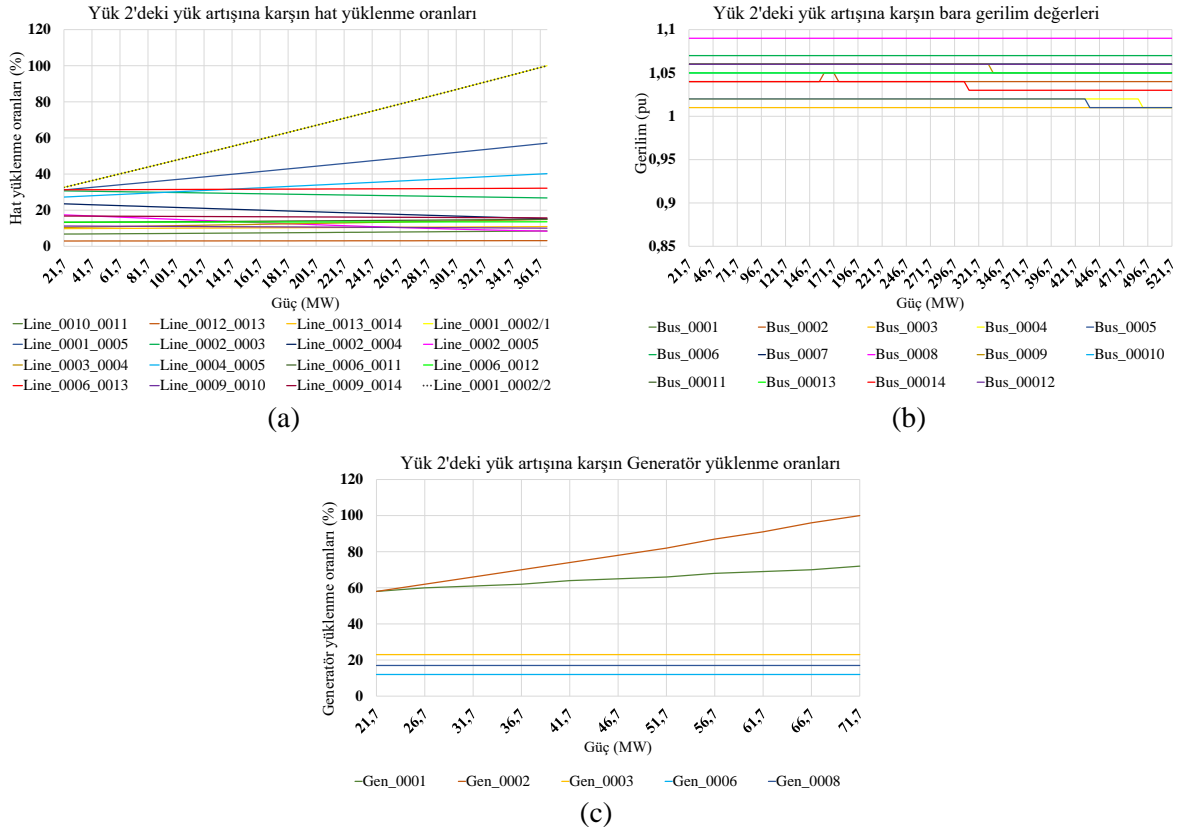
Tablo 6. IEEE 14 bara generatör bilgileri

Bağlı olduğu bara No	Generatör adı	Aktif gücü (MW)	Gerilim değeri (pu)	Maksimum Aktif Gücü (MW)	Minimum Aktif Gücü (MW)	Reaktif Gücü (Mvar)	Maksimum Reaktif Gücü (Mvar)	Minimum Reaktif Gücü (Mvar)
1	Gen_0001	232.4	1.06	200	50	-16.9	100	-40
2	Gen_0002	40	1.04	80	20	-42.4	50	-40
3	Gen_0003	0	1.01	50	15	-23.4	40	0
6	Gen_0006	0	1.07	35	10	12.2	24	-6
8	Gen_0008	0	1.09	30	10	17.4	24	-6

4. BENZETİM SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

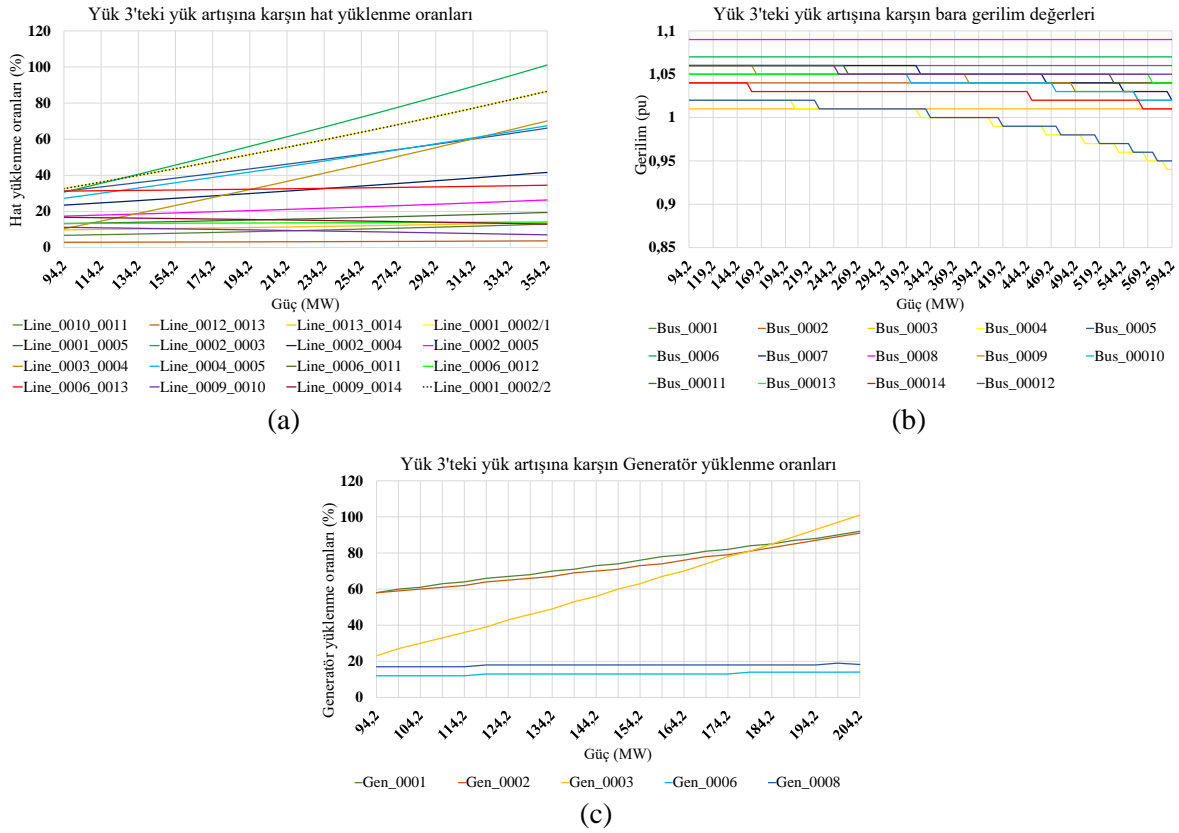
Şekil 6'da yer alan IEEE 14 bara sistemi modeli Tablo 3-6'da verilen parametreler kullanılarak DIGSILENT PowerFactory ortamında oluşturulmuştur. Yüklenme kapasitesinin belirlenmesi için, farklı baralara bağlı Tablo 5'teki 11 adet yükün değeri ayrı ayrı artırılarak sistem analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen benzetim sonuçları doğrultusunda her yük artışına karşılık hat, bara ve generatörlerdeki yüklenme oranları incelenmiştir. Dolayısıyla, her yük artışının sistem kararlılığına etkisi elde edilmiştir. Bu veriler doğrultusunda, baralara bağlanacak yükün maksimum değeri sistem kararlılığı göz önünde bulundurularak tespit edilmiştir. Bu çalışmada, hatların maksimum yüklenme değeri %100, bara gerilim eşik değerleri ± 0.1 pu, maksimum generatör yüklenme oranı ise %100 olacak şekilde sistem kararlılığı sınırları belirlenmiştir.

Bara 2'ye bağlı yük değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkisi Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7(a)'da yer alan grafikte görüldüğü üzere, IEEE 14 bara sisteminde 21.7MW olan Yük 2 (Load_002) değeri 361.7MW'a yükselinceye kadar tüm hat yüklenme oranları sınır değer (100%) altında kalmaktadır. Ancak, bu durum ilgili yük değerinin maksimum değerini belirlemede yeterli olmayıp, sistem kararlılığı ve bağlı alıcıların normal çalışma koşullarını sürdürmesi açısından bara gerilimlerinin de incelenmesi gerekmektedir. Şekil 7(b)'de verilen sonuçlardan görüldüğü üzere, bara gerilimleri geniş bantta yapılan güç değişiminden çok az oranda etkilenmektedir. Bununla birlikte incelenmesi gereken diğer bir husus ise sistemde yer alan enerji kaynaklarının yeterliliğidir. Şekil 7(c)'de verilen sonuçlardan görüldüğü üzere, Yük 2'nin değeri 71.7MW'a ulaştığında Generatör 2'nin (Gen_0002) yüklenme oranı maksimum olmaktadır. Daha önce bahsedildiği üzere, yük değerinin sınırı belirlenirken Şekil 7'de yer alan üç unsur birlikte değerlendirilmelidir. Dolayısıyla, sistem çalışma limitleri en erken Şekil 7(c)'deki generatör yüklenme oranları açısından aşıldığı için, Yük 2'nin olabilecek maksimum değeri 71.7MW'tan küçük seçilmelidir. Diğer bir deyişle, Yük 2'nin bulunduğu baraya 50MW'tan küçük olacak şekilde yük eklemek IEEE 14 bara sisteminin çalışmasını bozmamaktadır.



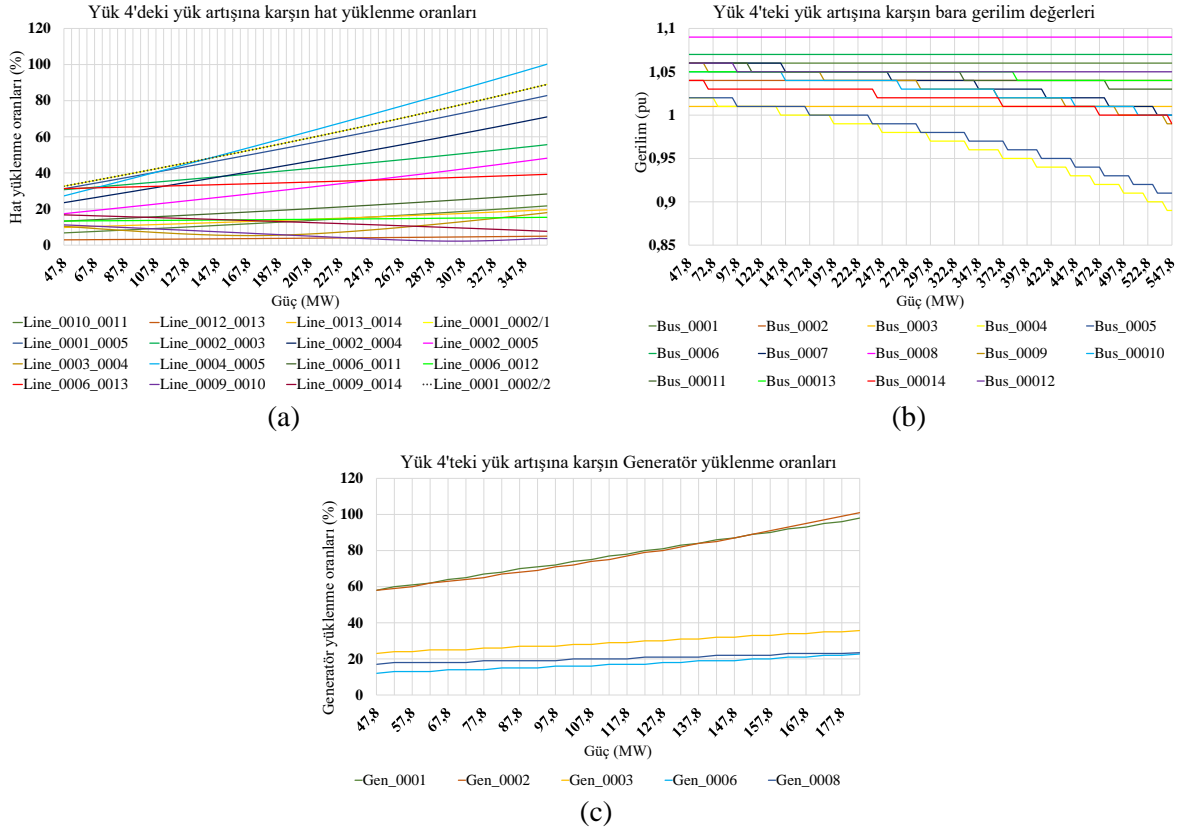
Şekil 7. Bara 2'ye (Bus_0002) bağlı yük (Load_0002) değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkisi, a: Hat yüklenme oranları, b: Bara gerilim değerleri, c: Generatör yüklenme oranları

Bara 3'e bağlı yük (Load_0003) değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkisi Şekil 8'de verilmiştir. IEEE 14 bara sisteminde 94,2MW olan Yük 3 değeri 5MW'lık artırımlarla hat yüklenmesi, generatör yüklenmesi ve bara gerilim düşümleri kademeli olarak izlenmiştir. Bu farklı yük değerlerinde ortaya çıkan durumlar incelenecek olursa; Şekil 8(a)'da verilen sonuçlara göre bara yük değeri 354,2MW'a yükselince Bara 2 ve Bara 3 arasındaki iletim hattı olan Line_0002-0003 hat yüklenme oranı sınır değerine çıkmaktadır. Bu yük artışları ile Şekil 8(b)'de verilen sonuçlara bakacak olursak, bara gerilimleri de etkilenmektedir. Buna göre Yük 2 değeri 594.2MW olduğunda Bara 4 gerilim değeri 0.95pu altına düşerek eşik değer altına düşmektedir. Son olarak Şekil 8(c)'de verilen sonuçlara bakacak olursak Yük 3, 204.2MW değerine ulaştığında Generatör 3'ün(Gen_0003) yüklenme oranı maksimum olmaktadır. Bu üç durum birlikte değerlendirildiğinde IEEE 14 bara sisteminde Yük 3 başlangıç değeri 94.2MW olarak alındığında sistemin kararlı çalışması için maksimum 204MW'lık bir yük altında çalıştırılması gerekmektedir. Bu sonuca göre Bara 3'e eklenebilecek maksimum yük miktarı 110MW görülmektedir. Sonuç olarak, Bara 3'e bağlı yük değerinin artışı sonucunda kritik seviyeyi aşan ilk bileşenin generatör yüklenme oranı olduğu belirtilebilir.



Şekil 8. Bara 3 (Bus_0003)'e bağlı yük (Load_0003) değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkisi, a: Hat yüklenme oranları, b: Bara gerilim değerleri, c: Generatör yüklenme oranları

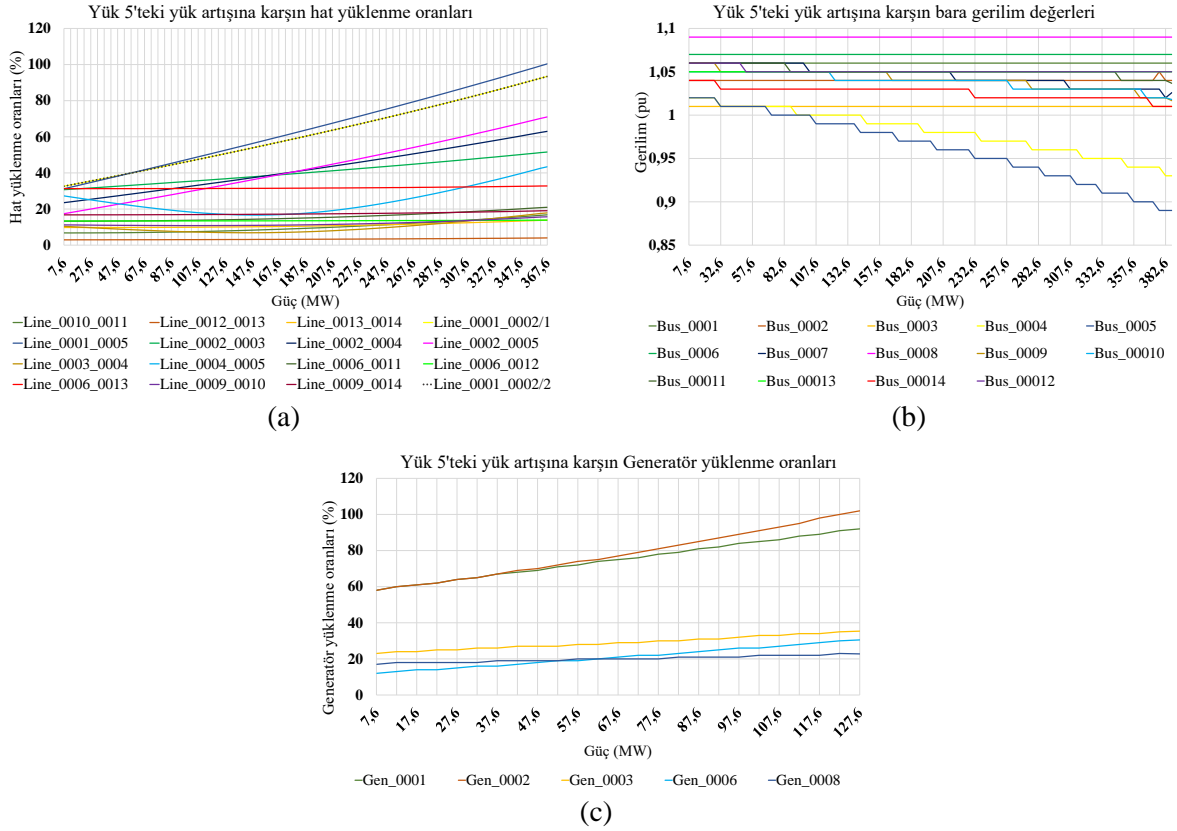
Önceki testlerde olduğu üzere, Bara 4'e (Bus_0004) bağlı yük (Load_0004) değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki incelenmiş ve sonuçlar Şekil 9'da verilmiştir. IEEE 14 bara sisteminde 47,8MW olan Yük 4 değerinde kademeli artış yapılarak elde edilen Şekil 9(a)'dan görüldüğü üzere, özellikle 4 numaralı baraya bağlantısı olan hatlardaki yüklenme oranları daha fazladır. Artışlar gözlemlendiğinde 362.8MW yük değerine ulaşıldığında, Line_0004_0005 hattında yüklenme oranı %100,21 olmaktadır. Şekil 9(b)'de ise 547,8MW değerinde Bara 4'ün gerilim değeri 0,89pu'a düşmüştür. Şekil 9(c)'deki generatör yüklenme oranlarına bakıldığında, Yük 4'ün değeri 182.9 MW'a ulaştığında Gen_0002 generatörünün yüklenme oranı %101 olmaktadır. Önceki sonuçlarda yapılan çıkarımlara benzer şekilde, sistemin kararlı çalışması için Bara 4'e eklenebilecek maksimum yük değerinin 182 MW olabileceği söylenebilir. Önceki sonuçlara benzer olarak, Bara 4'ün yüklenme seviyesini sınırlayan ilk faktörün generatör yüklenme oranı olduğu söylenebilir.



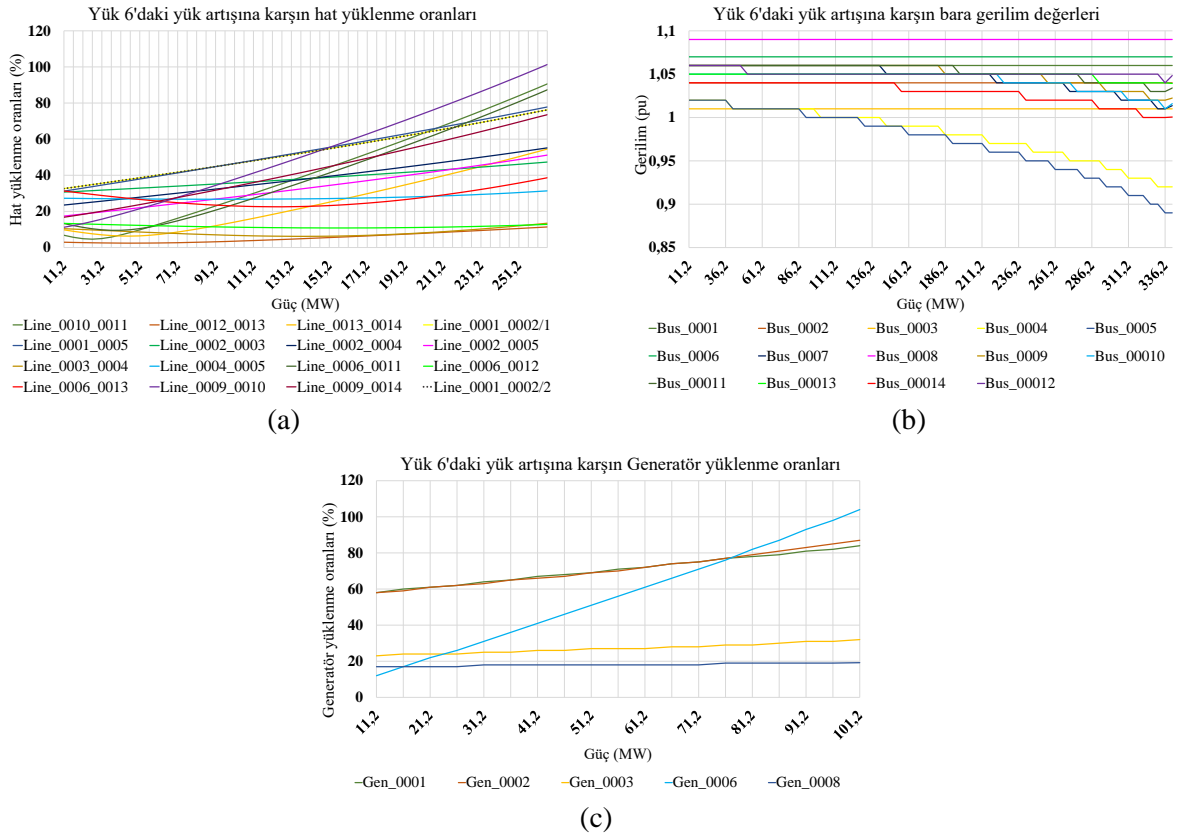
Şekil 9. Bara 4 (Bus_0004)'e bağlı yük (Load_0004) değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkisi, a: Hat yüklenme oranları, b: Bara gerilim değerleri, c: Generatör yüklenme oranları

Bara 5'e (Bus_0005) bağlı yük (Load_0005) değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkisi Şekil 10'da verilmiştir. Bara 5'e bağlı standart yük değeri 7.6 MW olan Yük 5, kademeli artırılarak elde edilen hat yüklenme oranlarından (Şekil 10(a)) görüldüğü üzere, yük değeri 367.6 MW'a çıktığında Line_0001_0005 hattında yüklenme oranı %100.4 olmaktadır. Şekil 10(b)'de Yük 5'in değeri 387.6MW değere ulaştığında Bara 5'in gerilim değeri 0,89pu'a düşmüştür. Şekil 10(c)'de verilen generatör yüklenme oranlarına bakıldığında ise Yük 5'in değeri 127.6 MW'a ulaştığında Gen_0002 generatörünün yüklenme oranı %102 olmaktadır. Bu durumda sistemin kararlı çalışması için Yük 5'in alabileceği maksimum değer 127MW görülmektedir. Bu test için ise sınırlayıcı faktörün generatör yüklenme oranı olduğu belirtilebilir.

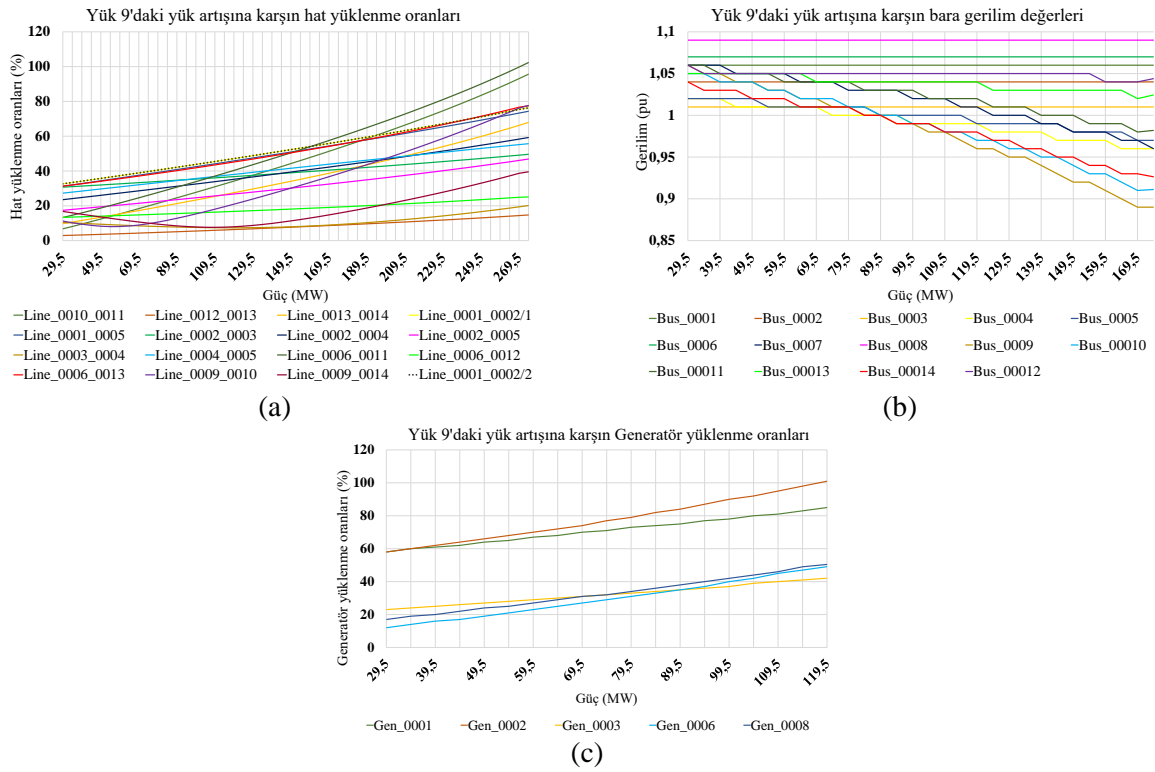
Bara 6 (Bus_0006)'ya bağlı yük (Load_0006) değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkisi Şekil 11'de verilmiştir. IEEE 14 bara sisteminde Bara 6'ya bağlı 11.2 MW olan Yük 6 değerinde kademeli artış değerleri incelendiğinde; Şekil 11(a)'da yük değeri 266.2MW'a çıktığında Line_0009_0010 hattında yüklenme oranı %101.34 olmaktadır. Şekil 11(b)'de Yük 6'nın değeri 341.2MW'a ulaştığında Bara 5'in gerilim değeri 0,89pu'a düşmüştür. Şekil 11(c)'de generatör yüklenme oranları ise, Yük 6'nın değeri 101.2 MW iken Gen_0006 generatörü yüklenme oranı %104 olmaktadır. Bu durumda sistemin kararlı çalışması için Yük 6'da maksimum 100MW değere çıkılabileceği görülmektedir. Önceki testlere benzer olarak, bu durumda da sınırlayıcı faktörün generatör yüklenme oranı olduğu belirtilebilir.



Şekil 10. Bara 5 (Bus_0005)'e bağlı yük (Load_0005) değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkisi, a: Hat yüklenme oranları, b: Bara gerilim değerleri, c: Generatör yüklenme oranları



Şekil 11. Bara 6 (Bus_0006)'ya bağlı yük (Load_0006) değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkisi, a: Hat yüklenme oranları, b: Bara gerilim değerleri, c: Generatör yüklenme oranları

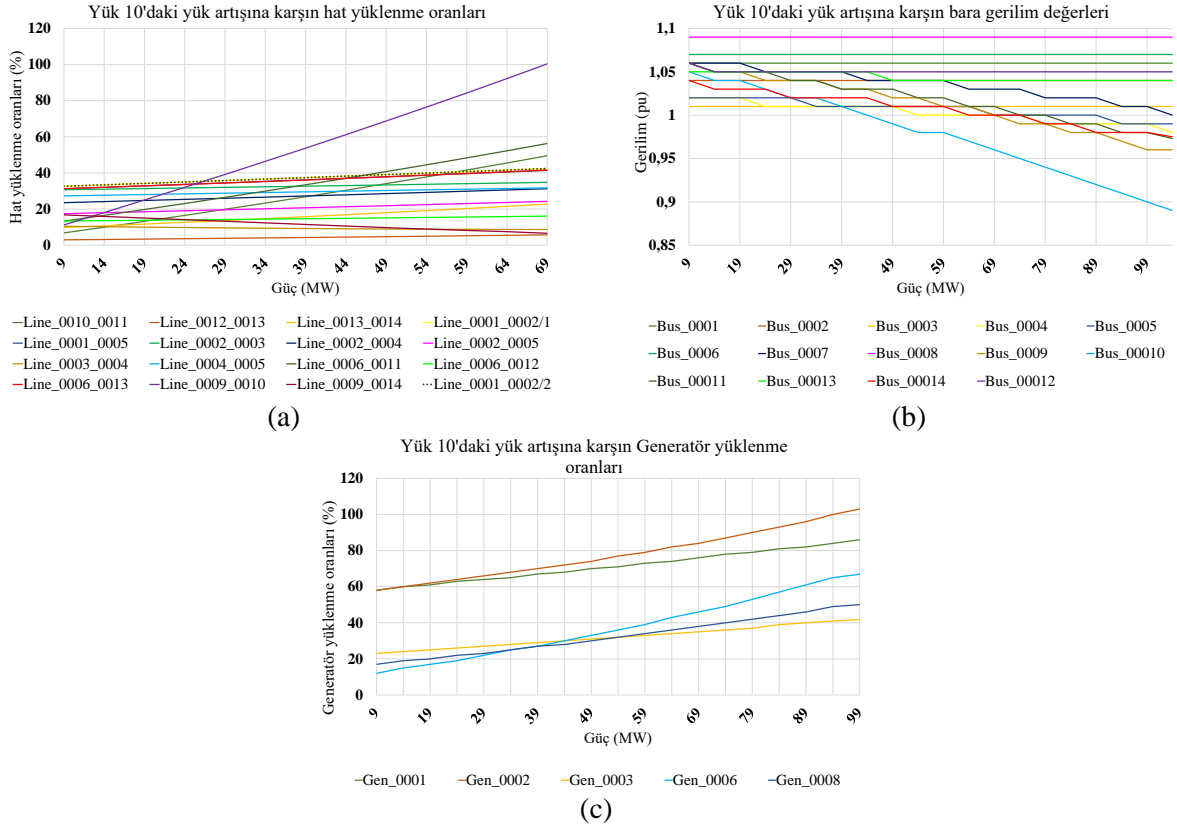


Şekil 12. Bara 9 (Bus_0009)'a bağlı yük (Load_0009) değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkisi, a: Hat yüklenme oranları, b: Bara gerilim değerleri, c: Generatör yüklenme oranları

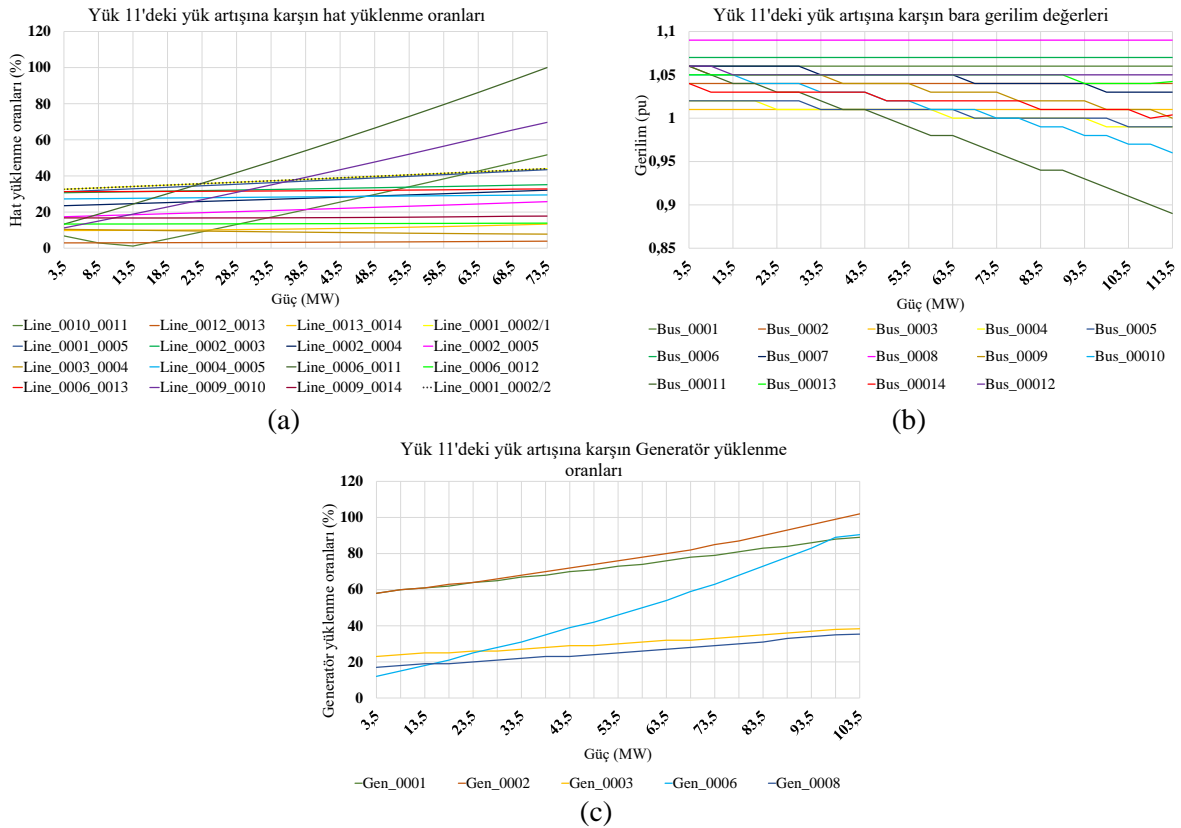
Bara 9 (Bus_0009)'a bağlı yük (Load_0009) değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkisi Şekil 12'de verilmiştir. Bara 9'a bağlı 29.5 MW olan Yük 9 değerinde kademeli artış değerleri incelendiğinde; Şekil 12(a)'da yük değeri 274.5MW'a kadar artırıldığında Line_0006_0011 hattında yüklenme oranı %102.35 olmaktadır. Şekil 12(b)'de Yük 9'un değeri 174.5 MW'a ulaştığında Bara 9'un gerilim değeri 0,89pu'a düşmüştür. Kademeli yük artışına bağlı olarak Şekil 12(c)'de generatör yüklenme oranları incelendiğinde ise, Yük 9'un değeri 119.5 MW iken Gen_0002 generatörü yüklenme oranı %101 seviyelerine çıkmaktadır. Bu üç durum birlikte değerlendirildiğin sistemin kararlı çalışması için Yük 9'da maksimum yük artışının 119 MW değere kadar olabileceği görülmektedir. Bu durum için de sınırı aşan ilk değer generatör yüklenme oranı olmuştur.

Bara 10 (Bus_0010)'a bağlı yük (Load_0010) değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkisi Şekil 13'te verilmiştir Bara 10'a bağlı 9 MW olan Yük 10 değerinde kademeli artış değerleri incelendiğinde; Şekil 13(a)'da yük değeri 69 MW'a kadar artırıldığında Line_0009_0010 hattında yüklenme oranı %100.38 olmaktadır. Şekil 13(b)'de Yük 10'un değeri 104 MW'a kadar artırıldığında Bara 10'un gerilim değeri 0,89pu'a düşmüştür. Şekil 13(c)'de Yük 10'un değeri 99 MW iken Gen_0002 generatörü yüklenme oranı ise %102 seviyelerinde olmaktadır. Şekil 13'teki grafiklerde sistem çalışma limitleri değerlendirildiğinde Yük 10 için üst limit değeri 69 MW olarak görülmektedir. Bu test neticesinde önceki test durumlarından farklı olarak hat yüklenme oranının sınırlayıcı faktör olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni ise ilgili baraya bağlı herhangi bir generatörün bağlı olmayışı ve diğer generatörlere olan mesafesidir.

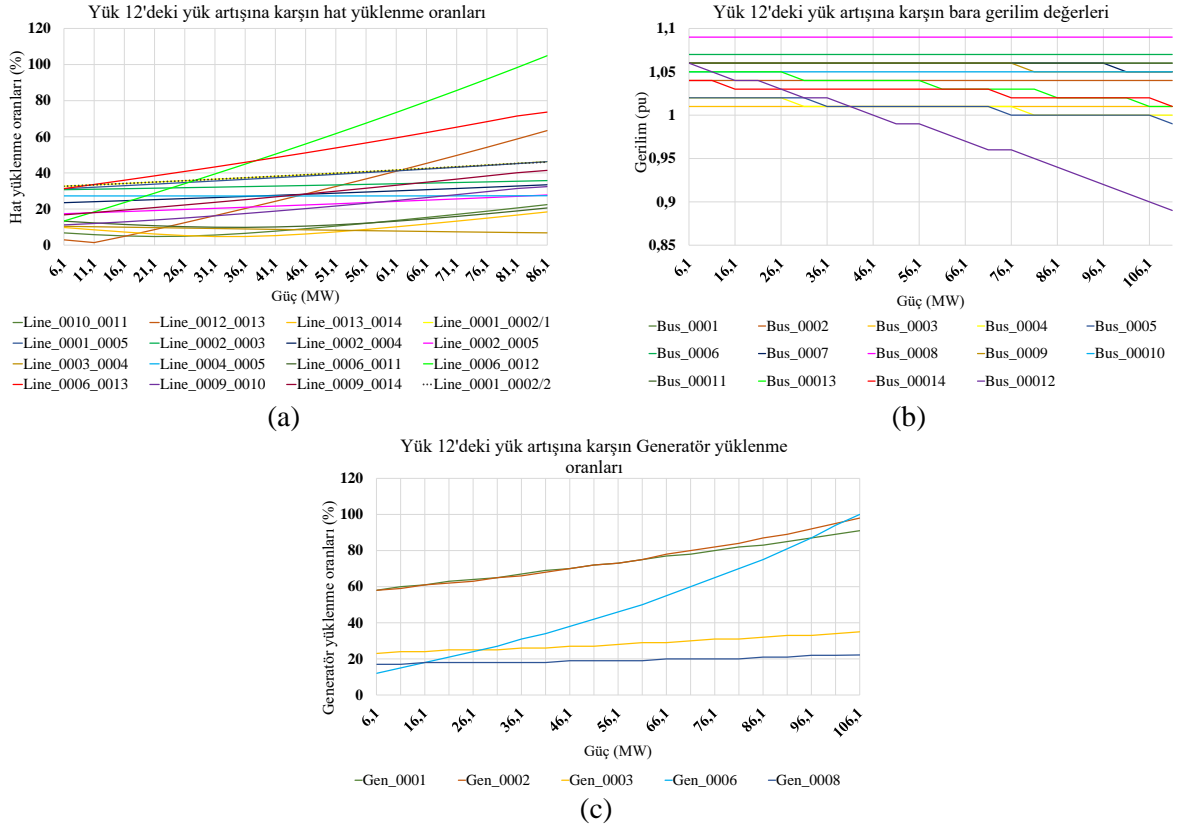
Bara 11 (Bus_0011)'e bağlı yük (Load_0011) bağlı yük değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkisi Şekil 14'te verilmiştir. Standart olarak 9MW olan Yük 11'in değeri kademeli olarak artırılarak elde edilen sonuçlar incelendiğinde; Şekil 14(a)'da verilen sonuçlara göre baraya bağlı yük değeri 73.5MW'a yükseldiğinde Bara 6 ve Bara 11 arasındaki iletim hattı olan Line_0006_0011 hat yüklenme oranı sınır değerinin üzerine çıkarak %100.04 olmuştur. Bu yük artışları ile Şekil 14(b)'de Yük 11'in değeri 113.5 MW'a kadar artırıldığında Bara 11'in gerilim değeri ise 0,89pu'a düşmüştür. Son olarak Şekil 14(c)'de verilen sonuçlara bakacak olursak Yük 103.5MW değerine ulaştığında Gen_0002 generatörü yüklenme oranı %102'ye çıkarak sistemi kararsızlığa götürmektedir. Şekil 8'de verilen sonuçlara benzer olarak, bu teste de hat yüklenme oranının sınırlayıcı faktör olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni ise baraya bağlı bir generatörün bağlı olmayışı ve diğer generatörlere olan mesafesi gösterilebilir.



Şekil 13. Bara 10 (Bus_0010)'a bağlı yük (Load_0010) değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkisi, a: Hat yüklenme oranları, b: Bara gerilim değerleri, c: Generatör yüklenme oranları



Şekil 14. Bara 11 (Bus_0011)'e bağlı yük (Load_0011) değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkisi, a: Hat yüklenme oranları, b: Bara gerilim değerleri, c: Generatör yüklenme oranları

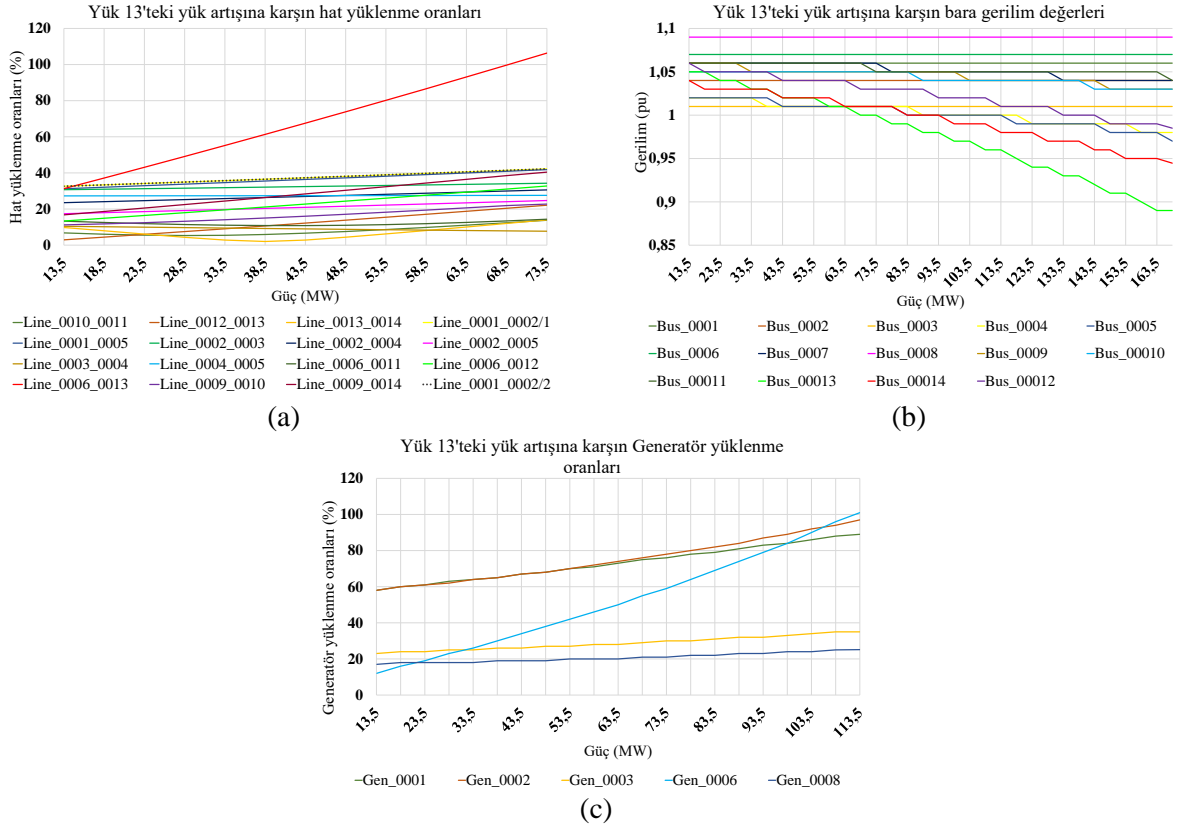


Şekil 15. Bara 12 (Bus_0012)'ye bağlı yük (Load_0012) değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkisi, a: Hat yüklenme oranları, b: Bara gerilim değerleri, c: Generatör yüklenme oranları

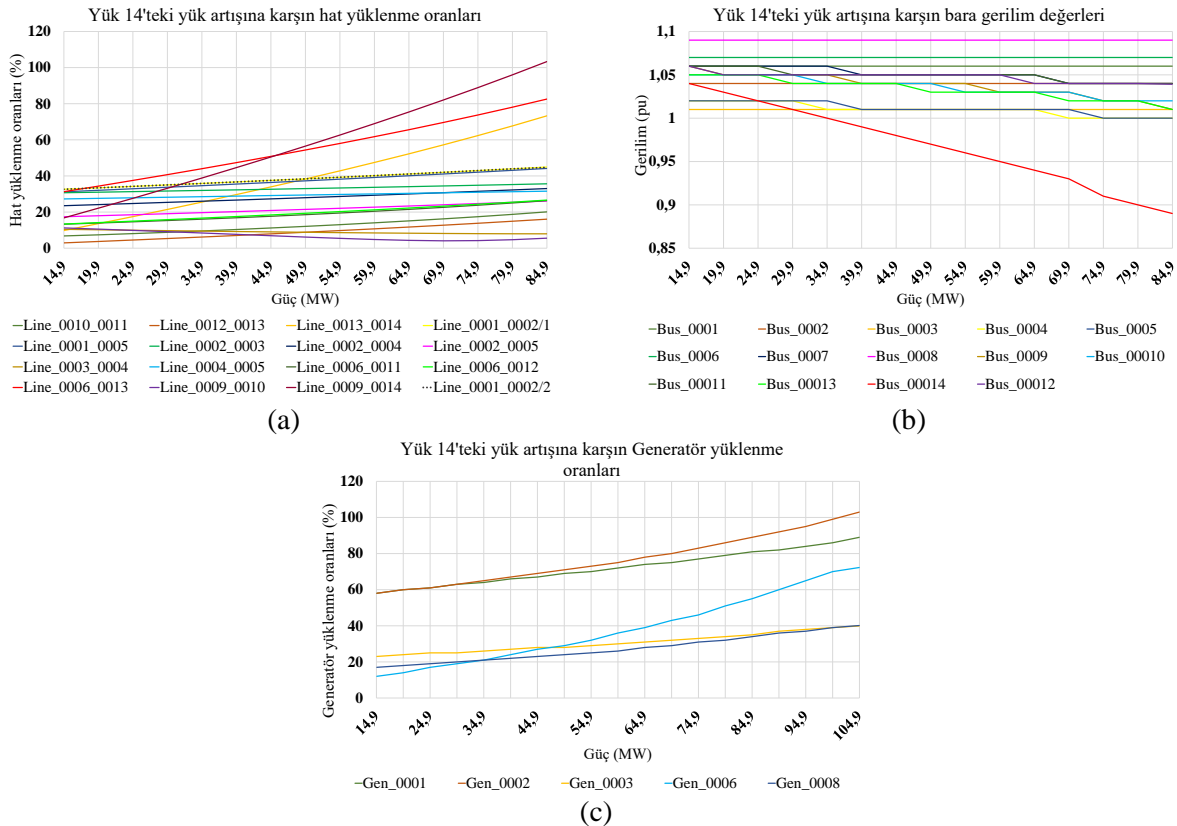
Bara 12 (Bus_0012)'ye bağlı yük (Load_0012) değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkisi Şekil 15'de verilmiştir. Bara 12'ye bağlı 6.1 MW olan Yük 12 değerinde kademeli artış değerleri incelendiğinde; Şekil 15(a)'da yük değeri 86.1 MW'a kadar artırıldığında Line_0006_0012 hattında yüklenme oranı %104.91 olmaktadır. Şekil 15(b)'de Yük 12'nin değeri 111.1 MW'a kadar artırıldığında Bara 12'un gerilim değeri 0,89pu'a düşmüştür. Şekil 15(c)'de Yük 12'nin değeri 106.1 MW iken Gen_0006 generatörü maksimum yüklenme oranına ulaşarak %100 olmaktadır. Bu sonuçlar değerlendirildiğinde Yük 12 için üst limit hat yüklenme oranından dolayı 85 MW olarak tespit edilmiştir.

Bara 13 (Bus_0013)'e bağlı yük (Load_0013) değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkisi Şekil 16'da verilmiştir. Bara 13'e bağlı 13.5 MW olan Yük 13 değerinde kademeli artış değerleri incelendiğinde; Şekil 16(a)'da yük değeri 73.5 MW'a kadar artırıldığında Line_0006_0013 hattında yüklenme oranı %106.36 olmaktadır. Artış kademeleri 5MW olarak simüle edildiğinden burada hat yüklenme oranı %100 seviyelerine 70MW dolaylarında ulaşmaktadır. Şekil 16(b)'de Yük 13'ün değeri 168.5 MW'a kadar artırıldığında Bara 13'un gerilim değeri 0,89pu'a düşmüştür. Şekil 16(c)'de Yük 13'ün değeri 168.5 MW iken Gen_0006 generatörü maksimum yüklenme oranını aşarak %106.36 olmaktadır. Bu test durumunda da sınırlayıcı faktörün hat yüklenme oranı olduğu görülmüştür.

Bara 14 (Bus_0014)'e bağlı yük (Load_0014) değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkisi Şekil 17'da verilmiştir. IEEE 14 bara sisteminde Bara 14'e bağlı 14.9 MW olan Yük 14 değerinde kademeli artış değerleri incelendiğinde; Şekil 17(a)'da verilen sonuçlara göre baraya bağlı yük değeri 84.9MW'a yükselince Line_0009_0014 hat yüklenme oranı sınır değerinin üzerine çıkarak %103 seviyelerinde olmuştur. Bu yük artışları ile Şekil 17(b)'de Yük 14'ün değeri 84.9 MW'a iken Bara 14'in gerilim değeri ise 0,89pu'a düşmüştür. Bunların yanı sıra Şekil 17(c)'de Yük 14'deki artış ile yük değeri 104.9 MW değerine ulaştığında Gen_0002 generatörü yüklenme oranı %103'ye çıkarak yine sistemi kararsızlığa götürmektedir. Bu durumda ise, hem hat yüklenme oranı hem de gerilim sınırı (0.9pu) limitleri dışına çıktığından her iki faktör sınırlayıcı olarak tespit edilmiştir.



Şekil 16. Bara 13 (Bus_0013)'e bağlı yük (Load_0013) değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkisi, a: Hat yüklenme oranları, b: Bara gerilim değerleri, c: Generatör yüklenme oranları



Şekil 17. Bara 14 (Bus_0014)'e bağlı yük (Load_0014) değerindeki artışın sistem parametreleri üzerindeki etkisi, a: Hat yüklenme oranları, b: Bara gerilim değerleri, c: Generatör yüklenme oranları

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada, güç sistemlerine yeni eklenecek yüklerin hat yüklenme seviyeleri, bara gerilimleri ve generatör yüklenme oranları üzerindeki etkileri incelenmiştir. IEEE 14 standart bara sistemi üzerinde yapılan benzetim çalışmalarıyla sisteme bağlanabilecek maksimum yük değerlerinin tespiti amaçlanmıştır. Bu amaçla, her yükün değeri adım adım artırılmış ve her yük noktasının hangi sistem parametresi üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Tüm yükler için elde edilen grafiksel sonuçlar, 2. yükten 9. yüke kadar generatör yüklenme oranlarının kısıtlayıcı parametre olduğunu göstermiştir. Diğer beş yük değerinde yapılan artışlarda ise ilk olarak hat yüklenme sınırları aşılmıştır. Bununla birlikte 14. yük değerindeki artış, hem 9-14'üncü baralar arasındaki hat yüklenme oranının aşılmasına hem de 14. baranın eşik gerilim değerinin altına düşmesine neden olmuştur. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, yük artışlarının belirlenen üç kriter üzerinde de etkili olduğu söylenebilir. Bununla birlikte yeni yüklerin eklenmesi için güç sisteminde yapılacak iyileştirme veya geliştirme çalışmalarında hangi noktalara dikkat edilmesi gerektiği elde edilen sonuçlardan tespit edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] P.KUNDUR, "Power System Stability and Control", 1994
- [2] P. KUNDUR, "Definition and classification of power system stability," IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, Aug. 2004, doi: 10.1109/TPWRS.2004.825981.
- [3] M. EREMİA, M. SHAHİDEHPOUR, Handbook of Electrical Power System Dynamics: Modeling, Stability, and Control. 2013. doi: 10.1002/9781118516072.
- [4] S. TOSUN, "Güç Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Sezgisel Yöntemlerle İncelenmesi" Doktora Tezi, 2011.
- [5] P. CHUSOVİTİN, A. PAZDERİN, G. SHABALİN, V. TASHCHİLİN, P. BANNYKH, "Voltage stability analysis using Newton method," Aug. 2015. doi: 10.1109/PTC.2015.7232823.
- [6] S. BOLOGNANİ and S. ZAMPİERİ, "On the existence and linear approximation of the power flow solution in power distribution networks," IEEE Trans. Power Syst., vol. 31, no. 1, pp. 163–172, 2016, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2395452.
- [7] Z. WANG, B. CUI, J. WANG, "A Necessary Condition for Power Flow Insolvability in Power Distribution Systems with Distributed Generators," IEEE Trans. Power Syst., vol. 32, no. 2, pp. 1440–1450, 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2588341.
- [8] L. AOLARİTEİ, S. BOLOGNANİ, and F. DORFLER, "Hierarchical and distributed monitoring of voltage stability in distribution networks," IEEE Trans. Power Syst., vol. 33, no. 6, pp. 6705–6714, 2018, doi: 10.1109/TPWRS.2018.2850448.
- [9] S. MENDOZA-ARMENTA, C. R. FUERTE-ESQUİVEL, and R. BECERRİL, "A numerical study of the effect of degenerate Hopf bifurcations on the voltage stability in power systems," Electr. Power Syst. Res., vol. 101, pp. 102–109, 2013, doi: 10.1016/j.epr.2013.03.013.
- [10] H. RAZMİ, H. A. SHAYANFAR, and M. TESHNEHLAB, "Steady state voltage stability with AVR voltage constraints," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 43, no. 1, pp. 650–659, 2012, doi: 10.1016/j.ijepes.2012.06.051.
- [11] R. J. AVALOS, C. A. CAÑİZARES, F. MİLANO, and A. J. CONEJO, "Equivalency of continuation and optimization methods to determine saddle-node and limit-induced bifurcations in power systems," IEEE Trans. Circuits Syst. I Regul. Pap., vol. 56, no. 1, pp. 210–223, 2009, doi: 10.1109/TCSI.2008.925941.

- [12] A. K. KAİLAY, "Identification of Best Load Flow Calculation Method for IEEE-30 BUS System Using," *Int. J. Electr. Electron. Res.* ISSN, vol. 3, no. 3, pp. 155–161, 2015.
- [13] K. HESAROOR and D. DAs, "Improved Modified Newton Raphson Load Flow Method for Islanded Microgrids," *2020 IEEE 17th India Counc. Int. Conf. INDICON 2020*, no. 1, 2020, doi: 10.1109/INDICON49873.2020.9342587.
- [14] T. E. GÜMÜŞ, M. A. YALÇIN, M. TURAN, C. AKSOY TIRMIKÇI, and C. YAVUZ, "Steady State Voltage Stability Estimation by Using Local Bus Parameters," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 16, no. 2, pp. 853–860, 2021, doi: 10.1007/s42835-021-00657-0.
- [15] T. YEŞİLYURT and B. AKBAL, "Elektrik Tesislerinde Gerilim Kararlılığının Sağlanması için Kullanılan Yöntemler," *Eur. J. Sci. Technol.*, Oct. 2020, doi: 10.31590/ejosat.804207.
- [16] M. A. KUSEKWA, "Load Flow Solution of the Tanzanian Power Network Using Newton-Raphson Method and MATLAB Software," *Int. J. Energy Power Eng.*, vol. 3, no. 6, p. 277, 2014, doi: 10.11648/j.ijepe.20140306.11.