



An improved mathematical model for the calculation of maximum permissible DG integration capacity

Kadir Doğanşahin^{1*}, Bedri Kekezoğlu², Recep Yumurtacı²

¹Electrical and Electronics Engineering, Artvin Çoruh University, Artvin, 08100, Turkey

²Electrical Engineering, Yıldız Technical University, Istanbul, 34220, Turkey

Highlights:

- Review of literature on DG planning
- The interaction between the DG capacity and the system voltages
- Proposing a more complete and consistent mathematical model for maximum permissible DG integration capacity

Keywords:

- Distribution Systems
- Distributed Generation (DG)
- DG planning
- Maximum permissible capacity
- Overvoltage

Article Info:

Research Article
Received: 24.09.2018
Accepted: 09.04.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.463225

Correspondence:

Author:Kadir Doğanşahin
e-mail:
dogansahin@artvin.edu.tr
phone: +90 466 215 1040

Graphical/Tabular Abstract

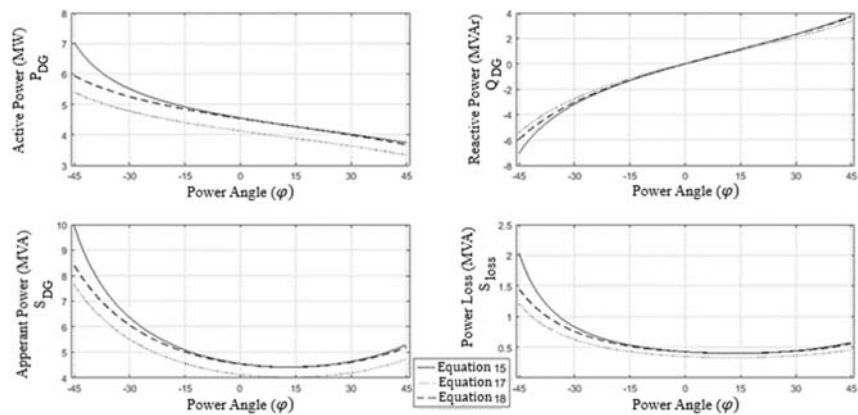


Figure A Variations of different power values obtained from Equal 15, Equal 17 and Equal 18 according to the power angle value

Purpose: Distributed generation is the power generation which is realized by being integrated into power systems from the consumption side. DG promises high potential in terms of reducing environmental and economic concerns by increasing power systems efficiency and enabling renewable energy sources to be used in power generation. On the other hand, DG is contrary to the centralized generation infrastructure of the conventional power systems, and excessive DG penetration in the systems may cause serious problems. Therefore, planning is an essential issue in DG integrations.

Theory and Methods:

Distributed generation increases voltage around the point they are integrated into the system Voltage variations are limited within certain values to protect power systems components and the consumers connected to the system from damage caused by these voltage increases. The voltages above those limits referred as overvoltage. In order to determine the maximum DG integration capacity from a point into a system without causing overvoltage risks, an analytical approach has been adopted within the consideration of voltage constraints. Consequently, a mathematical model, which is defined over the characteristic values of the integration point and the generator, is proposed. Although there are similar mathematical models in the literature, the contribution of the study is the proposition of a new mathematical model that can fully evaluate the problem without accepting various assumptions, unlike other mathematical models

Results:

The maximum permissible DG integration capacity calculation is performed on a 34-Bus test system. The results obtained from the proposed mathematical model are compared with those obtained with other mathematical models. The proposed mathematical model has always been able to give the highest and the most consistent results than other mathematical models.

Conclusion:

Accurate calculation of maximum permissible integration capacity increase the consistency of DG planning studies. With the proposed mathematical model, the most accurate results can be obtained regardless of the integration point and the conditions of the integration.



Maksimum bağlanabilirlik kapasitesi hesabına yönelik geliştirilen yeni bir matematiksel model

Kadir Doğanşahin^{1*}, Bedri Kekezoğlu², Recep Yumurtacı²

¹Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 08100 Merkez, Artvin, Türkiye

²Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 34220 Esenler, İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Dağıtık üretim planlamasına ilişkin literatürün incelenmesi
- Dağıtık üretim ve system gerilimleri arsındaki etkileşim
- Maksimum bağlanabilirlik kapasitesi hesabına yönelik daha genel ve tutarlı bir matematiksel modelin önerilmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 24.09.2018
Kabul: 09.04.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.463225

Anahtar Kelimeler:

Dağıtım sistemleri,
dağıtık üretim,
DÜ planlama,
bağlanabilirlik kapasitesi,
aşırı gerilim

ÖZET

Dağıtık üretim (DÜ), güç sistemlerine tüketim tarafından bağlanarak elektrik enerjisi üretimi yapma biçimidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimine katılımına ve enerji iletim kayıplarının azaltılmasına yönelik sağladıkları imkânlar neticesinde yüksek fayda potansiyeline sahip bir üretim biçimi olarak öne çıkmaktadır. Diğer taraftan, DÜ geleneksel güç sistemlerinin tek taraflı güç akışı alt yapısına aykırı bir üretim şeklidir. Bu durum, aşırı DÜ katılımının yer aldığı sistemlerde çift yönlü güç oluşmasına neden olarak sistemde aşırı gerilimlerin oluşması, sistemde koruma şemasının hatalı çalışması veya işlevini tamamen yitirmesi gibi sorunlara yol açabilmektedir. Bu nedenle DÜ katılımlarının uygun bir planlama neticesinde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Aşırı gerilim sorunları, DÜ katılımlarda en çok karşılaşılan ve sistemlerde büyük etkilere neden olabilen sorunlardan birisidir. Bir DÜ katılımının sistemde oluşturacağı gerilim artışı sisteme dâhil edilen DÜ kapasitesi ile doğrudan alakalıdır. Literatürde DÜ kapasitesi ile bu gerilim artışı arasındaki ilişkiyi inceleyen çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar, esas aldıkları varsayımlar ve ihmaller yönüyle uygulanabilirlik ve doğruluk açısından eleştiriye açıktır. Bu çalışmada, radyal dağıtım şebekelerine, aşırı gerilim sorunları yaratmaksızın, belirli bir noktadan dâhil edilebilecek maksimum DÜ kapasitesinin hesabı için yeni bir matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel model, bir test sistemi üzerinde gerçekleştirilen farklı durum analizleri ile incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürde yer alan diğer matematiksel modeller ile karşılaştırılarak, önerilen matematiksel modelin üstünlüğü ispatlanmıştır.

An improved mathematical model for the calculation of maximum permissible DG integration capacity

H I G H L I G H T S

- Review of literature on DG planning
- The interaction between the DG capacity and the system voltages
- Proposing a more complete and consistent mathematical model for maximum permissible DG integration capacity

Article Info

Research Article
Received: 24.09.2018
Accepted: 09.04.2019

DOI:

10.17341/gazimmfd.463225

Keywords:

Distribution systems,
distributed generation (dg),
dg planning,
maximum permissible
capacity,
overvoltage

ABSTRACT

Distributed generation is the power generation which is realized by being integrated into power systems from the consumption side. DG promises high potential in terms of reducing environmental and economic concerns by increasing power systems efficiency and enabling renewable energy sources to be used in power generation. On the other hand, DG is contrary to the centralized generation infrastructure of the conventional power systems, and excessive DG penetration in the systems may cause serious problems. Therefore, planning is an essential issue in DG integrations. Overvoltage problems are one of the most serious and the most frequently encountered problems in DG integration. The voltage increase caused by DG integration in the system is directly related to the DG capacity integrated in the system. In the literature, several studies have been conducted to relate the voltage increase with the capacity of DG. These studies are open to criticism in terms of their feasibility and accuracy because of the assumptions which adopted in the proposed methodology. In this study, a new mathematical model has been developed for the calculation of the maximum capacity for the DG planned to be integrated into a radial distribution networks from a certain point without conducting overvoltage problems. The developed mathematical model has been analyzed with different case studies performed on a test system. The results obtained has been compared with the other mathematical models in the literature and the proposed mathematical model has given better results.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: dogansahin@artvin.edu.tr, bkekez@yildiz.edu.tr, ryumur@yildiz.edu.tr / Tel: +90 466 215 1040

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Artan Dünya nüfusu, gelişen teknoloji ve yükselen yaşam standartları enerjiye olan ihtiyacı artırmaktadır. Nihai bir enerji çeşidi olan elektrik enerjisi, artan enerji talebi içerisinde oldukça önemli bir yere sahiptir. Elektrik enerjisi, alternatif nihai enerji çeşitlerine göre daha temiz, sürdürülebilir ve güvenilir olması sebebiyle, her geçen gün önemi artmakta ve kullanım alanı genişlemekte olan bir enerji çeşididir [1]. 2000 – 2015 yılları için küresel nihai enerji tüketimine ait veriler incelendiğinde, elektrik enerjisinin payı, %11,2'den %12,8'e yükselmiştir. Bu verilere göre, elektrik enerjisi, küresel nihai enerji tüketimi içerisinde, payını en fazla artıran enerji çeşidi olarak öne çıkmaktadır [2]. Gelecek 25 yıl içerisinde gerçekleşmesi beklenen küresel enerji ihtiyacındaki artışın, %70'ini elektrik enerjisi ihtiyacındaki artışın oluşturacağı öngörülmektedir [1]. Elektrik enerjisine erişilebilirliğin artması ve çeşitli sektörlerde, farklı enerji çeşitlerinin kullanımından, elektrik enerjisi kullanımına yönelik geçişler bu durumu tetikleyen temel unsurların başında gelmektedir [3]. Bunun yanı sıra, enerjinin kalitesi, sürdürülebilirliği ve güvenilirliği daha öncesinde hiç olmadıkları kadar yüksek öneme sahip konular haline gelmişlerdir. Diğer taraftan, yükselen çevresel ve ekonomik duyarlılıklar her alanda olduğu gibi, elektrik enerjisi sektöründe de çeşitli arayışlara ve değişimlere ihtiyaç doğurmaktadır. Dağıtık üretim, artan enerji ihtiyacına ve sektördeki arayışlara cevap verebilecek potansiyelde bir üretim şekli olarak öne çıkmış, güç sistemlerinde yerini almış ve kısa zamanda yaygınlaşmıştır [4-6].

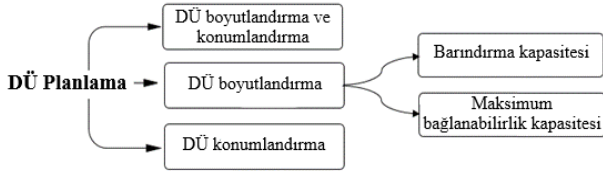
Dağıtık üretim, en genel tanımı ile doğrudan dağıtım şebekesine veya sayacı müşteri tarafına bağlı bir elektrik güç kaynağıdır [7]. Dağıtık üretim faaliyetleri, genellikle rüzgâr türbinleri, fotovoltaik (PV) sistemler, küçük içten yanmalı türbinler ve kombine ısı güç sistemleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir [8]. DÜ, Arz talep dengesinin desteklenmesi, iletim kayıplarının azaltılması, enerji çeşitliliğinin artırılması ve katılımcı piyasanın oluşmasına imkân sağlaması yönünde birçok fayda sunabilmektedir [9]. Diğer taraftan, geleneksel güç sistemleri, merkezi üretim altyapısına sahip ve tek yönlü güç akışına göre tasarlanan yapılardır. DÜ, geleneksel güç sistemleri altyapısına aykırı bir üretim şekli olması sebebiyle çeşitli sorunlara neden olabilmektedir [10]. Güç sistemlerinde herhangi bir bozucu etki oluşturmaksızın, böylesine yüksek bir fayda potansiyeline sahip olan dağıtık üretimden en üst düzeyde yararlanabilmek için, uygulama öncesinde uygun incelemelerin yapılması oldukça önemlidir. Literatürde DÜ planlaması olarak anılan bu süreç, bir dizi hedef ve çeşitli sistem kısıtlamalarının bir arada düşünülerek, bir sisteme dâhil edilmesi planlanan DÜ biriminin veya birimlerinin uygun kapasitesinin ve / veya konumunun incelenmesi sürecidir [13]. DÜ planlaması üzerine çok sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir [14–17]. Bu çalışmalar esas aldıkları kapsam, benimsedikleri yaklaşım ve kullandıkları yöntemlere göre birbirlerinden farklılıklar

göstermektedirler. DÜ planlama üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda esas alınan kapsamlar değerlendirildiğinde, en geniş literatürün, en uygun DÜ boyutlandırma ve konumlandırma çalışmalarına ait olduğu görülmektedir. Bu çalışmalara ait güncel bir derleme Prakas ve Khatod tarafından [18]'de sunulmuştur. Boyutlandırma ve konumlandırma, DÜ katılımlar açısından iki önemli hususu ifade etmektedir. Bu iki hususun ayrı ayrı, en uygun DÜ boyutlandırma [19] ve en uygun DÜ konumlandırma [20] olarak incelendiği çalışmaların sayıları da oldukça fazladır. DÜ planlama çalışmaları, esas alınan kapsamın hangi amaca göre değerlendirildiğine, yapılan değerlendirmelerde hangi kısıtların dikkate alındığına ve çalışmada benimsenen yaklaşıma göre özgünlük taşımaktadır. Benimsenen yaklaşım ile ele alınan kapsam, sisteme dâhil edilebilecek en yüksek DÜ kapasitesinin belirlenmesi, sistem kayıplarının en aza indirilmesi, enerji maliyetlerinin azaltılması ve çeşitli güvenilirlik indisleri üzerinden sistem güvenilirliğinin en üst düzeye çıkarılması gibi amaçlara göre değerlendirilir. Yapılan değerlendirmeler sonrasında elde edilen sonuçların sistem gerilim kararlılığının yüklenilebilirliği, sistem bileşenlerinin ısı kapasiteleri, mevzuatlarca belirlenen güç kalitesi indisleri ve yatırımın bütçe sınırları gibi teknik veya ekonomik kısıtlar açısından uygunluğu incelenir. DÜ planlama çalışmalarında benimsenen yaklaşımlar, bir veya birkaç amacın, tek veya birden fazla kısıta göre değerlendirilmesine yönelik olabilir. DÜ planlama çalışmalarında benimsenen yaklaşımlara göre mevcut literatürün tasnif edildiği güncel taramalara [14, 18, 21] kaynaklarından erişilebilir.

DÜ planlama çalışmalarını birbirinden farklı kılan bir diğer özgün değer ise çalışmalarda faydalanılan çözüm yöntemleridir. Bazı çalışmalarda tek bir amaç ile tek bir kısıt arasındaki ilişki, analitik yöntemler yardımıyla, matematiksel bir model üzerinden kurulabilmiştir. Bazı çalışmalarda ise birden fazla amaç, birden fazla kısıta göre değerlendirilmektedir. Bu tür çalışmalarda en uygun çözümün elde edilebilmesi amacı ile çeşitli optimizasyon algoritmalarından faydalanılır. Analitik yöntemler, yapay zeka yöntemleri, sezgi üstü algoritmalar, optimizasyon algoritmaları ve bunlardan iki veya daha fazlasının beraber kullanıldığı melez uygulamalar DÜ planlama çalışmalarında faydalanılan yöntemlerden bazılarına örnek olarak gösterilebilir. DÜ planlama çalışmalarında, kullanılan çözüm yöntemleri ile alakalı güncel ve kapsamlı bir taksonomi [16] ile verilmiştir.

Sorunsuz bir şekilde çalışmakta olan bir güç sistemine, dağıtım veya alt iletim seviyesinde herhangi bir noktadan belirli bir kapasitede üretimin dâhil edilmesi, ilgili nokta ve etrafında gerilimlerin yükselmesine neden olur [22, 23]. DÜ katılım sonrasında güç sistemi içerisinde oluşan gerilim artışları, sisteme dâhil edilen üreticinin kapasitesi ve sisteme bağlanılan noktanın kısa devre gücü ile doğrudan ilişkilidir. Güç sistemi bileşenlerini ve sisteme bağlı tüketicileri, güç sistemlerinde oluşabilecek gerilim dalgalanmalarından korumak amacıyla üst ve alt gerilim değerleri ile tanımlı

işletme koşulları bulunmaktadır [24, 25]. Bu durum göz önünde bulundurulmaksızın gerçekleştirilen üretim katılımları, sistem içerisindeki gerilimleri, üst gerilim sınırının ötesine taşıyarak sistem gerilimlerinin yükselmesine (Voltage Swell) ve bunun sonucu olarak aşırı gerilim sorunlarının yaşanmasına neden olabilir. Aşırı gerilimler, DÜ planlaması açısından dikkate alınması gereken en önemli hususlardan biridir. Aşırı gerilim sorunları oluşturmaksızın, sistem içerisindeki bir noktadan, sisteme dâhil edilebilecek en yüksek üretim, o noktanın maksimum bağlanabilirlik kapasitesini ifade eder [26]. Bu noktada, literatürde maksimum bağlanabilirlik kapasitesine yakın bir kavram olarak yer alan ve çoğu zaman terminoloji açısından karışıklığa yol açan barındırma kapasitesi (Hosting capacity) tanımının verilmesi önemlidir. Barındırma kapasitesi, gerilimin yanı sıra diğer sistem kısıtlarının da dikkate alınması ile sistem içerisindeki bir noktaya özgü olarak belirlenen en uygun kapasiteye karşılık gelmektedir [8, 27–30]. Maksimum bağlanabilirlik kapasitesi, güç sistemine ve üreticiye ilişkin karakteristik değerlerden yararlanılarak analitik yöntemler yoluyla elde edilmiş matematiksel modeller üzerinden hesaplanabilmektedir. Barındırma kapasitesi ise bir optimizasyon algoritması yardımıyla elde edilen en uygun değere karşılık gelmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, maksimum bağlanabilirlik kapasitesi, barındırma kapasitesinin belirlenmesine yönelik oluşturulan algoritma içerisinde yer alabilecek bir işlem adımı niteliğindedir. DÜ planlama çalışmalarında esas alınan kapsamlar üzerinden hiyerarşik bir görsel Şekil 1 ile verilmiştir.



Şekil 1. Ana başlıklarıyla DÜ planlama
(Main titles in DG planning)

Maksimum bağlanabilirlik kapasitesinin hesabına yönelik üç farklı matematiksel model literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu matematiksel modeller, kabul ettikleri varsayımlar ve ihmaller neticesinde birbirlerinden farklılık göstermektedirler. Bu çalışmada, maksimum bağlanabilirlik kapasitesine ilişkin mevcut matematiksel modellerin incelenmesi ve diğer çalışmaların temelinde esas aldıkları varsayımları ve ihmalleri kabul etmeksizin geliştirilen yeni bir matematiksel modelin önermesi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada, alternatiflerine oranla daha kabul edilebilir varsayımlar ve ihmaller esas alınarak geliştirilen yeni bir matematiksel modelin önermesi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, diğer çalışmalardan farklı olarak, çalışma kapsamında Thevenin eşdeğer devre modelinden yararlanılmıştır. Çalışma, DÜ planlamasında kullanılabilecek alternatif bir yöntem uygulamasını ve daha tutarlı bir matematiksel model önerisini içerdiği yönüyle literatüre katkıda bulunmaktadır.

Önerilen matematiksel modelin tutarlılığını sınamak amacıyla, bir test sistemi üzerinden farklı durum analizleri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar alternatif matematiksel modellerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar önerilen matematiksel modelin alternatiflerine göre mutlak üstünlükte olduğunu ortaya koymuştur. Bunun yanı sıra, önerilen matematiksel model, tüm bağlantı koşullarını kapsayan bir geçerliliğe sahip olması yönüyle, DÜ planlama çalışmalarında başvurulabilecek genel bir ifade sunabilmektedir.

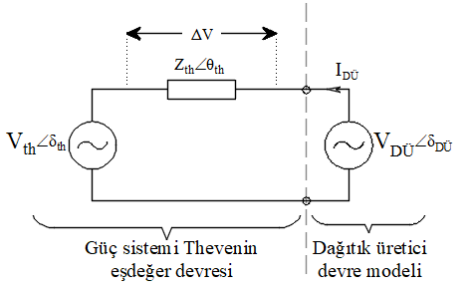
2. TEORİK METOD (THEORETICAL METHOD)

Güç sistemleri değişken doğaları gereği oldukça dinamik ve doğrusal olmayan karakterde davranışa sahiptirler. Değişen yük koşulları ve sistemi oluşturan aktif ve pasif bileşenlerin bu değişimlere cevabı detaylı incelemeler neticesinde kestirilebilmektedir. Bu durum DÜ planlama çalışmaları açısından çok fazla belirsizlik içermektedir. Bu belirsizliklerden kaçınmak amacıyla, güç sistemlerinin kararlı halleri için özel bir durumun belirlenmesi ve gerçekleştirilecek çalışmaların bu durum üzerinden yürütülmesi, elde edilecek sonuçların yorumlanabilmesi açısından uygun bir yaklaşım olacaktır. Bir önceki bölümde bahsedildiği üzere, DÜ katılımlar sonrasında sistem gerilimlerinin izin verilen sınırların üzerine çıkması ve bunun neticesinde aşırı gerilim sorunlarının yaşanması söz konusu olabilir. Dolayısıyla, DÜ planlama çalışmaları, aşırı gerilim sorunları açısından oldukça dikkatli bir şekilde gerçekleştirilmelidir. Güç sistemlerinde aşırı gerilimler için en elverişli durumun tespiti yapılarak, DÜ planlama çalışmaları için bir en kötü senaryo tanımı yapılabilir. Gerek literatürdeki çalışmalarda, gerekse de sistem işletmecileri tarafından gerçekleştirilen incelemelerde en kötü sistem senaryosu olarak sistemin yüksüz durumdaki kararlı hali dikkate alınmaktadır [31-38]. Güç sistemi içerisindeki yüklerin, sistemden çektikleri yük akımları, akış yönü doğrultusunda, gerilimlerin düşmesine neden olurlar. Dolayısıyla, yüksüz koşulda kararlı hal durumundaki bir sistemde, sistem içerisinde bütün noktalar alabilecekleri en yüksek gerilim değerini alırlar. Bir güç sistemi için yüksüz bir durumun gerçekleşmesi oldukça teorik bir yaklaşımdır. Ancak, yüksüz koşul dikkate alınarak belirlenen maksimum bağlanabilirlik kapasitesindeki bir üretici, sistemin normal çalışma koşullarında aşırı gerilim sorunları oluşturmaksızın sistemde faaliyet gösterebilir.

Dağıtık üreticiler, güç sistemlerine, çoğunlukla havai iletkenlerden oluşan radyal yapıdaki dağıtım bölgelerinden bağlanmaktadır. Dolayısıyla incelenecek güç sisteminde, havai iletken hatların düşük paralel kapasitelerinin ihmal edilmesi kabul edilebilir bir yaklaşım olacaktır. Literatürde birçok çalışmada ön kabul olarak esas alınan bu yaklaşım, çalışılacak güç sisteminin doğrusal bir modelinin oluşturulabilmesi açısından önemlidir [32 - 38]. Thevenin teoremi, farklı kaynaklardan oluşan doğrusal iki uçlu bir devrenin tek bir gerilim kaynağı ve bu kaynağa seri bağlı bir empedans ile modellenebileceği savını ve bunun yöntemini ifade etmektedir. Güç sistemleri, uygun koşullar altında

çeşitli yaklaşımlar üzerinden yorumlanarak, büyük, değişken ve çok uçlu bir yapıdan, doğrusal ve iki uçlu bir devreye indirgenebilirler. Böylece Thevenin teoremi kullanılarak, oldukça basit olan Thevenin eşdeğer devresi üzerinden çeşitli çalışmalar kolayca gerçekleştirilebilir.

Çalışmada, esas alınan en kötü senaryo ile sistemdeki yüklerin neden oldukları sürekli değişkenliğin ortadan kaldırılması ve belirli bir kararlı hal durumunun belirlenmesi yoluyla Thevenin teoremine uygun doğrusal özellikte bir sistem durumunun elde edilmesi amaçlanmıştır. DÜ'lerin güç sistemine radyal yapıdaki dağıtım sistemlerinden dahil edilecekleri bağlantı noktası, Thevenin eşdeğer devre modellemesi için esas alınacak iki uca karşılık gelmektedir. Bu bağlantı noktasına ait kısa devre gücü ve açık devre gerilimi üzerinden, güç sisteminin Thevenin eşdeğer devre modeli bileşenleri tanımlanabilir [39-41].



Şekil 2. Güç sistemine ait Thevenin eşdeğer devre modeli (Thevenin's equivalent of power system)

Bir güç sisteminin DÜ bağlantı noktasına göre Thevenin eşdeğer devre modeli Şekil 2'de verilmiştir. Oluşturulan devre modelinde Z_{th} , bağlantı noktasına ait Thevenin eşdeğer empedansını ve θ_{th} ise bu empedansa ait faz açısını ifade etmektedir. Bağlantı noktasına göre Thevenin eşdeğer devre gerilimi V_{th} , dağıtık üreticinin gerilimi ise $V_{DÜ}$ gösterilmiştir ve bu gerilimlere ait faz açıları sırasıyla δ_{th} ve $\delta_{DÜ}$ ile verilmiştir. $I_{DÜ}$ dağıtık üreticiden sisteme sağlanan akıma karşılık gelmektedir ve ΔV ise bu akımın Z_{th} üzerinde oluşturduğu gerilimi ifade etmektedir. Oluşturulan sistem modeli esas alınarak, verilen parametreler üzerinden sisteme bağlı dağıtık üreticinin gücü tanımlanabilir.

$$V_{DÜ} - V_{th} = I_{DÜ} \cdot Z_{th} \quad (1)$$

$$I_{DÜ} = \frac{(V_{DÜ} - V_{th})}{Z_{th}} \quad (2)$$

$$I_{DÜ} = |V_{DÜ}| |Y| \angle \delta_{DÜ} - \theta_{th} - |V_{th}| |Y| \angle \delta_{th} - \theta_{th} \quad (3)$$

$$S_{DÜ} = V_{DÜ} \cdot I_{DÜ}^* \quad (4)$$

$$S_{DÜ} = |V_{DÜ}|^2 |Y| \angle \theta - |V_{DÜ}| |V_{th}| |Y| \angle \theta + \delta_{DÜ} - \delta_{th} \quad (5)$$

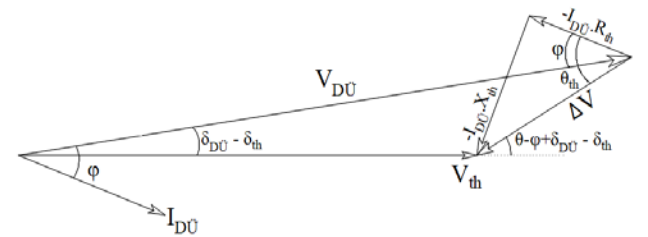
$$S_{DÜ} = P_{DÜ} + jQ_{DÜ} \quad (6)$$

$$P_{DÜ} = |V_{DÜ}|^2 |Y| \cos \theta_{th} - |V_{DÜ}| |V_{th}| |Y| \cos(\theta_{th} + \delta_{DÜ} - \delta_{th}) \quad (7)$$

$$Q_{DÜ} = |V_{DÜ}|^2 |Y| \sin \theta_{th} - |V_{DÜ}| |V_{th}| |Y| \sin(\theta_{th} + \delta_{DÜ} - \delta_{th}) \quad (8)$$

Yukarıda verilen eşitlikler (Eş. 1-Eş. 8) içerisinde Y Thevenin eşdeğer empedansının admitans karşılığıdır. $S_{DÜ}$, $P_{DÜ}$ ve $Q_{DÜ}$ gösterimler, sırasıyla dağıtık üreticinin görünür, aktif ve reaktif güç değerlerini temsil eder.

En kötü senaryo koşulları altında bir güç sisteminin kararlı hal durumu için, sistemde herhangi bir yük veya üretim bulunmadığından sistem noktaları arasında herhangi bir güç akışından bahsedilemez. Dolayısıyla, sistem içerisindeki her noktanın gerilimi, sistemin anma gerilim değerine eşit olur ve bağlantı noktasına ait Thevenin eşdeğer gerilimi, sistemin anma gerilimi olarak alınabilir. Thevenin eşdeğer empedansı ve bu empedansa ait faz açısı, bağlantı noktasının kısa devre gücü bilgisi üzerinden elde edilebilir. Sisteme dâhil edilebilecek en yüksek kapasitenin hesaplanabilmesi için bağlantı noktası gerilimini olabildiğince yüksek tutmak gerekmektedir. Bu nedenle bağlantı noktası geriliminin genliği sistem için tanımlanan üst gerilim sınırı değerine eşit olarak alınabilir. Tüm bu değerlendirmeler dikkate alındığında, eşitlik Eş. 7 ve Eş. 8 ile verilen bağlantılar içerisinde, gerilim açıları dışındaki tüm değişkenlerin belirli bir değere karşılık geldiği anlaşılmaktadır. Literatürdeki farklı çalışmalarca önerilmiş olan matematiksel modellerin türetilmesi aşamasında, bilinmeyen açı değerleri ihmal edilmiştir. Bu çalışmada ise, bu açı değerlerinin, bilinen parametreler üzerinden tanımlanması yoluna gidilmiştir. Bu amaçla, Thevenin eşdeğer devre modeli için oluşturulan fazörel diyagramdan faydalanılmıştır. Şekil 3 ile verilen fazörel diyagram incelendiğinde, Thevenin eşdeğer geriliminin, bağlantı noktası gerilimi ve bu iki gerilim arasındaki gerilim düşümü ile fazörel bir üçgen oluşturduğu görülebilmektedir. Fazörel üçgen üzerinde, fazör genlikleri ve açıları yardımıyla sinüs teoremi uygulanarak bilinmeyen faz açıları, bilinen diğer sistem değişkenleri ile ilişkilendirilebilir.



Şekil 3. Thevenin eşdeğer devre modeli için oluşturulan fazör diyagramı (Phasor diagram for the Thevenin's equivalent circuit)

$$\delta_{DÜ} - \delta_{th} = \sin^{-1} \left[\frac{|V_{DÜ}|}{|V_{th}|} \sin(\theta_{th} + \varphi) \right] - (\theta_{th} + \varphi) \quad (9)$$

Eş. 9 içerisindeki φ açısı, fazör diyagramından da görüleceği üzere bağlantı noktasından sisteme sağlanan akım ile bağlantı noktası gerilimi fazörleri arasındaki açıya karşılık gelmektedir. Uygulamada genellikle güç açısı kullanılacağından dolayı, eşitlik içerisinde bu açı değerinin negatif karşılığını kullanmak daha doğru olacaktır. Eş. 9 ile

elde edilen bağıntı Eş. 7 ve Eş. 8 içerisinde kullanıldığında aşağıdaki bağıntılar elde edilecektir.

$$P_{DÜ} = |V_{DÜ}|^2 |Y| \cos \theta_{th} - |V_{DÜ}| |V_{th}| |Y| \cos \left\{ \sin^{-1} \left(\frac{|V_{DÜ}|}{|V_{th}|} \sin(\theta_{th} + \varphi) \right) - \varphi \right\} \quad (10)$$

$$Q_{DÜ} = |V_{DÜ}|^2 |Y| \sin \theta_{th} - |V_{DÜ}| |V_{th}| |Y| \sin \left\{ \sin^{-1} \left(\frac{|V_{DÜ}|}{|V_{th}|} \sin(\theta_{th} + \varphi) \right) - \varphi \right\} \quad (11)$$

Yüksüz koşul altındaki bir güç sisteminin kararlı hal durumunda, tek bir barada gerçekleşen kısa devre durumu düşünüldüğünde; sistemdeki tüm senkron generatörlere ait iç gerilimin anma değerinde olduğu durum için, tüm generatörlerin tek bir noktadan sisteme bağlandığı kabul edilebilir [42]. Bu durumda gerçekleşen kısa devre akımı, sadece söz konusu bara ile anma gerilimdeki senkron generatör noktası arasındaki akım yolu üzerinden olacaktır. Kısa devre akımı ve sistem anma gerilimi üzerinden baraya ait eşdeğer (Thevenin) admitans elde edilebilir. Per unit tabanında çalışıldığında, baranın kısa devre akımı ve eşdeğer admitansı aynı genlik ve açıda, bara kısa devre gücü ise bu değerlere genlik olarak eşit, açısal olarak eşlenik değerdedir. Güç sistemleri içerisinde, baralar kısa devre güçleri ile anılmaktadır. Dolayısıyla pratik bir kullanım elde edilmesi amacıyla, Y admitansı yerine bağlantı noktası kısa devre gücü (S_{KD}) yazılabilir.

Aynı şekilde, θ_{th} faz açısı, bağlantı noktası kısa devre gücü faz açısı olarak alınabilir. Daha sade bir sunum oluşturabilmek amacıyla, eşitliklerin ikinci terimlerinde yer alan trigonometrik ifade içerisindeki açısal değer, α gösterimi ile temsil edilmiştir. Bu açı, bağlantı noktası ile Thevenin eşdeğer gerilimi arasındaki gerilim düşümünün faz açısına karşılık gelmektedir. Bu bilgiler ışığında, Eş. 10 ve Eş. 11 tekrar düzenlendiğinde aşağıdaki bağıntılar elde edilir (Eş. 12, Eş. 13, Eş. 14, Eş. 15).

$$\alpha = \sin^{-1}(|V_{DÜ}| \sin(\theta - \varphi)) + \varphi \quad (12)$$

$$P_{DÜ} = |S_{KD}| |V_{DÜ}| (|V_{DÜ}| \cos \theta_{th} - \cos \alpha) \quad (13)$$

$$Q_{DÜ} = |S_{KD}| |V_{DÜ}| (|V_{DÜ}| \sin \theta_{th} - \sin \alpha) \quad (14)$$

$$|S_{DÜ}| = \frac{|S_{KD}| |V_{DÜ}|}{\cos \varphi} (|V_{DÜ}| \cos \theta_{th} - \cos \alpha) \quad (15)$$

Eş. 13 ile verilen matematiksel model, çalışmanın maksimum bağlanabilirlik kapasitesi hesaplamasına ilişkin literatüre katkısıdır. Mevcut literatür içerisinde yaygın olarak kullanılmakta olan 3 farklı matematiksel model mevcuttur. Bu matematiksel modeller, aşağıdaki eşitlikler ile verilmiştir (Eş. 16, Eş. 17, Eş. 18).

$$|S_{DÜ}| = |\Delta V| |V_{DÜ}| |S_{KD}| \cos(\theta_{th}) \quad (16)$$

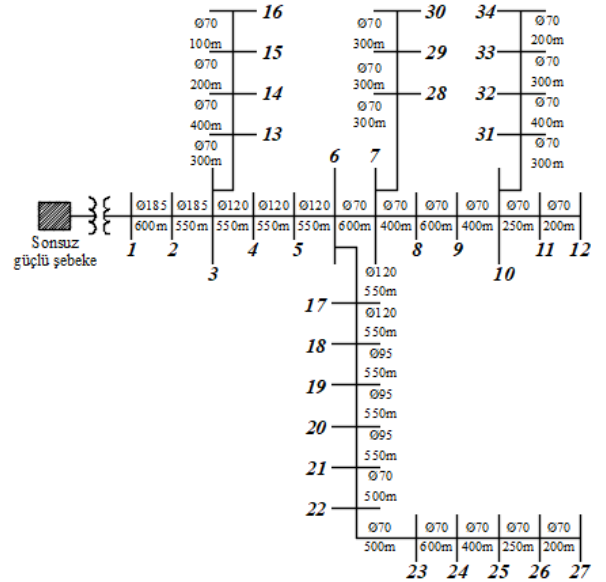
$$|S_{DÜ}| = \frac{|S_{KD}| (|V_{DÜ}| - |V_{th}|)}{|V_{th}| \cos(\theta_{th} - \varphi)} \quad (17)$$

$$|S_{DÜ}| = \frac{|V_{DÜ}| |S_{KD}| (|V_{DÜ}| - |V_{th}|)}{\cos(\theta_{th} - \varphi)} \quad (18)$$

Eş. 14 ile verilen matematiksel model, maksimum bağlanabilirlik kapasitesi hesabında, dağıtık üreticilerin güç sistemlerine birim güç faktöründe bağlandığı kabulü esas alınarak türetilmiştir. Bunun yanı sıra, bağlantı noktası gerilimi ile Thevenin eşdeğer gerilimi fazörleri arasındaki faz açısı ihmal edilmiştir [32]. Eş. 15'te verilen matematiksel model, kaynakçada [33-37] numaraları ile verilen çalışmalar bünyesinde gerçekleştirilen DÜ planlama incelemelerinde kullanılmıştır. Bu eşitlik, dağıtık üreticilerin güç faktörünü bir değişken olarak kabul etmektedir. Ancak sistem içerisindeki kayıplar ve bir önceki matematiksel modelde olduğu gibi gerilimler arasındaki faz açısı farkı ihmal edilmiştir. Maksimum bağlanabilirlik kapasitesine ilişkin Literatürde en yaygın kullanıma sahip olan Eş. 17, [38] kaynakça numaralı çalışmada önerilmiştir. Eşitlik, dağıtık üretime ait güç faktörünü bir değişken olarak hesaplamalara katıyor olmasının yanı sıra sistem içerisindeki güç kayıplarını da dikkate almaktadır. Ancak literatürdeki tüm matematiksel modellerde olduğu gibi gerilimler arasındaki faz farkını ihmal etmektedir.

3. DURUM ANALİZLERİ (CASE STUDIES)

Önerilen matematiksel modelin tutarlılığının ve işlevselliğinin incelenmesi ve diğer matematiksel modeller ile mukayese edilebilmesi amacıyla 34 Baralı radyal bir güç sistemi üzerinde çeşitli katılım koşullarının analizi yapılmıştır. Seçilen güç sistemi, üç fazlı havai hatlardan oluşmaktadır ve anma gerilimi 11 kV değerindedir [43]. Güç sistemine ait tek hat şeması Şekil 4 ile verilmiştir.



Şekil 4. 34 Baralı radyal güç sistemi tek hat şeması (One line diagram for 34 Bus radial power system)

Önerilen matematiksel modelin farklı katılım koşullarındaki işlevselliğini incelemek amacıyla, güç sistemi içerisinde iki

farklı bağlantı noktası seçilmiştir. Bu bağlantı noktalarından birisi, sistem içerisindeki radyal kollardan birisinin en son noktasında yer alan, düşük kısa devre gücüne sahip zayıf bir bağlantı noktası olan Bara – 27 olarak seçilmiştir. Diğer bağlantı noktası ise, sonsuz güçlü şebeke noktasına daha yakın yer almakta olan ve dolayısıyla Bara -27'ye göre daha yüksek kısa devre gücünde bir bağlantı noktasına karşılık gelen 5 numaralı baradır. Bunun yanı sıra, seçilen her bir bağlantı noktası için maksimum bağlanabilirlik kapasitesi hesaplamaları çeşitli güç faktörü değerleri ile yinelenerek incelenen durum senaryolarının sayısı artırılmıştır. Seçilen güç sistemi için üst gerilim sınırı 1,1 pu olarak belirlenmiştir. Verilen güç sistemi, güç analizi çalışmalarında güçlü bir yazılım olarak öne çıkan ve literatürde sıklıkla tercih edilen bir yazılım olan ETAP ortamında modellenmiştir. Önerilen matematiksel model ile gerçekleştirilecek hesaplamalarda, ihtiyaç duyulan bağlantı noktasının kısa devre gücü ve açık devre gerilimi gibi değişkenlerin belirlenmesi aşamasında, güç sisteminin kısa devre analizinin ve güç akış analizinin gerçekleştirilmesi gerekir. Uygulamada, güç sistemi içerisindeki bir noktaya ait kısa devre gücü ve açık devre gerilimi bilgisi sistem işletmecilerinden kolaylıkla edinilebilmektedir. Durum analizlerinde, bu değerler, ETAP ortamında oluşturulan güç sistemi modeli üzerinden yazılımın sağladığı analizler neticesinde elde edilmiştir.

Belirlenen her bir durum senaryosu için literatürdeki matematiksel modeller ve önerilen matematiksel model kullanılarak maksimum bağlanabilirlik kapasitesi hesaplaması gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalar sonrasında elde edilen kapasitede bir üretici, ait olduğu durum senaryosunda belirtilmiş olan katılım koşullarına uygun bir şekilde, ilgili bağlantı noktasından sisteme dâhil edilmiş ve sistemin güç akışı analizi çalışılmıştır. Güç akışı analizi sonrasında elde edilen sonuçlar incelenerek, bağlantı noktası geriliminin, hesaplamalarda esas alınan gerilim değerine eşit olup olmadığı irdelenmiştir. Böylece, matematiksel modeller ile hesaplanan kapasitelerin tutarlılıkları incelenebilmiştir. Çeşitli güç faktörlerinde katılımlar için Bara – 27'ye ait elde edilen maksimum bağlanabilirlik kapasitesi değerleri Tablo 1 ile verilmiştir.

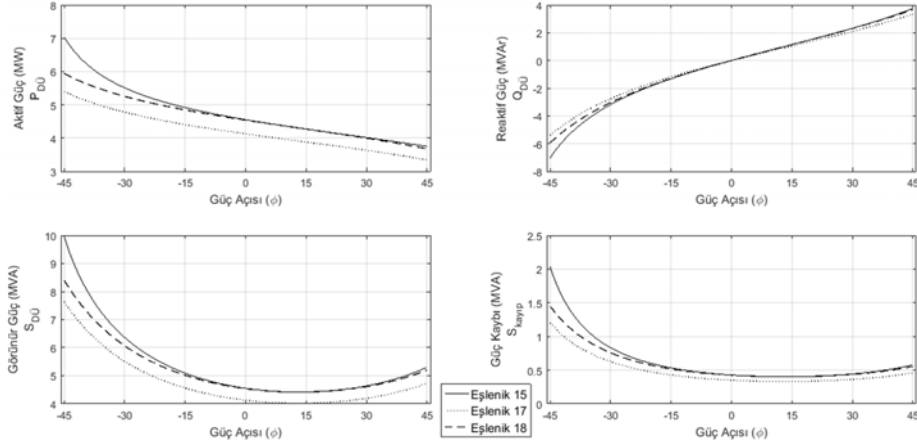
Tablodan görüleceği üzere tüm durum senaryoları için en yüksek kapasite değeri önerilen matematiksel model ile elde edilebilmiştir. Önerilen matematiksel modelin verdiği sonuçlara en yakın değeri, Eş. 18 verebilmektedir. Çalışılan durum senaryoları içerisinde, Eş. 15 ile Eş. 18 sonuçları arasındaki en yüksek fark 0,8 ileri güç faktörü ile katılımda gerçekleşmiştir ve Eş. 15 maksimum bağlanabilirlik kapasitesini yaklaşık %8,5 kadar daha yüksek bir değerde hesaplayabilmiştir. Önerilen matematiksel model, Eş. 18'den farklı olarak, Thevenin eşdeğer gerilimi ile bağlantı noktası gerilimi arasındaki faz açısını dikkate almaktadır. Bu iki gerilim arasındaki faz açısı arttıkça önerilen matematiksel model ile Eş. 18 kullanılarak elde edilen sonuçlar arasındaki fark artmaktadır. Eş. 16 ile sadece birim güç faktörü değerinde katılımlar incelenebildiğinden dolayı, birim güç faktöründen farklı değerlerde katılımlar için bu eşitliğin kullanılması uygun değildir. Eş. 17, DÜ katılım sonrasında, sistemde oluşacak güç kayıplarını dikkate almıyor olması sebebiyle, Eş. 15 ve Eş. 18 ile elde edilen değerlerden eksik kalmıştır. Ayrıca, hesaplamalarda dikkate alınan dağıtık üretici gerilimi ile güç akış analizleri sonrasında elde edilen bağlantı noktası gerilimi, sadece Eş. 15 ile elde edilen değerlerde birbirlerini sağlamaktadır.

Şekil. 5'te güç bileşenlerinin ve sistemde oluşan güç kaybının, güç açısı değerine göre değişimleri, her bir matematiksel model için çizdirilmiştir. Güç açısı sıfır değerinden uzaklaştıkça, matematiksel modellerden alınan sonuçlar arasındaki fark belirginleşmektedir. Eş. 15, 17 ve 18'in yorumlanması ile sistem kayıplarını ifade eden bağıntılar elde edilmiştir. Elde edilen bu bağıntılar üzerinden, incelenen her bir durum analizine göre sistemde oluşacak kayıplar hesaplanmıştır. Şekil 5'te, güç kayıpları için elde edilen eğriler incelendiğinde, Eş. 17 ve Eş. 18'in özellikle düşük güç faktörlerinde daha yüksek hata vereceği anlaşılmaktadır.

Önerilen matematiksel modelin tutarlılığını test etmek amacıyla Bara – 27 için gerçekleştirilen incelemeler, Bara – 5 için tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 2 ile verilmiştir.

Tablo 1 Bara – 27 için farklı senaryolara göre hesaplanan maksimum bağlanabilirlik kapasitesi değerleri
(maximum permissible integration capacity calculated for Bus – 27 within the different scenarios)

DÜ güç faktörü (φ)		Bara – 27 için elde edilen maksimum bağlanabilirlik kapasitesi değerleri			
Bağ. Nok. Gerilimi		Eş. 15	Eş. 16	Eş. 17	Eş. 18
$\cos\varphi = 0,9$ (geri)	$S_{DÜ}$	4,5405 MVA	-	4,1174 MVA	4,5291 MVA
	$V'_{DÜ} = 1,1$ pu	1,1 pu	-	1,0914 pu	1,0998 pu
$\cos\varphi = 0,95$ (geri)	$S_{DÜ}$	4,4383 MVA	-	4,0333 MVA	4,4366 MVA
	$V'_{DÜ} = 1,1$ pu	1,1 pu	-	1,0916 pu	1,1 pu
$\cos\varphi = 1$	$S_{DÜ}$	4,5534 MVA	4,3025 MVA	4,1279 MVA	4,5407 MVA
	$V'_{DÜ} = 1,1$ pu	1,1 pu	1,0949 pu	1,0914 pu	1,0997 pu
$\cos\varphi = 0,9$ (ileri)	$S_{DÜ}$	5,8956 MVA	-	5,1763 MVA	5,6939 MVA
	$V'_{DÜ} = 1,1$ pu	1,1 pu	-	1,0890 pu	1,0970 pu
$\varphi = 0,8$ (ileri)	$S_{DÜ}$	7,4748 MVA	-	6,2656 MVA	6,8921 MVA
	$V'_{DÜ} = 1,1$ pu	1,1 pu	-	1,0860 pu	1,0933 pu



Şekil 5. Güç açısı değerine göre Eş. 15, Eş. 17 ve Eş. 18 üzerinden elde edilen farklı güç değerlerinin değişimleri (Variations of different power values obtained from Equal 15, Equal 17 and Equal 18 according to the power angle value)

Tablo 2 Bara – 5 için farklı senaryolara göre hesaplanan maksimum bağlanabilirlik kapasitesi değerleri (maximum permissible integration capacity calculated for Bus – 5 within the different scenarios)

DÜ güç faktörü (φ)		Bara – 5 için elde edilen maksimum bağlanabilirlik kapasitesi değerleri			
Bağ. Nok. Gerilimi		Eş. 15	Eş. 16	Eş. 17	Eş. 18
$\cos\varphi = 0,9$ (geri) $V_{DÜ} = 1,1$ pu	$S_{DÜ}$	22,8565 MVA	N/A	20,7653 MVA	20,8419 MVA
	$V'_{DÜ}$	1,1 pu	N/A	1,0916 pu	1,0999 pu
$\cos\varphi = 0,95$ (geri) $V_{DÜ} = 1,1$ pu	$S_{DÜ}$	22,7027 MVA	N/A	20,6384 MVA	22,7022 MVA
	$V'_{DÜ}$	1,1 pu	N/A	1,0916 pu	1,1 pu
$\cos\varphi = 1$ $V_{DÜ} = 1,1$ pu	$S_{DÜ}$	24,2130 MVA	21,4099 MVA	21,8750 MVA	24,0622 MVA
	$V'_{DÜ}$	1,1 pu	1,0893 pu	1,0911 pu	1,0994 pu
$\cos\varphi = 0,9$ (ileri) $V_{DÜ} = 1,1$ pu	$S_{DÜ}$	34,0629 MVA	N/A	29,2986 MVA	32,2284 MVA
	$V'_{DÜ}$	1,1 pu	N/A	1,0876 pu	1,0953 pu
$\varphi = 0,8$ (ileri) $V_{DÜ} = 1,1$ pu	$S_{DÜ}$	46,9579 MVA	N/A	37,1499 MVA	40,8649 MVA
	$V'_{DÜ}$	1,1 pu	N/A	1,0828 pu	1,0895 pu

Görüldüğü üzere, tüm katılım koşulları için en yüksek bağlantı kapasitesi önerilen matematiksel model ile elde edilmiştir. Elde edilen bağlantı kapasitelerinin tutarlılığı incelendiğinde, sadece önerilen matematiksel model ile elde edilen kapasiteler, hesaplamalarda dikkate alınan gerilim değerlerini verebilmektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, belirli bir noktadan radyal bir dağıtım sistemine dâhil edilmesi planlanan DÜ ünitesinin maksimum bağlanabilirlik kapasitesi hesabı için yeni bir matematiksel model önerilmiştir. Yapılan çalışmada benimsenen yaklaşım, sisteme dâhil edilmesi planlanan dağıtık üreticinin, sistemde aşırı gerilim sorunlarına yol açmayacak en yüksek kapasitesinin tanımlanabilmesi esası üzerine belirlenmiştir. Kullanılan yöntemin temelinde, literatürde aynı amaca yönelik kullanılmakta olan matematiksel

modellerin esas aldıkları çeşitli varsayımlardan ve ihmallerden kaçınılarak daha tutarlı ve işlevsel bir matematiksel modelin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Tüm bu amaç ve kapsama uygun olduğu düşünülen bir en kötü senaryo üzerinden çeşitli yorumlar neticesinde güç sistemleri için bir Thevenin eşdeğer modeli oluşturulmuş ve bu eşdeğer modelin değişkenleri üzerinden yeni bir matematiksel model elde edilmiştir. Önerilen matematiksel model, örnek bir test sistemi üzerinden çeşitli durum analizlerine tabi tutularak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar literatürdeki matematiksel modellerden elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Bağlantı koşulları ve bağlantı noktası özellikleri fark etmeksizin, tüm durum analizlerinden en yüksek performansın önerilen matematiksel model ile elde edildiği görülmüştür. Özellikle, dağıtık üretici güç açısının mutlak değeri arttıkça, önerilen matematiksel modelin alternatifleri karşısındaki üstünlüğü daha net bir şekilde

gözlemlenmiştir. Sistem içerisindeki dağıtık üreticilerin reaktif güç çıkışının kontrolü yoluyla, bağlantı noktası gerilimi kontrol edilebilmektedir. Literatürde bu yönde çalışmalara rastlamak mümkündür [44]. Güç sistemleri altyapılarının güçlenmesi ve kontrol tekniklerinin iyileştirilmesi ile güç sistemleri içerisinde bu tür faaliyetlerin artması beklenmektedir. Bu durumda, en yüksek kapasite ile reaktif güç desteğinin sağlanabilmesi amacıyla önerilen matematiksel modelden faydalanılabilir. Reaktif güç desteği ile gerilim kontrolü, oldukça hassas bir çalışmadır. Bu tür kontrol uygulamaları açısından tutarlılık oldukça önemlidir. Önerilen matematiksel modelin, yeterli tutarlılığın sağlanabilmesi açısından ilgi göreceği düşünülmektedir. Maksimum bağlanabilirlik kapasitesi, barındırma kapasitesi, en uygun konumlandırma veya boyutlandırma çalışmaları kapsamında oluşturulan optimizasyon algoritmalarında bir işlem adımı yer alabilmektedir. Bu işlem adımının, yüksek tutarlılıkta, daha işlevsel bir matematiksel model ile algoritmaya dâhil edilmesi, yapılacak çalışmanın doğruluğunu ve işlevselliğini artıracaktır.

Bu çalışmada, tek bir DÜ'nün güç sistemine katılımı irdelenmiştir. Güç sistemi içerisinde katılması planlanan DÜ'den başka DÜ'lerin bulunması durumu iki farklı yönüyle değerlendirilmesi gereken bir durumdur. Birincisi sonsuz güçlü bara olarak kabul edilen noktanın ötesinde, dağıtık üretici katılımına uygun özellikte bir noktadan sisteme katılım gösteren üreticilerin bulunması durumudur. Bu durumda dağıtık üreticilerin sistem içerisindeki baraların kısa devre güçleri üzerinde etkisi olacaktır. Sonsuz güçlü olarak kabul edilen bara, binlerce MVA değerindeki dağıtım baralarına karşılık gelmektedir. Dağıtık üreticilerin kapasitesi ise bu değerler karşısında oldukça küçük kalmaktadır. Dolayısıyla sonsuz güçlü bara olarak kabul edilebilecek dağıtım baralarının, kısa devre güçlerinin etkilenmesi için sisteme eklenen dağıtık üretici sayısının çokluğu önemlidir. DÜ planlamalarda sonsuz güçlü bara olarak referans alınabilecek noktaların kısa devre gücü bilgisi, sistem işletmecilerinden edinilen hazır bilgiler olması nedeniyle bu durum çalışmanın kapsamı dışında kalmaktadır. Diğer taraftan, eğer incelenen radyal yapı içerisinde, sisteme katılması planlanan DÜ dışında hâlihazırda faaliyet gösteren bir veya daha fazla dağıtık üretici bulunuyorsa, bu dağıtık üreticilerin bara kısa devre güçleri üzerindeki etkileri yanı sıra, sistem gerilimlerine de etkileri olacaktır.

Çalışma kapsamında, güç sistemine eklenecek dağıtık üreticinin maksimum izin verilebilir bağlantı kapasitesi hesaplanırken önerilen matematiksel model içerisindeki dağıtık üretici gerilimi, sisteme ait izin verilebilir üst gerilim sınırı değerinde seçilmektedir. İncelenen radyal yapı içerisinde herhangi bir dağıtık üreticinin bulunmaması durumunda, önerilen matematiksel model içerisinde üst gerilim sınırının kullanılması ile elde edilen kapasitede bir dağıtık üreticinin, bağlantı noktasında bu gerilim değerini verecek şekilde devreye katılım gösterdiği durum analizleri ile birlikte kanıtlanmıştır. İncelenen radyal yapı içerisinde birden fazla dağıtık üreticinin bulunması durumunda aynı

yaklaşım benimsenecek olursa, bağlantı noktasında daha yüksek gerilimler oluşacaktır. Dolayısıyla, bir dağıtık üreticinin veya birden fazla üreticilerin bulunduğu bir bölge için gerçekleştirilen dağıtık üretim planlaması için önerilen matematiksel modelin kullanılması uygun olmayacaktır. Gerçekleştirdiğimiz çalışma bu yönüyle geliştirilmeye açıktır. Gelecekteki çalışmalarda burada kullanılan yöntemlerden ve elde edilen bulgulardan faydalanarak, başka bir veya daha fazla dağıtık üreticinin bulunduğu duruma yönelik yeni bir matematiksel modelin veya yaklaşımın araştırılması üzerine yoğunlaşılabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. British Petroleum. BP Energy Outlook 2018 Edition. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook.html>. Erişim tarihi Eylül 07, 2018.
2. Enerdata Intelligence+Consulting. Global energy statistical yearbook 2016. <https://yearbook.enerdata.net/world-electricity-production-map-graph-and-data.html>. Erişim tarihi: Eylül 2, 2018.
3. Denholm, P. ve Short, W., An Evaluation of Utility System Impacts and Benefits of Optimally Dispatched Plug-In Hybrid Electric Vehicles, NREL Report, Rapor No: TP-620, Ekim 2006.
4. Liserre, M., Sauter, T., ve Hung, J.Y., Future energy systems: Integrating renewable energy into the smart power grid through industrial electronics, IEEE Ind. Electron. Mag., 4, 18–37, Mart 2010.
5. Yaşar, C., ve Özyön, S., Parçalı yakıt maliyeti fonksiyonlarına sahip çevresel ekonomik güç dağıtım problemlerinin çözümüne yeni bir yaklaşım. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 33(2), 541-556, 2018.
6. Kocaman, A. S., Pompaj depolamalı hibrid enerji sistemi optimizasyonu -Türkiye için vaka analizi. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 34(1), 53-68, 2019.
7. Ackermann, T., Andersson, G., Söder, L., Distributed generation a definition, Electr. Power Syst. Res., 57 (3), 195–204, 2001.
8. El-Khattam, W. ve Salama, M. M.. Distributed generation technologies, definitions and benefits, Electric Power Systems Research, 71 (2), 119–128, 2004.
9. Pepermans, G., Driesen, J., Haeseldonckx, D., Belmans, R., D'haeseleer, W., Distributed generation: definition, benefits and issues, Energy Policy, 33 (6), 787–798, 2005.
10. Bollen, M. ve Hassan, F., Integration of Distributed Generation in the Power System, John Wiley & Sons, 2011.
11. Sallam, A. A. ve Malik, O. P., Electric Distribution Systems, John Wiley & Sons, Inc., 2011.
12. Bin Humayd, A. S. ve Bhattacharya, K., Distribution system planning to accommodate distributed energy resources and PEVs, Electric Power Systems Research, 145, 1–11, 2017.

13. Dugan, R. C., McDermott, T. E., ve Ball, G. J., Planning for distributed generation, *IEEE Industry Applications Magazine*, 7 (2), 80–88, 2001.
14. Singh, B. ve Sharma, J., A review on distributed generation planning, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 529–544, 2017.
15. W. L. Theo, J. S. Lim, W. S. Ho, H. Hashim, C. T. Lee, Review of distributed generation (DG) system planning and optimisation techniques: Comparison of numerical and mathematical modelling methods, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 67, 531–573, 2017.
16. Viral, R. ve Khatod, D. K., Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (7), 5146–5165, 2012.
17. Ehsan, A. ve Yang, Q., Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques, *Applied Energy*, 210, 44–59, 2018.
18. Prakash, P. ve Khatod, D. K., Optimal sizing and siting techniques for distributed generation in distribution systems: A review, *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, 57, 111–130, 2016.
19. Luna-Rubio, R., Trejo-Perea, M., Vargas-Vázquez, D., ve Ríos-Moreno, G. J., Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies, *Solar Energy*, 86 (4), 1077–1088, 2012.
20. Georgilakis, P. S. ve Hatziargyriou, N. D., Optimal Distributed Generation Placement in Power Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research, *IEEE Transactions on Power Systems*, 28 (3), 3420–3428, 2013.
21. Tan, W.S., Hassan, M. Y., Majid, M. S., ve Abdul Rahman, H., Optimal distributed renewable generation planning: A review of different approaches, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 626–645, 2013.
22. Vovos, P. N., Kiprakis, A. E., Wallace, A. R., Harrison, G. P., Centralized and Distributed Voltage Control: Impact on Distributed Generation Penetration, *IEEE Transactions on Power Systems*, 22 (1), 476–483, 2007.
23. Bollen, M. H. J., Yang, Y., ve Hassan, F., Integration of distributed generation in the power system - a power quality approach, 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 1–8, Eylül 2008.
24. T.C. Resmi Gazete, Elektrik piyasası dağıtım yönetmeliği. 28870, Ocak 01 2014.
25. T.C. Resmi Gazete, Elektrik şebeke yönetmeliği. 29013, Mayıs 28 2014.
26. Bhowmik, A., Maitra, A., Halpin, S. M., ve Schatz, J. E., Determination of allowable penetration levels of distributed generation resources based on harmonic limit considerations, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18 (2), 619–624, 2003.
27. Seuss, J., Reno, M. J., Broderick, R. J., Grijalva, S., Improving distribution network PV hosting capacity via smart inverter reactive power support, 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 1–5, Temmuz 2015.
28. Bollen, M. H. J., Rönnberg, K. S., Hosting Capacity of the Power Grid for Renewable Electricity Production and New Large Consumption Equipment, *Energies*, 10 (9), 1325, 2017.
29. Schwaegerl, C., Bollen, M. H. J., Karoui, K., ve Yagmur, A., Voltage control in distribution systems as a limitation of the hosting capacity for distributed energy resources, 18th International Conference And Exhibition on Electricity Distribution, CIRED, 6–9, 2005.
30. Etherden, N., Bollen, M. H. J., Increasing the hosting capacity of distribution networks by curtailment of renewable energy resources, *IEEE Trondheim PowerTech*, 1–7, Haziran 2011.
31. Mahmud M. A., Hossain M. J. ve Pota H. R., Worst case scenario for large distribution networks with distributed generation, 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 1–7, Temmuz 2011.
32. Altin M., Oguz E. U., Bizkevelci E., ve Simsek B., Distributed generation hosting capacity calculation of MV distribution feeders in Turkey, 2014 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, 1–7, Ekim 2014.
33. Deutsches Windenergie-Institut GmbH Tech-wise A/S, Wind Turbine Grid Connection and Interaction, 2001.
34. Yang N.C. ve Chen T.H., A review on evaluation of maximum permissible capacity of distributed generations connected to a smart grid, 2012 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 1589–1593, Temmuz 2012.
35. Ackermann T., *Wind Power in Power Systems*, John Wiley & Sons, Ltd , 2005.
36. Papathanassiou S. A. ve Hatziargyriou N. D., Technical requirements for the connection of dispersed generation to the grid, 2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings, 749–754, Temmuz 2001.
37. Papathanassiou S. A., A technical evaluation framework for the connection of DG to the distribution network, *Electr. Power Syst. Res.*, 77 (1), 24–34, 2007.
38. Jothibasu S. ve Santoso S., Sensitivity analysis of photovoltaic hosting capacity of distribution circuits, 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 1–5, Temmuz 2016.
39. Mou, X., Li, W., ve Li, Z. A preliminary study on the Thevenin equivalent impedance for power systems monitoring. 2011 IEEE 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 730 – 733, Temmuz 2011.
40. Patsalides, M., Georghiou, G. E., Stavrou, A., ve Efthymiou, V. Thevenin equivalent circuit for the study of high photovoltaic penetration in distribution grids. 2013 4th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), 1-5, Ekim 2013.
41. Yang, G. Y., Mattesen, M., Kjær, S. B., Lazar, R. D., Constantin, A., Østergaard, J., & Stephansen, C. Analysis of Thevenin equivalent network of a distribution system for solar integration studies. 2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe) 1-5, Ekim 2012
42. Glover, J. D., Sarma, M. S., & Overbye, T. (2017). *Power System Analysis & Design*, 6th Ed., pp 449-450.

43. Salama M. M. A. ve Chikhani, A. Y. A simplified network approach to the VAR control problem for radial distribution systems, IEEE Trans. Power Deliv., 8(3), 1529–1535, 1993.
44. Mahmud, M., Hossain, M. Pota, H.R., ve Nasiruzzamzn, A. B. M., Voltage Control of Distribution Networks with Distributed Generation using Reactive Power Compensation, 2011 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, IECON, 985-990, 7-10 Kasım 2011.

