



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Güç Sistemlerinde Thevenin Eşdeğer Devresi Kullanarak Gerilim Kararlılığı Sınırlarının Gerçek Zamanlı Değerlendirilmesi

 Talha Enes GÜMÜŞ^a,  Mehmet Ali YALÇIN^a

^a *Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, TÜRKİYE*

**Sorumlu yazarın e-posta adresi: tgumus@sakarya.edu.tr*

ÖZET

Bu çalışmada, N baralı bir güç sisteminin herhangi bir yük barasından görülen Thevenin empedansı ve baradaki yükün empedansı kullanılarak gerilim kararlılığı değerlendirilmesi yapılmıştır. Baradan görülen Thevenin eşdeğer empedansı optimizasyon esaslı bir yaklaşımla hesaplanmıştır. Önerilen yaklaşım için ilgili baraya ait sadece akım, gerilim ve güç faktörü ölçümleri kullanılmıştır. Önerilen yaklaşım ile hesaplanan Thevenin eşdeğer empedansı ve yükün empedansı ile baraya ait empedans kararlılık indeksi hesaplanmıştır. Hesaplanan indeks, baradaki gerilim kararlılığı durumunu gerçek zamanlı olarak takip etme imkanı sunmuştur. Önerilen yaklaşımla elde edilen Thevenin empedansı kullanılarak hesaplanan empedans kararlılık indeksine karşılık gelen kritik güç değerleri ile güç akışından elde edilen kritik güç değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: *Gerilim kararlılığı, Optimizasyon, Thevenin eşdeğer devresi*

Real-Time Voltage Stability Limits Assessment Using Thevenin Equivalent in Power Systems

ABSTRACT

In this study, voltage stability evaluation of an N-bus power system is made by using the Thevenin impedance observed from an any load bus and the impedance of the load in the bus. The Thevenin equivalent impedance seen from the bus is computed using an optimization-based approach. Only the current, voltage and power factor measurements of the related bus are used for the proposed approach. The impedance stability index of the bus is computed using the Thevenin equivalent impedance obtained with the proposed approach and the impedance of the load. The computed index provides an opportunity to evaluate the voltage stability status of the bus in real time. It is observed that the critical power values corresponding to the impedance stability index computed using Thevenin impedance obtained with the proposed approach and critical power values derived from power flow are very close to each other.

Keywords: *Voltage stability, Optimization, Thevenin equivalent*

Elektrik enerjine olan talebin sürekli olarak artması nedeniyle modern güç sistemlerinde gerilim kararlılığı önemli bir husus haline gelmiştir. Güç sistemleri büyüdükçe daha karmaşık ve dinamik hale geldiğinden sistemin kararlı işletilebilmesi de zorlaşmaktadır. Güç sistemlerinde kararlılığın sürdürülebilir olması için, güç sisteminin gerçek zamanlı izlenmesi ve kararsızlık sınırlarına yaklaşıldığı durumlarda, gerekli önlemler alınarak sistemin kararlılığının sürdürülmesi gerekmektedir.

Gerilim kararlılığı analizi çalışmalarında güç akışı esaslı yaklaşımlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Güç akışı esaslı yaklaşımlarda, sistemdeki bilinmeyen sayısının fazla olması nedeniyle oluşan hesap zorluğu ve olası topoloji değişimlerinde (hat açması, generatör devreye alınması veya devreden çıkması gibi) tekrar hesaplama gerektireceğinden uzun zaman almaktadır [1]–[3]. Bu durum uzun hesaplama zamanı dezavantajını ortaya çıkarmaktadır.

Son yıllarda PMU (Fazör Ölçüm Birimleri) ölçümlerini kullanarak gerilim kararlılığını gerçek zamanlı takip eden indeksler geliştirilmiştir [4]. Güç sisteminin farklı baralarından alınan PMU ölçümleri ile güç sistemine ait Thevenin eşdeğeri gerçek zamanlı hesaplanmakta ve kararlılık analizi yapılacak baranın (ilgili baranın) kararlılık durumu gerçek zamanlı olarak takip edilebilmektedir [5]–[7]. PMU ölçüm birimleri ile çok baradan ölçüm yapıldığı için, veri sayının çokluğu ve senkron veri işleme zorlukları ortaya çıkmaktadır.

Yerel bara parametreleri esaslı yaklaşımlarda, yerel baradan görülen Thevenin eşdeğeri hesaplanarak, baranın kararlılığı hakkında bilgi veren indeksler geliştirilmiştir [8]–[10]. Bu yaklaşımlarda Thevenin eşdeğer devre parametrelerinin doğru kestirilerek, maksimum güç transferi yasası gereği, ilgili baranın gerilim kararsızlık sınırları belirlenmeye çalışılmıştır. [11][12].

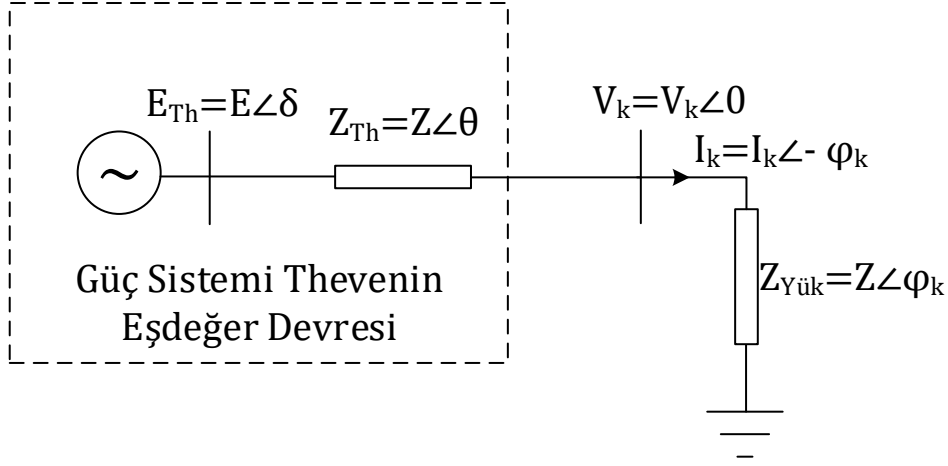
Bu çalışmada Thevenin empedansının kestirimi için yerel bara ölçümlerini kullanan optimizasyon esaslı yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşım güç sisteminin ilgili barasından görülen Thevenin empedansı, baradan yapılan akım, gerilim ve güç faktörü ölçümleri kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan Thevenin ve yük empedans değerleri ile ilgili baraya ait empedans kararlılık indeksi hesaplanmış ve başka bir gerilim kararlılık indeksi olan ISI [13] ile karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemle elde edilen Thevenin empedansı ile hesaplan kararlılık indeksinin gerçek kritik değerlere yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca kararlılık indeksi ile baranın gerilim kararlılığı gerçek zamanlı olarak izlenebilmektedir.

II. GÜÇ SİSTEMİ THEVENİN EŞDEĞER DEVRESİ

Güç sistemlerinde analizi yapılacak baradan görülen Thevenin eşdeğeri ile gerilim kararlılığı değerlendirmesi yapmak mümkündür. Şekil 1’de bir güç sisteminde kararlılık analizi yapılacak k. baradan görülen Thevenin eşdeğer devresi verilmiştir. Şekil 1’de verilen Thevenin eşdeğer devresine ait Kirchoff çevre denklemi yazılırsa;

$$E_{Th} = V_k + I_k \cdot (R_{Th} + jX_{Th}) \quad (1)$$

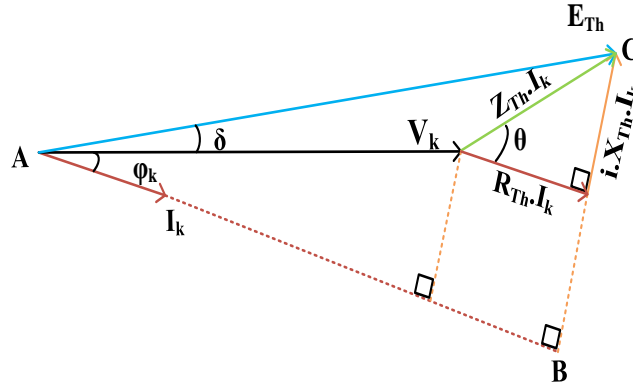
Denklem (1) elde edilir. Burada E_{Th} ve Z_{Th} bilinmeyen parametreler olup farklı yöntemler kullanılarak hesaplanabilir. Bu çalışmada yerel bara parametreleri kullanılarak optimizasyon esaslı yaklaşım ile ilgili baradan görülen Thevenin eşdeğer devresine ait Thevenin empedansı (Z_{Th}) hesaplanmıştır.



Şekil 1. Güç sistemi Thevenin eşdeğer devresi.

2.1. YEREL BARA PARAMETRELERİ İLE THEVENİN EMPEDANSININ HESAPLANMASI

Denklem (1)'de verilen Thevenin eşdeğer devre denkleminin fazör diyagramı çizilirse;



Şekil 2. Güç sistemi Thevenin eşdeğer devresi fazör diyagramı.

Şekil 2.'deki fazör diyagramı elde edilir. Thevenin eşdeğer devresi fazör diyagramı üzerinden, E_{th} 'i hesaplamak için ABC dik üçgeninin AC kenarı için Pisagor bağıntısı yazılırsa;

$$E_{Th} = \sqrt{(V_k \cdot \cos\phi_k + I_k \cdot R_{Th})^2 + (V_k \cdot \sin\phi_k + I_k \cdot X_{Th})^2} \quad (2)$$

Denklem (2) elde edilir. Denklem (2)'de, R_{Th} , X_{Th} ve E_{Th} bilinmeyen parametrelerdir. Matematiksel olarak Denklem (2)'deki bilinmeyen parametrelerin hesaplanabilmesi için üç denklem gereklidir. Bilinmeyen parametrelerin hesaplanabilmesi için yerel baradan ardışık üç ölçüm yapılarak üç denklemden oluşan üç bilinmeyenli denklem sistemi elde edilir.

$$E_{Th1} = \sqrt{(V_{k1} \cdot \cos\phi_{k1} + I_{k1} \cdot R_{Th})^2 + (V_{k1} \cdot \sin\phi_{k1} + I_{k1} \cdot X_{Th})^2} \quad (3)$$

$$E_{Th2} = \sqrt{(V_{k2} \cdot \cos\phi_{k2} + I_{k2} \cdot R_{Th})^2 + (V_{k2} \cdot \sin\phi_{k2} + I_{k2} \cdot X_{Th})^2} \quad (4)$$

$$E_{Th3} = \sqrt{(V_{k3} \cdot \cos\phi_{k3} + I_{k3} \cdot R_{Th})^2 + (V_{k3} \cdot \sin\phi_{k3} + I_{k3} \cdot X_{Th})^2} \quad (5)$$

Yapılan kısa aralıklı ardışık ölçümlerde güç sisteminin Thevenin empedansı ($Z_{Th} = R_{Th} + jX_{Th}$) sabit kalmasına rağmen[10] Thevenin gerilimi çok az da olsa değişmektedir [14]. Her bir ardışık ölçümden

denklem sistemine Thevenin gerilimi (E_{Th}) yeni bir bilinmeyen olarak eklenmektedir. Bu durumda E_{Th1} , E_{Th2} , E_{Th3} , R_{Th} ve X_{Th} denklem sisteminin bilinmeyen parametreleridir. Elde edilen denklem sistemi nonlinear olmasından dolayı iki ölçüm arasındaki E_{Th} değişimi bilinmeden denklem sisteminin analitik olarak çözülemez. E_{Th1} , E_{Th2} , E_{Th3} arasındaki değişim bilinirse sisteme ait Thevenin empedansının gerçek değeri hesaplanabilir. Fakat Thevenin gerilimindeki değişimin ölçüm yapılan baradan bilinmesi mümkün değildir. Denklem sisteminin çözülebilmesi için kısa aralıklı ardışık ölçümler arasında Thevenin Geriliminin sabit kaldığı ($E_{Th1}=E_{Th2}=E_{Th3}$) kabulü yapılırsa [15];

$$E_{Th1} - E_{Th2} = 0 \quad (6)$$

$$E_{Th2} - E_{Th3} = 0 \quad (7)$$

Denklem (6) ve Denklem (7) eşitlikleri elde edilir. Üç ardışık ölçüm ile elde edilen denklem sayısı ikiye düşürülerek iki bilinmeyenli iki denklem haline gelir [16]. Elde edilen iki denklem nonlinear optimizasyon yaklaşımı kullanılarak denklem sistemindeki bilinmeyenler R_{Th} ve X_{Th} hesaplanabilir. Fakat hesaplanan R_{Th} ve X_{Th} arasındaki açı olan ve Denklem (8)'de verilen Thevenin empedansı açısının;

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{X}{R}\right) \quad (8)$$

optimizasyon çözümünde hatalı bulunduğu ve özellikle ilgili barada güç arttıkça, açının doğru değerden uzaklaştığı yapılan benzetim çalışmalarında görülmüştür.

Enerji iletim hatları ve transformatörlerden oluşan güç sistemlerinin karakteristik empedans açısının $\theta = \text{atan}\left(\frac{X}{R}\right)$ 'nın $80^\circ \pm 7^\circ$ aralığında olduğu ve artan sistem gerilimi ile büyüdüğü bilinmektedir [17],[18]. Bu çalışmada Thevenin empedansı açısının değeri 80 derece kabul edilmiştir. Böylelikle $\Delta E = 0$ ve $\theta = 80^\circ$ kabulü ile denklem sistemine ait tek bilinmeyen parametre Z_{Th} olur. Yapılan kabuller ile sistemin ilgili barasından yapılacak ardışık iki ölçümle ilgili baradan görülen Thevenin empedansının genliği hesaplanabilecektir. Yapılan kabuller ve ilgili baradan alınan birinci ve ikinci ölçümler ile Denklem (9) ve Denklem (10) elde edilir.

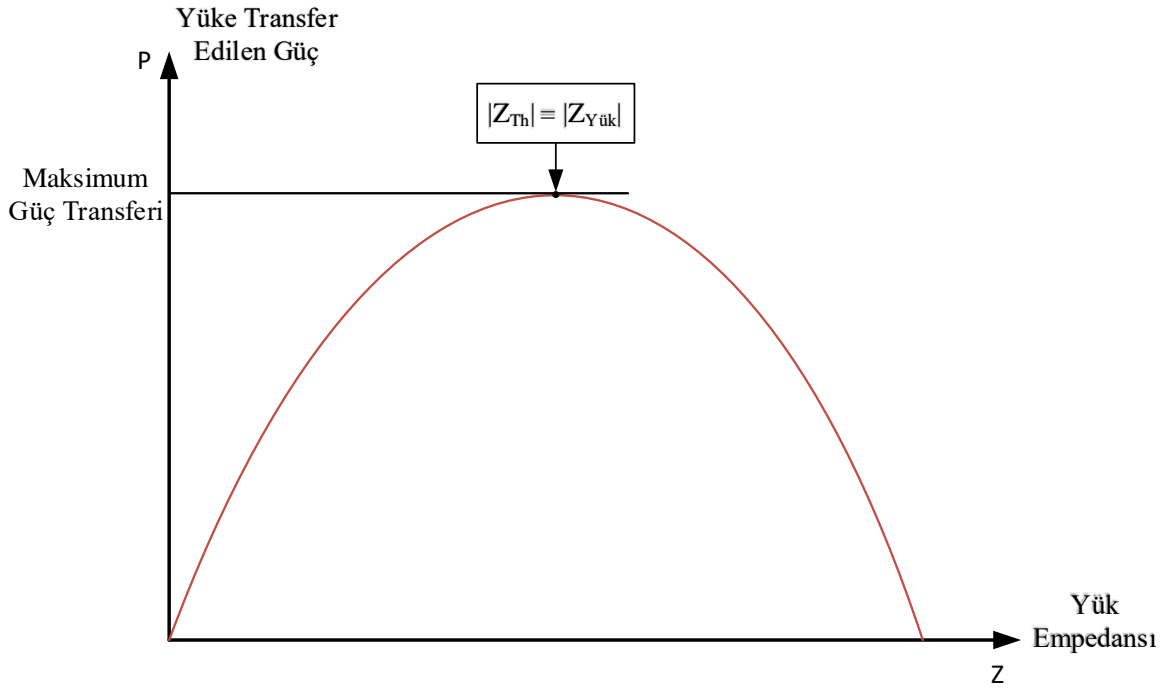
$$E_{Th1} = \sqrt{(V_{k1} \cdot \cos\varphi_{k1} + I_{k1} \cdot Z_{Th} \cdot \cos(80))^2 + (V_{k1} \cdot \sin\varphi_{k1} + I_{k1} \cdot Z_{Th} \cdot \sin(80))^2} \quad (9)$$

$$E_{Th2} = \sqrt{(V_{k2} \cdot \cos\varphi_{k2} + I_{k2} \cdot Z_{Th} \cdot \cos(80))^2 + (V_{k2} \cdot \sin\varphi_{k2} + I_{k2} \cdot Z_{Th} \cdot \sin(80))^2} \quad (10)$$

Elde edilen denklemlerin optimizasyon ile çözülebilmesi için amaç fonksiyonu Denklem (6)'da verilen eşitlik olacaktır ve denklem sistemi nonlinear optimizasyon çözüm yöntemi Levenberg-Marquardt [19], [20] ile çözümlenerek güç sistemini optimal temsil eden Z_{Th} değeri hesaplanır.

III. MAKSİMUM GÜÇ TRANSFERİ VE GERİLİM KARARLILIK İNDEKSİ

Güç sisteminde ilgili bara arkasında kalan güç sisteminin Thevenin eşdeğeri bilindiği takdirde baradan çekebilecek maksimum güç, maksimum güç transferi yasası ile hesaplanabilir. Yük empedansının ($Z_{Yük}$), Thevenin empedansına (Z_{Th}) eşit olduğu durumda yüke transfer edilebilecek görünür güç maksimum olur [21]. Şekil 3'deki yüke transfer edilecek gücün empedansa göre değişimi grafik olarak verilmiştir. Transfer edilen maksimum güç değeri, gerilim kararlılığı açısından ilgili bara için sınır değerdir.



Şekil 3. Thevenin eşdeğer devresi güç transferi [24]

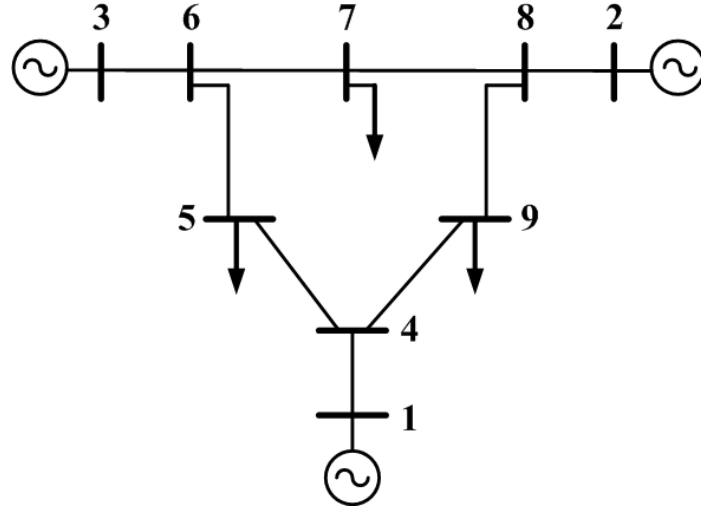
İlgili baradan görülen Thevenin empedansı ve bara yük empedansı gerçek zamanlı olarak takip edilerek, empedans kararlılık indeksi ile baranın gerilim kararlılığı takip edilebilir. Denklem (11)'de empedans kararlılık indeksi verilmiştir [13].

$$\text{Empedans Kararlılık İndeksi} = \frac{Z_{Yük} - Z_{Th}}{Z_{Yük}} \quad (11)$$

Denklem (11)'de verilen empedans kararlılık indeksi 0-1 arası değerler alıp, indeks değeri 0'a yaklaştıkça güç sisteminin kararsızlık sınırlarına doğru gittiği, 1'e yaklaştıkça sistemin kararlı olduğu anlaşılmaktadır.

IV. BENZETİM ÇALIŞMASI

IEEE 9 baralı test sisteminin yük baralarında önerilen yöntemle hesaplanan Thevenin empedansı ve bara yük empedansı ile baraya ait empedans kararlılık indeksi gerçek zamanlı olarak hesaplanmış ve sonuçları verilmiştir. Önerilen yaklaşımla hesaplanan kararlılık indeksi ve ISI indeksi ile karşılaştırılmış ve sonuçları verilmiştir. IEEE 9 baralı test sistemine ait detaylar Tablo 1 ve Tablo 2 'de verilmiştir.



Şekil 4. IEEE 9 baralı test sistemi [22]

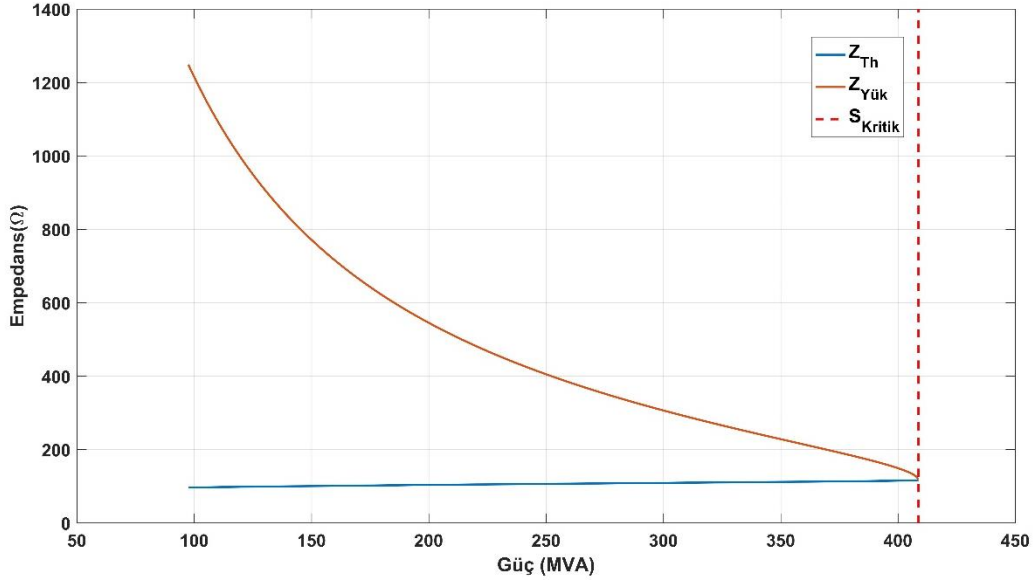
Tablo 1. IEEE 9 baralı test sistemi hat değerleri.

Hat	Resistans(pu)	Reaktans	Suseptans
1-4	0.0000	0.0576	0.0000
4-5	0.0170	0.0920	0.1580
5-6	0.0390	0.1700	0.3580
3-6	0.0000	0.0586	0.0000
6-7	0.0119	0.1008	0.2090
7-8	0.0085	0.0720	0.1490
8-2	0.0000	0.0625	0.0000
8-9	0.0320	0.1610	0.3060
9-4	0.0100	0.0850	0.1760

Tablo 2. IEEE 9 baralı test sistemi güç akışı sonuçları.

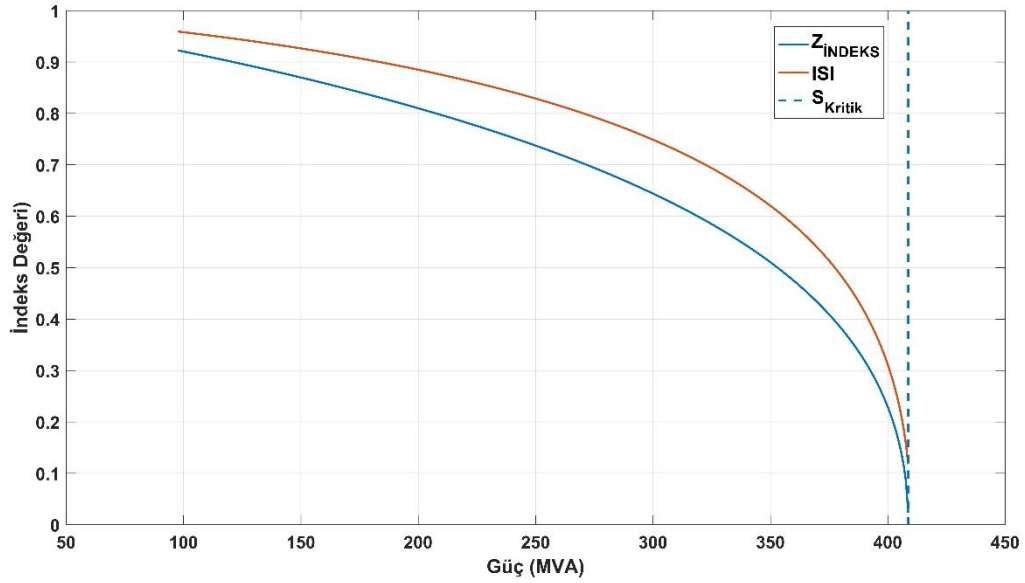
Bara	V(pu)	Açı(Derece)	Yük MW	Yük MVAr	Üretim MW	Üretim MVAr
1-4	0.0000	0.0576	0	0	71.69	27.91
4-5	0.0170	0.0920	0	0	163	4.9
5-6	0.0390	0.1700	0	0	85	11.45
3-6	0.0000	0.0586	0	0	0	0
6-7	0.0119	0.1008	125	50	0	0
7-8	0.0085	0.0720	90	30	0	0
8-2	0.0000	0.0625	0	0	0	0
8-9	0.0320	0.1610	100	35	0	0
9-4	0.0100	0.0850	0	0	0	0

Test sisteminin 5 numaralı yük barasından görülen Thevenin empedansının önerilen yöntemle hesaplanan değeri ve yükün empedansı değeri, baradaki güç değişimine bağlı olarak Şekil 5'te verilmiştir.



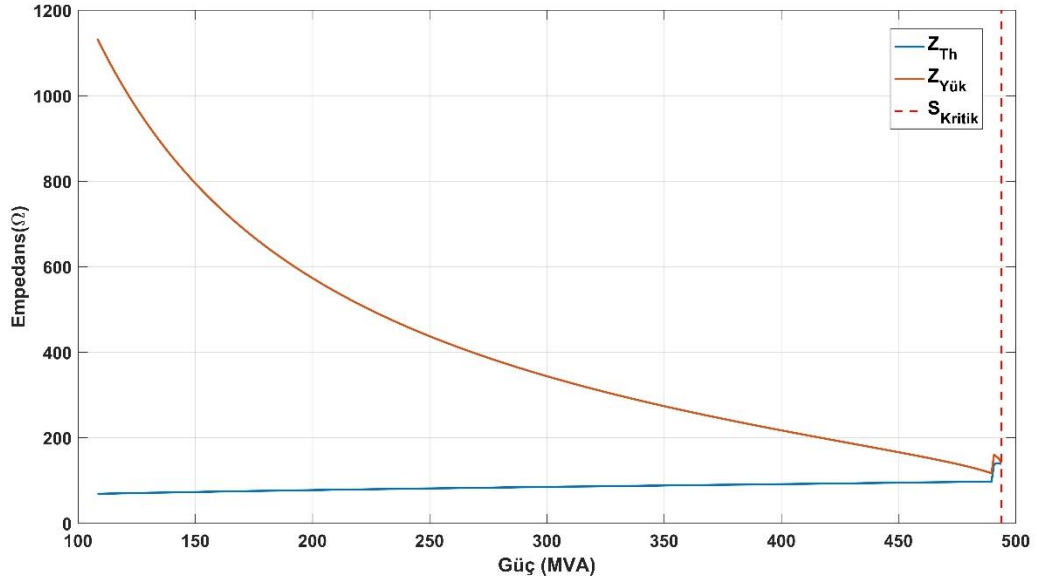
Şekil 5. Bara 5 Thevenin ve yük empedansı değerleri

Thevenin empedans değeri ve yük empedans değeri Denklem (11) kullanılarak 5 numaralı baraya ait empedans kararlılık indeksi ($Z_{İNDEKS}$) hesaplanmıştır. Hesaplanan $Z_{İNDEKS}$ değerleri ISI kararlılık indeksi karşılaştırılmış ve sonuçları Şekil 6'da verilmiştir.



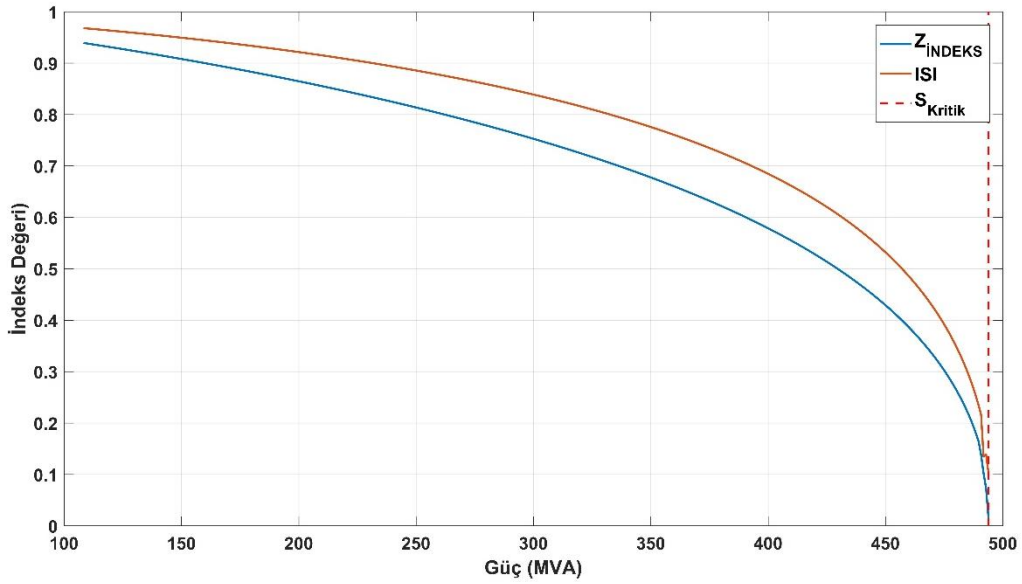
Şekil 6. Bara 5 Thevenin esaslı $Z_{İndeks}$ ve ISI değerleri

Test sisteminin 7 numaralı yük barasından görülen Thevenin Empedans değeri ve yük empedans değeri, baradaki güç değişimine bağlı olarak Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7'de verilen grafikte 450 MVA'dan sonra meydana gelen empedans değişimi, güç sisteminde bulunan generatörlerin reaktif güç limitlerine ulaşmasından kaynaklanmaktadır [23].



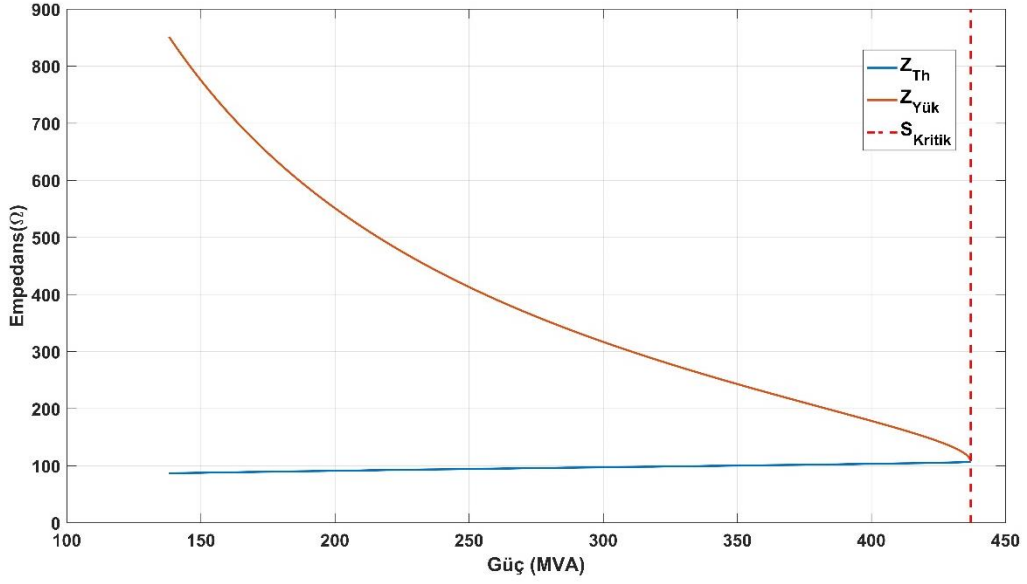
Şekil 7. Bara 7 Thevenin ve yük empedansı değerleri

Şekil 8'de 7 numaralı yük barasına ait $Z_{İNDEKS}$ ve ISI indeks sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



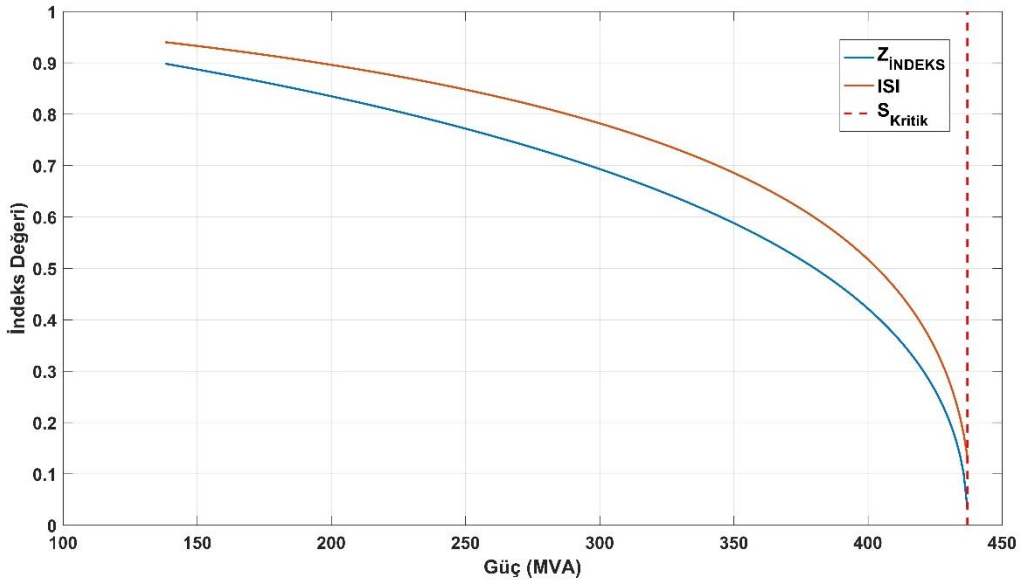
Şekil 8. Bara 7 Thevenin esaslı $Z_{İNDEKS}$ ve ISI değerleri

Test sisteminin 9 numaralı yük barasına ait önerilen yöntem ile hesaplanan Thevenin Empedans değerleri ve yük empedans değerleri güç değişimine bağlı olarak Şekil 9'de verilmiştir.



Şekil 9. Bara 9 Thevenin-yük empedansı değerleri

9 numaralı baraya ait $Z_{İNDEKS}$ ve ISI indeks değerlerine ait sonuçlar karşılaştırmalı olarak Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Bara 9 Thevenin esaslı $Z_{İNDEKS}$ ve ISI değerleri

Test sisteminin yük baralarına ait güç akışından elde edilen kritik güç değerlerine karşılık gelen $Z_{İNDEKS}$ ve ISI indeks değerleri Tablo 3'de verilmiştir. Ayrıca Tablo 3'de kritik güç değerlerine ait bara gerilim değerleri pu olarak verilmiştir.

Tablo 3. Yük baralarına ait kritik güç ve $Z_{İNDEKS}$, ISI ve Kritik Gerilim değerleri.

Bara Numarası	Kritik Güç Değeri (Güç akışı)	$Z_{İndeKS}$	ISI	V(pu)
5	480.69 MVA	0.0233	0.1176	0.6390
7	493.93 MVA	0.0125	0.1020	0.7645
9	437.14 MVA	0.0130	0.1346	0.6367

Yerel bara parametreleri kullanılarak hesaplanan empedans kararlılık indeksinin, güç akışından elde edilen kritik güç değerlerinde 0'a çok yakın olduğu görülmüştür. $Z_{İNDEKS}$ değerlerinin, karşılaştırılan ISI indeks değerlerine göre gerilim kararlılığı değerlendirmesi açısından, kritik değerleri daha doğru gösterdiği güç akışı sonuçları ile karşılaştırmalardan görülmüştür. Böylece $Z_{İNDEKS}$ kullanılarak gerçek zamanlı gerilim kararlılığı izleme imkânı, daha az işlem ve veri ile sağlanmıştır.

V. SONUÇLAR

Bu çalışmada N Baralı bir güç sisteminin yük baralarından görülen Thevenin eşdeğer devre empedansı, Levenberg-Marquardt optimizasyonu ile hesaplanmıştır. Thevenin empedansı ve yük empedansı kullanılarak yük barasına ait empedans kararlılık indeksi hesaplanmış ve gerçek zamanlı gerilim kararlılığı değerlendirilmesi yapılmıştır.

Önerilen optimizasyon esaslı yaklaşımda ilgilenilen yük barasından yapılacak ardışık iki örneklemede ölçüm hataları olması durumunda oluşabilecek yakınsama problemlerini ortadan kaldıran bir yaklaşım geliştirilmiştir. Önerilen yöntemle yük barasından yapılan ardışık iki ölçüm ile baraya ait kararlılık indeksinin hesaplanabilir olması işlem kolaylığı ve hızlı sonuç alınması avantajlarını sağlamıştır.

Bu avantajlar, sistem operatörlerinin iletim sistemlerde gerilim kararlılığı sınırları açısından gerçek zamanlı olarak hızlı değerlendirme yapabilmelerine imkan sağlayacaktır.

Gerilim kararlılığı çalışmalarında, reaktif güç sınırları büyük önem taşımaktadır. Kararlılık sınırlarının daha hassas indekslerle belirlenebilmesi için özellikle üretim tesislerindeki reaktif güç sınırlamalarının modellere olabildiğince doğru yansıtılması bu tür yaklaşımları daha güvenli kılacaktır. Önerilen yöntem ile reaktif güç limitlerinin aşılması durumunda Thevenin empedansındaki değişimler de gösterilmiştir.

VI. KAYNAKLAR

- [1] S. Ravindra, V. C. V. Reddy, and S. Sivanagaraju, "Power system security analysis under transmission line outage condition," *Ijireeice*, vol. 3, no. 1, pp. 46–50, 2015, doi: 10.17148/ijireeice.2015.3109.
- [2] I. Alhamrouni, M. A. Alif, B. Ismail, M. Salem, A. Jusoh, and T. Sutikno, "Load flow based voltage stability indices for voltage stability and contingency analysis for optimal location of STATCOM in distribution network with integrated distributed generation unit," *Telkomnika (Telecommunication Comput. Electron. Control.)*, vol. 16, no. 5, pp. 2302–2315, 2018, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v16i5.10577.
- [3] K. Döşoğlu, "Gerilim-Reaktif Güç Kontrol Modelli Kademe Değiştirici Transformatörün Gerilim Kararlılığı Üzerindeki Etkisi," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknol. Derg.*, vol. 9, no. 1, pp. 278–292, Jan. 2019, doi: 10.29130/dubited.521863.
- [4] M. S. S. Danish, T. Senjyu, S. M. S. Danish, N. R. Sabory, N. K., and P. Mandal, "A Recap of Voltage Stability Indices in the Past Three Decades," *Energies*, vol. 12, no. 8, p. 1544, Apr. 2019, doi: 10.3390/en12081544.
- [5] S. L. Ramírez-P, C. A. Lozano-M, and N. G. Caicedo-D, "Review and classification of indices for voltage stability monitoring using PMU measurements," *J. Eng. Sci. Technol. Rev.*, vol. 11, no. 4, pp. 180–198, 2018, doi: 10.25103/jestr.114.23.
- [6] B. Bozali and A. Öztürk, "Türkiye 400 KV'luk Güç Sistemi İçin Optimal Fazör Ölçüm Birimlerinin Yerleşim Yerlerinin Belirlenmesi," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknol. Derg.*, vol. 8, no. 2, pp. 1319–1336, Apr. 2020, doi: 10.29130/dubited.659075.
- [7] Y. Lee and S. Han, "Real-time voltage stability assessment method for the Korean power system based on estimation of Thévenin equivalent impedance," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 8,

- 2019, doi: 10.3390/app9081671.
- [8] B. Brusilowicz, W. Rebizant, and J. Szafran, "A new method of voltage stability margin estimation based on local measurements," in *2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, Oct. 2011, pp. 2443–2447, doi: 10.1109/APAP.2011.6180655.
- [9] B. Shakerighadi, F. Aminifar, and S. Afsharnia, "A real-time voltage stability index based on local measurements," in *2015 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering*, May 2015, pp. 1492–1497, doi: 10.1109/IranianCEE.2015.7146456.
- [10] K. Vu, M. M. Begovic, D. Novosel, and M. M. Saha, "Use of local measurements to estimate voltage-stability margin," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 3, pp. 1029–1035, 1999, doi: 10.1109/59.780916.
- [11] J. E. Tobón V., R. E. C. Gutiérrez, and J. M. Ramirez, "27-Voltage collapse detection based on local measurements," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 107, pp. 77–84, 2014, doi: 10.1016/j.epsr.2013.09.013.
- [12] Z. Yun, X. Cui, and K. Ma, "Online Thevenin Equivalent Parameter Identification Method of Large Power Grids Using LU Factorization," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, no. 6, pp. 4464–4475, Nov. 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2920994.
- [13] I. Smon, G. Verbic, and F. Gubina, "Local Voltage-Stability Index Using Tellegen's Theorem," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 3, pp. 1267–1275, Aug. 2006, doi: 10.1109/TPWRS.2006.876702.
- [14] R. Maharjan and S. Kamalasadán, "Voltage stability index for online voltage stability assessment," in *2015 North American Power Symposium (NAPS)*, Oct. 2015, pp. 1–6, doi: 10.1109/NAPS.2015.7335245.
- [15] Y. Wang, W. Li, and J. Lu, "A new node voltage stability index based on local voltage phasors," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, no. 1, pp. 265–271, 2009, doi: 10.1016/j.epsr.2008.06.010.
- [16] M.H.Haque, "25-On-line monitoring of maximum permissible loading of a power system within voltage stability limits," *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 150, no. 1, 2003, doi: 10.1093/oxfordjournals.ndt.a091183.
- [17] A. Birchfield *et al.*, "A Metric-Based Validation Process to Assess the Realism of Synthetic Power Grids," *Energies*, vol. 10, no. 8, p. 1233, Aug. 2017, doi: 10.3390/en10081233.
- [18] A. Wiszniewski, "45-New criteria of voltage stability margin for the purpose of load shedding," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 3, pp. 1367–1371, 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2006.886772.
- [19] D. W. Marquardt, "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters," *J. Soc. Ind. Appl. Math.*, vol. 11, no. 2, pp. 431–441, Jun. 1963, doi: 10.1137/0111030.
- [20] C. Kanzow, N. Yamashita, and M. Fukushima, "Levenberg-Marquardt methods with strong local convergence properties for solving nonlinear equations with convex constraints," *J. Comput. Appl. Math.*, vol. 172, no. 2, pp. 375–397, 2004, doi: 10.1016/j.cam.2004.02.013.
- [21] S. Polster, H. Renner, D. T. Duong, and K. Uhlen, "Voltage stability monitoring using a modified thevenin impedance," *2017 IEEE Manchester PowerTech, Powertech 2017*, pp. 2–7, 2017, doi: 10.1109/PTC.2017.7980864.
- [22] R. Kaur and D. Kumar, "Transient Stability Improvement of IEEE 9 Bus System Using Power World Simulator," *MATEC Web Conf.*, vol. 57, 2016, doi: 10.1051/mateconf/20165701026.
- [23] N. A. M. Ismail, A. A. M. Zin, A. Khairuddin, and S. Khokhar, "A comparison of voltage stability indices," *Proc. 2014 IEEE 8th Int. Power Eng. Optim. Conf. PEOCO 2014*, pp.

30–34, 2014, doi: 10.1109/PEOCO.2014.6814394.

- [24] Electronics Hub, Maximum Power Transfer Theorem (MPTT),(04 Mart 2021),[Çevrimiçi],
Erişim: <https://www.electronicshub.org/maximum-power-transfer-theorem/>