

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜK BARASI ÖLÇÜMLERİNE DAYALI GERİLİM KARARLILIĞI DEĞERLENDİRMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Selim MERİÇ

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TURAN

Mayıs 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜK BARASI ÖLÇÜMLERİNE DAYALI GERİLİM
KARARLILIĞI DEĞERLENDİRMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Selim MERİÇ

Enstitü Anabilim Dalı

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**

Bu tez 18.06.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr.
Mehmet Ali YALÇIN
Başkan

Dr.Öğr. Üyesi
Mustafa TURAN
Üye

Dr.Öğr. Üyesi
Erdal BÜYÜKBİÇAKÇI
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Selim MERİÇ

10.05.2019

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Dr.Öğr. Üyesi Mustafa TURAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında tüm yardımını esirgemeyen Arş.Gör. Talha Enes GÜMÜŞ'e çok teşekkür ederim

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLolar LİSTESİ	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Literatür Taraması	1
1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı	3
BÖLÜM 2.	
GÜÇ SİSTEMLERİ KARARLILIK PROBLEMİ.....	5
2.1. Giriş.....	5
2.2. Gerilim Kararlılığı Tanımı	6
2.2.1. Büyük bozucu etki gerilim kararlılığı.....	6
2.2.2. Küçük bozucu etki gerilim kararlılığı.....	6
2.2.3. Gerilim kararlılığını etkileyen faktörler.....	7
2.2.4. Gerilim kararsızlığından kaçınabilmek için alınabilecek önlemler.....	7
2.3. Yük Akışı Tabanlı Gerilim Kararlılığı İncelenmesi	8
2.4. Yerel Bara Ölçümü Temelli Gerilim Kararlılığı İncelenmesi	8
2.5. Geniş Şebekeler Üzerinde PMU Tabanlı İnceleme.....	10

BÖLÜM 3.

ANİ DEĞERLERE DAYALI OLARAK THEVENİN EŞDEĞER DEVRESİ PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE GERİLİM KARARLILIĞI

DEĞERLENDİRMESİ	11
3.1. Ani Değerlere Dayalı Olarak Thevenin Eşdeğer Devresi	
Parametrelerinin Elde Edilmesi.....	11
3.2. Etkin Değerlere Dayalı Olarak Thevenin Eşdeğer Devresi	
Parametrelerinin Elde Edilmesi.....	14
3.3. Thevenin Parametrelerine Dayalı Olarak Gerilim Kararlılığının	
Değerlendirilmesi	18
3.4. Dört Baralı Örnek Sistem Üzerinde Doğrulama.....	21

BÖLÜM 4.

IEEE 30 BARA İLETİM ŞEBEKESİ ÜZERİNDE GERİLİM KARARLILIĞI DEĞERLENDİRMESİ

4.1. IEEE 30 Bara İletim Şebekesi.....	24
4.2. IEEE 30 Baralı Sistemde 10 Nolu Baranın Ölçüm Ve Kestirim	
Sonuçları	28
4.3. IEEE 30 Baralı Sistemde 14 Nolu Baranın Ölçüm Ve Kestirim	
Sonuçları	30
4.4. IEEE 30 Baralı Sistemde 16 Nolu Baranın Ölçüm Ve Kestirim	
Sonuçları	32
4.5. IEEE 30 Baralı Sistemde 18 Nolu Baranın Ölçüm Ve Kestirim	
Sonuçları	34
4.6. IEEE 30 Baralı Sistemde 21 Nolu Baranın Ölçüm Ve Kestirim	
Sonuçları	36
4.7. IEEE 30 Baralı Sistemde 26 Nolu Baranın Ölçüm Ve Kestirim	
Sonuçları	38
4.8. IEEE 30 Baralı Sistemde 29 Nolu Baranın Ölçüm Ve Kestirim	
Sonuçları	40

BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR	42
 BÖLÜM 6.	
TARTIŞMA VE ÖNERİLER	44
 KAYNAKLAR.....	45
EKLER.....	48
ÖZGEÇMİŞ	52



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

*	: Eşlenik
.	: Fazorel
cr	: Kritik
kr	: Kritik
E	: Gerilim
FACTS	: Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri
G	: İletkenlik
HVDC	: Yüksek gerilim doğru akım
I	: Akım
i	: Bara ismi
J	: Jakobien matrisi
K	: Bara ismi
k	: Bara ismi
L	: İndeks
o	: Referans değeri
p	: Aktif bileşen
P	: Aktif güç
pi	: Aktif bileşen sabit akım
PMU	: Fazör Ölçüm Birimleri
pp	: Aktif bileşen sabit güç
pz	: Aktif bileşen sabit empedans
th	: Thevenin
q	: Reaktif bileşen
Q	: Reaktif güç
qi	: Reaktif bileşen Sabit akım
qp	: Reaktif bileşen sabit güç

QSS	: Quasi Kararlı-Hal
qz	: Reaktif bileşen sabit empedans
r	: Alıcı uç
R	: Direnç
R	: İndirgenmiş
RLS	: En küçük kareler tekniği
s	: Kararlı hal, gönderici uç
S	: Kompleks güç
sc	: Kısa devre
t	: Geçici hal
T	: Toparlama saman sabiti
Th	: Thevenin
u	: Ortogonal matris birim elamanın
ULTC	: Yük altında kademe değiştirici
V	: Gerilim
v	: Ortogonal matris birim elamanın
VSI	: Gerilim kararlılığı indeksi
VSM	: Gerilim kararlılığı marjini
X	: Reaktans
Y	: Bara admitans matrisi
Z	: Empedans
α	: Thevenin empedans açısı
β	: Akımın kısa devre akımına göre açısı
Γ	: İndirgenmiş Jakobien sol öz vektör matrisi
γ	: Yardımcı fazorel diyagram açısı
δ	: Gerilim faz açısı
λ	: Özdeğer
σ	: Ortogonal matris birim elamanı
u	: Yardımcı fazorel diyagram açısı
ϕ	: Güç açısı
Φ	: İndirgenmiş Jakobien sağ öz vektör matrisi
ψ	: İç güç açısı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Güç sistemi kararlılığının IEEE / CIGRE' ye göre sınıflandırılması.....	5
Şekil 3.1. İki baraya indirgenmiş şebeke Thevenin modeli (zaman domen)	11
Şekil 3.2. Akım ve gerilimlerin ani değişimleri.	12
Şekil 3.3. Güç sisteminin k. barası gerisinde kalan Thevenin Eşdeğeri ile çizilmiş fazör diyagram.....	16
Şekil 3.4. (a) k. bara arkasında kalan güç sistemi, (b) Thevenin Eşdeğeri ve yük..	18
Şekil 3.5. Kritik durumda gerilim fazörleri.....	19
Şekil 3.6. Dört baralı örnek sistemin tek hat şeması [13].	21
Şekil 3.7. Dört baralı örnek sistemin gerçek ve kritik gerilim grafiği.	23
Şekil 3.8. Dört baralı örnek sistemin gerçek ve kritik gerilim grafiği.	23
Şekil 3.9. Dört baralı örnek sistemin yük akışı simülasyonunda gerilimin kararsızlığı girdiği an.	23
Şekil 4.1. IEEE30 baralı sistemin tek hat şeması.....	26
Şekil 4.2. Bara 10, Gerilim kararlılık marjini grafiği [VSMv]	28
Şekil 4.3. Bara 10, ölçülen ve kritik voltaj grafiği.	28
Şekil 4.4. Bara 14, gerilim kararlılık marjini.	30
Şekil 4.5. Bara 14, ölçülen ve kritik gerilim grafiği.....	30
Şekil 4.6. Bara 16, Gerilim kararlılık marjini grafiği [VSMv]	32
Şekil 4.7. Bara 16, ölçülen ve kritik gerilim grafiği.....	32
Şekil 4.8. Bara 18, Gerilim kararlılık marjini grafiği [VSMv]	34
Şekil 4.9. Bara 18, ölçülen ve kritik gerilim grafiği.....	34
Şekil 4.10. Bara 21, Gerilim kararlılık marjini grafiği [VSMv]	36
Şekil 4.11. Bara 21, ölçülen ve kritik gerilim grafiği,.....	36
Şekil 4.12. Bara 26, gerilim kararlılık marjini.	38
Şekil 4.13. Bara 26, ölçülen ve kritik gerilim grafiği.....	38
Şekil 4.14. Bara 29, gerilim kararlılık marjini.	40

Şekil 4.15. Bara 29, ölçülen ve kritik gerilim grafiği.....	40
---	----



TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1. Dört baralı örnek sisteme ilişkin hat parametreleri.....	21
Tablo 3.2. Şekil 3.6’de tek hat şeması verilen dört baralı örnek sisteme ilişkin generatör ve yük değerleri.....	22
Tablo 3.3. Dört baralı örnek sisteme ilişkin ölçüm değerleri.....	22
Tablo 4.1. IEEE 30 Baralı sistemin bara yük değerleri.....	24
Tablo 4.2. IEEE 30 Baralı sistemin üretim değerleri.....	24
Tablo 4.3. IEEE 30 Baralı sistemin hat parametreleri.....	25
Tablo 4.4. IEEE 30 Baralı sistemin 10 nolu bara özet ölçüm sonuçları.....	29
Tablo 4.5. IEEE 30 Baralı sistemin 14 nolu bara özet ölçüm sonuçları.....	31
Tablo 4.6. IEEE 30 Baralı sistemin 16 nolu bara özet ölçüm sonuçları.....	33
Tablo 4.7. IEEE 30 Baralı sistemin 18 nolu bara özet ölçüm sonuçları.....	35
Tablo 4.8. IEEE 30 Baralı sistemin 21 nolu bara özet ölçüm sonuçları.....	37
Tablo 4.9. IEEE 30 Baralı sistemin 26 nolu bara özet ölçüm sonuçları.....	39
Tablo 4.10. IEEE 30 Baralı sistemin 29 nolu bara özet ölçüm sonuçları.....	41

ÖZET

Anahtar kelimeler: Güç sistemleri, Gerilim kararlılığı, Gerilim kararlılık sınırları

Modern bir güç sisteminin ileri seviyede planlanmış olması beklenir. Güç sistemleri çok değişkenli, dinamik ve karmaşık sistemlerdir. Güç sistemlerinde görülen işletim sorunları ve arızalarının sebepleri çok çeşitlidir. Genel olarak güç arz ve talebinin yönetildiği düşünülen sistemlerde bile arızaların ötesinde, pek çok yönetim – kararlılık sorunları yaşanabilmektedir. Güç sistemlerinde kararlılık; sistemin bir bozucuya maruz kaldıklarında oluşan geçici durum sonrasında, bozucu devre dışı kaldıktan sonra yeniden kararlı olarak işletimin sürmesi olarak özetlenebilir. Özelde, kararlılık konusu oluş - sonuç mekanizmaları ve süreleri kapsamında farklı sınıflarda incelenir.

Her ne kadar güç sistemleri oldukça dikkatli planlansa da, işin gelişme sürecinde altyapılar sürekli güncellenerek genişlemek zorunda kalmıştır. Diğer taraftan endüstrideki yüklerin beklentileri ve karakterleri de değişime uğramıştır. Örneğin kontrollü yükler – sabit güç yükleri, güç sistem harmonikleri ve reaktif güç gereksinimlerinin artması, gücün farklı bölgeler üzerinden tedariki gibi yeni durumlar ortaya çıkmıştır. Alternatif enerji kaynakları devreye girmiş – dağıtık üretimler güç akışlarını dinamik olarak değiştirmeye başlamıştır. Tüm bunların sonucunda güç sistemlerinin yönetimi, kalitesinin sürdürülmesi git gide daha karmaşık hale gelmeye başlamıştır.

Mühendislerin teorik olarak tahmin ettiği pek çok sorun 1980'lerden itibaren gerçek olmaya başlamıştır. Karmaşıklaşmış güç sistemleri beklenmedik yüklenme durumlarında kararsızlık sınırına gelebilmektedir. Bu nedenle mevcut sistemlerin kararlı işletimi için yapılan çalışmalar büyük ilgi çekmeye başlamıştır.

Bu tezde, güç sistemlerinin kararlılık sorunlarından biri olan gerilim kararlılığı sınırlarının yerel bara parametrelerine dayalı kestirimler ile belirlenmesine yönelik bir dizi inceleme yapılmıştır. Güç sisteminin herhangi bir barası arkasında kalan Thevenin Eşdeğer Parametreleri kestirim yaklaşımı ile elde edilmiş, sistemin kararsızlık sınırına ne kadar yakın olduğuna ilişkin değerlendirmeler yapılmıştır. Konu ile ilgili teorik incelemeler basit bir simülasyon çalışması ile doğrulandıktan sonra, IEEE 30 baralı standart test sistemi üzerinde uygulanmıştır. Simülasyon sonuçları, kullanılan yaklaşımın gerilim çökme sınırlarını yeterince doğru hesapladığı ve gerilim kararsızlığından kaçınmak için kullanılabileceğini göstermiştir.

VOLTAGE STABILITY ASSESSMENT BY USING LOCAL BUS PARAMETERS

SUMMARY

Keywords: Power systems, Voltage stability, Voltage stability limits

Power systems are dynamic and multiparameter systems which are very complex. A modern electric power system is expected to be very well designed. The reasons of operating problems and faults in power systems are very diverse. Even if the power system in supply and demand balance, some operational or topological issues can cause stability problems. Power system stability generally refers to the capability of a power system to remain in a state of operation equilibrium under normal operation conditions and to regain an acceptable state of equilibrium after being subjected to disturbances. Stability problems are examined in different classes within the context of the occurrence and outcome mechanisms.

Although power systems are designed properly in the beginning, sub-optimal hardware updates will be done by years as a result of continuous growth and industrialization. On the other hand, the variety and characteristics of the electrical loads are also changed by smart industrialization. New problems such as power delivery from distant and unexpected regions can occur as a result of power flow changes, increase in controlled loads and constant power loads, power system harmonics and reactive power demand increase. Renewable energy resources and distributed generations can cause unpredictable power flows and increasing complexity. As a result, the operating the power systems and maintaining the quality have become increasingly complex.

Many problems, which hypothetically predicted by engineers, began to become real from the 1980s. Increasingly complicated power systems can go under unexpected loading conditions and come on the edge of instability. Therefore, the studies for the stable operation of existing systems attract great interest for engineers.

In this thesis, voltage stability assessment which is the one of the major stability issue in power systems are examined by using local bus measurements. Thevenin equivalent model behind the corresponding local bus are estimated and the critical parameters are calculated to define voltage stability limits of the bus. Verification of the approach was done on a simple power system by simulation. Then concepts were applied on IEEE 30 bus standart test system. The simulation results has shown that the proposed assessment approach has accurate enough to estimate voltage stability limits and suitable for real time applications.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Giriş

Elektrik enerjisi günümüzün en esnek ve en yaygın kullanılan enerji türüdür. Elektrik güç sistemi; üretim, iletim, dağıtım ve tüketim gibi kısımlar olarak ele alınabilir. Günümüzde elektrik şebekeleri çok sayıda ülkeyi de içine alan dev ağlara dönüşmüş durumdadır. Günümüz alternatif akım şebekelerinde en önemli büyüklükler gerilim ve frekans olarak karşımıza çıkmaktadır. Diğer taraftan bakıldığında bu büyük sistem anlık olarak güç-arz talebini sağlamalı, çeşitli arıza veya bozululara karşı gerilim – frekans gibi önemli büyüklükleri kararlı bir şekilde sürdürebilmelidir. Böyle bir sistemin kaçınılmaz olarak kayıpları da vardır. Dolayısı ile beklenti hem kararlı ve hem de ekonomik bir işletimdir.

Güç sisteminin, olabildiğince verimli ve kabul edilebilir bir çalışma noktasında işletilmesi aynı zamanda bir bozucuya maruz kaldığında işletme gerilimini istenilen aralıkta temin edebilmesi için gerilim kararlılığı değerlendirmelerinin yapılması gerekir.

1.2. Literatür Taraması

Bu bölümde güç sistemlerinin yapılandırılması ve işletilmesinde büyük öneme sahip gerilim kararlılığı konusunda literatürdeki önemli çalışmalara yer verilmiştir.

Bir güç sistemini; diferansiyel, ayrık veya cebirsel olarak modellemek mümkündür. Böyle bir yaklaşım ile kısa veya uzun dönemli analizler yapılabilir. Dinamik etki yapan tüm aktörlerin etkileri izlenebilir [1]. Fakat binlerce düğümü olan lineer olmayan gerçek bir sisteminin modellenmesi ve doğru verilerin sürdürülmesi çok

gerçekçi olamamaktadır. Bunun yerine biraz daha sadeleştirilmiş yarı sürekli hal denilebilecek bir yaklaşım ile denklem sayısı azaltılabilir [1,2]. Bu az sayıdaki denklem ile simülasyonlar yapılarak sistem kararlılığı araştırılabilir. Fakat dinamik simülasyonlar gerçek zamanlı uygulamalar için uygun değildir.

Gerilim kararlılığı incelemesinde kullanılan en yaygın araç “yük akışı analizi” dir. Bu analizlerde genellikle klasik Newton-Raphson yöntemi kullanılmaktadır [3,4]. Bu hesaplamalarda Jacobian matrisinin tekil olduğu nokta kararlılık sınırındır. Yük akışı ile sistemin ilgilenilen barası için P-V ve Q-V eğrileri çizilerek sistemin yüklenme sınırları bulunur. Bu inceleme yaklaşımı sistemlerin planlanması ve yeniden yapılması (yapılandırılması) için daha uygun olmaktadır. Diğer taraftan tekillik noktası civarında Newton- Raphson tabanlı yaklaşımların yakınsama zorluğu bulunduğu bilinmektedir [5,6].

Gerilim kararlılığı incelemesinde kullanılan bir diğer yaklaşım ise “L” indisi diye tanımlanan göstergelerin kullanılmasıdır [7]. Bu indisler hat veya bara yüklenme indisleri olarak da isim almakta olup, pek çok farklı türleri geliştirilmiştir. “L” indisi değerinin 0 olması sistemin yüksüz durumda olduğunu; 1 olması ise hat veya baranın gerilim kararsızlığı oluşturacak şekilde yüklendiğini işaret etmektedir. Bu indisler yük atma içinde kullanılmaktadır [8].

Gerilim kararlılığının değerlendirilmesinde güç sistemin Thevenin eşdeğer empedansına dayalı indisler de oluşturulmuştur [9, 10, 11]. Bu yaklaşım güç sisteminin maksimum güç transferi noktasının belirlenmesine dayanmaktadır. Bu çalışmalarda sorun Thevenin eşdeğer devre parametrelerinin kestirilmesidir. [10]’de en küçük kareler tekniğini içeren bir yaklaşım ve [1, 11, 12, 13]’de ters matris çözümüne dayalı bir yaklaşım önerilmiştir. Bu çalışmalarda gerilim kararlılığı sınırlarının belirlenmesi için VSM diye ifade edilen farklı gerilim kararlılık marjini tanımlanmıştır. [14]’de farklı L ve VSM göstergeleri ve olası kullanım alanları tartışılmıştır.

Son zamanlarda, Fazör Ölçüm Birimlerin (PMU) geliştirilmesi ile beraber yeni yaklaşımlar geliştirilmeye başlanmıştır. PMU'ların kullanımı ile geniş alan görüntüleme ve kontrolü mümkün olabilecektir. Fakat PMU'lardan sağlanacak gerilim-akım fazör ölçümleri mikro saniyeler hassasiyetinde senkronize olması beklenmektedir. Güç sisteminin pek çok barasından senkronize toplanan verilerin bulut bilişim sistemlerinde büyük veri olarak depolanması ve çok hızlı değerlendirilmesi yeni sorunları beraberinde getirmekte olup, bu konuda pek çok çalışma yürütülmektedir. Bu veriler ile anlık gerilim kararlılığı ve diğer değerlendirmelerin yapılması mümkün olabilecektir [15, 16, 17, 18].

Bu çalışmada, özellikle [11, 12, 13]'den hareketle yerel bara ölçümlerine dayalı gerçek zamanlı bir gerilim kararlılığı değerlendirme sistemi üzerine yoğunlaşmıştır.

1.3. Tezin Amacı ve Kapsamı

Karmaşık ve dinamik güç sistemi üzerinde gerçek durumun değerlendirilerek gerilim kararlılık analizinin yapılması oldukça zordur. Zorluk genel olarak değerlendirme için gerekli verilerin elde edilmesi doğrultusundadır.

Tezin amacı, yerel bara ölçümlerinden hareketle gerilim kararlılığının gerçek zamanlı değerlendirilmesine yönelik bir yaklaşım ortaya koyup, simülasyonlar ile geçerliliğini sınamaktır.

Bu tezde gerçek zamanlı gerilim kararlılığı değerlendirmesine yönelik olarak öncelikle, n-baralı bir güç sisteminin iki bara eşdeğerine indirgenmesi yapılacaktır. n-baralı bir güç sisteminin k. yük barasından yapılan $V - I - \cos \varphi$ ölçümlerinden hareketle, k. bara arkasında kalan sistemin Thevenin eşdeğer devre parametrelerinin gerçek zamanlı kestirimine yönelik bir yaklaşım yürütülecek; elde edilen parametrelerden gerilim kararlılığı değerlendirmesinin nasıl yapılacağı araştırılacak ve elde edilen yaklaşımlar simülasyonlar üzerinde incelenecektir.

Bu amaca yönelik olarak, 2. bölümde gerilim kararlılığı kavramları detaylıca incelenmiş, 3. bölümde gerilim kararlılığını inceleme yöntemleri özetlenmiştir. 4. Bölümde, gerçek zamanlı Thevenin eşdeğer parametrelerinin kestirimine yönelik bir yaklaşım elde edilmiş ve basit bir simülasyon ile geçerlilik testi yapılmıştır. Bölüm 5'te ise 4. Bölümde elde edilen yaklaşımlar IEEE 30 baralı standart test sistemi üzerinde geniş bir şekilde değerlendirilmiştir.

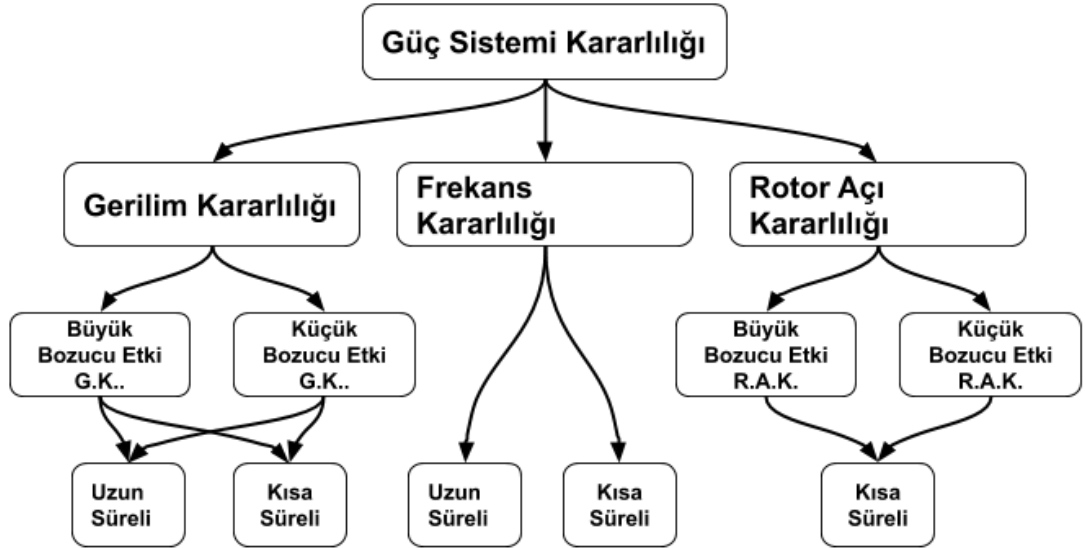


BÖLÜM 2. GÜÇ SİSTEMLERİ KARARLILIK PROBLEMİ

2.1. Giriş

Günümüzde elektrik enerjisine olan ihtiyacın sürekli artması güç sisteminin işletme problemlerini de beraberinde getirmektedir. Güç sistemin dinamik yapıda olması, sürekli değişken parametrelere sahip olan generatör ve yükler sistemin yapısını nonlineer yapmakta ve buna bağlı olarak sistemin kararlı işletilmesi zor bir hal almaktadır. Sistemde meydana gelen bozucu etkiler sonrasında sistemin normal işletme koşullarına gelebilmesi kararlılık olarak tanımlanabilir [19].

Güç sistemlerinde kararlılık genel olarak rotor açısı kararlılığı, frekans kararlılığı ve gerilim kararlılığı olmak üzere üç ana başlık altında incelenmektedir.



Şekil 2.1. Güç sistemi kararlılığının IEEE / CIGRE' ye göre sınıflandırılması

Bu çalışmada sadece gerilim kararlılığı problemi ile ilgilenildiği için bundan sonraki kısımda gerilim kararlılığı dair tanımlamalar ve etkilerden bahsedilmiştir.

2.2. Gerilim Kararlılığı Tanımı

Gerilim kararlılığı güç sisteminde büyük güçlü yük alma veya yük atma, hat açması, kısa devre gibi herhangi bozucu etki meydana gelmesi durumundan sonra sistemin tekrar normal çalışma koşullarına dönebilme yeteneğine denir [20].

Güç sisteminde normal çalışma koşullarının bozucu etkiler ile ani değişimi sonucunda gerilim seviyesindeki büyük düşümler gerilim kararsızlığına sebep olur. Gerilim kararsızlığının en büyük sebebi sistemde gerek duyulan reaktif gücün karşılanamamasıdır [21].

2.2.1. Büyük bozucu etki gerilim kararlılığı

Sistemdeki üretim azalması, hat arızası gibi büyük bozulmalar sonrasında güç sisteminin geriliminin kabul edilebilir seviyede kalabilmesi yeteneğidir. Sistemdeki kontrol ve koruma cihazlarının etkileşimini içeren güç sistemi lineer olmayan cevabı, büyük bozucu etki gerilim kararlılığı için önemlidir.

2.2.2. Küçük bozucu etki gerilim kararlılığı

Sistemdeki küçük yük değişimlerine karşı sistemin gerilimin kabul edilebilir seviyede tutulabilmesi yeteneğidir. Bu analiz için çalışma noktası civarında lineerleştirilmiş sistem modelini kullanmak gerekir.

Büyük Bozucu etki ve Küçük bozucu etki gerilim kararlılığı sistemdeki etki süresi açısından iki farklı şekilde tanımlanabilir.

Kısa Süreli Gerilim Kararlılığı;

Güç sisteminde bulunan asenkron motorları, HVDC dönüştürücüleri ve elektronik kontrollü yüklerin etkisiyle meydana gelir. Çalışma süresi saniyelerle kısıtlıdır ve diferansiyel denklem eşitleri ile çözülebilir.

Uzun süreli Gerilim Kararlılığı;

Güç sisteminde bulunan ULTC, ısıtma özellikli omik yükler gibi sistemde yavaş çalışan cihazların etkisiyle meydana gelir. Çalışma aralığı birkaç dakikaya çıkabilmektedir. Sürekli hal analizleri sistemin kararlılık sınırlarını elde etmek için kullanılabilir.

2.2.3. Gerilim kararlılığını etkileyen faktörler

1. Gerilim kararlılığı;
2. Güç sisteminin yükündeki doğal artışlar
3. Küçük kademeli değişiklikler
4. Sistemde üretim kaybı veya ani yüklenmeler
5. Sistemde reaktif güç talebi artışı ve generatörlerin bu ihtiyaca cevap verememesi
6. Sistemde aşırı reaktif güç kompanzasyonu

Gibi faktörler sistemin gerilim kararlılığını etkileyen ana faktörlerdir fakat en önemli faktör sistemdeki reaktif güç talebindeki artması ve karşılanamaması durumunda meydana gelen kararsızlıktır.

2.2.4. Gerilim kararsızlığından kaçınabilmek için alınabilecek önlemler

Güç sistemleri belirli bir gerilim seviyesi aralığında çalışmaktadır. Sistem baralarında meydana gelen gerilim düşüşlerinde ilk olarak sistemdeki reaktif güç kaynakları devreye alınarak sistemin tekrar normal işletme koşullarına getirilmesi hedeflenir. Burada asıl amaç toplam aktif güç kayıplarını azaltmak ve baralardaki gerilim seviyesini istenilen seviyeye getirmektir.

1. Reaktif güç kompanzasyonu sistemin gerilim seviyesini arttırabilir. Sistemdeki yük tesislerinde bulunan şönt kapasitörler uygun konum ve boyutta bulunmaları halinde sistemdeki reaktif güç üretimini azaltacak ve bunun sonucunda sistemde gerilim seviyesi düştüğü gibi kayıp güçler de azalacaktır. Bununla birlikte hatlar üzerinde bulunan seri kompanzatörler hattı kısaltmaya

benzer etki göstereceğinden sistemdeki gerilim düşümünü arttırıcı etki yapacaktır.

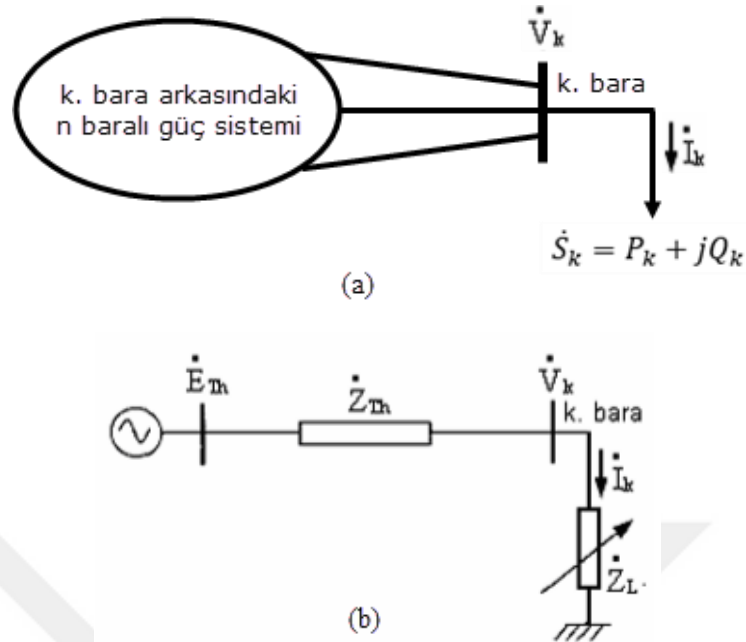
2. Gelişen teknoloji ile birlikte ortaya çıkan FACTS cihazları üretim ve ağ topolojisini değiştirmeden sistemdeki güç akışını kontrol etme kolaylığı sağlayarak gerilim kararsızlığı probleminin çözümüne katkı sağlamaktadır.
3. Kademe değiştiricili transformatörler yerel olarak sistemdeki gerilim düşüşlerini kademe ayarını değiştirerek giderir ve gerilim kararsızlığının etkilerini azaltabilir.[22]

2.3. Yük Akışı Tabanlı Gerilim Kararlılığı İncelenmesi

Yük akışı analizi sistemdeki yük değişimlerine bağlı olarak baralara ait gerilimi hesaplamak için kullanılır. Yük barasında yük adım adım arttırılarak maksimum yük akışı noktasına kadar hesaplama yapılır ve ilgili baraya ait P-V eğrisi çizdirilerek baranın gerilim kararlılığı hakkında yorum yapılabilir. Büyük güç sistemlerinde hesap kolaylığı için, ilgilenilen yük barasına ait P-V eğrileri çizdirmek için sistemde sadece ilgilenilen bara ve salınım barası kalacak şekilde diğer tüm üretim ve yük baraları pasif eleman olarak hesaplanıp sistemin bara admitans matrisine eklenir. Daha sonra elde edilen bara admitans matrisi indirgeme yapılarak iki baraya indirgenir ve ilgilenilen yük barasında güç faktörü sabit kalmak koşulu ile yük adım adım arttırılarak P-V eğrisi çizdirilebilir.[23]

2.4. Yerel Bara Ölçümü Temelli Gerilim Kararlılığı İncelenmesi

Yerel bara parametrelerini kullanarak yapılan gerilim kararlılığı incelemeleri bir güç sistemini iki baralı thevenin eşdeğer devresine indirgeyerek yapılan incelemelerdir. Bu yöntem ilgilenilen bara ve sistemin diğer tüm elemanları olmak üzere sistem iki elemanlı bir devre olarak ele alınır. Aşağıdaki devrede Z_L sistemin ilgilenilen barasına ait empedans değeri, E_{th} sistemde bulunan bütün üretim baralarının oluşturduğu gerilim değeri, Z_{th} ise ilgili bara hariç sistemde bulunan tüm elemanlara (generatörler, yükler, hatlar vs) ait empedansı Şekil 2.2(a,b) temsil etmektedir.



Şekil 2.2. İki baraya indirgenmiş n baralı güç sistemi (a) ve thevenin eşdeğer devresi (b)

Sisteme ait thevenin eşdeğeri kullanılarak ilgili baradan çekilebilecek maksimum güç hesaplanabilmektedir. Yük barasına ait empedans değeri ve sistemin thevenin eşdeğer empedansı birbirine eşit olduğunda ($Z_{th} = Z_L$) ilgili yük barasından maksimum güç transferi yapılabilmektedir ve bu da ilgili baranın gerilim kararlılığı açısından çökme noktasını göstermektedir.

Yapılan literatür incelemesinde thevenin eşdeğer devresi kullanılarak elde edilen ISI (impedance-stability index) empedans-kararlılık indeksi yük empedansının thevenin empedansına eşit olduğunda sistemin çökme noktasında olduğunu belirtmekte ve verilen indeks 0-1 arasında değişerek gerilim kararlılığı ile ilgili bilgi vermektedir. İndeks sıfıra yaklaştığında ve sıfır olduğunda sistemin çökeceği anlaşılmaktadır.

$$ISI = (Z_k - Z_{th}) / Z_k$$

[24,25,26]

Bu tez çalışmasında Thevenin eşdeğer devresi kullanılarak elde edilen VSM (voltage stability margin) kullanılmış ve ilgili baradaki kritik gerilim değeri her iki örnekleme

için hesaplanmış ve anlık gerilim değeri ile karşılaştırılarak sistemin gerilim kararlılığı incelenmiştir.

$$VSM_V = \frac{V_k - V_{k,cr}}{V_{k,cr}} \quad [13]$$

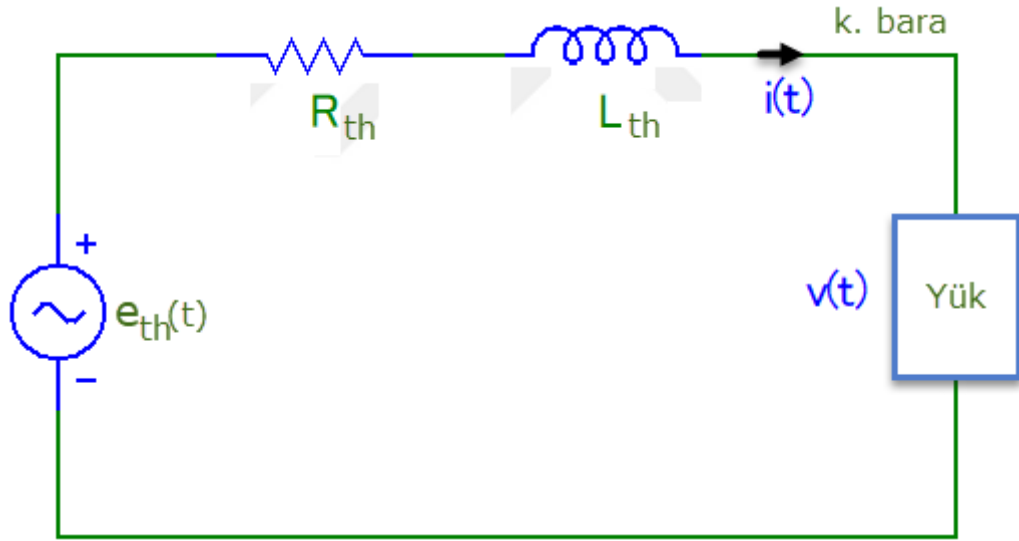
2.5. Geniş Şebekeler Üzerinde PMU Tabanlı İnceleme

Son zamanlarda, Fazör Ölçüm Birimlerin (PMU) geliştirilmesi ile beraber yeni yaklaşımlar geliştirilmeye başlanmıştır. PMU'ların kullanımı ile geniş alan görüntüleme ve kontrolü mümkün olabilecektir. Fakat PMU'lardan sağlanacak gerilim-akım fazör ölçümlerinin mikro saniyeler hassasiyetinde senkronize olması beklenmektedir. Güç sisteminin pek çok barasından senkronize toplanan verilerin bulut bilişim sistemlerinde büyük veri olarak depolanması ve çok hızlı değerlendirilmesi yeni sorunları beraberinde getirmekte olup, bu konuda pek çok çalışma yürütülmektedir. Bu veriler ile anlık gerilim kararlılığı ve diğer değerlendirmelerin yapılması mümkün olabilecektir [15,16,17].

BÖLÜM 3. ANİ DEĞERLERE DAYALI OLARAK THEVENİN EŞDEĞER DEVRESİ PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE GERİLİM KARARLILIĞI DEĞERLENDİRMESİ

3.1. Ani Değerlere Dayalı Olarak Thevenin Eşdeğer Devresi Parametrelerinin Elde Edilmesi

Bu bölümde Thevenin eşdeğer devresi parametreleri ani değerlerden hareketle belirlenecektir.



Şekil 3.1. İki baraya indirgenmiş şebeke Thevenin modeli (zaman domen)

Şekil 3.1.'e Kirchhoff gerilimler yasası uygulandığında;

$$e_{Th}(t) = v(t) + R_{Th} \cdot i(t) + L_{Th} \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (3.1)$$

elde edilir. Yerel bara ölçümlerinden hareket edildiğinde, sistem tarafına ait Thevenin eşdeğer devre parametreleri $e_{Th}(t)$, $R_{Th}(t)$ ve $L_{Th}(t)$ bilinmemekte; yük tarafındaki

$v(t)$ ve $i(t)$ kolayca ölçülebilmektedir. Bu tek eşitlikten görünen 3 bilmeyenin belirlenmesi imkânsızdır. Literatürde bu tür durumlarda, sistem tarafında değişiklik olmadığı varsayılarak, farklı yük şartlarına ait ardıl yerel bara ölçümleri yapılarak eşitlik sayısı arttırılmaktadır [11].

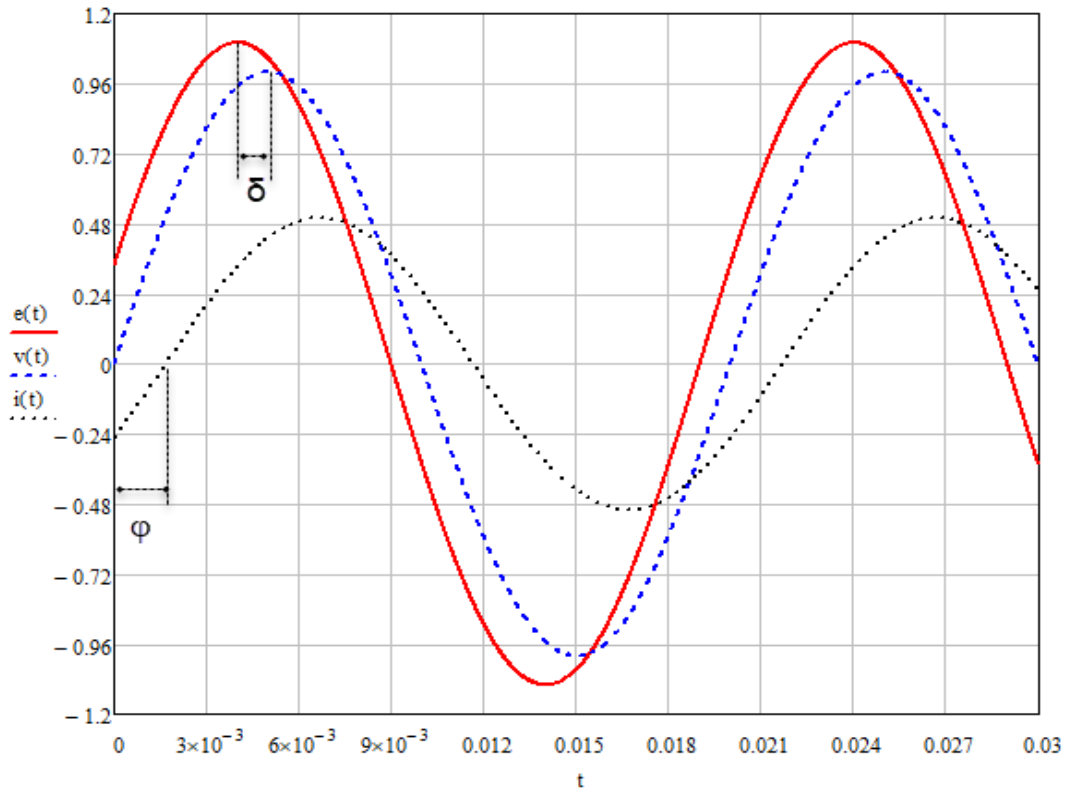
$v(t)$ Referans alındığında;

$$v(t) = V_m \cdot \sin(\omega t) \quad (3.2)$$

$$e(t) = E_m \cdot \sin(\omega t + \delta) \quad (3.3)$$

$$i(t) = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.4)$$

yazılabilir. Burada δ yük açısını, φ yük akımının $v(t)$ 'ye göre fazını göstermektedir (Şekil 3.2.). Yük barasından (yerel bara) iki ardıl ölçüm yapıldığı ve bu esnada $e(t)$ 'nin özellikleri olan E_{Thm} ve δ 'nın sabit kaldığı varsayılacaktır.



Şekil 3.2. Akım ve gerilimlerin ani değişimleri.

Eşitlik 3.2-3.4, Eşitlik 3.1 de yerine konup türev alındığında;

$$E_{Thm} \sin(\omega t + \delta) - V_m \sin(\omega t) + R_{Th} I_m \sin(\omega t + \varphi) - \omega L_{Th} I_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (3.5)$$

elde edilir.

$$\sin(\omega t + \varphi) = \sin(\omega t) \cdot \cos(\varphi) + \cos(\omega t) \cdot \sin(\varphi)$$

$$\cos(\omega t + \varphi) = \cos(\omega t) \cdot \cos(\varphi) - \sin(\omega t) \cdot \sin(\varphi)$$

Özdeşlikleri ve $\sin(\omega t)$ ile $\cos(\omega t)$ 'nin ortogonallığı kullanıldığında 3.5 eşitliği;

$$\sin(\omega t) \cdot [-V_m - R_{Th} I_m \cos(\varphi) + \omega L_{Th} I_m \sin(\varphi) + E_m \cos(\delta)] = 0 \quad (3.6)$$

$$\cos(\omega t) \cdot [-R_{Th} I_m \sin(\varphi) - \omega L_{Th} I_m \cos(\varphi) + E_m \sin(\delta)] = 0 \quad (3.7)$$

yazılabilir.

$$X_{Th} = \omega L_{Th} \quad (3.8)$$

$$E_{\alpha m} = E_{Thm} \cdot \cos(\delta) \quad (3.9)$$

$$E_{\beta m} = E_{Thm} \cdot \sin(\delta) \quad (3.10)$$

Tanımları kullanılarak 3.6 -3.7 eşitlikleri aşağıdaki gibi düzenlenebilir:

$$-V_m - R_{Th} I_m \cos(\varphi) + X_{Th} I_m \sin(\varphi) + E_{\alpha m} = 0 \quad (3.11)$$

$$-R_{Th} I_m \sin(\varphi) - X_{Th} I_m \cos(\varphi) + E_{\beta m} = 0 \quad (3.12)$$

Yukarıdaki iki eşitlikte, R_{Th} , X_{Th} , $E_{\alpha m}$ ve $E_{\beta m}$ sistem taraflı bilinmeyenlerdir. Dört bilinmeyen ve iki denklem mevcuttur. Sistem tarafında gözlem sürecinde değişiklik olmadığı varsayılarak, kısa zaman aralıklı ardıl 2 yerel bara ölçümleri yapılarak eşitlik sayısı 4'e arttırılırsa çözüm elde edilebilir [11]. Burada yeni ölçümden lineer bağımsız

katkı gelebilmesi için V_m , I_m ve φ 'nin az da olsa değişmesi gereklidir. Bu parametrelerin aynı değişmediği ölçümler tasnif dışı tutulmalıdır.

Yerel baradan iki ölçüm alınması (indis 1-2 diye belirtilmiştir) durumunda elde edilen eşitlikler matris biçiminde aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\begin{pmatrix} -I_{m1} \cos(\varphi_1) & I_{m1} \sin(\varphi_1) & 1 & 0 \\ -I_{m2} \cos(\varphi_2) & I_{m2} \sin(\varphi_2) & 1 & 0 \\ -I_{m1} \sin(\varphi_1) & -I_{m1} \cos(\varphi_1) & 0 & 1 \\ -I_{m2} \sin(\varphi_2) & -I_{m2} \cos(\varphi_2) & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R_{Th} \\ X_{Th} \\ E_\alpha \\ E_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{m1} \\ V_{m2} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

Faz farklı iki sinüzoidal büyüklük arasında aşağıdaki ilişki mevcuttur:

$$\begin{aligned} v(t) = 0 \text{ iken } i(t) &= I_m \cdot \sin(\varphi) \\ i(t) = 0 \text{ iken } v(t) &= -V_m \cdot \sin(\varphi) \\ v(t) = V_m \text{ iken } i(t) &= I_m \cdot \cos(\varphi) \\ i(t) = I_m \text{ iken } v(t) &= V_m \cdot \cos(\varphi) \end{aligned} \quad (3.14)$$

Sinüzoidal değişkenlerin yukarıda verilen ilişki mikrokontrolör uygulamalarında kolaylık sağlamak ve etkin değer hesaplamaksızın yarı periyod içerisinde maksimum değerler elde edilebilmektedir. Bu da, değerlendirmelerin daha kısa sürede yapılmasına imkân tanıyacaktır. Bu yaklaşımın etkinliği 4 noktaya sinüs uydurma yaklaşımıyla iyileştirilip süreklileştirilebilir [27].

3.2. Etkin Değerlere Dayalı Olarak Thevenin Eşdeğer Devresi Parametrelerinin Elde Edilmesi

3.13 Eşitliği, etkin değerler ile kullanılmak için aşağıdaki gibi düzenlenebilir:

$$\begin{pmatrix} -I_1 \cdot \cos(\varphi_1) & I_1 \cdot \sin(\varphi_1) & 1 & 0 \\ -I_2 \cdot \cos(\varphi_2) & I_2 \cdot \sin(\varphi_2) & 1 & 0 \\ -I_1 \cdot \sin(\varphi_1) & -I_1 \cdot \cos(\varphi_1) & 0 & 1 \\ -I_2 \cdot \sin(\varphi_2) & -I_2 \cdot \cos(\varphi_2) & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R_{Th} \\ X_{Th} \\ E_\alpha \\ E_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

Burada;

$$A = \begin{pmatrix} -I1 \cdot \cos(\varphi1) & I1 \cdot \sin(\varphi1) & 1 & 0 \\ -I2 \cdot \cos(\varphi2) & I2 \cdot \sin(\varphi2) & 1 & 0 \\ -I1 \cdot \sin(\varphi1) & -I1 \cdot \cos(\varphi1) & 0 & 1 \\ -I2 \cdot \sin(\varphi2) & -I2 \cdot \cos(\varphi2) & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad x = \begin{pmatrix} R_{Th} \\ X_{Th} \\ E_{\alpha} \\ E_{\beta} \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

Tanımlanarak, ters matris yöntemi ile bilinmeyen vektörü çözülebilir:

$$\begin{aligned} A \cdot x &= b \\ x &= A^{-1} \cdot b \end{aligned} \quad (3.17)$$

Literatür ile karşılaştırıldığında, ani değerlerden hareketle elde edilen bu çözüm, Haque'nin [11] çözümünün sadeleştirilmiş haline denk gelmektedir. Bu sadeleştirme, ters matris işleminde oluşan tekillik sorunu iyileşme sağlamaktadır.

3.15 eşitliğinin çözümünden, sistemin Thevenin eşdeğer geriliminin etkin değeri, yük açısı, eşdeğer empedans ve açısı;

$$E_{Th} = \sqrt{E_{\alpha}^2 + E_{\beta}^2} \quad (3.18)$$

$$\delta = \text{atan}\left(\frac{E_{\alpha}}{E_{\beta}}\right) \quad (3.19)$$

$$Z_{Th} = \sqrt{R_{Th}^2 + X_{Th}^2} \quad (3.20)$$

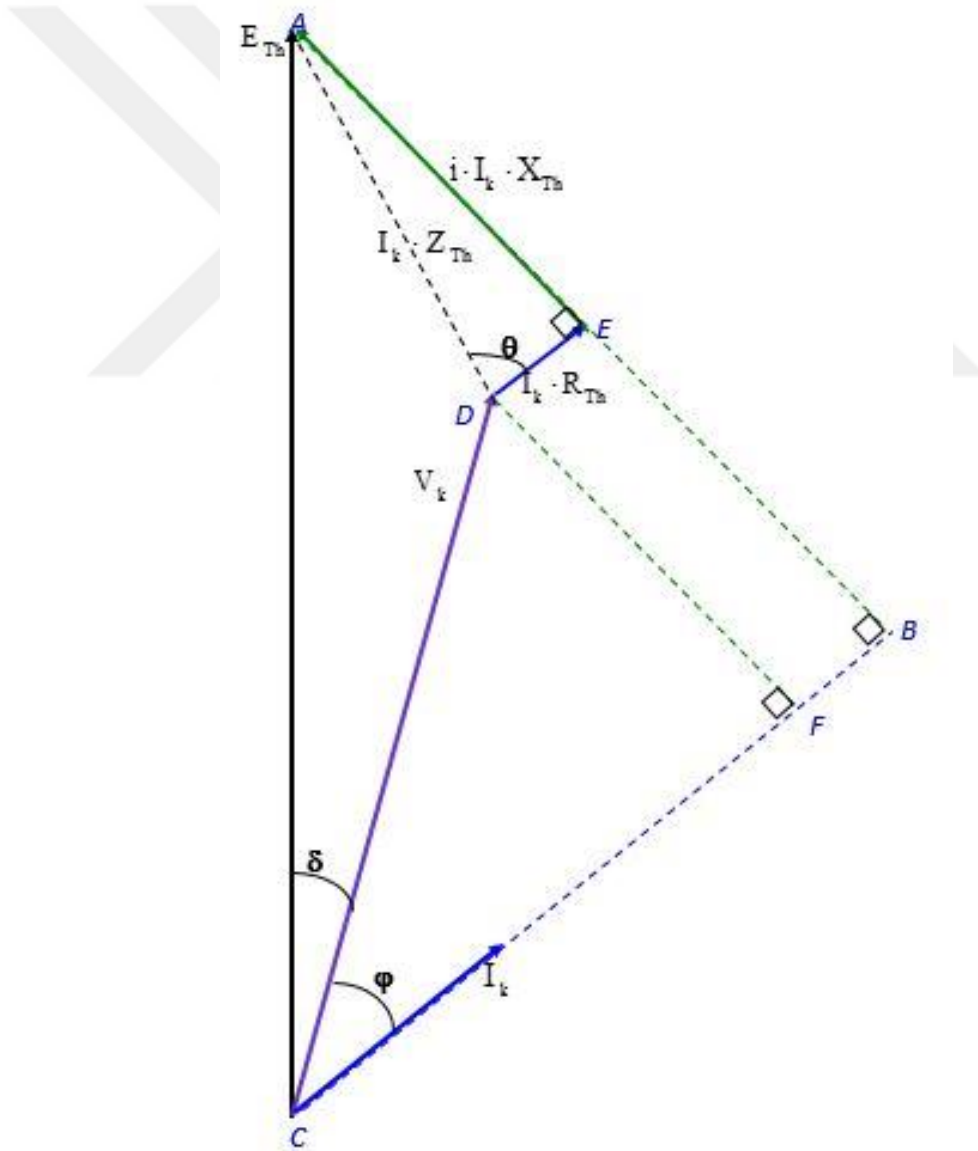
$$\theta = \text{atan}\left(\frac{X_{Th}}{R_{Th}}\right) \quad (3.21)$$

elde edilir. V referans seçildiğinden, 3.19 ifadesinde bulunan δ (yük açısı), k. baraya (yüke) doğru olan beslemelerde pozitifdir. Bu açı yük akışında, salınım referans seçildiğinden negatif çıkmaktadır. Bu durum karşılaştırma yaparken düzeltilecektir.

Yapılan çeşitli simülasyonlarda, 3.18 ifadesinin Thevenin gerilimini %1'den küçük hatalar ile ölçtüğü, 3.20 ve özellikle 3.21'in doğruluktan öte denklemleri sayacak

keyfilikte kestirildiği görülmüştür. Bu durumu [13]'da işaret etmiştir. Bu durumun düzeltilmesi için yazılacak ilave denklem veya kısıtlar denklem sistemlerinin lineer olmayan yapıya dönüşmesine neden olmakta, başlangıç şartlarına bağlı olmaya ve ters matris gibi basit çözümlerden uzaklaşmasına neden olmaktadır. Bir tek E_{Th} 'nin bile yüksek doğrulukta bulunması, sürece büyük katkı yapmaktadır. Zira Z_{Th} için yan çözümler geliştirilebilmektedir.

Güç sisteminin k. barası gerisinde kalan Thevenin Eşdeğeri ile çizilmiş fazör diyagram Şekil 3.3.'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Güç sisteminin k. barası gerisinde kalan Thevenin Eşdeğeri ile çizilmiş fazör diyagram

Kestirimler yapılırken, temel kabullerden ilki k. baradan yapılan ölçüm çiftleri esnasında E_{Th} 'ın sabit kaldığıdır. Fazör diyagram üzerinde tanımlanan ABC üçgeni için;

$$E_{Th}^2 = (V_k \cdot \cos(\varphi_k) + I_k \cdot Z_{Th} \cdot \cos(\theta))^2 + (V_k \cdot \sin(\varphi_k) + I_k \cdot Z_{Th} \cdot \sin(\theta))^2 \quad (3.22)$$

ile verilen Pisagor bağıntısı yazılabilir. Bu aşamada Z_{Th} ve θ haricindeki tüm parametreler bilinmektedir. Orta gerilim ve yüksek gerilim hatları için θ açısı 70-85 derece aralığında çıkmaktadır [13]. Bu durum, bu tezde yapılan simülasyon çalışmaları sürecinde de gözlenmiştir. Ayrıca çeşitli yük ve işletme şartlarında Z_{Th} ve θ 'nın çok az değiştiği gözlenmiştir. Çalışmanın devamında θ sabit ve ortalama 80 derece alınacaktır. θ ; Z_{Th} 'ın hesaplanmasına çok ciddi etki yapmamaktadır. Zira bu çalışmada sadece Z_{Th} 'ın genliği ile ilgilenilmekte ve yapılacak gerilim kararlılığı değerlendirmesi için R_{Th} ve X_{Th} 'ın ayrı ayrı bulunması gerekmemektedir. Yapılan simülasyonlarda θ 'daki 10 derecelik bir hatanın empedansta maksimum %4 hata getirdiği, devamında yapılan hesaplamalarda hatanın artmadığı gözlenmiştir.

3.22 Eşitliğinden Z_{Th} 'nin kökleri çözülüp, pozitif yanıt üreten kök alınırsa;

$$Z_{Th} = \frac{\sqrt{4 \cdot E_{Th}^2 - 2 \cdot V_k^2 + 2 \cdot V_k^2 \cdot \cos(2\varphi_k - 2\theta)} - 2 \cdot V_k \cdot \cos(\varphi_k - \theta)}{2 \cdot I_k} \quad (3.23)$$

bulunur. Yine Şekil 3.3'ten δ açısı hesaplanırsa;

$$\delta = \arccos\left(\frac{E_{Th}^2 - I_k^2 \cdot Z_{Th}^2 + V_k^2}{2 \cdot E_{Th} \cdot V_k}\right) \quad (3.24)$$

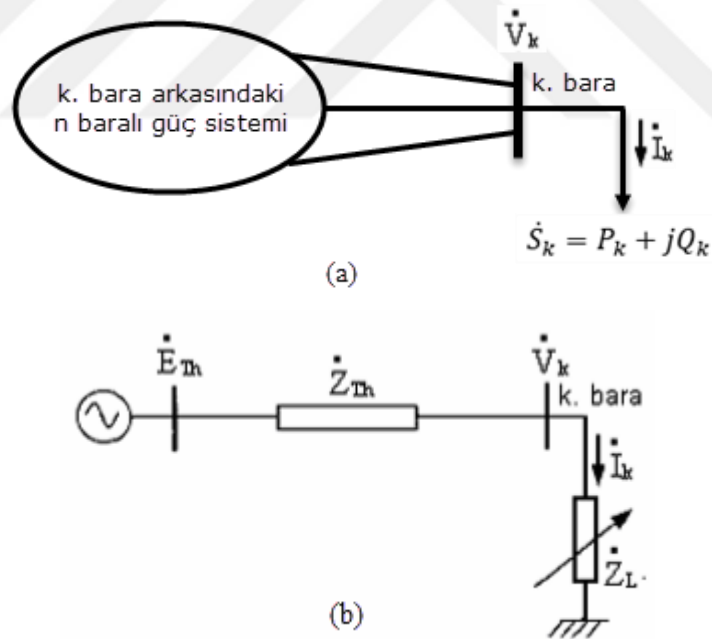
olarak bulunur. Burada k. baraya doğru olan besleme yapıldığı yaklaşımı yapıldığından δ pozitif çıkacaktır.

Böylece, 3.18 ve 3.23 ile n baralı güç sisteminin Thevenin eşdeğer parametreleri, k. baradan yapılan V, I ve $\cos\varphi$ ölçümleri ile kestirilmiş olur. Bir sistemin Thevenin

eşdeğer devresinin bilinmesi, yaygın bilinen maksimum güç transferi ilkelerinin uygulanması ile, o sistemden transfer edilebilecek maksimum güç sınırı hakkında kesin bilgi sağlar.

3.3. Thevenin Parametrelerine Dayalı Olarak Gerilim Kararlılığının Değerlendirilmesi

Güç sistemlerini gerilim kararsızlığına götüren ana etmenlerin lineer olmayan yükler ve yükler tarafından talep edilen reaktif gücün arz edilememesi olarak bilinmektedir [9]. Bu etmenler gözlem yapılan k. yük barasında gerilimin değişimine sebep olmaktadır. Gerilim kararsızlığı değerlendirmesi yapılacak k. baraya transfer edilecek güç sınır değere ulaştığında, sistem gerilim kararsızlığına girmektedir. Ayrıca bu nokta; Jacobian matrisin tekil olduğu ya da klasik P-V, Q-V eğrilerinin çatallaştığı buruna tekabül etmektedir.



Şekil 3.4. (a) k. bara arkasında kalan güç sistemi, (b) Thevenin Eşdeğeri ve yük

Yaygın bilinen maksimum güç teoremine göre, Şekil 3.4'deki sistemin yüke transfer edebileceği maksimum gücün üst değeri;

$$Z_L \angle(\varphi) = Z_{Th} \angle(\theta) \quad ; \quad \varphi = -\theta \quad (3.25)$$

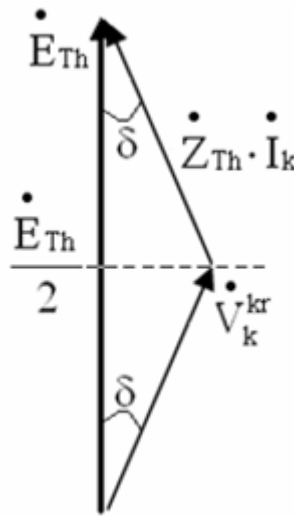
yani; yük empedansının, güç sisteminin Thevenin empedansının karmaşık eşleniğine eşit olması durumunda gerçekleşir. Fakat açılara dikkat edilmeksizin;

$$|Z_L| = |Z_{Th}| \quad (3.26)$$

olduğu her durumda bir ekstramum noktası bulunmaktadır ve bu gerilim kararlılığı açısından k. bara için sınır değerdir. Buradan hareketle, kritik durumda;

$$|Z_L| \cdot I_k = |Z_{Th}| \cdot I_k \quad (3.27)$$

olacaktır. Bu durum, Şekil 3.3.'deki fazörden aşağıdaki özeti elde edilmesini sağlar:



Şekil 3.5. Kritik durumda gerilim fazörleri

Şekil 3.5.'den gerilim kararlılığı değerlendirmesi yapılacak bara için kritik değerler;

$$V_{k,kr} = \frac{E_{Th}}{2 \cos \delta} \quad , \quad V_{k,kr} \geq \frac{E_{Th}}{2} \quad (3.28)$$

$$I_{k,sc} = \frac{\dot{E}_{Th}}{\dot{Z}_{Th}} = \frac{E_{Th} \angle \delta}{Z_{Th} \angle (\theta + \varphi_k)} \quad (3.29)$$

$$I_{k,kr} = \frac{E_{Th}}{2Z_{Th}} = \frac{I_{k,sc}}{2\cos\delta} \quad (3.30)$$

$$S_{k,kr} = \frac{E_{Th}}{2\cos\delta} \cdot \frac{I_{k,sc}}{2\cos\delta} = \frac{S_{k,sc}}{4\cos^2\delta} \quad (3.31)$$

$$P_{k,kr} = S_{k,kr} \cdot \cos\varphi_k \quad (3.32)$$

$$Q_{k,kr} = S_{k,kr} \cdot \sin\varphi_k \quad (3.33)$$

olup, gerilim kararlılığı marjini;

$$VSM_V = \frac{V_k - V_{k,cr}}{V_{k,cr}} \quad (3.34)$$

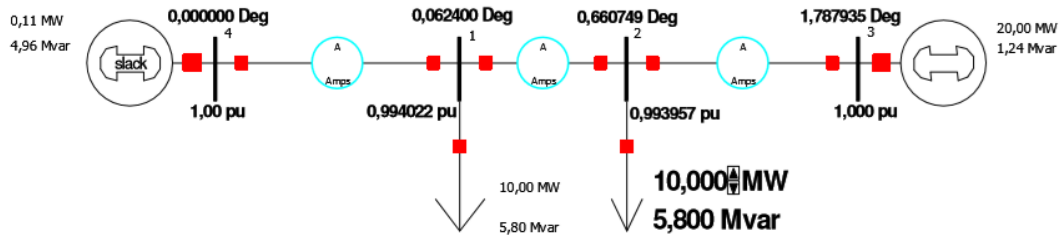
olarak tanımlanır [13].

Burada elde edilen kritik değerler ve marjin, n-baralı sistemi temsil eden ve k. baradan elde edilmiş bir Thevenin Eşdeğerine dayanmaktadır. n-baralı sistemde çok farklı karakterde yükler bulunabilmektedir. Özellikle sabit güç yükleri gibi lineer olmayan yükler farklı yüklenme şartlarında k. bara arkasındaki Thevenin gerilim, empedansını ve yük açısını değiştirebilmektedir. Ayrıca güç sisteminin reaktif rezervleri de yüklenme ile tükenmektedir. Bu nedenle 3.28-3.34 eşitlikleri ile bulunan kritik değer ve marjin ile çok küçük yüklerde hesaplanacak değerler, sistemin kalan yüklenilebilirliği anlamında bilgi türetecektir. Hesaplanan değerler, k. baradaki yüklenme arttığında, sistemin transfer kabiliyetinin azaldığını, güç marjinin azaltıldığını dinamik olarak yakalayacaktır. Bu durum simülasyon sonuçları ile gösterilecektir.

Yukarıda ifade edilen teknik, sistemdeki herhangi bir yük barasının gerilim kararlılık marjini ve müsaade edilebilir yüklenme düzeyini belirlemek için kullanılabilir. En küçük marjin değerine sahip sistem barası en zayıf ve gerilim kararsızlığı açısından en hassas bara olarak yorumlanmalıdır.

3.4. Dört Baralı Örnek Sistem Üzerinde Doğrulama

Şekil 3.6.'da tek hat şeması verilen 4 baralı test sistemi N baralı şebekeyi temsilen ele alınmış ve ilgili yönetimler uygulanarak sonuçları tartışılmıştır. PowerWorld yazılımı ilgili test ve ölçümler için kullanılmıştır.



Şekil 3.6. Dört baralı örnek sistemin tek hat şeması [13].

Gerilim kararlılığı açısından 2. bara incelenecektir. PowerWorld Simulator ile ikinci baradaki yük güç faktörü sabit tutularak güç kararsızlık noktasına kadar artırılmış ve simülasyon sonuçları kaydedilmiştir. Kaydedilen yerel bara (2. bara) parametreleri bu bölümde verilen kestirim algoritmasına girilip, kestirimler için VSM_v gerilim kararlılığı marjini belirlenmiştir.

Tablo 3.1. Dört baralı örnek sisteme ilişkin hat parametreleri

Hat No:	Baradan Baraya p-q		Hat Empedansı $R + jX$	Hattın Şönt Admitansı $G + jB$
1	1	2	$0,02 + j 0,01$	$0, + j 0,020$
2	1	4	$0,02 + j 0,01$	$0, + j 0,020$
3	2	3	$0,02 + j 0,01$	$0, + j 0,020$

Şekil 3.6'de tek hat şeması verilen 4 baralı örnek sistem, 2. Baradaki güç faktörü korunarak gerilim kararsızlık noktasına kadar adım adım artırılmış ve Tablo 3.3'deki değerler kaydedilmiştir (Şekil 3.6). 4 baralı örnek sistemde yapılan güç akışı sonucunda örnek alınan baranın gücü adım adım artırılarak sistemin çökme noktası olan $S=165\text{MVA}$ bulunmuştur. Yapılacak olan kestirimler sonucunda sistem ilgili baradaki güç bu değere ulaşınca sistemin çöktüğünü göstermesi beklenmektedir.

Tablo 3.2. Şekil 3.6'de tek hat şeması verilen dört baralı örnek sisteme ilişkin generatör ve yük değerleri

Bara No:	Bara Tipi	ÜRETİM		YÜK		Gerilim Genliği [V]	Reaktif Limitleri Qmin	Güç Qmax
		P(MW)	Q(MVar)	P(MW)	Q(MVar)			
1	P-Q			10	5,8			
2	P-Q			10	5,8			
3	P-V	20				1,0	-10	10
4	Salınım					1,0		

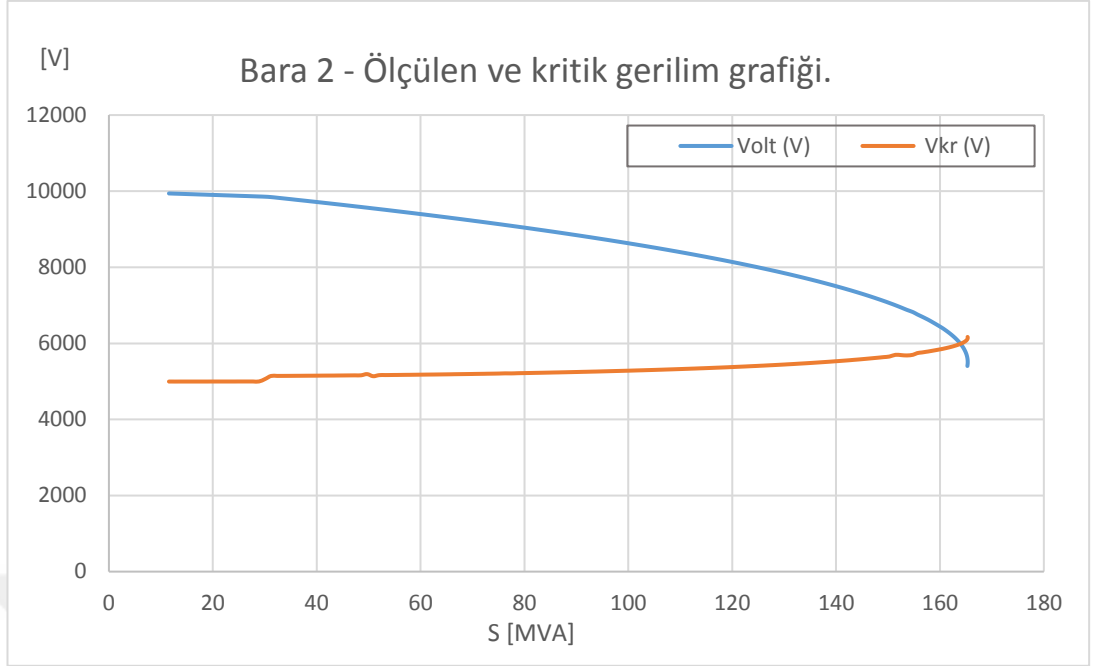
Kaydedilen ölçümler ile yapılan kestirim sonucunda 4 baralı örnek sistemde örnek alınan baradaki gücün 163,5 MVA değerine ulaşınca sistemin çöktüğünü belirten VSM_v indeksinin bu güç değerinde 0.007 olduğu görülmüştür.

Yapılan kestirimin gerçek sistemle karşılaştırıldığında kestirim sonuçlarının sistemin çökme noktasını %1 hata ile hesapladığı görülmüştür.

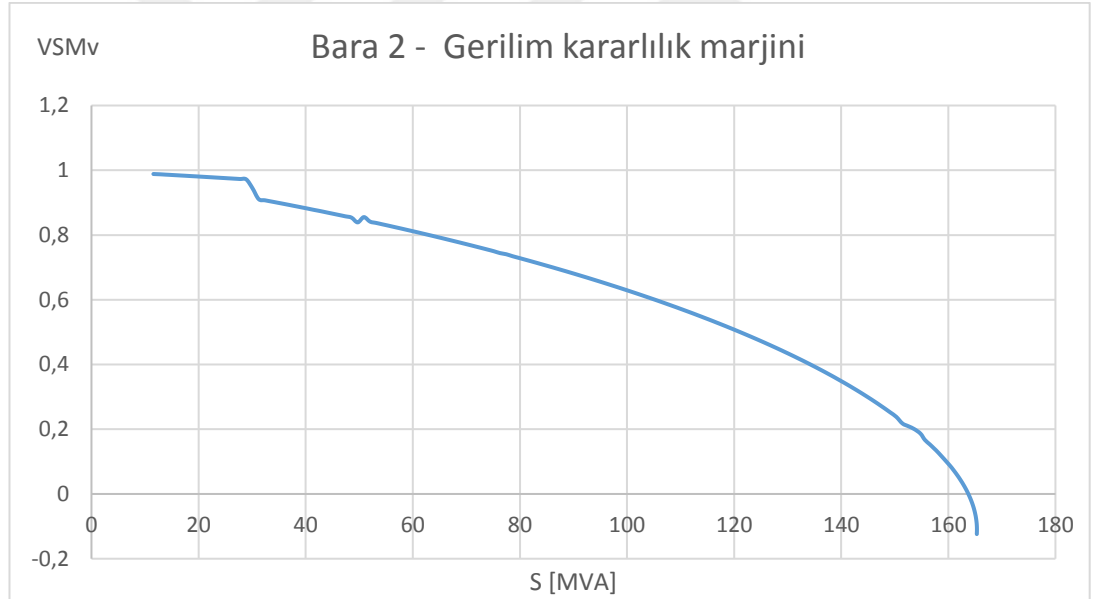
Tablo 3.3. Dört baralı örnek sisteme ilişkin ölçüm değerleri

S (MVA)	Ölçülen Parametreler			Kestirilen Parametreler			
	V2 (V)	Akım(A)	Cos(φ)	E_{Th}	Z_{Th}	$V2_{KR}(V)$	VSM_v
11,56027681	9939,71	671,481262	30,11373	9992,173	0,116099	4996,188	0,988403
20,80849826	9897,757	1213,789429	30,11373	9992,478	0,115664	4996,542	0,979858
30,05671971	9854,679	1760,915649	30,11373	10118,83	0,220097	5061,625	0,944875
40,46096885	9708,023	2406,272217	30,11373	10282,33	0,344174	5150,937	0,881318
50,86521798	9546,92	3070,74707	30,11373	10243,74	0,325029	5136,026	0,855221
60,11343943	9395,887	3693,796875	30,11373	10306,89	0,3494	5176,797	0,811244
70,51768856	9215,91	4417,729004	30,11373	10325,03	0,352134	5196,305	0,769562
80,92193769	9023,576	5177,580078	30,11373	10347,38	0,354861	5220,724	0,724157
90,17015914	8840,383	5888,856445	30,11373	10371,22	0,357265	5247,246	0,680228
100,5743218	8617,711	6738,058594	30,11376	10403,42	0,359982	5283,69	0,626084
110,9785709	8373,263	7652,158203	30,11376	10442,46	0,362714	5328,794	0,565927
120,2267924	8132,472	8535,289063	30,11376	10484,24	0,365153	5378,194	0,506172
130,6310415	7825,681	9637,486328	30,11376	10541,8	0,367936	5448,05	0,429612
139,8793131	7506,738	10758,24902	30,11379	10606,41	0,370497	5528,795	0,349782
150,2835622	7059,755	12290,26367	30,11379	10701,29	0,373274	5654,005	0,238218
160,2564964	6420,237	14411,32813	30,11378	10840,01	0,376209	5848,162	0,088523
160,8541327	6365,859	14588,63574	30,11376	10851,54	0,376363	5865,33	0,076198
161,9128409	6259,436	14934,31934	30,11377	10874,11	0,376642	5899,328	0,052224
162,8007867	6156,201	15268,0293	30,11377	10895,78	0,376864	5932,657	0,029184
163,5317761	6056,194	15589,8457	30,11379	10916,44	0,377028	5965,202	0,007074
164,1196877	5959,408	15899,99023	30,11377	10936,12	0,377141	5996,928	-0,01413
165,0468419	5731,187	16626,53906	30,11378	10980,85	0,377215	6072,399	-0,06333

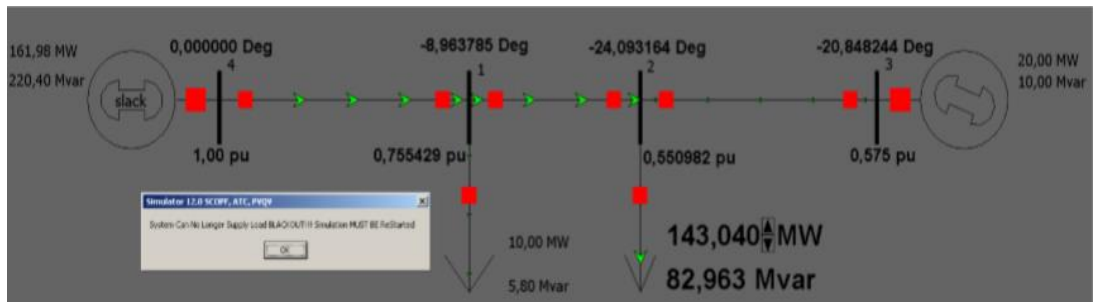
Detaylı ölçüm verileri Ek 1.'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Dört baralı örnek sistemin gerçek ve kritik gerilim grafiği.



Şekil 3.8. Dört baralı örnek sistemin gerçek ve kritik gerilim grafiği.



Şekil 3.9. Dört baralı örnek sistemin yük akışı simülasyonunda gerilimin kararsızlığı girdiği an.

BÖLÜM 4. IEEE 30 BARA İLETİM ŞEBEKESİ ÜZERİNDE GERİLİM KARARLILIĞI DEĞERLENDİRMESİ

4.1. IEEE 30 Bara İletim Şebekesi

N baralı şebekeyi temsil etmek üzere IEEE 30 baralı test sistemi üzerinde önerilen yöntemler uygulanmış ve sonuçları tartışılmıştır. Gerilim kararlılığını incelemek üzere sistemdeki 10, 14, 16, 18, 21, 26 ve 29 numaralı baralar incelenecektir.

Tablo 4.1. IEEE 30 Baralı sistemin bara yük değerleri.

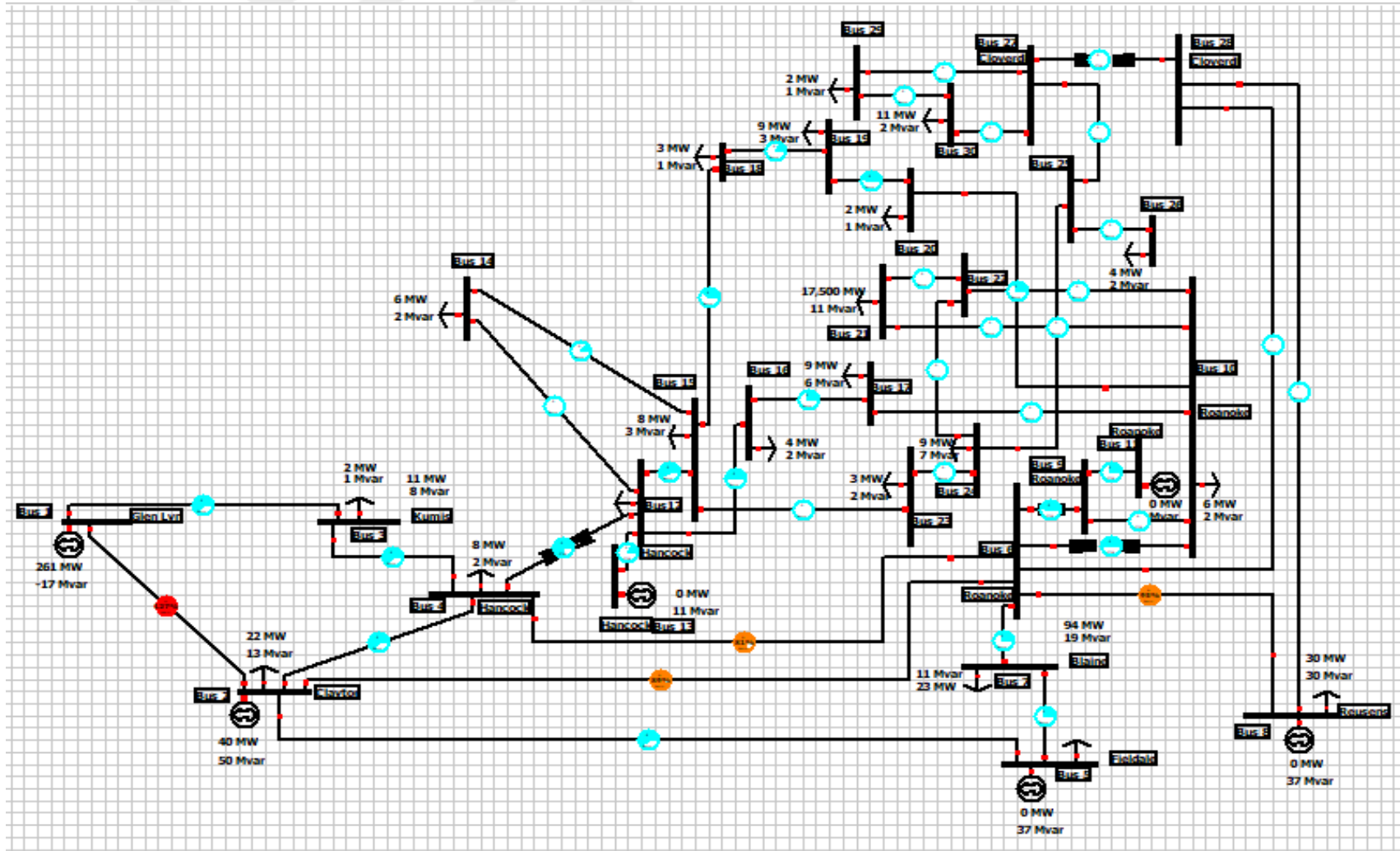
Bara	Yük (MW)	Bara	Yük (MW)	Bara	Yük (MW)
1	0,0	11	0,0	21	17,5
2	21,7	12	11,2	22	0,0
3	2,4	13	0,0	23	3,2
4	67,6	14	6,2	24	8,7
5	34,2	15	8,2	25	0,0
6	0,0	16	3,5	26	3,5
7	22,8	17	9,0	27	0,0
8	30,0	18	3,2	28	0,0
9	0,0	19	9,5	29	2,4
10	5,8	20	2,2	30	10,6

Tablo 4.2. IEEE 30 Baralı sistemin üretim değerleri.

Bara	Qmin (p.u.)	Qmax (p.u.)	Bara	Qmin (p.u.)	Qmax (p.u.)
1	-0,2	0,0	16		
2	-0,2	0,2	17	-0,05	0,05
3			18	0,0	0,055
4			19		
5	-0,15	0,15	20		
6			21		
7			22		
8	-0,15	0,15	23	-0,05	0,055
9			24		
10			25		
11	-0,1	0,1	26		
12			27	-0,055	0,055
13	-0,1	0,1	28		
14			29		
15			30		

Tablo 4.3. IEEE 30 Baralı sistemin hat parametreleri

Hat	Başlangıç Barası	Bitiş Barası	R (p.u.)	X (p.u.)	Tap Ratio	Rating (p.u.)
1	1	2	0,0192	0,0575		0,300
2	1	3	0,0452	0,1852	0,9610	0,300
3	2	4	0,0570	0,1737	0,9560	0,300
4	3	4	0,0132	0,0379		0,300
5	2	5	0,0472	0,1983		0,300
6	2	6	0,0581	0,1763		0,300
7	4	6	0,0119	0,0414		0,300
8	5	7	0,0460	0,1160		0,300
9	6	7	0,0267	0,0820		0,300
10	6	8	0,0120	0,0420		0,300
11	6	9	0,0000	0,2080		0,300
12	6	10	0,0000	0,5560		0,300
13	9	11	0,0000	0,2080		0,300
14	9	10	0,0000	0,1100	0,9700	0,300
15	4	12	0,0000	0,2560	0,9650	0,650
16	12	13	0,0000	0,1400	0,9635	0,650
17	12	14	0,1231	0,2559		0,320
18	12	15	0,0662	0,1304		0,320
19	12	16	0,0945	0,1987		0,320
20	14	15	0,2210	0,1997		0,160
21	16	17	0,0824	0,1932		0,160
22	15	18	0,1070	0,2185		0,160
23	18	19	0,0639	0,1292	0,9590	0,160
24	19	20	0,0340	0,0680		0,320
25	10	20	0,0936	0,2090		0,320
26	10	17	0,0324	0,0845	0,9850	0,320
27	10	21	0,0348	0,0749		0,300
28	10	22	0,0727	0,1499		0,300
29	21	22	0,0116	0,0236		0,300
30	15	23	0,1000	0,2020		0,160
31	22	24	0,1150	0,1790		0,300
32	23	24	0,1320	0,2700	0,9655	0,160
33	24	25	0,1885	0,3292		0,300
34	25	26	0,2544	0,3800		0,300
35	25	27	0,1093	0,2087		0,300
36	28	27	0,0000	0,3960		0,300
37	27	29	0,2198	0,4153	0,9810	0,300
38	27	30	0,3202	0,6027		0,300
39	29	30	0,2399	0,4533		0,300
40	8	28	0,0636	0,2000	0,9530	0,300
41	6	28	0,0169	0,0599		0,300

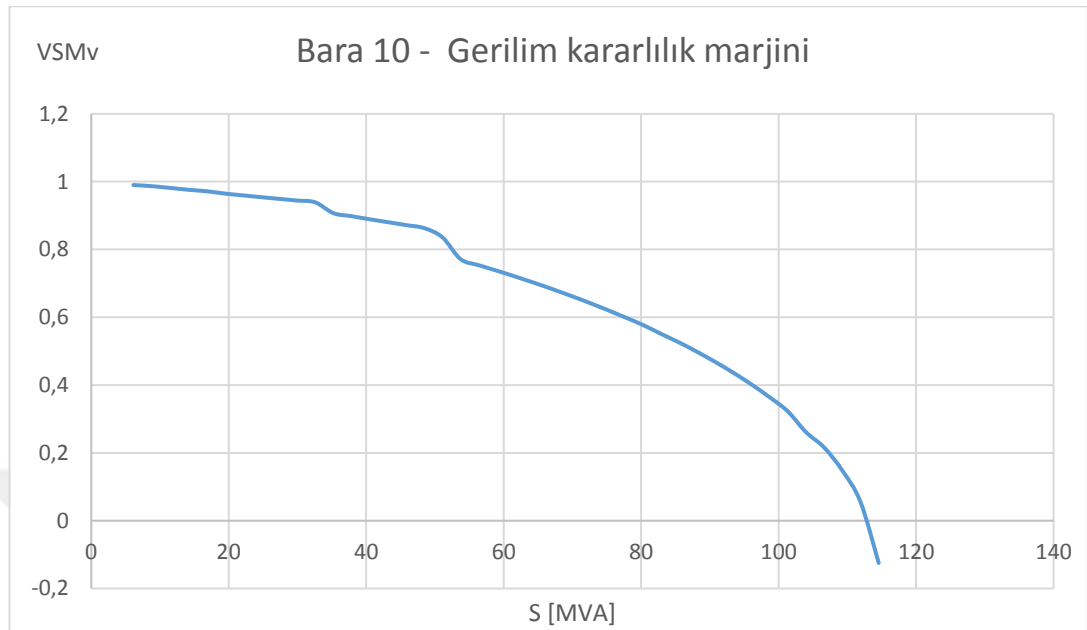


Şekil 4.1. IEEE30 baralı sistemin tek hat şeması.

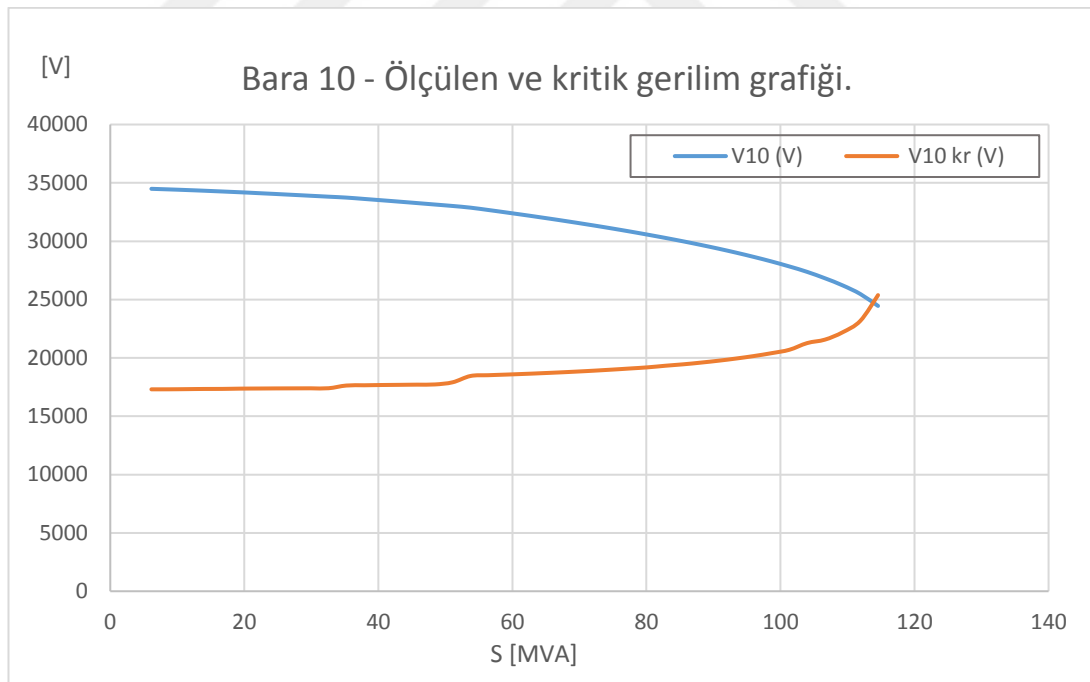
IEEE 30 baralı test sistemi [28] üzerinde PowerWorld programı ile 10, 14, 16, 18, 21, 26 ve 29 numaralı baralardaki güç faktörü sabit kalmak koşulu ile baralardaki güçler adım adım arttırılarak sistemin kararsızlık noktası belirlenmiştir. Bu baralardan elde edilen ölçüm parametreleri kestirim algoritmasına sokulup elde edilen gerilim kararlılığı indeksi VSM_V belirlenmiş ve $V_{(k,kr)} - V_k$ grafikleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar itibari ile VSM_V indeksinin 0 a gittiği nokta ile $V_{(k,kr)} - V_k$ grafiğinin kesiştiği noktanın aynı güç değerine denk geldiği gözlenmiştir. Bu sonuç ile kestirim algoritmasının doğru çalıştığı anlaşılmaktadır.



4.2. IEEE 30 Baralı Sistemde 10 Nolu Baranın Ölçüm Ve Kestirim Sonuçları



Şekil 4.2. Bara 10, Gerilim kararlılık marjini grafiği [VSMv]

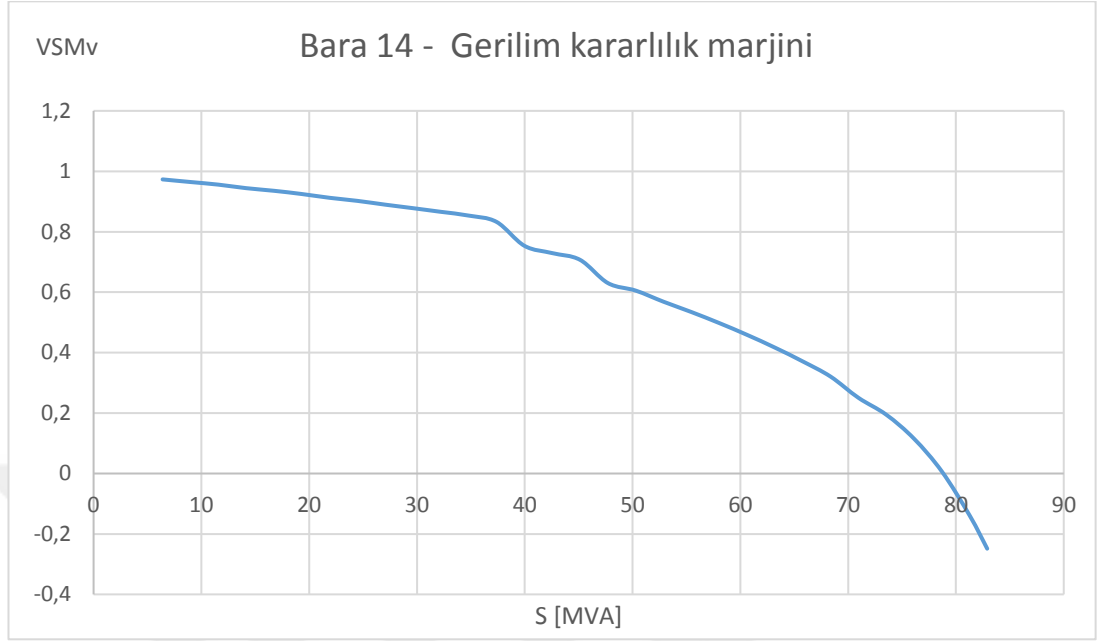


Şekil 4.3. Bara 10, ölçülen ve kritik voltaj grafiği.

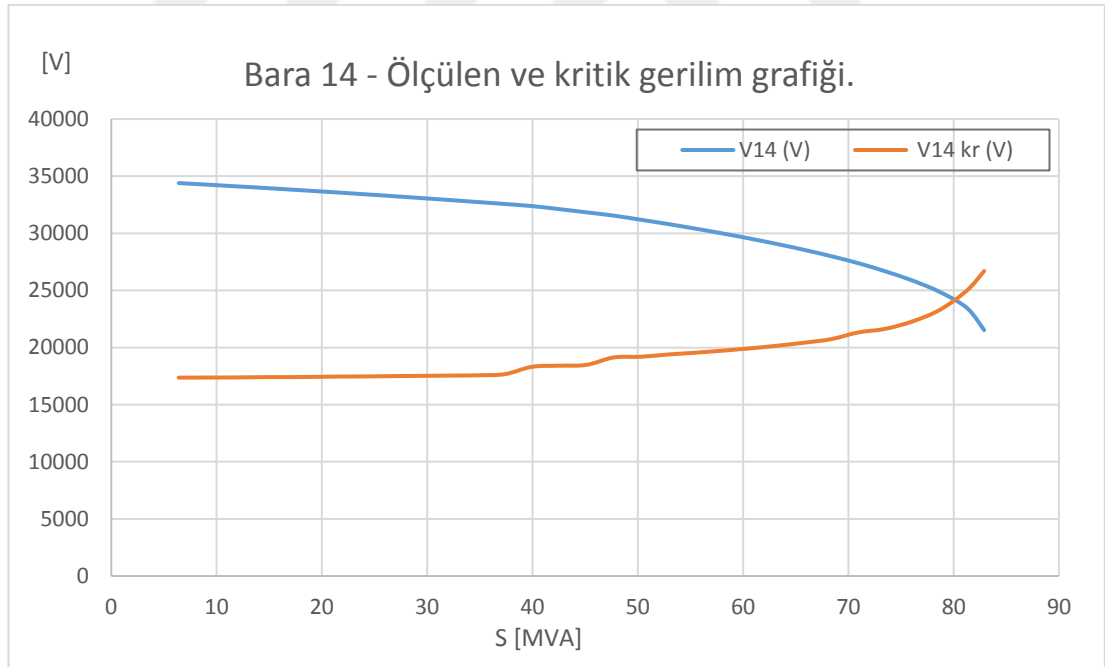
Tablo 4.4. IEEE 30 Baralı sistemin 10 nolu bara özet ölçüm sonuçları.

Ölçülen Parametreler				Kestirilen Parametreler			
S (MVA)	V10 (V)	Akım(A)	Cos(φ)	E_{Th}	Z_{Th}	V10 _{KR} (V)	VSM _V
6,135145	34489,2	102,7025	0,332059	34607,74	2,224437	17304,44	0,990116
8,779581	34437,85	147,19	0,332052	34612,9	2,286728	17307,47	0,986702
11,42402	34384,78	191,82	0,332048	34640,46	2,554373	17322,16	0,981568
14,06845	34325,04	236,6338	0,332046	34666,79	2,758047	17336,59	0,976169
16,71289	34260,04	281,6473	0,332044	34673,65	2,79681	17341,25	0,97181
19,35733	34193,66	326,8449	0,332043	34714,19	3,020287	17363,79	0,965084
22,00176	34121,29	372,2838	0,332042	34729,97	3,090317	17373,81	0,959653
24,6462	34046,64	417,9438	0,332041	34741,6	3,132677	17381,97	0,954344
27,29096	33970,35	463,827	0,332075	34746,63	3,143734	17386,91	0,949351
29,9354	33893,19	509,9297	0,332071	34752,26	3,154978	17392,42	0,944245
32,57983	33815,14	556,2574	0,332068	34758,47	3,166268	17398,51	0,939027
35,22427	33736,18	602,8157	0,332066	35176,08	4,38121	17630,55	0,907079
37,86871	33622,86	650,2564	0,332064	35204,64	4,440584	17652,65	0,898102
40,51314	33506,53	698,0807	0,332062	35232,02	4,490789	17674,83	0,888976
43,15758	33387,34	746,3021	0,33206	35245,5	4,504113	17689,9	0,880525
45,80202	33266,3	794,9131	0,332059	35260,22	4,517862	17706,29	0,871841
48,44645	33143,36	843,9277	0,332057	35276,12	4,531767	17723,98	0,862924
51,09089	33018,43	893,361	0,332056	35576,8	5,069023	17907,68	0,83576
53,73533	32874,2	943,7235	0,332055	36458,73	6,533512	18446,5	0,77133
56,37976	32674,86	996,2075	0,332054	36535,96	6,617537	18515,32	0,753575
59,0242	32468	1049,578	0,332053	36581,65	6,64729	18567,16	0,737227
61,66864	32255,36	1103,832	0,332053	36631,67	6,67835	18623,69	0,720203
64,3134	32036,52	1159,029	0,332067	36686,36	6,710973	18685,35	0,702457
66,95783	31811,01	1215,241	0,332065	36746,24	6,745246	18752,66	0,683936
69,60227	31578,29	1272,546	0,332064	36811,75	6,781219	18826,14	0,664587
72,24671	31337,75	1331,034	0,332063	36883,71	6,81926	18906,57	0,644333
74,89114	31088,7	1390,807	0,332062	36962,77	6,859505	18994,7	0,6231
77,53558	30830,31	1451,985	0,332061	37049,9	6,90228	19091,54	0,600795
80,18002	30561,64	1514,707	0,33206	37131,38	6,934174	19188,63	0,578099
82,82445	30281,57	1579,282	0,332059	37269,1	7,010359	19326,76	0,551669
85,46889	29988,72	1645,468	0,332059	37372,25	7,049781	19447,43	0,526241
88,11333	29681,48	1713,94	0,332058	37505,65	7,107025	19593,82	0,49832
90,75776	29357,81	1784,842	0,332057	37656,25	7,169692	19758,46	0,468493
93,4022	29015,16	1858,54	0,332057	37827,35	7,238652	19944,94	0,436467
96,04664	28650,24	1935,502	0,332056	38024,5	7,31588	20158,82	0,401804
98,69107	28258,71	2016,341	0,332056	38251,15	7,401193	20404,9	0,364113
101,3358	27834,6	2101,922	0,332064	38520,97	7,50015	20696,26	0,322428
103,9803	27369,31	2193,44	0,332064	39149,68	7,784562	21268,38	0,261227
106,6247	26824,25	2294,928	0,332063	39347,33	7,808828	21562,05	0,21583
109,2691	26215,79	2406,431	0,332062	39944,06	8,011805	22191,98	0,147904
111,9136	25474,26	2536,414	0,332062	40868,49	8,312728	23171,41	0,055228
114,558	24451,12	2704,99	0,332061	42782,53	8,851325	25378,61	-0,12468

4.3. IEEE 30 Baralı Sistemde 14 Nolu Baranın Ölçüm Ve Kestirim Sonuçları



Şekil 4.4. Bara 14, gerilim kararlılık marjini.

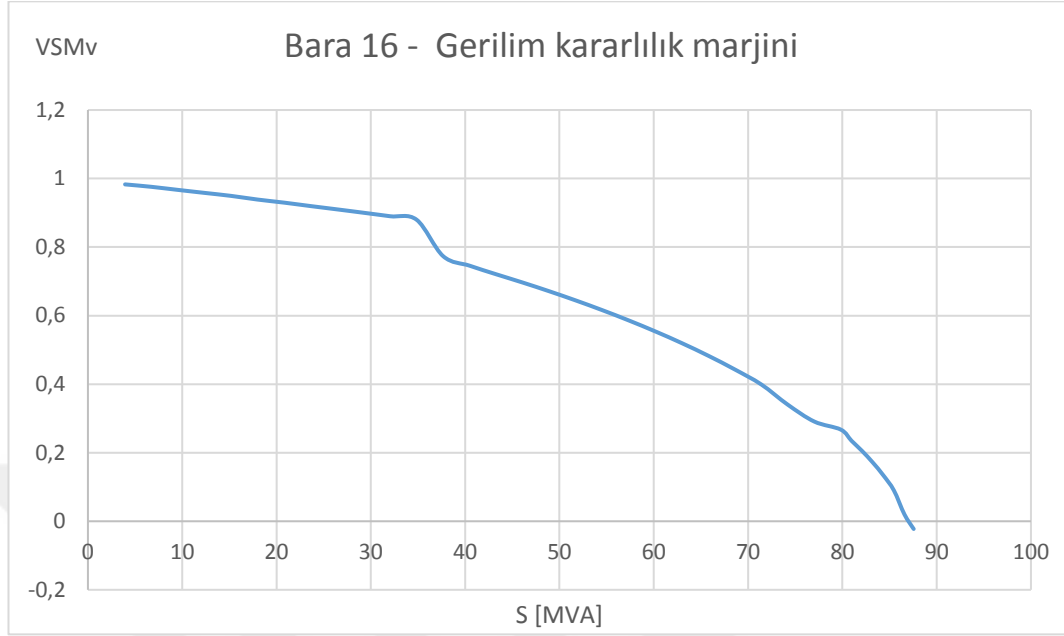


Şekil 4.5. Bara 14, ölçülen ve kritik gerilim grafiği.

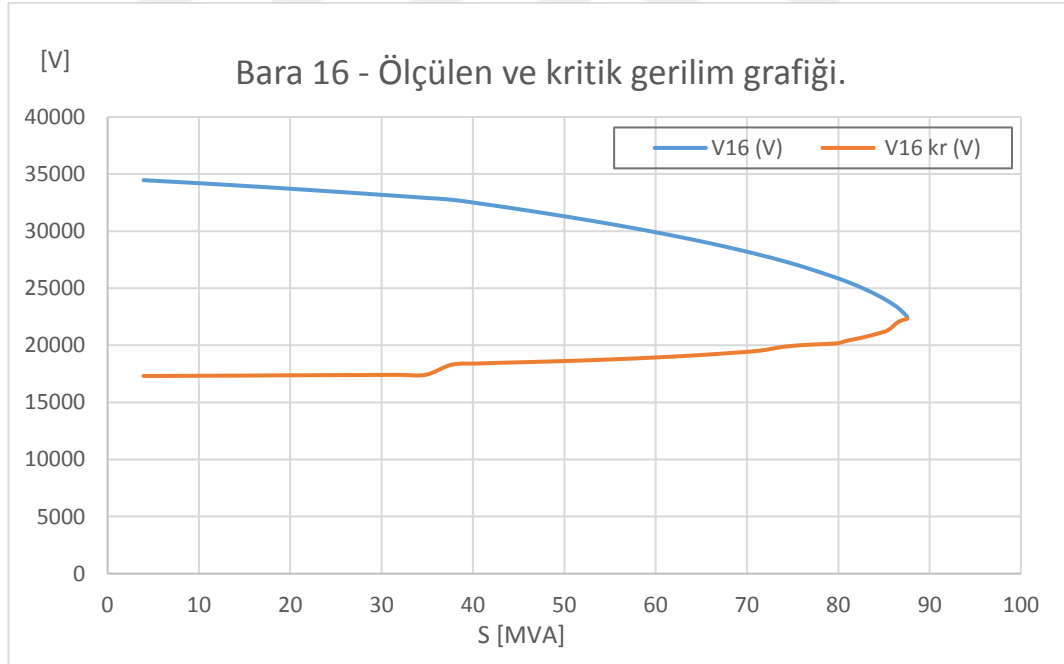
Tablo 4.5. IEEE 30 Baralı sistemin 14 nolu bara özet ölçüm sonuçları.

S (MVA)	Ölçülen Parametreler			Kestirilen Parametreler			
	V14 (V)	Akım(A)	Cos(φ)	E_{Th}	Z_{Th}	V14 _{KR} (V)	VSM _V
6,403124237	34395,268	107,481224	14,470294	34,7173	0,006554	17364,33	0,973222
8,98498887	34263,683	151,399628	14,469298	34,7253	0,006619	17372,33	0,964542
11,5668535	34128,685	195,676224	14,468747	34,72868	0,006608	17378,91	0,955923
14,14871814	33991,801	240,317825	14,468397	34,77106	0,006921	17408,05	0,944251
16,73083265	33845,621	285,398804	14,471471	34,76271	0,006812	17410,7	0,935563
19,31269727	33699,505	330,870239	14,47085	34,78198	0,006879	17429,81	0,924823
21,8945619	33549,295	376,783691	14,470376	34,82154	0,007034	17461,97	0,912304
24,47642654	33392,592	423,192413	14,470002	34,81959	0,006974	17471,95	0,902167
27,05829117	33234,564	470,057465	14,469699	34,84935	0,007044	17501,55	0,889649
29,6401558	33071,774	517,444824	14,469449	34,86109	0,007035	17522,15	0,877973
32,22227031	32906,118	565,350281	14,470961	34,87445	0,007027	17545,09	0,865904
34,80413494	32737,445	613,797058	14,470654	34,88919	0,00702	17570,26	0,853452
37,38599957	32565,625	662,809631	14,47039	35,0236	0,007332	17670,09	0,832526
39,9678642	32380,883	712,626465	14,47016	36,00896	0,009634	18314,49	0,753501
42,54972884	32114,469	764,955444	14,469958	36,09392	0,009725	18409,19	0,729359
45,13159347	31836,089	818,467407	14,469779	36,13788	0,009717	18481,77	0,707008
47,71370798	31548,539	873,177246	14,470782	37,02414	0,011191	19129,15	0,630231
50,29557261	31184,944	931,15863	14,470579	37,01683	0,011056	19194,22	0,605233
52,87743724	30811,191	990,834595	14,470396	37,18855	0,011188	19390,02	0,568436
55,45930187	30412	1052,855957	14,47023	37,28866	0,011197	19546,74	0,534311
58,0411665	29990,778	1117,347412	14,470078	37,40275	0,01121	19724,15	0,497859
60,62303114	29543,987	1184,700684	14,46994	37,53238	0,011225	19925,43	0,458796
63,20514564	29067,134	1255,419312	14,470691	37,68048	0,011245	20155,65	0,416687
65,78701028	28554,252	1330,17334	14,470539	37,8512	0,011268	20421,7	0,370949
68,36887491	27997,11	1409,887207	14,470399	38,05013	0,011295	20733,42	0,320757
70,95073954	27383,81	1495,899536	14,470269	38,55906	0,011555	21322,15	0,250572
73,53260417	26664,869	1592,135742	14,470148	38,65156	0,011433	21640,94	0,194757
76,1144688	25855,673	1699,617432	14,470035	39,07009	0,011508	22294,02	0,11512
78,69658331	24860,508	1827,614014	14,470635	39,69674	0,011613	23302,38	0,006626
81,27844794	23456,778	2000,533691	14,470514	40,79003	0,011854	25003,67	-0,13924
82,89862578	21522,04	2223,833252	14,469906	41,95899	0,012161	26694,61	-0,24865

4.4. IEEE 30 Baralı Sistemde 16 Nolu Baranın Ölçüm Ve Kestirim Sonuçları



Şekil 4.6. Bara 16, Gerilim kararlılık marjini grafiği [VSM_v]

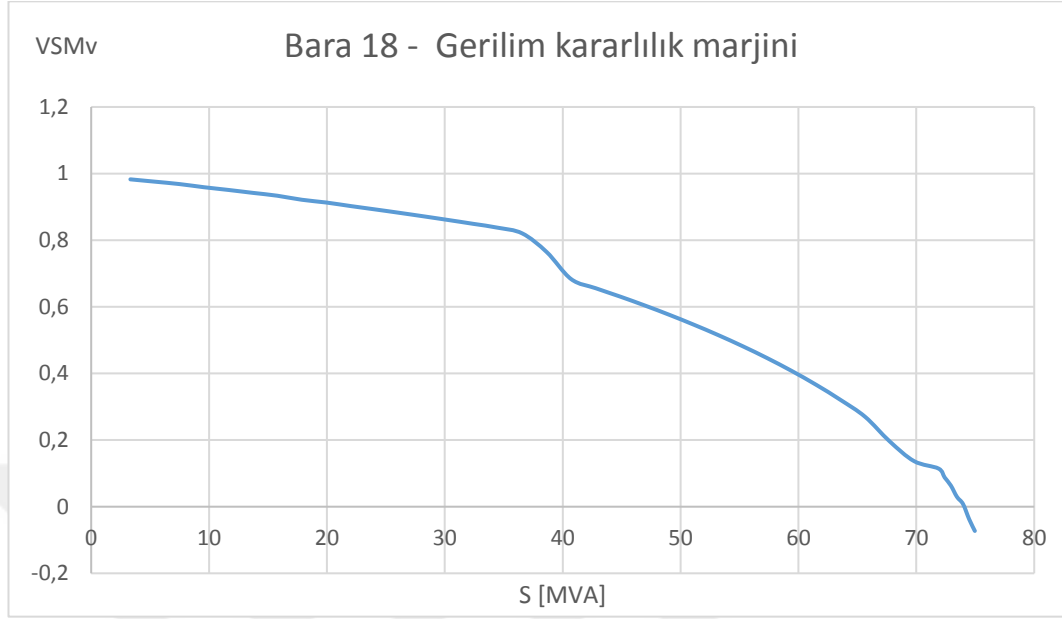


Şekil 4.7. Bara 16, ölçülen ve kritik gerilim grafiği.

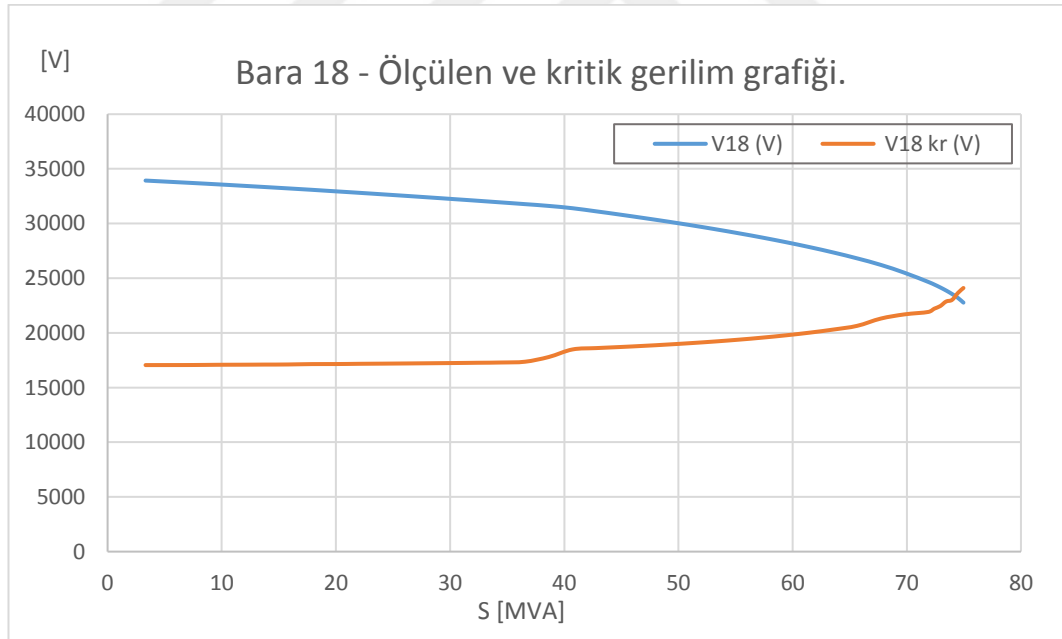
Tablo 4.6. IEEE 30 Baralı sistemin 16 nolu bara özet ölçüm sonuçları.

S (MVA)	Ölçülen Parametreler			Kestirilen Parametreler			
	V16 (V)	Akım(A)	Cos(φ)	E_{Th}	Z_{Th}	V16 _{KR} (V)	VSM _V
3,935734	34466,41	65,9278	27,21611	34636,09	4,044991	17318,96	0,98304
6,747103	34344,18	113,4214	27,21827	34636,22	4,036594	17319,94	0,975815
9,558014	34221,01	161,2586	27,21383	34657,93	4,234039	17332,37	0,966859
12,36938	34090,34	209,4876	27,21552	34670,3	4,312973	17340,52	0,958172
15,18075	33955,71	258,1178	27,21659	34680,09	4,358793	17347,81	0,949414
17,99212	33818,07	307,1625	27,21733	34715,06	4,519262	17368,77	0,938736
20,80303	33673,46	356,6819	27,21541	34718,69	4,521254	17373,98	0,929727
23,6144	33527,03	406,6505	27,21611	34735,65	4,570299	17386,71	0,919689
26,42577	33377,07	457,1058	27,21666	34742,49	4,579006	17394,67	0,910062
29,23668	33224,89	508,0504	27,21536	34750,39	4,58818	17403,73	0,900191
32,04805	33070,4	559,5031	27,21588	34759,21	4,597397	17413,82	0,890079
34,85942	32913,5	611,4835	27,21632	34768,97	4,606677	17425,01	0,879718
37,67079	32754,11	664,0123	27,21669	36325,22	7,914588	18298,35	0,773486
40,4817	32451,86	720,2113	27,21575	36474,23	8,156806	18405,08	0,745679
43,29307	32129,35	777,9574	27,21611	36554,85	8,252836	18476,64	0,720658
46,10444	31791,97	837,2661	27,21643	36603,31	8,284534	18532,99	0,696528
48,91535	31441,73	898,2141	27,21567	36658,44	8,318713	18596,56	0,671127
51,72672	31077,22	960,9766	27,21597	36720,59	8,354982	18668,02	0,64435
54,53809	30696,77	1025,761	27,21625	36790,8	8,393689	18748,51	0,616042
57,34946	30298,38	1092,818	27,21649	36870,25	8,435182	18839,38	0,586019
60,16037	29879,61	1162,454	27,21587	36960,67	8,479905	18942,45	0,554042
62,97174	29437,37	1235,054	27,21611	37063,99	8,528401	19059,95	0,519822
65,78311	28967,73	1311,108	27,21633	37182,81	8,581446	19194,85	0,482978
68,59402	28465,53	1391,258	27,21579	37320,88	8,639973	19351,25	0,442995
71,40539	27923,75	1476,376	27,21601	37482,86	8,705074	19534,72	0,399175
74,21676	27332,48	1567,696	27,21621	37884,5	8,93585	19889,34	0,340115
77,02813	26654,01	1668,495	27,2164	37967,21	8,909306	20062,92	0,290915
79,83904	25899,52	1779,769	27,21593	38055,45	8,930715	20174,87	0,267365
80,96386	25568,93	1828,172	27,21638	38318,14	9,058398	20407,41	0,235112
82,08823	25205,45	1880,292	27,2162	38481,58	9,115541	20584,82	0,205157
83,21259	24807,95	1936,591	27,21602	38671,69	9,180415	20791,22	0,171907
84,33696	24365,37	1998,413	27,21585	38894,63	9,253353	21035,47	0,13425
85,46178	23859,47	2067,996	27,21628	39158,19	9,333507	21331,81	0,090197
86,58614	23255,88	2149,586	27,21611	39994,84	9,689467	22056,02	0,019847
87,56202	22493,77	2247,455	27,21588	40174,83	9,708427	22328,61	-0,02249

4.5. IEEE 30 Baralı Sistemde 18 Nolu Baranın Ölçüm Ve Kestirim Sonuçları



Şekil 4.8. Bara 18, Gerilim kararlılık marjini grafiği [VSMv]

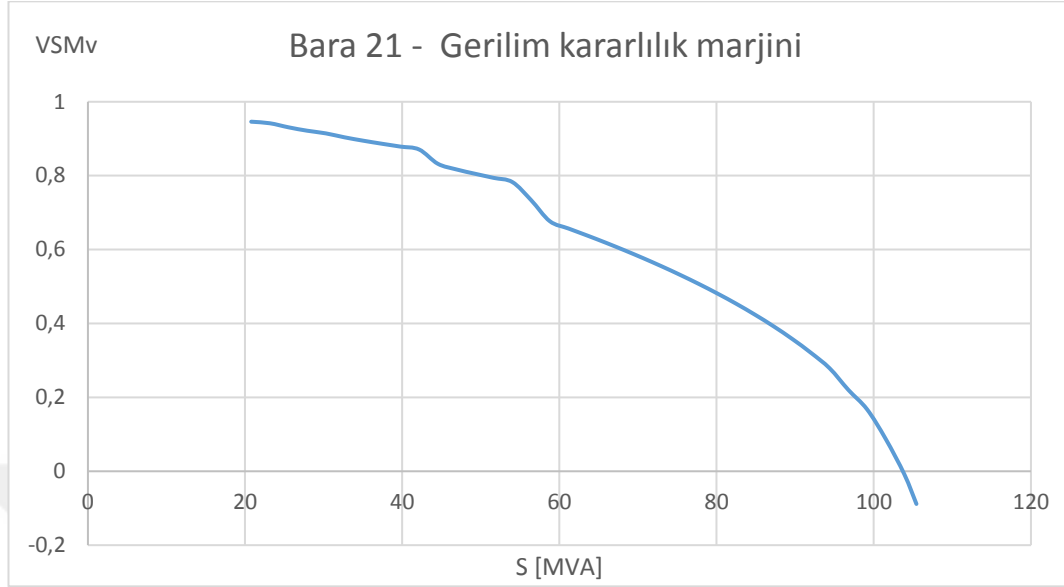


Şekil 4.9. Bara 18, ölçülen ve kritik gerilim grafiği.

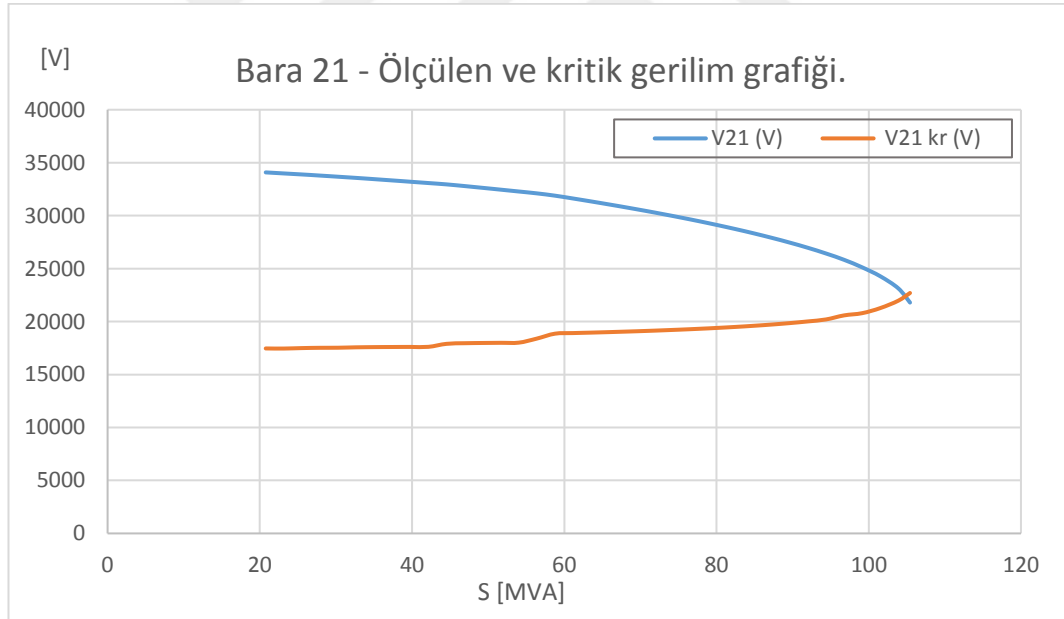
Tablo 4.7. IEEE 30 Baralı sistemin 18 nolu bara özet ölçüm sonuçları.

S (MVA)	Ölçülen Parametreler			Kestirilen Parametreler			
	V18 (V)	Akım(A)	Cos(φ)	E_{Th}	Z_{Th}	V18 _{KR} (V)	VSM _V
3,324154	33930,13	56,56334	15,70864	34107,96	6,661695	17056,15	0,982746
5,401615	33818,02	92,22012	15,70353	34109,61	6,659658	17058,99	0,975763
7,479347	33704,51	128,1194	15,70864	34111,92	6,659445	17062,84	0,96858
9,556807	33589,56	164,2684	15,70575	34142,52	6,996913	17082,59	0,959122
11,63454	33466,88	200,7119	15,70864	34148,25	7,013046	17090,06	0,950971
13,712	33342,21	237,4379	15,70663	34160,88	7,076008	17102,11	0,942131
15,78973	33214,54	274,4642	15,70864	34166,52	7,074605	17111,24	0,933529
17,86719	33085,07	311,7934	15,70709	34219,11	7,355933	17147,53	0,921439
19,94492	32947,93	349,497	15,70864	34209,85	7,26145	17150,46	0,913106
22,02239	32810,66	387,5176	15,70739	34232,49	7,327033	17172,26	0,902476
24,10012	32669,81	425,9041	15,70864	34242,39	7,326111	17187,89	0,892421
26,17758	32526,73	464,655	15,70758	34253,52	7,325671	17205,21	0,882064
28,25531	32381,31	503,7847	15,70864	34265,74	7,325705	17224,18	0,871408
30,33277	32233,48	543,3082	15,70773	34279,1	7,325572	17244,87	0,860445
32,4105	32083,12	583,2416	15,70864	34293,65	7,325901	17267,34	0,849164
34,48796	31930,15	623,6022	15,70784	34309,43	7,326073	17291,65	0,837561
36,56569	31774,46	664,4083	15,70864	34402,59	7,523568	17364,18	0,820457
38,64343	31610,75	705,7952	15,70935	35067,68	9,049201	17796,12	0,764458
40,72089	31400,5	748,7211	15,70864	36091,67	11,14402	18486,67	0,683164
42,79862	31116,09	794,1139	15,70928	36207,74	11,26958	18610,17	0,655929
44,87608	30817,13	840,7409	15,70864	36275,35	11,28985	18707,09	0,630731
46,95381	30506,23	888,629	15,70923	36350,78	11,3134	18814,53	0,60419
49,03127	30182,08	937,9151	15,70864	36434,64	11,33956	18933,55	0,576203
51,10873	29843,11	988,7618	15,7081	36528,14	11,36846	19065,77	0,546617
53,18646	29487,45	1041,366	15,70864	36632,74	11,40088	19213,33	0,515239
55,26393	29112,79	1095,969	15,70814	36750,35	11,43696	19378,76	0,48184
57,34166	28716,23	1152,875	15,70864	36883,29	11,47763	19565,51	0,446118
59,41912	28294,04	1212,472	15,70817	37034,76	11,52335	19777,94	0,407696
61,49685	27841,32	1275,271	15,70864	37208,95	11,57545	20022,27	0,366048
63,57431	27351,38	1341,97	15,7082	37411,46	11,63463	20306,79	0,320479
65,65204	26814,69	1413,562	15,70864	37650,36	11,70253	20644,21	0,26994
67,7295	26216,89	1491,547	15,70823	38263,31	12,0454	21311,22	0,196394
69,80723	25496,63	1580,728	15,70864	38425,9	11,9757	21693,75	0,136746
71,8847	24660,29	1682,978	15,70825	38613,18	12,05618	21914,64	0,114453
72,4042	24422,84	1711,619	15,70854	38887,95	12,19007	22214,19	0,087659
72,9237	24161,47	1742,546	15,70883	39059,52	12,2436	22445,06	0,063748
73,44293	23875,9	1775,947	15,70836	39448,67	12,43005	22866,51	0,02972
73,96243	23558,47	1812,606	15,70864	39477,93	12,36909	23014,98	0,007889
74,48193	23196,55	1853,814	15,70892	40078,86	12,65423	23655,54	-0,03757
74,96283	22766,85	1900,999	15,70875	40438,36	12,78367	24106,99	-0,07283

4.6. IEEE 30 Baralı Sistemde 21 Nolu Baranın Ölçüm Ve Kestirim Sonuçları



Şekil 4.10. Bara 21, Gerilim kararlılık marjini grafiği [VSMv]

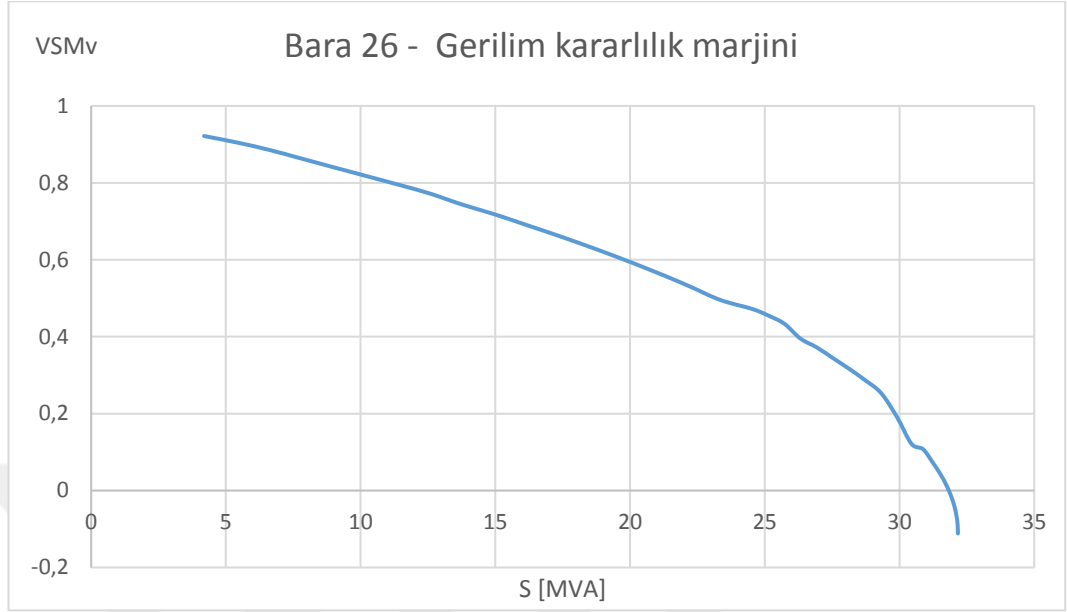


Şekil 4.11. Bara 21, ölçülen ve kritik gerilim grafiği.,

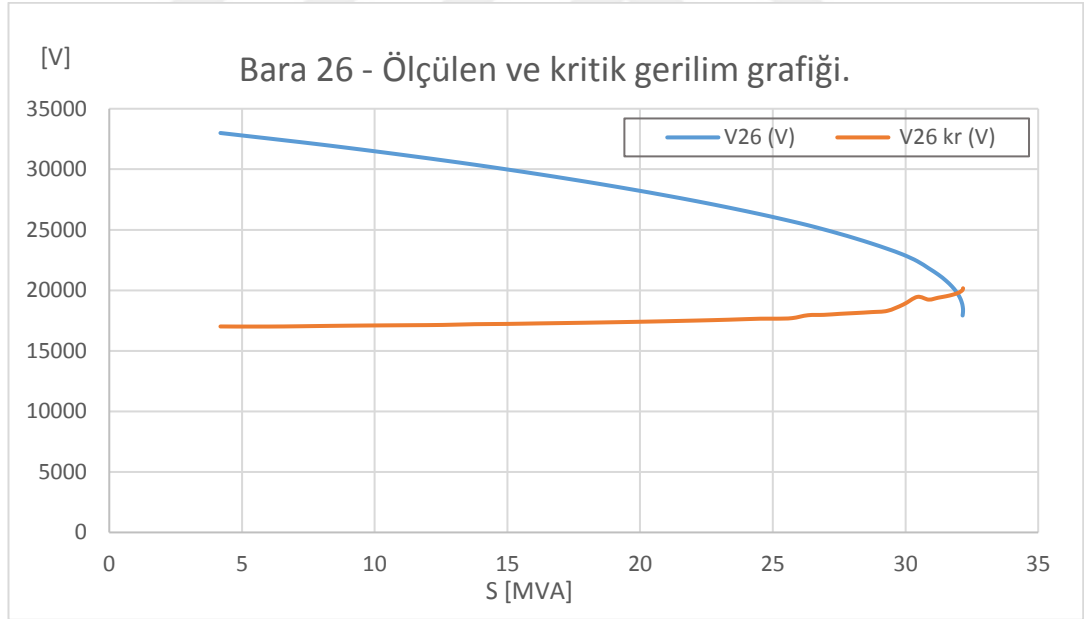
Tablo 4.8. IEEE 30 Baralı sistemin 21 nolu bara özet ölçüm sonuçları.

S (MVA)	Ölçülen Parametreler			Kestirilen Parametreler			
	V21 (V)	Akım(A)	Cos(φ)	E_{Th}	Z_{Th}	V21 _{KR} (V)	VSM _V
20,77715	34083,26	351,9526	32,61924	34914,54	3,317954	17463,45	0,946098
23,15168	33985,59	393,3028	32,61924	34890,59	3,229093	17452,46	0,941844
25,52621	33889,96	434,8652	32,61924	34974,93	3,492142	17497,52	0,930866
27,90075	33785,36	476,7894	32,61924	35023,03	3,625441	17524,33	0,921651
30,27528	33675,65	519,0527	32,61924	35034,03	3,648885	17532,22	0,914432
32,64981	33564,24	561,6207	32,61924	35098,61	3,799867	17568,38	0,903811
35,02434	33446,88	604,5798	32,61924	35133,45	3,871882	17589,46	0,894658
37,39887	33326	647,9099	32,61924	35148,98	3,897878	17600,74	0,88646
39,7734	33203,08	691,598	32,61924	35155,23	3,903561	17607,4	0,878685
42,14793	33078,76	756,4185	32,61924	35162,17	3,909667	17614,69	0,870768
44,52247	32952,98	780,0525	32,61924	35683,88	4,79232	17897,77	0,832258
46,897	32793,33	825,6555	32,61924	35782,25	4,939108	17957,13	0,816875
49,27153	32625,88	871,9131	32,61924	35810,72	4,971233	17979,6	0,80509
51,64606	32454,79	918,7507	32,61924	35824,04	4,979304	17994,41	0,79394
54,02059	32280,9	966,1689	32,61924	35838,55	4,987838	18010,4	0,782529
56,39512	32104,06	1014,194	32,61924	36513,96	5,831761	18392,04	0,733745
58,76966	31887,12	1064,087	32,61924	37318,66	6,770065	18856,3	0,676888
61,14419	31619,91	1116,436	32,61924	37390,03	6,828822	18915,11	0,657027
63,51872	31342,83	1170,046	32,61924	37430,88	6,850445	18958,37	0,638176
65,89325	31057,15	1224,951	32,61924	37475,97	6,873602	19005,76	0,618564
68,26778	30762,04	1281,268	32,61924	37525,41	6,89806	19057,53	0,598141
70,64231	30456,61	1339,13	32,61924	37579,56	6,923806	19114,09	0,576837
73,01684	30139,79	1398,692	32,61924	37639,28	6,951225	19176,19	0,554549
75,39138	29810,33	1460,139	32,61924	37705,06	6,980308	19244,42	0,531182
77,76591	29466,72	1523,691	32,61924	37778,08	7,011511	19319,84	0,506592
80,14044	29107,12	1589,614	32,61924	37859,32	7,045013	19403,47	0,480626
82,51497	28729,28	1658,24	32,61924	37950,35	7,0813	19496,81	0,453076
84,8895	28330,34	1729,982	32,61924	38053,01	7,120827	19601,68	0,423685
87,26403	27906,62	1805,374	32,61924	38169,73	7,164217	19720,53	0,392116
89,63857	27453,26	1885,125	32,61924	38303,99	7,212392	19856,77	0,3579
92,0131	26963,52	1970,209	32,61924	38460,3	7,266383	20015,08	0,32039
94,38763	26427,73	2062,027	32,61924	38645,14	7,327542	20202,34	0,278618
96,76216	25831,07	2162,73	32,61924	39115,11	7,524737	20585,15	0,220278
99,13669	25119,6	2278,563	32,61924	39257,81	7,537745	20792,83	0,167754
101,5112	24280,92	2413,727	32,61924	39745	7,684773	21272,51	0,087604
103,8858	23136,08	2592,421	32,61924	40495,82	7,912676	21973,2	-0,00814
105,4248	21794,3	2792,795	32,6195	41312,73	8,155875	22699,55	-0,08849

4.7. IEEE 30 Baralı Sistemde 26 Nolu Baranın Ölçüm Ve Kestirim Sonuçları



Şekil 4.12. Bara 26, gerilim kararlılık marjini.

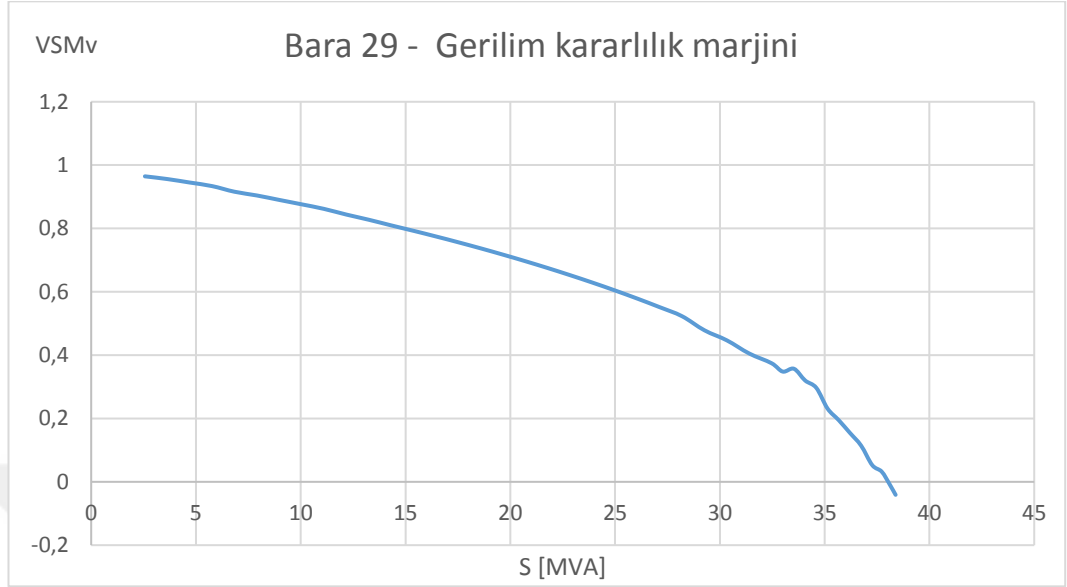


Şekil 4.13. Bara 26, ölçülen ve kritik gerilim grafiği.

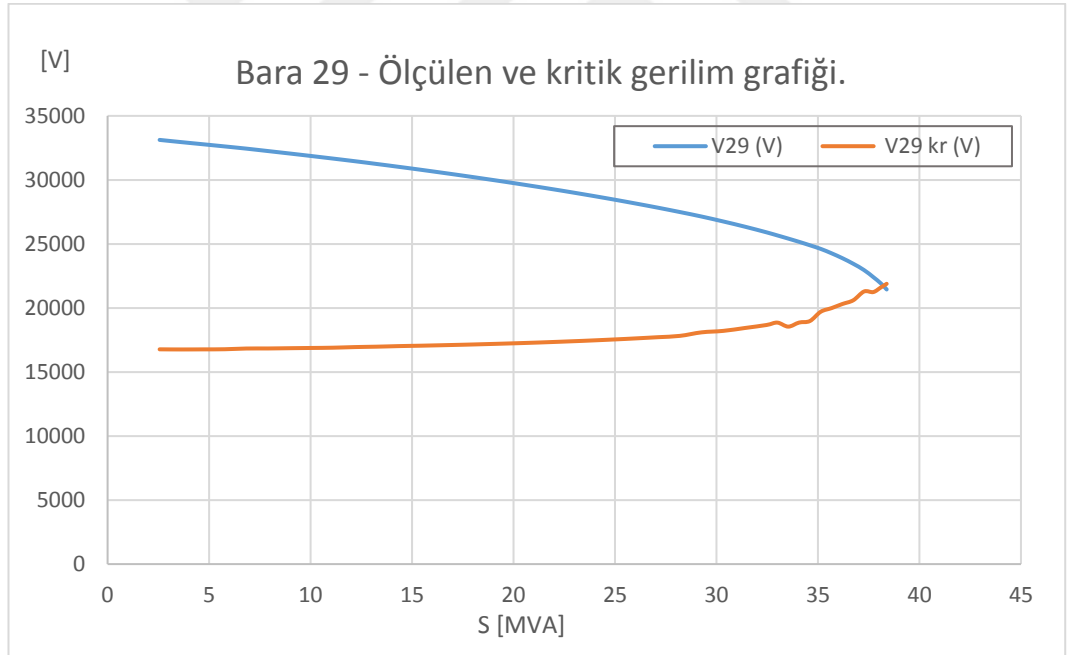
Tablo 4.9. IEEE 30 Baralı sistemin 26 nolu bara özet ölçüm sonuçları.

S (MVA)	Ölçülen Parametreler			Kestirilen Parametreler			
	V26 (V)	Akım(A)	Cos(φ)	E_{Th}	Z_{Th}	V26 _{KR} (V)	VSM _V
4,188078	32997,16	73,27867	33,31063	34005,75	19,009	17014,76	0,921689
5,384594	32697,09	95,08006	33,30936	33976,19	18,51179	17005,27	0,9052
6,581109	32398,44	117,2802	33,30855	33981,35	18,49521	17015,1	0,886138
7,777624	32092,82	139,9238	33,30799	34028,92	18,8682	17048,96	0,863599
8,974689	31772,44	163,0786	33,31292	34064,8	19,07695	17078,67	0,840849
10,1712	31439,25	186,781	33,31198	34081,67	19,11118	17100,17	0,818447
11,36772	31095,76	211,0613	33,31123	34090,37	19,07917	17119,17	0,795794
12,56423	30742,5	235,9588	33,31063	34100,67	19,04848	17141,04	0,772274
13,76075	30378,62	261,5266	33,31013	34178,59	19,33881	17202,56	0,743661
14,95727	29995,42	287,8997	33,30972	34179,52	19,24999	17224,42	0,718513
16,15378	29600,39	315,0812	33,30936	34213,44	19,2893	17267,32	0,690408
17,35085	29188,82	343,1924	33,31181	34230,5	19,25345	17303,93	0,662104
18,54736	28760,94	372,3187	33,31137	34250,41	19,21911	17345,5	0,632393
19,74388	28314,68	402,5859	33,31098	34272,85	19,18387	17392,29	0,601145
20,94039	27847,58	434,147	33,31063	34298,16	19,14756	17445,06	0,568157
22,13691	27356,58	467,1927	33,31032	34326,72	19,10981	17504,73	0,533175
23,33342	26837,8	501,9655	33,31004	34359,1	19,07033	17572,55	0,495864
24,52994	26286,16	538,7819	33,30979	34455,81	19,22128	17656,42	0,472114
25,12847	25992,27	558,1633	33,31063	34405,77	19,05291	17656,25	0,45506
25,727	25690,91	578,1562	33,31143	34430,43	19,03882	17702,04	0,433567
26,32499	25377,07	598,9181	33,31037	34778,34	19,64487	17943,75	0,394922
26,92352	25030,13	621,0199	33,31114	34763,3	19,54284	17974,29	0,372384
27,5215	24667,63	644,1494	33,31013	34829,47	19,58292	18057,21	0,344709
28,12003	24281,7	668,6133	33,31087	34861,75	19,55597	18124,64	0,317015
28,71802	23870,42	694,6041	33,30992	34899,36	19,52983	18200,86	0,287196
29,31655	23428,07	722,4631	33,31063	34972,47	19,54994	18305,78	0,253518
29,91148	22946,62	752,5931	33,31127	35695,86	20,52317	18819,81	0,19056
30,44511	22406,12	784,4992	33,31113	36589,55	21,67105	19456,11	0,121386
30,87557	21817,82	817,0387	33,31023	36105,16	20,91545	19233,15	0,107382
31,23585	21298,43	846,7402	33,31054	36235,78	20,98812	19391,53	0,072588
31,52319	20799,13	875,0441	33,31098	36295,27	20,97148	19504,58	0,042024
31,74785	20324,24	901,8601	33,31016	36361,1	20,96497	19620,21	0,01286
31,91676	19872,54	927,2625	33,31067	36426,63	20,96066	19734,34	-0,01477
32,03741	19442,89	951,3287	33,31012	36491,91	20,95821	19846,74	-0,04095
32,11535	19034,05	974,1418	33,31055	36556,28	20,95702	19957,07	-0,06576
32,15723	18644,73	995,786	33,31055	36619,96	20,95716	20065,43	-0,0893
32,16805	18273,67	1016,342	33,31067	36682,75	20,95829	20171,66	-0,11164

4.8. IEEE 30 Baralı Sistemde 29 Nolu Baranın Ölçüm Ve Kestirim Sonuçları



Şekil 4.14. Bara 29, gerilim kararlılık marjini.



Şekil 4.15. Bara 29, ölçülen ve kritik gerilim grafiği.

Tablo 4.10. IEEE 30 Baralı sistemin 29 nolu bara özet ölçüm sonuçları.

S (MVA)	Ölçülen Parametreler			Kestirilen Parametreler			
	V29 (V)	Akım(A)	Cos(φ)	E_{Th}	Z_{Th}	V29 _{KR} (V)	VSM _V
2,563201	33123,03	44,6778	20,55605	33531,39	16,63825	16771,63	0,964617
3,631202	32949,84	63,62624	20,55605	33503,16	15,75561	16760,6	0,955984
4,699202	32783,47	82,75772	20,55605	33508,19	15,77289	16767,86	0,945039
5,767203	32614,14	102,0936	20,55605	33513,89	15,78033	16776,51	0,933767
6,835203	32441,86	121,6424	20,55605	33605,21	16,97117	16833,16	0,915991
7,903203	32252,17	141,4762	20,55605	33596,42	16,76385	16837,12	0,904212
8,971204	32061,44	161,55	20,55605	33618,14	16,88677	16859,14	0,890097
10,0392	31865,4	181,8943	20,55605	33630,11	16,89258	16877,2	0,876219
11,1072	31665,33	202,5163	20,55605	33643,84	16,90008	16897,7	0,861852
12,17521	31461	223,4308	20,55605	33704,7	17,2339	16946,85	0,843854
13,24321	31247,51	244,6904	20,55605	33730,58	17,29395	16978,08	0,827551
14,31121	31028,31	266,2916	20,55605	33771,64	17,42644	17020,12	0,809735
15,37921	30801,91	288,2674	20,55605	33793,86	17,43467	17053,21	0,792615
16,44721	30569,85	310,6263	20,55605	33818,69	17,44513	17089,85	0,774839
17,51521	30331,72	333,3938	20,55605	33846,08	17,45651	17130,12	0,756387
18,58321	30087,12	356,5984	20,55605	33876,18	17,46876	17174,29	0,737223
19,65121	29835,58	380,2719	20,55605	33909,29	17,48221	17222,73	0,717299
20,71921	29576,57	404,45	20,55605	33945,61	17,49678	17275,75	0,696568
21,78721	29309,49	429,1733	20,55605	33985,46	17,5126	17333,79	0,674976
22,85521	29033,68	454,4881	20,55605	34029,15	17,52974	17397,33	0,652458
23,92321	28748,35	480,4475	20,55605	34077,16	17,54855	17466,96	0,628938
24,99121	28452,59	507,1131	20,55605	34129,89	17,569	17543,32	0,604334
26,05921	28145,35	534,557	20,55605	34187,92	17,59136	17627,23	0,578544
27,12721	27825,37	562,8642	20,55605	34251,91	17,61584	17719,64	0,55145
28,19521	27491,15	592,1365	20,55605	34322,74	17,64282	17821,77	0,522906
29,26321	27140,87	622,4975	20,55605	34642,62	18,1816	18096,44	0,478463
30,33121	26754,92	654,5239	20,55605	34706,13	18,15669	18211,45	0,446768
31,39921	26347,74	688,0416	20,55605	34916,3	18,39012	18435,21	0,405181
32,46721	25904,8	723,6093	20,55605	35195,64	18,79552	18671,29	0,374464
33,00104	25663,02	742,4404	20,55523	35393,48	19,04394	18855,57	0,348067
33,53521	25418,58	761,0911	20,55605	34858,17	18,06687	18543,85	0,356946
34,06904	25162,99	781,6982	20,55526	35238,16	18,58338	18859,77	0,319998
34,60322	24894,86	802,502	20,55605	35325,41	18,62106	18981,32	0,296659
35,13704	24612,3	824,2416	20,55528	36254,05	19,88323	19706,81	0,231422
35,67122	24267,4	848,6606	20,55605	36524,64	20,13675	19990,12	0,194812
36,20504	23884,43	875,1764	20,5553	36823,42	20,39724	20311,71	0,154546
36,73922	23450,81	904,5058	20,55605	37049,05	20,52763	20602,84	0,114353
37,26988	22958,83	937,2305	20,55551	37783,14	21,26076	21287,68	0,052797
37,724	22411,61	971,8268	20,5564	37527,79	20,79833	21241,27	0,032038
38,09549	21921,8	1003,318	20,55569	37824,3	20,9848	21601,97	-0,00729
38,38505	21444,56	1033,427	20,55622	38017,75	21,05411	21886,57	-0,04104

BÖLÜM 5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, önce bir güç sisteminin yerel bara ölçümlerine dayalı olarak Thevenin eşdeğer devre modeli elde edilmiştir. Bu model için iki kestirim yaklaşımı geliştirilmiştir: ilki yerel baradaki ani gerilim – akıma dayalı kestirimler yapmaya; diğeri ise yerel bara etkin gerilim akım ve güç açısına dayalı kestirimler yapmaya yarayan yaklaşımdır. Ani değerlere dayalı yaklaşım, hızlı değerlendirmeye yönelik mikroişlemcili sistemlere yöneliktir. İkinci etkin değerlere dayalı yaklaşım, yük barasındaki PMU ölçümleri ile kolayca kullanılabilen bir yaklaşımdır. Etkin değerlerin kullanıldığı bu yaklaşım, ani değerlerden hareketle elde edilmiş olmakla beraber; elde edilen yaklaşım literatürde Haque [11] tarafından yayınlanmış yaklaşımın sadeleştirilmiş hali olarak elde edilmiştir.

Elde edilen yerel bara etkin değer ölçümlerine dayalı yaklaşım önce 4 baralı basit bir test sistemi üzerinde PowerWorld yazılımı ile benzetim yapılarak 2. baradan sabit güç faktörü altında yükleme yapılarak veri üretilmiş; sonrasında elde edilen eşitlikler ile Thevenin eşdeğer devre parametreleri elde edilmiştir. Thevenin eşdeğer parametrelerinden hareketle, 2. bara için gerilim kararlılığı değerlendirmesi yapılmıştır. Hesaplamalar sonucunda 2. baranın kritik gerilimi ve gerilim kararlılığı marjini yüksek doğrulukla elde edilmiştir. Bu basit sına ile oluşturulan yaklaşımın geçerlilik testi yapılmış ve sonuçları 4. Bölümde verilmiştir.

Oluşturulan yaklaşım, IEEE 30 baralı standart test sistemi üzerinde yine PowerWorld yazılımı ile türetilen verilere dayalı olarak test edilmiştir. IEEE 30 baralı standart test sisteminin, sırasıyla 10, 14, 16, 18, 21, 26, 29'ncü baralarından, sistem süreksizliğe girene dek, baranın standart sabit güç faktörü ile yükleme yapılarak veri üretilmiş ve sonrasında gerilim kararlılığı değerlendirmesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçların hepsinde VSMv' nin gerilim kararsızlık sınırını maksimum %-1 hata sınırı içerisinde

kestirimi yapılmıştır. Böylelikle elde edilen yaklaşımın daha büyük sistemlerde de başarılı olduğu gösterilmiştir.

Yapılan tüm çalışmalarda, oluşturulan kestirim ve gerilim kararlılığı değerlendirme yaklaşımlarının, yük baralarının yüklenebilirlik sınırının ve dolayısı ile VSM değerlendirmesi için kullanılabilir olduğu görülmüştür.



BÖLÜM 6. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu tezde, oluşturulan kestirim ve değerlendirme yaklaşımlarının yük baralarındaki yüklenme ve gerilim kararlılığı değerlendirilmesi için kullanılabileceği gösterilmiştir.

Bundan sonraki çalışmalarda, bir baradaki yüklenmenin diğer bara VSM'lerine etkileri ve tüm baraların eş zamanlı yüklenmesi halinde VSM'lerin değişimi ve doğruluğu araştırılabilir.

Yerel bara etkin değer ölçümüne dayalı kestirim yaklaşımında, kestirim için girdi olarak kullanılan her iki ölçüm değeri sürecinde Thevenin gerilimi (E_{th}) bileşenleri; E_{α} ve E_{β} 'nin sabit kaldığı varsayılmıştır. Bu durum literatürde de bu şekildedir. Örneklemeler arasında E_{α} ve E_{β} 'da oluşabilecek ufak farklılıkları içerecek veya bu değişikliği düzelten yeni yaklaşımlar araştırılabilir. Bu Thevenin parametrelerinin ve buradan yapılabilecek çeşitli değerlendirmelerin daha doğru olmasını sağlayacaktır.

Geliştirilen ani değerlere dayalı Thevenin eşdeğer parametreleri kestirim yaklaşımının daha da hızlanması için 4 noktadan sinüs uydurma gibi yaklaşımlar uygulanabilir. Bu işlem doğasında bir filtreleme işlevi gördüğünden hızlı ve fakat hatalı değerler üretebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Van Cutsem, T., Vournas C., Voltage Stability of Electric Power Systems. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [2] Van Cutsem, T., Vournas C., "Voltage stability analysis in transient and mid-term time scales," IEEE Transactions in Power Systems, Vol. 11, No. 1, pp. 146-154, February 1996.
- [3] Glover, J.D., Sarma, M.S., Power System Analysis and Design, 3rd ed., Brooks/Cole, 2001.
- [4] Crow, M., Computational methods for electric power systems, CRC Press, 2002.
- [5] Canizares, C.A., De Souza, A.Z., Quintana, V.H., "Comparison of performance indices for detection of proximity to voltage collapse," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 11, No. 3, pp. 1441-1450, August 1996.
- [6] Chiang, H.D., Jean-Jumeau, R., "Toward a practical performance index for predicting voltage collapse in electric power systems," Proceeding of the 1993 IEEE/PES Summer Meeting, July 1993.
- [7] Kessel, P., Glavitsch, H., "Estimating the voltage stability of a power system," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 1, No. 3, July 1986, pp. 346-354.
- [8] Tuan, T.Q., Fandino, J., Hadjsaid, N.J., Sabonnadiere, C., Vu., H., "Emergency load shedding to avoid risks of voltage instability using indicators," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 341-351, February 1994.
- [9] Vu, K., Begovic, M., Novosel, D., Saha, M., "Use of local measurements to estimate voltage-stability margin," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 3, pp. 1029-1035, August 1999.
- [10] Milosevic, B., Begovic, M., "Voltage-Stability Protection and Control Using a Wide-Area Network of Phasor Measurement," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 1, pp. 121-127, February 2003.

- [11] Haque, M.H., On-line monitoring of maximum permissible loading of a power within the voltage stability limits. In IEE Proceedings of Generation Transmission And Distribution, January 2003, London, UK.
- [12] Turan, M; Demircioğlu, S.B.; Yalçın, M. A., “Voltage Stability Evaluation by Using Maximum Power Transfer Phasor Diagram”, Journal of Applied Sciences 6 (13): 2809-2812, Asian Network for Scientific Information, 2006.
- [13] Demircioğlu, S. B., Enerji Sistemlerinde Gerilim Kararlılığı Sınırlarının Yerel Bara Parametreleri Kullanılarak Gerçek Zamanlı Değerlendirilmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Doktora Tezi, 2006.
- [14] Cardet, C.E.D, Analysis on Voltage Stability Indices, AACHEN University, Master Thesis, 2010.
- [15] M. Glavic and T. Van Cutsem, “Wide-area detection of voltage instability from synchronized phasor measurements. Part I: Principle,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 3, August 2009, pp. 1408-1416.
- [16] M. Glavic and T. Van Cutsem, “Wide-area detection of voltage instability from synchronized phasor measurements. Part II: Simulation results,” IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 24, No. 3, August 2009, pp. 1417-1425.
- [17] M. Glavic and T. Van Cutsem, “Detecting with PMUs the onset of voltage instability caused by a large disturbance,” Proceedings 2008 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Pittsburgh, PA, July 2008.
- [18] M. Zima, M. Larsson, P. Korba, C. Rehtanz and G. Andersson, “Design aspects for wide-area monitoring and control systems”, Proceedings of the IEEE, Vol. 93, No. 5, May 2005, pp.980-996.
- [19] Anderson, P.M., Fouad, A.A., “Power System Control and Stability”, The Iowa State University Pres 4.th Printing,1986.
- [20] Kundur P. Power system stability and control,McGraw Hill,U.S.A,1994.
- [21] M. Begovic, B. Milosevic, D. Novosel, "A novel method for voltage instability protection", Proc. 35th Hawaii Int. Conf. Syst. Sci., pp. 802-811, 2002.
- [22] W. Nakawiro, "Voltage Stability Assessment and Control of Power Systems using Computational Intelligence," Ph.D. Thesis, University of Duisburg-Essen, 2011.
- [23] Yalçın, M.A., Enerji İletim Sistemlerinde Gerilim Kararlılığının Yeni Bir Yaklaşımla İncelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1995.

- [24] L. Huang, J. Xu, Y. Sun, T. Cui, and F. Dai, "Online monitoring of wide-area voltage stability based on short circuit capacity," in 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), march 2011, pp. 1-5.
- [25] K. Vu, M. Begovic, D. Novosel, and M. Saha, "Use of local measurements to estimate voltage-stability margin," in 20th International Conference on Power Industry Computer Applications, may 1997, pp. 318-323.
- [26] K. Vu, M. Begovic, and D. Novosel, "Grids get smart protection and control," IEEE Comput. Appl. Power, Vol. 10, no. 4, pp. 40-44, oct 1997.
- [27] Dou, H., and Y. Chen, "Optimal Features Extraction of Noisy Sinusoidal Signals Using Two-Stage Linear Least Squares Fitting", technical report, October 1998.
- [28] IEEE 30 Bus Standart Test System, <https://www.al-roomi.org/power-flow/30-bus-system>, ErişimTarihi: 10.05.2019.

EKLER

Ek 1: 4 Baralı test sistemin simülasyon üzerinde alınmış detaylı ölçüm sonuçları

2 nolu bara ölçüm sonuçları.

Ölçülen Parametreler				Kestirilen Parametreler			
S (MVA)	Volt (V)	Akım(A)	Cos(Fi)	Eth	Zth	Vkr (V)	VSMv
11,56027681	9939,71	671,481262	30,11373	9992,173	0,116099	4996,188	0,988403
12,71630449	9934,433	739,021729	30,11373	9991,069	0,113851	4995,651	0,987579
13,87233218	9929,252	806,62616	30,11373	9991,254	0,114153	4995,764	0,986493
15,02835986	9924,05	874,30304	30,11373	9991,414	0,114388	4995,867	0,985407
16,18438754	9918,83	942,052734	30,11373	9991,613	0,114664	4995,991	0,984309
17,34041522	9913,59	1009,875671	30,11373	9991,796	0,114895	4996,109	0,98321
18,4964429	9908,332	1077,772461	30,11373	9992,022	0,115168	4996,251	0,982097
19,65247058	9903,054	1145,74353	30,11373	9992,244	0,115417	4996,392	0,980981
20,80849826	9897,757	1213,789429	30,11373	9992,478	0,115664	4996,542	0,979858
21,96452595	9892,441	1281,910767	30,11373	9992,724	0,11591	4996,699	0,978728
23,12055363	9887,106	1350,10791	30,11373	9993,021	0,116196	4996,884	0,977582
24,27658131	9881,75	1418,381592	30,11373	9993,269	0,116416	4997,047	0,976443
25,43260899	9876,376	1486,732178	30,11373	9993,593	0,116699	4997,25	0,975283
26,58863667	9870,981	1555,1604	30,11373	9993,884	0,116936	4997,438	0,974125
27,74466435	9865,567	1623,666626	30,11373	9994,21	0,117193	4997,647	0,972955
28,90069203	9860,133	1692,251587	30,11373	9994,549	0,117448	4997,863	0,971778
30,05671971	9854,679	1760,915649	30,11373	10118,83	0,220097	5061,625	0,944875
31,2127474	9844,228	1830,584351	30,11373	10273,71	0,341023	5142,498	0,911049
32,36877508	9827,566	1901,602173	30,11373	10275,43	0,341987	5143,821	0,907293
33,52480276	9810,777	1972,886963	30,11373	10276,31	0,342299	5144,724	0,903677
34,68083044	9793,894	2044,435669	30,11373	10277,21	0,342606	5145,659	0,900032
35,83685812	9776,916	2116,252197	30,11373	10278,18	0,342929	5146,644	0,89635
36,9928858	9759,841	2188,340088	30,11373	10279,17	0,343244	5147,662	0,892639
38,14891348	9742,668	2260,703613	30,11373	10280,19	0,343555	5148,716	0,888898
39,30494117	9725,396	2333,346191	30,11373	10281,26	0,343878	5149,818	0,88512
40,46096885	9708,023	2406,272217	30,11373	10282,33	0,344174	5150,937	0,881318
41,61699653	9690,549	2479,48584	30,11373	10284,1	0,344842	5152,447	0,877355
42,77302421	9672,972	2552,91211	30,11373	10283,97	0,344444	5152,97	0,873733
43,92905189	9655,29	2626,79248	30,11373	10285,84	0,345111	5154,582	0,869696
45,08507957	9637,502	2700,894531	30,11373	10287,07	0,345412	5155,869	0,865758

46,24110725	9619,607	2775,301514	30,11373	10288,35	0,345722	5157,209	0,861783
47,39713493	9601,603	2850,018066	30,11373	10289,69	0,346038	5158,598	0,85777
48,55316262	9583,488	2925,049316	30,11373	10291,05	0,346345	5160,021	0,853725
49,7091903	9565,261	3000,399658	30,11373	10347,53	0,371914	5191,192	0,839061
50,86521798	9546,92	3070,74707	30,11373	10243,74	0,325029	5136,026	0,855221
52,02124566	9528,464	3152,078857	30,11373	10295,39	0,347277	5164,575	0,841369
53,17727334	9509,89	3228,418213	30,11373	10296,88	0,347568	5166,16	0,837186
54,33330102	9491,198	3305,097656	30,11373	10298,45	0,34788	5167,818	0,832956
55,4893287	9472,385	3382,122803	30,11373	10300,08	0,348194	5169,529	0,828687
56,64535639	9453,449	3459,499268	30,11373	10301,7	0,34849	5171,264	0,824387
57,80138407	9434,389	3537,233154	30,11373	10303,42	0,348806	5173,075	0,82004
58,95741175	9415,202	3615,330322	30,11373	10305,14	0,349103	5174,912	0,815661
60,11343943	9395,887	3693,796875	30,11373	10306,89	0,3494	5176,797	0,811244
61,26946711	9376,442	3772,63916	30,11373	10308,78	0,349727	5178,782	0,806769
62,42549479	9356,863	3851,86377	30,11373	10310,61	0,350017	5180,761	0,802274
63,58152247	9337,15	3931,477539	30,11373	10312,53	0,350321	5182,815	0,79773
64,73755015	9317,3	4011,487061	30,11373	10314,48	0,350618	5184,914	0,793147
65,89357784	9297,311	4091,899658	30,11373	10316,5	0,350925	5187,084	0,788515
67,04960552	9277,18	4172,722656	30,11373	10318,61	0,351244	5189,331	0,783834
68,2056332	9256,904	4253,962891	30,11373	10320,67	0,351532	5191,583	0,779126
69,36166088	9236,482	4335,629395	30,11373	10322,88	0,351848	5193,941	0,774358
70,51768856	9215,91	4417,729004	30,11373	10325,03	0,352134	5196,305	0,769562
71,67371624	9195,187	4500,270508	30,11373	10327,37	0,352459	5198,802	0,764697
72,82974392	9174,308	4583,261719	30,11373	10329,59	0,352733	5201,265	0,759817
73,98577161	9153,273	4666,712402	30,11373	10332,04	0,353059	5203,89	0,754856
75,14179929	9132,076	4750,630859	30,11373	10334,43	0,353351	5206,512	0,749869
76,29782697	9110,716	4835,026855	30,11373	10340,91	0,354748	5211,464	0,744062
77,45385465	9089,1189	4919,909668	30,11373	10335,29	0,352865	5209,676	0,74051
78,60988233	9067,493	5005,289063	30,11373	10342,03	0,354259	5214,837	0,734594
79,76591001	9045,623	5091,175781	30,11373	10344,69	0,354565	5217,756	0,729398
80,92193769	9023,576	5177,580078	30,11373	10347,38	0,354861	5220,724	0,724157
82,07796537	9001,349	5264,513184	30,11373	10350,14	0,355163	5223,774	0,71886
83,23399306	8978,938	5351,986328	30,11373	10352,98	0,355467	5226,904	0,713507
84,39002074	8956,339	5440,01123	30,11373	10355,81	0,355756	5230,075	0,708111
85,54604842	8933,549	5528,600098	30,11373	10358,83	0,356074	5233,388	0,702637
86,7020761	8910,562	5617,765625	30,11373	10361,82	0,35637	5236,728	0,697124
87,85810378	8887,375	5707,521484	30,11373	10364,88	0,356666	5240,146	0,691553
89,01413146	8863,984	5797,879883	30,11373	10368,06	0,356976	5243,682	0,685911
90,17015914	8840,383	5888,856445	30,11373	10371,22	0,357265	5247,246	0,680228
91,32618683	8816,569	5980,464844	30,11373	10374,57	0,357581	5250,966	0,67446
92,48221451	8792,535	6072,720703	30,11373	10377,84	0,357867	5254,691	0,668657
93,63824219	8768,278	6165,640137	30,11373	10381,31	0,358177	5258,57	0,66277
94,79426987	8743,791	6259,239258	30,11373	10384,81	0,358478	5262,519	0,656824
95,95029755	8719,069	6353,535156	30,11373	10388,39	0,358782	5266,567	0,650811

97,10623873	8694,106	6448,545898	30,11376	10391,97	0,359071	5270,665	0,644744
98,26226641	8668,897	6544,290527	30,11376	10395,76	0,359385	5274,937	0,638585
99,41829409	8643,434	6640,787598	30,11376	10399,57	0,359687	5279,273	0,632367
100,5743218	8617,711	6738,058594	30,11376	10403,42	0,359982	5283,69	0,626084
101,7303495	8591,722	6836,123535	30,11376	10407,39	0,360284	5288,232	0,619721
102,8863771	8565,459	6935,005859	30,11376	10411,48	0,360592	5292,904	0,613276
104,0424048	8538,914	7034,728516	30,11376	10415,6	0,36089	5297,656	0,606763
105,1984325	8512,08	7135,31543	30,11376	10419,85	0,361197	5302,549	0,600164
106,3544602	8484,948	7236,79248	30,11376	10424,16	0,361497	5307,537	0,593491
107,5104879	8457,51	7339,186035	30,11376	10428,62	0,361805	5312,675	0,586725
108,6665155	8429,756	7442,524902	30,11376	10433,12	0,362106	5317,912	0,579883
109,8225432	8401,677	7546,838867	30,11376	10437,73	0,362409	5323,283	0,572951
110,9785709	8373,263	7652,158203	30,11376	10442,46	0,362714	5328,794	0,565927
112,1345986	8344,503	7758,516602	30,11376	10447,27	0,363016	5334,433	0,558813
113,2906263	8315,386	7865,94873	30,11376	10452,15	0,363313	5340,188	0,551612
114,4466539	8285,901	7974,490234	30,11376	10457,3	0,363634	5346,187	0,544284
115,6026816	8256,033	8084,180664	30,11376	10462,4	0,36393	5352,233	0,536886
116,7587093	8225,771	8195,061523	30,11376	10467,71	0,36424	5358,495	0,529366
117,914737	8195,1	8307,174805	30,11376	10473,12	0,364548	5364,906	0,521742
119,0707647	8164,006	8420,564359	30,11376	10478,54	0,36484	5371,418	0,514027
120,2267924	8132,472	8535,289063	30,11376	10484,24	0,365153	5378,194	0,506172
121,38282	8100,482	8651,390625	30,11376	10490,07	0,365466	5385,146	0,498198
122,5388477	8068,017	8768,928711	30,11376	10495,96	0,365769	5392,245	0,490114
123,6948754	8035,059	8887,961914	30,11376	10502,1	0,366086	5399,594	0,481887
124,8509031	8001,586	9008,554688	30,11376	10508,22	0,366382	5407,056	0,473552
126,0069308	7967,578	9130,775391	30,11376	10514,63	0,366695	5414,804	0,46506
127,1629584	7933,01	9254,696289	30,11376	10521,21	0,367011	5422,783	0,456421
128,3189861	7897,856	9380,397461	30,11376	10527,85	0,367313	5430,933	0,44765
129,4750138	7862,09	9507,963867	30,11376	10534,8	0,367632	5439,401	0,438703
130,6310415	7825,681	9637,486328	30,11376	10541,8	0,367936	5448,05	0,429612
131,7870692	7788,598	9769,066406	30,11375	10549,11	0,368256	5457,04	0,420331
132,9430968	7750,805	9902,810547	30,11375	10556,48	0,368559	5466,227	0,410894
134,0991245	7712,265	10038,83984	30,11375	10564,21	0,368881	5475,802	0,401244
135,2551522	7672,935	10177,28125	30,11375	10572	0,369185	5485,596	0,391421
136,4111799	7632,771	10318,27832	30,11375	10580,15	0,369504	5495,798	0,381368
137,5672577	7591,721	10461,98731	30,11379	10588,45	0,369813	5506,295	0,371109
138,7232854	7549,731	10608,58008	30,11379	10597,09	0,370133	5517,219	0,360602
139,8793131	7506,738	10758,24902	30,11379	10606,41	0,370497	5528,795	0,349782
141,0353408	7462,6674	10911,20801	30,11379	10614,61	0,370711	5539,931	0,338909
142,1913685	7417,462	11067,69727	30,11379	10624,55	0,371078	5552,407	0,327535
143,3473962	7371,015	11227,98633	30,11379	10634,32	0,371392	5565,069	0,315929
144,5034238	7323,235	11392,38184	30,11379	10644,46	0,371709	5578,269	0,30399
145,6594515	7274,01	11561,23242	30,11379	10654,92	0,372021	5592,018	0,291701
146,8154792	7223,212	11734,93945	30,11379	10665,86	0,37234	5606,437	0,27901

147,9715069	7170,691	11913,96777	30,11379	10677,14	0,372648	5621,484	0,265907
149,1275346	7116,274	12098,86231	30,11379	10688,95	0,372962	5637,327	0,252323
150,2835622	7059,755	12290,26367	30,11379	10701,29	0,373274	5654,005	0,238218
151,4395899	7000,888	12488,94141	30,11378	10756,79	0,377477	5698,484	0,217758
152,5673864	6939,377	12693,47461	30,11377	10728,38	0,374083	5689,956	0,209077
153,639404	6879,596	12893,74609	30,11379	10703,09	0,370744	5681,661	0,20039
154,8063619	6820,207	13092,04785	30,20981	10713,25	0,371195	5699,344	0,186325
155,6162979	6761,273	13288,19141	30,11377	10766,65	0,374926	5742,857	0,167164
156,5217208	6702,856	13481,99512	30,11378	10779,28	0,375181	5760,564	0,153535
157,3728769	6645,011	13673,30664	30,11377	10791,72	0,375415	5778,208	0,140109
158,1706727	6587,788	13861,99316	30,11378	10803,99	0,375632	5795,788	0,126892
160,2564964	6420,237	14411,32813	30,11378	10840,01	0,376209	5848,162	0,088523
160,8541327	6365,859	14588,63574	30,11376	10851,54	0,376363	5865,33	0,076198
161,4057146	6312,254	14762,97363	30,11379	10863	0,376515	5882,449	0,064087
161,9128409	6259,436	14934,31934	30,11377	10874,11	0,376642	5899,328	0,052224
162,3772242	6207,416	15102,66992	30,11378	10885,01	0,376755	5916,044	0,040594
162,8007867	6156,201	15268,0293	30,11377	10895,78	0,376864	5932,657	0,029184
163,1850543	6105,793	15430,41309	30,11378	10906,15	0,376946	5948,97	0,018024
163,5317761	6056,194	15589,8457	30,11379	10916,44	0,377028	5965,202	0,007074
163,8428241	6007,4	15746,3584	30,11377	10926,3	0,377084	5981,1	-0,00363
164,1196877	5959,408	15899,99023	30,11377	10936,12	0,377141	5996,928	-0,01413
164,3639794	5912,21	16050,78223	30,11378	10945,61	0,377182	6012,493	-0,0244
164,577348	5865,799	16198,78027	30,11376	10954,67	0,377199	6027,725	-0,03443
164,761283	5820,166	16344,03809	30,11377	10963,75	0,377222	6042,91	-0,04429
164,9173468	5775,299	16486,60547	30,11377	10972,46	0,377226	6057,788	-0,05391
165,0468419	5731,187	16626,53906	30,11378	10980,85	0,377215	6072,399	-0,06333
165,1510211	5687,819	16763,89258	30,11379	10989,04	0,377197	6086,817	-0,07256
165,23136	5645,18	16898,72852	30,11379	10997,02	0,377172	6101,026	-0,08159
165,2890247	5603,258	17031,09961	30,11378	11004,76	0,377137	6115,014	-0,09043
165,3250948	5562,039	17161,06445	30,11378	11012,15	0,377086	6128,703	-0,09907
165,3409093	5521,509	17288,68359	30,11376	11019,32	0,377027	6142,178	-0,10754

ÖZGEÇMİŞ

Selim MERİÇ, 11.07.1978’da İstanbul’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İstanbul’da tamamladı. 1997 yılında Tuzla Anadolu Teknik Lisesi’nden mezun oldu. 1998 yılında başladığı Doğu Akdeniz Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nü 2002 yılında Sakarya Üniversitesinde bitirdi. 2003 yılında Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2003 yılından beri Sakarya Üniversitesi’nde araştırma görevlisi, özel sektörde bakım, arge mühendisi ve bir çok özel firmaya danışman olarak çalışma hayatına devam etti. Halen Sakarya Ünivesitesi Bilgisayar Araştırma ve Uygulama Merkezinde görev yapmaktadır.