

**T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ASENKRON GENERATÖRLÜ RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN
DENGESİZ GERİLİM ALTINDA DAĞITIM SİSTEMLERİNDE
YÜK AKIŞI İÇİN MODELLENMESİ**

**AHMET KÖKSOY
DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GEBZE
2020**

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ASENKRON GENERATÖRLÜ RÜZGAR
TÜRBİNLERİNİN DENGESİZ GERİLİM
ALTINDA DAĞITIM SİSTEMLERİNDE YÜK
AKIŞI İÇİN MODELLENMESİ

AHMET KÖKSOY
DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. MEHMET HAKAN HOCAOĞLU

II. DANIŞMANI
DOÇ. DR. MURAT ERHAN BALCI

GEBZE

2020

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**MODELING OF ASYNCHRONOUS
GENERATOR WIND TURBINES UNDER
UNBALANCED VOLTAGE LOAD FLOW IN
DISTRIBUTION SYSTEMS**

AHMET KÖKSOY
**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF SCIENCE**
DEPARTMENT OF ELECTRONICS ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. MEHMET HAKAN HOCAOĞLU

II. THESIS SUPERVISOR
ASSOC. PROF. MURAT ERHAN BALCI

GEBZE
2020



DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 19/06/2020 tarih ve .2020/30 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 14/07/2020 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ahmet KÖKSOY'un tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Mehmet Hakan HOCAOĞLU

ÜYE

: Prof. Dr. Abdulkadir BALIKÇI

ÜYE

: Prof. Dr. Ahmet Fevzi BABA

ÜYE

: Prof. Dr. Nedim TUTKUN

ÜYE

: Dr. Öğr. Üyesi Tuba GÖZEL

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

ÖZET

Bu tez çalışmasında, şebekeye doğrudan bağlı asenkron generatörlü rüzgâr türbinlerinin, dengesiz dağıtım sistemlerinin yük akışı analizleri için hassas ve hesap verimli şekilde modellenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, pozitif ve negatif sıra gerilim bileşenlerinin genliği, makine empedans parametreleri ve mekanik giriş gücü cinsinden analitik temelli kapalı ifadeye sahip bir model önerilmiştir. Önerilen modelde, mekanik giriş gücünün pozitif ve negatif sıra devrelerine etkileyen parçaları iteratif bir çözümle bulunmuştur.

Önerilen modelin yenilikçi yönünün gösterilmesi için literatürdeki mevcut modellerle karşılaştırmalı analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerin ilk aşamasında, çeşitli dengesiz gerilim durumlarında, 160 kW gücündeki bir asenkron generatör için Matlab/Simulink yazılım ortamında elde edilen d-q model sonuçları referans alınarak modellerin hassasiyetleri değerlendirilmiştir. Analizlerin ikinci aşamasında, laboratuvar ortamında kurulan küçük bir sistemde, yine çeşitli gerilim dengesizliği ve mekanik giriş gücü durumlarında, 1.5 kW ve 7.5 kW gücündeki iki asenkron generatör için elde edilen ölçüm verileri referans alınarak modellerin hassasiyetleri incelenmiştir. Analizlerin son aşamasında ise; önerilen model ve literatürdeki mevcut modeller kullanılarak, 4 baralı bir test sistemi ile IEEE 34 bara ve IEEE 123 bara test sistemlerinde dengesiz yük akışı analizleri gerçekleştirilmiştir. Yük akışı analizlerinin sonuçları, hassasiyet, iterasyon sayısı ve temel işlem sayıları (toplama, çıkarma, çarpma, bölme, karekök) göz önüne alınarak yorumlanmıştır.

Gerçekleştirilen analiz çalışmalarından, önerilen modelin rüzgâr türbinlerinin dağıtım sistemlerinde yük akışı için kullanılabilir olduğu, ayrıca hassasiyet ve hesap verimliliği kriterleri birlikte değerlendirildiğinde diğer modellere göre ön plana çıktığı sonuçlarına ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Rüzgâr Güç Üretim Sistemi Modelleri, Dağıtım Sistemleri, Yük Akışı, Gerilim Dengesizliği.

SUMMARY

In this study, it is aimed to propose a sensitive and computational efficient model of the wind turbine with asynchronous generator directly connected to the network for the load flow analysis of the unbalanced distribution systems. For this purpose, a model with analytical based expressions is proposed in terms of amplitude of positive and negative sequence voltage components, machine impedance parameters and mechanical input power. In the proposed model, parts of the mechanical input power related with the positive and negative sequence circuits are calculated by an iterative algorithm.

In order to show the novelty of the proposed model, its comparative analysis with the models existed in the literature were conducted. In the first stage of the analysis, the sensitivities of the models were evaluated by the d-q model results obtained in the Matlab / Simulink software environment for an asynchronous generator with 160 kW rating under various unbalanced voltage conditions. In the second stage of the analysis, the sensitivities of the models were examined by the measurement data obtained for two asynchronous generators with 1,5 kW and 7,5 kW ratings under various voltage unbalance and mechanical input power cases in a small system established in the laboratory environment. In the last stage of the analysis, using the proposed model and existing models in the literature, unbalanced load flow analysis was performed in 4 bus test system, IEEE 34 bus and IEEE 123 bus test systems. The results of the load flow analysis were interpreted by considering the sensitivity, iteration number and basic number of operations (addition, subtraction, multiplication, division, square root).

From the conducted analysis studies, it has been concluded that the proposed model can be used for load flow in the distribution systems of wind turbines, and it stands out compared to other models when their sensitivity and computational efficiency criteria are evaluated together.

Key Words: Wind power generation system models, Distribution systems, Load Flow, Voltage unbalance.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, TÜBİTAK tarafından desteklenen 112E222 kodlu “Asenkron Generatörlü Rüzgâr Türbinlerinin Dengesiz Gerilim Altında Dağıtım Sistemlerinde Yük Akışı İçin Modellenmesi” isimli projeden türetilmiştir.

Her şeyden önce, güler yüzünü, sabrını, ilgisini ve samimiyetini benden esirgemeyen, meslek hayatım boyunca bana verdiği değerli bilgilerden faydalandığım ve faydalanacağım, kullandığı her kelimenin hayatıma kattığı önemini asla unutmayacağım Prof. Dr. Mehmet Hakan HOCAOĞLU’ na sonsuz minnetlerimi ve şükranlarımı sunarım. Ayrıca, bu çalışmanın gerçekleşmesinde büyük paya sahip olan sürekli rehberliği, kritik tavsiyeleri, paha biçilemez desteği ve sınırsız sabrı için ikinci danışmanım Doç. Dr. Murat Erhan BALCI’ ya teşekkür etmek isterim. Hem akademik hem de kişisel bakış açıları bakımından, daha iyi danışmanlar hayal edemiyorum.

Sayısız sohbetlerimiz sırasında paylaşmaktan esirgemedikleri tecrübeleri, tavsiyeleri, yardımları ve destekleri sebepleriyle; Dr. Özgür KARACASU’ ya ve Elk. Y. Müh. Onur ÖZTÜRK’ e teşekkürlerin az kalacağını belirtmek istiyorum.

Bu uzun süreçte anlayışıyla her zaman yanımda olan, tüm zorlukları benimle göğüsleyen değerli eşim Tuğba KÖKSOY’ a sıkıntılı anlarımdaki destekleri için teşekkür ediyorum.

Son olarak, bu hayattaki en büyük şansım olan aileme karşılıksız sevgileri, cesaret veren duruşları ve kendilerinden uzakta geçirdiğim bu uzun süreçte bir an bile esirgemedikleri destekleri için teşekkür etmek istiyorum.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiv
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Katkısı	2
1.2. Tezin Yapısı	3
2. DAĞITIM SİSTEMLERİNDE GÜÇ AKIŞI ve RÜZGAR TÜRBİNLERİ	4
2.1. Dağıtılmış Üretim Sistemleri	4
2.2. Rüzgâr Türbinlerinde Generatör Türleri	6
2.3. Dağıtım Sistemlerinde Güç Akışı	8
2.4. Radyal Şebeke Yapısı için Geliştirilen İleri ve/veya Geri Süpürme Temelli (Sweep Based) Yük Akış Algoritmaları	12
2.5. Yük Akışında KGAGRT Modelleri	21
2.5.1. Dengeli Yük Akışı Analizleri için KGAGRT Modelleri	21
2.5.2. Dengesiz Yük Akışı için Literatürde Olan Asenkron Generatör Modelleri	27
2.5.2.1. Kayma Temelli Model [6]	27
2.5.2.2. Sabit P, Q Modeli [5]	28
2.5.2.3. Sabit P, Q(V+) Modeli [5]	29
2.6. Sonuç ve Değerlendirme	30
3. ÖNERİLEN ASENKRON GENERATÖR MODELİ	32
3.1. Rüzgâr Gücü Modeli	33
3.2. Önerilen Modelin Elektriksel Kısmı	35
3.3. Önerilen Model için Benzetim Temelli Hassasiyet Analizi	43

3.3.1. 160 kW Gücündeki Asenkron Generatör için Benzetim Temelli Model Hassasiyet Analizleri	43
3.3.1.1. Senaryo-1 için Analiz Sonuçları	44
3.3.1.2. Senaryo-2 için Analiz Sonuçları	47
3.4. Önerilen Model için Ölçüm Temelli Hassasiyet Analizleri	50
3.4.1. Test Sisteminin Tanıtılması	51
3.4.2. Test Sisteminde Kullanılan Asenkron Generatörlerin Eşdeğer Devre Parametrelerinin Elde Edilmesi	54
3.4.3. 1,5 kW Gücündeki Asenkron Generatör için Ölçüm Temelli Model Hassasiyet Analizleri	55
3.4.4. 7,5 kW Gücündeki Asenkron Generatör için Ölçüm Temelli Model Hassasiyet Analizleri	60
3.5. Sonuç ve Değerlendirme	66
4. ÖNERİLEN MODEL VE DİĞER ASENKRON GENERATÖR MODELLERİNİN YÜK AKIŞI TEST SİSTEMLERİNDE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ	69
4.1. OpenDSS Tanıtımı	69
4.2. Önerilen Modelin OpenDSS Yük Akışı Programına Adaptasyonu	70
4.3. Radyal Dağıtım Test Sistemleri	72
4.3.1. 4 Baralı Test Sistemi	72
4.3.2. 34 Baralı Test Sistemi	75
4.3.3. 123 Baralı Test Sistemi	77
4.4. Modellerin Radyal Dağıtım Test Sistemleri ile Analiz Sonuçları	78
4.4.1. 4 Baralı Test Sistemi Sonuçları	79
4.4.2. 34 Baralı Test Sistemi Sonuçları	81
4.4.3. 123 Baralı Test Sistemi Sonuçları	85
4.5. Modellerin Radyal Dağıtım Test Sistemlerinde İşlem ve İterasyon Sayısı Performansları	88
4.6. Sonuç ve Değerlendirme	92
5. SONUÇ	93
KAYNAK	96
ÖZGEÇMİŞ	106

EKLER	107
Diğer Ekler (CD)	107

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u> <u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
P	: Aktif Güç
Q	: Reaktif Güç
V ₊	: Gerilim Pozitif Sıra Bileşeni
P _m	: Mekanik Güç
R	: Rüzgâr Türbini Rotor Yarıçapı
ρ	: Hava Yoğunluğu (kg/m ³)
C _p	: Rüzgâr Türbini Güç Katsayısını
β	: Rüzgâr Türbini Kanatlarının Pitch Açısı
λ	: Rüzgâr Türbini Uç Hız Oranı
u	: Rüzgâr Hızı(m/s)
w _r	: Rotor Açısal Hızı(rpm)
I _r	: Rotor Akımı
R _r	: Rotor Direnci
s	: Kayma Faktörü Değeri
x	: Asenkron Generatör Stator ve Rotor Reaktans Değerleri Toplamı
x _p	: Asenkron Generatör Uyarım Reaktansı ve Ona Paralel Terminal Kapasitesi Değeri
V _{sp}	: Stator Barası Pozitif Sıra Gerilim Genlik Değeri
V _{sn}	: Stator Barası Negatif Sıra Gerilim Genlik Değeri
V _{rp}	: Stator Tarafından Görülen Rotor Barası Pozitif Sıra Gerilim Genlik Değeri
V _{rn}	: Stator Tarafından Görülen Rotor Barası Negatif Sıra Gerilim Genlik Değeri
R _{sc}	: Asenkron Generatör Kısa Devre Eşdeğer Rezistans Değeri
X _m	: Asenkron Generatör Kısa Devre Eşdeğer Reaktans Değeri
R _m	: Asenkron Generatör Çekirdek Rezistans Değeri
X _m	: Asenkron Generatör Manyetizasyon Reaktans Değeri

R_{rn}	:	Asenkron Generatör Negatif Sıra Rotor Rezistans Değeri
P_m	:	Asenkron Generatör Mekanik Giriş Gücü
Q_{sp}	:	Asenkron Generatörün Stator Tarafından Çektiği Pozitif Sıra Reaktif Güç
Q_{sn}	:	Asenkron Generatörün Stator Tarafından Çektiği Negatif Sıra Reaktif Güç
Q_{rp}	:	Asenkron Generatör Rotor Pozitif Sıra Reaktif Gücü
Q_{rn}	:	Asenkron Generatör Rotor Negatif Sıra Reaktif Gücü
Z_{sc}	:	Makine Kısa Devre Empedansı
I_{sn}	:	Negatif Sıra Stator Akımı
V_{sp}	:	Asenkron Generatör Stator Pozitif Sıra Gerilim Genlik Değeri
V_{sn}	:	Asenkron Generatör Stator Negatif Sıra Gerilim Genlik Değeri
ϕ_{sp}	:	Asenkron Generatör Stator Pozitif Sıra Gerilim Genlik Değeri Açısı
ϕ_{sn}	:	Asenkron Generatör Stator Negatif Sıra Gerilim Genlik Değeri Açısı
P_T	:	Rotor Miline Etkiyen Toplam Rüzgâr Gücü
P_{rp}	:	Pozitif Sıra Rotor Aktif Gücü
P_{rn}	:	Negatif Sıra Rotor Aktif Gücü
P_{DG}	:	Dağıtılmış Generatör Çıkış Aktif Gücü
V_{IDG}	:	Dağıtılmış Generatör Terminal Gerilimi
ε	:	Tölerans Değeri
β_{sp}	:	Pozitif Sıra Stator Akımı Açısı Değeri
β_{sn}	:	Negatif Sıra Stator Akımı Açısı Değeri
V_e	:	Gerilim Kollektif Etkin Değeri
BCBV	:	Branch Current To Bus Voltage
BIBC	:	Bus Injection To Branch Current
ÇBAG	:	Çift Beslemeli Asenkron Generatör
FACTS	:	Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (Flexible Alternating Current Transmission Systems)
IEEE	:	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
KAY	:	Kirchhoff Akımlar Yasası

KGAGRT	:	Küçük Güçlü Asenkron Generatörlü Rüzgâr Türbini
KGY	:	Kirchhoff Gerilimler Yasası
MOTEST	:	Motor/Generatör Test Sistemi
SCADA	:	Merkezi Denetleme Kontrol ve Veri Toplama (Supervisory Control And Data Acquisition)
SKAG	:	Sincap Kafesli Asenkron Generatör
VTK	:	Veri Toplama Kartı
VUF	:	Gerilim Dengesizlik Faktörü
YEÜ	:	Yerel Elektrik Üretim

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Üç faz hattın gösterilimi.	13
2.2: Örnek radyal dağıtım sistemi için hatların numaralandırılması.	14
2.3: Güç Akışı Akış Diyagramı.	16
2.4: Kullanılan 3 Fazlı Hat Modeli.	19
2.5: Feijoo and Cidras' ın geliştirdiği modeller.	22
2.6: Divya and Rao' nun geliştirdikleri model.	23
2.7: Cutsem ve Vournas' ın geliştirdikleri model.	24
2.8: Hatziargyriou ve arkadaşlarının geliştirdiği model.	24
2.9: Eminoğlu' nun geliştirdiği model.	25
2.10: Chen ve Arkadaşlarının geliştirdiği model.	28
2.11: Akher' in çalışmasında modelleme için dikkate alınan a) pozitif ve b) negatif sıra eşdeğer devreleri.	28
3.1: Farklı pitch açılarında güç katsayısı ve uç hız oranı.	34
3.2: Tipik bir rüzgâr türbin güç eğrisi.	35
3.3: Asenkron generatörün (a) pozitif ve (b) negatif sıra eşdeğer devreleri.	36
3.4: Senaryo-1 için 160 kW' lık asenkron generatörün (a) a fazı aktif gücü, (b) a fazı reaktif gücü, (c) b fazı aktif gücü, (d) b fazı reaktif gücü, (e) c fazı aktif gücü ve (f) c fazı reaktif gücünün Önerilen Model, Kayma Hesabı Temelli Model, Sabit P-Q Model, Sabit P, Q(V+) Model ile d-q Model kullanılarak bulunan pu değerleri.	45
3.5: Senaryo-1 için 160 kW' lık asenkron generatörün Önerilen Model, Kayma Hesabı Temelli Model, Sabit P-Q Model, Sabit P,Q(V+) Model ile d-q Model kullanılarak bulunan toplam a) aktif, b) reaktif gücü pu değerleri.	46
3.6: Senaryo-2 için 160 kW' lık asenkron generatörün a) a fazı aktif gücü, b) a fazı reaktif gücü, c) b fazı aktif gücü, d) b fazı reaktif gücü, e) c fazı aktif gücü ve f) c fazı reaktif gücünün Önerilen	48

	Model, Kayma Hesabı Temelli Model, Sabit P-Q Model, Sabit P,Q(V+) Model ile d-q Model kullanılarak bulunan pu değerleri.	
3.7:	Senaryo-2 için 160 kW'lık asenkron generatörün Önerilen Model, Kayma Hesabı Temelli Model, Sabit P-Q Model, Sabit P,Q(V+) Model ile d-q Model kullanılarak bulunan toplam a) aktif, b) reaktif gücü pu değerleri.	49
3.8:	MOTEST sistemi.	51
3.9:	Test sisteminin prensip şeması.	51
3.10:	Test sistemine ait fotoğraf.	52
3.11:	Varyaklar.	52
3.12:	LabVIEW programı arayüzü.	53
3.13:	1,5 kW'lık asenkron generatörün 1021 d/dk mekanik giriş gücü için a) toplam aktif gücü ve b) toplam reaktif gücü, 1027 d/dk mekanik giriş gücü için c) toplam aktif gücü ve d) toplam reaktif gücü, 1032 d/dk mekanik giriş gücü için e) toplam aktif gücü ve f) toplam reaktif gücünün Önerilen Model, Kayma Hesabı Temelli Model, Sabit P-Q Model, Sabit P,Q(V+) Model ile bulunan pu değerleri.	58
3.14:	1,5 kW'lık asenkron generatörün 1036 d/dk mekanik giriş gücü için a) toplam aktif gücü ve b) toplam reaktif gücü, 1042 d/dk mekanik giriş gücü için c) toplam aktif gücü ve d) toplam reaktif gücünün Önerilen Model, Kayma Hesabı Temelli Model, Sabit P-Q Model, Sabit P,Q(V+) Model ile bulunan pu değerleri.	59
3.15:	7,5 kW'lık asenkron generatörün 1004 d/dk mekanik giriş gücü için a) toplam aktif gücü ve b) toplam reaktif gücü, 1006 d/dk mekanik giriş gücü için c) toplam aktif gücü ve d) toplam reaktif gücü, 1008 d/dk mekanik giriş gücü için e) toplam aktif gücü ve f) toplam reaktif gücünün Önerilen Model, Kayma Hesabı Temelli Model, Sabit P-Q Model, Sabit P,Q(V+) Model ile bulunan pu değerleri.	64
3.16:	7,5 kW'lık asenkron generatörün 1010 d/dk mekanik giriş gücü için a) toplam aktif gücü ve b) toplam reaktif gücü, 1012 d/dk mekanik giriş gücü için c) toplam aktif gücü ve d) toplam reaktif	65

	gücünün Önerilen Model, Kayma Hesabı Temelli Model, Sabit P-Q Model, Sabit P,Q(V+) Model ile bulunan pu değerleri.	
4.1:	Önerilen modelin güç akışı analizine uygulanması için geliştirilen akış diyagramı.	71
4.2:	Önerilen 4 baralı radyal test sistemi.	73
4.3:	Rüzgâr türbinlerinin yerleştirildiği 34 baralı radyal test sistemi.	75
4.4:	Rüzgâr türbinlerinin yerleştirildiği 123 baralı radyal test sistemi.	77
4.5:	34 baralı test sisteminde generatörlere yakın baralar için modellerin a) A fazı, b) B fazı, c) C fazı gerilim genlik sonuçları.	82
4.6:	123 baralı test sisteminde generatöre yakın baralar için modellerin a) A fazı, b) B fazı, c) C fazı gerilim genlik sonuçları.	86
4.7:	a) 4, b) 34, c) 123 baralı sistemde yük akışı analizinde modeller için kullanılan işlem sayısı.	91

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
3.1: 160 kW'lık asenkron makinaya ait empedans parametreleri.	43
3.2: 1,5 kW gücündeki test generatörüne ait rotor-stator empedans değerleri.	54
3.3: 7,5 kW gücündeki test generatörüne ait rotor-stator empedans değerleri.	54
3.4: 1,5 kW gücündeki asenkron generatör için ölçüm senaryoları.	55
3.5: 1,5 kW gücündeki asenkron generatöre her bir test senaryosunda uygulanan faz gerilimleri ve mil güçleri (PT).	56
3.6: 1,5 kW gücündeki test generatörü için ölçülen faz aktif/faz reaktif güçleri.	57
3.7: 7,5 kW gücündeki asenkron generatör için ölçüm senaryoları.	61
3.8: 7,5 kW gücündeki asenkron generatöre her bir test senaryosunda uygulanan faz gerilimleri ve mil güçleri (PT).	62
3.9: 7,5 kW gücündeki test generatörü için ölçülen faz aktif/faz reaktif güçleri.	63
4.1: Kaynağa ait sıra empedansları.	73
4.2: Dengesiz yüke ait aktif güçler ve güç faktörleri.	74
4.3: Motor T eşdeğer devre parametreleri.	75
4.4: Servis transformatörü etiket değerleri.	76
4.5: 34 baralı test sisteminde kullanılan asenkron generatöre ait parametreler.	76
4.6: Regülatör tap kademeleri.	76
4.7: Servis transformatörüne ait etiket değerleri.	77
4.8: 123 baralı test sistemine dâhil edilen asenkron generatöre ait parametreler.	78
4.9: Regülatör Tap Kademeleri.	78
4.10: 4 baralı test sisteminde gerilim genlik (pu) ve açı (°) değerleri için model sonuçları.	80
4.11: 4 baralı sistemde faz gerilim genlikleri için modellerin hata oranları.	81

4.12:	34 baralı sistemde ilgili baraların A fazı gerilim genlikleri için modellerin % hata oranları.	83
4.13:	34 baralı sistemde ilgili baraların B fazı gerilim genlikleri için modellerin % hata oranları.	83
4.14:	34 baralı sistemde ilgili baraların C fazı gerilim genlikleri için modellerin % hata oranları.	84
4.15:	123 baralı test sisteminde ilgili baralar için modellerin A fazı gerilim genlik sonuçlarının Model 2 ile % farkları.	87
4.16:	123 baralı test sisteminde ilgili baralar için modellerin B fazı gerilim genlik sonuçlarının Model 2 ile % farkları.	87
4.17:	123 baralı test sisteminde ilgili baralar için modellerin C fazı gerilim genlik sonuçlarının Model 2 ile % farkları.	88
4.18:	Modellerin örnek radyal dağıtım test sistemleri için iterasyon sayıları.	89
4.19:	Modellerin yük akışına uygulanması için kullanılması gereken işlem sayıları.	90

1. GİRİŞ

Yük veya güç akışı analizi; sistemin, bünyesinde var olan yükleri (tüketicileri) belirlenen sistem limitleri dâhilinde besleyebilme kapasitesinin değerlendirildiği analiz çalışmasıdır. Bu analiz, güç sistemlerinin gelecek planlamasının yapılmasının yanı sıra mevcut durumda en iyi şekilde işletilmesi için gerekli olan bir çalışmadır. Yük akışı analizinde, sistemdeki bilinmeyen bara gerilimleri, akımları, aktif güçleri ve reaktif güçleri hesaplanır. Analiz sonucunda, sistemdeki gücün akış yönü, düşük/aşırı yüklenmenin olduğu veya yüksek/düşük gerilim seviyesindeki baralar belirlenmiş olur [1].

Günümüzde, Rüzgâr Türbin Generatör Sistemlerinin (RTGS'nin) büyük ölçekli uygulamaları yüksek gerilim iletim hatlarında, küçük ve orta ölçekli uygulamaları ise dağıtılmış üretim birimleri olarak dağıtım sistemlerinde karşımıza çıkmaktadır [2]. Geleneksel olarak, radyal yapıda tasarlanan ve işletilen dağıtım sistemlerinin, tek bir kaynaktan beslenmesi beklenir [3]. Ancak, RTGS'nin kullanımındaki artış, günümüz dağıtım sistemleri üzerinde birden fazla besleme noktasını ortaya çıkarmaktadır. Bu durum, geleneksel dağıtım sisteminin aksine sistem üzerinde kaynağa veya yüke doğru güç akışı olmasına sebep olabilir. Rüzgâr gücünün baskın olduğu bir durumda RTGS bulduran dağıtım sistemi aktif bir sistem olarak davranabilir ve bağlı olduğu yüksek gerilim tarafını besleyebilir. Ayrıca RTGS bulunan bir dağıtım sisteminde RTGS'ye yakın bir barada faz arızası olması durumunda RTGS'nin kısa devre akımına katkı oranının bilinmesi önemlidir. Bu ve benzeri durumlar teknik zorluklar ve işletme problemlerine sebep olacaktır [3].

Pratikte, dağıtım sistemleri genellikle, tek ve çift fazlı yüklerin üç faz üzerine dengeli dağıtılmayışı, asimetrik hat empedansı ve asimetrik arızalar gibi durumların bir veya birkaçı sebebiyle, dengesiz bara gerilimleri ve hat akımlarına sahiptir. Dengesizliğin olduğu, RTGS içeren bir dağıtım sisteminde, yük akışı analizinin hızlı ve doğru sonuca ulaşmasında bu elemanların modellenmesi kritik öneme sahiptir.

Yük akışı analizlerinde generatör bulunan bara PV bara olarak sınıflandırılmaktadır. Ancak, RGTS'ler için bara tipi RGTS'nin güç kontrol elemanının var olup olmamasına göre değişiklik gösterir. Rüzgar türbinlerinde generatör olarak genellikle sincap kafesli asenkron makine, rotoru sargılı asenkron

makine, çift beslemeli asenkron makine, senkron makine ve sabit mıknatıslı senkron makine tercih edilmektedir. Generatör olarak rotoru sargılı asenkron makine, çift beslemeli asenkron makine, senkron makine veya sabit mıknatıslı senkron makine tercih edilen rüzgar türbinlerinin güç kontrol elemanı içermesi sebebiyle yük akışı analizinde PQ veya PV bara olarak modellenmesi mümkündür. Fakat güç kontrol elemanı içermeyen, şebekeye doğrudan bağlı küçük güçlü asenkron generatörlü rüzgar türbinlerinin geleneksel yaklaşımla PV bara olarak yük akışına dahil edilmesi uygun değildir [4].

Bununla birlikte, literatürdeki çalışmalarda, asenkron generatörlü rüzgar türbinlerinin dengesiz dağıtım sistemlerinin yük akışı analizlerine dahil edilmesinde, genellikle dengesizliğin bu elemanlar üzerine etkilerinin kısmen veya tamamıyla ihmal edilmesiyle basitleştirilen modeller olan Sabit P-Q ve Sabit P-Q(V+) modelleri kullanılmıştır [5]. Son yıllarda, yapılan çalışmalarda ise dengesizlik altında yük akışı analizlerinde daha hassas sonuçlar elde edilmesi motivasyonu, asenkron generatörün pozitif ve negatif sıra eşdeğer devrelerinin iterative çözümüne dayalı kapalı form ifadeler model olarak geliştirilmiştir. Ancak, bu gelişmiş modellerin aşırı hesap yükünü beraberinde getirmeleri dezavantajlarıdır [6].

1.1. Tezin Amacı ve Katkısı

Bu tez çalışmasında, şebekeye doğrudan bağlı asenkron generatörlü rüzgâr türbinlerinin, dengesiz dağıtım sistemlerinin yük akışı analizleri için hassas ve hesap verimli şekilde modellenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, pozitif ve negatif sıra gerilim bileşenlerinin genliği, makine empedans parametreleri ve mekanik giriş gücü cinsinden analitik temelli kapalı ifadeye sahip bir model önerilmiştir. Önerilen modelde, mekanik giriş gücünün pozitif ve negatif sıra devrelerine etkileyen parçaları iteratif bir çözümle bulunmuştur. Ayrıca, önerilen modelin yenilikçi yönünün gösterilmesi için literatürdeki mevcut modellerle karşılaştırmalı analizleri gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

1.2. Tezin Yapısı

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde dağıtım sistemlerinde yük akışı hakkında detaylı bir literatür taraması verilmiştir. Ayrıca küçük güçlü şebekeye doğrudan bağlı asenkron generatörlü rüzgâr türbinleri (KGAGRT)' nin dengeli ve dengesizlik durumları için oluşturulan modeller sunulmuştur.

Üçüncü bölümde KGAGRT' lerin dengesiz yük akışı analizlerine dahil edilmesi için önerilen modeli tanıtılmış ve analitik ifadeleri detaylı olarak verilmiştir. Yine, bu bölümde, çeşitli dengesiz gerilim durumlarında, 160 kW gücündeki bir asenkron generatör için Matlab/Simulink yazılım ortamında elde edilen d-q model sonuçları referans alınarak modellerin hassasiyetleri değerlendirilmiştir. Devamında, laboratuvar ortamında kurulan küçük bir sistemde, yine çeşitli gerilim dengesizliği ve mekanik giriş gücü durumlarında, 1,5 kW ve 7,5 kW gücündeki iki asenkron generatör için elde edilen ölçüm verileri referans alınarak modellerin hassasiyetleri incelenmiştir.

Dördüncü bölümde, önerilen asenkron generatör modeli ve diğer modellerin, 4 baralı bir test sistemi ile IEEE 34 bara ve IEEE 123 bara test sistemleri için yük akışı analizleri gerçekleştirilmiştir. Yük akışı analizleri Electrotec Consept tarafından geliştirilen açık kaynak kodlu, metin tabanlı ve nesne yönelimli OpenDSS programı [7] ile gerçekleştirilmiştir. Modellerin OpenDSS programına entegrasyonu için ihtiyaç duyulan DLL (Dynamic Link Library) dosyaları Delphi programı [8] kullanılarak oluşturulmuştur. Yük akışı analizlerinin sonuçları, hassasiyet, işlem süresi ve temel işlem sayıları (toplama, çıkarma, çarpma, bölme, karekök) göz önüne alınarak yorumlanmıştır.

Beşinci ve son bölümde ise elde edilen sonuçlar ile ilgili yorumlara ve gelecek çalışma önerilerine yer verilmiştir.

2. DAĞITIM SİSTEMLERİNDE GÜÇ AKIŞI ve RÜZGAR TÜRBİNLERİ

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen literatür taraması sonucu, dağıtılmış üretim sistemleri, rüzgar türbinlerinde kullanılan generatör türleri, dağıtım sistemlerinde kullanılan güç akış algoritmaları ile dengeli/dengesizlik şartlarında yük akışında kullanılan asenkron generatörlü rüzgâr türbin modelleri üzerine elde edilen çıktılar özet halinde sunulmuştur.

2.1. Dağıtılmış Üretim Sistemleri

Geleneksel olarak elektrik enerjisi, enerji kaynaklarına yakın yerlerde kurulan büyük kapasitesli santrallerde merkezi olarak üretilip, enerji iletim hatlarıyla uzak mesafelere iletilir ve son kullanıcıya (tüketiciye) dağıtım hatlarıyla ulaştırılır. Bu geleneksel üretim şekli, enerjinin uzak mesafelere iletimi ve tüketicilere dağıtımında önemli kayıplara sahiptir [3].

Diğer taraftan, son yıllarda, dağıtım sistemine bağlanabilen, yenilenebilir enerji kaynaklı elektrik üretim birimlerinin teknolojisinde gelişmeler meydana gelmiştir. Bu gelişme neticesinde, modern dağıtım sistemlerinde tüketicilere yakın noktalardan dağıtılmış şekilde elektrik üretimi yapılabilmektedir. Böylece, günümüzde, dağıtılmış üretim birimleri, enerji transferine ilişkin kayıplar bakımından merkezi üretime göre avantajlı bir üretim şekli olarak ilgi odağı haline gelmiştir [4].

Elektrik endüstrisinde yeni bir yaklaşım olan dağıtılmış üretim için literatürde henüz kabul görmüş bir tanım bulunmamaktadır. Literatürde dağıtılmış üretim ile ilişkili çok sayıda terim ve tanımlar kullanılmaktadır. Aynı tipteki üretimler için Anglo Amerikan Ülkeleri “embedded generation”, kuzey Amerika ülkeleri “dispersed generation” ve Avrupa’ da, Asya’ nın bir kısmında ise “decentralized generation” terimleri kullanılmaktadır. Elektrik Güç Araştırma Enstitüsü (EPRI) birkaç kW’ tan 100 MW’ a kadar olan üretimler olarak dağıtılmış üretimi tanımlamaktadır [9]. Gaz Araştırma Enstitüsüne göre dağıtılmış üretim 25W ve 25 MW arasında yapılan üretimler olarak tanımlanmıştır [10]. Preston ve Rastler birkaç kW’ dan 100 MW’ ta kadar olan aralıkta yapılan üretimleri dağıtılmış üretim olarak tanımlamaktadır [11].

Son olarak Cardell ise dağıtılmış üretimi 500 kW ile 1 MW arasında yapılan üretimler olarak tanımlamışlardır [12].

Genellikle dağıtılmış üretim, müşteri tarafındaki şebekede veya dağıtım şebekeleri ile elektrik güç üretimi olarak tanımlanır. Dağıtılmış üretimin amacı aktif güç üretimi sağlamaktır. Tanıma göre reaktif güç sağlamasına ihtiyaç yoktur [13]. Diğer bir tanıma ise tüketicilere yakın inşa edilen ve bu bahsedilen tüketicilerin enerji ihtiyacını karşılamak üzere kurulan herhangi bir tipte üretim istasyonlarıdır [14]. Dağıtılmış üretim teknolojileri terimi sıklıkla yenilenebilir ve konvansiyonel üretim teknolojilerinin kombinasyonu olarak kullanılmaktadır. Dağıtılmış üretimin en genel tanımı; birkaç W seviyelerinden 100 MW üzeri seviyeler arasında üretim yapan küçük ölçekli fotovoltaikler, yakıt hücreleri, enerji depolama birimleri ve küçük ölçekli rüzgâr türbinleri gibi çevre dostu teknolojileri içeren kaynaklar şeklindedir.

Dağıtılmış üretim, daha önce belirtilen, enerji transferine ilişkin kayıpların azaltılması avantajının yanı sıra, sistem gerilim profilinin iyileştirilmesi ve güvenilirliğinin artırılması bakımından avantajlıdır. Ancak, dağıtılmış üretim birimleri doğru planlanmadığı takdirde, sistemde gerilim dalgalanmaları, harmonik bozulma, dengesizlik, ters güç akışına bağlı hat kayıplarında artış ve koruma sorunları gibi çeşitli olumsuz etkilere yol açabilirler [15]. Bu sebeple, dağıtılmış üretim birimlerinin planlanmalarında yük akışı analizlerinin gerçekleştirilmesi büyük öneme sahiptir.

Dağıtım şebekelerinin genellikle radyal yapıda olmasından dolayı güç akışı, iletim şebekelerinde olduğu gibi çift yönlü değil tek yönlü olarak gerçekleştirilmektedir. Dolayısıyla, dağıtılmış üretim birimlerinin dağıtım sistemlerine yerleştirilmesinin yerel gerilim seviyelerinde önemli etkisinin olması yanında uygun yerleştirildikleri takdirde sistem kayıplarını da önemli ölçüde azaltmaktadır. Dağıtım sistemlerinde dağıtılmış üretim birimlerinin yanı sıra Statik VAr Kompanzator (SVC) ve Statcom gibi aktif kompanzatorler kullanılarak reaktif güç kompanzasyonu ile sistemde gerilim kontrolü yapılmaktadır. Böylece, bu tür dağıtım sistemleri radyallıktan uzaklaşmakta ve sistemdeki güç transferi kaynağa doğru akabilmektedir. Bir başka ifadeyle, her iki yönde güç akışı olabilmektedir [16].

Güç akışı analizine dağıtılmış üretim birimleri (generatörler) veya kompanzatorler dâhil edilirken, bu elemanların aktif güçleri ve sisteme bağlantı noktası gerilimleri bilindiğinden PV-bara (Gerilim Kontrollü bara) olarak modellenmesi uygundur. Güç akışı algoritmalarından geleneksel güç akışı

algoritmaları ve onların dağıtım sistemleri için geliştirilmiş şekilleri kullanılarak PV baralı dağıtım sisteminde güç akışı yapılabilmektedir. Diğer bir deyişle, PV-bara kolaylıkla algoritmalarda modellenmekte ve bilinmeyen büyüklükleri (Reaktif güç ve faz açısı) analiz esnasında hesaplanabilmektedir. Fakat bu tip algoritmalarda dağıtım sistemlerinin yapısı sebebiyle yakınsama problemi görülebilmekte, sistemde radyallık arttıkça güç akışı analizi yapılamamaktadır [4].

Bu duruma çözüm olarak, dağıtım sistemleri için Süpürme (sweep)-temelli güç akışı algoritmaları geliştirilmiştir. Algoritmalar, tek yönlü güç akışını esas alarak geliştirildiğinden bunlara dağıtılmış üretim birimleri veya gerilim kontrolörleri PV-bara olarak doğrudan güç akışına dâhil edilememekte, genellikle sabit güçlü bara (PQ-bara) olarak modellenmektedir. Sabit PQ-bara olarak modellenmesi durumunda bu birimlerin bağlı olduğu bara gerilimleri kontrol edilememekte ve normal yük baralarında olduğu gibi güç değerlerine göre akımı hesaplanarak her bir iterasyonda gerilim değeri hesaplanmaktadır [17].

2.2. Rüzgâr Türbinlerinde Generatör Türleri

Dağıtılmış üretimler arasında Dünyada en yaygın kullanılanı rüzgârdır. Temiz, çevre dostu ve yaygın bir tabiat olayı olması gibi özelliklerinden dolayı, Dünyada elektrik üretimi için rüzgâr güç üretim sistemlerinin kullanımının önemi de her geçen gün artmaktadır. Rüzgârın en önemli özelliği ülkelerin coğrafi konumları itibariyle potansiyelleri ölçüsünde faydalanabildikleri bir kaynak olmasıdır [18]-[20].

Rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmede rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır. Rüzgâr türbin rotoru, aerodinamik olarak tasarlanmış kanatları vasıtası ile rüzgâr dalga enerjisinin bir kısmını yakalayarak mekanik enerjiye çevirir. Bu sistemlerde, yakalanan dalga enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü kısım ise generatördür. Rüzgâr türbin sistemleri, sabit hızlı, sınırlı değişken hızlı ve değişken hızlı olmak üzere üç ana gruba ayrılabilirler. Ayrıca, değişken hızlı rüzgâr türbinleri, çok kademeli dişli kutulu, tek kademeli dişli kutulu ve doğrudan sürüştü tiplerine sahiptirler. Sınırlı değişken ve değişken hızlı sistemlerde güç elektroniği devreleri bulunur, sabit hızlı sistemler ise doğrudan şebekeye bağlanabilirler. Rüzgâr türbinlerinde, generatör olarak genellikle,

- Sincap kafesli asenkron generatör,
- Rotoru sargılı asenkron generatör,
- Çift beslemeli asenkron generatör,
- Senkron generatör,
- Kalıcı mıknatıslı senkron generatörler

kullanılmaktadır [21]-[26].

Bununla birlikte, Dünya üzerinde kurulu rüzgâr güç üretim santrallerinin büyük çoğunluğu küçük güçlü sabit hızlı rüzgâr türbinlerinde sincap kafesli asenkron generatör bulunur [27]. Küçük güçlü sabit hızlı asenkron generatörlü rüzgâr türbinlerinin tercih edilmesinin sebepleri;

- Bakım ve onarım maliyetinin düşük olması,
- Herhangi bir kontrol mekanizmasına gerek duymaması,
- Üretimlerinin yaygın bir şekilde yapılabilmesi ve böylece bu tip türbinlerin kolay ulaşılabilir olması,
- Dağıtım sistemlerine herhangi bir senkronizasyon ve güç konvetörü devresine ihtiyaç duymadan doğrudan bağlanması,
- Devlet tarafından sağlanan teşvikler

maddeleri ile özetlenebilir. Bu maddelerden en önemlisi devlet tarafından sağlanan teşviklerdir. Ülkemizde 1 MW' a kadar üretim santralleri kurulmasında şebeke bağlantı ve EPDK' dan üretim için lisans alma zorunluluğu olmaması bu tipteki türbinler için cazibe merkezi haline getirmiştir [28].

Küçük güçlü sabit hızlı asenkron generatörlü rüzgâr güç üretim sistemleri herhangi bir kontrol mekanizmasına sahip olmadıklarından dolayı analizler sırasında sabit PQ bara olarak modellendiği takdirde bara gerilimleri kontrol edilememekte, normal yük baralarında olduğu gibi güç değerlerine göre akımı hesaplanarak her bir iterasyonda gerilim değeri hesaplanmaktadır. PV bara olarak modellendiğinde ise bara geriliminin ayarlanan değerde sabit tutulduğu varsayılmaktadır. Her iki varsayımda gerçek durumu yansıtmaktan uzaktır. KGAGRT tarafından üretilen güç terminal geriliminin bir fonksiyonudur ve daha da önemlisi terminal geriliminin dengesiz olması durumunda çok farklı değerler alabilmektedir [29].

2.3. Dağıtım Sistemlerinde Güç Akışı

Elektrik güç sistemleri ideal olarak; dengeli, belirli bir etkin değer, belirli bir frekans ve sinüzoidal dalga formunda gerilimler ve akımlara sahip üç fazlı sistemlerdir. Elektrik güç sistemlerinin, bu ideal koşullar gözetilmeden verimsiz bir şekilde planlanması ve işletilmesi, maliyet kaybına sebep olur. Diğer taraftan, bu sistemlerin her geçen gün büyümesi ve karmaşık bir hal alması, işletme ve planlama safhalarında ayrıntılı çalışmaların yapılması gerekliliğini ortaya çıkartmıştır. Elektrik güç sistemlerinde gerçekleştirilen ayrıntılı çalışmalardan en önemlisi yük akışı çalışmalarıdır [30].

Normal şartlar altında elektrik güç sistemleri sabit durumda kararlı halde (steady state) çalışırlar. Yük akışı hesaplamaları, temelde elektrik güç sisteminin kararlı durumda çalışma şartlarının belirlenmesi ve sistemin durumunun anlaşılması için gerçekleştirilir. Ayrıca şebekeler arası güç aktarım hesabının yanı sıra geçici kararlılık ve kestirim çalışmaları gibi birçok analizde de gereklidir. Sistemin olası uzun dönemli değişikliklere dayanıklı olup olmadığı, öngörülen yük artışlarına göre yapılacak yeni yük akışı hesaplamalarıyla belirlenir. Elde edilen sonuçlara göre geleceğe yönelik stratejiler tespit edilir. Yük akış hesapları, yüksek hat kaybı, düşük gerilim ve aşırı gerilim gibi olası güç kalitesi sorunlarına çözüm yolları bulmak için de kullanılmaktadır [31]-[34].

Mevcut güç sistemlerinin en iyi şekilde işletilmesi kadar, gelecekte sistemlerde meydana gelebilecek gelişmelerin planlanması yönünden de yük akışı analizleri büyük önem arz etmektedir. Geçtiğimiz yüzyılda elektrik güç sistemlerinde güç akışı için birden fazla etkili ve güvenilir güç akış metotları (Newton Raphson, Gauss Seidell ve Fast Decoupled) geliştirilmiştir [33]-[35]. Bu metotlar halen kullanılmaktadır. 1980' li yıllara kadar dağıtım sistemlerinde kısa devre hesapları ve gerilim düşümü hesabı yapılmakta iken güç akışına ihtiyaç duyulmamaktaydı. Fakat dağıtım sistemlerinde SCADA (Merkezi Denetleme Kontrol ve Veri Toplama (Supervisory Control And Data Acquisition)) sistemlerinin kullanılması, FACTS (Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (Flexible Alternating Current Transmission Systems)) cihazlarının maliyet efektif olarak uygun hale gelmesi ile dağıtım sistemlerinde de kullanılmaya başlaması, Yerel Elektrik Üretim (YEÜ) birimlerinin dağıtım seviyesine yerleştirilmesi, kompanzasyon yapılması ve bunların en uygun yerinin belirlenme ihtiyacı gibi bazı

teknolojik gelişmeler ve uygulamalar dağıtım sistemlerinde de yük akışı analizini yapmayı zorunlu kılmıştır. Yük akışı ile çok baralı bir güç sisteminde değişik yüklenme koşulları altında, sistemdeki her bir baranın gerilim genliği ve açısı ile aktif / reaktif güç değerleri, hatlardan akacak akımları ve hat kayıplarının belirlenmesi amaçlanır [36]-[38].

Geleneksel güç akış metotları (Newton Raphson, Gauss Seidell ve Fast Decoupled) diğer bir söylemle algoritmaları temelde iletim sistemleri için geliştirilmişlerdir [31]-[36]. Bu algoritmaların, temeli bir baraya enjekte edilen kompleks güçler ile baradan çekilen kompleks güçler arasındaki farktan kaynaklanan güç hatasının ihmal edilebilecek kadar küçük seçilmiş tolerans değerinin altına indirilmesi esasına dayanır.

Dağıtım sistemleri genellikle raydal bir yapıya sahiptir ve yeraltı kablolarının kullanılmasından dolayı R/X oranları birden büyük değerleri alabilmektedir. Ayrıca dağıtım sistemleri üç faz, iki faz ve bir fazlı dallara sahip olabildiğinden genellikle dengesiz yapıdadır. Bununla birlikte, sistem Jacobian matrisleri genellikle ill-conditioned matristir [39]-[40]. Diğer bir ifadeyle, sistem matrisindeki çok az bir değişim, sistemin çözümünde çok büyük değişikliklere sebep olabilmektedir. R/X oranı birden büyük bir değer aldığı anda admitans ve Jacobian matrislerinin ill-conditioned matris olması, hatlarda fazlar arasında çaprazlama yapılmaması sonucu dengesiz hat empedansının oluşması ve dengesiz yüklenme gibi durumlar yakınsama sorununun sebepleri olarak gösterilmektedir. Dolayısıyla, geleneksel yük akış metotları olarak bilinen temelde iletim sistemleri için geliştirilmiş metotlar dağıtım sistemlerine uygulandığında büyük oranda yakınsama sorunlarının ortaya çıktığı literatürde iyi bilinmektedir [34]-[40]. Bu durum, geleneksel metodların dağıtım sistemleri için yük akışı hesabında yetersiz kalmasına yol açmaktadır. Literatürdeki bu boşluğu doldurmak için dengeli ve dengesiz dağıtım sistemlerinde yük akışı için birçok algoritma geliştirilmiştir [40]-[86]. Dağıtım sistemlerinde kullanılan yük akış algoritmalarını temelde üç kategoriye ayırmak mümkündür [87]-[89]. Bu algoritmalar hakkında aşağıda maddeler halinde kısaca bilgi verilmiştir:

i) Genel şebeke yapılı yük akış algoritmaları:

- Geleneksel yük akış algoritmaları

Yük akışı analizi için literatürde iyi bilinen Gauss-Seidel, Newton-Raphson ve fast-decoupled yöntemlerinden birini kullanan algoritmalar [90]. Sistem

Jacobian matrisinin tekile düşmesi gibi kritik durumlarda performansları tatmin edici değildir [91].

- Z-Bara Gauss temelli yük akış algoritmaları
Gauss-Seidel çözüm temelli algoritmalarıdır. Büyük sistemler için hazırlanması zaman alan bara admitans matrisine ihtiyaç duyar [92].
- Düzeltilmiş fast-decoupled yük akış algoritmaları
Temel olarak Newton-Raphson metoduyla benzerdir. Ancak aktif güçler ile faz açıları arasında ve sistemdeki reaktif güçler ile gerilimler arasında kurulan bağıntıları kullanır. Bu yaklaşımla, ardışıl çözümler arasında hesaplama işlemleri büyük ölçüde azalmaktadır [93].
- Newton-Raphson metodunun yeniden düzenlenmesi ile elde edilen yük akış algoritmaları
 - Karmaşık sayılarla Newton-Raphson yük akış algoritmaları
Newton-Raphson metodu temelli karmaşık sayılar kullanarak çözüm sunan algoritmalarıdır. Güç ve akım uyumsuzluğu fonksiyonlarını kullanarak bilinmeyen bara gerilimlerini hesaplamaya yönelik çözüm yöntemidir [90].
 - Akım enjeksiyonu temelli yük akış algoritmaları
Literatürde dağıtım sistemlerinde diğer türevlerine göre daha popüler olan algoritmalarıdır [94]. Güç uyumsuzluğu hesaplanmasına dayalı, özellikle PQ baralar için Jacobian matrisindeki bazı çapraz ve köşegen elemanların sabit ve admitans matrisindeki değerlerine eşit olan yük akışı algoritmasıdır [95].

ii) Simetrik bileşen temelli yük akış algoritmaları

Bu algoritmalar, simetrik bileşenler yöntemini kullanarak çözülmek istenen sistemi sıra eşdeğer devreleriyle ifade eder. Böylece, karşılıklı empedansların yer aldığı büyük bir sistem yerine birbirinden bağımsız üç sistemi dikkate alarak işlem yükünü azaltır. Simetrik sistemlerde sadece pozitif sıra devresinin çözüm için kullanılması yeterlidir [96].

iii) Radyal şebeke yapısı için geliştirilen yük akış algoritmaları:

Kirchhoff Akım ve Gerilim kanununun veya hat parametreleri ve hattın transfer edilen aktif ve reaktif güçlerden oluşan gerilim denklemi (kuadratik denklem)

kullanılarak radyal sistemde ileri ve/veya geri yönde hesaplamalara dayanan sweep-temelli algoritmalarıdır [58]-[86].

- Direkt çözüm temelli yük akış algoritmaları

Dağıtım sistemlerinin topolojik karakteristiklerinin getirdiği avantajı kullanarak sistemin direk çözümüne yönelik metotlardır [97],[98]. Bir takım dönüşüm matrislerinden yararlanılarak Newton-Raphson tekniğine gerek kalmadan yük akışı çözümünü direkt olarak gerçekleştirirler. Bu matrisler bara akım enjeksiyonu ile kol akımları arasındaki ilişkiyi gösteren "Bus Injection To Branch Current (BIBC)" ve kol akımları ile bara gerilimleri arasındaki ilişkiyi gösteren "Branch Current To Bus Voltage (BCBV)" olarak isimlendirilmiş matrislerdir. Weakly-meshed sistemlere de uygulanabilir oluşları ve LU ayrıştırma, Jacobian matrisi, bara admitans matrisi gibi büyüklüklere ihtiyaç duymayışları sebebiyle zaman verimlidirler.

- Radyal şebekelere göre düzenlenmiş geleneksel yük akış algoritmaları

Bu kategorideki yöntemler radyal sistemlere uygun şekilde geleneksel algoritmaların modifiye edilip kullanıldığı durumlardır [41]-[57].

- Süpürme (Sweep) temelli yük akış algoritmaları

Bu tür algoritmalar genellikle şebekenin radyal yapıda olması avantajını kullanır. Ardışıl çözüm gerektiren ve her bir iterasyonu iki süpürme hesaplama adımıyla gerçekleştiren yöntemlerdir. Temelde ileri yönde (kaynaktan yüke) süpürme adımı düğüm gerilimlerinin hesaplamasını, geri yönde (yükten kaynağa) süpürme adımı ise kol akımlarını veya bara güçlerini ya da admitansların güncellendiği adımdır [90].

- Ladder network teorisi temelli yük akış algoritmaları

Bu tür algoritmalar, incelenen sistemin algoritmaya özgü birtakım prosedürler kullanılarak yeniden düzenlenmesini gerektirir (Düğümünün topolojiye göre sıralanması, her bir sistem bileşeninin iki kapılı devre parametreleri kullanılarak ifade edilmesi, vb.). Ayrıca sistemde yan kollarda birçok alt iterasyona ihtiyaç duyarlar. Büyük sistemler için bu verilerin hazırlanması zahmetlidir [99].

- Oran akışı (ratio-flow) temelli yük akış algoritmaları

Yakınsama kontrolünün gerilim oranını kullanarak sağlandığı, hızlı yakınsama karakteristiğine sahip algoritmalarıdır. İleri yönde süpürme

adımında, salınım barasındaki referans gerilim değerinin, hesaplama sonucu bulunan gerilim değerine oranını kullanır. Geri süpürme adımında hesaplanan gerilim değerleri bu oran ile çarpılarak bara gerilimlerini ileri yönde kolayca hesaplar. Böylece ileri süpürme adımı kompleks işlemlere gerek kalmadan lineer oran prensibini kullanarak çözümü gerçekleştirir [66], [88].

– İleri ve/veya geri süpürme temelli yük akış algoritmaları

Bu tür algoritmalar, temelde iki aşamadan oluşur. Birinci aşamada geri süpürme adımında, yükten kaynağa doğru yük ve hat akımları toplanarak hesaplanır. İkinci aşamada ise salınım barası referans alınarak kaynaktan yüklere doğru bara gerilimleri hesaplanır. Bu algoritmalar, iteratif olarak bara gerilimlerinin hesaplanmasına dayanır [100].

Çalışmanın bir sonraki kısmında, tez kapsamında gerçekleştirilen yük akışı çalışmalarında kullanılan, literatürde radyal şebeke yapısı için geliştirilen ileri ve/veya geri süpürme temelli (Sweep Based) algoritmalar daha detaylı bir şekilde ele alınacaktır.

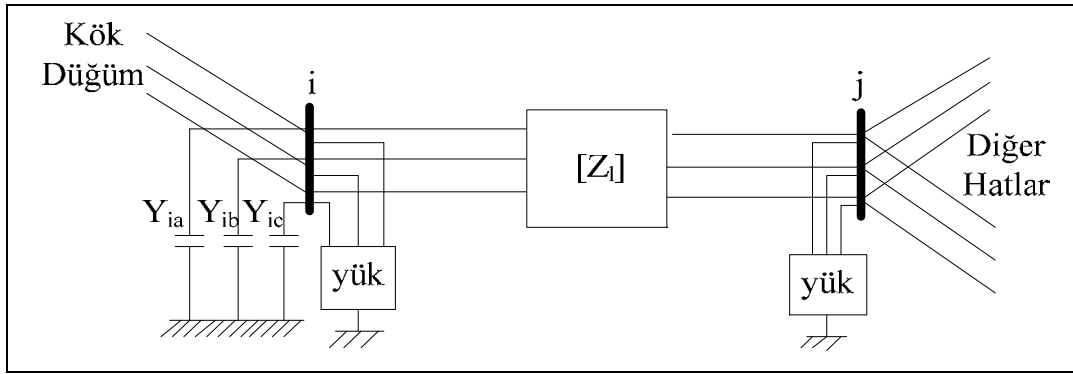
2.4. Radyal Şebeke Yapısı için Geliştirilen İleri ve/veya Geri Süpürme Temelli (Sweep Based) Yük Akış Algoritmaları

Diğer şebeke yapılarına göre daha ucuza mâl olması ve planlanmasının, tasarımının ve işletilmesinin daha kolaylığı sebepleriyle dağıtım sistemlerinin büyük bir çoğunluğu radyal yapıda oluşturulmuştur [89]. Radyal yapıdaki dağıtım sistemlerinde güç transferi tek yönlü olarak sadece kaynaktan yüke doğru gerçekleşmektedir.

Bu kategorideki metotlar radyallıktan ileri gelen ağaç yapısını kullanarak kaynaktan yüklere doğru ve yüklerden kaynağa doğru süpürme işlemi yaparak hat sonu veya hat başı gerilimlerin hesaplanmasına dayalı bir algoritmadır. Dağıtım sistemlerinde yük akışı analizinde yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [100].

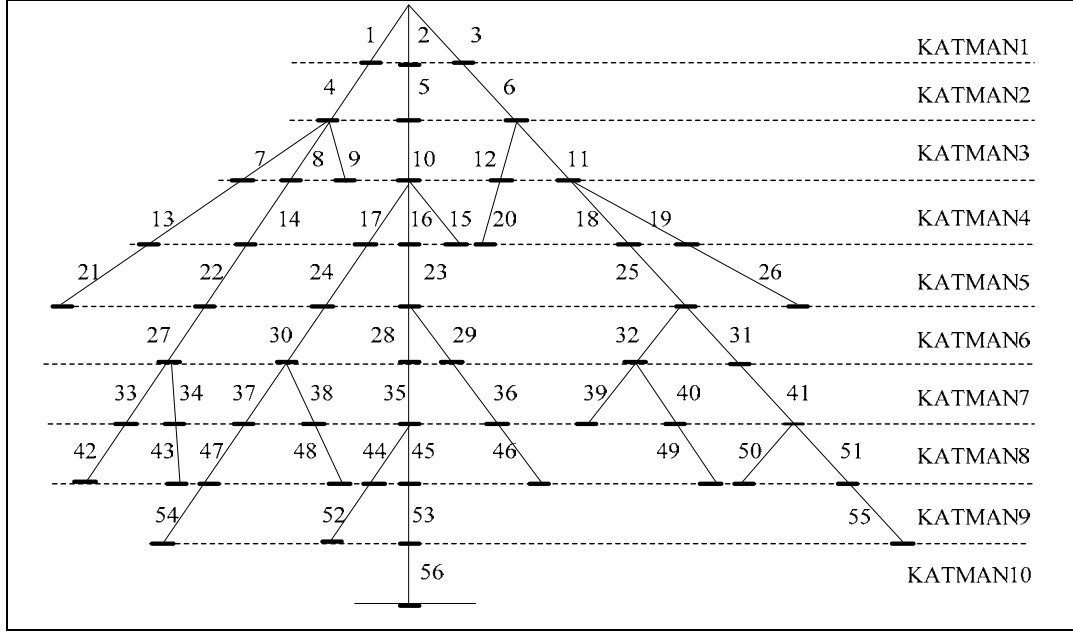
Daha önce belirtildiği şekilde, İleri ve/veya Geri süpürme temelli algoritmalar iki temel aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalardan birincisi geri süpürme adımında, yükten kaynağa doğru yük ve hat akımları toplanarak hesaplanmaktadır. İkinci

aşamada ise salınım barası referans alınarak kaynaktan yüklere doğru bara gerilimleri elde edilmektedir. Bu algoritmalar, iteratif olarak hat sonu veya hat başı gerilimlerin hesaplanmasına dayalıdır. Shirmohammadi ve arkadaşları [59], dengesiz dağıtım sistemleri için bir yük akışı algoritması geliştirmiştir. Geliştirilen algoritmada sondan kaynağa doğru geri yönde hat akımları hesaplanmakta ve bu akımlar kullanılarak ileri yönde bara gerilimleri Kirchoff Gerilim Yasası (KGY) ile hesaplanmaktadır. Algoritma dağıtım sistemlerinde yük akışı analizleri için geniş kullanım alanına sahiptir. Algoritmada hatlar öz ve ortak empedansların yer aldığı seri empedans matrisi şeklinde modellenmiştir. i ve j barası arasında yer alan l hattına ait gösterimi Şekil 2.1' deki gibidir.



Şekil 2.1: Üç faz hattın gösterilimi.

[59]' da öncelikle hatlar radyal yapıya uygun bir şekilde katmanlar halinde sıralı olarak numaralandırılmıştır. Sistemin katmanlar halinde modellenmesi, hat akımlarının toplamsal olarak elde edilmesinde kolaylık sağlamaktadır. Bu yaklaşımda kök bara (Root Node) olarak gerilim genliği ve açısının bilindiği salınım barası seçilmiştir.



Şekil 2.2: Örnek radyal dağıtım sistemi için hatların numaralandırılması.

Böylece, Şekil 2.2' deki gibi radyal yapıda parçalara ayrılan dağıtım sisteminde Kirchoff Gerilimler Yasası (KGY) ve Kirchoff Akımlar Yasası (KAY) doğrudan uygulanabilir ve bu sayede sistem daha basit ve sistematik şekilde çözülebilir hale gelir.

Radyal dağıtım sisteminin iteratif güç akışı analizi 6 adımdan oluşmaktadır.

- Adım 1: Sistemin bara gerilimlerinin başlangıç değerlerini belirle. (genellikle $1\angle 0^\circ$ pu veya referans bara gerilimine eşit)
- Adım 2: Bara akımlarını hesapla. (i. bara ve k. iterasyon için) (Y_{ix} : i barası x fazı için tüm şönt elemanların admitansı)

$$\begin{bmatrix} I_{ia} \\ I_{ib} \\ I_{ic} \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} (S_{ib}/V_{ia}^{(k-1)})^* \\ (S_{ib}/V_{ib}^{(k-1)})^* \\ (S_{ic}/V_{ic}^{(k-1)})^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{ia}^* & & \\ & Y_{ib}^* & \\ & & Y_{ic}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ V_{ic} \end{bmatrix}^{(k-1)} \quad (2.1)$$

- Adım 3: Bara akımlarını kullanarak sistemde sondan kaynağa doğru hat akımlarını hesapla. (J_{lx} : l hattı akımı, J_{mx} : m barasının alt kollarındaki hatlar)

$$\begin{bmatrix} J_{la} \\ J_{lb} \\ J_{lc} \end{bmatrix}^k = - \begin{bmatrix} I_{ja} \\ I_{jb} \\ I_{jc} \end{bmatrix}^k + \sum_{m \in M} \begin{bmatrix} J_{ma} \\ J_{mb} \\ J_{mc} \end{bmatrix}^k \quad (2.2)$$

- Adım 4: Hesaplanan hat akımlarını kullanarak sistemde kaynaktan sona doğru ileri yönde KGY ile bara gerilimini hesapla

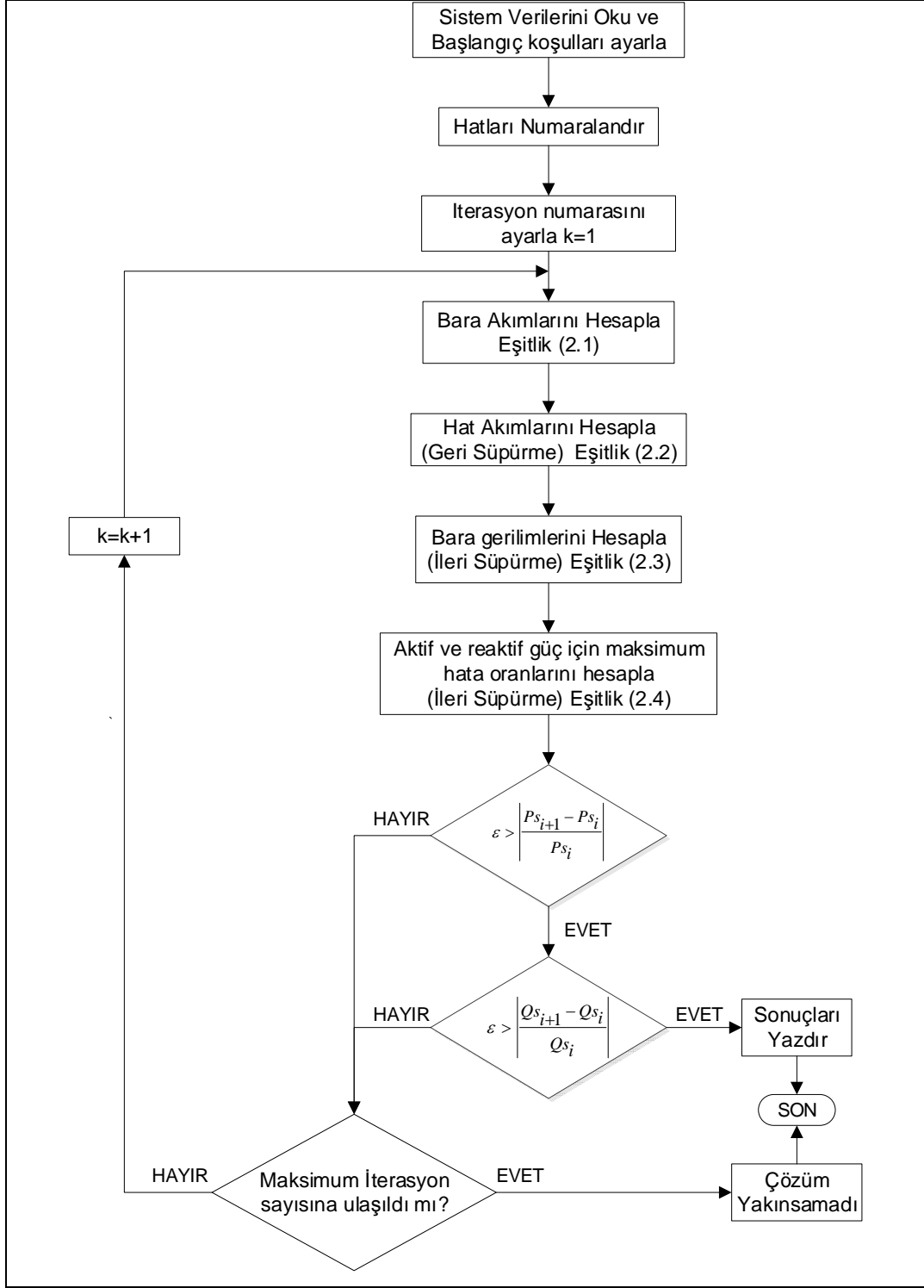
$$\begin{bmatrix} V_{ja} \\ V_{jb} \\ V_{jc} \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ V_{ic} \end{bmatrix}^k - \begin{bmatrix} Z_{aa,l} & Z_{ab,l} & Z_{ac,l} \\ Z_{ab,l} & Z_{bb,l} & Z_{bc,l} \\ Z_{ac,l} & Z_{bc,l} & Z_{cc,l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{la} \\ J_{lb} \\ J_{lc} \end{bmatrix}^k \quad (2.3)$$

- Adım 5: Hesaplanan yeni bara gerilimi ve akımını kullanarak bara güçlerini hesapla ve bir önceki adımda hesaplanan güç değerleri ile karşılaştır.

$$\begin{aligned} \Delta S_{ia}^{(k)} &= V_{ia}^{(k)} \left(I_{ia}^{(k)} \right)^* - Y_{ia}^* \left| V_{ia}^{(k)} \right|^2 - S_{ia}^{(k-1)} \\ \Delta S_{ib}^{(k)} &= V_{ib}^{(k)} \left(I_{ib}^{(k)} \right)^* - Y_{ib}^* \left| V_{ib}^{(k)} \right|^2 - S_{ib}^{(k-1)} \\ \Delta S_{ic}^{(k)} &= V_{ic}^{(k)} \left(I_{ic}^{(k)} \right)^* - Y_{ic}^* \left| V_{ic}^{(k)} \right|^2 - S_{ic}^{(k-1)} \end{aligned} \quad (2.4)$$

- Adım 6: Eğer güçlerin hata değerlerinden herhangi biri istenilen yakınsama şartını sağlamıyorsa Adım 2' ye geri dön. şart sağlanıyorsa program sonlandır.

[59]'daki metoda ait akış diyagramı Şekil 2.3' te verilmiştir.



Şekil 2.3: Güç Akışı Akış Diyagramı.

[59]' da YEÜ birimleri gerilim kontrollü bara (PV-bara) olarak modellenerek bara gerilimini istenilen değerde tutmak için gerekli reaktif gücün hesaplanmasına dair adımlar da yer almaktadır. Aynı çözüm tekniği [60]' ta YEÜ birimleri ve dengesiz transformatörler gibi elemanlar göz önünde bulundurularak dengesiz dağıtım

sistemlerinin yük akışı analizinde kullanılmıştır. Yapılan yük akışı analizinde YEÜ birimleri PV-bara olarak modellenmiş, gerilimi kontrol edilmiştir. Gerilim kontrolü PV-bara' nın akımı ayarlanarak gerçekleştirilmektedir. KGY kullanılarak ileri yönde gerilim, geri yönde hat akımı hesabı [61]-[63]' te verilen yük akışı algoritmalarında da kullanılmıştır. Dengesiz dağıtım sistemleri için [61]' de geliştirilen algoritmada hat akımları, diğerlerinden farklı olarak yük akımları yerine her bir hattın sonundaki bara gerilimi ve transfer edilen toplam güç kullanılarak hesaplanmakta olup algoritmaya ait adımlar aşağıda verilmiştir.

- Adım 1: Sistemin bara gerilimlerinin başlangıç değerlerini belirle (genellikle $1\angle 0^\circ$ pu veya referans bara gerilimine eşit).
- Adım 2: Hatlar için hat sonu bara güçlerini eşitlik (2.5) 'ten hesapla, (i ve j baraları arasındaki bir hat için n: j. baranın alt kollarındaki baralardan herbiri m: j. baranın alt kollarındaki hatlardan herbiri);

$$\begin{bmatrix} S_{ij}^{(a)} \\ S_{ij}^{(b)} \\ S_{ij}^{(c)} \end{bmatrix}^{(k)} = \sum_{n \in N} \begin{bmatrix} S_{na} \\ S_{nb} \\ S_{nc} \end{bmatrix}^{(k)} + \sum_{m \in M} \begin{bmatrix} SL_{ma} \\ SL_{mb} \\ SL_{mc} \end{bmatrix}^{(k)} \quad (2.5)$$

- Adım 3: Hat akımlarını ilk iterasyon için eşitlik (2.6) ile diğer iterasyonlar için eşitlik (2.7) ile hesapla;

$$\begin{bmatrix} I_{ij}^{(a)} \\ I_{ij}^{(b)} \\ I_{ij}^{(c)} \end{bmatrix}^{(1)} = \begin{bmatrix} (S_{ij}^{(a)} / V_{ia})^* \\ (S_{ij}^{(b)} / V_{ib})^* \\ (S_{ij}^{(c)} / V_{ic})^* \end{bmatrix}^{(1)} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} I_{ij}^{(a)} \\ I_{ij}^{(b)} \\ I_{ij}^{(c)} \end{bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} (S_{ij}^{(a)} / V_{ja})^* \\ (S_{ij}^{(b)} / V_{jb})^* \\ (S_{ij}^{(c)} / V_{jc})^* \end{bmatrix}^{(k)} \quad (2.7)$$

- Adım 4: Hesaplanan hat akımlarını ve hat empedansını kullanarak KGY eşitlik (2.8) ile bara gerilimlerini sistemde kaynaktan sona doğru ileri yönde hesapla;

$$\begin{bmatrix} V_j^a \\ V_j^b \\ V_j^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i^a \\ V_i^b \\ V_i^c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{ij}^{aa} & Z_{ij}^{ab} & Z_{ij}^{ac} \\ Z_{ij}^{ba} & Z_{ij}^{bb} & Z_{ij}^{bc} \\ Z_{ij}^{ca} & Z_{ij}^{cb} & Z_{ij}^{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ij}^{(a)} \\ I_{ij}^{(b)} \\ I_{ij}^{(c)} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

- Adım 5: Hatlardaki kayıpları eşitlik (2.9) daki ifadeyle hesapla;

$$\begin{bmatrix} SL_{ij}^{(a)} \\ SL_{ij}^{(b)} \\ SL_{ij}^{(c)} \end{bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} (V_{ia} - V_{ja}) (I_{ij}^{(a)})^{*-(k)} \\ (V_{ib} - V_{jb}) (I_{ij}^{(b)})^* \\ (V_{ib} - V_{jb}) (I_{ij}^{(c)})^* \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

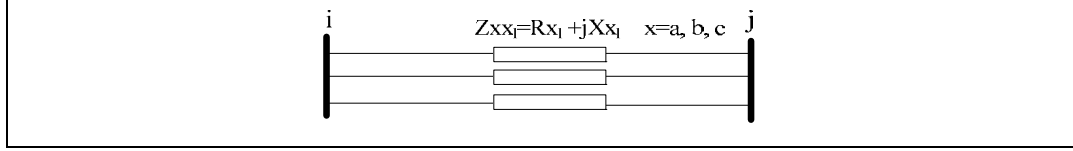
- Adım 6: Bir önceki gerilim değerleri ile hesaplanan gerilimleri kullanarak gerilim hatalarını belirle ve eğer gerilimlere ait hata değerlerinden en büyüğü tanımlanan hata değerinden küçük ise işlemi sonlandır, aksi halde Adım 2'ye geri dön.

[61]' de geliştirilen algoritmanın aynı gerilim ve akım hesaplama teknikleri [62] ve [63]' te kullanılmıştır. [62]' de verilen çalışmada hatlardan akan akımı ve dolayısıyla bu akımlar kullanılarak bara gerilimlerinin otomatik olarak hesaplanabileceği, bara ve hat bağlantılarının numaralandırılmasının otomatik olarak yapıldığı kodlama tekniği geliştirilmiştir. [63]' te geliştirilen algorithmada ise gerilim hesabında fider için uygulanan temel iterasyonun dışında alt-fiderler için de gerilim hesabı iteratif olarak hesaplanmaktadır.

Thukaram ve arkadaşlarına ait yük akışı metodu [59], [64] çalışmasındaki metot ile benzer yapıdadır. Aralarındaki tek fark yakınsama şartıdır. [59] çalışmasında yakınsama kontrolü son iki iterasyondaki bara güçleri dikkate alınarak eşitlik (2.4)'ten hesaplanırken, [64] çalışmasında yakınsama kontrolü için son iki iterasyona ait bara gerilimleri kullanılarak eşitlik (2.10)' daki ifadeyle hesaplanır.

$$\begin{bmatrix} \Delta V_{ia} \\ \Delta V_{ib} \\ \Delta V_{ic} \end{bmatrix}^{(k)} = \begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ V_{ic} \end{bmatrix}^{(k)} - \begin{bmatrix} V_{ia} \\ V_{ib} \\ V_{ic} \end{bmatrix}^{(k-1)} \quad (2.10)$$

Bara gerilimlerinin faz açılarından bağımsız olarak elde edilen kuadratik denklem yardımıyla hesaplandığı algoritmalar da literatürde mevcuttur [70]. Bu algoritmada hatların öz empedansları dikkate alınıp karşılıklı empedansları ihmal edilmiştir.



Şekil 2.4: Kullanılan 3 Fazlı Hat Modeli.

Herbir faz için eşitlik (2.11)' de verilen ifadeler yardımıyla j. baradaki gerilimler hesaplanmıştır. Bu denklemin V_{x_j} için çözülmesi ile elde edilen en büyük reel kök bize hat sonu geriliminin genliğini vermektedir.

$$|V_{x_j}|^4 + (2(P_{x_j}R_{x_l} + Q_{x_j}X_{x_l}) - |V_{x_l}|^2)|V_{x_j}|^2 + |S_{x_j}|^2|Z_{xx_j}|^2 = 0 \quad (2.11)$$

$$x = a, b, c$$

Algoritmanın adımları aşağıda yer almaktadır.

- Adım 1: Sistemin bara gerilimlerinin başlangıç değerlerini belirle. (genellikle $1 \angle 0^\circ$ pu veya referans bara gerilimine eşit)
- Adım 2: Herbir bara için yükten kaynağa doğru eşdeğer görünür güç değerini hesapla. (Bu adım geri süpürme adımıdır, j. baradaki eşdeğer güç değeri, bu baranın alt dallarındaki yük güçleri ve hat kayıplarının toplamı şeklinde hesaplanır.)
- Adım 3: Kaynaktan sona doğru eşitlik (2.11) kullanılarak, bara gerilimlerini ve eşdeğer bara güçlerini hesapla. (Bu adım ileri süpürme adımıdır.)
- Adım 4: Yeni gerilim değerleri ile kayıpları yeniden hesapla. Eğer toplam kayıp değeri, bir önceki iterasyonda hesaplanan toplam hat kaybına göre değişimi belli bir tolerans değerinin üzerinde ise Adım 2' ye geri dön, aksi halde programı sonlandır.

[78]' deki çalışmada, radyal sistemlerde optimum kapasitör büyüklüğünün belirlenmesinde yeni bir güç akışı algoritması önerilmiştir. Bu algorithmada, herbir hat için hattın akan aktif ve reaktif güç ile hatsonu geriliminden oluşan üç doğrusal olmayan denklem yazılmıştır. Bu denklem sisteminde, bazı indirgemeler yapılarak bu indirgenmiş denklem sisteminin çözümüne dayalı güç akışı yapılmıştır.

Benzer şekilde hattın akan güçleri esas alan bir diğer metot ise [81]' de verilmiştir. Bu metotta farklı olarak ileri süpürme adımında, bara gerilimleri eşitlik (2.12)' deki Kirchhoff gerilimleri KGY kullanılarak elde edilir.

$$\begin{bmatrix} Va_j \\ Vb_j \\ Vc_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Va_i \\ Vb_i \\ Vc_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{ij}^{aa} & Z_{ij}^{ab} & Z_{ij}^{ac} \\ Z_{ij}^{ba} & Z_{ij}^{bb} & Z_{ij}^{bc} \\ Z_{ij}^{ca} & Z_{ij}^{cb} & Z_{ij}^{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (Sa_i/Va_i)^* \\ (Sb_i/Vb_i)^* \\ (Sc_i/Vc_i)^* \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

2.5. Yük Akışında KGAGRT Modelleri

Daha önceki bölümlerde belirtildiği üzere, Rüzgâr Türbin Generatör Sistemlerinin (RTGS' nin) kullanımı günümüz dağıtım sistemleri üzerinde birden fazla besleme noktası ortaya çıkarmakta, bu durum ise radyal yapıda tasarlanan ve işletilen geleneksel dağıtım sistemlerinde olağanın aksine yükten kaynağa ters güç akışına yol açabilmektedir ve kısa devre arıza durumlarında RTGS arıza akımına katkıda bulunabilmektedir. Bu ve benzeri durumlar teknik zorluklar ve işletme sorunlarına sebep olmaktadır.

Teknik zorluklar ve işletme sorunlarının tespiti ve çözümleri için gerekli önlemlerin alınması amacıyla, RTGS içeren dağıtım sistemlerinin yük akışı analizlerinin hızlı ve doğru sonuç verecek şekilde gerçekleştirilmesi kritik derecede öneme sahiptir. Bunun için asenkron generatörlü rüzgâr türbinlerinin dengeli ve dengesiz dağıtım sistemlerinde yük akışı analizlerine dâhil edilmesine imkân veren literatürde geliştirilmiş çeşitli modeller bulunmaktadır.

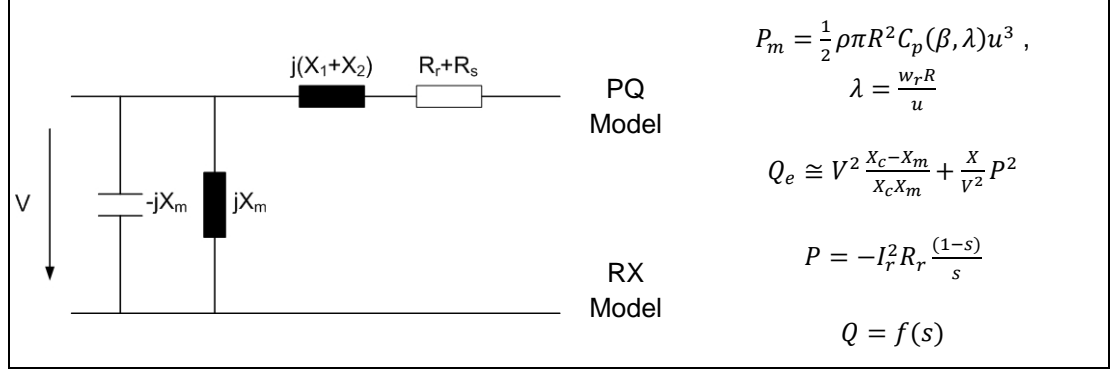
Şebekeye doğrudan bağlanabilen sabit hızlı RTGS' lerin yük akışı analizleri için önerilmiş asenkron generatör modelleri, dengeli ve dengesiz sistem şartları için iki kategori altında aşağıda incelenmiştir.

2.5.1. Dengeli Yük Akışı Analizleri için KGAGRT Modelleri

Feijoo and Cidras [101] rüzgâr güç üretim sistemini yük akışına entegre etmek üzere iki farklı model önermiştir. Bu iki model asenkron generatörlü rüzgâr güç üretim sisteminde asenkron makinenin sürekli hal modeli temel alınarak geliştirilmiştir. PQ model olarak isimlendirilen ilk modelde; reaktif güç, rüzgâr güç üretim sisteminin mekanik güç girişinin bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Mekanik güç (P_m) ise rüzgâr hızının bir fonksiyonudur.

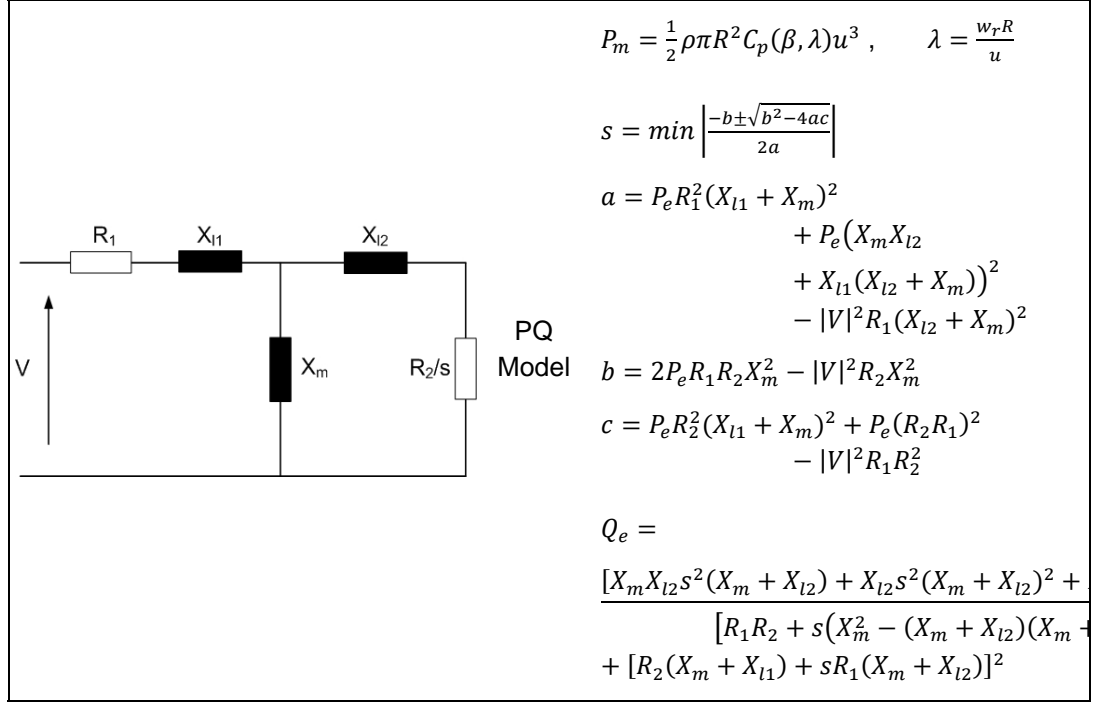
Diğer model ise RX model olarak isimlendirilmiştir. Bu modelde, aktif ve reaktif güç, asenkron makinenin eşdeğer devre parametreleri kullanılarak hesap edilmiştir. İki modele ait ifadeler Şekil 2.5' ten görülmektedir. Bu ifadelerde; ρ havanın yoğunluğunu, R rotor yarıçapını, C_p güç katsayısı, pitch açısı (β) ve uç hız oranının (λ) bir fonksiyonu olarak güç katsayısını, u rüzgâr hızını, w_r ise rotorun açısal hızını temsil

etmektedir. Ayrıca, I_r ve R_r sırasıyla rotor akımı ve direncini, s ise motorun kaymasını temsil etmektedir.



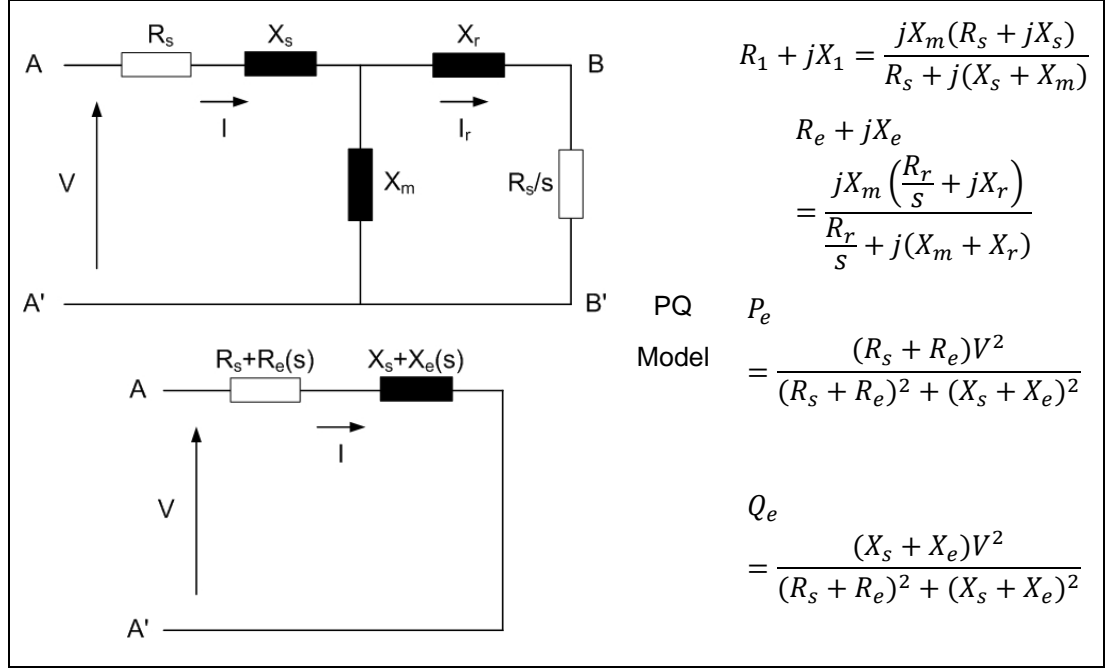
Şekil 2.5: Feijoo and Cidras' ın geliştirdiği modeller.

Divya and Rao' nun önerdikleri modelde [102], aktif güç ifadesi; RTGS' nin her bir rüzgâr hızı için üretebileceği aktif gücü veren güç eğrisine (Power Curve) dayalıdır. Bu eğri analitik veya ölçüm temelli olarak elde edilebilir. Ayrıca, üreticiler her rüzgâr türbini için bu testleri yaparak; rüzgâr türbininin üretime geçebileceği minimum rüzgâr hız değerini, anma rüzgâr hız değerini, rüzgâr türbinini tehlikeye sokacak sınır rüzgâr hız değerlerini ve bu hız değerlerine karşılık rüzgâr türbininden elde edilecek güç değerlerini, güç eğrisi şeklinde verirler. Diğer taraftan, reaktif güç değerinin hesaplanabilmesi için asenkron makinenin sürekli hal modeli temelli kaymaya bağlı ikinci dereceden bir denklem sistemi oluşturulmuştur. Modelde, geliştirilen algoritmayla, denklemin kökleri nümerik olarak çözümlendiğinde iki farklı kayma değeri bulunur. Uygun olan kayma değeri yerine konularak, reaktif güç değeri hesaplanır. Modele ilişkin eşitlikler Şekil 2.6' da görülmektedir.



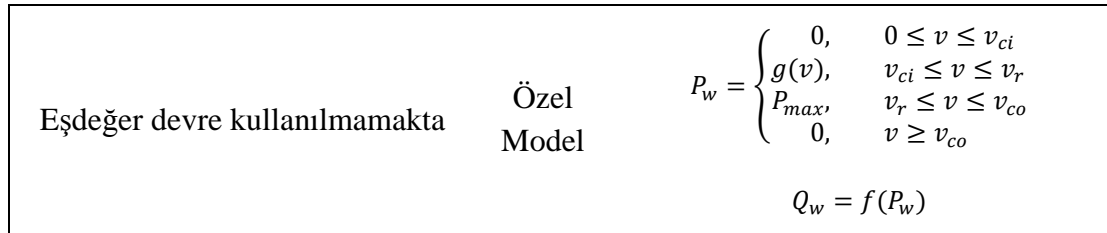
Şekil 2.6: Divya and Rao' nun geliştirdikleri model.

Cutsem ve Vournas [103] tarafından, Şekil 2.7' de verilen asenkron makinenin eşdeğer devresinde stator tarafı uçlarından (A-A') ve rotor tarafı uçlarından (B-B') görünen Thevenin eşdeğer devreleri model olarak önerilmiştir. Daha sonra, bu Thevenin Eşdeğer devreler dikkate alınarak, makinenin aktif ve reaktif güçlerine ilişkin ifadeler elde edilmiştir. Stator tarafı uçlarından görünen Thevenin Eşdeğer devreye göre, kaymanın bilindiği kabulüyle elde edilen modele ait aktif ve reaktif güç ifadeleri Şekil 2.7' de verilmiştir.



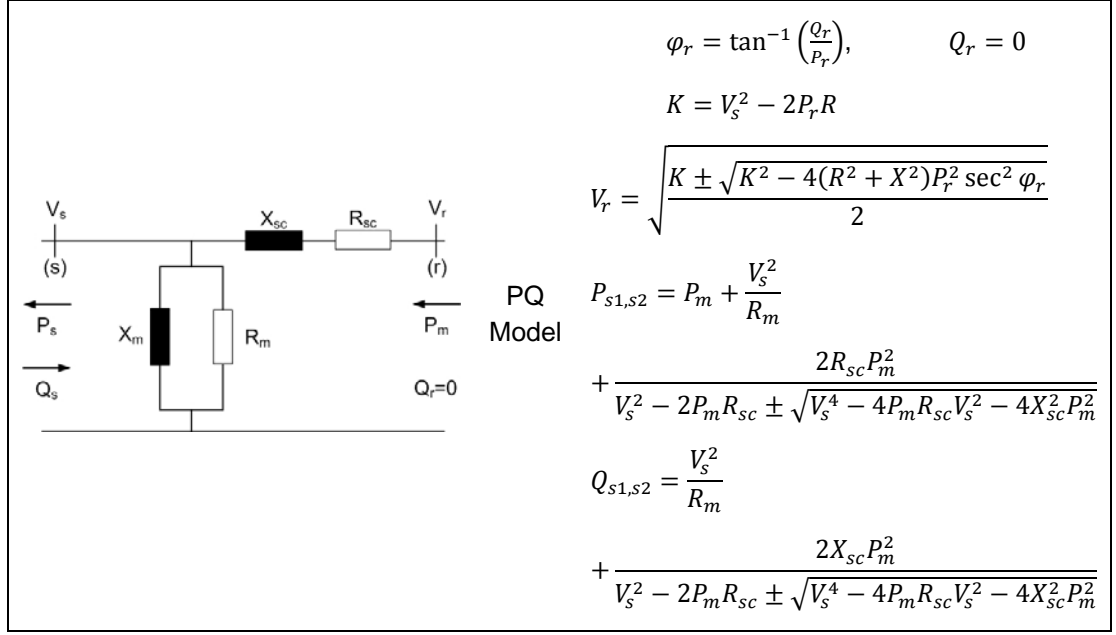
Şekil 2.7: Cutsem ve Vournas' ın geliştirdikleri model.

Hatziargyriou ve arkadaşları [104] rüzgâr güç üretim sistemleri için olasılık tabanlı bir modeli yük akışında kullanılmak üzere geliştirmişlerdir. Modelde, asenkron generatör şebekeden reaktif güç absorbe eden özel bir yük olarak düşünülmüştür. Böylece reaktif güç pozitif işaretli ve aktif güç ise negatif işaretli olarak ifade edilmiştir:



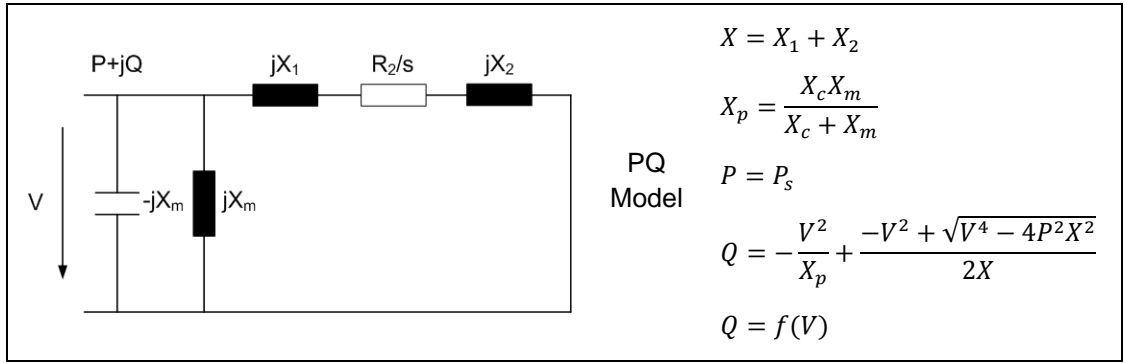
Şekil 2.8: Hatziargyriou ve arkadaşlarının geliştirdiği model.

Eminoğlu [105], [106] dağıtılmış üretimde yoğun bir şekilde kullanımı olan rüzgâr güç üretim sistemleri için model geliştirmiştir. Bu model dağıtım sistemlerinin yük akışı analizinde düğüm gerilimlerinin hesabında kullanılan bir quadratik eşitlik yeniden düzenlenerek geliştirilmiştir. Elde edilen eşitlikler ve kullanılan eşdeğer devre Şekil 2.9' da verilmiştir.



Şekil 2.9: Eminoğlu' nun geliştirdiği model.

Chen ve arkadaşları [107] dağıtılmış üretim sistemleri içeren dağıtım sistemlerinde yük akış ve gerilim kararlılık analizleri için yeni bir metot önermişlerdir. Asenkron generatörler, uyartım gerilimi sabit senkron generatörler ve yakıt hücreleri içeren dağıtılmış üretim sistemlerinin, ayrı ayrı modellenerek yük akışı hesaplarında kullanılması önerilmiştir. Bu modellerden biri olan asenkron generatör modeli eşdeğer devre parametreleri yardımıyla yük akışı analizinde kullanılmak üzere modellenmiştir. Elde edilen eşitlikler ve yük akışı analizinde kullanılacak parametreler Şekil 2.10' da görülmektedir.



Şekil 2.10: Chen ve Arkadaşlarının geliştirdiği model.

Coath and Al-Dabbagh [108]' de sincap kafesli asenkron generatör (SKAG), çift devirli asenkron generatör ve doğrudan sürürlü senkron generatör gibi rüzgâr türbin generatör modellerinin yük akışının ve gerilim kararlılık limitlerinin sürekli hale etkileri incelenmiştir. SKAG iyileştirilmiş PQ bara olarak (improved PQ bus) modellenmiştir. Bu modele göre, yük akışı analizi boyunca düğüm gerilimine bağlı olarak reaktif güç değeri her iterasyonda tekrar tekrar hesaplanmıştır. Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) iki farklı tipte modellenmiştir. PQ bara olarak güç faktörü kontrollü modda ve PV bara olarak ta reaktif gücü belirli sınırlar içinde tutulan gerilim kontrollü modda modellenmişlerdir. Son olarak, doğrudan sürürlü senkron generatör ise reaktif gücü sınırlandırılmaksızın PV bara olarak modellenmiştir. Eğer reaktif gücü belirli bir değerde sınırlı ise bu durumda PQ bara olarak modellenmiştir.

Yukarıda bahsedilen rüzgâr güç üretim sistemi modelleri, dağıtım sistemleri için geliştirilmiş olan yük akış algoritmalarına kolaylıkla dâhil edilebilmektedir. Sabit hızlı RTGS' leri herhangi bir kontrol mekanizmasına sahip olmadığı için sabit güç PQ bara olarak modellenmektedirler. Sweep temelli algoritmalarda PQ bara olarak modellenmesi durumunda, bu birimlerin bağlı olduğu bara gerilimleri kontrol edilememekte ve normal yük baraların da olduğu gibi güç değerlerine göre akımı hesaplanarak her bir iterasyonda gerilim ve akım değerleri hesaplanmaktadır.

Yukarıda detaylı anlatılan ve Şekil 2.5 - Şekil 2.10 aralığında verilen modellerin tamamı sistem dengeli olduğu durum dikkate alınarak çıkartılmışlardır. Dengesiz sistem şartları için önerilen asenkron generatör modelleri bir sonraki başlık altında incelenmiştir.

2.5.2. Dengesiz Yük Akışı için Literatürde Olan Asenkron Generatör Modelleri

Bu kısımda literatürde dengesiz yük akışı için kullanılan asenkron generatör modelleri incelenecektir. Dengesizlik, sistemde büyük tek veya çift fazlı yüklerin fazlar arasında yanlış dağıtılması ve hatların simetrik olmayan hat empedansları gibi sebeplerle fazlar arasında gerilim farklarının oluşması durumudur. Bu durum, dağıtım sistemlerinde, sistem kayıplarında artışa, kullanılan cihazların hizmet ömürlerinde azalmaya ve koruma cihazlarının hatalı manevralarına sebep olmaktadır. Böylece, güç sistemlerinin verimli, ekonomik, güvenilir ve sürekli işletimi sekteye uğramaktadır.

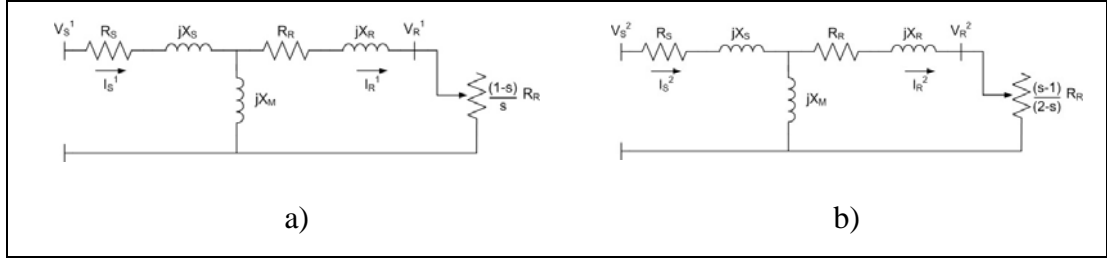
2.5.2.1. Kayma Temelli Model [6]

Detaylı literatür taraması neticesinde asenkron generatörün dengesiz şebeke gerilimleri altında sürekli hal modellenmesine ilişkin [6]' da sunulan çalışmaya ulaşılmıştır. Bu çalışmada asenkron makinaya ait pozitif ve negatif sıra eşdeğer devreleri yardımıyla gerilim, akım ve güçler hesaplanmıştır. Diğer taraftan, bu modelleme biçimi dengesiz dağıtım sistemlerinde yük akışı analizlerine ilk defa [6], [109] çalışmalarında uygulanmıştır. Uygulama sırasında rüzgâr türbininden asenkron generatör miline aktarılan güç literatürde iyi bilinen bir eşitlik olan (2.13)' teki ifadeden hesaplanmıştır.

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_P(\lambda, \beta) , \quad \lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (2.13)$$

Diğer taraftan asenkron generatorün ürettiği aktif güç Şekil 2.11' de verilen pozitif ve negatif sıra eşdeğer devrelerine göre eşitlik (2.14)' teki ifadeden hesap edilmiştir.

$$P_R = P_R^1 + P_R^2 = 3(I_R^1)^2 \left(\frac{1-s}{s} \right) + 3(I_R^2)^2 \left(\frac{s-1}{2-s} \right) \quad (2.14)$$



Şekil 2.11: Akher' in çalışmasında modelleme için dikkate alınan a) pozitif ve b) negatif sıra eşdeğer devreleri.

Böylece rüzgâr türbininden mile aktarılan güç ve makine tarafından üretilen aktif güçlerin eşit olduğu, diğer bir deyişle sürtünme ve ventilasyon kayıplarının ihmal edilebilir değerde olduğu kabulüyle; (2.15)' te verilen eşitsizliği sağlayan kayma değeri Newton-Raphson yöntemi ile iteratif olarak bulunmuştur.

$$P_{shaft} = P_T - P_R \leq \varepsilon \quad (2.15)$$

Newton-raphson yöntemi uygulanırken kayma eşitlik (2.16)' da verilen ifadeye göre güncellenmiştir:

$$s^{new} = s^{old} - \frac{\Delta P_{shaft}}{[d(\Delta P_{shaft})/ds]}, \quad \frac{dP_{shaft}}{ds} = -\frac{dP_R^1}{ds} - \frac{dP_R^2}{ds} \quad (2.16)$$

Çözüm sırasında kaymanın başlangıç değeri negatif sıra gerilimi ihmal edilerek eşitlik (2.17)' den tahmin edilmiştir:

$$s_0 = \frac{\left(\frac{P_T}{|V_R^1|}\right)^2 R_R}{\left(\frac{P_T}{|V_R^1|}\right)^2 R_R + P_T} \quad (2.17)$$

2.5.2.2. Sabit P, Q Modeli [5]

Geleneksel yük akışı algoritmalarında PQ tipi dağıtılmış generatör baralarının aktif ve reaktif güç bileşenleri simetrik ve negatif işaretlidir. Fakat simetrik olmayan bir dağıtım sistemine bağlanmış bir dağıtılmış generatör, asimetrik üç faz gerilimleri

sebebiyle simetrik faz güçleri sağlayamaz. Bu durumda generatörün çalışma karakteristiği sebebiyle negatif ve sıfır sıra aktif güç bileşenleri oluşur. Bu geleneksel yaklaşımın, dengesiz dağıtım sisteminde kullanılması hatalı sonuçlara yol açar.

Diğer taraftan, [5] çalışmasında, hesap kolaylığı sağlamak amacıyla, makinanın dengesizlikten etkilenmediği kabul edilerek, dengesiz dağıtım sistemlerinin yük akışı analizinde, dağıtılmış generatörler, sabit pozitif sıra aktif güç enjekte eden ve sabit pozitif sıra reaktif güç çeken PQ barası olarak modellenmiştir.

$$\begin{cases} P_{SDG} = -P_{DG} \\ Q_{SDG} = Q_{DG} \end{cases} \quad (2.18)$$

P_{SDG} ve Q_{SDG} PQ tip dağıtılmış generatör barasına ait aktif ve reaktif güçlerdir.

2.5.2.3. Sabit P, Q(V+) Modeli [5]

Sabit P, Q(V+) tip dağıtılmış generatör barasına ait yaklaşım Sabit P, Q tip dağıtılmış generatör barası yaklaşımına benzerlik gösterir. İki yaklaşım arasındaki temel fark; Sabit P, Q(V+) tip dağıtılmış generatör barası yaklaşımında yük akışı çözümü yapılırken -güncellenen bara gerilimleri sebebiyle- pozitif sıra reaktif gücü değerinin, dağıtılmış generatörün bağlı olduğu baranın pozitif sıra gerilim değeriyle sürekli olarak yeniden hesaplanması gerekliliğidir [5].

$$\begin{cases} P_{SDG} = -P_{DG} \\ Q_{SDG} = -Q_{DG} = -f(V_{1DG}) \end{cases} \quad (2.19)$$

Q_{DG} aşağıda verilen yöntemle hesaplanabilir.

$$Q_{DG} = f(V_{1DG}) = -\frac{V_{1DG}^2}{x_p} + \frac{-V_{1DG}^2 + \sqrt{V_{1DG}^4 - 4P_{DG}^2 x^2}}{2x} \quad (2.20)$$

Eşitlik (2.20)' de yer alan P_{DG} ve V_{1DG} dağıtılmış generatöre ait çıkış aktif gücü ve terminal geriliminin pozitif sıra genliği; x , asenkron generatörün stator ve rotor reaktans değerleri toplamıdır. x_p , ise asenkron generatör uyartım reaktansı ve ona paralel bağlı terminal kapasitesinin eşdeğerini ifade etmektedir.

2.6. Sonuç ve Değerlendirme

Tez çalışmasının bu bölümünde ilk olarak; dağıtılmış üretim için literatürde yapılmış tanımlamalar ve yaygın olarak kullanılan dağıtılmış üretim teknolojilerinden biri olan rüzgâr türbinleri topolojileri ve rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatör tipleri incelenmiştir.

Daha sonra, yük akışı algoritmaları üzerine literatür taraması sunulmuştur. Bu literatür taraması neticesinde, dengeli durum için geliştirilen iletim sistemlerine yönelik algoritmaların çözüm yaklaşımlarının dağıtım sistemlerinin yapısının iletim sistemlerinden farklı olması sebebiyle (tek ve çift fazlı yükler, dengesizlik durumu vb.) yetersiz kalması, dağıtım sistemlerine özel yeni algoritmaların geliştirilmesi ihtiyacını doğurduğu sonucuna varılmıştır. Dağıtım sistemlerine yönelik yük akışı algoritmaları detaylı olarak incelenmiş ve bu algoritmalar çözüm tekniklerine göre sınıflandırılmıştır. Süpürme temelli algoritmaların, radyal dağıtım sistemlerine yönelik diğer algoritmalarından daha etkili çözüm imkânı sunduğu tespit edilmiştir.

Son olarak; sabit hızlı asenkron generatörlü şebekeye doğrudan bağlanabilen rüzgâr türbinlerinin, dağıtım sistemlerinde dengeli ve dengesizlik durumunda yük akışı analizlerine dahil edebilmesi için literatürdeki modeller incelenmiştir. Literatür taraması sırasında dengeli durum için çıkartılmış asenkron generatör modellerinin genel olarak mekanik giriş gücünün bir fonksiyonu olarak makinenin sürekli hal modelini dikkate alan makine eşdeğer devre parametrelerini, klasik kayma formülizasyonunu kullanan, olasılık tabanlı hesaplama yapan, düğüm gerilimlerinin hesabında kullanılan bir quadratik eşitlikten faydalanan çeşitli türleri olduğu görülmüştür. Ancak makine eşdeğer devre parametreleri ve makinenin rotor kayma değeri kolayca ulaşılabilecek büyüklükler değildir. Ayrıca dağıtım sistemlerinde tek ve çift fazlı dağıtılmış yükler, simetrik olmayan hat empedansları vb. sebeplerle dengesizlik durumunun her zaman olduğu da bilinmektedir.

Dengesizlik durumu için çıkartılmış modellerin ise sıra eşdeğer devrelerinin kullanıldığı, makinenin kayma değerinin doğrusal olmayan karmaşık ifadelerin iteratif çözümüyle bulunduğu bir model ve basit yaklaşımla sistemin dengesizlik durumu ihmal edilerek sabit P,Q ve bu modelin kısmen iyileştirilmiş hali olan pozitif sıra eşdeğer devre gerilimini kullanarak generatörün reaktif güç değerini hesaplayan sabit P, Q(V+) modeli türünde modellerinin olduğu görülmüştür.

Yukarıda belirtilen literatür taraması sonucunda, şebekeye doğrudan bağlanabilen asenkron generatörlü rüzgâr türbinleri için dengesiz dağıtım sistemlerinde yük akışı analizlerinde kullanılmak üzere hesap verimli ve hassas bir model geliştirme gerekliliği görülmüştür. Hedeflenen modelin, ele alınan tipte rüzgâr türbini üretim birimlerini içeren dengesiz dağıtım sistemlerinin en iyi şekilde planlanması ve işletilmesi için gerekli olan yük akışı analizlerinin hızlı ve güvenilir şekilde gerçekleştirilmesinde kritik öneme haiz olduğu ön görülmüştür.

3. ÖNERİLEN ASENKRON GENERATÖR MODELİ

Bu modelleme çalışmalarında, dengesizliğin makine üzerindeki etkileri tamamen veya kısmen ihmal edilerek, şebekeye doğrudan bağlı asenkron generatörler; sabit P-Q olarak veya sabit P ve gerilimin pozitif sıra bileşeni (V+) ile makine rezistans- reaktans parametlerine bağlı Q olarak ifade edilmiştir. Bu yaklaşımların dengesiz yük akışında hatalı sonuçlara yol açtığı [5] -[6]' da belirtilmiştir. Ayrıca, [6], [109] çalışmalarında şebekeye doğrudan bağlı asenkron generatörler için pozitif - negatif sıra eşdeğer devrelerin çözümü temelli bir model sunulmuş ve bu ifadelerdeki kayma parametresi iteratif olarak bulunmuştur. Aynı modele ait ifadelerin, pozitif ve negatif sıra gerilimlerinin-akımlarının fazör değerlerini içerdiği, iteratif döngüler dikkate alındığında, bu durumunda yüksek hesap karmaşasına (computational complexity) sebep olduğu açıkça söylenebilir.

Bu tez çalışması kapsamında, dengesizliğin, şebekeye doğrudan bağlı sabit hızlı asenkron generatörlü rüzgar türbinleri üzerine etkilerinin ihmal edilmediği bununla birlikte düşük hesap karmaşasına sahip olan bir modelin dengesiz yük akışı analizlerinde kullanılmak üzere geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu yeni model geliştirilirken, asenkron generatörlü rüzgar türbinleri iki ana kısımda değerlendirilmiştir. Bu kısımlar, rüzgâr türbini ve şebekeye doğrudan bağlı asenkron generatördür. Dolayısıyla, önerilen model, rüzgâr gücü ve elektriksel güçle alakalı iki kısımda ele alınmıştır.

Daha sonra önerilen model için benzetim ve ölçüm temelli hassasiyet analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan benzetim ve ölçüm temelli analizler ile önerilen modelin performansı dengesiz yük akışı analizlerinde sıklıkla tercih edilen Sabit P-Q, Sabit P, Q(V+) ve Kaymanın İteratif Olarak Hesaplandığı Modeller ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

3.1. Rüzgâr Gücü Modeli

Rüzgâr türbinlerinde rüzgârdan elde edilecek güç değeri ile rüzgâr hızı arasında kübik bir ilişki vardır. Rüzgâr türbininden elde edilen güç değeri eşitlik (3.1)' de görülmektedir.

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p u^3 \quad (3.1)$$

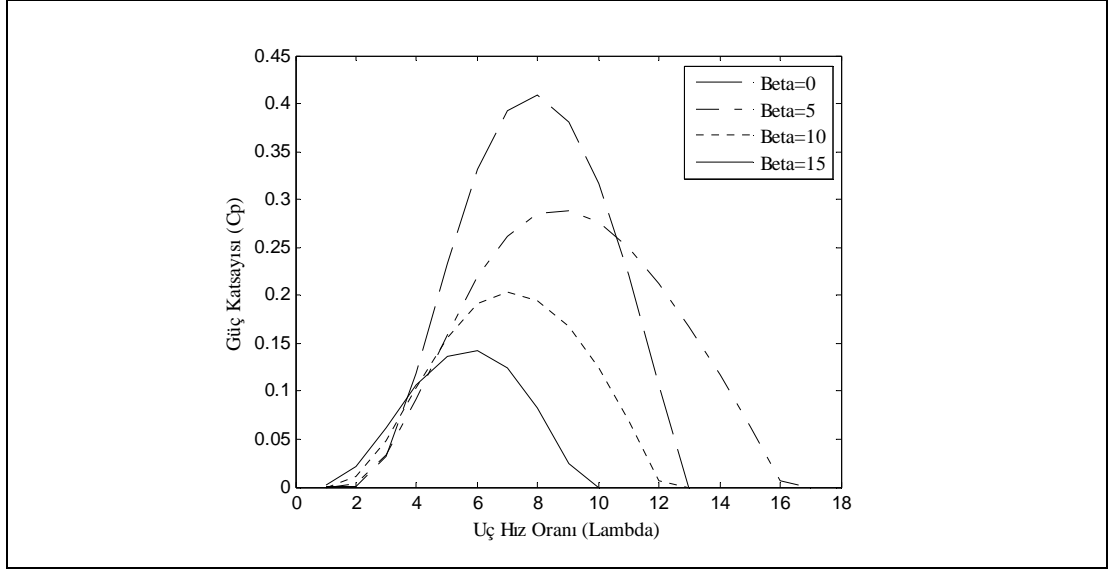
Burada; ρ , havanın yoğunluğunu (kg/m^3), C_p , güç katsayısını, u , rüzgâr hızını (m/s), R , rotor yarıçapını (m) göstermektedir. Güç katsayısı (C_p) rüzgâr türbini dönüşüm sistemlerinde uç hız oranı ve kanat eğiminin (pitch açısının) bir fonksiyonudur. Rüzgâr güç dönüşüm sistemlerinde güç katsayısı eşitlik (3.2) -(3.4)' te verilen şekilde ifade edilir.

$$C_p(\beta, \lambda_i) = 0.4654 \left[\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right] e^{-\frac{20.24}{\lambda_i}} \quad (3.2)$$

$$\lambda_i = \left[\frac{1}{(\lambda + 0.08\beta)} - \frac{0.4}{(\beta^3 + 1)} \right]^{-1} \quad (3.3)$$

$$\lambda = \frac{w_r R}{u} \quad (3.4)$$

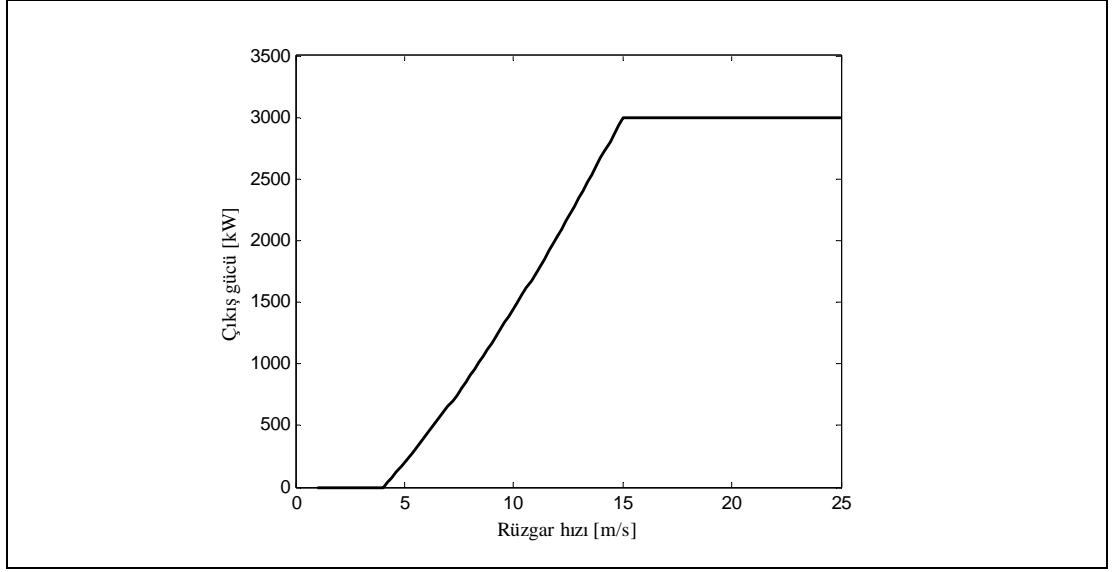
Burada: β , rotor kanatlarının eğimini (pitch açısını) (derece) ve w_r , açısal hızı (rpm) göstermektedir. Tipik bir rüzgâr türbin sisteminde farklı kanat eğimleri (pitch açıları) için güç katsayısı ve uç hız oranı arasındaki ilişki, Şekil 3.1' de görülmektedir [34], [110], [111].



Şekil 3.1: Farklı pitch açılarında güç katsayısı ve uç hız oranı.

Eşitlik (3.1)' de verilen ifade ile türbine etkiyen rüzgâr gücü hesap edilmektedir. Bu ifadeden, rotor çapının gücü etkileyen önemli parametrelerden biri olduğu görülmektedir. Diğer bir deyişle, rüzgâr türbininin kanat çapı ne kadar büyükse o kadar fazla rüzgârı süpürür ve elde edilecek güç değeri de o oranda büyür. Rüzgâr türbinlerinin performansını etkileyen ana faktörlerden biri de farklı rüzgâr hızlarında, türbinin üretebileceği güç değeridir. Rüzgâr türbinlerinin güç eğrisi genellikle rüzgâr türbin üreticileri tarafından verilir. Makinenin güç eğrisi sistemin aerodinamik ve üretim verimliliğini yansıtır [40]. Şekil 3.2' de herhangi bir rüzgâr türbin imalatçısına ait bir türbin için rüzgâr hızı ile üretilen güç arasındaki ilişki görülmektedir.

Şekil 3.2' de verilen grafik incelendiğinde 4 m/s-15 m/s rüzgâr hızı aralığında rüzgâr türbininin 0-3000 kW çıkış gücü sağlayabildiği, bu çıkış gücünün 15m/s rüzgâr hızından büyük hızlarda 3000 kW ile sınırlandırdığı görülmektedir. Rüzgâr hızının 15 m/s olduğu bir durumu ele aldığımızda rüzgâr türbini 3000 kW çıkış gücü sağlayabilecekken türbinden talep edilen güç daha küçük olabilir. Böyle bir durumda rüzgâr türbininin çıkış gücü Şekil 3.1' de verilen güç katsayısı ve uç hız oranı eğrileri kullanılarak istenen değere ayarlanabilir. Rüzgâr türbininin çıkış gücünde istenen bu değişiklik rotora bağlı kanatların pitch açılarının değiştirilmesi ve böylece eşitlik (3.1) ifadesinde güç katsayısının değişimi ile mümkündür.



Şekil 3.2: Tipik bir rüzgâr türbin güç eğrisi.

3.2. Önerilen Modelin Elektriksel Kısmı

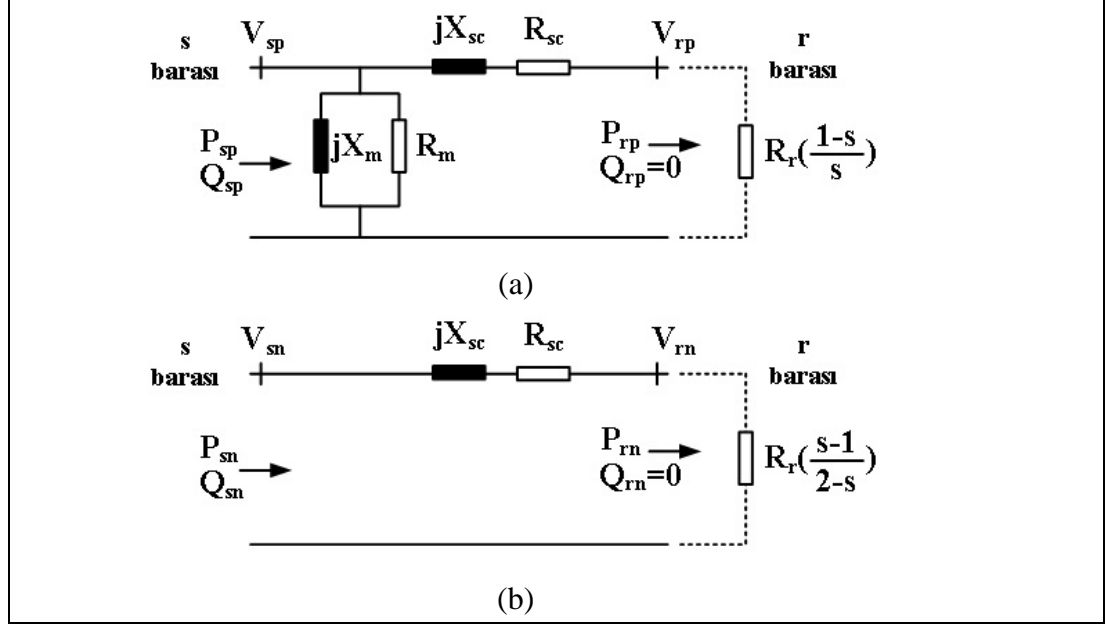
Şekil 3.3' te verilen asenkron motorpozitif ve negatif sıra eşdeğer devreleri yardımıyla şebekeye doğrudan bağlı asenkron generatörlerin dengesiz gerilimler altında şebekeye verecekleri sıra aktif güçleri ve şebekeden çekecekleri sıra reaktif güçleri bulunabilir. Eşdeğer devrede yer alan simgelerin anlamları aşağıda verilmiştir;

- V_{sp} , V_{sn} , V_{rp} ve V_{rn} pozitif-negatif sıra stator (s barası) ve stator tarafından görülen rotor (r barası) gerilimlerine ait fazör değerlerdir.
- R_{sc} ve X_{sc} asenkron generatörün kısa devre eşdeğer rezistans ve reaktansı,
- R_m ve X_m ise asenkron generatörün çekirdek rezistans ve manyetizasyon reaktansıdır.

Bununla birlikte negatif sıra eşdeğer devresinde R_m ve X_m parametrelerinin sonuca ihmal edilebilir etkisinin olmasından dolayı bu sıra eşdeğer devreyi basitleştirmek için her iki parametre ihmal edilmiştir. Eşdeğer devrede, stator tarafından (s barasından) şebekeye verilen pozitif ve negatif sıra aktif güçleri P_{sp} ve P_{sn} ' dir. Rüzgâr türbininin ürettiği generatörün mekanik giriş gücü (P_m) ise; pozitif ve negatif sıra rotor aktif güçlerinin toplamıdır:

$$P_m = 3(P_{rp} + P_{rn}) \quad (3.5)$$

Diğer taraftan, Q_{sp} ve Q_{sn} asenkron generatörün ihtiyaç duyduğu ve stator tarafından (s barasından) çekilen pozitif ve negatif sıra reaktif güçleridir. Rotor (r) barasında üretilen veya tüketilen reaktif güç ise yoktur ($Q_{rp}=Q_{rn}=0$).



Şekil 3.3: Asenkron generatörün (a) pozitif ve (b) negatif sıra eşdeğer devreleri.

Stator tarafına indirgenmiş rotor pozitif sıra gerilimi genlik değeri (V_{rp}) literatürde dağıtım sistemlerinde yük akışı için kullanılan bi-kuadratik denklem [70] göz önünde tutularak eşitlik (3.6)- (3.16)' da verilen ifadelerden bulunur. Eşitlik (3.6)' da Z_{sc} makinanın kısa devre empedansını temsil etmektedir.

$$S_{rp} = V_{rp} \cdot I_{rp}^* = V_{rp} \cdot \left(\frac{V_{sp}^* - V_{rp}^*}{Z_{sc}^*} \right) = \frac{V_{rp} \cdot V_{sp}^*}{Z_{sc}^*} - \frac{|V_{rp}|^2}{Z_{sc}^*} \quad (3.6)$$

$$P_{rp} = \frac{|V_{rp}| \cdot |V_{sp}|}{|Z_{sc}|} \cdot \cos(\theta_{Z_{sc}} - \theta_{V_{sp}} + \theta_{V_{rp}}) - \frac{|V_{rp}|^2}{|Z_{sc}|} \cdot \cos(\theta_{Z_{sc}}) \quad (3.7)$$

$$Q_{rp} = \frac{|V_{rp}| \cdot |V_{sp}|}{|Z_{sc}|} \sin(\theta_{Z_{sc}} - \theta_{V_{sp}} + \theta_{V_{rp}}) - \frac{|V_{rp}|^2}{|Z_{sc}|} \sin(\theta_{Z_{sc}}) \quad (3.8)$$

$\theta_v = \theta_{V_{sp}} - \theta_{V_{rp}}$ kabulüyle eşitlik (3.7) ve (3.8) yeniden düzenlenirse,

$$\cos(\theta_{Z_{sc}} - \theta_v) = \frac{P_{rp} \cdot |Z_{sc}|}{|V_{sp}| \cdot |V_{rp}|} + \frac{|V_{rp}|}{|V_{sp}|} \cdot \cos(\theta_{Z_{sc}}) \quad (3.9)$$

$$\sin(\theta_{Z_{sc}} - \theta_v) = \frac{Q_{rp} \cdot |Z_{sc}|}{|V_{sp}| \cdot |V_{rp}|} + \frac{|V_{rp}|}{|V_{sp}|} \cdot \sin(\theta_{Z_{sc}}) \quad (3.10)$$

Rotor barasında reaktif güç değerinin 0 olduğu bilindiğinden eşitlik (3.10) yeniden yazılırsa,

$$\sin(\theta_{Z_{sc}} - \theta_v) = \frac{|V_{rp}|}{|V_{sp}|} \cdot \sin(\theta_{Z_{sc}}) \quad (3.11)$$

elde edilmiş olur. Pisagor Teoremi'nden $\cos^2(\theta) + \sin^2(\theta) = 1$ olduğu bilinmektedir. Eşitlik (3.9) ve (3.11) ifadelerinin karesi alınırsa,

$$\cos^2(\theta_{Z_{sc}} - \theta_v) = \frac{P_{rp}^2 \cdot |Z_{sc}|^2}{|V_{sp}|^2 \cdot |V_{rp}|^2} + 2 \frac{P_{rp} \cdot |Z_{sc}|}{|V_{sp}|^2} \cos(\theta_{Z_{sc}}) + \frac{|V_{rp}|^2}{|V_{sp}|^2} \cos^2(\theta_{Z_{sc}}) \quad (3.12)$$

$$\sin^2(\theta_{Z_{sc}} - \theta_v) = \frac{|V_{rp}|^2}{|V_{sp}|^2} \sin^2(\theta_{Z_{sc}}) \quad (3.13)$$

eşitlik (3.12) ve (3.13) elde edilir. Bu iki eşitlik taraf tarafa toplanmasıyla,

$$1 = \frac{P_{rp}^2 \cdot |Z_{sc}|^2}{|V_{sp}|^2 \cdot |V_{rp}|^2} + 2 \frac{P_{rp} \cdot |Z_{sc}|}{|V_{sp}|^2} \cos(\theta_{Z_{sc}}) + \frac{|V_{rp}|^2}{|V_{sp}|^2} \quad (3.14)$$

elde edilmiş olur. $|Z_{sc}| \cos(\theta_{Z_{sc}}) = R_{sc}$ olduğu bilindiğinden eşitlik (3.14) yeniden düzenlenirse,

$$|V_{rp}|^4 + (2 \cdot P_{rp} \cdot R_{sc} - |V_{sp}|^2) |V_{rp}|^2 + P_{rp}^2 \cdot |Z_{sc}|^2 = 0 \quad (3.15)$$

eşitlik (3.15)' teki bi-kuadratik denklem elde edilmiş olur. Bu denklemin kökleri $a = 1$, $b = -(|V_{sp}|^2 - 2 \cdot P_{rp} \cdot R_{sc})$ ve $c = P_{rp}^2 \cdot |Z_{sc}|^2$ parametreleri kullanılarak Diskriminant Yöntemi ile bulunmak istenirse eşitlik (3.16)' daki ifadeye ulaşılır.

$$|V_{rp}|^2 = \frac{|V_{sp}|^2 - 2 \cdot P_{rp} \cdot R_{sc} \pm \sqrt{(|V_{sp}|^2 - 2 \cdot P_{rp} \cdot R_{sc})^2 - 4 \cdot P_{rp}^2 \cdot |Z_{sc}|^2}}{2} \quad (3.16)$$

Eşitlik (3.16)' daki ifadeye karekök işlemi uygulandığında,

$$|V_{rp}| = \sqrt{\frac{|V_{sp}|^2 - 2 \cdot P_{rp} \cdot R_{sc} + \sqrt{(|V_{sp}|^2 - 2 \cdot P_{rp} \cdot R_{sc})^2 - 4 \cdot P_{rp}^2 \cdot |Z_{sc}|^2}}{2}} \quad (3.17)$$

pozitif sıra stator tarafından görülen rotor (r barası) gerilim değeri bulunmuş olur.

Böylece pozitif sıra tek faz eşdeğer devresi kullanılarak rotor barası aktif gücü eşitlik (3.18)' deki ifade ile elde edilmiş olur.

$$P_{rp} = \frac{|V_{rp}|^2}{R_r \left(\frac{1-s}{s}\right)} \quad (3.18)$$

Bu ifadeden kayma faktörü değeri (s) çekilecek olursa,

$$s = \frac{P_{rp} R_r}{|V_{rp}|^2 + P_{rp} R_r} \quad (3.19)$$

eşitlik (3.19) elde edilir. Bu ifade kullanılarak pozitif-negatif sıra eşdeğer devresi kayma bağımlı direnç katsayıları eşitlik (3.20) ve (3.21)' deki gibi elde edilmiş olur.

$$\frac{1-s}{s} = \frac{|V_{rp}|^2}{P_{rp} \cdot R_r} \quad (3.20)$$

$$\frac{s-1}{2-s} = \frac{-|V_{rp}|^2}{2 \cdot |V_{rp}|^2 + P_{rp} \cdot R_r} \quad (3.21)$$

Eşitlik (3.21)' deki ifade kullanılarak negatif sıra eşdeğer devre rotor akımı,

$$I_{rn} = \frac{V_{sn}}{Z_{sc} + R_r \left(\frac{-|V_{rp}|^2}{2|V_{rp}|^2 + P_{rp}R_r} \right)} \quad (3.22)$$

eşitlik (3.22)' deki gibi elde edilmiş olur. Bu ifadede negatif sıra eşdeğer devre stator barası gerilimi V_{sn} bilinen bir büyüklüktür. Bu denklem ile pozitif sıra eşdeğer devre büyüklükleri kullanılarak negatif sıra eşdeğer devre bilinmeyen büyüklüklerinin çözümü bağlantılı hale getirilmiş olur. Eşitlik (3.22)' den negatif sıra eşdeğer devre rotor barası aktif gücü,

$$P_{rn} = |I_{rn}|^2 \cdot R_r \cdot \left(\frac{-|V_{rp}|^2}{2 \cdot |V_{rp}|^2 + P_{rp} \cdot R_r} \right) \quad (3.23)$$

eşitlik (3.23)' teki gibi ifade edilir. Bu denklem kullanılarak negatif sıra eşdeğer devre stator barası aktif gücü

$$P_{sn} = P_{rn} + |I_{rn}|^2 \cdot R_{sc} \quad (3.24)$$

eşitlik (3.24)' teki gibi bulunur. $|Z_{sc}| \sin(\theta_{Z_{sc}}) = X_{sc}$ olduğu bilindiğinden eşitlik (3.22)' den negatif sıra eşdeğer devre stator barası reaktif gücü

$$Q_{sn} = |I_{rn}|^2 \cdot X_{sc} \quad (3.25)$$

şeklinde bulunmuş olur. Bu aşamaya kadar bilinmeyen negatif sıra eşdeğer devre stator (s barası) aktif ve reaktif güçleri hesaplanmış oldu. Pozitif sıra eşdeğer devresi için bilinmeyen büyüklükleri olan stator (s barası) aktif ve reaktif güç değerleri bu aşamadan sonra bulunacaktır. Pozitif sıra tek faz eşdeğer devresi kullanılarak stator (s barası) aktif gücü,

$$P_{sp} = P_{rp} + \left(\frac{P_{rp}}{V_{rp}}\right)^2 \cdot R_{sc} + \frac{|V_{sp}|^2}{R_m} \quad (3.26)$$

eşitlik (3.26)' daki gibi elde edilmiş olur. Pozitif sıra eşdeğer devre rotor barası aktif gücü (P_{rp}) generatör iterasyonu sırasında her bir adımında eşitlik (3.23)' te verilen ve generatörün terminalindeki gerilim dengesizliği sebebiyle ortaya çıkan rotor barası negatif sıra aktif gücünün hesaplanması ile eşitlik (3.5)' teki ifade kullanılarak güncellenecektir.

Pozitif sıra eşdeğer devre stator (s barası) reaktif gücü,

$$Q_{sp} = \left(\frac{P_{rp}}{V_{rp}}\right)^2 X_{sc} + \frac{|V_{sp}|^2}{X_m} \quad (3.27)$$

eşitlik (3.27)' den elde edilmiş olur. Bu aşama itibariyle pozitif-negatif sıra eşdeğer devreleri stator (s barası) aktif ve reaktif güçleri hesaplanarak elde edilmiştir.

Pozitif-negatif sıra eşdeğer devreleri stator (s barası) akımları,

$$|I_{sp}| = \frac{\sqrt{P_{sp}^2 + Q_{sp}^2}}{|V_{sp}|} \quad (3.28)$$

$$|I_{sn}| = \frac{\sqrt{P_{sn}^2 + Q_{sn}^2}}{|V_{sn}|} \quad (3.29)$$

eşitlik (3.28) ve (3.29)' daki gibi hesaplanmış olur. Stator (s barası) akımlarının açı değerleri,

$$\theta_{I_{sp}} = \theta_{V_{sp}} - \cos^{-1}\left(\frac{P_{sp}}{\sqrt{P_{sp}^2 + Q_{sp}^2}}\right) \quad (3.30)$$

$$\theta_{I_{sn}} = \theta_{V_{sn}} - \cos^{-1}\left(\frac{P_{sn}}{\sqrt{P_{sn}^2 + Q_{sn}^2}}\right) \quad (3.31)$$

eşitlik (3.30) ve (3.31)' den elde edilir.

Eşitlik (3.24)-(3.27) kullanılarak stator (s barası) toplam aktif ve reaktif güçleri

$$P_{st} = 3(P_{sp} + P_{sn}) \quad (3.32)$$

$$Q_{st} = 3(Q_{sp} + Q_{sn}) \quad (3.33)$$

eşitlik (3.32) ve (3.33)' teki şekilde hesaplanır.

Stator (s) barası gerilimi şebeke gerilimidir ve bu gerilimin sıra bileşenlerine ait genlikler (V_{sp} ve V_{sn}) ve açılar (ϕ_{sp} ve ϕ_{sn}) bilinen değerlerdir. Ayrıca rotor miline etkiyen toplam rüzgâr gücü kayıplar ihmal edilerek ($P_m=P_T=3(P_{rp}+P_{rn})$) bilinen bir diğer büyüklüktür. Ancak pozitif-negatif sıra rotor aktif güçleri (P_{rp} ve P_{rn}) bilinmeyen büyüklüklerdir. Bu sebeple önerilen model ardışıl (iteratif) çözüm algoritmasına ihtiyaç duymaktadır. Bu ihtiyacı karşılamak için geliştirilen ardışıl (iteratif) çözüm algoritması aşağıda detaylandırılmıştır.

- Adım 1: Algoritma başlatılırken mekanik giriş gücünün (P_T) tamamının pozitif sıra eşdeğer devreye aktarıldığı kabulüyle rotor pozitif sıra aktif gücünü (P_{rp}) eşitlik (3.5)' ten hesaplanır,
- Adım 2: Rotor (r) barası pozitif sıra gerilimi (V_{rp}) eşitlik (3.17)' den bulunur,
- Adım 3: Bulunan V_{rp} değerini ve atanan P_{rp} değerini kullanarak; rotor (r) barası negatif sıra akımı ve negatif sıra aktif gücünü (I_m ve P_{rn}) eşitlik (3.22) ve (3.23) ile hesaplanır, Stator (s) barası pozitif – negatif sıra aktif ve reaktif güçleri eşitlik (3.24)-(3.27)' den bulunur,
- Adım 4: Stator (s) barası toplam aktif ve toplam reaktif güç değerleri i . İterasyon için eşitlik (3.32) ve (3.33)' ten bulunur. Son iki iterasyon için hata değerleri eşitlik (3.34) ve (3.35) kullanılarak bulunur ve tolerans değeri (ϵ) ile karşılaştırılır. Hesaplanan değerler tolerans değerinden (ϵ) küçük ise çözüm algoritması sonlandırılır. Aksi durumda P_{rp} değeri, son hesaplanan negatif sıra aktif gücü (P_{rn}) eşitlik (3.5)' te yerine konularak güncellenir ve Adım 2' ye geri dönlür.

$$\epsilon > \left| \frac{P_{st(i+1)} - P_{st(i)}}{P_{st(i)}} \right| \quad (3.34)$$

$$\varepsilon > \left| \frac{Q_{st(i+1)} - Q_{st(i)}}{Q_{st(i)}} \right| \quad (3.35)$$

Stator (s) barası pozitif ve negatif sıra güçleri ile stator tarafı pozitif ve negatif sıra akımlarının genlikleri ardışıl çözüm algoritmasının tamamlanması sonucu bulunur. Bu durumda algoritma sonlandırılmasının akabinde, sıra akımlarından faz akımlarına geçebilmek için stator sıra akımlarının açıları $\theta_{I_{sp}}$ ve $\theta_{I_{sn}}$ eşitlik (3.30) ve (3.31)' den bulunur.

Stator (s) barası gerilimi şebeke gerilimidir ve bu gerilimin genlik ve açı değeri her bir yük akışı analizi ardışıl (iteratif) çözümünde bilinen büyüklüklerdir. Generatör için gerçekleştirilen ardışıl çözümün Eşitlik (3.34) ve (3.35)' te verilen şartları sağlaması ile eşitlik (3.28) ve (3.29)' da verilen ifadelerden stator barası pozitif-negatif sıra akımlarının genlik değerleri elde edilmiş olur. Ayrıca bu büyüklüklerin açı değerleri eşitlik (3.30) ve (3.31)' de verilen ifadelerden elde edilmiştir. Pozitif ve negatif sıra devreleri akımlarının genlik ve açı değeri bilinen bu büyüklüklerin simetrik bileşenler uzayı değerlerinden faz bileşenleri değerlerine dönüşümü yapılarak stator (s) barası faz akım ve açı değerleri elde edilmiş olur. Böylece m=a, b, c fazlarına ait aktif ve reaktif güçler eşitlik (3.36) ve (3.37)' deki ifadelerle hesaplanır:

$$P_m = V_m I_m \cos \theta_m \quad (3.36)$$

$$Q_m = V_m I_m \sin \theta_m \quad (3.37)$$

3.3. Önerilen Model için Benzetim Temelli Hassasiyet Analizi

Bu kısımda önerilen modelin ve dengesiz yük akışı analizlerinde sıklıkla tercih edilen Sabit P-Q, Sabit P, Q(V+) Kaymanın İteratif Olarak Hesaplandığı Modellerin Matlab/Simulink programında yer alan 160 kW gücündeki asenkron generatör modeli ile elde edilen sonuçları referans kabul ederek performans analizlerinden bahsedilecektir. Analizler sırasında iki farklı parametrik analiz senaryosu uygulanmıştır. Analiz yapılan senaryolar ile modellerin gerilim dengesizlik faktörü ve gerilim kollektif etkin değeri parametrelerine karşı hassasiyetleri gözlemlenmek istenmiştir. Matlab/Simulink programında hazırlanan asenkron makine benzetim programına bu çalışmanın türetildiği proje raporundan [112] ulaşılabilir.

3.3.1. 160 kW Gücündeki Asenkron Generatör için Benzetim Temelli Model Hassasiyet Analizleri

Bu bölümde 160 kW'lık bir asenkron generatör için Önerilen Model, Kayma Hesabı Temelli Model [6], Sabit-P, Q(V+) Modeli [5] ve Sabit P-Q Modeli [5] ile çeşitli dengesiz gerilimler altında analizler yapılmıştır.

Bu amaçla Matlab/Simulink programında yer alan 160kW'lık asenkron makina modeli çeşitli dengesiz gerilimler altında generator olarak çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar referans kabul edilmiştir. Simulink ortamındaki model literatürde iyi bilinen d-q zaman domeyni modelidir [113]. Analizlerde dikkate alınan 160 kW'lık asenkron makinaya ait empedans parametreleri Tablo 3.1' de görülmektedir

Tablo 3.1: 160 kW'lık asenkron makinaya ait empedans parametreleri.

R_s	0,013790 Ω
X_s	0,047752 Ω
R_r (stator tarafından görülen)	0,007728 Ω
X_r (stator tarafından görülen)	0,047752 Ω
R_m	-
X_m	2,415884 Ω

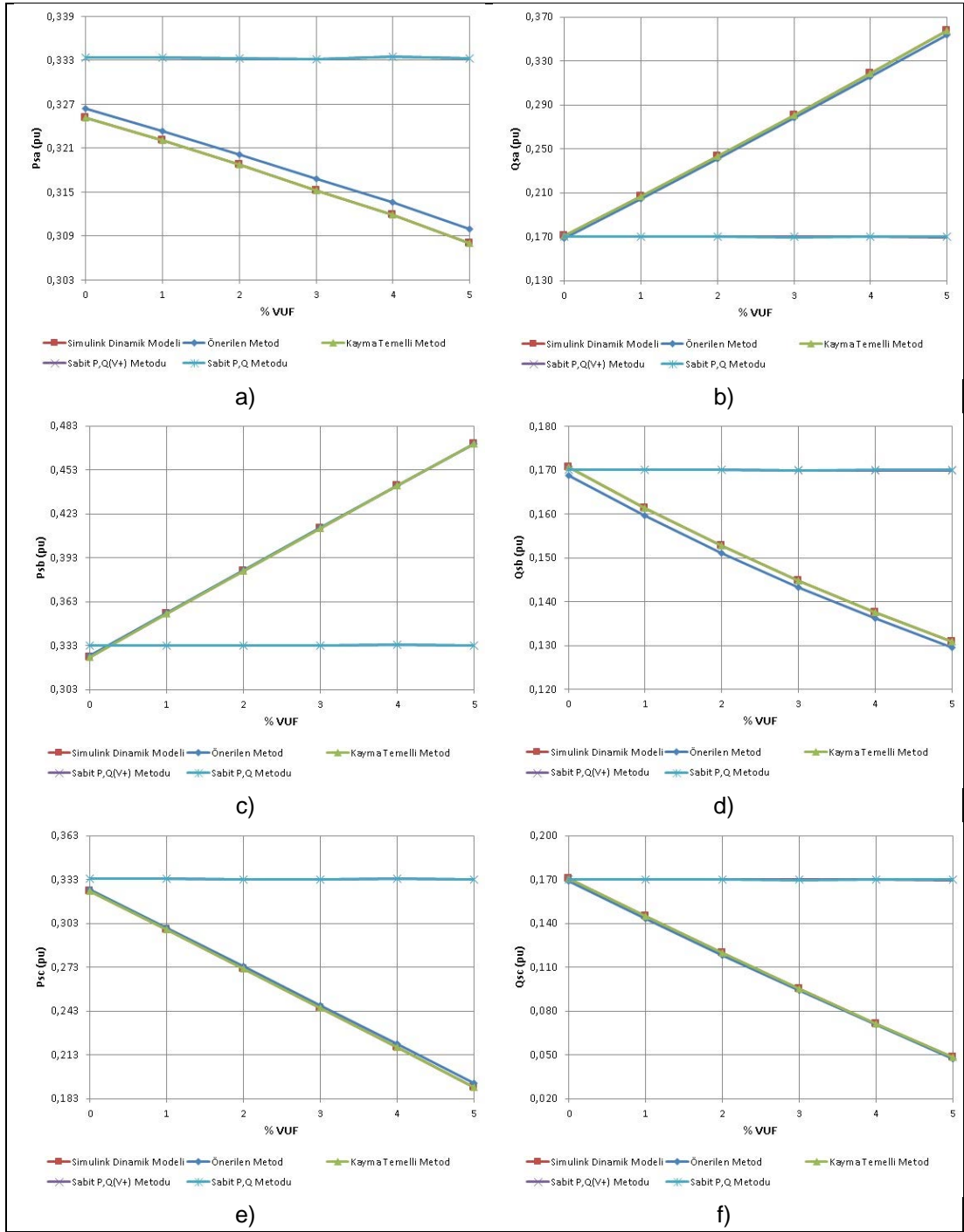
Analizler sırasında iki farklı parametrik analiz senaryosu uygulanmıştır. Analiz edilen senaryolar ile modellerin gerilim dengesizlik faktörü ve gerilim kollektif etkin

değeri parametrelerine karşı hassasiyetlerinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Bu senaryolar için analiz sonuçları aşağıda sırayla verilmiştir.

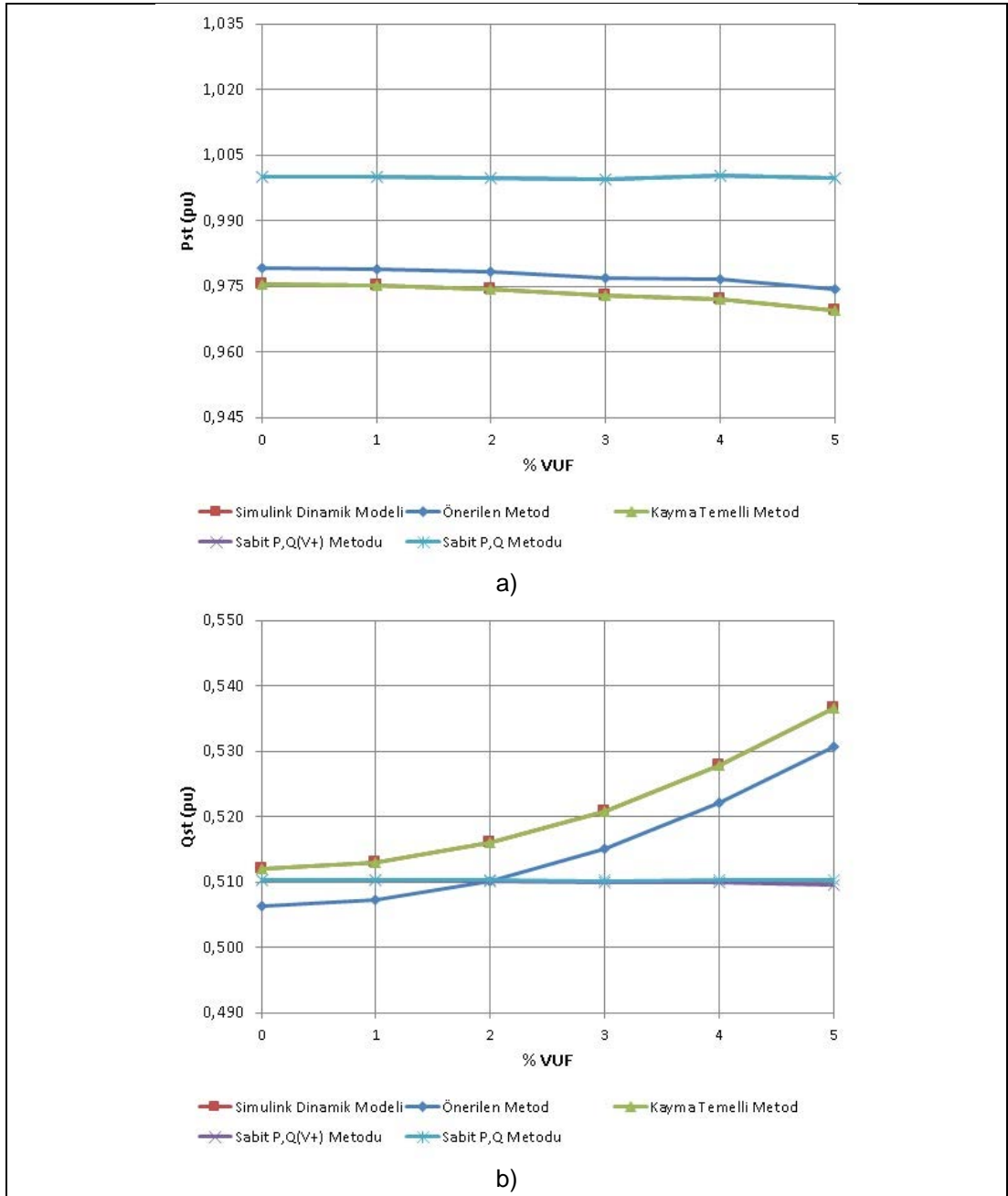
3.3.1.1. Senaryo-1 için Analiz Sonuçları

Literatürde Gerilim Dengesizlik Faktörü (VUF) için kesin bir tanım bulunmamakla birlikte dengesizlik durumunun 3 fazlı asenkron makine üzerindeki etkilerinin incelendiği analizlerde bazı yaklaşımlar yer almaktadır. Bu senaryoda Gerilim Dengesizlik Faktörü ($VUF = V_{sn}/V_{sp}$) [114], [115] değeri %0' dan %5' e arttırılmıştır. $VUF=0 - 5$ aralığında dengesizlik değerine sahip gerilimlerin kolektif etkin değerleri ($V_e = \sqrt{V_{sp}^2 + V_{sn}^2}$) [114], [116] ise makinenin nominal faz gerilimine (230 V) eşit tutulmuştur. Bu senaryo için generatörün rotor gücü ise generatör nominal gücünde sabit tutulmuştur. Böylece aynı V_e seviyedeki farklı VUF değerlerinin modeller ile elde edilen sonuçlara etkisinin analiz edilmesi amaçlanmıştır. [117]' da rüzgar enerjisi elektrik üretim sisteminin bağlı olduğu şebekenin nominal elektriksel durumu tarif edilmiş ve gerilim dengesizliği değerinin %2 nin üzerinde olmaması gerektiği belirtilmiş, buna ek olarak rüzgar enerjisi elektrik üretim sisteminin %15 gerilim dengesizliği altında bile işleyebilecek kabiliyette olması gerektiği ifade edilmiştir. Bu sebeple analiz sırasında VUF parametresinin %0'dan %5'e değiştirilmesinin uygun olacağı öngörülmüştür.

Çalışma kapsamında incelenen modellerin Senaryo 1 için sonuçları Şekil 3.4 ve Şekil 3.5' te verilmiştir. Şekil 3.4' te verilen sonuçlar 160 kW'lık asenkron generatörün (VUF' un %0-5 aralığında) şebekenin her bir fazına dengeli olmayan aktif güçler verdiğini işaret etmektedir. VUF değerinin artması ile a ve c fazlarının şebekeye sağladığı aktif güçlerin azalma eğiliminde olduğu, c fazının ise şebekeye sağladığı aktif gücün artış eğiliminde olduğu görülmektedir. Diğer taraftan generatörün şebekeden çektiği reaktif gücün a fazında artış gösterirken b ve c fazlarında azalma eğiliminde olduğu görülmektedir. Bu durum fazlara ait aktif güçler arasındaki dengesizlik ile fazlara ait reaktif güçler arasındaki dengesizliğin VUF artışından önemli derecede etkilendiğini göstermektedir.



Şekil 3.4: Senaryo-1 için 160 kW'lık asenkron generatörün (a) a fazı aktif gücü, (b) a fazı reaktif gücü, (c) b fazı aktif gücü, (d) b fazı reaktif gücü, (e) c fazı aktif gücü ve (f) c fazı reaktif gücünün Önerilen Model, Kayma Hesabı Temelli Model, Sabit P-Q Model, Sabit P, Q(V+) Model ile d-q Model kullanılarak bulunan pu değerleri.



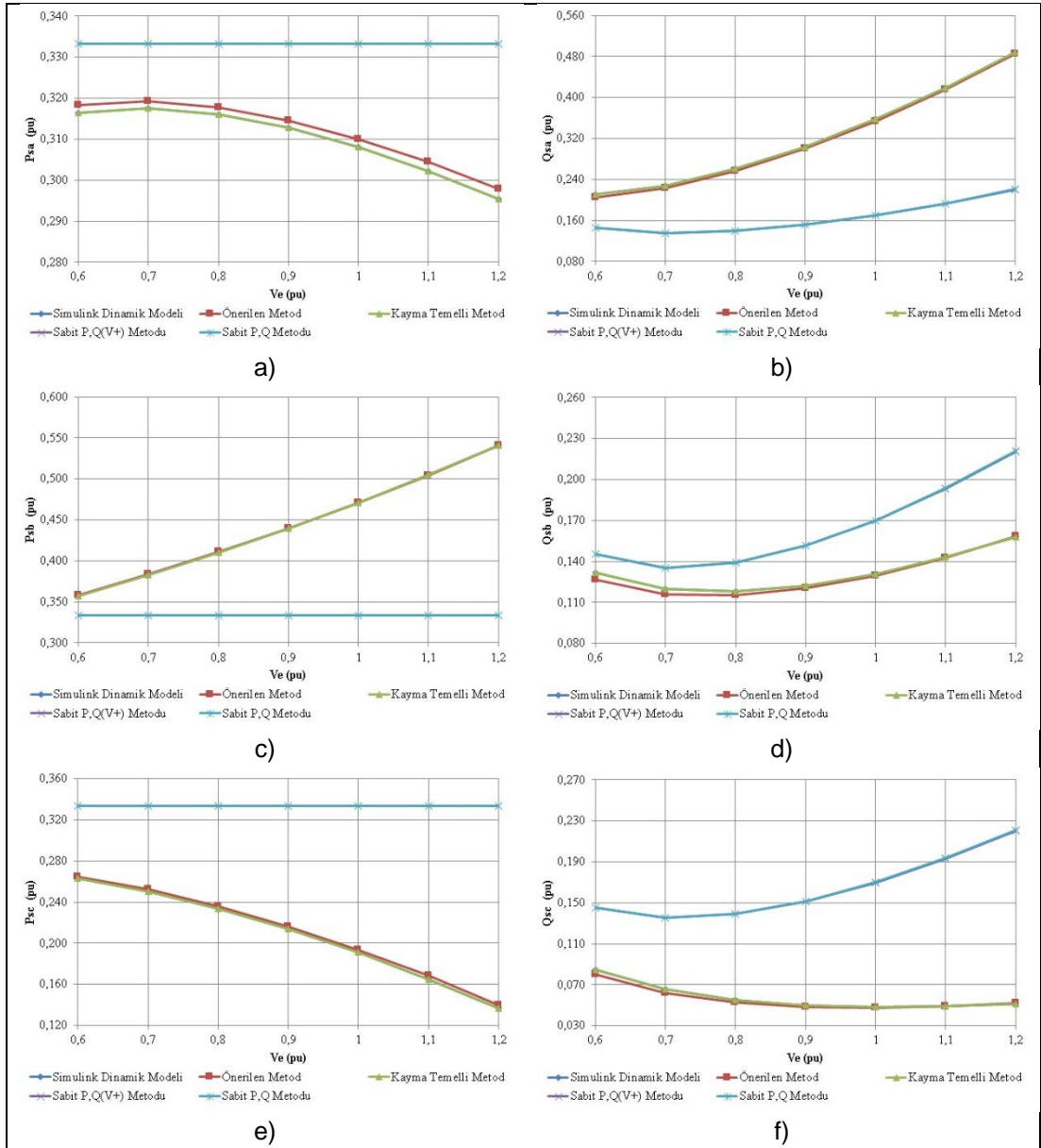
Şekil 3.5: Senaryo-1 için 160 kW'lık asenkron generatörün Önerilen Model, Kayma Hesabı Temelli Model, Sabit P-Q Model, Sabit P,Q(V+) Model ile d-q Model kullanılarak bulunan toplam a) aktif, b) reaktif gücü pu değerleri.

Şekil 3.5' te verilen sonuçlar incelendiğinde, VUF değerinin artması ile Önerilen Model, Kayma Hesabı Temelli Model [6] ve d-q Model [118] ile hesap edilen toplam aktif güç değerlerinde azalma eğilimi olduğu, bu modellerle hesaplanan reaktif güç değerinin ise artma eğilimi olduğu görülmüştür. Genel olarak gerçekleştirilen analiz sonuçları göz önüne alındığında önerilen model, kayma hesabı temelli model ve d-q

modelin birbirine yakın ve benzer karakteristikte sonuçlar verdiği görülmektedir. Basit modeller olan Sabit P-Q ve sabit P, Q(V+) modellerine ait sonuçların ise VUF indisinin artışıyla diğer üç modelin sonuçlarından uzaklaştığı görülmüştür. Bu basit modeller, generatörün toplam aktif güç değerini gerilim dengesizliği durumunu dikkate almadan, üç faza eşit şekilde pay etmektedir. Faz reaktif gücü bakımından ise Sabit P-Q model toplam reaktif güç değerini gerilim dengesizliği durumunu dikkate almadan, üç faza eşit şekilde pay etmekte iken sabit P, Q(V+) modeli ise pozitif sıra gerilimini dikkate alarak toplam faz reaktif gücünü hesaplamakta ve üç faza eşit pay etmektedir. Gerçekleştirilen analiz sonucunda VUF değerinin aşırı şartlarında önerilen modelin Kayma Hesabı Temelli Model ve d-q Model ile elde edilen sonuçlarla yakın ve benzer karakterde olduğu görülmüştür.

3.3.1.2. Senaryo-2 için Analiz Sonuçları

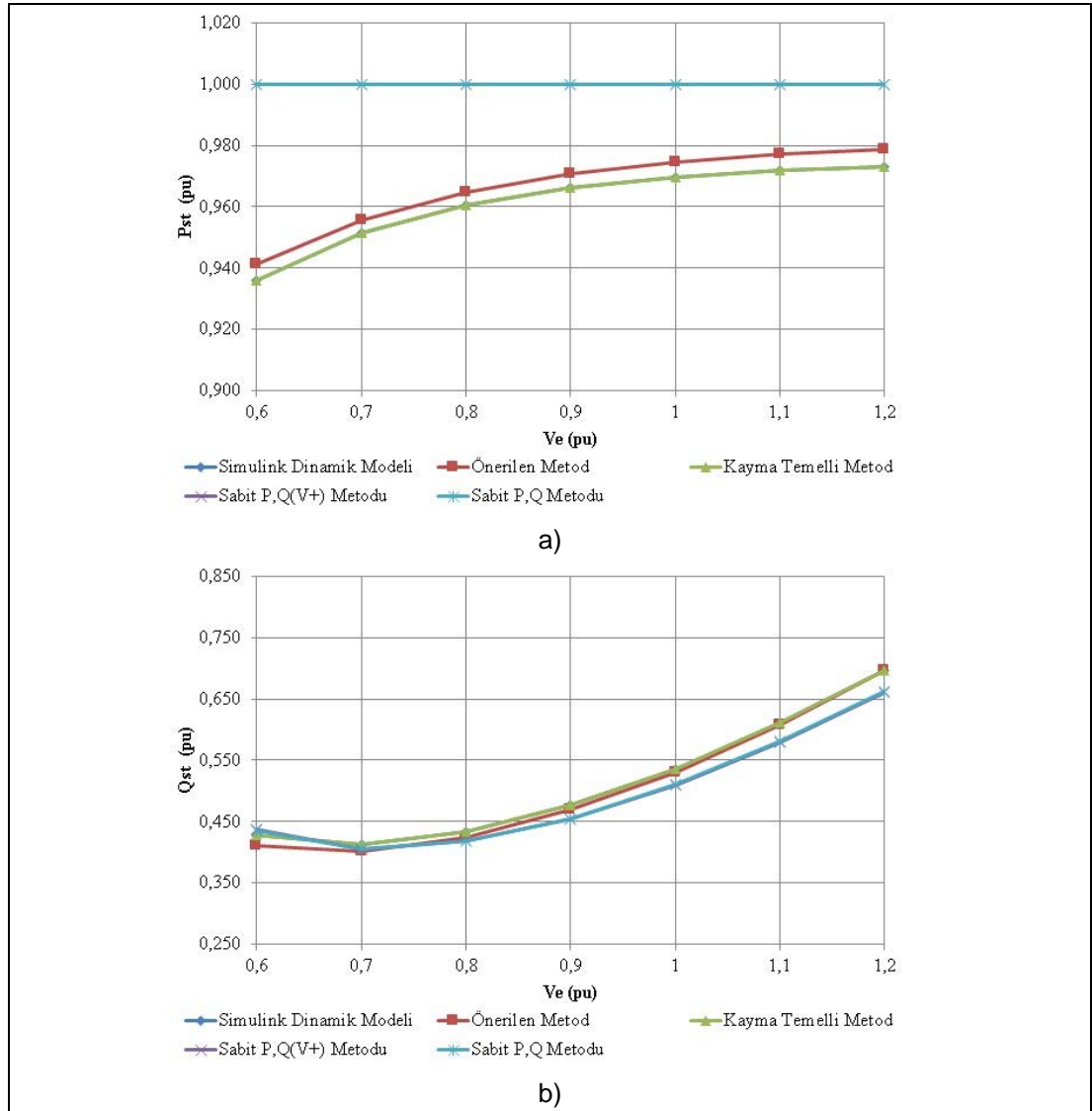
Senaryo-2' de generatör mil gücü generatör nominal gücüne ayarlanmış ve terminal gerilimlerinin VUF değeri ise %5' te sabit tutulmuştur. Bununla birlikte terminal gerilimlerinin V_e değeri 0,6 pu' dan 1,2 pu değerine kadar arttırılmıştır. Böylece aynı mil gücü ve aşırı bir durum olan %5 VUF değeri ile terminal gerilim seviyesindeki aşırı değişim durumlarında model sonuçlarının ne şekilde etkilendiğinin gözlemlenmesi amaçlanmıştır. Senaryo 2 için beş modele ait faz aktif ve reaktif güçleri sonuçları Şekil 3.6' da verilmiştir. Gerilim seviyesindeki artış ile a ve b fazlarından çekilen reaktif güçlerin arttığı, c fazı reaktif gücünün azalma eğiliminde olduğu görülmüştür.



Şekil 3.6: Senaryo-2 için 160 kW'lık asenkron generatörün a) a fazı aktif gücü, b) a fazı reaktif gücü, c) b fazı aktif gücü, d) b fazı reaktif gücü, e) c fazı aktif gücü ve f) c fazı reaktif gücünün Önerilen Model, Kayma Hesabı Temelli Model, Sabit P-Q Model, Sabit P,Q(V+) Model ile d-q Model kullanılarak bulunan pu değerleri.

Diğer taraftan V_e 'nin artışıyla a ve c fazlarından şebekeye verilen aktif güç azalmış, b fazından şebekeye verilen aktif güç ise önemli derecede artmıştır. Bu sonuçlardan gerilim seviyesinin dengesizlik altında çalışan asenkron generatörlerin faz aktif/reaktif güçleri arasındaki dengesizliği önemli derecede etkileyebileceği anlaşılmaktadır. Ayrıca Senaryo 1'de olduğu gibi önerilen model, kayma hesabı temelli model ve d-q modelin birbirine çok yakın sonuçlar verdiği görülmektedir. Sabit

P-Q ve sabit P, Q(V+) modellerine ait sonuçlar ise V_e ' nin artışıyla diğer üç modelin sonuçlarından uzaklaşmıştır.



Şekil 3.7: Senaryo-2 için 160 kW' lık asenkron generatörün Önerilen Model, Kayma Hesabı Temelli Model, Sabit P-Q Model, Sabit P,Q(V+) Model ile d-q Model kullanılarak bulunan toplam a) aktif, b) reaktif gücü pu değerleri.

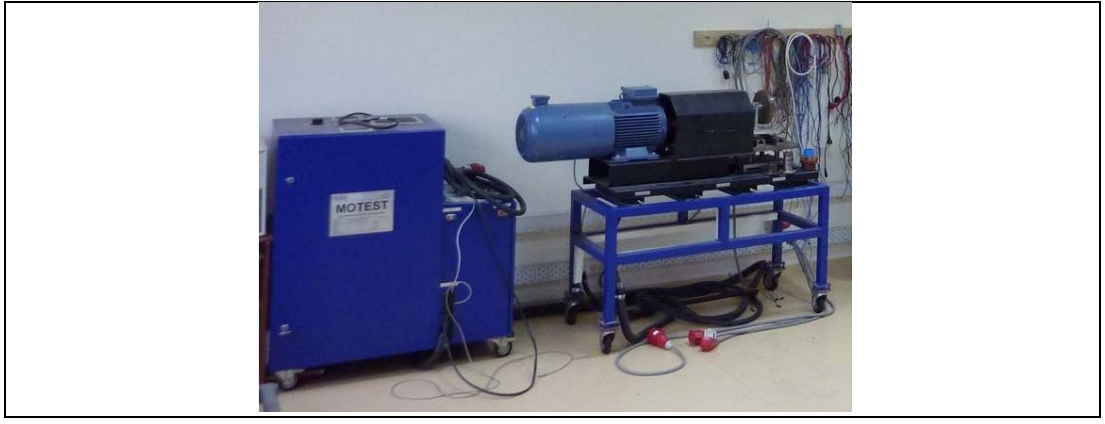
Şekil 3.7' de verilen sonuçlar incelendiğinde V_e değerinin artması ile Önerilen Model, Kayma Hesabı Temelli Model [6] ve d-q Model [118] toplam aktif güç ve reaktif güç değerlerinin artma eğiliminde olduğu görülmüştür. Genel olarak gerçekleştirilen analiz sonuçları göz önüne alındığında önerilen model, kayma hesabı temelli model ve d-q modelin birbirine yakın ve benzer karakteristikte sonuçlar verdiği görülmektedir.

3.4. Önerilen Model için Ölçüm Temelli Hassasiyet Analizleri

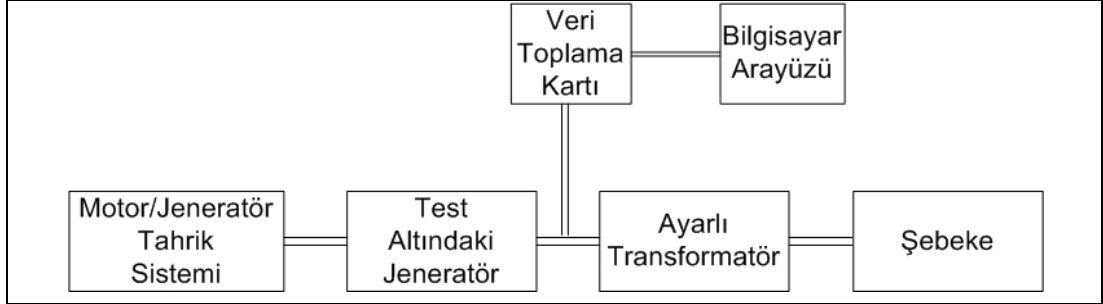
Bu kısımda tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen test sistemi tanıtılacak ve bu test sistemi kullanılarak 1,5 kW ve 7,5 kW gücünde iki asenkron makineden alınan ölçümler temel alınarak önerilen model ve diğer asenkron generatör modellerinin karşılaştırmalı analizleri sunulacaktır. Ölçümlerin gerçekleştirileceği asenkron makinelerin eşdeğer devre parametreleri literatürde iyi bilinen kısa devre - boşa çalışma testleri ile elde edilmiştir. Literatürde gerçekleştirilen birçok çalışmada asenkron makinenin çekirdek kaybı (R_{sc})' nin ihmal edildiği, ihmal edilen bu büyüklüğün küçük güçlü asenkron makineler üzerinde önemli etkisinin olduğu iyi bilinmektedir [119]. Çalışmanın bir önceki bölümünde gerçekleştirilen benzetim temelli analizlerde önerilen modelin benzetim sonucu ile tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştü. Ancak gerçekleştirilen benzetim temelli analizlerde önerilen modelin performansının değerlendirilmesinde kullanılan diğer asenkron generatör modelleri (Kayma Hesabı Temelli Model [6] ve d-q Model [118]) hesaplamalar sırasında makinenin çekirdek kaybı (R_{sc})' yi ihmal etmektedir. Önerilen modelin performansının daha iyi gözlemlenebilmesi için 1,5 kW ve 7,5 kW gücünde asenkron makineler için kısa devre - boşa çalışma testleri ile elde edilen eşdeğer devre parametreleri kullanılarak gerçeğe daha yakın analizlerin gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu sebeple hem ölçümlerin gerçekleştirildiği test sisteminin kısıtları na uygun olması hem de test sisteminde faz gerilimlerini ayarlamak için kullanılan varyakların 2 kW gücünde olması sebebiyle ve literatürden küçük güçlü asenkron makinelerin çekirdek kaybı (R_{sc}) değerinin büyük değerde olacağı bilindiğinden 1,5 kW gücündeki asenkron makine ile 7,5 kW gücündeki asenkron makine ölçüm temelli analizleri için seçilmiştir.

3.4.1. Test Sisteminin Tanıtılması

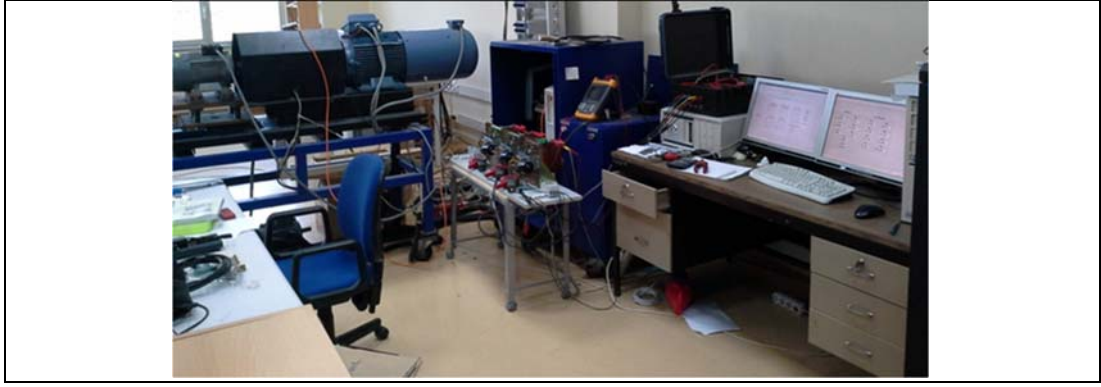
Çeşitli rotor hızlarında asenkron generatörün dengesiz gerilimler altında çeşitli mekanik giriş güçlerinde testlerinin yapılacağı sisteme ait fotoğraflar ve prensip şeması Şekil 3.8 - Şekil 3.10' da verilmiştir. Bu şekillerden görüldüğü üzere sistemde, asenkron generatörü istenen mekanik güçte (veya devirde) süren bir makine tahrik sistemi, test altındaki generatör, tek fazlı üç adet oto transformatör, veri örnekleme kartı ve bilgisayar yer almaktadır.



Şekil 3.8: MOTEST sistemi.



Şekil 3.9: Test sisteminin prensip şeması.



Şekil 3.10: Test sistemine ait fotoğraf.

Test düzeneğinde generatörün miline aktarılan mekanik gücü sağlayan Motor/Generatör Tahrik Sistemi (MOTEST)' dir. Bu tahrik sistemi, içerisinde 15 kW gücünde 2 kutuplu tahrik motoru bulunduran ve bu motoru 4 bölgede sürebilme özelliğinde olan elektrik sürücüsüne sahip bir sistemdir. MOTEST sisteminde bulunan tork ve hız sensörleri (encoder) ile test edilen generatörün mekanik tork değeri ve rotor devir bilgisi okunabilmektedir.

Kurulan test sisteminde asenkron generatöre gerilim dengesizliği senaryoları üç adet tek fazlı 2 kW gücünde oto transformatör (varyak) kullanılarak uygulanmıştır. Aşağıda gerilim dengesizliği şartlarını sağlamak için kullanılan varyaklara ait bir fotoğraf görülmektedir.

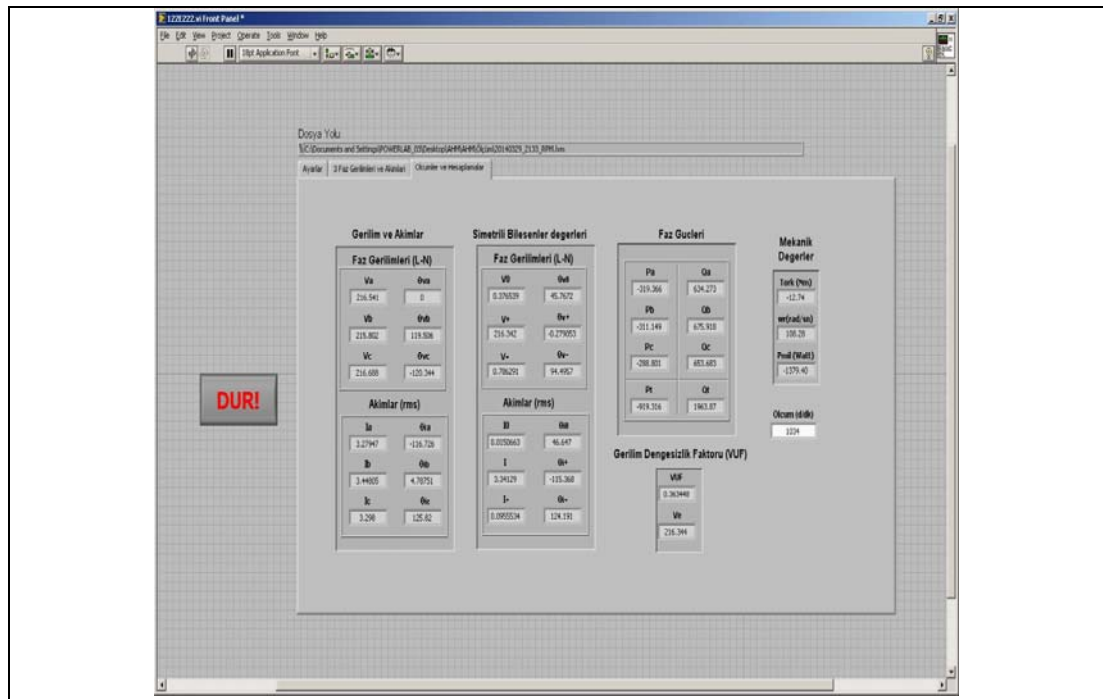


Şekil 3.11: Varyaklar.

Kurulan test sisteminin bir diğer parçası olan veri toplama kartı (VTK) ise generatöre ait stator faz gerilim ve akım bilgilerini örneklemek için kullanılmıştır. Ölçüm düzeneğinde kullanılan VTK 12 bit örnekleme çözünürlüğünde 8 adet farksal

analog girişe sahiptir. Bu kartın analog giriş kanallarından 3 adedi stator faz gerilimlerinin örneklenmesinde, diğer 3 analog giriş kanalı ise generatörün stator faz akımının örneklenmesinde kullanılmıştır. Akım örneklemesine ayrılan kanallara faz akım bilgileri Fluke i1000s AC akım kelepçeleri kullanılarak girilmiştir. Fluke i1000s AC akım kelepçeleri 10 A akım kademesinde 100mV/A çıkış hassasiyetinde kullanılmıştır.

Test sisteminin son kısmı ise VTK aracılığıyla alınan verilerin işlendiği LabVIEW programı tabanlı arayüzdür. Geliştirilen program ön panel ve blok çizelgesi olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Aşağıdaki şekilde LabVIEW programı ile hazırlanan arayüz programına ait ön panel ekran görüntüsü verilmiştir. Hazırlanan arayüz programına ait ölçüm bloklarına bu çalışmanın türetildiği proje raporundan [112] ulaşılabilir.



Şekil 3.12: LabVIEW programı arayüzü.

Test sisteminde kullanılan varyaklar ile oluşturulan faz gerilim dengesizliğinin ayarlanabilmesi ve ölçüm verilerinin takibi Şekil 3.12' de verilen arayüz ile sağlanmıştır. Bu arayüzde, generatöre ait stator faz gerilim ve akım bilgilerinin anlık değerleri, bu değerlerin Simetrik Bileşenler Uzayında karşılıkları, faz akım ve gerilim değerleri kullanılarak hesaplanan faz güçleri, test sisteminde varyaklarla oluşturulan

faz gerilimlerinin VUF (%) ve V_e değerleri ile MOTEST sisteminde bulunan tork ve hız sensörlerinden alınan veriler gösterilmiştir.

3.4.2. Test Sisteminde Kullanılan Asenkron Generatörlerin Eşdeğer Devre Parametrelerinin Elde Edilmesi

Tez çalışması kapsamında önerilen model ve diğer asenkron generatör modellerinin analizleri için her ikisinde 6 kutuplu olan 1,5 kW ve 7,5 kW etiket gücündeki iki adet asenkron generatörden test sistemi aracılığıyla ölçümler alınmıştır.

6 kutuplu ve 1,5 kW gücündeki asenkron generatöre ait stator ve rotor sargı parametreleri, kilitli rotor ve boşta çalışma deneyleri ile elde edilmiştir. Ölçüm sonuçları kullanılarak hesaplanan ve modelleme çalışmalarında kullanılan eşdeğer devre parametreleri Tablo 3.2' de sunulmuştur.

Tablo 3.2: 1,5 kW gücündeki test generatörüne ait rotor-stator empedans değerleri.

R_s	0,926 Ω
X_s	5,669 Ω
R_r (stator tarafından görünen)	9,164 Ω
X_r (stator tarafından görünen)	5,669 Ω
R_m	452,285 Ω
X_m	88,785 Ω

6 kutuplu ve 7,5 kW gücündeki asenkron generatöre ait stator ve rotor sargı parametreleri, kilitli rotor ve boşta çalışma deneyleri ile elde edilmiştir. Ölçüm sonuçları kullanılarak hesaplanan ve modelleme çalışmalarında kullanılan eşdeğer devre parametreleri Tablo 3.3' te sunulmuştur.

Tablo 3.3: 7,5 kW gücündeki test generatörüne ait rotor-stator empedans değerleri.

R_s	0,710 Ω
X_s	1,154 Ω
R_r (stator tarafından görünen)	0,710 Ω
X_r (stator tarafından görünen)	1,154 Ω
R_m	195,199 Ω
X_m	30,738 Ω

Tablo 3.2 ve Tablo 3.3' teki R_m ve X_m değerleri dikkate alındığında 1,5 kW gücündeki test generatörünün 7,5 kW gücündeki test generatörüne göre beklendiği gibi daha büyük değerlere sahip olduğu görülmektedir.

3.4.3. 1,5 kW Gücündeki Asenkron Generatör için Ölçüm Temelli Model Hassasiyet Analizleri

Beklenildiği üzere 1,5 kW gücündeki asenkron makinenin R_m ve X_m parametreleri 7,5 kW gücündeki asenkron makineye kıyasla daha büyük değerlerdedir. Gerçekleştirilen bu analiz ile önerilen modelin büyük R_m ve X_m değerlerine sahip küçük güçlü asenkron generatörler için geçerliliği teyit edilmek istenmiştir. Bu amaçla 5 farklı rotor hızında (birbaşka ifadeyle 5 farklı mil giriş gücünde) çalıştırılan test generatörü her bir rotor hızında generatör stator faz gerilimleri, gerilim dengesizlik faktörü ($VUF = V_{sn}/V_{sp}$) değeri %0' dan birer adımlarla %5 değerine ulaşacak şekilde arttırılmış, faz gerilimi açılarında bir dengesizlik oluşturulmadan ölçümler alınmıştır. Her bir senaryoda generatör faz gerilimleri, faz akımları, rotor hızı, mekanik tork değeri LabVIEW programı aracılığıyla bilgisayar ortamında kayıt altına alınmıştır. Generatöre uygulanan rotor hızları ve VUF değerlerini gösterir ölçüm senaryoları Tablo 3.4' te verilmiştir. Her bir test senaryosu için üretilen faz gerilimleri ve mile uygulanan güçler (P_T), Tablo 3.5' te sunulmuştur.

Tablo 3.4: 1,5 kW gücündeki asenkron generatör için ölçüm senaryoları.

VUF (%)	Rotor Hızı (d/dk)				
	1021	1027	1032	1036	1042
0	✓	✓	✓	✓	✓
1	✓	✓	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓	✓	✓
3	✓	✓	✓	✓	✓
4	✓	✓	✓	✓	✓
5	✓	✓	✓	✓	✓

Tablo 3.5' teki faz gerilimleri, uygulanan mekanik güç ve rotor hız değerleri altında çalışan generatörün ölçülen faz aktif/reaktif güç değerleri Tablo 3.6' da yer verilmiştir.

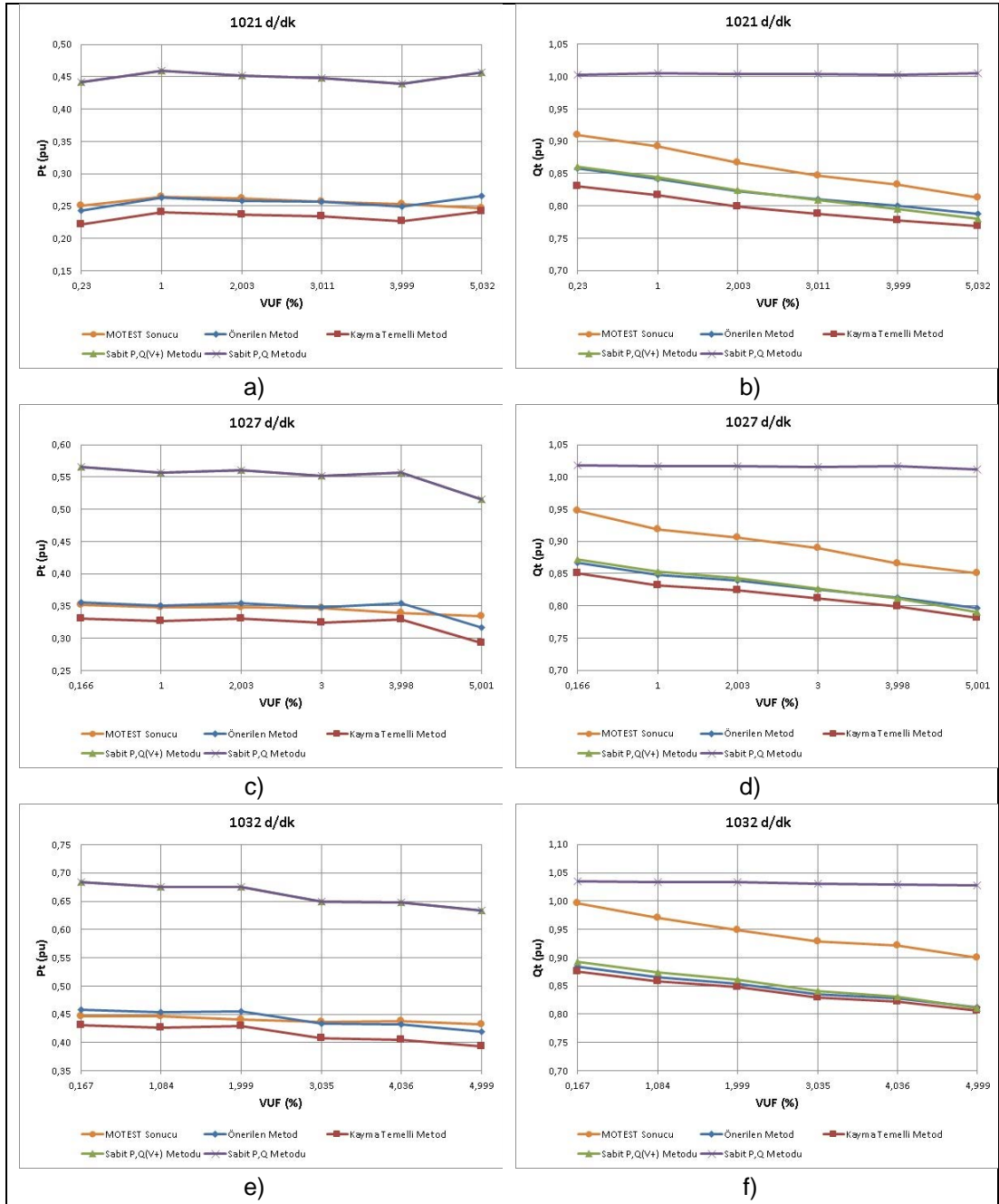
Tablo 3.5: 1,5 kW gücündeki asenkron generatöre her bir test senaryosunda uygulanan faz gerilimleri ve mil güçleri (P_T).

Hız (rpm)	V_e	VUF (%)	P_T (Watt)	V_a	θ_{Va}	V_b	θ_{Vb}	V_c	θ_{Vc}
1021	202,3	0,23	-662,1	203,2	0,0	202,7	119,6	201,0	-120,4
	199,9	1,00	-689,4	202,6	0,0	202,0	119,6	195,1	-120,4
	197,6	2,00	-677,6	202,3	0,0	201,5	119,5	188,7	-120,4
	195,7	3,01	-672,1	202,5	0,0	201,5	119,5	182,8	-120,3
	194,1	4,00	-659,7	202,8	0,0	201,7	119,5	177,5	-120,3
	191,9	5,03	-685,1	202,4	0,0	201,4	119,5	171,3	-120,2
1027	201,6	0,17	-847,7	202,1	0,0	201,7	119,7	201,0	-120,3
	199,3	1,00	-834,6	202,1	0,0	201,4	119,6	194,5	-120,3
	197,9	2,00	-840,2	202,7	0,0	201,9	119,5	189,0	-120,4
	196,1	3,00	-827,0	202,9	0,0	201,9	119,5	183,2	-120,3
	193,8	4,00	-835,3	202,6	0,0	201,5	119,4	177,0	-120,3
	192,1	5,00	-772,5	202,6	0,0	201,4	119,4	171,5	-120,3
1032	201,6	0,17	-1025,5	201,9	0,0	201,7	119,6	201,1	-120,4
	199,3	1,08	-1013,3	202,0	0,0	201,7	119,6	194,1	-120,4
	197,6	2,00	-1013,7	202,2	0,0	201,7	119,5	188,7	-120,4
	195,5	3,04	-974,8	202,2	0,0	201,4	119,5	182,6	-120,2
	194,2	4,04	-971,8	202,9	0,0	201,9	119,5	177,3	-120,2
	191,9	5,00	-949,6	202,3	0,0	201,1	119,5	171,6	-120,1
1036	202,2	0,15	-1231,7	202,5	0,0	202,3	119,7	201,9	-120,3
	199,5	1,00	-1214,0	202,2	0,0	201,6	119,5	194,6	-120,3
	197,5	2,06	-1178,9	202,3	0,0	201,6	119,5	188,3	-120,3
	195,9	3,01	-1209,7	202,6	0,0	201,9	119,5	183,0	-120,2
	193,7	4,05	-1205,2	202,4	0,0	201,3	119,5	176,8	-120,1
	192,3	5,00	-1203,0	202,8	0,0	201,7	119,5	171,8	-120,1
1042	202,3	0,14	-1447,7	202,4	0,0	202,4	119,8	202,3	-120,3
	199,9	1,03	-1415,6	202,5	0,0	202,1	119,6	195,0	-120,3
	198,5	2,00	-1398,3	203,0	0,0	202,7	119,5	189,6	-120,2
	196,3	3,01	-1391,1	203,1	0,0	202,2	119,5	183,4	-120,2
	193,7	4,05	-1418,4	202,1	0,0	201,5	119,6	177,1	-119,9
	191,6	5,02	-1341,7	201,9	0,0	201,1	119,4	171,0	-120,0

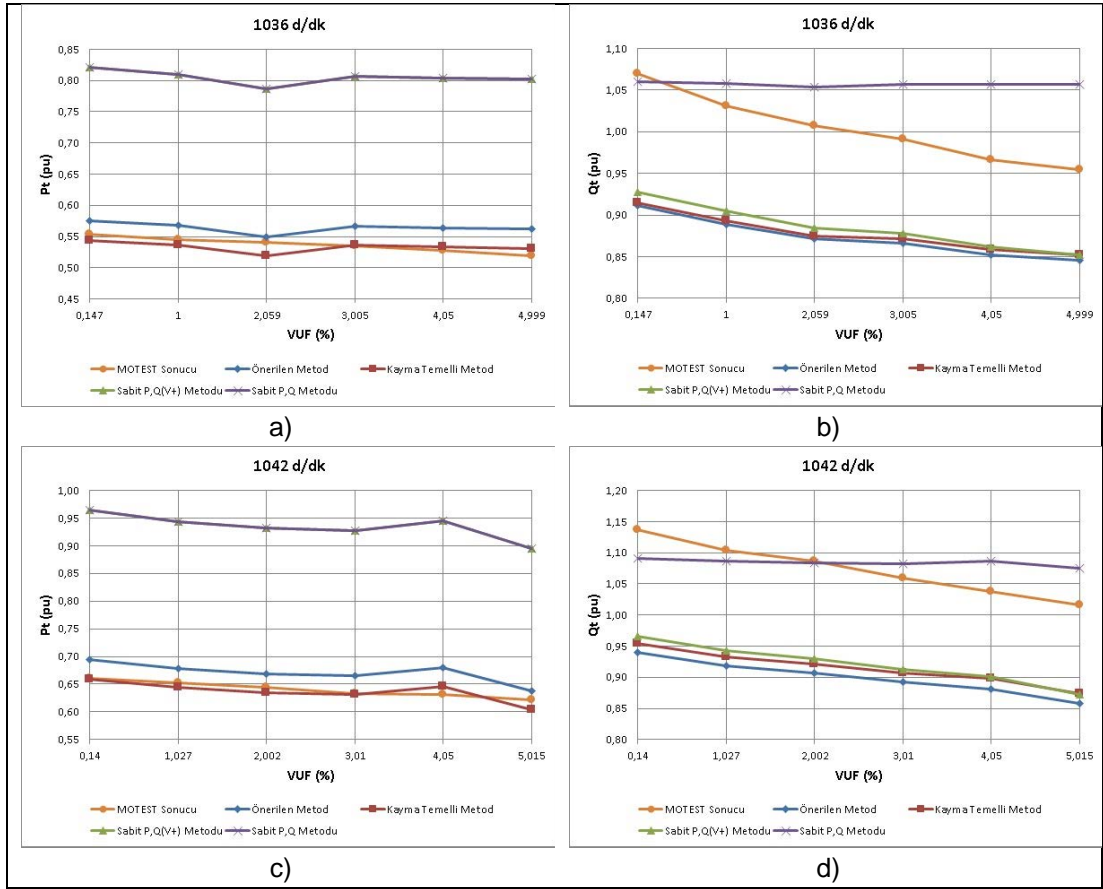
Tablo 3.6: 1,5 kW gücündeki test generatörü için ölçülen faz aktif/faz reaktif güçleri.

Hız (d/dk)	VUF (%)	P _a	P _b	P _c	Q _a	Q _b	Q _c
1021	0,23	-127,58	-140,35	-107,42	478,73	444,60	441,44
	1,00	-144,84	-162,59	-88,95	499,42	410,01	429,04
	2,00	-157,21	-176,20	-58,88	519,20	366,46	414,28
	3,01	-168,35	-186,65	-29,92	539,20	327,12	404,27
	4,00	-179,90	-196,14	-3,09	561,71	294,58	393,55
	5,03	-190,43	-203,87	23,63	578,27	259,93	381,07
1027	0,17	-176,96	-188,10	-162,22	492,67	468,18	460,17
	1,00	-188,08	-201,78	-131,35	510,30	422,01	446,16
	2,00	-202,31	-216,82	-103,43	538,19	386,26	435,41
	3,00	-215,74	-228,34	-75,31	560,53	348,08	425,22
	4,00	-225,14	-236,51	-47,03	578,09	309,63	411,60
	5,00	-236,08	-244,46	-19,85	599,86	278,50	397,86
1032	0,17	-225,56	-233,72	-210,18	512,99	494,54	486,00
	1,08	-243,37	-250,05	-175,54	539,86	445,32	469,53
	2,00	-252,02	-260,71	-148,95	559,31	407,36	457,12
	3,04	-262,34	-271,88	-121,05	581,87	364,85	445,24
	4,04	-277,41	-285,11	-94,73	611,37	332,71	437,80
	5,00	-287,17	-289,72	-71,76	624,06	298,47	427,05
1036	0,15	-278,02	-287,29	-264,24	548,75	532,99	522,85
	1,00	-289,93	-299,92	-228,29	568,94	475,34	502,56
	2,06	-302,94	-310,83	-196,44	593,14	430,66	487,68
	3,01	-314,82	-319,13	-169,22	615,10	393,43	478,60
	4,05	-324,87	-326,56	-139,51	635,62	352,52	462,17
	5,00	-334,13	-332,07	-112,82	657,34	321,62	452,21
1042	0,14	-333,25	-341,18	-317,09	582,86	565,36	557,91
	1,03	-345,67	-352,85	-278,92	607,61	508,86	538,78
	2,00	-358,43	-359,18	-248,09	632,26	465,94	530,57
	3,01	-365,23	-368,03	-217,00	652,84	423,07	512,86
	4,05	-378,95	-376,23	-192,53	672,67	383,10	501,44
	5,02	-391,38	-379,49	-161,28	693,70	345,22	484,77

Çalışma kapsamında geliştirilen analitik temelli modelin Tablo 3.5’ te verilen faz gerilimleri ve mekanik giriş güçleri kullanılarak Önerilen Model, Kayma Hesabı Temelli Model, Sabit P-Q Model, Sabit P,Q(V+) Model ile hesaplanan toplam aktif ve toplam reaktif güçler Şekil 3.13 ve Şekil 3.14’ te sunulmuştur.



Şekil 3.13: 1,5 kW' lık asenkron generatörün 1021 d/dk mekanik giriş gücü için a) toplam aktif gücü ve b) toplam reaktif gücü, 1027 d/dk mekanik giriş gücü için c) toplam aktif gücü ve d) toplam reaktif gücü, 1032 d/dk mekanik giriş gücü için e) toplam aktif gücü ve f) toplam reaktif gücünün Önerilen Model, Kayma Hesabı Temelli Model, Sabit P-Q Model, Sabit P,Q(V+) Model ile bulunan pu değerleri.



Şekil 3.14: 1,5 kW'lık asenkron generatörün 1036 d/dk mekanik giriş gücü için a) toplam aktif gücü ve b) toplam reaktif gücü, 1042 d/dk mekanik giriş gücü için c) toplam aktif gücü ve d) toplam reaktif gücünün Önerilen Model, Kayma Hesabı Temelli Model, Sabit P-Q Model, Sabit P,Q(V+) Model ile bulunan pu değerleri.

1,5 kW gücündeki asenkron generatör için modeller ile elde edilen sonuçlardan aşağıda maddeler halinde sunulan çıkarımlarda bulunulmuştur.

- Önerilen Model ve Kayma Hesabı Temelli Model ölçüm sonuçlarına yakın ve aynı karakterde toplam aktif ve toplam reaktif güç değişim eğrileri vermiştir.
- Önerilen Modelin genel olarak Kayma Hesabı Temelli Modele göre ölçüm sonuçlarına daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Sabit P-Q ve Sabit P, Q(V+) modellerle hesaplanan toplam aktif güç değerleri, önerilen model ve kayma hesabı temelli modelle hesaplanan toplam aktif güç değerlerine kıyasla ölçüm sonuçlarına daha uzak kalmıştır, bir başka ifadeyle Sabit P-Q ve Sabit P, Q(V+) modelleri toplam aktif güç hesabında diğer iki modele göre daha fazla hata yapmıştır.

- Son olarak, Sabit P-Q model dışındaki üç modelin toplam reaktif güç hesabında birbirine yakın sonuçlar verdiği ve bu üç modelle hesaplanan toplam reaktif güç değerlerinin ölçüm sonuçlarıyla aynı değişim eğilimini gösterdiği ifade edilebilir.

Ölçümler sırasında asenkron generatörün terminal gerilimine ait dengesizlik faktörünün (VUF) sabit tutulması hedeflenmiştir. Test sisteminde şebekeye doğrudan bağlı varyaklar kullanılarak beslenen asenkron makinenin ölçümler sırasında şebekede meydana gelebilecek olaylardan etkileneneği aşikârdır. Tablo 3.5 incelendiğinde ölçümler sırasında aynı rotor hızında A ve B fazı gerilim genlik değerleri için dalgalanmalar olduğu görülmektedir. Ayrıca ölçümler sırasında %VUF değerinin ayarlanması sırasında kullanılan varyakların kısıtları sebebiyle, gerilimlerin kollektif etkin değerleri (V_e)' nin sabit kalmadığı görülmektedir. Her ne kadar ölçümler sırasında V_e değeri sabit tutulmamış olsa da analiz sonuçları ışığında önerilen modelin ölçüm sonuçlarına yakın ve tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu durumun yegâne sebebi önerilen model için önem arz eden ve bir önceki bölümde gerçekleştirilen benzetim temelli analizlerde ulaşılamayan R_m değerinin gerçekleştirilen kısa devre – boşa çalışma testi ile 1,5 kW gücündeki asenkron makine için ulaşılabilir olmasıdır.

3.4.4. 7,5 kW Gücündeki Asenkron Generatör için Ölçüm Temelli Model Hassasiyet Analizleri

Kurulan test sisteminde asenkron generatörün faz gerilim dengesizlikleri 2 kW gücündeki varyaklar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sebeple 7,5 kW gücündeki asenkron generatör ile gerçekleştirilen ölçümlerde faz güçleri test sisteminde kullanılan varyakların gücü ile sınırlı tutulmuştur. Gerçekleştirilen ölçümler sırasında 7,5 kW gücündeki asenkron generatör 5 farklı rotor hızında (bir başka ifadeyle 5 farklı mil giriş gücünde) çalıştırılmıştır. Her bir rotor hızında generatör stator faz gerilimleri, gerilim dengesizlik faktörü ($VUF = V_{sn}/V_{sp}$) değeri %0' dan birer adımlarla %5 değerine ulaşacak şekilde değiştirilmiş, fazlar arası açı dengesizliği oluşturulmamıştır. Her bir senaryoda generatör faz gerilimleri, faz akımları, rotor hızı ve mekanik tork değeri LabVIEW programı aracılığıyla bilgisayar ortamında kayıt altına alınmıştır. Generatöre uygulanan rotor hızları ve VUF değerlerini gösterir ölçüm senaryoları Tablo 3.7' de verilmiştir. Her bir test senaryosu için üretilen faz gerilimleri ve mile uygulanan güçler (P_T) Tablo 3.8' de sunulmuştur.

Tablo 3.7: 7,5 kW gücündeki asenkron generatör için ölçüm senaryoları.

VUF (%)	Rotor Hızı (d/dk)				
	1004	1006	1008	1010	1012
0	✓	✓	✓	✓	✓
1	✓	✓	✓	✓	✓
2	✓	✓	✓	✓	✓
3	✓	✓	✓	✓	✓
4	✓	✓	✓	✓	✓
5	✓	✓	✓	✓	✓

Tablo 3.8' deki faz gerilimleri, uygulanan mekanik güç ve rotor hız değerleri altında çalışan generatörün ölçülen faz aktif/reaktif güç değerleri Tablo 3.9' da yer almaktadır.

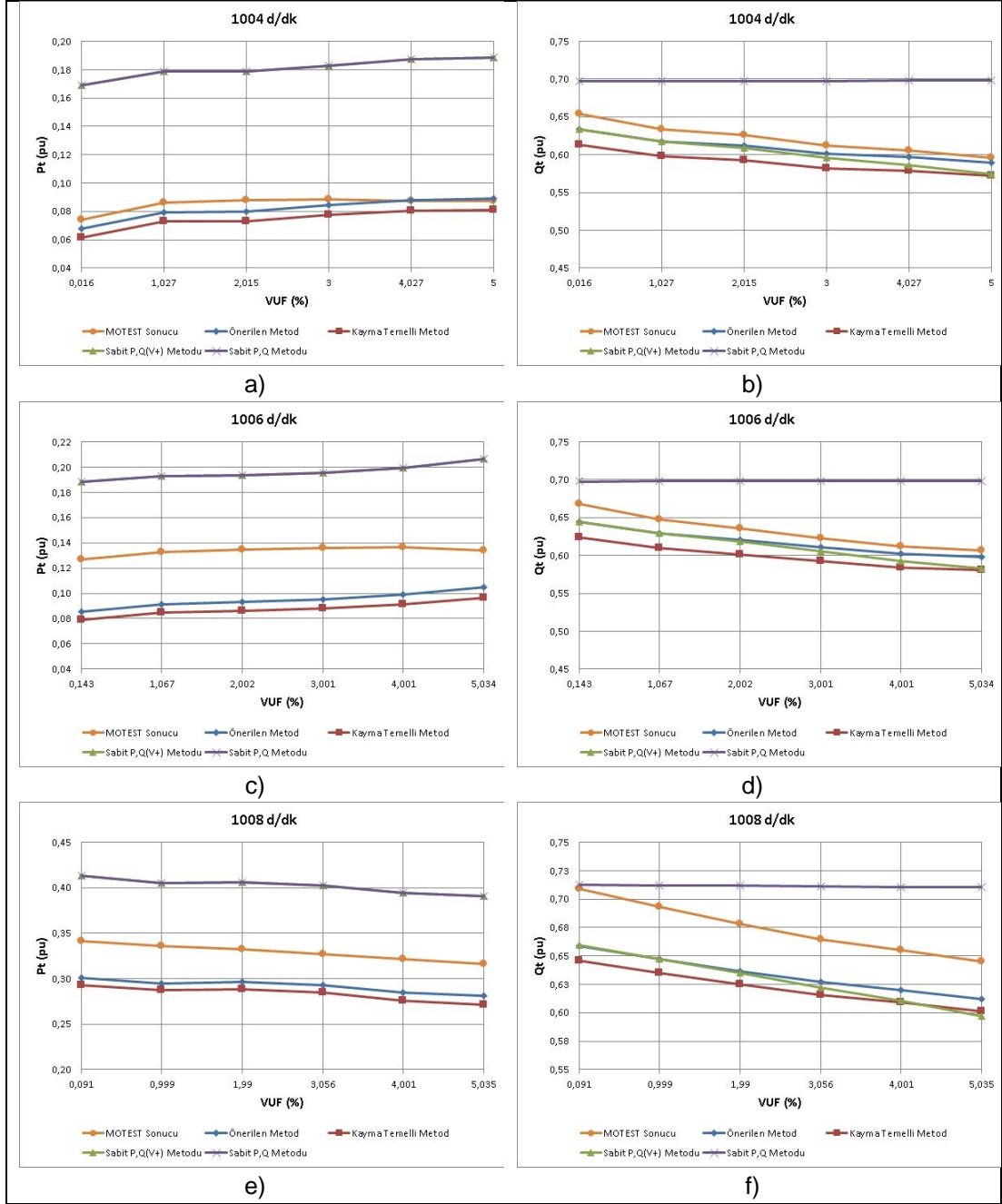
Tablo 3.8: 7,5 kW gücündeki asenkron generatöre her bir test senaryosunda uygulanan faz gerilimleri ve mil güçleri (P_T).

Hız (rpm)	V_e	VUF (%)	P_T (Watt)	V_a	θ_{Va}	V_b	θ_{Vb}	V_c	θ_{Vc}
1004	220,1	0,02	-1267,4	220,0	0,0	220,2	120,0	220,2	-120,0
	217,1	1,03	-1339,4	212,3	0,0	219,8	119,9	219,2	-120,2
	215,7	2,02	-1340,0	206,6	0,0	220,6	119,8	219,7	-120,3
	213,2	3,00	-1369,0	200,0	0,0	220,3	119,8	219,2	-120,3
	211,6	4,03	-1404,7	193,8	0,0	221,0	119,8	219,5	-120,5
	209,4	5,00	-1415,0	187,5	0,0	220,9	119,9	219,0	-120,5
1006	221,8	0,14	-1415,1	222,3	0,0	221,3	119,9	222,0	-120,0
	219,1	1,07	-1446,9	214,4	0,0	221,2	119,7	221,6	-120,3
	217,2	2,00	-1452,0	208,3	0,0	221,4	119,6	221,7	-120,5
	214,9	3,00	-1464,1	201,7	0,0	221,4	119,6	221,3	-120,5
	212,6	4,00	-1493,1	195,0	0,0	221,5	119,7	220,8	-120,5
	210,8	5,03	-1551,0	188,8	0,0	222,2	119,8	220,8	-120,5
1008	221,7	0,09	-3098,3	221,3	0,0	221,6	120,0	222,2	-120,0
	219,7	1,00	-3039,0	215,3	0,0	221,7	119,7	222,0	-120,3
	217,5	1,99	-3043,8	208,6	0,0	221,8	119,6	221,8	-120,4
	215,1	3,06	-3018,2	201,7	0,0	222,0	119,6	221,5	-120,5
	213,3	4,00	-2956,0	195,7	0,0	222,3	119,5	221,4	-120,7
	210,9	5,04	-2930,3	188,7	0,0	222,1	119,5	221,0	-120,8
1010	219,7	0,05	-3491,4	219,6	0,0	219,9	120,1	219,7	-120,0
	217,8	1,01	-3432,9	212,9	0,0	220,5	119,9	219,8	-120,2
	215,2	2,04	-3376,0	205,9	0,0	220,3	119,8	219,2	-120,4
	213,8	3,07	-3351,2	200,2	0,0	221,1	119,7	219,7	-120,5
	211,8	3,99	-3285,4	194,2	0,0	221,2	119,6	219,4	-120,6
	209,1	5,10	-3264,3	186,9	0,0	220,8	119,5	218,8	-120,8
1012	221,6	0,11	-3619,3	221,2	0,0	221,5	120,0	222,1	-120,0
	219,3	1,03	-3544,6	214,7	0,0	221,6	119,8	221,6	-120,3
	216,9	2,01	-3509,4	208,1	0,0	221,3	119,7	221,2	-120,4
	215,1	3,01	-3436,5	202,0	0,0	221,8	119,5	221,3	-120,5
	212,8	3,99	-3362,4	195,2	0,0	221,8	119,5	220,8	-120,7
	210,9	5,00	-3321,9	189,1	0,0	222,0	119,3	220,9	-120,9

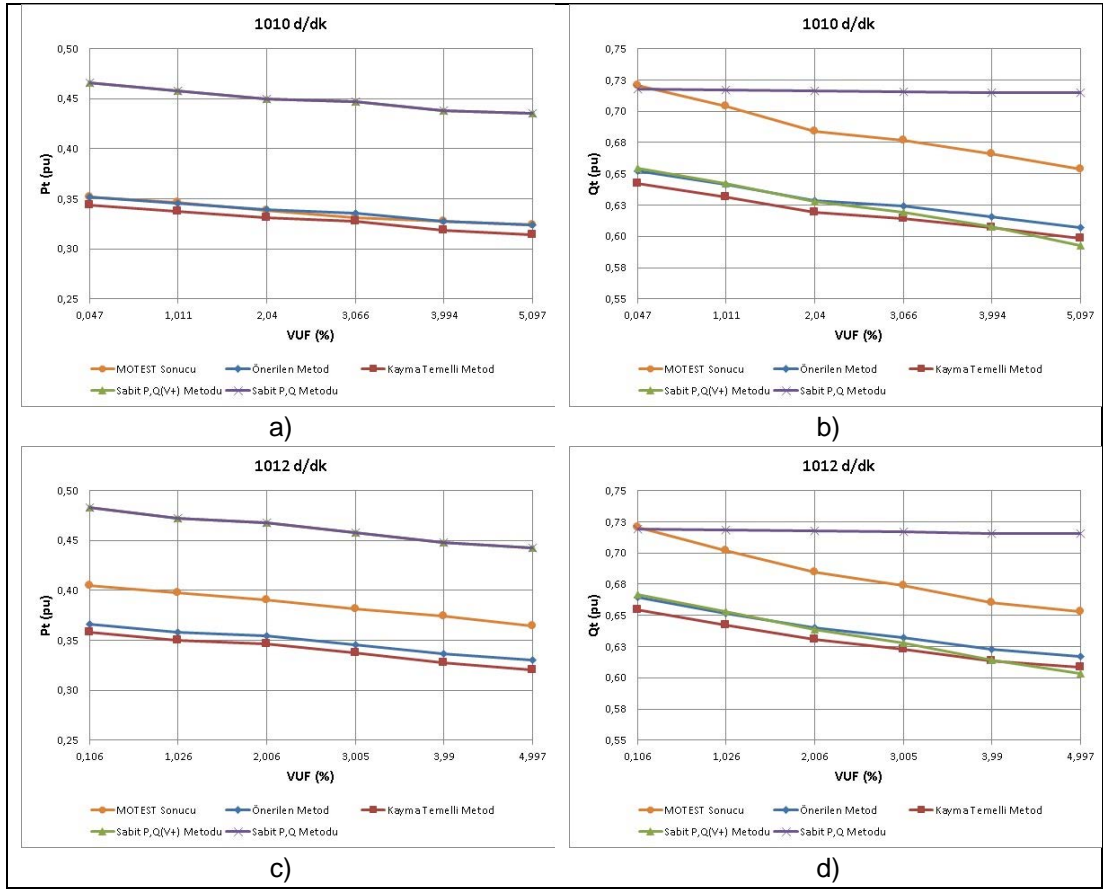
Tablo 3.9: 7,5 kW gücündeki test generatörü için ölçülen faz aktif/faz reaktif güçleri.

Hız (d/dk)	VUF (%)	P _a	P _b	P _c	Q _a	Q _b	Q _c
1004	0,02	-161,04	-146,37	-248,64	1585,00	1680,40	1640,22
	1,03	-290,39	35,71	-390,89	1320,27	1643,02	1788,53
	2,02	-391,23	230,10	-496,21	1110,07	1620,90	1961,27
	3,00	-481,58	411,98	-592,18	905,91	1576,64	2107,63
	4,03	-570,58	609,68	-695,32	714,61	1547,08	2277,06
	5,00	-648,07	774,61	-783,39	550,50	1503,71	2418,31
1006	0,00	-244,27	-323,63	-386,23	1613,44	1739,36	1655,65
	1,07	-352,49	-102,93	-542,06	1309,43	1723,92	1827,28
	2,00	-433,44	88,17	-665,22	1076,12	1716,11	1972,64
	3,00	-516,62	258,45	-761,28	865,99	1673,52	2130,75
	4,00	-609,80	452,85	-865,53	674,56	1636,87	2279,66
	5,03	-686,50	644,28	-964,44	497,52	1600,32	2452,26
1008	0,00	-783,33	-826,55	-948,48	1675,84	1856,61	1783,67
	0,00	-826,64	-631,22	-1061,65	1415,49	1851,23	1930,89
	1,99	-894,63	-425,80	-1173,20	1172,42	1829,22	2084,73
	3,06	-963,52	-207,31	-1278,52	938,60	1789,54	2255,98
	4,00	-1018,13	-9,93	-1383,23	745,28	1773,70	2396,83
	5,04	-1063,15	190,07	-1496,14	543,79	1745,41	2547,35
1010	0,00	-836,04	-842,25	-957,69	1745,81	1869,44	1788,29
	1,01	-913,47	-617,31	-1068,07	1480,99	1842,50	1955,30
	2,04	-980,48	-391,85	-1166,07	1224,41	1797,70	2107,24
	3,07	-1049,35	-177,61	-1255,60	1018,77	1770,12	2286,23
	3,99	-1105,45	-1,78	-1349,00	832,42	1737,76	2424,59
	5,10	-1158,52	194,03	-1467,10	622,52	1708,71	2570,65
1012	0,00	-937,64	-981,74	-1117,35	1702,00	1896,70	1804,15
	1,03	-985,63	-773,78	-1219,74	1441,52	1876,75	1944,48
	2,01	-1039,75	-566,62	-1319,05	1191,20	1843,99	2098,48
	3,01	-1084,18	-354,11	-1420,48	964,34	1825,78	2262,77
	3,99	-1135,24	-153,11	-1515,48	760,98	1789,98	2402,96
	5,00	-1167,46	57,78	-1622,60	565,45	1778,74	2552,09

7,5 kW'lık test generatörü kullanılarak elde edilen ölçüm sonuçları ile Önerilen Model, Kayma Hesabı Temelli Model, Sabit P-Q Model, Sabit P,Q(V+) Model ile hesaplanan generatör toplam aktif/reaktif güç değerlerinin pu değerleri sonuçları Şekil 3.15 ve Şekil 3.16' da verilmiştir.



Şekil 3.15: 7,5 kW' lık asenkron generatörün 1004 d/dk mekanik giriş gücü için a) toplam aktif gücü ve b) toplam reaktif gücü, 1006 d/dk mekanik giriş gücü için c) toplam aktif gücü ve d) toplam reaktif gücü, 1008 d/dk mekanik giriş gücü için e) toplam aktif gücü ve f) toplam reaktif gücünün Önerilen Model, Kayma Hesabı Temelli Model, Sabit P-Q Model, Sabit P,Q(V+) Model ile bulunan pu değerleri.



Şekil 3.16: 7,5 kW'lık asenkron generatörün 1010 d/dk mekanik giriş gücü için a) toplam aktif gücü ve b) toplam reaktif gücü, 1012 d/dk mekanik giriş gücü için c) toplam aktif gücü ve d) toplam reaktif gücünün Önerilen Model, Kayma Hesabı Temelli Model, Sabit P-Q Model, Sabit P,Q(V+) Model ile bulunan pu değerleri.

7,5 kW gücündeki asenkron generatör için modeller ile elde edilen sonuçlardan, 1,5 kW gücündeki asenkron generatör için ulaşılan çıkarımlarla örtüşür şekilde;

- Önerilen Model ve Kayma Hesabı Temelli Modelin ölçüm sonuçlarına yakın ve aynı karakterde toplam aktif ve toplam reaktif güç değişim eğrileri verdiği,
- Önerilen Modelin genel olarak Kayma Hesabı Temelli Modele göre ölçüm sonuçlarına daha yakın sonuçlar ürettiği,
- Sabit P-Q ve Sabit P, Q(V+) modellerinin toplam aktif güç hesabında diğer iki modele göre daha fazla hata yaptığı,
- Sabit P-Q model dışındaki üç modelin toplam reaktif güç hesabında birbirine yakın sonuçlar verdiği ve bu üç modelle hesaplanan toplam reaktif güç değerlerinin ölçüm sonuçlarıyla aynı değişim eğilimini gösterdiği,

ifade edilebilir.

1,5 kW gücündeki asenkron generatörün testinde karşılaşılan sebeplerle, 7,5 kW gücündeki asenkron generatörün testinde de, Tablo 3.8' den görüldüğü üzere aynı rotor hızında B ve C fazı gerilim genlik değerleri için dalgalanmalarının olduğu, ayrıca ölçümler sırasında gerilimlerin V_e değerinin sabit olmadığı ifade edilmelidir. Bu ideal olmayan durumların olmasına karşın yine de 7,5 kW gücündeki asenkron generatör için elde edilen test ve analiz sonuçlarından önerilen modelin ölçüm sonuçlarına yakın ve tutarlı sonuçlar verdiği görülmektedir.

3.5. Sonuç ve Değerlendirme

Çalışmanın bu kısmında Önerilen Modelin tanıtımı yapılmış, Önerilen Model ile literatürde dengesiz 3 fazlı güç akışı analizlerinde asenkron generatörlü rüzgar türbin modeli olarak sıklıkla tercih edilen Kayma Hesabı Temelli Model [6], Sabit P-Q Model [5], Sabit P,Q(V+) Model [5]' in karşılaştırmalı hassasiyet analizlerine yer verilmiştir.

Modeller ile gerçekleştirilen hassasiyet analizlerinin ilki Matlab/Simulink programında var olan 160 kW gücündeki asenkron generatör d-q modeli referans alınarak gerçekleştirilen benzetim temelli analizdir. Bu benzetim temelli analiz iki farklı senaryo kurgulanarak gerçekleştirilmiştir. Bu senaryolardan ilki; generatörün anma gücüne eşit mekanik giriş gücüyle sürüldüğü, terminal geriliminin kollektif etkin değerinin (V_e) generatörün anma gerilimine eşit olduğu şartlarda, farklı gerilim dengesizliği (VUF) değerleri için modellerin hassasiyetlerinin irdelendiği durumdur (Senaryo-1). Matlab/Simulink programı ile gerçekleştirilen benzetim temelli analiz senaryolarından ikincisi ise; generatörün anma gücüne eşit mekanik giriş gücüyle sürüldüğü, terminal gerilimlerinin VUF değerinin ise %5' te sabit tutulduğu durum için farklı V_e değerleri altında modellerin hassasiyetlerinin irdelendiği durumdur (Senaryo-2). Analizlerden, her iki senaryoda incelenen dengesiz gerilim şartlarının, asenkron generatörlerin faz aktif / reaktif güçleri üzerinde önemli etkilere sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Gerilim dengesizliğinin, asenkron makinada tork salınımı, nominal faz akımı değerinden daha yüksek faz akımlarının oluşması ile sargılarda aşırı ısınma etkileri sonucunda, makinenin servis süresinin azaldığı ve bakım maliyetlerinin

yükseldiği literatürde iyi bilinmektedir. Yine analiz sonuçlarından Önerilen Model ve Kayma Hesabı Temelli Model ile yapılan hesaplamaların Matlab/Simulink programı ile elde edilen faz güç değerlerine yakın ve aynı karakterde olduğu görülmüştür. d-q model sonuçları referans alındığında, Sabit P-Q ve Sabit P,Q(V+) Modellerinin, Önerilen Model ve Kayma Hesabı Temelli Modele kıyasla faz aktif ve reaktif güçlerinin hesabında önemli derecede hatalı sonuçlar ürettiği görülmüştür. Bu analizler sırasında önerilen model için kritik önem arz eden R_m değeri ulaşılabilir bir değer değildir. Ancak literatürden küçük güçlü asenkron makineler için bu değer makinenin diğer eşdeğer devre parametrelerine oranla büyük bir değerde olduğu bilindiğinden analizler sırasında bu değer 1 MOhm olarak kabul edilmiştir.

Modeller ile gerçekleştirilen hassasiyet analizlerinin ikinci kısmı 1,5kW ve 7,5 kW gücündeki asenkron generatörlerin MOTEST sistemi ve varyaklar kullanılarak farklı giriş güçlerinde ve gerilim dengesizliği durumlarında alınan ölçümlerine dayanan hassasiyet analizleridir. Bu analizler sırasında önerilen model için kritik önem arz eden R_m değeri asenkron makinelere gerçekleştirilen kısa devre – boşa çalışma testleri ile deneysel olarak elde edilmiştir. Bu analiz kapsamında, 1,5 kW gücündeki test generatörü için alınan ölçüm sonuçları dikkate alındığında; Sabit P-Q ve Sabit P,Q(V+) modellerinin özellikle aktif güç hesabında ölçüm sonuçlarına kıyasla önemli derecede hatalı sonuçlar ürettiği ifade edilmelidir. Önerilen Model ve Kayma Hesabı Temelli Model ile elde edilen hesaplama sonuçları ise 1,5 kW gücündeki test generatöründen ölçülen aktif ve reaktif güç değerleri ile yakın ve benzer karakterde sonuçlar vermektedir. Ayrıca Önerilen Modelin genel olarak Kayma Hesabı Temelli Modele kıyasla ölçüm sonuçlarına daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Diğer taraftan, ölçüm temelli model hassasiyet analizlerinin ikinci kısmı olan ve 7,5 kW gücündeki test generatörü ile gerçekleştirilen ölçümlerden, 1,5 kW gücündeki generatör için elde edilen analiz sonuçlarına benzer nitelikte sonuçlar gözlemlenmiştir.

Gerçekleştirilen benzetim ve ölçüm temelli analizlerden genel olarak,

- Literatürde güç akışı analizlerinde sıklıkla tercih edilen Sabit P-Q ve Sabit P,Q(V+) modellerinin generatörün özellikle aktif güç hesabında gerilim dengesizliği değişimi karşısında ihmal edilemeyecek derecede hatalı sonuçlar verdiği görülmüştür.

- Önerilen model ve Kayma Hesabı Temelli modelle elde edilen sonuçların benzetim ve ölçümle elde edilen sonuçlarla benzer karakterde ve yakın değerlerde olduğu görülmüştür.
- Önerilen Model için kritik önem arz eden R_m değerinin asenkron generatörler için ulaşılabilir olması Kayma Hesabı Temelli Modele kıyasla genel olarak ölçüm sonuçlarına daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Ölçümler sırasında her ne kadar terminal gerilimi dengesizlik faktörü (VUF) değeri sabit tutulmuş olsada test sisteminde kullanılan varyakların kısıtı sebebiyle Gerilim Kollektif Etkin Değeri (V_e) sabit tutulamamıştır. Ayrıca kullanılan varyakların şebeke geriliminden beslenmesi sebebiyle şebekedeki olaylar alınan ölçümleri doğrudan etkilemektedir. Test sisteminin tüm bu zayıf yönüne rağmen elde edilen ölçüm sonuçları ile önerilen model sonuçları örtüşmekte olduğu görülmüştür.
- Kayma hesabı temelli model eşdeğer devresinde çekirdek direncinin ihmal edilmesi ve küçük güçlü makinalarda ihmal edilen bu direncin önemli kayıplara sebep olduğu bilindiğinden bu modelin ölçüm sonuçlarıyla arasındaki farkın sebebi olarak öngörülmüştür.

Böylece önerilen modelin özellikle küçük güçlü asenkron generatörler için kayma hesabı temelli model, Sabit P-Q modeli ve Sabit P, Q(V+) modeline göre hassasiyet bakımından üstün olduğu sunucuna varılmıştır.

4. ÖNERİLEN MODEL VE DİĞER ASENKRON GENERATÖR MODELLERİNİN YÜK AKIŞI TEST SİSTEMLERİNDE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Bu bölümde detayları önceki bölümlerde sunulan ve Tez Çalışması Kapsamında Önerilen Model [120] (Model 1) ile birlikte literatürde yer alan pozitif ve negatif sıra eşdeğer devrelerinin iteratif çözümüne dayalı Model [6] (Model 2), Sabit P, Q(V+) Modeli [5] (Model 3) ve Sabit P-Q Modeli [5] (Model 4) olmak üzere 4 model çeşitli test sistemleri için OpenDSS programında [7] yük akışı analizine dâhil edilmiş ve sonuçların doğrulukları karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu modellerin işlem yükleri ile iterasyon sayıları incelenmiştir.

4.1. OpenDSS Tanıtımı

OpenDSS, 1997’ de Electrotec Concepts tarafından dağıtık üretim açısından dağıtım sistemlerinin planlanması, esnek bir araştırma platformu oluşturmak amacıyla geliştirilen açık kaynak kodlu metin tabanlı ve nesne yönelimli benzetim programıdır. Oluşturulan OpenDSS platformu, 2004 yılında “Electric Power Research Institute” (EPRI) kurumu tarafından satın alınmıştır. Bu programın kaynak kodları DELPHI ile oluşturulmuştur. OpenDSS, bağımsız EXE uygulaması şeklinde kullanıldığı gibi DLL gibi kütüphane dosyaları aracılığı ile Excel, MATLAB gibi programlarda nesne yönelimli olarak kullanılabilir [121].

OpenDSS programı ile yapılan uygulamalardan bazıları;

- Dağıtım sistemlerinde kısa devre, yük akışı, optimal yük akışı analizlerinin gerçekleştirilmesi,
- Dengesiz yüklenme altında kayıp hesabının yapılması,
- Geliştirilen dağıtık generatör modellerinin herhangi bir dağıtım sistemine uygulanması
- Transformatörün frekans cevabı analizi,
- Dağıtım otomasyonu kontrol algoritmalarının incelenmesi,
- Rüzgâr çiftliğinin, mahallî iletim sistemine etkisi,

- Rüzgâr gücü ile üretimin, anahtarlamalı kapasitörlere ve gerilim düzenleyicilerine etkisi,
- Yüksek frekans harmonikleri ve ara harmoniklerin etkileşiminin incelenmesi.

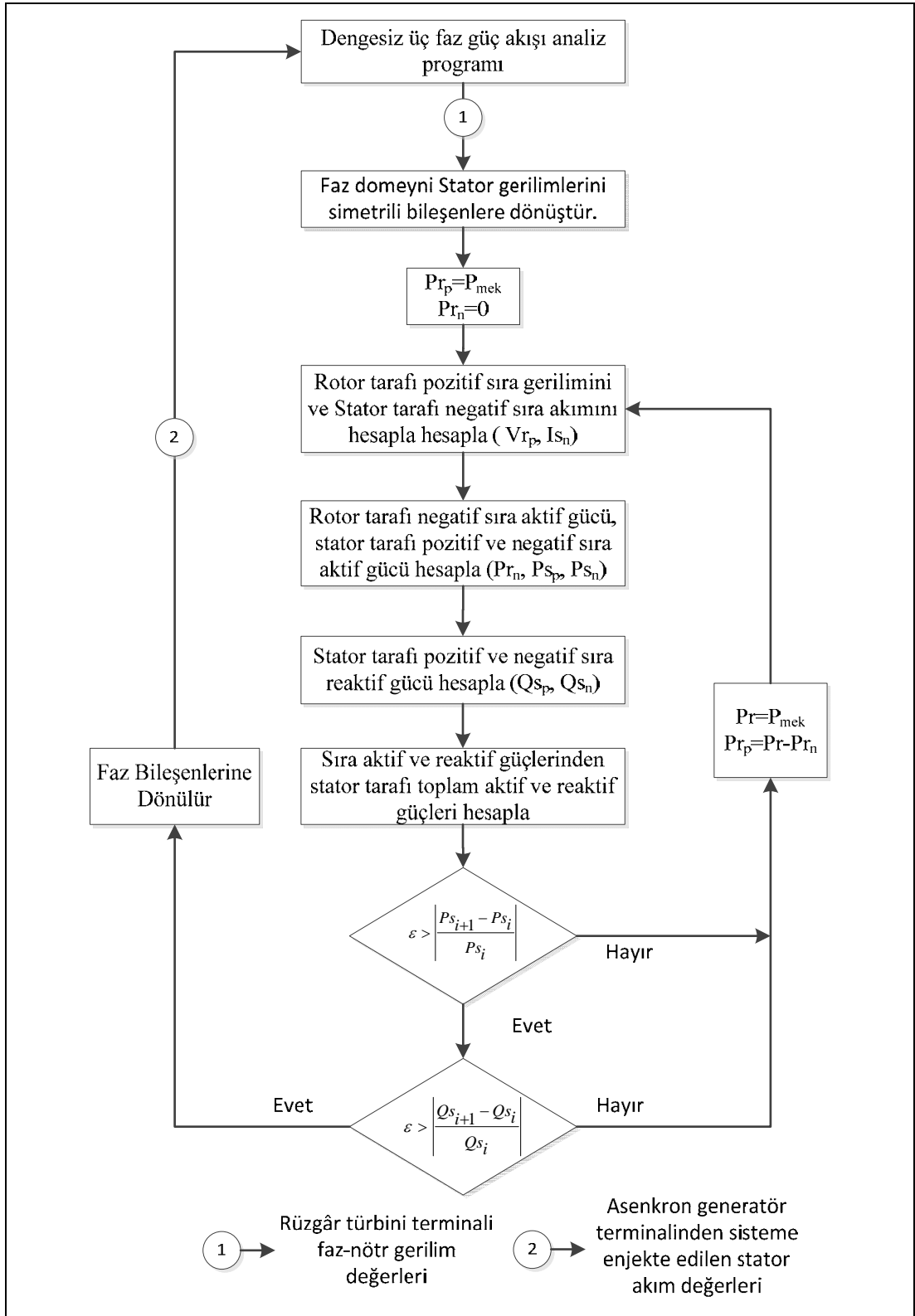
olarak sıralanabilir.

OpenDSS programının ücretsiz ve çok sayıda eleman modelini hazırda barındırması, kullanıcıların geliştirdiği model veya metotların analizlere dahil edilmesine izin veren esnek yapıya sahip olması, geliştirilen dağıtık generatör modellerinin herhangi bir dağıtım sistemine uygulanmasında sağladığı esneklik ve yük akışı analizleri için birçok IEEE test senaryolarını hâlihazırda bulundurması, bu programın önemli avantajlarıdır [121]. Bu avantajlar sebebiyle, tez kapsamında çalışan yük akışı analizleri OpenDSS programı ile gerçekleştirilmiştir.

4.2. Önerilen Modelin OpenDSS Yük Akışı Programına Adaptasyonu

Önerilen modelin yük akışı analizine dâhil edilebilmesi için oluşturulan algoritma, temel olarak iki iteratif bloktan oluşmaktadır. Bunlardan bir tanesi dengesiz üç faz yük akışı bloğu, diğeri ise asenkron generatör için oluşturulan iterasyon bloğudur. Dağıtım sistemleri genellikle radyal yapıya sahip olduğundan, bu sistemlerin dengesiz üç faz yük akışı analizi için literatürde sweep (süpürme) temelli algoritmalar kullanılmıştır [100]. Burada dengesiz üç fazlı yük akışı detayları anlatılmamıştır.

Bu tez çalışması kapsamında Önerilen modelin yük akışı analizine uygulanabilmesi için izlenen akış diyagramı Şekil 4.1' de verilmiştir. Bu akış diyagramında öncelikle hat empedansları, yük güçleri, transformatör ve generatör bilgileri gibi gerekli veriler tanıtılır ve bara gerilimleri için başlangıç değerleri atanır. Daha sonra dengesiz üç faz yük akışı iterasyonu gerçekleştirilir. Böylelikle asenkron makine için oluşturulan iterasyon bloğunda (Makine İterasyon Bloğu) kullanılmak üzere stator gerilimleri elde edilmiş olur. Faz domeyni stator gerilimleri pozitif ve negatif sıra bileşenlerine ayrılır. Bu veri akışı Şekil 4.1' de 1 numara ile belirtilmiştir.



Şekil 4.1: Önerilen modelin güç akışı analizine uygulanması için geliştirilen akış diyagramı.

Makine İterasyonuna başlamadan önce modelde rotor tarafına ait pozitif sıra aktif gücünün (P_{rp}), mekanik güce (P_{mek}) eşit olduğu kabulü yapılır. Rotor tarafı negatif sıra aktif gücü (P_{rn}) için başlangıç değeri sıfır kabul edilir. Makine iterasyon bloğunun ilk adımında pozitif sıra rotor gerilimi (V_{rp}) ve ardından negatif sıra stator akımı (I_{sn}) hesaplanır. Bu değerler elde edildikten sonra rotor tarafı negatif sıra aktif güç ve stator tarafı pozitif-negatif sıra aktif güç değerleri belirlenir (P_{rn} , P_{sp} , P_{sn}). Aynı şekilde stator tarafı pozitif ile negatif sıra reaktif güç (Q_{rn} , Q_{sp} , Q_{sn}) değerleri hesaplanır. Böylece, simetrik bileşenler tanım bölgesinde rotor ve stator tarafına ait aktif ve reaktif güç değerleri elde edilmiş olur. Devamında, stator tarafı üç faz toplam aktif ve reaktif güçleri, pozitif ve negatif sıra aktif ve reaktif güçlerin toplamının üç katı şeklinde hesaplanır. (P_s , Q_s). Bir önceki iterasyondan elde edilen P_s ve Q_s değerleri ile içinde bulunulan mevcut iterasyon sonrasında hesaplanan P_s ve Q_s değerleri karşılaştırılır. Hata tolerans değerleri içinde ise makine iterasyonu sonlandırılır. Eğer hata, tolerans değerleri dışında ise en son hesaplanan rotor negatif sıra aktif gücüne (P_{rn}) göre rotor pozitif sıra aktif gücü (P_{rp}) güncellenip V_{rp} ile I_{rn} değerlerinin hesaplandığı adıma geri dönlür. Stator tarafı gerilim ve güç değerleri ile asenkron generatör terminalinden sisteme enjekte edilen stator akımları belirlenir. Dengesiz yük akışı iterasyonunda bu akım değerleri kullanılarak bara gerilimleri yeniden hesaplanır. İki iterasyon bloğu arasındaki veri akışı Şekil 4.1' de 2 numara ile gösterilmiştir. Eğer dengesiz güç akışı iterasyonu yakınsıyorsa program sonlandırılır. Algoritmaya ait OpenDSS kodlarına bu çalışmanın türetildiği proje raporundan [112] ulaşılabilir.

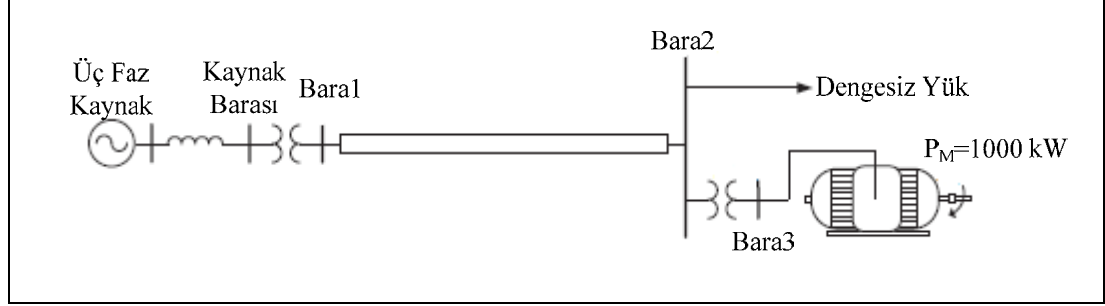
4.3. Radyal Dağıtım Test Sistemleri

Bu kısımda, yük akışı analizlerinde dikkate alınan IEEE tarafından hazırlanan 4, 34 ve 123 baralı test sistemleri tanıtılacaktır.

4.3.1. 4 Baralı Test Sistemi

IEEE tarafından hazırlanan 4 baralı test sistemi, üçgen-yıldız bağlı transformatör, iki mil uzunluğunda çaprazlanmamış bir havai iletim hattı, 1000 kW

asenكرون motor ve dengesiz yükün bulunduğu basit bir radyal sistemden oluşmaktadır [122]. Sistemin tek hat şeması Şekil 4.2' de verilmiştir.



Şekil 4.2: Önerilen 4 baralı radyal test sistemi.

4 baralı test sisteminde yer alan kısımlar aşağıda maddeler halinde verilerek kısaca tanıtılmıştır.

- Kaynak Eşdeğeri

Üç faz yıldız bağlı kaynak 115 kV etiket değerine sahip olup sağladığı gerilim 1.05 pu değerindedir. Anma frekansı 60 Hz'dir. Kaynağa ait sıra empedansları Tablo 4.1' de verilmiştir.

Tablo 4.1: Kaynağa ait sıra empedansları.

R_1	0,16038 Ω
X_1	0,64151 Ω
R_0	0,16977 Ω
X_0	0,50932 Ω

- Besleme Transformatörü

Sistemde 115 kV / 12,47 kV dönüştürme oranına ve 12 MVA güç değerine sahip üçgen-yıldız bağlı bir transformatör kullanılmıştır. Transformatörün pozitif sıra direnç ve reaktans değeri sırası ile %1 ve %10' dur. Sıfır sıra empedansı pozitif sıra empedansı ile aynı değerlerde kabul edilmiştir.

- Havai Hat

Test sisteminde havai hat pi eşdeğer devre şeklinde modellenmiştir. Hattın empedans ve kapasite değerleri dengesiz olup seri empedans ([Z]) ve şönt kapasitans ([C]) matrisi aşağıda verilmiştir.

$$Z = \begin{bmatrix} 0,284928 + i0,664518 & 0,097871 + i0,277956 & 0,094778 + i0,235945 \\ 0,097871 + i0,277956 & 0,291329 + i0,643520 & 0,097871 + i0,277956 \\ 0,094778 + i0,235945 & 0,097871 + i0,277956 & 0,284928 + i0,664518 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Ω/km

$$Z = \begin{bmatrix} 8,989 & -2,297 & -1,115 \\ -2,297 & 9,711 & -2,329 \\ -1,115 & -2,329 & 8,989 \end{bmatrix} \text{nF/km} \quad (4.2)$$

- Dengesiz Yük

Sistemde yıldız bağlı üç faz yük kullanılmıştır. Her bir fazın güç ve güç faktörü değerleri Tablo 4.2' de verilmiştir.

Tablo 4.2: Dengesiz yüke ait aktif güçler ve güç faktörleri.

Faz	Güç (kW)	Güç Faktörü
A	2000	0,95
B	1500	0,95
C	1000	0,90

- Motor Servis Transformatörü

Motor Servis transformatörü, 1000 kVA gücünde 12,47 kV / 480 V dönüştürme oranına sahip ve yıldız-yıldız bağlıdır. Her iki yıldız bağlı sargının nötr noktası topraklıdır. Pozitif sıra direnç ve reaktans değerleri sırası ile %1 ve %5 pu' dur. Sıfır sıra empedans değerleri pozitif sıra empedans değerleri ile aynı kabul edilmiştir.

- Motor

Sistemde 3 numaralı baraya bağlı olan üçgen bağlı asenkron motorun anma gerilimi 480 V, anma gücü 1200 kW' tır. T eşdeğer devre parametreleri Tablo 4.3' te verilmiştir. Analizde motorun gücü 1000 kW alınmıştır. Burada önerilen modelin asenkron motorlar için de uygulanabileceğini belirtmemiz gerekir.

Tablo 4.4: Servis transformatörü etiket değerleri.

Anma Gücü	750 kVA
Anma Gerilimi	24,9 / 0,48 kV
R (pu)	% 1
X (pu)	% 5

34 baralı radyal test sisteminde G1 ve G2 baralarına bağlı asenkron generatörlü rüzgâr türbinlerinin çıkış gücü 660 kW olarak kabul edilmiştir. Her iki rüzgâr türbininde kullanılan asenkron makinenin etiket değerleri Tablo 4.5' te verilmiştir.

Tablo 4.5: 34 baralı test sisteminde kullanılan asenkron generatöre ait parametreler.

Anma Gücü (kVA)	660
Anma Gerilimi (V)	480
Rs (Ω)	0,0018501
Xs (Ω)	0,037006
Rr (Ω)	0,0024436
Xr (Ω)	0,04189
Xm (Ω)	1,39636

Bu test sisteminde 814-850 baraları arasında ve 852-832 baraları arasında iki adet regülatör yer almaktadır. Regülatörlerin tap kademeleri Tablo 4.6' da verilmiştir.

Tablo 4.6: Regülatör tap kademeleri.

814-850	Tap kademesi
a	6
b	1
c	0
852-832	
a	6
b	6
c	5

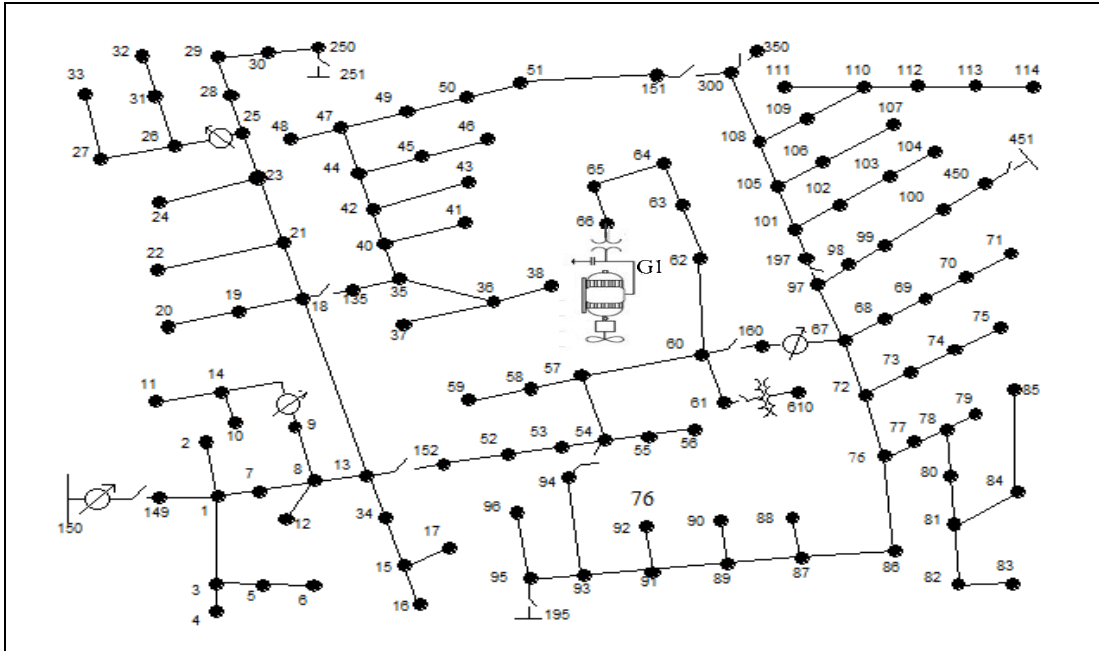
34 baralı test sistemine ait daha detaylı bilgiye [123] no' lu referanstan ulaşılabilir.

4.3.3. 123 Baralı Test Sistemi

IEEE tarafından hazırlanan, 3,8 MVA kurulu güce sahip ve 114 adet yükü bulunan 123 baralı test sistemine ait tek hat şeması Şekil 4.4' te verilmiştir. Bu sistemde yer alan dağıtım hatları, regülatörler, yükler ve transformatörlere ait bilgiler [125] çalışmasında verilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan yük akışı analizlerinde 123 baralı test sisteminde 66 numaralı baraya servis transformatörü ve sonrasında G1 barasına rüzgâr türbini yerleştirilmiştir. 66 numaralı bara ve G1 barası arasında yer alan servis transformatörüne ait etiket değerleri Tablo 4.7' de verilmiştir.

Tablo 4.7: Servis transformatörüne ait etiket değerleri.

Anma Gücü	180 kVA
Anma Gerilimi	4,16 / 0,48 kV
R	%1,27
X	%2,72



Şekil 4.4: Rüzgâr türbinlerinin yerleştirildiği 123 baralı radyal test sistemi.

G1 barasına bağlı rüzgâr türbininde kullanılan asenkron makinenin etiket değerleri Tablo 4.8' de verilmiştir. Bu rüzgâr türbininin Tablo 4.8' de verilen anma gücü değeri göz önüne alınarak asenkron generatörün miline gelen mekanik güç değeri 140 kW olarak kabul edilmiştir.

Tablo 4.8: 123 baralı test sistemine dâhil edilen asenkron generatöre ait parametreler.

AnmaAktif Gücü	150 kW
Anma Gerilimi	480 V
R_s (Ω)	0,0208
X_s (Ω)	0,148
R_r (Ω)	0,0154
X_r (Ω)	0,153
X_m (Ω)	3,75

Ayrıca 123 baralı test sisteminde 4 adet regülatör yer almaktadır. Bu regülatörlere ait tap kademeleri Tablo 4.9' da verilmiştir.

Tablo 4.9: Regülatör Tap Kademeleri.

150-149	Tap kademesi
a	7
9-14	
a	-1
25-25	
a	0
c	-1
160-67	
a	8
b	1
c	5

4.4. Modellerin Radyal Dağıtım Test Sistemleri ile Analiz Sonuçları

Bu kısımda, önerilen rüzgâr türbinli asenkron generatör modeli (Model 1 [120]) ve literatürde yük akışı çalışmalarında kullanılan diğer rüzgâr türbinli asenkron generatör modellerinin (Model 2 [6], Model 3 [5] ve Model 4 [5]), 4 baralı, IEEE 34 ve IEEE 123 baralı radyal dağıtım test sistemleri için yük akışı analiz sonuçları sunulmuştur. Dört farklı model kullanılarak dengesiz sistem şartları için elde edilen bu yük akışı sonuçları karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.

4.4.1. 4 Baralı Test Sistemi Sonuçları

Asenkron motor yükü bulunduran 4 baralı radyal test sistemi için modellerle gerçekleştirilen yük akışı sonucunda elde edilen bara gerilimlerine ait genlik ve açı değerleri her bir model için Tablo 4.10' da verilmiştir. [122] referansında verilen bara gerilim genlik sonuçları referans alınarak hesaplanan hata oranları Tablo 4.11' de gösterilmiştir. Tablo 4.11' de verilen hata oranları incelendiğinde A fazına ait en büyük hata oranlarının; model 1 ve model 2 için %0,19, model 3 için %0,32 ve model 4 için %0,37 olduğu görülmektedir. B fazı ile ilgili olarak model 1 ve model 2 için en büyük hata oranının %0,06, model 3 için %0,12 ve model 4 için %0,17 olduğu belirlenmiştir. Son olarak C fazı ile ilgili hata oranlarına bakıldığında en büyük hata oranlarının model 1 için %0,06, model 2 için %0,04, model 3 için %0,61 ve model 4 için %0,56 olduğu görülmektedir.

Tablo 4.10: 4 baralı test sisteminde gerilim genlik (pu) ve açı (°) değerleri için model sonuçları.

Faz Adı	Bara Adı	TEST SİSTEMİ SONUCU [122]		MODEL1		MODEL2		MODEL3		MODEL4	
		Genlik	Açı	Genlik	Açı	Genlik	Açı	Genlik	Açı	Genlik	Açı
A	Kaynak Barası	1,0498	0,0	1,0498	0	1,0498	0	1,0498	0	1,0498	0,0
	Bara1	1,0172	-33,1	1,0173	-33,1	1,0173	-33,1	1,0171	-33,1	1,0171	-33,1
	Bara2	0,9458	-36,4	0,9463	-36,4	0,9463	-36,4	0,9459	-36,4	0,9458	-36,4
	Bara3	0,9129	-39,2	0,9112	-39,2	0,9112	-39,2	0,9100	-39,4	0,9095	-39,4
B	Kaynak Barası	1,0498	-120,0	1,0498	-120,0	1,0498	-120,0	1,0498	-120,0	1,0498	-120,0
	Bara1	1,0258	-152,4	1,0257	-152,4	1,0256	-152,4	1,0255	-152,4	1,0254	-152,4
	Bara2	1,0041	-154,9	1,0035	-154,9	1,0035	-154,9	1,0033	-154,8	1,0032	-154,8
	Bara3	0,9671	-157,8	0,9675	-157,8	0,9675	-157,8	0,9660	-157,5	0,9655	-157,5
C	Kaynak Barası	1,0498	120,0	1,0498	120,0	1,0498	120,0	1,0498	120,0	1,0498	120,0
	Bara1	1,0280	88,3	1,0279	88,3	1,0279	88,3	1,0286	88,3	1,0285	88,3
	Bara2	1,0001	87,7	1,0000	87,7	0,9999	87,7	1,0014	87,7	1,0013	87,7
	Bara3	0,9562	85,0	0,9569	85,0	0,9566	85,0	0,9621	85,0	0,9616	85,0

Tablo 4.11: 4 baralı sistemde faz gerilim genlikleri için modellerin hata oranları.

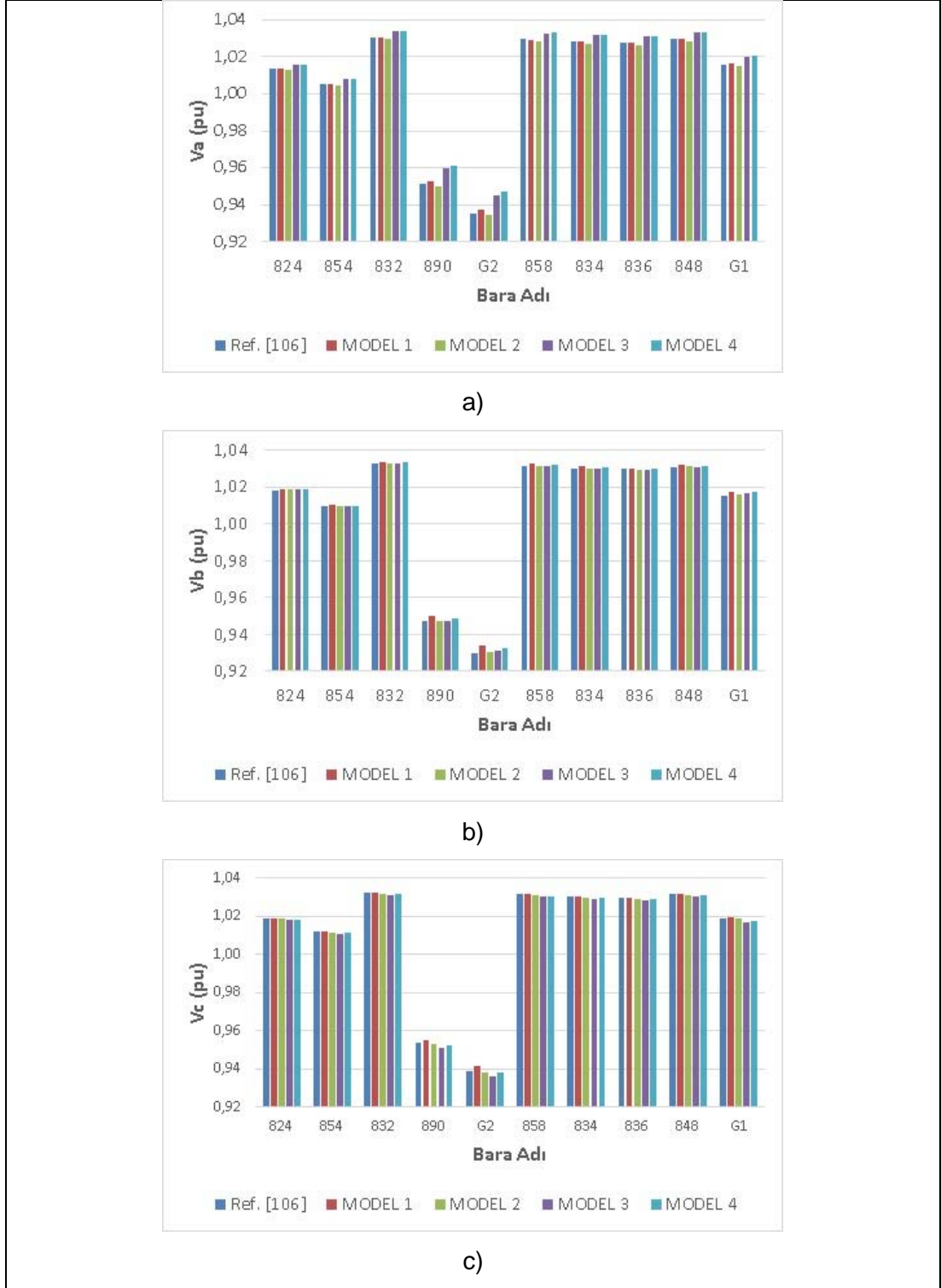
Faz Adı	Bara Adı	MODEL1	MODEL2	MODEL3	MODEL4
A	Kaynak Barası	%0,00	%0,00	%0,00	%0,00
	Bara1	%0,01	%0,01	%0,00	%0,00
	Bara2	%0,06	%0,06	%0,00	%0,00
	Bara3	%0,19	%0,19	%0,32	%0,37
B	Kaynak Barası	%0,00	%0,00	%0,00	%0,00
	Bara1	%0,01	%0,02	%0,03	%0,04
	Bara2	%0,06	%0,06	%0,08	%0,09
	Bara3	%0,05	%0,04	%0,12	%0,17
C	Kaynak Barası	%0,00	%0,00	%0,00	%0,00
	Bara1	%0,00	%0,01	%0,06	%0,05
	Bara2	%0,00	%0,01	%0,13	%0,12
	Bara3	%0,06	%0,04	%0,61	%0,56

4 baralı test sistemi için yapılan analiz neticesinde önerilen modelin motor modunda çalıştırılması ile elde edilen sonuçların asenkron motorun dinamik model ile modellendiği [122] çalışmasında verilen referans sonuçlarıyla uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca, burada önerilen modelin ve Kaymanın İteratif Olarak Hesaplandığı modelin motor modunda birbirine yakın sonuçlar verdiği ve basit iki modele kıyasla daha küçük hatalar yaptığı ifade edilmelidir.

4.4.2. 34 Baralı Test Sistemi Sonuçları

Motor modu için doğru sonuçlar ürettiği tespit edilen önerilen modelin generatör modu için performansının değerlendirilmesi amacıyla 34 baralı radyal dağıtım test sisteminde [123] önerilen model ve diğer modellerle yük akışı analizleri gerçekleştirilmiştir.

Yük akışı analizi sonucunda A, B ve C fazları için generatör barasına yakın baralar olan 824, 854, 832, 890, G2, 858, 834, 836, 848, G1 baraları için elde edilen gerilim genliklerinin grafikleri ve ilgili baralar için [124]' te verilen sonuçlar Şekil 4.5 a), b) ve c) 'de verilmiştir.



Şekil 4.5: 34 baralı test sisteminde generatörlere yakın baralar için modellerin a) A fazı, b) B fazı, c) C fazı gerilim genlik sonuçları.

İlgili baralar için [124]' te verilen gerilim genliklerine ait sonuçlar referans alınarak modellerin hata oranları hesaplanmış ve bu oranlar A, B ve C fazları için sırası ile Tablo 4.12, Tablo 4.13 ve Tablo 4.14' te verilmiştir.

Tablo 4.12: 34 baralı sistemde ilgili baraların A fazı gerilim genlikleri için modellerin % hata oranları.

Bara Adı	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3	MODEL 4
824	%0,00	%0,06	%0,19	%0,22
854	%0,01	%0,09	%0,23	%0,26
832	%0,03	%0,13	%0,29	%0,33
890	%0,13	%0,14	%0,88	%1,03
G2	%0,24	%0,10	%1,06	%1,26
858	%0,04	%0,13	%0,30	%0,34
834	%0,04	%0,13	%0,30	%0,34
836	%0,04	%0,13	%0,30	%0,34
848	%0,04	%0,14	%0,31	%0,35
G1	%0,02	%0,11	%0,41	%0,45

Tablo 4.13: 34 baralı sistemde ilgili baraların B fazı gerilim genlikleri için modellerin % hata oranları.

Bara Adı	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3	MODEL 4
824	%0,09	%0,04	%0,04	%0,06
854	%0,10	%0,03	%0,03	%0,06
832	%0,12	%0,04	%0,03	%0,07
890	%0,32	%0,05	%0,04	%0,21
G2	%0,42	%0,10	%0,11	%0,32
858	%0,12	%0,04	%0,03	%0,07
834	%0,13	%0,04	%0,03	%0,07
836	%0,03	%0,06	%0,07	%0,03
848	%0,12	%0,04	%0,02	%0,06
G1	%0,17	%0,06	%0,11	%0,15

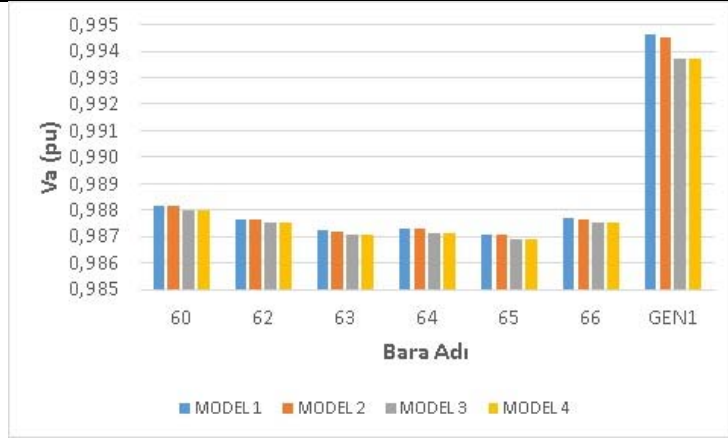
Tablo 4.14: 34 baralı sistemde ilgili baraların C fazı gerilim genlikleri için modellerin % hata oranları.

Bara Adı	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3	MODEL 4
824	%0,01	%0,03	%0,09	%0,07
854	%0,01	%0,05	%0,11	%0,08
832	%0,01	%0,07	%0,14	%0,10
890	%0,18	%0,07	%0,24	%0,08
G2	%0,28	%0,02	%0,27	%0,06
858	%0,00	%0,07	%0,15	%0,11
834	%0,00	%0,07	%0,15	%0,11
836	%0,00	%0,07	%0,15	%0,11
848	%0,00	%0,07	%0,15	%0,11
G1	%0,05	%0,05	%0,23	%0,19

[124]' te verilen yük akışı analizi sonuçları asenkron makinenin dinamik modeli kullanılarak generatör modda çalıştırılması ile elde edilmiş sonuçlardır. Generatör modda çalıştırılan modellerin yük akışı analizine uygulanması ile elde edilen bara gerilimleri ilgili baralar için [124]' te verilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında A fazı için Tablo 4.12' de en büyük hata oranı Model 1 için %0,24, Model 2 için %0,14, Model 3 için %1,06 ve Model 4 için %1,26 değerinde olduğu görülmektedir. Tablo 4.13' te B fazı için Model 1' e ait en büyük hata oranı %0,42 iken Model 2 için bu değer %0,10, Model 3 için %0,11 ve Model 4 için %0,32' dir. C fazı için Tablo 4.14' teki hata oranları incelendiğinde en büyük hata oranı Model 1 için %0,28, Model 2 için %0,07, Model 3 için %0,27 ve Model 4 için %0,19' dur. Tablo 4.12, Tablo 4.13 ve Tablo 4.14' te verilen hata oranları birlikte incelendiğinde en büyük hata oranına sahip modellerin Model 3 ve Model 4' le elde edilen sonuçlarda olduğu görülmüştür. Model 1 ve Model 2 ise ilgili baralar için Model 3 ve Model 4' e kıyasla [124]' te verilen sonuçlara daha yakın sonuçlar vermiştir. 34 baralı radyal dağıtım test sisteminde gerçekleştirilen ve önerilen modelin generatör modu için geçerliliğinin test edildiği yük akışı analizi sonucunda generatör modu için önerilen modelin tutarlı sonuçlar ürettiği görüşüne varılmıştır.

4.4.3. 123 Baralı Test Sistemi Sonuçları

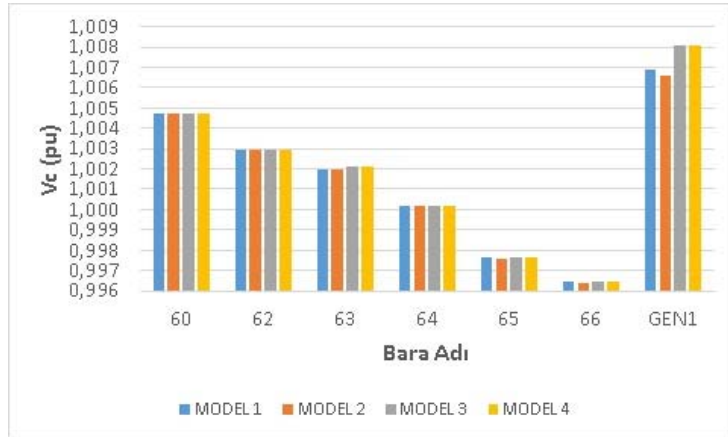
Motor ve generatör modu için 4 bara ve 34 bara test sisteminde yapılan analizlerle doğru sonuçlar ürettiği tespit edilen önerilen modelin ve diğer 3 modelin büyük test sisteminde performansının incelenmesi amacıyla ulaşılabilen en büyük test sistemi olan 3,8 MVA sistem gücü olan 123 baralı radyal dağıtım test sisteminde [125] yük akışı analizi gerçekleştirilmiştir. [125]' te model performanslarının karşılaştırılabileceği generatör kullanılarak yapılan bir analiz sonucu verilmemiştir. Test sisteminde 66 numaralı baraya servis transformatörü ve sonrasında G1 barasına rüzgâr türbini yerleştirilerek bir analiz gerçekleştirilmiştir Yapılan yük akışı analizi sonucunda generatör barasına yakın baralar olan 60, 62, 63, 64, 65, 66 ve GEN1 baralarına ait A, B ve C fazları için gerilim genliklerinin grafikleri sırası ile Şekil 4.6 a), b) ve c)' de verilmiştir.



a)



b)



c)

Şekil 4.6: 123 baralı test sisteminde generatöre yakın baralar için modellerin a) A fazı, b) B fazı, c) C fazı gerilim genlik sonuçları.

Bu grafikler incelendiğinde GEN1 barası için Model 3 ve Model 4 ile elde edilen A ve B fazları sonuçları Model 1 ve Model 2 ile elde edilen sonuçlara göre daha yüksek değerler verirken C fazı için Model 1 ve Model 2' ye göre daha düşük sonuç vermiştir Daha önce belirtildiği gibi [125]' te modellerin hata analizlerinde referans olarak alınabilecek bir sonuç bulunmadığı için burada Model 2 ile elde edilen sonuçlar referans alınarak modeller arası bir karşılaştırma yapılmıştır. A, B ve C fazları için Modeller ile elde edilen sonuçların Model 2 ile karşılaştırma sonuçları Tablo 4.15 - Tablo 4.17' de verilmiştir.

Tablo 4.15: 123 baralı test sisteminde ilgili baralar için modellerin A fazı gerilim genlik sonuçlarının Model 2 ile % farkları.

Bara Adı	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3	MODEL 4
60	%0,001	%0	-%0,013	-%0,013
62	%0,002	%0	-%0,013	-%0,013
63	%0,003	%0	-%0,012	-%0,013
64	%0,002	%0	-%0,013	-%0,014
65	%0,002	%0	-%0,014	-%0,015
66	%0,004	%0	-%0,014	-%0,014
GEN1	%0,015	%0	-%0,076	-%0,078

Tablo 4.16: 123 baralı test sisteminde ilgili baralar için modellerin B fazı gerilim genlik sonuçlarının Model 2 ile % farkları.

Bara Adı	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3	MODEL 4
60	%0,001	%0	-%0,013	-%0,013
62	%0,002	%0	-%0,013	-%0,013
63	%0,003	%0	-%0,012	-%0,013
64	%0,002	%0	-%0,013	-%0,014
65	%0,002	%0	-%0,014	-%0,015
66	%0,004	%0	-%0,014	-%0,014
GEN1	%0,015	%0	-%0,076	-%0,078

Tablo 4.17: 123 baralı test sisteminde ilgili baralar için modellerin C fazı gerilim genlik sonuçlarının Model 2 ile % farkları.

Bara Adı	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3	MODEL 4
60	%0,000	%0	%0,000	%0,000
62	%0,000	%0	%0,000	%0,000
63	%0,000	%0	%0,010	%0,010
64	%0,000	%0	%0,000	%0,000
65	%0,004	%0	%0,004	%0,004
66	%0,004	%0	%0,004	%0,004
GEN1	%0,030	%0	%0,149	%0,149

İlgili baralar için A, B ve C fazlarına ait gerilim genlik sonuçlarının verildiği Tablo 4.15, Tablo 4.16 ve Tablo 4.17 dikkate alındığında Model 1' in Model 3 ve 4' e kıyasla Model 2' ye daha yakın sonuçlar verdiği ifade edilebilir. Şayet test sisteminde gerçekleştirilen analizde sisteme kurulu gücüne yakın değerlerde yüklenme durumu analiz edilecek olursa Model 1' in Model 3 ve Model 4 'e göre üstünlüğü daha iyi vurgulanabilir.

4.5. Modellerin Radyal Dağıtım Test Sistemlerinde İşlem ve İterasyon Sayısı Performansları

Önceki bölümlerde doğrulukları incelenen dört modelin yük akışı performansları, iterasyon sayıları ve modellerde kullanılan 5 temel işlemin (toplama, çarpma, çıkarma, bölme ve karekök alma) kullanılma sıklıkları bakımından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Bu modeller, kullanılan radyal dağıtım test sistemlerine göre iterasyon sayıları bakımından karşılaştırmaları Tablo 4.18' de verilmiştir. Tablo 4.18' de modellerin uygulandığı yük akışı analizinde iterasyon sayıları iki farklı açıdan ele alınmıştır. Bunlardan birincisi genel iterasyon sayısı, diğeri ise azami makine iterasyonu sayısıdır. Genel iterasyon sayısı yük akışı çözümüne ulaşılabilmesi (yük akışı çözümünde yakınsama koşulunun sağlanabilmesi) için gerekli iterasyon sayısını, azami makine iterasyonu ise yük akışı iterasyonu içerisinde makineye ait çözümün yakınsama kriterini sağlama için gerekli olan iterasyon sayısını temsil etmektedir.

Basit yapılı modeller olan Model 3 ve Model 4 makine iterasyonuna gerek duymamaktadır.

Tablo 4.18: Modellerin örnek radyal dağıtım test sistemleri için iterasyon sayıları.

		IEEE Test Sistemi		
		4 Bara	34 Bara	123 Bara
Model 1	Genel İterasyon	5	11	4
	Azami Makine İterasyonu	1	1	1
Model 2	Genel İterasyon	5	12	4
	Azami Makine İterasyonu	5	6	5
Model 3	Genel İterasyon	5	10	4
	Azami Makine İterasyonu	-	-	-
Model 4	Genel İterasyon	5	9	4
	Azami Makine İterasyonu	-	-	-

Tablo 4.18’ de aynı test sistemi için modellere göre iterasyon sayılarının birbirine yakın olduğu görülmektedir. 4 baralı sistemde bütün modeller için 5 genel iterasyon sonunda analiz sonlandırılırken, 34 baralı sistemde Model 1 için 11, Model 2 için 12, Model 3 için 10 ve Model 4 için 9 iterasyonda analiz sonlandırılmıştır. 123 baralı sistemde ise bütün modeller için yük akışı çözümü 4 iterasyonda yakınsamıştır. Diğer taraftan, Model 1’ in azami makine iterasyon sayıları tüm test sistemleri için 1 iken, Model 2’ nin 4 baralı, IEEE 34 baralı ve IEEE 123 baralı test sistemleri için azami makine iterasyon sayıları sırasıyla 5, 6 ve 5’ tir.

Bir genel iterasyon ve bir makine iterasyonu için metotlarda temel işlemlerin kullanılma sayıları Tablo 4.19’ da verilmiştir.

Tablo 4.19: Modellerin yük akışına uygulanması için kullanılması gereken işlem sayıları.

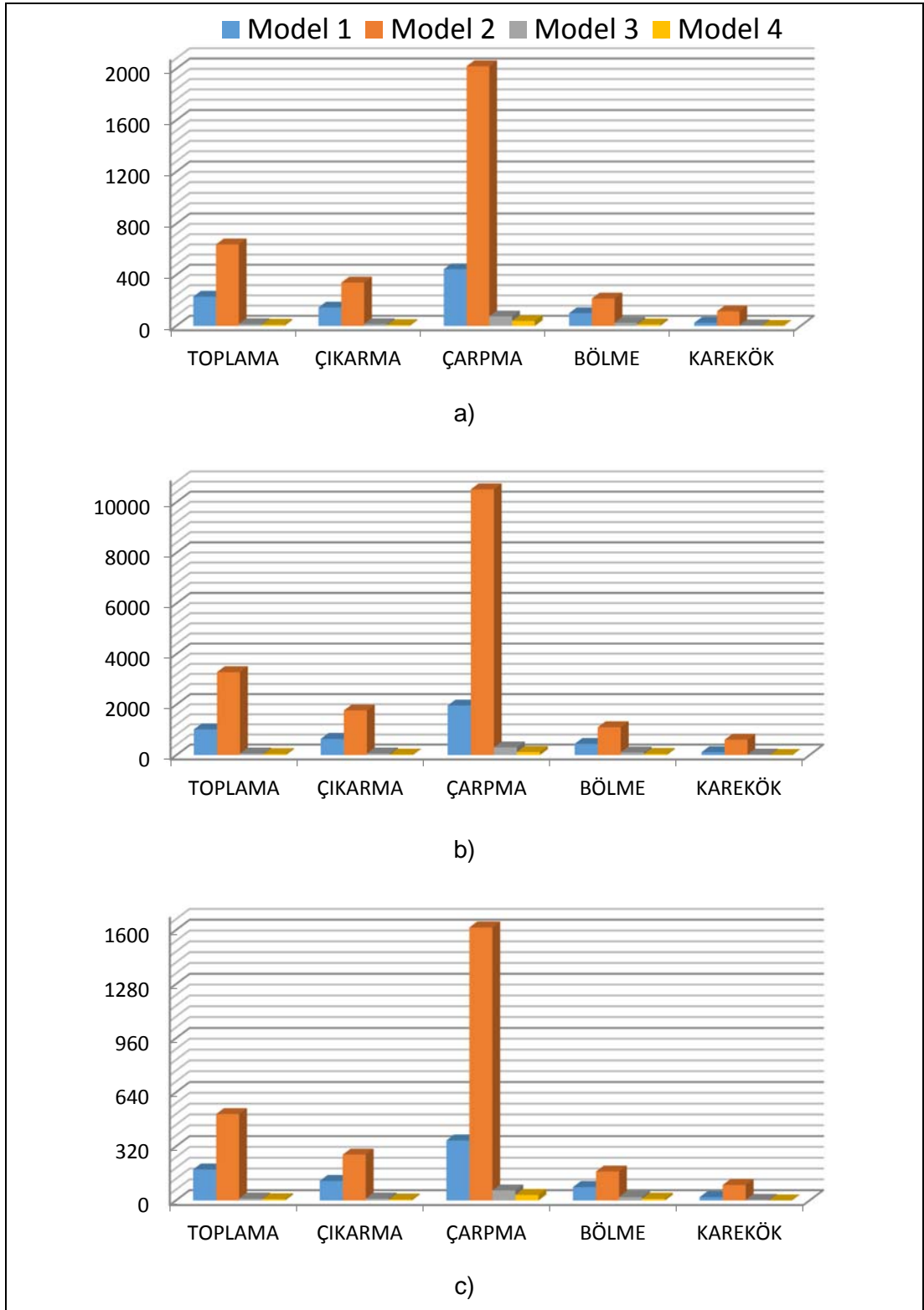
	MODEL1		MODEL2		MODEL3		MODEL4*	
	1 Genel İterasyon için	1 Makine İterasyonu	1 Genel İterasyon için	1 Makine İterasyonu	1 Genel İterasyon için	1 Makine İterasyonu	1 Genel İterasyon için	1 Makine İterasyonu
TOPLAMA	46	42	64	16	3	-	2	-
ÇIKARMA	29	29	28	10	3	-	1	-
ÇARPMA	89	85	156	62	15	-	6	-
BÖLME	20	20	23	5	5	-	2	-
KAREKÖK	5	3	7	4	1	-	-	-

(*: Model 4 için Generatöre ait sabit reaktif güç değerinin güç akışı başında bir kere hesaplanması için belli işlemlerin yapılması gerekir. Tablodaki değerlere bu işlemlerin sayısı dâhil değildir.)

Model 3 ve Model 4 iteratif olmayan ve karmaşık matematiksel işlemler gerektirmeyen ilkel modellerdir. Tablo 4.19' daki değerlere bakıldığında daha karmaşık ifadeler ve iteratif yapıya sahip Model 1 ve Model 2 karşılaştırıldığında en karmaşık matematiksel ifadelerin Model 2' de olduğu görülmektedir.

Makine iterasyonu ve genel iterasyon sayısı büyüdükçe generatör modellerini yük akışına uygulayabilmek için Tablo 4.19' daki tek bir iterasyon için kullanılan işlem sayılarının misli nispetinde daha fazla işleme gerek duyulacaktır. Yük akışının yapıldığı sistemde birden fazla YEÜ biriminin modellendiği durumlarda bu çözüm için gerekli olan işlem sayıları daha da artacaktır.

Şekil 4.7' de sırası ile 4, 34 ve 123 baralı sistemlerde yük akışı analizi sonlanana kadar modeller için kullanılan temel işlem sayıları grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.7: a) 4, b) 34, c) 123 baralı sistemde yük akışı analizinde modeller için kullanılan işlem sayısı.

Şekil 4.7' deki grafikler incelendiğinde Model 3 ve Model 4' te beklenildiği gibi diğer iki modele göre daha az işlem yapıldığı görülmektedir. İteratif olan Model 1 ve Model 2 karşılaştırıldığında özellikle çarpma işleminde belirgin bir fark gözükmemektedir. Bu fark, 34 baralı sistemde, iki generatörün yerleştirilmiş olması ve daha fazla iterasyon gerçekleştirilmesinden dolayı daha da açılmaktadır. 123 baralı sistemde de modeller için kullanılan işlem sayıları arasında benzer değişimler göstermektedir.

4.6. Sonuç ve Değerlendirme

Bu bölümde önerilen model ile literatürde yer alan diğer üç modelin, 4, 34 ve 123 baralı radyal dağıtım test sistemlerinde yük akışı performanslarının incelenmesi amacıyla analizler gerçekleştirilmiştir. IEEE 4 ve 34 baralı test sistemlerinde modellerin sonuçlarının karşılaştırılabileceği referans sonuçlar bulunmaktadır. Bu test sistemlerinde gerçekleştirilen analizler sonucunda Model 1 ve Model 2' nin diğer basit modeller olan Model 3 ve Model 4' e göre daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. 123 baralı test sisteminde ise modeller ile elde edilen sonuçların karşılaştırılabileceği bir referans sonuç verilmemiştir. Bu sebeple 123 baralı test sisteminde Model 2 ile elde edilen sonuçlar referans kabul edilmiş, Model 1, Model 3 ve Model 4 ile hesaplanan sonuçlar Model 2 ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. 123 baralı test sisteminde Model 1 ve Model 2 sonuçlarının birbirine yakın olduğu, Model 3 ve Model 4' ün ise daha hatalı sonuçlar oluşturduğu görülmüştür. 123 bara test sisteminin kurulu gücü 3,8 MVA, test sisteminde 66 numaralı baraya servis transformatörü ile ilave edilen asenkron generatörlü rüzgâr türbininin etiket gücü ise 150 kW' tır. Ayrıca analiz sırasında asenkron generatörlü rüzgâr türbininin mekanik giriş gücünün 140 kW olduğu kabul edilmiştir. Test sisteminde yüklenme durumu artırılarak bir analiz gerçekleştirilmesi durumunda Model 1' in Model 3 ve Model 4' e kıyasla üstünlüğü daha kolay vurgulanabilir.

Modeller kullandıkları temel işlem sayılarına göre değerlendirildiğinde Model 1' in Model 2' ye göre daha az temel işlem kullandığı görülmektedir. Bu iki modelin ihtiyaç duydukları temel işlem sayıları arasındaki fark 2 adet generatör bulunduran 34 baralı test sisteminde daha belirgin hale gelmektedir.

5. SONUÇ

Elektrik güç sistemlerinin her geçen gün büyümesi ve karmaşık bir hal alması, işletme, planlama safhalarında ayrıntılı çalışmaların yapılması gerekliliğini ortaya çıkartmıştır. Bu ayrıntılı çalışmalardan en önemlilerinden biri yük akışı çalışmalarıdır. Yük akışı, güç sistemlerinin en iyi şekilde işletilmesi ve kontrolü kadar, gelecekte sistemlerde meydana gelebilecek gelişmelerin planlanması, bakımından da büyük öneme sahiptir. Özellikle dağıtım sistemlerinde SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition - Merkezi Denetleme Kontrol ve Veri Toplama) sistemlerinin kullanımının yaygınlaşması, FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems - Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri) cihazlarının dağıtım sistemlerinde de kullanılması ve bu tesislerinin en uygun yerinin belirlenmesi ihtiyacı gibi sebeplerden ötürü dağıtım sistemlerinde yük akışı bir zorunluluk haline gelmiştir. Ayrıca günümüzde dağıtılmış üretim sistemlerinin yaygın bir şekilde kullanılıyor olması da dağıtım sistemlerinde yük akışı yapılmasının gerekliliğini bir kez daha ortaya koymaktadır. Ancak dağıtım sistemlerinde yüksek X/R oranı, admitans ve Jacobian matrislerinin ill-conditioned matris olması, hatlarda fazlar arasında çaprazlama yapılmaması sebebiyle dengesiz hat empedansının oluşmasının yanında fazların farklı yükleri beslemesi ve tek veya iki fazlı hatlarla elektrik enerjisinin dağıtılması sebepleriyle oluşan dengesiz yüklenme durumları geleneksel yük akışı analizlerinde yakınsama problemini ortaya çıkarmaktadır. Bu sebeplerle, literatürde dağıtım sistemleri için geliştirilmiş özel yük akış algoritmaları bulunmaktadır. Bu algoritmalar en yaygın olanları süpürme (sweep)-temelli algoritmalarlardır. Bu algoritmalar temelde Kirchhoff akım ve gerilim kanunu kullanarak radyal sistemde ileri ve/veya geri yönde yapılan hesaplamalara dayanmaktadır.

Literatürde dengeli dağıtım sistemlerinde yük akışı algoritmalarında uygulanmak üzere şebekeye doğrudan bağlı asenkron generatörlü rüzgâr türbinleri için geliştirilmiş modeller bulunmaktadır. Diğer taraftan, bazı çalışmalarda dengesizliğin makine üzerine etkileri ihmal edilerek, şebekeye doğrudan bağlı asenkron generatörler Sabit P-Q modeliyle dengesiz dağıtım sistemlerinde yük akışına dâhil edilmiştir. Ayrıca, bazı çalışmalarda şebekeye doğrudan bağlı asenkron generatörlü rüzgâr türbinleri sabit P ve gerilimin pozitif sıra bileşenine (V_+) ve makine rezistans-reaktans parametrelerine bağlı Q olarak modellenmiştir. Ancak, bu yaklaşımların dengesiz yük

akışında hatalı sonuçlara yol açtığı [5], [6]' da belirtilmiştir. Ayrıca, [6], [109] çalışmalarında şebekeye doğrudan bağlı asenkron generatörler için pozitif-negatif sıra eşdeğer devrelerin çözümü temelli bir model sunulmuştur. Bu modelde kayma parametresi iteratif olarak bulunmuştur. Bu modelin ifadeleri pozitif ve negatif sıra gerilim-akımlarının fazör değerlerini içermektedir. Dolayısıyla yüksek hesap karmaşasına (computational complexity) sahiptir.

Bu tez çalışmasında şebekeye doğrudan bağlı asenkron generatörlü rüzgâr türbinleri, dengesiz dağıtım sistemlerinin yük akışı analizlerinde kullanılmak üzere modellenmiştir. Bu önerilen yeni model, pozitif ve negatif sıra gerilim bileşenlerinin genliği, makine empedans parametreleri, mekanik giriş gücü cinsinden analitik temelli kapalı ifadelerle sahip bir modeldir. Önerilen modelde, mekanik giriş gücünün pozitif ve negatif sıra devrelerine etkileyen parçaları iteratif olarak güncellenmiştir.

Önerilen model ve yukarıda bahsedilen diğer üç model çeşitli dengesiz gerilim durumlarındaki hassasiyetleri, Matlab-SIMULINK programında verilen 160 kW gücünde bir asenkron generatör için benzetim temelli analizler ile değerlendirilmiştir. Bu analizlerde referans değerler d-q makine modeli ile elde edilerek belirlenmiştir. Ayrıca, önerilen model ve diğer üç modelin hassasiyetleri, laboratuvar ortamında kurulan bir test sistemi ile 1,5 kW ve 7,5 kW gücündeki asenkron generatörler için alınan ölçümler referans kabul edilerek analiz edilmiştir. Bu benzetim ve ölçüm temelli analizlerden iki önemli sonuca ulaşılmıştır. Bu sonuçlar; (i) önerilen modelin dengesiz gerilimler altında asenkron generatörlerin kalıcı hal analizinde güvenilir olduğu ve (ii) sabit P-Q ve sabit P-Q(V+) modellerinin ise dengesizlik altında güç hesabında önemli hatalara yol açtığıdır.

Çalışma kapsamında son olarak; önerilen model ile Sabit P-Q, Sabit P-Q(V+) ve kayma hesabı temelli modelleri, 4 baralı küçük bir test sistemi ile IEEE 34 bara ve IEEE 123 bara test sistemlerinde dengesiz yük akışı için uygulanmıştır. Yük akışı sonuçları modellerin hassasiyetleri ve temel işlem sayıları (toplama, çıkarma, çarpma, bölme, karekök) göz önüne alınarak analiz edilmiştir. Böylece, önerilen modelin dengesiz yük akışında kullanılabilirliği ve diğer modellere göre hesap verimliliği (computational efficiency) gösterilmiştir.

Bu çalışmada gelecekteki araştırmalarda ele alınabilecek iki önemli sınırlama vardır. Bu sınırlamalardan ilki gerçekleştirilen test sisteminde kullanılan varyaklar ile sağlanan gerilim dengesizliği değeri faz gerilim değerinin azaltılması ile elde edilmiştir. Ancak aynı gerilim dengesizliği değerinin, gerilim dengesizlik faktörü

doğası gereği faz geriliminin yükseltilmesiyle de elde edilebilir olduğu bilinmektedir. Ayrıca kullanılan varyaklar ile faz açđ dengesizliği durumu da oluşturulamamıştır. Çalışmanın bir diğer sınırlaması ise küçük güçlü asenkron makinelerde önemli kayıplara sebep olduğu bilinen magnetizasyon direnci (R_m)' nin Matlab/Simulink programında dikkate alınmamış olmasıdır. Benzetim ile elde edilen senaryo sonuçlarının magnetizasyon direnci (R_m)' nin dâhil edilmesiyle güncellenmesi ve önerilen modelin güvenilirliğini daha çok vurgulayacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Karimi M., Shahriari A., Aghamohammadi M. R., Marzooghi H., Terzija V., (2019), “Application of Newton-based load flow methods for determining steady-state condition of well and ill-conditioned power systems: A review”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 113, 298-309.
- [2] Ackermann T., Söder L., (2002), “An overview of wind energy-status 2002”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 6 (1-2), 67–127.
- [3] Kumar R., Saxena D., (2019), “A Literature Review on Methodologies of Fault Location in Distribution System with Distributed Generation”, *Energy Technology*, 8 (3), 1901093.
- [4] Kulworawanichpong T., Sangsarawut P., (2007), “Power Flow Modelling of a Self-excited Induction Generator”, *Proceedings of the World Congress on Engineering*, I, 378-383, London, U.K., 2-4 July.
- [5] Fengli J., Zailin P., Shihong W., Rui H., Yunan Z., (2012), “Power Flow Calculation for Radial Distribution Systems with Distributed Generation”, *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, 1287-1291, Chengdu, China, 5-8 Aug.
- [6] Mahmoud K., Abdel-Akher M., Orabi M., (2010), “Induction generator model for unbalanced distribution power-flow analysis”, *2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2786-2790, Atlanta, GA, 12-16 Sept.
- [7] Web 1, (2020), <https://www.epri.com/pages/sa/openss>, (Erişim tarihi: Ağustos 2020)
- [8] Web 2, (2020), <https://www.embarcadero.com/products/delphi>, (Erişim tarihi: Ağustos 2020).
- [9] Khetrupal P., (2020), “Distributed Generation: A Critical Review of Technologies, Grid Integration Issues, Growth Drivers and Potential Benefits”, *International Journal of Renewable Energy Development*, 9 (2), 189-205.
- [10] Dolenc D.A., (1998), “Distributed Power Generation: A Strategy for a Competitive Energy Industry”, (1), *Gas Research Institute*, Chicago, USA.
- [11] Preston, George T., Rastler D.M., (1996), “Distributed generation: Competitive threat or opportunity?”, *Fortnightly*, 134 (15).
- [12] Cardell J., Tabors R., (1997), “Operation and control in a competitive market: distributed generation in a restructured industry”, *The Energy Journal*,(1), 111-136.

- [13] Ackerman T., Andersson G., Soder L., (2001), "Distributed generation: a definition", *Electrical Power System Research*, 57 (3), 195-204.
- [14] Daly P. A., Morrison J., (2001), "Understanding the Potential Benefits of Distributed Generation on Power Delivery Systems", *Rural Electric Power Conference*, Little Rock, AR, A2/1-A213.
- [15] Karadeniz A., Balcı M. E., (2019), "Fotovoltaik dağıtık üretim birimleri (FV-DÜB): güç kalitesine etkileri, uluslararası güç kalitesi standartları ve FV-DÜB barındıran dağıtım sistemleri için güç kalitesi iyileştirme yöntemleri", *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 21, 882-903.
- [16] Wang S., (2009), "Distributed generation and its effect on distribution network system", *CIREN 2009 - 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution - Part 1*, 1-4, Prague, Czech Republic.
- [17] Eminoglu U., (2007), "Dağıtım Sistemleri İçin Yeni Bir Güç Akışı Algoritmasının Geliştirilmesi", *Doktora Tezi*, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- [18] Alboyacı B., Dursun B., (2005), "Electricity restructuring in Turkey and the share of wind energy production", *Renewable Energy*, 33 (11), 2499-2505.
- [19] Heier S., (1998), "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", *Wiley*.
- [20] Dursun B., Alboyacı B., Gokcol C., (2011), "Optimal wind-hydro solution for the Marmara region of Turkey to meet electricity demand", *Energy*, 36 (2), 864-872.
- [21] Ackermann T., (2005), "Wind Power in Power Systems", *John Wiley & Sons*.
- [22] Hansen L. H., Madsen P. H., Blaabjerg F., Christensen H. C., Lindhard U., Eskildsen K., (2001), "Generators and Power Electronics Technology For Wind Turbines", *The 27th Annual Conference of the IEEE*, 3, 2000 -2005.
- [23] Polinder H., Haan S. W. H., Dubois M. R., Sootweg J. G., (2004), "Basic Operation Principles and Electrical Conversion of Wind Turbines", *NORPIE 2004, Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics*, Trondheim, Norway.
- [24] Uyar M., Gençoğlu M. T., Yıldırım S., (2003), "Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri İçin Generatör Sistemleri", *II. Ulusal Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, YEKSEM2003*, Mersin, 15-18 Ekim
- [25] Muller S., Deicke M., De Doncker, R., (2002), "Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines", *IEEE Industry Applications Magazine*, 8 (3), 26-33.

- [26] Marques J., Pinheiro H., Gründling A., Pinheiro J. R., Hey H. L., (2003), “A Survey on Variable-Speed Wind Turbine System”, 7. Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência - COBEP'03, Fortaleza, Brazil, 732- 738.
- [27] Akhmatov V., Eriksen P. B., (2007), “A large wind power system in almost island operation—a Danish case study”, IEEE Transactions on Power Systems, 22, 937–943.
- [28] ResGaz 1, (2013), EPDK, Elektrik Piyasası Lisans Yönetmeliği, 2 Kasım 2013 tarih ve 28809 sayılı Resmi Gazete
- [29] N. Jenkins, (1995), “Embedded generation”, in Power Engineering Journal, 9 (3), 45-150.
- [30] Kaur G., Bath S. K., Sidhu B. S., (2014), “Comparative Analysis of Load Flow Computational Methods Using MATLAB”, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 03 (04).
- [31] Cakir H., (1986), “Elektrik Güç Sistemlerinin Analizi”, Nesil Matbaacılık, İstanbul.
- [32] Grainger J. J., Stevenson W. D., (1994), “Power System Analysis”, McGraw-Hill, Inc, International Editions.
- [33] Arrilaga J., Arnold C. P., (1990), “Computer Analysis of Power Systems”, John Wiley & Sons Ltd, England.
- [34] Eminoglu U., Dursun B., Hocaoglu M. H., (2009), “Incorporation of a New Wind Turbine Generating System Model into Distribution Systems Load Flow Analysis”, Wind Energy, 12, 375 -390.
- [35] Stevenson W. D., (1982), “Elements of Power System Analysis”, 4th edition, McGraw-Hill: New York.
- [36] Mageshvaran R., Raglend I. J., Yuvaraj V., Rizwankhan P. G., Vijayakumar T., Vijayakumar S., (2008), “Implementation of Non-Traditional Optimization Techniques (PSO, CPSO, HDE) for the Optimal Load Flow Solution”, TENCON2008-2008 IEEE Region 10 Conference, Hyderabad, India, 19-21.
- [37] Elgerd O. L., (2012), “Electric Energy Systems Theory: An Introduction”, 2nd Edition, Mc-Graw-Hill.
- [38] Kothari I. J., Nagrath D. P., (2007), “Modern Power System Analysis”, 3rd Edition, New York.
- [39] Tinney W. G., Hart C. E., (1967), “Power flow solutions by Newton’s method, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems”, PAS-86, 1449–1457.

- [40] Iwamoto S., Tamura Y., (1981), "A load flow calculation method for ill-conditioned power systems", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS- 100 (4), 1736-1743.
- [41] Arrillaga J., Arnold C. P., (1978), "Fast decoupled three-phase load flow", Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm., Distrib., 125 (8), 734-740.
- [42] Chen B. K., Chen M. S., Shoults R. R., Liang C. C., (1990), "Hybrid three-phase load flow", Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm., Distrib., 137 (3), 177-185.
- [43] Chen T. H., Chen M. S., Hwang K. J., Kotas P., Chebli E. A., (1991), "Distribution system power flow analysis-A rigid approach", IEEE Trans. on Power Delivery, 6 (3), 1146–1152.
- [44] Lo K. L., Zhang C., (1993), "Decomposed three-phase power flow solution using the sequence component frame", Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Trans., Distrib., 140 (3), 181-188.
- [45] Zhang X. P., Chen H., (1994), "Asymmetrical three-phase load flow based on symmetrical component theory", Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Trans., Distrib., 141 (3), 248-252.
- [46] Zhang X. P., (1996), "Fast three-phase load flow methods", IEEE Trans. on Power System, 11 (3), 1547-1553.
- [47] Lin W. M., Teng J. H., (1996), "Phase-decoupled load flow method for radial and weakly-meshed distribution systems", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., 143 (1), 39-42.
- [48] Zhang X. P., Chu W. J., Chen H., (1996), "Decoupled asymmetrical three-phase load flow study by parallel processing", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., 143 (1), 61-65.
- [49] Le Nguyen H., (1997), "Newton-Raphson method in complex form", IEEE Trans. on Power Systems, 12 (33), 1355-1359.
- [50] Zhang F., Cheng C. S., (1997), "A modified Newton method for radial distribution system power flow analysis", IEEE Trans. on Power System, 12 (1), 389–397.
- [51] Da Costa V. M., Martins N., Pereira J. L., (1999), "Development in the Newton Raphson power flow formulation based on current injections", IEEE Transactions on Power Systems, 14 (4), 1320-1326.
- [52] Lin W. M., Su Y. S., Chin H. C., Teng J. H., (1999), "Three-phase unbalanced distribution power flow solutions with minimum data preparation", IEEE Trans. on Power System, 14 (3), 1178–1183.

- [53] Garcia P. A. N., Pereira J. L. R., Carneiro S., Da Kosta W. M., Martins N., (2000), “Three-phase power flow calculations using the current injection method”, *IEEE Trans. on Power Systems*, 15 (2), 508-514.
- [54] Lin W. M., Teng J. H., (2000), “Three-phase distribution network fast-decoupled power flow solutions”, *Electrical Power and Energy Systems*, 22 (5), 375-380.
- [55] Teng J. H., (2002), “A modified Gauss-Seidel algorithm of three-phase power flow analysis in distribution networks”, *Electrical Power and Energy Systems*, 24 (2), 97-102.
- [56] Vieira J. C. M., Freitas W., Morelato A., (2004), “Phase-decoupled method for three-phase power flow analysis of unbalanced distribution systems”, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, 151 (5), 568-574.
- [57] Abdel-Akher M., Mohamed Nor K., Abdul Rashid A. H., (2005), “Improved three-phase power flow methods using sequence components”, *IEEE Trans. on Power Systems*, 20 (3), 1389-1397.
- [58] Shirmohammadi D., Hong H. W., Semlyen A., Luo G. X., (1998), “A Compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks”, *IEEE Trans. on Power System*, 3 (2), 753–762.
- [59] Cheng C. S., Shirmohammadi D., (1995), “A three-phase power flow method for real time distribution system analysis”, *IEEE Trans. on Power System*, 10 (2), 671–679.
- [60] Zhu Y., Tomsovic K., (2002), “Adaptive power flow method for distribution systems with dispersed generation”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, 17 (3), 822-827.
- [61] Ranjan R., Venkatesh B., Chaturvedi A., Das D., (2004), “Power flow solution of three-phase unbalanced radial distribution network”, *Electric Power Components and Systems*, 32 (4) ,421-433.
- [62] Ghosh S., Das D., (1996), “Method for load-flow solution of radial distribution networks”, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, 146 (6), 641-648.
- [63] Mok S., Elangovan S., Longjian C., Salama M., (2000), “A new approach for power flow analysis of balanced radial distribution systems”, *Electric Machines and Power Systems*, 28 (1), 325-340.
- [64] Thukaram D., Banda H. M. W., Jerome J., (1999), “A robust three-phase power flow algorithm for radial distribution systems”, *Electric Power Systems Research*, 50 (3), 227-236.
- [65] Kersting W. H., (2006), “Distribution System Modeling and Analysis”, 2nd Edition, CRC Press.

- [66] Liu J., Salama M. M. A., Mansour R. R., (2002), "An efficient power flow algorithm for distribution systems with polynomial load", *International Journal of Electrical Engineering Education*, 39 (4), 371-386.
- [67] Teng J.H., (2000), "A network-topology based three-phase load flow for distribution systems", *Proceedings of National Science Council ROC (A)*, 24 (4), 259-264.
- [68] Teng J. H., (2003), "A direct approach for distribution system load flow solutions", *IEEE Trans. on Power Delivery*, 18 (3), 882-887.
- [69] Aravindhhabuba P., Ganapathy S., Nayar K. R., (2001), "A novel technique for the analysis of radial distribution systems", *Electrical Power and Energy Systems*, 23 (3), 167-171.
- [70] Cespedes G. R., (1990), "New method for the analysis of distribution networks", *IEEE Trans. on Power Delivery*, 5 (1), 391-396.
- [71] Eminoglu U., Hocaoglu M. H., (2005), "A New Power Flow Method for Radial Distribution Systems Including Voltage Dependent Load Models", *Electric Power Systems Research*, 76 (2-3), 106-114.
- [72] Haque M. H., (1996), "Efficient load flow method for distribution systems with radial or mesh configuration", *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, 143 (1), 33-38.
- [73] Haque M. H., (2000), "A general load flow method for distribution systems", *Electric Power System Research*, 54 (1), 106-114.
- [74] Asfari M., Singh S. P., Raju G. S., Rao G.K., (2002), "A fast power flow solution of radial distribution networks", *Electric Power Components and Systems*, 30 (3), 1065-1074.
- [75] Ranjan R., Das D., (2003), "Simple and efficient computer algorithm to solve radial distribution networks", *Electric Power Components and Systems*, 31 (1), 95-107.
- [76] Das D., Nagi H. S., Kothari D. P., (1994), "Novel method for solving radial distribution networks", *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, 141(4), 291-298.
- [77] Das D., Kothari D. P., Kalam A., (1995), "Simple and efficient method for load flow solution of radial distribution networks", *Electrical Power & Energy Systems*, 17 (5), 335-346.
- [78] Baran M. E., Wu F. F., (1989), "Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system", *IEEE Trans. on Power Delivery*, 4 (1), 735-742.
- [79] Mekhamer S. F., Soliman S. A., Moustafa M. A., El-Hawary M. E., (2002), "Load flow solution of radial distribution feeders: a new contribution", *Electrical Power and Energy Systems*, 24 (9), 701-707.

- [80] Baran M. E., Wu F. F., (1989), “Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4 (2), 1401-1407.
- [81] Luo G. X., Semlyen A., (1990), “Efficient load flow for large weakly meshed networks”, IEEE Trans. on Power System, 5 (4), 1309–1316.
- [82] Rajicic D., Ackovski R., Taleski R., (1994), “Voltage correction power flow”, IEEE Trans. on Power Delivery, 9 (2), 1056–1062.
- [83] Jasmon G. B., Lee L. H. C., (1991), “Distribution network reduction for voltage stability analysis and load flow calculations”, Electrical Power & Energy Systems, 13 (1), 9-13.
- [84] Satyanarayana S., Ramana T., Sivanagaraju S., Rao G. K., (2007), “An efficient load flow solution for radial distribution network including Voltage dependent load models”, Electric Power Components and Systems, 35 (5), 539-551.
- [85] Exposito G., Ramos E. R., (1999), “Reliable load flow technique for radial distribution networks”, IEEE Trans. on Power Systems, 14 (3), 1063-1069.
- [86] Nagendra Rao P. S., Deekshit R. S., (2005), “Radial load flow for systems having distributed generation and controlled q sources”, Electric Power Components and Systems, 33 (6), 641-655.
- [87] Hassan M. Y., (2010), “Recent Developments In Three Phase Load Flow Analysis”, Penerbit UTM, Johor.
- [88] Eminoglu U., Hocaoglu M. H., (2005), “Three-Phase Voltage Regulator Modelling for Forward/ Backward sweep-Based Distribution Systems Power Flow Algorithms”, in Proc. Dec.2005 ELECO 5th International Conference on Electrical and Electronics Engineering, Electric-Control, 224-228.
- [89] Balamurugan K., Srinivasan D., (2011), “Review of power flow studies on distribution network with distributed generation”, Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2011 IEEE Ninth International Conference on IEEE, IEEE PEDS 2011, 411-417, Singapore, 5-8 December.
- [90] Sereeter B., Vuik K., Witteveen C., (2017), “Newton Power Flow Methods for Unbalanced Three-Phase Distribution Networks”, Energies, 10 (10), 1658.
- [91] Acharjee P., Goswami S. K., (2009), “Chaotic Particle Swarm Optimization based reliable algorithm to overcome the limitations of conventional power flow methods”, 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, 1-7, Seattle, WA, 15-18 March.

- [92] Teng J. H., (2002), "A modified Gauss–Seidel algorithm of three-phase power flow analysis in distribution networks", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 24 (2), 97-102.
- [93] Ochi T., Yamashita D., Koyanagi K., Yokoyama R., (2013), "The development and the application of fast decoupled load flow method for distribution systems with high R/X ratios lines", 2013 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 1-6, Washington DC, 24-27 Feb.
- [94] Kumar A., JHA B. K., Misra R. K., Singh D., (2019), "A Novel Current Injection based Newton-Raphson Power flow algorithm for droop-based Islanded Microgrids", *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13 (23), 5271-5283.
- [95] Jurado-Melguizo F., Kamel S., Abdel-Akher M., (2017), "Newton-Raphson Current Injection Load Flow Solution Based on Sparse Matrix Calculations", *DYNA New Technologies*, 4 (1), 255-263.
- [96] Dzafic I., Neisius H. T., (2011), "Generic Three-Phase Power Flow methods using symmetrical components for symmetrical and unsymmetrical power system networks", *ISGT 2011*, 1-6, Anaheim, CA, 17-19 Jan.
- [97] Chen T. H., Yang N. C., (2010), "Loop frame of reference based three-phase power flow for unbalanced radial distribution systems", *Electric Power Systems Research*, 80(7), 799-806, 01 July.
- [98] Teng J. H., Chang C. Y., (2002), "A novel and fast three-phase load flow for unbalanced radial distribution systems", *Power Systems, IEEE Transactions on Power Systems*, 17 (4), 1238-1244.
- [99] Yang N.-C., (2016), "Three-phase power flow calculations using direct Z BUS method for large-scale unbalanced distribution networks", *IET Generation, Transmission & Distribution*, 10 (4), 1048-1055.
- [100] Eminoglu U., Hocaoglu M. H., (2008), "Distribution systems forward/backward sweep-based power flow algorithms: a review and comparison study", *Electric Power Components and Systems*, 37 (1), 91-110.
- [101] Feijoo A., Cidras J., (2000), "Modeling of wind farms in the load flow analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, 15, 110-115.
- [102] Divya K. C., Rao P. S. N., (2006), "Models for wind turbine generating systems and their application in load flow studies", *Electric Power Systems Research*, 76, 844-856.
- [103] Cutsem T. V., Vournas C., (1998), "Voltage Stability of Electric Power Systems", *Kluwer Academic Publishers, Springer, Boston*.

- [104] Hatziargyriou N. D., Karakatsanis T. S., Papadopoulos M., (1993), “Probabilistic load flow in distribution systems containing dispersed wind power generation”, IEEE Transactions on Power Systems, 8, 159-165.
- [105] Eminoglu U., (2009), “Modeling and application of wind turbine generating system (WTGS) to distribution systems”, Renewable Energy, 34 (11), 2474-2483.
- [106] Eminoglu U., Dursun B., Hocaoglu M. H., (2009), “Incorporation of a new wind turbine generating system model into distribution system load flow analysis”, International Journal of Wind Energy, 12 (4), 375-390.
- [107] Chen H., Chen J., Shi D., Duan X., (2006), “Power flow study and voltage stability analysis for distribution systems with distributed generation”, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 1-8, Montreal Que, 18–22 June.
- [108] Coath G., Al-Dabbagh M., (2005), “Effect of steady-state wind turbine generator models on power flow convergence and voltage stability limit”, Proceedings of: The Australasian Universities Power Engineering Conference, Hobart Tasmania Australia, 25 -28 September.
- [109] Mahmoud K., Abdel-Akher M., (2012), “Unbalanced distribution power-flow model and analysis of wind turbine generating systems”, ETEP, Wiley Online Library.
- [110] Heier S., (1998), “Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems”, John Wiley & Sons, 2nd edition, Newyork.
- [111] Kyoungsoo R., Han-ho C., (2005), “Application of neural network controller for maximum power extraction of a grid-connected wind turbine system” Electrical Engineering, 88, 45-53.
- [112] Balcı M. E., Hocaoğlu M. H., Dursun B., Öztürk O., Köksoy A., Karakulak O., (2014), “Asenkron Generatörlü Rüzgar Türbinlerinin Dengesiz Gerilim Altında Dağıtım Sistemlerinde Yük Akışı için Modellenmesi”, TÜBİTAK Proje No: 112E222, Balıkesir.
- [113] Krause P.C., (2002), “Analysis of Electric Machinery and Drive Systems”, Wiley Press.
- [114] Şen M., Balcı M. E., (2013), “Gerilim Dengesizliğinin Ölçülmesi için Yeni Bir Yaklaşım”, EVK 2013, Kocaeli, Türkiye, Mayıs 2013.
- [115] IEC Standard, (2002), 60034-26, “Rotating Electrical Machines, Part 26: Effects of Unbalanced Voltages on the Performance of Three-Phase Induction Motors”, International Electrotechnical Commission.
- [116] IEEE Standard, (2010), “Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions”, IEEE Std. 1459 – 2010.

- [117] IEEE Standart, (2006), “Design Requirements for Small Wind Turbines”, IEEE Std. 61400-2.
- [118] Web 3, (2020), <https://www.mathworks.com/products/simscape-electrical.html>, (Erişim tarihi: Ağustos 2020).
- [119] Yin W. J., Wen T., (2019), “Performance Analysis of Refined Induction Machine Models Considering Iron Loss”, Progress In Electromagnetics Research Letters, 85, 31-36.
- [120] Koksoy A.; Ozturk O.; Balci M. E.; Hocaoglu M. H., (2018), “A New Wind Turbine Generating System Model for Balanced and Unbalanced Distribution Systems Load Flow Analysis”, Appl. Sci., 8 (4), 502; <https://doi.org/10.3390/app8040502>.
- [121] Web 4, (2020), <https://sourceforge.net/projects/electricdss/files/OpenDSS/OpenDSSManual.pdf/download>, (Erişim tarihi: Ağustos 2020).
- [122] Dugan R. C., (2006), “Induction machine modeling for distribution system analysis—Test case description”, in Proc. 2006 IEEE Power Eng. Soc. Transmission and Distribution Conf., Dallas, TX, May 2006.
- [123] Web 5, (2020), <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/feeder34.zip>, (Erişim tarihi: Ağustos 2020).
- [124] Dugan R. C., Kersting W. H., (2006), “Induction machine test case for the 34-bus test feeder-description”, in Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting, Montreal, QC, Canada, 18-22 Jun..
- [125] Web 6, (2020), <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/feeder123.zip>, (Erişim tarihi: Ağustos 2020).

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet KÖKSOY 1984 yılında Ankara’da doğdu. Lisans eğitimine Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Fakültesi Elektronik Mühendisliği Bölümünü’nde 2002 yılında başladı, 2007 yılında mezun oldu. Yüksek lisans eğitimini aynı yıl Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda başladı. Yüksek lisans eğitimini 2010 yılında tamamlayarak aynı yıl Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda doktora programına kayıt oldu. 2017 yılından bu yana TÜBİTAK MAM Malzeme Enstitüsü’nde araştırmacı olarak çalışmaktadır.

EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Koksoy A., Ozturk O., Balci M. E., Hocaoglu M. H., (2018), “A New Wind Turbine Generating System Model for Balanced and Unbalanced Distribution Systems Load Flow Analysis”, Appl. Sci., 8 (4), 502, <https://doi.org/10.3390/app8040502>.

Balci M. E., Hocaoglu M. H., Koksoy A., Ozturk O., Dursun B., (2014), “A fixed speed induction generator model for unbalanced power flow analysis”, IEEE 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP) 2014; 10.1109/ICHQP.2014.6842843.

Diğer Ekler (CD)

- Matlab/Simulink Benzetim Sonuçları
- 1,5 kW Gücündeki Test Generatörü için Modeller ile Elde Edilen Sonuçlar
- 7,5 kW Gücündeki Test Generatörü için Modeller ile Elde Edilen Sonuçlar
- IEEE 34 Bara Test Sistemi Sonuçları
- 123 Bara Test Sistemi Sonuçları

Matlab/Simulink Benzetim Sonuçları

Tablo 1: Senaryo – 1 için Önerilen Model ile hesaplanan faz aktif/faz reaktif güçleri.

Pm (kW)	VUF (%)	Pa (W)	Pb (W)	Pc (W)	Qa (VAR)	Qb (VAR)	Qc (VAR)
160	0	-52226,1	-52231,3	-52222,4	27009,64	27002,45	26999,82
	1	-51738,4	-56893,4	-48008,6	32725,3	25536,79	22904,88
	2	-51224,3	-61531	-43766,9	38546,57	24173,94	18911,48
	3	-50684,9	-66136,6	-39503,9	44464,22	22916,22	15025,94
	4	-50187,8	-70770,5	-35286	50487,41	21778,66	11260,16
	5	-49599,7	-75303,4	-30987,9	56586,85	20733,66	7595,74

Tablo 2: Senaryo – 1 için Kayma Temelli Model ile hesaplanan faz aktif/faz reaktif güçleri.

Pm (kW)	VUF (%)	Pa (W)	Pb (W)	Pc (W)	Qa (VAR)	Qb (VAR)	Qc (VAR)
160	0	-52028,9	-52034,2	-52025,2	27316,21	27308,94	27306,29
	1	-51526,2	-56742,9	-47773,3	33087,03	25823,52	23176,25
	2	-50992,8	-61423	-43489,1	38963,67	24440,99	19148,04
	3	-50429,4	-66066,9	-39179,6	44936,76	23163,62	15228,16
	4	-49903,6	-70734,7	-34910,9	51016,56	22007,42	11429,74
	5	-49282,1	-75297,7	-30558,1	57171,43	20942,56	7732,337

Tablo 3: Senaryo – 1 için Sabit P, Q(V+) Model ile hesaplanan faz aktif/faz reaktif güçleri.

Pm (kW)	VUF (%)	Pa (W)	Pb (W)	Pc (W)	Qa (VAR)	Qb (VAR)	Qc (VAR)
160	0	-53336,9	-53336,9	-53336,9	27316,21	27308,94	27306,29
	1	-53333,8	-53333,8	-53333,8	33087,03	25823,52	23176,25
	2	-53324,2	-53324,2	-53324,2	38963,67	24440,99	19148,04
	3	-53308,3	-53308,3	-53308,3	44936,76	23163,62	15228,16
	4	-53353,5	-53353,5	-53353,5	51016,56	22007,42	11429,74
	5	-53324,9	-53324,9	-53324,9	57171,43	20942,56	7732,337

Tablo 4: Senaryo – 1 için Sabit P, Q Model ile hesaplanan faz aktif/faz reaktif güçleri.

Pm (kW)	VUF (%)	Pa (W)	Pb (W)	Pc (W)	Qa (VAR)	Qb (VAR)	Qc (VAR)
160	0	-53336,9	-53336,9	-53336,9	-27217,7	-27217,7	-27217,7
	1	-53333,8	-53333,8	-53333,8	-27217,1	-27217,1	-27217,1
	2	-53324,2	-53324,2	-53324,2	-27215,2	-27215,2	-27215,2
	3	-53308,3	-53308,3	-53308,3	-27212,1	-27212,1	-27212,1
	4	-53353,5	-53353,5	-53353,5	-27220,9	-27220,9	-27220,9
	5	-53324,9	-53324,9	-53324,9	-27215,4	-27215,4	-27215,4

Tablo 5: Senaryo – 2 için Önerilen Model ile hesaplanan faz aktif/faz reaktif güçleri.

Ve (pu)	Pa (W)	Pb (W)	Pc (W)	Qa (VAR)	Qb (VAR)	Qc (VAR)
0,6	-50905,2	-57287,1	-42348,1	32693,11	20265,24	12814,13
0,7	-51087	-61441,7	-40375,7	35607,6	18578,41	9935,271
0,8	-50847,7	-65738,3	-37763,0	40914,17	18418,39	8436,901
0,9	-50346,2	-70349,3	-34632,5	48008,85	19230,9	7751,636
1,0	-49599,7	-75303,4	-30987,9	56586,85	20733,66	7595,738
1,1	-48704,7	-80696,1	-26912,5	66500,87	22793,85	7828,45
1,2	-47651,7	-86523	-22393,4	77648,72	25316,22	8355,272

Tablo 6: Senaryo – 2 için Kayma Temelli Model ile hesaplanan faz aktif/faz reaktif güçleri.

Ve (pu)	Pa (W)	Pb (W)	Pc (W)	Qa (VAR)	Qb (VAR)	Qc (VAR)
0,6	-50599,3	-57075	-42047,5	33682,17	21055,44	13594,2
0,7	-50811,8	-61305,3	-40076,6	36440,82	19183,51	10514,86
0,8	-50573,9	-65654,4	-37437,1	41645,49	18880,81	8858,917
0,9	-50056,5	-70307,1	-34261,6	48661,53	19565,12	8029,995
1,0	-49282,2	-75297,8	-30558,2	57171,44	20942,57	7732,34
1,1	-48349,8	-80724,2	-26412,2	67023,36	22876,22	7820,874
1,2	-47251,7	-86583,6	-21812,1	78111,51	25267,52	8197,675

Tablo 7: Senaryo – 2 için Sabit P, Q(V+) Model ile hesaplanan faz aktif/faz reaktif güçleri.

Ve (pu)	Pa (W)	Pb (W)	Pc (W)	Qa (VAR)	Qb (VAR)	Qc (VAR)
0,6	-53313,9	-53313,9	-53313,9	-23276,1	-23276,1	-23276,1
0,7	-53325,8	-53325,8	-53325,8	-21639,6	-21639,6	-21639,6
0,8	-53328,9	-53328,9	-53328,9	-22257,7	-22257,7	-22257,7
0,9	-53344,9	-53344,9	-53344,9	-24234,6	-24234,6	-24234,6
1,0	-53324,9	-53324,9	-53324,9	-27173,4	-27173,4	-27173,4
1,1	-53329,1	-53329,1	-53329,1	-30891,6	-30891,6	-30891,6
1,2	-53326,6	-53326,6	-53326,6	-35271,3	-35271,3	-35271,3

Tablo 8: Senaryo – 2 için Sabit P, Q Model ile hesaplanan faz aktif/faz reaktif güçleri.

Ve (pu)	Pa (W)	Pb (W)	Pc (W)	Qa (VAR)	Qb (VAR)	Qc (VAR)
0,6	-53313,9	-53313,9	-53313,9	-23250,8	-23250,8	-23250,8
0,7	-53325,8	-53325,8	-53325,8	-21637,2	-21637,2	-21637,2
0,8	-53328,9	-53328,9	-53328,9	-22271,6	-22271,6	-22271,6
0,9	-53344,9	-53344,9	-53344,9	-24262,7	-24262,7	-24262,7
1,0	-53324,9	-53324,9	-53324,9	-27215,4	-27215,4	-27215,4
1,1	-53329,1	-53329,1	-53329,1	-30947,5	-30947,5	-30947,5
1,2	-53326,6	-53326,6	-53326,6	-35341,6	-35341,6	-35341,6

1,5 kW Gücündeki Test Generatörü için Modeller ile Elde Edilen Sonuçlar

Tablo 1: 1,5 kW gücündeki test generatörü için Önerilen Model ile hesaplanan faz aktif/faz reaktif güçleri.

Hız (d/dk)	VUF (%)	Pa (W)	Pb (W)	Pc (W)	Qa (VAR)	Qb (VAR)	Qc (VAR)
1021	0,23	-118,52	-127,67	-119,06	435,89	428,59	422,26
	1,00	-137,61	-149,73	-107,52	452,35	395,37	414,06
	2,00	-144,37	-162,34	-81,43	471,99	359,27	403,11
	3,01	-153,58	-174,46	-57,14	492,51	325,49	396,93
	4,00	-158,77	-184,12	-31,58	513,47	295,17	390,84
	5,03	-176,90	-203,04	-18,14	532,82	263,61	385,74
1027	0,17	-173,73	-181,00	-177,80	436,41	436,46	427,83
	1,00	-181,64	-192,50	-151,31	456,04	398,85	417,70
	2,00	-193,13	-209,18	-129,61	481,08	366,92	410,90
	3,00	-199,88	-218,61	-103,44	501,68	333,18	403,91
	4,00	-212,00	-233,65	-85,12	521,22	301,32	395,99
	5,00	-201,93	-228,15	-45,28	538,40	269,12	387,42
1032	0,17	-225,08	-231,18	-231,41	441,88	446,84	436,81
	1,08	-235,25	-244,54	-201,24	467,29	404,37	426,51
	2,00	-244,80	-257,80	-180,82	488,28	373,47	418,35
	3,04	-244,63	-259,96	-146,90	507,91	336,83	409,07
	4,04	-252,95	-271,39	-123,93	531,83	307,18	403,74
	5,00	-256,04	-275,38	-98,37	547,36	275,53	395,93
1036	0,15	-283,75	-288,55	-289,60	454,96	460,62	451,76
	1,00	-290,94	-299,90	-260,41	477,38	419,03	437,39
	2,06	-292,82	-304,10	-226,72	499,80	380,48	426,97
	3,01	-313,05	-322,29	-214,40	523,15	350,29	425,33
	4,05	-320,74	-333,87	-191,84	545,26	317,71	414,48
	5,00	-329,13	-342,68	-171,14	567,35	289,96	410,43
1042	0,14	-343,64	-347,85	-349,28	468,72	474,89	466,51
	1,03	-347,96	-354,36	-315,19	492,84	431,47	452,86
	2,00	-355,45	-360,33	-288,13	515,87	396,57	447,82
	3,01	-362,43	-371,54	-264,74	539,06	363,69	436,01
	4,05	-382,54	-387,11	-251,39	560,31	328,98	432,05
	5,02	-369,46	-377,18	-211,25	574,20	295,20	418,27

Tablo 2: 1,5 kW gücündeki test generatörü için Kayma Temelli Model ile hesaplanan faz aktif/faz reaktif güçleri.

Hız (d/dk)	VUF (%)	Pa (W)	Pb (W)	Pc (W)	Qa (VAR)	Qb (VAR)	Qc (VAR)
1021	0,23	-107,38	-116,88	-107,91	422,48	415,03	408,57
	1,00	-126,83	-139,34	-95,48	440,86	382,72	401,83
	2,00	-134,07	-152,60	-68,52	461,47	346,46	391,27
	3,01	-143,64	-165,13	-43,22	482,93	312,53	385,54
	4,00	-149,08	-175,16	-16,64	504,51	281,83	379,61
	5,03	-167,15	-194,12	-1,93	525,64	250,99	375,91
1027	0,17	-161,38	-168,93	-165,60	427,97	428,00	419,20
	1,00	-169,88	-181,16	-138,35	448,53	390,13	409,47
	2,00	-181,63	-198,31	-115,62	474,72	358,15	403,26
	3,00	-188,75	-208,22	-88,53	496,05	324,02	396,53
	4,00	-200,95	-223,53	-69,14	516,97	292,44	389,56
	5,00	-191,44	-218,70	-28,59	533,48	258,64	379,86
1032	0,17	-211,35	-217,68	-217,92	438,09	443,13	432,88
	1,08	-222,11	-231,84	-186,85	464,55	400,24	423,05
	2,00	-231,89	-245,58	-165,56	486,61	369,28	415,48
	3,04	-232,29	-248,46	-130,93	506,37	331,58	405,86
	4,04	-240,70	-260,21	-106,89	531,12	301,60	400,91
	5,00	-244,03	-264,58	-80,51	547,15	269,46	393,27
1036	0,15	-268,21	-273,18	-274,29	456,42	462,18	453,12
	1,00	-275,93	-285,40	-244,37	479,89	420,19	439,21
	2,06	-278,40	-290,47	-210,01	502,59	380,55	428,58
	3,01	-298,50	-308,68	-196,46	527,70	350,92	428,42
	4,05	-306,19	-320,68	-172,91	550,93	318,20	418,21
	5,00	-314,53	-329,70	-151,18	573,78	290,11	414,63
1042	0,14	-325,99	-330,33	-331,85	475,91	482,19	473,60
	1,03	-330,93	-337,86	-297,14	500,63	437,79	460,03
	2,00	-338,82	-344,45	-269,33	524,15	402,07	455,16
	3,01	-345,87	-356,19	-245,06	548,40	368,91	443,91
	4,05	-365,69	-371,74	-230,41	571,61	334,86	441,75
	5,02	-353,33	-362,83	-190,06	584,53	299,05	426,60

Tablo 3: 1,5 kW gücündeki test generatörü için Sabit P, Q(V+) Model ile hesaplanan faz aktif/faz reaktif güçleri.

Hız (d/dk)	VUF (%)	Pa (W)	Pb (W)	Pc (W)	Qa (VAR)	Qb (VAR)	Qc (VAR)
1021	0,23	-220,71	-220,71	-220,71	430,216	430,216	430,216
	1,00	-229,80	-229,80	-229,80	421,8947	421,8947	421,8947
	2,00	-225,85	-225,85	-225,85	412,0439	412,0439	412,0439
	3,01	-224,05	-224,05	-224,05	404,425	404,425	404,425
	4,00	-219,92	-219,92	-219,92	397,6837	397,6837	397,6837
	5,03	-228,35	-228,35	-228,35	390,1682	390,1682	390,1682
1027	0,17	-282,55	-282,55	-282,55	436,282	436,282	436,282
	1,00	-278,20	-278,20	-278,20	426,6731	426,6731	426,6731
	2,00	-280,06	-280,06	-280,06	421,5229	421,5229	421,5229
	3,00	-275,67	-275,67	-275,67	413,636	413,636	413,636
	4,00	-278,44	-278,44	-278,44	405,5574	405,5574	405,5574
	5,00	-257,49	-257,49	-257,49	395,2132	395,2132	395,2132
1032	0,17	-341,83	-341,83	-341,83	446,559	446,559	446,559
	1,08	-337,77	-337,77	-337,77	437,1981	437,1981	437,1981
	2,00	-337,91	-337,91	-337,91	430,6769	430,6769	430,6769
	3,04	-324,92	-324,92	-324,92	420,3742	420,3742	420,3742
	4,04	-323,92	-323,92	-323,92	415,1753	415,1753	415,1753
	5,00	-316,52	-316,52	-316,52	405,2397	405,2397	405,2397
1036	0,15	-410,56	-410,56	-410,56	463,6677	463,6677	463,6677
	1,00	-404,67	-404,67	-404,67	452,3285	452,3285	452,3285
	2,06	-392,97	-392,97	-392,97	442,3545	442,3545	442,3545
	3,01	-403,22	-403,22	-403,22	439,2541	439,2541	439,2541
	4,05	-401,75	-401,75	-401,75	430,8126	430,8126	430,8126
	5,00	-401,01	-401,01	-401,01	425,8841	425,8841	425,8841
1042	0,14	-482,56	-482,56	-482,56	482,5492	482,5492	482,5492
	1,03	-471,86	-471,86	-471,86	471,0901	471,0901	471,0901
	2,00	-466,08	-466,08	-466,08	464,637	464,637	464,637
	3,01	-463,70	-463,70	-463,70	456,6389	456,6389	456,6389
	4,05	-472,80	-472,80	-472,80	450,6113	450,6113	450,6113
	5,02	-447,23	-447,23	-447,23	435,9906	435,9906	435,9906

Tablo 4: 1,5 kW gücündeki test generatörü için Sabit P, Q Model ile hesaplanan faz aktif/faz reaktif güçleri.

Hız (d/dk)	VUF (%)	Pa (W)	Pb (W)	Pc (W)	Qa (VAR)	Qb (VAR)	Qc (VAR)
1021	0,23	-220,71	-220,71	-220,71	501,5306	501,5306	501,5306
	1,00	-229,80	-229,80	-229,80	502,5012	502,5012	502,5012
	2,00	-225,85	-225,85	-225,85	502,0748	502,0748	502,0748
	3,01	-224,05	-224,05	-224,05	501,8821	501,8821	501,8821
	4,00	-219,92	-219,92	-219,92	501,4473	501,4473	501,4473
	5,03	-228,35	-228,35	-228,35	502,3441	502,3441	502,3441
1027	0,17	-282,55	-282,55	-282,55	508,9194	508,9194	508,9194
	1,00	-278,20	-278,20	-278,20	508,3392	508,3392	508,3392
	2,00	-280,06	-280,06	-280,06	508,5865	508,5865	508,5865
	3,00	-275,67	-275,67	-275,67	508,0056	508,0056	508,0056
	4,00	-278,44	-278,44	-278,44	508,3716	508,3716	508,3716
	5,00	-257,49	-257,49	-257,49	505,7027	505,7027	505,7027
1032	0,17	-341,83	-341,83	-341,83	517,7409	517,7409	517,7409
	1,08	-337,77	-337,77	-337,77	517,0824	517,0824	517,0824
	2,00	-337,91	-337,91	-337,91	517,1052	517,1052	517,1052
	3,04	-324,92	-324,92	-324,92	515,0505	515,0505	515,0505
	4,04	-323,92	-323,92	-323,92	514,8954	514,8954	514,8954
	5,00	-316,52	-316,52	-316,52	513,7645	513,7645	513,7645
1036	0,15	-410,56	-410,56	-410,56	530,1282	530,1282	530,1282
	1,00	-404,67	-404,67	-404,67	528,9751	528,9751	528,9751
	2,06	-392,97	-392,97	-392,97	526,7354	526,7354	526,7354
	3,01	-403,22	-403,22	-403,22	528,6939	528,6939	528,6939
	4,05	-401,75	-401,75	-401,75	528,4095	528,4095	528,4095
	5,00	-401,01	-401,01	-401,01	528,2664	528,2664	528,2664
1042	0,14	-482,56	-482,56	-482,56	545,6374	545,6374	545,6374
	1,03	-471,86	-471,86	-471,86	543,1668	543,1668	543,1668
	2,00	-466,08	-466,08	-466,08	541,8563	541,8563	541,8563
	3,01	-463,70	-463,70	-463,70	541,3202	541,3202	541,3202
	4,05	-472,80	-472,80	-472,80	543,3799	543,3799	543,3799
	5,02	-447,23	-447,23	-447,23	537,7	537,7	537,7

7,5 kW Gücündeki Test Generatörü için Modeller ile Elde Edilen Sonuçlar

Tablo 1: 7,5 kW gücündeki test generatörü için Önerilen Model ile hesaplanan faz aktif/faz reaktif güçleri.

Hız (d/dk)	VUF (%)	Pa (W)	Pb (W)	Pc (W)	Qa (VAR)	Qb (VAR)	Qc (VAR)
1004	0,02	-171,933	-167,185	-168,274	1583,819	1582,383	1587,994
	1,03	-272,368	-23,754	-298,832	1354,132	1572,97	1707,046
	2,02	-347,19	138,8123	-389,889	1162,491	1577,857	1847,067
	3,00	-430,224	281,6955	-482,993	972,2474	1566,487	1970,219
	4,03	-513,507	429,6179	-577,608	791,9599	1570,052	2111,998
	5,00	-586,157	567,1295	-648,668	628,6765	1557,478	2234,302
1006	0,00	-187,924	-225,425	-226,541	1612,009	1636,711	1585,108
	1,07	-278,006	-49,5748	-358,92	1361,653	1639,065	1721,643
	2,00	-340,41	102,0863	-459,113	1165,14	1650,717	1839,337
	3,00	-422,996	257,7844	-547,81	970,773	1638,835	1972,994
	4,00	-513,106	402,1398	-630,056	791,3043	1619,214	2108,672
	5,03	-616,169	541,1093	-713,948	625,0733	1601,593	2262,25
1008	0,00	-747,36	-740,795	-767,354	1627,666	1660,098	1650,725
	0,00	-777,224	-571,317	-860,733	1416,326	1676,243	1761,258
	1,99	-847,167	-411,379	-961,76	1208,383	1671,397	1896,234
	3,06	-915,374	-234,818	-1047,89	1000,717	1658,474	2043,394
	4,00	-954,572	-70,6372	-1110,81	825,1507	1657,47	2168,043
	5,04	-1001,91	85,96434	-1190,62	639,8772	1658,249	2291,734
1010	0,00	-886,177	-878,574	-872,412	1635,818	1621,718	1636,622
	1,01	-933,469	-694,322	-963,522	1416,171	1622,576	1773,415
	2,04	-981,614	-515,535	-1048,57	1199,636	1613,425	1902,256
	3,07	-1041,09	-345,355	-1132,57	1010,285	1615,773	2053,49
	3,99	-1076,64	-186,828	-1191,49	838,663	1610,041	2171,302
	5,10	-1120,73	-26,5498	-1282,38	640,8571	1616,553	2296,626
1012	0,00	-909,587	-902,891	-933,483	1640,316	1678,482	1666,929
	1,03	-946,782	-724,789	-1015,15	1426,443	1674,637	1787,606
	2,01	-992,608	-558,959	-1109,4	1214,774	1675,706	1908,912
	3,01	-1035,07	-377,926	-1178,93	1020,409	1672,481	2048,069
	3,99	-1072,41	-207,807	-1240,97	834,1896	1662,951	2171,426
	5,00	-1107,46	-47,5753	-1319,69	654,0902	1677,479	2298,157

Tablo 2: 7,5 kW gücündeki test generatörü için Kayma Temelli Model ile hesaplanan faz aktif/faz reaktif güçleri.

Hız (d/dk)	VUF (%)	Pa (W)	Pb (W)	Pc (W)	Qa (VAR)	Qb (VAR)	Qc (VAR)
1004	0,02	-156,121	-151,261	-152,381	1531,43	1529,969	1535,663
	1,03	-258,084	-3,90695	-285,486	1301,706	1523,558	1659,783
	2,02	-333,904	163,0093	-378,193	1108,472	1529,566	1803,046
	3,00	-417,604	310,3711	-472,38	917,7338	1520,223	1930,261
	4,03	-501,001	463,5121	-567,474	736,5076	1525,494	2075,758
	5,00	-573,588	606,0268	-638,433	572,6633	1514,575	2201,581
1006	0,00	-171,073	-209,465	-210,559	1560,289	1585,378	1533,023
	1,07	-262,734	-29,2546	-345,834	1308,948	1590,261	1674,249
	2,00	-325,883	126,4654	-447,886	1111,188	1603,586	1795,3
	3,00	-409,226	286,8414	-537,67	915,9625	1593,415	1932,865
	4,00	-499,778	436,1845	-620,259	736,0109	1575,617	2072,612
	5,03	-602,9	580,7993	-703,713	569,3481	1559,801	2230,351
1008	0,00	-728,366	-721,649	-748,808	1595,913	1628,84	1619,316
	0,00	-759,37	-548,791	-844,716	1382,305	1646,239	1732,457
	1,99	-830,36	-384,664	-947,398	1173,008	1643,237	1871,28
	3,06	-899,375	-203,288	-1034,58	963,653	1631,734	2022,113
	4,00	-938,802	-34,6026	-1098,11	786,0619	1631,481	2149,216
	5,04	-985,834	127,1583	-1178,06	599,4306	1633,944	2276,118
1010	0,00	-866,801	-859,033	-852,728	1610,497	1596,185	1611,322
	1,01	-915,658	-671,078	-946,234	1388,352	1598,081	1751,075
	2,04	-964,958	-488,261	-1033,08	1169,834	1590,299	1883,213
	3,07	-1025,05	-313,408	-1118,03	978,2696	1593,571	2037,421
	3,99	-1060,88	-150,628	-1177,51	804,7078	1588,623	2157,655
	5,10	-1104,52	15,00592	-1268,59	605,4926	1597,165	2286,391
1012	0,00	-889,439	-882,577	-913,856	1615,003	1653,762	1642,011
	1,03	-928,137	-701,073	-997,872	1398,8	1650,964	1765,483
	2,01	-974,889	-531,318	-1093,94	1185,362	1653,71	1890,112
	3,01	-1018,09	-345,882	-1164,6	988,4839	1651,085	2031,83
	3,99	-1055,78	-171,264	-1227,29	800,2633	1642,465	2157,855
	5,00	-1090,42	-5,95204	-1306,24	618,1867	1658,241	2287,169

Tablo 3: 7,5 kW gücündeki test generatörü için Sabit P, Q(V+) Model ile hesaplanan faz aktif/faz reaktif güçleri.

Hız (d/dk)	VUF (%)	Pa (W)	Pb (W)	Pc (W)	Qa (VAR)	Qb (VAR)	Qc (VAR)
1004	0,02	-422,48	-422,48	-422,48	1584,94	1584,94	1584,94
	1,03	-446,459	-446,459	-446,459	1543,20	1543,20	1543,20
	2,02	-446,681	-446,681	-446,681	1522,66	1522,66	1522,66
	3,00	-456,331	-456,331	-456,331	1488,67	1488,67	1488,67
	4,03	-468,245	-468,245	-468,245	1465,75	1465,75	1465,75
	5,00	-471,674	-471,674	-471,674	1434,77	1434,77	1434,77
1006	0,00	-471,69	-471,69	-471,69	1611,52	1611,52	1611,52
	1,07	-482,287	-482,287	-482,287	1572,48	1572,48	1572,48
	2,00	-483,988	-483,988	-483,988	1545,30	1545,30	1545,30
	3,00	-488,023	-488,023	-488,023	1513,03	1513,03	1513,03
	4,00	-497,688	-497,688	-497,688	1480,96	1480,96	1480,96
	5,03	-516,987	-516,987	-516,987	1456,59	1456,59	1456,59
1008	0,00	-1032,78	-1032,78	-1032,78	1648,95	1648,95	1648,95
	0,00	-1013	-1013	-1013	1618,96	1618,96	1618,96
	1,99	-1014,58	-1014,58	-1014,58	1588,18	1588,18	1588,18
	3,06	-1006,07	-1006,07	-1006,07	1555,00	1555,00	1555,00
	4,00	-985,345	-985,345	-985,345	1527,07	1527,07	1527,07
	5,04	-976,759	-976,759	-976,759	1492,65	1492,65	1492,65
1010	0,00	-1163,81	-1163,81	-1163,81	1635,51	1635,51	1635,51
	1,01	-1144,31	-1144,31	-1144,31	1606,38	1606,38	1606,38
	2,04	-1125,32	-1125,32	-1125,32	1568,94	1568,94	1568,94
	3,07	-1117,07	-1117,07	-1117,07	1548,58	1548,58	1548,58
	3,99	-1095,13	-1095,13	-1095,13	1518,46	1518,46	1518,46
	5,10	-1088,11	-1088,11	-1088,11	1481,62	1481,62	1481,62
1012	0,00	-1206,43	-1206,43	-1206,43	1666,32	1666,32	1666,32
	1,03	-1181,52	-1181,52	-1181,52	1632,09	1632,09	1632,09
	2,01	-1169,8	-1169,8	-1169,8	1597,43	1597,43	1597,43
	3,01	-1145,49	-1145,49	-1145,49	1569,68	1569,68	1569,68
	3,99	-1120,79	-1120,79	-1120,79	1534,66	1534,66	1534,66
	5,00	-1107,3	-1107,3	-1107,3	1507,82	1507,82	1507,82

Tablo 4: 7,5 kW gücündeki test generatörü için Sabit P, Q Model ile hesaplanan faz aktif/faz reaktif güçleri.

Hız (d/dk)	VUF (%)	Pa (W)	Pb (W)	Pc (W)	Qa (VAR)	Qb (VAR)	Qc (VAR)
1004	0,02	-422,48	-422,48	-422,48	1742,82	1742,82	1742,82
	1,03	-446,459	-446,459	-446,459	1743,72	1743,72	1743,72
	2,02	-446,681	-446,681	-446,681	1743,73	1743,73	1743,73
	3,00	-456,331	-456,331	-456,331	1744,11	1744,11	1744,11
	4,03	-468,245	-468,245	-468,245	1744,59	1744,59	1744,59
	5,00	-471,674	-471,674	-471,674	1744,73	1744,73	1744,73
1006	0,00	-471,69	-471,69	-471,69	1744,73	1744,73	1744,73
	1,07	-482,287	-482,287	-482,287	1745,16	1745,16	1745,16
	2,00	-483,988	-483,988	-483,988	1745,24	1745,24	1745,24
	3,00	-488,023	-488,023	-488,023	1745,41	1745,41	1745,41
	4,00	-497,688	-497,688	-497,688	1745,82	1745,82	1745,82
	5,03	-516,987	-516,987	-516,987	1746,67	1746,67	1746,67
1008	0,00	-1032,78	-1032,78	-1032,78	1781,35	1781,35	1781,35
	0,00	-1013	-1013	-1013	1779,59	1779,59	1779,59
	1,99	-1014,58	-1014,58	-1014,58	1779,73	1779,73	1779,73
	3,06	-1006,07	-1006,07	-1006,07	1778,98	1778,98	1778,98
	4,00	-985,345	-985,345	-985,345	1777,19	1777,19	1777,19
	5,04	-976,759	-976,759	-976,759	1776,46	1776,46	1776,46
1010	0,00	-1163,81	-1163,81	-1163,81	1793,86	1793,86	1793,86
	1,01	-1144,31	-1144,31	-1144,31	1791,90	1791,90	1791,90
	2,04	-1125,32	-1125,32	-1125,32	1790,03	1790,03	1790,03
	3,07	-1117,07	-1117,07	-1117,07	1789,22	1789,22	1789,22
	3,99	-1095,13	-1095,13	-1095,13	1787,11	1787,11	1787,11
	5,10	-1088,11	-1088,11	-1088,11	1786,45	1786,45	1786,45
1012	0,00	-1206,43	-1206,43	-1206,43	1798,25	1798,25	1798,25
	1,03	-1181,52	-1181,52	-1181,52	1795,66	1795,66	1795,66
	2,01	-1169,8	-1169,8	-1169,8	1794,47	1794,47	1794,47
	3,01	-1145,49	-1145,49	-1145,49	1792,02	1792,02	1792,02
	3,99	-1120,79	-1120,79	-1120,79	1789,58	1789,58	1789,58
	5,00	-1107,3	-1107,3	-1107,3	1788,28	1788,28	1788,28

IEEE 34 Bara Test Sistemi Sonuçları

Tablo 1: 34 baralı test sistemi için A fazı gerilim genlik sonuçları.

Bara No	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3	MODEL 4	Ref. Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.
800	1,05000	1,05000	1,05000	1,05000	1,04990
802	1,04830	1,04830	1,04840	1,04840	1,04820
806	1,04720	1,04720	1,04730	1,04730	
808	1,02590	1,02570	1,02640	1,02650	1,02580
810	-	-	-	-	-
812	1,00100	1,00060	1,00210	1,00230	
814	0,98107	0,98054	0,98269	0,98292	0,98104
850	1,01780	1,01730	1,01950	1,01980	1,01780
816	1,01760	1,01700	1,01930	1,01950	1,01760
818	1,01670	1,01610	1,01830	1,01860	
820	0,99292	0,99235	0,99464	0,99488	
822	0,98987	0,98931	0,99160	0,99185	0,98984
824	1,01360	1,01300	1,01550	1,01580	1,01360
826	-	-	-	-	-
828	1,01330	1,01270	1,01520	1,01550	
830	1,00550	1,00480	1,00790	1,00820	
854	1,00540	1,00460	1,00780	1,00810	1,00550
852	0,99313	0,99223	0,99640	0,99678	0,99343
856	-	-	-	-	-
832	1,03040	1,02940	1,03370	1,03410	1,03070
858	1,02920	1,02830	1,03270	1,03310	1,02960
888	0,98417	0,98245	0,98826	0,98921	
890	0,95275	0,95013	0,95982	0,96131	0,95147
864	1,02920	1,02830	1,03270	1,03310	1,03110
834	1,02800	1,02710	1,03150	1,03190	1,02840
842	1,02800	1,02710	1,03160	1,03200	
844	1,02820	1,02720	1,03170	1,03210	
846	1,02930	1,02840	1,03290	1,03330	
848	1,02950	1,02850	1,03310	1,03350	1,02990
860	1,02760	1,02660	1,03110	1,03150	
836	1,02740	1,02640	1,03090	1,03130	1,02777
840	1,02740	1,02640	1,03090	1,03130	1,02770
862	1,02740	1,02640	1,03090	1,03130	
838	-	-	-	-	-
G1	1,01620	1,01490	1,02020	1,02060	1,01600
G2	0,93770	0,93453	0,94535	0,94724	0,93546

Tablo 2: 34 baralı test sistemi için B fazı gerilim genlik sonuçları.

Bara No	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3	MODEL 4	Ref. Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.
800	1,05000	1,05000	1,05000	1,05000	1,04990
802	1,04900	1,04900	1,04900	1,04900	1,04890
806	1,04840	1,04840	1,04840	1,04840	
808	1,03800	1,03790	1,03790	1,03790	1,03770
810	1,03790	1,03770	1,03770	1,03780	1,03750
812	1,02680	1,02640	1,02640	1,02660	
814	1,01770	1,01720	1,01730	1,01750	1,01690
850	1,02410	1,02360	1,02360	1,02380	1,02320
816	1,02390	1,02350	1,02350	1,02370	1,02310
818	#YOK	#YOK	#YOK	#YOK	-
820	#YOK	#YOK	#YOK	#YOK	-
822	#YOK	#YOK	#YOK	#YOK	-
824	1,01890	1,01840	1,01840	1,01860	1,01800
826	1,01870	1,01820	1,01820	1,01840	1,01780
828	1,01860	1,01810	1,01800	1,01830	
830	1,01050	1,00980	1,00980	1,01010	
854	1,01030	1,00960	1,00960	1,00990	1,00930
852	0,99638	0,99558	0,99548	0,99586	0,99517
856	1,01020	1,00960	1,00950	1,00980	1,00920
832	1,03370	1,03290	1,03280	1,03320	1,03250
858	1,03240	1,03160	1,03150	1,03190	1,03120
888	0,98738	0,98578	0,98612	0,98710	
890	0,94989	0,94741	0,94728	0,94888	0,94689
864	#YOK	#YOK	#YOK	#YOK	-
834	1,03100	1,03010	1,03000	1,03040	1,02970
842	1,03090	1,03010	1,03000	1,03040	
844	1,03090	1,03010	1,03000	1,03040	
846	1,03170	1,03080	1,03070	1,03110	
848	1,03180	1,03100	1,03080	1,03120	1,03060
860	1,03050	1,02970	1,02960	1,03000	
836	1,03020	1,02930	1,02920	1,02960	1,02990
840	1,03010	1,02930	1,02920	1,02960	1,02990
862	1,03010	1,02930	1,02920	1,02960	
838	1,03000	1,02910	1,02900	1,02940	1,02870
G1	1,01720	1,01610	1,01660	1,01700	1,01550
G2	0,93378	0,93075	0,93082	0,93285	0,92983

Tablo 3: 34 baralı test sistemi için C fazı gerilim genlik sonuçları.

Bara No	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3	MODEL 4	Ref. Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.
800	1,05000	1,05000	1,05000	1,05000	1,04990
802	1,04930	1,04930	1,04920	1,04920	1,04920
806	1,04880	1,04880	1,04880	1,04880	
808	1,04060	1,04040	1,04020	1,04030	
810	#YOK	#YOK	#YOK	#YOK	-
812	1,03050	1,03020	1,02990	1,03000	
814	1,02240	1,02200	1,02150	1,02170	1,02230
850	1,02240	1,02200	1,02150	1,02170	1,02220
816	1,02230	1,02190	1,02140	1,02160	1,02210
818	#YOK	#YOK	#YOK	#YOK	-
820	#YOK	#YOK	#YOK	#YOK	-
822	#YOK	#YOK	#YOK	#YOK	-
824	1,01910	1,01870	1,01810	1,01830	1,01900
826	#YOK	#YOK	#YOK	#YOK	-
828	1,01880	1,01840	1,01780	1,01810	
830	1,01220	1,01170	1,01110	1,01130	
854	1,01210	1,01150	1,01090	1,01120	1,01200
852	1,00120	1,00050	0,99977	1,00010	1,00120
856	#YOK	#YOK	#YOK	#YOK	-
832	1,03250	1,03170	1,03100	1,03140	1,03240
858	1,03150	1,03080	1,03000	1,03040	1,03150
888	0,98857	0,98711	0,98542	0,98636	
890	0,95514	0,95282	0,95118	0,95272	0,95346
864	#YOK	#YOK	#YOK	#YOK	-
834	1,03040	1,02970	1,02890	1,02930	1,03040
842	1,03050	1,02970	1,02890	1,02930	
844	1,03060	1,02980	1,02910	1,02940	
846	1,03180	1,03100	1,03020	1,03060	
848	1,03190	1,03120	1,03040	1,03080	1,03190
860	1,03010	1,02930	1,02860	1,02890	
836	1,02990	1,02920	1,02840	1,02880	1,02990
840	1,02990	1,02920	1,02840	1,02880	1,02990
862	1,02990	1,02920	1,02840	1,02880	
838	#YOK	#YOK	#YOK	#YOK	-
G1	1,01960	1,01860	1,01680	1,01720	1,01910
G2	0,94123	0,93840	0,93609	0,93804	0,93862

123 Bara Test Sistemi Sonuçları

Tablo 1: 123 baralı test sistemi için A fazı gerilim genlik sonuçları.

Bara İsmi	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3	MODEL 4	Bara İsmi	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3	MODEL 4
150	0,99999	0,99999	0,99999	0,99999	46	0,99120	0,99120	0,99115	0,99115
149	1,04370	1,04370	1,04370	1,04370	49	0,99082	0,99081	0,99077	0,99077
1	1,03130	1,03130	1,03130	1,03130	39	-	-	-	-
2	-	-	-	-	97	1,03470	1,03460	1,03450	1,03450
3	-	-	-	-	197	1,03470	1,03460	1,03450	1,03450
7	1,02210	1,02210	1,02210	1,02210	72	1,03610	1,03600	1,03590	1,03590
4	-	-	-	-	30	0,99720	0,99719	0,99715	0,99715
8	1,01610	1,01610	1,01600	1,01600	32	-	-	-	-
5	-	-	-	-	64	0,98729	0,98727	0,98714	0,98713
9	1,01460	1,01460	1,01460	1,01460	50	0,99080	0,99079	0,99075	0,99074
12	-	-	-	-	69	1,03240	1,03240	1,03220	1,03220
13	1,00810	1,00810	1,00810	1,00810	76	1,03600	1,03600	1,03580	1,03580
152	1,00810	1,00810	1,00810	1,00810	101	1,03380	1,03380	1,03370	1,03370
6	-	-	-	-	98	1,03450	1,03440	1,03430	1,03430
34	-	-	-	-	250	0,99720	0,99719	0,99715	0,99715
15	-	-	-	-	73	-	-	-	-
14	1,00660	1,00660	1,00650	1,00650	33	0,99554	0,99553	0,99549	0,99549
52	1,00220	1,00220	1,00210	1,00210	51	0,99063	0,99063	0,99058	0,99058
10	1,00630	1,00620	1,00620	1,00620	102	-	-	-	-
11	1,00590	1,00590	1,00590	1,00590	151	0,99063	0,99063	0,99058	0,99058
17	-	-	-	-	300	1,03100	1,03100	1,03090	1,03090
53	0,99949	0,99948	0,99941	0,99941	105	1,03250	1,03250	1,03240	1,03240
16	-	-	-	-	70	1,03110	1,03110	1,03100	1,03100
54	0,99797	0,99796	0,99789	0,99789	65	0,98707	0,98705	0,98691	0,98690
18	0,99911	0,99910	0,99905	0,99905	77	1,03710	1,03710	1,03700	1,03700
135	0,99911	0,99910	0,99905	0,99905	74	-	-	-	-
55	0,99776	0,99775	0,99768	0,99767	78	1,03740	1,03740	1,03730	1,03730
19	0,99779	0,99778	0,99774	0,99774	106	-	-	-	-
57	0,99479	0,99477	0,99468	0,99468	103	-	-	-	-
21	0,99855	0,99855	0,99850	0,99850	71	1,03040	1,03040	1,03030	1,03030
35	0,99633	0,99632	0,99628	0,99628	99	1,03470	1,03470	1,03460	1,03460
56	0,99773	0,99772	0,99765	0,99764	108	1,03100	1,03100	1,03090	1,03090
58	-	-	-	-	66	0,98768	0,98764	0,98750	0,98750
23	0,99814	0,99813	0,99809	0,99808	GEN1	0,99465	0,99450	0,99374	0,99372
20	0,99693	0,99693	0,99688	0,99688	86	1,03510	1,03510	1,03490	1,03490
40	0,99481	0,99481	0,99476	0,99476	79	1,03710	1,03710	1,03700	1,03700
59	-	-	-	-	75	-	-	-	-
22	-	-	-	-	100	1,03490	1,03490	1,03480	1,03480
25	0,99747	0,99747	0,99742	0,99742	80	1,03950	1,03950	1,03940	1,03940
42	0,99322	0,99322	0,99317	0,99317	109	1,02690	1,02690	1,02680	1,02680
41	-	-	-	-	107	-	-	-	-
60	0,98814	0,98813	0,98800	0,98800	87	1,03460	1,03460	1,03440	1,03440
160	0,98814	0,98813	0,98800	0,98800	104	-	-	-	-
28	0,99710	0,99710	0,99705	0,99705	88	1,03450	1,03450	1,03440	1,03440
36	0,99540	0,99539	0,99535	0,99535	110	1,02490	1,02490	1,02480	1,02480
44	0,99213	0,99212	0,99208	0,99208	89	1,03420	1,03410	1,03400	1,03400
24	-	-	-	-	81	1,04170	1,04170	1,04160	1,04150
26	0,99722	0,99721	0,99717	0,99716	112	1,02430	1,02430	1,02410	1,02410
62	0,98765	0,98763	0,98750	0,98750	90	-	-	-	-
38	-	-	-	-	91	1,03400	1,03390	1,03380	1,03380
45	0,99160	0,99159	0,99155	0,99155	82	1,04260	1,04250	1,04240	1,04240
29	0,99694	0,99693	0,99689	0,99688	93	1,03360	1,03360	1,03350	1,03350
37	0,99461	0,99461	0,99456	0,99456	83	1,04370	1,04370	1,04360	1,04360
47	0,99109	0,99109	0,99104	0,99104	92	-	-	-	-
67	1,03570	1,03560	1,03550	1,03550	111	1,02420	1,02420	1,02410	1,02410
43	-	-	-	-	113	1,02220	1,02220	1,02200	1,02200
31	-	-	-	-	84	-	-	-	-
63	0,98724	0,98721	0,98709	0,98708	94	1,03290	1,03290	1,03280	1,03280
27	0,99686	0,99685	0,99681	0,99680	95	1,03360	1,03360	1,03350	1,03340
48	0,99082	0,99081	0,99076	0,99076	114	1,02180	1,02180	1,02160	1,02160
61	0,98814	0,98813	0,98800	0,98800	96	-	-	-	-
610	0,99581	0,99579	0,99568	0,99567	85	-	-	-	-
68	1,03410	1,03410	1,03400	1,03400					

Tablo 2: 123 baralı test sistemi için B fazı gerilim genlik sonuçları.

Bara İsmi	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3	MODEL 4	Bara İsmi	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3	MODEL 4
150	0,99999	0,99999	0,99999	0,99999	46	0,99120	0,99120	0,99115	0,99115
149	1,04370	1,04370	1,04370	1,04370	49	0,99082	0,99081	0,99077	0,99077
1	1,03130	1,03130	1,03130	1,03130	39	-	-	-	-
2	-	-	-	-	97	1,03470	1,03460	1,03450	1,03450
3	-	-	-	-	197	1,03470	1,03460	1,03450	1,03450
7	1,02210	1,02210	1,02210	1,02210	72	1,03610	1,03600	1,03590	1,03590
4	-	-	-	-	30	0,99720	0,99719	0,99715	0,99715
8	1,01610	1,01610	1,01600	1,01600	32	-	-	-	-
5	-	-	-	-	64	0,98729	0,98727	0,98714	0,98713
9	1,01460	1,01460	1,01460	1,01460	50	0,99080	0,99079	0,99075	0,99074
12	-	-	-	-	69	1,03240	1,03240	1,03220	1,03220
13	1,00810	1,00810	1,00810	1,00810	76	1,03600	1,03600	1,03580	1,03580
152	1,00810	1,00810	1,00810	1,00810	101	1,03380	1,03380	1,03370	1,03370
6	-	-	-	-	98	1,03450	1,03440	1,03430	1,03430
34	-	-	-	-	250	0,99720	0,99719	0,99715	0,99715
15	-	-	-	-	73	-	-	-	-
14	1,00660	1,00660	1,00650	1,00650	33	0,99554	0,99553	0,99549	0,99549
52	1,00220	1,00220	1,00210	1,00210	51	0,99063	0,99063	0,99058	0,99058
10	1,00630	1,00620	1,00620	1,00620	102	-	-	-	-
11	1,00590	1,00590	1,00590	1,00590	151	0,99063	0,99063	0,99058	0,99058
17	-	-	-	-	300	1,03100	1,03100	1,03090	1,03090
53	0,99949	0,99948	0,99941	0,99941	105	1,03250	1,03250	1,03240	1,03240
16	-	-	-	-	70	1,03110	1,03110	1,03100	1,03100
54	0,99797	0,99796	0,99789	0,99789	65	0,98707	0,98705	0,98691	0,98690
18	0,99911	0,99910	0,99905	0,99905	77	1,03710	1,03710	1,03700	1,03700
135	0,99911	0,99910	0,99905	0,99905	74	-	-	-	-
55	0,99776	0,99775	0,99768	0,99767	78	1,03740	1,03740	1,03730	1,03730
19	0,99779	0,99778	0,99774	0,99774	106	-	-	-	-
57	0,99479	0,99477	0,99468	0,99468	103	-	-	-	-
21	0,99855	0,99855	0,99850	0,99850	71	1,03040	1,03040	1,03030	1,03030
35	0,99633	0,99632	0,99628	0,99628	99	1,03470	1,03470	1,03460	1,03460
56	0,99773	0,99772	0,99765	0,99764	108	1,03100	1,03100	1,03090	1,03090
58	-	-	-	-	66	0,98768	0,98764	0,98750	0,98750
23	0,99814	0,99813	0,99809	0,99808	GEN1	0,99465	0,99450	0,99374	0,99372
20	0,99693	0,99693	0,99688	0,99688	86	1,03510	1,03510	1,03490	1,03490
40	0,99481	0,99481	0,99476	0,99476	79	1,03710	1,03710	1,03700	1,03700
59	-	-	-	-	75	-	-	-	-
22	-	-	-	-	100	1,03490	1,03490	1,03480	1,03480
25	0,99747	0,99747	0,99742	0,99742	80	1,03950	1,03950	1,03940	1,03940
42	0,99322	0,99322	0,99317	0,99317	109	1,02690	1,02690	1,02680	1,02680
41	-	-	-	-	107	-	-	-	-
60	0,98814	0,98813	0,98800	0,98800	87	1,03460	1,03460	1,03440	1,03440
160	0,98814	0,98813	0,98800	0,98800	104	-	-	-	-
28	0,99710	0,99710	0,99705	0,99705	88	1,03450	1,03450	1,03440	1,03440
36	0,99540	0,99539	0,99535	0,99535	110	1,02490	1,02490	1,02480	1,02480
44	0,99213	0,99212	0,99208	0,99208	89	1,03420	1,03410	1,03400	1,03400
24	-	-	-	-	81	1,04170	1,04170	1,04160	1,04150
26	0,99722	0,99721	0,99717	0,99716	112	1,02430	1,02430	1,02410	1,02410
62	0,98765	0,98763	0,98750	0,98750	90	-	-	-	-
38	-	-	-	-	91	1,03400	1,03390	1,03380	1,03380
45	0,99160	0,99159	0,99155	0,99155	82	1,04260	1,04250	1,04240	1,04240
29	0,99694	0,99693	0,99689	0,99688	93	1,03360	1,03360	1,03350	1,03350
37	0,99461	0,99461	0,99456	0,99456	83	1,04370	1,04370	1,04360	1,04360
47	0,99109	0,99109	0,99104	0,99104	92	-	-	-	-
67	1,03570	1,03560	1,03550	1,03550	111	1,02420	1,02420	1,02410	1,02410
43	-	-	-	-	113	1,02220	1,02220	1,02200	1,02200
31	-	-	-	-	84	-	-	-	-
63	0,98724	0,98721	0,98709	0,98708	94	1,03290	1,03290	1,03280	1,03280
27	0,99686	0,99685	0,99681	0,99680	95	1,03360	1,03360	1,03350	1,03340
48	0,99082	0,99081	0,99076	0,99076	114	1,02180	1,02180	1,02160	1,02160
61	0,98814	0,98813	0,98800	0,98800	96	-	-	-	-
610	0,99581	0,99579	0,99568	0,99567	85	-	-	-	-
68	1,03410	1,03410	1,03400	1,03400					

Tablo 3: 123 baralı test sistemi için C fazı gerilim genlik sonuçları.

Bara İsmi	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3	MODEL 4	Bara İsmi	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3	MODEL 4
150	0,99999	0,99999	0,99999	0,99999	46	-	-	-	-
149	1,04370	1,04370	1,04370	1,04370	49	1,00700	1,00700	1,00700	1,00700
1	1,03480	1,03480	1,03480	1,03480	39	-	-	-	-
2	-	-	-	-	97	1,03320	1,03320	1,03330	1,03330
3	1,03320	1,03320	1,03320	1,03320	197	1,03320	1,03320	1,03330	1,03330
7	1,02900	1,02900	1,02900	1,02900	72	1,03380	1,03370	1,03380	1,03380
4	1,03260	1,03260	1,03260	1,03260	30	1,00770	1,00770	1,00770	1,00770
8	1,02520	1,02520	1,02520	1,02520	32	1,00120	1,00110	1,00120	1,00120
5	1,03180	1,03180	1,03180	1,03180	64	1,00020	1,00020	1,00020	1,00020
9	-	-	-	-	50	1,00660	1,00660	1,00670	1,00670
12	-	-	-	-	69	-	-	-	-
13	1,01950	1,01950	1,01950	1,01950	76	1,03440	1,03440	1,03440	1,03440
152	1,01950	1,01950	1,01950	1,01950	101	1,03270	1,03270	1,03270	1,03270
6	1,03120	1,03120	1,03120	1,03120	98	1,03300	1,03300	1,03300	1,03300
34	1,01850	1,01850	1,01850	1,01850	250	1,00770	1,00770	1,00770	1,00770
15	1,01810	1,01810	1,01810	1,01810	73	1,03160	1,03160	1,03160	1,03160
14	-	-	-	-	33	-	-	-	-
52	1,01620	1,01620	1,01620	1,01620	51	1,00660	1,00660	1,00660	1,00660
10	-	-	-	-	102	1,03130	1,03120	1,03130	1,03130
11	-	-	-	-	151	1,00660	1,00660	1,00660	1,00660
17	1,01770	1,01770	1,01770	1,01770	300	1,03280	1,03280	1,03280	1,03280
53	1,01460	1,01450	1,01460	1,01460	105	1,03300	1,03290	1,03300	1,03300
16	1,01720	1,01720	1,01720	1,01720	70	-	-	-	-
54	1,01360	1,01350	1,01360	1,01360	65	0,99762	0,99758	0,99762	0,99762
18	1,01210	1,01210	1,01210	1,01210	77	1,03530	1,03520	1,03530	1,03530
135	1,01210	1,01210	1,01210	1,01210	74	1,02980	1,02970	1,02980	1,02980
55	1,01360	1,01360	1,01360	1,01360	78	1,03540	1,03540	1,03540	1,03540
19	-	-	-	-	106	-	-	-	-
57	1,01090	1,01090	1,01090	1,01090	103	1,02960	1,02960	1,02960	1,02960
21	1,01090	1,01090	1,01100	1,01100	71	-	-	-	-
35	1,01110	1,01100	1,01110	1,01110	99	1,03270	1,03270	1,03270	1,03270
56	1,01370	1,01370	1,01370	1,01370	108	1,03280	1,03280	1,03280	1,03280
58	-	-	-	-	66	0,99642	0,99638	0,99642	0,99642
23	1,00980	1,00980	1,00980	1,00980	GEN1	1,00690	1,00660	1,00810	1,00810
20	-	-	-	-	86	1,03580	1,03580	1,03580	1,03580
40	1,01000	1,01000	1,01000	1,01000	79	1,03540	1,03540	1,03540	1,03540
59	-	-	-	-	75	1,02870	1,02870	1,02880	1,02880
22	-	-	-	-	100	1,03230	1,03230	1,03230	1,03230
25	1,00890	1,00890	1,00900	1,00890	80	1,03630	1,03630	1,03630	1,03630
42	1,00910	1,00910	1,00910	1,00910	109	-	-	-	-
41	1,00960	1,00960	1,00960	1,00960	107	-	-	-	-
60	1,00470	1,00470	1,00470	1,00470	87	1,03640	1,03630	1,03640	1,03640
160	1,00470	1,00470	1,00470	1,00470	104	1,02780	1,02780	1,02780	1,02780
28	1,00860	1,00860	1,00860	1,00860	88	-	-	-	-
36	-	-	-	-	110	-	-	-	-
44	1,00830	1,00830	1,00830	1,00830	89	1,03680	1,03670	1,03680	1,03680
24	1,00840	1,00840	1,00840	1,00840	81	1,03690	1,03680	1,03690	1,03690
26	1,00210	1,00210	1,00210	1,00210	112	-	-	-	-
62	1,00290	1,00290	1,00290	1,00290	90	-	-	-	-
38	-	-	-	-	91	1,03700	1,03700	1,03700	1,03700
45	-	-	-	-	82	1,03760	1,03760	1,03770	1,03770
29	1,00820	1,00810	1,00820	1,00820	93	1,03710	1,03710	1,03710	1,03710
37	-	-	-	-	83	1,03850	1,03840	1,03850	1,03850
47	1,00730	1,00730	1,00730	1,00730	92	1,03690	1,03690	1,03690	1,03690
67	1,03400	1,03390	1,03400	1,03400	111	-	-	-	-
43	-	-	-	-	113	-	-	-	-
31	1,00150	1,00150	1,00160	1,00160	84	1,03430	1,03430	1,03430	1,03430
63	1,00200	1,00200	1,00210	1,00210	94	-	-	-	-
27	1,00210	1,00210	1,00210	1,00210	95	1,03730	1,03720	1,03730	1,03730
48	1,00710	1,00710	1,00710	1,00710	114	-	-	-	-
61	1,00470	1,00470	1,00470	1,00470	96	-	-	-	-
610	1,01280	1,01280	1,01280	1,01280	85	1,03310	1,03310	1,03310	1,03310
68	-	-	-	-					