

**İLETİM ŞEBEKELERİNDE
GEÇİCİ HAL KARARLILIK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ebru TAVUKCU

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Belgin EMRE TÜRKAY

ARALIK 2017

**İLETİM ŞEBEKELERİNDE
GEÇİCİ HAL KARARLILIK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ebru TAVUKCU
(504141010)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Belgin EMRE TÜRKAY

ARALIK 2017

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504141010 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Ebru TAVUKCU, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “İLETİM ŞEBEKELERİNDE GEÇİCİ HAL KARARLILIK ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Belgin EMRE TÜRKAY**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mehmet BAYRAK**
Sakarya Üniversitesi

Doç. Dr. Şükran Emel ÖNAL
İstanbul Teknik Üniversitesi

.....

Teslim Tarihi : **15 Kasım 2017**
Savunma Tarihi : **18 Aralık 2017**





Sevdiklerime ve canım aileme,



ÖNSÖZ

Bugüne kadar bana yardımcı olan ve desteğini esirgemeyen tüm tanıdıklarına, hem akademik anlamda hem de arkadaşça desteklerini gösterdikleri için öncelikli olarak teşekkür ederim.

Prof. Belgin Emre Türkay hocam bu zorlu yolda bana karşı desteğini esirgemediği ve hayatımda almam gereken kararlarda her zaman yardımcı olduğu için özellikle teşekkür ediyorum. Benim için kendisi bir danışman profesörden daha önemlidir. Zorlu durumlarda önemli adım atmamı sağlayarak kişisel özgüvenimin gelişmesine ve daha yeni fikirlere açık olmamı sağlayarak benim için örnek bir rol modelidir.

RWTH Aachen’da akademik çalışma yapmamda bana her zaman yardımcı olup bilgilerini paylaşan M.Sc. Dominik Willenberg ve M.Sc., M.Sc. Philipp Erlinghagen’e ayrıca teşekkür ediyorum. Zorlu akademik çalışma döneminde bana farklı bakış açısı edinmemi sağlayarak, sorunların üstünden daha kolay gelerek hem kişisel hem de akademik disiplin edinmemi sağladılar.

Akademik desteklerin dışında, her zaman yanımda ve bana destek oldukları için aileme minnettirim. Yorgun ve tükenmiş hissettiğimde bir telefon uzağımda olarak bana manevi desteklerini esirgemediler ve sahip olduğum değerleri bana hatırlattılar. Ayrıca Osman Alenbey arkadaşşıma teşekkür ederim.

Mustafa Saraoğlu’na daha iyiye ilerlememi ve öğrenmeye açık olmamı desteklediği için teşekkür ederim. Almanya’da birbirimizden her ne kadar uzakta olursak olalım, benim ihtiyacım olduğunda elinden geldiğince yardımcı oldu.

Bu tez her ne kadar hayatımın kısa bir süresini kapsadığı gözükse de aslında edindiğim tecrübeler ile benim için bir tez çalışmasından daha önemli.

Kasım 2017

Ebru TAVUKCU
(Elektrik Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. ANALİZ YAPISI VE MODELLENMESİ.....	5
2.1 Arıza Öncesi Güç Sisteminin Analizi.....	6
2.2 Güç Sisteminde Arızalar.....	10
2.3 Güç Sisteminde Kararlılık	11
3. ARIZA ÖNCESİ GÜÇ SİSTEMİ	19
3.1 Bara Değişkenlerin Belirlenmesi.....	19
3.2 Generatör Değişkenlerinin Belirlenmesi	20
3.3 İletim Hattı Değişkenlerinin Belirlenmesi.....	20
3.4 Düzenlenmiş IEEE-9 Baralı Güç Sistemi.....	21
4. DİNAMİK SİSTEM PARAMETRELERİ	25
4.1 Senkron Generatörlerin Dinamik Modelleri	25
4.2 Uyarma Sistemlerinin Dinamik Modelleri	28
4.3 Governor Sistemlerinin Dinamik Modelleri	30
5. ARIZA ÖNCESİ KARARLILIK ANALİZİ.....	33
5.1 Yük Akışı Yöntemleri	33
5.2 Yük Akışı Analiz Sonuçları.....	36
6. GEÇİCİ HAL KARARLILIK ANALİZİ.....	39
6.1 Farklı Çalışma Durumların Geçici Hal Kararlılık Analizi İle İncelenmesi....	39
6.2 Güç Sisteminde Dengeli 3-fazlı Kısa Devre Arızaların Oluşturulması.....	52
7. GOVERNOR SİSTEM MODELİ İLE FREKANS KONTROLÜ	57
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR.....	63
EKLER	67
EK A.1	69
EK A.2	71
EK A.3	73
ÖZGEÇMİŞ	89

KISALTMALAR

TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
GW	: Gigawatt
MW	: Megawatt
MVA_r	: MegaVoltAmperReaktif
MVA	: Megavoltampere
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
BİT	: Bilgi ve İletişim Teknolojileri
DCPS	: Dynamic Computation for Power Systems
p.u	: Per Unit
Hz	: Hertz



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: Matpower fonksiyonlarının algoritması [18].	7
Çizelge 3.1: Matpower test güç sisteminin statik bara verileri [17].	19
Çizelge 3.2: Matpower test güç sisteminin statik generatör verileri [17].	20
Çizelge 3.3: Matpower test güç sisteminin iletim hattı verileri [17].	21
Çizelge 4.1: Senkron generatör parametreleri ve değişkenleri [26].	26
Çizelge 4.2: Senkron generatör uyarma dinamik parametre ve değişkenleri [26]. .	29
Çizelge 4.3: IEEE tip-1 uyarma sistem modelinin sınır değerleri [27].	30
Çizelge 4.4: Mikro türbine ve governor sisteminin değişkenleri [28].	31
Çizelge 5.1: Güç sisteminin farklı çalışma koşullarında yük akışı analizi.	37
Çizelge 6.1: Birinci analiz: geçici hal arıza çeşidi.	39
Çizelge 6.2: İkinci analiz: geçici hal arıza çeşidi.	44
Çizelge 6.3: Üçüncü analiz: geçici hal arıza çeşidi.	47
Çizelge 6.4: PowerWorld kullanılarak elde edilen kararlılık analizi verileri.	50
Çizelge 6.5: Örnek 3-fazlı kısa devre arıza ve senkron generatör-1'in geçici süreliğine güç sisteminde devre dışı olması.	52
Çizelge 6.6: 3-fazlı kısa devre ve senkron generatör-1'in geçici devre dışı olması ile elde edilen bara değerleri.	56
Çizelge 6.7: 3-fazlı kısa devre ve senkron generatör-1'in geçici devre dışı olması ile elde edilen generatör değerleri.	56
Çizelge A.1 Matpower test güç sisteminin statik bara verileri [17].	69
Çizelge A.2 Matpower test güç sisteminin iletim hattı verileri [17].	70
Çizelge A.3 Matpower test güç sisteminin statik generatör verileri [17].	70
Çizelge B.1 Senkron generatör parametreleri ve değişkenleri [26].	71
Çizelge B.2 Mikro türbine ve governor sisteminin değişkenleri [28].	71
Çizelge B.3 IEEE tip-1 uyarıcı sistem modelinin sınır değerleri [27].	72
Çizelge B.4 Senkron generatör uyarıcı dinamik parametre ve değişkenleri [26]. ..	72
Çizelge C.1 Güç sisteminin farklı çalışma koşullarında yük akışı analizi.	74
Çizelge C.2 Geçici hal kararlılık analizi sonuçları.	75
Çizelge C.3 Geçici hal kararlılık analizi sonuçları.	77
Çizelge C.4 Geçici hal kararlılık analizi sonuçları.	79
Çizelge C.5 Bara gerilimi sonuçları.	81
Çizelge C.6 İletim hattı akımları sonuçları.	82
Çizelge C.7 Senkron generatör-1 (bara-10) güç sisteminden 0.30 saniye ile çıkarılması ile elde edilen geçici hal kararlılık analizi verileri.	86



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : Analiz methodunun temsili gösterimi.....	5
Şekil 2.2 : Güç sisteminin analizinde ilk adım olarak yük akışı analizi.	6
Şekil 2.3 : Matpower fonksiyonlarının Matlab’da kodlanması.....	8
Şekil 2.4 : Pi Modelinin İletim Hatlarında Gösterimi [17].	9
Şekil 2.5 : Güç sisteminde oluşturulan arızanın modellenmesi.	10
Şekil 2.6 : Geçici hal kararlılık analizinin modellenmesi.	11
Şekil 2.7 : Güç sistemlerinin kararlılığının sınıflandırılması [38] [39].....	12
Şekil 2.8 : Senkron generatör ve sonsuz güçte bara sistemi [30].....	13
Şekil 2.9 : Eşit-alan kriteri: senkron generatör ve sonsuz güç bara sistemi [30].	14
Şekil 2.10 : Geçici hal rotor açısı kararsızlığı örneği.....	15
Şekil 2.11 : Geçici hal frekans kararsızlığı örneği.....	16
Şekil 2.12 : Geçici hal generatör gerilimi kararsızlığı örneği.....	17
Şekil 2.13 : Geçici hal generatör hızı kararsızlığı örneği.....	17
Şekil 3.1 : PowerWorld düzenlenmiş IEEE-9 baralı güç sistemi.....	22
Şekil 3.2 : Matpower düzenlenmiş IEEE-9 baralı güç sistemi.	22
Şekil 3.3 : PowerWorld güç sistemi bara parametreleri.....	23
Şekil 3.4 : PowerWorld güç sistemi senkron generatör parametreleri.	23
Şekil 3.5 : PowerWorld güç sistemi iletim hattı parametreleri.	23
Şekil 4.1 : Senkron generatör makine şeması [23].	25
Şekil 4.2 : Senkron generatör altgeçici - geçici -kararlı-durum arıza reaktansı [31].....	27
Şekil 4.3 : Uyarma dinamik sistemin blok diyagramı [27].....	29
Şekil 4.4 : Mikro türbine ve governor sisteminin blok diagramı [?].	31
Şekil 5.1 : Güç Sistemi Matpower Gauss Seidel Yük Akışı Analizi Sonucu.	34
Şekil 5.2 : Güç Sistemi Matpower Fast-decoupled, XB Yük Akışı Analizi.	34
Şekil 5.3 : Newton-Raphson yöntemi ile baraların analiz sonuçları.....	36
Şekil 5.4 : Newton-Raphson yöntemi ile iletim hatların analiz sonuçları.	36
Şekil 6.1 : İlk analiz: geçici hal kararlılık çalışma durumundaki güç sistemi. ...	40
Şekil 6.2 : Generatör gerilimleri - ilk arıza geçici hal kararlılık analizi.	40
Şekil 6.3 : Generatör rotor açıları - ilk arıza geçici hal kararlılık analizi.	41
Şekil 6.4 : Generatör hızları - ilk arıza geçici hal kararlı analizi.	42
Şekil 6.5 : Bara Frekansları - ilk arıza geçici hal kararlılık analizi.....	43
Şekil 6.6 : İkinci analiz: geçici hal kararlı çalışma durumundaki güç sistemi. ..	44
Şekil 6.7 : Generatör gerilimleri - ikinci arıza geçici hal kararlılık analizi.	44
Şekil 6.8 : Generatör rotor açıları - ikinci arıza geçici hal kararlılık analizi.	45
Şekil 6.9 : Generatör hızları - ikinci arıza geçici hal kararlılık analizi.....	46
Şekil 6.10 : Bara Frekansları - ikinci arıza geçici hal kararlılık analizi.....	46

Şekil 6.11	: Üçüncü analiz: geçici hal kararlı çalışma durumundaki güç sistemi.	47
Şekil 6.12	: Bara Frekansları - üçüncü arıza geçici hal kararlılık analizi.	48
Şekil 6.13	: Generatör rotor açıları - üçüncü arıza geçici hal kararlılık analizi.	48
Şekil 6.14	: Generatör hızları - üçüncü arıza geçici hal kararlılık analizi.	49
Şekil 6.15	: Bara Frekansları - üçüncü arıza geçici hal kararlılık analizi.	49
Şekil 6.16	: Üç fazlı arızanın güç sisteminde oluşturulması.	52
Şekil 6.17	: Senkron generatör-1'in devre dışı iken geçici hal 3-fazlı kısa devre arızaların oluşturulması.	53
Şekil 6.18	: Generatör gerilimleri - 3. Bara 3-fazlı kısa devre oluşturulması ve senkron generatör-1'in devre dışı bırakılması.	54
Şekil 6.19	: Generatör açıları - 3. Bara 3-fazlı kısa devre oluşturulması ve senkron generatör-1'in devre dışı bırakılması.	54
Şekil 6.20	: Generatör hızları - 3. Bara 3-fazlı kısa devre oluşturulması ve senkron generatör-1'in devre dışı bırakılması.	55
Şekil 6.21	: Bara frekansları - 3. Bara 3-fazlı kısa devre oluşturulması ve senkron generatör-1'in devre dışı bırakılması.	55
Şekil 7.1	: Bara-3 frekansı - 3. Bara 3-fazlı kısa devre oluşturulması ve senkron generatör-1 devre dışı bırakılması.	57
Şekil 7.2	: Root Locus yöntemi ile senkron generator-1 kök eğrisi çizimi.	58
Şekil 7.3	: türbin - IEEE1 IEEE Type 1 governor hız modeli.	58
Şekil 7.4	: Bara-2 frekansı - senkron generatör-1 T5 ara ısıtıcı değişkeni değiştirilerek frekans kontrolünün elde edilmesi.	59
Şekil 7.5	: Bara-2 frekansı - senkron generatör-1 T4 ara ısıtıcı değişkeni değiştirilerek frekans kontrolünün elde edilmesi.	59
Şekil A.1	: PowerWorld düzenlenmiş IEEE-9 baralı güç sistemi.	69
Şekil A.2	: Matpower düzenlenmiş IEEE-9 baralı güç sistemi.	70
Şekil C.1	: Senkron generatör-1 (bara-10) güç sisteminden "0.00" saniye ile çıkarılması sonucu elde edilen yük akışı analizi sonucu.	73
Şekil C.2	: (0.300 - 0.445 saniye) senkron generatör 1 - (Bara 10) devre dışı bırakılması ile elde edilen geçici hal kararlılık analizinin sonuçları (elde edilen maksimum arıza etkisi)	76
Şekil C.3	: Bara 5 - 125 MW, 50 Mvar statik yükün (0.300 - 0.445 saniye) devre dışı bırakılması ile elde edilen geçici hal kararlılık analizinin sonuçları (maksimum arıza etkisi)	78
Şekil C.4	: (0.300 - 0.445 saniye) tüm statik yükler devre dışı bırakılırken, senkron generatör 1 - (Bara 10) devre dışı bırakılması ile elde edilen geçici hal kararlılık analizinin sonuçları (elde edilen maksimum arıza etkisi)	80
Şekil C.5	: (0.30 -0.445 s) SG-1 (bara-10) güç sisteminden çıkarılırken bara-3'te oluşturulan üç fazlı kısa devre analizinin sonuçları.	83
Şekil C.6	: (0.30 -0.445 s) SG-1 (bara-10) güç sisteminden çıkarılırken bara-4'te oluşturulan üç fazlı kısa devre analizinin sonuçları.	84
Şekil C.7	: (0.30-0.445 s) SG-1 (bara-10) güç sisteminden çıkarılırken bara-4'te oluşturulan tek fazlı kısa devre analizinin sonuçları.	85
Şekil C.8	: Senkron generatör-1 (bara-10) güç sisteminden çıkarılması ile elde edilen geçici hal kararlılık analizi grafikleri.	87

İLETİM ŞEBEKELERİNDE GEÇİCİ HAL KARARLILIK ANALİZİ

ÖZET

Bu tez çalışmasının temel amacı arıza öncesi kararlı çalışma koşullarına sahip örnek iletim sisteminin dışarıdan etki edilebilecek geçici müdahaleler sonunda (arıza etkisi altında) geçici hal davranışının incelenmesidir. Bu tez çalışmasında MATLAB Matpower (Matlab M-file) ve PowerWorld yazılımı kullanılmıştır. Analiz öncesi her iki programda incelenen IEEE-9 baralı güç sisteminin parametreleri aynı olacak şekilde değiştirilmiştir ve böylece aynı güç sisteminin farklı yazılımlarda kullanılması sağlanmıştır. Statik parametrelerin Matpower ve PowerWorld programında belirlendikten sonra, PowerWorld programında geçici hal kararlılık analizinin incelenmesi için kontrol sistemlerin (senkron generatör, uyarma ve governor) dinamik sistem parametreleri, modelleri ve değişkenleri tanımlanmış ve verilmiştir. İncelenen güç sisteminin potansiyel çalışma koşullarında arıza öncesi yük akışı analizi Matpower programı ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen analiz sonuçları aktif ve reaktif güç sistemi kayıpları ile verilmiştir. Dinamik analiz yöntemi ile güç sisteminde müdahale edilmiş çalışma durumlarının elde edilmesi için farklı örnek arızalar oluşturulmuştur. Bunun için öncelikle Matpower ile incelenen potansiyel çalışma durumları (senkron generatörlerin güç sistemine ilettiği toplam mekanik gücün değiştirilmesi) geçici hal kararlılık incelemesi için PowerWorld programında oluşturulmuş ve sonrasında sistemin geçici hal kararlılık analizi sonuçları yük akışı sonuçları ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen analiz sonuçlarında 75 MW'lık senkron generatörün güç sisteminden devre dışı bırakıldığında 85 MW güçteki senkron generatörün devre dışı bırakılmasından daha fazla iletim kayıpları elde edildiğinin ve arızanın güç sistemine etkisinin - rotor açısı ve hız dalgalanmasının daha fazla olduğu gözlenmiştir. Daha sonrasında örnek güç sistemi arızaları ile dinamik geçici hal kararlılık analizi gerçekleştirilerek güç sisteminde elde edilen maksimum arıza yeri ve maksimum arıza durumların güç sistemine etkisi değerlendirilmiştir. Ek analizler ayrıca tez sonunda verilmiştir. Analizi yapılan müdahaleler güç sistemindeki senkron generatörlerde geniş rotor ve açı salınımlarına sebep olduğu için örnek olarak seçilmiş ve incelenmiştir. Bunun için iki temel arıza çeşidi olan senkron generatörlerin ve statik yüklerin açıp/kapatılması ve kısa devre (3-fazlı dengeli ve faz A-toprak arası tek fazlı) oluşturulması geçici hal kararlılık analizi olarak seçilmiştir. Farklı arıza koşullarında güç sisteminin geçici hal kararlılık incelemesi yapıldıktan sonra elde edilen analizler karşılaştırılmıştır. Analiz sonuçlarında senkron generatörlerin rotor açısının değişimi mekanik ve elektrik yük dengesinin arttıracak arızanın oluşması ile arttığı ve senkron generatörlerin gerilim değişimi de üç-fazlı kısa devrenin oluşması ile arttığı gözlenmiştir. Ayrıca elde edilen analiz sonuçlarında örnek olarak governor kontrol sistemi ile sistem frekansının iyileştirilmesi sağlanmıştır. Yapılan analizlerde güç sistemin farklı çalışma koşullarında analiz edilen süre içerisinde kararlı çalışma koşullarına yaklaştığı gözlenmiştir.



TRANSIENT STABILITY ANALYSIS ON THE TRANSMISSION SYSTEM

SUMMARY

In a power system, the initial conditions of the power system, and the impact of possible disturbances on the power systems determine the stability of the system. The possible disturbances are considered in this thesis as transient disturbances, which occur in a specific period of time such as 0.145 seconds (during 0.30 to 0.445 seconds). The observation of the transient behavior in a power system is carried out by the simulations results of rotor angle, voltage, and frequency fluctuation.

In another way around, the impact of transient disturbances on a power system is analyzed with the transient stability of the system. The examination of transient stability is realized with the observation of the dynamic behavior of the power system, in which the sample time is selected as 0.0004 seconds in the thesis. Also, the ability of synchronism of a power system under, or after different disturbances is determined by the analysis of the dynamic behavior of power system.

In this thesis, after the analyzed power system is selected as the modified IEEE 9-bus test system, load flow, and the time domain dynamic simulations are realized. In the selected modified power system, there are three different synchronous generators (the same synchronous generator type but with different parameters) with their different controller systems as governor, and exciter.

The aim of this thesis is to realize different transient sample faults and to analyze the impact of the faults on the power system. The selected fault types are considered as the deactivation of some synchronous generators and creating three-phase balanced short circuit faults in the selected time period.

Before conducting the transient faults to the test system, the planned future power generation through renewable energy resources in Turkey is given in chapter 1 with introduction considering the objectives and prospects of Ministry of Energy and Natural Resources (ETKB). The given information on the change of energy resources indicates that the desired installed capacity from renewable energy resources is increasing, and expected as 20.000 MW in the end of 2023. While the more renewable energy resources are integrating to the power systems, the more given attention on the potential power system networks failure and manipulation are required to assure the reliability and security of supplying electricity from electrical generation to the end of customers. That's why, the main purpose of the thesis is to analyze the effect of different fault events on the system stability.

While the load flow analyses are realized by using of MATLAB Matpower (M-file) software, the time-domain dynamic transient analyses are realized by PowerWorld software. After that, MATLAB® is used to adjust the parameters of the governor system to get more stable system frequency results.

After that, some potential operating conditions of the power system are performed by Matpower m-file software and the results are given with load flow analyses with the active and reactive transmission losses in chapter 5. Then, the same operating conditions are created by PowerWorld software to analyze the power system with dynamic analyses.

For this purpose, the potential working conditions examined by Matpower (for example the change of total mechanical power of the synchronous generators) are applied to the PowerWorld program as transient steady-state analysis, and the results of the transient stability analyses of the system are then compared with the load flow results. To realize the transient stability analyses, the dynamic parameters, models, and variables of the control systems, which are for synchronous generator, exciter, and governor, are specified as shown in chapter 4.

But in that case, the different working conditions are considered as a transient fault event, which occurs within 0.145 seconds from 0.300 to 0.445 seconds. Also, the same fault analysis is performed for different cases to see the system's general transient response to the same fault.

One of the considerable results of the obtained transient stability and load flow analyses is that when the synchronous generator with 75 MW active power is deactivated from the power system, the more transmission losses are obtained rather than deactivating of the synchronous generator with 85 MW active power. That's why, it is summarized in the end of the first simulation part that the more power losses have a large effect on the power system stability by the change and fluctuation of the rotor angle and speed. On the other hand, the exemplary fault cases are selected as switching on/off synchronous generators, and 3-phase balanced short circuit. In the analysis results, it has been observed that the change of rotor angle of the synchronous generators increases with the short circuit faults, which raises the unbalance of produced mechanical and supplied electrical power of the power system.

In the second part of the simulations, by performing transient stability analyses with the exemplary fault cases, the maximum change of rotor angle is specified. After the analyses are performed, the improvements in the system frequency are provided with the governor control system, which is selected as an example in the obtained results.

After the reheater of the micro-turbine system (which is T5) is arranged according to the limit parameters of the model, the results show that when the mechanical output power of a synchronous generator is changed in the way of increasing, the frequency of the system becomes more stable. With this result, it can be summarized that by arranging output power of a synchronous generator via governor system the desired frequency value is possible to regain after the fault is cleared.

On the other hand there are many other simulations are performed as shown in the appendix part such as network errors - a single-line short-circuit fault, three-phase balanced short circuit fault (at bus-4), and load fluctuations - switching-off static loads in the power systems, and switching-off static loads and each synchronous generator with new fault cases.

The obtained results show that when a single-line short-circuit fault occurs in a power system, there is less voltage drop than a balanced three-phase short circuit fault (which is explained as the current during transient fault), and the system reaches its stability in both cases, so the damping torque is enough to return the power system after the faults to equilibrium working conditions.

When static loads are deactivated from the power system in a defined period (0.30-0.445 seconds), the swings of synchronous rotor angle are decreased compared with the first analyses (when each synchronous generator is switched-off with a new case study). That is because of the total load demand is decreased and the power balanced of the system is less disturbed than the first analyses.

With all the analyses, it can be summarized that the load losses are a great issue in a power system to evaluate the transient stability problems, and the understanding of a synchronous generator's behavior during a transient stability helps to control the system with possible faults. After all the analyses power systems security can be improved by integrating these information to Information and Communication Technologies (ICT)



1. GİRİŞ

2005'te Tomsovic, Bakken, Venkatasubramanian, ve Bose tarafından yapılan çalışmada, iletim sistemlerinin kontrolü ve denetiminin bilişim ve fiziksel kontrol sistemlerin güç sistemine entegre olması ile arttığı belirtilmiştir. Ayrıca güç sistemlerinde var olan kontrol sistemleri (yerel kontroller: devre kesicileri kontrolü, governor kontrolleri, uyarma sistemi kontrolü, yük akışı-faz dönüştürücü transformatör kontrolü, güç sistemleri sabitleyici (PSSs) ve geniş olan kontrolleri) ayrıntılı olarak açıklanmıştır [1]. Kontrol sistemlerin uygulanması ile güç sistemlerinin aktif çalışma koşullarından pasif çalışma koşullarına geçisi siber-fiziksel sistemler olarak tanımlanmaktadır [2]. Güç sistemindeki çalışma koşulların - arıza altında transformatör ve iletim hatlarının korunumu ya da frekans kontrolü için türbin sistemlerin governor kontrolü - çoktan otomatik güç sistemleri ile oluşturulmuş olsa da bazı kontrol sistemleri pasif çalışma koşullarını sürdürmektedir. Fakat kontrol edilen yük sistemlerin güç sistemine entegrasi edilmesinin artması ile birlikte BİT (Bilgi ve İletişim Teknolojileri) teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır [3].

2015'te Kang, Maynard ve McLaughlin'in yaptığı çalışmada, dışarıdan gelebilecek bozucu etkilerin BİT teknolojilerin çalışma koşullarının etkilenmesine sebep olabileceği belirtilmiştir. Bir güç sisteminde iletilen bilgi dış etkenler tarafından müdahale edilebilmektedir [4]. BİT teknolojileri ile oluşabilecek örnek müdahaleler arızanın tespit edilememesi, iletilen bilginin gözlenememesi, arıza yerinin belirlenememesi olarak verilmiştir. İletilen bilgi dış müdahaleler ile değiştirilirken, kullanıcı operatörün yanlış bilgilenmesinden dolayı farklı çalışma koşulları sistemde yaratılabilir [5] [6]. 2017'de Huadong, Giovanni tarafından yapılan çalışmada siper saldırılarında tek bir arıza siber bozucu sinyalin iletilmesi ile güç sisteminde bulunan tüm fiziksel bileşenlerin etkileneceği açıklanmıştır [7]. 2013 Liu, Mashayekh, Kundur ve arkadaşları ile yapılan çalışmada güç sisteminde uzaktan kontrol edilebilen güç elemanların devre kesicilerin, senkron generatörlerin ve yüklerin v.b arızadan etkilenme çeşidi ve koruma yöntemleri anlatılmıştır [8].

2017’de Berndt, Kang, Maynard, McLaughlin ve arkadaşları tarafından yazılan, Almanya iletim sistemleri operatörlerinin sistem ve şebeke kuralları raporuna göre, üretim sistemlerinde senkron generatörlere yakın oluşabilecek 3-fazlı kısa devre arızaların güç sistemlerinde kararsızlığa sebep olmaması için maksimum arıza temizleme süresinin 150 milisaniye olacak şekilde tanımlanmıştır [9]. 2012’de Hashim, Hamzah, Latip, Sallehuddin tarafından IEEE-14 baralı güç sisteminde beş farklı bara sisteminde oluşabilecek 3-fazlı arıza durumları altında güç sisteminin geçici hal kararlılığı incelenmiş ve bara-1’de oluşan arıza durumunda güç sisteminde maksimum arıza temizlenme süresinin 0.145 saniye olarak bulunmuştur. Yapılan incelemelerde sonrasında kararlı durum önerisi için ek koruma sistemlerinin kullanılması önerilmiş; fakat güç sistemi içinde kontrol elemanların değiştirilmesi ya da parametrelerin iyileştirilmesi önerilmemiştir [10].

2008’te Meegahapola, Flynn ve Littler tarafından yapılan çalışmada, güç sistemlerin kararlılık incelenmesi rotor açısı ve gerilim kararlılığı ile yapılmıştır. Geçici hal durumlarında rotor açısının maksimum değişimi en büyük arıza durumu olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak rotor açısı kararlılığı, geçici hal durumları altında kararlılık analizinin incelenmesi için yeterli bulunmuştur. Ayrıca ani dağılık güç sistemlerin şebekeye bağlanması ile oluşabilecek kararlılık incelemesi gerçekleştirilmiş; fakat sistemde oluşabilecek kısa devre arızaları örnek olarak incelenmemiştir [11].

2015’te Demetriou, Quiros, Asprou, ve Kyriakides’nin yaptığı incelemede IEEE dinamik-geçici hal kararlılığı analizi frekans, rotor açısı ve gerilim kararlılığı ile gerçekleştirilmiştir. Her senkron generatör için uyarma ve governor modelleri ve parametreleri verilmiştir. Aktif yük değiştirilip governor ile sistemin frekans ve rotor açısı kararlılığı incelenmiştir. Sonuç olarak IEEE test sistemlerinin arıza koşulları altında beklenen kararlılık sonuçları verdiği belirtilmiştir. Yapılan incelemede farklı arıza tipleri oluşturulup, governor kontrol sistemlerinin parametrelerinin değiştirilmesi ve sonuçlarının karşılaştırılması yapılmamıştır [12].

2009 Tziouvaras tarafından yapılan çalışmada, 3-fazlı ve tek fazlı kısa devre arızalarında sistemde iletilen kısa devre akımının hesaplanması açıklanmıştır. Böylece geçici hal kararlılık analizi için kullanılan Powerworld yazılımında sıfır, pozitif ve negatif admitans matrisine matematiksel çözüm yapılmasını sağlarken, elde edilen arıza sonuçlarını yorumlamayı sağlamaktadır [13].

Geçici hal kararlılık analizi elektrik güç sistemlerin planlanması ve çalıştırılması için önemli rol oynamaktadır. 1960 yılında direkt yönteminin önerilmesi ile birlikte arıza durumunda ve arıza sonrasında sayısal denklemler ile geçici hal kararlılık analizi uygulaması mümkün hale gelmiştir [14]. Daha önceki çalışmalarda reaktif güç talep değişimini ve gerilimdeki dalgalanmaları dikkate almayan klasik method kullanılıyordu [15]. Güç sisteminde kabul edilen varsayımlar şebeke topolojisinde aksaklıklara ve dolayısıyla güç sistemi içerisinde farklı bileşenler içinde geçici enerji akışısında kayıplara sebep olmaktadır [16].

Dinamik analiz yöntemleri kaynak [12]'de PowerWorld yazılımı ile yapılırken, [11]'de DIgSILENT power factory programı ve [10]'de ise C++ paket programı olan Dynamic Computation for Power Systems (DCPS) yazılımı kullanılmıştır. Geçici hal kararlılık ihtiyacının her geçen gün daha da artması ile yeni yazılımlar ve yeni paket programları geliştirilmektedir.

Örnek güç sisteminin yük akışının incelenmesi için kullanım kılavuzu yardımı ile [17] ve [18] Matpower ve [19] PowerWorld yazılımı kullanılmıştır. Matpower yazılımında güç sisteminin statik verilerinin değiştirilmesi (aktif güç, reaktif güç, senkron generatörlerin sistemden çıkarılması vb.) daha kolay gerçekleştirilmesini sağladığı için tercih edilmiştir.

2015 Shi, Cao ve Tan tarafından yapılan çalışmada Siber-fiziksel elektrik enerji sistemleri, iletişim kontrol sistemleri ile birlikte (ICT) güç sisteminde en verimli bilgi ve kontrol akışının sağladığı belirtilmiştir. Fakat güç sistemlerinde daha fazla ICT teknolojilerin kullanılması ile birlikte oluşabilecek arıza çeşitlerine ve sistem güvenilirliği değinilmiştir [20]. Bu tez çalışmasında örnek analizler ile güç sisteminde oluşabilecek arızaların geçici kararlılık incelemesi yapılmıştır. Güç sistemleri başlangıç koşullarında (arıza öncesi) kararlı çalışma koşullarında olduğu kabul edilir. Fakat güç sisteminde dışarıdan etki eden müdahaleler sonucunda sistemin nasıl etkileneceği bilinmemektedir. Bu sebepten bu tez çalışmasında farklı arıza koşulları altında güç sistemlerinin davranışının incelenmesi için sistemlerin geçici hal kararlılık analizi gerçekleştirilmiştir.

Literatür taraması sonucu incelenen güç sistemlerinde geçici kararlılık analizinin, aktif sistem koşullarına göre daha ayrıntılı incelenmediği (belirli çalışma koşulları altında gerçekleştirildiği) ve arıza koşullarına göre sistem performansının iyileştirilmediği gözlenmiştir. Tezin amacı farklı arıza koşulları altında örnek aktif iletim sisteminin geçici kararlılık analizinin gerçekleştirilmesi ve sistem çalışma performansının iyileştirilmesi sağlanmıştır. Örnek güç sisteminde oluşabilecek arıza koşullarında güç sisteminin incelenmesi Matpower paket programı ve PowerWorld yazılımı kullanarak elde edilmiş ve daha sonrasında MATLAB® yazılımı ile güç sisteminin kararlılığı iyileştirilmiştir. Kısaca dış etkenler tarafından müdahale edilmiş örnek iletim sisteminin sistem davranışının incelenmesi, geçici kararlılık analizi ile gerçekleştirildikten sonra, güç sisteminde çalışma koşullarının iyileştirilmesi önerilmiştir.

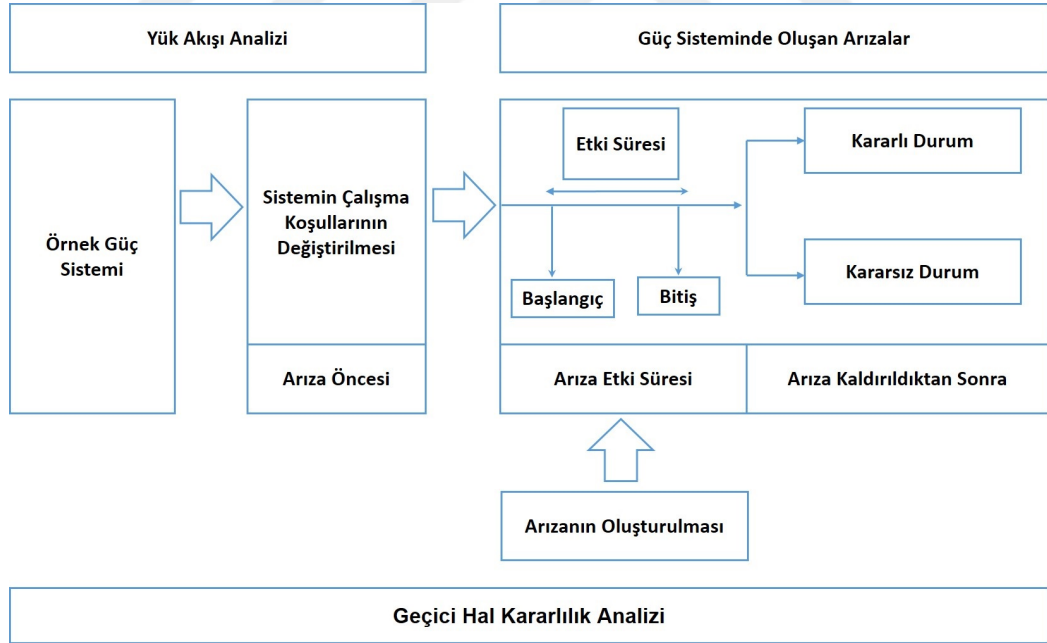
Tezin içeriği genel olarak 8 ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümlerde sırası ile tezin giriş kısmı, analiz yapısı ve modellenmesi, modellenmiş IEEE-9 baralı güç sistemi, dinamik sistem parametreleri, arıza öncesi kararlılık analizi – yük akışı analizi, geçici hal kararlılık analizi, governor sistem modelinin değiştirilerek frekans kontrolünün gerçekleştirilmesi verilmiş son olarak da sonuç ve öneriler verilmiştir. Bir sonraki alt başlıkta analiz yapısı ve modellenmesi anlatılmıştır.

2. ANALİZ YAPISI VE MODELLENMESİ

Bu bölümde test güç sistemlerinin analiz modeli ve genel yapısı açıklanacaktır. Tez çalışmasında güç sistemlerinin incelenmesi kısaca üç bölümden oluşmaktadır.

- İlk Kısım: Arıza öncesi güç sisteminin analizi
- İkinci Kısım: Güç sisteminde arızalar
- Üçüncü Kısım: Güç sisteminin geçici hal kararlılık analizi

Güç sisteminin incelenmesi ve modellenmesi yukarıda belirtildiği gibi arıza öncesi, arızanın oluşturulması ve geçici hal kararlılık olarak üç kısımdan oluşmaktadır ve Şekil 2.1 ile aşağıda gösterilmiştir.



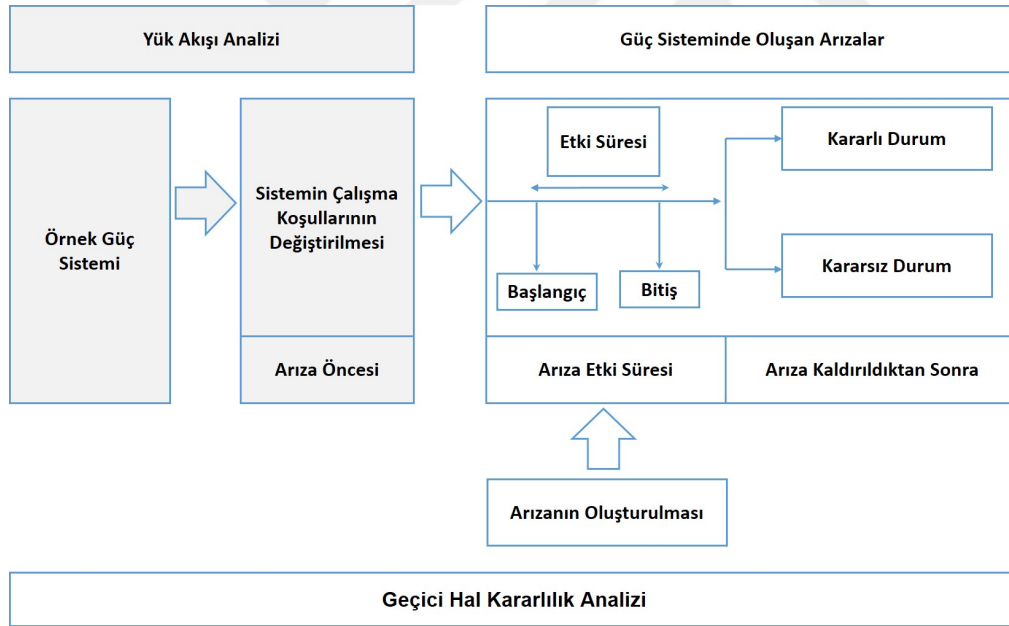
Şekil 2.1 : Analiz methodunun temsili gösterimi.

Şekil 2.1’da gözüktüğü gibi analiz yapısı yük akışı analizi ve arızanın oluşturulması ile incelenen geçici kararlılık analizi olarak genel şekilde ikiye ayrılmaktadır [23].

Güç sistemleri kararlılığı senkron makinaların senkronizasyonunu kaybetmeden arıza sonrası kararlı çalışma durumunu sürdürebilmesi veya başka bir kararlı çalışma durumuna geçmesi yeteneğidir [21]. Geçici kararlılık analizinin temel amacı senkron generatörlerin arıza sonrası yeni kararlı çalışma durumunda senkronizasyonda kalıp / kalamama durumunun incelenmesidir. Yük akışları ve bara gerilimleri de dikkate alınmaktadır [22] Lineer olmayan güç sistemlerin kararlılığını sürdürebilmesi, güç sisteminin arıza öncesi çalışma koşullarına ve arızanın sisteme olan etkisine bağlıdır. Ayrıca bir güç sisteminde geçici hal kararlılık güç sistemlerinin yapısına ve güç sistem elemanları dikkate alınarak gerçekleştirilmektedir [23]. İlk olarak arıza öncesi güç sistem incelemesi tanımlanmıştır.

2.1 Arıza Öncesi Güç Sisteminin Analizi

Bu bölümde arıza öncesi güç sisteminin incelenmesi açıklanmış ve Şekil 2.2’de genel olarak modellenmesi tüm simülasyon yapısı içinde belirtilmiştir.



Şekil 2.2 : Güç sisteminin analizinde ilk adım olarak yük akışı analizi.

Şekil 2.2’de gözüktüğü gibi yük akışı analizinde örnek güç sistemi arıza öncesi farklı çalışma koşullarında gerçekleştirilmiştir. Yük akışı analizi güç sistemlerinin denge çalışma noktası ile ilgili bilgi verir ve arıza olmadan önce ve arıza giderildikten sonra güç sistemlerin kararlı çalışma koşullarında parametrelerin hesaplanması için kullanılmaktadır [24].

Matpower ile yük akışı

Bu bölümde kullanılan yük akışı analizi için kullanılan Matpower Matlab paket programı ve kullanılan analiz yöntemleri hakkında bilgi verilecektir.

Matpower fonksiyonları

Matpower yük akışı analizi ve farklı fonksiyonlu yük akışı problemlerini çözmek için kullanılan ve sonuçların ara yüz ekranına hızlı simülasyonunu sağlayan Matlab M-file paket programıdır [18] ve referanslar [25] ile indirilmiştir.

Matpower yazılım paketinde uygun çözüm algoritmaları arasından seçilen ya da algoritmanın davranışının değiştirilmesini sağlayan ve arayüz ekranında gösterilen sonuçların belirlenmesine yarayan fonksiyon çeşitleri vardır.

- **define_constant:** Tanımlanan değişkenleri yapısını (structure) oluşturur.
- **casedata:** Matpower durum yapısı (structure) ya da dizisidir. Analiz edilen güç sistemlerinin çağırmak için 'case' komutu ile oluşturulur.
- **mpoption:** Farklı algoritmaların, fonksiyonların seçilmesini sağlamaktadır.
- **runpf:** Çağırılan m-file dosyasını veri olarak algılamaktadır.
- **result:** İstenen fonksiyonlara ve algoritmalara göre yük akışı yapar.

Kullanılan fonksiyon çeşitleri aşağıda bulunan Çizelge 2.1 ile verilmiştir [18] [25].

Çizelge 2.1 : Matpower fonksiyonlarının algoritması [18].

Fonksiyon Çeşidi	Kodu	Algoritması
pf.alg	mpoption("PF_ALG",1)	Newton Raphson yöntemi
	mpoption("PF_ALG",2)	Fast-Decoupled (XB version)
	mpoption("PF_ALG",3)	Fast-Decoupled (BX version)
	mpoption("PF_ALG",4)	Gauss-Siedel Yöntemi
verbose	mpoption("verbose",0)	Sonuç Verme
	mpoption("verbose",1)	Az Sonuç Göster
	mpoption("verbose",2)	Birçok sonuç göster
	mpoption("verbose",3)	Bütün Sonuçları Göster

Çizelge 2.1'de gözüktüğü gibi Matpower ile farklı yük akışı yöntemleri yapılabilir ve sonuçlar istenilen şekilde ara yüz ekranına çıkartılmaktadır.

Bu tez çalışmasında kullanılan Matpower fonksiyonların çağırılması ve yazılması aşağıda bulunan Şekil 2.3 örnek olarak Matlab Command Window ara yüzü ile verilmiştir.

```
Command Window
>> define_constants;
>> mpc=loadcase('case9');
>> mpopt = mppoption('PF_ALG',1,'VERBOSE',1);
>> results = runpf('case9',mpopt);

MATPOWER Version 6.0, 16-Dec-2016 -- AC Power Flow (Newton)

Newton's method power flow converged in 4 iterations.

Converged in 0.12 seconds|
-----
```

Şekil 2.3 : Matpower fonksiyonlarının Matlab'da kodlanması.

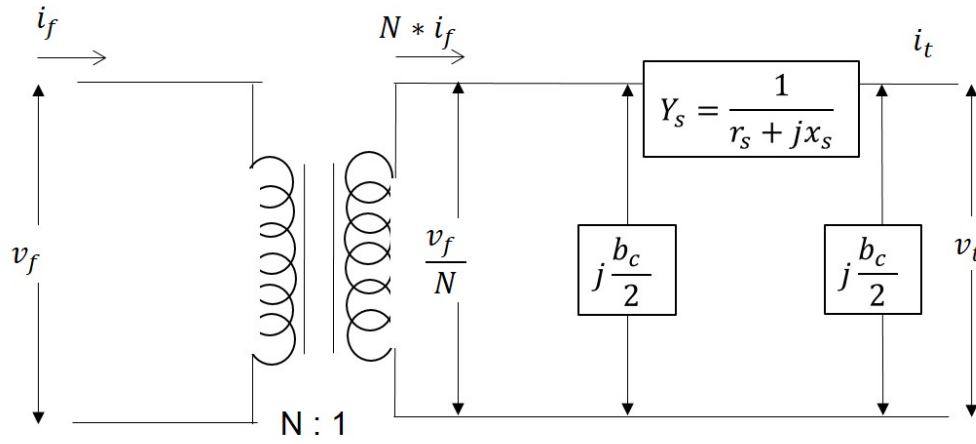
Örnek olarak verilen Şekil 2.3'de Matpower değişkenleri belirtilmiştir. Öncelikle "case9" ile istenilen dosya çağırılmış ve yük akışı analizi Newton Raphson yük akışı ile yapılmıştır. Matpower programının elde ettiği sonuçlar 'verbose' fonksiyonu ile arayüz ekranına az yazılacak şekilde seçilmiştir. Yük akışı Matpower programında 4 iterasyon ile hesaplanıp sonuçlar 0.12 saniyede elde edilmiştir.

Güç sistemlerinin arıza öncesi yük akışı analizinde farklı yöntemler uygulanacak ve sonuçlar karşılaştırılıp elde edilen simülasyon sonuçları daha sonraki kısımlarda verilecektir. Arıza sırası ve sonrası yük akışı analizi PowerWorld yazılımı ile yapılacaktır. Arıza öncesi farklı çalışma koşullarında istenilen karşılaştırmayı daha mümkün kıldığı için Matpower Matlab M-file paket yazılımı özellikle seçilmiştir.

Güç sistemlerin modellenmesi

Matpower yazılımında tüm değişkenlerinin mutlak değerleri per unit cinsinden ve açıları ise karmaşık radyan cinsinden tanımlanmaktadır. Değişkenler yapısal olarak matris cinsinden oluşturulmuştur. Kullanılmayan senkron generatörler, kablolar ve yenilenebilir enerji kaynakları yük akışı analizi için önceden matris yapılarında sıfır olarak tanımlanır.

Bütün transformatörler, iletim hatları seri empedans ile birlikte π iletim hatları modeli kullanılarak oluşturulmuştur. Aşağıda bulunan Şekil 2.4 ile transformatörlerin dönüştürme oranının π ve faz açısının $\theta(shift)$ olarak gösterilmiştir [18].



$$N = \pi e^{j\theta_{shift}}$$

Şekil 2.4 : Pi Modelinin İletim Hatlarında Gösterimi [17].

π modeli göz önüne alınarak iletim hattı modelinde giren i_f ve i_t akım değerlerinin hesaplanması iletim hattı empedans matrisi Denklem(2.1)'de Y_{br} ile elde edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} i_f \\ i_t \end{bmatrix} = Y_{br} \begin{bmatrix} v_f \\ v_t \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Akımların admitans matrisi ve gerilimler cinsinden yazılması Matpower yük akışı analizinin temel algoritmasını oluşturmaktadır. İletim hattı π modeli kullanılarak elde edilen seri admitans değeri $Y_{br} = 1 \setminus Z_{br}$ genel Denklem(2.2) ile verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} (y_s + \frac{jb_c}{2}) \frac{1}{\tau^2} & -y_s \frac{1}{\tau * e^{-j\Theta}} \\ -y_s \frac{1}{\tau * e^{-j\Theta}} & (y_s + \frac{jb_c}{2}) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Kısaca elde edilen empedans matrisinin gösterimi tüm direnç ve reaktans değerleri kullanılarak sistemin admitans matrisinin bulunmasını sağlar. Genelleştirilmiş ve Denklem(2.3) ile özetlenmiştir.

$$Y_{br}^i = \begin{bmatrix} y_{ff}^i & y_{ft}^i \\ y_{tf}^i & y_{tt}^i \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

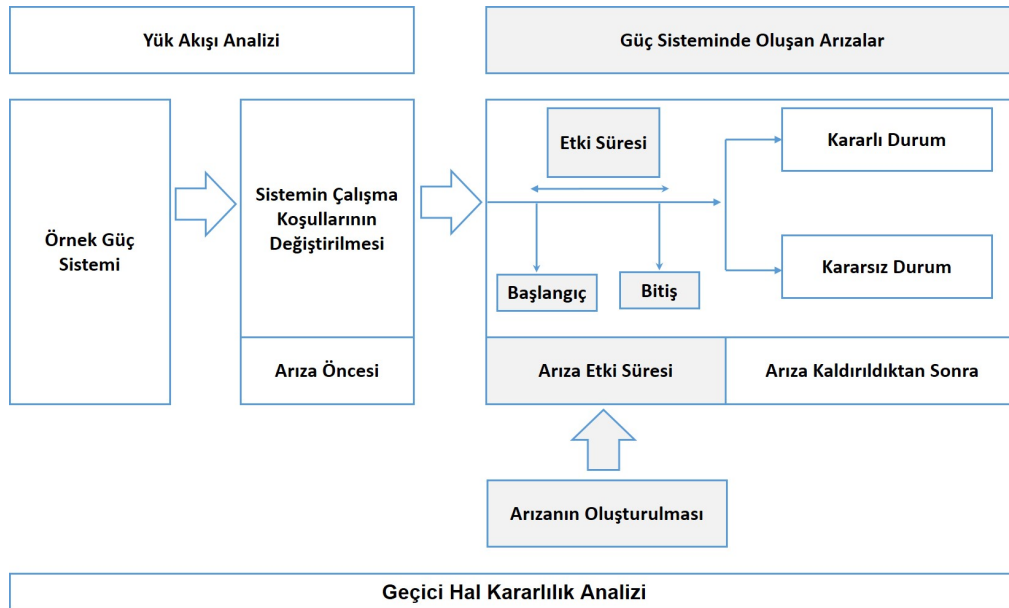
Transformatör ve iletim hatlarının admitansı bulunmasının yanında senkron generatör, statik yükler ve şönt elemanların kompleks güç değerleri de güç sistemlerinin yük analizi için verilmiştir [17] [32] .

Sekron generatör bara sistemine entegre edilmiş kompleks güç olarak modellenmektedir. Her bir senkron generatör aktif ve reaktif gücün per unit değeri $s_g^i = p_g^i + jq_g^i$. Her bir senkron generatör aktif ve reaktif gücün per unit değeri Matpower algoritması ile dönüştürülüp matris olarak arayüzde oluşmaktadır. Yükler de matris olarak oluşturulur. Şönt Elemanları ise kapasitans ve endüktans gibi bir baraya topraklandırılmış empedans olarak belirtilmektedir [17] [32].

2.2 Güç Sisteminde Arızalar

Yenilenebilir enerji kaynaklarının artması ile birlikte bir güç sisteminde daha fazla kontrol sistemleri kullanılmakta ve güç sistemi pasif güç sisteminden aktif güç sistemine dönüşmektedir [33]. Daha çok Bilgi ve İletişim Teknolojilerin (BİT) sistem kontrolünün artırılması için kullanılması ile siber saldırıların güç sistemlerinin çalışma koşullarını değiştirmektedir. Bu yüzden oluşabilecek etkilerin daha önceden tespit edilmesi güç sistemlerin güvenilirliği için oldukça önemlidir [34]. Diğer bir değiş ile daha önceden belirlenen parametrelerin siber saldırılar ile değiştirilmesi güç sistemlerinde kararlılık problemlerin oluşmasına ve güç sistemlerin çalışma davranışlarının değişmesine sebep olabilmektedir [35]. Bu tez kapsamında oluşabilecek arıza koşullarında sistem davranışının incelenmesi yapılmıştır.

Geçici hal kararlılık analizi için öncelikle sistemde farklı tipte arıza tipleri oluşturulmuştur. Öncelikle arızanın genel modellenmesi Şekil 2.5’de verilmiştir.

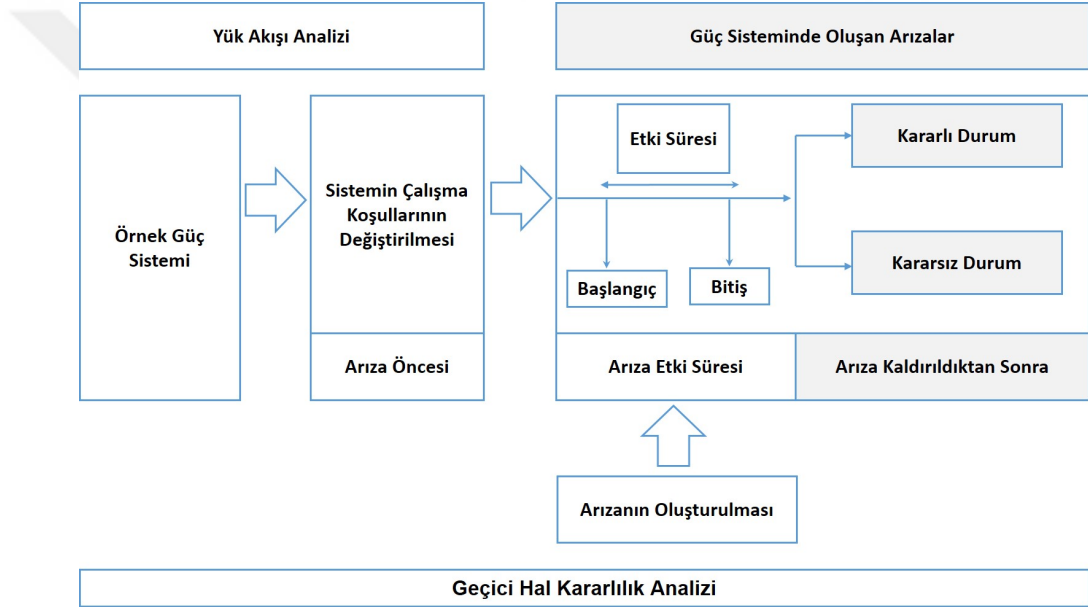


Şekil 2.5 : Güç sisteminde oluşturulan arızanın modellenmesi.

Sekil 2.5'te belirtildiği gibi her çalışma koşullarında geçici hal kararlılık analizinin yapılması için arızanın oluşturulur ve arıza etkisi sistemin kararlılığı incelenir. Powerworld yazılımında test güç sistemi için oluşturulan arızaların adımları 1. Kısım: Farklı çalışma koşullarının oluşturulması, 2. Kısım: Arıza çeşidinin belirlenmesi ve 3. Kısım: Geçici hal kararlılık analizinin incelenmesidir. Güç sistemlerinin arıza etkisi altında geçici kararlılık analizi açıklanmıştır.

2.3 Güç Sisteminde Kararlılık

Bu bölümde öncelikli olarak geçici hal kararlılık analizinin güç sisteminin genel modellenmesi üzerinde gösterimi Sekil 2.6 ile verilmiştir.



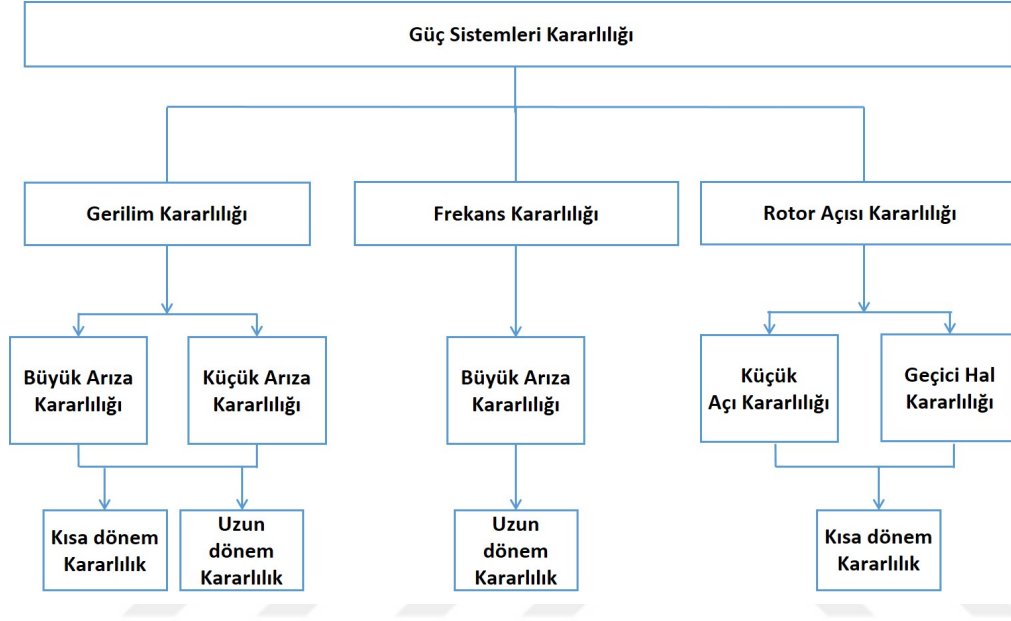
Şekil 2.6 : Geçici hal kararlılık analizinin modellenmesi.

Burada geçici hal kararlılık analizi ayrıca güç sistemlerin çalışma koşullarına da bağlıdır. Fakat bu modellemelerde özellikle güç sistemlerinde yapılan incelemelerin arıza öncesi, sırası ve sonrası sistem davranışını incelediğini belirtmek amacı ile oluşturulmuştur. Bir güç sisteminin kararlılık incelenmesi alt başlıklarda verilmiştir.

Güç sistemlerinin geçici kararlılığı yeni denge durumu ya da başlangıç kararlılık durumu olmak üzere arıza sonrası güç sisteminin kabul edilen çalışma koşullarına ulaşabilme yeteneğidir [36].

Ayrıca arıza koşullarında güç sistemlerinin kararlılık analizi için güç sistem elemanları (senkron generatör, uyarma, governor, gerilim-kaynaklı dönüştürücü ve yük vb.) dinamik parametreleri ile kullanılmaktadır [12].

Arıza süresi boyunca güç sistemlerinin geriliminin, rotor açısının ve frekansının zamana bağlı olarak dinamik olarak incelenmesi güç sisteminin kararlılık analizini vermektedir ve Şekil 2.7 ile gösterilmiştir [37].



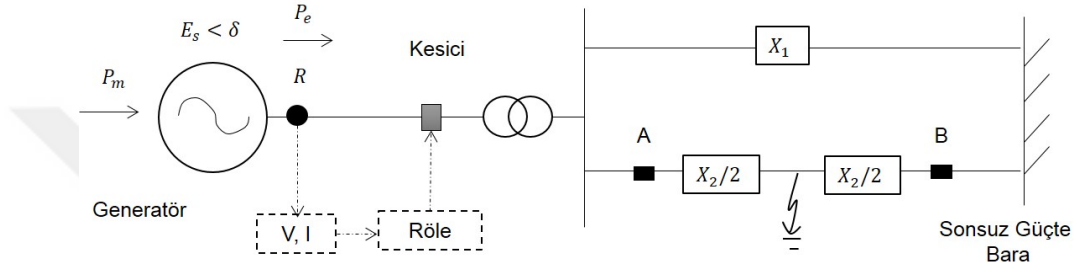
Şekil 2.7 : Güç sistemlerinin kararlılığının sınıflandırılması [38] [39].

- Güç sistemlerinde güç ve yük arasındaki dengesizlik güç sistemlerinin frekansında değişime sebep olmaktadır ve frekans kararlılığı arıza durumlarında güç sistemlerinin izin verilen frekans değerleri içinde kalabilmesi yeteneğidir [38].
- Gerilim kararlılığı arıza koşulları altında güç sistemlerinin dinamik koşullar altında gerilimin izin verilen gerilim tolerans aralığında kalabilmesidir [23]. Gerilim kararlılığının analizi her baranın arıza öncesi geriliminin arıza sonrası gerilimin karşılaştırılmasının ile değerlendirilir [38].
- Bir güç sisteminde küçük ya da büyük arızalarda (bara gerilimlerinin ani düşmesi, yük değişimleri vb.) senkron generatörlerin dinamik davranışlarının incelenmesi rotor açısı kararlılığı ve senkronizasyonu hakkında bilgi vermektedir [39].

Genellikle geçici hal kararlılık analizler 3-5 saniye arasında yapılmaktadır. Fakat bu 10-20 saniyeye kadar uzatılabilir. Frekans kararlılığı ise 10 saniyeden - birkaç dakikaya kadar olmaktadır [38].

Güç sistemlerinin rotor açısı kararlılığı

Tezin bu bölümünde ayrıntılı olarak rotor açısı kararlılığı hakkında bilgi verilecektir. Bir güç sisteminin rotor açısı kararlılığının incelenmesi Şekil 2.8’te belirtildiği gibi sonsuz güçte bara ve tek senkron generatör modelinin eşit-alan kriteri (the equal-area criterion) referans alınarak incelenmektedir.



Şekil 2.8 : Senkron generatör ve sonsuz güçte bara sistemi [30].

Burada senkron generatörde endüklenen gerilim E_s , rotor ya da güç açısı δ . Normal çalışma durumlarında ya da güç sisteminde arıza oluşmadan önce, senkron generatörün çıkış gücü P_e giriş mekanik güç P_m ’e eşittir. Güç sisteminin empedansları Şekil 2.8’te gösterildiği gibi X_1 ve X_2 ’dir.

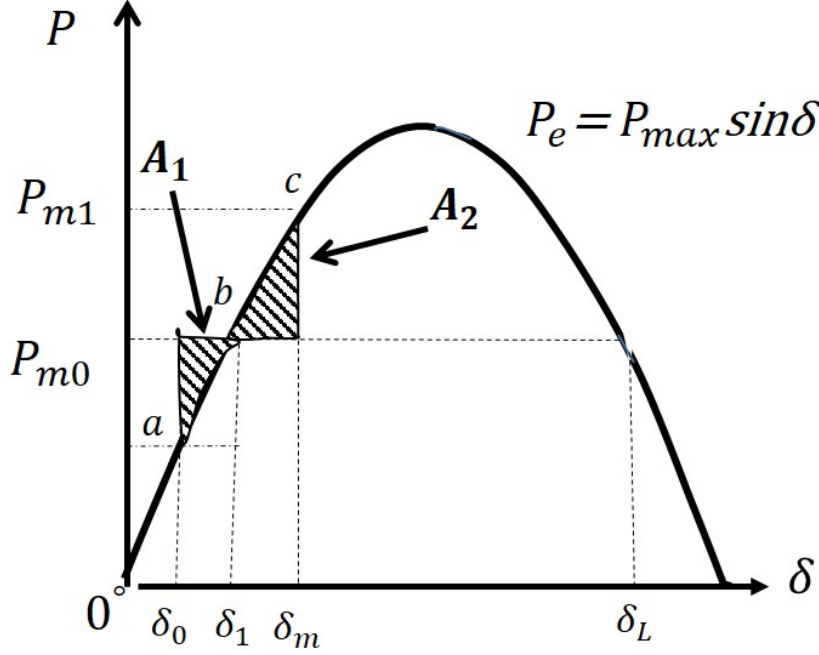
Bu güç sisteminde, 3-fazlı kısa devre akımı ikinci iletim hattının ortasına uygulandığında, A-B iletim hattının ortası güç sisteminden yalıtılmıştır. Güç sisteminin geçici hal kararlılık salınım denklemi aşağıda Denklem(2.4) ve 2.5 ile verilmiştir [36] [39].

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e = P_{acc} \quad (2.4)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta\omega = \omega - \omega_s \quad (2.5)$$

Burada P_{acc} net salınım gücü, $\Delta\omega$ rotor hızı değişimi saniyede radyan (rad/s), M senkron generatörlerin açısal momenti, P_m senkron generatörün net mil gücü, P_e elektriksel hava-boşluğu gücü, P_D sönümlleme gücü.

Salınım denkleminde göre mekanik ve elektrik güç arasındaki dengesizlik senkron generatörlerde açı değişimine sebep olmaktadır ve arıza süresi boyunca geçici hal davranışı salınım denkleminde göre belirlenmektedir [23] [30] . Salınım denkleminde göre tek senkron generatör - bara sisteminin eşit-alan kriteri aşağıda bulunan Şekil 2.9 ile verilmiştir.



Şekil 2.9 : Eşit-alan kriteri: senkron generatör ve sonsuz güç bara sistemi [30].

Çoklu senkron generatör sisteminin tek makine modelinde, A_2 güç sisteminin mekanik ve elektriksel güç olarak dengelenmesi için A_1 'e eşit veya küçük olmalıdır. Belirtilen durum aşağıda verilen Denklem (2.6) ile verilmiştir.

$$A_1 - A_2 \leq 0 \quad (2.6)$$

Bu denklemde A_2 rotor açısı azalmayı ve A_1 rotor açısının artması durumunu belirtmektedir. Her bir senkron generatör arıza oluşmadan önce ya da arıza temizlendikten sonra rotor açısı δ_0 ve δ_e arasında değişmektedir. Ayrıca güç-açı karakteristiğinin denklemi aşağıda Denklem (2.7) ile verilmiştir.

$$P_\delta = \frac{E \times V_s}{X_{eq}} \sin \delta \quad (2.7)$$

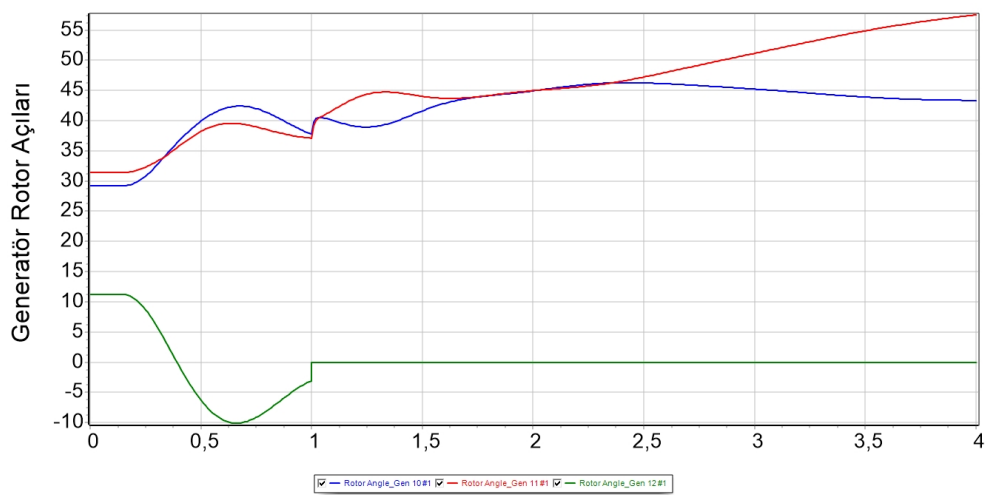
E senkron generatörün direkt eksen senkron reaktansı gerisindeki gerilim, V_s sonsuz barasının gerilimi ve δ sonsuz senkron generatöre göre eşdeğer güç açısı [40].

Çoklu-senkron generatörlü sistemlerin rotor açısı kararlılığı

Çoklu-senkron generatörlü sistemlerde, arıza anında sistemdeki elektriksel ve mekanik güç dengesizliği sistemde bulunan senkron generatörler tarafından karşılanır. Fakat arızanın her bir senkron generatörlere olan etkisi, generatörlerin arızaya olan uzaklığına bağlı olarak değişmektedir. Güç sisteminde bulunan senkron generatörlerin birinin arıza süresince sistemden çıkarıldığında, sistemin toplam mekanik enerjisi bağlantısı çıkarılan senkron generatör kadar azalır. Denklem (2.7)'e göre güç-açı karakteristiği bağlantısı çıkarılan senkron generatör geçici reaktansı kadar azalmaktadır. Güç sisteminde azalan toplam mekanik güç güç-açı karakteristiğinden daha fazla olduğu için ($P_e > P_m$) güç sistemindeki diğer senkron generatörlerin rotor açısı Denklem (2.4)'e göre azalmaktadır. Senkron generatörlerin rotor açısı sistem dengeye ulaşana kadar atalet momenti etkisi ile salınım yapmaktadır [23]. Bir sonraki alt başlıkta güç sistemlerinde kararlılığın değerlendirilmesi verilecektir.

Güç sistemlerinin kararlılığının değerlendirilmesi

Bu bölümde örnek simülasyon sonuçlarına göre geçici hal - kararsız sistem davranışlarına örnekler verilecektir. Örnek sistemde güç sisteminde bulunan statik yükler 0.30 saniye ve senkron generatör (12) güç sisteminden 1.00 saniyede sistemden çıkarılmıştır. Senkron generatörlerin geçici hal rotor açısı davranışları Şekil 2.10 ile verilmiştir.

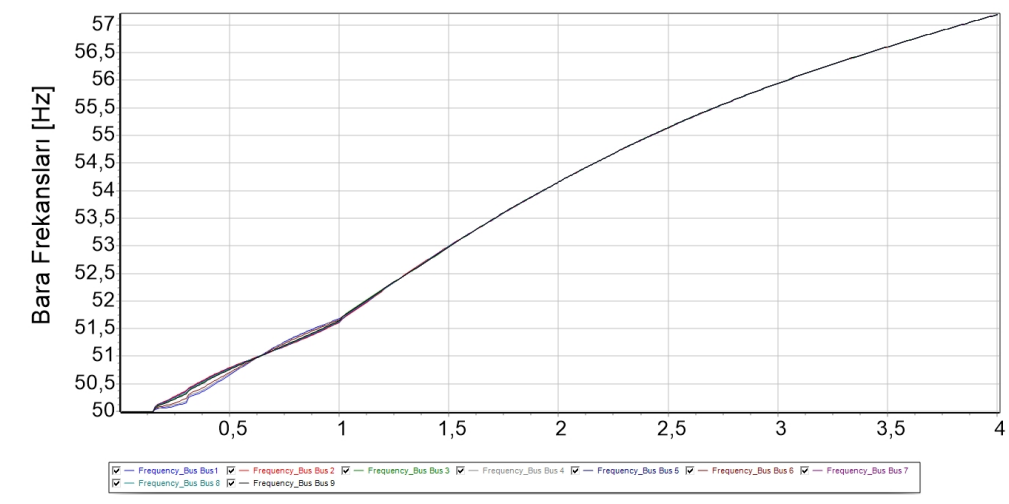


Şekil 2.10 : Geçici hal rotor açısı kararsızlığı örneği.

Şekil 2.10'daki sonuçlara göre, 0.30-1.00 saniye arasında senkron generatör 10 ve 11'nin rotor açısı artıp, senkron generatör 12'nin rotor açısının azalmıştır. Güç sisteminin geçici hal kararlılık analizinin sonuçları sırası ile bir sonraki adımda verilmiştir.

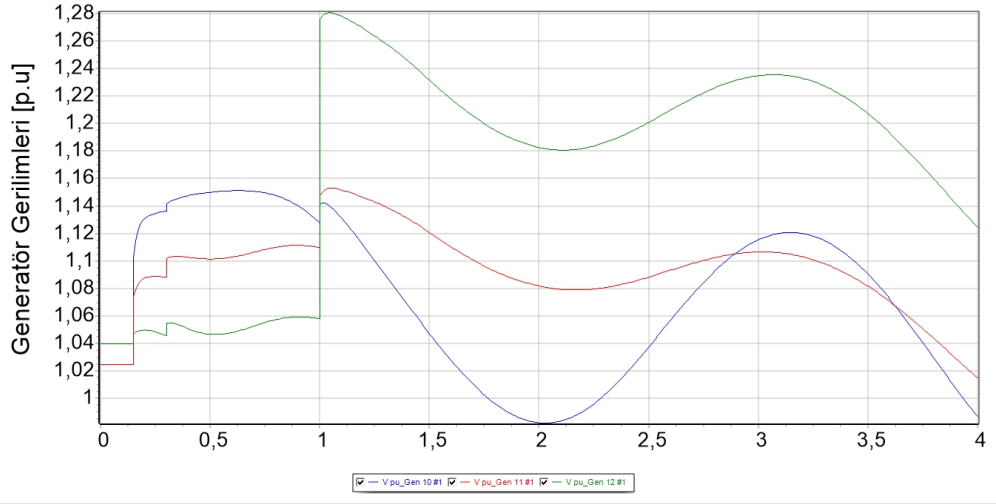
- 0.15 saniyeden itibaren sistemde harcanan statik yüklerin azalması.
- Senkron generatör 11 ve 10'nun mekanik enerjisinin elektrik enerjisinden fazla olması Denklem (2.4) göre rotor açısının artmıştır. Daha sonra senkron generatör 12'nin yük akışının değişmesinden dolayı elektriksel enerjinin mekanik enerjiden yüksek olması ve rotor açısının azalmasıdır.
- Senkron generatör 12'nin 1. saniyede devre dışı bırakılması ile birlikte 11. ve 10. senkron generatör sistemdeki eksik elektriksel gücü (kaybedilen mekanik gücü) dengelemek için rotor açısını arttırmıştır.
- Rotor açıların sürekli artması ve başlangıç koşuluna dönmemesi ya da yeni dengeye ulaşmamasından dolayı sistemin kararsızdır.

Elde edilen gerilim ve frekans geçici hal kararlılık analizi sonuçları Şekil 2.11, Şekil 2.12, Şekil 2.13 ile verilmiştir.



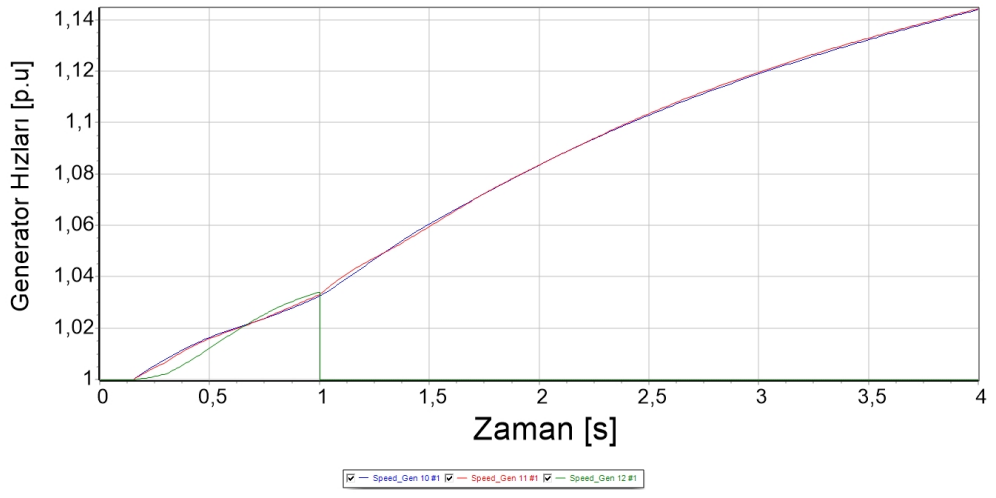
Şekil 2.11 : Geçici hal frekans kararsızlığı örneği.

Şekil 2.11'da sistem normal frekansı 50 Hz ve izin verilen frekansın 57 Hz altında olduğu düşünülerek değerlendirilmiştir.



Şekil 2.12 : Geçici hal generatör gerilimi kararsızlığı örneği.

Şekil 2.12’de alınan sonuçlara göre ilk birinci saniyeye kadar statik yükler kaldırıldığı zaman oluşan gerilim değişimi 1.02-1.14 p.u aralığındadır ve kablolarla iletilen elektriksel güç azalmıştır. Daha sonrasında 1. saniyesinde 12. senkron generatör sistemden çıkarıldığında, diğer senkron generatörlerin gerilimleri düşmüştür.



Şekil 2.13 : Geçici hal generatör hızı kararsızlığı örneği.

Şekil 2.13’de elde edilen sonuçlara göre 12. senkron generatör 1. saniyede sistemden istenildiği gibi çıkarılmış ve 10. ve 11. senkron generatörler sistemdeki eksik elektriksel gücü gidermek için rotor açısı ve doğal olarak generatör hızı artmıştır.



3. ARIZA ÖNCESİ GÜÇ SİSTEMİ

Bu bölümde incelenen örnek test güç sisteminin statik parametreleri verilecektir. Bölüm 2.1’de belirtildiği gibi yük akışı analizleri geçici hal kararlılık analizi öncesi Matpower-Matlab yazılımı ile yapılmıştır.

3.1 Bara Değişkenlerin Belirlenmesi

Öncelikle temel güç "mpc.baseMVA = 100;" 100MVA’dır. Test güç sistemi bara verileri Çizelge A.1’de 9x11’lik bara matrisi ile verilmiştir ("mpc.bus = [...];" (9x11)).

Çizelge 3.1 : Matpower test güç sisteminin statik bara verileri [17].

bara_no	çeşidi	Pd	Qd	Gs Bs	Vm	Va	Temel_kV	Vmak-Vmin
1	1	0	0	0	1.04000	0	16.52	1.1-0.9
2	1	0	0	0	1.02499	-0.91	18.00	1.1-0.9
3	1	0	0	0	1.02500	-1.65	13.80	1.1-0.9
4	1	0	0	0	1.03800	-2.29	230	1.1-0.9
5	1	125	50	0	0.84349	-19.97	230	1.1-0.9
6	1	90	30	0	1.02010	-5.93	230	1.1-0.9
7	1	0	0	0	0.98599	-6.70	230	1.1-0.9
8	1	100	35	0	0.98852	-8.09	230	1.1-0.9
9	1	0	0	0	1.02416	-4.36	230	1.1-0.9
10	2	0	0	0	0.98599	-0.19	230	1.1-0.9
11	2	0	0	0	0.98852	-1.64	230	1.1-0.9
12	3	0	0	0	1.02416	0	230	1.1-0.9

Yazılan bara verileri düzeltilmiş IEEE-test güç sistemi verileridir. Yapılan incelemelerde Powerworld programı için yazılan IEEE-9 [26] baralı test sistemi ile Matpower IEEE-9 [25] baralı test sisteminde farklılıklar olduğu tespit edilmiş ve aynı güç sistemi analizi için güç sistemlerinde değişiklikler yapılmıştır. Ayrıca test güç sistemi üzerinde yazılan değişiklikler PoweWorld programında da uygulanmıştır.

Çizelge A.1’da = Pd : aktif güç (MW), Qd : reaktif güç (MVar), GS : şönt kapasitans (MW - V=1.0 p.u), BS : şönt süseptans, Vm : gerilim genliği (p.u), Va : gerilim açısı, $Vmak$.: maksimum gerilim genliği (p.u), $Vmin$.: minimum gerilim genliği (p.u)’dur.

İkinci sütünde verilerin bara çeşitlerinde 1: PQ (generatör olmayan baralar) barası, 2: PV (generatör) barası, 3: *slack* barasıdır. Bir sonraki kısımda generatör değişkenleri verilecektir.

3.2 Generatör Değişkenlerinin Belirlenmesi

İkincil olarak test güç sisteminde kullanılan generatörlerin değişkenleri verilecektir. Bu güç sisteminde Çizelge A.1’de 5,6 ve 9. satırda gözüktüğü gibi aktif ve reaktif güç "3" tane bara numarası ile güç sistemine sağlanmaktadır.

Generatör matrisi Çizelge A.3 ile 3x10’luk bara matrisi olarak yazılmıştır. Örnek generatör matrisi Matpower kodlaması "mpc.gen=[...];"(3x10)’dur.

Çizelge 3.2 : Matpower test güç sisteminin statik generatör verileri [17].

bara	Pq	Qq	Qmak.	Qmin.	Vg	mTemel	durum	Pmak.	Pmin
10	163	72.20	300	-300	1.025	100	1	300	10
11	85	3.49	300	-300	1.025	100	1	270	10
12	75	3.92	300	-300	1.040	100	1	250	10

Çizelge A.3’deki değişken şu şekildedir: Pq : aktif güç (MW), Qq : reaktif güç (MVA), $Qmak$: maksimum reaktif güç (MVA), $Qmin$: minimum reaktif güç (MVA), Vg : gerilim büyüklüğü başlangıç noktası (p.u), $mTemel$: toplam MVA değeri, durum 1: bağlantılı; 0: bağlantısız, $Pmak$: maksimum aktif güç değeri (MW), $Pmin$: minimum aktif güç değeri (MW).

Bu Çizelge A.3’de en önemli olan kısım istenilen generatörlerin güç sistemde çalışması için durum değişkeni "1" ve çıkarılması için "0" olması gerekmektedir. Yapılan yük akışı analizlerinde farklı çalışma koşullarında durum değişkeni değiştirilecektir. Ayrıca güç sisteminin temel güç değeri: 100MVA ve temel gerilim değeri 345 kV’dır.

3.3 İletim Hattı Değişkenlerinin Belirlenmesi

Burada iletim hatlarının bara ve generatörlere olan bağlantı şeklinin de belirtilmesi ile birlikte güç sisteminin yapısı tamamlanmıştır. IEEE-9 Matpower ve PowerWorld test sistemindeki değişiklikler Bölüm 3.1’de belirtildiği gibi giderilerek, farklı programlarda aynı güç sistemi analizi yapılmıştır.

İletim hattı 5x10'luk matrisidir. Örnek iletim hattı matrisi Matpower kodlamasında "mpc.branch=[...];"(5x10)'dur. Öncelikle değişkenler ve değerleri aşağıda Çizelge A.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Matpower test güç sisteminin iletim hattı verileri [17].

fbara	tbara	r	x	b	oranA oranB oranC	açı	durum	min-açı	mak-açı
1	4	0	0.0576	0	250	0	1	-360	360
1	12	0	0.00001	0	250	0	1	-360	360
2	7	0	0.0625	0	250	0	1	-360	360
2	10	0	0.00001	0	250	0	1	-360	360
3	9	0	0.0586	0	300	0	1	-360	360
3	11	0	0.00001	0	250	0	1	-360	360
4	6	0.017	0.092	0.158	250	0	1	-360	360
5	7	0.032	0.161	0.306	250	0	1	-360	360
6	9	0.039	0.17	0.358	150	0	1	-360	360
7	8	0.0085	0.072	0.149	250	0	1	-360	360
8	9	0.0119	0.1008	0.209	150	0	1	-360	360

Çizelge A.2'deki değişken şu şekildedir: *fbara*: ilk bara bağlantısı, *tbara*: son bara bağlantısı, *r*: direnç (p.u), *x*: reaktans (p.u), *b*: hattın toplam süseptansı (p.u), oran A;B;C: MVA oranı (A:uzun zamanlı oranı, B:kısa zamanlı oranı, C:acil durum oranı), açı: transformatörün faz değişimi açısı (derece), durum 1: bağlantılı; 0: bağlantısız, min-açı: minimum faz açısı farkı, mak-açı: maksimum faz açısı farkı.

Bir sonraki bölümde Matpower ile belirlenen güç sistemin statik parametrelerin PowerWorld IEEE-9 baralı düzenlenmiş test sistemine uygulanılmış hali verilecektir.

3.4 Düzenlenmiş IEEE-9 Baralı Güç Sistemi

Daha önceden Bölüm 2.1'de belirtildiği gibi PowerWorld programı için yazılan IEEE-9 [12] güç sistemi Bölüm 3'de verilen güç sistemi parametreleri ve değişkenleri ile birlikte tekrardan düzenlenmiştir.

The diagram illustrates a power system with 12 buses and various power sources and loads. The buses are labeled as follows:

- Bus 1:** 125 MW, 50 Mvar
- Bus 2:** 163 MW, 72 Mvar
- Bus 3:** 85 MW, 3 Mvar
- Bus 4:** 100 MW, 35 Mvar
- Bus 5:** 125 MW, 50 Mvar
- Bus 6:** 90 MW, 30 Mvar
- Bus 7:** 10,25 pu
- Bus 8:** 0,986 pu
- Bus 9:** 1,024 pu
- Bus 10:** 1,025 pu
- Bus 11:** 1,025 pu
- Bus 12:** 75 MW, 4 Mvar

The diagram shows the following components and connections:

- Generators:** Represented by circles with a vertical line through the center. They are connected to Buses 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, and 12.
- Loads:** Represented by circles with a horizontal line through the center. They are connected to Buses 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, and 12.
- Transformers:** Represented by a circle with a vertical line through the center and a horizontal line through the center. They are connected to Buses 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, and 12.
- Transmission Lines:** Represented by lines connecting the buses. The lines are labeled with their respective impedances in pu.

Güç sisteminde Çizelge A.1’da gözüktüğü gibi "12" tane bara (Bus 1’den: Bus 12’ye kadar), "3" tane statik yük (Bus 3, Bus 6 ve Bus 8’de) ve "3" tane senkron generatör (Bus 10, Bus 12 ve Bus 11’de) bulunmaktadır. Bara gerilimleri p.u cinsinden verilmiştir. İletim hattı, bara ve senkron generatörlerin diğer değişkenleri ayrı kısımlarda belirtilmiştir. Bir sonraki adımda güç sisteminin yapısı Matpower yazılımı ile verilecektir. Matpower yazılımından elde edilen sonuç bir sonraki Çizelge A.2 ile verilmiştir.

Şekil 3.2 : Matpower düzenlenmiş IEEE-9 baralı güç sistemi.

Çizelge A.1 ve A.2’de gözüktüğü gibi güç sistemlerinde benzerlik elde edilmiştir. Bir sonraki adımda PowerWorld yazılımında tanımlanan güç sistemi değişkenleri değişkenleri ve parametreleri verilecektir. Öncelikli olarak PowerWorld bara verileri Çizelge 3.3 ile verilmiştir.

	Number	Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar	Switched Shunts Mvar	Act G Shunt MW	Act B Shunt Mvar	Area Num	Zone Num
1	1	Bus 1	1	16,50	1,04000	17,160	-0,00						0,00	0,00	1	1
2	2	Bus 2	1	18,00	1,02499	18,450	-0,91						0,00	0,00	1	1
3	3	Bus 3	1	13,80	1,02500	14,145	-1,65						0,00	0,00	1	1
4	4	Bus 4	1	230,00	1,03866	238,891	-2,29						0,00	0,00	1	1
5	5	Bus 5	1	230,00	0,84349	194,002	-19,97	125,00	50,00				0,00	0,00	1	1
6	6	Bus 6	1	230,00	1,02010	234,622	-5,93	90,00	30,00				0,00	0,00	1	1
7	7	Bus 7	1	230,00	0,98599	226,779	-6,70						0,00	0,00	1	1
8	8	Bus 8	1	230,00	0,98852	227,360	-8,09	100,00	35,00				0,00	0,00	1	1
9	9	Bus 9	1	230,00	1,02416	235,556	-4,36						0,00	0,00	1	1
10	10	10	1	18,00	1,02500	18,450	-0,91			163,00	72,20		0,00	0,00	1	1
11	11	11	1	15,50	1,02500	15,888	-1,64			85,00	3,49		0,00	0,00	1	1
12	12	12	1	24,00	1,04000	24,960	0,00			75,00	3,92		0,00	0,00	1	1

Şekil 3.3 : PowerWorld güç sistemi bara parametreleri.

Bir sonraki adımda senkron generatör verileri Çizelge 3.4 ile verilmiştir.

	Number of Bus	Name of Bus	ID	Status	Gen MW	Gen Mva	Set Volt	AGC	AVR	Min MW	Max MW
1	10	10	1	Closed	163,00	72,20	1,02500	YES	YES	10,00	300,00
2	11	11	1	Closed	85,00	3,49	1,02500	YES	YES	10,00	270,00
3	12	12	1	Closed	75,00	3,92	1,04000	NO	YES	10,00	250,00

Şekil 3.4 : PowerWorld güç sistemi senkron generatör parametreleri.

Sıradaki adımda güç sistemindeki iletim hattı parametreleri Çizelge 3.5 ile verilmiştir.

	From Number	From Name	To Number	To Name	Circuit	Status	Branch Device Type	Xfmr	R	X	B	Lim MVA A	Lim MVA B	Lim MVA C
1	4	Bus 4	1	Bus 1	1	Closed	Transformer	YES	0,00000	0,05760	0,00000	250,0	250,0	250,0
2	1	Bus 1	12	12	1	Closed	Transformer	YES	0,00000	0,00001	0,00000	0,0	0,0	0,0
3	2	Bus 2	7	Bus 7	1	Closed	Transformer	YES	0,00000	0,06250	0,00000	250,0	250,0	250,0
4	10	10	2	Bus 2	1	Closed	Transformer	YES	0,00000	0,00001	0,00000	0,0	0,0	0,0
5	9	Bus 9	3	Bus 3	1	Closed	Transformer	YES	0,00000	0,05860	0,00000	300,0	300,0	300,0
6	3	Bus 3	11	11	1	Closed	Transformer	YES	0,00000	0,00001	0,00000	0,0	0,0	0,0
7	6	Bus 6	4	Bus 4	1	Closed	Line	NO	0,01700	0,09200	0,15800	250,0	250,0	250,0
8	7	Bus 7	5	Bus 5	1	Closed	Line	NO	0,03200	0,16100	0,30600	250,0	250,0	250,0
9	9	Bus 9	6	Bus 6	1	Closed	Line	NO	0,03900	0,17380	0,35800	150,0	150,0	150,0
10	7	Bus 7	8	Bus 8	1	Closed	Line	NO	0,00850	0,07200	0,14900	250,0	250,0	250,0
11	8	Bus 8	9	Bus 9	1	Closed	Line	NO	0,01190	0,10080	0,20900	150,0	150,0	150,0

Şekil 3.5 : PowerWorld güç sistemi iletim hattı parametreleri.

Bölüm 3’deki Matpower parametreleri ve PowerWorld verilerinin aynı olduğu tablo ve çizelge verileri karşılaştırılarak görülebilir. Verilen değişkenler ve veriler güç sistemi analizi için yeterlidir. Bir sonraki adımda geçici hal kararlılık analizi için güç sisteminde kullanılan dinamik güç sistemlerinin modelleri ve parametreleri ayrıntılı olarak anlatılacaktır.

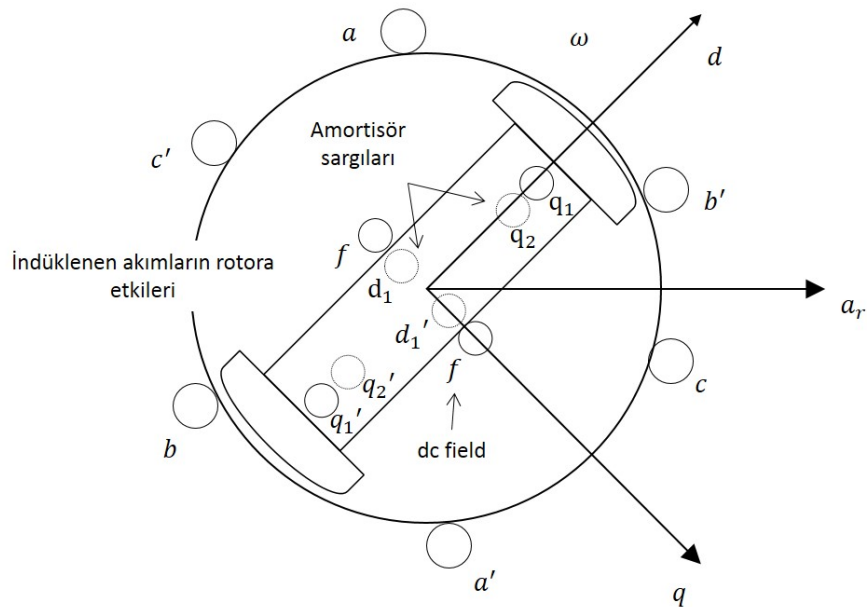


4. DİNAMİK SİSTEM PARAMETRELERİ

Bu bölümde tezde kullanılan modellerin dinamik modelleri verilecektir. Güç sistemi normal çalışma koşullarında kararlı olduğu kabul edilir. Fakat büyük arıza koşullarında güç sistemlerinin geçici hal davranışının incelenmesi için kullanılan cihazların dinamik modellerinin tanımlanması gerekmektedir. Alt başlıklarda kullanılan sistemlerin dinamik modelleri verilecektir.

4.1 Senkron Generatörlerin Dinamik Modelleri

Senkron generatörler aktif ve reaktif güç ile elektriksel enerjinin üretimini sağlayan elektrik makinalarıdır. Her bir senkron generatör modelinde türbin, governor ve uyarma sistemleri bulunmaktadır. Bir senkron generatörde rotor ve stator olmak üzere iki kısım bulunmaktadır. Genel olarak senkron generatör Park iki-reaksiyon teorisine dayanmaktadır. Park teorisine göre senkron generatörün rotor ve stator denklemleri (rotor'un senkron hızda döndüğü kabul edildiğinde) "dqo" referans yapısına sahip olduğu kabul edilir [23]. Senkron generatörün yapısı Şekil 4.1 ile verilmiştir ve bir sonraki alt başlıkta senkron generatörlerin dinamik yapısı açıklanacaktır.



Şekil 4.1 : Senkron generatör makine şeması [23].

Tezde 6. derece senkron generatör modeli olarak bilinen 4-kutuplu yuvarlak (silindirik) senkron generatör kullanılmaktadır. Kullanılan 6. derece senkron generatör modelinde geçici hal kararlılık analizine izin veren kaçak akı reaktansı bulunmaktadır [41].

Kullanılan senkron generatörün dinamik model denklemleri aşağıda bulunan "6" dinamik model denklemi ile açıklanır [42].

$$T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = E_{fd} - E'_q + (X_d - X'_d)[I_d - \frac{X'_d - X''_d}{(X'_d - X_{lk,s})^2} * (\psi_{1d} + (X'_d - X_{lk,s})I_d + E'_q)] \quad (4.1)$$

$$\frac{d\psi_{1d}}{dt} = \frac{1}{T''_{d0}} [-\psi_{1d} + E'_q - (X'_d - X_{lk,s})I_d] \quad (4.2)$$

$$T'_{q0} \frac{dE'_d}{dt} = -E'_d + (X_q - X'_q)[I_q - \frac{X'_q - X''_q}{(X'_q - X_{lk,s})^2} * (\psi_{2q} + (X'_q - X_{lk,s})I_q + E'_d)] \quad (4.3)$$

$$\frac{d\psi_{2d}}{dt} = \frac{1}{T''_{q0}} [-\psi_{2q} + E'_d - (X'_q - X_{lk,s})I_q] \quad (4.4)$$

$$\Delta\omega_r = \frac{1}{2H} [P_m - P_e - D\Delta\omega_r] \quad (4.5)$$

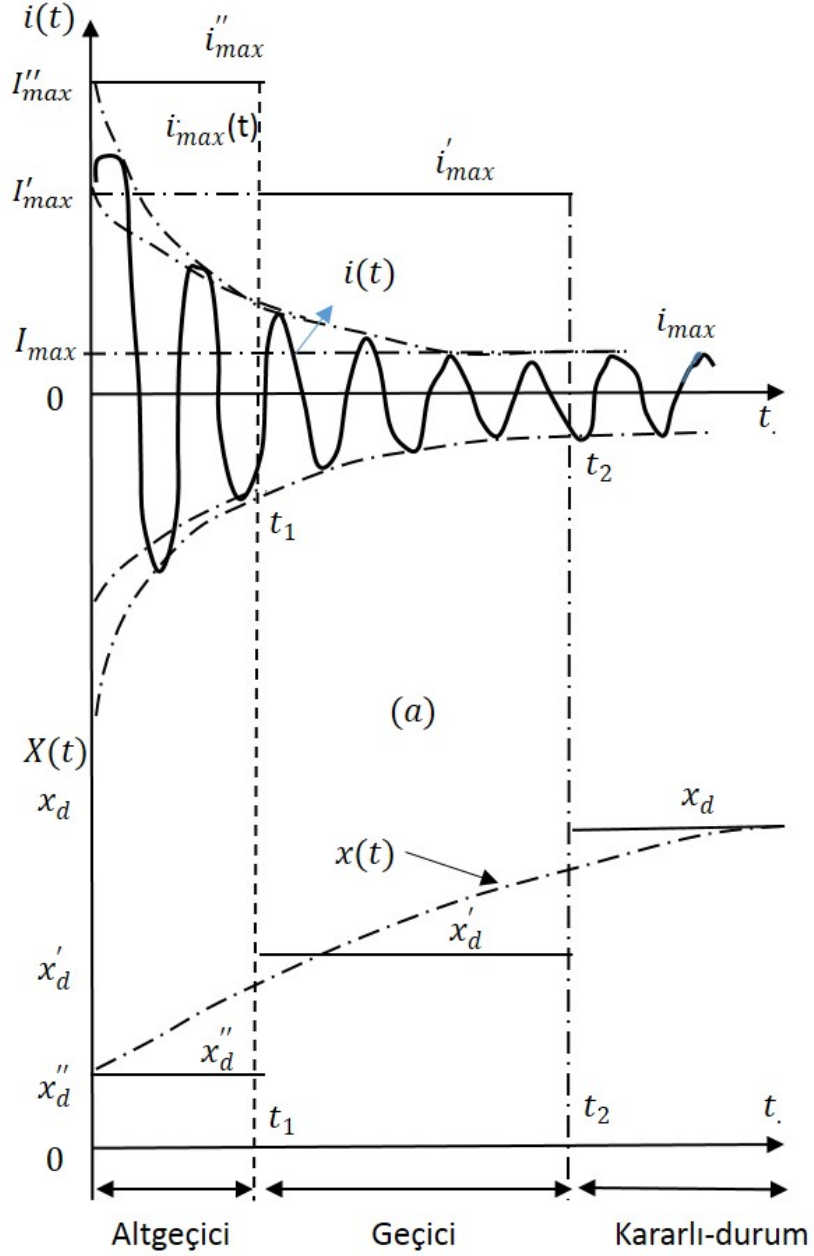
$$\frac{d\delta}{dt} = (\omega_r - \omega_{syn}) = \Delta\omega_r \quad (4.6)$$

Senkron generatörlerin dinamik parametreleri Çizelge B.1 ile verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Senkron generatör parametreleri ve değişkenleri [26].

No.	1	2	3	Senkron Generatör Numarası
MVA	270	125	512	Nominal Güç
kV	18	15.5	24	Nominal Gerilim
Nominal pf	0.85	0.85	0.9	Güç Faktörü
H (s)	4.1296	4.768	2.6312	Atalet sabiti
D	2	2	2	Makine Sönümleme Katsayısı
ra (p.u)	0.0016	0.004	0.004	Armatür Direnci (p.u)
Xd (p.u)	1.700	1.220	1.700	Doymamış d eksenli senkron reaktans
Xq (p.u)	1.620	1.160	1.650	Doymamış q eksenli senkron reaktans
X'd (p.u)	0.256	0.174	0.270	Doymamış d eksenli geçici reaktans
X'q (p.u)	0.245	0.250	0.470	Doymamış q eksenli geçici reaktans
X''d (p.u)	0.185	0.134	0.200	Doymamış d eksenli alt iletken reaktans
T'do (s)	4.800	8.970	3.800	d eksenli geçici, açık devre zaman sabiti
T'qo (s)	0.500	0.500	0.480	q eksenli geçici, açık devre zaman sabiti
T''do (s)	0.010	0.033	0.010	d eksenli alt, iletken açık devre zaman sabiti
T''qo (s)	0.008	0.070	0.0008	q eksenli alt, iletken açık devre zaman sabiti
S (1.0)	0.125	0.1026	0.090	Makine Satürasyonu 1.0 p.u gerilimde
S (1.2)	0.450	0.432	0.400	Makine Satürasyonu 1.2 p.u gerilimde

Belirtilen dinamik denklemler d- ve q-ekseni için Park dönüşümü kullanılarak elde edilmiştir [?]. Ayrıca senkron generatörde arıza akımlarının hesaplanması için senkron generatörün üç değişken reaktansları Şekil 4.1 ile gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : Senkron generatör altgeçici - geçici -kararlı-durum arıza reaktansı [31].

X (geçici hal reaktansı) $\gg R$ (armatür direnci) olduğu için, senkron generatörün empedansı yaklaşık olarak reaktansına eşittir. Burada X''_d : geçici alt reaktansı: arıza oluşuktan sonraki ilk dalgalanmada oluşur. Yaklaşık 0.05-0.1 saniye'de X'_d : geçici reaktansa ulaşmaktadır. 0.2 - 2.0 saniye sonrası da senkron reaktansı $X_d = X_s$ oluşur (kararlı duruma eriştikten sonra arıza akımını belirler [31]).

Bir sonraki kısımda senkron generatörler için kullanılan uyarma sistemlerin (exciter) dinamik modelleri açıklanacaktır.

4.2 Uyarma Sistemlerinin Dinamik Modelleri

Bir senkron makinanın rotor alanı sargılarındaki manyetik alanı (doğru akım ile) kayma halkaları vasıtasıyla indüklemek için bir güç sistemi veya gerilim regülatörü kullanılır. Alan akımlarının kontrolü bir uyarma sistemi ile gerçekleştirilir. Bir uyarma sisteminin bir diğer işlevi, terminal gerilimi olarak tanımlanan çıkış generatör geriliminin kontrolünü sağlar. Sürekli veya geçici arızalar altında, bir uyarma sistemi generatörün gerilimini izin verilen sınırlar içinde tutmak için bir güç sistemindeki değişikliklere göre kontrol sistemini oluşturur [41].

Bu tez çalışmasında IEEE tip-1 uyarma sistem modeli kullanılmaktadır ve örnek sistemde kullanılan "7" dinamik model denklemleri aşağıda verilmiştir [?].

$$E'_{FD} * T_E = (-[K_E + S_E(E_{FD}) + V_R]) \quad (4.7)$$

$$V'_2 * T_E = \frac{K_F}{T_F} E_{FD} - V_2 \quad (4.8)$$

$$V'_1 * T_R = V_T - V_1 \quad (4.9)$$

$$V_{ERR} = V_{REF} - V_1 \quad (4.10)$$

$$V_F = \frac{K_F}{T_F} E_{FD} - V_2 \quad (4.11)$$

$$F_R = \frac{1}{T_A} [-V_R + K_A(V_{ERR} + V_S - V_F)] \quad (4.12)$$

$$V_r = \begin{cases} V_{r,max} & \leftrightarrow & V_R > V_{R,max} \\ V_R = 0 & \leftrightarrow & V_R = V_{R,max} \text{ ve } F_R > 0 \\ V_{r,min} & \leftrightarrow & V_R < V_{R,min} \\ V_R = 0 & \leftrightarrow & V_R = V_{R,max} \text{ ve } F_R < 0 \\ \int F_R & \text{veya} & \end{cases} \quad (4.13)$$

Uyarma sisteminin çıkış gerilimi regülatör gerilimin değerinin Denklem (4.13)'lerde belirtildiği gibi karşılaştırmalı olarak kontrolü sağlanmaktadır. İncelenen güç sistemde kullanılan uyarma sistemlerin IEEE-1 type-1 uyarma dinamik sisteminin modeli aşağıda bulunan Şekil 4.3 ile verilmiştir [27].

Simülasyon kısımlarında arıza sonrası gerilim kontrolü uyarma sisteminin izin verilen sınırlar içerisinde parametrelerinin değiştirilmesi ile sağlanabilmektedir. Bir sonraki adımda IEEE tip-1 uyarma sistem modelinin sınır değerleri Çizelge B.3 ile verilmiştir [27].

Çizelge 4.3 : IEEE tip-1 uyarma sistem modelinin sınır değerleri [27].

Ka (p.u)	10.01	499.99	Regülatör Kazancı (Sürekli Çalışan)
Ta (s)	0	0.99	Regülatör Zaman Sabiti
VRmax (p.u)	0.51	9.99	Maksimum Regülatör Çıkışı Başlangıçta Tam Yükte Alan Gerilimi (BTYAG)
VRmin (p.u)	-9.99	-0.01	Minimum Regülatör Çıkışı (BTYAG)
Ke (p.u)	-1	1	Uyarma Kendinden-uyarma (BTYAG)
Te >0(s)	0.041	0.99	Uyarma Zaman Sabiti
Kf (p.u)	0.01	0.29	Regülatör Sabitleyici Devre Kazancı
Tf >0(s)	0.041	1.49	Regülatör Sabitleyici Devre Zamanı Sabiti
Efd min	0		
E1 (p.u)	0		Alan Gerilimi Değeri, 1
SE (E1)	0	0.99	Satürasyon Faktörü E1
SE (E2)	0		Satürasyon Faktörü E2 - Efd mak.

Bu tez çalışmasında generatör gerilim kontrolleri Çizelge B.3’de izin verilen gerilim sınır değerleri dikkate alınarak gerçekleştirilecektir. Bir sonraki adımda senkron generatörlerde kullanılan governor sistemlerinin dinamik modelleri verilecektir.

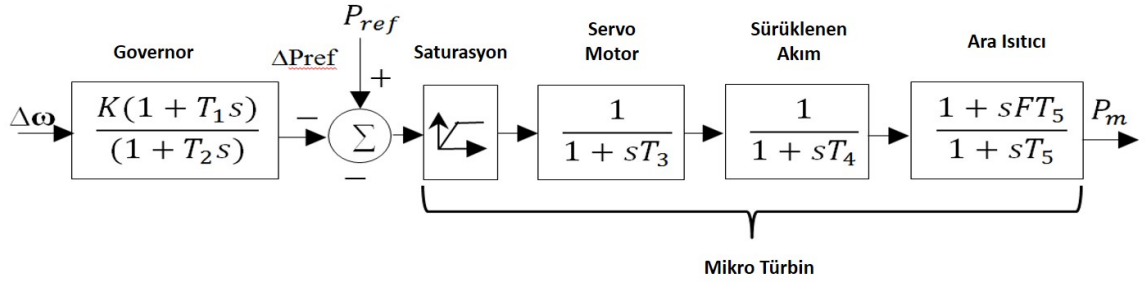
4.3 Governor Sistemlerinin Dinamik Modelleri

Senkron generatörlerin birincil frekans kontrolleri türbin governor sistemleri ile sağlanmaktadır. Governor sisteminin transfer fonksiyonu ile frekans değişimi senkron generatörün mekanik momentini belirlemektedir. Frekans kontrolünün genel denklemi aşağıda Denklem (4.3)ile verilmiştir.

$$\Delta p_m = \frac{1}{R}(\Delta \omega^{ref} - \Delta \omega) \quad (4.14)$$

Denklem (4.3’da senkron generatörün transfer fonksiyonu "R" ile belirtilmiştir ve güç sistemlerinin frekans ve aktif gücü kontrolünü sağlamaktadır. Governor sistemlerinin frekans kontrolleri mekanik çıkış gücünü etkileyen valf (valve) ile sağlanmaktadır [23]. Governorlerin çıkış referans hızına göre senkron generatörlerin temel frekansı kontrol edilmektedir [23].

Örnek düzenlenmiş test sisteminde kullanılan governor modeli mikro-türbine governor sistemidir ve aşağıda Şekil 4.4 ile blok diagramı verilmiştir.



Şekil 4.4 : Mikro türbine ve governor sisteminin blok diagramı [?].

Bu governor dinamik sistem modelinde, giriş değişkeni governor referans hız ayarı ve ölçülen governor hızı arasındaki farkı oluşturur. Çıkış sinyali ise governor sisteminden istenen çıkış gücün değeri oluşturmaktadır [?]. Kullanılan governor dinamik sistem modelinin Denklem (4.14)'de gösterilen "R" transfer fonksiyonun değişkenlere göre gösterimi aşağıda Denklem (4.15) ile gösterilmiştir.

$$\frac{P_m}{\Delta Pref} = \frac{1 + sFT_5}{1 + s(T_3 + T_4 + T_5) + s^2(T_3T_4 + T_3T_5 + T_4T_5) + s^3(T_3T_4T_5)} \quad (4.15)$$

Örnek güç sisteminde kullanılan governor sisteminin standart dinamik değişkenleri B.2 ile gösterilmiştir [28].

Çizelge 4.4 : Mikro türbine ve governor sisteminin değişkenleri [28].

No.	1	2	3	Governor Modeli Numarası
Modeli	BPA_GG	BPA_GG	BPA_GG	Micro-türbine Sistem
Pmaksimum (p.u)	0.8518	1.056	0.8984	Maksimum Türbin Çıkış Gücü
R (p.u)	0.01852	0.040	0.00976	Türbin kararlı-durum regülatör ayarı-düşmesi
T1	0.100	0.083	0.150	Kontrol Zamanı Sabiti
T2	0.000	0.000	0.050	Hidrolik Reset Zamanı Sabiti
T3	0.259	0.200	0.300	Servo Zaman Sabiti
T4	0.100	0.050	0.260	Buhar Valfi Zaman Sabiti
T5	10.000	5.000	8.000	Buhar Isıtma Zaman Sabiti
F (p.u)	0.272	0.280	0.270	Ara Isıtıcı Mil Çıkışı

Simülasyonlarda frekans kontrolü generatör transfer fonksiyonu ile yapılacaktır.



5. ARIZA ÖNCESİ KARARLILIK ANALİZİ

Tezin bu kısmında, Bölüm 3’de belirtilen düzenlenmiş IEEE-9 test güç sisteminin farklı çalışma koşullarında yük akışı analizi MATLAB Matpower m-file yazılımı kullanılarak verilmiştir. Öncelikli olarak yük akışı yöntemlerinden bahsedilecektir.

5.1 Yük Akışı Yöntemleri

Güç sistemlerinin sürekli lineer olmayan yük akışı denklemlerin çözümleri iterasyon teknikleri kullanılarak çözülmektedir. Lineer olmayan yük akışı denklemlerinin çözümlerinde birçok yöntem vardır. Bunlar sırası ile aşağıda verilmiştir.

- Newton-Raphson
- Fast Decoupled
- Gauss Seidel

Yukarıda belirtilen yük akışı yöntemleri ile bir güç sisteminde bilinmeyen yükler, gerilimler, bara değerleri ve güç sisteminde bulunan karmaşık yük akışının analizinin çözümü elde edilir. Kısaca yük akışı analizinin adımları aşağıda verilmiştir: Pasif sistem elemanlarının değerlerinin belirlenmesi, bütün karmaşık güç yüklerinin değerleri ve yerlerinin tanımlanması, generatörlerin belirtilmesi ve sınır değerlerinin kararlaştırılması, güç akışı yöntemi için matematiksel modelin elde edilmesi, güç sistemlerin gerilim değerlerinin çözülmesi, yük akışı analizi yapılarak güç sistemlerindeki kayıpların hesaplanması, yük akışı analizi sonucunda elde edilen değerlerin güç sistemin kararlı çalışma sınır değerlere göre karşılaştırılması [43].

Bölüm 3’te belirtilen yük akışı analizi yöntemlerine göre Matematiksel modelin seçilmesi kısmına kadar elde edilmiştir. Bundan sonraki adımda yük akışı yönteminin seçilmesi anlatılacaktır ve daha sonrasında sistemdeki bilinmeyen aktif ve reaktif güç değerleri (örnek: Slack ve PV baraları), gerilim büyüklükleri (PQ bara) ve gerilim açısı değerleri (PQ ve PV bara) hesaplanacaktır [43].

Newton-Raphson yöntemi yük akışı yöntemlerinde en yaygın yöntemdir. Her iterasyon Gauss Seidel yük akışı analizine göre daha uzun sürede çözülürken, Newton-Raphson yöntemi Gauss-Seidel yük akışı yöntemine göre daha geniş yakınsaklık bölgesine sahiptir. Matris algoritmalarını yapılan yazılımlarda Newton-Raphson yönteminin uygulanması oldukça karmaşık fakat sonuçların elde edilmesi seçilen başlangıç değişkenin elde edilecek sonuca olan yakınsaklığına göre daha hızlı gerçekleşmektedir [43]. Bu tez çalışmasında Bölüm 3’de belirtilen düzenlenmiş IEEE-9 test sisteminin Gauss Seidel yük akışı analizi sonucu Şekil 5.1 ile verilmiştir.

```
Command Window

>> define_constants;
mpc=loadcase('case9');
mppopt=mpoption('PF_ALG',4,'VERBOSE',1);
results=runpf('case9',mppopt);

MATPOWER Version 6.0, 16-Dec-2016 -- AC Power Flow (Gauss-Seidel)

Gauss-Seidel power flow did not converge in 1000 iterations.

>>>>> Did NOT converge (0.17 seconds) <<<<<
```

Şekil 5.1 : Güç Sistemi Matpower Gauss Seidel Yük Akışı Analizi Sonucu.

Elde edilen yük akışı sonucuna göre, Gauss Seidel yük akışı analizi 1000 iterasyon sonucu yakınsama olmadığı için yük akışı analizi gerçekleşmemiştir. Geriye kalan yük akışı analiz yöntemlerinden Fast Decoupled yük akışı yöntemi kullanılarak elde edilen analiz sonucu ise Şekil 5.2’de verilmiştir.

```
Command Window

>> define_constants;
mpc=loadcase('case9');
mppopt=mpoption('PF_ALG',2,'VERBOSE',1);
results=runpf('case9',mppopt);

MATPOWER Version 6.0, 16-Dec-2016 -- AC Power Flow (fast-decoupled, XB)

Fast-decoupled power flow converged in 12 P-iterations and 12 Q-iterations.

Converged in 0.04 seconds
```

Şekil 5.2 : Güç Sistemi Matpower Fast-decoupled, XB Yük Akışı Analizi.

Fast-decouplede yönteminde yük akışı analizi sonucu 12 iterasyon ile elde edilmiştir.

Newton Raphson yük akışı analizi ise Çizelge A.1'de gösterildiği gibi 3 iterasyon sonucu istenen yük akışı analizi gerçekleştirildiği için yük akışı analizi yöntemi olarak seçilmiştir.

Newton-Raphson yöntemi

Newton-Raphson yöntemi Taylor serisi yakınsaklık fonksiyonuna dayanmaktadır. Yük akışı denklemlerinin çok değişkenli fonksiyon olarak yazılması aşağıda bulunan denklemlerle birlikte verilmiştir [43].

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i = V_i^* \sum_{n=1}^N (Y_{in} V_n) = \sum_{n=1}^N (|Y_{in} V_i V_n|) \angle(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (5.1)$$

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} = |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + j |Y_{ij}| \sin \theta_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (5.2)$$

Denklem (5.1) ve (5.2)'e göre Newton-Raphson formülasyonu aşağıda verilmiştir:

$$P_i = |V_i|^2 G_{ii} + \sum_{n=1, n \neq i}^N |V_i V_n Y_{in}| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (5.3)$$

$$Q_i = -|V_i|^2 B_{ii} - \sum_{n=1, n \neq i}^N |V_i V_n Y_{in}| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (5.4)$$

Elde edilen polar koordinatlara göre yük akışı analizinin yakınsaması bir sonraki denklemlerle birlikte verilmiştir.

$$\Delta P_i = P_{i, belirlenen} - P_{i, bulunan}(\forall PQ, PV) \quad (5.5)$$

$$\Delta Q_i = Q_{i, belirlenen} - Q_{i, bulunan}(\forall PQ) \quad (5.6)$$

Elde edilen yük akışı denklemlerinin polar denklemleri cinsinden yazılması aşağıda verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^i = - \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial U} U \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial U} U \end{bmatrix}^i = \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \frac{\Delta U}{U} \end{bmatrix}^i \quad (5.7)$$

Elde edilen polar denklemler lineer olmayan denklemlerin çok değişkenli çözümler için kullanılmaktadır. Her bir bilinmeyen değişkenler için aç ve gerilim her iterasyon sonucunda tekrardan hesaplanmaktadır. İterasyon sonucunda elde edilen fark değeri istenen " ϵ " değerinden küçük olması ile istenen aktif ve reaktif güç değeri elde edilir $\max(\Delta P^{(i)}; \Delta Q^{(i)}) = \epsilon < \epsilon_{limit}$ [43].

5.2 Yük Akışı Analiz Sonuçları

Bu bölümde IEEE-9 test güç sisteminin farklı çalışma koşullarında yük akışı analizi MATLAB Matpower m-file yazılımı ile verilecektir. Öncelikle İlk durum koşul analiz sonuçlarından bara gerilimleri ve açıları aşağıda bulunan Çizelge 5.3 ile verilmiştir.

Command Window						
Bus Data						
Bus #	Voltage		Generation		Load	
	Mag (pu)	Ang (deg)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1.040	-0.000	-	-	-	-
2	1.025	-1.453	-	-	-	-
3	1.025	-1.987	-	-	-	-
4	1.039	-2.340	-	-	-	-
5	0.839	-20.395	-	-	125.00	50.00
6	1.020	-6.067	-	-	90.00	30.00
7	0.988	-7.229	-	-	-	-
8	0.989	-8.531	-	-	100.00	35.00
9	1.024	-4.706	-	-	-	-
10	1.025	-1.453	163.00	69.37	-	-
11	1.025	-1.987	85.00	3.06	-	-
12	1.040	0.000*	76.57	3.80	-	-
Total:			324.57	76.22	315.00	115.00

Şekil 5.3 : Newton-Raphson yöntemi ile baraların analiz sonuçları.

Bara gerilimleri 0.839 p.u - 1.040 p.u (289.455 kV- 358,8 kV) değerleri arasındadır. Ayrıca kablo gerilimleri ve kayıpları aşağıda Çizelge 5.4 ile verilmiştir.

Branch Data								
Brnch #	From Bus	To Bus	From Bus Injection P (MW)	From Bus Injection Q (MVar)	To Bus Injection P (MW)	To Bus Injection Q (MVar)	Loss ($I^2 * Z$)	
							P (MW)	Q (MVar)
1	1	4	76.57	3.80	-76.57	-0.67	0.000	3.13
2	1	12	-76.57	-3.80	76.57	3.80	0.000	0.00
3	2	7	163.00	69.36	-163.00	-50.70	0.000	18.67
4	2	10	-163.00	-69.36	163.00	69.37	0.000	0.00
5	3	9	85.00	3.06	-85.00	0.98	0.000	4.04
6	3	11	-85.00	-3.06	85.00	3.06	0.000	0.00
7	4	6	76.57	0.67	-75.63	-12.34	0.937	5.07
8	7	5	132.81	63.59	-125.00	-50.00	7.808	39.28
9	9	6	14.45	-19.42	-14.37	-17.66	0.078	0.34
10	7	8	30.19	-12.90	-30.11	-0.97	0.082	0.70
11	9	8	70.55	18.45	-69.89	-34.03	0.663	5.61
Total:							9.567	76.84

Şekil 5.4 : Newton-Raphson yöntemi ile iletim hatların analiz sonuçları.

İletim hattında toplam aktif güç iletim kayıpları 9.567 MW ve reaktif güç kayıpları 76.84 MVar olarak bulunmuştur. Bu tez çalışmasında yapılan incelemelerde farklı çalışma koşullarında Çizelge 5.4’da gösterildiği gibi toplam iletim kayıpları dikkate alınarak incelenecektir. Belirlenen çalışma koşullarında, senkron generatörlerin güç sistemindeki toplam statik yüklerin yük dengesini karşılama durumu incelenecektir.

Her çalışma durumunda Çizelge A.3’nun "Pd" ve "Qd" sütununda belirtildiği gibi toplam statik yük değeri 315,00 MW ve 115,00 MVar’dır. Analizler sonucunda sonuçlar Şekil 5.4’da olduğu gibi elde edilmiş ve Çizelge C.1 ile verilmiştir.

Çizelge 5.1 : Güç sisteminin farklı çalışma koşullarında yük akışı analizi.

Senkron Generatör Sonuçları					Güç Sistemi Kayıpları	
Generatör	Bara	Durum 1:devrede 0:devre dışı	Pg (MW)	Qg (MVar)	Pkayıp (MW)	Qkayıp (MVar)
<i>İlk Analiz: Tüm Senkron Generatörler Devrede</i>						
1	10	1	163.00	69.37	9.567	76.84
2	11	1	85.00	3.06		
3	12	1	76.57	3.80		
<i>İkinci Analiz: İkinci Senkron Generatör Devre Dışı</i>						
1	10	1	163.00	67.11	11.794	93.15
2	11	0	0	0		
3	12	1	163.79	27.48		
<i>Üçüncü Analiz: Üçüncü Senkron Generatör Devre Dışı</i>						
1	10	1	242.62	91.19	12.618	109.66
2	11	1	85.00	23.22		
3	12	0	0	0		
<i>Dördüncü Analiz: Birinci Senkron Generatör Devre Dışı</i>						
1	10	0	-	-	-	-
2	11	1	-	-		
3	12	1	-	-		

Çizelge C.1’de görüldüğü üzere, ikinci analizde üçüncü analizden daha az güç sistemi kayıpları elde edilmiştir. Bir diğer taraftan "12." senkron generatör güç sisteminden çıkarıldığında güç sistemi kayıpları oldukça fazla olmasına rağmen güç sistemi analizi elde edilmiştir. En son güç sistemi analizinde "10." senkron generatör güç sisteminden çıkarıldığında statik ve senkron generatör güç dengesi olmadığından dolayı yük akışı analizi gerçekleşmemiştir.

Tezin bir sonraki kısmında yapılan arıza öncesi kararlılık analizleri dikkate alınarak geçici hal kararlılık analizleri yapılacaktır.



6. GEÇİCİ HAL KARARLILIK ANALİZİ

Bu bölümde yapılan analizlerde güç sistemindeki toplam mekanik gücün azaltılması ve 3-fazlı kısa arızanın oluşturulması ile geçici hal kararlılık analizinin gerçekleştirilmesidir. Her bir analiz, Bölüm 3’de belirtilen düzenlenmiş IEEE-9 test güç sisteminin geçici hal kararlılık analizi PowerWorld yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Bölüm 5’te belirtilen farklı çalışma koşulları Çizelge C.1 bu bölümde arıza ile oluşturulup, güç sisteminde geçici hal kararlılık analizi olarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra her güç sistemi barasında 3-fazlı kısa devre arıza oluşturularak güç sisteminin kararlılık analizi yapılmıştır. İlk olarak ikinci maddede belirtildiği gibi Bölüm 5’deki farklı çalışma koşulları geçici hal kararlılık analizi incelemesi olarak ilk alt başlıkta verilmiştir.

6.1 Farklı Çalışma Durumların Geçici Hal Kararlılık Analizi İle İncelenmesi

Elde edilen sonuçlar: generatör gerilimleri, generatör rotor açıları, generatör hızları ve bara frekansları dinamik analiz zaman-saniye’ye bağlı olarak verilmiştir.

Birinci kararlılık analizi: ikinci senkron generatörün çıkarılması

Çizelge C.1’de belirtilen ilk çalışma koşulunda tüm senkron generatörler güç sisteminde aktif bulunduğundan, ilk geçici hal kararlılık analizi olarak incelenmemiştir. İlk geçici hal kararlılık incelemesi Çizelge C.1’de gösterilen ikinci çalışma koşulu dikkate alınarak oluşturulmuştur. Çizelge C.1’de senkron generatör-2 analiz süresince güç sisteminden çıkarılırken, geçici hal kararlılık analizinde senkron generatör-2 (Bara-11) geçici olarak güç sistemden çıkartılmıştır.

Öncelikle geçici hal kararlılık analizinde oluşturulan arıza aşağıda Çizelge 6.1 ile verilmiştir. Oluşturulan arıza çeşidinin tanımlanması PowerWorld programında seçildiği gibi yazılmıştır.

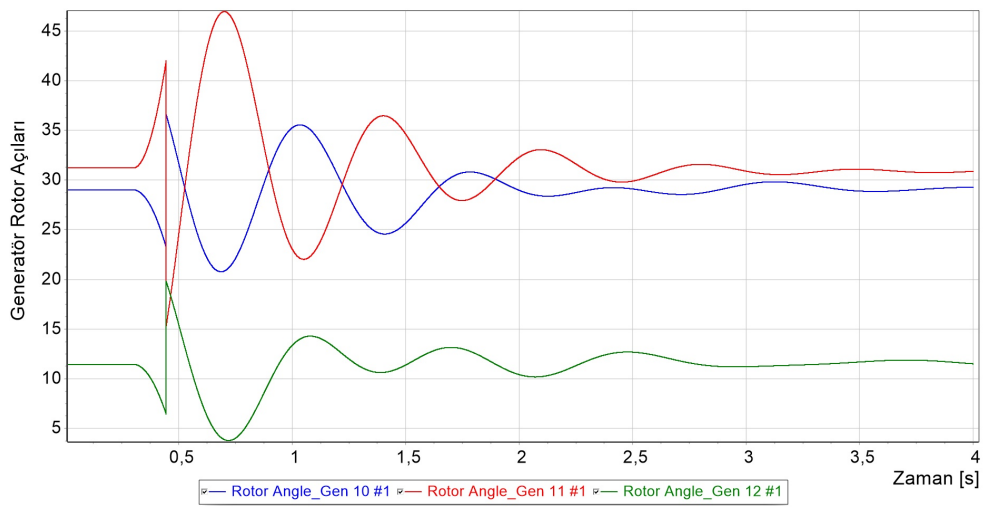
Çizelge 6.1 : Birinci analiz: geçici hal arıza çeşidi.

Sayı	Zaman-saniye (t)	Arıza Yeri	Arıza Çeşidi
1	0.3000 s	Branch '11' '3'	OPEN BOTH
2	0.4450 s	Branch '11' '3'	CLOSE BOTH

Çizelge 6.2'deki analizde 0.30 saniyede senkron generator-2'in (bağlı olduğu bara-11) (bakınız: Çizelge C.1) arıza etkisi anında ilk olarak toplam elektrik yükü anlık olarak hızla azaldığı için gerilimi 1.025 p.u (15.50 Nom. kV)'dan 1.0345 p.u (15.643 Nom. kV) değerine yükselmiştir. Daha sonrasında senkron generatör-tork etkisi ile birlikte generatör geriliminde dalgalanmalar gerçekleşmiştir.

Azalan yük ile "exciter" (uyarma sistemi) generatör-2 rotor sargılarında rotor manyetik alanı düşürmek için DC uyarma akımını 0.3004 saniye ile azaltmaya başlamıştır. Azalan uyarma akımının endüklenen gerilimi düşürmesi de 0.3208 saniyeden sonra başlamıştır. Ayrıca arıza ortadan kalktıktan sonra elektriksel yükün 0.445 saniyede artmasından sonra DC uyarma akımı 0.4452 saniye ile artarak 0.4580 saniyeden sonra endüklenen gerilimi yükselmiştir. Generatör-2 gerilimi 0.300 - 0.445 saniye süresince belirtilen gerilim ve uyarma akımı etkisi ile 0.9930 p.u değerine kadar düşmüştür.

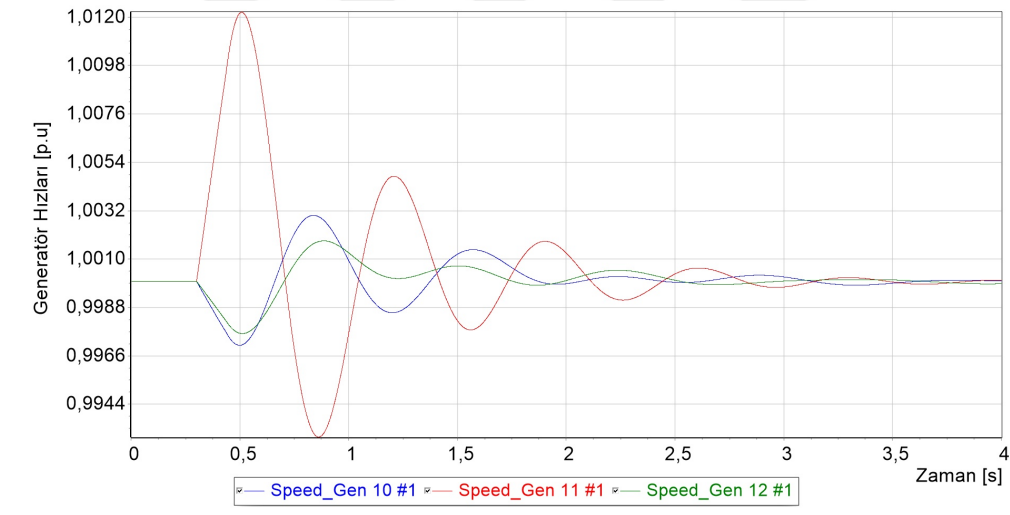
Senkron generator-1 (bara-10) ve generator-3 (bara-12) arıza etkisi altında toplam elektriksel yükü artmıştır. Artan yük ile elektrik akımı artıp ve senkron generatörlerin çıkış gerilimi ani azalmıştır. Uyarma sistemi rotor sargılarına rotor manyetik alanı arttırmak için DC uyarma akımını arttırmıştır. Generator-1 0.3084 saniyeden ve generator-3 0.3004 saniyeden itibaren arıza etki süresi içinde endüklenen gerilimi arttırmıştır. Arıza sonrasında tüm senkron generatörlerin gerilimleri kararlılık gerilimine yaklaşmıştır. Bir sonraki simülasyon analizinde senkron generatör rotor açılarının zamana bağlı değişimi Çizelge 6.3 ile verilmiştir.



Şekil 6.3 : Generatör rotor açıları - ilk arıza geçici hal kararlılık analizi.

0.300 - 0.445 saniye arıza süresinde generator-2 (bara-11)'de (güç sisteminden çıkarılan senkron generatör) toplam elektrik yükü azalmıştır. Böylece 0.30 saniyede generatör-2'in mekanik gücü bağlı olduğu baraya ilettiği elektrik çıkış gücünden oldukça fazladır. Salınım denkleminde (bakınız: Denklem 2.4)'de belirtildiği gibi geçici hal durumlarında mekanik enerjisi elektrik enerjisinden fazla olan senkron generatör-2'nin rotor açısı artmıştır ve maksimum 46.95 derecedir.

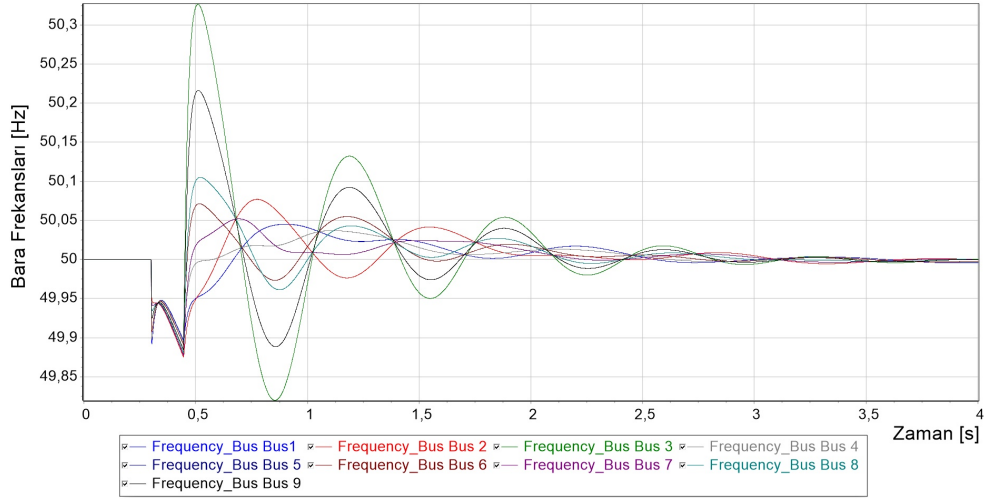
0.300 - 0.445 saniyede generatör-1 ve generatör-3'e bağlı olan toplam elektriksel yük artmıştır. Böylece senkron generatörlerin mekanik güçleri (mekanik giriş güç) bağlı olduğu güç sisteminin elektrik gücünden fazladır ve generatörlerin rotor açısı azalmıştır. Simülasyon sonunda güç sistemin ilk kararlı çalışma koşullarına yakınsadığı ve senkron generatörlerin rotor açıları sistem dengeye ulaşana kadar atalet momenti etkisi ile salınım yapmıştır. Güç sisteminin bir sonraki analiz sonucunda senkron generatörlerin zamana bağlı generatör hızları Çizelge 6.4 ile verilmiştir.



Şekil 6.4 : Generatör hızları - ilk arıza geçici hal kararlı analizi.

Senkron generatörlerin rotor açılarının birinci dereceden türevi senkron generatörlerin rotor hızı değişimini vermektedir (bakınız: Denklem 2.5). Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4 karşılaştırıldığı zaman, generatör hızları değişimi (başlangıç referans değerine göre) rotor açısının zamana göre birinci dereceden türevi ile bağlantılı olduğu görülmektedir. Simülasyon analizinde senkron generatör-2'nin generatör hızı 1.02 - 0.993 p.u (güç sistemindeki maksimum ve minimum senkron generatör hızı) arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca incelenen simülasyon süresi sonunda, tüm senkron generatörlerin hızları başlangıç kararlı çalışma koşullarına yakınsamıştır.

Bir sonraki simülasyon sonucunda bara frekanslarının zamana bağlı geçici hal kararlılık analizi Çizelge 6.5 ile verilmiştir.



Şekil 6.5 : Bara Frekansları - ilk arıza geçici hal kararlılık analizi.

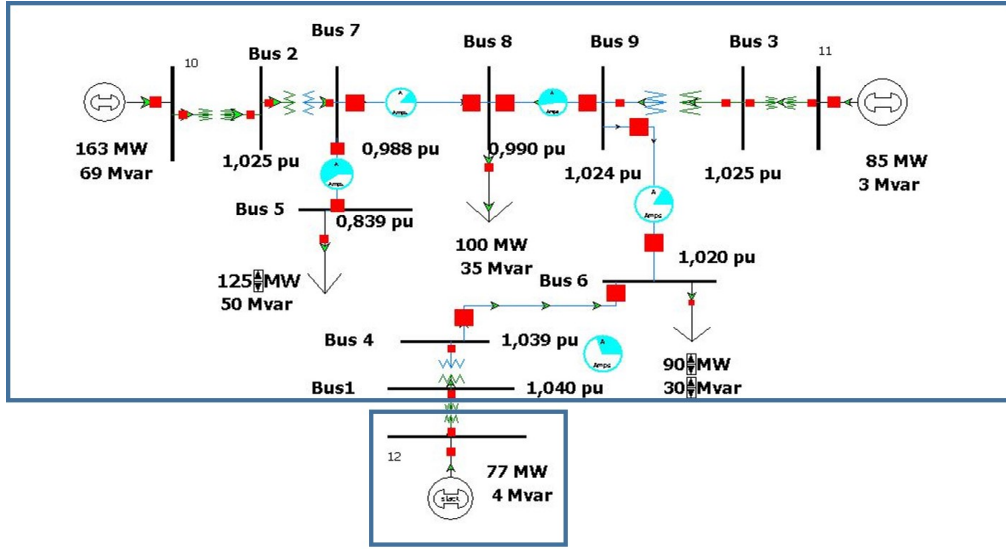
Elde edilen analiz sonunda güç sisteminde bulunan bara frekanslarının arıza süresince 50.542 (bara-11) - 49.820 (bara-11 ve bara-3) Hz değiştiği ve arıza kaldırıldıktan sonra 50 Hz çalışma frekansına yakınsadığı gözlenmiştir.

İlk analiz geçici hal kararlılık incelemesinde, bara "11" ve "3" arasındaki iletim hattının bağlantısının geçici olarak kaldırıldığında (senkron generatör-2 devre dışı bırakıldığında), güç sistemi arıza sonrası kararlı çalışma koşullarına yaklaştığı elde edilen sonuçlarda görülmüştür. Ayrıca maksimum dalgalanmanın olduğu senkron generatör-2'nin generatör hızı 1.02 - 0.993 p.u arasında değiştiği bulunmuştur.

Bir sonraki geçici hal kararlılık analizinde Çizelge C.1'de gösterilen üçüncü çalışma koşulu dikkate alınarak oluşturulmuştur.

İkinci kararlılık analizi: üçüncü senkron generatörün çıkarılması

Bu geçici hal kararlılık analizinde belirlenen arıza süresi içerisinde senkron generatör-3 (Bara-12) Çizelge 6.6'de gösterildiği gibi güç sisteminden çıkartılmıştır.



Şekil 6.6 : İkinci analiz: geçici hal kararlı çalışma durumundaki güç sistemi.

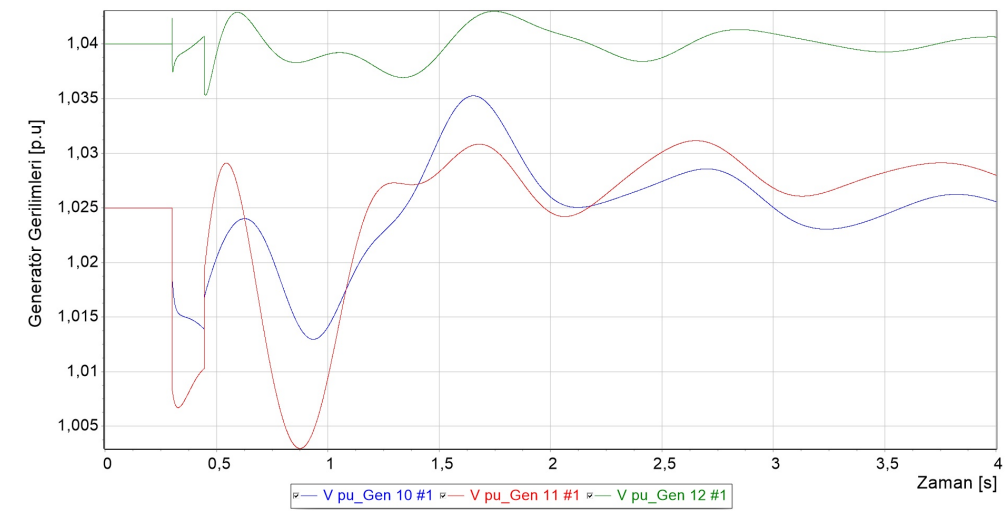
Bu geçici hal kararlılık analizinde oluşturulan arıza Çizelge 6.2 ile verilmiştir.

Çizelge 6.2 : İkinci analiz: geçici hal arıza çeşidi.

Sayı	Zaman-saniye (t)	Arıza Yeri	Arıza Çeşidi
1	0,30000 s	Branch '12' '1'	OPEN BOTH
2	0,44500 s	Branch '12' '1'	CLOSE BOTH

Analiz sonuçları Çizelge 6.7, Çizelge 6.8, Çizelge 6.9 ve Çizelge 6.10'de verilmiştir.

Öncelikle Çizelge 6.7 ile jeneratörlerin geçici hal gerilim değişimi incelenecektir.

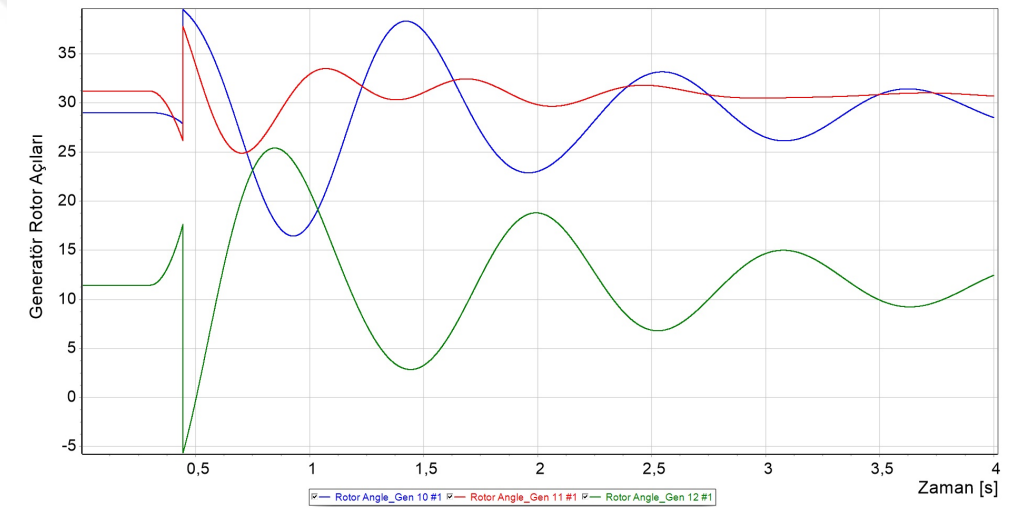


Şekil 6.7 : Jeneratör gerilimleri - ikinci arıza geçici hal kararlılık analizi.

Çizelge 6.7’de gösterilen analizde 0.30 saniyede senkron generator-3’in (bağlı olduğu bara-12) (bakınız: Çizelge C.1) toplam elektrik yükü anlık olarak hızla azalmıştır. Gerilimi 1.04 p.u (24.00 Nom. kV)’dan 1.0422 p.u (24.05 Nom. kV)’a yükselmiştir.

Azalan yük ile uyarma kontrolü generatör-3 DC uyarma akımını 0.3004 saniyeden itibaren azaltıp ve endüklenen gerilimi 0.3004 saniye ile düşürmeye başlamıştır. Senkron generatörün-3 gerilimi arıza süresinde 1.0350 p.u’ya düşmüştür. Generatör-3’nin elektriksel yükü 0.445 saniyede artması (arızanın giderilmesi) ile DC uyarma akımı 0.4452 saniyeden sonra artarak 0.4456 saniyede endüklenen gerilimi yükselmiştir ve arıza sonrası dalgalanmaya devam etmiştir.

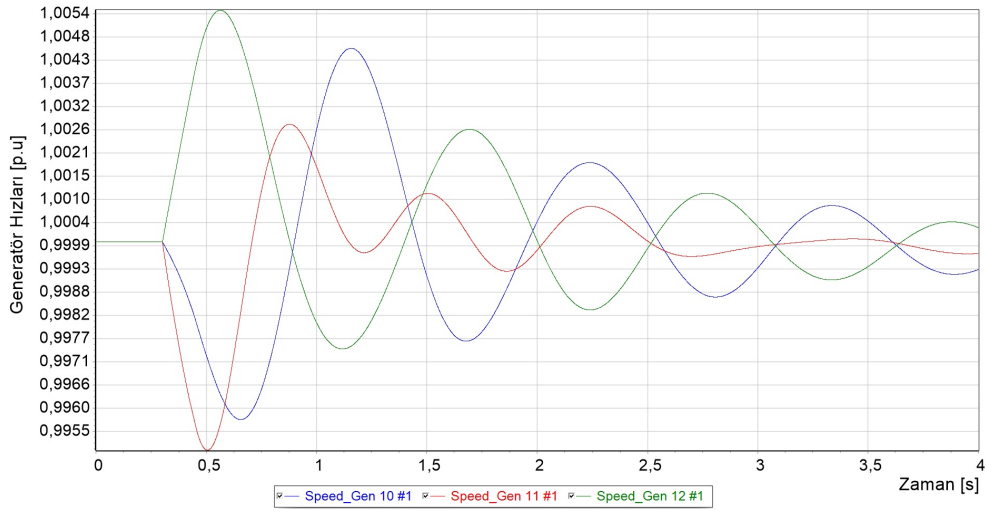
Ayrıca geçici hal kararlılık analizi ile elde edilen senkron generatörlerin rotor açıları Çizelge 6.8 ile verilmiştir.



Şekil 6.8 : Generatör rotor açıları - ikinci arıza geçici hal kararlılık analizi.

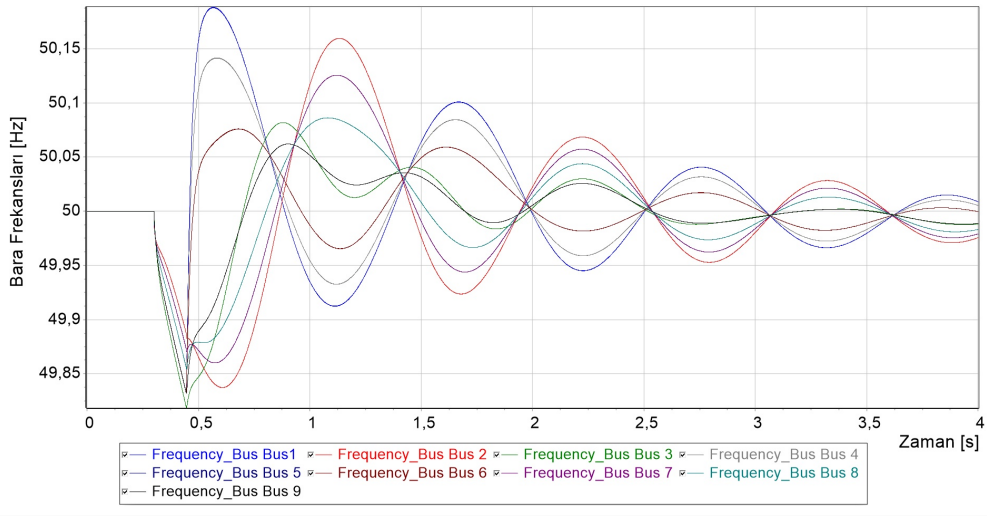
Senkron generator-3 (bara-12)’de (güç sisteminden çıkarılan generatör) arızada elektrik yükü azalmıştır ve 0.30 saniyede mekanik gücü bağlı olduğu baraya ilettiği elektrik çıkış gücünden fazladır. Bunun etkisi ile geçici hal durumlarında senkron generatör-3’nin rotor açısı ilk çeyrek dalgalanmada artarak maksimum 25.408’ dir.

Arıza sonucunda senkron generatör-2 geçici hal arıza öncesi rotor aç değeri yaklaşırken, senkron generatör-1 ve -2’nin rotor aç dalgalanması arıza sonrası devam etmiştir. Bir sonraki analizde senkron generatör hızları Çizelge 6.9 ile verilmiştir.



Şekil 6.9 : Generator hızları - ikinci arıza geçici hal kararlılık analizi.

Generatör-3 hızı 1.005 - 0.997 p.u arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Simülasyon süresince generatör-2 başlangıç çalışma koşullarına yakınsarken, generatör-1 ve generatör-3 yakınsamamıştır. Bara frekanslarının analizi Çizelge 6.10 ile verilmiştir.



Şekil 6.10 : Bara Frekansları - ikinci arıza geçici hal kararlılık analizi.

Analiz sonunda bara frekanslarının 50.208 (bara-12)- 49.819 (bara-3) Hz arasında değiştiği ve arıza kaldırıldıktan sonra 50 Hz çalışma frekansına yaklaştığı gözlenmiştir. İkinci analizde, bara "12" ve "1" arasındaki iletim hattının kaldırıldığında (senkron generatör-3 devre dışı bırakıldığında), güç sistemi arıza sonrası kararlı çalışma koşullarına yaklaştığı görülmüştür. Ayrıca maksimum dalgalanmanın olduğu senkron generatör-3'de generatör hızı 1.005-0.997 p.u arasında değiştiği gözlenmiştir.

Bir sonraki analizde, dördüncü analiz sonucunda elde edilen sonuçlar verilmiştir.

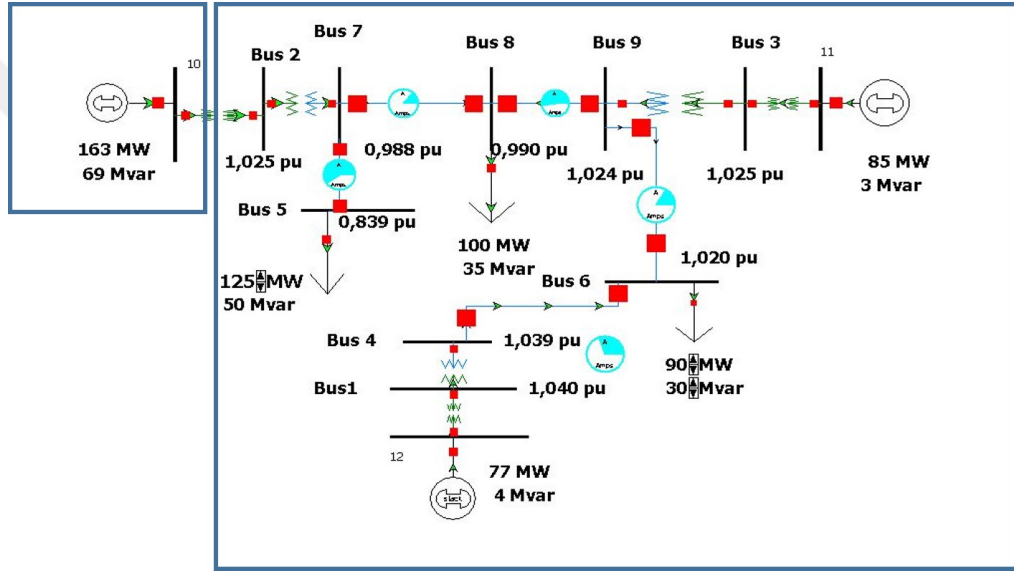
Üçüncü kararlılık analizi: birinci senkron generatörün çıkarılması

Çizelge 6.3 ile bu geçici hal kararlılık analizinde oluşturulan arıza verilmiştir.

Çizelge 6.3 : Üçüncü analiz: geçici hal arıza çeşidi.

Sayı	Zaman-saniye (t)	Arıza Yeri	Arıza Çeşidi
1	0,30000 s	Branch '10' '2'	OPEN BOTH
2	0,44500 s	Branch '10' '2'	CLOSE BOTH

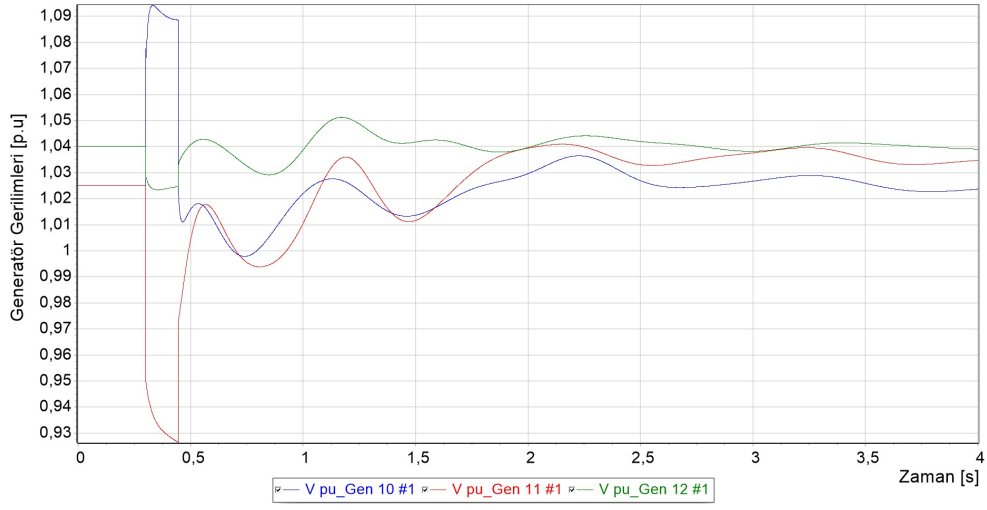
Bu arızada "10" ve "2" baraları arasındaki iletim hattının bağlantısı kaldırılmıştır ve böylece senkron generatör-1 (Bara-10) Çizelge 6.11'de gösterildiği gibi güç sisteminden çıkartılmıştır.



Şekil 6.11 : Üçüncü analiz: geçici hal kararlı çalışma durumundaki güç sistemi.

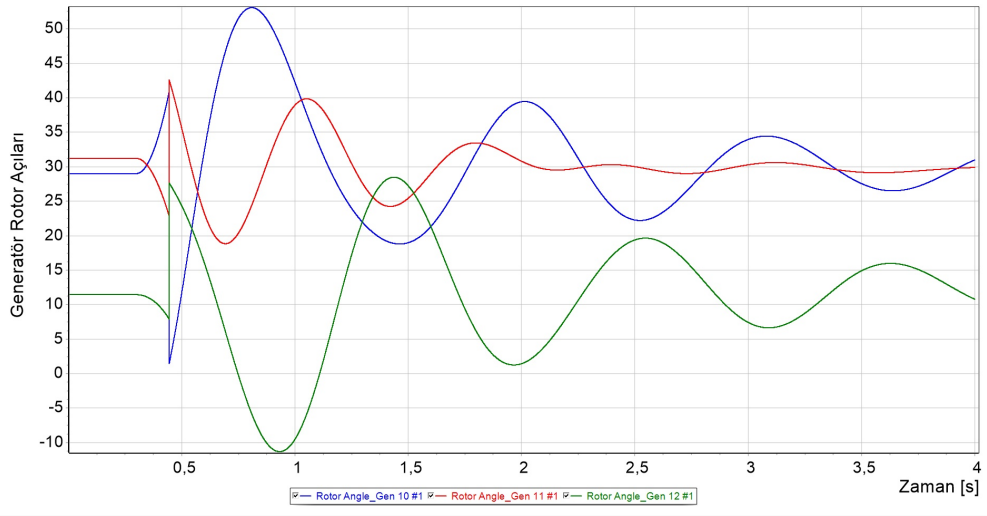
Belirtilen geçici hal arıza etkisi altında elde edilen analiz sonuçları Çizelge 6.12, Çizelge 6.13, Çizelge 6.14 ve Çizelge 6.15'de verilmiştir. Öncelikle Çizelge 6.12 ile senkron generatörlerin zamana göre geçici hal gerilim değişimi verilmiştir.

Çizelge 6.12'de gösterilen analizde 0.30 saniyede generator-1'in (bağlı olduğu bara-10) (bakınız: Çizelge C.1) statik yükü azalmıştır. Böylece gerilimi 1.025 p.u (18.00 Nom kV)'dan 1.094 p.u (19.21 Nom kV) değerine yükselmiştir. Azalan yük etkisi ile uyarma kontrolü senkron generatör-1 rotor sargılarında rotor manyetik alanı düşürmek için DC uyarma akımını 0.3004 saniyeden itibaren azaltıp ve uyarma akımının endüklenen gerilimi 0.3040 saniye ile düşürmeye başlamıştır.



Şekil 6.12 : Bara Frekansları - üçüncü arıza geçici hal kararlılık analizi.

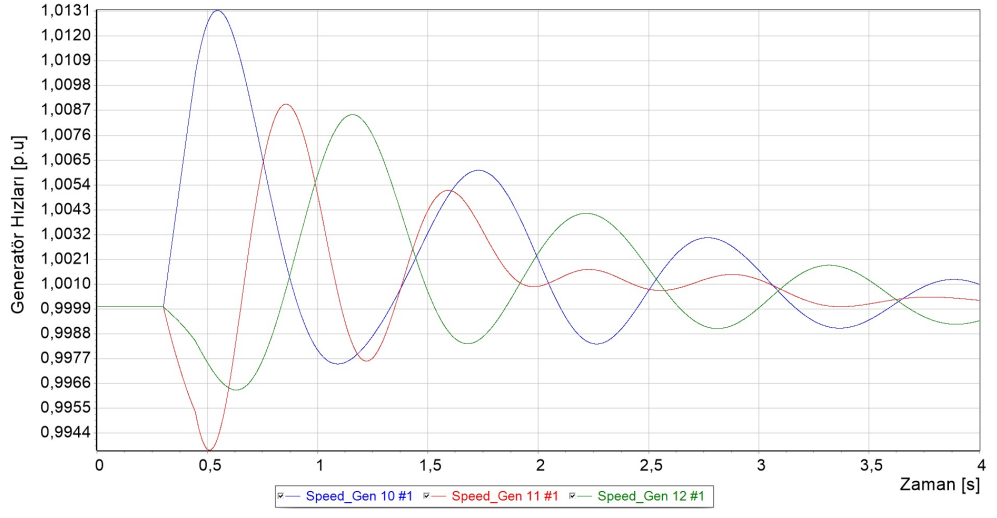
Arıza etkisi kaldırıldıktan sonra senkron generatörlerin gerilimleri dalgalanmaya devam edip ve arıza öncesi değerlere yaklaşmıştır. Geçici hal kararlılık analizi ile elde edilen senkron generatörlerin rotor açıları Çizelge 6.13 ile verilmiştir.



Şekil 6.13 : Generator rotor açıları - üçüncü arıza geçici hal kararlılık analizi.

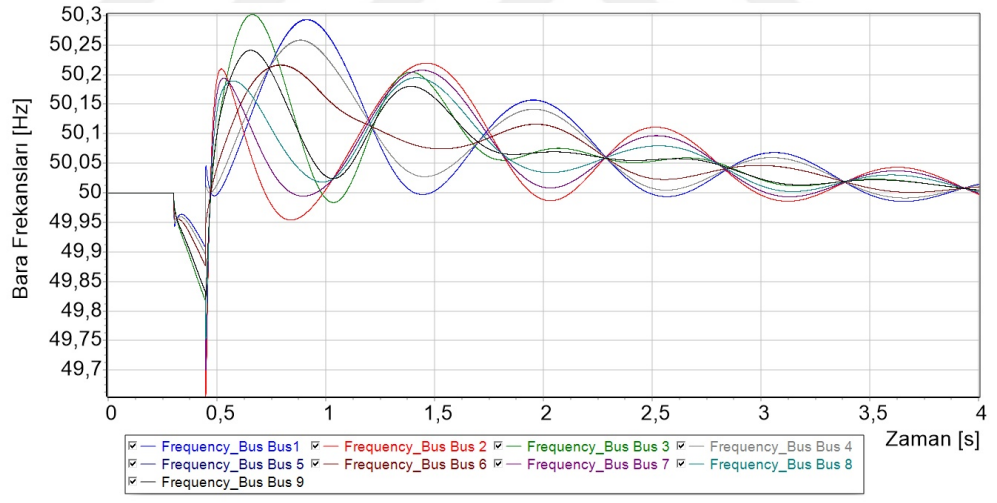
0.300 - 0.445 saniyede generatör-1'in mekanik gücü bağlı olduğu baraya ilettiği elektrik çıkış gücünden fazladır ve böylece rotor açısı artıp 53.087 dereceye ulaşmıştır.

Arızada generatör-1 ve generatör-2'e bağlı olan elektriksel yük arttığından, mekanik güçleri elektrik gücünden fazladır ve arıza süresince rotor açıları azalmıştır. Simülasyonda generatör-2 arıza öncesi değerine yaklaşırken generatör-1 ve generatör-3 yaklaşmamıştır. Generatörlerin hızları Çizelge 6.14 ile verilmiştir.



Şekil 6.14 : Generator hızları - üçüncü arıza geçici hal kararlılık analizi.

Generatör-1 hızı 0.997 - 1.013 p.u arasında değiştiği gözlemlenmiştir. İncelenen simülasyon süresi sonunda generatörler hızlarının başlangıç koşullara yaklaştığı fakat yakınsamadığı gözlenmiştir. Bir sonraki simülasyon sonucunda bara frekanslarının geçici hal kararlılık analizi Çizelge 6.15 ile verilmiştir.



Şekil 6.15 : Bara Frekansları - üçüncü arıza geçici hal kararlılık analizi.

Güç sisteminde frekanslarının 50.5588 (bara-10)- 49.8138 (bara-11) Hz arasında değiştiği ve arıza kaldırıldıktan sonra 50 Hz çalışma frekansına yaklaştığı gözlenmiştir. Üçüncü geçici hal kararlılık analiz incelemesinde güç sistemi arıza sonrası kararlı çalışma koşullarına yaklaştığı elde edilen sonuçlarda görülmüştür. Ayrıca maksimum dalgalanmanın olduğu senkron generatör-1'de generatör hızı 0.997 - 1.013 p.u arasında değiştiği gözlenmiştir.

Elde edilen analiz sonuçlarının değerlendirilmesi

Bu bölümde elde edilen tüm sonuçlar aşağıda Çizelge C.2 ile verilmiştir.

Çizelge 6.4 : PowerWorld kullanılarak elde edilen kararlılık analizi verileri.

Geçici Hal Kararlılık Analizi					
Generatör					Bara
		Gerilim [p.u]	Rotor Açısı [derece]	Hız [p.u]	Frekans [Hz]
Sayı-(Bara)	1:0	Min - Mak (Fark)	Min-Mak (Fark)	Min - Mak (Fark)	Min - Mak (Fark)
İlk Analiz: İkinci Senkron Generatör 85.00 MW (Bara - 11) Devre Dışı					
1 - (10)	1	1.011 - 1.03 (0.019)	20.769 - 36.573 (15.805)	0.997 - 1.003 (0.0059)	49.875 - 50.077 (0.202)
2 - (11)	0	1 - 1.039 (0.038)	15.310 - 46.950 (31.639)	0.993 - 1.02 (0.0193)	49.820 - 50.327 (0.506)
3 - (12)	1	1.034 - 1.044 (0.01)	3.775 - 19.778 (16.003)	0.998 - 1.002 (0.004)	49.896 - 50.045 (0.149)
İkinci Analiz: Üçüncü Senkron Generatör 75.00 MW (Bara-12) Devre Dışı					
1 - (10)	1	1.013 - 1.035 (0.022)	16.453 - 39.505 (23.056)	0.996 - 1.005 (0.008)	49.837 - 50.159 (0.322)
2 - (11)	1	1.003 - 1.031 (0.028)	24.883 - 37.775 (12.893)	0.995 - 1.003 (0.007)	49.819 - 50.082 (0.263)
3 - (12)	0	1.035 - 1.043 (0.008)	(-5.623) - 25.408 (31.031)	0.997 - 1.005 (0.008)	49.912 - 50.208 (0.296)
Üçüncü Analiz: Birinci Senkron Generatör 163.00 MW (Bara-10) Devre Dışı					
1 - (10)	0	0.998 - 1.094 (0.096)	1.447 - 53.087 (51.645)	0.997 - 1.013 (0.0157)	49.936 - 50.558 (0.622)
2 - (11)	1	0.927 - 1.041 (0.114)	18.842 - 42.577 (23.735)	0.994 - 1.009 (0.0153)	49.813 - 50.303 (0.489)
3 - (12)	1	1.024 - 1.051 (0.028)	(-11.324) - 28.48 (39.803)	0.996 - 1.009 (0.0122)	49.857 - 50.329 (0.471)

"1" devrede olan senkron generatör ve "0" devrede olmayan senkron generatördür.

Elde edilen tüm sonuçlar maksimum ve minimum değerleri ile verilmiştir. Ayrıca senkron generatörlerin normal çalışma gerilimleri: senkron generatör-1: 1.025 p.u, generatör-2: 1.025 p.u ve generatör-3 1.04 p.u.

- İlk incelemede senkron generatörlerin gerilimlerinin değerlendirilmesi verilecektir.

Üçüncü analizde (senkron generatör-1 (bara-10)'nin (Pg: 163 MW, Qg: 72.20 MVar) güç sisteminden çıkarıldığında), senkron generatörlerin anlık yük değişimi etkisi ile oluşan gerilim dalgalanması birinci ve ikinci analizdeki senkron generatörlerin gerilim dalgalanması değişiminden daha fazla olduğu gözlenmiştir.

Elde edilen sonuçlarda senkron generatör-1 arıza anında gerilimi (0.998 - 1.094 pu) arasında değiştiği gözlenmiştir (Nom kV: 18.00 kV - 1.025 p.u).

Arıza süresi boyunca uyarma sistemi senkron generatörlerin rotor manyetik alanı arttırmak ve azaltmak için DC uyarma akımını kontrol ederek endüklenen geriliminde değişim sağlamıştır. Örnek olarak ani yük azalmasında rotor manyetik alanı düşürmek için uyarma sistemi DC uyarma akımını azaltmıştır ve böylece senkron generatörün endüklenen gerilimi azalmıştır.

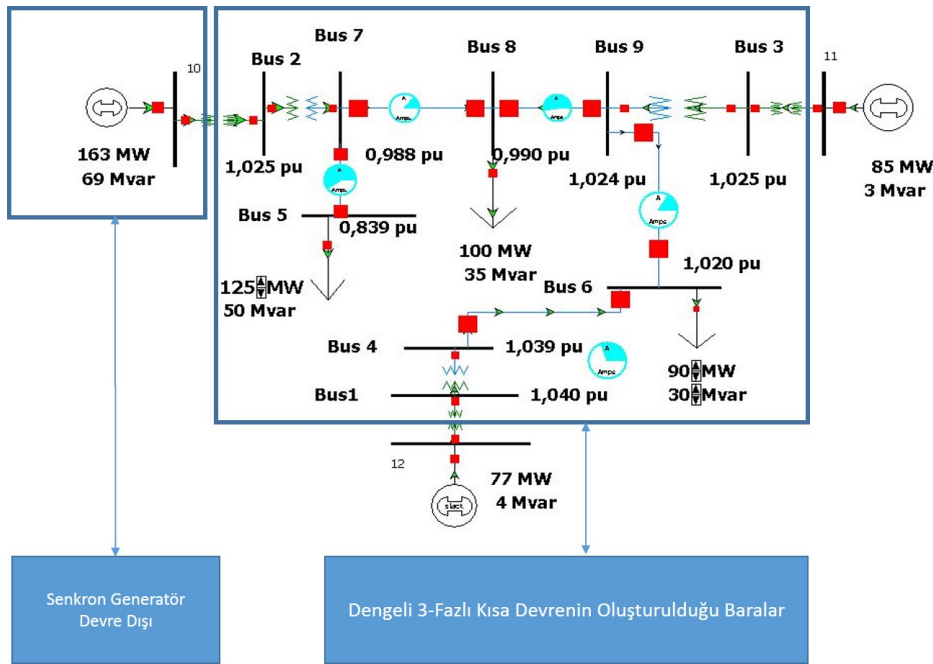
- Bir diğer analiz sonucu rotor açısı kararlılığıdır.

Güç sisteminde senkron generatör-1: 163.00 MW, generatör-2: 85.00 MW ve generatör-3: 75.00 MW'tır. Salınım denkleminde göre (bakınız: Denklem 2.4) elektrik ve mekanik güçteki dengesizlik güç sisteminde senkron generatörlerin rotor açısı değişimine sebep olmaktadır. Üçüncü analizde (senkron generatör-1 (bara-10)- 163.00 MW'nin güç sisteminden çıkarıldığında) tüm senkron generatörlerin rotor açısı dalgalanmasının değişimi diğer analiz sonuçlarından daha fazla olduğu beklendiği gibi gözlenmiştir. Governor kontrolünde elektrik ve mekanik güç dengesinin sağlamak için generatörlerin mekanik giriş gücü azalmış veya artmıştır. Mekanik güç değişimi arttıkça frekans dalgalanması da artmıştır (Denklem 4.14).

- Elde edilen Çizelge C.1 analiz sonucunda iletim kayıplarının senkron generatör-3 (bara 12) : 75.00 MW devre dışı bırakılmasında (Ploss: 12.618 MW, Qloss: 109.66 MVar) generatör-2 (bara 11) : 85.00 MW devre dışı bırakılmasından (Ploss: 11.794 MW, Qg: 93.15 MVar) daha fazla olduğu analiz edilmiştir. Yapılan analizde mekanik ve elektrik güç dengesizliğin yanında iletim kayıplarının da değerlendirilmesinin yapılması gerektiği değerlendirilmiştir. Kısaca iletim kayıpları arttıkça güç sistemindeki rotor açısı dalgalanması arttığı gözlenmiştir.
- Birinci ve ikinci analizde senkron generatör-1 rotor açısı Çizelge C.2 karşılaştırıldığı zaman referansa göre rotor açısı değişimi ikinci analizde daha fazla olduğu (23.056 derece) gözlenmiştir. Çizelge 6.8 senkron generatör-1'in rotor açısı arıza sonrası Çizelge 6.3 ile karşılaştırmalı olarak daha fazla dalgalanmakta ve arıza sonrası arıza öncesi rotor açısı değerine yakınsamamaktadır.

6.2 Güç Sisteminde Dengeli 3-fazlı Kısa Devre Arızalarının Oluşturulması

Senkron generatör-1 - (bara-10)'ın güç sisteminden geçici olarak çıkarıldığında maksimum iletim kayıpları; gerilim, rotor açısı ve hız dalgalanması elde edilmiştir. Bir sonraki analizde geçici hal kararlılık incelemesi 3-fazlı kısa devre ile oluşturulacaktır. Senkron generatör-1 güç sisteminden geçici olarak çıkartılırken, baralarda 3-fazlı kısa devre oluşturulmuştur. Yapılan arıza çeşidi Çizelge 6.16 ile verilmiştir.



Şekil 6.16 : Üç fazlı arızanın güç sisteminde oluşturulması.

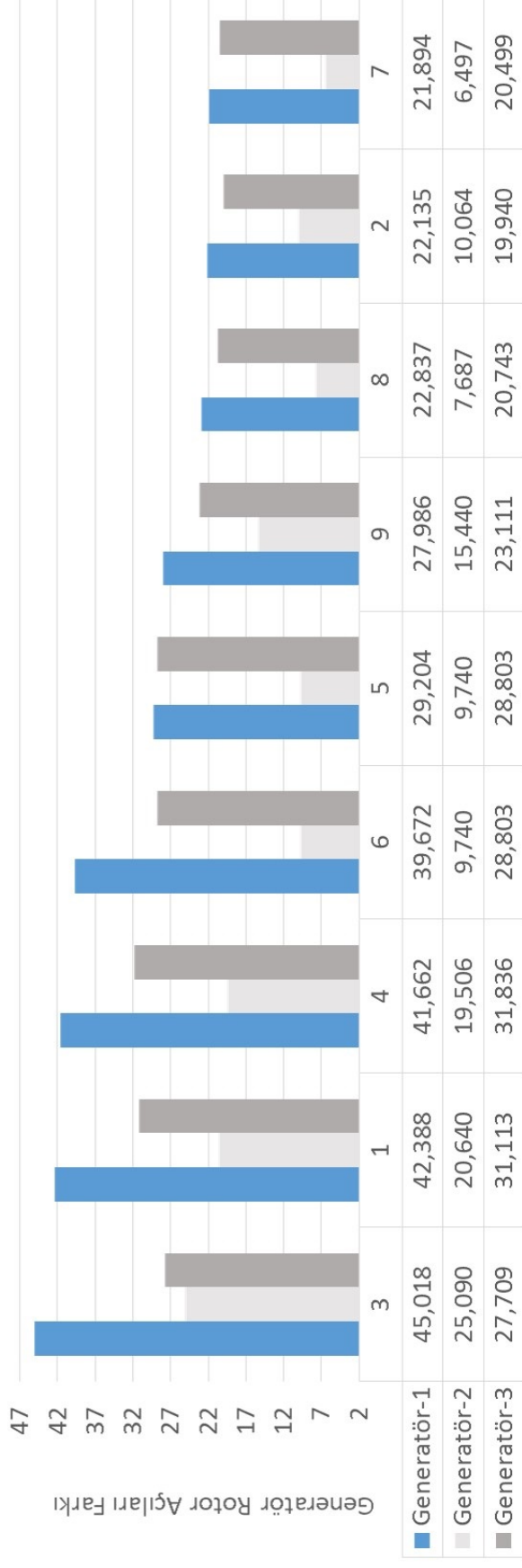
OLuşturulan örnek arıza aşağıda Çizelge 6.5 ile verilmiştir.

Çizelge 6.5 : Örnek 3-fazlı kısa devre arıza ve senkron generatör-1'in geçici süreliğine güç sisteminde devre dışı olması.

Sayı	Zaman-saniye (t)	Arıza Yeri	Arıza Çeşidi
1	0.3000 s	Branch '10' '2'	OPEN BOTH
1	0.3000 s	Bus '1'	Fault 3PB Solid
2	0.4450 s	Branch '10' '2'	CLOSE BOTH
2	0.4450 s	Bus '1'	CLEAR FAULT

Her bir arıza analizinde farklı baralarda 3-fazlı dengeli kısa devre arıza oluşturulmuş ve senkron generatör-1 geçici süreliğine güç sisteminden çıkarılmıştır. Analiz çeşidinde her bir analiz sonucu senkron generatörlerin rotor açıları farkı dikkate alınarak incelenmiş ve elde edilen tüm sonuçlar Çizelge 6.17 ile verilmiştir.

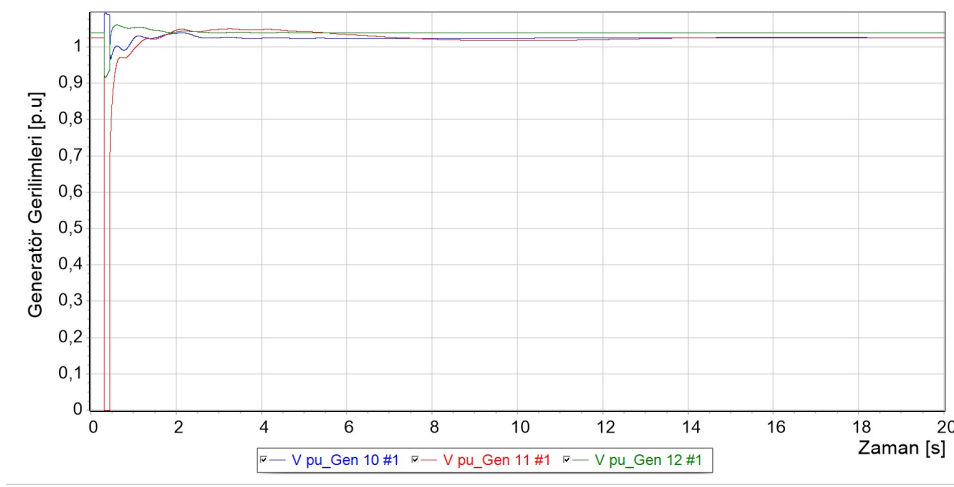
Güç sisteminde bara 1 ve 9 arasında oluşturulan 3-fazlı dengeli kısa devre arıza sonunda elde edilen generatör rotor açıları



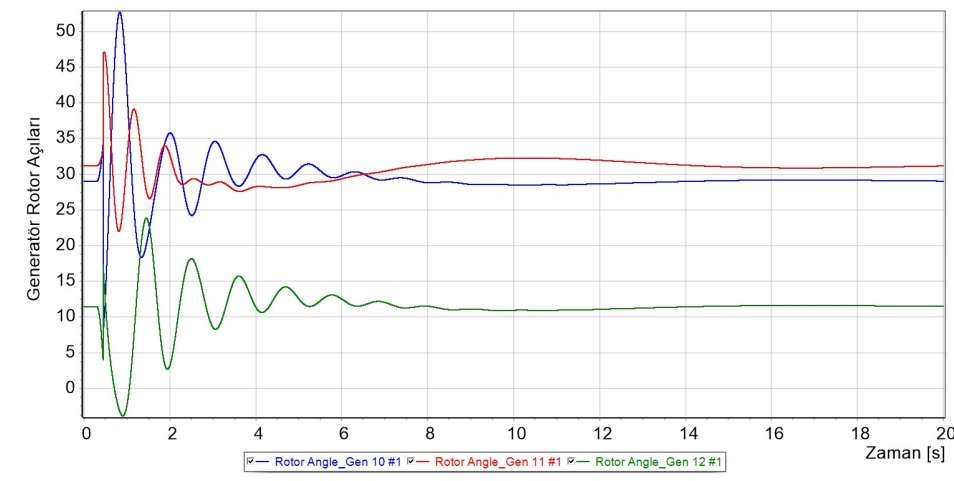
Şekil 6.17 : Senkron generatör-1'in devre dışı iken geçici hal 3-fazlı kısa devre arızaların oluşturulması

Elde edilen sonuçlarda maksimum senkron generatör rotor açısı değişimi bara-3'te kısa devre arızanın oluşturulduğu zaman senkron generatör-1'de gözlenmiştir. Bu durum dikkate alınarak farklı baralarda kısa devre oluşturulduğu zaman, tüm sonuçlar öncelikli büyükten-küçüğe generatör-1'e göre verilmiştir. Yapılan analizlerde kısa devre ile oluşturulan yük dengesizliği arttıkça senkron generatörlerin rotor açıları farkı arttığı gözlenmiştir.

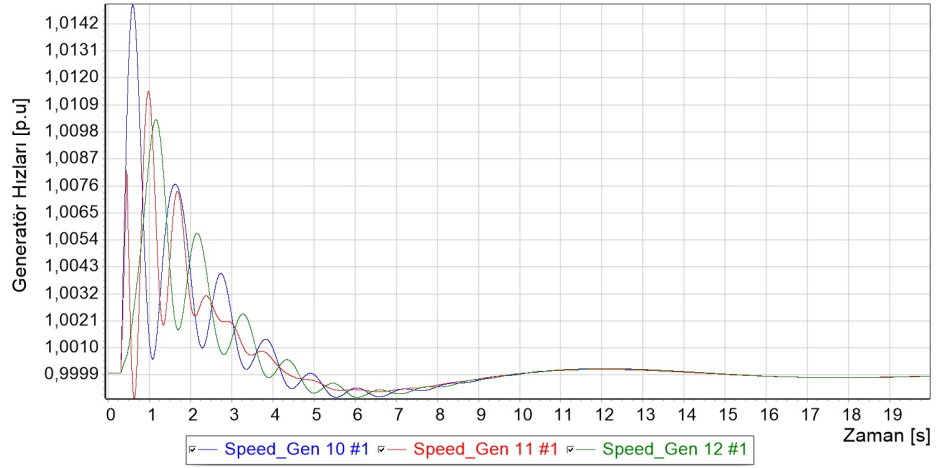
Maksimum arıza etkisi senkron generatör-1'in geçici süreliğine devre dışı bırakıldığında ve bara-3'te kısa devre oluşturulduğunda gözlemiştir ve sonuçlar sırası ile Çizelge 6.18, Çizelge 6.19, Çizelge 6.20 ve Çizelge 6.21'de verilmiştir.



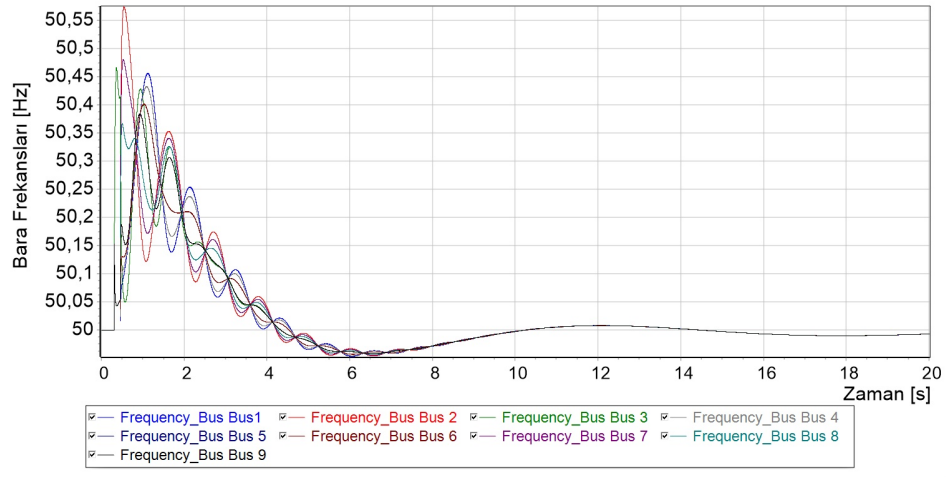
Şekil 6.18 : Generatör gerilimleri - 3. Bara 3-fazlı kısa devre oluşturulması ve senkron generatör-1'in devre dışı bırakılması.



Şekil 6.19 : Generatör açıları - 3. Bara 3-fazlı kısa devre oluşturulması ve senkron generatör-1'in devre dışı bırakılması.



Şekil 6.20 : Generator hızları - 3. Bara 3-fazlı kısa devre oluşturulması ve senkron generator-1'in devre dışı bırakılması.



Şekil 6.21 : Bara frekansları - 3. Bara 3-fazlı kısa devre oluşturulması ve senkron generator-1'in devre dışı bırakılması.

Çizelge 6.18'de senkron generator-1 (bara-11)'in bağlı olduğu bara-3'te kısa devre olduğunda arıza süresi boyunca senkron generator-1'in geriliminin "0" olduğu beklendiği gibi gözlenmiştir. Çizelge 6.19'de görüldüğü gibi senkron generatörler-1'nin rotor açısı değişimi üç fazlı kısa devre arızanın bara-3'te olması ile arıza sonrası başlangıç değerine yakınsamaktadır. Ayrıca Çizelge 6.20'de senkron generatörlerin hızlarının arıza etkisi sonrası başlangıç gerilim değerine yaklaştığı gözlenmiştir. Bir sonraki incelemede Çizelge 6.21'de bara frekanslarının maksimum değeri bara-3'de olduğu gözlenmiştir. Ayrıca elde edilen maksimum ve minimum bara değişimi değerleri Çizelge 6.6 ile verilmiştir.

Çizelge 6.6 : 3-fazlı kısa devre ve senkron generatör-1'in geçici devre dışı olması ile elde edilen bara değerleri.

Geçici Hal Kararlılık Analizinde Elde Edilen Bara Gerilim ve Frekans Değerleri								
Bara Numarası	Gerilim				Frekans			
	<i>Temel</i>	<i>Min.</i>	<i>Mak.</i>	<i>Mak-Min Fark</i>	<i>Temel</i>	<i>Min.</i>	<i>Mak.</i>	<i>Mak-Min Fark</i>
1	1.04	1.0067	1.061	0.0542	50	49.9534	50.4572	0.5038
2	1.025	0.9673	1.0392	0.0719	50	49.9555	50.5745	0.619
3	1.025	0.7093	1.0506	0.3413	50	49.962	50.4288	0.4668
4	1.0388	0.9672	1.0501	0.083	50	49.9549	50.4332	0.4783
5	0.8387	0.747	0.8517	0.1047	50	49.9575	50.4816	0.5241
6	1.0203	0.8888	1.0316	0.1428	50	49.9573	50.4021	0.4448
7	0.9877	0.8797	1.003	0.1233	50	49.9575	50.4816	0.5241
8	0.9895	0.8153	1.007	0.1917	50	49.9598	50.3674	0.4076
9	1.0244	0.7747	1.0452	0.2706	50	49.9619	50.3847	0.4229
10	1.025	0.9673	1.0392	0.0719	50	49.9555	50.5809	0.6254
11	1.025	0.7093	1.0506	0.3413	50	49.962	50.5544	0.5923
12	1.04	1.0068	1.061	0.0542	50	49.9534	50.4572	0.5038

Çizelge 6.6'de görüldüğü gibi kısa devre arızanın olduğu bara 3'te maksimum gerilim değişimi gözlenmiştir. Ayrıca bara 3'te bağlı olan bara 11'de de gerilim ve frekans farkı yüksektir. Bir diğer Çizelge 6.7'de generatörlerin geçici arıza süresince maksimum ve minimum değişken değerleri verilmiştir.

Çizelge 6.7 : 3-fazlı kısa devre ve senkron generatör-1'in geçici devre dışı olması ile elde edilen generatör değerleri.

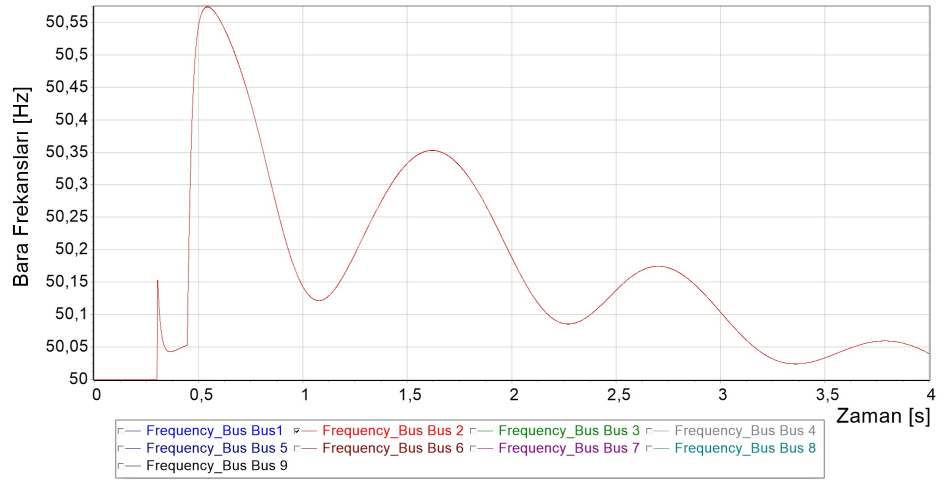
Geçici Hal Kararlılık Analizinde Elde Edilen Senkron Generatör Değerleri			
	<i>Generatör-1 (270 MVA)</i>	<i>Generatör-2 (125 MVA)</i>	<i>Generatör-3 (512 MVA)</i>
Temel Açısı	29.01	31.207	11.444
Rotor Açısı	7.68 - 52.684 (45.004)	22.018 - 47.107 (25.09)	(-3.866) - 23.843 (27.709)
Hız	0.999 - 1.015 (0.016)	0.999 - 1.011 (0.0125)	0.999 - 1.01 (0.0113)
PMech	162.439 - 163.177 (0.738)	85.064 - 85.22 (0.156)	74.508 - 76.61 (2.102)
Efd	1.8467 - 2.116 (0.269)	1.342 - 2.098 (0.755)	1.084 - 2.917 (1.832)
Ifd	1.547 - 2.460 (0.913)	0.910 - 2.271 (1.361)	1.184 - 1.727 (0.543)

Bir sonraki bölümde kararlılık problemlerinin değerlendirilmesi ve analiz sonuçlarının iyileştirilmesi yapılmıştır.

7. GOVERNOR SİSTEM MODELİ İLE FREKANS KONTROLÜ

Bu bölümde Bölüm 3’de belirtildiği gibi senkron generatör-10 geçici süreliğine güç sisteminden çıkartıldığında ve bara 3’te dengeli üç fazlı kısa devre olduğunda elde edilen maksimum frekans dalgalanmasının (Bara-2) iyileştirilmesi ve örnek bir yaklaşım ile analiz edilen güç sisteminin frekans kontrolü yapılacaktır.

Arıza süresince maksimum bara-2 frekansı - 50.575 Hz ve arıza sonunda elde edilen frekans değeri - 50.04 Hz’dir ve Çizelge 7.1 ile verilmiştir.

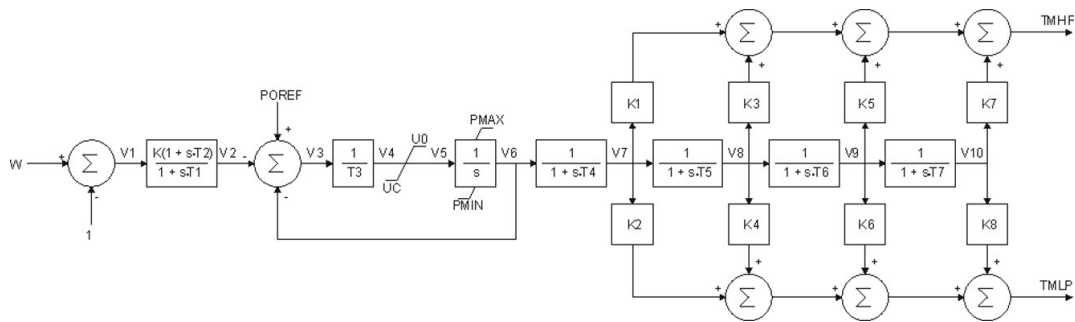


Şekil 7.1 : Bara-3 frekansı - 3. Bara 3-fazlı kısa devre oluşturulması ve senkron generatör-1 devre dışı bırakılması.

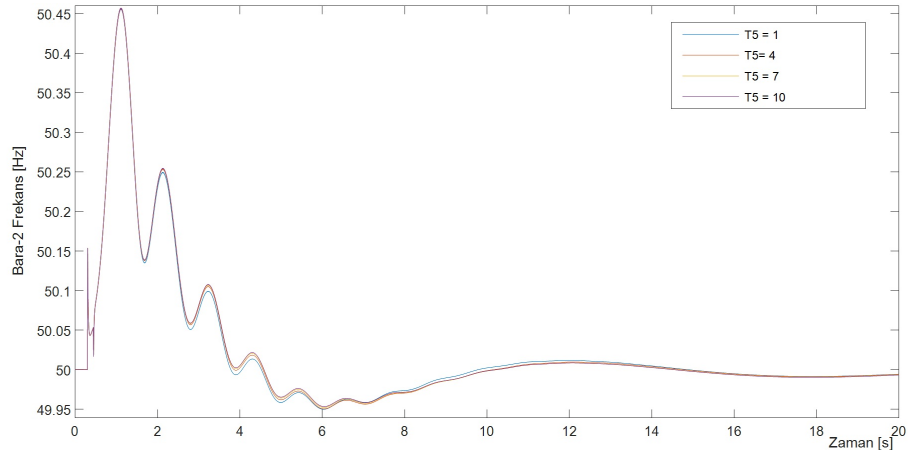
Simülasyon sonuçlarından elde edilen geçici hal frekans değişimini arıza sonunda ilk durum değerine yakınsamak için senkron generatörlerin governor sistemlerinin parametreleri incelenmiştir ve parametre kontrolü örnek çalışma koşulları ile gerçekleştirilmiştir. Güç sisteminde kullanılan governor sistemleri micro-türbine sistemidir ve bu türbine sistemine göre elde edilen transfer fonksiyonu aşağıda verilmiştir Denklem (7.1) ile gösterilmiştir.

$$\frac{P_m}{\Delta Pref} = \frac{1 + sFT_5}{1 + s(T_3 + T_4 + T_5) + s^2(T_3T_4 + T_3T_5 + T_4T_5) + s^3(T_3T_4T_5)} \quad (7.1)$$

Bu tez çalışmasında frekans kontrolü, senkron generatörün mekanik güç kontrolünü sağlayan governor sisteminin ara ısıtıcı parametresi- T3, T4, T5 kademeli olarak değiştirilerek kontrol sistemi oluşturulmuştur. Senkron generatör-1 T3 sınır değeri ($0.04 < T3 < 1$ arası), T4 sınır değeri ($0 < T4 < 1.0$ arası), T5 sınır değeri ise ($0 < T5 < 10$ arası) 'dır. Belirlenen sınırlar içinde değerler değiştirilmiştir. Bu sınır değerler aşağıda verilen Çizelge 7.3 türbin - IEEEG1 IEEE Type 1 governor hız modelinde verilen sınır değerler dikkate alınarak seçilmiştir [45].



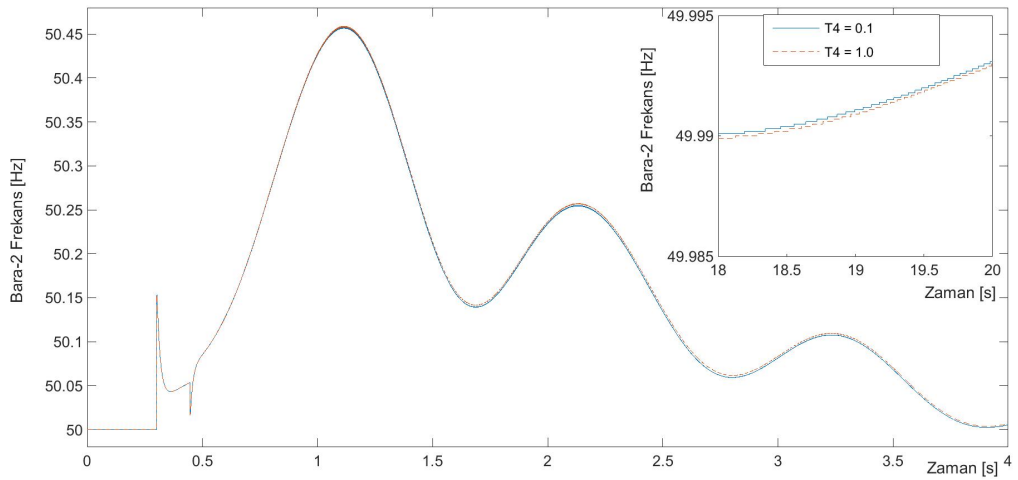
Öncelikle ara ısıtıcı parametresi- T5 kademeli olarak değiştirilerek elde edilen frekans değişimi aşağıda bulunan Çizelge 7.4 ile verilmiştir.



Şekil 7.4 : Bara-2 frekansı - senkron generatör-1 T5 ara ısıtıcı değişkeni değiştirilerek frekans kontrolünün elde edilmesi.

Elde edilen sonuçlara göre ara ısıtıcı kademesi 10 saniyeye ayarlandığı zaman (maksimum limit değeri olarak belirtilmiş), frekans cevabının maksimum değeri ilk 6.19 saniyede diğer T5 değişken değerlerinden daha yüksektir. Bunun yanında, ara ısıtıcı zaman sabiti azaltıldığında, 6.19 saniyeden sonra Bus 2’teki frekans değeri ilk koşuldaki frekans değerine daha hızlı yakınsamakta ve daha kararlı sonuç vermektedir.

Transfer fonksiyonunda görüldüğü gibi çıkış gücü mikro türbine ve governor kombinasyon sisteminde T3, T4 azaltılması ve F’in artırılması ile artmaktadır. T3 (servo zaman sabiti) ya da T4 (buhar valfi zaman sabiti) artması ile transfer fonksiyon artacağından, sadece T4 değiştirilerek Bara-3 frekans değişimi aşağıda bulunan Çizelge 7.5 ile gözlenmiştir.



Şekil 7.5 : Bara-2 frekansı - senkron generatör-1 T4 ara ısıtıcı değişkeni değiştirilerek frekans kontrolünün elde edilmesi

Çizelge 7.5’de elde edilen sonuca göre, ilk 5. saniyeye kadar $T4 = 0.1$ olduğunda frekans değeri $T4 = 1.0$ olduğundan daha fazladır. 5. saniyeden sonraki frekans dalgalanmalarında $T4 = 0.1$ frekansı $T4 = 1.0$ frekansından önce arıza öncesi çalışma frekansına yaklaşmıştır. Ayrıca bu tez çalışmasında farklı arıza koşullarında elde edilen analiz sonuçları ek kısmında verilmiştir.



8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu kısımda sonuçlar ve öneriler kısaca bahsedilecektir. Öncelikle yapılan tüm analizlerde güç sistemin kararlı çalışma koşullarını sürdürdüğü gözlenmiştir. Güç sisteminde yapılan geçici hal kararlılık analizlerinde, üçüncü analizde (senkron generatör-1 (bara-10)'nin (Pg: 163 MW, Qg: 72.20 MVar) güç sisteminden çıkarıldığında) senkron generatörlerin anlık yük değişimi etkisi ile oluşan gerilim dalgalanması diğer analizlerden daha fazla olduğu gözlenmiştir. Örnek olarak senkron generatör-1 arıza anında gerilimi (0.998 - 1.094 pu) arasında değişmektedir (Nom kV: 18.00 kV - 1.025 p.u). Yapılan incelemelerde geçici hal arıza süresi boyunca kontrol sistemleri- uyarma ve governor sistemi etkindir. Örnek olarak geçici arıza süresince üçüncü analizde güç sisteminden çıkarılan senkron-generatör-1'in yükü azalmıştır. Azalan elektriksel yük etkisi ile uyarma sistemi DC uyarma akımını düşürmüştür.

Bir diğer analiz rotor açısı kararlılığıdır. Elde edilen analizlerde geçici hal kararlılık analizlerinde mekanik ve elektrik güç dengesizliği senkron generatörlerin rotor açısı değişimine sebep olduğu gözlenmiştir. Güç sistemindeki senkron generatörlerin aktif güçleri: senkron generatör-1: 163.00 MW, generatör-2: 85.00 MW ve generatör-3: 75.00 MW'tır. En büyük aktif güçteki senkron generatör-1'in güç sisteminden geçici süre çıkarılması en büyük rotor açısı dalgalanması oluşturduğu gözlenmiştir.

Governor kontrolünde elektrik ve mekanik güç dengesinin sağlamak için generatörlerin mekanik giriş gücü azalmış veya artmıştır. Örnek olarak üçüncü analizde senkron generatör-1'in güç sisteminden çıkarılması ile birlikte generatörün ürettiği mekanik güç ilettiği elektrik güçten fazladır. Böylece 0.3516 saniye ile senkron generatör-1'in mekanik gücü azalmıştır.

İletim kayıpları senkron generatör-3 (bara 12) : 75.00 MW devre dışı bırakılmasında (Ploss: 12.618 MW, Qloss: 109.66 MVar) generatör-2 (bara 11) : 85.00 MW devre dışı bırakılmasından (Ploss: 11.794 MW, Qloss: 93.15 MVar) daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Böylece senkron generatörlerin rotor açısı değişimi iletim kayıpları arttıkça arttığı gözlenmiştir.

Bunun sonucunda iletim kayıplarının da geçici hal kararlılık analizi için gerekli olduğu tespit edilmiştir. Örnek olarak birinci ve ikinci analizde senkron generatör-1 rotor açısı Çizelge C.2 karşılaştırıldığı zaman referansa göre rotor açısı değişimi ikinci analizde daha fazla olduğu (23.056 derece) gözlenmiştir.

Ayrıca güç sistemlerinde baralarda 3-fazlı arıza çeşidi oluşturularak kararlılık analizi yapılmıştır. Üç fazlı kısa devre arızaların daha yaygın olmasından dolayı analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında güç sisteminin kararlı çalışma koşullarına yaklaştığı gözlenmiştir. Elde edilen analiz sonuçlarında governör sistemlerinin frekans kontrolünde etkisi incelenmiş ve parametrelerinin iyileştirilmesine örnek verilmiştir. Daha iyi sonuç ve sistem güvenilirliği için tüm uyarıcı ve governör sistemlerinin parametre incelenip sistemin arıza altında etkilenmesinin minimum seviyeye indirilmesi sağlanabilmektedir.

Ayrıca bu tez çalışmasında farklı arıza koşullarında elde edilen analiz sonuçları örnek olarak ek kısmında verilmiştir. Yapılan ek analizlerde elektriksel yükler geçici olarak güç sisteminden çıkarılmış ve tek fazlı kısa devre güç sisteminde oluşturulmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] **Tomsovic K., Bakken D. E., Venkatasubramanian V., and Bose A.** (2005) "Designing the Next Generation of Real-Time Control, Communication, and Computations for Large Power Systems" *Proceedings of the IEEE*, Volume: 93, Issue: 5, May 2005 pp: 965-979.
- [2] **Lee A. E.** (2008) "Cyber Physical Systems: Design Challenges" *Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC), 2008 11th IEEE International Symposium on* 5-7 May 2008.
- [3] **Müller C. S., Häger U., and Rehtanz C.** (2014) "A Multiagent System for Adaptive Power Flow Control in Electrical Transmission Systems" *IEEE Transactions on Industrial Informatics* Volume: 10, Issue: 4, Nov. 2014, pp: 2290 - 2299.
- [4] **Kang B., Maynard P., McLaughlin K., and Sezer S.** (2015) "Investigating Cyber-Physical Attacks against IEC 61850 Photovoltaic Inverter Installations" *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2015 IEEE 20th Conference on*, pp: 1-3.
- [5] **Lee R., Assante M., and Conway T.** (2016). "Analysis of the Cyber Attack on the Ukrainian Power Grid", *2016, E-ISAC Electricity Information Sharing and Analysis Center, Industrial Control Systems, Report on Traffic Light Protocol*, March 2016, pp: 1-6.
- [6] **Stefanov A., Liu C.** (2012). "ICT modeling for integrated simulation of cyber-physical power systems", *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe), 2012 3rd IEEE PES International Conference and Exhibition on*, 14-17 Oct. 2012, pp: 1-8.
- [7] **Mo H., and Sansavini G.** (2017). "Dynamic Defense Resource Allocation for Minimizing Unsupplied Demand in Cyber-Physical Systems Against Uncertain Attacks", *IEEE Transactions on Reliability*, Volume: 66, Issue: 4, December 2017 pp: 1253 - 1256.
- [8] **Liu S., Mashayekh S., Kundur D., Zourtos T., and Butler-Purpy K.** (2013). "A Framework for Modeling Cyber-Physical Switching Attacks in Smart Grid", *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, Volume: 1, Issue: 2, Dec. 2013 pp: 273 - 283.
- [9] **Berndt H., Hermann M., Kreye H., and all,** (2007) "TransmissionCode 2007, Network and System Rules of the German Transmission System Operators", *Verband der Netzbetreiber - VDN – e.V. beim VDEW*, pp: 25-26.

- [10] **Hashim N., Hamzah N., Latip M., and Sallehuddin A.**, (2012). "Transient Stability Analysis of the IEEE14-Bus Test System Using Dynamic Computation for Power Systems (DCPS)", 2012, *Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS), 2012 Third International Conference on*.
- [11] **Meegahapola, L., Flynn, D., and Littler, T.** (2008). "Transient Stability Analysis of a Power System with High Wind Penetration", 2012 *Universities Power Engineering Conference, 2008. UPEC 2008. 43rd International*, 1-4 Sept. 2008.
- [12] **Demetriou, P., Quiros, J., Asprou, M., and Kyriakides, E.** (2015). "Dynamic IEEE Test Systems for Transient Analysis", 2015 *IEEE Systems Journal*, vol. pp, no.99, pp.1-10, Jul. 2015.
- [13] **Tziouvaras, D.**, (2009). "Analysis of Complex Power System Faults and Operating Conditions", 63rd *Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference, Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*, April 2009 pp:1-12.
- [14] **Ribbens-Pavella M., and Evans F.J.**, (1985)"Direct methods for studying dynamics of largescale electric power systems - A Survey," *Automatica* vol-32, January, 1985, pp.1-21.
- [15] **Varaiya P. P., Wu F. F. and Chen R-L.**, (1985) "Direct methods for transient stability analysis of power systems: Recent results," *Proceedings of the IEEE*, December 1985, pp. 1703-1715.
- [16] **Fouad A. A., and Vittal V.**, (1988) "The transient energy function method", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 10, No. 4, Oct. 1988, pp. 233-246.
- [17] **Zimmerman, R. D.** (2010). "Matpower 4.0b2 User's Manual", *Power Systems Engineering Research Center (Pserc)*, pp.6-92, March 19, 2010.
- [18] **Zimmerman, R. D., Murillo-Sanchez, C. E., and Thomas, R. J.** (2011). "Matpower: Steady-State Operations, Planning and Analysis Tools for Power Systems Research and Education", *submitted to IEEE Transactions on Power Systems*, pp: 1-5, April 19, 2010.
- [19] **PowerWorld Corporation** (2011). "Simulator Version 16: Interactive power system simulation, analysis and visualization", *User's Guide*, *Url: <https://www.powerworld.com>*, December 22, 2011, erişim tarihi: 12-09-2017.
- [20] **Shi, X., Li, Y., Cao, Yilja, and Tan, Y.** (2015). "Cyber-physical Electrical Energy Systems: Challenges and Issues", *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, Volume: 1, Issue: 2, June 2015, pp: 36 - 42.
- [21] **Stagg G. W., and El-Abiad A. H.**, (1968) "Computer Methods in Power Systems", *New York: McGraw-Hill*, 1968.
- [22] **Glover J. D., Sarma S. M., and Overbye J. T.**, (2012) "Power systems Analysis and Design", *Cengage Learning*, SI 5th Edition, Stamford, USA pp. 2-807.

- [23] **Machowski, J., Bialek, J.W., and Bumby, J.R.** (2008). "Power System Dynamics: Stability and Control", *Indian Institute of Science, Bangalore*, 2nd Edition pp: 1-257.
- [24] **Abhyankar, S.**, (2006), "Simulating Voltage Collapse Dynamics for Power Systems with Constant Power Loads", *Master Tezi Department Of Electrical And Computer Engineering, Graduate College of the Illinois Institute of Technology, Chicago, Illinois* December 2006, pp: 9-19.
- [25] **Zimmerman, R., and Murillo, C.**, (2017) "MATLAB Power System Simulation Package", *Url: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>*, Nov 15, 2017 erişim tarihi: 12-09-2017.
- [26] **Demetriou, P., Ansrou, M., Quiros-Tortos J., and Kyriakides E.**, "Dynamic IEEE Test Systems, IEEE 9-Bus Modified Test System Data", *Url: <http://www.kios.ucy.ac.cy>*, *Koios Center for Intelligent Systems and Networks*, University of Cyprus, erişim tarihi: 20-09-2017.
- [27] **Ruhle, Beissler, Medak, and Lynn etc.,**(2012), "Dynamic Models Package „Standard-1“, GMB Dynamic Models for PSS® Software Product Suite", *Url: <https://www.energy.siemens.com>*, Revision 1.7, Oct 2012, erişim tarihi: 20-09-2017.
- [28] **Venayagamoorthy, G.K., and Harley, R.G.** (2005). "Adaptive Critic Designs for Optimal Control of Power Systems" *Intelligent Systems Application to Power Systems, 2005. Proceedings of the 13th International Conference on*, 6-10 Nov. 2005.
- [29] **Paudyal, S., Gokaraju, R., and Sachdev, M.** (2010). "Application of Equal Area Criterion Conditions in the Time Domain for Out-of-Step Protection", *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, 25-29 July 2010.
- [30] **Paudyal, S., Gokaraju, R., and Sachdev, M.** (2010). "Application of Equal Area Criterion Conditions in the Time Domain for Out-of-Step Protection", *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, 25-29 July 2010.
- [31] **Gonen T** (2013). *Modern Power System Analysis*, CRC Press, Second Edition, February 25, 2013, pp:165-168.
- [32] **PowerWorld Corporation**, (2017). "Steady-State Power System Security Analysis with PowerWorld Simulator", *Url: <http://www.powerworld.com>*.
- [33] **Hallberg, P., Rios, J., Bergerland C., and Blandet A., etc.,** (2013)"Active Distribution System Management, A key tool for the smooth integration of distributed generation", *Eurelectric: Url: <http://www.eurelectric.org>*, *reports full discussion paper*, erişim tarihi: 14-09-2017.
- [34] **Kang, B., Maynard, P., McLaughlin, K., and Sezer, S.** (2015). "Investigating Cyber-Physical Attacks against IEC 61850 Photovoltaic Inverter Installations", *Emerging Technologies Factory Automation (ETFA), 2015 IEEE 20th Conference on*, 8-11 Sept. 2015.

- [35] **Su, D.**, (2012), "Impact of Smart Grid, ICT on Environment and Climate Change", *ITU Symposium on ICTs, the Environment and Climate Change*, Advanced Network Technologies, National Institute of Standard and Technology, 30 May, 2012.
- [36] **Padiyar, K.R.** (2004). *Power System Dynamics Stability and Control*, Indian Institute of Science, Bangalore, Bs Publications, 2nd Edition, 2004.
- [37] **Faulkner, D. W., Payne, D.B., and Stern, J.R.** (1988). "Passive Optical Telephony Networks and Broadband Evolution", *Global Telecommunications Conference, 1988, and Exhibition. 'Communications for the Information Age.'* Conference Record, *GLOBECOM '88, IEEE*, 28 Nov.-1 Dec. 1988.
- [38] **Kundur, P., Paserbe J., Vittal V., Andersson G.** (2006). "Closure of "Definition and classification of power system stability"", *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume: 21, Issue: 1, Feb. 2006, pp:446.
- [39] (2001) **Farmer, Richard G., and Grigsby, L.** (2001). "Power System Dynamics and Stability: The Electric Power Engineering Handbook", CRC Press LLC, 3rd Edition, 2001, pp:1-101.
- [40] **Hillberg, E., and Toftevaag, T.** "Equal-Area Criterion Applied on Power Transfer Corridors: Power and Energy Systems", *From Proceeding, Power and Energy Systems*, 2012.
- [41] **Kundur, P.** (1994). "Power System Stability and Control", *McGraw-Hill*, New York, 1994.
- [42] **Weckesser, T., Jóhannsson H., and Østergaard J.** (2013). "Impact of Model Detail of Synchronous Machines on Real-time Transient Stability Assessment", *Bulk Power System Dynamics and Control - IX Optimization, Security and Control of the Emerging Power Grid (IREP), IREP Symposium*, 25-30 Aug. 2013
- [43] **Hertem, D.V., Ergun, H., and Thakurta, P.G.**, Power Flow Calculations, *Presentation: Research group Electa Department of electrical engineering*, Url: <http://homes.esat.kuleuven.be>, ESAT K.U.Leuven, Sep 19, 2011, Belgium.
- [44] **Atienza, E., and Moxley R.**, (2011) "Improving Breaker Failure Clearing Times", *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., proceedings of the 2nd Annual Protection, Automation and Control World Conference* Dublin, Ireland, June 27–30, 2011, pp:1-8.
- [45] **NEPLAN AG**, "Turbine-Governor Models, Standard Dynamic Turbine-Governor Systems in NEPLAN Power System Analysis Tool" url: <http://www.neplan.ch>, Switzerland, pp: 9-98.

EKLER

EK A.1 : Statik Parametreler

EK A.2 : Dinamik Parametreler

EK A.3 : Yük Akışı ve Geçici Hal Kararlılık Analizi Sonuçları



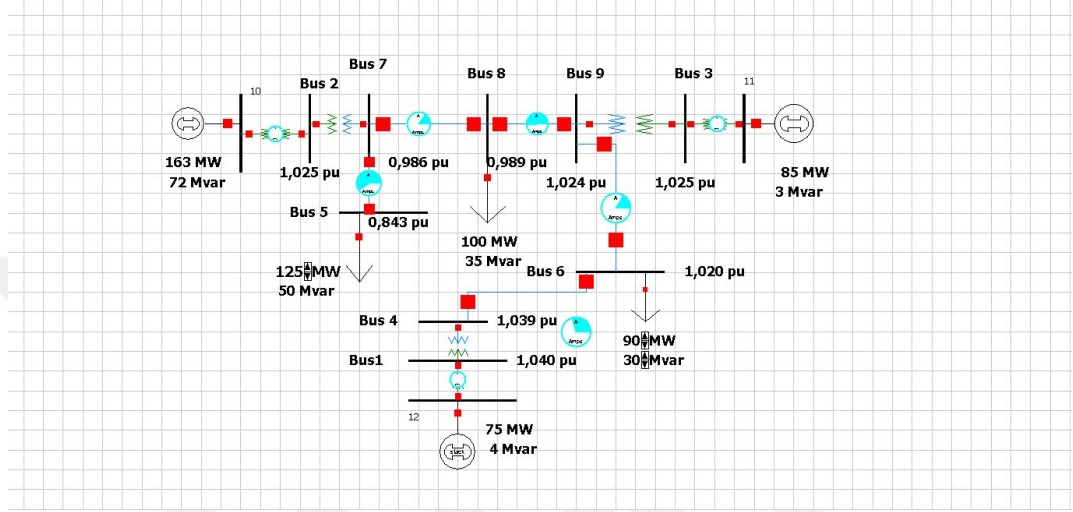


EK A.1

MVA Base: 100 MVA

Bara Temel Gerilim: 230 kV

Sistem Frekansı: 50 Hz



Şekil A.1 : PowerWorld düzenlenmiş IEEE-9 baralı güç sistemi.

Çizelge A.1 : Matpower test güç sisteminin statik bara verileri [17].

bara_nu	çeşidi	Pd	Qd	Gs Bs	Vm	Va	Temel_kV	Vmak-Vmin
1	1	0	0	0	1.04000	0	16.52	1.1-0.9
2	1	0	0	0	1.02499	-0.91	18.00	1.1-0.9
3	1	0	0	0	1.02500	-1.65	13.80	1.1-0.9
4	1	0	0	0	1.03800	-2.29	230	1.1-0.9
5	1	125	50	0	0.84349	-19.97	230	1.1-0.9
6	1	90	30	0	1.02010	-5.93	230	1.1-0.9
7	1	0	0	0	0.98599	-6.70	230	1.1-0.9
8	1	100	35	0	0.98852	-8.09	230	1.1-0.9
9	1	0	0	0	1.02416	-4.36	230	1.1-0.9
10	2	0	0	0	0.98599	-0.19	230	1.1-0.9
11	2	0	0	0	0.98852	-1.64	230	1.1-0.9
12	3	0	0	0	1.02416	0	230	1.1-0.9

Çizelge A.2 : Matpower test güç sisteminin iletim hattı verileri [17].

fbara	tbara	r	x	b	oranA oranB oranC	açı	durum	min-açı	mak-açı
1	4	0	0.0576	0	250	0	1	-360	360
1	12	0	0.00001	0	250	0	1	-360	360
2	7	0	0.0625	0	250	0	1	-360	360
2	10	0	0.00001	0	250	0	1	-360	360
3	9	0	0.0586	0	300	0	1	-360	360
3	11	0	0.00001	0	250	0	1	-360	360
4	6	0.017	0.092	0.158	250	0	1	-360	360
5	7	0.032	0.161	0.306	250	0	1	-360	360
6	9	0.039	0.17	0.358	150	0	1	-360	360
7	8	0.0085	0.072	0.149	250	0	1	-360	360
8	9	0.0119	0.1008	0.209	150	0	1	-360	360

Çizelge A.3 : Matpower test güç sisteminin statik generatör verileri [17].

bara	Pq	Qq	Qmak.	Qmin.	Vg	mTemel	durum	Pmak.	Pmin
10	163	72.20	300	-300	1.025	100	1	300	10
11	85	3.49	300	-300	1.025	100	1	270	10
12	75	3.92	300	-300	1.040	100	1	250	10

Command Window			
>> results=runpf('case9',mpopt);			
MATPOWER Version 6.0, 16-Dec-2016 -- AC Power Flow (Newton)			
Newton's method power flow converged in 3 iterations.			
Converged in 0.12 seconds			
=====			
System Summary			
=====			
How many?	How much?	P (MW)	Q (MVar)
-----	-----	-----	-----
Buses 12	Total Gen Capacity	820.0	-900.0 to 900.0
Generators 3	On-line Capacity	820.0	-900.0 to 900.0
Committed Gens 3	Generation (actual)	324.6	76.2
Loads 3	Load	315.0	115.0
Fixed 3	Fixed	315.0	115.0
Dispatchable 0	Dispatchable	-0.0 of -0.0	-0.0
Shunts 0	Shunt (inj)	-0.0	0.0
Branches 11	Losses (I ² * Z)	9.57	76.84
Transformers 0	Branch Charging (inj)	-	115.6
Inter-ties 0	Total Inter-tie Flow	0.0	0.0
Areas 1			

Şekil A.2 : Matpower düzenlenmiş IEEE-9 baralı güç sistemi.

EK A.2

Çizelge B.1 : Senkron generatör parametreleri ve değişkenleri [26].

No.	1	2	3	Senkron Generatör Numarası
MVA	270	125	512	Nominal Güç
kV	18	15.5	24	Nominal Gerilim
Nominal pf	0.85	0.85	0.9	Güç Faktörü
H (s)	4.1296	4.768	2.6312	Atalet sabiti
D	2	2	2	Makine Sönümleme Katsayısı
ra (p.u)	0.0016	0.004	0.004	Armatür Direnci (p.u)
Xd (p.u)	1.700	1.220	1.700	Doymamış d ekseni senkron reaktans
Xq (p.u)	1.620	1.160	1.650	Doymamış q ekseni senkron reaktans
X'd (p.u)	0.256	0.174	0.270	Doymamış d ekseni geçici reaktans
X'q (p.u)	0.245	0.250	0.470	Doymamış q ekseni geçici reaktans
X''d (p.u)	0.185	0.134	0.200	Doymamış d ekseni alt iletken reaktans
T'do (s)	4.800	8.970	3.800	d ekseni geçici, açık devre zaman sabiti
T'qo (s)	0.500	0.500	0.480	q ekseni geçici, açık devre zaman sabiti
T''do (s)	0.010	0.033	0.010	d ekseni alt, iletken açık devre zaman sabiti
T''qo (s)	0.007	0.070	0.0007	q ekseni alt, iletken açık devre zaman sabiti
S (1.0)	0.125	0.1060	0.090	Makine Satürasyonu 1.0 p.u gerilimde
S (1.2)	0.450	0.432	0.400	Makine Satürasyonu 1.2 p.u gerilimde

Çizelge B.2 : Mikro türbine ve governör sisteminin değişkenleri [28].

No.	1	2	3	Governör Modeli Numarası
Modeli	BPA_GG	BPA_GG	BPA_GG	Micro-türbine Sistem
Pmaksimum (p.u)	0.8518	1.056	0.8984	Maksimum Türbin Çıkış Gücü
R (p.u)	0.01852	0.040	0.00976	Türbin kararlı-durum regülatör ayarı-düşmesi
T1	0.100	0.083	0.150	Kontrol Zamanı Sabiti
T2	0.000	0.000	0.050	Hidrolik Reset Zamanı Sabiti
T3	0.259	0.200	0.300	Servo Zaman Sabiti
T4	0.100	0.050	0.260	Buhar Valfi Zaman Sabiti
T5	10.000	5.000	8.000	Buhar Isıtma Zaman Sabiti
F (p.u)	0.272	0.280	0.270	Ara Isıtıcı Mil Çıkışı

Çizelge B.3 : IEEE tip-1 uyarıcı sistem modelinin sınır değerleri [27].

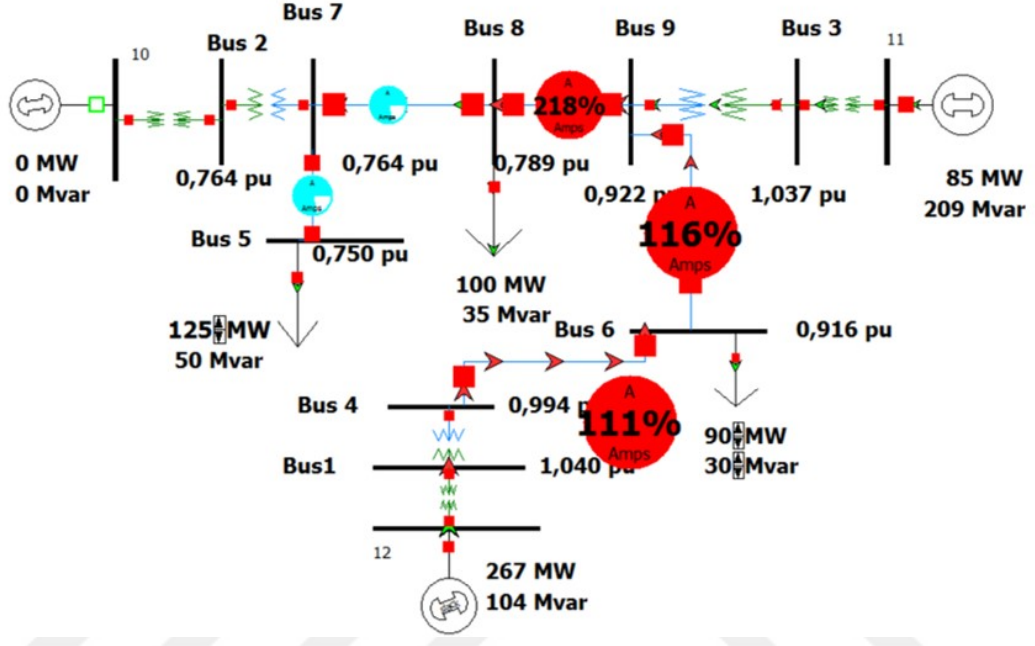
Ka (p.u)	10.01	499.99	Regülatör Kazancı (Sürekli Çalışan)
Ta (s)	0	0.99	Regülatör Zaman Sabiti
VRmax (p.u)	0.51	9.99	Maksimum Regülatör Çıkışı Başlangıçta Tam Yükte Alan Gerilimi (BTYAG)
VRmin (p.u)	-9.99	-0.01	Minimum Regülatör Çıkışı (BTYAG)
Ke (p.u)	-1	1	Uyarıcı Kendinden-uyarıcı (BTYAG)
Te >0(s)	0.041	0.99	Uyarıcı Zaman Sabiti
Kf (p.u)	0.01	0.29	Regülatör Sabitleyici Devre Kazancı
Tf >0(s)	0.041	1.49	Regülatör Sabitleyici Devre Zamanı Sabiti
Efd min	0		
E1 (p.u)	0		Alan Gerilimi Değeri, 1
SE (E1)	0	0.99	Satürasyon Faktörü E1
SE (E2)	0		Satürasyon Faktörü E2 - Efd mak.

Çizelge B.4 : Senkron generatör uyarıcı dinamik parametre ve değişkenleri [26].

No.	1	2	3	Senkron Generatör Uyarıcı Modeli Numarası
Model	IEEE T1	IEEE T1	IEEE T1	Dinamik Modeli
MVA	270	125	512	Nominal Güç
kV	18	15.5	24	Nominal Gerilim
Tr (s)	0.000	0.060	0.000	Regülatör Giriş Filtresi Zaman Sabiti
Ka (p.u)	30	25	200	Regülatör Kazancı (Sürekli Çalışan)
Ta (s)	0.400	0.200	0.395	Regülatör Zaman Sabiti
VRmax (p.u)	4.590	1.000	3.840	Maksimum Regülatör Çıkışı Başlangıçta Tam Yükte Alan Gerilimi (BTYAG)
VRmin (p.u)	-4.590	-1.000	-3.840	Minimum Regülatör Çıkışı (BTYAG)
Ke (p.u)	-0.020	-0.0601	1.000	Uyarıcı Kendinden-uyarıcı (BTYAG)
Te (s)	0.560	0.6758	0.000	Uyarıcı Zaman Sabiti
Kf (p.u)	0.050	0.108	0.0635	Regülatör Sabitleyici Devre Kazancı
Tf (s)	1.300	0.350	1.000	Regülatör Sabitleyici Devre Zamanı Sabiti
E1 (p.u)	2.5875	2.4975	2.880	Alan Gerilimi Değeri, 1
SE(E1)	0.7298	0.0949	0.000	Satürasyon Faktörü E1
E2 (p.u)	3.450	3.330	3.840	Alan Gerilimi Değeri, 2
SE (E2)	1.3496	0.37026	0.000	Satürasyon Faktörü E2

EK A.3

Çizelge C.1: Senkron generatör-1 (bara-10) güç sisteminden çıkarılması ile elde edilen yük akışı analizi sonuçları.



Şekil C.1 : Senkron generatör-1 (bara-10) güç sisteminden "0.00" saniye ile çıkarılması sonucu elde edilen yük akışı analizi sonucu.

Çizelge C.1: Farklı çalışma koşullarına ait yük akışı analizi sonuçları aşağıda verilmiştir. Yapılan analizlerde "1": devrede, "0": devre dışı.

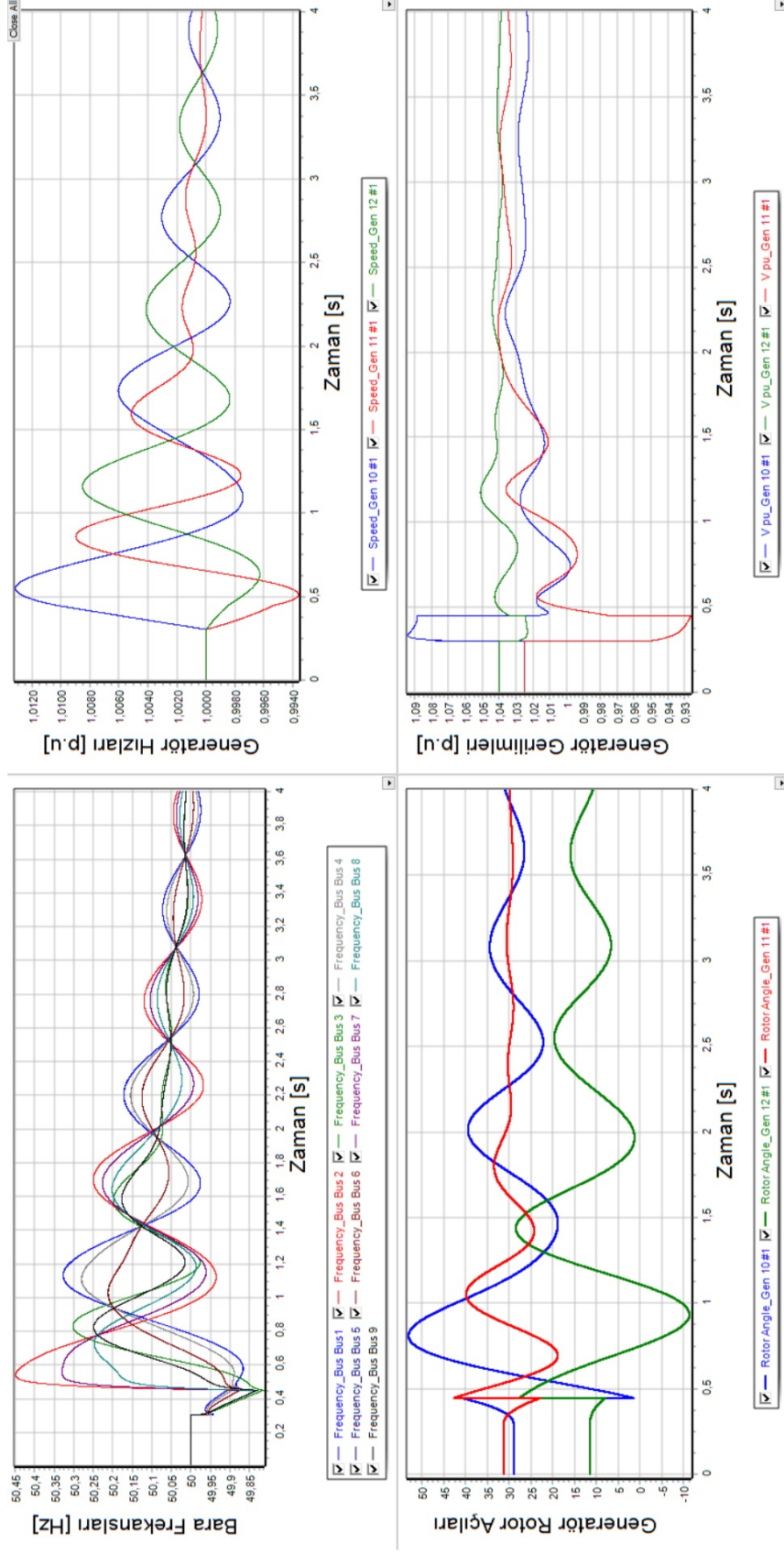
Çizelge C.1 : Güç sisteminin farklı çalışma koşullarında yük akışı analizi.

Senkron Generatör Sonuçları					Güç Sistemi Kayıpları	
Generatör	Bara	1: devrede 0: devre dışı	P _g (MW)	Q _g (MVar)	P _g (MW)	Q _g (MVar)
<i>İlk Analiz: Tüm Senkron Generatörler Devrede</i>						
1	10	1	163.00	69.37	9.567	76.84
2	11	1	85.00	3.06		
3	12	1	76.57	3.80		
<i>İkinci Analiz: İkinci Senkron Generatör Devre Dışı</i>						
1	10	1	163.00	67.11	11.794	93.15
2	11	0	0	0		
3	12	1	163.79	27.48		
<i>Üçüncü Analiz: Üçüncü Senkron Generatör Devre Dışı</i>						
1	10	1	242.62	91.19	12.618	109.66
2	11	1	85.00	23.22		
3	12	0	0	0		
<i>Dördüncü Analiz: Birinci Senkron Generatör Devre Dışı</i>						
1	10	0	-	-	-	-
2	11	1	-	-		
3	12	1	-	-		

Çizelge C.2: Güç sistemindeki senkron generatörlerin (0.300 - 0.445 saniye) süreliğine devre dışı bırakılması ile elde edilen kararlılık analizi sonuçları aşağıda verilmiştir.

Çizelge C.2 : Geçici hal kararlılık analizi sonuçları.

Senkron Generatörlerin Devre Dışı Bırakılması					
Generatör					Bara
		Gerilim [p.u]	Rotor Açısı [derece]	Hız [p.u]	Frekans [Hz]
Sayı-(Bara)	1:0	Min - Mak (Fark)	Min-Mak (Fark)	Min - Mak (Fark)	Min - Mak (Fark)
İlk Analiz: İkinci Senkron Generatör 85.00 MW (Bara - 11) Devre Dışı					
1 - (10)	1	1.011 - 1.03 (0.019)	20.769 - 36.573 (15.805)	0.997 - 1.003 (0.0059)	49.875 - 50.077 (0.202)
2 - (11)	0	1 - 1.039 (0.038)	15.310 - 46.950 (31.639)	0.993 - 1.02 (0.0193)	49.820 - 50.542 (0.772)
3 - (12)	1	1.034 - 1.044 (0.01)	3.775 - 19.778 (16.003)	0.998 - 1.002 (0.004)	49.896 - 50.045 (0.149)
İkinci Analiz: Üçüncü Senkron Generatör 75.00 MW (Bara-12) Devre Dışı					
1 - (10)	1	1.013 - 1.035 (0.022)	16.453 - 39.505 (23.056)	0.996 - 1.005 (0.008)	49.837 - 50.159 (0.322)
2 - (11)	1	1.003 - 1.031 (0.028)	24.883 - 37.775 (12.893)	0.995 - 1.003 (0.007)	49.819 - 50.082 (0.263)
3 - (12)	0	1.035 - 1.043 (0.008)	(-5.623) - 25.408 (31.031)	0.997 - 1.005 (0.008)	49.912 - 50.208 (0.296)
Üçüncü Analiz: Birinci Senkron Generatör 163.00 MW (Bara-10) Devre Dışı					
1 - (10)	0	0.998 - 1.094 (0.096)	1.447 - 53.087 (51.645)	0.997 - 1.013 (0.0157)	49.936 - 50.558 (0.622)
2 - (11)	1	0.927 - 1.041 (0.114)	18.842 - 42.577 (23.735)	0.994 - 1.009 (0.0153)	49.813 - 50.303 (0.489)
3 - (12)	1	1.024 - 1.051 (0.028)	(-11.324) - 28.48 (39.803)	0.996 - 1.009 (0.0122)	49.857 - 50.329 (0.471)

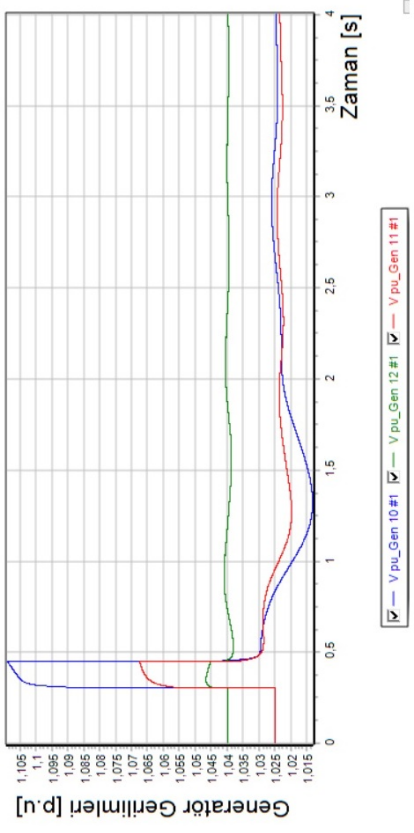
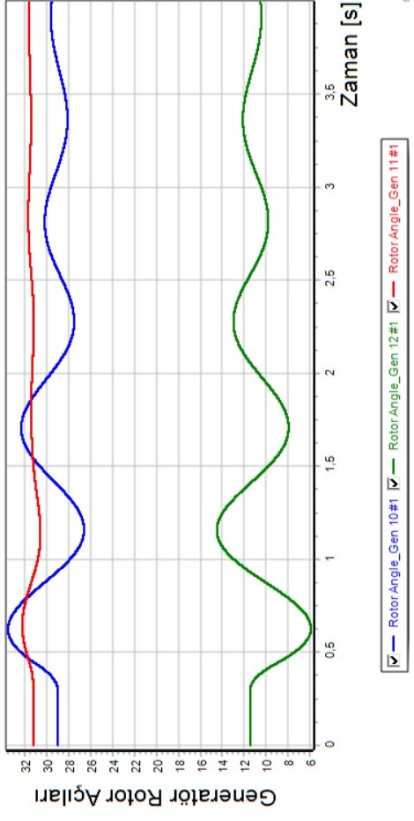
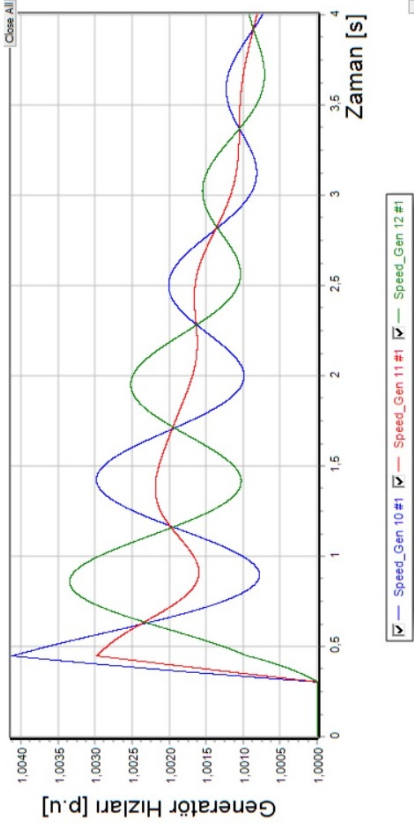
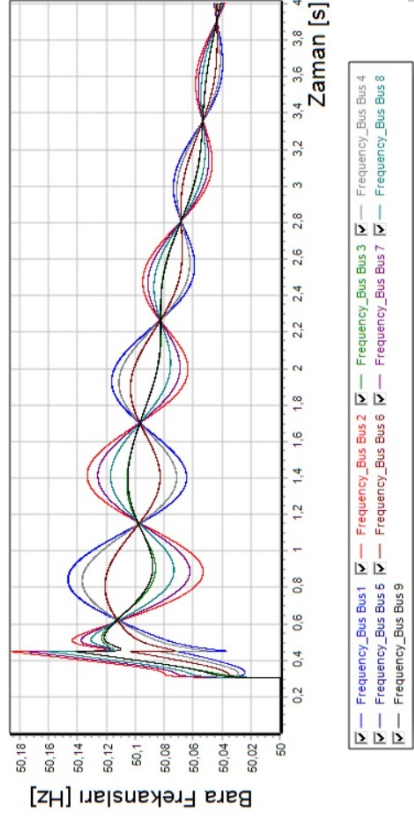


Şekil C.2 : (0.300 - 0.445 saniye) senkron generatör 1 - (Bara 10) devre dışı bırakılması ile elde edilen geçici hal kararlılık analizinin sonuçları (elde edilen maksimum arıza etkisi)

Çizelge C.3: Güç sisteminde statik yüklerin (0.300 - 0.445 saniye) süreliğine devre dışı bırakılması ile elde edilen kararlılık analizi sonuçları aşağıda verilmiştir.

Çizelge C.3 : Geçici hal kararlılık analizi sonuçları.

Statik Yüklerin Devre Dışı Bırakılması					
Generatör					Bara
Generatör		Gerilim [p.u]	Rotor Açısı [derece]	Hız [p.u]	Frekans [Hz]
Sayı - (Bara)	1:0	Min - Mak. (Fark)	Min-Mak (Fark)	Min - MaxHız (Fark)	Min - Mak (Fark)
<i>İlk Analiz: Bara 5 - (125 MW, 50 Mvar) Statik Yükün Devre Dışı Bırakılması</i>					
1 - (10)	1	1.013 - 1.109 (0.096)	26.598 - 33.521 (6.923)	1 - 1.004 (0.004)	50 - 50.176 (0.176)
2 - (11)	1	1.019 - 1.068 (0.048)	30.566 - 32.232 (1.665)	1 - 1.003 (0.003)	50 - 50.138 (0.138)
3 - (12)	1	1.038 - 1.047 (0.009)	5.915 - 14.493 (8.578)	1 - 1.003 (0.003)	50 - 50.147 (0.147)
<i>İkinci Analiz: Bara 6 - (90 MW, 30 Mvar) Statik Yükün Devre Dışı Bırakılması</i>					
1 - (10)	1	1.024 - 1.031 (0.007)	26.378 - 30.261 (3.883)	1 - 1.002 (0.002)	50 - 50.108 (0.108)
2 - (11)	1	1.022 - 1.038 (0.016)	30.431 - 32.42 (1.989)	1 - 1.003 (0.003)	50 - 50.107 (0.107)
3 - (12)	1	1.037 - 1.052 (0.015)	9.649 - 13.276 (3.627)	1 - 1.002 (0.002)	49.986 - 50.100 (0.107)
<i>Üçüncü Analiz: Bara 8 - (100 MW, 35 Mvar) Statik Yükün Devre Dışı Bırakılması</i>					
1 - (10)	1	1.022 - 1.054 (0.032)	27.231 - 31.088 (3.857)	1 - 1.003 (0.003)	50 - 50.123 (0.123)
2 - (11)	1	1.023 - 1.051 (0.028)	30.316 - 33.351 (3.035)	1 - 1.003 (0.003)	50 - 50.129 (0.129)
3 - (12)	1	1.039 - 1.044 (0.005)	7.942 - 12.976 (5.033)	1 - 1.002 (0.002)	50 - 50.107 (0.107)

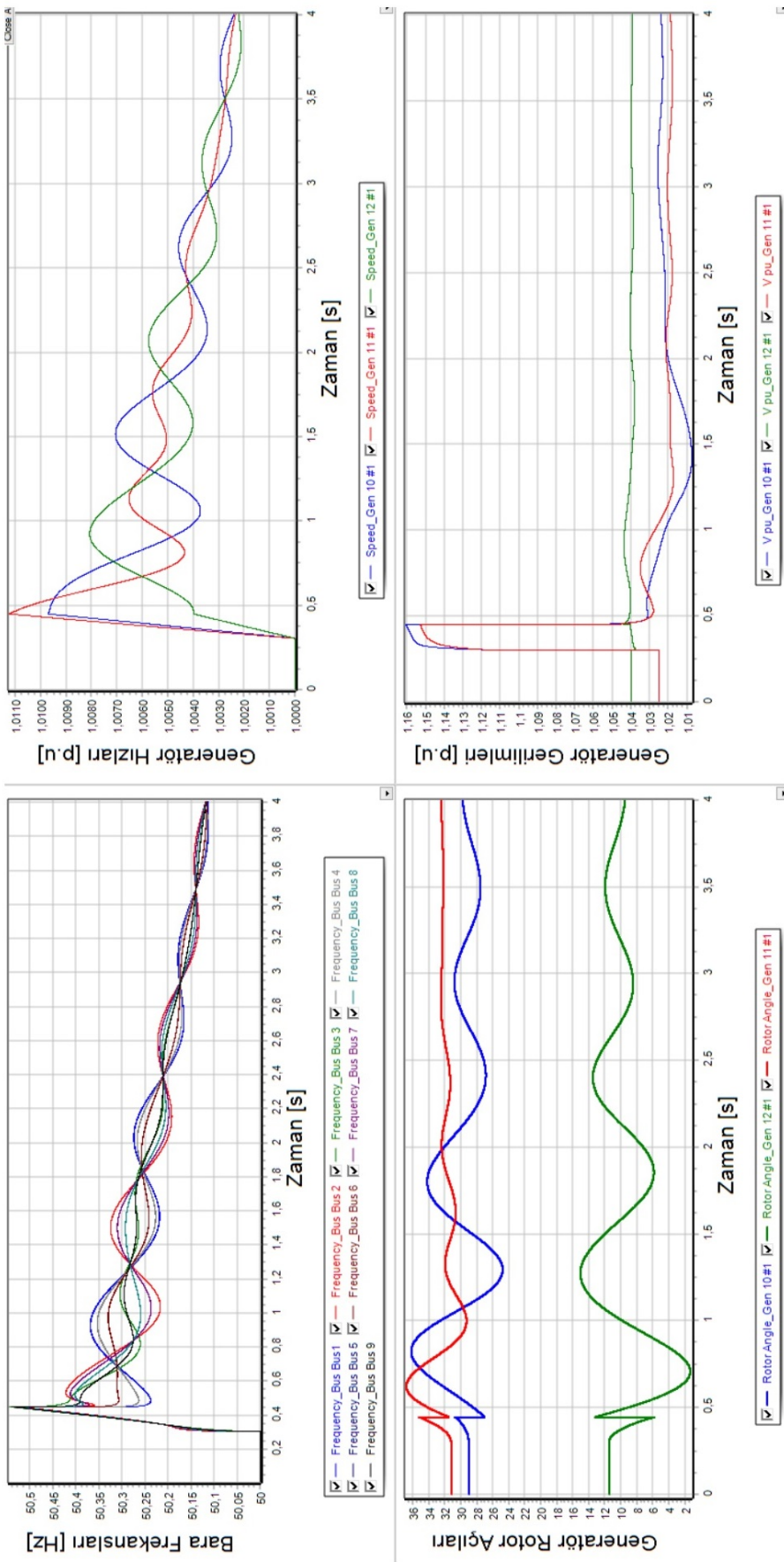


Şekil C.3 : Bara 5 - 125 MW, 50 Mvar statik yükün (0.300 - 0.445 saniye) devre dışı bırakılması ile elde edilen geçici hal kararlılık analizinin sonuçları (maksimum arıza etkisi)

Çizelge C.4: Tüm statik yüklerin (0.300 - 0.445 saniye) süreliğine devre dışı bırakılırken sırası ile senkron generatörlerin güç sisteminden devre dışı bırakılması ile elde edilen kararlılık analizi sonuçları aşağıda verilmiştir.

Çizelge C.4 : Geçici hal kararlılık analizi sonuçları.

Senkron Generatörlerin ve Tüm Statik Yüklerin Devre Dışı Bırakılması					
Generatör					Bara
Generatör	Durum	Gerilim [p.u]	Rotor Açısı [derece]	Hız [p.u]	Frekans [Hz]
Sayı - (Bara)		Min - Mak (Fark)	Min-Mak (Fark)	Min - Mak (Fark)	Min - Mak (Fark)
<i>İlk Analiz: İkinci Senkron Generatör 85.00 MW (Bara - 11) ve Statik Yükler Devre Dışı</i>					
1 - (10)	1	1.009 - 1.174 (0.165)	26.526 - 34.224 (7.698)	1 - 1.009 (0.009)	50 - 50.407 (0.407)
2 - (11)	0	1.011 - 1.035 (0.024)	29.094 - 34.807 (5.713)	1 - 1.01 (0.01)	50 - 50.527 (0.527)
3 - (12)	1	1.03 - 1.075 (0.045)	3.198 - 15.194 (11.996)	1 - 1.008 (0.08)	50 - 50.379 (0.379)
<i>İkinci Analiz: Üçüncü Senkron Generatör 75.00 MW (Bara-12) ve Statik Yükler Devre Dışı</i>					
1 - (10)	1	1.008 - 1.161 (0.153)	24.762 - 36.196 (11.434)	1 - 1.01 (0.01)	50 - 50.488 (0.488)
2 - (11)	1	1.017 - 1.153 (0.136)	29.278 - 36.79 (7.511)	1 - 1.011 (0.011)	50 - 50.528 (0.528)
3 - (12)	0	1.037 - 1.044 (0.007)	1.3 - 15.033 (13.732)	1 - 1.008 (0.008)	49.982 - 50.369 (0.386)
<i>Üçüncü Analiz: Birinci Senkron Generatör 163.00 MW (Bara-10) ve Statik Yükler Devre Dışı</i>					
1 - (10)	0	1.018 - 1.094 (0.076)	24.196 - 37.166 (12.97)	1 - 1.01 (0.01)	50 - 50.523 (0.523)
2 - (11)	1	1.017 - 1.159 (0.142)	29.871 - 36.023 (6.752)	1 - 1.009 (0.009)	50 - 50.350 (0.350)
3 - (12)	1	1.033 - 1.071 (0.038)	3.652 - 15.766 (12.114)	1 - 1.008 (0.008)	50 - 50.369 (0.369)



Şekil C.4 : (0.300 - 0.445 saniye) tüm statik yükler devre dışı bırakılırken, senkron generatör 1 - (Bara 10) devre dışı bırakılması ile elde edilen geçici hal kararlılık analizinin sonuçları (elde edilen maksimum arıza etkisi)

Çizelge C.5: Senkron generatörler devredeyken Bara-3'te oluşturulan sürekli üç fazlı ve tek fazlı kısa devre analizi bara gerilimleri sonuçları her bir faza göre aşağıda verilmiştir.

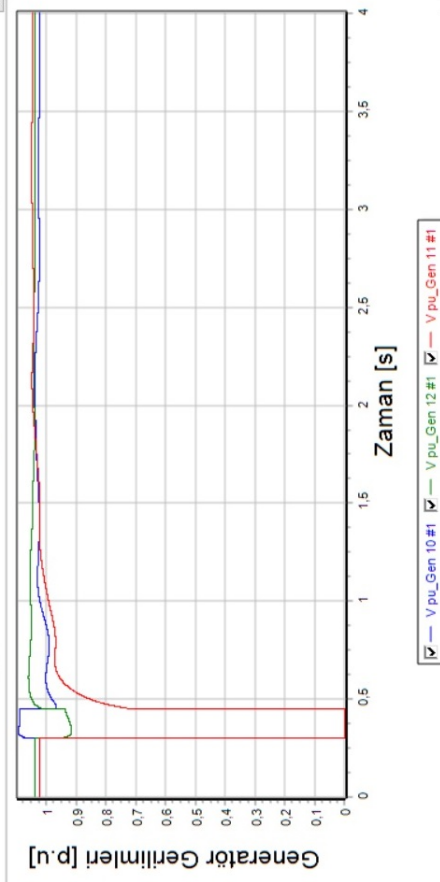
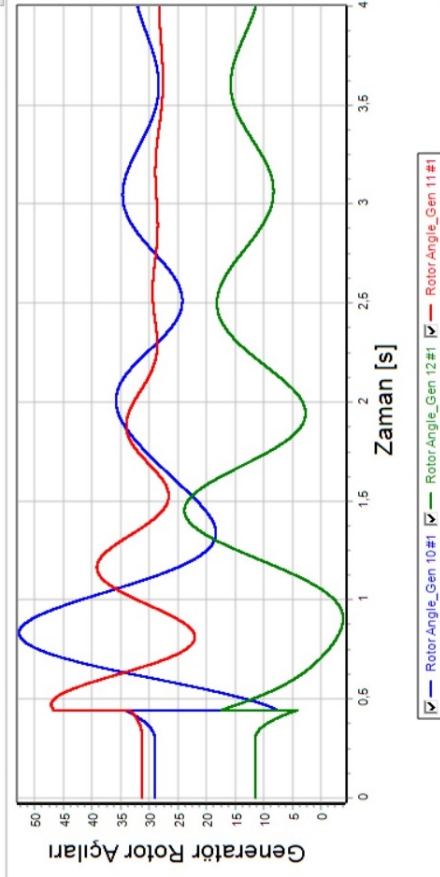
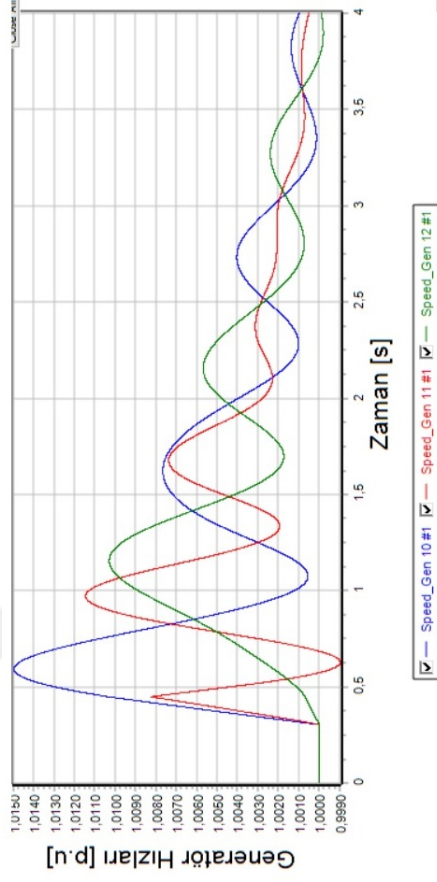
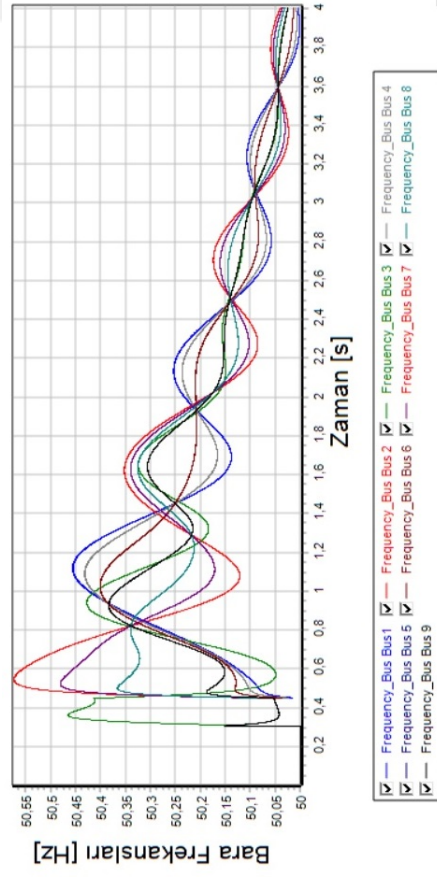
Çizelge C.5 : Bara gerilimi sonuçları.

Bara 3 [13.80 kV] = Dengeli 3 Fazlı Kısa Devre						
<i>Bara Numarası</i>	<i>Faz Volt A</i>	<i>Faz Volt B</i>	<i>Faz Volt C</i>	<i>Faz Açısı A</i>	<i>Faz Açısı B</i>	<i>Faz Açısı C</i>
Bara 1	0.96008	0.96008	0.96008	0.2	-119.8	120.2
Bara 2	0.86896	0.86896	0.86896	0.4	-119.6	120.4
Bara 3	0	0	0	178.92	58.92	-61.08
Bara 4	0.84088	0.84088	0.84088	-2.47	-122.47	117.53
Bara 5	0.58166	0.58166	0.58166	-18.59	-138.59	101.41
Bara 6	0.63381	0.63381	0.63381	-5.7	-125.7	114.3
Bara 7	0.68497	0.68497	0.68497	-5.42	-125.42	114.58
Bara 8	0.50277	0.50277	0.50277	-6.95	-126.95	113.05
Bara 9	0.26439	0.26439	0.26439	-1.47	-121.47	118.53
Bara 10	0.86899	0.86899	0.86899	0.4	-119.6	120.4
Bara 11	0.0001	0.0001	0.0001	4.1	-115.9	124.1
Bara 12	0.9601	0.9601	0.9601	0.2	-119.8	120.2
Bara 3 [13.80 kV] = Faz-A - Toprak Arası Tek Fazlı Kısa Devre						
<i>Bara Numarası</i>	<i>Faz Volt A</i>	<i>Faz Volt B</i>	<i>Faz Volt C</i>	<i>Faz Açısı A</i>	<i>Faz Açısı B</i>	<i>Faz Açısı C</i>
Bara 1	1.04	1.04	1.04	0	-120	120
Bara 2	1.02499	1.02499	1.02499	-1.42	-121.42	118.58
Bara 3	0	1.77535	1.77535	-175.5	-151.96	148.04
Bara 4	1.03877	1.03877	1.03877	-2.34	-122.34	117.66
Bara 5	0.83874	0.83874	0.83874	-20.36	-140.36	99.63
Bara 6	1.02026	1.02026	1.02026	-6.07	-126.07	113.93
Bara 7	0.98771	0.98771	0.98771	-7.2	-127.2	112.8
Bara 8	0.98947	0.98947	0.98947	-8.5	-128.5	111.5
Bara 9	1.0244	1.0244	1.0244	-4.68	-124.68	115.32
Bara 10	1.025	1.025	1.025	-1.42	-121.42	118.58
Bara 11	1.025	1.025	1.025	-1.96	-121.96	118.04
Bara 12	1.04	1.04	1.04	0	-120	120

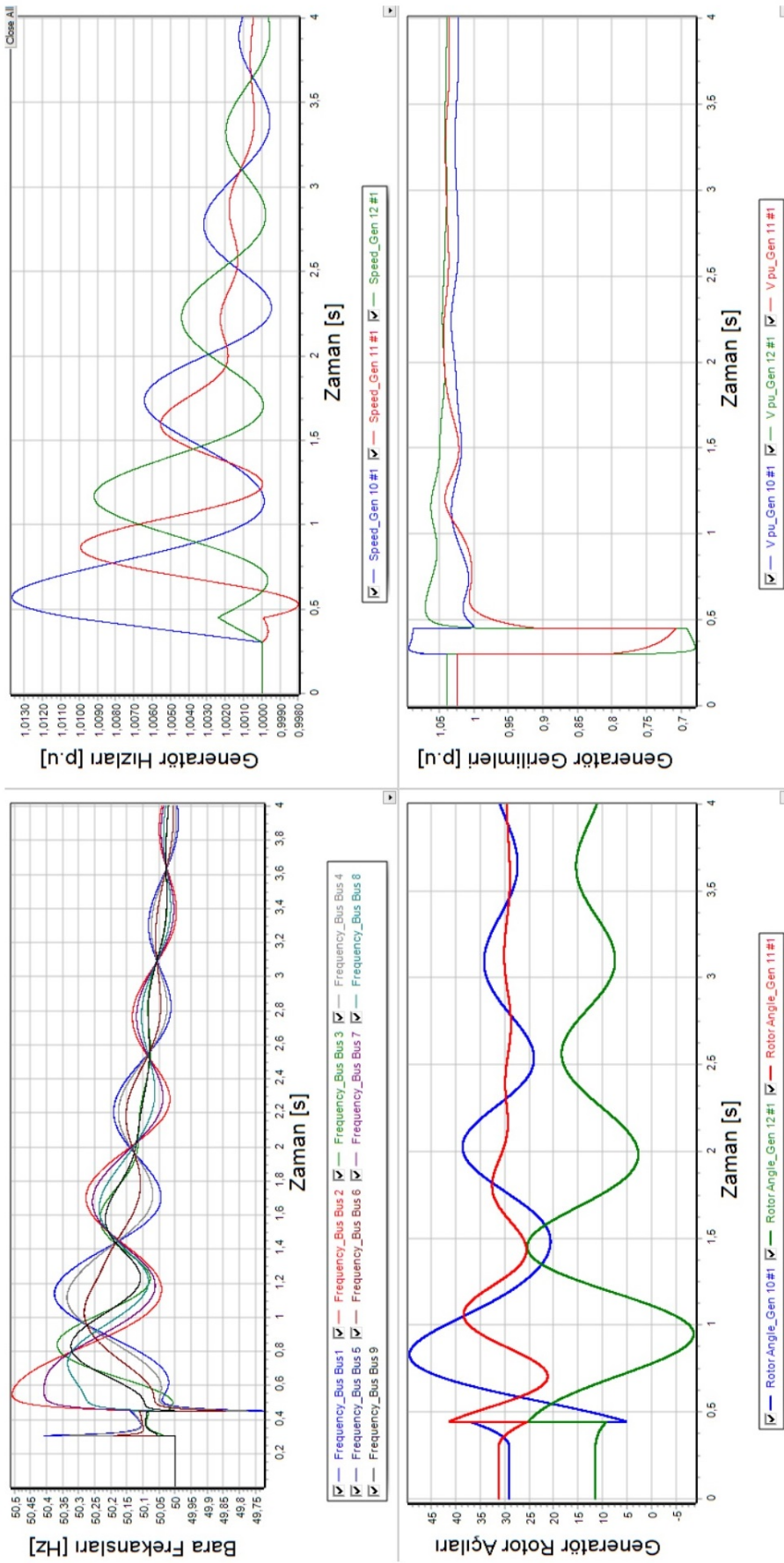
Çizelge C.6: Senkron generatörler devredeyken Bara-3'te oluşturulan sürekli üç fazlı ve tek fazlı kısa devre analizi iletim hattı akımları sonuçları her bir faza göre aşağıda verilmiştir.

Çizelge C.6 : İletim hattı akımları sonuçları.

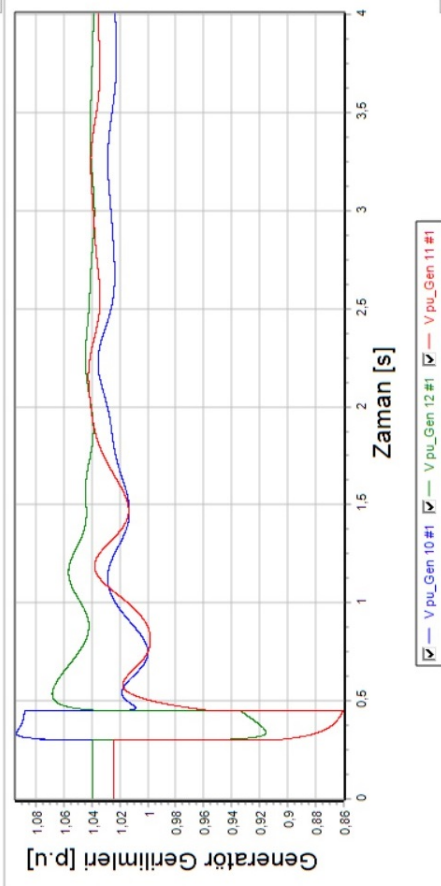
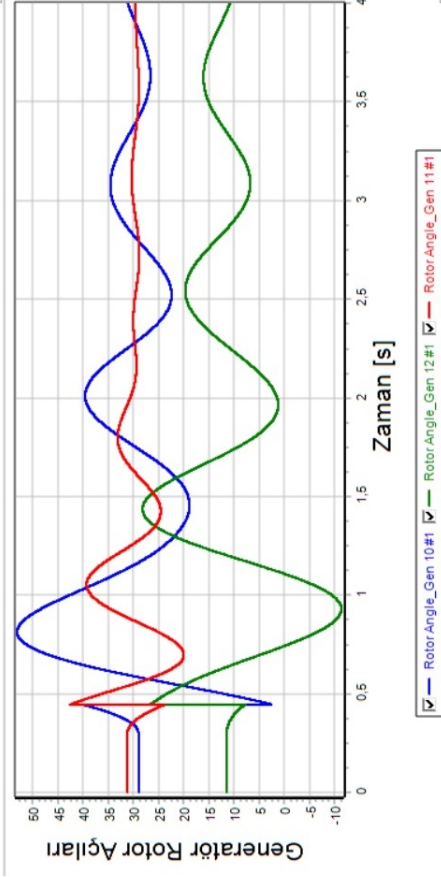
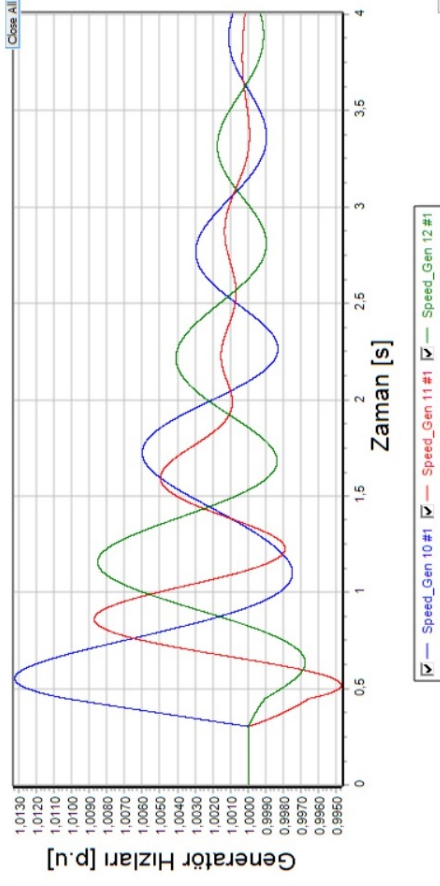
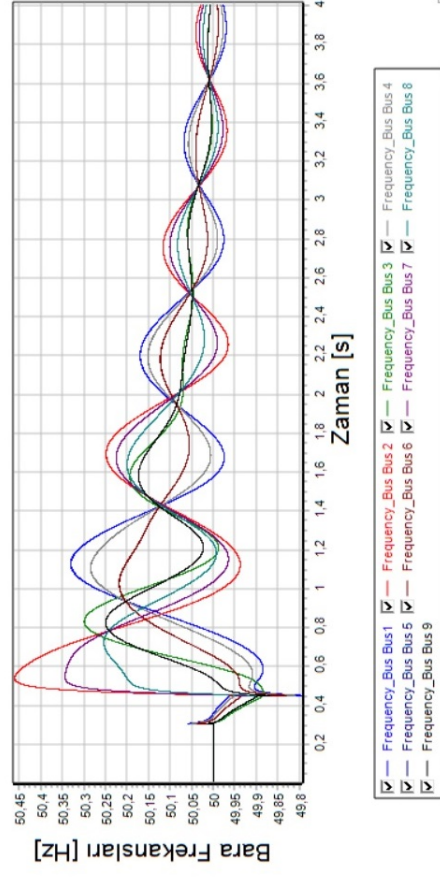
Bara 3 [13.80 kV] = Dengeli 3 Fazlı Kısa Devre							
<i>Başlangıç</i>	<i>Bitiş</i>	<i>Akım</i>			<i>Akım</i>		
		<i>Başlangıç Bara</i>			<i>Bitiş Bara</i>		
		<i>Faz A</i>	<i>Faz B</i>	<i>Faz C</i>	<i>Faz A</i>	<i>Faz B</i>	<i>Faz C</i>
Bara 4	Bara 1	2.19409	2.19409	2.19409	2.19409	2.19409	2.19409
Bara 1	Bara 12	2.2019	2.2019	2.2019	2.2019	2.2019	2.2019
Bara 2	Bara 7	3.19969	3.19969	3.19969	3.19969	3.19969	3.19969
Bara 10	Bara 2	3.19437	3.19437	3.19437	3.19437	3.19437	3.19437
Bara 9	Bara 3	4.51184	4.51184	4.51184	4.51184	4.51184	4.51184
Bara 3	Bara11	9.65169	9.65169	9.65168	9.65169	9.65169	9.65168
Bara 6	Bara 4	2.30235	2.30235	2.30235	2.19409	2.19409	2.19409
Bara 7	Bara 5	1.03387	1.03387	1.03387	1.11316	1.11316	1.11316
Bara 9	Bara 6	2.12797	2.12797	2.12797	1.96909	1.96909	1.96909
Bara 7	Bara 8	2.47219	2.47219	2.47219	2.55887	2.55887	2.55887
Bara 8	Bara 9	2.32092	2.32092	2.32092	2.401	2.401	2.401
Bara 3 [13.80 kV] = Faz-A - Toprak Arası Tek Fazlı Kısa Devre							
<i>Başlangıç</i>	<i>Bitiş</i>	<i>Akım</i>			<i>Akım</i>		
		<i>Başlangıç Bara</i>			<i>Bitiş Bara</i>		
		<i>Faz A</i>	<i>Faz B</i>	<i>Faz C</i>	<i>Faz A</i>	<i>Faz B</i>	<i>Faz C</i>
Bara 4	Bara 1	0.73713	0.73712	0.73713	0.73713	0.73712	0.73713
Bara 1	Bara 12	0.73737	0.73736	0.73737	0.73737	0.73736	0.73737
Bara 2	Bara 7	1.72827	1.72827	1.72827	1.72827	1.72827	1.72827
Bara 10	Bara 2	1.72644	1.72644	1.72645	1.72644	1.72644	1.72645
Bara 9	Bara 3	0.82981	0.82981	0.82981	0.82981	0.82981	0.82981
Bara 3	Bara 11	0.83043	0.83043	0.83044	0.83043	0.83043	0.83044
Bara 6	Bara 4	0.75109	0.75109	0.75109	0.73713	0.73712	0.73713
Bara 7	Bara 5	1.49081	1.49081	1.49081	1.60514	1.60514	1.60514
Bara 9	Bara 6	0.23619	0.23619	0.23619	0.22317	0.22317	0.22317
Bara 7	Bara 8	0.33239	0.33239	0.33239	0.30446	0.30446	0.30446
Bara 8	Bara 9	0.78561	0.78561	0.78561	0.71186	0.71187	0.71186



Şekil C.5 : (0.30 -0.445 s) SG-1 (bara-10) güç sisteminin çıkarılırken bara-3'te oluşturulan üç fazlı kısa devre analizinin sonuçları.



Şekil C.6 : (0.30 -0.445 s) SG-1 (bara-10) güç sisteminin çıkarılırken bara-4’te oluşturulan üç fazlı kısa devre analizinin sonuçları.

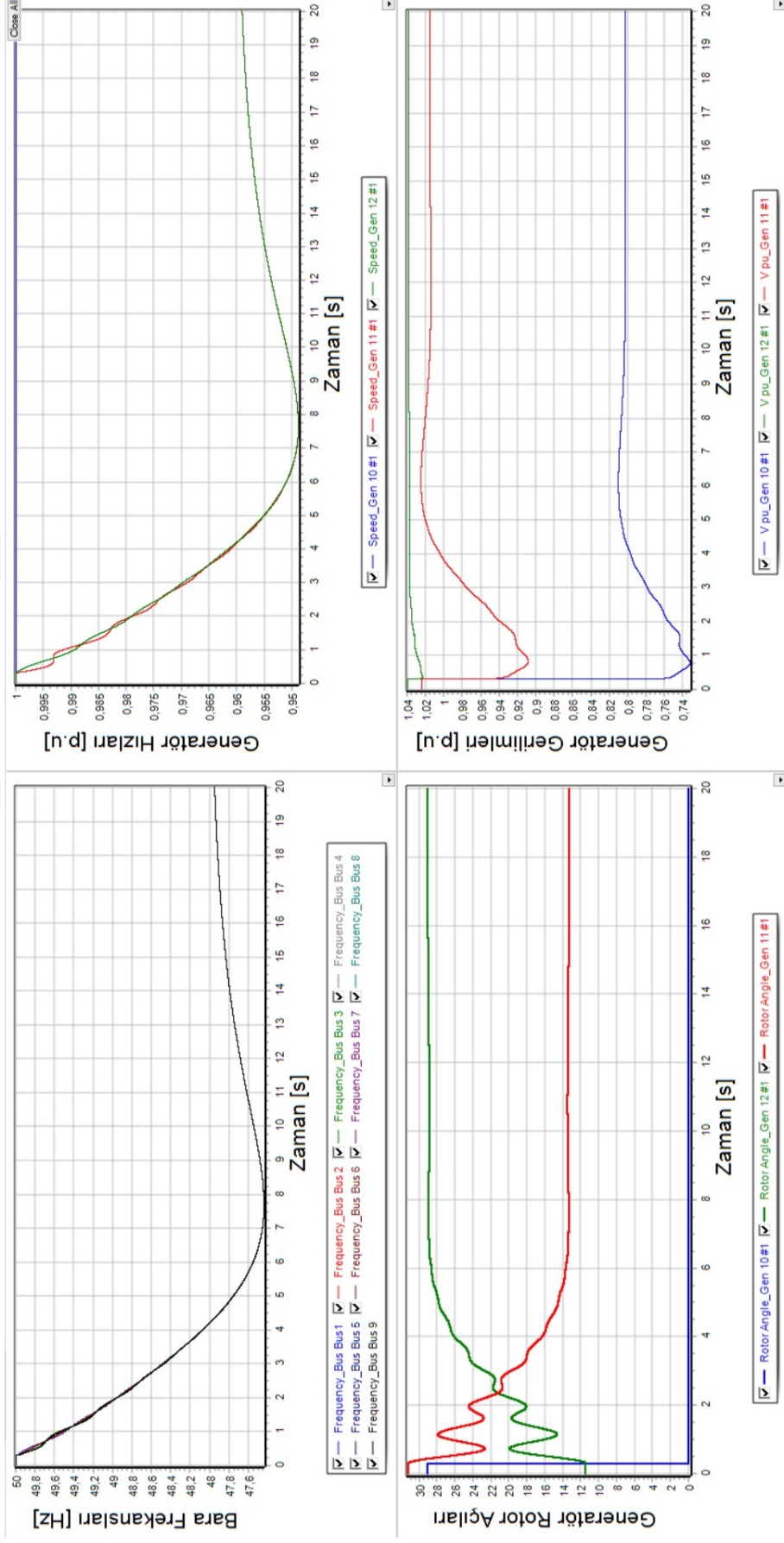


Şekil C.7 : (0.30-0.445 s) SG-1 (bara-10) güç sisteminde çıkarılınca bara-4'te oluşan tek fazlı kısa devre analizinin sonuçları.

Çizelge C.7: Senkron generatör-1 (bara-10) güç sisteminden (0.30 saniye sonra) çıkarılması ile elde edilen geçici hal kararlılık incelemesi sonuçları aşağıda bulunan tabloda verilmiştir. Analiz verileri ölçülen simülasyon sonunda elde edilmiştir. (Senkron generatör-2 (bara-11), Senkron generatör-3 (bara-12))

Çizelge C.7 : Senkron generatör-1 (bara-10) güç sisteminden 0.30 saniye ile çıkarılması ile elde edilen geçici hal kararlılık analizi verileri.

Model Sınıfı	Model Çeşidi	Bara No	Değişken	Değeri	Yakınsama
Uyarma	IEEE1	12	EField	1,521	0,0189664
Governor	BPA_GG	12	Pmek	0,2309	0,0003762
Senkron Gen.	GENROU	12	Hız w	-0,0409	-0,0002343
Senkron Gen.	GENROU	12	Açı	-253,8612	-12,8626574
Senkron Gen.	GENROU	12	Eqp	1,0649	-0,0002575
Senkron Gen.	GENROU	12	Edp	0,2422	-0,0011618
Senkron Gen.	GENROU	11	Açı	-254,1358	-12,8627765
Uyarma	IEEE1	11	EField	2,6038	-0,0004517
Senkron Gen.	GENROU	11	Edp	0,2804	0,0005997
Governor	BPA_GG	11	Pmek	0,7027	-0,00008
Senkron Gen.	GENROU	11	Eqp	1,1632	-0,0003674
Senkron Gen.	GENROU	11	Hız w	-0,0409	0,0001859
Senkron Gen.	GENROU	10	Edp	0	0
Senkron Gen.	GENROU	10	Eqp	0	0
Governor	BPA_GG	10	Pmek	0,1644	0
Uyarma	IEEE1	10	EField	0	0
Senkron Gen.	GENROU	10	Hız w	0	0
Senkron Gen.	GENROU	10	Açı	0	0



Şekil C.8 : Senkron generatör-1 (bara-10) güç sisteminden çıkarılması ile elde edilen geçici hal kararlılık analizi grafikleri.



ÖZGEÇMİŞ

Ebru Tavukcu:

Zonguldak, 24/01/1991:

ebrutavukcu@gmail.com:



ÖĞRENİM DURUMU:

- **Yüksek Lisans:** 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği
- **Yüksek Lisans:** 2017, RWTH Aachen Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği, Yüksek Lisans Tez Çalışması
- **Lisans:** 2014, İstanbul Teknik Mühendisliği, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİMLER VE ÖDÜLLER:

- 2012-2014 yılları arasında İstanbul Teknik Üniversitesi CanSat – İTÜ Team takımında yer aldı. Teksas ayaletinde bulunan "The American Astronautical Society AAS ve AIAA" organizasyonun düzenlediği yarışmada CanSat – İTÜ takımı olarak 59 kişilik yarışmada 13. olundu.
- Rheinisch Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen Üniversitesi'nde, IFHT Yüksek Gerilim Enstitüsünde "Analysis of the Impact of Corrupted Medium Voltage Grids onto the Transient System Stability of Active Distribution Grid Areas using Equivalent Models" tez çalışmasını gerçekleştirdi.

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Tavukcu, E, Türkay, B. (2017): Transient Stability Analysis of the Transmission System Considering the Initial Steady State Results, The 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering March 2017, Bucharest, Romania, 23.03.2017 - 25.03.2017.