

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÜÇ SİSTEMLERİNDE RÜZGAR ENERJİSİ İLE ÜRETİMİN KÜÇÜK
İŞARET KARARLILIĞINA ETKİLERİNİN DETERMİNİSTİK VE
OLASILIKSAL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İbrahim Gürsu TEKDEMİR

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

OCAK 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÜÇ SİSTEMLERİNDE RÜZGAR ENERJİSİ İLE ÜRETİMİN KÜÇÜK
İŞARET KARARLILIĞINA ETKİLERİNİN DETERMİNİSTİK VE
OLASILIKSAL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İbrahim Gürsu TEKDEMİR
(504091056)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. V. M. İstemihan GENÇ

OCAK 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504091056 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **İbrahim Gürsu TEKDEMİR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**GÜÇ SİSTEMLERİNDE RÜZGAR ENERJİSİ İLE ÜRETİMİN KÜÇÜK İŞARET KARARLILIĞINA ETKİLERİNİN DETERMİNİSTİK VE OLASILIKSAL OLARAK İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. V. M. İstemihan GENÇ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ayşen DEMİRÖREN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Canbolat UÇAK
Yeditepe Üniversitesi

Teslim Tarihi : **19 Aralık 2011**
Savunma Tarihi : **16 Ocak 2012**

*Sevgili aileme
ve değerli hocam İstemihan Genç'e,*

ÖNSÖZ

Günümüzde, hem Türkiye'de hem de dünyada, alternatif enerji kaynakları konusunun gündemde üst sıralara geldiğini görmekteyiz. Gerçi bu gündeme gelişin, büyük çapta mevcut enerji kaynaklarının tükeneceği gerçeğinden kaynaklanması, ister istemez "dünyayı kirletmeyelim" çağrılarının gerçekten dikkate alınıp alınmadığı konusunda şüphe uyandırmıyor da değil. İnsanlığın kafasındaki soru, ne yazık ki kimi zaman "enerji açlığımızı doyurabileceğimiz yeni kaynaklar var mıdır, varsa bunlardan nasıl faydalanabiliriz?"den ibaretmiş gibi duruyor.

Rüzgarın bu kaynaklar arasında öne çıkması, kim hangi gözle bakarsa baksın, dünya ve insanlık için sevindiricidir diye düşünüyorum. Çünkü dünyanın altını üstüne getirmeden, daha sağlıklı, daha temiz bir enerji kaynağı ile yola devam etmek her anlamda umutludur, her anlamda olumludur inancını taşıyorum. Ama şunu eklemekten de geçemeyeceğim: enerji açlığının bu denli arttığı ve daha da artacağı anlaşılan insanlığı, böyle giderse hiçbir kaynak doyuramayacak ve bir değil birden fazla dünya bile bizlere yetmeyecektir.

Bütün bunlar bir yana, eğer rüzgar enerjisi ile elektrik üretmeye karar verdiysek, bu kez de bu üretimin mevcut elektrik şebekesine katılmasıyla ilgili çeşitli sorunların üstesinden gelmeliyiz. Mevcut güç sisteminin, bu yeni üretim teknolojisi ve değişken üretim varlığı ile başa çıkıp çıkamayacağını anlamak, hiç kuşkusuz elektrik mühendislerinin kafa yormaları gereken konulardandır. Bu anlamda rüzgar enerjisi ile üretimin mevcut güç sistemlerinin küçük işaret kararlılığına ve özel olarak güç sistemleri salınımlarına etkisinin araştırılması bu çalışmada da üzerinde durulmuş olan önemli bir konudur.

Bu çalışmada güç sistemlerine rüzgar enerjisi ile üretim birimlerinin eklendiği durumlar için kararlılık analizi fırsatları değerlendirilmiş, buna ilişkin yeni yöntem ve yaklaşımlar önerilmiştir. Bunlar bir yerde, gelecekte çok daha fazla sayıda üretim birimiyle – belki farkında olmasak da - hayatımızda olacağı öngörülen rüzgar enerjisi ile üretimin, mevcut şebekeye katılması ile ilgili kimi mühendislik açmazlarına da cevap arayışlarıdır. Yanı sıra çalışmadaki kimi yöntem ve yaklaşımların daha genel anlamda elektrik mühendisliğindeki kararlılık problemlerine cevap verme potansiyelini taşıdığını da belirtmem gerekir.

Bu çalışmanın yapılmasında - ve her zaman – bana her açıdan destek olan aileme ne kadar teşekkür etsem azdır, bu noktaya gelmemde onlara çok şey borçluyum. Bunun yanında tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. V. M. İstemihan GENÇ hocama da teşekkürü bir borç bilirim. "Güç sistemleri dinamiği ve kararlılığı" konusunda çalışmak üzere yanına geldiğim hocamın hem akademik açıdan başarılı ve hevesli; hem de yapı, karakter ve hocalık vasıfları ile örnek bir insan olduğunu görmek ve onu tanımış olmak benim için büyük bir şanstır. Onunla çalışmak her şeyden önce keyifliydi ve öğreticiydi. Yeri geldiğinde tüm mesaisini bana ayıracak kadar özverili olan hocamın beklentilerini boşa çıkarmamış olmayı diliyorum. Umarım ben de hocamda iyi izlenimler bırakabilmiş ve ona layık olabilmişimdir.

Sevgili arkadaşım Gökhan ÇAKAL'a da teşekkürü bir borç bilirim, çünkü beni İTÜ'de yüksek lisans yapmak için cesaretlendirmeseydi, ne İTÜ'de yüksek lisans eğitimim boyunca kazandıklarım olurdu ne de böylesine değerli bir danışmanı

tanıyabilirdim. Dolayısıyla bu çalışma da olmazdı. İTÜ'de kurduğum arkadaşlıklarda, tüm kazanımlarımda ve güzel anılarımda onun da payı vardır. Son olarak yaptığım çalışmanın, yapılacak yeni çalışmalara ışık tutmasını ve araştırmacıların zihinlerinde yeni cevaplar ve tekrar yeni sorular oluşturmasını diliyorum.

Aralık 2011

İbrahim Gürsu Tekdemir
(Elektrik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. ÇALIŞMAYA İLİŞKİN TEMEL KAVRAMLAR	9
2.1 Güç Sistemlerinin Dinamiği	9
2.1.1 Güç sistemlerinin dinamiğini tanımlayan denklemler	9
2.1.2 Denklemlerin doğrusallaştırılması	10
2.1.3 Güç sistemleri salınımları	12
2.2 Rüzgar Enerjisi ile Üretim.....	13
2.2.1 Kullanılan rüzgar türbinli generatör tipleri	13
2.2.1.1 SKAG tipi rüzgar türbinli generatörler	13
2.2.1.2 ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatörler	14
2.2.2 Rüzgar enerjisi ile elektrik üretiminin özellikleri	15
2.3 Güç Sistemlerinde Olasılık Yaklaşımı	15
2.3.1 Olasılık dağılımları	16
2.3.2 Olasılık yoğunluk fonksiyonu	16
2.3.3 Olasılık benzetim yöntemleri	18
2.3.3.1 Monte Carlo (MC) yöntemi	18
2.3.3.2 Latin Hiperküp Örnekleme (LHÖ) yöntemi.....	19
3. RÜZGAR ENERJİSİ İLE ÜRETİM KATILAN GÜÇ SİSTEMLERİ İÇİN DETERMİNİSTİK KÜÇÜK İŞARET KARARLILIĞI ANALİZLERİ.....	21
3.1 G1'in Rüzgar Türbinli Generatörler ile Değiştirilmesi.....	22
3.2 G1 ve G3'ün Rüzgar Türbinli Generatörler ile Değiştirilmesi	24
3.3 G2'nin Rüzgar Türbinli Generatörler ile Değiştirilmesi.....	25
3.4 G3'ün Rüzgar Türbinli Generatörler ile Değiştirilmesi.....	26
3.5 G4'ün Rüzgar Türbinli Generatörler ile Değiştirilmesi.....	26
3.6 G2 ve G4'ün Rüzgar Türbinli Generatörler ile Değiştirilmesi	27
3.7 G1 ve G4'ün Rüzgar Türbinli Generatörler ile Değiştirilmesi	28
3.8 G2 ve G3'ün Rüzgar Türbinli Generatörler ile Değiştirilmesi	30
3.9 Sisteme Rüzgar Türbinli Generatör Eklenmesi ile İlgili Yorumlar	31
4. RÜZGAR ENERJİSİ İLE ÜRETİM KATILAN GÜÇ SİSTEMLERİ İÇİN OLASILIKSAL KÜÇÜK İŞARET KARARLILIĞI ANALİZLERİ	35
4.1 Test Sisteminin Tanıtılması.....	36
4.2 Test Sisteminde Yapılan Analizler.....	37
4.2.1 Yalnızca üretimin değişken olduğu durum	37
4.2.1.1 SKAG tipi rüzgar türbinli generatörler ile yapılan analizler.....	38

MC yöntemiyle yapılan analizler	38
LHÖ yöntemiyle yapılan analizler	43
MC ve LHÖ yöntemlerinin karşılaştırılması.....	46
4.2.1.2 Olasılıksal indeksin tanımı	52
Test sistemi için indeks hesaplamaları	53
MC ve LHÖ yöntemlerin indeks hesaplaması açısından karşılaştırılması..	55
4.2.1.3 ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatörler ile yapılan analizler.....	56
MC yöntemiyle yapılan analizler	56
LHÖ yöntemiyle yapılan analizler	59
Test sistemi için indeks hesaplamaları	62
4.2.1.4. Rüzgar türbinli generatör tiplerinin karşılaştırılması	63
4.2.2 Hem üretimin hem de tüketimin değişken olduğu durum.....	65
4.2.2.1. SKAG tipi rüzgar türbinli generatörler ile yapılan analizler.....	67
LHÖ yöntemiyle 25 örnekleme alındığı durum	67
LHÖ yöntemiyle 50 örnekleme alındığı durum	72
4.2.2.2. ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatörler ile yapılan analizler.....	77
LHÖ yöntemiyle 25 örnekleme alındığı durum	77
LHÖ yöntemiyle 50 örnekleme alındığı durum	82
5. BEŞ BÖLGELİ, 16 GENERATÖRLÜ ÖRNEK GÜÇ SİSTEMİNE	
RÜZGAR ENERJİSİ İLE ÜRETİM KATILMASININ ETKİLERİNİN	
İNCELENMESİ	87
5.1 Test Sisteminin Tanıtılması	87
5.2 Rüzgar Türbinli Generatörlerin (Bir Rüzgar Çiftliğinin) Sisteme Eklenmesi..	91
5.2.1 SKAG tipi rüzgar türbinli generatörlerin sisteme eklenmesi	91
5.2.2 ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatörlerin sisteme eklenmesi.....	93
6. SONUÇ VE YORUMLAR	97
KAYNAKLAR.....	103
EKLER.....	107
ÖZGEÇMİŞ.....	117

KISALTMALAR

BDF	: Birikimli Dağılım Fonksiyonu
ÇBAG	: Çift Beslemeli Asenkron Generatör
LHÖ	: Latin Hiperküp Örneklemesi
MC	: Monte Carlo
OYF	: Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu
SKAG	: Sincap Kafesli Asenkron Generatör

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : İki bölgeli, dört generatörlü test sistemine ait üretim ve tüketim değerleri	22
Çizelge 4.1 : Şekil 4.1'deki test sistemine ait üretim ve tüketim güç değerleri	37
Çizelge 4.2 : MC ve LHÖ yöntemlerinin farklı örnekleme sayıları için hesapladıkları özdeğer dağılımlarının uyum değerleri (%)	49
Çizelge 4.3 : MC ve LHÖ yöntemlerinin farklı örnekleme sayıları için hesapladıkları sönüm dağılımlarının uyum değerleri (%)	50
Çizelge 4.4 : MC yönteminin farklı örnekleme sayıları için kendi bulduğu özdeğer dağılımlarının uyum değerleri (%)	51
Çizelge 4.5 : LHÖ yönteminin farklı örnekleme sayıları için kendi bulduğu özdeğer dağılımlarının uyum değerleri (%)	52
Çizelge 4.6 : Farklı örnekleme sayısı ve yöntemler için bulunan indeks değerleri... 55	
Çizelge 4.7 : SKAG ve ÇBAG tipi generatörler için MC yöntemi ile hesaplanan indeksler	64
Çizelge 4.8 : SKAG ve ÇBAG tipi generatörler için LHÖ yöntemi ile hesaplanan indeksler	64
Çizelge 4.9 : Üretim ve tüketim değişken olduğu durumda test sistemine ait güç değerleri.....	66
Çizelge 5.1 : Test sistemine ait hat parametreleri.....	89
Çizelge 5.2 : Test sisteminde, baralara ait güç üretimi ve tüketimi miktarları.....	90
Çizelge 5.3 : SKAG generatörlerinin sisteme 16 farklı yerden katılması sonucunda elde edilen kararlılık indeksi değerleri (alt sönüm değeri=%3)	92
Çizelge 5.4 : ÇBAG generatörlerinin sisteme 16 farklı yerden katılması sonucunda elde edilen kararlılık indeksi değerleri (alt sönüm değeri=%2,8)	94
Çizelge A.1 : İki bölgeli sistemin hat parametreleri	108
Çizelge A.2 : Senkron generatörlere ait parametreler	109
Çizelge A.3 : SKAG tipi rüzgar türbinli generatöre ait parametreler.....	110
Çizelge A.4 : ÇBAG tipi generatöre ait parametreler.....	111
Çizelge A.5 : Anılan model için güç sistemi kararlı kılıcı parametreleri	112
Çizelge B.1 : Kullanılan tüm senkron generatörlere ait ortak parametreler	112
Çizelge B.2 : Kullanılan senkron generatörlere ait parametreler	113
Çizelge B.3 : Güç sistemi kararlı kılıcı için parametreler	114

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	: Sincap kafesli asenkron generatörün (SKAG) yapısı.....	14
Şekil 2.2	: Çift beslemeli asenkron generatörün (ÇBAG) yapısı.....	14
Şekil 2.3	: Rüzgarın hızı ile örnek bir rüzgar türbinli generatörün elektriksel çıkış gücü arasındaki ilişki	15
Şekil 2.4	: Normal dağılıma sahip bir x değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu.....	17
Şekil 2.5	: Weibull dağılımına sahip bir x değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu	17
Şekil 2.6	: Weibull dağılımına sahip bir x değişkeninin birikimli dağılım fonksiyonu	18
Şekil 2.7	: Normal dağılıma sahip bir x değişkeninin LHÖ yöntemi uygulanırken eşit alanlı parçalara ayrılması.....	19
Şekil 2.8	: Normal dağılıma sahip bir x değişkenine ait BDF ve LHÖ yöntemi ile oluşturulan eşit alanlı parçalar	20
Şekil 3.1	: İki bölge, dört generatörlü test sistemi.....	21
Şekil 3.2	: Tüm generatörler senkron generatörken bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin beş farklı yüklenme durumunda konumları.	22
Şekil 3.3	: İlk durumda ve yalnız G1 SKAG (veya ÇBAG) olduğu zaman salınım moduna ilişkin özdeğerlerin konumları.	23
Şekil 3.4	: İlk durumda ve G1 ile G3 SKAG (veya ÇBAG) olduğu zaman salınım moduna ilişkin özdeğerlerin konumları.	24
Şekil 3.5	: İlk durumda ve yalnız G2 SKAG (veya ÇBAG) olduğu zaman salınım moduna ilişkin özdeğerlerin konumları.	25
Şekil 3.6	: İlk durumda ve yalnız G3 SKAG (veya ÇBAG) olduğu zaman salınım moduna ilişkin özdeğerlerin konumları.	26
Şekil 3.7	: İlk durumda ve yalnız G4 SKAG (veya ÇBAG) olduğu zaman salınım moduna ilişkin özdeğerlerin konumları.	27
Şekil 3.8	: İlk durumda ve G2 ile G4 SKAG (veya ÇBAG) olduğu zaman salınım moduna ilişkin özdeğerlerin konumları.	28
Şekil 3.9	: İlk durumda ve G1 ile G4 SKAG (veya ÇBAG) olduğu zaman salınım moduna ilişkin özdeğerlerin konumları.	29
Şekil 3.10	: İlk durumda ve G2 ile G3 SKAG (veya ÇBAG) olduğu zaman salınım moduna ilişkin özdeğerlerin konumları.	30
Şekil 3.11	: İlk durumda ve diğer tüm yer değiştirme senaryolarına ilişkin olarak, beş farklı yüklenme durumu için elde edilen tüm özdeğerler (SKAG için). 31	
Şekil 3.12	: İlk durumda ve diğer tüm yer değiştirme senaryolarına ilişkin olarak, beş farklı yüklenme durumu için elde edilen tüm özdeğerler (ÇBAG için). 32	
Şekil 4.1	: İki bölge, beş generatörlü test sistemi.....	36
Şekil 4.2	: Bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin düzlemde konumları	39

Şekil 4.3	: 0,002 genişlikteki aralıklarla, özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin örneklemeler boyunca dağılımını gösteren histogram.	40
Şekil 4.4	: 0,2 genişlikteki aralıklarla, bölgeler arası salınım modunun sönümlenme oranlarının örneklemeler boyunca dağılımını gösteren histogram.....	40
Şekil 4.5	: Rüzgar hızı ile rüzgar türbinli generatörün çıkış gücü arasındaki ilişkinin örneklemeler üzerinden gösterilmesi.	41
Şekil 4.6	: SKAG'ün çıkış gücü ile bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi.....	42
Şekil 4.7	: SKAG'ün çıkış gücü ile bölgeler arası salınımın sönümlenme oranlarının değişimi	42
Şekil 4.8	: Bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin düzlemde konumları.	43
Şekil 4.9	: 0,01 genişlikteki aralıklarla, özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin örneklemeler boyunca dağılımını gösteren histogram.	44
Şekil 4.10	: 0,2 genişlikteki aralıklarla, bölgeler arası salınım modunun sönümlenme oranlarının örneklemeler boyunca dağılımını gösteren histogram.....	44
Şekil 4.11	: SKAG'ün çıkış gücü ile bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi.....	45
Şekil 4.12	: SKAG'ün çıkış gücü ile bölgeler arası salınımın sönümlenme oranlarının değişimi	45
Şekil 4.13	: MC ve LHÖ yöntemlerinin MC-1000 örnekleme sonuçlarıyla uyum oranlarının değişimi (salınım modunun sönümlenmesi için).....	48
Şekil 4.14	: MC ve LHÖ yöntemlerinin MC-1000 örnekleme sonuçlarıyla uyum oranlarının örnekleme sayısı ile değişimi (salınım modunun sönümlenmesi için)	48
Şekil 4.15	: Rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesi ile olasılıksal güvenlik indeksinin değişimi grafiği (Generatör tipinin SKAG olduğu durum).....	54
Şekil 4.16	: MC yöntemiyle yapılan örneklemelerde elde edilen, salınım moduna ilişkin özdeğerlerin düzlemde gösterimi (500 özdeğer).	56
Şekil 4.17	: Bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin MC yöntemiyle alınan 500 örnekleme boyunca dağılımı	57
Şekil 4.18	: Bölgeler arası salınım modunun sönümlenme değerlerinin MC yöntemiyle alınan 500 örnekleme boyunca dağılımı.	57
Şekil 4.19	: ÇBAG'ün çıkış gücü ile bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi.....	58
Şekil 4.20	: ÇBAG'ün çıkış gücü ile bölgeler arası salınımın sönümlenme oranlarının değişimi	58
Şekil 4.21	: Bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin düzlemde konumları (LHÖ yöntemiyle, 50 örnekleme için)	59
Şekil 4.22	: Bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin LHÖ yöntemiyle ve 50 örnekleme boyunca histogram dağılımı	60
Şekil 4.23	: Bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin LHÖ yöntemiyle ve 50 örnekleme boyunca histogram dağılımı	60
Şekil 4.24	: ÇBAG'ün çıkış gücü ile bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi.....	61
Şekil 4.25	: ÇBAG'ün çıkış gücü ile bölgeler arası salınımın sönümlenme oranının değişimi	61
Şekil 4.26	: Rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesi ile olasılıksal güvenlik indeksinin değişimi grafiği (Generatör tipinin ÇBAG olduğu durum).....	62

Şekil 4.27 : Rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesi değişimine karşılık indeks değerinin değişimi (SKAG ve ÇBAG tipi generatörler için).....	65
Şekil 4.28 : Örneklemeler boyunca SKAG'ün çıkış gücüne karşılık L2'nin elektrik tüketimi miktarının değişimi (LHÖ-25 örnekleme).....	68
Şekil 4.29 : Üretim ve tüketimin değişken olduğu durumda bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin düzlemde konumları (LHÖ-25 örnekleme).....	68
Şekil 4.30 : Üretim ve tüketimin değişken olduğu durumda ilgilenilen özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin LHÖ yöntemiyle dağılımı.....	69
Şekil 4.31 : Üretim ve tüketimin değişken olduğu durumda salınımın sönüm değerlerinin LHÖ yöntemiyle dağılımı.....	69
Şekil 4.32 : SKAG'ün çıkış gücüne karşılık bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi.	70
Şekil 4.33 : SKAG'ün çıkış gücüne karşılık bölgeler arası salınımın sönümlenme oranının değişimi (üretim ve tüketim değişken)	70
Şekil 4.34 : L2 yükünün güç tüketimine karşılık ilgili özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi (üretim ve tüketim değişken).....	71
Şekil 4.35 : L2 yükünün güç tüketimine karşılık salınım modunun sönümlenme oranlarının değişimi.	71
Şekil 4.36 : LHÖ ile 25 örneklemede SKAG'lerin çıkış gücü ve L2'nin elektrik tüketimi miktarına karşılık salınımın sönüm değerinin değişimi.....	72
Şekil 4.37 : Örneklemeler boyunca SKAG'ün çıkış gücüne karşılık L2'nin elektrik tüketimi miktarının değişimi (LHÖ-50 örnekleme).....	73
Şekil 4.38 : Üretim ve tüketimin değişken olduğu durumda bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin düzlemde konumları (LHÖ-50 örnekleme).....	73
Şekil 4.39 : Üretim ve tüketimin değişken olduğu durumda ilgilenilen özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin LHÖ yöntemiyle, 50 örnekleme boyunca dağılımı.	74
Şekil 4.40 : Üretim ve tüketimin değişken olduğu durumda salınımın sönüm değerlerinin LHÖ yöntemiyle, 50 örnekleme boyunca dağılımı.	74
Şekil 4.41 : SKAG'ün çıkış gücüne karşılık bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi.	75
Şekil 4.42 : SKAG'ün çıkış gücüne karşılık bölgeler arası salınımın sönümlenme oranının değişimi. (üretim ve tüketim değişken)	75
Şekil 4.43 : L2 yükünün güç tüketimine karşılık ilgili özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi (üretim ve tüketim değişken).....	76
Şekil 4.44 : L2 yükünün güç tüketimine karşılık salınım modunun sönümlenme oranlarının değişimi.	76
Şekil 4.45 : LHÖ ile 50 örneklemede SKAG'lerin çıkış gücü ve L2'nin elektrik tüketimi miktarına karşılık salınımın sönüm değerinin değişimi.....	77
Şekil 4.46 : Örneklemeler boyunca ÇBAG'ün çıkış gücüne karşılık L2'nin elektrik tüketimi miktarının değişimi (LHÖ-25 örnekleme).....	78
Şekil 4.47 : Üretim ve tüketimin değişken olduğu durumda bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin düzlemde konumları ; (LHÖ-25 örnekleme).....	78
Şekil 4.48 : Üretim ve tüketimin değişken olduğu durumda ilgilenilen özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin LHÖ yöntemiyle, 25 örnekleme boyunca dağılımı.	79

Şekil 4.49 : Üretim ve tüketimin değişken olduğu durumda salınımın sönüm değerlerinin LHÖ yöntemiyle, 25 örnekleme boyunca dağılımı.....	79
Şekil 4.50 : ÇBAG'ün çıkış gücüne karşılık bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi.....	80
Şekil 4.51 : ÇBAG'ün çıkış gücüne karşılık bölgeler arası salınımın sönümlenme oranının değişimi. (üretim ve tüketim değişken)	80
Şekil 4.52 : L2 yükünün güç tüketimine karşılık ilgili özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi (üretim ve tüketim değişken)	81
Şekil 4.53 : L2 yükünün güç tüketimine karşılık salınım modunun sönümlenme oranlarının değişimi.....	81
Şekil 4.54 : LHÖ ile 25 örneklemede ÇBAG'lerin çıkış gücü ve L2'nin elektrik tüketimi miktarına karşılık salınımın sönüm değerinin değişimi.....	82
Şekil 4.55 : Örneklemeler boyunca ÇBAG'ün çıkış gücüne karşılık L2'nin elektrik tüketimi miktarının değişimi (LHÖ-50 örnekleme)	82
Şekil 4.56 : Üretim ve tüketimin değişken olduğu durumda bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin düzlemde konumları (LHÖ-50 örnekleme).....	83
Şekil 4.57 : Üretim ve tüketimin değişken olduğu durumda ilgilenilen özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin LHÖ yöntemiyle, 50 örnekleme boyunca dağılımı.....	83
Şekil 4.58 : Üretim ve tüketimin değişken olduğu durumda salınımın sönüm değerlerinin LHÖ yöntemiyle, 50 örnekleme boyunca dağılımı.....	84
Şekil 4.59 : ÇBAG'ün çıkış gücüne karşılık bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi.....	84
Şekil 4.60 : ÇBAG'ün çıkış gücüne karşılık bölgeler arası salınımın sönümlenme oranının değişimi. (üretim ve tüketim değişken)	85
Şekil 4.61 : L2 yükünün güç tüketimine karşılık ilgili özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi (üretim ve tüketim değişken)	85
Şekil 4.62 : L2 yükünün güç tüketimine karşılık salınım modunun sönümlenme oranlarının değişimi.....	86
Şekil 4.63 : LHÖ ile 50 örneklemede ÇBAG'lerin çıkış gücü ve L2'nin elektrik tüketimi miktarına karşılık salınımın sönüm değerinin değişimi.....	86
Şekil 5.1 : Beş bölge, 16 generatörlü, 68 baralı test sistemi	88
Şekil A.1 : SKAG tipi rüzgar türbinli generatör – WECC Tip 1 modeli	109
Şekil A.2 : ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatör – WECC Tip 3 modeli.....	110
Şekil A.3 : Çalışmada kullanılan senkron generatörlerin uyartım devresine ilişkin model.....	111
Şekil A.4 : Çalışmada kullanılan güç sistemi kararlı kılıcılar için kullanılan model.....	111
Şekil B.1 : Beş bölge sistemde kullanılan senkron generatörlerin uyartım devresine ilişkin model.....	114

GÜÇ SİSTEMLERİNDE RÜZGAR ENERJİSİ İLE ÜRETİMİN KÜÇÜK İŞARET KARARLILIĞINA ETKİLERİNİN DETERMİNİSTİK VE OLASILIKSAL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada bir güç sistemine rüzgar enerjisi ile üretimin katıldığı durum özelinde, güç sistemlerinin küçük işaret kararlılığı konusu incelenmiş ve hem kararlılık analizlerine ilişkin yeni yöntem ve yaklaşımlar önerilmiş, hem de önerilen yöntem ve yaklaşımlar örnek güç sistemleri üzerinde denenmiştir.

Çalışmanın odak noktasını oluşturan rüzgar enerjisi ile üretimin güç sistemlerinin küçük işaret kararlılığı ve özel olarak da güç sistemleri salınımları açısından ele alınmasını gerekli kılan nedenlerden biri kullanılan generatör tipinin farklılığıdır. Çünkü rüzgar türbinli generatörlerin yapısı klasik senkron generatörlerden farklıdır ve bu yüzden küçük işaret kararlılığına, başka bir deyişle güç sistemleri salınımlarına etkileri de farklıdır. Çalışmada yapılan deterministik analizler ile, rüzgar enerjisi ile üretim yapıldığı zaman kullanılacak generatörlerin (hem Sincap Kafesli Asenkron Generatörlerin-SKAG, hem de Çift Beslemeli Asenkron Generatörlerin-ÇBAG) sistem kararlılığına etkileri anlaşılmaya çalışılmıştır. Deterministik analizlerin rüzgar türbinli generatörlerin güç sistemlerinin küçük işaret kararlılığına yalnızca yapısal etkilerini anlamakta yardımcı olmalarının nedeni, bu analizler esnasında generatör tipi dışında başka hiçbir parametrenin değiştirilmemesi, örneğin üretimin değişkenliğinin hesaba katılmamasıdır. Bu anlamda öncelikli olarak rüzgar türbinli generatörlerin senkron generatörler ile yapısal farklılıklarının güç sistemleri salınımlarına etkisini incelemek anlamlıdır.

Rüzgar enerjisi ile üretimi genel olarak güç sistemlerinin küçük işaret kararlılığı araştırmalarında ön plana getiren önemli nedenlerden bir diğeri ise rüzgar enerjisi ile üretim miktarının değişken olması ve önceden kestirilememesidir. Bu, sistem işletmesi adına ciddi bir sorundur. Öte taraftan, küçük işaret kararlılığı problemini çözmek için tek bir çalışma noktası etrafında analiz yapıldığı düşünülürse, böylesi değişken bir üretim yapısına sahip olan bir sistemi inceleyebilmek için de yeni araçlara ihtiyaç var demektir. Bu çalışmada başvurulanan araç, olasılık kavramı olmuştur ve rüzgar enerjisi ile üretim katılan güç sistemlerinin küçük işaret kararlılığını incelemek için olasılıksal benzetim yöntemlerinden yararlanılmıştır. Olasılıksal küçük işaret kararlılığı analizleri yapılarak sistemin değişken yapısı dahilinde bile küçük işaret kararlılığı hakkında yorum yapmak mümkün olmaktadır.

Literatürde yaygın kullanıma sahip olan olasılıksal benzetim yöntemlerinden birisi Monte Carlo (MC) yöntemidir. Bu çalışmada MC yöntemi, belirsiz üretim birimlerinin çıkış gücünü örneklemeye ve güç akışı senaryolarının üretilmesinde kullanılmıştır. Burada rüzgar hızının Weibull olasılık dağılımına uygun olarak değiştirildiği kabul edilmiştir. Bu noktadan sonra özdeğer analizleri yapılmış ve çok sayıda çalışma noktasına ait kararlılık parametreleri elde edilmiştir. Bu

parametrelerden biri de güç sistemleri salınımlarının sönümlenme değerleridir. Bu bilgileri elde etmek, sistemin küçük işaret kararlılığını anlayabilmek adına önemlidir.

Bunun yanında MC yöntemi ile sistemi gerçekçi bir şekilde modelleyebilmek için çok sayıda örnekleme almak gerekmektedir. Bu da işlem yükünü ve analiz için harcanan zamanı çok fazla arttırabilmekte ve analizi yavaşlatabilmektedir. Bu yüzden bu çalışmada, MC yönteminden çok daha az sayıda örnekleme ile de gerçekçi sonuçlar verebildiği gösterilmiş olan Latin Hiperküp Örneklemesi (LHÖ) yönteminin güç sistemlerinin küçük işaret kararlılığı analizlerinde kullanılması önerilmiştir. Bunun için MC yöntemi ile örnek güç sistemlerinde hesaplanan kararlılık parametreleri aynı şekilde LHÖ yöntemi ile de, üstelik daha az sayıda örnekleme alınarak hesaplanmıştır. Üstelik MC ve LHÖ yöntemleri ile alınan sonuçlar karşılaştırıldığı zaman, LHÖ yönteminin de en az MC yöntemi kadar başarılı olduğu, üstelik bu başarıyı çok daha az sayıda örnekleme alarak gösterdiği ortaya çıkmaktadır. LHÖ yönteminin, güç sistemlerinin küçük işaret kararlılığı analizlerinde de kullanılabilecek pratiklikte olduğu vurgulanmış ve uygulama sonuçlarıyla da gösterilmiştir.

Herhangi bir benzetim yöntemi kullanılarak sistemin küçük işaret kararlılığına ilişkin önemli parametreler elde edilebileceği açıktır. Fakat güç sisteminin küçük işaret kararlılığı analizleri için önemli olan noktalardan bir diğeri de, elde edilen bu verilerin doğru bir şekilde yorumlanmasıdır. Bu anlamda, rüzgar enerjisi ile üretim ve dolayısıyla sistem için değişen çalışma noktaları söz konusu olduğunda, istatistiksel yaklaşımlar önem kazanmaktadır. Bu çalışmada, çeşitli senaryolar dahilinde ve her iki benzetim yöntemiyle elde edilen verilerin, sisteme yeni bakış açıları getirmek için değerlendirilebilmesi amacıyla olasılıksal bir indeks kullanılması önerilmiştir. Bu indeks, güç sistemleri salınımlarının belirli bir sınır değerinin üstünde olma olasılığını hesaplamaya dayanır. İndeksin en büyük avantajlarından birisi, belirsiz bir üretim birimini (veya belirsiz üretim ve tüketim birimlerini) içeren bir güç sisteminin küçük işaret kararlılığı hakkında net ve sayısal sonuçlar verebilmesidir.

Bu çalışmada, olasılıksal indeks yardımıyla iki temel senaryo üzerinde sisteme yeni yaklaşımlar getirilmiştir. Buna göre, iki bölge bir güç sisteminde, sisteme eklenmesi planlanan bir rüzgar çiftliği ile sistemdeki bölgeler arası salınım modunun yeterli miktarda sönümlenebilmesi olasılığı arasında bir ilişki kurulmuş ve sisteme katılacak rüzgar çiftliğinin çeşitli üretim kapasitesi değerleri için sistemin kararlılığı hakkında yorum yapılmıştır. Buna göre, güç sistemleri salınımlarının yeterli miktarda sönümlenmesi olasılığı için yapılacak bir kabul ile, kurulacak rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesini belirlemek de mümkün olabilecektir. Bu, sistem planlamasına ışık tutabilecek etkili bir yorumdur. Bu çalışmada indeks ile bu yorumların getirilebileceği gösterilmiş ve sistem planlamasına dair kararın, bir kararlılık ölçütüyle şekillenebileceği öngörülmüştür.

Buna ek olarak yine olasılıksal indeks yardımıyla, beş bölge ve 16 generatörlü başka bir örnek güç sisteminde, sisteme katılması planlanan bir rüzgar çiftliğinin sisteme hangi noktadan katılmasının güç sistemlerinin sönümlenmesi açısından iyi, hangi noktadan katılmasının güç sistemlerinin sönümlenmesi açısından kötü olabileceğini anlamak mümkün olmuştur. Bu da yeni kurulacak bir rüzgar çiftliğinin konumu hakkında karar vermede yardımcı olabilir. Bu da bu çalışmada indeks kullanılarak getirilebileceği önerilen bir yorumdur ve yine sistem planlamasına dair etkili bir araç olarak kullanılabilir.

Çalışmada hem rüzgar enerjisi ile üretimin sisteme katılmasının güç sistemlerinin küçük işaret kararlılığına etkisini incelemek için yapılabilecek analizler hem de analiz sonucunda elde edilen verilerin sistem işletmesi ve planlaması açısından yorumlanması adına yeni bakış açıları sunulmuş, yeni yöntemler önerilmiştir. Ayrıca, bu yöntemlerin etkinlik ve anlamı da örnek güç sistemleri üzerinde yapılan uygulamalarla gösterilmiştir.

DETERMINISTIC AND PROBABILISTIC STUDIES OF THE EFFECTS OF WIND POWER GENERATION IN POWER SYSTEMS ON SMALL-SIGNAL STABILITY

SUMMARY

In this work, small signal stability of power systems into which wind power generation is integrated is studied. New methods and approaches associated with small signal stability analyses are proposed and they are also demonstrated on some test systems. Some of the analyses carried out in this work are deterministic and some of them are probabilistic.

One of the reasons for the investigation of power system small signal stability, especially power system oscillations, is that wind power generation can be served to the system through various generator types that are different than the conventional synchronous generators. The dynamics due to a considerable penetration of various generating units is certainly expected to be diverse to a certain extent. In this work, the effects of wind turbine generator dynamics on power system oscillations are studied through deterministic analyses. The wind turbine generator types considered are Squirrel Cage Induction Generators (SCIGs) and Doubly-Fed Induction Generators (DFIGs). Some scenarios in which one or two of the synchronous generators are replaced with wind turbine generators are created. Then eigenvalue analyses are carried out for each one of them. The results of the deterministic analyses include only the effect of generator type (dynamics) on power system oscillations as they provide an opportunity to see how differently the wind turbine generators effect power system oscillations in comparison with synchronous generators. The variability of wind power generation is not considered during these analyses. Another reason for the investigation of power system small signal stability for power systems into which wind power generation is penetrated is the variability and the unpredictability of wind power generation, which can be a serious problem for system operation. Some new tools for investigating power systems subjected to variable generation are needed since the small signal stability of the system is to be studied for various operating points rather than a single operating point. Some probabilistic simulation methods are applied for investigating the small signal stability of power systems into which wind power generation is penetrated. By making some probabilistic small signal stability analyses, it is even possible to talk about the small signal stability of systems that has variable generation characteristics.

One of the probabilistic simulation methods that is widely referred in literature is Monte Carlo (MC) method. In this work, it is used for simulating power outputs of variable generation units and for creating some probabilistic power flow solutions. It is accepted that wind speed is Weibull distributed. After having generated probabilistic wind power generation outputs, some eigenvalue analyses are carried out and stability parameters associated with operating points generated during analyses are obtained. One of the stability parameters obtained is the damping ratios

of power system oscillations. It is very important and valuable to know about these parameters while investigating the small signal stability of a power system.

As a part of probabilistic analyses, first of all only the uncertainty of generation is considered and eigenvalue analyses are carried out for changing generator outputs. Both, MC and LHS methods are used for calculating the stability parameters during this study. Additionally, some analyses considering uncertainties of both generation and load are also carried out. For this case study, the LHS method are used while an algorithm is applied for creation of some generation and load values that have a desired correlation. Considering the uncertainties of the system gives an opportunity for having more realistic results than the ones found by deterministic analyses.

In the MC method, an extensive number of simulations can be required for a realistic application. This may increase the time spent for analyses and the work load very much and may slow down the process. As an alternative to MC method, usage of the Latin Hypercube Sampling (LHS) method is proposed for power system small signal stability analyses in this work. It is showed that by the application of LHS method, less number of iterations and thus less simulation time can be sufficient for obtaining realistic results. The stability parameters calculated by MC method are also calculated by LHS method and fewer simulations are made for that purpose. Moreover, as the results obtained by MC and LHS methods are compared, it is understood that LHS method is as successful as MC method in calculating the stability parameters with fewer simulations.

As a part of comparison of MC and LHS methods, a similarity ratio is defined. The similarity ratio defined is based on the closeness of the stability parameters calculated by MC and LHS methods. When histograms of some stability parameters, such as the real parts of eigenvalues or damping ratios, are created, firstly, a normalization process is applied. Then, through the calculation of the differences between the normalized values calculated for MC and LHS methods, the similarity ratio is found. The comparison of the simulation results of MC and LHS methods for different numbers of iterations shows that the LHS method is more reliable than MC method for small numbers of iterations. By the help of the similarity ratio defined in this work, it is emphasized that LHS is such a practical method that it can be used for small signal stability analyses of power systems. The effectiveness of the proposed approach is demonstrated on some test systems.

By means of the application of MC or LHS methods, some important parameters associated with power system small signal stability can be obtained. Utilization of these parameters is also crucial for drawing meaningful conclusions. These can be used for making some useful comments for operational or planning purposes. When wind power generation and variable operating points are in question it is important to use some statistical tools. In this work, a probabilistic index is proposed to make some comments about the small signal stability of a power system from some new viewpoints by using the data obtained by either MC or LHS method in any scenario. The probabilistic index is defined based on the probability of having sufficient damping in power system oscillations above an acceptable level. One of the advantages of the index is that it gives some clear and numerical results for a power system that even has some uncertainties. It is also a tool that has a potential for gaining benefits in the operation and planning processes.

In this work the probabilistic index is utilized for two test systems in each of which some possible scenarios are considered. For a two area test system, the relationship

between the production capacity of a wind farm and the probability of sufficient damping of system oscillations is investigated. Both of the generator types (SCIG and DFIG) are considered in the scenarios developed. The production capacity of a wind farm is determined from a new viewpoint considering the probability of sufficient damping of power system oscillations. Thus, if there is an acceptable risk level for poorly damped oscillations in a system, it may be possible to make some judgement about planning and about the capacity of the wind farm that is projected to be integrated on a given power system. It can be concluded that the probabilistic index can be a new planning criterion and it can be useful for system planners when a new wind farm is decided to be installed. The decision process can be introduced as an advantage of the index proposed in this work. In a five area test system containing 16 generators, some judgements about the location of wind farm that is projected to be integrated on power system are made. The probability of sufficient damping of power system oscillations is calculated by the probabilistic index and it is possible to decide in terms of small-signal stability whether a location of a wind farm to be integrated on a power system is proper or not. It is also possible to decide the most appropriate location where the wind farm is to be integrated on power system. This is again considered as an advantage of the index proposed.

In the scenarios where the SCIGs are used in the wind farm, it is possible to say that some of the locations (buses) are always advantageous for damping power system oscillations whereas some of the buses are always unfavorable. Also it is found out that the damping of power system oscillations is sometimes better for some locations (buses) and it is sometimes worse for some others. These are very clear results for a given power system and they can be very meaningful for system planning as well as for operation.

In the scenarios where DFIGs are used in the wind farm, all of the candidate locations are found to be unfavorable for damping power system oscillations when the wind farm is integrated into the power system at these locations. The index is very small for only one location (bus) but it is zero for the rest of the buses. It is possible to say that location (bus) where the index is nonzero is the best for the integration of wind farm on power system, because the highest index value is calculated here although it is very small. Moreover, it is possible to make a comparison between locations (buses) when the amount of acceptable damping level is reduced slightly.

In this work, by carrying out some deterministic and probabilistic analyses, and by developing some new tools and approaches, it is showed that the relation between integration of wind power generation on power systems and the small signal stability of power systems can be investigated more practically and clearly. This study proposes some new tools for analyzing and understanding the small signal stability of power systems, especially when wind power generation is considered.

The methods and approaches proposed in this work can be used as some new operating and planning tools. The capabilities and the effectiveness of them are also demonstrated on some test systems. The test systems that are considered in this work include a two area system which is composed of four generators and a five area system with 16 generators and 68 buses. Finally, it is showed that they are also useful and meaningful for small signal stability analyses of power systems and it is possible to carry out some necessary analyses more practically. Additionally, determining the

effects of wind power generation on the small signal stability of power systems is easier by using the methods and the tools proposed in this work.

1. GİRİŞ

Güç sistemlerinde küçük işaret açısı kararlılığı konusu, gerek bölgeler arası, gerekse bölgeler içi elektromekanik salınımların uygun bir şekilde sönümlendirilmesi açısından, diğer kararlılık problemleri arasında önemli bir yer almaktadır. Küçük işaret kararlılığı, sisteme ilişkin her bir olası çalışma noktası etrafında, küçük bozucu etkiler altında denge noktasının kararlılığını ve sistemin davranışını inceler. Bu incelemeler, elektrik güç sistemleri gibi doğrusal olmayan dinamik sistemlerde, diferansiyel-cebirsal denklemlerin doğrusallaştırılması ve modal (özdeğer) analizleri kapsamında çeşitli yaklaşımların ve araçların kullanımını içermektedir.

Literatürde güç sistemlerinde küçük işaret açısı kararlılığı konusu ile ilgili pek çok çalışma mevcuttur. [1]'de, küçük işaret kararlılığı açısından önemli bir yer tutan "güç sistemlerinde salınımlar" kavramından söz edilir. Buna göre birbirinden uzak bölgelerdeki üretim birimlerinin zayıf bağlarla – enterkonnekte olarak – bağlanması, kararlılık açısından sorunlar yaratabilmekte ve küçük işaret kararlılığı analizinde bölgeler arası salınımlara yol açan elektromekanik modlar gözlenmektedir. Buna göre enterkonnekte şebekede sistemi küçük işaret kararsızlığına götürmeye en yakın aday, bölgeler arası salınım moduna ilişkin parametreler gibi görünmektedir. Bu açıdan sistem salınımlarını, yani bölgeler arası salınım modlarını önemsemek ve küçük işaret kararlılığı ile sistemi analiz etmek ve gerekli ise tedbir almak önemlidir. Küçük işaret kararlılığı analizleri, eğer tedbir almak gerekiyorsa alınacak tedbire ilişkin olarak somut veriler de sağlamaktadır.

Küçük işaret kararlılığına ilişkin deterministik yaklaşımlar, genellikle, sistemin kararlılığını olumsuz yönde etkileyecek en kötü senaryoların ve sınırlı sayıda kritik olası çalışma noktalarının analizini içermektedir. Bu tür yaklaşımlar, sistemin kararlılığını konservatif bir şekilde incelenmesini sağlasa da yüklerin veya üretimin ciddi değişkenlikler barındırabilmesi nedeniyle sistemin sürekli çalışma noktasını değiştirme olasılığını kapsamaması dolayısıyla eksik kalmaktadır. Rüzgar enerjisi ile üretimi küçük işaret kararlılığı araştırmaları açısından odak noktasına koyan nedenlerden biri de bu belirsizlik konusudur. Çünkü rüzgar enerjisi ile üretim

yapılmak istendiğinde göz önünde bulundurulması gereken en önemli konulardan biri üretimin çok büyük ve hızlı değişimler göstermesidir. Bu nedenle sistemde yine tek bir çalışma noktasından söz etmek ve sistemin küçük işaret kararlılığı hakkında tek bir cevap vermek mümkün değildir.

Rüzgar enerjisini küçük işaret kararlılığı çalışmaları açısından ön plana getiren etkenlerden biri de rüzgar türbinli generatörlerin klasik senkron generatörlerden yapı olarak farklılık göstermesidir. Bu da küçük işaret kararlılığı analizleri öncesinde kurulması gereken matematiksel modellerin farklılaşması ve sistem matrisinin yeni ve farklı bir yapı kazanması demektir. Bu da rüzgar üretimi katılmış bir sistemin özdeğerlerinin yani dinamik özelliklerinin nasıl değiştiğini araştırma gereğini beraberinde getirir. Anlamlı miktarda rüzgar üretimi eklenmiş bir güç sisteminin küçük işaret kararlılığının iyi veya kötü yönde değişmesini anlamak önemlidir.

Güç sistemine rüzgar üretimi eklenmesi, söz edilen nedenlerle küçük işaret kararlılığı açısından ilgi çekicidir ve araştırmaya değerlidir. Literatürde konuyla ilgili pek çok çalışma mevcuttur [2-7] . [8]'de, güç sistemine rüzgar enerjisi ile üretimin eklenmesi üretimin değişkenliği değil yalnızca kullanılan makinelerin farklılığı açısından değerlendirilmiş, rüzgar enerjisi ile üretim katılmış sistemde sistem matrisine ait özdeğerlerin nasıl değiştiği incelenmiş ve bazı çıkarımlarda bulunulmuştur. Buna göre rüzgar türbinli generatörlerin sistemde kullanımının artması ile birlikte generatörlerin bölgeler arası ve sonsuz bir sisteme karşı salınım modlarının sönümlenmelerinde bir iyileşme gözlenmiştir. İyileşme sabit hızlı rüzgar türbinli generatör kullanıldığında daha belirgindir. Generatörlerin iç bölgedeki salınımlarının sönümlenmesindeki değişim ise açık değildir. Çalışmada, sistem salınımlarının sönümlenmesinde gözlenen iyi yöndeki değişimin nedenlerinden biri, generatörlerin sisteme doğrudan değil, bir güç elektroniği devresi üzerinden bağlanmaları olarak açıklanmaktadır.

Rüzgarla üretimin sisteme katılmasının küçük işaret kararlılığı ile ilgisini araştıran çalışmaların bir diğesinde de [9], bir güç sistemindeki senkron generatörlerden birinin bir rüzgar çiftliği ile yer değiştirdiği durumda özdeğerlerin nasıl değişeceği, güç değerleri açısından incelenmiştir. Çalışmada güç değerleri nominal değerlerine ulaşırken senkron ve rüzgar türbinli generatörler için özdeğerlerin değişimi incelenmiş ve sonuçta rüzgar türbinli generatör nominal güç değerine yaklaştıkça modal analiz sonunda bulunan özdeğerlerin sola doğru hareket ettiği gözlenmiştir;

yani küçük işaret kararlılığı açısından daha iyi bir durum ortaya çıkmıştır. Senkron generatörde ise tersine, nominal güç değerlerine yaklaşılmaması özdeğerleri sağa hareket ettirmiş ve küçük işaret kararlılığı açısından daha olumsuz bir durum ortaya çıkmıştır. Bu çalışmada da rüzgar üretimi katıldığı zaman, elektromekanik salınım modlarının daha iyi sönümlenmesinin nedeni olarak, rüzgar türbinli generatörün sistemin geri kalanına yalnızca bir empedans önündeki bir gerilim kaynağı gibi davrandığı gösterilmiş ve bunun da bölgeler arası salınım moduyla ilintili olan sağ özvektörün hız ve açı gibi mekanik durumlarının kaybına neden olduğu anlatılmıştır.

Bir diğer çalışmada [10], üç bölgeli bir test sistemi üzerinde küçük işaret kararlılığını etkileyen nedenler üzerinde durulmuş, sistemin bir bölgesindeki üretim artışı ile diğer bölgelerindeki üretim artışlarının bölgeler arası salınımı sönümlemede zıt roller üstlenebildikleri gösterilmiştir; bir bölgedeki üretim artarken sönümlenme azalmış, ve diğer bölgelerdeki üretimler artarken sönümlenme artmıştır. Ayrıca diğer çalışmalara benzer şekilde bu çalışmada da, klasik senkron generatörlerin rüzgar türbinli olanlarla değiştirilmesinin salınım modunun sönümlenmesine olumlu katkısı olduğu açıklanmaktadır. Çalışmada sönümlenmenin zamana bağlı olarak nasıl gerçekleştiği de grafik olarak gösterilmiştir.

Yine küçük işaret kararlılığı çalışmalarında temel bir analiz göstergesi olan özdeğerlerin baz alındığı bir diğer yöntem de özdeğer duyarlılığı analizi yöntemidir. Bu yöntem, sisteme ait herhangi bir parametredeki değişimin özdeğerleri ne yönde etkilediğine ilişkin veriler sunmaktadır. Bir diğer çalışmada [11] özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin makine eylemsizliklerine göre duyarlılıkları analiz edilmiş ve sisteme rüzgar türbinli generatörlerden çift beslemeli asenkron generatörlerin (ÇBAG) katılmasının toplam eylemsizlikte azalmaya neden olacağı kabul edilerek senkron generatörler ile ÇBAG'lerin küçük işaret kararlılığına etkileri, eylemsizliğe göre duyarlılık analizi yapılarak büyük bir güç sistemi üzerinde karşılaştırmıştır. Özdeğer analizi ile birlikte özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin eylemsizliğe göre duyarlılığı analiz edilerek yapılan denemeler sonunda, sisteme ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatörlerin eklenmesinin sistemin dinamiğine hem olumlu hem de olumsuz etkilerinin bulunduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu analizlere göre, iki aday generatör yapısından – yani senkron generatör ve ÇBAG'den – hiçbirinin çalışmada kullanılan sistem için mutlak iyi veya mutlak kötü bir etkiye sahip olduğunu söylemek mümkün olmamıştır; özdeğer duyarlılığı analizleri sonunda her iki generatör açısından da hem

iyi hem de kötü etkiler görülmüştür, fakat özdeğer duyarlılığı analizlerinin sistem kararlılığına ilişkin çıkarımlara ulaşmada etkin bir yöntem olduğu vurgulanmıştır.

Daha önce söz edildiği gibi, küçük işaret kararlılığı analizleri tek bir çalışma noktası etrafında sonuç vermekte ve doğası gereği rüzgar enerjisi ile üretim yapılırken güç miktarında da anlamlı değişimler yaşanmaktadır. Bu nedenle rüzgar üretimi katılmış sistemde küçük işaret kararlılığı analizini tek bir noktada yapmak ve sistemin kararlılığına ilişkin tek bir güvenilir cevap beklemek mümkün değildir. Bu sıkıntıyı aşabilmek, ister tüketim ister üretim değişkenliği söz konusu olsun, olasılıksal yaklaşımlar ile bir ölçüde olanaklıdır. Literatürde olasılıksal küçük işaret kararlılığına ilişkin çeşitli çalışmalar mevcuttur [12,13] ve olasılıksal küçük işaret kararlılığı analizi, rüzgar üretimi içeren sistemlere uygulanabilecek bir yöntemdir. Bu yöntemde olasılıksal yapı, analitik olarak veya benzetimli olarak ifade edilebilir. Bu çalışmada da gerçekleştirilmiş olan benzetimli olasılıksal kararlılık analizlerinde, çok sayıda örnek çalışma noktası oluşturularak olasılıksal yapıya yaklaşılmaya çalışılmış ve her örnek çalışma noktası etrafında küçük işaret kararlılığı analizleri tekrarlanmıştır. Bütün bu örneklemelerden çıkan sonucun, o sistemin küçük işaret kararlılığı hakkında fikir vermesi beklenir. Elde edilen verileri anlamlı sonuçlar durumuna getirmede istatistiksel yöntemler de kullanılabilir.

Olasılıksal küçük işaret kararlılığı analizlerinin rüzgar üretimi katılmış sistemlere uygulandığı çalışmalardan birinde [14], benzetimli olasılıksal küçük işaret kararlılığı analizleri yapılmış ve rastgele çalışma noktaları Monte Carlo (MC) yöntemiyle üretilmiştir. Rüzgar üretimi, rüzgarın esme hızına bağlıdır ve rüzgar hızının da genellikle Weibull olasılık dağılımına uyduğu kabul edilir. Çalışmada MC benzetimi yapılarak Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonuna uygun olarak üretilen rüzgar hızı verileri, elektriksel üretim ve farklı çalışma noktaları oluşmasını sağlar. Bütün bu veriler, çalışmada küçük işaret kararlılığına ilişkin özdeğerlerin olasılık dağılımının elde edilmesini ve kararlılığa ilişkin istatistiksel bilgiye ulaşılmasını sağlamıştır. Buna göre rüzgar hızı istatistiği bilinen bir bölgede rüzgar üretimi bulunan bir sistemin hangi olasılıkla küçük işaret kararlı olup hangi olasılıkla küçük işaret kararsız olabileceği, çalışmada açıklanan yöntemle kestirilebilmektedir. Çalışmada ayrıca, sözü edilen yöntemler kullanılarak, rüzgar türbinli generatörün sisteme hangi noktadan bağlanmasının küçük işaret kararlılığı açısından daha olumlu veya daha

olumsuz olabileceğine ilişkin çıkarımlarda da bulunulabileceği gösterilmiştir. Bu da rüzgarla üretimin sisteme hangi noktadan katılacağına ilişkin ipuçları verir.

Rüzgarla üretimi içeren bir sistem için yapılmış olasılıksal küçük işaret kararlılığı çalışmalarından bir diğerinde [15], bir güç sistemindeki üretim değişkenliklerinin yanında sistem elemanlarının arızalanma olasılıkları da göz önüne alınarak kararlılık analizleri yapılmıştır. Ayrıca, sistemin küçük işaret kararlılığına ilişkin bir indeks tanımlanmış ve 3 bölgeli bir güç sisteminin farklı çalışma noktaları MC yöntemiyle örneklenerek söz edilen kararlılık indeksi hesaplanmıştır. Böylece, olasılıksal çalışma yapılarak sistemin kararlılığına ilişkin farklı bir bakış açısı elde edilebileceği gösterilmiş ve farklı çıkarımlarda bulunulabilmektedir. Örneğin çalışmada, olasılıksal bir çıkarım olarak bir bölgeden diğer bir bölgeye güç akışı artışının sönümlenme oranını düşürdüğü tespit edilebilmiştir. Olasılıksal yaklaşım kullanılarak ve tanımlanan indeks yardımıyla bulunan sonuçlardan bir diğeri de, çalışmada incelenen sistemde büyük üretim birimlerinin veya bölgeler arası bir bağlantının devre dışı kalmasının küçük işaret kararlılığını olumsuz yönde etkilediğidir. Kararlılık analizini hem olasılıksal hale getirmek, hem de bunu bir indeksle ifade etmek yeni ve anlamlı sonuçlara ulaşmayı sağlamıştır.

Daha önce yapılan çalışmalar göstermiştir ki: değişken ve belirsiz miktarda üretim yapan birimlerin güç sistemine katılmasının küçük işaret kararlılığı açısından incelenmesi söz konusu olduğunda, olasılıksal yöntemlere başvurmak daha etkili ve doğru bir çözümdür. Söz konusu olan rüzgar enerjisi ile üretim olduğunda, olasılıksal çalışma yapmak bu nedenle önem kazanmaktadır. Olasılıksal çalışma yapılırken, küçük işaret kararlılığına ilişkin sonuçlara ulaşmak için kullanılan yöntemler, yapılan analiz açısından belirleyici olabilmektedir.

Bu çalışmada, rüzgar enerjisi ile üretimin bir güç sistemine – çeşitli güçlerde – katılmasının sistemin küçük işaret kararlılığına ne yönde etki edebileceği, değişik açılardan incelenmiştir. Bu incelemelerde hem deterministik hem de olasılıksal çalışmalar yapılmıştır. Daha önce söz edildiği gibi, rüzgar enerjisi ile üretimin, küçük işaret kararlılığı çalışmaları açısından odak noktası durumuna gelmesine neden olan iki önemli unsur vardır: biri kullanılan makinelerin ve yardımcı devrelerin yapı olarak klasik senkron generatörlerden farklılık göstermesi, diğeri ise üretimin belirsiz ve değişken olmasıdır. Yapılan deterministik analizler ile, rüzgar enerjisi katıldığında değişen makine yapısının sistemin kararlılığını nasıl etkilediği anlaşılmaya çalışılmış

ve sorun farklı koşullarda incelenmiştir. Olasılıksal çalışmalarda ise, makine yapısının farklılığının yanına üretimin belirsizliği ve değişkenliği de katılmış ve daha gerçek işletme koşullarına ilişkin birtakım çıkarımlarda bulunulmuştur. Gerçekçi işletme koşullarını örnekleyebilmek için elektrik üretiminin yanında elektrik tüketiminin de değişkenliğini gözetin çalışmalar yapılmıştır. Benzetimli olasılıksal küçük işaret kararlılığı analizleri farklı benzetim yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. Kimi analizler de, üretimle tüketim değişimleri arasında bir korelasyon söz konusu olduğunda, yöntemlerde korelasyonu gözetecek değişiklikler yapılarak tekrarlanmıştır. Bu değişikliğin nasıl yapılabileceği konusunda literatürde bazı çalışmalar mevcuttur [16,17]

Yapılan benzetimli olasılıksal çalışmalarda ayırt edici unsurlardan biri benzetim için MC yönteminin yanısıra, bu yönteme göre daha az örneklemeyle daha gerçekçi sonuçlar verdiği hem daha önceki çalışmalar hem de bu çalışmada yapılan karşılaştırmalar ile anlaşılan Latin Hiperküp Örneklemesi (LHÖ) yönteminin kullanılmış olmasıdır.

Bir benzetim yöntemi olarak LHÖ yöntemi, şimdiye kadar değişik alanlarda kullanım bulmuştur. Yöntemin manyetik alan optimizasyonu [18], işletme maliyeti optimizasyonu [19] ve olasılıksal güç akışı hesaplaması [20] gibi konulara uygulanmış ve etkinliği denenmiştir. Bunun dışında güç sistemlerinin güvenilirliği [21] ve güvenilirlik indeksleri [22] gibi konularda da uygulaması vardır. Daha önce küçük işaret kararlılığı analizlerinde uygulamasına rastlanmamıştır.

Olasılıksal çalışmalarda kullanılan bir diğer yöntem de; bölgeler arası salınımına ait sönümün belli sınırlar içinde kalmasına dayanan ve [15]'de tanımlanana benzer bir indeksin kullanılması olmuştur. Bu sayede örnek sistemlerde küçük işaret kararlılığına dayanan faydalı birtakım sonuçlar elde edilebilmiştir. Tanımlanan indeks, olasılıksal benzetim yöntemiyle bulunmaktadır ve çalışmada hem MC hem de LHÖ yöntemi ile hesaplanmıştır. İndeksin hesaplanmasında LHÖ yöntemini kullanmak, MC yöntemini kullanmaktan yine daha etkili ve verimli olmuştur.

Hem tanımlanan indeks ve özdeğer analizleri kullanılarak örnek güç sistemlerinin küçük işaret kararlılığına ilişkin faydalı sonuçlar elde edilmiş ve hem de hesaplama başarımı LHÖ yöntemi yardımıyla daha da yükseltilmiştir. İki bölgeyi bir test sisteminde, sisteme katılması öngörülen bir rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesi ile

bölgeler arası salınımın sönümlenme değişimi arasında nasıl bir ilişki olabileceği araştırılmıştır. Böylece gerekli küçük işaret kararlılığı koşulunu sağlayabilmek için, kurulacak bir rüzgar çiftliğinin en az hangi büyüklükte olması gerektiği öngörülme çalışılmıştır. Başka bir örnekte, 16 generatörlü bir güç sistemine rüzgar enerjisi ile üretim eklenmek istenirse, üretimin nereden sisteme katılmasının güç sistemleri salınımlarının sönümlenmesi açısından daha iyi olabileceği araştırılmıştır. Bu yöntemle, rüzgar çiftliğinin hangi baralar üzerinden sisteme katılmasının sistem salınımları açısından olumlu, hangi baralar üzerinden katılmasının sistem salınımları açısından olumsuz olabileceğine ilişkin net yanıtların bulunması mümkün olmuştur. Bu sorunu çözmek için kullanılan araçlar yine, sözü edilen olasılıksal indeks ve LHÖ benzetim yöntemidir.

Çalışmanın ikinci bölümünde çalışmanın kuramsal temelini oluşturan kavramlar açıklanmıştır. Güç sistemleri dinamiği ve kararlılığı kavramları üzerinde durulduktan sonra, küçük işaret kararlılığının ne olduğu, matematiksel olarak nasıl tanımlandığı ve bir güç sistemi için sistem salınımlarının neyi ifade ettiği üzerinde durulmuştur. Ayrıca rüzgar enerjisi ile üretimi küçük işaret kararlılığı çalışmaları açısından ilginç kılan nedenler, generatör yapıları ve üretim belirsizliğini tanımlayan olasılık yoğunluk fonksiyonları ile açıklanmaya çalışılmıştır. Ayrıca olasılıksal küçük işaret kararlılığı analizleri ve benzetim yöntemleri hakkında da bilgi verilmiştir.

Üçüncü bölümde; iki bölgeli örnek güç sisteminde, rüzgar türbinli generatörlerin çeşitli senaryolarda, klasik senkron generatörlerin yerine kullanılmasının küçük işaret kararlılığına, başka bir deyişle güç sistemleri salınımlarına nasıl bir etkisi olduğu araştırılmıştır. Bu bölümde yapılan çalışmalar, rüzgar üretiminin değişkenliğini göz önünde bulundurulmadan yapılmış deterministik analizleri içerir. Elde edilen sonuçlar, rüzgar üretiminde kullanılan generatörler ile klasik senkron generatörlerin küçük işaret kararlılığına yaptıkları farklı etkileri karşılaştırma fırsatı vermektedir. Küçük işaret kararlılığına etkileri açısından klasik senkron generatörler ile karşılaştırılan rüzgar türbinli generatörler; sabit hızlı makinelerden olan sincap kafesli asenkron generatör (SKAG) ile değişken hızlı makinelerden olan çift beslemeli asenkron generatördür (ÇBAG). Karşılaştırma yapmak için özdeğer analizleri gerçekleştirilmiştir.

Dördüncü bölümde, iki bölgeli örnek güç sisteminde yapılan küçük işaret kararlılığı analizleri açıklanmaktadır. Bu kez yapılan analizlerin bir kısmında üretimin

değişkenliği, bir kısmında da hem üretimin hem de tüketimin değişkenliği göz önünde bulundurulmaktadır. Bunu sağlayabilmek için benzetimli olasılıksal küçük işaret kararlılığı analizleri yapılmıştır. Analizlerde benzetim için MC ve LHÖ yöntemleri kullanılmış, ayrıca bu iki yöntem verim ve gerçekçi sonuca ulaşma açılarından karşılaştırılmıştır. Hem üretimin hem de tüketimin değişkenliği söz konusu olduğunda, benzetim yöntemlerinde bu iki değişimin korelasyonunu yansıtan bir düzenlemenin nasıl yapılabileceği üzerinde de durulmuş ve buna ilişkin olarak yapılan bazı analizler anlatılmıştır. Küçük işaret kararlılığına ilişkin bir indeks tanımlanmış, bu indeks ve olasılıksal küçük işaret kararlılığı analizleri kullanılarak değişik örnekler üzerinde küçük işaret kararlılığına ilişkin hangi farklı sonuçların elde edilebileceği gösterilmiştir.

Beşinci bölümde, benzetim yöntemi olarak LHÖ kullanılarak ve olasılıksal indeks yardımıyla, 16 generatörlü örnek güç sistemi üzerinde analizler yapılmış ve bu sisteme bir rüzgar çiftliğinin katılacağı düşünülmüştür. İndeksin örnek bir uygulaması olarak, bu güç sisteminde rüzgar çiftliğinin hangi bara üzerinden sisteme katılmasının, salınım modunun sönmelenmesini daha iyi veya daha kötü noktaya getirebileceği üzerine çıkarımlarda bulunulmuştur. Hem SKAG hem de ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatörlerin sisteme katılacağı durumlar ayrı ayrı analiz edilebilmiş ve sisteme katılacakları konumların avantaj ve dezavantajları belirlenebilmiştir.

Son bölümde; rüzgar enerjisi ile üretimin güç sistemlerine katılması ve küçük işaret kararlılığı arasındaki ilişkiyle ilgili olarak bu çalışmada bulunan sonuçlar özetlenmiştir. Deterministik çalışma, rüzgar türbinli generatörlerin sisteme katılması ile küçük işaret kararlılığının nasıl etkilendiğine dair sonuçlar vermiştir, bu sonuçlar farklı generatör tipleri açısından yorumlanmıştır. Ayrıca, olasılıksal küçük işaret kararlılığı analizlerinin probleme yaklaşmakta katkılarının nasıl olduğu açıklanmış, çalışmada kullanılan LHÖ benzetim yönteminin güç sistemleri kararlılığı analizlerinde de etkili olduğundan söz edilerek, kararlılık indeksinin yeni ve faydalı bilgiler sunmadaki başarısı açıklanmıştır.

2. ÇALIŞMAYA İLİŞKİN TEMEL KAVRAMLAR

Çalışmada ilgilenilen en temel kavramlar, güç sistemlerinin dinamiğine ilişkin kavramlardır. Bu yüzden güç sistemlerinin nasıl bir dinamik yapıya sahip olduklarından, güç sistemlerinin küçük işaret kararlılığından ve güç sistemleri salınımlarından söz etmek yararlı olacaktır. Bunun yanında çalışmada bu kavramlar, rüzgar enerjisi ile üretim birimlerinin kullanıldığı durumlar ile birlikte anılmaktadır. Bu anlamda rüzgar enerjisi ile üretim ve çalışmada incelenen rüzgar türbinli generatör çeşitleri hakkında bilgi vermek de anlamlıdır. Bunun yanında rüzgar enerjisi ile üretimin değişkenliği söz konusu olduğundan dolayı çalışmada ağırlıklı olarak olasılık temelli yöntemler kullanılmıştır. Bunun için bu bölümde olasılık kavramından ve olasılık dağılımlarını örneklemede kullanılan ve çalışmada yararlanılan benzetim yöntemlerinden de söz edilmektedir.

2.1 Güç Sistemlerinin Dinamiği

Güç sistemlerinin dinamiğini anlamak, sistemin kararlılığı hakkında da yorum yapabilmek için gereklidir. Bu çalışmada güç sistemlerinin küçük işaret kararlılığı incelenmekte ve buna ilişkin olarak gerçekleştirilen birtakım analizler açıklanmaktadır. Bu yüzden bu noktada sistemin dinamiğine ve dolayısıyla kararlılığına temel oluşturacak bazı kavramlardan söz etmek faydalı olacaktır.

2.1.1 Güç sistemlerinin dinamiğini tanımlayan denklemler

Bir güç sistemi, diferansiyel ve cebirsel birtakım denklemlerle ifade edilebilir. Bunlardan bazıları; sistemde bulunan döner elektrik makinelerinin dinamiğini tanımlayan diferansiyel denklemler, makine statoruna ait cebirsel denklemler ve güç akışı denklemleridir. Bunlara sistemde varsa denetleyiciye (kontrolöre) ait denklemler de eklenebilir. Senkron generatörler için dinamik modeller [23]'de bulunabilir. Sistemdeki güç akışını tanımlayan denklemler de [24]'de gösterilmiştir.

2.1.2 Denklemlerin doğrusallaştırılması

Söz konusu olan güç sistemleri dinamiği ve sistemin küçük işaret kararlılığı olduğu zaman, sistemin küçük değişimlere karşı nasıl tepkiler verdiği ve sisteme ait durum değişkenlerinin (bara gerilimleri, faz açıları, makinelerin rotor açıları gibi) nasıl değiştiği incelenir. Bu noktada bir kabul yapılır ve sistem bir çalışma noktası etrafında doğrusallaştırılır (lineerleştirilir). Sisteme etki eden değişimlerin küçük olduklarının bilindiği durumda doğrusallaştırma (lineerleştirme) yapıldıktan sonra güç sistemine ait bir sistem matrisi elde edilir ve matrisin özdeğerleri kullanılarak sistemin küçük işaret kararlılığı incelenebilir.

Sistemin dinamiğini oluşturan denklem sistemi aşağıdaki eşitlikteki gibi gösterilebilir.

$$\dot{x} = f(x, u) \quad (2.1)$$

Burada, x , durum değişkenlerini, u , sistemin girişlerini ve $\dot{x}$ ise durum değişkenlerinin zamana göre türevlerini göstermektedir. Bu sistem bir nokta etrafında doğrusallaştırılırsa,

$$x_0 = f(x_0, u_0) = 0 \quad (2.2)$$

eşitliği yazılabilir. $x = x_0 + \Delta x$ ve $u = u_0 + \Delta u$ eşitlikleri durum değişkenlerine ve sistemin girişlerine küçük bozucuların eklendiğini göstermektedir.

Bunlara ek olarak sisteme ait çıkışlar aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$y = g(x, u) \quad (2.3)$$

Burada y , sistemin çıkışlarını göstermektedir.

(2.3) ifadesinin Taylor serisine açılması ile gerekli sadeleştirmelerden sonra aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\Delta y_j = \frac{\partial g_j}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial x_n} \Delta x_n + \frac{\partial g_j}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial g_j}{\partial u_r} \Delta u_r$$

Bu ifade doğrusal bir ifadedir. Bu noktadan sonra (2.1) ve (2.3) eşitlikleri doğrusallaştırılmış biçimde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (2.4)$$

$$\Delta y = C\Delta x + D\Delta u \quad (2.5)$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_r} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial u_r} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial g_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial x_n} \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial u_r} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial g_m}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial u_r} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Buradaki kısmi türevler, tek bir denge noktası etrafında hesaplanan değerlerdir.

Δx , durum vektörü (n boyutlu)

Δy , çıkış vektörü (m boyutlu)

Δu , giriş vektörü (r boyutlu)

A , durum matrisi (n x n boyutlu)

B , kontrol (veya giriş) matrisi (n x n boyutlu)

C , çıkış matrisi (m x n boyutlu)

D , girişin çıkışa hangi oranda (doğrudan) yansıdığını tanımlayan ileri besleme matrisi (m x r boyutlu) olarak tanımlanabilir [25].

A sistem matrisi için aşağıdaki eşitlik yazılarak sisteme ait özdeğerler bulunabilir.

$$\det(\lambda I - A) = 0 \quad (2.8)$$

Bu eşitlikte λ 'nın alacağı değerler, A matrisinin özdeğerleri olarak bilinir ve eşitlik (2.8)'de A matrisinin karakteristik denklemdir. Burada söz edilen özdeğerler, çalışmada yapılan özdeğer analizlerinin de temelini oluşturmaktadır. Sistem matrisinin özdeğerleri dinamik sistemin küçük işaret kararlılığı hakkında önemli bilgiler vermektedir.

Matris ifadeleri elde edilen sistemin modal ayrışımı yapılırsa, zamana bağlı değişimler için aşağıdaki ifade yazılabilir.

$$\Delta x(t) = \phi_1 c_1 e^{\lambda_1 t} + \phi_2 c_2 e^{\lambda_2 t} + \dots + \phi_n c_n e^{\lambda_n t} \quad (2.9)$$

$i=1\dots n$ olduğu kabul edilirse; c_i katsayıları, $\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$ özdeğerleri, ϕ_i özvektörleri, $\Delta x(t)$ ise durum değişkenindeki sapmaların zamana bağlı değişimlerini göstermektedir. Buradan yol çıkarak şu çıkarımda bulunulabilir: sistemin küçük işaret kararlılığını sağlaması için bütün özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin sıfırdan küçük olması gerekir. Eğer bir tane özdeğerin bile gerçel bileşeni sıfırdan büyükse bu, durum değişkenindeki sapmanın zamana bağlı olarak artacağı anlamına gelir, ki bu da sistemin kararsız olması demektir.

Böylece, herhangi bir doğrusal olmayan (nonlinear) yapıdaki güç sistemi; makine, denetleyici (kontrolör) ve şebeke denklemleri ile modellendikten, sisteme ait denklemler doğrusallaştırıldıktan ve sistem matrisinin özdeğerleri hesaplandıktan sonra sistemin küçük işaret kararlılığı hakkında yorum yapmak olanak olmaktadır. Tüm özdeğerlerin gerçel bileşenleri sıfırdan küçükse çalışma noktası asimptotik kararlıdır.

2.1.3 Güç sistemleri salınımları

Güç sistemlerinde karşılaşılan problemlerden biri de sistem salınımlarıdır. Enerji iletiminde zayıf bağlanmış üretim-tüketim bölgeleri varsa veya uzak mesafelere büyük güç aktarımı söz konusuysa, güç sistemi salınımları gözlenebilmektedir. Elektromekanik salınımlar olarak da adlandırılabilen bu salınımların sönümlenmesi önemli bir konudur.

Eşitlik (2.9)'de görülen her bir terimin sisteme ait bir modu tanımladığı söylenebilir. Her bir karmaşık (kompleks) özdeğer çifti, bir modla ilişkilidir. Salınım modu ile ilişkili olan özdeğer $\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$ 'nın salınım modunun sönüm oranı

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (2.10)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu sönümün pozitif olması kadar, yeterli düzeyde olması da sistemin güvenli işletilmesi açısından önemlidir.

2.2 Rüzgar Enerjisi ile Üretim

Günümüzde artık elektrik üretiminin daha yüksek oranlarda rüzgar enerjisi ile yapıldığı bilinmektedir. Bu durum güç sistemlerine rüzgar enerjisi ile üretim birimleri eklendiği zaman sistemin kararlılığının hangi yönde değişeceği sorusunu akla getirmektedir. Bu soruyu cevaplamak üzere inceleme yapılırsa, sisteme rüzgar enerjisi ile üretimin katılmasının iki temel değişimi beraberinde getirdiği görülmektedir. Bunlardan biri makine (generatör) tipinin, diğeri ise üretim profilinin değişmesidir.

2.2.1 Kullanılan rüzgar türbinli generatör tipleri

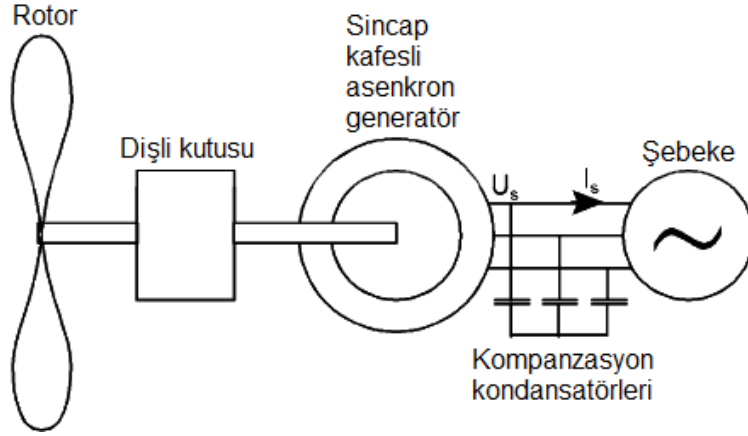
Bugün güç sistemlerinde kullanılan birkaç farklı rüzgar türbinli generatör tipi vardır. Bu generatörlerin klasik senkron generatörlerden gösterdikleri farklılıklar, sistemin dinamiğine de etki etmektedir. Örneğin çift beslemeli asenkron generatörler (ÇBAG) sisteme katıldıklarında bir dönüştürücü (converter) üzerinden sisteme eklenmektedirler. Bu da sistemin doğrudan elektromekanik unsurları görmemesi ve bunlara ilişkin modların da ortadan kalkması anlamında gelmektedir. Fakat bu, rüzgar enerjisi ile üretimin eklendiği her durumda sistem salınımlarının daha iyi sönümlenmesi anlamına gelmemektedir. Çünkü söz edilen sistemin topolojisi ve rüzgar türbinli generatörün sisteme eklendiği konum da kararlılık için önemlidir.

Bu çalışmada iki farklı generatör tipi kullanılmıştır. Bunlardan biri sincap kafesli asenkron generatör (SKAG), diğeri ise çift beslemeli asenkron generatördür (ÇBAG).

2.2.1.1 SKAG tipi rüzgar türbinli generatörler

Sincap Kafesli Asenkron Generatörler (SKAG), sabit hızlı rüzgar türbinli generatörlerdendir. Yapısı Şekil 2.1'deki gibidir.

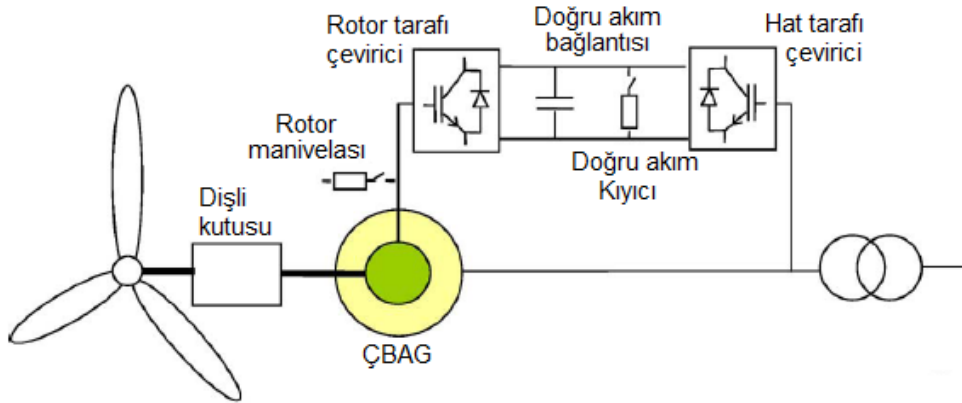
SKAG tipi generatörler doğrudan şebekeye bağlanır. Rüzgar türbini rotoru generatöre bir dişli kutusu üzerinden bağlıdır. Çoğu çeşidinde, rüzgardan elde edilen güç miktarı hız kaybettirilerek sınırlanır. Bu şu anlama gelir: rotor tasarımı yüksek rüzgar hızlarında verimi düşecek şekilde tasarlanmıştır, bu yüzden yüksek rüzgar hızlarından korunması gerekir. [8]. Çalışmada kullanılan dinamik SKAG modeli için [26]'ya bakılabilir.



Şekil 2.1 : Sincap kafesli asenkron generatörün (SKAG) yapısı ([8]'den uyarlanmıştır).

2.2.1.2 ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatörler

Çift Beslemeli Asenkron Generatörler (ÇBAG), değişken hızlı rüzgar türbinli generatörlerdendir. Yapısı Şekil 2.2'deki gibidir.



Şekil 2.2 : Çift beslemeli asenkron generatörün (ÇBAG) yapısı ([27]'den uyarlanmıştır).

ÇBAG tipi generatörler, şebekeye doğrudan bağlı değildir, güç elektroniği elemanları üzerinden sisteme bağlanırlar. Bu da kontrol esnekliği sağlamaktadır. Fakat güç elektroniği elemanları kullanıldığı zaman, sistem harmonikleri de göz önünde bulundurulmalıdır [28]. Güç sistemleri salınımları açısından bakıldığında zaman, generatör şebekeye doğrudan bağlı olmadığından dolayı elektromekanik modların da kaybolduğu söylenebilir. Çalışmada kullanılan dinamik ÇBAG modeli için [26]'ya bakılabilir.

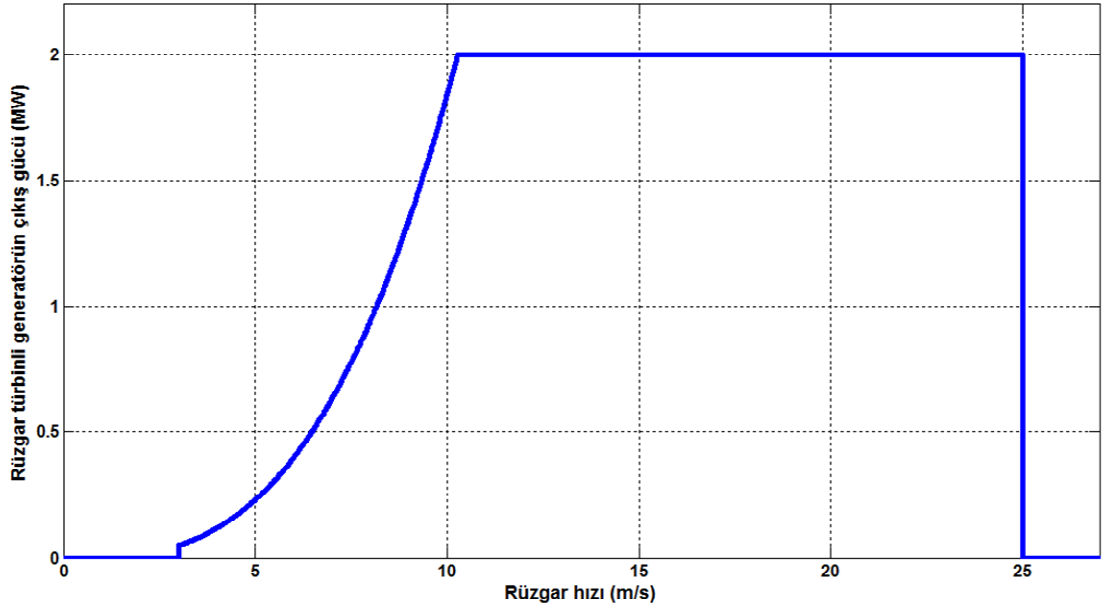
2.2.2 Rüzgar enerjisi ile elektrik üretiminin özellikleri

Rüzgar enerjisi ile üretim yapıldığı zaman üretim miktarı o anda esen rüzgarın hızına bağlıdır. Rüzgar hızı değişken olduğundan dolayı üretilen elektrik enerjisi miktarı da değişkendir ki, üretim miktarının öngörülebilir olmaması da ayrıca bir dezavantajdır.

Değişik rüzgar hızlarında, rüzgar hızı ile rüzgar türbininin mekanik gücü arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir [14].

$$P_m = \begin{cases} 0 & V_r \leq V_{alt-kesme} \\ 0.5 \cdot \rho \cdot A_{rt} \cdot C_p(\beta, \theta) \cdot V_r^3 & V_{alt-kesme} < V_r \leq V_{anma} \\ P_r & V_{anma} < V_r < V_{üst-kesme} \\ 0 & V_r \geq V_{üst-kesme} \end{cases} \quad (2.11)$$

Buna göre rüzgarın hızı ile bir rüzgar türbinli generatörün elektriksel çıkış gücü arasındaki ilişki Şekil 2.3'deki gibi olur.



Şekil 2.3 : Rüzgarın hızı ile örnek bir rüzgar türbinli generatörün elektriksel çıkış gücü arasındaki ilişki.

2.3 Güç Sistemlerinde Olasılık Yaklaşımı

Bir güç sistemi her zaman aynı çalışma koşullarında kalmaz, az veya çok bir değişim içindedir. Böylesi bir sistemin bundan sonra hangi çalışma noktasına geleceğine dair soru, sistemin küçük işaret kararlılığını belirlemede önemlidir.

Sistemin olasılık kuramı aracılığıyla incelenmesini gerekli kılan unsurlar genelde üretime ve/veya tüketime dair belirsizliklerdir.

Bu çalışmada rüzgar hızı ve elektrik tüketimi miktarları, olasılık kuramının sunduğu kavram ve araçlar vasıtasıyla incelendi. Özellikle öne çıkan kavramlar olasılık dağılımı ve olasılık yoğunluk fonksiyonu kavramlarıdır.

2.3.1 Olasılık dağılımları

Bir değişkenin hangi değerleri alma olasılığına sahip olduğu, o değişimin karakterini ifade eden olasılık dağılımları ile gösterilebilir. Buna göre bir değişkenin gerçekleşmesine dair istatistiksel bir bakış elde edilebilir ve aynı zamanda var olan bir istatistik yapı, tanımlı herhangi bir dağılıma benzetilerek çalışma yapılabilir.

Yaygın kullanıma sahip olasılık dağılımlarından biri Normal dağılım bir başka deyişle Gauss dağılımıdır. Bu dağılımı tanımlayan iki önemli parametre: ortalama değer ve varyans olarak tanımlanmıştır.

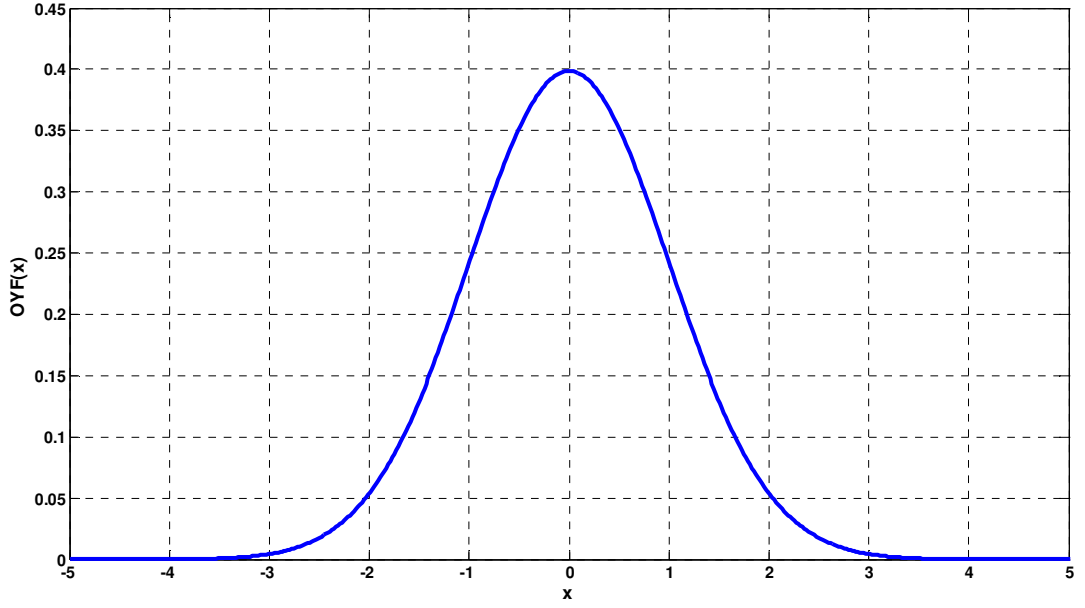
2.3.2 Olasılık yoğunluk fonksiyonu

Olasılık dağılımlarını tanımlamada en sık başvuru yollarından biri "olasılık yoğunluk fonksiyon"larını kullanmaktır. OYF, herhangi bir dağılıma sahip değişkenin hangi olasılıkla gerçekleşeceğine dair ipuçları edinilmesini sağlar.

Yaygın kullanıma sahip olan Normal dağılımına ait OYF aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$y = f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.12)$$

Burada; x Normal dağılıma sahip olan değişken, μ , ortalama (veya beklenen) değer, σ^2 ise varyanstır. Normal dağılıma sahip bir değişkenin OYF grafiği Şekil 2.4'deki gibidir. Bu çalışmada elektriksel tüketimin değişkenliği göz önünde bulundurulmak istendiği zaman elektrik tüketim miktarının belli bir ortalama ve standart sapma değerinde bir "Normal dağılım"a sahip olduğu kabul edilmiş ve analizler bu şekilde yapılmıştır. Çalışmanın kritik noktalarından birini, rüzgar türbinli generatörlerin çıkış güçlerinin değişkenliği oluşturmaktadır. Buradaki değişkenliğin kaynağı rüzgar hızındaki değişkenliklerdir, ki çalışmada rüzgar hızının Weibull dağılımına sahip olduğu kabul edilmiştir.

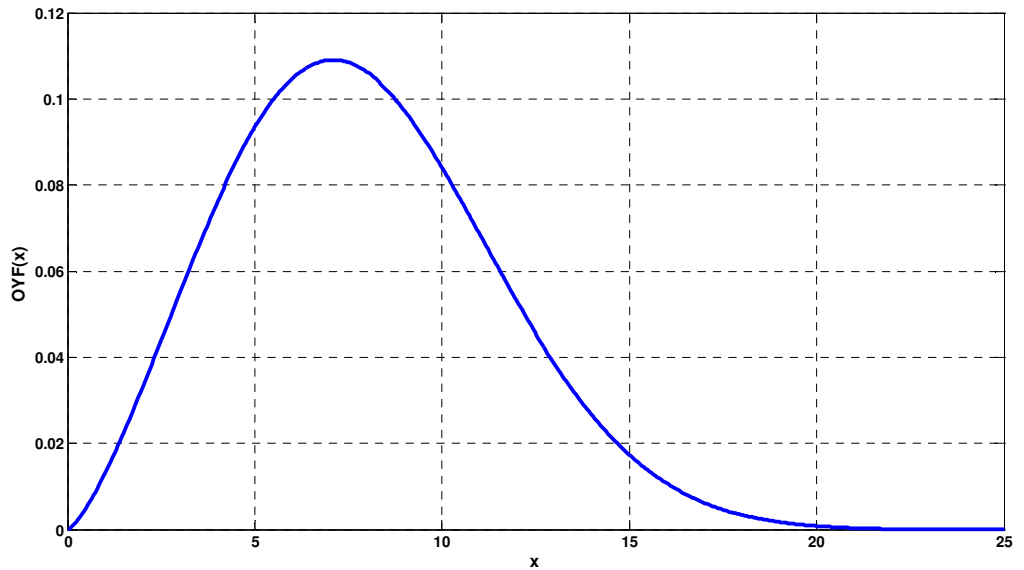


Şekil 2.4 : Normal dağılıma sahip bir x değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu (Ortalama değer : $\mu = 0$, varyans : $\sigma^2 = 1$).

Weibull dağılımı için OYF aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$y = f(x) = ba^{-b} x^{b-1} e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b} \quad (2.13)$$

Weibull dağılımına sahip bir büyüklüğü (x) tanımlarken kullanılan iki temel parametre: ölçü parametresi (a) ve biçim parametresidir (b). Weibull dağılımına sahip bir değişkenin OYF grafiği Şekil 2.5'deki gibidir.



Şekil 2.5 : Weibull dağılımına sahip bir x değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonu (Ölçü parametresi : $a=8,9142$, biçim parametresi : $b=2,3808$).

2.3.3 Olasılık benzetim yöntemleri

İster Normal dağılıma ister Weibull dağılımına sahip olsun, herhangi bir değişkenin sayısal olarak örneklenebilmesi için bu dağılıma ait OYF'ye ihtiyaç vardır. Herhangi bir OYF'nun sayısal olarak örneklenebilmesi için örnekleme yöntemleri kullanılır.

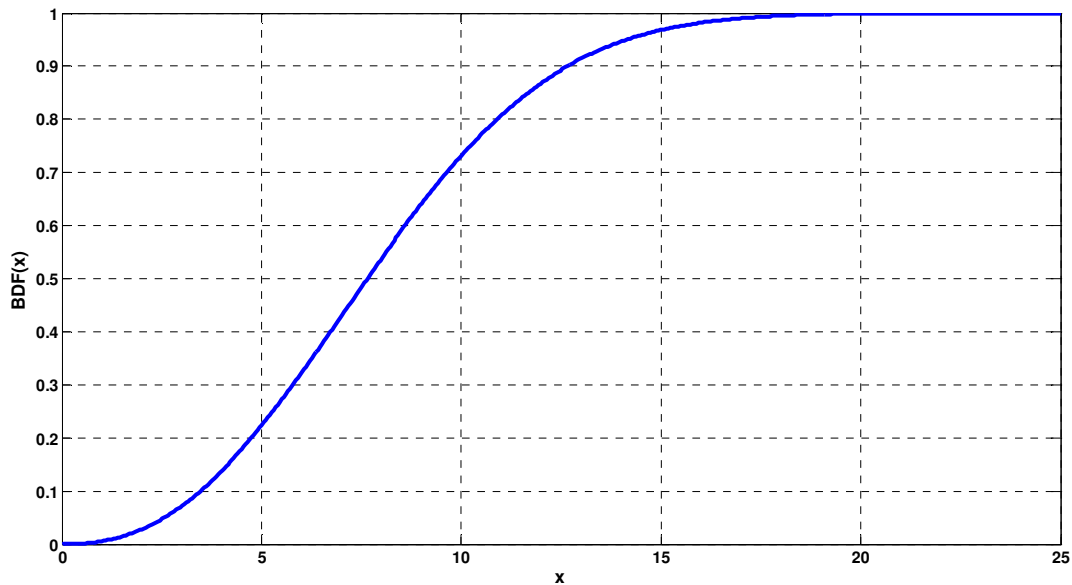
Şimdiye kadar yaygın kullanıma sahip örnekleme yöntemlerinden birisi Monte Carlo örnekleme yöntemidir. Bunun yanında Latin Hiperküp Örneklemesi yöntemi de kullanılabilmektedir. Bu çalışmada her iki yöntem de kullanılmış ve örnekleme başarımları açısından karşılaştırmaları yapılmıştır.

2.3.3.1 Monte Carlo (MC) yöntemi

MC yöntemi rastgele örneklemelerle uygun olasılık yaklaşımı bulmayı sağlayan bir yöntemdir. MC yöntemi ile bir OYF'nu tanımlamak mümkündür.

MC yöntemi ile herhangi bir dağılımın OYF'na ait örneklemeler yapabilmek için bu dağılıma ait birikimli dağılım fonksiyonuna (BDF) ihtiyaç vardır. BDF fonksiyonu, herhangi bir değişken için tanımlı OYF kullanılarak hesaplanabilir ve değişkenden küçük veya değişkene eşit olma olasılığını gösterir. 0 ile 1 arasında bir değer alır.

Örneğin, Weibull dağılımına sahip bir değişkene ait BDF Şekil 2.6'daki gibidir.



Şekil 2.6 : Weibull dağılımına sahip bir x değişkeninin birikimli dağılım fonksiyonu (Ölçü parametresi - $a=8,9142$, biçim parametresi - $b=2,3808$).

Weibull dağılımına sahip bir değişkeni MC yöntemiyle örnekleyebilmek için ilk olarak 0 ile 1 arasında tekdüze dağılıma sahip istenen sayıda sayı üretilir. Arkasından bu sayıların istenen bir olasılık dağılımına ait BDF'nun tersindeki değerleri hesaplanır [29].

$$x = BDF_x^{-1}(u) \quad (2.14)$$

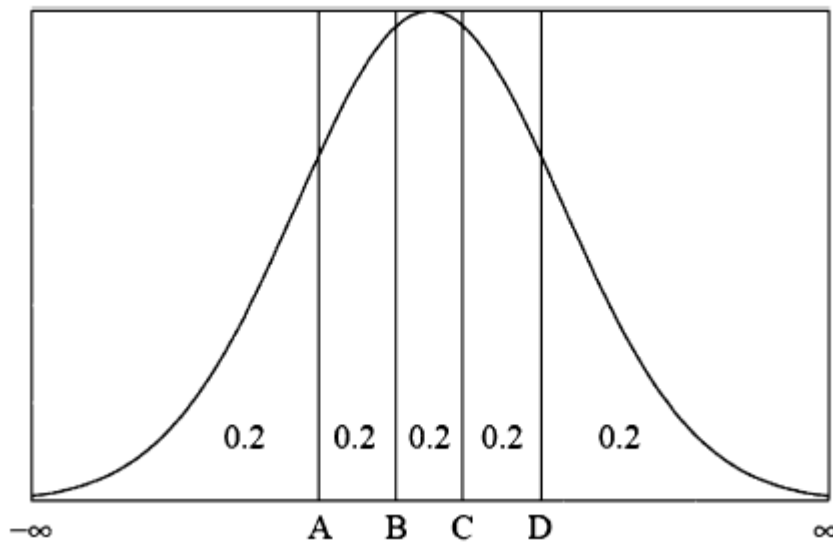
Burada u; tekdüze dağılıma sahip, 0 ile 1 arasında bir sayı; x ise uygun olasılık dağılımına sahip, istenen sayıda rastgele sayıdır.

MC yöntemiyle uygun BDF ile istenen dağılıma ait örneklemeler üretilebilmektedir. Ama MC yönteminin rastsal bağımlılığı çok fazla olduğundan, gerçekçi sonuçlar alabilmek için çok sayıda örnekleme yapmak gerekmektedir.

2.3.3.2 Latin Hiperküüp Örnekleme (LHÖ) yöntemi

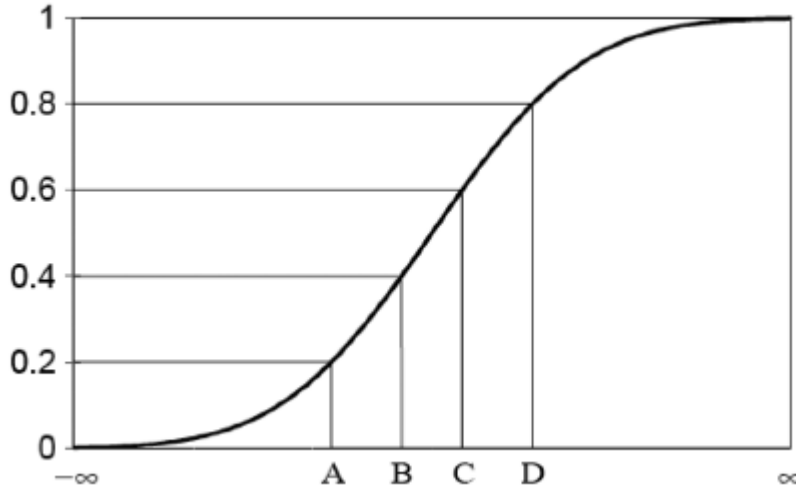
LHÖ yöntemi de bilinen bir olasılık dağılımı ve ona ait OYF için örneklemeler alınabilmesini sağlayan bir yöntemdir. MC yöntemiyle benzerlikler taşısa da yöntemin MC yönteminden belirgin bir farkı gerçekçi sonuçlara daha az örnekleme ile ulaşılabilmesidir.

Yöntem ile bir olasılık dağılımına uygun rastgele sayılar üretebilmek için öncelikle dağılıma ait OYF, örnekleme sayısı kadar eşit alanlı parçalara bölünür (Şekil 2.7). Örneklemeler esnasında bu parçalardan biri rastgele olarak seçilir ve bir kere seçilen parça bir daha seçilmez.



Şekil 2.7 : Normal dağılıma sahip bir x değişkeninin LHÖ yöntemi uygulanırken eşit alanlı parçalara ayrılması.(Şekilde örnekleme, yani parça sayısı 5'tir) [18].

Hangi parça seçilmişse bunun içinden bir de nokta seçilmesi gerekir. Bu da rastgele olarak gerçekleştirilir. Bunun için yine BDF'nun tersinde işlem yapılır (şekil 2.8). Tekdüze dağılma sahip ve seçilen parçanın sınırları aralığında üretilen sayı, BDF'nun tersinde yerine konur ve böylece rastgele seçilen parçanın içinden rastgele bir değer bulunmuş olur.



şekil 2.8. Normal dağılma sahip bir x değişkenine ait BDF ve LH yöntemi ile oluşturulan eşit alanlı parçalar [18].

LH yöntemiyle daha az rneklemeye ihtiyaç duyulmasının nedeni OYF'nun öncelikle eşit alanlı parçalara ayrılması, her parçasının mutlaka ve yalnız bir defa kullanılmasıdır. OYF rnekleme yapılrken örnekleme sayısını düşürmesi açısından MC yöntemine göre daha avantajlı olduğu görülmektedir. Ayrıca bu çalışmanın içinde, iki yöntemi karşılaştırmak için çeşitli analizler de yapılmıştır.

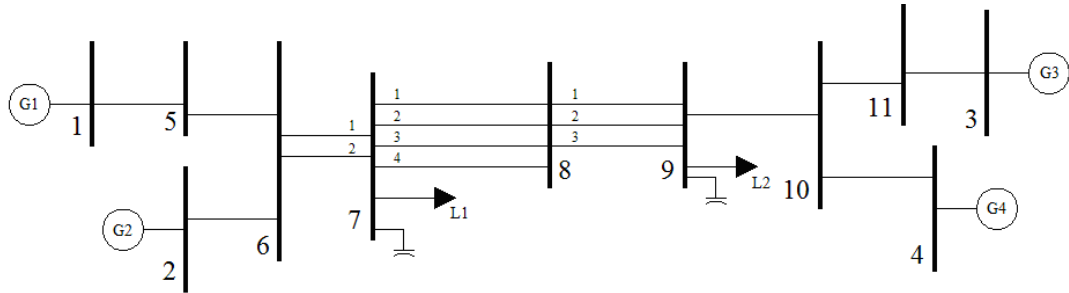
3. RÜZGAR ENERJİSİ KATILAN SİSTEMLER İÇİN DETERMİNİSTİK KÜÇÜK İŞARET KARARLILIĞI ANALİZLERİ

Küçük işaret kararlılığı analizlerinin ilk ayağı olarak, bir test sistemi ele alınmış ve özdeğer analizleri uygulanmıştır.

Sistemde hem senkron generatörler varken hem de çeşitli generatör birimleri rüzgar türbinli olanlarıyla değiştirildiği durumlarda analizler yapılarak sistemin kararlılığının ne yönde değiştiği anlaşılmaya çalışılmıştır. Bu esnada ne toplam üretimde ne de tüketimde herhangi bir değişim söz konusu değildir ve sisteme rüzgar türbinli generatörlerin eklenmesini incelemenin en önemli çıkarımı makine modeli için yapılmış olacaktır; çünkü rüzgar hızının ve dolayısıyla rüzgar gücünün veya elektriksel tüketimin değişkenliği göz önüne alınmadığından dolayı burada önemli olan şebekeye bağlanan, yani şebekenin gördüğü generatörün dinamik karakteridir.

Bu çalışmada rüzgar türbinli generatörün hem SKAG hem de ÇBAG olduğu durumlar incelenmiş ve çeşitli özdeğer analizleri yapılarak sistemin küçük işaret kararlılığı hakkında çeşitli çıkarımlarda bulunulmuştur.

Çalışılan test sistemi Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



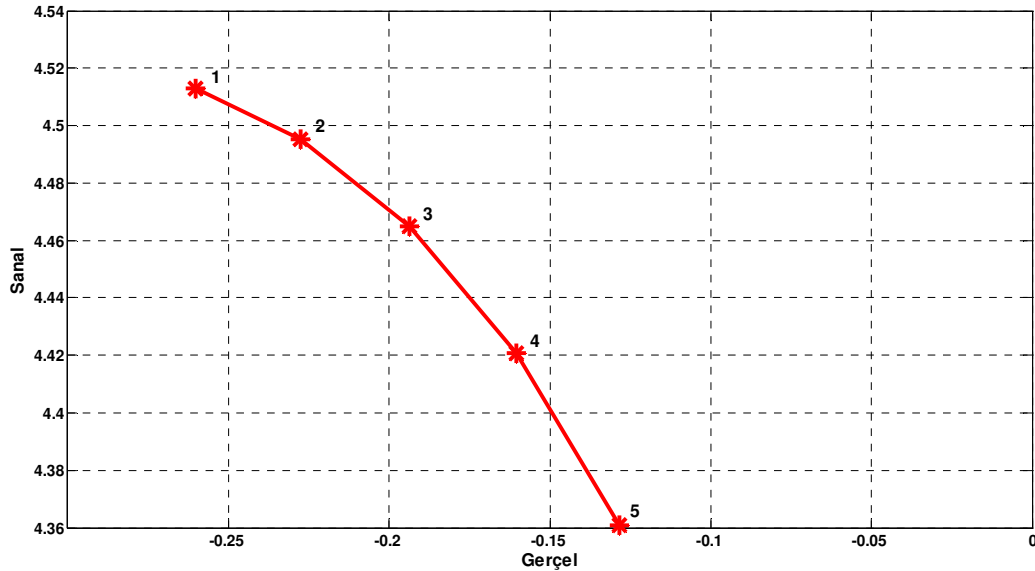
Şekil 3.1 : İki bölge, dört generatörlü test sistemi [26].

Test sistemine ait güç değerleri Çizelge 3.1'deki gibidir. Sistemdeki senkron generatörlerde güç sistemleri kararlı kılıcı düzenekleri mevcuttur ve analizlerde senkron generatörlerin uyarım modelleri de göz önünde bulundurulmaktadır. Sistem ve bileşenlerine ait model ve parametrelerin ayrıntıları Ek A'da verilmiştir.

Çizelge 3.1 : İki bölge, dört generatörlü test sistemine ait üretim ve tüketim değerleri.

	G1	G2	G3	G4	L1	L2
Durum	(MW)	(MW)	(MW)	(MW)	(MW)	(MW)
1	281,14	967	719	700	967	1650
2	335,43	967	719	700	967	1700
3	390,66	967	719	700	967	1750
4	446,81	967	719	700	967	1800
5	504,11	967	719	700	967	1850

Öncelikle sisteme henüz herhangi bir rüzgar türbinli generatör eklenmediği durumda özdeğer analizleri yapılmıştır. Senaryoda L2'nin beş farklı yüklenme durumu söz konusudur (Çizelge 3.1). Bu beş farklı yüklenme durumu için bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerler düzlemde, Şekil 3.2'deki gibi konumlanmıştır.



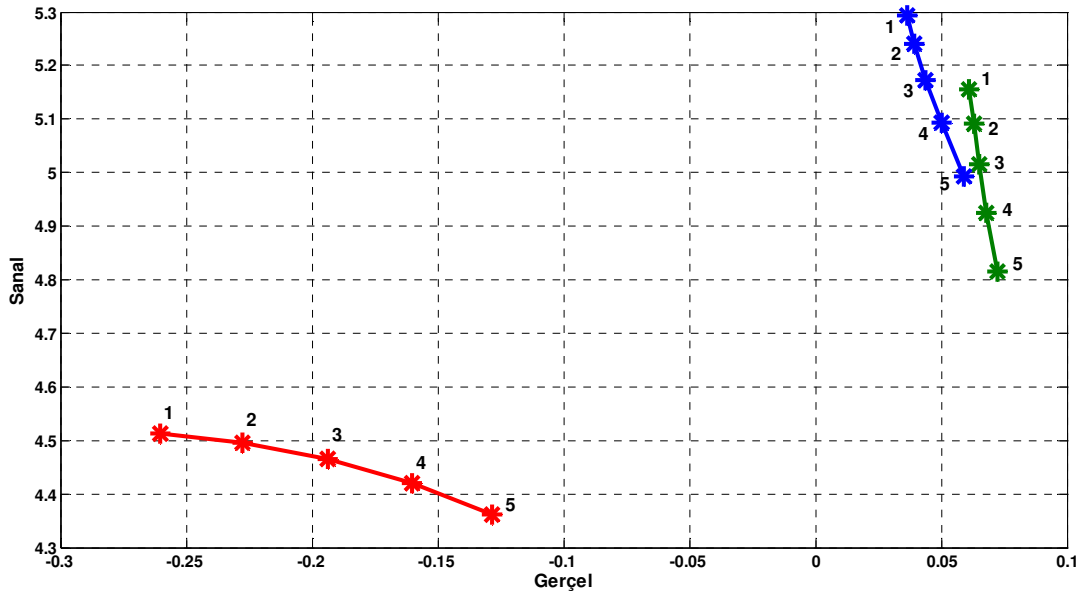
Şekil 3.2 : Tüm generatörler senkron generatörken bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin beş farklı yüklenme durumunda konumları.

3.1 G1'in Rüzgar Türbinli Generatörler ile Değiştirilmesi

Aynı senaryo; sistemin salınım barasına (slack bus) bağlı olan senkron generatörün (G1), aynı üretim gücündeki bir rüzgar türbinli generatörle değiştirildiği durum için

tekrarlanmıştır. Bu sefer, kademeli olarak arttırılan yük talebini bir rüzgar türbinli generatör karşılayacaktır. Dolayısıyla bir önceki durumla aynı miktarda gerçekleşecek olan güç akışı artışının bu kez bir rüzgar türbinli generatör tarafından sağlanıyor olmasının, sistemin bölgeler arası salınım moduna (inter-area mode) hangi yönde etki edeceği anlaşılmaya çalışılmıştır. Böylece rüzgar enerjisi ile üretim yapılmasının bu modu hangi yönde etkileyeceği konusunda da bir fikir üretme şansı oluşmuştur.

Yük artışı, yine Şekil 3.1'deki sistemde yalnızca L2 için gerçekleştirildi ve artışın beş adımdaki etkileri hem SKAG hem de ÇBAG tipi generatörler için gözlendi. Buna göre özdeğerlerin değişimi, Şekil 3.3'teki gibi gerçekleşmiştir. Her iki rüzgar türbinli generatör tipinin birbirleriyle ve senkron generatörle karşılaştırılması amacıyla her üç duruma ilişkin sonuçlar da aynı grafik üzerinde gösterilmiştir.



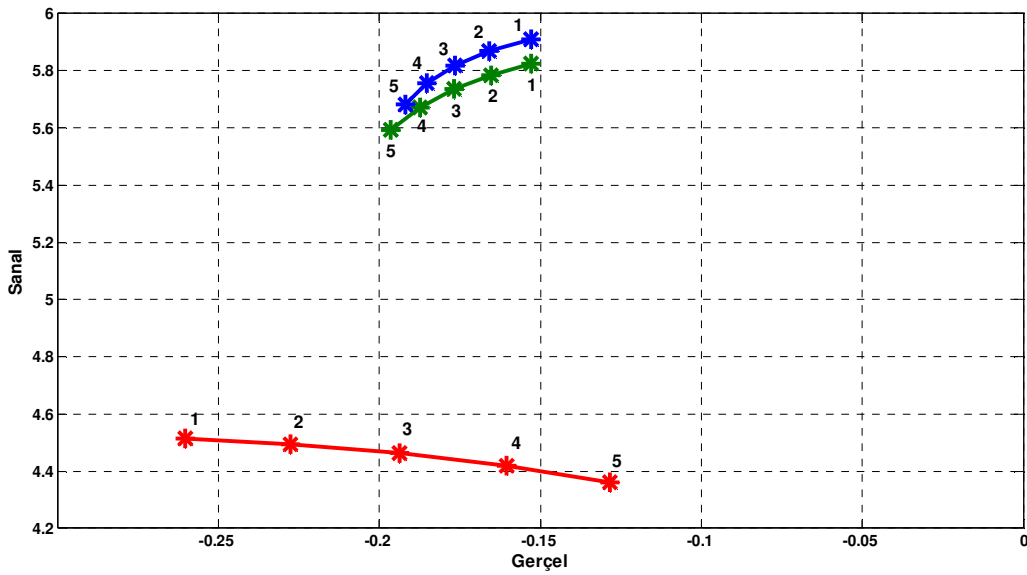
Şekil 3.3 : İlk durumda ve yalnız G1 SKAG (veya ÇBAG) olduğu zaman salınım moduna ilişkin özdeğerlerin konumları (SKAG: yeşil, ÇBAG: mavi).

Her iki durumda da bölgeler arası güç akışındaki artış miktarı aynıdır ve buna karşılık her iki durumda da kararsızlık eğilimi meydana gelmiş ve özdeğerler sağ yarı-düzleme doğru hareket etmişlerdir. Fakat G1 generatörü SKAG veya ÇBAG olduğu zaman, her yüklenme durumunda sistem kararsızdır. G1 generatörü ÇBAG olduğu durumda özdeğerler düzlemde daha sol taraftadır, bu SKAG tipi generatöre göre bir avantaj olsa da, her ikisinin de kararsızlığı meydana getirmiş olması, bu avantajı sistem için anlamsız kılmaktadır, denebilir.

Gelinen nokta, rüzgar türbinli generatörlerin sistemin küçük işaret kararlılığına etkileri açısından olumsuz bir sonuçtur. Bu sistemde ve bu senaryoda G1'in rüzgar türbinli generatör olarak tercih edilmemesi gerektiği sonucuna ulaşılabilir.

3.2 G1 ve G3'ün Rüzgar Türbinli Generatörler ile Değiştirilmesi

Aynı test sisteminde; G1 ile G3 SKAG veya ÇBAG, G2 ile G4 de senkron generatör olduğu zaman L2 için beş ayrı yüklenme koşulu oluşturulmuş ve aynı güç akışları üretilmiştir. Bu durumda G1'in üretim değeri L2'nin farklı yüklenmelerinde değişmektedir ve 281,14 MW'tan 504,11 MW değerine kadar değişmektedir. G3'ün üretim miktarı ise farklı yüklenmeler esnasında aynı kalmaktadır ve değeri 719 MW'tır. Bu durumda bölgeler arası salınım modu (inter-area mode) izlenirse, ilişkili olan özdeğerlerin düzlemde konumları şekil 3.4'teki gibi olur.



Şekil 3.4 : İlk durumda ve G1 ile G3 SKAG (veya ÇBAG) olduğu zaman salınım moduna ilişkin özdeğerlerin konumları (SKAG: yeşil, ÇBAG: mavi).

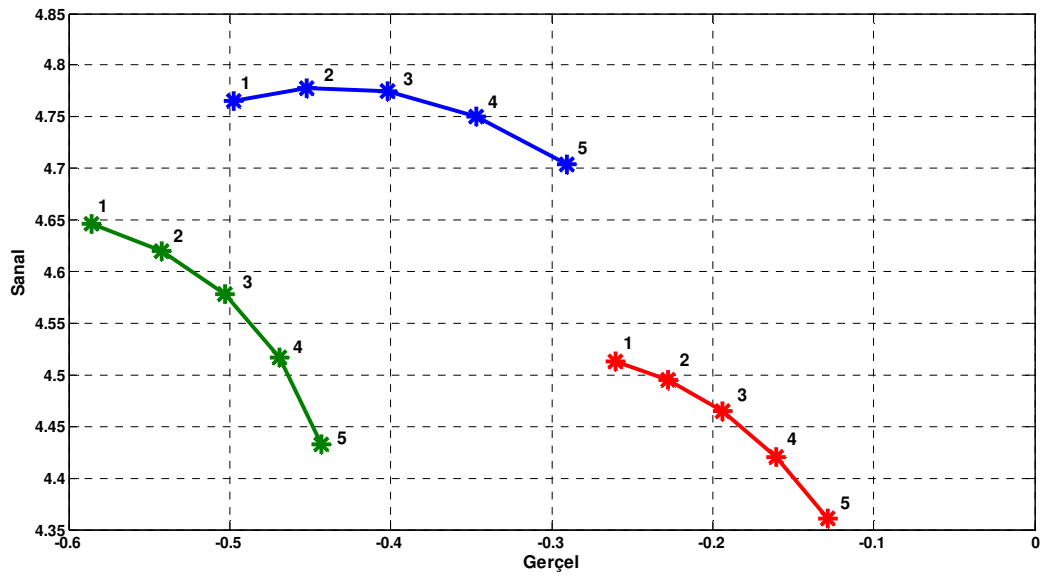
Grafikte belirgin bir şekilde görülen şey şudur: yük artışı ile birlikte tüm generatörler senkron generatör olduğu durumda özdeğerler düzlemde sağa gitmekte iken, G1 ve G3 SKAG veya ÇBAG olduğu durumda özdeğerler sola gitmektedir. Yani eğer G1 ve G3 generatörleri rüzgar türbinli generatörler olursa yük artışı ile birlikte sistemin küçük işaret kararlılığı önceki durumdan daha iyi yönde değişmektedir. İlk üç yüklenme durumunda bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerin gerçel bileşeni rüzgar üretimi olduğu durumda daha sağda iken, dördüncü ve beşinci yüklenme

durumlarında daha soldadır. Yükleme durumuna göre rüzgar-senkronun kararlılık başarımları değişmektedir. Sonuçlarda SKAG ve ÇBAG tipleri açısından büyük farklılık yoktur.

3.3 G2'nin Rüzgar Türbinli Generatörler ile Değiştirilmesi

Bu kez yalnızca G2 generatörünün SKAG veya ÇBAG tipi bir rüzgar türbinli generatör olduğu ve diğer generatörlerin senkron generatör olduğu durum göz önüne alınmıştır. G2 generatörü bir generatör barasına bağlı durumdadır ve üretim değeri, L2'nin farklı yüklenme değerlerinden etkilenmemektedir, sürekli 967 MW değerindedir.

Bu durumda bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin, L2'nin farklı yüklenmeleri esnasında düzlemde aldıkları konumlar, Şekil 3.5'teki gibi olmuştur.



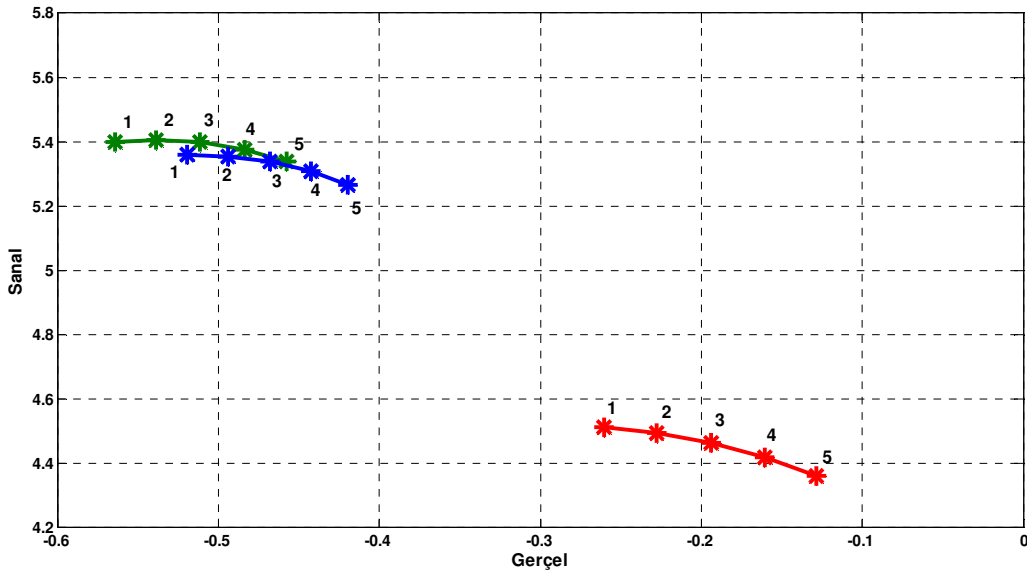
Şekil 3.5 : İlk durumda ve yalnız G2 SKAG (veya ÇBAG) olduğu zaman salınım moduna ilişkin özdeğerlerin konumları (SKAG: yeşil, ÇBAG: mavi).

G2 bir SKAG veya ÇBAG ile değiştirildiği zaman her yüklenme durumunda sistemin küçük işaret kararlılığı profili ilk durumdakinden daha iyidir. Genel olarak bu senaryo sistemin kararlılığı açısından daha olumludur. Özel olarak, özdeğerlerin konumu incelendiğinde, SKAG tipi generatörün de her durumda ÇBAG tipi generatörden daha iyi kararlılık sonucu meydana getirdiği görülmektedir. Olumludan olumsuza doğru kararlılık başarımları sırasıyla SKAG, ÇBAG ve senkron

generatördür. Yüklenme ile kararlılığın değişimi incelendiğinde ise her üç durumda da yüklenme arttıkça sistemin kararsızlığa biraz daha yaklaştığı görülmektedir.

3.4 G3'ün Rüzgar Türbinli Generatörler ile Değiştirilmesi

Bu kez G3 generatörü bir SKAG veya ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatörle değiştirilmiştir. G3 birimi de bir generatör barasına bağlıdır ve değeri L2'nin farklı yüklenmelerinde değişmemekte ve hep 719 MW'ta sabit kalmaktadır. Bu durumda yine aynı güç akışı senaryoları oluşturulmuştur ve bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin düzlemde konumları Şekil 3.6'daki gibi gerçekleşmiştir.



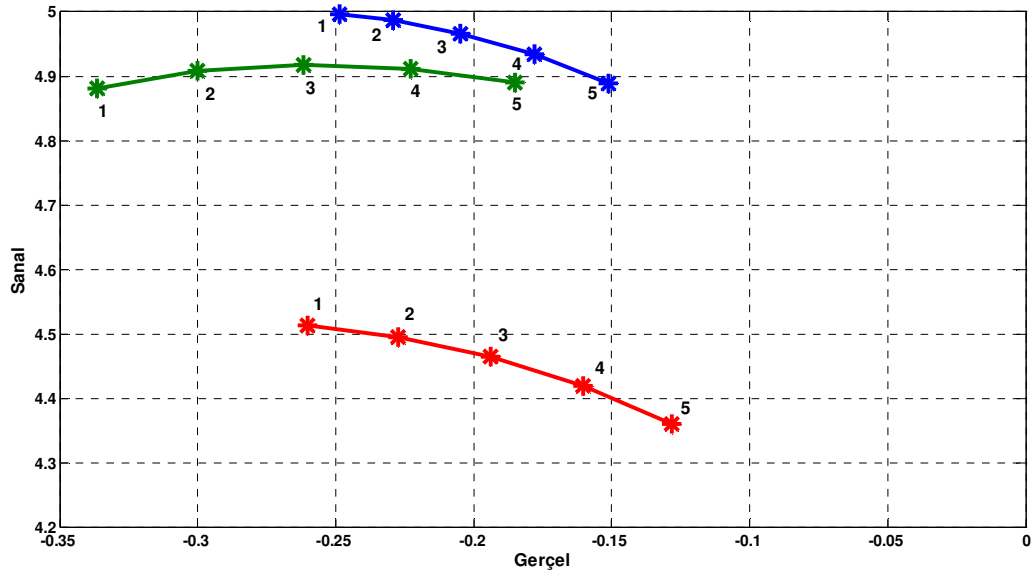
Şekil 3.6 : İlk durumda ve yalnız G3 SKAG (veya ÇBAG) olduğu zaman salınım moduna ilişkin özdeğerlerin konumları (SKAG: yeşil, ÇBAG: mavi).

G3 SKAG veya ÇBAG olduğu zaman da yine her yüklenme durumunda sistemin küçük işaret kararlılığı ilk durumdakinden daha iyidir. Bu senaryo da, rüzgar enerjisi ile üretimin küçük işaret kararlılığına etkisi açısından olumlu sonuçlanmıştır. Sonuçlarda SKAG ve ÇBAG için büyük farklılık görülmemektedir.

3.5 G4'ün Rüzgar Türbinli Generatörler ile Değiştirilmesi

Bu kez de G4 generatörü SKAG veya ÇBAG tipi bir rüzgar türbinli generatör olarak yerleştirilmiş ve yine aynı güç akışı senaryoları oluşturulmuştur. G4 de bir generatör barasına bağlıdır ve L2'nin farklı yüklenmeleri boyunca sabit kalmaktadır; üretim değeri her durumda 700 MW'tır.

Bu durumda, ilgilenilen bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin düzlemde konumları Şekil 3.7'deki gibi olmuştur.



Şekil 3.7 : İlk durumda ve yalnız G4 SKAG (veya ÇBAG) olduğu zaman salınım moduna ilişkin özdeğerlerin konumları (SKAG: yeşil, ÇBAG: mavi).

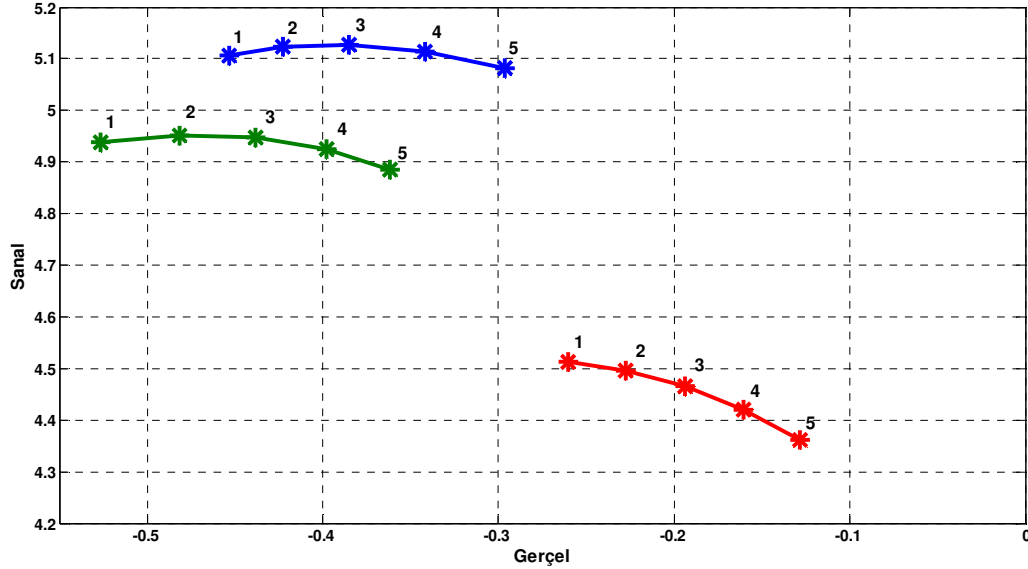
G4 SKAG olduğu zaman yine her beş yüklenme durumunda sistemin küçük işaret kararlılığı ilk durumdakinden daha iyi olmuştur. Yalnız, yüklenmenin artışı ile birlikte bu durumda özdeğerlerin sağ yarı düzleme doğru hareketi ilk durumdakinden daha hızlıdır. Bu da kararlılık açısından belki bir dezavantaj olarak değerlendirilebilir. G4 ÇBAG olduğu zaman ise özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin düzlemde konumları hemen hemen ilk durumdakiyle aynıdır, bu anlamda ÇBAG için ilk durumdakine oranla - iyi veya kötü yönde - çok büyük bir değişim görülmemektedir. Bu senaryoda; SKAG tipi generatörün hem ÇBAG tipi hem de senkron generatör kullanılmasına göre, sistemin küçük işaret kararlılığı açısından daha olumlu olduğu söylenebilir. G4'ü ÇBAG olarak kullanmak ise sistemde çok fazla değişiklik meydana getirmemiştir.

3.6 G2 ve G4'ün Rüzgar Türbinli Generatörler ile Değiştirilmesi

Bu kez de senaryodaki değişiklik, yüklenmeler boyunca güç üretimleri sabit kalan (generatör baralarına bağlı konumdaki) G2 ve G4 üretim birimlerinin bir SKAG veya ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatör olarak alınmasıyla gerçekleştirilmiştir. Tüm

yüklenme koşullarında G2'nin üretim miktarı 967 MW, G4'ünki 700 MW'tır. G2'nin üretim miktarı L1 yükünü tam olarak karşılıyor gibi görünmektedir.

Bu durumda bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin konumları, L2'nin beş farklı yüklenme değeri için Şekil 3.8'deki gibi gerçekleşmektedir.



Şekil 3.8 : İlk durumda ve G2 ile G4 SKAG (veya ÇBAG) olduğu zaman salınım moduna ilişkin özdeğerlerin konumları (SKAG: yeşil, ÇBAG: mavi).

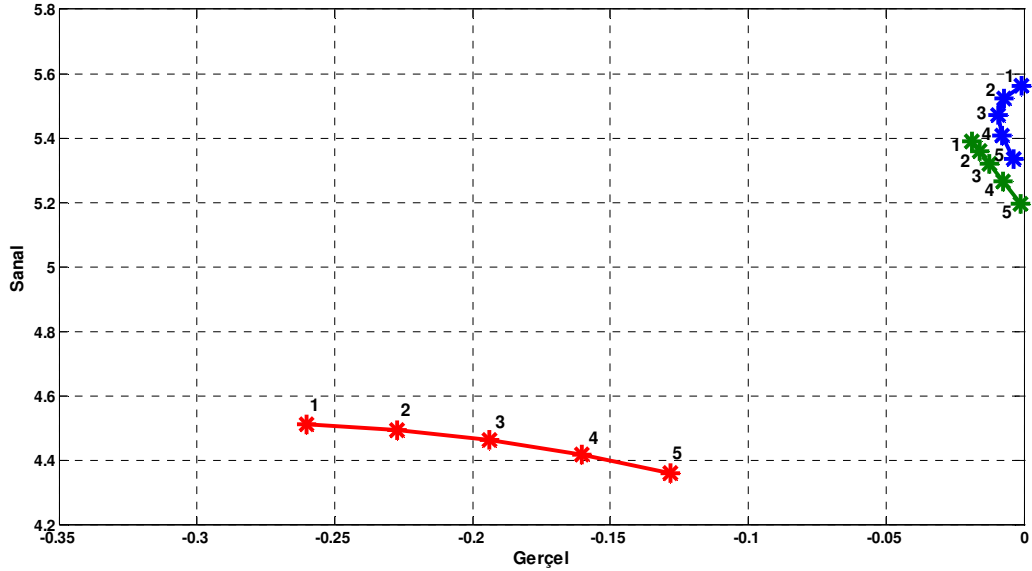
G2 ve G4 SKAG veya ÇBAG olduğu zaman yine her yüklenme durumunda sistemin küçük işaret kararlılığı profili daha iyidir; her durumda bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçek bileşenleri ilk durumdakinden, yani tüm generatörlerin senkron olduğu durumdakinden soldadır. Bu senaryoda, rüzgar enerjisinin kararlılığa etkisi açısından olumlu bir sonuç ortaya çıkmaktadır. Bu değişim senaryosunda, her iki tipteki rüzgar türbinli generatör de daha iyi sonuç vermekle birlikte, özel olarak kullanılan SKAG tipinin ÇBAG tipine oranla biraz daha iyi sonuç verdiği görülmektedir.

3.7 G1 ve G4'ün Rüzgar Türbinli Generatörler ile Değiştirilmesi

Bu kez de, L2'nin yük artışlarını karşılamak üzere farklı yüklenmelerde güç üretimi miktarını değiştiren (salınım barasına bağlı durumdaki) G1 generatörü ile generatör barasına bağlı durumda olan ve farklı yüklenmelerde aynı miktarda üretim yapan G4 generatörleri SKAG veya ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatörlerle değiştirilmiştir.

G1'in üretim miktarı yüklenme arttıkça artmaktadır ve 281,14 MW'tan 504,11 MW'a kadar değişmektedir. G4'ün üretimi ise her koşulda 700 MW'tır.

Bu durumda bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin L2'nin beş farklı yüklenme durumunda düzlemde aldıkları konumlar Şekil 3.9'daki gibi olmuştur.



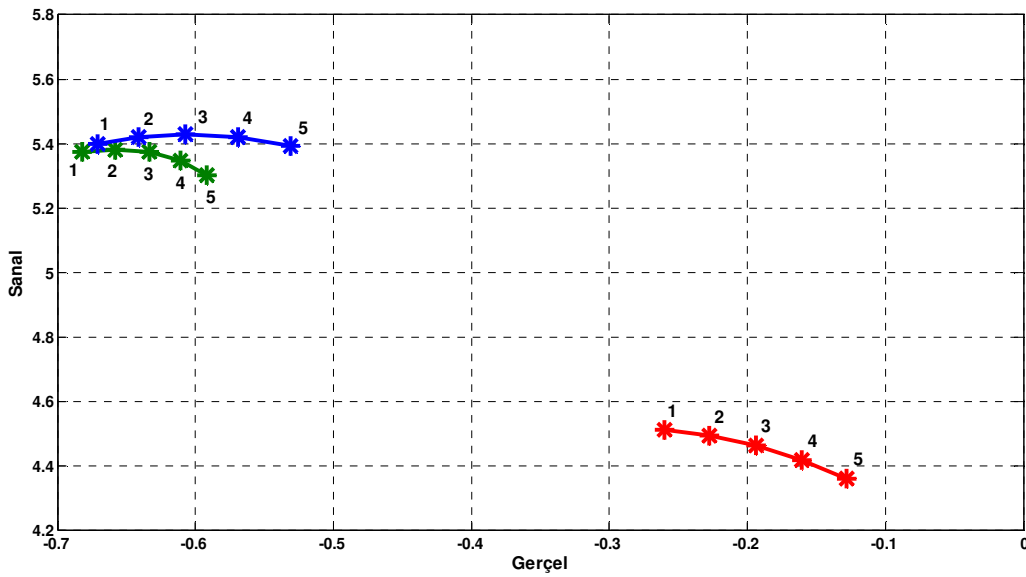
Şekil 3.9 : İlk durumda ve G1 ile G4 SKAG (veya ÇBAG) olduğu zaman salınım moduna ilişkin özdeğerlerin konumları (SKAG: yeşil, ÇBAG: mavi).

G1 ve G4 SKAG veya ÇBAG olduğu zaman, küçük işaret kararlılığı açısından daha olumsuz bir durum söz konusu olmuştur. Her beş yüklenme durumunda da bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenleri ilk durumdakinin, yani tüm generatörlerin senkron olduğu durumdakinin sağındadır; bu da sistemin kararlılığı için daha olumsuz bir durumdur. Bu senaryoda, rüzgar enerjisi ile üretimin kararlılığa etkisi açısından daha olumsuz bir sonuç ortaya çıkmıştır. Özel olarak G1 ve G4 olarak ÇBAG kullanıldığı zaman, yüklenmenin artmasıyla birlikte özdeğerler önce sola, daha sonra sağa doğru hareket etmişlerdir. Bu da bu değiştirme senaryosunda, ÇBAG için, yüklenmeyle özdeğerlerin hareket yönü ilişkisine net bir yorum getirmeyi zorlaştırmaktadır. Fakat sonuç olarak bu durumda da özdeğerler sistemin kararsızlığa çok yakın olduğunu işaret etmektedir ve sonuç sistem kararlılığı açısından ilk durumdakinden daha olumsuzdur.

3.8 G2 ve G3'ün Rüzgar Türbinli Generatörler ile Değiştirilmesi

Bu kez de yine L2'nin farklı yüklenmelerinde üretim değerleri değişmeyen (generatör barasına bağlı durumdaki) G2 ve G3 generatörleri SKAG veya ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatörlerle değiştirilmiştir. Farklı yüklenme koşullarında G2'nin değeri 967 MW'ta, G3'ün değeri de 719 MW'ta sabit durumdadır.

Bu durumda, L2'nin beş farklı yüklenme durumda, bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin düzlemde aldıkları konumlar Şekil 3.10'daki gibidir.

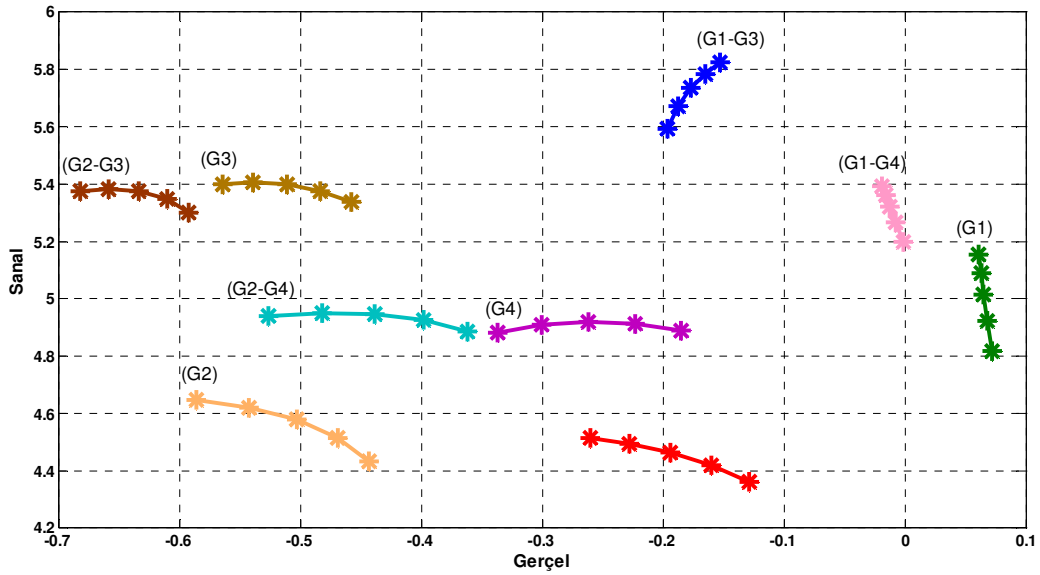


Şekil 3.10 : İlk durumda ve G2 ile G3 SKAG (veya ÇBAG) olduğu zaman salınım moduna ilişkin özdeğerlerin konumları (SKAG: yeşil, ÇBAG: mavi).

Bu senaryoda elde edilen sonuçlar da rüzgar türbinli generatörler ile değişimin küçük işaret kararlılığına ilk durumdakinden daha olumlu etki ettiğini göstermektedir. L2'nin farklı yüklenme değerlerinde üretim miktarı değişmeyen generatörlerin rüzgar türbinli olanlarıyla değiştirilmesi, sistemin küçük işaret kararlılığı açısından bir olumsuzluk yaratmamıştır. Bu senaryoda da, rüzgar üretiminin kararlılığa etkisi açısından daha olumlu bir sonuç ortaya çıkmaktadır. SKAG ve ÇBAG tipi generatörler için sonuçların benzer oldukları görülmekle birlikte, ÇBAG kullanıldığı durumda özdeğerlerin düzlemde sağa doğru hareketinin SKAG tipinden daha hızlı olduğu ve SKAG için kararlılık sonucunun ÇBAG tipinden biraz daha iyi olduğu görülmektedir.

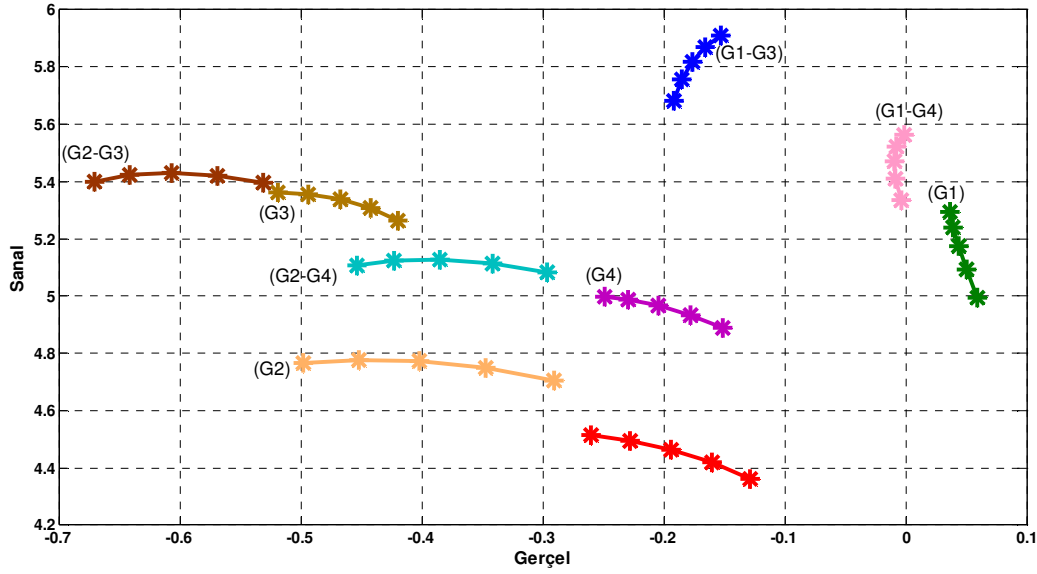
3.9 Sisteme Rüzgar Türbinli Generatör Eklenmesi ile İlgili Yorumlar

Şimdiye kadar ilk durumda senkron generatörler olan G1, G2, G3 ve G4 generatörlerinin, SKAG veya ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatörlerle değiştirildiği durumlar için ayrı ayrı özdeğer analizleri yapılmış ve küçük işaret kararlılığına ilişkin sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Bunun yanında G1 ile G3, G1 ile G4, G2 ile G3 ve G2 ile G4 generatörlerinin de SKAG veya ÇBAG tipi olanlarla değiştirildiği durumlar aynı şekilde incelenmiş ve özdeğer analizleri yürütülmüştür. Yapılan bütün deneyler, L2'nin beş farklı yüklenme koşulu için sonuçları içermektedir ve her durumda sonuçlar, tüm generatörlerin senkron generatör olduğu durumla karşılaştırılmıştır. Şekil 3.11'de, tüm generatörlerin senkron generatör olduğu durum ile gerçekleştirilen tüm generatör değişimi senaryolarına ilişkin sonuçlar (SKAG tipi için) birlikte aynı düzlemde görülmektedir. İlgilenilen mod, elektromekanik salınım modu, sistem özelinde bölgeler arası salınım modudur ve Şekil 3.11'de, bu moda ilişkin özdeğerlerin konumları görülmektedir.



Şekil 3.11 : İlk durumda ve diğer tüm yer değiştirme senaryolarına ilişkin olarak, beş farklı yüklenme durumu için elde edilen tüm özdeğerler (SKAG için).

Şekil 3.12'de ise yine L2'nin beş farklı yüklenme durumu için, ilk durumda tüm generatörlerin senkron generatör olduğu duruma ilişkin özdeğerler ile gerçekleştirilen tüm ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatörlerle yer değiştirme senaryolarına ilişkin sonuçlar birlikte görülmektedir. Özdeğerler, ilgilenilen moda, yani bölgeler arası salınım moduna ilişkin olanlardır.



Şekil 3.12 : İlk durumda ve diğer tüm yer değiştirme senaryolarına ilişkin olarak, beş farklı yüklenme durumu için elde edilen tüm özdeğerler (ÇBAG için).

Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'deki grafiklerde, şimdiye kadar oluşturulan tüm senaryolar için elde edilen sonuçlar bir arada görülmektedir. Her iki grafikte görülen sonuçlar birbirine yakındır; SKAG ve ÇBAG için büyük farklılık görünmemektedir. Her iki grafikte de kırmızı renkle görülen özdeğerler, tüm generatörlerin senkron generatör olduğu duruma ilişkin sonuçları göstermektedir. Diğer tüm özdeğer konumları, bu temel gösterge ile kıyaslandığı zaman genellikle senkron generatörlerin rüzgar türbinli olanlarla değiştirilmesinin sistemin küçük işaret kararlılığına olumlu yönde etki ettiği görülmektedir; çünkü çoğu özdeğerin gerçel bileşeni bu değerlerin solunda kalmıştır. Kırmızı renkli olarak görülen ve rüzgar enerjisinin henüz söz konusu olmadığı ilk durumda elde edilen özdeğerlerin sağında kalanların ortak bir özelliği olarak, G1'in SKAG veya ÇBAG tipi bir rüzgar türbinli generatörle değiştirilmiş olması göze çarpmaktadır. G1, her şeyden önce salınım barasına bağlı durumdadır ve L2'nin farklı yüklenme koşullarında üretim miktarını arttırmaktadır (281,14 MW'tan 504,11 MW'a). Bu test sisteminde, bu özelliklere sahip durumdaki G1'in bir rüzgar türbinli generatörle değiştirilmesinin sistemin kararlılığına olumsuz yönde etki ettiği görülmektedir. Mevcut generatörlerin, rüzgar türbinli generatörler olan SKAG veya ÇBAG'lerden biriyle değiştirilmesi aşamasında, G1'in de bu değişimlere katıldığı hemen hemen her durumda, sistem bundan kararlılık açısından olumsuz yönde etkilenmiştir. Tersine, generatörlerin SKAG veya ÇBAG tipi olanlarıyla değiştirilmesi sırasında, G1'in senkron olarak bırakıldığı ve diğer çeşitli

generatörlerin değişime katıldığı hemen hemen her durumda ise, sistemin kararlılığı ilk durumdakinden daha iyi olmuştur. Burada kilit noktada olan üretim birimi G1 gibi görünmektedir ve ilgilenilen test sisteminde G1 hariç senkron generatörlerin SKAG veya ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatörlerle değiştirilmesi sistemin küçük işaret kararlılığını olumlu yönde etkilemektedir.

Bunun dışında düzlemde yapılan incelemeler sonunda bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin, L2'nin güç talebi artışıyla birlikte, büyük çoğunlukla sağ yarı düzleme doğru hareket ettiği görülmektedir. Bunun istisnalarından biri, G1 ile G3'ün SKAG veya ÇBAG'lerle değiştirildiği durumlardır. Bir diğeri de G1 ile G4'ün ÇBAG'larla değiştirildiği durumdur. G1 ile G3'ün SKAG veya ÇBAG'lerle değiştirildiği durumda yüklenme arttıkça bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenleri sürekli sola doğru hareket etmiştir, ki bu küçük işaret kararlılığı açısından olumlu bir sonuç olarak yorumlanabilir. G1 ile G4'ün ÇBAG'lerle değiştirildiği durumda ise özdeğerler yük artışıyla birlikte önce sola, bir yerden sonra da sağa doğru hareket etmişlerdir. Söz edilen bu durumların dışında her durumda, L2'nin yük talebi artışı özdeğerlerin sağa doğru hareketiyle paralel seyretmiştir, ki bu da yük artışının küçük işaret kararlılığına etkisi açısından olumsuz bir durumdur.

Bölgeler arası salınım modu incelenerek, küçük işaret kararlılığına ilişkin en olumlu sonuçların ister SKAG, ister ÇBAG tipi olsun, G2 ve G3'ün rüzgar türbinli olanlarıyla değiştirildiği zaman elde edildiği görülmüştür. En kötü sonuçlar ise hem SKAG hem de ÇBAG tipi için yalnızca G1 generatörünün rüzgar türbinli olanla değiştirildiği zaman görülmektedir, ki bu durumda sistem tamamen kararsızdır.

4. RÜZGAR ENERJİSİ İLE ÜRETİM KATILAN GÜÇ SİSTEMLERİ İÇİN OLASILIKSAL KÜÇÜK İŞARET KARARLILIĞI ANALİZLERİ

Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda, rüzgar enerjisi katılmış sistemlerde analizler sabit bir çalışma noktası etrafında yapılmıştır. Bu analizler aslında makine yapılarının farklılığına ilişkin sonuçları göstermektedir.

Bu bölümde ise, rüzgar enerjisi ile üretimin değişkenliği göz önünde bulundurularak küçük işaret kararlılığı analizleri gerçekleştirilmiştir. Bunun yanında hem üretimin hem de elektrik yüklerinin değişkenliği birlikte göz önüne alınarak çeşitli analizler yapılmıştır. Bu bölümdeki çalışmaların dayanağı olasılık ve istatistiksel yöntemlerdir. Bu anlamda 2. bölümde söz edilen olasılık benzetim yöntemleri ve olasılıksal kararlılık indeksi önemli araçlar olacaktır.

İster yalnızca üretimin, isterse hem üretimin hem de tüketimin değişkenliği söz konusu olsun; küçük işaret kararlılığı analizleri yapılırken sistemin sabit bir çalışma noktası etrafında olduğu kabulü geçersiz kalmaktadır. Çünkü bu sefer sistem, yalnızca üretimin veya hem üretimin hem de tüketimin değişkenliği dolayısıyla çalışma noktasını sürekli değiştirmektedir. İşte bu nedenle bu gibi sistemlerin küçük işaret kararlılığına ilişkin bilgi edinebilmek için birden fazla çalışma noktası etrafında yapılan çok sayıdaki analizin sonuçlarını değerlendirmek, söz edilen çıkmazın çözümlerinden biridir. Çok sayıda çalışma noktası oluşturmak, benzetimli olasılıksal küçük işaret kararlılığı adını verdiğimiz yöntemle gerçekleştirilebilmektedir.

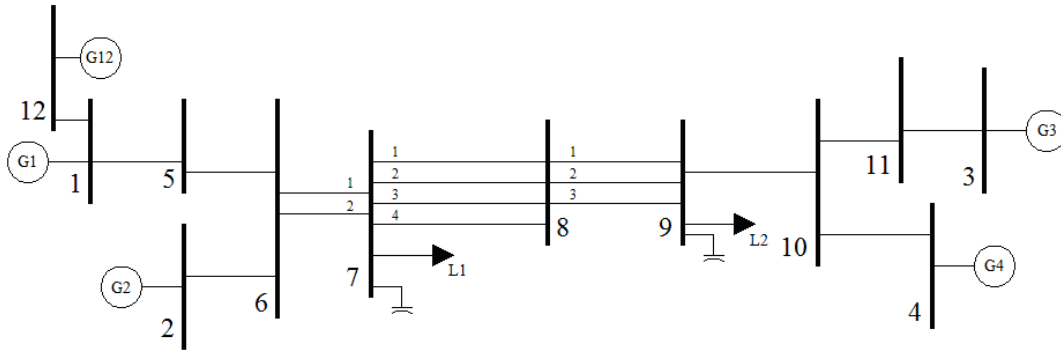
Küçük işaret kararlılığı analizlerine olasılıksal bir bakış açısı getirmek değişik biçimlerde olabilir. Örneklemeler üreterek çalışmak yani örneklemeli yani benzetimli olasılıksal küçük işaret kararlılığı analizleri kullanmak bu yollardan biridir; bu çalışmada bu yöntem tercih edilmiştir. Bunun dışında analitik yöntemler de kullanılabilmektedir. Çalışmada benzetimli olasılıksal küçük işaret kararlılığı analizleri yapılarak bir güç sistemine ait çok sayıda çalışma noktası oluşturulmuş ve çok sayıdaki analiz sonucu yine olasılık ve istatistik yöntemlerle yorumlanmıştır. Bu çalışmada, benzetimli olasılık yöntemlerin sunduğu verileri değerlendirmek amacıyla

bir indeks kullanmak tercih edilmiş ve bu indeksin kullanılması ile yapılabilecek çıkarımlar değerlendirilmiş ve ayrıca örnek sistem üzerinde yorumlar yapılmıştır.

Olasılık çalışmasında kullanılan araçların sağlıklı ve başarılı olmaları, analizlerin de sağlıklı ve başarılı sonuçlar vermelerini sağlamaktadır. Çalışmanın bu bölümünde hem yeni benzetim yöntemleri, hem de verileri değerlendirmede başvurulabilecek yeni yöntemler üzerine uygulamalar yapılmış ve güç sistemi kararlılığı için olasılık kavramı üzerine oturan yeni bakış açıları geliştirilmeye çalışılmıştır.

4.1 Test Sisteminin Tanıtılması

Bir önceki bölümde kullanılan test sistemine benzer bir test sistemi bu bölümde yapılan analizlerde de kullanılmıştır. Bu bölümde kullanılan test sistemi, Şekil 4.1'de görülen iki bölge, beş generatörlü sistemdir.



Şekil 4.1 : İki bölge, beş generatörlü test sistemi ([26] ile oluşturulmuştur).

Olasılıksal küçük işaret kararlılığı analizleri yapılacağı zaman ve sisteme bir rüzgar çiftliği (rüzgar türbinli generatörler) eklenmesi söz konusu olduğunda bir güç akışı ve sistem işletme planlanması yapılmış ve bu nedenle 3. bölümde kullanılan test sistemine rüzgar çiftliğini temsil etmek üzere beşinci bir generatör birimi eklenmiştir. Bu test sisteminde G1, G2, G3 ve G4 senkron generatörleri; G12 ise SKAG veya ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatörlerden meydana gelmiş bir rüzgar çiftliğini göstermektedir ve sisteme ait güç değerleri Çizelge 4.1'deki gibidir. Sistemdeki senkron generatörlerde güç sistemleri kararlı kılıcı düzenekleri mevcuttur ve analizlerde senkron generatörlerin uyarım modelleri de göz önünde bulundurulmaktadır. Model ve parametre ayrıntıları için Ek A'ya bakılabilir.

Olasılıksal küçük işaret kararlılığı analizleri yapılırken oluşturulan güç akışı senaryosu şu şekildedir: G12 ile temsil edilen ve 400 MW üretim kapasitesine sahip

olan bir rüzgar çiftliği test sistemine, G1 senkron generatörünün de bağlı olduğu 1 numaralı salınım barası üzerinden ve $0,001+j0,01$ pu değerinde bir empedans üzerinden bağlanmaktadır. Güç akışı senaryosunda bölgeler arası bir güç akışı olduğu ve bunu da G1 ve/veya G12'nin birlikte güç paylaşımı yaparak karşılayacakları planlanmaktadır. G12'nin üretim miktarının rüzgar hızının değişimine bağımlı olduğu göz önünde bulundurulursa G12'nin düşük üretimlerinde G1 senkron generatörü (generatörleri) devreye girecek; G12'nin yeterli olduğu durumlarda ise G1 devreden çıkacaktır (veya üretim miktarını azaltacaktır). Çizelge 4.1'de G1+G12 ile gösterilen sütun bu senaryodan kaynaklanmaktadır ve bölgeler arası toplam güç akışı değerinin 412 MW civarında olması beklenmektedir. Bu değeri 400 MW üretim kapasitesine sahip olan rüzgar çiftliğinin hiçbir zaman tek başına karşılayamayacağı göz önüne alınırsa, G1'in her zaman az da olsa üretim rolü üstleneceği yorumu yapılabilir.

Çizelge 4.1 : Şekil 4.1'deki test sistemine ait üretim ve tüketim güç değerleri.

G1+G12 (MW)	G2 (MW)	G3 (MW)	G4 (MW)	L1 (MW)	L2 (MW)
412	967	719	700	967	1767

4.2 Test Sisteminde Yapılan Analizler

Tanıtilan test sisteminde öncelikle yalnızca üretimin, sonra da hem üretimin hem de tüketimin değişkenliği göz önünde bulundurularak çeşitli analizler yapılmıştır. Bu değişimler, güç akışını da değiştirmiş ve sistemin küçük işaret kararlılığına ait parametrelerin de farklılıklar göstermesine neden olmuştur. Kararlılığa ait parametrelerin nasıl değiştiğini incelemek ve yorumlamak da analizlerin getirmesi istenen noktadır.

4.2.1 Yalnızca üretimin değişken olduğu durum

Üretim değişkenliği, rüzgar çiftliğinin değişken üretim güçleri olarak değerlendirilmiştir. Bunun dışında kalan senkron generatörlerin hiçbirinin üretim güçleri değiştirilmemiş, hep sabit oldukları kabul edilmiştir.

Rüzgar enerjisi ile yapılan üretiminin değişkenliğini modellemek amacıyla, öncelikle rüzgar hızının değişkenliğinin göz önünde bulundurulması gerekir. Rüzgar hızının belirli bir zamanda hangi hızda estiğine ilişkin olasılıksal dağılım, Weibull olasılık dağılımıyla gösterilebilir. Buna göre Weibull olasılık yoğunluk fonksiyonu takip edilerek herhangi bir zamanda rüzgarın hangi hızda esebileceği kestirilebilir veya bu bilgi istatistiksel olarak elde edilebilir. Rüzgar hızı ile rüzgar türbinli generatörün çıkış gücü arasındaki bağıntıdan yararlanılarak, rüzgar hızına ilişkin olasılıksal dağılım bilgisi, rüzgar türbinli generatörün çıkış gücüne ilişkin olasılıksal dağılım bilgisine dönüştürülebilir. Böylece, güç akışı ve küçük işaret kararlılığı analizleri için olasılıksal bir altyapı oluşturulmuş olur. Bütün bu işlemler sonunda çok sayıda çalışma noktası yani çok sayıda güç akışı analizi ve çok sayıda küçük işaret kararlılığı analizi verisi elde edilmiş olur.

Rüzgar hızına ilişkin veriler, Texas-ABD'deki White Deer kasabasının 2010 yılına ait gerçek verilerdir [30]. Bu veriler, bir Weibull dağılıma benzetilerek buna ilişkin Weibull fonksiyonu parametreleri elde edilmiştir. [31]'de, rüzgar verileri kullanılarak Weibull parametrelerinin nasıl hesaplanacağı anlatılmıştır. Buradan, Weibull fonksiyonu için ölçü parametresi a 9,3058; biçim parametresi b ise 2,6264 olarak hesaplanmıştır. Bu bölümde rüzgar hızı örneklemeleri elde etmek için bu parameterlere sahip olan bir Weibull fonksiyonu kullanılmış ve örneklenmiştir.

4.2.1.1 SKAG tipi rüzgar türbinli generatörler ile yapılan analizler

Benzetimli olasılıksal küçük işaret kararlılığı analizleri, öncelikle G12 ile temsil edilen rüzgar çiftliğindeki rüzgar türbinli generatörlerin SKAG olduğu durumda yapılmıştır. Bu durumda benzetim yöntemi olarak öncelikle MC yöntemi, daha sonraysa çalışmada küçük işaret kararlılığı analizlerinde de kullanılması önerilen LHÖ yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca bu yöntemler örnekleme başarımları açısından birbirleriyle de karşılaştırılmıştır.

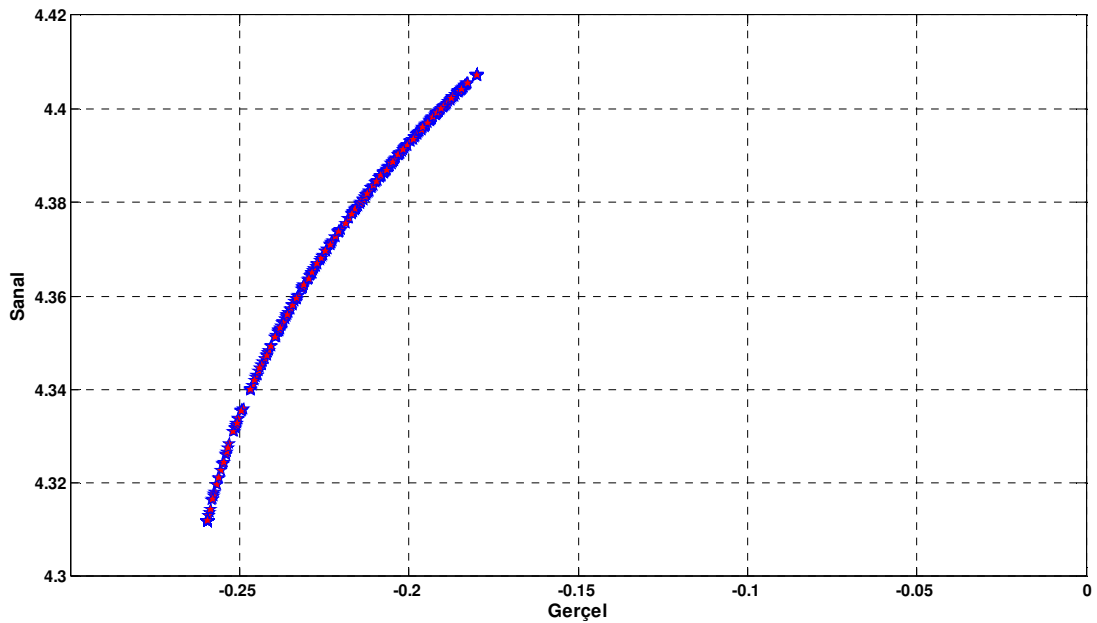
MC yöntemiyle yapılan analizler

Şekil 4.1'deki test sisteminde, üretimin değişkenliği G12 ile gösterilen rüzgar çiftliğinin çıkış gücü değiştirilerek modellenmiştir. Bu sistem için yapılacak analizlerde benzetim yaklaşımı güç sisteminde farklı çalışma noktaları elde etmek için kullanılmıştır. Öncelikle MC yöntemiyle 500 farklı rüzgar hızı, yani rüzgar türbinli generatörler için 500 farklı çıkış gücü elde edilmiştir. Bu örneklemeler aynı

sayıda güç akışı senaryosu elde edilmesini ve yine aynı sayıda küçük işaret kararlılığı analizi sonucu elde edilmesini sağlamıştır. Böylece, küçük işaret kararlılığına ilişkin olarak istenen sayıda parametre bulunmuş olur.

Yapılan analizlerde, güç sisteminin salınım modunun (bölgeler arası salınım modunun) nasıl değiştiği incelenmektedir. Bu, çoğu kez kritik modun incelenmesi anlamına gelir ve sistemin tamamının küçük işaret kararlılığına ilişkin bir ölçü olarak değerlendirilir.

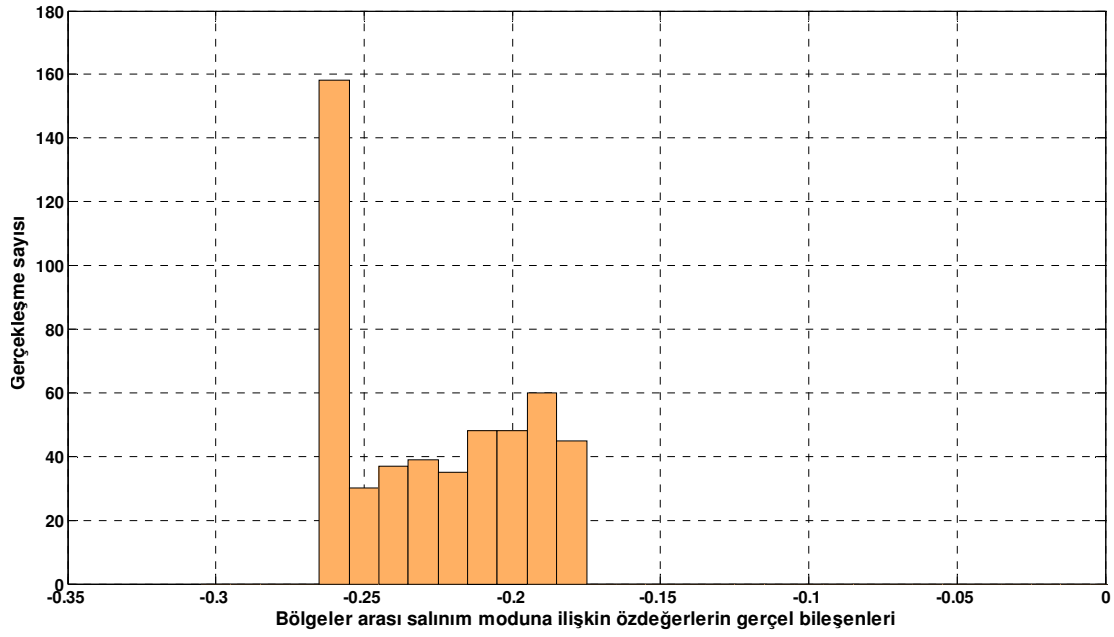
MC yöntemiyle ve 500 örnekleme alındığı durumda, bölgeler arası salınım moduna ilişkin olarak bulunan özdeğerlerin düzlemde aldıkları konumlar Şekil 4.2'deki gibi olmuştur.



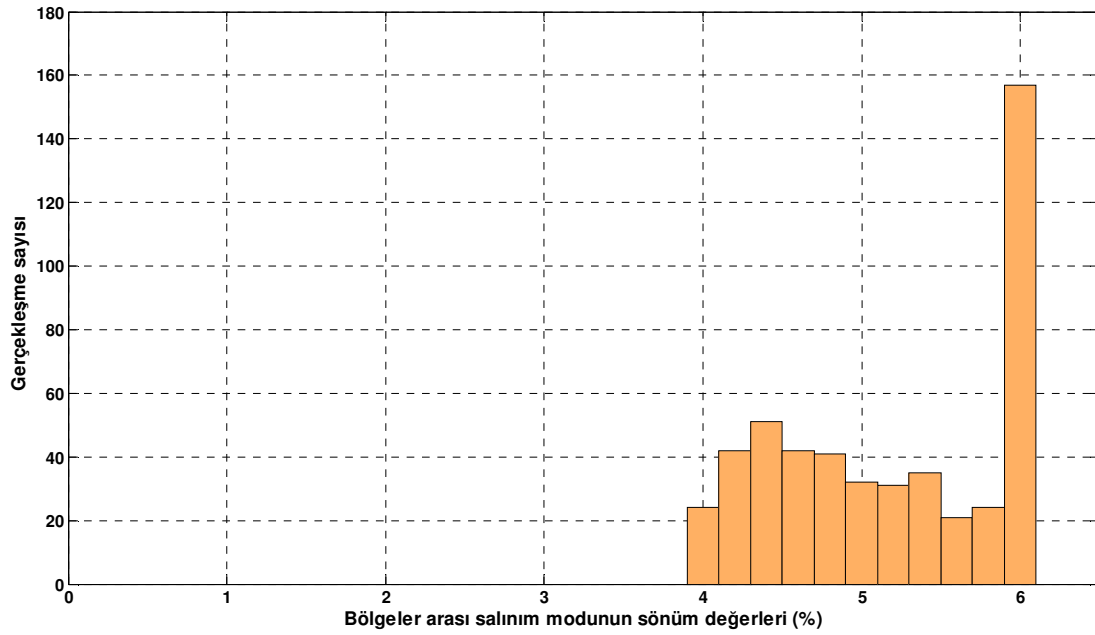
Şekil 4.2 : Bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin düzlemde konumları.

Bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenleri, histogram olarak Şekil 4.3'teki gibi gösterilebilir.

Bölgeler arası salınım modunun hangi oranda sönümlendiği de kararlılığa ilişkin önemli bir ölçektir. Salınım modlarının dağılımını gösteren histogram grafik Şekil 4.4'deki gibidir.



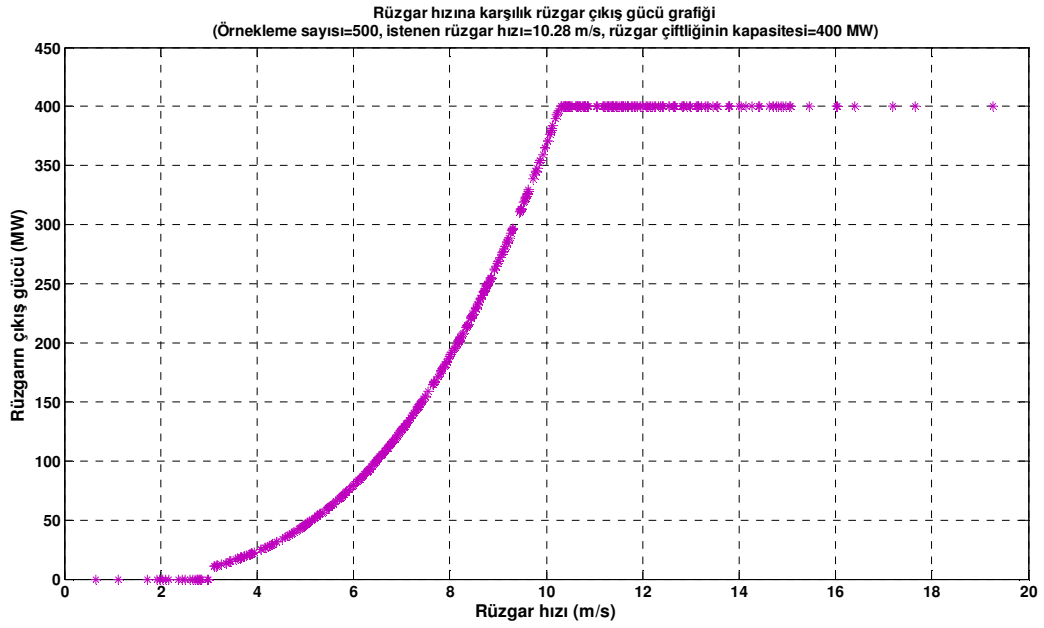
Şekil 4.3 : 0,002 genişlikteki aralıklarla, özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin örneklemeler boyunca dağılımını gösteren histogram.



Şekil 4.4 : 0,2 genişlikteki aralıklarla, bölgeler arası salınım modunun sönümleme oranlarının örneklemeler boyunca dağılımını gösteren histogram.

Her iki histogramda da bir değerin diğerlerinden çok daha fazla miktarda gerçekleştiği görülmektedir. Bu değer, özdeğerlerin gerçel bileşenleri için -0.26 civarı ve sönüm değerleri içinse %6 civarıdır. Bunun nedeni şöyle açıklanabilir: örnekleme rüzgar hızı düzleminde gerçekleşirken, kararlılık verileri güç akışlarına yani rüzgarın elektriksel çıkış gücüne bağlı olarak oluşmaktadır. Rüzgar hızı Weibull

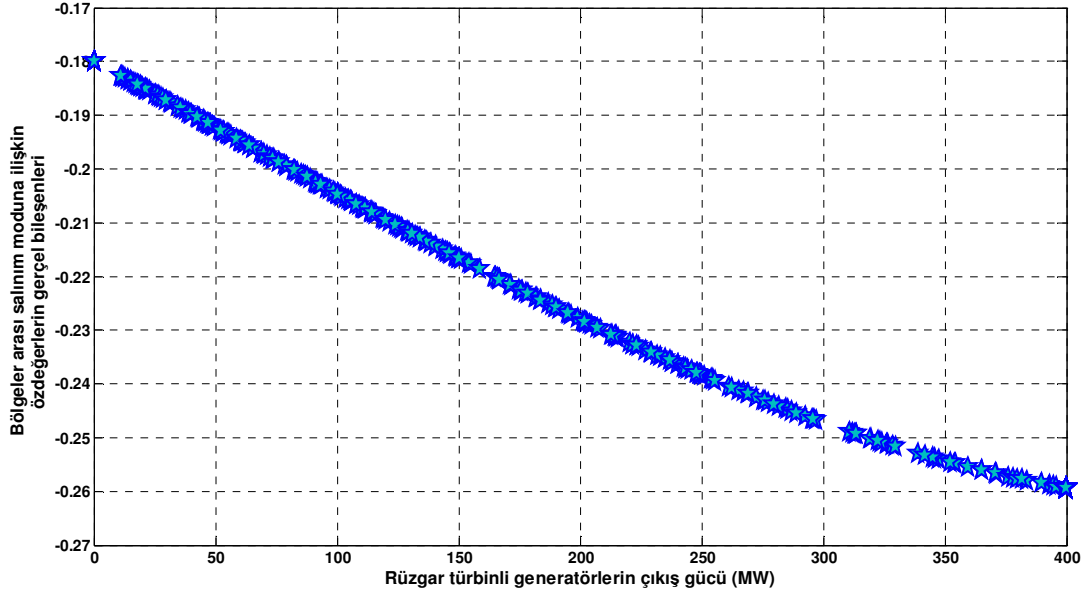
fonksiyonuna uygun üretilmişse de rüzgar hızı ile rüzgarın çıkış gücü arasındaki ilişki doğrusal olmadığı ve çıkış gücü, belli bir rüzgar hızından sonra sabitleştiği için rüzgar hızı sınırından büyük olan değerler hep aynı kararlılık profili çizmekte ve bu hız değerleri için hep aynı değerler gözlenmektedir. Örneğin Şekil 4.5'te çıkış gücü, rüzgarın hızının 10,28 m/s'den büyük olduğu durumlarda maksimum çıkış gücünde (anma gücünde) sabit kalmaktadır. Bu durum histogram grafiğinde kendini birikmeler şeklinde göstermektedir.



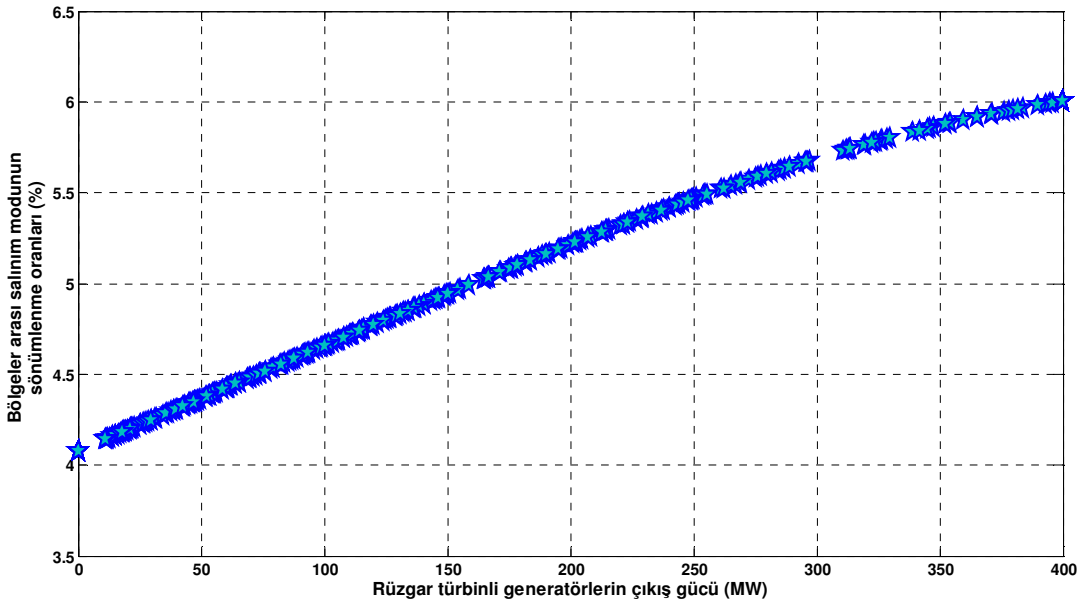
Şekil 4.5 : Rüzgar hızı ile rüzgar türbinli generatörün çıkış gücü arasındaki ilişkinin örneklemeler üzerinden gösterilmesi.

Rüzgarın çıkış gücüne karşılık özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin nasıl değiştiği Şekil 4.6'da görülmektedir. Burada korelasyon negatif değerde ve -%99,37 gibi çok yüksek bir değerdedir. Rüzgar türbinli generatörün çıkış gücünün artması ile özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin negatife yaklaşması arasında kuvvetli bir bağlantının söz konusu olduğu görülmektedir. Güç akışı senaryolarında rüzgar türbinli generatörün çıkış gücü artışının kararlılık açısından daha olumlu bir etkiye sahip olduğu söylenebilir.

Rüzgar türbinli generatörün çıkış gücüne karşılık bölgeler arası salınımın modunun sönümlenme oranlarının değişimi Şekil 4.7'deki gibi gerçekleşmiştir.



Şekil 4.6 : SKAG'ün çıkış gücü ile bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi (korelasyon: $-\%99,37$).



Şekil 4.7 : SKAG'ün çıkış gücü ile bölgeler arası salınımın sönümlenme oranlarının değişimi (korelasyon: $\%99,53$).

Şekil 4.7'den de görüldüğü gibi ve Şekil 4.6'ya paralel olarak bu kez rüzgarın çıkış gücüyle bölgeler arası salınımın sönümlenmesi arasında kuvvetli bir bağlantı vardır; korelasyon $\%99,53$ gibi çok büyük bir değerde çıkmaktadır. Güç akışı senaryolarında, rüzgar türbinli generatörün çıkış gücünün artışı bölgeler arası salınımın sönümlenmesinin de doğru orantılı olarak artmasını beraberinde

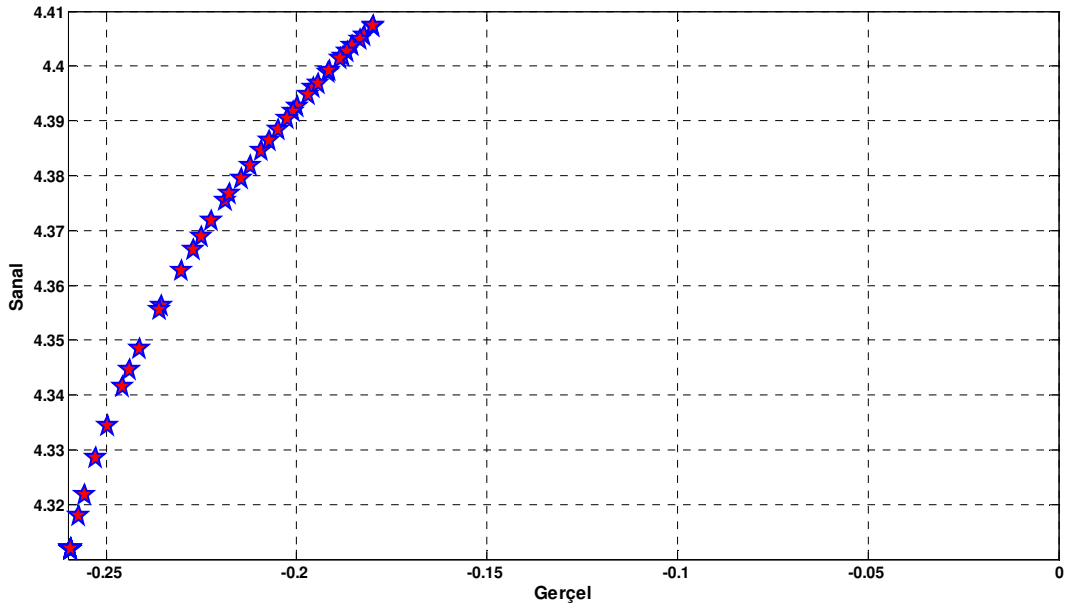
getirmiştir. Yani güç akışını rüzgar türbinli generatörün artan miktarlarda karşılaması, kararlılığı da arttırmıştır.

Bu iki grafik; test sistemindeki bölgeler arası güç talebini karşılamada rüzgar türbinli generatörlerin payının artmasıyla birlikte, sistemin küçük işaret kararlılığı parametrelerinin iyileşmesi arasında güçlü bir bağ (korelasyon) bulunduğunu göstermektedir. Bölgeler arası güç akışı, rüzgar enerjisi ile üretim birimleri tarafından artan miktarlarda karşılandıkça, sistemin küçük işaret kararlılığı daha da iyileşmektedir.

LHÖ yöntemiyle yapılan analizler

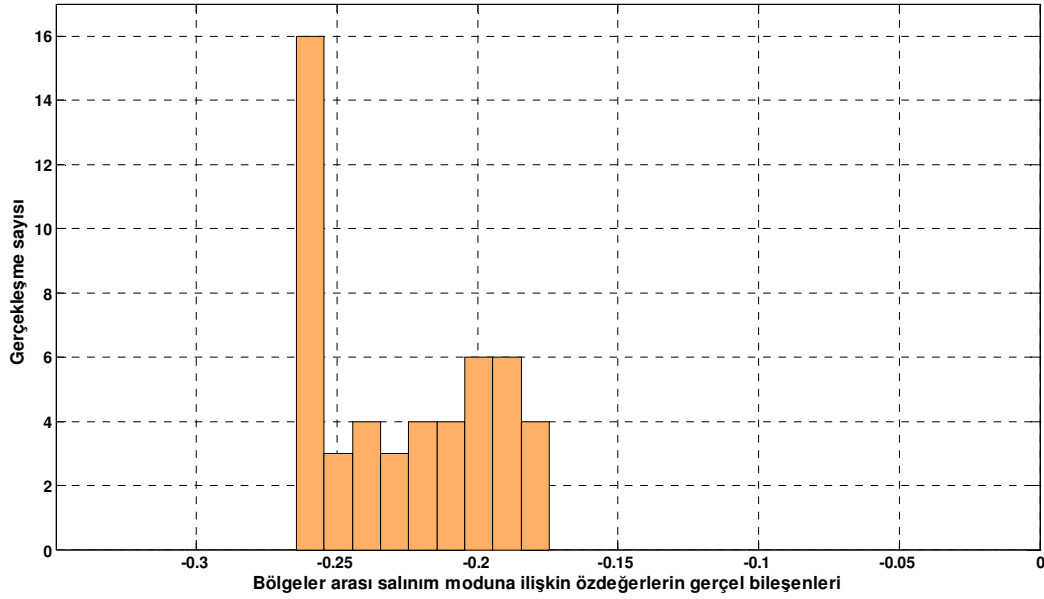
Şekil 4.1'deki test sisteminde, üretimin değişkenliği yine G12 ile gösterilen rüzgar çiftliğinin çıkış gücü değiştirilerek modellenmiştir. Sistem için bu kez LHÖ yöntemiyle ve 50 örnekleme alınarak özdeğerlerin gerçel bileşenleri ve salınım modunun sönümlenme oranları hesaplanmıştır. MC yönteminde 500 örnekleme alındığı göz önüne alınırsa LHÖ yöntemiyle alınan örnekleme sayısının oldukça düşük olduğu söylenebilir.

LHÖ yöntemiyle ve 50 örnekleme alındığı durumda, bölgeler arası salınım moduna ilişkin olarak bulunan özdeğerlerin düzlemde konumları Şekil 4.8'deki gibidir.



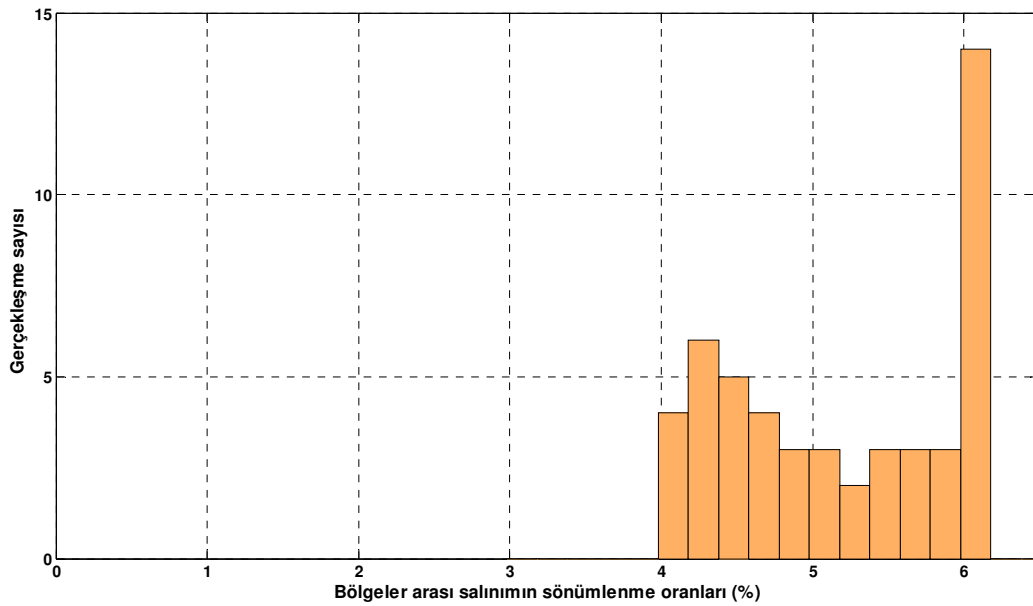
Şekil 4.8 : Bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin düzlemde konumları.

Bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenleri, histogram olarak Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9 : 0,01 genişlikteki aralıklarla, özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin örneklemeler boyunca dağılımını gösteren histogram.

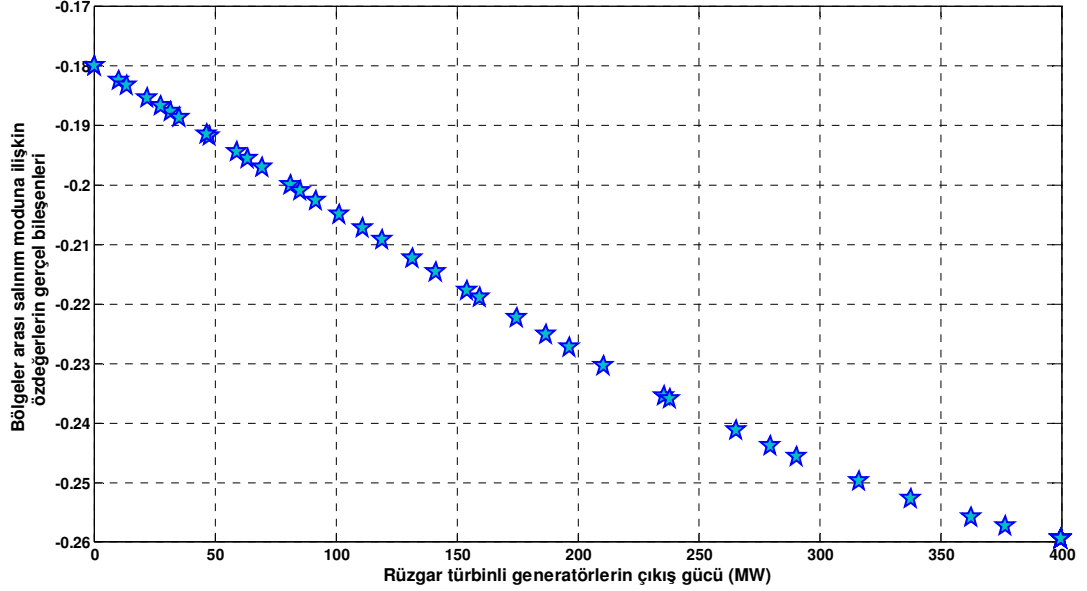
Bölgeler arası salınım modlarının örneklemeler boyunca dağılımını gösteren histogram Şekil 4.10'daki gibidir.



Şekil 4.10 : 0,2 genişlikteki aralıklarla, bölgeler arası salınım modunun sönümlenme oranlarının örneklemeler boyunca dağılımını gösteren histogram.

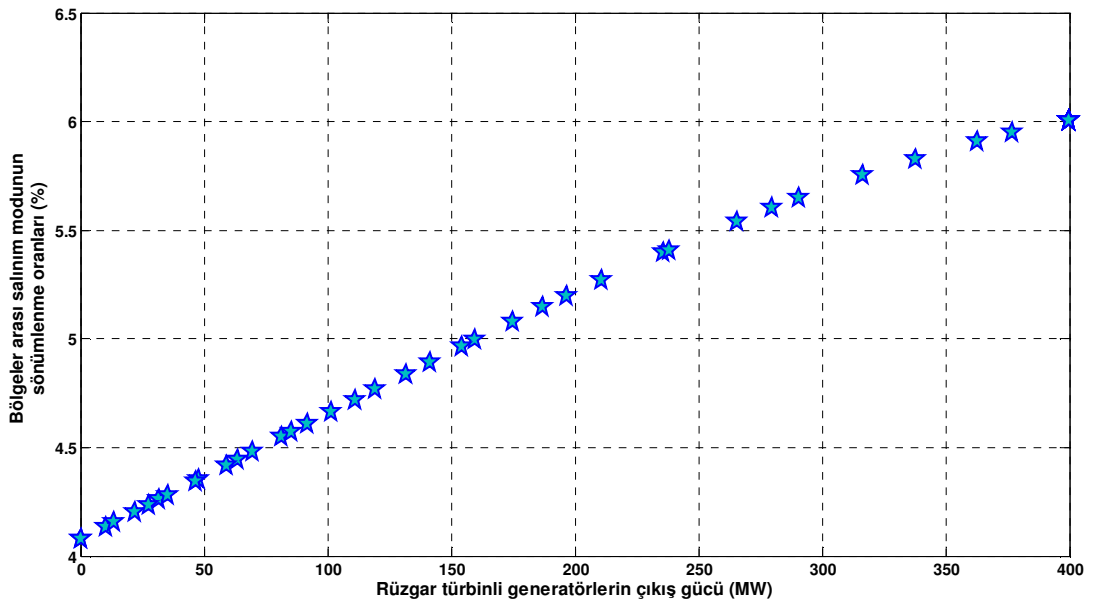
Rüzgar türbinli generatörün çıkış gücüne karşılık özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi Şekil 4.11'de görülmektedir. Burada korelasyon negatif değerde ve -%99,41 gibi çok yüksek bir değerdedir. Bu değer MC yöntemiyle 500 örneklem alınarak bulunan -%99,37 değerine çok yakındır. Buradan LHÖ yöntemiyle ve yalnızca 50

örnekleme alınarak MC yöntemiyle 500 örneklemeyle bulunan değere çok yakın sonuç bulunabildiği görülmektedir, bu da LHÖ yöntemini kullanmanın bir avantajı olarak düşünülebilir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 : SKAG'ün çıkış gücü ile bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi (korelasyon= -%99,41).

Rüzgar türbinli generatörün çıkış gücüne karşılık bölgeler arası salınım modunun sönümlenme oranlarının değişimi Şekil 4.12'deki gibidir.



Şekil 4.12 : SKAG'ün çıkış gücü ile bölgeler arası salınımın sönümlenme oranlarının değişimi (korelasyon= %99,56).

Grafikten de görüldüğü gibi, rüzgar türbinli generatörün çıkış gücüyle bölgeler arası salınım modunun sönümlenme oranı arasındaki korelasyon LHÖ yöntemiyle %99,56 olarak bulunmuştur. Bu değer, MC yöntemiyle ve 500 örneklemeyle bulunan %99,53 değerine çok yakındır. Bu yaklaşık değer, LHÖ yöntemiyle yalnızca 50 örnekleme sonunda bulunmuştur.

MC ve LHÖ yöntemlerinin karşılaştırılması

Önceki iki uygulamada aynı sistem, aynı senaryo ile ve aynı parametreleri bulmak üzere analiz edilmiştir. İlk uygulamada MC yöntemi kullanılarak 500 örnekleme, ikinci uygulamada LHÖ yöntemi kullanılarak 50 örnekleme yapılmıştır.

Şimdiye kadar yapılan pek çok çalışmada LHÖ yönteminin, MC yöntemine göre daha az sayıda örnekleme ihtiyacı duyduğu gösterilmiştir [18,19]. Bu anlamda bunun doğrulamasını bir güç sistemi için ve olasılıksal küçük işaret kararlılığı analizleri üzerinden yapmak anlamlı olacaktır. Bu yüzden güç sistemleri için MC ve LHÖ yöntemleri ile çeşitli kararlılık analizleri yapılmakla birlikte bu iki yöntemin gerçeği yansıtmaya başarımları da çeşitli yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar yine iki bölge test sistemi üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan iki benzetim yönteminden MC ile LHÖ yöntemlerinin olasılıksal küçük işaret kararlılığını hesaplamaları açısından birbirleriyle karşılaştırılabilirliği amacıyla, yöntemlerin ürettikleri veriler birbirleriyle karşılaştırılmış ve ne kadar uyumlu oldukları hesaplanarak yöntemlerin başarımları açısından çeşitli çıkarımlarda bulunulmuştur.

Her iki yöntemle de bir güç sistemi için özdeğer ve sönüm değerleri hesaplanmıştır. Bu noktada hem özdeğerler hem de sönüm değerleri için iki farklı dağılım söz konusudur. Özdeğer hesaplanması referans alınır, MC yöntemi ile elde edilen dağılımın, LHÖ yöntemiyle elde edilen dağılımla karşılaştırılması sonucunda birbirlerine ne kadar benzedikleri belirlenebilir. Bunun için aynı büyüklüğü örnekleyen iki yöntemin sonuçlarının benzerliklerini irdeleyen bir uyum değeri tanımlanmıştır. Her iki yöntemle yapılan analizlerde, özdeğerlerin örneklemeler boyunca dağılımları histogramlar olarak elde edilmiştir. Uyum değerini hesaplayabilmek için öncelikle MC ve LHÖ yöntemleriyle elde edilmiş olan histogramların her bir aralığına düşen değer sayıları normalize edilmiş, yani bütün değerler örnekleme sayısına bölünerek toplamı 1'e eşitlenmiştir.

$$h_n = \frac{1}{n} h \quad (4.1)$$

Burada h , özdeğerlerin histogram aralıkları boyunca örneklenme sayıları vektörüdür; h_n ise bu değerlerin, toplamaları 1 olacak şekilde normalize edildikleri durumdaki vektördür. Bu dönüşüm yapıldıktan sonra MC için elde edilmiş h_n vektörüyle LHÖ için elde edilmiş h_n vektörünün bütün elemanlarının birbirinden farkları alınarak toplam bir fark değeri bulunur.

$$\Delta h = \sum_{i=1}^N h_{ni}^{MC} - h_{ni}^{LHÖ} \quad (4.2)$$

Burada N , $\overline{h_n}$ vektörlerinin boyutunu göstermektedir. Bulunan fark değeri Δh , skaler bir büyüklüktür. Buradan yola çıkarak uyum değeri hesaplanabilir.

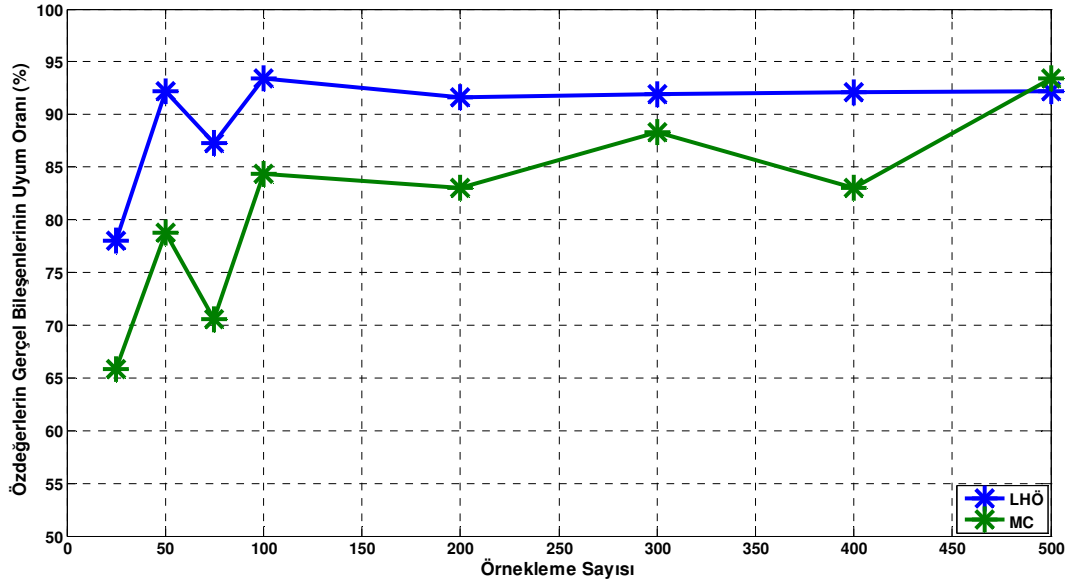
$$\% \rho = (1 - \Delta h) \times 100 \quad (4.3)$$

Burada elde edilen uyum değeri, yüzde olarak, bir büyüklüğün herhangi bir örnekleme sayısı ile ve MC yöntemiyle hesaplanması sonucundaki dağılımıyla, aynı büyüklüğün yine herhangi bir örnekleme sayısı ile ve bu kez LHÖ yöntemiyle hesaplanması sonucundaki dağılımıyla benzerlikleri hakkında somut fikir elde edilmesini sağlar. Uyum değerini kullanarak yöntemlerin farklı örnekleme sayılarında elde edilen sonuçlarını birbirleriyle kıyaslamak olanaklı olduğu gibi, bir yöntemin farklı örnekleme sayılarında elde edilmiş olan verilerini kendisiyle kıyaslamak da olanaklıdır.

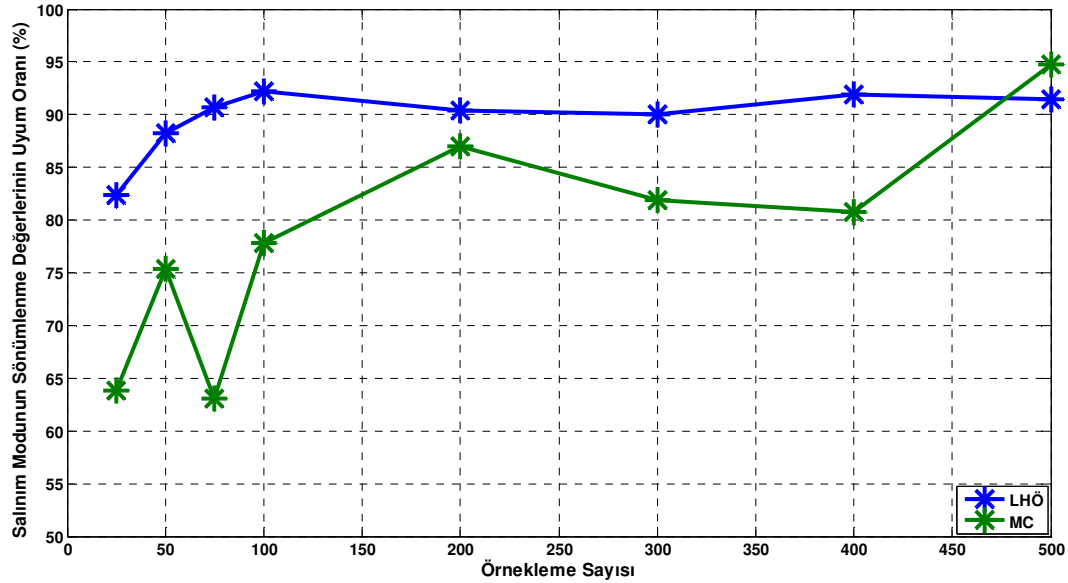
Bu çalışmada özdeğerler ve salınım modunun sönüm değerleri üzerinden karşılaştırmalar yapılmıştır. Yöntemleri karşılaştırmak için MC ve LHÖ yöntemleri kullanılarak farklı örnekleme sayıları için uyum değerleri hesaplandığı gibi, yöntemlerin kendi başarımlarını ölçebilmek için de her iki yöntemin farklı örnekleme sayıları için kendileriyle uyum değerleri bulunmuştur.

LHÖ yönteminin MC yöntemine göre bilinen en büyük avantajı daha az örnekleme sayısına ihtiyaç duyması olduğundan dolayı, örnekleme sayılarının başarıma etkisini değerlendirebilmek amacıyla Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'teki grafikler elde edilmiştir. Şekil 4.13'teki grafik bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin hesaplanmasındaki başarımları değerlendirmekte ve buna ilişkin uyum değerlerini gözetmekte iken, Şekil 4.14'teki grafik bölgeler arası salınım modunun sönümlenme

değerinin hesaplanmasındaki başarımı değerlendirerek buna ilişkin uyum değerlerini göstermektedir.



Şekil 4.13 : MC ve LHÖ yöntemlerinin MC-1000 örnekleme sonuçlarıyla uyum oranlarının değişimi (özdeğerlerin gerçel bileşenleri için).



Şekil 4.14 : MC ve LHÖ yöntemlerinin MC-1000 örnekleme sonuçlarıyla uyum oranlarının değişimi (salınım modunun sönümlenmesi için).

Her iki grafikte de MC ve LHÖ yöntemlerinin farklı örnekleme sayılarında elde edilen parametre dağılımları, MC yöntemiyle ve 1000 örnekleme yapılarak elde edilen parametre dağılımıyla karşılaştırılmıştır. Burada MC yöntemiyle ve 1000 örnekleme ile bulunan dağılımın gerçeğe yeterince yakın olduğu kabul edilmiştir ve her iki yöntemin farklı örnekleme sayılarıyla bu dağılıma hangi oranda yaklaştıkları

anlaşılmaya çalışılmıştır. Bu bir yerde gerçek değerlere ulaşmada yöntemlerin örnekleme sayılarıyla nasıl bir etki gösterdiklerini ve birbirleriyle başarımlarını göstermektedir. Her iki grafikten de görüldüğü gibi LHÖ yöntemiyle örnekleme sayısının daha az olduğu durumda uyum değeri, MC yönteminin uyum değerinden daha büyüktür. Yani LHÖ yöntemiyle MC yönteminden daha az sayıda örneklemeyle daha yüksek başarımlar alınabileceği görülmektedir.

Şimdi tekrar MC ve LHÖ yöntemlerinin farklı sayıdaki örnekleme sayılarının başarımları için bir değerlendirme yapılır ve aynı büyüklüğü örneklemede elde edilen verilerin uyum değerleri incelenirse Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'deki sonuçlar ortaya çıkar. Çizelge 4.2, bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin, Çizelge 4.3 ise salınım modunun sönümlenme değerleri için yapılan hesaplamaların uyum değerlerini içerir.

Çizelge 4.2 : MC ve LHÖ yöntemlerinin farklı örnekleme sayıları için hesapladıkları özdeğer dağılımlarının uyum değerleri (% ρ).

		MC								
		25	50	75	100	200	300	400	500	1000
LHÖ	25	68	68	57,33	66	71	76,67	70	78	78
	50	68	76	73,33	88	85	84	83	89,20	92,20
	75	65,33	84	70,67	86	85,33	88	90,50	90,27	87,27
	100	68	78	69,33	86	84	89,33	87,50	91,20	93,40
	200	66	80	71,33	86	85	89	86,50	93,20	91,60
	300	65,33	80,67	72	87,33	85	88,67	87,50	93,87	91,93
	400	66	80,50	71,83	86	85	88,50	86,50	93,70	92,10
	500	65,60	79,60	70,53	86,40	84,40	89,60	87,10	92,80	92,20
	1000	66,20	79,80	71,33	86	84,80	89,20	86,50	93,40	92,60

Her iki çizelgeden de yöntemlerin başarımları hakkında çeşitli çıkarımlarda bulunulabilir. Örneğin Çizelge 4.2'de öncelikle MC yöntemiyle yapılan 25 ve 50 adet örnekleme LHÖ yöntemi ile 1000 örnekleme alındığında elde edilen sonuçlarla uyum değerleri incelenirse bunların sırasıyla %66,20 ve %79,80 olduğu görülmektedir. Bunun yanında LHÖ yöntemiyle yapılan 25 ve 50 örnekleme MC yöntemi ile 1000 örnekleme alındığında elde edilen sonuçlarla uyum değerleri ise sırasıyla %78 ve %92,2'dir.

Yalnızca bu sonuç bile LHÖ yönteminin daha az sayıda örnekleme ile daha gerçekçi sonuçlar almada etkili olduğunu yorumunun yapılmasını sağlayabilir. Çünkü çok yüksek sayıda alınan örneklemlerle elde edilen sonuçlara LHÖ yöntemiyle çok daha az örneklemeyle yaklaşılabildiği görülmektedir. MC yöntemi ise az sayıda örneklemede, LHÖ yönteminden daha başarısız görünmektedir.

Çizelge 4.3 : MC ve LHÖ yöntemlerinin farklı örnekleme sayıları için hesapladıkları sönüm dağılımlarının uyum değerleri (ρ).

		MC								
		25	50	75	100	200	300	400	500	1000
LHÖ	25	68	64	62,67	74	79	76	68	79,20	82,40
	50	64	68	66,67	76	88	84	81,50	88	88,20
	75	65,33	74,67	62,67	78	92,33	88	88,50	91,33	90,67
	100	64	74	64,67	80	91	86,67	85,50	93,20	92,20
	200	64	73	64,67	79	92	87,67	86,50	91,20	90,40
	300	64	72,67	65,33	80	92	88,67	86,17	91,07	90,07
	400	65	74,50	64,67	79,50	93	86,33	86	92,10	91,90
	500	64	72,40	64,27	79,60	92	88,13	86,30	92	91,40
	1000	64,20	73	64,47	79,60	92,20	87,73	86,30	92	91,20

Yöntemlerin kendi içlerinde kıyaslamaları da yine uyum değerleri yardımıyla yapılabilir. Buna göre MC ve LHÖ yöntemlerinin uyum değerleri üzerinden kendileri için yapılan karşılaştırmaları Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'teki gibidir. Bu iki çizelgede özdeğerlerin hesaplanması göz önünde tutulmuştur.

Çizelge 4.4 : MC yönteminin farklı örnekleme sayıları için kendi bulduğu özdeğer dağılımlarının uyum değerleri ($\% \rho$).

		MC								
		25	50	75	100	200	300	400	500	1000
MC	25	100	56	62,67	66	78	66	66,5	64,8	65,8
	50	56	100	78,67	80	75	74	78,5	80	78,8
	75	62,67	78,67	100	81,33	80,33	72,67	69,17	74,93	70,53
	100	66	80	81,33	100	87	86,67	86,5	84,8	84,4
	200	78	75	80,33	87	100	86	83	85,4	83
	300	66	74	72,67	86,67	86	100	87,5	89,47	88,33
	400	66,5	78,5	69,17	86,5	83	87,5	100	82,3	83
	500	64,8	80	74,93	84,8	85,4	89,47	82,3	100	93,4
	1000	65,8	78,8	70,53	84,4	83	88,33	83	93,4	100

Bu iki çizelgedeki uyum değerlerinden yola çıkarak yöntemlerin başarımları için yöntemlerin birbirleriyle uyum değerleri çizelgeleri için yapılabılır. Buna göre MC yöntemiyle 25 ve 50 örnekleme alındığı durumda bulunan dağılımların yine MC yöntemiyle ve 1000 örnekleme alınarak bulunan dağılımlarla uyum değerleri sırasıyla %65,8 ve %78,8'dir. Bunun yanında LHÖ yöntemiyle 25 ve 50 örnekleme alındığı durumda bulunan dağılımların yine LHÖ yöntemiyle ve 1000 örnekleme alınarak bulunan dağılımlarla uyum değerleri ise sırasıyla %78,8 ve %89,4 olmaktadır.

Çizelge 4.5 : LHÖ yönteminin farklı örnekleme sayıları için kendi bulduğu özdeğer dağılımlarının uyum değerleri (% ρ).

		LHÖ								
		25	50	75	100	200	300	400	500	1000
LHÖ	25	100	76	78,67	80	79	77,33	78,5	78,8	78,8
	50	76	100	85,33	92	89	89,33	89	89,2	89,4
	75	78,67	85,33	100	92,67	94,33	94	94,17	94,13	93,87
	100	80	92	92,67	100	96	96	96	96,4	96,4
	200	79	89	94,33	96	100	98,33	99,5	99	99
	300	77,33	89,33	94	96	98,33	100	98,67	98,4	98,33
	400	78,50	89	94,17	96	99,5	98,67	100	98,7	99,1
	500	78,80	89,2	94,13	96,4	99	98,4	98,7	100	99
	1000	78,80	89,4	93,87	96,4	99	98,33	99,1	99	100

Bu sonuçlarda da yine LHÖ yönteminin az sayıda örnekleme ile çok sayıda örnekleme MC yönteminde daha yüksek bir başarıyla yaklaştığı görülmektedir. Uyum değerleri hesabı yapılarak LHÖ yönteminin daha az örnekleme ile MC yönteminin ancak çok sayıda örnekleme ile bulduğu sonuçları elde edebildiği ve bu anlamda LHÖ yöntemini kullanmanın analizlerde özellikle hesap yükünü azaltma ve süreyi kısaltma anlamında avantajlı olduğu söylenebilir. Benzer bir karşılaştırma için ileriki bölümlerde yapılan indeks hesaplamaları da kullanılabilir.

4.2.1.2 Olasılıksal indeksin tanımı

Çalışmada yapılan benzetimli olasılıksal küçük işaret kararlılığı analizlerinin sonunda - daha önce de söz edildiği gibi – çok sayıda veri elde edilmektedir. Analiz sonunda bu verilerin istatistiksel olarak değerlendirilmesi, sistemin kararlılığına ve bağlantılı olarak işletilmesine ilişkin önemli ipuçlarına ulaşmak için kullanılabilir.

Bu çalışmada, bu doğrultuda birtakım istatistiksel değerlendirmeler yapılmış ve bölgeler arası salınımın sönümlenme oranının belirli bir değerin üstünde – yani yeterli düzeyde – bulunmasına ilişkin bir indeks tanımlanmıştır. Bu indeks, sistemin istenen bir küçük işaret kararlılığı başarımı yardımıyla hesaplanan ve kararlı işletilebilmesi olasılığına ilişkin bir indekstir.

$$\eta = P(\zeta_{\lambda} \geq \zeta_o, \forall \lambda \in \sigma_{EM}(A)), 0 \leq \eta \leq 1 \quad (4.4)$$

Burada η , 0 ile 1 arasında değerler alan olasılıksal indeksi, $\sigma_{EM}(A)$, A sistem matrisine ilişkin elektromekanik salınım modu spektrumunu, ζ_{λ} elektromekanik salınım modunun sönüm değerini, ζ_o salınım modunun sönüm değeri için kabul edilebilir alt sınırı göstermektedir. İndeks değeri 1'e ne kadar yakınsa, sistem istenen kararlılık düzeyini yakalama açısından o kadar iyi durumdadır. Bu yaklaşım, iki bölgeli test sistemi üzerinde uygulanmış ve bir senaryo üzerinden çeşitli sonuçlara ulaşılmıştır.

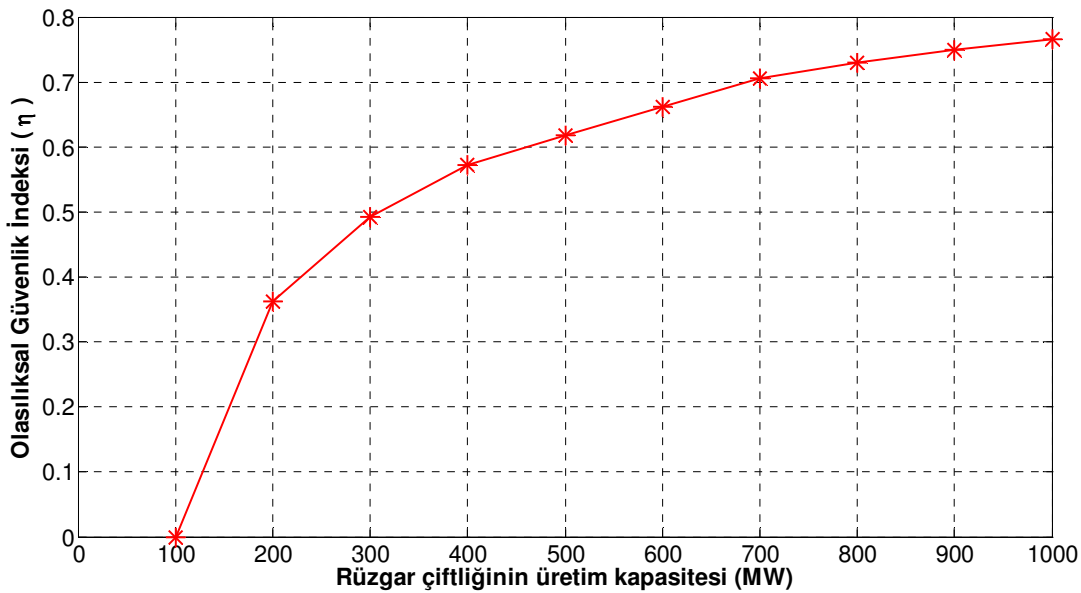
Test sistemi için indeks hesaplamaları

İki bölgeli test sisteminde yine G12 rüzgar çiftliğini temsil etmek üzere, bu kez rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesi ile birlikte sistemin küçük işaret kararlılığı profilinin nasıl değişeceği anlaşılmak istenmektedir. Bu nedenle sisteme eklenecek rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesinin yani sisteme dahil olacak rüzgar türbinli generatör sayısının değişimi ile, söz edilen indeksin değişimi arasındaki ilişki araştırılmıştır. Böylece, bir güç sisteminde kabul edilebilir bir küçük işaret kararlılığı senaryosu varsa veya sistem belirli kararlılık sınırları içerisinde tutulmak isteniyorsa, bu düzeyi korumak (veya yakalamak) için sisteme katılmak istenen rüzgar çiftliğinin en az hangi üretim kapasitesinde olması gerektiği belirlenebilmektedir. Bu sonuca, tanımlanan indeks yardımıyla ulaşmakta ve bu sistem planlamacısına rüzgar çiftliğinin hangi üretim kapasitesinde kurulması gerektiğine ilişkin de bir ipucu verecek ve sistemin kararlı işletilebilmesi açısından bir bakış açısı kazandırabilecektir.

Sistemde güç akışı senaryosu aynı olmakla birlikte rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesi bu kez değişkendir. İndeks hesaplanırken sistemin salınım modunun sönümlenmesi için kabul edilebilir en düşük değer %5 olarak düşünülmüştür.

Rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesi 100 MW olduğunda, MC yöntemi kullanılarak ve 500 örnekleme alınarak söz edilen indeks değeri (SKAG için) 0 olarak hesaplanmıştır. Rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesi 200 MW olduğu durumda bu değer 0,3620 olmaktadır, yani bu durumda sürekli işletmede %36,2 olasılıkla salınım modunun sönüm değeri %5'in üstünde olacaktır ve %63,8 olasılıkla da %5'in altında kalacaktır. Bu durumda, rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesi değeri 200 MW olduğunda, salınımın sönümlemesinin istenen düzeyde kalma olasılığı, alt sınırın da altına düşme olasılığından daha düşüktür, sistem için olumsuz bir durum olduğu söylenebilir.

Benzer şekilde, 100 MW'lık artışlar yapılarak rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesi değeri 1000 MW'a kadar getirilerek her seferinde indeks değeri hesaplanmıştır. Rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesiyle indeks değerinin değişimi ilişkisi Şekil 4.15'deki gibi olmuştur.



Şekil 4.15 : Rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesi ile olasılıksal güvenlik indeksinin değişimi grafiği (Generatör tipinin SKAG olduğu durum).

Görüldüğü gibi, rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesinin artırılmasıyla birlikte, söz edilen indeks değeri de artmıştır. Örneğin rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesi 400 MW olduğu durumda indeks değeri %57,2 olmuştur, ki buna göre sürekli işletmede salınım modunun sönüm değerinin istenen düzeyde olma olasılığının, istenen düzeyin altında kalma olasılığından daha fazla olduğu görünmektedir. Buradan da anlaşılmaktadır ki, mevcut test sistemine katılan rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesi ne kadar büyükse, kararlılık performansının iyi olması olasılığı da o kadar yüksektir.

MC ve LHÖ yöntemlerinin indeks hesaplaması açısından karşılaştırılması

Söz edilen indeksin hesaplanması da benzetim yöntemleriyle gerçekleştirildiğinden dolayı, indeksin hesaplanmasında kullanılan benzetim yöntemi önem kazanmaktadır. İndeksin farklı yöntemlerle hesaplanması sonucu elde edilen indeks değerleri SKAG için Çizelge 4.6'daki gibidir.

Çizelge 4.6 : Farklı örnekleme sayısı ve yöntemler için bulunan indeks değerleri.

Örnekleme Sayısı	MC Yöntemi	LHÖ Yöntemi
25	0,520	0,560
50	0,620	0,540
75	0,560	0,560
100	0,560	0,550
500	0,572	0,558
1000	0,573	0,558

Rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesinin 400 MW olduğu durumda, indeksi hesaplamak üzere iki yöntemin de kullanılması sonucunda, indeks değerinin 0,56-0,57 düzeyinde hesaplandığı görülmektedir. Yani mevcut senaryo için test sisteminde, bölgeler arası salınımın sönümlenme oranının %5'in üstünde olma olasılığı %56-%57 düzeyindedir.

Olaya yöntemlerin başarımı açısından bakılacak olursa, örnekleme sayıları arttıkça LHÖ yöntemiyle hesaplanan değerlerin çok fazla değişmediği görülmektedir. Oysa örnekleme sayılarının değişimi ile birlikte MC yöntemiyle hesaplanan değerlerin daha fazla miktarda değiştiği görülmektedir. Buradan yola çıkarak - yine - LHÖ yöntemiyle daha az sayıda örnekleme ile bile iyi sonuçlar alınabildiği söylenebilir.

4.2.1.3 ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatörler ile yapılan analizler

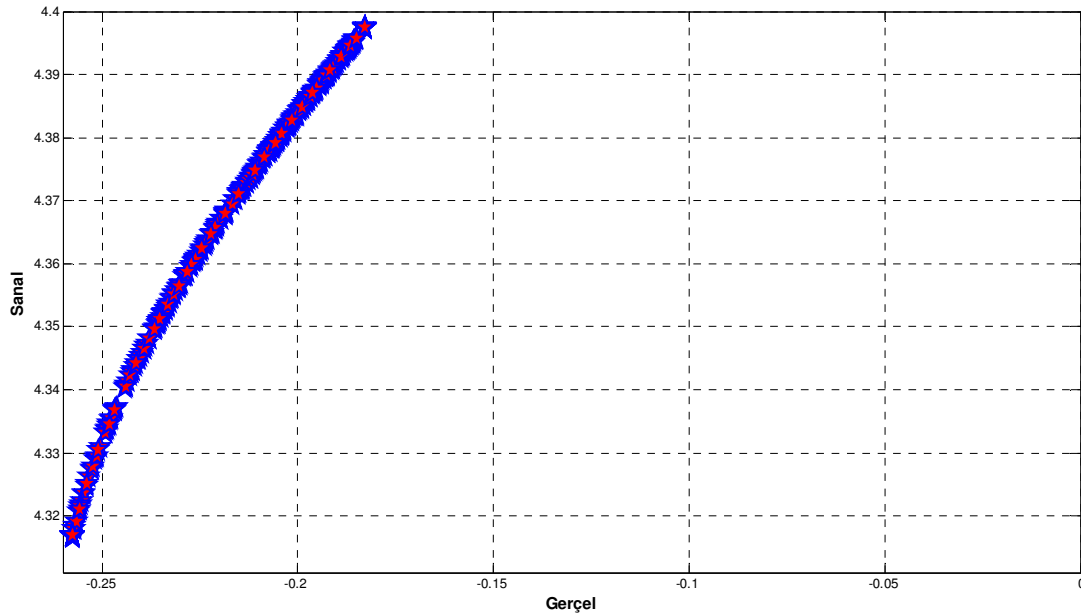
Olasılıksal küçük işaret kararlılığına ilişkin analizler, rüzgar çiftliğindeki rüzgar türbinli generatörlerin ÇBAG olması durumunda da tekrarlanmıştır. Bir önceki analiz sonuçları ile farklılık gösteren tek şey, bu kez rüzgar türbinli generatör tipinin değiştirilmiş olmasıdır. Güç akışı ve işletme senaryoları aynıdır. Bu durumda da analizler, hem MC hem de LHÖ benzetim yöntemleriyle tekrarlanmıştır.

MC yöntemiyle yapılan analizler

SKAG'lerin kullanıldığı durumda olduğu gibi yine, olasılıksal küçük işaret kararlılığı analizleri öncelikle MC benzetim yöntemi kullanılarak yapılmıştır. MC ile 500 örnekleme alındığı ve rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesinin de yine 400 MW olduğu durumda kararlılık analizine ilişkin veriler elde edilmiştir.

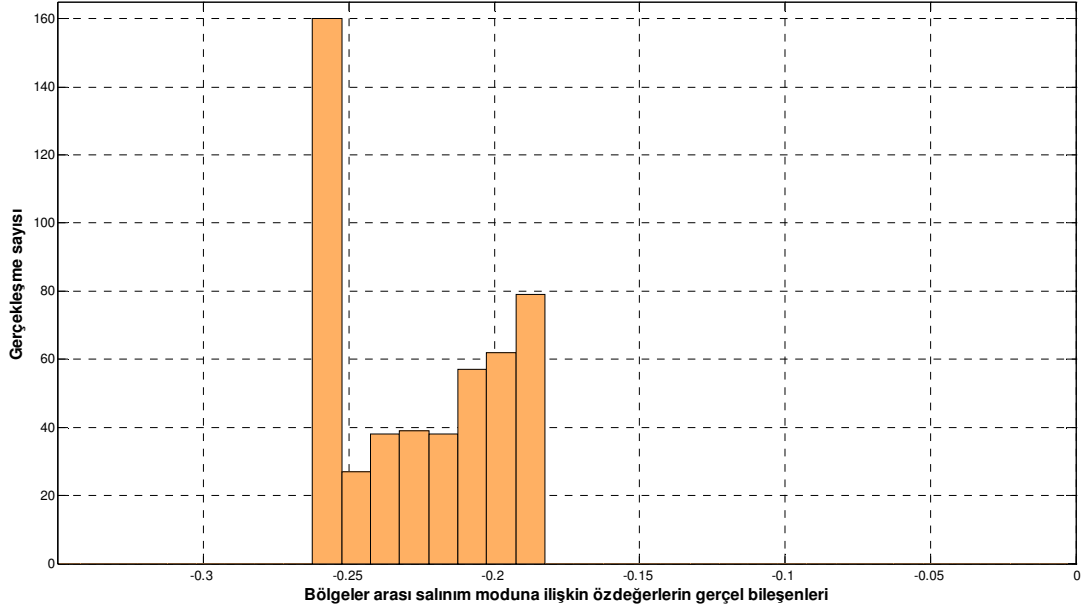
Yapılan analizlerde, daha önce de olduğu gibi, bölgeler arası salınım modunun ne yönde değiştiği temel gösterge olarak incelenmiştir.

Bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin farklı örneklemeelerde düzlemde aldıkları konumlar, Şekil 4.16'da görülmektedir.



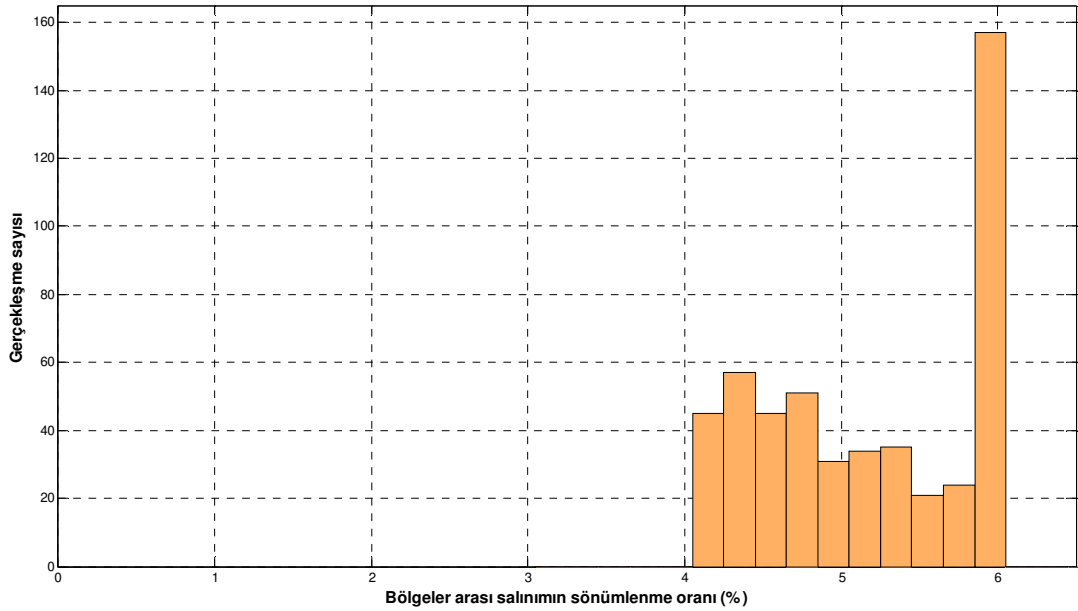
Şekil 4.16 : MC yöntemiyle yapılan örneklemeelerde elde edilen, salınım moduna ilişkin özdeğerlerin düzlemde gösterimi (500 özdeğer).

Bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenleri histogram olarak Şekil 4.17'de görülmektedir.



Şekil 4.17 : Bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin MC yöntemiyle alınan 500 örnekleme boyunca dağılımı.

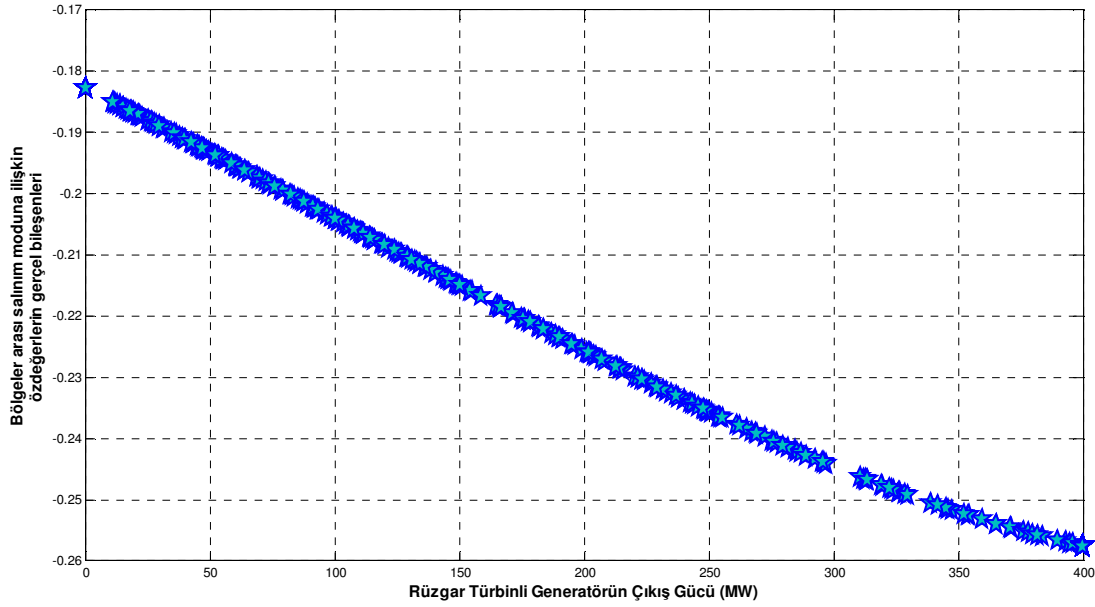
Benzer dağılım, örneklemlerde elde edilen bölgeler arası salınımın sönümlenme oranları için de hesaplanırsa Şekil 4.18'deki histogram elde edilir.



Şekil 4.18 : Bölgeler arası salınım modunun sönümlenme değerlerinin MC yöntemiyle alınan 500 örnekleme boyunca dağılımı.

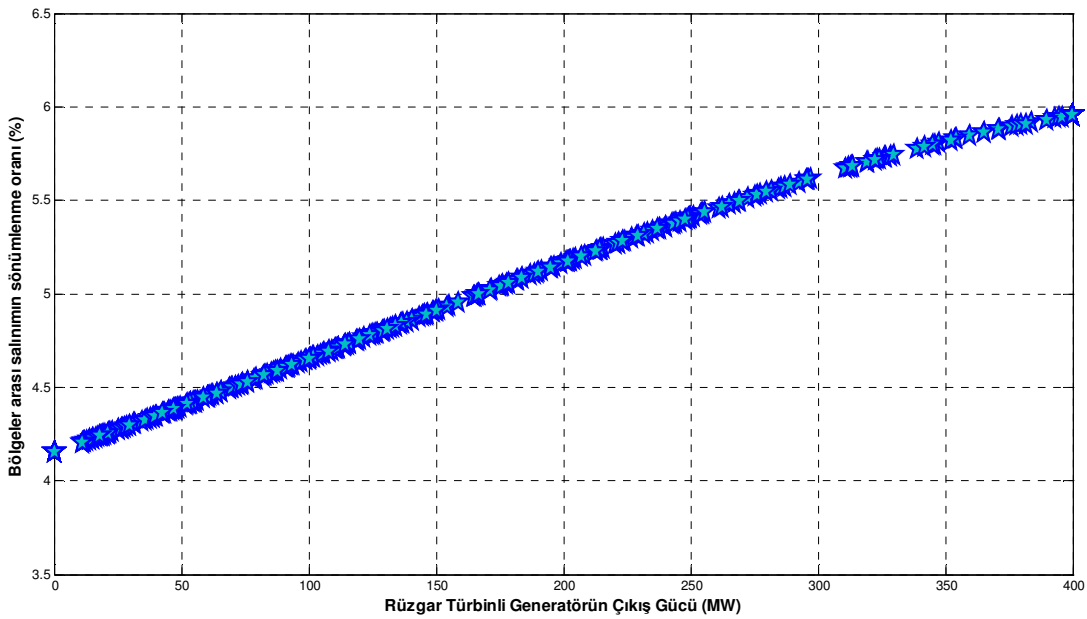
Rüzgar türbinli generatörün çıkış gücünün değişimine karşılık bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi grafiği Şekil 4.19'daki gibidir. İki büyüklüğün arasındaki korelasyon -%99,66 olmuştur, yani rüzgar türbinli

generatörün çıkış gücünün artması küçük işaret kararlılığı açısından daha olumlu bir sonuç ortaya çıkarmıştır.



Şekil 4.19 : ÇBAG'ün çıkış gücü ile bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi (korelasyon= -%99,66).

Rüzgar türbinli generatörün çıkış gücünün değişimine karşılık bölgeler arası salınının sönümlenme oranının değişimi grafiği de Şekil 4.20'deki gibidir. Aralarındaki korelasyon %99,75 gibi yüksek bir değerdedir.



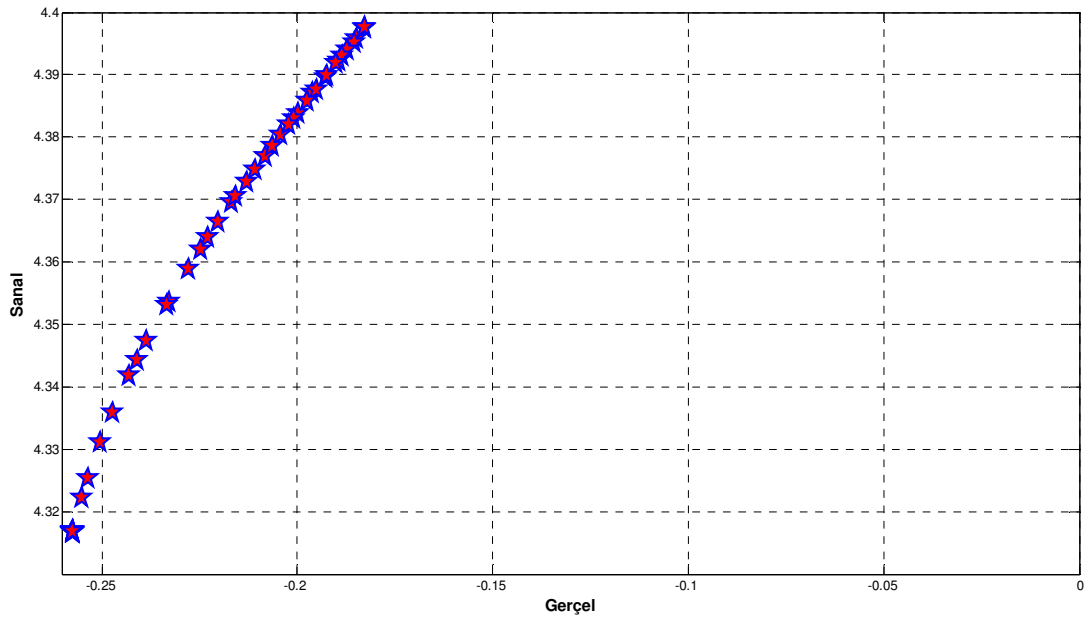
Şekil 4.20 : ÇBAG'ün çıkış gücü ile bölgeler arası salınının sönümlenme oranlarının değişimi (korelasyon= %99,75).

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'den görüldüğü gibi, güç akışı senaryosu içinde, bölgeler arası güç akışını rüzgar türbinli generatörün karşılama miktarı arttıkça doğru orantılı olarak bölgeler arası salınımın sönümlenmesi artmakta ve bu anlamda küçük işaret kararlılığı da doğrudan olumlu yönde etkilenmektedir.

LHÖ yöntemiyle yapılan analizler

Bu kez LHÖ yöntemiyle analizler, ÇBAG tipi makineler kullanıldığı durumda yapılmaktadır. Rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesi 400 MW ve örnekleme sayısı 50 olmak üzere, temel bazı küçük işaret kararlılığı parametrelerinin değişimi incelenmiştir.

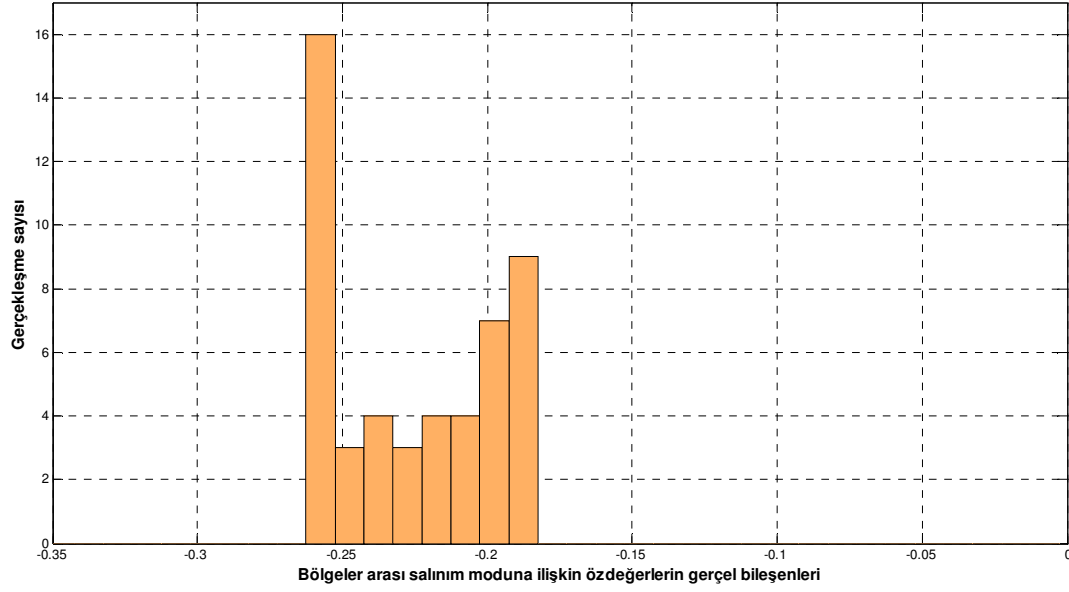
Bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin düzlemde konumları, Şekil 4.21'deki gibidir.



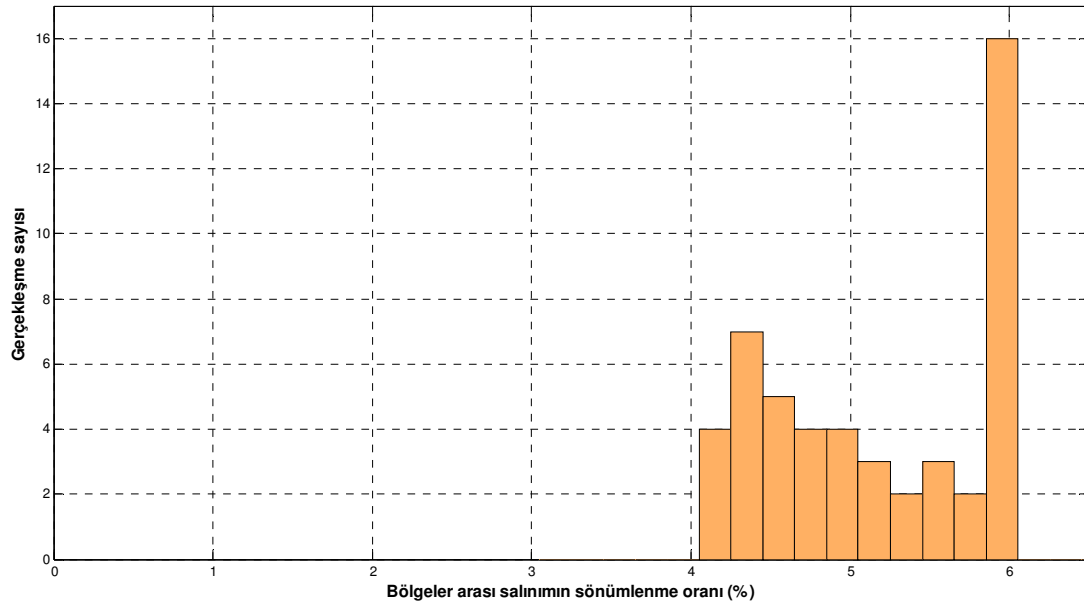
Şekil 4.21 : Bölge arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin düzlemde konumları (LHÖ yöntemiyle, 50 örnekleme için).

Yine bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin histogram gösterimi Şekil 4.22'deki gibidir.

Bölgeler arası salınımın sönümlenme oranlarının histogram dağılımı Şekil 4.23'deki gibidir.

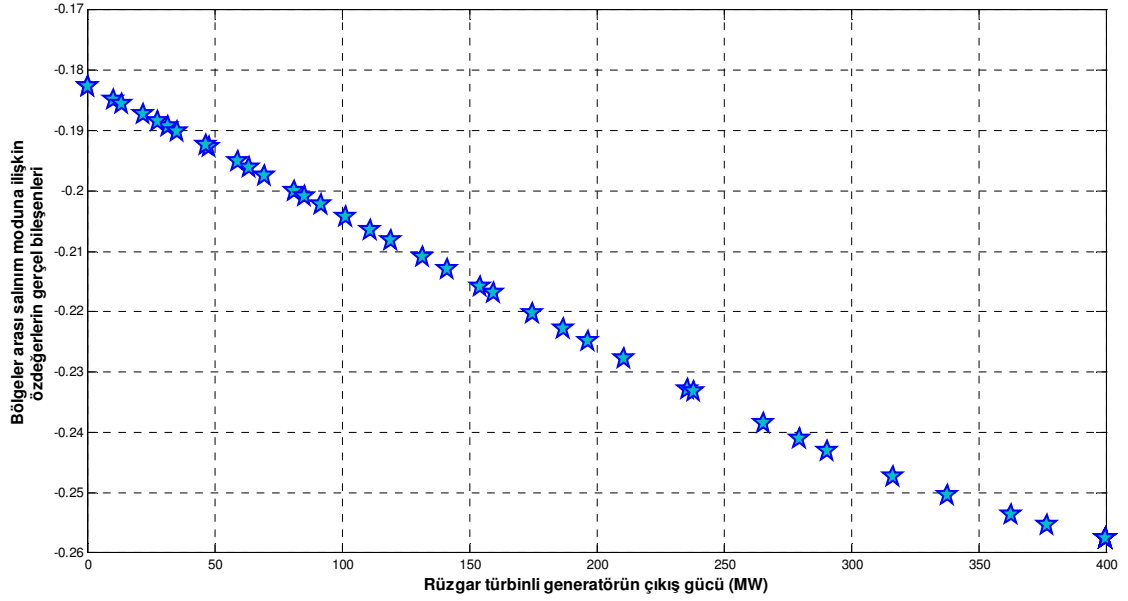


Şekil 4.22 : Bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin LHÖ yöntemiyle ve 50 örnekleme boyunca histogram dağılımı.



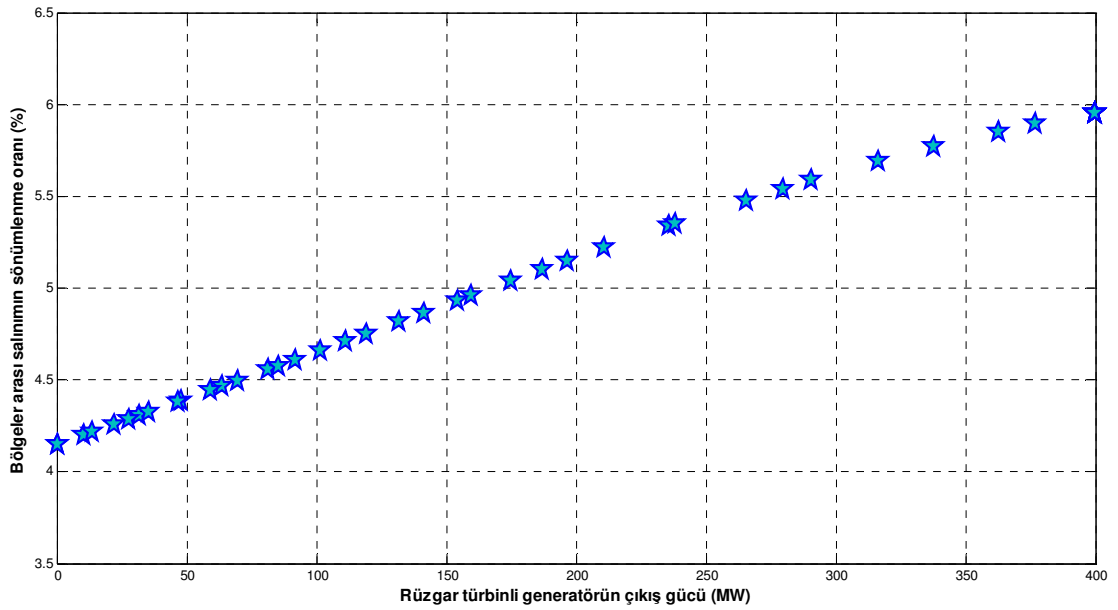
Şekil 4.23 : Bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin LHÖ yöntemiyle ve 50 örnekleme boyunca histogram dağılımı.

Rüzgar türbinli generatörün çıkış gücüyle bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi Şekil 4.24'deki gibidir. Aralarında kuvvetli bir orantı olduğu görülmektedir. İki büyüklük arasındaki korelasyon - %99,69 değerindedir. Bu da güç akışına rüzgar türbinli generatörün katılmasıyla küçük işaret kararlılığına ait olumlu bir eğilimin arasında kuvvetli bir ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 4.24 : ÇBAG'ün çıkış gücü ile bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeşlerin gerçel bileşenlerinin değişimi (korelasyon= -%99,69).

Rüzgar türbinli generatörün çıkış gücüyle bölgeler arası salınının sönümlenme oranının değişimi Şekil 4.25'deki gibidir.



Şekil 4.25 : ÇBAG'ün çıkış gücü ile bölgeler arası salınının sönümlenme oranının değişimi (korelasyon= %99,76).

Bir önceki grafikte elde edilen sonuç ve yorumlar, bu grafikte de benzer şekildedir; yani güç akışına rüzgar türbinli generatörün artan güçlerde katılması, küçük işaret kararlılığı açısından daha olumlu bir sonucu da beraberinde getirmiştir; çünkü salınının sönümlenme oranı artmıştır. Rüzgar türbinli generatörün çıkış gücü ile

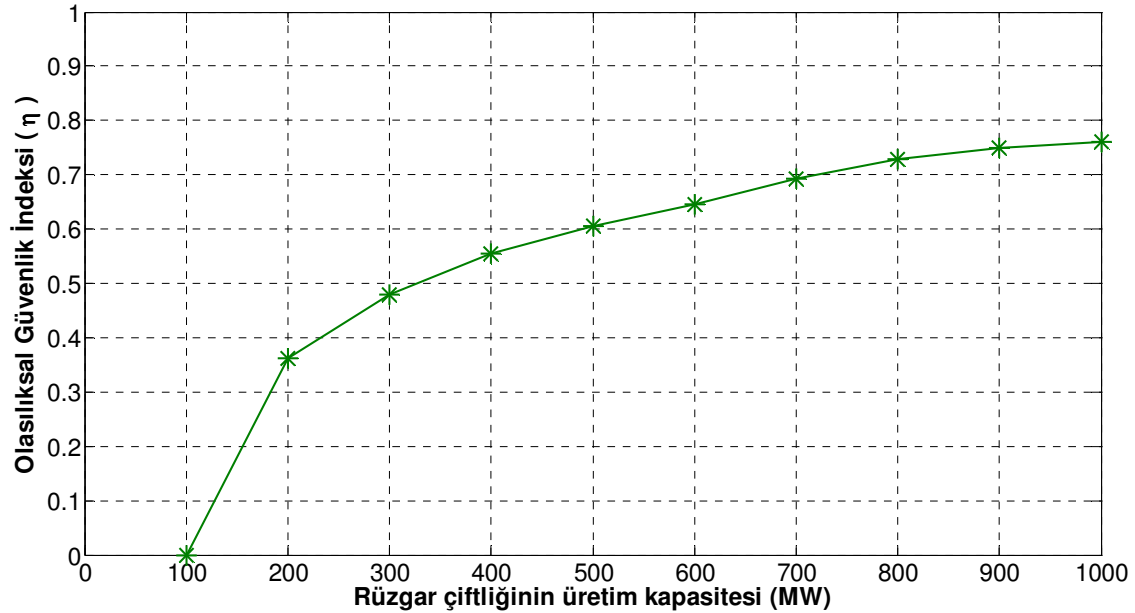
bölgeler arası salınımın sönümlenme oranının korelasyonu %99,76 olmuştur. Bu da çok kuvvetli bir ilişkidir ve rüzgar türbinli generatörün küçük işaret kararlılığına – en azından incelenen sistem için - olumlu bir etkisi olduğunun bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.

Test sistemi için indeks hesaplamaları

Daha önce, sisteme ait küçük işaret kararlılığı odaklı bir güvenlik değerlendirmesinin yapılmasını sağlayan indeks, SKAG tipi generatörler için hesaplanmıştı. İndeks bu kez ÇBAG tipi makinelerin kullanıldığı durumda hesaplanmıştır.

Yine aynı test sisteminde ve yine G12 rüzgar çiftliğini göstermek üzere, bu kez rüzgar çiftliğindeki generatörlerin ÇBAG olduğu durumda, daha önce de yapıldığı gibi üretim artışlarıyla birlikte çeşitli güç akışı analizi sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen bu güç akışlarının dinamik makine modelleriyle birlikte kullanılması ile özdeğer analizleri yapılmış ve indeks hesaplanmıştır.

Olasılıksal indeks yardımı ile yine istenen bir küçük işaret kararlılığı düzeyi için bir güç sistemine katılmak istenen rüzgar çiftliğinin en az hangi üretim kapasitesi ile kurulması gerektiğine ilişkin bir yorum yapılmak istenmiştir. Sonuçlar, SKAG için bulunanlara çok benzemektedir (Şekil 4.26).



Şekil 4.26 : Rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesi ile olasılıksal güvenlik indeksinin değişimi grafiği (Generatör tipinin ÇBAG olduğu durum).

Bu kez de yine ÇBAG tipi generatörlerin kullanıldığı durumda, SKAG için yapılanlara benzer yorumlar yapılabilir. Rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesini arttırmasıyla indeks değeri de artmaktadır. Bu da sistemin kabul edilebilir en düşük sönüm değerinin daha büyük olasılıkla üstünde kalacağı anlamına gelir. Hangi indeks değerini seçmenin kararını sistem planlamacısı verecektir. Bunun yanında kabul edilebilir sınır değerin seçilmesi de aynı şekilde tercihle ilgilidir. Örneğin en az %50 olasılıkla sönüm değerinin %5'in üstünde kalması isteniyorsa buradan, test sistemine eklenecek rüzgar çiftliğinin en az 300 MW-400 MW arasında bir üretim kapasitesine sahip olması gerektiği sonucu çıkarılabilir.

4.2.1.4. Rüzgar türbinli generatör tiplerinin karşılaştırılması

Şimdiye kadar olasılıksal küçük işaret kararlılığına ilişkin analizler, SKAG ve ÇBAG tipi generatörlerin bulunduğu sistemler için ayrı ayrı yapılmıştı. Bu iki tip analizin sonuçları birarada değerlendirildiğinde, kullanılan rüzgar türbinli generatör tipinin de küçük işaret kararlılığına ne yönde ve ne miktarda etkisinin olduğunu görmek mümkün olacaktır. Yapılan analizlerde; generatör tipinin değişmesinin (SKAG ve ÇBAG tipleri açısından) kararlılığa ilişkin sonuçlarda büyük farklılık oluşturmadığı gözlenmiştir.

Rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesinin 400 MW olduğu durumda, generatör tiplerinin farklılığını indeks açısından incelemek için Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8 oluşturulabilir.

Çizelge 4.7, indeks değerinin MC yöntemi ile oluşturulduğu duruma ilişkin sonuçları; Çizelge 4.8 ise aynı indeks değerlerinin LHÖ yöntemi ile hesaplandığı duruma ilişkin sonuçları göstermektedir. Her iki çizelgede de örnekleme sayısının değişimine karşılık olarak indeks değerinin değişimi görülmektedir. Beklenen durum, çizelgelerdeki değerlerin tek bir değere yakınsamasıdır, zaten öyle olmuştur. Generatör tiplerinin farklılığını anlayabilmek üzere her iki çizelgenin ulaştığı değerler birbirleriyle karşılaştırılabilir.

Hem Çizelge 4.7'de MC yöntemiyle, hem de Çizelge 4.8'de LHÖ yöntemiyle yapılan örneklemelelerde, SKAG ve ÇBAG tipi generatörler için hesaplanan indeks değerlerinin büyük bir farklılık taşımadığı görülmektedir. Yalnızca, ÇBAG tipi için elde edilen indeks değeri, kimi durumlarda SKAG tipi için elde edilenden biraz daha küçük olmuştur.

Çizelge 4.7 : SKAG ve ÇBAG tipi generatörler için MC yöntemi ile hesaplanan indeksler.

Örnekleme sayısı	SKAG	ÇBAG	Örnekleme sayısı	SKAG	ÇBAG
25	0,520	0,520	100	0,560	0,550
50	0,620	0,580	500	0,572	0,554
75	0,560	0,560	1000	0,573	0,557

Çizelge 4.8 : SKAG ve ÇBAG tipi generatörler için LHÖ yöntemi ile hesaplanan indeksler.

Örnekleme sayısı	SKAG	ÇBAG	Örnekleme sayısı	SKAG	ÇBAG
25	0,5600	0,5600	100	0,5500	0,5500
50	0,5400	0,5400	500	0,5580	0,5460
75	0,5600	0,5467	1000	0,5580	0,5450

Generatör tiplerinin değişimi, daha önce de söz edilen bir senaryo içinde göz önüne alınır ve rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesinin değişimi ile indeks değerinin değişimleri SKAG ve ÇBAG makine tipleri için hesaplanırsa; karşılaştırma yapabilmek için başka bir ölçek daha elde edilmiş olur. Generatör tiplerinin karşılaştırılmasına bu kez, rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesi değerleri de bir parametre olarak katılmaktadır. Bu durumda elde edilen sonuçlar, Şekil 4.27'deki grafikte görülmektedir.



Şekil 4.27 : Rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesi değişimine karşılık indeks değerinin değişimi (SKAG ve ÇBAG tipi generatörler için).

4.2.2 Hem üretimin hem de tüketimin değişken olduğu durum

Şimdiye kadar yapılan testlerde, belirsiz ve olasılıksal olarak kabul edilen tek parametre üretim değeri idi. Gerçekte, tüketim miktarı da her zaman sabit değildir ve anlamlı miktardaki değişimler söz konusu olduğunda bunları da hesaba katmak gerekir.

Üretimin ve tüketimin değişimi birlikte göz önünde bulundurulduğu zaman da yine öncelikle özdeğer analizlerinin yapılması gerekir. Olasılıksal bir durum söz konusu olduğu ve yine benzetimli bir olasılıksal yöntemle çalışıldığı için, yöntemin bu kez birden fazla sayıda değişkeni doğru bir şekilde örnekleyebilmesi gerekmektedir. Bunun için bu çalışmada, iki değişimin de ayrı ayrı olasılık dağılımları ve birbirleri arasındaki korelasyon göz önünde bulundurularak örneklemeler alınmıştır.

Bu bakış açısı ile, gerçekleştirilen tüm analizlerde LHÖ yöntemi ile örneklemeler alınarak, özdeğer analizi veya indeks hesaplaması yapılmış ve bunun için şu işlem sırası takip edilmiştir:

- 1) Üretimin ve tüketimin değişimleri birbirlerinden bağımsız olarak ve her ikisinin de bir olasılık dağılımına uyduğu düşünülerek ayrı ayrı LHÖ yöntemiyle örneklemeleri alınmıştır.

- 2) Ayrı ayrı örneklenen üretim ve tüketim değerleri, [17]'de önerilen algoritma yardımıyla istenen korelasyonu sağlayacak şekilde tekrar sıralanmıştır (eşleştirilmiştir). Bu durumda bir değişkenin sıralaması diğerine göre değiştirilerek uygun korelasyon değeri kolayca elde edilebilmektedir.
- 3) Bu durumda elde edilen üretim ve tüketim değerleri, güç akışlarını meydana getirmiş; özdeğer analizlerini ve indeks hesaplamalarını olanaklı hale getirmiştir.

Bu kez güç akışı senaryosunda daha önce yapılanlara göre birkaç değişiklik söz konusudur. Bu duruma ilişkin üretim ve yük değerleri Çizelge 4.9'daki gibidir. Çizelgede koyu renkle gösterilmiş değerler, bir önceki senaryodan farklılık gösteren değerlerdir.

Çizelge 4.9 : Üretim ve tüketim değişken olduğu durumda test sistemine ait güç değerleri.

G1+G12	G2	G3	G4	L1	L2
(MW)	(MW)	(MW)	(MW)	(MW)	(MW)
186	967	719	700	967	1560

Üretim ve tüketim belirsizliklerini göstermek üzere oluşturulan güç akışı senaryosundaki belli başlı değerler için şunlar söylenebilir:

Üretim: Senaryoya göre, rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesi 400 MW'tır. Farklı rüzgar hızlarına göre rüzgar çiftliğinin çıkış gücü 0 MW ile 400 MW arasında değişebilmektedir. Fakat güç akışı senaryosu içinde bunun 186 MW'ı geçmemesi öngörülmektedir.

Tüketim: Senaryoya göre, L2 yükü 1560 MW'tır ve bu değer 1380 MW ile 1920 MW arasında değiştiği öngörülmektedir. Buna göre L2 yükü normal değerinin %11,5 altı ile %23,1 üstü arasında değişim göstermektedir.

Üretim ve tüketim değişkenlikleri hesaplanırken:

Rüzgar hızının Weibull dağılımına uyduğu ve $a=9.3058$, $b=2.6264$ olduğu;

Elektrik yükünün Normal dağılıma uyduğu ve $\mu = 1650$, $\sigma = 90$ olduğu;

kabul edilmiştir.

Elde edilen rüzgar hızı ve elektrik tüketimi miktarı veri çiftleri [17]'deki yöntemle tekrar sıralanırken korelasyonun -%18 olduğu kabul edilmiştir.

Güç akışı senaryosu içinde üretim değerinin hiçbir zaman 186 MW'ı aşmasına, tüketim değerinin de hiçbir zaman 1380 MW - 1920 MW aralığının dışına çıkmasına izin verilmemektedir. Tüm güç akışı senaryoları, söz edilen üretim ve tüketim aralıklarında gerçekleşmektedir.

4.2.2.1. SKAG tipi rüzgar türbinli generatörler ile yapılan analizler

Rüzgar türbinli generatör olarak SKAG tipi makine kullanıldığı ve üretimin yanında tüketimin de değişkenlik gösterdiği durumda, hem özdeğer analizleri yapılarak özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin ve sönüm oranlarının dağılımı hesaplanmış, hem de indeks hesapları yapılmıştır.

LHÖ yöntemi kullanılarak rüzgar hızı ve elektrik tüketimi miktarı örneklemeleri alınmış, daha sonra bu örneklemeler üzerinden güç akışı ve sistem için özdeğer analizleri yapılmıştır. Ayrıca LHÖ yöntemiyle yapılan örneklemeler sonunda, bölgeler arası salınımın düşük sönümlenme olasılığını göz önünde bulunduran indeksin hesaplanması, hem üretim hem de tüketimin değişken olduğu durumda da tekrarlanmış, böylece yine daha az örnekleme ile de indeks değeri için sağlıklı ve gerçekçi sonuçlar bulunmuştur. LHÖ yöntemini kullanmanın avantajı, daha önce de MC ve LHÖ yöntemleri karşılaştırılarak gösterilmişti.

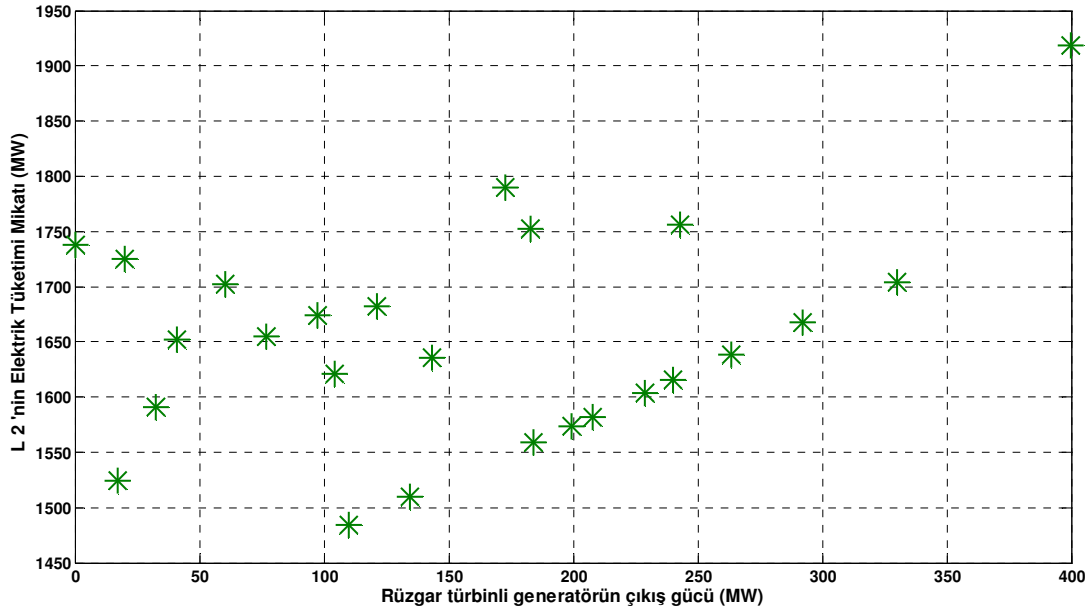
LHÖ yöntemiyle 25 örnekleme alındığı durum

İlk durumda, LHÖ yöntemiyle 25 örnekleme yapıldığı durum göz önünde bulundurulmuş ve analizler SKAG tipi generatör kullanıldığı durum için yapılmıştır.

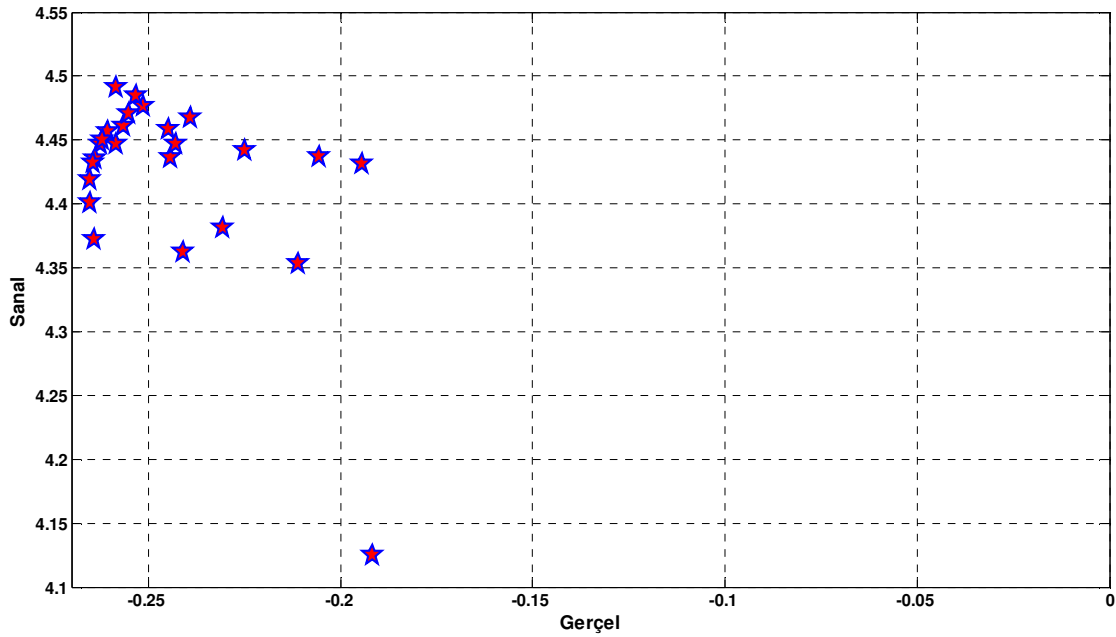
25 örnekleme yapıldığı durumda indeks değeri 0,84 olarak bulunmaktadır.

İlk olarak; yapılan örneklemelerde SKAG tipi rüzgar türbinli generatörlerin çıkış gücüne karşılık L2 yükünün elektrik tüketim miktarı, Şekil 4.28'de görülmektedir.

Şekil 4.29'da, üretim ve tüketim değişimleri gösterilen sistemin bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerinin 25 örneklemede düzlemde aldıkları konumlar görülmektedir.



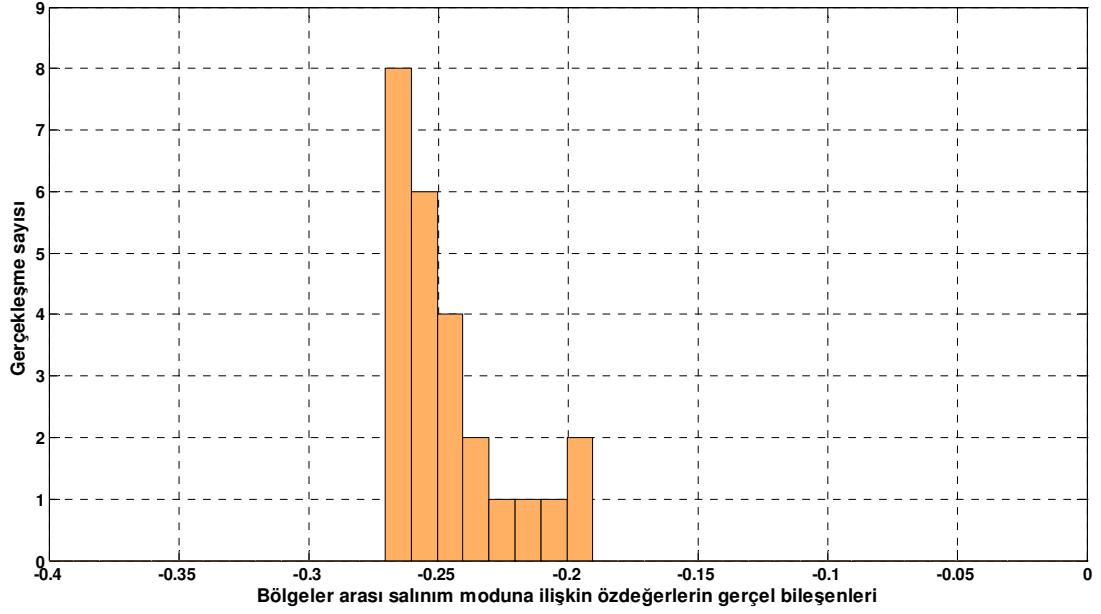
Şekil 4.28 : Örneklemeler boyunca SKAG'ün çıkış gücüne karşılık L2'nin elektrik tüketimi miktarının değişimi (LHÖ-25 örnekleme).



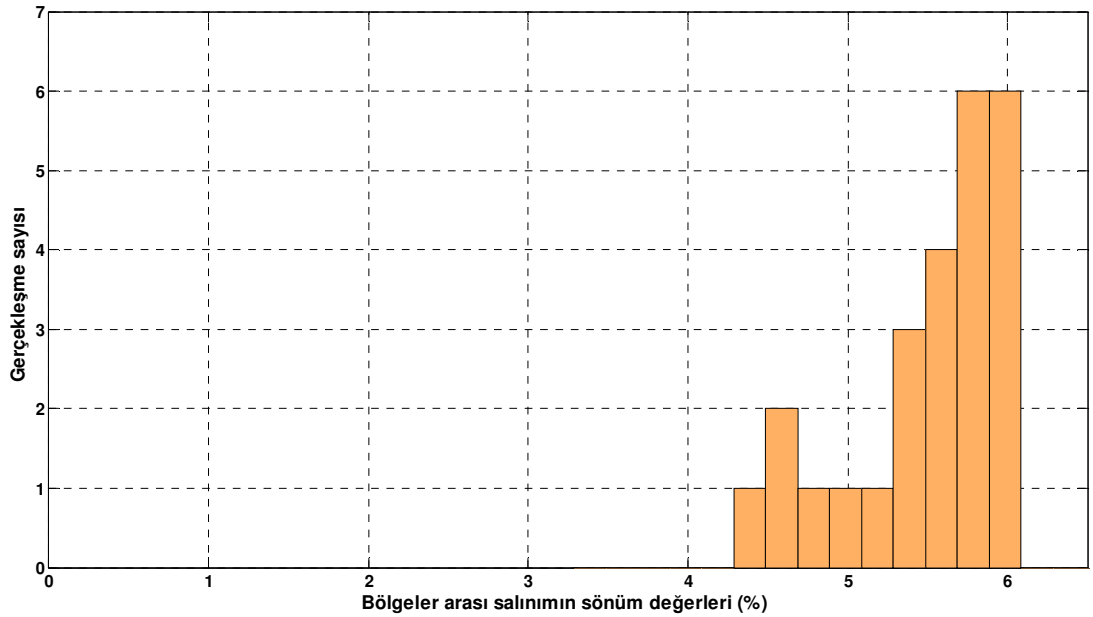
Şekil 4.29 Üretim ve tüketimin değişken olduğu durumda bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin düzlemde konumları. (LHÖ-25 örnekleme)

Yine bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin, farklı örneklemeler boyunca düştükleri aralıklar Şekil 4.30'daki histogramda görülmektedir.

Bölgeler arası salınım modunun sönüm değerlerinin dağılımı da Şekil 4.31'deki gibidir.



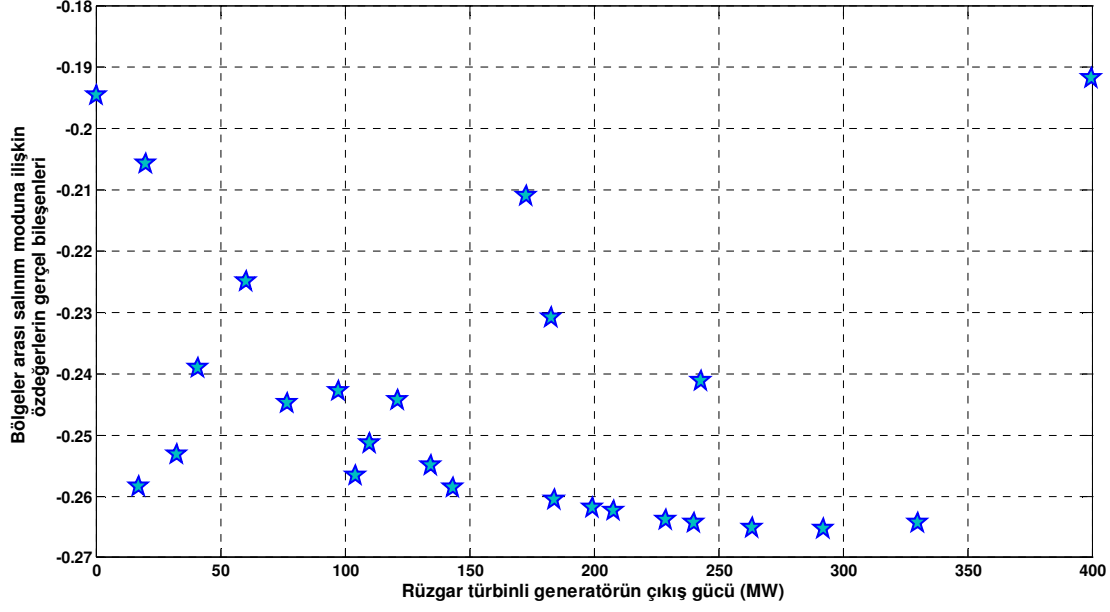
Şekil 4.30 : Üretim ve tüketimin değişken olduğu durumda ilgilenilen özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin LHÖ yöntemiyle dağılımı.



Şekil 4.31 : Üretim ve tüketimin değişken olduğu durumda salınının sönüm değerlerinin LHÖ yöntemiyle dağılımı.

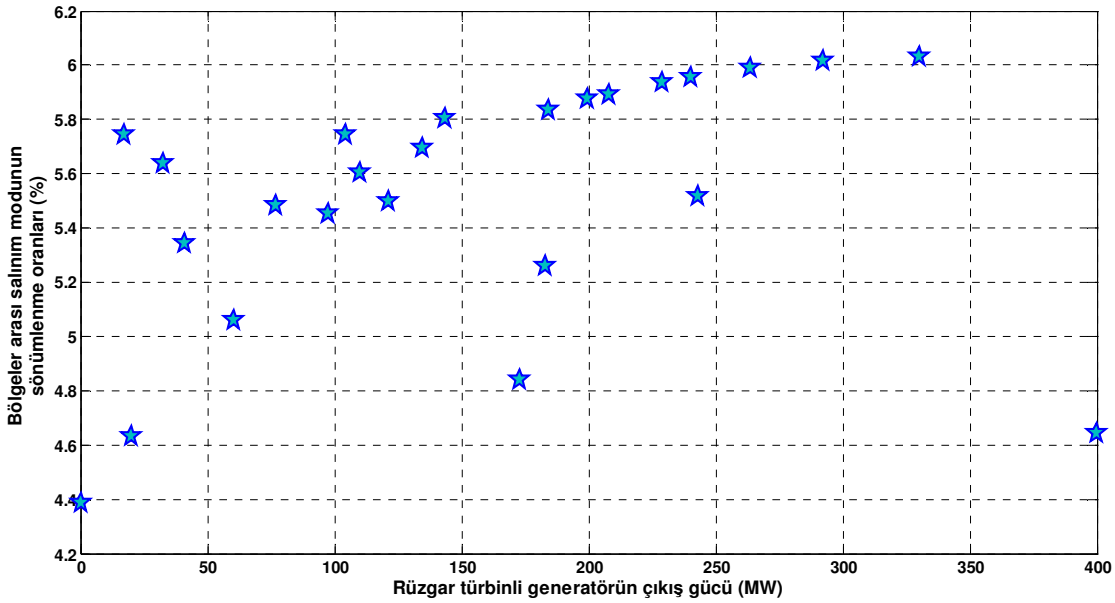
Bu kez üretim ve tüketim değişkenliği söz konusu olduğundan dolayı küçük işaret kararlılığına ilişkin parametreler (özdeğerlerin gerçel bileşenleri ve sönüm oranı gibi) üretim değişimine göre elde edilebileceği gibi tüketim değişimine göre de elde edilebilir.

Rüzgar türbinli generatörlerin çıkış güçlerine göre, bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi Şekil 4.32'deki gibidir.



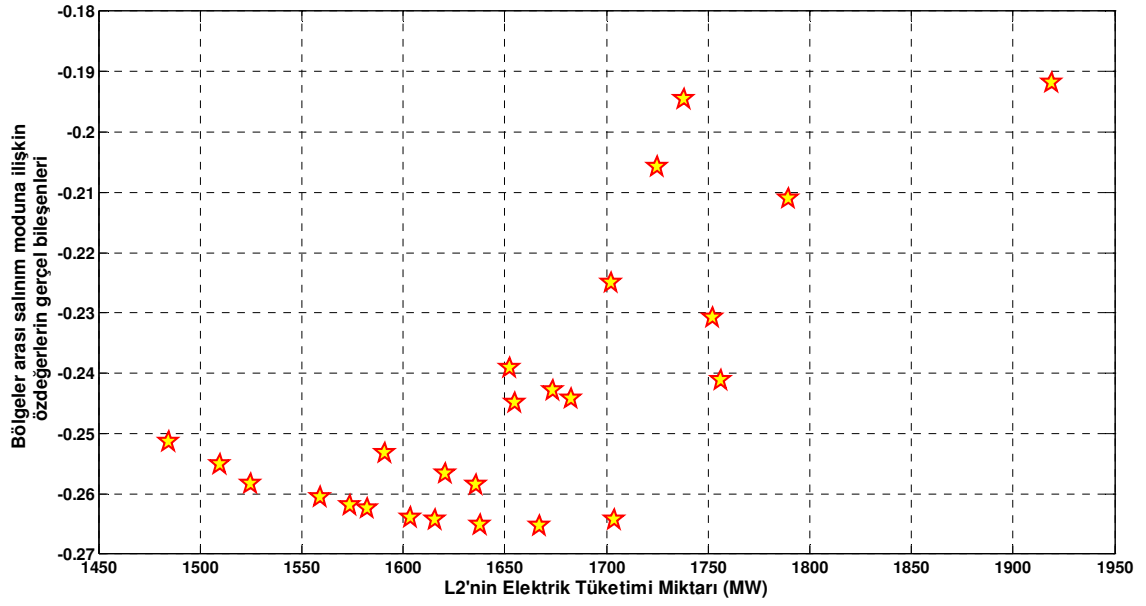
Şekil 4.32 : SKAG'ün çıkış gücüne karşılık bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi.

Bölgeler arası salınının sönümlenme oranının yine üretime göre değişimi Şekil 4.33'deki gibidir.



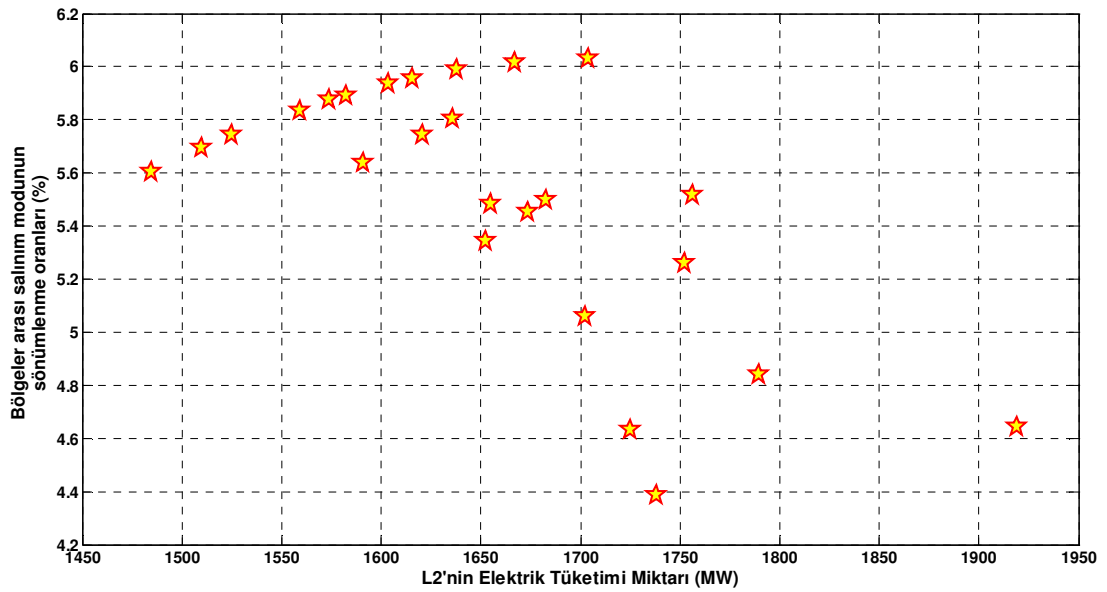
Şekil 4.33 : SKAG'ün çıkış gücüne karşılık bölgeler arası salınının sönümlenme oranının değişimi (üretim ve tüketim değişken).

Bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin bu kez tüketim miktarına göre değişmesi göz önüne alınırsa Şekil 4.34'deki grafik elde edilir. Değişim L2 yükünde gerçekleşmiştir.



Şekil 4.34 : L2 yükünün güç tüketimine karşılık ilgili özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi (üretim ve tüketim değişken).

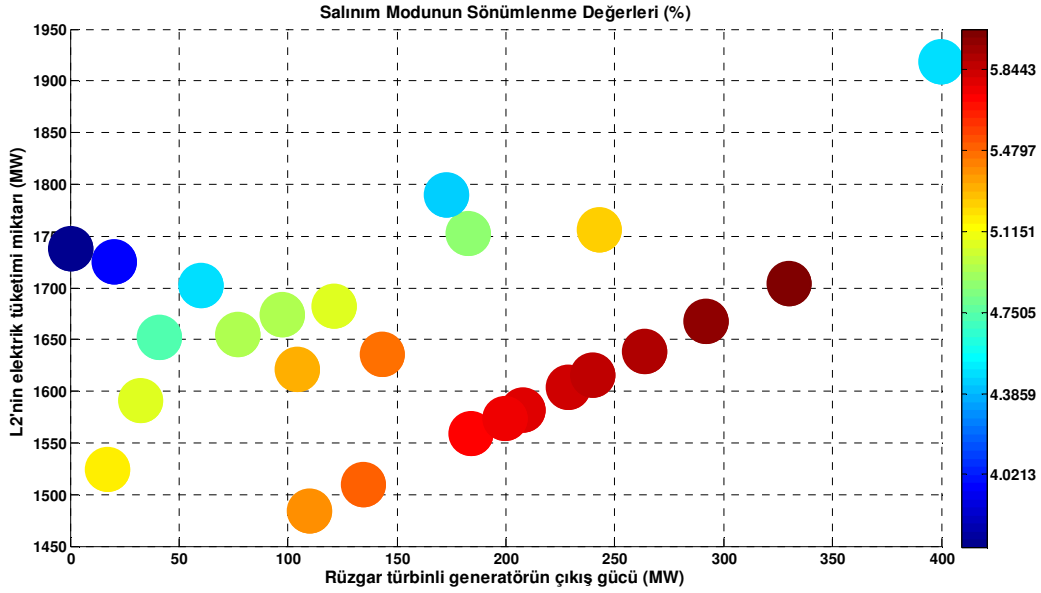
Bölgeler arası salınım modunun sönüm oranı ile L2'nin elektrik tüketimi arasındaki ilişki de Şekil 4.35'deki gibidir.



Şekil 4.35 : L2 yükünün güç tüketimine karşılık salınım modunun sönümleme oranlarının değişimi.

Üretime veya tüketime bağlı olarak çizdirilen grafiklerde net bir eğilim görmek olanaklı değildir. Çünkü üretim değişirken tüketim de farklı bir şekilde değişmekte, tüketim değişirken de üretim farklı bir şekilde değişmektedir. Bu durum da güç akışı senaryosunun oluşmasında birden fazla parametre olduğundan dolayı tek bir

parametreyi kullanarak özdeğerler için net bir eğilim görmeyi zorlaştırmaktadır. Bu yüzden, sonuçları biraz daha netleştirebilmek için üretim, tüketim ve sönüm değerlerinin birlikte gösterildiği, Şekil 4.36'daki grafik elde edilmiştir.



Şekil 4.36 : LHÖ ile 25 örneklemede SKAG'lerin çıkış gücü ve L2'nin elektrik tüketimi miktarına karşılık salınımın sönüm değerinin değişimi.

Şekil 4.36'da, üretim ve tüketim çiftleri için daha iyi olan durumlar kırmızı renk tonlarında görülmektedir. Buna göre salınım modunun yeterli sönümlendiği üretim ve tüketim çiftleri için grafikte bir bölge tanımlaması bile yapılabilir. Bu yeterli sönüm bölgesi tanımı, sistem işletmesinde, üretim ve tüketimin belli sınırlar içinde tutulması gerekliliği şeklinde uygulanabilir.

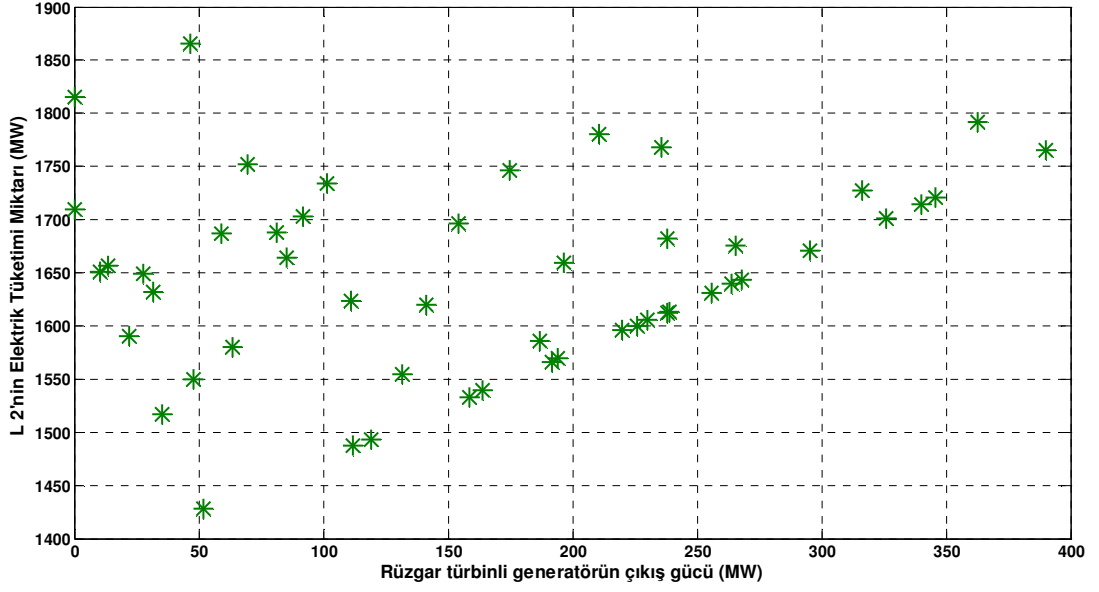
LHÖ yöntemiyle 50 örnekleme alındığı durum

Bu kez LHÖ yöntemiyle 50 örnekleme yapılarak benzer analizler tekrarlanmıştır.

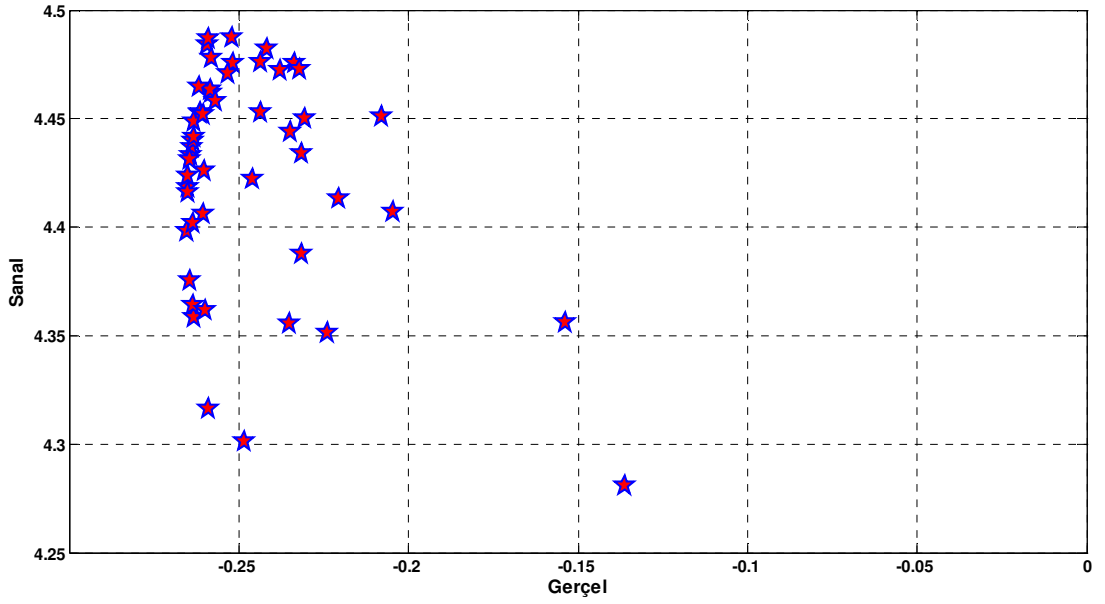
Bu durumda indeks değeri 0,90 olarak hesaplanmaktadır.

Yine ilk olarak; yapılan örneklemelelerde SKAG tipi rüzgar türbinli generatörlerin çıkış gücüne karşılık L2 yükünün elektrik tüketimi miktarı, Şekil 4.37'de gösterilmiştir.

Bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin düzlemde konumları Şekil 4.38'deki gibidir.



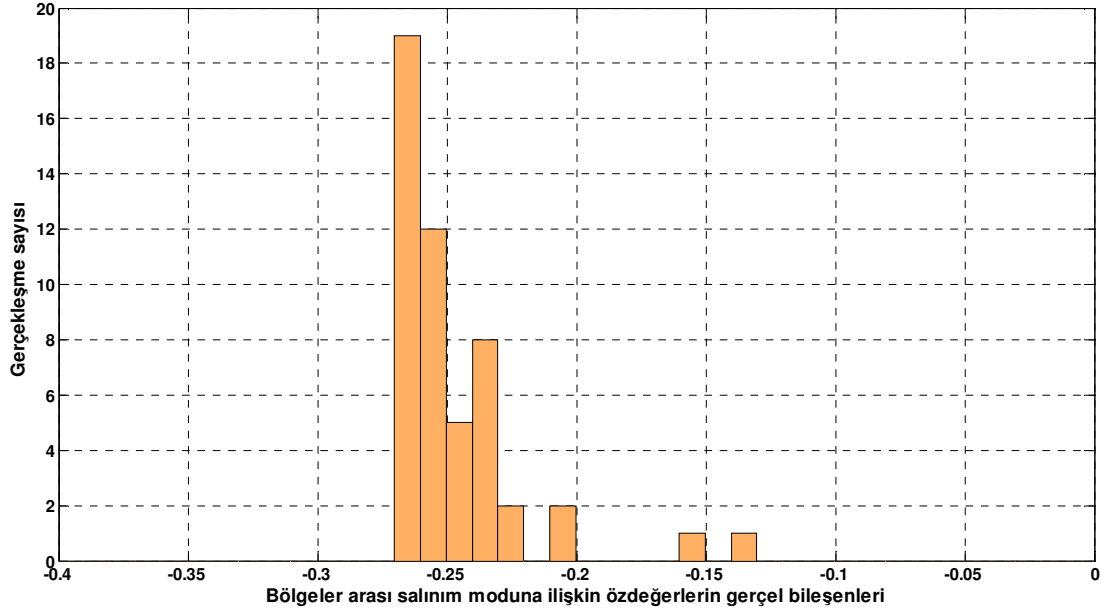
Şekil 4.37 : Örneklemeler boyunca SKAG'ün çıkış gücüne karşılık L2'nin elektrik tüketimi miktarının değişimi (LHÖ-50 örnekleme).



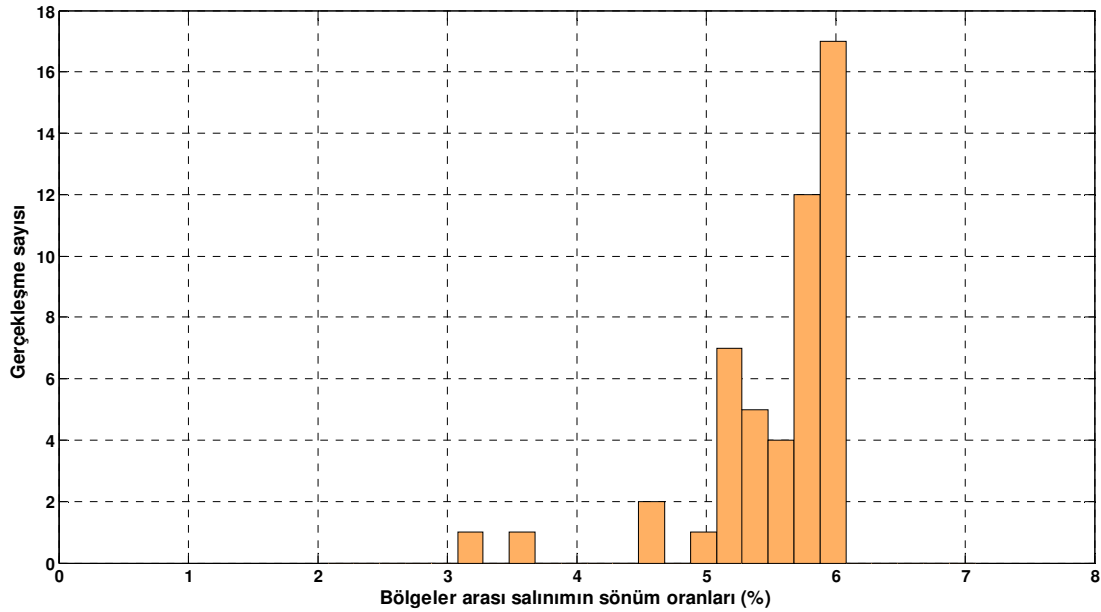
Şekil 4.38 : Üretim ve tüketimin değişken olduğu durumda bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin düzlemde konumları (LHÖ-50 örnekleme).

Bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin 50 örnekleme boyunca dağılımı Şekil 4.39'daki histogramda görülebilir.

Bölgeler arası salınının sönümlenme oranının 50 örnekleme için dağılımı Şekil 4.40'daki histogramda gösterilmiştir.



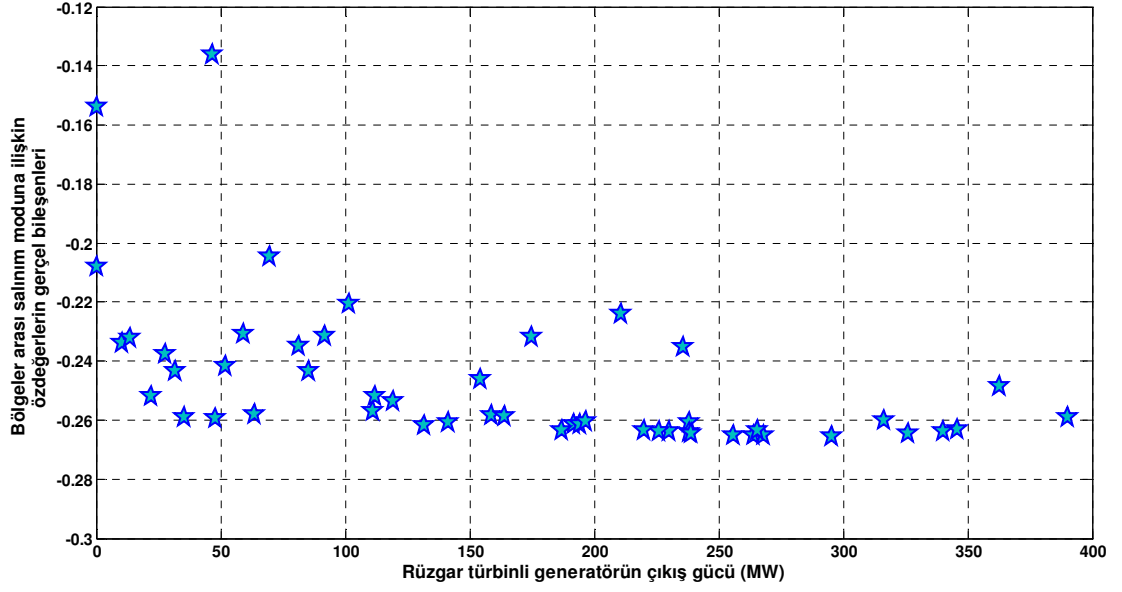
Şekil 4.39 : Üretim ve tüketimin değişken olduğu durumda ilgilenilen özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin LHÖ yöntemiyle, 50 örnekleme boyunca dağılımı.



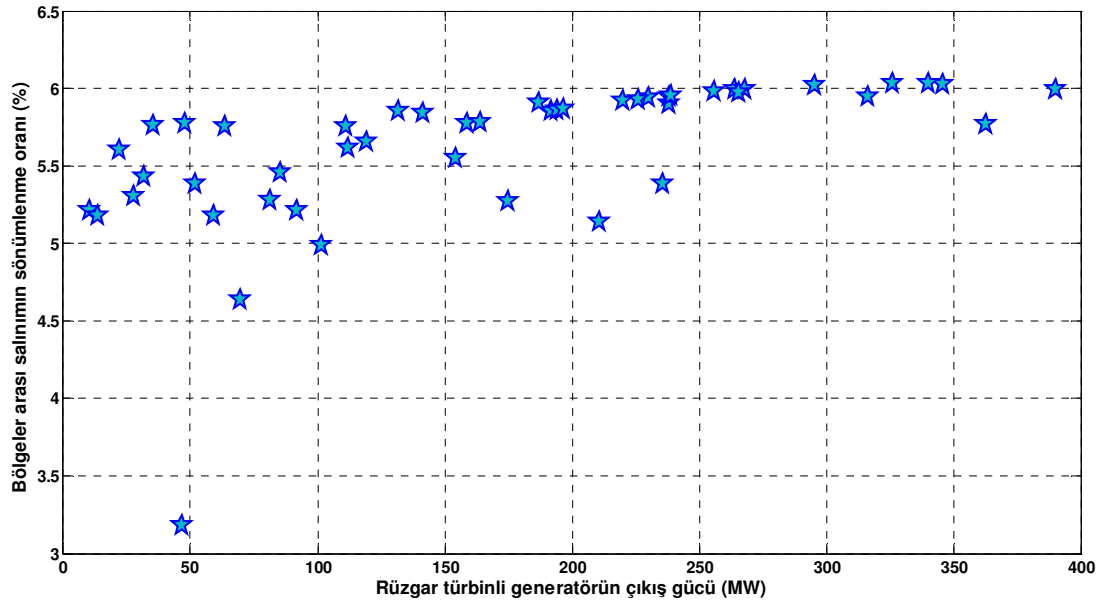
Şekil 4.40 : Üretim ve tüketimin değişken olduğu durumda salınının sönüm değerlerinin LHÖ yöntemiyle, 50 örnekleme boyunca dağılımı.

Bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin, rüzgar türbinli generatörlerin çıkış gücüne göre değişimi de Şekil 4.41'de görüldüğü gibidir.

Bölgeler arası salınının sönümlenme oranlarının, rüzgar türbinli generatörün çıkış gücüne göre değişimi de Şekil 4.42'de görüldüğü gibidir.

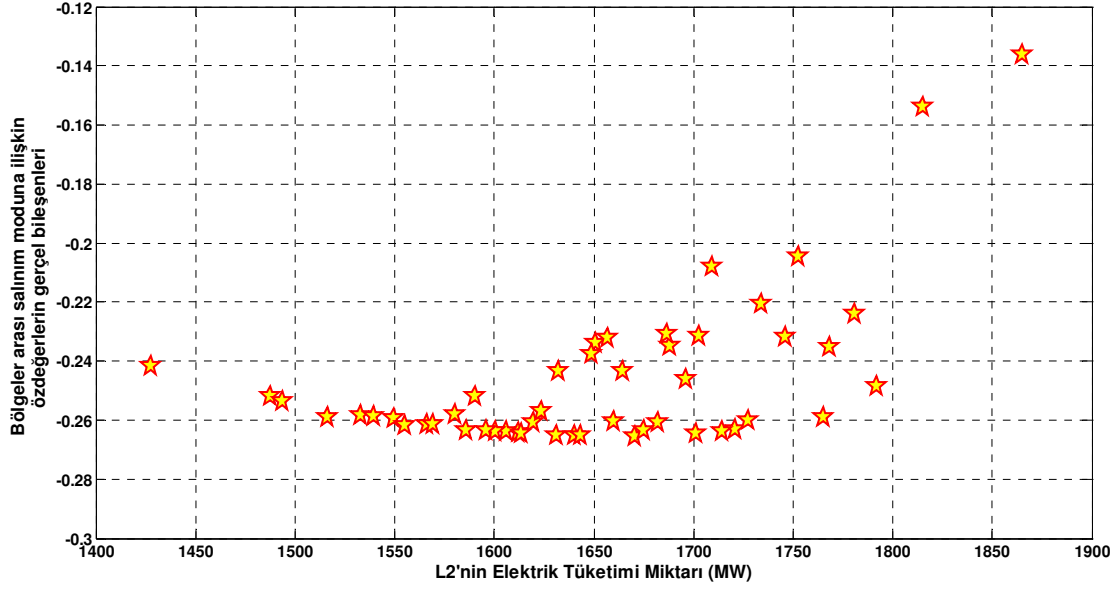


Şekil 4.41 : SKAG'ün çıkış gücüne karşılık bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi.



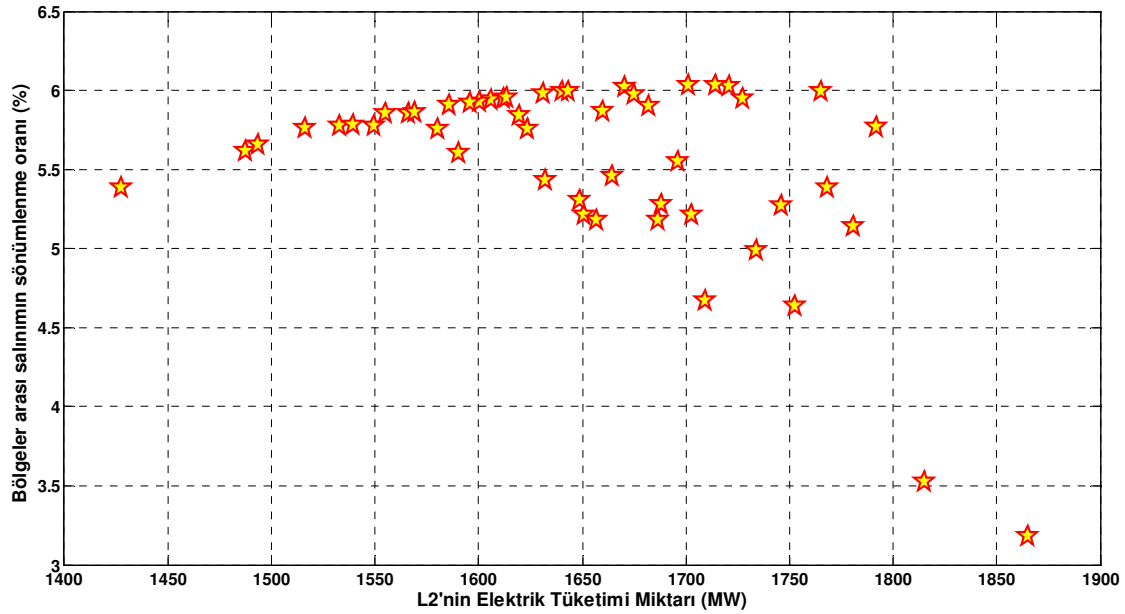
Şekil 4.42 : SKAG'ün çıkış gücüne karşılık bölgeler arası salınımın sönümlenme oranının değişimi (üretim ve tüketim değişken).

Bu kez L2'nin elektriksel tüketim miktarı ile, bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi göz önüne alınırsa Şekil 4.43'deki grafik elde edilir.



Şekil 4.43 : L2 yükünün güç tüketimine karşılık ilgili özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi (üretim ve tüketim değişken).

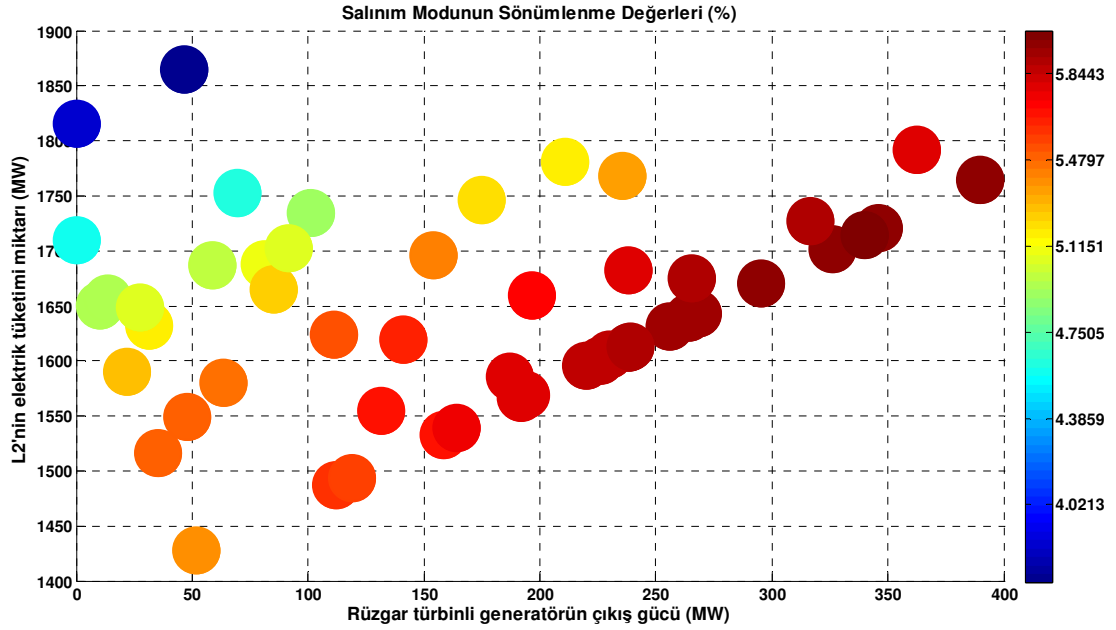
L2'nin elektrik tüketimi miktarına göre bölgeler arası salınımın sönümlenme oranlarının değişimi ilişkisi de Şekil 4.44'de görülmektedir.



Şekil 4.44 : L2 yükünün güç tüketimine karşılık salınım modunun sönümlenme oranlarının değişimi.

Üretime veya tüketime bağlı olarak çizdirilen grafiklerde net bir eğilim görmek yine olanaklı değildir. Fakat, bölgeler arası salınımın sönümlenme oranının; rüzgar türbinli generatörün çıkış gücü arttıkça artma, L2 yükünün tüketim miktarı arttıkça

da azalma eğilimi gösterdiği söylenebilir. Bu yüzden daha net bir eğilim görebilmek için Şekil 4.45'deki grafik oluşturulmuştur.



Şekil 4.45 : LHÖ ile 50 örneklemede SKAG'lerin çıkış gücü ve L2'nin elektrik tüketimi miktarına karşılık salınımın sönüm değerinin değişimi.

Şekil 4.45'de üretim ve tüketim çiftleri için uygun sönüm oranlarına sahip bölgeler bulunabilir, işletmede bu verilere uygun ölçütler geliştirilebilir.

4.2.2.2 ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatörler ile yapılan analizler

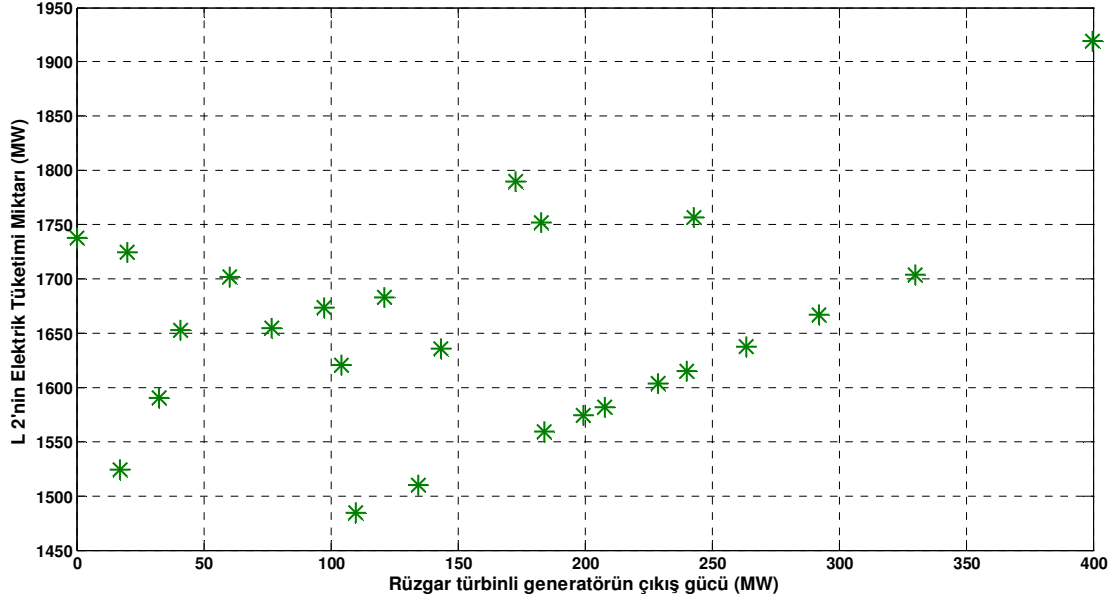
Rüzgar türbinli generatör olarak bu kez ÇBAG tipi makine kullanılmıştır ve yine üretimin yanında tüketim de değişkenlik göstermektedir. Özdeğer analizleri yapılarak özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin ve sönüm oranlarının dağılımı hesaplanmış, ayrıca indeks hesapları da yapılmıştır.

LHÖ yöntemiyle 25 örnekleme alındığı durum

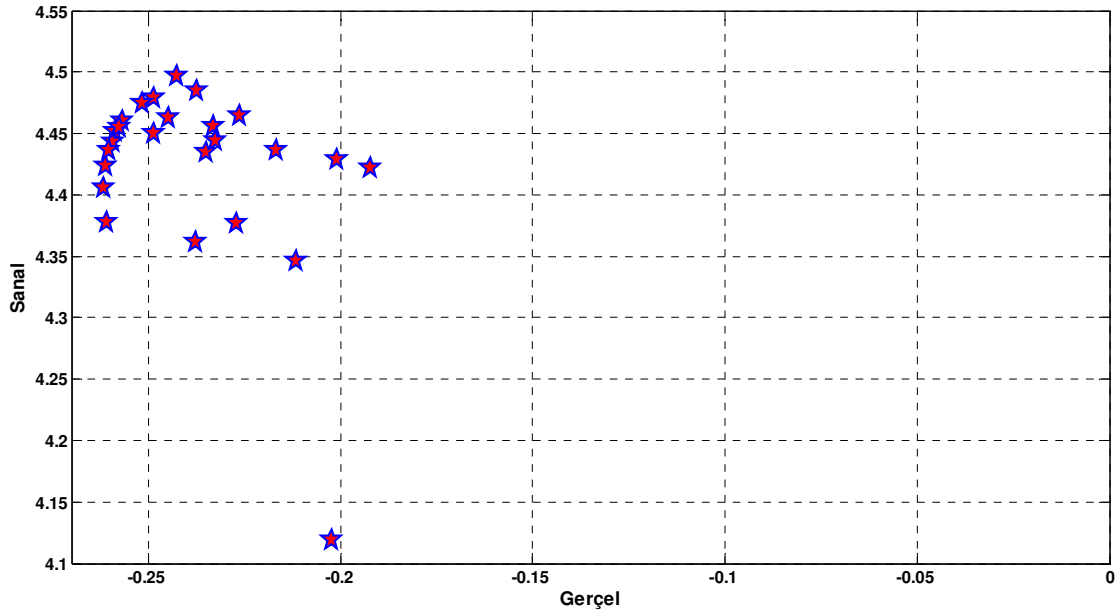
İlk durumda analizler LHÖ yöntemiyle ve 25 örnekleme için yapılmıştır. Bu durumda indeks değeri 0,80 olarak hesaplanmaktadır.

Örnekleme yapılarak oluşturulan, rüzgar türbinli generatörlerin çıkış gücü değerlerine karşılık L2 yükünün elektrik tüketimi miktarları Şekil 4.46'daki gibidir.

Bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin düzlemde konumları Şekil 4.47'teki gibidir.



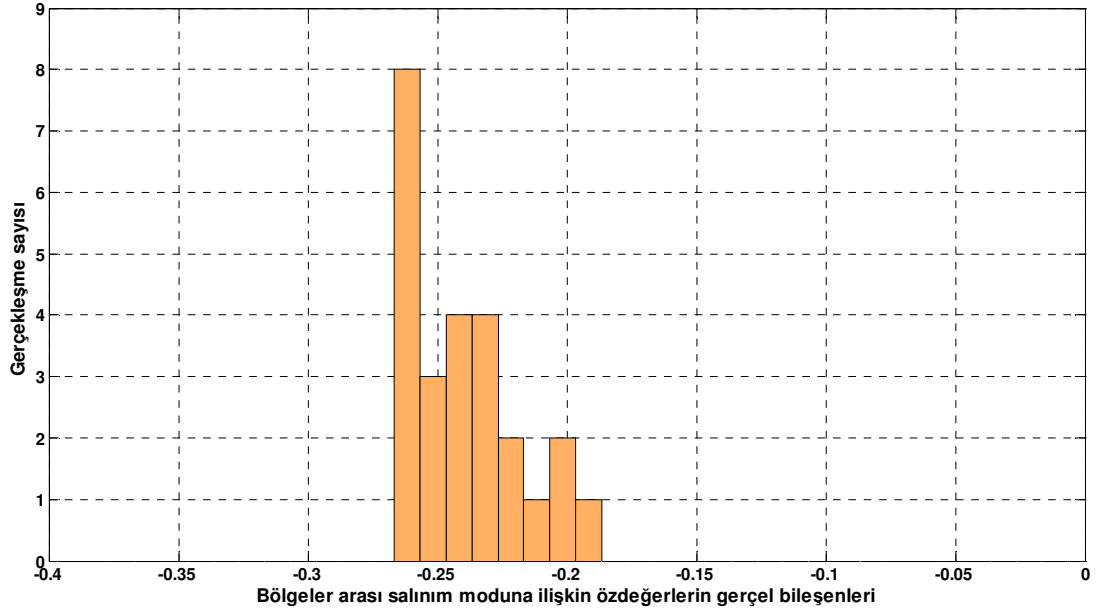
Şekil 4.46 : Örneklemeler boyunca ÇBAG'ün çıkış gücüne karşılık L2'nin elektrik tüketimi miktarının değişimi (LHÖ-25 örnekleme).



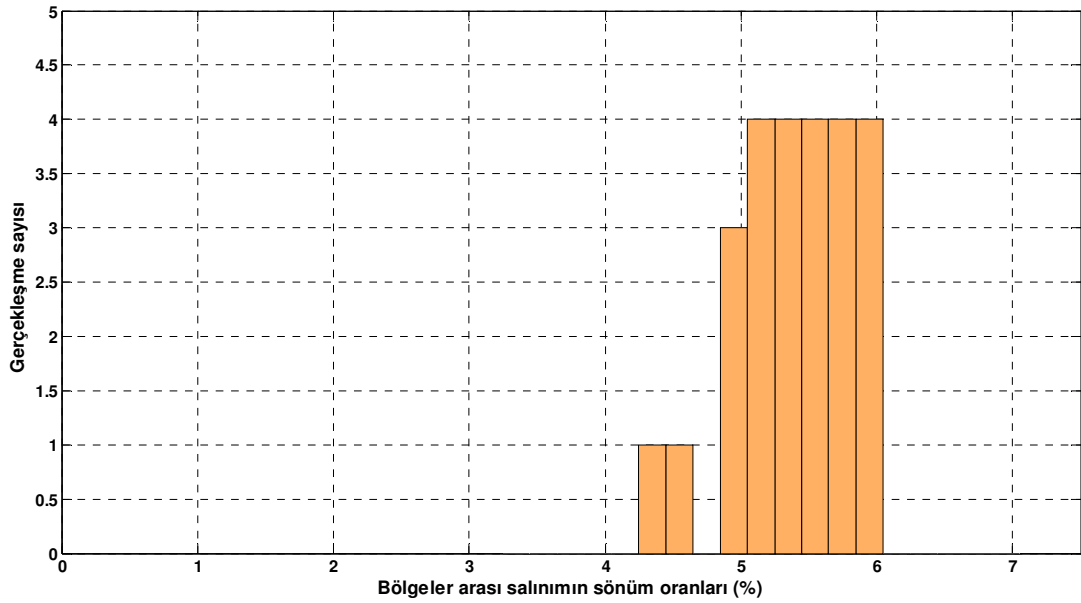
Şekil 4.47: Üretim ve tüketimin değişken olduğu durumda bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin düzlemde konumları.(LHÖ-25 örnekleme)

Bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin örneklemeler boyunca gösterdiği dağılım Şekil 4.48'deki histogramda görülmektedir.

Bölgeler arası salınının sönümlenme oranları Şekil 4.49'daki gibidir.



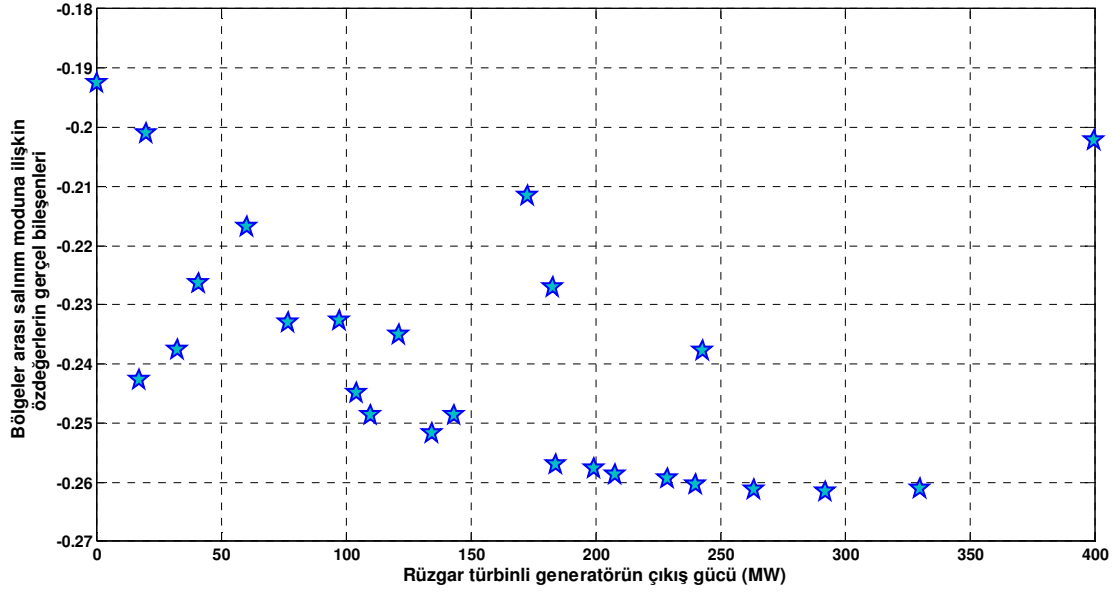
Şekil 4.48 : Üretim ve tüketimin değişken olduğu durumda ilgilenilen özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin LHÖ yöntemiyle, 25 örnekleme boyunca dağılımı.



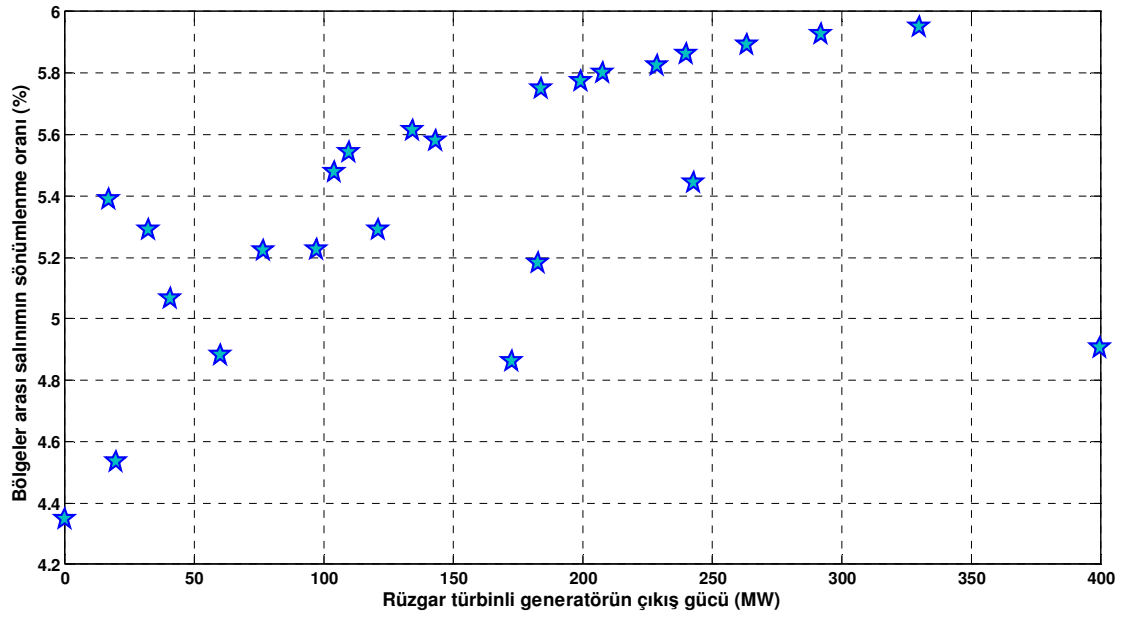
Şekil 4.49 : Üretim ve tüketimin değişken olduğu durumda salınının sönüm değerlerinin LHÖ yöntemiyle, 25 örnekleme boyunca dağılımı.

25 örnekleme boyunca ÇBAG'lerden oluşan rüzgar çıkış güçleri ile bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi Şekil 4.50'deki gibidir.

Yine 25 örnekleme boyunca ÇBAG'lerden oluşan rüzgar çıkış güçleri ile bölgeler arası salınının sönüm oranları değişimi Şekil 4.51'deki gibidir.



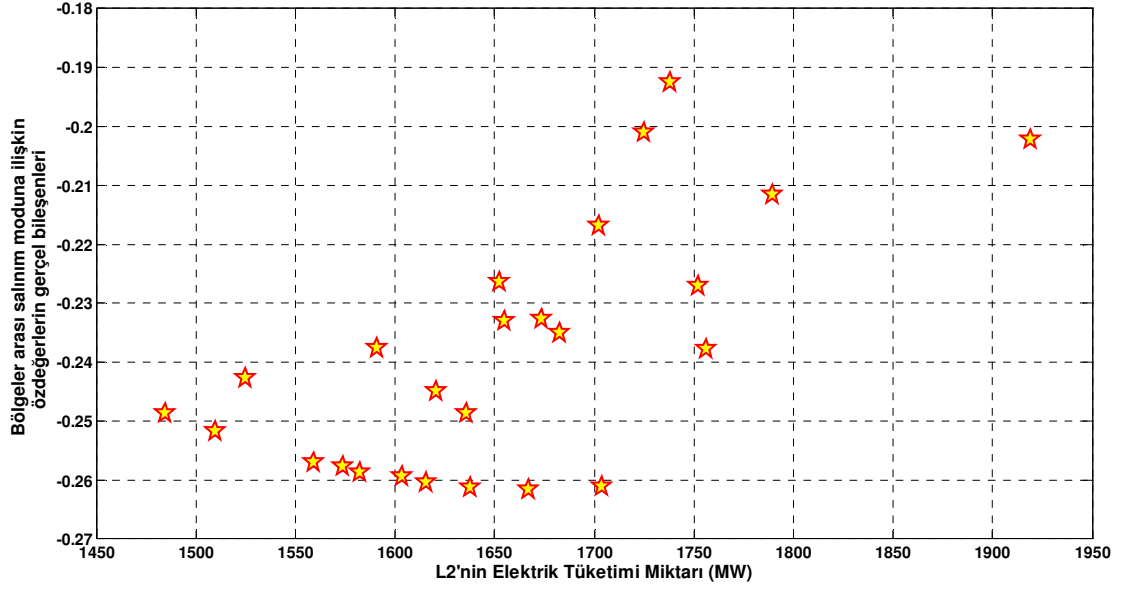
Şekil 4.50 : ÇBAG'ün çıkış gücüne karşılık bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi.



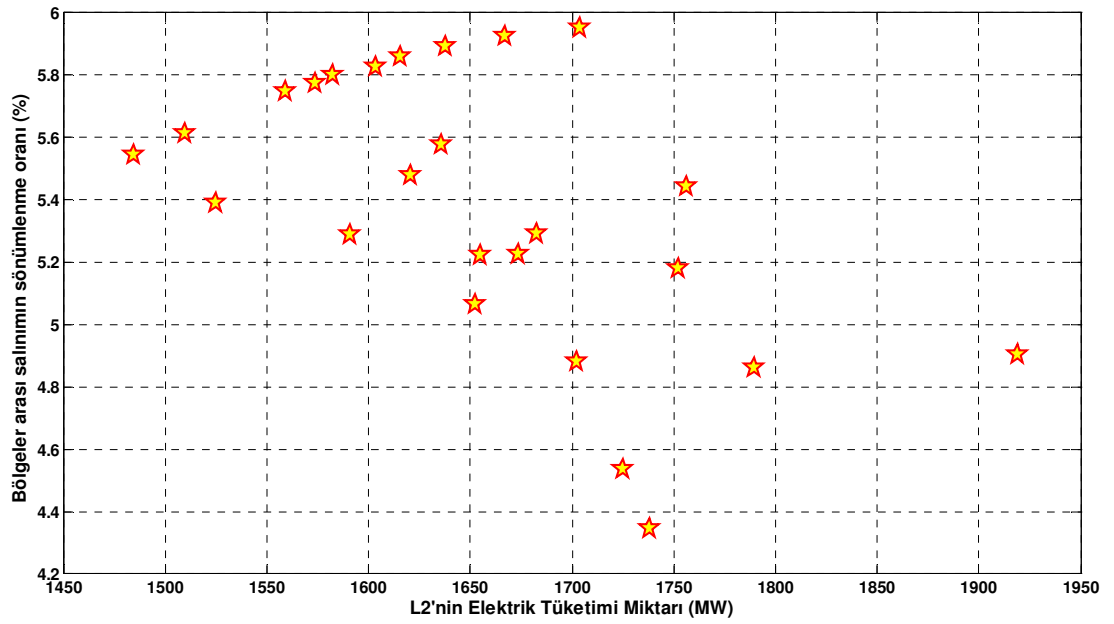
Şekil 4.51 : ÇBAG'ün çıkış gücüne karşılık bölgeler arası salınımın sönümlenme oranının değişimi (üretim ve tüketim değişken).

25 farklı durumda L2 'nin farklı elektrik tüketimi miktarlarına karşılık bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi Şekil 4.52'deki gibidir.

L2'nin farklı elektrik tüketimi miktarlarına karşılık bölgeler arası salınımın sönümlenme oranları Şekil 4.53'deki gibidir.



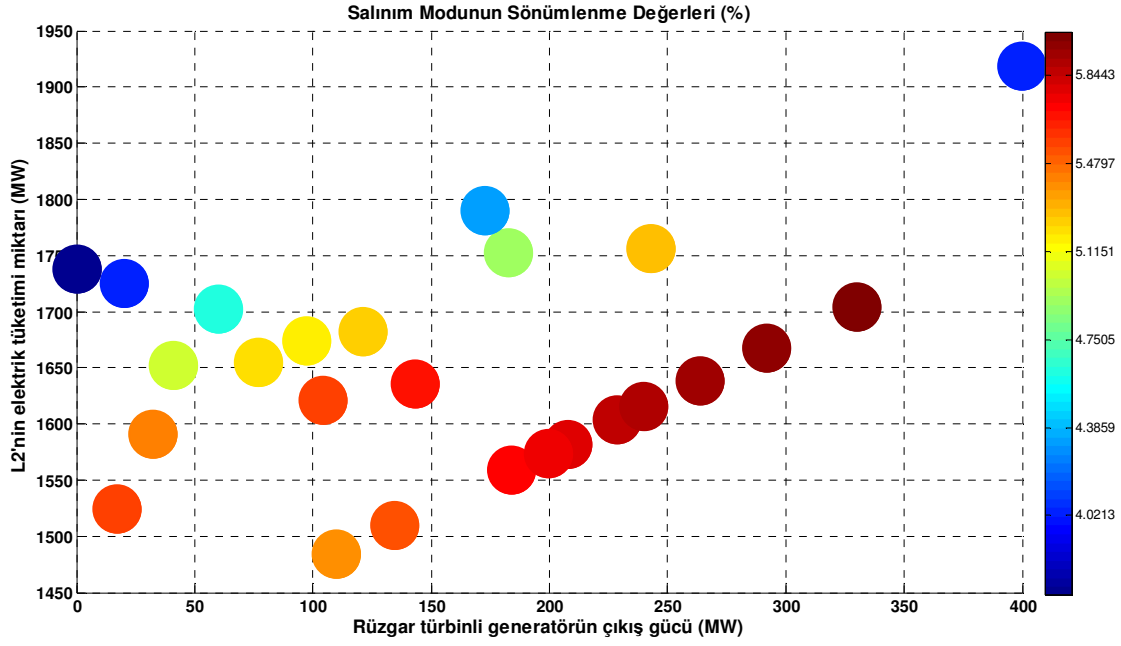
Şekil 4.52 : L2 yükünün güç tüketimine karşılık ilgili özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi (üretim ve tüketim değişken).



Şekil 4.53 : L2 yükünün güç tüketimine karşılık salınım modunun sönümlenme oranlarının değişimi.

Bu durumda da üretime göre ve tüketime göre elde edilen sonuçlar net bir eğilim yansıtmamaktadır. Bu yüzden yine üretimin, tüketimin ve sönümün birlikte değişimlerinin gösterildiği Şekil 4.54'teki grafik elde edilmiştir.

Şekil 4.54'de de üretim ve tüketimin uygun sönüm değerini sağlayan eşleşmeleri görülebilir ve bu bilgi işletmede doğru üretim ve tüketim planlaması yapmaya yol gösterebilir.

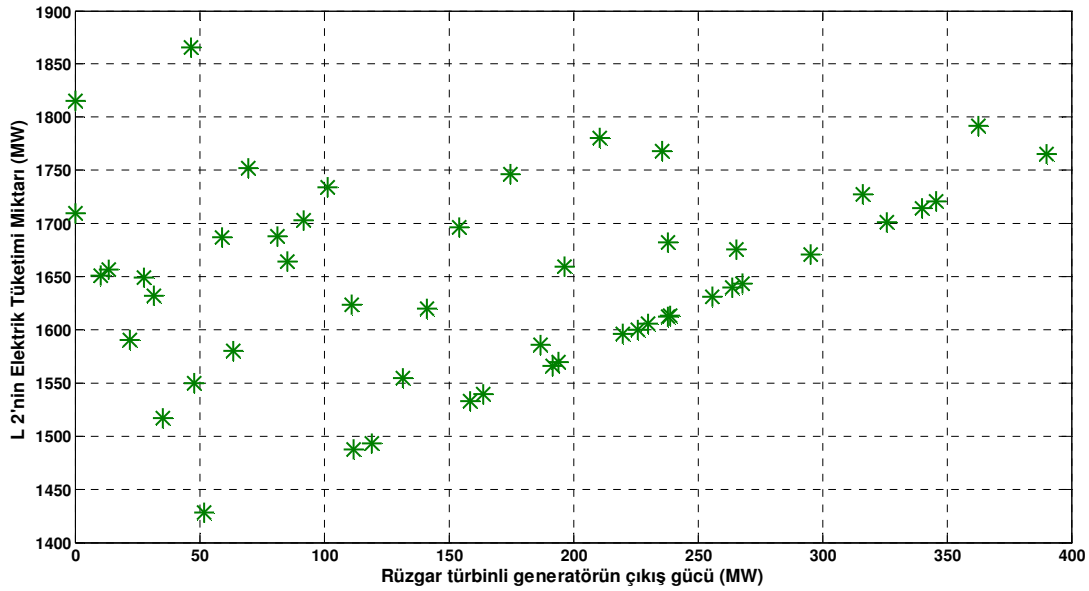


Şekil 4.54 : LHÖ ile 25 örneklemede ÇBAG'lerin çıkış gücü ve L2'nin elektrik tüketimi miktarına karşılık salınımın sönüm değerinin değişimi.

LHÖ yöntemiyle 50 örnekleme alındığı durum

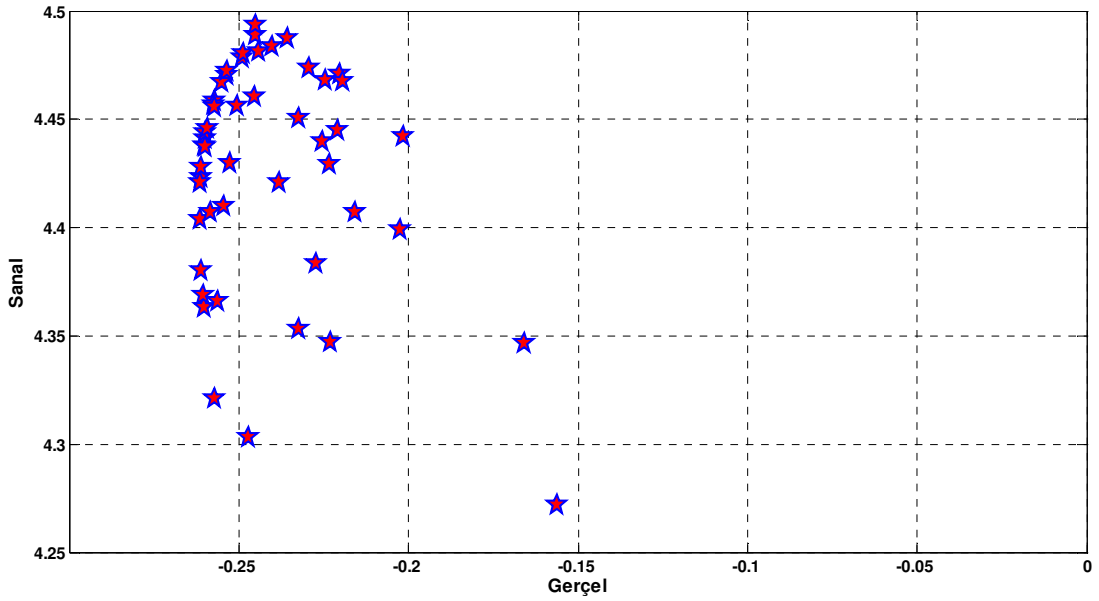
Yine LHÖ yöntemi kullanılarak bu kez 50 örnekleme için benzer analizler yapılmıştır. Bu durumda indeks değeri 0,84 olarak hesaplanmaktadır.

Farklı üretim ve elektrik yükü eşleşmeleri bu kez Şekil 4.55'deki gibi olmuştur.



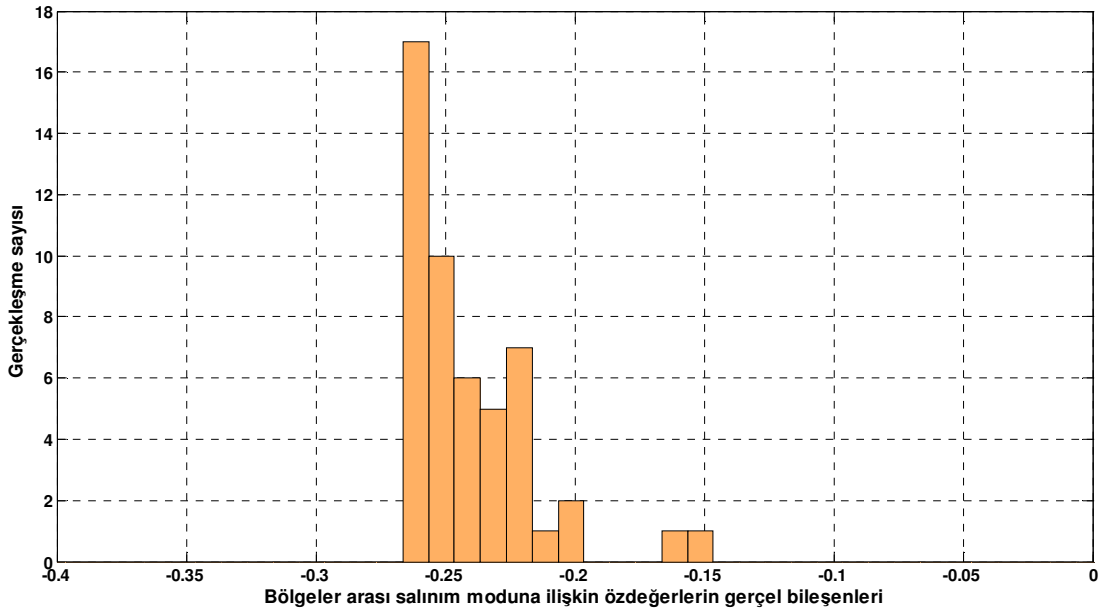
Şekil 4.55 : Örneklemeler boyunca ÇBAG'ün çıkış gücüne karşılık L2'nin elektrik tüketimi miktarının değişimi (LHÖ-50 örnekleme).

50 farklı durum için bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin düzlemde konumları Şekil 4.56'daki gibidir.



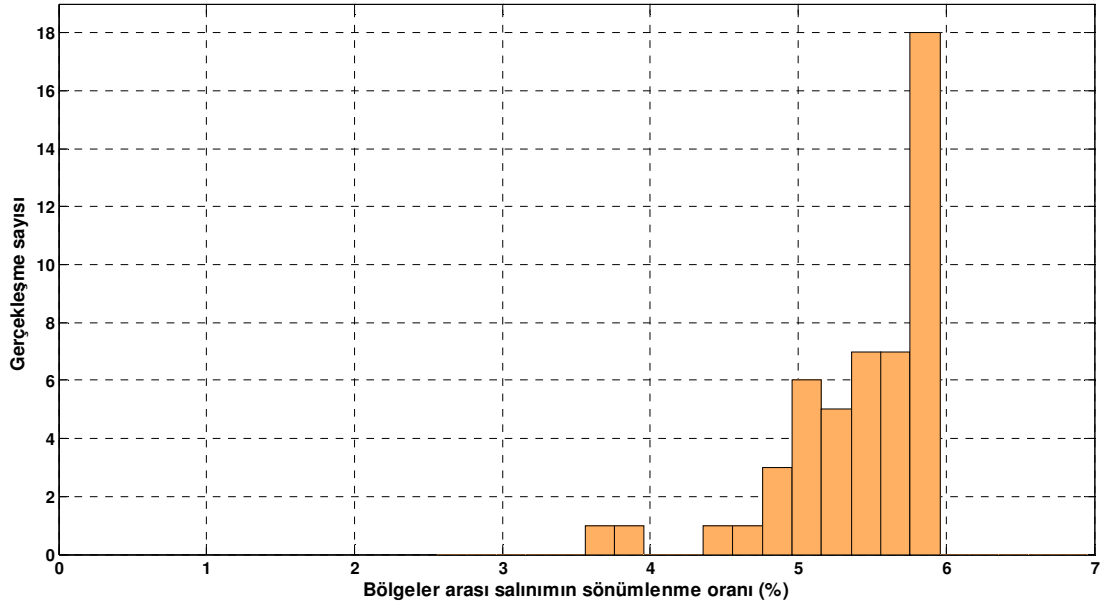
Şekil 4.56 : Üretim ve tüketimin değişken olduğu durumda bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin düzlemde konumları(LHÖ-50 örnekleme).

Bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin 50 örnekleme boyunca dağılımı Şekil 4.57'deki histogramdaki gibidir.



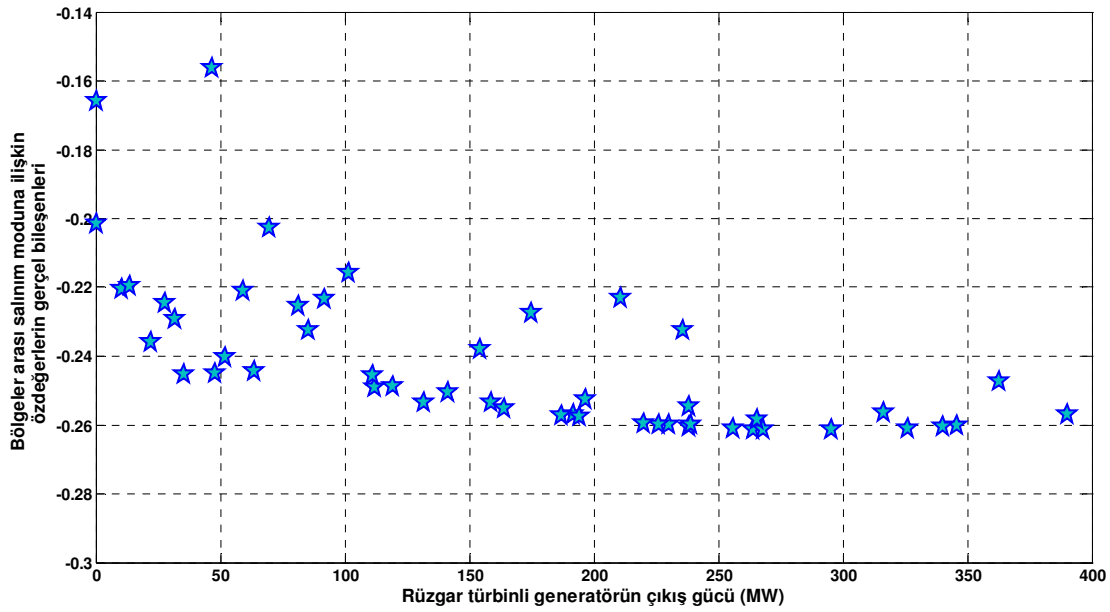
Şekil 4.57 : Üretim ve tüketimin değişken olduğu durumda ilgilenilen özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin LHÖ yöntemiyle, 50 örnekleme boyunca dağılımı.

Bölgeler arası salınının sönümlenme oranlarının 50 örnekleme boyunca dağılımı Şekil 4.58'deki histogramdaki gibidir.



Şekil 4.58 : Üretim ve tüketimin değişken olduğu durumda salınının sönüm değerlerinin LHÖ yöntemiyle, 50 örnekleme boyunca dağılımı.

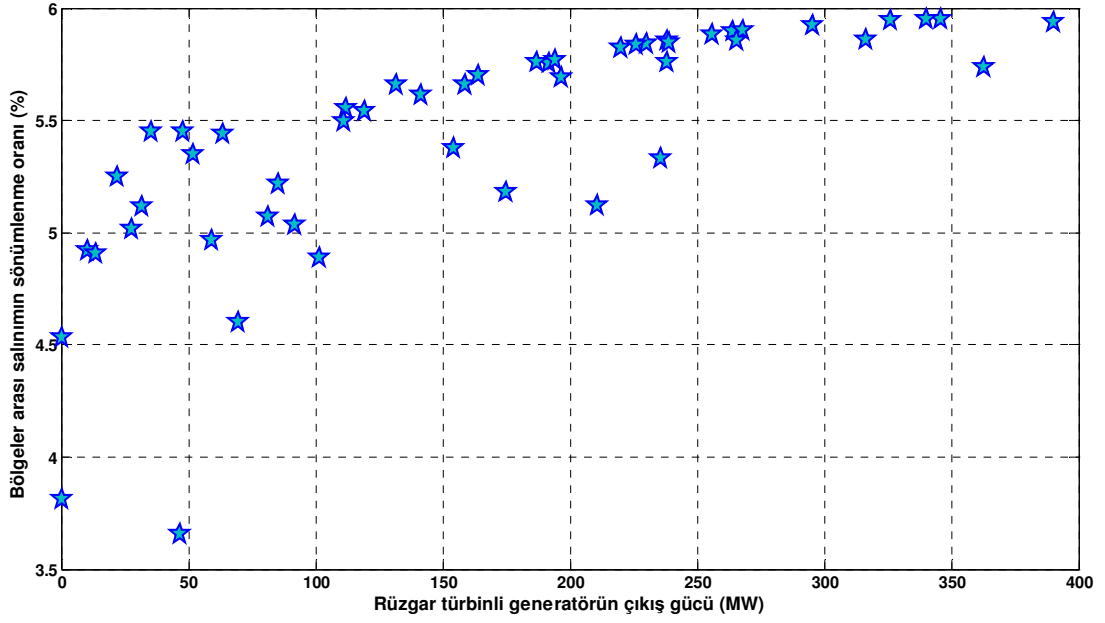
Rüzgar türbinli generatörün çıkış gücü ile bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi Şekil 4.59'daki gibidir.



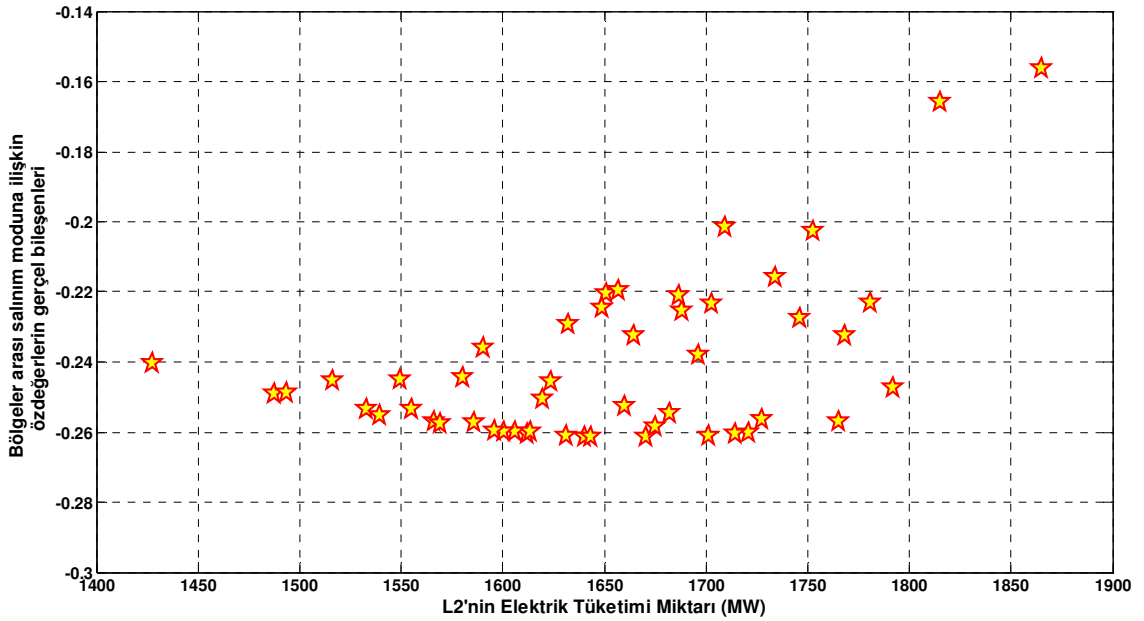
Şekil 4.59 : ÇBAG'ün çıkış gücüne karşılık bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi.

Rüzgar türbinli generatörün çıkış gücü ile bölgeler arası salınının sönümlenme oranlarını gösteren grafik Şekil 4.60'daki gibidir.

L2'nin elektrik tüketimi miktarı ile bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi Şekil 4.61'deki gibidir.



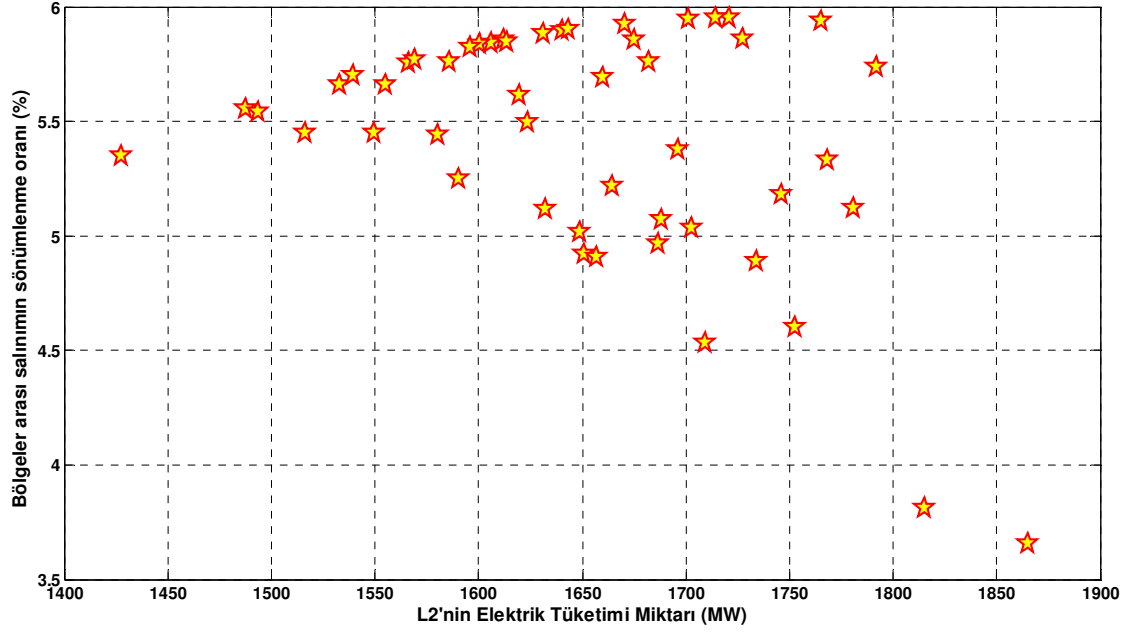
Şekil 4.60 : ÇBAG'ün çıkış gücüne karşılık bölgeler arası salınımın sönümlenme oranının değişimi (üretim ve tüketim değişken).



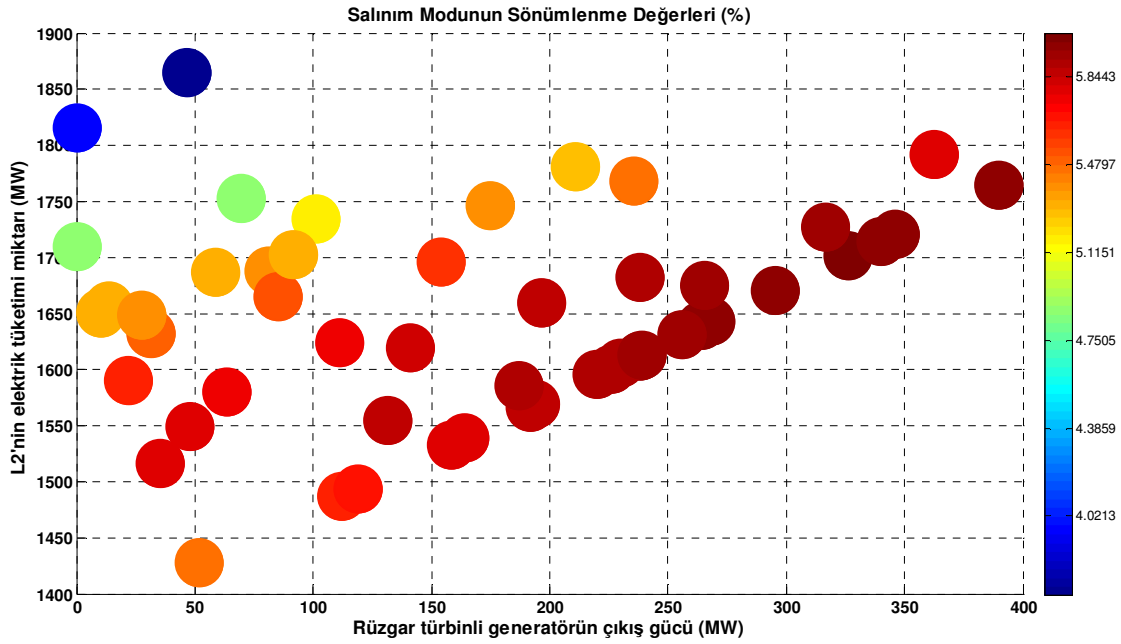
Şekil 4.61 : L2 yükünün güç tüketimine karşılık ilgili özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin değişimi (üretim ve tüketim değişken).

L2'nin elektrik tüketimi miktarı ile bölgeler arası salınımın sönümlenme oranları arasındaki ilişki Şekil 4.62'deki grafikteki gibidir.

Yine, hem üretim hem de tüketim değişken olduğu durum için, özdeğerlerin veya sönüm oranlarının yalnızca üretim veya yalnızca tüketime göre değişiminden yola çıkarak net bir eğilim görmek zordur. Bu nedenle üretim, tüketim ve sönüm değerlerinin birlikte değişimini gösteren Şekil 4.63'deki grafik oluşturulmuştur.



Şekil 4.62 : L2 yükünün güç tüketimine karşılık salınım modunun sönümlenme oranlarının değişimi.



Şekil 4.63 : LHÖ ile 50 örneklemede ÇBAG'lerin çıkış gücü ve L2'nin elektrik tüketimi miktarına karşılık salınımın sönüm değerinin değişimi.

Şekil 4.63'deki grafikte, üretim ve tüketim miktarlarının salınım modunun yeterli düzeyde olduğu durumlarda aldıkları değerler gözlenebilmektedir. Bu bakışla, Şekil 4.63'deki grafikte uygun sönüm değerinin sağlanacağı bir bölge tanımlanabilir ve bu bilgi sistem işletmesinde üretim ve tüketimin olması gerektiği sınır değerleri belirlemede kullanılabilir.

5.BEŞ BÖLGELİ, 16 GENERATÖRLÜ ÖRNEK GÜÇ SİSTEMİNE RÜZGAR ENERJİSİ İLE ÜRETİM KATILMASININ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Şimdiye kadar bu çalışmada hem deterministik olarak, hem de olasılıksal yaklaşımlarla, sisteme rüzgar enerjisi ile üretim birimlerinin eklenmesinin etkileri, iki bölgesel bir test sistemi üzerinde anlaşılmaya çalışıldı. Bunun için deterministik ve olasılıksal olarak sistem için bazı senaryolar oluşturuldu ve bu senaryolar için etkilerin incelenmesi için özdeğer analizi veya olasılıksal indeks gibi araçlar kullanıldı.

Dördüncü bölümde, olasılık kavramı ile ilgilenirken, sistemin kararlılık resmini daha iyi çekebilmek için bir olasılıksal indeks tanımlanmıştı. Bu indeks yardımıyla, sistem için oluşturulan çok sayıda farklı çalışma noktası için özdeğer analizleri yapılarak, (bölgeler arası) salınım moduna ilişkin sönüm değerlerinin hangi sıklıkla istenen değerde olduğuna ilişkin yorum yapmak olanaklı olmuştur. Dördüncü bölümde bu indeks, sisteme eklenecek bir rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesiyle salınımın sönümlenme manzarasının nasıl değiştiğini araştırmak için kullanılmıştır. Burada indeks değeri, kabul edilebilir bir risk değeri için sisteme eklenecek bir rüzgar çiftliğinin en az hangi üretim kapasitesine sahip olması gerektiği konusunda çıkarım yapabilmeyi olanaklı kılmaktadır.

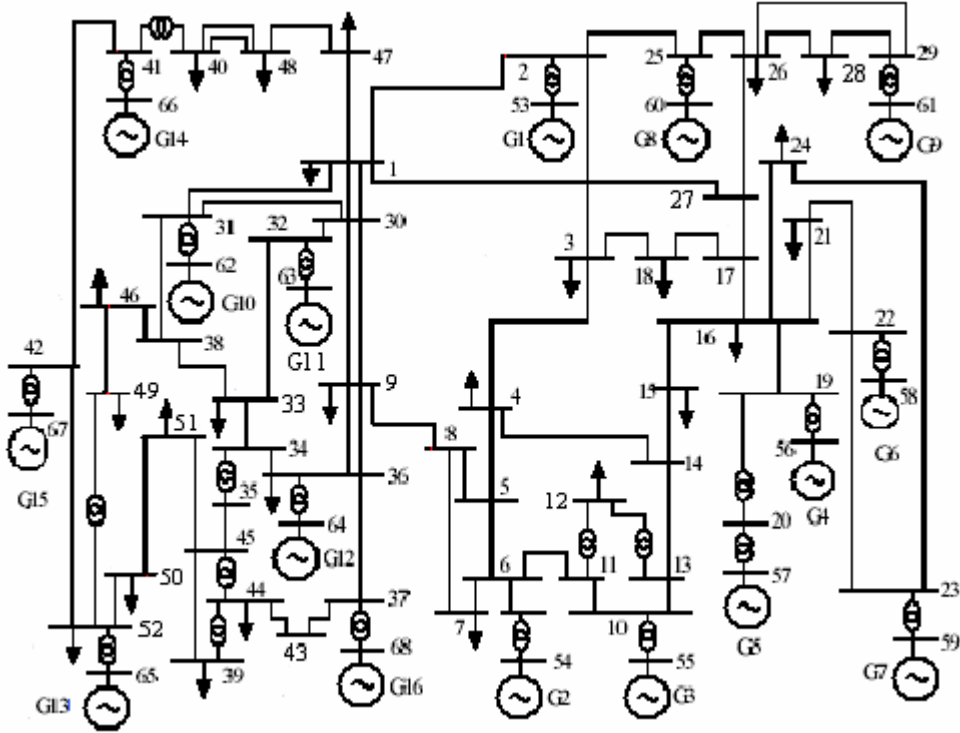
Bu bölümde ise daha büyük bir güç sistemi kullanılarak, rüzgar çiftliğinin hangi noktadan sisteme eklenmesinin sistem kararlılığı için olumlu olacağı veya tersine hangi noktadan eklenmesinin sistem kararlılığı için görece olumsuz olacağı anlaşılmaya çalışılmıştır. Bu anlamda, daha önce tanımlanan olasılıksal indeks yardımıyla rüzgar çiftliğinin konumu hakkında yorum yapmak olanaklı olmaktadır.

5.1 Test Sisteminin Tanıtılması

Bu bölümdeki analizler; beş üretim bölgesine sahip, 16 generatörlü, 68 baralı bir test sistemi için gerçekleştirilmiştir. Sisteme eklenmesi istenen rüzgar türbinli generatörler, yani rüzgar çiftliği, oluşturulan 69. bara üzerinden sisteme katılmaktadır. Bu nedenle sistemde yapılan değişikliklerle sistem 69 baralı duruma

getirilmekte ve farklı konumlardan rüzgar enerjisi ile üretim eklenmesi söz konusu olduğundan dolayı da, analizler boyunca sistemde sürekli değişiklikler yapılmaktadır.

Söz edilen test sistemi Şekil 5.1'deki gibidir.



Şekil 5.1 : Beş bölge, 16 generatörlü, 68 baralı test sistemi [32].

Test sistemine ait hat parametreleri Çizelge 5.1'deki gibidir. Sisteme ve bileşenlerine ait model ve diğer parametrelerin ayrıntıları Ek B'de verilmiştir.

Çizelge 5.1'deki hat değerleri, 68 baralı ilk duruma ilişkindir. Analizler süresince rüzgar türbinli generatörü sisteme bağlayan 69. bara ile, bu baranın bağlı olacağı bara arasına da bir hat eklenmektedir. Bu hattın direnci 0,0008 pu, reaktansı ise 0,00740 pu olarak kabul edilmiştir.

Çalışmada oluşturulan güç akışı senaryolarında, 69. baranın sisteme bağlandığı bara, her durumda salınım barası (slack bus) olarak değiştirilmiştir. Bu durumda rüzgar türbinli generatörün bağlı olduğu 69. bara her durumda generatör barası olarak alınmıştır.

Çizelge 5.1 : Test sistemine ait hat parametreleri [32].

Hat başı	Hat sonu	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Hat başı	Hat sonu	R (pu)	X (pu)	B (pu)
1	2	0,0070	0,0822	0,3493	26	29	0,0057	0,0625	1,0290
1	30	0,0008	0,0074	0,48	28	29	0,0014	0,0151	0,2490
2	3	0,0013	0,0151	0,2572	29	61	0,0008	0,0156	0,00
2	25	0,0070	0,0086	0,146	9	30	0,0019	0,0183	0,29
2	53	0,0000	0,0181	0,00	9	36	0,0022	0,0196	0,34
3	4	0,0013	0,0213	0,2214	9	36	0,0022	0,0196	0,34
3	18	0,0011	0,0133	0,2138	36	37	0,0005	0,0045	0,32
4	5	0,0008	0,0128	0,1342	34	36	0,0033	0,0111	1,45
4	14	0,0008	0,0129	0,1382	35	34	0,0001	0,0074	0,00
5	6	0,0002	0,0026	0,0434	33	34	0,0011	0,0157	0,202
5	8	0,0008	0,0112	0,1476	32	33	0,0008	0,0099	0,168
6	7	0,0006	0,0092	0,1130	30	31	0,0013	0,0187	0,333
6	11	0,0007	0,0082	0,1389	30	32	0,0024	0,0288	0,488
6	54	0,0000	0,0250	0,00	1	31	0,0016	0,0163	0,25
7	8	0,0004	0,0046	0,078	31	38	0,0011	0,0147	0,247
8	9	0,0023	0,0363	0,3804	33	38	0,0036	0,0444	0,693
9	30	0,0019	0,0183	0,29	38	46	0,0022	0,0284	0,43
10	11	0,0004	0,0043	0,0729	46	49	0,0018	0,0274	0,27
10	13	0,0004	0,0043	0,0729	1	47	0,0013	0,0188	1,31
10	55	0,0000	0,02	0,00	47	48	0,0025	0,0268	0,40
12	11	0,0016	0,0435	0,00	47	48	0,0025	0,0268	0,40
12	13	0,0016	0,0435	0,00	48	40	0,0020	0,022	1,28
13	14	0,0009	0,0101	0,1723	35	45	0,0007	0,0175	1,39
14	15	0,0018	0,0217	0,366	37	43	0,0005	0,0276	0,00
15	16	0,0009	0,0094	0,171	43	44	0,0001	0,0011	0,00
16	17	0,0007	0,0089	0,1342	44	45	0,0025	0,073	0,00
16	19	0,0016	0,0195	0,3040	39	44	0,00	0,0411	0,00
16	21	0,0008	0,0135	0,2548	39	45	0,00	0,0839	0,00
16	24	0,0003	0,0059	0,0680	45	51	0,0004	0,0105	0,72
17	18	0,0007	0,0082	0,1319	50	52	0,0012	0,0288	2,06
17	27	0,0013	0,0173	0,3216	50	51	0,0009	0,0221	1,62
19	20	0,0007	0,0138	0,00	49	52	0,0076	0,1141	1,16
19	56	0,0007	0,0142	0,00	52	42	0,0040	0,0600	2,25
20	57	0,0009	0,0180	0,00	42	41	0,0040	0,0600	2,25
21	22	0,0008	0,0140	0,2565	41	40	0,0060	0,0840	3,15
22	23	0,0006	0,0096	0,1846	31	62	0,00	0,026	0,00
22	58	0,00	0,0143	0,00	32	63	0,00	0,013	0,00
23	24	0,0022	0,0350	0,3610	36	64	0,00	0,0075	0,00
23	59	0,0005	0,0272	0,00	37	65	0,00	0,0033	0,00
25	26	0,0032	0,0323	0,5310	41	66	0,00	0,0015	0,00
25	60	0,0006	0,0232	0,00	42	67	0,00	0,0015	0,00
26	27	0,0014	0,0147	0,2396	52	68	0,00	0,0030	0,00
26	28	0,0043	0,0474	0,7802	1	27	0,032	0,32	0,41

İlk durumda 68 bara ve 16 generatör olduğu duruma ilişkin üretim ve yük değerleri Çizelge 5.2'deki gibidir. Burada rüzgar enerjisi katılması sonucu üretim değerleri, her durumda, rüzgar türbinli generatörün çıkış gücüne ve salınım barasının değişimine bağlı olarak çizelgedekinden bir miktar farklılık göstermektedir.

Çizelge 5.2 : Test sisteminde, baralara ait güç üretimi ve tüketimi miktarları [32].

Bara No	Aktif Güç Üretimi (pu)	Aktif Güç Tüketimi (pu)	Reaktif Güç Tüketimi (pu)	Bara No	Aktif Güç Üretimi (pu)	Aktif Güç Tüketimi (pu)	Reaktif Güç Tüketimi (pu)
1	0,00	2,527	11,856	35	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	36	0,00	1,02	-0,1946
3	0,00	3,22	0,02	37	0,00	60,00	3,00
4	0,00	5,00	1,840	38	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	39	0,00	2,67	0,126
6	0,00	0,00	0,00	40	0,00	0,6563	0,2353
7	0,00	2,34	0,84	41	0,00	10,00	2,50
8	0,00	5,22	1,77	42	0,00	11,50	2,50
9	0,00	1,04	1,25	43	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	44	0,00	26,755	0,0484
11	0,00	0,00	0,00	45	0,00	2,08	0,21
12	0,00	0,09	0,88	46	0,00	1,507	0,285
13	0,00	0,00	0,00	47	0,00	20,312	0,3259
14	0,00	0,00	0,00	48	0,00	24,120	0,022
15	0,00	3,200	15,300	49	0,00	16,400	0,29
16	0,00	3,290	0,32	50	0,00	2,00	-1,47
17	0,00	0,00	0,00	51	0,00	4,37	-1,22
18	0,00	1,58	0,30	52	0,00	24,70	1,23
19	0,00	0,00	0,00	53	2,50	0,00	0,00
20	0,00	6,800	1,03	54	5,45	0,00	0,00
21	0,00	1,740	1,15	55	6,50	0,00	0,00
22	0,00	0,00	0,00	56	6,32	0,00	0,00
23	0,00	1,480	0,85	57	5,052	0,00	0,00
24	0,00	3,09	-0,92	58	7,00	0,00	0,00
25	0,00	2,24	0,47	59	5,60	0,00	0,00
26	0,00	1,39	0,17	60	5,40	0,00	0,00
27	0,00	2,810	0,76	61	8,00	0,00	0,00
28	0,00	2,060	0,28	62	5,00	0,00	0,00
29	0,00	2,840	0,27	63	10,000	0,00	0,00
30	0,00	0,00	0,00	64	13,50	0,00	0,00
31	0,00	0,00	0,00	65	35,91	0,00	0,00
32	0,00	0,00	0,00	66	17,85	0,00	0,00
33	0,00	1,12	0,00	67	10,00	0,00	0,00
34	0,00	0,00	0,00	68	40,00	0,00	0,00

Sistem için baz gücü 100 MVA olarak alınmıştır.

Sisteme henüz herhangi bir rüzgar türbinli generatörün katılmadığı bu ilk durumda sistemin salınım modunun sönümlenme oranı %3 olarak hesaplanmaktadır.

Sistemdeki senkron generatörlerde güç sistemleri kararlı kılıcı düzenekleri mevcuttur ve analizlerde senkron generatörlerin uyartım modelleri de göz önünde bulundurulmaktadır.

5.2 Rüzgar Türbinli Generatörlerin (Bir Rüzgar Çiftliğinin) Sisteme Eklenmesi

Bu bölümde, temel olarak rüzgar türbinli generatörlerin (bir rüzgar çiftliğinin) sisteme eklendiği noktanın, salınım modunun sönümlenmesini ne yönde etkilediği anlaşılmaya çalışılmış ve bu anlamda olumlu veya olumsuz noktalar hakkında yorum yapabilmek istenmiştir. Bir rüzgar çiftliğinin nereye kurulabileceği ve işletmede hangi noktadan sisteme eklenmesinin olumlu veya olumsuz olabileceği bu noktada önemli bir çıkarımdır.

Bu yorumların yapılabilmesi için bu çalışmada tanımlanmış olan olasılıksal indeks kullanılmıştır. İndeksin hesaplanmasında LHÖ yöntemi kullanılmış ve her farklı bağlantı için 50 örnekleme alınmıştır. Olasılıksal indeks hesaplanırken salınım modu için kabul edilebilir en düşük sönümlenme oranı %3 olarak belirlenmiştir.

Rüzgar türbinli generatörlerin toplam üretim gücü 500 MW olarak değerlendirilmiştir ve sisteme 16 generatörün bağlı olduğu baralar üzerinden eklenmeleri söz konusudur. Yani bu durumda 16 farklı aday bağlantı senaryosu oluşturulmuştur. Bunun nedeni, sistemde rüzgar türbinli generatörlerin bir senkron generatörle birlikte kullanılması ve birlikte yük paylaşımında bulunmalarıdır. Rüzgar hızı sabit olmadığından ve dolayısıyla rüzgar türbinli generatörlerin toplam çıkış gücü de değişken olduğundan dolayı, söz edilen durum (bir yedekleme ünitesiyle birlikte kullanılma durumu) bu açıdan anlam kazanır.

5.2.1 SKAG tipi rüzgar türbinli generatörlerin sisteme eklenmesi

İlk olarak, rüzgar çiftliğinde kullanılan rüzgar türbinli generatörlerin SKAG oldukları durum incelenmiştir. Yapılan analizler sonunda, SKAG tipi rüzgar türbinli generatörlerin sisteme 16 farklı noktadan katılması sonucunda indeks değerleri Çizelge 5.3'deki gibi olmaktadır.

Çizelge 5.3 : SKAG generatörlerinin sisteme 16 farklı yerden katılması sonucunda elde edilen kararlılık indeksi değerleri (alt sönüm değeri=%3).

Bağlanan Bara	Kararlılık İndeksi	Bağlanan Bara	Kararlılık İndeksi
53	0,48	61	0,60
54	1,00	62	0,00
55	1,00	63	0,76
56	1,00	64	0,00
57	1,00	65	0,02
58	1,00	66	1,00
59	0,36	67	0,00
60	1,00	68	1,00

Çizelge 5.3'deki sonuçlar yardımıyla, sisteme rüzgar enerjisi ile üretimin hangi noktadan katılmasının kararlılık açısından olumlu, hangi noktadan katılmasının kararlılık açısından olumsuz olabileceği hakkında yorumlar yapılabilir.

16 aday noktanın 8'inde indeks değeri 1 olarak hesaplanmıştır. Bu da rüzgar enerjisini temsil eden 69. baranın bu noktalara bağlanmasının salınımın sönümlenmesi açısından istenen şartları sağladığını göstermektedir. Henüz hiçbir SKAG tipi rüzgar türbinli generatör grubunun sisteme katılmadığı durumda salınımın sönüm değerinin %3 olduğu göz önüne alınırsa, bu kez her durumda sönüm değeri ilk durumdakinden daha iyidir. Buna göre SKAG tipi rüzgar türbinli generatörlerin sisteme; 54., 55., 56., 57., 58., 60., 66. ve 68. baralar üzerinden eklenmesi sistem salınımlarının sönümlenmesi açısından olumlu ve uygun görünmektedir.

16 aday noktanın 3'ünde indeks değeri 0 olarak hesaplanmıştır. Buna göre SKAG tipi rüzgar türbinli generatörlerin sisteme bu noktalardan katılması sistem salınımları açısından olumsuz olacaktır. Bu nedenle SKAG'lerin sisteme; 62., 64. ve 67. baralar üzerinden katılması sistem salınımlarının sönümlenmesi açısından olumsuz görünmektedir, ki bu durumda her zaman salınım modunun sönüm değeri ilk

durumdakinden kötüdür. Bu yüzden rüzgar enerjisi ile üretimin bu noktalardan sisteme katılmaması gerektiği yönünde bir çıkarımda bulunulabilir.

16 aday noktadan geriye kalan 5'inde indeks değeri 0 ile 1 arasında çeşitli değerler almıştır. SKAG'lerin sisteme 53., 59. ve 65. baralar üzerinden katılması, sistemin kararlılığı ve sistem salınımlarının sönümlenmesi açısından görece olumsuz görünmektedir; indeks değeri %50'nin altında kalmaktadır, ki buna göre salınım modunun sönüm değeri çoğu durumda ilk durumdakinden daha kötüdür. Buna kıyasla SKAG'lerin sisteme 61. ve 63. baralar üzerinden bağlanmasının daha olumlu olduğu söylenebilir; indeks değeri %50'nin üstündedir. Bu, sistem salınımlarının sönüm değerinin çoğu durumda, rüzgar enerjisi eklenmediği durumdan daha iyi olacağı anlamına gelir, bu da rüzgar enerjisinin sisteme bu noktalardan katılması açısından iyi bir sonuç olarak değerlendirilebilir. Bu 5 ara indeks değeri için, rüzgar enerjisinin sisteme bu noktalardan katılıp katılamayacağı kararının, sistem tasarımcısının kabul ettiği minimum salınım sönümlenme değerine bağlı olacağı söylenebilir.

5.2.2 ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatörlerin sisteme eklenmesi

SKAG tipi generatörler için yapılan analizlerden sonra benzer analizler bir de sisteme eklenen rüzgar türbinli generatörlerin ÇBAG tipi olduğu durumda tekrarlanmıştır.

Olasılıksal kararlılık indeksinin kabul edilebilir en düşük sönümlenme oranı %3 olarak alındığı zaman, hemen hemen her durumda indeks değeri sıfır olmaktadır. ÇBAG'lerin sisteme eklendiği 15 farklı durum için indeks değeri sıfırdır, yalnızca sisteme 60. bara üzerinden bağlandığı durumda indeks değeri çok küçük de olsa sıfırdan farklı bir değer almakta ve 0,04 değerinde kalmaktadır. Buna göre ÇBAG tipi generatörlerin kullanıldığı hemen hemen her durumda sistemdeki salınım modunun sönümlenmesi ilk durumdakinden daha kötüdür. Bu da ÇBAG tipi generatörler için bir dezavantaj gibi görünmektedir.

İndeks analizleri açısından bakıldığında bu sonuçlar, sisteme ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatörlerin eklenmesi açısından baraları karşılaştırmayı olanaksız duruma getirmektedir. Ama bir yandan da rüzgar enerjisinin sisteme katılmasının sistemin salınım modunun sönümlenmesi açısından en iyi olacağı noktanın da 60. bara olduğu ortaya çıkmaktadır.

Bu sonuçlardan, elimizdeki parametre ve karakteristikteki bir ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatörü ilgilenilen test sistemine eklemenin SKAG'lerden daha olumsuz bir etki yaptığı söylenebilir. Bunun yanında ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatörler söz konusu olduğunda, ÇBAG'lerin hangi bara üzerinden sisteme katılmasının salınım modunun sönümlenmesini daha iyi duruma getireceği ve hangi bara üzerinden katılmasının salınım modunun sönümlenmesini görece daha kötü durumda bırakacağı hakkında yorum yapabilmek için analizde bir değişiklik yapılmıştır. Buna göre olasılıksal indeksin salınım modu için kabul edilebilir en düşük sönümlenme oranı %3 yerine %2,8 olarak alınırsa, baraların rüzgar enerjisini sisteme katarken gösterdikleri kararlılık başarımlarının karşılaştırılması mümkün olur.

Söz edilen değişiklik yapılarak olasılıksal indeksin salınım modu için kabul edilebilir en düşük sönümlenme oranı %2,8 olarak alınırsa, 16 farklı katılma senaryosu için indeks değerleri Çizelge 5.4'deki gibi olur.

Çizelge 5.4 : ÇBAG generatörlerinin sisteme 16 farklı yerden katılması sonucunda elde edilen kararlılık indeksi değerleri (alt sönüm değeri=%2,8).

Bağlanan Bara	Kararlılık İndeksi	Bağlanan Bara	Kararlılık İndeksi
53	1,00	61	0,38
54	0,34	62	0,52
55	0,40	63	1,00
56	0,60	64	0,32
57	0,58	65	0,64
58	0,46	66	0,42
59	0,44	67	0,54
60	1,00	68	1,00

Çizelge 5.4'deki indeks değerleri yardımıyla, rüzgar enerjisi ile üretimin sisteme katılacağı noktaların birbirleriyle sistem kararlılığı açısından karşılaştırılması olanaklıdır.

16 aday noktanın 4'ünde indeks değeri 1 olarak hesaplanmıştır. Buna göre ÇBAG'lerin sisteme 53., 60., 63. veya 68. baraların herhangi biri üzerinden katılmasının uygun olacağı söylenebilir. Çünkü rüzgar türbinli generatörler sisteme bu 4 baranın herhangi biri üzerinden katıldığı zaman, salınım modunun sönümlenmesi, diğer baralar üzerinden katılmasına göre daha iyi durumda olacaktır.

16 aday noktanın diğer 5'inde indeks değeri 0 ile 1 arasındadır ve %50'den büyüktür: Bu adaylar, ilk dört adaydan daha olumsuz olmakla birlikte indeks değerinin %50'nin üzerinde olması bir avantaj olarak görülebilir. Buna göre ÇBAG'lerin sisteme 56., 57., 62., 65. veya 67. baralar üzerinden katılması da bir bakış açısına göre uygun olarak değerlendirilebilir.

16 aday noktadan geriye kalan 7'sinde indeks değeri 0 ile 1 arasında ve %50'den küçüktür. Bu adaylar, diğer 9 adaydan daha olumsuz durumdadır. Buna göre ÇBAG'lerin sisteme 54., 55., 58., 59., 61., 64. veya 66. baralar üzerinden katılması, salınım modunun sönümlenmesi açısından diğer durumlara göre daha kötüdür. Bu durumdaki adaylar, diğerlerine göre daha olumsuz görülebilir ve rüzgar enerjisinin sisteme katılması açısından tercih edilmeyebilir.

Öte yandan, büyük bir güç sistemine tek bir rüzgar türbinli generatör eklendiği için değişimler çok küçüktür ve küçük değişimler üzerinden bazı yorumlara erişilmeye çalışılmıştır. Buradaki değerlendirmeler birbirlerine göre daha iyi veya birbirlerine göre daha kötü olarak düşünülebilir. Ama sisteme katılacak rüzgar enerjisi miktarı çok daha büyük olsaydı rüzgar türbinli generatörlerin sisteme hangi baradan katılacağı bu anlamda önemli olacaktı. Bu yüzden bu karşılaştırmalar, küçük değişimleri göstermekle birlikte kararlılık veya kararsızlık eğilimlerini anlayabilmek ve yorumlayabilmek için önemlidir. Bu yorumlar da sistem planlamacısının yeni bir rüzgar çiftliğinin hangi noktaya kurulması (veya kurulmaması) gerektiği konusunda karar vermesine yardımcı olabilir. Bu da rüzgar türbinli generatörlerin (rüzgar çiftliğinin) sisteme hangi noktadan (baradan) katılmasının salınım modunun sönümlenmesi açısından (yani daha genel olarak sistemin kararlılığı açısından) daha iyi (veya daha kötü) olacağı gözetilerek hesaplanabilmektedir.

6. SONUÇ VE YORUMLAR

Bu çalışmada, güç sistemlerinin küçük işaret kararlılığı analizlerinde kullanılabilecek yeni birtakım yöntem ve araçlar önerilmiş ve özellikle değişken üretim ve/veya tüketim birimleri içeren güç sistemlerine nasıl uygulanabileceği ve sonuçların nasıl yorumlanabileceği üzerine örnekler verilmiştir. Bunlar, büyük çapta olasılık kavramına dayanan ve çalışmada, güç sistemlerinin kararlılığı analizlerinde de kullanılması önerilen bazı matematiksel araç ve yöntemlerdir.

Çalışmanın odak noktasını, güç sistemlerine rüzgar enerjisi ile üretim birimlerinin katılması problemi oluşturmaktadır. Bu anlamda rüzgar türbinli generatör birimlerinin sistem salınımlarına etkisi öncelikle sistemdeki üretimin ve tüketimin sabit olduğu ve dolayısıyla sistem için tek bir çalışma noktasının söz konusu olduğu durumda incelenmiştir. Bu senaryoda, sistemdeki tüm üretimin senkron generatörler ile gerçekleştirildiği durum ile çeşitli senkron generatörlerin rüzgar türbinli olanlarıyla değiştirildiği durum, sistemin küçük işaret kararlılığı açısından ve bir test sistemi üzerinde karşılaştırılmış ve böylece kullanılan generatör yapısının kararlılığa etkisi anlaşılmak istenmiştir. Bu noktada, sistemde kullanılan rüzgar türbinli generatör yapısının sistemin küçük işaret kararlılığına etkisini incelemek olanaklı olmuş ve rüzgar türbinli generatörün henüz üretim değişkenliğinin söz konusu olmadığı durumda, sistem kararlılığına etkisini gözlemek anlamlı olmuştur.

Öte yandan, rüzgar enerjisi ile üretimin en önemli özelliklerinden birisi, üretim miktarının (generatörün çıkış gücünün) değişken olması ve önceden kestirilememesidir. Bu durumun güç sistemleri salınımlarına etkisini incelemek için olasılık kavramına ve ilgili araçlara başvurmak bu çalışmada da kullanılan, yaygın bir uygulamadır. Ayrıca bu çalışmada hem pratik bir benzetim aracı olan Latin Hiperküp Örnekleme (LHÖ) yönteminin küçük işaret kararlılığı analizlerinde de kullanılabilecek etkinlikte olduğu gösterilmiş, hem de örneklemeler sonunda elde edilen verileri yorumlayabilmek için sayısal bir ifade kullanılmış ve olasılıksal bir indeks önerilmiştir. İndeksin bir güç sisteminde, hangi senaryolarda hangi yorumları getirebileceği gösterilmiştir. Bu indeks yardımıyla, değişken üretim (veya değişken

Üretim ve tüketim) birimlerinin bulunduğu herhangi bir g sisteminde sistem salınımları açısından kararlılık başarımı, sayısal olarak ifade edilebilmektedir. Bu da sistemin küçük işaret kararlılığı ve sisteme rüzgar enerjisi ile üretim katılması açılarından bakıldığında, örneğin rüzgar iftliğinin sisteme hangi noktadan katılmasının daha iyi veya hangi noktadan katılmasının daha kötü olabileceği veya salınım modunun yeterli miktarda (veya oranda) sönümlenmesi için rüzgar iftliğinin en az hangi üretim kapasitesiyle kurulması gerektiği gibi çıkarımları beraberinde getirebilmektedir. Bu indeks, sistem planlamacısına rüzgar enerjisi ile üretim mevcut sisteme katılması aşamasında yol gösterebilecek bir araç olarak da değerlendirilebilir.

Hem retim veya tüketim değişkenliğinin olmadığı, hem yalnızca üretim değişken olduğu, hem de üretim ve tüketimin birlikte değişken olduğu durumlar için SKAG ve ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatörlerin sistem salınımlarına etkileri araştırılmıştır. Üretim veya tüketim değişkenliğinin olmadığı durumda yapılan analizlerde doğrudan doğruya generatör tiplerinin sistem kararlılığına etkileri, oluşturulan değişik senaryolar için gözlenmiştir. SKAG ve ÇBAG tipi generatörlerin sistemin salınım moduna etkileri genellikle benzer olsa da bazı farklılıklar da gözden kaçmamaktadır. Ama incelenen sistem özelinde dahi olsa, bu iki rüzgar türbinli generatör yapısının birbirlerine göre belirgin bir üstünlükleri gözlenmemiştir.

Üretim değişken olduğu durum için benzetimli olasılıksal küçük işaret kararlılığı analizleri gerçekleştirilmiştir. Benzetim yöntemi olarak, mevcut çalışmalarda da yaygın kullanıma sahip olan Monte Carlo (MC) yönteminin yanı sıra, küçük işaret kararlılığı analizlerinde de kullanılması bu çalışmada nerilen LH yöntemi kullanılmıştır. Her iki örnekleme yöntemiyle de düzlemde özdeğerlerin konumları gösterilmiş ve bölgeler arası salınım moduna ilişkin özdeğerlerin konumları ile salınım modunun sönümlenme değerleri hem histogramlar olarak hem de rüzgar türbinli generatörlerin çıkış gücüne göre değişimler şeklinde gösterilmiştir. MC yöntemi ile çok sayıda örnekleme almak yoluna gidilirken, LH yöntemiyle çok daha az sayıda örnekleme alınarak, gerçekçi sonuçlar bulunabileceği karşılaştırmalar sonunda da gösterilmiştir. Her şeyden önce, MC yöntemiyle hesaplanan tüm parametreleri LH yöntemiyle de ve çok daha az örnekleme yaparak hesaplamak mümkündür. Bunun yanında MC yöntemiyle yapılan çok sayıda örnekleme sonunda bulunan indeks değerleri de LH yöntemiyle ve çok daha az sayıda yapılan

örneklemler sonunda bulunanlara yakındır. Bu da LHÖ yönteminin güç sistemlerinin olasılıksal küçük işaret kararlılığı analizlerinde de kullanılabilecek pratiklikte olduğunu gösteren bir diğer sonuçtur. Yapılan analizler sonucunda, LHÖ yöntemi MC yönteminden daha pratik ve verimli görünmektedir.

Hem üretimin hem de tüketimin değişkenliği söz konusu olduğunda bu iki değişimin arasında bir korelasyonun var olduğu göz önünde bulundurulmuştur. Burada özel olarak korelasyonları göz önünde bulundurulan iki büyüklük, rüzgar hızı ve elektriksel tüketim miktarıdır. Her iki büyüklük de zamandan (gece ve gündüzden) bağımsız olmadıklarından dolayı birbirlerine göre istatistiksel bir ilişki içerisindedirler ve aralarında belli bir korelasyon vardır. İşte bu aşamada örneklemler alınırken bu korelasyon da gözötilmiş ve örnekleme yönteminde buna ilişkin değişiklikler yapılmıştır. Yöntem olarak, bağımsız olarak üretilen veri çiftleri uygun korelasyon değerini sağlayacak biçimde yeniden sıralanmış ve kararlılık analizlerine uygun duruma getirilmiştir. Bu senaryo için de özdeğerlerin konumları düzlemde, özdeğerlerin gerçel bileşenlerinin ve salınım modunun sönüm değerlerinin dağılımları histogram olarak gösterilmiştir. Ayrıca bu kez; üretim, tüketim ve salınım modunun sönüm değerlerinin birlikte değişimlerini gösteren grafikler oluşturulmuştur. Uygulamada bu grafikler, sistem işletmesi esnasında, üretimin ve tüketimin sistemin yeterli kararlılık ölçütünü sağlayacak miktarlarını ve sınırlarını belirlemek için kullanılabilir. Bu önemli bir çıkarım olarak değerlendirilebilir.

Olasılıksal analizler söz konusu olduğunda kararlığa ilişkin yorum yapmayı sağlayan en önemli araçlardan birisi, elektromekanik salınım modlarının yeterli miktarda sönümlenmesine dayanan olasılıksal indeks olmuştur. Bu indeks yardımıyla ilgilenilen test sistemlerinde çeşitli uygulamalar yapılarak indekse yeni boyutlar kazandırılmıştır.

İndeks, iki bölgeli test sisteminde, sisteme eklenen rüzgar çiftliğinin üretim kapasitesi üzerine yorum yapabilmek için kullanılmıştır. Buna göre sistem salınımları için bir alt sönüm değeri kabul edilerek, yapılan örneklemlerle rüzgar çiftliğinin çeşitli üretim kapasitesi değerleri için indeks hesaplanmıştır. İndeks değerleri yardımıyla, rüzgar çiftliğinin hangi üretim kapasitesinde salınım modunun sönümlenme değerinin daha olumlu, hangi üretim değerinde sönümlenmenin daha olumsuz olduğu yorumunu yapmak olanaklı hale gelmiştir. İncelenen sistemde, SKAG (veya ÇBAG) tipi rüzgar türbinli generatörlerden oluşan rüzgar çiftliğinin

Üretim kapasitesinin artmasıyla birlikte sistem salınımlarının istenen düzeyin üstünde sönümlenmesi olasılığı da artmıştır. Sistemin, yeterli düzeydeki alt sönüm değerinin üstünde kalması olasılığına ilişkin olarak, sistem planlamacısı tarafından yapılacak kabul; rüzgar iftliğinin en az hangi üretim kapasitesinde kurulması gerektiği konusunda verilecek kararı da etkileyebilecektir. Bu yorumların yapılmasını sağlayan da yine olasılıksal küçük işaret kararlılığı analizleri ve hesaplanan olasılıksal indekstir.

İndeks ayrıca, 16 generatörlü ve beş bölgeli bir g sisteminde, bir rüzgar iftliğinin sisteme eklendiği konunun, sistemdeki salınım modunun sönümlenmesi açısından yorumlanması amacıyla da kullanılmıştır. Yine sistemdeki salınım modu için kabul edilebilir bir alt sönüm değerı belirlenmiş ve SKAG (veya ÇBAG) tipi generatörlerden oluşan rüzgar iftliğinin sisteme çeşitli aday noktalardan eklenmesi sonucunda her durumda bir indeks değerı bulunmuştur. Uygulamada 16 farklı aday nokta için elde edilen indeks değerlerine göre, rüzgar iftliğinin sisteme hangi noktalardan bağlanması sistemin kararlılığı açısından daha olumlu, hangi noktalardan bağlanması daha olumsuz olduğu net bir şekilde ortaya konulabilmiştir.

Özel olarak, SKAG tipi generatörlerin kullanıldığı durumda, henüz sisteme rüzgar enerjisi ile üretimin katılmadığı durumdan daha iyi veya daha kötü olan bağlantı adayları net bir şekilde ortaya konmuştur. Buna göre rüzgar iftliğinin bazı baralar üzerinden bağlanması elektromekanik salınım modunun sönümlenmesini her durumda daha iyi, bazı baralar üzerinden bağlanması ise elektromekanik salınım modunun sönümlenmesini her durumda daha kötü duruma getirmiştir. Bu netlikte sonuçlar elde edilmesi, sistem planlaması ve rüzgar enerjisi ile üretimin sisteme katılması adına anlamlıdır ve bu çıkarımlar çalışmada kullanılan indeks yardımıyla gerçekleşmiştir.

ÇBAG tipi generatörlerin kullanıldığı durumda ise, 16 aday noktanın biri hariç hepsinde sistemin salınım modunun sönümlenmesi ilk durumdakinden daha kötü olmuştur. Yalnızca bir barada indeks değerı sıfırdan farklıdır ve bu da rüzgar enerjisi ile üretimin sisteme katılması için en iyi konunun burası olabileceği yorumunu getirmektedir. Bunun yanında, rüzgar enerjisi ile üretimin diğer baralar üzerinden eklenmesinin de sistem salınımlarına etkisini inceleyebilmek amacıyla sönüm değerinin kabul edilebilir alt sınır değerı değiştirilmiş ve indeksler tekrar

hesaplanmıştır. Bu noktadan sonra da yine rüzgar türbinli generatörlerin bağlanması için daha avantajlı veya daha dezavantajlı baraların belirlenebilmesi ve bu anlamda bağlantı noktalarının birbirleriyle bir kararlılık ölçütü aracılığıyla karşılaştırılabilmesi olanaklı duruma gelmiştir.

Bu çalışmada hem deterministik hem de olasılıksal temele dayanan küçük işaret kararlılığı analizleri gerçekleştirilmiş ve özellikle olasılıksal analizler için yeni yöntem ve yaklaşımlar önerilmiştir.

Buna göre, olasılıksal küçük işaret kararlılığı analizleri için yeni bir benzetim yöntemi olan LHÖ yönteminin kararlılık analizlerinde de kullanılması önerilmiş ve yöntem, örnek güç sistemlerinde denenmiştir. Çalışmada, hem MC hem de LHÖ yöntemleriyle analizler yapılmış ve özellikle LHÖ yöntemini güç sistemlerinin küçük işaret kararlılığı analizlerinde kullanmanın daha avantajlı olacağı savunulmuştur. Aynı zamanda bu sonuca ulaşabilmek için; önerilen LHÖ yöntemi, yaygın kullanıma sahip olan MC yöntemi ile çeşitli açılardan karşılaştırılmıştır.

Ayrıca, güç sistemleri salınımlarının sönümlenme düzeyini gözeten olasılıksal bir indeks yardımıyla da - bu çalışmada özellikle rüzgar enerjisi ile üretimin katıldığı – güç sistemleri üzerine çok sayıda somut çıkarımda bulunulabileceği gösterilmiştir. Bunlar, sistem planlaması ve işletmesi adına yeni bakış açılarını içermektedir. Bu indeksin LHÖ yöntemiyle, dolayısıyla daha az işlem yüküyle hesaplanabildiği ve indeks yardımıyla üretim ve işletme planlamasına dair önemli çıkarımlara ulaşmanın mümkün olduğu gösterilmiştir. İndeks, değişken üretim ve/veya tüketim durumundaki bir sistemde bile sistemin küçük işaret kararlılığı için sayısal ve daha tutarlı bir ölçü sunmaktadır. Bu da güç sistemi için daha net ve anlamlı sonuçlara ulaşabilmek anlamına gelmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Rogers, G.** (1996). Demystifying power system oscillations. *IEEE Computer Applications in Power*, sayı. 9-3, Sf. 30-35.
- [2] **Wang, H., Zhang Y. ve Zhou Q.** (2011). Wind farm model with DFIG for small signal stability study. *4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, 6-9 July 2011, Weihai, Shandong, China.
- [3] **Bu, S. Q., Du, W., Wang, H. F., Chen, Z., Xiao, L. Y. ve Li, H. F.** (2011). Probabilistic Analysis of Small-Signal Stability of Large-Scale Power Systems as Affected by Penetration of Wind Generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, sayı. pp-99, Sf. 1-9.
- [4] **Li, X., Zeng, Z., Zhou, J. ve Zhang Y.** (2008). Small signal stability analysis of large scale variable speed wind turbines integration. *The 11th International Conference on Electrical Machines and Systems*, October 17-20, 2008 Wuhan, China.
- [5] **Rueda, J.L. ve Erlich, I.** (2011). Impacts of large scale integration of wind power on power system small-signal stability. *4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, 2011, July 06-09, 2011 Weihai, Shandong, China.
- [6] **Morton, A.B.** (2009). Wind turbines and oscillatory stability in power systems: Towards a general approach. *19th Australasian Universities Power Engineering Conference: Sustainable Energy Technologies and Systems*, 27-30 September 2009.
- [7] **Vowles, D.J., Samarasinghe, C., Gibbard, M.J. ve Ancell, G.** (2008). Effect of wind generation on small-signal stability — A New Zealand Example. *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, 2008 IEEE.
- [8] **Slootweg, J. G. ve Kling, W. L.** (2003). The impact of large scale wind power generation on power system oscillations. *Electric Power Systems Research*, sayı. 67, no. 1, Sf. 9-20.
- [9] **Sanchez-Gasca, J.J., Miller, N.W. ve Price, W.W.** (2004). A Modal Analysis of a Two-Area System with Significant Wind Power Penetration. *Power Systems Conference and Exposition, 2004*, IEEE PES, 2004, sayı. 2 Sf. 1148 – 1152.
- [10] **Mendonca, A. ve Lopes, J.A.P.** (2005). Impact of Large Scale Wind Power Integration on Small Signal Stability. *International Conference On Future Power Systems*, 2005, Amsterdam, 2005, 5 Sf - 5.
- [11] **Gautam, D. ve Vittal, V.** (2009). Impact of DFIG based wind turbine generators on transient and small signal stability of power systems.

Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09. IEEE, Sf. 1-6.

- [12] **Pans, C.K., Dong, Z.Y., Zhang, P. ve Yin, X.** (2005). Probabilistic analysis of power system small signal stability region. *International Conference on Control and Automation, 2005. ICCA '05*, Budapest, Hungary June 26-29, 2005, sayı.1, Sf. 503-509.
- [13] **Burchett, R. C. ve Heydt, G. T.** (1978). Probabilistic Methods For Power System Dynamic Stability Studies. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, May-June 1978 , Sf. 695 – 702.
- [14] **Wang, C., Shi, L., Yao, L., Wang, L., Ni, Y. ve Bazargan, M.** (2010). Modelling analysis in power system small signal stability considering uncertainty of wind generation. *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, Sf. 1 – 7.
- [15] **Rueda, J.L. ve Colome, D.G.** (2009). Probabilistic performance indexes for small signal stability enhancement in weak wind-hydro-thermal power systems. *Generation, Transmission & Distribution, IET*, sayı. 3-8, Sf. 733 – 747.
- [16] **Papaefthymiou, G., Verboomen, J., Schavemaker, P., H. ve van der Sluis, L.** (2006). Impact of Stochastic Generation in Power Systems Contingency Analysis. *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, PMAPS 2006*, Sf. 1 – 6.
- [17] **Huntington, D.E. ve Lyrantzis, C.S.** (1998). Improvements to and limitations of Latin hypercube sampling. *Probabilistic Engineering Mechanics*, October 1998, sayı. 13-4, Sf. 245-253.
- [18] **Davey, K., R.** (2008). Latin Hypercube Sampling and Pattern Search in Magnetic Field Optimization Problems. *IEEE Transactions On Magnetics*, sayı. 44-6, Sf. 974 – 977.
- [19] **Yan Y., Yang, S., Wen, F. ve MacGill, I.** (2009). Generation scheduling with volatile wind power generation. *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN '2009*, Nanjing, China, April 6-7, 2009.
- [20] **Yu, H., Chung, C.Y., Wong, K.P., Lee, H.W. ve Zhang, J.H.** (2009). Probabilistic Load Flow Evaluation With Hybrid Latin Hypercube Sampling and Cholesky Decomposition. *IEEE Transactions on Power Systems*, sayı. 24-2, Sf. 661 – 667.
- [21] **Shu, Z. ve Jirutitijaroen, P.** (2011). Latin Hypercube Sampling Techniques for Power Systems Reliability Analysis With Renewable Energy Sources. *IEEE Transactions on Power Systems*, sayı. 26-4, Sf. 2066 – 2073.
- [22] **Jirutitijaroen, P. ve Singh, C.** (2008). Comparison of Simulation Methods for Power System Reliability Indexes and Their Distributions. *IEEE Transactions on Power Systems*, sayı. 23-2, Sf. 486 – 493.
- [23] **Sauer, P., W. ve Pai, M. A.** (1998). *Power system dynamics and stability*, Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall.
- [24] **Grainger, J. J. ve Stevenson, W., D.** (1994). *Power system analysis*, New York : McGraw-Hill.

- [25] **Kundur, P.** (1994). *Power system stability and control*, New York : McGraw-Hill.
- [26] **DSAToolsTM Dynamic Security Assessment Software** (2010).
Adres: <http://www.dsatools.com/>
- [27] **Erlich, I., Kretschmann, J., Fortmann, J., Mueller-Engelhardt, S. ve Wrede, H.** (2007). Modeling of Wind Turbines Based on Doubly-Fed Induction Generators for Power System Stability Studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, sayı. 22-3, Sf. 909 – 919.
- [28] **Sun, Y., Lin, J., Li, G. ve Li, X.** (2009). A review on the integration of wind farms with variable speed wind turbine systems into power systems. *The 1st International Conference On Sustainable Power Generation And Supply (SUPERGEN)*, Nanjing, China, April 6-7, 2009, Sf. 1 – 6.
- [29] **Papaefthymiou, G., Tsanakas, A., Kurowicka, D., Schavemaker, P.H. ve van der Sluis, L.** (2005). Probabilistic power flow methodology for the modeling of horizontally-operated power systems. *International Conference on Future Power Systems*, 2005, sayı. 7 Sf. – 7.
- [30] **West Texas A&M University, Alternative Energy Institute** (2011). Adres: <http://www.windenergy.org/datasites/14-whitedeer/2010.html>
- [31] **Nigim, K.A. ve Parker, P.** (2007). Heuristic and probabilistic wind power availability estimation procedures: Improved tools for technology and site selection. *Renewable Energy*, April 2007. sayı.32-4, Sf. 638-648.
- [32] **Rogers, G.** (2000). *Power system oscillations*, Boston : Kluwer Academic.
- [33] **Western Electricity Coordinating Council (WECC).**
Adres: <http://www.wecc.biz>

EKLER

EK A : İki bölgele test sistemine ait model ve parametreler

EK B : Beş bölgele test sistemine ait model ve parametreler

EK A

Sisteme ait hat parametreleri Çizelge A.1'deki gibidir.

Çizelge A.1 : İki bölgeli sistemin hat parametreleri [26].

Bara 1	Bara 2	Direnç	Reaktans	Süseptans
1	5	0,000000	0,016660	0,00000
2	6	0,000000	0,016660	0,00000
3	11	0,000000	0,016660	0,00000
4	10	0,000000	0,016660	0,00000
5	6	0,002500	0,025000	0,04375
6	7	0,001000	0,010000	0,01750
7	8	0,007500	0,075000	0,12833
7	8	0,007500	0,075000	0,12833
7	8	0,007500	0,075000	0,12833
8	9	0,018000	0,180000	0,19250
8	9	0,018000	0,180000	0,19250
9	10	0,001000	0,010000	0,01750
10	11	0,002500	0,025000	0,04375
8	9	0,018000	0,180000	0,19000
6	7	0,002000	0,020000	0,01700
7	8	0,007500	0,075000	0,12833
12	1	0,001000	0,010000	0,00000

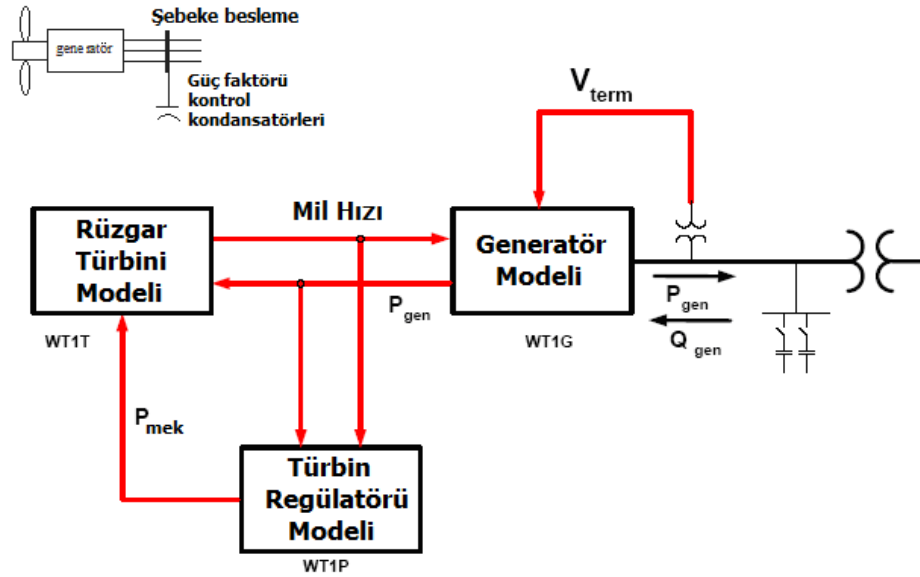
Çalışmada, tip 4 denilen d eksenli üzerinde kuadratik modellenmiş yapı kullanılmıştır [26]. Bu model için, kullanılan her generatör birbiriyle eşdeğer olarak düşünülmüştür. İki bölgeli sistemde kullanılan senkron generatörlere ait parametreler Çizelge A.2'deki gibidir.

Çalışmada kullanılan SKAG tipi generatörler için SSAT programının da referans aldığı Western Electricity Coordinating Council (WECC) Eşdeğer Tip 1 modeli kullanılmıştır [33]. Test sisteminde kullanılan SKAG'lerin dinamik modelleri Şekil A.1'deki gibidir.

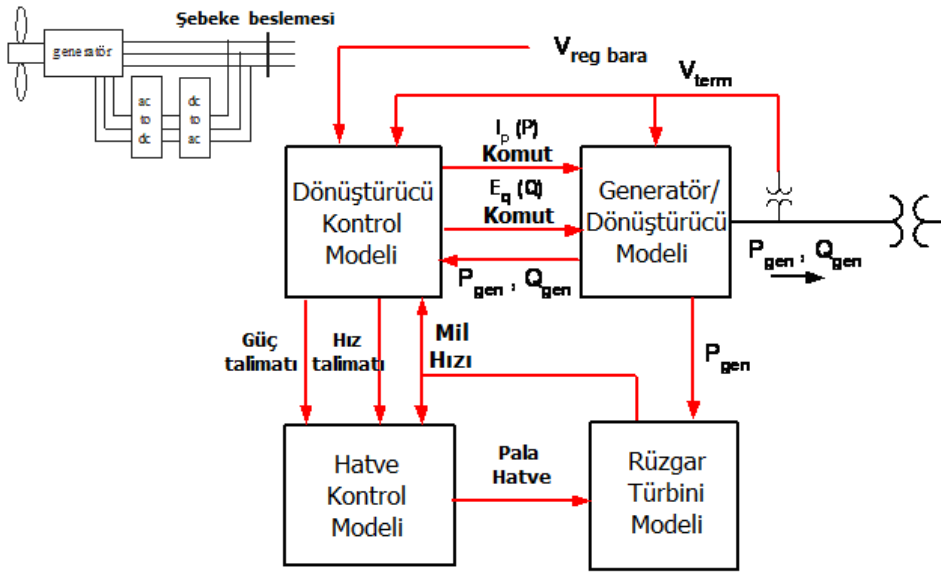
Çalışmada kullanılan ÇBAG tipi generatörler için SSAT programının da referans aldığı Western Electricity Coordinating Council (WECC) Eşdeğer Tip 3 modeli kullanılmıştır [33]. Test sisteminde kullanılan ÇBAG'lerin dinamik modelleri Şekil A.2'deki yapıdadır.

Çizelge A.2 : Senkron generatörlere ait parametreler [26].

S_{baz} (MVA)	900	T'_{d0}	8
R_a	0	T'_{q0}	0,4
X_d	1,8	T''_{d0}	0,03
X_q	1,7	T''_{q0}	0,05
X_l	0,2	H	6,5
X'_d	0,3	K_D	0
X'_q	0,55	α	0
X''_d	0,25	$S(1.0)$	0,0392
X''_q	0,25	$S(1.2)$	0,267



Şekil A.1 : SKAG tipi rüzgar türbinli generatör – WECC Tip 1 modeli [33].



Şekil A.2 : ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatör – WECC Tip 3 modeli [33].

Çalışmada kullanılan SKAG tipi rüzgar türbinli generatörlere ait parametreler Çizelge A.3'deki gibidir

Çizelge A.3 : SKAG tipi rüzgar türbinli generatöre ait parametreler [26].

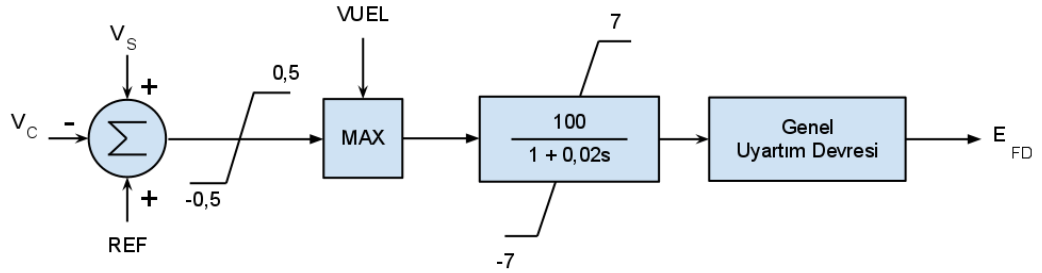
S_{baz} (MVA)	900	$S(1.0)$	0
X_s	3,1	$S(1.2)$	0
X'	0,178	X''	0,1
R_a	0	X_l	0
T'_0	5	T''_0	0,05

Çalışmada kullanılan ÇBAG tipi rüzgar türbinli generatörlere ait parametreler Çizelge A.4'teki gibidir.

Çalışmada kullanılan senkron generatörlerin herbirinde uyarım devreleri ve bunları temsil eden dinamik modeller mevcuttur. Uyarım modelleri Şekil A.3'teki yapıdadır.

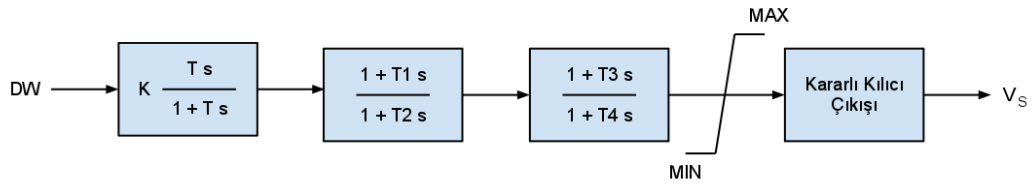
Çizelge A.4 : ÇBAG tipi generatöre ait parametreler [26].

X''	0,8
L_{VPLSW}	1
R_{LVPL}	5
V_{LVPL2}	0,9
V_{LVPL1}	0,5



Şekil A.3 : Çalışmada kullanılan senkron generatörlerin uyarım devresine ilişkin model [32].

Çalışmada ayrıca, senkron generatörler ile birlikte, güç sistemleri kararlı kılıcılar da kullanıldıkları varsayılarak bunlara ilişkin modeller elde edilmiştir. Çalışmada, Şekil A.4'teki model kullanılmıştır. Burada SSAT'ın 'PSS1' kodlu modeli temel alınmıştır.



Şekil A.4 : Çalışmada kullanılan güç sistemi kararlı kılıcılar için kullanılan model [26].

Şekil A.4'teki model geçerli olmak üzere, kullanılan güç sistemi kararlı kılıcı parametreleri Çizelge A.5'te gösterilmiştir.

Çizelge A.5 : Anılan model için güç sistemi kararlı kılıcı parametreleri.

K	T	T1	T2	T3	T4	MAX	MIN
3	2	0,08	0,04	0,08	0,04	0,1	-0,1

EK B

Çalışmada kullanılan beş bölgesi, 68 baralı test sistemine ait ayrıntılar verilmiştir.

Beş bölgesi test sisteminde de iki bölgesi test sisteminde olduğu gibi tip 4 denilen d eksenini üzerinde kuadratik modellenmiş yapı kullanılmıştır [26]. Kullanılan senkron generatörlerlere ait ortak parametreler Çizelge B.1'deki, diğer parametreler ise Çizelge B.2'deki gibidir.

Çizelge B.1 : Kullanılan tüm senkron generatörlere ait ortak parametreler [26].

R_a	X_d	T''_{d0}	T'''_{q0}	K_D	α	$S(1.0)$	$S(1.2)$
0	1,8	0,05	0,035	0	0	0	0

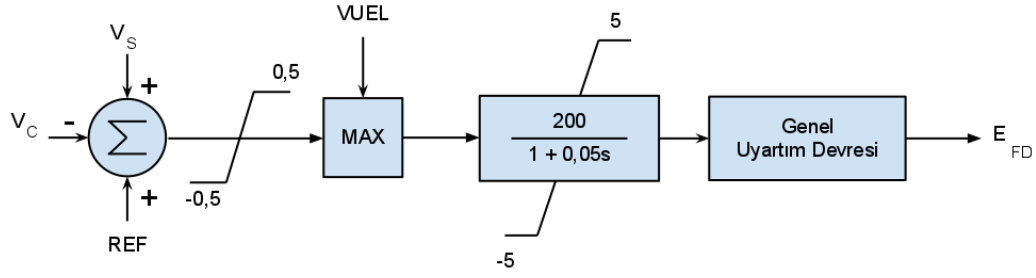
Beş bölgesi test sisteminde kullanılan SKAG tipi generatörler için SSAT programının da referans aldığı Western Electricity Coordinating Council (WECC) Eşdeğer Tip 1 modeli kullanılmıştır [33]. Model yapısı (bkz. Şekil A.1) ve parametreler (bkz. Çizelge A.3) iki bölgesi sistemdeki aynıdır.

Beş bölgesi test sisteminde kullanılan ÇBAG tipi generatörler için SSAT programının da referans aldığı Western Electricity Coordinating Council (WECC) Eşdeğer Tip 3 modeli kullanılmıştır [33]. Model yapısı (bkz. Şekil A.2) ve parametreler (bkz. Çizelge A.4) iki bölgesi sistemdeki aynıdır.

Çalışmada kullanılan senkron generatörlerin herbirinde uyarım devreleri ve bunları temsil eden dinamik modeller mevcuttur. Uyarım modelleri Şekil B.1'deki yapıdadır.

Çizelge B.2 : Kullanılan senkron generatörlere ait parametreler [32].

Bara	S_{baz} (MVA)	X_q	X_l	X'_d	X'_q	X''_d	X''_q	T'_{d0}	T'_{q0}	H
53	1800	1,242	0,013	0,558	0,504	0,450	0,450	10,2	1,5	2,333
54	610,17	1,721	0,035	0,425	0,366	0,305	0,305	6,56	1,5	4,949
55	721,44	1,710	0,030	0,383	0,361	0,325	0,325	5,70	1,5	4,962
56	687,02	1,773	0,030	0,300	0,275	0,240	0,240	5,69	1,5	4,163
57	545,45	1,691	0,027	0,360	0,327	0,273	0,273	5,4	0,44	4,767
58	708,66	1,708	0,022	0,354	0,319	0,283	0,283	7,3	0,4	4,911
59	610,17	1,782	0,032	0,299	0,275	0,244	0,244	5,66	1,5	4,327
60	620,69	1,738	0,028	0,354	0,310	0,279	0,279	6,7	0,41	3,915
61	854,7	1,752	0,030	0,487	0,427	0,385	0,385	4,79	1,96	4,037
62	1065,1	1,225	0,020	0,487	0,479	0,426	0,426	9,37	1,5	2,911
63	1406,3	1,730	0,010	0,253	0,211	0,169	0,169	4,1	1,5	2,005
64	1782,2	1,693	0,022	0,552	0,499	0,446	0,446	7,4	1,5	5,179
65	12162	1,739	0,003	0,334	0,304	0,243	0,243	5,9	1,5	4,078
66	10000	1,730	0,002	0,285	0,25	0,23	0,23	4,1	1,5	3
67	10000	1,730	0,002	0,285	0,25	0,23	0,23	4,1	1,5	3
68	10112	1,689	0,004	0,359	0,303	0,278	0,278	7,8	1,5	4,450



Şekil B.1 : Beş bölgeci sistemde kullanılan senkron generatörlerin uyarım devresine ilişkin model [32].

Çalışmada ayrıca, senkron generatörler ile birlikte, güç sistemleri kararlı kılıcılarının da kullanıldıkları varsayılarak bunlara ilişkin modeller elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan model Şekil A.4'teki yapıda olmak üzere güç sistemi kararlı kılıcılarının parametreleri Çizelge B.3'deki gibidir.

Çizelge B.3 : Güç sistemi kararlı kılıcı için parametreler [32].

Bara	K	T	T1	T2	T3	T4	MAX	MIN
53	2	10	0,08	0,01	0,08	0,01	0,2	-0,05
54	10	10	0,08	0,01	0,08	0,01	0,2	-0,05
55	10	10	0,04	0,02	0,1	0,01	0,2	-0,05
56	5	10	0,08	0,02	0,08	0,02	0,2	-0,05
57	5	10	0,05	0,01	0,08	0,02	0,2	-0,05
58	8	10	0,05	0,01	0,08	0,02	0,2	-0,05
59	3	10	0,08	0,01	0,08	0,02	0,2	-0,05
60	10	10	0,05	0,01	0,05	0,02	0,2	-0,05
61	10	10	0,08	0,01	0,08	0,02	0,2	-0,05
62	3	10	0,08	0,03	0,05	0,01	0,2	-0,05
63	10	10	0,08	0,01	0,08	0,01	0,2	-0,05

Çizelge B.3 (devam) : Güç sistemi kararlı kılıcı için parametreler [32].

64	4	10	0,04	0,01	0,05	0,01	0,2	-0,05
65	4	10	0,04	0,01	0,05	0,01	0,2	-0,05
66	10	10	0,03	0,02	0,05	0,01	0,2	-0,05
67	8	10	0,05	0,01	0,08	0,02	0,2	-0,05
68	7	10	0,04	0,01	0,05	0,01	0,2	-0,05

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: İbrahim Gürsu TEKDEMİR
Doğum Yeri ve Tarihi: Kadıköy, 13.02.1987
E-Posta: gtekdemir@yahoo.com
Lisans: Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü (2005-2009)

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

▪ **Tekdemir, İ. G.,** Genç, V. M. İ. (2011). A Small-Signal Stability Related Probabilistic Security Assessment of Wind Power Integration into Power Systems. *7th International Conference On Electrical And Electronics Engineering, ELECO'2011*, December 1-4, 2011 Bursa, Turkey.