

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN GÜÇ KALİTESİ ÜZERİNE
ETKİLERİNİN MODELLENMESİ**

Elektrik Müh. Akın TAŞCIKARAOĞLU

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Tesisleri Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ.....	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ÖNSÖZ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ	15
2. RÜZGAR GÜCÜ	17
3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ	20
3.1 Türbin Tipleri	20
3.1.1 Kanat Sayılarına Göre Türbin Tipleri.....	20
3.1.2 Eksenlerine Göre Türbin Tipleri	21
3.1.2.1 Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	21
3.1.2.2 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri.....	21
3.1.2.2.1 Rüzgarı Önden Alan (Upwind) Türbinler.....	22
3.1.2.2.2 Rüzgarı Arkadan Alan (Downwind) Türbinler	22
3.1.3 Türbin Hızlarına Göre Türbin Tipleri.....	22
3.1.3.1 Sabit Hızlı Türbinler	22
3.1.3.2 Değişken Hızlı Sistemler	23
3.2 Türbin Elemanları.....	24
3.2.1 Kule.....	24
3.2.2 Rotor Kanatları	24
3.2.3 Generatör.....	24
3.2.3.1 Doğru Akım Generatörleri	25
3.2.3.2 Senkron Generatörler	25
3.2.3.2.1 Alan Sargılı Senkron Generatörler	25
3.2.3.2.2 Sabit Mıknatıslı Senkron Generatörler	25
3.2.3.3 Asenkron Generatörler.....	26
3.2.3.3.1 Sincap Kafesli Asenkron Generatörler	26
3.2.3.3.2 Çift Beslemeli Asenkron Generatörler	26
3.2.4 Yön Saptırma (yaw) Mekanizması.....	26
3.2.5 Güç Elektroniği Elemanları.....	26
3.2.6 Anemometre	26

3.2.7	Frenleme Düzeni.....	27
3.2.8	Dişli Kutusu.....	27
3.3	Türbin Hız ve Güç Kontrolü	27
3.3.1	Tek Sabit Hızlı Türbinler	30
3.3.2	Çift Sabit Hızlı Türbinler	30
3.3.3	Değişken Hızlı Türbinler	31
3.4	Türbin Dizaynları	31
3.4.1	Sabit Hızlı Rüzgar Türbinleri (Tip A)	31
3.4.2	Değişken Rotor Direncine Sahip Olan Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri (Tip B).....	32
3.4.3	Kısmi Ölçek Frekans Konverterine Sahip Olan Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri (Tip C)	33
3.4.4	Tam Ölçek Frekans Konverterine Sahip Olan Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri (Tip D).....	34
4.	RÜZGAR ENERJİSİNİN ELEKTRİKSEL UYGULAMALARI	36
4.1	Şebekeden Bağımsız Rüzgar Türbinleri	36
4.2	Şebeke Bağlantılı Rüzgar Türbinleri	36
4.3	Rüzgar Türbinlerinin Güç Kalitesi Üzerine Etkileri.....	36
4.3.1	Rüzgar Türbinlerinin Güç Kalitesi Üzerine Etkilerinin Faktörleri.....	37
4.3.1.1	Rüzgar Türbini Teknolojisi	37
4.3.1.2	Ortak Bağlantı Noktasındaki Şebeke Şartları.....	38
4.3.1.3	Rüzgar Çiftliği Dizaynı.....	38
4.3.1.4	Rüzgar Akışı Yerel Karakteristikleri	39
4.3.2	Rüzgar Türbinlerinin Neden Olduğu Güç Kalitesi Problemleri.....	39
4.3.2.1	Gerilim Dalgalanmaları	39
4.3.2.1.1	Yavaş Gerilim Değişimleri	40
4.3.2.1.2	Hızlı Gerilim Değişimleri (Fliker).....	41
4.3.2.2	Gerilim Çökmesi	44
4.3.2.3	Reaktif Güç	45
4.3.2.4	Frekans	46
4.3.2.5	Harmonikler	48
5.	ŞEBEKEYE BAĞLANAN RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN GÜÇ KALİTESİ KARAKTERİSTİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ İÇİN MODELLEMELER.....	51
5.1	Kararlı Hal Gerilimi.....	51
5.2	Gerilim Dalgalanmaları	53
5.2.1	Sürekli Çalışma	54
5.2.2	Anahtarlama İşlemleri.....	67
5.3	Harmonikler	73
6.	TEST SONUÇLARI ve YORUMLAR	75
6.1	Kararlı Hal Gerilimi.....	75
6.2	Gerilim Dalgalanmaları	76
6.2.1	Sürekli Çalışma	76
6.2.2	Anahtarlama İşlemleri.....	81
6.3	Harmonikler	86

7.	SONUÇLAR	89
	KAYNAKLAR.....	90
	ÖZGEÇMİŞ.....	93

SİMGE LİSTESİ

A	Süpürme alanı (m^2)
A'	Alan (m^2)
A_c	Sinüzoidal bir gerilim dalgalanmasının genliği (V)
$c(\psi_k)$	Sürekli çalışma için fliker katsayısı
c_p	Rotor güç katsayısı
D	Türbin rotor çapı (m)
d	Bağıl gerilim değişimi (%)
d_{max}	Nominal gerilimin yüzdesi içinde eşdeğer gerilim adımı
E_{plti}	Uzun dönem fliker emisyon sınırı
E_{psli}	Kısa dönem fliker emisyon sınırı
f	Temel şebeke frekansı (Hz)
f_c	Sinüzoidal bir gerilim dalgalanmasının frekansı (Hz)
f_m	Bir modülasyon dalgalanmasının frekansı (Hz)
$f_{m,i}$	i 'ninci rüzgar hızı aralığında fliker katsayı değerlerinin meydana gelme frekansı
$f_{y,i}$	i 'ninci rüzgar hızı aralığında rüzgar hızlarının meydana gelme frekansı
h	Harmonik derecesi
H'	Dikey eksenli türbinlerde kule yüksekliği (m)
H	Yükseklik (m)
H_0	Referans yükseklik (m)
$I_{h,i}$	i 'ninci rüzgar türbininin h 'ninci mertebedeki harmonik akım distorsiyonu (A)
$i_m(t)$	Ölçülen ani akım (A)
I_n	Nominal akım (A)
$k_f(\psi_k)$	Fliker adım faktörü
$k_u(\psi_k)$	Gerilim değişim faktörü
L_{fic}	Hayali şebekenin endüktansı (H)
m	Rüzgarın kütlesi (kg)
m'	Kütleli debi (kg/s)
N_{10}	10 dakika içerisinde anahtarlamaların bir türünün maksimum sayısı
N_{120}	120 dakika içerisinde anahtarlamaların bir türünün maksimum sayısı
N_{bin}	v_{cut-in} (üretim yapılan en düşük rüzgar hızı) ile 15 m/s arasındaki rüzgar hızı aralıklarının toplam sayısı
n_i	i 'ninci rüzgar türbinindeki transformatörün oranı
N_m	Ölçülen fliker katsayısı değerlerinin toplam sayısı

$N_{m,i}$	i'ninci rüzgar hızı aralığında ölçülen fliker katsayısı değerlerinin sayısı
$N_{m,i,c < x}$	i'ninci rüzgar hızı aralığında x değerinden küçük olan fliker katsayısı değerlerinin sayısı
N_{wt}	Rüzgar türbinlerinin sayısı
p	Rüzgar türbininde üretilen aktif güç (W)
$P_{0,2}$	Ölçülen maksimum güç (0,2 saniyelik ortalama değer) (W)
P_{60}	Ölçülen maksimum güç (60 saniyelik ortalama değer) (W)
$P_f(t)$	Ani fliker seviyesi
P_{lt}	Uzun dönem fliker şiddeti
P_{mc}	İzin verilen maksimum güç (W)
P_n	Rüzgar türbininin nominal gücü (W)
$P_{r(c < x)}$	c'nin kümülatif dağılımı
P_{st}	Kısa dönem fliker şiddeti
$P_{st, fic}$	Hayali şebekedeki kısa dönem fliker şiddeti
P_w	Rüzgardan elde edilen güç (W)
q	Rüzgar türbininin şebekeden çektiği reaktif güç (VAr)
$Q_{0,2}$	$P_{0,2}$ 'deki reaktif güç (0,2 saniyelik ortalama değer) (VAr)
Q_{60}	P_{60} 'daki reaktif güç (60 saniyelik ortalama değer) (VAr)
Q_{mc}	P_{mc} 'deki reaktif güç (VAr)
Q_n	Rüzgar türbininin nominal reaktif gücü (VAr)
R	Şebeke direnci (Ω)
r	Türbin rotor yarıçapı (m)
R_{fic}	Hayali şebekenin direnci (Ω)
$S_{0,2}$	$P_{0,2}$ 'deki görünür güç (0,2 saniyelik ortalama değer) (VA)
S_{60}	P_{60} 'daki görünür güç (60 saniyelik ortalama değer) (VA)
S_k	Şebekenin kısa devre görünür gücü (VA)
$S_{k, fic}$	Hayali şebekenin kısa devre görünür gücü (VA)
S_{mc}	P_{mc} 'deki görünür güç (VA)
S_n	Rüzgar türbininin nominal görünür gücü (VA)
T_f	Fliker etki zamanı (s)
T_p	Bir anahtarlama işleminin geçici zaman periyodu (s)
$u_0(t)$	İdeal bir gerilim kaynağının ani faz-nötr gerilimi (V)
$u_{fic}(t)$	Hayali şebekede simule edilen ani faz-nötr gerilimi (V)
$u_{fic, max}$	Hayali şebekede maksimum faz-nötr gerilimi (V)

$u_{fic,min}$	Hayali şebekede minimum faz-nötr gerilimi (V)
U_n	Nominal fazlararası gerilim (V)
v	Rüzgar hızı (m/s)
v_0	H_0 yüksekliğindeki rüzgar hızı (m/s)
v_a	Yıllık ortalama rüzgar hızı (m/s)
v_{cut-in}	Üretim yapılan en düşük rüzgar hızı (m/s)
v_d	Türbin kanatlarının arka tarafındaki rüzgar hızı (m/s)
v_i	i'ninci rüzgar hızı aralığının orta noktası (m/s)
w	Rotor açısal hızı (rad/s)
w_c	Sinüzoidal bir gerilim dalgalanmasının açısal frekansı (rad/s)
w_i	i'ninci rüzgar hızı aralığı için ağırlıklandırma faktörü
w_m	Bir modülasyon dalgasının açısal frekansı (rad/s)
X	Şebeke reaktansı (Ω)
x_{fic}	Hayali şebekenin reaktansı (Ω)
z	Pürüzlülük katsayısı
I_p	Rotor hızı (Hz)
$\Delta U_{dyn}/U_n$	Maksimum izin verilen gerilim değişimi (%)
$\Delta V/V$	Bir modülasyon dalgasının genliği (%)
α	Sürtünme katsayısı
$\alpha_m(t)$	Ölçülen gerilimin temel değerinin elektriksel açısı (derece)
β	Harmoniklerin toplamı ile bağlantılı parametre
ρ	Hava yoğunluğu (kg/m^3)
ψ_k	Şebeke empedansı faz açısı (derece)

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternative Current
ASSG	Alan Sargılı Senkron Generatör
AVR	Automatic Voltage Regulator
ÇBAG	Çift Beslemeli Asenkron Generatör
DC	Direct Current
DMSG	Daimi Mıknatıslı Senkron Generatör
EN	European Norm
GTO	Gate Turn-off Thyristor
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MW	Megawatt
PCC	Point of Common Coupling
RMS	Root Mean Square
SKAG	Sincap Kafesli Asenkron Generatör
SRAG	Sargılı Rotorlu Asenkron Generatör
STATCOM	Static Compensator
SVC	Static Var Compensator
TSR	Tip Speed Ratio
UCTE	Union for the Co-ordination of the Transmission of Electricity

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Farklı kanat sayılarına sahip rotorlar için rotor verimi-TSR değişimi	19
Şekil 3.1 Rüzgar türbinlerinde değişken mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi	20
Şekil 3.2 Şebeke bağlantılı değişken hızlı bir rüzgar güç sisteminin elektriksel şeması	23
Şekil 3.3 Rotor hızı kontrol bölgeleri	28
Şekil 3.4 Direkt bağlı sincap kafes endüksiyon generatörlü sabit hızlı rüzgar türbini	32
Şekil 3.5 Değişken rotor direncine sahip değişken hızlı rüzgar türbini	33
Şekil 3.6 Kısmi ölçek frekans konverterine sahip değişken hızlı rüzgar türbini	34
Şekil 3.7 Tam ölçek frekans konverterine sahip değişken hızlı rüzgar türbini	35
Şekil 4.1 IEC 61000-4-15 ve IEEE Std 141-1993 standartlarına göre düzenli dikdörtgensel gerilim değişimleri için $P_{st} = 1$ eğrisi	42
Şekil 4.2 Reaktif güç sınırlandırma eğrisi	45
Şekil 4.3 Aktif gücün frekans kontrollü regülasyonu	47
Şekil 4.4 EN 50160 standardına göre nominal gerilimin yüzdesi olarak tekil harmonik gerilimlerinin değerleri	49
Şekil 5.1 Kararlı hal gerilim değişiminin hesabı modeli	53
Şekil 5.2 Rüzgar türbininin sürekli çalışması sırasında fliker için ölçüm ve değerlendirme işlemleri	54
Şekil 5.3 Hayali gerilimin simülasyonu için hayali şebeke	55
Şekil 5.4 Hayali şebeke modeli	56
Şekil 5.5 IEC flikermetresinin fonksiyon şeması	57
Şekil 5.6 Sinüzoidal kalibrasyon sinyali modeli	58
Şekil 5.7 Dikdörtgensel kalibrasyon sinyali modeli	58
Şekil 5.8 Kare prensipli demodülatör modeli	58
Şekil 5.9 Yüksek ve alçak geçiren filtre modelleri	59
Şekil 5.10 Birinci derece yüksek geçiren ve altıncı derece Butterworth alçak geçiren filtrelerin frekans cevapları	59
Şekil 5.11 Ağırlıklandırma filtresi modeli	60
Şekil 5.12 İnsan gözünü simule eden ağırlık filtresinin frekans cevabı	61
Şekil 5.13 Kare alıcı ve düzleştirici modeli	61
Şekil 5.14 Kümülatif dağılım fonksiyonları hesabı modeli	62
Şekil 5.15 Normalleştirme (Normalization) modeli	63
Şekil 5.16 Rüzgar türbininin anahtarlama işlemleri sırasında meydana gelen	

gerilim değişimleri ve fliker emisyonu için ölçüm ve değerlendirme işlemleri	68
Şekil 5.17 Anahtarlama işlemlerinde fliker ve maksimum - minimum hayali şebeke gerilimi hesabı modeli	69
Şekil 5.18 Fliker adım faktörü hesabı modeli	70
Şekil 5.19 Gerilim değişim faktörü hesabı modeli	71
Şekil 6.1 Rüzgar hızının fonksiyonu olarak fliker katsayıları ($\psi_k=50^\circ$ için).....	76

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 Rüzgar türbini konfigürasyonlarının sistem karşılaştırması	35
Çizelge 5.1 Ağırlıklandırma filtresi parametreleri ve değerleri	60
Çizelge 5.2 Farklı rüzgar hızları için olasılıklar ve yüzdelikler	65
Çizelge 5.3 IEC 61000-3-6'ya göre β değerlerinin belirlenmesi	74
Çizelge 6.1 Cut-in rüzgar hızı ile 15 m/s arasındaki her bir rüzgar hızı aralığı için ölçümlerin ($N_{m,i}$) ve meydana gelme frekanslarının ($f_{m,i}$ ve $f_{y,i}$) sayısı	77
Çizelge 6.2 Her bir rüzgar hızı aralığı için ağırlıklandırma faktörleri	78
Çizelge 6.3 Her bir rüzgar hızı dağılımı için ağırlıklandırma faktörünün toplamaları	78
Çizelge 6.4 Her bir rüzgar hızı dağılımı için fliker katsayılarının toplam ağırlıklı dağılımı ...	79
Çizelge 6.5 Sürekli çalışmada fliker katsayısı	80
Çizelge 6.6 Anahtarlama işlemlerinde L1 fazı için $P_{fic, st}$ değerleri	81
Çizelge 6.7 Anahtarlama işlemlerinde L1 fazı için U_{fic} 'in maksimum ve minimum değerleri	81
Çizelge 6.8 Anahtarlama işlemlerinde L1 fazı için fliker adım faktörleri ve gerilim değişim faktörleri	82
Çizelge 6.9 Anahtarlama işlemlerinde fliker katsayısı ve bağlı gerilim değişimi	83
Çizelge 6.10 Güç kalitesini etkilemeden şebekeye bağlanabilecek verilen özelliklere sahip rüzgar türbini sayısı	84
Çizelge 6.11 Her bir rüzgar türbininde bulunan konverterin tekil harmonik distorsiyonları...	87

ÖNSÖZ

Rüzgar türbinlerinin şebekeler içindeki güçlerinin artmasıyla birlikte, türbinlerden kaynaklanan nedenlerden dolayı güç kalitesi önemli bir sorun haline gelmeye başlamıştır. Bu sorun şebeke içerisindeki rüzgar gücünün daha fazla artmasına engel olmaktadır. Bu nedenle belli bir bölgede mevcut türbinlerin neden olduğu veya kurulması düşünülen türbinlerin neden olacağı etkileri değerlendirebilmenin önemi giderek artmaktadır.

Günümüzde gelişmiş ülkelerde türbinlerin şebeke üzerindeki etkileri, standartlar ve şebeke kodları (yönetmelikleri) yardımıyla değerlendirilebilmesine rağmen ülkemizde bu konuda yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Ancak rüzgar türbini sayısı ülkemizde son yıllarda hızlı bir şekilde artmaya başladığından, bu konu daha fazla önem kazanacaktır. Bu nedenle bu çalışmada yapılacak ölçümler ile rüzgar türbinlerinin güç kalitesi karakteristiklerini değerlendirebilmek amacıyla bir algoritma oluşturulmuştur. MATLAB tabanlı modeller ile oluşturulan bu algoritma içerisinde yine modellemelerle elde edilen ölçüm değerleri kullanılmasına rağmen, gerçek veriler ile de değerlendirmelerin yapılabilmesi mümkündür.

Çalışmalarımın her aşamasında bilgi ve deneyimleriyle beni yönlendiren danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU'na, TÜBİTAK “Güç Kalitesi Milli Projesi” kapsamında vermiş olduğu desteklerden dolayı Prof. Dr. Celal KOCATEPE'ye ve yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Bülent VURAL'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca “Projem İstanbul” kapsamında bu çalışmaya destek olan İstanbul Büyükşehir Belediyesi'ne ve yüksek lisans öğrenimim boyunca bana finansal destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

ÖZET

Son yıllarda fosil yakıt kaynaklarının tükenmeye başlamasıyla birlikte mevcut enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi gittikçe artmaktadır. Bu enerji kaynakları içerisinde rüzgar enerjisi temiz, sürdürülebilir ve diğer kaynaklara göre daha az maliyetli olması nedeniyle ön plana çıkmaktadır. Ancak rüzgardan elde edilen enerjinin oldukça değişken olması nedeniyle büyük güçlerde rüzgar çiftliklerinin şebekeye bağlanmaları, güç kalitesi açısından sorunlara neden olabilmektedir. Güç kalitesi ile ilgili bu problemler genellikle rüzgar çiftliklerinin şebeke entegrasyonu yapıldıktan sonra çözülmeye çalışılmaktadır. Oysaki bu problemlerin çözümünde türbinler kurulmadan önce yapılacak değerlendirmeler ile alınacak önlemler, çok daha basit ve ekonomik bir yol sunacaktır.

Bu çalışmada şebeke bağlantılı rüzgar türbinlerinin güç kalitesi karakteristikleri üzerindeki olası etkileri belirtilmiş ve bu etkilerinin hesaplanabilmesi amacıyla MATLAB tabanlı modellemeler gerçekleştirilmiştir. Özellikle insan faktörü ile doğrudan ilişkisi nedeniyle modellenmesi daha karmaşık olan hızlı gerilim değişimleri, ayrıntılı bir biçimde incelenmiştir. Modellerin oluşturulabilmesi için başta IEC 61400-21 ve IEC 6100-4-15 olmak üzere çeşitli standartlardan yararlanılarak, yapılan modellemelerin pratikte de kullanılabilmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise bir uygulama gerçekleştirilerek, ülkemizde rüzgar gücünden tam olarak yararlanmaya bir engel oluşturan uygulamaların üretim ve tüketim açısından analizleri yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar türbinleri, güç kalitesi, flikermetre.

ABSTRACT

The importance of renewable energy sources has increased gradually on the present energy production while the supply of fossil fuels began to run out of late years. Among these renewable energy sources, wind energy comes into prominence owing to it is a clean, sustainable and cost-effective energy. However, the connection of large wind farms to the grid may cause problems in terms of power quality due to the variability of the energy extracted from the wind. The problems related with the power quality are striven to solve after the grid integration of wind farms. However, the precautions that can be taken by means of the assessments before the installation of the turbines represent an easier and economic way.

In the thesis, the possible effects of the grid connected wind turbines on the power quality characteristics have been defined and the MATLAB based models have been constructed so as to calculate these effects. Particularly, fast voltage variations that are difficult to model due to its relation with the human factor have been analyzed in detail. It has been aimed that the models are able to use in practice while utilizing various standards such as IEC 61400-21 and IEC 61000-4-15 in order to set up the models. In the last section of the thesis, the analyses of the implementations that represent constraints for exploiting the wind resources in Turkey have been realized in terms of production and consumption with a case study.

Key Words: Wind turbines, power quality, flickermeter.

1. GİRİŞ

Rüzgar gücü endüstrisinin 1980'lerde gelişmeye başlamasıyla birlikte rüzgar türbinlerinin nominal güçleri oldukça büyük bir artış göstermiştir ve bu güçteki türbinlerden oluşan rüzgar çiftliklerinin kullanımı günümüzde oldukça yaygınlaşmıştır. Ancak rüzgar çiftliklerinin yüksek kurulu güç değerlerine ulaşmasıyla şebeke bağlantıları büyük bir sorun haline gelmiştir. Bu sorunlar genellikle güç sistemlerinde yavaş gerilim değişimleri, fliker, gerilim çökmeleri ve harmonikler olarak görülmektedir (Knudsen ve Akhmatov, 2001; Tande, 2002; Bollen vd., 2005).

Son yıllarda, iletim sistemine bağlanacak olan kontrol edilebilir rüzgar santrallerinin uyması gereken teknik kriterleri içeren çok sayıda şebeke kodu (yönetmeliği) yayınlanmıştır. Bu kodlara göre rüzgar santralleri, şebekenin gerilim ve frekans kontrolüne yardımcı olmalıdır ve aynı zamanda arıza durumlarında iletim sistemine bağlı kalarak gerekli aktif ve reaktif gücü üretmelidir (Tande, 2003; De Alegria vd., 2006; Ummels vd., 2006). Ancak bazı durumlarda, güç sistemlerine bağlı olan rüzgar türbinlerinin bu şartları sağlamasına rağmen, şebeke güç kalitesi açısından bakıldığında belirlenen sınırların dışına çıkabilmektedir. Bu nedenle rüzgar türbinlerine sahip olan ülkelerin, şebeke içerisindeki rüzgar gücünü sınırlayan yönetmelikleri bulunmaktadır. Bu yönetmelikler genellikle, türbinlerin şebeke gerilimde % 1'lik bir artışa sebep olmaması, nominal güçlerinin şebeke kısa devre gücünün $1/25$ 'inden küçük olması gibi basit şartlardan oluşmaktadır (Tande, 2002; Ackermann, 2005). Gerçekte bu şartlar çoğu bölgede şebekelerin güç kalitesindeki bozulmaları sınırlandırmaya yetmektedir. Ancak özellikle rüzgar potansiyeli yüksek olan ve zayıf şebekelere sahip bölgelerde, rüzgar gücünden faydalanma oranı oldukça düşmektedir. Bu oranı arttırabilmek için yapılan çalışmalar arasında en önemlisi 2001 yılında IEC 61400-21 adıyla yayımlanan standarttır. Rüzgar türbinlerinin güç kalitesi karakteristiklerini belirlemek için gerekli işlemleri tanımlayan bu standardın kullanılmasıyla rüzgar türbinleri henüz kurulmadan önce şebeke üzerindeki olası etkileri değerlendirilebilmekte ve böylece şebekelerde daha fazla rüzgar gücü için yer açılabilir.

Bu çalışmada standarttan daha kolay faydalanılabilmesi amacıyla, izlenmesi gereken işlemler MATLAB simülasyon programından yararlanılarak modellenmiştir. Böylece rüzgar türbinlerinden alınan ölçüm değerlerinin kullanılmasıyla daha hızlı ve daha basit bir şekilde güç kalitesi karakteristikleri belirlenebilmektedir. Modelleme işlemleri şebeke bağlantılı türbinlerin güç karakteristiklerinin tamamı için yapılmıştır, ancak en önemli kısım hızlı gerilim değişimlerine ayrılmıştır. Bunun nedeni hızlı gerilim değişimlerinin insan faktörü ile

olan doğrudan ilişkisi nedeniyle modellemesinin diğer güç kalitesi karakteristiklerine göre daha karmaşık olmasıdır.

Hızlı gerilim değişimleri bugüne kadar farklı simülasyon programlarıyla ve farklı şekillerde modellenmeye çalışılmıştır. Bu modeller içerisinde ağırlıklandırma eğrilerini kullanan ve gerilimin analog filtrelemesine dayanan yapılar da bulunmasına rağmen (Bertola vd., 2004), filtrelerin dijital uygulaması yaklaşımına dayanan yapılar daha önemli bir yer tutmaktadır (Mombaure, 1989; Caldara vd., 1998; Caldara vd., 1999; Soliman ve El-Hawary, 2000; Wei vd., 2003). Ayrıca literatürde ışık kaynaklarına uygulanan gerilim değerlerini kullanmadan direkt lambanın ışık yoğunluğunu ölçerek fliker emisyonu tahmini yapan flikermetreler gibi farklı uygulamalar da vardır (Gallo vd., 2008). Ancak gerçekleştirilen flikermetre modellerinin en önemli sorunları, cihazın istatistiksel analizini tam olarak başaramamalarıdır. Bu nedenle bu çalışmada flikermetre yazılımının tamamı için bir model oluşturularak gerçek ölçümler için de kullanılabilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca fliker dışındaki diğer güç kalitesi karakteristikleri için yapılan modeller yardımıyla IEC standardında belirtilen değerlendirme işlemlerinin tamamının basit bir şekilde gerçekleştirilebilmesi sağlanmıştır.

Bu tez çalışmasının 2. ve 3. Bölümlerinde genel olarak rüzgar türbinlerinden bahsedilmiştir. 4. Bölümde ise türbinlerin neden olduğu güç kalitesi problemleri anlatılmış ve 5. Bölümde bu problemlerin ölçüm ve değerlendirme işlemleri ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Son olarak değerlendirme işlemleri için oluşturulan modeller yardımıyla, Bölüm 6'da bir uygulama gerçekleştirilerek türbinlerin güç kalitesi karakteristikleri üzerindeki etkileri açıkça gösterilmiştir.

2. RÜZGAR GÜCÜ

Atmosferdeki basınç ve sıcaklık farklarından oluşan rüzgar akımlarının sahip olduğu güç, rüzgar gücü olarak adlandırılır. v hızına ve m kütlesine sahip rüzgarın kinetik enerjisi şu şekilde verilir:

$$\text{Kinetik enerji} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.1)$$

Güç birim zamandaki enerji olduğundan, A' alanından v hızıyla geçen hava kütlesi ile güç,

$$A' \text{ alanı içindeki güç} = \frac{\text{Enerji}}{\text{Zaman}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\text{Kütle}}{\text{Zaman}} \right) v^2 \quad (1.2)$$

şeklinde hesaplanabilir. Kütleli debi m' , A' alanı içinde hava yoğunluğu ρ , hız v ve süpürme alanı A' 'nın ürünüdür:

$$\left(\frac{A' \text{ içinden geçen kütle}}{\text{Zaman}} \right) = m' = \rho A v \quad (1.3)$$

Bu eşitlik, (1.2) içinde yerine yazılırsa rüzgardan elde edilen güç bulunmuş olur (Patel, 2006).

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1.4)$$

Burada P_w rüzgar gücü (Watt), ρ hava yoğunluğu (kg/m^3) (15°C ve 1 atm 'de $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$), A süpürme alanı (m^2) ve v süpürme alanına dik rüzgar hızıdır (m/s).

Hava yoğunluğu sıcaklıkla ve yükseklikle ters orantılı olarak değişir. Süpürme alanı ise türbin ekseninin durumuna göre, D rotor çapı ve H' dikey eksenli türbinlerde kule yüksekliği olmak üzere,

$$\text{Yatay eksenli rüzgar türbinlerinde: } A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (1.5)$$

$$\text{Dikey eksenli rüzgar türbinlerinde: } A \cong \frac{2}{3} D \cdot H' \quad (1.6)$$

olarak hesaplanır. Rüzgardan elde edilen güç, rüzgar hızının küpüyle doğru orantılı olarak değiştiğinden kule yüksekliği, özellikle türbinlere gelen rüzgarı kesen engellerin fazla olduğu bölgelerde çok önemlidir. Rüzgar hızının yükseklikle değişimi aşağıdaki eşitlikle verilir:

$$\left(\frac{v}{v_0}\right) = \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha \quad (1.7)$$

Burada α sürtünme katsayısı, v rüzgarın H yüksekliğindeki hızı, v_0 ise H_0 yüksekliğindeki hızıdır. Bu eşitlik ABD’de sıklıkla kullanılırken Avrupa’da daha çok,

$$\left(\frac{v}{v_0}\right) = \frac{\ln(H/z)}{\ln(H_0/z)} \quad (1.8)$$

eşitliği tercih edilmektedir. Su yüzeyinde sıfıra yakın bir değer olan ve rüzgar türbinine gelen havanın çarpabileceği engellerin sayısı ile birlikte artan z değeri ise pürüzlülük katsayısıdır (Masters, 2004).

Rüzgar türbinlerinde kanatlar, rüzgarın kinetik enerjisinin tamamını mekanik enerjiye dönüştüremezler. Kanatların elde edebileceği güç, türbine giren ve türbinden çıkan hava akımları arasındaki kinetik enerji farkıdır:

$$P_b = \frac{1}{2} m'(v^2 - v_d^2) \quad (1.9)$$

Güç değeri, eşitlik (1.3) ve eşitlik (1.9)’dan yararlanılarak yazılır ve kanatlar üzerindeki rüzgar hızı, türbine giren ve türbinden çıkan rüzgar hızlarının ortalaması olarak alınırsa,

$$P_b = \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{v + v_d}{2}\right) (v^2 - v_d^2) = \frac{1}{2} \rho A v^3 \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_d}{v}\right) \left(1 - \left(\frac{v_d}{v}\right)^2\right) \right] = \frac{1}{2} \rho A v^3 \cdot C_p \quad (1.10)$$

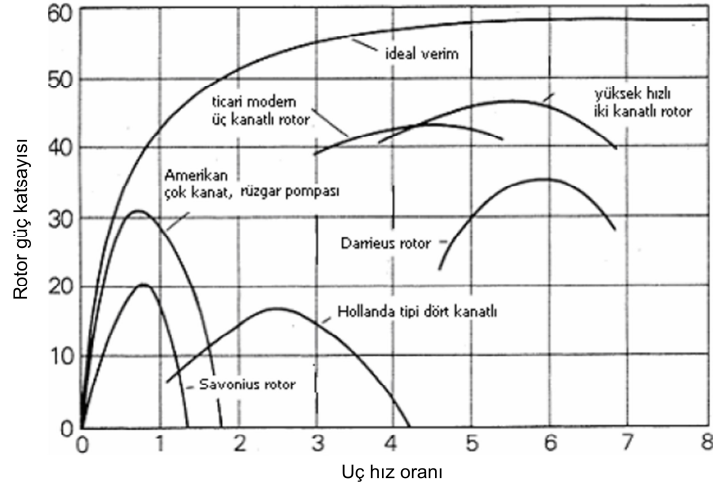
eşitliği yazılabilir. Burada C_p rotor verimidir ve bu verimin v_d/v ’ye göre türevinin alınarak sıfıra eşitlenmesiyle, türbinden çıkan rüzgar hızının türbine giren rüzgar hızına oranı $1/3$ olarak elde edilir. Bu değer rotor verimi eşitliğinde yerine yazılırsa maksimum teorik rotor verimi, Betz verimi olarak adlandırılan 0,593 olarak bulunur (Masters, 2004).

Belli bir rüzgar hızı için rotor verimi, rotorun dönüş hızının bir fonksiyonudur. Rotorun çok yavaş dönmesiyle çok fazla rüzgarın kanatların arasından etkilenmeden geçmesinden ve rotorun çok hızlı dönmesiyle de bir kanadın sebep olduğu türbülansın diğer kanadı etkilemesinden dolayı verim azalır.

Rotor verimi genellikle kanat uç hız oranının bir fonksiyonu olarak gösterilir ve bu oran kanat uç hızının rüzgar hızına bölünmesiyle elde edilir.

$$\text{Kanat uç hız oranı (TSR)} = \frac{\text{Rotor uç hızı}}{\text{Rüzgar hızı}} = \frac{w \cdot r}{v} \quad (1.11)$$

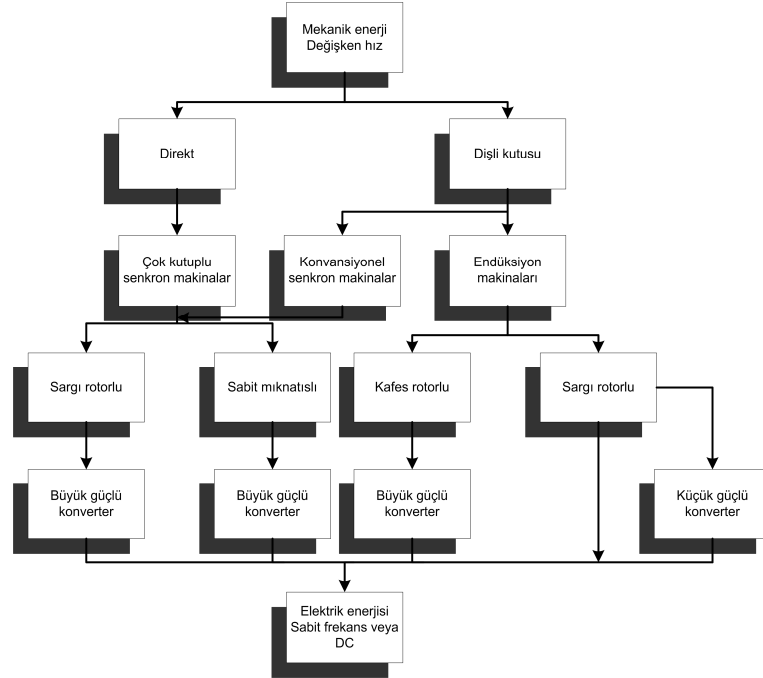
Burada w rotorun açısal hızıdır. Çeşitli rotor tipleri için kanat uç hızlarına göre verim değerleri (rotor güç katsayıları) Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1 Farklı kanat sayılarına sahip rotorlar için rotor verimi-TSR değişimi (Patel, 2006).

3. RÜZGAR TÜRBİNLERİ

Rüzgar türbinleri öncelikle kanatları yardımıyla rüzgar içerisindeki kinetik enerjiyi mekanik enerjiye, daha sonra da bu mekanik enerjiyi generatörleri ve konverterleri yardımıyla uygun gerilim ve frekansa sahip elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir (Şekil 3.1). Kullanılmaya başlanıldığı ilk zamanlarda rüzgar türbinleri çok küçük güçlerde üretilirken günümüzde 5 MW'ın üstündeki güçlerdeki türbinler çeşitli üreticiler tarafından üretilmektedir.



Şekil 3.1 Rüzgar türbinlerinde değişken mekanik enerjinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi (Hansen vd., 2001).

3.1 Türbin Tipleri

Rüzgar türbinleri kullandıkları elemanların yapılarına ve kontrol sistemlerine göre çok sayıda sınıfa ayrılabilirler. Türbinlerin sınıflandırılmasında kullanılan en önemli parametreler aşağıda alt bölümler şeklinde anlatılmıştır.

3.1.1 Kanat Sayılarına Göre Türbin Tipleri

Elektrik üretmek amacıyla kullanılan modern rüzgar türbinleri genellikle iki veya üç kanatlı olarak imal edilirler. Daha çok kanada sahip olan türbinler, su pompalama gibi işlerde kullanılırken tek kanatlı türbinler, ürettikleri dalgalı gücün kararlılık problemlerine yol açması

yüzünden çok fazla tercih edilmezler. Çok kanatlı türbinler, rüzgarı daha fazla alabilecek yüzeye sahip olduklarından yüksek moment ve düşük hızlarda çalışırlar. Rüzgar türbinlerinin kanat sayısı azaldığı zaman hızı artar ve her bir kanadın kendisini takip eden kanat üzerinde oluşturduğu türbülans etkisi azalır. Böylece türbinin verimi artar.

İki kanatlı türbinlerde kanatlardan biri tepe noktaya ulaştığı zaman (en yüksek rüzgar hızına maruz kalırken), diğer kanat kule gölge etkisi altında kalır ve böylece kararlılık problemleri ortaya çıkar. Tek kanatlı türbinlerde bu problemin daha büyük olmasının yanı sıra yüksek hız, gürültülü çalışma ve rotoru dengelemek amacıyla kanadın diğer tarafına koyulan denge ağırlığının yol açtığı ek ağırlık sorunları vardır ve bu sorunlar tek kanatlı türbinlerin ticari kullanımını sınırlamaktadır. Üç kanatlı türbinlerde tüm bu sorunlar en aza indirildiğinden bugün çoğu Avrupa ülkesinde üç kanatlı türbinler tercih edilmektedir. Bu türbinlerde, kule etkileri ve rüzgar hızının yükseklikle değişimi, kanatlardan mile daha düzenli olarak iletildiğinden daha düzgün ve sessiz çalışırlar. Ancak iki kanatlı türbinlere göre ilave bir kanat kullanılması, hem türbinin ağırlığını hem de maliyetini arttırmaktadır (Farret ve Simoes, 2006).

3.1.2 Eksenlerine Göre Türbin Tipleri

Rüzgar türbinleri, rotorlarının konumlarına göre yatay ve dikey eksenli türbinler olarak iki ana grup altında incelenebilir.

3.1.2.1 Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri

Dönme eksenini rüzgarın akım çizgilerine dik olan türbinlerdir. Darrieus ve Savonius olmak üzere başlıca iki tipi vardır, ancak bunlardan yalnızca Darrieus tipi ticari olarak başarılı olabilmektedir. En önemli özellikleri rüzgara doğru dönmeyi sağlayan bir sapma mekanizmasına (yaw) ihtiyaç duymamalarıdır. Diğer bir avantajı ise tüm ağır donanımlarının yerde olmasıdır. Bu sayede kulenin yatay eksenli türbinlerdeki gibi güçlü olması gerekmemektedir. Dikey eksenli türbinlerin günümüzde çok fazla kullanılmamasının başlıca nedenleri; yere yakın olmalarından dolayı düşük ve türbülanslı rüzgar hızında çalışmak zorunda kalmaları, verimlerinin düşük olması ve ilk hareket momentine ihtiyaç duymalarıdır (Kocaman, 2003).

3.1.2.2 Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri

Dönme eksenini rüzgarın akım çizgilerine paralel olan türbinlerdir. Günümüzde elektrik üretmek amacıyla kullanılan rüzgar türbinlerinin büyük bir kısmı yatay eksenli türbinlerdir.

3.1.2.2.1 Rüzgarı Önden Alan (Upwind) Türbinler

Rüzgarı önden alan türbinlerde, kanatların sürekli olarak rüzgarı karşıdan alabilmesini sağlayan karmaşık bir sapma mekanizması bulunmaktadır. Sapma mekanizması, türbinin daha düzgün çalışmasını ve daha fazla güç üretmesini sağlar. Bu türbinlerde kanatlar çok sert olarak imal edilirler ve kuleden belli bir mesafe uzağa yerleştirilirler. Modern rüzgar türbinlerin büyük bir kısmı rüzgarı önden alan türbinlerdir (Patel, 2006).

3.1.2.2.2 Rüzgarı Arkadan Alan (Downwind) Türbinler

Kanatlarının daha esnek olarak imal edilebilmesi ve eğer rotor uygun tasarlanırsa, değişen rüzgar yönü ile rüzgarı en iyi alabilecek şekilde kendiliğinden dönebilmeleri, rüzgarı arkadan alan türbinlerin en önemli avantajlarıdır. Bu nedenle bir sapma mekanizmasına ihtiyaç duymazlar. Ancak bu mekanizmanın olmaması nedeniyle, generatörden inen kablolar bu türbinlerde sorunlara yol açabilir. Ayrıca bu tip türbinlerde rotor, rüzgar yönüne göre kulenin arka tarafında kaldığından gölgeleme etkisi görülmektedir. Başka bir deyişle rüzgar türbinleri dönerken, kanatlarının her birinin kule ile paralel hale geldiği kısa sürelerde bu kanatlara çarpan rüzgar hızında bir azalma olmaktadır. Bu azalma kanadın esnemesine dolayısıyla da zaman içerisinde kanatlarda yorulmaya ve türbinin daha gürültülü çalışmasına neden olur. Ayrıca bu anlık geçişlerde türbin çıkış gücünde dalgalanmalar meydana gelir (Masters, 2004).

3.1.3 Türbin Hızlarına Göre Türbin Tipleri

Günümüzde en çok tercih edilen rüzgar türbini tipleri özellikle hız kontrol yöntemlerine göre sınıflandırılırlar. Rüzgar türbinleri hız kontrollerine göre iki temel sınıfta incelenebilir.

3.1.3.1 Sabit Hızlı Türbinler

Sabit hızlı rüzgar türbinlerinde generatörün etkisi küçük olması nedeniyle ihmal edilirse, türbininin rotor hızı sabittir ve bu değer rüzgar hızından bağımsız olarak türbinin bağlı olduğu şebekenin frekansı, dişli oranı ve generatör tarafından belirlenir. Bu türbinler tek bir rüzgar hızında maksimum verimi elde etmek için dizayn edilirken, bazı türbinler güç üretimini artırmak için iki hızda çalışabilmektedir. Sabit hızlı rüzgar türbinleri genellikle bir endüksiyon generatörü kullanırlar ve şebekeye direkt bağlanırlar. Yapılarında bir “soft-starter”(yumuşak yolverici) ve reaktif güç ihtiyacını azaltmak için bir kondansatör grubu bulundurlar. Bu türbinlerinin en önemli avantajları; basit, dayanıklı ve güvenilir olmaları, ayrıca düşük maliyetli elektriksel parçalara sahip olmalarıdır. Kontrol edilemeyen reaktif güç tüketimleri,

türbinlere göre en önemli avantajları; türbinin döner hızının rüzgar hızına göre ayarlanmasıyla rotor güç katsayısının sabit tutulabilmesi ve güç dalgalanmalarının türbininin mekanik eylemsizliğinde absorbe edilmesiyle mil ve dişli kutusu gibi mekanik elemanlar üzerindeki baskının azaltılabilmektedir. Ayrıca düşük rüzgar hızlarında düşük hızda işletim mümkün olduğundan bu türbinlerdeki akustik gürültü, sabit hızlı türbinlere göre daha azdır. Bunların yanında değişken hızlı türbinlerde bulunan güç konverterleri, rüzgar çiftliklerinde şebeke işletmecileri tarafından istenen yüksek güç kalitesi, frekans ve gerilim kontrolü gibi koşulların karşılanması için yüksek kontrol kapasitesi sağlar. Ancak bu güç konverterleri, türbinlerin toplam maliyetlerini ve kontrol karmaşıklığını arttırırken ek kayıplara da sebep olurlar.

3.2 Türbin Elemanları

Rotor kanatları ve generatör gibi elemanlar her türbinde mutlaka bulunurken, türbin tipine göre bazı elemanlar her türbin için gerekli olmayabilir. Rüzgar türbinlerinde bulunan elemanlar, özellikle seçilen generatör tipine göre farklılıklar gösterirler. Çoğu rüzgar türbininde bulunan başlıca elemanlar alt başlıklar biçiminde incelenmiştir.

3.2.1 Kule

Kuleler gövde elemanlarını taşıyan, genellikle çelik veya betondan yapılan kısımlardır. Çok farklı şekillerde kuleler bulunmasına karşın genellikle boru biçiminde olanlar tercih edilmektedir. Rüzgar hızlarının yükseklikle artmasından dolayı kulelerin boylarının yüksek olması önemlidir, ancak belli bir yükseklikten sonra rüzgar hızları fazla değişmediğinden maliyet konusu da göz önüne alınarak kuleler için optimum bir yükseklik belirlenmektedir.

3.2.2 Rotor Kanatları

Rotor kanatları rüzgar hareketindeki kinetik enerjiyi mekanik enerjiye çeviren ve genellikle cam elyafla güçlendirilmiş plastikten veya karbon fiberden yapılan en dış birimlerdir.

3.2.3 Generatör

Rüzgar türbinlerinde DC, senkron ve asenkron generatör olmak üzere üç değişik generatör kullanılmaktadır. Günümüzde rüzgar türbinlerinde ise çoğunlukla asenkron generatörler bulunmaktadır.

3.2.3.1 Doğru Akım Generatörleri

Genellikle şebekeden bağımsız çalışan küçük güçlü rüzgar türbinlerinde kullanılmaktadırlar. En büyük avantajları hız kontrollerinin kolay olmasıdır ancak DC çıkış elde etmek için kullanılan mekanik komütatör yapısı yüzünden bakım masrafları fazladır. Sabit mıknatıslı olarak üretilen ve doğrultma işlemi güç elektroniği elemanları ile yapılan DC makineler ise sınırlı güçlerinden dolayı yüksek güçlü türbinlerde kullanılamamaktadırlar (Rashid, 2001).

3.2.3.2 Senkron Generatörler

Günümüzde konvansiyonel üretim santrallerinin neredeyse tamamının kullandığı senkron generatörler, uyarımları için gereken DC akımdan dolayı bir uyarma devresine ihtiyaç duyarlar. Sabit mıknatıslı senkron generatörlerin böyle bir devreye ihtiyacı olmamasına rağmen güçleri sınırlı olduğundan kullanımları çok yaygın değildir.

3.2.3.2.1 Alan Sargılı Senkron Generatörler

Alan sargılı generatörlerin en büyük dezavantajları uyarma akımları için gereken ek elemanlar ve bu akımların rotora iletilmesi için kullanılan fırçaların bakım masraf ve süreleridir. Rüzgar türbinlerinde kullanılan senkron generatörler genellikle çok sayıda kutup sayısına sahip olacak şekilde üretildiklerinden, bir dişli kutusu kullanılmaksızın kanatlara direkt bağlanırlar. Kontrolleri için kullanılan konverterlerden stator tarafında olan elektromagnetik momenti, şebeke tarafında olan ise bu sistemin oluşturduğu aktif ve reaktif gücü regüle eder. Güç kontrol konverterinin, nominal gücün üzerinde bir değerde seçilmesi ise bu generatörlerin bir diğer dezavantajıdır (Baroudi vd., 2006).

3.2.3.2.2 Sabit Mıknatıslı Senkron Generatörler

Sabit mıknatıslı senkron generatörler genellikle küçük güçlü rüzgar güç sistemlerinde tercih edilmektedirler. Bunun nedeni sabit mıknatısların maliyeti ve sıcaklıkla malzemenin magnetikliğinin bozulmasıdır. Uyarma devrelerinin olmaması en büyük avantajlarıdır ancak bu devrenin olmamasından dolayı sabit mıknatıslı generatörlerde güç faktörü kontrolü, güç elektroniği elemanları olmaksızın mümkün değildir. Bu generatörlerde bulunan DC/DC kıyıcı elektromagnetik momenti, şebeke tarafındaki konverter ise güç faktörünü ve DC hat gerilimini regüle etmektedir (Rashid, 2001; Uyar vd., 2005).

3.2.3.3 Asenkron Generatörler

Rüzgar türbinlerinde kullanılan asenkron generatörler, rotorlarının yapılarına göre sincap kafesli ve çift beslemeli olarak iki sınıfa ayrılırlar.

3.2.3.3.1 Sincap Kafesli Asenkron Generatörler

Günümüzde rüzgar türbinlerinin çoğunda kullanılan sincap kafesli asenkron generatörlerin en önemli avantajı, bir uyarma devresine ihtiyaç duymamalarıdır. Bu nedenle maliyetleri ve bakım masrafları aynı güçteki diğer generatörlere göre daha azdır, ancak ihtiyaçları olan reaktif gücü sağlayan stator tarafındaki konverterin, nominal güce göre % 30-50 büyük ölçülerde boyutlandırılması gerekir. Bu konverter aynı zamanda elektromagnetik momenti ayarlarken, şebeke tarafındaki konverter ise şebekeye aktarılan aktif ve reaktif gücü regüle eder (Patel, 2006).

3.2.3.3.2 Çift Beslemeli Asenkron Generatörler

Dört bölgeli konvertere sahip çift beslemeli endüksiyon generatörleri temel olarak bir senkron makine gibi çalışırlar. Konverter yalnızca uyarma enerjisini sağlar. Bu nedenle bu generatörlerde düşük maliyetle güç faktörü kontrolü yapılabilir. Bu generatörlerde kullanılan güç konverterleri, nominal türbin gücünün yaklaşık % 30-40'ı olduğundan konverter maliyetleri diğer generatörlerden daha azdır. Ancak kendi maliyetleri kafes rotorlu endüksiyon generatörlerinin yaklaşık olarak iki katıdır. Bu generatörlerin diğer bir dezavantajı ise bakıma ihtiyaç duyan bileziklere sahip olmalarıdır (Simoes ve Farret, 2004).

3.2.4 Yön Saptırma (yaw) Mekanizması

Rüzgar yönünü ölçen rüzgar gülü yardımıyla türbinleri, rüzgar yönüne dik bir şekilde tutmayı sağlayan mekanizmadır.

3.2.5 Güç Elektroniği Elemanları

Rüzgardan elde edilen elektrik enerjisi, güç elektroniği elemanları ile istenilen gerilim ve frekans değerinde şebekeye verilir. Bu değerleri sağlamak için önce doğrultucularla bir DC hat oluşturulur ve bir inverter yardımıyla istenen gerilim ve frekans değeri sağlanır.

3.2.6 Anemometre

Anemetreler rüzgar hızının ölçülmesinde ve bu değerlerin kontrol sistemine iletilmesinde

kullanılırlar. Genellikle dikey bir eksen etrafında dönen fincanlar şeklindedirler, ancak ses şiddeti ve sıcaklık gibi büyüklükleri ölçerek buradan rüzgar hızını hesaplayan ve buzlanmadan etkilenmemeleri nedeniyle özellikle kışın daha doğru ölçümler yapabilen anemometreler de bulunmaktadır.

3.2.7 Frenleme Düzeni

Frenleme düzenleri kanatların belli bir hızın üzerinde dönmelerini engellemek ve bu sayede kanatları korumak amacıyla kullanılırlar. Kanatların açıları değiştirilerek yapılan frenleme aerodinamik fren, dişli kutusuna yerleştirilen bir diskten oluşan sistem ise mekanik fren olarak adlandırılır.

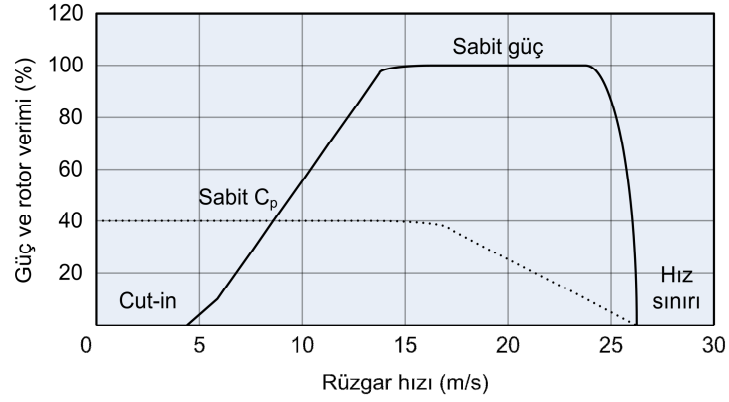
3.2.8 Dişli Kutusu

Rüzgar türbinlerinde elde edilen güç, generatörlere dişli kutuları ile aktarılır. Dişli kutuları türbinlerinin dönme hızlarını, generatörlerin üretim yapabilmeleri için gereken yüksek devir sayılarına çıkarırlar. Dişli kutusu oranları genellikle sabittir ve 1:40 - 1:80 arasında bir değerdedir. Çok kutuplu senkron generatörlerde çoğunlukla dişli kutusu kullanılmaz, böylece sistemin verimi artar ve bakım masrafları azalır.

3.3 Türbin Hız ve Güç Kontrolü

Rüzgar hızı değiştiğinde TSR ve rotor güç katsayısı değişir. Ancak C_p karakteristiği, TSR'nin belli bir değerinde tek bir maksimum noktaya sahiptir. Bu nedenle sabit hızlı sistemlerde yalnızca bir rüzgar hızında güç katsayısı maksimum olur. Ancak elde edilebilecek en yüksek enerji değeri için rotor güç katsayısı her zaman maksimum seviyede olmalıdır. Bunun için çok yüksek rüzgar hızları dışında, değişen rüzgar hızıyla rotor hızının da değişmesi gerekir. Bu değişim, rotor hız kontrolü ile sağlanır. Şekil 3.3'te gösterildiği gibi rüzgar türbinlerinin işletiminde dikkate alınan dört hız bandı vardır:

- “Cut-in” (üretim yapılan en düşük rüzgar hızı)
- Sabit optimum C_p
- Sabit güç
- Hız sınırı



Şekil 3.3 Rotor hızı kontrol bölgeleri (Patel, 2006).

İlk bant sıfırdan başlayıp üretim yapılan en düşük hıza (cut-in) kadar devam eder. Rüzgar türbinlerinde bu hız genellikle 3-4 m/s arasındadır. Bu hızların altında üretilen güç ancak sürtünme kayıplarını karşılayabilir. İkinci bant, hız kontrolünün sistemi önceden belirlenmiş optimum sabit C_p değerinde işlettiği normal çalışma modudur. Sabit C_p bölgesinde kontrol sistemi, belli bir sınıra kadar artan rüzgar hızıyla rotor hızını artırır. Bu sınıra ulaşıldığı zaman üçüncü banda geçilir. Bu bantta hız, yalnızca generatörün kapasitesi tarafından belirlenen maksimum bir sabit çıkış gücünü sürdürülebilmek amacıyla kontrol edilir. Güç katsayısı C_p artık optimum değerde değildir ve rotor güç verimi düşmektedir. Eğer rüzgar hızı artmaya devam ederse dördüncü banda geçilir ve sistemi mekanik zararlardan korumak amacıyla üretim durdurulur (Farret ve Simoes, 2006).

Rüzgar türbinlerinde herhangi bir kontrol sistemi kullanılmazsa türbin şebekeye bağlı olduğundan sabit bir hızda döner. Ancak bu durumda, rüzgar hızıyla değişen güç kontrol edilemediği için çok yüksek rüzgar hızları da hesaba katılarak rüzgar türbininin boyutlandırılması gerekmektedir. Türbinin maksimum rüzgar gücüne göre boyutlandırılması ekonomik bir çözüm olmayacağından bütün rüzgar türbinlerinde bir güç kontrolü bulunmaktadır. Şiddetli rüzgarlarda rüzgar türbininde oluşabilecek hasarlardan korunmak için türbin rotoru üzerindeki aerodinamik kuvvetleri kontrol etmek, dolayısıyla gücü sınırlamak için farklı yöntemler vardır. Rüzgar türbinlerinde güç (kanat) kontrolü şu şekilde sınıflandırılabilir:

Pasif (stall) kontrol: Stall kontrol en kolay, en dayanıklı ve en ucuz kontrol yöntemidir. Bu kontrolde rotorda hareket eden bir parça yoktur. Rüzgar hızı belli bir değeri aştığında rotorun hız kaybetmesini rotor aerodinamiğinin dizaynı sağlar. Böylece kanatlar tarafından üretilen

aerodinamik güç, otomatik olarak nominal güç bölgesinde sınırlanır. Güç üretimi, rüzgar hızının nominal değerinde kendi nominal değerinin biraz daha üzerine çıkar ve daha sonra “cut-out” (üretim yapılabilen en yüksek rüzgar hızı) rüzgar hızına ulaşılan kadar azalır. Bu noktadan sonra türbin durur ve güç üretimi sıfıra iner. Yavaş bir şekilde olan aerodinamik güç regülasyonu, hızlı bir “pitch” güç regülasyonundan daha az güç dalgalanmalarına sebep olur. Bu dizaynın en önemli dezavantajı düşük rüzgar hızlarında veriminin düşük olmasıdır. Hava yoğunluğu ve şebeke frekansındaki değişimlerden dolayı maksimum kararlı hal gücünde meydana gelen değişiklikler ise bu kontrolün diğer bir önemli problemidir (Patel, 2006).

Aktif (pitch) kontrol: Aktif kontrolde, nominal rüzgar hızının altında güç çıkışı düşük olduğundan, rüzgardan optimum gücü elde etmek için kanatlar kontrol mekanizmasından gelen bir sinyalle kendi eksenleri etrafında mekanik veya hidrolik olarak döndürülür. Nominal rüzgar hızının üstünde ise gücü sınırlamak amacıyla küçük hücum açıları elde etmek için aynı şekilde kanatların açıları değiştirilir.

Aktif kontrolde güç, değişen rüzgar hızıyla kanat açısı ayarlandığından nominal değeri etrafında dalgalanır. Bu dalgalanmanın sebebi, özellikle şiddetli rüzgarlarda rotorun yüksek eylemsizliğinden dolayı “pitch” mekanizmasının cevap süresinin yeterince hızlı olamamasıdır. Ancak generatör çıkış gücü, generatör hızındaki dalgalanmalar % 10'luk bir değere ulaşana kadar sabit tutulabilir. Aktif kontrolün diğer avantajları; ilk çalışma anında kanat açılarının rüzgarı en iyi alabilecek şekilde ayarlanabilmesiyle bu anda bir destek sağlaması ve acil durumlarda türbini çok hızlı bir şekilde durdurabilmesidir. “Pitch” mekanizmasının karmaşık olması ve yüksek rüzgar hızlarındaki türbülans nedeniyle ortaya çıkan büyük güç dalgalanmaları ise bu kontrolün en önemli dezavantajlarıdır (Farret ve Simoes, 2006).

Aktif stall kontrol: Rüzgar türbinlerinde özellikle son yıllarda kullanılmaya başlayan aktif stall kontrolde nominal güç için gerekenden daha düşük rüzgar hızlarında, kanatlar bir “pitch” kontrollü rüzgar türbini gibi optimum güç elde edilecek şekilde döndürülür. Böylece maksimum verim sağlanır. Ancak nominal güç için gerekenden daha fazla rüzgar hızlarında, kanatlar “pitch” kontrolden farklı olarak daha küçük hücum açıları yerine daha büyük hücum açıları için çevrilerek “stall” durumuna geçerler. Aktif stall kontrollü rüzgar türbinleri, “pitch” kontrollü rüzgar türbinlerinin sebep olduğu güç dalgalanmaları olmaksızın gücün düzgün bir şekilde sınırlanmasını sağlarlar. Ayrıca bu kontroldeki “pitch” mekanizması rüzgar türbininin hem çok hızlı bir şekilde durmasını sağlar hem de ilk çalışmasını kolaylaştırır. Günümüzde bu kontrol, yalnızca stall kontrolün kullanılabildiği türbinlerde (A tipi rüzgar türbinleri)

kullanılmaktadır (Ackermann, 2005).

Rüzgar türbinlerinde bulunan türbin elemanlarının önemli bir kısmı generatörlere bağlı olarak seçildiğinden, generatörlerin işletim hızı ve değişen rüzgar hızı ile kontrolleri sistem dizaynı sırasında önceden belirlenmektedir. Alternatif stratejiler ve ilgili hız kontrol yöntemleri aşağıdaki gibidir.

3.3.1 Tek Sabit Hızlı Türbinler

Generatörlerin sabit hızlı işletimi, sabit hızlı yapıya sahip olan bir makine olduğundan endüksiyon generatörleri için oldukça uygundur. Bu sistemlerde türbin hızı, bir dişli kutusu ile generatörlerin üretim yapabilmesi için uygun hale getirilmektedir. Rüzgar hızının değişimiyle moment ve güç, dolayısıyla da rotorun kayma miktarını değiştirir. Rüzgar generatörleri genellikle % 1-2 kayma ile çalışırlar. Daha yüksek değerler rotordaki elektriksel kaybı arttırır ve böylece soğutma sorunları ortaya çıkar (Patel, 2006).

Bu sistemlerin çalışma hızları sabit olduğundan, bu hız değerinin seçilmesi yıllık enerji üretiminin arttırılabilmesi bakımından önemlidir. Sabit hızda çalışan generatörlerde yıllık enerji üretimi, rüzgar hızına ve dişli oranına bağlıdır. Optimum dişli oranı bölgenin ortalama rüzgar hızı dikkate alınarak hesaplanmaktadır.

Tek sabit hızda çalışmanın en büyük dezavantajı, bu türbinlerde rotor güç katsayısının çoğu zaman maksimum değerinden uzak değerlerde olmasıdır. Optimum olarak seçilen belli bir değer altındaki veya üstündeki rüzgar hızlarında, rüzgarın enerjisinden tam olarak faydalanılamaz.

3.3.2 Çift Sabit Hızlı Türbinler

Çift hızlı sistemlerin en önemli özelliği, tek hızlı sistemlere göre daha fazla rüzgar enerjisini mekanik enerjiye çevirebilmeleridir. Bunu gerçekleştirebilmek için bazı sistemler iki farklı dişli oranı kullanırlar ve bölgede beklenen rüzgar hızı dağılımına göre iki işletim hızı seçilir. Böylece belli bir rüzgar hızına ulaşıldığında dişli oranı değiştirilerek yıllık enerji üretimi arttırılabilir.

Eski rüzgar türbinlerinde ise iki farklı hızı sağlamak için iki ayrı generatör ve bunlar arasında anahtarlamayı sağlayan bir kayış kullanılmaktadır. Ancak endüksiyon generatörlerini iki farklı hızda çalışabilecek şekilde dizayn etmek, çok daha ekonomik ve verimli bir yöntemdir. Bunun için sincap kafesli makinalar, farklı kutup sayılarında iki ayrı statora sahip olacak

şekilde üretilirler. Tek bir sargıya sahip olan motorların da bağlantısı değiştirilerek P ve 2P kutup sayılarında çalışmaları sağlanabilir, ancak makinenin kontrolü kaybedilmeden hız değişiminin yapılması gereken yerlerde ayrı sargılı generatörlerin tercih edilmesi daha uygundur. Ayrı sargıların yerleştirilmesinin zor olması ise bu generatörlerin en büyük dezavantajıdır (Patel, 2006).

3.3.3 Değişken Hızlı Türbinler

Modern değişken hızlı sistemler değişken gerilim ve frekansı, sabit gerilim ve frekansa çeviren güç elektroniği elemanlarını kullanırlar. Bu sistemlerin en önemli özelliği yıllık elde edilen enerji oranının yüksek olmasıdır, ancak güç elektroniği elemanlarının ek maliyetleri ve kayıpları yeni sorunlar ortaya çıkarmaktadır. Bunun yanında tristör tabanlı olan sistemler harmoniklere yol açmaktadır. Diğer güç kalitesi parametreleri ise değişken hızlı sistemlerde kontrol edilebildiğinden özellikle zayıf şebekelerin güç kalitesi iyileştirilebilmektedir. Ayrıca bu kontrol uzaktan yapılabildiği için deniz üstü (offshore) türbinler için de değişken hızlı sistemler daha uygundur (Patel, 2006).

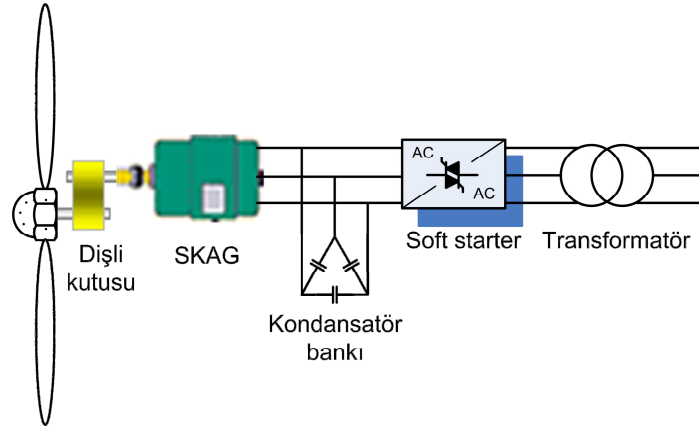
Değişken hızlı ve sargı rotorlu senkron makineler çok sayıda kutup sayısına sahip olacak şekilde üretilebilirler ve böylece çalışma hızlarının düşürülmesi sağlandığından şebekeye direkt bağlanırlar. Değişken hızlı ve değişken dişli oranına sahip olan sistemler ise önceden kullanılmasına rağmen günümüzde tercih edilmemektedir.

3.4 Türbin Dizaynları

En çok kullanılan rüzgar türbin dizaynları dört sınıfa ayrılabilir. Bu konseptler arasındaki en büyük fark, generatör sistemi ve aşırı yüklenmeden kaçınmak amacıyla nominal değer üstündeki değerler boyunca rotorun aerodinamik veriminin sınırlanma şeklidir.

3.4.1 Sabit Hızlı Rüzgar Türbinleri (Tip A)

Sabit hızlı türbinler, Şekil 3.4'te gösterildiği gibi bir transformatör aracılığıyla şebekeye direkt bağlanan sincap kafesli bir endüksiyon generatörüne (SKAG) sahip rüzgar türbinini göstermektedir.

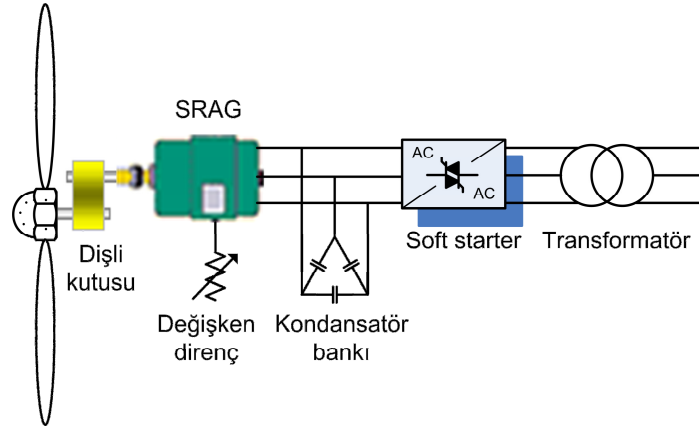


Şekil 3.4 Direkt bağlı sincap kafes endüksiyon generatörlü sabit hızlı rüzgar türbini.

Sincap kafesli endüksiyon generatörlerin reaktif güç ihtiyaçları için bu konfigürasyonda bir kondansatör grubu kullanılmaktadır ve ani akımlar bir “soft starter” kullanılarak sınırlanmaktadır. Sabit hızlı rüzgar türbinlerinde en büyük sorun, rüzgar hızındaki dalgalanmaların mekanik dalgalanmalara ve daha sonra elektriksel güç dalgalanmalarına dönüştürülmesidir. Bu durum özellikle zayıf şebekelerde gerilim dalgalanmalarına yol açar. Bu gerilim dalgalanmalarından dolayı sabit hızlı rüzgar türbinleri, şebekeden değişen miktarlarda reaktif güç çekerler (kondansatör grubu olmaması durumunda) ve böylece hem gerilim dalgalanmaları hem de hat kayıpları artar. Bu konseptin başlıca dezavantajları, bir hız kontrollerinin olmaması ve güç kalitesi üzerindeki olumsuz etkilerinin diğer sistemlere göre daha fazla olmasıdır. Ayrıca bu sistemlerde mekanik yapılar, ani ve kuvvetli rüzgarlardan kaynaklanan yüksek mekanik baskılara dayanabilecek şekilde dizayn edilmelidir (Ackermann, 2005).

3.4.2 Değişken Rotor Direncine Sahip Olan Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri (Tip B)

B tipi rüzgar türbinleri, değişken rotor direncine sahip olan ve bu direncin değerinin değiştirilmesi ile hızları belli bir ölçüde kontrol edilebilen (sınırlı değişken hız kontrollü) rüzgar türbinlerine karşılık gelir. Bu türbinlerin dizaynı genellikle Şekil 3.5’te gösterildiği gibidir.



Şekil 3.5 Değişken rotor direncine sahip değişken hızlı rüzgar türbini.

Normal bir endüksiyon generatörünün hızı, senkron hızın yaklaşık % 1 üzerindedir. Bu generatörlerde kayma, rotor iletkenlerindeki direncin bir fonksiyonudur. Rotor direncine değişken bir direnç ekleyerek kayma miktarı % 10'a kadar arttırılabilir. Generatöre bir direnç ekleyebilmek amacıyla, bu türbinler bir sargı rotorlu asenkron generatör (SRAG) kullanırlar ve burada generatörün rotor sargıları, boyutları değişken hızın aralığını belirleyen kontrollü bir dirençle seri olarak bağlanır. Rotor direnci değiştirilerek kayma ve dolayısıyla sistemdeki güç çıkışı kontrol edilebilir. Dinamik hız kontrol aralığı, değişken rotor direncinin boyutlarına bağlıdır. Genellikle hız aralığı senkron hızın % 0-10 üzerindedir (Ackermann, 2005).

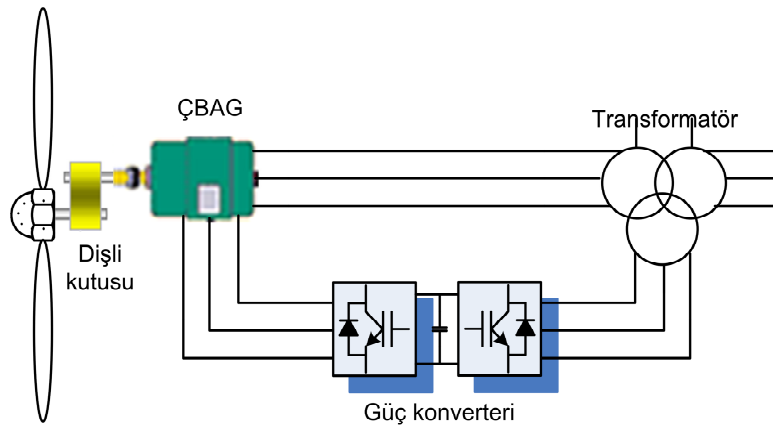
Bu generatörlerde kullanılan kayma halkaları nedeniyle bakım masrafları artmaktadır. Fırçalara ve bakıma ihtiyaç duyan maliyetli kayma halkalarına olan ihtiyacı ortadan kaldırmak için "OptiSlip" adı verilen bir sistem kullanılmaktadır. Burada rotora bir dirençle birlikte elektronik elemanlar monte edilmektedir ve bir optik fiber bağlantıyla istenen kayma miktarı için direnç değeri değiştirilmektedir.

Bu tip rüzgar türbinlerinde stator, şebekeye direkt olarak bağlanır. Bir kondansatör grubu reaktif güç kompanzasyonunu gerçekleştirir ve şebeke bağlantısında oluşabilecek ani akımlar bir "soft starter" yardımıyla sınırlandırılır.

3.4.3 Kısmi Ölçek Frekans Konverterine Sahip Olan Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri (Tip C)

C tipi rüzgar türbinleri çift beslemeli bir asenkron generatöre (ÇBAG) sahiptir ve Şekil 3.6'da gösterildiği gibi generatörün stator sargısı şebekeye direkt bağlanır. Generatörün rotor devresi ise nominal generatör gücünün yaklaşık % 30'u olarak seçilen kısmi ölçekli bir frekans

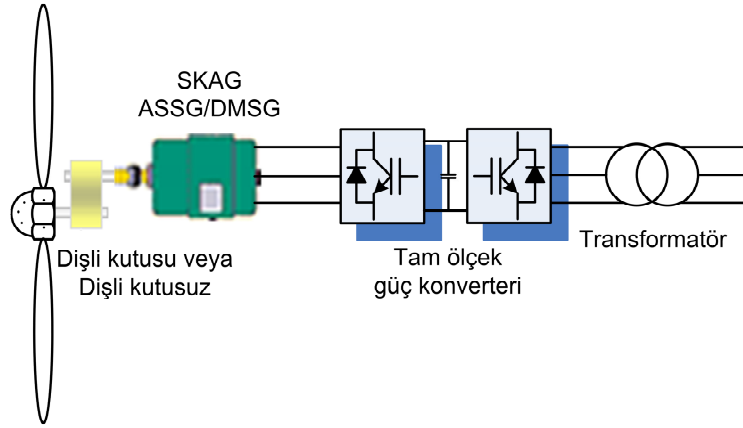
konverteri üzerinden şebekeye bağlanmaktadır. Kısmi ölçek güç konverterinin güç değeri, senkron hız çevresinde genellikle $\pm \% 30$ olan hız aralığını belirler ve rotor frekansını, dolayısıyla rotor hızını kontrol eder. Ayrıca bu konverter, reaktif güç kompanzasyonunu sağlar ve ani akımları sınırlayarak düzgün bir şebeke bağlantısını gerçekleştirir. Rotor hızının kontrol aralığı “OptiSlip”deki aralığa göre daha geniştir ve “OptiSlip” konseptinde kontroledilebilir rotor direncinde harcanan enerji de bu türbinlerde değerlendirilebilir. Bu konseptin diğerlerine göre en önemli avantajı daha küçük güçlü bir frekans konverteri kullanılmasıdır. En önemli dezavantajları ise kayma halkalarının kullanılması ve şebeke arızalarında meydana gelen koruma problemleridir (Ackermann, 2005).



Şekil 3.6 Kısmi ölçek frekans konverterine sahip değişken hızlı rüzgar türbini.

3.4.4 Tam Ölçek Frekans Konverterine Sahip Olan Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri (Tip D)

D tipi rüzgar türbinleri, Şekil 3.7’de gösterildiği gibi tam ölçek bir frekans konverteri üzerinden şebekeye bağlanan bir generatöre sahip olan ve bu konverter yardımıyla hızı geniş bir aralıkta kontrol edilebilen (tam değişken hız kontrollü) türbinleri temsil etmektedirler. Burada frekans konverteri tüm hız aralığı için reaktif güç kompanzasyonunu sağlar ve ani akımları sınırlar. Generatör ise bir asenkron generatör veya senkron generatör (alan sargılı senkron generatör, ASSG veya daimi mıknatıslı senkron generatör, DMSG) olabilir.



Şekil 3.7 Tam ölçek frekans konverterine sahip değişken hızlı rüzgar türbini.

Bazı tam değişken hızlı rüzgar türbin sistemleri dişli kutuna sahip değildir. Bu durumlarda büyük güçlü direkt sürülen çok kutuplu generatörler kullanılmaktadır (Ackermann, 2005). Farklı tipteki rüzgar türbinlerinin sistemlerinin karşılaştırması Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Rüzgar türbini konfigürasyonlarının sistem karşılaştırması

Sistem	Tip A	Tip B	Tip C	Tip D
Değişken hız	Hayır	Hayır	Evet	Evet
Aktif güç kontrolü	Sınırlı	Sınırlı	Evet	Evet
Reaktif güç kontrolü	Hayır	Hayır	Evet	Evet
“Soft starter” ihtiyacı	Evet	Evet	Hayır	Hayır
Reaktif kompanzatör	Evet	Evet	Hayır	Hayır
Ada işletimi	Hayır	Hayır	Evet /Hayır	Evet

4. RÜZGAR ENERJİSİNİN ELEKTRİKSEL UYGULAMALARI

Rüzgar türbinleri yalnızca bir tüketicinin veya küçük bir bölgenin ihtiyacını karşılayabilecek şekilde kullanılabildiği gibi, bir iletim veya dağıtım sistemine bağlanacak boyut ve özelliklerde de olabilirler.

4.1 Şebekeden Bağımsız Rüzgar Türbinleri

Şebeke bağlantısı olmayan rüzgar türbinleri genellikle düşük güçlerde imal edilirler. Bu türbinlerin bir kısmı yalnız bir evin ihtiyacını karşılamak için kullanılırken, bazıları ise su pompalama gibi işlerde tercih edilirler. Şebeke bağlantısının olmadığı ve rüzgar hızının da yeterli gücü üretmediği durumlarda, DC/AC çeviriciye sahip bir elektrik enerjisi depolama ünitesi veya daha yüksek güçlerde paralel bir dizel generatör bulundurulması gerekir. Bu türbinler genellikle enterkonnekte şebekeden uzak ve yüksek rüzgar potansiyeline sahip yerlerde tercih edilirler.

4.2 Şebeke Bağlantılı Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbinleri şebekeye bağlandıkları zaman genellikle bazı güç kalitesi problemlerine yol açarlar. Bu problemleri tanımlamak ve güç kalitesini ne derecede etkileyebileceklerini değerlendirmek için Avrupa’da 2001 yılında IEC (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu) 61400-21 standardı yürürlüğe girmiştir. Ayrıca bu konu ile ilgili yapılan çalışmalar sonucunda Avrupa Elektrik İletimi Koordinasyon Birliği (UCTE) tarafından rüzgar türbinlerinin de diğer konvansiyonel üretim santralleri gibi sistem işletmesine katkıda bulunmasına karar verilmiştir. Buna göre rüzgar türbinleri gerektiğinde şebekeye aktif ve reaktif güç desteği vererek, gerilim ve frekans kontrolünde aktif olarak yer alabilmelidirler.

4.3 Rüzgar Türbinlerinin Güç Kalitesi Üzerine Etkileri

Yüklerin iyi eşleştirildiği, yüksek güç rezervi olan ve komşu şebekelerle güçlü bağlantıları olan sistemlerde rüzgardan elde edilen güç, sisteminin güvenilirliğini etkilemeksizin kurulu gücün % 30-40’ı arasında olabilir. Bu şartların sağlanamaması durumunda rüzgar gücünün şebeke içindeki oranının artması, güç kalitesini olumsuz yönde etkileyebilir. Güç kalitesi parametrelerinin standartlarda belirtilen sınırlar içerisinde olması gerektiğinden, bu etkiler rüzgar türbinleri kurulmadan önce mutlaka değerlendirilmelidir. Rüzgar türbinlerinin elektriksel karakteristiklerinin bilinmesi, güç kalitesi üzerindeki türbin etkilerini tahmin etmek

için yeterlidir. Herhangi bir türbin için gerçek parametrelerin bilinmesi ile belirli bir bölge ve belirli bir sayıda türbin için beklenen etki hesaplanabilir. Böylece türbinlerinin kullanılmaya başladığı ilk zamanlarda geçerli olan en önemli kriterlerin (türbinlerin en fazla % 1’lik bir gerilim artışına sebep olması ve kısa devre oranının en az 25 olması) rüzgar gücünden faydalanma oranını ne kadar azalttığı görülebilir. Ayrıca bugün ülkemizde de şebekeye bağlanacak olan rüzgar türbinlerinin toplam gücünün, şebekenin kısa devre gücünün % 5’i oranında seçilmesi gibi bir kriter yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak IEC 61400-21’e göre yapılacak hesaplamalarla, bu oranın üstündeki oranlarda bile güç kalitesi için belirlenen sınırların aşılmayabileceği veya çok daha düşük oranlarda şebekenin güç kalitesinin bozulabileceği görülebilir. IEC tarafından “şebeke bağlantılı rüzgar türbinlerinin güç kalitesi karakteristiklerinin ölçülmesi ve değerlendirilmesi” adıyla 2001 yılında yayınlanan bu standart, güç kalitesi açısından rüzgar türbin davranışlarının karakteristikleri olan parametreleri tanımlamaktadır. Ayrıca bu standart şebeke bağlantılı rüzgar türbinlerinin güç kalitesi karakteristiklerinin ölçümlerinin gerçekleştirilmesi ve değerlendirilmesi ile ilgili tavsiyeleri de içerir (Tande, 2002; De Alegria, 2006).

4.3.1 Rüzgar Türbinlerinin Güç Kalitesi Üzerine Etkilerinin Faktörleri

Rüzgar türbinlerinde kullanılan elemanlar, türbinlerin rüzgar çiftliği içindeki konumları, bağlanılan ortak bağlantı noktasındaki (PCC) şebekenin şartları ve türbinlerin kurulu olduğu bölgedeki rüzgar karakteristikleri, güç kalitesi üzerinde etkilere neden olan başlıca faktörlerdir. Bu faktörler ve güç kalitesine olan etkileri aşağıda verilmiştir:

4.3.1.1 Rüzgar Türbini Teknolojisi

Farklı rüzgar türbinlerinin güç kalitesi üzerindeki etkileri oldukça değişkendir ve genellikle modern türbinlerin olumsuz etkileri çok daha azdır. Türbinlerin şebeke üzerindeki etkileri çoğunlukla kullanılan generatör tipiyle ve bu generatörün şebekeye bağlanma şekliyle (direkt veya kontrollü bağlantı) değişir. Kısa devre rotorlu veya çift beslemeli endüksiyon generatörleri kullanan rüzgar santralleri, şebekeye değişken bir güç ulaştırırlar. Bu güç akışı gerilimin şeklini etkiler ve fliker emisyonunu artırır. Bu etkilerin azaltılabilmesi için çoğu zaman reaktif güç kompanzasyonundan yararlanılır. Kısa devre rotorlu generatörlerde reaktif güç ihtiyacı kondansatör grupları ile sağlanırken, çift beslemeli endüksiyon generatörlerinde ise frekans konverterlerinin kullanılması reaktif güç kompanzasyonuna yardımcı olur. Ayrıca frekans konverterleri, aktif güç çıkışındaki dalgalanmaları da azaltırlar. Harmonik distorsiyonunu arttırmaları ise bu konverterlerinin güç kalitesi açısından tek dezavantajdır.

Bunların dışında rotor kanatları ile generatör arasında kullanılan dişli kutuları, verimi azaltırken fliker oluşumuna da sebep olurlar. Bu nedenle dişli kutusu kullanılmaması güç kalitesi açısından daha uygundur (Estanqueiro vd., 2007).

4.3.1.2 Ortak Bağlantı Noktasındaki Şebeke Şartları

Rüzgar türbinlerinin şebekenin güç kalitesi üzerindeki etkileri, türbinlerin özellikleri kadar bağlanılan şebekenin şartları ile de ilgilidir. Özellikle şebekenin kısa devre gücünün ve eşdeğer hat empedansının güç kalitesi parametreleri üzerinde doğrudan bir etkisi vardır. Bu nedenle şebekenin yeni bağlantılarla kuvvetlendirilmesi, büyük rüzgar çiftliklerinin bağlantısını sağlamak amacıyla ortak bağlantı noktasının kısa devre gücünün artırılmasında kullanılabilir. Ancak ekonomik nedenlerden dolayı bu durum her zaman mümkün olmayabilir. Bunun yerine dinamik gerilim düzelticiler veya aktif filtreler gibi yerel düzeltici yöntemlerin kullanması çok daha yaygındır (Bossanyi vd., 1998; Tande, 2000).

Ayrıca türbinlerin şebeke bağlantısında kullanılan transformatörlerin tipi, bu bağlantının gerilim seviyesi ve koruma sistemlerinin koordinasyonu da güç kalitesi üzerinde etkilere sahiptirler (Estanqueiro vd., 2007).

Rüzgar türbinlerinin şebeke bağlantısından dolayı gerilim kalitesinin azalması ile ilgili olarak IEC 61000-3-6 ve 61000-3-7 elektromagnetik uyumluluk standartlarına göre, öncelikle güç kalitesi (harmonikler ve fliker) için şebeke içinde gerilim açısından kabul edilebilir seviyelerin tanımlanması gerekmektedir. Daha sonra komşu şebekelerin etkileri de hesaba katılarak üretim faaliyetleri için distorsiyon limitlerinin ayarlanması ve her bir rüzgar çiftliğinde harmonik akım enjeksiyonları ile fliker için kabul edilebilir limitlerin değerlendirilmesi gerekmektedir.

4.3.1.3 Rüzgar Çiftliği Dizaynı

Şebekeye bağlanacak olan rüzgar türbinlerinin nominal gücünün ve sayısının artmasıyla, güç kalitesi üzerindeki olumsuz etkiler artar. Bunun dışında rüzgar türbinlerinin rüzgar çiftliği içindeki yerleşme planlarının da güç kalitesi üzerinde önemli etkileri vardır. Rüzgar çiftliği topolojileri genelde, bazı türbinlerin gölge etkisi altında çalışmasını önleyecek şekilde yapılır. Bu topolojiler mevcut standartlarda yer almamalarına rağmen rüzgar çiftliklerinin dinamik davranışını etkilediği için ihmal edilmemelidir (Masters, 2004).

Rüzgar çiftliklerinin kurulumu sırasında aynı kurulu güç için karar verilen çeşitli

konfigürasyonların güç kalitesi üzerine farklı etkileri vardır ve zayıf şebekeler için bu konu çok daha önemlidir. Ayrıca rüzgar türbinlerinde kullanılan kontrol sistemleri dışında, rüzgar çiftliğinde ek olarak kullanılan güç ve gerilim kontrol sistemlerinin de güç kalitesi üzerinde olumlu etkileri bulunmaktadır.

4.3.1.4 Rüzgar Akışı Yerel Karakteristikleri

Rüzgarın ani hız değişimlerinin ve hava boşluğu yoğunluğunun güç kalitesi üzerindeki etkileri, deneysel çalışmalar sayesinde bilinmesine rağmen ihmal edilmektedir. Ancak rüzgar hızının standart sapmasının ortalama rüzgar hızına bölünmesiyle elde edilen hava boşluğu yoğunluğunun iki farklı değeri için güç kalitesi oldukça değişmektedir. Reaktif güç kontrolü yapabilen rüzgar türbinleri içinse bu şartlar çok etkili değildir. Ayrıca rüzgar akış yönünü ve hızını değiştirebilecek her türlü engel, türbin kulelerinde olduğu gibi türbinin gölge etkisi altında çalışmasını sağlayarak güç kalitesini etkiler (Bossanyi vd., 1998; Thiringer vd., 2004; Estanqueiro vd., 2007).

4.3.2 Rüzgar Türbinlerinin Neden Olduğu Güç Kalitesi Problemleri

Rüzgar türbinlerinin, üzerinde bozucu etkilere sebep olduğu başlıca güç kalitesi karakteristikleri aşağıda alt başlıklar halinde incelenmiştir.

4.3.2.1 Gerilim Dalgalanmaları

Gerilim kalitesini etkileyen en yaygın sorun yük ve üretim değerlerin sürekli değişimidir. Yük değerlerindeki değişime genellikle ark ocakları, eritme tesisleri ve sık sık devreye girip çıkan büyük güçlü motorlar gibi yükler sebep olurken, üretim değerlerindeki değişiminin en önemli nedeni ise rüzgar türbinleridir.

Rüzgar türbinleri elektrik üretimlerine bağlı olarak, dağıtım sisteminin gerilim seviyesinde bazı değişimlere sebep olurlar. Büyük güçteki dağıtım istasyonları genellikle gerilim seviyesini regüle edebilecek sistemlere sahiptir. Bu durumda rüzgar türbinleri sadece bağlandıkları hatların gerilim seviyesini etkilerler. Bu tür dağıtım istasyonlarında herhangi bir gerilim regülasyon sistemi bulunmaması halinde ise güç sisteminin bütününün gerilim seviyesi etkilenir.

Rüzgar türbinleri, sisteme aktif güç verdikleri için sistemdeki gerilim seviyesini artırırlar. Aynı zamanda sistemden reaktif güç çekmeleri nedeniyle de gerilim seviyesini düşürürler. Rüzgar türbinlerindeki bu gerilim değişimleri aşağıdaki eşitlikle tahmin edilebilir:

$$U = R \frac{p}{U_n} - X \frac{q}{U_n} + U_n \quad (4.1)$$

Burada U bağlantı noktasındaki gerilimi, U_n şebekenin nominal gerilimini, p üretilen aktif gücü, q tüketilen reaktif gücü, R ve X ise sırasıyla şebeke direnci ve reaktansını göstermektedir (Thiringer vd., 2004).

Bu durumda, rüzgar türbinlerinin gerilim seviyesine bağlı olarak aktif veya reaktif güç değerlerinin değiştirilmesi veya tamamen şebekeden ayrılması gerekebilir. Bu sayede türbinde maksimum elektrik üretimi nedeniyle oluşan yüksek gerilim değerlerinde gerilim seviyesi aşağıya çekilebilir.

Gerilim dalgalanmaları da kendi aralarında hızlı ve yavaş gerilim değişimleri olmak üzere ikiye ayrılıp incelenebilir.

4.3.2.1.1 Yavaş Gerilim Değişimleri

İletkenlerin empedansından dolayı gerilim seviyesi, rüzgar gücü üretimine ve beslenen yüke bağlı olarak hat boyunca değişir. Bu etkiyi değerlendirmek ve rüzgar türbini gerilim değerinin gereken sınırların dışına çıkmamasını sağlamak amacıyla yük akış analizlerinin yapılması önerilmektedir. En doğru çözüm için şebekenin, yüklerin ve rüzgar türbininin tüm durumları göz önüne alınmalıdır, ancak genelde bu analizler dört uçdeğer için yapılır:

- Az yük ve düşük rüzgar gücü
- Az yük ve yüksek rüzgar gücü
- Fazla yük ve düşük rüzgar gücü
- Fazla yük ve yüksek rüzgar gücü

EN 50160 standardına göre 10 dakikalık ortalamalarla tüketici noktalarında ölçülen yavaş gerilim değişimleri, bir haftanın % 95'i boyunca nominal gerilimin $\pm$ % 10'u içerisinde kalmalıdır. Yalnızca alçak gerilimde ise bu değer her zaman - % 15 ve + % 10 arasında kalmalıdır (Tande ve Uhlen, 2001).

Rüzgar gücünün şebeke içindeki oranının artması, maksimum gerilim değerini arttırmaktadır, ancak bu sorun rüzgar türbinlerinin güç faktörü ayarlanarak çözülebilir. Güç faktörünün 1'den 0,98 (endüktif)'e düşürülmesiyle maksimum gerilim % 1,5 düşürülebilir ve daha fazla rüzgar gücü için yer açılabilir. Ancak güç faktörünün düşürülmesi, şebekede kayıpların artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle güç faktörü regülasyonu dikkatli kullanılmalıdır ve alternatif çözümler de değerlendirilmelidir. Bu çözümlerin bazıları; yeni hatlar ile şebekeye takviye

yapmak ve rüzgar çiftliği gücünü gerilime göre azaltmak olarak sıralanabilir. Gerilime bağlı güç faktörü kontrolü ile de şebeke kayıplarındaki artış önemli derecede azaltılabilir (Tande, 2002).

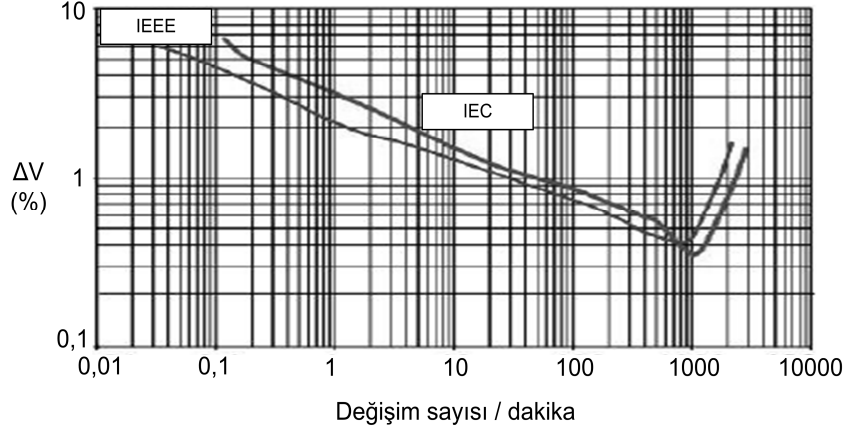
4.3.2.1.2 Hızlı Gerilim Değişimleri (Fliker)

Hızlı gerilim değişimleri genellikle yükteki veya üretilen güç değerindeki hızlı değişimlerden kaynaklanırlar. 0,05 Hz ile 35 Hz frekans aralığındaki gerilim dalgalanmalarının neden olduğu ışık kaynaklarındaki aydınlık şiddetleri değişimi, gerilim flikeri olarak adlandırılır. Gerilim flikerinin röleleri trip ettirme, güç elektroniği elemanlarının hatalı çalışmasına veya arızalanmasına neden olma gibi etkileri vardır. Ancak şebekeler içerisindeki değerinin standartlarla kesin bir şekilde sınırlandırılmasının asıl nedeni, insan sağlığı üzerindeki etkileridir. Flikerin insanlar üzerindeki etkileri çok sayıda parametreye bağlıdır ve flikerin neden olduğu rahatsızlık derecesi bu parametrelere bağlı olarak artabilir. Hızlı değişimlere sahip bir gerilim tarafından beslenen ışık kaynaklarına uzun süre maruz kalan insanlarda yorgunluk, baş ağrısı ve migren gibi belirtiler görülebilmektedir. Bu yönüyle, güç kalitesi karakteristikleri içinde insan sağlığını en fazla etkileyen hızlı gerilim değişimleridir ve bu etkileri en aza indirmek için EN 50160 standardına göre, hızlı bir gerilim değişimi genellikle nominal gerilimin % 5'inden daha az olmalıdır (Caldara vd., 1998; Gallo vd., 2008).

Gerilim flikeri IEC 61000-4-15 standardında belirtildiği bir flikermetre ile kullanılmasıyla ölçülebilir. Flikermetre giriş olarak gerilim değerlerini alır ve çıkışta fliker şiddetlerini verir. Ancak bir rüzgar türbininin neden olduğu fliker seviyesinin flikermetre ile ölçümü sırasında, ölçüm yapılacak olan noktaya her zaman başka fliker kaynakları da bağlı olduğundan hatalı değerler bulunabilir. Rüzgar türbinlerinin ölçüm süresi boyunca şebekeden ayrılması ise ekonomik olmayacağından, türbinlerde şebekeden bağımsız fliker ölçümü, akım ve gerilim veya aktif ve reaktif güç ölçümlerine göre yapılır (Gutierrez vd., 2007).

Fliker şiddeti 10 dakikalık bir periyot içinde ölçülen bir kısa dönem değeri (P_{st}) veya 2 saatlik bir ölçüm sonucunda elde edilen kısa dönem değerlerinden hesaplanan bir uzun dönem değeri (P_{lt}) ile verilebilir. EN 50160'a göre uzun dönem fliker şiddeti bir haftanın % 95'i boyunca 1'e eşit veya 1'den küçük olmalıdır. Ancak flikere verilen tepki öznel olduğundan 1 değeri de bazı insanlar için rahatsız edici olabilir. Tüketici noktasında $P_{lt} = 1$ değerini sağlamak için şebekeye bağlı her bir fliker kaynağının IEC 61000-3-7'de belirtildiği gibi sınırlı bir değerle katkı yapmasına izin verilir. Rüzgar türbinleri için bu değeri her ülke kendi belirlemekle birlikte genellikle 0,25-0,35 arasında alınmaktadır.

Flikerin insanlar üzerindeki olumsuz etkisi, gerilimin genliğine ve frekansına bağlıdır. Farklı frekans ve genliklerde hızlı gerilim değişimlerinin uygulandığı bir akkor flamanlı lambanın ışık akısına maruz bırakılan insanların verdiği tepkilere göre oluşturulan $P_{st} = 1$ eğrileri, Şekil 4.1’de gösterildiği gibidir. Bu eğriler üzerindeki her noktada kısa dönem fliker katsayısı 1’e eşittir (Halpin vd., 2003; Bollen ve Gu, 2006).



Şekil 4.1 IEC 61000-4-15 ve IEEE Std 141-1993 standartlarına göre düzenli dikdörtgenel gerilim değişimleri için $P_{st} = 1$ eğrisi (Halpin vd., 2003).

Şekil 4.1’den görülebileceği gibi, küçük bir gerilim dalgalanması bile belli bir frekansta fliker seviyesinin sınır değerlere yaklaşmasına neden olabilir. Yüksek frekansa sahip gerilim dalgalanmalarının insanlar tarafından fark edilememesinin nedeni, lamba flamanının ısı değerinin bu kadar hızlı değişmemesidir. Düşük frekansa sahip dalgalanmalar ise insan beynindeki görme ile ilgili hafızaya alma bölümünün bu kadar uzun süreli değişimleri depolayamamasından dolayı fark edilememektedir (Diez vd., 2002).

Rüzgar türbinlerinin ilk çalışması (start-up) gibi anahtarlama işlemleri ve sürekli çalışması esnasındaki aktif ve/veya reaktif güçteki dalgalanmalar, flikere neden olurlar. Sürekli çalışma sırasındaki güç dalgalanmaları genellikle; hava boşluğu yoğunluğu, kule gölge etkisi, kanat açısı kontrol ve sapma mekanizmalarının hatalı çalışması, kısa bir mesafe içindeki rüzgar hız ve yönünün farklı değerler alması (wind shear), kule salınımı, dişli kutusundaki problemler ve rüzgar hızındaki dalgalanmalar nedeniyle meydana gelir. Meydana gelen bu dalgalanmaların şebeke üzerindeki etkisi, şebekenin kısa devre gücüne ve şebeke empedans açısına bağlıdır. Fliker şiddetleri, kısa devre gücünün artması ile azalırken şebeke empedans faz açısının artmasıyla, türbinin ürettiği aktif güce ve şebekeden çektiği reaktif güce bağlı olarak değişirler (Sorensen vd., 1996; Hsu vd., 2006).

Kullanılan generatörler açısından fliker etkisi incelenecek olursa, endüksiyon generatörüne sahip olan türbinler, şebekeden çektikleri değişken reaktif güç nedeniyle fliker üretirler. Bu generatörler daha çok sabit hızlı türbinlerde kullanıldığından ve sabit hızlı türbinler ani rüzgarlarda kendileri de flikere neden olduklarından, bu türbinlerin fliker açısından şebekeye olumsuz etkileri, değişken hızlı türbinlerden daha fazladır. Sabit hızlı türbinlerde hızlı gerilim değişimlerinin şebeke üzerindeki etkilerini azaltmak için, kondansatör grupları kullanılarak çekilen reaktif gücün kontrol edilmesi sağlanabilir. Ancak bu durumda da kondansatörler arası anahtarlamalar sırasında yüksek fliker değerleri ortaya çıkabilir (Tande, 1998).

Senkron generatörlü değişken hızlı makinalar ise fliker üretmezler. Ancak günümüzde çoğu değişken hızlı türbin, şebekeden reaktif güç çeken çift beslemeli endüksiyon generatörlerine sahiptir ve belli bir oranda fliker emisyonu görülebilir. Bu türbinlerde de güç elektroniği dönüştürücüleri ile reaktif güç kontrol edilerek, hızlı gerilim değişimlerinin şebeke üzerindeki etkileri sınırlandırılabilir.

Sabit hızlı rüzgar türbinlerinde rüzgardan kaynaklanan stokastik güç dalgalanmaları dikkate alınmazsa, baskın olan periyodik güç dalgalanmalarının frekansı 1 – 2 Hz arasındadır. Bu güç dalgalanmaların en yaygın olanı rotor kanatlarının kulenin önünden geçmesiyle oluşan ve üç kanatlı türbinler için frekansı, $1p$ rotor hızını göstermek üzere, $3p$ olarak belirtilen dalgalanmalardır. $1p$ frekansına sahip olan dalgalanmalar ve kule rezonans frekansındaki dalgalanmalar ise $3p$ frekansına sahip dalgalanmalarda olduğu gibi gerilimde hızlı değişimlere dolayısıyla flikere neden olurlar. Burada frekansı $1p$ olan dalgalanmaların, rotorun dengeli olmamasından veya kanatlardan birinin diğerlerinden daha yüksek bir moment üretmesinden kaynaklanabileceği tahmin edilmektedir. Bu frekanstaki dalgalanmaların olduğu anlarda rotor kanatlarının pozisyonları çok farklı şekillerde olabilir, ancak $3p$ frekansındaki dalgalanmalar yalnızca kanatlardan birinin kule ile paralel konuma gelmesi durumunda meydana gelir. Kule rezonans frekansında oluşan güç dalgalanmaları ise genellikle düşük değerdedir, ancak eğer bir türbin iz (wake) etkisi altında çalışıyorsa bu dalgalanmalar en yüksek değerlerini alırlar. Bunun nedeni “wake” etkisi altında çalışan türbinlere gelen rüzgarın hız ve yönünün oldukça değişmesi ve böylece hava boşluğu yoğunluğunun artmasıdır. Gücün kule rezonans bileşeninin genliği, naselin (nacelle) bir yöne doğru açılmal hareket etme hızıyla doğru orantılıdır. Endüksiyon generatörlerinde üretilen güç, rotorun açılmal hızı ve statordaki döner magnetik alanın açılmal hızı arasındaki fark (kayma) ile orantılı olduğundan kulenin açılmal yer değiştirmesi, naselin açılmal sapmasına neden olur. Böylece döner magnetik alanda, görünür bir salınım meydana gelir ve türbinin çıkış gücünde

dalgalanmalar oluşur. Naselin sapması direkt olarak ölçülemez, ancak naselin bir yöne doğru hızlanmasından elde edilebilir (Thiringer, 1996; Thiringer ve Dahlberg, 2001; Larsson, 2002).

Rüzgar türbinlerinin sürekli çalışmaları sırasında ürettikleri güç değerlerinde dalgalanmalara neden olan bir diğer önemli faktör ise hava boşluğu yoğunluğudur. IEC 61400 – 21 standardında yapılan ölçümler sırasında daha doğru sonuçlar elde etmek için hava boşluğu yoğunluğunun % 8 ile % 16 arasında olmasının yeterli olduğunun belirtilmesine rağmen, bu iki değer için yapılan ölçümlerinde bile fliker şiddetlerinin iki kata kadar fark edebildiği görülmüştür (Estanqueiro vd., 2007).

Ayrıca her bir rüzgar türbininin oluşturduğu ani değişimler türbin büyüklüğü ile artmaktadır. Tek bir rüzgar türbininin gerilimde meydana getirdiği ani değişimler, toplamda aynı güce sahip birkaç türbinin neden olduğu değişimlerden çok daha fazladır (Tande ve Uhlen, 2001).

4.3.2.2 Gerilim Çökmesi

Gerilim çökmesi, nominal gerilimin ani bir şekilde değerinin % 10'u ile % 90'ı arasında bir değere düşmesi ve kısa bir süre sonra geriliminin düzelmeye başlamasıdır. Bu olay genellikle 1ms ile 1dk arasında gerçekleşir. Nominal gerilimin % 10'u ile % 15'i arasındaki düşmelerin nedeni genellikle yüklerin anahtarlanmasıdır. Daha büyük düşmeler ise arızalar sırasında oluşmaktadır (Tande, 2003).

Elektrik güç sistemlerinde hatbaşı ve hatsonu arasındaki faz farkı aktif güç tarafından belirlenirken, gerilimin genliği reaktif güç değişimi ile kontrol edilir. Güç sisteminde kaynak ile yük arasındaki aktif ve reaktif güç akışı, büyük akım ve gerilim dalgalanmalarından sakınmak için dengelenmelidir. Bir hata meydana geldiğinde akımla ve trafo merkezinden uzaklıkla orantılı olarak devre boyunca bir gerilim düşümü meydana gelir. Rüzgar çiftlikleri genellikle trafo merkezlerinden uzakta bulunduğu için empedans yüksek değerde olmakta ve bu nedenle gerilim düşümleri önemli boyutlara ulaşmaktadır. Trafo merkezindeki regülatör, kendi gerilim sınırlarını aşmadan rüzgar çiftliği bağlantı noktasındaki gerilimi yükseltmeyebilir. Bu durumda rüzgar çiftlikleri gerilim kontrolü özelliğine sahip olmalıdır (De Alegria vd., 2006).

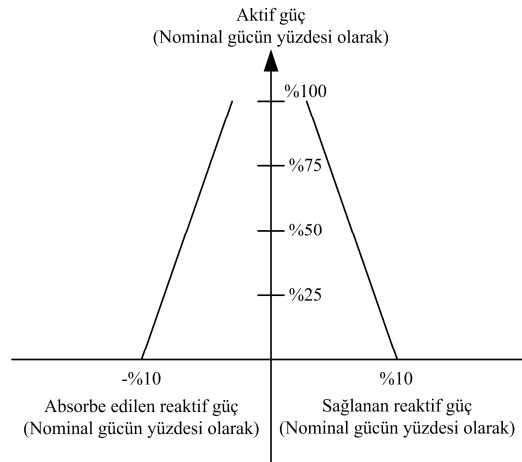
Gerilim çökmeleri, rüzgar santrallerinin şebeke entegrasyonundaki en önemli sorundur. Geçici hataların etkileri, çok büyük coğrafi alanlara yayılabilir ve bu hata şartları altında rüzgar çiftliklerinin bağlantısının kesilmesi ile de şebeke ve kaynakların güvenliği açısından ciddi bir tehlike oluşabilir. Bu yüzden günümüzde çoğu şebeke kodlarında, rüzgar

türbinlerinin arıza üstü çalışma (fault ride through) yeteneğine sahip olması zorunlu hale getirilmiştir. Ancak bir sistemin rüzgar gücünün çoğu, asenkron generatörlü küçük güçlü rüzgar türbinleri tarafından sağlanıyorsa gerilim çökmelerinde rüzgar türbinlerinin bağlantısını kesmek daha uygun olmaktadır. Böylece düşen reaktif güç talebi şebeke gerilimini artırabilir (Akhmatov ve Eriksen, 2007).

4.3.2.3 Reaktif Güç

Bir iletim hattının uçları arasındaki gerilim farkı, hattaki reaktif güç akışını belirler. Bu nedenle belirli bir aktif güç çıkışı için konvansiyonel generatörlerin otomatik gerilim regülatörleri (AVR) iletim sistemine istenen reaktif güç miktarını sağlamak (veya absorbe etmek) amacıyla generatörün uç geriliminin genliğini belirlemekte kullanılırlar. Sağlanan ve talep edilen reaktif güç arasındaki fark, sistem gerilimde bir değişikliğe neden olur. Eğer sağlanan geri reaktif güç talep edilenden daha az ise sistem geriliminde bir düşme, daha fazla ise bir artma meydana gelir (De Alegria vd., 2006).

Generatörler şebeke tarafından talep edilen reaktif gücü sağlarken, ürettikleri aktif güç düşük ise güç faktörü düşebilir. Ancak generatörler nominal şartlarda çalışırken güç faktörü 1'den uzaklaşırsa aşırı akımlar oluşur. Bu nedenle rüzgar türbinlerinin güvenli bir şekilde sağlayabileceği aktif ve reaktif güç değerleri, genellikle bir sınırlayıcı eğri (Şekil 4.2) ile belirlenir. Reaktif gücün birkaç saniyenin üzerindeki bir süredeki ortalama değeri bu eğrinin sınırları içinde kalmalıdır.



Şekil 4.2 Reaktif güç sınırlandırma eğrisi (De Alegria vd., 2006).

Herhangi bir yerel bölgede toplam reaktif güç talebi, rüzgar türbini ve yüklerin taleplerinin

toplamıdır. Kayıpları azaltıp gerilim kararlılığını arttırmak için rüzgar türbinleri, şebekeye de bağlı olarak, boşa reaktif talepleri ile tam yük talepleri arasında kompanze edilirler. Bu nedenle türbin güç faktörleri genelde 0,96'nın üzerindedir. Dönüştürücülere sahip rüzgar türbinlerinde reaktif güç, inverter tarafından kontrol edilebilir. Bu nedenle bu türbinlerde güç faktörü 1 yapılabilir. Ayrıca bu inverterler reaktif güç kontrolü ile gerilimi de kontrol edebilirler.

Endüksiyon generatörleri şebekeden reaktif güç çekerler ve düşük güç faktörü üretirler. Yüksüz durumda bile reaktif güç tüketimleri, nominal aktif gücün % 30-40'ı kadardır. Ayrıca çekilen reaktif gücün çok fazla artmasıyla sistem kararsız hale gelebilir. Rüzgar türbinlerinde endüksiyon generatörleri kullanılması durumunda generatörün reaktif güç ihtiyacı, direkt olarak şebekeye bağlı olduğu için şebekeden çekilir veya bu ihtiyaç rüzgar türbinine yerleştirilecek kondansatör gruplarından karşılanır. Rüzgar türbinlerinin şebekeden çekecekleri reaktif gücün azaltılması, gerilim seviyesini yükseltecektir. Bu sayede rüzgar türbinlerinin şebeke gerilimi üzerindeki etkileri azalacaktır.

4.3.2.4 Frekans

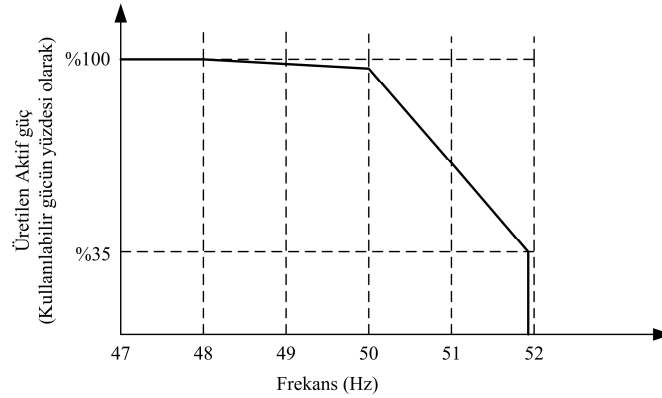
Bir generatörün çıkış gücünün aktif bileşeni, miline uygulanan mekanik giriş gücü ile belirlenir. Sağlanan güç (üretim) ve talep edilen güç (yük ve şebeke kayıpları) arasındaki fark, sistem frekansında değişimlere yol açar. Üretimdeki fazlalık frekansta artışa, eksiklik ise düşüşe neden olur.

Şebekelerde yükün artması durumunda sistem frekans kontrolü devreye girerek, frekans yeniden nominal değerine ulaşana kadar bazı generatörlerin momentini artırır. Frekansın belirli bir aralıkta sürdürülebilmesi, çoğunlukla üretimin birincil ve ikincil regülasyonu ile sağlanır. Frekans kontrolünde bir alan, her birinin birincil ve ikincil kontrolü olan çeşitli sayıda bölgelere ayrılır. Birincil frekans kontrolü, şebekede ani bir güç dengesizliği nedeniyle oluşan frekans değişikliklerini sınırlar ve bu kontrol her bir üretim biriminin hız regülatörü ile 15-30 saniye arasında gerçekleştirilir. Bu regülasyon genelde otomatiktir ve her bir generatör üzerinde sürekli olarak yapılır. İkincil kontrolün amacı ise her bir bölge içinde üretim ve talep arasındaki dengeyi korumak ve diğer bölgelerle önceden belirlenmiş güç değişimini sağlamaktır. Böylece 15 dakika içinde bir otomatik merkezi regülatörün kontrolü altında üniteler kullanılarak frekans ve değiştirilen gücün belirlenen değerlerine geri dönmesi sağlanır. Bu regülasyon ise normalde düzenli zaman aralıklarında (genelde 60 dk) veya frekans değeri önceden belirlenen limitleri (genelde 49,9 ve 50,1) aştığı zaman sistem

operatörü tarafından kullanılır (Tande, 2002; De Alegria vd., 2006).

EN 50160 standardına göre temel frekansın 10 saniyelik ortalama değeri bir yılın % 99,5'i boyunca 49,5 – 50,5 Hz arasında ve zamanın % 100'ü boyunca 47 – 52 Hz arasında olmalıdır. Bu limitler paralel işletmedeki enterkonnekte sistemler için geçerlidir. Ada sistemleri içinse ilgili sınırlar 49 -51 Hz ve 42,5 – 57,5 Hz arasındır.

Rüzgar türbinlerinde frekans 50 Hz'i aştığında, türbinin aktif güç üretimi ancak nominal değerinin altında bir değerde olacak şekilde sürdürülebilir. Ayrıca şebeke kodlarına göre de frekans nominal değerini aştığında santraller, belli bir oranda (Şekil 4.3'te verilen grafiğe göre) çıkış güçlerini düşürmelidir.



Şekil 4.3 Aktif gücün frekans kontrollü regülasyonu (De Alegria vd., 2006).

Rüzgar türbinlerinin çıkış gücündeki değişiklikler frekansı etkiler. Bir değerlendirme için, toplam beklenen rüzgar gücü değişimlerinin ve talep değişimlerinin tahmini ile birincil ve ikincil regülasyonların analizi gerekir. Ancak eğer rüzgar gücü toplam yükün yalnızca küçük bir yüzdesini karşılıyorsa, rüzgar türbinlerinin frekans üzerindeki etkisi çoğu durumda ihmal edilebilir. Günümüzde çoğu güç sisteminde bu durum geçerli olduğundan frekans ile ilgili çalışmalar izole sistemler dışında çok fazla yapılmamaktadır (Tande, 2002).

Rüzgar türbinlerinin bağlı olduğu şebekelerde, farklı durumlarda kullanabilmek amacıyla ek güç kontrol stratejileri gerekmektedir. Şebekenin durumuna ve yerel şebeke koduna bağlı olarak, en önemli güç regülasyon tipleri; tam güç sınırlaması, delta üretim sınırlaması, denge regülasyonu, güç eğim sınırlaması ve sistem koruması olarak sıralanabilir (De Alegria vd., 2006).

- **Tam güç sınırlaması:** Tam güç sınırlaması yapılan kontrol tipinde rüzgar çiftliğinin güç

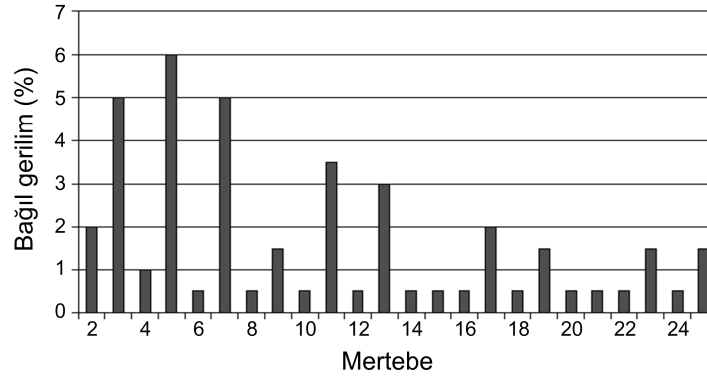
çıkışı, talep edilen güç değerine ayarlanır. Bu yüzden rüzgar hızı uygun olsa bile daha fazla güç üretilmez. Bu kontrolün yapılmasının nedeni, talep edilen güçten daha fazla güç üretilmesine engel olarak şebekeyi frekans artışı gibi olası sorunlardan korumaktır.

- **Delta üretim sınırlaması:** Delta üretim sınırlaması kontrol tipi, rüzgar çiftliğinin frekans kontrolüne yardımcı olmasını sağlar. Nominal frekansta rüzgar çiftlikleri güç üretimlerini maksimum güç değerlerinin bir miktar altında sınırlamalıdır. Böylece eğer frekans düşmeye başlarsa, rüzgar çiftliği çıkış gücü maksimum ulaşılabilecek güce kadar arttırılarak frekansın belli bir değerde devam etmesi sağlanabilir. Bu kontrol ayrıca rüzgar hızındaki yüksek değişkenlikten dolayı oluşan güç dalgalanmalarını da azaltır, böylece döner yedeğe ihtiyaç da azalır. Döner yedek, üretimde olan toplam generatör kapasitesi ile bu generatörlerin toplam çıkış güçleri arasındaki farktır ve genellikle tepe gücünün % 1,5'u ile % 3'ü arasındadır. Güç sistemlerinde gerekli olan bir diğer yedek ise 10 dakika içinde çalışmaya başlayabilecek ve 30 dakika içinde tamamen hazır olabilecek üretim kapasitesine karşılık gelen ilave yedektir.
- **Denge regülasyonu:** Rüzgar çiftlikleri güçlerini hem istenen güç değerinde ($\pm$ MW) hem de istenen güç eğiminde (MW/Hz) çok hızlı bir şekilde arttırabilmeli veya azaltabilmelidir. Bu özellik şebekedeki aktif gücün üretimini ve tüketimini dengelemeye yardımcı olur.
- **Güç eğim sınırlaması:** Konvansiyonel güç santrallerinin çıkış güçlerini arttırma veya azaltma eğimleri, rüzgar türbinlerinden daha yavaştır. Bu santrallerin üretimi durdurulurken güç dengesini koruyabilmek amacıyla rüzgar santrali için maksimum bir güç eğimi belirlenir ve santral bu eğime göre üretim kayıplarını karşılayacak şekilde gücünü arttırır.
- **Sistem koruması:** Şebekede bir hattın enerjisinin kesilmesi gibi bir arıza olduğunda şebeke işletmecisi, rüzgar santralinden hızlı bir şekilde gücünü düşürmesini ister ve bu güç azaltımı sistemdeki güç dengesi sağlanana kadar devam eder (Örneğin türbinin çıkış gücü 2 saniye içerisinde nominal gücün % 20'sine düşürülebilmelidir). Bu denge sağlandığında harici koruma sinyali kesilir ve güç, o andaki değerinde sabit tutulur (Bindner ve Lundsager, 2002).

4.3.2.5 Harmonikler

EN 50160 standardına göre her bir tekil harmonik distorsiyon değerinin 10 dakikalık ortalama efektif değeri, bir haftanın % 95'i boyunca Şekil 4.4'te gösterilen sınırlar içerisinde olmalıdır. Ayrıca gerilimin toplam harmonik distorsiyonu % 8'den daha küçük olmalıdır. Harmonik

gerilim değerlerinin kabul edilebilir sınırlar içinde kalmasını sağlamak için her bir harmonik akım kaynağının sınırlı bir katkı yapmasına izin verilmektedir. Bu sınırlar harmonik empedansı ve gerilim seviyesi gibi şebeke özelliklerine bağlıdır ve IEC 61000-3-6 standardından bulunabilir.



Şekil 4.4 EN 50160 standardına göre nominal gerilimin yüzdesi olarak tekil harmonik gerilimlerinin değerleri (Tande, 2002).

Kabul edilebilir harmonik gerilimleri sınırları standartlarda 40. harmoniğe kadar tanımlanmıştır. 40. harmonikten sonrası genelde küçük değerli olduğundan ve bu değerlerin ölçümü zor olduğundan herhangi bir sınır tanımlanmamıştır. Aynı şekilde ara harmonikler için de şu an bir sınırlama yoktur.

Bir güç elektroniği konverteri olmaksızın şebekeye direkt bağlanan endüksiyon generatörlü bir rüzgar türbini, gerilimin dalga şeklini bozmaz. “Soft start” (yumuşak kalkış) için kullanılan güç elektroniği elemanları kısa süreli olarak yüksek dereceli harmonik akımları oluşturabilir, ancak bunların süreleri ve genlikleri çok küçük olduğu için göz önüne alınmazlar. Bu nedenle sabit hızlı rüzgar türbinli sistemler için harmonikler dikkate alınmazlar. Ancak bu türbinlerde kullanılan kondansatör grupları, harmonik empedansın rezonans frekansını değiştirerek yüksek harmonik gerilimlerinin oluşmasına sebep olabilirler. Bu nedenle harmonik kaynakların fazla olduğu şebekelerde, kondansatör gruplarına sahip olan rüzgar türbinlerinin kondansatör değerleri dikkatli bir şekilde seçilmelidir.

Değişken hızlı türbinlerde ise tristör kullanan konverterler, standartlarda sınırları verilen harmonik gerilimlerini etkileyebilecek harmonik akımları üretirler. Ancak bu konverterler, yeni rüzgar türbinlerinde nadiren kullanılmaktadır. Günümüzde türbinlerde kullanılan konverterler daha çok transistör bazlıdır ve 3 kHz’in üzerindeki anahtarlama frekanslarında çalışırlar. Sonuç olarak yeni rüzgar türbinlerinin gerilim dalga şekli üzerindeki etkileri

genelde önemslenmeyecek kadar azdır ve bu nedenle rüzgar gücünün şebeke içindeki oranının artmasına bir engel oluşturmamaktadır.

5. ŞEBEKEYE BAĞLANAN RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN GÜÇ KALİTESİ KARAKTERİSTİKLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ İÇİN MODELLEMELER

IEC 61400-21 standardı belirli bir bölgeye kurulan bir veya daha fazla sayıdaki rüzgar türbininden beklenen güç kalitesini tahmin etmeye yarayacak yöntemleri gösterir ve sonuçların diğer IEC yayınlarındaki gereksinimlerle karşılaştırılabilmesine olanak sağlar. Güç kalitesi gereksinimleri ile uyumluluğu değerlendiren işlemlerde rüzgar türbinlerinin üç fazlı orta veya yüksek gerilime sahip bir güç sistemi ile ortak bağlantı noktası olmalıdır. Ayrıca bu güç sisteminin ± 1 Hz içindeki sabit frekansa, yeterli aktif ve reaktif güç regülasyon kabiliyetine ve rüzgar gücü üretimini absorbe edebilecek yeterli yüke sahip olmasına dikkat edilmelidir. Bir rüzgar türbini için ölçülen karakteristikler, yalnızca değerlendirilen rüzgar türbininin belirli konfigürasyonu için geçerlidir. Diğer durumlarda güç kalitesi gereksinimlerine uygunluğun değerlendirilmesi sadece bir rehber olarak kullanılabilir.

IEC 61400-21 standardına göre bir rüzgar türbininin güç kalitesini karakterize etmek için aşağıdaki parametrelerin belirlenmesi gerekmektedir:

- Nominal veri (P_n , Q_n , S_n , U_n ve I_n),
- Maksimum izin verilen güç (P_{mc} , 10 dk'lık ortalama),
- Maksimum ölçülen güç (P_{60} , 60 sn'lik ortalama veya $P_{0,2}$, 0,2 sn'lik ortalama),
- Reaktif güç (Q_{mc} , aktif gücün bir fonksiyonu olarak 10 dk'lık ortalama değerler),
- Fliker katsayısı ($c(\psi_k, v_a)$, sürekli çalışma için şebeke empedans faz açısının ve yıllık ortalama rüzgar hızının bir fonksiyonu olarak),
- Maksimum rüzgar türbini ilk çalışma sayısı (N_{10} ve N_{120} , 10 dk ve 2 saat içindeki),
- Fliker adım faktörü ve gerilim değişim faktörü ($K_f(\psi_k)$ ve $K_u(\psi_k)$, ilk çalışmada şebeke empedans faz açısının fonksiyonları olarak),
- Harmonik akımlar ($I_{h,i}$, sürekli çalışma esnasında 50. mertebeye kadar her bir harmonik için 10 dk'lık ortalama değerlerle verilen)

Bu parametrelerin belirlenmesiyle rüzgar türbinlerinin neden olduğu kararlı hal gerilimi değişimleri, gerilim dalgalanmaları ve harmonikler hesaplanabilir. Hesaplamalar sırasında kullanılan 5.1, 5.2, 5.4 – 5.11, 5.24 – 5.44 eşitlikleri IEC 61400-21 standardından ve 5.16, 5.18 – 5.23 eşitlikleri ise IEC 61000-4-15 standardından alınmıştır. Ayrıca modeller oluşturulurken izlenen yöntemlerde de bu standartlardan faydalanılmıştır.

5.1 Kararlı Hal Gerilimi

Bir rüzgar türbininin işletimi, bağlı olduğu şebekedeki kararlı hal gerilimini etkileyebilir. Bu etkiyi değerlendirmek ve rüzgar türbini gerilim değerinin belirlenen sınırların dışına çıkmasını

önlemek amacıyla, genellikle dört uçdeğer durum için yük akış analizlerinin yapılması gerektiği daha önce belirtilmişti. Burada yük akış analizinin kapsamına bağlı olarak, rüzgar türbini tesisinin P_{mc} ve Q_{mc} , P_{60} ve Q_{60} veya $P_{0,2}$ ve $Q_{0,2}$ güçlerini sağladığını varsaymak uygun olabilir. Çok sayıda rüzgar türbinine sahip bir tesis, ortak bağlantı noktasındaki çıkış gücü varsayılarak değerlendirilebilir. On dakikalık ortalama veri (P_{mc} ve Q_{mc}) ve 60 saniyelik ortalama veri (P_{60} ve Q_{60}) bir toplama işlemiyle hesaplanabilirken, 0,2 saniyelik ortalama veri,

$$P_{0,2\Sigma} = \sum_{i=1}^{N_{wt}} P_{n,i} + \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{wt}} (P_{0,2i} - P_{n,i})^2} \quad (5.1)$$

$$Q_{0,2\Sigma} = \sum_{i=1}^{N_{wt}} Q_{n,i} + \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{wt}} (Q_{0,2i} - Q_{n,i})^2} \quad (5.2)$$

eşitliklerine göre hesaplanır. Şebeke empedans faz açısı ile akım ve gerilim arasındaki faz açısının toplamının kosinüsünün alınmasıyla elde edilen değerinin 0,1'den büyük olması durumunda ($\cos(\psi+\varphi)>0,1$) kararlı hal gerilimi değişimi,

$$d = \frac{S_{60}}{S_k} \cdot |\cos(\psi + \varphi)| \quad (5.3)$$

eşitliği ile daha kolay bir şekilde hesaplanabilir (DM Energy, 2001). Burada,

S_k : Ortak bağlantı noktasındaki şebeke kısa devre gücü,

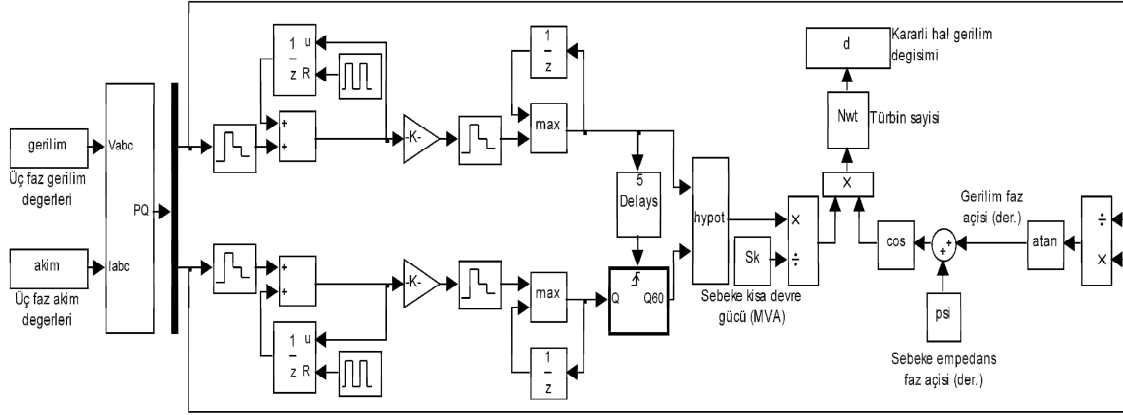
S_{60} : 60 sn ortalama maksimum aktif güçte görünür güç,

d : Ortak bağlantı noktasındaki şebekenin kararlı hal gerilim değişimi,

φ : Akım ve gerilim arasındaki faz açısı,

ψ : Şebeke empedans faz açısıdır.

Kararlı hal geriliminin MATLAB/Simulink ile modellenmesinde eşitlik (5.3)'ten yararlanılmıştır. Model içerisinde seçilecek değerler genellikle $\cos(\psi+\varphi)>0,1$ koşulunu sağladığından güç akış analizleri yerine bu eşitliğin tercih edilmesinde bir sakınca yoktur. MATLAB ile oluşturulan model Şekil 5.1'de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.1 Kararlı hal gerilim değişiminin hesabı modeli.

Burada gerilim ve akım değerleri, “cut-in” ile 15 m/s rüzgar hızları (rüzgar hızı 10 dakikalık ortalama değerlerle ifade edilir) arasındaki her bir 1 m/s’lik aralık için en az beş adet 10 dakikalık zaman dizisi olarak ölçülmüş olmalıdır. Bu modelde şebeke empedans faz açısı, şebeke kısa devre gücü ve türbin sayısı parametreleri girildikten sonra rüzgar türbinlerinin bağlanmasıyla şebekede meydana gelen kararlı hal gerilim değişimi belirlenebilir. Formül içerisinde gereken diğer parametreler ise türbin uçlarından alınan gerilim ve akım ölçümlerinin kullanılmasıyla model tarafından hesaplanmaktadır. Şebeke empedans faz açısı, gerilim ile akım arasındaki faz açısından bulunurken, P_{60} değeri 5 Hz’lik kesim frekansı ile ölçülen güç değerlerinin 60 saniyelik ortalamalarının en büyük değeri olarak hesaplanmaktadır. Q_{60} değerinin hesabı ise P_{60} değerindeki reaktif gücü hesaplayacak şekilde oluşturulan model tarafından yapılmaktadır.

5.2 Gerilim Dalgalanmaları

Bir rüzgar türbini tesisinin fliker emisyonu,

$$P_{st} \leq E_{Psti} \quad (5.4)$$

$$P_{lt} \leq E_{Plti} \quad (5.5)$$

eşitliklerine uyacak şekilde sınırlandırılmalıdır. Burada,

P_{st} ve P_{lt} : Rüzgar türbini tesisinin kısa ve uzun dönem fliker emisyonlarını,

E_{Psti} ve E_{Plti} : İlgili PCC için kısa ve uzun dönem fliker emisyon sınırlarını

göstermektedir. Ayrıca bir rüzgar türbini tesisinden kaynaklanan bağıl gerilim değişimi,

$$d \leq \frac{\Delta U_{dyn}}{U_n} \quad (5.6)$$

olacak şekilde sınırlandırılmalıdır. Burada,

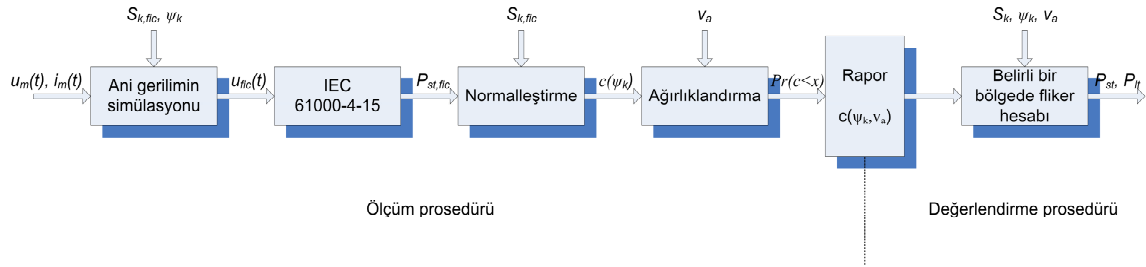
d : Rüzgar türbinindeki bir anahtarlama kaynaklı gerilim değişimi,

$\Delta U_{dyn}/U_n$: Maksimum izin verilen gerilim değişimidir.

Rüzgar türbinlerinin neden olduğu fliker emisyonları ve bağıl gerilim değişimleri, sürekli çalışma ve anahtarlama işlemleri için ayrı ayrı incelenmelidir.

5.2.1 Sürekli Çalışma

Sürekli çalışma sırasındaki fliker için ölçüm ve değerlendirme işlemleri Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2 Rüzgar türbininin sürekli çalışması sırasında fliker için ölçüm ve değerlendirme işlemleri (IEC 61400-21, 2001).

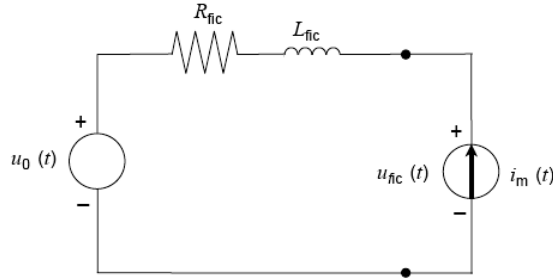
Şekil 5.2’deki ölçüm prosedürü aşağıda maddeler halinde detaylı bir biçimde verilmiştir:

1) Belli bir sayıda (en az otuz ölçüm) gerilim ve akım zaman dizisi, $u_m(t)$ ve $i_m(t)$, “cut-in” rüzgar hızından 15 m/s’ye kadar olan her 1 m/s’lik rüzgar hızı aralığı için ölçülür. Ancak yapılan ölçümlerde anahtarlama işlemleri, kondansatörlerin anahtarlaması gibi durumlar hariç hesaba katılmaz. Her bir aralık için ölçüm yapmanın amacı, değerlendirilen rüzgar türbininin tüm işletim aralığı için karakteristik güç kalitesi parametrelerini bulmaktır. 15 m/s’nin üzerindeki rüzgar hızları için ölçümlerin istenmemesinin nedeni, yüksek rüzgar hızlarının sık görülmemesinden dolayı ölçümlerin oldukça uzun sürmesidir. Ayrıca bu hızlarda yapılan ölçümler ile güç kalitesi parametrelerinin fazla değişmesi beklenmemektedir.

Burada akım ve gerilim (faz-nötr) değerleri üç faz için ani değerler olarak ölçülmeli, rüzgar

hızı ise hava boşluğu yoğunluğu % 8-16 arasında iken 10 dakikalık ortalama değerlerle ölçülmelidir. Bu aralığın dışında kalan hava boşluğu yoğunluğuna sahip periyotlardaki test verileri değerlendirilmemelidir. Hava boşluğu yoğunluğu, arazi değişimlerinin ve engellerin “akıllı bölge tanıma” ile belirlenmesine veya rüzgar hızı ölçümlerine göre değerlendirilebilir. Gerilim ve akım ölçümlerinin kesim frekansı ise en az 400 Hz olmalıdır.

2) Ölçülen her zaman dizisi seti, bir hayali şebeke üzerinde dört farklı şebeke empedans faz açısı (ψ_k) için gerilim dalgalanmalarını ($u_{fic}(t)$) simüle etmek amacıyla giriş olarak kullanılır. Hayali şebekenin faz diyagramı Şekil 5.3’te gösterilmiştir.



Şekil 5.3 Hayali gerilimin simülasyonu için hayali şebeke (IEC 61400-21, 2001).

Hayali şebeke, $u_0(t)$ ani değerine sahip ideal bir faz-nötr gerilim kaynağı ve bir endüktans (L_{fic}) ile ona seri bağlı bir dirençten (R_{fic}) oluşan bir empedans ile gösterilir. Rüzgar türbini, hat akımının ölçülen ani değeri olan ($i_m(t)$) bir akım kaynağı ile gösterilir. Şebekedeki diğer yüklerin neden olduğu dalgalanmaları ortadan kaldırmak için kullanılan bu model, aşağıdaki eşitliğe göre ani değere sahip simüle edilmiş bir gerilimi verir (Sorensen vd., 1999).

$$u_{fic}(t) = u_0(t) + R_{fic} \cdot i_m(t) + L_{fic} \cdot \frac{di_m(t)}{dt} \quad (5.7)$$

İdeal gerilim kaynağı farklı yollarla oluşturulabilir. Ancak ideal gerilimde dalgalanmalar olmamalıdır, yani gerilim üzerindeki fliker sıfır olmalıdır ve $u_0(t)$, ölçülen gerilimin temel değeri ile aynı elektriksel açıya ($\alpha_m(t)$) sahip olmalıdır. Bu özellikleri sağlamak için $u_0(t)$,

$$u_0(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_n \cdot \sin(\alpha_m(t)) \quad (5.8)$$

şeklinde tanımlanır. Burada U_n şebekenin nominal geriliminin efektif değeridir. Ölçülen gerilimin temel değerinin elektriksel açısı ise

$$\alpha_m(t) = 2 \cdot \pi \cdot \int_0^t f(t) dt + \alpha_0 \quad (5.9)$$

olarak tanımlanır. Burada,

$f(t)$: Frekans,

t : Zaman dizilerinin başlamasından sonraki zaman,

α_0 : $t = 0$ 'daki elektriksel açıdır.

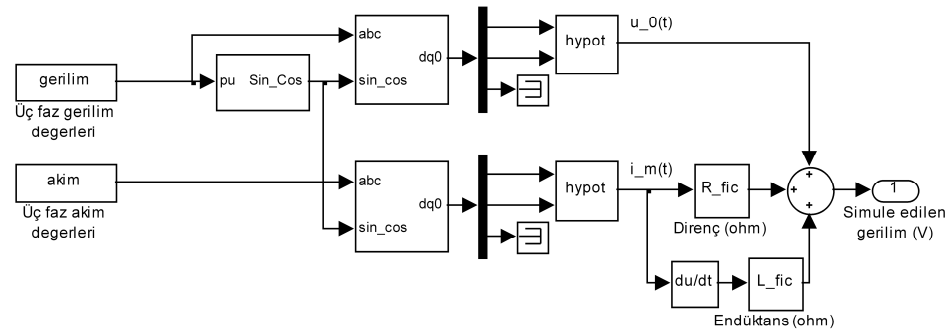
R_{fic} ve L_{fic} , uygun şebeke empedans faz açısı (ψ_k) elde edilecek şekilde seçilmelidir:

$$\tan(\psi_k) = \frac{2\pi \cdot f \cdot L_{fic}}{R_{fic}} = \frac{X_{fic}}{R_{fic}} \quad (5.10)$$

Hayali şebekenin üç faz kısa devre görünür gücü ise

$$S_{k,fic} = \frac{U_n^2}{\sqrt{R_{fic}^2 + X_{fic}^2}} \quad (5.11)$$

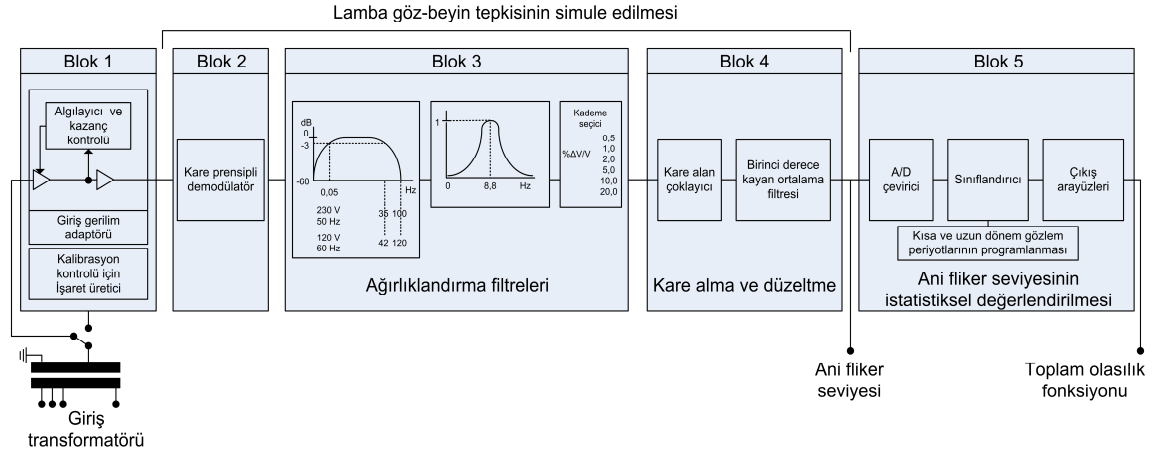
ile elde edilir. Hayali şebekenin MATLAB modeli, Şekil 5.4'te gösterildiği gibi temel olarak d-q dönüşümünden oluşmaktadır. Rüzgar türbinlerinin ortak bağlantı noktasında ölçülen üç faz gerilim ve akım değerlerinin giriş olarak kullanılmasıyla, modelin çıkışında simule edilen gerilim elde edilmiştir. Model içerisinde bulunan R_{fic} ve L_{fic} parametreleri ise hayali şebeke empedans faz açısına ve kısa devre gücüne göre hesaplanarak yerine yazılmaktadır. Güç kalitesi karakteristikleri dört farklı şebeke empedans faz açısı için belirleneceğinden, R_{fic} ve L_{fic} değerleri de her bir açı için yeniden hesaplanmalıdır.



Şekil 5.4 Hayali şebeke modeli.

3) Simule edilen ani gerilim zaman dizileri, fliker emisyon değerini ($P_{st,fic}$) elde etmek

amacıyla IEC 61000-4-15'te tanımlanan gerilim fliker algoritmasına giriş olarak uygulanır. Fliker algoritması 61000-4-15 standardında Şekil 5.5'teki gibi verilmiştir. Burada şekil içerisinde bulunan her bir blok aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.



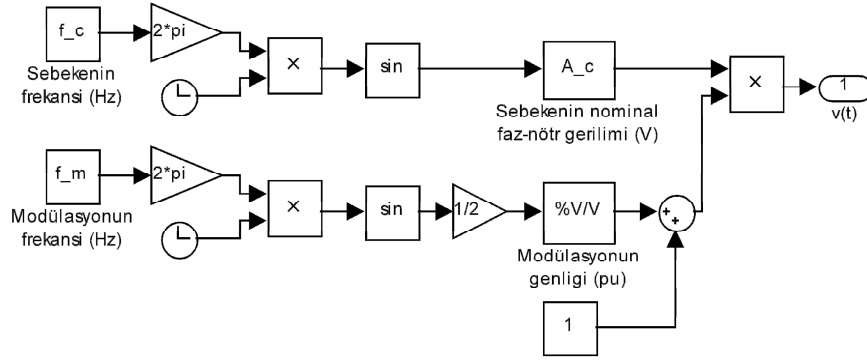
Şekil 5.5 IEC flikermetrelerinin fonksiyon şeması (IEC 61000-4-15, 1997).

Blok 1 – Giriş gerilim uyarlayıcı ve kalibrasyon kontrol devresi: Bir gerilim uyarlayıcı devre ve bir sinyal üreticiden oluşmaktadır. Burada giriş gerilim uyarlayıcı devre, giriş sinyalini analog flikermetrelerin sınırlı aralığı ile eşleştirebilmek için kullanılmaktadır. Ancak simülasyon modelinde sınırlı bir aralık olmadığından gerilim uyarlayıcı bir devre kullanmaya gerek yoktur. Kalibrasyon sinyal üreticinin amacı ise, flikermetrelerin doğru çalışmasını kontrol edebilmektir. Oluşturulan modelin doğruluğunu test etmek için MATLAB Simulink elemanları kullanılarak sinüzoidal ve dikdörtgensel olmak üzere iki farklı kalibrasyon sinyali kullanılmıştır. Bu sinyallerin matematiksel ifadeleri aşağıda sırasıyla verilmiştir (Mazadi ve Hosseini, 2004).

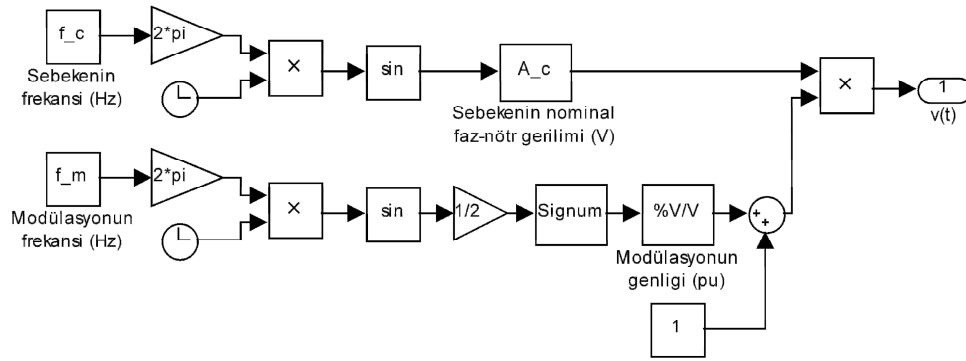
$$v(t) = A_c \cdot \sin(w_c t) \left[1 + \% \frac{\Delta V}{V} \cdot \frac{1}{2} \sin(w_m t) \right] \quad (5.12)$$

$$v(t) = A_c \cdot \sin(w_c t) \left[1 + \% \frac{\Delta V}{V} \cdot \frac{1}{2} \cdot \text{signum}(\sin(w_m t)) \right] \quad (5.13)$$

Burada A_c sinüzoidal gerilim dalgalanmasının genliğini, w_c gerilim dalgalanmasının açısal frekansını, $\% \Delta V/V$ modülasyonun dalgasının genliğini ve w_m modülasyonun açısal frekansını göstermektedir. Eşitlik (5.12) ve (5.13)'e göre modeller, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de gösterildiği gibi oluşturulmuştur.

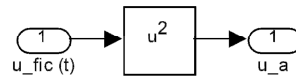


Şekil 5.6 Sinüzoidal kalibrasyon sinyali modeli.



Şekil 5.7 Dikdörtgensel kalibrasyon sinyali modeli.

Blok 2 – Kare prensipli demodülatör: Ölçeklendirilmiş giriş geriliminin karesini alarak yüzde gerilim dalgalanmasını düzelten bir kare prensipli demodülatör içerir. Bu şekilde lambanın davranışı simüle edilmiş olur. Demodülatörün modeli için Şekil 5.8’de gösterilen blok kullanılmıştır.



Şekil 5.8 Kare prensipli demodülatör modeli.

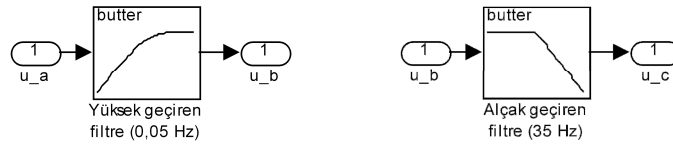
Blok 3 – Ağırlıklandırma filtreleri: Kaskad bağlı iki filtreden ve bir ölçüm aralığı seçiciden oluşmaktadır. İlk filtre demodülatörün çıkış gerilimdeki dc bileşenleri ve şebeke frekansının iki katında olan bileşenleri ortadan kaldırır. Standartlara göre bu filtre, dc bileşeni filtreleyen 0,05 Hz kesim frekansına sahip birinci dereceden bir yüksek geçiren filtre ve şebeke frekansının iki katındaki bileşenleri filtreleyen 35 Hz kesim frekansına sahip altıncı dereceden

bir Butterworth alçak geçiren filtre içermektedir. Modelde kullanılan filtrelerin transfer fonksiyonları aşağıda sırasıyla verilmiştir (Bertola vd., 2004).

$$F(s) = \frac{3,1830939s}{3,1830939s + 1} \quad (5.14)$$

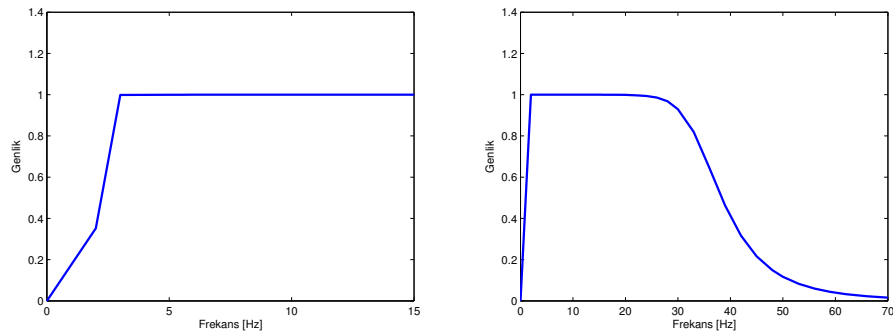
$$F(s) = \prod_{i=1}^3 \left(\frac{w_i^2}{\left(\frac{s}{w_B} \right)^2 + 2 \cdot \zeta_i \cdot w_i \left(\frac{s}{w_B} \right) + w_i^2} \right) \quad (5.15)$$

Burada s kompleks Laplace değişkeni ve w_B açısal kesim frekansıdır. Diğer parametrelerin değerleri ise altıncı derece filtre için; $w_1 = w_2 = w_3 = 1$, $\zeta_1 = 0,26$, $\zeta_2 = 0,71$ ve $\zeta_3 = 0,97$ alınmıştır. Eşitlik (5.14) ve (5.15)'te verilen transfer fonksiyonlarının modelleri, transfer fonksiyonu bloklarıyla oluşturulabildiği gibi, Şekil 5.9'da gösterilen analog filtre blokları ile de aynı görevi gören bloklar elde edilebilir.



Şekil 5.9 Yüksek ve alçak geçiren filtre modelleri.

İki filtrenin transfer fonksiyonlarının Simulink içinde kullanılmasıyla elde edilen frekans cevapları Şekil 5.10'da verilmiştir. Simülasyon sırasında filtrelerin geçici durumları nedeniyle ilk birkaç saniyede elde edilen değerler dikkate alınmamıştır.



Şekil 5.10 Birinci derece yüksek geçiren ve altıncı derece Butterworth alçak geçiren filtrelerin frekans cevapları.

İkinci filtre 8,8 Hz merkezli bir ağırlıklandırma filtresidir. Bu filtre, insan gözü tarafından takip edilen bir bobinli ve flamanlı gaz doldurulmuş lambanın (60 W-230 V ve/veya 60 W-120 V), sinüzoidal gerilim dalgalanmalarına karşı frekans cevabını simule etmek için kullanılır. Ağırlıklandırma filtresi için uygun bir transfer fonksiyonu,

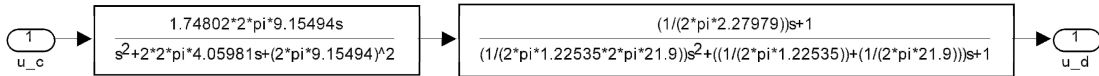
$$F(s) = \frac{k w_1 s}{s^2 + 2\lambda s + w_1^2} \cdot \frac{1 + s/w_2}{(1 + s/w_3)(1 + s/w_4)} \quad (5.16)$$

olarak gösterilmektedir. Burada s Laplace kompleks değişkenidir ve parametrelerin değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Ağırlıklandırma filtresi parametreleri ve değerleri (IEC 61000-4-15, 1997)

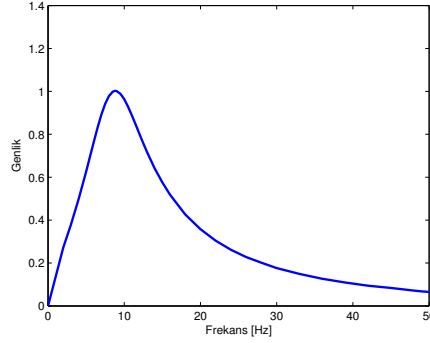
Parametreler	Değerler (230 V – 50 Hz)
k	1,74802
λ	$2 \times \pi \times 4,05981$
w_1	$2 \times \pi \times 9,15494$
w_2	$2 \times \pi \times 2,27979$
w_3	$2 \times \pi \times 1,22535$
w_4	$2 \times \pi \times 21,9$

Bu parametrelerin eşitlik (5.16)’da verilen transfer fonksiyonunda yerine yazılmasıyla Şekil 5.11’de gösterilen ağırlıklandırma filtresi modeli elde edilir.



Şekil 5.11 Ağırlıklandırma filtresi modeli.

Filtrenin transfer fonksiyonu kullanılarak elde edilen frekans cevabı ise Şekil 5.12’de verilmiştir. Bir grup insan üzerinde uygulanan deneylerden elde edilen bu eğri yardımıyla belirli frekanslarda hızlı gerilim dalgalanmaları uygulanan bir lambanın ışık akısına maruz bırakılan insanların yüzde kaçının rahatsız olduğu hesaplanabilmektedir (Wei vd., 2003; Mazadi ve Hosseinian, 2004).



Şekil 5.12 İnsan gözünü simule eden ağırlık filtresinin frekans cevabı.

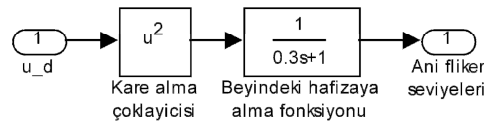
Kademe seçici, ölçülecek olan gerilim dalgalanmasının bir fonksiyonu olarak kazancı değiştirerek cihazın hassaslığına karar verir. Simulink'te modellenen flikermetre sınıf sayısı, cihazın yeteri kadar hassas ölçümler yapmasını sağladığından kademe seçiciye ihtiyaç duyulmamıştır.

Blok 4 – Kare alıcı ve düzleştirici: Göz-beyin algılamasının nonlinear karakteristiğini simule eden bir kare alma çoklayıcısından ve beyin hafızada tutma süresini simule eden 0,3 saniyeli birinci dereceden bir yüksek geçiren filtreden oluşmaktadır. Bu bloğun çıkışı ani fliker seviyesini ($P_F(t)$) verir. Birinci dereceden yüksek geçiren filtre,

$$F(s) = \frac{1}{0,3s + 1} \quad (5.17)$$

transfer fonksiyonu ile ifade edilir (Bertola vd., 2004).

Kare alıcı ve düzleştirici bloğu için Şekil 5.13'te gösterilen ve bir kare alma çoklayıcısı ile bir transfer fonksiyonundan oluşan simülasyon modeli kullanılmıştır.



Şekil 5.13 Kare alıcı ve düzleştirici modeli.

Blok 5 – İstatistiksel analiz: Ani fliker seviyesinin istatistiksel analizini gerçekleştirerek kısa ve uzun dönem fliker şiddetlerini verir.

Kısa dönem fliker şiddeti: Kısa dönem fliker şiddeti (P_{st}) 10 dakikalık gözlem periyodu ile

ölçülür ve hesabı,

$$P_{st} = \sqrt{(0,0314.P_{0,1} + 0,0525.P_{1s} + 0,0657.P_{3s} + 0,28.P_{10s} + 0,08.P_{50s})} \quad (5.18)$$

ile yapılır. Buradaki $P_{0,1}$, P_1 , P_3 , P_{10} , P_{50} değerleri, gözlem süresi içindeki zamanın % 0,1; % 1; % 3; % 10 ve % 50'sini aşan fliker seviyeleridir. Formüldeki s takıları ise daha doğru sonuçlar için düzgünleştirilmiş (smoothing) değerlerin kullanılabileceğini göstermektedir. Bu değerler aşağıdaki eşitlikler kullanılarak elde edilir:

$$P_{50s} = (P_{30} + P_{50} + P_{80})/3 \quad (5.19)$$

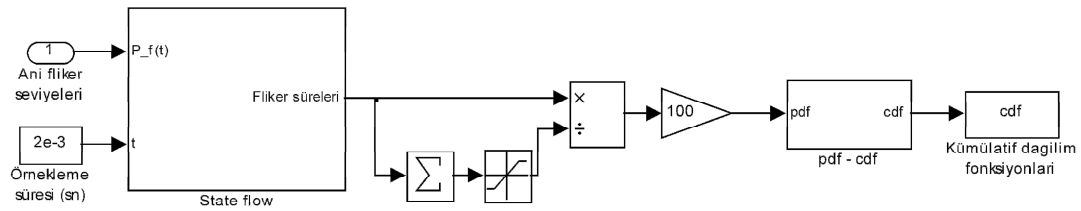
$$P_{10s} = (P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17})/5 \quad (5.20)$$

$$P_{3s} = (P_{2,2} + P_3 + P_4)/3 \quad (5.21)$$

$$P_{1s} = (P_{0,7} + P_1 + P_{1,5})/3 \quad (5.22)$$

Flikermetredeki 0,3 sn'lik hafıza süresi sabiti, $P_{0,1}$ 'in aniden değiştirilemeyeceğini ve bu zaman dilimi için düzeltme gerekmediğini gösterir.

Şekil 5.14'te gösterildiği gibi, verilen zaman sürelerini aşan fliker seviyelerinin hesaplanabilmesi için MATLAB State Flow aracından yararlanılmıştır. Burada belirli ani fliker seviyesi değerlerini aşan süreler ölçülerek, bu değerlerden kümülatif dağılım fonksiyonları elde edilmiştir. Elde edilen dağılım fonksiyonlarından enterpolasyon yardımıyla, eşitlik (5.19) ile (5.22) arasında bulunan değerler hesaplanmıştır ve bu değerlerin eşitlik (5.18)'de yerine yazılmasıyla kısa dönem fliker şiddetleri elde edilmiştir.



Şekil 5.14 Kümülatif dağılım fonksiyonları hesabı modeli.

Uzun dönem fliker şiddeti: Kısa dönem fliker şiddeti genellikle tek bir kaynağın sebep olduğu kısa süreli flikerlerin değerlendirilmesi için uygundur. Güç sistemi üzerinde sürekli değişen büyüklüklerde fliker emisyonuna sahip olan çok sayıda yük için daha uzun süreli bir değerlendirme gerekmektedir. Bu amaç için genellikle 2 saatlik bir gözlem periyodu boyunca

ölçüm yapılır ve elde edilen kısa dönem fliker şiddetleri aşağıdaki eşitlikte yerine yazılarak uzun dönem fliker şiddeti (P_{lt}),

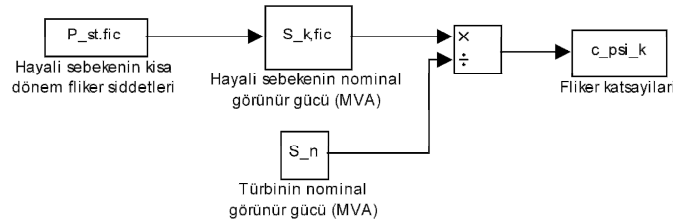
$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N P_{st,i}^3}{N}} \quad (5.23)$$

ile bulunur. Sürekli çalışma esnasında uzun dönem fliker şiddeti kısa dönem fliker şiddetine eşit kabul edildiğinden, bu değer için ayrıca bir işlem yapılmamıştır.

4) Her $P_{st, fic}$ değeri seçilen kısa devre görünür gücünden ($S_{k, fic}$) bağımsız olan bir fliker katsayısına ($c(\psi_k)$) normalize edilir (normalization). Rüzgar türbinlerinde hayali şebekede simule edilen fliker ($P_{st, fic}$) değeri, şebekenin kısa devre gücüne ($S_{k, fic}$) ve şebeke empedans açısına (ψ_k) bağlı olacaktır. $P_{st, fic}$ ile ψ_k arasındaki ilişki rüzgar türbini tipine bağlı iken, $P_{st, fic}$ yaklaşık olarak $S_{k, fic}$ ile ters orantılıdır. Bu nedenle fliker katsayısı şu şekilde tanımlanabilir:

$$c(\psi_k) = P_{st, fic} \cdot \frac{S_{k, fic}}{S_n} \quad (5.24)$$

Normalleştirme işlemi için Şekil 5.15'te gösterildiği gibi, fliker katsayısı eşitliğinin Simulink modeli kullanılmıştır. Türbinin nominal görünür gücü ile hayali şebekenin belirlenen nominal görünür gücünün girilmesiyle, her bir fliker şiddetine karşılık gelen fliker katsayısı hesaplanmıştır.



Şekil 5.15 Normalleştirme (Normalization) modeli.

5) Her bir şebeke empedans faz açısı için ağırlıklandırma (weighting) işlemi yapılarak dört farklı rüzgar hızı dağılımı için fliker katsayılarının toplam ağırlıklı dağılım fonksiyonları ($\Pr(c < x)$) hesaplanır. Ölçümler yıllık ortalama rüzgar hızının Rayleigh dağılımına uyan rüzgar hızlarına sahip bir bölgede gerçekleştirilmişse, bu fonksiyonlar elde edilen fliker katsayılarının dağılımını temsil eder. Rayleigh dağılımı, genellikle yıllık rüzgar hızı dağılımına uyan bir olasılık dağılımıdır. Bu dağılım,

$$F(v) = 1 - e^{\left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{v_a}\right)^2\right)} \quad (5.25)$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada,

$F(v)$: Rüzgar hızı için Rayleigh kümülatif olasılık dağılım fonksiyonu,

v_a : Merkez yüksekliğinde yıllık ortalama rüzgar hızı,

v : Rüzgar hızıdır.

Ağırlıklandırma faktörünün bulunması için öncelikle i 'ninci rüzgar hızı aralığı içindeki ölçülen fliker katsayılarının meydana gelme frekansları,

$$f_{m,i} = \frac{N_{m,i}}{N_m} \quad (5.26)$$

eşitliğine göre hesaplanır. Burada,

$N_{m,i}$: i 'ninci rüzgar hızı aralığında ölçülen fliker katsayısı değerlerinin sayısı,

N_m : Fliker katsayısı değerlerinin toplam sayısıdır.

i 'ninci rüzgar hızı aralığı içindeki rüzgar hızlarının meydana gelme frekansları Rayleigh dağılımına göre,

$$f_{y,i} = \exp\left(-\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{v_i - 0,5}{v_a}\right)^2\right) - \exp\left(-\frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{v_i + 0,5}{v_a}\right)^2\right) \quad (5.27)$$

şeklinde hesaplanır. Burada,

v_i : i 'ninci rüzgar hızı aralığının orta noktası,

v_a : Varsayılan yıllık ortalama rüzgar hızıdır.

Daha sonra $v_{\text{cut-in}}$ ile 15 m/s arasındaki her 1 m/s'lik rüzgar hızı için $f_{y,i}$ ve $f_{m,i}$ 'nin hesaplanan değerleri kullanılarak ağırlık faktörleri,

$$w_i = \frac{f_{y,i}}{f_{m,i}} \quad (5.28)$$

ile belirlenir. Son olarak ölçülen fliker katsayısı $c(\psi_k, v_a)$ değerlerinin toplam ağırlıklı dağılımı bulunur ve fliker katsayısı bu dağılımın 99. yüzdeliği olarak belirlenir. Fliker katsayısı

değerlerinin toplam ağırlıklı dağılımı,

$$\Pr(c < x) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{bin}} w_i \cdot N_{m,i,c < x}}{\sum_{i=1}^{N_{bin}} w_i \cdot N_{m,i}} \quad (5.29)$$

olarak bulunur. Burada,

$N_{m,i,c < x}$: i'nci rüzgar hızı aralığında x değerinden küçük veya x değerine eşit olan fliker katsayısı değerlerinin sayısı,

N_{bin} : Rüzgar hızı aralıklarının toplam sayısıdır.

Yapılan ölçümler yalnızca 15 m/s'ye kadar gerekmektedir. Rüzgar hızının Rayleigh dağılımına uygun olduğu varsayılarak 15 m/s'nin $v_a = 6$ m/s için 99. yüzdeliğe ve $v_a = 7,5$ m/s, 8,5 m/s, 10 m/s için sırasıyla % 96, % 91 ve % 83'e karşılık geldiği hesaplanabilir. Bu nedenle $c(\psi_k, v_a)$ değerinin veri setinin 99. yüzdeliği olarak belirlenmesine rağmen, 7,5 m/s, 8,5 m/s ve 10 m/s yıllık ortalama rüzgar hızlarına sahip Rayleigh dağılımlı rüzgar hızı dağılımları için daha düşük yüzdeler görülebilir. Ancak $v_a = 7,5$ m/s, 8,5 m/s ve 10 m/s için 99. yüzdeleri sağlamak amacıyla 15 m/s'den büyük rüzgar hızları için ölçüm yaparak veri setini genişletmek, gereken test zamanını ve dolayısıyla maliyetini çoğu kez büyük ölçüde artırır. Dört rüzgar hızı için olasılıklar ve yüzdeler Çizelge 5.2'de verilmiştir. Burada ölçüm aralığı dışındaki tüm fliker katsayılarının 99. yüzdelerden daha düşük olması en iyi durum yüzdeliği olarak, daha yüksek olması ise en kötü durum yüzdeliği olarak adlandırılmıştır.

Çizelge 5.2 Farklı rüzgar hızları için olasılıklar ve yüzdeler (IEC 61400-21, 2001)

v_a (m/s)	6,0	7,5	8,5	10,0
$\Pr(v < 3 \text{ m/s})$ (%)	17,8	11,8	9,3	6,8
$\Pr(3 \text{ m/s} < v < 15 \text{ m/s})$ (%)	81,4	83,9	82,0	76,1
$\Pr(v > 15 \text{ m/s})$ (%)	0,7	4,3	8,7	17,1
En iyi durum yüzdeliği (%)	99,2	99,2	99,2	99,2
En kötü durum yüzdeliği (%)	98,4	94,8	90,5	82,2

Ağırlıklandırma işlemlerindeki değerleri hesaplamak için çok sayıda tablo kullanıldığından,

bu işlemler için MS Excel ortamı tercih edilmiştir. MS Excel kullanılarak yapılan işlemler Bölüm 6’da bir uygulama üzerinde gösterilmiştir.

6) Her bir toplam dağılım için fliker katsayısının 99. yüzdeliği, değerlendirme işleminde kullanılacak olan tabloda yerine yazılır.

Şekil 5.2’deki değerlendirme prosedürü ise belirli bir bölgedeki fliker katsayılarının bulunması için yapılacak işlemlerden oluşur.

1) Ölçme işlemi sonucunda oluşturulan tablodan, bölgenin yıllık ortalama rüzgar hızına ve türbinin bağlanacağı şebekenin empedans faz açısına göre uygun fliker katsayısı değeri seçilir. Eğer bölgenin rüzgar hızı ara bir değer ise bir üst değer kullanılır. Şebeke empedans faz açısının ara bir değer olması durumunda ise bu değere karşılık gelen fliker katsayısı, empedans açısının bir alt ve bir üst değerlerine karşılık gelen fliker katsayıları arasında enterpolasyon yapılarak bulunur.

2) Sürekli çalışma sırasında tek bir rüzgar türbininin 99. yüzdelik fliker emisyonu,

$$P_{st} = P_{lt} = c(\psi_k, v_a) \cdot \frac{S_n}{S_k} \quad (5.30)$$

eşitliği yardımıyla bulunabilir. Burada,

$c(\psi_k, v_a)$: Rüzgar türbini merkez yüksekliğinde bölgenin yıllık ortalama rüzgar hızı ve ortak bağlantı noktasındaki şebeke empedans faz açısı için rüzgar türbininin fliker katsayısı,

S_n : Rüzgar türbininin nominal görünür gücü,

S_k : Ortak bağlantı noktasındaki kısa devre görünür gücüdür.

Tablodan seçilen değerlerin ve rüzgar türbininin nominal görünür gücü ile ortak bağlantı noktasında kısa devre görünür gücünün eşitlik (5.30)’da yerine yazılmasıyla, rüzgar türbininin sürekli çalışma sırasındaki fliker emisyonları bulunmuş olur.

Uzun dönem fliker emisyonu IEC 61000-3-7’ye göre 12 ardışık kısa dönem değerlerin kübik ortalaması olarak hesaplanabilir. Bir rüzgar türbinin sebep olduğu fliker emisyonunun rüzgar hızının bir fonksiyonu olduğu ve rüzgar şartlarının 2 saatlik bir süre boyunca aynı kalmasının olası olduğu düşünülürse, 12 ardışık kısa dönem değerlerin eşit olma ihtimali yüksektir. Bu nedenle rüzgar türbinleri için uzun dönem fliker şiddeti, kısa dönem değerine eşit olarak kabul

edilir.

3) Eğer ortak bağlantı noktasına bağlanan türbin sayısı birden fazla ise bu durumda fliker emisyonu,

$$P_{st\Sigma} = P_{lt\Sigma} = \frac{1}{S_k} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{wt}} (c_i(\psi_k, v_a) \cdot S_{n,i})^2} \quad (5.31)$$

eşitliği kullanılarak tahmin edilebilir. Burada,

$c_i(\psi_k, v_a)$: Tek rüzgar türbininin fliker katsayısı,

$S_{n,i}$: Tek rüzgar türbininin nominal görünür gücü,

N_{wt} : Ortak bağlantı noktasına bağlı rüzgar türbinlerinin sayısıdır.

5.2.2 Anahtarlama İşlemleri

Karakteristikler aşağıdaki anahtarlama türleri için ifade edilmelidir:

- Rüzgar türbininin cut-in rüzgar hızında ilk çalışması.
- Rüzgar türbininin nominal rüzgar hızında ilk çalışması.
- Generatörler arasındaki anahtarlamanın en kötü durumu (yalnızca birden fazla generatöre veya çok sargılı bir generatöre sahip olan rüzgar türbinleri için geçerlidir).

Generatörler arasındaki anahtarlamanın en kötü durumu, fliker adım faktörü açısından en yüksek fliker adım faktörünü ve gerilim değişim faktörü açısından en yüksek gerilim değişim faktörünü veren anahtarlama türüdür.

Yukarıdaki her bir anahtarlama türü için aşağıdaki parametrelerin değerleri ifade edilmelidir:

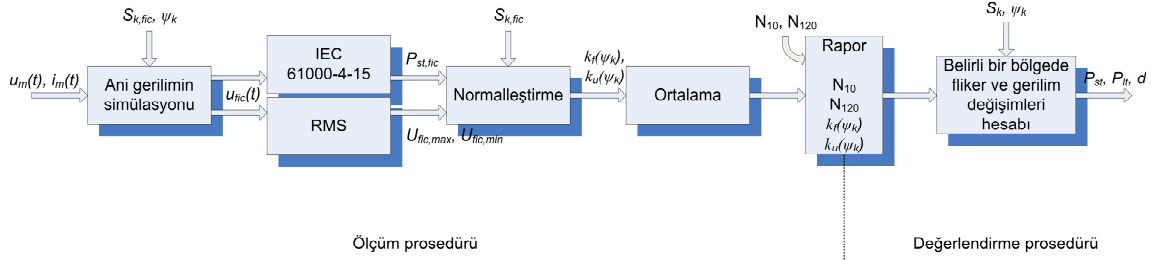
- 10 dakikalık bir zaman içerisindeki maksimum anahtarlama sayısı (N_{10})
- 2 saatlik bir zaman içerisindeki maksimum anahtarlama sayısı (N_{120})
- $\psi_k = 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ$ ve 85° şebeke empedans faz açıları için fliker adım faktörü ($k_f(\psi_k)$)
- $\psi_k = 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ$ ve 85° şebeke empedans faz açıları için gerilim değişim faktörü ($k_u(\psi_k)$)

$k_f(\psi_k)$ ve $k_u(\psi_k)$ parametreleri anahtarlama sırasında ölçülen değerlerden hesaplanırken, N_{10} ve N_{120} değerleri üreticilerin bilgisine dayanmaktadır. Anahtarlama türünün maksimum sayısı yukarıda belirtilen her bir anahtarlama türü için belirlenmelidir. Rüzgar türbini üreticisinin bu sayıları sağlayamaması durumunda aşağıdaki değerler varsayılabilir:

- $N_{10} = 10$ ve $N_{120} = 120$ (a ve c türü anahtarlama türleri için)
- $N_{10} = 1$ ve $N_{120} = 12$ (b türü anahtarlama türleri için)

Normalde rüzgar türbininin kontrol sistemine bağlı olarak 2 saat içindeki anahtarlama maksimum sayısı 10 dakika içindeki anahtarlama maksimum sayısının 12 katından daha az olabilir.

Anahtarlama durumları için ölçüm ve değerlendirme işlemleri Şekil 5.16’da gösterilmektedir.



Şekil 5.16 Rüzgar türbininin anahtarlama işlemleri sırasında meydana gelen gerilim değişimleri ve fliker emisyonu için ölçüm ve değerlendirme işlemleri (IEC 61400-21, 2001).

Şekil 5.16’daki ölçüm prosedürü, aşağıda maddeler halinde detaylı bir biçimde verilmiştir:

1) Belli bir sayıda gerilim ve akım zaman dizisi ($u_m(t)$ ve $i_m(t)$) her bir anahtarlama türü için ölçülür. Ölçümlerin sonuçlarının normal ortalama şartlar için bir örnek teşkil etmesini sağlamak amacıyla her durum beş defa gerçekleştirilmelidir.

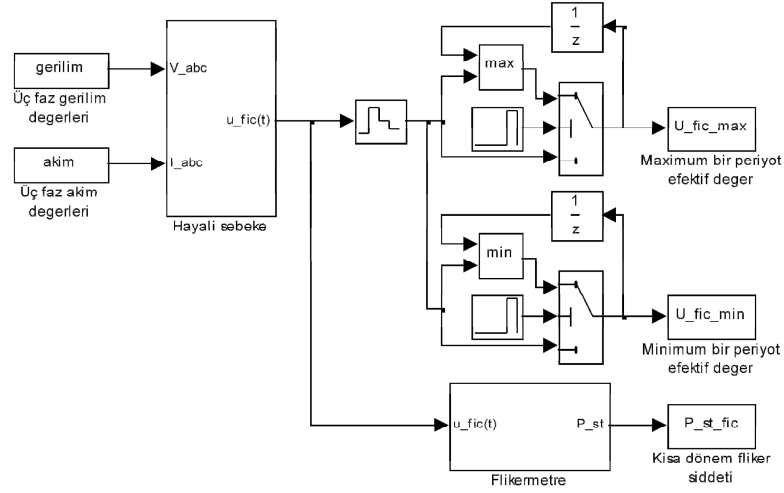
Rüzgar hızı sürekli çalışmada belirtildiği gibi ölçülmelidir ve 10 dakikalık ortalama rüzgar hızının anahtarlama işlemi boyunca gerekli rüzgar hızının ± 2 m/s aralığı içinde kalması gerekmektedir. Gerilim ve akım ölçümlerinin cut-off frekansı ise en az 1500 Hz olmalıdır.

2) Ölçülen zaman dizisi setleri, dört farklı şebeke empedans faz açısı için gerilim dalgalanmalarını simüle etmek amacıyla hayali şebeke üzerinde giriş olarak kullanılır. Hayali şebekenin modeli, sürekli çalışma için kullanılan model ile aynıdır.

3) Her bir simüle edilen ani gerilim zaman dizisi, fliker emisyon değerini elde etmek amacıyla IEC 61000-4-15’te tanımlanan gerilim fliker algoritmasına uygulanır. Ayrıca gerilimin maksimum ve minimum efektif değerlerini ($U_{fic,max}$ ve $U_{fic,min}$) belirlemek amacıyla da bu zaman dizileri giriş olarak kullanılır.

Hayali şebeke ve flikermetre için kullanılan modeller, sürekli çalışmada detaylı olarak açıklandığından Şekil 5.17’de sadece birer blok olarak gösterilmiştirler. Burada kısa dönem fliker şiddeti flikermetrenin çıkışından belirlenmekte, sanal şebekenin maksimum ve minimum değerleri ise anahtarlama sürelerinin zamanlayıcı (timer) bloğu ile girilmesiyle

hesaplanmaktadır.



Şekil 5.17 Anahtarlama işlemlerinde fliker ve maksimum - minimum hayali şebeke gerilimi hesabı modeli.

4) Her $P_{st,fic}$ değeri bir fliker adım faktörüne ve her gerilim değişimi ($U_{fic,max} - U_{fic,min}$) de bir gerilim değişim faktörüne normalize edilir.

Fliker adım faktörü: Anahtarlama işlemi ile aynı fliker şiddetine sahip eşdeğer bir gerilim adımını hesaplamak için kullanılabilecek şekilde tanımlanır. Normal tanım,

$$d_{max} = k_f(\psi_k) \cdot \frac{S_n}{S_{k,fic}} \cdot 100 \quad (5.32)$$

şeklinde. Burada d_{max} nominal gerilimin yüzdesi içindeki eşdeğer gerilim adımıdır. IEC 61000-3-3 analitik yöntemi uygulanınca bir gerilim adımı (d_{max}) fliker etki zamanını,

$$t_f = 2,3 \cdot d_{max}^{3,2} \quad (5.33)$$

verir. Bu fliker etki zamanı bir gözlem süresi içinde (T_p) fliker şiddetini,

$$P_{st,fic} = \left(\frac{\sum t_f}{T_p} \right)^{1/3,2} \quad (5.34)$$

olarak verir. Tek bir fliker etki zamanı için aşağıdaki eşitlik elde edilir:

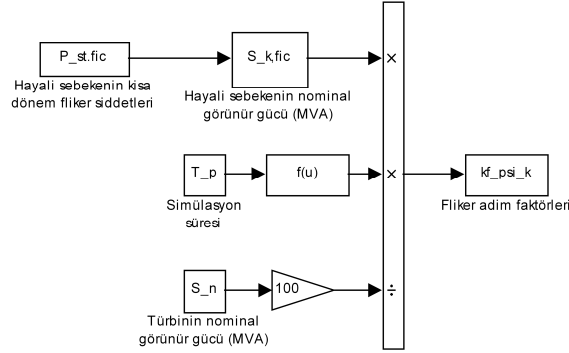
$$P_{st,fic} = 100 \cdot k_f(\psi_k) \cdot \frac{S_n}{S_{k,fic}} \left(\frac{2,3}{T_p} \right)^{1/3,2} \quad (5.35)$$

Bu sonuç kullanılarak fliker adım faktörü,

$$k_f(\psi_k) = \frac{S_{k, fic}}{100 \cdot S_n} \left(\frac{T_p}{2,3} \right)^{1/3,2} \cdot P_{st, fic} \quad (5.36)$$

şeklinde tanımlanabilir. Eşitlik (5.36)'daki gözlem süresi (T_p), simule edilen gerilim zaman dizilerinin saniye olarak uzunluğudur. Bu süre hava boşluğundan kaynaklanan güç dalgalanmalarını hesaba katmayacak kadar kısa, ancak anahtarlama işleminin etkilerinin azalacağı kadar da uzun bir ölçüm süresi olmalıdır.

Fliker adım faktörü için eşitlik (5.36)'nın Simulink elemanları ile oluşturulmuş modeli kullanılmıştır. Şekil 5.18'de gösterilen bu model içerisine gerekli parametrelerin girilmesiyle fliker adım faktörleri hesaplanmaktadır.



Şekil 5.18 Fliker adım faktörü hesabı modeli.

Gerilim değişim faktörü: Anahtarlama işlemlerinden kaynaklanan bağıl gerilim değişimi (Δu), şebekenin kısa devre gücüne ve şebeke empedans açısına bağlı olacaktır. Δu ile ψ_k arasındaki ilişki rüzgar türbininin teknolojisine bağlı iken, Δu yaklaşık olarak $S_{k, fic}$ ile ters orantılıdır. Bu nedenle bağıl gerilim değişimi,

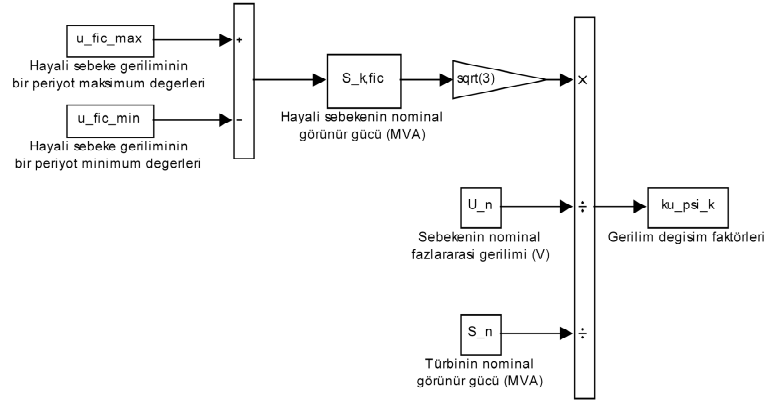
$$\Delta u = k_u(\psi_k) \cdot \frac{S_n}{S_{k, fic}} \quad (5.37)$$

şeklinde tanımlanabilir. Şebeke üzerinde simule edilen gerilim değişiminin yerine yazılmasıyla gerilim değişim faktörü,

$$k_u(\psi_k) = \sqrt{3} \cdot \frac{U_{fic, max} - U_{fic, min}}{U_n} \cdot \frac{S_{k, fic}}{S_n} \quad (5.38)$$

şeklinde elde edilir. Burada $U_{fic,max}$ ve $U_{fic,min}$, hayali şebeke üzerinde simule edilen faz-nötr efektif gerilimlerinin sırasıyla maksimum ve minimum değerleridir.

Gerilim değişim faktörü eşitlik (5.38) kullanılarak modellenmiştir. Hayali şebeke ve türbin için belirlenen değerlerle, gerilim değişim faktörü Şekil 5.19'da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.



Şekil 5.19 Gerilim değişim faktörü hesabı modeli.

5) Her bir şebeke empedans faz açısı için, ölçülen fliker adım faktörlerinin ve gerilim değişim faktörlerinin ortalaması alınır. Sürekli çalışma için belirtilen nedenlerden dolayı bu işlem ve daha sonrasındaki işlemler için MS Excel ortamı kullanılmıştır. Bu işlemler Bölüm 6'da bir uygulama üzerinde gösterilmiştir.

6) Ortalaması alınan fliker adım faktörleri ve gerilim değişim faktörleri daha sonra 10 dakika içindeki anahtarlama maksimum sayısı ve 120 dakika içindeki anahtarlama maksimum sayısı ile birlikte her anahtarlama türü için tablo üzerinde kaydedilir.

Anahtarlama işlemlerinde değerlendirme prosedürü yardımıyla fliker emisyonu ve bağlı gerilim değişimi belirlenir.

Fliker emisyonu: Tek bir rüzgar türbininin anahtarlama işlemlerinden kaynaklanan fliker emisyonu,

$$P_{st} = 18 \cdot N_{10}^{0,31} \cdot k_f(\psi_k) \cdot \frac{S_n}{S_k} \quad (5.39)$$

$$P_{lt} = 8 \cdot N_{120}^{0,31} \cdot k_f(\psi_k) \cdot \frac{S_n}{S_k} \quad (5.40)$$

eşitlikleri kullanılarak tahmin edilebilir. Burada $k_f(\psi_k)$, ortak bağlantı noktasında verilen şebeke empedans faz açısı için rüzgar türbininin fliker adım faktörünü göstermektedir. Daha fazla rüzgar türbininin ortak bağlantı noktasına bağlanması durumunda ise toplam fliker emisyonu,

$$P_{st\Sigma} = \frac{18}{S_k} \cdot \left(\sum_{i=1}^{N_{wt}} N_{10,i} \cdot (k_{f,i}(\psi_k) \cdot S_{n,i})^{3,2} \right)^{0,31} \quad (5.41)$$

$$P_{lt\Sigma} = \frac{8}{S_k} \cdot \left(\sum_{i=1}^{N_{wt}} N_{120,i} \cdot (k_{f,i}(\psi_k) \cdot S_{n,i})^{3,2} \right)^{0,31} \quad (5.42)$$

eşitlikleri yardımıyla tahmin edilebilir. Burada,

$N_{10,i}$ ve $N_{120,i}$: Bir rüzgar türbininin sırasıyla 10 dakika ve 2 saat içindeki anahtarlama işlemlerinin sayısı,

$k_{f,i}(\psi_k)$: Bir rüzgar türbininin fliker adım faktörü,

$S_{n,i}$: Bir rüzgar türbininin nominal gücüdür.

Ayrıca eğer rüzgar türbini tesisi ile ilgili anahtarlama işlemlerinin toplam sayısını sınırlayan genel bir kontrol sistemi varsa, bunun etkisi de hesaba katılmalıdır.

Bağlı gerilim değişimi: Tek bir rüzgar türbininin anahtarlama işlemlerinden kaynaklanan bağlı gerilim değişimi,

$$d = 100 \cdot k_u(\psi_k) \cdot \frac{S_n}{S_k} \quad (5.43)$$

eşitliği kullanılarak tahmin edilebilir. Burada,

d : Bağlı gerilim değişimi (%),

$k_u(\psi_k)$: PCC’de verilen ψ_k için rüzgar türbininin gerilim değişim faktörüdür.

Daha fazla rüzgar türbininin ortak bağlantı noktasına bağlanması durumunda bile, iki rüzgar türbininin aynı anda bir anahtarlama işlemi gerçekleştirmesi olası olmadığından, bu durumda gerilim değişim faktörünü değerlendirmek için bir toplama işlemine gerek yoktur.

5.3 Harmonikler

Direkt bağılı senkron veya asenkron generatörlü rüzgar türbinleri, çok sınırlı harmonik akımlar üretirler ve bu yüzden bu türbinler için harmonik analizlerin yapılmasına ihtiyaç duyulmaz. Ayrıca IEC 61400-21 standardında kısa süreli harmonik emisyonlarının genellikle problemlere neden olduğu görülmediğinden, “Soft-start” güç elektroniği üniteleri kullanan rüzgar türbinleri için de bir değerlendirme bulunmamaktadır. Bir güç elektroniği konverterine sahip rüzgar türbinlerinde ise harmonik akım emisyonu iki değer olarak belirlenmelidir. Bu değerlerden ilki, sürekli çalışma sırasında temel şebeke frekansının 50 katına kadar olan tekil harmonik akımlardır ve diğeri ise maksimum toplam harmonik akım distorsiyonudur. Tekil harmonik akımları, maksimum tekil harmonik akımı veren çıkış gücünde her bir harmonik derecesi için 10 dakikalık ortalama veriler şeklinde olmalıdır ve değerler nominal akımın yüzdesi olarak bir tablo içerisinde verilmelidir. Herhangi bir harmonik derecesi için nominal akımın % 0,1’inden aşağı değerdeki harmonik akımlarının belirtilmesine gerek yoktur.

Bir güç elektroniği dönüştürücüsüne sahip olan rüzgar türbinleri için harmonik emisyonlarının uygulanabilir limitleri ve harmonik akım distorsiyonlarının toplamı IEC 61000-3-6’da verilen bilgiler yardımıyla bulunabilir. Bu standarda göre belli bir sayıda rüzgar türbini içeren bir tesisten kaynaklanan ortak bağlantı noktasındaki harmonik akımlar,

$$I_{h\Sigma} = \sqrt[\beta]{\sum_{i=1}^{N_{wt}} \left(\frac{I_{h,i}}{n_i} \right)^\beta} \quad (5.44)$$

eşitliği kullanılarak tahmin edilebilir. Burada,

N_{wt} : Ortak bağlantı noktasına bağlı rüzgar türbinlerinin sayısı,

$I_{h\Sigma}$: Ortak bağlantı noktasındaki h’ninci mertebedeki harmonik akım distorsiyonu,

n_i : i’ninci rüzgar türbinindeki transformatörün oranı,

$I_{h,i}$: i’ninci rüzgar türbininin h’ninci mertebedeki harmonik akım distorsiyonu,

β : Çizelge 5.3’te verilen parametredir.

Eğer bir rüzgar çiftliği aynı tip türbinlerden oluşuyorsa ve bu türbinlerin konverterleri aynı anda anahtarlanıyorsa, harmoniklerin aynı fazda olmaları olasıdır ve tüm harmonik dereceleri için β parametresi 1 olarak alınabilir.

Çizelge 5.3 IEC 61000-3-6'ya göre β değerlerinin belirlenmesi (IEC 61400-21, 2001)

Harmonik derecesi	β
$h < 5$	1,0
$5 \leq h \leq 10$	1,4
$h > 10$	2,0

Rüzgar türbinlerinin sebep olduğu harmonikler çok sınırlı olduğundan ve hesabı eşitlik (5.44) ile tahmini olarak yapıldığından bir modele ihtiyaç duyulmamıştır. Bunun yerine Bölüm 6'da rüzgar türbinlerinde kullanılan bir güç konverterinin neden olduğu harmonik emisyonları verilerek, bu konverterin toplam harmonik distorsiyonu hesaplanmıştır.

6. TEST SONUÇLARI ve YORUMLAR

Güç kalitesi karakteristiklerinin değerlendirilmesi ile ilgili bir uygulama için aşağıda özellikleri verilen rüzgar türbini kullanılmıştır.

Rüzgar türbini tipi: Stall kontrollü, şebekeye direkt bağlı endüksiyon generatörlü

Nominal güç: 2400 kW

Nominal görünür güç: 2445 kVA

Nominal gerilim: 690 V

Bu türbinin, farklı özelliklerde seçilen bölge ve şebekeler için güç kalitesi karakteristiklerine olan etkileri; kararlı hal gerilimi (steady state voltage), sürekli çalışma (continuous operations) ve anahtarlama işlemleri (switching operations) başlıkları altında incelenmiştir.

6.1 Kararlı Hal Gerilimi

Kararlı hal gerilim modelinde şebekenin kısa devre gücünün 120 MVA ve şebeke empedans faz açısının 60 derece seçilmesiyle hesaplanan kararlı hal gerilim değişimi % 0,7 olarak bulunmuştur. Bu nedenle kararlı hal gerilim değişimi sınırı % 2 olan ülkeler için bu tipte 3 adet türbinin (Yük akış analizleri yardımıyla bulunan değerlerin daima bu modelle bulunan değerlerden daha düşük çıkması göz önüne alınırsa) şebekeye bağlanması uygundur. Şebekenin kısa devre gücünün artmasıyla kararlı hal gerilim değişimi azaltılabilir. Örneğin 200 MVA kısa devre gücüne sahip bir şebekeye, aynı empedans faz açısı ve gerilim değişim sınırı için 4 adet türbinin bağlanması durumunda sınır değerler aşılmamaktadır.

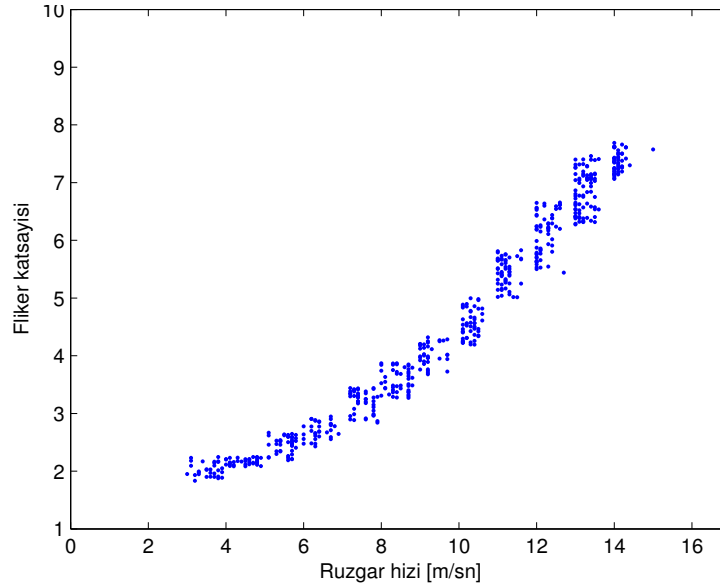
Kararlı hal gerilim değişiminde türbin sayısı üzerindeki en büyük etken empedans faz açısıdır. Kısa devre gücünün 120 MVA olduğu ilk durum için faz açısının 55 derece olması, bağlı gerilim değişimini % 0,9'a yükseltecektir ve böylece şebekeye bağlanabilecek türbin sayısı 2'ye düşecektir. Empedans faz açısının artması durumunda ise eşitlik (4.1) dikkate alınarak, bağlı gerilim düşümünün 79 dereceye kadar azalacağı ve şebekeye bağlanabilecek türbin sayısının artacağı söylenebilir. Bu açı değerinden daha büyük değerlerde ise türbinlerin şebeke bağlantısıyla gerilim düşmeleri görülmeye başlandığından türbin sayısı tekrar azalmaya başlayacaktır.

6.2 Gerilim Dalgalanmaları

Gerilim dalgalanmaları için gerçekleştirilen uygulamalar, sürekli çalışma ve anahtarlama başlıkları altında gösterilmiştir.

6.2.1 Sürekli Çalışma

Rüzgar türbinlerinde sürekli çalışma esnasındaki fliker katsayılarının hesabı için Bölüm 5'te gösterilen modeller kullanılmıştır. Özellikleri yukarıda belirtilen rüzgar türbininin $\psi_k = 50^\circ$ şebeke empedans faz açısı için, yıllık ortalama rüzgar hızının bir fonksiyonu olarak hesaplanan fliker katsayıları Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Diğer şebeke empedans faz açılarına ait fliker katsayıları ve bu katsayılardan elde edilen değerler aynı işlemleri tekrarlamamak için gösterilmemiştir.



Şekil 6.1 Rüzgar hızının fonksiyonu olarak fliker katsayıları ($\psi_k=50^\circ$ için).

Rüzgar türbininin cut-in rüzgar hızı bu örnekte 3 m/s'dir. Fliker katsayısının belirlenmesinde yalnızca cut-in rüzgar hızının üstündeki ve 15 m/s'nin altındaki ölçümler kullanılmıştır. Bu aşamadan sonra öncelikle rüzgar hızının 1 m/s aralıklarında fliker katsayıları sınıflandırılmıştır ve her rüzgar hızı aralığında ölçümlerin sayıları belirlenmiştir. Rüzgar hızı aralıkları, her aralıktaki ölçümlerin sayısı, her rüzgar hızı aralığı için ölçülen fliker katsayılarının bağıl meydana gelme frekansı ve $v_a = 6$ m/s, 7,5 m/s, 8,5 m/s ve 10 m/s yıllık ortalama rüzgar hızları için Rayleigh dağılımları Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1 Cut-in rüzgar hızı ile 15 m/s arasındaki her bir rüzgar hızı aralığı için ölçümlerin ($N_{m,i}$) ve meydana gelme frekanslarının ($f_{m,i}$ ve $f_{y,i}$) sayısı

Rüzgar hızı aralığı (m/s)	Ölçümlerin sayısı $N_{m,i}$	$f_{m,i}$ (%)	$f_{y,i}$ (%) 6 m/s	$f_{y,i}$ (%) 7,5 m/s	$f_{y,i}$ (%) 8,5 m/s	$f_{y,i}$ (%) 10 m/s
3 - <4	30	5,27	11,64	8,21	6,64	4,98
4 - <5	36	6,33	12,57	9,44	7,83	6,02
5 - <6	41	7,21	12,37	10,04	8,59	6,80
6 - <7	34	5,98	11,26	10,04	8,91	7,32
7 - <8	46	8,08	9,58	9,53	8,83	7,56
8 - <9	47	8,26	7,67	8,65	8,41	7,56
9 - <10	37	6,50	5,80	7,52	7,74	7,34
10 - <11	51	8,96	4,15	6,29	6,88	6,93
11 - <12	55	9,67	2,82	5,07	5,94	6,39
12 - <13	60	10,54	1,82	3,95	4,97	5,75
13 - <14	80	14,06	1,11	2,97	4,05	5,07
14 - <15	52	9,14	0,65	2,16	3,21	4,37
Toplam N_m	569					

Daha sonra her rüzgar hızı aralığı için hesaplanan ağırlıklandırma faktörleri Çizelge 6.2’de gösterilmiştir. Ağırlıklandırma faktörü, rüzgar hızlarının meydana gelme frekansı ile ölçülen fliker katsayılarının bağıl meydana gelme frekansı arasındaki orandır.

Çizelge 6.2 Her bir rüzgar hızı aralığı için ağırlıklandırma faktörleri

Rüzgar hızı aralığı (m/s)	w_i 6 m/s	w_i 7,5 m/s	w_i 8,5 m/s	w_i 10 m/s
3 - <4	2,21	1,56	1,26	0,95
4 - <5	1,99	1,49	1,24	0,95
5 - <6	1,72	1,39	1,19	0,94
6 - <7	1,88	1,68	1,49	1,22
7 - <8	1,19	1,18	1,09	0,94
8 - <9	0,93	1,05	1,02	0,92
9 - <10	0,89	1,16	1,19	1,13
10 - <11	0,46	0,70	0,77	0,77
11 - <12	0,29	0,52	0,61	0,66
12 - <13	0,17	0,37	0,47	0,55
13 - <14	0,08	0,21	0,29	0,36
14 - <15	0,07	0,24	0,35	0,48

Çizelge 6.3’de her bir rüzgar hızı dağılımı için gösterilen ağırlıklandırma faktörünün toplamaları ise her aralık için ağırlıklandırma faktörünün, ölçüm sayısı ile çarpılmasıyla ve elde edilen değerlerin toplanmasıyla hesaplanır.

Çizelge 6.3 Her bir rüzgar hızı dağılımı için ağırlıklandırma faktörünün toplamaları

v_a (m/s)	6,0	7,5	8,5	10,0
$\sum_{i=1}^{N_{bin}} w_i \cdot N_{m,i}$	463,36	477,22	466,66	432,97

Sonraki adımda, ölçümler fliker katsayılarına göre sıralanır. Sıralanmış fliker katsayıları, en üst satırın ölçüm yapılan rüzgar hızı aralıklarındaki fliker katsayılarının maksimum değerini verdiği Çizelge 6.4’te gösterilmiştir. Fliker katsayılarının maksimumu 100 yüzdelerdir. Bunun anlamı, ağırlıklandırılmış kümülatif dağılım faktörünün ($Pr(c < 7,690)$) bire eşit olmasıdır.

Çizelge 6.4'ün sonraki satırları için ilgili rüzgar hızına karşılık gelen ağırlıklandırma faktörleri, ağırlıklandırma faktörlerinin toplamına bölünmektedir ve bu değer, bir üst satırdaki dağılım faktöründen çıkartılarak tablo tamamlanmaktadır.

Çizelge 6.4 Her bir rüzgar hızı dağılımı için fliker katsayılarının toplam ağırlıklı dağılımı

Sıralanan fliker katsayıları	İlgili rüzgar hızı (m/s)	Pr(c<x) 6 m/s	Pr(c<x) 7,5 m/s	Pr(c<x) 8,5 m/s	Pr(c<x) 10 m/s
7,690	14,0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
7,660	14,2	0,9998	0,9995	0,9992	0,9989
7,630	14,0	0,9997	0,9990	0,9985	0,9978
7,617	14,0	0,9995	0,9985	0,9977	0,9967
7,616	14,0	0,9994	0,9980	0,9970	0,9956
7,615	14,0	0,9992	0,9975	0,9962	0,9945
7,609	14,0	0,9991	0,9970	0,9955	0,9934
7,559	14,1	0,9989	0,9965	0,9947	0,9923
7,514	14,1	0,9988	0,9960	0,9940	0,9912
7,504	14,2	0,9986	0,9955	0,9932	0,9901
7,499	14,2	0,9985	0,9951	0,9925	0,9890
7,489	14,1	0,9983	0,9946	0,9917	0,9879
7,461	13,4	0,9982	0,9941	0,9910	0,9867
7,443	14,1	0,9980	0,9936	0,9903	0,9859
7,432	14,0	0,9978	0,9931	0,9896	0,9848
:	:	:	:	:	:
7,400	13,0	0,9969	0,9903	0,9853	0,9787
:	:	:	:	:	:
7,137	14,0	0,9901	0,9703	0,9559	0,9367

İlgili 99. yüzdellikler Çizelge 6.4 içinde koyu renkle işaretlenmiştir. Bu 99. yüzdellikler ölçüm raporunda 50° şebeke empedans faz açısı için fliker katsayılarını vermektedir. Diğer şebeke

empedans faz açıları içinde aynı işlemlerin yapılmasıyla Çizelge 6.5 elde edilir.

Çizelge 6.5 Sürekli çalışmada fliker katsayısı

Ψ_k (der.)	30	50	70	85
V_a (m/s)	Fliker katsayısı			
6,0	8,2	7,1	6,2	7,5
7,5	8,3	7,4	6,3	7,6
8,5	8,6	7,4	6,7	8,1
10,0	8,7	7,5	6,8	8,4

Çizelge 6.5'te kaydedilen fliker katsayıları, cut-in rüzgar hızı ile 15 m/s rüzgar hızı arasındaki değerlerin 99. yüzdeliğidir. Bu çizelge sayesinde özellikleri verilen türbinin, belirli bir bölgede şebekeye bağlanması sonucunda oluşacak güç kalitesi problemleri hesaplanabilir. Kararlı hal gerilim değişimi hesabında ilk durumda kullanılan şebeke kısa devre gücü ve empedans faz açısı için; yıllık ortalama rüzgar hızı 8,4 m/s olan bir bölgede kısa dönem fliker şiddeti tek rüzgar türbini için 0,14 olarak bulunmuştur. Ayrıca bu bölgenin nominal şebeke gerilimi 34,5 kV ve fliker emisyon sınırı 0,3 olarak kabul edilmiştir. Hesaplanan kısa dönem fliker şiddeti, sürekli çalışmada uzun dönem fliker şiddetine eşittir. Rüzgar çiftliğinin sadece bu tipte türbinlerden oluşması durumunda toplam fliker şiddeti, türbin sayısının karekökü ile bulunan fliker şiddetinin çarpılması ile elde edilir. Buna göre fliker emisyon sınırı aşılmadan belirlenen şebekeye bağlanabilecek türbin sayısı 4 olarak hesaplanmaktadır. Bu sayıyı etkileyebilecek en önemli parametre şebeke kısa devre gücüdür. Bu gücün 200 MVA olması durumunda türbin sayısı 12; 60 MVA olması durumunda ise yalnızca 1 olarak bulunmaktadır. Türbin sayısını etkileyebilecek diğer parametreler ise Çizelge 6.5'ten görüldüğü gibi şebeke empedans faz açısı ve bölgenin yıllık ortalama hızıdır. Kararlı hal gerilim değişiminde olduğu gibi şebekeye bağlanabilecek türbin sayısı, empedans faz açısının 79 derece olması durumunda en yüksek değerini alacaktır. Ortalama rüzgar hızının etkisi ise uçdeğerlerde bile türbin sayısını en fazla 1 adet arttırabilmektedir. Ancak hava yoğunluğunun belirtilen sınırlar dışında olması durumunda, rüzgar hızının da fliker şiddetleri üzerinde kayda değer etkileri olabilmektedir.

6.2.2 Anahtarlama İşlemleri

Anahtarlama işlemlerinde fliker şiddetleri ve bağıl gerilim değişimi hesabı yapılmaktadır. Fliker hesabı için 5. bölümde anlatıldığı şekilde hesaplanan hayali şebekenin kısa dönem fliker katsayılarından yalnızca L1 fazı için olan değerler kullanılmıştır. Sistemin dengeli olduğu varsayıldığından diğer fazlardan alınan ölçümler gösterilmemiştir. Ayrıca türbinler iki ayrı generatöre veya iki sargılı bir generatöre sahip olmadığından fliker şiddetleri, cut-in rüzgar hızında ve nominal rüzgar hızında çalışmaya başlama olmak üzere iki anahtarlama türü için hesaplanmıştır. Her iki durum için elde edilen ölçümler Çizelge 6.6’da verilmiştir.

Çizelge 6.6 Anahtarlama işlemlerinde L1 fazı için $P_{fic, st}$ değerleri

	Cut-in rüzgar hızında çalışmaya başlama	Nominal rüzgar hızında çalışmaya başlama
Ölçüm 1	2,349893	3,868212
Ölçüm 2	2,355843	3,878362
Ölçüm 3	2,341456	3,861267
Ölçüm 4	2,339841	3,853494
Ölçüm 5	2,355674	3,883912

Hayali şebekenin maksimum ve minimum değerleri de Çizelge 6.7’de verildiği gibi iki anahtarlama türü için hesaplanmaktadır.

Çizelge 6.7 Anahtarlama işlemlerinde L1 fazı için U_{fic} ’in maksimum ve minimum değerleri

	Cut-in rüzgar hızında çalışmaya başlama		Nominal rüzgar hızında çalışmaya başlama	
	$U_{fic,min}$	$U_{fic,max}$	$U_{fic,min}$	$U_{fic,max}$
Ölçüm 1	325,09	339,02	326,23	345,02
Ölçüm 2	327,11	337,43	332,51	346,46
Ölçüm 3	326,95	339,11	331,45	346,11
Ölçüm 4	327,44	337,27	329,91	346,65
Ölçüm 5	326,53	338,87	329,58	347,12

Çizelge 6.6 ve 6.7’de ölçümlerden elde edilen değerlerin sırasıyla Şekil 5.18 ve 5.19’da gösterilen modellere giriş olarak uygulanmasıyla, Çizelge 6.8’de verilen fliker adım faktörleri ve gerilim değişim faktörleri hesaplanmıştır. Fliker adım faktörü hesabında gözlem periyodu süresi 3 saniye alınarak MATLAB içerisinde geçici zaman etkilerinin tamamen sona ermesi sağlanmıştır.

Çizelge 6.8 Anahtarlama işlemlerinde L1 fazı için fliker adım faktörleri ve gerilim değişim faktörleri

	Cut-in rüzgar hızında çalışmaya başlama		Nominal rüzgar hızında çalışmaya başlama	
	Fliker adım faktörü	Gerilim değişim faktörü	Fliker adım faktörü	Gerilim değişim faktörü
Ölçüm 1	0,231505912	0,609279489	0,381087117	0,82184936
Ölçüm 2	0,232092092	0,451382938	0,382087071	0,610154262
Ölçüm 3	0,230674719	0,531862066	0,380402912	0,641208708
Ölçüm 4	0,230515613	0,429950996	0,379637134	0,732185114
Ölçüm 5	0,232075443	0,539735024	0,382633844	0,76717604

Son olarak, bulunan fliker adım faktörlerinin ve gerilim değişim faktörlerinin 15 değerinin aritmetik ortalaması alınarak Çizelge 6.9 oluşturulmuştur. Burada çizelge içerisindeki değerlerin hesabında hayali şebekenin kısa devre gücü 40 MVA olarak alınmıştır. Çizelgede yer alan diğer bir parametre ise maksimum anahtarlama sayılarıdır.

Çizelge 6.9 Anahtarlama işlemlerinde fliker katsayısı ve bağlı gerilim değişimi

Anahtarlama işleminin durumu	Cut-in rüzgar hızında çalışmaya başlama				Nominal rüzgar hızında çalışmaya başlama			
Maksimum anahtarlama sayısı, N_{10}	3				1			
Maksimum anahtarlama sayısı, N_{120}	30				7			
Şebeke empedans açısı, ψ_k (der.)	30	50	70	85	30	50	70	85
Fliker adım faktörü, k_f (ψ_k)	0,22	0,23	0,24	0,26	0,37	0,38	0,39	0,41
Gerilim değişim faktörü, k_u (ψ_k)	0,50	0,51	0,62	0,71	1,18	0,71	0,92	1,39
Kısa dönem fliker katsayısı, P_{st}	0,17	0,18	0,19	0,20	0,20	0,21	0,22	0,23
Uzun dönem fliker katsayısı, P_{lt}	0,16	0,16	0,17	0,18	0,16	0,17	0,18	0,19
Bağlı gerilim değişimi, $d(\%)$	1,01	1,02	1,25	1,42	2,37	1,43	1,83	2,78

Çizelge 6.9'daki değerler yardımıyla özellikleri verilen türbinin, herhangi bir şebeke üzerinde anahtarlama durumları açısından güç kalitesine etkileri değerlendirilebilir. Burada şebeke empedans faz açısının 60 derece ve kısa devre gücünün 120 MVA alınmasıyla, kısa ve uzun dönem fliker şiddetleri, bir türbin için sırasıyla 0,21 ve 0,25 olarak bulunmaktadır. Bu durumda anahtarlama göz önüne alındığında sınır değerler aşılmadan şebekeye bağlanabilecek türbin sayısı 2 olmaktadır. Şebeke kısa devre gücünün artması durumunda ise bu sayı, sürekli çalışmada olduğu gibi oldukça artmaktadır. Örneğin 200 MVA kısa devre gücüne sahip bir şebekeye, fliker açısından güç kalitesini etkilemeden 8 türbin bağlanabilmektedir. Türbin sayısı üzerindeki diğer bir parametre ise anahtarlama sayısıdır. Türbinlerin 10 dakika ve 2 saat içerisindeki anahtarlama sayıları bir kontrol sistemi ile sınırlandırılarak, türbin sayısının aynı kısa devre gücü için 2-3 katına çıkması sağlanabilir. Şebeke empedans faz açısının ise anahtarlama esnasında meydana gelen fliker şiddetleri üzerindeki etkisi oldukça azdır.

Rüzgar türbinlerinde bağlı gerilim değişimi, aynı anda iki anahtarlama yapılmadığı sürece

türbin sayısından bağımsızdır. Bu nedenle bir anahtarlamamanın neden olduğu gerilim değişimi üzerinde etkili olan parametreler şebeke kısa devre gücü ve empedans faz açısıdır. Bu örnekte 120 MVA kısa devre gücü için bağıl gerilim değişimi 0,98 ve 200 MVA kısa devre gücü için 0,59 olarak hesaplanmıştır. Empedans faz açısının bu iki kısa devre gücü için alacağı değerler de, gerilim değişiminin sınır değerlerin dışına çıkmasını sağlamamaktadır. Bu nedenle anahtarlamalar esnasında meydana gelen bağıl gerilim değişimleri bu örnek için türbin sayısını sınırlamamaktadır. Ancak bağıl gerilim değişimleri için tanımlanan sınırlar % 2'nin altında ise empedans faz açısının çok düşük ve çok yüksek değerleri, güç kalitesi açısından sorun olabilmektedir.

Türkiye'de şebekeye bağlanması düşünülen rüzgar çiftliklerinin, şebekenin kısa devre gücünün en fazla % 5'i oranında kurulu güce sahip olması gerektiği daha önce belirtilmişti. Bu kuralı değerlendirebilmek amacıyla, verilen rüzgar türbininin güç kalitesi karakteristikleri için farklı bölge ve şebekeler göz önüne alınarak yapılan hesaplamalarından elde edilen değerler ve % 5 kuralına göre hesaplanan değerler çizelge 6.10'da verilmiştir.

Çizelge 6.10 Güç kalitesini etkilemeden şebekeye bağlanabilecek verilen özelliklere sahip rüzgar türbini sayısı

Şebeke kısa devre gücü (MVA)	Şebeke empedans faz açısı (der.)	Güç kalitesini etkilemeden şebekeye bağlanabilecek türbin sayısı				
		% 5 kuralı	IEC 61400-21			
			Kararlı hal gerilimi	Fliker (sürekli çalışmada)	Fliker (anahtarlama esnasında)	Bağıl gerilim değişimi
60	50	1	1	1	0	0
	55	1	1	1	0	0
	65	1	2	1	0	0
120	50	2	2	4	2	∞
	55	2	2	4	2	∞
	65	2	4	4	2	∞
200	50	4	3	10	9	∞
	55	4	4	11	8	∞
	65	4	6	13	8	∞

Çizelge 6.10'da sürekli çalışma esnasındaki fliker hesabında etkisi çok fazla olmadığından yıllık ortalama rüzgar hızı sabit olarak 7,5 m/s alınmıştır. Ayrıca anahtarlama esnasındaki fliker hesabında, anahtarlama sayılarının üreticiden alınan değerler olduğu varsayıldığından bu değerler hesaplamalar sırasında sabit tutulmuştur.

Burada % 5 kuralına göre yapılan hesaplamalarda elde edilecek sonucu değiştirebilecek tek parametre şebekenin kısa devre gücü olduğundan, türbin sayısı kısa devre gücü ile orantılı olarak artmıştır. Ancak IEC 61400-21'e göre yapılan hesaplamalarda bu sayıların, çoğu durumda şebeke içerisindeki rüzgar gücünü sınırladığı veya şebekenin güç kalitesini olumsuz yönde etkilediği görülmüştür. Örneğin şebeke kısa devre gücünün 60 MVA olması durumunda % 5 kuralına göre belirlenen rüzgar türbini sayısı, kararlı hal gerilimi ve sürekli çalışmada fliker şiddetleri açısından IEC standardındaki değerlerle uyum sağlamaktadır. Ancak anahtarlama sırasında meydana gelen güç kalitesi problemleri nedeniyle bu kısa devre gücüne sahip bir şebekeye 2,4 MW gücünde bir rüzgar türbini bağlamak, fliker ve bağlı gerilim değişimleri açısından sınır değerlerin aşılmasına neden olacaktır. Bu nedenle 60 MVA kısa devre gücüne sahip bir şebekeye, verilen özelliklere sahip bir türbinin bağlanması şebekenin güç kalitesini, insanları rahatsız edecek şekilde etkileyecektir. Günümüzde şebekenin kısa devre gücünün % 5'i ile sınırlanan rüzgar gücünün, güç kalitesini düşürmesi genellikle görülmeyen bir durumdur. Ancak uygulama işleminden de görüldüğü gibi gerekli değerlendirme işlemleri yapılmadan karar verilen türbin gücünün, dolayısıyla türbin sayısının güç kalitesi problemlerine yol açması ihtimali her zaman bulunmaktadır. Bu gibi durumlarda, bozulan güç kalitesi karakteristiklerini düzeltmek için kullanılacak gerilim düzelticiler (SVC, STATCOM, vb.), filtreler ve diğer güç kalitesini iyileştirmeye yardımcı olabilecek cihazlar, yüksek ek masraflara neden olacaktır. Oysa yapılacak bir değerlendirme işlemi sayesinde, türbin tipini değiştirmek ve anahtarlama sayılarını bir kontrol sistemi ile azaltmak gibi önlemler alınarak bu sorunların oluşması baştan önenebilir. Bu önlemlerin de yeterli olmadığı durumlarda şebekeye bağlanacak olan rüzgar türbini sayısının azaltılması (bu örnek için şebekeye türbin bağlanmaması) veya bahsedilen güç kalitesini düzeltebilecek olan cihazların kullanılmaması bir çözüm olarak düşünülebilir.

120 MVA kısa devre görünür gücüne sahip bir şebekede % 5 kuralına göre belirlenen türbin sayısı, güç kalitesi karakteristiklerinden anahtarlama esnasındaki fliker şiddetleri nedeniyle IEC standardında da aynı şekilde hesaplanmaktadır. Rüzgar türbinlerinde anahtarlamaların "cut-in" rüzgar hızında meydana gelmesi durumunda şebekeye bağlanacak olan türbin sayısı normalde daha yüksek değerlerde olabilmektedir. Ancak standarda göre fliker hesabı nominal

rüzgar hızındaki anahtarlama için de yapıldığından daha yüksek fliker şiddetleri, dolayısıyla da daha düşük türbin sayısı elde edilmektedir. Bu kısa devre gücünde bağlı gerilim değişimlerinin sonsuz olmasının nedeni ise, bu değerin türbin sayısından bağımsız olmasıdır.

Kısa devre gücünün 200 MVA olması durumunda ise, güç kalitesi karakteristiklerinden yalnızca kararlı hal gerilimi sınırlayıcı bir etkiye sahiptir. Diğer karakteristikler için yapılan hesaplamalar, % 5 kuralı için bulunan değerlerden çok daha yüksektir. Ancak yüksek kısa devre görünür gücüne sahip şebekelerde genellikle empedans faz açısı yüksek değerlerde olduğundan, kararlı hal geriliminin sınırlayıcı etkisi azalmaktadır ve şebekeye bağlanabilecek türbin sayısı % 5 kuralı ile hesaplanan değerden daha fazla olmaktadır. Dolayısıyla ülkemizde kullanılan yönetmelik nedeniyle yüksek kısa devre gücüne sahip şebekelerde rüzgardan faydalanabilme oranı oldukça düşecektir. Oysaki günümüzde rüzgar teknolojisi bakımından gelişmiş ülkelerde, şebekelere bağlanan rüzgar türbinlerinin güçleri % 20 oranındadır ve bu oran özellikle yüksek rüzgar hızlarında ve düşük yük miktarlarında çok daha yüksek olabilmektedir (De Alegria vd., 2006).

Bu uygulamada, rüzgar türbinlerinin şebeke entegrasyonunda meydana gelebilecek tüm durumları gösterebilmek amacıyla, endüksiyon generatörlü ve şebekeye direkt bağlanan bir türbin sistemi göz önüne alınmıştır. Seçilen türbinin güç kalitesi açısından şebekeye olumsuz etkileri, günümüzde kullanılan türbinlerin büyük bir çoğunluğundan daha fazladır. Ayrıca türbinlerin modellenmesinde hava yoğunluğunun ve rotor kanatları, dişli kutusu vb. türbin elemanlarının güç kalitesi üzerinde olan etkileri de göz önüne alınmıştır. Bu nedenle IEC standardına göre hesaplanan türbin sayıları, güç kalitesi açısından olabilecek en kötü durum dikkate alınarak hesaplanan değerleri göstermektedir. Güç konverterlerine sahip olan veya reaktif güç ihtiyaçları bir kondansatör grubu tarafından kontrollü olarak sağlanan rüzgar türbini sistemlerinde, elde edilecek türbin sayısı değerleri oldukça artış gösterecektir. Ancak yönetmeliğe göre hesaplanacak türbin sayısı, türbin tipinden bağımsız olduğu için daima sabit bir değere sahip olacaktır. Bu nedenle özellikle modern türbin sistemleri için bir değerlendirme işlemi gerçekleştirilmeden, rüzgar türbinlerinin yeni yaygınlaşmaya başladığı zamanlarda deneysel olarak belirlenen bir şarta göre şebekeye bağlanacak türbin sayısı hesabının yapılması, rüzgar potansiyelinden yararlanma oranını kayda değer bir biçimde etkileyecektir.

6.3 Harmonikler

Rüzgar türbinlerinin neden olduğu harmonik emisyonlarının, yalnızca kullanılan konverterler

ile ilgili olduğu ve bu nedenle bir uygulama için model oluşturmak yerine, türbinlerde kullanılan konverterlerin harmonik emisyonları ile bir değerlendirme yapılabileceği Bölüm 6’te belirtilmişti. Bu uygulamada kullanılan türbinler şebekeye direkt bağlı olduklarından harmonikler açısından bir değerlendirme yapılmasına gerek bulunmamaktadır. Buna rağmen, harmonik hesabında kullanılan yöntemi daha iyi açıklayabilmek için rüzgar türbinlerinin birer konvertere sahip oldukları varsayılmıştır. Türbinlerde transistör tabanlı elemanların kullanıldığı konverterlerin harmonik emisyonları çok düşük olduğundan, değerlendirme esnasında bir GTO konverter tercih edilmiştir. 2,445 MVA gücünde 10 adet türbinden oluşan bir rüzgar çiftliğinde, MATLAB yardımıyla modellenen bir türbinin akım ölçümünden elde edilen tekil harmonik distorsiyonları Çizelge 6.11’de verilmiştir.

Çizelge 6.11 Her bir rüzgar türbininde bulunan konverterin tekil harmonik distorsiyonları

Mertebe	Harmonik akım (% I_n)	Mertebe	Harmonik akım (% I_n)	Mertebe	Harmonik akım (% I_n)
2	0,01	3	0,01	4	0,01
5	0,01	6	0,01	7	0,01
8	0,00	9	0,01	10	0,01
11	0,01	12	0,01	13	0,01
14	0,01	15	0,01	16	0,02
17	0,02	18	0,01	19	0,01
20	0,01	21	0,01	22	0,01
23	0,27	24	0,00	25	0,27
26	0,01	27	0,01	28	0,01
29	0,01	30	0,01	31	0,02
32	0,02	33	0,01	34	0,01
35	0,01	36	0,01	37	0,01
38	0,01	39	0,01	40	0,00
41	0,01	42	0,01	43	0,01
44	0,01	45	0,01	46	0,01
47	2,13	48	0,02	49	2,04
50	0,01				

Konverterin toplam harmonik distorsiyonu % 2,97 olarak hesaplanmıştır. Değerlendirme işlemleri esnasında standartta belirtildiği gibi, Çizelge 6.1’de verilen değerlerden yalnızca % 0,1’in üstünde olanlar kullanılmıştır. Ayrıca türbinler aynı tipte olduklarından β parametresi 1 olarak alınmıştır. Bu durumda, ortak bağlantı noktasındaki harmonik akım distorsiyonları 23., 25., 47. ve 49. harmonikler için,

$$I_{h\Sigma} = \sqrt[10]{\sum_{i=1}^{10} \left(\frac{I_{h,i}}{n_i} \right)^1} = \frac{10xI_h}{n}$$

eşitliği ile hesaplanmıştır. Türbinlerin çıkış gerilimleri 690 V ve şebeke tarafındaki gerilim 34,5 kV olduğundan transformatör oranlarının 50 olarak alınmasıyla, ortak bağlantı noktasındaki akım distorsiyonları $I_{23\Sigma} = \% 0.54$, $I_{25\Sigma} = \% 0.54$, $I_{47\Sigma} = \% 4.26$ ve $I_{49\Sigma} = \% 4.08$ olarak elde edilmiştir. Bu değerlerden de görüldüğü gibi rüzgar türbinlerinin neden olduğu harmonik emisyonları, rüzgar gücünün şebeke içindeki oranının artmasına bir engel oluşturmamaktadır.

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada şebeke bağlantılı rüzgar türbinlerinin güç kalitesi karakteristiklerinin değerlendirilebilmesi amacıyla oluşturan modeller yardımıyla bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu sayede farklı sayılarda türbinin, belirli bir bölgede olması ve belirli bir şebekeye bağlı olması halinde, ortak bağlantı noktasındaki etkileri değerlendirilmiştir. Uygulama sırasında yine MATLAB yardımıyla modellenen stall kontrollü, bir endüksiyon generatörüne sahip ve şebekeye direkt bağlı türbinlerinden oluşan rüzgar çiftlikleri göz önüne alınmıştır. Ancak gereken ölçümlerin yapılmasıyla farklı türbin tipleri için de aynı değerlendirme işlemleri gerçekleştirilebilir. Ayrıca bir rüzgar çiftliğinin farklı tiplerde türbinlerden oluşması durumunda da güç kalitesi karakteristiklerinin değerlendirilebilmesi mümkündür. Gerçek veriler yerine MATLAB modellerinden elde edilen verilerin tercih edilmesinin sebebi, modellemeler sayesinde istenen parametrelerin kolaylıkla değiştirilebilmesi ve gerçek veriler için gereken ölçüm sürelerinin oldukça uzun olmasıdır.

Değerlendirmeler sonucunda elde edilen değerlerin, ülkemizde kullanılan ilgili yönetmeliğe (Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği) göre belirlenen değerlerle karşılaştırılması sonucunda, çoğu zaman rüzgar gücü potansiyelinden tam olarak yararlanılamadığı görülmüştür. Ayrıca bazı durumlarda yönetmeliğin uygulanmasıyla, şebekenin güç kalitesi üzerindeki oluşan etkilerinin sınır değerleri aştığı kaydedilmiştir. Bu nedenle bu çalışmanın sonucunda, yalnızca şebekenin kısa devre gücünü veya şebeke gerilimdeki artış değerlerini dikkate alarak, şebekeye bağlanabilecek olan rüzgar gücünün belirlenmesinin, güç kalitesini olumsuz yönde etkileyebileceği veya rüzgar gücünü oldukça sınırlayabileceği gösterilmiştir.

Bu çalışmada oluşturulan modeller yardımıyla, özellikle çok düşük genlikte gerilim dalgalanmalarına sahip olan geçici durumların (transient) etkileri yüksek doğrulukta ölçülebilir ve bu durumların şebeke üzerindeki etkileri değerlendirilebilir. Bu sayede oluşturulan modeller, şebekelerin güç kalitesini iyileştirebilmek amacıyla kullanılan filtrelerin, gerilim düzelticilerin ve diğer cihazların modellerinin test edilmesinde de kullanılabilir. Ayrıca gelecekte güç kalitesi ile ilgili ölçüm ve değerlendirme yöntemlerinin değişmesi durumunda, uygulanan algoritmanın yeni düzenlemelere uyarlanması oldukça basittir.

KAYNAKLAR

- Ackermann, T., (2005), *Wind Power in Power Systems*, John Wiley & Sons, Chichester.
- Akhmatov, V. ve Eriksen, P.B., (2007), "A Large Power System in Almost Island Operation- A Danish Case Study", *IEEE Trans. Power Systems*, 22:937-943.
- "American Wind Energy Association Homepage" (<http://www.awea.org>)
- Baroudi, J.A., Dinavahi, V. ve Knight, A.M., (2007), "A review of power converter topologies for wind generators", *Renew. Energy*, doi:10.1016/j.renene.2006.12.002.
- Bertola, A., Lazaroïu, G.C., Roscia, M. ve Zaninelli, D., (2004), "A Matlab-Simulink Flickermeter Model for Power Quality Studies", 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 12-15 Sept. 2004, 734-738.
- Bindner, H. ve Lundsager, P., "Integration of wind power in the power system", *IECON 02*, 5-8 Nov. 2002, 3309-3316.
- Bollen, M.H.J., Olguin, G. ve Martins, M., (2005), "Voltage Dips at the Terminals of Wind Power Installations", *Wind Energ.*, 8:307-318.
- Bollen, M.H.J. ve Gu, I.Y.H., (2006), *Signal Processing of Power Quality Disturbances*, John Wiley & Sons, New Jersey.
- Bossanyi, E., Saad-Saoud Z. ve Jenkins, N., (1998), "Prediction of Flicker Produced by Wind Turbines", *Wind Energ.*, 1:35-51.
- Caldara, S., Nuccio, S. ve Spataro, C., (1998), "A Virtual Instrument for Measurement of Flicker", *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, 47:1155-1158.
- Caldara, S., Nuccio, S. ve Spataro, C., (1999), "Digital Techniques for Flicker Measurement: Algorithms and Implementations Analysis", 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 656-661.
- De Alegria, I.M., Andreu, J., Martin, J.L., Ibanez, P., Villate, J.L. ve Camblong, H., (2007), "Connection Requirements for Wind Farms: A Survey on Technical Requirements and Regulation", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11:1858-1872.
- Diez, G., Eguiluz, L.I., Manana, M., Lavandero, J.C. ve Ortiz, A., (2002), "Instrumentation and Methodology for Revision of European Flicker Threshold", 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 262-265.
- Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği, (2004).
- Estanqueiro, A. I., Tande, J. O., Lopes ve J. A. Peças, (2007), "Assessment of Power Quality Characteristics of Wind Farms", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 24-28 June 2007, 1-4.
- Farret, F.A. ve Simoes, M.G., (2006), *Integration of Alternative Sources of Energy*, John Wiley & Sons, New Jersey.
- Gallo, D., Landi, C. ve Pasquino, N., (2008), "An Instrument for Objective Measurement of Light Flicker", *Measurement*, 41:334-340.
- Gutierrez, J.J., Ruiz, J., Leturiondo, L.A. ve Lazkano, A., (2007), "Flicker Measurement System for Wind Turbine Certification", *IEEE Instrumentation and Measurement Technology*

Conference, 1-3 May 2007, Warsaw.

Halpin, S.M., Bergeron, R., Blooming, T.M., Burch, R.F., Conrad, L.E. ve Key, T.S., (2003), "Voltage and Lamp Flicker Issues: Should the IEEE Adopt the IEC Approach?", IEEE Trans. Power Delivery, 18:1088-1097.

Hansen, L.H., Madsen, P.H., Blaabjerg, F., Christensen, H.C., Lindhard, U. ve Eskildsen, K., (2001), "Generators and Power Electronics Technology for Wind Turbines", IECON 01, 29 Nov.-12 Dec. 2001, Denver, 2000-2005.

Hsu, Y.J. ve Lu, C.N., (2006), "Flicker Measurements at an Industrial Power Network with Wind Turbines", Power Engineering Society General Meeting, 18-22 June 2006.

IEC 61000-4-15, (1997), Electromagnetic Compatibility (EMC)-Part 4: Testing and Measurement Techniques-Section 15: Flickermeter-Functional and Design Specifications.

IEC 61400-21, (2001), Wind Turbine Generator Systems-Part 21: Measurement and Assessment of Power Quality Characteristics of Grid Connected Wind Turbines.

Knudsen, H. ve Akhmatov, V., (2001), "Evaluation of Flicker Level in a T&D Network with a Large Amount of Dispersed Windmills", 16th International Conference and Exhibition on CIRED, 18-21 June 2001.

Kocaman, B., (2003), Elektrik Enerjisi Üretim Santralleri, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Larsson, A., (2002), "Flicker Emission of Wind Turbines During Continuous Operation", IEEE Trans. Energy Conversion, 17:114-118.

Masters, G.M., (2004), Renewable and Efficient Electric Power Systems, John Wiley & Sons, New Jersey.

Mazadi, M. ve Hosseinian, S.H., (2004), "Flickermeter Simulation to Use in Power System Analysis Software", 39th International UPEC, 6-8 Sept. 2004, 917-923.

Mombauer, W., (1989), "Flicker-Simulation and Minimization", 10th International Conference on CIRED, 8-12 May 1989, Brighton, 102-106.

Rashid, M.H., (2001), Power Electronics for Renewable Energy Sources, Academic Press Series in Engineering, USA.

Patel, M.R., (2006), Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation (Second Edition), CRC Press, Boca Raton.

Simoes, M.G. ve Farret, F.A., (2004), Renewable Energy Systems: Design and Analysis with Induction Generators, CRC Press, Boca Raton.

Soliman, S. ve El-Hawary, M., (2000), "Measurement of Power System Voltage and Flicker Levels for Power Quality Analysis Static LAV State estimation Based Algorithm", Int. J. Elect. Power Energy Syst., 22:447-450.

Sorensen, P., Tande, J.O.G., Sondergaard, L.M. ve Kledal, J.D., (1996) "Flicker Emission Levels from Wind Turbines", Wind Energ., 20:39-46

Sorensen, P., Gerdes, G., Santjer, F., Robertson, N., Davy, W., Koulouvari, M., Morfiadakis, E. ve Larsson, A., (1999), "Standards for Measurements and Testing of Wind Turbine Power Quality", Proc. Eur. Wind Energy Conference, 1-5 Mar. 1999, Nice, 721-724.

- Tande, J.O.G., (1998), "Impact of Wind Turbines on Voltage Quality", Proceedings of 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 14-16 Oct. 1998, 1158-1161.
- Tande, J.O.G., (2000), "Exploitation of Wind-Energy Resources in Proximity to Weak Electric Grids", Applied Energy, 65:395-401.
- Tande, J.O.G. ve Uhlen, K., (2001), "Wind Turbines in Weak Grids-Constraints and Solutions", 16th International Conference and Exhibition on CIRED, 18-21 June 2001.
- Tande, J.O.G., (2002), "Applying Power Quality Characteristics of Wind Turbines for Assessing Impact on Voltage Quality", Wind Energ., 5:37-42.
- Tande, J.O.G., (2003), "Grid Integration of Wind Farms", Wind Energ., 6:281-295.
- Thiringer, T., (1996), "Power Quality Measurements Performed on a Low-Voltage Grid Equipped with Two Wind Turbines", IEEE Trans. Energy Conversion, 11:601-606.
- Thiringer, T. ve Dahlberg, J.A., (2001), "Periodic Power Pulsations from a Three-Bladed Wind Turbine", IEEE Trans. Energy Conversion, 16:128-133.
- Thiringer, T., Petru, T. ve Lundberg, S., (2004), "Flicker Contribution From Wind Turbine Installations", IEEE Trans. Energy Conversion, 19:157-163.
- TS EN 61000-4-15, (2004), Elektromanyetik Uyumluluk (EMU) – Bölüm 4: Deney ve Ölçme Teknikleri – Kısım 15: Kırpışma Ölçer – Fonksiyon ve Tasarım Özellikleri.
- TS EN 61400-21, (2002), Rüzgar Türbinli Jeneratör Sistemleri-Bölüm 21: Şebekeye Bağlanan Rüzgar Türbinlerinin Güç Kalitesi Karakteristiklerinin Ölçülmesi ve Değerlendirilmesi.
- Ummels, B.C., Gibescu, M., Kling, W.L. ve Paap, G.C., (2006), "Integration of Wind Power in the Liberalized Dutch Electricity Market", Wind Energ., 9:579-590.
- Uyar, M., Gencoğlu, M.T. ve Yıldırım, S., (2005), "Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri için Generatör Sistemleri", III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, 19-21 Ekim 2005, Mersin.
- Wei, K., Xiangwu, Y. ve Lixia, Z., (2003), "A Modified Digital Measuring Method on Flickering", Proceedings of Asia-Pacific Conference on CEEM, 4-7 Nov. 2003, 621-625.
- "Wind Turbine Grid Connection and Interaction" Deutsches Windenergie-Institut Tech-wise A/S, DM Energy, 2001.
(http://ec.europa.eu/energy/res/sectors/doc/wind_energy/maxibrochure_final_version.pdf)

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 30.10.1983

Doğum yeri İstanbul

Lise 1997-2001 Orhan Cemal Fersoy Lisesi

Lisans 2001-2006 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
Elektrik Mühendisliği Bölümü