

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR RÜZGAR TÜRBİNİNİN
MODELLENMESİ, SİMULASYONU VE
KONTROLU

İsmail İrfan GÜNEŞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2006

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİR RÜZGAR TÜRBİNİNİN MODELLENMESİ,
SİMULASYONU VE KONTROLU

İsmail İrfan GÜNEŞ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
Prof.Dr. Muammer KALYON

GEBZE
2006

ÖZET

TEZ BAŞLIĞI: Bir Rüzgar Türbininin Modellenmesi, Simulasyonu Ve Kontrolu

YAZAR ADI: İsmail İrfan GÜNEŞ

Bu tezin ana odak noktası bir rüzgar türbininin modellenmesi ve kontrolü üzerindedir. Bu tezin amacı modelleme ve kontrol alanında devam eden rüzgar türbin araştırmaları konusunda bir katkı sağlamaktır. Geliştirilecek model bir kontrolör tasarımının temellini oluşturması için kullanılacaktır. Kontrolörün ana stratejisi herhangi bir rüzgar hızında maksimum güç elde edecek şekilde türbin hızının ayarlanması şeklindedir.

Rüzgar türbini tasarımı çok sayıda serbestlik derecesine uyum sağlayan gelişmiş tasarım kodlarının son gelişmeleri ile desteklenmiştir. Fakat, kontrol tasarımı her bir parçanın modelini gerektirmez. Matematik model ve dinamik analiz için rüzgar türbininin rotor dinamikleri Matlab-simulink yazılımı kullanılarak modellendi.

Bu çalışma

- Bir rüzgar türbininin matematiksel modelinin geliştirilmesi,
- Sabit frekans ve sabit bir türbin çıkışını elde etmek için bir kontrolör tasarımı

SUMMARY

TITLE OF THE THESIS: Modeling, Simulation, And Control Of a Wind Turbine

AUTHOR: İsmail İrfan GÜNEŞ

The main focus of this thesis is the modelling and control of a wind turbine. The goal of this thesis is to have a significant contribution on the ongoing wind turbine research in the areas of modeling and control. A complete model will be developed and it will be used as a basis for the design of a controller. The main strategy of the controller will be to fulfill the desired power profile, regulate the wind turbine power production in case of high winds and also maximize the power production in times of slow wind.

Wind turbines design has been aided with the recent development of sophisticated design code that accommodate numerous degrees of freedom. However, control design does not require complex models of each component. For the mathematical model and dynamic analysis, the rotor dynamics of the wind turbine were modeled using the matlab-simulink software.

The following list describes the overall objectives of this research;

- Develop a wind turbine mathematical model
- Design a control for constant frequency and maintain a constant turbine output

TEŞEKKÜR

Bu çalışmadaki değerli katkılarından dolayı Sayın Prof.Dr. Muammer KALYON hocama , sabırla bana itici güç oluşturan sevgili eşim Nurhan GÜNEŞ'e, teknik desteğinden dolayı elektronik ve haberleşme yük. Müh. CUMHUR GÜNEŞ'e ve biricik kızım D.DENİZ GÜNEŞ'e teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Genel Bilgiler	1
1.2. Rüzgar Türbininin Sınıflandırılması	6
1.3. Rüzgar Türbininin Tanımı	7
1.3.1. Kule	8
1.3.2. Türbin Pervanesi	9
1.3.3. Dişli Kutusu	9
1.3.4. Jeneratör	10
2. RÜZGARIN MATEMATİKSEL MODELİ	12
2.1 Rüzgar Gücü	12
2.2 Türbin Gücü	14
2.3 Basınç Katsayısı C_p nin Tepe Hızı Oranı λ ve Pitch Açısı β ile Değişimi	14
2.4 Kontrol Edilen Rüzgar Türbininin Güç Yapısı	16
3. RÜZGAR TÜRBİN MODELİ	18
3.1. Rüzgar Türbininin Matematiksel Modellemesi	18
3.2. Spesifik Referans Şartları Civarında Lineerleştirme İle Kontrol “Linearization About A Set Point Control”	24
3.3. Spesifik Referans Şartları Civarında Lineerleştirme ile Ele Aldığımız Durum Denklemlerinin Kontrolü “Linearization About A Set Point Control”	25

3.4. Sliding Mode Kontrol	28
3.4.1. Sliding Mode Kontrol Teorisi	28
3.4.2. Lyapunov Fonksiyonu	29
3.5. Sliding Mode Kontrol Yönteminin Ele aldığımız Durum	
Denklemlerine Uygulanışı	31
3.6. Feedback Linearization Kontrol	32
3.7. “Feedback Linearization Kontrol”Metodu İle Ele Aldığımız Sistemin	
Kontrolü	33
4. SİMULASYON SONUÇLARI	35
5. SONUÇ	41
KAYNAKLAR	42
ÖZGEÇMİŞ	43

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

B_m	: Damper Etkisi
T_m	: Rüzgarın Yarattığı Tork
T	: Dişli kutusu Girişindeki Tork
k_m	: Dönmedeki Burkulma Etkisi
ω_e	: Jeneratörün Açısal Hızı
ω	: Türbinin Açısal Hızı
m	: Türbin
e	: Jeneratör
T_p	: Dişli Kutusunun Çıkış Torku
T_e	: Jeneratörün Torku
I_f	: Jeneratörün akımı
u_f	: Jeneratörün Voltajı
P_e	: Jeneratörün Gücü
P_m	: Türbinin Gücü
k_ϕ	: Motor Sabiti
ρ	: Havanın yoğunluğu
R_f	: Rotorun Direnci
θ	: Türbinin Şaft Açısı
R	: Rotor Yarıçapı
L	: Elektrik Devresinin İndüktansı
U	: Rüzgarın Kinetik Enerjisi
u	: Rüzgarın Hızı
A_x	: Rüzgarın Kontrol hacmi
P_ω	: Rüzgarın gücü
C_p	: Performans Katsayısı
λ	: Tepe Hız Oranı
β	: Pitch Açısı

J_m : Türbinin Momenti

J_e : Jeneratörün Momenti

A : Rüzgar Türbininin Etki Alanı

u_1 : Rüzgar Giriş Hızı

u_2 : Pervane Önündeki Rüzgar Hızı

u_3 : Pervane Arkasındaki Rüzgar Hızı

u_4 : Rüzgar Çıkış hızı

C_{pR} : Nominal Hızdaki Performans Katsayısı

u_c : Elektriksel Güç Üretiminin Başladığı Rüzgar Hızı

u_R : Maksimum Elektrik Gücünü Üreten Minimum Rüzgar Hızı

u_F : Türbinin Yüksek Hızlı Rüzgardan Korunmak İçin Kapatıldığı Hızı

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması	7
1.2. Rüzgar Türbininin Elemanları	8
1.3. Dişli Kutusu	10
1.4. Jeneratör	11
2.1. Rüzgar Akışı Ve Spesifik Hız Değerleri.	12
2.2. C_p nin Tepe Hızı Oranı λ ve Pitch Açısı β ile Değişimi	15
2.3. Rüzgar Türbininin Arzu Edilen Güç Yapısı	17
3.1. Genel Türbin Görüntüsü	18
3.2. Dişli yapısı	19
3.3. Geri beslemeli lineer sistemin blok diyagramı	24
3.4. Sliding Manifold	28
4.1. Belirli Bir Aralıkta Lineerleştirilmiş Kontrol Matlab Sunumu	35
4.2. Sliding Mod Matlab Gösterimi	36
4.3. Feedback linearization kontrol fonksiyonunun Matlab Simulasyonu	36
4.4.a. Linearization method ile kontrol edilen sistemin türbin açısal hızının (ω_{lin}) rüzgar referans hızı (ω_{ref}) ile karşılaştırılması grafiği	37
4.4b. Linearization method ile kontrol edilen sistemin türbin açısal hızının (ω_{lin}) sabit rüzgar referans hızı (ω_{ref}) ile karşılaştırılması grafiği	38
4.5. Rüzgar referans hızı, feedback linearization ve sliding mode eğrileri	39
4.6. Rüzgar referans hızı, linearization method, feedback linearization, ve sliding mode eğrileri	39
4.7. Sliding mode, feedback linearization ve linearization method ile kontrol edilen sistemin sağlandığı gerilimin (sistem kontrolünün) zamanla değişim grafikleri	40

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Tükenebilirliğine Göre Enerji Türleri, Avantaj ve Dezavantajları	2
2.2 Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Sınıflandırılması	3

1.GİRİŞ

1.1 Genel Bilgiler

Rüzgâr enerjisinin kaynağı güneştir. Güneş enerjisinin; karaları, denizleri ve atmosferi her yerde özdeş ısıtmamasından dolayı oluşan sıcaklık ve buna bağlı basınç farkları rüzgârı yaratmaktadır. Rüzgâr, yüksek basınç alanından alçak basınç alanına yer değiştiren havanın dünya yüzeyine göre bağlı hareketidir. Dünyaya ulaşan güneş enerjisinin çok küçük bir kısmı rüzgâr enerjisine dönüşebilmektedir. Bu enerji yerel coğrafi farklılıklar ve homojen olmayan ısınmaya bağlı olarak zamansal ve yöresel değişiklikler gösterir. Rüzgâr enerjisinde; rüzgârın hızı, yönü ve esme saat sayısı gibi özellikleri değerlendirilir. Rüzgârın hızı yükseklikle, gücü ise hızının küpü ile orantılı biçimde artar. Rüzgârın yönü, günlük hava şartlarına ve iklim özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Meteorolojik ve topografik açıdan rüzgârın olabileceği yerler aşağıda sıralanmıştır:

- Basınç gradyantının yüksek olduğu yerler
- Yağışların sürekli esen rüzgârlara paralel olduğu vadiler
- Yüksek, engebesiz tepe ve platolar
- Yüksek basınç gradyantlı düzlükler ve sürekli rüzgâr alan az eğimli vadiler
- Güçlü jeostrofik rüzgâr alanlarının etkisinde kalan tepe ve zirveler
- Jeostrofik rüzgâr ve termal gradyant alanına sahip kıyı şeritleri

Topografya rüzgârın yönü, hızı ve dağılımında önemli rol oynar. Dağ silsileleri, tepe ve kayalıklar, rüzgâr profillerini büyük ölçüde etkiler. [1]

Enerjiye olan büyük gereksinim, yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarının sürekli gündemde olmasının nedenidir. Alternatif kaynaklar olarak da adlandırılan bu enerji kaynaklarından biriside rüzgâr enerjisidir.

Rüzgâr enerjisi, fosil yakıtların tükeneceğinin anlaşıldığı son yıllarda, enerji sorununa çözüm olarak görülen kaynaklardan birisidir. İlk kullanım örneklerinin bundan 3000 yıl öncesinde rastlanılmasına rağmen, rüzgar enerjisi son on yıl öncesine kadar yeterince irdelenmemiş ve değerlendirilmemiştir.

Enerji, dünyanın varolma süresinin referans olarak alındığı bir sınıflandırmaya göre; tükenebilen ve kendisini dünya varoldukça yenileyebilen, yani tükenmeyen enerji olarak iki grupta incelenebilmektedir Tablo 1.1 Yenilenebilir enerji kaynakları da enerjinin ana kaynağına göre; güneş kaynaklı, dünya kaynaklı ve ay kaynaklı olarak üç grupta incelenebilmektedir. Tablo 1.2 'nin incelenmesinden de anlaşıldığı gibi güneş kaynaklı olan rüzgar enerjisi, doğal enerji dönüşümü sonucunda kendisini atmosferde hava hareketi ve denizlerde dalga hareketi olarak hissettirmektedir. Bu kinetik enerjide, rüzgar enerjisi ve dalga enerjisi tesislerinde elektrik enerjisine, su pompalama tesislerinde mekanik enerjiye dönüştürülebilmektedir.

Dünya enerji gereksiniminin karşılanmasında ağırlıklı olarak kullanılan fosil yakıtlar ve atom enerjisi, kendine özgü ve tüm insanları doğrudan ilgilendiren sorunlara neden olurlar.

Bu sorunların başında, 2001 yılı kaynaklarına göre; tahmini olarak atom enerjisinin kaynağı olan uranyumun 50 yıl, petrolün 44 yıl, doğalgazın 64 yıl ve kömürün 185 yıl sonra, bugüne kadar bulunmuş rezervlerinin tükenecek olmasıdır. Fosil yakıtlar ile ilgili diğer bir sorunda, çevreye verdikleri zararlarıdır. Elektrik enerjisi elde etmek için fosil yakıtlar yerine rüzgar santrali kullanıldığında, karbondioksit, kül, kükürt dioksit ve azot oksit'in atmosfere karışması engellenmiş olunacaktır.

Bu nedenlerden dolayı son yıllarda gelişmiş dünya ülkeleri, enerji gereksinimlerinin karşılanabilmesi için rüzgar, güneş, jeotermal, bioenerji, gelgit ve hidrolik enerjiden oluşan yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmişlerdir.

Tablo 1.1 Tükenebilirliğine göre enerji türleri, avantaj ve dezavantajları [2]

TÜKENEBİLEN ENERJİ	TÜKENMEYEN (YENİLENEBİLİR) ENERJİ
Kömür, Linyit, Petrol, Doğalgaz, Atom (Uranyum) gibi kaynaklardan elde edilen enerji	Su (Hidrolik), Güneş, Rüzgar, Dalga, Jeotermal, bioenerji, gelgit olayı gibi kaynaklardan elde edilen enerji
Çevreyi kirletirler ve dünyanın varolma sürecinde tükenirler	Çevre dostudurlar ve dünya varoldukça tükenmezler.

Tablo 1.2 Yenilenebilir enerji kaynaklarının sınıflandırılması [2]

YENİLENEBİLİR ENERJİ KAYNAKLARI				
Ana Kaynak	Birincil Enerji Kaynakları	Doğal Enerji Dönüşümü	Teknik Enerji Dönüşümü	Kullanım Enerjisi
GÜNEŞ	Su	Buharlaştırma, Yağış	Su Güç Tesisleri (Hidroelektrik Santralleri)	Elektrik Enerjisi
	Rüzgar	Atmosferdeki Hava Hareketi	Rüzgar Enerjisi Tesisleri	Elektrik ve Mekanik Enerji
		Dalga Hareketi	Dalga Enerjisi Tesisleri	Elektrik ve Mekanik Enerji
	Güneş Işınları	Yer ve Atmosferin Isınması	Isı Pompası	Isı Enerjisi
		Güneş Işınları	Kollektörler	Isı Enerjisi
			Solar Hücreler (Güneş Pilleri-Fotovoltaikler)	Elektrik Enerjisi
	Bioenerji	Bioenerji Üretimi	Isı Güç Tesisleri	Isı ve Elektrik Enerjisi
			Dönüşüm Tesisleri	Yakıt Enerjisi
DÜNYA	Yer Merkezi Isısı	Jeotermal Enerji	Jeotermal Güç Tesisleri	Isı ve Elektrik Enerjisi
AY	Ay Çekimi Gücü	Gel-Git olayı	Gel-Git Güç Tesisleri	Elektrik Enerjisi

Elektrik gücünün temel kaynağı, elektrik jeneratörüne bağlı olan bir mili çevirmek için yenilenebilir olmayan yakıtlardan elde edilen enerjiyi kullanan katı yakıtlı güç jeneratörleri olmuştur [3]. Bu sistemler her zaman birincil güç kaynakları oldukları için kontrol edilebilirlik ve verimlilik alanlarında büyük gelişmeler kaydedilmiştir. Ayrıca, elektrik her zaman, elektrik endüstrisini tekelleştiren büyük hizmet şirketleri tarafından sağlanmıştır. Bu, elektrikte fiyatın artmasına ve büyüyen pazarla birlikte daha düşük kalite ve hizmetin verilmesine neden olmuştur [4]. Buna tepki olarak daha küçük hizmet şirketleri elektriği belki daha düşük bir fiyattan üretmekte kullanabilecekleri alternatif enerji kaynaklarının araştırmasına yatırım yaptılar. Amerika Birleşik Devletleri'nde yapılan elektrik düzenlemeleri ile birlikte alternatif enerji kaynaklarına yönelik araştırmalarda artış gözlenmiştir. Üzerinde araştırma yapılmakta olan önemli kaynakların bazıları yakıt hücreleri, mikro-türbinler ve rüzgar türbinleridir. Rüzgar türbinleri bu tezin odaklandığı ana konu olacaktır.

Rüzgar enerji dönüşümü dünyada yeni elektrik üretiminin en hızlı büyüyen kaynağıdır ve belli bir sürede öyle kalacağı tahmin edilmektedir [5]. Diğer kaynaklarla kıyaslandığında rüzgar enerji dönüşümünün ömrü, yayınıcı olmayan işlemi ve düşük maliyeti yenilenebilir bu enerji kaynağını daha cazip hale getirmiştir. İş yaratma açısından da caziptir ve teknolojisi gelişmekte olan ülkelere kolayca nakledilebilir. Rüzgar türbinleri belirli şartlar altında en az maliyet yaklaşımını sağlayarak diğer elektrik güç kaynaklarının kullanımını tamamlarlar. Pek çok durumda en düşük maliyetli sistem, güç kaynaklarından birisi olarak rüzgar enerjisine sahip bir hibrit sistem olacaktır. Bu, merkezi olmayan elektrik projeleri günümüzün merkezi elektrik üretim projeleri ile aynı derecede uygulandığında günümüzü yansıtan potansiyel elektrik üretim projelerinin alanını genişletir.

Rüzgar türbinleri birkaç yüz yıldır kullanılıyor olmasına rağmen, Danimarka elektrik üretimi amacıyla rüzgarı kullanan ilk ülkeydi. 1910 yılına kadar Danimarka işletimde olan birkaç yüz rüzgar türbinine sahipti. Geniş ölçekte, ticari rüzgar türbinleri elektrik pazarında 1925 yıllarında görülmeye başlandı. Bunlar ucuz alternatif enerji üretti ve birincil kullanımları bataryaları şarj etmek ve tarlalara su basmaktı. Fakat, hizmet endüstrisi tarafından üretilen elektriğin düşük maliyeti ve güvenilirliği rüzgar türbinlerine talep eğilimini arttırdı. 1970'lerin başında hizmet

endüstrisi tarafından tüketilen elektrik artmaya başladı ve tüketiciler şikayet etmeye başladılar; bu rüzgar türbinlerini düşünme ihtiyacını gündeme getirdi. Ev rüzgar türbinlerine ek olarak, hizmet şirketleri daha ucuz güç üretmek ve kömür fabrikalarının salınımlarını dengelemek için büyük rüzgar türbinleri yapmaya başladılar. Palmar C. Putnam büyük değerinde güç sağlayan büyük rüzgar türbinlerinin kullanımı kavramını sundu. The S. Morgan Smith Şirketi, PA onun çalışmasını destekledi ve the Smith – Putman rüzgar türbini deneyi doğdu. Daha sonraki yıllarda daha büyük ve iyi rüzgar türbinleri tasarlama yönünde araştırmalar yapıldı. Federal rüzgar enerji programı (FWEP) 1972’de çalışmalarına başladı. Ulusal bilim kuruluğu (NSF) ve ulusal havacılık ve uzay dairesi ulusun enerji kaynak seçeneklerinin geliştirilmesi için rüzgar enerjisinin geliştirilmesini tavsiye ettikten birkaç yıl sonra, rüzgar türbini geliştirme sorumluluğu enerji araştırma ve geliştirme dairesi (ERDA)’nın bir parçası oldu. Yıllar boyunca birkaç yüz tip rüzgar türbini geliştirilmiş ve daha verimli ve daha güvenilir rüzgar türbinleri bulma yönünde çalışmalar devam etmektedir[3]. Rüzgar türbinlerinin en önemli özelliği diğer üretim sistemlerinden farklı olarak güç akış hızının kontrol edilemez olmasıdır. Güç üretim sistemlerinin büyük bir bölümünde jeneratöre uygulanan yakıt akış veya enerji miktarı çıkış gerilim frekansını kontrol eder. Fakat, rüzgar hızı zamanla değişir. Tabi buna bağlı olarak güç talebi de değişir. Bundan dolayı diğer üretim sistemleri kontrollü enerji kaynakları olarak adlandırılabilir. Oysa rüzgar kontrol edilemeyen bir enerji kaynağıdır ve güç talebi kontrol edilemeyen enerji azalmasıdır. Bazen rüzgar hızı çok yüksek olabilir ki bu güç üretiminin yükün talebini aşmasıyla sonuçlanabilir. Bu türbinin, dönme hızı oranını aşmasına sebep olabilir ve sonuç olarak türbine zarar verebilir. Diğer yandan rüzgar hızı herhangi bir güç üretimi için çok düşük olabilir ve bu yüzden diğer enerji kaynakları kullanılmalıdır. Enerji kaynak girişi, rüzgarın önceden tahmin edilmezliğini ve değişken bir kontrolör ihtiyacını doğrulamak için yeterli sebepleri vermektedir. Bu kontrolör, rüzgar türbininin eşlenmiş bir işlemi için kontrol edilmesi gereken bütün değişkenleri düzenleyecektir. Ana enerji kaynaklarının çoğu toprak altında bulunmaktadır ve bu enerji kaynaklarının teknolojik olarak yenileştirilebilmesi kısa vadede ekonomik olarak kolay olmadığı için yenileştirme çabaları uzun zaman dilimlerine yayılarak gerçekleştirilmektedir. Elektrik endüstrisinde rüzgar türbinleri çoğunlukla enerji miktarını desteklemek için ek enerji kaynaklarıdır. Bu yüzden, türbinlerin çıkış ara

yüzlerinin var olan elektrik hatlarına uyumunu sağlamak için rüzgar türbinlerinin tasarlanması ve kontrolüne ihtiyaç vardır.

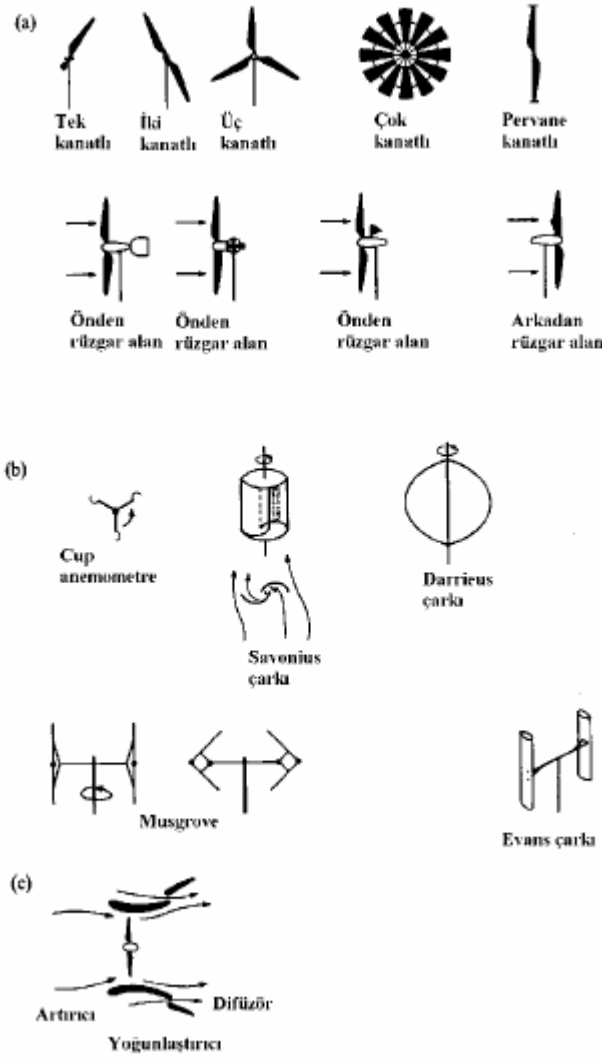
1.2 Rüzgar Türbinlerinin Sınıflandırılması

Tarih boyunca çeşitli değişiklikler geçiren rüzgar makinalarında kullanılan türbinler:

a-Yatay eksenliler: Dönme eksenini rüzgarın akım çizgilerine paralel olan türbinlerdir. Bkz. Şekil 1.1.a.

b- Dikey eksenliler: Dönme eksenini rüzgarın akım çizgilerine dik olan türbinlerdir. Bunların başlıcaları Şekil 1.1.b ile verilen Darreus ve Savonius tipinde olanlardır. Bunların olumsuz yanlarından birincisi ilk hız alamaması, ikincisi ise veriminin düşük olmasıdır. Yatay eksenli türbinlerden olan çok kanatlılar düşük devirlerde, tek ve birkaç kanatlılar ise yüksek devirlerde çalıştırılmaktadır.

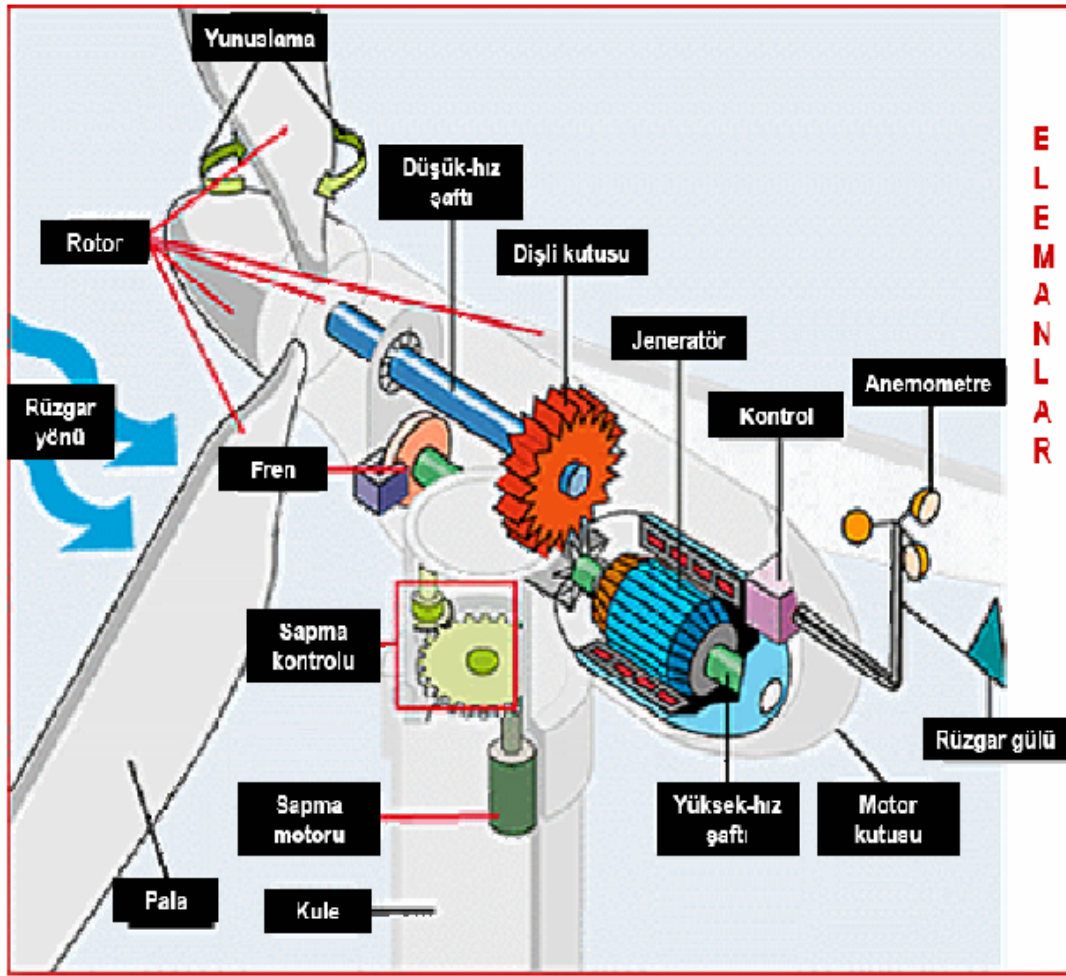
c- Yoğunlaştırılan yapıdakiler Şekil 1.1.c



Şekil 1.1: Rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması.

1.3 Rüzgar Türbininin Tanımı

Şekil 1.2 rüzgar türbininin genel yapısının göstermektedir. Rüzgar türbin rotoru sabit hızlı bir jeneratöre bağlıdır. jeneratör çıkışı istenen gerilim değerini takip etmek için kontrol edilebilir. Rüzgar türbini rüzgardan elde edilen aerodinamik gücü kontrol etmek için eğimli kanatlara sahiptir. Ayrıca şekilde düşük hızlı rotor mili ile yüksek hızlı jeneratör mili arasındaki mekanik parça (dişli kutusu) gösterilmiştir. Düşük hızlı mil aerodinamik güç üreten türbin kanatları tarafından sürülmektedir. Yüksek hızlı mil elektrik jeneratörü tarafından bir elektrik yükü şeklinde yüklenmektedir.



Şekil 1.2: Rüzgar Türbini Elemanları

Rüzgar türbini, kanatlarını kullanarak rüzgar enerjisini dönme enerjisine çevirir. Bu dönme enerjisi daha sonra bir elektrik jeneratörü kullanılarak dağıtım şebekesindeki hizmet şebekesini besleyen elektrik enerjisine çevrilir. Bu bildiğimiz elektrik fanının tam tersidir.

1.3.1 Kule

Kule malzemesi, genelde çelik veya betondur. Modern rüzgar türbinleri, halka enine kesitli kulelere sahiptir. Kule yüksekliği, yüksekteki daha rüzgar hızlarından yararlanmanın getirisi ile boya bağlı artış gösteren kule maliyeti arasındaki optimum çözümle belirlenir. Kule boyutlandırılmasındaki bir diğer parametre de, eğilme doğal frekansı, kule malzemesi ve dolayısıyla maliyeti önemli ölçüde etkilemektedir. Rüzgar türbinlerinin tüm imalat giderlerinin % 11-20'si kule imalatına aittir.

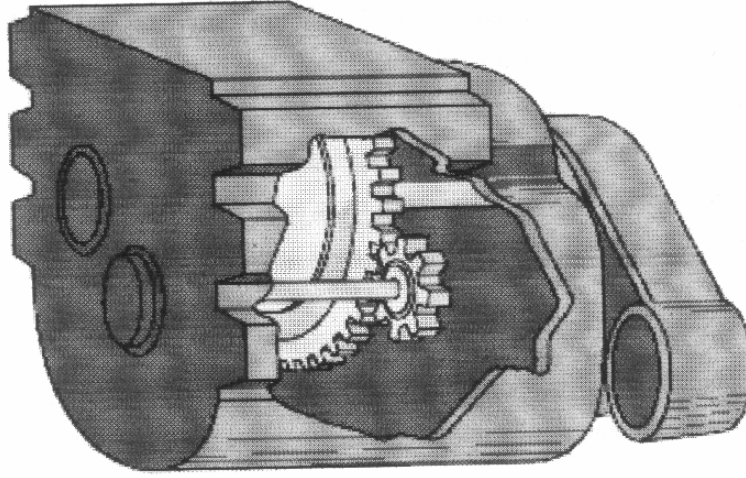
1.3.2. Türbin Pervanesi

Rüzgar türbinlerinin pervaneleri; alüminyum, titan, çelik, elyaf ile güçlendirilmiş plastik (cam elyafı, karbon elyafı ve aramid elyafı) ve ağaçtan imal edilmektedir. Modern rüzgar türbinlerinin kanatlarının hemen hemen tamamı, cam elyafı ile güçlendirilmiş polyester veya epoksi gibi, cam elyafıyla plastikten üretilirler. Çelikten üretilen kanatların eğilmeye dayanımı çok iyidir. Fakat, yorulma dayanımları ve korozyon sorunu yaratmaktadır. Alüminyum kanatlar, çeliğe göre daha hafiftir, yorulma dayanımları daha iyidir ve korozyona daha dayanıklıdır. Alüminyum malzemenin zayıf noktaları; kabuk şeklindeki malzemenin burkulması, imalat tekniğinin zorluğu ve pahalı olmasıdır.

1.3.3. Dişli Kutusu

Rotor açısız hızı ω genellikle ihtiyaç duyulan elektriksel frekans değerini üretmek için jeneratörü hareket ettirmede yeteri kadar hızlı değildir. Dişli takımları dönme sistemleri için hızlarda mekanik olarak bir artış ve azalış sağlayabilirler. Rüzgar türbinlerini dikkate aldığımızda dişli takımları düşük hızlı milin aşısız hızını jeneratöre bağlanan yüksek hızlı mil hareketine dönüştürmede kullanılırlar. Pek çok uygulama için dişli takımları karşılıklı iki dişli arasındaki boşluktan kaynaklanan şiddetli tepki gösterirler. Sürücü dişli karşı dişli ile temas yapmadan önce bir açı boyunca döner sonuç, giriş dişlinin açısız dönüşü gerçekleşene kadar çıkış dişlisinin açısız dönüşü gerçekleşmez. Bu çalışmadaki dişli kutusu için kullanılan modelde dişlilerin davranışını idealleştirecek ve şiddetli tepkinin olmadığı bir zorluk yapılacaktır.

Dişli kutusu için giriş parametreleri rotoru dişli kutusuna bağlayan düşük hızlı mil için açısız hız ve torktur. Çıkış parametreleri ise, dişli kutusunun Jeneratöre bağlayan yüksek hızlı mil için açısız hız ve torktur.



Şekil 1.3: Dişli Kutusu

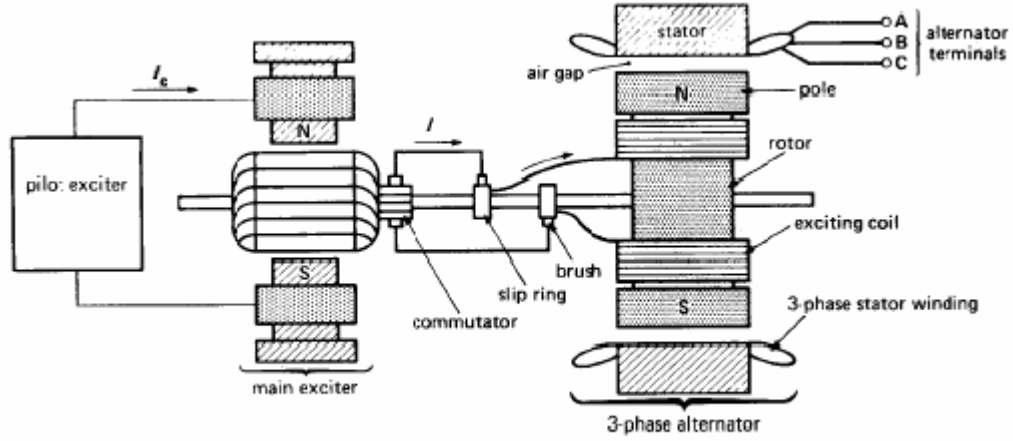
1.3.4. Jeneratör

Rüzgar enerjisi tesislerinde kullanılan jeneratörler, alternatif akım veya doğru akım jeneratörleri olabilir. Burada elde edilen elektrik akımı, yetersiz kalitede alternatif akım veya doğru akım bile olsa, çeşitli güç elektroniği düzenekleriyle şebekeye uygun hale getirilebilir.

Doğru akım jeneratörleri, büyük güçlü rüzgar enerjisi tesislerinde tercih edilmemektedir. Bunun nedeni, sık bakım gereksinimi ve alternatif akım jeneratörlerine göre daha pahalı olmasıdır. Doğru akım jeneratörleri, günümüzde sadece küçük güçlü rüzgar enerji tesislerinde akülere enerji depolamak için kullanılır. Dişlideki kayıplar ve gürültünün önlenmesi amacıyla, çok kutuplu jeneratörü olan dişli kutusuz türbinler de kullanılmaktadır.. Bu nedenle, yüksek kutup sayılı jeneratörlerde dişli kutusuna gerek kalmamaktadır.

Germiyan da otoprodüktör sistemi ile kurulan, Alman Firması Enercon tarafından üretilen E-40 adlı dişli kutusuz rüzgar türbinleri, 84 kutupludurlar ve pervane milinin dakikada 38 devir yapması durumunda 500 kw lık nominal güce ulaşmaktadır.

Şebeke bağlantılı alternatif akım jeneratörlerinde, sadece şebeke frekansını sağlayan devir sayısında elektrik enerjisi üretebilmektedir. Bu da, rüzgar türbininden örneğin 8 m/s olan optimum hızda yararlanmak demektir. Bu nedenle, rüzgar türbinlerinin bazılarında, düşük ve yüksek rüzgar hızları için iki ayrı jeneratör kullanılmaktadır.



Şekil 1.4: Jeneratör

2. RÜZGARIN MATEMATİKSEL MODELİ

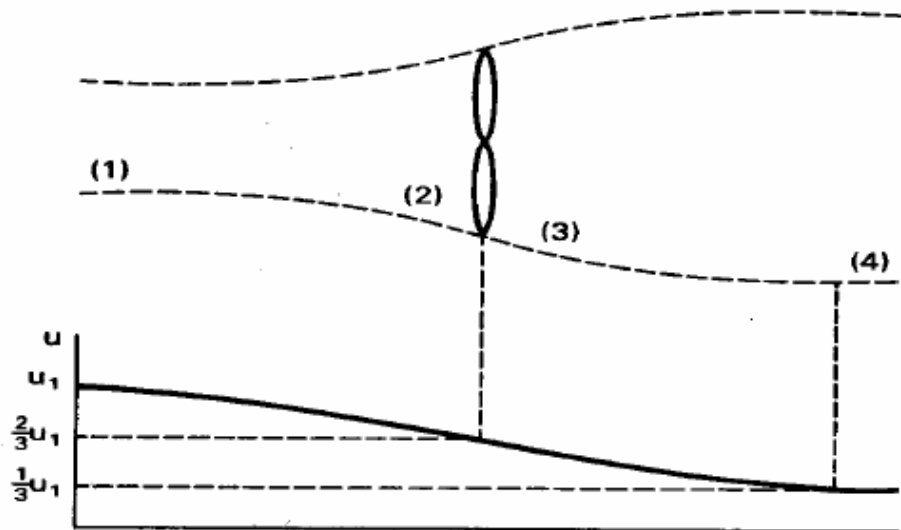
2.1 Rüzgar Gücü

Kütlesi m , kontrol hacmi “ $A x$ ”, ve akış hızı “ u ” olan bir rüzgar kütlesinin kinetik enerjisi (2.1.1) ile verilmektedir [7-8]. Burada A rotor süpürme alanı, ρ rüzgar (hava) yoğunluğudur.

$$U = \frac{1}{2} m u^2 \Rightarrow U = \frac{1}{2} (\rho A x) u^2 \quad (2.1.1)$$

Rüzgar gücü, rüzgar kontrol hacminin kinetik enerjisinin zamana göre türevi olup eşitlik (2.1.2) ile verilmiştir. Bu eşitlik, elde edilen kullanılabilir toplam gücü temsil eder

$$P_{\omega} = \frac{dU}{dt} \Rightarrow P_{\omega} = \frac{1}{2} \rho A u^2 \frac{dx}{dt} \Rightarrow P_{\omega} = \frac{1}{2} \rho A u^3 \quad (2.1.2)$$



Şekil 2.1: Rüzgar Akışı Ve Spesifik Hız Değerleri.

Optimum koşullar altında bir rüzgar türbinine rüzgar akış hız dağılımı Şekil 2.1 de gösterilmektedir.

Burada u_1 , giriş hızını, u_2 ve u_3 pervane önünde ve arkasındaki hızları, u_4 ise çıkış hızını temsil etmektedir. Bu hızlar arasındaki aşağıdaki eşitliklerdeki gibi verilmektedir [8].

$$u_2 = u_3 = \frac{2}{3}u_1 \quad (2.1.3.a)$$

$$u_4 = \frac{1}{3}u_1 \quad (2.1.3.b)$$

$$A_2 = A_3 = \frac{3}{2}A_1 \quad (2.1.3.c)$$

$$A_4 = 3A_1 \quad (2.1.3.d)$$

A_1 , A_2 , A_3 , A_4 sırasıyla 1, 2, 3, ve 4 noktalarındaki kesit alanlarıdır. Rüzgar, türbin üzerinden geçerken türbinin kullandığı güce eşit bir güç kaybedecektir. Bu eşitlik (2.1.4) ile verilmiştir.

$$P_{m,ideal} = P_1 - P_4 \Rightarrow P_{m,ideal} = \frac{1}{2}\rho(A_1u_1^3 - A_4u_4^3) \quad (2.1.4)$$

(2.1.4) eşitliğinde

$u_4 = \frac{1}{3}u_1$ ve $A_4 = 3A_1$ eşitlikleri yerine konursa

$$P_{m,ideal} = \frac{1}{2}\rho \left[A_1 u_1^3 - (3A_1) \left(\frac{1}{3}u_1 \right)^3 \right] = \frac{1}{2}\rho A_1 u_1^3 \left(1 - \frac{3}{27} \right) \quad (2.1.5)$$

$$\Rightarrow P_{m,ideal} = \frac{1}{2}\rho A_1 u_1^3 \frac{8}{9} \quad (2.1.5.a)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikte A_1 , (1) nolu tüp kesit alanıdır. İdeal bir türbin, rüzgardaki toplam gücün $\frac{8}{9}$ 'ini kullanabilecektir. Rüzgar türbininin karşıt çapraz alanının aksine elde edilen güç genellikle rüzgar türbin etki alanı, A olarak belirtilir, fakat rüzgar türbin etki alanı ifadesi olan A terimi, A_2 terimi ile açıklanır. Bu

durumda eşitlik (2.1.3) kullanılarak eşitlik (2.1.6) elde edilebilir ve bu, türbinin çapraz bölgesel alana eşit olan rüzgar türbinin etki alanlarıyla havanın dağıtılmamış türbindeki toplam gücün %59'undan fazlasını kullanamayacağını gösterir. Bu Bertz teoremi olarak bilinir ve bütün türbinlerin %59'dan fazla verimli olmasını sınırlar.

$$P_{m,ideal} = \frac{1}{2} \rho \left[\frac{8}{9} \left(\frac{2}{3} A_2 \right) u_1^3 \right] \Rightarrow P_{m,ideal} = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{16}{27} A_2 u_1^3 \right) \quad (2.1.6)$$

$$P_{m,ideal} = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho A_2 u_1^3 \right) = 0.59 P_\omega \quad (2.1.6.a)$$

2.2 Türbin Gücü

Türbinin gücü, P_ω rüzgarın gücü ile C_p performans katsayısının çarpımı şeklinde tanımlanır.

$$P_m = C_p P_\omega = C_p \left(\frac{1}{2} \rho A u^3 \right) \quad (2.2.1)$$

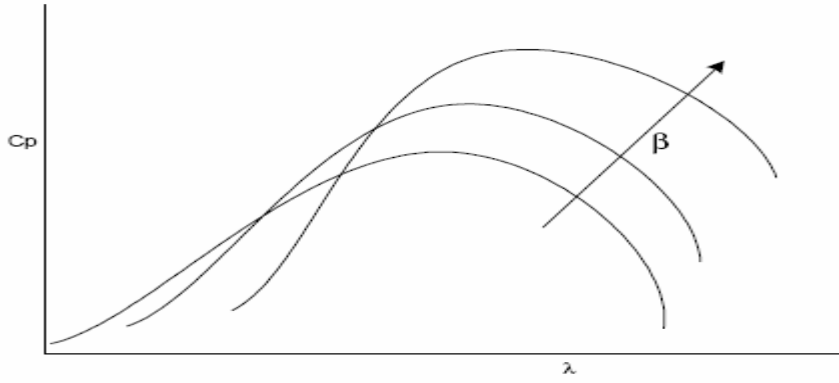
C_p performans katsayısı değeri rüzgar hızı, türbinin dönme hızı, rotor kanat açısı ve türbin pervane parametreleri ile değişir. Bu eşitlik (2.1.6.a)'da görüldüğü gibi 0,59'u aşamaz. Tepe hız oranı, türbin pervanesinin uç hızının rüzgar hızına oranıdır. Burada ωR ve u pervane uç hızı ve rüzgarın hızıdır.

$$\lambda = \frac{\omega R}{u} \quad (2.2.2)$$

R parametresi rüzgar türbin etki alanının maksimum yarıçapıdır.

2.3. Basınç Katsayısı C_p nin Tepe Hızı Oranı λ ve Pitch Açısı β ile Değişimi

Şekil 2.2 de Basınç Katsayısı C_p nin Tepe Hızı Oranı λ ve Pitch Açısı β ile Değişimi görülmektedir.



Şekil 2.2: Basınç Katsayısı C_p nin Tepe Hızı Oranı λ ve Pitch Açısı β ile Değişimi

Eğer bir rüzgar türbin rotorunun güç performansı değerlendirilecekse onun $C_p(\lambda, \beta)$ eğrisi rüzgar türbini üreticisinden ve her bir tepe hız oranı ve pitch eğim açısı için katsayı performansını değerlendirmek için oluşturulan teknik tablodan yararlanılmalıdır.

Eğer dönme hızı ω , ve eğim açısı β biliniyorsa ($\omega = \omega_0$ ve $\beta = \beta_0$, şartlarında dönen rotor için) mekanik güç çıkışı P_m herhangi bir u karşıt rüzgar hızında eşitlik (2.2.1) kullanılarak bulunabilir.

Bazen bütün $C_p(\lambda, \beta)$ bilgisi bulunmaz. Bu durumda güç performansı hesaplamalarında eşitlik (2.2.1) direk olarak kullanılamaz. Justus [6]'a göre herhangi bir çalışma eğim açısı hızın bir fonksiyonu olarak iyi bir yaklaşımla C_p eşitlik (2.3.1) ve (2.3.2) kullanılarak bulunur.

F ve G katsayıları $C_p(u_c) = 0$ ve $C_p(u_R) = C_{pR}$ sınır koşulları uygulanılarak bulunabilir.

$$C_p = C_{p_m} \left[1 - F \left(\frac{u_m}{u} - 1 \right)^2 - G \left(\frac{u_m}{u} - 1 \right)^3 \right] \Rightarrow u_c \leq u \leq u_R \quad (2.3.1)$$

$$C_p = C_{pR} \left[\frac{u_R^3}{u^3} \right] \Rightarrow u_R \leq u < u_F \quad (2.3.2)$$

F ve G katsayıları eşitlik (2.3.3)'de verilen sınır şartları kullanılarak bulunabilir. Bu, performans katsayısının kesme hızındaki ve nominal hızdaki

değerinden elde edilir. Bur da performans katsayısı ve nominal hızdaki performans katsayısı için C_p , C_{pR} gösterimleri kullanıldı.

$$C_p(u_c) = 0 = C_{pm} \left[1 - F \left(\frac{u_m}{u_c} - 1 \right)^2 - G \left(\frac{u_m}{u_c} - 1 \right)^3 \right] \quad (2.3.3.a)$$

$$C_p(u_R) = C_{pR} = C_{pm} \left[1 - F \left(\frac{u_m}{u_R} - 1 \right)^2 - G \left(\frac{u_m}{u_R} - 1 \right)^3 \right] \quad (2.3.3.b)$$

Eğer eşitlik (2.3.1) ve (2.3.2) de verilen C_p değeri (2.2.1) ifadesinde yerine yazılırsa türbinin güç değişimi rüzgar hızının bir değişimi olarak eşitlik (2.3.4.a) ve (2.3.4.b)'de gösterildiği gibi değerlendirilebilir.

Eşitlik (2.3.4.a) $u_c \leq u \leq u_R$ aralığı ve eşitlik (2.3.4.b) $u_R \leq u < u_F$ aralığı için geçerlidir.

$$P_m = P_R \left[\frac{C_{pm}}{C_{pR} u_R^3} \right] \left[1 - (F + G)u^3 + (2F - 3G)u_m u^2 + (3G - F)u_m^2 u - Gu_m^3 \right] \quad (2.3.4.a)$$

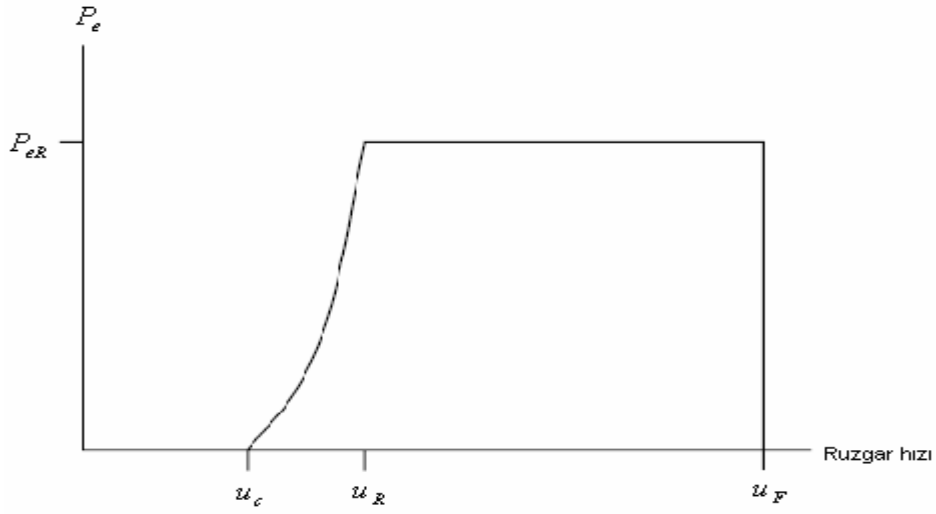
$$P_m = P_R \quad (2.3.4.b)$$

Burada P_m rüzgar türbini nominal gücü, C_{pm} maksimum güç katsayısını, C_{pR} nominal güç katsayısını, u_R nominal rüzgar hızını, u_c kesme açısını göstermektedir. Bunlar rüzgar türbini için verilirler.

Her bir pitch açısı için bu yaklaşım metodu rotor ve milin başlangıç dönme momenti, maksimum performans katsayısı, nominal performans katsayısı, nominal rüzgar hızı, C_{pm} de oluşan rüzgar hızı ve rüzgar türbini nominal gücü, kesme açısının bir fonksiyonudur.

2.4 Kontrol Edilen Rüzgar Türbininin Güç Yapısı

Rüzgar gücünü değerlendirdikten sonra P_w , C_p değişimleri ve rüzgar türbininin kontrol yapısı düşük hızlarda mümkün olduğu kadar daha fazla güç elde etmek ve sonra türbini korumak için yüksek hızlarda gücü ayarlamaktır. Şekil 2.3 de genel rüzgar hızının bir fonksiyonu olarak arzu edilen güç yapısını göstermektedir [9].



Şekil 2.3: Rüzgar Türbininin Arzu Edilen Güç Yapısı

Eşitlik (2.4.1) bir rüzgar türbininin elektriksel çıkış gücü için elde edilir.

$$P = 0 \quad (u \leq u_c) \quad (2.4.1.a)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho C_p (\lambda, \beta) A u^3 \quad (u_c \leq u \leq u_R) \quad (2.4.1.b)$$

$$P = P_R \quad (u_R \leq u \leq u_F) \quad (2.4.1.c)$$

$$P = 0 \quad (u > u_F) \quad (2.4.1.d)$$

u_c parametresi elektriksel güç üretiminin başladığı kesme rüzgar hızıdır. u_R nispi rüzgar hızıdır. Bu u_R değeri maksimum elektrik gücünü üreten minimum hızdır. u_F , türbinin yüksek hızlı rüzgarlardan korunmak için kapatıldığı hızıdır. Fakat, güç şebekesinde bağlanan bir rüzgar türbini için yük talebini karşılayabilen bir kontrol yapısı kullanılmalıdır. Dolayısıyla kontrolörler için iki çalışma durumu vardır. Bunlardan birisi sabit (veya maksimum) güç sağlarken diğer durum yük talebini karşılar.

3. RÜZGAR TÜRBİN MODELİ

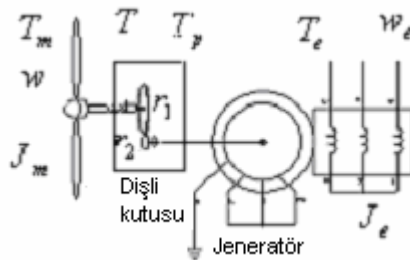
Son 10 yıl esnasınca rüzgâr türbinlerinin geliştirilmiş güç jeneratörlerinde kullanılması yaygınlaşmıştır. Dünya pazarı için rüzgâr türbin jeneratörleri ile elektrik gücü üretiminin gittikçe artış göstermesiyle rüzgâr teknolojisini doğrudan daha fazla rekabet edilebilir yaptı. Son zamanlarda şirketlerin pozitif eğilimleri müşterilere yenilenebilir enerji sunmaktır. Çevresel olarak bilinçli olan birçok müşteri artık rüzgâr türbinlerinden elde edilen enerji gibi yeşil enerji kaynaklarını tercih ediyor. Elektrik kaynaklarının dağıtımına ve yeşil enerjiye olan istek rüzgâr türbin araştırmaları üzerindeki önemi artırmıştır. Rüzgâr türbinlerinin kullanımının birçok farklı yolları vardır fakat esas kullanımı var olan elektrik güç aktarım hatları içerisinde bütünleşmesidir. Bu tezin ana amacı bir rüzgâr türbininin modellenmesi, simülasyonu ve kontrolüdür.

Bu tez için belirlenen özel adımlar aşağıdaki gibi olacaktır.

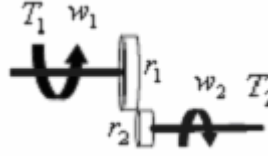
- 1- Bir rüzgâr türbini seçimi ve temel çalışması. Fiziki özellik bilgilerini ve rüzgâr türbininin matematiksel modelini çıkarmak.
- 2- Sabit bir rotor frekansı ve sabit bir rüzgâr çıkış gücü sağlamada bir kontrolör tasarlamak.
- 3- Çıkış değerlerinde yada bu değerde oluşabilecek sapmaların belirli bir aralıkta ve diğer bağlanmış kaynaklarla karşılaştırılabilir olması.

3.1 Rüzgar Türbinin Matematiksel Modellenmesi

Bu bölümde Şekil 1.1 de verilen temsili bir rüzgar türbini ele alınıp, matematiksel formülasyonu elde edilecektir.



Şekil 3.1: Genel Türbin Görüntüsü



Şekil 3.2: Dişli Yapısı

Şekil 3.2 de görüldüğü üzere, dişlilerin kontak noktasındaki hızların eşit olması gerektiği fikrinden hareketle aşağıdaki ilişki yazılabilir,

$$r_1 \cdot w_1 = r_2 \cdot w_2 \quad (3.1.1)$$

Burada w_1, w_2 dişlilerin açısal hızlarını, r_1, r_2 ise dişlilerin yarıçaplarını temsil etmektedir. Yine Şekil 3.2 de görüldüğü üzere, dişliler vasıtasıyla şaftlardaki tork yerine güç transferinin gerçekleştiği bilindiğinden aşağıdaki ilişkiyi yazabiliriz,

$$(Güç)_1 = (Güç)_2 \Rightarrow T_1 \cdot w_1 = T_2 \cdot w_2 \quad (3.1.2)$$

Burada T_1, T_2 dişlilerin momentlerini(torklarını) göstermektedir.

Dişlilerin diş sayıları ile dişli yarıçapları arasında ilişki aşağıdadır:

$$\left. \begin{array}{l} 2\pi r_2 = n_2 d \\ 2\pi r_1 = n_1 d \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{r_2}{r_1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3.1.3)$$

Şekil 1.4 deki sisteme Newton un 2. kanunu uygulanırsa aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\sum moment = J_m \alpha = J_m \frac{d\omega}{dt} = J_m \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

Biz bu çalışmada

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} = \dot{\theta}, \quad \alpha = \frac{d\omega}{dt}, \quad \alpha = \frac{d^2\theta}{dt^2} = \ddot{\theta} \quad (3.1.4)$$

notasyonları seçilmiştir.

$$\Rightarrow T_m - T - B_m \omega - K_m \theta = J_m \alpha = J_m \dot{\omega} = J_m \ddot{\theta} \quad (3.1.5)$$

$$\Rightarrow T_p - T_e = J_e \dot{\omega}_e + B_e \omega_e + K_e \theta_e \quad (3.1.6)$$

(3.1.5) ve (3.1.6) ifadesinde geçen T_m , T , T_p ve T_e ifadeleri: rüzgarın oluşturduğu tork, dişli kutusunun girişindeki tork, dişli kutusunun çıkışındaki tork ve jeneratörün giriş torku şeklinde tanımlanır. Burada (3.1.5) ifadesi türbin pervanesi ile dişli kutusu girişi arasında yazılan moment denklemdir. Benzer şekilde (3.1.6) ifadesi de dişli kutusu çıkışı ile jeneratör arasında yazılan moment denklemdir. (3.1.2) bahsedilen ifade Şekil 3.1 deki dişli için yazılırsa

$$T \omega = T_p \omega_e \quad (3.1.7)$$

denklemini elde edilir. (3.1.7) ifadesinde gerekli işlemler yapıldığında

$$T = T_p \frac{\omega_e}{\omega} \Rightarrow \frac{T}{T_p} = \frac{\omega_e}{\omega} \quad (3.1.8)$$

Formülasyonu elde edilir. (3.1.8) denkleminde:

$$\gamma = \frac{\omega_e}{\omega} \quad (3.1.9)$$

olarak tanımlanırsa,

$$\frac{T}{T_p} = \gamma \quad (3.1.10)$$

elde edilir.

Burada (3.1.5) ve (3.1.6) ifadeleri uygun matematiksel işlemler uygulanıp gerekli düzenlemeler yapıldığında aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$T_m \omega - T \omega = B_m \omega^2 + K_m \theta \omega + J_m \omega \dot{\omega} \quad (3.1.11)$$

$$T_p \omega_e - T_e \omega_e = J_e \dot{\omega}_e \omega_e + B_e \omega_e^2 + K_e \theta_e \omega_e \quad (3.1.12)$$

(3.1.11) ve (3.1.12) İfadelerini bir matematiksel eşitlik sistemi şeklinde düşünüp uygun matematiksel işlemler ve sadeleştirmeler yapıp ortak bir çözüm yaptığımızda aşağıdaki denklemini elde etmiş oluruz.

$$T_m \omega - T_e \omega_e = J_m \dot{\omega} \omega + J_e \dot{\omega}_e \omega_e + B_m \omega^2 + B_e \omega_e^2 + K_m \theta \omega + K_e \theta_e \omega_e \quad (3.1.13)$$

(3.1.9) ifadesinde uygun matematiksel değişimler yapılrısa:

$$\omega_e = \gamma \omega \Rightarrow \gamma = \frac{\omega_e}{\omega} \Rightarrow \gamma = \frac{\frac{d\theta_e}{dt}}{\frac{d\theta}{dt}} \Rightarrow \gamma = \frac{\dot{\theta}_e}{\dot{\theta}} \Rightarrow \gamma \dot{\theta} = \dot{\theta}_e \quad (3.1.14)$$

(3.1.14) ifadesinde matematiksel düzenlemeler yapılrısa

$$d\theta_e = \gamma d\theta \Rightarrow \theta_e = \gamma \theta + c \Rightarrow \theta_e = \gamma \theta \quad (3.1.15)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadede c sabiti ihmal edildi. (3.1.9) ve (3.1.15) ifadesindeki notasyonları (3.1.13) numaralı ifadeye uygulayıp gerekli işlemler ve sadeleştirmeler yapıldığında (3.1.16) numaralı eşitlik aşağıdaki gibi elde edilir.

$$T_m \omega - T_e \gamma \omega = J_m \dot{\omega} \omega + J_e \gamma \dot{\omega} \gamma \omega + B_m \omega^2 + B_e \gamma^2 \omega^2 + K_m \theta \omega + k_e \gamma \theta \gamma \omega \quad (3.1.16)$$

(3.1.14) numaralı eşitlikte gerekli matematiksel düzenlemeler yapıldığında:

$$\omega(T_m - T_e \gamma) = \dot{\omega}(J_m + J_e \gamma^2) + \omega^2(B_m + B_e \gamma^2) + \theta \omega(K_m + k_e \gamma^2) \quad (3.1.17)$$

$$\Rightarrow T_m - T_e \gamma = \dot{\omega}(J_m + J_e \gamma^2) + \omega(B_m + B_e \gamma^2) + \theta(K_m + k_e \gamma^2) \quad (3.1.18)$$

(3.1.16) numaralı eşitlikte uygun notasyonları aşağıdaki gibi tanımlayalım.

$$\left. \begin{aligned} J &= J_e + J_m \gamma^2 \\ B &= B_m + B_e \gamma^2 \\ K &= K_m + K_e \gamma^2 \end{aligned} \right\} \quad (3.1.19)$$

(3.1.19) numaralı gösterimleri (3.1.18) numaralı eşitlikte uygulamasını yaparsak:

$$T_m - T_e \gamma = \dot{\omega} J + \omega B + \theta K \quad (3.1.20)$$

(3.1.20) eşitliği elde edilir.

$$\omega T_m = p_m \text{ ve } \omega_e T_e = p_e \quad (3.1.21)$$

Olduęundan (3.1.22) ifadesi elde edilir.

$$\dot{\omega} J + \omega B + \theta K = \frac{P_m}{\omega} - \gamma \frac{P_e}{\omega_e} \quad (3.1.22)$$

(3.1.22) eşitliğinde uygun işlemler yapılarak düzenleme yapılrısa:

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} \frac{P_m}{\omega} - \frac{\gamma}{J} \frac{P_e}{\omega_e} - \frac{B}{J} \omega - \frac{K}{J} \theta \quad (3.1.23)$$

(3.1.23) eşitliği elde edilir. Jeneratörün gücü P_e ,

$$P_e = K_\phi \omega_e C(I_f) \quad (3.1.24)$$

olarak verilmektedir [10]

Burada $C(I_f)$ fonksiyonu I_f akımı ile lineer olarak değiştiği kabul edildiğinden

$$C(I_f) = K_3 I_f, \quad (K_3 = \text{sabit}) \quad (3.1.25)$$

ifadesi yazılabilir [10]. (3.1.24) ve (3.1.25) denklemlerinden,

$$\Rightarrow P_e = K_\phi K_3 \omega_e I_f \Rightarrow \frac{P_e}{\omega_e} = K_\phi K_3 I_f$$

$$(3.1.26)$$

(3.1.26) ifadesi (3.1.23) ifadesinde yerine yazılırsa,

$$\dot{\omega} = \frac{1}{J} \frac{P_m}{\omega} - \frac{\gamma}{J} K_\phi K_3 I_f - \frac{B}{J} \omega - \frac{K}{J} \theta \quad (3.1.27)$$

ifadesi elde edilir. (3.1.27) denklemi ile verilen jeneratör gücü P_e nin bağlı olduğu

I_f akımı (3.1.28) ile verilen bir voltaj kaynağından beslenir

$$L \frac{d I_f}{dt} + I_f R_f = u_f \Rightarrow \frac{d I_f}{dt} = u_f - \frac{1}{L} I_f R_f \quad (3.1.28)$$

ifadesi elde edilir.

Türbinin gücü, performans (güç) katsayısı $C_{p, mak}$ cinsinden aşağıdaki şekilde verilmektedir [7-8].

$$P_m = \frac{1}{2} C_{p, mak} \rho \pi \frac{R^5 \omega^3}{\lambda_{opt}} \Rightarrow P_m = K_\omega \omega^3 \quad (3.1.29)$$

burada,

$$K_\omega = \frac{1}{2} C_{p, max} \rho \pi \frac{R^5}{\lambda_{opt}} \quad (3.1.30)$$

olarak tanımlanmaktadır.

(3.1.29), ifadesi (3.1.27) denkleminde yerine konursa

$$\dot{\omega} = \frac{K_\omega}{J} \omega^2 - \frac{\gamma}{J} K_\phi K_3 I_f - \frac{B}{J} \omega - \frac{K}{J} \theta \quad (3.1.31)$$

elde edilir. Bu durumda

$$\begin{aligned}\dot{\theta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= \frac{k_{\omega}}{J} \omega^2 - \frac{\gamma}{J} K_{\phi} K_3 I_f - \frac{B}{J} \omega - \frac{K}{J} \theta \\ \dot{I}_f &= u_f - \frac{1}{L} I_f R_f\end{aligned}\tag{3.1.32}$$

durum denklemleri elde edilir. (3.1.32) durum denklemlerindeki $\frac{k_{\omega}}{J} \omega^2$ terimi lineer olmayan bir terimdir. Bu durumda, durum denklemleri referans şartları civarında lineerleştirilmelidir.

Lineer kontrol sistemlerinin çözümü literatürde verilmektedir. Aşağıdaki bölümde lineer kontrol sistemleri özetlenmiştir.

Bu tezin amaçlarından biri (3.1.32) numaralı lineer olmayan durum denklemlerinin lineer hale getirilip Matlab-Simulink yazılımı kullanılarak modellenmesi ve simulasyonunun yapılmasıdır. Bu tezin diğer iki amacı ise (3.1.32) numaralı lineer olmayan durum denklemlerinin lineer hale getirilmeden “siliding mode control” ve “feedback linearization control” olmak üzere iki ayrı lineer olmayan (nonlinear) kontrol yöntemiyle analiz edilip Matlab-Simulink yazılımı kullanılarak modellenmesi ve simulasyonunun yapılmasıdır. Bu durumda

1. Spesifik referans şartları civarında lineerleştirme ile kontrol “Linearization about a set point control”
2. Siliding mode control
3. Feedback linearization control

yöntemlerinin teorisi kısaca ele alınacak ve daha sonra da bu yöntemler (3.1.32) numaralı durum denklemlerine uygulanacaktır.

3.2 Spesifik Referans Şartları Civarında Lineerleştirme ile Kontrol “Linearization about a set point control”

Lineer olmayan durum denklemleri lineer hale getirilirse aşağıdaki lineer durum denklemleri formu elde edilmiş olur.

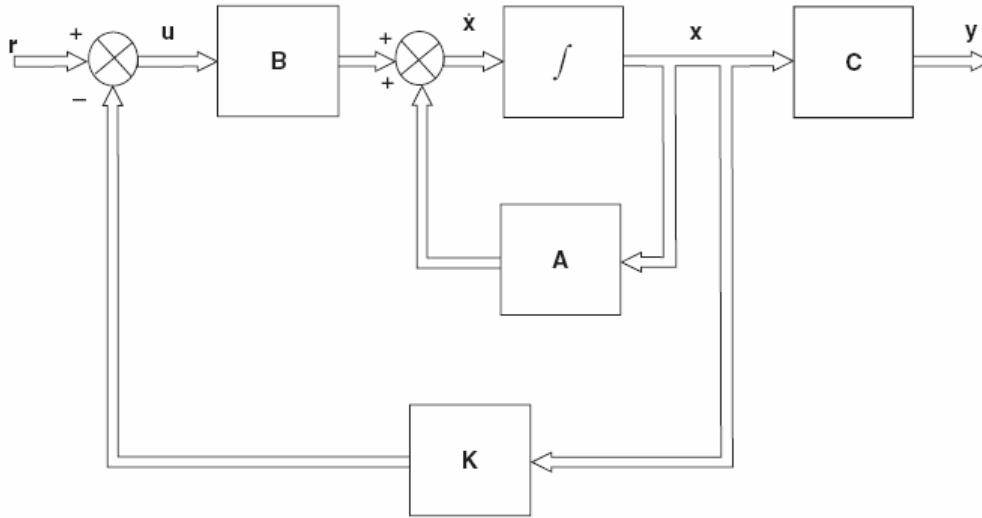
$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3.2.1)$$

$$y = Cx \quad (3.2.2)$$

Lineer kontrol

$$u = r - Kx \quad (3.2.3)$$

ifadesi ile tanımlanmaktadır. Burada $r(t)$ sistemin referans girişi K ise geri beslemeli kazanç matrisini ifade eder. (3.2.1), (3.2.2) ve (3.2.3) ile verilen lineer sistemin blok diyagramı Şekil 3.3 de gösterilmektedir.



Şekil 3.3: Geri beslemeli lineer sistemin blok diyagramı

(3.2.3) ifadesi (3.2.1) de yerine konursa,

$$\dot{x} = Ax + B(r - Kx) \Rightarrow \dot{x} = (A - BK)x + Br \Rightarrow \dot{x} = \bar{A}x + Br \quad (3.2.4)$$

elde edilir. (3.2.4) ifadesinde bulunan matris $(A - BK)$ kapalı döngü sistem matrisidir.

Sistemin stabilitesi için

$$|\lambda I - \bar{A}| = 0 \Rightarrow |\lambda I - A + BK| = 0 \quad (3.2.5)$$

karakteristik denkleminin köklerinin veya $\bar{A}$ matrisinin özdeğerlerinin reel kısmının negatif olması gerekmektedir.

3.3 Spesifik Referans Şartları Civarında Lineerleştirme Metodunun Ele Aldığımız Durum Denklemlerinin Kontrolü “Linearization About A Set Point Control”

Sistemin hareket denklemlerinin

$$\dot{\theta} = \omega \quad (3.3.1)$$

$$\dot{\omega} = -\frac{K}{J} \theta - \frac{B}{J} \omega + \frac{K_{\omega}}{J} \omega^2 - \frac{\gamma}{J} k_{\phi} C(I_F) \quad (3.3.2)$$

şeklinde olduğu bilinmektedir. Burada “ $\frac{k_{\omega}}{J} \omega^2$ ” terimi ile “ $C(I_F)$ ” terimi nonlinear terimlerdir. Dolayısıyla (3.3.1) ve (3.3.2) denklemleri nonlinear denklemlerdir. Bu denklemleri referans şartları civarında lineerleştirelim.

$$\Delta \dot{\theta} = \Delta \omega \quad (2.3.3)$$

$$\Delta \dot{\omega} = -\frac{K}{J} \Delta \theta + \left. \frac{-B + 2k_{\omega} \omega}{J} \right|_{\omega = \omega_{ref}} \Delta \omega - \left. \frac{\gamma}{J} K_{\phi} \frac{\partial C}{\partial I_f} \right|_{I_f = I_{f,ref}} \Delta I_f \quad (3.3.4)$$

Bu yöntemde kontrol $\Delta u = \Delta I_f$ olarak alınırsa,

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\theta} \\ \Delta \dot{\omega} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \omega \end{bmatrix} + B \Delta u \quad (3.3.5)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \omega \end{bmatrix}$$

Olarak bulunur. A ve B matrisleri

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K}{J} & a_{22} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (3.3.6)$$

ve

$$a_{22} = -\frac{B}{J} + 2\frac{k_{\omega}}{J} \omega_{ref}, \quad b_2 = -\frac{\gamma}{J} k_{\phi} \frac{\partial C}{\partial I_f} \Big|_{ref} \quad (3.3.7)$$

şeklindedir. Şimdi (3.3.5)-(3.3.7) lineer denklemlerinin stabilitesini (kararlılığını) inceleyelim.

$$|\lambda I - A| = 0 \quad \Rightarrow \quad \left| \lambda \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K}{J} & a_{22} \end{bmatrix} \right| = 0 \quad \Rightarrow \quad \left| \begin{bmatrix} \lambda & -1 \\ -\frac{K}{J} & \lambda + a_{22} \end{bmatrix} \right| = 0 \quad (3.3.8)$$

$$\Rightarrow \quad \lambda(\lambda + a_{22}) + \frac{K}{J} = 0 \quad (3.3.9)$$

a_{22} yerine yazılırsa

$$\Rightarrow \quad \lambda^2 + \left(\frac{B}{J} - \frac{K_{\omega}}{J} \omega_{ref} \right) \lambda + \frac{K}{J} = 0 \quad (3.3.10)$$

olarak bulunur. (2.3.10) numaralı ifadenin kökleri

$$\lambda_{1,2} = -\frac{B}{J} + \frac{K_{\omega} \omega_{ref}}{J} \mp \sqrt{\Delta} \quad , \quad \Delta = \left\{ (B - K_{\omega} \omega_{ref})^2 - 4 K J \right\} / J^2 \quad (3.3.11)$$

olarak bulunur. Bilindiği üzere sistemin kararlılığı için köklerin reel kısmının negatif olması gerektiği şartı garanti edilmelidir.

$$\text{Eğer } \Delta \leq 0 \quad \Rightarrow \quad -B + K_{\omega} \omega_{ref} < 0 \text{ olmalıdır.} \quad (3.3.12)$$

$$\text{Aksi halde } -B + K_{\omega} \omega_{ref} + \sqrt{(B - K_{\omega} \omega_{ref})^2 - 4 K J} < 0 \text{ olmalıdır} \quad (3.3.13)$$

(2.3.12) ve (2.3.13) eşitsizlikleri sağlandığı durumda sistem kontrol olmadan bile kararlı olmuş olur. Lineer kontrol,

$$\Delta u = -k_1 \Delta \theta - k_2 \Delta \omega \quad \Rightarrow \quad \Delta u = (-k_1 - k_2) \begin{bmatrix} \Delta \omega \\ \Delta \theta \end{bmatrix} \quad (3.3.14)$$

Olarak tanımlansın. (3.3.14) ifadesi (3.3.5) ifadesinde yerine konursa

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\theta} \\ \Delta \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K}{J} & -a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_2 \end{bmatrix} [-k_1 \quad -k_2] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \omega \end{bmatrix} \quad (3.3.15)$$

$$\Rightarrow \quad \begin{bmatrix} \Delta \dot{\theta} \\ \Delta \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K}{J} - b_2 k_1 & -a_{22} - b_2 k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \omega \end{bmatrix} \quad (3.3.16)$$

$$\Rightarrow \quad \begin{bmatrix} \Delta \dot{\theta} \\ \Delta \dot{\omega} \end{bmatrix} = \bar{A} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta \omega \end{bmatrix} \quad (3.3.17)$$

Burada

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K}{J} - b_2 k_1 & -a_{22} - b_2 k_2 \end{bmatrix} \quad (3.3.18)$$

şeklindedir. Şimdide (3.3.18) ifadesinin stabilitesini araştıralım;

$$|\lambda I - \bar{A}| = 0 \quad (3.3.19)$$

$$\begin{vmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{vmatrix} - \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K}{J} - b_2 k_1 & -a_{22} - b_2 k_2 \end{vmatrix} = 0 \quad (3.3.20)$$

$$\lambda^2 + \lambda(a_{22} + b_2 k_2) + \frac{K}{J} + b_2 k_1 = 0 \quad (3.3.21)$$

(3.3.21) denkleminin kökleri arzu edilen kökler (pole placement technique) elde edilecek şekilde seçmek mümkündür.

Örneğin arzu edilen kökler: $\lambda_1 = -2$ ve $\lambda_2 = -3$ olsun. Bu durumda karakteristik denklem

$$(\lambda + 2)(\lambda + 3) = 0 \Rightarrow \lambda^2 + 5\lambda + 6 = 0 \quad (3.3.22)$$

formunda olacaktır.

(3.3.21) ve (3.3.22) polinomlarının eşitliğinden

$$a_{22} + b_2 k_2 = 5 \Rightarrow \frac{B}{J} - \frac{2k_\omega}{J} \omega_{ref} - \frac{\gamma}{J} k_\phi K_3 k_2 = 5 \quad (3.3.23)$$

$$\Rightarrow k_2 = \frac{B - 2k_\omega \omega_{ref} - 5J}{\gamma k_\phi K_3} \quad (3.3.24)$$

ve

$$\frac{K}{J} + b_1 k_1 = 6 \Rightarrow k_1 = \frac{6 - \frac{K}{J}}{\frac{\gamma}{J} k_\phi K_3} = \frac{K - 6J}{\gamma k_\phi K_3} \quad (3.3.25)$$

Böylece verilen (3.3.1) ve (3.3.2) numaralı denklemlerin belli bir referans aralığında lineerleştirilmiş kontrolü elde edilmiş oldu. Bulduğumuz bu sonuçların Matlab-Simulink ile simülasyonu Şekil 4.1 de verilmektedir.

3.4. Sliding Mode Kontrol

3.4.1 Sliding Mode Kontrol Teorisi

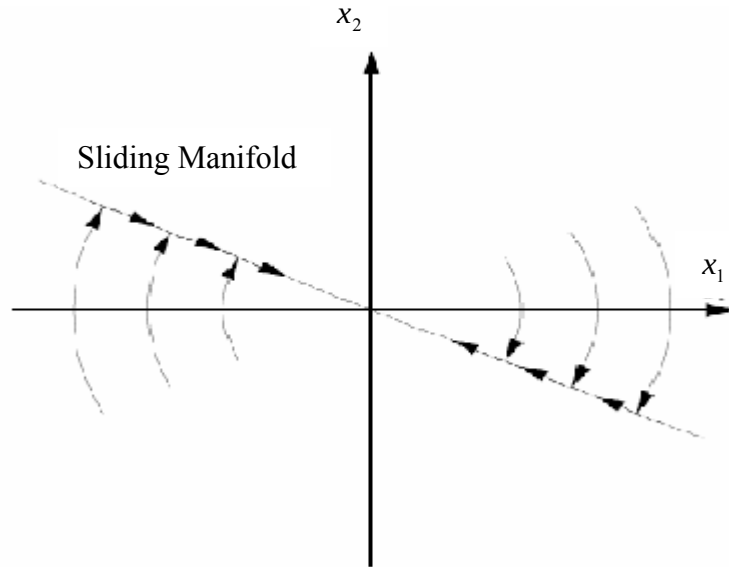
Herhangi ikinci dereceden lineer olmayan bir sistemin durum denklemleri

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3.4.1)$$

$$\dot{x}_2 = f(x) + g(x)u \quad (3.4.2)$$

şeklinde olsun. Burada $f(x)$ ve $g(x)$ lineer olmayan (nonlinear) fonksiyonlar olup $g(x) > 0$ olduğu varsayılmaktadır.

Ulaşılan evre (Reaching mode) ve orjine varma (sliding mode) dinamikleri Şekil 3.8 de $x_1 - x_2$ hata durum uzayında gösterilmektedir.



Şekil 3.4: Sliding manifold

Sliding mode “S” aşağıda tanımlanmaktadır.

$$S = x_2 + ax_1 \Rightarrow x_2 = S - ax_1 \quad (3.4.3)$$

(3.4.3) denklemini (3.4. 1) denkleminde yerine yazarsak:

$$\dot{x}_1 = x_2 = -ax_1 + S \quad (3.4.5)$$

elde edilir.

$S = 0$ durumu için (3.4.5) denkleminde

$$\dot{x}_1 = x_2 = -ax_1 \quad (3.4.7)$$

ifadesi bulunur. (3.4.7) numaralı ifadenin kararlı olduğu açıktır.

$$S = x_2 + ax_1 \quad \Rightarrow \quad \dot{S} = \dot{x}_2 + a x_1 = \underbrace{f(x) + g(x)u}_{\dot{x}_2} + ax_1 \quad (3.4.8)$$

Sliding mode kontrol iki evrede gerçekleşir. Birinci evre “reachin phase” sistemin doğruya (sliding manifolda) ulaşma safhası olup, ikinci evre ise “sliding phase” sistemin doğru (manifold) üzerinde kaydırılması ile hata durum uzayının orjinine yakınsaması safhasıdır.

3.4.2 Lyapunov Fonksiyonu

Herhangi bir $V(x_1, x_2)$ Lyapunov fonksiyonu aşağıdaki şartları sağlıyorsa sistem kararlıdır:

$$V(x_1, x_2) > 0, \quad \forall \quad (x_1, x_2) \neq 0 \quad (3.4.9)$$

$$V(0,0) = 0 \quad (3.4.10)$$

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} \leq 0, \quad \text{her } (x_1, x_2) \text{ için.} \quad (3.4.11)$$

Bu teoriyi S sliding mode manifoldu olmak üzere

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (3.4.12)$$

şeklinde tanımlanan bir Lyapunov fonksiyonuna uygulayalım. S^2 teriminden dolayı (3.4.9) şartı doğrudan sağlanmaktadır. Şimdi (3.4.11) şartını araştıralım;

$$V = \frac{1}{2} S^2 = \frac{1}{2} (x_2 + ax_1)^2 \quad \Rightarrow \quad \dot{V} = S \dot{S} \quad (3.4.13)$$

(3.4.8) ifadeleri (3.4.13) denkleminde yerine konursa

$$\Rightarrow \quad \dot{V} = S \dot{S} = \underbrace{[x_2 + ax_1]}_S \underbrace{[f(x_1, x_2) + g(x_1, x_2)u + ax_1]}_{\dot{S}} \quad (3.4.14)$$

denklemini bulunur. Bu teoride amacımız $\dot{V}$ ifadesinin negatif olmasını sağlamaktır.

S ve $\dot{S}$ aşağıdaki şekilde seçilirse $\dot{V}$ ifadesinin negatif olması şartı sağlanmış olur.

$$S > 0 \quad \Rightarrow \quad \dot{S} < 0 \quad (3.4.15)$$

$$\dot{S} < 0 \Rightarrow \dot{S} > 0 \quad (3.4.16)$$

Bir başka deyişle $\dot{V} = S \dot{S}$ (3.4.14) ifadesine göre “S” fonksiyonu ile “ $\dot{S}$ ” fonksiyonları ters işaretli ise $\dot{V}$ ifadesi daima negatif olur.

$$\dot{S} = f(x_1, x_2) + g(x_1, x_2)u + ax_2 \quad \begin{cases} < 0 \Rightarrow S > 0 \\ = 0 \Rightarrow S = 0 \\ > 0 \Rightarrow S < 0 \end{cases} \quad (3.4.17)$$

(3.4.17) denkleminde

$$\dot{S} = f(x_1, x_2) + g(x_1, x_2)u + ax_2 = 0 \Rightarrow u = -\frac{f(x_1, x_2) + ax_2}{g(x_1, x_2)} \quad (3.4.18)$$

Eğer

$$\beta(x_1, x_2) = \frac{f(x_1, x_2) + ax_2}{g(x_1, x_2)} \quad (3.4.19)$$

olarak tanımlanırsa (3.4.17) aşağıdaki şekilde de ifade edilmiş olur.

$$\dot{S} < 0 \Rightarrow u < -\beta(x_1, x_2) \quad (3.4.20)$$

$$\dot{S} = 0 \Rightarrow u = \beta(x_1, x_2) \quad (3.4.21)$$

$$\dot{S} > 0 \Rightarrow u > -\beta(x_1, x_2) \quad (3.4.22)$$

(3.4.20)- (3.4.22) ile verilen üç şartı da sağlayan aşağıdaki ifadeyi yazabiliriz;

$$u = -\beta(x_1, x_2) - K \operatorname{sign}(s), \quad (K > 0) \quad (3.4.23)$$

(3.4.8) ve (3.4.19) ifadeleri (3.4.23) denkleminde yerine konursa:

$$u = -\frac{[ax_2 + f(x_1, x_2)]}{g(x_1, x_2)} - K \operatorname{sgn}(x_2 + ax_1) \quad (3.4.24)$$

olarak u kontrol fonksiyonu elde edilir.

3.5. Sliding Mode Kontrol Yönteminin Ele aldığımız Durum Denklemlerine Uygulanışı

(3.1.32) ile verilen sistemin denklemlerini tekrar yazalım:

$$\begin{aligned}\dot{\theta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= -\frac{K}{J} \theta - \frac{B}{J} \omega + \frac{k_{\omega}}{J} \omega^2 - \frac{\gamma}{J} K_{\phi} k C(I_f) \end{aligned} \quad (3.5.1)$$

$$\dot{I}_f = u_f - \frac{1}{L} I_f R_f$$

Sliding mode yönteminde I_f yi kontrol olarak ele alacağız ve (3.5.1) denkleminde

$$C(I_f) = C(u) = K_3 u ,$$

olarak kabul edilmektedir.

$$\theta_{opt} - \theta = x_1 \quad \Rightarrow \quad \theta_{opt} - x_1 = \theta ,$$

$$\omega_{opt} - \omega = x_2 \quad \Rightarrow \quad \omega_{opt} - x_2 = \omega$$

ve

$$I_f = u$$

olduğunu kabul edip ele aldığımız (3.5.1) denkleminde uygulayalım. Burada x_1 ve x_2 sistemin hata parametreleridir.

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\dot{\omega} = \underbrace{\frac{B}{J}(\omega_{opt} - x_2) + \frac{k}{J}(\theta_{opt} - x_1) - \frac{k_{\omega}}{J}(\omega_{opt} - x_2)^2}_{f(x_1, x_2)} + \underbrace{\left(-\frac{\gamma}{J} k_{\phi} K_3\right) u}_{g(x_1, x_2)} \end{aligned} \quad (3.5.2)$$

Ayrıca

$$f(x_1, x_2) = \frac{B}{J}(\omega_{opt} - x_2) + \frac{k}{J}(\theta_{opt} - x_1) - \frac{k_{\omega}}{J}(\omega_{opt} - x_2)^2 , \quad (3.5.4)$$

$$g(x_1, x_2) = -\frac{\gamma}{J} k_{\phi} K_3 \quad (3.5.5)$$

olduğu da not edilmelidir. (3. 4.24), (3.5.4) ve (3.5.5) denklemlerinden sliding mode kontrol

$$u = \frac{\frac{B}{J}(\omega_{opt} - x_2) + \frac{k}{J}(\theta_{opt} - x_1) - \frac{k_{\omega}}{J}(\omega_{opt} - x_2)^2 - ax_2}{\frac{\gamma}{J}k_{\phi}K_3} - K \operatorname{sgn}(x_2 + ax_1) \quad (3.5.6)$$

(3.5.6) ile verilen Sliding Mode kontrol fonksiyonunun (3.5.1) sistemine uygulanması halinde oluşan sistemin Matlab-Simulink simülasyonu şekil 4.2 de verilmektedir.

3.6 “Feedback Linearization Control” Metodu

Bu metodun esasını oluşturan prensibi bir örnek ile açıklayalım.

Birinci dereceden herhangi bir sistemin hata denkleminin

$$\dot{\varepsilon} = -a\varepsilon, \quad a > 0, \quad \varepsilon(0) = \varepsilon_0 \quad (3.6.1)$$

şeklinde olduğu kabul edilirse, bu hatanın zamanla sifıra yakınsayacağı (3.6.1)

denklemin çözümü olan (3.6.2) ifadesinden görülebilir.

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 e^{-at} \quad (3.6.2)$$

Bu fikirden hareketle kontrol edilmesi arzu edilen birinci dereceden aşağıda örnek olarak verilen (3.6.3) nonlineer diferansiyel denklemin hata denklemine dönüştürüldükten sonra (3.6.1) formuna getirilmesi amaçlanmaktadır.

Bu durumda aşağıdaki adımlar gerçekleştirilmelidir.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (3.6.3)$$

Bu çalışmada,

$$\varepsilon = x - x_0, \quad x_0 = \text{sabit} \quad (3.6.4)$$

$$\dot{\varepsilon} = \dot{x} \quad (3.6.5)$$

notasyonlarını kullanacağız. (3.6.4) ve (3.6.5) ifadeleri (3.6.3) denkleminde yazılırsa

$$\dot{\varepsilon} = f(\varepsilon + x_0) + g(\varepsilon + x_0)u \quad (3.6.6)$$

elde edilir. (3.6.6) ve (3.6.1) denklemlerinden,

$$f(\varepsilon + x_0) + g(\varepsilon + x_0)u = -a\varepsilon \quad \Rightarrow \quad u = \frac{-a\varepsilon - f(\varepsilon + x_0)}{g(\varepsilon + x_0)} \quad (3.6.7)$$

ifadesi elde edilir. Burada $g(\varepsilon + x_0) \neq 0$ olması gerektiği not edilmelidir.

3.7 “Feedback Linearization Control” Metodu İle Ele Aldığımız sistemin Kontrolü

Ele aldığımız sistemin durum denklemini tekrar yazalım

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= -\frac{K}{J} \theta - \frac{B}{J} \omega + \frac{K_{\omega}}{J} \omega^2 - \frac{\gamma}{J} k_{\phi} C(I_F) \end{aligned} \quad (3.7.1)$$

(3.7.1) numaralı denklemde $C(I_f) = K_3 I_f$ olarak yazılırsa

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega \\ \dot{\omega} &= -\frac{K}{J} \theta - \frac{B}{J} \omega + \frac{K_{\omega}}{J} \omega^2 - \frac{\gamma}{J} k_{\phi} K_3 I_F \end{aligned} \quad (3.7.2)$$

ifadesi elde edilir. Eğer

$$\begin{aligned} \theta_r - \theta &= x_1 \quad \Rightarrow \quad \theta = \theta_r - x_1 \\ \omega_r - \omega &= x_2 \quad \Rightarrow \quad \omega = \omega_r - x_2 \end{aligned} \quad (3.7.3)$$

$$\dot{\omega}_r - \dot{\omega} = \dot{x}_2 \quad \Rightarrow \quad \dot{\omega} = \dot{\omega}_r - \dot{x}_2$$

dönüşümleri yapılırsa, (3.7.2) ifadesi

$$\dot{\omega}_r - \dot{x}_2 = -\frac{K}{J}(\theta_r - x_1) - \frac{B}{J}(\omega_r - x_2) + \frac{K_{\omega}}{J}(\omega_r - x_2)^2 - \frac{\gamma}{J} k_{\phi} K_3 I_F \quad (3.7.5)$$

$$\Rightarrow \quad \dot{x}_2 = \dot{\omega}_r + \frac{K}{J}(\theta_r - x_1) + \frac{B}{J}(\omega_r - x_2) - \frac{K_{\omega}}{J}(\omega_r - x_2)^2 + \frac{\gamma}{J} k_{\phi} K_3 I_F \quad (3.7.6)$$

olarak elde edilir.

$$f(x_1, x_2) = \dot{\omega}_r + \frac{K}{J}(\theta_r - x_1) + \frac{B}{J}(\omega_r - x_2) - \frac{K_{\omega}}{J}(\omega_r - x_2)^2, \quad (3.7.7)$$

$$g(x_1, x_2) = \frac{\gamma}{J} k_{\phi} K_3 \quad (3.7.8)$$

$I_f = u$ olarak tanımlanırsa (3.7.6) denklemi

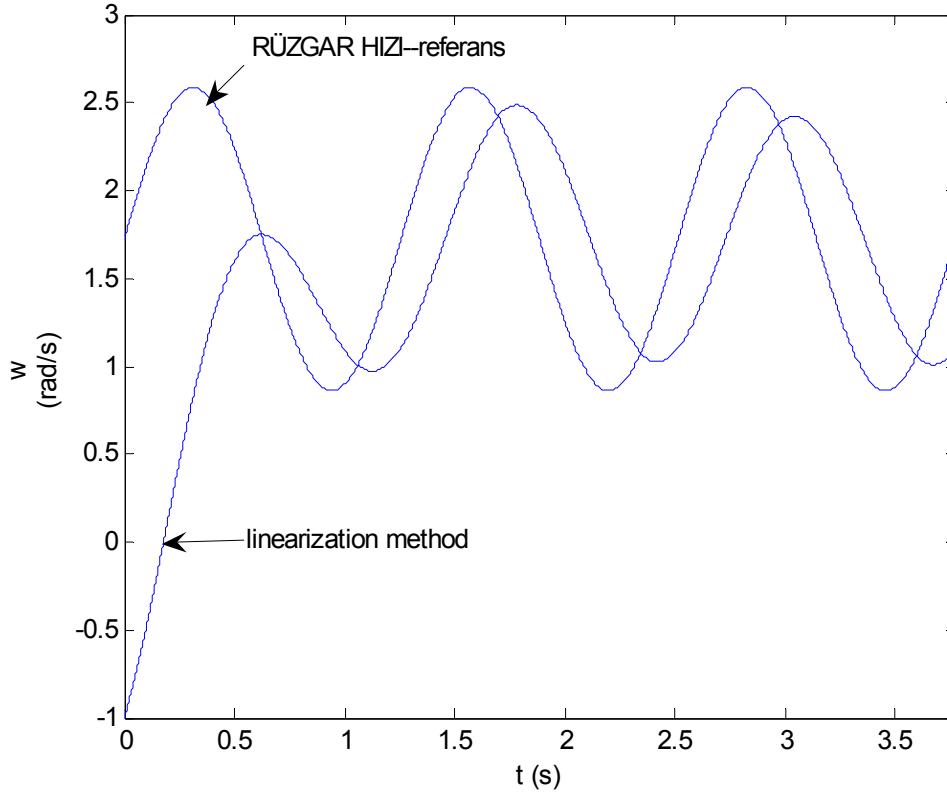
$$\dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + g(x_1, x_2)u \quad (3.7.9)$$

olarak bulunur. Feedback linearization kontrol fonksiyonu ise

$$u = -\frac{a x_2 + f(x_1, x_2)}{g(x_1, x_2)} \quad (3.7.10)$$

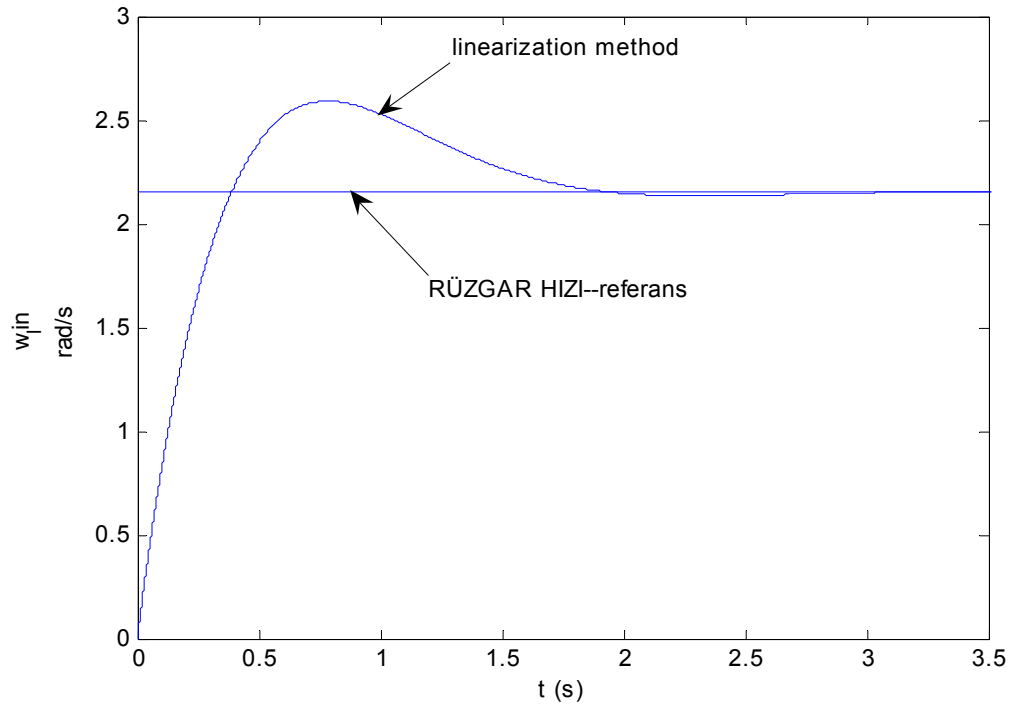
olarak elde edilir. (3.7.10) feedback linearization kontrol fonksiyonunun (3.7.1) ile tanımlanan sisteme uygulanması halinde oluşan sistemin Matlab-Simulink simülasyonu şekil 4.3 de verilmektedir.

Bu simülasyonların her birinde kontrol metodları orijinal sistem olan linear olmayan (nonlinear) sisteme uygulanmıştır. Ayrıca simülasyonlar aynı ilk şartlarda ve aynı sistem parametreleri kullanılarak elde edilmiştir. Bulunan simülasyon sonuçları karşılaştırmalı olarak aşağıdaki grafiklerde verilmiştir.



Şekil 4.4a: Linearization method ile kontrol edilen sistemin türbin açısal hızının (ω_{lin}) rüzgar referans hızı (ω_{ref}) ile karşılaştırılması grafiği

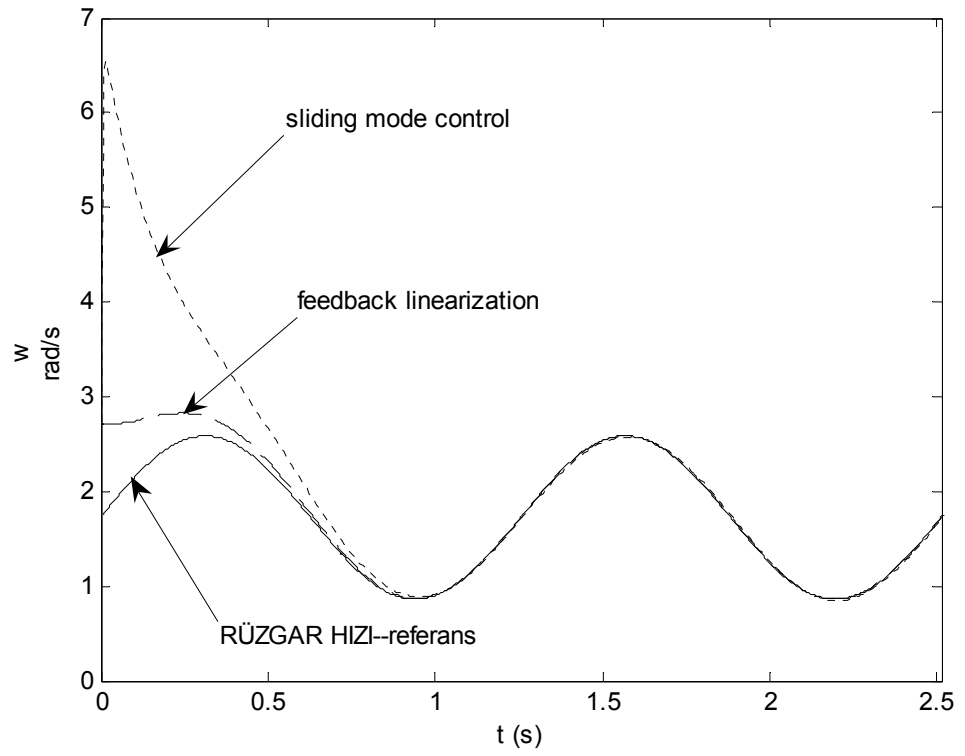
Şekil 4.4a da görüldüğü üzere linearization method ile kontrol edilen türbin açısal hızı yaklaşık 0.6 saniye sonra rüzgar referans hızına ulaşmakta ve daha sonra rüzgar referans hızını yaklaşık 0.3 saniyelik bir faz farkıyla takip etmektedir. Ancak Şekil 4.4b de görüldüğü üzere sabit rüzgar referans hızı olduğu hallerde linearization method ile kontrol edilen türbin açısal hızı oldukça iyi performans göstermektedir. Özellikle faz farkı problemi ortadan kalkmaktadır.



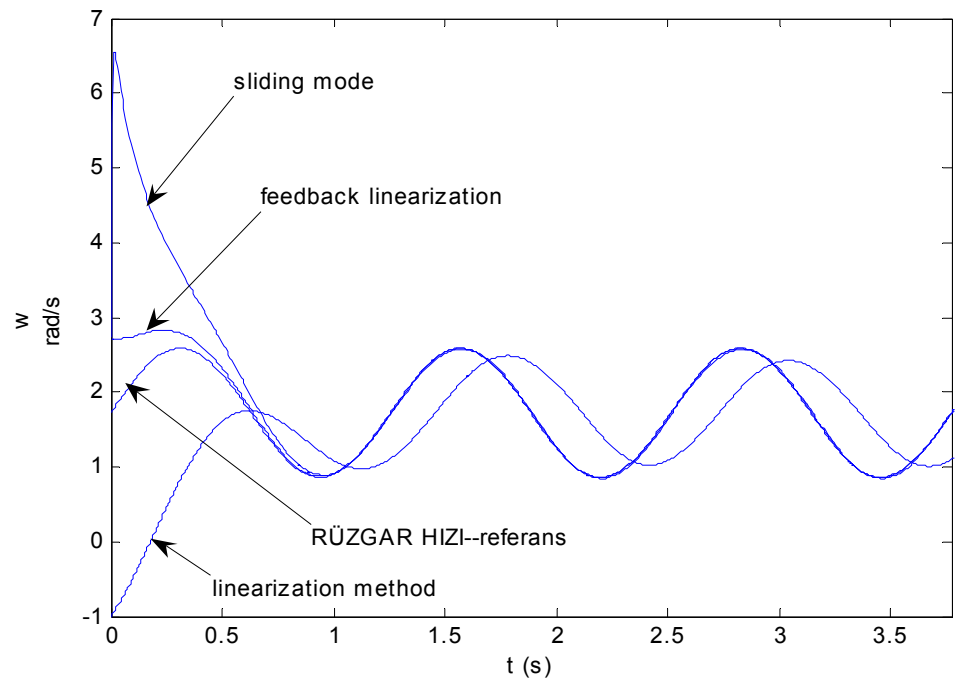
Şekil 4.4b: Linearization method ile kontrol edilen sistemin türbin açısai hızının (ω_{lin}) sabit rüzgar referans hızı (ω_{ref}) ile karşılaştırılması grafiği

Şekil 4.5 de Rüzgar referans hızı, feedback linearization ve sliding mode eğrileri karşılaştırmalı olarak görülmektedir. Feedback linearization metodu ve sliding mode metodu ile kontrol edilen türbin açısai hızı bir saniye sonunda rüzgar referans hızına ulaşmakta ve hatasız olarak de rüzgar referans hızını takip etmektedir. Burada sliding mode metodu ile feedback linearization metodunun başlangıç şartlarında biraz farklılık gösterdiğini de not etmek gerekir.

Şekil 4.6 da linearization method, feedback linearization ve sliding mode ile kontrol edilen türbin açısai hızları rüzgar referans hızını birinci saniyeden sonra yakalamakta ve linearization method hariç diğer metodlar hatasız bir şekilde rüzgar referans hızı takip etmektedir. Linearization method ise belli bir faz farkıyla takip etmektedir. Şekil 4.6 da dikkati çeken sliding mode ile kontrol edilen türbin açısai hızı (0-0.5) aralığında linearization method, feedback linearization yöntemlerinden daha büyük bir sıçrama yaptıktan sonra kendini toplayıp rüzgar referans hızını yakalayıp takip etmektedir. Dolayısıyla yukarıda da bahsedildiği üzere sliding mode ilk şartlarda biraz farklılık göstermektedir.

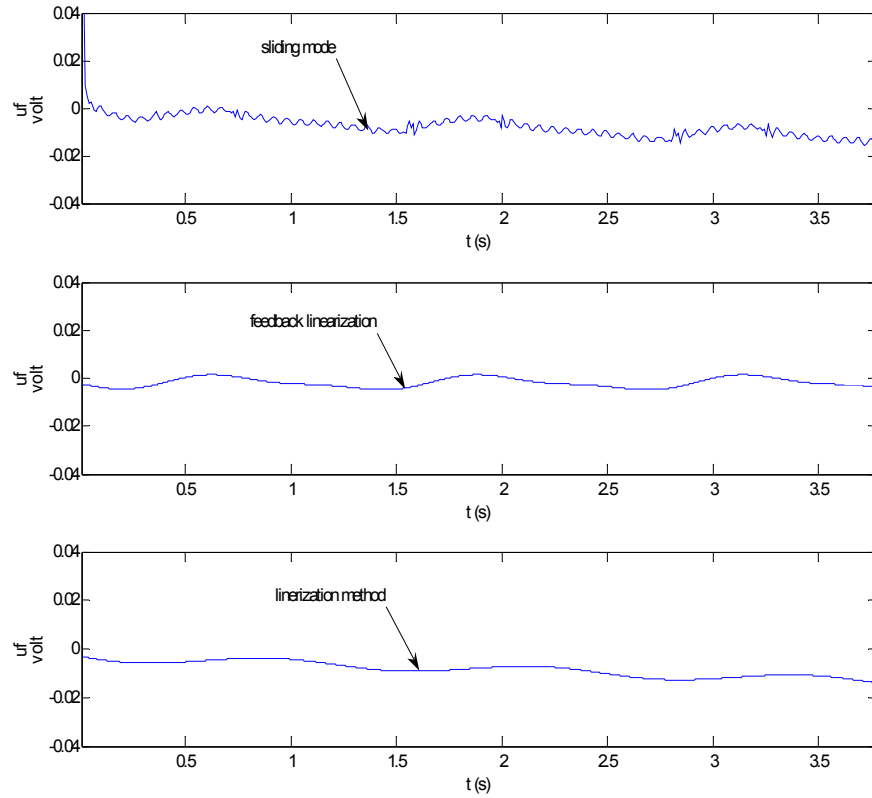


Şekil 4.5: Rüzgar referans hızı, feedback linearization ve sliding mode eğrileri



Şekil 4.6: Rüzgar referans hızı, linearization method, feedback linearization, ve sliding mode eğrileri

Şekil 4.7 de sliding mode, feedback linearization ve linearization method ile kontrol edilen sistemin sağlandığı gerilimin (sistem kontrolünün) zamanla değişim grafikleri verilmektedir. Bu grafikte sliding mode yönteminin ilk şartlarda biraz farklılık gösterdiği sliding mode un doğasından kaynaklanan parazit etkilerin olduğu not edilmelidir. Ancak sliding mode un parazit etkilerinin filtrelendiği durumda (sinyalin ortalaması alındığında) bu üç grafiğin de aynı davranış gösterdiği göze çarpmaktadır.



Şekil 4.7: Sliding mode, feedback linearization ve linearization method ile kontrol edilen sistemin sağlandığı gerilimin (sistem kontrolünün) zamanla değişim grafikleri

5. SONUÇ

Bu tezde rüzgar türbinleri ile ilgili genel bilgiler verildikten sonra herhangi bir türbinin matematiksel modellenmesi yapıldı. Matematiksel modellemeden kasıt sistemin dinamiğini oluşturan durum denklemlerinin elde edilmesidir. Bu genelde lineer olmayan (nonlinear) sistem denklemleri üç ayrı metod (Sliding mode, feedback linearization ve linearization method) ile kontrol edildi. Her bir kontrol metoduna ait teori kısaca özetlendikten sonra ele alınan rüzgar türbini modeline bu teoriler uygulandı. Sistemin gerekli simulasyon blokları Matlab-Simulink yazılımı ile oluşturuldu. Aynı şartlarda koşturulan (run edilen) simulasyon sonuçları karşılaştırıldı. Bu sonuçlardan aşağıdaki bulgular elde edildi:

- Sliding mode ve feedback linearization metodları ilk şartlar hariç hemen hemen aynı davranışı göstermektedir. Bu noktada sliding mode yönteminin sistemde bozuntular ve parametre belirsizlikleri olması halinde daha etkin olacağı literatürdeki bilgiler doğrultusunda söylenebilir.
- Linearization method belirli bir faz farkı ile referans rüzgar hızını takip etmektedir. Rüzgar hızının fazla değişmediği durumlarda bu problemin ortadan kalkacağı kestirilmektedir.

Bundan sonraki çalışmalarda bu tezde varsayılan belli terimlerin lineer olması gibi bazı kabullerin olmadığı daha genel durumlar ele alınabilir. Ayrıca sliding mode yönteminin sistemde bozuntular ve parametre belirsizlikleri olması halinde nasıl davrandığı da araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Elektrik İşleri Etüd İdaresi Genel Müdürlüğü, 1992
- [2] Yenilebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, İZMİR 2001
- [3] Johnson, Gary L.; Wind Energy Systems, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1995
- [4] Forsyth, T., Tu, P. And Gilbert, J.; “ Economics of Grid Connected Small Wind Turbines in the Domestic Markert”, Windpower’99, Burlington, VT, June 20-23, 1999
- [5] Muljadi, E., Pierce, K. And Miglione, P.; “Control Strategy for Variable-Speed Stall-Regulated Wind Turbines”, American Controls Conference, Philadelphia, PA, June 24-26, 1998.
- [6] Justus, C.G., Winds and Wind Systems Performance, The Franklin Institute Press, Philadelphia, PA, 1978.
- [7] Mike Robinson, Paul Veers, Wind Türbine Control Workshop, Santa Clara University, Santa Clara, CA June 1997
- [8] E. Muljadi, C.P. Butterfield, P. Migliore, Variable Speed Operation Of Generators With Rotor-Speed Feedback In Power Applications, Fifteenth ASME Wind Energy Symposium Huston, Texas, 1996
- [9] A. Mciver , D.G. Holmes, P. Freere, Optimal Control Of A Variable Speed Wind Türbine Under Dynamic Wind Conditions, IAS’96 Conference Record Of The IEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting, 1996
- [10] A.R. Bergen, Power System Analysis, Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 1996

ÖZGEÇMİŞ

İsmail İrfan Güneş, 1969 Yılında Turhal’da doğdu. İlkokulu Turhal’da bitirdikten sonra ortaokul ve liseyi Kartal’da bitirdi. Üniversiteyi Van Yüzüncü Yıl Üniversitesinde 1992’de bitirdi. 1993 yılından beridir çeşitli devlet liselerinde matematik öğretmeni olarak çalışmaktadır. Evli ve bir kız çocuk sahibidir.