

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri	2
1.2. Rüzgar Türbini Kanatlarına Etki Eden Kuvvetler	3
1.3. Elde Edilebilir Rüzgar Gücü	6
1.4. Çıkartılan Rüzgar Gücü	7
1.5. Güç Sabiti C_p 'nin Değişimi	9
1.6. Tork Sabiti C_q 'nın Değişimi	13
2. RÜZGAR TÜRBİNİ MATEMATİK MODELİ	14
3. KONTROL DİZAYN YÖNTEMLERİ	19
3.1. Genel Backstepping Kontrol Dizaynı	19
3.1.1 Genel Backstepping Kontrol Dizayn Örneği	23
3.2. Adaptif Backstepping Kontrol Dizaynı	26
4. KONTROL DİZAYN ÇALIŞMASI	30
4.1. Genel Backstepping Kontrol Dizaynı	30
4.2. Adaptif Backstepping Kontrol Dizaynı	36
5. SİMÜLASYONLAR	43
5.1 Genel Backstepping Kontrol Dizaynı Simülasyonu	44
5.1.1. Sinüs Dalgası Rüzgar Hızı	44
5.1.2. Değişken Rüzgar Hızı	46
5.2 Adaptif Backstepping Kontrol Dizaynı Simülasyonu	50
5.2.1. Sinüs Dalgası Rüzgar Hızı	50
5.2.2 Değişken Rüzgar Hızı	52
6. SONUÇ	55
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	57
EKLER	58

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
u_c	Başlangıç rüzgar hızı
u_B	Müsaade edilebilir maksimum rotor hızındaki rüzgar hızı
u_R	Orantısal rüzgar hızı
u_F	Koruma için türbinin durdurulduğu rüzgar hızı
ρ	Hava yoğunluğu
R	Rotorun yarıçapı
u	Rüzgar hızı
C_p	Rüzgar türbininin güç sabiti
λ	Tepe hız oranı
α	Taarruz açısı
β	Pitch açısı
ω	Rotor hızı
F_L	Kaldırma kuvveti
F_D	Sürtünme kuvveti
L	Gövde uzunluğu
b	Kanat Genişliği
A	Rüzgar türbininin süpürme kesit alanı
P_w	Elde edilebilir toplam güç
P_m	Mekanik güç çıkışı
J	Atalet momenti
B	Sönüm katsayısı
K	Yay katsayısı
T	Şaft torku
L	Devre indüktansı
I_f	Alan akımı
R_f	Rotor alanının direnci
u_f	Kontrol voltajı
γ_a	Adaptasyon kazancı

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Rüzgar türbini bileşenleri	3
1.2. Türbin kanatlarına etki eden kaldırma ve sürtünme kuvvetleri	4
1.3. Kanat profili üzerine etki eden kuvvetler	5
1.4. Rüzgar türbinine doğru esen bir dairesel hava akımı	6
1.5. Rüzgar hızları	9
1.6. C_p 'nin tepe hız oracı ve pitch açısına göre değişimi	9
1.7. Güç sabiti C_p 'nin tepe hız oranına göre değişimi	13
1.8. Tork sabitinin tepe hız oranına göre değişimi	13
2.1. Rüzgar türbini mekanik kısım şematik gösterimi	15
2.2. Rüzgar türbini elektriksel kısım şematik gösterimi	18
5.1. Rotor hızı değişimi	44
5.2. İzleme hatası değişimi	45
5.3. Kontrol Voltajı	46
5.4. Rüzgar türbini genel görünümü	48
5.5. Rotor hızı değişimi	48
5.6. İzleme hatası değişimi	49
5.7. Kontrol Voltajı	49
5.8. Rotor hızı değişimi	50
5.9. Tahmin edilen parametreler	51
5.10. Kontrol voltajı	51
5.11. İzleme hatası değişimi	52
5.12. Rotor hızı değişimi (değişken rüzgar hızı)	53
5.13. Tahmin edilen parametreler (değişken rüzgar hızı)	53
5.14. Kontrol voltajı (değişken rüzgar hızı)	54
5.15. İzleme hatası değişimi (değişken rüzgar hızı)	54

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI : Değişken Hızlı Rüzgar Türbinlerinin Nonlineer Kontrolü
YAZAR ADI : Sinan KÖSE

Teknolojik gelişmelerin çok hızlı geliştiği çağımızda otomatik kontrol uygulamaları verimlilik ve ekonomi açısından tercih edilmektedir. Çevresel etkileri az olan ve yenilenebilir enerji kaynağı olan rüzgar enerjisi, özellikle elektrik üretim sektöründe gelişme sağlamaktadır. Elektrik enerjisi üretimi için kullanılan türbinlerin bir çoğu sabit hızlı türbinler olmasına rağmen değişken hızlı rüzgar türbinleri yüksek verimlilikleri ve türbin bileşenleri üzerindeki düşük gerilmeler sebebiyle son derece ilgi çekicidir.

Değişken hızlı rüzgar türbinlerinde rotor hız kontrolü sağlanabilmektedir. Böylelikle türbin sisteminin optimum tepe hız oranına yakın bir noktada çalıştırılması mümkündür. Değişken hızlı rüzgar türbinleri, rüzgar hızındaki değişimleri takip ederek düşük rüzgar hızlarında bile yüksek aerodinamik verimlilik sağlamak amacıyla dizayn edilirler.

Bu çalışmada rüzgar türbinlerinin kontrol sistemleri ile ilgili genel backstepping ve adaptif backstepping kontrol dizayn çalışmaları yapılmıştır. Mekanik ve elektriksel dinamikler temel alınarak uygulanan kontrol dizaynlarının ortak amacı jeneratör sargı voltajını rotor hızına göre sürekli ayarlayarak elde edilen elektrik enerjisinin stabil olmasını sağlamaktır. Uygulanan dizayn metotları ve simülasyonlar düzgün ve asimptotik rotor hız takibi sağlandığını göstermektedir.

SUMMARY

THESIS TITLE : Nonlinear Control of Variable Speed Wind Turbines

AUTHOR NAME : Sinan KÖSE

Wind power generation is a growing sector in the electricity production industry owing to its renewable energy characteristics and reduced environmental problems. Most wind turbines used for power generation are operated at constant speed, however, there is considerable interest in variable speed wind turbines due to their increased energy capture and reduced drive train loads.

In variable speed wind turbines, it is possible to control the rotor speed of turbine. This allows the wind turbine system to operate constantly near to its optimum tip-speed ratio. Variable speed wind turbines are designed by following the changes in the speed of wind in order to get high aerodynamic efficiency. Therefore, variable speed wind turbines maximize the energy capture by operating the turbine at the peak of the power coefficient.

In this thesis, a variable speed wind turbine is modeled with mechanical and electrical dynamics and a general backstepping and adaptive backstepping control design methods are applied to the obtained model. A Matlab/Simulink simulation model is generated and the designed controllers are realized on-line by adjusting the excitation winding voltage of the generator for stability of the overall wind turbine system. In simulation results, the designed controllers achieved smooth and asymptotic rotor speed tracking for the variable speed wind turbine.

1.GİRİŞ

Fosil yakıtların sürekli kullanım sonucu yakın tarihlerde tükeneyeceği bilinmektedir. Bir yandan sonsuz olmayan kısıtlı bir enerji kaynağı diğer yandan bu enerji kaynağının küresel boyutlardaki zararının dikkat çekici hale gelmesiyle, çevresel zararlı etkileri daha az olan alternatif enerji kaynaklarına olan ilgiyi artırmaktadır. Rüzgar enerjisi üretimi, çevreye vermiş olduğu zararın çok az olması nedeniyle, alternatif enerji kaynakları arasında önemli bir yer tutar. Yeni kontrol metodolojilerinin geliştirilmesi, türbin aerodinamiğinin iyileştirilmesi ile rüzgar enerjisinin rekabet gücü artmıştır.

Rüzgar oluşumu güneş enerjisinin bir dönüşümü olarak düşünülebilir. Güneş tarafından atmosferde meydana gelen sıcaklık yükselmeleri, yerküre üzerindeki yükseltiler ve yerkürenin dönme hareketi rüzgar oluşumuna neden olan başlıca etkenlerdir.

Rüzgar türbinleri kinetik enerjiyi mekanik enerjiye çevirmektedir. Elde edilen mekanik enerji değişik amaçlar için kullanılabilir. Rüzgar enerjisinden faydalanma insanlık tarihi kadar eski olmasına rağmen ciddi manada rüzgar türbinleri 19. yüzyıl ortalarında su pompalama işleminde kullanılmasıyla başlamıştır. 1970 yıllarında ise rüzgar türbinlerinden elektrik elde edilerek yeni bir çıkış açılmıştır.

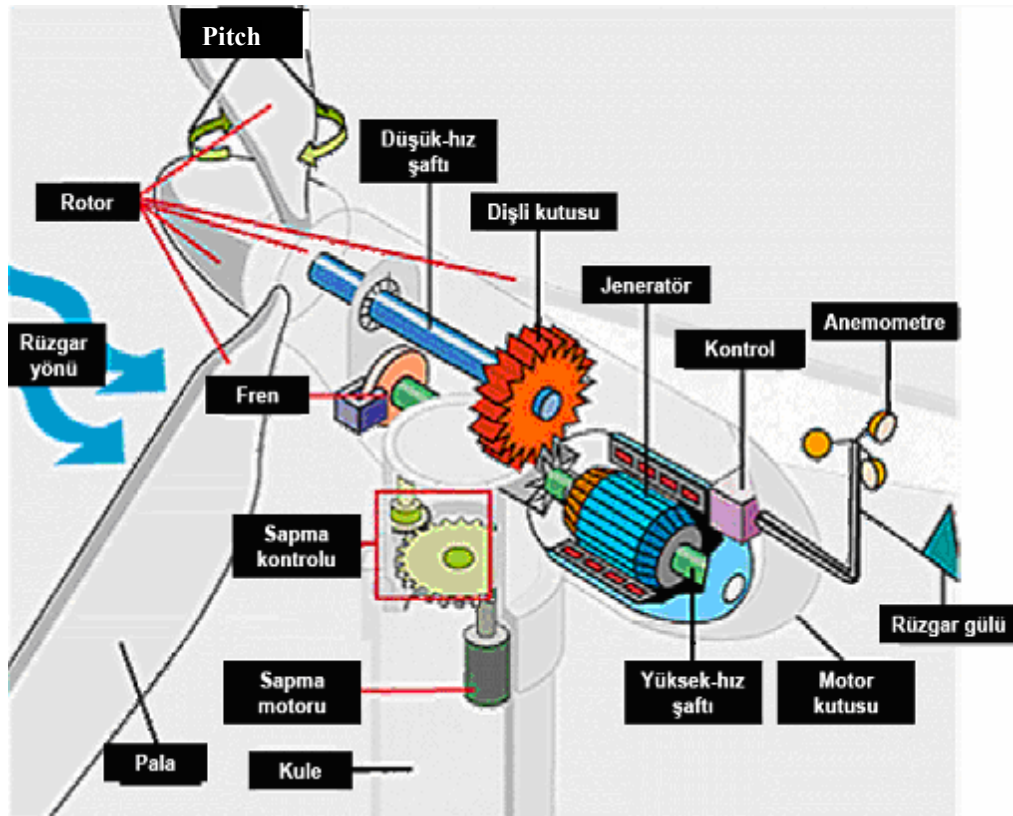
Rüzgar türbinleri temel olarak yatay ve dikey eksenli olarak iki tipte düşünülebilir. Tipik yatay eksenli rüzgar türbinleri iki ya da üç kanatlıdır. Yatay eksenli türbinlerin gruplandırması ise ürettiği güç göz önüne alınarak yapılmaktadır. 100 kilowatt türbinlerden başlayarak birkaç megawatt güç üreten büyük türbinlere kadar geniş bir güç aralığı ve türbin boyutları mevcuttur. Büyük boyuttaki yatay eksenli türbine örnek olarak GE Wind Energy'nin prototip olarak ürettiği 3,6 megawatt gücündeki türbin gösterilebilir [1]. Büyük güç gereksinimlerini karşılamak için birkaç türbinden meydana gelen rüzgar tarlaları kurulmaktadır. 100 kilowatt gücün altındaki küçük türbinler su pompalama, telekomünikasyon ve şebekeye bağlantısı mümkün olmayan evler için kullanılabilir. Bazen de

küçük boyutlu türbin, dizel jeneratör, güneş enerjisi, bataryalar ile birlikte hibrid sistem olarak adlandırılan uygulamalarda kullanılmaktadır.

1.1. Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri

Günümüzde dünya piyasasında kullanılan iki çeşit rüzgar türbini sisteminden bahsedebiliriz. İlki sabit hızlı rüzgar türbinleridir. Bu türbinlerde elektrik jeneratörü direkt olarak şebekeye bağlıdır. Bu nedenle rotor hızında küçük bir değişikliğe müsaade edilebilmektedir. Bu sistemin performansı sistemi oluşturan elemanların mekanik performansına bağlıdır. Oluşan türbülans ve kule gölgeleri yük ve enerji dalgalanmalarına neden olur ($P \approx v^3$). Bu değişkenlikler sabit hızlı rüzgar türbinlerinde elde edilen enerji kalitesini düşürdüğü ve mekanik gerilmelere neden olarak türbin ömrünü olumsuz etkilediği için istenmez. Diğer taraftan sabit hızlı türbinlerinde optimum tepe hız oranının elde edildiği bir rüzgar hızı vardır ve genellikle türbinler bu rüzgar hızında çalıştırılırlar. Bu noktada ise rüzgardan maksimum enerji elde edilemez. İkinci tip olarak değişken rüzgar hızlarında çalıştırılabilen rüzgar türbinlerinden söz edebiliriz. Bu türbinlerde jeneratör elektrik şebekesine direkt bağlı değildir. Jeneratör ve şebeke arasında elektronik konvertörler olduğundan rotorun herhangi bir hızda dönmesine olanak sağlanır. Değişken hız konfigürasyonları rotor hız kontrolü sağlar. Bu da yaklaşık sabit bir tepe hız oranında türbin sisteminin çalıştırılmasına olanak sağlar. Şebekedeki elektrik enerjisine uyum sağlandığı için mekanik gerilmeler önlenmiş olur. Enerji türbin ataletiyle emilerek rotor torkunda dalgalanmalar giderilir. Yüksek hızda rüzgar türbin kanatlarına ulaştığında rotor hızı artarken şebekeye sabit güç verilmeye devam edilir. Güç dalgalanmaları azaltılarak elde edilen gücün kalitesi artırılabilir. Böylelikle son kullanım noktalarında voltaj değişikliği önlenmiş olur. Değişken hızda zaman sabiti

daha uzun olabilir böylelikle pitch kontrol karmaşıklığı azaltılabilir. Yerleşim yerlerine yakınlığı düşünüldüğünde ise değişken hızlı rüzgar türbinleri sabit hızlı türbinlere göre daha sessiz çalışmaktadırlar. Değişken hız konfigürasyonlarında ek maliyetler ve karmaşık güç dönüştürücüleri gerekliliği dezavantaj olmasına rağmen yukarıda sıralanan avantajlar nedeniyle gün geçtikçe değişken hızlı rüzgar türbinleri kullanımı artmaktadır [1,2]. Şekil 1.1’de değişken hızlı rüzgar türbinine ait bileşenler verilmiştir.



Şekil 1.1. Rüzgar türbini bileşenleri [1]

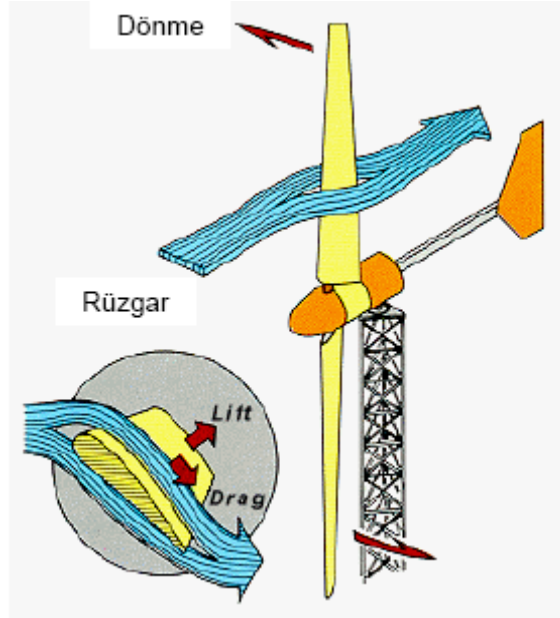
1.2. Rüzgar Türbini Kanatlarına Etki Eden Kuvvetler

Rüzgar türbinleri aerodinamik olarak dizayn edilen kanatlardan oluşmaktadır. Bu kanatların kesiti aerodinamik bir profil olup hava akışını karşılayan kanat profili, aerodinamik kaldırma ve sürtünmeyi oluşturur. Kanat kesitinin ve kesit üzerine etkiyen kuvvetlerin daha kolay anlaşılabilir olması için Şekil 1.2’de kanat kesiti ve

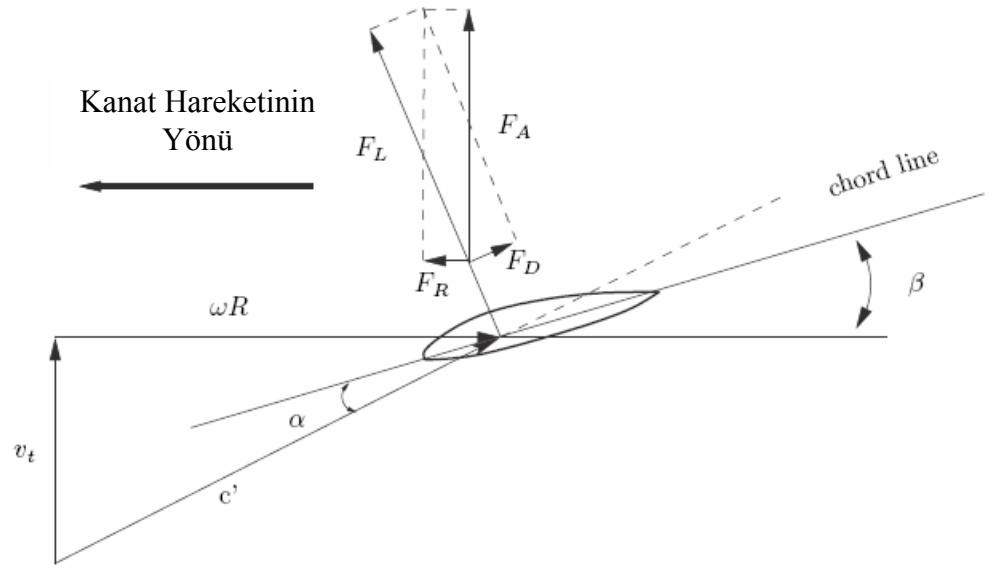
rüzgarın uyguladığı kuvvetler basit olarak gösterilmiştir. Alınan kesit üzerine etkiyen kuvvetler Şekil 1.3’de vektörel olarak gösterilmektedir. Şekil 1.3’de görüldüğü gibi R yarıçapında ve β pitch açısında türbin ω_t hızında döner. Kaldırma kuvveti F_L havanın akış yönüne dik yöndeki bir kuvvettir. Sürtünme kuvveti F_D ise hava akışına paralel yönde bir kuvvettir. Kaldırma ve sürtünme kuvvetleri havanın akış hızına, kanadın boyutuna, hava yoğunluğuna ve akışın hız vektörü ile kiriş hattı arasındaki açığa göre değişir. Bu açı taarruz açısı olarak isimlendirilir. Gövde uzunluğu L genişliği b olan bir kanadın akış hızı c ve yoğunluğu ρ olan hava akımı içindeki kaldırma ve sürtünme kuvvetleri aşağıdaki şekilde verilir.

$$F_L = c_L(\alpha) \frac{\rho}{2} c^2 L b \quad (1.1)$$

$$F_D = c_D(\alpha) \frac{\rho}{2} c^2 L b \quad (1.2)$$



Şekil 1.2. Türbin kanatlarına etki eden kaldırma ve sürtünme kuvvetleri [3]



Şekil 1.3. Kanat profili üzerine etki eden kuvvetler [4]

Verilen bir profil için, kaldırma $c_L(\alpha)$ ve $c_D(\alpha)$ sürtünme katsayıları rüzgar tüneli testlerine veya analitik formülasyonlara dayanarak yada hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde(CFD) bilgisayarda taarruz açısının bir fonksiyonu olarak hesaplanabilir. $c_L(\alpha)$ ve $c_D(\alpha)$ eğrileri kanat boyutuna ve akış hızı ile ilişkili Reynold sayısına bağlıdır

$$Re = 68460 \cdot c \cdot L \quad (1.3)$$

İdeal bir rüzgar türbininde, kaldırma ve sürtünme vektörleri aksiyal F_A ve radyal F_R kuvvetleri türbin şaftı boyunca olan eksene ve türbin yarıçapı boyunca olan eksene taşınır. Rüzgar türbinlerini kontrol etmek için iki yol vardır. Bunlar (1) taarruz açısı α yi değiştirmek, (2) pitch açısı β yi değiştirmek veya türbin dönme hızını kontrol etmektir [4].

1.3. Elde Edilebilir Rüzgar Gücü

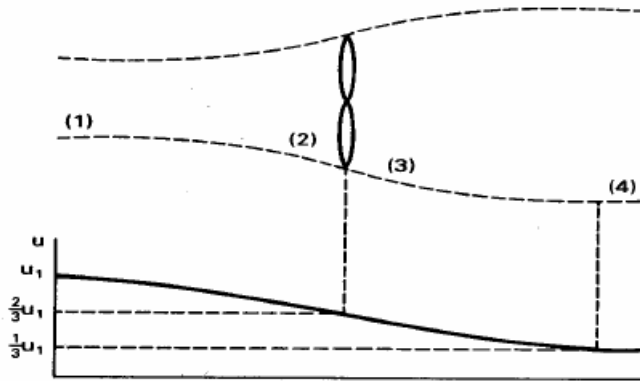
En ideal durumda kütlesi m , akış hızı u olan bir rüzgar paketinin kinetik enerjisi

$$U = \frac{1}{2}mu^2 = \frac{1}{2}(\rho Ax)u^2 \quad (1.4)$$

olarak verilmektedir. Burada A rüzgar türbininin süpürme kesit alanı, ρ hava yoğunluğu, x rüzgar paketinin kalınlığıdır. Elde edilebilir toplam güç P_w için kinetik enerji denkleminin zamana göre türevi alınır

$$P_w = \frac{dU}{dt} = \frac{1}{2}\rho Au^2 \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2}\rho Au^3 \quad (1.5)$$

bulunur. İdeal şartlarda rüzgar türbinine yaklaşan havanın profili Şekil 1.4 deki gibidir.



Şekil 1.4. Rüzgar türbinine doğru esen bir dairesel hava akımı

Rüzgar paketinin kesit alanı ve rüzgar hızı arasındaki ilişki aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir.

$$\begin{aligned}
u_2 &= u_3 = \frac{2}{3}u_1 \\
u_4 &= \frac{1}{3}u_1 \\
A_2 &= A_3 = \frac{3}{2}A_1 \\
A_4 &= \frac{1}{3}A_1
\end{aligned} \tag{1.6}$$

Rüzgar türbin üzerinden geçerken, türbin tarafından alınan güç kadar güç kaybedecektir. Denklemsel olarak

$$P_{m, ideal} = P_1 - P_4 = \frac{1}{2}\rho(A_1u_1^3 - A_4u_4^3) = \frac{1}{2}\rho\left(\frac{8}{9}A_1u_1^3\right) \tag{1.7}$$

Bu denklem verilen bir hava akış alanı A_1 için, ideal bir türbinin rüzgardan elde edilebilir gücün 8/9'unu aldığını gösterir. Hava akışının kesit alanı fiziksel olarak ölçülemediğinden, elde edilen güç için kabul edilen uygun kesit alanı rüzgar türbininin kesit alanının aksine A alanı olarak belirtilen rüzgar türbini süpürme alanı A_2 olarak ifade edilecektir. Bu durumda

$$P_{m, ideal} = \frac{1}{2}\rho\left(\frac{8}{9}\left(\frac{2}{3}A_2\right)u_1^3\right) = \frac{1}{2}\rho\left(\frac{16}{27}A_2u_1^3\right) = \frac{16}{27}\left(\frac{1}{2}\rho A_2u_1^3\right) = 0.59P_w \tag{1.8}$$

elde edilebilir gücün denklemi çıkarılmış olur. Bunun anlamı türbinin rüzgar türbini süpürme alanına eşdeğer yayılı olmayan hava tüpündeki toplam gücün %59 dan fazlasını çıkartamadığıdır. Bu durum Betz teoremi olarak bilinir ve bütün rüzgar türbinleri için verimliliğin %59 dan fazla olamayacağı bir sınırdır.

1.4. Çıkartılan Rüzgar Gücü

Türbinler vasıtasıyla elde edilebilir toplam rüzgar gücü P_w 'den çıkartılan kısmı güç P_m ve performans katsayısı C_p ile ifade edilir.

$$P_m = C_p P_w = C_p \left(\frac{1}{2} \rho A u^3 \right) \quad (1.9)$$

C_p 'nin değeri rüzgar hızıyla, türbinin dönme hızıyla, rotor pitch açısıyla ve türbin kanat parametreleriyle değişir. Değeri 0.59'u aşamaz.

Emniyetli bir operasyonu sağlarken, rüzgar gücünü efektif olarak çıkartmak için rüzgar türbini rüzgar hızı, müsaade edilebilir maksimum rotor hızı ve orantısal güç gibi aşağıda tanımlanan üç temel modda çalıştırılmalıdır.

Mod 1- Değişken hız / değişken tepe hız oranında çalışma:

$$u_c \leq u \leq u_B \quad (1.10)$$

Mod 2- Sabit hız / değişken tepe hız oranında çalışma:

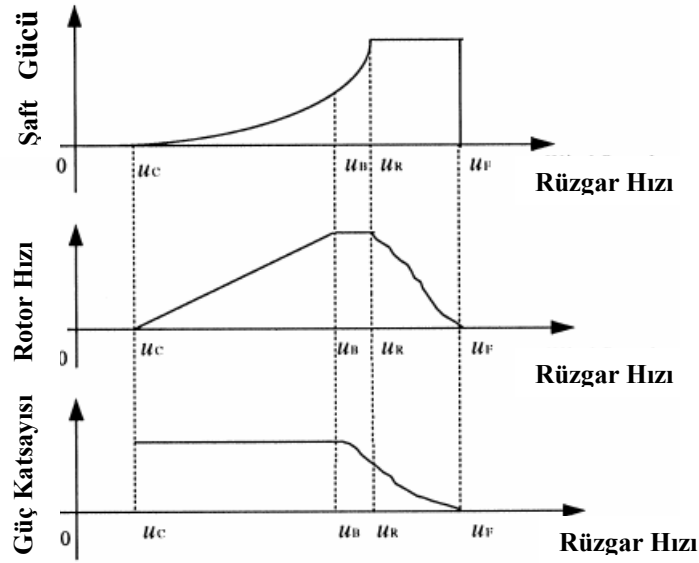
$$u_B \leq u \leq u_R \quad (1.11)$$

Mod 3- Değişken hız / sabit güçte çalışma.

$$u_R \leq u \leq u_F \quad (1.12)$$

burada u_c başlangıç rüzgar hızıdır, u_B müsaade edilebilir maksimum rotor hızındaki rüzgar hızını gösterir ve u_R orantısal rüzgar hızı, u_F koruma için türbinin durdurulduğu rüzgar hızıdır (Şekil 1.5) [5].

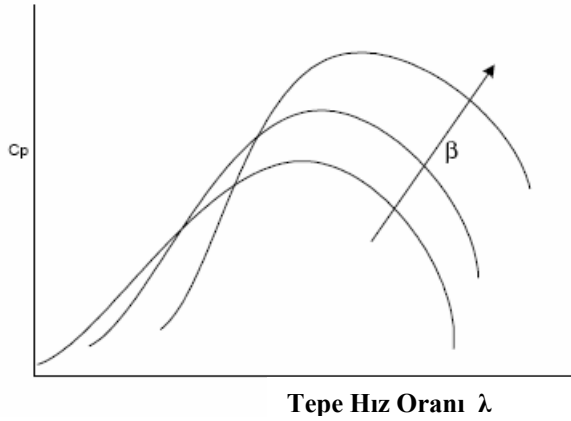
Eğer düşük rüzgar hızlarında yüksek güç verimi sağlanacaksa, rüzgar türbininin rotor hızı rüzgar hızına karşın sürekli şekilde ayarlanmalıdır.



Şekil 1.5. Rüzgar Hızları [5]

1.5. Güç Sabiti C_p 'nin Değişimi

Şekil 1.6 tipik bir rüzgar türbinin kanat pitch açısı β 'nin değişik değerleri için tepe hız oranı λ ve performans katsayısı C_p arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 1.6. C_p 'nin tepe hız oranı ve pitch açısıyla değişimi

Eğer bir türbin rotorunun güç performansı değerlendirilecekse $C_p(\lambda, \beta)$ eğrisi rüzgar türbini imali sırasında elde edilmeli ve her bir tepe hız oranı ve kanat pitch açısı için performans katsayısı değerlendirilmelidir. Eğer dönme hızı ω ve

pitch açısı β biliniyorsa ($\omega = \omega_0$, $\beta = \beta_0$) o zaman herhangi bir rüzgar hızı u için mekanik güç çıkışı P_m bulunabilir.

Bazen tam bir $C_p(\lambda, \beta)$ verisi olmayabilir o zaman güç performansı değerlendirmede denklem (1.8) doğrudan kullanılamaz. Herhangi bir pitch açısı için C_p 'nin iyi bir tahmini aşağıdaki denklemle yapılabilir.

$$\begin{aligned} C_p &= C_{pm} \left[1 - F \left(\frac{u_m}{u} - 1 \right)^2 - G \left(\frac{u_m}{u} - 1 \right)^3 \right] & u_c \leq u \leq u_R \\ C_p &= C_{pR} \left[\frac{u_R^3}{u^3} \right] & u_R \leq u \leq u_F \end{aligned} \quad (1.13)$$

F ve G katsayıları sınır şartlarından bulunabilir.

$$\begin{aligned} C_p(u_c) = 0 &= C_{pm} \left[1 - F \left(\frac{u_m}{u_c} - 1 \right)^2 - G \left(\frac{u_m}{u_c} - 1 \right)^3 \right] \\ C_p(u_R) &= C_{pR} = C_{pm} \left[1 - F \left(\frac{u_m}{u_R} - 1 \right)^2 - G \left(\frac{u_m}{u_R} - 1 \right)^3 \right] \end{aligned} \quad (1.14)$$

Bu iki denklemin bir arada çözülmesi ile F ve G nin çözümleri aşağıdaki şekilde verilebilir.

$$\begin{aligned} 0 &= C_{pm} \left[1 - F \left(\frac{u_m}{u_c} - 1 \right)^2 - G \left(\frac{u_m}{u_c} - 1 \right)^3 \right] \\ C_{pR} &= C_{pm} \left[1 - F \left(\frac{u_m}{u_R} - 1 \right)^2 - G \left(\frac{u_m}{u_R} - 1 \right)^3 \right] \end{aligned} \quad (1.15)$$

$$\begin{aligned} F \left(\frac{u_m}{u_c} - 1 \right)^2 + G \left(\frac{u_m}{u_c} - 1 \right)^3 &= 1 \\ F \left(\frac{u_m}{u_c} - 1 \right)^2 + G \left(\frac{u_m}{u_c} - 1 \right)^3 &= 1 - \frac{C_{pm}}{C_{pR}} \end{aligned} \quad (1.16)$$

denklemlerde düzenleme yapılır ise

$$\begin{bmatrix} ((u_m/u_c)-1)^2 & ((u_m/u_c)-1)^3 \\ ((u_m/u_R)-1)^2 & ((u_m/u_R)-1)^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1-C_{pR}/C_{pm} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F \\ G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ((u_m/u_c)-1)^2 & ((u_m/u_c)-1)^3 \\ ((u_m/u_R)-1)^2 & ((u_m/u_R)-1)^3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 1-C_{pR}/C_{pm} \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

Eğer denklem (1.13) de verilen C_p denklem (1.8) da yerine konursa,

$$\begin{aligned} P_m &= C_p P_w = C_p \left(\frac{1}{2} \rho A u^3 \right) \\ &= C_{pm} \left[1 - F \left(\frac{u_m}{u} - 1 \right)^2 - G \left(\frac{u_m}{u} - 1 \right)^3 \right] \left(\frac{1}{2} \rho A u^3 \right) \\ &= \frac{1}{2} \rho A C_{pm} \left[1 - F \left(\frac{u_m^2}{u^2} - 2 \frac{u_m}{u} + 1 \right) - G \left(\frac{u_m^3}{u^3} - 2 \frac{u_m^2}{u^2} + \frac{u_m}{u} - \frac{u_m^2}{u^2} + 2 \frac{u_m}{u} - 1 \right) \right] u^3 \\ &= \frac{1}{2} \rho A C_{pm} \left[u^3 - F u_m^2 u + 2 F u_m u^2 - F u^3 - G u_m^3 + 2 G u_m^2 u \right. \\ &\quad \left. - G u_m u^2 + G u_m^2 u - 2 G u_m u^2 + G u^3 \right] \\ &= \frac{1}{2} \rho A C_{pm} \left[(1 - F + G) u^3 + (2F - 3G) u_m u^2 + (3G - F) u_m^2 u - G u_m^3 \right] \end{aligned} \quad (1.18)$$

elde edilir. Orantısal güç ifadesi aşağıdaki şekilde tanımlanırsa

$$P_R = C_{pR} \left(\frac{1}{2} \rho A u_{pR}^3 \right) \quad (1.19)$$

Rüzgar hızlarının $u_c \leq u \leq u_R$ aralığı için mekanik güç aşağıdaki formdadır.

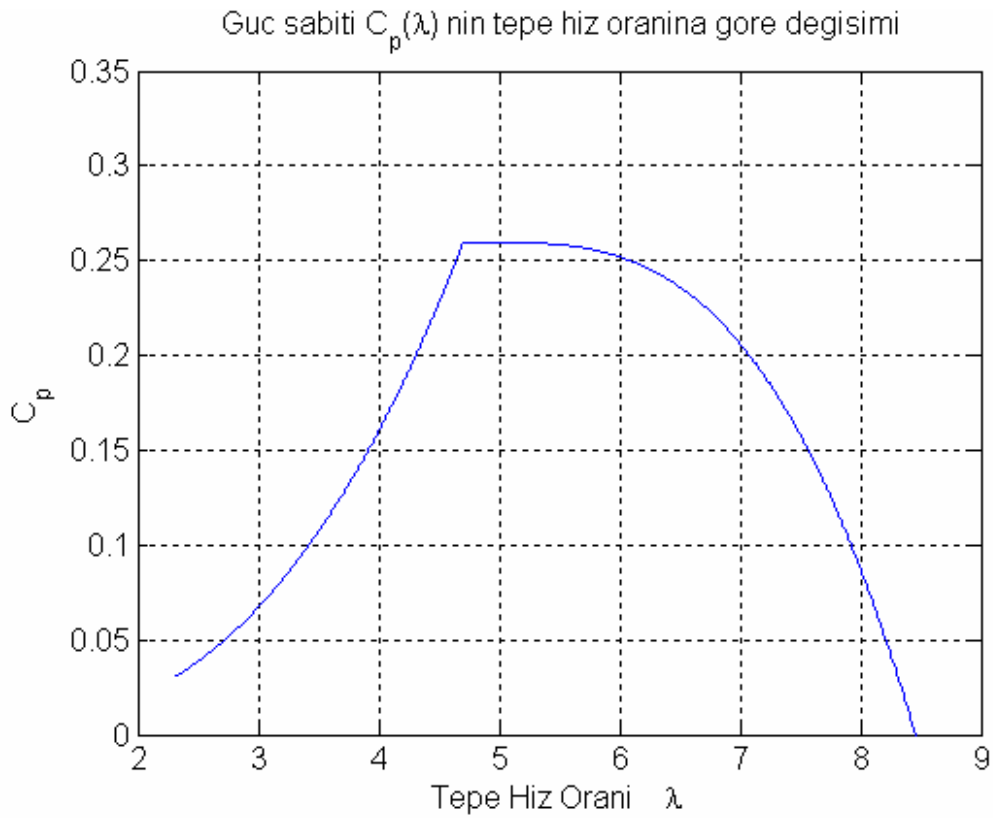
$$P_m = P_R \left[\frac{C_{pm}}{C_{pR} u_{pR}^3} \right] \left[(1 - F + G) u^3 + (2F - 3G) u_m u^2 + (3G - F) u_m^2 u - G u_m^3 \right] \quad (1.20)$$

Rüzgar hızlarının $u_R \leq u \leq u_F$ aralığı için

$$\begin{aligned}
 P_m &= C_p \left(\frac{1}{2} \rho A u^3 \right) \\
 &= C_{pR} \left(\frac{u_R^3}{u^3} \right) \left(\frac{1}{2} \rho A u^3 \right) \\
 &= C_{pR} \left(\frac{1}{2} \rho A u_R^3 \right)
 \end{aligned} \tag{1.21}$$

$$P_m = P_R \tag{1.22}$$

Her bir pitch açısı için bu yaklaşımın uygulanabilmesi için u_c, u_R, C_{pR}, C_{pm} ve P_R değerlerinin verilmesi gerekmektedir. Şekil 1.7’de verilen grafik bir rüzgar türbini için gerekli parametreler tanımlanıp, yukarıdaki denklemler kullanılarak Matlab programında elde edilmiştir (Ek1).



Şekil 1.7. Güç sabiti C_p 'nin tepe hız oranına göre değişimi

1.6. Tork Sabiti C_q 'nın Değişimi

Rüzgar türbini performansı tork sabiti C_q 'nın bir fonksiyonu olarak da açıklanabilir. Denklem (1.23)'deki gibi tork sabiti C_q ile güç sabiti C_p arasında bir bağıntı yazılabilir.

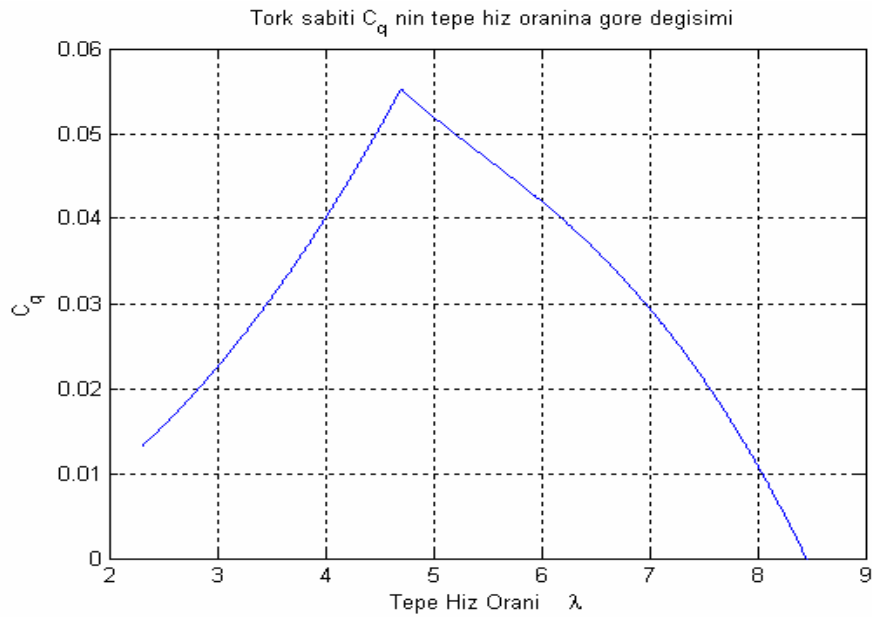
$$C_p(\lambda, \beta) = \lambda C_q(\lambda, \beta) \quad (1.23)$$

elde edilen denkleme göre tork sabitinin bağlı olduğu λ ve β değerlerindeki değişim türbinden elde edilecek gücü de değiştirecektir.

Mekanik güç çıkışı P_m ve tork sabiti C_q arasındaki bağıntının bilinmesi gereklidir. Denklem (1.9)'da verilen güç ifadesi P_m yeniden düzenlenir ise:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho R A C_q(\lambda, \beta) u^2 \quad (1.24)$$

halini alır. Değişken pitch açılı rüzgar türbinleri için, performans katsayısı her bir pitch açısı için kullanıcı tarafından geliştirilebilir. Şekil (1.8)'de verilen grafik gerekli parametreler tanımlanarak Matlab programı kullanılarak elde edilmiştir (Ek1).



Şekil 1.8. Tork sabitinin tepe hız oranına göre değişimi

2. RÜZGAR TÜRBİNİ MATEMATİK MODELİ

Rüzgar türbininden güç elde edilmesi üç ana faktörün fonksiyonudur; bunlar (1) elde edilebilir rüzgar gücü, (2) rüzgar türbini güç eğrisi ve (3) rüzgar düzensizliklerine karşı türbinin cevap verme kabiliyetidir. Rüzgar türbini tarafından üretilen gücün ifadesi aşağıdaki şekilde verilebilir.

$$P_m(u) = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 u^3 \quad (2.1)$$

Burada ρ hava yoğunluğunu, R rotorun yarıçapını, u rüzgar hızını, C_p rüzgar türbininin güç sabitini, λ tepe hız oranını ve β pitch açısını temsil eder. Tepe hız oranı

$$\lambda = \frac{R\omega}{u} \quad (2.2)$$

dır. Burada ω rotor hızıdır. Bu denklemde eğer rotor hızı sabit tutulursa o zaman rüzgar hızındaki herhangi bir değişimin tepe hız oranına yansıtacağı görülür. Bunun sonucu C_p rüzgar türbini güç sabitinin aynı zamanda rüzgar türbininden üretilen güç çıkışının değişmesi demektir. Bununla birlikte eğer rüzgar hızındaki değişime göre rotor hızı ayarlanırsa, o zaman tepe hız oranının optimum bir noktada bulunması sağlanabilir. Bunun sonucunda sistemden maksimum güç çıkışı üretilebilir. Denklem (2.1) ve (2.2) den

$$\lambda = \frac{R\omega}{u} \quad \rightarrow \quad u = \frac{R\omega}{\lambda} \quad (2.3)$$

şeklinde rüzgar hızı ifade edilebilir. Denklem (2.1) de verilen ifadede rüzgar hızı yerine konursa,

$$P_m(\omega) = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 \left(\frac{R\omega}{\lambda} \right)^3 \quad (2.4)$$

$$P_m(\omega) = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 \frac{R^3 \omega^3}{\lambda^3} \quad (2.5)$$

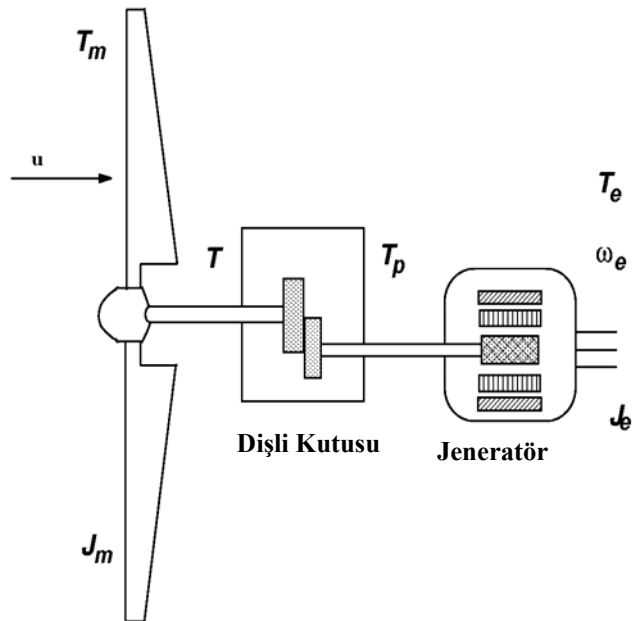
haline gelir. Burada aşağıdaki eşitlik tanımlanır ise,

$$k_w = \frac{1}{2} C_p \rho \pi \frac{R^5}{\lambda^3} \quad (2.6)$$

denklem (2.5) düzenlenerek rüzgar türbini tarafından üretilen güç,

$$P_m(\omega) = k_w \omega^3 \quad (2.7)$$

olarak elde edilir. Tipik bir rüzgar güç üretim sistemi için temel çalışma prensibini göstermek için şekil 2.1'deki blok diyagramı kullanılmıştır. Bu sistem rüzgar enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren türbin kanadından, hızı arttırmak ve torku azaltmak için kullanılan dişli kutusundan ve mekanik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren jeneratörden ibarettir. Giriş rüzgar torku T_m ile , rüzgar türbininin rotoru ω hızı ile döner. Transmisyon çıkış torku T_p , jeneratör açısal hızı ω_e de shaft torku T_e yi üreten jeneratöre iletilir. Dişli kutusunun kullanılmasından dolayı genelde rotor hızı ve jeneratör hızı aynı değildir.



Şekil 2.1. Rüzgar Türbini Mekanik Kısım Şematik Gösterimi [5]

Sistem dinamiği aşağıdaki denklemlerle karakterize edilebilir.

$$T_m - T = J_m \dot{\omega} + B_m \omega + K_m \theta \quad (2.8)$$

$$T_p - T_e = J_e \dot{\omega}_e + B_e \omega_e + K_e \theta_e \quad (2.9)$$

$$T_p \omega_e = T \omega \quad (2.10)$$

Bu denklemlerde B_m ve B_e sönüm, K_m ve K_e yay katsayılarını, T_m , T_e , T , T_p torsiyonal sabitler olup sırasıyla türbin ucundaki, jeneratör ucundaki ve dişli kutusu öncesi ve sonrasındaki shaft torklarıdır. J_m türbinin, J_e ise jeneratörün atalet momentleridir. ω , ω_e ise türbin shaftının ve jeneratör ucundaki açısal hızlardır.

Dişli oranı γ aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$\gamma = \frac{\omega_e}{\omega} \quad (2.11)$$

(2.10) ve (2.11) denklemleri kullanılarak (2.8) ve (2.9) denklemleri birleştirilebilir.

$$\gamma = \frac{\omega_e}{\omega} = \frac{\theta_e}{\theta} = \frac{T}{T_p} \quad (2.12)$$

$$T = \gamma T_p, \quad \theta_e = \gamma \theta, \quad \omega_e = \gamma \omega \quad (2.13)$$

Denklem (2.13)'de elde edilen eşitlikler yerine yazılarak denklemler taraf tarafa toplanır ise:

$$\begin{aligned} & T_m - \gamma T_p = J_m \dot{\omega} + B_m \omega + K_m \theta \\ & + \frac{\gamma / T_p - T_e = J_e \gamma \dot{\omega} + B_e \gamma \omega + K_e \gamma \theta}{\gamma / T_p - T_e = J_e \gamma \dot{\omega} + B_e \gamma \omega + K_e \gamma \theta} \\ & T_m - \gamma T_p + \gamma T_p - \gamma T_e = (J_m + J_e \gamma) \dot{\omega} + (B_m + B_e \gamma) \omega + (K_m + K_e \gamma) \theta \end{aligned} \quad (2.14)$$

sonuç olarak elde edilen denklemde gerekli sadeleştirme işlemi yapılarak

$$(J_m + J_e\gamma)\dot{\omega} + (B_m + B_e\gamma)\omega + (K_m + K_e\gamma)\theta = T_m - \gamma T_e \quad (2.15)$$

elde edilir. (2.15) denkleminde aşağıdaki düzenlemeler yapılır ise :

$$\begin{aligned} J &= (J_m + J_e\gamma) \\ B &= (B_m + B_e\gamma) \\ K &= (K_m + K_e\gamma) \end{aligned} \quad (2.16)$$

ve ifadeler tekrar (2.15) denkleminde yerine yazılır ise:

$$J\dot{\omega} + B\omega + K\theta = T_m - \gamma T_e \quad (2.17)$$

denklemini elde edilir. Rüzgar türbini tarafından üretilen güç ve jeneratörden elde edilen elektriksel güç denklemlerinden tork ifadeleri çekilir ise,

$$P_m = \omega T_m \rightarrow T_m = \frac{P_m}{\omega} \quad (2.18)$$

$$P_e = \omega_e T_e \rightarrow T_e = \frac{P_e}{\omega_e} \quad (2.19)$$

elde edilir ve denklem (2.17)'ye eşdeğer olarak aşağıdaki denklem yazılabilir.

$$J\dot{\omega} + B\omega + K\theta = \frac{P_m}{\omega} - \gamma \frac{P_e}{\omega_e} \quad (2.20)$$

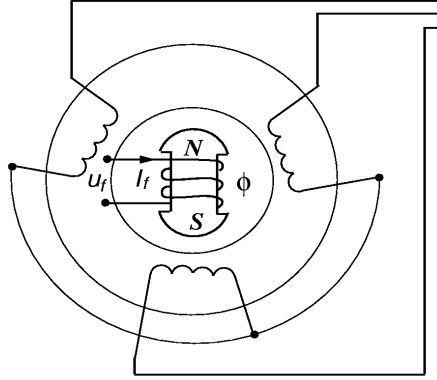
Burada P_m denklem (2.7)'de verilen rüzgar gücünü, P_e sistem tarafından oluşturulan elektriksel gücü göstermektedir. P_e jeneratörün tahrik akımı ile ilgili olup aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$P_e = K_\phi \omega_e c(I_f) \quad (2.21)$$

Burada K_ϕ makine ile ilgili sabittir, $c(\cdot)$ jenerasyon sistemindeki akıdır ve I_f alan akımıdır. Bu çalışmada sistemin nonlinear fakat saturasyonun olmadığı bir manyetik şartlarda çalıştığı kabul edilmiştir. Sistemin tahrik dinamiği aşağıdaki şekildedir.

$$L\dot{I}_f + I_f R_f = u_f \quad (2.22)$$

Burada L devrenin indüktansını, I_f alan akımını, R_f rotor alanının direncini ve u_f kontrol voltajını göstermektedir. Kontrol dizaynında rotor dinamiği (2.20) ve tahrik dinamiği (2.22) iyi bir kontrol performansı için bir arada düşünülmelidir. Şekil 2.2’de rüzgar türbini elektriksel kısmı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Rüzgar Türbini Elektriksel Kısım Şematik Gösterimi

3. KONTROL DİZAYN YÖNTEMLERİ

Bu çalışmada kontrol dizayn yöntemleri olarak genel backstepping ve adaptif backstepping kontrol dizayn yöntemleri ele alınacaktır. Genel bir denklem üzerinde sistem kararlılığı incelenecektir. Esas olarak backstepping kontrol dizayn yöntemi Lyapunov denkleminde bağlı olarak kararlılığı sağlamaktadır.

3.1. Genel Backstepping Kontrol Dizaynı

Kontrol dizaynı için ele alınan sistem denklemi en genel halde aşağıdaki şekilde verilmiş olsun.

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \\ \dot{x}_2 &= f_2(x) + g_2(x)u\end{aligned}\tag{3.1}$$

Burada

$$\begin{aligned}g_1(x_1) &\neq 0 & \forall x_1 \in \mathfrak{R} \\ g_2(x) &\neq 0 & \forall x \in \mathfrak{R}^2\end{aligned}\tag{3.2}$$

şartlarının sağlanması gerekmektedir. Sistemin çıkış denklemi

$$y = x_1\tag{3.3}$$

şeklinde olsun. Çıkış ifadesi için istenen yani referans değeri aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$y_d(t) \begin{cases} \dot{y}_d, \ddot{y}_d & \text{mevcut} \\ & \text{sürekli} \end{cases}$$

Kontrol dizaynının ilk adımında aşağıdaki hata değişkenleri tanımlanır.

$$z_1 = x_1 - y_d \quad (3.4a)$$

$$z_2 = x_2 - \alpha_1(x_1, y_d) \quad (3.4b)$$

Burada amaç hata değişkenlerini zaman içinde sıfır yapacak kontrolü bulmaktır. Bu amaçla birinci hata denkleminin türevini alalım.

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= \dot{x}_1 - \dot{y}_d \\ &= f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 - \dot{y}_d \end{aligned} \quad (3.5)$$

Burada x_2 yerine ikinci hata denklemi (3.4b)'den çekilen ifade konursa

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_1 - \dot{y}_d = f_1(x_1) + g_1(x_1)[z_2 + \alpha_1(z_1)] - \dot{y}_d \quad (3.6)$$

Lyapunov fonksiyonu kontrol sisteminin durum değişkenlerinin, zaman sonsuza giderken, sıfıra gitmesini sağlayacak bir fonksiyondur. Şimdi aşağıdaki Lyapunov fonksiyonu önerilsin.

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (3.7)$$

Lyapunov denkleminin türevi alınırsa

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= z_1 \dot{z}_1 \\ &= z_1 [f_1(x_1) + g_1(x_1)[z_2 + \alpha_1(z_1)] - \dot{y}_d] \\ &= z_1 [f_1(z_1 + y_d) + g_1(z_1 + y_d)\alpha_1(z_1) - \dot{y}_d] + g_1(z_1 + y_d)z_1 z_2 \end{aligned} \quad (3.8)$$

elde edilir. Global bir kararlılık için Lyapunov fonksiyonunun zamana bağlı türevinin sıfırdan küçük olması gerekmektedir. Bu amaçla (3.8) denkleminde aşağıdaki eşitlik önerilebilir.

$$-c_1 z_1 = f_1(z_1 + y_d) + g_1(z_1 + y_d)\alpha_1(z_1) - \dot{y}_d \quad (3.9)$$

eşitliğinden $\alpha_1(z_1)$ ifadesi çekilirse

$$\alpha_1(z_1) = \frac{1}{g_1(z_1 + y_d)} [-f_1(z_1 + y_d) - c_1 z_1 + \dot{y}_d] \quad (3.10)$$

elde edilir. Burada $\alpha_1(z_1)$ sanal kontrol olarak isimlendirilir. (3.9) denklemi yerine konursa Lyapunov denklemi

$$\dot{V}_1 = -c_1 z_1^2 + g_1(z_1 + y_d) z_1 z_2 \quad (3.11)$$

halini alır. Burada kararlılık şartı

$$z_2 \equiv 0 \quad \Rightarrow \quad \dot{V}_1 < 0 \quad (3.12)$$

şeklinde olup denklem (3.11) pozitif terim içerdiğinden bu şartı sağlamamaktadır. Bu nedenle bir sonraki adımda z_2 sıfır yapacak Lyapunov denklemini genişletmek gerekecektir. Bu amaçla ikinci hata denkleminin türevini alalım.

$$\dot{z}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 \quad (3.13)$$

Sanal kontrol α_1 ; z_1 , y_d ve $\dot{y}_d$ 'nin bir fonksiyonu olduğundan türevi aşağıdaki şekilde elde edilebilir.

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}_1 &= \frac{\partial \alpha}{\partial z_1} \frac{dz_1}{dt} + \frac{\partial \alpha}{\partial y_d} \frac{dy_d}{dt} + \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{y}_d} \frac{d\dot{y}_d}{dt} \\ &= \frac{\partial \alpha}{\partial z_1} \dot{z}_1 + \frac{\partial \alpha}{\partial y_d} \dot{y}_d + \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{y}_d} \ddot{y}_d \end{aligned} \quad (3.14)$$

(3.14) denklemindeki $\dot{z}_1$ ifadesi (3.11) denkleminin son halinden

$$\begin{aligned}\dot{V}_1 &= -c_1 z_1^2 + g_1(z_1 + y_d)z_1 z_2 \\ &= z_1 \underbrace{(-c_1 z_1 + g_1(x_1)z_2)}_{\dot{z}_1}\end{aligned}\quad (3.15)$$

$$\dot{z}_1 = -c_1 z_1 + g_1(x_1)z_2 \quad (3.16)$$

şeklinde elde edilebilir. (3.14) ve (3.16) denklemleri (3.13) denkleminde yerine konursa

$$\dot{z}_2 = f_2(x) + g_2(x)u - \frac{\partial \alpha}{\partial z_1}[-c_1 z_1 + g_1(x_1)z_2] - \frac{\partial \alpha}{\partial y_d} \dot{y}_d - \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{y}_d} \ddot{y}_d \quad (3.17)$$

halini alır. İkinci hata değişkenini de içine alan Lyapunov fonksiyonu

$$V(z) = V_1(z_1) + \frac{1}{2} z_2^2 \quad (3.18)$$

şeklinde tanımlanabilir. Lyapunov denkleminin türevi alınır ve gerekli ifadeler yerine konursa

$$\begin{aligned}\dot{V}(z) &= \dot{V}_1(z_1) + z_2 \dot{z}_2 \\ &= -c_1 z_1^2 + g_1(x_1)z_1 z_2 + \left[z_2 f_2(x) + g_2(x)u - \frac{\partial \alpha}{\partial z_1}[-c_1 z_1 + g_1(x_1)z_2] \right. \\ &\quad \left. - \frac{\partial \alpha}{\partial y_d} \dot{y}_d - \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{y}_d} \ddot{y}_d \right] \\ &= -c_1 z_1^2 + z_2 \left[z_1 g_1(x_1) + f_2(x) + g_2(x)u - \frac{\partial \alpha}{\partial z_1}[-c_1 z_1 + g_1(x_1)z_2] \right. \\ &\quad \left. - \frac{\partial \alpha}{\partial y_d} \dot{y}_d - \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{y}_d} \ddot{y}_d \right]\end{aligned}\quad (3.19)$$

elde edilir. Burada ikinci hata değişkenin bulunduğu kısmı negatif yapacak eşitlik aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned}
-c_2 z_2 &= z_1 g_1(x_1) + f_2(x) + g_2(x)u \\
&\quad - \frac{\partial \alpha}{\partial z_1} [-c_1 z_1 + g_1(x_1)z_2] - \frac{\partial \alpha}{\partial y_d} \dot{y}_d - \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{y}_d} \ddot{y}_d
\end{aligned} \tag{3.20}$$

Buradan kontrol u çekilirse

$$\begin{aligned}
u &= \frac{1}{g_2(x)} \left[-c_2 z_2 - z_1 g_1(x_1) - f_2(x) + \frac{\partial \alpha}{\partial z_1} [-c_1 z_1 + g_1(x_1)z_2] \right. \\
&\quad \left. + \frac{\partial \alpha}{\partial y_d} \dot{y}_d + \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{y}_d} \ddot{y}_d \right]
\end{aligned} \tag{3.21}$$

elde edilir. Bu durumda Lyapunov fonksiyonu

$$\dot{V}(z) = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 < 0 \tag{3.22}$$

şeklini alacaktır. $c_1, c_2 > 0$ seçilen kontrol parametreleridir.

3.1.1 Genel Backstepping Kontrol Dizayn Örneği

Bir önceki konuda genel bir formda verilen kontrol dizaynı bir örnek üzerinde uygulanabilir. Kontrol sisteminin aşağıdaki şekilde verildiğini düşünelim.

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= Ax_2 \\
\dot{x}_2 &= -bu \\
y &= x_1
\end{aligned} \tag{3.23}$$

Kontrol dizaynı için durum denkleminde x_1 ve x_2 gibi iki değişken olduğu için iki hata (error) değişkeni tarif ediyoruz. Burada amaç bu hata değişkenlerini sıfır yapacak kontrolü bulmak olacaktır.

$$\begin{aligned}
z_1 &= y - y_r \\
z_2 &= x_2 - \alpha_1(z_1)
\end{aligned} \tag{3.24}$$

Burada y_r referans çıkış değeri olmaktadır. $\alpha_1(z_1)$ ise sanal kontrol olarak düşünülmektedir. İlk hata değişkeninin zamana bağlı türevini alırsak

$$\dot{z}_1 = \dot{y} - \dot{y}_r \quad (3.25)$$

Denklem (3.23)'den $\dot{y} = \dot{x}_1$ olduğu anlaşılır. Referans değerinin $y_r = 0$ olduğu kabul edilirse $\dot{y}_r = 0$ anlaşılır. Bu bilgiler ışığında $\dot{z}_1$ aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\dot{z}_1 = x_2 \quad (3.26)$$

Denklem (3.24)'den x_2 çekilir ve (3.26) denkleminde yerine yazılır ise:

$$\dot{z}_1 = z_2 + \alpha_1(z_1) \quad (3.27)$$

halini alır. Şimdi aşağıdaki Lyapunov fonksiyonunu öneriyoruz.

$$V_1(z_1) = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (3.28)$$

Bu Lyapunov fonksiyonunun zamana bağlı türevini alalım.

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= z_1 \dot{z}_1 \\ &= z_1 [z_2 + \alpha_1(z_1)] \end{aligned} \quad (3.29)$$

Burada amaç z_1 değişkenini sıfır yapmak olduğundan kararlılık fonksiyonu α_1 aşağıdaki şekilde seçilebilir.

$$\alpha_1(z_1) = -c_1 z_1 \quad c_1 > 0 \quad (3.30)$$

Kararlılık fonksiyonu yerine konursa Lyapunov fonksiyonunun türevi aşağıdaki şekli alır.

$$\dot{V}_1 = -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 \quad (3.31)$$

Herhangi bir sistemin kararlı olabilmesi için önerilen Lyapunov fonksiyonunun türevinin sağ tarafının eksi değerli olması gerekmektedir. Oysa $z_1 z_2$ pozitif terim olarak bulunmaktadır dolayısı ile tam bir kararlılık sağlanmamaktadır. Bu nedenle ikinci hata değişkenin türevini alarak backstepping işlemine devam ediyoruz.

$$\begin{aligned}\dot{z}_2 &= \dot{x}_2 + c_1 \dot{x}_1 \\ &= -bu + c_1 x_2\end{aligned}\tag{3.32}$$

Şimdi ikinci hata değişkenini de içine alan yeni bir Lyapunov fonksiyonu tarif ediyoruz.

$$V_2(z_1, z_2) = V_1(z_1) + \frac{1}{2} z_2^2\tag{3.33}$$

Lyapunov fonksiyonunun türevini alırsak :

$$\begin{aligned}\dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 \\ &= -c_1 z_1^2 + z_2 [z_1 - bu + c_1 x_2]\end{aligned}\tag{3.34}$$

Denklem (3.35)'te ikinci hata değişkeninin katsayısını eksi değerli yapacak şekilde köşeli parantez içindeki kısmı aşağıda verilen denklemdeki gibi düşünersek

$$-c_2 z_2 = z_1 - bu + c_1 x_2\tag{3.35}$$

Burada $c_2 > 0$ serbestçe seçilebilen dizayn parametresidir. Buradan kontrol u ifadesi çekilirse

$$u = \frac{1}{b}(c_2 z_2 + z_1 + c_1 x_2)\tag{3.36}$$

bulunur. Seçilen bu kontrol girişi yukarıda yerine konursa Lyapunov fonksiyonu aşağıdaki şekli alır.

$$\dot{V}_2 = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 < 0\tag{3.37}$$

Buradan anlaşılacağı gibi kontrol sisteminin kararlılığı bu son Lyapunov fonksiyonunun türevinin eksi değerli olması ile tam garanti edilmektedir. Denklem (3.37)'de bulunan kontrol girişini sistemin durum değişkenlerine bağlı olarak ifade edersek

$$\begin{aligned} z_1 &= x_1 \\ z_2 &= x_2 + c_1 x_1 \end{aligned} \quad (3.38)$$

kontrol girişi

$$\begin{aligned} u &= -c_2(x_2 + c_1 x_1) - x_1 - c_1 x_2 \\ &= -(1 + c_1 c_2)x_1 - (c_1 + c_2)x_2 \end{aligned} \quad (3.39)$$

olarak bulunur.

3.2. Adaptif Backstepping Kontrol Dizaynı

Adaptif kontrol dinamik bir kontrol tekniği olduğu için statik kontrole göre biraz daha komplekstir. Adaptif kontrol ile sistemin durum değişkeni x değerinin sınırlanması sağlanmakla kalmaz aynı zamanda istenilen sabit değere yaklaşılr veya referans sinyalinin asimptotik olarak takip edilmesi sağlanır [4]. Basit bir nonlineer sistem düşünelim

$$\dot{x} = u + \theta \varphi(x) \quad (3.40)$$

Bu denklemde θ parametresi bilinmeyen sabit bir parametredir. θ parametresi bilinmese dahi aşağıdaki denklemde olduğu gibi statik bir kontrolör düşünülebilir.

$$u = -cx - \kappa x \varphi^2(x) \quad (3.41)$$

denklem (3.41)'de verilen kontrol girişi denklem (3.40)'ta yerine yazılır ise:

$$\dot{x} = -cx - \kappa x \varphi^2(x) + \theta \varphi(x) \quad (3.42)$$

elde edilir. Lyapunov fonksiyonu uygulandığında,

$$V = \frac{1}{2}x^2 \quad (3.43)$$

Denklem (3.43)'ün türevi alınır ve (3.42) denklemi bu türevde yerine yazılır ise ,

$$\begin{aligned} \dot{V} &= x\dot{x} \\ \dot{V} &= \left[-cx - \kappa x \varphi^2(x) + \theta \varphi(x) \right] x \\ &= -cx^2 - \kappa x^2 \varphi^2(x) + x\theta \varphi(x) \\ &= -cx^2 - \kappa \left(x\varphi(x) - \frac{\theta}{2\kappa} \right)^2 + \frac{\theta^2}{4\kappa} \end{aligned} \quad (3.44)$$

elde edilebilir. (3.44) denkleminin aşağıdaki eşitsizliği sağlaması için

$$\dot{V} \leq -cx^2 + \frac{\theta^2}{4\kappa} \quad (3.45)$$

$x(t)$ nin yakınsaması gereken sınır

$$|x| \leq \frac{|\theta|}{2\sqrt{\kappa c}} \quad (3.46)$$

olarak belirlenir.

Burada κ ve c kazançları büyütülerek eşitsizlik küçültülebilir, fakat θ sıfırdan farklı bir sabit olduğu için $x(t)$ hiçbir zaman sıfıra yaklaşmaz. κ ve c kazançlarının aşırı yüksek seçilmesi ise sistemin bant aralığını genişleteceği için tercih edilmez. Burada $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$ eşitliği κ ve c 'nin değerlerinin yükseltilmeden sağlanması amaçlanmalıdır. Bunun için ilk başta $\kappa = 0$ ve sonra $\kappa > 0$ seçilerek denklemler oluşturulacaktır [6].

Eğer θ biliniyor ise kontrol girişi,

$$u = -\theta \varphi(x) - c_1 x, \quad c_1 > 0 \quad (3.47)$$

bu denkleme bağılı olarak Lyapunov fonksiyonu uygulandığında kararlılık için $\dot{V}_1 = -c_1 x^2$ gibi sağ tarafı negatif bir eşitlik elde edilmelidir. θ bilinmeyen olduğu için denklem ilerletilemez. Bu nedenle θ yerine tahmin olan $\hat{\theta}$ kullanılır ise:

$$u = -\hat{\theta}\varphi(x) - c_1 x \quad (3.48)$$

denklem (3.48) denklem (3.40)'da yerine konursa,

$$\dot{x} = -c_1 x + \tilde{\theta}\varphi(x) \quad (3.49)$$

elde edilir. $\tilde{\theta}$ parametre tahmin hatasıdır ve aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta} \quad (3.50)$$

Lyapunov fonksiyonunun türevi alındığında,

$$\dot{V}_1 = -c_1 x^2 + \tilde{\theta} x \varphi(x) \quad (3.51)$$

kararlılık şartı için denklem (3.51)'in sağ tarafının sıfırdan küçük olması gerekmektedir. Fakat $\tilde{\theta}$ ifadesi bilinmediği için ikinci Lyapunov fonksiyonu tanımlanır.

$$V_2 = \frac{1}{2} x^2 + \frac{1}{2\gamma_a} \tilde{\theta}^2 \quad (3.52)$$

burada γ_a adaptasyon kazancıdır. Lyapunov fonksiyonunun türevi alınır ise:

$$\begin{aligned}\dot{V}_2 &= x\dot{x} + \frac{1}{\gamma_a} \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}} \\ &= -c_1 x^2 + \tilde{\theta} x \varphi(x) + \frac{1}{\gamma_a} \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}} \\ \dot{V}_2 &= -c_1 x^2 + \tilde{\theta} \left[x \varphi(x) + \frac{1}{\gamma_a} \dot{\tilde{\theta}} \right]\end{aligned}\tag{3.53}$$

Karalılık için ikinci Lyapunov denkleminin de sağ tarafı sıfırdan küçük olmalıdır.

Denklem (3.51)'deki çözümden daha iyi bir çözüm sağlanmasına rağmen $\tilde{\theta}$ terimi nedeniyle belirsizlik devam etmektedir. $\dot{\tilde{\theta}} = -\tilde{\theta}$ eşitliğinde uygun seçim ile belirsiz terimi denklem sisteminden çıkarmış oluruz.

$$\dot{\tilde{\theta}} = -\tilde{\theta} = \gamma_a x \varphi(x)\tag{3.54}$$

eşitliği denklem (3.53)'te yerine yazılır ise,

$$\dot{V}_2 = -c_1 x^2 \leq 0\tag{3.55}$$

elde edilir. Denklemin sıfırdan küçük olması kararlı olduğunu göstermektedir [4,5].

4. KONTROL DİZAYN ÇALIŞMASI

Değişken hızlı rüzgar türbinlerinde rotor hızı tahrik sargı voltajı vasıtasıyla ayarlanmaktadır. Bu metodun temel prensibi, rotor hızını ayarlamak için jeneratörün reaksiyon torkunu (gücünü) sargı voltajını değiştirerek ayarlamaktır. Bu tanımlamalara göre kontrol problemini şöyle açıklayabiliriz: Bölüm 1’de verilen üç çalışma moduna göre türbin rotor hızının (ω) istenen rotor hızını (ω^*) çok yakın bir şekilde takip etmesini sağlayacak kontrol voltajı (u_f) dizaynı oluşturmaktır.

4.1. Genel Backstepping Kontrol Dizaynı

Bölüm 2’de elde edilen (2.20) ve (2.22) denklemlerini düşünelim. Bu denklemleri aşağıdaki şekilde yazabiliriz.

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= -\frac{B}{J}\omega - \frac{K}{J}\theta + \frac{P_m}{J\omega} - \gamma \frac{P_e}{J\omega_e} \\ &= -\frac{B}{J}\omega - \frac{K}{J}\int \omega d\tau + \frac{P_m}{J\omega} - \gamma \frac{P_e}{J\omega_e}\end{aligned}\quad (4.1)$$

$$\dot{I}_f = -\frac{R_f}{L}I_f + \frac{1}{L}u_f \quad (4.2)$$

verilen denklemler yeniden düzenlenir ise:

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= a_1\omega^2 - a_2\omega - a_3\int_0^t \omega d\tau - Ac(I_f) \\ \dot{I}_f &= -b_1I_f + b_2u_f\end{aligned}\quad (4.3)$$

elde edilir. Burada $c(I_f) = k_1I_f$ ve $A_1 = -Ak_1$ olarak alınmıştır. Ayrıca $a_1 = \frac{k_w}{J}$,

$a_2 = \frac{B}{J}$, $a_3 = \frac{K}{J}$, $b_1 = \frac{R_f}{L}$ ve $b_2 = \frac{1}{L}$ dir.

Bölüm 3’de anlatılan genel backstepping kontrol dizaynı yöntemini adım adım takip edecek şekilde değişken dönüşümü yapılır ise:

$$x_1 = \omega, \quad x_2 = I_f \quad (4.4)$$

sistem denklemi

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= a_1 x_1^2 - a_2 x_1 - a_3 \int_0^t x_1 d\tau + A_1 x_2 \\ \dot{x}_2 &= -b_1 x_2 + b_2 u_f \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (4.5)$$

şeklinde ifade edilir. Genel backstepping kontrol dizaynı uygulanacak sistem denklemi (denklem (3.1)) düşünülürse

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1) + g_1(x_1)x_2 \\ \dot{x}_2 &= f_2(x) + g_2(x)u \end{aligned} \quad (4.6)$$

burada denklem (4.5) ile karşılaştırılır ise

$$f_1(x_1) = a_1 x_1^2 - a_2 x_1 - a_3 \int_0^t x_1 d\tau \quad (4.7)$$

$$f_2(x) = -b_1 x_2 \quad (4.8)$$

$$g_1(x) = A_1 \quad (4.9)$$

$$g_2(x) = b_2 \quad (4.10)$$

$$u = u_f \quad (4.11)$$

olduğu anlaşılır.

Adım 1:

Kontrol dizaynında ilk olarak hata değişkenlerini tanımlayalım.

$$z_1 = y - y_r = x_1 - y_r \quad (4.12)$$

$$z_2 = x_2 - \alpha(z_1, y_r) \quad (4.13)$$

denklem (4.12)'de verilen birinci hata değişkenin türevi alınarak (4.5) denklem sisteminde verilen y ifadesinin türevi olan $\dot{x}_1$ eşitliği yazılır ise :

$$\dot{z}_1 = \dot{y} - \dot{y}_r = a_1 x_1^2 - a_2 x_1 - a_3 \int_0^t x_1 d\tau + A_1 x_2 - \dot{y}_r \quad (4.14)$$

elde edilir. (4.13) denkleminde verilen ikinci hata değişkeni düzenlenerek x_2 ifadesinin yerine yazılır ise:

$$\dot{z}_1 = a_1 x_1^2 - a_2 x_1 - a_3 \int_0^t x_1 d\tau + A_1 [z_2 + \alpha(z_1, y_r)] - \dot{y}_r \quad (4.15)$$

denklemini elde edilir. Türev ifadesinde değişken yerine yazılırsa

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= a_1 (z_1 + y_r)^2 - a_2 (z_1 + y_r) \\ &\quad - a_3 \int_0^t (z_1 + y_r) d\tau + A_1 [z_2 + \alpha(z_1, y_r)] - \dot{y}_r \end{aligned} \quad (4.16)$$

ifadesi çıkarılır. Genel backstepping kontrol dizayn adımları takip edilerek aşağıdaki Lyapunov fonksiyonu önerilebilir:

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (4.17)$$

Bu fonksiyonun türevi alınarak (4.14) denklemini elde edilen türev ifadesinde yerine yazılırsa

$$\begin{aligned}
\dot{V}_1 &= z_1 \dot{z}_1 \\
&= z_1 \left[a_1(z_1 + y_r)^2 - a_2(z_1 + y_r) - a_3 \int_0^t (z_1 + y_r) d\tau \right. \\
&\quad \left. + A_1[z_2 + \alpha(z_1, y_r)] - \dot{y}_r \right] \\
&= z_1 \left[\underbrace{a_1(z_1 + y_r)^2 - a_2(z_1 + y_r) - a_3 \int_0^t (z_1 + y_r) d\tau}_{-c_1 z_1} + A_1 \alpha(z_1, y_r) - \dot{y}_r \right] \\
&\quad + A_1 z_1 z_2
\end{aligned} \tag{4.18}$$

denklemini oluşturulur. Denklem içerisinde gerekli düzenlemeler yapılarak Lyapunov fonksiyonunun birinci türevi

$$\begin{aligned}
\dot{V}_1 &= -c_1 z_1^2 + A_1 z_1 z_2 \\
\dot{V}_1 &= z_1 \underbrace{(-c_1 z_1 + A_1 z_2)}_{\dot{z}_1}
\end{aligned} \tag{4.19}$$

haline getirilmiş olur. Burada

$$\begin{aligned}
-c_1 z_1 &= a_1(z_1 + y_r)^2 - a_2(z_1 + y_r) \\
&\quad - a_3 \int_0^t (z_1 + y_r) d\tau + A_1 \alpha(z_1, y_r) - \dot{y}_r
\end{aligned} \tag{4.20}$$

olarak belirlenmiştir. Bu denklemden sanal kontrol ifadesi α çekilir ise,

$$\begin{aligned}
\alpha(z_1, y_r) &= \frac{1}{A_1} \left[-c_1 z_1 - a_1(z_1 + y_r)^2 + a_2(z_1 + y_r) \right. \\
&\quad \left. + a_3 \int_0^t (z_1 + y_r) d\tau + \dot{y}_r \right]
\end{aligned} \tag{4.21}$$

denklemini elde edilir.

Adım 2:

Kontrol dizaynında denklem (4.13)'de tanımlanan ikinci hata değişkeninin türevi alınır

$$\dot{z}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha} \quad (4.22)$$

elde edilir. Burada α , z_1 , y_r ve $\dot{y}_r$ 'ye bağılı bir değişken olduğu için kısmi türevi alınarak

$$\dot{\alpha} = \frac{\partial \alpha}{\partial z_1} \frac{dz_1}{dt} + \frac{\partial \alpha}{\partial y_r} \frac{dy_r}{dt} + \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{y}_r} \frac{d\dot{y}_r}{dt} \quad (4.23)$$

elde edilir . Gerekli düzenlemeler yapılarak

$$\dot{\alpha} = \frac{\partial \alpha}{\partial z_1} \dot{z}_1 + \frac{\partial \alpha}{\partial y_r} \dot{y}_r + \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{y}_r} \ddot{y}_r \quad (4.24)$$

denklemini elde edilir. Bu aşamada (4.22) denklemini genişletilerek yazılır ise:

$$\dot{z}_2 = -b_1 x_2 + b_2 u_f - \left[\frac{\partial \alpha}{\partial z_1} (-c_1 z_1 + A_1 z_2) + \frac{\partial \alpha}{\partial y_r} \dot{y}_r + \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{y}_r} \ddot{y}_r \right] \quad (4.25)$$

elde edilir. İkinci hata değişkenini içerecek şekilde Lyapunov fonksiyonu tanımlayalım,

$$V_2 = V_1(z_1) + \frac{1}{2} z_2^2 \quad (4.26)$$

Lyapunov fonksiyonunun türevi alınır ise ,

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 \\ &= -c_1 z_1^2 + z_2 \underbrace{\left[A_1 z_1 - b_1 x_2 + b_2 u_f - \frac{\partial \alpha}{\partial z_1} (-c_1 z_1 + A_1 z_2) - \frac{\partial \alpha}{\partial y_r} \dot{y}_r - \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{y}_r} \ddot{y}_r \right]}_{-c_2 z_2} \end{aligned} \quad (4.27)$$

elde edilir. Denklem (4.27)'yi negatif tanımlı yapacak şekilde aşağıdaki eşitlik yazılır ise,

$$-c_2 z_2 = A_1 z_1 - b_1 x_2 + b_2 u_f - \frac{\partial \alpha}{\partial z_1} (-c_1 z_1 + A_1 z_2) - \frac{\partial \alpha}{\partial y_r} \dot{y}_r - \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{y}_r} \ddot{y}_r \quad (4.28)$$

sistem kararlılığı,

$$\dot{V}_2 = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 < 0 \quad (4.29)$$

sağlanır. Denklem (4.28)'den kontrol girişi çekilir ise

$$u_f = \frac{1}{b_2} \left[-c_2 z_2 - A_1 z_1 + b_1 x_2 + \frac{\partial \alpha}{\partial z_1} (-c_1 z_1 + A_1 z_2) + \frac{\partial \alpha}{\partial y_r} \dot{y}_r + \frac{\partial \alpha}{\partial \dot{y}_r} \ddot{y}_r \right] \quad (4.30)$$

Kontrol girişi denklem (4.30)'daki gibi elde edilmiş oldu. Bu denklemdeki kısmi türev ifadeleri denklem (4.21)'den yararlanarak hesaplanacak olursa

$$\frac{\partial \alpha}{\partial z_1} = \frac{1}{A_1} \left[-c_1 - 2a_1(z_1 + y_r) + a_2 + a_3 \left(\int_0^t d\tau \right) \right] \quad (4.31)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial y_r} = \frac{1}{A_1} \left[-2a_1(z_1 + y_r) + a_2 + a_3 \left(\int_0^t d\tau \right) \right] \quad (4.32)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \dot{y}_r} = \frac{1}{A_1} \quad (4.33)$$

denklemleri elde edilir. Bulunan bu denklemler (4.30)'da yerine yazılarak kontrol girişi aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$u_f = \frac{1}{b_2} \left[-c_2 z_2 - A_1 z_1 + b_1 x_2 + \frac{1}{A_1} \left(\left[-c_1 - 2a_1(z_1 + y_r) + a_2 + a_3 \left(\int_0^t d\tau \right) \right] (-c_1 z_1 + A_1 z_2) + \left[-2a_1(z_1 + y_r) + a_2 + a_3 \left(\int_0^t d\tau \right) \right] \dot{y}_r + \ddot{y}_r \right) \right] \quad (4.34)$$

4.2. Adaptif Backstepping Kontrol Dizaynı

Adaptif backstepping kontrol dizaynına genel backstepping kontrol dizaynında başlangıç olarak ele alınan, rüzgar türbininin mekanik ve elektriksel modellerini ifade eden denklemlerle başlayalım.

$$\begin{aligned}\dot{\omega} &= \frac{k_w}{J} \omega^2 - \frac{B}{J} \omega - \frac{K}{J} \int_0^t \omega d\tau - Ac(I_f) \\ \dot{I}_f &= -\frac{R_f}{L} I_f + \frac{1}{L} u_f\end{aligned}\quad (4.35)$$

Burada $\dot{x}_1 = \dot{\omega}$, $\dot{x}_2 = \dot{I}_f$ değişken dönüşümleri yapılırsa sistem denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \frac{k_w}{J} x_1^2 - \frac{B}{J} x_1 - \frac{K}{J} \int_0^t x_1 d\tau + A_1 x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{R_f}{L} x_2 + \frac{1}{L} u_f\end{aligned}\quad (4.36)$$

burada $c(I_f) = k_1 I_f$ ve $A_1 = -Ak_1$ 'dir. Denklem yeniden düzenlenerek $\dot{x}_1$ ifadesinde eşitlik vektör çarpanı şeklinde yazılır ise,

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \begin{bmatrix} \frac{k_w}{J} & -\frac{B}{J} & -\frac{K}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^2 \\ x_1 \\ \int_0^t x_1 d\tau \end{bmatrix} + A_1 x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{R_f}{L} x_2 + \frac{1}{L} u_f\end{aligned}\quad (4.37)$$

elde edilir. Denklem (4.37) aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= \theta \varphi(x_1) + A_1 x_2 \\
\dot{x}_2 &= -b_1 x_2 + b_2 u_f \\
y &= x_1
\end{aligned} \tag{4.38}$$

Burada

$$\begin{aligned}
\theta &= \begin{bmatrix} \frac{k_w}{J} & -\frac{B}{J} & -\frac{K}{J} \end{bmatrix} \\
\varphi(x_1) &= \begin{bmatrix} x_1^2 \\ x_1 \\ \int_0^t x_1 d\tau \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{4.39}$$

elde edilen denklem sisteminde θ bilinmeyen parametre olarak kabul edilmektedir. Denklem (4.38)'de verilen y değişkeni gerçek türbin hızını ifade etmektedir ve referans hız değerini asimptotik olarak takip etmesi gerekmektedir. Sistem denklemleri elde edildikten sonra Bölüm 3.2'de anlatılan adaptif backstepping kontrol dizaynı adımlarını sırasıyla takip edelim.

Adım 1.

Adaptif kontrol dizaynında ilk hata değişkenini izleme hatası olarak tanımlayalım:

$$z_1 = y - y_r = x_1 - y_r \tag{4.40}$$

Hata değişkeninin türevi aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned}
\dot{z}_1 &= \dot{x}_1 - \dot{y}_r \\
\dot{z}_1 &= A_1 x_2 + \theta \varphi(x_1) - \dot{y}_r
\end{aligned} \tag{4.41}$$

Bu aşamada x_2 sanal kontrol olarak görülebilir ve aşağıdaki kararlılık fonksiyonu tanımlanabilir:

$$\alpha_1 = \frac{1}{A_1}(-c_1 z_1 - \kappa_1 z_1 \varphi^2 - \hat{\theta} \varphi + \dot{y}_r) \quad (4.42)$$

Burada $\kappa_1 z_1 \varphi^2$ ($\kappa_1 > 0$) nonlinear sönüm terimini göstermektedir. Ayrıca $\hat{\theta}$, bilinmeyen θ 'nın tahminidir. İkinci hata değişkeni aşağıdaki şekilde tanımlanırsa

$$z_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (4.43)$$

Bu ifadeden x_2 çekilirse:

$$x_2 = z_2 + \alpha_1 \quad (4.44)$$

denklem (4.42)'de verilen α_1 yerine yazılır ise:

$$x_2 = z_2 + \frac{1}{A_1}(-c_1 z_1 - \kappa_1 z_1 \varphi^2 - \hat{\theta} \varphi + \dot{y}_r) \quad (4.45)$$

elde edilir. Bu durumda denklem (4.41)'de elde edilen ilk hata değişkeninin türevinde x_2 yerine yazılarak düzenlenecek olur ise:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= A_1 \left[z_2 + \frac{1}{A_1}(-c_1 z_1 - \kappa_1 z_1 \varphi^2 - \hat{\theta} \varphi + \dot{y}_r) \right] + \theta \varphi(x_1) - \dot{y}_r \\ &= A_1 z_2 - c_1 z_1 - \kappa_1 z_1 \varphi^2 - \hat{\theta} \varphi + \theta \varphi(x_1) \\ &= -c_1 z_1 - \kappa_1 z_1 \varphi^2 + A_1 z_2 + \tilde{\theta} \varphi \end{aligned} \quad (4.46)$$

elde edilir. $\tilde{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ parametre tahmin hatasıdır. Birinci hata değişkeni için Lyapunov fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2\gamma_a} \tilde{\theta}^2 \quad (4.47)$$

$\gamma_a > 0$ adaptasyon kazancıdır. Lyapunov denkleminin türevi

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 + \frac{1}{\gamma_a} \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}} \quad (4.48)$$

olarak elde edilir. $\dot{z}_1$ ifadesinin yerine denklem (4.46) yazılarak

$$\dot{V}_1 = z_1 (-c_1 z_1 - \kappa_1 z_1 \varphi^2 + A_1 z_2 + \tilde{\theta} \varphi) + \frac{1}{\gamma_a} \tilde{\theta} \dot{\tilde{\theta}}$$

eşitliği oluşturulur. Gerekli düzenleme işleminden sonra

$$\dot{V}_1 = A_1 z_1 z_2 - c_1 z_1^2 - \kappa_1 z_1^2 \varphi^2 + \tilde{\theta} \left(\varphi z_1 - \frac{1}{\gamma_a} \dot{\tilde{\theta}} \right) \quad (4.49)$$

denklemini elde edilmiş olur. Burada parametre θ 'nın sabit olduğu kabul edilebilir bu durumda $\dot{\tilde{\theta}} = -\dot{\tilde{\theta}}$ alınabilir.

Adım 2.

Şimdi ikinci hata değişkeni $z_2 = x_2 - \alpha_1$ nin türevini düşünelim.

$$\dot{z}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 \quad (4.50)$$

denklem (4.38)'de elde edilen denklem $\dot{x}_2$ ifadesinin yerine yazılarak

$$\dot{z}_2 = -b_1 x_2 + b_2 u_f - \dot{\alpha}_1 \quad (4.51)$$

elde edilmiş olur. Burada kararlılık fonksiyonunun türevi

$$\begin{aligned}
\dot{\alpha}_1(z_1, y_r, \dot{y}_r, \hat{\theta}) &= \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} \frac{dz_1}{dt} + \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \frac{dy_r}{dt} + \frac{\partial \alpha_1}{\partial \dot{y}_r} \frac{d\dot{y}_r}{dt} + \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} \frac{d\hat{\theta}}{dt} \\
&= \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} \dot{z}_1 + \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \dot{y}_r + \frac{\partial \alpha_1}{\partial \dot{y}_r} \ddot{y}_r + \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} \dot{\hat{\theta}}
\end{aligned} \tag{4.52}$$

gibidir. Elde edilen denklem ikinci hata değişkeni ifadesinde yerine konursa,

$$\begin{aligned}
\dot{z}_2 &= -b_1 x_2 + b_2 u_f - \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} (A_1 x_2 + \theta \varphi) - \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \dot{y}_r - \frac{\partial \alpha_1}{\partial \dot{y}_r} \ddot{y}_r - \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} \dot{\hat{\theta}} \\
&= -b_1 x_2 + b_2 u_f - \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} (A_1 x_2 + (\hat{\theta} + \tilde{\theta}) \varphi) - \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \dot{y}_r - \frac{\partial \alpha_1}{\partial \dot{y}_r} \ddot{y}_r - \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} \dot{\hat{\theta}}
\end{aligned} \tag{4.53}$$

denklemini elde edilmiş olur. Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra,

$$\begin{aligned}
\dot{z}_2 &= -b_1 x_2 + b_2 u_f - \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} A_1 x_2 - \hat{\theta} \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} \varphi - \tilde{\theta} \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} \varphi \\
&\quad - \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \dot{y}_r - \frac{1}{A_1} \ddot{y}_r - \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} \dot{\hat{\theta}}
\end{aligned} \tag{4.54}$$

olarak bulunur. Burada $\frac{\partial \alpha_1}{\partial \dot{y}_r} = \frac{1}{A_1}$ olarak alınmıştır. İkinci hata değişkenini içeren

Lyapunov fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanabilir.

$$\begin{aligned}
V_2 &= V_1 + \frac{1}{2} z_2^2 \\
&= \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} z_2^2 + \frac{1}{2\gamma_a} \tilde{\theta}^2
\end{aligned} \tag{4.55}$$

Lyapunov fonksiyonunun türevi

$$\begin{aligned}
\dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 \\
&= A_1 z_1 z_2 - c_1 z_1^2 - \kappa_1 z_1^2 \varphi^2 + \tilde{\theta} \left(\varphi z_1 - \frac{1}{\gamma_a} \dot{\tilde{\theta}} \right) + z_2 \dot{z}_2
\end{aligned} \tag{4.56}$$

denklem (4.54)'de elde edilen $\dot{z}_2$ ifadesi eşitlikte yerine yazılır ise

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & A_1 z_1 z_2 - c_1 z_1^2 - \kappa_1 z_1^2 \varphi^2 + \tilde{\theta} \left(\varphi z_1 - \frac{1}{\gamma_a} \dot{\hat{\theta}} \right) \\ & + z_2 \left[-b_1 x_2 + b_2 u_f - \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} A_1 x_2 - \hat{\theta} \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} \varphi - \tilde{\theta} \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} \varphi - \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \dot{y}_r - \frac{1}{A_1} \ddot{y}_r - \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} \dot{\hat{\theta}} \right] \end{aligned} \quad (4.57)$$

elde edilir gerekli düzenlemelerden sonra

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -c_1 z_1^2 - \kappa_1 z_1^2 \varphi^2 + \tilde{\theta} \left(\varphi z_1 - z_2 \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} \varphi - \frac{1}{\gamma_a} \dot{\hat{\theta}} \right) \\ & + z_2 \left[A_1 z_1 - b_1 x_2 + b_2 u_f - \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} A_1 x_2 - \hat{\theta} \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} \varphi - \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \dot{y}_r - \frac{1}{A_1} \ddot{y}_r - \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} \dot{\hat{\theta}} \right] \end{aligned} \quad (4.58)$$

elde edilir. Bu denklemde $\tilde{\theta}$ parantezine alınan kısmı yok etmek için aşağıdaki seçim yapılabilir:

$$\dot{\hat{\theta}} = \gamma_a \left(\varphi z_1 - z_2 \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} \varphi \right) \quad (4.59)$$

Bu durumda Lyapunov fonksiyonunun türevi:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -c_1 z_1^2 - \kappa_1 z_1^2 \varphi^2 + z_2 \left[A_1 z_1 - b_1 x_2 + b_2 u_f - \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} A_1 x_2 \right. \\ & \left. - \hat{\theta} \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} \varphi - \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \dot{y}_r - \frac{1}{A_1} \ddot{y}_r - \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} \dot{\hat{\theta}} \right] \end{aligned} \quad (4.60)$$

olarak elde edilir. Buradan Lyapunov fonksiyonun türevini negatif tanımlı yapacak şekilde aşağıdaki seçim uygulanabilir.

$$\begin{aligned} -c_2 z_2 - \kappa_2 z_2 \left(\frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} \varphi \right)^2 = & A_1 z_1 - b_1 x_2 + b_2 u_f - \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} A_1 x_2 \\ & - \hat{\theta} \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} \varphi - \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \dot{y}_r - \frac{1}{A_1} \ddot{y}_r - \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} \dot{\hat{\theta}} \end{aligned} \quad (4.61)$$

Buradan u_f çekilir ise,

$$u_f = \frac{1}{b_2} \left[-c_2 z_2 - \kappa_2 z_2 \left(\frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} \varphi \right)^2 - A_1 z_1 + b_1 x_2 + \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} A_1 x_2 + \hat{\theta} \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} \varphi + \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \dot{y}_r + \frac{1}{A_1} \ddot{y}_r + \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} \dot{\hat{\theta}} \right] \quad (4.62)$$

elde edilir. Burada ikinci hata değişkeni için de nonlineer sönüm ifadesi

$\kappa_2 z_2 \left(\frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} \varphi \right)^2$ $\kappa_2 > 0$ eklenmiştir. Son durumda Lyapunov fonksiyonunun türevi

$$\dot{V}_2 = -c_1 z_1^2 - \kappa_1 z_1^2 \varphi^2 - c_2 z_2^2 - \kappa z_2^2 \left(\frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} \varphi \right)^2 \leq 0 \quad (4.63)$$

halini alır. Bu ifade kararlılığın sağlandığını gösterir. Denklem (4.62)'deki kısmi türevler hesaplanarak denklem yeniden düzenlenir ise

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} = \frac{1}{A_1} (-c_1 - \kappa_1 \varphi^2) \quad (4.64)$$

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} = 0 \quad (4.65)$$

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} = -\frac{1}{A_1} \varphi \quad (4.66)$$

Hesaplanan kısmi türevler denklem (4.62)'de yerine yazılır ise kontrol girişi denklemini aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$u_f = \frac{1}{b_2} \left[-c_2 z_2 - \kappa_2 z_2 \left(\frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} \varphi \right)^2 - A_1 z_1 + b_1 x_2 + \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} A_1 x_2 + \hat{\theta} \frac{\partial \alpha_1}{\partial z_1} \varphi + \frac{\partial \alpha_1}{\partial y_r} \dot{y}_r + \frac{1}{A_1} \ddot{y}_r + \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} \dot{\hat{\theta}} \right] \quad (4.67)$$

5. SİMÜLASYONLAR

Bu bölümde elde edilen sonuçlar, genel backstepping kontrol dizaynı ve adaptif backstepping kontrol dizaynı yöntemlerine göre sinüs dalgası ve değişken rüzgar hızlarında, ortak değişkenlerle Simulink programı kullanılarak yapılmıştır. Oluşturulan Simulink blok diyagramları Ek 2 ve Ek 3'te verilmiştir.

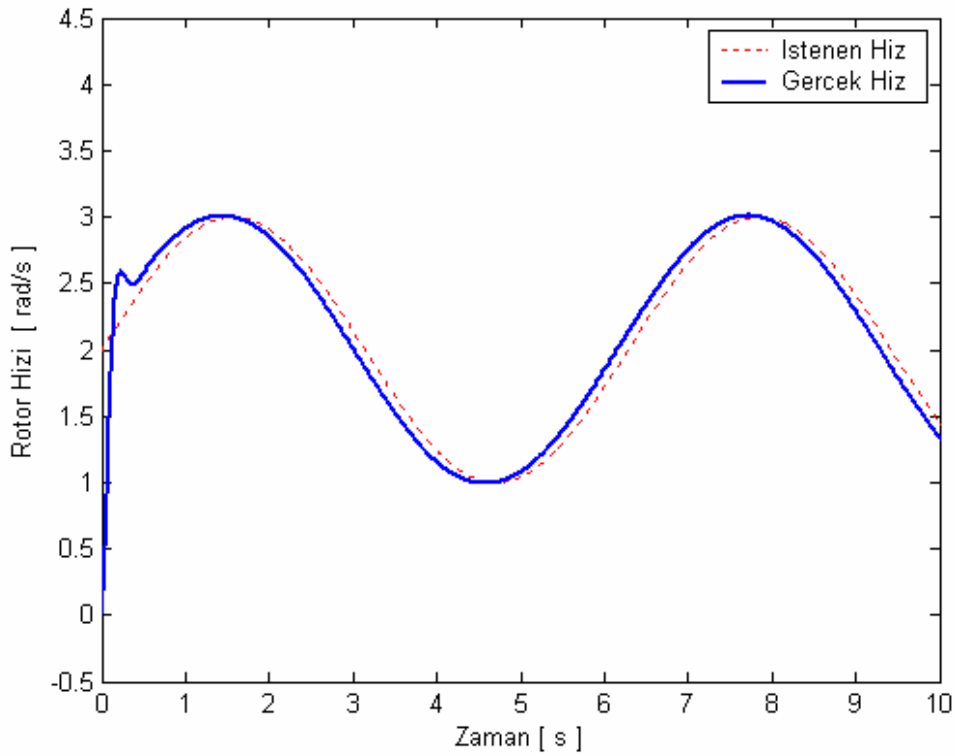
Tablo 5.1. Simülasyon parametreleri

Sembol	Açıklama	Değer	Birim
R_f	Sargı direnci	0.02	Ohm
B	Sönüm katsayısı	52	
K	Rijitlik katsayısı	52	
J	Atalet momenti	2.4494×10^5	Kg m ²
c	Jenerasyon sistemindeki akı	300	
k_0	Dizayn parametresi	2	
k_m	Dizayn parametresi	54	
k_w	Güç katsayısı	3	
L	İndüktans	0.003	H
X_m	Müsaade edilebilir rotor hızı	4.1	Rad/s
γ	Dişli oranı	37.5	
k_a	Kontrol parametresi	54	
k_φ	Türbinle ilgili sabit	1.7	
κ_1	Nonlineer sönüm katsayısı	0.00001	
κ_2	Nonlineer sönüm katsayısı	0.00001	
γ_a	Adaptasyon kazancı	0.00001	
c_1	Dizayn parametresi	80	
c_2	Dizayn parametresi	80	

5.1 Genel Backstepping Kontrol Dizaynı Simülasyonu

5.1.1. Sinüs Dalgası Rüzgar Hızı

Türbin kanatlarına gelen rüzgar hızının sinüs eğrisi şeklinde bir karakteristiğe sahip olduğu düşünülerek Matlab-Simulink programı kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. Tablo 5.1’de verilen parametrelere göre Şekil 5.1’de rotor hızı değişimi grafiği, Şekil 5.2’de izleme hatası değişimi ve Şekil 5.3’te kontrol voltajı grafiği elde edilmiştir.

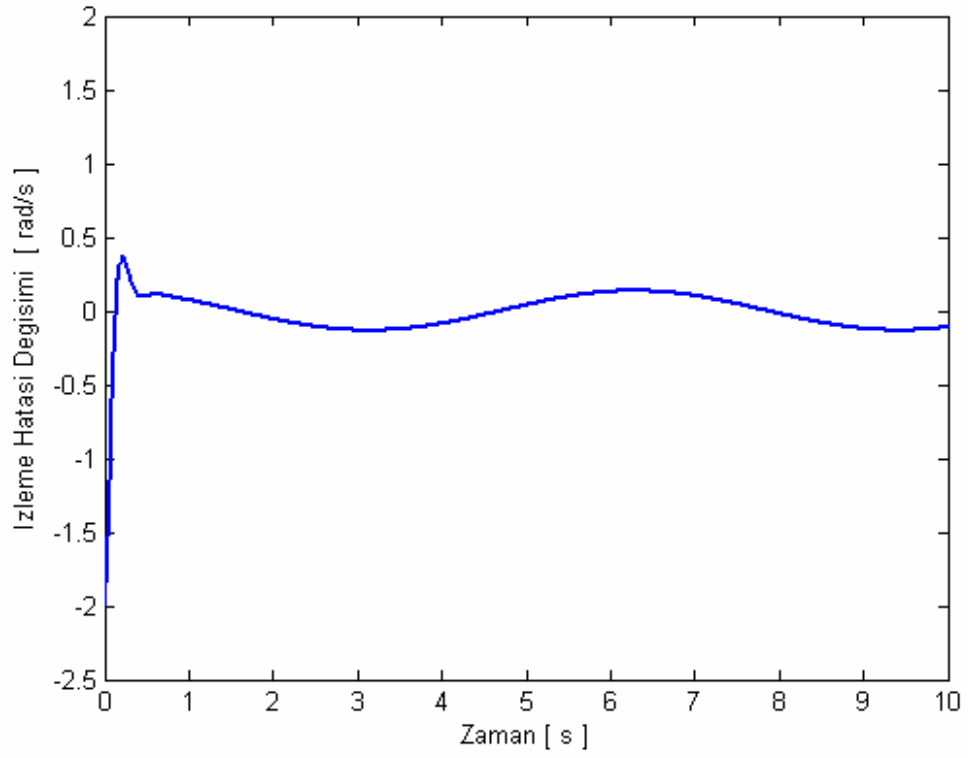


Şekil 5.1. Rotor hızı değişimi

Şekil (5.1)’de elde edilen grafikte kesikli çizgiler,

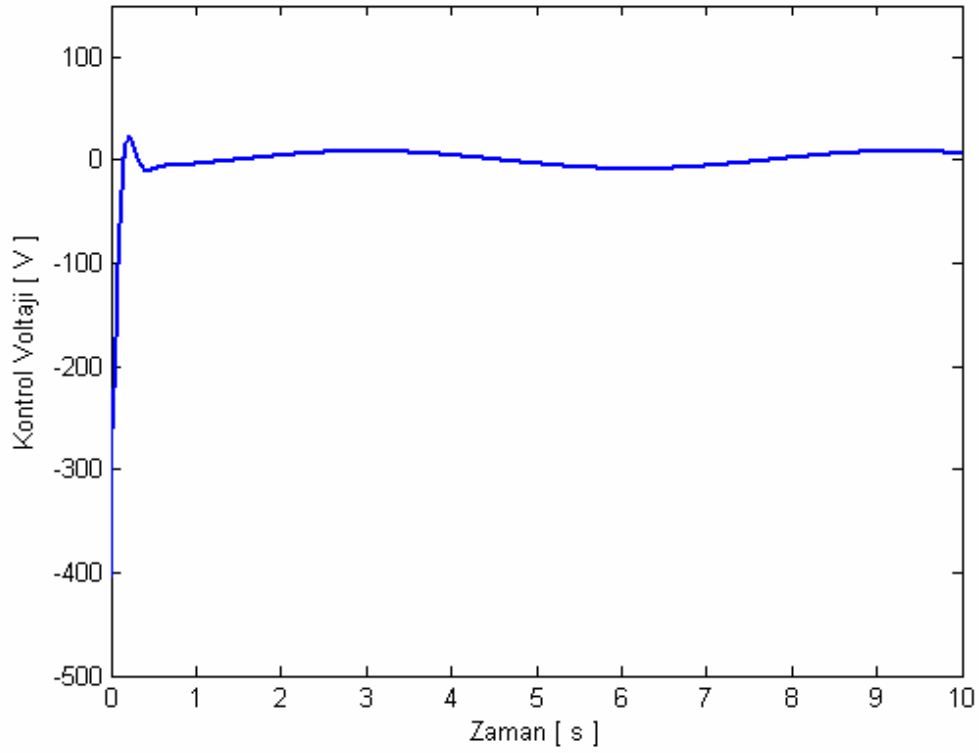
$$\omega^* = 2 + \sin(t) \quad (\text{rad/s}) \quad (5.1)$$

denklemine göre referans (istenen) rotor hızını gösterirken sürekli çizgi ile belirtilen grafik simülasyon sonucu elde edilen gerçek rotor hızını göstermektedir. Simülasyon başlangıcından itibaren gerçek hız istenen hızı yakından takip etmektedir.



Şekil 5.2. İzleme hatası değişimi

Şekil 5.2. de gerçek hızla istenen hız arasındaki fark ($z_1 = y - y_r$) yani izleme hatası grafiği elde edilmiştir. Bu grafiğin sıfıra yakınsaması gerçek hızın istenen hıza yakınsaması anlamına gelmektedir.



Şekil 5.3. Kontrol voltajı

Şekil 5.3.'de gerçek rotor hızının istenen rotor hızını takip etmesi için ayarlanan tahrik sargı voltajının değişimi gösterilmiştir. Voltaj değerinin sıfıra yaklaşması rotor hızı takibinin istenen hıza yaklaştığı anlamına gelmektedir.

5.1.2. Değişken Rüzgar Hızı

Değişken rüzgar hızından kasıt takip edilecek istenen hız değerinin değişkenlik gösteren rüzgar hızına göre ayarlanmasıdır. Buna göre istenen hız değeri aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır. Rotor hızı ω 'nin takip edeceği referans (istenen) hız ω^* :

$$\omega^* = \begin{cases} 0, & u < u_c \\ (Xm/2)(1 + \sin((\pi/2)(u - u_c)/u_R)), & u < u_r \\ Xm, & u < u_F \\ (Xm/2)(1 - \sin((\pi/2)(u - u_c)/u_R)), & u < u_s \\ 0, & u > u_s \end{cases} \quad (5.2)$$

şeklindedir. Değişken hız ω^* 'ın Simulink programında uygulanan blok diyagramı Ek 5'de verilmiştir. Tablo 5.2.'de başlangıç rüzgar hızı u_c , bağıl rüzgar hızı u_R , Türbinin durdurulduğu rüzgar hızı u_F , ve u_s rüzgar hızları verilmiştir.

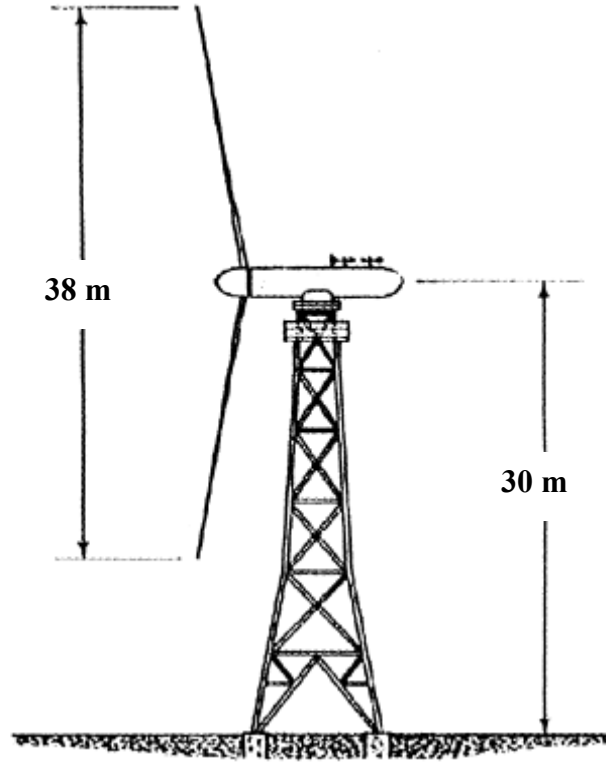
Tablo 5.2.

Sembol	Açıklama	Değer	Birim
u_c	Başlangıç rüzgar hızı	4.3	m/s
u_R	Bağıl rüzgar hızı	7.7	m/s
u_F	Maksimum rüzgar hızı	17.9	m/s
u_s	Türbinin durdurulduğu rüzgar hızı	21.3	m/s
X_m	Müsaade edilebilir rotor hızı	4.1	Rad/s

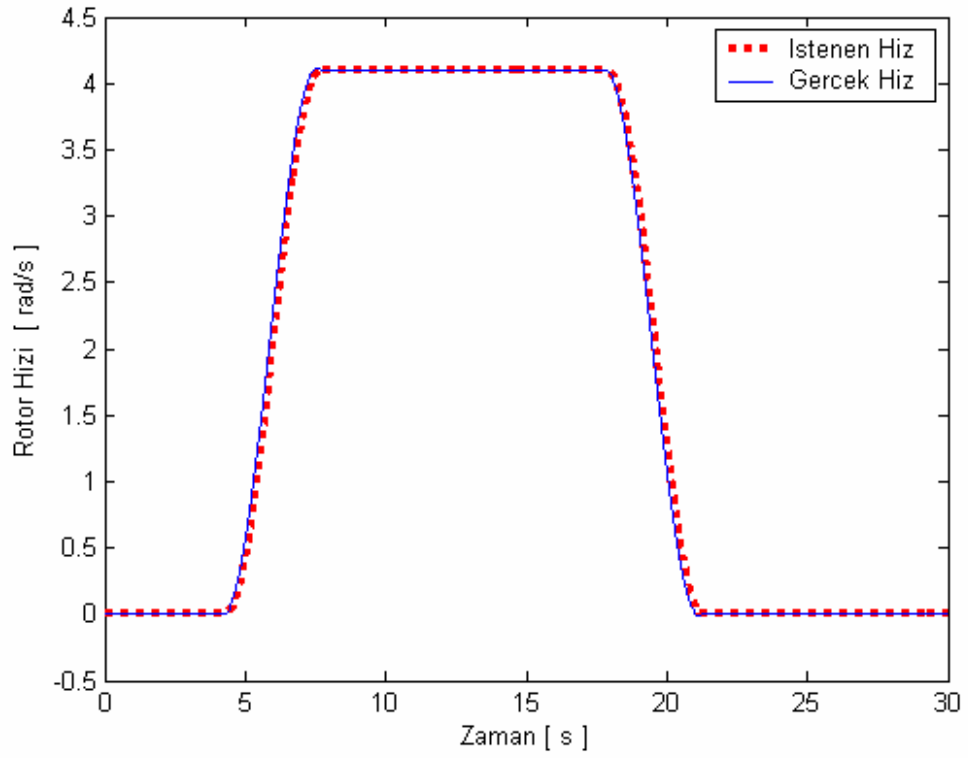
Değişken hız simülasyonlarında pratikte kullanılan bir rüzgar türbini değerleri esas alınmıştır [5]. Simülasyon için Tablo 5.3'de özellikleri ve Şekil 5.4.'de genel görünümü verilen iki kanatlı yatay eksenli rüzgar türbini düşünülmüştür. Şekil 5.5'de Rotor Hızı Değişimi, Şekil 5.6'da izleme hatası değişimi, Şekil 5.7'de kontrol voltajı değişimleri elde edilmiştir.

Tablo 5.3.

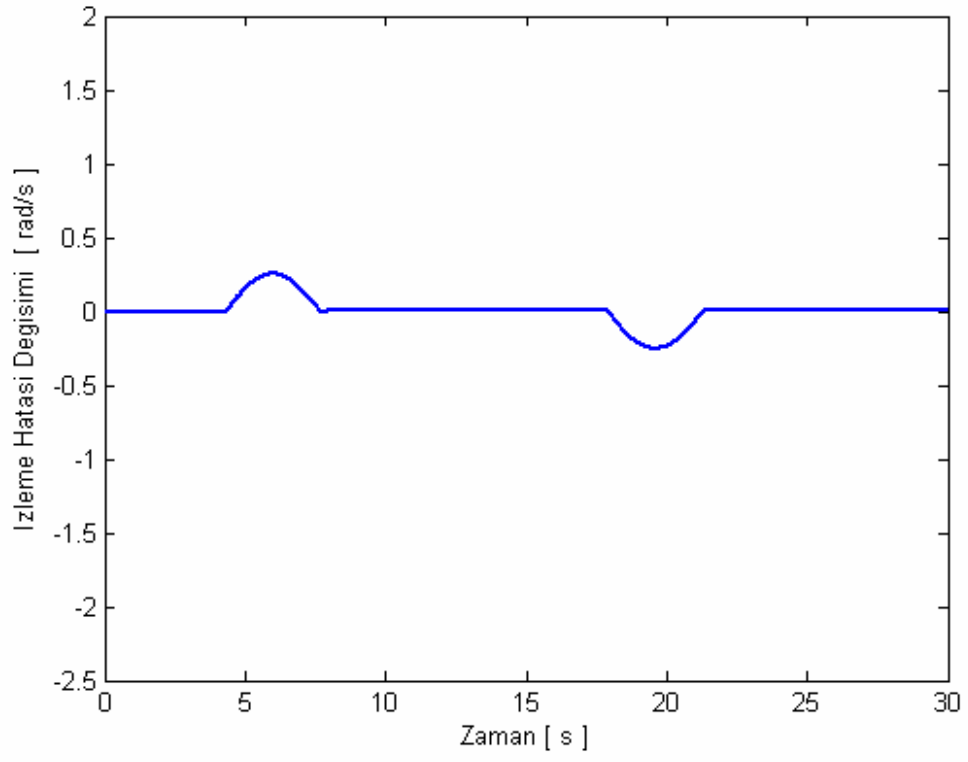
Açıklama	Değer	Birim
Müsaade edilebilir rotor hızı	4.1	r/s
Jeneratör çıkış gücü	100	kW
Optimum performans katsayısı, $C_{p\max}$	0.375	
Rotor çapı	38	m
Hub yüksekliği	30	m
Kanat süpürme alanı	1072	m ²
Kanatların ağırlığı	2090	Kg
Jeneratör voltajı	480	V



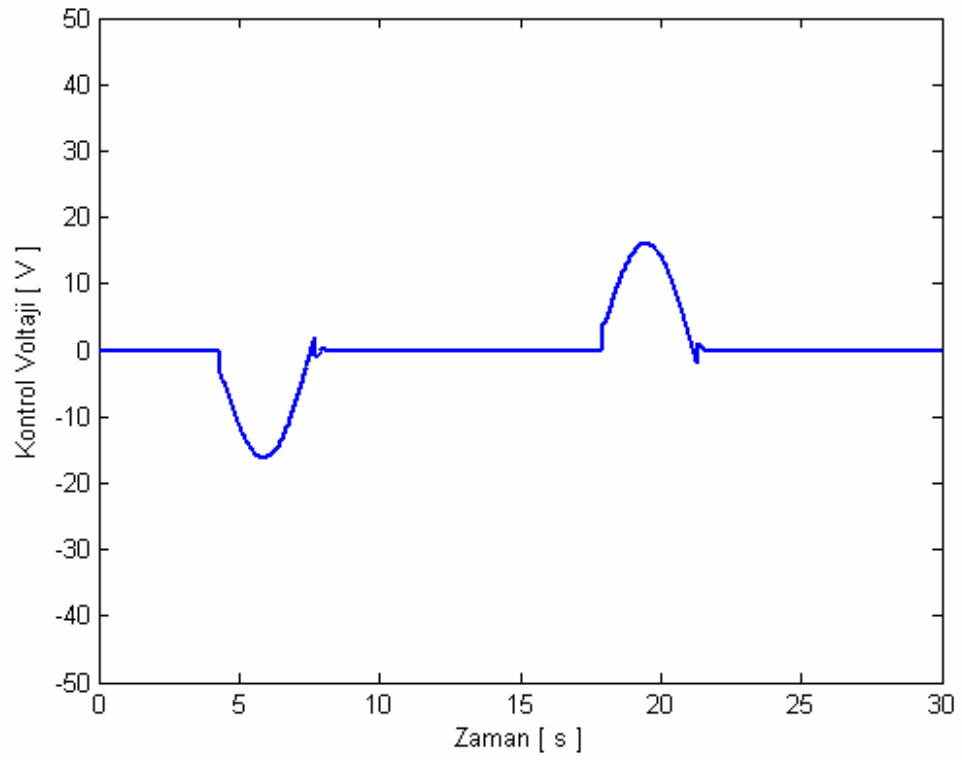
Şekil 5.4. Rüzgar türbini genel görünümü



Şekil 5.5. Rotor hızı değişimi



Şekil 5.6. İzleme hatası değişimi



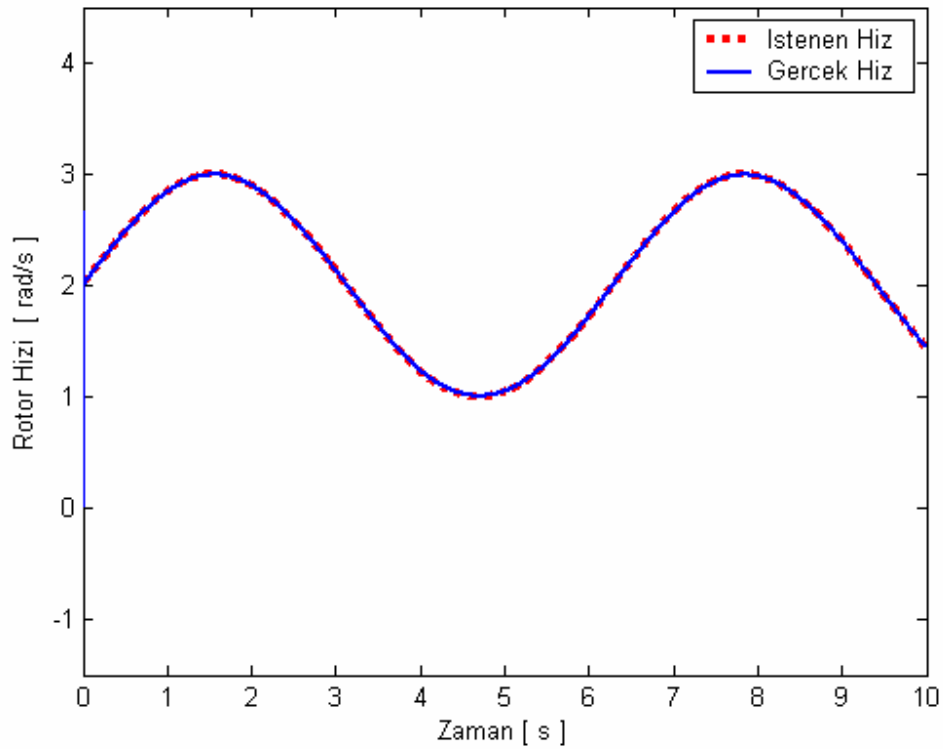
Şekil 5.7. Kontrol voltajı

5.2 Adaptif Backstepping Kontrol Dizaynı Simülasyonu

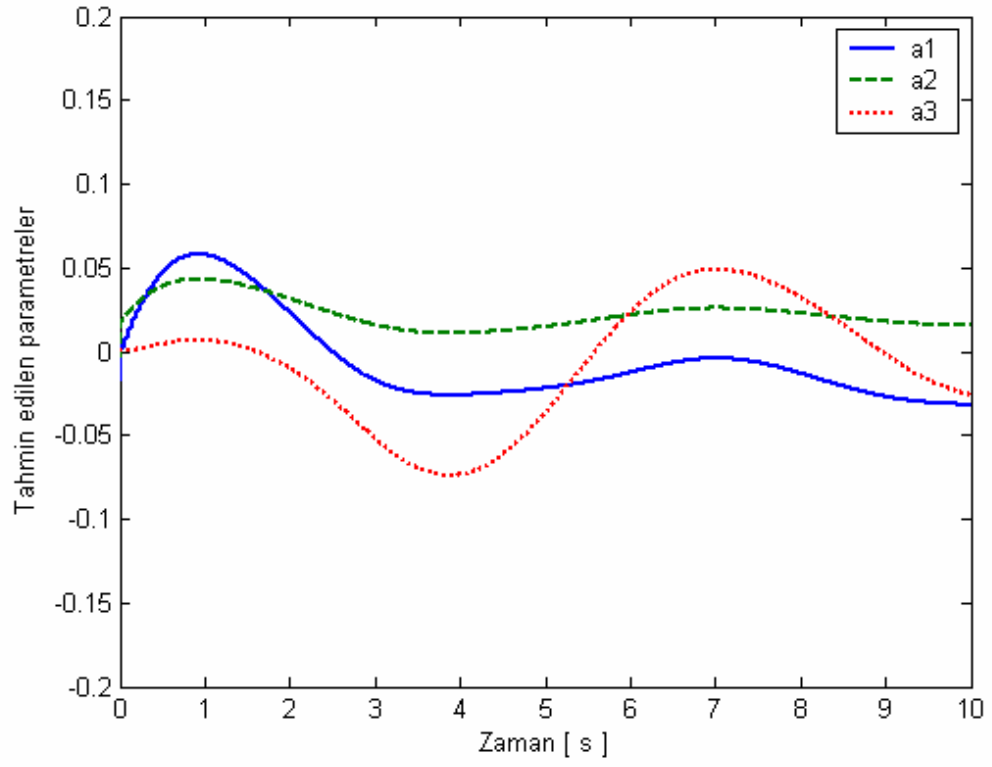
Genel backstepping kontrol dizaynında Tablo 5.1.'de belirlenen şartlar Adaptif backstepping dizaynı için de kullanılmıştır. Adaptif backstepping simülasyon sonuçlarına göre, sinüs dalgası rüzgar hızı ve değişken rüzgar hızlarında şekil 5.8 ve şekil 5.12'de görüldüğü gibi gerçek hız değeri referans (istenen) hız değerini asimptotik olarak takip etmektedir. Bu takip değerlerine bağlı olarak şekil 5.11 ve şekil 5.15'de belirlenen izleme hataları da sıfıra yakınsamaktadır. Dolayısıyla adaptif kontrol düzgün ve asimptotik bir rotor hızı takibi sağlamaktadır.

5.2.1. Sinüs Dalgası Rüzgar Hızı

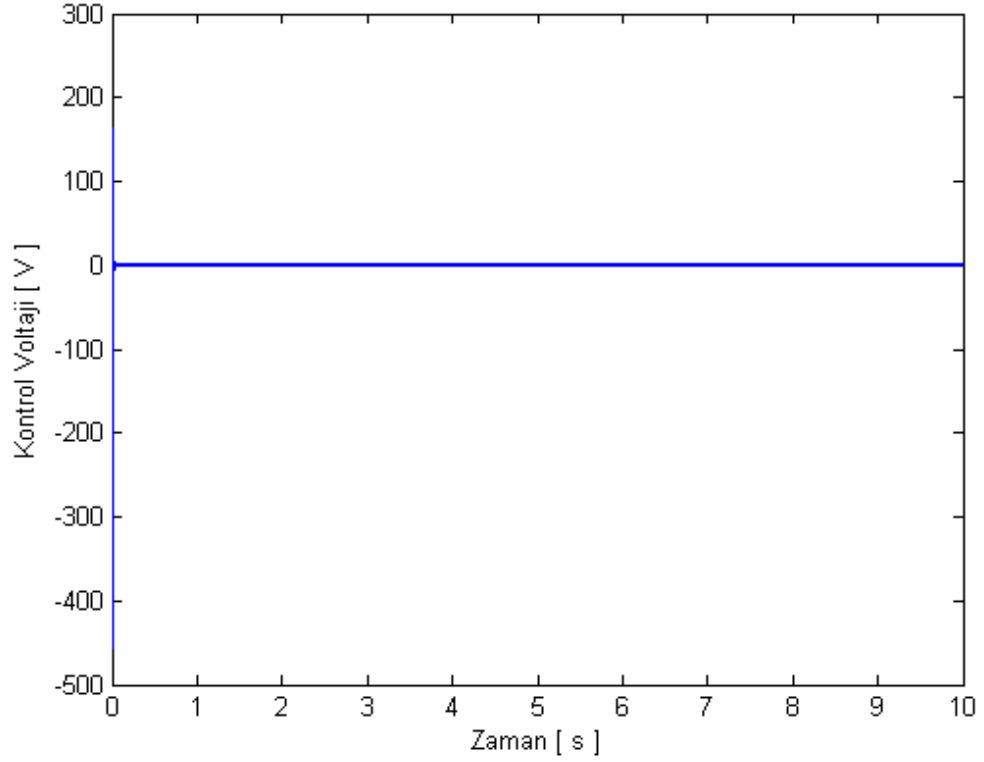
Genel backstepping dizaynında (5.1) denklemi ile verilen sinüs dalgası şeklindeki referans hız girişi adaptif kontrol uygulanması için de kullanılmıştır. Simülasyon sonucu, şekil 5.8.'de rotor hızı değişimi, şekil 5.9.'da tahmin edilen parametreler, şekil 5.10.'da kontrol voltajı ve şekil 5.11.'de izleme hatası değişimi grafikleri elde edilmiştir.



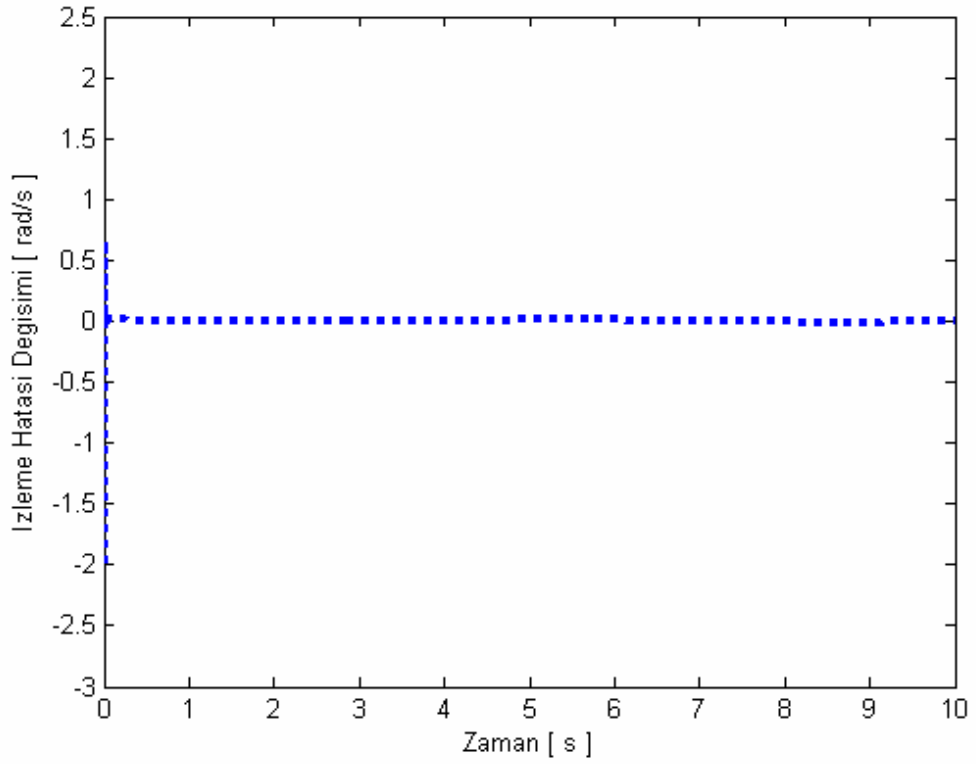
Şekil 5.8. Rotor Hızı Değişimi



Şekil 5.9. Tahmin edilen parametreler



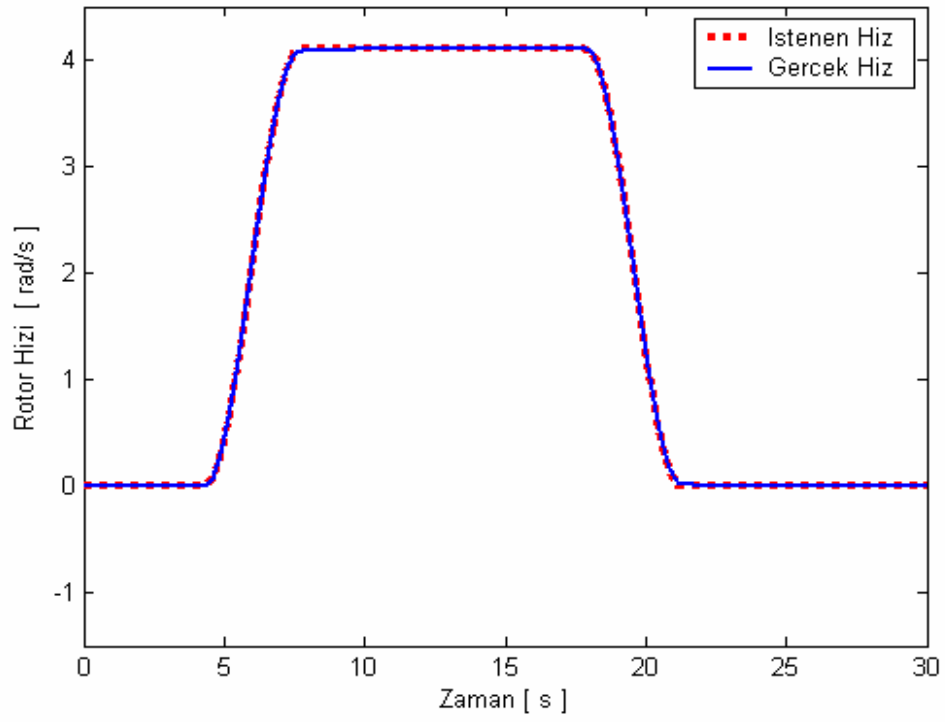
Şekil 5.10. Kontrol voltajı



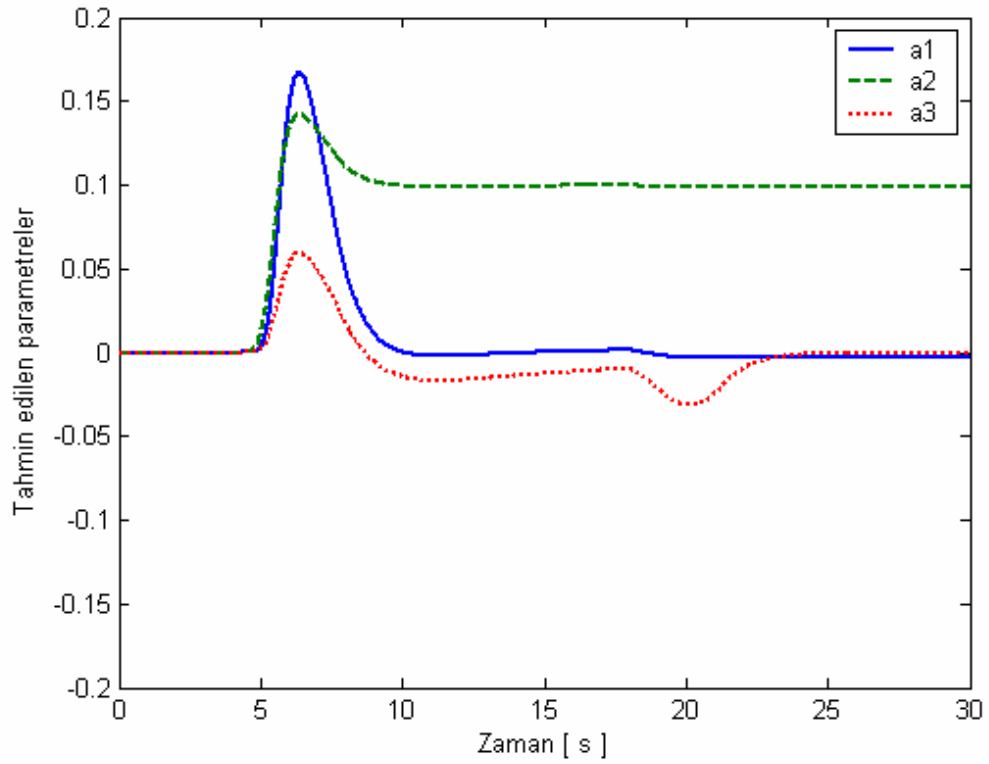
Şekil 5.11. İzleme hatası değişimi

5.2.2 Değişken Rüzgar Hızı

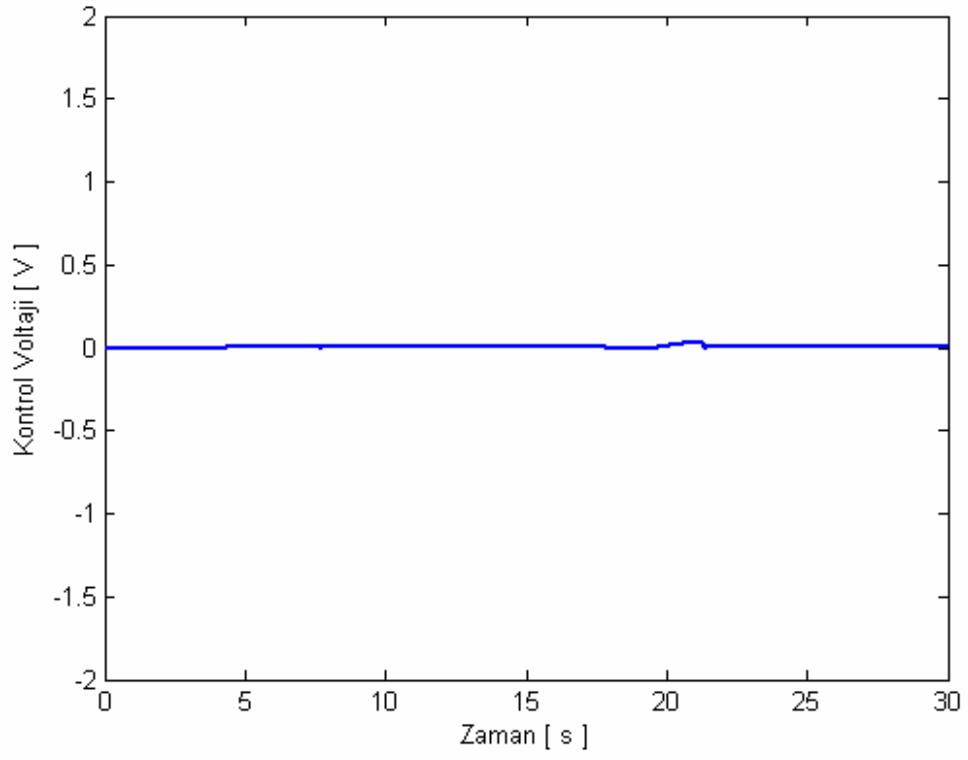
Genel backstepping kontrol dizayn çalışmasında(5.2) denklemi ile verilen değişken özellikteki referans (istenen) hız girişi adaptif kontrol dizaynı simülasyonlarında da kullanılarak şekil 5.12’de rotor hızı değişimi, şekil 5.13’de tahmin edilen parametreler, şekil 5.14’de kontrol voltajı, şekil 5.15’de izleme hatası değişimi grafikleri verilmiştir.



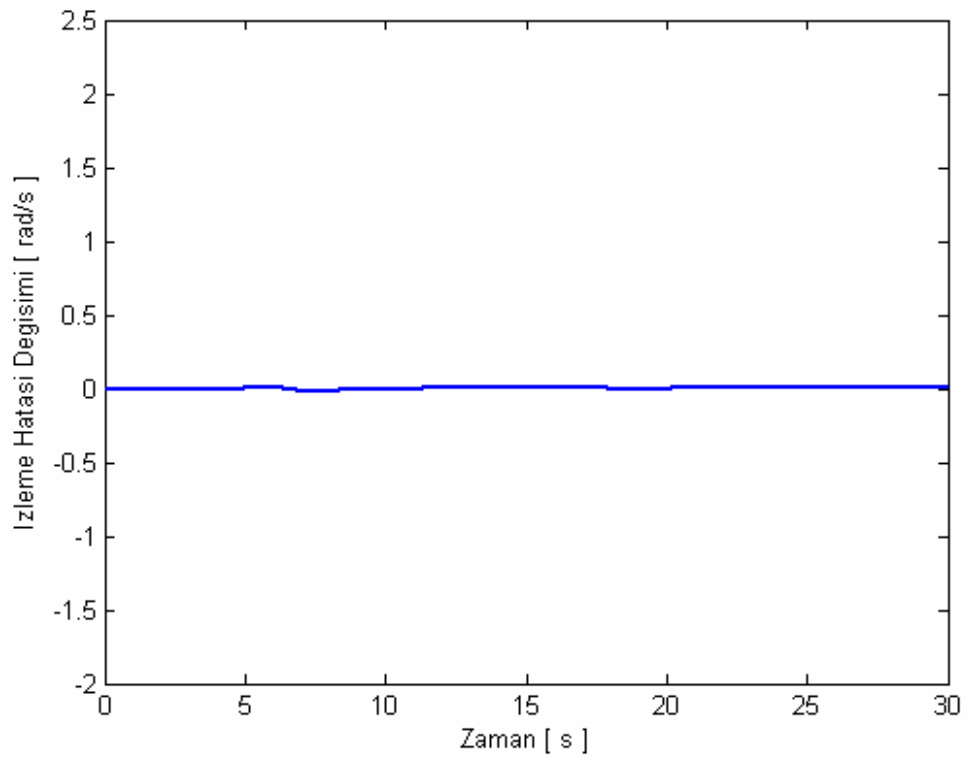
Şekil 5.12. Rotor hızı değişimi (değişken rüzgar hızı)



Şekil 5.13. Tahmin edilen parametreler (Değişken rüzgar hızı)



Şekil 5.14. Kontrol Voltajı (Değişken Rüzgar Hızı)



Şekil 5.15. İzleme hatası Değişimi (Değişken Rüzgar Hızı)

6. SONUÇ

Güç üretiminin verimliliğini artırmak için rüzgar türbinlerine değişken hız kontrolü uygulanmalıdır. Bu çalışmada 1. bölümde türbin kanatlarına etkiyen kuvvetler ve rüzgardan türbin vasıtasıyla güç elde edilmesi ele alınmıştır. Rüzgar türbininin verimlilik ve emniyet açısından çalıştırılması gereken rüzgar hızı aralıkları belirlenmiştir. 2. bölümde rüzgar türbininin matematik modeli çıkarılmış, mekanik ve elektrik açıdan türbin modellenmiştir. 3. bölümde kontrol dizayn yöntemleri anlatılmıştır. Genel backstepping ve adaptif backstepping kontrol dizayn yöntemleri ele alınmış, her iki yöntemin kararlılığı genel denklemler üzerinde ispatlanmıştır. 4. bölümde kontrol dizayn çalışmasının temeli olan rüzgar türbini jeneratör kontrol voltajının regülasyonu ele alınmıştır. Matematik modelleme sonucu elde edilen mekanik ve elektrik modellerin kontrol dizayn yöntemlerine göre dizayn çalışması yapılmıştır ve simülasyonlar için gerekli denklemler çıkarılmıştır. 5. bölümde Matlab-Simulink programı vasıtasıyla simülasyon grafikleri çıkarılmıştır.

Simülasyonlardan da görüleceği gibi rotor hızının izlenmesi düzgün ve tatmin edici niteliktedir. Aynı çalışma parametrelerinde yapılan simülasyon sonuçlarından da görülebileceği gibi adaptif kontrol tekniği ile daha düzgün bir çalışma şartları ve daha yüksek güç elde edilebilmektedir. Temel amaç jeneratör kontrol voltajının regülasyonu ve rotor hızının istenen hız değerini takip etmesidir. Simülasyon sonuçları bu amaca uygunluğu ispatlamaktadır [7].

KAYNAKLAR

- [1] <http://www.nrel.gov/wind>, 2006
- [2] Johan Morren , Jan Pierik , Sjoerd W.H. de Hana , “Inertial Response Of Variable Speed Wind Turbines”, Electric Power Systems Research, 2006
- [3] Yrd. Doç. Dr. Hayri Acar, “Rüzgar Enerjisi Ders Notu -5”, İTÜ Uçak Ve Uzay Bilimleri Fakültesi, 2004
- [4] H. Vihliara, “Control of Variable Speed Wind Turbine”, Ph.D Thesis, Tampere University of Technology, 2002
- [5] Y.D. Song, B. Dhinakaran, X.Y. Bao, “Variable Speed Control Of Wind Turbines Using Nonlinear And Adaptive Algorithms”, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000
- [6] M. Krstic, I. Kanellakopoulos, P. Kokotovic, “Nonlinear and Adaptive Control Design”, Wiley Interscience Publication, 1995
- [7] K.E. Johnson, L.Y. Pao, M.J. Balas, V. Kulkarni, and L.J. Fingersh, “Stability Analysis of an Adaptive Torque Controller for Variable Speed Wind Turbines”, 2004
- [8] J. Marques, H. Pinheiro, H. A. Gründling, J. R. Pinheiro and H. L. Hey, “A Survey On Variable-Speed Wind Turbine System”, 2003
- [9] B. Maligo, “Modeling and Control of Wind Turbine as a Distributed Resource in an Electric Power System”, West Virginia University, 2001
- [10] Kathryn E. Johnson, Lucy Y. Pao, Mark J. Balas, And Lee J. Fingersh, “Control of Variable Speed Wind Turbine”, Ieee Control Systems Magazine, 2006
- [11] W. Henson, Review of the paper “Variable Speed Control of Wind Turbines Using Non-linear and Adaptive Algorithms”2004,
[http://people.umass.edu/whenson/.](http://people.umass.edu/whenson/)

ÖZGEÇMİŞ

1976 yılında Kars'ta doğdu. İlk-orta öğrenimini Kars'ta tamamladı. 1996 yılında kazandığı Niğde Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünden 2000 yılında mezun oldu. Halen özel bir şirkette Mekanik Bakım Mühendisi olarak görev yapmaktadır.

EKLER

Ek 1

```

% Ruzgar turbini parametreleri
%
J_T=1270; % Turbin atalet momenti
Pr=20000; % Orantisal Guc
R=5; % Rotorun yaricapi
rho=1.225; % Havanin yogunlugu
uc=6.5; % Baslangic ruzgar hizi
ur=11.7; % Orantisal ruzgar hizi
uf=24; % Turbinin durduruldugu ruzgar hizi
omega=105; % Acisal hiz
Cpm=0.2596; % Performans katsayisi maksimum degeri

lamdam=5; % Performans katsayisi maksimum degerinde tepe hiz orani

um=11; % Maksimum Cp de ruzgar hizi
Cpr=Pr/(0.5*rho*ur^3*R^2*pi);

% Operasyon veya lineerlestirme degeri

lamb_op=7; % Operasyon tepe hiz orani
u_op=7.5; % Operasyon aninda ruzgar hizi
cp_op=0.2; % Operasyon aninda Cp degeri
cq_op=cp_op/lamb_op; % Operasyon Cq

% F ve G degerlerinin hesabi
FG=inv([(um/uc)-1]^2 ((um/uc)-1)^3;((um/ur)-1)^2 ((um/ur)-1)^3])*[1;1-Cpr/Cpm];
F=FG(1,1);
G=FG(2,1);

% Cp ve P nin degisiminin bulunmasi

%uu=[uc:0.01:uf]';
u=[uc:0.01:ur]';
u1=[ur+0.01:0.01:uf]';

for i=1:size(u)
for k=1:2;
beta(k)=0;
Cp(i,k)=Cpm*(1-F*((um/u(i))-1)^2-G*((um/u(i))-1)^3);
P(i,k)=0.5*rho*pi*R^2*Cp(i,1)*u(i)^3;
lamb(i,1)=R*omega^2*pi/(60*u(i));
Cq(i,k)=Cp(i,k)/lamb(i,1);
end
end

for k=1:size(u1)
j=k+521;

```

```

for l=1:2
beta(l)=0;
Cp(j,l)=(Cpr*ur^3)/u1(k)^3;
P(j,l)=0.5*rho*pi*R^2*Cp(j,l)*u1(k)^3;
lamb(j,l)=R*omega*2*pi/(60*u1(k));
Cq(j,l)=Cp(j,l)/lamb(j,l);

end

end

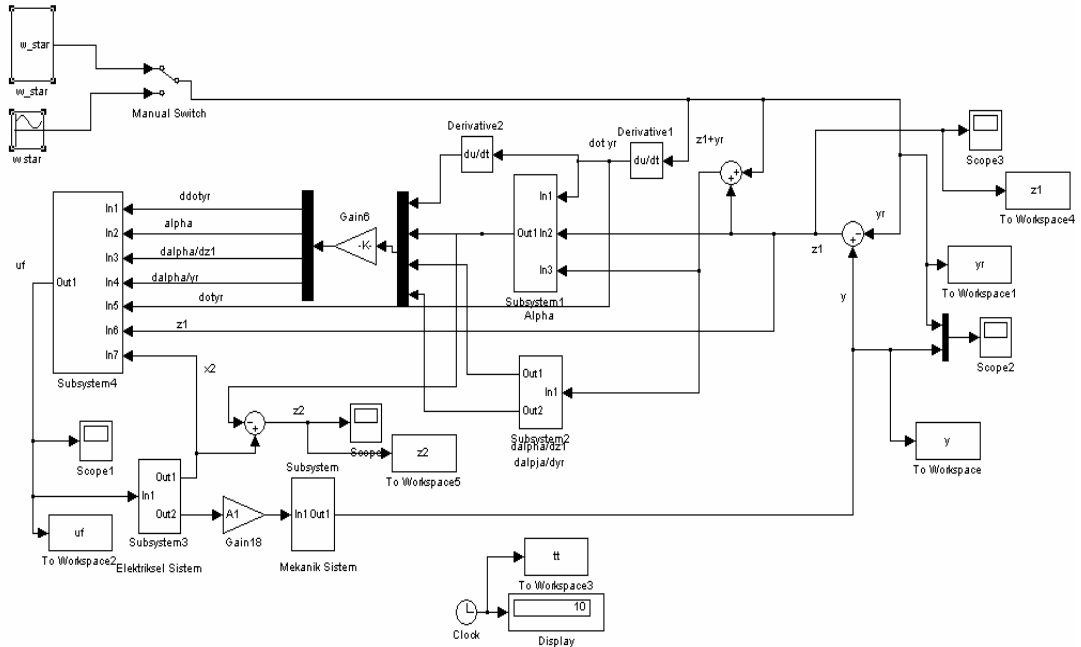
figure(2)
plot(lamb,Cp(:,1)),set(gca,'fontsize',12),grid;

title(' Guc sabiti C_p(\lambda) nin tepe hiz oranina gore degisimi');
xlabel('Tepe Hiz Orani \lambda');
ylabel('C_p')

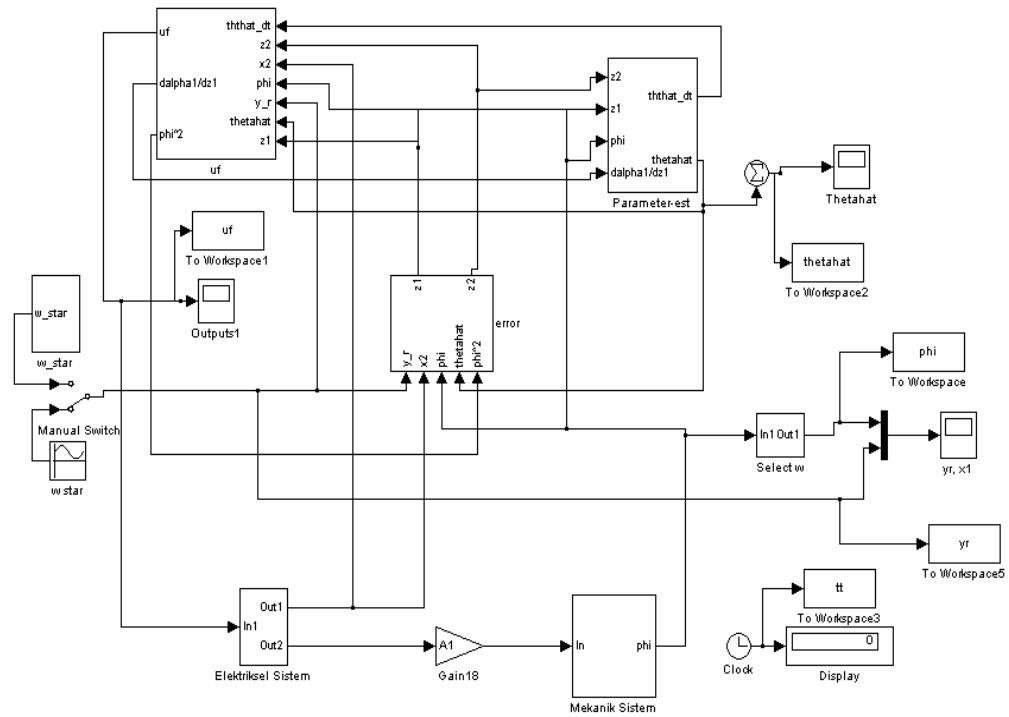
figure(4)
plot(lamb,Cq(:,1)),grid;
title(' Tork sabiti C_q nin tepe hiz oranina gore degisimi');
xlabel('Tepe Hiz Orani \lambda');
ylabel('C_q')

```

Ek.2. Genel Backstepping Kontrol Dizaynı Simulink Blok Diyagramı



Ek.3. Adaptif Backstepping Kontrol Dizaynı Simulink Blok Diyagramı



Ek.4. Değişken Rüzgar Hızı Simulink Blok Diyagramı

