



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

풍력 발전시스템의 피치제어를 위한
PID 제어기 설계

濟州大學校 大學院

風力特性化協同科程

高 正 玟

2012年 6月

풍력 발전시스템의 피치제어를 위한 PID 제어기 설계

指導教授 康 珉 齊

高 正 玫

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2012年 6月

高正玫의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ (印)

委 員 _____ (印)

委 員 _____ (印)

濟州大學校 大學院

2012年 6月

PID Controller Design for Pitch Control of A Wind Turbine System

Jung-Min Ko

(Supervised by professor Min-Jae Kang)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement
for the degree of Master of Engineering

Multidisciplinary Graduate School Program for Wind Energy
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2012年 6月

목 차

Abstract	1
제 1 장 서론	2
1.1 연구 배경	2
1.2 연구 동향 및 목적	4
제 2 장 풍력 터빈 시스템의 구조	6
2.1 형태에 따른 구조	6
2.2 동력 전달 장치에 따른 구조	7
2.3 출력 제어 방식에 따른 구조	8
제 3 장 피치 제어를 위한 PID 제어기 설계	9
3.1 풍력 터빈 시스템 모델	9
3.1.1 풍력 터빈 시스템의 공기 역학적 모델	10
3.1.2 풍력 터빈 시스템의 동력 전달 장치 모델	14
3.1.3 풍력 터빈 시스템의 발전기 모델	15
3.1.4 풍력 터빈 시스템의 제어기 모델	15
3.1.5 풍력 터빈 시스템의 토크 제어 모델	17
3.2 제안된 PID 제어기 설계	19
3.2.1 풍력 터빈 시스템의 피치 제어 모델	19
3.2.2 PID 제어기 설계	21
제 4 장 Matlab/Simulink 모델 구현 및 결과 고찰	26
4.1 Matlab/Simulink 모델	26
4.1.1 공기 역학적 모델	27
4.1.2 동력 전달 장치 모델	27
4.1.3 발전기 모델	28
4.1.4 PID 제어기 모델	38
4.2 시뮬레이션 결과 및 고찰	29
4.2.1 주기적인 풍속이 적용된 경우	29

4.2.2 난류 성분이 포함된 풍속이 적용된 경우	34
4.2.2.1 정격 이하의 풍속에서의 시뮬레이션 결과	34
4.2.2.2 정격 이상의 풍속에서의 시뮬레이션 결과	34
제 5 장 결론	37
참고 문헌	38
감사의 글	

List of Figures

Fig. 1 Cumulative Capacity[GW] of Global Wind Power	2
Fig. 2 Growth of wind Turbine Size	4
Fig. 3 Structure according to the wind turbine type	6
Fig. 4 Block Diagram of Wind Turbine System	9
Fig. 5 Power Coefficient VS. TSR(Tip Speed Ratio) according to the Pitch Angle	12
Fig. 6 Power Coefficient VS. TSR VS. Pitch Angle	13
Fig. 7 Drive Train Model	14
Fig. 8 Ideal Power Curve of Wind Turbine systems	16
Fig. 9 Generator Torque VS Generator Speed of Variable Speed Controller	19
Fig. 10 Best Fit Line if Pitch Sensitivity	23
Fig. 11 Matlab/Simulink Model of Wind Turbine System	26
Fig. 12 Matlab/Simulink Model of Rotor Aerodynamics	27
Fig. 13 Matlab/simulink Model of Wind Turbine Drive Train	27
Fig. 14 Matlab/simulink Model of Wind Turbine Generator	28
Fig. 15 Matlab/Simulink Model of Pitch PID Controller	28
Fig. 16 Simulation Results of Wind Turbine without Pitch Controller ..	29
Fig. 17 Simulation Results with Pitch PI Controller	31
Fig. 18 Comparison of Simulation Results of Wind Turbine with Pitch PID Controller and without Pitch Controller	32
Fig. 19 Comparison of Simulation Results of Wind Turbine with PI and PID Controller	33
Fig. 20 Simulation Results of Wind Speeds including Tubulences (Below rated Wind Speeds)	35
Fig. 21 Simulation Results of Wind Speeds including Tubulences (Above rated Wind Speeds)	36

List of Table

Table. 1 Cumulative Capacity[MW] of Domestic Wind Power	3
Table. 2 Classification of Dirve-train type	7
Table. 3 Features of Pitch Control Type	8
Table. 4 Features of Stall Control Type	9
Table. 5 Parameters of Power Coefficient	11
Table. 6 Parameters for the PID Controller	22
Table. 7 K_p and K_i	24

Abstract

Control plays a very important role in modern wind turbine systems. In fact, wind turbine control enables a better use of the turbine capacity as well as the alleviation of aerodynamic and mechanical loads that reduce the useful life of the installation. This thesis suggests PID controller method in order to regulate the generator power above the rated wind speed. In order for designing PID pitch controller, we use the two mass drive train model and the pitch control system based on the simple single-degree-of-freedom(single DOF) model and then verified the reasonability about the designed PID pitch controller. We use the Matlab/Simulink for the simulation and verification. Also, this model is based on the 5MW class wind turbine.

제 1 장 서론

1.1 연구 배경

오늘날, 인구는 기하급수적으로 증가하고 필수 물자는 부족해지고 폐기물처리 설비는 불충분하며 비효율적이고 토양, 공기 및 물의 오염은 증가하여 일반인, 과학자, 엔지니어, 정치인 및 그 지역 정부의 관심을 끌고 있다. 물질적인 생활 유형과 산업화로 인해서 에너지 수요는 기하급수적으로 증가하여 그에 따른 환경오염 또한 급속히 증가하고 있다.[1] 전 세계적으로 화석연료의 사용량의 급증으로 발생한 지구 온난화로 인해 전 세계적으로 이상기후의 발생빈도가 증가하고 이로 인해 생태계가 급속히 파괴되고 있다. 또한 기후변화협약 및 교토의정서 등 세계적으로 추진되고 있는 환경규제와 관련된 규약은 제품 생산에 있어서 온실 가스 배출량을 최소화하도록 유도하고 있어서 에너지 다소비국인 우리나라로서는 국가경쟁력 향상을 위해 환경 친화적인 새로운 에너지원의 독자적인 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다.[2] 풍력은 이러한 신재생에너지 중에서도 가장 기대되는 에너지원이다.

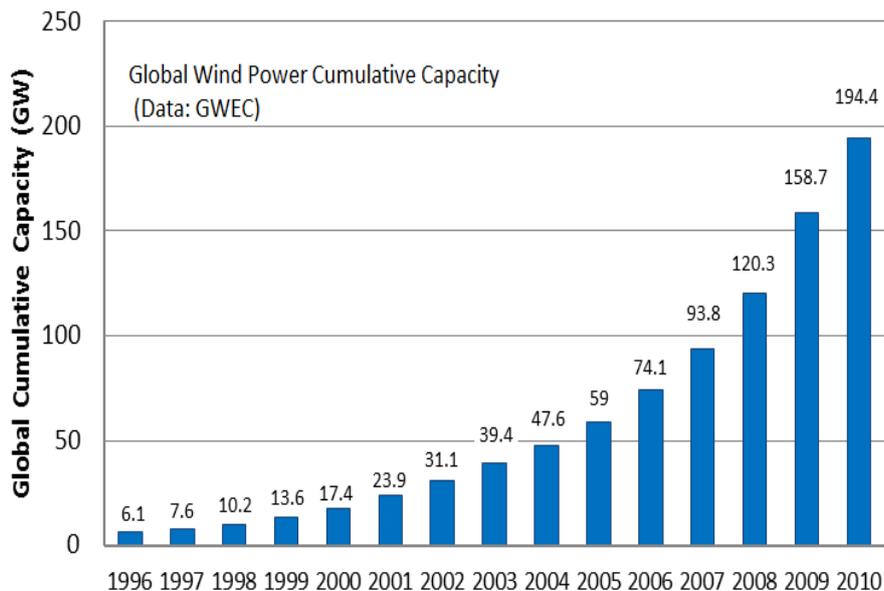


Fig. 1 Cumulative Capacity[GW] of Global Wind Power

Fig. 1에서 최근의 세계 풍력 발전 누적 용량을 살펴보면, 풍력 발전 설비는 빠르게 증가하고 있음을 알 수 있다. 1996년에 전 세계 풍력 발전 설비는 기가 와트 [GW] 단위로 보면 6.1[GW]였지만, 12년 후인2008년에는 120[GW] 수준까지 거의 20배 증가했다. 그리고 2011년에는 194[GW]가 되었다. 2005년과 비교해도 2008년에는 발전 설비가 2배 이상 증가했음을 알 수 있다. 이와 같은 성장 속도는 풍력 발전 자체가 그만큼 경제성이 있다는 것을 입증하고 있다. 앞으로도 경제적으로 쓸 만한 풍력 에너지를 다 개발하기 전까지는 한동안 풍력 발전을 크게 증가 할 것이다.

Table. 1 Cumulative Capacity[MW] of Domestic Wind Power

년도	설비용량[MW]		비고
	신규	누계	
-99	4,398	4,398	
2000	1,501	5,899	
2001	2,036	7,935	
2002	4,757	12,692	
2003	5,467	18,159	
2004	49,903	68,062	
2005	30,644	98,726	
2006	78,941	177,677	
2007	18,420	196,087	
2008	108,020	304,107	
2009	41,788	348,445	
2010.07		352,945 (219기)	

Table. 1에서 국내의 풍력 발전 누적 용량을 살펴보면, 2004에서 2006년 까지 풍력 발전 용량이 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다. 2007년도에 신규 설비 용량이 상대적으로 전년도에 비해 적지만 누적 용량을 계속해서 증가하고 있다. 앞으로도 정부 정책에 의해 제주도와 서해안에 대규모 해상 풍력 단지가 조성될 예정

이므로 국내의 풍력 발전 누적 용량은 지속적으로 증가할 것이다.

1.2 연구 동향 및 목적

최근 친환경 정책 및 분산전원으로서 바람에너지를 이용하는 풍력산업이 크게 성장하고 있다. 우리나라에서도 국가적으로 신재생 에너지로서의 풍력산업에 관심이 증대되면서 국내 여러 기업에서 풍력 산업에 진출하고 있다. 또한 Fig. 2와 같이 최근의 풍력 터빈(wind turbine)은 수 MW급으로 용량이 증가하고 있다.[3] 풍력 터빈의 용량이 증가함에 따라 로터(rotor)의 회전반경 또한 증가하게 된다.

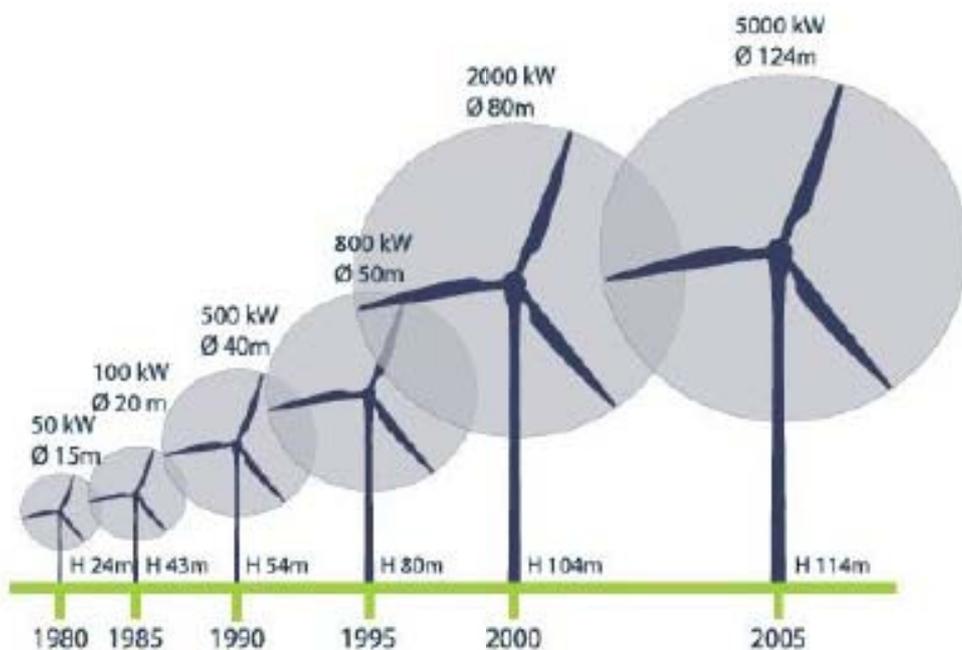


Fig. 2 Growth of wind Turbine Size

풍력 터빈(wind turbine)은 바람이 갖고 있는 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 장치이다. 에너지 회수 관점에 있어서, 에너지 회수 효율을 최대로 하는 것이 경제적으로 유리하다. 풍력 터빈(wind turbine)의 에너지 최대 회수 효율은 로터 블레이드(rotor blade)의 형상과 제어전략에 의해 결정된다. 바람 에너지 회수 효율을 출력 계수(power coefficient)라고 하며, 이를 C_p 로 표기한다.[4] 이 C_p 값은

이론적으로 16/27의 값을 넘을 수 없다. 이 수치는 Albert Betz에 의해 연구된 것으로 Betz의 한계라고 한다. Betz의 한계는 이상적인 상태에서 계산된 값으로, 실제 풍력 터빈(wind turbine)에 있어서 잘 설계된 블레이드(blade)라 하더라도 최대 C_p 값은 약 0.5 이하의 값을 가지게 된다.

풍력 터빈(wind turbine) 블레이드(blade)의 설계가 최적화되어, 높은 C_p 값을 얻을 수 있도록 설계되었다 하더라도 풍력 터빈(wind turbine)의 작동상태에 따라 C_p 값이 달라진다. 풍력 터빈(wind turbine)이 최대 C_p 값을 얻기 위해서는 풍력 터빈(wind turbine)으로 불어오는 풍속에 따라 회전 속도(rotor speed), 피치각(pitch angle)이 최대 C_p 값을 얻을 수 있는 작동 조건으로 운전되어야 한다.

풍력 터빈(wind turbine)의 출력은 기본적으로 풍속의 3승에 비례하여 출력된다. 풍속이 증가됨에 따라 지속적으로 풍속의 3승에 비례하는 출력을 생산하는 것이 경제적으로 보일 수 있으나 그렇지 않다. 고풍속 영역에서 풍속의 3승에 비례하는 출력을 얻기 위해서는 풍력 터빈(wind turbine) 발전기(generator)의 용량 및 무게가 증가될 뿐만 아니라 로터의 회전 속도(rotor speed) 또한 지속적으로 증가되어야 한다. 무게 증가와 풍력 터빈(wind turbine)의 로터 회전 속도(rotor speed)가 높아지게 되면, 안정적인 작동을 위해 기계적 구조물인 풍력 터빈(wind turbine)의 강성을 증가시켜야 한다. 이러한 강성의 증가는 비용적인 측면을 증가시킨다. 또한, 연간 풍속 분포를 고려할 때, 고풍속 영역의 바람이 불 확률은 저풍속 영역의 바람이 불 확률보다 적기 때문에 고풍속 영역에서 풍속의 3승에 비례하는 출력까지 고려하여 설계하는 것은 경제적으로 바람직하지 못하다.

앞에서 언급한 것처럼, MW급 풍력 터빈(wind turbine)의 작동상태는 풍속에 따라 변화하게 된다. 정격 풍속 이전의 영역에서는 보다 많은 바람 에너지 회수를 하여야 하고, 정격풍속 이후의 영역에서는 풍력 터빈(wind turbine)의 출력이 일정하도록 작동되어야 한다. 따라서 풍속변화에 따라 풍력 터빈(wind turbine)의 작동상태를 조절해주는 제어시스템이 필요하고, 제어시스템이 적절하게 작동되어야 풍력 터빈(wind turbine)의 효율 증가와 안정적인 작동을 할 수 있다.

본 논문에서 다루고자 하는 연구는 MW급의 풍력 터빈(wind turbine)의 출력 제어로서, 풍력 터빈(wind turbine)이 발전을 시작하는 시동풍속(cut-in wind speed), 발전을 중지하는 종단풍속(cut-out wind speed) 영역에서 피치 제어 영

역에서 PID 제어기를 설계하여 풍력 터빈(wind turbine)이 적절히 동작하는지의 평가에 있다. 제어기는 5[MW]급 풍력 터빈을 대상을 해서 설계하였다. 여기서 최종적으로 살펴볼 것은 PID 제어기를 설계하고, Matlab/Simulink를 통해서 설계된 제어기가 적절하게 동작하는 지를 살펴볼 것이다.

제 2 장 풍력 터빈 시스템의 구조

풍력 터빈(wind turbine) 시스템의 구조는 크게 형태, 동력 전달 장치 및 출력 제어 방식에 따라 간단히 분류할 수 있다.

2.1 형태에 따른 구조

풍력 터빈(wind turbine) 시스템은 형태에 따라서 수평축과 수직축 풍력 발전기로 구분된다. 수직축 풍력 발전기는 회전축이 수직으로 되어 있으며, 수평축 풍력 발전기는 회전축이 수평으로 되어 있는 발전기이다. 90년대 말에는 수직축 풍력 발전기에 대한 연구가 활발했으나, 근래에 들어서는 기술이 사장되었고, 대부분의 풍력 발전기들은 수평축 풍력 발전기 형태를 취하고 있다. Fig 3는 형태에 따른 풍력 터빈(wind turbine)의 구조를 나타낸 그림이다. 왼쪽은 수직축 풍력 발전기이고, 오른쪽은 수평축 풍력 발전기이다.



Fig. 3 Structure according to the wind turbine type

2.2 동력 전달 장치에 따른 구조

풍력 터빈(wind turbine)시스템의 구조는 동력 전달 장치의 구조에 따라서 Geared type 과 Gearless type으로 나눌 수 있다. Geared type은 발전기의 출력 주파수를 계통의 상용주파수에 맞추기 위하여 로터 회전 속도(rotor speed)를 증가시키기 위하여 Gearbox를 사용하는 풍력 발전기이다. 그러나 Gearbox를 사용함으로써 유지 보수가 요구되며, 기계적인 손실이 발생하게 된다. 또한 이러한 시스템은 유도 발전기를 사용하게 되는데, 이로 인하여 전력 품질에 악영향을 미치게 된다. Gearless type은 기어박스 없이 발전기와 로터를 직접 연결하는 풍력 발전기이다. 이러한 type은 발전기의 출력을 계통이 요구하는 대로 제어하기 위해 발전기 후단에 전력 변환 장치를 설치하게 된다. 그리고 동기 발전기를 사용하게 되는데 최근에 들어 효율 향상을 위해 영구자석을 많이 사용하고 있다. 그러나 고가의 장비를 사용함으로써 Gearbox type 보다 가격이 증가하며 전력 변환 장치에 의한 손실이 발생하게 된다. Table. 2는 동력 전달 장치의 형태에 따른 특징 및 장단점을 간략히 정리한 것이다.

Table. 2 Classification of Dirve-train type

	Gearless type	Geared type
특징	<ul style="list-style-type: none"> - 가변속도 운전 - 동기형 발전기 - Pitch 제어 or Stall 제어 	<ul style="list-style-type: none"> - 일정속도 운전 - 비동기형 유도발전기 - Stall 제어 or Pitch 제어
장점	<ul style="list-style-type: none"> - AC/DC/AC 방식으로 계통 연계성이 우수 - 풍자원의 활용도 높음 - 증속기 제거로 신뢰성 향상 - 높은 풍속에서 고속회전으로 torque 감소 및 drive train에 부하경감 	<ul style="list-style-type: none"> - Direct 계통연결 가능 - 발전기의 가격이 상대적으로 낮음 (저원가 생산 가능) - 제작사 및 보급 모델의 다양화 - 운전경험이 풍부
단점	<ul style="list-style-type: none"> - Torque가 커으로써 발전기 증량 증대, 다극 구조로 반경이 커짐 - 유도발전기에 비해 가격이 높음 - 계통연결 위해서 AC/DC/AC 변환 필요 	<ul style="list-style-type: none"> - 높은 풍속에서 에너지 캡처가 적음 - 유도 전동기의 효율 낮음 (약92.6%) - Gearbox의 유지보수 및 신뢰성 문제 - Tower head mass의 증가 - 소음의 과다 발생

그러나 근래에는 이러한 2가지 기술을 결합시킨 풍력 발전기도 등장하고 있다. 동력 전달 장치에 Gear를 사용하여 영구자석형 풍력 발전기의 극수를 줄였다. 그러므로 발전기의 무게를 줄이고, 바람 자원의 활용도가 높아지고, 전력 품질이 우수한 반면 가격이 비싸고, 유지 보수 및 신뢰성이 문제 시 된다.

2.3 출력 제어 방식에 따른 구조

풍력 터빈(wind turbine) 시스템은 출력 제어 방식에 따라서 Stall type과 Pitch type으로 분류할 수 있다. Stall type은 블레이드 설계를 정격풍속 이상에서는 발전기 출력이 증가하지 않고 정지풍속에서 Stall 현상이 발생하도록 설계하는 방식이다. Pitch type은 블레이드(blade) 피치각(pitch angle)을 제어하여 정격 풍속 이상에서는 일정한 출력이 발생하도록 제어하며, 정지풍속에서는 블레이드(blade)를 페더링(feathering)상태로 둌으로서 발전기가 정지하도록 제어하는 방식이다.

Table. 3 Features of Pitch Control Type

장 점	<ul style="list-style-type: none"> ○ 날개 피치각을 제어하는 방식으로써 적정출력을 능동적으로 제어 가능 ○ 피치각의 회전(Feathering)에 의한 공기역학적 제동 방식을 사용하여 기계적 충격 없이 부드럽게 정지 및 계통투입 ○ 계통 투입 시에 전압강하나 유입전류(In-rush) 최소화
단 점	<ul style="list-style-type: none"> ○ 날개 피치각 회전을 위한 유압장치 실린더와 회전자간의 기계적 링크부분의 장기간 운전 시 마모.부식 등에 의한 유지보수 필요 ○ 외부 풍속이 빠르게 변할 경우 제어가 능동적으로 이루어지지 않아 순간적인 Peak 등이 발생할 우려

Table. 4 Features of Stall Control Type

장 점	<ul style="list-style-type: none"> ○ 회전날개의 공기역학적 형상에 의한 제어방식으로 회전자를 이용하므로 Pitch 방식보다 많은 발전량 생산(고효율 실현) ○ 유압장치와 회전자간의 기계적 링크가 없어 장기운전시에도 유지보수 불필요
단 점	<ul style="list-style-type: none"> ○ 날개 피치각에 의한 능동적 출력제어 결여로 과출력 발생 가능성 ○ 회전날개 피치각이 고정되어 있어 비상제동 시 회전자 끝부분만이 회전되어 제동장치로서 작동하게 되므로, 제동효율이 나쁠 뿐 아니라 동시에 유압제동장치가 작동해야 하므로 주축 및 기어박스에 충격이 가하여짐. ○ 계통 투입 시 전압강하나 In-rush 전류로 인한 계통영향 소지 상존

제 3 장 피치 제어를 위한 PID 제어기 설계

3.1 풍력 터빈 시스템 모델

가변속 풍력 터빈(wind turbine) 시스템의 전체적인 구성을 블록다이어그램으로 나타내면 Fig. 4과 같다.

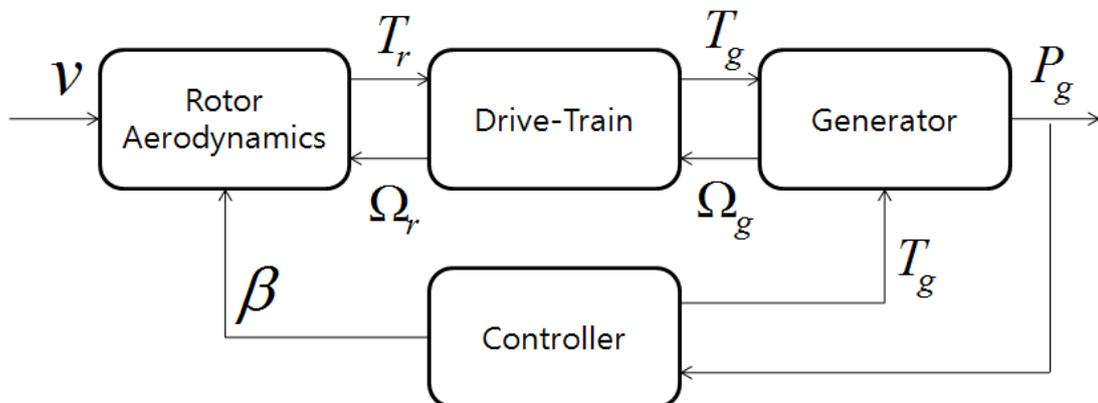


Fig. 4 Block Diagram of Wind Turbine System

바람이 불어 들어오면 Rotor Aerodynamics에서 공기 역학적 토크 T_r 을 만들어 내고 Drive-Train을 통해서 발전기 토크 T_g 로 변환된다. 여기서 T_r 은 공기 역학적 토크, T_g 는 발전기 토크, Ω_r 은 로터의 회전 속도, Ω_g 는 발전기 회전 속도이며, P_g 는 발전기 출력을 나타낸다. 그리고 제어기에 의해 피치각과 발전기의 토크의 제어가 이루어진다.

3.1.1 풍력 터빈 시스템의 공기 역학적 모델

앞의 서론에서 언급하였듯이 풍력 터빈(wind turbine) 시스템은 운동 에너지를 전기 에너지로 변환시키는 장치이다. 여기서 풍력 터빈(wind turbine)의 에너지원은 바람의 흐름으로 바람의 시간당 운동 에너지는 다음과 같다.

$$P_t = \frac{1}{2}mv^2 \frac{1}{t} = \frac{1}{2}(\rho Al)v^2 \frac{1}{t} = \frac{1}{2}\rho Av^3 [W] \quad \text{식 (2-1)}$$

여기서 m 은 질량[kg], ρ 는 공기밀도[kg/m³], A 는 단면적[m²], l 은 이동거리[m], v 는 풍속[m/s]이다. 본 논문에서는 사용된 공기 밀도는 1.2231[kg/m³]를 사용하였다. 바람이 풍력 터빈을 지나면서 발생하는 터빈의 기계적 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_r = \frac{1}{2}\rho Av^3 C_p(\lambda, \beta) [W] \quad \text{식 (2-2)}$$

여기서 λ 는 주속비(TSR : Tip Speed Ratio)이고, β 는 피치각(pitch angle)이다. 주속비(TSR : Tip Speed Ratio)는 풍속(wind speed)에 대한 블레이드(blade)의 끝단 속도의 비라고 할 수 있다. 이를 식으로 표현하면,

$$\lambda = \frac{\Omega_r R}{v} \quad \text{식 (2-3)}$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서 Ω_r 은 로터(rotor)의 각속도[rad/s]이고, R 은 로터의 반경[m]을 의미한다. 여기서 공기 역학적 출력 P_r [W]을 로터의 각속도로 나누면 공기 역학적 토크 T_r [Nm]인 식 (2-4)를 만들 수 있다.

$$T_r = \frac{1}{2\Omega_r} \rho A v^3 c_p(\lambda, \beta) \quad \text{식 (2-4)}$$

그리고 $C_p(\lambda, \beta)$ 는 풍력 터빈(wind turbine) 시스템이 바람의 운동에너지를 기계적인 에너지로 변환시켜주는 능력을 나타내는 중요한 함수인데, 비선형 함수로서 피치각(pitch angle) β 와 주속비(TSR) λ 에 의해 결정됨을 알 수 있다. 이를 식으로 나타내면,

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda \quad \text{식 (2-5)}$$

으로 나타낼 수 있다. 본 논문에서 사용된 $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ 의 값은 다음 표와 같다.

Table. 5 Parameters of Power Coefficient

C_1	0.5176
C_2	116
C_3	0.4
C_4	5
C_5	21
C_6	0.0068

또한 λ_i 를 식으로 표현하면,

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad \text{식 (2-6)}$$

나타낼 수 있다.

식 (2-2)에 의하면 C_p 값이 일정하다면 풍속(wind speed)이 증가함에 따라 풍력 터빈(wind turbine) 시스템의 출력 P_r [W]는 풍속(wind speed)의 3승에 비례하여 증가할 것이다. 그리고 풍속이 일정하다면 풍력 터빈(wind turbine) 시스템의 출력 P_r [W]는 C_p 에 따라 출력 값이 결정된다. MW급 풍력 터빈(wind turbine) 시스템의 경우, 정격 풍속을 기준으로 정격 풍속보다 낮은 풍속에서는 풍력 터빈(wind turbine) 시스템의 효율을 최대로 유지하는 것이 유리하며, 반대로 정격 풍속이상에서는 전기적 출력을 일정하게 유지하는 것이 유리하다.

Fig. 5은 피치각(pitch angle)에 따른 주속비(TSR)과 출력 계수(power-coefficient)의 비를 나타낸 것이다.

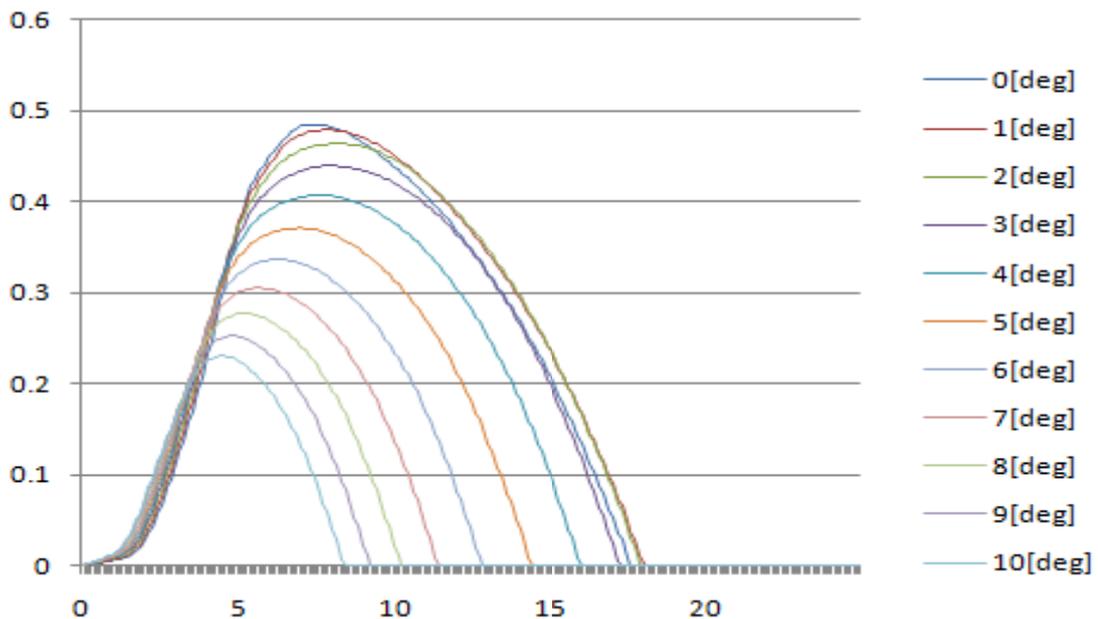


Fig. 5 Power Coefficient VS. TSR(Tip Speed Ratio)
according to the Pitch Angle

그림을 보면, 출력 계수(power coefficient)의 최대치는 피치각(pitch angle)의

변화에 따라서 그 값이 변화하는 것을 확인 할 수 있다. 일반적으로 피치각(pitch angle)이 증가함에 따라 출력 계수(power coefficient)의 최대치는 감소하고 있음을 알 수 있다. 피치각(pitch angle)을 증가시키는 것은 로터 블레이드(rotor blade)로 붙어 들어오는 바람에너지를 최대로 회수하지 않고 일정량을 흘려보낸다는 것을 의미한다.

최대 출력 계수 C_{pmax} 를 얻기 위해서는 피치각(pitch angle) β 와 주속비(TSR) λ 가 특정 값에서 최대가 된다. 여기서 출력 계수(power coefficient)가 최대가 되는 피치각(pitch angle)은 0° 주속비(TSR)은 7.5에서 약 0.4851의 값을 가진다. 즉, 바람이 가진 에너지의 약 48%까지 회수할 수 있음을 알 수 있다. 정격 풍속이상에서는 풍속이 증가함에 따라 풍속의 3승에 비례하여 증가하는 출력을 정격 출력으로 유지하기 위해 C_p 값을 감소시켜야한다. 이를 위해 피치각(pitch angle)을 증가시켜 원하는 만큼의 바람에너지만을 전기적 에너지로 변환시킨다.

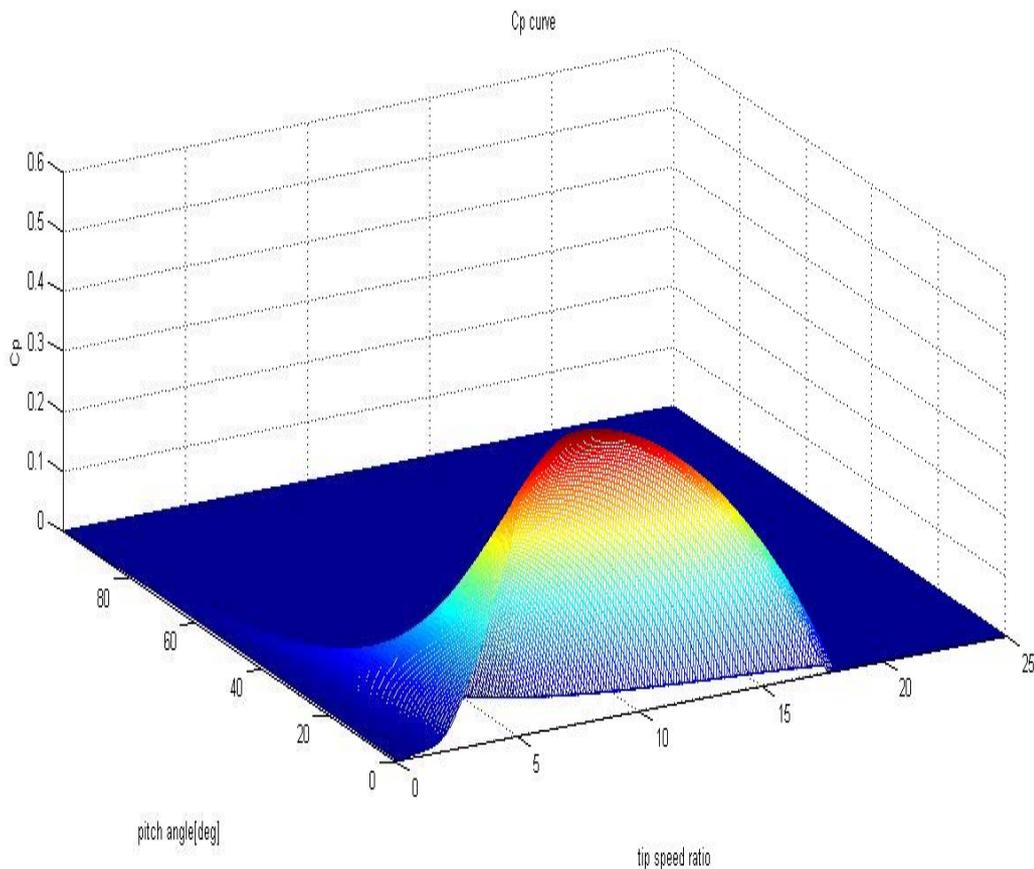


Fig. 6 Power Coefficient VS. TSR VS. Pitch Angle

Fig. 6는 본 논문에서 사용된 C_p 값을 3차원 그래프로 나타낸 것이다. 실제 식을 사용하여 그래프를 구하면 일정 구간에서 (-)값도 나오지만 (-)값은 의미가 없으므로 모두 0으로 처리하였다.

3.1.2 풍력 터빈 시스템의 동력전달장치 모델

본 논문에서 사용된 풍력 터빈 시스템의 동력 전달 장치 모델은 Fig. 7과 같다. Fig. 10과 같이 나타나는 동력 전달 장치는 회전자로부터의 에너지를 발전기로 전달해주며, 발전기가 필요로 하는 회전속도로 증속하기 위해 기어로 구성되어 있다.

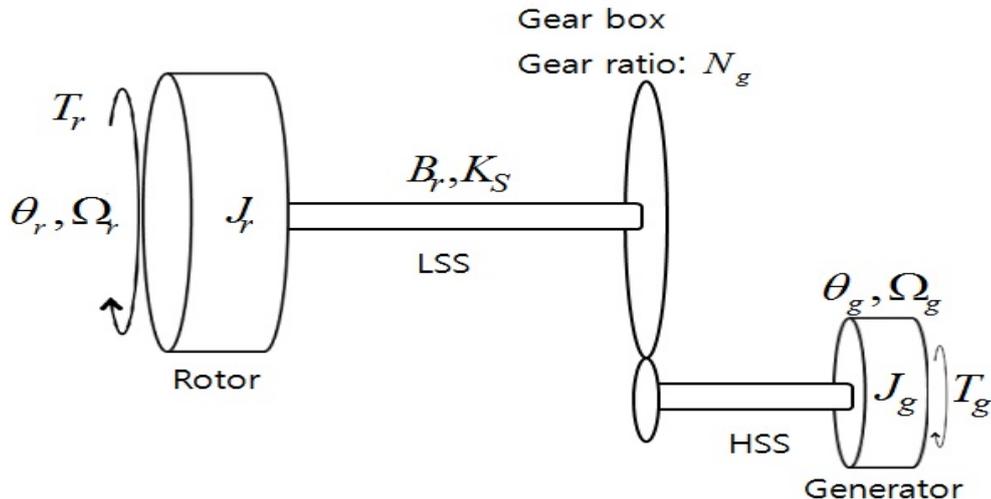


Fig. 7 Drive Train Model

Fig. 7에서 J_r 은 3개의 블레이드, 허브 그리고 저속 회전축(low speed shaft, LSS)의 효과를 모두 고려한 관성 질량(moment of inertia)이고, J_g 는 발전기 회전축의 관성 질량을 의미한다. 3개의 블레이드의 운동으로 인해 공기역학적 토크가 발생하게 된다. 이는 식 (2-4)와 같다. 식 (2-4)와 Fig. 13을 관성 질량에 대하여, Newton의 운동 방정식을 적용하면 식 (2-7)을 유도할 수 있다.

$$J_r \frac{d\Omega_r}{dt} = T_r - K_s \left(\theta_r - \frac{1}{N_g} \theta_g \right) - B_r \left(\Omega_r - \frac{1}{N_g} \Omega_g \right)$$

$$J_g \frac{d\Omega_g}{dt} = \frac{K_s}{N_g} \left(\theta_r - \frac{1}{N_g} \theta_g \right) + \frac{B_r}{N_g} \left(\Omega_r - \frac{1}{N_g} \Omega_g \right) - T_g \quad \text{식 (2-7)}$$

여기서 K_s 는 동력 전달축의 비틀림 상수이고, B_r 은 동력 전달축의 비틀림 댐핑 상수이다. 그리고 N_g 는 기어박의 기어비이고, θ_r, θ_g 는 각각 저속 회전축(LSS)와 발전기축의 고속 회전축(HSS)의 각도를 의미한다. 또한 Ω_r, Ω_g 는 저속 회전축과 고속 회전축의 각속도를 의미한다.

3.1.3 풍력 터빈 시스템의 발전기 모델

풍력 터빈 시스템에서 가장 흔히 쓰이는 발전기는 DFIG(Doubly-Fed Induction Generator)이다. 하지만 본 논문에서는 피치 제어가 양호하게 이루어지는가에 있기 때문에 발전기 모델은 간단하게 효율을 곱하는 정도로 모델을 적용하였다. 여기서 사용된 발전기 효율 값은 0.95이다.

3.1.4 풍력 터빈 시스템의 제어기 모델

Fig. 8는 이상적인 파워 커브를 나타낸다. 이 그래프의 목적은 시동 풍속 V_{min} 과 종단 풍속 V_{max} 에 의해 운전 풍속의 범위를 정하는데 있다. 풍속이 범위 밖에 있게 되면 풍력 터빈은 정지해 있게 된다. 시동 풍속 V_{min} 이하에서는 운전 비용과 손실을 보상에 대한 이용 가능한 에너지가 너무 적다. 그리고 종단 풍속 V_{out} 이상에서는 풍력 터빈 시스템의 구조적인 과부하로부터 보호하기 위해 정지한다.

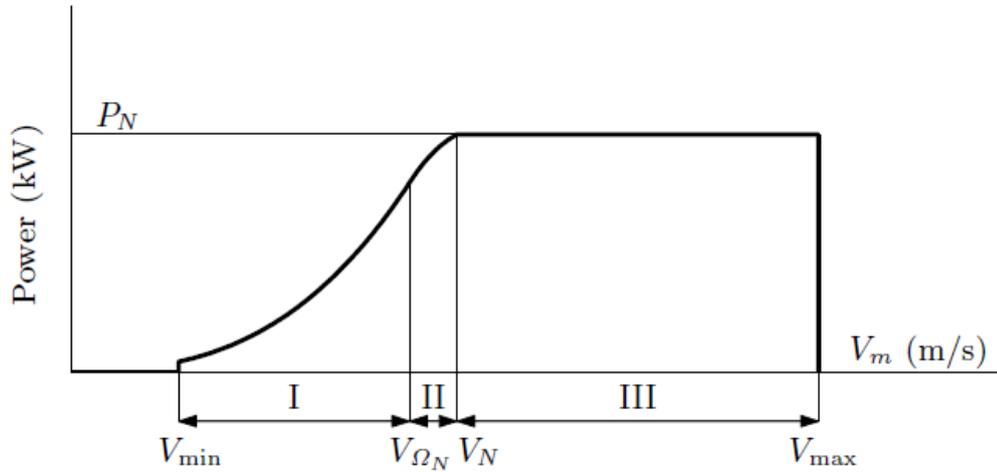


Fig. 8 Ideal Power Curve of Wind Turbine systems

영역-I의 목적은 로터 블레이드로 붙어 들어오는 바람 에너지의 회수 효율이 최대가 되도록 풍력 터빈을 제어하는데 있다. 즉, C_p 값이 최대 값을 유지할 수 있도록 제어가 이루어져야 한다. 이를 간단히 식을 통해 정리하면, 우선 C_p 값이 최대일 때에는 주속비(TSR) 또한 최적화된 값인 λ_{opt} 일 것이다. 이는 Fig. 10에서 확인할 수 있다. 그리고 λ_{opt} 을 유지하기 위해서는 풍속 v 와 로터의 회전 속도 Ω_r 사이에서는 식(2-3)과 같은 식이 성립해야 한다. 식(2-3)을 식(2-4) 공기 역학적 토크 식에 대입하여 정리하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$T_r = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_{p_{max}}}{\lambda_{opt}} \Omega_r^2 \quad \text{식 (2-8)}$$

여기서 $T_r = \frac{T_g}{N_g}$ 이고 $\Omega_r = \frac{\Omega_g}{N_g}$ 이므로 공기 역학적 토크 T_r 을 발전기 토크와 발전기 회전 속도에 관한 식으로 다시 표현하면 다음 식과 같다.

$$T_g = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_{p_{max}}}{\lambda_{opt} N_g^3} \Omega_g^2 \quad \text{식 (2-9)}$$

이를 간단히 표현하면 다음과 같다.

$$T_g = K_{opt} \Omega_g^2 \quad \text{식 (2-10)}$$

풍력 발전기 토크가 식(2-10)과 같이 제어가 된다는 것은 C_p 가 최대로 유지되고 있는 것이다. 여기서 K_{opt} 은 비례 상수이다.

영역-III는 피치 제어를 통해서 바람 에너지 회수 효율 즉, C_p 를 조절하면서 풍력 터빈의 출력을 일정하게 유지하는데 그 목적이 있는 영역이다. 그리고 영역-II은 영역-I과 영역-III사이에서 자연스런 전환이 이루어지도록 제어가 수행되는 영역이다.

3.1.5 풍력 터빈 시스템의 토크 제어 모델

가변속도 가변피치 풍력 터빈에서 토크 제어는 일반적으로 Fig. 9의 그래프 형태를 따라 제어가 이루어진다. 그래프를 보면 최적 토크(optimal torque)는 식(2-10)에 의한 그래프이다. 즉, 제어가 이루어지지 않았을 때의 그래프이다. 가변속 제어에서는 적색선을 따라 제어가 이루어진다. 약 $70[\text{rad/s}]$ 근처를 기준으로 그 이전에는 토크 값이 $0[\text{Nm}]$ 로 유지되고 있다. 그리고 바람 에너지로부터 회수되는 출력 또한 없다. 하지만 풍속은 시동(start-up)을 위해 로터의 속도를 가속시켜준다. 발전기 회전 속도가 약 $70[\text{rad/s}]$ 이상인 영역에서는 발전기 토크를 최적 토크(optimal torque)값 보다 낮게 설정하여 즉, 공기 역학적인 토크보다 낮게 설정하여 풍력 터빈이 시동(start-up)시 동력 전달 축에 존재하는 마찰 토크를 최소화시키면서 최대한 빠르게 최대 C_p 값에 도달하기위해 선형적인 제어가 이루어진다. 이에 관한 식은 다음과 같다.

$$T_g = \frac{\Omega_o - \Omega_{cutin}}{\Omega_1 - \Omega_{cutin}} T_{g1} \quad \text{식 (2-11)}$$

여기서 Ω_0 는 동작점에서의 발전기 회전 속도이고 Ω_1 은 그래프에서 보여지는 것처럼 최적 토크 제어가 시작되는 시점에서의 발전기 회전 속도를 의미한다. 그리고 Ω_{cutin} 은 시동 풍속에서의 발전기 회전 속도이다. 또한 T_{g1} 은 Ω_1 에서의 토크이고 다음 식과 같다.

$$T_{g1} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_{p_{max}}}{\lambda_{opt} N_g^3} \Omega_1^2 \quad \text{식 (2-12)}$$

약 90[rad/s]에서 약 113[rad/s]사이에서는 앞에서 설명한 식 (2-10)에 의해 제어가 이루어지는 영역이다. 즉, C_p 값이 최대 값으로 유지가 되는 영역이다. 여기서 발전기 토크는 발전기 회전 속도의 2승에 비례하여 증가하게 된다. 마지막으로 그 이후의 값에서 발전기 정격 속도까지는 발전기 토크가 블레이드의 회전 속도에 따라 선형적으로 변하는 구간이다. 그 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_g = T_{g2} + \frac{\Omega_r - \Omega_2}{\Omega_{rated} - \Omega_2} \left(\frac{P_{rated}}{\Omega_{rated}} - T_{g2} \right) \quad \text{식 (2-13)}$$

여기서 Ω_2 는 그래프에서 볼 수 있는 것처럼 최적 토크 제어가 끝나는 지점에서의 발전기 회전 속도를 의미하고 Ω_{rated} 는 발전기 정격 회전 속도를 의미한다. T_{g2} 는 Ω_2 에서의 토크이고 그 식은 다음과 같다.

$$T_{g2} = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_{p_{max}}}{\lambda_{opt} N_g^3} \Omega_2^2 \quad \text{식 (2-14)}$$

그래프 상에는 나와 있지 않지만 발전기 정격 회전 속도 이후에는 발전기 출력이 정격 출력으로 일정하게 유지되는 구간이므로 발전기 토크는 발전기 회전 속도에 반비례적으로 감소하게 된다. 그 관계식은 다음과 같다.

$$T_g = \frac{P_{rated}}{\Omega_r} \quad \text{식 (2-15)}$$

여기서 P_{rated} 는 발전기 정격 출력이다. 발전기 토크가 현재 동작점에서의 발전기 속도에 반비례함을 알 수 있다.

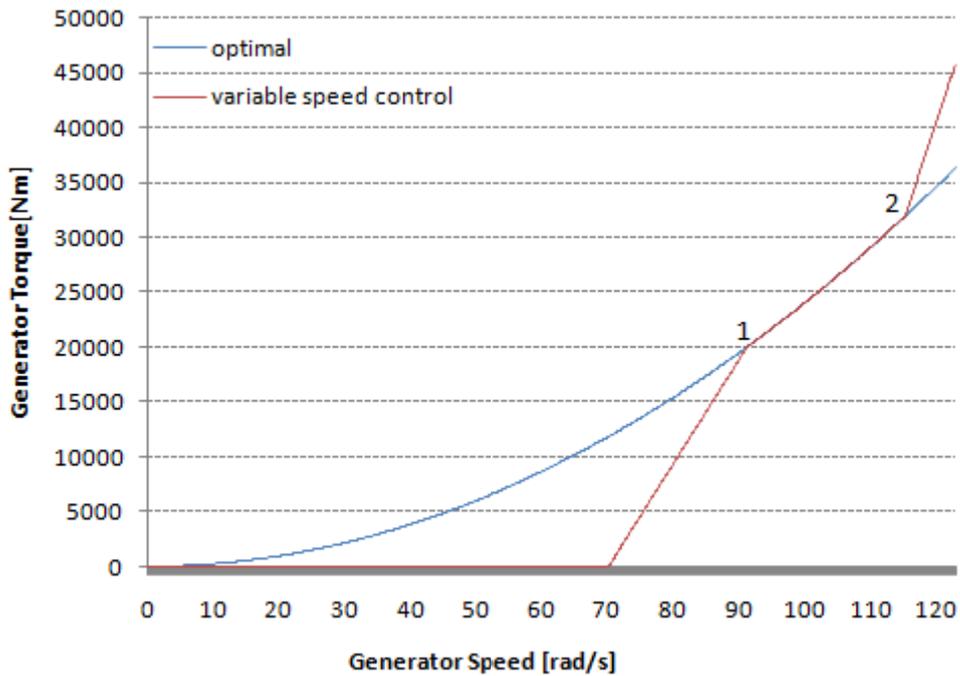


Fig. 9 Generator Torque VS Generator Speed of Variable Speed Controller

3.2 제안된 PID 제어기 설계

3.2.1 풍력 터빈 시스템의 피치 제어 모델

풍력 터빈의 토크 제어의 목적이 정격의 작동점 이하에서 바람에너지 회수를 최대화하는데 있다면, 피치 제어는 정격의 작동점 이상에서 발전기 회전 속도를 일정하게 유지하는데 그 목적이 있다고 하겠다. 본 논문에서는 PID 제어기를 설계하였다. PID 제어기를 설계하기 위하여 먼저 PI제어기를 설계하여 최적화된 PI게인 값을 찾고, 그 값을 바탕으로 해서 적절한 D게인 값을 찾는 방법을 선택하였다.

먼저 PI제어기에 대해서 알아보겠다. 여기서 풍력 터빈의 모델은 단일 자유도 (single DOF[Degree of Freedom])을 사용한 피치 제어 시스템을 설계하였다. 즉, 본 논문에서의 피치 제어 목적은 발전기 회전 속도를 일정하게 유지하는 것이기 때문에 DOF는 각속도가 된다. 따라서 제어 게인 값을 계산하기 위해 다음과 같은 운동 방정식을 세울 수 있다.

$$T_r - N_g T_g = (J_r + N_g^2 J_g) \frac{d}{dt} (\Omega_o + \Delta\Omega) = J_d \Delta\Omega \quad \text{식 (2-16)}$$

여기서 J_r 은 로터의 관성 질량(inertia)이고 J_g 는 고속 축에 걸리는 발전기 관성 질량(inertia)을 나타낸다. 그리고 J_d 는 J_r 과 J_g 를 합성한 것으로 동력 전달 축의 관성 질량을 의미한다. Ω_o 는 저속 축의 정격 회전 속도이고, $\Delta\Omega$ 는 저속 축의 회전 속도 변화율, 그리고 $\Delta\Omega'$ 는 저속 축의 회전 가속도를 나타낸다.

피치제어가 이루어지는 영역에서는 발전기 토크는 일정한 발전기 출력을 유지하기 위해 제어가 이루어지기 때문에 발전기 토크는 발전기 회전 속도에 반비례적이다. 이에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$T_g = \frac{P_{rated}}{N_g \Omega_r} \quad \text{식 (2-17)}$$

여기서 P_{rated} 는 발전기 정격 출력이고 N_g 는 기어비이다. 그리고 Ω_r 은 저속 축의 회전 속도이다.

피치 제어가 이루어지는 영역에서는 로터 회전 속도의 변화가 거의 없기 때문에 이에 대한 공기 역학적 토크의 변화를 무시할 수 있다고 가정을 하면, 즉 정격 회전 속도에 있다고 하면, 공기 역학적 토크는 다시 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_r(\theta) = \frac{P(\beta, \Omega_{rated})}{\Omega_{rated}} \quad \text{식 (2-18)}$$

즉, 저속 축의 회전 속도는 정격에 도달하여 변화가 없으므로 출력과 토크는 피치각(pitch angle)에 의해서만 결정된다고 할 수 있다. 여기서 β 는 피치각을 의미하고 P 는 발전기 출력이다.

위의 식(2-17)과 식(2-18)를 1차 Taylor Series를 이용하여 선형화를 하면 다음과 같다.

$$T_g \approx \frac{P_{rated}}{N_g \Omega_{rated}} - \frac{P_{rated}}{N_g \Omega_{rated}^2} \Delta\Omega \quad \text{식 (2-19)}$$

$$T_r \approx \frac{P_{rated}}{\Omega_{rated}} + \frac{1}{\Omega_{rated}} \left(\frac{\partial P}{\partial \theta} \right) \Delta\beta \quad \text{식 (2-20)}$$

3.2.2 PID 제어기 설계

식(2-19)은 식(2-17)을 저속 축의 회전 속도인 Ω 에 대해서 미분한 결과이고, 식(2-20)은 식(2-18)을 피치각인 θ 에 대해서 미분한 결과이다. $\Delta\beta$ 는 각각의 작동점에 대해서 피치각의 작은 변화를 의미한다. 이를 PI 제어기를 사용하여 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta\beta = K_p N_g \Delta\Omega + K_i \int_0^t N_g \Delta\Omega dt \quad \text{식 (2-21)}$$

K_p, K_i 는 피치 제어기의 비례 계수와 적분 계수이다. 여기서 $\Phi = \Delta\Omega$ 라고 놓고 식(2-16)에 식(2-19), 식(2-20), 식(2-21)를 대입하여 풀면 다음과 같은 로터 회전 속도에 대한 운동 방정식을 유도할 수 있다.

$$[J_d] \Phi'' + \left[\frac{1}{\Omega_{rated}} \left(-\frac{\partial P}{\partial \beta} \right) N_g K_p - \frac{P_{rated}}{\Omega_{rated}^2} \right] \Phi' + \left[\frac{1}{\Omega_{rated}} \left(-\frac{\partial P}{\partial \beta} \right) N_g K_i \right] \Phi = 0 \quad \text{식 (2-22)}$$

여기서 PI 제어기로 제어되는 로터의 회전 속도는 2차 시스템으로서 반응할 것임을 알 수 있다. 이 시스템의 고유 주파수(natural frequency) ω_n 와 제동비(damping ratio) ζ 는 다음과 같다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{J_d}{\Omega_{rated} \left(-\frac{\partial P}{\partial \beta}\right) N_g K_i}} \quad \text{식 (2-23)}$$

$$\zeta = \frac{\frac{1}{\Omega_{rated} \left(-\frac{\partial P}{\partial \beta}\right) N_g K_p} - \frac{P_{rated}}{\Omega_{rated}^2}}{2 \sqrt{\left[\frac{1}{\Omega_{rated} \left(-\frac{\partial P}{\partial \beta}\right) N_g K_i}\right] J_d}} \quad \text{식 (2-24)}$$

Table. 6 Parameters for the PID Controller

J_d [kg.m ²]	4.047e+07
Ω_{rated} [rad/s]	1.2671
N_g	97
ω_n	0.6
ζ	0.7

PID 제어기에 사용되는 기본적인 값은 Table. 6과 같다. 이는 Ref[9], [10]에서 제공한 값을 사용하였다. 이에 따라서 비례 게인 K_p 와 적분 게인 K_i 를 구하면 다음과 같다.

$$K_p = \frac{2J_d \Omega_{rated} \zeta \omega_n}{N_g \left(-\frac{\partial P}{\partial \beta}\right)} \quad \text{식 (2-25)}$$

$$K_i = \frac{J_d \Omega_{rated} \omega_n^2}{N_g \left(-\frac{\partial P}{\partial \beta}\right)} \quad \text{식 (2-26)}$$

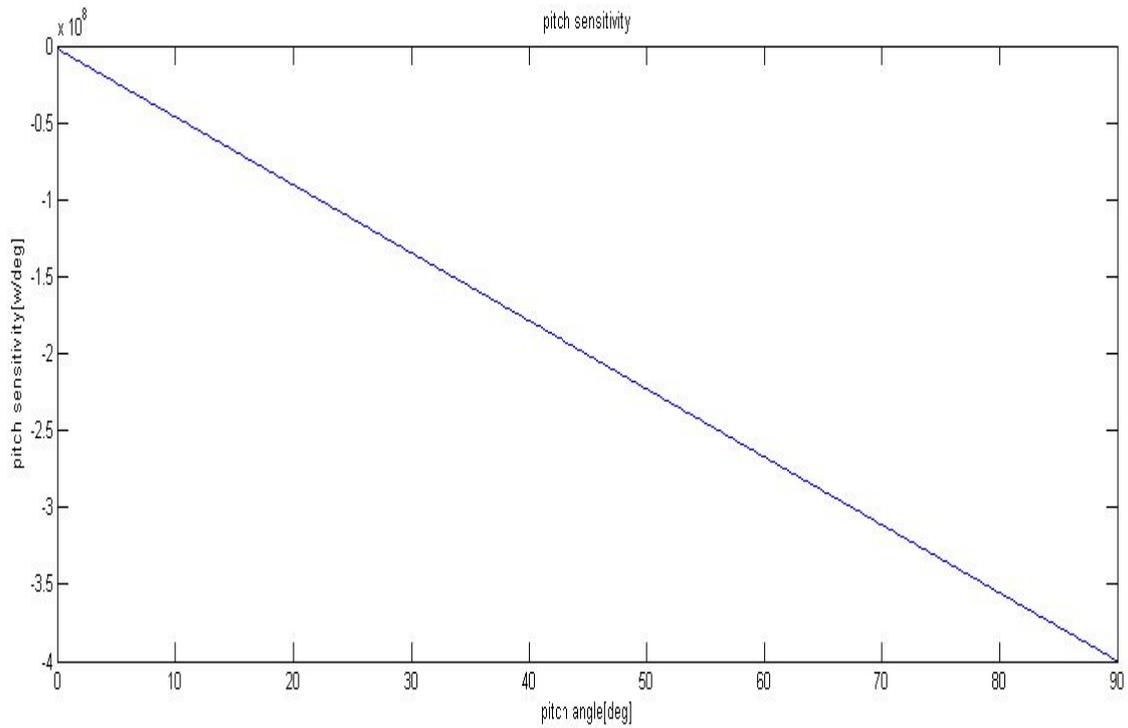


Fig. 10 Best Fit Line of Pitch Sensitivity

여기서 $\frac{\partial P}{\partial \beta}$ 는 풍속, 로터의 회전 속도, 피치각에 따라서 변하는 로터의 공기 역학적인 특성을 가진다. 본 논문에서는 NREL 5MW에서 사용한 값을 사용하였다.

Fig. 10는 정격 풍속 이상, 로터의 정격 속도에서 각 동작점에 따른 피치각의 변화에 의한 값이다. 여기서 $\beta=0^\circ$ 일 때의 $\frac{\partial P}{\partial \beta}$ 값과 이에 따른 PI 게인 값을 구하면 다음과 같다.

Table. 7 K_p and K_i

	$\beta = 0^\circ$
$\partial P / \partial \beta [W/\text{deg}]$	-2072294.3017664
K_p	-0.2143
K_i	-0.0918

마지막으로 D계인을 구하기 위해 다음과 같은 PID 제어기의 전달 함수를 나타내면 다음과 같다.

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad \text{식 (2-27)}$$

$$= \frac{K(s+a)(s+b)}{s}$$

흔히 $a=b$ 로 선정하여 $G_c(s)$ 를 구하면

$$G_c(s) = \frac{K(s+\alpha)^2}{s} \quad \text{식 (2-28)}$$

가 된다. 위와 같이 식을 변형한 이유는 PID제어기의 매개변수의 수가 3개인 점을 고려하여 이를 2개로 만들기 위해서 이다. 이와 같은 단순화를 통해서 D계인을 구하면 다음과 같다.

$$K_p = 2K\alpha$$

$$K_i = K\alpha^2$$

$$K_d = K \quad \text{식 (2-29)}$$

위 관계식을 통해서 식 (2-31)과 같은 K_d 에 관한 일반식을 유도 할 수 있다.

$$K_d = \frac{J_d \Omega_{rated} \zeta^2}{N_g \left(\frac{\partial P}{\partial \beta} \right)} \quad \text{식 (2-30)}$$

제 4 장 Matlab/Simulink 모델 구현 및 결과 고찰

4.1 Matlab/Simulink 모델

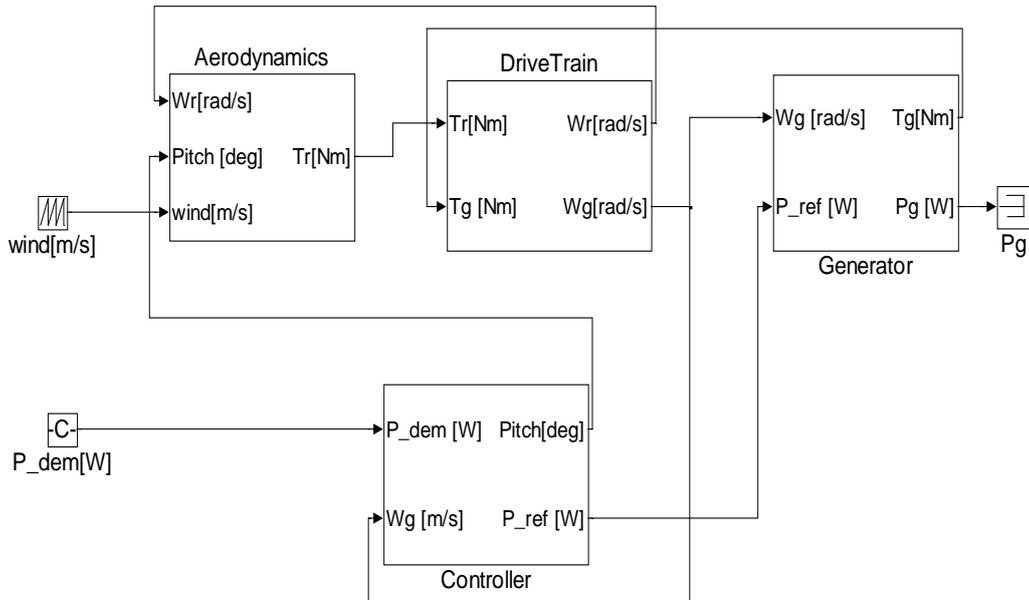


Fig. 11 Matlab/Simulink Model of Wind Turbine System

Fig. 11는 풍력 터빈 시스템의 전체적인 모델을 Matlab/Simulink를 이용해 나타낸 것이다. 입력은 풍속 $v[m/s]$ 이고 최종 출력은 발전기 출력 $P_g [W]$ 이다. 본 논문에서 확인하고자 하는 것은 풍속에 따라 피치 PI제어기와 피치 PID제어기를 사용하였을 때 로터의 회전속도, 피치각, 발전기 토크, 공기 역학적 토크와 발전기 출력이 어떻게 변하고 달라지는 지를 확인하고자 한다. 여기서 풍속은 $1m/s$ 에서 $25 m/s$ 까지 비례적으로 증가시켜 확인하였다. 그리고 풍속이 급격히 떨어질 경우 제어가 어떻게 이루어지고 있는지 확인하였다. 그리고 마지막으로 실제 풍속에 가까운 난류가 포함된 풍속을 생성하여 정격 이하의 풍속과 정격 이상의 풍속에서 시뮬레이션을 하였다.

4.1.1 공기 역학적 모델

식(2-2)에서 식(2-6)를 matlab/simulink를 이용하여 만들면 Fig. 8과 같다. 여기서 C_p 는 Fig. 7의 곡선을 따르고, 이를 테이블로 정리하여 피치각(pitch angle) β 와 주속비(TSR) λ 에 의해 결정될 수 있도록 하였다. 입력(input)은 3개이며, 풍속, 로터 각속도 그리고 피치각이다. 출력(output)은 2개이며, 공기 역학적 파워 $P_r [W]$ 과 공기 역학적 토크 $T_r [Nm]$ 이다.

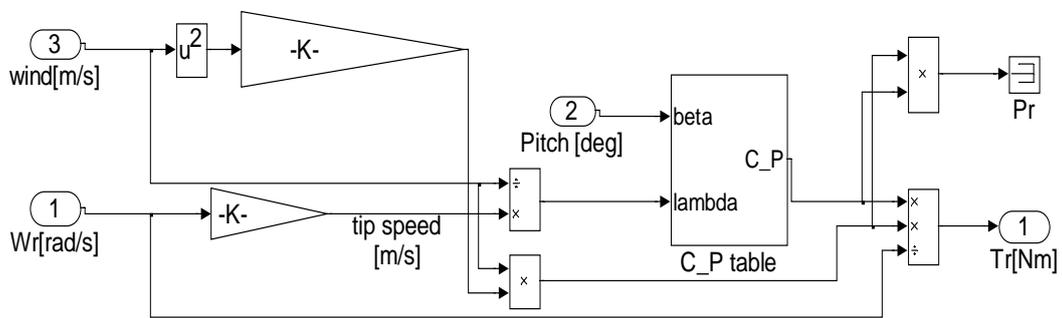


Fig. 12 Matlab/Simulink Model of Rotor Aerodynamics

4.1.2 동력 전달 장치 모델

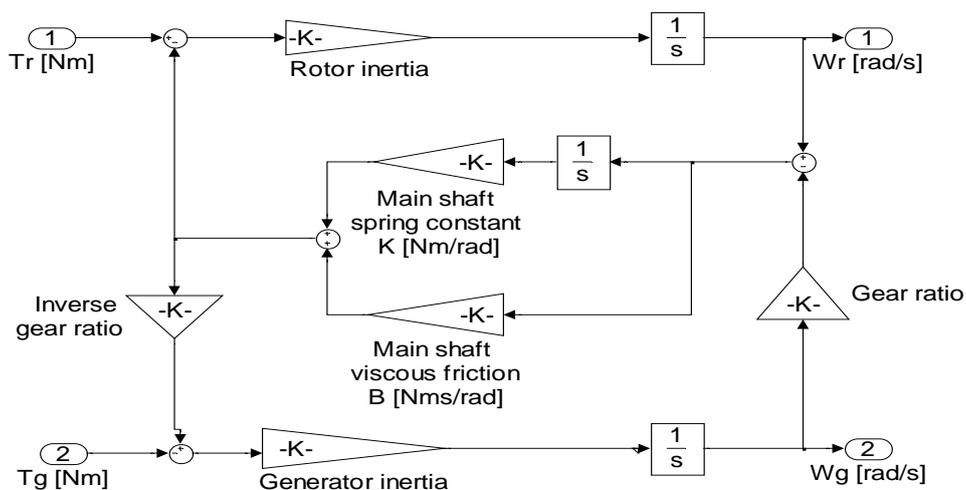


Fig. 13 Matlab/simulink Model of Wind Turbine Drive Train

식 (2-7)을 matlab/simulink로 나타내면 Fig. 13과 같이 나타낼 수 있다.

4.1.3 발전기 모델

Fig. 14는 발전기 모델을 간단하게 나타낸 것이다.

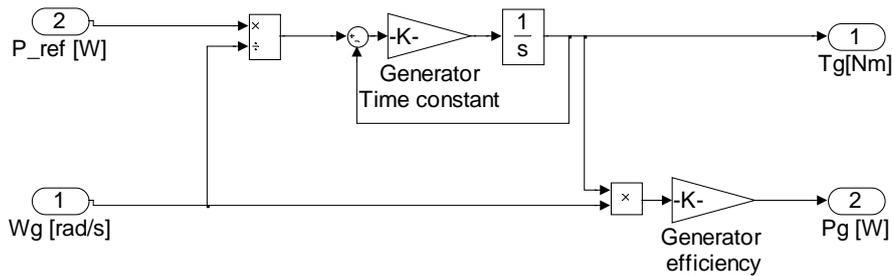


Fig. 14 Matlab/simulink Model of Wind Turbine Generator

4.1.4 PID 제어기 모델

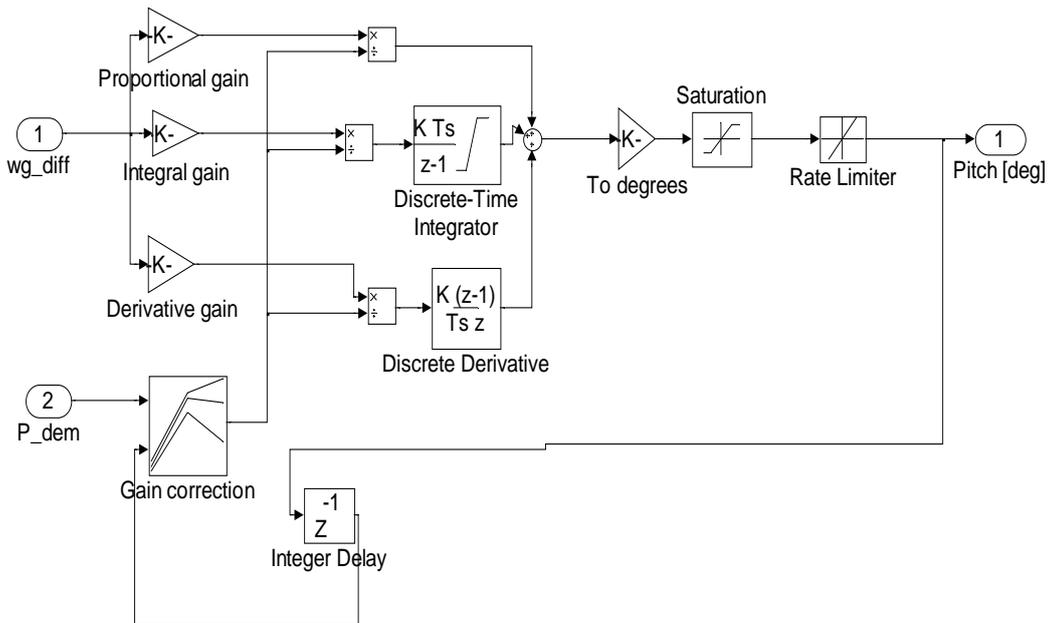


Fig. 15 Matlab/Simulink Model of Pitch PID Controller

Fig. 15은 3장에서 논의된 PID 제어기를 Matlab/Simulink로 구현한 것이다.

4.2 시뮬레이션 결과 및 고찰

4.2.1 주기적인 풍속이 적용된 경우

시뮬레이션은 피치 제어가 이루어지지 않는 경우와 PID제어기를 사용하여 피치제어를 한 경우를 비교 분석하였고 PI gain 설정의 적절함을 확인하기 위해 PI 제어기만을 가지고 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션을 위한 풍속은 제어기의 적절한 동작 여부를 확인하기위해 0 ~ 24[m/s]까지 계단함수 형태로 증가시켰다. 피치 제어가 이루어지지 않는 경우를 보면 Fig. 16와 같다.

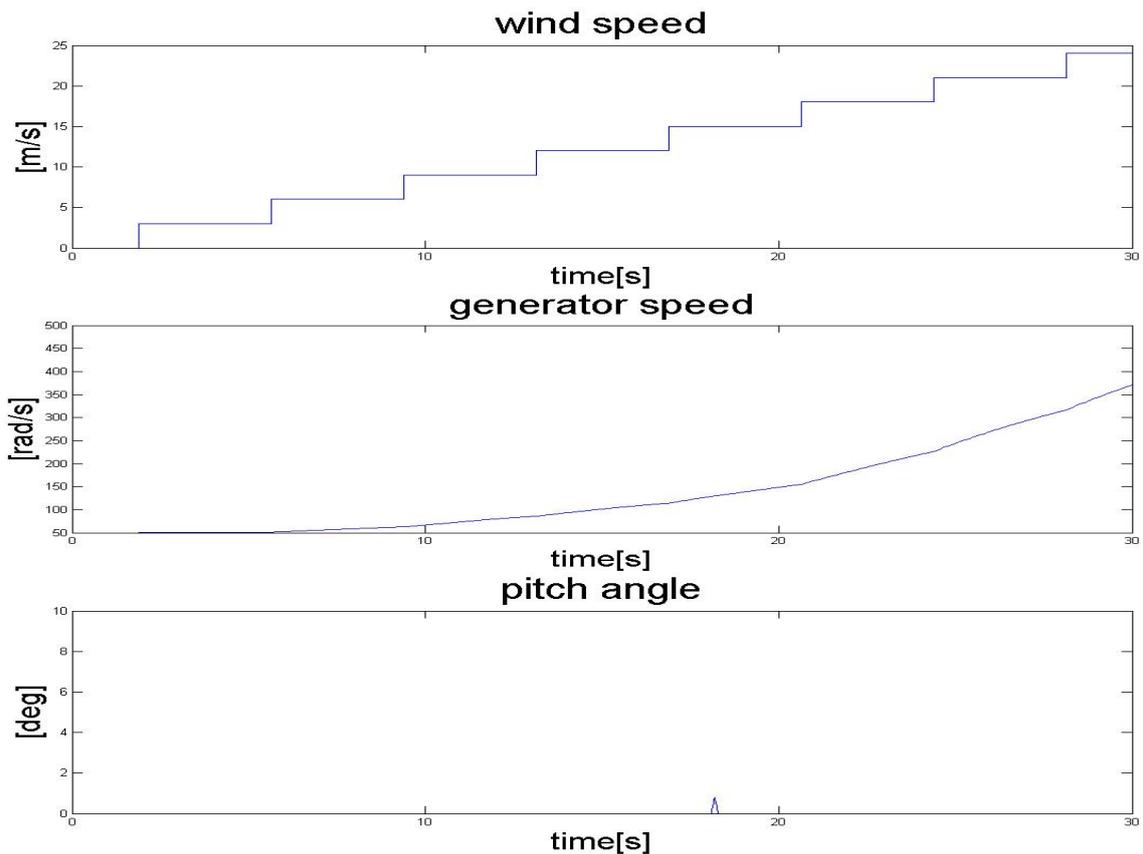


Fig. 16 Simulation Results of Wind Turbine without Pitch Controller

Fig. 16에서 살펴 볼 것은 발전기 회전 속도와 피치각의 변화이다. 기본적으로 피치 제어가 이루어지지 않으므로 피치각은 0[deg]이다. 그래서 발전기 회전 속도는 피치각이 0[deg]가 유지되므로 계속해서 증가하게 된다. 설계된 발전기 정격 회전 속도는 122.9[rad/s]인데, 여기서는 그 이상의 값까지 계속해서 증가하고 있음을 확인 할 수 있다.

Fig. 17은 PI gain을 구한 후 시뮬레이션을 한 결과이다. 풍속이 증가하면서 발전기 속도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 하지만 정격 풍속 이상에서는 정격 회전 속도에 있음을 알 수 있다. 그 이유는 설계된 피치 제어기에 의해서 발전기 회전 속도가 정격 속도에 이르게 되면 피치 제어가 이루어져 더 이상 회전 속도가 증가하는 것을 제한한다. 그리고 약 5초에서 12초 사이에서 발전기 토크를 보면 발전기 회전 속도에 따라 선형적으로 증가하는 영역과 Ω_g^2 에 비례하여 증가하는 영역을 확인할 수 있다.

그리고 피치 제어가 이루어지는 영역부터는 토크 값이 더 이상 증가하지 않고 일정해 짐을 알 수 있다. 그리고 30초 이후에 잠깐 발전기 토크 값이 증가하는데 이는 풍속이 갑자기 급격히 떨어지면서 일어나는 현상이다. 마지막으로 출력을 보면 피치 제어가 이루어지는 구간에서 출력 값이 정격 값으로 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 이로써 PI gain 값이 적절하게 설정되었음을 알 수 있다.

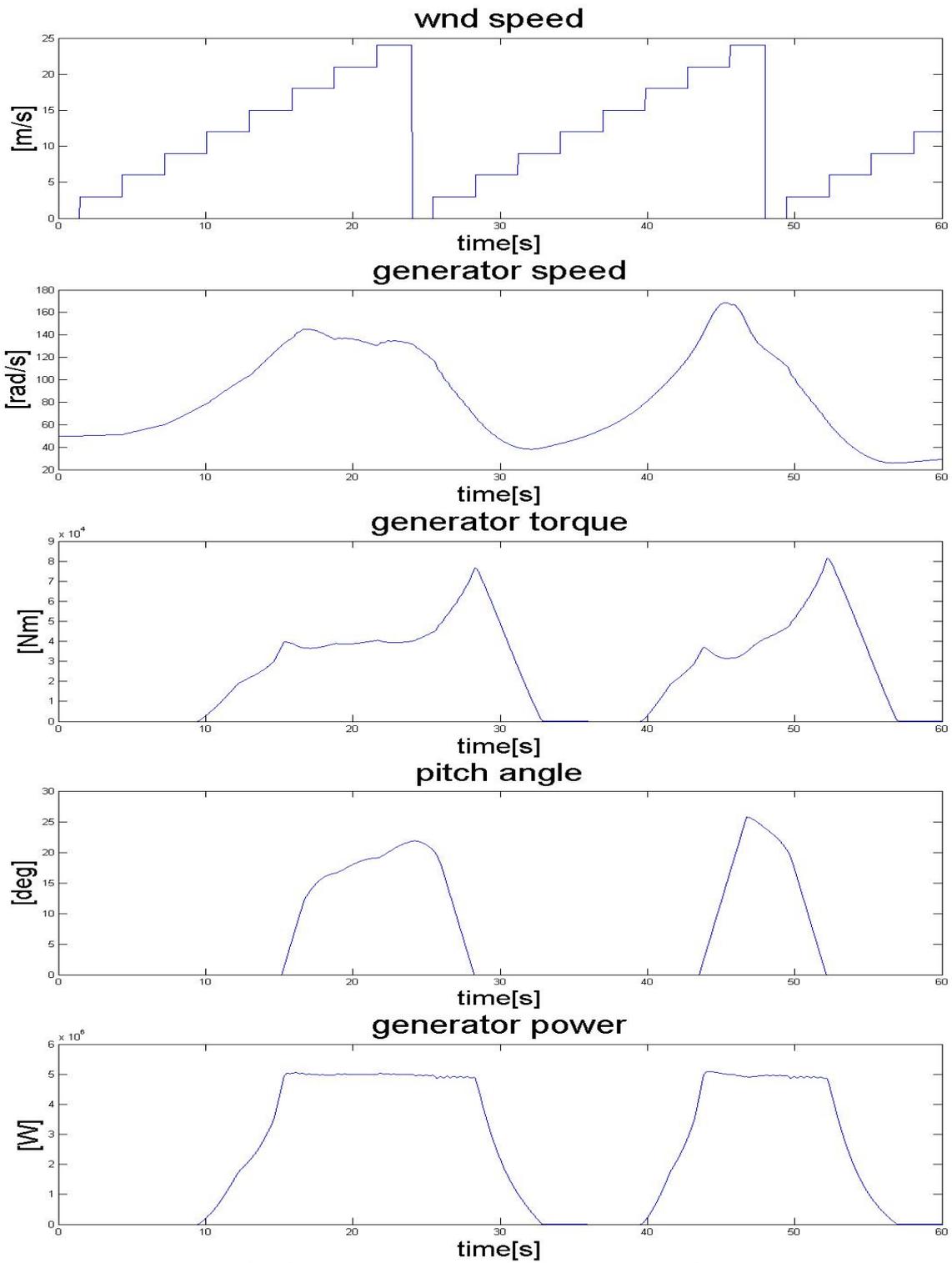


Fig. 17 Simulation Results with Pitch PI Controller

Fig. 18는 제어가 이루어지지 않은 경우와 PID제어기를 사용하여 제어가 이루어진 경우를 동시에 비교한 것이다.

풍속이 정격 풍속에 이르러서 피치각이 증가하기 시작하고 발전기 회전 속도는 피치각이 동작하는 순간부터 정격 회전 속도 근처에서 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 즉, PID제어기가 적절히 작동하고 있음을 확인할 수 있다.

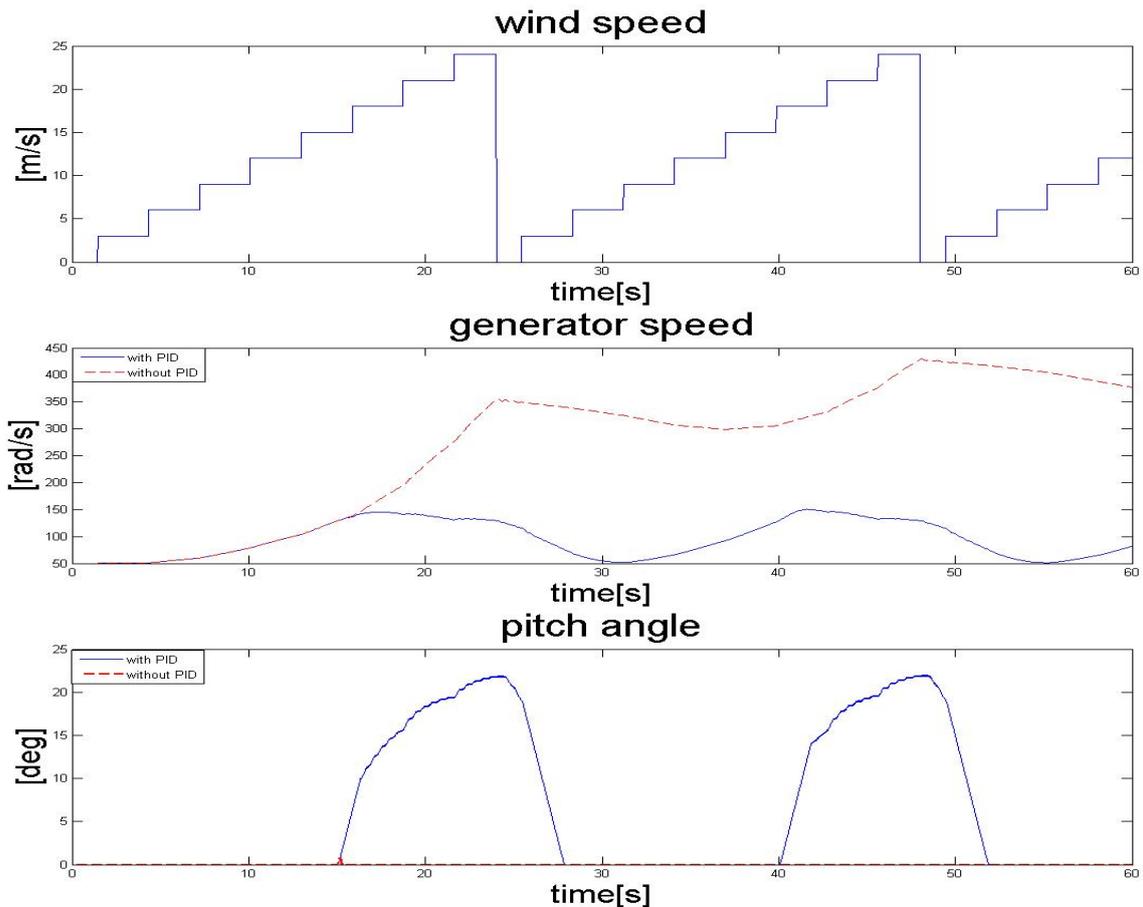


Fig. 18 Comparison of Simulation Results of Wind Turbine with Pitch PID Controller and without Pitch Controller

Fig. 19은 PI제어기를 적용하여 제어가 이루어지는 경우와 PID제어기를 적용하여 제어가 이루어지는 경우를 비교한 것이다. 풍속은 앞의 풍속과 동일하다. D게인이 추가됨으로서 풍속이 급격히 떨어질 때 발전기 회전속도를 비교해 보면 PI제어 보다 PID제어가 이루어지는 경우가 변동이 심하지 않음을 알 수 있다. 발전기 토크

또한 풍속이 급격히 떨어질 때 변동 폭이 크지 않고 회복이 빠르게 이루어짐을 알 수 있다. 결과적으로 발전기 출력량이 PI제어보다 PID제어가 이루어질 때 더 증가하는 것을 확인할 수 있다.

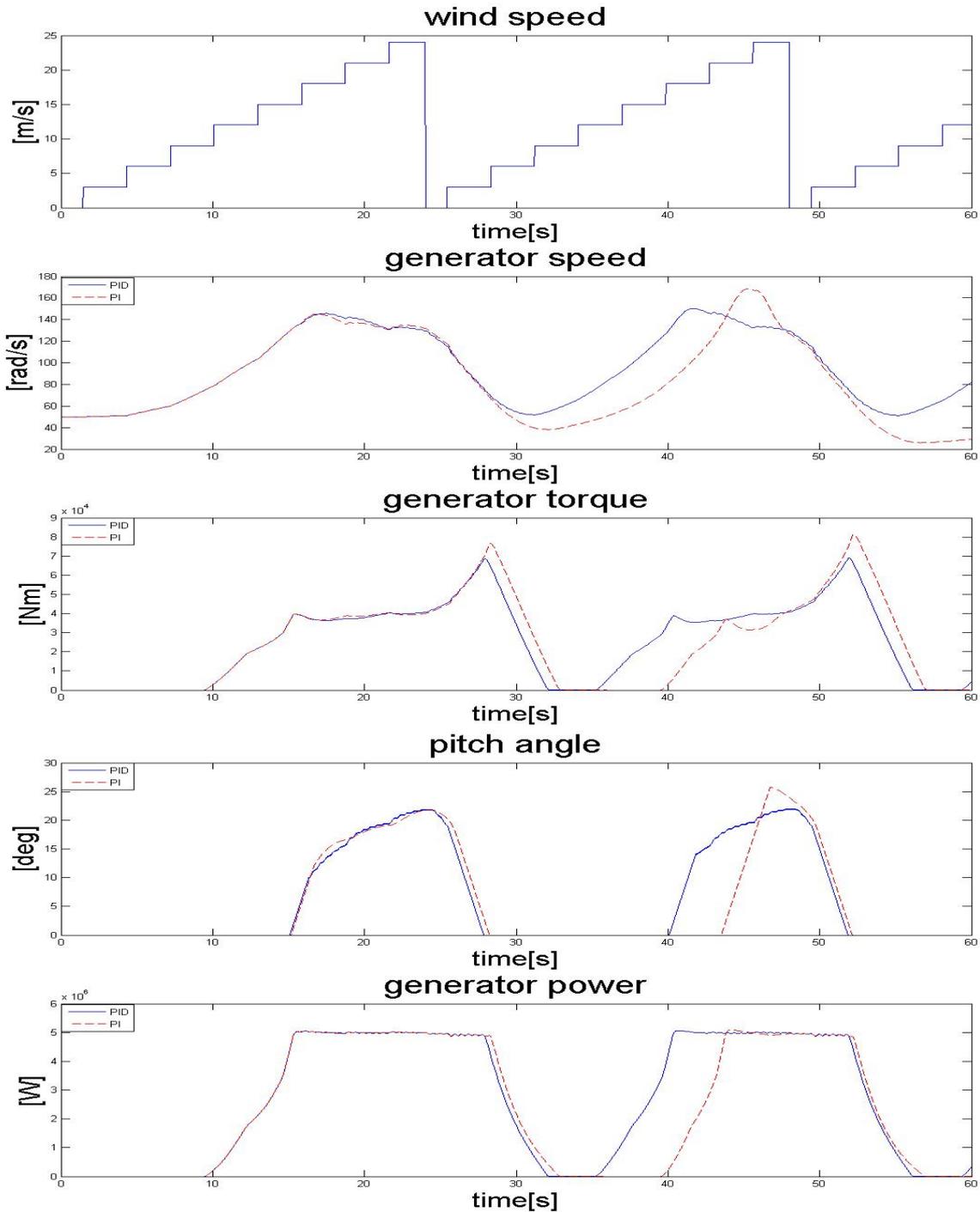


Fig. 19 Comparison of Simulation Results of Wind Turbine with PI and PID Controller

4.2.2 난류 성분이 포함된 풍속이 적용된 경우

설정된 풍속이 아닌 실제 풍속과 비슷한 풍속 모델에서 시뮬레이션을 하였다. 이미 앞에서 제어가 없는 경우와 PI제어가 이루어진 경우와 PID 제어가 이루어진 경우의 비교는 이루어졌으므로 여기서는 PID 제어가 사용된 경우만을 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션은 정격 풍속 이하인 경우와 정격 풍속 이상인 경우로 나누어 실시하였다. 여기서 정격 풍속은 $11[m/s]$ 이다.

4.2.2.1 정격이하의 풍속에 대한 시뮬레이션 결과

정격 이하의 풍속에서 시뮬레이션을 한 결과는 Fig. 20과 같다. 풍속이 정격 이하이기 때문에 피치각은 $0[deg]$ 를 유지한다. 발전기 회전 속도는 풍속이 증가하면서 풍속이 감소할 때는 서서히 감소하고 있다. 발전기 토크 또한 풍속이 증가할 때에는 증가하다가 풍속이 감소하면 서서히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 발전기 출력은 발전기 회전 속도와 발전기 토크의 곱으로 그 값은 그래프에서 대략적으로 확인할 수 있다.

4.2.2.2 정격이상의 풍속에 대한 시뮬레이션 결과

정격이상의 풍속에서 시뮬레이션을 한 결과는 Fig. 21와 같다. 정격 풍속 이상이므로 피치각의 변화가 있음을 알 수 있다. 0초에서 10초 사이에 피치각이 $0[deg]$ 인 이유는 아직 발전기 회전 속도가 정격이 아니기 때문이다. 발전기 회전 속도는 약 10초 전후로 해서 과속도가 나오지만 빠르게 정격 속도로 회복되는 것을 확인할 수 있다. 발전기 토크 또한 일정한 값을 유지하는 것을 확인할 수 있다. 그에 따라서 발전기 출력 또한 일정하게 유지되고 있다. 피치각은 풍속의 크기에 따라 움직이고 있다. 하지만 풍속이 감소할 때 피치각이 과도하게 변화하는 것을 확인할 수 있다. 이는 시스템의 안정도에 부정적인 영향을 줄 수 있다. 이 부분은 아직 해결하지 못한 부분으로 추후 연구에서 해결할 예정이다.

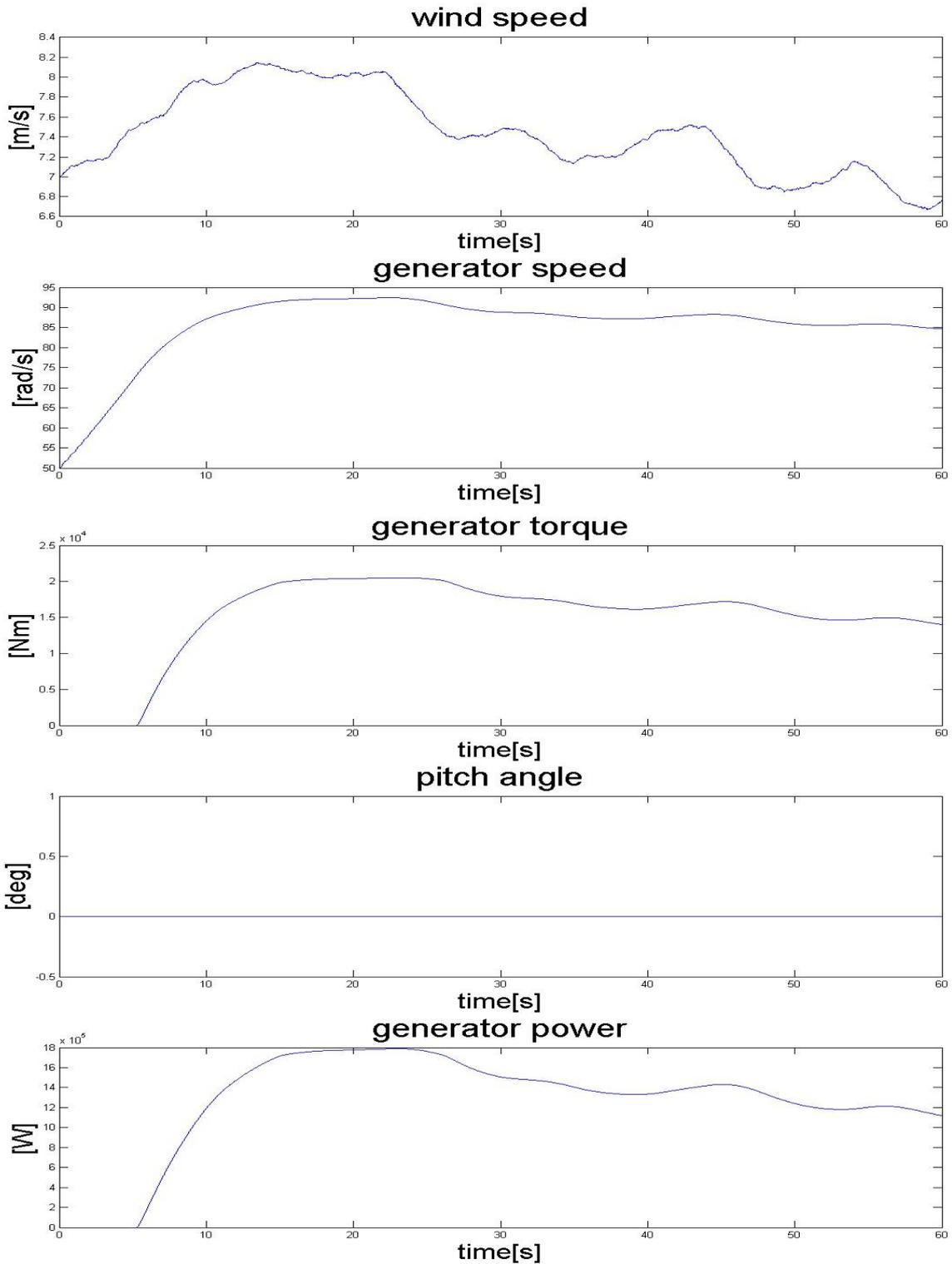


Fig. 20 Simulation Results of Wind Speeds including Tubulences
(Below rated Wind Speeds)

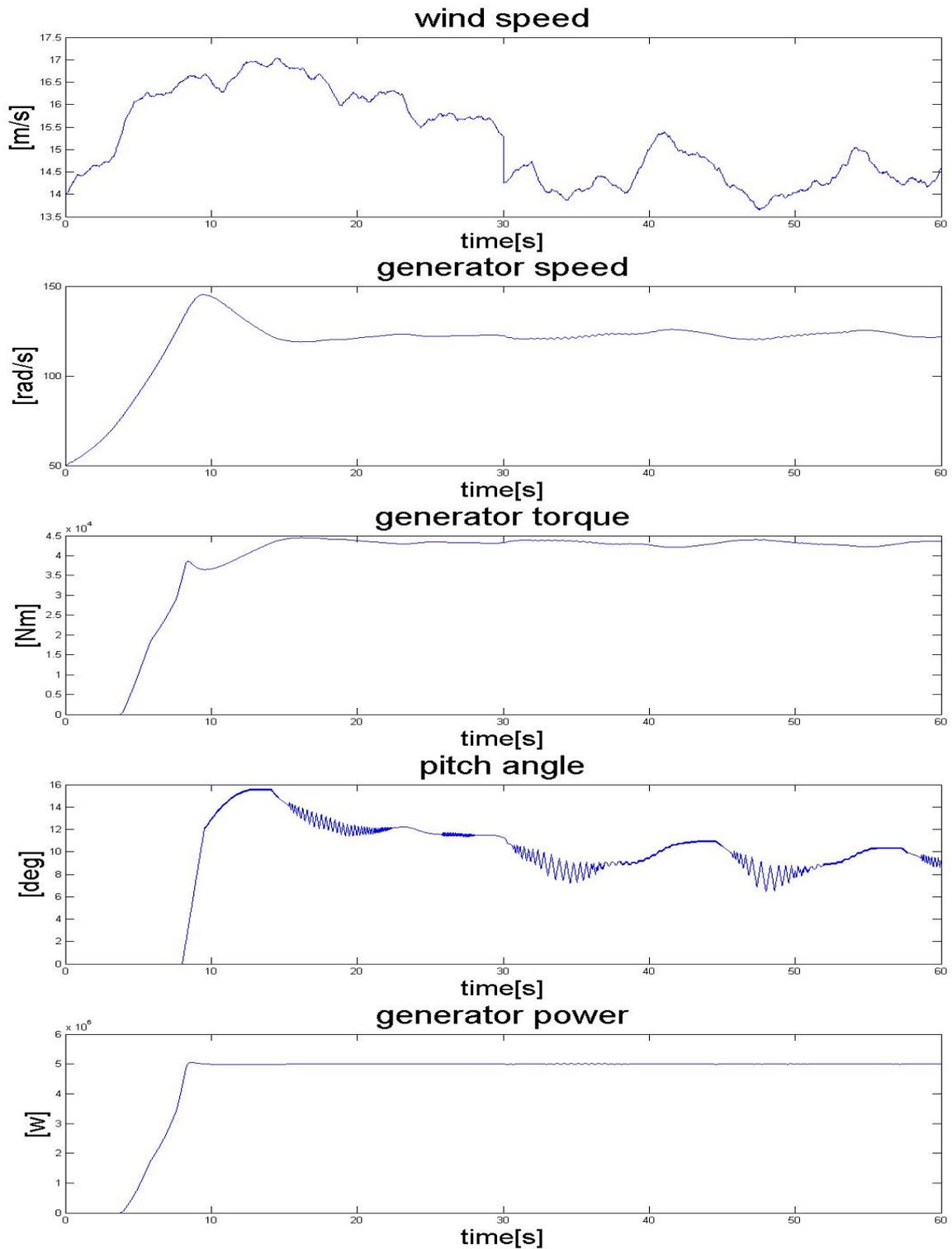


Fig. 21 Simulation Results of Wind Speeds including Tubulences
(Above rated Wind Speeds)

제 5 장 결론

풍력 터빈 시스템은 대체적으로 약 20년에서 25년 정도의 수명을 가지고 있는데 이때 불어오는 바람에 대해 잘 견디고 품질 좋은 전력을 생산할 수 있도록 설계되어야 한다. 최근 들어 풍력 터빈 시스템은 대형화되고 있는 추세이다. 하지만 그 구조물은 크기에 비해 경량화 되어가는 방향으로 이루지고 있다. 구조물의 크기가 커지면 고품속일 경우 구조물에 가해지는 하중에 의해서 위험한 상황을 발생시킬 수 있다. 이 때 풍력 터빈의 블레이드의 피치각을 조절함으로써 이러한 하중을 줄일 수 있고, 안정적인 운전을 할 수 있게 된다. 즉, 일정 바람 에너지를 흡수하지 않고 흘려보낸다. 이러한 피치 제어에는 여러 종류의 제어 방법들이 존재한다. 본 논문에서는 여러 기법중 PID 제어를 설계하여 적용하였다. 이를 위한 풍력 터빈 시스템은 5MW급으로 구성하였다.

PID 제어기의 설계에 앞서 풍력 터빈 시스템을 수학적으로 모델링을 하고, Matlab/Simulink를 이용한 모델을 구성하였다. 공기 역학적인 모델은 5MW급에 맞게 설계되었고, 드라이브 트레인 모델은 Two-Mass 모델로 구성하였다. 그리고 발전기 모델은 단순히 발전기 효율을 가정하여 효율지만 곱한 형태로 나타내었다. 이는 본 논문의 목적이 PID제어를 설계하고 적절하게 제어되는 가를 살펴보는 것이기 때문에 세부적인 발전기 모델은 필요하지 않다고 생각하였다. 그리고 피치 제어는 풍력 터빈 시스템의 공기 역학적인 특성이 비선형적이기 때문에 Taylor 시리즈를 이용하여 발전기 토크와 공기 역학적 토크를 나타내고 이를 운동 방정식에 대입하여 특성 방정식을 유도하였다. 여기서 최적화된 P gain과 I gain을 구한 후 이 두 가지 gain을 가지고 나머지 D gain을 찾았다.

시뮬레이션 결과를 통해서 PID제어가 적절하게 이루어짐을 확인 할 수 있다. 난류 풍속을 적용한 시뮬레이션에서 정격이상의 풍속에서 풍속이 갑자기 떨어지는 구간에서 피치제어가 과도하게 동작하는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 시스템의 안정도에 부정적인 영향을 줄 수 있다. 이는 아직 해결하지 못한 부분으로 추후의 연구를 통해서 해결할 예정이다.

참고문헌

- [1] S.Rehman, I.M. El-Amin, F.Ahmad, S.M. Shahid, A.M. Al-Shehri, J.M. Bakhashwain, A. Shash, "Feasibility study of hybrid retrofits to an isolated off-grid diesel power plant", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol.11 pp. 635-653,2007
- [2] 박근현, "신재생 하이브리드 발전시스템의 최적 용량 설계에 관한 연구", 제주대학교, 2011
- [3] Hugo Chandler, "Wind Energy The Facts an Analysis of Wind Energy in the EU-25,Executivesummary," EWEA, 2004Ed.
- [4] Fernando D.Bianchi,Hernan De Battista,Ricardo J.Mantz,"Wind Turbine Control Systems", Springer, 2007.
- [5] Jeonggi Kim, Power Control of a MW Class Wind Turbine, 강원대학교 대학원, 2011
- [6] E.Hau, Windturbines:Fundamentals,Technologies,Application and Economics, Springer ,2nd Edition, 2005
- [7] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott, Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development, Technical Report NREL/TP-500-38060, 2009
- [8] 김호찬, 소형 풍력 발전 시스템에서의 제어 알고리즘 개선에 관한 연구(최종 보고서), 기초전력공학 공동연구소, 1998
- [9] Bir, G. and Jonkman, J., "Aeroelastic Instabilities of Large Offshore and Onshore Wind Turbines," Journal of Physics: Conference Series, The Second Conference on The Science of Making Torque From Wind, Copenhagen, Denmark, 28-31 August 2007, [online journal], Vol. 75, 2007, NREL/CP-500-41804, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory.
- [10] Hansen, M. H., Hansen, A., Larsen, T. J., Φye, S., Sørensen, and

Fuglsang, P., Control Design for a Pitch-Regulated, Variable-Speed Wind Turbine, Risø-R-1500(EN), Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory, January 2005.

감사의 글

대학원에 입학한지 어느덧 2년 반이 흘렀습니다. 대학교 4학년 때 우연히 풍력관련 수업을 들으면서 처음으로 풍력에 관심을 가졌고, 그 계기로 이렇게 풍력 특성화 대학원에서 2년 반 동안 좋은 교육 환경에서 공부를 할 수 있었습니다. 대학원에 있는 동안 참 많은 것을 보고, 많은 것을 듣고, 많은 것을 경험하였습니다. 제가 조금 더 성장할 수 있었던 시간이었습니다.

이 논문이 완성되기까지 아무것도 모르는 저에게 열성적으로 지도와 편달을 아끼지 않으셨던 강민제 교수님께 감사의 말씀을 전하고 싶습니다. 교수님의 그 가르침 하나하나 잊지 않고 간직하며 살겠습니다. 그리고 바쁘신 가운데서도 부족한 저의 논문을 자상하게 심사해주시고 아낌없는 조언을 해주신 김호찬 교수님과 김경연 교수님께 깊이 감사드립니다.

풍력 특성화 대학원과 학생들의 학업을 위해 물심양면 노력하시는 허종철 교수님께 감사드리며, 늘 학생의 입장을 대변해주시는 행정실의 김익선 실장님, 이창림 선생님, 김봄솔 선생님께 감사드립니다.

그리고 사랑하는 풍력 특성화 대학원 1기생에게도 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 여러분이 있었기에 웃음을 잃지 않으며 지낼 수 있었습니다. 그리고 신경회로망 연구실에서 같이 고생하면서 내 논문을 작성하는데 많은 도움을 줬던 민호에게도 고맙다는 말을 꼭 전하고 싶다. 또한 매일 매일 같이 먹고 자고 지금도 같이 생활하고 있는 공대 고시반 친구와 선배님과 후배들에게도 감사합니다.

마지막으로 저를 늘 걱정하시지만 믿음과 사랑을 아끼지 않는 우리 가족, 어머니, 아버지, 형, 형수님 그리고 멀리 제주도까지 건너와 내 옆에서 힘이 되어준 안나에게 감사의 마음을 전합니다.

2012년 8월