

工學碩士學位論文

소규모 풍력에너지 변환시스템의
모델링과 제어에 관한 연구

指導教授 洪淳一

이 論文을 工學碩士學位論文으로 提出함



2005년 2월

釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

金實根

金實根의 工學碩士 學位論文으로
認准함

2004 年 12 月

主 審 工學博士 朴 瀚 錫



委 員 工學博士 禹 炅 一



委 員 工學博士 洪 淳 一



목 차

목차	i
표목차	iii
그림목차	iv
제 1 장 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 국내외의 기술수준	4
1.3 연구목적 및 필요성	7
1.4 연구 내용	10
제 2 장 풍력발전 시스템	12
2.1 풍력발전 시스템의 구성	12
2.2 풍력터빈 모델	16
2.3 유도 발전기 모델	23
2.3.1 농형 유도기 원리	23
2.3.2 PWM 인버터제어	25
2.3.3 유도발전기 모델	28
제 3 장 동적모델과 제어	35
3.1 풍력에너지 변환 제어시스템의 구성	35
3.3 WECS의 전 동적 모델	36

3.3 관성 변화를 고려한 제어	44
제 4 장 컴퓨터 시뮬레이션	46
4.1 시뮬레이션 및 실험 모델	46
4.2 시스템과 제어 파라미터	48
4.3 피드백 파라미터	50
4.4 시뮬레이션 결과	53
4.5 파라미터 변화에 따른 감도	58
제 5 장 결 론	60
참 고 문 헌	62
부 록 : 전력 변환 계수	65

표 목 차

표 4.1 유도기 정수 및 터빈 정수	49
----------------------------	----

그림목차

Fig. 2.1 Wind energy conversion system employing an inverter fed induction generator	13
Fig. 2.2 Outline of wind generator system	15
Fig. 2.3 Power coefficient	17
Fig. 2.4 Coefficient	18
Fig. 2.5 model of wind turbine with oscillatory torque.	20
Fig. 2.6 captured power vs. rotational speed of the wind turbine	21
Fig. 2.7 Efficiency gain due to speed wind turbines.	22
Fig. 2.8 Torque-speed characteristic of induction machine	24
Fig. 2.9 Transistorized single phase bridge inverter	26
Fig. 2.10 Output voltage a.c and d.c current waveform for a PWM inverter .	27
Fig. 2.11 Steady state equivalent circuit of an induction machine	28
Fig. 2.12 Desired power speed relationships for induction machine.	34
Fig. 3.1 Block diagram of overall wind energy conversion system using squirrel cage induction motor.	36
Fig. 3.2 The control system	37
Fig. 3.3 Plot of against	43
Fig. 4.1 Laboratory experimental setup.	47
Fig. 4.2 The measured turbine power coefficient() of the winder	49
Fig. 4.3 Slip plotted against turbine speed for optimum wind power input.	51
Fig. 4.4 Response of system to a step change in the wind speed for different values of the equivalent inertia	54
Fig. 4.5 Results of simulation for a stochastically varying wind speed.	56

Fig. 4.6 Electrical power(PE), ω , and motor speed57

Fig. 4.7 Input wind power plotted against wind speed for two difference values
of machine resistance.59

Modeling and Control of a Small Wind Energy Conversion System

Sil-Keun Kim

Department of Electrical Engineering

Graduate School of Industry

Pukyong National University

Abstract

The dynamical model of a novel low power wind energy conversion system consisting of a wind turbine, an induction generator, a PWM(pulse width modulation) A.C. inverter and a D.C. battery group is obtained. A feedback control law is developed to provide optimum power conversion and arbitrarily fast responses at steady state. The control structure consist of feedback loop with the shaft speed and by including a term concerning the accelerating of the shaft speed. The feedback law does not require measurement of the wind speed and therefor is suitable, simple for real applications.

Before implementing the feedback law in an actual system it is very useful to perform a detailed computer simulation of a 1kVA system to investigate its

performance in real environment.

In the simulation results, it is shown that the system remains stable for wind speed variations that are not both large and fast at the same time. The response of the system shows robustness for variations of a initial moment and remains stable for variations of machine resistance.

Simulation studies on a test system verify the theoretical results and it is very useful to perform a Small Wind Energy Conversion System.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경

풍력발전 시스템은 가장 환경 친화적이며 에너지 재생능력이 뛰어나서 석유에너지 발전소와 경쟁할 만하고 원자력 발전보다 경제적이다. 풍력의 역사는 2세기보다 오래 되었지만 풍력을 이용한 발전은 금세기에 들어 관심을 받기 시작했다. 그러나 지난 20년 동안 풍력은 석유에너지나 원자력에너지로 대체할 만한 에너지로 심각하게 받아들여지고 있다.

전통적으로 풍력발전 시스템은 농형 유도발전기나 동기발전기가 사용되어 다른 전원과 병렬운전 되거나 독립된 자율부하와 연결한 풍력터빈을 가변하여 정속운전하여 왔다. 최근 전력반도체 기술의 발전은 주파수 가변 구동기술을 촉진하게 되었고 아울러 가변 발전시스템의 수요에 적극 이용되고 있다.

풍력발전 시스템은 풍차의 설치가 지면에 대한 회전축의 방향에 따라 수평형 및 수직형으로 분류되고 주요 구성요소로는 날개(blade)와 허브(hub)로 구성된 회전자와 회전을 증속하여 발전기를 구동시키는 증속장치(gear box), 발전기 및 각종 안전장치를 제어하는 제어장치, 유압 브레이크장치와 전력 제어장치 및 철탍등으로 구성된다. 풍력발전 시스템에서 수평형과 수직형은 각각 특징 있으며 현재 실용화되어 있다[3, 4].

고정피치 풍력터빈은 얻어진 풍력을 제어하기 위해 가변속도에 의해 운전되

어야 한다. 가변속도 운전은 획득한 에너지의 증가나 감소에 대하여 제어의 유연성이 있어야 한다. 최근 풍력에너지의 효율적인 이용을 위하여 가변속도 풍력에너지 변환시스템(Wind Energy Conversion System)의 새로운 구성이 제안되고 있다[5,6].

풍력발전기는 항상 모든 방향의 바람을 마주보거나 등지는 방향을 유지해야 한다. 이런 이유 때문에 회전날개는 회전반 위에 설치되어 바람의 방향을 알려주는 감지기가 연결된 전동기에 의해 조정되도록 되어 있다. 회전날개를 수평축이 아닌 수직축에 설치하면 이 풍향문제를 완벽하게 해결할 수 있다. 수직축에 날개를 달면 바람이 어느 쪽에서 불어오건 아무 문제가 없다.

수직축 발전기는 풍력을 전력으로 전환시키는 무거운 발전기를 탑 위에 설치하는 대신 지상에 설치할 수 있고 풍향문제를 해결할 수 있는 이점이 있다. 따라서 수평축 발전기에 비해 회전날개가 압력을 적게 받게 된다. 수직축 터빈의 한가지 결점은 회전날개를 돌리려면 처음에 손이나 전동기로 구동시켜야 하는 경우가 있다는 것이다[6,7].

발전기를 풍속에 관계없이 일정한 속도로 회전시킬 필요가 있으므로, 풍속에 따라 풍차날개의 기울기를 바꾸는 등의 제어를 해야 한다. 바람이 없을 때는 발전할 수 없으므로, 정전되는 것을 피하기 위해 축전지나 디젤발전기도 같이 설치해 두는 경우가 많다. 다만 이 경우는 직류발전이 되는데, 그 용량은 수십 W에서 수십 kW 정도이다.

풍력발전 시스템의 구성은 풍력터빈, 유효 또는 무효 VAR (Volt Ampere

Reactive)를 갖는 농형 유도발전기와 컨버터, 인버터를 통해서 교류선로의 정전압 정주파수 전력을 발전하는 것으로 제안되고 있다[5,6]. 최근 가변 reluctance 기기와 이중 고정자전압 권선형유도기를 풍력발전 시스템에 적용한 것이 제안되고 있다[7].

전통적 전력변환기 구성의 주된 문제는 선로의 역율이 저하하고 기기의 선로전류에 고조파 왜곡이 발생한다는 것이다. 최근 IEEE Standard 519 에서는 고조파 유입을 엄격하게 제한하고 한다. 그래서 고조파 기준과 저역율 문제를 만족하게 하기 위해서 능동형태의 VAR과 고조파 보상기를 추가적으로 설치하고 있다.

풍력발전이란 공기의 유동이 가진 운동에너지의 유체역학적(aerodynamic) 특성을 이용하여 회전자(rotor)를 회전시켜 기계적 에너지로 변환시키고 이 기계적 에너지로 전기를 얻는 기술이다.

전력전자 기술에 의한 제어는 비용이 추가됨에도 불구하고 가변속 풍력 터빈의 총 에너지 출력은 더 크게 되어서 유지비용은 낮다[2]-[4].

풍력에너지는 바람의 속도와 방향이 자주 바뀌고 지속적이지 못한 경우도 있어 동력원으로 전환에 많은 기술들이 요구되어 이것의 연구가 활발히 진행되고 있다[7,8].

1.2 국내외의 기술수준

국내에서는 1970년대의 유류 파동 이후 풍력발전 연구를 시작하였는데, 1975년도에는 한국과학기술원(KAIST)에서 경기도 화성군 잇섬에 설치한 2kW급 풍력발전기가 국내 풍력발전기의 효시이며, 1990년대 이전까지 약 20여대의 소형 풍력발전기(1-14kW)가 단위전원공급용으로써 연구개발의 시제품으로 또는 외국으로부터 도입하여 설치되었으나, 지속적인 지원 부족이나 관리 소홀 등의 이유로 대부분 철거되어 뚜렷한 성과를 올리지 못한 상태이다.

최근 국내에서도 신뢰성을 이미 확보한 선진외국의 풍력시스템을 도입하여 풍력발전기에 대한 설치 운영 및 개발연구가 진행되고 있는데. 한국에너지기술연구소가 제주 중분에 설치된 국내 최대의 250[kW] 급과 제주 월령에 설치된 100[kW]급, 30[kW]급 풍력발전기의 운전을 통하여 계통연계용 풍력발전기의 운전특성에 대한 연구를 수행하고 있고, 풍력발전기의 성능특성에 대한 각종 측정 및 분석작업도 병행하고 있다[1,2].

그러나, 앞서 언급한 바와 같이 한국과학기술연구원에서 20[kW]급 계통연계용 풍력발전기의 국산화 개발 연구를 수행하고 있으며, 한국화이바(주)에서는 300[kW] 다리우스형 풍력발전기를 연구 개발하여 국산화 하였고, 98년 현재수평축 500[kW]급 중형 풍력발전시스템개발을 진행중에 있으나 아직까지는 모두 연구개발단계에 머물러 실용화까지는 상당시일이 소요될 전망이다.

국내의 기술개발 현황은, 1단계 대체 에너지기술 개발사업으로 전국 64개

기상청 산하 기상관측소의 통계자료와 도서 및 내륙 일부지역의 측정 자료를 이용한 풍력자원 특성분석이 이루어 졌으나 지역적 조건에 크게 영향을 받는 풍력자원의 특성 때문에 아직 기초 통계자료의 정비가 미흡한 실정이다. 따라서 앞으로 풍력발전 유망지역에 대한 풍력자원의 정밀한 평가와 풍력단지 건설에 대한 타당성 평가사업이 지속되어야 한다.

풍력발전기 개발은 한국과학기술연구원이 1단계 대체 에너지 기술 개발 사업으로 20kW급 수평축 풍력 발전기의 국산화를 시도하였고, 2단계 사업에서는 복합 재료 전문 업체인 한국화이버(주)가 다리우스형(Darrieus) 수직축 300 kW급 풍력 발전기를 개발하여 시운전을 시도하여 본 결과에 의하면 성능과 신뢰성의 확보가 충분하지는 못하였으나, 본격적인 기술개발의 계기가 되었다.

풍력발전의 국산화와 병행하여 이용 기술을 개발하기 위한 목적으로 한국에너지기술연구소가 이미 신뢰도가 확립된 외국의 풍력발전 시스템의 도입과 국내 시스템운용기술을 접목시켜 제주 월령에 100 [kW]급 및 30 [kW]급, 20[kW]급 풍력 발전기를 여러 기 설치해 가동하고 있으며, 계통 연계형 풍력 발전기의 이용 기술개발과 성능과 운전 특성에 대한 각종 측정과 분석 작업을 수행하고 있다.

외국의 풍력발전 관련기술은 이미 실용화 단계이기 때문에 요소 기술 개발보다는 풍력 발전기의 저가화와 대형화 및 보급 확대에 치중하는 경향이 다. 많은 국가에서 경쟁적으로 풍력 발전기를 보급하고 있다.

현재 가장 많은 풍력발전기가 운전되고 있는 국가는 미국으로서 캘리포

니아의 대규모 풍력단지를 중심으로 현재 총 1,619[MW]용량을 지닌 2만 여대의 풍력발전시스템에서 연간 38억[kW]의 전력을 생산하고 있으며 시설추가에 박차를 가하고 있다. 미국은 AWEA(American Wind Energy Association)가 2000년도까지 약 100,000 MW 정도의 풍력발전기를 보급하기 위한 Wind Power 2000계획을 채택하여 추진하고 있다.

유럽 국가 중 독일은 2000년까지 1,000[MW]의 보급이 이루어질 전망이며, 영국은 950[MW], 덴마크는 750[MW]의 보급 확대가 예상된다. 또한, 2005년까지 영국이 2,200[MW], 독일이 1,550 [MW], 덴마크가 1,050[MW] 정도의 풍력 발전기를 보급할 계획이므로 2000년대 초에는 전세계 풍력 발전의 보급 규모가 9,200-14,000[MW] 정도에 이를 것으로 전망된다.

1.3 연구목적 및 필요성

최근 석유에너지의 안전성 문제와 환경문제로 풍력의 장점이 더욱 설득력 있게 받아들여지고 있다. 지구는 막대한 풍력 에너지 자원을 가지고 있고 잠재적인 풍력의 10%만 사용되어 진다면 세계의 전력 수요에 가까워질 것이다. 전 세계적으로 1700[MW]의 풍력 발전기가 설치되어 연 60억 [kwh]를 발전하고 있다. 2005년까지 700억[kwh]가 발전될 전망이다. 물론 풍력 발전의 주요 결점은 그것의 효율성이 다소 뒤지는 것이지만 전력의 수요 곡선을 만족하기 위해서는 풍력 이용 기술의 개발과 추가적인 자원이 공급되어야 한다는 것이다.

소규모 전력 시스템은 전기 통신과 무선 결합 시스템에서 충분히 D.C. 축전기에 전원을 제공할 수 있다. 이와 같은 소규모 풍력발전 시스템에서는 정상적인 풍력은 일반 부하와 축전기에 전원을 공급하지만 풍력이 부족하면 축전기에만 전력이 공급된다. 풍력에 의해 얻어진 A.C.발전기 출력전압을 D.C.로 정류하는 것은 D.C.발전기에 의한 것 보다 가격 면에서 싸고 유지 관리비가 적게 필요로 한다.

현재의 일반적인 추세는 고정자에 다이오드 브리지가 연결된 A.C. 동기 발전기를 사용한다. 발전기의 출력 전압은 계자 자속제어에 의해 조절하고 계자 전압은 D.C. 초퍼를 사용하여 제어한다. 이와 같은 구성의 중요한 결점은 풍속에 의존하는 여러 주파수에서 발전기가 구동해야 되기 때문에 저 주파수에서는 요구되는 자속밀도를 유지하기 위해서 매우 높은 D.C. 전압

이 요구된다. 이것은 기계의 자기 포화를 일으키고 결과적으로 시스템의 효율을 저하를 가져오게 된다. 그러나 이것은 공심(Air cored) 설계 발전기와 같은 특수한 기기를 사용함으로써 어느 정도 억제할 수 있지만(Eriksson and Ottosson 1983), 이와 같은 특수 제작은 시스템 비용 증가와 발전기의 대체를 어렵게 한다.

동기 발전기 사용의 두 번째 결점은 최적의 파워 변환 조건이 어렵다. 풍력 변환 시스템에서 가장 중요한 풍력의 최적화는 기계의 속도가 풍속에 정확히 비례하여 유지해야만 하는 것이다. 이것은 어려운 측정풍속의 피드백에 의한 방법이나 적응제어에 의한 계산에 의해 달성할 수 있다(Eriksson and Ottosson 1983), 결국, 다이오드 브리지에 의한 전력의 흐름은 단일 방향이기 때문에 동기 발전기는 필요할 때 전동기를 구동하기가 어렵다.

이러한 결점이 있는 동기 발전기에 대하여 풍력 에너지의 중요 변환 기기는 유도 발전기가 사용되고 있다. 이론적으로 유도 발전기의 속도는 다양한 풍속에 대하여 광범위하게 최대 전력 변환을 행할 수 있다.

전통적으로 풍력발전 시스템은 농형유도 발전기나 동기 발전기가 사용되어 다른 전원과 병렬운전 되거나 독립된 자율 부하와 연결한 풍력 터빈을 가변하여 정속 운전하여 왔다. 최근 전력 반도체 기술의 발전은 주파수 가변 구동기술을 촉진하게 되었고 아울러 가변 발전 시스템의 수요에 적극 이용되고 있다.

전력전자 기술에 의한 제어는 비용이 추가됨에도 불구하고 가변속 풍력

터빈의 총 에너지 출력은 더 크게 되어서 유지비용은 낮다[2~4].

풍력발전 시스템의 구성은 풍력터빈, 유효 또는 무효 VAR (Volt Ampere Reactive)를 갖는 농형 유도발전기와 컨버터와 인버터를 통해서 교류 선로의 정전압 정주파수 전력을 발전하는 것으로 제안되고 있다[5,6]. 최근 가변 Reluctance 기기와 이중 고정자 전압 권선형유도기를 풍력발전 시스템에 적용한 것이 제안되고 있다[7].

풍력터빈의 효율은 풍속에 따라 작용하는 터빈속도의 접선비인 팁 속도비 (Tip speed ratio) 의해 특징 지워지고 보통 효율이 최대가 되도록 제어하는 것이 바람직하다. WECS은 바람의 변동에도 불구하고 최적 팁 속도비를 유지하기 위해 터빈의 회전 속도를 제어하여 행한다.

풍력은 두 개의 다른 팁 속도비를 취할 수 있고 두 가지 다른 터빈 속도를 가진다. 그러므로 풍력터빈 동작은 정상영역과 엔진 정지영역이라 불리는 두 가지의 동작영역이 있다. 이 논문의 주제는 유도발전기를 이용한 WECS(Wind Energy Conversion System)의 풍력 조정을 제어하는 방법을 개발하는 것이다.

또한 유도발전기를 사용한 풍력발전 시스템에서 풍력터빈의 최대 효율 운전과 안정도를 증가시키기 위하여 터빈 속도 피드백과 가속도 피드포워드를 도입한 풍력제어 시스템을 제안하는 것이다.

1.4 연구 내용

풍력터빈의 효율은 풍속에 따라 작용하는 팁 속도비 (Tip speed ratio) 의해 특징 지워지고 보통 효율이 최대가 되도록 제어하는 것이 바람직하다. WECS은 바람의 변동에도 불구하고 최적치에 팁 속도비를 유지하기 위해 터빈의 회전속도를 제어하여 행한다.

발전출력은 풍속의 변화에 따라 변동하므로 이용 가능한 풍력의 변동을 보상하도록 터빈의 팁 속도비를 조정한다. 풍력은 두 개의 다른 팁 속도 비를 취할 수 있고 두 가지 다른 터빈속도를 가진다. 그러므로 풍력터빈 동작은 정상영역과 엔진 정지영역이라 불리우는 두 가지의 동작 영역이 있다.

본 연구의 목적은 풍력에너지의 효율적인 변환시스템의 개발이다. 풍력발전 시스템은 풍력터빈, 일반적인 농형유도기, PWM 인버터와 D.C. 배터리들로 구성된다.

이 논문에서는 유도 발전기를 이용한 WECS의 풍력조정의 제어방법을 개발하는 것이다. 또한 본 논문에서는 농형유도 발전기와 양방향 PWM 인버터를 가진 WECS 시스템을 모델링하고 이 모델에 기초하여 제어법칙을 제안하였다.

풍력변환 시스템은 모든 유효전력이 인버터를 통해서 유도기에 입출력되고 유도발전기는 병렬 연결된 축전지에 의해 여자되기 때문에 별도의 여자장치가 필요없고 여자가 되지않는 위험이 없다. 그리고 D.C.전압은 인버터의 기본과 출력 전압의 크기와 주파수에 의해 제어된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 1장은 풍력발전 시스템의 연구배경, 장점, 연구목적, 연구필요성, 연구개요를 나타내었다. 제 2장은 풍력발전 시스템의 구성과 구동에 대해서 간단히 설명하고 수직형 풍력터빈, 농형유도 발전기(Squirrel Cage Induction Generator) PWM, 인버터 등 개별 시스템의 수학적 표현과 근사 동적모델을 나타낸다.

제 3장은 제 2장에서 나타낸 모델에 기초하여 최대 전력 변환을 위한 간단한 피드백 제어법칙을 나타내고 안정상태를 검증하였다. 이 제어법칙은 터빈 축 속도와 가속도의 피드백에 의해서 행하고 실제 적용이 아주 쉽다. 축 가속의 궤환에 의해 시스템의 응답속도가 바라던 대로 조절할 수 있음을 보여준다. 또한 아주 작은 풍속의 변화에 대해서 시스템의 응답은 안정된 상태를 유지한다.

제4장은 1KVA 시스템에서 풍속 변화에 대하여 이론적으로 모델링 한 해석의 결과를 디지털 컴퓨터 시뮬레이션으로 타당성이 있음을 증명하고 풍속 변동이 좀더 실제적인 조건 아래 시스템에 적용할 수 있음을 나타내었다.

제 2 장 풍력발전 시스템

본 단원에서는 풍력발전 시스템(Wind Energy Conversion System) 을 구성하고 수직형 풍력터빈, 농형유도 발전기(Squirrel Cage Induction Generator) PWM, 인버터 등 개별 시스템의 수학적 표현과 모델을 나타낸다.

2.1 풍력발전 시스템의 구성

유도 발전기 출력은 컨버터에 의해 D.C. 전압 제어는 오래 전부터 사용되어 왔다. 여기서는 풍력 터빈에 의한 외부 에너지원에 의해서 구동되는 유도기에 의해 D.C. 전력 발생을 목적으로 사용한다.

Fig. 2.1은 풍력발전 시스템의 구성을 나타내고 농형 유도발전기, PWM 인버터, 풍차 및 속도 상승 기어 등으로 구성된다. 유도전동기를 이용한 유도발전기(IG)는 가변 주파수 AC 전력을 출력한다. IG는 독립하여 수분 동안 양 쪽 컨버터에 전원을 공급할 수 있는 DC 축전지(Battery)가 연결되어 있다. 그리고 2개의 PWM 컨버터를 경유하여 공용 주파수의 태양광 발전시스템에 병렬 운전된다.

또한 앞단의 전력 컨버터는 유도발전기출력을 직류로 변환하고 직렬로 연결되어 있는 인버터는 가변 주파수 AC 전력을 고정 주파수 AC전력으로 변환한다.

수직형의 풍력 터빈은 속도증가 기어를 통해서 농형 유도 발전기와 같은

축에 결합되어 있다. 발전기의 가변 주파수, 가변 전압의 전력은 PWM IGBT 정류기에 의해서 정류된다

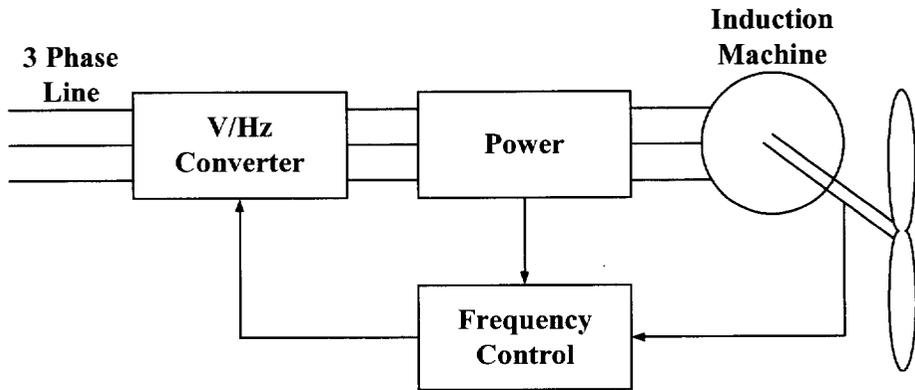


Fig. 2.1 Wind energy conversion system employing an inverter fed induction generator

수직형의 풍력 터빈은 속도증가 기어를 통해서 농형 유도 발전기와 같은 축에 결합되어 있다. 발전기의 가변 주파수, 가변 전압의 전력은 PWM IGBT 정류기에 의해서 정류된다.

또한 축전지는 발전기에서 요구하는 여자전원을 공급한다. 인버터는 축전지에서 DC 입력을 받아 유도발전기에서 50[Hz] 상용 주파수의 전력을 발전한다. 본 시스템의 장점은 다음과 같다.

- 농형 유도기는 구조가 간단하고 신뢰성이 있으며 일반적으로 널리 사용되고 있는 것이다.
- 기기 전류는 정현파이고 고조파 손실이 없다.
- 터빈 속도가 0에서부터 최고치 까지 연속적으로 발전하는 것이 가능하다.

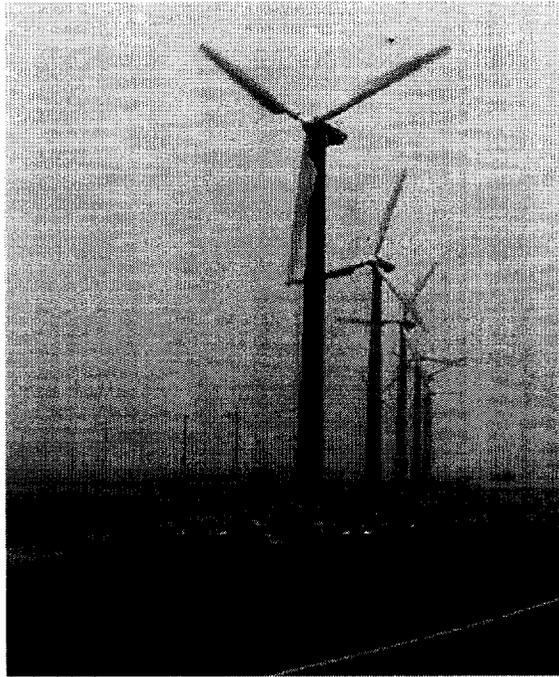
- 전력은 수직 터빈에 요구되는 기동을 위해 유도 전동기가 발전기가 동작하는 것을 가능하게 된다. 회생제동은 터빈을 신속하게 멈추게 할 수 있다.

- 속도 응답이 매우 빠르다.

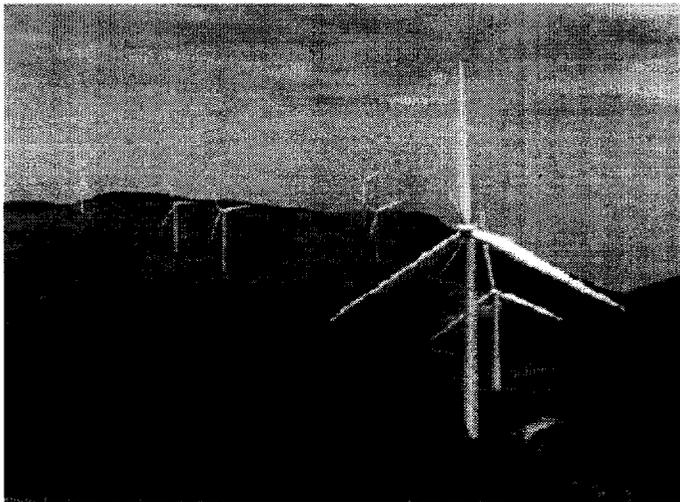
- 인버터는 VAR/고조파 보상기로 작동될 수 있다.

- 저속 동작은 낮은 전력 상태에서 가능하기 때문에 소음이 감소된다.

Fig. 2.2 (a)는 영국 블라이스에 세워진 세계 최대 해상풍력발전기이고 (b)는 강원도 대관령 삼양 및 한일목장내에 설치된 권선형유도 발전기의 풍차 발전 시스템을 보여주고 있다.



(a)



(b)

Fig. 2.2 Outline of wind generator system

2.2 풍력터빈 모델

풍력발전 시스템에는 수직 축의 풍력터빈을 사용한다. 수직 Darrieus 형은 지면에 위치할 수 있는 장점을 가지고 있고 기계적인 흔들림 방지장치 없이도 어떤 방향에서의 바람도 받아들일 수 있다. 이것은 고 출력에 가장 적합하다. 단점으로는 터빈이 스스로 기동할 수 없다는 것과 바람의 속도, 터빈 속도 및 터빈의 설계에 따른 요소에 따라 토크의 진동이 크다는 것이다.

풍력터빈 사양은 풍속 $8 [m/s] \sim 11 [m/s]$ 에서 정격 출력을 내는 것으로 한다.

바람으로부터 얻어진 풍력에 의해 터빈에 얻어지는 기계 에너지는 식 (2.1)과 같다

$$P_T(v_w, \lambda) = 1/2 \cdot \rho \cdot A C_p(\lambda) \cdot v_w^3 \quad (2.1)$$

여기서, C_p : 터빈 전력 변환계수 (Power conversion coefficient of turbine)

ρ : 공기 밀도

v_w : 풍속

A : 풍차 날개의 공기 접촉면적.

λ : 팁 속도비

식(2.1)을 간단히 나타내면 터빈의 기계적 출력은 식(2.2)이다

$$P_T = K C_p(\lambda) v_w^3 = K \frac{C_p(\lambda) \Omega^3 R^3}{\lambda^3} \quad (2.2)$$

여기서, $K = 1/2 \cdot \rho \cdot A$

여기서 팁 속도비 (Tip speed ratio) λ 는 비선형이고 식(2.3)과 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{v_w} \quad (2.3)$$

여기서, R 은 날개 길이이고 Ω 는 터빈 회전 속도이다.

식 (2.2)에서 터빈 전력변환 계수 C_p 는 터빈의 구조에 관계되고 그 특성은 Fig. 2.3와 같다.

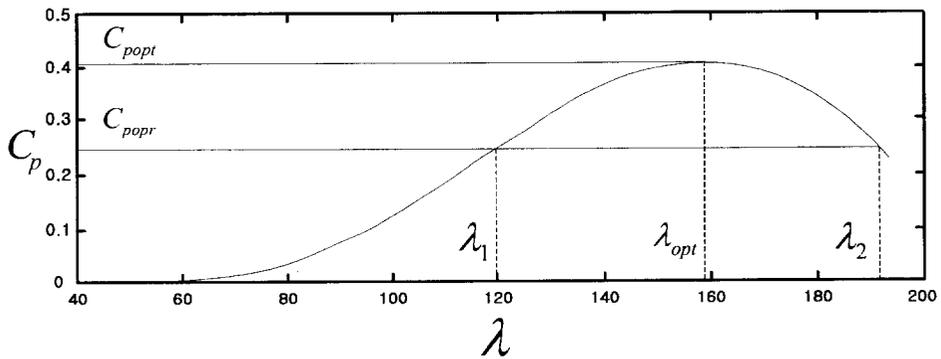


Fig. 2.3 Power coefficient $C_p(\lambda)$

Fig. 2.4는 전력변환 계수 C_p 의 미분함수를 나타낸 것이고 미분 계수함수 $\chi(\lambda)$ 는 식(2.4)과 같이 얻어진다.

$$\chi(\lambda) = \frac{dC_p(\lambda)}{d\lambda} \cdot \frac{\lambda}{C_p(\lambda)} \quad (2.4)$$

계수 함수 $\chi(\lambda)$ 는 정상 영역에서 음이고, 정지 영역에서는 양이며 최적 λ_{opt} 에서 0이다.

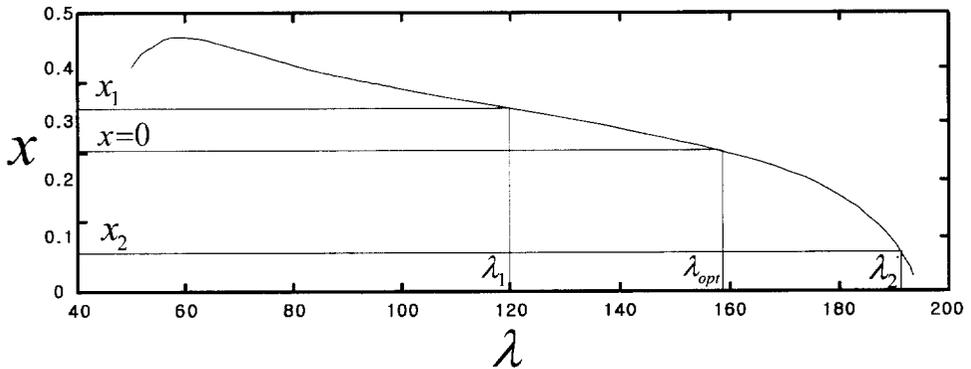


Fig. 2.4 Coefficient $\chi(\lambda)$

전력변환 계수 C_p 는 도표로 제시되지만 식 (2.5)과 같이 수학적으로 근사화 할 수 있다[2].

$$C_p(\lambda) = a(b/\lambda - 1) \exp(-c/\lambda) \quad (2.5)$$

여기서 a, b 및 c 는 날개의 기계적 구조에 관련된 파라미터이다. 전력 변환 계수 C_p 가 최고치에 도달하기 위한 팁 속도비의 최적 값은 식(2.5)를 미분하여 식 (2.6)으로 계산 할 수 있다.

$$\lambda_0 = cb/(b+c) \quad (2.6)$$

그러므로, 임의의 풍속 v_w 에서 풍력으로 최대 출력을 내기 위해서는 가능한 한 축 속도는 $\Omega = \frac{\lambda_0 v_w}{R}$ 값으로 유지해야 한다.

수직 터빈의 유체역학적 토크는 식(2.7) 같다.

$$T_T = C_p(\lambda) \cdot \left[0.5 \frac{\rho \pi R^3}{\eta_G} \right] \cdot v_w^2 \quad (2.7)$$

η_G : 치차의 속도상승비

$C_p(\lambda)$ 는 Fig. 2.3에 나타낸 것과 같이 진동함수 임으로 터빈의 진동 토크는 터빈 각속도의 제1, 제2, 제4 고조파를 포함한 식(2.8)와 같이 표현된다.

$$T_{osc} = T_m \cdot [A \cos(\Omega) + B \cos(2\Omega) + C \cos(4\Omega)] \quad (2.8)$$

여기서 A, B, C 는 상수이다.

Fig. 2.5은 진동토크를 가진 터빈 모델의 블록 다이어그램을 나타낸다.

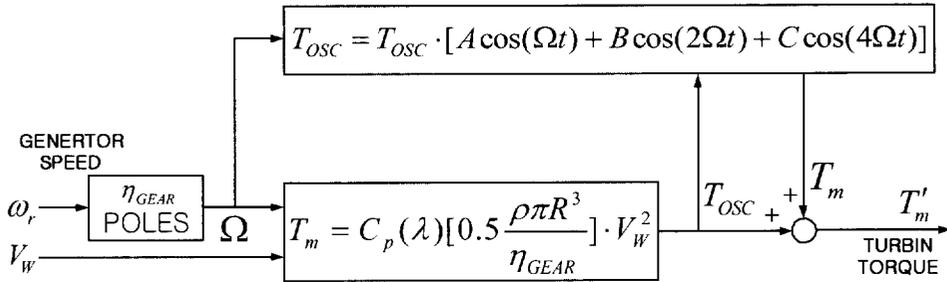


Fig. 2.5 model of wind turbine with oscillatory torque.

Fig. 2.6은 각 풍속에 대한 터빈의 토크/회전속도 곡선의 전형적인 형태를 나타낸다. 풍력발전 시스템의 토크/회전속도 특성곡선은 터빈이 역방향 회전하는 경우를 제외하면 송풍기 시스템의 특성과 유사하다. 즉, 토크는 제곱 법칙특성 $T_T = K\Omega^2$ 이고 출력은 세제곱 법칙특성 $P_T = K\Omega^3$ 을 따른다.

전형적인 $C_p(\lambda)$ 의 특성은 최적 팁 속도비 λ_o 에서 최대치 $C_p = C_{popt}$ 를 나타내므로 임의의 풍속에서 이용할 수 있는 풍력을 최대로 하기 위하여 제어 시스템은 $\lambda = \lambda_o$ 의 조건을 만족하도록 회전 속도(유도발전기 슬립)를 조정해야 한다.

만약, 이용할 수 있는 풍력이 희망하는 풍력보다 낮은 풍력 P_R 을 얻는다면, 전력 계수는 $C_{pR} < C_{popt}$ 으로 낮아질 것이다. 따라서 풍력 터빈은 두 가지 가능한 팁 속도비 $\lambda_1 < \lambda_o$ 또는 $\lambda_2 > \lambda_o$ 조건 중 하나에서 동작한다. 그러

므로 $\lambda > \lambda_0$ 조건의 정상 운전 영역과 $\lambda < \lambda_0$ 조건의 정지 영역인 두 개의 동작 영역이 있다.

일정 풍속 선은(일 점 세선) 특성곡선 집합에 대하여 풍속이 최대 풍력이 발생하는 영역을 나타내고 있다. 이와 같이 풍속의 크기에 따라 터빈속도(TRS)의 최대출력을 내는 점이 변화고 희망한 최대 토크 점으로부터 벗어나게 된다.

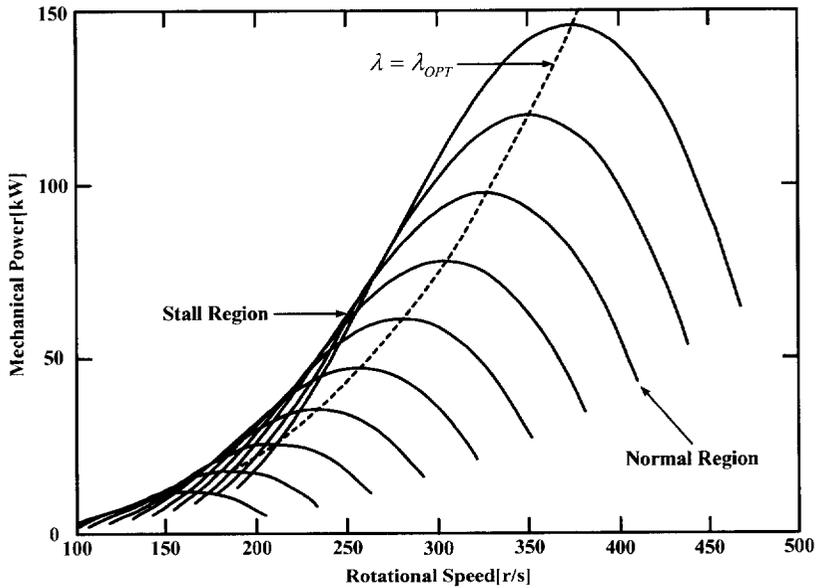


Fig. 2.6 captured power vs. rotational speed of the wind turbine for wind velocities.

이 그림은 임의의 풍속에 대하여 최대 발전기 출력이 발생되도록 풍력터빈 시스템이 제어되어야 하는 것을 알 수 있다.

데쉬 라인은 $\lambda = \lambda_o$ 에서 최대 풍력 효율의 동작점을 나타낸 것이다. 데쉬 라인의 오른쪽($\lambda > \lambda_o$ and $\chi > 0$)은 정상동작 영역이고 왼쪽($\lambda < \lambda_{opt}$ and $\chi > 0$)은 터빈 정지영역이 된다. 정상동작 영역은 강풍에 고속 회전속도로 운전되는 특성을 나타내고 WECS의 한계 속도에 의해 제한된다.

본 연구의 목적은 이러한 주제 하에 제어시스템을 구축하는 것이다.

Fig. 2.7은 풍력터빈의 피치 제어에 의한 풍력에너지 변환 특성을 나타내고 이것의 제어에 의해 10%의 에너지 변환 개선이 가능한 것을 나타내고 있다.

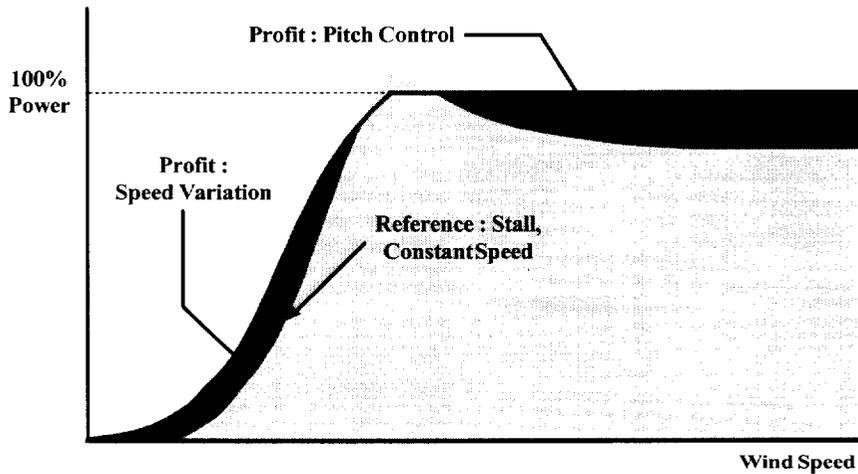


Fig. 2.7 Efficiency gain due to speed wind turbines.

2.3 유도 발전기 모델

2.3.1 농형 유도기 원리

농형 유도전동기는 회전자 권선이 단락되어 있고 고정자의 유도작용에 의해 전원을 공급받는다. 고정자 권선에 직접 3상 전원이 공급된다. 고정자에 공급된 전원에 의해 동기속도 $n_1 = 120f_1/P$ 로 회전하는 일정 공극자속 Φ 이 생기고 전동기는 이 동기 속도보다 수 % 적은 속도 n 로 회전한다.

그 결과 회전자 유기기전력 (e.m.f)의 주파수는 $f_2 = sf_1$ 이고 슬립 s 는 $s = f_2/f_1 = (n_1 - n)/n_1$ 이다. 그리고 회전자 전류 i_2 는 (e.m.f) 보다 회전자 위상각 ϕ_2 만큼 뒤진다.

이 때 발생 토오크는 식(2.9)과 같다.

$$T = K\Phi i_2 \cos \phi_2 \quad (2.9)$$

Fig. 2.8은 일정 주파수의 3상 전원을 공급하여 구동할 때 유도기의 토오크-속도특성을 나타낸 것이다. 동기 속도에서는 토오크가 0 이고 슬립이 적을 때는 거의 선형적으로 감소하고 있는 것을 알 수 있다.

회전자 슬립 주파수가 증가할 때 회전자 누설 리액턴스 크게되고 회전자 임피던스와 위상각 ϕ_2 가 증가한다. 슬립의 증가에 따라 토오크는 최대 토오크(이것을 Breakdown torque라 한다) 에 도달하고 이후 급격히 감소하게 된다.

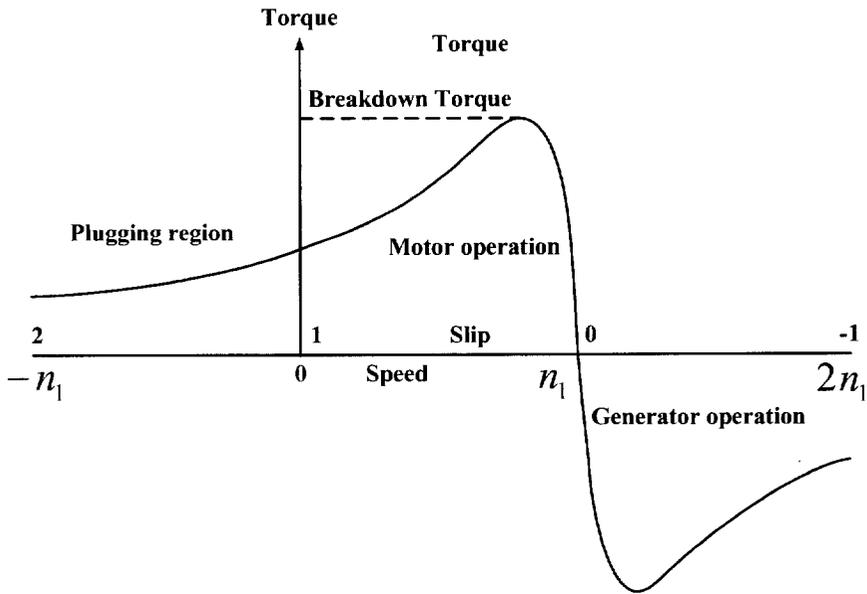


Fig. 2.8 Torque-speed characteristic of induction machine
at constant voltage and frequency

유도전동기의 슬립 s 는 언제나 $0 < s < 1$ 의 범위에 있고 항상 정(+)의 값을 갖는다. 지금 3상 유도전동기의 고정자를 전원에 접속한대로 다른 원동기(풍차)로 회전자가 고정자가 만드는 회전자계의 회전방향과 동일 방향으로 동기속도 n_s 이상의 속도 n 로 회전시켜 주면 슬립 s 는 부(-)의 값을 갖는다.

슬립 s 가 부(-)가 되면 회전자 권선은 전동기의 경우와 역으로 회전자속을 끊고 그 유도기전력과 전류의 방향은 회전자속의 방향에 대하여 역으로 된다.

따라서 회전자 전류와 회전자속에 의한 토오크의 방향은 전동기의 경우

와 역으로 되므로 원동기에서 회전자에 전달되는 기계적 입력은 전기적 출력으로 되어 고정자에서 전원으로 되돌려 주는 것으로 되어 유도발전기가 된다.

2.3.2 PWM 인버터 제어

Fig. 2.9 은 유도발전기에 공급되는 PWM 인버터이고 Fig. 2.10은 PWM 제어에 의한 인버터의 각 전압 전류파형을 나타낸 것이다. Fig. 2.10(a)는 단순한 PWM 전압파형 v_{ac} 를 나타내고 Fig. 2.10(b)는 일정 D.C. 전원전압이 공급될 때 흐르는 정현파의 전류 i_{ac} 를 나타낸 것이다. Fig. 2.10(c)는 트랜지스터와 플라이휠링 다이오드의 도통 타임차트를 나타내고 Fig. 2.10(d)는 이 때 선로 전류 I_{ac} 의 파형을 나타낸 것이다.

그림의 전압과 전류파형의 간단한 분석에서 발생전력은 식(2.10)과 같이 계산된다.

$$P_G = V_s I_s \cos \theta \quad (2.10)$$

V_s 와 I_s 는 정현파 고정자의 전압과 전류의 실효치 이고, θ 는 전압과 전류 사이의 위상각이다. 실제로 고성능 PWM 인버터는 기본파보다 높은 스위칭 주파수에 의해 제어되기 때문에 기기의 전류는 정현파로 가정할 수 있다. 그러므로 실제로 발생하는 전력은 식 (2.10)과 같이 나타낼 수 있다.

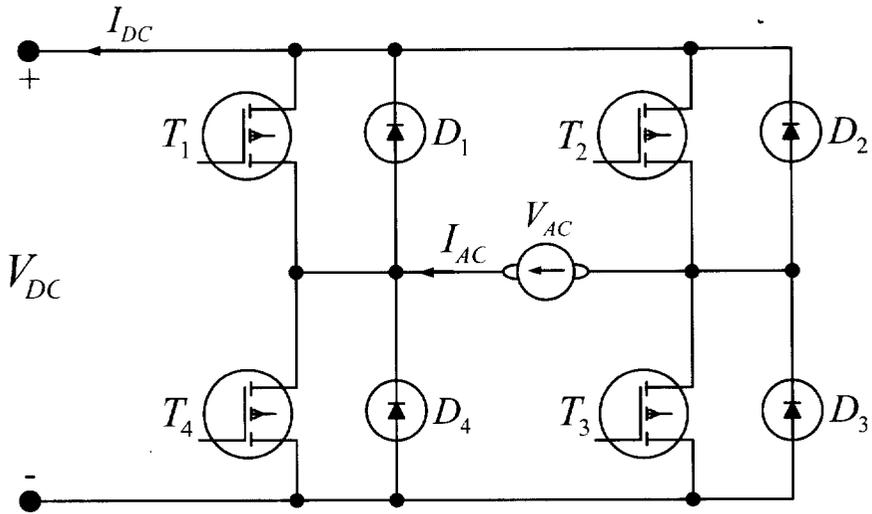


Fig. 2.9 Transistorized single phase bridge inverter

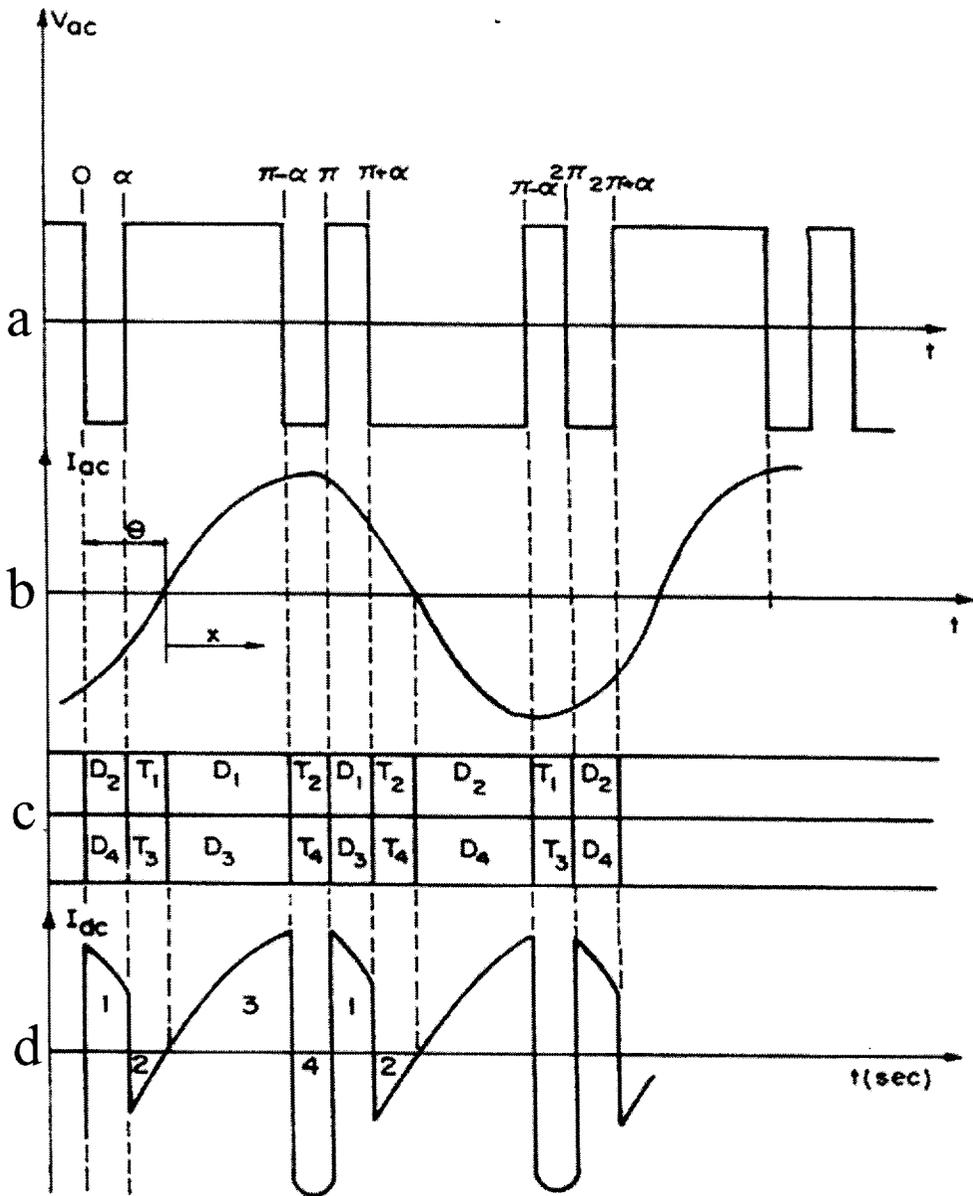


Fig. 2.10 Output voltage a.c. and d.c. current waveform for a PWM inverter with sinusoidal output current

2.3.3 유도발전기 모델

유도발전기 시스템은 충분히 큰 관성을 가지고 축 속도의 변화는 유도기의 전기적 시정수에 비해 빠르지 않다고 가정하고 철손은 무시한다. 이러한 가정아래 Fig. 2.11은 정상상태에서 정현파 전류에 대한 유도기의 T형 근사 등가회로 모델이다.

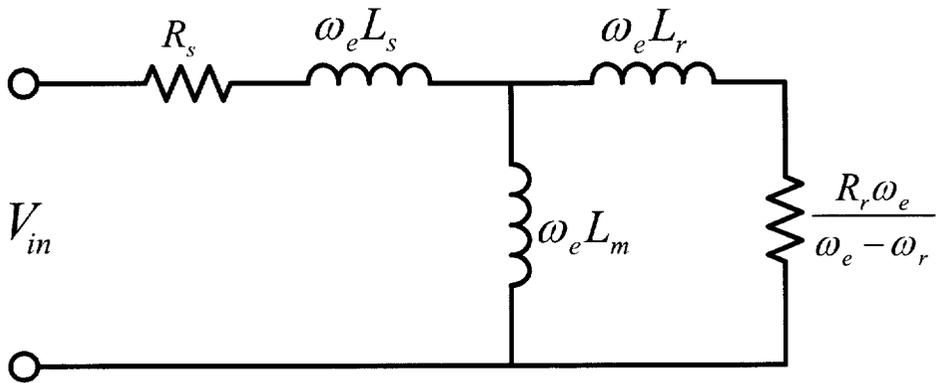


Fig. 2.11 Steady state equivalent circuit of an induction machine

여기서,

E_0 : 공극 유기 전압 E_1 : 1차 유기 전압

f_s : 슬립 주파수 f : 전압 주파수

유도기에서 실제로 발생된 전력은 발생 전원의 주파수에 대하여 고정자 전압이 한계를 넘으면 철심의 자계포화 현상을 초래하게 되므로 이것을 일정히 유지해야 한다.

그림 2.11의 등가회로에서 기본파 성분만을 고려하면 공극 유기 전압은

식 (2.11)과 같이 표현된다.

$$E_0 = 2\pi f \cdot \frac{M^2}{L_r} \cdot I_0 = \left(\frac{M}{L_r}\right)^2 \frac{R_r}{s} i_r \quad (2.11)$$

식(2.11)을 변형하면 식 (2.12)이다.

$$\frac{E_0}{f} = 2\pi \frac{M^2}{L_r} \cdot I_0 \quad (2.12)$$

식(2.12)에서 $\frac{E_0}{f}$ 을 일정하게 유지시키면 철심의 자계 포화현상이 생기지 않고 최대 토오크 τ_{\max} 는 속도의 변화에 관계없이 일정하게 된다. 그러나 공급 유기전압 E_0 나 1차 유기전압 E_1 을 검출하기 어렵기 때문에 전동기의 1차 단자전압 V 에 대하여 $\frac{V_s}{f}$ 일정하게 (여기서 f 는 전원 주파수를 의미) 유지한다. $\frac{V_s}{f}$ 일정 제어를 행하면 $R_s i_s$ 전압 강하가 발생하기 때문에 일정전압을 얻기 위해서는 $R_s i_s$ 강하분 만큼 보상해야 하는 결점도 있다.

유도기의 발전에서 자속의 포화현상이 생기지 않기 위해서는 기계의 정격 전압-주파수비 즉, 고정자 전압-주파수의 비를 일정하게 유지해야 한다. 그러므로, V/Hz 일정제어를 행하여야 한다. V/Hz 일정제어에서 발생 전원 주파수 f 일 때 고정자 전압은 식(2.13)으로 선택된다.

$$V_s = (V_0/f_0)f \quad (2.13)$$

여기서, V_0 와 f_0 는 고정자 정격 여자전압과 그 주파수이다.

슬립이 적을 때 고정자 전원 주파수는 식(2.14)로 근사화 할 수 있다.

$$f = \frac{1}{2} P \eta_G \Omega = N \Omega \quad (2.14)$$

여기서, Ω 는 터빈 축 속도, P 는 극수, η_G 는 속도증가 치차비,

$$N = \frac{1}{2} P \eta_G \text{이다.}$$

등가회로와 식 (2.10)를 이용해서 3상 유도발전기에서 발생하는 전력은 슬립 s 의 작은 값에 대하여 식(2.15)으로 근사할 수 있다.

$$P_G = -3(V_s^2/R_r)s \quad (2.15)$$

여기서 R_r 은 회전자 저항이고 s 는 슬립이다. 마이너스 부호는 슬립이 부(-)값을 가짐으로써 전력은 정의 값을 나타내게 한다.

식(2.15)에서 발생전력은 고정자 전압 V_s^2 와 슬립 s 의 곱에 의해서 발생 되는 것을 알 수 있다. 그리고 최대 발전 효율은 슬립을 가능한 한 작게 유지해야 하는 것을 쉽게 알 수 있다.

또한 전류로 나타내면 발생전력은 식 (2.16) 이다.

$$P_G = -3I_r^2 R_r \frac{\omega_r}{(\omega_e - \omega_r)} \quad (2.16)$$

여기서, ω_e 공급 전압 각속도

ω_r : 회전자 각속도

그리고 치차에 연결된 터빈과 발전기 사이의 축속도와 발전기 회전자 속도는 식(2.17)의 관계가 된다

$$\omega_r = \frac{P}{2} \eta_G \Omega \quad (2.17)$$

여기서 η_G : 치차비

식 (2.15)에 식(2.13), (2.14)을 대입하면 발생된 전력은 식(2.18)와 같이 표현된다.

$$P_G = -3(V_0/f_0)^2 (N^2/R_r) \Omega^2 s \quad (2.18)$$

기계의 동적 상태는 이상적인 동작을 하고 있다는 가정 하에서, 정상상태에서 발전기 토크 계산은 식(2.19)과 같다[11].

$$T_G(\Omega, \omega_e) = \frac{3 \cdot (V_s/\Omega)^2 \cdot s \cdot \Omega \cdot R_r}{(s \cdot R_s + R_r)^2 + (s \cdot \omega_e \cdot (L_s + L_r))^2} \quad (2.19)$$

여기서, V_s : 고정자 전압

R_s, R_r : 고정자 및 회전자 권선 저항

L_s, L_r : 고정자 및 회전자 권선의 누설인덕턴스

s : 발전기의 슬립이다.

ω_e : 전원 각속도

그리고 터빈 기계적 입력과 발전기 출력은 다음의 관계가 성립한다.

$$P_G = \eta \Omega P_T \quad (2.20)$$

발전기 권선에 의한 손실은 WECS의 최대 효율뿐 만 아니라 최적 톱 속도비에도 영향을 미친다. 발전기의 효율은 $\eta = P_G/P_T$ 이고 여기서, P_G 는 발전기의 전기적 출력이다. 터빈출력 $P_T = \Omega \cdot T_T$ 는 발전기의 기계적 입력이다. 전기적 출력은 $P_G = \omega_e \cdot T_T$ 이기 때문에 발전기의 효율은 식(2. 21)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{\omega_e}{\Omega} \quad (2.21)$$

이러한 관점에서 발전기의 변환 효율을 고려한 WECS의 전력 변환 계수 (Power conversion coefficient)는 $C_E = \eta \cdot C_p$ 로 정의하고 $\chi_E = (\lambda/C_E) \cdot \partial C_E/\partial \lambda$

으로 정의한다. 이것들의 근사적 계산은 부록 A에 나타내었다.

WECS의 전력 변환 계수 C_E 는 팁 속도비 λ_{opt} 에서 최대이고 $x_E=0$ 이다. WECS의 최적 팁 속도비 λ_{opt} 는 터빈의 팁 속도비 보다 약간 크다 ($\lambda_{opt} > \lambda$). 그러므로 λ 는 정상 영역과 정지 영역에서 x_E 의 부호에 따라 각각 $\lambda > \lambda_{opt}$ 또는 $\lambda < \lambda_{opt}$ 이다.

풍력터빈 운전에서 중요한 사항은 터빈이 한계 속도와 정격 출력 내에서 운전하는 것이고 유도발전기는 이러한 조건을 만족하도록 제어해야 한다.

Fig. 2.12는 유도발전기의 희망하는 출력과 터빈 속도의 관계를 나타낸 것이고 속도한계와 출력한계를 보여 주고 있다. 정상운전모드는 주어진 운전 점에 대하여 최대 C_p 가 되도록 제어하는 영역이다.

발전기가 희망하는 출력을 발생하기 위해서는 정상운전모드에서 속도가 점점 증가 할 때 터빈속도는 한계속도에 도달하도록 제어되어야 한다. 이 정상모드 영역에서 발전기 주파수는 일정하게 유지되고 회전속도는 슬립 증가만큼 증가 할 수 있다.

풍속이 연속해서 상승하면 시스템은 전력변환 한계에 접근할 것이다. 발전기의 주파수가 감소하는 현상이 생길 때 터빈 속도는 서서히 감소할 것이다.

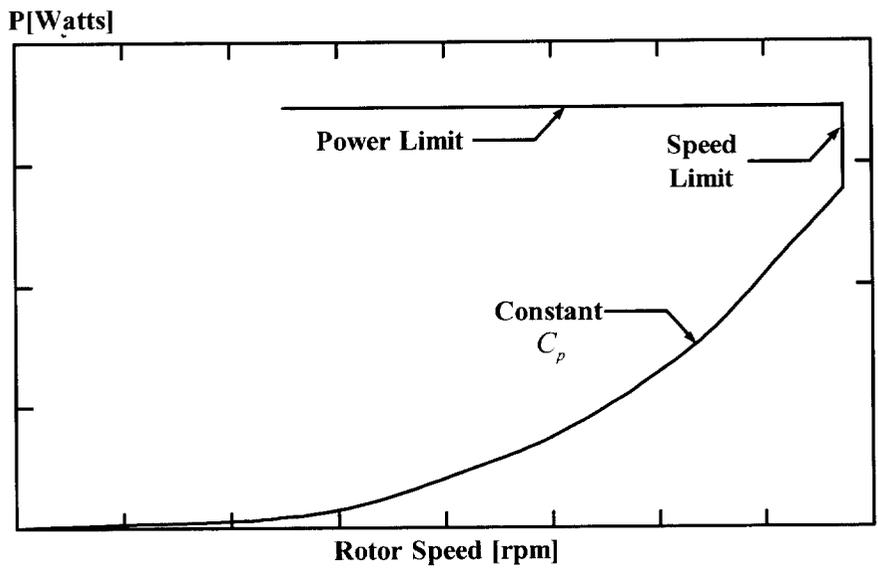


Fig. 2.12 Desired power speed relationships for induction machine.

제 3 장 동적모델과 제어

본 단원은 풍력 에너지 변환 피드백 제어 시스템의 구성을 나타내고 제어법칙을 제안한다. 그리고 제어 시스템의 동적 모델을 나타내고 해석한다.

3.1 풍력에너지 변환 제어시스템의 구성

Fig. 3.1 은 유도전동기를 이용한 WECS의 구성을 나타낸 것이다. 이 장치의 발전 전압은 정지형 변환기의 주파수 제어 즉, 유도기의 동기속도 제어에 의해 행하여진다.

WECS의 운전에서 축 속도가 빠르지 않을 때, 점성 마찰 토크는 발생된 토크에 비교하여 매우 작은 값이라 가정한다. 축의 마찰력과 스프링 계수는 무시할 수 있으므로 기계적 손실은 무시한다.

제어 목적은 팁 속도비가 최적치 λ_{opt} 이 되도록 슬립 s 를 조절하는 것이다. 이 경우 터빈 속도 Ω 가 제어변수이고 제어 입력은 슬립 s 와 풍속 v_w 이다.

WECS 시스템의 동적 모델은 식 (3.1)과 같이 표현된다[10].

$$\dot{\Omega} = f(\Omega, u, v_w) = 1/J \cdot \left[\frac{P_T(v_w, \lambda)}{\Omega} - T_G(\Omega, u) \right] \quad (3.1)$$

여기서, J 는 WECS 전체의 관성이다. 입력 신호 u 는 전기적 동기 속도 ω 이다.

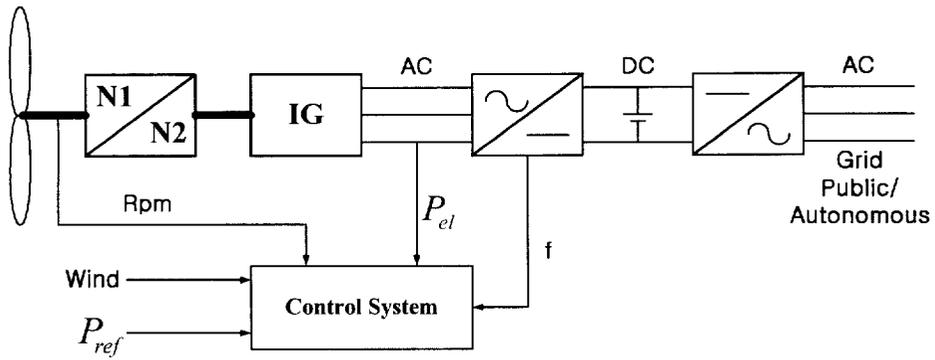


Fig. 3.1 Block diagram of overall wind energy conversion system using squirrel cage induction motor.

여기서 전력 조절이 목표이기 때문에 정규화된 전력 오차는 시스템의 출력에 따라 식(3.2)과 같이 된다.

$$y = h(\Omega, u) = \frac{P_G(\Omega, u)}{P_R} - 1 \quad (3.2)$$

여기서, P_R 는 전기적 출력의 기준치이다. 그리고 전기적 출력은 식 (2.16)에서 식(3.3)이다.

$$P_G(\Omega, u) = \eta(\Omega, u) \cdot \Omega \cdot T_T(\Omega, u) \quad (3.3)$$

3.2 WECS의 전 동적 모델

풍력터빈의 제어는 기준전력 P_{ref} 에 대하여 유도발전기 전기적 출력 P_G 가 추종하도록 제어하는 것이다 풍력이 너무 적지 않고 충분히 있을 때 최대 전력변환 계수 C_p 에서 운전되도록 제어해야 한다.

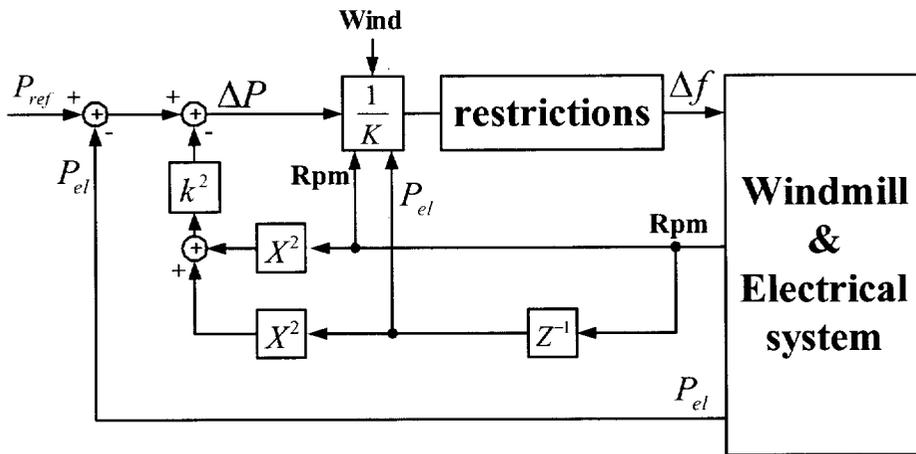


Fig. 3.2 The control system

Fig. 3.2는 풍력에너지 변환에 데드비트(Dead beat) 제어를 적용한 제어 시스템을 나타내고 이 시스템은 데드-빗(Dead-beat) 제어 기술로 운전하고 이것은 전력 오차를 1 샘플링 구간에서 정확히 제어할 수 있다.

여기서 채택한 데드비트 제어는 매 샘플링 주기마다 현재의 전력 P_{el} 가 기준전력 P_{ref} 를 추종하기 위해 필요한 ΔP 를 계산하는 방법이다.

이 시스템은 식(3.6)에서 제어 대상 전력이 비선형이고 터빈의 관성 모멘트 때문에 제어에 제한이 있다. 여기서는 샘플링 주기 $\Delta t = 0.5[\text{sec}]$ 로

한다.

검출한 전력 P_G 는 주어진 기준 전력 P_{ref} 비교되어 관성효과를 보상하여 전력오차 ΔP 가 결정된다. 터빈 축속도 Ω 의 검출에서 속도와 가속도 피드백에 의해 슬립 Δs 가 결정된다.

풍력 터빈과 유도발전기 시스템은 비선형성이기 때문에 이상적으로 회전자 변화가 계산되기 위해서는 최적 운전 점 λ_0 는 미리 알 수 있어야 한다.

회전 에너지와 축속도 사이에는 식 (3.3)이 성립한다.

$$W_r = \frac{J\Omega^2}{2} \quad (3.3)$$

이 식에서 풍력은 식 (3.4)이 된다.

$$P_r = \frac{dW_r}{dt} = \frac{\Delta W_r}{\Delta t} = J \frac{\Omega(t)^2 - \Omega(t-\Delta t)^2}{2\Delta t} \quad (3.4)$$

식 (2.3)의 미분은 식(3.5)이다.

$$d\lambda = d\Omega \frac{R}{v_w} \quad (3.5)$$

터빈 기계적 출력의 λ 에 대한 미분은 식(3.6)이다.

$$\frac{dP_T}{d\lambda} = \frac{dC_p(\lambda)}{d\lambda} k v_w^3 \quad (3.6)$$

터빈 기계적 출력의 Ω 에 대한 미분은 식(3.7)이다.

$$\frac{dP_T}{d\Omega} = \frac{dC_p(\lambda)}{d\lambda} k v_w^2 R \quad (3.7)$$

효율을 η 라 하면 전기적 출력의 회전자 속도에 대한 미분은 다음이 된다.

$$\frac{dP_G}{d\omega_r} = \frac{dC_p(\lambda)\eta(\omega_r)k v_w^2 R}{\eta_C P} = K_1 \quad (3.8)$$

실제 구성한 터빈/발전기 일체형에서 모든 출력은 축을 가속하기 위해 사용되므로 입출력 관계는 식(3.9)이 된다.

$$J\dot{\Omega} = P_T - P_G \quad (3.9)$$

식(3.9)에 P_G 와 P_T 의 식 (2.16), (2.2)을 대입하여 정리하면 전체적인 시스템의 동력 모델은 식(3.10)이 된다.

$$\dot{\Omega} = [KR^3 C_p(\lambda)/\lambda^3 + 3(V_0/f_0)^2(N^2/R_r)(s/\Omega)](\Omega^2/J) \quad (3.10)$$

식(3.10)에서 제어 목적에 편리한 Ω 혹은 λ 를 제어변수로 할 수 있다. 제어 입력은 슬립 s 와 풍속 v_w 이다. v_w 는 (3.10)식에 나타나지 않으나 $\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{v_w}$ 이기 때문에 λ 안에 내재되어 있다.

식 (3.10)으로 주어진 동적 모델에서 제어 목적은 틱 속도비가 최적치 λ_0 로 되도록 슬립 s 를 조절하는 것이다. 이 경우 Ω 가 제어변수이고 제어 입력은 슬립 s 와 풍속 v_w 이다.

시스템은 매우 비선형성이기 때문에 변화되는 풍속에 대응하여 λ 를 조절하는 것은 매우 어렵다.

첫 번째 단계로서 제어 규칙의 설계는 풍속이 일정하다고 가정하면 정상상태 동작에서 최적 틱 속도비를 유지하도록 하는 것이다.

정상상태에서 축 가속도 $\dot{\Omega} = 0$ 임으로 식(3.10)은 식(3.11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$0 = [KR^3 C_p(\lambda_0) / \lambda_0^3 + 3(V_0 / f_0)^2 (N^2 / R_r)(s / \Omega)] (\Omega^2 / J) \quad (3.11)$$

여기서, λ_0 는 최적 틱 속도비이다.

슬립과 축속도 사이에 식(3.12)과 같이 선형적인 관계의 피드백 법칙을 적용한다.

$$s = -k_1 \Omega \quad (3.12)$$

$$k_1 = -KR^3 [C_p(\lambda_0)/\lambda_0^3] / [3(V_0/f_0)^2(N^2/R_r)] \quad (3.13)$$

식(3.12)은 최적 운전상태로 되는 간단한 피드백 법칙을 나타낸다.

식 (3.10)에 식(3.12)과 식(3.13)을 대입하면 식 (3.14)이 얻어진다.

$$\dot{\Omega} = KR^3 [C_p(\lambda)/\lambda^3 - C_p(\lambda_0/\lambda_0^3)] (\Omega^2/J) \quad (3.14)$$

실제 풍속 $v_w = v_c$ 로 일정하고 $\lambda = \lambda_0$ 일때 미분방정식 (3.14)의 해는 $\Omega = \lambda_0 v_c / R$ 이다.

식(3.12)의 피드백 법칙은 단지 터빈 축 속도 Ω 에만 관계하는 것을 알 수 있고 실행하는 데 매우 간단한 방법이다. 이것은 풍력에너지 변환만 고려할 때 간편한 제어시스템의 구성 방법을 나타낸 것이다.

식(3.12)으로 주어진 피드백 법칙은 정상상태의 조건 λ_0 에서 λ 를 일정히 유지할 목적으로 유도한 식이다. 그러나 풍속의 단계적 변화에 대응하여 λ 를 조절하는 제어규칙이 필요하다.

풍속이 단계적으로 변화하는 것을 고려하면 식 (3.12)는 식(3.15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\Omega} = [f(\lambda)/J] \Omega^2 \quad (3.15)$$

여기서 $\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{v_w}$ 이다.

여기서, $f(\lambda)$ 는 식(3.16)과 같다.

$$f(\lambda) = KR^3 [C_p(\lambda)/\lambda^3 - C_p(\lambda_0)/\lambda_0^3] \quad (3.16)$$

Fig. 3.3은 식(3.6)에서 λ 에 대한 함수 $f(\lambda)$ 의 관계를 나타낸다. 여기서 $\lambda = \lambda_1$, $\lambda = \lambda_2 = \lambda_0$ 의 두 개의 근을 확인할 수 있다. 풍속이 $v_w = v_c$ 일정할 때 이러한 근은 $\Omega = \Omega_1 = \lambda_1 v_c / R$, $\Omega = \Omega_2 = \lambda_2 v_c / R$ 에서 시스템의 균형점을 정의하고 초기 시작점 $\Omega = \Omega_3 = 0$ 인 것도 균형점으로 정의한다.

Fig. 3.3에서 일정 풍속 v_c 에 대한 시스템의 동정을 검토할 수 있다. 초기 텀 속도비 $\lambda = \lambda_i = R \Omega_i / v_c$ 에 대응하는 초기 축 속도는 $\Omega = \Omega_i$ 이라고 가정한다.

(a) $\lambda_i > \lambda_2$ 구간에서는 $f(\lambda) < 0$ 이고 Ω 는 λ 의 감소에 대응하여 시간에 따라 감소한다. 결국 λ 는 λ_2 에 도달하고 최적 운전조건으로 회복된다.

(b) $\lambda_1 < \lambda_i < \lambda_2$ 구간에서는 $f(\lambda) > 0$ 이고 이 구간에서는 Ω 와 λ 는 시간에 따라 증가하고 반복해서 시스템은 $\lambda = \lambda_2 = \lambda_0$ 일 때 일시적인 중지상태로 도달하게 된다.

(c) $\lambda_i < \lambda_1$ 에서는 $f(\lambda) < 0$ 이고 Ω 는 $\Omega_3 = 0$ 로 감소하고 시스템은 정지하게 된다.

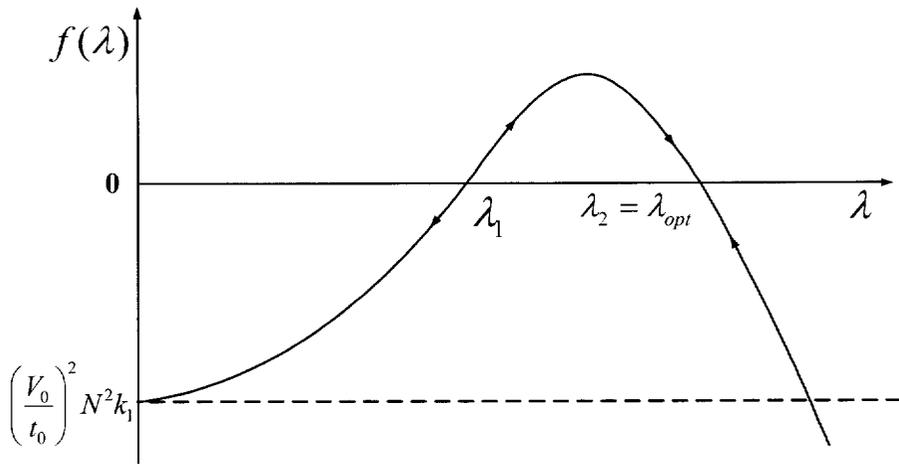


Fig. 3.3 Plot of $f(\lambda)$ against λ

이상의 검토에서 풍속이 일정이고 초기에 $\lambda > \lambda_1$ 일 때 식 (3.12)으로 주어진 피드백 법칙은 시스템이 최적 운전점으로 동작하게 되는 것을 알 수 있다.

3.3 관성 변화를 고려한 제어

시스템의 동적인 동작은 관성이 매우 크거나 매우 작은 경우에는 만족하게 동작되지 않는다. 이것은 식(3.15)을 좀더 검토하면 알 수 있다. 풍속이 일정한 경우 임의의 풍속에서 축의 가속도는 터빈의 관성에 의해서 결정되기 때문에 식(3.12)과 같이 터빈속도 만의 피드백은 시스템의 응답속도에 어떠한 개선을 하지 않는다.

그러나 축 가속도 변화비에 관한 정보가 피드백 법칙에 포함되면 이 정보는 풍속의 변화에 더욱 신속히 맞추어 터빈속도를 올리던지 낮추게 하는 것에 이용 할 수 있다. 다시 말해 축속도의 증가비(축 가속도)가 검출되면 이것은 풍속의 증가를 나타내고 이 때 발전량의 감소에 의해 풍력은 톱 속도비가 최적치에서 멀어지지 않게 하기 위해 축을 더 빨리 가속하는데 사용될 수 있다.

이 경우 유도기는 전동기로써 동작하게 되지만 이것은 컨버터를 통한 전력의 흐름이 양방향이므로 쉽게 처리될 수 있다. 물론 반대의 경우 풍속의 감소로 터빈의 속도가 떨어지는 경향을 나타낼 때 발전량의 증가에 의해 축 위치 에너지는 터빈의 감속을 위해 축전지로 전송된다.

식 (3.12)에 주어진 피드백 법칙은 여러 풍속에 대해 디지털컴퓨터로 시뮬레이션하면 시스템의 동특성을 고찰할 수 있다. 그러나 축의 가속도에 관한 정보가 포함되지 않아 이것에 의한 응답특성의 개선을 위해 피드백법칙에 축의 가속도에 관한 정보를 포함해서 수정할 수 있다.

이상의 검토에 의해 식(3.17)은 속도 피드백에 가속도 정보를 피드백에 추가한 제어규칙을 나타낸다.

$$s = -k_1\Omega + k_2(\dot{\Omega}/\Omega) \quad (3.17)$$

여기서 k_2 는 가속도 피드백 상수이다.

또한 식(3.10)에 식(3.17)을 대입하여 정리하면 식 (3.15)의 폐회로 모델은 식(3.18)와 같이 수정된다.

$$\dot{\Omega} = [f(\lambda)/J_{eq}]\Omega^2 \quad (3.18)$$

$$J_{eq} = J - 3k_2(V_0/f_0)^2(N^2/R_r) \quad (3.19)$$

식(3.18)의 수정된 모델은 식(3.15)과 같은 형태가 된다. 그리고 동적 피드백 하에서 시스템의 평형점은 앞에서 구한 것과 같다. 식(3.17)에서 추가한 가속도 피드백 항은 등가 관성의 변화를 가져오는 것을 알 수 있다.

등가 관성은 피드백 계수 k_2 의 선택에 의해 커지거나 작아질 수 있으므로 시스템의 응답속도는 희망 한 대로 조정할 수 있다.

마지막으로 축 마찰계수(D)와 비틀림 계수(F)가 결정되면 피드백 법칙은 식(3.20)과 같이 수정하여 응답이 최적 상태의 운전점으로 제어할 수 있다.

$$s = -k_1\Omega + k_2(\dot{\Omega}/\Omega) + D + F/\Omega \quad (3.20)$$

그러나 일반적으로 D와 F는 매우 작기 때문에 실제 장치에서 무시 할 수 있다.

제 4 장 컴퓨터 시뮬레이션

피드백 파라미터의 선정에 의해 최적 전력변환을 행하는 방법을 앞장에서 제안하였다. 그러나 제안한 방법은 비선형시스템을 간략화 하여 실험실에서 행할 수 있는 모델에 대하여 실제 시스템에서 수행하기 전에 시뮬레이션에 의해 이를 검토하는 것이다.

4.1 시뮬레이션 및 실험 모델

실제 환경에서의 동작을 하기 위해 시스템의 상세한 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하는 것은 매우 유용하다. 유도발전기의 고정자, 회전자 저항이 온도에 따라 변하기 때문에 이것에 대한 시뮬레이션 실험은 매우 중요하다.

시스템의 동작에서 풍속의 확률적인 변화의 영향을 현실적 조건에 만족하도록 여러 피드백 파라미터를 시뮬레이션으로 쉽게 결정할 수 있다. 시뮬레이션은 파라미터를 변경해 가면서 희망하는 전체 시스템의 응답을 얻기 위해 여러 번 수행하였다.

Fig. 4.1은 실험실에서 소규모로 풍력발전 시스템의 실험을 하기 위한 실험장치이다. 이 장치는 유도발전기(IM), DC 전동기의 다이내모 미터(DC/M), PWM 인버터, SCR 컨버터, 및 마이크로 프로세스 등으로 구성되어 있다. DC/M는 유도발전기와 연결되어 있고 풍력터빈 역할을 한다.

유도발전기는 인버터에 연결되어 있고 인버터는 마이크로 프로세스(micro

controller)에 의해 PWM 제어된다. 마이크로 프로세서는 요구되는 풍력과 회전자의 속도를 받아 희망하는 지령 주파수 f_s 를 계산하고 인버터에 전송한다.

AC/DC 컨버터는 DC/M에 입력을 공급하고 마이크로 프로세스에서 계산된 지령전류와 실전류의 편차를 피드백 하여 PI제어에 의해 SCR 위상제어된다.

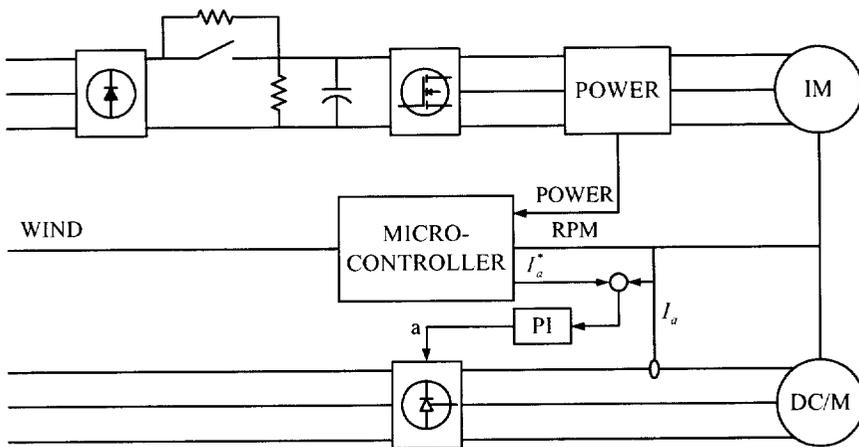


Fig. 4.1 Laboratory experimental setup.

마이크로 프로세스로 요구되는 풍속과 회전자속도 입력을 받아 풍속과 회전자 속도에 대하여 요구되는 토오크를 계산한다.

직류전동기에서 토오크는 전기자 전류에 선형적으로 비례하기 때문에 계산된 토오크는 지령전류로 SCR 컨버터에 보내져서 위상제어 한다.

4.2 시스템과 제어 파라미터

본 연구에서 사용한 풍력 터빈은 수직 축에 반지름 $R=1.5[m]$ 인 3개의 날개를 가지고 있고 시스템의 총 관성은 약 $J=100[kgm^2]$ 이다. 발전기의 기계적 입력 에너지는 식(2.2)에 의해 계산되고 터빈 전력변환계수 $C_p(\lambda)$ 는 식(2.5)에 의해 계산한다. 이때 터빈구조계수는 $K=3.96$, $a=45.85$, $b=4.7$, $c=14.4$, 그리고 최적 침두 속도비는 $\lambda_0=3.55$ 이다.

인버터는 IGBT를 이용한 3상전압형 PWM 인버터이고 DC단자는 DC 48 [V] 축전지 그룹과 연결된다. 그리고 인버터의 정격 AC출력은 약

$v_0=18[V_{rms}]$, 정격 주파수는 50 [Hz]이다. 이 경우 $\frac{V_0}{f_0}=0.36$ 이고 임의의 주파수 f_s 에서 출력 전압은 식 (2.13)에서 $V_s=0.36 f_s$ 이다.

유도발전기는 3상 1[KVA] 농형 유도전동기이고 고정자는 18 V_{rms} , 50Hz 전원에 직접 연결되어 있다. 유도전동기 등가회로의 자화회로 정수는 생략하였고 그 외 회로 파라미터는 $R_s=R_r=0.05 [\Omega/\Phi]$ 와 $X_s=X_r=0.20 [\Omega/\Phi]$ 이다. 고정자 주파수와 터빈 각속도에 관계를 나타내는 정수는 $N=2.22$ 이다.

표 4.1 유도기 정수 및 터빈 정수

R_s	0.05[Ω]	η_G	2.22
R_r	0.05[Ω]	λ_0	3.35
X_s	0.20[Ω]	C_{pmax}	0.5
X_r	0.20[Ω]	R	1.5[m]
J	100[kgm^2]	V_0/f_0	0.36

Fig. 4.2 은 본 연구에 사용한 터빈의 λ 에 대한 함수 $C_p(\lambda)$ 를 시뮬레이션 하여 나타낸 것이고 비선형인 것을 알 수 있다.

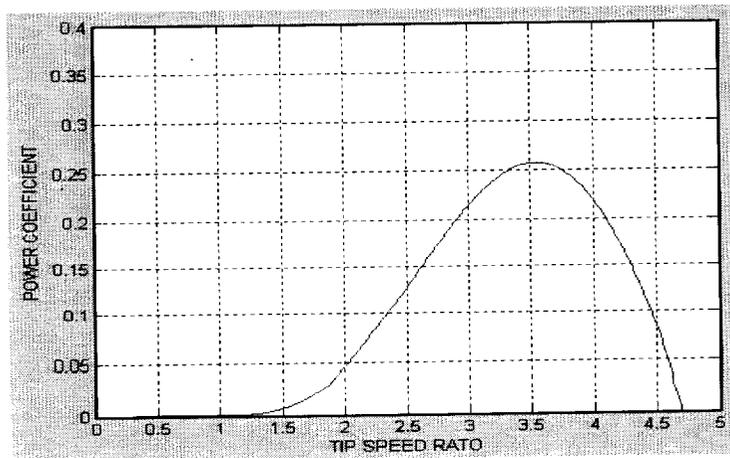


Fig. 4.2 The measured turbine power coefficient(C_p) of the winder turbine

4.3 피드백 파라미터

시스템의 피드백 법칙에서 선택한 속도 피드백 파라미터 k_1 은 식(3.8)에서 $k_1=1.95 \times 10^{-3}[s]$ 으로 계산된다. Fig. 4.3은 $s=-k_1\Omega$ 에서 슬립과 축속도 사이의 관계를 나타낸 것이다. 일정 풍속에 실제 시스템이 최적 팁 속도비로 운전하기 위해서는 슬립과 축속도 관계는 비선형으로 표현되는 것을 Fig. 4.3에서 알 수 있다.

따라서 이 곡선에서 10 ms^{-1} 이하의 풍속에 대해서 선형으로 근사화 하면(정격 출력이 얻어지는 부분) 그 기울기는 $2.05 \times 10^{-3}[s]$ 를 얻을 수 있다. 시뮬레이션에서는 이 기울기를 k_1 의 실제 값으로 한다. 이 k_1 에 대하여 함수 $f(\lambda)$ 의 근은 $\lambda_1=2.06$ 과 $\lambda_2=3.5$ 로 계산된다. 여기서 근 $\lambda_2=3.5$ 는 최적 팁 속도비와 거의 등가로 되는 것을 알 수 있다.

λ_2 과 λ_0 사이의 근소한 차이는 식(3.8)에서 계산된 속도 피드백이득 k_1 에 차이가 생긴 결과이다. 그러한 차이의 선택은 최적 동작에서 시스템의 안정도를 개선하기 위해 적절히 결정할 수 있는 것으로 평가된다.

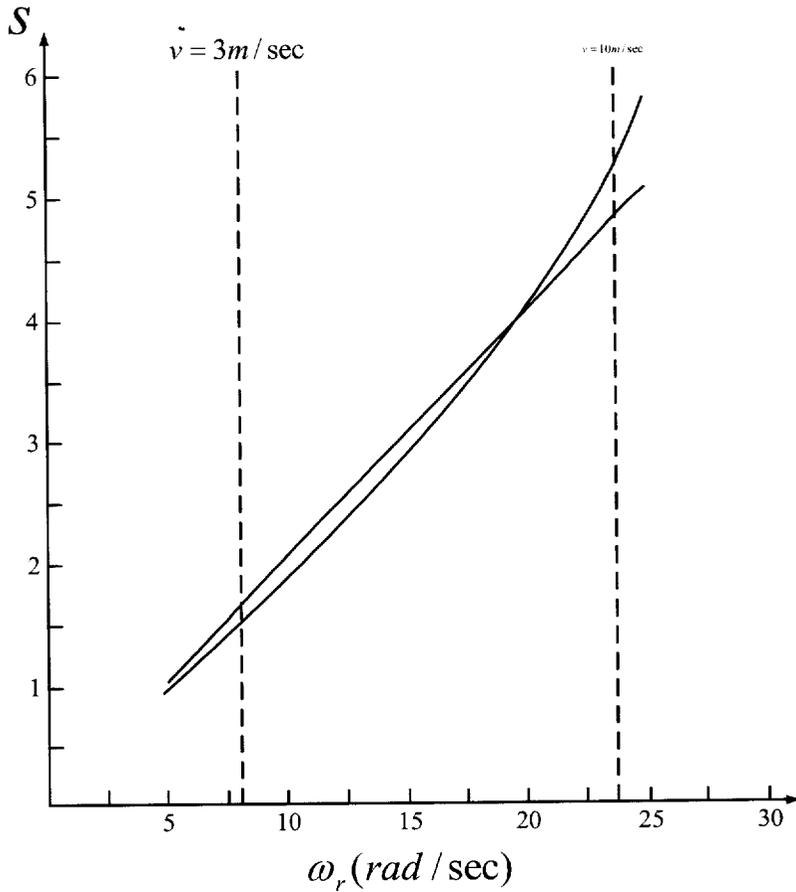


Fig. 4.3 Slip plotted against turbine speed for optimum wind power input.

또한 Fig. 3.2에서 명백히 알 수 있는 것은 k_1 을 점점 작게 선택하면 λ_1 은 더 작아지고 λ_2 는 더 커지는 결과로 되어 $f(\lambda)$ 곡선을 상승시킨다. λ_1 은 더 작게 하면 풍속의 가변에 여유도가 증가하고 더욱 강인성이 증가되어 안정성을 개선할 수 있다. 그러나 λ_0 보다 더 큰 λ_2 는 정상상태에서 부분적인 최적화를 의미하므로 k_1 의 선택은 안정성과 최적성의 타협을 제시한다.

가속도 피드백 이득 k_2 의 선택은 k_1 의 선택만큼 영향이 크지는 않다, 그리고 안정성, 응답속도, 원활한 전력발생 사이의 타협에 위한 시뮬레이션 검토를 행한다.

시뮬레이션은 $k_1 = 1.95 \times 10^{-3} [s]$ 으로 일정할때 k_2 는 $k_2=0$, $k_2=1.5$, $k_2=2.0$ 으로 변화하고 등가관성 모우먼트를 파라미터는 $J_{eq} = 100 \text{ kg m}^2$, $J_{eq} = 43 \text{ kg m}^2$ 및 $J_{eq} = 23 \text{ kg m}^2$ 로 하여 각각 축소도 응답을 고찰한다.

4.4 시뮬레이션 결과

첫 번째 시뮬레이션은 풍속의 단계적인 변화에 대한 시스템의 응답 특성을 조사하는 것이다. Fig. 4.3은 3가지 다른 등가 관성 모우먼트에서 풍속 초기치 $v_{wi}=7 [m/s]$ 에서 최종치 $v_{wf}=10 [m/s]$ 까지 풍속을 단계적으로 변화한 경우 축 속도변화를 나타낸 것이다.

Fig. 4.4의 풍속의 단계적 변화에서 초기 축 속도 $\Omega_i=\lambda_2 v_i/R=16.3 [rad/s]$ 에서 시스템은 안정상태로 도달하고 있는 것을 알 수 있다. 관성 모우먼트 $J_{eq}=43 kg m^2$ 와 $J_{eq}=23 kg m^2$ 인 경우 응답을 보면 관성 모우먼트 $J_{eq}=100 kg m^2$ 일 때 보다 2배, 4배정도 빠르게 응답함을 관찰할 수 있다.

그리고 세 가지 등가 관성 모우먼트의 경우 시스템은 각각 $t_1=13[s]$, $t_2=23[s]$ 및 $t_3=49[s]$ 에서 축 속도가 $21[rad/s]$ 로 같아진다. 이것은 시스템의 효과적인 시정수가 등가 관성 모우먼트에 비례하는 것을 나타내므로 시스템 응답속도는 피드백 파라미터 k_2 의 값 변화에 의해 충분히 조정할 수 있다는 것을 증명하는 것이다.

여기서 그래프로 나타내지는 아니하였지만 $v_f=12 [m/s]$ 일 때 축 속도는 등가 관성모우먼트에 관계없이 초기치에서 연속적으로 영으로 떨어지고 있는 것을 확인하였다. 이 실험에서 최종풍속 v_f 는 최대 허용치 이하에서 선택되어야 하는 것을 알 수 있다.

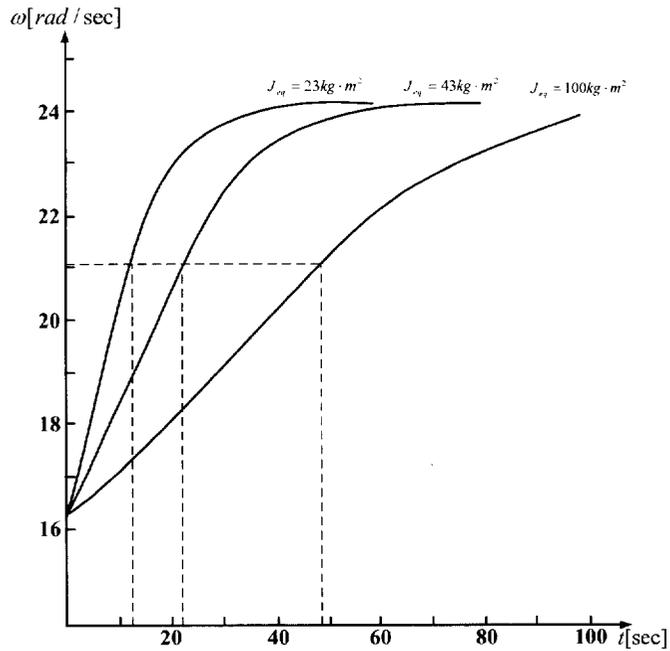


Fig. 4.4 Response of system to a step change in the wind speed for different values of the equivalent inertia

Fig. 4.5는 풍속 $v(t) = 7 + 3\sin Ft$ 로 일반적인 변화는 주고 발전전력, 축 속도, 풍속 등을 시뮬레이션한 결과를 나타낸다. 이 경우 F 와 J_{eq} 의 값에 따라서 시스템의 응답은 임계상태 또는 진동으로 되는 것을 나타내고 있다.

Fig.(a) 에서 발전 전력은 $J_{eq} = 100 [kg m^2]$ 에서는 주기가 매우 길고 불안정한 출력이 나타나지만 $J_{eq} = 43 [kg m^2]$ 에서 정상적인 교류가 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig(b)는 축 속도 응답을 나타낸 것으로 $J_{eq} = 100 [kg m^2]$ 에 대해서 시스템의 응답은 임계상태로 되고 $J_{eq} = 23 [kg m^2]$ 에서는 응답이 진동으로 되

는 것을 알 수 있다. $J_{eq} = 43 [kg\ m^2]$ 에서 안정하게 동작하고 최대 허용 주파수는 $F_{max} = 0.006 [rad/s]$ 로 계산된다. 또한 시스템 응답은 $F = 0.005 [rad/s]$ 에서 임계치에 근접한 값이 됨을 알 수 있고 $F = 0.05 [rad/s]$ 에서 안정 동작하는 것을 알 수 있었다. Fig(c)의 주어진 풍속은 $7 [m/s]$ 를 중심으로 변하고 있고 최대 이탈 풍속은 $1.05 [m/s]$ 반복 주기는 $10[s]$ 이다.

이 시뮬레이션 결과에서 등가 관성을 더 작게 취하면 축 속도는 더 빠른 응답으로 되어 풍속 변화에 더욱더 민감하게 동작하는 것을 알 수 있다. Fig. 4.3의 시뮬레이션에서 희망한 응답 특성이 얻어진 것처럼 보이지만 Fig. 4.4의 발전기 출력을 보면 등가 관성 J_{eq} 이 큰 경우는 발전기와 인버터가 정상 동작이 되지 않는 것을 예상 할 수 있다.

Fig. 4.6은 풍속이 영에서 터빈이 최대 풍력을 출력하는 레벨까지 상승할 때 축속도, 전력변환 계수 C_p , 발전 전력을 시뮬레이션 한 것을 나타낸다.

그림에서 풍속이 증가하거나 감소하여도 터빈 축속도는 진동하고 있지만 출력 한계 범위 내에서 출력(PE)은 일정히 유지되고 있는 것을 알 수 있다. 출력 한계치 범위에서는 풍속이 점점 증가하면 축속도를 일정히 유지하여 출력을 증가시키도록 C_p 는 감소하고 출력은 일정히 유지한다. 반대로 풍속이 감소하면 C_p 는 증가하여 출력이 일정히 유지된다. 그러나 최대 C_p 영역에서는 풍력은 감소하고 있지만 C_p 값은 일정히 유지되고 있는 것을 알 수 있다.

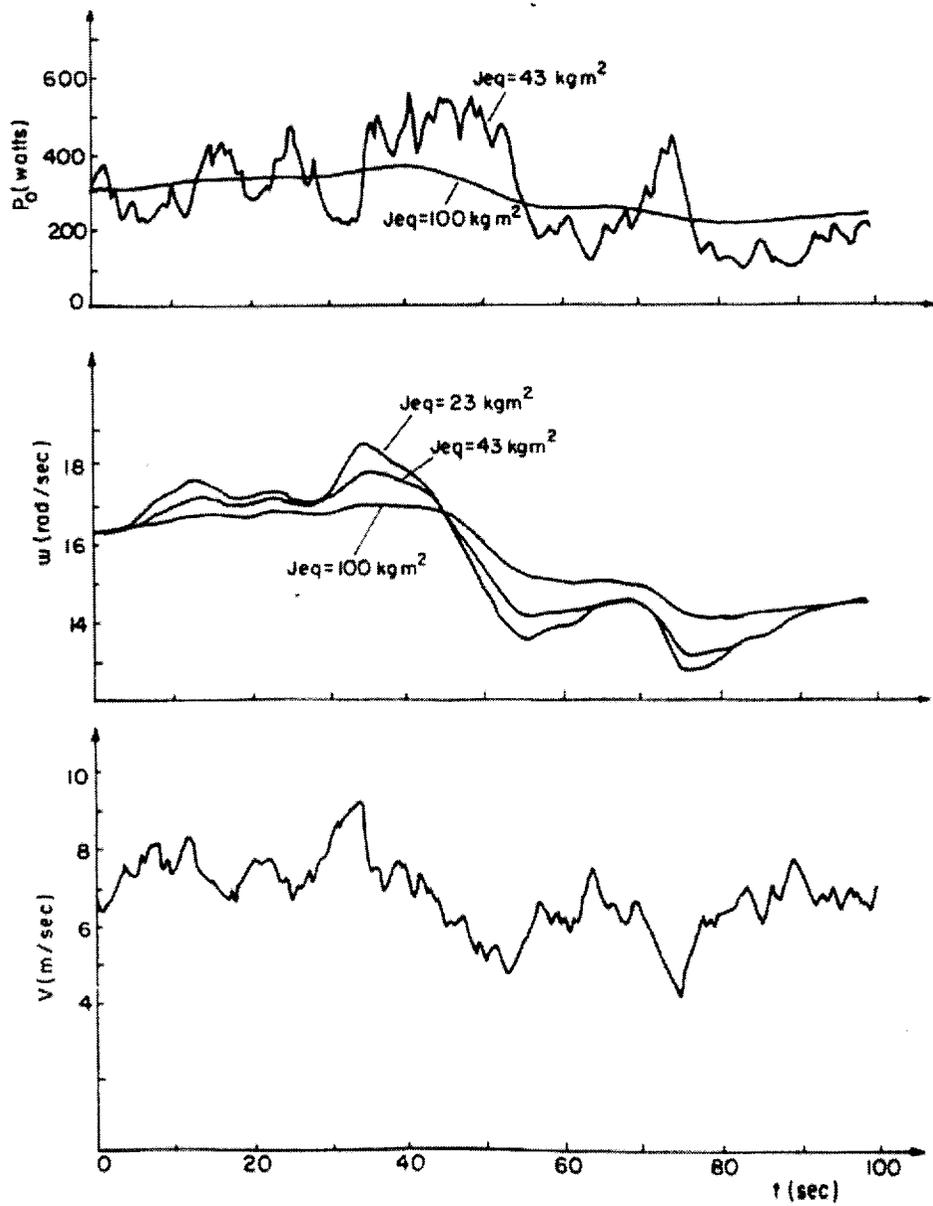


Fig. 4.5 Results of simulation for a stochastically varying wind speed.

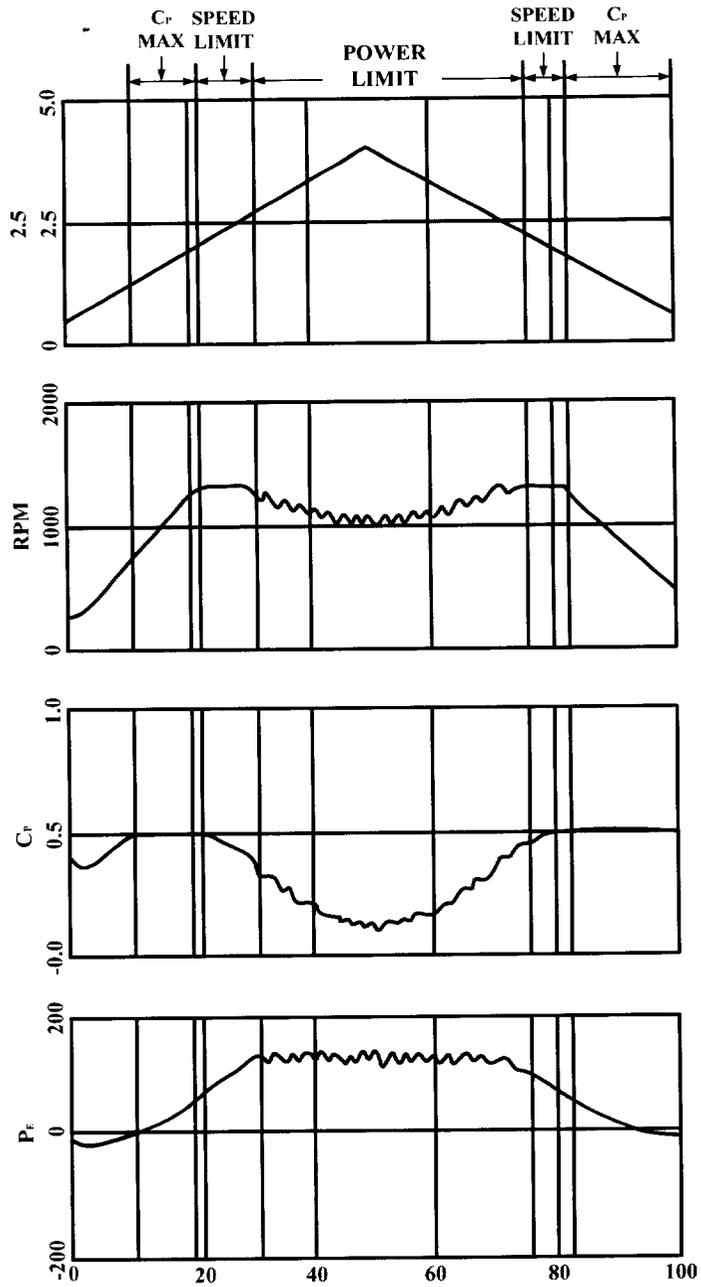


Fig. 4.6 Electrical power(P_e), C_p , v_w and motor speed by controlled wind speed

4.5 파라미터 변화에 따른 감도

같은 정격의 유도 전동기일지라도 설계가 다르면 전동기 파라미터 정수는 다르다. 그러므로 이 논문에서 나타낸 풍력에너지 변환시스템에서 발전기가 새로운 것으로 대체될 때 제어루프의 피드백 파라미터들은 조정되어야 한다. 그러나 실제로 발전기는 자주 교체할 필요가 없기 때문에 많은 문제를 야기하지 않는다.

발전기의 파라미터들은 운전하는 동안에 온도에 따라 변하는 것이 있다. 발전기의 회전자 저항은 운전하는 동안 온도가 증가하면 그 저항도 증가하게 된다. 이것은 정상상태에서 최적의 운전상태를 유지하기 위해 연속적인 조정이 필요할 것이다.

Fig. 4.7는 일정한 풍속에서 얻어진 전력에서 회전자 저항 변화의 영향을 조사한 것이다. 그림에서 유도발전기 파라미터 전기적 저항 $R=0.05[\Omega]$ (상온에서)와 이것의 $1.35R$ 의 두 가지 다른 값에서 풍속에 대비하여 얻어진 전력을 나타낸다. 상온에서 저항값은 20°C 일 때이고 $1.35R$ 는 110°C 에서의 얻어진 것으로 하였다. 두 곡선사이에 매우 작은 차이가 있는 것을 알 수 있고 이 정도의 차이는 시스템의 운전에서 온도 변화가 중대한 약화를 야기하지 않는다고 추측할 수 있다.

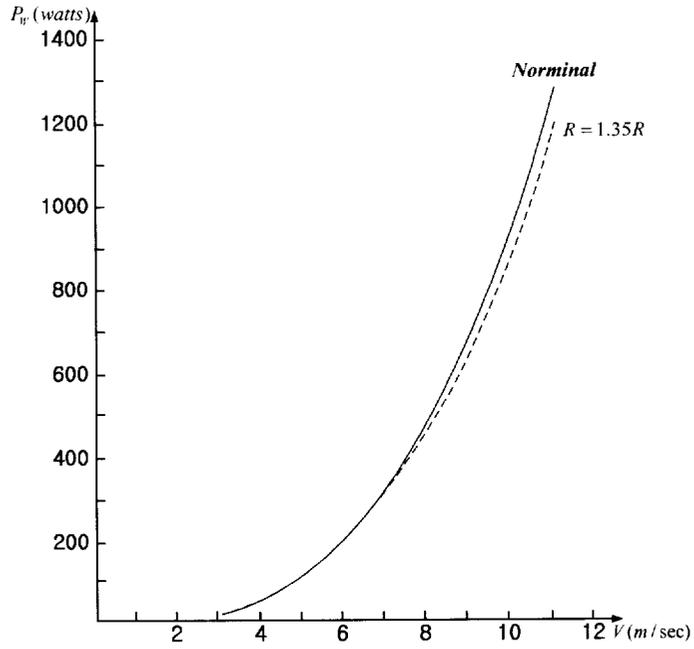


Fig. 4.7 Input wind power plotted against wind speed for two difference values of machine resistance.

제 5 장 결 론

본 연구는 풍력에너지 변환시스템에 대하여 나타 내었다. 이 시스템의 주요내용은 아래와 같이 간단하게 요약할 수 있다.

(1) 본 풍력발전 시스템은 풍량이 많은 해안가 고지대나 무인도 등 소규모 독립적인 장소의 적용에 매우 알맞다.

(2) 발전된 전력은 직류로 변환되기 때문에, 유도발전기의 전압이나 주파수제어가 필요하지 않는다.

(3) 제안한 제어방법은 풍력발전 시스템의 수행에 유용함을 확인하였다.

(4) 발전기와 축전지 그룹사이에 인버터를 사용함으로써 고정자전압과 주파수를 쉽게 제어할 수 있었고, 동특성 개선 및 양방향으로 전력변환이 가능하였다.

(5) 정지상태의 시스템을 기동하기 위해 별도의 여자장치가 필요없고 모든 무효에너지는 인버터에 의해 공급된다. 또한 터빈에 별도의 기동날개 구조를 필요로 하지 않는다.

시스템의 주요 결점은 전력변환을 위한 인버터가 필요하고 인버터 설치비용이 증가한다는 것이다. 그러나 대용량 고속바이폴라 트랜지스터나 MOSFET의 생산증가로 인버터 가격이 계속해서 감소하는 것으로 보완될 수 있다. 또한 유도발전기와 인버터의 전력소자 구성의 총 가격은 브릿지 정류기, 인버터와 특별히 설계된 공심동기 발전기시스템 구성가격보다 더

적을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] "풍력발전단지 건설을 위한 풍력자원 정밀조사(II)", 한국에너지 기술 연구소, 1993
- [2] "제주 월령 신재생 에너지 시범단지 조성", 통상산업부, 1995
- [3] "소형 수평축 풍차 및 풍력시스템 개발연구", 한국전력공사 기술연구원, 1992
- [4] B. K Bose, "*Power Electronics and AC Drives*", Prentice Hall, pp. 121-135, 1986
- [5] Behcet M. Saribater and Mesut E. Sezer, "Modelling and Control of a Winder Energy Conversion System ", *INT. J. Control*, Vol. 46, No. 1, 1987.
- [6] Ricardo J. Mantz and Carlos F. Christiansen, " Dynamical Sliding Mode Power Control of Wind Driven Induction Generator ", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 15, No. 4, 2000.
- [7] Roberto Leidhold, Guillermo Garcia, Maria Ines Valla, "Induction Generator Controller Based on the Instantaneous Reactive Power Theory", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 17, No.3, 2002.
- [8] Torbjorn Thiringer, Jan Linders, "Control by Variable Rotor Speed of a Fixed-Pitch Wind Turbine Operating in a Wide Speed Range", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 8, No.3, 1993.
- [9] P. Novak, T. Ekelund, I. Jovik, B. Schmidtbauer, "Modeling and Control

- of Variable-Speed Wind-Turbine Drive-System Dynamics", *IEEE Control Systems*, 1995
- [10] T.F. Chan, Loi Lei Lai, "Steady-State Analysis and Performance of a Stand-Alone Three-Phase Induction Generator With Asymmetrically Connected Load Impedances and Excitation Capacitances", *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol. 16, No.4, 2001.
- [11] Thomas James Hammons, Mui Wah Goh "Turbine, Generator, System Modeling and Impact of Variable-Frequency Ripple Currents on Torsional Stressing of Generators in Poland and Sweden Lithuania/Poland and Sweden/Poland HVDC Links", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 15, No.4, 2000.
- [12] Z.M. Salameh, L.F. Kazda, "Analysis of the Steady State Performance of the Double Output Induction Generator", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. EC-1, No.1, 1986.
- [13] T.F. Chan, Loi Lei Lai "Single-Phase Operation of a Three-Phase Induction Generator With the Smith Connection", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 17, No.1, 2002
- [14] Rajesh Karki, Roy Billinton, "Reliability/Cost Implications of PV and Wind Energy Utilization in Small Isolated Power Systems", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 16, No.4, 2001.
- [15] Marcelo Godoy Simoes, Bimal K. Bose, Ronald J. Spiegel "Fuzzy

Logic Based Intelligent Control of a Variable Speed Cage Machine
Wind Generation System", IEEE Transactions on Power Electronics,
Vol. 12, No.1, 1997.

[16] S. Muller, M. Deicke, Rik W. De Doncker, "Doubly Fed Induction
Generator Systems", IEEE Industrial Applications Magazine, 2002.

[17] Suresh H. Jangamshetti, V. Guruprasada Rau, "Optimum Siting of
Wind Turbine Generators", IEEE Transactions on Energy Conversion,
Vol. 16, No.1, 2001.

부록 : 전력 변환 계수

발전기토크 대 속도특성은 선형근사 방법에 의하여 식(1) 이 성립한다.

$$T_G = K \cdot (\Omega - \omega_s) \quad (1)$$

식 (1)과 식(2.18)에서 효율 η 는 식 (2)가 된다.

$$\eta = 1 - \frac{T_G}{K \cdot \Omega} = 1 - \frac{P_G}{K \cdot \Omega^2} < 1 \quad (2)$$

정상상태에서 P_G 는 식 (2.1)에 의해서 식(2)에 대입하면 식 (3)이 된다.

$$\eta(\lambda, v_w) = 1 - \left(\frac{(1/2) \cdot \rho \cdot A \cdot R^2}{K} \right) \cdot \frac{C_p(\lambda)}{\lambda^2} \cdot v_w \quad (3)$$

그러므로 발전기에 의해서 출력되는 전력은 다음과 같이 표현한다.

$$P_G = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot C_E(\lambda, \Omega) \cdot v_w^3 \quad (4)$$

$$C_E(\lambda, v_w) = \eta(\lambda, v_w) \cdot C_p(\lambda) \quad (5)$$

이고 WECS의 전력 변환 계수이다. 그러므로 계수 $\chi_E(\lambda, v_w)$ 는 식(6)과 같이 정의할 수 있다.

$$\chi_E(\lambda, v_w) = \frac{dC_E(\lambda, v_w)}{d\lambda} \cdot \frac{\lambda}{C_E(\lambda, v_w)} \quad (6)$$

(5)에서 λ 에 관해서 미분한 C_E 와 (6)에서 그것을 다시 놓고, 발전기 효율 η 와 터빈 계수 χ 의 함수로서 χ_E 는 다음과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$\chi_E = \chi \cdot \left(2 - \frac{1}{\eta}\right) + 2 \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 1\right) \quad (7)$$

최적의 속도율 $\lambda_{optE}(w)$ 에서 전력계수 $C_E(\lambda, v_w)$ 는 최대이고 $\chi_E(\lambda, v_w)$ 는 0이다. 이것은 식(8)과 같이 λ 의 값을 충족시킨다.

$$\chi(\lambda_{optE}) = \frac{2 \cdot (\eta(\lambda_{optE}, v_w) - 1)}{2 \cdot \eta(\lambda_{optE}, v_w) - 1} < 0 \quad (8)$$

그러므로 WECS의 최적 팁 속도율은 터빈계수 $\lambda_{optE}(\Omega) > \lambda_{opt}$ 의 것보다 약간 크다.

감사의 글

오늘이 있기까지 세심한 지도와 조언으로 학문과 삶의 가치관을 새롭게 닦아주신 지도교수님이신 홍순일교수님의 크신 은혜에 진심으로 감사를 드립니다.

그리고 바쁘신 와중에도 본 논문이 완성될 때까지 충고와 격려를 아끼지 않으시며 부족한 논문을 지도해 주신 박한석교수님, 우경일교수님께 깊은 감사를 드립니다. 아울러 학자의 자세로 지도해 주신 부경대학교 전기공학과의 모든 교수님에게 감사를 드립니다.

항상 인생의 선배님으로서 학문의 길로 인도하시고 따뜻함으로 격려와 도움을 주신 부경대학교 인쇄공학과 안석출교수님께 감사를 드립니다.

학위과정 3년동안 격려와 조언으로 힘찬 박수를 보내주시고 학업 전념할 수 있도록 배려 해주신 부산광역시 시설관리공단 임주섭이사장님, 김영두상임이사님, 이수구경영관리실장님, 유성오공원문화사업본부장님, 김형규도로사업본부장님께 깊은 감사를 드립니다.

또한 시민회관 최석수관장님, 광안대로 관리사업소 황주석소장님, 학위과정 입학과 졸업까지 물신양면으로 도와주신 시설관리공단의 모든분들에게 깊은 감사를 드립니다.

그리고 피지제어 연구실에서 같이 공부를 하면서 격려를 아끼지 않고 많은 조언으로 본 논문을 완성할 수 있도록 도와준 (실험실 사람들)에게 깊은 감사를 드립니다.

항상 무조건적인 사랑으로 노심초사 아들을 바라보시고 한평생 피와 땀을 흘리면서 정직과 성실을 말보다 행동으로 보여주신 부모님의 은혜에 감사를 드립니다.

늘 걱정해주시고 작은 일까지 관심과 사랑으로 격려 해주신 울산에 계시는 누님내외분님과 조카들에게도 감사를 드립니다.

마지막으로 남편이 공부할 수 있도록 항상 옆자리에서 어려운 가운데도 내조하신 사랑하는 아내 윤난희여사와 항상 공부하는 이유 때문에 사랑하는 딸 청숙이와 아들 민수에게 잘해주지 못한 마음 앞서 이 보람을 가족함께 하고 싶습니다.

끝으로 본 논문이 결실이 되기까지 많은 것을 베풀어주신 모든 분께 무한한 감사를 드립니다.