

풍력터빈의 제어

함경선⁰ 김용호
전자부품연구원

ksham@keti.re.kr, yhkim@keti.re.kr

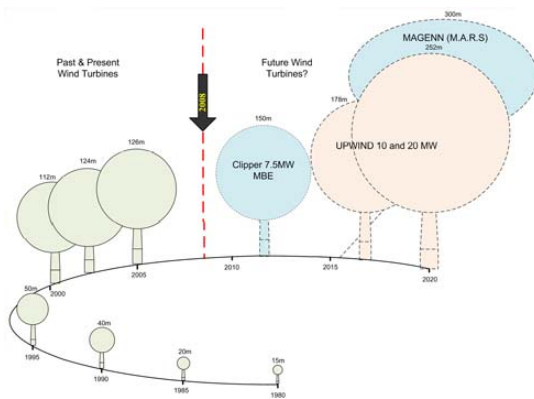
Understanding of Wind Turbine Control

Kyung-sun Ham⁰ Yong-ho Kim
Korea Electronics Technology Institute

요 약

차세대 청정에너지로서의 풍력발전 보급이 급속히 증가하고 있다. 고 효율의 풍력발전이 요구됨에 따라 풍력터빈이 대형화 되면서 풍력터빈의 경제 수명 보장과 발전 효율을 극대화하기 위해 제어기술의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 거대 구조물인 풍력터빈의 기계적 부하를 최소화하고, 바람 상태에 따른 고 효율 출력 제어가 필수적인 것만큼 제어장치의 궁극적인 목표는 바람으로부터의 에너지 획득 비용을 줄이는 것이라고 할 수 있다. 본고에서는 에너지 변환장치로서의 풍력터빈이 갖는 제어 장치의 기본 기능을 설명하고, 이에 대한 실현에 대하여 논한다.

1. 서 론



[그림 1] 풍력터빈의 대형화
(출처 : www.wind-energy-the-facts.org)

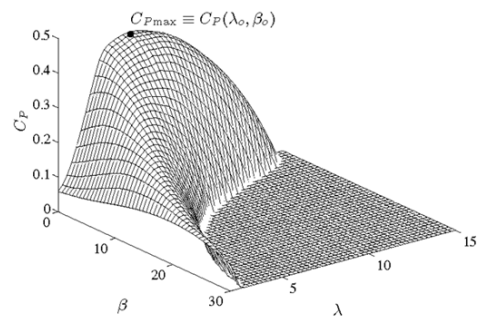
풍력터빈은 에너지 회수 효율의 증대 및 단위용량 당 건설비 절감을 목표로 대형화 추세에 있다 덴마크의 Vestas, 미국의 GE Wind의 경우는 이미 3MW급 시스템이 상용화 되었으며, Enercon의 경우에는 6MW급이 실증 테스트 중에 있다 EWEA (European Wind Energy Association)에 따르면 유럽의 해상 풍력은 2010년 40GW, 2020년에는 70GW로 급속한 보급이 이루어질 것으로 내다보고 있다. 최근에는 국내 26개 기업 컨소시엄이 서남해안의 5GW급 풍력단지에 공동 투자할 것으로 알려지고 있다.

풍력터빈에서의 제어기술은 대형 풍력터빈의 기술 경쟁력을 좌우할 정도로 핵심적인 것이다 제어기술에 의한 풍력터빈의 기계적 부하저감 기술은 20년 이상의 풍력 시스템 수명주기를 보장할 수 있는 핵심기술이 것이다. 공기역학적 현상으로 회전날개에 발생된 기계적 부하는 드라이브 트레인(Drive train), 타워(Tower)등의 구조물을 가진 시켜 풍력터빈의 기계적 피로도를 가중시키게 된다[1].

2. 풍력터빈과 에너지

풍력터빈은 에너지 변환을 이루는 영역 A 를 통과하는 공기 흐름을 에너지로 바꾸는 풍력에너지변환시스템(WECS : Wind Energy Conversion System)이다. 유체 밀도 ρ 와 V 의 속도를 갖는 바람에서 얻는 에너지는 $P_V = 1/2 \rho AV^3$ 으로 나타낼 수 있다[2].

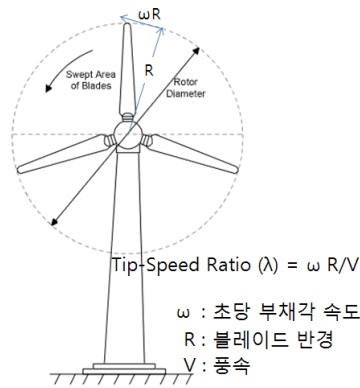
따라서 풍력에너지 변환 효율을 나타내는 출력과워 계수는 풍력에너지로부터 얻을 수 있는 변환에너지 P_T 의 비율을 출력과워 계수 C_P 로 나타낸 것이다. 풍력에너지의 효율을 높이기 위해서는 최대효율인 C_{Pmax} 를 추종해야 한다.



C_P : 출력과워 계수, β : 피치각, λ : 선단속도비

[그림 2] 출력과워계수의 추종

풍력터빈에서 효율계수 C_P 는 자유 풍속에 대한 회전날개 끝단의 속도 비율인 선단속도비(TSR : Tip-Speed Ratio)와 날개 피치각과의 비선형적 상관계를 갖고 있다 이때 최대 출력과워 계수 C_{Pmax} 는 0.593을 초과할 수 없는 것이 이론적으로 알려진 Betz의 한계(Betz's limit)이다[1].



[그림 3] 선단속도비(λ)

3. 풍력터빈 제어

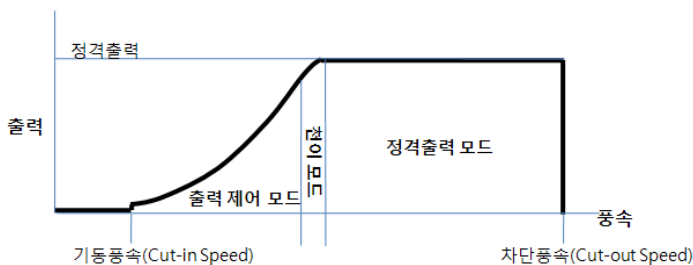
풍력터빈 제어는 바람으로부터의 에너지 획득 비용을 최소화하는 것을 목표로 한다. 이를 위해서는 풍력 에너지 최대회수, 기계적 하중 최소화, 전력품질의 관점에서 기술이 실현되어야 한다. 풍력터빈이 대형화될수록 위의 3가지 요구조건들을 동시에 충족시키는 제어 시스템을 설계하는 것은 쉽지 않은 것이다.

풍력 에너지의 최대 회수를 위해서는 기동 풍속과 차단풍속 범위 안에서 풍력터빈 안정성을 고려한 최대 에너지 회수를 위한 피치각(pitch angle) 조절과 선단속도비를 제어하는 기술이 핵심이다.

기계적 하중을 최소화하기 위해서는 풍력터빈 운전 중 공기역학적으로 발생하는 기계적 스트레스를 센싱하여, 적절한 제어 신호를 산출하고 이를 활용하여 각 날개의 피치각을 개별적으로 제어하여야 한다.

전력품질 관점에서는 계통 연계점에서의 주파수와 전압의 안정성과 플리커(flicker) 여부에 의해 감시되며, 전력 품질 제어가 컨버터(converter)에서 직접 제어될 수 있다[1].

3.1 풍력터빈 제어 모드



[그림 4] 풍력터빈의 파워 커브와 제어모드

풍력터빈 제어는 바람으로부터의 에너지 획득 비용을 최소화하는 것을 목표로 한다. 위의 그림 4는 풍속에 따른 풍력터빈의 출력 특성을 나타내는 파워커브(Power curve)이다. 여기서의 풍속은 풍력터빈이 전력을 생산하기 시작하는 기동풍속(cut-in speed), 정격출력(rated power)을 생산하는 정격풍속(rated speed), 전력생산을 멈추는 최대 풍속인 차단풍속(cut-out speed)으로 구분

할 수 있다.

풍속의 구분에 따라서 풍력터빈의 제어 모드를 나눌 수 있다. 기동풍속과 정격 풍속간 바람 에너지 회수 효율을 극대화 하는 제어 영역이 출력제어 모드이다 이 구간에서는 날개 피치각과 선단속도비에 의해 결정되는 출력과 위계수(C_p)를 최대화하기 위한 제어 알고리즘이 적용 된다.

정격풍속과 차단풍속 사이 구간인 정격출력모드에서는 풍력터빈의 정격 출력이 유지되도록 바람 에너지 회수 효율을 조절해야 한다. 출력효율을 높이는 제어보다는 오히려 출력효율을 저하시켜 풍력터빈의 정격출력이 유지되도록 날개 피치각을 실시간을 조절하는 기술이 필요하게 된다.

출력제어 모드와 정격출력모드 구간 사이에는 천이모드가 있다. 천이모드에서는 두 영역간의 부드러운 전환이 이루어지도록 풍력터빈을 제어하는 기술이 필요하다. 예를 들어 최대효율을 위한 제어에서 정격 출력 유지를 위한 제어로 천이하는 과정에서는 급격한 기계적 부하가 발생하게 되는데, 이러한 문제점을 최소화하는 천이과정 제어가 필요한 것이다.

3.2 풍력터빈의 제어 변수

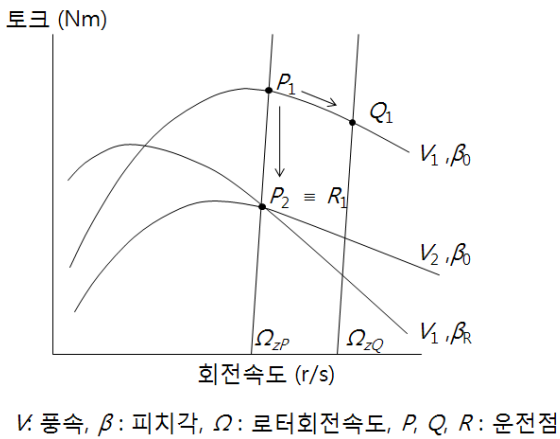
풍력터빈에서 풍력 에너지 출력의 최대 회수와 기계적 부하의 최소화는 다음과 같은 2가지 제어 변수의 조절을 통해 가능하다[1].

첫째는 회전날개 피치각이다. 피치각을 조절하면, 바람에 대한 날개 익형(airfoil)에서의 받음각(angle of attack)을 변화시킬 수 있다. 받음각이 변화되면, 날개에서 발생하는 양력과 항력이 변화되는데, 이를 통하여 회전날개의 공기역학적 토크를 변화시킬 수 있게 된다. 즉, 회전날개가 받게 되는 공기 역학적 토크를 조절할 수 있는 입력 인자가 피치 액츄에이터(actuator) 조절에 의한 피치각 변수이다.

둘째는 회전축 반력 토크(generator torque)이다. 증속기 고속 회전자에 직결된 발전기의 회전자(rotor)에 작용하는 반력 토크로 고속 회전축(HSS, High Speed Shaft)의 회전을 방해하는 역할을 수행한다. 즉, 반력 토크를 사용하여 회전 날개의 속도를 가변시킬 수 있다.

3.3 풍력터빈의 운전점 제어

발전기의 반력토크가 날개에 의해 로터에 가해진 공기역학적 토크가 같아지는 경우와 같이 풍력시스템에 가해지는 순 토크(net torque)가 0일 때 풍력터빈은 안정된 운전점 (operating point)에서 동작한다고 할 수 있다. 다음의 그림 5에서 보는 바와 같이 풍속과 날개의 피치각, 그리고 로터의 토크에 따라 운전점이 다양하게 존재함을 알 수 있다. 이때의 로터의 회전 속도를 제로토크(zero torque) (Ω_0) 속도라고 한다. 예를 들어, 피치각이 β_0 , 제로토크가 Ω_{0P} 일 때의 운전점은 풍속 V_1 일 때 P_1 , V_2 일 때 P_2 가 된다. 즉, 발전기의 반력토크와 피치각에 의한 공기역학적 토크 조절을 이용하면 다양한 위치를 운전점으로 하여 제어가 가능하게 된다[2].

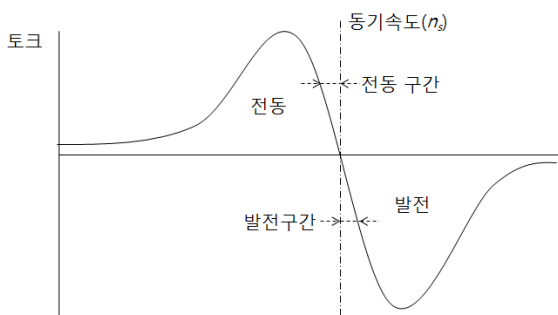


[그림 5] 풍력터빈의 운전점

피치각 제어는 공기역학적 토크를 제어하기 위한 가장 쉬운 방법이다. 그림 5에서 보는 바와 같이 동일한 풍속 V_1 에 대해 피치각을 β_0 에서 β_R 로 변화시킴으로써 운전점을 P_1 에서 R_1 로 변화시킬 수 있게 된다. 이것은 풍속이 V_2 에서 V_1 로 변화하더라도 일정한 피치각을 β_0 에서 β_R 로 제어함으로써 운전점을 $P_2 \equiv R_1$ 로 유지시킬 수 있다는 것과 동일한 의미가 된다. 즉, 풍속이 급속히 변화하더라도 피치각을 조절함으로써 운전점을 일정하게 유지할 수 있다는 결론이 된다.

3.4 풍력터빈의 발전기 토크제어

현대의 풍력터빈에 사용되는 발전기는 경제적인 이중여자유도발전기가 보편적이다 유도발전기는 로터의 회전속도 n 이 동기속도 n_s 이하인 경우 전동기로서 그 이상인 경우 발전기로서 동작하게 된다 발전기로 동작하는 회전 구간에서는 동기속도 n_s 로 유지하고자 하는 반력토크가 생기게 된다 이 반력토크가 풍력터빈의 피치각과 더불어 주요 제어 변수가 되는 것이다[1].

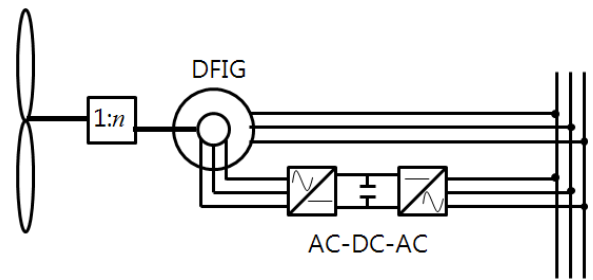


[그림 6] 유도기기의 토크-속도 특성

그림 6에서의 발전 구간을 넓게 조정하면 풍력터빈의 성능 효율을 개선할 수 있으며 터빈에 미치는 기계적 하중 크기를 완화시킬 수 있다 유도기기의 동작 구간의 토크 기울기를 완만하게 하는 방법은 고정자 권선에 가해지는 전원 주파수를 조정하는 것이다 그러나 이러한 방법은 발전기를 제어하기 위한 컨버터의 용량이 커야

하는 단점이 있다. 또 다른 방법은 회전자에 공급되는 전류를 제어함으로써 그러한 효과를 달성할 수 있다[3].

컨버터가 회전자에 연결되는 이중여자유도발전기를 사용하게 되는 경우 고정자를 그리드에 연결하고 회전자에 연결된 컨버터를 통해 전류를 조정함으로써 토크를 제어하게 된다. 다음의 그림 7에서는 이중여자유도발전기(DFIG : Doubly-fed Induction Generator)를 적용한 계통연계를 보여주고 있다 이러한 경우 발전기의 회전자에 전류를 제어함으로써 발전의 토크를 조절할 수 있다 AC/DC 컨버터를 조절함으로써 그림 5의 제로토크 회전속도를 Ω_{zP} 에서 Ω_{zQ} 로 조절할 수 있게 된다 따라서 풍속 V_1 , 피치각 β_0 에서의 운전점을 P_1 에서 Q_1 으로 조절할 수 있는 것이다[2].

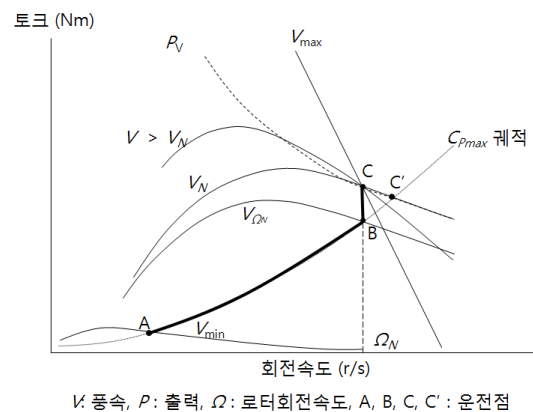


[그림 7] 유도발전기 연결구조

3.5 풍력터빈 제어 전략

풍력터빈 제어 전략은 파워커브를 이상적으로 추종하기 위한 방법론을 의미한다 따라서 각기 다른 풍속을 갖는 풍력터빈 운영상황에서 안정된 상태의 토크 또는 파워를 유지하고 로터의 회전속도를 유지할 수 있는냐의 전략이라고 할 수 있다

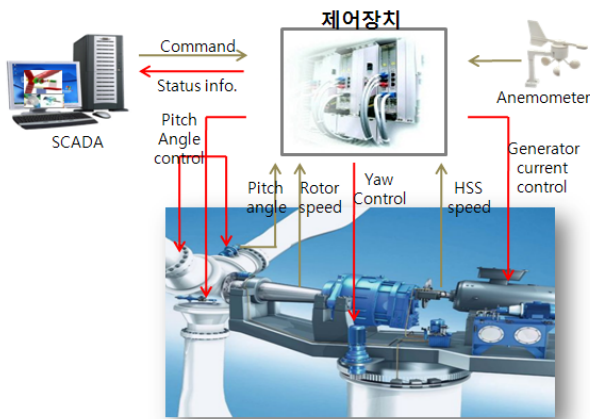
제어 전략을 토크-로터 회전속도의 관계를 사용하여 논하는 것이 가장 적합하다 본고에서는 상용 풍력터빈에서 공통적인 가변속도 가변피치(Variable-speed variable-pitch) 제어에 국한하여 설명한다 이러한 제어 방법은 정격출력(rated power) 이하에서는 고정된 피치각을 갖는 가변속도 제어를 사용하고 그 이상에서는 가변 피치 제어를 수행하게 된다[2].



[그림 8] 가변속도 가변피치 제어 운전점

그림 8에서 보는 바와 같이 풍속이 느린 지점($V_{\omega N}$)에서는 풍력터빈이 C_{Pmax} 를 추종하게 되나 $V_{\omega N}$ 에서의 정격회전속도(ω_N)에 이르러서는 풍속이 $V_{\omega N}$ 에서 V_N 까지 변화하더라도 회전속도는 변화하지 않도록 제어된다 만일 최대 효율(C_{Pmax})과 정격출력(P_N) 곡선의 교차점이 정격회전속도(ω_N) 이하의 속도에서 이뤄질 경우는 정격출력 구간에서의 운전점은 B-C'가 된다. 결국 정격풍속을 기준으로 그 이하의 풍속에서는 최대 출력을 얻기 위해 C_{Pmax} 를 가변속도(Variable-speed) 제어로 추종하게 되고 그 이상의 풍속에서는 가변피치(Variable-pitch)로 효과적인 출력조정을 이루게 되는 것이다[2][4].

4. 제어기술의 실현



[그림 9] 제어장치의 입출력

본고에서 설명한 제어기술은 풍력터빈의 날개 피치와 발전기 토크 그리고 요잉(yawing)을 제어할 목적으로 구현된다. 나셀(nacelle)에 위치한 주 제어장치는 풍력터빈의 내외부 환경을 모니터링하고 각 부분품으로부터의 정보를 취득하여 알고리즘에 의한 제어신호를 생성 실행하게 된다. 입력되는 신호는 주로 풍향풍속계(anemometer), 터빈의 회전날개 굽힘 모멘트(moment), 로터(rotor) 및 샤프트(shaft) 회전 속도, 발전기 진동이다. 그러나, 풍력터빈이 복잡해지고 대형화 되면서 제어장치가 활용하는 정보의 종류와 양은 늘어날 수 있다 [6]. 제어장치가 출력하는 신호는 터빈 날개의 각각(individual) 또는 일괄(collective) 피치각, 발전기의 토크 제어신호, 요 제어 신호등이다

풍력터빈이 대형화되면서 제어장치가 갖춰야 하는 요구사항을 살펴보면 가장 중요한 것이 신뢰성이다 풍력터빈의 운전 환경에 대한 하드웨어적 소프트웨어적 고가용성(high availability)가 보장되어야 한다 또한 입출

력에 대한 확장성이 보장되어야 한다 복잡한 풍력터빈을 제어하기 위한 입출력은 기존의 단일 입출력(SISO : Single Input Single Output) 구조에서 다중 입출력(MIMO : Multiple Input Multiple Output)으로 변화하고 있다[6]. 이에 따른 제어로직도 복잡해져 가는 상황에서 풍력터빈 운영체제(supervisory control)에 필요한 다양한 제어 어플리케이션이 증가하면서 안정적인 컴퓨팅 파워에 대한 확장성을 요구하고 있다

5. 결론

제어기술은 회전날개, 발전기, 기어박스과 같은 풍력터빈의 핵심부품 만큼이나 중요한 비중을 가지고 있다 가격 비중으로 논하자면 비교할 수 없을 정도지만 제어장치 기술 하나로 풍력터빈의 전체 성능 및 수명주기를 좌우할 수 있다.

우리나라의 풍력터빈 제어기술은 덴마크 미국, 독일 등 선진국에 비하여 상대적으로 현저하게 낮은 상태이다. 지난 몇 년간을 뒤돌아보면 선진국이 수십년동안 집중해 온 풍력터빈 기술을 우리는 불과 십여년에 이뤄내고 있다. 그동안 풍력터빈 시스템, 고가 부품기술에 집중해 오던 패러다임을 제어장치와 같은 은닉된 지능 기술로 변화시켜야 할 때이다.

참고문헌

- [1] 남윤수, “풍력터빈의 제어”, 도서출판 GS인터비전, 2009
- [2] Fernando D. Bianchi, Hernan De Battista and Ricardo J. Mantz, Springer, “Wind Turbine Control Systems”, 2006
- [3] K. S. Rongve, B. I. Naess, “Overview of Torque Control of a Doubly Fed Induction Generator”, IEEE Bologna Power Tech Conference, 2003
- [4] Munteanu, I., “Optimal Control of Wind Energy Systems”, Springer, 2008
- [6] Jason H. Laks, Lucy Y. Pao, “Control of Wind Turbines: Past, Present, and Future”, American control Conference, 2009
- [7] A. D. Wright, “Advanced Control Design for Wind Turbines Part I”, NREL, 2008
- [8] A. D. Wright, “Modern Control Design for Flexible Wind Turbines”, NREL, 2004
- [9] AWEA Policy Department, “Electrical Guide to Utility Scale Wind Turbines”, AWEA, 2005