

가변속 동기발전기를 이용한 풍력발전 출력제어

오철수

김철호*

경북대 전자전기공학부, *경북대 대학원 전기공학과

**Power Control of Wind Turbine Generation
using Variable Speed Synchronous Generator**

Chul-Soo Oh

Chul-Ho Kim*

School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

*Department of Electrical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

1. 서론

풍력발전시스템은 일정속과 가변속 풍력발전시스템으로 나누어 진다. 일정속 풍력발전시스템은 유도발전기를 이용한 시스템이 주종을 이루고, 가변속 풍력발전시스템은 동기발전기-인버터로 이루어 진다. 본 논문에서는 이 두 시스템을 분석하여 가변속 동기발전기를 이용한 시스템의 출력제어가 타 시스템보다 우수함을 보여준다.

2. 풍차의 공기역학적 출력

풍력발전시스템에서 풍차(rotor)에서 만들어 주는 출력의 식은 일반적으로 다음과 같이 주어진다. 여기에서 도입되는 파라메타는 공기무게 ρ (kg/m^3), 풍차속도 ω (rad/s), 회전면적 A (m^2), 풍속 v (m/s), 주속비 λ , 출력계수 C_p 등이며, 토크는 P/ω 로 얻어진다. ^{1,6)}

$$\lambda = r\omega/v \quad 1)$$

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} \rho C_p(\lambda) A v^3 \\ &= \frac{1}{2} \rho C_p \frac{(\lambda)^3}{\lambda^3} A r^3 \omega^3 \quad 2) \\ &= \frac{1}{2} \rho C_p'(\lambda) A r^3 \omega^3 \quad [\text{kW}] \end{aligned}$$

$$T = \frac{1}{2} \rho C_p'(\lambda) A r^3 \omega^2 \quad [\text{kNm}] \quad 3)$$

$$C_p' = \frac{C_p}{\lambda^3} \times 10^3 \quad 4)$$

여기에서 C_p' 는 C_p 에서 유도된 변형된 출력계수이다. 날개의 형상과 외형이 주어지면, 출력 P 와 토크 T 는 풍속 v 와 풍차의 속도 ω 만으로 결정된다 함을 알 수 있겠다.²⁾ 본 연구에서 Zond 40 날개에서 얻는 P 와 T 를 계산하여 나타내면 그림 1, 2과 같으며, 두 그림의 차이는 각 곡선의 최대점이 토크곡선에서 서로간 상당히 좁아짐을 알 수 있겠고, 토크특성곡선에 일정출력곡선을 삽입함으로써 토크와 출력이 동시에 나타나므로 제어특성을 논하는 데는 대단히 유익하다. 이러한 양상의 그래프는 수평축 풍력발전이든 수직축 풍력발전시스템이든 비슷하게 나타난다. 수평축 풍력발전시스템에서는 고정식 날개시스템과 가변식 피치시스템(Pitch Control System)의 두 유형으로 나누어 진다. Zond 40은 후자에 속하며, Pitch각을 -2° , 0° , 3° , 6° 로 바꿀 때 발생토크가 어떻게 변하는가를 얻을 수 있는데 이를 그림 3에 나타내었다. 그림 2에서 3으로 옮기는 과정에서 각 피치각에 따른 2)식의 C_p' 를 감안하여 곡선의 변화를 얻을 수가 있는데, 이 C_p' 의 λ 에 대한 그래프가 그림 4에 수록되어 있다.¹⁰⁾ 그림 4의 C_p' 값을 그림 2의 토크곡선에 피치각에 해당하는 값으로 변화시켜 줌으로써 그림 3을 얻었다. 그림 3에서의 실선곡선은 피치각 3° 때의 곡선이고, 점선들은 피치각 -2° , 0° ,

6° 로 변화시켰을 때의 토크곡선이다. 복잡성을 피하기 위해 풍속 $v=12\text{m/s}$ 에
 서만 이 변화를 예시하였고, 다른 풍속에서도 이와 유사한 양식으로 토크곡선이
 변하는 것을 확인하였다.

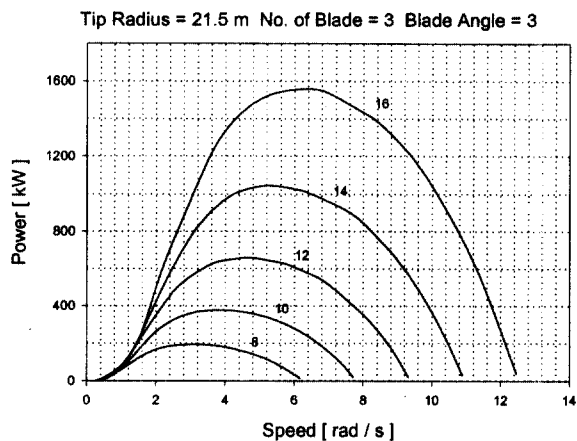


Fig. 1. Power vs. speed.

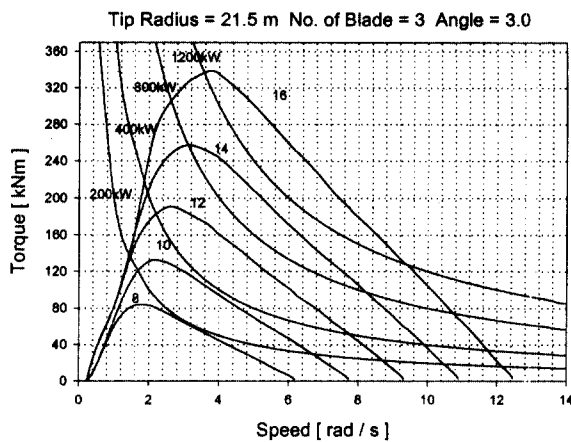


Fig. 2. Torque vs. speed.

3. 일정속과 변속 발전기시스템

앞서 언급한 바와 같이 풍력발전시스템은 일정속 혹은 가변속으로 운전하게 되며, 이는 발전기에 따라 좌우된다. 예를 들면, 유도발전기는 속도 변동 1%이내의 좁은 슬립의 범위내에서 작동되기 때문에 계통의 주파수가 바뀌지 않는 한, 일정속 풍차시스템으로 간주되며, 동기발전기-인버터 결합시스템의 경우 비교적 넓은 범위의 속도변화를 발전기가 수용할 수 있으므로하여 가변속 풍차시스템의 범위에 든다. 일정속 발전기의 경우 계통의 기계와 직접 연계되어있는 반면, 가변속 발전기의 경우 계통과 기계사이에 주파수를 연계시키는 시스템이 buffer가 들어있는 시스템을 말한다.

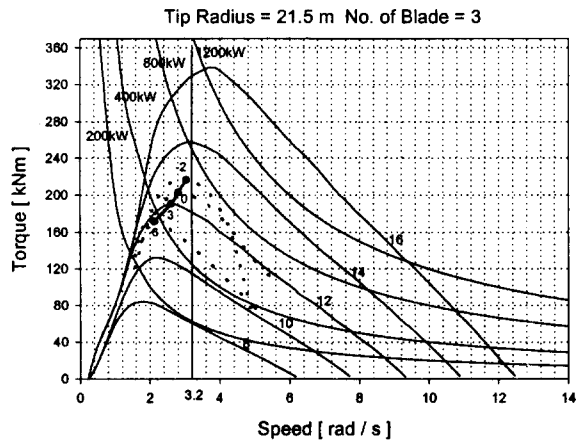


Fig. 3. Torque vs. speed in variation of pitch angle -2° , 0° , 3° , 6°

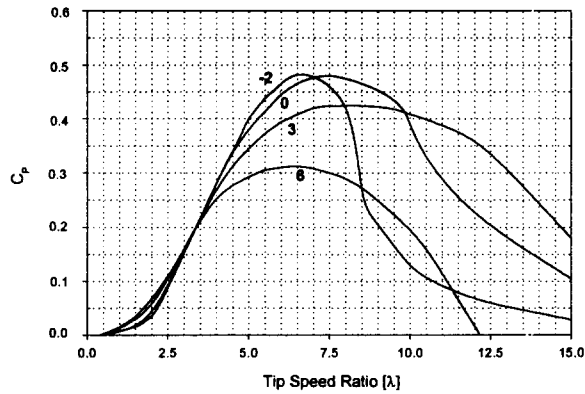


Fig. 4. Power coefficient C_p vs. tip speed ratio λ .

Zond의 경우 발전기 형식은 6극 농형유도발전기이며, 정격 풍차회전수가 30.5rpm($\omega=3.2\text{rad/s}$)로 고정되어 있는 상태이다. (그림 3에서의 $\omega=3.2\text{rad/s}$ 에 해당되는 수직선 참조)

가변속 풍력발전시스템에서는 속도의 자유도를 가지고 있다. 다시 말하면, 동기발전기의 동작점을 그림 3의 각 풍속에 따른 토크곡선의 최대점을 따라 이동시킬 수 있다. 피치 컨트롤을 장착한 시스템의 경우, 이에 추가하여 또 하나의 자유도, 즉 피치각을 가지고 있으며 이 시스템이 현재로써 가장 고급스러우며 성능이 우수한 시스템으로 알려져 있다.

4. 가변속 동기발전기

앞 절에서 언급한 가변속 동기발전기와 피치컨트롤을 장착한 Lagerwey LW50을 본 연구에서 모델로 정해 분석하고, 이의 발전기의 사양은 다음과 같다.

발전기	: 3상 750kW
발전기 형식	: 동기발전기 84극
발전기 Case 직경	: 5.5m
전류	: 369A
전압	: 690V
동기속도	: 27rpm

이 발전기는 풍차(rotor)와 직접 연결되어 있으며, 회전수는 15-35rpm이다. Pitch System의 개요는 다음과 같다.

Pitch rate	: 3 °/s
Pitch bearings	: Ring bearing
Actuation	: Electric Motor

Lagerwey LW50의 출력곡선을 일정속 풍력발전시스템인 Vestas44, Zond40와 비교하여 나타내면 그림 5와 같다. 그림에서 보다시피 중부하(medium power output range) 영역인 풍속 9-10m/s에서 타기종에 비해 100kW정도가 더 많이 출력됨을 알 수 있다. 높은 부하 영역인 풍속 12m/s범위에는 타 기종보다

200kW가 더 많이 출력되고, 최대 부하에 이르는 풍속도 타기종이 14m/s인 반면 LW50에서는 13m/s로 앞당겨짐을 알 수 있겠다.

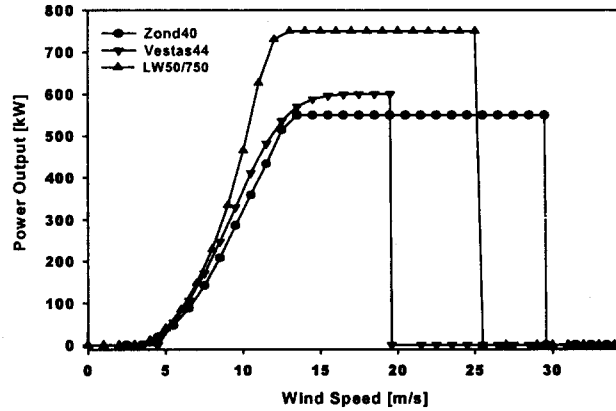


Fig. 5. Performance curve of some wind power plants.

5. 전기에너지 변환방식

본 논문에서 가변속 풍력발전시스템의 모델로 삼은 Lagerwey LW50의 인버터 시스템은 다음과 같다. 발전기에서의 출력은 6상으로 만들어져 나오는데 이를 2 채널의 3상 인버터로 나누어지며, 두 시스템은 30° 위상차를 가지며, 하나의 출력 변압기로 연결하는 방식을 취하고 있다. 이 변압기의 1차 결선은 각 채널별로 Y와 Δ 결선을 만들어 주어 30° 위상차이를 보상하여 주고 있다. 이의 Block Diagram과 전류의 파형은 그림 6과 같다.

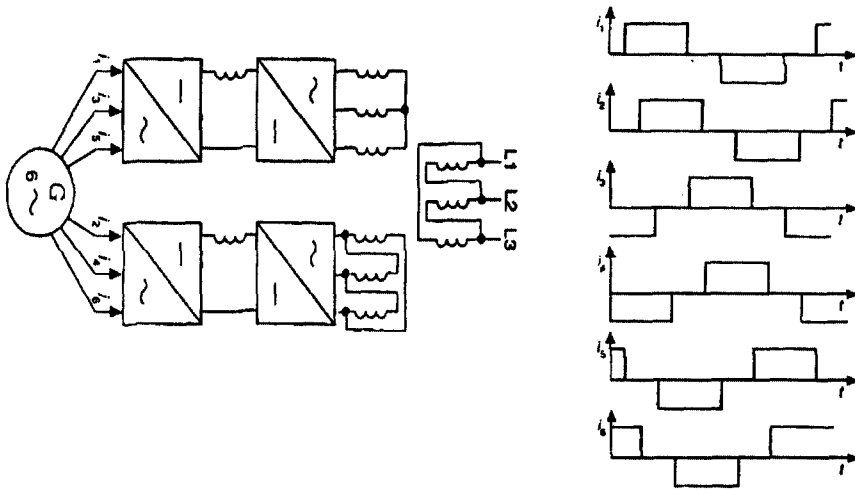


Fig. 6. Electric power conversion and current sequence

6. 결론

본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 피치컨트롤 시스템의 예에서 날개의 위치각에 따라 발생토크의 변화를 알아내었다.
- 2) 가변속 풍력발전시스템에 부여된 출력곡선에서의 자유도에 대한 분석을 하였다.
- 3) 가변속 풍력발전시스템의 모델로 잡은 LW50의 전기적 출력특성을 얻었고, 이를 기존의 일정속 풍력발전시스템과 비교하였다.
- 4) 위 비교결과 가변속 풍력발전시스템이 일정속 풍력발전시스템보다 우수한 원인을 분석한 결과, 첫째는 운전속도를 풍력에너지의 최대점으로 이동되며 운전될 수 있음이고, 둘째는 이에 따른 출력의 이득이 인버터의 손실보다 훨씬 큼을 알 수 있었고, 셋째는 직구동(Direct Drive)장치로 인해 증속기어의 손실을 줄이고 있음에 기인한다 함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 오철수 : “다리우스 풍력터빈의 부하변동에 따른 속도제어”, 에너지공학회지 4권 3호 (1995).
2. 오철수, 서영택 : “다변풍속적용형 Darrieus-Savonius 조합 수직축 풍력발전시스템의 설계”, 전기학회논문지 제 44권 12호 (1996).
3. 오철수, 김기승 : “풍력발전시스템의 인버터 위상제어를 통한 전력제어”, 전자기술연구지 16권 2호 (1995).
4. 오철수, 강창수, 권순홍 : “동해안지역에 적합한 풍력발전 시스템에 관한 조사”, 전기학회지 제41권 제10호 (1992).
5. 오철수, 서영택, 김기승 : “수직축 Darrieus 풍력발전시스템의 설계에 관한 기초연구”, 1994년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A권 (1994).
- 6) D. M. Eggleston & F. S. Stoddard : “Wind Turbine Engineering Design”, Van Nostrand Reinhold Co., N. Y. (1987).
- 7) M. Ermis, H. B. Ertan, E.Akpinar, F. Uigut : “Autonomous wind energy conversion system with a simple controller for maximum-power transfer,” IEE Proceedings-B, Vol. 139. No. 5, September (1992).
- 8) M. L Robinson : “The Darrieus wind turbine for electrical power generation”, Aeronautical Journal, June (1981).
- 9) H.L. Nakra, Benoit Dube : “Slip Power Recovery Induction Generators for Large Vertical Axis Wind Turbines,” IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 3, No. 4, December (1988).
- 10) L. Jarass, et al : “Wind Energy”, Springer-Verlag (1981).