

독립형 풍력발전을 위한 농형 유도발전기의 최대 출력제어 전략

정재웅*, 홍정표**, 권순재*

*부경대학교, **동의과학대학

Maximum Power Control Method of Cage-Type Induction Generators For Stand Alone Wind Power Generation System

Jung J. W.*, Hong J. P.** , Kwon S. J.*

*PuKyoung National University, **Dong-Eui Institute of Technology

ABSTRACT

부존 자원의 고갈과 전력 수요의 증가에 따라 대체 에너지의 개발이 시급해 지고 있다. 인류가 관심을 가지는 대체 에너지 중에서 풍력 발전은 발전단가가 저렴하여 친환경 청정 에너지원으로서 실용화 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 독립형 풍력 발전 시스템에 주로 채택되는 농형 유도 발전기를 대상으로 주어진 풍속에 최대 출력을 만드는 발전전략을 제시하고 Psim 프로그램으로 시뮬레이션하여 검증하였다.

1. 서 론

최근 화석연료의 고갈과 전력수요의 증가에 따라 대체에너지의 개발에 대한 관심이 전 세계적으로 고조되고 있는 실정이다. 인류가 관심을 가지는 대체 에너지 중 풍력발전은 태양광 발전과 더불어 친환경, 청정 에너지원으로서 실용화 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 특히 풍력발전은 원자력, 화력, 수력에 비해 발전단가가 저렴하여 시장 전망이 매우 밝다고 할 수 있다.

독립 운전형태의 풍력 발전 시스템은 전력계통의 연계 없이 발전된 전력을 축전지와 같은 저장장치에 저장하여 사용자에게 직접 전력을 공급하는 방식으로 도서지역과 산간오지, 등대 및 통신장비의 전원공급용으로 주로 쓰이고 있다.

독립 운전형태로 주로 채택되는 농형 유도발전기는 저가이면서 견고하여 유지보수가 용이하다. 또한 전력전자기술의 발달로 농형 유도발전기의 문제점이었던 초기여자확립과 좁은 발전영역 등을 해결할 수 있게 되어 그 활용도가 더욱 높아졌다.^{[1][2][3]}

본 논문에서는 독립형 풍력 발전시스템에서 많은 장점을 가지고 있는 농형 유도발전기의 최대전력 제어기법을 제안하고 시뮬레이션을 실시하였다. 벡터 제어 기법을 이용하여 농형 유도발전기의 토크제어를 함으로서 주어진 풍속에 대하여 최대전력을 발생할 수 있도록 제어하고 시뮬레이션을 통하여 이를 검증 하고자 한다.

2. 본 론

2.1 풍력 발전 시스템

2.1.1. 풍력 터빈의 입력에너지

풍력 발전시스템은 바람의 운동에너지를 풍력 터빈에 의해 기계적 회전운동으로 변환하여 발전기의 원동력으로 사용하는 발전 방식이다. 바람이 가지는 에너지는 풍속이 낮을 때에 적은 에너지가 발생하고, 풍속이 높아지면 상대적으로 에너지의 크기도 커진

다. 풍력 터빈 블레이드의 회전 단면에 입력되는 에너지(P_{wind})는 다음의 식과 같다.

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A (v_{wind})^3 \quad [W] \quad (2.1)$$

단, $\rho[kg/m^3]$ 는 공기 밀도, $A[m^2]$ 는 풍력 터빈의 날개가 커버하는 면적, $v_{wind}[m/sec]$ 는 풍속을 나타내고 있다.

그러나, 식(2.1)에서 산출되어지는 풍력에너지는 풍력 터빈 블레이드에 의한 에너지 변환 과정에서 일부만이 기계적 회전에너지로 변환되어 진다. 블레이드의 형상과 피치 각이 고정되어 있다고 가정하면 출력계수를 결정하는 데 있어서 풍속과 블레이드의 회전 속도의 관계가 중요한 변수가 된다. 풍속과 블레이드의 회전 속도의 관계는 주속 비(Tip Speed Ratio)라고 하며 그 관계식은 다음과 같다.^{[4][5]}

$$\lambda = \frac{\omega_{blade} R}{v_{wind}} \quad (2.2)$$

단, λ 는 주속 비이고 $\omega_{blade}[rad/sec]$ 은 블레이드의 회전속도이며 $R[m]$ 은 블레이드의 반경이다.

이러한 특성곡선을 $C_p - \lambda$ 곡선이라고 하며 최대 출력 계수값(C_{pmax})을 가지는 최적의 주속비(λ_{opt})가 존재하고 λ_{opt} 를 기준으로 왼쪽 곡선은 회전 속도가 너무 느리거나 풍속이 갑자기 증가했을 경우에 해당하며 오른쪽 곡선은 반대로 회전속도가 빠르거나 풍속이 감소하였을 경우에 해당된다.

식(2.1)에 블레이드의 출력계수를 곱하면 풍력 터빈 블레이드에서 변환되는 기계적 회전에너지(P_{blade})가 된다.

$$P_{blade} = P_{wind} C_p = \frac{1}{2} \rho A v_{wind}^3 \cdot C_p(\lambda) \quad (2.3)$$

식(2.2)와 식(2.3)을 살펴보면 V_{wind} 가 일정하다면 $C_p - \lambda$ 곡선의 X축을 ω_{blade} 로, Y축을 P_{blade} 로 대신하여 그릴 수 있다. 풍속이 일정하더라도 회전속도가 변하게 되면 P_{blade} 는 C_p 곡선과 같은 형태로 Fig. 1 와 같이 나타나게 된다.

Fig. 1을 살펴보면 풍속이 일정하더라도 풍력 터빈의 블레이드에 의해 변환되는 전력은 블레이드의 회전속도에 따라서 달라지고 풍속에 따라 최대출력을 얻을 수 있는 블레이드의 회전속도가 다를 수 있다. 따라서 풍력 터빈에 의해 변환되는 전력은 풍속

에 따라 달라지며 일정한 풍속 하에서 최대전력을 얻기 위해서는 블레이드의 회전속도를 최대전력을 만들어 내는 회전속도로 일정하게 유지할 필요가 있다.

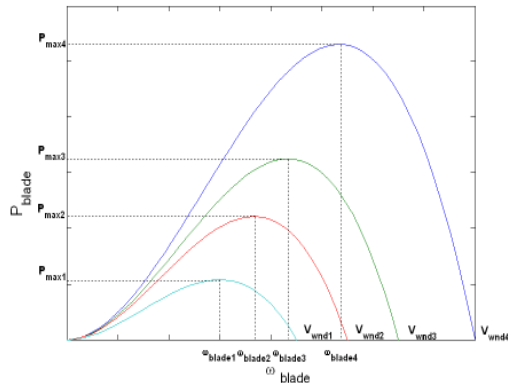


그림 1 풍력 터빈의 출력 특성
Fig. 1 Power characteristic of wind turbine

2.1.2. 유도발전기의 토크제어

임의의 회전 각속도 ω 로 회전하고 있는 d-q 직교 좌표축 상에서 유도발전기의 전압방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + p \lambda_{qs} + \omega \lambda_{ds} \quad (2.4)$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + p \lambda_{ds} + \omega \lambda_{qs} \quad (2.5)$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + p \lambda_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (2.6)$$

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + p \lambda_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda_{qr} \quad (2.7)$$

쇄교 자속 λ_{qs} , λ_{ds} , λ_{qr} , λ_{dr} 은 고정자 및 회전자의 전류에 의하여 다음과 같이 표현 된다.

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (2.8)$$

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (2.9)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (2.10)$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (2.11)$$

농형유도기에서 회전자 전압은 0이므로 d-q축 상에서의 회전자 쇄교 자속 λ_{qr} 과 λ_{dr} 에 대한 미분 방정식은 식(2.4)와 식(2.5)로부터 다음과 같이 주어진다.

$$p \lambda_{qr} + R_r i_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \lambda_{dr} = 0 \quad (2.12)$$

$$p \lambda_{dr} + R_r i_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \lambda_{qr} = 0 \quad (2.13)$$

단, p 는 미분연산자(d/dt)이다.

위 식에서 회전자 전류를 소거하기 위해 식(2.10)과 식(2.11)을 대입하면 다음과 같이 된다.

$$p \lambda_{qr} + \frac{R_r}{L_r} \lambda_{qr} - \frac{L_m}{L_r} R_r i_{qs} + \omega_{sl} \lambda_{dr} = 0 \quad (2.14)$$

$$p \lambda_{dr} + \frac{R_r}{L_r} \lambda_{dr} - \frac{L_m}{L_r} R_r i_{ds} - \omega_{sl} \lambda_{qr} = 0 \quad (2.15)$$

회전자 쇄교 자속을 기준으로 하여 동기 좌표축 d 축이 λ_r 과 일치하도록 제어를 행하는 것을 회전자 쇄교 자속 기준 벡터제어라고 한다. 이 경우 i_{ds} 는 자속 성분전류가 되고 i_{qs} 는 토크 성분의 전류에 해당한다. 회전자 쇄교 자속 기준 벡터제어가 성립되는 조건은 $\lambda_{qr} = 0$ 이고 $p \lambda_{qr} = 0$ 이다. 이 조건을 식(2.14)와 식(2.15)에 각각 대입하면 다음과 같다.

$$-\frac{L_m}{L_r} R_r i_{qs} + \omega_{sl} \lambda_{dr} = 0 \quad (2.16)$$

$$\frac{L_r}{R_r} p \lambda_{dr} + \lambda_{dr} = L_m i_{ds} \quad (2.17)$$

이는 i_{qs} , i_{ds} , ω_{sl} 을 적절히 제어하면 회전자 쇄교 자속을 d축에 일치시킬 수 있다는 것을 의미한다. 이때 유도기의 토크는 다음과 같이 표현된다.

$$T = \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (i_{qs} \lambda_{dr} - i_{ds} \lambda_{qr}) \quad (2.18)$$

토크도 마찬가지로 회전자 쇄교 자속 기준 벡터제어가 행해지면 $\lambda_{qr} = 0$ 이 되므로 i_{qs} 에 의해 직접 제어가 가능하다.

회전자 쇄교 자속이 이상적으로 d축에 일치하기 위해서는 식(2.16)과 식(2.17)을 동시에 성립하고 i_{qs} 의 기준치는 회전자 쇄교 자속이 d축에 이상적으로 일치가 되었다고 가정 한 상태에서 토크제어 루프로부터 주어지는 값이 되며 회전자 쇄교 자속 기준 벡터제어를 행하기 위해 조절할 수 있는 변수로는 i_{ds} 와 ω_{sl} 이 있으나 이를 위해서는 회전자 쇄교 자속에 대한 정보를 알 수 있어야만 한다.

본 논문에서는 Feedforward방식을 사용하여 벡터제어를 실현함으로써 회전자 쇄교 자속 기준 벡터제어를 수행하였다. 회전자 자속의 기준치를 λ_r^* 라 할 때 주어진 i_{qs} 에 대해서 i_{ds} 와 ω_{sl} 은 다음의 식에 의해 결정 된다.

$$i_{ds} = \frac{\lambda_r^*}{L_m} \quad (2.19)$$

$$\omega_{sl} = \frac{R_r}{L_r} \frac{L_m}{\lambda_r^*} i_{qs} \quad (2.20)$$

2.2 시뮬레이션

전력전자 시뮬레이션 프로그램인 Psim 프로그램을 이용하여 독립형 풍력 발전시스템에 채용되는 농형 유도발전기의 최대 출력제어를 구현하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 실제 풍력 터빈을 모의하기에는 여러 가지 제약이 있으므로 풍력 터빈을 직류전동기로 대체하였으며 풍력 터빈 출력과 같이 풍속에 대응하는 토크를 발생하도록 프로그램을 하였다.

Fig. 2는 작성한 Psim 프로그램이다. 농형 유도발전기의 특성 상 초기 여자가 확보되어야 발전이 가능하여 초기 충전 회로를 부가

하였다.

Fig. 4는 스텝속도 명령이 1,400[rpm]에서 1,000[rpm]으로 주기적으로 변할 때 속도응답을 보인다. (a)는 속도 응답파형으로 정상상태 도달시간이 0.4 초 이내로 동일하게 응답하고 있음을 보여 준다. (b)는 농형 유도발전기의 한 상의 전류와 토크를 나타내고 있고 (c)는 인버터의 직류 측의 발전되는 전력으로 회전자 회전자수가 달라짐에 따라 즉, 농형 유도발전기의 토크가 변화함에 따라서 발전되는 전력 곡선의 기울기가 달라지고 있음을 알 수 있다.

이와 같은 시뮬레이션 결과를 토대로 Fig. 2에서 보이는 것과 같이 풍속의 변화에 따라 농형 유도발전기의 토크를 회전자 쇄교 자속 벡터제어를 통해 순시 제어하여 블레이드의 회전속도를 최대전력을 발생하도록 제어한다면 주어진 풍속에 항상 최대전력을 생산할 수 있는 풍력 발전시스템을 구성할 수 있을 것이다.

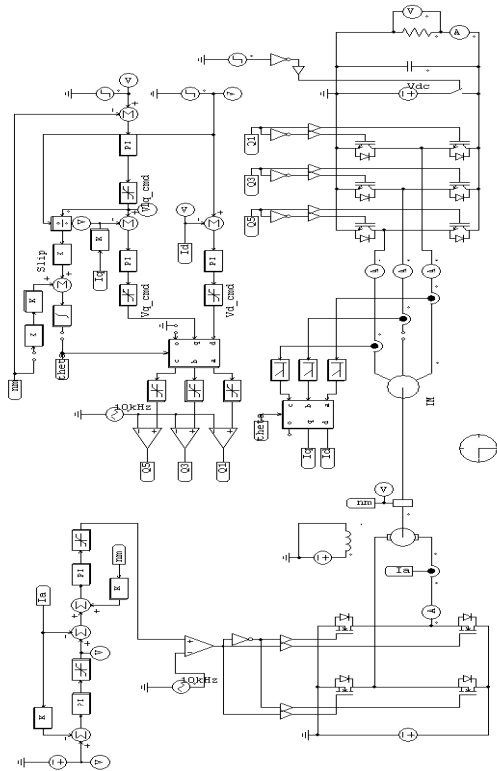
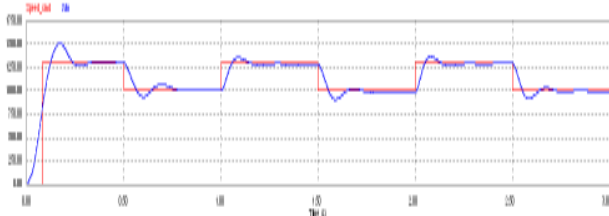
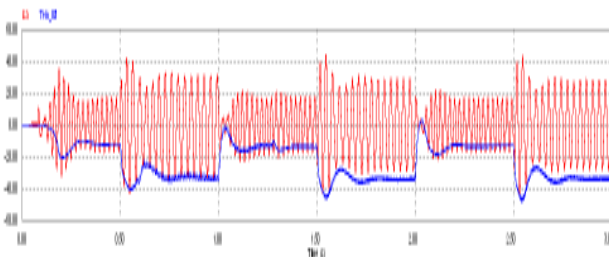


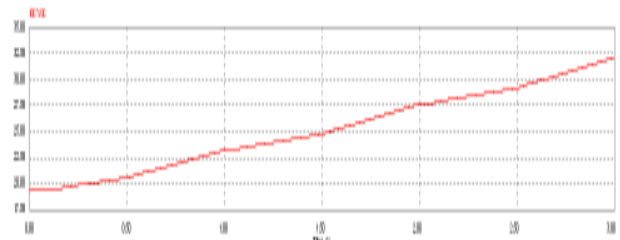
그림 2 Psim 프로그램
Fig. 2 Psim Program



(a)



(b)



(c)

그림 4 스텝 입력에 대한 시뮬레이션 결과
Fig. 4 Simulation result of step response

3. 결론

기존의 독립형 풍력 발전 시스템에서는 풍력 터빈과 발전기를 단순 조합하여 터빈 블레이드의 회전량에 의존한 전력 생산을 하는 반면 제시한 발전 제어 전략과 같이 회전자 쇄교 자속 기준 벡터 제어를 수행하여 q-축 전류를 제어함으로써 발전기의 토크를 제어하여 주어진 풍속에서 농형 유도발전기가 항상 최대전력을 발생시킬 수 있도록 하여 기존의 풍력 발전 시스템보다 발전효율이 좋을 것으로 기대된다. 향후 다양한 부하실험을 통하여 발전된 전력의 안정성을 확보하고 실제 풍속 데이터를 수집하여 시간에 따라 급속하게 변화하는 풍속에 대하여 제안된 전략을 적용하는 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고 문헌

1. "풍력발전단지 건설을 위한 풍력자원 정밀조사(II)", 한국에너지 기술연구소, 1993
2. "제주 월령 신재생 에너지 시범단지 조성", 통상산업부, 1995
3. "Conceptual survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbine" Riso National Laboratory, Denmark, 2001
4. "소형 수평축 풍차 및 풍력시스템 개발연구", 한국전력공사 기술연구원, 1992
5. B. K Bose, "Power Electronics and AC Drives", Prentice Hall, pp. 121-135, 1986