

소규모 풍력 에너지 변환 시스템의 모델링과 제어에 관한 연구

\*김실근, \*\*홍정표, \*홍순일  
\*부경대학교 전기공학과, \*\*부경대학교 기계설계학과

Modeling and Control of a Small Wind Energy Conversion System

\*Sil-Keun Kim, \*\*Jeng-Pyo Hong, \*Soon-Il Hong

\*Electrical and Control Instrumentation Pukyong National Univ., \*\*Mechanical Engineering Pukyong National Univ.

**Abstract** - 본 연구는 농형 유도 발전기와 양방향 PWM 인버터를 가진 WECS (Wind Energy Conversion System) 시스템을 모델링하고 이 모델에 기초하여 제어 법칙을 제안하였다. 제어 법칙은 풍속 따라 작용하는 최적 팁 속도비에 의해 효율이 최대가 되도록 제어하는 것이다. WECS은 바람의 변동이 있어도 최적치에 팁 속도비를 유지하기 위해 터빈의 회전 속도 제어하여 행한다.

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{v_w} \quad (2)$$

여기서,  $\rho$  : 공기 밀도,  $v_w$  : 풍속  
A : 공기 접촉면적  $\lambda$  : 팁 속도비이다.

전력변환 계수  $C_p$  는 식 (3)과 같이 수학적으로 근사화 할 수 있다.

$$C_p(\lambda) = a(b/\lambda - 1) \exp(-c/\lambda) \quad (3)$$

여기서 a, b 및 c 는 날개의 기계적 구조 계수이고 터빈 출력 변환 계수  $C_p$  가 최고치에 도달하는 최적 팁 속도비는 식 (4)으로 계산 할 수 있다.

$$\lambda_0 = cb/(b+c) \quad (4)$$

수직 터빈의 유체역학적 토크는 식(5) 같다.

$$T_T = C_p(\lambda) \cdot \left[ 0.5 \frac{\rho \pi R^3}{\eta_G} \right] \cdot v_w^2 \quad (5)$$

$\eta_G$  : 치차의 속도상승비

1. 서 론

풍력에 의한 소규모 전력 변환 시스템은 등대, 유목생활 독립된 해안 가로등 등에 전원을 제공할 수 있다. 소규모 풍력발전 시스템은 정상적인 풍력은 일반 부하와 축전기에 전원을 공급하지만 풍력이 부족하면 축전기에만 전력이 공급된다.

현재의 풍력변환 시스템에서 a.c. 동기 발전기를 사용하지만 최적의 풍력변환 조건이 어렵다. 이론적으로 유도 발전기의 속도는 다양한 풍속에 대하여 광범위하게 최대 전력 변환을 행할 수 있다.

최근 전력 반도체 기술의 발전은 주파수 가변 구동기술을 촉진하게 되었고 농형 유도발전기가 풍력발전 시스템의 수요에 적극 이용되고 있다.

2. 풍력 발전 시스템

Fig. 1 은 유도전동기를 이용한 WECS의 구성을 나타낸 것이다. 이 장치의 발전 전압은 정지형 변환기의 주파수 제어 즉, 유도기의 동기속도 제어에 의해 행하여진다.

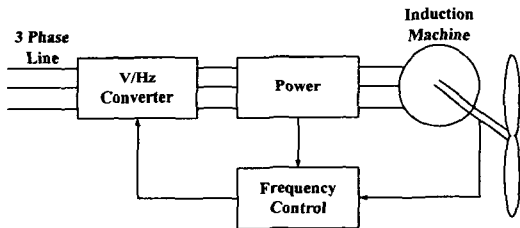


Fig. 1 Block diagram of overall wind energy conversion system

2.1 풍력 터빈 모델

바람으로부터 얻어진 풍력에 의해 터빈에 얻어지는 기계 에너지는 식(1)과 같다

$$P_T(v_w, \lambda) = 1/2 \rho A C_p(\lambda) v_w^3 = \frac{C_p(\lambda) K \Omega^3 R^3}{\lambda^3} \quad (1)$$

2.2 유도 발전기 모델

고정자 전압-주파수의 비를 일정할 때 고정자 전압은 식(6)으로 선택된다.

$$V_s = (V_0/f_0)f \quad (6)$$

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

3상 유도발전기에서 발생하는 전력은 슬립 s의 작은 값에 대하여 식(7)으로 근사할 수 있다.

$$P_G = -3(V_0/f_0)^2 (N^2/R_r) \Omega^2 s \quad (7)$$

3. WECS의 동적 모델과 제어

Fig. 2는 풍력에너지 변환에 데드비트(Dead beat) 제어를 적용한 제어 시스템을 나타내고 데드비트 제어는 매 샘플링 주기마다 현재의 전력  $P_{el}$ 가 기준전력  $P_{ref}$ 를 추종하기 위해 필요한  $\Delta P$ 를 계산하는 방법이다. 샘플링 주기  $\Delta t = 0.5$ [sec]이다.

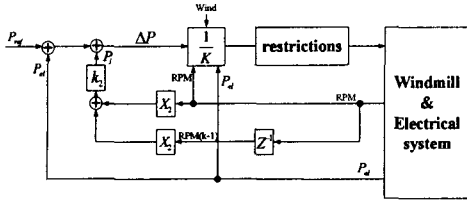


Fig. 2 The control system

터빈 축속도  $\Omega$ 의 검출에서 속도와 가속도 피드백에 의해 슬립  $\Delta s$ 가 결정된다. 터빈/발전기 일체형에서 식(8)이 된다.

$$J\Omega\dot{\Omega} = P_T - P_G \quad (8)$$

식(8)에 식(1), (7)을 대입하여 정리하면 전체적인 시스템의 동력 모델은 식(9)이다.

$$\dot{\Omega} = [KR^3 C_p(\lambda)/\lambda^3 + 3(V_0/f_0)^2(N^2/R_r)(s/\Omega)](\Omega^2/J) \quad (9)$$

식(9)에서 제어규칙 설계는 팁 속도비가 최적치  $\lambda_0$ 이 되도록 슬립  $s$ 를 조절하는 것이다. 풍속이 일정하고 가정하면 슬립과 축속도 사이에 식(10)과 같이 선형적인 관계의 피드백 법칙을 적용한다.

$$s = -k_1\Omega \quad (10)$$

여기서

$$k_1 = -KR^3[C_p(\lambda_0)/\lambda_0^3]/[3(V_0/f_0)^2(N^2/R_r)] \text{ 이다.}$$

식(8)에 식(9)을 대입하면 식(11)이 얻어진다.

$$\dot{\Omega} = KR^3[C_p(\lambda)/\lambda^3 - C_p(\lambda_0)/\lambda_0^3](\Omega^2/J) \quad (11)$$

실제 풍속  $v_w = v_c$ 로 일정하고  $\lambda = \lambda_0$ 일 때 미분방정식의 해는  $\dot{\Omega} = \lambda_0 v_c / R$ 이다. 풍속이 단계적으로 변화하는 것을 고려하면 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\Omega} = [f(\lambda)/J]\Omega^2 \quad (12)$$

여기서,  $f(\lambda)$ 는 식(13)과 같다.

$$f(\lambda) = KR^3[C_p(\lambda)/\lambda^3 - C_p(\lambda_0)/\lambda_0^3] \quad (13)$$

관성 변화를 고려하여 속도 피드백에 가속도 정보를 피드백에 추가한 제어규칙을 다음과 같이 제안한다.

$$s = -k_1\Omega + k_2(\dot{\Omega}/\Omega) \quad (14)$$

여기서  $k_2$ 는 가속도 피드백 상수이다. 식(14)을 대입하면 폐회로 모델은 식(15)와 같이 수정된다.

$$\dot{\Omega} = [f(\lambda)/J_{eq}]\Omega^2 \quad (15)$$

여기서,  $J_{eq} = J - 3k_2(V_0/f_0)^2(N^2/R_r)$ 이다.

다음 축 마찰계수(D)와 비틀림 계수(F)가 결정되면 피드백 법칙은 식(16)과 같이 수정 수정하여 응답이 최

적 상태의 운전점으로 제어할 수 있다. 그러나 일반적으로 D와 F는 매우 작기 때문에 실제 장치에서 무시할 수 있다

$$s = -k_1\Omega + k_2(\dot{\Omega}/\Omega) + D + F/\Omega \quad (16)$$

## 4 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험

### 4.1 시스템과 제어 파라미터

풍력 터빈의  $R=1.5[m]$ 이고 터빈 구조계수는  $K=3.96$ ,  $a=45.85$ ,  $b=4.7$ ,  $c=14.4$ , 그리고 최적 침두 속도비는  $\lambda_0=3.55$ 이다. 인버터의 정격 AC출력은 약  $v_0=18[V]$ , 정격 주파수는  $50[Hz]$ 이다. 유도 발전기는 3상 1[KVA], 고정자는  $18V_{rms}$ ,  $50[Hz]$  전원에 직접 연결되어 있다.

표 1 유도기 정수 및 터빈 정수

$R_s$	$0.05[\Omega]$	$\eta_G$	2.22
$R_r$	$0.05[\Omega]$	$\lambda_0$	3.35
$X_s$	$0.20[\Omega]$	$C_{pmax}$	0.5
$X_r$	$0.20[\Omega]$	$R$	1.5[m]
$J$	$100[kg\ m^2]$	$V_0/f_0$	0.36

Fig.3은  $\lambda$ 에 대한 함수  $C_p(\lambda)$ 를 시뮬레이션을 통하여 구하게 되면 비선형인 것을 알 수 있다.

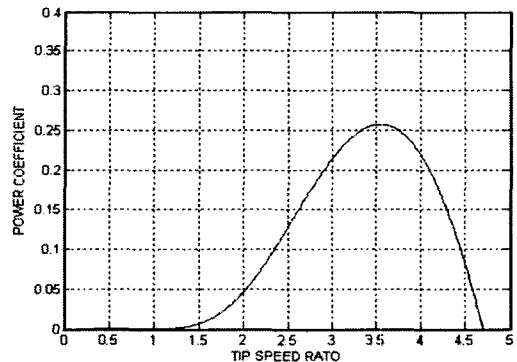


Fig. 3  $C_p$  of the winder turbine

### 4.2 시뮬레이션 결과

피드백 파라미터는  $10\ ms^{-1}$ 이하의 풍속에 대해서 선형으로 근사화 하면(정격 출력이 얻어지는 부분)  $k_1=1.95 \times 10^{-3}[s]$ 이다. 이 때  $k_2=0$ ,  $k_2=1.5$ ,  $k_2=2.0$ 으로 변화하고 등가관성 모멘트 파라미터는  $J_{eq}=100\ kg\ m^2$ ,  $J_{eq}=43\ kg\ m^2$  및  $J_{eq}=23\ kg\ m^2$ 로 하여 각각 축속도 응답을 고찰한다.

Fig.4는 풍속 초기치  $v_{wi}=7[m/s]$ 에서 최종치  $v_{wf}=10[m/s]$ 까지 풍속을 단계적으로 변화한 경우 축속도변화를 나타낸 것이다. 풍속의 단계적 변화에서 초기 축속도  $\Omega_i=\lambda_0 v_i/R=16.3[rad/s]$ 에서 시스템은 안정상태로 도달하고 있는 것을 알 수 있다. 관성 모

먼트  $J_{eq} = 43 \text{ kg m}^2$ 와  $J_{eq} = 23 \text{ kg m}^2$ 인 경우 응답을 보면 관성 모우먼트  $J_{eq} = 100 \text{ [kg m}^2\text{]}$ 일 때 보다 2배, 4배정도 빠르게 응답함을 관찰할 수 있다.

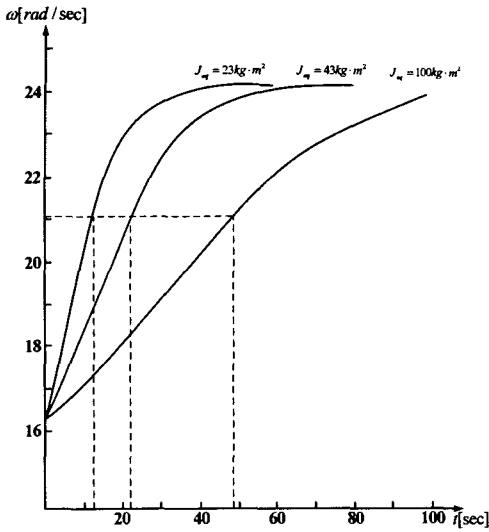


Fig. 4 Response of system for the equivalent inertia

Fig. 5는 풍속  $v(t) = 7 + 3\sin Ft$ 로 일반적인 변화를 주고 발전전력, 축 속도, 풍속 등을 시뮬레이션한 결과를 나타낸다. 발전 전력은  $J_{eq} = 43 \text{ [kg m}^2\text{]}$ 에서 정상적인 교류가 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 축 속도 응답은  $J_{eq}$ 에 따라 임계상태 또는 진동으로 되는 것을 알 수 있다.  $J_{eq} = 43 \text{ [kg m}^2\text{]}$ 에서 최대 허용 주파수는  $F_{max} = 0.006 \text{ [rad/s]}$ 로 계산된다. 또한 시스템 응답은  $F = 0.005 \text{ [rad/s]}$ 에서 임계치에 근접한 값이 됨을 알 수 있고 안정 동작하는 것을 알 수 있었다. 풍속은  $7 \text{ [m/s]}$ 를 중심으로 변하고 있고 최대 이탈 풍속은  $1.05 \text{ [m/s]}$  반복 주기는  $10 \text{ [s]}$ 이다.

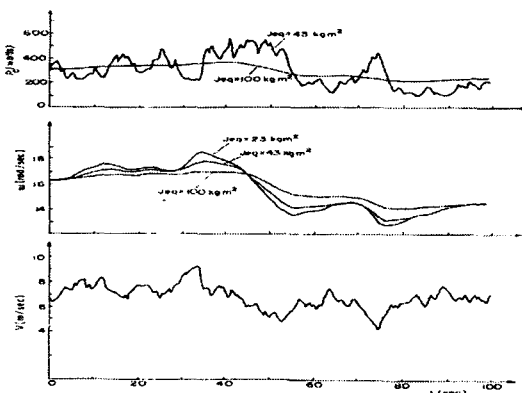


Fig. 5 Results of simulation for a stochastically varying wind speed.

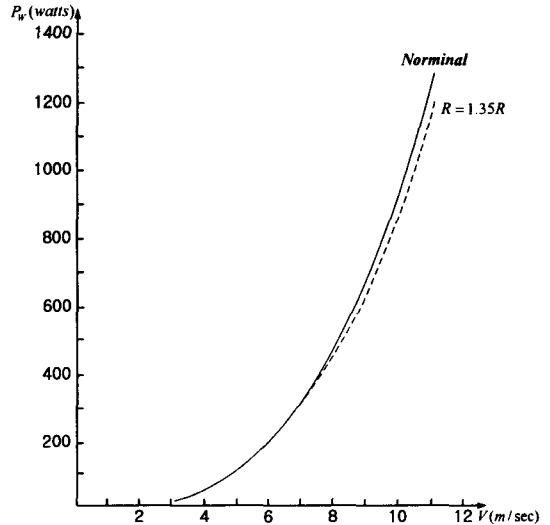


Fig. 6 Input wind power plotted against wind speed for machine resistance.

Fig. 6은 일정한 풍속에서 유도발전기 기계적 저항  $R = 0.05 \text{ [}\Omega\text{]}$  (상온에서)와  $1.35R$ 의 두 가지 다른 값에서 얻어진 전력을 나타낸다. 두 곡선사이에 매우 작은 차이가 있는 것을 알 수 있고 이 정도의 차이는 시스템의 운전에서 온도 변화가 중대한 악화를 야기하지 않는다고 추측할 수 있다.

## 5. 결론

(1) 본 풍력발전 시스템은 섬이나 무인도 등 소규모 독립적인 장소에 적용할 수 있고 발전 전력은 직류로 변환되기 때문에, 유도 기계의 전압이나 주파수 제어가 필요 없다.

(2) 제한한 제어방법은 풍력 발전 시스템의 수행에 적합한 것을 알 수 있고 정상상태의 시스템을 기동하기 위해 별도의 여자장치가 필요 없다.

## [참고 문헌]

- [1] Behcet M. Saribater and Mesut E. Sezer, "Modelling and Control of a Winder Energy Conversion System", INT. J. Control, Vol. 46, No. 1, 1987.
- [2] 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.
- [3] 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.