

동기발전기를 갖는 풍력발전 시스템의 성능 예측
 Performance Prediction of Wind Power System
 With a Synchronous Generator

김 건 훈*	한국동력자원연구소
신 동 열	"
이 철 형	"

I. 서론

최근 세계 각국의 에너지 사정은 대체에너지로서 자연에너지의 개발 촉진을 유도하고 있다. 자연에너지 중에서도 풍력에너지는 무공해이며 연료비가 없고 수명이 길다는 장점에 의해 주목을 받고 있다. 풍력발전 시스템의 전체적인 효율은 풍차의 형태 뿐만 아니라 풍황조건 및 부하조건 등에 많은 영향을 받게 되므로 먼저 풍력발전 시스템의 정확한 성능 해석을 통해 시스템 운전조건을 제시하는 것에 의해 풍력발전 시스템의 설계 및 운영 최적화가 가능하게 된다.

본 논문에서는 동기발전기를 포함한 풍력발전시스템의 모델링을 행하였고, 이의 결과를 통해 여러가지 부하변수에 대한 시스템의 성능 변화에 관한 연구를 수행하여 시스템에 대한 새로운 모델링을 제시하였고, 최적운전 조건에 의한 풍력시스템의 최적화를 가능하게 하였다. 또한 수행된 여러 결과를 실험값과 비교하여 근사하게 일치함을 보이고 있다.

II. 본론

1. 풍차특성(Windmill Characteristics)

풍력시스템의 성능 해석에는 적절한 풍차 모델이 필요하게 된다. 그림 1에 본 논문에서 사용되어진 풍차모델을 보이고 있다. 즉, 풍속 V_w 인 바람의 운동에너지 P_{in} 을 회전자가 기계적에너지로 P_w 만큼 변환시키는데, P_f 만큼의 손실이 발생함을 보이고 있다. 따라서 다음과 같은 관계가 성립하게 된다.

$$P_{in} = P_w + P_f \quad (1)$$

$$T_{in} = T_w + T_f \quad (2)$$

여기서 순수히 바람이 갖는 동력과 호오크는 다음과 같게 된다.

$$P_{in} = \rho A V_w^3 / 2 \quad (3)$$

$$T_{in} = \rho A R V_w^2 / 2 \quad (4)$$

또 변환된 기계적 동력과 호오크 P_w, T_w 는 다음과 같게 된다.

$$P_w = C_p P_{in} \quad (5)$$

$$T_w = C_t T_{in} \quad (6)$$

다음으로 손실되는 동력과 호오크를 모델링

하게 되는데, 손실호오크 T_f 를 풍차의 회전 속도 N 의 함수로서 다음과 같이 표시할 수 있게 된다. [3]

$$T_f = f_0 + f_1 N + f_2 N^2 + f_3 N^3 + \dots \quad (7)$$

여기서, f_0 등은 풍차속 회전속도 N 에 대한 손실 계수를 나타내고 있다. 손실되는 호오크를 해석적으로 구하기는 매우 어려우므로, 프로펠라형 풍차에 대한 풍동실험을 통해서, [3]에 의해 식(7)의 각 계수들이 풍속의 함수로서 다음과 같이 구해져 있다.

$$\begin{aligned} f_0 &= K_{f0} V_w^2 \\ f_1 &= K_{f1} V_w \\ f_2 &= K_{f2} \\ f_3 &= K_{f3} / V_w \end{aligned} \quad (8)$$

따라서, 식(6), 식(7)을 식(2)에 대입하여 무차원 풍차 호오크 계수 C_t 는 다음과 같은 관계를 갖게 된다.

$$C_t = 1 - (1/T_{in}) (f_0 + f_1 N + f_2 N^2 + f_3 N^3 + \dots) \quad (9)$$

이상에서 손실 계수 K_{f0} , K_{f1} 등을 알면 식(9)에 의해 회전자 호오크 계수를 계산할 수 있게 된다. 호오크 계수 C_t 에 관해서는 공기역학적인 측면에서, 여러가지 형상을 갖는 회전자에 대해 Jones [1] 등에 의해 해석적으로 다음과 같이 구해져 있다.

$$C_t = \frac{8}{\lambda^3} \int_{\lambda_H}^{\lambda} (1-a) a' x^3 dx \quad (10)$$

여기서, a , a' 는 간섭 계수, x 는 극부 회전 속도비를 나타낸다. 그러나 식(10)은 계산 시간이 오래 걸릴 뿐만 아니라, 다루기가 복잡한 적분형태 꼴이므로, 풍력 시스템의

모델링에 사용될 수 있는 간단한 형태로 변환시킬 필요가 있게 된다. 즉, 특정날개끝 속도비 영역내에서 식(10)을 계산하여 가장 영향을 주는 날개끝 속도비 λ 에 대한 다음과 같은 근사식을 사용할 수 있게 된다.

$$C_t = \alpha \lambda^3 + \beta \lambda^2 + \gamma \lambda + \delta \quad (11)$$

여기서 α , β , γ 및 δ 는 λ 에 대한 호오크 계수를 나타내고 있다. 이상의 식(8)(9)(11)에 의해 손실 계수는 다음과 같이 정리되어질 수 있다.

$$\begin{aligned} K_{f0} &= -(\delta - 1) \rho_{AR} / 2 \\ K_{f1} &= -\gamma \rho_{AR}^2 / 2 \\ K_{f2} &= -\beta \rho_{AR}^3 / 2 \\ K_{f3} &= -\alpha \rho_{AR}^4 / 2 \end{aligned} \quad (12)$$

식(11)에 의해 구해진 α , β , γ , δ 에 의해 λ 에 대한 C_t 와 풍속 V_w 에 대해 손실 계수들이 각각 그림 2와 그림 3에 나타나고 있다. 그림 2에서는 식(11)에 의한 근사식과 실험[5]에 의한 값을 비교하고 있는데, 근사식이 실험값과 잘 일치하고 있으므로 실제의 해석에 근사식을 이용할 수 있게 된다. 또, 기계적인 동력과 호오크 P_0 , T_0 를 부하계수 K_t 와 풍차회전 속도 N 에 대해서 다음과 같이 표시할 수 있게 된다.

$$P_w \approx P_0 = K_t N^2 \quad (13)$$

$$T_w \approx T_0 = K_t N \quad (14)$$

따라서, 식(2), (7) 및 (14)에 의해 다음과 같은 호오크 평형식이 만들어질 수 있다.

$$f_3 N^3 + f_2 N^2 + (f_1 + K_t) N + f_0 - \frac{\rho_{AR} V_w^2}{2} = 0 \quad (15)$$

이 식(15)에 의해 부하계수에 대한 $N-V_w$ 의

관계를 알 수가 있게 되므로 풍속 V_w 에 대한 풍차동력 P_0 를 식(13)에 의해 얻을 수 있게 된다. 이를 그림 4에 보이고 있는데, 부하 계수 및 풍속에 대해 최대동력이 민감하게 변하고 있음을 나타내고 있다. 따라서, 적절하게 풍속조건에 따라 부하를 바꿔주는 것에 의해 항상 시스템의 최대동력을 얻을 수 있음을 보이고 있다.

2. 풍력발전 시스템 특성(Wind Generating System Characteristics)

실제의 풍력발전 시스템에서는 구조가 간단하고 값이 싸며, 출력의 슬립을 보상해 줄 별도의 보조장치가 필요없다는 장점에 의해 동기발전기를 사용하게 된다. 따라서, 본 절에서는 동기발전기를 사용하는 풍력발전시스템의 전기적 부하에 대한 성능의 변화를 예측하고자 한다. 우선 동기발전기를 모델링하는데 있어서, 여자전류 I_f 는 일정하다고 보고 동기 임피던스 Z 는 다음과 같이 쓸 수 있으며, 1상에 대한 등가회로는 그림 5에 보이고 있다.

$$Z = R_a + j X_a \quad (16)$$

이 때의 유도기전력 E 는 여자전류 I_f 가 일정한 상태에서 다음과 같이 표시할 수 있게 된다.

$$E = K_v N = \sqrt{(R_a + R_L)^2 + (X_a + X_L)^2} \cdot I_L + V_b \quad (17)$$

따라서, 식(17)에서 평균부하 전류 I_L 은 속회전속도 N 의 함수로서 다음과 같게 된다.

$$I_L = \frac{K_v N - V_b}{\sqrt{(R_a + R_L)^2 + (X_a + X_L)^2}} \quad (18)$$

또, 발전기 출력 호오크 T_g 및 동력 P_g 는 다음과 같이 표시할 수 있게 된다.

$$P_g = V \cdot I_L \cos \phi \quad (19)$$

$$T_g = K_t I_L = \frac{K_v N - V_b}{\sqrt{(R_a + R_L)^2 + (X_a + X_L)^2}} \cdot I_L \quad (20)$$

여러가지 손실항을 포함하는 풍차출력 호오크 T_w 와 발전기출력 호오크 T_g 는 다음의 식(21)과 같은 관계를 갖게 된다.

$$T_w = \varepsilon_g N + T_{gc} + T_g \quad (21)$$

식(21)에 식(2)(7) 및 (20)을 대입하게 되면 동기발전기를 갖는 풍력발전 시스템의 호오크 평형식을 세울 수 있게 되어, 부하조건외 변화에 대한 시스템 출력변화를 예측할 수 있게 된다.

$$T_{in} = K_{f0} V_w^2 + K_{f1} V_w N + K_{f2} N^2 + T_{gc} + \varepsilon_g N + K_t I_L \quad (22)$$

즉, 일정 V_w 와 $\cos \phi$ 에 대해 식(22)에서 부하에 대한 풍차회전속도 N 의 관계를 알 수가 있게 되고, 식(19)에 의해 발전기 출력을 알 수 있게 된다. 이의 결과를 그림 6에 보이고 있다. 계산에 사용된 변수치들은 Takayuki [3] 의 실험조건을 이용하여 실험값과 비교하였는데 비교적 잘 일치하고 있고, 실험이 행해지지 않은 발전기 출력 P_g 의 역률 $\cos \phi$ 에 대한 변화도 그 계산결과를 보이고 있다.

III. 결론

본 논문은 풍차 및 동기발전기를 포함하는 풍력발전 시스템의 모델링을 통해서, 해석적으로 부하조건에 대한 성능의 변화를 예측하여 실험치와 비교 논의하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 본 논문에서 이용된 모델링은 실험치와

잘 일치하므로 실제의 시스템 성능 예측에 이용될 수 있다.

(2) 부하조건의 변화에 대한 출력의 변화를 보임으로서, 적절한 부하의 조절에 의해 풍력 발전시스템의 최적화가 가능하다.

(3) 본 모델링을 통해 동기발전기를 갖는 풍력발전시스템의 유도성부하에 대한 영향을 살펴볼 수 있게 되었다.

참고 문헌

- 1) C.N.Jones, "Blade Element Performance in Horizontal-Axis Wind-Turbine Rotors," Wind Engineering, Vol.7, No.3, 1983.
- 2) T.Suzuki and H.Okitsu, "Characteristics of a Savonius Windmill Power System with a Synchronous Generator," Wind Engineering, Vol.6, No.3, 1982.
- 3) T.Suzuki "Study on Modeling and Characteristics of a Windmill Power System," Wind Engineering, Vol.7, No.3, 1983.
- 4) 鈴木茂行, 黒川和重, "風力発電システムの風速による最大出力制御法", Japan Wind Energy, Vol.8, No.2, 1984.
- 5) 신동열, 이철형, 박경호, 김건훈, 김효래, "풍력발전 기술 개발", KE-85-10, 연구보고서, 한국동력자원연구소, 1985.

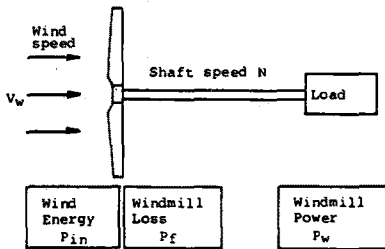


그림 1. 풍력시스템 모델

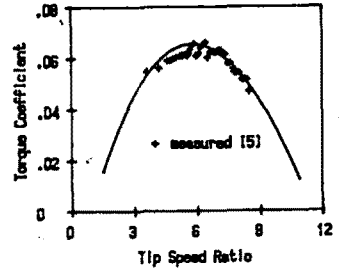


그림 2. λ 에 따른 C_t 곡선

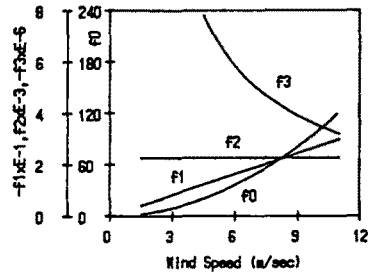


그림 3. 풍속에 따른 손실계수 곡선

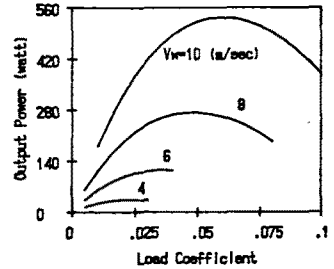


그림 4. 부하계수에 의한 출력의 변화

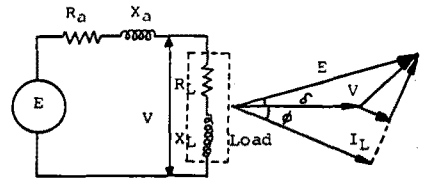


그림 5. 동기발전기 등가회로

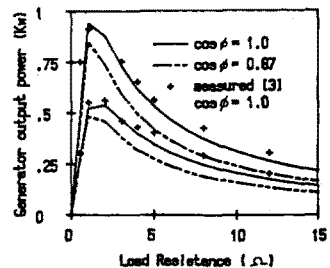


그림 6. 부하에 의한 발전기 출력변화