

Maximum Output Power Control of Wind Generation System Using Fuzzy Control

아보칼릴 아메드<sup>†</sup> · 金永信<sup>\*</sup> · 李東椿<sup>\*\*</sup>  
 (Ahmed. G. Abo-Khalil · Young-Sin Kim · Dong-Choon Lee)

**Abstract** - For maximum output power, wind turbines are usually controlled at the speed which is determined by the optimal tip-speed ratio. This method requires information of wind speed and the power conversion coefficient which is varied by the pitch angle control. In this paper, a new maximum output power control algorithm using fuzzy logic control is proposed, which doesn't need this information. Instead, fuzzy controllers use information of the generator speed and the output power. By fuzzy rules, the fuzzy controller produces a new generator reference speed which gives the maximum output power of the generator for variable wind speeds. The proposed algorithm has been implemented for the 3[kW] cage-type induction generator system at laboratory, of which results verified the effectiveness of the algorithm.

**Key Words** : Wind Turbine, Maximum Output Power, Fuzzy Control, Cage-Type Induction Generator

1. 서 론

풍력발전 시스템은 발전기의 속도제어 방법에 따라 일정속 운전과 가변속 운전 방식으로 나눌 수 있다. 종래에는 풍속변화에 무관하게 일정한 속도로 동작하는 운전방식을 채택하였으나 이는 풍속변화에 대응하여 최대전력을 발생시킬 수 없는 단점이 있어 최근에는 가변속 방식을 채택하고 있는 추세이다[1]. 이는 풍속이 변할 때 이에 대응하여 발전기 출력이 최대로 되게 하는 회전속도로 발전기를 동작시킴으로써 이루어진다. 현재 가변속 방식의 상용화 시스템에서 채택하고 있는 출력제어 방법은 주로 최적주속비  $\lambda_{opt}$ 를 이용한다[2],[3]. 주속비는 풍속에 대한 블레이드 끝점의 속도의 비인데 이는 블레이드의 반경, 풍속, 그리고 회전속도로 계산된다, 주어진 풍속에서 최적주속비가 주어지면 최대출력을 발생하는 회전속도를 구할 수 있다. 최적주속비는 블레이드 설계시 정해지는 설계사양이다. 이 방법은 단순하지만 풍속과 주속비에 대한 정보를 필요로 한다. 더구나 나셀 위에 위치한 풍속계로 측정된 풍속이 정확히 평균 풍속을 나타내지는 못한다[4]. 한편, 태양광 발전에 흔히 사용되는 hill-climbing 방법도 풍력발전에도 시도된 바 있다[5]. 이는 추종 속도가 느리고 정상상태에서도 최대전력점 주위에서

속도가 계속적으로 흔들리는 문제가 있다. 그리고 퍼지 이론을 이용하는 MPPT(maximum power point tracking) 제어기법이 태양광 발전 시스템에 많이 적용되어 왔다[6],[7]. B. K. Bose씨는 이 기법을 풍력발전 시스템에 적용한 바 있다[8]. 이 연구에서는 제어의 강인성과 수렴성을 높이기 위해 사전 시뮬레이션을 통해 제어기에 필요한 여러 가지 상수를 미리 구해야 하는 불편함이 있다.

이러한 기존 방법의 단점을 제거하고자 본 연구에서는 퍼지제어 이론을 적용하여 풍속이 변하더라도 항상 최대전력을 출력할 수 있는 발전기 회전속도를 찾아내는 간단한 알고리즘을 도출하고자 한다. 이는 발전기의 순시전력을 측정하여 출력이 증가하는 방향으로 발전기의 속도를 조절함으로써 이루어진다. 발전기의 기준속도를 결정하는 퍼지제어기는 발전기의 출력전력과 회전속도에 대한 정보만 필요로 하며 풍속이나 주속비에 대한 정보가 필요하지 않다는 장점이 있다. 반면 최대전력점에 대한 추종 응답성은 최적주속비를 이용하는 방법에 비해 느리지만 실제 발전기와 직결된 터빈 블레이드의 큰 관성 모멘트를 고려하면 큰 문제가 되지는 않는다.

도출된 제어알고리즘은 직류전동기의 토크제어로 모의되는 터빈 시뮬레이터와 농형 유도발전기를 이용한 시스템으로 구현된다. 유도발전기는 벡터 제어방식으로 제어되며 회전속도의 기준값은 풍속의 변화에 대해 퍼지 물에 의해 결정된다. 발생된 전력은 back-to-back PWM 컨버터의 직류링크전압을 일정하게 제어함으로써 계통측으로 넘어가게 되며 계통측의 역률은 1로 제어된다. 실험실의 3[kW]급 M-G 세트를 이용한 실험을 통해 제안된 알고리즘의 타당성을 입증한다.

† 교신저자, 正會員 : 嶺南大 大學院 電氣工學科 博士課程  
 E-mail : a\_galal@yahoo.com  
 \* 學生會員 : 嶺南大 大學院 電氣工學科 碩士課程  
 \*\* 正會員 : 嶺南大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博  
 接受日字 : 2005年 7月 8日  
 最終完了 : 2005年 9月 15日

## 2. 풍력 터빈

### 2.1 풍력터빈의 모델링

바람이 가지고 있는 풍력  $P_w$ 는 다음과 같이 표시된다 [9].

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 [W] \quad (1)$$

여기서  $\rho [kg/m^3]$ 는 공기밀도,  $A [m^2]$ 는 풍력터빈의 회전 단면적,  $v [m/sec]$ 는 풍속이다. 식(1)은 풍속에 의해 발생하는 이상적인 풍력이고 실제로 풍력터빈에 의해서 획득될 수 있는 기계적 출력은 풍력터빈의 전력변환계수  $C_p$ 에 의해서 결정된다.  $C_p$ 는 터빈 블레이드의 기하학적 형상과 피치각  $\beta$ 에 의해 결정된다. 풍력터빈에 의해 발생하는 출력은 식(2)와 같이 결정되며 그림 1(a)에 그 특성이 보인다.

$$P_b = C_p(\lambda, \beta) P_w = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (2)$$

여기서 주속비  $\lambda$ 는 풍속에 대한 블레이드 끝점의 선속도의 비이고 식(3)으로 정의된다.

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{v} \quad (3)$$

여기서  $\omega_m$ 과  $R$ 은 각각 블레이드의 회전속도와 반경을 나타낸다. 주속비에 대한 전력변환계수의 관계가 그림 1(b)에 보이며, 주어진 형상의 블레이드에서 최대 전력변환계수를 주는 최적주속비는 유일하다.

식(2)와 (3)으로부터 블레이드에 포획되는 전력은 다음과 같이 표시된다.

$$P_b = \frac{1}{2} \rho A R^5 \frac{C_p}{\lambda^3} \omega_m^3 \quad (4)$$

이로부터 회전체의 토크  $T_b$ 는 다음과 같다.

$$T_b = \frac{P_b}{\omega_m} \quad (5)$$

식(5)로 주어지는 풍력터빈의 토크를 구현하기 위해 타여자 직류전동기를 사용한다. 실제의 터빈 블레이드의 관성은 직류전동기의 관성보다 훨씬 크므로 동일한 풍속 변화에 대해서 시스템의 속도 응답은 달라진다. 터빈 시뮬레이터 구현시 이 점을 고려하여 토크 지연치를 발생한다[10]. 풍력터빈이 발전기를 구동할 때 동적 방정식은 다음과 같고

$$T_b = (J_B + J_D) \frac{d\omega_{gb}}{dt} + T_{g,b} \quad (6)$$

터빈 시뮬레이터의 직류전동기가 발전기를 구동할 때의 동

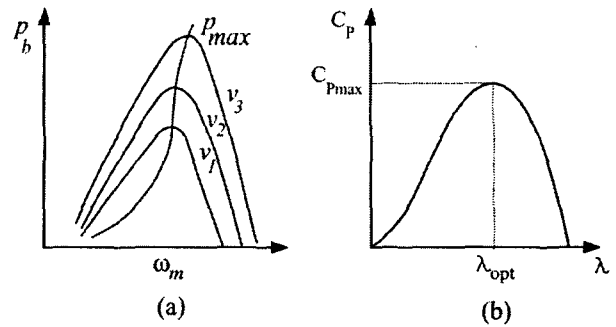


그림 1 풍력터빈의 특성 (a) 회전속도에 대한 출력 (b) 주속비에 대한 전력변환계수

Fig. 1 Characteristics of wind turbine (a) output power versus rotational speed (b) power conversion coefficient versus tip-speed ratio

적 방정식은 식(7)과 같다.

$$T_m = (J_M + J_D) \frac{d\omega_{g,m}}{dt} + T_{g,m} \quad (7)$$

여기서  $T_b$ 는 블레이드의 토크,  $T_m$ 은 직류전동기의 토크,  $T_{g,b}$ ,  $T_{g,m}$ 는 발전기의 토크,  $J_B$ 는 발전기 축으로 환산된 블레이드의 등가관성모멘트,  $J_M$ 은 직류전동기의 관성모멘트,  $J_D$ 는 유도발전기의 관성모멘트,  $\omega_{g,b}$ ,  $\omega_{g,m}$ 은 발전기 회전속도이다.

실제 풍력터빈의 경우와 전동기를 사용한 경우에 발전기는 동일한 동특성을 가져야 하므로 위 식에서  $T_{g,b} = T_{g,m} = T_g$ 이고  $\omega_{g,b} = \omega_{g,m} = \omega_m$ 이 된다. 이 조건을 이용하여 위의 두 식으로부터 다음 식이 유도된다.

$$T_m = T_b - (J_B - J_M) \frac{d\omega_m}{dt} = T_b - T_{comp} \quad (8)$$

여기서

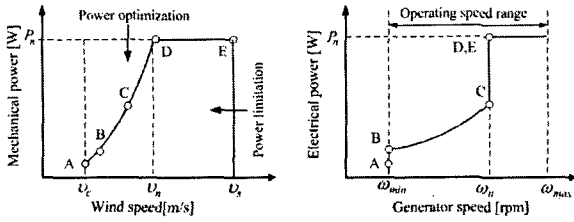
$$T_{comp} = (J_B - J_M) \frac{d\omega_m}{dt} \quad (9)$$

식(8)에서 알 수 있듯이 실제 직류전동기에서 발생해야 할 토크는 블레이드의 토크에서 관성체의 가속도에 필요한 토크  $T_{comp}$ 를 뺀 값이다. 식(9)의 보상토크 성분  $T_{comp}$ 는 과도상태에만 나타나는 성분이며 정상상태에서는 0이 된다. 그리고 블레이드의 토크를 직류 타여자 전동기의 토크로 표시하면 다음과 같다.

$$T_b = K \Phi I_a (= T_{DCM}) \quad (10)$$

여기서  $K$ 는 토크상수,  $\Phi$ 는 계자속,  $I_a$ 는 전기자 전류이다.

2.2 터빈 제어



(a) 풍속에 따른 출력 특성 (b) 회전속도에 따른 출력 특성

그림 2 터빈 제어 모드에 대한 출력특성

Fig. 2 Output power for turbine control modes

- (a) output power versus wind speed
- (b) output power versus rotational speed

풍속이 변함에 따라 최대의 출력을 발생하기 위해 풍력터빈의 속도를 제어할 필요가 있다. 풍속이 낮을 경우에는 블레이드의 피치각을 고정시킨 상태에서 최대 전력을 발생하는 회전속도로 기계를 운전하고, 풍속이 정격치 이상일 때는 피치각을 제어하여 일정출력이 되도록 제어한다. 이는 회전체의 관성이 매우 크기 때문에 피치각 제어로 풍속의 변화에 대해 충분히 회전속도를 제어할 수 있기 때문이다.

그림 2(a)는 풍속에 대한 발전기 출력, (b)는 발전기 속도에 대한 출력 특성을 보인다[1],[11]. 그림에서  $v_c$ 는 cut-in 속도,  $v_n$ 는 정격 풍속,  $v_s$ 는 shut-down 풍속이고,  $\omega_{min}$ ,  $\omega_n$ ,  $\omega_{max}$ 는 각각 발전기 최저회전속도, 정격속도, 최대회전속도이다. AB 구간은 풍속이 너무 낮아 회전속도가  $\omega_{rot} \leq \omega_{min}$  이므로 발전기 기준속도를  $\omega_m^* = \omega_{min}$  로 설정한다. BC 구간은 회전속도가  $\omega_{min} < \omega < \omega_n$ 로 최대 전력 추종제어가 수행되는 영역이다. CD 구간은 발전기 회전속도는 이미 정격치에 도달하여 그 상태를 유지한 채 풍속이 더욱 증가함에 따라 발생전력만 증가하는 영역이다. D 점에서부터는 발생전력도 정격치에 도달하게 되고 풍속이 증가하면 블레이드의 피치각을 조절하여 출력을 일정하게 유지하는 구간이며, 풍속이  $v_s$  이상이 되면 시스템의 운전을 정지시킨다.

3. 계통 연계형 풍력발전 시스템

그림 3은 back-to-back PWM 컨버터로 구성된 농형 유도발전기의 전력변환시스템을 나타낸다[3],[12]. 풍력터빈에

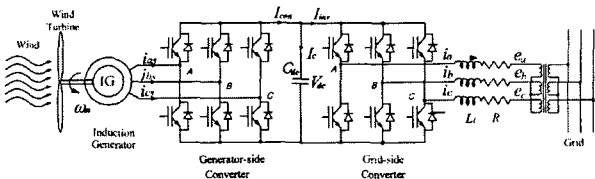


그림 3 농형 유도발전기를 이용한 계통연계형 풍력발전 시스템

Fig. 3 Grid-connected wind power generation system using cage-type induction generators

포획된 기계적 에너지는 농형 유도발전기에 의해 전기에너지로 변환되고 이는 발전기측 컨버터의 제어에 의해 직류링크단으로 넘어간다. 직류링크단 전압은 계통측 컨버터에 의해 직류링크 전압을 일정하게 제어함으로써 계통으로 넘어가게 된다. 농형 유도발전기에 사용되는 back-to-back PWM 컨버터는 이중여자 권선형 유도발전기에서와는 달리 발전기의 전체 출력을 계통측으로 전달해야 하므로 그 정격용량이 발전기의 용량과 같아야 한다.

3.1 발전기측 제어

풍력발전 시스템에서 발전기의 속도를 풍속의 변화에 대응되게 제어함으로써 최대출력을 얻을 수 있다. 식(3)으로부터 발전기 기준속도는 다음과 같이 계산된다.

$$\omega_m^* = \frac{\lambda \omega v}{R} \tag{11}$$

서론에서도 언급되었듯이 이 방법은 피치각  $\beta$ 에 의해 전력 변환계수  $C_p(\lambda, \beta)$ 가 달라지고 이에 따라 주속비도 달라지므로 피치각에 대한 주속비를 미리 알아야 하는 문제점이 있다. 정격 풍속 이상에서 피치각 제어에 의해 일정출력 제어 방법을 사용한다 하더라도 최소한 풍속에 대한 정보가 필요하다.

본 연구에서는 풍속의 변화에 따라 최대출력을 발생하는 발전기의 속도지령치는 후술하는 퍼지제어를 통해 생성된다. 농형 유도발전기는 고정자 d-축 전류로 자속을 제어하여 여자의 크기를 제어하고 고정자 q-축 전류로 토크를 제어하여 발전기의 속도를 제어하는 벡터제어 방식을 이용한다. 그림 4는 농형 유도발전기의 제어블럭도를 나타낸다.

3.2 계통측 컨버터 제어

계통측 PWM 컨버터의 제어블럭도는 그림 5와 같다. 계통측 PWM 컨버터는 농형 유도발전기에 의해 발생된 전력을 계통으로 공급하고 출력전류의 역률제어를 수행한다. 발전기의 출력이 증가하면 직류링크 전압이 상승하고 감소하면 직류링크 전압도 감소한다. 따라서 직류링크전압을 일정하게 제어함으로써 발전기로부터 계통으로 넘어가는 전력을

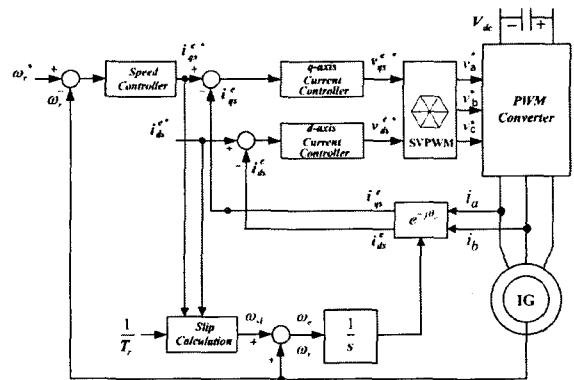


그림 4 농형 유도발전기 벡터제어

Fig. 4. Vector control of cage type induction generators

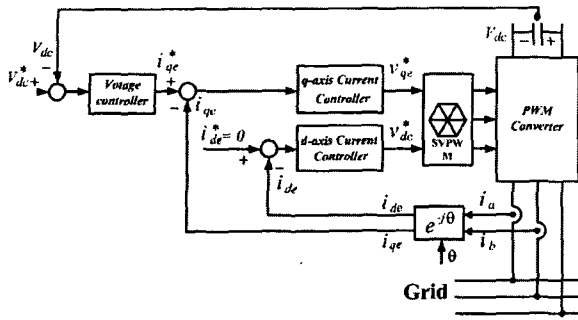


그림 5 계통측 컨버터 제어 블록도  
Fig. 5 Control block diagram of grid-side converter

제어할 수 있다. 또한 계통측 컨버터 d-축 전류를 0으로 제어함으로써 계통측에서 단위역률을 얻을 수 있다.

#### 4. 퍼지제어를 이용한 최대출력 제어

그림 6은 풍속의 변화에 대해 발전기 속도를 조절함으로써 발전기의 동작이 최대출력점에서 이루어질 수 있다는 것을 보여준다. 예를 들어, 풍속이  $v_1$ 일 때 발전기가  $\omega_1$ 의 속도로 A점에서 동작하고 있다면 최대 출력을 위해 발전기 속도는  $\omega_2$ 로 조절되어 B점으로 이동한다. 이 때 풍속이  $v_3$ 로 변한다면 발전기는 C점에서 동작하게 되는데 여기서 다시 발전기 속도 조절이 수행되어 D점으로 운전점이 이동한다. 여기서 다시 풍속이  $v_2$ 로 변한다면 동작점은 E점이 되고, 최대출력을 위해 발전기 속도는  $\omega_3$ 로 감속된다. 풍속이 변하더라도 최대전력 추종제어에 의해 발전기는 항상 주어진 풍속에서 최대전력을 발생하게 된다.

본 논문에서 제시된 퍼지제어기는 풍속에 관계없이 현재의 발전기 출력과 직전의 발전기 속도를 입력으로 하여 출력이 증가하는 방향으로 새로운 발전기 회전속도의 기준값을 계산해 낸다. 그림 7(a)는 퍼지제어기의 전체 구성도로 퍼지화기(fuzzifier), 추론기(inference), 비퍼지화기(defuzzifier)의 세 개의 블록으로 구성된다. (b)는 규칙에 근거한 추론과정의 블록을 보인다. 먼저 발전기 속도가 변화하면 출력  $P_0$ 가 변화하게 된다. 직전의 속도변화분  $L\delta\omega^*$ 이 양이고  $\delta P_0$ 가 양이면 퍼지제어기는 속도가 최대전력점이 될 때까지  $\delta\omega^*$ 만큼 속도를 증가시키고,  $\delta P_0$ 이 음이면  $\delta\omega^*$ 만큼 기준속도를 감

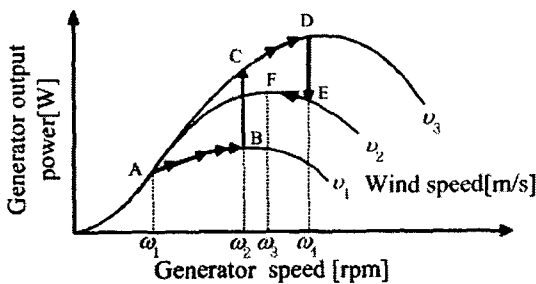


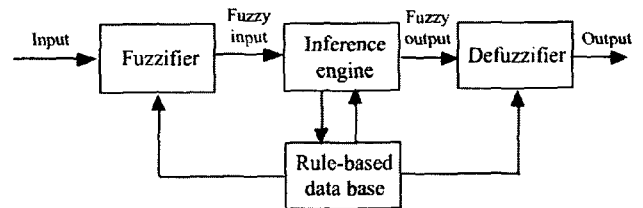
그림 6. 최대전력 추종  
Fig. 6 Maximum output power tracking

소시킨다.  $L\delta\omega^*$ 이 음일 경우에는 이와 반대로 조절한다. 즉,  $L\delta\omega^*$ 의 변화가 출력을 증가시키면 동일한 방향으로 발전기 기준속도를 계속 증가시키고, 출력을 감소시키면 반대방향으로 기준속도를 변화시킨다.

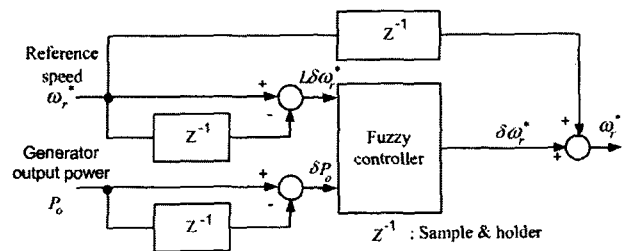
#### 4.1 퍼지화(fuzzification)

퍼지화는 입력변수를 소속함수로 처리하는 과정이고 입력 변수가 소속함수를 통해 관계되는 퍼지집합에 속하는 정도를 결정한다. 소속함수는 각각의 입력변수를 0~1사이의 값으로 변환하는데 사용된다. 소속함수는 Gaussian 분포, Sigmoid 곡선, 종 모양, 삼각함수 등 임의의 형태일 수 있다. 이론적으로 소속함수가 만족시켜야 하는 유일한 조건은 변환된 값이 0~1 사이에 존재해야 한다는 것이다. 실용적으로 소속함수는 입력변수의 특성을 반영하고 제어기 요구 조건을 만족시키도록 선택된다. 소속함수의 선택은 일종의 제어기 튜닝을 의미하기 때문에 신중하게 선택해야 한다. 일단 소속함수의 형태가 선택되면 중앙값과 변역을 선정한다. 어떠한 순간에 하나 이상의 규칙이 만족되도록 소속함수가 중복이 되게 한다[13].

본 연구에서는 삼각형 모양이 빠른 처리에 유리하므로 이를 소속함수로 선택한다. 그리고 발전기 출력의 변화분  $\delta P_0$ 와 직전의 기준속도 변화분  $L\delta\omega^*$ 를 입력으로 선택한다. 제시된 퍼지 시스템에서  $\delta P_0$ 에 대해 9개,  $L\delta\omega^*$ 에 대해 3개,  $\delta\omega^*$ 에 대해 9개의 퍼지집합을 갖도록 선정한다. 그림 8은 입출력 소속함수를 나타내며, 집합의 요소는 다음과 같은 의미를 갖는다.



(a) 퍼지제어기의 전체 구성  
(a) Overall block diagram of fuzzy logic controller



(b) 퍼지제어기  
(b) Fuzzy logic controller

그림 7. 퍼지 로직 제어기  
Fig. 7 Fuzzy logic controller

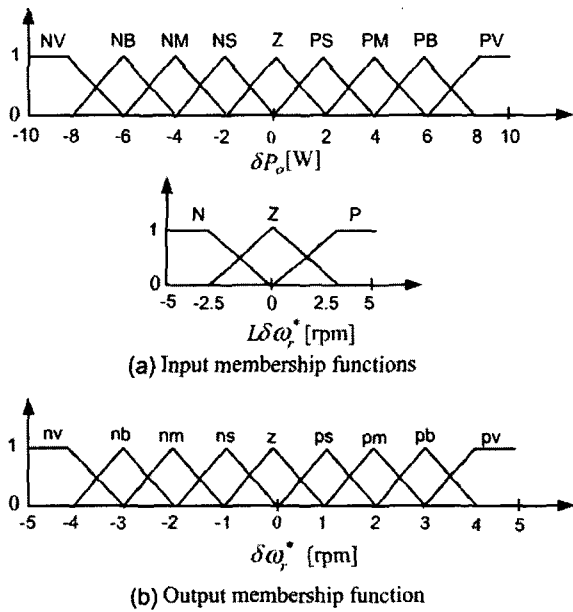


그림 8. 입출력 소속 함수  
Fig. 8 Input and output membership functions

N(negative), NV(negative very big), NB(negative big), NM(negative medium), NS(negative small), Z(zero), P(positive), PS(positive small), PM(positive medium), PB(positive big), PV(positive very big).

4.2 퍼지 추론(fuzzy inference)

퍼지추론은 퍼지논리 연산, 퍼지규칙 함의(implication)와 회합(aggregation)의 과정을 포함한다. 추론시스템에서 입력 변수는 퍼지연산자와 IF-THEN 규칙에 의해 처리된다. 각 규칙에 대해 출력퍼지 집합은 하나의 집합으로 회합된다. 입력퍼지 집합은 논리 연산자 AND에 의해 퍼지 규칙과 관계를 맺는다. 두 입력 퍼지집합에 대한 연산은 다음과 같이 정의된다.

$$\mu_{A \cap B} = \min[\mu_A, \mu_B] \tag{12}$$

이 규칙이 기본적으로 시스템 제어법칙이다. 각 규칙이 다른 가중치를 가질 수 있지만 본 연구에서는 모든 규칙은 동일한 가중치를 갖는다고 가정한다. 제시된 시스템은 주어진 입력에 대해 27개의 규칙을 갖는다. 두 입력( $L\delta\omega_r^*$ ,  $\delta P_o$ )의 값에 따라 출력( $\delta\omega_r^*$ )이 어떻게 변할 지가 결정된다. 이 규칙

표 1 퍼지추론 규칙  
Table 1 Rules of fuzzy inference

$L\delta\omega_r^* \backslash \delta P_o$	NV	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PV
N	pv	pb	pm	ps	z	ns	nm	nb	nv
Z	nb	nm	ns	z	ps	pm	pv	pb	pv
P	nv	nb	nm	ns	z	ps	pm	pb	pv

이 표 1에 보여진다.

회합과정에서 입력은 출력 퍼지집합이고 출력은 각 출력 변수에 대한 하나의 퍼지집합으로 된다. 본 연구에서는 하나의 퍼지집합을 만들기 위해 모든 출력 퍼지집합의 최대치를 취하는 최대 회합법이 사용된다.

4.3 비퍼지화(defuzzification)

비퍼지화 과정의 입력은 퍼지집합이고 출력은 단일 값이다. 무게중심법(center of gravity)을 비퍼지화에 사용하는데 이는 회합된 출력 퍼지집합을 나타내는 전체 면적의 평균치에 해당된다. 퍼지제어기 설계는 플랜트의 수학적 모델을 필요로 하지 않지만 시스템의 특성과 제어 조건들에 대한 이해를 필요로 한다.

5. 실험 결과 및 검토

제시된 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 실험실에서 M-G 세트를 이용한 실험을 수행하였다. 그림 9는 실험 장치의 구성을 보인다. 표 2와 3은 각각 모의 풍력발전 시스템에 사용된 농형 유도발전기와 타여자 직류전동기의 정격과 파라미터이고 표 4는 실험을 위해 모의된 터빈블레이드의 사양이다. 타여자 직류전동기를 사용하며 계자를 정격으로 일정하게 유지하고 전기자전류를 제어하여 풍속에 대응되는 토크를 발생한다. 직류전동기를 제어하기 위한 컨버터는 단상반파 PWM 컨버터와 4상한 초퍼로 동작하는 단상인버터를 사용한다. 터빈 블레이드의 가속과 감속 특성을 잘 모의하기 위해서는 전동기의 가감속 특성이 좋아야 하는데 그림 9에 보인 회로를 사용하면 기존의 3상 인버터 회로를 그대로 이용할 수 있는 이점이 있다[14]. 직류전동기의 감속시 발생하는 회생전력에 의해 직류링크 전압이 상승하여 과전압이 발생할 수도 있는데 입력단의 ac/dc PWM 컨버터를 통하여 직류전압을 일정하게 유지시킬 수 있다. 직류전동기측 컨버터의 스위칭 주파수는 3.5 [kHz]이고, 유도발전기와 계통측 컨버터의 스위칭 주파수는 5 [kHz]이다. 그림 10은 M-G 세트로 구성된 실험장치의 사진이다. 농형 유도발전기를 구동하기 위한 back-to-back PWM 컨버터와 이를 제어할 TMS320VC33 DSP 제어보드, 그리고 직류전동기를 구동하기 위한 컨버터와 이를 제어할 TMS320C31 DSP 제어보드 등이 보인다.

그림 11은 풍속이 8[m/s]에서 11[m/s]로 스텝으로 변화할 경우의 제어특성을 보인다. (a)는 함수발생기로 모의한 풍속

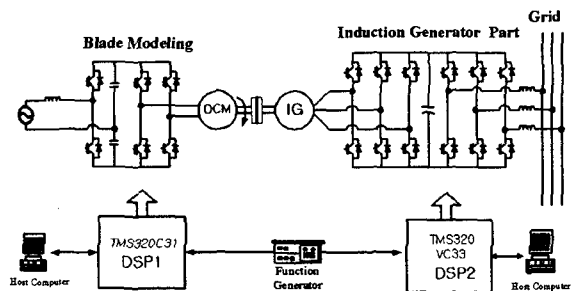


그림 9 터빈 시뮬레이터와 발전기 제어시스템  
Fig. 9 Turbine simulator and generator control system

을 나타내고 (b)는 퍼지제어기에 의해 발생한 기준속도를 따라가는 실제 발전기속도를 나타낸다. (c)는 발전기 출력단 상전압과 상전류를 이용하여 계산된 발전기 출력전력이고 (d)는 계통측으로 넘어가는 출력전력으로 전원측 상전압과 상전류를 이용하여 계산하였다. (e)는 계통측 컨버터의 q-축 전류, (f)는 계통측 컨버터의 d-축 전류, (g)는 발전기측 q-축 전류, (h)는 발전기측 d-축 전류를 나타낸다. 농형 유도 발전기의 벡터제어의 의해 발전기측 d-축 전류는 일정한 값으로 유지되고 q-축 전류에 의해 발전기의 토크가 제어되고, 또한 회전속도가 제어된다. 계통측 컨버터에서 d-축 전류를 0으로 제어하여 역률 1제어를 얻고 q-축 전류제어에 의해 직류링크 전압을 일정한 값으로 제어함으로써 발전전력을 직류링크로부터 계통측으로 전달한다. 그림 12는 풍속이 8~11[m/s] 사이에서 삼각과 형태로 연속적으로 변화할 경우의 제어특성을 나타낸다. 스텝으로 변화할 경우와 마찬가지로 풍속의 변화에 따라 발전기 회전속도가 최대출력을 위해 조절되며 발전기 전력이 일부 손실을 제외하고 거의 계통측으로 전달되는 것을 알 수 있다.

그림 13은 회전속도에 대한 유도발전기의 출력전력 곡선이다. 주어진 풍속에 대해서 회전속도를 바꿔가며 출력전력을 실측한 데이터를 점으로 표시하였고, 특정한 속도에서 최대의 출력을 발생한다는 것을 알 수 있다.

표 4 터빈 블레이드의 파라미터  
Table 4 Parameters of wind turbine blades

파라미터	값
블레이드 반지름 R	0.95 [m]
$C_{p\ max}$	0.434
$\lambda_{opt}$	5
관성 모멘트	0.5 [ $kg \cdot m^2$ ]
정격 출력	3 [kW]
기어비	1 : 2

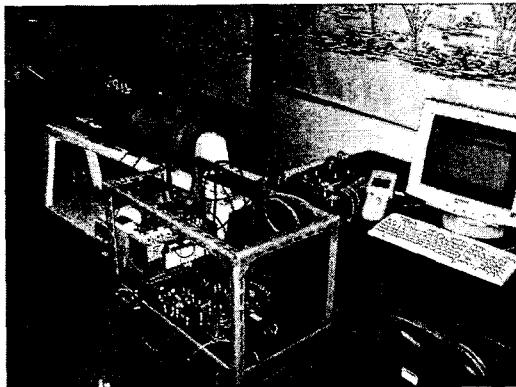


그림 10 실험장치  
Fig. 10 Experimental set-up

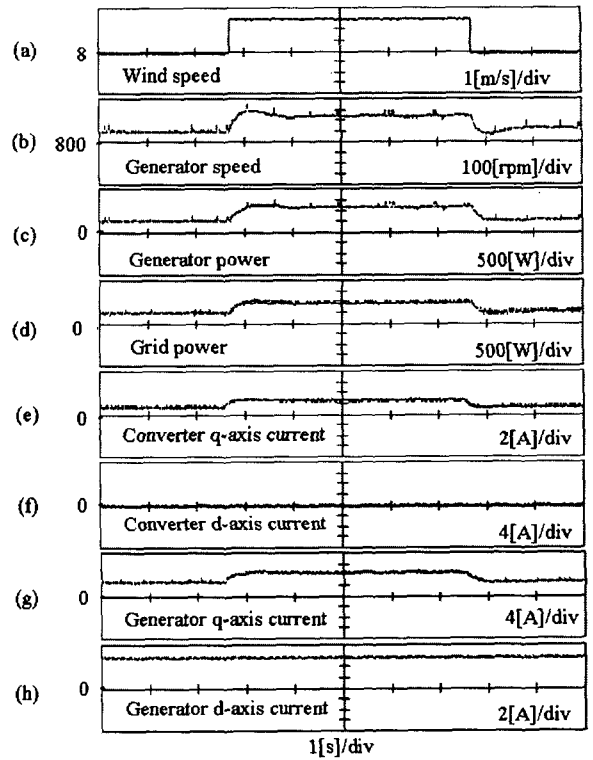


그림 11 풍속이 스텝으로 변할 경우의 제어특성  
Fig. 11 Control performance in case of step-wise variation of wind speed 8-11[m/s]

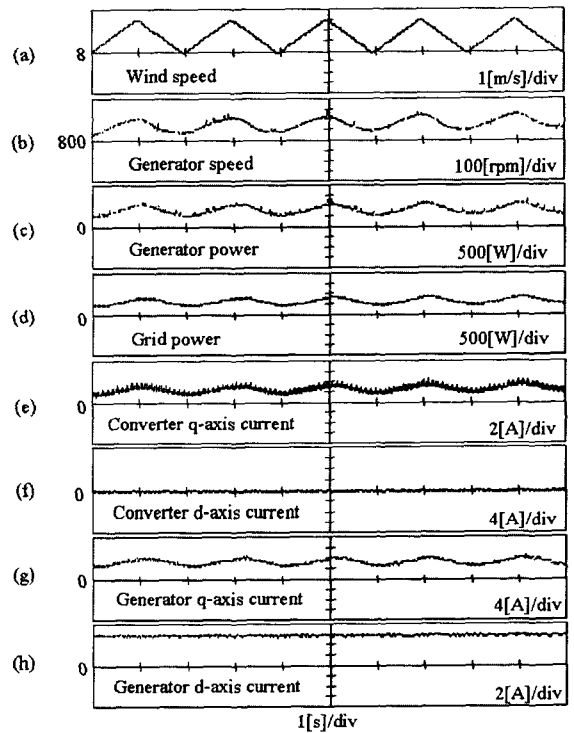


그림 12 풍속이 연속적으로 변할 경우의 제어특성  
Fig. 12 Control performance in case of continuous variation of wind speed

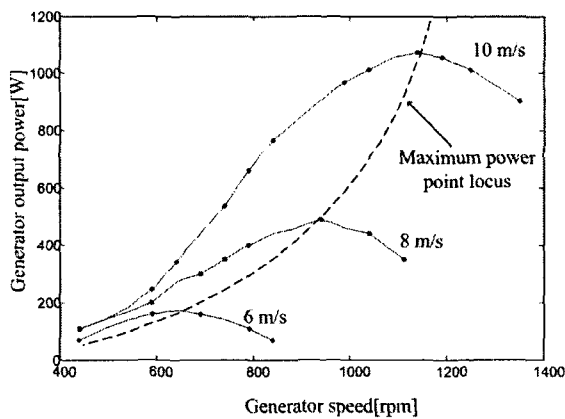


그림 13 회전속도에 따른 발전기 출력  
 Fig. 13 Output power curves for different wind speeds

### 6. 결 론

본 논문에서는 농형 유도발전기를 이용한 계통 연계형 풍력발전 시스템에서 풍속의 변화에도 불구하고 퍼지제어를 이용하여 항상 최대전력점으로 동작할 수 있는 가변속 제어 시스템을 제안하고 실험으로 그 타당성을 입증하였다. 직류발전기의 토크제어에 의해 블레이드의 관성을 포함한 터빈의 특성을 모의하였으며 발전기의 벡터제어에 의해 최대 전력제어를 위한 가변속 시스템을 구현하였다. 현재 사용되고 있는 최적주속비를 이용하는 방법은 최대전력점 추종특성이 뛰어나지만 실제로 최대전력점은 발전기 출력이 아니라 블레이드의 출력이므로 정확한 최대출력점이라고 보기 어렵다. 뿐만 아니라 이 방법은 풍속계를 필요로 하며 이로부터 측정된 풍속도 평균값으로 보기 어렵다. 그러나 퍼지 제어법에서는 풍속에 대한 정보가 불필요하고, 발전기 출력을 직접 이용하여 발전기 속도를 조절함으로써 정확한 최대전력점을 찾을 수 있는 장점이 있다.

제안된 알고리즘은 직류전동기를 이용한 풍력터빈 시뮬레이터와 3[kW] 농형 유도발전기 시스템으로부터 그 타당성을 보였고 실제 풍력발전 시스템에도 적용 가능하다고 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 기초전력 연구원(과제번호: R-2003-B-362) 주관으로 수행된 과제임.

#### 참 고 문 헌

[1] Z. Lubosny, *Wind Turbine Operation in Electric Power Systems*, Springer, 2003.  
 [2] Mukund R. Patel, *Wind and Solar Power Systems*, CRC Press, 1999.  
 [3] 김형균, 이동춘, 석줄기, "농형 유도발전기를 이용한 계통연계형 가변속 풍력발전 시스템", 전력전자학회 논문

지, 제 9권, 제4호, pp. 397-404, 2004. 8.  
 [4] L. Hui, P. McLaren, and K. L. Shi, "Neural network based sensorless maximum wind energy capture with compensated power coefficient" IEEE IAS Conf. Rec., Vol. 4, pp. 2600-2608, October 2004.  
 [5] Q. Wang and L. Chang, "An independent maximum power extraction strategy for wind energy conversion systems", IEEE Canadian Conf. Rec. on Electrical and Computer Eng., pp. 1142-1147, May 1999.  
 [6] N. Patcharaprakiti, and S. Premrudeepreechacharn, "Maximum power point tracking using adaptive fuzzy logic control for grid-connected photovoltaic system", IEEE PES Winter Meeting, Vol. 1, pp. 372-377, January 2002.  
 [7] M. G. Simoes, N. N. Franceschetti, and M. Friedhofer, "A fuzzy logic based photovoltaic peak power tracking control", IEEE ISIE Proceedings, Vol. 1, pp. 300-305, July 1998.  
 [8] M. G. Simoes, B. K. Bose, and R. J. Spiegel, "Design and performance evaluation of a fuzzy-logic-based variable-speed wind generation system." IEEE Trans. on IA, Vol. 33, No. 4, pp. 956-965, July 1997.  
 [9] Siegfried Heier, *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, John Wiley & Sons, 1998.  
 [10] 정병창, 정세중, 송승호 "가변성 모의 기능을 가진 풍력터빈 시뮬레이터의 제어 알고리즘". 전력전자학회 논문지, pp 266-273. 제 8권, 제 3호, 2003. 6.  
 [11] A. D. Hansen, C. Jauch, P. Sørensen, F. Iov, and F. Blaabjerg, "Dynamic wind turbine models in power system simulation tool DIGSILENT", Risø National Laboratory, December 2003.  
 [12] R. Pena, J. Clare, G. Asher "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation" IEE Proc. on Electric Power Applications, vol. 143, pp. 231-241, May, 1996  
 [13] 오성권, *C 프로그래밍에 의한 퍼지모델 및 제어시스템*, 내하출판사, 2002.  
 [14] 김태운, 이지명, 석줄기, 이동춘 "유도전동기 구동을 위한 저가형 단상-3상 AC/DC/AC PWM 컨버터", 전력전자학회 논문지, 제 7권, 제 4호, pp. 244-252, 2002, 8.

저 자 소 개



**아보칼릴 아메드**

1969년 10월 12일생. 1992년 이집트 Assuit Univ. 전기공학과 졸업(학사). 1996년 동대학원 졸업(석사). 현재 영남대 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 053-810-3933

E-mail : a\_galal@yahoo.com



**이 동 춘 (李 東 椿)**

1985년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1987년~1988년 대우중공업 중앙연구소 주임 연구원. 1998년 미국 텍사스 A&M Univ 방문연구교수. 2004년 미국 Wisconsin Univ. 방문연구교수. 현재 영남대 전기공학과 부교수.

Tel : 053-810-2582

E-mail : dclee@yu.ac.kr



**김 영 신 (金 永 信)**

1978년 12월 29일생. 2004년 영남대 전자공학과 졸업(학사). 현재 영남대 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 053-810-3933

E-mail : antonio41@hanmail.net