

## 가변속과 일정속 풍력발전시스템의 출력제어

金哲浩 · 孔正植 · 吳哲洙\*

경북대 대학원 전기공학과, \*경북대 전자전기공학부

### Power Control of Variable and Constant Speed Wind Power System

Chul-Ho Kim, Jeong-Sik Kong and Chul-Soo Oh\*

Department of Electrical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.

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

#### 요 약

풍력발전시스템은 일정속과 가변속 풍력발전시스템으로 나누어진다. 일정속 풍력발전시스템은 유도발전기를 이용한 시스템이 주종을 이루고, 가변속 풍력발전시스템은 동기발전기-인버터로 이루어진다. 본 논문에서는 피치컨트롤이 장착된 두 시스템을 분석하여, 피치컨트롤의 제어알고리즘을 유도하고 공기역학적 출력제어 국면에서 두 시스템의 출력제어를 비교 분석하고자 한다.

**Abstract**— Wind turbine generation system is classified to constant and variable speed type, viewing on the power control of the system. The generator of constant speed system is generally induction generator, and it of the variable type is synchronous generator, combined with inverter system. In this paper, the power control of these two types of wind power generating system, which are equipped with pitch control system, is analysed and the adequate pitch control algorithm is studied. The pitch control is devoting to capture the proper wind energy in the wind turbine shaft from resource, which is used to protect the machine system and to limit the generating power.

#### 1. 서 론

현대 산업사회의 급속한 발달과 함께 에너지소비의 빠른 증가는 석탄, 석유등의 화석에너지 고갈에 대한 위기감과 더불어, 화석에너지 사용으로 인한 대기환경 오염문제 등이 지구 자체를 위협하므로 인해, 세계 각국의 미래 대체에너지 개발에 대한 관심을 고조시키는 계기가 되었다. 특히, 부존자원의 부족으로 에너지를 대다수 수입에 의존하고 있는 우리 나라의 경우 그 심각성이 더욱 심하게 나타나고 있다.

풍력발전시스템은 전력제어적 측면으로 볼 때 일정속과 가변속 풍력발전시스템으로 나누어진다. 일정속 풍력발전시스템은 유도발전기를 이용한 시스템이 주종을 이루고, 가변속 풍력발전시스템은 동기발전기-인버터로 이루어진다<sup>[1][2]</sup>. 본 연구에서는 피치제어장치를 장착한 위 두 시스템의 출력제어를 분석하여 보기로 하였으며, 일

정속 풍력발전시스템으로는 Zond사 Z40을, 가변속 풍력발전시스템으로는 Lagerwey사 LW50을 기준으로 삼았다. 피치제어장치는 풍력터빈을 각 날개의 종축을 중심으로 틀어주는 장치이며, 바람의 속도와 이루는 영각(迎角, Angle of Attack)을 가변 시킴으로써 바람에너지의 일부분만 출력으로 전달하게 하는 방식이다<sup>[3][4]</sup>. 이는 바람에너지가 클 때 발전기로 하여금 일정출력을 낼 수 있게 하는 공력학적인(aerodynamic) 출력제어방식이며, 이를 본 논문에서 일차적 출력제어의 수단으로 삼고자 한다<sup>[5][6]</sup>. 여기에서 속도가 상당히 민감한 요소로 작용하고 있는데, 이 속도가 피치제어에 어떠한 영향을 미치는가 하는 것을 알아보는 것이 중요한 관심사이다.

이차적 출력제어는 발전기 자체의 출력제어이고, 이는 발전기의 형태와 그 후속 연계단, 즉 인버터 등의 연결 여하에 따라 달라지며, 이는 전기적 출력제어이다<sup>[3][6]</sup>.

### 2. 풍차의 공기역학적 출력

풍력발전시스템에서 풍차(rotor)에서 만들어 주는 출력의 식은 일반적으로 공기무게  $\rho(\text{kg/m}^3)$ , 풍차속도  $\omega(\text{rad/s})$ , 회전면적  $A(\text{m}^2)$ , 풍속  $v(\text{m/s})$ , 주속비  $\lambda$ , 출력계수  $C_p$  등으로 얻어지며, 단위 면적당 공기역학적 출력과 이로 부터 로터 축에 얻는 기계적 출력은 다음과 같다. 출력계수  $C_p$ 는 최대값이 Betz 상수인 0.59를 넘지 못하며, 그 값은 일반적으로 주속비  $\lambda$ 의 함수이며, 또한 피치 제어인 경우와 스톨제어(Stall regulated)인 경우에서 각각 다르게 나타난다<sup>[5][6]</sup>. 특히 공기무게  $\rho$ 를  $(1.25 \pm 0.04) \times 10^{-3} \text{ t/m}^3$ 의 실용값을 넣었을 때 P는 kW로 나타나며 관계식은 다음 식(1), (2)와 같다.

$$\frac{P}{A} = 0.59 \frac{1}{2} \rho v^3 \quad [\text{kW/m}^2] \quad (1)$$

$$\frac{P}{A} = C_p(\lambda) \frac{1}{2} \rho v^3 \quad [\text{kW/m}^2] \quad (2)$$

주속비(走速比, Tip Speed Ratio)  $\lambda$ 는 다음 식과 같이 정의되며,  $r$ 는 날개의 반경이다<sup>[1][2]</sup>.

$$\lambda = r\omega/v \quad (3)$$

따라서 식(2)는 다음과 같이 변형되며, 이 식은  $\omega$ 의 함수로 나타나다록 되어 있는데 의의가 있다 할 수 있겠다.

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \eta \rho \frac{C_p(\lambda)}{\lambda^3} r^3 \omega^3 = \frac{1}{2} \eta \rho C_p'(\lambda) r^3 \omega^3 \quad [\text{kW/m}^2] \quad (4)$$

$$C_p' = \frac{C_p}{\lambda^3} \quad (5)$$

여기에서  $\eta$ 는 풍력발전시스템의 효율이고,  $C_p'$ 는 출력계수  $C_p$ 에서 유도된 변형된 출력계수이다<sup>[1]</sup>.

기계적 출력식(2)는 풍차에서 얻는 이상적인 출력으로 풍속에 대한 그래프를 Fig. 1에 나타내었고, 아울러 피치제어와 스톨제어를 장착한 풍력발전의 단위 면적당 출

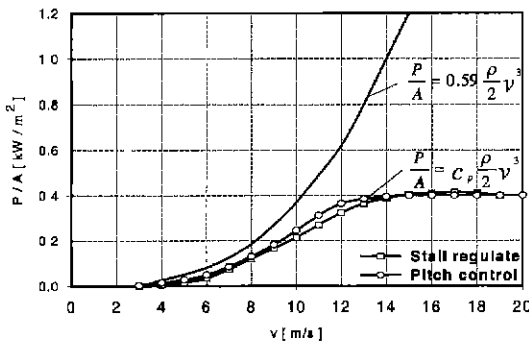


Fig. 1. Power Extraction per unit rotating area.

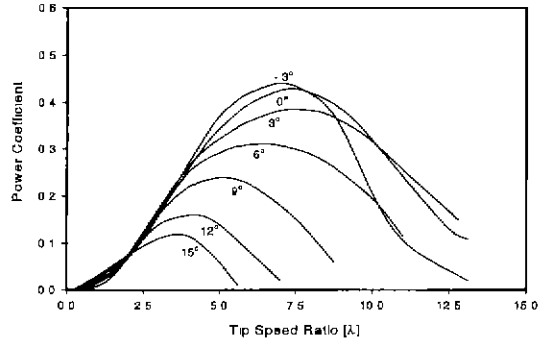


Fig. 2. Tip speed ratio versus Power coefficient.

력 그래프를 같이 나타내었다. 그래프에 제시한 풍력발전기의 정격풍속은 14 m/s 임을 알 수 있겠고, 이때  $C_p$  값은 0.24임을 알 수 있겠다. 다시 말해 공기역학적 출력효율은 최대 0.59인데 그 값의 40%만 사용하고 나머지는 활용하지 않는다는 뜻이며, 이는 피치제어로서 발전기에 무리가 가지 않게 하는 의도적 조치로 볼 수 있다. 한편 정격풍속의 75%에 해당되는(3/4 정격풍속으로 표기) 10 m/s에서는  $C_p$  값이 0.4임을 알 수 있겠고, 이때에는 최대효율의 68%까지를 사용하는 것을 알 수 있다. 또한 정격풍속에서 단위 면적 당 출력이 0.4 kW/m<sup>2</sup>이라 함은 태양광발전이 0.1 kW/m<sup>2</sup>인 것과 비교할 수 있는 값으로, 풍력발전과 태양광발전의 경제성을 비교할 수 있는 중요한 척도가 되리라 생각한다<sup>[6]</sup>.

$C_p$ 는 날개의 형상과 외형에 따라 주어지며, Zond사 Z40 모델의  $C_p$  값을 예로 하여 제시하면 Fig. 2와 같다. 피치각의 정의는 풍차 회전면과 날개의 코드(Chord)가 이루는 각이다. 수평축 풍력발전 날개는 중앙에서 밖으로 나갈 수록, 즉 날개의 반경이 커질수록, 피치각이 적어진다. 즉 날개가 트위스트되게 만들어져 있다. 그러면 어느 위치의 피치각을 취하느냐 하는 피치각의 정의는 회사마다 다소 차이는 있지만 일반적으로 날개의 무게 중심에 해당하는 거리의 피치각을 피치각으로 정의한다. Zond사 Z40 모델에서 전체 트위스트각은 10° 정도이고, Lagerwey LW50의 경우는 12° 정도이다.

### 3. 풍력발전기의 토크와 출력

일반적으로 토크  $T=P/\omega$ 의 관계식에서, 풍력발전기의 출력  $P$ 는  $\omega^3$ , 토크  $T$ 는  $\omega^2$ 와 비례관계가 성립한다. 토크  $T$ 는 (4)로부터 다음과 같이 얻어진다<sup>[1][6]</sup>.

$$T = \frac{1}{2} \eta \rho C_p'(\lambda) A r^3 \omega^2 \quad [\text{kNm}] \quad (6)$$

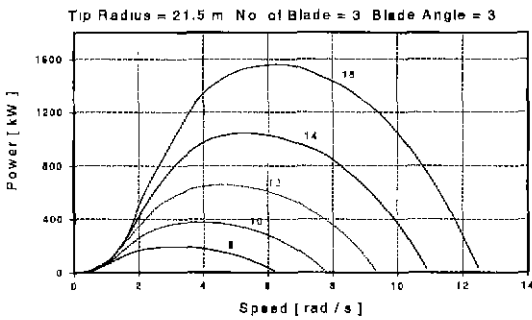


Fig. 3. Power vs. speed.

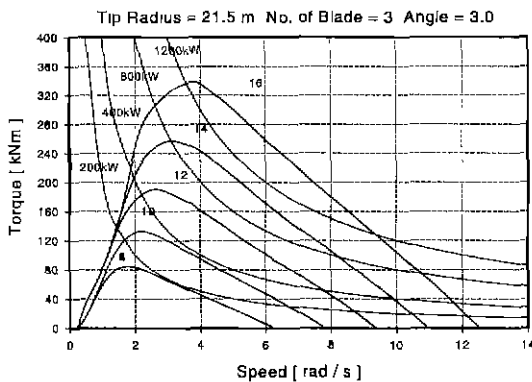


Fig. 4. Torque vs. speed.

위 식에서 알 수 있는 바, 토크 T는  $C_p$ 와  $\omega$ 의 함수이지만, Fig. 2에 따라 일정 피치각 일 때  $v$ 와  $\omega$ 의 함수임을 알 수 있겠다. 풍력학측에서 제시된  $\lambda$ 의 함수로 된 Zond 40의 출력 P를  $\omega$  축으로 변형시켜 나타내면 Fig. 3과 같고, 여기서 다시 T를 계산하여 나타내면 Fig. 4와 같다. 특히 Fig. 4에서 일정출력 곡선을 200 kW, 400

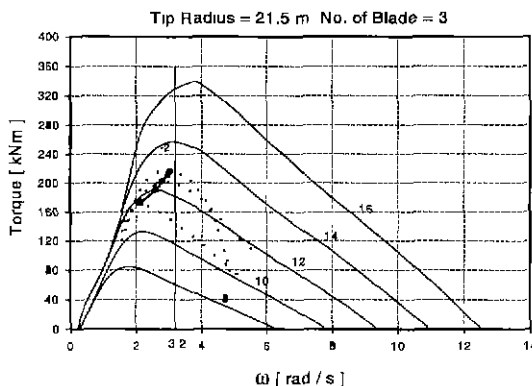


Fig. 5. Torque vs.  $\omega$  in variation of  $\theta_{pitch} = -2^\circ, 0^\circ, 3^\circ, 6^\circ$ .

kW 등을 그려 넣어 토크와 출력을 같이 볼 수 있도록 제시해 주었는데, 풍속과 날개의 속도가 정해지면 토크와 출력이 정해 짐을 알 수 있다.

Figs. 3, 4는 피치각을  $3^\circ$ 일 때의 P와 T를 나타내었으며 다른 각도에서는 T 곡선이 어떻게 변하는 가를 알아보고자 한다. 이를 위해서 Fig. 2의  $C_p$  곡선을 사용하여 그림 4를 수정하면 된다. 여기에서 피치각을  $-2^\circ, 0^\circ, 3^\circ, 6^\circ$ 로 바꿀 때 토크곡선이 변하는 양상을 구하여, 이를 Fig. 5에 나타내었다. 즉, Fig. 5에서의 실선곡선은 피치각  $3^\circ$ 때의 곡선이고, 점선들은 피치각이  $-2^\circ, 0^\circ, 6^\circ$ 일 때의 곡선이다. 복잡성을 피하기 위해 풍속  $v=12$  m/s에서만 이 변화를 제시하였고, 다른 풍속에서도 이와 유사한 양식으로 토크곡선이 변하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 일정속과 가변속 시스템의 출력계수

앞서 언급한 바와 같이 풍력발전시스템은 일정속 혹은 가변속으로 운전하게 되며, 이는 발전기에 따라 좌우된다. 예를 들면, 유도발전기는 속도 변동 1~2% 이내의 좁은 슬립의 범위 내에서 작동되기 때문에, 계통의 주파수가 바뀌지 않는 한, 일정속 풍차시스템으로 간주되며, 동기발전기-인버터 결합시스템의 경우 비교적 넓은 범위의 속도변화를 발전기가 수용할 수 있으므로 가변속 풍차시스템이다. 일정속 발전기의 경우 계통의 기계와 직접 연계되어있는 반면, 가변속 발전기의 경우 계통과 풍력발전시스템사이에 주파수를 연계시키는 시스템인 buffer가 들어있다고 볼 수 있다.

Zond의 경우 발전기 형식은 6극 농형유도발전기이며, 정격 풍차회전수가 30.1 rpm( $\omega=3.2$  rad/s) 로 고정되어 있는 상태이다(Fig. 5에서의  $\omega=3.2$  rad/s에 해당되는 수직선 참조). 가변속 풍력발전시스템에서는 속도의 자유도를 가지고 있다. 다시 말하면, 동기발전기의 동작점을 Fig. 3의 각 풍속에 따른 토크곡선의 최대점을 따라 이동시킬 수 있다. 피치컨트롤을 장착한 시스템의 경우, 이에 추가하여 또 하나의 자유도, 즉 피치각을 가지고 있으며 이 피치각제어는 공기역학적 제어시스템이다

Zond Z40에 대한 전기적 사양과 전기 시스템을 제시하면 다음과 같다.

##### a) Turbine 측 사양

날개 수	: 3
직경	: 40.0 m
Swept Area	: 1,257 m <sup>2</sup>
Hub 높이	: 40.6 m
Turbine 정격회전수	: 30.1 rpm
정격풍속	: 13 m/s

기어비 : 1/40.65

- b) 발전기의 전기적 사양
- 발전기 : 3상 6극 550 kW
- 전류 : 710 A
- 부부하 전류 : 159 A
- 전압 : 480 V
- 주파수 : 60 Hz
- 동기속도 : 1,200 rpm
- 정격 속도 : 1,224 rpm
- kVAr no load : 297 kVAr

가변속 풍력발전시스템의 모델로 정한 Lagerwey LW50의 사양은 다음과 같다.

- a) Turbine 측 사양
- 날개 수 : 3
- 직경 : 50.50 m
- Swept Area : 2,003 m<sup>2</sup>
- Hub 높이 : 50.5 m
- Turbine 정격회전수 : 27.0 rpm
- Turbine 회전수영역 : 15.0~35.0 rpm
- 정격풍속 : 12.5 m/s
- 기어비 : 1/1

- b) 발전기의 전기적 사양
- 발전기 정격 : 3상 84극 750 kW
- 발전기 형식 : 동기발전기
- 전류 : 369 A(x 2)
- 전압 : 690 V
- 동기속도 : 27.0 rpm

위에 예시한 일정속 모델에서 출력계수  $C_p$ 를 풍속에 대해 나타내고자 한다 이를 위해 Fig. 2의 곡선을 식(2)와 더불어 계산하여 도시한 것이 Fig. 6이다. 여기에서 유의하여야 할 사항이 풍속이 정격값 일 때 풍력발전기 로터의  $\lambda$  값을 어떻게 취하느냐 하는 문제이다. 정격 풍속시  $\lambda$ 의 선택은 풍력발전기 날개를 설계할 때 필히 고려하여야 할 사항이다. 날개의 반경이 주어 졌을 때  $\lambda$ 를 낮게 선정하면 풍차의 정격속도를 낮추어야 하는 단점이 있는 반면,  $\lambda$ 를 높게 선정하면 풍차의 정격속도를 높일 수 있는 장점이 있다. 한편 3/4 정격풍속에서의 풍차의 yield를 따져 보아야 한다.  $\lambda$ 를 높게 선정하면(아래 그림) 낮게 선정한 경우보다 동일 피치각에서 비교하면 풍차의 yield가 높게 나타난다. 이 풍속대에서의 중점적 관찰이 필요한 이유는, 3/4 정격풍속이 어느 지역을 막론하고, 빈도

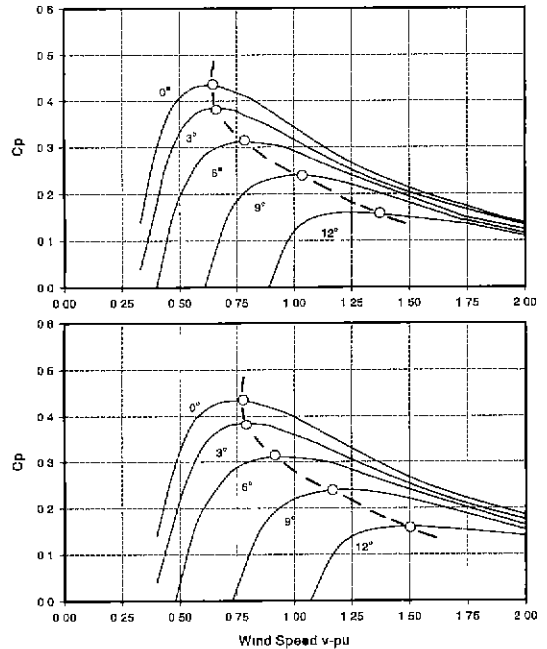


Fig. 6. Power Coefficient of constant speed type versus v (above at  $\lambda_{pu}=5$ , below at  $\lambda_{pu}=6$ ).

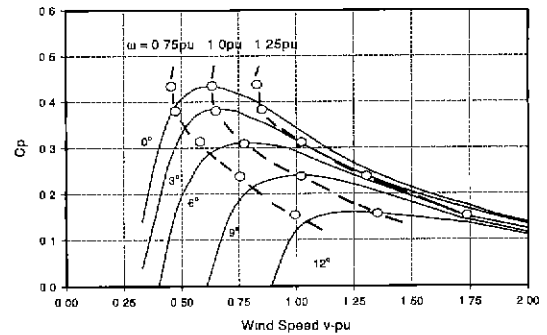


Fig. 7. Power Coefficient of variable speed type versus v.

가 상당히 높기 때문이다<sup>4)</sup>. Fig. 6은 일정속 풍력발전기 모델에서  $\lambda$  값을 각각 5와 6으로 선정하였을 때,  $C_p$  값이다.

다음으로 가변속 모델에서 출력계수  $C_p$ 를 피치각의 변수로, 풍속에 대해 나타내고자 한다. 가변속의 경우는 식(3)의 분자에 있는  $\omega$ 가 가변이다. 따라서 Fig. 6에서 계산한 곡선이  $\omega$ 가 가변 할 때 v에 대해  $C_p$  값이 비례추이 하도록 곡선을 택할 수 있다. Fig. 7에서는  $\lambda$ 가 5인 경우를 택하여  $\omega=1.0$  pu일 때 실선으로 나타내었고,  $\omega=0.75, 1.25$  pu일 때, 그 곡선점이 비례추이로 이동시켜, 각 곡선의 꼭지점을 'o'으로 표시하였다. 이 계산 과정에서 두 풍력발전기 모델의  $\lambda$ 에 대한  $C_p$  값이 같

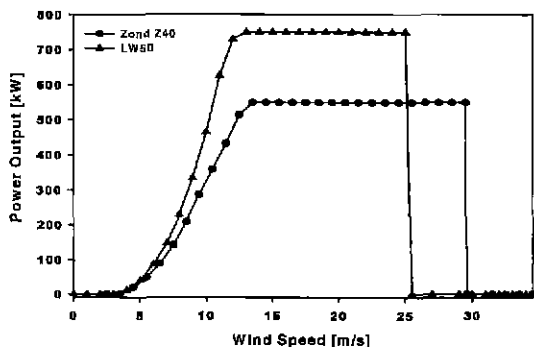


Fig. 8. Power Performance of wind power models.

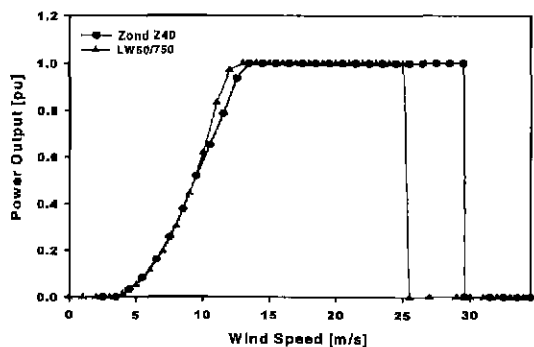


Fig. 9. Power Performance in pu value of wind power models.

다고 전제하였다.

### 5. 풍력발전기의 출력곡선

풍력발전기의 출력곡선을 Power Performance Curve 라하며, 풍속이 주어지면 이에 따라 낼 수 있는 출력값을 제시해 준다. 본 연구에서 모델로 삼은 일정속 Zond Z40과 가변속 Lagerwey LW50의 출력곡선을 나타내면 Fig. 8과 같다. 그림에서 보듯이 가변속 모델이 중부하(medium power output range) 영역인 풍속 9~10 m/s(3/4 정격 풍속대)에서 일정속 모델에 비해 100 kW정도가 더 많이, 높은 부하 영역인 풍속 11.3 m/s(정격의 90% 풍속대) 범위에는 200 kW가 더 많이 출력됨을 알 수 있겠다. 위 출력곡선을 각 기체의 정격출력기준 pu 값으로 나타내면 Fig. 9와 같다.

### 6. 피치제어 알고리즘

피치제어 알고리즘은 풍력발전기의 Power Performance 를 맞추기 위한 피치각의 설정치를 정하는 것이다. 이

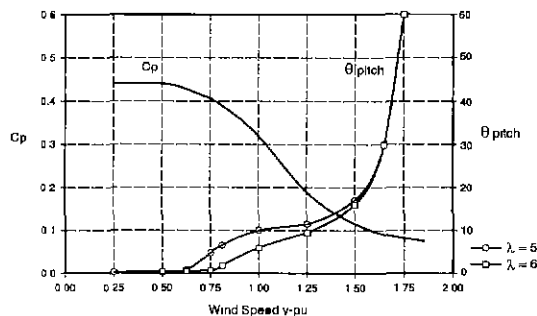


Fig. 10. Pitch Control Algorithm of Constant Speed type.

를 위해 출력곡선을 풍속축에 있어 각 풍속마다  $C_p$  값이 얼마가 되어야 하는가를 알아, 그에 따른 피치각  $\theta_{pitch}$  를 정하도록 하는 수순을 취하면 된다 일정속 모델에서 이를 나타낸 그림이 Fig. 10이다.  $\theta_{pitch}$  가 0 값이라 함은 풍속이 정격풍속에 훨씬 못미쳐 출력계수  $C_p$ 를 최대로 하여 풍차를 운전하는 상태를 나타내고, 0 값에서 벗어난다 함은 풍속이 정격풍속에 근접하여 Power Performance의 변곡점에 접근하기 시작함으로 인해 출력조정이 시작된다 함을 뜻 한다. 그리하여 풍속이 정격풍속에 달하면, 이미  $\theta_{pitch}$  는 어느 값에 도달해 있어야 하며, 풍속이 정격값의 1.75배에 도달하면  $\theta_{pitch}$  는 약 60°에 진입하는 것으로 하였고, 풍속이 그 이상 되면  $\theta_{pitch}$  가 90°가 되도록 하였다.  $\theta_{pitch}$ 가 90°이다 함은 날개가 완전제동이 되는 상태로 되며, 이 때를 풍차날개의 feathering 상태라 한다<sup>16)</sup>. 풍속이 정격풍속일 때,  $\theta_{pitch}$  는 6°가 되도록 본 논문에서 전제하였다. 그림에서 알 수 있는 바는  $\lambda=5$ 일 때가  $\lambda=6$ 일 때보다 더 낮은 풍속에서  $\theta_{pitch}$ 의 조정이 시작 된다는 사실이다.

가변속 풍력발전기의 피치제어 알고리즘을 나타낸 그림이 Fig. 11이다 이 곡선의 작성법은 일정속의 경우와 같다. 다만 다른 점은 풍차의 속도에 따라  $\theta_{pitch}$  값이 달라 진다는 사실이고, 이는  $C_p$  곡선이 속도에 따라 달

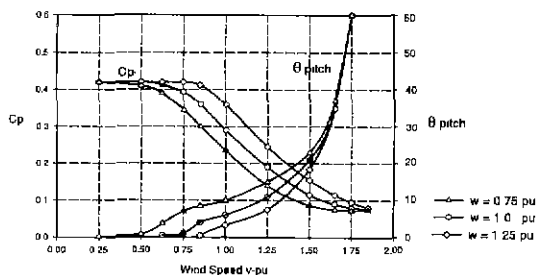


Fig. 11. Pitch Control Algorithm of Variable Speed type.

라져 있고, 피치각도 이와 연관이 되어 있음을 알 수 있다. 그림에서 보여 주는 바는, 속도가 낮을 때에는 속도가 높을 때보다 피치각의 조정이 더 빨리 이루어져야 한다는 점이다 또한 높은 풍속에서 피치각이 커지는 관계는 일정속의 경우와 다를 바 없다. 이들의 결과는 피치제어 알고리즘을 구성함에 있어, 피치각 기준값이 됨을 알 수 있다.

## 7. 결 론

본 연구에서는 피치제어장치를 장착한 위 두 시스템의 출력제어를 분석하였고, 일정속 풍력발전시스템으로는 Zond사 Z40을, 가변속 풍력발전시스템으로는 Lagerwey사 LW50을 기준으로 삼았으며, 나아가서 두 시스템의 피치제어 알고리즘을 유도하였다. 피치제어는 바람에너지가 클 때, 발전기로 하여금 일정출력을 낼 수 있게 하는 공력학적인 출력제어방식이며, 이를 풍력발전시스템의 출력제어의 1단계로 보고자 한다. 출력제어의 2단계로는 발전기 자체 및 이와 연계된 인버터 등의 제어이며, 이는 전기적 제어이다. 이 전기적 제어는 본 논문의 후속편으로 보완하도록 하겠다.

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 피치제어 알고리즘을 유도하기 위한 첫 단계로 날개의 주속비에 대한 출력계수 곡선을 확보한다.
- 2) 위 출력계수 곡선을 풍속에 대한 그래프로 전환시킨다. 이 그래프를 풍력발전 시스템의 요구되는 출력곡선이 만들어지도록 정렬시킨다.
- 3) 위에서 얻은 출력계수로 피치각을 정렬시키고, 이에 따른 풍속에 대한 제어 알고리즘을 유도한다.
- 4) 피치제어 알고리즘을 유도함에 있어 일정속 시스템에서는 날개의 주속비를 선정하는 값에 따라 그 결과가 다르다 함을 얻었다. 가변속 시스템에서는 날개의 주속비 이외에 속도의 변수가 작용하여, 이에 따라 그 결과가 다를 것을 알아 내었다.
- 5) 일정속 풍력발전시스템에서는 주속비를 낮게 선정하면 피치각의 구동을 보다 낮은 풍속에서부터 시작하여야 한다 함을 얻었다(Fig. 10). 가변속 시스템에서는 속도가 낮을수록 피치각의 구동을 보다 낮은 풍속에서

부터 시작하여야 한다 함을 얻었다(Fig. 11). 이들의 결과는 피치제어 알고리즘을 구성함에 있어, 피치각 기준값이 됨을 제시하였다.

## 후 기

본 논문은 (주)한국화이바 주도로 에너지관리공단 R&D 본부에서 지원한 98 대체에너지 자금의 일환으로 수행하였음

## 참고문헌

1. 오철수: "다리우스 풍력터빈의 부하변동에 따른 속도 제어", 에너지공학회지 4권 3호 (1995).
2. 오철수, 서영택: "다변풍속 적응형 Darreus-Savonius 조합 수직축 풍력발전시스템의 설계", 전기학회논문지 제 44권 12호 (1996).
3. 오철수, 김기승: "풍력발전시스템의 인버터 위상제어를 통한 전력제어", 전자기술 연구지 16권 2호 (1995).
4. 오철수, 강창수, 권순홍: "동해안지역에 적합한 풍력발전 시스템에 관한 조사", 전기학회지 제41권 제10호(1992).
5. Eggleston, D.M. and Stoddard, F.S.: "Wind Turbine Engineering Design", Van Nostrand Reinhold Co., N. Y. (1987)
6. Jarass, L. *et al.* "Wind Energy", Springer-Verlag (1981).
7. Ermus, M., Ertan, H B., Kpınar, E.A. and Uğut, F.: "Autonomous wind energy conversion system with a simple controller for maximum-power transfer", IEE Proceedings-B, Vol. 139, No. 5, September (1992).
8. Muljadi, E. and Butterfield, C.P.: "Pitch-controlled Variable-speed Wind Turbine Generation", U.S. Department of Energy, 1998 Report.
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).