

제주 행원 풍력 단지 실무하 운전 특성 연구

오시덕, 차종환, 이현주*, 허종철**

A Study on the Characteristic of Field Operation of Wind farm at Hangwon, Cheju

Si DoeK Oh, Jong Hwan Cha, Hyun Joo Lee*, Jong Cheul Huh**

Key Words: Pitch Control(피치 제어), Stall Control(실속 제어), Wind Farm(풍력단지)

Abstract

In now a days, the concern to environment and energy saving problem is increased worldly. So many countries are developing the wind power system as clean energy system. In our country, Cheju local government has the plan of the Cheju Island wind farm and 600kW class 2 wind turbines, 660kW class 2 turbines, 225kW class 1 turbine and 750kW class 2 turbines has been operated at Hangwon. In this paper the field operation data of the wind turbines was analyzed and was compared with the characteristics & performance of each turbines. As the results, we would find the possibility of wind turbine in domestic and suggest the direction of developing technology.

1. 서론

풍력 발전 시스템은 무한정의 바람을 이용하는 무공해 에너지원이기 때문에 최근 전 세계적으로 에너지와 환경에 대한 문제가 대두되면서 화석 에너지원에 대한 대체 에너지로서 관심이 고조되고 있는 시스템이다. 국내에서도 몇 차례의 유류 파동과 OECD 가입 등으로 인한 에너지 문제 및 환경 부담을 해소하기 위하여 1990년 초부터 풍력 발전 시스템의 연구 개발 및 선진 제품의 도입 설치가 활발히 진행되어 왔으며, 풍력 자원이 풍부한 강원도, 경상북도, 제주도 등의 지방 자치 단체가 중심이 되어 시험단지 구성 및 상업 운전을 실시하고 있다. 정부에서도 대체 에너지 공급 비율을 2006년까지 2%로 잡았던 계획을 수정하여 2003년까지 달성하고자하는 의지를 표명함으로써 국내 풍력 발전 시스템 발전에 일대 전환기

를 맞고 있다.

특히, 제주도는 2000년까지 3차에 걸친 실용화 사업을 통해 660kW급 2기, 600kW급 2기, 225kW급 1기, 750kW급 2기의 설치를 완료하고, 현재 4차 실용화 사업으로 660kW급 2기를 설치 중으로, 총 5.5MW용량의 국내 최대 풍력 발전 단지를 구성하였으며, 2006년까지 도내 전력의 10%를 풍력 발전으로 대체한다는 계획을 세우고 있다.

또한, 제주 행원 풍력 단지의 경우 세계적으로 널리 설치 운전되고 있는 시스템 중에서 출력 제어 방식에 의해 구분되는 Pitch 제어 시스템과 Stall 제어 시스템이 설치 운영되고 있다.

본 논문에서는 각 시스템의 기술적 특징과 운전 상태의 비교 검토를 통하여 국내 풍력 발전 시스템 기술개발의 나아갈 바를 생각해보고자 한다.

2. 풍력 발전 시스템의 출력 제어 특징

풍력 발전 시스템은 불규칙적으로 변화하는 바람을 이용하여 일정한 출력의 전기를 생산해야

* (주)효성 중공업 연구소
** 제주 대학교

하는 시스템이다. 따라서 능동적이거나, 수동적인 방법을 통하여 풍속의 변화에 대처하도록 구성되어 있고, 풍력 터빈의 출력 제어는 아래와 같은 세 가지를 목적을 가지고 수행된다.

- 정격 출력에 최대한 근접한 발전
- 전력 품질의 안정
- 회전 날개에 작용하는 하중변화의 최소화 (특히 피로 하중의 최소화)

상기의 목적들은 적절한 설계와 적합한 제어를 통해 이루어질 수 있고, 현재 이에 대한 많은 연구가 수행되고 있으며, 제주도 행원 단지에는 두 종류, 즉 Pitch 제어방식과 Stall 제어방식의 풍력 발전 시스템이 각각 설치되어 운전되고 있다.

Pitch 제어방식의 풍력 발전 시스템은 1, 2차 실용화 사업에 의한 덴마크 Vestas사의 제품으로 600kW급 2기, 660kW급 2기, 225kW급 1기이고, Stall 제어방식의 풍력 발전 시스템은 3차 실용화 사업에 의한 덴마크 NEG-Micon사의 제품으로 750kW 2기이다. 본 절에서는 두 제어방식의 특징을 비교 검토해보고자 한다.

2.1 회전자 날개(Blade)의 운동과 출력과의 관계

풍력 발전 시스템에 있어서 회전자 날개는 바람이라는 자연 에너지를 회전력의 기계적 에너지로 변환하는 장치이기 때문에 그 동작 원리는 비행기에 작용하는 양력의 원리와 같다. Fig.1은 어느 일정 시점에서 회전자 날개에 바람이 불었을 경우의 역학 관계를 나타내고 있다.

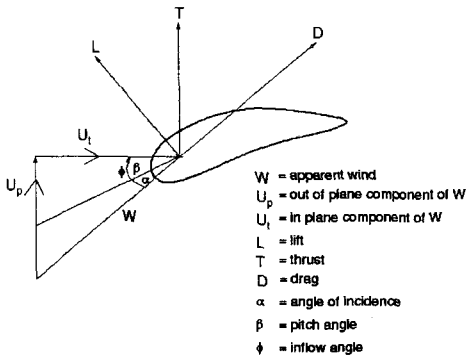


Fig. 1 The Force Relation of Blade

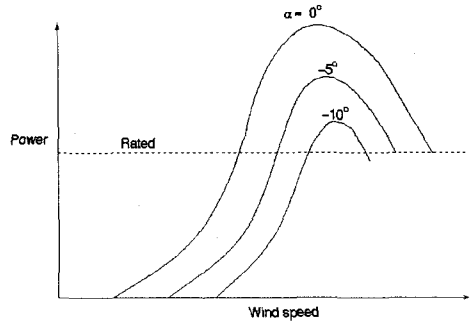


Fig. 2 Increasing the angle of Incidence

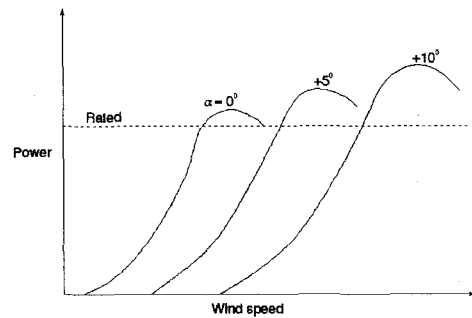


Fig. 3 Decreasing the angle of Incidence

Fig.1에서 회전자의 동작과 관계되는 양력 및 항력과 풍속의 관계를 살펴보면 다음과 같다.

$$C_L = \frac{2L}{\rho u^2 A_L} \quad (1)$$

여기서, C_L : 양력계수(Lift coefficient)

ρ : 공기밀도, u : 풍속

A_L : Area of airfoil, L : 양력

$$C_D = \frac{2D}{\rho u^2 A_D} \quad (2)$$

여기서, C_D : 항력 계수(Drag coefficient)

ρ : 공기밀도, u : 풍속

A_D : Area of airfoil, D : 항력

풍속이 증가함에 따라 회전자 날개에 작용하는 힘이 증가하고, 이에 따라 날개의 회전 에너지도 증가하여 회전속도가 빨라진다. 이는 다음의 식(3)에서 알 수 있는 바와 같이 풍력 발전 시스템의 출력이 풍속의 3제곱에 비례하는 것과 관련이 있다.

$$P = \frac{1}{2} C_P \rho A u^3 \quad (3)$$

여기서, C_P : 출력 계수(Power coefficient)

ρ : 공기밀도, u : 풍속

A : 회전면적(swept area of rotor)

또한, Fig.2와 Fig.3은 바람에 대한 입사각 α 의 변화에 따른 출력의 변화를 보여주고 있다. Fig. 2는 입사각 α 가 -10° 에서 0° 까지 점점 증가함에 따라 출력이 증가함을 보이고 있으며, Fig. 3은 입사각 α 가 10° 에서 0° 까지 점점 감소함에 따라 출력이 감소함을 보여주고 있다^[9]. 이는 회전자 날개의 각도가 변화함에 따라 회전자 날개에 전달되는 힘의 크기가 달라지며, 이것이 풍력 발전 시스템의 출력으로 나타남을 말한다.

따라서, 회전자 날개의 기하학적 구조나 바람에 대한 날개 각도의 변화가 주어진 풍속에서 출력의 변화를 가져옴을 알 수 있다.

2.2 Pitch 제어방식과 Stall 제어방식^[10]

Pitch 제어방식과 Stall 제어방식은 앞 절에서 설명한 바와 같이 회전자 날개의 형상에 따른 공기 역학적 원리를 이용한 것이다. 전자의 경우는 Fig.1에서 입사각 α 를 제어한 것이고, 후자의 경우는 C_L , C_D 등과 같은 회전자 날개의 기하학적 구조를 이용한 방식이다.

공기역학적인 측면에서 보면 Fig.4와 Fig.5에서 보는 바와 같이 Pitch 제어방식의 경우는 항상 회전자 날개의 각도를 제어하기 때문에 공기 흐름의 변화는 볼 수 없는 반면, Stall 제어방식의 경우는 회전자 날개의 각도가 일정하여 고속에서 회전자 날개 후면에서 공기 흐름의 변화가 일어나는 것을 알 수 있다.

Fig.4, 5와 같은 현상으로 인하여 두 방식에 의한 출력은 Fig.6과 같이 차이를 보이게 된다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 저 풍속 및 고 풍속범위에서는 Pitch 제어방식을 채용하는 경우가 출력이 크고 중간 풍속범위에서는 Stall 제어방식을 채용하는 경우가 출력이 크다고 보고되어 있다.^[8]

Pitch Regulation

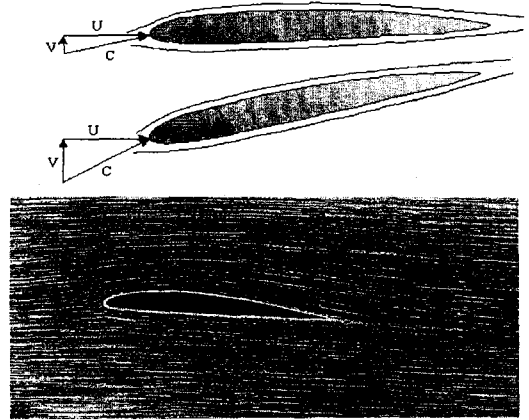


Fig. 4 Air Stream of Pitch Regulation

Stall Regulation

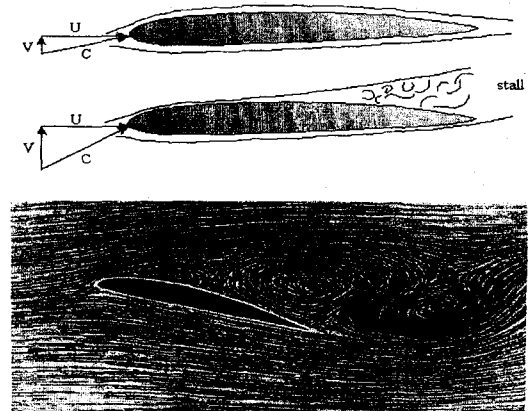


Fig. 5 Air Stream of Stall Regulation

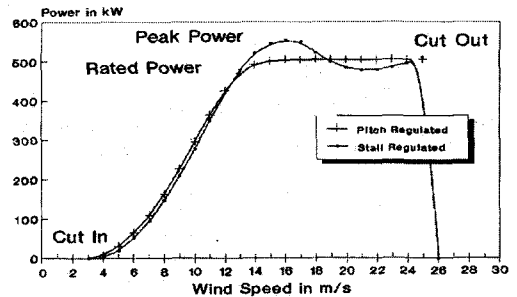


Fig. 6 Power curves for Stall & Pitch machines^[8]

2.3 행원 풍력 단지 시스템의 특징⁴⁾

행원 단지 내에 설치되어 있는 시스템은 Pitch 제어방식을 대표하는 Vestas사의 V47-660 시스템과, Stall 제어방식을 대표하는 NEG-Micon사의 NM750/48 시스템이다.

두 시스템 모두 공통적으로 유도 발전기와 증속기를 사용하고, 3m/s에서 시동하여 4~5m/s에서 자동으로 계통과 연계하는 Thyristor를 이용한 병입 시스템을 갖추고 있으며, 원형 타워 형태의 수평형 풍력 발전 시스템이다.

그러나, 앞서 설명한 바와 같이 서로 상이한 제어방식을 가지고 있기 때문에 이를 구현하기 위해서는 시스템 구성에 있어서 여러 가지 차이점을 가지고 있다.

Table 1 에서 보는 바와 같이 두 시스템 모두 유도 발전기를 채용하고 있지만 NM750/48은 농형 구조이고, V47-660은 권선형으로 다르다.

이는 NM750/48 시스템이 Stall 제어의 정속도 운전을 하는 반면 V47-660은 풍속에 따라 회전자의 날개 각도를 조정하여 최적의 출력을 얻도록 제어하고, 정격출력에 도달하면 전기적으로 슬립을 10%까지 가변함으로써 부분적으로 가변속 운전을 하고 있기 때문이다.

또한, 저 풍속에서의 출력을 보상하기 위하여 Stall 제어방식의 NM750/48 시스템에서는 발전기의 구조를 극변환 방식으로 설계하여 저용량과 고용량 발전기로 병행 사용하도록 하고 있다.¹⁾

따라서, 계통 운전 방식에 있어서 NM750/48 시스템은 최초 보조발전기로 계통 병입 후 풍속이 7m/s 이상이거나, 보조 발전기의 평균출력이 600초 이상 112kW가 넘을 때 또는 240초 동안 135kW를 초과한 경우 주발전기로 전환하며, 반대로 주발전기의 평균출력이 1200초 이상 56kW 또는 600초 이상 45kW 이하가 되면 공기 제동장치가 발전기 속도를 600rpm으로 감소시켜 보조발전기로 전환한다.¹⁾ V47-660의 경우는 계통 연계 후 항상 최상의 출력을 위한 최적의 Pitch 제어를 실시하고 정격 출력에 도달하면 기계적인 Pitch 제어와 함께 전기적으로 슬립을 10%까지 가변하여 중단 풍속까지 정격 출력을 유지한다.

Table 1 The Characteristics of systems

항목	NM750/48	V47-660
시스템 형식	수평형	수평형
발전기 형식	극변환 농형 유도발전기	가변 슬립형 권선형 유도 발전기
출력 제어	Stall 제어	Pitch 제어
전기적 사양	출 력 : 750kW (200kW포함) 전 압 : 690V 극 수 : 4극/6극 회전수 : 1800/1200 주파수 : 60Hz	출 력 : 660kW 전 압 : 690V 극 수 : 4극 회전수 : 1800 주파수 : 60Hz
제동 장치	2단 제동장치 -Blade tip air brake -Disk brake	2단 제동장치 -Full blade air brake -Disk brake
무게 (닛셀 +로터)	40 ton	27.6 ton
Cut In 풍속	4 m/s	4 m/s
Cut Out 풍속	25 m/s	25 m/s

3. 실부하 운전 비교

3.1 예상 발전량²⁾

예상 발전량은 제주도내에서 풍력 발전 시스템 설치에 유리하다고 생각되는 후보지의 풍향, 풍속 등을 조사하여 각 시스템의 출력 특성을 가지고 추정된 것이다. 1차 적으로 행원 지역의 조사가 이루어졌으며, 김녕, 신산, 대유, 하모, 무릉 등의 후보지에 대한 조사도 이루어졌다.

본 논문에서 고찰하고자 하는 행원 지역의 예상 발전량은 다음과 같다. 세 시스템 모두 1월이 가장 많은 발전량을 나타내고 있으며, 총 발전량은 각각 1,613,299.5kWh, 2,009,207.5kWh, 2,111,103.5kWh로 정격 출력의 순으로 나타났다.

Table 2 The Forecast Generated Energy

월	발전량(kWh)		
	V42/600	V47/660	NM750/48
1	245,533.3	289,864.1	311,181.3
2	177,762.1	216,105.9	228,989.2
3	228,285.7	284,183.9	294,151.1
4	73,532.2	97,284.3	100,788.3
5	101,102.4	128,724.9	134,811.2
6	57,447.3	75,395.6	78,846.4
7	62,941.0	85,660.1	88,334.9
8	85,189.0	111,906.7	115,815.6
9	136,100.8	167,291.5	177,207.6
10	133,407.6	170,270.8	176,173.5
11	148,142.5	183,123.7	193,020.1
12	163,855.6	199,396.0	211,784.3
총계	1,613,341.5	2,009,254.5	2,111,853.5

Table 3 The Actual Generated Energy

월	발전량(kWh)		
	V42/600	V47/660	NM750/48
*1	184,101.0	225,948.0	202,006.0
2	198,067.5	225,474.5	202,883.0
3	141,701.0	180,276.5	183,340.5
4	129,104.5	145,716.0	149,813.5
5	64,522.5	67,620.5	84,586.5
6	37,475.0	46,760.0	56,888.0
7	46,435.5	56,282.5	71,420.0
8	55,303.5	66,182.5	77,077.0
9	129,793.5	131,610.5	147,987.5
10	124,257.0	156,196.5	142,773.5
11	110,547.0	118,960.0	150,262.0
12	119,400.0	166,606.5	179,108.0
총계	1,340,708.0	1,587,634.0	1,648,145.5

* : 750kW급 풍력 시스템이 2000년 1월에 설치되었으므로 1월의 발전량은 2001년 1월의 발전량으로 대체함.

3.2 실부하 운전 발전량

행원 단지 내에 설치되어 있는 풍력발전 시스템은 600kW, 660kW, 750kW가 각각 2대씩 설치되어 있는데, 설치 위치에 따라 풍속 분포가 약간 상이할 수 있으므로, 실부하 운전 발전량은 2대의 평균값을 취하였으며, 세 기종이 모두 운전된 2000년의 총 발전량은 1,340,708.0kWh, 1,587,634.0kWh, 1,648,145.5kWh로 예상 발전량과

같이 정격 출력 순으로 나타났다. 그러나, 예상 발전량에 대한 실부하 발전량의 비율을 보면 83.1%, 79.0%, 78.1%로 600kW급이 가장 많은 비율을 보이고 있다.

3.3 비교 분석 결과

Table 2와 Table 3의 발전량 자료를 그래프로 나타내면 Fig. 7, 8, 9와 같다. 600kW와 660kW는 년도별 변화 추이를 분석하기 위해서 과년도 자료를 추가하였다.

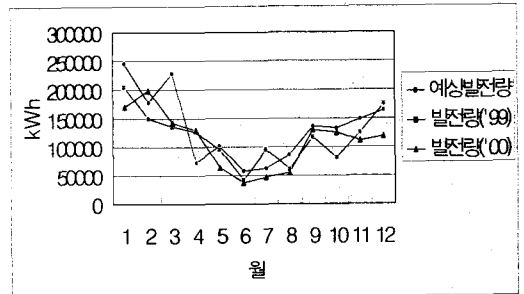


Fig. 7 The Forecast vs. Actual Generated Energy (600kW)

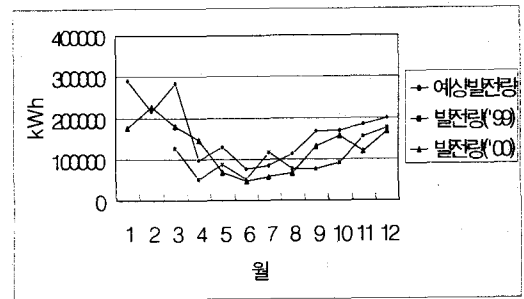


Fig. 8 The Forecast vs. Actual Generated Energy(660kW)

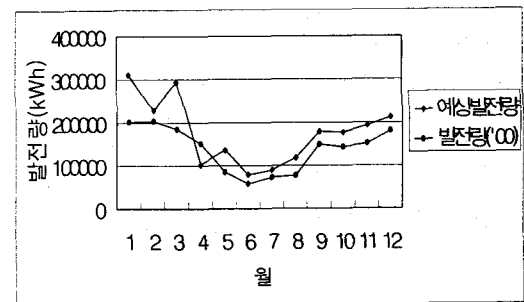


Fig. 9 The Forecast vs. Actual Generated Energy(750kW)

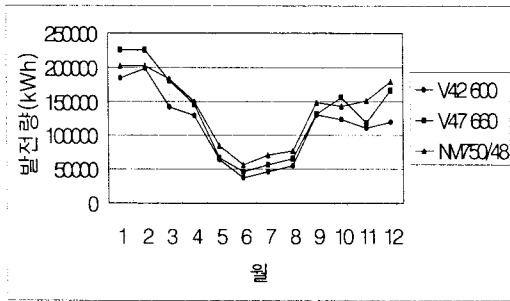


Fig. 10 The Actual Generated Energy of Pitch vs. Stall System

위의 검토 결과에서 알 수 있듯이 예상 발전량과 실제 발전량이 차이를 보이고 있다. 바람이라는 자연 현상이 매우 불규칙하고, 같은 지역 내에서도 장소에 따라 약간의 차이를 보이며, 해마다 다르다. 따라서, 풍향과 풍속을 조사한 곳과 풍력 발전 시스템을 설치한 곳이 거리의 차이를 가지고 있고, 측정 시기에 차이가 있으므로 발전량의 전체적인 형태는 비슷하나 값에 있어서는 차이를 보이고 있으며, 년 간 누적 발전량에 있어서도 예상 발전량과 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나, 전체 누적 발전량에서 각 시스템 누적 발전량이 차지하는 비율을 계산해 보면, 예상 발전량이 600kW급 28.2%, 660kW급 35.0%, 750kW급 36.8%이고, 실부하 발전량은 29.3%, 34.7%, 36.0%로, 예상 발전량에 비해 600kW급이 약간 상회하는 것을 보이고 있다. 하지만, 비교한 기간이 짧기 때문에 Pitch 제어방식의 600kW급이 에너지 변환 효율이 더 크다고 단정하기는 어려우며, 장기간의 자료분석이 이루어져야 할 것이다.

Pitch 제어방식과 Stall 제어방식의 발전량을 비교해 보면 전체적으로 계절별 풍속에 따라 비슷한 추이를 보이고 있으나, 정격출력을 고려할 때 Stall 제어방식의 풍력 에너지 변환 효율이 생각보다 크지 않게 나타나고 있다. 이는 2절 Fig.6의 출력 곡선에서 알 수 있는 바와 같이 행원 단지 내의 풍속이 평균적으로 10m/s이하인 기간이 상대적으로 길기 때문에 Stall 제어방식보다는 Pitch 제어방식의 에너지 변환 효율이 상대적으로 큰 결과를 나타내는 것으로 판단된다.

이러한 결과를 좀 더 살펴보고자 3~5월을 봄, 6~8월을 여름, 9~11월을 가을, 12~2월을 겨울로 설정하여 계절별로 풍속에 대한 발전 출력을

비교해 보았다.

Fig. 11, 12, 13, 14은 V47-660 Pitch 제어 시스템과 NM750/48 Stall 제어 시스템의 풍속별 실부하 운전 출력을 나타낸 것이다.

여기서, V47-660 시스템은 30분 간격으로 풍속과 출력의 순시값을 저장하고, NM750/48 시스템은 1시간 간격으로 그 시간 동안의 평균 풍속과 평균 출력을 저장하기 때문에 Cut In 풍속은 같지만 출력은 서로 다른 값을 나타내고 있다.

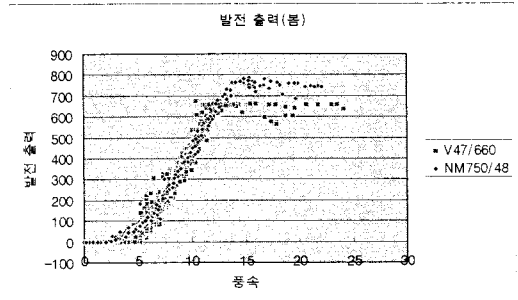


Fig. 11 The Trend of Power vs. Wind Speed (Spring)

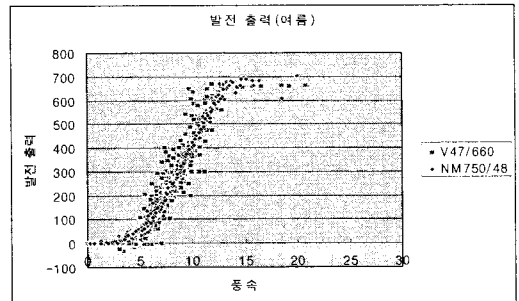


Fig. 12 The Trend of Power vs. Wind Speed (Summer)

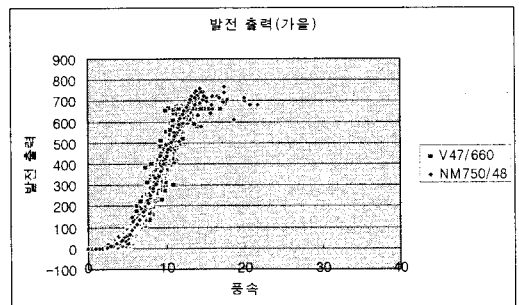


Fig. 13 The Trend of Power vs. Wind Speed (Autumn)

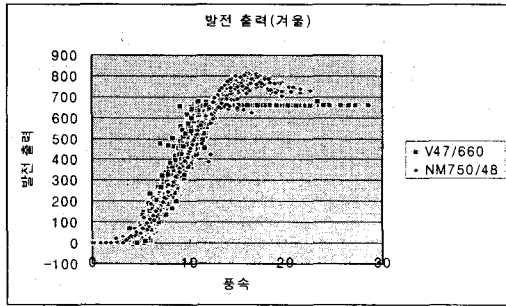


Fig. 14 The Trend of Power vs. Wind Speed (Winter)

그림에서 보는 바와 같이 대부분의 풍속 분포가 12m/s 이하를 이루고 있기 때문에, Pitch 제어 방식에 비해 Stall 제어 방식이 정격 출력을 고려한다면 시스템의 이용 효율이 충분치 않다고 판단된다. 그러나, 운전 시간이 비교적 짧고, 바람이 불규칙한 자연 현상이므로, 장기적인 자료의 수집과 분석이 요구된다.

이와 같은 이유로 일본에서는 시스템을 수입하더라도, 제어 시스템 부분은 자국의 풍황에서 최대의 출력을 얻을 수 있도록 국산화하는 연구에 많은 관심과 지원을 하고 있는 것은 풍력 발전 시스템의 조기 보급을 위한 중요한 요소일 수 있다고 여겨진다.^[1]

4. 결론

본 논문에서는 세계적으로 에너지 및 환경 문제에 대한 해결 방안으로 관심이 대두되고 있는 청정·대체 에너지원으로서의 풍력 발전 시스템을 고찰함에 있어 특징 있는 두 가지 시스템으로 국내 최대의 풍력 단지를 형성한 제주 행원단지 내의 시스템간의 장·단점과 예상 발전량 및 실부하 발전량을 비교 검토한 결과는 다음과 같다.

1) 예상 발전량과 실부하 발전량을 비교하여 볼 때 바람이라는 자연 현상의 특성상 시간, 장소에 따라 매우 불규칙하므로 전체적인 발전 경향은 일치하였으나, 실제적인 값은 예상 발전량보다 작은 것으로 나타났다. 봄, 여름철에 비해서 풍속이 높은 가을, 겨울철의 실부하 발전량이 더 큰 차이를 보이고 있다.

2) 풍력 발전 시스템이 전반적으로 약 13~15m/s의 풍속에서 최대 출력이 되도록 설계되어 있으므로 평균 풍속이 약 10m/s 이하인 행원단지와 같은 경우 Pitch 제어 방식에 비해 Stall 제어 방식이 정격 출력에 비해 풍력 에너지 이용 효율이 낮은 것으로 판단된다. 그러나, 현재 운전 시간이 짧고, 년도별 풍속의 변화와 봄, 여름철의 풍속이 낮은 경우와, 가을, 겨울철의 풍속이 높은 경우에 따라 발전량의 변화가 크므로, 장시간에 걸친 자료 분석이 요구된다.

따라서, 현재 국내의 풍황 자료와 일부하 운전 중인 시스템의 특성 및 출력 자료를 면밀히 검토하여 국내 상황에 맞는 최적의 시스템 개발에 기술력을 집중시킨다면, 풍력 발전 시스템이 국내의 대체 에너지원으로서의 보급 가능성은 높다고 할 수 있다.

참고문헌

- (1) 허 종철 외, 1998, "제주도내 풍력자원 조사에 관한 연구 용역(I)", 제주도청
- (2) 허 종철 외, 2000, "제주도내 풍력자원 조사에 관한 연구 용역(II)", 제주도청
- (3) 전기저널, 1999, "일본-풍력발전 현황과 후진국 탈피를 위한 전략", pp70~74
- (4) 유 광택, 2000, "정속운전형 풍력발전 계통 기술의 특성", 대체 에너지 기술 세미나, 산업자원부·에너지관리공단, pp 2-83~2-93
- (5) 오 시덕, 2000, "분야별 에너지 기술개발 동향-풍력발전", 2000 지역 에너지 담당 공무원 연수교육 자료집, 에너지관리공단, pp 225~258
- (6) Lahmeyer International, 2000, "Wind Energy Technology-Technology, Market, Costs, Perspectives"
- (7) BTM Consult ApS, 2000, "International Wind Energy Development", pp39 ~ 42
- (8) Paul Gipe, 1995, "Wind Energy Comes of Age", John Wiley & Sons, Inc. pp 143 ~ 225
- (9) <http://www.iesd.dmu.ac.uk/~slb/>, "Wind Energy Training Course"