

제주 월령 시범단지 풍력발전시스템 성능시험 및 결과의 고찰

김건훈* · 김홍우* · 주영철* · 허종철**

*한국에너지기술연구원, **제주대학교

Performance Testing and Analysis of Wind Power Systems in Cheju Demonstration Site

Keon-Hoon Kim*, Hong-Woo Kim*, Young-Chul Ju* and Jong-Chul Huh**

*KIER, **CNU

요 약

고대로부터 바람에너지는 단순한 기계적 에너지로 또는 지하로 부터 물을 끌어올리거나 곡식을 정제하는데 사용되곤 하였다. 그러나 현대에 와서 풍력발전시스템은 신재생에너지원 가운데 가장 유망하고 비용이 저렴한 에너지로 각광받고 있다. 1992년에 시작된 제주도 풍력발전 시범 사업은 신재생에너지의 개발을 위하여 한국에너지기술연구소(KIER)와 산업자원부(MOCIE), 그리고 정부추도하에 계획되고 추진되는 사업이다. 이 시범사업의 가장 중요한 목적은 한국에서 풍력발전의 타당성을 검증하고 결과적으로 운전기술을 발전시키며, 또한 성능을 분석하여서 국내에서의 기술확산을 위해 기술적인 문제점과 신뢰성을 분석하는데 있다. 이와 같은 연구를 통해 이미 제주도 월령에 설치되어 있는 중형 풍력발전 시스템의 운전기술을 향상시키고 나아가 국내 풍력발전 시스템의 보급과 활성화에 기여할 것으로 기대한다.

Abstract — In ancient times, wind energy has been used to grind corn, pump water from underground and was applicable to provide simple mechanical power. But the modern wind power generating technology has now been proved as one of the most promising and cost-effective means among the already developed several kind of new and renewable technologies. In 1992, Cheju island's demonstration project for wind power generation had been planed by Korean Government, 'Ministry of Commerce, Industry, and Energy (MOCIE)' and Korea Institute of Energy Research (KIER), which have functions to develop the new and renewable energy sources, had accomplished the demonstration project. The major aim of this demonstration project was to analyze the applicability of wind energy in Korea and it should be consequently proceeded to develop the operating technology, the performance testing and analysis technology on the wind power systems to enlarge the domestic diffusion and the reliability of them. So it is the main target of this research to develop the operating technologies on the medium scale wind power system, which was already installed on Wolryung Demonstration Site in Cheju island.

1. 서 론

국내에 본격적으로 도입되기 시작하는 풍력발전기술과 풍력발전시스템에 관한 성능분석과 기술 축적을 위한 본 연구의 주요 내용을 정리하면 다음과 같다.

○ 제주 월령 시범단지내 기상자료의 정밀측정 및 분석을 통한 성능시험의 기초 자료 활용

○ 풍력발전시스템의 안정적 운영을 위한 운전기술의 개발

○ 풍력발전시스템의 기초 성능시험과 안정성 평가

본 연구의 대상은 1992년부터 1995년까지 국가(산업자원부)계획에 의해 신재생에너지 관련 기술의 보급 및 기술개발을 목적으로 조성된 제주도 월령 신재생에너지 시범단지이다. 시범단지내에는 본 연구의 성능평가시험의 대상인 3기의 도입 풍력발전시스템과 1기의 국산 풍력발전기가 설치되어 운전중에 있다. 이미 많은 선진국에서는 중대형의 풍력발전시스템을 실용화하여 설치하여 운전하고 있으며 독자적인 성능시험 및 평가기술을

확보하여 성능이 우수한 대형풍력발전시스템의 설계 및 개발에 이를 활용하고 있을 뿐만 아니라, 객관적인 성능평가 기술을 국립연구소(예 : 덴마크 RISO 등)를 중심으로 하여 활발히 연구개발을 진행하고 있는 실정이다.

따라서, 우리 나라의 경우에도 아직은 완전히 국산화되고 있지 못한 풍력발전시스템의 설계기술 확보와 성능평가에 대한 기술 확보를 위해서 본 연구를 수행 하였다.

2. 본 론

2-1. 시범단지 개요

공해물질과 지구온난화 방지에 효과적인 풍력발전기술은 현재 청정에너지원 중 가장 실용화가 앞서있는 기술중의 하나로 자리잡아 가고 있다. 한반도의 남쪽에 자리잡고 있는 제주도는 총 면적 1,821 km²에 인구 54만 명의 가장 큰 도서로서 예로부터 바람이 많은 지역으로 알려져 왔다. 이러한 다풍지역에 산업자원부는 한국에너지기술연구소를 통해서 해발 10 m, 해안가로부터 약 300 m 떨어진 제주도내 북서쪽에 위치한 북제주군 한림읍 월령리 내에 신재생에너지 시범단지를 조성하여 설치하게 되었다. 이 단지 내에는 총 4기의 풍력발전시스템과 13 kW의 태양광발전시스템, 그리고 300리터 용량의 태양열 급탕 시스템이 함께 설치되어 운전 중에 있다. 그러나, 본 연구에서는 풍력발전시스템의 성능시험 결과에 대해서만 집중적으로 언급할 것이다. 월령 시범단지의 전경은 아래의 [그림 1]과 같다.

2-2. 시범단지 풍력자원 특성

본 연구를 위하여 시범단지 내 풍력자원의 특성을 측정·분석하였다. 풍력자원의 측정을 위해서 시범단지 내에 30미터 높이의 측정 pole을 세워 각각 3지점의 고도에 풍속계를 설치하였으며, 이를 분석하기 위한 데이터 처리장치는 미국의 NRG사의 9300모델을 사용하여 측

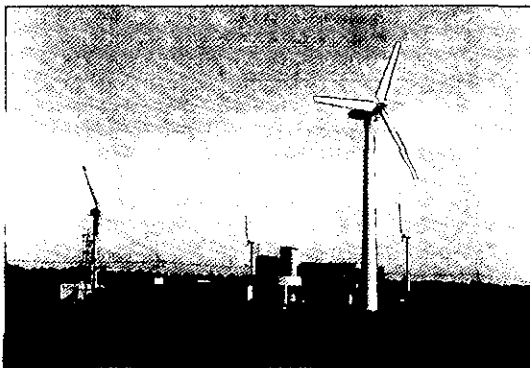


그림 1. 제주 월령 신재생에너지 시범단지 전경.

정 pole의 하단부에 설치하였다. 이 데이터 처리장치는 풍속과 풍향자료를 각각 0.1 mph와 1.4°의 분해도로 측정하여 매시간 평균치를 메모리 카드에 저장하게 된다.

이렇게 얻어진 자료는 RSW 232C 비동기 통신방식에 의해 PC내로 전송되어 본 연구진에 의해 개발된 “WEAP(Wind Energy Analysis Program)” 컴퓨터 프로그램에 의해 분석되어 진다. 이 프로그램과 측정설비에서 측정된 풍력자료는 주위의 지형학적 조건과 보정식에 의해 실제 풍력발전기의 허브 높이로 보정되게 된다. 보정된 풍력자료는 풍속확률 분포를 가장 잘 표현하고 있는 2-Weibull 분포모델에 의해 통계적으로 가정되고 분포의 2변수치는 1차 및 3차 모멘트를 이용하여 계산되어 진다. 풍속분포의 수학적 모델 중 가장 적절하게 이용되고 있는 2변수 Weibull 분포 함수는 아래 수식(1)과 같다.

$$P(V) = \left(\frac{K}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{K-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^K\right] \quad (1)$$

여기서, V는 풍속을 나타내고 C는 척도계수(scale parameter)로서 분포되는 풍속의 평균치와 관계하며, K는 형상계수(shape parameter)로서 분포된 풍속의 편차에 관계되는 상수이다. 또한, 평균 풍속의 정의를 다음과 같이 정리하면,

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} P(V) \cdot V \, dV \quad (2)$$

위의 관계에서 다음과 같은 일반식이 도출된다.

$$\bar{V} = C \Gamma\left(1 + \frac{n}{K}\right) \cdot 1 + \left(\frac{n}{K}\right) > 0 \quad (3)$$

따라서, 위의 관계식에서 풍속의 측정된 \bar{V} 및 \bar{V}^3 값에 의해 C와 K의 값이 계산된다. 계산된 C와 K의 값을 알면 풍력에너지가 갖는 에너지 밀도를 계산 할 수 있게 되고, 실제 풍력발전시스템의 출력특성이 입력되면 분석된 풍속자료를 이용하여 풍력발전시스템의 예상 발전량 및 가동률 등의 자료를 예측할 수 있다.

월별 평균 풍속은 계절적으로 변화가 심하며 지상 30미터 높이에서의 연평균 풍속은 <표 1>에서와 같이 5.3 m/sec로 나타났다. 15 m 높이에서의 평균 풍속과 평균 풍력에너지 밀도는 각각 4.7 m/sec 및 153 W/m²에 불과하나 30 m 정도의 높이에서는 충분히 가능성이 있는 5.3 m/sec와 200 W/m² 이상의 풍력에너지 밀도를 나타냄으로 인하여 동일 지점이라도 중대형의 풍력발전시스템의 설치가 바람직함을 보이고 있다. 다음의 [그림 2]에는 실제 풍력발전기의 허브높이인 24 m와 15 m 높이에서의 월별 평균 풍속의 변화를 보이고 있다.

표 1. 높이별 풍속 분석자료.

높이 (m)	분석 평균풍속 (m/sec)	척도계수 (m/sec)	형상계수	평균 풍력에너지 밀도 (W/m ²)	최고 풍력에너지 밀도 (W/m ²)	최저 풍력에너지 밀도 (W/m ²)
15	4.7	5.21	1.61	153.0	362.0	38.7
24	5.1	5.72	1.68	190.0	438.1	51.6
30	5.3	5.92	1.70	206.7	472.0	57.7

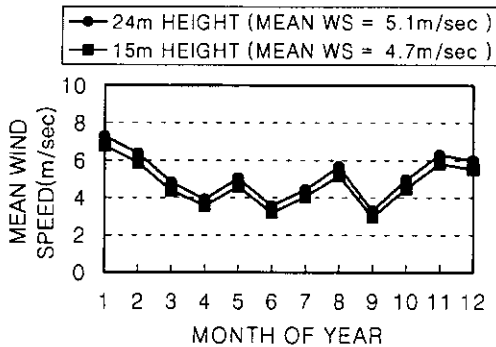


그림 2. 월별 평균 풍속의 변화.

24 m 높이에서 4.0 m/sec 이상의 바람이 불었던 시간 비율은 54.7% 정도이며, 15 m에서는 48.3% 정도로 역시 높은 높이에 비해 떨어지고 있다. 또, 표준편차도 24 m 높이와 15 m 높이에서 각각 3.31 m/sec와 3.15 m/sec로서 평균풍속 대비 각각 64.9%와 67.0%로서 난류도 역시 낮은 높이에서 심함을 알 수 있었다.

다음의 [그림 3]에는 24 m 및 15 m 높이에서의 월별 풍력에너지 밀도의 변화를 보이고 있다. 풍속의 세제곱에 비례하는 에너지밀도는 특성상 풍속에 의해 많은 차이를 나타내고 있다. 비교적 충분한 풍력에너지 밀도는 겨울철인 1, 2월과 11, 12월에 나타나고 있다.

24 m와 15 m에서의 평균 풍력에너지 밀도는 각각

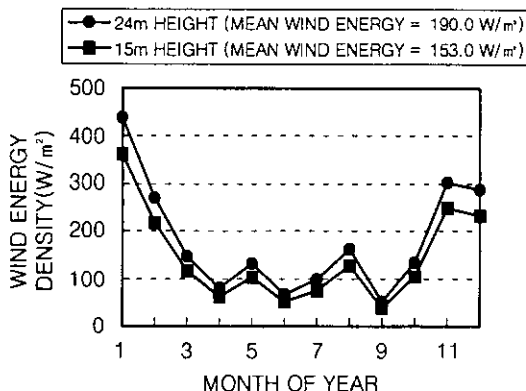


그림 3. 월별 풍력에너지 밀도의 변화.

190.0 W/m² 및 153.0 W/m²로서 다소 기대치에 미치지 못하고 있다. 특히, 계절적인 에너지 밀도의 편차가 매우 심하게 나타나고 있음을 볼 수 있고, 3월부터 9월까지의 풍력 에너지 밀도가 매우 약함을 보이고 있다.

2-3. 풍력발전시스템 제원

시험단지에는 각각 100 kW와 30 kW, 20 kW의 풍력발전시스템과 30 kW의 풍력발전시스템과 45 kW 디젤 및 33 kWh 축전지로 구성된 복합발전 시스템이 설치되어 운영 중에 있다. 각각의 풍력발전시스템은 3상의 유도형 발전기로서 한전제동과 60 Hz의 주파수로서 연계운전 되도록 설치하였다.

VESTAS V-20(100 kW) 풍력발전시스템은 풍향에 대하여 수평축이고, 제어방식은 스톱제어를 하는 상방향 회전자로서 직경이 20 m이고 3익이며, 허브높이가 25 m인 전형적인 덴마크형 풍력발전시스템이다. HSW-30(30 kW) 풍력발전기는 12.5 m의 회전자 직경을 갖는 2익의 후방형 풍력기로서 풍향에 대하여 수평축이고, 제어방식은 피치제어형이며 허브높이는 14.5 m이다. 그리고, 국산화된 20 kW 풍력발전기는 아직 시험단계로서 본 연구의 대상에서는 제외한다.

이 모든 풍력발전시스템으로부터 생산되는 전력은 지하로 매설된 선로를 통해 변압기실로 모여진 후 한전의 배전선로인 22.9 kV의 전압으로 승압후 선로에 연계되어 전력을 송전하게 된다. 다음의 <표 2>에 각각 풍력발전시스템의 세부 사양을 정리 하였다.

2-4. 풍력발전시스템 전력생산량의 측정 및 분석

시험단지 내에서 측정된 풍속자료에 의하면 2-변수 Weibull 함수의 척도계수(scale parameter)와 형상계수(shape parameter)는 <표 1>과 같고, 이 계수들을 이용하면 풍력발전기의 성능특성 곡선 및 제원을 통하여 예상발전량을 예측할 수 있다. 100 kW 및 30 kW 풍력발전시스템의 성능특성 곡선으로부터 예측된 연간 예상발전량은 각각 142,800 kWh 및 33,160 kWh로 나타났다.

다음의 [그림 4]에서는 10 kW 풍력발전시스템의 월별 예상 발전량과 실제 발전량을 비교하였고, [그림 5]에서는 30 kW 풍력발전시스템의 발전량을 비교하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 정확한 풍력자료만 있으면, WEAP

표 2. 시범단지내 풍력발전시스템의 세부 사양.

Nominal output (kW)	100	30	20
Rotor diameter (m)	20	12.5	14
No. of rotor	3	2	2
Rotor RPM	46	92/46	84.7
Operation type	Upwind	Downwind	Downwind
Tower shape	Tapered tubular	Tapered octagonal	Straight tubular
Tower height (m)	23.4	14.5	12
Generator type	Asynchronous	Asynchronous	Asynchronous
Yawing type	Active	Passive	Active
Brake	Mechanical rotor tip brake	Mechanical full span pitch	Mechanical full span pitch
Power regulation	Stall regulated	Pitch regulated	Pitch regulated
Manufacturer	VESTAS	HSW	Korean Institute

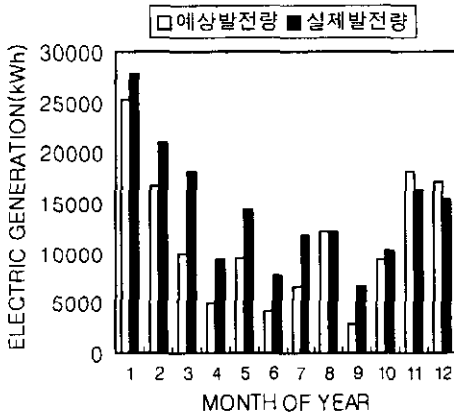


그림 4. 100 kW 풍력발전시스템의 발전량 비교.

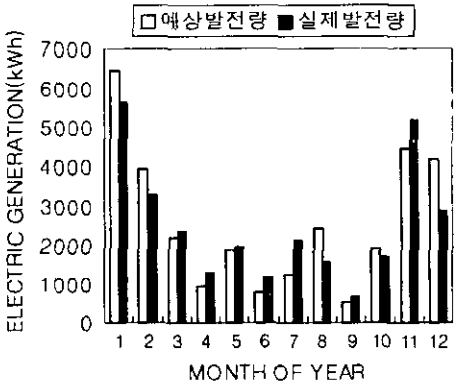


그림 5. 30 kW 풍력발전시스템의 발전량 비교.

에 의해 거의 정확하게 풍력발전량을 예측할 수 있다. 실제 풍속·풍향 측정은 야외에서 이루어지는 관계로 정확히 예측하기에는 불가능한데, 풍속의 변화가 작은 계절에서는 거의 정확히 예측을 할 수 있으나, 풍속의 변화가 심한 계절에서는 다소의 차이가 있음을 보이고 있

다. 풍속의 변화뿐만 아니라 풍속의 변화시에 큰 회전자가 갖는 관성에 의한 히스테리시스 등도 발전량의 차이를 나타내게 하는 요인이라 할 수 있다.

2-5. 풍력발전시스템 출력특성 곡선

풍력발전시스템의 출력특성 곡선은 풍속에 대한 풍력발전시스템의 순 출력을 표시하는 것으로서, 이미 국제적으로 제시된 IEA(International Energy Agency) 전문가 위원회의 권장안에 의해 100 kW 풍력발전시스템의 출력특성 시험을 수행하였다. 풍속계로부터의 신호를 받아 변환하는 장치는 신호 변환기를 보정하여 사용하였고, 본 시험에서는 100 kW 풍력발전시스템의 허브 높이에서 계측되는 풍속계에서 신호를 받아 처리하였다.

보다 정확한 출력특성을 시험하기 위해서 먼저 풍속·풍향 측정용 pole로부터 풍속계 신호를 측정하였고, 풍력발전시스템으로부터의 유효전력은 직접 3상의 전압과 전류를 측정하여 변환하는 전력변환기를 이용하여 매 10분 평균치를 측정하였다.

[그림 6]에는 앞에서 언급한 측정기기에 의해 측정된 100 kW 풍력발전시스템의 10분 평균풍속 자료에 대한 10분 평균출력 자료의 측정점들을 나타내고 있다. 전반적으로 일반적인 출력특성 곡선의 형태를 잘 따르고 있으며, 추후 보다 많은 측정점의 확보 후에 빈 구간별로 자료의 분석 작업에 들어갈 예정이다. 현재에는 빈 구간별로 정리하지는 않았지만 전체적으로 측정점의 분포로서 풍력발전시스템의 출력특성을 파악하기에는 무리가 없을 것으로 여겨진다.

일정한 풍속이상에서는 풍력발전기 날개에 실속(stall)이 발생하는데, 이때 피치각(pitch angle)이 변하지 않으면서도 자체적으로 출력이 제어되는 현상을 관측할 수 있었다. 가장 큰 출력의 측정점은 17.3 m/sec에서 98.1 kW 이었다. 앞서 언급 한 바와 같이 실속에 의해 풍속 16 m/sec 이상에서는 출력이 제어되고 있다.

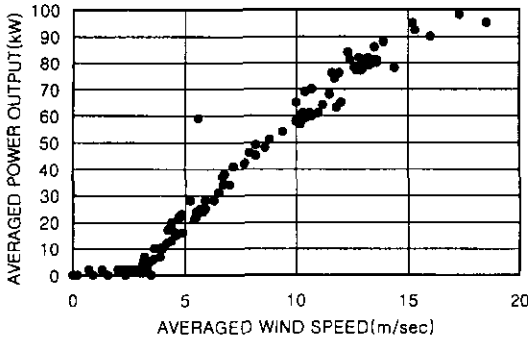


그림 6. 측정된 100 kW 풍력발전시스템 성능 출력 곡선.

2-6. 풍력발전시스템 소음측정

풍력발전시스템으로 부터의 소음방출량은 풍력발전시스템의 적용 및 보급범위의 확대를 위해서는 반드시 측정되어야 할 필수 요소라 할 수 있다. 풍력발전시스템의 소음 방출량은 IEA 권고안에 의거하여 측정 될 수 있는데, 본 측정실험에서는 실험장비의 한계 때문에 약간 수정하여 측정하였다. 즉, 권고안에 의하면, 풍력발전시스템 주변의 5군데(측정점 : 풍력발전기를 중심으로 동·서·남·북 4지점, 기준점 : 바람이 불어오는 방향에서 풍력발전기의 뒤부분 1지점)에서 측정하게 되어 있으나, 본 측정에서는 가장 크게 소음이 날것으로 판단되는 기준점에서 연속 A-음압신호를 측정 하였으며, 이와 같은 소음을 측정하기 위하여 합판 위에 마이크로폰을 설치하였다. 설치 지점은 기준거리 R_0 의 2배로서 바람의 반대방향으로 후방에 설치하여 측정하였다. 여기서, R_0 는 다음과 같이 정의 된다.

$$R_0 = H + D/2 \tag{4}$$

H : 회전축 중심으로부터 지면까지의 거리

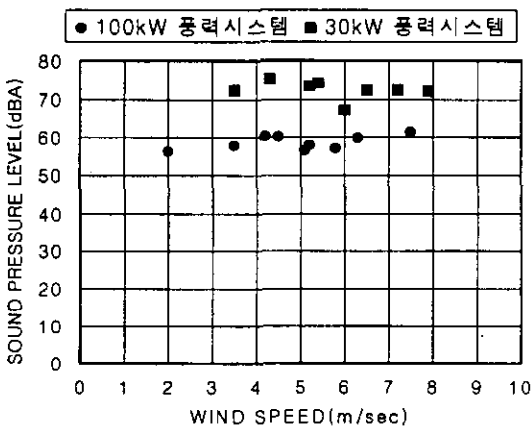


그림 7. 풍속에 대한 각 풍력발전시스템 소음의 변화.

D : 회전자 직경

위 식을 이용하려면 소음 측정 거리를 환산하여 음압 신호가 측정되어야 하고 동시에 10 m 높이에서 풍속도 함께 측정되어야 한다. 다음의 [그림 7]는 시범단지내에 있는 풍력발전시스템의 1/3옥타브밴드 스펙트럼으로 측정 A-음압과 풍속의 관계를 보이고 있다. 소음의 방출은 100 kW 풍력발전시스템이 30 kW 풍력발전시스템 보다도 낮게 측정되었는데, 이는 소형 30 kW 풍력발전시스템이 2억으로서 100 kW 풍력발전시스템 보다도 2배 정도 빠르게 회전하므로 발생하는 공기역학적 소음에 기인하는 것으로 볼 수 있다.

2-7. 전력 품질 특성 실험

가장 중요한 계통영향요소는 flicker와 고조파를 들 수가 있고, 계통 투입 및 이탈시의 간섭 등도 있을 수 있다. 따라서, 이러한 요소들에 대한 측정은 계통에 영향을 주는지 또는 그렇지 않은지 등의 평가에 있어 매우 중요한 요소가 될 수 있다. 본 실험에서는 과동응답성의 측정실험 보다는 정적상태에서의 전력 품질측정에 역점을 두고 실험하였다. 즉, 풍력발전시스템의 전력 품질 특성 실험을 하기 위하여 [그림 8]과 같이 구성하여 실험하였으며, 실험을 통해 발전출력의 변화에 대한 전압의 공동연계점(PCC)에서의 변동과 역률 또는 소비되는 무효전력 등의 변화를 알 수 있었다. 또한 본 실험에서 풍력발전시스템 출력의 측정은 3상 전력분석기를 통해 측정하였고, 본 3상 전력분석기는 모델이 SYS-3로서 최대 600 V 및 1000 A까지 측정 가능한 전력 분석기이다.

이와 같은 전력분석기를 통해 100 kW 풍력발전시스템의 정상 발전시 계통과의 연계운전중일 때의 10분간 평균 발전전압을 측정하였다. 모든 자료는 매 10분 평균의 자료로서 전압변화가 출력 70~100 kW 범위내에서는 약 2.0%로서 매우 안정적임을 알 수가 있으나, 출력이 낮은 범위에서는 전압의 변동폭이 심해지는 것을 볼 수가 있다. 이때에는 전압 변동폭이 약 4% 정도로서 역률과 연계하여 무효전력의 수급균형이 다소 불안정해짐으로서 발생하는 것으로 판단된다. 그러나, 발전출력이 증가할 수록 전압 변동률은 오히려 감소하여 안정적인 상태로 계통 연계되어 운전되고 있음을 알 수 있다. 측정된 전압의 변화는 [그림 9]와 같다.

다음으로는 풍력발전시스템의 운전시 발전출력에 대한 10분 평균의 역률 변화를 측정하여 보았다. 역률 역시 풍력발전시스템이 계통에 미치는 주요한 인자로서, 측정된 결과를 [그림 10]에 보이고 있는데, [그림 9]의 전압변동과 마찬가지로 저출력일때는 다소의 불안정한 요소를 보이고 있으나, 고출력시에는 안정적으로 역률이 유

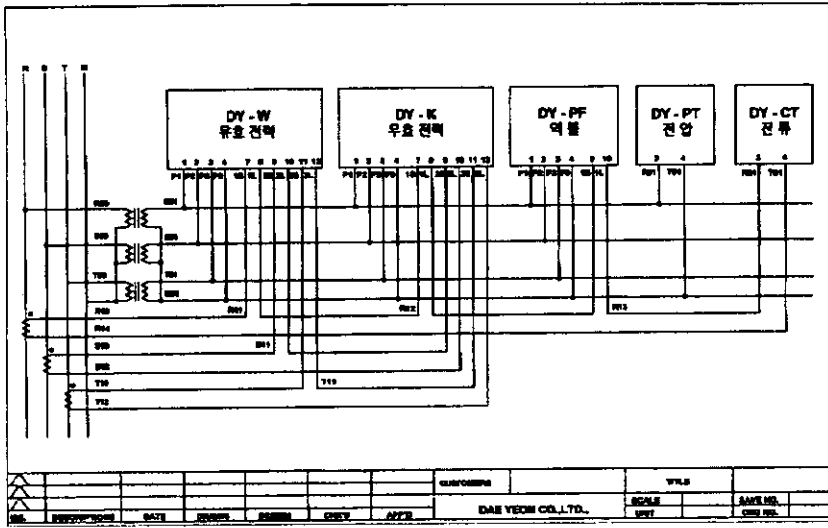


그림 8. 풍력발전 시스템 출력 특성 측정 구성도.

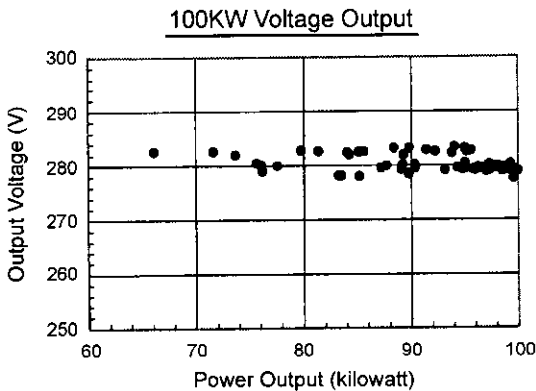


그림 9. 풍력발전시스템 발전전압의 변화.

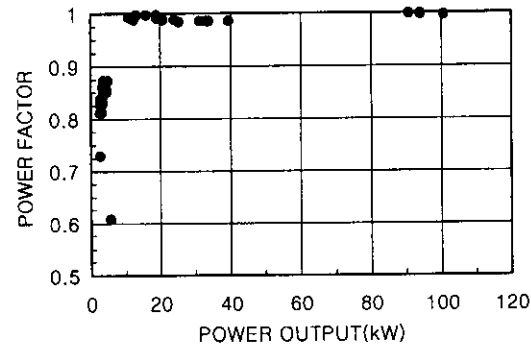


그림 10. 풍력발전시스템 역률의 변화.

지되고 있음을 볼 수 있다. 이는 보통의 풍력발전시스템내의 역률 보상장치가 2단 또는 3단으로서 거의 출력

이 큰 범위에 맞게 보상장치의 용량 등이 설계되어 있기 때문에 저출력 일 때는 필요한 무효전력을 보상장치가 충분히 공급하지 못하게 되므로, 결국 계통으로부터 공급받게 되어 역률의 저하를 초래하는 것으로 판단된다.

3. 결 론

풍력발전시스템의 성능 측정기술은 풍력발전시스템의 개발과 응용측면에서 점차 그 중요성이 강조되고 있는 실정에 있다. 이에 따라 제주도 월령시범단지내에 설치되어 가동중인 풍력발전시스템을 대상으로 하여 성능시험 및 측정이 이루어 졌다. 이렇게 운전중인 풍력발전시스템을 대상으로 하는 성능시험 및 측정은 풍력발전시스템에 대하여 여러 가지 측면에서 기계 및 전기적인 요소에 대한 특성 파악과 해석에 많은 도움을 주었다. 또한, 풍력발전시스템의 국산화에 대한 기술 수요가 증가하고 있는 시점에서 이에 대한 적절한 성능의 측정 및 평가기술은 우선 풍력발전시스템에 대한 국산화 기술의 개발 및 평가과정에서 중요한 역할을 담당하게 될 것으로 여겨진다. 본 연구를 통하여 풍속·풍향 등의 일차적인 기상자료를 측정·분석하는 기술의 정립과 풍력발전시스템의 출력특성, 소음특성, 전압변동, 역률변동 등 계통영향 요소의 측정을 통해 풍력발전시스템에 대한 물리적 특성과 성능을 이해하고, 이러한 것을 바탕으로 실제 설계에 이용될 수 있도록 분석하는 기술개발이 부분적으로 개발되었고, 앞으로도 이와 병행하여 지속적인 연구와 실험을 통해 성능 측정 및 분석에 관한 체계적인 정립이 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. 1996, Renewable Energy - Status Report, DOE.
2. 김건훈외: 1997, 풍력자원 정밀조사 및 분석, KIER.
3. 김건훈외: 1997, 중형급 풍력발전시스템 운영기술 개발, 전력연구원.
4. IEA: 1990, IEA Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation, - Power Performance Testing, 2nd Ed.
5. IEA: 1988, IEA Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation, - Measurement of Noise Emission from Wind Turbines and Fatigue Loads, 2nd Ed.
6. 1994, Testing of Wind Turbines, Germanischer Lloyd, Hamburg.
7. Randemakers, L. and Hunter, R.: 1996, European Wind Turbine Standards, EC, Brussels.
8. ASME: 1989, Performance Test Codes, ASME/ANSI PTC 42-1988.