

풍력발전기를 위한 신경망 기반의 풍속 추정 및 MPPT 기법에 관한 연구

A Study on Wind Speed Estimation and Maximum Power Point Tracking scheme for Wind Turbine System

문대선¹ · 김성호²

Dae-Sun Moon and Sung-Ho Kim

¹군산대학교 전자정보공학부

E-mail: nalba01@kunsan.ac.kr

²군산대학교 전자정보공학부

E-mail: shkim@kunsan.ac.kr

요 약

최근 풍력발전 시스템은 가장 빨리 발전하고 있는 신재생 에너지원중 하나로 각광을 받고 있으며, 풍력발전 시스템의 주된 관심사는 어떻게 광범위한 풍속의 변화에서도 효율적으로 시스템을 동작시키는 가에 있다. 일반적으로 풍속은 풍력발전시스템의 동특성에 큰 영향을 미치는 요소이다. 따라서 많은 풍력발전 제어 알고리즘은 성능향상을 위해 풍속의 추정을 요구하게 된다. 그러나 불행히도 풍속계와 같은 센서에 의한 실효 풍속의 정확한 측정은 어려운 실정이며 따라서 제어 시스템의 동작을 위해 풍속은 여러 가지 기법을 통해 추정되고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 신경망 학습을 통해 현재 풍속을 추정한 후 추정된 풍속을 이용하여 최대 전력점을 추종(MPPT)하는 방법을 제안하고자 하며, 제안된 기법의 유용성 검증에 위해 실제 제작된 실험환경에서의 적용실험을 수행하였다.

키워드 : 신재생 에너지, 신경망, 최대 전력점 추종(MPPT), 풍력발전기, 풍속추정

Abstract

As the wind has become one of the fastest growing renewable energy sources, the key issue of wind energy conversion systems is on how to efficiently operate the wind turbines in a wide range of wind speeds. In general, the wind speed is the main factor that impact on the dynamics of wind turbine system. Wind turbine algorithms are thus required to improve the performance of wind speed measurements. However, the accurate measurement of the effective wind speed using wind gauge and similar sensors is difficult such that control systems are needed for wind speed estimation using various techniques. Therefore, this research suggests the Maximum Power Point Tracking (MPPT) method for tracking the wind speed based on neural networks. Design experiments were carried out in laboratory environment to validate the application of the proposed method.

Key Words : Renewable energy, Neural network, Maximum power point tracking, Wind turbine system, Wind speed estimation

1. 서 론

최근 화석에너지의 고갈에 대비한 친환경적인 대체 에너지원으로 풍력발전이 주목을 받고 있다. 97%의 에너지원을 해외에서 수입하고 있는 우리나라에서 풍력에너지의 활용은 원유 수입절감을 통한 단순한 외화 절약뿐만 아니라 화

석연료의 고갈에 대비하는 재생 가능한 에너지원 확보, 비산유국으로서 에너지 자립 등을 위해 반드시 필요하다.

신재생에너지중의 하나인 풍력은 지속적으로 개발 가능한 무공해 천연에너지로서 최근 국내외에서 활발하게 사업이 진행되고 있다. 국내에서는 현재 다수의 연구기관을 중심으로 풍력발전 시스템의 국산화 연구개발이 활발히 진행되고 있으며, 또한 정부 지원의 에너지 사업을 통해 제주도 등 다수의 지역에 중대형 국내외 시스템이 도입되어 설치 운전되면서 국내 풍력 자원 개발의 가능성을 검토하고 있는 실정이다.

대부분의 풍력 발전 단지(Wind farm)는 수 십대의 풍력 발전기와 높이에 따른 풍속 및 풍향의 추정을 위한 기상타워(meteorological tower)로 구성된다. 터빈 블레이드의 허

접수일자 : 2010년 10월 21일

완료일자 : 2010년 11월 25일

감사의 글 : 본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2009T100100576)

브 높이에서의 풍속은 발전 용량과 밀접한 관계가 있으며, 이는 허브 높이에서의 풍속이 지표면으로부터 허브까지의 높이에 따라 속도 프로파일이 변하지 않는다는 것을 가정하고 있으나 풍력 발전기가 설치된 위치와 기상 타위가 설치된 위치사이의 지형 변화로 인해 실제 풍력발전기의 허브단에서의 풍속은 정확히 알기가 어려운 실정이다.

풍력발전 시스템은 운전방식에 따라 고정속-고정피치(Fixed-speed Fixed-Pitch), 고정속-가변피치(Fixed-speed Variable-Pitch), 가변속-고정피치(Variable-Speed Fixed-Pitch) 및 가변속-가변피치(Variable-speed Variable-Pitch) 등으로 구분되며, 운전효율적인 측면에서는 고정속 보다는 가변속 제어 시스템이 유리하다. 가변속 시스템은 cut-in 속도가상부터 정격 풍속까지의 풍속 범위 내에서 블레이드가 바람으로부터 얻을 수 있는 에너지를 최대한 얻고자 하는 제어 방식으로 이를 위해서는 블레이드 허브단에서의 정확한 풍속의 계측이 필수적으로 요구된다. 그러나 수평축 풍력발전기의 경우, 허브단에 풍속계의 직접적인 설치는 어려운 상태이며, 또한 설치한다 하더라도 블레이드의 회전에 의해 계측된 풍속 값은 정확하지 않게 된다.

이에 본 연구에서는 미리 계측한 발전기의 특성을 신경망에 학습을 시켜 풍속을 추정하고 추정된 풍속을 기반으로 최대 전력점(MPPT)을 추종하는 방법을 제안하고자 하며, 제안된 기법에 대한 유용성 검증을 위해 실제 제작된 풍력발전기 실험장비에의 적용실험을 수행하였다.

2. 풍력발전시스템의 구성

풍력발전시스템은 그림 1과 같이 바람이 가진 에너지를 흡수/변환하는 운동량 변환장치, 동력전달장치, 동력변환장치, 제어장치 등으로 구성되어 있다.

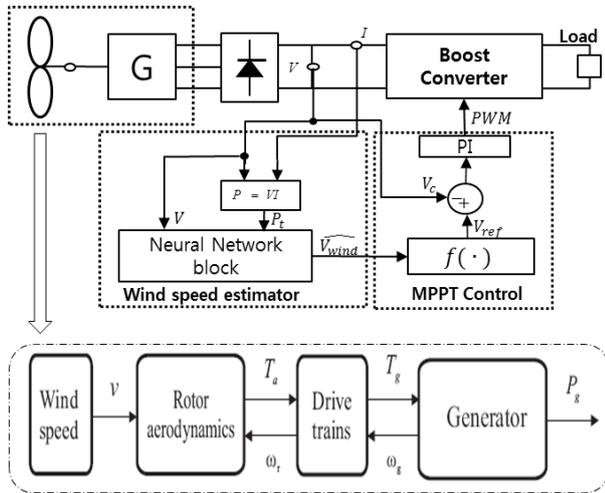


그림 1. 풍력발전 시스템의 전체 구성

Fig. 1. The overall configuration of wind turbine system

풍력발전시스템의 블레이드는 바람의 운동에너지를 기계적 회전력으로 변환하고, 동력전달장치(Geerbox)는 입력된 에너지를 증폭 시킨다. 발전기는 기계적 회전력을 전기에너지로 변환시키며, 전력변환장치(브릿지 다이오드, Inverter)를 거쳐 수용가에게 전력을 공급하게 된다.

풍력발전시스템에서의 전력의 인출은 다음과 같은 세 가지 요소 즉, 풍력 에너지, 터빈의 파워곡선 및 풍속의 변화에 대한 전력 변환장치의 적응 능력 등에 의해 결정된다.

2.1 블레이드의 특성

풍력에너지를로부터 터빈에 의해 흡수되는 에너지는 다음과 같은 비선형 함수에 의해 표현이 가능하다.

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_{wind}^3 C_p(\lambda, \beta) \quad [W] \quad (1)$$

여기서 R 는 회전자의 반경[m], ρ 는 공기의 밀도로 약 $1.25 [Kg/m^3]$ 이다.

상기 식에서 전력계수 C_p 란 풍속 V_{wind} 의 바람이 갖고 있는 에너지 중에서 블레이드가 받아들이는 에너지의 비율을 의미하며, λ 는 풍속에 대한 블레이드의 회전 속도비인 주속비(tip-speed ratio)로 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V_{wind}} \quad (2)$$

따라서 풍속의 변화나 터빈의 회전속도 변화는 λ 의 변화를 가져오며 이는 식(1)의 전력 계수 $C_p(\lambda, \beta)$ 의 변화를 초래한다. 전형적인 전력 계수 $C_p(\lambda, \beta)$ 곡선은 그림 2와 같으며, 그림으로부터 터빈이 회전을 개시하여 주속비가 점점 커지면 출력 계수, 즉 효율이 증가하다가 어느 속도 이상으로 회전하게 되면 효율이 오히려 떨어짐을 알 수 있다. 이러한 출력 계수는 블레이드 설계시 결정되며 Betz의 연구결과에 따르면 이론적 최대값이 0.593이다.

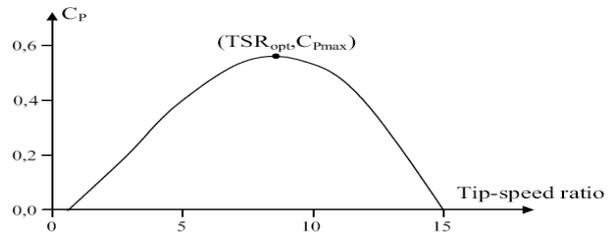


그림 2. 주속비 변화에 따른 전력계수

Fig. 2. Power coefficient vs. tip-speed ratio(TSR)

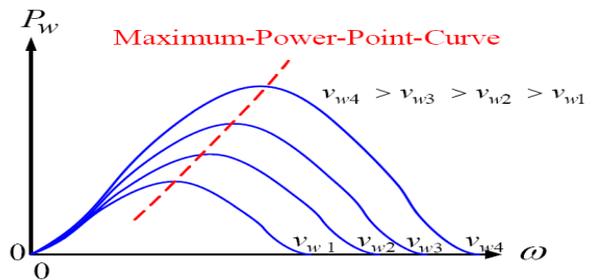


그림 3. 풍속의 변화에 대한 회전속도 대 출력특성

Fig. 3. Characteristic of turbine power and speed of blade corresponding to wind speed

그림 2로 주어지는 주속비 대 전력계수의 관계로부터 풍속이 변화할 경우, 블레이드의 회전속도에 따른 출력을 구하면 그림 3과 같다. 그림 3으로부터 알 수 있듯이 최대 전

력점 추종은 풍속이 변화함에 따라 최대 전력의 인출을 위해 발전기 또는 블레이드를 규정된 속도로 회전 시키는 것을 의미한다.

2.2 PMSG 및 부스트 컨버터의 특성

일반적으로 풍력발전 시스템의 발전기로 널리 사용되고 있는 PMSG(Permanent Magnet Synchronous Generator)와 DC 부하 또는 배터리로의 전력 공급을 위한 부스트 컨버터의 특징에 대해 살펴보고자 한다.

PMSG에서는 블레이드와 연결된 영구자석의 회전에 의해 고정자 권선으로부터 3상 전압이 유도되고, 유도된 3상 전압의 효율적 처리를 위해 발전기 내부에 3상 브릿지 다이오드 정류회로를 사용하여 직류발전기와 같이 직류 전압을 출력하도록 설계된다.

따라서 PMSG에 3상 다이오드 브릿지 정류회로를 도입하면 PMSG의 로터의 회전속도 대 출력 전압(V_s)은 다음과 같은 수식에 의해 표현될 수 있다

$$\frac{V_s}{\omega_e} = k_1 \phi = k_2 \tag{3}$$

여기서 ϕ 는 영구자석 회전자에 의해 발생하는 자속이며, ω_e 는 고정자 권선으로부터 발생하는 3상 전압의 전기적 회전 각속도이다. 또한 k_1 과 k_2 는 PMSG와 관련된 상수이다.

다음으로 부스트 컨버터의 입력 V_s 와 출력 V_o 는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1-D} \tag{4}$$

여기서 D 는 부스트 컨버터의 스위칭 소자에 인가되는 펄스의 듀티비(Duty ratio)를 의미한다. 부스트 컨버터의 듀티비 변화는 부스트 컨버터 출력단에 연결된 부하의 가변을 의미하며, 부하의 크기를 변화시킴으로써 발전기로부터 인출되는 전류의 크기를 조절하는 것이 가능하게 된다.

따라서 블레이드의 회전수, PMSG 발전기의 출력전압 V_s 및 듀티비 D 의 변화에 따른 발전기 출력곡선은 다음과 같이 비슷한 양상을 보이게 된다.

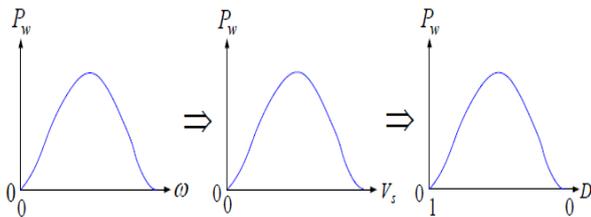


그림 4. 회전수, 전압, 듀티비에 대한 발전기의 출력곡선
Fig. 4. The curve of the wind-turbine output power versus to the rotation speed, generator output voltage, and the boost converter switch duty cycle

2.3 최대 전력점 추종(MPPT) 알고리즘

가변속-고정피치 풍력시스템의 경우 그림 5에서와 같이 풍속이 컷인속도(cut-in speed) 이상이 될 때부터 동작하기 시작하며, 정격속도(rated speed)를 넘게 되면 풍력발전기는 스톱제어(stall control)에 의해 최대 정격 출력으로 출력을 제한하여 운전한다. 풍속이 영역III인 컷아웃속도

(cut-out speed)에 이르게 되면 자체보호를 위하여 운전을 중지한다. 그림 5에서 알 수 있듯이 풍속이 영역II인 정격속도와 컷아웃속도 사이에 있는 경우 풍력의 크기에 관계없이 일정한 출력을 발생한다. 그러나 풍속이 영역I인 컷인속도와 정격속도 사이에 있을 때는 풍력발전기의 출력은 풍속에 따라 크게 변동하게 되는데, 최대 전력점 추종(MPPT) 제어 등이 필요한 구간이기도 하다.

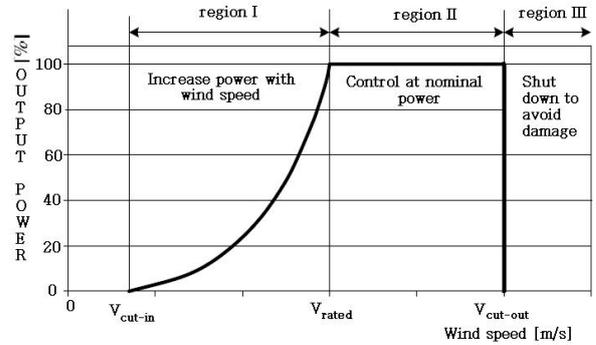


그림 5. 풍력 발전 시스템의 동작모드
Fig. 5. The operation mode of wind turbine system

그림 6은 그림 5의 영역별 운전특성을 풍속에 따른 전력 대 회전수 특성 곡선상에 나타낸 것이다.

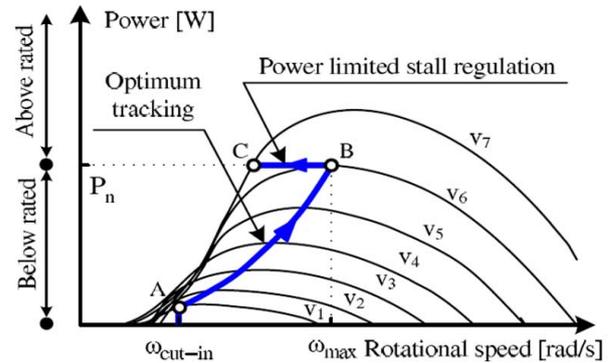


그림 6. 풍력발전시스템의 동작모드에 대한 특성
Fig. 6. The characteristic corresponding to operation mode of wind turbine system

3. 제안된 시스템의 구성

3.1 인공 신경망을 이용한 풍속 추정 기법

본 연구에서는 풍력발전기의 전단부 풍속을 추정하기 위해 인공신경망 기반의 풍속추정기를 제안하고자 하였다. 제안된 인공신경망 기반의 풍속추정기는 그림 7에 나타난 것과 같이 풍속에 따른 발전기의 전압 대 전력 곡선을 인공신경망에 학습시켜 풍속을 추정하게 된다.

인공 신경망은 인간의 두뇌의 구조와 동작방식을 모델로 하여 만들어진 기법으로 다양한 신경망 구조 중 일반적으로 많이 사용되고 있는 오류 역전파(Back-Propagati-on) 알고리즘을 사용하였으며, 인공신경망의 도입 근거는 풍속에 대한 전력 대 전압 곡선이 서로 겹치지 않는다는 것이다.

인공신경망의 기능은 그림 7에서와 같이 매 순간 입력되는 전력 P_t 와 발전기의 출력 전압 V 를 이용하여 현재 풍속을 추정한 후 출력으로 내보내는 기능을 수행한다.

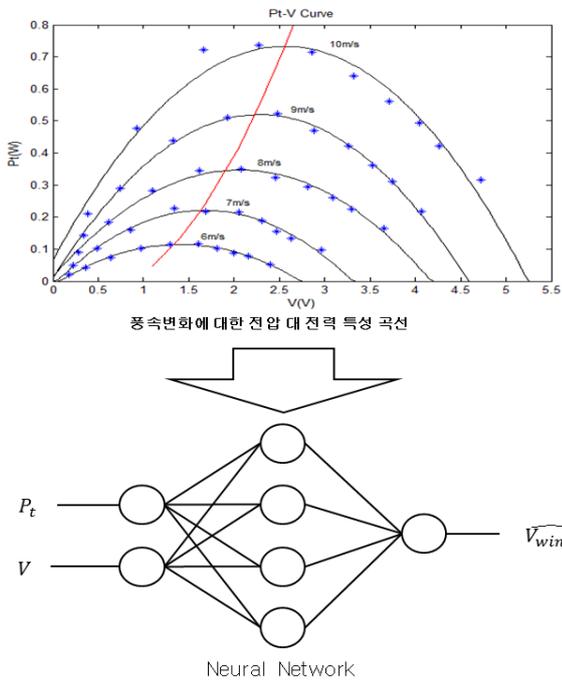


그림 7. 신경망 기반의 풍속 추정기

Fig. 7. Wind speed estimator based on artificial neural network

오류 역전파 알고리즘은 그림 8과 같이 입력층, 은닉층, 출력층으로 구성된다.

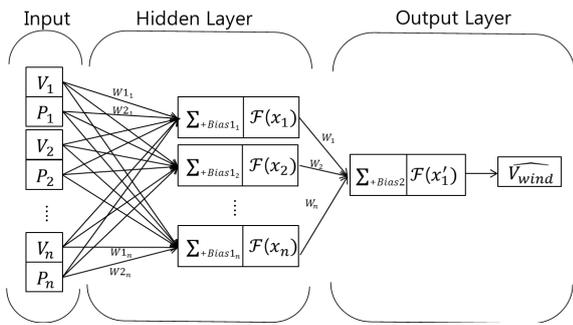


그림 8. 오류 역전파 알고리즘의 구조

Fig. 8. The structure of back propagation algorithm

은닉층 뉴런의 출력은 다음 식(5)에 의해 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 z_1 &= f\left(\sum_{i=1}^n w_{i1}x_i + Bias_1\right) \\
 &\vdots \\
 z_j &= f\left(\sum_{i=1}^n w_{ij}x_i + Bias_j\right)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

여기서 w_{ij} 는 입력층 뉴런 j 와 은닉층 뉴런 i 간의 연결 강도이다.

따라서, 출력층은 다음 식(6)에 의해 입력에 해당하는 풍

속을 최종적으로 출력한다.

$$\begin{aligned}
 y_1 &= f\left(\sum_{i=1}^z w_{i1}z_i + Bias_1\right) \\
 &\vdots \\
 y_m &= f\left(\sum_{i=1}^z w_{im}z_i + Bias_m\right)
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

마찬가지로 여기서 w_{im} 은 은닉층 뉴런 i 와 출력층 뉴런 m 간의 연결강도이고, $Bias$ 는 각 층에서 뉴런이 활성화되기 위한 최소 한계치이다.

3.2 추정된 풍속을 이용한 MPPT 제어

MPPT 제어는 그림 5의 동작I 구간에서 현재 풍속에 대한 최대 전력점을 추종하는 것으로 일반적으로 풍력발전 시스템에 적용 가능한 MPPT 알고리즘에는 그림 9와 같이 크게 풍속 정보를 이용하는 방법과 풍속 정보를 이용하지 않는 방법으로 구분된다.

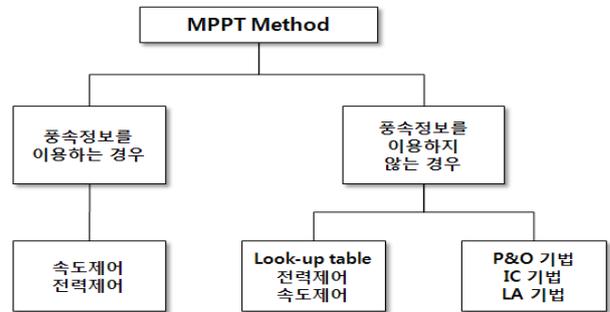


그림 9. 일반적인 풍력발전 시스템에 적용 가능한 각종 MPPT 알고리즘의 종류

Fig. 9. Wind turbine system can be applied in various type of MPPT algorithm

본 연구에서는 다양한 형태의 MPPT 알고리즘 중, 풍속 정보를 이용하여 MPPT를 수행하는 방법에 대해 고찰하고자 한다.

추정된 풍속을 이용한 MPPT제어 방법은 그림 10과 같다.

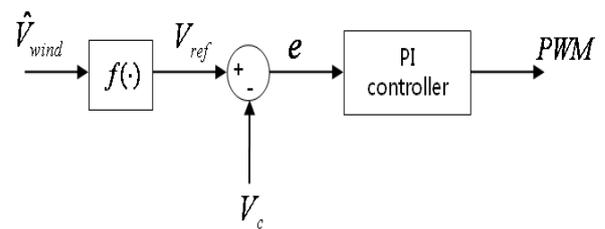


그림 10. 추정된 풍속을 이용한 최대 전력점 추종 방법
Fig. 10. Maximum power point tracking method using estimated wind speed

그림 10에서와 같이 추정된 풍속이 보간 다항식에 입력되면, 현재 풍속에서 최대의 전력을 인출하기 위한 기준전압 V_{ref} 가 출력되고, 현재의 출력전압 V_c 가 기준전압 V_{ref} 를 추적하도록 제어함으로써 최대 전력점을 추종하게 된다. 그림 11은 풍속에 대한 전력 대 전압 곡선으로부터 얻은 풍속

에 대한 기준전압 곡선을 나타낸 것이다. 즉, 풍속에 대한 기준전압 곡선은 보간 다항식 계산을 위해 사용되게 된다.

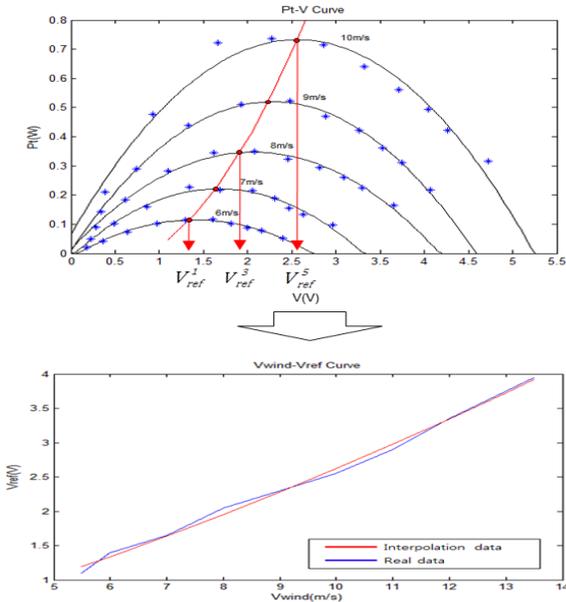


그림 11. 풍속에 대한 V_{ref} 곡선의 특성

Fig. 11. The characteristic curve of V_{ref} versus wind speed

본 연구에서는 현재의 출력전압 V_c 가 기준전압 V_{ref} 를 빠르게 추적하기 위해 일반적으로 많이 사용되는 PI 제어기를 사용하였다.

4. 실험 및 고찰

4.1 제작된 풍력발전기 실험장비

그림 12는 제안된 기법의 유용성 검증을 위해 실제 제작된 실험 장비를 나타낸 것이며, 그림 13은 그림 12에 대한 블록도를 나타낸 것이다.



그림 12. 제작된 풍력발전기 실험 장비

Fig. 12. The designed wind turbine test equipment

상기의 실험장비는 풍속 발생부, 블레이드, 3W 발전기, DC/DC컨버터(boost 컨버터) 및 DSP기반의 제어기, 모니터링 시스템으로 구성된다.

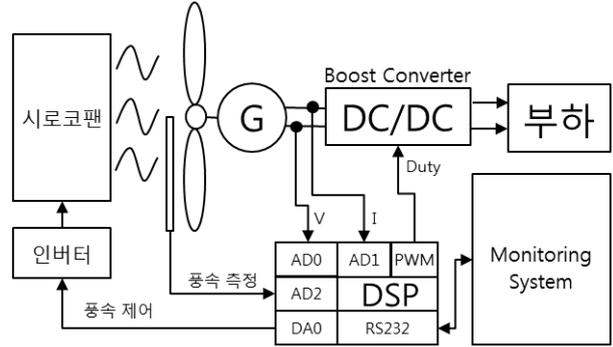


그림 13. 풍력발전기 실험 장비에 대한 블록도

Fig. 13. The block diagram of wind turbine test equipment

제안된 시스템에서는 실제 풍속과 유사한 풍속을 만들기 위해 시로코팬을 사용하였으며, 시로코팬의 풍속조절을 위해 인버터를 사용하였다. 블레이드는 날개가 4개인 수평축 타입을 사용하였고, 발전기는 3W DC모터를 사용하였으며, 발전기의 후단에 연결된 DC/DC컨버터(boost 컨버터)는 풍력발전기의 출력 전력을 가변하기 위해 사용된다. DSP 제어 보드는 풍속을 제어하는 기능, 센서 데이터 측정 및 측정된 데이터를 기반으로 풍속을 추정하는 기능, 추정된 풍속을 이용한 MPPT 제어기능 및 모니터링 시스템과의 인터페이스 기능을 수행한다.

4.2 신경망을 이용한 풍속추정

본 연구에서 신경망 학습은 Matlab을 이용하였으며, 그림 7의 전력 대 전압곡선의 학습을 위해 입력층, 은닉층, 출력층을 각각 2개, 22개, 1개를 사용하였다. 또한 실제 시스템에 학습된 인공신경망을 적용하기 위해 학습완료된 신경망의 파라미터를 DSP 코드로 구현하였다.

그림 15는 풍속을 6m/s에서 10m/s 까지 서서히 변화시킨 후 풍속계에서 측정된 출력신호와 추정된 풍속을 시간에 따라 비교한 그래프를 나타낸 것이다.

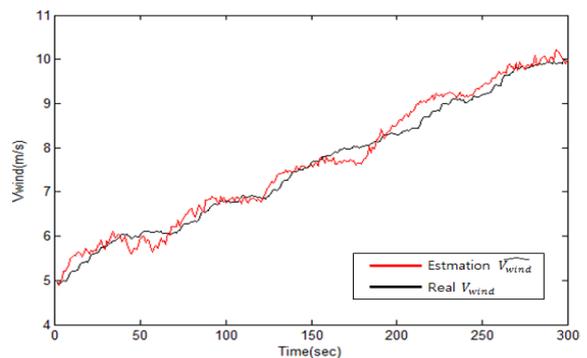


그림 14. 실제 측정된 풍속과 신경망에 의해 추정된 풍속의 비교

Fig. 14. Comparison of measured wind speed and estimated wind speed

그림 15는 실제풍속과 추정된 풍속에 대한 오차그래프를 나타낸 것으로 에러율은 9m/s 일 때 약 6.1%로 최대 오차를 나타냈으며, 평균적으로 약 2.34%의 오차를 보였다.

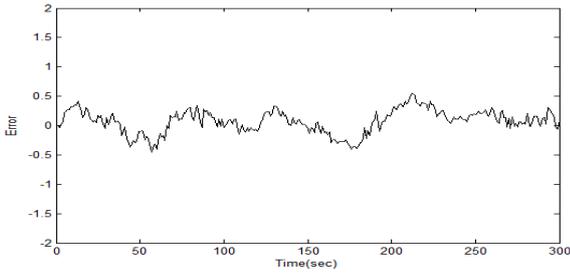


그림 15. 실제 측정된 풍속과 신경망에 의해 추정된 풍속의 오차

Fig. 15. Error of measured wind speed and estimated wind speed

4.3 추정된 풍속을 이용한 MPPT제어

그림 16은 추정된 풍속을 이용하여 MPPT를 수행한 결과 그래프를 2차원 곡선 상에 나타낸 것이다.

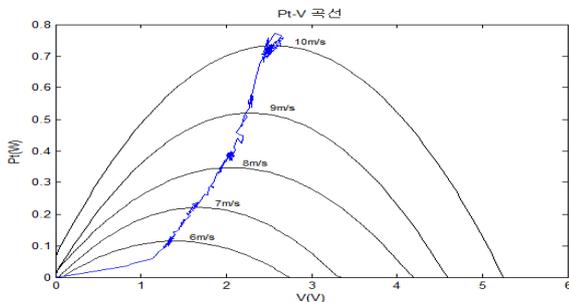


그림 16. 제안된 MPPT 기법의 제어 특성

Fig. 16. The control characteristic of the proposed MPPT method

6. 결 론

본 연구에서는 고가의 센서를 이용하지 않고 풍속을 추정 할 수 있는 인공 신경망 기반의 풍속추정기법 및 추정된 풍속을 이용하여 풍력발전기의 최대 전력을 추종하는 기법을 제안하였으며, 제안된 기법의 유용성 검증을 위해 실제 제작된 풍력 발전기 실험장비에의 적용실험을 수행하였다. 실험 결과 추정된 풍속이 실제 풍속과 거의 일치함을 확인할 수 있었으며, 우수한 추정 특성으로 인해 풍속이 변화하는 상황에서도 효율적으로 최대 전력점을 추종을 할 수 있음을 확인하였다.

하지만, 풍력발전기의 특성을 이용한 인공신경망 기반의 풍속추정기법의 최대 단점으로는 정격속도이상의 구간에서는 풍속을 추정하기가 어렵다는 단점이 있다. 이는 스톱제어 등에 의해 출력을 강제적으로 제한하기 때문이다. 향후, 컷인속도구간에서 정격속도까지의 풍속추정뿐만 아니라, 정격속도구간에서의 풍속추정기법 연구 또한 계획 중이며, 다양한 MPPT제어 기법에 대해서도 연구하고자 한다.

참 고 문 헌

[1] Ekelund, T. "Modelling and linear quadratic op-

timal control of wind turbines", Ph.D. thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 1997

- [2] Ma, X. "Adaptive extremum control and wind turbine control", Ph.D. thesis, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 1997
- [3] Boubekeur Boukhezzar and Houria Siguerdidjane, "Nonlinear control of variable speed wind turbines without wind speed measurement", *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference*, Seville, Spain, Dec. 2005
- [4] J. H. R. Enslin and D. B. Snyman, "Simplified feed-forward control of the maximum power point in PV installations," in *Conf. Rec. IEEE Industrial Electronics Conf.*, pp. 542-547, 1992
- [5] V. Arcidiacono, S. Corsi, and L. Lambri, "Maximum power point tracker for photovoltaic power plants," in *Conf. Rec. IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, pp. 507-512, 1982

저 자 소 개



문대선 (Moon Dae-sun)

2010년 : 군산대학교 전자정보공학부 학사 졸업

2010년~현재 : 동 대학원 전자정보공학부 석사과정

관심분야 : 풍력발전, 뉴럴 네트워크, DSP, 마이크로 컨트롤러, 하드웨어 설계 및 개발

Phone : 010-2972-0351

Fax : 063-468-6224

E-mail : nalba01@kunsan.ac.kr



김성호 (Kim Sung-ho)

1984년 : 고려대학교 공과대학 학사졸업

1986년 : 고려대학교 대학원 석사졸업

1991년 : 고려대학교 대학원 박사졸업

1988년~1990년 : 고려대 생산기술연구소 연구원

1995년~1996년 : JAPAN HIROSHIMA UNIVERSITY-Y POST-DOC

1997년 : 군산대학교 제어계측공학과 부교수 임명

관심분야 : 풍력발전, 뉴럴 네트워크, 퍼지, 센서 네트워크, 공장 자동화 및 오류검출

Phone : 016-610-1224

Fax : 063-468-6224

E-mail : shkim@kunsan.ac.kr