

도시형 풍력발전 시스템의 효율적 에너지 관리를 위한 인공신경망 기반 최대 전력점 추종 알고리즘 개발

Design of Neural Network based MPPT(Maximum Power Point Tracking) Algorithm for Efficient Energy Management in Urban Wind Turbine Generating System

김승영 · 김성호

Seung-Young Kim and Sung-Ho Kim

군산대학교 전자정보공학부

요 약

일반적으로 풍력발전은 광범위한 영역에 지속적인 바람을 요구하는 대형 시스템 위주로 개발이 되어왔다. 그러나 소형 풍력발전 시스템은 사용자에 보다 친숙하고, 대형에 비해 보다 광범위한 적용이 가능하다는 점 때문에 최근 이에 대한 관심이 증가되고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 배터리 충전에 효과적으로 도입될 수 있는 도시형 풍력발전을 위한 프로토타입 시스템에 대해 기술하며, 프로토타입 시스템에 효과적으로 도입될 수 있는 인공신경망 기반의 최대 전력점 추종 알고리즘을 제안하고자 한다. 또한 Matlab기반의 다양한 시뮬레이션 및 실제 시스템 설계를 통해 제안된 기법의 유용성을 확인하고자 한다.

키워드 : 도시형 풍력발전 시스템, 배터리 충전, 인공 신경망, 최대 전력점 추종제어

Abstract

Generally, wind industry has been oriented to large power systems which require large windy areas and often need to overcome environment restrictions. However, small-scale wind turbines are closer to the consumers and have a large market potential, and much more efforts are required to become economically attractive. In this paper, a prototype of a small-scale urban wind generation system for battery charging application is described and a neural network based MPPT(Maximum Power Point Tracking) algorithm which can be effectively applied to urban wind turbine system is proposed. Through Matlab based simulation studies and actual implementation of the proposed algorithm, the feasibility of the proposed scheme is verified.

Key Words : Small-scale Urban Wind Turbine, Battery charging, Neural Network, MPPT(Maximum Power Point Tracking)

1. 서 론

최근 화석에너지의 고갈에 대비한 친환경적인 대체 에너지원으로 풍력발전이 주목을 받고 있다. 독일, 네덜란드 및 덴마크를 중심으로 서유럽 여러 나라에서는 1970년대부터 풍력발전에 대한 많은 연구가 있어 왔고, 그 결과 최근에는 수 MW급 풍력발전 시스템을 상용화하기에 이르렀다[1-3]. 국내에서도 다수의 연구기관을 중심으로 풍력발전 시스템의 국산화 연구개발이 활발히 진행되고 있으며 또한 정부 지원의 지역 에너지 사업을 통해 제주도 등 다수의 지역에 중대형 국내의 시스템이 도입되어 설치 운전되면서 국내 풍력 자원 개발의 가능성을 검토하고 있는 실정이다.

최근 군산대학교는 지식경제부에서 지원하는 신재생에너지 기술 개발사업 분야의 도시형 풍력연구센터를 유치한 바

있다. 본 센터에서는 사람이 사는 곳에서 멀리 떨어진 곳에 설치되어 운영되고 있는 기존의 풍력발전 시스템과는 달리 사람들이 많이 모여 사는 도심에 적용가능한 도시형 풍력발전 시스템의 체계적인 개발에 연구 목표를 두고 있다. 구체적인 연구 개발은 풍력가로등, 건물풍력 및 소형풍력 등으로 나뉘어지며 이와 관련된 체계적인 연구개발이 진행되고 있다.

풍력발전 시스템은 에너지 변환 흐름에 따라 블레이드, 동력 전달부 등의 기계 부분과 발전기, 전력변환회로 등의 전기 부분으로 구분되며, 풍력가로등 및 건물풍력 시스템에 적용 가능한 300W - 500W 규모의 수평형 풍력발전 시스템의 전기 부분 개발과 관련된 기초 연구를 수행 하고자 한다.

본 연구에서는 우선 가변속 풍력발전이 가능한 수평형 풍력발전기의 에너지/토크 곡선을 얻은 후, 이 특정 곡선을 기반으로 발전기 후단에 연결된 정류기 및 부스트 컨버터의 출력을 최대로 할 수 있는 인공신경망 기반의 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 알고리즘을 제안하고자 실제 실험을 통해 제안된 기법의 유용성을 확인하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 도시형 풍력발전 시스템의 전체 구성 및 이의 토오크/출력과 관련된 특성

접수일자 : 2009년 10월 21일

완료일자 : 2009년 12월 5일

"본 연구는 지식경제부의 도시형풍력발전원천기술센터 사업으로 수행된 연구결과 임"

에 대해 고찰하고 3장에서는 현재 사용되고 있는 각종 MPPT 알고리즘에 대해 고찰한 후, 4장에서는 간이로 제작된 소형 풍력발전시스템을 대상으로 토크 출력 곡선의 취득 및 신경망 이론에 기반한 MPPT의 실제 적용을 수행하며 마지막으로 결론을 기술하고자 한다.

2. 도시형 풍력발전 시스템의 전체 구성

본 연구센터에서 최종 목표로 하는 도시형 풍력 발전 시스템의 전체 구성은 그림 1과 같다. 그림에서와 같이 도시형 풍력발전 시스템은 풍력가로등 및 조형물 풍력에 도입 · 운영될 수 있도록 설계되어야 되기 때문에 효율적인 전력확보를 위해 풍력 및 태양광이 병행 운전될 수 있도록 구성된다 [4].

본 연구에서는 도시형 풍력발전 연구의 초기 단계로서 풍력터빈, 발전기, 정류기, DC/DC 컨버터 및 배터리로 구성되는 독립 운전형 (stand-alone) 발전 시스템(그림 1의 박스안쪽부분)과 관련된 여러 가지 특성 및 이에 기반한 다양한 제어 기법에 대해 고찰하고자 한다.

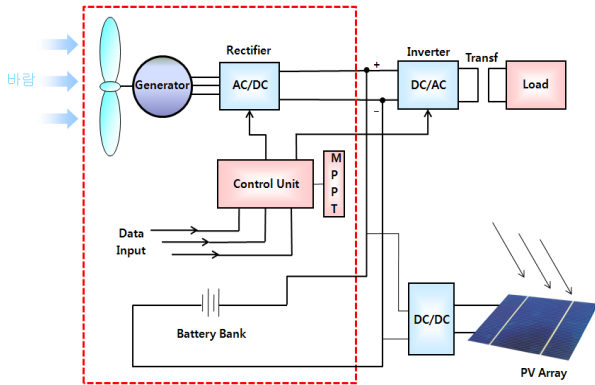


그림 1. 도시형 풍력발전 시스템의 전체 구성도

Fig. 1. Entire configuration of urban wind turbine generating system

2.1 풍력 터빈의 토크/출력 특성

풍속 V_{wind} 의 바람이 불 때, 블레이드가 바람으로부터 받아들이는 에너지는 식(1)과 같이 출력계수(power coefficient) C_p 와 풍속의 3승에 비례한다[4-5].

$$P_{wind} = \frac{1}{2} A \rho V_{wind}^3 C_p \quad [W] \quad (1)$$

여기서 A 는 회전자의 단면적[m^2], ρ 는 공기의 밀도로 약 $1.25[Kg/m^3]$ 이다.

따라서 매 순간 일정 풍속에서 블레이드가 바람으로부터 받아들일 수 있는 토크 T_{wind} 는 식(2)와 같이 표현된다.

$$T_{wind} = \frac{P_{wind}}{w_{blade}} = \frac{1}{2} A \rho V_{wind}^3 \frac{C_p}{w_{blade}} \quad [Nm] \quad (2)$$

여기서 w_{blade} 는 블레이드의 회전속도[rad/sec]이다.

상기 식(1),(2)의 출력계수 C_p 란 풍속 V_{wind} 의 바람이 갖고 있는 에너지 중에서 블레이드가 받아들이는 에너지의 비

율을 의미하며, 풍속에 대한 블레이드의 회전속도의 비율인 주속비(TSR: Tip Speed Ratio) λ 에 따라 변한다. 주속비 λ 는 다음 식과 같이 정의되며, R 는 블레이드의 반경이다.

$$\lambda = \frac{R w_{blade}}{V_{wind}} \quad (3)$$

그림 2는 주속비에 따른 출력계수 변화의 한 예를 보이고 있다. 즉, 블레이드가 회전을 개시하여, 주속비가 점점 커지면 블레이드의 출력계수, 즉 출력 효율이 증가하다가 어느 속도 이상으로 회전하게 되면 효율이 오히려 떨어진다는 것을 나타낸다. 이러한 출력계수는 블레이드의 설계에 따라 달라지며 Betz의 연구결과 및 Rankine-Froude 모델에 따르면 출력계수의 이론적 최대값은 0.59임이 알려져 있다.

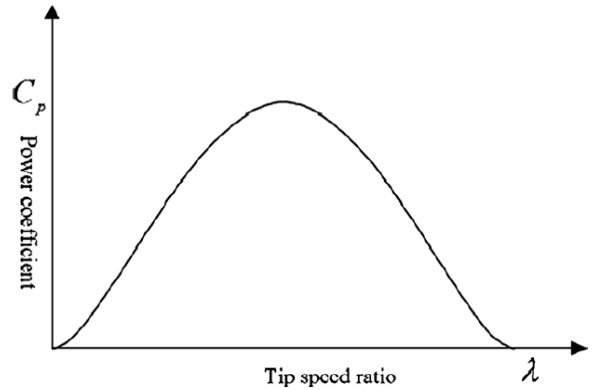


그림 2. 주속비와 출력계수의 관계

Fig. 2. Relationship between tip speed ratio and power coefficient

일반적으로 풍력발전 시스템으로부터 최대의 전력을 인출하기 위한 최대 전력점 추종 알고리즘 (MPPT: Maximum Power Point Tracking)을 구현하기 위해서는 기계적 발전 시스템(풍력터빈 및 발전기 포함)에서 가장 중요한 특성중 하나인 토크/출력 특성 곡선에 대한 고찰이 요구된다.

식(2)의 V_{wind} 의 바람으로부터 터빈이 받아들인 토크는 블레이드 및 발전기의 구동 토크로 사용되며 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$T_{wind} = J_w^* \frac{dw_{blade}(t)}{dt} + T_{load} \quad (4)$$

여기서 J_w 는 터빈의 관성모멘트이고, T_{load} 는 터빈에 연결된 발전기의 구동에 사용되는 토크이다.

만일 터빈과 발전기가 증속기를 거치지 않고 직결되었다면 ω_m (발전기 샤프트의 회전속도)은 ω_{blade} 와 같게 되며 따라서 T_{load} 는 다음과 같이 표현된다.

$$T_{load} = J_g^* \frac{dw_m(t)}{dt} + F_g w_m(t) + T_g \quad (5)$$

여기서 J_g 는 발전기의 관성 모멘트이고, F_g 는 발전기의 마찰계수 그리고 T_g 는 발전기의 부하단에서 인출되는 토크를 의미한다.

따라서 식(5)를 식(4)에 대입하여 정리하면 다음과 같은

풍력 터빈의 토크를 구할 수 있다.

$$T_{wind} = (J_w + J_g) \frac{dw_m(t)}{dt} + F_g w_m(t) + T_g \quad (6)$$

또한 블레이드의 출력은 식(6)의 양변에 $w_m(t)$ 를 곱하여 구할 수 있으며 식(7)과 같이 표현된다.

$$P_{wind} = J \frac{dw_m(t)}{dt} \cdot w_m(t) + F_g w_m(t)^2 + P_g \quad (7)$$

여기서 $J = J_w + J_g$ 이다.

일반적인 풍력 터빈의 풍속의 변화에 대한 블레이드의 회전속도와 출력 특성을 나타내면 그림 3과 같다.

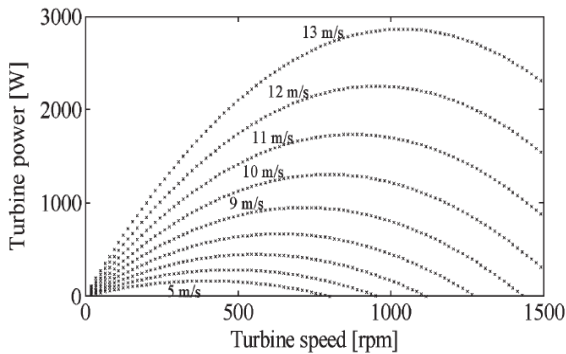


그림 3. 풍속에 대한 블레이드의 회전속도와 출력간의 특성
Fig. 3. characteristic of turbine power and speed of blade corresponding to wind speed

2.2 풍력 발전시스템의 PCS(Power Conditioning System)

본 연구에서는 2.1 절에서 설명한 풍력 터빈에서 발생된 토크/출력을 충전용 배터리에 저장하기 위한 다음과 같은 stand-alone 형태의 PCS에 대해 고찰하고자 한다[5].

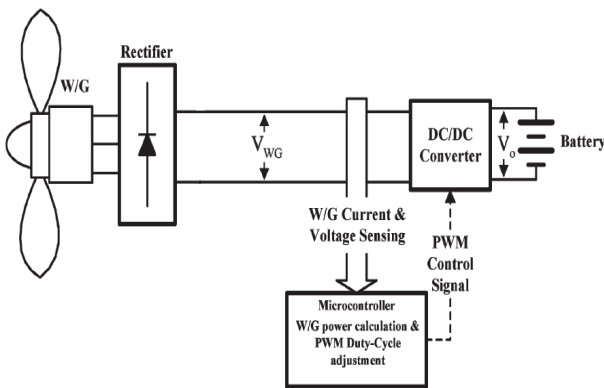


그림 4. Stand-alone형의 풍력발전 시스템을 위한 PCS의 구조

Fig. 4. Structure of PCS for wind turbine of stand-alone type

그림 4는 본 연구에서 채택한 도시형 풍력발전용 전력변환 시스템의 구조를 나타낸 것으로 풍력 터빈에 직결된 영구 자석형 동기발전기에서 교류가 출력된다. 이 교류는 정류 다

이오드를 통하여 직류로 변환된 뒤, DC/DC 컨버터에 의해 배터리를 충전하게 된다. 또한 발전기와 정류기 사이에는 그림 5와 같이 태풍 등 풍력발전기의 정격 용량을 초과하는 바람에 대해 풍력발전기 출력단을 릴레이 등을 이용하여 상단락을 통해 풍력발전기를 제동함으로써 안정화시키는 장치가 포함된다.

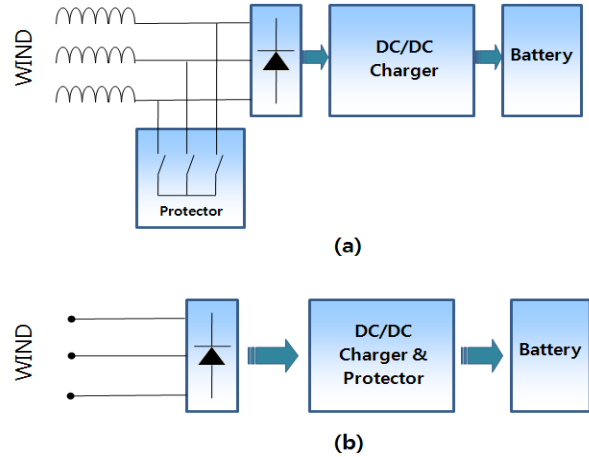


그림 5. 제동장치가 발전기와 정류기 사이에 존재하는 시스템(a), 제동장치가 DC/DC 변환기내에 포함된 시스템(b)
Fig. 5. System for protection between generator and rectifier(a), system for protection in DC/DC converter(b)

3. 풍력발전 시스템의 효율적 에너지 저장을 위한 MPPT 알고리즘

일반적인 풍력발전 시스템에 적용가능한 MPPT 알고리즘은 그림 6과 같이 풍속계의 사용 여부에 따라 여러 형태로 분류될 수 있다.

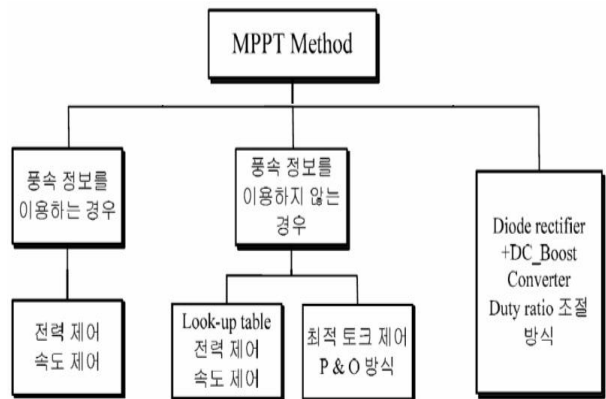


그림 6. 일반적인 풍력발전 시스템에 적용가능한 각종 MPPT 알고리즘의 종류

Fig. 6. Various MPPT algorithms which can be applied to general wind turbine system

본 연구에서는 다양한 형태의 MPPT 알고리즘 중, 풍속정보를 이용하여 MPPT를 수행하는 방법에 대해 고찰하고자 한다. 일반적인 풍속정보에 기반한 MPPT 제어 시스템의 전

체 구성을 나타내면 그림 7과 같다.

그림 7로부터 알 수 있듯이 풍속정보에 기반한 MPPT 제어 시스템은 풍속의 측정을 위해 풍속계의 설치가 요구된다. 측정된 풍속정보를 이용하여 그림 3의 풍속에 대한 블레이드의 회전속도와 출력간의 특성 곡선으로부터 현재 풍속에서 최대 출력의 인출을 가능케 하는 ω_{mopt} 를 구하고 이를 기준으로 하여 블레이드 샤프트의 속도 ω_{mact} 가 ω_{mopt} 를 추종하도록 DC/DC 컨버터의 duty ratio를 조절하는 형태를 취한다.

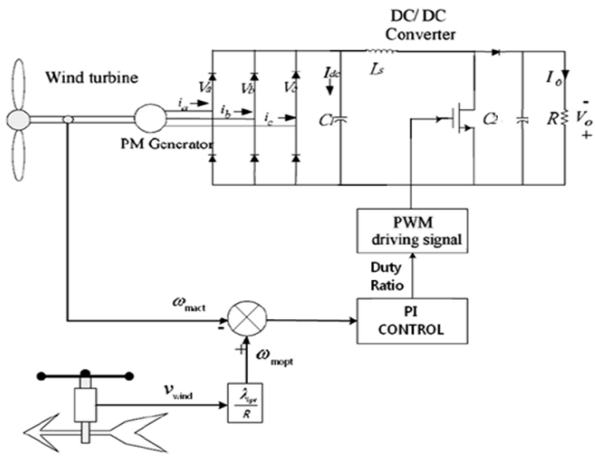


그림 7. 풍속계를 이용한 MPPT 제어 시스템의 구성
Fig. 7. Configuration of MPPT control system based on anemometer

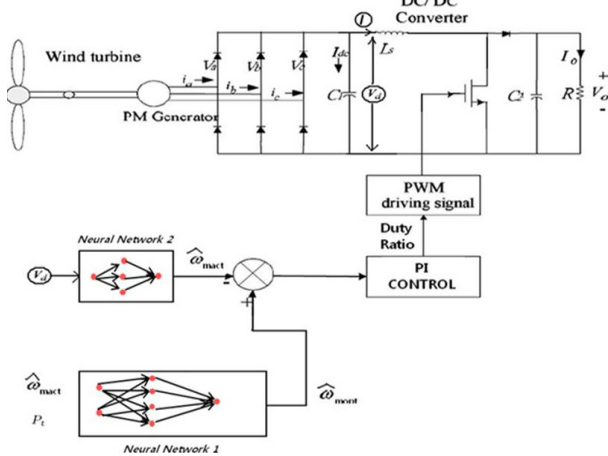


그림 8. 본 연구에서 제안된 신경망 기반의 MPPT 제어 시스템
Fig. 8. Proposed MPPT control system based on neural network

상기의 풍속계를 이용한 MPPT 제어 시스템은 현재 풍속에 해당되는 최적의 ω_{mopt} 를 구하기 위해 고가의 풍속계의 설치를 필요로 하며 이는 전체 시스템의 가격 상승을 야기한다는 문제점을 갖는다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 Ahmed G. 등은 풍속계를 대신할 수 있는 신경망 및 SVR(Support Vector Regression)기법을 도입하여 풍속계를 사용하지 않고도 효과적으로 수행될 수 있는 MPPT 알고리즘을 제안한 바 있다[6].

4. 제안된 도시형 풍력발전 시스템의 효율적 에너지 저장을 위한 신경망 기반의 MPPT 알고리즘

본 절에서는 풍속계의 사용이 없이도 도시형 풍력발전 시스템에 적용가능한 MPPT 제어 기법을 제안하고자 한다. 제안된 시스템의 전체 구조는 그림 8과 같다. 제안된 시스템은 풍력터빈, 발전기, 정류기, PWM 제어가 가능한 DC/DC (Booster) 컨버터 및 부하(배터리)로 구성되며 이의 MPPT 제어를 위한 두 개의 신경망 및 PWM 제어를 위한 PI 제어기로 이루어져 있다. 각 부분의 기능에 대해 살펴보면 다음과 같다.

4.1 풍속에 따른 최적 회전속도 추정을 위한 신경망 (Neural Network 1)

제안된 시스템은 큰 특징 중 하나는 풍속계 대신에 그림 3과 같은 풍속에 대한 블레이드의 회전속도에 따른 출력 특성을 학습이 가능한 인공지능망에 학습시켜 현재 풍속하에서 최대의 출력을 발생시킬 수 있는 최적의 ω_{mopt} 를 추정하고자 한 것으로 이의 도입 근거는 다음과 같다. 그림 3으로부터 풍속의 변화에 대한 블레이드의 회전속도와 출력 파형은 서로 겹치지 않음을 알 수 있으며 따라서 해당 풍속의 출력과 블레이드의 회전속도를 안다면 현재의 풍속을 추정하는 것이 가능하게 된다. 이에 본 연구에서는 인공지능망의 입력으로 현재의 출력 및 블레이드의 회전속도를 사용하여 현재의 풍속을 추정하고 추정된 풍속에서의 최적 ω_{mopt} 를 구하여 이를 reference로 하는 MPPT 알고리즘을 제안하였다.

그림 8의 신경망 1의 구조는 그림 9와 같다. 학습이 완료된 신경망은 그림 10에서와 같이 매 순간 계산되는 $P_t(t)$ 와 블레이드의 회전속도 ω_m 이 입력된다면 현재 풍속에서 최적인 ω_{mopt} 값을 출력하게 된다.

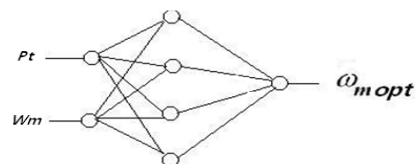
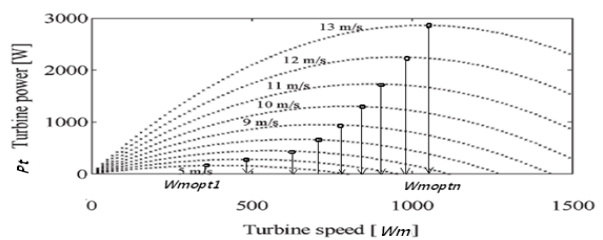


그림 9. 신경망 학습을 위한 풍속에 따른 블레이드 속도와 출력의 특성
Fig. 9. Characteristic of blade speed and turbine power for neural network train

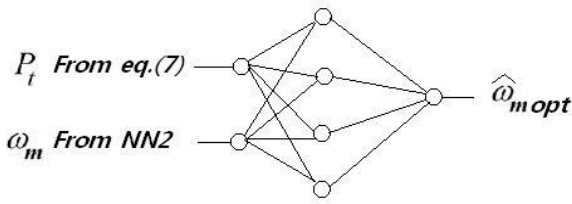


그림 10. 학습된 신경망에 의한 현재 풍속에서의 최적 $\widehat{\omega}_{mopt}$ 의 추정

Fig. 10. Estimation of optimized wind speed($\widehat{\omega}_{mopt}$) by using trained neural network

4.2 블레이드 회전속도 추정을 위한 신경망(Neural Network 2)

그림 10에서와 같이 학습완료된 신경망으로부터 현재 풍속에서의 최대 출력을 발생시키는 $\widehat{\omega}_{mopt}$ 을 구하기 위해서는 식(7)에 의해 계산된 P_t 와 블레이드의 회전속도 ω_m 이 요구된다. 일반적인 경우, 터빈 블레이드의 회전속도를 구하기 위해서 블레이드 샤프트에 엔코더 등을 설치하여 회전속도를 구하나 본 연구에서는 풍력 발전기 출력단의 전압으로부터 블레이드의 회전속도를 추정하기 위한 인공 신경망을 사용하였다. 즉, 엔코더와 같은 고가의 센서를 사용하는 대신에 발전기 출력단 전압의 측정을 통해 간접적으로 블레이드의 회전속도를 추정하고자 하였다.

5. 제안된 알고리즘의 프로토타입 시스템의 적용

본 연구에서는 우선, Matlab에서 구동되는 Simulink의 Real-time workshop을 이용하여 제안된 알고리즘의 유용성 확인한 후, Simulink에서 사용한 각종 파라미터 및 블록을 이용하여 DSP용 코드를 얻은 후, 이를 기반으로 DSP 기반의 MPPT 알고리즘을 실제 구현하여 제작된 프로토타입 시스템에 실제 적용을 수행하였다.

본 연구에서는 실제 제작된 풍력터빈의 부재로 인해 다음과 같은 도시형 풍력발전 시스템 프로토타입을 제작하여 실험에 사용하였다.

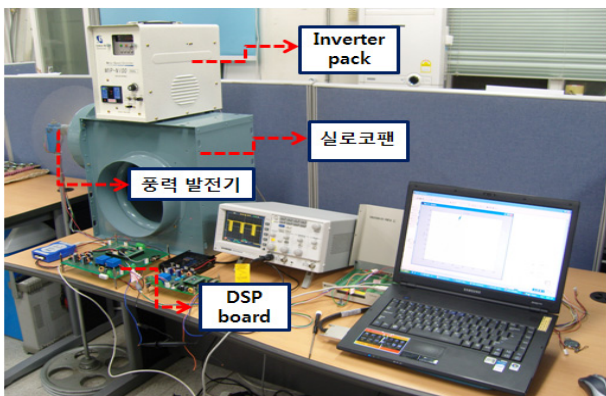


그림 11. 도시형 풍력발전 프로토타입 시스템

Fig. 11. Prototype for urban wind turbine generating system

프로토타입 시스템은 1W 출력의 풍력발전기와 boost 컨버터 및 DSP 보드로 구성되며 또한 풍량의 발생 및 제어를 위해 인버터팩으로 제어되는 실로코팬을 사용하였다.

5.1 프로토타입 풍력 시스템의 토크/출력 특성

본 실험에서 사용된 풍력발전기는 용량은 작으나 여타의 모든 풍력발전기와 마찬가지로 고유의 출력 특성을 갖게 된다. 풍력발전기 부하단에 저항을 달고 PWM duty ratio를 변화가면서 풍속의 변화에 따라 식(7)의 출력 곡형을 구한 결과는 그림 12와 같다. 이 특성곡선은 본 연구에서 제안된 신경망 기반의 MPPT 알고리즘의 구현에 사용된다. 즉, 그림 12로부터 얻어지는 블레이드의 속도, 출력 및 각 풍속에서의 최적 ω_{mopt} 를 신경망의 학습에 이용하였다.

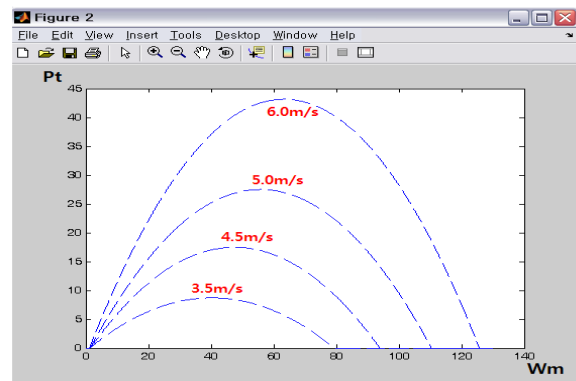


그림 12. 풍력발전시스템의 출력 특성 곡선

Fig. 12. Characteristic curve for prototype wind turbine system

5.2 프로토타입 시스템의 PCS(Power Conditioning System)

발전기의 출력단에 연결되어 부하에 인가되는 전압을 조절하기 위해 boost 컨버터가 사용되었으며, 설계·제작된 boost 컨버터의 사양은 다음과 같다. PWM 입력이 인가되는 스위칭 소자로는 2N2222를 사용하였으며, L은 10uH, C는 330uF, 부하 저항은 10%의 5KΩ을 사용하였다.

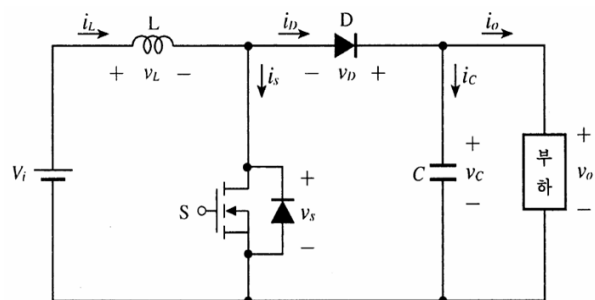


그림 13. Boost converter의 구성

Fig. 13. Configuration of boost converter

5.3 Matlab Simulink의 Real-time workshop을 이용한 제안된 MPPT 알고리즘의 특성 분석

본 연구에서는 Matlab의 Simulink를 이용하여 제안된 신경망 기반의 MPPT 제어 블록을 설계하고, 설계된 Simulink

블록을 Real-time workshop을 통해 실시간 수행시킴으로서 제안된 기법의 유용성을 확인하고자 하였다. 설계 제작된 Simulink 블록은 그림 14와 같으며 그림에서 알 수 있듯이 실시간 데이터 취득 및 PWM 제어 신호 출력을 위해 NI사의 DAQCARD-6024E board를 사용하였다.

그림 14의 Simulink 블록을 Real-time workshop을 통해 실시간 수행시킨 결과를 나타내면 그림 15와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 제안된 신경망 기반의 MPPT 제어 알고리즘은 풍속의 변화에 효과적으로 최대 출력을 인출하는 것이 가능함을 알 수 있다. 그러나 출력의 최대점에서 약간의 진동이 발생되며 이는 Real-time workshop의 sampling time 을 0.01sec로 선정함에 기인한다.

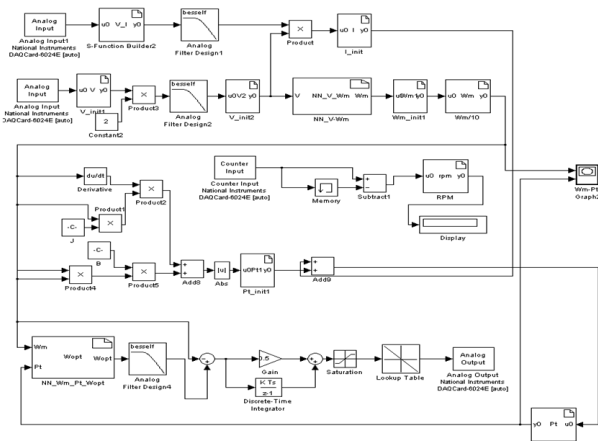


그림 14. 설계된 Simulink 블록 다이어그램
Fig. 14. Designed simulink block diagram

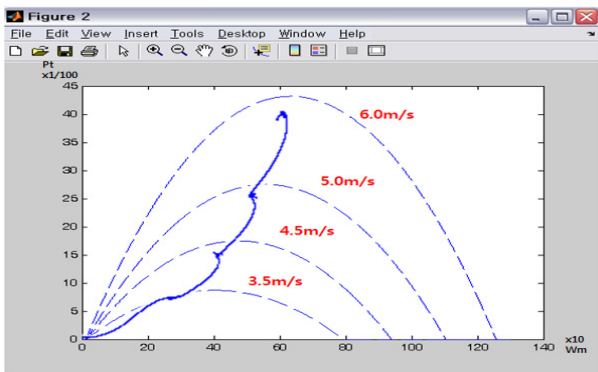


그림 15. Simulink 블록의 실시간 MPPT 제어 특성
Fig. 15. Realtime MPPT control characteristic by using simulink block

5.4 DSP를 이용한 제안된 MPPT 기법의 유용성 확인

전절에서는 Real-time workshop을 통해 제안된 기법의 실시간 제어 특성을 확인하였다. 본 절에서는 전절에서 설계된 MPPT 알고리즘의 DSP 보드를 사용한 실시간 제어 특성을 고찰하고자 하였다.

DSP 보드로의 제안된 MPPT 알고리즘의 포팅을 위해 그림 14를 기반으로 하는 그림 16과 같은 Simulink 블록을 구성하였고 이로부터 TMS320F2812 DSP 칩에 포팅 가능한 C 코드를 Real-time workshop을 통해 얻은 후, 이를 TI사

서 제공하는 Code Composer Studio를 통해 포팅을 수행하였다.

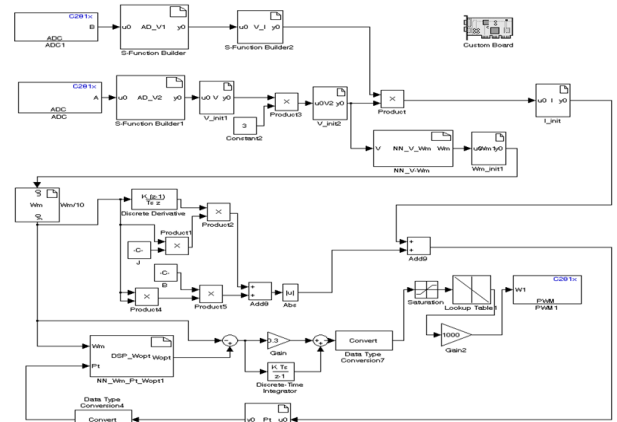


그림 16. DSP용 코드 발생을 위한 Simulink 블록
Fig. 16. Simulink block for DSP code generation

TI사의 Code Composer Studio에 의해 생성된 실행파일은 그림 17의 설계 제작된 Target board에 포팅되었다. Target board의 블럭도를 나타내면 그림 18과 같다.

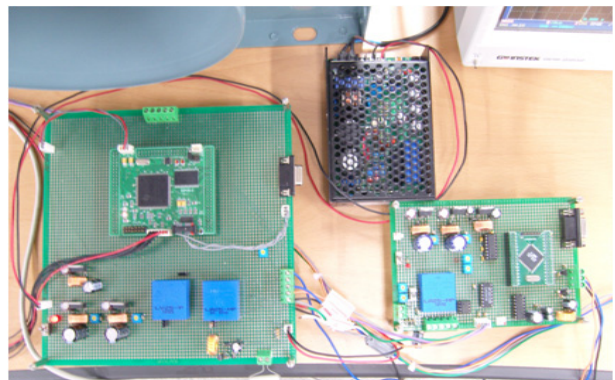


그림 17. TMS320F2812용 Target board
Fig. 17. Target board based on TMS320F2812

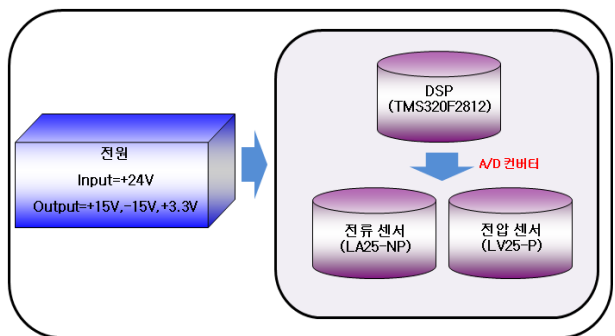


그림 18. Target board 블록도
Fig. 18. Target board block diagram

DSP에 의해 구현된 제안된 MPPT 제어 기법의 응답특성은 그림 19와 같으며 그림으로부터 빠른 sampling time(1μ

sec)으로 인해 전절에서 발생된 최대점에서의 진동이 더 이상 발생되지 않음을 알 수 있다.

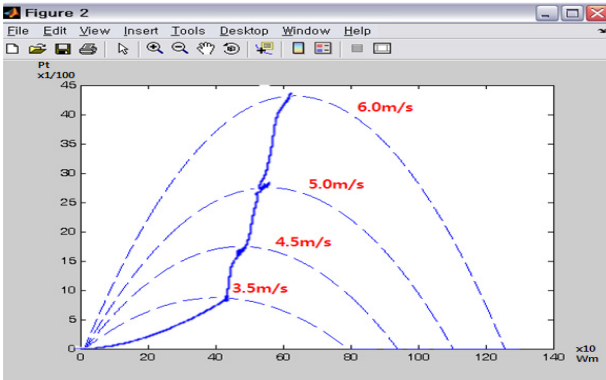


그림 19. DSP 기반의 제안된 MPPT 제어 특성
Fig. 19. Proposed MPPT control characteristic by using DSP

6. 결 론

본 연구에서는 도시형 풍력발전 시스템에 적용가능한 신경망 기반의 MPPT 알고리즘을 제안하고 제안된 기법의 실제 유용성 확인을 위해 Matlab Simulink상에서의 Real-time workshop 및 TMS320F2812 DSP를 통한 실시간 적용 실험을 수행하였다. 실험결과 제안된 신경망 기반의 MPPT 알고리즘은 고가의 풍속계의 설치 없이도 효율적인 최대 전력점 추종이 가능함을 확인할 수 있었다. 향후, 본 센터에서 수직축 풍력발전기의 개발이 완료되면 본 연구에서 제안된 MPPT 기법의 실제 적용을 통해 유용성을 확인할 계획이며 또한 DC/DC 컨버터와 교류부하간의 최대 전력 전달을 위한 MPPT 기법에 대해서도 연구할 계획이다.

참 고 문 헌

[1] R. Hoffmann, P. Mutschler, "The Influence of Control Strategies on the Energy Capture of Wind Turbine", *2000 IAS Conference Record*, pp.886-893, 2000

[2] Anders Grauers, "Efficiency of three wind energy generator system", *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 11, No. 3, pp.650-657, 1996

[3] Shibashis Bhowmik, Rene Spee, Hohann H.R. Enslin, "Performance Optimization for Doubly Fed Wind Power Generation Systems", *IEEE Trans. Industry Application*. Vol. 35, No. 4, pp.949-958, 1999

[4] Bogdan S. Borowy, Ziyad M. Salameh, "Dynamic Respose of a Stand-Alone Wind Energy Conversion System with Battery Energy Storage to a Wind Gust", *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol.12, No. 1, pp.73-78, March 1997

[5] Eftichios Koutroulis, Kostas Kalaitzakis, "Design of a Maximum Power Tracking System for

Wind-Energy-Conversion Applications", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol.53, No.2, pp.486-494, April 2006

[6] Ahmed G. Abo-Khalil and Dong-Choon Lee, "MPPT Control of Wind Generation Systems Based on Estimated Wind Speed Using SVR", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol.55, No.3, pp.1489-1490, March 2008

[7] C. M. Liaw, T. H. Chen, S. J. Chiang, C. M. Lee, and C. T. Wang, "Small battery energy storage system," *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. 140, pt. B, no. 1, pp.7-17, 1993.

[8] Z. Salameh and D. Taylor, "Step-up maximum power point tracker for photovoltaic arrays," *Sol. Energy Proc.*, vol. 44, no. 1, pp. 57 - 61, 1990.

[9] 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.*, 1992, pp. 542 - 547

[10] V. Arcidiacono, S. Corsi, and L. Lambri, "Maximum power point tracker for photovoltaic power plants," in *Conf. Rec. IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, 1982, pp. 507 - 512

저 자 소 개



김승영 (Seung-young Kim)

2008년 : 군산대학교 전자정보공학부
학사졸업

2008년~현재 : 동 대학원 전자정보
공학부 석사과정

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

E-mail: ksyhello@nate.com



김성호 (Sung-ho Kim)

1984년 : 고려대학교 공과대학 학사졸업

1986년 : 고려대학교 대학원 석사졸업

1991년 : 고려대학교 대학원 박사 졸업

1988~1990년 : 고려대 생산기술연구소
연구원

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

1991년~현재 : 군산대학교 제어로봇시스템학과 교수

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

E-mail : shkim@kunsan.ac.kr