

## 풍력발전 시스템을 위한 풍속 추정기 개발

# Development of Wind Speed Estimator for Wind Turbine Generation System

김병문 · 김성호 · 송화창

Byung-Moon Kim, Sung-Ho Kim and Hwa-Chang Song

군산대학교 전자정보공학부

### 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 측정을 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 칼만 필터 및 신경망에 기반한 새로운 형태의 풍속 추정 기법을 제안하고 제안된 기법의 유용성 확인을 위해 다양한 형태의 시뮬레이션을 수행하고자 한다.

**키워드 :** 신재생 에너지원, 풍속, 칼만 필터, 인공신경망, 실효풍속 추정

### Abstract

As wind has become one of the fastest growing renewable energy sources, the key issue of wind energy conversion systems is how to efficiently operate the wind turbines in a wide range of wind speeds. The wind speed has a huge impact on the dynamic response of wind turbine. For this purpose, many control algorithms are in need for a method to measure wind speed to increase performance. Unfortunately, no accurate measurement of the effective wind speed is online available from direct measurements, which means that it must be estimated in order to make such control methods applicable in practice. In this paper, a new method based on Kalman filter and artificial neural network is presented for the estimation of the effective wind speed. To verify the performance of the proposed scheme, some simulation studies are carried out.

**Key Words :** Renewable energy source, wind speed, Kalman filter, artificial neural network, estimation of effective wind speed

### 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 에너지 사업을 통해 제주도 등 다수의 지역에 중대형 국내의 시스템이 도입되어 설치 운전되면서 국내 풍력 자원 개발의 가능성을 검토하고 있는 실정이다. 특히 서해안 군산지역에 시범 설치된 풍력발전 단지는 약 160억의 사업비를 들여 덴마크 NEG-Micon사의 750KW 모델(NM48)

6기와 덴마크 VESTAS사의 850KW 모델(V5) 4기로 구성되어 총 7.9MW의 발전용량을 갖고 있어 약 3천 세대에서 사용할 수 있는 전기를 공급하도록 설계되었다. 각 발전기의 허브까지의 높이는 45m와 49m이며, NM48은 스톨제어방식이고, V52는 피치제어방식을 채택하고 있다.

대부분의 풍력 발전 단지(wind farm)는 수 십대의 풍력발전기와 높이에 따른 풍속 및 풍향의 측정을 위한 기상타워(meteorological tower)로 구성된다. 터빈 블레이드의 허브 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 타워가 설치된 위치사이의 지형 변화로 인해 실제 풍력발전기의 허브단에서의 풍속은 정확히 알기가 어려운 실정이다[그림 1참조].

풍력발전 시스템은 운전방식에 따라 고정속-고정피치(Fixed-speed Fixed-Pitch), 고정속-가변피치(Fixed-speed Variable-Pitch), 가변속-고정피치(Variable-Speed Fixed-Pitch), 가변속-가변피치(Variable-speed Variable-Pitch) 등으로 구분되며 운전효율적인 측면에서는

접수일자 : 2010년 2월 10일

완료일자 : 2010년 9월 13일

"본 연구는 지식경제부의 도시형풍력발전원천기술센터 사업으로 수행된 연구결과임"

고정속 보다는 가변속 제어 시스템이 유리하다. 가변속 시스템은 cut-in 속도이상부터 정격 풍속까지의 풍속 범위내에서 블레이드가 바람으로부터 얻을 수 있는 에너지를 최대한 얻고자 하는 제어 방식으로 이를 위해서는 블레이드 허브단에서의 정확한 풍속의 계측이 필수적으로 요구된다. 그러나 수평축 풍력발전기의 경우, 허브 단에 풍속계의 직접적인 설치는 어려운 상태이며 또한 설치한다 하더라도 블레이드의 회전으로 인해 계측된 풍속값은 정확하지 않게 된다. 이러한 풍속 측정의 문제점을 해결하기 위해 Ekelund와 Ma 등은 칼만 필터를 이용하여 블레이드의 회전속도와 토오르크를 추정한 후, 이를 기반으로 실효 풍속을 추정하고자 한 바 있다[4-6].

이에 본 연구에서는 칼만 필터로부터 추정된 토오르크 정보를 기반으로 효율적인 풍속의 추정을 가능케 하는 방법을 제안하고 시뮬레이션 고찰을 통해 제안된 방법의 유용성을 확인하고자 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 터빈 동력학을 통해 얻어진 블레이드의 토오르크 특성에 대해 고찰하며 3장에서는 칼만 필터에 의한 토오르크 추정기법에 대해 살펴봄, 4장에서는 본 연구에서 제안된 기법에 대해 설명한 후, 5장에서는 제안된 기법에 대한 시뮬레이션 고찰을 수행하고 마지막으로 결론을 기술하고자 한다.

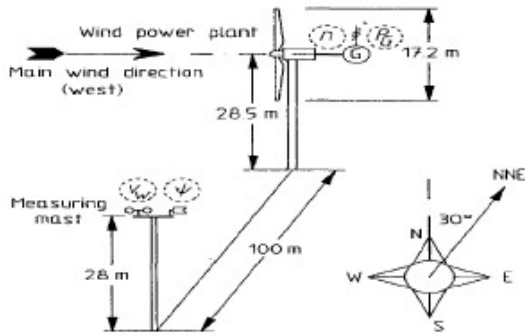


그림 1. 풍력발전 단지에서의 풍속의 추정  
Fig. 1. Estimation of wind speed in the wind farm

## 2. 풍력발전 시스템의 구성

풍력발전 시스템에서 전력의 인출은 다음과 같은 세 가지 요소 즉, 풍력 에너지, 터빈의 파워곡선 및 풍속의 변화에 대한 전력 변환장치의 적응 능력 등에 의해 결정된다. 터빈과 기어박스 및 발전기로 구성된 가변속-고정피치 풍력발전 시스템의 전체 구성을 나타내면 다음과 같다.

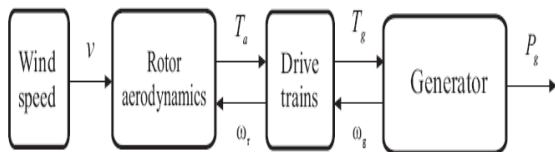


그림 2. 가변속 고정피치 풍력 발전 시스템의 구성  
Fig. 2. Configuration of Variable-Speed Fixed-Pitch wind turbine system

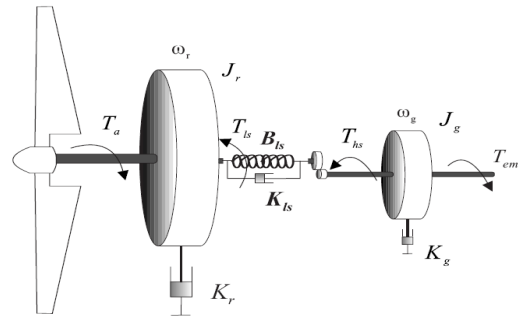


그림 3. Drive-train의 동력학  
Fig. 3. Drive-train dynamics

풍력에너지로부터 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],  $\rho$ 는 공기의 밀도로 약  $1.25 [Kg/m^3]$ 이며  $\lambda$ 는 주속비(tip-speed ratio)로 다음과 같이 표현된다.

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

따라서 풍속의 변화나 터빈의 회전속도 변화는  $\lambda$ 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 4와 같으며 그림으로부터 터빈이 회전을 개시하여, 주속비가 점점 커지면 출력계수, 즉 효율이 증가하다가 어느 속도 이상으로 회전하게 되면 효율이 오히려 떨어짐을 알 수 있다. 이러한 출력 계수는 블레이드의 설계시 결정되며 Betz의 연구결과에 따르면 이론적 최대값이 0.593이다.

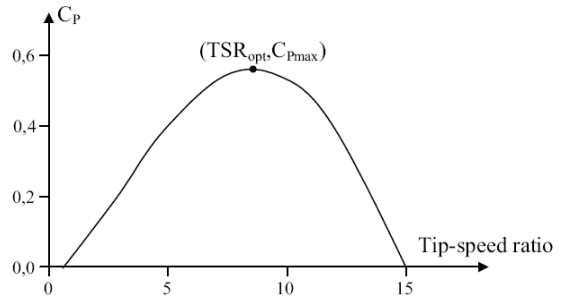


그림 4. 주속비 변화에 따른 전력계수  
Fig. 4. Power coefficient vs. tip-speed ratio(TSR)

식(1)의 파워  $P_a = \omega_r T_a$  이므로 터빈으로부터 발생하는 토오르크는 다음과 같이 표현될 수 있다.

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

여기서  $C_q(\lambda, \beta)$ 는 토오르크 계수로 다음과 같이 표현된다.

$$C_q(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (4)$$

식(3)으로 표현되는 토오크는 로터를  $\omega_r$ 의 속도로 회전시킨다. 그림 2에서와 같이 drive-train의 저속축 토오크  $T_{ls}$ 는 로터의 정지 토오크로 동작하며 이를 미분방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$T_a = J_r \dot{\omega}_r + K_r \omega_r + T_{ls} \quad (5)$$

여기서  $T_{ls}$ 는 다음과 같이 표현되는  $\omega_r$ 과  $\omega_{ls}$ 간의 속도 차에 기인하여 발생하는 정지 토오크이다.

$$T_{ls} = B_{ls}(\theta_r - \theta_{ls}) + K_{ls}(\omega_r - \omega_{ls}) \quad (6)$$

Drive-train의 고속축 토오크  $T_{hs}$ 는 발전기의 회전과 발전기로부터 인출되는 토오크  $T_{em}$ 의 발생을 위해 사용되며 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$T_{hs} = J_g \dot{\omega}_g + K_g \omega_g + T_{em} \quad (7)$$

drive-train을 거치게 되면, 저속의 축 회전속도  $\omega_{ls}$ 는 기어박스비  $n_g$ 에 의해 증가되어  $\omega_r$ 로 되고 저속축의 토오크는 감소된다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$n_g = \frac{T_{ls}}{T_{hs}} = \frac{\omega_g}{\omega_{ls}} \quad (8)$$

만일  $\omega_r = \omega_{ls}$ 이라고 가정한다면 터빈의 모델은 다음과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$T_a = J_t \dot{\omega}_r + K_t \omega_r + T_g \quad (9)$$

여기서

$$J_t = J_r + n_g^2 J_g$$

$$K_t = K_r + n_g^2 K_g$$

$$T_g = n_g T_{em}$$

이다.

### 3. 칼만 필터에 의한 풍속 추정 기법

풍력발전 시스템에서 블레이드로부터의 토오크를 나타내는 식(3)에서  $V_{wind}$ 는 여러 가지 이유로 인해 정확한 측정이 어렵게 된다. 다수의 풍력발전기들이 설치된 풍력발전 단지의 경우, 별도로 설치된 기상타워에서 측정된 풍속을 기반으로 추정된 풍속을 풍력발전기 제어에 이용하고 있는 실정이다. 따라서 기상타워의 풍속계로부터 추정된 풍속은 식(3)의  $V_{wind}$ 에 대한 근사치로 간주될 수밖에 없으며 이로 인해 풍력발전 시스템의 효율적인 제어가 힘들게 된다.

일반적으로 풍력발전기는 전력을 생산하는 장치이지만 관점을 달리하면 풍속을 측정할 수 있는 센서로도 간주될 수 있다. 풍력발전기를 센서로 간주하여 풍속을 추정하는 과정은 두 단계이며 구성되며 첫 단계는 블레이드로부터 발생된 토오크 및 회전 속도를 추정하는 것이고 두 번째는 이들 추정된 값을 기반으로 풍속을 유추하는 단계이다.

이에 본 절에서는 칼만 필터에 의한 풍속 추정기법에 대해 설명하고자 한다. 이 기법은 칼만 필터를 이용하여 토오크  $T_a$ 와  $\omega_r$ 를 추정할 후, 이를 기반으로 현재의 풍속을 추

정하는 기법으로 구체적인 설명은 다음과 같다.

블레이드로부터 발생된 토오크를 칼만 필터를 사용하여 추정하기 위해, 식(9)의 토오크 동적 모델을 이용하여 풍력발전 시스템을 상태공간 미분방정식으로 표현하면 식(10)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_r \\ \dot{T}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_t}{J_t} & \frac{1}{J_t} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ T_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{J_t} \\ 0 \end{bmatrix} T_g + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \xi$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r \\ T_a \end{bmatrix} + w \quad (10)$$

여기서  $\xi$ 는 프로세스 노이즈이며  $w$ 는 측정 노이즈이다. 식(10)의  $K_t, J_t$ 는 시스템과 관련된 기지의 파라미터로 식(10)에 대한 칼만 필터를 설계하면  $\omega_r, T_a$ 에 대한 추정치  $\hat{\omega}_r$  및  $\hat{T}_a$ 를 구하는 것이 가능하게 된다. 칼만 필터 기반의 풍속 추정 시스템에 대한 블록도를 나타내면 그림 5와 같다.

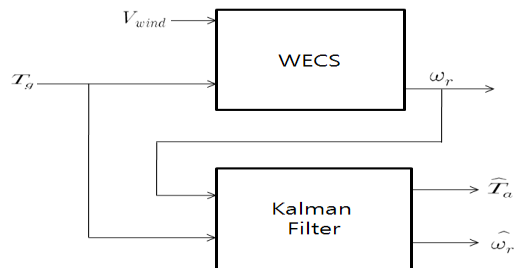


그림 5. 칼만 필터 기반의 풍속 추정 시스템  
Fig. 5. Wind speed estimation system based on Kalman filter

블레이드에 대한 식(3)의 토오크 계수  $C_q(\lambda, \beta)$ 는 블레이드 생산자로부터 look-up 테이블 형태로 주어지며 따라서 이를 다음과 같은 다항식으로 근사화하는 것이 가능하다.

$$C_q(\lambda) = \sum_{i=0}^n a_i \lambda^i \quad (11)$$

따라서 칼만 필터로부터의 추정값  $\hat{\omega}_r, \hat{T}_a$  및 식(3), 식(11)을 이용한다면 다음과 같은 수식을 얻을 수 있으며

$$\hat{T}_a - \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_q \left( \frac{\hat{\omega}_r R}{\widehat{V}_{wind}} \right) \widehat{V}_{w=0ind}^2 \quad (12)$$

Newton-Raphson 알고리즘을 적용한다면 풍속의 추정치  $\widehat{V}_{wind}$ 를 구할 수 있다.

### 4. 제안된 칼만 필터 기반의 풍속 추정 알고리즘

전장에서는 칼만 필터에 의한 회전속도와 토오크의 추정 및 이를 기반으로 하는 풍속 추정 기법에 대해 고찰하였다. 본 절에서는 고정피치 뿐만 아니라 가변 피치 제어 시스템의 경우에도 효과적으로 도입될 수 있는 풍속 추정기법을 제안

하고자 한다.

식(1)의 파워  $P_a = T_a \omega_r$  는 주속비 관계를 이용한다면 식(13), 식(14)와 같이 표현될 수 있다.

$$T_a \omega_r = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \frac{R^3 \omega_r^3}{\lambda^3} C_p(\lambda, \beta) \quad [W] \quad (13)$$

$$\frac{2T_a}{\rho \pi R^5 \omega_r^2} = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda^3} \quad [W] \quad (14)$$

식(14)의 좌변은 칼만 필터의 추정치를 사용한다면 기지의 값이 되며 또한 우변의  $C_p(\lambda, \beta)$ 는 선정된  $\beta$ 값에 따라  $C_{p,\beta}(\lambda)$ 를 갖게 된다. 따라서 식(14)의 방정식으로부터  $\lambda$ 를 구할 수 있으며 다음과 같은 주속비 관계를 이용한다면 풍속은 계산될 수 있다.

$$V_{wind} = \frac{\omega_r R}{\lambda} \quad (15)$$

식(14)를 이용하여  $\lambda$ 를 계산할 때,  $\lambda^{-3} \cdot C_{p,\beta}(\lambda)$ 의 특성에 대해 주의할 필요가 있다.  $\lambda^{-3}$ 은 명확히 단조 감소 함수이나  $C_{p,\beta}(\lambda)$ 는 그림 4와 같이 불록함수의 형태를 취하게 된다. 따라서 이들 두 함수의 곱은  $\beta$ 의 값에 따라 그림 6과 같이 단조 또는 비단조 함수가 되게 된다.

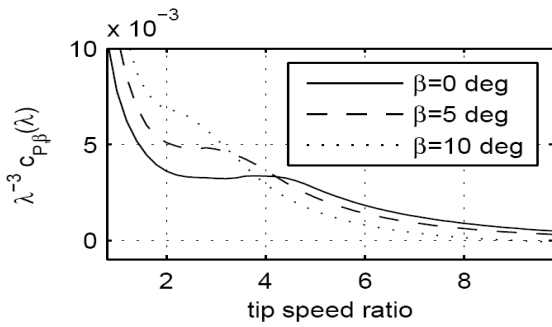


그림 6.  $\lambda^{-3} \cdot C_{P,\beta}(\lambda)$ 의 비단조 함수 특성

Fig. 6. Illustration of non-monotonicity of  $\lambda^{-3} \cdot C_{P,\beta}(\lambda)$

그림 6으로부터 알 수 있듯이 식(14)의 계산시에는 그림 6과 같이 표현되는  $\lambda^{-3} \cdot C_{P,\beta}(\lambda)$ 의 테이블 형식의 데이터가 필요로 된다.

이에 본 연구에서는 그림 6과 같은 비선형 특성의  $\lambda^{-3} \cdot C_{P,\beta}(\lambda)$ 를 효율적으로 처리하기 위한 인공 신경망을 이용한 풍속 추정기를 제안하고자 한다. 제안된 인공신경망 기반의 풍속 추정기의 구조를 나타내면 다음과 같다.

신경망 학습에 사용되는 학습 데이터는 그림 6으로부터 구할 수 있으며 본 연구에서는 입력뉴런이 두 개, 출력뉴런이 한 개 그리고 2층의 은닉층으로 구성된 신경망을 사용하였다. 입력뉴런에 사용되는 데이터는 그림 6의 y축 좌표값 및 해당  $\beta$ 의 값이며 출력값은 y축 좌표값에 해당되는 x축 좌표의 값이 된다. 그림 6에서  $\beta$ 가 0 일 경우, 하나의 y축 값에 대해 여러개의 x 축값(TSR)가 존재하며 이 경우는 최대의 TSR값을 학습데이터로 사용하게 된다.

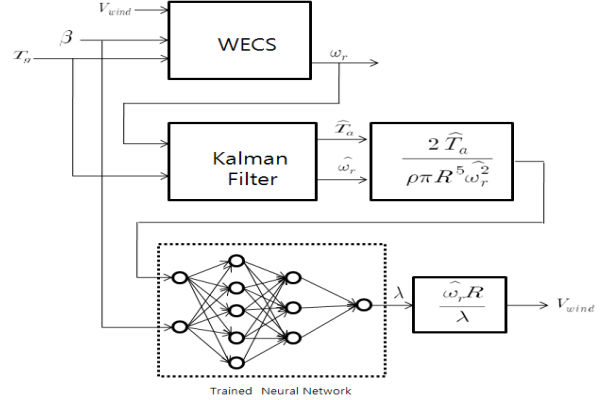


그림 7. 신경망 기반의 풍속 추정기

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

## 5. 시뮬레이션 고찰

본 절에서는 제안된 칼만 필터 및 인공신경망 기반의 풍속추정 알고리즘에 대한 유용성 검증에 대해 그림 8과 같은 시뮬링크 블록을 구성하였다.

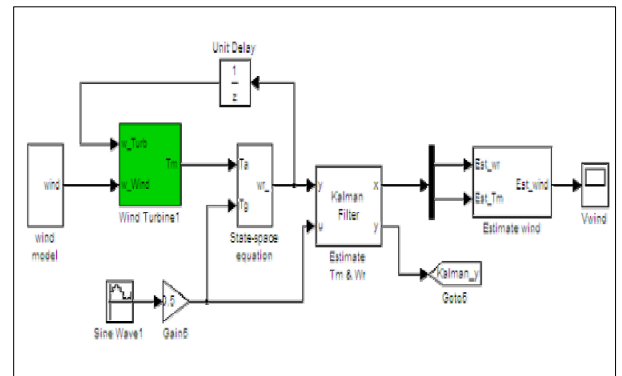


그림 8. 풍속추정을 위한 시뮬링크 블록

Fig. 8. Simulink block for wind speed estimation

그림 8의 시뮬링크 블록은 터빈 블레이드의 토크 특성 곡선을 look-up 테이블로 표현한 wind turbine 블록과 식 (9)의 상태공간 미분방정식 및 발전기로부터의 인출 토크  $T_g$  및  $\omega_r$ 을 입력으로 하여  $\hat{T}_a$  및  $\hat{\omega}_r$ 을 추정하는 칼만 필터로 구성된다. 또한 터빈 블레이드의 구동을 위한 풍속의 발생을 위한 실효 풍속 발생 블록이 포함되며 각 블록에 대한 설명은 다음과 같다.

### 5.1 터빈 블레이드 블록

설계된 터빈 블레이드 블록은 그림 9와 같이 현재의 풍속 및 블레이드의 회전수를 입력받아 해당 토크를 발생시키는 기능을 한다.

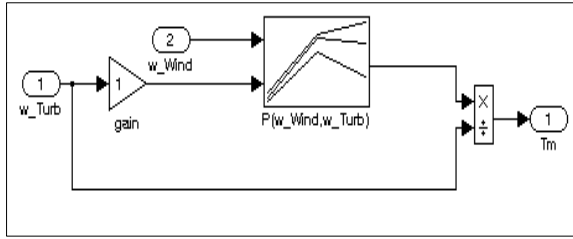


그림 9. 토오크 발생을 위한 시뮬링크 블록  
Fig. 9. Simulink block for torque generation

그림 9의 look-up 테이블에는 그림 10과 같이 표현되는 토오크 특성 곡선이 저장되었다.

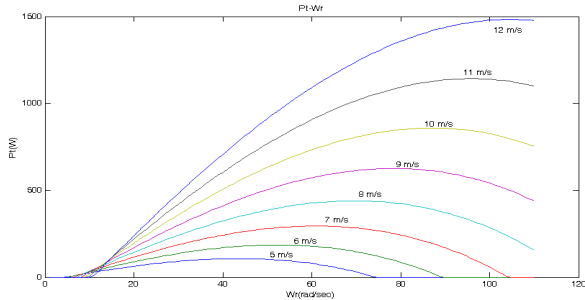


그림 10. Look-up 테이블에 사용된 토오크 특성 곡선  
Fig. 10. Torque characteristic curve for look-up table

5.2 토오크 추정을 위한 칼만 필터 블록

현재 풍속에서 발생하는 토오크의 추정을 위한 칼만 필터는 발전기로부터의 인출 토오크  $T_g$  및  $\omega_r$ 을 입력으로 하여  $\hat{T}_a$  및  $\hat{\omega}_r$ 을 추정하는 기능을 수행하며 블록의 내부 구조는 다음과 같다.

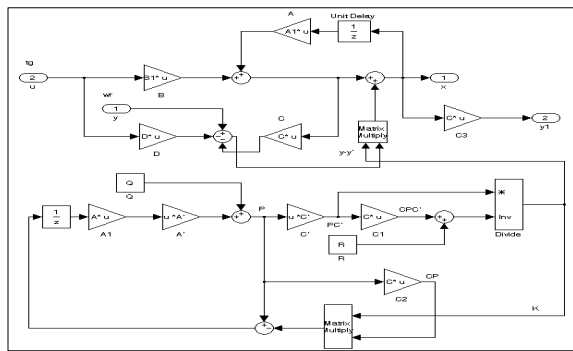


그림 11. Kalman filter 추정기를 위한 시뮬링크 블록  
Fig. 11. Simulink block for kalman filter estimator

5.3 실효 풍속 발생 블록

일반적으로 임의의 한 지점에 있어서의 풍속은 그림 12에서와 같이 기상조건과 관련된 평균풍속(mean wind speed)과 빠른 풍속 변화를 나타내는 난류(turbulence)의 합으로 표현될 수 있다.

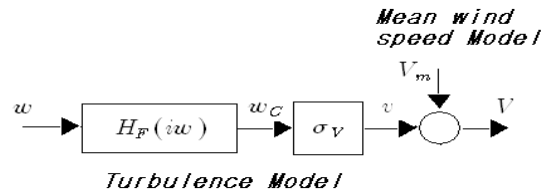


그림 12. 실효 풍속 모델  
Fig. 12. Effective wind speed model

평균 풍속 모델에는 여러 종류가 있으나 본 연구에서는 Nichita 등이 제안한 모델을 사용하였으며 이에 대한 세부 구성은 그림 13과 같다.

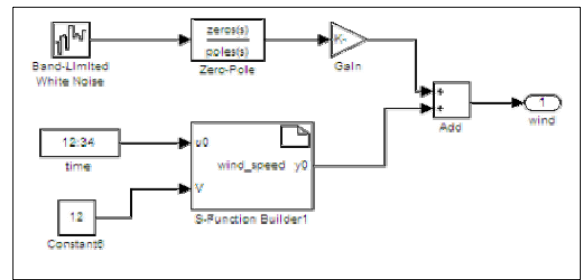


그림 13. 풍속 모델을 위한 시뮬링크 블록  
Fig. 13. Simulink block for wind speed model

5.4 칼만 필터의 토오크 추정 특성

그림 14는 터빈 블레이드 블록에서 출력되는 토오크  $T_a$ 와 칼만 필터에 의해 추정된  $\hat{T}_a$ 를 나타낸 것이며, 그림 15는 두 토오크의 오차를 나타낸 것이다.

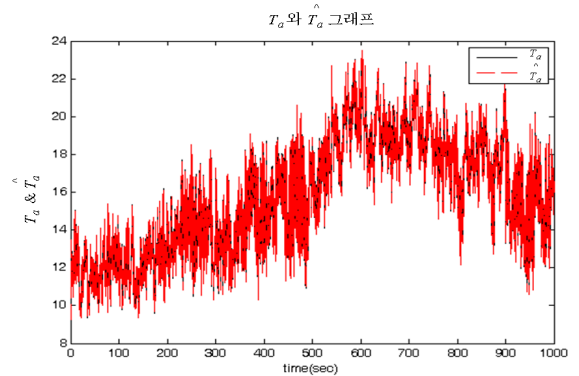


그림 14. 풍력터빈의  $T_a$ 와 칼만필터에 의해 추정된  $\hat{T}_a$ 의 비교  
Fig. 14. Comparison of output  $T_a$  of wind turbine and Estimated  $\hat{T}_a$  by kalman filter

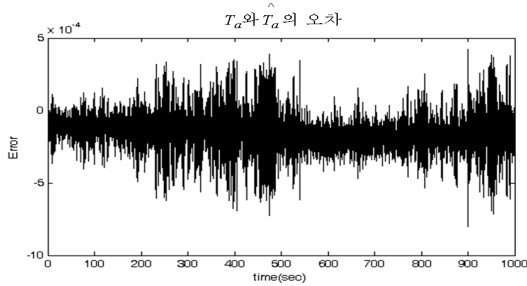


그림 15. 풍력터빈의  $T_a$ 와 칼만필터에 의해 추정된  $\hat{T}_a$ 의 오차  
 Fig. 15. Error of output  $T_a$  of wind turbine and Estimated  $\hat{T}_a$  by kalman filter

### 5.5 칼만 필터 및 신경망에 기반 한 풍속 추정 특성

그림 16은 터빈 블레이드 모델에서 입력으로 사용된  $\omega_r$  과  $\omega_r$  및 풍속에 대한 출력 토크  $T_a$ 를 이용하여 추정된 풍속과 칼만필터 블록에서 추정된  $\hat{T}_a$ 과  $\hat{\omega}_r$ 을 이용하여 추정된 풍속을 나타낸 것이고, 그림 17은 두 결과에 대한 오차를 나타낸 것이다.

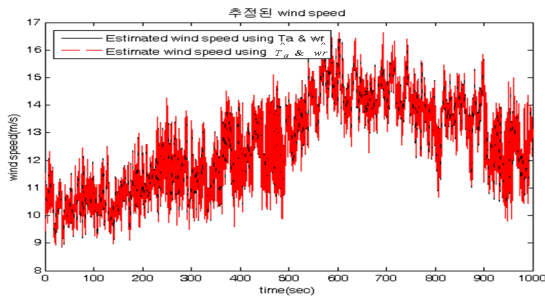


그림 16.  $T_a$ 와  $\omega_r$  및  $\hat{T}_a$ 과  $\hat{\omega}_r$ 에 의해 추정된 풍속에 대한 비교  
 Fig. 16. comparison of estimated wind speed by  $T_a$ and  $w_r$  and estimated wind speed by  $\hat{T}_a$  and  $\hat{\omega}_r$

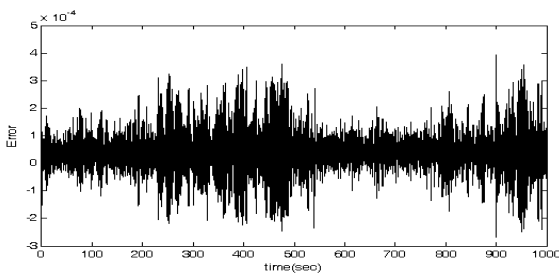


그림 17.  $T_a$ 와  $w_r$  및  $\hat{T}_a$ 과  $\hat{\omega}_r$ 에 의해 추정된 풍속에 대한 오차  
 Fig. 17. Error of estimated wind speed by  $T_a$ and  $w_r$  and estimated wind speed by  $\hat{T}_a$  and  $\hat{\omega}_r$

## 6. 결론

본 연구에서는 칼만 필터 및 신경망을 이용하여 풍속을 추정하는 기법을 제안하였으며, 제안된 기법에 대한 유용성 검증을 위해 matlab simulink를 활용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션은 터빈블레이드 모델의 입/출력 데이

터인  $\omega_r$ 과  $T_a$ 에 의해 추정된 풍속과 칼만필터에 의해 추정된  $\hat{T}_a$ 과  $\hat{\omega}_r$ 을 이용하여 추정된 풍속데이터를 비교해 보았으며, 그 결과 거의 오차가 없음을 확인할 수 있었다.

## 참고 문헌

- [1] Ahmed G. Abo-Khalil and Dong-ChoonLee, "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
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Ekelund, T. Modelling and linear quadratic optimal control of wind turbines, Ph.D. thesis, *Chalmers University of Technology*, Goteborg, Sweden, 1997
- [5] Ma, X. Adaptive extremum control and wind turbine control, Ph.D. thesis, *Technical University of Denmark*, Lyngby, Denmark, 1997
- [6] Boubekeur Boukhezzar and Houria Siguerdidjane, "Nonlinear control of vaible 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
- [7] 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
- [8] 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

## 저자 소개

**김병문(Byung-Moon Kim)**

2010년 : 군산대학교 전자정보 공학부 학사 졸업  
 2010년~현재 : 동 대학원 전자정보 공학부 석사과정

관심분야 : 풍력발전, DSP, USN  
 E-mail : sanyo2020@naver.com

**김성호(Sung-Ho Kim)**

한국지능시스템학회 논문지 2009년도 국문 19권 제6호 참조

**송화창(Hwa-Chang Song)**

한국지능시스템학회 논문지 2010년도 영문 10권 제2호 참조