

# 토크제어를 이용한 풍력발전시스템의 적응 최대 출력 제어

## The Adaptive Maximum Power Point Tracking Control in Wind Turbine System Using Torque Control

현종호\*, 김경연\*\*\*

Jong-Ho Hyun\*, Kyung-Youn Kim\*\*\*

### Abstract

The parameter K which decides how much to convert wind energy to electric energy in MPPT(maximum power point tracking) control of wind turbine system using torque controller is changed because blade shape and air density change. If the parameter K is not optimal value, power lose occur. The changed parameter K is important issue in wind turbine system. In this paper, to solve this problem, considering wind turbine system using back-to-back converter control and torque control, we propose the adaptive MPPT algorithm which performs fast control by using initial K, estimates mechanical power using Kalman filter method, uses the estimated mechanical power as input for MPPT algorithm again, and consequently performs optimal MPPT control.

### 요약

토크제어를 이용한 최대 출력 제어에서 얼마나 많은 풍력에너지를 전기에너지로 변환하는지 결정하는 파라미터 K는 블레이드 형상 변화, 공기 밀도 등으로 인하여 변동하게 된다. 이러한 파라미터 K가 최적의 값이 아니면 이는 출력의 손실까지 이어진다. 이렇게 변동하는 K로 인하여 최적의 K를 찾는 것이 풍력발전시스템의 손실을 줄이는 중요한 문제이다. 본 논문은 양방향 컨버터 제어와 토크제어를 사용한 풍력발전시스템을 고려하여 초기의 K를 이용하여 빠른 제어를 수행하고 칼만 필터를 이용한 기계적 출력을 추정하여 최대 출력 제어 알고리즘의 입력으로 다시 사용하여 결과적으로 최적의 최대 출력 제어 제어를 수행하는 적응 최대 출력 제어 알고리즘을 제안한다.

*Key words* : permanent magnet synchronous generator, wind turbine system, maximum power point tracking, torque control, hill climbing search

\* Major of Wind Power Electricity and Control System Engineering, Faculty of Wind Energy Engineering Graduate School, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

\*\* Dept. of Electronic Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

★ Corresponding author

e-mail : kyungyk@jejunu.ac.kr, +82-64-754-3664

※ Acknowledgment

This work was supported by Graduate School of Specialized Wind Energy the Human Resources Development (NO.20094020200020) and the Expansion of the Type Testing Site for Wind Turbines (NO.2012T100201731) of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) grant funded by the Korea government Ministry of Trade, Industry and Energy.

Manuscript received Apr. 14, 2015; revised May. 20, 2015 ; accepted May. 21, 2015

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## I. 서론

풍력발전시스템의 최대 출력점 추종(maximum power point tracking, MPPT) 제어는 바람에너지로부터 어떻게 최대로 전기에너지로 변환시키는가에 목적을 두고 있다. 이러한 풍력발전시스템의 대표적인 MPPT 제어에는 TSR(tip Speed ratio) 제어, OTC(optimal torque control), PSF(power signal feed), HCS(hill climbing search) 등이 있다.

TSR 제어 방식은 센서를 통하여 측정된 풍속과 각속도를 최적의 주속비  $\lambda_{opt}$ 로 유지하여 속도제어기를 통한 MPPT 제어가 이루어진다. PSF, OTC 제어는 풍속계가 필요 없는 제어지만 사전의 파라미터 K를 얻기 위해 오프라인 실험을 통한 시뮬레이션이 필요하다. 그리고 HCS은 풍속 측정과 사전의 파라미터 K 값이 필요 없지만 변화하는 스텝의 크기에 따라 MPPT 제어 속도와 정확도가 달라지는 단점이 있다 [1],[2]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 제어 기법들의 단점을 보완한 혼합 형태의 MPPT 기법들이 많이 연구되었다[1]-[5].

토크제어기를 이용한 풍력발전시스템의 MPPT 제어는 사전의 K를 통해 이루어지게 된다. 하지만 블레이드 형상 변화, 공기 밀도의 변화 등으로 인하여 기존의 K와 현재 풍력발전시스템의 최적의  $K_{opt}$ 에 차이가 발생하게 되고 이러한 오차로 인하여 최대출력에 문제점이 발생하게 된다. 이러한 부정확한 K값의 문제점을 극복하기 위해서 풍속 센서를 통하여 얻은 출력과 실제 풍력터빈의 출력을 비교하여 이러한 오차를 줄이는 방법이 제시되었다[6].

본 논문은 풍속 센서 없이 불확실한 K를 칼만 필터를 이용한 기계적 출력을 추종하고 정밀한 HCS를 통해 최적의  $K_{opt}$ 과 근사한 K를 찾아내어 그 값들을 평균하고 다시 MPPT 제어에 적용하여 보다 빠르고 정밀한 MPPT 제어를 수행하는 데 목적을 두고 있다. 본 논문은 MATLAB/Simulink를 이용하여 시뮬레이션이 수행되었다.

## II. 풍력발전시스템

바람으로부터 얻을 수 있는 출력과 풍속-로터의 회전속도의 비를 나타내는 주속비  $\lambda$ (TSR : Tip Speed Ratio)을 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R_r^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{R_r \omega_r}{v} \quad (2)$$

여기서  $v$ 는 풍속,  $\rho$ 는 공기 밀도,  $R_r$ 는 블레이드의 반경,  $\beta$ 는 블레이드 피치각,  $C_p$ 는  $\lambda$ 와  $\beta$ 의 함수인 출력계수,  $\omega_r$ 는 로터의 각속도이다.

식(1)과 식(2)을 이용하여 풍속과 로터의 회전속도를 고려한 기계적 출력으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R_r^2 C_p(\lambda, \beta) \frac{R_r^3}{\lambda^3} \omega_r^3 \quad (3)$$

이때, 정격출력이 아닌 천이영역(2영역)에서의 제어만을 고려하면 피치각  $\beta = 0$ 이다. 그리고 주속비  $\lambda$ 가 최적의 값일 때  $C_p$  값이 최대가 되므로 최대 출력을 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{max} = \frac{1}{2} \rho \pi R_r^2 C_{p,max} \frac{R_r^3}{\lambda_{opt}^3} \omega_r^3 \quad (4)$$

식(4)에서  $\omega_r$ 를 제외한 나머지는 상수로 나타낼 수 있으므로 다음과 같이 식(5)을 얻을 수 있다.

$$P_{max} = K_{opt} \omega_r^3 \quad (5)$$

최대로 출력하기 위한 토크제어기의 입력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{ref} = K_{opt} \omega_r^2 \quad (6)$$

여기서 풍력발전시스템의 기어비를 고려한다면 각속도와 토크를 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$N_{gear} = \frac{T_r}{T_m} = \frac{\omega_g}{\omega_r} \quad (7)$$

식(7)에서  $N_{gear}$ 는 기어비,  $T_r$ 는 저속 축 토크,  $T_m$ 는 고속 축 토크,  $\omega_g$ 는 발전기의 각속도를 나타낸다.

### 1. 풍력발전시스템 모델

본 논문은 PMSG(permanent magnet synchronous generator)로 구성된 풍력터빈에서 양방향 컨버터와 토크제어를 통한 기계측 MPPT 제어에 초점을 두었다. 그림 1은 동력 전달축과 PMSG를 포함한 기계측 컨버터 시스템을 보여주고 있다.

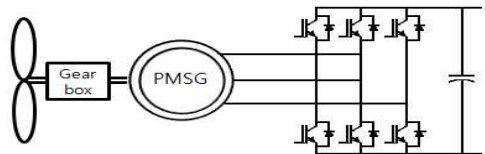


Fig. 1. Drive-train and PMSG system with machine side converter

그림 1. 동력 전달축과 영구자석 발전기가 연결된 기계측 컨버터 시스템

여기서 매입형 영구자석 동기 발전기(interior permanent magnet synchronous generator)모델을 사용하였다. 발전기의 전압을 d와 q축으로 나타내면 다음과 같다[5],[7].

$$U_d = R_s I_d + L_d I_d \cdot s - \omega_e L_q I_q \tag{8}$$

$$U_q = R_s I_q + L_q I_q \cdot s + \omega_e L_d I_d + \omega_e \phi_f \tag{9}$$

여기서  $U_d$ 와  $U_q$ 는 각각 발전기의 d와 q축 전압,  $I_d$ 와  $I_q$ 는 각각 발전기의 d와 q축 전류,  $L_d$ 와  $L_q$ 는 각각 발전기의 d와 q축 인덕턴스,  $R_s$ 는 발전기의 고정자 저항,  $\omega_e$ 는 전기적 회전속도,  $\phi_f$ 는 영구자석의 자속을 의미한다.

$$T_g = \frac{3}{2} npp I_q \phi_f + (L_d - L_q) I_d I_q \tag{10}$$

식(10)은 발전기의 토크  $T_g$ 의 방정식이다.  $npp$ 는 극수를 의미한다.

$$T_m - T_g = J \frac{d\omega_g}{dt} + B\omega_g \tag{11}$$

식(11)은 동력 전달축의 동적 모델 방정식이다[7].  $J$ 는 동력 전달축의 관성계수,  $B$ 는 동력 전달축의 감쇠계수이다.

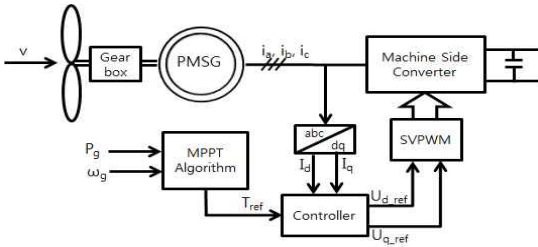


Fig. 2. General hybrid MPPT block diagram using torque controller

그림 2. 토크제어기를 이용한 일반적인 혼합형 MPPT 블록도

그림 2는 토크제어기를 이용한 일반적인 혼합형 MPPT 제어를 수행하는 전체적인 블록도이다. MPPT 알고리즘 블록도에서 알고리즘에 의한  $T_{ref}$ 을 토크제어기로 전달하고 이 토크제어기에서  $U_{d,ref}$ 와  $U_{q,ref}$ 을 SVPWM(space vector PWM)로 전달하게 되어 스위칭 신호에 따라 기계측 컨버터의 제어를 통해 풍력발전시스템의 MPPT 제어가 수행된다[2]-[5].

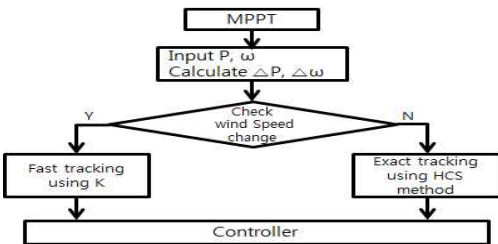


Fig. 3. General hybrid MPPT algorithm  
그림 3. 일반적인 혼합형 MPPT 알고리즘

그림 3은 직접 토크제어에 쓰이는 일반적인 혼합형 MPPT 알고리즘이다. 입력으로 출력  $P$ 와 각속도  $\omega$ 를 이용하고 계산한 후 풍속 변화를 감지하고 풍속의 변화가 있을 경우  $K$ 에 따른 빠른 제어를 수행하고 풍속의 변화가 거의 없을 경우 스텝변화를 이용한 HCS를 통하여 정밀한 제어를 수행한다.

2. 칼만 필터를 이용한 기계적 출력 추정기법

시스템 모델의 상태방정식을 나타내는 식(12)가 다음과 같이 주어졌다.

$$\begin{aligned} x_k &= Ax_{k-1} + Bu_k + w_k \\ z_k &= Hx_k + \gamma_k \end{aligned} \tag{12}$$

여기서  $x_k$ 는 상태변수,  $z_k$ 는 측정값,  $u_k$ 은 입력,  $w_k$ 는 프로세스 노이즈,  $\gamma_k$ 는 측정 잡음,  $A$ 는 이전상태에 기반으로 한 상태 천이 행렬,  $B$ 는 입력에 의한 상태 천이 행렬,  $H$ 는 측정에 관계되는 행렬이다[8].

칼만 필터의 식을 다음과 같이 나타내었다.

Time update :

$$\begin{aligned} \hat{x}_k^- &= A\hat{x}_{k-1} + Bu_k + w_k \\ P_k^- &= AP_{k-1}A^T + Q \end{aligned} \tag{13}$$

Measurement update :

$$\begin{aligned} K_k &= P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R)^{-1} \\ \hat{x}_k &= \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H\hat{x}_k^-) \\ P_k &= P_k^- - K_k HP_k^- \end{aligned} \tag{14}$$

이때 식(13)는 상태와 공분산을 예측하는 단계, 식(14)는 측정값을 이용하여 칼만 이득, 추정 값, 오차 공분산을 계산하고 보정하는 단계를 나타내는 식이다.  $Q$ 는  $w_k$ 의 공분산 행렬,  $R$ 은  $\gamma_k$ 의 공분산 행렬,  $K_k$ 는 칼만 이득,  $P_k$ 는 오차 공분산 행렬이다.  $\hat{x}_k^-$ 와  $P_k^-$ 는 예측값이고  $\hat{x}_k$ 는 추정값이다. 칼만 필터는 예측값과 실제 측정값  $z_k$ 의 오차에 매번 변하는 가중치 ( $K_k$ )를 주고 예측값  $\hat{x}_k^-$ 을 더해 매번 추정값  $\hat{x}_k$ 을 계산한다[8].

동력 전달축 동적모델 식(11)에 이용하여 식(12)의 상태방정식과 출력방정식은 다음과 같이 식(15)로 나타낼 수 있다[9].

$$\begin{bmatrix} \frac{d\omega_g}{dt} \\ \frac{dT_m}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & \frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_g \\ T_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix} T_g + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \xi \tag{15}$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_g \\ T_m \end{bmatrix} + w$$

그림 4는 발전기의 토크  $T_g$ 와 각속도  $\omega_g$ 를 입력으로

로 하고 칼만 필터를 이용하여  $T_{m\_est}$ 와  $\omega_{est}$ 을 출력하는 추정기의 블록도이다.



Fig. 4. Mechanical torque and angular velocity estimator using Kalman filter

그림 4. 칼만 필터를 이용한 기계적 토크와 각속도 추정기

여기서  $T_{m\_est}$ 와  $\omega_{est}$ 을 통해 추정된 기계적 출력  $P_{m\_est}$ 는 다음과 같다.

$$P_{m\_est} = T_{m\_est} \omega_{est} \quad (16)$$

### III. 제안된 적응 MPPT 알고리즘

실제 전기적 출력  $P_g$ 는 실제 기계적 출력  $P_m$ 와 다른 비선형적 출력 거동을 보인다. 만약 HCS을 위한 제어에 전기적 출력  $P_g$ 을 입력으로 사용할 경우 노이즈와 늦은 응답속도로 인하여 MPPT 제어에 문제를 발생시킨다. 특히 최적의  $K$ 를 찾기 위한 정밀한 HCS을 이용할 경우 칼만 필터를 이용하여 보다 정확한 기계적 출력을 추정할 필요가 있다.

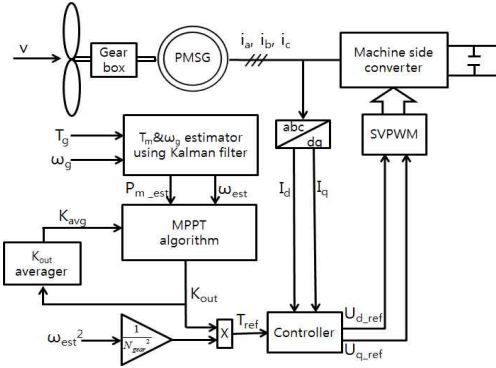


Fig. 5. The adaptive MPPT system block diagram proposed in this paper

그림 5. 제안된 적응 MPPT 시스템의 블록도

그림 5는 본 논문에서 제안된 MPPT 시스템 블록도이다.  $T_g$ 와  $\omega_g$ 를 이용하여 이를 칼만 필터를 통해  $P_{m\_est}$ 와  $\omega_{est}$ 을 추정하였다. 이 값은 MPPT 제어를 위한 입력으로 사용되고 MPPT 알고리즘을 통한  $K_{out}$ 을 출력한다. 여기서 식(6)과 같이  $T_{ref}$ 을 토크제어기의 입력으로 사용되어 MPPT 제어가 수행된다.

앞에서 언급한 일반적인 혼합형 MPPT 알고리즘과

칼만 필터를 이용한 기계적 출력 추정기법을 이용하여 그림 6과 같이 알고리즘을 제안하였다. 본 논문에서는 HCS을 정밀한 MPPT 제어를 수행하기 위해서 사용되었고 이러한 최적의  $K$ 를 직접 찾기 위한 방법으로 HCS에 사용되는 변화량을  $K_{step}$ 으로 사용하였다.

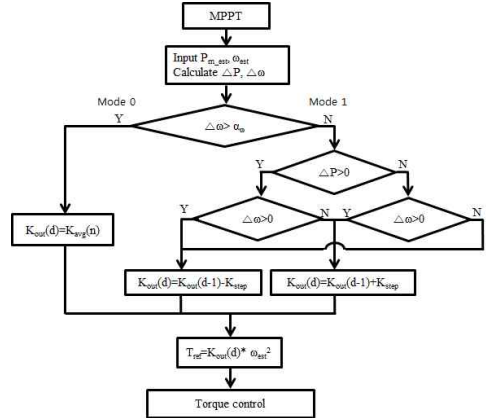


Fig. 6. The proposed MPPT control algorithm

그림 6. 제안된 MPPT 제어 알고리즘

풍속 측정 없이  $P_{m\_est}$ 와  $\omega_{est}$ 을 입력으로 사용한 이 알고리즘은  $\omega$ 의 변화를 통하여 풍속의 변화를 예측하였다.  $\Delta\omega$ 가 허용 오차  $\alpha_w$ 를 넘을 경우(Mode 0)는 풍속에 변화가 있는 경우로 기존의  $K_{avg}(n)$ 으로 빠른 제어를 수행하고  $\Delta\omega$ 가 허용 오차  $\alpha_w$ 를 넘지 않을 경우(Mode 1)는 풍속의 변화가 거의 없는 경우로 정밀한 HCS을 수행한다. 정밀한 HCS 수행하는 동안 풍속의 변화가 발생할 경우 Mode 0로 돌아가 다시 현재  $K_{avg}(n)$ 로 제어를 수행한다.

정밀한 HCS 수행되는 동안에 발생하는 해당 시간의  $K$ 가 풍력발전시스템의 최적의  $K_{opt}$ 과 가까운 값이다. 하지만  $K_{out}(d)$ 가  $K_{opt}$ 의 근사한 값이 되기 전에 풍속이 변동이 생기면 각속도와 출력도 변동하므로 잘못된 HCS을 하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해  $K_{out}$ 평균기는 HCS을 수행하는 중에 변화되는  $K_{out}(d)$ 을 취득하여 점차적으로 현재의  $K_{opt}$  값과 가까운 값을 찾는다.

다음 식은  $K_{out}$ 평균기에서 쓰이는 조건과  $K_{out}(d)$ 을 평균내기 위한 식이다.

$$|K_{avg}(n) - K_{out}(d)| \geq 2 * K_{step} \quad (17)$$

$$K_{avg}(n+1) = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m K_{out}(d) \quad (18)$$

$K_{out}$ 평균기는 식(17) 조건에 의한  $K_{out}(d)$ 을 식(18)을 이용해  $n = m$ 가 될 때까지 평균값을 취득하여

$K_{avg}(n+1)$ 을 계산한다. 이때의  $K_{avg}(n+1)$ 는 MPPT 제어 알고리즘의 입력이 되면서  $K_{avg}(n+1)$ 에서부터 다시 MPPT 제어가 시작된다. 이 알고리즘을 통하여 실제  $K_{opt}$ 에 가까운  $K$ 를 계산하여 정밀한 MPPT 제어를 수행한다.

#### IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 블레이드 형상 및 공기 밀도 변화 등에 의해 변하는 파라미터  $K$ 의 변동을 그림 7과 같이 가정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

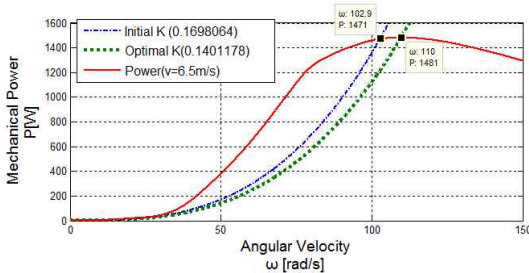


Fig. 7. The maximum power point according to K  
그림 7. K값에 따른 얻을 수 있는 최대 출력점

그림 7은 각속도에 따른 기계적 출력에 대한 그래프이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 풍속이 6.5[m/s]일 때 각속도에 따라 출력이 변하게 되는데  $K = 0.1401$ 로 MPPT 제어가 수행된다면 현재 풍력발전시스템의 각속도가 약 110[rad/s]로 출력은 약 1481[W]이다. 하지만 최초의  $K = 0.1698$ 로 MPPT 제어를 수행했을 경우 각속도가 약 102[rad/s]로 출력은 약 1471[W]이다. 최적의  $K$ 로 MPPT 제어를 했을 경우 보다 최초의  $K$ 로 MPPT 제어를 했을 때 출력이 낮아지고 이때 최적의 MPPT 제어를 수행한다고 볼 수 없다.

##### 1. 칼만 필터를 이용한 기계적 토크 추정 결과

그림 8은 풍속의 스텝변화에 따른 칼만 필터를 이용하여 추정된 토크와 각속도, 실제 기계적 토크와 각속도를 비교한 시뮬레이션 결과이다. 그림 8(a)처럼 풍속이 스텝으로 변할 때 그림 8(b)의 결과처럼 발전기의 토크는 기계적 토크보다 응답이 느리고 컨버터의 스위칭 등에 인한 노이즈가 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 칼만 필터를 이용하여 기계적 토크를 추정하였다. 추정된 기계적 토크는 풍속이 스텝으로 변할 때 기계적 토크와 근사한 거동을 보이고 전기적 토크로부터 발생하는 노이즈를 상당히 제거하는 것을 알 수 있다. 이렇게 얻은  $T_{m\_est}$ 와  $\omega_{est}$ 을 이용하여 식(16)에 의해 기계적 출력을

추정할 수 있다. 그림 8(c)는 실제 각속도와 추정된 각속도가 거의 일치한다는 것을 보여준다.

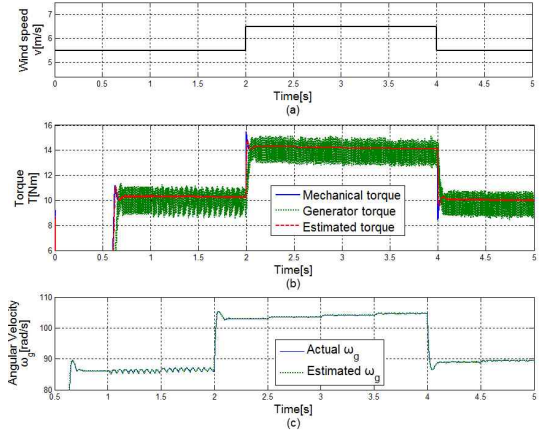


Fig. 8. The performance of estimator using Kalman filter  
그림 8. 칼만 필터를 이용한 추정기의 성능

##### 2. 풍속이 일정할 때 적응 MPPT 제어 결과

그림 9는 풍속이 6.5[m/s] 일 때 적응 MPPT 제어 성능을 보여주는 그래프이다.  $K_{out}$ 은 그림 5의 MPPT 알고리즘 블록도의 출력이고  $K_{avg}$ 는  $K_{out}$  평균기를 통해 나오는  $K_{out}$ 의 평균값에 대한 출력이다. 풍속이 일정할 때 HCS를 통해 나오는  $K_{out}$ 과  $K_{avg}$ 을 결과를 다음과 같이 볼 수 있다.

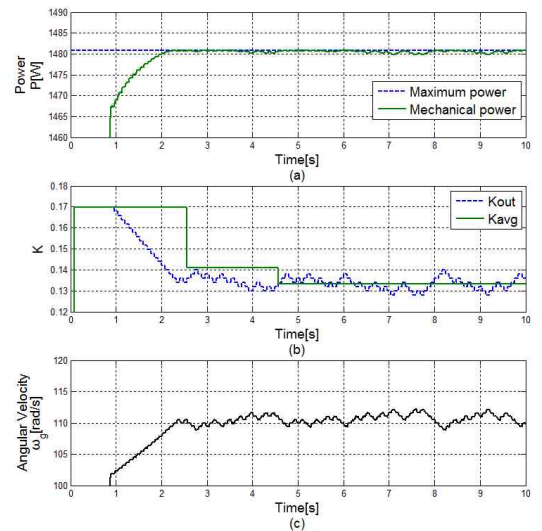


Fig. 9. The performance of the adaptive MPPT control in constant wind speed

그림 9. 풍속이 일정할 때 적응 MPPT 제어 성능



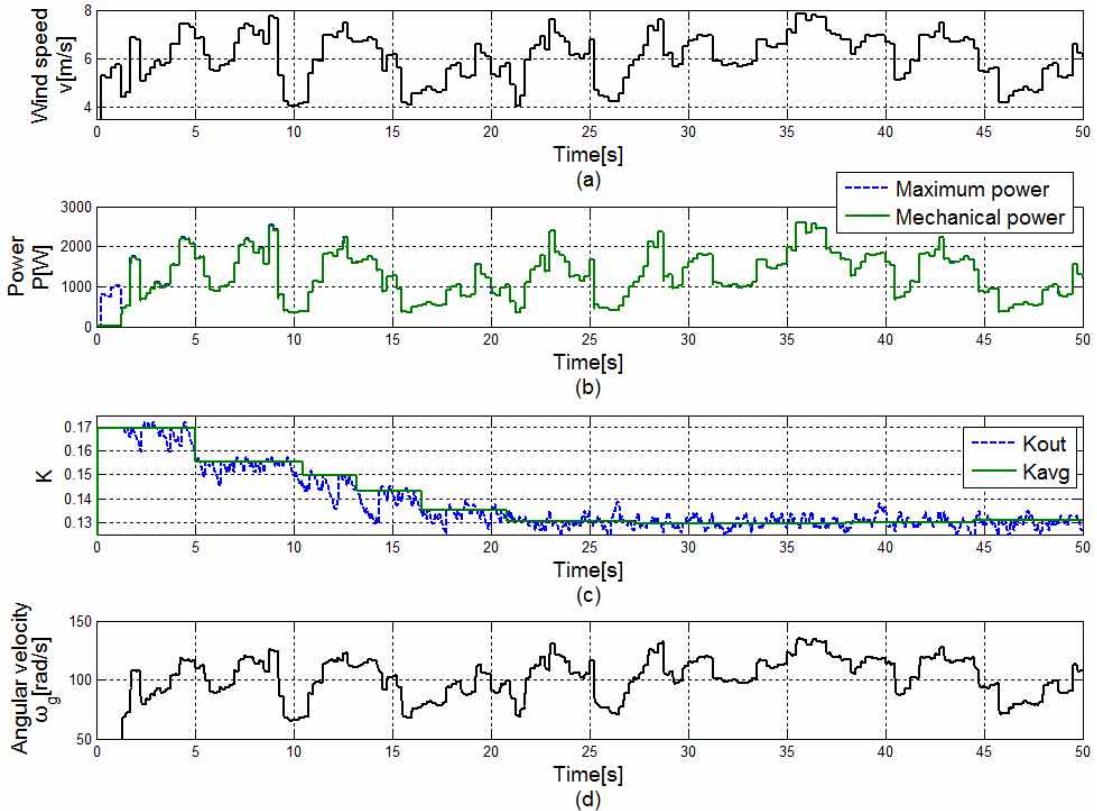


Fig. 10. The performance of the adaptive MPPT control when wind speed change

그림 10. 풍속이 변할 때 적응 MPPT 제어 성능

그림 9(b)에서 볼 수 있듯이 처음  $K$ 값이 대략 0.169에서 HCS를 수행하는 것을 볼 수 있다. HCS 제어가 지속적으로 이루어지면서  $K_{out}$ 이 대략 0.140 ~ 0.135에 유지하게 되고 그림 9(c)의 결과로부터 각속도는 대략  $110[rad/s]$ 를 유지하는 것을 알 수 있다. 그리고  $K_{out}$ 평균기의 출력  $K_{avg}$ 도 대략 0.135에 도달하고 그림 9(a)의 결과로부터 기계적 출력이 바람으로부터 얻을 수 있는 이론적 최대 출력과 근사한 값을 유지하는 것을 알 수 있다. 결과적으로 최종  $K$ 로 제어를 했을 때의 출력보다 더 높은 출력을 내는 것을 알 수 있다.

### 3. 풍속이 변할 때 적응 MPPT 제어 결과

그림 10은 풍속이 변할 때 적응 MPPT 제어의 결과를 보여주고 있다. 그림 10(a)는 시간에 따라 변하는 풍속을 보여주고 있다. 그림 10(b)는 변하는 풍속에 따라 풍력발전시스템이 MPPT 제어 결과를 통해 얻을 수 있는 출력 결과이다. 그림 10(c)는 MPPT 제어에 따라 변하는  $K$ 값을 나타낸다. 그림에서 알 수

있듯이 처음 대략 2~3초 구간에서는 풍속변화를 감지하는 알고리즘에 따라  $K$ 가 대략 0.1698에서 시작하여 풍속이 일정할 때는 HCS를 수행하고 풍속이 변할 때에는 기존의  $K_{avg}(n)$ 로 토크제어를 수행하는 것을 알 수 있다. 그리고 대략 5초에서  $K_{out}$ 평균기에서  $K_{avg}(n+1)$ 을 MPPT 제어 알고리즘의 HCS를 위한 기준값  $K_{avg}$ 을 변경함으로써 이후에는  $K_{avg}(n+1)$ 에서부터 HCS가 수행되는 것을 알 수 있다. 그림 10(d)는 MPPP 제어에 따른 발전기의 각속도를 나타내는 결과이다. 이러한 제어가 반복적으로 이루어지면서  $K_{out}$ 평균기에서 MPPT 제어의 기준이 되는  $K_{avg}$ 가 대략 0.130에서 유지하게 된다. 이는 최적의  $K_{opt}$ 와 가까운 값으로 MPPT 제어가 이루어지고 있다는 것을 보여주고 있다.

## V. 결론

풍력발전시스템의 MPPT 제어를 함에 있어 최적이

아닌  $K$ 로 제어를 할 경우 출력에 손실이 발생한다. 이러한 손실을 줄이기 위해 최적의  $K$ 로 풍력발전시스템을 제어하는 것이 중요하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 풍력발전시스템의 동적모델과 양방향 컨버터를 포함한 전기적 모델을 고려하여 부정확한  $K$ 에서 최적에 가까운  $K$ 로 적응 MPPT 제어를 하는 시스템의 성능을 살펴보았다.

기존의 양방향컨버터의 SVPWM을 통한 제어는 스위칭 하는데 있어서 노이즈를 발생시키고 이로 인하여 얻어진 전기적 출력은 변동이 크다. 그리고 시뮬레이션 결과를 통해 알 수 있듯이 기계적 출력에 비해 응답이 느리다. 이는 정밀한 MPPT 제어를 하는데 있어서 문제를 발생시킨다. 이러한 문제를 칼만 필터를 이용한 기계적 출력 추정을 통해 최소화하였고 이를 보다 정밀한 MPPT 제어를 위한 입력으로 사용하였다. 그리고 풍속이 변할 때는 기존의  $K$ 를 이용하여 빠른 MPPT 제어를 수행하고 풍속에 변동이 없을 경우는 정밀한 MPPT 제어를 수행하여 점차적으로 최적의  $K$ 와 근사한  $K$ 를 찾고 다시 적용하여 결과적으로 적응 MPPT제어를 수행하였다.

## References

- [1] Jeong Min Kwon, Jung Hun Kim, Sung Hyo Kwak, Hong Hee Lee, "Optimal Power Extraction Algorithm for DTC in Wind Power Generation Systems", Sustainable Energy Technologies, 2008. ICSET 2008. IEEE International Conference on, pp.639-643, Nov. 2008
- [2] Jogendra Singh Thongam and Mohand Ouhrouche, "MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems, Fundamental and Advanced Topics in Wind Power, Dr. Rupp Carriveau (Ed.)", InTech pp.339-360, 2011
- [3] Ch. Patsios, A. Chaniotis, A. Kladas, "A Hybrid Maximum Power Point Tracking System for Grid-Connected Variable Speed Wind-Generators", Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE, pp.1749-1754, June 2008
- [4] Raza Kazmi, S.M.,Goto, H., Hai-Jiao Guo, Ichinokura, O., "A Novel Algorithm for Fast and Efficient Speed-Sensorless Maximum Power Point Tracking in Wind Energy Conversion Systems", Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol:58, pp.29-36, Jan. 2011
- [5] Lijun He, Yongdong Li, Harley, R., "Novel adaptive power control of a Direct-drive PM wind

generation system in a micro grid", Power Electronics and Machines in Wind Applications (PEMWA), 2012 IEEE, pp.1-8, July 2012

[6] K.E johnson and L.J. Fingersh, M.J. Balas and L., "Methods for Increasing Region 2 Power Capture on a Variable Speed HAWT", 23th ASME Wind Energy Symposium, January, 2004

[7] Alejandro Rolan', Alvaro Luna, Gerardo Vazquez, Daniel Aguilar "Modeling of a Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator", IEEE International Symposium on Industrial Electronics, July 5-8, 2009

[8] Phil Kim, "Essential Kalman filter", A-jin Publishing Company, pp. 39-67, 2010

[9] Bourliss, D.,Bleijts, J.A.M., "A wind speed estimation method using adaptive Kalman filtering for a variable speed stall regulated wind turbine", Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2010 IEEE 11th International Conference, pp. 89-94, June 2010

## BIOGRAPHY

### Jong-Ho Hyun (Student Member)



2013 : BS degree in Electronic Engineering, Jeju National University.

2013~presently : MS degree course in Faculty of Wind Energy Engineering Graduate School, Jeju National University

### Kyung-Youn Kim (Member)



1983 : BS degree in Electronic Engineering, Kyungpook National University.

1986 : MS degree in Electronic Engineering, Kyungpook National University.

1990 : PhD degree in Electronic

Engineering, Kyungpook National University.

1990~presently : Professor, Dept. of Electronic Engineering, Jeju National University.