

적응 슬라이딩 모드제어를 통한 PMSG 풍력발전시스템의 MPPT제어

정형철\*, 천관호\*\*  
 충남대학교\*, 충남대학교\*\*

Mppt control of PMSG wlnnd power system using adaptive sliding mode control

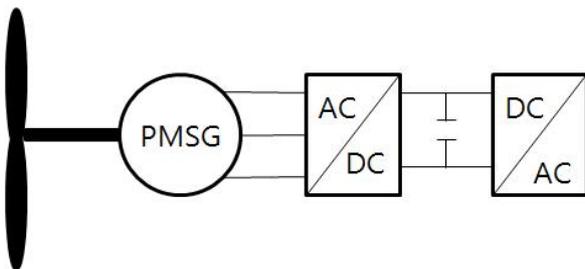
Hyeong-Cheol Jeong\*, Kwan-Ho Chun\*\*  
 ChungNam National University\*, ChungNam National University\*\*

**Abstract** - This paper presents the control method of MPPT (Maximum Power Point Tracking) using back-to-back converter. The windturbine system use PMSG(ermanent Magnet Synchronous Generator) system considering low maintenance costs and driving performance at low wind. This paper use the adaptive sliding mode control to the torque control. Proposed method was analyzed mathematically.

1. 서 론

산업의 발전에 따라 사람들이 누리는 물질적 풍요로움은 갈수록 증가하고 있다. 이러한 물질적 풍요로움은 대부분 많은 에너지를 소비하고 있다. 현재 화석연료를 사용하여 에너지를 이용하고 있다. 하지만 제한적인 매장량에 의해 새로운 에너지원의 필요성이 대두되고 이에 신재생 에너지의 수요가 꾸준히 증가하고 있다.

풍력발전기의 종류에는 유도발전 방식과 동기발전 방식, 정속 운전방식과 가변속 운전방식이 있다[1,5]. 과거에는 정속 구동형 발전기가 많이 사용되었으나, 가변속 발전의 우수한 효율에 의해 소자를 사용한 가변속 발전에 대해 연구가 되어 왔다. 이에 본 논문에서는 그림 1과 같은 Back-to-Back 컨버터를 사용한 가변속 운전방식과 넓은 운전범위를 보이고 기어박스를 제거해 유지비용을 줄일 수 있는 영구자석 동기발전기(PMSG, Permanent Magnet Synchronous Generator)를 이용한 풍력발전 시스템을 모델로 토크를 이용한 MPPT제어 방법을 제안한다.



<그림 1> PMSG 풍력발전 시스템

2. 본 론

2.1 풍력 터빈 모델링

블레이드를 통해 변환된 바람의 기계적 에너지  $P_m$ 은 다음과 같다.

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda) v^3 \quad (1)$$

여기에서  $A$ 는 블레이드의 회전 단면적[m<sup>2</sup>],  $\rho$ 는 공기의 밀도[kg/m<sup>3</sup>],  $v$ 는 풍속[m/s],  $C_p$ 는 블레이드의 출력계수,

$\lambda$ 는 주속비 이다.

주속비는 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{w^* R}{v} \quad (2)$$

여기에서  $w$ 는 로터의 속도[rad/sec],  $R$ 은 블레이드의 반지름[m]이다.

2.2 PMSG 모델링

먼저 로터의 운동 방정식은 다음과 같다[2,3].

$$\frac{dw}{dt} = \frac{T_m}{J} - \frac{T_e}{J} - \frac{B}{J}w \quad (3)$$

$$T_e = 1.5p\phi i_q \quad (4)$$

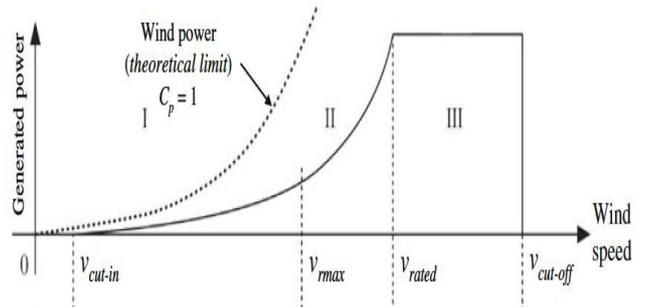
$B$ 는 점성마찰계수,  $J$ 는 관성모멘트이다.

발전기의 고정자에 흐르는 전류를 d-q좌표로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L}i_q - p i_d w - \frac{K_M}{J}w - \frac{1}{L}v_q \quad (5)$$

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L}i_d + p i_q w - \frac{1}{L}v_d \quad (6)$$

$K_M = 1.5p\phi$ 이다.



<그림 2> 풍속에 따른 발전전력량[5]

2.3 토크제어

풍속에 따른 발전전력량은 그림 2와 같다. 이를 이용하여 발전 전력의 최대 출력을 얻기 위해 출력  $P_e$ 가 기준 출력  $P_e^*$ 를 추종하도록 한다. 이를 위해 출력 오차를 다음과 같이 정의한다[4].

$$e = P_e - P_e^* \quad (7)$$

$P_e^*$ 를 상수로 가정하면 오차의 미분은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{P}_e - \dot{P}_e^* = \dot{T}_e w + T_e \dot{w} \\ &= K_M \dot{i}_q w + \frac{T_e}{J}(T_m - T_e - Bw) \\ &= -ae + \frac{1}{J}(T_e T_m - T_e^2 - B(e + P_e^*)) + JK_M \dot{i}_q w + Jae \end{aligned} \quad (8)$$

가상의 입력  $\alpha$ 를 다음과 같이 설정한다.

$$\alpha = -T_e \hat{T}_m + T_e^2 + B(e + P_e^*) - Jae - JK_M w \dot{i}_q \quad (9)$$

식 (9)를 이용하여 (8)을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{e} &= -ae + \frac{1}{J}(T_e(T_m - \widehat{T}_m) - T_e^2 - (B - \widehat{B})(e + P_e^*) \\ &\quad + JK_M w \dot{i}_q + Jae) \\ &= -ae + \frac{1}{J}(T_e \Delta T_m - T_e^2 - \Delta B(e + P_e^*) + JK_M w \dot{i}_q + Jae) \\ &= -ae + f(t) + d(t)\end{aligned}\quad (10)$$

여기에서  $f(t) = \frac{1}{J}(-T_e^2 + JK_M w \dot{i}_q + Jae)$ ,

$d(t) = \frac{1}{J}(T_e \Delta T_m - \Delta B(e + P_e^*))$ 이다.

슬라이딩 모드 제어를 위해 슬라이딩 평면을 다음과 같이 설정한다.

$$S = e(t) + \int_0^t (k+a)e(\tau) d\tau \quad (11)$$

식 (11)을 이용한 리아프노프 함수를 다음과 같이 설정한다.

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (12)$$

$V$ 를 미분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{V} &= S\dot{S} = S(\dot{e} + (k+a)e) \\ &= S(-ae + f + d + (k+a)e) \\ &= S(f + d + ke)\end{aligned}\quad (13)$$

입력값을 다음과 같이 설계한다.

$$f = -ke - \rho \operatorname{sgn}(S) \quad (14)$$

(14)와 같이 설계하면 (13)식은 다음과 같이 정리된다.

$$\dot{V} = S(d - \rho \operatorname{sgn}(S)) \quad (15)$$

$\dot{V} < 0$ 을 만족해야 하므로  $\rho > |d|$ 를 만족한 값으로 설정한다.

식 (10), (14)를 이용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{i}_q = (-Jke - J\rho \operatorname{sgn}(S) + T_e^2 - Jae) / JK_M w \quad (16)$$

$f = (-Jke - J\rho \operatorname{sgn}(S) + T_e^2 - Jae) / JK_M w$  라고 하면 다음과 같이 정리 된다.

$$v_q = -(f + \frac{R}{L}i_q + p i_d w + \frac{K_M}{J}w)L \quad (17)$$

최대 출력토크를 얻기 위해  $i_d$  전류는 0이 되어야 한다. 이에 따라  $i_d$ 를 제어하기 위해  $e_i$ 를 설정한다.

$$e_i = i_d - i_d^* \quad (18)$$

$i_d^*$  값이 0이 되어야 하므로 (18)식은 다음과 같다.

$$e_i = i_d \quad (19)$$

식 (19)를 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{e}_i = \dot{i}_d = (-\frac{R}{L}i_d + n i_q w - \frac{1}{L}v_d) \quad (20)$$

슬라이딩 평면을 다음과 같이 설정한다.

$$S = e \quad (21)$$

식 (21)을 이용한 리아프노프 함수를 다음과 같이 설정한다.

$$V = \frac{1}{2} S^2 \quad (22)$$

$V$ 를 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{V} = S\dot{S} = S(\dot{e}) \quad (23)$$

$$= S(-\frac{R}{L}i_d + n i_q w - \frac{1}{L}v_d)$$

$$u = -\frac{1}{L}v_d \quad (24)$$

입력  $u$ 를 다음과 같이 설계한다.

$$u = -\gamma \operatorname{sgn}(S) + \frac{R}{L}i_d - n i_q w \quad (25)$$

식 23은 다음과 같이 정리된다.

$$\dot{V} = S(-\gamma \operatorname{sgn}(S)) \quad (26)$$

식 (26)은  $\dot{V} < 0$ 을 만족한다.

식 (24), (25)를 정리하면 다음과 같다.

$$v_d = (\gamma \operatorname{sgn}(S) - \frac{R}{L}i_d + n i_q w)L \quad (27)$$

### 3. 결 론

본 논문에서는 가변속 운전에 용이한 back-to-back 컨버터와 운전 범위의 폭이 넓은 PMSG를 이용한 MPPT 문제를 고려하였다. 제안된 문제를 위해 PMSG의 수학적 모델링을 이용하여 토크제어를 진행하였다. 풍속에 따른 출력 토크의 추정값이 존재 하고 이를 바탕으로 출력 토크와의 오차를 최소화한다. 시스템의 불확실성을 줄이기 위해 적응 슬라이드 모드를 통한 토크제어 방법을 설계하였다. 시스템의 안정성 확인을 위하여 리아프노프 함수를 이용하여 확인하였다.

### [참 고 문 헌]

- (1) Muhammad H., Rashid, 'Power electronics handbook', Academic press, 2001.
- (2) Guk Sun Kim, Tae Soo No, Gyeong-Eon Jeon, Ji-yon Kim. 'Nonlinear Pitch and Torque Controller Design for Wind Turbine Generator Using Lyapunov Function', 2012.
- (3) Abdelmounime El Magri, Fouad Giri, Abderrahim Elfadili, Luc Dugard. 'Adaptive Nonlinear Control of Wind Energy Conversion System with PMS Generator', 2013.
- (4) Oscar Barambones, Jose M. Gonzalez de Durana, Enrique Kremers. 'Adaptive robust control to maximizing the power generation of a variable speed wind turbine', 2013.
- (5) Luo, N.; Vidal, Y.; Acho, L. 'Wind Turbine Control and Monitoring', Springer, 2014.