

IPMSG을 이용한 풍력 발전 시스템의 최대 출력화 제어 특성

Characteristics of Maximization Output Control for Variable Wind Generation System Using IPMSG

문 상 필* · 허 영 환** · 김 중 석*** · 박 한 석†
 (Sang-Pil Mun · Young-Hwan Heo · Jong-Suk Kim · Han-Seok Park)

Abstract - This paper proposes the variable wind generation system based on the direct torque control(DTC)for the interior permanent magnet synchronous generator. The proposed system can achieve the MPPT control without wind speed in addition to the speed and position sensorless control as well as the conventional current control method. The DTC has several advantages such as simply system configuration, ease of the flux weakening control and the sensorless control. The experimental results show the performance of the proposed wind generation system.

Key Words : Maximum power point tracker, Permanent magnet synchronous generator, Direct torque control, Interior permanent magnet synchronous generator, Flux weakening control

1. 서 론

최근 산업이 발전하면서 에너지사용의 증가로 환경오염과 자연고갈문제가 대두되고 있으며, 에너지 공급 확보와 기후 변화에 대처하기 위한 온실가스(GHG) 배출량 감소, 생물 다양성 보호, 에너지 절약 및 효율 개선 등이 세계적으로 중요한 화두가 되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 최근 화석연료를 대체하기 위한 에너지원으로 풍력발전 및 태양광, 태양열 등을 이용한 깨끗하고 재사용이 가능한 신재생 에너지에 대한 관심이 높아지고 있으며, 전 세계적으로 신재생 에너지를 이용하여 에너지를 공급하려는 시도가 증가하고 있다. 이러한 신재생에너지는 전 세계 뿐만 아니라 국내에서도 활발한 연구가 진행되고 있다. 이중 풍력 발전 시스템은 바람이 가지는 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 대표적인 신재생에너지 시스템이다.

신재생 에너지중 하나인 풍력 발전 시스템은 발전기로 유도기계를 사용하는 경우가 많지만, 최근에는 발전 효율이 뛰어난 영구자석 동기 발전기(PMSG : Permanent Magnet Synchronous Generator)를 이용한 시스템에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다[1, 2]. d-q축 전류 제어 방식에 의한 풍속 센서리스 최대 전력점 추종(MPPT : Maximum Power Point Tracker)제어법이나 매립형 영구자석 동기 발전기(IPMSG : Interior Permanent Magnet Synchronous Generator)

의 최적 전류 벡터 제어법이 이미 사용되고 있다[1-4]. 또한 직접 토크 제어(DTC : Direct Torque Control)에 의한 매립형 영구자석 동기 발전기의 구동방식은 직접 토크 제어에 위치한 센서를 필요로 하지 않는 특징을 가진다[5-8].

본 논문에서는 발전기 제어를 기존의 전류 제어 방식을 이용하는 것이 아니라 시스템 구성이 간단하고, 발전기 단자 전압 제한에 대한 대응과 위치 센서리스 구동이 쉬운 직접 토크 제어를 이용한 풍력 발전 제어 시스템을 제안하고, 그 발전 특성을 실험결과를 통하여 서술하였다.

2. 풍력발전 시스템의 구성 및 제어법

2.1 풍력발전 시스템의 구성

그림 1는 매립형 영구자석 동기 발전기를 이용한 풍력 발

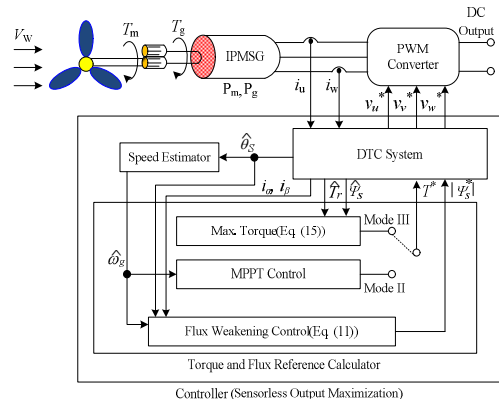


그림 1 매립형 영구자석 동기 발전기를 이용한 풍력 발전 시스템

Fig. 1 Wind generation system using Interior Permanent Magnet Synchronous Generator

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Pukyong National University, Korea
 E-mail : phanseok@pknu.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Masan University, Korea

** Gimhae-Si Urban Development Corporation, Korea

*** Dept. of Electronic Information Communication, Dong-Pusan College, Korea

접수일자 : 2016년 7월 23일

최종완료 : 2016년 8월 25일

진 시스템을 나타낸 것이다. 그림 1에서 기어를 통해 풍차와 연결되는 매립형 영구자석 동기 발전기는 직접 토크 제어에 의해 위치 센서리스 구동이 이루어지며, 풍속 센서리스 MPPT제어 등에 필요한 발전기 회전속도의 추정부, 최대 효율 제어 및 약화 자속 제어를 위한 토크 지령값 T^* 와 전기자 쇄교 자속 지령값 $|\Psi_s^*|$ 의 작성부, 변환기의 지령 전압 v_u^* , v_v^* , v_w^* 으로 직접 토크 제어 장치가 구성된다.

2.2 직접 토크 제어법과 속도 추정법

그림 2는 직접 토크 제어 블록도를 나타낸 것이다. 그림 2에 나타난 것처럼 직접 토크 제어는 α, β 좌표상의 인버터 지령 전압 벡터 v_a^* 와 전류 벡터 i_a 보다 추정된 전기자 쇄교 자속 벡터 $\hat{\Psi}_s$ 를 사용하여 제어하며, 이때의 전기자 쇄교 자속과 토크 \hat{T}_f 의 추정식을 식으로 나타내면 식 (1)~(3)와 같다.

본 논문에서는 전류 센서 등으로 발생하는 DC 오프셋의 영향을 줄이기 위해 1차 지연 필터에 의한 자속을 추정하였다.

$$\hat{\Psi}_s = \frac{1}{s + \omega_c}(v_a^* - R_a i_a) \quad (1)$$

$$\hat{\theta}_s = \arg(\hat{\Psi}_s) \quad (2)$$

$$\hat{T}_f = P_n(\hat{\Psi}_\alpha \times i_\beta - \hat{\Psi}_\beta \times i_\alpha) \quad (3)$$

여기서, R_a : 전기자저항, P_n : 극대수, $\hat{\Psi}_\alpha, \hat{\Psi}_\beta$: 추종된 전기자 쇄교 자속 벡터 $\hat{\Psi}_s$ 의 α, β 축 성분, i_α, i_β : 전기자 전류 벡터 i_a 의 α, β 축 성분, ω_c : 컷오프 각 주파수

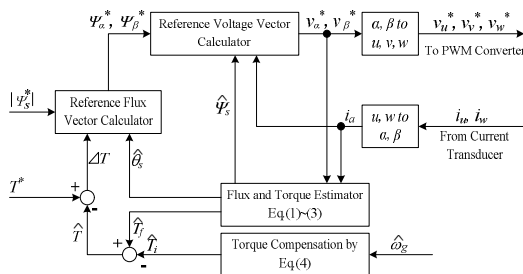


그림 2 직접 토크 제어 블록도
Fig. 2 Block diagram of the DTC with RFVC

직접 토크 제어는 일반적인 d, q 축에서 전류 제어 방식에 비해 위치 센서리스 구동이 쉬운 것이 특징이며, 또한 인덕턴스 등 모터 매개 변수가 필요하지 않고 쉽게 측정할 수 있는 전기자 저항값과 전기자 쇄교 자속의 초기값만으로 제어가 가능하다. 또한 본 논문에서는 스위칭 테이블을 이용하여 기본적인 직접 토크 제어 대신에 전류 제어 방식과 마찬가지로 지령 전압을 사용하는 방식을 채택하였다.

정상 상태에서는 IPMSG의 회전자의 회전 속도 및 전기자 쇄교 자속 벡터의 회전 속도가 거의 일치하는 것을 이용하였으며, 식 (2)에서 얻은 전기자 쇄교 자속의 위치 $\hat{\theta}_s$ 의 시간 차이를 계산하여 저역통과필터를 통해 IPMSG의 회전각속도 추정값을 얻었다. 이렇게 추정된 발전기 속도는 풍속 센서리스

MPPT 제어와 최대 출력화 제어에 사용하였다.

2.3 추정 토크 보정

본 논문에서 제안한 시스템에서는 철손을 고려한 d, q 축 IPMSG 모델을 상정(想定)하여 최대 효율 제어 및 약화 자속 제어를 실행하였다. 식 (1)~(3)에 의해 구해진 토크 추정에서는 IPMSG에서 발생하는 철손을 고려하지 않기 때문에 발전기의 발생 토크 사이에 차이가 생긴다. 철손에 의해 생기는 토크 오차는 식 (4)에서 추정할 수 있으며, 발전기에서 발생 토크는 식 (5)에서 추정 할 수 있다.

$$\hat{T}_i = \frac{P_n \times |\hat{\Psi}_s|^2 \times \hat{\omega}_g}{R_c} \quad (4)$$

$$\hat{T} = \hat{T}_f - \hat{T}_i \quad (5)$$

여기서, R_c 는 철손 저항에서 발전기 회전 속도의 함수이다.

3. 발전기 제어법

발전기의 단자 전압과 전기자 전류의 상태에 따라 발전기 제어 방법을 전환하였다. 발전기 제어 모드와 제어 방법의 대응을 표 1에 나타내었다. 표 1에서 V_a 와 V_{am} 는 각 발전기의 단자 전압과 컨버터 제어 가능한 전압의 상한이며, I_a, I_{am} 는 각 전기자 전류와 정격값이다. 그리고 Mode (I)에서 Mode (II)로의 전환은 $1,822[\text{min}^{-1}]$, Mode (II)에서 Mode (III)로의 전환은 $2,423[\text{min}^{-1}]$ 로 했다. 자속과 토크를 발전기 회전수에 따라 적절하게 제어함으로써, 풍차에서 얻을 수 있는 에너지의 극대화가 가능하다.

표 1 제어 모드의 정의

Table 1 Definition of control mode

	발전기 (IPMSG) 상태		발전기 제어법	
	단자전압	전기자전류	지령 토크 T^*	지령자속 $ \Psi_s^* $
Mode (I)	$V_a < V_{am}$	$I_a < I_{am}$	MPPT제어	최대효율제어
Mode (II)	$V_a = V_{am}$	$I_a < I_{am}$	MPPT제어	정전압제어
Mode (III)	$V_a = V_{am}$	$I_a = I_{am}$	정전류제어	정전압제어

3.1 토크와 전기자 쇄교자속의 지령 생성

Mode (I)과 Mode (II)에서는 전류 벡터의 진폭 I_a 가 제한값 I_{am} 이하에서 기계 입력이 최대가 되는 MPPT 제어를 실시한 것이다. 이 경우에 최적 토크 T_{opt} 는 식 (6)과 같으며, 이 식을 토크 지령값으로 DTC에 제공한다.

$$T_{opt} = K_{opt} \times \omega_g^2 \quad (6)$$

한편, Mode (III)에서는 발전기의 회전 속도가 상승하고, 전

압과 전류가 모두 한계에 도달하면 MPPT 제어는 불가능하기 때문에 전압과 전류의 제한 범위 내에서 토크가 최대가 되도록 제어한 것이다. 이 경우에 토크 최대값 T_{max} 과 회전 속도의 관계를 식 (7)와 같이 근사식으로 나타낼 수 있다.

$$T_{max} = K_{t13}\omega_g^3 + K_{t12}\omega_g^2 + K_{t11}\omega_g + K_{t10} \quad (7)$$

여기서, K_{t13} , K_{t12} , K_{t11} , K_{t10} 는 발전기 파라미터 및 전압과 전류의 제한값에서 결정되어지는 계수이다.

단자전압 V_a 가 제한값 V_{am} 이하인 경우에는 발전기의 동손과 철손이 최소가 되어 최대 효율 제어를 수행한다. d , q 축상의 발전기 모델과 토크 식, 전기자 쇄교자속의 진폭 $|\psi_s|$ 과 토크 T 의 관계를 근사식으로 나타내면 식 (8)과 같다.

$$|\psi_s|_{maxEff.} = K_{me3}T^3 + K_{me2}T^2 + K_{me1}T + K_{me0} \quad (8)$$

여기서, K_{me3} , K_{me2} , K_{me1} , K_{me0} 는 모터 파라미터에서 결정된 계수이다.

3.2 정전압제어(약화 자속 제어)과 정전류제어

그림 3은 본 논문에서 제안한 시스템의 회전 속도에 대한 유도전압 V_0 와 단자전압 V_a 의 특성을 나타낸 것이다. 그림 3에서 알 수 있듯이 단자전압을 일정하게 제어하는 경우에도 전류의 크기와 위상에 따라 유도전압은 변화하고 발전기의 경우에는 $V_a < V_0$ 의 관계가 성립한다. 그리고 Mode (II)와 (III)에서 알 수 있듯이 단자전압을 인버터에서 출력 할 수 있는 최대값으로 제어함으로써 고속 영역에서의 발전이 가능해진다.

α , β 축 전압에 대해 관계식이 성립하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = V_0 \begin{bmatrix} \cos(\theta_s + \frac{\pi}{2}) \\ \sin(\theta_s + \frac{\pi}{2}) \end{bmatrix} + R_a \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (9)을 스칼라 형태로 바꾸어 다시 표현하면 식 (10)과 같다.

$$V_a^2 = \{-V_0 \sin\theta_s + R_a i_\alpha\}^2 + \{V_0 \cos\theta_s + R_a i_\beta\}^2 \quad (10)$$

식 (10)에서 V_0 는 유도전압이며, 이 유도전압과 자속의 관계식인 $|\psi_s| = V_0/\omega$ 를 이용하면 지령 자속의 계산식인 식 (11)을 구할 수 있다.

만일 단자 전압이 제한값 V_{am} 에 도달하면, 약화 자속 제어를 적용한다. Mode (II)와 (III)에서와 같이 단자 전압을 제한값으로 유지함으로써 고속 영역에서의 발전이 가능해진다. 이 영역(Mode (II)와 (III))에서는 아래의 관계식에서 전기자 쇄교자속의 지령값 $|\psi_s^*|$ 을 결정할 수 있어 모터 매개 변수중 R_a 만으로 계산할 수 있다.

$$|\psi_s|_{FW} = \frac{1}{\omega} \left\{ (-R_a \times f_1) + \sqrt{(R_a \cdot f_1)^2 + V_{am}^2 - (R_a^2 \times f_2)} \right\} \quad (11)$$

여기서, $f_1(i_\alpha, i_\beta, \theta_s) = i_\alpha \cos(\theta_s + \frac{\pi}{2}) + i_\beta \sin(\theta_s + \frac{\pi}{2})$,

$$f_2(i_\alpha, i_\beta) = i_\alpha^2 + i_\beta^2, \omega = P_n \omega_g \text{이다.}$$

그림 3에서 운전점 B는 전기자 전류가 정격되고, 유도전압과 전류의 위상차가 거의 180[°]로 운전점이 되기 때문에 저항의 파라미터 변동의 영향을 크게 받는 동작점으로 예상된다. 식 (11)에 미치는 저항 R_a 를 변화시킨 경우의 유도전압 특성을 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 알 수 있듯이 식 (11)에 미치는 저항이 공칭값보다 작은 경우에는 유도전압이 본래의 값보다 작도록 지령 자속이 생성된다. 그 결과, 단자전압이 제한값 V_{am} 이하지만 DTC에 의해 제어가 가능해진다.

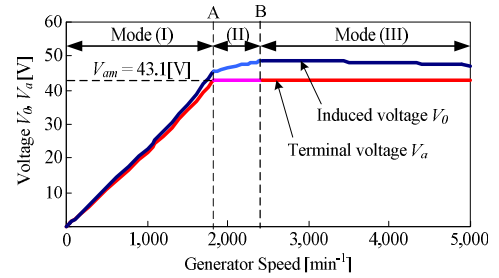


그림 3 발전기 속도에 대한 유도전압과 단자전압의 특성
Fig. 3 Characteristics of induced voltage and terminal voltage

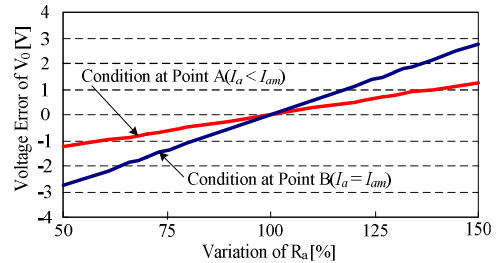


그림 4 파라미터 오차가 유도전압에 미치는 영향
Fig. 4 Influence of parameter variation on induced voltage

풍속이 증가하여 발전기 회전 속도가 상승하고 전압과 전류가 모두 상한값에 도달하면 MPPT 제어는 불가능하기 때문에 전압과 전류의 제한 내에서 토크가 최대가 되도록 제어해야 한다. 하지만 본 논문에서 제안한 제어법은 발전기 매개 변수가 필요하지 않는 것이 특징이다. DTC에서 일반적으로 사용되는 토크 추정식은 식 (3)과 같다. 식 (3)은 자속과 전류 벡터의 외적(外積)에 의한 계산식이며, 본 논문에서는 유효 토크라고 정의한다. 한편, 자속과 전류 벡터의 내적(內積)에 의해 얻어지는 값을 무효 토크 \hat{T}_r 라 정의하고, 추정식을 나타내면 식 (12)와 같다.

$$\hat{T}_r = P_n (\hat{\psi}_\alpha i_\alpha + \hat{\psi}_\beta i_\beta) \quad (12)$$

단순하게 철손을 무시하면 IPMSG의 전력의 관계는 식 (13)으로 나타낼 수 있다.

$$(V_0 I_0)^2 = (T_f \omega_g)^2 + (T_r \omega_g)^2 \quad (13)$$

여기서, V_0 는 유도전압이며, 식 (13)의 좌변은 피상 전력, 우변의 제1 항은 유효 전력, 제 2 항은 무효 전력에 해당된다. 유도전압 및 전기자 쇠교자속 $|\psi_s|$ 의 관계식($V_0 = P_n \omega_g |\psi_s|$)과 식 (13)에서 $I_a = I_{am}$ 이 되는 경우의 최대 토크 T_{max} 는 식 (14)으로 얻을 수 있다.

$$T_{max} = -\sqrt{(P_n |\psi_s| I_{am})^2 - T_r^2} \quad (14)$$

본 논문에서는 토크의 추정에 철손을 고려하고 있기 때문에, 식 (15)로 표시되는 계산식을 이용하여 지령 토크를 얻는다.

$$T^* = -\hat{T}_i - \sqrt{(P_n |\psi_s| I_{am})^2 - T_r^2} \quad (15)$$

또한, 식 (15)에서 얻어지는 지령값을 그림 2의 시스템에 적용할 경우 철손에 의한 토크 오차 A가 상쇄된다. 따라서 Mode (III)에서는 A의 추정은 불필요하고, 이 방식은 DTC의 추정 자속과 검출 전류만으로 실현할 수 있다.

4. 실험결과 및 고찰

본 논문에서는 실제 풍차가 아니라 서보 모터와 제어 장치로 이루어진 풍차 시뮬레이터를 이용하여 제안된 시스템의 발전 특성의 검토하였다. 표 2는 실험 시스템에서 사용된 회로 상수를 나타낸 것이다. IPMSG에서 발전된 3상 교류는 PWM 컨버터를 통해 직류로 변환되며, 발전에 의해 얻어진 전력은 전자 부하에서 모두 소모되기 때문에 DC 링크 전압은 항상 일정하다. DTC 속도 추정 등의 처리는 모두 DSP(Digital Signal Processor)에서 진행되며, 제어주기는 100 [μs]이며, 토크와 자속 지령은 5[ms]마다 업데이트하였다.

표 2 실험 시스템에서 사용된 회로상수

Table 2 Parameters in experimental system

구분	회로정수
최적계수(K_{opt})	$2.64 \times 10^{-5} [\text{Nm}/(\text{rad/s})^2]$
극 쌍수(P_n)	2
자속 결합(ψ_a)	0.108[wb]
d축 인덕턴스(L_d)	8.7[mH]
q축 인덕턴스(L_q)	$28.3 - 0.657 i_q $ [mH]
전기자 저항(R_a)	0.64[Ω]
철손 저항(R_c)	$240 \times 60 / (40 + 260/\omega)$ [Ω]
직류링크전압	61[V]
최대 단자 전압(V_{am})	43.1[V]
최대 전기자 전류(I_{am})	8.66[A]

그림 5는 회전 속도에 대한 전기자 전류와 전력 특성을 나타낸 것이다. 그림 5에서 Mode (II)의 경우에는 전기자 전류 정격이 8.66[A]미만이지만 Mode (III)이 되면 정격값을 유지하도록 제어가 이루어지는 것을 알 수 있다. 기존 제어법의 경우에는 Mode (II)와 Mode (III)의 전환점 부근에서 정격 제

어 할 수 있지만 회전 속도의 증가에 따라 전류가 감소해 버린다. 이것은 근사식을 만들 때 사용한 발전기 파라미터가 반드시 발전중인 매개 변수와 일치한다고는 할 수 없기 때문이다. 한편, 전력의 관계식을 이용한 제안한 제어법의 경우에는 식 (14)에 필요한 자속과 무효토크의 추정값은 발전 중에 추정되므로 파라미터 변동의 영향을 받지 않으며, 정격 제어를 할 수 있다.

Mode (III)에서의 제어 특성은 발전 전력에도 영향을 미친다. 그림 5에 나타난 발전기 기계 입력 P_m 과 컨버터의 직류 출력 전력 P_{dc} 의 특성에서 알 수 있듯이 기존 제어법에서는 발전기 토크가 필요 이상으로 감소하고, 기계 입력과 직류 출력도 발전기 회전수의 상승과 함께 크게 감소한다. 하지만 본 논문에서 제안한 제어법의 경우에는 전류를 정격 제어하여 발전 전력의 저하를 억제 할 수 있다. 그리고 발전기 매개 변수 외에도 근사식 작성에 많은 계산이 필요한 기존의 제어법과 비교하여 DTC로 추정 할 수 있다. 무효 토크와 전력의 관계식을 이용한 제안 제어법은 파라미터 변동의 영향을 받지 않으며, 전압과 전류를 정격으로 유지하면서 발전기 제어가 양호하게 행해진다.

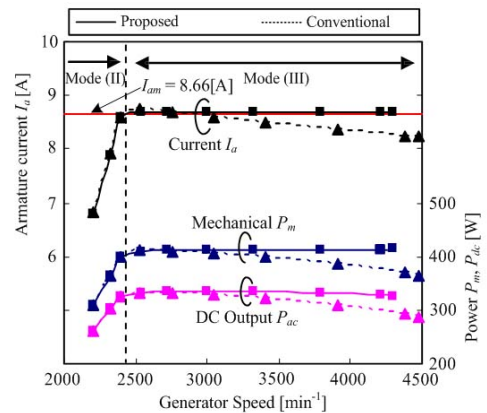


그림 5 전압 제한시(Mode (II), Mode (III))의 정상 특성
Fig. 5 Steady-state operation under constant voltage and current

그림 6은 속도 추정기의 특성으로 풍속이 3[m/s]에서 11[m/s]의 계단식으로 변화 한 경우의 추정 속도와 속도 오차

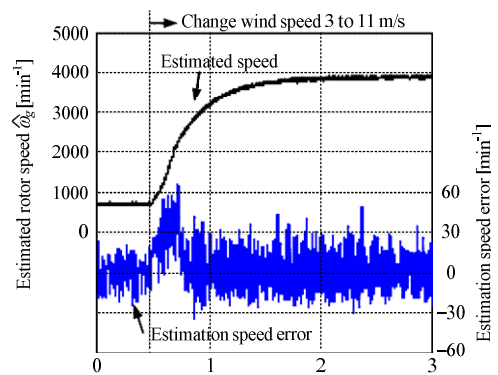


그림 6 속도 추정기의 특성
Fig. 6 Performance of speed estimator

를 나타낸 것이다. 그림 6에서 알 수 있듯이 풍속이 변화 한 직후에는 추정 속도 오차가 약 $60[\text{min}^{-1}]$ 까지 증가하지만, 발전기 회전 속도의 변화가 완만하게 되면 속도 오차도 감소하고, 약 $30[\text{min}^{-1}]$ 의 속도 변동이 발생하고 있지만 실제 회전 속도에 거의 일치한다. 결과적으로 발전기 회전 속도를 양호하게 추정 할 수 있기 때문에 DTC에 의해 IPMSG 속도와 위치 센서리스 구동이 가능해진다.

그림 7~그림 11는 제안한 시스템의 풍속을 $7[\text{m/s}]$ 에서 $11[\text{m/s}]$ 로 변화할 때의 각 특성을 나타낸 것이다. 먼저 그림 7는 제안한 시스템의 풍속을 $7[\text{m/s}]$ 에서 $11[\text{m/s}]$ 로 변화할 때의 풍속과 발전기 회전수의 추정값을 나타낸 것이며, 그림 8는 제안한 시스템의 발전기 속도의 추정값과 오차를 나타낸 것이다. 두 그림에서 발전기 회전 속도의 추정은 양호하게 이루어지고 있음을 확인하였다.

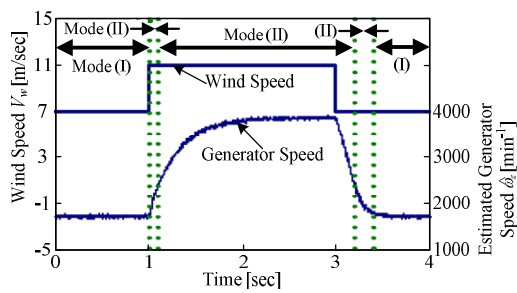


그림 7 제안한 시스템의 풍속을 변화할 때의 풍속과 발전기 회전수의 추정값

Fig. 7 The estimated value of the number of revolutions of the wind generator and when the wind speed changes of the proposed system

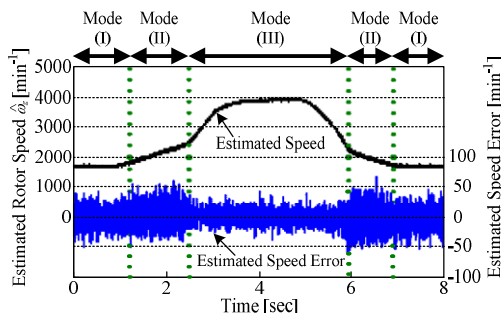


그림 8 제안한 시스템의 발전기 속도의 추정값과 오차

Fig. 8 The estimated value of the generator and error rate of the proposed system

그림 9는 제안한 시스템의 토크 및 전기자 쇄교자속 진폭의 추정값을 나타낸 것이다.

그림 9에서 알 수 있듯이 Mode (I)과 Mode (II)의 영역에서 식 (6)의 관계에 따라 발전기 토크를 제어하는 회전 속도의 상승에 따라 토크도 증가하며, Mode (III)영역에서는 전압과 전류를 제한하면 발전기 토크도 제한된다. 그리고 전기자 쇄교자속은 회전 속도가 낮은 Mode (I) 영역에서 식 (8)에 따라 제어되며, 회전 속도가 상승하여 단자 전압이 한계에 도달하는 Mode (II)와 Mode (III)에서 식 (11)를 이용하여 약화 자속 제어가 이루어진다. 따라서 회전 속도의 증

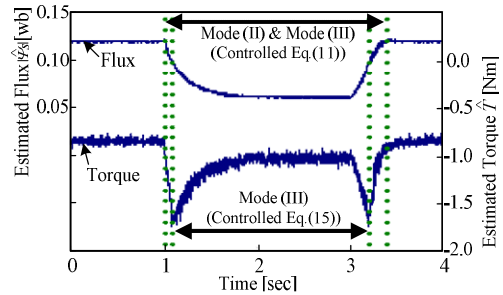


그림 9 제안한 시스템의 토크와 전기자 쇄교 자속 진폭의 추정값

Fig. 9 The estimated value of the proposed system, the torque and the armature flux linkage amplitude

가에 따라 전기자 쇄교자속을 감소시키면 단자 전압 V_{am} 은 일정한 값으로 유지된다.

그림 10은 전기자 전류의 특성을 나타낸 것이다. 그림 10에서 알 수 있듯이 Mode (III)의 영역에서는 식 (15)를 이용하여 발전기 토크를 제어한 결과, 전류 제한값인 $8.66[\text{A}]$ 부근에서 제어된다. 그러나 시간 4초 부근에서 전류 진폭의 평균값이 제한값보다 이하로 떨어지는 현상이 발생한다. 이는 식 (15)과 식을 만들 때 이용한 발전기 파라미터와 발전 중인 파라미터가 반드시 일치하지 않기 때문에 전류 진폭을 $8.66[\text{A}]$ 의 일정한 값으로 유지할 수 없으므로 전류 진폭을 일정하게 유지하기 위해서 전류 진폭의 정보를 이용하여 토크 제한값을 조정해야만 한다.

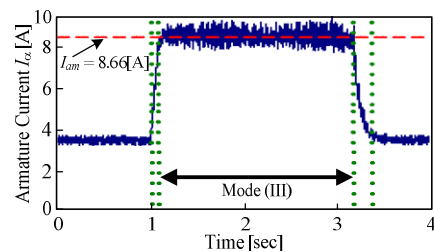


그림 10 제안한 시스템의 전기자 전류의 특성

Fig. 10 Armature current characteristics of the proposed system

그림 11은 제안한 시스템의 DC 출력전력을 나타낸 것이다. 그림 11에서 알 수 있듯이 Mode (I)과 Mode (II)의

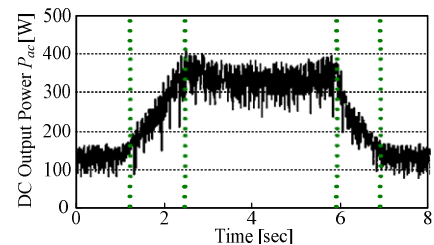


그림 11 제안한 시스템의 DC 출력전력

Fig. 11 DC output power of proposed system

범위에서는 풍속의 상승과 함께 얻을 수 있는 출력 전력도 증가하며, Mode (III)의 범위에서는 전압과 전류를 제한하기 위해서 발전 전력을 증가시킬 수 없으므로 출력 전력이 거의 일정하다.

마지막으로, 제안된 시스템이 최대 출력화 제어가 가능한지를 확인하기 위해서는 발전기의 기계 입력에 주목해야 한다. 그림 12은 발전기의 기계 입력(풍차의 기계 출력)궤적과 풍차의 특성 곡선을 나타낸 것이다.

그림 12에서 알 수 있듯이 발전이 시작될 때의 풍속 7[m/s]의 최대 출력점은 점 A이다. 풍속의 상승으로 최대 출력점도 변화하지만, 식 (6)에 나타난 관계식으로 발전기 토크를 제어함으로써 운전 포인트는 최대 출력 곡선 위를 이동한다. 풍속이 10[m/s]에 도달하면(그림 12의 동작점 B), 전압과 전류 제한을 위한 MPPT 제어를 하지 않게 되지만, 전압과 전류 제한의 범위 내에서 최대 토크가 되도록 제어 하면서 동작점 C까지 이동한다. 동작점 B-C 사이는 Mode (III)에 대응한다. 또한 동작점 C는 풍속 11[m/s]의 경우에 있어서의 평형점이다. 풍속이 11[m/s]에서 7[m/s]로 떨어질 경우, 동작점은 C-B-A로 이동하고 전류 진폭이 제한 이하가 되면 다시 최대 출력 곡선으로 이동한다. 이상의 결과에서 제안한 시스템이 최대출력화 제어가 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.

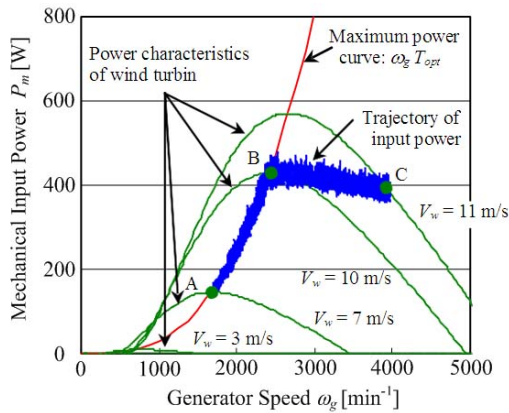


그림 12 발전기의 기계 입력(풍차의 기계 출력)궤적과 풍차의 특성 곡선

Fig. 12 Mechanical input of the generator characteristic curve of the trajectory and windmills

5. 결론

본 논문에서 제안한 IPMSG를 이용한 풍력 발전 시스템은 직접 토크 제어에 의해 발전기 제어 및 속도·위치 센서리스 구동이 가능하다는 것을 실험을 통해 다음과 같은 사항을 확인하였다.

- ① DTC로 추정되는 전기자 쇄교자속에서 발전기의 회전 속도를 추정 할 수 있고, 이 추정 속도를 이용하여 풍속 센서리스 MPPT 제어가 가능하다는 것을 확인하였다.
- ② 단자 전압을 일정하게 하기 위해서 약화 자속 제어에 필요한 전기자 저항의 값이 변동한 경우의 영향을 보여

주었다.

- ③ 자속과 전류의 내적(內積)으로 정의되는 무효 토크를 이용한 정전류 제어를 위한 지령 토크 계산 방법을 제안하고, 그 효과를 실험으로 보여 주었다.
- ④ 풍속이 빨라져 발전기와 컨버터의 정격 전압과 전류가 되는 영역에 있어서도 제한 범위내에서 최대 전력이 되는 발전이 가능하다는 것도 확인하였다.

끝으로 본 논문에서 제안한 제어방법은 발전기의 종류에 따라 매개 변수를 사용하지 않기 때문에 직접 토크 제어인 경우에 유도 발전기 등에도 적용이 가능할 것으로 사료된다.

References

- [1] W. Qiao, L. Qu, and R. G. Harley, "Control of IPM Synchronous Generator for Maximum Wind Power Generation Considering Magnetic Saturation", in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, 2007
- [2] L. Tang, L. Zhong, M. F. Rahman, and Y. Hu, "A Novel Direct Torque Control for Interior Permanent-Magnet Synchronous Machine Drive With Low Ripple in Torque and Flux - A Speed-Sensorless Approach", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol.39, pp.1748-1756, 2003
- [3] Garcia. X.T, Zigmund. B, Terlizzi. A, Pavlanin. R, Salvatore. L, "Comparison Between FOC and DTC strategies for Permanent Magnet". Advances in Electrical and Electronic Engineering 5(1-2), Vol.5, No.1 - 2, 2006
- [4] Kazmierkowski. M. P, Franquelo. L, Rodriguetz. J, Perez. M, Leon. J, "High Performance Motor Drives". IEEE Industrial Electronics Magazine Sept 2011, Vol. 5, no.3, pp.6 - 26, 2011
- [5] Takahashi, Isao Noguchi, Toshihiko, "A New Quick-Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor", IA-22(5), pp.820-827. IEEE Trans. on Industry Applications. Retrieved 13 November 2012
- [6] Jänecke. M, Kremer. R, Steuerwald. G, "Direct Self-Control(DSC), A Novel Method Of Controlling Asynchronous Machines In Traction Applications", Proceedings of the EPE'89, pp.75 - 81, 1989
- [7] Tiitinen. P, Pohjalainen. P, Lahu. J, "The Next Generation Motor Control Method: Direct Torque Control (DTC)". EPE Journal 5(1), pp.14 - 18, 2012
- [8] Nash. J.N, "Direct Torque Control, Induction Motor Vector Control Without an Encoder". IEEE Trans. on Industry Applications 33(2), pp.333 - 341, 1997

저 자 소 개



문 상 필 (文 相 弼)

1997년 부경대 전기공학과 졸업. 1999년 경남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2010년 8월~현재 마산대학교 전기과 조교수. 2009년 7월 IEEE ISIE Bsst Paper Award 수상. 2010년 12월 한국조명전기설비학회 학술상 수상. 현 본 학회 산업전기위원회 편집위원 겸 정회원



허 영 환 (許 英 煥)

1995년 부경대 전기공학과 졸업. 2005년 동아대학교 교육대학원 전기·전자·통신 교육학과 졸업 (석사). 2015년 부경대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 김해시도시개발공사 근무



김 종 석 (金 種 錫)

2000년 경남대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2010년 8월~현재 동부산대학교 전자정보통신과 교수.



박 한 석 (朴 瀚 錫)

1981년 중앙대학교 전기공학과 졸업. 1983년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 한국해양대학교 대학원 졸업(박사). 1986년 3월 ~현재 부경대학교 공과대학 전기공학과 교수. 현 본 학회 정회원