

# 가스 엔진용 1kW급 계통 연계 영구자석형 동기발전기 구동 시스템 설계

이태영, 조영훈  
 건국대학교 전력전자연구소

## Design of Control System for 1kW Grid-connected Permanent Magnet Synchronous Generator

Taeyeong Lee, Younghoon Cho  
 Konkuk Univ. KOPEL

### ABSTRACT

This paper presents design of control system for permanent magnet synchronous generator(PMSG). The gas engine make rotating mechanical energy from gas fuel energy. The rotor of synchronous generator is connected to axis of engine. And it converts the mechanical energy to the electrical energy. The control system of PMSG helps the electrical energy to flow to grid. the single phase pfc rectifier controls the DC link voltage by controlling the current of filter inductor. If the DC link voltage is higher than the voltage reference, the filter current could be controlled to flow to grid. The three phase inverter controls the stator current of generator. The direction of the current is controlled depends on motoring or generating mode. The feasibility of the grid connected PMSG is verified by the experimental results with 1kW prototype.

### 1. 서론

비상 전원에 대한 관심이 증가함에 따라 엔진 발전기에 대한 연구가 활발히 진행되어왔다. 영구 자석형 동기발전기는 타 전동기에 비해 효율이 높고 속도성이 빠른 장점이 있어 소용량 엔진 발전기에 적용하기에 적합하다. 동기 전동기를 제어하기 위해서는 회전자의 위치를 알기 위한 센서가 필요하다. 본 논문에서 다른 위치 센서보다 저렴한 홀센서에 대해 낮은 분해능을 극복하기 위한 알고리즘을 설명한다. 그리고 영구자석형 동기발전기의 구동 시스템 구조와 제어 알고리즘에 대해 설명한다.

### 2. 가스 엔진용 계통 연계 영구자석형 동기발전기 구동 시스템

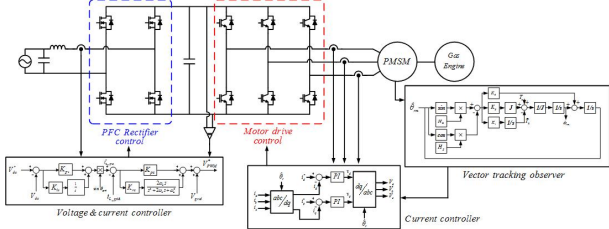


Fig. 1 The topology of control system of PMSG for gas engine

### 2.1 영구자석형 동기발전기 구동기

#### 2.1.1 영구자석형 동기발전기 모델링

영구자석형 동기발전기의 특징으로는 회전자의 자속을 발생시키기 위한 여자 권선이 따로 필요 없어 효율이 높고, 전동기 부피에 비해 출력 토크의 비가 커서 출력밀도가 높은 특징이 있다. 동기 좌표계에서의 영구자석형 동기발전기 전기적 모델링은 식 (1), (2)로 나타낼 수 있다. 여기서  $R_s$ ,  $L_s$ ,  $w_r$ ,  $\phi_f$ 는 각각 고정자 권선 저항, 고정자 인덕턴스, 전기 각속도, 회전자 자속을 의미한다.  $p = d/dt$ 를 의미하고  $P_n$ 은 극 쌍수를 의미한다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -w_r L_s \\ w_r L_s & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \phi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_e = P_n \phi_f i_q \quad (2)$$

#### 2.1.2 벡터 트래킹 옵저버

영구자석형 동기발전기의 순시토크를 제어하기 위해서 회전자의 위치 정보가 필요하다. 이를 알기 위해 사용되는 위치 센서에는 엔코더와 레졸버, 홀센서가 있다. 성능 측면에서는 엔코더와 레졸버가 우수하지만 가격이 비싼 단점이 있다. 이 보다 가격이 싸지만 홀센서는 분해능이 낮은 단점이 있다. 그림 2와 같은 홀센서에서 출력되는 전압 신호를 이용하여 60도의 분해능으로 회전자의 위치를 측정할 수 있다.

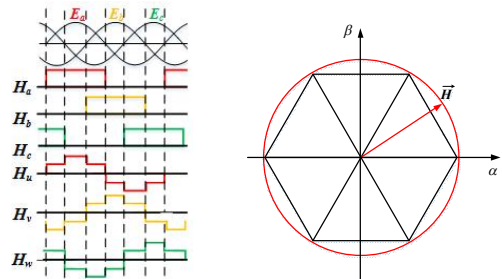


Fig. 2 The output voltage and the position vector of hall effect sensor in stationary reference frame

60도 마다 절대각을 알 수 있기 때문에 분해능이 낮아 순시토크 제어를 하기에는 좋은 성능을 기대할 수 없다. 이러한 단점을 보완하기 위해 벡터 트래킹 옵저버를 이용하여 회전자 위치를 추종할 수 있다.

$$\begin{aligned} \|\hat{\theta} \times \vec{H}\| &= -\sin H \cos \hat{\theta} + \cos H \sin \hat{\theta} \\ &= \sin(\hat{\theta} - H) \simeq -\theta_{err} \end{aligned} \quad (3)$$

벡터 트래킹 옵저버로 추종하는 각  $\hat{\theta}$ 와 홀센서 출력 각  $H$ 와의 차이가 아주 작다면, 두 벡터의 외적은 두 벡터의 각 차이로 근사화할 수 있다. 식 (3)을 이용하여 구한 각 오차  $\theta_{err}$ 를 그림 3과 같이 관측기에 적용함으로써 순시적인 회전자 위치를 추종할 수 있다.<sup>[1]</sup>

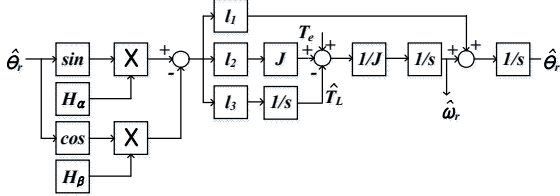


Fig. 3 Block diagram of vector tracking observer

### 2.1.3 전력 제어 알고리즘

가스 엔진용 동기발전기의 순시적인 유효전력 제어를 위해서는 발전되고 있는 유효 전력을 계산하는 알고리즘이 필요하다. 식 (4)와 같이 계통 전압  $v_a$ 와 계통 전류  $i_a$ 의 값을 고정좌표계에서  $\alpha$ 축으로 놓고, 전역 통과 필터를 이용하여 구한 위상이 90도 차이 나는 전압, 전류를 고정좌표계에  $\beta$ 축으로 나타낼 수 있다. 고정좌표계에서의 전압, 전류 정보  $v_\alpha, i_\alpha, v_\beta, i_\beta$ 를 이용하여 식 (5)로 유효전력  $P$ 를 구할 수 있다.<sup>[2]</sup>

$$v_\alpha = v_a, \quad v_\beta = \frac{s-w}{s+w} v_a$$

$$i_\alpha = i_a, \quad i_\beta = \frac{s-w}{s+w} i_a \quad (4)$$

$$P = \frac{1}{2}(v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) \quad (5)$$

그림 4와 같이 유효전력 제어기에는 비례적분 제어기를 사용하였고, 제어기의 출력은 3상 인버터의 q축 지령값으로 토크 제어를 수행한다.

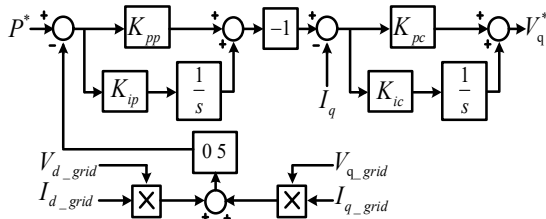


Fig. 4 Block diagram of power control algorithm

### 3. 실험 결과

표 1 PMSG 변수 값

Table 1 Parameter values of PMSG

변수	값	변수	값
$R_s$	0.2977 [ $\Omega$ ]	$f_{sw}$	10 [kHz]
$L_s$	3.1113 [mH]	$P_{rated}$	1000 [W]
$P_n$	10	$w_{rpm}$	1950 [rpm]
$V_{dc}$	400 [V]		

앞 절에 설명한 영구자석형 동기 전동기 구동 알고리즘의 동작을 확인하기 위하여 표 (1)과 같은 사양의 동기전동기를 이용하여 실험을 진행하였다. 그림 5와 같이 실험세트를 꾸며

실험을 진행하였고, 그림 6에서는 벡터 트래킹 옵저버로 각 추정 알고리즘의 동작을 확인하였다. 역기전력과 홀센서의 물리적인 위치 차이로 차이 나는 위상은 옵셋을 추가하여 해결하였다. 그림 7은 1950rpm 정속 조건에서 q축 전류제어를 통해 1kW 유효전력 발전 실험의 파형이다.



Fig. 5 The control system of PMSG for gas engine

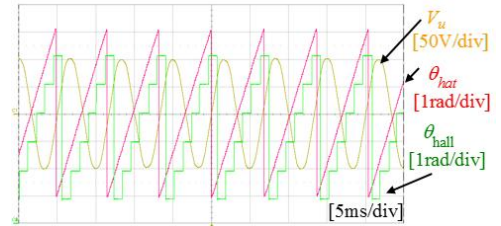


Fig. 6 The waveforms of vector tracking observer in 1000rpm

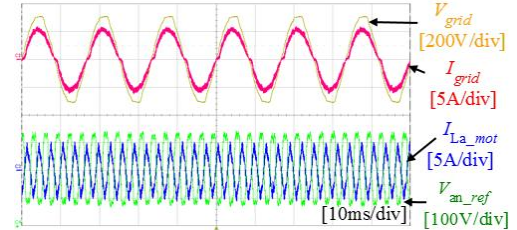


Fig. 7 The waveforms of 1kW generating test in 1950rpm constant speed

### 4. 결과

본 논문에서는 가스 엔진용 계통 연계 영구자석형 동기발전기의 구동 시스템에 대해 연구하였고, 1kW급 시제품을 제작하여 실험을 진행하였다. 홀센서의 낮은 분해능을 벡터 트래킹 옵저버를 이용하여 성능 향상을 도모하였고, 순시전력 제어를 위해 전력 계산 알고리즘을 적용하였다.

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 지원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20164030201100)

### 참고 문헌

- [1] Z. M. Dalala, Younhoon Cho and Jih Sheng Lai, "Enhanced vector tracking observer for rotor position estimation for PMSM drives with low resolution Hall Effect position sensors," 2013 International Electric Machines & Drives Conference, Chicago, IL, 2013, pp. 484-491.
- [2] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA 20, no. 3, pp. 625-630, May 1984.