

# 소용량 직류단 커패시터를 갖는 인버터로 구동되는 매입형 영구자석 동기기의 속응성 향상 기법

손호표, 박영수, 이교범  
아주대학교

## Fast Dynamic Control for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor of Small DC-Link Capacitor Based Inverter with P-Q Control

Ho Pyo Sohn, Yeongsu Bak, Kyo Beum Lee  
Ajou University

### ABSTRACT

본 논문에서는 소용량 직류단 커패시터를 갖는 인버터로 구동되는 매입형 영구자석 동기기의 속응성 향상을 위한 제어 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 매입형 영구자석 동기기에서 요구되는 지령 전력을 통해 인버터 동작을 위한 지령 전압을 결정한다. 제안하는 제어 기법을 통해 매입형 영구자석 동기기의 속응성을 향상시킬 수 있다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법의 타당성을 검증한다.

### 1. 서론

3상 다이오드 정류기를 이용한 AC DC AC 전력 변환 장치는 일반적으로 출력 단의 부하에 안정적인 전력을 공급하기 위해 대용량 직류단 전해 커패시터를 사용한다<sup>[1]</sup>. 전해 커패시터는 수명이 짧고, 효율이 낮으므로 시스템의 신뢰성을 저하시킨다. 최근에는 대용량의 전해 커패시터를 대체하여 소용량의 필름 커패시터를 사용하는 연구가 진행되고 있다. 하지만, 소용량 필름 커패시터를 갖는 인버터의 직류단 전압은 맥동하며, 불안정한 직류단 전압은 출력단의 제어에 영향을 미친다. 최근에는 소용량 직류단 커패시터를 갖는 인버터에 보조 회로를 추가하여 직류단 전압을 안정화하는 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[2]</sup>.

본 논문에서는 보조 회로가 추가된 소용량 직류단 커패시터를 갖는 인버터로 구동되는 매입형 영구자석 동기기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)의 속응성 향상을 위한 P-Q 제어 기법을 제안한다. P-Q 제어는 IPMSM에서 요구되는 지령 전력을 통해 직접 지령 전압을 결정한다. 따라서 IPMSM의 속응성을 향상시킬 수 있으며, 일반적인 비례 적분 제어기와 달리 이득 선정 과정이 필요하지 않은 장점을 갖는다. 제안하는 기법의 타당성은 PSIM을 이용한 시뮬레이션 결과를 통해 검증하였다.

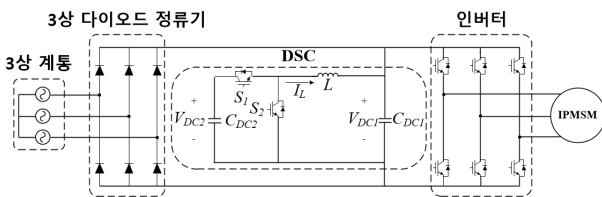


그림 1 DSC를 갖는 소용량 직류단 커패시터 시스템  
Fig. 1 Small capacitor system with DSC

### 2. 소용량 직류단 커패시터를 갖는 인버터를 이용한 전동기 구동 시스템

그림 1은 소용량 직류단 커패시터를 갖는 인버터를 이용한 전동기 구동 시스템의 회로도를 나타낸다. 시스템의 입력단과 출력단은 각각 3상 계통 및 IPMSM이다. 직류단 커패시터는 계통으로부터 3상 다이오드 정류기를 통해 공급되는 전력과 부하에서 요구되는 전력의 차이를 순시적으로 보상해주는 역할을 한다. 하지만, 소용량 직류단 커패시터를 사용하는 경우에는 입출력 전력의 차이를 충분히 보상해주지 못하며, 부하를 안정적으로 제어할 수 없다. 또한, 직류단 전압이 맥동하고, 시스템의 입력 전류에 왜곡이 발생한다. 본 논문에서는 직류단 전압의 안정화 및 입력 전류의 품질 향상을 위해 직류단 보조 회로(DC link Shunt Compensator, DSC)를 추가한 구조를 사용한다<sup>[3]</sup>. DSC는 부스트 컨버터로 구성되어 있으며, 소용량 직류단 커패시터와 DSC 커패시터의 충전 및 방전을 통해 맥동하는 직류단 전압을 안정화시킨다.

### 3. 속응성 향상 기법

#### 3.1 지령 전력

IPMSM 구동을 위한 지령 전력은 식 (1)과 같다. 유효 지령 전력은 지령 토크 및 각속도, 극수를 통해 계산된다. 유효 전력은 IPMSM의 기계적 출력을 나타내며, 무효 전력은 IPMSM의 구동에 기여하지 않으므로 지령 무효 전력은 0으로 설정한다.

$$P^* = \frac{T_e^* \omega_r^*}{pole/2}, \quad Q^* = 0 \quad (1)$$

#### 3.2 지령 전압

유효 전력 및 무효 전력은 식 (2)와 같으며, 회전 좌표계 d-q축 전압 및 전류를 통해 계산된다.

$$\begin{aligned} P &= 1.5 \operatorname{Re} [V_{dq}^T \overline{I_{dq}^*}] = 1.5 (V_d^T I_d^* + V_q^T I_q^*) \\ Q &= 1.5 \operatorname{Im} [V_{dq}^T \overline{I_{dq}^*}] = 1.5 (V_q^T I_d^* - V_d^T I_q^*) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)를 회전 좌표계 d-q축 전류에 대해 전개하고 P와 Q에  $P^*$  및  $Q^*$ 를 대입하여, 식 (3)과 같이 회전 좌표계 d-q축 지령 전류를 계산할 수 있다.

$$I_d^{r*} = \frac{2(V_d^r P^* + V_q^r Q^*)}{3((V_d^r)^2 + (V_q^r)^2)} \quad (3)$$

$$I_q^{r*} = \frac{2(I_q^r P^* - V_d^r Q^*)}{3((V_d^r)^2 + (V_q^r)^2)}$$

식 (4)는 IPMSM의 전압 방정식을 이용한 d q축 지령 전압을 나타낸다. 식 (3)에서 계산된 회전 좌표계 d q축 전류를 식 (4)에 대입하여, 인버터 동작을 위한 지령 전압을 계산한다.

$$V_d^{r*} = R_s I_d^{r*} + L_d \frac{I_d^{r*} - I_d^r}{T_s} - \omega_r^* L_q I_q^{r*} \quad (4)$$

$$V_q^{r*} = R_s I_q^{r*} + L_q \frac{I_q^{r*} - I_q^r}{T_s} - \omega_r^* L_d I_d^{r*} + \omega_r^* \phi_f$$

계산된 지령 전압을 이용하여 인버터를 동작시키며, IPMSM 구동을 위한 전력을 제어한다. 제안하는 P Q 제어 기법을 통해 IPMSM의 속응성을 향상시킬 수 있다. 또한, 일반적인 비례 적분 제어기와 달리, 제어기의 이득 선정 과정이 필요하지 않기 때문에 간단한 제어가 가능하다.

#### 4. 시뮬레이션

제안하는 기법의 타당성을 검증하기 위해 PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 1에서 3상 계통의 상전압은 220 V<sub>rms</sub>/60 Hz이며, 표 1은 시뮬레이션에서 사용된 IPMSM의 파라미터를 나타낸다. 그림 2는 제어 방법에 따른 IPMSM의 속응성 비교 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 2의 (a)와 (b)는 각각 일반적인 비례 적분 제어기 및 제안하는 P Q 제어기를 사용한 경우의 d q축 전류를 나타낸다. 비례 적분 제어기를 사용한 경우의 정상상태 도달 시간은 2.0 ms이고, P Q 제어기를 사용한 경우는 0.8 ms이다. 제안하는 P Q 제어기를 통해 IPMSM의 속응성이 향상되는 것을 확인할 수 있다.

표 1 IPMSM 파라미터  
Table 1 IPMSM Parameters

파라미터	값	파라미터	값
정격출력	11 kW	정격속도	1450 rpm
정격토크	72 Nm	정격전류	38 A
극수	6	고정자 저항	0.099 Ω
d 축 인덕턴스	4.070 mH	q 축 인덕턴스	4.650 mH
쇄교 자속	0.5818 Wb	J	0.02 kgm <sup>2</sup>

#### 5. 결론

본 논문에서는 보조 회로가 추가된 소용량 직류단 커패시터를 갖는 인버터로 구동되는 IPMSM의 속응성 향상을 위한 제어 기법을 제안하였다. P Q 제어는 출력단의 지령 유효 및 무효 전력을 통해 지령 전압을 계산한다. 계산된 지령 전압을 통해 IPMSM을 구동하며, 속응성을 향상시킬 수 있다. 또한, 일반적인 비례 적분 제어기와 달리 이득 선정 과정이 필요없다. 제안하는 기법의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

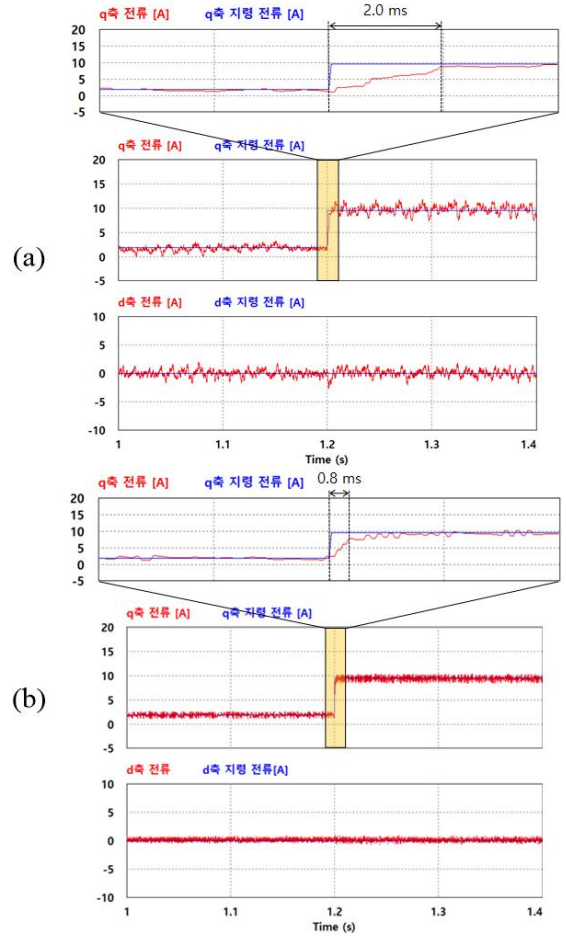


그림 2 제어 방법에 따른 IPMSM 속응성 비교 시뮬레이션 결과

- (a) 일반적인 비례-적분 제어기
- (b) 제안하는 P-Q 제어기

Fig. 2 Simulation results for response comparison depending on control methods  
(a) Proportional-integral controller  
(b) Proposed P-Q controller

#### 참고 문헌

- [1] J. S. Lee, K. B. Lee, and F. Blaabjerg, "Open Switch Fault Detection Method of a Back to Back Converter Using NPC Topology for Wind Turbine Systems," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 51, No. 1, pp. 325-335, Jan./Feb. 2015.
- [2] H. Shin, Y. H. Chae, Y. Son, and J. I. Ha, "Single Phase Grid Connected Motor Drive System with DC Link Shunt Compensator and Small DC Link Capacitor," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 32, No. 2, pp. 1268-1278, Feb. 2017.
- [3] H. Shin, Y. Son, and J. I. Ha, "Grid Current Shaping Method with DC Link Shunt Compensator for Three Phase Diode Rectifier Fed Motor Drive System," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 32, No. 2, pp. 1279-1288, Feb. 2017.