

단상 입력과 소용량 직류단 캐패시터를 가지는 3상 교류 전동기 구동용 인버터의 제어

정현삼*, 지승준*, 설승기*, 박영재**, 이동환**

*서울대학교 전기·컴퓨터 공학부, **삼성전자 DMC 연구소 책임연구원

Control of Three Phase Inverter for AC Motor Drive with Small DC-Link Capacitor Fed by Single Phase AC Source

Hyun-Sam Jung*, Seung-Jun Chee*, Seung-Ki Sul*, Young-Jae Park**, and Dong-Hwan Lee**

* School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University,

**SAMSUNG ELECTONICS DMC R&D Centor

Abstract

본 논문에서는 단상입력을 가지고, 직류단에 소형 캐패시터를 사용하는 인버터를 사용해 3상 전동기 가변속 구동을 한다. 이때 주기적으로 크게 맥동하는 직류단 전압 조건에서 어떻게 전동기를 제어하는가에 대해 언급한다. 평균 전압 제한원을 전류 영역에 표현하고, 새로운 약자속 영역을 정의한다. 이를 바탕으로 전류 지령을 생성하는 제어기를 구성하여 전동기를 제어할 수 있는 기법을 제안하고 이를 실험을 통해 검증한다. 이를 통해 입력 전류의 고조파를 줄여 역률도 개선할 수 있다.

1. 서론

단상 입력을 가지는 3상 교류 전동기 구동용 인버터의 기본 구조는 그림 1과 같다. 그림 1에서 입력과 출력의 순시적 전력의 차이를 보상하기 위해서 큰 용량의 전해 캐패시터를 사용하게 된다. 하지만 직류단 전압이 캐패시터에 의해서 직류단 전압을 평활화 되면 입력 전류의 왜곡이 심해진다. 만약 전동기 입력 순시 전력을 전원 입력 순시 전력과 같게 만들어 주면 직류단 캐패시터의 용량을 줄일 수 있다. 그리고 작은 용량의 캐패시터가 인버터의 직류단에 사용하면 역률 보상 회로, 초기충전 회로가 필요 없고 필터의 크기를 줄일 수 있다. 또 전해 캐패시터를 필름 캐패시터로 교체하게 되면, 시스템의 신뢰성이 증대되고, 제품의 원가 절감 및 부피 감소의 효과가 있다.

하지만 캐패시터의 감소로 인한 주기적인 직류단 전압의 변동으로 인해서 전동기 제어의 어려움이 존재한다. 이에 대해서 기존 논문들은 q 축 전류 지령만을 수정하고, d축 전류 지령은 순시적인 동작 조건과 전동기의 전압 방정식을 이용하여 지령을 만든다. 이러한 제어 방식은 전동기 제어에 필요한 약자속을 위한 최적 d 축 전류 지령을 찾지 못한다. 따라서 본 논문에서는 직류단 전압의 주기적인 변동 특성을 고려한 '평균 전압 제한원'의 개념을 도입한다. 이를 바탕으로 d, q축 전류 지령을 생성하는 전류 지령 생성부를 제안하고, 시뮬레이션과 실험을 통해 검증한다.

2. 평균 전압 제한원

캐패시터의 용량이 큰 전동기 구동 시스템에서는 직류단 전압의 변동을 무시할 만하기 때문에 전동기의 속도에 의해서만 전압 제한원이 변동한다. 하지만 소용량의 캐패시터를 직류단에 사용하는 이 시스템은 고정된 속도에서도 직류단 전압이 두 배의 계통 주파수로 크게 변동하게 된다. 따라서 새로운 '평균전압 제한원'을 정의하고, 이를 바탕으로 제어기를 구성하고자 한다. 평균 전압 제한원이란, 주기적으로 변동하는 전압 제한원을 전원 주파수의 반주기 동안 평균하여 d, q 축 전류 평면에 표현한 것이다. 이는 식 (1)을 이용하여 구할 수 있

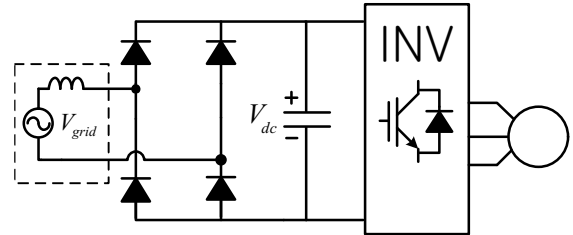


그림 1. 단상 입력을 가지는 전동기 구동용 3상 인버터

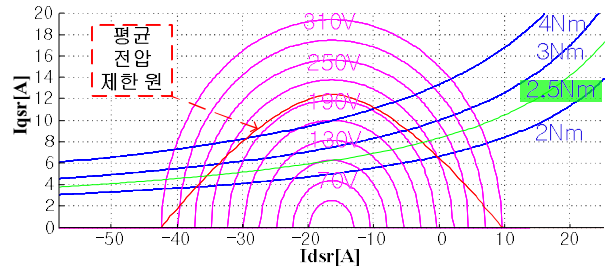


그림 2. 직류단 변동과 평균 전압 제한 원

다.

$$i_{qs-av}^r = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{1}{L_q} \sqrt{\frac{V_{dc}(\theta)^2}{3\omega_r^2} - (\lambda_{pm} + L_d i_{ds-av}^r)^2} d\theta \quad (1)$$

식 (1)을 바탕으로 5400r/min에서 평균 전압 제한원을 그리면 그림 2와 같이 전류 평면에 표현된다. 예를 들면 평균 전압 제한원에 따르면 5400r/min의 조건에서 2.5Nm의 토크를 내기 위해서는 d축 전류를 -2.5A를 유지해야 함을 알 수 있다.

3. D 축 전류 지령 생성부

식 (1)을 전압에 관한 식으로 다시 표현하면 식 (2)와 같이 주어진다. 전압 경계값 ($V_{qs}^r - boundary$)은 어드미턴스 단위의 이득 (K_z)을 곱해서 등가의 전류 경계값 ($I_{qs}^r - boundary$)으로 변환 할 수 있다.

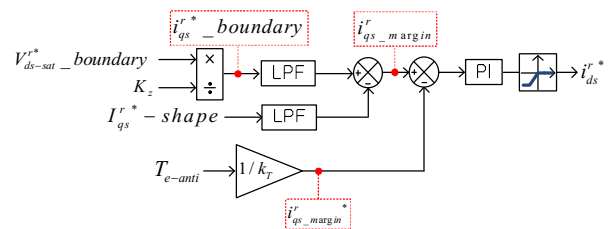


그림 3. D축 전류 지령 생성 블록도

$$V_{ds}^{r*} \text{_boundary} = (\sqrt{V_{dc}^2/3 - (V_{qs-sat}^{r*})^2})$$

(2)

K_z 의 값은 이상적인 경우 $\omega_r L_q$ 의 값을 사용하면 되지만, 일반적으로 q축 인덕턴스의 경우 운전 조건에 따라서 크게 변동하므로 정확한 값을 알 수 없다. 따라서 이 값을 d축 전압 방정식을 통해서 추정하여 사용한다. d축 전압 방정식은 식 (3)과 같고, 이 식의 직류 성분만을 신호처리를 통해서 얻으면 운전 조건에서 $\omega_r L_q$ 의 값을 알 수 있다.

$$V_{ds}^r = R_s i_{ds}^r + L_d \frac{di_{ds}^r}{dt} - \omega_r L_q i_{qs}^r$$

(3)

그리고 속도 제어기의 출력에 있는 토크의 안티 와인드업(T_{e-anti})의 항은 토크 상수로 나누어서 등가 전류로 변환하여 $i_{qs-margin}^r$ 의 지령을 생성한다. 이 값은 q축 전류 밀도가 부족한 경우 d축을 음의 방향으로 증가시켜, 전류 밀도를 높게 된다. 또한 정상 상태에서는 q축 전류의 정계값 평균과 q축 전류의 평균을 같도록 d축 지령을 생성하여 최대 효율로 운전할 수 있다.

4. Q축 전류 지령 생성부

역률이 1이 되기 위해서는 입력 전력이 $\sin^2 \theta_{grid}$ 의 형태가 되어야 한다. 그런데 입력 전력은 전동기 쪽 출력 전력(P_{inv})과 같다. 만약 d축 전류가 일정하고 q축 과도 전압이 무시하면 P_{inv} 는 식 (4)와 같이 정리가 된다.

$$P_{inv} / 1.5 = V_{ds}^{r*} i_{ds}^{r*} + V_{qs}^{r*} i_{qs}^{r*} - (\omega_r L_q i_{ds}^{r*} + \omega_r L_d i_{ds}^{r*} + \omega_r \lambda_{pm}) i_{qs}^{r*} \quad (4)$$

따라서 입력 순시 전력이 출력 순시 전력과 일치하고, 입력 전원의 역률을 1로 제어하기 위해서는 q축 전류 지령이 $\sin^2 \theta_{grid}$ 의 형태가 되어야 함을 알 수 있다^[2].

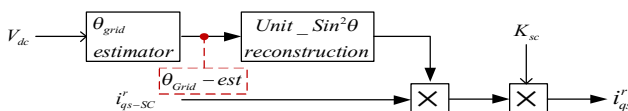


그림 4. Q축 지령 생성부 블록도

본 논문에서는 계통 전압을 측정하지 않고 계통각을 추정하는 방식을 개발하여 사용하였다.

5. 실험 결과

인버터의 직류단 캐패시터는 필름 캐패시터($6.8\mu F$)를 사용하였고, 실험은 에어컨의 압축기 부하(그림 5)에서 수행되었다. 제어를 위해 전동기 상 전류와 직류단 전압을 측정하였고, 위치 센서 없는 운전 알고리즘을 적용하였다. 그림 6은 5400 r/min에서 d, q 축 실제 전류가 전류 지령을 잘 추종하고 있음을 보여준다. 부하의 증가에 따라서 q축 전류는 A만큼 증가하고 $2/\pi \times A$ 만큼의 q축 전류를 증가시키기 위해서 d축 전류가 B만큼 음의 방향으로 증가한다. 이는 평균 전압 제한원의 개념과 일치한다. 그림 7은 같은 동작 속도에서 일반 부하(Normal)에서 입력 전류와 그 주파수 분석을 보여준다. 입력 전류는 22차 고조파 까지는 IEC 6100-3-2 class A의 모든 규제를 만족하지만, 그 이상의 고조파는 규제



그림 5. 실험 세트-실외기(압축기 부하)

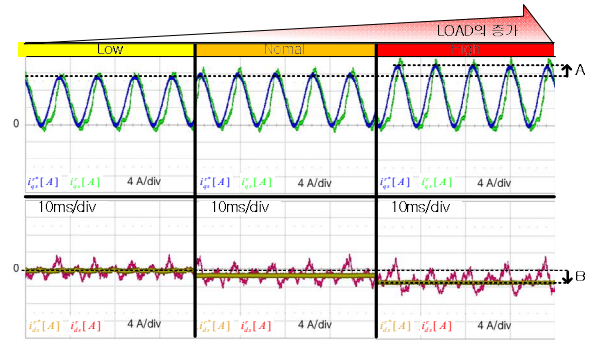


그림 6. D, Q 전류 지령과 전류 파형

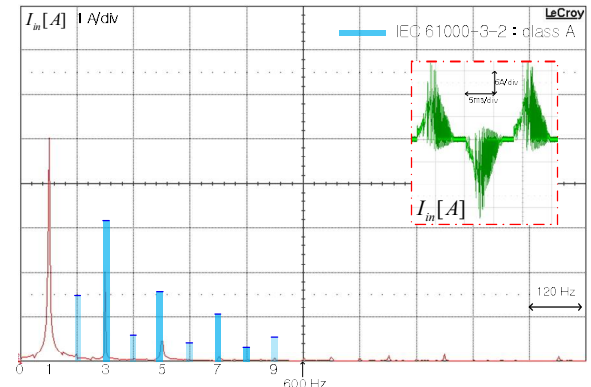


그림 7. 계통 입력 전류 주파수 분석

를 만족하지 못하는 경우가 생기는 것을 확인하였다.

6. 결론 및 향후 연구 계획

본 논문에서는 기존의 단상 입력을 가지는 전동기 구동용 인버터의 캐패시터를 최소로 사용하여, 실제 에어컨의 압축기를 구동하였다. 이를 위해 평균 전압 제한원을 정의하고 이를 바탕으로 약자속을 위한 d축 전류 지령을 생성하였다. 또 역률과 고조파 특성을 고려해서 q축 전류 지령을 변조하였다. 그리고 IEC 61000-3-2 class A와 비교하였다.

[본 논문은 삼성전자 주식회사 DMC 연구소 연구비 지원에 의하여 연구 되었음.]

참고문헌

- [1] S. K. Sul, Control of Electric Machine Drive Systems, John Wiley & Sons, New Jersey, 2011.
- [2] I.Takahashi, and H.Haga, "Power Factor Improvement of Single-Phase Diode Rectifier Circuit by Field-Weakening of Inverter-Driven IPM Motor", Electricla Engineering in Japan, Vol. 152, No. 2, 2005