

초고속 단상 영구자석 전동기의 전력 제어 방법

이옥진, 정부문
삼성전자 생활가전사업부

Power control of high-speed single-phase BLDC motor

Wook-Jin Lee and Bumun Jung
Samsung Electronics Co. / Digital Appliances

ABSTRACT

본 논문에서는 단상 영구자석 전동기를 초고속으로 구동하면서 전력을 제어할 수 있는 방법을 제안한다. 일반적으로 단상 영구자석 전동기의 제어는 전류 센서 및 홀 위치 센서를 기반으로 전류 제어를 통하여 이루어진다. 그러나 초고속 구동에서 위치 측정의 정밀도는 떨어지게 되고, 평균 전류의 측정 또한 어렵게 된다. 또한, 가정용 단상 전원을 사용하는 경우, 전류 고조파 규제를 만족시키기 위하여 PFC회로의 추가가 필요하다. 본 논문에서는 하나의 홀 센서를 사용하여 위치를 추정하고, 전류 센서를 사용하지 않으면서 전류 고조파를 억제할 수 있는 초고속 구동 방법을 제안한다.

1. 서론

단상 영구자석 전동기는 그림 1. 과 같이 영구자석이 삽입된 회전자와 단상의 고정자 권선으로 구성되어 있으며, 회전자의 회전에 따라 고정자 권선에 교번하는 전류를 흘려 토크를 얻는 전동기이다. 단상으로 구성되어 있어 회전에 따른 토크 리플이 삼상에 비하여 매우 큰 단점이 있지만 그 구조가 간단하여 토크 리플이 중요하지 않은 팬 모터를 비롯한 저가의 구동 시스템에 주로 사용되어 왔다. 한편, 구동 전원으로 가정용 전원을 사용하는 경우, 정류 회로 및 직류단 캐패시터가 필요하며, 입력 파워가 일정 수준 이상일 경우 고조파 전류 규제를 만족시키기 위하여 PFC 회로를 사용해야 한다. 그러나 이 회로들로 인하여 시스템의 가격 및 부피, 무게 등이 상승하게 되므로 저가, 소형의 구동 시스템에는 적합하지 않게 된다. 따라서 본 논문에서는 직류단 캐패시터 및 PFC를 삭제하고 최소한의 회로 요소로 동작할 수 있는 구동 방법을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 구동 방법은 스위치 소자 4개를 사용한 Full-bridge 형태의 인버터를 사용하여 전동기의 입력 파워를 직접 제어할 수 있으며, 조절된 파워로 인하여 입력 전류가 정현파에 가깝게 되어 별도의 PFC 회로가 필요치 않게 된다. 또한, 고용량의 직류단 캐패시터가 필요 없어 소용량의 필름 캐패시터만으로 직류단 구성이 가능하여 부피, 수명 및 가격적인 측면에서 기존의 구동 시스템에 비하여 유리하다.

2장에서는 단상 영구자석 전동기의 수학적 모델을 설명하며, 3장에서 고속의 영구자석 전동기의 파워를 제어하는 방법이 제안된다. 4장에서는 모의시험 결과로 제안된 방법에

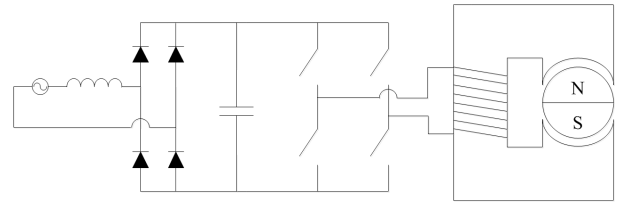


그림 1 단상 영구자석 전동기 구동 시스템
Fig. 1 Single-phase permanent magnet motor drive system

대한 검증을 한다.

2. 단상 BLDC 모터 모델

단상 영구자석 모터의 고정자의 전압 방정식은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$v_a = R_s i_a + \frac{d\lambda}{dt} \quad (1)$$

여기서, v_a , i_a 는 고정자 전압 및 전류, R_s 는 고정자 저항, λ 는 고정자 쇄교 자속이다. 고정자 쇄교 자속은 영구자석에 의한 자속과, 고정자 전류에 의한 자속으로 아래와 같이 분리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \lambda &= \lambda_{PM} + \lambda_a \\ \lambda_{PM} &= K_e \sin\theta_r \\ \lambda_a &= L_s i_a \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 K_e 는 역기전력 상수, L_s 는 고정자 인덕턴스이다. 식 (2)를 (1)에 대입하면, 고정자 전압 방정식은 아래와 같이 된다.

$$v_a = R_s i_a + L_s \frac{di_a}{dt} + K_e \omega_r \cos\theta_r \quad (3)$$

위 전압식 양변에 i_a 를 곱하고, 전기 한주기동안 적분하여 평균 전력을 구하면,

$$\begin{aligned} P_{e,average} &= \frac{1}{T} \int^T v_a i_a dt \\ &= \frac{1}{T} \int^T R_s i_a^2 dt + \frac{1}{T} \int^T K_e \omega_r i_a \cos\theta_r dt \end{aligned} \quad (4)$$

위 파워 식에서 첫 번째 항은 동손을 의미하며, 두 번째 항은 역기전력과 전동기 전류의 위상에 따라 발생하는 토크를 의미한다.

3. 고속 운전에서의 파워 제어

전동기를 구동하면서 PFC 없이 입력 전류의 고조파 성분을 억제하기 위해서 여러 가지 제어 방법에 대한 논문들이 있어 왔다.^[1,2] 이러한 방법들의 기본 아이디어는 인버터로부터 모터로 투입되는 전력의 모양을 정현파의 계급 형태로 유지할 경우 전원측 입력 전류는 정현파에 가까워진다는 것이다. 정현파 전원측 전류를 얻기 위한 순시 전력 지령($P^*(t)$)은 아래와 같이 계산될 수 있다.

$$P^*(t) = P_{average}^* \frac{v_g(t)^2}{V_g^2} - C_{dc} v_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} \quad (5)$$

$$v_g(t) = \sqrt{2} V_g \sin(\omega_g t)$$

여기서 $P_{average}^*$ 는 전동기가 출력해야하는 평균 전력이고, $v_g(t)$ 는 측정을 통해 얻은 순시 계통 전압, V_g 는 계통의 rms 전압, C_{dc} 는 직류단 캐패시턴스, v_{dc} 는 직류단 전압, ω_g 는 계통의 각주파수이다. 위와 같은 전력을 출력하기 위하여 본 논문에서 전류제어 없이 전동기의 임피던스 및 역기전력 상수로부터 open loop로 원하는 출력을 내는 방법을 제안한다.

고속 운전시에 단상 영구자석 전동기는 저항 성분을 무시하고 단순하게 고정자 인덕턴스 및 정현파의 역기전력 전압으로 모델링될 수 있으며, 역기전력 전압을 정확히 선보상하여 인버터에서 전압을 출력할 경우, 전동기의 전류는 0이 된다. 그에 부가하여 역기전력보다 90도 앞서 전압을 인가할 경우 인가 전압과 90도 위상 지연되어 흐르게 된다. 따라서 토크분의 전류만을 흐르게 하여 최소 전류 운전, 즉 역률 1의 운전을 하게 할 경우, 다음과 같이 역기전력 전압(v_{emf})과 역기전력에 90도 앞선 전압을 인가하여야 한다. 역기전력과 동상인 성분의 전압을 v_q , 역기전력보다 90도 앞선 성분의 전압을 v_d 로 정의할 경우, 모터에 인가되는 전압을 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$\mathbf{v}_a = v_q + jv_d \quad (6)$$

여기서 역기전력 v_{emf} 는 전동기 파라미터와 회전각으로부터 정확하게 계산 가능하다고 가정한다. 또한 유효 전력 성분으로 토크를 발생시키게 되는 전압 v_d 는 전력 지령과 모터의 인덕턴스 값으로부터 아래와 같이 구해진다.

$$v_d^* = 2P^*(t)L_s P/K_e \quad (7)$$

여기서 P는 전동기의 극수를 의미한다. 또한, 정현파의 입력 전류를 얻기 위하여 직류단 전압의 경우 120Hz 주기로 0으로 떨어지기 때문에 전압이 부족한 경우가 주기적으로 발생하게 된다. 이렇게 직류단 전압이 부족하게 되어 역기전력 전압을 충분히 상쇄하지 못할 경우 역기전력과 동상인 전압 v_q 는 아래와 같이 가용 전압에서 토크분 전압을 뺀 나머지 전압을 모두 인가하는 것으로 한다.

$$v_q^* = \min(\sqrt{v_{dc}^{*2} - v_d^{*2}}, v_{emf}) \quad (8)$$

이렇게 함으로써 가용 전압 내에서 최소의 전류로 원하는 전력을 출력하며 운전이 가능하다.

4. 모의실험 결과

본 논문에서 제안한 파워 제어 방법을 4극, 1100W 단상 영구자석 전동기를 대상으로 모의실험 하였다. 그림 2(a)는 전압이 부족하지 않은 상황에서 전압 및 전류의 위상을 표현한 그림이고, (b)는 전압이 부족한 상황에서의 위상도이다. (a)의 경우 모든 전동기 전류가 역기전력과 동상이 되기 때문에 가장

효율적인 운전을 하는 영역이 된다. 직류단 전압이 주기적으로 감소하면서 전압이 부족하게 되는 상황에서는 그림 (b)와 같이 무효전력분 전류가 전동기에 흐르게 되며, 효율은 떨어지게 되지만 전력 지령은 여전히 만족할 수 있도록 토크 생성분 전압은 출력할 수 있게 된다. 그림 3은 이러한 방식으로 전력을 제어했을 경우, 계통 입력 전류 및 전동기 전류, 직류단 전압을 나타낸 그림이다. 결과와 같이 입력 전류는 정현파 형태로 고조파가 억제되어 있으며, 직류단 전압 또한 주기적으로 0으로 떨어지게 된다. 반면, 모터 전류는 전압이 작아지면서 약간 상승하게 되지만, 직류단 전압이 작을 때는 식 (5)에 의해서 전력 지령 또한 작아지게 되므로 전력 지령을 만족시키는데 문제는 없게 된다.

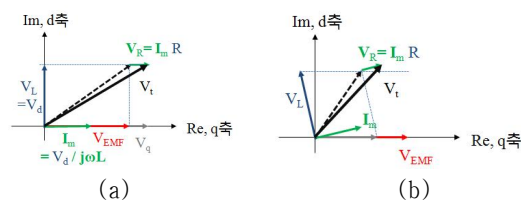


그림 2 모터 전압 및 전류의 위상도

Fig. 2 Phase diagram of motor voltages and current

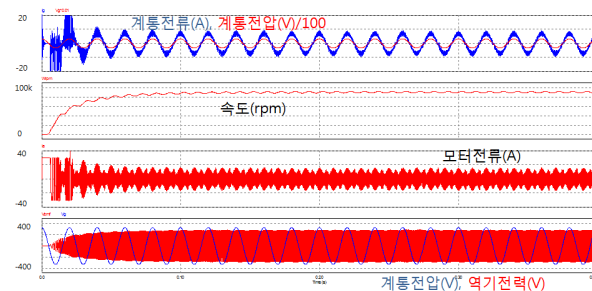


그림 3 컴퓨터 모의실험 결과

Fig. 3 Simulation results

5. 결론

본 논문에서는 단상 영구자석 전동기를 PFC 없이 구동 가능한 파워 제어 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 경우 전류 제어를 통하지 않고, 전동기의 상수로부터 계산된 전압을 직접 인가하는 방법을 사용하여 전류 센서 및 고가의 프로세서가 필요 없으며, 대용량 직류단 캐패시터 또한 삭제가 가능하다. 입력 전류를 정현파로 만들 수 있는 파워 지령을 사용함으로써 PFC 없이 높은 역률을 얻을 수 있기 때문에 저가의 고속 팬 부하용 인버터 제어 방법으로써 장점이 있다.

참고 문헌

[1] K. Inazuma, H. Utsugi, and H. Haga, "High Power Factor Single Phase Diode Rectifier Driven by Repetively Controlled IPM Motor", IEEE Transactions on Industry Electronics, Vol. 60, No. 10, pp. 4427-4437, 2013, Oct.

[2] Wook Jin Lee, Yeongrack Son, and Jung Ik Ha, "Single phase active power filtering method using diode rectifier fed motor drive", ECCE Proceeding, pp. 2461-2465, 2013.