

PMSM의 MTPA 제어에 기반한 센서리스 V/f 운전 기법

김원재, 김상훈
강원대학교 전기전자공학전공

A Sensorless V/f Control Method based on MTPA operation for PMSM

Won Jae Kim, Sang Hoon Kim
Kangwon National University

ABSTRACT

본 논문에서는 PMSM에서 단위 전류당 최대 토크를 발생시키는 MTPA(Maximum Torque Per Ampere)제어에 기반한 센서리스 V/f 운전 기법을 제안한다. 기존의 센서리스 V/f 운전에서는 MTPA 제어가 고려되지 않아 구동 효율이 감소하는데 본 논문에서는 d축 전류를 기반으로 비례적분기 제어를 사용하여 개선하였다. 또한 부하 변동에 대한 우수한 동특성과 안정성을 갖도록 하였다. 250W 블로워용 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)에 대한 실험을 통해 그 효용성을 확인하였다.

1. 서 론

최근 에너지 절감의 필요성이 대두됨에 따라 영구자석형 동기전동기(PMSM)의 수요가 증가하고 있다. PMSM은 높은 전력밀도와 효율, 좋은 동특성 때문에 저용량부터 수백 kW까지의 고용량까지의 여러 응용분야에 적용되고 있다. PMSM의 제어를 위해 고신뢰성을 요구하는 시스템에서는 속도센서를 이용한 백터 제어 기법이 통상적으로 사용되지만 팬, 펌프, 블로워용 모터에서는 구조적인 측면과 비용 절감을 위해 속도센서가 없는 센서리스 기법이 사용된다. PMSM은 부하 변동에 따라 탈조가 발생할 가능성이 있기 때문에 안정화를 위해서는 회전자 속도를 동기주파수로 잘 제어할 필요가 있다. 센서리스 V/f 제어에서는 안정화를 위해 속도정보에 의해 인가주파수를 변동하는 방법^[1] 또는 인가전압의 크기를 변동하는 방법이 있다. 본 논문에서는 인가전압을 변동하는 센서리스 V/f 제어에서 구동 효율증가를 위한 MTPA 제어 방법을 제안한다.

2. MTPA 제어에 기반한 V/f 운전 기법

2.1 MTPA 제어 가능 조건

PMSM의 구동시 MTPA 제어를 위해서는 적절한 d,q축 전류의 분배가 요구되며, 이 전류를 흘려주기 위해 고정자 전압이 적절히 d,q축으로 분배되어야 한다. SPMSM(Surface mounted PMSM)의 MTPA 제어 시 즉, d축 전류는 영이며 고정자 전류를 모두 q축으로 흘려주는 경우에 PMSM의 회전자 좌표계 d,q축 고정자 전압과 전압각, 고정자 전압의 크기는 다음과 같이 표현된다^[2].

$$v_{ds}^r = -\omega_r L_{qs} i_{qs}^r \quad (1)$$

$$v_{qs}^r = R_s i_{qs}^r + \omega_r \lambda_{pm} \quad (2)$$

$$\delta_M = -\tan^{-1}\left(\frac{v_{qr}^r}{v_{dr}^r}\right) \quad (3)$$

$$v_s = \sqrt{(v_{qs}^r)^2 + (v_{ds}^r)^2} \\ = \sqrt{(R_s i_{qs}^r)^2 + (\omega_r \lambda_{pm})^2 + (\omega_r L_{qs} i_{qs}^r)^2 + 2R_s i_{qs}^r \omega_r \lambda_{pm}} \\ \approx \sqrt{(\lambda_{pm})^2 + (L_{qs} i_{qs}^r)^2} \omega_r + R_s i_{qs}^r \quad (4)$$

V/f 제어 시에는 공극자속을 일정하게 유지하기 위해 주어진 운전주파수에서 고정자 전압을 V/f 비에 따라 가변하여 준다. 그러나 이 경우 MTPA 제어에 요구되는 d,q축 전압 즉, 식(1)과 (2)과 같이 분배되지 않기 때문에 MTPA 운전을 보장할 수 없다. 따라서 좋은 구동 효율을 얻기 힘들다.

MTPA 제어에 필요한 고정자 전압 v_s 의 크기는 식(4)를 통해 속도 ω_r 과 부하전류 즉, q축 전류 i_{qs}^r 를 사용하여 구할 수 있다. 그러나 이 경우 요구되는 q축 전류의 크기를 알기 위해서는 정확한 부하 정보가 요구된다. 부하 정보가 없거나 운전 중에 부하가 변동한다면 MTPA 제어를 위해 필요한 크기의 고정자 전압을 인가해줄 수 없다. 이에 본 논문에서는 SPMSM의 센서리스 V/f 운전 시 d축 전류 크기를 통해 얻은 부하정보로부터 적절한 고정자 전압이 인가되도록 함으로써 MTPA 제어가 가능한 V/f 운전 기법을 제안한다. 또한 250W급 차량 블로워 구동용 PMSM에 적용한 실험을 통해 그 효용성을 확인한다.

2.2 제안된 센서리스 V/f 제어 방법

영구자석 동기전동기의 정상상태 출력토크는 식(5)와 같다. 부하조건에 따라 전압각 δ 이 변동되어 출력토크가 변동된다^[2].

$$T_e = \frac{3P}{2} \frac{v_s \lambda_{pm}}{X_s} \sin\delta \quad (5)$$

여기서 P 는 극수, X_s 는 고정자 리액턴스이다.

MTPA 운전을 위해 필요한 전류 제어를 위해서는 식(1)과 (2)의 전압 또는 식(3)에 따른 전압각에 따라 고정자 전압이 분배될 필요가 있지만, V/f 제어를 할 경우에는 인가전압의 크기만이 고려되므로 이러한 전압각으로의 운전을 보장할 수 없다.

따라서 센서리스 V/f 제어를 할 경우 MTPA 운전을 위해 필요한 d, q축 전류로 제대로 분배되지 못하여 효율적인 운전을 기대하기 어렵다.

V/f 운전 시에 특정 속도에서 일정한 고정자 전압이 인가된 경우에 d, q축 전류의 분배 상황은 다음과 같다. 초기에 고정자 전압 v_s 를 제어기가 선정된 q_c 축에 인가한다고 가정한다. 이 경우 부하로 인해 q_c 축 위치는 실제 모터의 q축 위치와 전압각 δ_M 만큼 차이가 발생한다. v_s 의 크기가 적절한 경우에는 MTPA 제어가 되어 d축 전류는 영이 되고, 고정자 전류 i_s 는 부하전류로서 모두 q축에 위치하게 된다. 이 경우 δ_M 은 MTPA 제어에서 요구되는 전압각이 된다. 그러나 v_s 의 크기가 적절하지 못한 경우에는 d, q축 전류가 모두 존재하게 되는데 부하 증가 또는 감소에 따라 고정자 전류 i_s 의 궤적은 그림 1과 같이 된다.

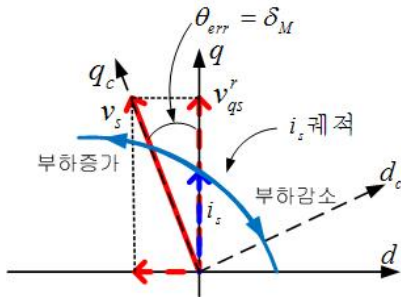


그림 1. MTPA제어 조건에 의한 v_s 를 제어기의 q_c 축으로 인가한 경우 실제 d,q축 전압과 고정자 전류 궤적.

일정한 크기의 v_s 를 제어기 q_c 축에 인가한 상태에서 부하가 감소한 경우에는 식(5)에 따라 전압각이 감소하므로 전압 분배에 따른 결과로 q축 전압 크기는 커지고 d축 전압 크기는 작아지므로 d축 전류는 양의 방향으로 증가한다. 반대로 부하가 증가한 경우에는 전압각이 증가하므로 전압 분배에 따른 결과로 q축 전압은 작아지고 d축 전압은 커지므로 d축 전류는 음의 방향으로 증가한다. 이처럼 부하의 증가, 감소에 따라 전압이 적절치 변동되지 못한 경우 d축 전류는 각각 음, 양의 방향으로 증가한다는 것을 알 수 있는데, 이러한 d축 전류의 정보로부터 부하의 변동정보를 알 수 있어 MTPA 제어를 가능하게 할 수 있다.

부하의 변동정보를 알기 위해서는 실제 d축 전류의 크기를 알아야하는데 이를 위해서는 회전자의 정확한 위치정보가 필요하다. 센서리스 V/f 제어를 할 경우 위치센서가 없기 때문에 회전자의 위치는 인가주파수를 적분하여 얻게 되는데, 이 위치는 부하조건에 따라 실제 회전자 위치와 오차가 발생할 수 있다. 그런데 그림 1에서의 제어기 q_c 축과 실제 q축 사이의 각 δ_M 은 회전자의 위치오차 θ_{err} 가 된다. 따라서 제어기 q_c 축을 δ_M 만큼 이동시켜 실제 d, q축을 구해서 고정자 전류를 좌표 변환하면 실제 d, q축 전류를 구할 수 있다.

MTPA 제어를 위한 제안된 센서리스 V/f 운전 방법이 그림 2에 나타나있다. SPMSM의 MTPA 제어 시에 고정자 전류는 모두 q축 전류가 되며 d축 전류는 영($i_d^{r*} = 0$)이다. 이에 따라 실제 구한 d축 전류가 영이 되도록 비례적분(PI) 제어기를 사용하여 q축 전류지령을 변동시켜주고 이에 따라 식(4)로부터

고정자 전압을 구해 변동시켜준다.

3. 실험 결과

제안된 기법의 효율성 검증을 위해 디지털 제어기를 사용하여 250W, 12V, 25A PMSM이 구동하는 블로워에 대해 실험하였다. 스위칭 주파수 20kHz이며, 샘플링 주기는 200us이다. 속도지령 2400r/min에 대한 동특성을 보이는 결과가 그림 3에 보인다. MTPA 제어에 따른 d, q축 전류로 잘 분배됨을 알 수 있다.

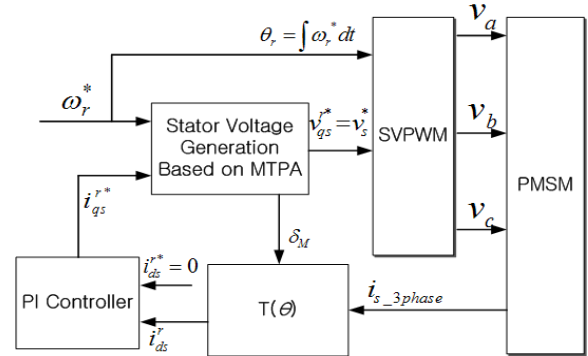


그림 2. 제안된 센서리스 V/f 제어 블록도.

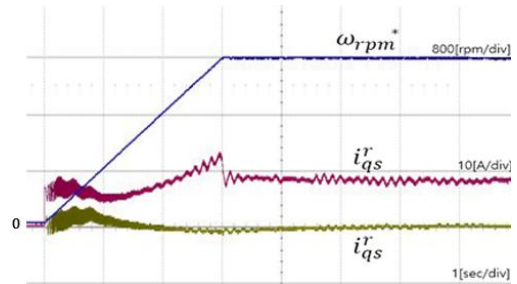


그림 3. 실험 결과.

4. 결 론

본 논문에서는 PMSM의 센서리스 V/f 운전 시에 MTPA 제어 방법을 제시하였다. 제안된 기법은 d축 전류로부터 부하 변동을 확인하고 V/f 비를 가변하여 고정자 전압의 크기를 MTPA 제어 가능 조건으로 적절히 보상하였다. 250W 블로워용 PMSM에 적용하여 제안된 기법의 유효성을 검증하였다. 제안된 기법은 PI 제어기 하나만 사용하여 벡터 제어보다 간단한 알고리즘으로 구현이 가능하고 고신뢰성을 요구하지 않는 블로워용 PMSM에 적용이 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] P. D. Chandana Perera, et al., "A Sensorless, stable V/f control method for permanent magnet synchronous motor drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.* vol. 39, no. 3, pp. 783-791, May/June, 2003.
- [2] Sang Hoon Kim, *Electric Motor Control DC, AC, and BLDC Motors*, Elsevier Inc., Ch.3 & 4, 2017.