

신호 주입을 이용한 매입형 영구자석 동기 전동기의 단위 전류당 최대 토크 제어

김 성 민, 설 승 기

서울대학교 전기·컴퓨터 공학부

Maximum Torque per Ampere Control of IPM Machine Based on Signal Injection

Sungmin Kim, Seung-Ki Sul

School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University

ABSTRACT

매입형 영구자석 동기 전동기는 높은 효율과 빠른 동특성, 넓은 정출력 운전 영역 등의 장점 때문에 다양한 산업 분야에서 각광을 받고 있다. 특히 최대 효율 운전을 위해서 매입형 영구자석 동기기의 단위전류당 최대 토크(Maximum Torque Per Ampere, MTPA) 운전 방법에 대한 많은 연구들이 수행되어져 왔다. 이론적인 MTPA 운전점은 전동기의 제 정수에 의해 결정되는데, 매입형 영구자석 동기 전동기는 온도와 운전 영역에 따라 전동기 제 정수의 변화가 극심하여 정확한 MTPA 운전을 하기 위해서는 전동기의 전 운전 영역에 대한 전동기 제정수를 미리 알고 있어야 한다. 실시간으로 전동기 제 정수를 추정하여 MTPA 운전점을 알아내는 방법도 제안되었으나 대부분 복잡한 비선형 방법이 적용되고 있다.

본 논문에서는 신호 주입 개념을 도입한 새로운 MTPA 운전 방법을 제안한다. 전류에 높은 주파수의 신호를 주입하여 그 주입된 신호에 의한 반응을 확인함으로써 MTPA 운전점을 판별하게 된다. 이 방법은 전동기 제 정수 변동에 강인하며, 간단한 신호처리 과정만으로 MTPA 운전을 할 수 있다.

둘째, 전동기 제 정수를 이용하여 MTPA 운전점을 계산하는 방법이다. 이론적으로 MTPA 운전점은 전동기 제 정수를 이용하여 계산이 가능하지만, IPMM의 제 정수는 운전 조건과 온도 등에 의한 변화가 심하기 때문에, 계산식을 이용해 정확한 MTPA 운전점을 찾는 것은 어려운 일이다. 이러한 한계를 보완하기 위하여 전동기 제 정수를 추정하는 여러 가지 연구가 발표되었다.^[3] 그러나 이러한 방법은 복잡한 실시간 추정 이론을 적용해야 하며, 고정자 저항이나 영구자석의 쇄교 자속 오차에 대응할 수 없다.

셋째, 특정 토크에 대해서 최소 전류 운전점을 찾아가는 방법^[4]으로, 일정 토크 발생 구간에서 일정 패턴으로 전류 운전점을 변화시키며 최소 전류, 혹은 최소 입력 전력을 찾는 방법이다. 이러한 방법은 부하나 운전 속도가 변하지 않는 상황에서 유효하며, 추적 시간이 길다는 단점이 있다.

본 논문에서는 IPMM의 입력 전류에 고주파 신호를 주입하여 MTPA 운전점을 찾는 새로운 방법을 제안한다. MTPA 운전점에서는 전류 지령각의 변화에 대한 토크의 변화가 없다는 특징을 이용하여, 주입된 신호에 대한 입력 전력의 반응을 보고 MTPA 운전점 여부를 파악한다.

1. 서 론

매입형 영구자석 동기 전동기(IPMM: Interior Permanent Magnet synchronous Machine)는 높은 에너지 효율과 단위 체적당 높은 토크를 만들 수 있기 때문에 관심과 연구가 집중되어 왔다. 회전자에 인입된 자석으로 인하여 원주 방향 자기저항(Reluctance)이 고르게 분포되지 않는 IPMM의 구조 때문에, 자속축 자기 회로와 토크축 자기 회로의 릴럭턴스가 서로 다르게 되어 돌극성이 나타나게 된다. 이러한 돌극성으로 인하여 IPMM은 영구자석이 만드는 자속에 의한 토크 뿐만 아니라, 릴럭턴스 차이가 만드는 릴럭턴스 토크가 동시에 발생한다. 이는 같은 토크를 발생시키기 위해서 여러 가지 전류 조합이 가능하다는 뜻이다. 입력 전류의 크기가 작을수록 동손이 줄어들게 되므로, 최소의 전류로 운전하는 것이 손실을 최소로 하는 방법이다. 따라서 IPMM을 최대 효율로 운전하기 위해서는 토크축 전류 뿐만 아니라 릴럭턴스 토크를 적절하게 제어해야 한다.^[1] 따라서 IPMM의 최대 효율 운전을 위해서 동손을 최소로 하는 단위 전류당 최대 토크 운전(MTPA: Maximum Torque Per Ampere)이 가능하며, 이에 대하여 지금까지 발표된 연구는 크게 세 가지로 전략으로 구분될 수 있다.

첫째, 전동기의 모든 운전 영역에서 전류와 토크를 측정하여 참조표를 작성하고, 그 참조표를 기준으로 MTPA 운전점을 결정하는 방법이다.^[2]

2. 제안된 MTPA 운전점 제어 방법

2.1 IPMM의 MTPA 운전점

IPMM의 토크는 식 (1)과 같이 영구자석의 쇄교 자속에 의한 자속 토크와 자속축 릴럭턴스와 토크축 릴럭턴스의 차이에 의한 릴럭턴스 토크로 구성된다. 영구자석의 자속(λ_f)과 인덕턴스(L_{ds}, L_{qs})가 변하지 않는다면, 이론적으로 MTPA 운전점은 식 (2)와 같이 계산된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_f i_{qs}^r + (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds}^r i_{qs}^r) \quad (1)$$

$$= \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_f I_s \sin(\theta) + (L_{ds} - L_{qs}) I_s^2 \sin(2\theta))$$

$$\theta_{MTPA} = \cos^{-1} \left(\frac{-\lambda_f + \sqrt{\lambda_f^2 + 8(L_{ds} - L_{qs})^2 I_s^2}}{4(L_{ds} - L_{qs}) I_s} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_e}{\partial \theta} = \frac{3P}{4} I_s \{ (L_{ds} - L_{qs}) I_s (2\cos^2\theta - 1) + \lambda_f \cos\theta \} = 0 \quad (3)$$

MTPA 운전을 하기 위해서, 동일 토크 발생 조건에서 전류 크기(I_s)가 최소가 되는 운전점을 찾아야 한다. 그림 1은 동기 좌표계 전류 평면에서 일정 토크 곡선을 표현한 것이다. MTPA 운전점은 원점에서 가장 가까운 운전점이며, 일정 토크 곡선과 원점을 중심으로 하는 원과의 접점이다. 따라서, 전류각(θ)에 대한 토크(T_e)의 미분값은 식 (3)과 같이 MTPA 운전점

에서 0이 된다. 따라서 일정 전류를 유지하면서 전류 지령각에 교류 신호를 주입했을 때의 토크 변화 정보를 통해 MTPA 운전 여부를 확인할 수 있다.

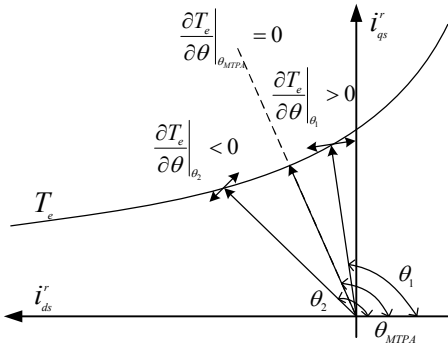


그림 1 전류 평면에서 일정 토크 곡선
Fig. 1 Locus of the constant torque in the current plane

2.2 신호 주입을 이용한 MTPA 판별

전류 변화에 대한 토크 변화 정보를 통해 MTPA 운전점을 판별하려면 식 (3)의 정보가 필요하다. 본 논문에서는 주입된 신호에 대한 입력 전력의 반응을 통해 토크 변화 정보를 대신하였다.

제안된 방법은 전류각(θ)에 식 (4)와 같이 작은 고주파 신호를 주입한다. 주입된 신호는 전류 평면에서 전류 크기는 일정하지만, 전류각을 흔들게 되며, 이에 대한 입력 전력은 식 (5)-(8)로 정리된다. 전류 크기가 일정하기 때문에 동손은 일정하며(식 (6)), 자기 에너지의 시간적 변화는 식(7), 토크와 직접적인 관계가 있는 기계적 출력은 식(8)로 표현된다.

$$\theta = \theta_{avg} + \theta_h = \theta_{avg} + A_{mag} \sin(f_h \times 2\pi t) \quad (4)$$

$$P_e = P_{copper} + P_{reactive} + P_m \quad (5)$$

$$P_{copper} = R_s I_s^2 \quad (6)$$

$$P_{reactive} = -\frac{1}{2} (L_{ds} - L_{qs}) I_s^2 \sin 2\theta_{avg} + \frac{1}{2} (L_{ds} \sin^2 \theta_{avg} + L_{qs} \cos^2 \theta_{avg}) I_s^2 A_{mag}^2 \omega_h \sin 2\omega_h t \quad (7)$$

$$P_m = \omega_r \left\{ \frac{1}{2} (L_{ds} - L_{qs}) I_s^2 \sin 2\theta_{avg} + \lambda_f I_s \sin \theta_{avg} \right\} + \left\{ (L_{ds} - L_{qs}) I_s^2 \cos 2\theta_{avg} + \lambda_f I_s \cos \theta_{avg} \right\} \omega_r A_{mag} \sin \omega_h t + \frac{1}{4} \omega_r (L_{ds} - L_{qs}) I_s^2 A_{mag}^2 \sin 2\theta_{avg} \cos 2\omega_h t \quad (8)$$

식 (8)을 통해 알 수 있는 것처럼, 기계적 출력은 기본파 성분에 의한 출력과 주입된 고주파 신호에 의한 성분으로 구성된다. 식 (8)에서 주입된 신호 주파수(ω_h) 성분의 크기는 식 (3)의 전류각에 대한 토크 미분 값과 비례한다. 따라서, 기계적 출력 성분 중, 주입된 고주파 성분을 추출하여 그 값이 0이 되도록 제어하면 MTPA 운전을 할 수 있다. 그림 2는 입력 전력에서 전류각에 대한 토크의 변화 정보를 얻기 위한 신호 처리 과정을 나타낸다.

2.3 고주파 전류 제어

주입되는 전류 신호는 전동기 제어에 필요한 기본파 성분과의 상호 영향을 최소화 하기 위해서 가능한 높은 주파수의 신호로 인가해야 한다. 이를 위해서 기본파 전류 제어기에 고주파 전류 제어기를 추가하였다. 측정된 자속축, 토크축 전류로부터 Band-Pass-Filter를 통해 주입하는 주파수 성분만을 얻고, 그 성분이 고주파 전류 지령과 일치하도록 그림 3과 같이 제어기를 추가하였다.

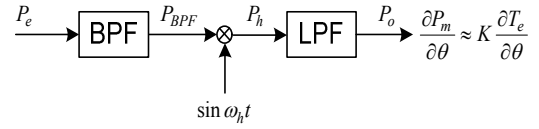


그림 2 MTPA 운전 기준 정보를 얻기 위한 신호 처리 과정
Fig. 2 Signal process to extract the MTPA criterion

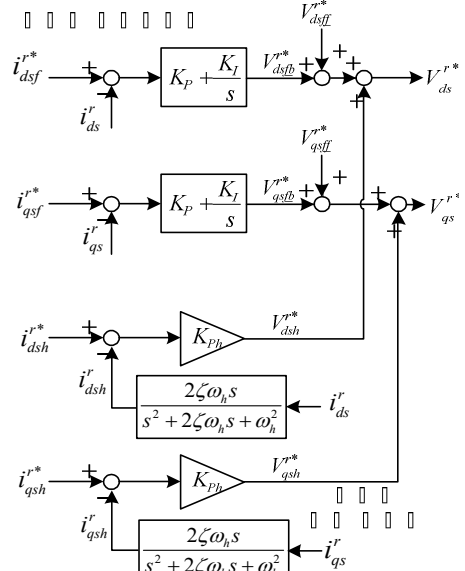


그림 3 기본파 및 고주파 전류 제어기
Fig. 3 Current control loop block diagram

2.4 MTPA 제어

그림 4는 MTPA 제어를 포함하는 속도 제어 시스템을 나타낸다. 속도 제어기는 속도 지령과 실제 속도를 받아 전류 지령의 크기를 결정한다. 전류 지령의 위상각은 제안된 MTPA 제어기에 의해 결정되며, MTPA 제어기는 입력 전력을 받아 간단한 신호처리 과정을 거친 후 MTPA 운전점에 해당하는 전류 지령각을 출력한다.(그림 5)

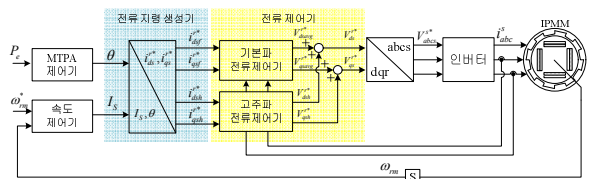


그림 4 MTPA 제어를 포함한 전체 속도 제어 구성
Fig. 4 Speed control system with MTPA control

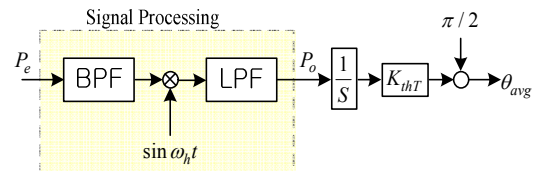


그림 5 MTPA 운전을 위한 전류 지령각 제어(MTPA 제어기)
Fig. 5 Current reference angle control of MTPA operation

3. 실험 결과

3.1 시스템 구성

제안된 MTPA 제어 방법의 타당성을 검증하기 위하여 11kW IPMM을 대상으로 한 실험을 수행하였다. 그림 6과 같이 IPMM

을 부하 전동기와 직결하여 MG-Set를 구성하였다. 실험한 IPMM의 제 정수는 다음과 같다.

- 정격 전력 : 11 kW
- 정격 토크 : 60 Nm
- 정격 속도 : 1750 r/min
- 정격 전류 : 39.5 Arms
- 극 수 : 6극
- 상 저항 : 0.109 Ω
- 인덕턴스 : L_{ds} (3.6 mH) L_{qs} (4.3mH)

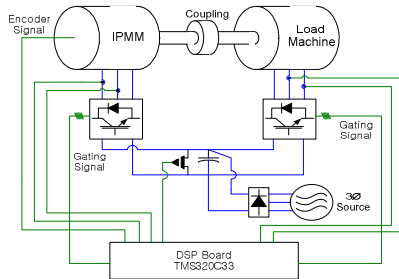


그림 6 전체 시스템 구성
Fig. 6 System configuration of IPMM test

3.2 실험 결과

MTPA 운전점을 측정하기 위하여, 부하 전동기로 일정 토크를 인가하고 IPMM으로 일정 속도 제어를 하면서, 전류 지령각 변화에 따른 전류 크기를 측정하였다. 그림 7은 전동기로 900r/min 속도제어를 했을 경우, 전체 운전 영역에서의 측정 결과와 제안된 방법의 결과이다. 제안된 방법이 모든 부하 조건마다 최소의 전류 크기로 운전하도록 제어하는 것을 확인할 수 있다. 그림 8은 위와 동일한 실험 조건에서 전동기 속도를 1750r/min으로 제어하였다. 제안된 방법이 모든 부하 조건에서 전류 크기가 최소인 운전점에 있음을 확인할 수 있다.

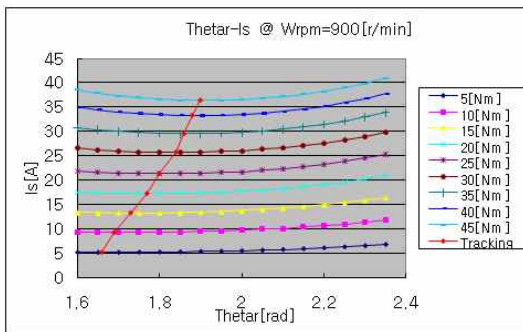


그림 7 부하에 따른 전류 지령각과 전류 크기 관계(900r/min)
Fig. 7 Current phase angle and magnitude according to the load torque at 900r/min

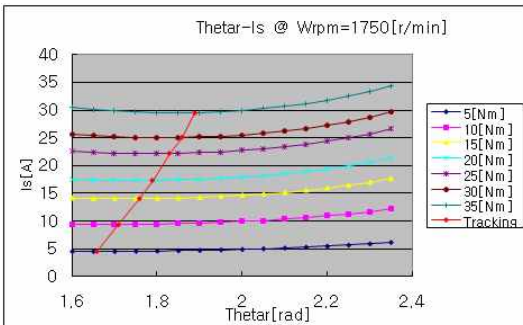


그림 8 부하에 따른 전류 지령각과 전류 크기 관계(1750r/min)
Fig. 8 Current phase angle and magnitude according to the load torque at 1750r/min

제안된 방법의 성능을 자세히 보이기 위해 부하 35Nm, 1700r/min 운전 조건에서 전류 지령각을 1.58[rad]에서 1.98[rad]까지 변화시키며 전류 크기를 측정하고, 제안된 방법을 적용하였을 때 MTPA 운전점 여부를 확인하였다. 전류 지령각을 천천히 변화시킬 때, 전류 크기가 최소가 되는 지점은 1.85[rad] 부근이었다. 다시 전류 지령각을 1.58[rad]에 위치시키고 제안된 방법을 적용하면, 제어된 전류 지령각은 1.89[rad]에 위치함을 확인할 수 있다. 실제 MTPA 운전점보다 0.04[rad]의 차이를 보이나, 전류 크기는 실제 MTPA 운전점에서의 크기와 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

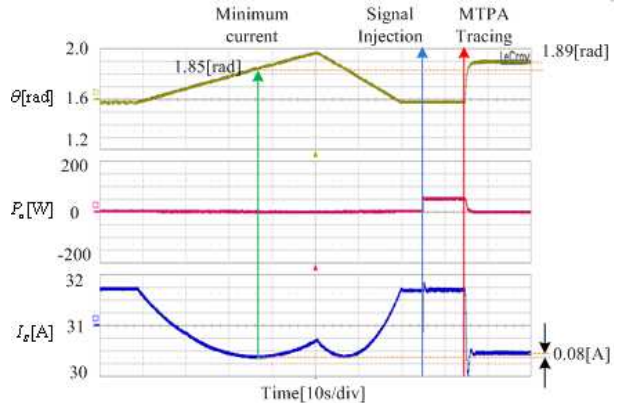


그림 9 전류 지령각, MTPA 신호처리 결과, 전류 크기(1700r/min, 35Nm)
Fig. 9 Current angle, MTPA signal processing result, current magnitude at 1700r/min and 35Nm

4. 결론

본 논문에서는 IPMM의 최대 효율 운전을 위한 새로운 MTPA 제어 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 전동기 제 정수의 변화에 강인할 뿐 아니라, 참조표가 필요하지 않다. 주입 전류에 작은 고주파 신호를 인가하여 그에 대한 입력 전력을 신호처리함으로써, MTPA 운전점 여부를 확인하여 실시간으로 제어할 수 있다. 부하 변화 및 운전 속도의 변화에도 강인하기 때문에, 실제 전동기 운영에 적용되기 쉽다.

참고 문헌

- [1] T. M. Jahns, G. B. Kliman, and T. W. Neumann, "Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors for Adjustable-Speed Drives", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. IA-22, No. 4, pp. 738-747, Jul./Aug. 1986.
- [2] B. H. Bae, N. Patel, S. Schulz, and S. K. Sul "New Field Weakening Technique for High Saliency Interior Permanent Magnet Motor", in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting., vol. 2, 2003, pp. 898-905.
- [3] Y. Jeong, S. K. Sul, S. Hiti, and K. M. Rahman "Online Minimum-Copper-Loss Control and Interior Permanent-Magnet Synchronous Machine for Automotive Application", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 42, No. 5, pp. 1222-1229, Sep./Oct. 2006.
- [4] 이광운, "영구자석 동기전동기의 단위 전류당 최대 토크 운전 점 추적 제어", 전력전자학회 논문지, 제12권 제4호, pp. 291-299, 2007. 8.