

실시간 제정수 추정을 통한 매입형 영구자석 전동기의 최소손실 제어

김영욱*, 김휘곤**, 박재연**, 설승기**
충북대학교*, 서울대학교**

Minimum Loss Control of IPMSM with Real Time Parameters Estimation

Young-Wook Kim*, Hwigon Kim**, Jaeyeon Park**, Seung-Ki Sul**
Chungbuk National University*, Seoul National University**

ABSTRACT

본 논문에서는 실시간 제정수 추정을 이용한 제어 시 최소손실 운전을 하기 위한 운전방법을 제안한다. 이를 위하여 전류센서로 측정된 전동기 시스템의 DC입력과 제어를 통해 추정된 전동기 출력을 이용하여 시스템 전체 손실을 추정하고 전체 손실을 직렬손실과 철손으로 분리하는 실시간 손실저항 추정기를 제안한다. 또한 손실저항 추정기로 추정된 전체 손실을 최소화 하면서 토크 지령치를 만족하는 최적 전류 지령치를 계산하는 실시간 최소손실 최적전류 지령치를 제안한다. 제안한 최소손실 최적전류 지령치는 라그랑주 승수법과 수치해석 알고리즘으로 주어진 제한 최적화 문제에 대한 해를 구하도록 유도되었다. 제안된 알고리즘은 여러 조건의 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증되었다. 실험용 M-G set은 4.4 kW급 가전용 전동기를 기반으로 구성하였으며, 실험을 통해 제안하는 알고리즘을 검증하였다.

손실, 효율 및 출력 토크의 변화 등을 분석하기 위하여 시험용 전동기를 선정하고, 시험용 전동기에 대한 유한요소해석 (Finite Element Analysis, FEA)을 수행하였다. 본 논문의 연구에 사용된 실험용 전동기의 제정수(20 °C)는 표 1과 같다. 분석 시 전동기의 속도 조건은 기저(Base) 속도에 가까운 4,100 r/min으로 선정하여 FEA 철손해석 및 인버터 손실 시뮬레이션에 적용하였다.

표 1 전동기의 제정수값

Table 1 Parameters of motor

정격출력 [kW]	4.4	고정자 저항[Ω]	0.307
정격토크 [N·m]	10	영구자석 자속 [Wb]	0.133
정격전류 [A _{ms}]	12	d축 인덕턴스 [mH]	5.8
기저속도 [r/min]	4,200	q축 인덕턴스 [mH]	7.3
DC 전압 [V]	375	극 수	6

1. 서론

매입형 영구자석 전동기를 최적의 효율점에서 운전한다는 것은 여러 손실을 고려하여 전체 손실이 최소화되는 전류 운전점에서 운전한다는 것이다. 매입형 영구자석 전동기의 효율적인 운전은 최소화하고자 하는 손실의 범위에 따라서 그림 1과 같이 크게 세가지 방법으로 구분할 수 있다. 첫번째는 단위 전류당 최대토크(Maximum Torque Per Ampere, MTPA) 제어 방법이며 고정자의 동손의 최소화를 목표로 하는 것이다. 두번째는 전동기 단위의 단위 손실당 최대토크(Maximum Torque Per Motor Loss, MTPML)이며 전동기의 손실의 최소화를 목표로 한다. 세번째는 전동기 시스템 단위의 단위 손실당 최대토크(Maximum Torque Per System Loss, MTPSL)이며 전동기를 구동하는 인버터 손실과 전동기의 손실의 최소화를 목표로 한다. 본 논문에서는 매입형 영구자석 전동기의 MTPA 제어, MTPML 제어, MTPSL 제어에 의한

2. 매입형 영구자석 전동기의 손실분석

매입형 영구자석 전동기의 제어 방법에 따른 특성을 이해하는데 필요한 손실을 계산하여 분석하였다. 전동기의 손실 중에서 동손은 표 1의 고정자 저항값을 이용하여 d,q축 전류 평면에서 MATLAB을 이용하여 계산하였고, 철손은 FEA 프로그램 ANSYS 19.1을 이용하여 해석한 결과를 적용하였다. 인버터 손실은 손실값에 대한 정확도를 높이기 위해서, 근사 계산식 대신 IGBT 제조사에서 제공하는 손실 시뮬레이션 결과를 사용하였다. 그림 2의 토크맵과 동손맵에 MTPA, MTPML, MTPSL 곡선을 표시하였다. MTPA곡선은 토크맵의

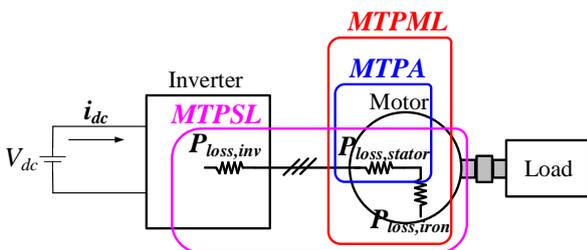


그림 1 손실 범위에 따른 최소손실 제어 방법
Fig.1 Minimum loss control methods with various loss range

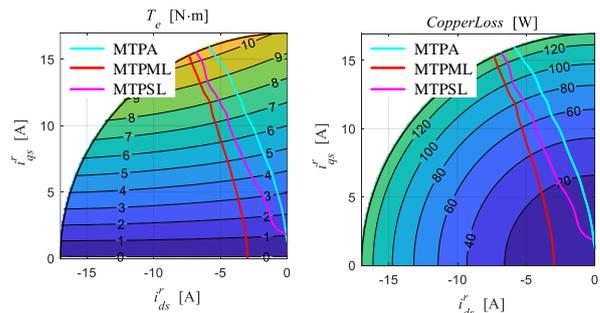


그림 2 FEA해석에 의한 MTPA 곡선, MTPML 곡선, MTPSL곡선
Fig.2 MTPA, MTPML and MTPSL curve based on FEA analysis

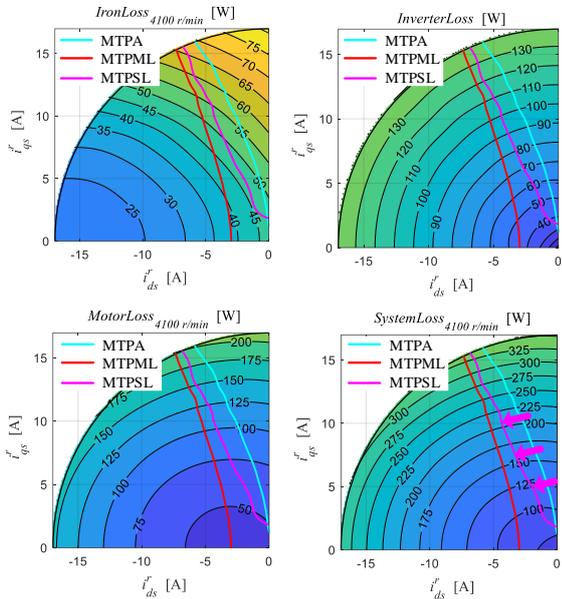


그림 3 철손맵, 인버터 손실맵, 전동기 손실맵, 시스템 손실맵
Fig.3 Iron loss, inverter loss, motor loss, system loss map

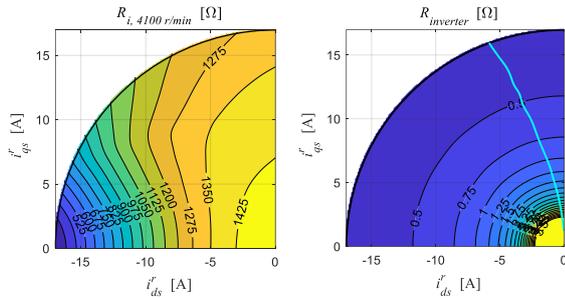


그림 4 철손저항 맵과 인버터 손실저항 맵
Fig.4 Iron loss and inverter loss resistance map

등토크(Equi-torque) 곡선과 동손맵의 동심원이 접하는 부분의 궤적으로 만들어진다. 그림 3은 철손맵, 인버터 손실맵, 전동기 손실맵, 시스템 손실맵에 MTPA, MTPML, MTPSL 곡선을 표시하였다. 전동기 손실맵은 동손맵과 철손맵의 합으로 만들어 졌고, 시스템 손실맵은 전동기 손실맵에 인버터 손실맵까지 합하여 만들어 진다. MTPML 제어는 고정자 동손

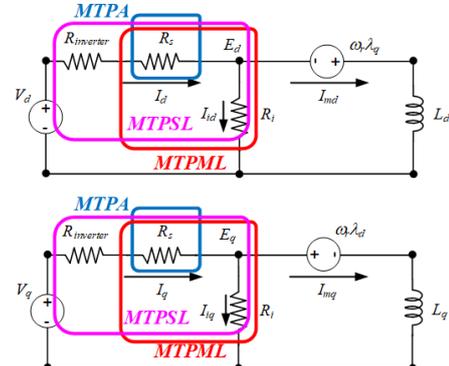


그림 5 d,q축 등가 철손저항 및 인버터 손실저항 회로
Fig.5 Equivalent d- and q-axis iron loss resistance and inverter loss resistance circuit

뿐만 아니라 철손까지 포함한 전동기의 전체 손실을 최소화하는 전류로 제어하는 방법이므로, 그림 3의 전동기 손실맵에 표시된 바와 같이 고정자의 자속을 줄여 철손을 줄이기 위해서 MTPA 제어보다 음(-)의 d축 방향으로 운전점이 이동한다. MTPSL 제어도 MTPML 제어와 유사하게 음(-)의 d축으로 전류를 증가시키지만, 전류의 증가에 따른 인버터의 손실 증가까지 고려하기 때문에 MTPML 제어보다 음(-)의 d축 전류의 크기를 적게 증가시키는 것을 알 수 있다.

3. 최소손실 제어 및 실시간 제정수 추정

MTPSL 제어는 토크리딩을 만족하면서 인버터의 손실과 전동기의 고정자 저항(Stator Resistance, R_s)에 의한 동손과 철손을 최소화하는 최적화 문제로 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\min \left\{ \frac{3}{2} R_{inverter} (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + \frac{3}{2} R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + \frac{3}{2} R_i (i_{id}^2 + i_{iq}^2) \right\}$$

$$\text{Subject to } T_e^* = \frac{3P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \quad (1)$$

식(1)에 적용된 철손저항 R_i 와 인버터 저항 $R_{inverter}$ 는 그림 3의 철손맵과 인버터 손실맵을 등가 저항으로 치환한 것이다. 그림 4는 철손 저항맵과 인버터의 등가 손실저항 맵을 나타낸다. MTPSL 제어를 위한 등가회로를 철손저항 R_i 와

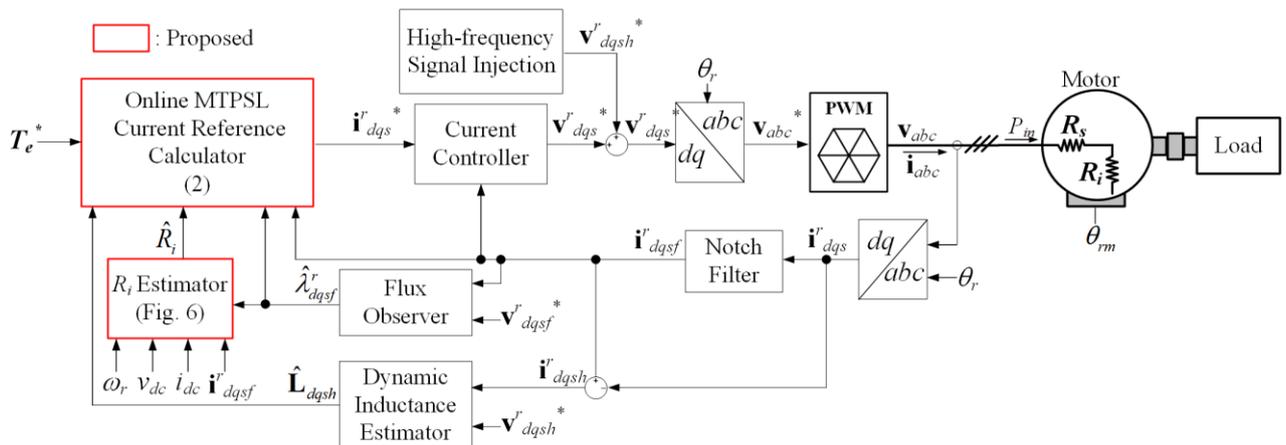


그림 7 제안하는 MTPSL 알고리즘의 제어 블록도

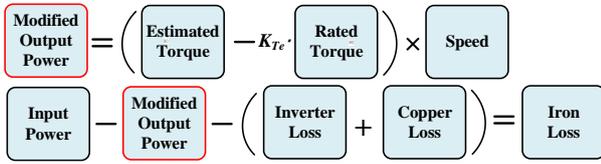


그림 6 보정된 전동기 출력을 이용한 철손 추정방법
Fig.6 Iron loss estimation with modified torque output

고정자 저항 R_s , 인버터 손실 저항 $R_{inverter}$ 로 나타내면 그림 5와 같다.

식(1)의 비선형 제한 조건이 있는 최적화 문제는 라그랑주 함수(Lagrangian function)로 나타낼 수 있고 라그랑주 승수법을 통해 풀 수 있다 [1]. 수치해석을 적용하면 식(2)와 같은 최적전류 지령기를 얻을 수 있다 [1]. 이 최적전류 지령기는 동적 인덕턴스 (L_{dd} , L_{dq} , L_{qd} , L_{qq})에 대한 정보를 필요로 하므로 본 논문에서는 신호주입기법과 함께 적용하였다 [1].

$$\mathbf{i}_{dq}^* = \mathbf{i}_{dq} - \{ \mathbf{J}_c(\mathbf{i}_{dq})^T \mathbf{J}_c(\mathbf{i}_{dq}) + \mu_k \cdot \text{diag}(\mathbf{J}_c(\mathbf{i}_{dq})^T \mathbf{J}_c(\mathbf{i}_{dq})) \}^{-1} \mathbf{J}_c(\mathbf{i}_{dq})^T \mathbf{F}_c(\mathbf{i}_{dq}) \quad (2)$$

전동기 시스템의 전체 손실 중 고정자 동손은 고정자 저항값과 측정된 전류를 통해 계산할 수 있고, 인버터 손실은 전동기에 대한 사전실험 없이도 인버터의 IGBT 데이터 시트의 손실 그래프를 이용하여 인버터에서 실시간으로 계산하거나 IGBT 제조사가 제공하는 손실 계산 프로그램의 계산 결과를 참조표 형태로 인버터에 저장하여 계산할 수 있다. 하지만, 전동기의 철손은 실제 실험 없이는 얻기가 어려우므로 전동기의 입력과 출력 정보가 주어지면, 인버터 손실과 고정자 동손을 정확하게 계산할 있다는 가정 하에 실시간 철손 추정기를 제안한다. 철손저항을 실시간으로 추정하기 위해서는 인버터의 DC입력단에 전류센서를 추가하여 전동기 시스템의 입력을 측정한다. 하지만 전동기의 출력은 일반적인 전동기 시스템에서 주어지지 않으므로, 그림 6과 같이 전동기 출력 추정치를 보정하여 철손을 추정하는 방법을 제안한다.

전동기 출력 추정치의 보정에는 전동기의 정격토크 값과 토크 보정계수 K_{Te} 가 증가할수록 전동기 출력 추정치는 감소하고, 철손 추정치가 증가한다. 반대로 보정계수 K_{Te} 가 감소할수록 전동기 출력 추정치가 증가하고 철손 추정치는 감소한다. 손실저항 추정기는 이 보정계수 K_{Te} 를 시스템 효율이 최대(=같은 출력조건 대하여 DC입력이 최소)가 되도록 섭동기반 탐색방법 (Perturbation searching method)을 적용한다. 본 연구에서는 0.5초 주기로 시스템 효율을 평가하고, 정격토크의 0.1 %씩 섭동을 주면서 시스템 효율을 평가하여 섭동 방향을 결정하였다. 섭동기반 탐색방법이 전동기 출력 추정치를 보정하는 동안 철손 추정치가 변동하게 되고, 손실저항 추정기가 최소손실 최적전류 지령기에 전달하는 직렬 손실저항 R_s 와 병렬 손실저항 R_l 의 추정치도 변동하게 된다. 최소손실 최적전류 지령기는 전달받은 직렬 손실저항 R_s 와 병렬 손실저항 R_l 의 추정치에 대하여 항상 시스템 손실이 최소인 운전점으로 이동하고, 섭동기반 탐색방법이 전동기 출력 추정치를 실제와 같게 보정하는 지점에서 시스템 효율이 최대치로 수렴하게 된다. 제안하는 전체 MTPSL 알고리즘의 제어 블록도는 그림 7에 나타나 있다.

4. 실험 결과

실험에 적용된 M-G세트는 그림 8과 같다. 토크센서는



그림 8 토크센서가 적용된 실험용 M-G세트
Fig.8 Experimental M-G set with torque sensor

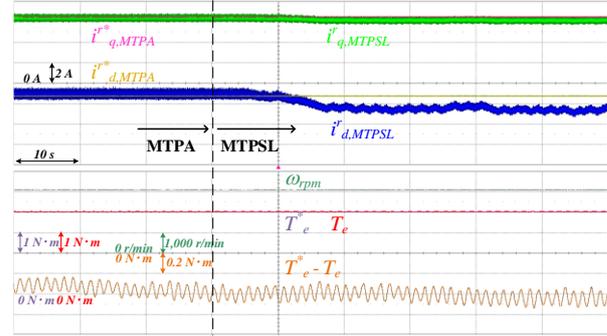


그림 9 제안된 MTPSL 제어 실험결과
Fig.9 Experimental results of proposed MTPSL control

표 2 실험결과
Table 2 Experimental results

	MTPA제어	MTPSL제어	증감분
DC 입력 [W]	1798	1796	-2
토크 [N·m]	4.03	4.04	0.01
전동기출력 [W]	1730	1735	5
시스템손실 [W]	68	61	-7
시스템효율 [%]	96.2	96.6	0.4

제안하는 MTPSL 알고리즘의 검증용으로만 사용되고 제어에는 사용되지 않았다. 표 2는 전동기를 4,100 r/min으로 구동하고, MTPA 제어로 4 N·m 토크지령으로 운전하다가 MTPSL 알고리즘을 적용한 실험결과이다. MTPA제어보다 MTPSL 제어 시 시스템 효율이 0.4 %p증가한 것을 볼 수 있다. 그림 9는 실험파형을 나타낸다. 실험파형을 통하여서 MTPA제어 시보다 MTPSL 제어 시 전류 운전점이 등토크 곡선을 따라서 음(-)의 d축으로 이동하는 것을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 토크제어를 하면서 전동기의 동손, 철손과 인버터의 손실을 고려하여 시스템 손실을 최소화하는 MTPSL 제어방법을 제안하고 실험으로 검증하였다. 인버터의 손실은 참조표 형태로 제어기에 저장한 값을 적용하였으며, 전동기의 철손저항 추정을 위한 실시간 철손 추정기를 제안하여 섭동기반 탐색방법과 결합하여 적용하였다. MTPSL 제어 시의 토크 증감은 약 0.25 %p로 매우 작고, 시스템효율 면에서는 96.2 %에서 96.6 %로 0.4 %p 증가하였다.

참고 문헌

[1] Y.Kim, H.Kim, J.Park and S. Sul, "On-line minimum loss control strategy of IPMSM in torque-controlled application," J. Power Electron. 24, 756-766 (2024). <https://doi.org/10.1007/s43236-024-00773-w>.