

IPMSM 토크 제어를 위한 곡면 적합을 이용한 Look Up Table 생성 및 분할 방법

허홍준*, 김장목*, 박귀열**, 안태규**, 신덕웅**
부산대학교*, 현대위아**

Surface Fitted Look Up Table and Division Method for IPMSM Torque Control

Hong Jun Heo*, Jang Mok Kim*, Gui Yeol Park**, Tae Gyu Ahn**, Duck Woong Shin**
Pusan National University*, Hyundai Wia**

ABSTRACT

기존 IPMSM (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) 제어를 위한 LUT (Look Up Table) 방식은 입력한 일정 간격의 데이터를 이용한 선형 보간 방법이 주로 사용되었다. 하지만, 이러한 방식은 LUT 구성을 위해 많은 데이터를 요구하므로, DSP 메모리 용량에 LUT 구성의 한계가 존재한다. 또한, 많은 양의 데이터를 관리해야하는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 영역 분할을 이용한 다항식 곡면 적합 LUT 구성을 제안하였다. 다항식 곡면 적합을 이용한 LUT 구성 방법은, 관리해야하는 데이터양을 비약적으로 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 제안한 방법의 효용성은 실험을 통하여 증명하였다.

1. 서론

IPMSM (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)은 높은 토크 밀도와 효율, 넓은 운전 영역으로 인하여 최근 전기 자동차의 추진 전동기로 많은 관심을 받고 있다.^[1] 하지만, IPMSM의 이러한 장점을 모두 발휘하기 위해서는 MTPA (Maximum Torque Per Ampere) 제어와 약자속 제어가 필요하다. 기존 IPMSM의 모델링에 기반을 둔 제어 방식은 범용성이 뛰어난 장점을 가지지만, 운전에 따른 IPMSM 상수의 비선형적인 변화에 취약한 단점을 가지고 있다. LUT (Look Up Table) 방식은 실험 결과 값을 입력하여 제어하는 방식으로, IPMSM의 상수 변화에 강인한 장점을 가지고 있다. 하지만, 기존에 주로 사용되는 방식은 입력된 데이터 중 인접한 데이터들을 이용하여 선형 보간을 하는 방식으로, 정밀도 향상을 위해서는 많은 데이터를 필요로 한다.^[1] 이는 제어에 사용되는 DSP의 메모리 용량에 따라 입력 할 수 있는 데이터양이 제한되어 제어 정밀도를 저감 시킬 수 있으며, 데이터 입력 및 관리가 어렵다는 단점을 발생시킨다.

본 논문은 이러한 단점을 극복하기 위하여 다항식 곡면 적합을 이용한 LUT 구성 방법을 제안하였다. 다항식 곡면 적합을 이용한 LUT는 다항식의 계수만을 데이터 입력으로 받으므로 기존의 선형 보간 방법에 비하여 DSP의 메모리 사용량 및 데이터 입력, 관리의 어려움을 완화 시킬 수 있다. 또한, 운전 영역을 분할하여 LUT를 구성함으로써 토크 제어 정밀도 향상을 꾀할 수 있다. 제안한 방법은 실험을 통하여 검증하였다.

2. 제안한 LUT 구성 방법

2.1 다항식 곡면 적합 LUT

다항식 곡면 적합은 그림 1과 같이 주어진 데이터에 대하여 다음과 같은 수식을 만족하는 계수를 결정함으로써 데이터와 다항식의 오차를 최소화하는 하나의 수식을 획득하는 방법이다.

$$y = p_0 + p_1x + p_2x^2 + p_3x^3 + \dots \quad (1)$$

이를 본 논문에서 사용한 속도 및 토크 지령에 대한 dq축 전류에 대한 LUT에 적용하기 위해서는 2차원 다항식을 이용하여 곡면 적합을 사용하면 된다. 그림 2는 MATLAB의 Curve Fitting Tool을 이용하여 곡면 적합한 결과이다. 사용한 곡면 적합 수식은 xy축에 대한 2차원 5x5차 다항식으로 총 21개의 계수를 가지고 있다. 따라서, dq축 전류에 대하여 각각 21개의 데이터만으로 LUT를 구성 할 수 있다.

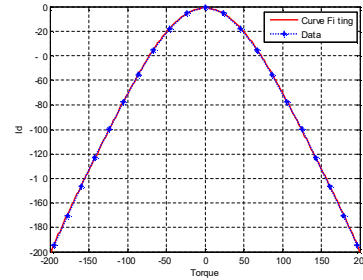


그림 1 데이터에 대한 곡선 적합 예시
Fig. 1 The example of curve fitting

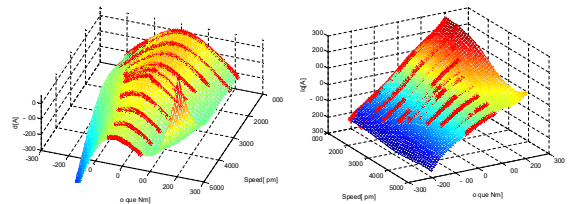


그림 2 속도 및 토크 지령에 대한 dq축 전류 곡면 적합 LUT
Fig. 2 The surface fitted dq-axis current LUTs about torque reference and speed inputs

2.2 구간 분할 곡선 적합 LUT 방법

다항식 곡면 적합을 이용한 LUT 구성은 적은 데이터 입력만으로 LUT를 구성할 수 있지만, 변곡점이 발생하는 MTPA 제어 영역과 약자속 제어 영역에서 오차를 발생시킨다. 그림 3은 실험값에 대한 곡면 적합 LUT의 dq축 전류 오차이다. d축의 경우 MTPA 및 약자속 영역에서 $\pm 10[A]$ 의 오차를 가지는 반면, MTPA와 약자속 영역의 경계인 2,500 ~ 3,000[rpm] 영역에서 $\pm 20[A]$ 의 오차를 발생시키는 것을 확인할 수 있다.

이를 해결하기 위한 방법으로 그림 4와 같이 MTPA와 약자속 영역을 각각 곡선 적합을 이용하여 LUT를 구성한 후, 경계 속도에서는 가중치를 두어 최종 출력을 도출하는 구간 분할 곡선 적합 LUT를 사용하였다. MTPA LUT는 경계 속도가 끝나는 3,000[rpm]까지의 데이터를 이용하여 생성하였으며, 약자속 LUT는 경계 속도가 시작하는 2,500[rpm]부터의 데이터를 이용하여 생성하였다. 각각의 LUT 2차원 5x5차 다항식을 이용하여 구성하였다. 가중치의 경우 그림 5와 같이 각각의 영역에서는 각각의 LUT 출력만을 이용하여 하도록 설정하였으며, 경계 속도에서는 속도에 따라 가중치를 선형적으로 변화시켜 적용하였다. 그림 3의 구간 분할 이후의 dq전류 오차를 보면 곡면 적합 LUT만을 사용하였을 때에 비하여 경계 영역에서의 오차가 감소한 것을 확인할 수 있으며, 전체적인 오차 역시 감소한 것을 확인할 수 있다.

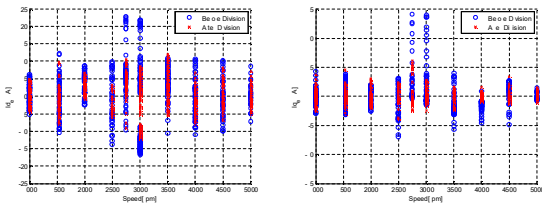


그림 3 실험값에 대한 곡면 적합 LUT의 dq축 전류 오차
Fig. 3 The dq-axis current errors by surface fitted LUTs

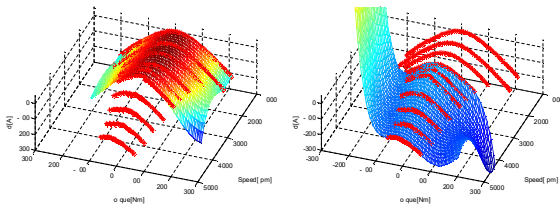


그림 4 MTPA와 약자속 영역에 대한 각각의 d축 전류 곡면 적합 LUT
Fig. 4 The d-axis current surface fitted LUTs about MTPA and flux weakening regions

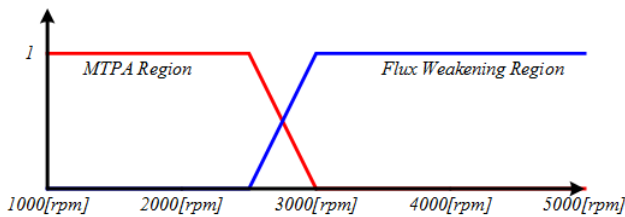


그림 5 속도에 따른 MTPA, 약자속 LUT 가중치
Fig. 5 The weight of LUTs according to the rotor speed

구간 분할 곡선 적합 LUT를 사용할 경우에는 d축 또는 q축 전류 LUT를 구성하기 위하여 42개의 계수를 사용하여야 하지만, 이는 2차 10x5차 다항식을 이용하여 곡면 적합을 한 경우보다 80% 정도의 메모리만을 이용하여 구성할 수 있으므로 차수를 증가시키는 경우보다 효율적인 LUT 구성이 가능하다.

3. 실험 결과

그림 6은 다항식 곡면 적합 및 구간 분할 곡선 적합을 이용한 LUT를 이용하여 속도별 토크 지령에 대한 실제 토크 오차이다. 실험은 10[Nm]단위로 음의 최대 토크에서 양의 최대 토크까지 이루어 졌으며, 실험이 이루어진 속도는 1000, 1540, 2300, 3100, 3800, 4800[rpm]이다.

실험 결과를 보면 곡면 적합 LUT를 이용한 경우 5 ~ 4[Nm]의 토크 오차가 발생한 것을 확인할 수 있으며, 구간 분할 곡면 적합 LUT를 사용한 경우 2 ~ 2[Nm] 정도의 토크 오차가 발생한 것을 확인할 수 있다. 또한 곡면 적합 LUT와 구간 분할 곡면 적합 LUT의 SSE (Sum of Squared Error)는 각각 500.73와 186.41로 전체적으로 토크 제어 정밀도가 향상된 것을 확인할 수 있다.

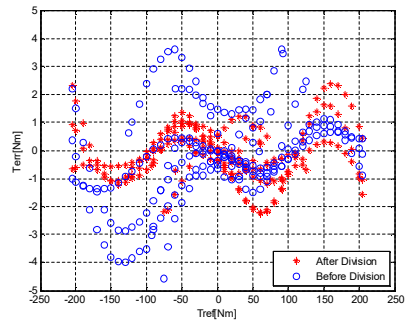


그림 6 토크 지령별 토크 오차
Fig. 6 The torque error according to the torque reference

4. 결론

본 논문에서는 IPMSM 토크 제어를 위한 곡면 적합 LUT 및 구간 분할 곡면 적합 LUT를 제안하였다. 제안한 방법은 최대 80여개의 계수만으로 LUT를 구성 함으로써 기존의 LUT에 비하여 LUT 구성을 위한 DSP 메모리 사용량을 감소시켰다.

이 논문은 2012년도 정부재원(지역혁신 인력 양성 사업) 한국 연구재단의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.
(No. NRF 2012H1B8A2026153)

참고 문헌

- [1] 원일권, 김도윤, 고안열, 이정효, 김영렬, 원충연, "전기자동차 구동용 IPMSM의 2D Look up Table 작성기법", 2013년도 전력전자학술대회 논문집, pp. 104 105, 2013, 7월.