

영구자석 동기 전동기 식스-스텝 운전의 시간-최적 절환

조형준, 설승기
서울대학교

Time-Optimal Transition for Six-Step Operation of PMSM

Hyung-June Cho, Seung-Ki Sul
Seoul National University

ABSTRACT

본 논문에서는 식스-스텝 운전 하에서 영구자석 동기 전동기 고정자 자속의 시간-최적 절환 궤적을 분석한다. 회전자 기준 좌표계 상에서 시간-최적 궤적은 목표 지점을 우회하는 형태를 가진다. 이는 회전자 기준 좌표계 상에서 설계된 선형 제어기를 통해 시간-최적 궤적을 구현하는 데에 어려움으로 작용한다. 반면, 정지 좌표계 상에서 시간-최적 궤적은 자속각이 증가할 때는 직선 경로로, 자속각이 감소할 때는 우회하는 궤적으로 나타난다. 정지 좌표계 상에서의 분석을 바탕으로, 본 논문에서는 영구자석 동기 전동기 식스-스텝 운전의 시간-최적 절환 방법을 제안한다. 제안된 방법은 자속 벡터 예측을 통해 자속 벡터가 시간-최적 궤적을 따르도록 전압 벡터를 인가한다. 30 kW 급 영구자석 동기 전동기를 통해 제안된 방법의 성능을 실험적으로 검증하였다.

1. 서론

3상 인버터의 식스-스텝 운전(Six-step operation)은 전압 육각형의 꼭짓점 벡터만을 이용하여 직류단 전압 이용률을 최대화하는 운전 기법이다. 식스-스텝 운전을 통하여 전동기의 가용한 토크 크기를 주어진 직류단 전압 조건 하에서 최대화 할 수 있다. 또한 PWM 운전과 비교할 때 식스-스텝 운전시 인버터의 스위칭 손실이 현저히 줄어든다는 장점이 있다. 이러한 이유로 높은 출력 토크 및 인버터 효율을 얻을 수 있는 식스-스텝 운전에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

식스-스텝 운전시 전압의 크기는 최대화된 상태이므로, 출력 전압의 위상만이 정상상태 자유도로 남게 된다. 선행 연구 [1], [2]는 전압각에 초점을 맞추어 기본과 전압각의 변화분을 입력으로 가지는 선형 시스템으로 영구자석 동기 전동기(Permanent-magnet synchronous motor, PMSM)의 식스-스텝 운전을 모델링하고, 모델링에 기반하여 주파수 영역(Frequency domain) 분석을 통해 제어기를 설계하였다. 하지만 해당 모델링은 평형점 근방의 소신호 분석을 바탕으로 수립되므로 대신호에 대한 정확성이 보장되지 않으며, 주파수 영역에서의 분석은 출력 전압의 기본파에만 초점을 맞추기 때문에 식스-스텝 운전의 고조파 전압 성분이 동특성에 끼치는 영향이 고려되지 않는다. 이러한 모델링 오차는 식스-스텝 운전의 동특성 향상에 있어 제약 사항으로 작용한다.

PMSM 식스-스텝 운전의 동특성 향상을 위하여, 회전자 기준 좌표계 상에서의 식스-스텝 운전 모델링을 바탕으로 한 시간-최적 절환 방법에 대한 연구가 진행되었다 [3]. 회전자 기준

좌표계 상에서 식스-스텝 운전의 순시 전압은 회전자의 반대 방향으로 회전하는 효과를 지닌다. 이러한 순시 전압의 회전 효과를 반영하기 위하여 해당 연구에서는 시간 영역(Time domain) 분석을 진행하였고, 이를 바탕으로 순시 자속 궤적을 모델링하여 시간-최적 절환 방법을 유도하였다. 하지만 회전자 기준 좌표계 상에서 자속의 시간-최적 경로는 목표 운전점을 크게 우회하는 형태로 나타난다. 이러한 경로는 회전자 기준 좌표계에서 설계된 선형 제어기를 통해 구현하기 어렵고, 개루프 형태를 취해야 한다는 문제점이 존재한다.

반면, 정지 좌표계 상에서 자속의 시간-최적 경로는 부하 출력 토크 증가 상황에선 직선 경로로, 부하 감소 상황에선 우회로로 나타난다. 본 논문에서는 정지 좌표계 자속 궤적에 대한 고찰을 바탕으로 페루프 형태의 시간-최적 절환 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 데드비트(Dead-beat) 제어 구조를 취하며, 자속 벡터 예측을 통하여 자속이 시간-최적의 경로를 따르도록 전압 벡터를 인가한다.

본 논문에서는 시간-최적 절환 방법을 적용한 전류 제어 구조를 제안한다. 시간-최적 절환 방법을 하위 제어기로 구성하여 식스-스텝 운전의 동특성을 확보하며, 상위 전류 제어기를 통하여 전류 제한에 대한 모니터링 및 토크 제어를 수행한다. 30 kW 급 하이브리드 자동차 견인용 IPMSM을 대상으로, 제안하는 방법의 성능을 시뮬레이션 및 실험으로 검증하였다.

2. PMSM 식스-스텝 운전의 자속 궤적 모델링

식스-스텝 운전은 일반적으로 기저 속도 이상의 약자속 영역에서 이루어진다. 저항에 의한 전압 강하 성분이 작다는 가정 하에 PMSM의 전압 방정식은 회전자 기준 좌표계와 정지 좌표계 상에서 아래와 같이 나타난다.

$$\mathbf{v}_{dqs}^r = \frac{d}{dt} \boldsymbol{\lambda}_{dqs}^r + \omega_r \mathbf{J} \boldsymbol{\lambda}_{dqs}^r \quad (1)$$

$$\mathbf{v}_{dqs}^s = \frac{d}{dt} \boldsymbol{\lambda}_{dqs}^s \quad (2)$$

v, λ, ω_r 은 각각 전압, 자속, 전기 각속도를 의미하며, 변수의 굵은 활자체는 dq 열벡터를, 윗첨자 ‘r’과 ‘s’는 각각 회전자 기준 좌표계와 정지 좌표계 변수임을 나타낸다. \mathbf{J} 는 반시계 방향 90° 회전 변환 행렬을 의미한다.

각 좌표계에서 전압에 대한 자속의 일반해는 아래와 같이 나타난다.

$$\boldsymbol{\lambda}_{dqs}^r(t) = \mathbf{R}(-\omega_r(t-t_0)) \left\{ \boldsymbol{\lambda}_{dqs}^r(t_0) + \int_{t_0}^t \mathbf{R}(\omega_r(t-t_0)) \cdot \mathbf{v}_{dqs}^r(t') dt' \right\} \quad (3)$$

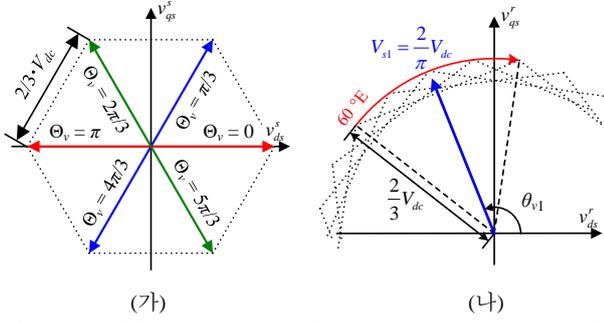


그림 1. 좌표계에 따른 식스-스텝 운전 전압. (가) 회전자 기준 좌표계, (나) 정지 좌표계.

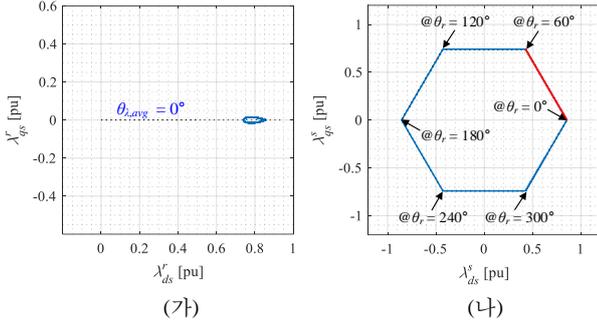


그림 2. 좌표계에 따른 정상상태 자속 궤적. (가) 회전자 기준 좌표계, (나) 정지 좌표계.

$$\lambda_{dqs}^s(t) = \lambda_{dqs}^s(t_0) + \int_{t_0}^t \mathbf{v}_{dqs}^s(t') dt' \quad (4)$$

여기서 $\mathbf{R}(\theta)$ 는 반시계 방향 θ 회전 변환 행렬을 의미한다.

회전자 기준 좌표계 상에서는 전압과 자속 간의 교차 결합 성분으로 인하여, 자속 궤적이 식 (3)과 같이 다소 복잡하게 나타난다. 반면, 정지 좌표계 상에서는 교차 결합 성분이 없으며, 인가되는 전압이 해당 방향으로의 자속 변화를 야기하기 때문에 식 (4)와 같이 자속 궤적이 표현된다.

식스-스텝 운전시 전압은 정지 좌표계 상에서 그림 1(가)와 같이 전압 육각형의 꼭짓점 중 하나를 출력하게 된다. 정지 좌표계 상에서 고정된 벡터는 회전자 기준 좌표계 상에서는 회전자의 반대 방향으로 회전하는 효과를 지닌다. 그림 1(나)는 회전자가 시계 방향으로 회전하는 경우에 대한 회전자 기준 좌표계 상에서의 전압 벡터를 나타낸다.

그림 2는 식스-스텝 운전 상황에서 좌표계에 따른 정상상태 자속 궤적을 나타낸다. 회전자 기준 좌표계에서는 전압의 회전 효과와 전압 방정식의 교차 결합 성분으로 인하여 물방울 모양을 가진다. 그림 2(가)의 $\theta_{\lambda,avg}$ 는 회전자 기준 좌표계 상에서의 평균 자속각을 의미한다. 정지 좌표계 상에서는 육각형 궤적을 그리며, 자속은 육각형 궤적을 따라 등속으로 이동한다.

3. 시간-최적 자속 궤적

선행 연구 [3]에서는 식 (3)에 기반하여 회전자 기준 좌표계 상에서의 시간-최적 절환 방법을 제시하였다. 그림 3은 좌표계에 따른 시간-최적 절환 자속 궤적을 나타낸다. 여기서 빨간색으로 강조된 부분은 절환 과정에서의 자속 벡터를 나타낸다. 그림 3(가)에 나타나듯이, 회전자 기준 좌표계 상에서의 자속 궤적은 전압 벡터의 회전 효과와 교차 결합 성분으로 목표 지점을 우회하는 형태로 나타난다. 이러한 우회 궤적은 일반적인 선형

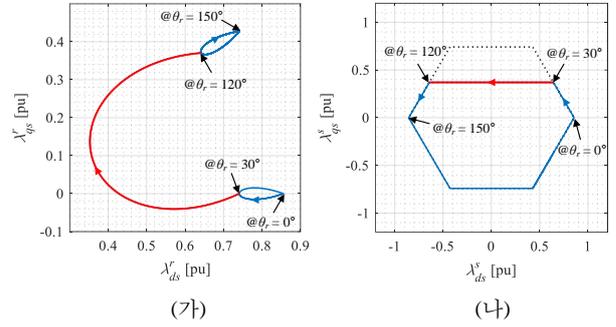


그림 3. 좌표계에 따른 시간-최적 절환 자속 궤적 ($\theta_{\lambda,avg} = 0^\circ \rightarrow 30^\circ$). (가) 회전자 기준 좌표계, (나) 정지 좌표계.

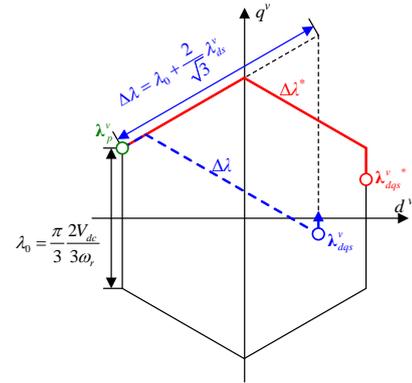


그림 4. 제안하는 절환 방법.

제어기로 구현하기에 어려움이 존재한다.

그림 3(나)를 살펴보면, 정지 좌표계 상에서의 시간-최적 절환 자속 궤적은 정상상태 궤적의 내부를 통과하여 정상상태 궤적에 합류하는 것을 확인할 수 있다. 식스-스텝 운전시 시간에 대한 자속 벡터의 변화율은 $2/3 \cdot V_{dc}$ 로 최대화 된다. 이는 정지 좌표계 상에서의 자속 벡터 선속도가 더 이상 빨라질 수 없다는 것을 의미한다. 따라서 정상상태 육각형 궤적을 유지한 상태로 회전자의 위상을 앞지르는 것은 물리적으로 불가능하다. 시간-최적 절환 궤적을 살펴보면, 자속 벡터는 절환 과정에서 자속 벡터의 선속도가 고정된 상태에서 원점으로부터의 거리가 가까워 지게 되어, 자속 벡터의 각속도가 증가하는 효과를 일으킨다. 이로 인해 자속 벡터는 회전자의 위상을 추월할 수 있게 된다.

4. 제안하는 시간-최적 절환 방법

본 절에서는 앞선 정지 좌표계 상에서의 고찰을 바탕으로 한 페루프 형태의 시간-최적 절환 방법을 제안한다.

제안하는 절환 알고리즘은 샘플링 시점의 전압을 $+q$ 축에 동기화 시키는 전압 기준 좌표계에서 수행된다. 그림 4는 입의 시점에서 전압 기준 좌표계 상에서의 자속 벡터와 지령 벡터를 나타낸다. 윗첨자 'v'는 전압 기준 좌표계를 의미한다. 전압 기준 좌표계에서 전압 벡터가 $+q$ 축에 동기화 되므로, 해당 좌표계에서의 자속 벡터는 항상 $+q$ 축으로 이동한다. 지령 벡터는 상위 토크 제어기로부터 결정되는 자속각을 통하여 계산되며, 자속 벡터는 전압 모델 기반 자속 관측기로부터 얻어진다.

제안하는 알고리즘의 핵심 사항은 자속 벡터와 지령 벡터의 합류 지점을 선정하고, 합류 지점까지의 거리를 비교하여 절환 시점을 결정하는 것이다. 합류 지점 λ_p^v 는 정방향 회전

표 1. 시험용 PMSM 대표 제정수

폴 / 슬롯	16/24	V_{dc}	250 V
정격 토크 (1 pu)	150 N·m	λ_{PM}	80.1 mWb
정격 전류 (1 pu)	140 A	L_{ds}	3.27 mH
정격 자속 (1 pu)	101 mWb	L_{qs}	8.08 mH
정격 속도 (1 pu)	1,700 r/min	R_s	13.3 mΩ

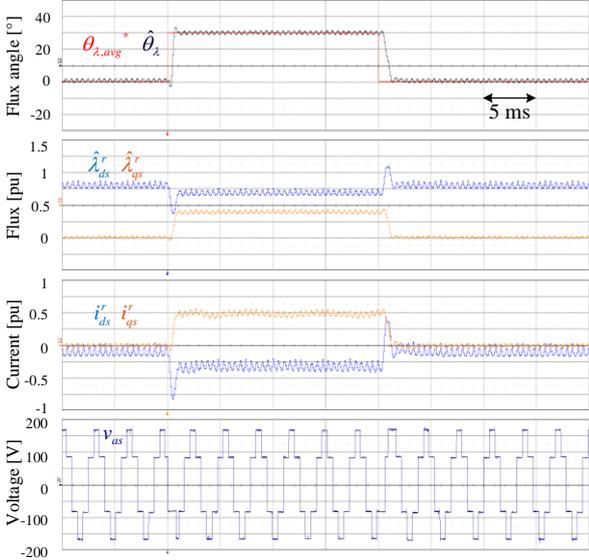


그림 5. 제안하는 절환 방법의 계단 응답.

상황에서는 전압 기준 좌표계 자속 육각형의 제 2사분면 꼭짓점, 역방향 회전 상황에서는 1사분면 꼭짓점으로 선정한다. $\Delta\lambda^*$ 는 정상상태 육각형 궤적상에서 λ_{dqs}^v 와 λ_p^v 의 거리를 나타내며, $\Delta\lambda$ 는 가상의 60° 격자 상에서의 λ_{dqs}^v 와 λ_p^v 의 최단 거리로, 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta\lambda = \frac{\pi}{3} \frac{2V_{dc}}{3\omega_r} + \frac{2}{\sqrt{3}} \lambda_{ds}^v. \quad (5)$$

전압 기준 좌표계 상에서 자속 벡터는 항상 +q축으로 이동하므로, 인가 전압 벡터를 유지할 경우 λ_{ds}^v 는 변하지 않는다. 따라서 인가 전압 벡터를 유지하면 $\Delta\lambda$ 는 일정하게 유지되는 한편, 시간이 흐름에 따라 λ_{dqs}^v 는 자속 육각형 궤적을 따라 이동하면서 $\Delta\lambda^*$ 는 줄어들게 된다. 제안하는 알고리즘은 $\Delta\lambda^*$ 와 $\Delta\lambda$ 의 크기를 비교하여 현재 전압 벡터를 유지할지, 다음 전압 벡터를 인가할지를 결정한다. $\Delta\lambda^* > \Delta\lambda$ 의 경우 $\Delta\lambda^*$ 가 줄어들도록 인가되는 전압 벡터를 유지하며, $\Delta\lambda^* \leq \Delta\lambda$ 의 경우 다음 전압 벡터로 스위칭 한다.

5. 실험 결과

제안하는 방법의 성능 검증을 위하여 실험을 진행하였다. 표 1은 시험용 PMSM의 대표 제정수를 나타낸다. 시험은 2,400 r/min 운전 조건에서 진행되었다.

그림 5는 자속각 지령을 계단 형태로 인가하여 자속 및 전류의 응답성을 살펴본 결과이다. 여기서 추정 자속각은 자속 관측기의 출력 위상이며, 정상상태에서도 전압 고조파로 인하여 6배수 고조파를 지닌다. 제안하는 절환 방법을 통하여 약 1 ms 안에 정상상태에 도달하는 것을 볼 수 있다. 절환 직후 주파수의 전류 리플이 발생하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 제안하는 방법이 저항에 의한 전압 강하 성분이 작다는 가정 하에 설계되었기 때문이다. 실제 실험 세트에서는 케이블 및

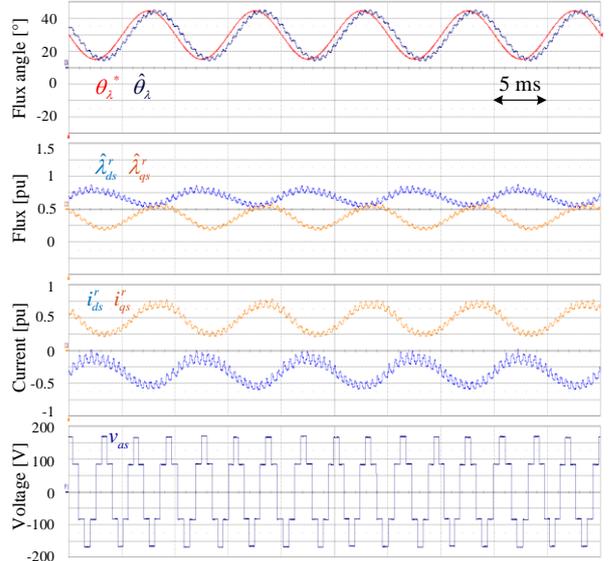


그림 6. 제안하는 절환 방법의 AC 응답.

스위칭 소자로 인하여 전체 터미널 저항이 증가하여, 모델링 오차로 인한 과도 전류 리플이 존재한다. 하지만 상위 제어기 등을 통하여 자속각 지령을 서서히 바꾸는 경우, 저항 모델링 오차로 인한 전류 리플은 상당 부분 줄어들게 된다.

그림 6은 100 Hz의 AC 자속각 지령에 대한 제안 방법의 응답 결과를 나타낸다. 제안 방법은 지령이 운전 주파수의 약 1/3 주파수로 변할 때 약 15° 위상 지연이 발생하지만, 안정적으로 동작하는 것을 확인할 수 있다.

5. PMSM 식스-스텝 운전의 자속 궤적 모델링

본 논문은 식스-스텝 운전 하에서의 영구자석 동기 전동기의 시간-최적 절환 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 정지 좌표계 상에서의 고찰을 바탕으로, 전압을 +q축에 동기화 시키는 전압 기준 좌표계에서 절환을 수행한다. 제안된 방법은 기하학적인 자속 벡터 예측을 기반으로 이루어지며, 30 kW 급 영구자석 전동기를 대상으로 제안 방법의 성능을 실험적으로 검증하였다. 제안하는 계단 형태의 지령에 대하여 1 ms 이내에 정상 상태에 도달하며, AC 형태의 지령에 대해서도 약간의 위상 지연이 발생할 뿐 안정적으로 동작하는 것을 확인하였다.

이 논문은 서울대학교 전력연구소의 지원을 받아 작성되었습니다.

참고 문헌

- [1] T. Miyajima, H. Fujimoto, and M. Fujitsuna, "A precise model-based design of voltage phase controller for IPMSM," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 12, pp. 5655–5664, Dec. 2013.
- [2] H. Lee, J. Kim, J. Hong, and K. Nam, "Torque control for IPMSM in the high speed range based on voltage angle," in *Proc. 2014 IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, 2014, pp. 2500–2505.
- [3] H. Cho, Y. Kwon, and S. Sul, "Time-optimal voltage vector transition scheme for six-step operation of PMSM," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, no. 5, pp. 5724–5735, May 2021.