

토크 각 기반 Direct Self Control 기법의 매입형 영구자석 동기전동기 고속 운전

한별*, 이준석**, 박영수*, 전지용***, 이교범*
 아주대학교*, 단국대학교**, 아주자동차대학***

High-speed Operation of Direct Self Control method based on Torque Angle for IPMSM

Byeol Han*, June-Seok Lee**, Yeongsu Bak*, Ji-Yong Chun***, Kyo-Beum Lee*
 Ajou University*, Dankook University**, Ajou Motor College***

ABSTRACT

본 논문은 토크 각 기반 Direct Self Control (DSC) 기법의 매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM) 고속 운전 방법을 제안한다. DSC 기법은 철도차량용 유도전동기에 처음으로 적용되었으며, 토크 동특성이 우수하고 약자속 영역에서 6-스텝 운전의 구현이 유리한 장점이 있다. 기존 DSC 기법으로 IPMSM을 구동하는 경우 토크 동특성이 우수하지만, 약자속 영역에서 6-스텝 운전의 성능이 떨어지는 단점이 있다. 본 논문에서는 지령 토크 각을 이용한 DSC 기법의 IPMSM 고속 운전 방법을 제안한다. 제안하는 방법의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서 론

매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)은 효율 및 전력 밀도가 높아 여러 응용 분야에 활발하게 사용되고 있다. 특히, IPMSM은 영구자석이 회전자에 매입된 기계적 구조 때문에 고속 운전에 적합하여, 유도전동기(Induction Motor, IM)를 대체하여 견인 시스템의 전동기로 사용하기 위한 연구가 진행되고 있다^[1].

견인 전동기의 제어 기법 또한 여러 가지 연구가 수행되었으며, 그 중에서 자속 기준 제어(Field Oriented Control, FOC)는 IPMSM 및 IM을 제어하는 보편적인 제어 기법이다. FOC는 3상 전류를 회전자 쇄교 자속 기준 $d-q$ 축 동기 좌표계로 좌표 변환하고 비례-적분 제어를 사용하여 토크와 자속을 간접적으로 제어한다.

Direct Self Control (DSC)은 철도차량용 IM에 처음으로 적용되었으며, 고정자 저항만 사용하므로 정수 변동에 강인한 장점이 있다^[2]. 인버터의 스위칭 동작이 전동기 자속 자체로 결정되고, 고정자 쇄교 자속의 궤적이 공간상에 정육각형을 형성하므로 고속에서 6-스텝 운전을 쉽게 구현할 수 있다. 이러한 DSC 기법의 장점을 철도차량용 IPMSM에 적용하기 위해 Modified-DSC (M-DSC)와 같은 연구가 진행되었으며, M-DSC 기법이 FOC 기법을 대체할 수 있음을 입증하였다^[3]. 하지만, 기존 DSC 기법 기반의 철도차량용 IPMSM 고속 운전은 토크 각을 고려하지 않으므로 약자속 영역에서 성능이 떨어지는 단점이 있다.

본 논문에서는 토크 각 기반 DSC 기법의 IPMSM 고속 운전 방법을 제안한다. 토크 각 기반의 3상 고정자 쇄교 자속 추

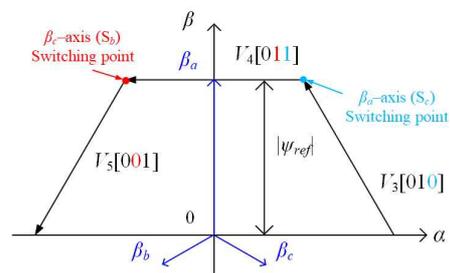


그림 1 DSC 기법의 스위칭 동작 원리
 Fig. 1 Switching operation principle of DSC method

정 방법과 기존 DSC 기법으로 IPMSM의 6-스텝 운전 시 문제점을 분석하고, 지령 토크 각으로 DSC 기법을 수행하여 IPMSM의 원활한 고속 운전이 가능하게 한다. 제안하는 제어 기법의 타당성은 시뮬레이션으로 검증한다.

2. Direct Self Control 기법

2.1 Direct Self Control 기법의 기본 원리

기존 DSC 기법의 원리는 제어 주기 동안 일정한 전압 벡터를 인가하여 IM의 고정자 쇄교 자속의 궤적을 정육각형으로 제어하는 것이다. IM의 토크 $T_{e,IM}$ 과 고정자 쇄교 자속 ψ_s 는 지령 토크 및 지령 자속으로 직접 제어한다^[2].

그림 1은 DSC 기법의 스위칭 원리를 나타낸다. 스위칭 동작은 정지 좌표계 $\alpha-\beta$ 축 고정자 쇄교 자속 $\psi_{\alpha\beta}$ 를 β 축 기준으로 3상 역변환하고 각 β_{abc} 축 성분과 지령 자속 $|\psi_{ref}|$ 를 비교하여 이루어진다. 예를 들어, 고정자 쇄교 자속 β_a 축 성분이 지령 자속 $+\psi_{ref}$ 를 초과하면 $V_3(010)$ 전압 벡터가 $V_4(011)$ 전압 벡터로 스위칭된다. 이와 같은 방법으로 3상 고정자 쇄교 자속 $\psi_{\beta abc}$ 와 지령 자속의 크기 $|\psi_{ref}|$ 에 의한 스위칭 동작으로 고정자 쇄교 자속 궤적은 공간 상에 정육각형을 형성한다.

정지 좌표계 $\alpha-\beta$ 축 고정자 쇄교 자속 $\psi_{\alpha\beta}$ 와 고정자 쇄교 자속의 크기 ψ_s 는 $\alpha-\beta$ 축 고정자 전압 $v_{\alpha\beta}$ 와 전류 $i_{\alpha\beta}$, 고정자 저항 R_s 를 이용하여 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$\psi_{\alpha\beta} = \int (v_{\alpha\beta} - R_s i_{\alpha\beta}) dt, \psi_s = \sqrt{\psi_\alpha^2 + \psi_\beta^2} \quad (1)$$

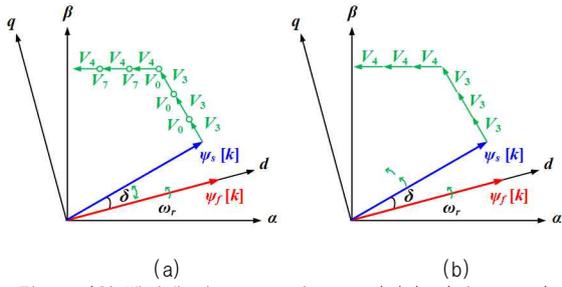


그림 2 전압 벡터에 따른 IPMSM의 토크 각 (a) 일정 토크 영역, (b) 일정 출력 영역
Fig. 2 Torque angle of IPMSM by applied voltage vectors (a) constant torque region, (b) constant power region

DSC 기법에서 3상 고정자 쇄교 자속 $\psi_{\beta abc}$ 는 식 (1)을 이용하여 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} \psi_{\beta a} &= \psi_{\beta}, \quad \psi_{\beta b} = -0.5\psi_{\beta} + \sqrt{3}/2\psi_{\alpha}, \\ \psi_{\beta c} &= -0.5\psi_{\beta} - \sqrt{3}/2\psi_{\alpha}. \end{aligned} \quad (2)$$

$T_{e,IM}$ 은 $\psi_{\alpha\beta}$, $i_{\alpha\beta}$, IM의 극 쌍수 P_n 을 이용하여 식 (3)과 같이 나타내며, 영전압 벡터를 인가하는 토크 히스테리시스 제어기로 토크의 크기를 조절한다.

$$T_{e,IM} = \frac{3}{2}P_n(\psi_{\alpha}i_{\beta} - \psi_{\beta}i_{\alpha}), \quad (3)$$

2.2 Direct Self Control 기법의 6-스텝 운전

전동기의 역기전력은 회전자 속도에 비례하여 증가하지만, 인버터 출력 전압의 한계로 고정자 전압은 더 이상 증가하지 못한다. 전동기의 토크를 최대 발생시키기 위해 유효 자속의 크기를 감소시켜야 하며 이를 약자속 제어라고 한다^[1].

6-스텝 운전은 구형파 운전으로 고속에서 인버터의 전압 이용률을 최대 발생시키며 출력 가능한 토크 영역을 증가시키지만, 토크 리플이 큰 단점이 있다. 하지만, 철도차량과 같은 견인 시스템에서는 토크 리플에 의해 전동기에서 발생하는 진동이 차륜과 레일의 마찰에 의해 발생하는 진동보다 훨씬 작으므로 6-스텝 운전은 인가 전압의 실효값을 높이고 스위칭 손실을 저감하는 등의 장점이 있다.

DSC 기반 6-스텝 운전은 고정자 쇄교 자속을 정육각형으로 제어하기 때문에 $|\psi_{ref}|$ 를 감소시키고 토크 히스테리시스 제어를 사용하지 않는 것만으로 간단하게 구현할 수 있다^[2].

2.3 DSC 기법 기반 IPMSM 6-스텝 운전의 문제점

기존 DSC 기법으로 IM의 6-스텝 운전은 쉽게 구현할 수 있지만, IPMSM의 6-스텝 운전은 쉽게 구현할 수 없다. 이는 IM과 IPMSM의 토크가 각각 슬립 각 및 토크 각에 의해 발생하는 차이에 기인한다.

그림 2의 (a)와 (b)는 각각 일정 토크 영역과 약자속 제어 영역인 일정 출력 영역에서 전압 벡터에 의한 IPMSM의 토크 각을 나타낸다. 일정 토크 영역에서는 유효 전압 벡터에 의해 토크 각이 증가하고, 영전압 벡터에 의해 토크 각이 감소하여 토크 각을 일정하게 유지할 수 있다. 하지만, 6-스텝 운전을 수행하는 일정 출력 영역에서는 유효 전압 벡터만 인가하므로 토크 각은 점점 증가하여 IPMSM의 안정 운전 범위를 초과하고

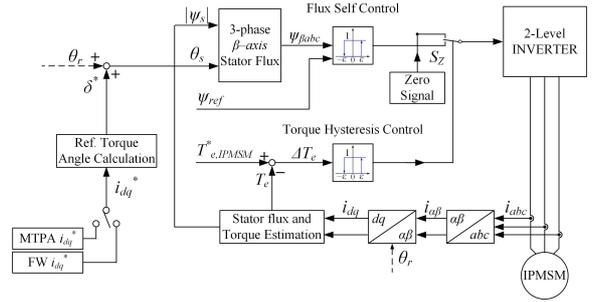


그림 3 제안하는 토크 각 기반 IPMSM DSC 블록도
Fig. 3 Block diagram of proposed IPMSM DSC method using torque angle

시스템의 불안정을 초래한다.

3. 토크 각 기반 IPMSM의 DSC 기법

3.1 토크 각 기반 DSC 기법 및 블록도

그림 3은 제안하는 토크 각 기반 IPMSM의 DSC 기법 블록도를 나타내며, 고정자 쇄교 자속 및 토크 추정, 지령 토크 각 계산, 고정자 쇄교 자속 및 토크 제어 블록으로 구성한다.

고정자 쇄교 자속은 $d-q$ 축 동기 좌표계 전류 i_{dq} 로 추정하며 $d-q$ 축 고정자 쇄교 자속(ψ_{dq})은 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_f, \quad \psi_q = L_q i_q, \quad \psi_s = \sqrt{\psi_d^2 + \psi_q^2}, \quad (4)$$

여기서, L_{dq} 는 $d-q$ 축 인덕턴스, ψ_f 는 영구자석 쇄교자속을 나타낸다.

고정자 쇄교 자속 각 θ_s 는 회전자 쇄교 자속 각 θ_r 과 토크 각 δ 로 표현하고 δ 는 식 (4)를 이용하여 식 (5)로 나타낸다.

$$\theta_s = \theta_r + \delta, \quad \delta = \tan^{-1}(\psi_q/\psi_d). \quad (5)$$

스위칭 동작을 위한 $\psi_{\beta abc}$ 는 식 (4)와 식 (5)를 이용하여 식 (6)으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} \psi_{\beta a} &= \psi_{\beta} = \psi_s \sin \theta_s, \quad \psi_{\beta b} = \psi_s \sin(\theta_s - 2/3\pi), \\ \psi_{\beta c} &= \psi_s \sin(\theta_s + 2/3\pi). \end{aligned} \quad (6)$$

IPMSM의 토크 $T_{e,IPMSM}$ 은 식 (7)로 나타낸다.

$$T_{e,IPMSM} = \frac{3}{2}P_n\{\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q\}. \quad (7)$$

3.2 지령 토크 각 계산

일정 토크 영역에서 IPMSM의 토크와 고정자 쇄교 자속은 각각 DSC 기법의 지령 토크와 지령 고정자 쇄교 자속으로 제어한다. 반면에, 일정 출력 영역에서 IPMSM의 고정자 쇄교 자속은 DSC 기법의 지령 고정자 쇄교 자속으로 제어하지만, 토크는 6-스텝 운전을 수행하기 위해 제어되지 않는다.

일정 출력 영역의 6-스텝 운전 중 토크 각을 안정 범위에서 제어하기 위해 FOC 기법의 $d-q$ 축 지령 전류 i_{dq}^* 및 식 (4)

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation parameters

고정자 저항	39.2 mΩ	d -축 인덕턴스	1.833 mH
q -축 인덕턴스	5.335 mH	영구자석 쇠교자속	0.5 Wb
극 수	6	직류단 전압	1500 V
정격 출력	210 kW	정격 속도	2350 rpm
정격 토크	1220 Nm	제어 주기	200 μs

를 이용하여 지령 토크 각 δ^* 를 식 (8)과 같이 나타낸다.

$$\psi_d^* = L_d i_d^* + \psi_f, \psi_q^* = L_q i_q^*, \delta^* = \tan^{-1}(\psi_q^*/\psi_d^*). \quad (8)$$

결과적으로, 고정자 쇠교 자속의 크기는 i_{dq} 로 제어하고 DSC 기법의 스위칭 동작에 사용되는 3상 고정자 쇠교 자속의 위상을 θ_s 과 δ^* 로 제어하면 토크 각을 고려한 IPMSM의 DSC 기법을 수행할 수 있다. 여기서, d - q 축 지령 전류는 단위 전류당 최대 토크(Maximum Torque per Ampere, MTPA) 및 약자속(Flux Weakening, FW) 운전의 전류 식으로 설정한다[1].

4. 시뮬레이션 결과

PSIM 시뮬레이션을 통해 제안하는 토크 각 기반 DSC 기법의 IPMSM 고속 운전 방법의 타당성을 검증하였다. 시뮬레이션 파라미터는 표 1과 같다.

제안하는 토크 각 기반 DSC 기법의 IPMSM 고속 운전 제어 시퀀스는 다음과 같다. 일정 토크 영역인 기동 시에는 정격 속도의 30 %까지 FOC 기법으로 MTPA 운전을 수행하며, 정격 속도까지 제안하는 DSC 기법과 MTPA 지령 전류로 계산한 δ^* 로 MTPA 운전을 수행한다. 정격 속도 이상의 일정 출력 영역에서는 토크 히스테리시스 제어를 사용하지 않고 DSC 기반 FW 지령 전류로 계산한 δ^* 로 6-스텝 운전을 수행하여 IPMSM을 구동한다.

그림 4는 제안하는 토크 각 기반 DSC 기법으로 IPMSM을 4000 rpm까지 가속한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 4의

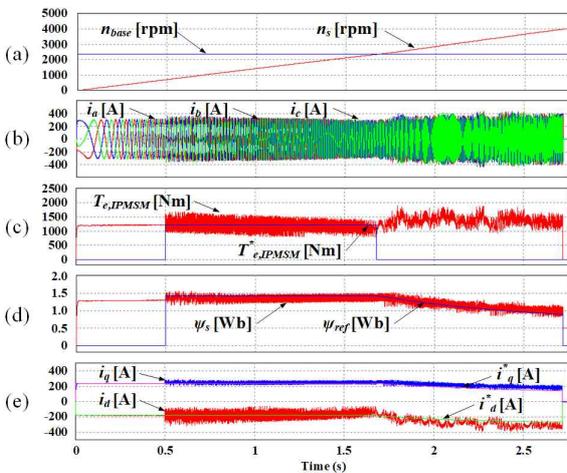


그림 4 토크 각 기반 DSC 기법의 IPMSM 시뮬레이션 결과
Fig. 4 Simulation results of DSC method for IPMSM based on torque angle

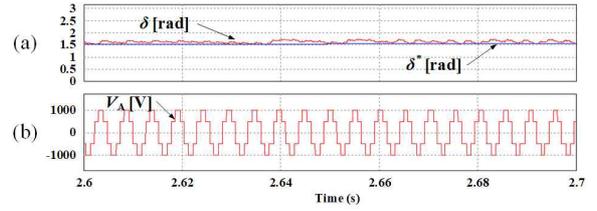


그림 5 일정 출력 영역에서 DSC 기법의 IPMSM 6-스텝 운전 시뮬레이션 결과
Fig. 5 Simulation results of six-step operation of IPMSM based on DSC method in constant power region

(a)는 IPMSM의 속도 n_s 및 약자속 영역의 시작점인 기저 속도 n_{base} 를 나타내며, 그림 4의 (b)는 3상 전류 i_{abc} , 그림 4의 (c)는 $T_{e,IPMSM}$ 및 지령 토크 $T_{e,IPMSM}^*$ 를 나타낸다. 그림 4의 (d)는 ψ_s 와 ψ_{ref} 를 나타내며, 그림 4의 (e)는 i_{dq} 및 i_{dq}^* 를 나타낸다.

그림 5는 제안하는 DSC 기법으로 일정 출력 영역에서 IPMSM의 6-스텝 운전을 나타낸다. 그림 5의 (a)는 δ 와 δ^* 를 나타내며, δ 는 i_{dq}^* 로 생성한 δ^* 에 따라 제어된다. 그림 5의 (b)는 A상 전압을 나타내며, 토크 히스테리시스 제어를 사용하지 않으므로 A상 전압은 기본과 1 주기에 6 개의 유효 전압 벡터만 인가하는 6-스텝 운전을 수행한다.

5. 결론

본 논문은 토크 각 기반 DSC 기법의 IPMSM 고속 운전 방법을 제안하였다. 기존 DSC 기법으로 IPMSM을 구동하는 경우 고속에서 6-스텝 운전의 문제점을 분석하고, FOC 기법의 지령 전류를 이용하여 지령 토크 각을 생성하는 방법을 제시하였다. 지령 토크 각으로 DSC 기법을 수행하여 약자속 영역에서 IPMSM의 원활한 6-스텝 운전을 수행하였다. 제안하는 기법의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

이 논문은 국토교통부 철도기술연구개발사업의 연구비지원(20RTRP-B146008-03)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] B. Han, J.-S. Lee, Y. Bak, and K.-B. Lee, "Performance Analysis of Direct Torque Control method for Traction System based on IPMSM," *Journal of the Korean Society for Railway*, vol. 23, no. 1, pp. 21-34, Jan. 2020.
- [2] A. Steimel, "Direct Self-Control and Synchronous Pulse Techniques for High-Power Traction Inverters in Comparison," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 4, pp. 810-820, Aug. 2004.
- [3] C. Calleja, A. Lopez-de-Heredia, H. Gaztanaga, L. Aldasoro, and T. Nieva, "Validation of a Modified Direct-Self-Control Strategy for PMSM in Railway-Traction Applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 63, no. 8, pp. 5143-5155, Aug. 2016.