

고정자 자속의 해석을 통한 직접 토크 제어 SPMSM의 최대 토크 운전

김상훈[†]

Maximum Torque Operating Strategy based on Stator Flux Analysis for Direct Torque and Flux Control of a SPMSM

Sang-Hoon Kim[†]

Abstract

This paper proposes a maximum torque operation strategy for the direct torque control of a surface-mounted permanent-magnet synchronous motor (SPMSM). The proposed method analyzes the available operation region of the stator flux of the SPMSM under voltage and current constraints. Based on this analysis, the optimal stator flux trajectory that yields the maximum torque is obtained across the entire operation region, including constant torque and constant power regions. The proposed strategy is also applicable in the flux-weakening region II operation of the SPMSM, which has no speed limit. The validity of the proposed method is verified through experiments conducted on an 800 W SPMSM drive system.

Key words: SPMSM, Direct torque control, Optimal stator flux trajectory, Flux weakening region

1. 서 론

효율이 높고 출력 밀도가 크며 빠른 동특성을 갖는 영구자석 동기 전동기는 순시 토크 제어가 요구되는 고성능 전동기 구동분야에 가장 우수한 성능을 제공할 수 있다.

영구자석 동기 전동기의 고성능 순시 토크 제어 기법으로는 벡터 제어 기법(Vector Control)과 직접 토크 제어 기법(Direct Torque Control, DTC)이 있다. 벡터 제어 기법은 고정자 전류를 자속의 위치를 기준으로 자속과 토크를 제어할 수 있는 성분으로 분리하여 이들을 각각 독립적으로 빠르게 제어함으로써 순시 토크제어를 실현한다^[1]. 이러한 벡터 제어 기법은 현재 고성능 전동기 구동시스템에 가장 널리 이용되고 있지만, 고정자 전류를 이용하여 자속과 토크를 간접적으로 제어하기 때문에 토크 제어의 동특성 향상에 한계가 있으며 그 구

현이 복잡하다. 이에 비해 직접 토크 제어 기법은 고정자 쇄고 자속과 토크를 직접 독립적으로 제어하는 기법으로 우수한 토크 제어의 동특성을 보이며, 위치 정보에 의존하지 않는 센서리스(Sensorless) 구동이 가능하기 때문에 최근 세탁기 구동 등의 고성능 전동기 분야에 그 적용이 늘고 있다^[2-3].

그림 1은 전통적인 스위칭 테이블 방식의 직접 토크 제어 기법의 블록도를 나타내고 있다^[4]. 이 기법에서는 매 제어 주기마다 전동기의 인가전압과 전류로부터 연산된 고정자 자속과 토크를 그 지령값과 비교하고 히스테리시스 제어를 통해 그 오차를 감소시키도록 하는 전압 벡터가 선정되어 바로 인버터의 스위칭 상태가 결정된다. 통상적으로 전압 벡터의 선정은 미리 결정된 룩업 테이블(Look-up table)이 사용된다.

이러한 직접 토크 제어 방식은 매 제어 주기마다 제어기나 전압 변조에 의한 지연 없이 바로 스위칭 상태가 결정되므로 동특성이 빠르고, 급작스러운 부하의 변동이나 순간적인 지령 변동 등에 대한 응답특성이 우수하다. 또한 제어구조가 매우 단순하고, 토크 제어특성이 전동기의 제정수 변동에 영향이 없으며, 연산시간이 작다는 장점이 있다. 그러나 토크 리플이 크고 히스테리시스 제어기의 영향으로 인버터의 스위칭 주파수가 운전 조건에 따라 변동하는 문제가 있다^[5].

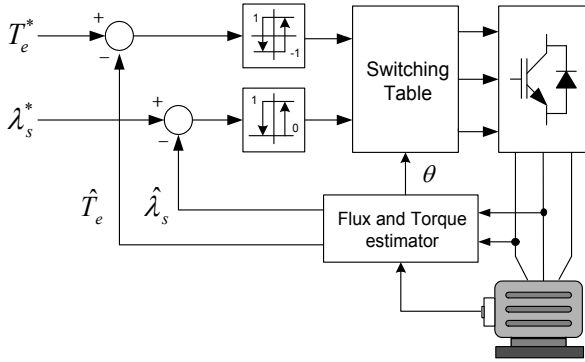
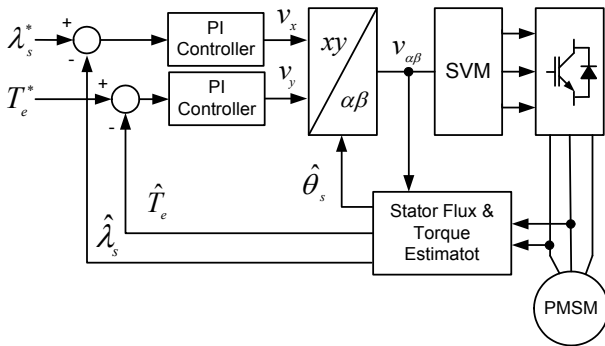
Paper number: TKPE-2014-19-5-10

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: kshoon@kangwon.ac.kr, Dept. of Electric & Electrical Engineering, Kangwon Nat'l Univ. Tel: +82-33-250-6293

Manuscript received Jun. 10, 2014; accepted Sep. 1, 2014

— 본 논문은 2011년 전력전자학술대회 우수추천논문임

Fig. 1. Block diagram of a DTC using a switching table^[3].Fig. 2. Block diagram of a DTFC Method^[5].

이러한 문제점을 보완하기 위하여 공간 벡터 전압 변조 기법(Space Vector PWM, SVPWM)을 이용한 DTFC(Direct Torque and Flux Control) 기법이 제안되었다^[6]. 이 기법에서는 그림 2에 보이듯이 토크와 고정자 쇄교 자속을 독립된 두 개의 비례적분 제어기를 사용하여 제어하고 그 출력을 고정자 전압으로 선형함으로써 스위칭 주파수가 일정한 SVPWM 방식을 적용할 수 있도록 하고 있다.

이러한 고정자 쇄교 자속과 토크를 직접 제어하는 직접 토크 제어 방식에서 가장 중요한 사항은 운전 조건에 따른 최적의 고정자 자속 지령과 토크 지령을 구하는 것이다. 기존의 직접 토크 제어 시스템에서는 통상적으로 회전자 자속 기준 벡터 제어 기법에서 사용된 전류 지령을 이용하여 고정자 자속 및 토크 지령치를 구하여 사용하고 있다^[7-8]. 이와는 달리 [9]의 방법에서는 전동기의 전압 제한 조건만을 고려하여 고정자 자속 지령의 크기를 구하고 전류 제한 조건을 이용하여 토크 지령의 제한치를 결정하여 운전하고 있다.

고정자 자속의 크기는 전동기의 전압 제한 조건뿐만 아니라 전류 제한 조건에도 영향을 받기 때문에 이들 두 조건을 모두 고려하여 그 크기를 결정할 필요가 있다. 또한 고속 영역인 일정 출력 영역에서 운전 가능한 고정자 자속의 지령 값은 영구자석의 자속 크기 λ_{pm} 과 $L_s I_{smax}$ 의 크기에 따라 달라진다. 더욱이 기존 방법들은 최대 속도의 제한이 있는 영구자석 동기 전동기에 대해서만 적용이 가능하였고, 운전 속도의 제한을 갖지 않는

전동기의 고속 영역 운전에 대한 연구는 이루어지지 않고 있다.

본 논문에서는 표면 부착형 영구자석 동기 전동기(Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor, SPMSM)의 직접 토크 제어 시에 필요한 최적의 운전점을 해석하였다. 전동기 구동 시에 요구되는 전압과 전류 제한 조건을 모두 고려하여 최대 토크 운전을 위한 고정자 자속 벡터의 최적 궤적을 분석하여, 이를 바탕으로 일정 토크 영역부터 일정 출력 영역까지의 전 운전 영역에서 직접 토크 제어 시에 필요한 자속 지령을 생성하도록 하였다. 또한 제한된 방법은 속도 제한을 갖는 SPMSM뿐만 아니라 속도 제한이 없는 SPMSM까지도 적용이 가능하다. 제안된 기법의 유효성은 속도 제한이 없는 800 W SPMSM에 대한 실험을 통하여 검증하였다.

2. SPMSM의 운전 영역 해석

먼저 SPMSM 구동 시에 요구되는 전압과 전류 제한 조건에 따른 고정자 쇄교 자속의 운전 가능 범위를 분석해보기로 한다^[10].

2.1 전류 및 전압 제한 조건

전동기의 허용 가능한 최대 고정자 전류를 I_{smax} 라 주어진 경우, 전동기의 d와 q축 고정자 전류는 좌표계와는 관계없이 항상 식(1)과 같은 제한 조건 내에서 운전될 필요가 있다.

$$i_{ds}^2 + i_{qs}^2 \leq I_{smax}^2 \quad (1)$$

이 전류 제한 조건을 SPMSM에 대해 동기 좌표계의 d와 q축 고정자 쇄교 자속 평면상($\lambda_{ds}^r - \lambda_{qs}^r$)에서 표현하기 위하여 SPMSM의 고정자 쇄교 자속 식(2)와 (3)을 전류에 대하여 정리하면 식(4) 및 (5)와 같이 된다.

$$\lambda_{ds}^r = L_s i_{ds}^r + \lambda_{pm} \quad (2)$$

$$\lambda_{qs}^r = L_s i_{qs}^r \quad (3)$$

$$i_{ds}^r = \frac{\lambda_{ds}^r - \lambda_{pm}}{L_s} \quad (4)$$

$$i_{qs}^r = \frac{\lambda_{qs}^r}{L_s} \quad (5)$$

여기서 L_s 는 고정자 인덕턴스, λ_{pm} 은 영구자석의 자속이다. 이 d와 q축 고정자 전류를 식(1)의 전류 제한 조건에 대입하면 전류 제한 조건에 의한 고정자 쇄교 자속의 운전 가능 범위가 다음과 같이 표현된다.

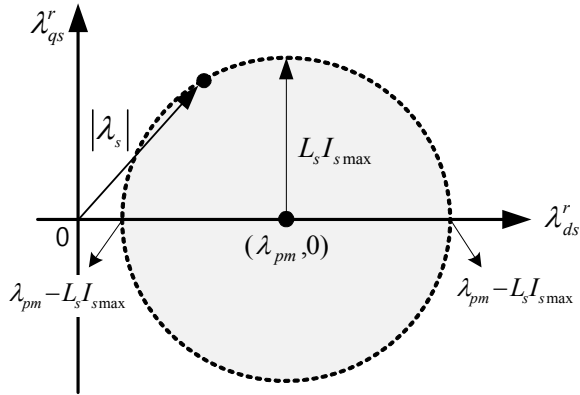


Fig. 3. Operating region of the stator flux linkage by the current constraint.

$$(\lambda_{ds}^r - \lambda_{pm})^2 + \lambda_{qs}^{r2} = (L_s I_{smax})^2 \quad (6)$$

이에 따라 고정자 자속의 운전 가능 범위는 그림 3에 보이듯이 중심이 $(\lambda_{pm}, 0)$ 이고 반지름이 $L_s I_{smax}$ 인 원의 내부로 주어진다. 여기서 1 상만이 전동기로 동작 시의 운전 영역이다.

이러한 운전가능범위는 운전 주파수와는 관계없고 단지 허용된 전류의 크기 I_{smax} 에만 의존한다. 그런데 동일한 전류 크기라도 동작 전류의 위상에 따라 고정자 자속의 크기 $|\lambda_s|$ 는 달라질 수 있다. 전류 제한 조건으로 인한 고정자 자속 크기의 범위는 다음과 같다.

$$|\lambda_{pm} - L_s I_{smax}| \leq |\lambda_s| \leq |\lambda_{pm} + L_s I_{smax}| \quad (7)$$

이 식으로부터 λ_{pm} 과 $L_s I_{smax}$ 의 크기 차이에 따라 운전 가능한 최소 자속의 크기가 결정된다는 것을 알 수 있다. 또한 이에 따라 고속 영역의 운전 가능 범위가 달라진다. 고속 운전을 위해서는 고정자 자속의 크기를 감소시켜줄 수 있어야 하는데, $\lambda_{pm} - L_s I_{smax} \leq 0$ 의 경우는 허용된 전류 크기 I_{smax} 로 고정자 자속의 크기를 충분히 줄여줄 수 있는 약자속 제어가 가능하게 되어 운전 가능한 최대 속도에 제한이 없게 된다. 그러나 반대로 그림 3에 보이는 $\lambda_{pm} - L_s I_{smax} > 0$ 의 경우에는 고정자 자속을 줄일 수 있는 한계가 존재하게 되어 운전 가능한 최대 속도에 제한이 있게 된다.

전동기가 사용할 수 있는 최대 고정자 전압을 V_{smax} 라 하면, 전동기의 d과 q축 전압은 언제나 다음과 같은 전압 제한 조건 내에서 제어가 가능하다.

$$v_{ds}^2 + v_{qs}^2 \leq v_{smax}^2 \quad (8)$$

여기서 V_{smax} 는 인버터의 이용 가능한 직류 전압과 적용된 PWM 기법에 따라 달라진다. 고정자 저항의 전압 강하를 무시한 경우 SPMSM의 정상상태 동기 좌표계 d와 q축 고정자 전압 식은 다음과 같다.

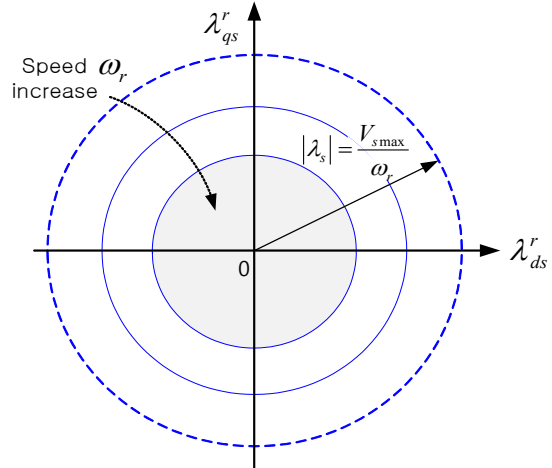


Fig. 4. Operating region of the stator flux linkage by the voltage constraint.

$$v_{ds}^r \approx -\omega_r \lambda_{qs}^r \quad (9)$$

$$v_{qs}^r \approx \omega_r \lambda_{ds}^r \quad (10)$$

여기서 ω_r 은 회전자 속도이다. 이 두 식을 식(8)에 대입하여 고정자 자속에 대하여 정리하면 다음과 같은 전압 제한 조건에 의한 고정자 쇄교 자속의 운전 가능 범위를 얻을 수 있다.

$$\lambda_{ds}^{r2} + \lambda_{qs}^{r2} = \left(\frac{V_{smax}}{\omega_r}\right)^2 \quad (11)$$

이러한 고정자 자속의 운전 가능 범위는 그림 4에 보이는 바와 같이 d와 q축 자속 평면상에서 V_{smax}/ω_r 의 반지름을 가진 원의 내부가 된다. 따라서 주어진 고정자 전압 하에서 얻을 수 있는 고정자 자속의 최대 크기 $|\lambda_{s-max}| = V_{smax}/\omega_r$ 이다. 그러나 이 크기는 운전 속도 ω_r 에 따라 달라지는데, 속도가 증가함에 따라 감소한다.

3. SPMSM의 최적 운전점

SPMSM의 직접 토크 제어 시에 고정자 자속의 운전 가능 범위는 앞서 살펴본 전류 제한 조건과 전압 제한 조건을 동시에 만족시켜야한다. 이를 만족하는 운전 가능 범위는 전압 제한 조건의 영역이 속도의 함수이므로 속도에 따라 달라지는데, 크게 일정 토크 영역과 일정 출력 영역으로 나누어 살펴볼 필요가 있다.

각각의 영역에서 직접 토크 제어 시에 최대 토크 운전이 가능하도록 하는 최적의 고정자 자속 운전점은 다음과 같이 구할 수 있다. 그런데 $L_s I_{smax}$ 와 λ_{pm} 의 크기에 따라 일정 출력 영역의 범위와 특성이 달라지므로, 먼저 그림 5에 보이는 $\lambda_{pm} - L_s I_{smax} > 0$ 경우, 즉 최대 속도의 제한을 갖는 SPMSM에 대해 살펴보기로 한다. 또한 해석은 전동기 동작의 정방향 운전 영역인 1 상한에서만 살펴본다.

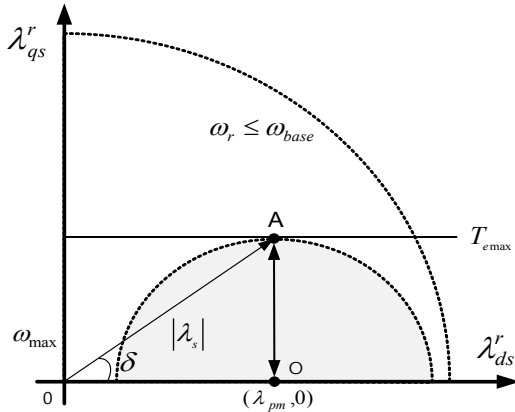


Fig. 5. Trajectory of the stator flux for the maximum torque in the constant torque region ($\lambda_{pm} > L_s I_{smax}$).

3.1 일정 토크 영역

이 영역은 정격속도이하의 속도 범위로서 운전 속도가 크지 않아 통상 전압 제한 영역이 전류 제한 영역을 포함한다. 이것은 전압 제한 조건은 문제되지 않으며, 운전 가능한 고정자 자속의 범위는 단지 허용된 고정자 전류에 의해서만 제한된다는 의미이다.

SPMSM의 출력 토크는 고정자 자속의 크기 $|\lambda_s|$ 와 고정자 자속과 회전자 자속 사이의 위상차인 부하각 δ 으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{1}{L_s} \lambda_{pm} |\lambda_s| \sin \delta \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{1}{L_s} \lambda_{pm} \lambda_{qs}^r \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 P 는 극수이다. 직접 토크 제어 시에는 고정자 자속의 크기와 부하각으로 토크의 크기를 제어한다.

출력 토크를 최대로 하기 위해서는 $|\lambda_s| \sin \delta$ 의 크기를 최대화하는 것이 바람직하는데, 이를 위해서는 $|\lambda_s| \sin \delta$ 는 q축 고정자 자속 λ_{qs}^r 이므로 이 자속의 크기를 최대로 설정할 필요가 있다. 이로부터 전류 제한 조건만을 고려하는 경우에 최대 토크가 발생하는 고정자 자속의 크기와 부하각은 그림 5에 보이는 운전점 A이 되며 이 경우의 고정자 자속과 부하각은 다음과 같이 된다.

$$\lambda_{ds}^{r*} = \lambda_{pm} \quad (13)$$

$$\lambda_{qs}^{r*} = L_s I_{smax} \quad (14)$$

$$|\lambda_s|^{*} = \sqrt{\lambda_{ds}^{r*2} + \lambda_{qs}^{r*2}} = \sqrt{\lambda_{pm}^2 + (L_s I_{smax})^2} \quad (15)$$

$$\delta^* = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{qs}^{r*}}{\lambda_{ds}^{r*}} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{L_s I_{smax}}{\lambda_{pm}} \right) \quad (16)$$

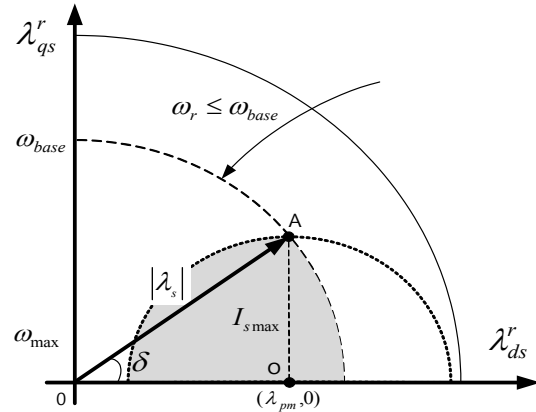


Fig. 6. Onset speed for flux weakening operation.

이 최대 토크 운전점 A에서의 토크는 다음과 같다.

$$T_{e-max} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_{pm} I_{smax} \quad (17)$$

이러한 고정자 자속 지령은 벡터 제어 시에 동손을 최소화하는 MTPA(Maximum Torque Per Ampere) 운전과 동일한 결과를 가져온다. 즉, 식(13)과 (14)의 자속 지령

$$\lambda_{ds}^{r*} = L_s i_{ds}^{r*} + \lambda_{pm} = \lambda_{pm} \quad (18)$$

$$\lambda_{qs}^{r*} = L_s i_{qs}^{r*} = L_s I_{smax} \quad (19)$$

는 다음과 같은 고정자 전류 지령을 발생하기 때문이다.

$$i_{ds}^{r*} = 0, \quad i_{qs}^{r*-max} = I_{smax} \quad (20)$$

따라서 A점은 SPMSM의 MTPA 운전점이다.

이 속도 영역에서는 요구되는 토크 지령에 따라 운전점이 직선 OA내에서 움직이며 이에 따라 q축 자속의 크기와 부하각이 달라진다.

3.2 일정 출력 영역: 약자속 영역 I

일정 토크 영역에서 속도가 증가함에 따라 전압 제한 영역의 크기는 줄어들고 그림 6에 보이듯이 어떤 속도에서 전압 제한 원이 MTPA의 운전점 A를 만나게 된다.

이 지점의 각속도가 바로 일정 출력 영역의 개시 속도인 기저속도 ω_{base} 이다. 이 이상의 속도 영역에 대한 고정자 자속의 운전 가능 범위는 전압 제한 조건과 전류 제한 조건 모두에 의해 영향을 받는다.

기저속도 ω_{base} 이상의 속도 영역에서 전압과 전류 제한 조건 모두를 고려하는 경우에 운전점 A는 그림 7에 보이듯이 더 이상 운전 가능 범위에 있지 않다. 운전 가능한 영역 내에서 출력 토크가 최대가 되는 운전점은 두

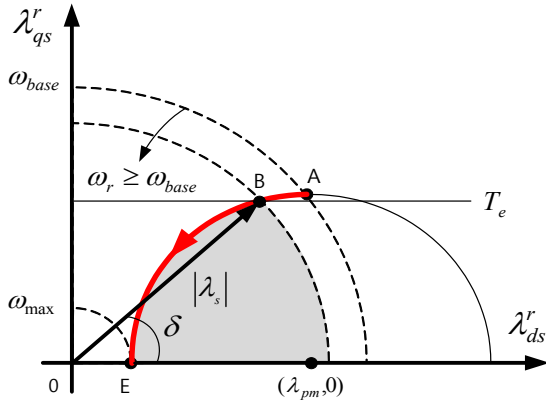


Fig. 7. Trajectory of the stator flux for the maximum torque in the flux weakening region ($\lambda_{pm} > L_s I_{smax}$).

제한 조건의 교점인 B점이 된다. 그 이유는 두 제한 조건의 교점에서 λ_{qs}^r 의 크기가 가장 크기 때문이다. 이러한 교점에서의 d축과 q축 고정자 자속은 식(6)과 (11)로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\lambda_{ds}^{r*} = \frac{\left(\frac{V_{smax}}{\omega_r}\right)^2 + \lambda_{pm}^2 - (L_s I_{smax})^2}{2\lambda_{pm}} \quad (21)$$

$$\lambda_{qs}^{r*} = \sqrt{(L_s I_{smax})^2 - (\lambda_{ds}^{r*} - \lambda_{pm})^2} \quad (22)$$

속도가 증가함에 따라 이러한 최적의 운전점은 원주상을 따라 A에서 E로 움직인다. 이에 따라 고정자 자속의 크기는 계속 감소하고 부하각 δ 는 증가하다가 영으로 감소하는데, 출력 가능한 최대 토크는 줄어든다. $\lambda_{pm} - L_s I_{smax} > 0$ 의 경우 E점에서 최소의 고정자 자속의 크기 $|\lambda_s| = |\lambda_{pm} - L_s I_{smax}|$ 를 얻게 되며, 이때의 속도가 SPMSM의 운전 가능한 최대 속도 ω_{max} 가 된다.

$\lambda_{pm} \leq L_s I_{smax}$ 인 SPMSM의 경우에는 속도가 증가함에 따라 두 제한 조건의 교점이 최적의 운전점이 되지 못하는 또 다른 운전 영역이 존재하게 된다. 이 영역은 $\lambda_{pm} \leq L_s I_{smax}$ 의 조건으로 인하여 그림 8에 보이듯이 전압 제한 영역이 전류 제한 영역 내에 포함되는 경우에 발생한다. 이 영역의 시작 속도는 전압 제한 조건만을 고려한 경우의 최적의 운전점 (즉, $|\lambda_s| = \lambda_{qs}^{r*} = V_{smax}/\omega_r$)인 MTPV(Maximum Torque per Voltage) 운전점과 교점이 같아지는 속도 ω_1 에서 시작된다. 이 속도 영역은 유도 전동기의 특성 영역과 유사한 영역으로 볼 수 있다.

$\omega_r \geq \omega_1$ 에서의 최적 운전점은 제한 조건들의 교점이 아니라 전압 제한 조건만을 고려한 경우의 최적 운전점, 즉 MTPV 운전점이 된다. 이 점에서 λ_{qs}^r 의 크기가 교점에서보다 크기 때문이다. 이 경우 최적의 자속 지령은 다음과 같이 주어진다.

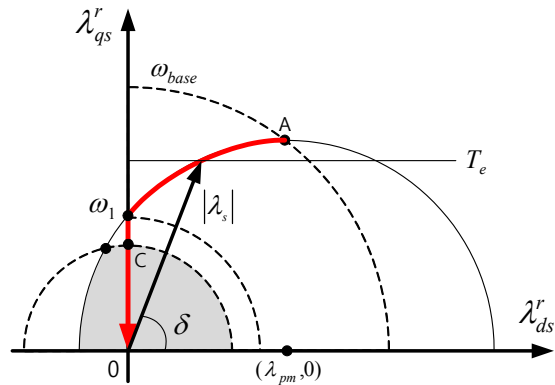


Fig. 8. Flux-weakening region II ($\lambda_{pm} \leq L_s I_{smax}$).

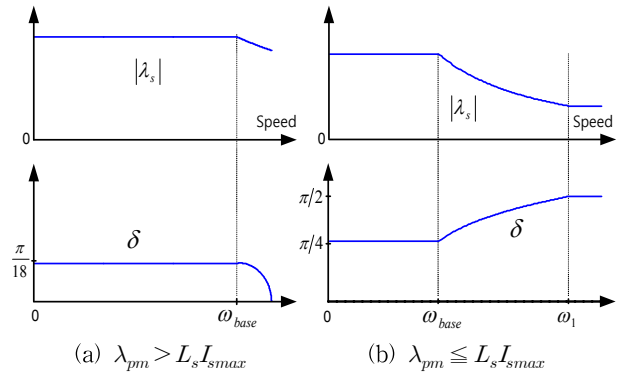


Fig. 9. Stator flux and load angle.

$$\lambda_{ds}^{r*} = 0 \quad (23)$$

$$\lambda_{qs}^{r*} = |\lambda_s| = \frac{V_{smax}}{\omega_r} \quad (24)$$

속도 증가에 따라 최적 자속 지령의 궤적은 C에서 원점으로 이동한다. 부하각 δ 는 일정 출력 영역에서는 속도 증가에 따라 계속 증가하며 $\omega_r \geq \omega_1$ 에서는 그 최대값 $\pi/2$ 로 일정하게 유지된다. $\lambda_{pm} \leq L_s I_{smax}$ 인 SPMSM 경우에는 고정자 자속의 크기를 영까지 감소시킬 수 있으므로 운전 속도의 제한은 없다.

지금까지 설명한 SPMSM의 속도 영역에 따른 최적의 고정자 자속과 부하각 지령이 그림 9에 보인다.

이러한 최적의 고정자 자속 지령을 토대로 하는 직접 토크 제어 기법의 전체 블록도가 그림 10에 보인다. 일정한 스위칭 주파수를 얻고자 자속과 토크 제어를 사용하는 DTFC 기법을 사용하였고, 속도 제어를 위한 비례적분 속도 제어기가 포함되었다. DTFC 제어에 사용될 최적의 고정자 자속 지령과 토크 지령은 속도 제어기의 출력, 속도 및 직류 링크 전압의 정보로부터 앞에서 설명한 방법으로 구하여 사용한다. 또한 제어기에 필요한 SPMSM의 고정자 자속의 크기는 확장 회전자 자속을 이용한 자속 관측기를 이용하여 추정하였고[10], 출력 토크는 추정한 고정자 자속과 측정된 고정자 전류로부터 추정하여 사용하였다.

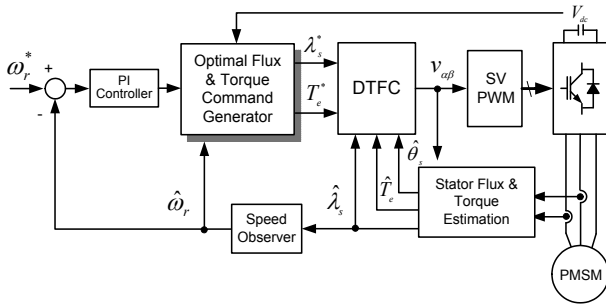


Fig. 10. Block diagram of the proposed system.



Fig. 11. SPMSM drive system.

TABLE I
SPMSM PARAMETERS

Rated power	800 W
Number of Poles	48
Rated speed	300 r/min
Rated current	6 A
Rs	3.6 Ω
Ls	19 mH
λ_{pm}	0.0925 Wb

4. 실험 결과

제안된 최대 토크 운전을 위한 최적의 고정자 자속 지령을 기반으로 한 직접 토크 제어 방식의 유효성을 검증하기 위하여 그림 11에 보이는 것과 같은 800 W, 48극의 외전형(Outer rotor type)의 SPMSM 구동 시스템에서 실험을 수행하였다.

실험에 사용된 SPMSM은 $\lambda_{pm} \leq L_s I_{smax}$ 인 최대 속도에 제한이 없는 전동기로서 그 사양과 제정수가 표 1에 보인다. 알고리즘 수행을 위한 디지털 컨트롤러로는 TI (Texas Instruments)사의 32-비트 DSC(Digital Signal Controller)인 TMS320F28335를 사용하였다. IGBT를 사용한 인버터의 스위칭 주파수는 16 kHz이며 직류단 전압은 300 V이다.

그림 12는 200 r/min에서 고정자 자속 제어기에 사용될 정좌표계 d와 q축 고정자 쇄교 자속의 추정 특성을 보이고 있다. 그림 13은 일정 토크 영역인 200 r/min에서 특성 영역에 해당하는 속도인 1200 r/min까지의

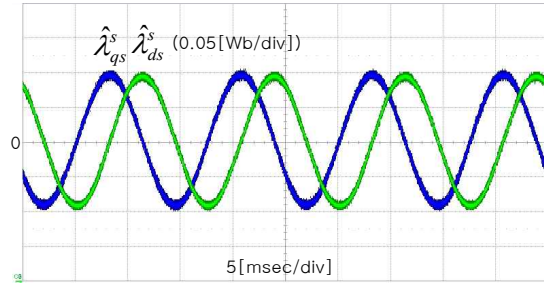


Fig. 12. Estimated stator flux linkages.

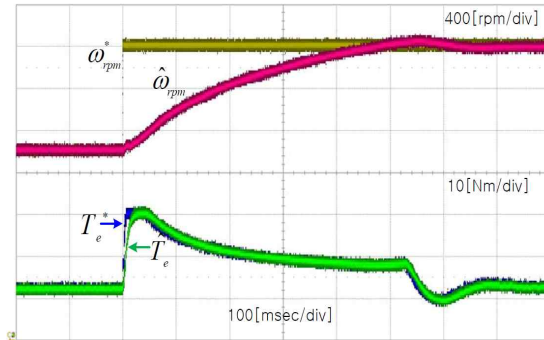


Fig. 13. Speed and torque responses.

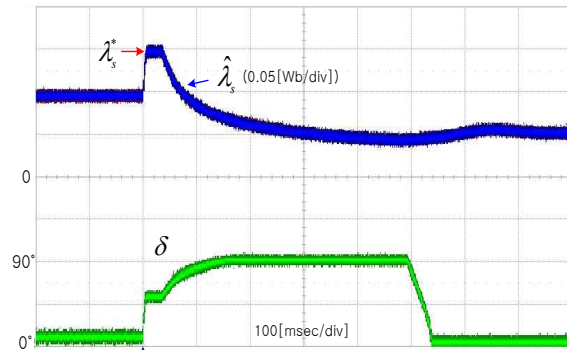


Fig. 14. Magnitude of stator flux and load angle.

스텝 속도 지령에 대한 속도와 토크 응답 특성을 보이고 있다. 실제 속도와 추정 토크가 지령을 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다. 그림 14는 이 경우 고정자 자속의 크기와 부하각 δ 의 변동 특성을 보이고 있다. 기저속도 이하에서는 MTPA 운전에 따라 고정자 자속의 크기와 토크는 일정하게 유지된다. 따라서 부하각은 일정하다. 기저 속도 이상으로 속도가 증가함에 따라 고정자 자속의 크기는 감소하는 반면에, 최대 토크를 발생시키도록 부하각은 증가하게 된다. 부하각이 90° 가 되는 속도 특성 영역의 시작점이 되는데 이 특성 영역에서는 MTPV 운전을 하며 부하각은 90° 로 일정하게 유지된다.

그림 15는 속도 변동에 따른 추정된 동기좌표계 d와 q축 고정자 자속과 이 자속 벡터의 궤적을 보이고 있다. 고정자 자속 벡터는 앞 절에서 설명된 최적의 궤적대로 잘 움직임을 알 수 있다. 일정 토크 영역에서 q축 자속은 최대로 유지되며, 기저속도 이상의 일정 출력 영역에서는 전류 제한 원을 따라 d와 q축 자속이 모두 감소된

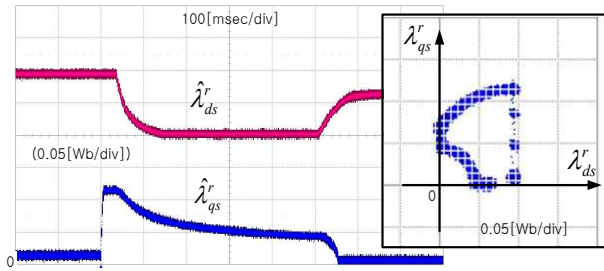


Fig. 15. D-q axis stator flux linkage.

다. 또한 d축 자속이 0이 되는 특성 영역부터는 q축 자속만이 감소되며 MTPV 궤적을 따라 움직인다.

5. 결 론

본 논문에서는 SPMSM의 직접 토크 제어 시 최적 운전에 대해 연구하였다. SPMSM에 대해 전압과 전류 제한 조건을 고려한 고정자 자속의 운전 가능 영역을 해석하였으며, 이를 토대로 직접 토크 제어에 필요한 최대 토크를 발생시키는 최적의 고정자 자속 운전점을 구하였다. 제안된 기법으로 일정 토크 영역 뿐 만아니라 일정 출력 영역까지의 속도 범위에서 최적 운전이 가능하며, 더욱이 기존 방식에서는 고려되지 않은 속도 제한이 없는 SPMSM의 특성 영역에서도 최적 제어가 가능하다. 제안된 기법은 800 W SPMSM에 대한 실험을 통하여 그 유효성이 검증되었다.

본 논문은 2013년도 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였음.(과제번호-120131304)

References

- [1] S. H. Kim, *Motor Control - DC, AC, BLDC*, Bogdo, Ch. 6, pp. 294-304, 2014.
- [2] C. French and P. Acarnley, "Direct torque control of permanent magnet drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 32, No. 5, pp. 1080-1088, Sep./Oct, 1996.
- [3] R. Bojoi and B. He, "Sensorless direct flux and torque control for direct drive washing machine applications," in *Conf Rec. IEEE ECCE*, pp. 347-354, 2011.
- [4] L. Zhong, M. F. Rahman, W. Y. Hu, and K. W. Lim, "Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 12, No. 3, pp. 528-536, May 1997.
- [5] Z. Xu and M. F. Rahman, "Direct torque and flux regulation of an IPM synchronous motor drive using a variable structure approach," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 22, No. 6, pp. 2487-2498, Nov. 2007.
- [6] G. F. H. Beng, *Sensorless direct torque and flux control*

of interior permanent magnet synchronous motor at very low speeds including standstill, Ph.D. Dissertation, University of New South Wales, 2010.

- [7] L. Tang, L. Zhong, M. F. Rahman, and Y. Hu, "A novel direct torque controlled interior permanent magnet synchronous machine drive with low ripple in flux and torque and fixed switching frequency," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 19, No. 2, pp. 346-354, Mar. 2004.
- [8] Y. Inoue, S. morimoto, and M. Sanada, "Control method for direct torque controlled PMSG in wind power generation system," in *Conf Rec. IEEE IEMDC*, pp. 1231-1238, 2009.
- [9] Y. Inoue, S. morimoto, and M. Sanada, "A novel method of maximum power operation for IPMSMs in DTC systems," in *Proc. 13th EPE*, pp. 1-10, 2009.
- [10] N. C. Park, *Analysis and control in flux plane for PMSM drive systems based on direct torque control*, Ph.D. Dissertation, Kangwon Nat'l Univ., Ch. 4, 2013.



김상훈(金相勳)

1964년 9월 11일생. 1987년 서울대 전기공학 학과 졸업. 1989년 동 대학원 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1994년~1996년 대우 중공업 철도차량 연구소 선임연구원. 1997년~현재 강원대 전기전자공학부 교수. 당 학회 편집위원.