

# 전기자동차 구동용 IPMSM의 2D Look-up Table 작성기법

원일권\*, 김도윤\*, 고안열\*, 이정효\*\*, 김영렬\*\*\*, 원충연\*  
 성균관대학교\*, LG 이노텍\*\*, 안양대학교\*\*\*

## A Design Method of 2D Look-up Table of IPMSM for Electric Vehicle

Il Kwon Won\*, Do Yun Kim\*, An Yeol Ko\*, Jung Hyo Lee\*\* Young Real Kim\*\*\*,  
 Chung Yuen Won\*  
 Sungkyunkwan University\*, LG-Innotec\*\*, Anyang University\*\*\*

### ABSTRACT

When actual IPMSM is driving, it is difficult to figure out the correct current during the current control period due to the operation speed limit of digital signal processing. Therefore, in order to control IPMSM for electric vehicle efficiently, we should design 2D Look up Table to find out optimal current reference corresponding to speed and torque of IPMSM. This paper explains the design method of 2D Look up Table for optimal current control of constant torque area and constant output area of IPMSM for electric vehicle. Finally, experimental results are presented to verify the reliability of 2D Look up Table.

### 1. 서론

IPMSM은 단위체적당 토크 효율이 높고 넓은 속도영역을 가지므로 전기자동차 구동용 전동기에 주로 사용된다. IPMSM에 토크지령이 주어졌을 때, 최소 고정자 전류를 구하는 식은 4차방정식으로 주어진다. 하지만 4차방정식을 이용하여 고정자 전류를 구하는 방식은 DSP의 연산속도의 한계를 가지며, 전동기 구동 시 파라미터가 가변되기 때문에 신뢰성이 낮다. 이러한 단점을 극복하기 위해, 본 논문은 특정 속도에서 최대 토크를 출력하는 최적의 고정자  $d-q$ 축 전류지령을 실험을 통하여 구해 2D Look up Table로 작성하는 기법에 대하여 기술한다.

### 2. 2D Look-up Table작성기법

단위 전류 당 IPMSM이 최대 토크를 출력하기 위한  $d$ 축 전류 방정식은 식 (1)과 같다.

$$i_{ds}^4 + \frac{3\phi_{pm}}{(L_d - L_q)} i_{ds}^3 + \frac{3\phi_{pm}}{(L_d - L_q)^2} i_{ds}^2 + \frac{\phi_{pm}^3}{(L_d - L_q)} i_{ds} - \left\{ \frac{T_c}{P_n(L_d - L_q)} \right\}^2 = 0 \quad (1)$$

그러나 식 (1)을 통해  $d$ 축 전류를 구할 경우, 전류제어 주기 내에 연산이 어렵다. 따라서 IPMSM을 최적전류제어하기 위해, 실험을 통해 미리 각각의 속도와 전류에서의 최대 토크점을 출력하는  $d-q$ 축 전류를 2D Look up Table로 작성해야 한다. 그림 1은 IPMSM의 운전영역에 따른 토크점과 단위 전류당 최대 토크점을 나타내고 있다.

### 2.1 정토크 영역 Look-up Table작성기법

IPMSM의 정토크 영역에서는 단위 전류당 최대 토크를 출력하는 MTPA(Maximum Torque Per Ampere)제어를 수행한다. IPMSM에 인가되는 고정자전류  $I_a$ 는 전류각에 따라 동일한 크기의 전류라도 각각 다른 토크를 출력한다. 그림 2는 정토크 영역에서 MTPA점을 찾는 기법을 나타낸다. 단위전류  $I_a$ 를 인가한 후  $q$ 축을 기점으로 전류각을 가변시킬 때, 최대의 토크를 출력할 때의 전류각이  $\beta$ 이며 그때의 토크점이 MTPA점이다.<sup>[1]</sup> MTPA를 수행할 때  $\beta$ 의 전류각을 가진  $I_a$ 의  $d-q$ 축 전류성분은 식 (2)와 같다. 구한  $d-q$ 축 전류를 속도, 토크에 따른 2D Look up Table로 작성한다.

$$\begin{aligned} i_{ds}^r &= -I_a \sin\beta \\ i_{qs}^r &= I_a \cos\beta \end{aligned} \quad (2)$$

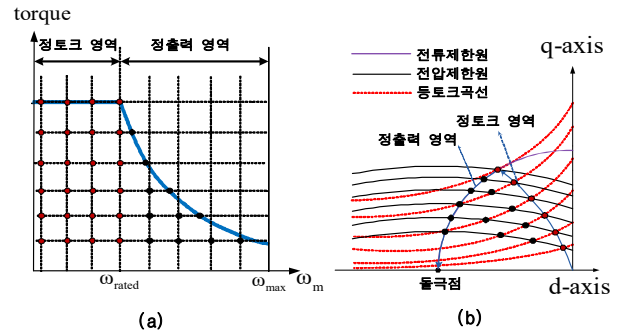


그림 1 IPMSM 운전영역에 따른 출력 토크점 (a) 토크-속도 출력영역, (b) 운전영역에 따른 최대 토크점

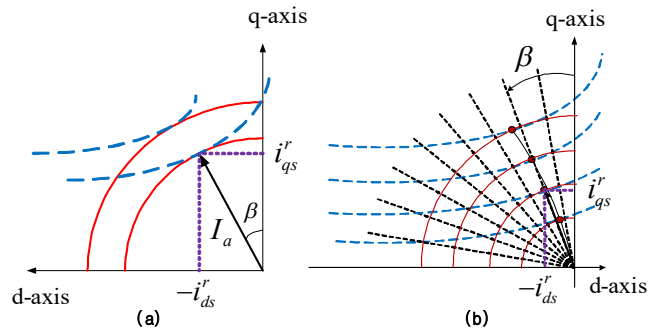


그림 2 정토크 운전영역에서의 MTPA점 (a)  $I_a$ 의 MTPA점, (b) 단위  $I_a$ 에 따른 MTPA점

## 2.2 정출력 영역 Look-up Table작성기법

정출력 영역에서는 전동기의 속도가 증가함에 따라 역기전력의 상승에 의해 전압제한영역이 감소한다. 전압제한을  $d-q$  축 전류에 대한 유기전압의 제한으로 표현하면 식(3)과 같다.

$$(\omega_r L_q \dot{i}_{qs}^r)^2 + (\omega_r L_{ds} \dot{i}_{ds}^r + \omega_r \Phi_f)^2 \leq V_{\max}^2 \quad (3)$$

정출력 영역에서 제어 가능한 지령전류의 영역은 전압제한원과 전류제한원의 공통영역이다. 이때 지령전류는 공통 영역의 내부로 주어져야 하며 최대 토크점은  $I_a$ 와  $V_a$ 의 제한영역의 교점이 된다. 이 경우 먼저  $I_a$ 를  $-d$ 축 방향으로 인가한 후 전류각을 가변시키는 것이 최대 토크점을 찾는 데 유리하다. 그림 1의 (b)는 정출력 영역에서의 역기전력에 의한 전압제한원의 감소와 그때의 최대 토크점을 나타낸다. 마찬가지로 속도와 토크에 따른  $d-q$  축 전류를 2D Look up Table로 작성한다.

### 2.3 2D 인터플레이션 기법

그림 3은 위와 방식으로 실험을 통해 구현한 속도 토크에 따른 2D Look up Table의  $d-q$  축 전류를 나타낸다. 실험에 사용한 IPMSM의 파라미터는 표 1과 같다. 모터의 정출력 영역은 3750rpm 부터이다.

표 1 실험용 IPMSM의 파라미터

$L_d$	0.303	$mH$
$L_q$	0.907	$mH$
$\Phi_f$	0.045501	$Wb$
Pole	8	pole
Rated Current	46	$A$
$V_{dc}$	150	$V$
Max_Torque	14.32	$Nm$

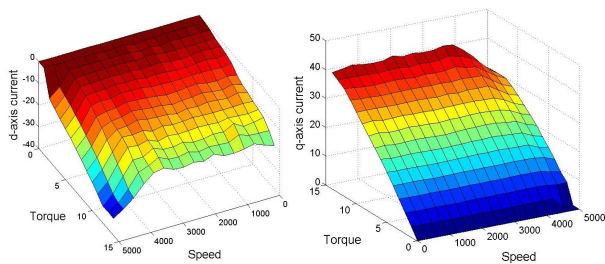


그림 3 속도-토크에 따른  $d-q$  축 전류 분포

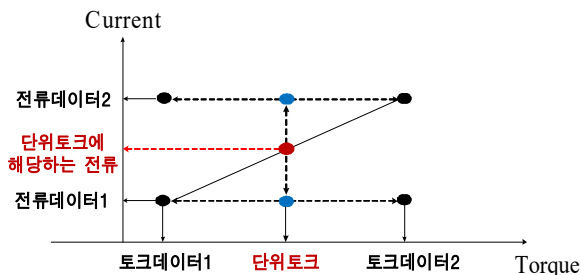


그림 4 인터플레이션 기법

전기자동차용 IPMSM은 운전자의 엑셀러레이터 조작에 따라 각기 다른 토크를 출력하므로 정지상태 부터 최고속도까지의 모든 토크에 대한 전류데이터가 필요하다. 하지만 모든 속도와 토크에서의 전류데이터를 실험적으로 구하는 것은 불가능하므로 인터플레이션으로 단위 토크에 대한 출력 전류데이터를 근사하여 구해야 한다. 그림 4는 단위 토크점의  $d-q$  축 전류를 구하는 방법을 나타낸다. 단위 토크에 인접한 두 토크점을 식 (4)에 대입하여 단위토크에 해당하는 출력전류를 구한다. 식 (4)의  $x$ 축은 토크,  $y$ 축은 단위토크를 출력하는  $d-q$  축 전류이다. 이를 통해 더욱 정밀하게 단위 토크에 대한 전류데이터를 구할 수 있다.

$$f(x) = f(x_1) + \frac{f(x_2) - f(x_1)}{x_2 - x_1}(x - x_1) \quad (4)$$

## 3. 실험결과

그림 5는 작성된 2D Look up Table의 속도별 최대토크지령을 표 1의 파라미터의 전동기에 인가할 때 동작영역에 따른 토크와  $d-q$  축 전류파형을 나타낸다. 정토크 영역은 일정한 토크와 일정한  $d-q$  축 전류를 가지지만, 정출력 영역부터 속도가 증가함에 따라 토크와  $q$  축 전류가 감소하고,  $d$  축 전류가 음의 방향으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 실험을 통하여 작성한 2D Look up Table을 통한 토크제어가 유효함을 검증하였다.

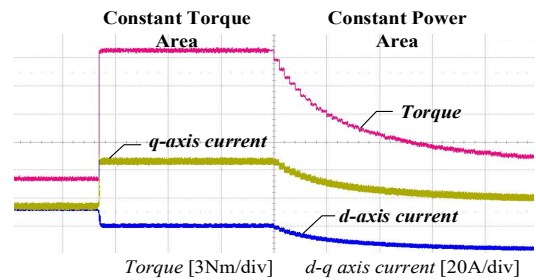


그림 5 IPMSM 토크, 전류-속도 실험파형

## 4. 결론

본 논문은 전기자동차 구동용 IPMSM의 정확한 토크제어를 위한 2D Look up Table을 동작영역에 따라 실험을 통해 작성하는 기법에 대해 기술하였고 각각의 속도, 전류에 따라 추종된 토크점들을 인터플레이션을 통해 토크 레졸루션을 높이는 기법을 설명하였다. 또한 실험을 통하여 2D Look up Table의 구현과, 작성된 2D Look up Table의 타당성을 입증하였다.

이 논문은 전자부품연구원의 연구비지원에 의하여 연구되었음

## 참고문헌

- [1] Jung Hyo Lee, Chung Yuen Won, Byoung Kuk Lee, Hyun Bae Kim, Jei Hoon Baek, Kyu Bum Han, U In Chung "IPMSM torque control method considering DC link voltage variation and friction torque for EV/HEV applications," IEEE Conf., pp. 1063-1069, Oct. 2012.