

# HEV용 영구자석 동기전동기의 상수변동 시 최대토크 운전

조관열<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>충주대학교 제어계측공학과

## Maximum Torque Operation of a PM Synchronous Motor for HEV under Parameter Variation

Kwan-Yuhl Cho<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Control & Instrumentation Engineering, Chungju National University

**요약** 본 논문에서는 HEV용 영구자석 매립형 동기전동기의 단위전류 당 최대토크 운전을 위한  $dq$  전류 궤적에 대하여 고찰하였다. 전동기 상수로부터의 단위전류 당 최대토크 운전을 위한  $dq$  전류를 해석하고, 이를 바탕으로 영구자석의 자속 및  $dq$  인덕턴스 등의 전동기 상수가 변할 경우 단위전류 당 최대토크 운전점의 변화를 고찰하였다. 또한 단위전류 당 최대토크 제어를 위한  $dq$  전류의 궤적을 실험을 통하여 검증하였다.

**Abstract** This paper investigates the  $dq$  current trajectory for maximum torque per ampere(MTPA) operation of an interior PM synchronous motor for HEV(Hybrid Electric Vehicle). Based on the  $dq$  current trajectory for the MTPA operation derived from the motor parameters, the change of the MTPA operating point for the variation of the motor parameters including the magnet flux and the  $dq$  inductances is considered. The  $dq$  current trajectory for MTPA operation is verified through the experiment.

**Key Words** : HEV, IPMSM, MTPA(Maximum Torque Per Ampere)

### 1. 서론

최근 국제 유가 급등 및 환경오염에 대한 관심의 증대로 승용차에 요구되는 배기 기준 및 연비 기준에 대하여 높은 수준을 요구하고 있다. 하이브리드 전기자동차(Hybrid Electric Vehicle, HEV)는 내연기관 차량과 전기자동차의 특징들을 상호 보완함으로써 유해 배출가스 저감 및 연비 향상을 모두 만족시킬 수 있는 친환경 미래형 자동차로 주목받고 있다. 하이브리드 전기자동차는 내연기관의 엔진과 전동기의 상호 보완적인 동작에 의해 자동차의 운전효율을 높일 수 있다. 즉, 내연기관 엔진의 효율이 낮은 저속영역에서는 전동기를 이용하여 엔진동력을 보완하거나 엔진동력 없이 전동기만의 동력으로 차량이 주행하도록 함으로써 전체적으로 연비를 개선한다[1].

하이브리드 전기자동차용 전동기는 효율이 높고 넓은 가변속운전이 가능한 영구자석 매립형 동기전동기

(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)가 주로 적용되고 있다. 영구자석 매립형 동기전동기는 영구자석이 회전자 코어(core)내에 삽입되어 있어 회전자의 위치에 따라 릴럭턴스(reluctance)가 변한다. 따라서 단위전류 당 최대토크(Maximum Torque Per Ampere, MTPA)를 발생하기 위해서는 영구자석에 의한 마그네틱 토크(magnetic torque)와 릴럭턴스 차이에 의한 릴럭턴스 토크(reluctance torque)의 비율을 부하에 따라 적절히 조절하여야 한다[2]. 단위 전류당 최대토크를 발생하기 위한  $dq$  전류는 부하의 크기,  $dq$  인덕턴스 및 영구자석의 자속(magnet flux)에 의해 결정된다. 영구자석의 자속은 영구자석의 온도에 따라 변하게 되며 온도가 증가함에 따라 자속은 감소한다. 또한 전동기에 인가되는 전류가 증가하면 고정자 및 회전자 철심의 포화(saturation)에 의해  $dq$  인덕턴스는 감소하게 된다. 따라서 영구자석의 온도 및 전동기에 인가되는 전류의 변화에 따라 단위전류

본 논문은 2010년도 충주대학교 교수연구년제 지원프로그램에 의해 수행되었음.

\*교신저자 : 조관열(kycho@cju.ac.kr)

접수일 11년 07월 12일

수정일 (1차 11년 09월 26일, 2차 11년 10월 07일)

게재확정일 11년 11월 10일

당 최대토크 운전점은 변하게 된다[3-4].

본 논문에서는 HEV용 영구자석 매립형 동기전동기의 단위전류 당 최대토크 운전을 위한  $dq$  전류를 해석하고 이를 바탕으로 영구자석의 자속 및  $dq$  인덕턴스 등의 전동기 상수(parameter)가 변할 경우 단위전류 당 최대토크 운전점의 변화를 고찰하였다. 또한 단위전류 당 최대토크 제어를 위한  $dq$  전류의 궤적(trajecory)을 실험을 통하여 검증하였다.

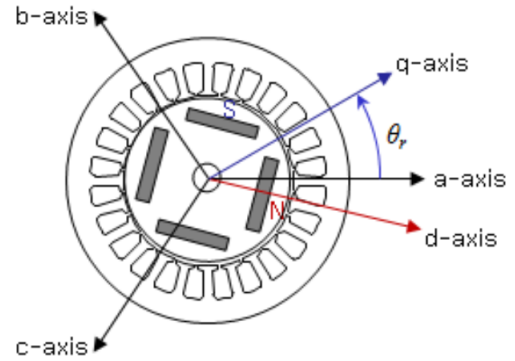
## 2. 영구자석 동기전동기의 모델링

### 2.1 영구자석 동기전동기의 모델링

영구자석 동기전동기는 영구자석이 회전자 표면에 부착된 영구자석 표면부착형 동기전동기(Surface mounted PM Synchronous Motor, SPMSM)와 영구자석이 회전자 코어 내에 삽입된 영구자석 매립형 동기전동기(IPMSM)로 구분할 수 있다. IPMSM은 SPMSM에 비해 약자속 제어에 의한 가변속 운전범위가 넓고 킬러턴스 토크를 이용할 수 있으므로 고효율 운전이 가능하다. 본 논문에서 사용한 HEV용 영구자석 동기전동기의 회전자는 16극, 영구자석이 회전자 코어(core) 내에 삽입되어 있는 영구자석 매립형 구조이다. 그림 1은 4극 영구자석 매립형 동기전동기의 구조를 나타낸다. 그림 1에서  $abc$ 축은 각각  $a$ 상,  $b$ 상, 및  $c$ 상의 기준축을 나타낸다.  $abc$  축 상에서 영구자석 동기전동기의 전압방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{abc} &= r_s i_{abc} + \frac{d}{dt} \lambda_{abc} = r_s i_{abc} + \frac{d}{dt} (L_s i_{abc} + \lambda_{abcf}) \\ &= r_s i_{abc} + \frac{d}{dt} (L_s i_{abc}) + e_{abc} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $v_{abc}$  및  $i_{abc}$ 는 각각  $abc$  3상의 상전압 및 상전류를 나타내며,  $\lambda_{abc}$ 는  $abc$  3상의 쇄교자속(flux linkage)을 나타낸다. 쇄교자속  $\lambda_{abc}$ 는 고정자 권선에 흐르는 전류에 의한 자속( $L_s i_{abc}$ )과 회전자의 영구자석에 의해 고정자 3상에 유기되는 쇄교자속( $\lambda_{abcf}$ )으로 구성된다. 또한  $e_{abc}$ 는 회전자의 영구자석에 의해  $abc$  3상에 유기되는 유기전압(induced voltage, back emf)을 나타내며 본 논문의 HEV용 영구자석 매립형 동기전동기의 유기전압은 고조파(subharmonics)를 함유하고 있다.



[그림 1] 4극 IPM 영구자석동기전동기  
[Fig. 1] 4 pole Interior PM synchronous motor

평형(balanced) 3상 전동기의 경우 3상 유기전압의 고조파 중 짝수 차 고조파와 3배수 차 고조파는 3상의 평형에 의해 서로 상쇄되어 전동기의 토크에 영향을 미치지 않으므로  $6n\pm 1$  ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )차 고조파만 토크리플에 영향을 미친다. 본 논문의 영구자석 동기전동기의 경우 17차 이상의 고조파 성분은 무시할 만큼 작으므로 13배수 차 고조파까지만 고려할 경우  $a$ 상의 유기전압은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.[5]

$$\begin{aligned} e_{am} &= \frac{d}{dt} \lambda_{af} = \omega_r \sum_{n=1}^{\infty} (n\phi_{fn}) \cos(n\theta_r) \\ &\cong \omega_r [\phi_f \cos \theta_r + 5\phi_{f5} \cos(5\theta_r) + 7\phi_{f7} \cos(7\theta_r) \\ &\quad + 11\phi_{f11} \cos(11\theta_r) + 13\phi_{f13} \cos(13\theta_r)] \end{aligned} \quad (2)$$

일반적으로 3상 영구자석동기전동기의 해석 및 제어가 용이하도록 그림 1의  $abc$  축을 회전자 위치  $\theta_r$ 에 동기되어 회전하는  $dq$ 축으로 변환한다[2].  $d$ 축(direct axis)은 회전자의 영구자석의 N극의 방향으로 설정하고,  $d$ 축에 대해 전기적으로 90도(4극 모터의 경우 기계각 45도) 앞선 축을  $q$ 축(quadrature axis)으로 설정하며  $a$ 축에 대한  $q$ 축의 위치를 회전자의 위치  $\theta_r$ 로 정의한다.  $abc$ 축의 3상 전압, 전류 및 쇄교자속은 정현파(sinusoidal waveform)로 나타나지만  $dq$ 축으로 변환된  $dq$  전압, 전류 및 쇄교자속은 각각 전압, 전류 및 쇄교자속의 크기(amplitude)에 비례하는 일정한 값(constant value)으로 나타난다.  $dq$  변환(dq transformation)에 의한  $dq$ 축 쇄교자속은 다음과 같다.

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_{df} \quad (3)$$

$$\lambda_q = L_q i_q + \lambda_{qf} \quad (4)$$

여기서  $\lambda_d$ 와  $\lambda_q$ 는 각각  $d$ 축 및  $q$ 축의 쇄교자속을,  $\lambda_{df}$ 와  $\lambda_{qf}$ 는 각각 영구자석의  $d$ 축 및  $q$ 축의 쇄교자속을 나타낸다. 또한  $L_d$ 와  $L_q$ 는 각각  $d$ 축 및  $q$ 축의 인덕턴스를 나타내며 영구자석 매립형 동기전동기의 경우  $d$ 축 인덕턴스는 자기회로(magnetic circuit)의 영구자석에 의해  $q$ 축 인덕턴스보다 작은 값을 갖는다.

영구자석 동기전동기의 3상이 평형(balanced)일 경우  $\lambda_{df}$ 와  $\lambda_{qf}$ 에는 기본파의 6배수차의 고조파 성분만 나타나게 되므로 영구자석의  $d$ 축 및  $q$ 축 쇄교자속은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_{df} = \phi_f + \lambda_{df6}\cos(6\theta_r) + \lambda_{df12}\cos(12\theta_r) \quad (5)$$

$$\lambda_{qf} = \lambda_{qf6}\sin(6\theta_r) + \lambda_{qf12}\sin(12\theta_r) \quad (6)$$

식 (5)와 (6)에서 영구자석의  $dq$ 축 쇄교자속의 6차 및 12차 고조파의 크기는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\lambda_{df6} = 5\phi_{f5} + 7\phi_{f7}, \quad \lambda_{df12} = 11\phi_{f11} + 13\phi_{f13} \quad (7)$$

$$\lambda_{qf6} = 5\phi_{f5} - 7\phi_{f7}, \quad \lambda_{qf12} = 11\phi_{f11} - 13\phi_{f13} \quad (8)$$

쇄교자속의 고조파를 반영한 영구자석 동기전동기의  $dq$ 축 전압방정식은 식 (9), (10)으로 나타낼 수 있다. 여기서 영구자석에 의한  $dq$ 축 쇄교자속  $\lambda_{df}$ 와  $\lambda_{qf}$ 는 6차 및 12차의 고조파를 포함한다.

$$v_d = r_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_r L_q i_q + \omega_r \lambda_{qf} \quad (9)$$

$$v_q = r_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \lambda_{df} \quad (10)$$

전동기의 평균 토크 및 기계적 동특성은 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $P$ 는 전동기의 극수(number of poles),  $J_m$ 는 관성모멘트(moment of inertia),  $B_m$ 는 점성계수(coefficient of viscous friction)를 나타낸다.

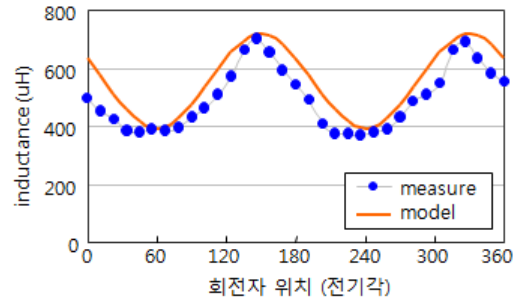
$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) = \frac{3}{2} \frac{P}{2} [\phi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \\ &= J_m \left( \frac{2}{P} \right) \frac{d\omega_r}{dt} + B_m \left( \frac{2}{P} \right) \omega_r + T_L \end{aligned} \quad (11)$$

## 2.2 인덕턴스 및 유기전압 상수

영구자석 동기전동기의 상 저항은 LCR 미터나 휘스

톤브릿지(wheatstone bridge)를 이용하여 측정된 선간저항으로부터 계산한다.

또한 영구자석 매립형 동기전동기의 경우 선간 인덕턴스(line to line inductance)는 회전자 위치 따라 변하므로 LCR 미터를 이용하여 회전자 위치 따른 인덕턴스값을 측정한다. 그림 2는 회전자 위치에 따른 선간 인덕턴스를 나타낸다.  $dq$  인덕턴스와 선간 인덕턴스 식 (12)의 관계식을 갖으며 그림 2의 선간 인덕턴스로부터  $dq$  인덕턴스는 각각  $L_d = 196\mu\text{H}$ ,  $L_q = 359\mu\text{H}$ 로 모델링할 수 있다.

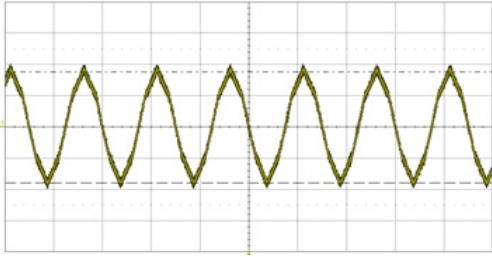


[그림 2] 선간 인덕턴스( $L_{ab}$ ) 측정값 및 모델링

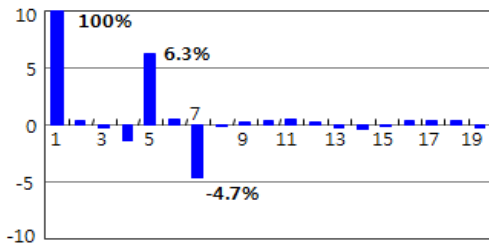
[Fig. 2] Measured value and model of line to line inductance

$$L_d = \frac{1}{2} L_{ab\_min}, \quad L_q = \frac{1}{2} L_{ab\_max} \quad (12)$$

영구자석 동기전동기의 유기전압 상수 및 유기전압에 포함된 고조파를 측정하기 위해서는 외부 장치로 측정 대상인 전동기를 일정한 속도로 회전시킨 상태에서 전동기의 권선에 유기되는 선간전압(line to line voltage) 또는 상 전압(line to neutral voltage)을 측정한다. 그림 3은 1,000rpm으로 운전 시 고조파권선에 유기된 선간 역기전력 파형을 나타낸다. 그림 4의 FFT 분석에 나타난 바와 같이 HEV용 영구자석 동기전동기의 선간 유기전압에는 5차, 7차 등의 고조파가 포함되어 있으므로 유기전압 상수는 기본파의 전압을 기준으로 구한다. 유기전압의 고조파는 전동기의 토크특성에 영향을 주는 5차 고조파가 6.3%, 7차 고조파는 -4.7%로 나타났다. 반면 11차와 13차의 고조파는 각각 0.72%와 -0.66%로 5차와 7차에 비해 작게 나타났다. 영구자석의  $dq$ 축 쇄교자속의 6차 및 12차 고조파는 식 (2), (7), 및 (8)로부터 구할 수 있다.



[그림 3] 1,000rpm 운전 시 선간 유기전압  
[Fig. 3] Line to line induced voltage at 1,000rpm (eab : 20V/div., time : 10ms/div.)



[그림 4] 선간 역기전력(eab)의 FFT 분석  
[Fig. 4] FFT analysis of line to line back emf (eab)

### 3. MTPA 운전

#### 3.1 MTPA 궤적

단위전류 당 최대토크 운전을 위한 MTPA 궤적 (trajectory)은 식 (2)의 토크 식으로부터 도출할 수 있다. MTPA 궤적은  $d$ 축 전류와  $q$ 축 전류의 관계식으로 표현하거나 전류크기와 진상각(lead angle)의 관계로 나타낼 수 있다. 먼저 MTPA 운전을 위한  $d$ 축 전류 및  $q$ 축 전류의 관계는 식 (11)의 토크식으로부터 식 (13)의 관계를 갖으며 MTPA 운전점은 식 (14)를 만족해야 한다. 식 (13)과 (14)로부터 MTPA 운전을 위한  $dq$  전류는 식 (15)와 같이 나타난다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (13)$$

$$I_m = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$$

$$\frac{dT_e}{dI_m} = \frac{\partial T_e}{\partial i_d} \frac{\partial i_d}{\partial I_m} + \frac{\partial T_e}{\partial i_q} \frac{\partial i_q}{\partial I_m} = 0 \quad (14)$$

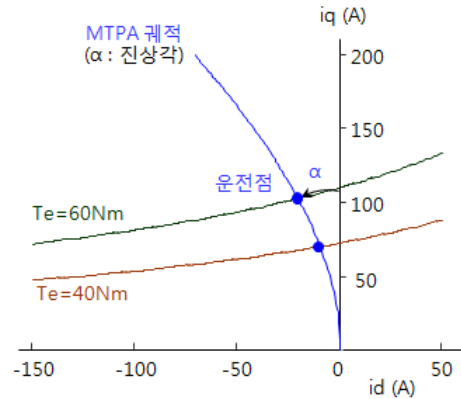
$$i_q = \sqrt{i_d(i_d - k)} \quad \text{where } k = \frac{\psi_f}{L_q - L_d} \quad (15)$$

MTPA 운전을 위한 전류크기와 진상각의 관계는 식 (15)와 (16)의 관계식을 이용하여 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_d = -I_m \sin \alpha, \quad i_q = I_m \cos \alpha \quad (16)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left( \frac{k - \sqrt{k^2 + 8I_m^2}}{4I_m} \right) \quad (17)$$

그림 5는 식 (15)로 주어진 MTPA 궤적과 동일토크 곡선을 나타낸다. 부하토크가 60Nm일 때 MTPA 운전을 위한  $dq$  전류는  $i_d = -23A$ ,  $i_q = 108A$ 이다. 이 운전점은 전류크기와 진상각으로 나타내면  $I_m = 110A$ ,  $\alpha = 12^\circ$ 이다. MTPA 운전점은 동일한 토크를 나타내는 동일토크 곡선상의  $dq$  전류 중에서 원점에서 가장 가까운  $dq$  전류를 나타내며 이는 동일한 토크를 발생하기 위해 전류의 크기가 가장 작은  $dq$  전류를 의미한다. 본 연구에서는 토크명령에 대한 MTPA 운전은 제어를 용이하게 하기 위해 전류크기와 진상각으로 나타내었으며 이들의 관계를 lookup table로 구현하였다.



[그림 5] MTPA 곡선과 동일 토크곡선  
[Fig. 5] MTPA trajectory and constant torque curve

#### 3.2 MTPA 운전점 해석 및 실험

영구자석 동기전동기의 영구자석의 자속 및 dq 인덕턴스 변화에 따른 최대토크 운전특성의 해석결과를 검증하기 위하여 전동기의 속도 별로 전동기가 발생할 수 있는 최대토크를 실험으로 확인하였다. 실험은 다이내모 (dynamo)의 서보전동기로 속도를 제어하고 실험대상인 영구자석 동기전동기의 토크를 토크센서(torque sensor)로 측정하였다. 표 1은 영구자석 동기전동기의 상수(parameters)를 나타낸다. HEV용 영구자석 동기전동기의

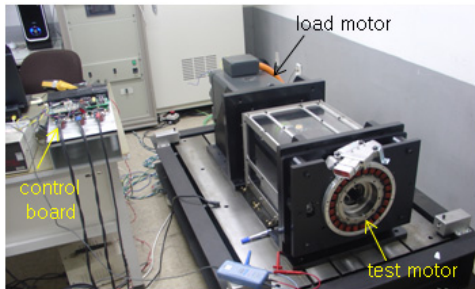
요구 토크는 1,500rpm 이하에서 최대 105Nm, 최대속도 6,000rpm에서 22.5Nm이다. 이 경우 정 출력(constant power) 운전 영역에서의 출력은 15kW이다. 또한 배터리의 전압(nominal voltage)은 158V이다.

그림 6은 영구자석동기전동기의 토크특성을 검증하기 위한 실험장치를 나타낸다. 시험용 영구자석 동기전동기의 회전자 위치검출을 위한 레졸버는 타마가와 세이키(Tamagawa Seiki)의 TS2296N178E102를, 토크센서는 500Nm까지 측정 가능한 마그트롤(Magtrol)의 TM 313을 사용하였다. 최대토크 운전점 검증을 위한 제어 알고리즘은 프리스케일(Free scale)사의 DSP인 MC56F8345로 구현하였고, 인버터의 스위치 IGBT는 Semikron의 600V, 360A 용량의 Semix302GB066HD를 사용하였다.

[표 1] 전동기 상수

[Table 1] Motor parameters

구분	값	단위
극수 ( $P$ )	16	
고정자 상저항 ( $r_s$ )	0.013	$\Omega$
$d$ 축 인덕턴스 ( $L_d$ )	0.196	$mH$
$q$ 축 인덕턴스 ( $L_q$ )	0.359	$mH$
유기전압 상수 ( $\phi_f$ )	0.0460	$Vsec$
관성 모멘트 ( $J_m$ )	0.0050	$kgm^2$
점성 계수 ( $B_m$ )	0.0010	$kgm^2/sec$



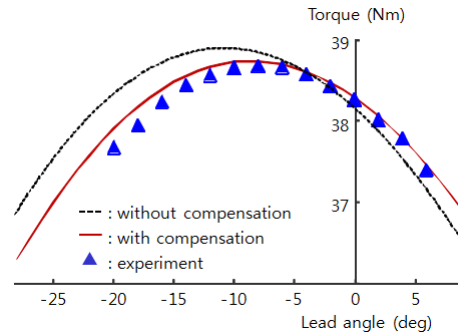
[그림 6] 실험장치

[Fig. 6] Experiment setup

그림 7과 그림 8은 진상각에 따른 토크의 해석과 실험 결과를 나타낸다. 그림 7은 전류명령의 크기가 71A일 때 영구자석의 자속 및  $dq$  인덕턴스의 변화를 고려하지 않을 경우와 고려한 경우의 진상각에 따른 전동기 토크의 해석결과와 실험결과를 나타낸다. 또한 그림 8은 전류명령의 크기가 112A일 때 진상각에 따른 전동기 토크의 해석결과와 실험결과를 나타낸다. 그림 7의 경우 전류명령의 크기가 71A일 때  $q$ 축 인덕턴스는 고정자 및 회전자

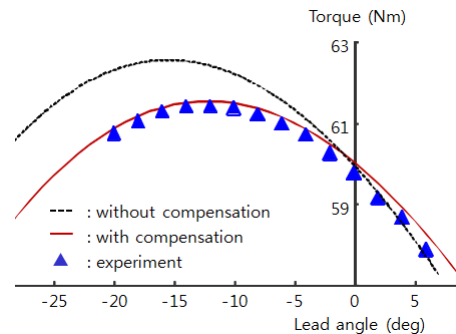
코어의 포화에 의해 8% 감소하고,  $d$ 축 인덕턴스의 변화는 없으며, 영구자석의 자속은 3% 감소한 결과를 해석에 반영하였다. 전동기 상수의 변화를 고려한 경우 최대토크를 발생하는 진상각은  $\alpha = 9^\circ$ 이고 이 때 토크는 38.6Nm로 해석결과와 실험결과가 일치함을 알 수 있다. 반면 전동기 상수의 변화를 고려하지 않을 경우 최대토크를 발생하는 진상각은  $\alpha = 12^\circ$ 로 실험결과와 차이가 발생한다.

그림 8은 전류명령의 크기가 112A일 때  $q$ 축 인덕턴스는 10% 감소,  $d$ 축 인덕턴스의 변화는 없으며, 영구자석의 자속은 3% 감소한 결과를 해석에 반영한 경우의 해석 및 실험결과를 나타낸다. 최대토크를 발생하는 진상각은  $\alpha = 12^\circ$ , 토크는 61.4Nm로 해석결과와 실험결과가 일치하나 전동기 상수의 변화를 고려하지 않을 경우 최대토크를 발생하는 진상각은  $\alpha = 16^\circ$ 로 실험결과와 차이가 발생한다. 그림 8에 나타난 바와 같이 전류크기가 112A일 경우 진상각을 영(zero)으로 할 경우 토크는 59.9Nm, 진상각을  $12^\circ$ 로 제어할 경우 토크는 61.4Nm로 약 3%의 토크가 증가된다.



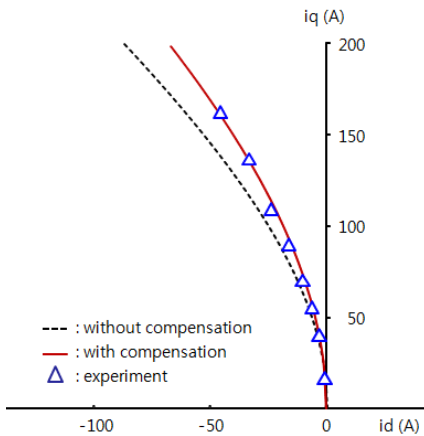
[그림 7] 진상각에 따른 토크 ( $I_m=71A$ )

[Fig. 7] Torque v.s. lead angle ( $I_m=71A$ )

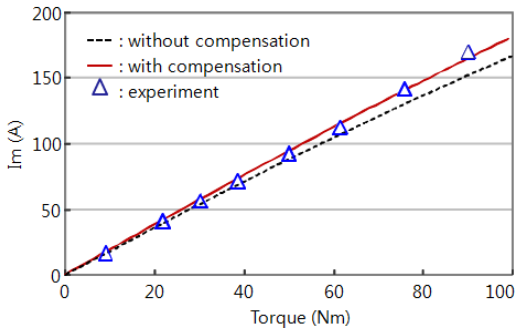


[그림 8] 진상각에 따른 토크 ( $I_m=112A$ )

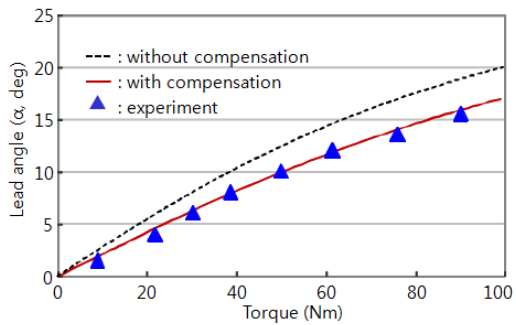
[Fig. 8] Torque v.s. lead angle ( $I_m=112A$ )



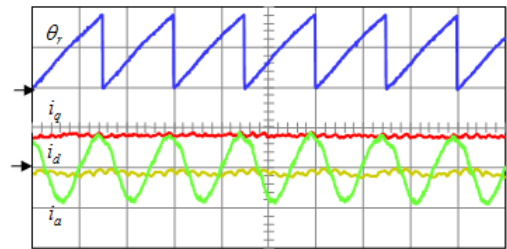
[그림 9] MTPA 곡선과 운전점  
[Fig. 9] MTPA curve and operating point



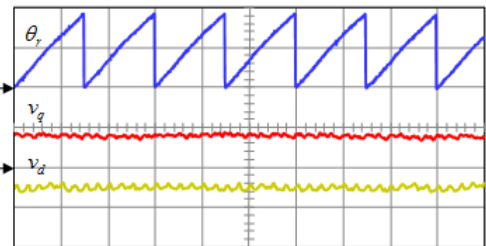
[그림 10] 토크별 전류크기  
[Fig. 10] Current magnitude v.s. torque



[그림 11] 토크별 진상각  
[Fig. 11] Lead angle v.s. torque

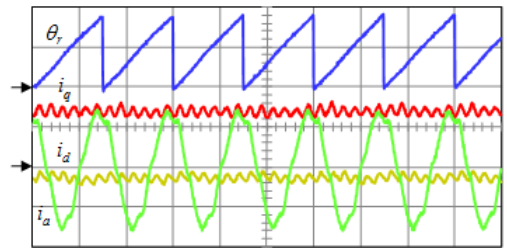


(a) dq 전류 및 상전류 (100A/div., 5msec/div.)  
(a) dq-axis currents and phase current

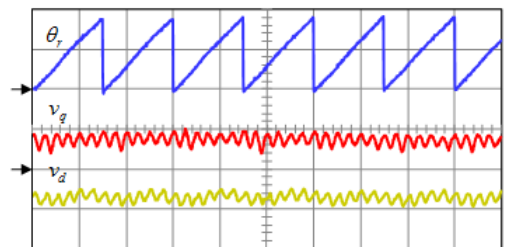


(b) dq 전압 (50V/div., 5msec/div.)  
(b) dq-axis voltages

[그림 12]  $\omega_r=1000\text{rpm}$ ,  $I_m=80\text{A}$ 일 때 전류 및 전압  
[Fig. 12] Current and voltage at 1000rpm,  $I_m=80\text{A}$



(a) dq 전류 및 상전류 (100A/div., 5msec/div.)  
(a) dq-axis currents and phase current



(b) dq 전압 (50V/div., 5msec/div.)  
(b) dq-axis voltages

[그림 13]  $\omega_r=1000\text{rpm}$ ,  $I_m=140\text{A}$ 일 때 전류 및 전압  
[Fig. 13] Current & voltage at 1000rpm,  $I_m=140\text{A}$

그림 9는 MTPA 운전을 위한  $dq$  전류 궤적의 해석 및 실험결과를 나타낸다. 영구자석의 자속 및  $dq$  인덕턴스

의 변화를 반영한 해석결과가 실험결과와 일치함을 알 수 있다. 그림 10과 그림 11은 그림 9의 MTPA 궤적의  $dq$  전류의 해석 및 실험결과를 전류크기 및 진상각으로 나타낸 결과이다. 전동기의 토크가 90Nm일 때 전동기 상수의 변화를 고려한 경우 전류크기와 진상각은 각각 169A, 15.5°를 나타내며 이 경우  $d$ 축 및  $q$ 축 전류는 각각 -45.2A, 162.9A를 나타낸다.

그림 12와 그림 13은 전동기의 속도가 1,000rpm에서 전류명령의 크기가 각각 80A, 140A일 때  $dq$  전류 및  $dq$  전압의 실험파형을 나타낸다. 그림 12에 나타난 바와 같이 전류명령의 크기가 80A일 경우 전동기 토크는 47Nm 이고 진상각은 10°, 이 때  $d$ 축 및  $q$ 축 전류는 각각 -14.1A, 78.7A이다. 이 때  $d$ 축 및  $q$ 축 전압은 각각 -25.1V, 39.6V이다.

그림 13에서 전류명령의 크기가 140A일 경우 전동기 토크는 84Nm,  $d$ 축 및  $q$ 축 전류는 각각 -27.3A, 137.3A이고,  $d$ 축 및  $q$ 축 전압은 각각 -35.7V, 38.7V이다.  $dq$  전류 및 상전류에 발생하는 고조파(subharmonics)는 그림 4에 나타난 바와 같이 유기전압에 포함된 고조파에 의해 발생한다.  $dq$  전류의 고조파는  $dq$  유기전압의 경우와 같이 기본파의 6차 고조파가 주로 나타남을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 HEV용 영구자석 매립형 동기전동기의 단위전류 당 최대토크를 발생하는  $dq$  전류의 운전점에 대하여 고찰하였다. 영구자석의 자속 및  $dq$  인덕턴스의 변화를 고려한 MTPA 운전점의 해석결과가 실험결과와 일치함을 검증하였다. MTPA 곡선의 해석결과를 기반으로 부하토크 별 최대토크 운전을 위한 전류 맵(current map)을 구현할 수 있고 이를 바탕으로 HEV용 영구자석 동기전동기의 토크제어 알고리즘을 구현할 수 있다. 본 연구에서 검증한 MTPA 운전을 위한  $dq$  전류의 해석결과와 실험결과로부터 전동기의 최대토크 운전에 있어 해석결과를 바탕으로 다소의 튜닝(tuning)에 의해 실제 시스템의 최대토크 운전점을 확보할 수 있다.

#### Referencse

[1] T. Xisheng and Q. Zhiping, "Economic Analysis of EDLC/Battery Hybrid Energy Storage", *11th International Conference on Electrical Machines and Systems(ICEMS)*, pp. 2729-2733, 2008

[2] P. C. Krause, *Analysis of electric machinery, McGraw-Hill Book Company*, 1986.

[3] T. Sebastian, "Temperature effects on torque production and efficiency of PM motors using NdFeB magnets", *Record of IEEE Industry Applications Society Annual Meeting(IAS)*, pp. 78-83, 1993.

[4] G. Kang et al., "A MTPA control scheme for an IPM synchronous motor considering magnet flux variation caused by temperature", *Record of IEEE Applied Power Electronics Conf.(APEC)*, vol. 3, pp. 1617-1621, 2004.

[5] K. Y. Cho, B. G. Woo, G. M. Kim, C. H. Kang, H. K. Shin, B. C. Youn, and M. G. Park, "Analysis of flux weakening operating regions for a PM synchronous motor in HEV by considering back EMF harmonics," *Trans. of the Korean Institute of Power Electronics*, vol. 16, no. 2, pp. 152-161, April 2011.

#### 조 관 열(Kwan-Yuhl Cho)

[정회원]



- 1986년 2월 : 서울대학교 전기공학과 (공학사)
- 1988년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학석사)
- 1993년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학박사)
- 1993년 3월 ~ 2004년 3월 : LG 전자(주) DA연구소 책임연구원
- 2004년 4월 ~ 현재 : 충주대학교 제어계측공학과 부교수

<관심분야>

전동기제어, 전력전자, 신재생에너지