

HEV용 영구자석동기전동기의 유기전압 고조파를 고려한 약자속 운전 영역해석

趙官烈[†], 禹炳國^{*}, 金京滿^{*}, 姜燦鎬^{*}, 申熙根^{**}, 尹炳喆^{**}, 朴敏圭^{***}

Analysis of Flux Weakening Operating Regions for a PM Synchronous Motor in HEV by considering Back EMF Harmonics

Kwan-Yuhl Cho, Byung-Guk Woo, Gyoung-Man Kim, Chan-Ho Kang, Hee-Keun Shin,
Byung-Chul Yoon, and Min-Gyu Park

요 약

영구자석 매립형 동기전동기는 고효율, 소형화 및 넓은 가변속운전 등의 특성으로 인해 전기자동차에 적용되고 있다. 본 논문에서는 유기전압이 고조파를 함유하고 있는 영구자석 동기전동기에 대하여 고속운전 시 약자속 운전 영역의 해석에 대해 제안한다. 유기전압의 고조파가 전동기 속도와 최대토크에 미치는 영향을 해석하고 전압제한 및 전류제한 조건에서 최대토크 운전을 위한 dq 전류에 대해 분석한다. 약자속 운전영역에 대한 기존 및 제안된 해석결과를 비교하고 최대토크-속도 특성의 실험을 통하여 해석결과를 검증한다.

ABSTRACT

An interior permanent magnet synchronous motor(IPMSM) has been applied to the electric vehicle due to its high efficiency, compact volume, and wide operating speed ranges. This paper presents the analysis of the flux weakening operating regions at high speeds for the IPMSM that has back emf harmonics. The effect of the back emf harmonics on the motor speed and the maximum torque is analyzed. Also the dq currents for maximum torque operation under the voltage and the current limit conditions are analyzed. The conventional analysis and the presented analysis for the flux weakening operating regions are compared and the maximum torque - speeds characteristics for both analysis are verified through the experiment.

Key Words : PM Synchronous Motor, Flux weakening, Back emf harmonics, HEV

1. 서 론

최근 하이브리드 자동차(Hybrid electric vehicle,

HEV) 및 플러그인(Plug-in) 자동차의 구동용 전동기는 고효율 및 소형화가 가능하고 넓은 가변속 범위의 운전 특성이 요구된다. 영구자석이 회전자 코어 내에 삽입된 영구자석 매립형 동기전동기(Interior PM synchronous motor)는 MTPA(Maximum torque per ampere) 운전에 의해 릴럭턴스 토크(Reluctance torque)를 이용함으로써 단위체적 당 출력(Output power)을 증가시킬 수 있다. 또한 dq 축의 인덕턴스 차이에 따라 약자속 제어(Flux weakening control)의

[†]교신저자 : 정희원, 충주대 제어계측공학과 부교수

E-mail : kycho@cjnu.ac.kr

^{*}정희원, 이지트로닉스 수석연구원/대표이사

^{**}학생회원, 충주대 제어계측공학과 석사과정

^{***}정희원, 동아일렉콤 연구원

접수일자 : 2010. 12. 14

1차 심사 : 2011. 1. 3

심사완료 : 2011. 1. 7

범위를 넓게 할 수 있으므로 넓은 가변속운전이 요구되는 HEV에 적합하다.^[1]

자동차의 고속운전 시 또는 엔진 rpm이 증가할 경우 엔진 축에 물려있는 전동기의 회전속도도 증가한다. 일반적인 HEV용 영구자석 동기전동기의 경우 약자속 제어를 사용하지 않을 경우 최고속도는 HEV용 전동기에 요구되는 최고속도의 30% 이하이므로 매우 넓은 영역의 약자속 제어가 요구된다. 영구자석 동기전동기를 약자속 영역에서 운전할 경우 부하에 따라 전동기가 발생할 수 있는 최대토크의 크기를 파악하는 것은 전동기의 설계 및 제어 알고리즘을 구현하는데 있어 매우 중요하다. 즉 전동기의 설계 상수(Parameter) 또는 제작된 전동기의 상수로부터 부하 및 속도에 따라 약자속 운전에 의해 발생할 수 있는 최대토크를 정확히 해석하여 전동기 설계 및 제어 알고리즘에 반영해야 한다.

전동기의 속도가 증가하여 약자속 운전영역에 들어갈 경우 전동기에 공급할 수 있는 dq 전류는 배터리 전압에 의해 제한되는 전압제한 조건과 인버터의 하드웨어에서 제한되는 전류제한 조건에 의해 결정된다. 전압제한에 의해 전동기에 공급할 수 있는 dq 전류의 영역을 파악하기 위하여 일반적으로 전동기의 dq 전압방정식에서 상 저항에 걸리는 전압은 무시하고 해석하였다.^[1] 최근의 경우 상저항에 걸리는 전압을 반영하여 약자속 운전영역을 해석하는 논문이 발표되고 있으나 유기전압은 정현파로 가정하고 dq 전류의 제어 가능영역을 해석하였다.^{[1]-[7]} 그러나 유기전압에 고조파가 존재할 경우 실제 전동기에 공급할 수 있는 dq 전류의 영역은 더욱 좁아지게 된다. 따라서 유기전압을 정현파로 가정한 경우에 비해 실제 운전에서는 동일한 속도에서 전동기가 발생할 수 있는 토크의 크기가 작아진다. 이는 동일한 토크에서 전동기가 도달할 수 있는 최대속도가 낮아짐을 의미한다. 따라서 전동기의 최대운전 영역을 보다 정확하게 해석하기 위해서는 전동기의 상 저항에 걸리는 전압 및 유기전압의 고조파를 함께 고려하여야 한다.

본 논문에서는 유기전압에 고조파가 있는 경우 배터리 전압에 의해 제한되는 dq 전류의 영역을 해석하고, 전동기의 속도에 따라 전동기가 발생할 수 있는 최대토크의 크기를 도출한다. 또한 속도별 최대토크를 발생하는 dq 전류의 운전점을 분석하고 기존의 해석결과와 비교한다. 전동기의 토크-속도 특성 실험을 통하여 약자속 운전영역의 기존 해석 및 제안된 해석의 타당성을 검증한다.

2. 영구자석 동기전동기의 모델링

2.1 영구자석 동기전동기의 모델링

본 논문에서 사용한 HEV용 영구자석 동기전동기의 고정자 권선은 집중권(Concentrated windings) 형태이고, 회전자는 16극, 영구자석이 회전자 코어(core) 내에 삽입되어 있는 영구자석 매립형 구조이다. abc 축 상에서 영구자석 동기전동기의 전압방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, v_{abc} 및 i_{abc} 는 각각 abc 3상의 상전압 및 상전류를 나타내며, λ_{abc} 는 abc 3상의 쇄교자속(Flux linkage)을 나타낸다. 3상의 쇄교자속 λ_{abc} 는 고정자 권선에 흐르는 전류에 의한 자속과 회전자의 영구자석에 의해 고정자 3상에 유기되는 쇄교자속으로 구성된다. 또한 e_{abc} 는 회전자의 영구자석에 의해 abc 3상에 유기되는 유기전압(Induced voltage)을 나타내며 HEV용 영구자석 매립형 동기전동기의 유기전압은 고조파(Subharmonics)를 함유하고 있다.

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 반영해도 된다. 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.

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

고조파를 함유한 abc 축의 쇄교자속으로부터 dq 축 쇄교자속은 다음과 같이 나타낸다.

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

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

여기서, λ_d 와 λ_q 는 각각 d 축 및 q 축의 쇄교자속을, λ_{df} 와 λ_{qf} 는 각각 영구자석의 d 축 및 q 축의 쇄교자속을 나타낸다. 영구자석 동기전동기의 3상이 평형

(Balanced)일 경우 λ_{df} 와 λ_{qf} 에는 기본파의 6배수 고조파 성분만 나타나게 되므로 영구자석의 d 축 및 q 축 쇄교자속은 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[8]

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

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

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 다음과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 영구자석에 의한 dq 축 쇄교자속 λ_{df} 와 λ_{qf} 는 6차 및 12차의 고조파를 포함한다.

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

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

전동기의 평균 토크 및 기계적 동특성은 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 J_m 는 관성(Momentum

of inertia), B_m 는 점성계수(Coefficient of viscous friction)를 나타낸다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) = \frac{3}{2} \frac{P}{2} [\phi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (11)$$

$$= J_m \left(\frac{2}{P} \right) \frac{d\omega_r}{dt} + B_m \left(\frac{2}{P} \right) \omega_r + T_L$$

2.2 유기전압 상수

영구자석 동기전동기의 유기전압 상수 및 유기전압에 포함된 고조파를 측정하기 위해서는 외부 장치로 측정 대상인 전동기를 일정한 속도로 회전시킨 상태에서 전동기의 권선에 유기되는 선간 전압(Line to line voltage) 또는 상 전압(Line to neutral voltage)을 측정한다. 그림 1은 6,000rpm으로 운전 시 선간 역기전력 파형을 나타낸다. 그림 2의 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 -6.29%, 7차 고조파는 -4.83%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.

3. 약자속 운전영역 해석

영구자석 동기전동기의 권선에 유기되는 유기전압은 전동기 속도에 비례한다. 따라서 정격속도 이상의 고속회전 시에 고정자의 권선에 유기되는 유기전압이 인버터에서 전동기에 공급 할 수 있는 최대 상 전압에 도달하게 되면 더 이상 속도를 증가 시킬 수 없게 된다. 즉 영구자석 동기전동기의 최대속도는 인버터의 DC 입력전압인 배터리전압과 인버터의 최대 허용전류에 의해 제한받게 된다. 제한된 전압 및 전류 조건하에서 영구자석 동기전동기의 톨릭턴스 토크를 적절히 활용하는 약자속 제어에 의해 전동기의 속도를 증가시킬 수 있다. 약자속 제어 시 전체 토크에서 차지하는 톨릭턴스 토크의 비율이 증가하게 되므로 토크성분의 전류(q -axis current)는 감소하고 자속성분의 전류(d -axis current)는 음의 방향으로 증가하게 된다.

3.1 약자속 운전영역 해석

전동기의 속도가 증가하여 약자속 운전영역에 들어

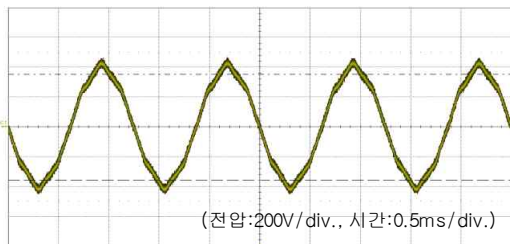


그림 1 6,000rpm 운전 시 선간 유기전압
Fig. 1 Line to line induced voltage at 6,000rpm

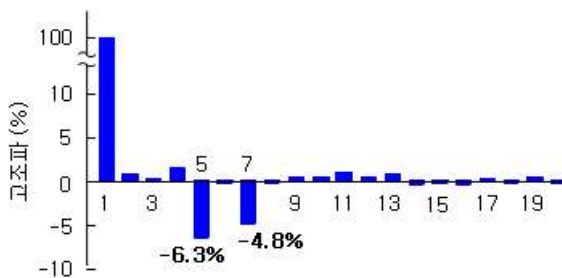


그림 2 역기전력의 FFT 분석
Fig. 2 FFT of induced voltage

갈 경우 전동기에 공급할 수 있는 dq 전류는 배터리 전압에 의해 제한되는 전압제한 조건과 인버터의 하드웨어에서 제한되는 전류제한 조건에 의해 결정된다. 식 (12)는 배터리 전압에 의한 전압제한 조건을, 식 (13)은 인버터에 의한 전류제한 조건을 나타낸다.

$$v_d^2 + v_q^2 \leq V_{\max}^2 \quad (12)$$

$$i_d^2 + i_q^2 \leq I_{\max}^2 \quad (13)$$

일반적으로 약자속 운전영역을 해석하기 위해서는 식 (9)와 (10)의 dq 전압방정식에서 전동기가 일정부하에서 일정한 속도로 회전하는 정상상태(Steady state)로 가정한다. 또한 고정자 권선의 유기전압은 정현파로 가정하고, 저항에 걸리는 전압이 DC 링크전압에 비해 매우 작은 경우 dq 전압은 식 (14)와 (15)로 나타낼 수 있다.

$$v_d = -\omega_r L_q i_q \quad (14)$$

$$v_q = \omega_r L_d i_d + \phi_f \omega_r \quad (15)$$

이 경우 DC 링크 전압제한에 의해 전동기에 공급할 수 있는 dq 전류의 영역은 식 (16)과 같다.

$$(L_d i_d + \phi_f)^2 + L_q^2 i_q^2 \leq \left(\frac{V_{\max}}{\omega_r} \right)^2 \quad (16)$$

식 (16)에서 저항에 걸리는 전압이 DC 링크전압에 비해 무시할 만큼 작지 않은 경우에는 인버터의 최대전압 V_{\max} 에서 저항에 걸리는 최대전압 $r_s I_{\max}$ 만큼 뺀 값을 전동기에 공급하는 최대전압으로 사용하여 해석한다. 그러나 이 경우에도 전동기에 흐르는 전류가 최대전류 I_{\max} 보다 작은 경우 전동기에 공급하는 최대전압에 오차가 발생한다. 또한 전동기의 실제 운전상태에서는 전류의 진상각(Lead angle)이 부하 및 속도에 따라 변하므로 실제 전동기에 인가되는 최대전압을 정확하게 반영하지 못한다.

본 논문에서는 상 저항에 걸리는 전압 및 유기전압의 고조파 성분을 모두 포함하는 식 (9)와 (10)의 dq 전압방정식을 이용하여 전압제한 조건에서 제어 가능한 dq 전류의 영역을 해석한다. 먼저 기존의 경우와 같이 전동기가 일정한 부하 및 일정한 속도에서 운전하는 정상상태일 경우 d 축 및 q 축 전류의 동특성은 무시할 수 있으므로 dq 전압방정식은 식 (17) 및 (18)로 나타낼 수 있다.

$$v_d = r_s i_d - \omega_r L_q i_q + \omega_r \lambda_{qf} \quad (17)$$

$$v_q = r_s i_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \lambda_{df} \quad (18)$$

식 (17)과 (18)에서 영구자석에 의한 dq 축 쇄교자속 λ_{df} 와 λ_{qf} 는 6차 및 12차의 고조파를 포함한다. 식 (12), (17) 및 (18)로부터 전압제한에 의해 전동기에 인가 할 수 있는 dq 전류는 다음과 같은 영역으로 제한된다.

$$(r_s i_d - \omega_r L_q i_q + \omega_r \lambda_{qf})^2 + (r_s i_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \lambda_{df})^2 \leq V_{\max}^2 \quad (19)$$

식 (19)는 타원 방정식을 나타내며 타원의 중심점은 식 (20)과 식 (21)의 조건을 만족한다.

$$r_s i_d - \omega_r L_q i_q + \omega_r \lambda_{qf} = 0 \quad (20)$$

$$r_s i_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \lambda_{df} = 0 \quad (21)$$

식 (20)과 식 (21)로부터 타원의 중심점은 다음과 같이 주어진다.

$$C = (i_{dc}, i_{qc}) \quad (22)$$

$$= \left(-\frac{\omega_r^2 L_q \lambda_{df} + r_s \omega_r \lambda_{qf}}{r_s^2 + \omega_r^2 L_d L_q}, \frac{\omega_r^2 L_d \lambda_{qf} - r_s \omega_r \lambda_{df}}{r_s^2 + \omega_r^2 L_d L_q} \right)$$

식 (22)에서 상 저항에 걸리는 전압강하를 무시하고 유기전압을 정현파로 가정할 경우 $r_s = \lambda_{qf} = 0$, $\lambda_{df} = \phi_f$ 이므로 dq 전류영역의 타원의 중심점은 식 (23)과 같이 나타나므로 식 (16)에 주어진 타원의 중심점과 동일함을 알 수 있다.

$$C = (i_{dc}, i_{qc}) = \left(-\frac{\phi_f}{L_d}, 0 \right) \quad (23)$$

영구자석에 의한 쇄교자속은 회전자의 위치에 따라 변하는 고조파를 함유하고 있으므로 타원의 중심점 및 반경도 회전자의 위치에 따라 변하게 된다. 약자속 운전 영역에서 정상상태의 q 축 전압은 양(positive)의 값을 가지므로 제어가 가능한 q 축 전류는 q 축 유기전압의 고조파가 가장 큰 양의 값을 갖는 위치에 의해 결정된다. 반대로 d 축 전압은 약자속 운전 영역에서 음(negative)의 값을 가지므로 제어가 가능한 d 축 전류는 d 축 유기전압의 고조파가 가장 작은 음의 값을 갖는 위치에 의해 결정된다. 즉 유기전압의 고조파를 반영할 경우 식 (19)에서 q 축 유기전압 $\omega_r \lambda_{df}$ 은 가장 큰

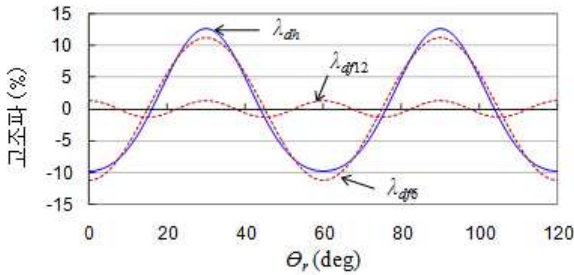
양의 값을 갖고, d 축 유기전압 $\omega_r \lambda_{qf}$ 은 가장 작은 음의 값을 갖는 경우에 전동기에 공급할 수 있는 dq 전류의 제어 가능 영역이 결정된다.

식 (5)와 (6)에 주어진 영구자석의 dq 축 쇄교자속에서 q 축 유기전압 $e_q = \omega_r \lambda_{df} = \omega_r (\phi_f + \lambda_{dfh})$ 을 결정하는 영구자석의 d 축 쇄교자속의 고조파 성분 λ_{dfh} 는 6차 고조파 λ_{df6} 및 12차의 고조파 λ_{df12} 의 합으로 주어지며 그림 3(a)에 나타난 바와 같이 $\theta_r = 30^\circ$ 일 때 가장 크게 되고 최대값은 식 (24)로 주어진다. 또한 d 축 유기전압 $e_d = \omega_r \lambda_{qf} = \omega_r \lambda_{qfh}$ 을 결정하는 영구자석의 q 축 쇄교자속의 고조파 성분 λ_{qfh} 는 6차 고조파 λ_{qf6} 및 12차의 고조파 λ_{qf12} 의 합으로 주어지며 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 $\theta_r = 15^\circ$ 일 때 음의 방향으로 가장 크게 되고 최소값은 식 (25)로 주어진다.

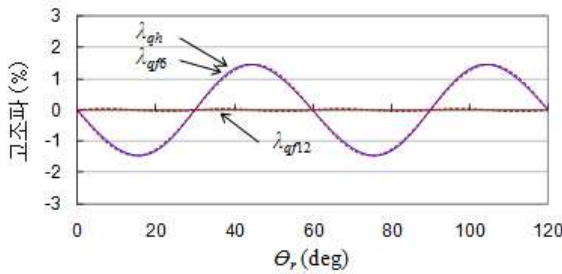
$$\lambda_{df, \max} = \phi_f - \lambda_{df6} + \lambda_{df12} \quad (24)$$

$$\lambda_{qf, \min} = \lambda_{qf6} - \lambda_{qf12} \quad (25)$$

식 (24), (25)에서 영구자석에 의한 dq 쇄교자속의 고조파 성분은 그림 2의 유기전압 FFT와 식 (6), (7)로부터 6차 고조파 성분은 음의 값, $\lambda_{df6} = -11.12\%$, $\lambda_{qf6} = -1.46\%$ 을, 12차 고조파 성분은 양의 값, $\lambda_{df12} = 1.38\%$, $\lambda_{qf12} = 0.06\%$ 을 갖는다 따라



(a) d축 쇄교자속의 고조파



(b) q축 쇄교자속의 고조파

그림 3 dq축 쇄교자속의 고조파
Fig. 3 Harmonics of dq-axis flux linkages

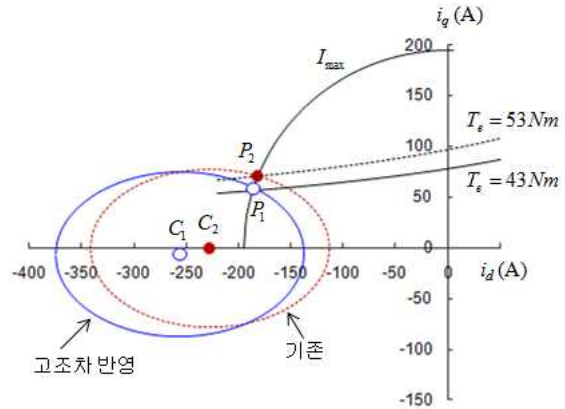


그림 4 전압제하에 의한 전류영역
Fig. 4 Available current under voltage limit

서 영구자석에 의한 d 축 쇄교자속의 고조파 성분의 최대값은 12.5%, 영구자석에 의한 q 축 쇄교자속의 고조파 성분의 최소값은 -1.52%가 된다. 따라서 q 축 유기전압은 고조파를 반영하지 않은 경우에 비해 최대 12.5%의 전압이 고조파에 의해 증가하게 된다.

유기전압의 고조파를 반영할 경우 전압제하에 의한 제한되는 최소의 dq 전류영역은 식 (19), (24), (25)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(r_s i_d - \omega_r L_q i_q + \omega_r \lambda_{qf, \min})^2 + (r_s i_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \lambda_{df, \max})^2 \leq V_{\max}^2 \quad (26)$$

그림 4는 전동기의 속도가 4,200rpm일 때 전압제하에 의한 dq 전류의 제어 가능영역을 나타낸다. 유기전압의 고조파를 고려하지 않은 기존 해석에서는 제어 가능한 dq 전류의 경계를 나타내는 타원의 중심점 C_2 은 (-227.8, 0)을 나타내고 있으며, 인버터의 전류를 195Apeak로 제한할 경우 최대토크는 그림 4의 P_2 에서 발생하며 53Nm를 나타낸다. 반면에 유기전압의 고조파를 반영한 해석의 경우 제어 가능한 dq 전류의 타원의 중심점 C_1 은 (-256.2, -6.3)을 나타낸다. 또한 인버터의 전류를 195Apeak로 제한할 경우 최대토크는 그림 4의 P_1 에서 발생하며 43Nm를 나타낸다. 즉 유기전압을 고려한 해석의 경우 기존 해석에 비해 동일한 속도에서 발생할 수 있는 최대토크가 작음을 알 수 있다.

3.2 최대전압

전동기에 공급할 수 있는 최대전압은 DC 링크전압

과 PWM 방법, 듀티비(Duty ratio), 및 데드타임(Dead time) 등에 의해 결정된다.^[9] 전동기에 DC 링크전압이 인가되는 액티브(Active) 스위칭 상태일 때 전동기의 3상 전류는 항상 인버터의 상단 스위치와 하단 스위치를 통하여 흐르게 된다. 따라서 전동기의 선간에 걸리는 전압은 DC 링크전압 V_{dc} 에서 스위치 2개의 통전 전압(Turn on voltage) $2V_{DS}$ 을 뺀 전압 $V_{dc-eff} = V_{dc} - 2V_{DS}$ 이 걸리게 된다. 따라서 공간벡터 PWM(SVPWM, Space vector PWM)을 사용할 경우 선형변조(Linear modulation) 구간에서 한 상에 인가할 수 있는 최대전압은 다음과 같다. 여기서 배터리의 DC 링크전압은 $V_{dc} = 158V$, 스위치의 turn-on 전압은 $V_{DS} = 2V$ 이다.

$$V_{max-PWM} = \frac{V_{dc} - 2V_{DS}}{\sqrt{3}} = \frac{158 - 4}{\sqrt{3}} = 88.9V$$

또한 전압제어의 최대 PWM 듀티비를 95%로 가정하고, 인버터의 데드타임(dead time)을 3%로 설계할 경우 인버터가 전동기에 공급할 수 있는 최대 상전압은 다음과 같다.

$$V_{max} = V_{max-PWM} \times D_{max} \times (1 - D_{deadtime})$$

$$= 88.9 \times 0.95 \times (1 - 0.03) = 81.9V$$

3.3 최대토크 운전궤적

HEV용 영구자석 동기전동기는 그림 5에 나타난 바와 같이 저속에서는 단위전류 당 최대토크(MTPA, Maximum torque per ampere) 모드로 제어하고 고속에서는 약자속 모드로 제어한다. 본 논문의 영구자석 동기전동기는 6,000rpm 운전 시 전압제어에 의한 dq 전류의 중심점이 $C_1(i_d, i_q) = (-256.2, -5.1)$ 로 인버터의 최대전류($I_{max} = 195A$) 범위 밖에 있으므로 MTPV (Maximum torque per voltage) 운전모드는 발생하지 않는다.

그림 5에서 A점은 HEV용 전동기의 요구토크인 105Nm를 발생하는 MTPA 운전점으로 이 때 전동기 속도는 1,450rpm이다. 전동기의 속도가 1,450rpm 이하일 경우 전동기는 영역 I의 MTPA 곡선을 따라 운전한다. 전동기의 속도가 1,450rpm보다 클 경우 105Nm를 발생하기 위해서 전동기는 A점과 B점 사이의 영역 II에서 운전한다. B점은 전동기가 105Nm를 발생할 수 있는 최대속도의 운전점을 나타내며 이 때 전동기의 속도는 1,700rpm이다. 전동기의 속도가 1,700rpm보다

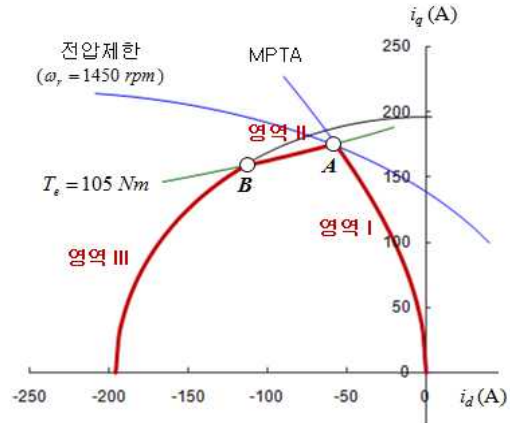


그림 5 최대토크 운전궤적: A(-58,177.5), B(-112,159)
Fig. 5 Trajectory for maximum torque operation

클 경우 최대토크 운전점은 영역 III의 곡선을 따라 이동한다.

4. 실험 및 토크-속도 특성

영구자석 동기전동기의 약자속 제어에 의한 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)로부터 측정하였다. 표 1은 영구자석 동기전동기의 상수(parameters)를 나타내며 그림 6은 실험장치를 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 정격전압(nominal voltage)은 158V이다.

표 1 전동기 상수
Table 1 Motor parameter

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

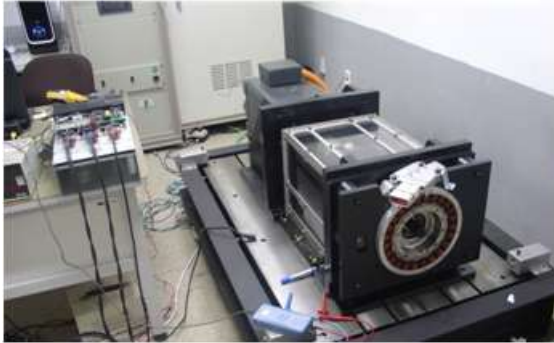


그림 6 실험장치
Fig. 6 Experiment setup

그림 7은 4,200rpm으로 운전 시 10Nm - 40Nm의 토크를 발생하는 운전점의 해석 및 실험결과를 나타낸다. 유기전압의 고조파를 반영하지 않은 기존 해석의 경우 4,200rpm에서 40Nm의 토크를 발생하기 위한 운전점은 전압제한에 의한 dq 전류 타원과 일정토크곡선(Constant torque curve)이 만나는 A점으로 $A(i_d, i_q) = (-150.1, 57)$ 이다. 유기전압의 고조파를 반영한 해석의 경우 4,200rpm에서 40Nm의 토크를 발생하기 위한 운전점 B는 $B(i_d, i_q) = (-185.7, 59.2)$ 이다. 실제 실험의 경우 운전점은 $C(i_d, i_q) = (-188.8, 56.3)$ 으로 유기전압의 고조파를 반영한 운전점이 실험결과와 유사하게 나타남을 알 수 있다. 또한 4,200rpm에서 전동기가 발생할 수 있는 최대토크는 기존 해석의 경우 52.4Nm, 유기전압의 고조파를 반영한 해석의 경우 43.9Nm, 실험의 경우 42.0Nm로 유기전압의 고조파를 반영한 해석이 실험결과와 유사하게 나타났다. 기존 해석의 경우 4,200rpm에서 최대토크인 52.4Nm를 발생하기 위한 운전점은 $(i_d, i_q) = (-181.6, 71.1)$ 로 실제 시스템의 경우 전압제한의 전류영역을 벗어남으로써 전류제어가 되지 못한다.

그림 8은 6,000rpm으로 운전 시 10Nm - 20Nm의 토크를 발생하는 운전점의 해석 및 실험결과를 나타낸다. 기존 해석의 경우 6,000rpm에서 20Nm의 토크를 발생하기 위한 운전점은 $A(i_d, i_q) = (-159.3, 28.1)$, 유기전압의 고조파를 반영한 해석의 경우 $B(i_d, i_q) = (-187.2, 26.8)$ 이다. 실험의 경우 운전점은 $C(i_d, i_q) = (-188.5, 27.0)$ 으로 유기전압의 고조파를 반영한 운전점이 실험결과와 유사하게 나타남을 알 수 있다. 또한 6,000rpm에서 전동기가 발생할 수 있는 최대토크는 기존 해석의 경우 35.5Nm, 유기전압의 고조파를 반영한 해석의 경우 23.6Nm, 실험의 경우

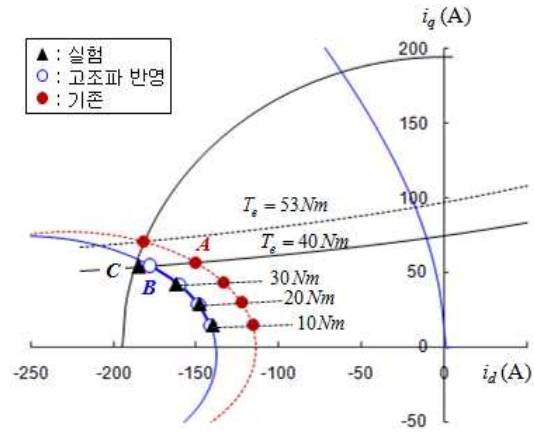


그림 7 4200rpm의 운전점
Fig. 7 Operating point at 4200rpm

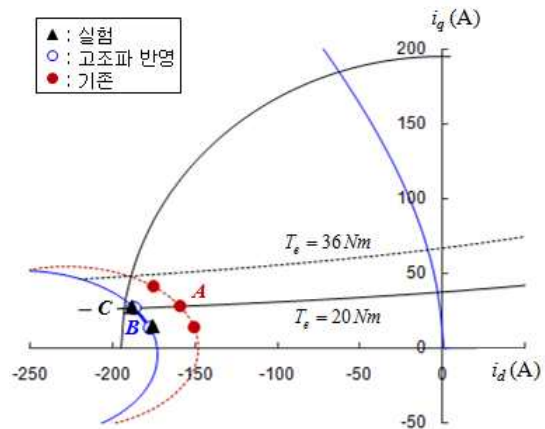


그림 8 6000rpm의 운전점
Fig. 8 Operating point at 6000rpm

22.5Nm로 유기전압의 고조파를 반영한 해석이 실험결과와 유사하게 나타났다.

그림 9는 전동기 속도에 따라 최대토크를 발생하는 dq 전류의 동작점에 대한 해석 및 실험결과를 나타낸다. 최대토크를 발생하기 위한 dq 전류의 궤적은 앞의 장에서 설명한 바와 같이 전동기 속도가 1,450rpm보다 작은 경우에는 MTPA 궤적을 따라 운전하고 전동기 속도가 B점의 속도인 1,700rpm 보다 큰 경우에는 속도가 증가함에 따라 최대전류 제한궤적을 따라 B점에서 C점으로 이동한다.

실험결과 MTPA 궤적을 따라 105Nm를 발생할 수 있는 최대속도는 1,400rpm으로 해석치 1,450rpm과 비슷한 수준으로 나타났다. 또한 약자속 제어에 의해 105Nm를 발생할 수 있는 최대속도인 B점은 1,700rpm

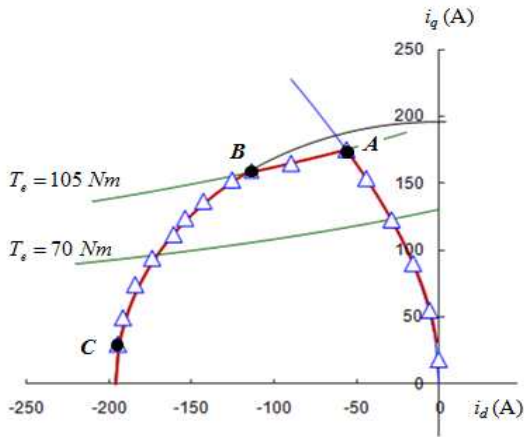


그림 9 최대토크 운전 시 전류궤적
 Fig. 9 Current Trajectory for maximum torque operation
 A(1400rpm,105Nm), B(1700rpm,105Nm), C(6000rpm,22.5Nm)

으로 해석결과와 동일하게 나타났다. 전동기 속도별 최대토크 및 최대토크를 발생하는 dq 전류의 실험결과와 유기전압의 고조파를 반영한 해석결과와 유사함을 알 수 있다.

그림 10은 기존 해석 및 유기전압의 고조파를 반영한 약자속 해석, 실험의 토크-속도 특성을 나타낸다. 유기전압의 고조파를 반영한 토크-속도 특성이 실험결과와 유사하게 나타남을 알 수 있다. 반면 기존의 해석에 따른 최대토크는 약자속 모드로 운전하는 1,700rpm 이상의 속도에서 실험값보다 더 크게 나타났다. 실제 시스템에서는 유기전압의 고조파에 의해 전동기에 공급할 수 있는 전류의 영역이 기존의 해석보다 더 좁아짐에 따라 오차가 발생하며 전동기의 속도가 증가함에 따라 유기전압의 고조파 영향이 더 크게 되므로 기존의 해석결과와 실험값의 오차는 더 증가한다.

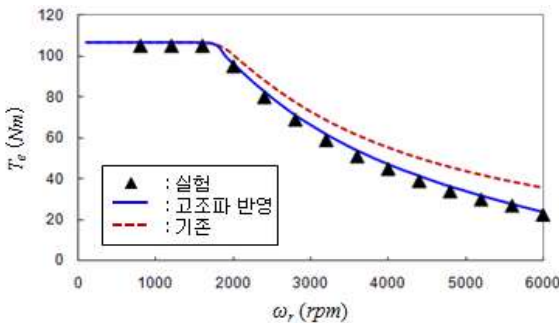


그림 10 토크-속도 특성
 Fig. 10 Torque-speed characteristics

그림 11은 그림 10의 최대토크 운전을 위한 전류의 크기 및 진상각(Lead angle)의 해석 및 실험결과를 나타낸다. 기존의 해석에 의한 전류 진상각이 실험값보다 작게 나타나며 속도가 증가함에 따라 기존의 해석에 의한 진상각과 실험값은 차이가 더 크게 된다. 따라서 속도가 증가함에 따라 기존의 해석에 의한 dq 전류의 동작점은 전류제어가 정상적으로 수행되지 않으므로 전류제어의 특성이 저하되고 전동기의 토크가 크게 변동한다.

그림 12와 그림 13은 전동기의 속도가 6,000rpm일 때 각각 기존 및 유기전압을 고려한 약자속 해석에 의한 dq 전류로 토크를 제어할 경우 dq 전류 및 상전류를 나타낸다. 기존의 약자속 해석에 의해 20Nm의 토크를 발생하기 위한 dq 전류로 제어할 경우 전압제단에 의해 제어 가능한 전류영역을 벗어나게 되므로 그림 12에 나타난 바와 같이 dq 전류의 제어특성이 현저히 저하되어 토크의 리플이 증가하게 되고 토크명령을 추종하지 못하게 된다. 반면에 유기전압의 고조파를 반영한 해석 시 dq 전류명령은 전압제단에 의한 전류영역 내에 있으므로 dq 전류가 정상적으로 제어되며 전동기의 토크도 토크명령을 잘 추종하게 된다.

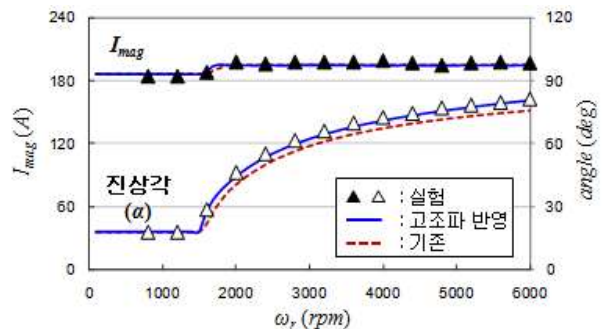


그림 11 최대토크 운전 시 전류크기 및 진상각
 Fig. 11 Current magnitude and lead angle at maximum torque operation

4. 결 론

본 논문에서는 HEV용 영구자석 매립형 동기전동기의 유기전압이 고조파를 포함하고 있는 경우 고속운전을 위한 약자속 운전 영역에 대하여 분석하였다. 배터리의 전압제한 및 인버터의 최대전류 제한 조건하에서 유기전압의 고조파가 전동기의 속도 및 최대토크에 미치는 영향을 검토하고, 최대토크를 발생하기 위한 dq 전류의 운전점에 대해 분석하였다.

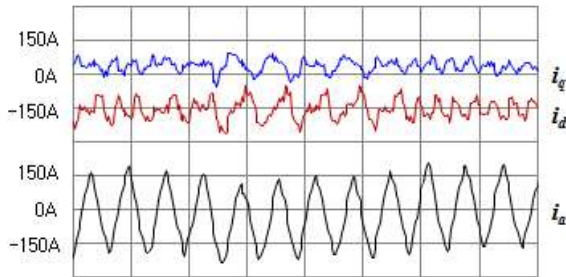


그림 12 6,000rpm 운전 시 기존 약자속 해석의 전류 (시간: 2msec/div.)

Fig. 12 Currents for conventional analysis at 6,000rpm

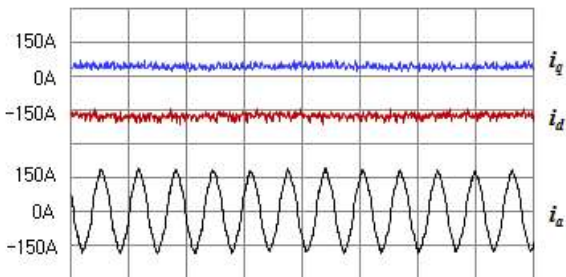


그림 13 6,000rpm 운전 시 제안된 약자속 해석의 전류 (시간: 2msec/div.)

Fig. 13 Currents for proposed analysis at 6,000rpm

또한 기존의 약자속 운전의 해석과 제안된 해석에 의한 속도별 최대토크 및 운전점에 대해 비교, 분석하고 실험을 통하여 제안된 약자속 영역 해석의 타당성을 확인하였다.

본 논문에서 제안된 약자속 운전해석은 고속에서 실제 전동기의 최대토크 운전 가능영역을 정확히 파악하고, 약자속 제어 시 속도 및 토크에 따른 dq 전류의 맵 또는 약자속 제어 알고리즘을 구현하는데 유용하게 활용할 수 있다.

이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2008-331-D00210).

참고 문헌

[1] N. Bianchi, S. Bolognani, and B. J. Chalmers, "Salint rotor PM synchronous motors for an extended

flux-weakening operation range", *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 36, No. 4, pp. 1118-1125, 2000, July/Aug.

[2] 이홍균, 이정철, 정동화, "전기자동차 구동을 위한 IPMSM의 최대 토크제어", *전력전자학회 논문지*, 제8권 제3호, pp. 221-229, 2003. 6.

[3] G. G. López, F. S. Gunawan, and J. E. Walters, "Optimum torque control of Permanent-Magnet AC machines in the field-weakened region", *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 41, No. 4, pp. 1020-1028, 2005, July/Aug.

[4] N. V. Olarescu, M. Weinmann, S. Zeh, and S. Musuroi, "Novel flux weakening control algorithm for PMSMS", in *POWERENG*, pp. 123-127, 2009, March.

[5] M. Tursini, E. Chiricozzi, and R. Petrella, "Feedforward flux weakening control of surface mounted Permanent Magnet synchronous motors accounting for resistive voltage drop", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 1, pp. 440-448, 2010. Jan.

[6] X. Cao and L. Fan, "A Novel Flux-weakening Control Scheme Based on the Fuzzy Logic of PMSM Drive", in *Proc. of International Conference on Mechatronics and Automation(ICMA)*, pp. 1228-1232, 2009. Aug.

[7] Z. Sun, J. Wang, G. W. Jewell, and D. Howe, "Enhanced optimal torque control of fault-tolerant PM machine under flux-weakening operation", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 1, pp. 344-353, 2010. Jan.

[8] S. K. Chung, H. S. Kim, C. G. Kim, M. J. Youn, "A new instantaneous torque control of PM synchronous motor for high-performance direct-drive applications", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 13, No. 3, pp. 388-400, 1998. May.

[9] 김장목, 임익현, 류홍우, "약제자 영역에서 최대전압 설정에 관한 연구", *전력전자학술대회 논문집*, pp. 26-30, 1999. 7.

저 자 소 개



조관열(趙官烈)

1986년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기및전자공학과 졸업(공학박). 1993년~2003년 LG전자(주) DA연구소 책임연구원. 2004년~현재 충주대 제어계측공학과 부교수. 당 학회 JPE Publication Editor.



우병국(禹炳國)

1970년 9월 17일생. 1996년 울산대 전기공학과 졸업. 2008년~2009년 충주대 정보제어공학과 졸업(석사). 1996년~2009년 (주)동아일렉콤 책임연구원. 2010년~현재 (주)이지트로닉스 수석연구원.



김경만(金京滿)

1971년 1월 11일생. 1996년 울산대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기전자정보시스템공학과 박사과정. 현재 울산과학기술대 전기전자학부 겸임 조교수. 현재 (주)이지트로닉스 수석연구원.



강찬호(姜燦鎬)

1959년 4월 13일생. 1986년 중앙대 전자공학과 졸업. 1996년 한양대 전기공학과 졸업(석사). 2003년 SOJO대 전력전자공학 졸업(공학박). 1988년~1989년 LG정보통신(주)연구원. 1989년~2008년 (주)동아일렉콤 연구소장. 2008년~현재 (주)이지트로닉스 대표이사.



신희근(申熙根)

1985년 2월 20일생, 2010년 충주대 정보제어공학과 졸업. 2010년~현재 동 대학원 제어계측공학과 석사과정.



윤병철(尹炳喆)

1985년 11월 1일생, 2010년 충주대 정보제어공학과 졸업. 2010년~현재 동 대학원 제어계측공학과 석사과정.



박민규(朴敏圭)

1981년 5월 1일생. 2005년 경북전문대학 전자과 졸업. 2006년~2008년 충주대 정보제어공학과 졸업. 2008년~2010년 충주대 정보제어공학과 졸업(석사). 2010년~현재 동아일렉콤 연구원.