

A Study on the Torque Ripple Reduction of Low Voltage High Current SPMSM

이근호* · 홍정표†
(Geun-Ho Lee · Jeong-Pyo Hong)

Abstract - Active control schemes which modify the excitation to correct for any of the nonideal characteristics of the SPMSM is described. Especially, because of design limitations(size and cost) in automobile, the back-EMF of SPMSM can't be perfectly designed with sinusoidal wave and iron core of stator is saturated so that torque ripple is unavoidable. An active cancellation method of the pulsating torque components which would otherwise be generated using the classic sinusoidal current excitation is illustrated.

Key Words : SPMSM, Torque Ripple, Magnetic Saturation, Torque Ripple Reduction

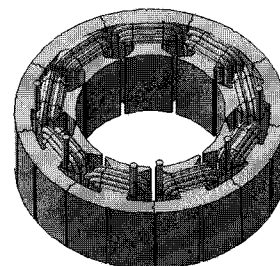
1. 서론

최근 화석연료에 의한 배기가스로 인하여 공기 오염 및 지구 온난화 문제가 심각해지고 화석연료 사용을 감축하자는 국제간의 협약이 발효되었다. 이러한 협약은 불이행시 선진국에서의 무역 규제 조치가 이루어져, 결국 생존을 위하여 전기자동차(Electric Vehicle) 및 하이브리드 전기자동차(Hybrid Electric Vehicle)와 같은 친환경 차량 개발 및 대체 에너지 연구가 국가 차원에서 경쟁적으로 수행되고 있다. 자동차 시스템에서도 연비 향상을 위한 연구가 활발히 진행되면서, 자동차 핸들 조작부에서도 유압식 조향장치(Hydraulic Power Steering)대신 전동식 조향장치(Electric Power steering)가 차세대 조향 보조장치로서 주목을 받고 있고 유압브레이크 등에서도 전자식 브레이크 시스템(Electro Mechanical Brake System)으로 변경하려는 연구가 진행되고 있다[1].

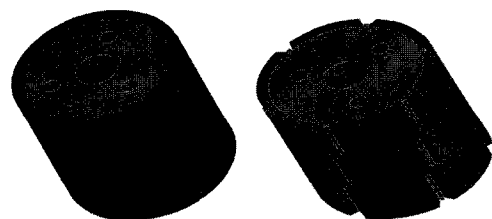
이와 같이 자동차에 많은 장치를 전동식으로 변환하고 기존의 DC 모터를 BLDC(Brushless DC Motor)나 영구자석동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor)으로 변경하려는 필요성이 대두되면서 저가의 고성능 PMSM 구동시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 자동차에서는 기존의 배터리 시스템으로 인해 12V로 구동되므로 전류가 매우 크고 사이즈의 제약으로 인해 PMSM이 쉽게 포화되고 역기전력 또한 큰 THD를 갖기도 한다.

특히 자동차의 전동식조향장치와 같은 시스템에서는 토크리플이 매우 중요하여 수 %이하로 전동기를 설계하지만 사

이즈 Cost등의 제약으로 설계목표치를 달성하기에 어려움이 따른다[2][3][4]. 그림 1에는 저 토크 리플로 설계된 자동차용 저전압 대전류 PMSM의 고정자와 회전자 형상을 나타내었다. 토크리플 저감을 위해서 회전자를 스큐(skew)하기 위해 세그먼트 마그넷(segment magnet)으로 제작하였다. 본문에서 그림 1과 같은 SPMSM(표면부착형 영구자석동기전동기)에서 실제적인 제약으로 인해 토크리플을 제어기의 전류 제어를 이용해 저감할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.



(a) 전기차 구조



(b) Ring magnet rotor & segment magnet rotor

그림 1 저전압 대전류 PMSM의 구조
Fig. 1 A structure of low voltage high current PMSM

* 정 회 원 : 한양대학교 자동차공학과 박사과정
† 교신저자, 펠로우회원 : 한양대학교 자동차공학과 교수
E-mail : hongjp@hanyang.ac.krr
접수일자 : 2009년 10월 26일
최종완료 : 2009년 11월 19일

2. PMSM에서의 토크 리플

PMSM의 고정자나 회전자를 스큐하거나 그림 1과 같이 영구자석을 세그먼트로 하여 역기전력의 왜형을 줄일 수 있지만 제작비용이 증가할 수 있다. 고정자를 스큐하는 것은 저전압 대전류 전동기의 경우 권선이 어렵고 분할 코어를 사용할 경우 더욱 스큐하기도 어렵다. 또한 영구자석 회전자를 스큐할 경우 마그네트를 세그먼트로 분할하여 제작하므로 제작비용이 증가할 수 있다.

따라서, 전동기 설계의 제약조건인 가격적인 문제나 사이즈의 제한 등으로 인해 역기전력 왜형과 자기적 포화를 완벽히 피할 수는 없다. 이러한 역기전력 왜형과 자기포화가 있는 경우 정현파 전류를 인가하더라도 전동기는 그 자체적 요인으로 토크 리플을 가질 수밖에 없다[3]. 본 논문에서는 전동기의 자체의 요인으로 인해 발생하는 토크리플을 제어기에서 저감하는 것을 목표로 하고 있다. 따라서 표 1의 사양으로 실제 제작된 저전압 대전류 EPS PMSM의 역기전력과 자기적인 해석을 통해 포화에 따른 토크 리플을 분석하고 그 저감 대책에 대해 기술한다.

표 1 저전압 대전류 SPMSM 사양

Table 1 The specification of low voltage SPMSM

Items	Value
Stator outer diameter	117 mm
Rotor outer diameter	70 mm
Br (@20~25°C)	1.35 T
Number of poles and slots	6 / 9
Rated torque	4 Nm
Rated current	50 A _{rms}
Base and Maximum speed	1000, 2000 rpm

2.1 역기전력 왜형에 의한 토크 리플

3상 SPMSM에서 전자기적 토크는 다음 식(1)과 같이 계산될 수 있다[4].

$$T = \frac{1}{\omega_m} \sum_i^3 \sum_n^n \left[I_m E_n \sin(p\omega_m t - \frac{2\pi}{3}) \cdot \sin(n(p - \omega_m t - \frac{2\pi}{3} - \phi)) \right] \quad (1)$$

여기서, ω_m 는 전동기속도, P 는 Polepair, E_n 은 n 차 역기전력, I_m 은 상전류의 최대치이다. 공극자속 분포에서 even order 고조파는 나타나지 않으므로 n 은 positive odd number이고, 식(1)은 다음식과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$T(t) = \frac{3I_m E_1}{2\omega_m} \cos(\phi) + \left[\sum_i^3 \sum_n^n \left\{ E_n \cos\left((n-1)p\omega_m t - (n-1)\frac{2\pi}{3} - n\phi \right) \right\} \right] - \frac{I_m}{2\omega_m} \left[\sum_i^3 \sum_n^n \left\{ E_n \cos\left((n+1)p\omega_m t - (n+1)\frac{2\pi}{3} - n\phi \right) \right\} \right] \quad (2)$$

여기서, $n = km \pm 1$, m 은 상수, k 는 정수이다.

그러므로 정현파 전류를 전동기에 인가할 경우 역기전력의 왜형으로 인해 3상의 경우 $n=5, 7, 11, 13...$ 이 된다[4].

그림 1의 Ring Type 회전자 PMSM의 역기전력파형을 그림 2에 나타내었다. 역기전에는 6차의 고조파가 함유되며 약 2.3%의 THD를 가진다. 그림 3은 정현파전류 제어시 토크 리플을 나타내었다.

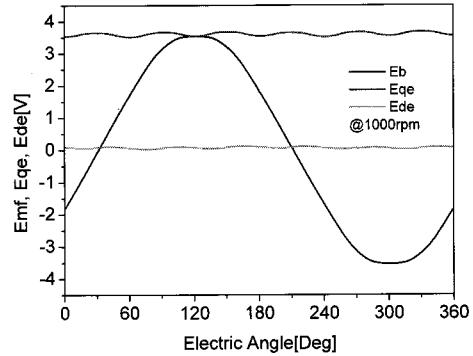


그림 2 Ring형 마그네트 회전자 구조의 역기전력파형
Fig. 2 Back-EMF of ring magnet rotor PMSM

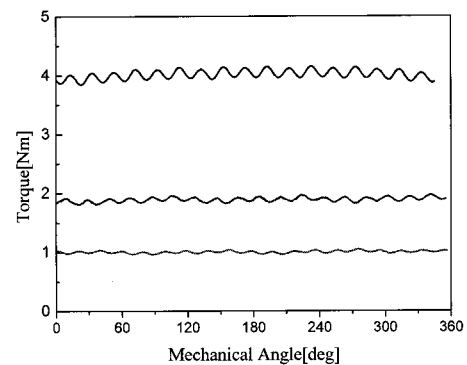


그림 3 Emf THD 2.3% PMSM의 토크(Ring Magnet)
Fig. 3 Ring Magnet PMSM Torque(Emf THD 2.3%)

2.2 자기적 포화에 의한 토크 리플

자동차 시스템에서는 전동기 설계에 사이즈 제약으로 인해 고평크 영역에서 고정자 철심의 부분적인 포화를 피할 수 없다. 그림 4에는 표 1에 나타난 사양의 세그먼트형 회전자(그림 1 참고)의 전자장 해석결과를 나타내었다. 정역전류에서 약 2.2T까지 자속밀도가 올라가고, 토크를 측정할 결과(그림 5)를 살펴보면 포화로 인해 고평크 영역에서 구동주파수의 6배 리플이 크게 나타남을 볼 수 있다.

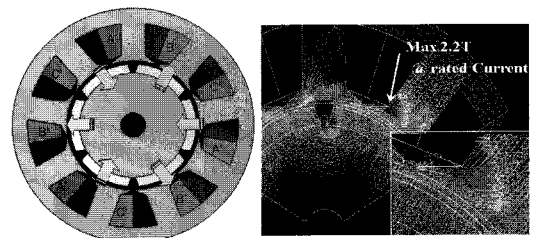


그림 4 세그먼트 회전자의 전자장 해석
Fig. 4 FEM analysis of segment magnet rotor PMSM

그림 5의 토크 리플은 0.5% 이하의 THD를 가지는 정현파 전류를 인가하여 측정하였으며 정밀한 측정을 위하여 5rpm으로 측정한 결과이다. 이 전동기의 경우 그림 3의 역기전력 THD가 높은 경우(그림 3)와 다른 토크 리플특성을 보인다. 그림 3의 토크 파형은 작은 토크에서도 토크 리플이 나타나지만 자기적인 포화에 의한 토크 리플은 그림 5와 같이 토크가 커질수록 급격히 증가함을 볼 수 있다.

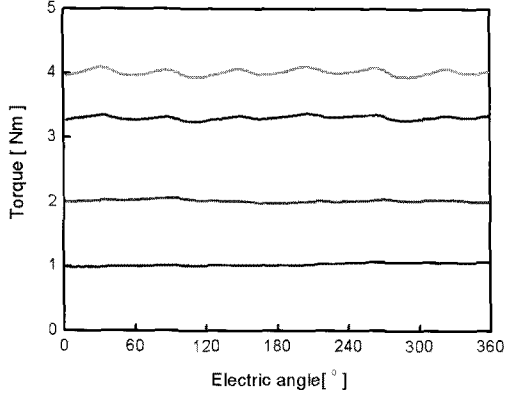


그림 5 Emf THD 0.7% PMSM의 토크(Segment Magnet)
Fig. 5 Segment Magnet PMSM Torque(Emf THD 0.7%)

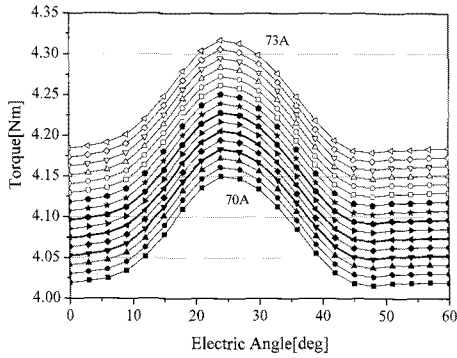


그림 6 전류의 크기에 따른 토크(유한요소해석)
Fig. 6 Torque distribution according to current(by FEM)

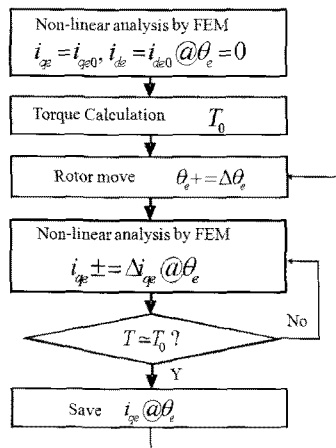


그림 7 토크리플 저감 전류를 구하기 위한 Flowchart
Fig. 7 Flowchart to get the compensation current

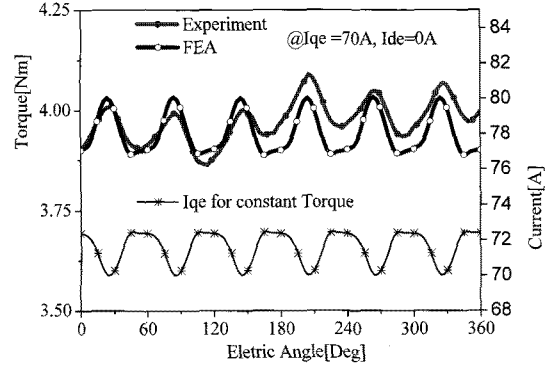


그림 8 해석치와 실험치 토크 리플 비교
Fig. 8 Comparison measured and analyzed torque

자기적인 포화에 의한 토크 리플을 유한요소법으로 토크를 구하면 전기각에 대해 그림 6과 같은 토크 분포를 얻을 수 있다. 그림 8에는 유한요소법에 의한 토크 파형과 실험치를 비교하였는데 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다. 따라서 유한요소법을 통해 토크 리플 없이 구동하기 위한 전류 파형을 구할 수 있다. 그림 7의 Flow chart와 같이 특정 전기각에서 평균토크를 얻기 위한 전류를 결정하고 전류원 유한요소해석으로 토크를 구한 다음 전류를 가변하면서 일정 토크 크기를 얻을 수 있는 Q축 전류를 계산할 수 있다. 이때 자기적인 포화를 고려하기 위하여 비선형 유한요소 해석을 이용하였으며, 그 결과 그림 8과 같이 토크리플 없이 구동할 수 있는 Q축 전류 분포를 전기각에 대해 구할 수 있다. 해석결과 정격전류의 약 3.2%의 전류로 토크 리플이 저감될 수 있음을 알 수 있다.

3. 토크리플 저감 제어

역기전력의 왜형과 자기적인 포화에 의한 토크리플을 저감하기 위해서는 결과적으로 전류에 고조파를 주입하는 것이다. 역기전력의 왜형에 의한 토크 리플은 역기전력을 측정하고 미리 DSP에 저장한 다음 전기각에 대하여 전력의 식으로부터 Q축 전류지령에 ac성분을 더하여 전류 고조파를 주입함으로써 토크리플을 저감할 수 있다. 자기적인 포화에 의한 토크리플을 최소화하기 위해 그림 8과 같이 구해진 고조파 전류를 토크 크기에 대해 함수화하고 Q축전류에 추가하는 형태로 보상하는 방법을 제시한다.

3.1 역기전력 왜형에 의한 토크 리플 저감제어

전기각에 대하여 회전좌표계상의 e_{qe} (역기전력 Q축 성분)와 e_{de} (역기전력 D축 성분)를 계산하고 전력의 식(3)에서 리플이 없어지기 위한 Q축 전류지령을 구하면 식(6과) 같이 구해진다. 이 때 $e_{qeac}i_{qeac} + e_{deac}i_{dedc} + e_{deac}i_{deac}$ 항은 $e_{qeac}i_{qedc}$ 에 비해 작은 항이므로 무시하여 계산하였다.

$$P = \frac{3}{2}(e_{qe}i_{qe} + e_{de}i_{de}) + j\frac{3}{2}(e_{qe}i_{de} + e_{de}i_{qe}) \quad (3)$$

$$e_{qeac}i_{qedc} + e_{qedc}i_{qeac} + e_{qeac}i_{qeac} + e_{deac}i_{dedc} + e_{deac}i_{deac} = 0 \quad (4)$$

$$e_{qeac}i_{qedc} + e_{qedc}i_{qeac} + e_{deac}i_{dedc} = 0 \quad (5)$$

$$i_{qeac} = \frac{e_{qeac}i_{qdc} + e_{deac}i_{dedc}}{e_{qdc}} \quad (6)$$

여기서, $P, e_{qe}, e_{de}, i_{qe}, i_{de}$ 는 순시전력, 회전좌표계상의 Q축 역기전력, D축 역기전력, 회전좌표계 상의 Q, D축 전류이다. 역기전력의 크기는 무부하 실험에 의해 미리 구하고, 속도에 따라 비례하므로 검출된 속도를 이용하여 회전좌표계 상의 D, Q축에 주입할 고조파 성분의 전류 크기를 미리 결정하여 보상함으로써 제어기에 의해 토크 리플을 최소화하여 SPMSM을 구동할 수 있다. 주입하는 고조파 전류의 위상이 역기전력 위상에 일치하여야 하므로 회전자 전기각 위치에 대응하여 위상이 결정된다. 그림 9에는 속도와 토크 지령으로부터 Q축 지령과 D축 지령전류에 고조파 성분 전류를 주입하는 Block도를 나타내었다. 그림 10은 제안된 알고리즘의 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

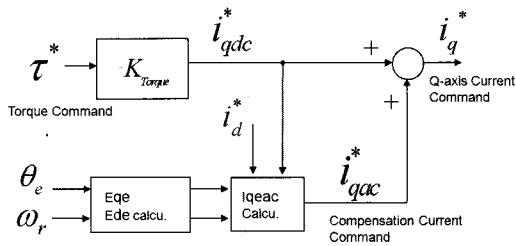


그림 9 역기전력 THD에 의한 토크리플 저감 제어블럭도
Fig. 9 Block diagram for torque ripple reduction

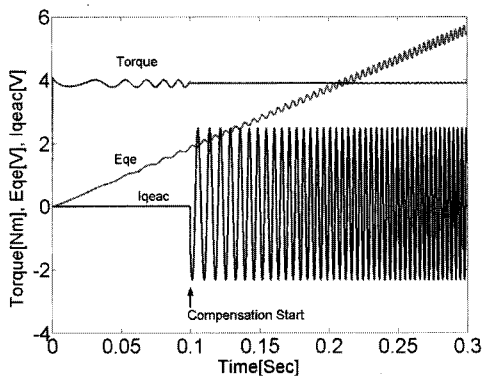


그림 10 역기전력 THD에 의한 토크리플 저감 시뮬레이션
Fig. 10 Simulation result to reduce torque ripple

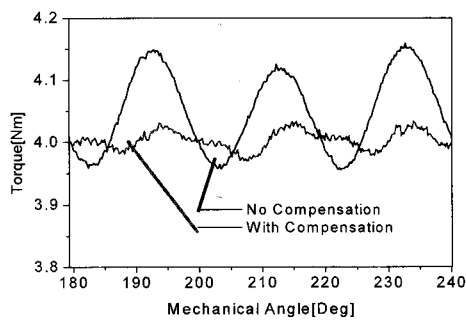


그림 11 역기전력 보상 방식에 의한 토크리플 실험결과
Fig. 11 Test result of EMF compensation method

그림 11에는 EMF THD 2.3%를 가지는 Ring type magnet PMSM에 전력개념으로 구한 토크 리플 식으로 보상하는 알고리즘으로 실험한 결과를 나타내었다. Torque Ripple은 완전히 사라지는 않았지만 대폭적으로 저감됨을 볼 수 있다. 완전히 사라지지 않은 것은 고정자 철심의 포화와 식(4)에서 imaginary항의 $e_{de}i_{qe}$ 를 무시한 것에 의해 Torque ripple이 완전히 제거되지 않는 것으로 판단된다.

3.2 자기적 포화에 의한 토크리플 저감제어

포화에 의한 토크 리플 저감은 유한요소 해석을 통해 얻어진 보상 ac전류를 Q축 전류지령의 함수로 나타내고 이를 Realtime으로 전류제어 주기에서 연산하여 전류지령에 추가하는 방식을 이용한다. 그림 1의 segment형 회전자에 대해 그림 7과 같은 방식으로 Q축 전류지령에 따라 보상해야 할 ac 전류를 계산하면 SPMSM구동주파수의 6차, 12차, 18차, 24차 성분의 전류로 나타나며, 그림 12와 같은 크기로 나타낼 수 있다. 또한 전기각에 대해서는 그림 13과 같은 ac성분 전류가 Q축에 보상되어야 할 전류이다. 이 전류에서 18차와 24차는 적은 값이므로 무시하면 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$i_{qeAC} = \sqrt{0.062 + 0.00028i_{qdc}^2} \cos(6\theta_e) + (0.071 + 0.0056i_{qdc}) \cos(12\theta_e) \quad (7)$$

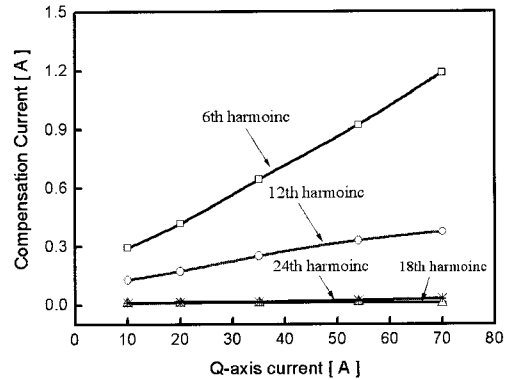


그림 12 토크리플 저감을 위한 보상전류의 고조파 전류크기
Fig. 12 Harmonic component in the compensation current

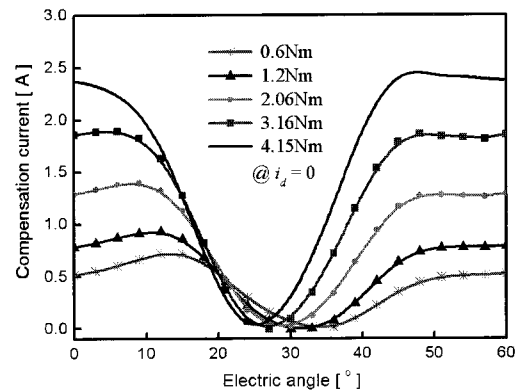


그림 13 토크리플 저감을 위한 보상전류의 고조파 전류크기
Fig. 13 Compensation current according to phase angle

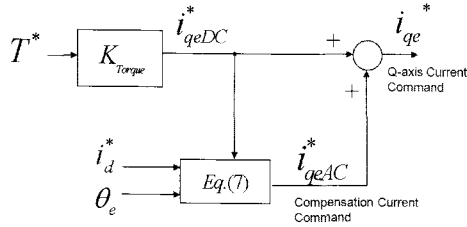
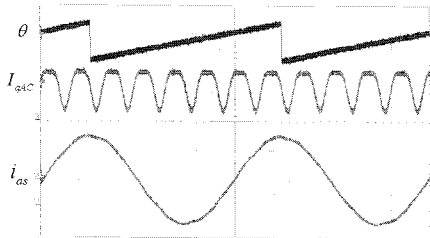
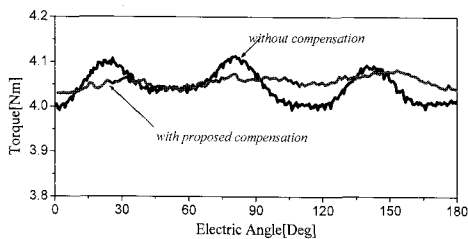


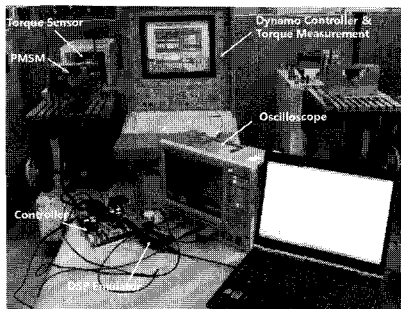
그림 14 포화에 의한 토크 리플 보상 개념도
Fig. 14 Compensation strategy to torque ripple



(a) 전기각, 보상전류[1A/div] 및 상전류[50A/div]



(b) 토크 리플



(c) 실험 장면

그림 15 제시된 토크리플 저감 알고리즘 실험 결과
Fig. 15 Test Result proposed algorithm

그림 14에는 포화에 의한 토크 리플 보상을 벡터제어 기법에서 구현하기 위한 개념도를 나타내었다. 6차와 12차의 고조파 전류를 상전류에 주입할 경우 그림 15(a)와 같은 파형으로 보상이 되며, 그 때의 토크 리플 파형을 그림 15(b)에 나타내었다. 토크 리플이 약 30%까지 저감됨을 확인할 수 있다. 그림 15의 경우 정밀 토크 리플 측정과 정확한 전류제어를 위하여 전동기를 10rpm 저속구동으로 측정하였다. 전동기 상전류에 고조파가 함유되어 있음을 볼 수 있다. 제어기는 TI사의 TMS320F28335 DSP, 6Pack FET GWM220-004, 전류센서로 ACS754-100으로 구성되었다.

4. 결론

본 논문에서 SPMSM의 설계적 요인으로 EMF THD와 자기포화에 의해 발생하는 토크리플을 제어기에서 고조파 전류를 주입함으로써 토크 리플을 저감할 수 있는 방법을 제시하였다. 자동차에 사용되는 PMSM은 저전압 대전류 형태로 큰 전류로 구동되며 수 %의 전류로 토크 리플을 현저히 저감시킬 수 있음을 실험을 통해 검증하였다. 특히 제시된 알고리즘은 PMSM 벡터제어기에서 비교적 쉽게 구현될 수 있어 실용성이 크다고 판단된다. 향후 연구과제로는 약계자 영역에서는 더욱 복잡하게 보상전류가 연산되어야 하므로 이에 대한 연구와 높은 주파수의 전류로 인해 전류제어기가 빠르게 응답해야 하므로 고성능의 제어기를 설계하는 연구가 진행되어야 할 것으로 본다.

참고 문헌

- [1] Nakayama, T. and Suda, E., "The Present and Future of Electric Power Steering", Int. J. of Vehicle Design, Vol.15, Nos 3/4/5, pp.243~254, 1994
- [2] Nakayama Islam.M, "Design Considerations of Sinusoidally Excited Permanent-magnet Machines for low-torque-ripple applications", IEEE Trans. IAS. App.41,4, 955-962. 2005.
- [3] Lee, G. H., Kim, S.I., Hong, J.P.and Bhan, J.H., "Torque Ripple Reduction of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Using Harmonic Injected Current", IEEE Trans. Mag.44,6, 1582-1585.
- [4] Mohammad S. Islam, Sayeed Mir, "Design Considerations of Sinusoidally Excited Permanent Magnet Machines for Low Torque Ripple Applications", IEEE, IAS, VOL. 41, NO. 4, 2005.

저 자 소 개



이근호 (李根浩)

1969년 4월 11일생, 1992년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원전기공학과 졸업. 1994년~2002년 LG산전 선임연구원. 2002년~현재 경남도립남해대학 전기과 부교수. 2007년~현재 한양대학교 자동차공학과 박사과정



홍정표 (洪正杓)

1959년 4월 17일생, 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업. 1985년~1990년 LG정밀(주) 중앙연구소 선임연구원, 1990년~1992년 삼성전기(주) 종합연구소 선임 연구원, 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사), 1996년~2006년 창원대학교 전기공학과 부교수, 2006년~2008년 한양대학교 기계공학부 부교수, 2008년~현재 한양대학교 기계공학부 교수.