

고조파 전류를 이용한 영구자석형 동기 전동기의 토크 리플 저감

논 문
58-10-14

Torque Ripple Reduction for Permanent Magnet Synchronous Motor using Harmonic Current Injection

권 순 오* · 이 정 종* · 이 근 호* · 홍 정 표†
(Soon-O Kwon · Jeong-Jong Lee · Geun-Ho Lee · Jung-Pyo Hong)

Abstract - This paper deals with the torque ripple reduction of permanent magnet synchronous motor using harmonic current injection. Torque ripple of electric motor reduces system stability and performances, therefore efforts to reduce torque ripple are exerted in the design process. Torque ripple can be reduced by appropriate pole/slot combination, skew of rotor or stator, design of magnetic circuit, etc. In addition, torque ripple can be also reduced by input voltage and current, and many researches have been conducted to reduce torque ripple for six-step drive. Torque ripple reduction for current vector controlled permanent magnet synchronous motor also have been conducted and verified by investigating back emf wave form. Torque ripple reduction in this paper started from getting torque profile according to input current and electrical angle calculated by FEA, then instantaneous currents at each electrical angles for constant torque are calculated and applied to experiments. Therefore, 0% of torque ripple can be obtained theoretically with harmonic current injection. In order to maximize the effect of torque ripple reduction, a BLDC motor having high harmonic component of back emf is chosen. With sinusoidal current drive, over 100% of torque ripple is obtained initially, then 0.5 % of torque ripple is obtained by FEA using harmonic current injection. The effect is verified by experiment and the presented method can be effectively applicable to Electric Power Steering(EPS).

Key Words : Permanent magnet synchronous motor, Torque ripple, Finite element analysis, Current vector control

1. 서 론

영구자석 동기전동기는 유도전동기나 릴럭턴스 전동기에 비해 고효율 및 높은 출력 밀도를 가지므로 소형 경량화가 효과적으로 이루어 질 수 있다. 따라서 소형 가전 기기에서부터 대형 발전기에 이르기까지 다양한 분야에 적용되고 있으며 적용범위를 더 넓혀 가고 있다. 이러한 영구자석 동기 전동기의 다양한 특성 중 토크 리플은 소음 및 진동의 원인이 되며 시스템의 안전성에 영향을 끼친다. 따라서 토크 리플은 저감되어야 하며 크게 자기회로 설계와 전동기의 제어에 의한 토크 리플 저감이 있을 수 있다.

토크 리플의 요인은 크게 4가지로 나누어지며, 각각 전기자 기자력과 계자 기자력에 의한 성분, 역기전력 또는 전류 고조파에 의한 성분, 코깅 토크, 기계적 요인과 같다. 본 논문에서는 기계적 요인을 제외한 요인을 반영하여 토크 리플 저감을 이루고자 한다[1].

자기 회로 설계 관점에서 토크 리플을 저감하기 위해서 정현적인 공극 자계 분포, 전동기의 형상 치수, 높은 극수 또는 슬롯 수, Fractional pole-slot의 선택 등이 있다 [2],

[3]. Fractional pole-slot 조합은 낮은 토크 리플 및 코깅 토크 특성을 갖지만 비대칭적인 공극 자계 분포 특성으로 인해 실제 소음 및 진동에 취약하다. 높은 극수와 슬롯 수 설계는 스위칭 소자, 제작 단가 상승, 스위칭 주파수 제한에 의한 운전 속도 제약 등의 문제를 유발한다. 전동기의 형상 치수는 토크 리플에 커다란 영향을 주며 특히 회전자와 자극 폭, 고정자의 슬롯 오픈 폭은 토크 리플 저감 설계 시 중요한 파라미터가 된다. 정현적인 공극의 자계 분포는 주어진 극수와 슬롯 수 조합에서 전동기의 형상 치수 최적화를 통해 얻을 수 있지만 토크 리플 저감에는 한계가 있다. 또한 고정자 또는 회전자에 기계적인 Skew를 적용하는 방법이 있지만 이는 생산비용의 증가를 필요로 한다.

제어관점에서의 토크 리플 저감은 브러시리스 DC 전동기를 대상으로 활발한 연구가 수행되었지만[4], 전류 위상 제어가 적용되는 영구자석형 동기기의 토크 리플 저감에 관한 연구는 상대적으로 연구가 부족한 실정이다. 전류위상 제어가 적용되는 영구자석 동기전동기의 토크 리플 저감은 고조파 전류 주입을 적용한 방법[5], 전류 측정오차를 반영한 연구[6] 등이 이루어졌으며, 본 논문에서는 기존의 고조파 전류 주입 방법에서 전류 고조파 산정 방법을 달리 하였다. 기존 전류 고조파 산정 방식은 정현파 전류 입력, 부하 시 왜교 자속 산정, 출력을 일정하게 하는 고조파 전류 산정, 부하 시 왜교 자속 재산정, 고조파 전류 재산정 등의 절차를 요구되는 토크 리플의 수준까지 반복해야 한다. 본 논문에서는 토크 리플을 저감할 수 있는 전류 고조파를 부하 시 왜교자

* 정 회 원 : 한양대학교 자동차 공학과 박사과정

† 교신저자, 펠로우 회원 : 한양대학교 자동차 공학과 교수

E-mail : hongjp@hanyang.ac.kr

접수일자 : 2009년 2월 24일

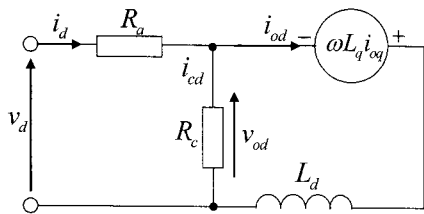
최종완료 : 2009년 8월 12일

속이 아니라 토크 파형으로부터 얻음으로써 수렴과정을 필요로 하지 않으며 이론적으로 0%의 토크 리플이 가능하다. 토크 파형은 정자계 유한요소 해석으로 산정되며 이때의 파형은 전기자 기자력과 계자 기자력의 상호 작용, 역기전력의 고조파 또는 전류 고조파, 코깅 토크의 영향이 동시에 반영된다 할 수 있다. 고조파 전류의 산정은 유한요소 해석을 이용하고 시험을 통해 토크리플 저감 효과를 검증하였다. 또한 전류 고조파를 적용했을 때의 전동기의 전압, 전류, 손실 등을 분석하여 토크 리플 저감 제어의 전동기 성능 측면의 영향을 평가 하였다.

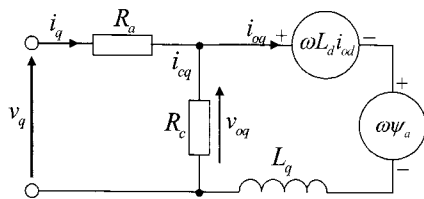
2. 본 론

2.1. 철손을 포함한 d-q축 등가회로 및 전압 방정식

영구자석 동기전동기의 특성 해석에는 일반적으로 d-q축 등가회로가 이용되고 있으며 등가 회로 및 전압 방정식은 각각 그림 1, 식 (1), (2)와 같다[7]. 본 논문에서는 표면부착형 영구자석 동기전동기를 해석 대상으로 하고 있으므로 전압 방정식에서 d, q축 인덕턴스는 동일하며 식(3)의 우변 두 번째 항인 릴럭턴스 토크가 0이 된다. 따라서 표면 부착형 영구자석 동기 전동기는 역기전력과 전류가 동상인 경우에 최대 토크가 발생하며 이러한 제어를 $i_d=0$ 제어라 한다 [7]. 본 논문에서의 전동기는 $i_d=0$ 제어 조건에서 유한요소 해석 및 시험을 수행하였다.



(a) d-axis equivalent circuit



(b) q-axis equivalent circuit

그림 1 영구자석형 동기 전동기의 d-q축 등가회로

Fig. 1 d-q equivalent circuit of PMSM

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_a \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \left(1 + \frac{R_a}{R_c}\right) \begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_q \\ \omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \psi_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T = P_n \{ \psi_a i_{od} + (L_d - L_q) i_{od} i_{oq} \} \quad (3)$$

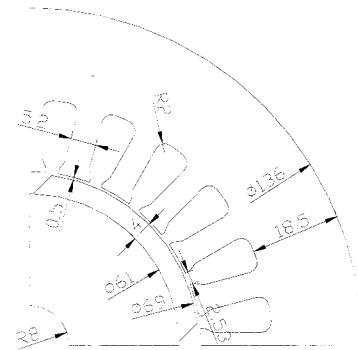
2.2. 대상 모델 및 주요 사양

표 1은 대상 전동기의 주요 사양을 나타낸다. 그림 2는 토크 리플 저감 대상 전동기의 주요 형상과 역기전력을 나타낸다. 대상 전동기는 BLDC 전동기로서 120o top flat 역기전력파형을 나타내며 높은 고조파 함유를 나타낸다.

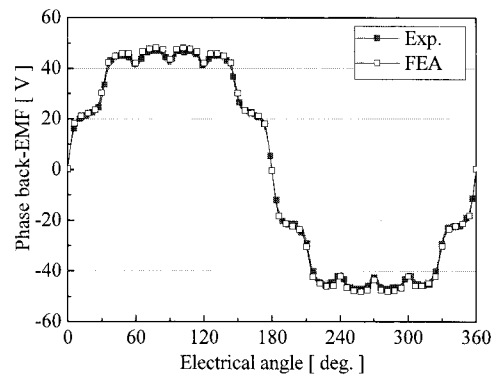
표 1 대상 전동기의 주요 사양

Table 1 Motor specifications

정격 출력(W)	420
정격 토크(Nm)	2.74
정격 전류(Arms)	5
적층 길이(mm)	40
상당 직렬 턴 수	108
코일 직경 (mm)	0.75
영구자석 Br(T)	1.21
코어 재질	35PN230



(a) Dimensions



(b) Phase back emf waveform at 1500rpm

그림 2 대상전동기

Fig. 2 Analyzed model

2.3 토크 리플 저감 고조파 전류 산정

그림 3은 토크리플 저감을 위한 고조파 전류 산정 절차를 나타낸다. 우선 유한요소 해석을 통해 각각의 정현파 입력 전류에 따른 토크 파형을 산정한다. 다음으로 요구되는 일정 토크 값과 만나는 입력 전류별 토크 파형과 그때의 전기각을 이용하여 요구되는 토크를 내는데 필요한 전류를 계산한다. 계산된 전류는 고조파를 포함하며 고조파 분석을 통해

고조파 성분을 확인하고 고조파 전류를 함수화 한다. 고조파 전류의 함수화는 각 고조파 전류를 전류의 크기와 회전자의 위치에 따른 함수로 모델링한다. 따라서 실제 운전에 적용할 때에는 위치센서로부터 자극의 위치 신호를 받아 이에 대응되는 고조파 전류를 입력한다.

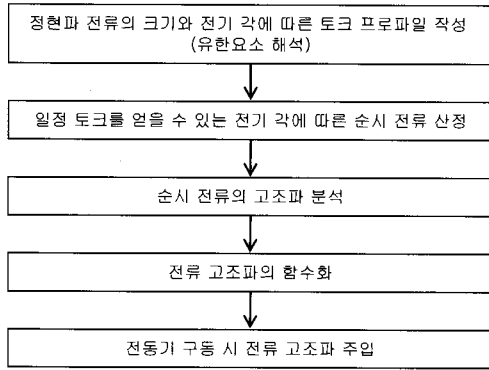


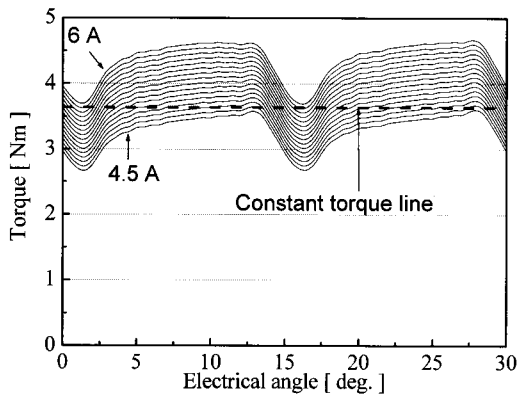
그림 3 고조파 전류 산정 프로세스

Fig. 3 Calculation process of harmonic current

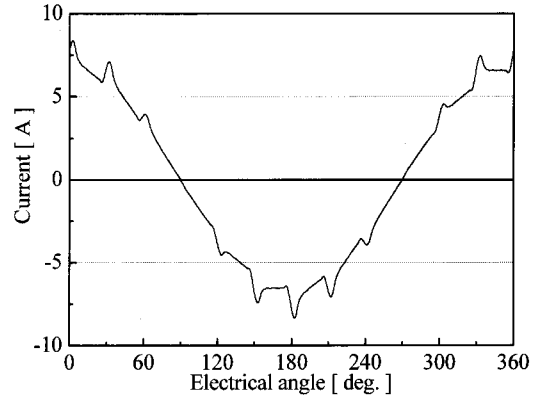
그림 4(a)는 2차원 유한요소 해석을 통해 계산된 정현파 전류 인가 시 전류의 크기와 전기 각도에 따른 순시 토크 파형을 나타낸다. 이때의 운전 조건은 표면부착형 영구자석 동기 전동기에서 일반적으로 적용되는 $i_d=0$ 제어가 적용되었다. Constant torque line은 요구되는 평균 토크를 나타낸다. 그림 4(b)는 요구 되는 평균 토크를 얻기 위한 순시 전류를 나타낸다. 그림 4(b)에 나타난 바와 같이 전류의 파형은 일반적인 동기 전동기와 달리 높은 고조파를 포함하고 있다. 그림 4에서 일정 토크를 얻기 위해서 회전자의 위치에 따라 순시 전류가 constant torque line과 순시 토크 프로파일의 교점으로 식 (4)로 계산된다.

$$\text{Harmonic current of phase A} = A(\theta) \cdot \sqrt{2} \cdot \cos(\theta) \quad (4)$$

여기서, θ 는 회전자 위치, $A(\theta)$ 는 회전자 위치에서 θ 에서 일정 토크파형을 얻기 위해 입력되어야 하는 정현파 전류의 실효값을 나타낸다.



(a) Torque wave form according to input current and rotor position

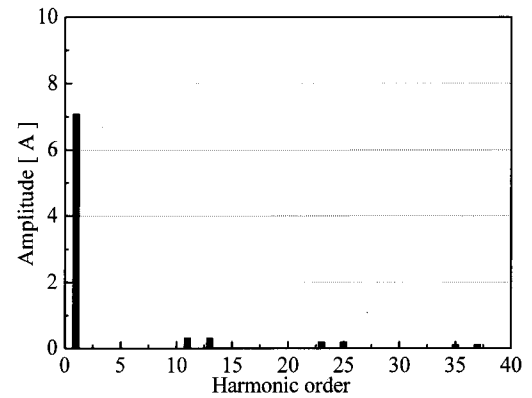


(b) Input current for constant torque

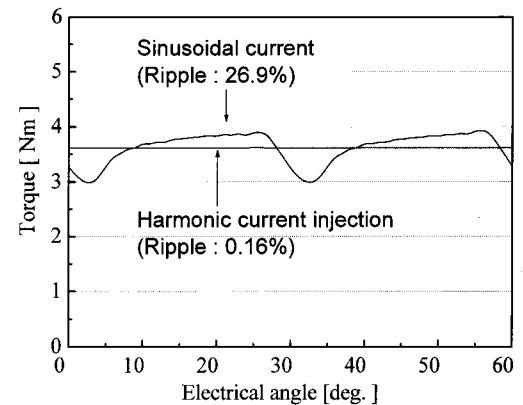
그림 4 토크 파형 및 일정토크를 얻기 위한 전류파형

Fig. 4 Torque and current wave form for constant torque

그림 4(b)의 전류 파형을 고조파 분석한 결과는 그림 5(a)와 같다. 그림 4(b)의 전류를 인가했을 때 유한요소 해석으로 얻은 토크는 그림 5(b)와 같다. 그림 5(b)에서 토크 리플은 약 0.2%이며 이론적으로 0%의 토크 리플을 얻을 수 있다.



(a) Harmonic components of current for constant torque



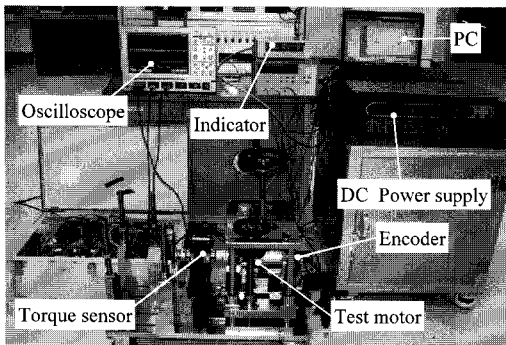
(b) Comparison of torque waveform

그림 5 입력 전류의 고조파 성분과 토크 파형비교

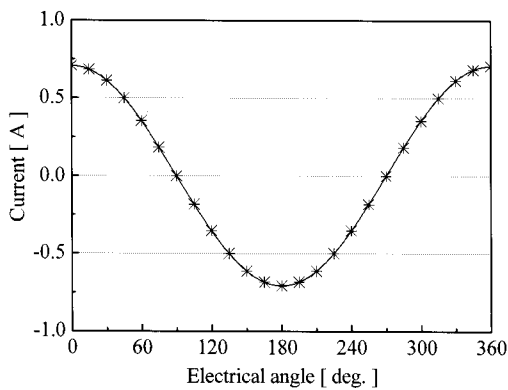
Fig. 5 Harmonic currents and torque waveform comparison

2.4 회전자 구속 시험

고조파 전류를 이용한 토크리플 저감을 확인하기 위하여 그림 6(a)의 장비 구성을 하였다. 정자계 유한요소 해석을 이용하여 토크 리플을 확인 하였으므로 시험은 해석조건과 동일한 회전자를 구속 시킨 상태에서 순시 토크를 측정하여 유한요소 해석 결과와 비교 하였다. 회전자의 위치를 고정시킨 후 회전자 위치에 대응되는 3상 DC 전류를 인가하여 토크를 측정 하였다. 3상에 DC 전류를 인가해야 하므로 다수의 DC power supply가 사용 되었으며 회전자 위치에 따른 전류는 그림 6(b)와 같다. 회전자 위치는 encoder를 이용하여 검출 하였으며 oscilloscope를 이용하여 확인 하였다. 토크의 측정은 토크 센서를 이용하였다.



(a) Test setup for stall test



(b) Input current waveform

그림 6 시험 장비 구성과 입력 전류파형

Fig. 6 Test setup and input current waveform

그림 7은 측정 된 회전자 위치에 따른 순시 토크 파형을 나타낸다. 해석 결과와 시험 결과는 서로 일치 하였으며 고조파 전류를 이용한 토크 리플 저감 효과를 확인 할 수 있다.

2.5 부하시험

부하를 적용한 상태에서 전동기를 500rpm으로 회전 시킬 때 정현파 전류만을 인가할 때와 고조파 전류를 포함 할 때의 토크 파형을 비교하였다. 그림 8은 시험 장비 구성을 나타낸다. DC 전동기에 감속기를 결합하고, DC 전동기의 속

도 제어를 통해 일정 부하를 구현 하였다. 그림 9는 제어 블록 다이어그램을 나타낸다. 제어 블록에서는 전류 검출단에 회전자 위치 신호로부터 연산된 전기각에 따라 FEM 해석에 의해 계산된 고조파를 주입한다. 고조파의 주입은 실험의 편리성을 위하여 검출 전류에 고조파를 주입하여 실제 전류에 고조파가 함유될 수 있도록 하였다. DSP는 TI사의 TMS320F28335를 이용하였으며, 전류제어기의 응답성을 좋게 하기 위하여 20kHz 스위칭주파수로 구동하였다. 실제 실험에서는 전류 응답성을 고려하여 11차, 13차, 23차, 25차 전류가 입력되었다.

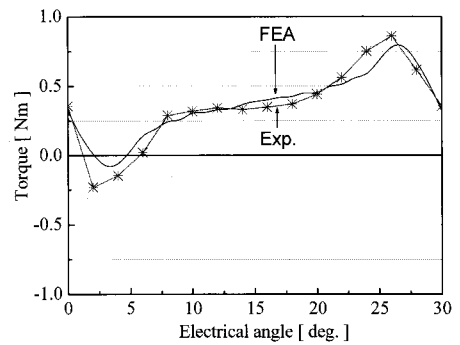


그림 7 구속 시험의 토크파형비교

Fig. 7 Torque waveform comparison of stall test

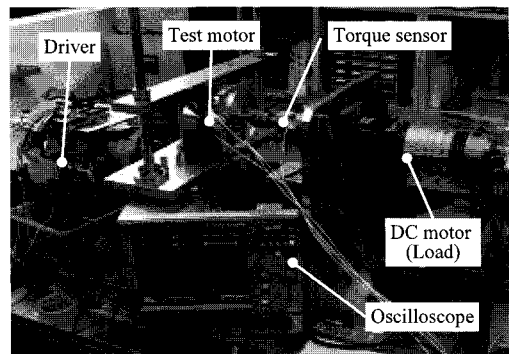


그림 8 부하시험 장비 구성

Fig. 8 Load test setup

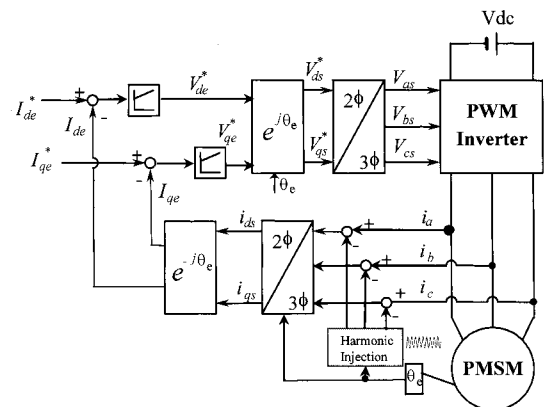
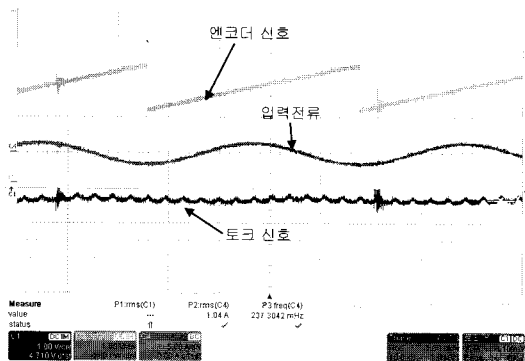


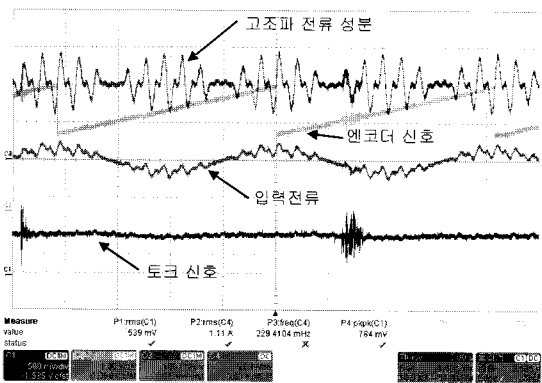
그림 9 제어 블록 다이어그램

Fig. 9 Control block diagram

그림 10은 1Arms를 정현파 전류로 구동한 경우와 고조파를 포함한 경우의 시험에서 측정된 입력 전류파형, 엔코더 신호, 토크 신호, 고조파 전류 파형을 나타낸다. 엔코더 신호인 톱니파의 피크 값에서 입력 전류가 최대 또는 최소가 되는 것으로부터 전류 위상제어는 정확히 적용된 것으로 판단된다. 그림 11에서 정현파 구동을 하여 측정된 토크 파형과 유한요소 해석 결과로 얻은 토크 파형을 나타낸다. (a)에서는 정현파 구동 시 측정 토크 파형과 해석 토크 파형을 나타낸다. 시험에서는 해석 결과와 같은 토크 리플이 나타나지 않았는데, 이는 실험 시 기계적인 관성 때문인 것으로 판단된다. (b)는 고조파 전류를 인가한 경우의 출력 토크 파형을 비교하였다. 마찬가지로 정현파 구동과 달리 출력 토크의 크기는 거의 비슷하며 토크 리플도 정현파 구동에 비해 현저하게 감소한 것으로 나타났다. 결과적으로 목표로 하는 토크 리플 저감을 얻을 수 있다.



(a) Input current and torque waveform with sinusoidal current input



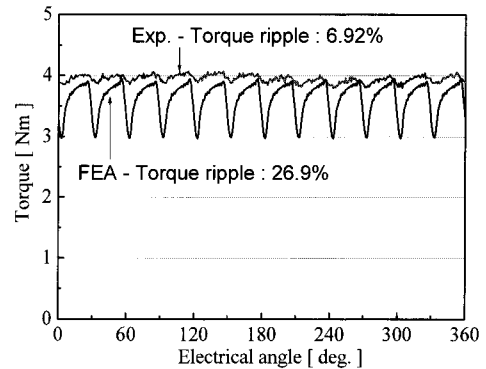
(b) Input current and torque waveform with harmonic current input

그림 10 엔코더, 입력전류, 토크 신호 측정결과
 Fig. 10 Measured signals of encoder, input current, and torque

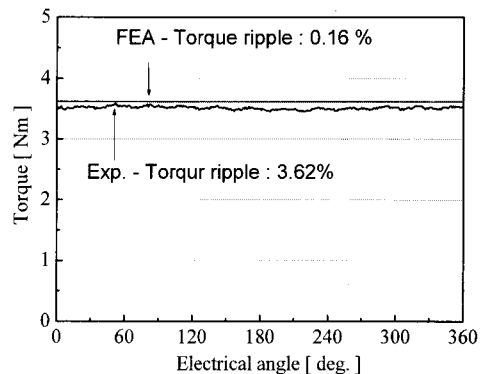
2.5 고조파 전류의 영향

적절한 고조파 전류가 토크 리플 감소에 효과적임을 해석과 시험을 통하여 검증 하였다. 고조파 전류는 또한 전원파

손실 특히 철손에 큰 영향을 주므로 정현파 전류 구동 시, 고조파 전류 추가 시 유한요소 해석을 통하여, 쇄교 자속, 철손을 산정하여 표 2에 나타내었다. 전압은 쇄교 자속과 운전 속도로 계산 되었으며, 고조파 전류를 포함한 경우 실효치 전압, 전류의 상승과 동손, 철손의 증가를 나타내었지만 정현파 구동과 비교 했을 때 그 차이는 아주 작다.



(a) Comparison of torque ripple with sinusoidal input current



(b) Comparison of torque ripple with harmonic current input

그림 11 시험결과와 해석 결과의 토크리플 비교
 Fig. 11 Comparison of measured and calculated torque ripple

표 2 기타 전동기 특성 비교(@1500rpm)

Table 2 Comparison of other motor characteristics(@1500rpm)

	정현파 전류 구동	정현파 + 고조파 전류 구동
전압 (Vrms)	103.47	104.45
전류(Arms)	5.00	5.06
철손(W)	5.73	5.87
동손(W)	48.49	49.66

3. 결 론

본 논문에서는 영구자석 동기 전동기에서 토크리플을 저감하기 위해 고조파 전류를 이용하였다. 정자계 유한요소 해석을 이용하여 토크 리플을 저감하기 위한 고조파 전류를 산정하는 방법을 나타내었다. 정자계 유한요소 해석으로 약 0%의 토크 리플을 얻을 수 있었다. 정자계 유한요소 해석과 동일한 시험조건인 회전자 구속 시험에서는 해석결과와 거

의 동일한 시험 결과를 얻을 수 있었지만, 회전자가 구동하고 있는 상태에서는 해석결과에 비해 낮은 토크 리플을 정현파 구동에서 얻었다. 고조파 전류를 주입함으로써 해석결과 만큼의 개선은 이루어 지지 않았지만 토크 리플의 개선은 뚜렷이 확인 할 수 있다. 회전자 구동 시 유한요소 해석과 실험결과와의 차이는 기계적인 관성 때문으로 판단되며 향후 이에 대한 연구가 필요하다.

고조파 전류 주입에 의한 전동기 특성 변화 또한 검토 하였으며 전류 고조파에 의해 전압, 전류의 증가 및 효율의 감소가 있었지만 전동기 성능에 큰 영향은 없는 것으로 판단 된다. 전류고조파를 이용한 토크 리플 저감 제어는 특히 현재 많은 관심을 갖고 있는 EPS 구동용 전동기의 토크리플 저감에 효과적으로 적용될 것이다.

참 고 문 헌

[1] John S. Hsu (Htsui), Brian P. Scoggins, Matthew B. Scudiere, Laura D. Marlino, Donald J. Adams, Pragasen Pillay, "Nature and Assessments of Torque Ripples of Permanent-Magnet Adjustable-Speed Motors", Industry Application Conference, vol. 3, pp.:2696 - 2702, Oct., 1995

[2] A. Kioumars, M. Moallem, B. Fahimi, "Mitigation of Torque Ripple in Interior Permanent Magnet Motors by Optimal Shape Design" IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, vol. 42, no. 11, Nov. 2006

[3] Rakib Islam, Iqbal Husain, Abbas Fardoun, and Kevin McLaughlin, "Permanent-Magnet Synchronous Motor Magnet Designs With Skewing for Torque Ripple and Cogging Torque Reduction" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, vol. 45, no. 1, Jan. 2009

[4] Ki-Yong Nam, Woo-Taik Lee, Choon-Man Lee, and Jung-Pyo Hong, "Reducing Torque Ripple of Brushless DC Motor by Varying Input Voltage", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, vol. 42, no. 4, Apr. 2006

[5] Geun-Ho Lee, Sung-II Kim, Jung-Pyo Hong, and Ji-Hyung Bahn, "Torque Ripple Reduction of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Using Harmonic Injected Current", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, vol. 44, no. 6, June 2008

[6] 윤덕용, 홍순찬, "인버터의 전류 측정 오차에 기인하는 교류전동기의 토크리플 저감", 전력전자학회 논문지 제 3 권 제 4호, 1998

[7] 김기찬, 안준선, 원성홍 공역, "매입자석 동기 모터의 설계 및 제어", 도서 출판 인터뷰전, 2007

저 자 소 개



권 순 오 (權 純 吾)

1975년 11월 25일 생. 2003년 창원대학교 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기공학박사 수료. 2007년~현재 한양대학교 자동차 공학과 재학(박사과정)
Tel : 02-2220-4466
Fax : 02-2220-4465
E-mail : kso1975@hanyang.ac.kr



이 정 종 (李 貞 宗)

1976년 3월 10일생. 2000년 창원대학교 전기공학과 졸업. 2002년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003~2007년 (주)KOMOTEK 부설 연구소 책임연구원. 2007년~현재 한양대학교 자동차 공학과 재학(박사과정)
E-mail : motor@hanyang.ac.kr



이 근 호 (李 根 浩)

1969년 4월 11일 생. 1993년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 1994년~2002년 LG-OTIS 선임연구원. 2002년~현재 경남도립남해대학 전기과 부교수. 2007년~현재 한양대학교 자동차 공학과 박사과정
Tel : 055-860-55354
E-mail : motor@namhae.ac.kr



홍 정 표 (洪 正 杓)

1959년 4월 17일 생. 1983년 한양대 공대 전기 공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 1985년~1990년 LG정밀(주) 중앙연구고 주임 연구원, 1990년~1992년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원. 1995년 동 대학원 전기 공학과 졸업(공학박사). 1996년 한양대학교 산업과학연구소 선임연구원. 1996년 ~ 2006년 창원대학교 전기공학과 부교수. 현재 한양대학교 자동차공학과 교수
Tel : 02-2220-0455
Fax : 02-2220-4465
E-mail : hongjp@hanyang.ac.kr