



# 2015 한국자동차공학회 학술대회 및 전시회

## KSAE 2015 Annual Conference and Exhibition

기간: 2015. 11. 18(수)~21(토)

장소: **HICO** 경주화백컨벤션센터  
GYEONGJU Hwabaek International Convention Center

후원:  **KOFST**  
한국과학기술단체총연합회

 **Gride**  
Gyeongbuk

 **Gyeongju**  
CVB

 **Gyeongju**  
CVB



Km/h



**한국자동차공학회**  
The Korean Society of Automotive Engineers

- 1185 소형 하이브리드 전기 자동차 제어 시스템 개발을 위한 BenchTop Test Simulator 제작  
 김일환\*(국민대학교), 김정용(국민대학교), 최웅철(국민대학교)
- 
- 1186 공기공급장치 변경에 따른 상압형 자동차용 연료전지시스템의 효율 분석  
 김일중\*(서울과학기술대학교), 이정재(서울과학기술대학교), 김한상(서울과학기술대학교)
- 
- 1189 양전자교환막 연료전지 기체 확산층 두께에 따른 단일 유로 채널에서의 물방울 특성 횡단면 가시화 연구  
 김한상\*(서울과학기술대학교)
- 
- 1192 태양전지 파노라마 루프의 글라스 구동에 따른 접촉스위치의 최적화  
 라명수\*(베바스토동회홀딩스), 최수윤(베바스토동회홀딩스), 전병윤(베바스토동회홀딩스), 정전기(베바스토동회홀딩스)
- 
- 1197 EV용 WFSM의 최대효율 제어를 통한 효율 개선  
 박진철\*(한양대학교), 차경수(한양대학교), 채승희(한양대학교), 홍정표(한양대학교)
- 
- 1202 마그파인 자석의 불가역 감자 특성을 고려한 전기 자동차 구동용 전동기 설계  
 박호용\*(한양대학교), 이수경(한양대학교), 정영훈(한양대학교), 정경태(한양대학교), 홍정표(한양대학교)
- 
- 1206 전기차 에어컨용 베인 압축기의 열유동 해석을 통한 성능 설계  
 배석정\*(자동차부품연구원), 허형석(자동차부품연구원), 이준용(자동차부품연구원)
- 
- 1214 EPS용 IPMSM의 토크리플 저감 최적설계  
 손형수\*(한양대학교), 홍정표(한양대학교), 김두영(한양대학교)
- 
- 1218 고조파 전류 인가 방법을 이용한 Electric Power Steering용 매입형 영구자석 동기 전동기의 토크리플 저감  
 신창욱\*(한양대학교), 김두영(한양대학교), 홍정표(한양대학교)
- 
- 1223 Kalman Filter와 Least Squares Method를 이용한 전방 타깃의 위치 추정 시스템  
 유동연\*(성균관대학교), 박찬호(성균관대학교), 황성호(성균관대학교)
- 
- 1225 PMP 기반 병렬형 플러그인하이브리드 차량의 동력분배 제어  
 이성화\*(한양대학교), 이형철(한양대학교)
- 
- 1227 연료전지 시스템 운전 시 수소 크로스오버 발생량에 대한 고찰  
 정애리\*(서울대학교), 김민수(서울대학교)
- 
- 1228 ISG 시스템의 테스트 벤치 기반 성능시험 환경 구축  
 정연수\*(한양대학교), 김영준(한양대학교), 박태호(한양대학교), 이형철(한양대학교)
- 
- 1230 HEV LDC의 성능 평가를 위한 실차 환경 모사 시스템 개발  
 조재동\*(신영), 임정식(신영), 남재두(신영), 서종덕(신영), 김대근(신영)
- 
- 1232 1.5 kW급 HEV LDC의 실차 시험을 통한 동작 성능 검증  
 조재동\*(신영), 임정식(신영), 남재두(신영), 서종덕(신영), 김대근(신영)
-

# 고조파 전류 인가 방법을 이용한 EPS용 IPMSM의 토크리플 저감

신창욱\* · 김두영 · 홍정표

한양대학교 미래자동차공학과

## Torque Ripple Reduction of IPMSM for EPS using the Harmonic Current Injection Method

Chang-Wook Shin\* · Doo-Young Kim · Jung-Pyo Hong

*Department of Automotive Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea*

**Abstract** : Recently, Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM) is widely used in various industry fields. IPMSM have advantage for a higher power density and a wider operating area. But IPMSM has a larger torque ripple in comparison with other type of motors and this is because back electromotive force have many harmonic components. Also, it can cause that the driver makes a mistake and feels nervous when torque ripple of Electric Power Steering (EPS) which is a sort of IPMSM is large. This paper suggests how to reduce torque ripple of EPS on load. First, the harmonic components of current offsetting harmonic components of back electromotive force can be found using the power equation. Second, those are added to fundamental current and inputted on load analysis. Last, each torque ripple of EPS for inputting the only fundamental current and the current including harmonic components is compared and it can show how large torque ripple is reduced using the harmonic current injection method.

**Key words** : Fundamental current (기본파 전류), Harmonic component (고조파 성분), Interior permanent magnet synchronous motor (매입형 영구자석 동기 전동기), Magnetic torque(마그네틱 토크), Torque ripple (토크리플)

### Nomenclature

$e$  : back electromotive force, V  
 $i$  : current, A  
 $T$  : torque, Nm  
 $\omega$  : angular speed, rad/s

### Subscripts

$avg$  : average  
 $c$  : cosine  
 $j$  : integer  
 $k$  : integer  
 $n$  : integer  
 $p$  : integer  
 $s$  : sine  
 $1, 2, \dots$  : the number of harmonic components

---

\* 신창욱, [neosincw@gmail.com](mailto:neosincw@gmail.com)

## 1. 서론

최근 산업에서 매입형 영구자석 동기전동기 (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)는 파워트레인, 컴프레서, 가전제품 등 대부분의 분야에서 널리 이용되고 있다. 그러나 IPMSM는 높은 출력 밀도와 넓은 운전 영역을 가지는 반면에 표면 부착형 영구자석 동기전동기 (Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor, SPMSM)에 비해 토크리플이 큰 단점이 있다. 전동식 동력 조향 장치(Electric Power - Steering, EPS)는 차의 속도 및 조향 상태에 따라 조향을 조절하는 장치인데, EPS용 전동기의 토크리플이 클 경우에는 운전자의 조작 미숙 및 불안감을 야기 시킬 수 있다. 그러므로 EPS에서의 토크리플은 중요한 인자라고 할 수 있다. 본 논문에서는 무 부하시 역기전력의 고조파 성분을 상세시킬 수 있는 고조파 전류를 인가시킴으로써, IPMSM의 토크리플을 저감하는 방법을 제안하고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 대상 전동기 모델

Fig.1은 대상 전동기 모델 형상을 나타낸 그림이며, Table. 1은 대상 전동기의 파라미터들에 대한 표이다. 대상 전동기는 집중권, 6극 9슬롯, AC로 구동되며 인가되는 전류는 40[Arms]이다.

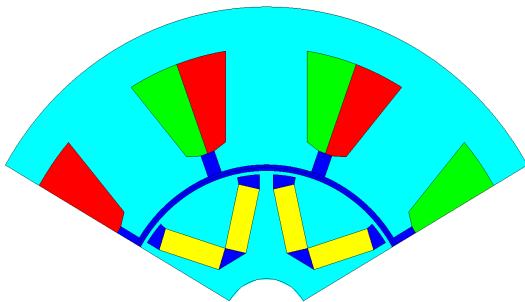


Fig. 1 Motor Shape for EPS

Table 1 Parameters of motor for EPS

Pole / Slot	6 Pole / 9 Slot
Winding Method	Concentrated Winding
Driving Method	AC
Current	40[Arms]

### 2.2 역기전력

역기전력은 전기자 권선에 의해 발생하는 자속과 영구자석에서 발생하는 자속이 서로 쇄교하여 유도되며, 고조파 성분을 고려하여 식 (1)처럼 나타낼 수 있다. Fig. 2는 역기전력을 전기각 기준으로 나타낸 파형인데, Fig. 2의 역기전력은 고조파 성분으로 인해 찌그러져 있는 형상을 보이고 있다. 이러한 고조파 성분으로 인한 찌그러진 형상의 역기전력은 토크리플이 커짐을 야기 시킨다.

$$e = \sum_{j=1}^n e_{jc} \cos(j\omega t) + e_{js} \sin(j\omega t) \quad (1)$$

Fig. 3은 Fig. 2의 역기전력에 대해 고조파 분석을 한 결과이며 기본파 성분뿐만 아니라 5차와 7차 등의 고조파 성분이 역기전력 파형에 섞여있는 것을 확인할 수 있다.

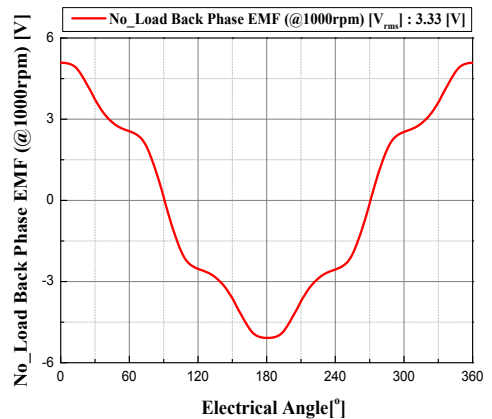


Fig. 2 No load phase back EMF wave form (@ 1000rpm)

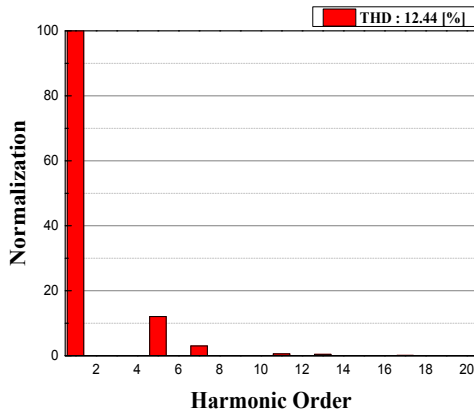


Fig. 3 Harmonic analysis of phase back EMF

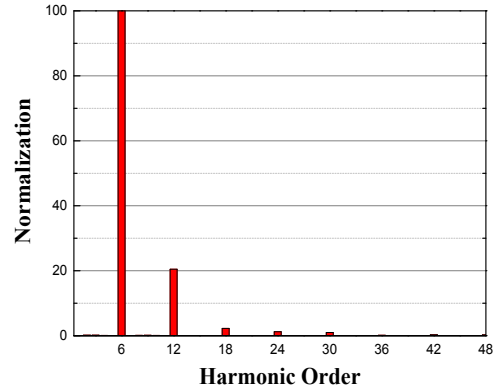


Fig. 4 Harmonic analysis of torque (Fundamental)

### 2.3 마그네틱 토크

식 (2)는 3상이 평형하다고 가정했을 때의, 마그네틱 토크에 대한 전동기의 출력 방정식이다. 역기 전력이 토크리플에 끼치는 영향을 보기 위해 고조파를 고려한 역기전력 식 (1)과 기본파만을 고려한 전류 식 (3)을 이용하였다. 토크는 식 (4)처럼 평균 토크와 토크리플 성분들의 합으로 나타낼 수 있다. 일반적으로 토크리플은 전원주파수의 6배가 되는 고조파가 토크리플의 주 요인이므로 식 (4)에서는 6의 배수가 되는 고조파들을 고려하였다.

$$3ei = Tw \quad (2)$$

$$\text{where, } i = i \cos(wt) \quad (3)$$

$$T = T_{avg} + \sum_{k=1}^n T_{6k} \quad (4)$$

Fig. 4는 토크에 대해 고조파 분석을 하여 나타낸 그래프이며, 토크의 각 고조파 차수의 크기를 전원주파수의 6배 성분의 크기로 나누어 Normalization 한 값이다. 앞에서 언급하였듯이 전원주파수의 6배 성분의 차수의 크기가 다른 고조파 차수의 크기보다 큼을 확인할 수 있다. 특히 전원주파수의 6배가 되는 6 고조파 차수의 크기가 다른 6배 성분의 고조파 차수의 크기보다 큼을 확인할 수 있다.

### 2.4 고조파 전류 인가

Fig. 4에서의 발생하는 전원 주파수의 6배 성분인 토크리플은 d축 전류가 0일 때 구할 수 있다. 그리고 전원 주파수의 6배 성분인 토크리플을 줄일 수 있는 기본파와 고조파가 섞인 전류는 고조파를 고려한 역기전력 식 (1), 고조파를 고려한 전류 식 (5), 고조파를 고려한 토크 식 (4) 그리고 출력방정식 식 (2)을 전개함으로써 수식적인 과정을 거쳐 위상을 고려한 전류를 산정할 수 있다.

$$i = \sum_{p=1}^n i_{pc} \cos(pwt) + i_{ps} \sin(pwt) \quad (5)$$

$$(-) \begin{pmatrix} +e_{1c} - e_{1s} + e_{1c} + e_{1s} \\ +e_{1s} + e_{1c} - e_{1s} + e_{1c} \\ +e_{7c} - e_{7s} + e_{5c} - e_{5s} \\ +e_{7s} + e_{7c} + e_{5s} + e_{5c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{5c} \\ i_{5s} \\ i_{7c} \\ i_{7s} \end{pmatrix} = \frac{4\omega}{3} \begin{pmatrix} T_{6c} \\ T_{6s} \\ T_{12c} \\ T_{12s} \end{pmatrix} \quad (6)$$

식 (1), (4), (5)를 이용하여 출력 방정식 (2)를 전개해보면 식 (6)과 같은 행렬식을 얻을 수 있으며, 식 (6)을 통해 전원주파수의 6배 성분의 토크리플을 줄이기 위해서는 전류의 5 고조파와 7 고조파 성분을 고려해야 한다는 것을 알 수 있다. 식 (6)을 통해 위상을 고려한 5 고조파와 7 고조파에 대한 전류를 구한 후 (-)값을 취하는데 이는 토크리플을 저감시킬 수 있는 고조파 전류는 반대방향임을 의미한다.



### 3. 해석 결과

#### 3.1 전류 파형 비교

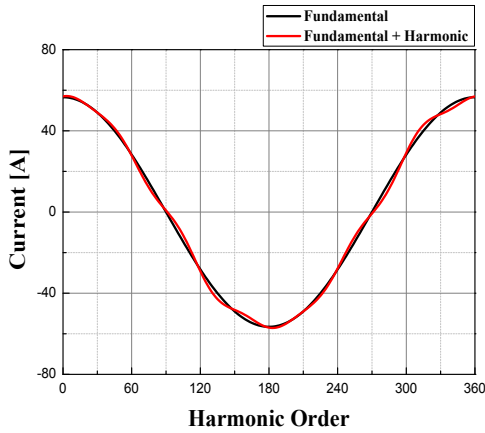


Fig. 5 Current wave form comparison

(Fundamental & Fundamental + Harmonic)

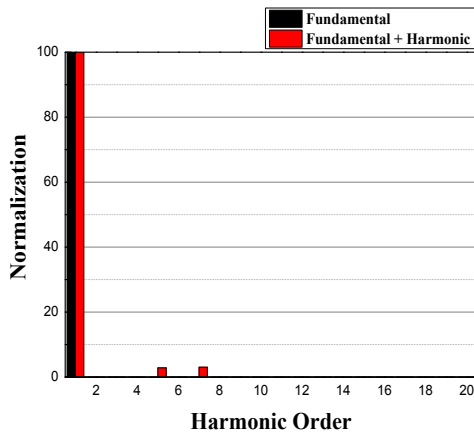


Fig. 6 Harmonic analysis of current

(Fundamental & Fundamental + Harmonic)

Fig. 5는 기본파 전류와 기본파와 고조파가 섞인 전류의 파형을 비교한 그래프이다. 고조파가 섞여 있는 전류파형이 더 정현적이지 않음을 볼 수 있다. Fig. 6은 고조파와 기본파가 섞인 전류와 기본파만 있는 전류에 대해 고조파 분석을 하여 비교한 그래프인데, 기본파와 고조파가 섞인 전류에 5 고조파와 7 고조파가 섞여 있는 것을 볼 수 있다.

#### 3.2 토크 & 토크리플

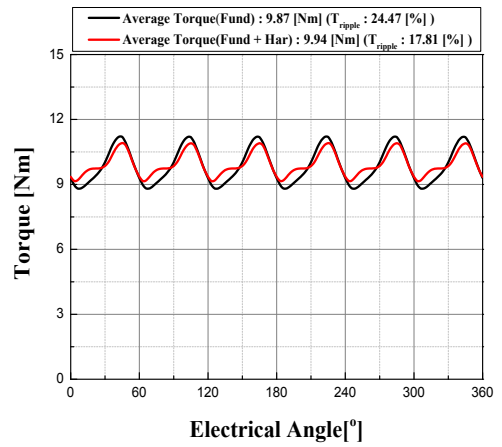


Fig. 7 Torque wave form comparison

(Fundamental & Fundamental + Harmonic)

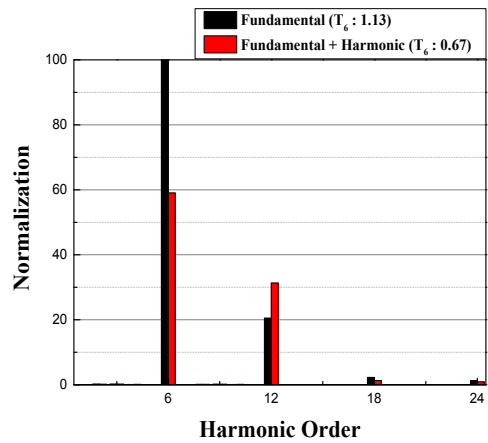


Fig. 8 Harmonic Analysis of Torque

(Fundamental & Fundamental + Harmonic)

Fig. 7은 기본파 전류로만 부하 해석 시의 토크 파형과 기본파 전류와 고조파 전류를 같이 인가했을 때의 토크 파형을 비교한 그래프이다. 기본파 전류만 인가했을 때의 평균 토크는 9.87[Nm] 토크 리플은 24.47[%]이고 기본파와 고조파 전류를 같이 인가했을 때의 평균 토크는 9.94[Nm] 토크 리플은 17.81[%]이다.

고조파와 기본파를 같이 인가했을 때와 기본파만 인가했을 때의 평균 토크, 토크리플을 비교한 결과 평균 토크의 증가율은 0.71[%], 토크리플의 감소율은 37.39[%]이다.

Fig. 8은 기본파 전류로만 부하 해석 시의 토크와 기본파와 고조파 전류를 섞어 부하 해석 시의 토크에 대해서 고조파 분석을 한 결과이다. Fig. 8에서 기본파와 고조파 전류를 섞어 부하 해석 시 전원 주파수의 6배 성분은 0.67이고, 기본파 전류로만 부하 해석 시의 전원주파수의 6배 성분은 1.13이다. 즉, 기본파와 고조파 전류를 섞어 인가했을 때의 전원 주파수의 6배 성분이 0.41[%]의 감소율을 보였다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 EPS용 IPMSM의 토크리플에 대해서 역기전력의 고조파 차수를 상쇄시킬 수 있는 고조파 전류를 찾아 기본파 전류와 섞어 인가함으로써, 마그네틱 토크로 인한 토크리플을 개선시키는 방법을 설명하고 유한요소해석을 통해 각 전류 인가방법에 따른 토크리플에 대해 비교 분석 하였다. 유한요소해석 후, 고조파와 기본파를 섞은 전류를 인가했을 때와 기본파 전류만 인가했을 때의 평균 토크와 토크리플을 비교한 결과 평균 토크의 증가율은 0.71[%], 토크리플의 감소율은 37.39[%]이었다. 또한, 기본파와 고조파 전류를 섞어 부하 해석 시 전원 주파수의 6배 성분은 0.67이고, 기본파 전류로만 부하 해석 시의 전원주파수의 6배 성분은 1.13으로, 기본파와 고조파 전류를 섞어 인가했을 때의 전원 주파수의 6배 성분이 0.41[%]의 감소율을 보였다.

#### References

- 1) Geun-Ho Lee, Sung-Il Kim, Jung-Pyo Hong, 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.
- 2) Islam, M. S. ; Mir, S. ; Sebastian, T. ; Underwood,

S. "Design Considerations of Sinusoidally Excited Permanent-magnet Machine for Low-Torque-Ripple Applications", IEEE Industry Applications Conference, Vol. 3, Pages. 1723 - 1730, 2004.