

전압 고조파를 고려한 매입형 영구자석 동기전동기의 d-q 등가회로 해석

권순오*, 이근호**, 이우택***, 홍정표****

한국생산기술연구원*, 국민대학교**, 창원대학교***, 한양대학교****

Characteristic analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors Considering Voltage Harmonics

Soon-O Kwon*, Geun-Ho Lee**, Woo-Taik Lee***, Jung-Pyo Hong****

Korea Institute of Industrial Technology*, Kookmin University**, Changwon National University***, Hanyang University****

Abstract - This paper deals with d-q axis equivalent circuit analysis of IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motors) considering voltage harmonics. In the field weakening region, as the current vector angle increased, back-emf contains large harmonics, therefore, significant underestimation of voltage or overestimation of speed can be occurred from the conventional d-q axis equivalent circuit analysis. In order to consider the effects of voltage harmonics, a harmonic coefficient is introduced and verified by experiments.

$$V_{rms} = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{\left(\frac{V_h}{\sqrt{2}}\right)^2} = k_r V_{rms} \tag{4}$$

여기서 V_{rms} 는 고조파를 포함한 실효치 전압, V_h 는 고조파 전압, V_{rms} 는 기본파의 실효치 전압을 각각 나타낸다.

1. 서 론

매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)는 토크 밀도, 운전 속도 영역, 효율 등에서 다른 형태의 전동기에 비해 장점을 갖는다. 따라서 소형 가전에서부터 자동차에 이르기 까지 그 활용 영역은 점점 증가되고 있다. IPMSM의 장점은 특히 견인용 전동기에 효과적이며 도요다, 혼다, 현대 등의 하이브리드 전기 자동차에 주로 적용 되고 있다. IPMSM을 견인용 전동기에 적용 할 경우 운전 속도 영역 증대를 위해서 약계자 운전이 필수적인데 약계자 운전 구간에서는 전류 위상 증가에 따라 전압 고조파가 증가 하게 된다. 전압 고조파는 자기회로의 포화에 의해 발생하게 되며 분포권 타입 보다는 집중권 타입의 전동기에서 보다 심각하게 나타난다. 이러한 전자기적 현상은 유한요소 해석을 통해 정확히 해석이 가능 하지만 다양한 부하 조건 및 제어 기법에 해당하는 결과를 유한요소 해석으로 얻기에는 현실적으로 어려움이 있다. d-q축 등가회로 시뮬레이션은 다양한 부하조건 및 제어 기법에 따른 특성을 빠른 시간에 얻을 수 있으므로 전동기 성능 평가에 효과적으로 적용될 수 있다. 그러나 정현파의 전압, 전류, 쇄교자속을 가정 한 d-q축 등가회로 시뮬레이션 결과로 얻은 최대 운전 속도는 고조파의 영향으로 인해 실제로는 구현 할 수 없거나 시뮬레이션 결과보다 많은 약계자 전류가 필요하게 된다. 따라서 d-q축 등가회로 시뮬레이션에서 전압 고조파를 반영하는 연구가 필요하며 기존에 고조파 성분의 쇄교자속을 고조파 인덕턴스의 형태로 모델링하는 연구가 있지만 각 고조파 성분의 크기를 더하는 형태로 모델링하여 전압의 과대평가가 나타날 수 있다. 입력 측에서는 고조파를 포함한 실효치 전압이 인가되며 본 논문에서는 고조파를 포함한 전압의 실효치를 모델링하는 방법을 제시하였다.

2. 본 론

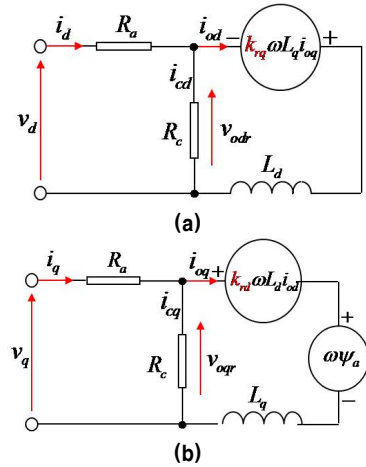
2.1 전압 고조파를 고려한 d-q 축 등가회로

d-q축 등가회로 시뮬레이션은 시변하는 회전자계를 DC로 모델링함으로써 동기 전동기의 특성 해석에 효과적이다. 일반적인 형태로써 철손 저항이 병렬로 연결되는 형태로 모델링 되고 이때 모든 물리량은 기본파만 반영된다. 전압 고조파 성분을 등가회로 시뮬레이션에 반영하기 위해 본 논문에서는 고조파 계수를 도입하였다. 인덕턴스를 산정하는 과정에서 얻을 수 있는 쇄교자속의 고조파를 이용하여 기본파에 대한 고조파 전압의 비율로써 고조파 계수 k_r 을 정의하고 전압방정식에 도입하였다. IPMSM의 토크는 식 (1)과 같고 고조파 계수를 포함한 전압 방정식은 (2), (3)과 같으며, 고조파 계수 k_r 은 (4)와 같다. 고조파 계수는 고조파를 포함한 경우 실효치 입력과 출력을 모델링 하며 FEA로 산정된다.

$$T = P_n (\Psi_a i_{oq} + (L_d - L_q) i_{od} i_{oq}) \tag{1}$$

$$\begin{bmatrix} v_{odr} \\ v_{ogr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -k_{rq} \omega L_q \\ k_{rd} \omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi_a \end{bmatrix} \tag{2}$$

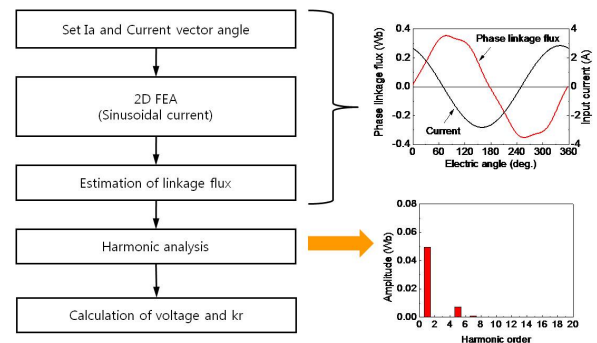
$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_a \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \left(1 + \frac{R_a}{R_c}\right) \begin{bmatrix} v_{odr} \\ v_{ogr} \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} \tag{3}$$



<그림 1> 고조파 계수를 포함한 d-q축 등가회로; (a)d-축, (b)q-축

2.2 전압 고조파를 고려한 d-q 축 등가회로

고조파 계수는 쇄교자속을 이용한 인덕턴스산정 과정에서 구할 수 있다. 쇄교자속을 이용한 인덕턴스 산정은 FEA를 이용하여 무부하 쇄교자속, 부하 쇄교자속의 크기와 위상, 전류의 크기와 위상으로부터 계산된다. 이 방법에서 각각의 물리량은 기본파만을 고려하며 고조파 분석을 통해 기본파 성분을 분리 하게 된다. 이때 고조파 성분에 대한 영향을 반영하기 위해 각각의 고조파 성분을 이용하여 고조파를 포함한 실효치 전압을 계산하게 된다. 전압을 계산할 때 속도 향이 필요하게 되는데 k_r 은 기본파에 대한 고조파 전압의 비율이므로 속도는 어떤 속도가 되든지 관계없다. 또한 전압을 계산할 때 선간전압을 이용해야한다. 왜냐하면 3상 Y결선에서 상 전압을 이용하여 고조파 전압을 계산 할 경우 선간에서는 나타나지 않는 3배수 고조파 성분이 반영되게 되어 전압의 과대평가될 수 있기 때문이다. 고조파계수 산정은 그림 2에 나타낸바와 같다.



<그림 2> 고조파 계수 산정 절차

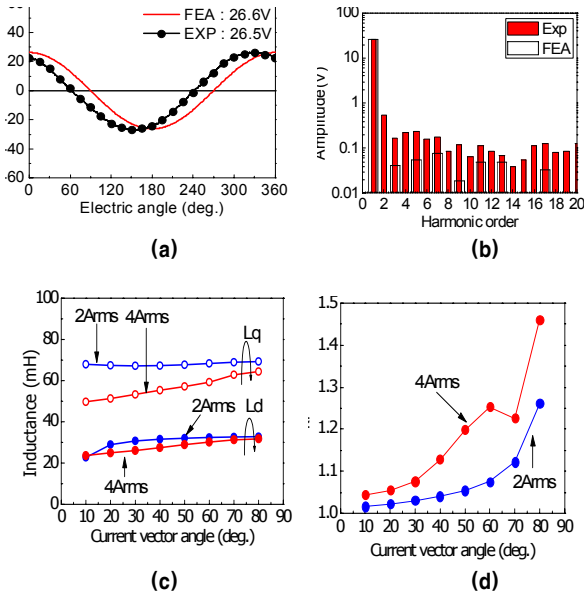
2.3 시험을 통한 검증

고조파 계수 k_r 의 타당성을 검증하기 위한 시험을 표 1에 나타난 모델을 대상으로 수행하였다. 대상 전동기는 4극의 Ferrite 타입 IPM 전동기로서 100W급의 냉장고 컴프레서 구동용전동기이다.

〈표 1〉 대상 모터의 주요 사양

DC link 전압 (V)	150
모터 타입	IPMSM
극수/슬롯수	4/6
Br (T)	0.41
Ra (ohm)	1.2
Ψ_a (Wb)	0.103

그림 3은 대상 전동기의 무부하 선간 역기전력의 파형, 고조파 성분, 인덕턴스, 고조파 계수를 나타낸다. 무부하 역기전력은 시험치와 해석치를 비교 하였으며 시험 결과는 해석결과와 일치한다. 2차원 FEA로 $d-q$ 축 인덕턴스, 고조파 계수를 산정하였다. 고조파 계수는 전류 위상이 증가함에 따라 증가하는 형태를 나타내며 이는 전류 위상이 증가 할수록 고조파 전압의 크기가 증가함을 의미한다.



〈그림 3〉 (a)무부하 역기전력(1000rpm), (b)무부하 역기전력의 고조파 분석 (c)d-q축 인덕턴스 (d)고조파 계수 k_r

그림 4는 시험 구성을 나타내며, 그림 5(a)는 500rpm, 2A, 전류 위상 20° 조건에서 측정된 선간 전압을, 그림 5(b)는 입력 전류를 나타낸다. 입력 전류는 최대한 정현파에 가깝게 인가되었으며 전고조파 왜형률이 2% 이하이다. 그림 5(c)는 FEA로 얻은 전압의 고조파 분석 결과, 그림 5(d)는 시험으로 얻은 선간 전압의 고조파 분석 결과를 나타낸다. 해석에서는 10차 고조파 이후의 성분들은 무시할 수 있을 정도이며 시험에서는 PWM에 의한 성분과, 속도 리플 등으로 인해 10차 이상의 고조파 성분들이 크게 나타났다. 해석 결과와 비교를 위해서 시험 결과에서 10차 이후의 고조파 성분은 반영하지 않았다.

그림 6에서 측정 전압과 고조파 계수 k_r 을 이용한 등가회로 시뮬레이션 결과를 비교한 결과이다. 10차 고조파까지 반영한 결과이며 시뮬레이션 결과는 시험 결과와 동일한 수준이다.

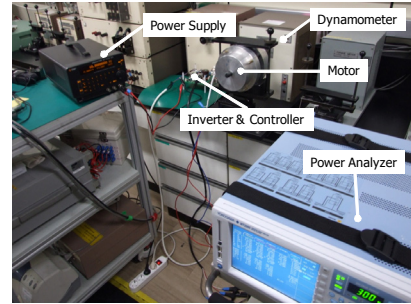
그림 7은 부하시 선간역기전력의 측정치와 FEA 결과를 비교하였다. 500rpm, 2A에서 전류위상 20°, 80° 조건에서 측정된 선간 전압에서 저항의 전압 강하와 10차 이후의 고조파 성분을 제외한 상태에서 비교한 결과이며 FEA 결과는 시험 결과와 일치한다. 따라서 FEA로 산정한 고조파계수 k_r 은 신뢰성을 가지며 이를 반영한 등가회로 시뮬레이션 또한 현상을 반영한다고 할 수 있다.

3. 결 론

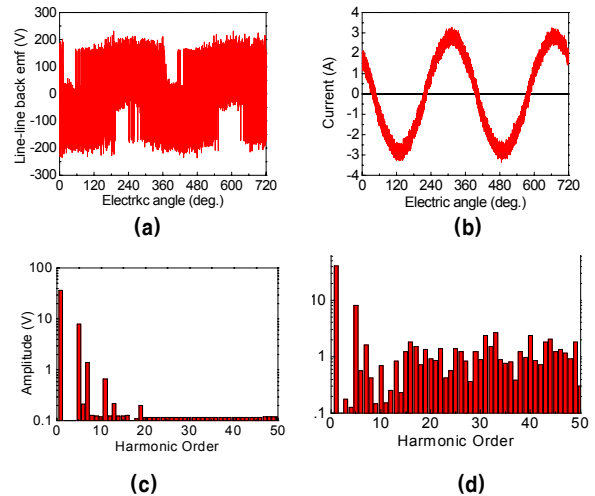
기본파만을 고려한 기존의 $d-q$ 축 등가회로에 기본파 전압에 대한 실효 전압의 비율인 고조파계수를 적용함으로써, 약계자 영역에서 고조파 전압을 반영하였다. 그 결과는 시험으로 검증 하였으며 고속 약계자 영역에서의 전압을 효과적으로 평가함으로써 등가회로 시뮬레이션에서 속도 예측의 정확도를 높일 수 있다. 향후 PWM에 의한 전압 고조파 성분을 반영하여 실제 운전에 가까운 등가회로 모델링이 필요하다.

[참 고 문 헌]

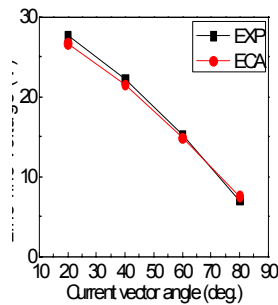
- [1]武田洋次, "埋入磁石同期モータの設計と制御", OHM社, 2002.
- [2]B.H. Lee, et al., "Modeling of Core Loss Resistance for d-q Equivalent Circuit Analysis of IPMSM considering Harmonic Linkage Flux", IEEE Trans. on Magn., Vol.47, May 2011.



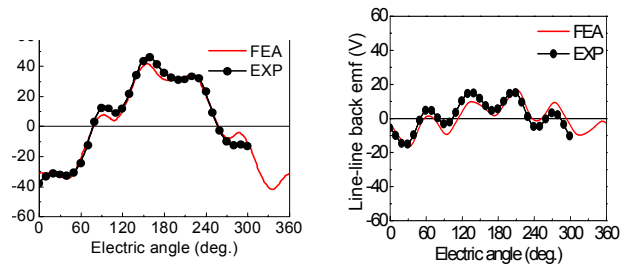
〈그림 4〉 시험 장비 구성



〈그림 5〉 측정결과와 해석 결과의 비교 (500rpm, 2Arms, 전류 위상:20°); (a)선간전압 측정치, (b)입력 전류 파형, (c)전압 파형고조파(FEA), (d)전압파형 고조파(시험치)



〈그림 6〉 전류 위상에 따른 전압 비교 (500rpm, 2Arms)



〈그림 7〉 line-line back emf (500rpm, 2A); (a) 전류위상: 20°, (b) 전류위상: 80°