

고속전철용 견인 유도전동기의 전자력 해석

°김병택^a, 권병일^a, 박승찬^b, 이기호^c, 김근웅^c, 윤중희^c
 한양대학교 전기공학과^a, 한양대학교 공학기술연구소^b대우중공업(주) 철차연구소^c

Analysis of electromagnetic force of a high-speed tractive induction motor

°B. T. Kim^a, B. I. Kwon^a, S. C. Park^b, K. H. Lee^c, K. W. Kim^c, J. H. Yoon^c
 Dept. of Elec., Graduate School of Hanyang Univ.^a, RIET^b, Daewoo Heavy Industry Ltd.

Abstract - Electromagnetic forces as a source of vibration and noise are analyzed and compared for an induction motor with different rotor slot number each other which drive high speed trains. Time stepped finite element method is used to analyze electromagnetic field considering the voltage harmonics supplied from a inverter. As a result, a rotor slot number is determined to reduce the harmonics of electromagnetic forces.

1. 서 론

유도전동기는 효율, 내구성 측면에서 타 전동기보다 유리하며, 근래 제어기의 발전으로 인버터를 이용하여 손쉽게 제어가 가능하게 되어, 대표적인 고속 운송 기기의 구동원으로 응용되고 있다. 그러나, 인버터를 이용하여 전동기 구동하는 경우, 우수한 제어성능 확보에 반하여, 전압의 고조파 성분에 의해 전동기의 중요한 성능인 진동과 소음은 커지는 단점이 있다. 전동기의 진동은 전동기 축의 편심, 회전자 질량의 불평형 등의 제작상의 결함을 제외하더라도, 고정자 표면에 작용하는 용력의 주파수가 전동기 프레임과 지지대의 형상이 갖는 구조물 고유의 진동수와 일치하는 경우 크게 발생하게된다. 이와 같은 진동을 저감하기 위하여 전동기에 전달되는 전자력의 주파수와 전동기의 전체구조물의 고유진동주파수가 서로 일치하지 않도록 구조 설계가 이루어져야 한다.

특히 고속전철용 전동기와 같이 전동기의 지지대가 전동기 프레임에 ARM의 형태로 장착되는 경우 용력은 물론 토오크 리플이 진동에 큰 영향을 주게 되므로, 이와 같은 용력과 토오크 리플의 정확한 해석이 요구된다.

본 논문에서는 고속전철용으로 기본설계된 고정자 슬롯 60개의 전동기에 대하여 진동저감에 유리할 것으로 예상되는 회전자 슬롯수인 52슬롯과 74슬롯을 가지는 경우[1], 각각 토오크 리플과 고정자 치에 전달되는 용력의 크기 및 주파수 특성을 해석하고 비교, 분석하였다. 전자력 해석방법으로는 인버터 전압을 구동원으로 하는 시간 차분 유한 요소법을 이용하였다.

2. 인버터 구동 유도전동기의 전자력 해석

2.1 해석모델

그림1은 고속전철용으로 기본설계된 전동기의 고정자 형상이며, 고정자 슬롯수 60개이다. 인버터 구동시 특성을 비교하기 위해 선정된 52개 및 74개의 슬롯을 가지는 회전자의 형상과 각각의 경우에 대한 회전자 슬롯의 형상을 그림2, 그림3에 나타내었다.

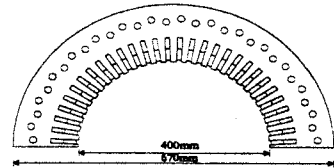


그림1. 고정자형상

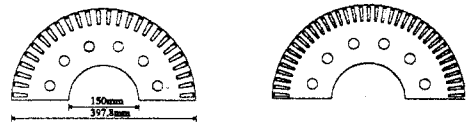
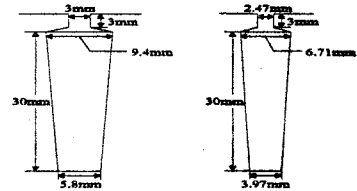


그림2. 52슬롯 및 74슬롯의 회전자형상



a. 52슬롯 b. 74슬롯

그림 3. 52슬롯과 74슬롯의 회전자 형상

2.2 시간 차분 유한 요소법을 이용한 전자력 해석
 정현파 구동시 전동기의 용력은 근사화된 수식을 이용하여 간단히 계산될 수 있으며[2], 52슬롯과 72슬롯의 경우 발생하는 용력의 고조파 성분을 표1에 나타내었다

표1. 52 및 74슬롯의 발생 용력의 고조파 성분

	시간차수	공간차수
52슬롯	2	124, 64, 4, -56, -116
	24	168, 108, 48, -12, -72
	26	172, 112, 52, -8, -68
	28	176, 116, 56, -4, -64
	50	220, 160, 100, -40, -20
	52	224, 164, 104, 44, -16
	54	228, 168, 108, 48, -12
74슬롯	2	124, 64, 4, -56, -116
	35	130, 70, 10, -50
	37	134, 74, 14, -46
	39	138, 78, 18, -42
	72	144, 84, 24
	74	148, 88, 28
	76	92, 32

* (-)는 반대방향으로 회전하는 고조파성분

그러나, 인버터를 이용한 전동기구동의 경우는 정현파 구동에 비하여 매우 많은 고조파 성분을 포함하게 되므로 기자력파형의 크기를 차수별로 예측하는 것과, 또한 포화현상을 예측하는 것이 불가능하므로 기존의 해석적인 방법을 통한 용력의 계산으로는 발생하는 고조파의 정확한 예측을 할 수 없다. 이를 정확하게 계산하기 위해, 인버터 전압을 구동원으로 하는 시간 차분 유한 요소법을 도입하였으며, 해석을 위한 Maxwell 방정식의 Matrix 형태를 식(1)에 나타내었으며, 이로부터 토오크와 용력을 식(2)과 식(3)을 이용하여 계산하였다(3).

$$\begin{bmatrix} [S] + \frac{[I]}{\Delta t} & [H] & -[C] \\ \frac{[G]}{\Delta t} & [Y] & [0] \\ [W] & [0] & \frac{[L_0] + \Delta t [R]}{h_{eff}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A] \\ [U_{ij}] \\ [I] \end{bmatrix}_{i+1} \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{[I]}{\Delta t} & [0] & [0] \\ \frac{[G]}{\Delta t} & [0] & [0] \\ [W] & [0] & \frac{[L_0]}{h_{eff}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A] \\ [U_{ij}] \\ [I] \end{bmatrix}_i + \begin{bmatrix} [0] \\ [0] \\ \frac{\Delta t}{h_{eff}} [V] \end{bmatrix}_{i+1}$$

$$\vec{F}_r = \oint_V \vec{r} \times \left(\frac{1}{\mu_0} (\vec{B} \cdot \vec{n}) \vec{B} - \frac{1}{2\mu_0} B^2 \vec{n} \right) d\vec{s} \quad (2)$$

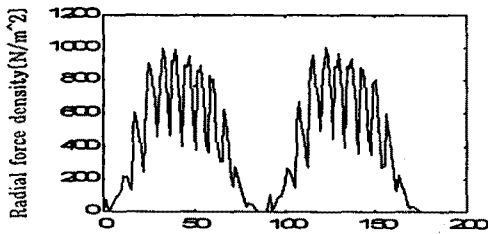
$$\vec{F}_r = [\vec{H}_1(\vec{B}_1 n_{12}) - (\vec{B}_1 \vec{H}_1 / 2) n_{12}] - [\vec{H}_2(\vec{B}_2 n_{12}) - (\vec{B}_2 \vec{H}_2 / 2) n_{12}] \quad (3)$$

2.3 해석결과

인버터구동시 기본주파수(base frequency)인 60Hz, 회전속도 1635rpm일 때 그림 2에 나타낸 회전자 형상에 대하여 해석하였으며, 시간차분간격은 매 주기당 200회로 하였다. 전동기 구동전압은 6-step square wave inverter에서 출력되는 전압으로, DC 링크단의 전압은 2800 V이다.

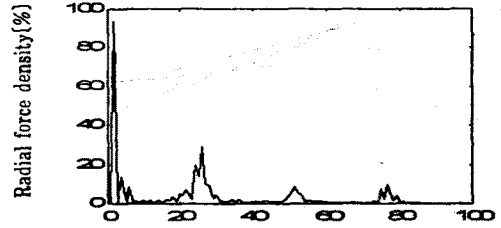
2.3.1 회전자 슬롯 52개의 해석결과

52슬롯의 경우 용력의 1주기 특성을 그림 4.(a)에 나타내었으며, 이의 평균대비 고조파성분의 비율 그림 4.(b)에 나타내었다. 그림 4의 주파수 성분과 표1을 비교하면, 4~6차, 75~77차 성분 등이 인버터 구동시에 발생하는 것을 볼 수 있으며, 인버터의 고유 구동특성에 의해 발생되어지는 항힘을 알 수 있다.



(a)

Analysis step(1 Period)



(b)

그림 4. 52슬롯의 경우 (a)용력과 (b)주파수특성

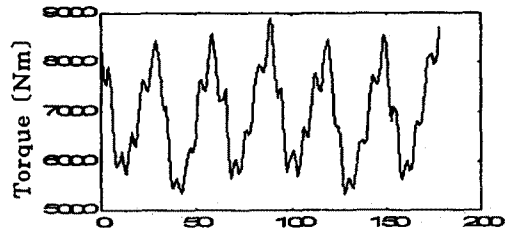
이와 같이 인버터 구동시 발생하는 고조파항의 공간차수를 파악을 위하여 고정자에 존재하는 모든 치에 작용하는 용력으로부터, 임의의 시간고조파성분에 대한 Phase 특성을 통해 시간고조파 성분의 공간적인 주기를 알 수 있다. 표2는 이와 같은 방법으로 평균치 대비 고조파의 성분이 5%이상인 성분에 대해 시간 및 공간 차수를 분석한 것이다. 표2에 제시된 2, 24, 26, 28, 50, 52, 54차 시간고조파항의 경우 표1과 비교하면 공간 고조파항이 서로 일치함을 알 수 있다. 또한 인버터 특성에 의해 발생하는 시간 차수항으로 볼 수 있는 4차, 6차, 30차, 77차, 79차 고조파항의 경우 각각 8차, 12차, 8차, 24차, 20차의 공간차수를 가짐을 알 수 있다. 전동기의 진동은 대부분 저차의 공간차수를 가질 때 발생하게 되므로(4), 2차, 4차, 6차, 24차, 26차, 28차 및 30차의 시간고조파 성분의 주파수와 전동기의 고유 진동수가 일치하는 경우 진동이 커질 가능성이 높다는 것을 알 수 있다.

표2. 인버터 구동시 52슬롯의 시간 및 공간고조파분석

		시간차수										
		2	4	6	24	26	28	30	51	52	75	77
공 간 차 수	4	V					V					
	8		V(*)			V	V(*)					
	12			V(*)	V							
	16								V	V		
	18											V(*)
	28											V(*)

(*)는 인버터 구동특성에 의해 발생하는 성분

그리고 52슬롯의 토오크 리플과 주파수특성을 그림 5에 나타내었으며, 이로부터 40차이하의 고조파항이 비교적 다양하게 발생하는 것을 알 수 있다.



(a)

Analysis step(1 Period)

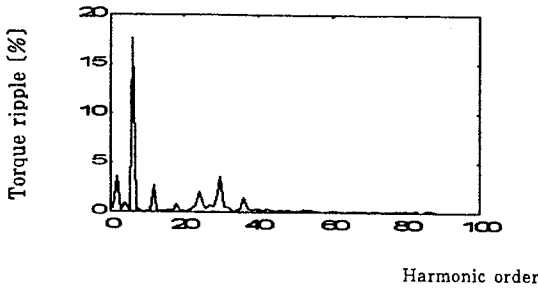
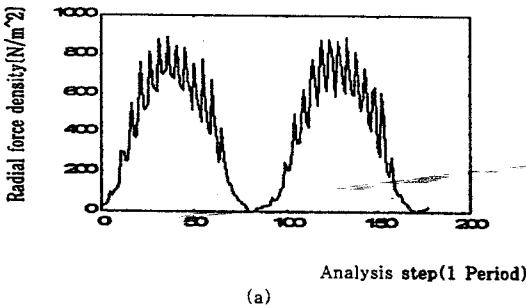


그림5. 52슬롯의 경우 (a)토크리플과 (b)주파수특성

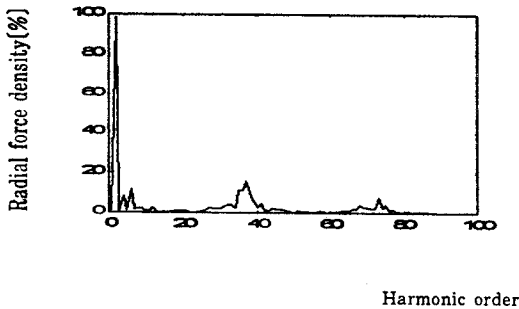
2.3.2 회전자 슬롯 74개의 해석결과

그림6에 74개 슬롯에 대한 용력의 1주기에 대한 특성과 주파수 특성을 나타내었다. 용력의 크기를 52슬롯의 경우와 비교할 때 용력의 고조파 성분이 저감되어 있음을 볼 수 있다. 그리고, 표3에 평균대비 5%이상의 성분에 대한 시간 및 공간차수를 분석하였다. 표3에 제시된 용력의 시간 고조파항을 표1과 비교하면, 시간고조파항의 공간차수가 서로 일치하는 것을 알 수 있으며, 이는 인버터 구동의 특성에 의해 부가적으로 발생하는 고조파 성분은 4차와 6차를 제외하고 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 74슬롯의 경우는 저차의 고조파 성분인 2차, 4차, 6차, 35차 성분이 진동에 영향을 줄 수 있음을 예측할 수 있다.

그리고, 74슬롯의 경우에 대한 토크 리플과 이의 주파수 특성을 그림7에 나타내었다. 토크의 주파수 특성을 52슬롯의 경우와 비교하면, 20~40차수의 고조파 성분이 매우 감소되어 있으므로 용력은 물론 토크 리플 특성도 74슬롯의 경우가 진동에 유리함을 알 수 있다.



(a)

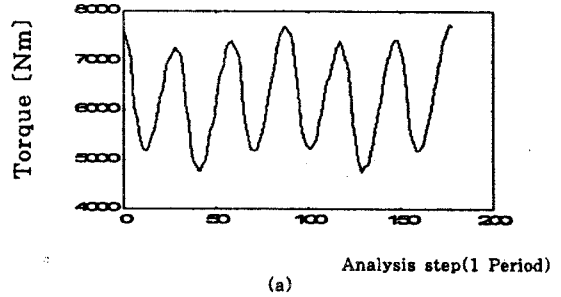


(b)

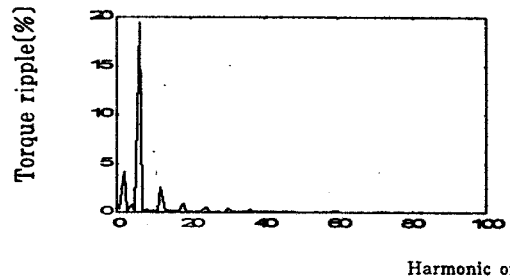
그림6. 74슬롯의 경우 (a)용력과 (b)주파수특성

표3. 인버터 구동시 74슬롯의 시간 및 공간고조파분석

		시간차수						
		2	4	6	35	37	39	74
공간차수	4	V						
	8		V(*)					
	10				V			
	12			V(*)				
	14					V		
	18						V	
	28							V



(a)



(b)

그림7. 74슬롯의 경우 (a)토크리플과 (b)주파수특성

3. 결 론

고속전철용으로 설계된 인버터 구동 유도전동기의 회전자 슬롯의 변화에 따른 용력 및 토크 리플(전자력) 특성을 파악하기 위하여 52개와 74개의 회전자 슬롯개수를 갖는 회전자에 대해 인버터전압을 구동원으로 하는 시간 차분 유한 요소법을 이용하여 해석하였다. 이로부터 52슬롯의 경우는 정현파 구동시에 비해 인버터구동전압의 고조파성분에 영향을 많이 받아, 2차, 4차, 6차, 24차, 26차, 28차 및 30차의 용력성분이 진동에 영향을 주로 줄 것으로 예상되며, 이에 비해 74슬롯의 경우 2차, 4차, 6차, 35차 성분만이 진동을 발생시키는 것으로 사료된다. 또한 토크 특성에 있어서도 52슬롯의 경우보다 74슬롯이 20~40차수의 고조파 성분이 현저히 감소됨을 알 수 있으므로, 전동기의 설계측면으로 74슬롯의 경우가 진동저감에 유리하다.

(참 고 문 헌)

- [1] 대우중공업, "전인전동기개발", 고속전철 기술개발사업 1차년도 보고서, 1997. 10
- [2] P. L. Timar, A. Fazekas, J. Kiss, A. Miklos, S. J. Yang, "Noise and Vibration of Electrical Machines", Elsevier, 1989
- [3] D.H. Im, S.C. Park, B.T Kim, B.I. Kwon, "Cogging Torque Calculation of Induction Motor with Skewed Slots", Proc. of ICEE '95, pp.529-532, July, Korea, 1995
- [4] 小林 孝司, "誘導電動機の電機設計と騒音", '96 モータ技術シンポジウム, 1996.