

시간고조파를 고려한 선형유도전동기의 등가회로와 특성해석

장석명*, *이현구*, 박영태**
충남대학교 전기공학과* 한국표준과학연구원**

Equivalent Circuit and Characteristics Analysis of LIM Considering the Time Harmonics

S.M. Jang*, *H.G. Lee*, Y.T. Park**
Dept. of Electrical Engineering Chungnam Nat'l University* KRISS**

ABSTRACT

Because most LIM is driven by inverter, input voltage is involved with the time harmonics. Therefore the equivalent circuit for an inverter-fed LIM has to be modified to represent every harmonic present in supply voltage. This paper analyzes the characteristics and loss of LIM to construct the equivalent circuit for each time harmonic through the static test and theoretical analysis. To make an analysis of nonsinusoidal supply waveforms, it is developed the simulation program to calculate the RMS, peak value and THD for any waveforms expressing Fourier series.

1. 서론

선형유도전동기(Linear Induction Motor; 이하 LIM)는 대부분 인버터에 의해 구동되기 때문에 입력전압은 많은 시간고조파를 포함한 비정현파형이다. 그러나 일반적으로 정현파 입력전압에 대한 등가회로를 구성하여 특성해석 및 제어에 응용하기 때문에 실제 현상과는 크게 달라지게 된다.[1]

본 연구에서는 시간고조파가 함유된 입력전압의 영향을 고려하기 위하여 각각의 시간고조파 차수에 대한 등가회로를 구성하여 LIM의 특성 및 손실을 해석하였다. 또한 시간고조파가 함유된 파형을 분석하기 위하여, 푸리에 급수로 표현되는 임의의 파형에 대하여 실효치 및 최대치, 전고조파왜형률(THD) 등을 계산할 수 있으며 임의의 고조파 함유율을 고려하여 파형을 수치적으로 합성할 수 있는 시뮬레이션 프로그램을 작성하였다. 이로부터 각각의 시간고조파 차수에 대한 등가회로를 구성하여 시간고조파에 대한 LIM의 특성 및 손실을 계산하여 분석검토하였다. 이로써 실제 현상에 가장 접근하는 LIM의 등가회로를 구성하여 특성의 정밀한 해석은 물론 설계, 제어에도 중요한 자료를 제시하게 되었다.

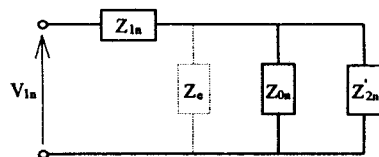
2. n 차 시간고조파에 대한 LIM의 등가회로

2.1 등가회로의 선정

시간고조파가 함유된 비정현파 전압이 공급될 경우 등가회로는 공급전압에 나타나는 각각의 고조파 차수에 대하여 구성되어야만 한다. 각각의 고조파 차수에 대하여 [그림 1]의 등가회로와 같은 개별적인 등가회로를 구성한

다. 여기서 $Z_{1n} = R_{1n} + jX_{1n}$ 은 1차측 권선 임피던스, Z_{0n} 은 철손저항 R_{Fm} 과 상호인덕턴스 X_{m} 을 직렬연결한 임피던스 그리고 $Z'_{2n} = R'_{2n}(s_n)/s_n + jX'_{2n}/s_n$ 은 2차측 임피던스이다. 단부효과 임피던스 Z_e 는 기본파 고조파에 대해서만 계산되어지며 $n > 1$ 인 고차시간고조파에 대해서는 등가회로에서 무시된다.

고조파에 의해 등가회로의 회로정수는 주파수가 증가함에 따라 표피효과의 영향으로 등가회로 저항과 리액턴스가 변화한다. 리액턴스를 변화시키는 다른 요인은 부하전류에 의한 포화이다. 고조파 전류는 누설자속을 증가시키며 상호리액턴스 X_{m} 과 누설리액턴스 X_{1n} , X_{2n} 에 영향을 미친다.



[그림 1] n 차 시간고조파에 대한 LIM의 등가회로

2.2 n 차 시간고조파에 대한 등가회로 구성을 위한 알고리즘

시간고조파 차수 n에 대하여 2차측 전류의 슬립과 주파수는 다음과 같다.

$$n = 6k + 1 \text{ 일 때, 여기서 } k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$s_n^+ = 1 - \frac{1}{n}(1 - s) \quad (1)$$

$$w_n^+ = wns_n^+ = w[n - (1 - s)] \quad (2)$$

$$n = 6k - 1 \text{ 일 때, 여기서 } k = 1, 2, 3, \dots$$

$$s_n^- = 1 + \frac{1}{n}(1 - s) \quad (3)$$

$$w_n^- = wns_n^- = w[n + (1 - s)] \quad (4)$$

시간고조파 차수 n이 증가하면 할수록, 슬립 s_n 은 1에

가까워지며 n 차 시간고조파에 대한 동기속도와 동기속도에 따른 슬립은 다음과 같다.

$$|v_{m}| = n v_s \quad (5)$$

$$s_m = \frac{v_s \mp n v_s}{v_s} = 1 \mp n \quad (6)$$

고차수 시간고조파에 대한 상당 1차측 권선저항은 각형 고정자도선을 갖는 중·대형 LIM인 경우 $R_{1n} \approx n R_1$ 이며, 원형 고정자도선을 갖는 소형 LIM인 경우에는 $R_{1n} \approx R_1$ 이다. 여기서 R_1 은 $n=1$ 에 대한 1차측 권선의 교류저항이다.

1차측 고정자 누설리액턴스와 상호리액턴스는 기본파에 의해서만 자기회로의 포화가 있으므로 $n=1$ 에 대한 값에 고조파차수를 곱하여 구한다.

$$X_{1n} = n X_1 \quad (7)$$

$$X_{2n} = n X_2 \quad (8)$$

고차수 시간고조파에 대하여 표피효과를 고려한 2차측 임피던스는 식 (9), (10)에서 구한 임피던스를 병렬연결하여 식 (11)에 의하여 구한다.

$$Z_{A1}(s) = \frac{j\omega \mu_0}{x_{A1}} \frac{1}{\tanh(x_{A1}d)} k_{tr} \frac{L_i}{r} \quad (9)$$

$$Z_{F0}(s) = \frac{j\omega \mu F_e}{x_{F0}} \frac{1}{\tanh(x_{F0}h_{mc})} k_{tr} k_x \frac{L_i}{r} \quad (10)$$

$$Z_{2n} = \frac{Z_{A1n}(s_n) Z_{F0n}(s_n)}{Z_{A1n}(s_n) + Z_{F0n}(s_n)} \frac{1}{s_n} \quad (11)$$

여기서 각주파수 ω 와 슬립 s 는 식 (1)에서 식 (4)까지의 고조파에 대한 값을 대입한다. 그리고 각각의 상수는 [표 1]에 정리하였다.[2]

[표 1] 2차측 임피던스 계산에 사용되는 상수

상 수	정 의 식
AI의 복소전달상수	$x_{A1} = \sqrt{j\omega \mu_0 \sigma_{A1} + \left(\frac{\pi}{r}\right)^2}$
Fe의 복소전달상수	$x_{F0} = \sqrt{j\omega \mu F_e \sigma_{Fe} + \left(\frac{\pi}{r}\right)^2}$
transverse edge 효과 보정 계수	$k_{en} = 1 - \frac{\epsilon}{n L_i} + \frac{2}{\pi} \frac{\epsilon}{\omega} [1 - e^{-n \frac{\pi}{L_i} L_i}]$
2차측 임피던스 감소 턴 수 비	$k_{un} = \frac{2m(N_s k_{en})^2}{n p}$
권선 계수	$k_w = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2mq}\right)}{q \sin\left(\frac{\pi}{2mq}\right)} \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{\omega_c}{r}\right)$

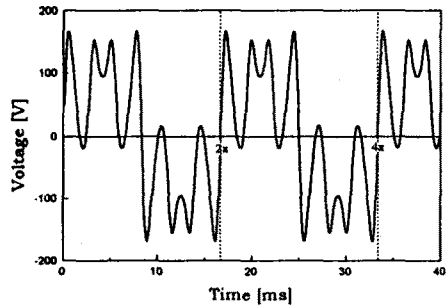
3. 고조파를 함유한 입력전원의 특성

본 논문에서는 시간고조파가 함유된 입력파형에 대한 영향을 살펴보기 위하여 다음의 [표 2]와 같은 입력전압파형을 임의로 선정하여 특성을 분석하였다.

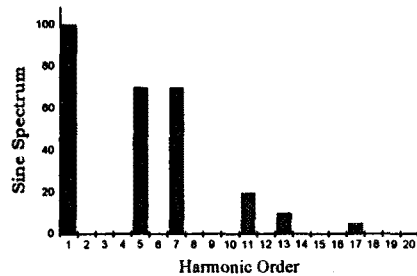
[표 2] LIM의 입력전압

정현파 입력	141.42 sin ωt
고 조 파	# 1 135 sin ωt + 30 sin 5 ωt + 30 sin 7 ωt + 10 sin 11 ωt + 10 sin 13 ωt + 10 sin 17 ωt
입 력	# 2 100 sin ωt + 70 sin 5 ωt + 70 sin 7 ωt + 20 sin 11 ωt + 10 sin 13 ωt + 5 sin 17 ωt

[표 2]의 고조파 입력 #2에 대한 순시파형은 다음 [그림 3]과 같다. 여기서 주파수는 60[Hz]이며 샘플링타입은 0.01[ms]로 계산하여 플로팅하였다. 그리고 [그림 4]에는 이 파형에 대한 정현파 스펙트럼을 나타내었다.



[그림 3] 고조파 입력전압파형



[그림 4] 고조파 스펙트럼

[표 2]의 전압에 대하여 실효치, 전고조파왜형률(THD), 최대치 등의 사양을 계산한 결과를 다음의 [표 3]에 정리하였다.

[표 3] 입력고조파전압의 사양

	정현파 입력	고조파 입력 #1	고조파 입력 #2
최 대 치	141.4 [V]	159.7 [V]	167.4 [V]
실효치(RMS)	100.0 [V]	100.8 [V]	100.8 [V]
THD	0.0 [%]	16.0 [%]	101.6 [%]
입력주파수	60 [Hz]		

4. 고조파에 대한 등가회로 해석결과

4.1 LIM의 사양

시험 및 해석에 사용되는 SLIM의 사양은 다음의 [표 4]와 같으며 1차측 코어는 개방슬롯이고 2층권이다. 1차측에는 발생추력을 측정하기 위한 Load-Cell과 Indicator가 설치되어 있다.

[표 4] LIM의 사양

극 수	4	1 차 축	극 간 격	75 [mm]
상 수	3		슬롯 폭	4.9 [mm]
상극당슬롯수	3		치 간 격	8.4 [mm]
공 극	10 [mm]		1차철심폭	100 [mm]
			OVER HANG	52 [mm]
2 차 축			매상당권선수	360
AI판 두께	5 [mm]		권선계수	0.7
Back Iron 두께	10 [mm]		단 절률	3/3
2 차 폭	204 [mm]			

4.2 고조파에 대한 등가회로 해석결과

[표 2]의 고조파 입력 #2와 같은 비정현파 전압이 인가될 때 각각의 고조파 차수에 대하여 LIM의 등가회로를 구성하여 구한 특성을 [표 5]에 나타내었다. 이 때 입력전압의 실효치는 100[V]이며 주파수는 60[Hz]이다. 각 고조파에 대한 동기속도는 차수에 비례하며 시간고조파 차수 n 이 증가할수록 슬립 s_n 은 1에 가까워진다. 고조파에 의한 발생력은 기본파에 의해 발생하는 힘에 비해 매우 작다. 이는 고조파 차수가 증가할수록 임피던스가 커져서 슬립이 1에 가까워져서 발생력이 작아지기 때문이다.

[표 5] n 차 시간고조파에 대한 특성

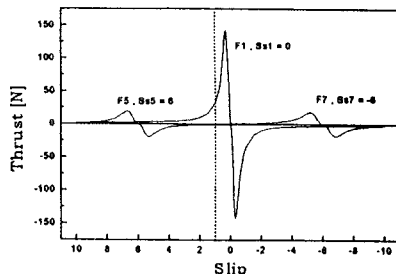
1. $s = 0.5$ 일 때 $v = 4.5$ [m/s] = 16.2 [km/h]

n	s_n	$Z_{2n}(s_n)/s_n$	I_{2n}	PF_n	F_{2n}
1	0.50	1.073+j0.474	11.804	0.272	99.654
5	1.10	0.132+j0.102	2.165	0.071	-0.375E-1
7	0.93	0.112+j0.086	1.553	0.051	0.138E-1
11	1.05	0.083+j0.085	0.283	0.033	-0.192E-3
13	0.96	0.076+j0.078	0.120	0.028	0.292E-4
17	1.03	0.069+j0.073	0.046	0.021	-0.276E-5

2. $s = 0.1$ 일 때 $v = 8.1$ [m/s] = 29.16 [km/h]

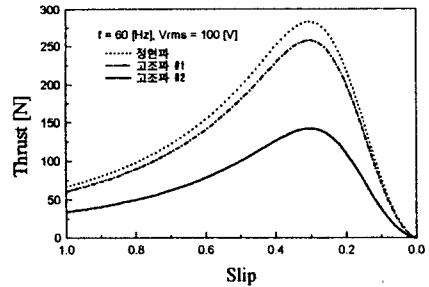
n	s_n	$Z_{2n}(s_n)/s_n$	I_{2n}	PF_n	F_{2n}
1	0.10	0.072+j0.649	12.664	0.292	21.230
5	1.18	0.128+j0.107	2.164	0.071	-0.370E-1
7	0.87	0.116+j0.082	1.554	0.051	0.160E-1
11	1.08	0.083+j0.086	0.283	0.033	-0.513E-4
13	0.93	0.076+j0.077	0.120	0.028	0.334E-4
17	1.05	0.069+j0.073	0.046	0.021	-0.285E-5

[그림 5]는 기본파, 제5고조파, 제7고조파에 의해 발생하는 비동기 추력을 슬립에 대하여 나타낸 것이다. 고조파에 의한 발생력은 기본파에 의해 발생하는 힘보다 매우 작기 때문에 20배로 나타내었다.



[그림 5] 시간고조파에 의한 비동기 추력

[표 2]의 입력전압파형은 100[V]의 같은 실효치를 갖지만 [그림 6]에서와 같이 추력특성은 큰 차이를 보인다. 그 이유는 고조파에 의한 발생력이 기본파에 의해 발생하는 힘에 비해 매우 작기 때문이다. 이를 통해 인버터 출력전압과 같이 시간고조파가 함유된 전압이 LIM에 입력된 경우 같은 실효치를 갖더라도 고조파 함유율에 따라 LIM의 특성이 달라짐을 알 수 있다. 즉 기본파 성분의 함유율에 따라 특성이 크게 좌우됨을 알 수 있다.



[그림 6] 정현파와 고조파 입력에 대한 추력특성

5. 결론

대부분의 LIM이 인버터에 의해 구동되기 때문에 입력된 원은 많은 시간고조파를 포함하게 된다. 따라서 시간고조파가 함유된 입력전원을 분석하기 위한 시뮬레이션 프로그램 구성하였으며 시간고조파가 함유된 입력 전원에 대하여 각각의 n 차 고조파에 대한 등가회로를 구성하여 특성을 해석하였다. 이를 통해 입력전압의 실효치가 같더라도 고조파 함유율에 따라 LIM의 특성이 달라짐을 알 수 있었다.

본 논문에서 구성된 시간고조파를 고려한 LIM의 등가회로를 통해 보다 정확한 특성해석이 가능하게 되었으며 시간고조파의 영향을 알 수 있었다. 또한 이를 통해 얻어진 결과를 토대로 설계는 물론 벡터제어 등의 제어시스템 구성에 응용하고자 하였다.

참 고 문 헌

- [1] 장석명, 이현구, 박영태, 김봉섭, 정현갑 "선형유도전동기의 등가회로 구성 -LIM의 T형 등가회로 산정을 위한 구축시험", '96 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A권 pp47-49
- [2] Jacek F. Gieras "Linear Induction Drives", CLARENIXON PRESS · OXFORD, 1994.
- [3] S. Nonaka, K. Hayashi and K. Yoshida "Thrust Characteristics of High Speed Linear Motors driven by the Three-Phase Inverter", 九大工学集報, 第46卷, 第2号, pp.102-108, 昭和48年
- [4] 物名英利, 開口一夫, 海老原大樹, 和田正晴 "片側式LIM의 T形等價回路による 特性算定法", 電氣學會研究會資料 LD-91-43, pp.11-19, 1991
- [5] Jacek F. Gieras "Analysis of Inverter-Fed Linear Induction Motors", LDIA'95 Nagasaki, pp373-376, 1995