

3상 유도전동기운전에 대한 전압고조파영향의 분석

김 태 한* · 좌 종 근**

Analysis of Voltage Harmonics Effects on Three Phase Induction Motor Operation

Tae-Han Kim* · Chong-keun Jwa**

ABSTRACT

In this paper an attempt is made to analyze the time harmonic effects on a three phase induction motor operation. The T-type equivalent circuit is used to calculate the current distortion factor and efficiency of the motor under the nonsinusoidal voltage source which is consisted of the fundamental combined with the 2nd to 13th order harmonic. The current distortion factors and efficiencies are computed and analyzed at various voltage distortion factors with load variation. The results show that the low order harmonics have more impacts on the motor than the higher order harmonics.

Key Words : Induction motor, Nonsinusoidal voltage, Current distortion factor, Efficiency

1. 서 론

유도전동기의 고조파에는 비정현파 전원이나 전압에 의한 시간고조파와 고정자의 분포권 권선으로 인하여 발생하는 공간고조파가 있다. 시간고조파에 의한 회전자계는 고조파의 차수에 따라 기본파 회전자계와 같은 방향 또는 반대방향으로 기본파 속도의 차수배의 속도로 회전하고, 공간고조파에 의한 회전자계도 두 방향으로 기본파속도를 차수로 나눈 속도로

회전한다. 이들의 영향으로는 전동기의 운전성능을 저하시키고 진동토크를 발생하게 하므로 이에 대한 연구가 계속되고 있다.

이에 따라 시간고조파에 의한 유도전동기의 운전성능에 대한 연구로 Doggett와 Queer[1]는 고조파전원으로 시험하고 운전성능을 분석하여 10[%]이하의 고조파는 무부하시를 제외하고 큰 영향이 없음을 확인하였고, Jain[2]은 다양한 차수의 고조파전압 인가시 회전자 시정수 개념을 도입하여 고정자 저항을 무시한 T형 등가회로에 의하여 전류, 동손, 그리고 토크 분석을 위한 해석식을 제시하였다. Klingshim과 Jordan[3]은 고조파전류와 각종 손실계산식을 제시하였고, Lee[4]는 전압왜형률에 따른 실부하시험으로 비틀림진동 등을 분석하였으며, 또한 Lee[5]는 제 13차 고조파까지 실부하시험에 의하여 입력전류, 역률,

* CBS제주방송

Christian Broadcasting System Cheju branch

** 제주대학교 전기전자공학부, 첨단기술연구소

Faculty of Electrical & Electronic Eng., Cheju Nat'l Univ., Res. Inst. of Adv. Tech.

효율, 그리고 온도상승 등을 분석하였다. Vamvakari 등[6]은 누설자속과 포화에 관련된 철손을 고려한 수정된 정밀 T형 등가회로를 사용하여 상전류와 토오크의 저차수의 고조파 영향을 분석하였고, Lumyong과 Chat-uthai[7]는 제 11차 고조파까지 정밀 T형 등가회로를 사용하여 전압왜형률과 출력변화에 따른 입력전류와 전력을 분석하였다.

그러나 이들의 연구에서는 부하변화에 따른 전류왜형률이나 효율의 분석은 되어 있지 않다. 본 논문에서는 IEEE권장 T형 등가회로에 의하여 전압왜형률이 5%, 10%, 그리고 15%인 각각의 고조파가 포함된 경우에 제 13차 고조파까지 부하변동에 따른 전류왜형률과 효율을 구하여 분석한다.

II. 해석 이론

2.1. 전압왜형률과 전류왜형률

IEEE-519에 의하면 전압왜형의 정도를 전전압고조파 왜형률(total voltage harmonics distortion factor, THD_v)을 다음과 같이 정의한다.

$$THD_v = \sqrt{\frac{\text{모든 고조파전압 크기의 제곱합}}{\text{기본파전압 크기의 제곱}}} \times 100$$

$$= \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}{V_1^2}} \times 100 \quad (1)$$

그리고 제 k 차 고조파에 의한 전압왜형의 정도는 전압왜형률(voltage distortion factor, VDF)로 다음과 같다.

$$VDF = \sqrt{\frac{\text{제 } k\text{차 고조파전압 크기의 제곱}}{\text{기본파전압 크기의 제곱}}} \times 100$$

$$= \frac{V_k}{V_1} \times 100 \quad (2)$$

이와 유사하게 제 k 차 고조파에 의한 전류왜형의 정도를 전류왜형률(current distortion factor, CDF)을

정의하면 다음과 같다.

$$CDF = \sqrt{\frac{\text{제 } k\text{차 고조파전류 크기의 제곱}}{\text{기본파전류 크기의 제곱}}} \times 100$$

$$= \frac{I_k}{I_1} \times 100 \quad (3)$$

여기서, V_1, V_k 는 각각 기본파와 제 k 차 고조파전압의 크기이고 I_1, I_k 는 각각 기본파와 제 k 차 고조파전류의 크기이다.

2.2. 등가회로와 해석

고조파에 의한 유도전동기의 영향을 해석하기 위하여 Fig. 1과 같은 IEEE권장 T형 등가회로를 사용한 다. 이 등가회로에서 다음과 같은 가정을 둔다.

- i) 3상 전압의 파형은 정현파이며 전압의 크기는 모두 같고, 위상은 120° 씩 떨어져 있다.
- ii) 모든 회로정수는 상수이고 포화의 영향은 고려하지 않는다.
- iii) 철손과 기계손은 고려하지 않는다.

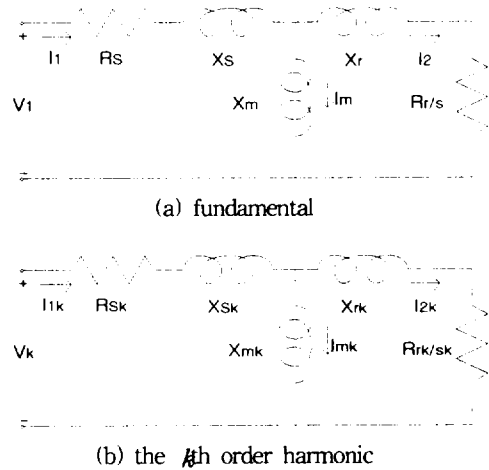


Fig. 1 Equivalent circuit of three phase induction motor per phase

등가회로에서 R_s, R_r 은 각각 고정자와 고정자측으로 환산한 저항이고, X_s, X_r 은 각각 고정자와 고정자측으로 환산한 리액턴스이며 X_m 과 s 는 각각 자화리

액턴스와 슬립을 표시한다. 또한 V_1, V_k 는 기본파와 제 k 차 고조파전압을 I_1, I_m, I_2 는 각각 고정자, 자회회로, 고정자측으로 환산한 회전자 전류를 표시하고 하첨자 k 는 제 k 차 고조파 성분을 나타낸다.

이 등가회로에 기본파와 제 k 차 고조파의 합으로 된 전압이 인가되었을 때 특성을 계산하여 분석한다. 이 때 제 3차 고조파와 이의 배수차수의 고조파는 유도전동기가 일반적으로 중성점을 사용하지 않으므로 제외한다. n 을 양의 정수라할 때 $k=3n+1$ 차수의 고조파는 기본파 회전자계와 같은방향으로 회전하고, $k=3n+2$ 차수의 고조파는 기본파 회전자계와 반대방향으로 회전하므로 이들차수의 고조파만을 분석대상으로 한다.

$k=3n+1$ 차수의 각상 인가전압의 순시치는

$$v_a = \sqrt{2} V_1 \sin \omega t + \sqrt{2} V_k \sin (k \omega t + \theta_k) \quad (4)$$

$$v_b = \sqrt{2} V_1 \sin (\omega t - 120^\circ) + \sqrt{2} V_k \sin (k \omega t - 120^\circ + \theta_k) \quad (5)$$

$$v_c = \sqrt{2} V_1 \sin (\omega t - 240^\circ) + \sqrt{2} V_k \sin (k \omega t - 240^\circ + \theta_k) \quad (6)$$

으로 나타낼 수 있고, $k=3n+2$ 차수의 각상 인가전압의 순시치는

$$v_a = \sqrt{2} V_1 \sin \omega t + \sqrt{2} V_k \sin (k \omega t + \theta_k) \quad (7)$$

$$v_b = \sqrt{2} V_1 \sin (\omega t - 120^\circ) + \sqrt{2} V_k \sin (k \omega t + 120^\circ + \theta_k) \quad (8)$$

$$v_c = \sqrt{2} V_1 \sin (\omega t - 240^\circ) + \sqrt{2} V_k \sin (k \omega t + 240^\circ + \theta_k) \quad (9)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 ω 는 전원 각주파수이고 θ_k 는 제 k 차 고조파전압의 위상각이다.

이들의 전압이 인가되어 고정자 권선에 전류가 흐르면 회전자계가 발생하고 기본파 회전자계는 동기속도 N_s 로, 고조파 회전자계의 속도는 kN_s 로 차수에 따라 방향이 다르다. 회전자의 회전속도를 N 이라하면 기본파 회전자계에 대한 슬립 s 는

$$s = \frac{N_s - N}{N_s} \quad (10)$$

이고, 고조파 회전자계에 대한 슬립 sk 는

$$sk = \frac{kN_s - N}{kN_s} \quad (11)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서 -부호는 $k=3n+1$ 차수의 고조파일 때이고 +부호는 $k=3n+2$ 차수의 고조파일 때이다.

III. 해석결과 및 분석

고조파영향의 분석에 사용한 전동기는 Lab Volt사의 정격전압 208[V], 전류 1.3[A], 출력 175[W], 주파수 60[Hz], 회전수 1500[rpm]인 4극의 3상 권선형 유도전동기이다. 등가회로 정수는 $R_s=12.5[\Omega]$, $R_r=14.9[\Omega]$, $X_s=8.8[\Omega]$, $X_r=8.8[\Omega]$, 그리고 $X_m=180[\Omega]$ 이다.

이 전동기에 전압불평형률이 5[%], 10[%], 그리고 15[%]의 비정현파 전압이 인가된 경우에 정격부하 전후로 부하가 변화할 때의 전류불평형률과 효율을 Fig.1의 등가회로로부터 계산한다. 이 때 고조파성분 전압은 기본파 회전자계의 방향과 같은 4, 7, 10, 13차 고조파와 반대방향인 2, 5, 8, 11차 고조파이고, 3, 6, 9, 12차 고조파는 회전자계와 무관하고 중성점을 사용하지 않을 경우에는 이들 차수의 고조파전류는 흐를 수 없으므로 제외한다.

전압불평형률 5[%], 10[%], 그리고 15[%]에 대한 계산결과를 각각 Table 1, Table 2, Table 3에 보였다.

Table 1. CDF and efficiency of the induction motor in the VDF=5[%]

Harmonics	Speed [rpm]			Speed [rpm]		
	1450	1500	1550	1450	1500	1550
	C D F [%]			Efficiency [%]		
Equivalent sinusoidal wave	0	0	0	66.0	69.7	73.5
2nd	10.1	11.3	12.7	66.4	69.8	73.2
4th	5.5	6.2	6.9	66.6	70.0	73.5
5th	4.7	5.2	5.8	66.6	70.1	73.5
7th	3.4	3.7	4.2	66.6	70.1	73.6
8th	3.0	3.3	3.7	66.6	70.1	73.6
10th	2.4	2.7	3.0	66.6	70.1	73.6
11th	2.2	2.4	2.7	66.6	70.1	73.6
13th	1.9	2.1	2.3	66.6	70.1	73.6

Table 2. CDF and efficiency of the induction motor in the VDF=10[%]

Harmonics	Speed [rpm]			Speed [rpm]		
	1450	1500	1550	1450	1500	1550
	C D F [%]			Efficiency [%]		
Equivalent sinusoidal wave	0	0	0	66.0	69.7	73.5
2nd	20.3	22.6	25.5	65.6	68.9	72.1
4th	11.1	12.3	13.9	66.4	69.8	73.2
5th	9.3	10.4	11.7	66.4	69.9	73.3
7th	6.7	7.5	8.4	66.5	70.0	73.5
8th	6.0	6.6	7.5	66.5	70.0	73.5
10th	4.8	5.3	6.0	66.6	70.1	73.5
11th	4.4	4.9	5.5	66.6	70.1	73.6
13th	3.7	4.1	4.6	66.6	70.1	73.6

Table 3. CDF and efficiency of the induction motor in the VDF=15[%]

Harmonics	Speed [rpm]			Speed [rpm]		
	1450	1500	1550	1450	1500	1550
	C D F [%]			Efficiency [%]		
Equivalent sinusoidal wave	0	0	0	66.0	69.7	73.5
2nd	30.4	33.8	38.2	64.3	67.4	70.3
4th	16.6	18.5	20.8	66.0	69.4	72.7
5th	14.0	15.5	17.5	66.1	69.6	72.9
7th	10.1	11.2	12.7	66.4	69.8	73.3
8th	8.9	9.9	11.2	66.4	69.9	73.3
10th	7.2	8.0	9.0	66.5	70.0	73.4
11th	6.6	7.3	8.2	66.5	70.0	73.5
13th	5.6	6.2	7.0	66.6	70.0	73.5

이 들 Table에서 보듯이 전류불평형률은 전압불평형률이 클수록 전류불평형률도 커지고, 고조파차수가 클수록 전류불평형률은 작아진다. 또한 부하가 클수록(속도가 느릴수록) 전류불평형률은 작아진다.

효율은 전압불평형률이 클수록 제 5차 고조파까지는 작아지고 제 7차 고조파 이상에서는 거의 동일하고, 고조파 차수가 클수록 효율은 커진다. 또한 부하가 클수록 효율은 작아진다.

제 4차 고조파까지는 전류불평형률이 전압불평형률보다 크고, 제 7차 고조파 이상에서는 작아지고 있다.

이상의 분석에서는 Fig. 1의 선형 등가회로를 사용하여 해석하였으므로 자기회로의 포화와 철손과 기계손을 고려하지 않았다. 그러므로 실제의 운전시험의 값과는 차이가 있을 수 있으나 대체로 고조파 차수변화나 부하변화에 따른 전류왜형률이나 효율의 변화의 경향은 유사할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

3상 유도전동기의 인가전압에 고조파가 포함된 경우에 부하변화에 따른 전류왜형률과 효율을 IEEE권장 T형 등가회로를 사용하여 계산하고 이들을 분석하였다. 분석결과는 다음과 같다.

- 1) 저차수의 고조파가 특성에 미치는 영향이 우세하다.
- 2) 전류불평형률은 전압불평형률이 클수록, 부하가 작을수록 커진다.
- 3) 전류불평형률은 고조파의 차수가 커질수록 작아진다.
- 4) 효율은 부하가 작을수록 커진다.
- 5) 효율은 고조파의 차수가 커질수록 커진다.

참고문헌

- [1] L. A. Doggett and E. R. Queer, 1929, Induction Motor Operation with Non-Sinusoidal Impressed Voltages, Trans. AIEE, Vol.48, pp.1217-1220.
- [2] G. C. Jain, 1964, The Effect of Voltage Wave-shape on the Performance of a 3-Phase Induction Motor, IEEE Trans. on PAS, Vol.83, No.6, pp.561-566.
- [3] E. A. Klingshirn and H. E. Jordan, 1968, Poly-phase Induction Motor Performance and Losses on Nonsinusoidal Voltage Sources, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-87, No.3, pp.624-631.
- [4] C. Y. Lee, W. J. Lee, Y. N. Wang, and J. C. Gu, 1998, Effects of Voltage Harmonics on

- the Electrical and Mechanical Performance of a Three-Phase Induction Motor, Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, IEEE, 3-8 May, pp.88-94.
- [5] C. Y. Lee and W. J. Lee, 1999, Effects of Nonsinusoidal Voltage on the Operation Performance of a Three-Phase Induction Motor, IEEE Trans. on EC, Vol.14, No.2, pp.193-201.
- [6] A. Vamvakari, A. Kandianis, A. Kladas, S. Manias, and J. Tegopoulos, 2001, Analysis of Supply Voltage Distortion Effects on Induction Motor Operation, IEEE Trans. on EC, Vol.16, No.3, pp.209-213.
- [7] P. Lumyong and C. Chat-uthai, 2002, A Study of Harmonics Effect on Performances of Three-Phase Induction Motor Using BSRG, Power system Technology, Proceedings, Power con 2002, International Conference, Vol.2, 13-17 Oct., pp.1190-1194.