

유도전동기의 PWM제어와 누설 축전류 발생 모델링에 관한 연구

이재호*, 임경내*, 전진휘*, 박성준**, 김철우*
부산대학교*, 거제전문대**

A Study on Modeling of High-Frequency Leakage Currents
in PWM Inverter Feeding an Induction Motor

Jae-Ho Lee*, Kyoung-Nae Lim*, Jin-Hwi Jun*, Sung-Jun Park**, Cheul-U Kim*
Pusan National University*, Koeje college**

Abstract

A PWM inverter with an induction motor often has a problem with a high-frequency leakage current that flows through the distributed electrostatic capacitance from the motor windings to ground.

This paper presents an equivalent circuit for high-frequency leakage currents in PWM inverter feeding an induction motor, which forms an LCR series resonant circuit.

1. 서 론

최근 제어기술의 발달로 인해 유도전동기가 산업용으로 널리 보급되고 있으며 이 유도전동기를 고효율로 제어하기 위해 PWM 인버터가 사용되고 있다.

고효율 제어를 위한 PWM 인버터의 캐리어 주파수 증가는 무시할 수 없는 양의 고주파 누설 축전류를 발생시키는데, 이 누설 축전류는 common-mode 전압이 큰 스텝 형태로 변화하기 때문에 그림 1과 같이 모터 프레임과 고정자 권선사이의 부유용량 (stray capacitors)과 접지를 통해 흐른다. 최악의 경우 이 누설 축전류의 피크치는 정격전류까지 이르게 되어 아래와 같은 문제점들을 발생시키고 있다.

- 전력사용 효율이 낮아지며 모터 전류제어에 불필요한 영향을 미침.
- 모터절연에 나쁜 영향을 주어 모터의 수명을 단축시킴.
- AC전원 입력장치(변압기등)에 부착되어 있는 누전 보호계전기의 오 동작을 유발시킴.
- 누설 축전류가 100 kHz에서 수 MHz 범위의 주파수를 가지기 때문에 전자기기 등에 전자장애(EMI)을 야기 시킴.

이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 이 누설 축전류를

억제시켜야 한다.

실험을 통하여 누설 축전류를 측정하여 해석한 결과 하나의 LCR 직렬공진회로에 스텝 전압이 가해졌을 때 감쇄 진동하는 파형과 비슷하고 일정한 공진주파수를 가진다는 것을 알게 되었다.

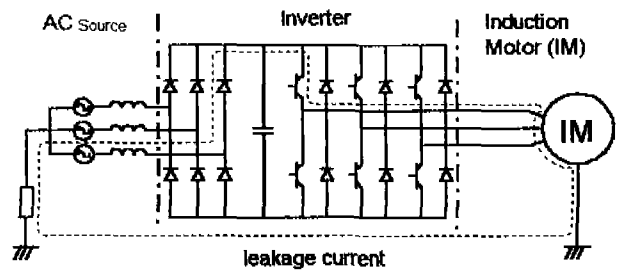


그림 1. 인버터로 구동되는 유도기시스템과 누설 축전류

따라서 본 논문은 전압형 PWM 인버터로 구동되는 유도전동기의 누설 축전류에 대한 등가회로를 하나의 LCR 직렬공진회로로 제안하였다.

2. 누설 축전류에 대한 해석 및 모델링

2.1 Common-mode 전압

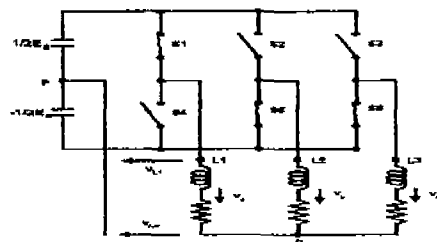


그림 2. 3상 전압형 인버터

그림 2는 3개의 인덕턴스와 저항으로 표현된 모터에 연결된 전압형 인버터를 나타내고 있다.

여기서

V_{L1}, V_{L2}, V_{L3} : 인버터출력 상전압

(dc link단 중성점 p 기준)

V_a, V_b, V_c : 부하 상전압(부하 중성점 n 기준)

V_{np} : common-mode 전압

부하 임피던스의 합 Z_t 는

$$Z_t = Z + \frac{Z}{2} = \frac{3}{2} Z$$

부하에 흐르는 전류 i 는

$$i = \frac{E_{dc}}{Z_t} = \frac{2}{3} \frac{E_{dc}}{Z}$$

부하 상전압 V_a, V_b, V_c 은

$$\begin{aligned} \therefore V_a &= Zi = \frac{2}{3} E_{dc} \\ V_b &= -\frac{1}{2} Zi = -\frac{1}{3} E_{dc} \\ V_c &= -\frac{1}{2} Zi = -\frac{1}{3} E_{dc} \end{aligned} \quad (1)$$

인버터출력 상전압 V_{L1}, V_{L2}, V_{L3} 은

$$V_{L1} = +\frac{E_{dc}}{2}, \quad V_{L2} = -\frac{E_{dc}}{2}, \quad V_{L3} = -\frac{E_{dc}}{2} \quad (2)$$

부하 중성점 n을 기준으로 3상 전류의 합은 0 이므로 common-mode 전압 V_{np} 은

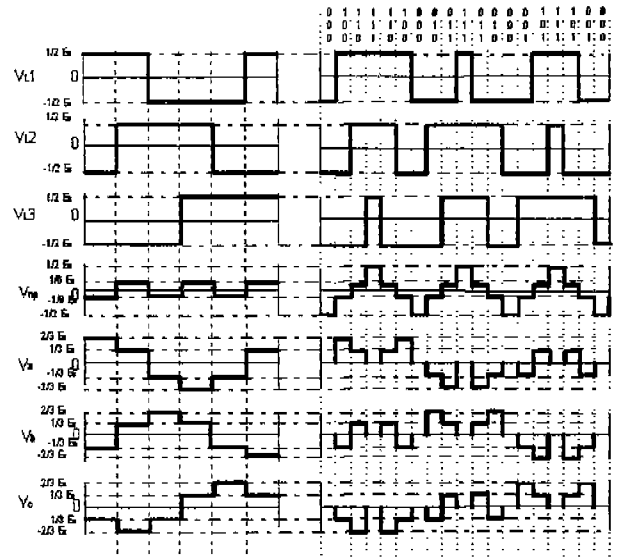
$$\begin{aligned} i_a + i_b + i_c &= 0 \\ \frac{V_{L1} - V_{np}}{Z} + \frac{V_{L2} - V_{np}}{Z} + \frac{V_{L3} - V_{np}}{Z} &= 0 \\ \therefore V_{np} &= \frac{1}{3} (V_{L1} + V_{L2} + V_{L3}) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)은 단지 스위칭 상태가 부하 임피던스와 상관 없이 common-mode 전압을 결정함을 보여주고 있고 common-mode 전압은 그림 3과 같이 인버터의 때 스위칭 $\frac{E_{dc}}{3}$ 에 의해 변한다.

인버터에 의해 생성된 common-mode 전압은 누설 축전류를 모터 권선들과 모터 프레임사이의 부유용량을 통해 흐르도록 한다.

2.2 누설 축전류의 모델링

그림 4는 누설 축전류를 측정하기 위한 실험 시스템



(a) 6-펄스 스위칭 (b) 대칭변조 PWM

그림 3. common-mode 전압 및 3상 전압파형

으로 유도기는 전압형 PWM 인버터에 의해 동작되고 모터 프레임은 접지되어 있다. 모터 프레임을 통해 흐르는 누설 축전류는 접지선으로 흐른다.

표 1 은 실험에 사용한 인버터와 유도기에 대한 파라미터를 나타내고 있다.

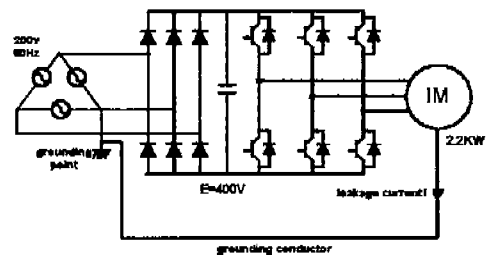


그림 4. 누설 축전류를 측정하기 위한 시스템

PWM 방식	Space Vector PWM	
IGBT	3	ea
Collector-Emitter 전압	600	V
Collector 전류	50(연속)	A
	100(순간 1ms)	A
스위칭주파수	2.5	kHz
전압	220/330	V
전류	8.8/5.1	A
정격출력	2.2kW (3Hp)	
회전수	1735	rpm
극수	4	

표 1. 인버터 및 모터 파라미터

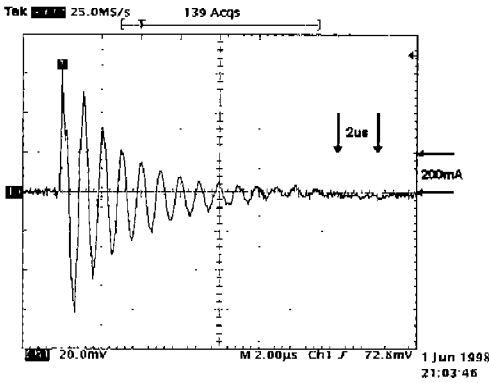
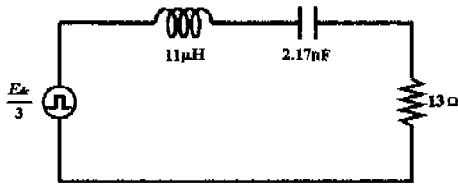


그림 5. 측정된 누설 축전류



$$Z_0 = 71 \Omega, \quad \omega_n/2\pi = 1 \text{ MHz}, \quad \zeta = 0.09$$

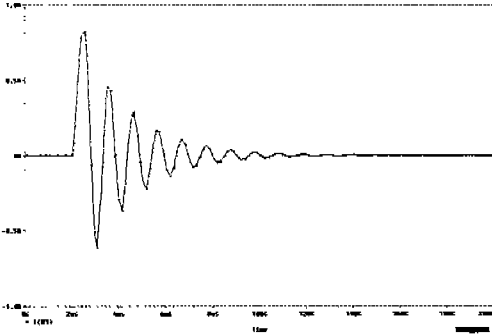


그림 6. 측정된 누설 축전류에 대한 등가회로 및 시뮬레이션 결과

그림 5는 PWM 인버터의 한 상이 스위칭 되었을 때 측정된 누설 축전류 파형을 보여주고 있으며 고정자 권선과 모터 프레임 사이의 부유용량을 통해 흐르는 고주파 누설 축전류가 무시될 수 없음을 보여주고 있다. 여기서 그림 5와 같이 측정된 누설 축전류가 스텝 전압이 하나의 LCR 직렬공진회로에 공급되어진 뒤의 전류파형과 비슷하기 때문에 그림 6와 같이 누설 축전류에 대해 LCR 직렬공진회로 형태의 등가회로를 제안하였다. LCR 직렬공진회로에 스텝 전압이 공급되어지면 공진회로에 흐르는 전류에 대한 방정식은 아래와 같다.

$$i(t) = \frac{E}{\sqrt{1-\zeta^2} Z_0} e^{-\zeta \omega_n t} \sin \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t \quad (4)$$

여기서

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$\zeta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

여기서 ω_n 은 공진주파수, ζ 는 damping factor, Z_0 는 특성임피던스 임. $1 \gg \zeta^2$ 인 경우, 공진회로에 흐르는 전류는

$$i(t) \approx \frac{E}{Z_0} e^{-\zeta \omega_n t} \sin \omega_n t \quad (5)$$

식 (5)로 부터 특성임피던스 Z_0 는 누설 축전류의 피크값을 결정한다는 것을 알 수 있으며 그림 6의 등가회로에 있는 회로 정수들은 측정된 파형으로 부터 추정하였다.

2.3 등가회로 정수

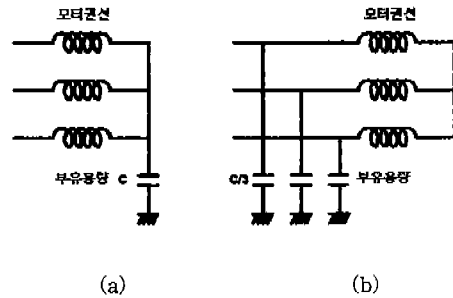


그림 7. 모터의 부유용량 모델

그림 7과 같이 모터내에 부유용량에 대한 2가지 모델을 비교해 보면, 그림 7 (a)의 경우 부유용량을 통해 흐르는 누설 축전류는 모터의 누설 인덕턴스와 권선저항에 의존한다. 반면, 그림 7 (b)의 경우에는 고주파 누설 축전류가 모터 권선에 흐르지 않기 때문에 모터의 누설 인덕턴스와 권선저항 누설 축전류에 영향을 주지 않는다. 이 두가지 모델에 대한 유효성을 검증하기 위해 케이블 인덕턴스를 LCR 메터(HP 4284A)로 측정한 결과 $11\mu\text{H}$ 로 이 값은 측정된 누설 축전류 파형으로 부터 추정한 인덕턴스 근사하다. 따라서 등가회로의 인덕턴스는 모터와 인버터 사이의 케이블 인덕턴스를 의미하고, 모터의 누설 인덕턴스와 권선저항는 누설 축전류에 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 그러므로 그림 7 (b)는 그림 7 (a)보다는 누설 축전류를 해석하는데 더 적당한 모델임을 알 수

있었다. 그리고 모터 프레임과 쇼트된 고정자 권선간의 임피던스 측정을 측정한 결과 캐패시터와 직렬 저항은 측정된 누설 축전류 파형으로 부터 추정한 이득값과 거의 일치하였다.

3. 결 론

본 논문에서 전압형 PWM 인버터로 구동되는 유도기의 고주파 누설 축전류에 대해 논하였고 누설 축전류를 실험 시스템으로 측정하여 이론적인 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 누설 축전류에 대한 등가회로는 하나의 LCR 직렬 공진 회로 형태이다.
- 등가회로에서 C는 고정자 권선과 모터 프레임 간의 부유용량이다.
- 거의 모든 저항성분은 케이블보다는 모터에 있다.
- 모터의 누설 인덕턴스와 권선 저항는 누설 축전류에 영향을 끼치지 않는다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Murai, T. Kubota, and Y. Kawase, "leakage current reduction for a high-frequency carrier inverter feeding an induction motor." IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. 28, PP.858-863, July/Aug. 1992.
- [2] C. R. Paul and K. B. Hardin, "Diagnosis and reduction of conducted noise emissions," IEEE Trans. Electromag. Compat., vol. 30, no.4, PP.553-560, Nov. 1988
- [3] G. Venkataramannan and D. M. Divan, "Pulse width modulation with resonant dc link converters," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 29, PP.113-120, Jan./Feb. 1993.
- [4] I. Suzuki, O. Aizawa, and F. Ishibashi, "Inverter driven variable speed induction motor," Toshiba Rev., vol. 37, no. 3, PP 246-250, 1982.
- [5] T. Nishimura, "Evaluation of low noise in three phase induction motor by employing 20kHz carrier sinusoidal PWM inverter," Elec. Eng. Japan, vol. 107, no. 5, PP.620-627, 1987.