

# 능동형 커먼 모드 전압 감쇄기를 통한 유도 전동기의 고주파 누설전류 억제

류도형\*, 홍순일\*\*, 박성준\*\*\*, 김철우\*  
부산대학교\*, 부경대학교\*\*, 동명대학\*\*\*

## Suppression of high frequency leakage current in PWM Inverter-Fed Induction Motor Drives using Active Common Mode Voltage Damper

Do-Hyung Lyu\*, Soon-Il Hong\*\*, Sung-Jun Park\*\*\*, Cheul-U Kim\*

Pusan National University\*, Pukyung National University\*\*, DongMyung College\*\*\*

### ABSTRACT

This paper propose a "Active common-mode voltage damper circuit" that is capable of a suppression of a common-mode voltage produced in the PWM VSI. The four level half-bridge PWM inverter circuit and common-mode transformer are incorporated into the "Active common-mode voltage damper", the design method of which is presented. Effect of "Active common-mode voltage damper" in this paper verifies a propriety and effectiveness in 2.2[kW] induction motor drive using IGBT inverter. Experimental results show that "common-mode voltage damper" makes contributions to reducing a high frequency leakage current and common-mode voltage.

처에서 EMI 노이즈를 방출할 수 있다. 그래서, AM 라디오 수신기와 의학장비와 같은 전자장비에 악영향을 끼치게 된다.

본 연구에서는 커먼모드 트랜스포머의 2차 권선에 제동 저항<sup>[1]</sup> 대신에 4레벨 half-bridge 인버터를 이용한 능동 보조 회로를 첨가하여 누설 전류의 근원이 되는 커먼 모드 전압을 상쇄하는 "능동형 커먼 모드 전압 감쇄기 (Active common-mode voltage damper)"를 제시한다. 제시된 커먼 모드 전압 감쇄기는 PWM 인버터에 의해서 생기는 커먼 모드 전압과 크기는 동일하지만 반대의 극성을 가지는 보상전압을 생성하게 되고, 그 결과 커먼 모드 전압은 상쇄됨으로 해서 고주파 누설 전류의 억제가 가능하다<sup>[4]</sup>. 이를 실험을 통해 효과적임을 입증한다.

### 1. 서 론

최근 제어기술의 발달로 인해 유도 전동기가 산업용으로 널리 보급되고 있으며 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)와 같은 고속 스위칭 소자의 발달로 인해 전압형 PWM 인버터의 스위칭 주파수 증가가 가능하게 되었다. 이로 인해 매우 우수한 동작 특성을 가지게 되었으나 고속 스위칭시 전압과 전류의 급격한 변화로 인해 다음과 같은 문제점들을 발생하게 되었다.

- 전동기의 고정자 권선과 프레임 사이에 존재하는 부유용량(stray capacitors)을 통하여 접지로 흐르는 고주파 누설전류(high frequency leakage current or common-mode current)<sup>[1]</sup>
- 전도 및 방사 EMI<sup>[2]</sup>
- 베어링 전류와 축전압(shaft voltage)
- 전동기와 변압기의 절연 수명 단축
- AC전원 입력장치(변압기등)에 부착되어 있는 누전 보호 계전기의 오 동작을 유발시킴<sup>[2]</sup>

기생적인 부유용량이 필연적으로 전동기의 내부에 존재하기 때문에, 매 스위칭마다 생기는 전압과 전류의 변화 즉, dv/dt, di/dt는 진동하는 고주파 누설전류를 발생시킨다. 수십 kHz에서 수 MHz의 주파수 범위를 가지고 진동하는 커먼 모드 전류는 자계를 형성할 뿐만 아니라 도

### 2. 고주파 누설전류의 해석 및 억제

#### 2.1 PWM 인버터와 커먼 모드 전압

그림 1은 전압형 PWM 인버터와 유도전동기의 결선을 나타낸 것이다. 여기서 DC-link단 전원의 중성점 p에 대한 PWM 인버터 출력단 전압을 각각  $V_{L1}, V_{L2}, V_{L3}$ 라 하고, Y 결선된 3상 유도전동기의 중성점 n에 대한 각 상전압을  $V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$ 이라 할 때, 커먼 모드 전압은 DC-link단 전원의 중성점 p와 3상 유도전동기의 중성점 n사이의 전위차  $V_{np}$ 로 정의된다. 따라서, 커먼 모드 전압  $V_{np}$ 를 구하기 위해서 PWM 인버터의 6개 스위치 S1~S6 중에서 그림 1과 같이 S1, S5 및 S6이 ON된 상태에서 살펴본다. 유도전동기의 각 상 임피던스를 Z라 하고 DC-link단에서 바라 본 총 부하 임피던스를  $Z_i$ 라 하면  $Z_i$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_i = Z + \frac{Z}{2} = \frac{3}{2}Z \quad (1)$$

DC-link단으로부터 부하에 흐르는 전류  $i$ 와 부하 상 전압  $V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$ 는 각각 식 (2), 식 (3)~(5)와 같다.

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

$$V_{an} = Zi = \frac{2}{3} E_{dc} \quad (3)$$

$$V_{bn} = -\frac{1}{2} Zi = -\frac{1}{3} E_{dc} \quad (4)$$

$$V_{cn} = -\frac{1}{2} Zi = -\frac{1}{3} E_{dc} \quad (5)$$

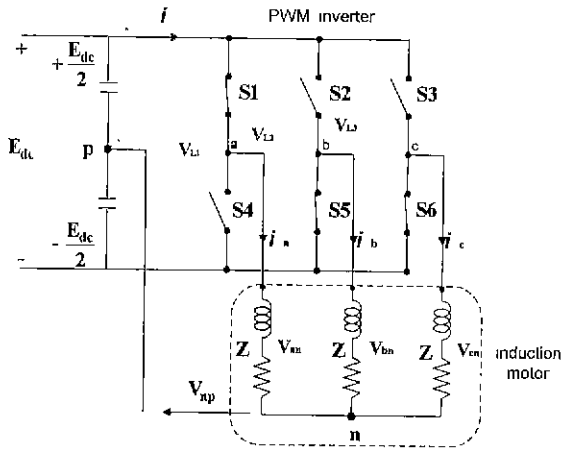


그림 1 전압형 PWM 인버터와 유도전동기  
Fig. 1 PWM voltage source inverter and induction motor

또한 인버터 출력 상전압  $V_{L1}, V_{L2}, V_{L3}$  는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{L1} &= +\frac{E_{dc}}{2}, & V_{L2} &= -\frac{E_{dc}}{2} \\ V_{L3} &= -\frac{E_{dc}}{2} \end{aligned} \quad (6)$$

부하 중성점 n을 기준으로 3상 전류의 합은 0 이므로 커먼 모드 전압  $V_{np}$ 는 식 (9)와 같이 구해진다.

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (7)$$

$$\frac{V_{L1} - V_{np}}{Z} + \frac{V_{L2} - V_{np}}{Z} + \frac{V_{L3} - V_{np}}{Z} = 0 \quad (8)$$

$$\therefore V_{np} = \frac{1}{3} (V_{L1} + V_{L2} + V_{L3}) \quad (9)$$

식 (9)는 단지 PWM 인버터의 스위칭 상태가 부하 임피던스와 상관없이 커먼 모드 전압을 결정함을 보여준다.

그림 2는 PWM 인버터의 스위칭 상태에 따른 생성 커먼 모드 전압을 각각의 경우에 대하여 나타낸 것으로, 매번 스위칭을 할 때마다  $\frac{E_{dc}}{3}$ 의 크기를 가지고 스텝 형태로 변화함을 알 수 있다.

## 2.2 커먼 모드 전압과 고주파 누설전류의 관계

PWM 인버터에서 매 스위칭 순간마다 커먼 모드 전압이 DC-link 전압의 1/3 크기로 스텝적으로 변화하기 때문에 고주파 성분의 누설전류는 유도전동기 내의 고정자 권선과 프레임 사이에 존재하는 부유용량( $C_s$ )을 통해 접지로 흐르게 된다.

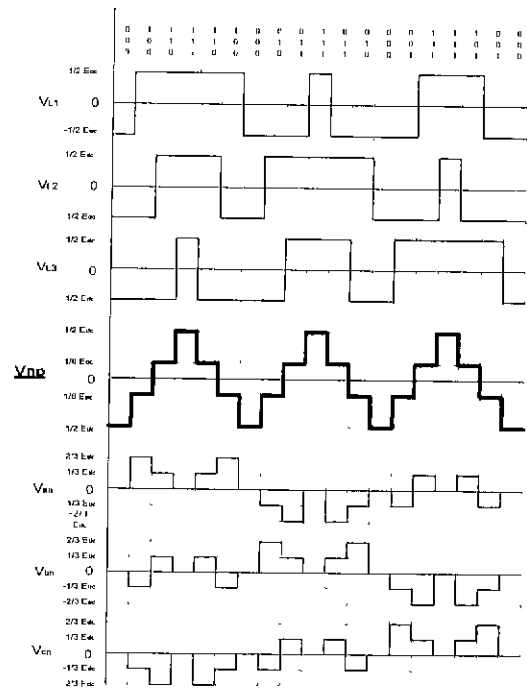


그림 2 PWM 인버터의 스위칭 상태에 따른 생성 커먼 모드 전압 및 3상 전압 파형

Fig. 2 Common-mode voltage and three-phase voltage waveforms according to switching states of PWM inverter

실제 측정 파형인 그림 3에서와 같이 커먼 모드 전압은 4가지 레벨( $\pm 1/2 E_{dc}, \pm 1/6 E_{dc}$ )을 가지고, 스텝적인 변화마다 고주파 성분의 누설전류가 발생한다. 그리고 이때 발생한 전류는 LCR 직렬공진 회로에 스텝전압이 인가되었을 때 발생하는 감쇄 공진 전류와 유사한 형태임을 알 수 있다.

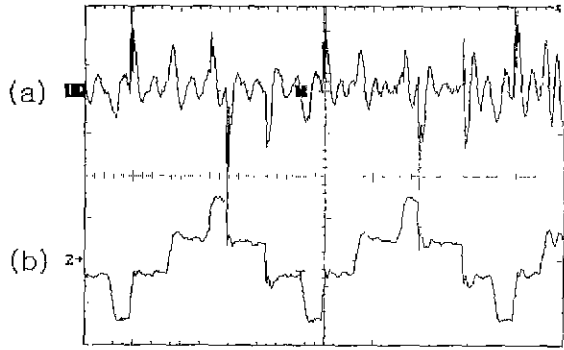


그림 3 실측파형: 50[ $\mu$ s/div]  
 (a) 고주파 누설전류: 50[mA/div]  
 (b) 커먼 모드 전압: 100[V/div]  
**Fig. 3** Measured waveforms: 50[ $\mu$ s/div]  
 (a) high frequency leakage current: 50[mA/div]  
 (b) common-mode voltage: 100[V/div]

### 2.3 능동형 커먼 모드 전압 감쇄기

#### 2.3.1 능동형 전압 감쇄기의 원리

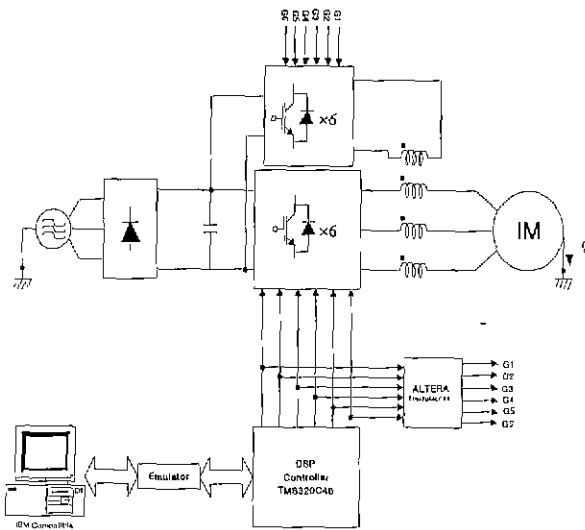


그림 4 실험 시스템의 구성  
**Fig. 4** System configuration

그림 4는 능동형 커먼 모드 전압 감쇄기를 포함하는 실험 시스템의 회로도이다. IGBT를 이용하는 전압형 PWM 인버터가 세 개의 케이블을 통하여 2.2[kW]의 유도전동기를 구동하고, 전동기의 외함은 접지 단자에 접속되어 있다. 커먼 모드 전압 감쇄기는 인버터 출력 단자와 세 개의 케이블 사이에 접속되며 다음의 요소로 구성된다.

- 3상 인버터의 스위칭 신호에 동기된 구동신호를 가지고 동작되는 IGBT를 이용한 4 레벨 half-bridge 인버터 회로
- 1:1의 커먼 모드 트랜스포머

- 3상 인버터의 신호를 조합해서 4 레벨 half-bridge의 스위칭 신호를 생성하는 EPLD

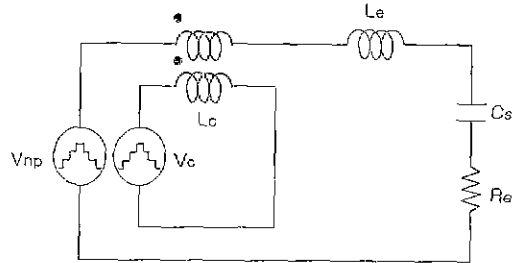


그림 5 능동형 커먼 모드 전압 감쇄기의 등가회로  
**Fig. 5** Equivalent circuit of Active common-mode voltage damper

그림 5는 실험 시스템에서 커먼 모드 전압 감쇄에 대한 등가회로를 보여준다. 여기서,  $C_s, R_e$ 는 전동기의 고정자 권선과 프레임 사이의 등가 부유용량과 등가 직렬저항을 의미하고,  $L_e$ 는 케이블의 인덕턴스를 나타낸다. 능동형 커먼모드 전압 감쇄기는 인버터의 스위칭 신호와 동기 되어 커먼모드 전압과 크기는 동일하지만 반대의 극성을 가지는 보상전압 ( $V_c$ )을 생성하여 커먼모드 트랜스포머 1차측에 인가되므로 커먼모드 전압을 상쇄한다. 따라서 고주파 누설전류는 억제된다.

#### 2.3.2 4 레벨 half-bridge 인버터를 이용한 보상 전압의 생성

그림 6이 제안한 4레벨 half-bridge 인버터이다. 커먼 모드 전압 레벨 ( $\pm 1/2 E_{dc}, \pm 1/6 E_{dc}$ )을 만들기 위한 C에 병렬로 연결된 저항 R는 전압레벨의 확보와 C에 충전 전류를 제공하는 역할을 한다.

여기에 인가되는 스위칭 신호는 3상 인버터를 구동하기 위해 인가되는 PWM 스위칭 상태에 따라서 생기는 4 레벨의 커먼 모드 전압에 대해 레벨이 동기화 되도록 신호를 생성한다.

그림 7이 half-bridge 인버터의 스위칭 신호이다. 여기서 G3, G6 스위칭 신호는 커먼모드 전압 레벨이 정(+)과 부(-)로 변화시  $L_c$ 에 축적된 에너지의 wheeling 경로를 만들어주기 위한 것으로 3상 인버터에서 암 단락 (arm-short) 방지를 위한 dead-time ( $T_{dead}$ )만큼 각각 G2, G4보다 앞서서 ON된다. 이는 3상 인버터를 구동하기 위한 6개의 신호 중 윗단 세 신호와 아랫단 세 신호를 조합하여 생성한다 따라서 4레벨 half-bridge 인버터의 윗단과 아랫단의 dead-time도 부가적인 소프트웨어 나 하드웨어 없이 생성된다.

실험에서 4레벨 half-bridge 인버터의 스위칭 신호는 ALTERA EP7064LC84-7을 이용하여 EPLD로 구현하였다.

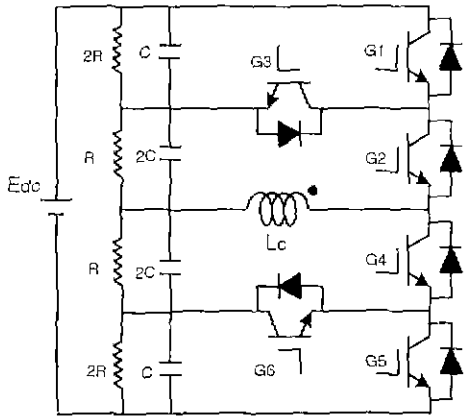


그림 6 제안한 4 레벨 half-bridge 인버터의 회로도  
**Fig. 6** Proposed 4 level half-bridge inverter circuit diagram

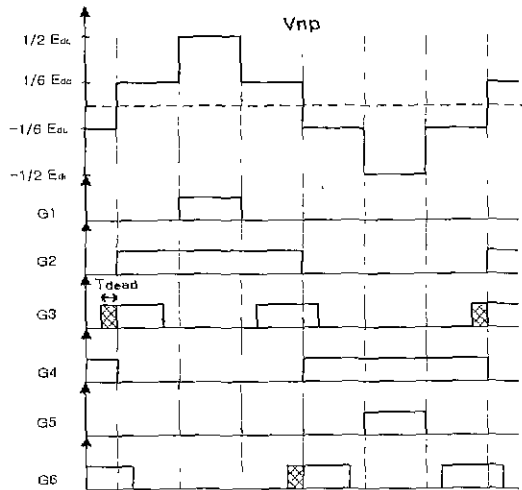


그림 7 4레벨 half-bridge 인버터의 스위칭 신호  
**Fig. 7** Switching signals of the four level half-bridge inverter switching signals

표 1. 커먼모드 트랜스포머 제작에 사용된 코어 사양  
**Table 1.** Specification of toroidal ferrite core

모델명	ZW-47313-TC	MAGNETICS
$A_e$	212	mm <sup>2</sup>
$I_e$	165	mm
$AL$	$16.28 \pm 20\%$	$\mu\text{H}/\text{N}^2$
$W_t$	177	g
$B_s$	430(25°C에서)	mT
	250(100°C에서)	mT

### 2.3.3 커먼모드 트랜스포머의 설계

커먼모드 트랜스포머를 제작하기 위해 페라이트 재질

의 트로이달 코어를 사용하였으며, 그 사양은 표 1과 같다.

코어가 자기적으로 포화되지 않을 최대 자속 밀도 ( $B_{\max}$ )는 식 (10)과 같다.

$$B_{\max} = \frac{(E_{dc}/2)(T/4)}{k \cdot A_e \cdot N} \quad (10)$$

여기서  $A_e$ 는 코어의 유효 단면적,  $E_{dc}$ 는 DC-link 전압의 크기,  $T$ 는 스위칭 주기,  $k$ 는 적층한 코어의 개수이며 그 정수는  $k=5$ ,  $T=200[\mu\text{s}] = 5[\text{kHz}]$ ,  $E_{dc}=300[\text{V}]$  이다. 식 (10)으로부터 코어의 자기적 포화를 방지하기 위한 권수를 계산하면 식 (11)과 같다.

$$N > \frac{(E_{dc}/2)(T/4)}{k \cdot A_e \cdot B_{\max}} \cong 29[\text{turns}] \quad (11)$$

실험에서는 마진을 고려하여  $N=33[\text{turns}]$ 로 하였다. 위의 정수를 식 (10)에 대입하면  $B_{\max} = 214[\text{mT}]$ 이므로 설계된 코어는 자기 포화 조건을 만족한다.

### 2.4 실험결과

실험 파라미터는 커먼모드 트랜스포머 설계 정수이며 3[hp] 유도 전동기에 적용하였다. 그림 8은 능동형 커먼모드 전압 감쇄기를 부착할 경우와 부착하지 않을 경우 커먼모드 전압과 고주파 누설전류를 비교한 실험 파형이다. 그림 9는 능동형 커먼 모드 전압 감쇄기에서 생성된 보상전압의 파형이다.

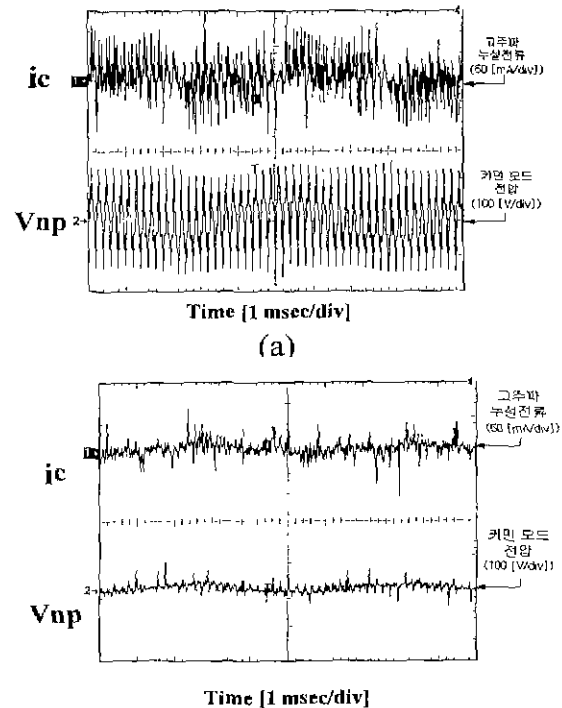


그림 8 능동형 커먼 모드 전압 감쇄기 부가 전(a)과 부가 후(b)의 실험 파형

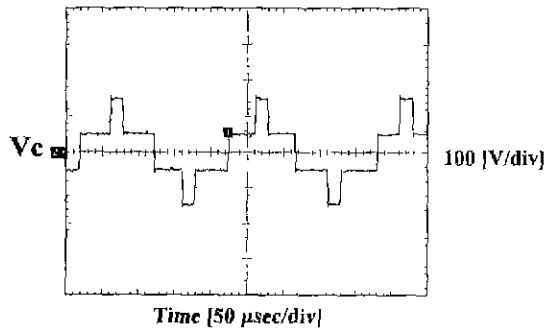


그림 9 능동형 커먼모드 전압감쇄기의 보상전압

### 3. 결론

본 연구에서 PWM 인버터에 의해 생성된 커먼모드 전압과 고주파 누설전류를 저감시킬 수 있는 능동형 커먼 모드 전압 감쇄기를 제시하였다. 완전한 상쇄는 되지 못했는데 이는 완전히 스텝적 4 레벨인 보상전압과 왜형적인 스텝변화 4 레벨형인 생성 커먼 모드 전압사이의 차 부분이 남은 것이다. 그러나 실험을 통해서 제시한 방식이 PWM 인버터를 이용한 유도전동기 구동에 있어서, 커먼모드 전압의 감쇄로 고주파 누설전류를 매우 효과적으로 억제함을 보여준다.

### 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. on Industry Applications, Vol.28, No.4, pp.858-863, 1992
- [2] McDonald, Gray, "PWM Drive Related Bearing Failures", IEEE Industry Applications Magazine, July/August, 1999
- [3] S.Ogasawara, H.Ayano and H.Akagi, "Measurement and Reduction of EMI Radiated by a PWM Inverter-Fed AC Motor Drive System." IEEE/IAS Annual Meeting. pp1072-1079, 1996
- [4] S.Ogasawara, H.Ayano and H.Akagi, "An Active Circuit for cancellation Common Mode Voltage Generated by a PWM Inverter", IEEE PESC Conference Record., pp.1547-1553, 1997