

새로운 능동형 커먼 모드 전압 감쇄기를 이용한 고주파 누설전류 억제

구정희, 빈재구, 박성준*, 김철우
부산대학교, 동명대학*

The suppression of high frequency leakage current using a new active Common Mode Voltage Damper

Jeong-Hoi Gu, Jae-Goo Bin, Sung-Jun Park*, Cheul-U Kim
Pusan National University, TongMyong college*

ABSTRACT

This paper propose a new active common-mode voltage damper circuit that is capable of suppressing a common-mode voltage produced in the PWM VSI. The new active common mode voltage damper is consisted of a half-bridge inverter and a common mode transformer with a blocking capacitor. Principle of the active common mode damper is as follow; by applying the compensation voltage which has the same amplitude and opposite polarity to the PWM inverter system. So, common mode voltage and high frequency leakage current can be reduced. Simulated and experimental results show that common-mode voltage damper makes contributions to reducing a high frequency leakage current and common-mode voltage.

1. 서 론

PWM 인버터에 의하여 구동되는 유도전동기는 정현파의 전압과 전류를 얻기 위해서 높은 스위칭 주파수를 필요로 하며, 이 스위칭 동작이 일어 나는 순간마다 전압과 전류는 급격한 변화를 일으키게 된다. 즉 매 스위칭 시마다 di/dt 및 dv/dt 가 매우 크기 때문에 무시할 수 없는 양의 고주파 누설전류(high frequency leakage current)가 발생하게 된다.

이 고주파 누설전류는 DC-Link단 전원의 중성점과 3상 Y결선된 유도전동기 교류전압 중성점 간의 전압차로 정의되는 커먼 모드 전압(Common mode voltage)이 DC-Link단 전압의 1/3크기를 가지고 스태프 형태로 변화하기 때문에 생성되는 전류로써 유도전동기의 외함(frame)과 고정자 권선 사이에 필연적으로 존재하는 기생 커패시터(stray capacitor)를 통해 유도 전동기의 접지 도체로 흐르게 된다. 이런 고주파 누설전류는 유도전

동기의 절연파괴, 누전 차단기의 오동작, 전도 및 방사 등의 악영향을 주게 된다.

이런 고주파 누설전류를 저감하기 위한 기존의 연구 방법들은 크게 커먼 모드 트랜스포머를 사용하는 방법^[1]과 스위칭 패턴의 변형에 의한 방법^[2]들이 있으며 첫 번째 방식은 고주파 누설전류를 효과적으로 저감할 수 있는 장점은 있지만 부가적인 하드웨어의 부피가 커진다는 단점이 있다. 스위칭 패턴의 변형에 의한 방법은 부가적인 하드웨어의 도움없이 소프트웨어에 의해 고주파 누설전류를 저감시킬 수 있지만 그 효과가 영전압 벡터구간에 제한된다는 단점을 갖는다. 따라서 본 논문에서는 그 저감 효과를 최대화하기 위해 커먼 모드 트랜스포머의 방법을 도입하면서 그 하드웨어의 부피를 최소화 할 수 있는 새로운 형태의 능동형 커먼 모드 전압 감쇄기를 제시하였다. 능동형 커먼 모드 전압 감쇄기는 4레벨 반파 하프브릿지 인버터에 의해 커먼 모드 전압과 크기가 같고 극성이 반대인 보상전압을 커먼 모드 트랜스포머에 인가함으로써 누설전류의 원인이 되는 커먼 모드 전압을 상쇄시키게 된다.

제안한 능동형 커먼 모드 전압감쇄기를 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증해 보였다.

2. 커먼모드전압 및 고주파 누설전류

2.1 PWM 인버터와 커먼 모드 전압

그림 1과 같이 연결된 PWM 인버터와 유도 전동기 시스템에서 커먼 모드 전압은 DC-link단 전원의 중성점 p와 3상 유도 전동기의 중성점 n사이의 전위차 V_{np} 로 정의되며, 수식적으로 나타내면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

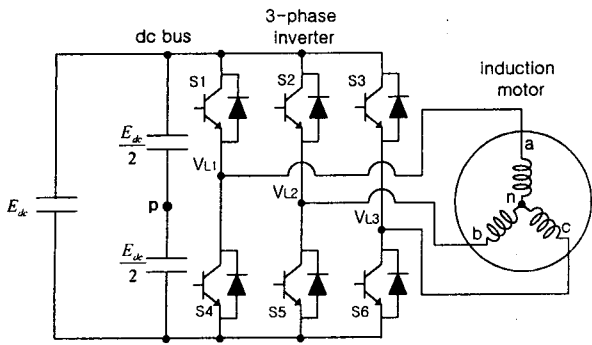


그림 1 전압형 PWM 인버터와 유도전동기
Fig. 1 PWM voltage source inverter and induction motor

표 1 PWM 인버터 스위칭 상태에 따라서 생성된 커먼 모드 전압
Table 1 Common mode voltage according to switching pattern of VSI

VSI의 스위칭 패턴			인버터 출력단 전압			커먼 모드 전압
S1	S2	S3	V_{L1}	V_{L2}	V_{L3}	
0	0	0	$-\frac{E_{dc}}{2}$	$-\frac{E_{dc}}{2}$	$-\frac{E_{dc}}{2}$	$-\frac{E_{dc}}{2}$
0	0	1	$-\frac{E_{dc}}{2}$	$-\frac{E_{dc}}{2}$	$\frac{E_{dc}}{2}$	$-\frac{E_{dc}}{6}$
0	1	1	$-\frac{E_{dc}}{2}$	$\frac{E_{dc}}{2}$	$\frac{E_{dc}}{2}$	$\frac{E_{dc}}{6}$
0	1	0	$-\frac{E_{dc}}{2}$	$\frac{E_{dc}}{2}$	$-\frac{E_{dc}}{2}$	$-\frac{E_{dc}}{6}$
1	1	0	$\frac{E_{dc}}{2}$	$\frac{E_{dc}}{2}$	$-\frac{E_{dc}}{2}$	$\frac{E_{dc}}{6}$
1	0	0	$\frac{E_{dc}}{2}$	$-\frac{E_{dc}}{2}$	$-\frac{E_{dc}}{2}$	$-\frac{E_{dc}}{6}$
1	0	1	$\frac{E_{dc}}{2}$	$-\frac{E_{dc}}{2}$	$\frac{E_{dc}}{2}$	$\frac{E_{dc}}{6}$
1	1	1	$\frac{E_{dc}}{2}$	$\frac{E_{dc}}{2}$	$\frac{E_{dc}}{2}$	$\frac{E_{dc}}{2}$

식 (1)에 나타난 바와 같이 커먼 모드 전압은 부하의 임피던스와는 상관없이 인버터 측의 스위칭 상태에 따라 결정됨을 알 수 있다. 표 1은 커먼 모드 전압을 SVPWM(space vector PWM)의 8가지 전압벡터에 대하여 나타낸 것이다.

이와 같이 PWM 인버터의 스위칭 상태에 따라서 생성된 커먼 모드 전압은 4개의 전압 레벨 ($\pm 1/2 E_{dc}$, $\pm 1/6 E_{dc}$)을 가지며, 매번 스위칭이 일어날 때마다 $|\frac{E_{dc}}{3}|$ 의 크기를 가지고 스텝 형태로 변화함을 알 수 있다.

2.2 고주파 누설전류

고주파 누설전류는 크게 차동 모드에 의한 누설전류와

커먼 모드에 의한 누설전류로 나누어 진다.

차동 모드 전류는 전동기 시스템의 선간 전압의 dv/dt 에 의해 발생된 고주파 전류는 DC버스 커패시터를 통해 대부분 공급되며 DC버스 커패시터가 공급하지 못하는 고주파의 전류가 그림과 같은 경로를 통해 흐르게 되며, 커먼 모드 전류는 PWM 인버터에서 매 스위칭 순간마다 커먼 모드 전압이 DC-link 전압의 1/3 크기로 스텝적으로 변화하면서 고정자 권선과 프레임 사이에 존재하는 부유용량(C_s)을 충전시킴으로써 펄스성의 고주파 누설전류가 접지를 통해 흐르게 된다.

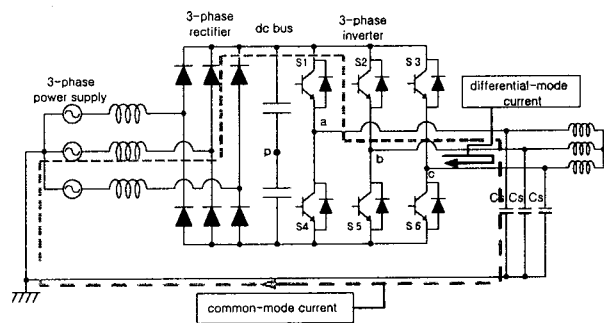


그림 2 고주파 누설전류의 경로
Fig. 2 High frequency leakage currents path

2.3 능동형 커먼 모드 전압 감쇄기

2.3.1 능동형 전압 감쇄기의 원리

그림 3은 새롭게 제안한 능동형 커먼 모드 전압 감쇄기를 포함하는 실제 시스템의 회로도이다.

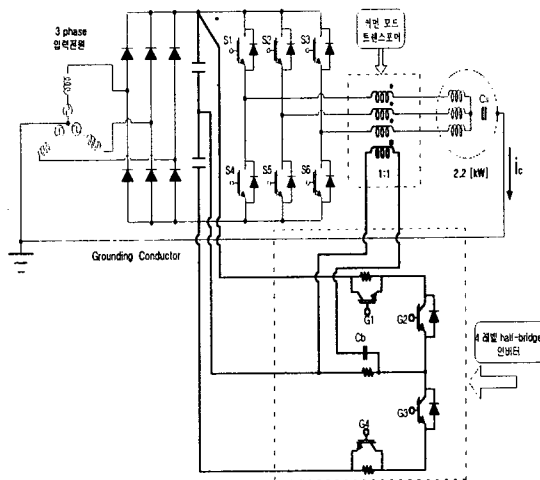


그림 3 제안한 능동형 전압감쇄기가 부착된 전체 시스템
Fig. 3 Overall system circuit with proposed active common mode voltage canceller

그림 3에 나타난 바와 같이 커먼 모드 전압 감쇄기는 인버터 출력 단자와 세 개의 케이블 사이에 접속되며 다음과 같은 요소로 구성되어 있다.

- 3상 인버터의 스위칭 신호에 동기된 구동신호를 가지고 동작되는 IGBT를 이용한 4 레벨 반파 브릿지 인버터 회로
- 커먼 모드 트랜스포머 (브로킹 커패시터 포함)
- 3상 인버터의 신호를 조합해서 4 레벨 half-bridge의 스위칭 신호를 생성하는 EPLD

능동형 커먼모드 전압 감쇄기의 원리는 인버터의 스위칭 신호와 동기되어 4레벨 반파 브릿지를 동작시켜 크기가 같고 극성이 반대인 보상전압을 생성하여 커먼 모드 트랜스포머를 통해 인가하므로써 커먼모드 전압을 상쇄할 수 있게 된다.

2.3.2 4레벨 반파 브릿지 인버터를 이용한 보상 전압의 생성

그림 4는 제안한 4레벨 반파 브릿지 인버터이며, EPLD(Erasable Programmable Logic Device)를 통해 동기화된 스위칭 신호에 의해서 커먼 모드 전압 레벨 ($\pm 1/2 E_{dc}$, $\pm 1/6 E_{dc}$)을 생성하게 된다.

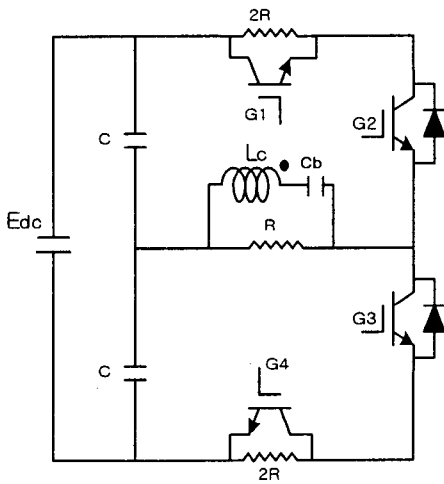


그림 4 제안한 4 레벨 half-bridge 인버터의 회로도
Fig. 4 The proposed 4 level half-bridge inverter circuit diagram

커먼 모드 전압 레벨을 만들기 위한 기존의 회로도들 보다 간략하게 구성하였으며, 3상 인버터 및 단상 4레벨 반파 브릿지 인버터의 dc-link단을 하나의 소스로 공유하면서 시스템의 부피를 최소화 시켰다. 또한 커먼 모드 트랜스포머의 편여자 현상으로 인한 자기포화를 방지하기 위해서 브로킹 커패시터(Cb)를 삽입하여 커먼 모드 트랜스포머의 부담을 감소시키면서 회로의 안정성을 확보하였다.

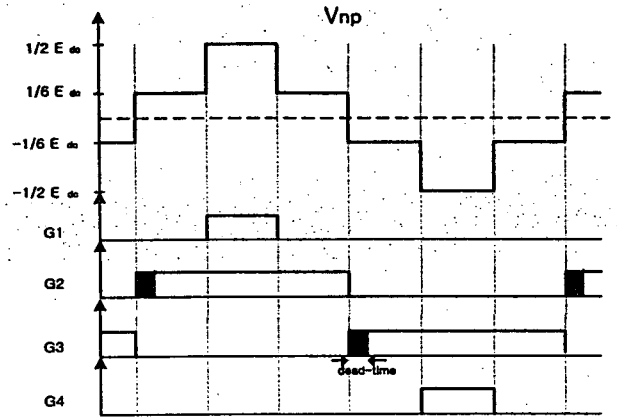


그림 5 4레벨 half-bridge 인버터의 스위칭 신호
Fig. 5 Input switching signals of the level half-bridge inverter

그림 5는 제안한 4레벨 반파 브릿지 인버터를 통해 커먼 모드 전압과 크기는 같고 극성이 반대인 전압을 만들기 위해 회로에 인가하는 스위칭 패턴을 그림으로 나타낸 것이다. 그림 5에 나타난 바와 같이 스위치 G2, G3사이에는 암단락을 방지하기 위해서 데드타임(dead-time)이 존재하게 된다. 데드타임 구간 동안에는 스위치 G2, G3에 있는 스너버회로를 통해 커먼 모드 전압을 보상하게 된다. 이 스위칭 신호에 따른 등가회로 및 생성되는 보상전압의 크기가 그림 6과 같이 나타내어진다.

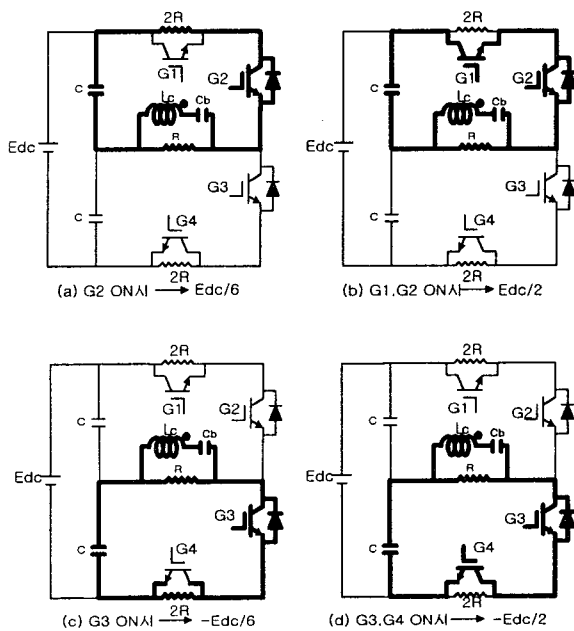
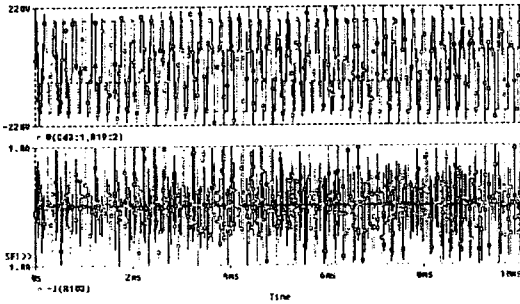
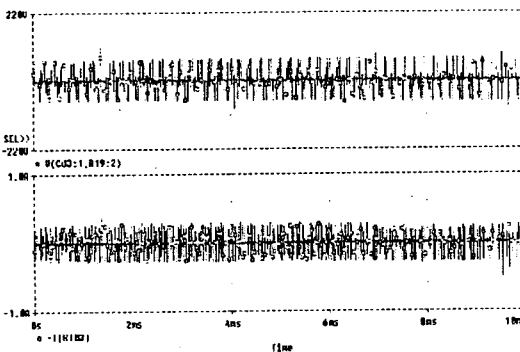


그림 6 스위칭 상태에 따른 등가회로 및 보상전압의 크기
Fig. 6 Equivalent circuit and amplitude of compensation voltage according to switching signals.

2.4 시뮬레이션 및 실험결과



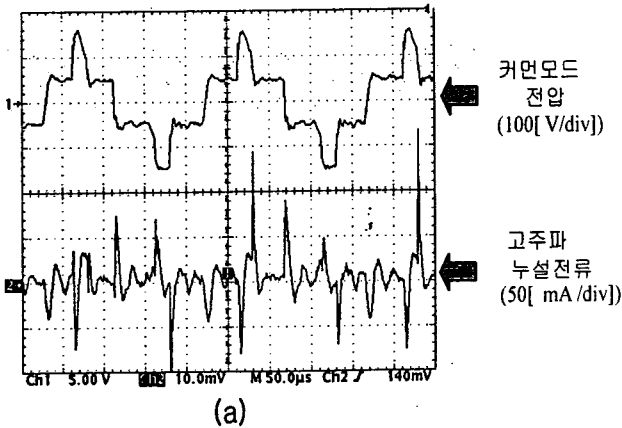
(a) 능동형 커먼 모드 전압 감쇄기로 보상 전
(a) Simulation waveform without common-mode damper



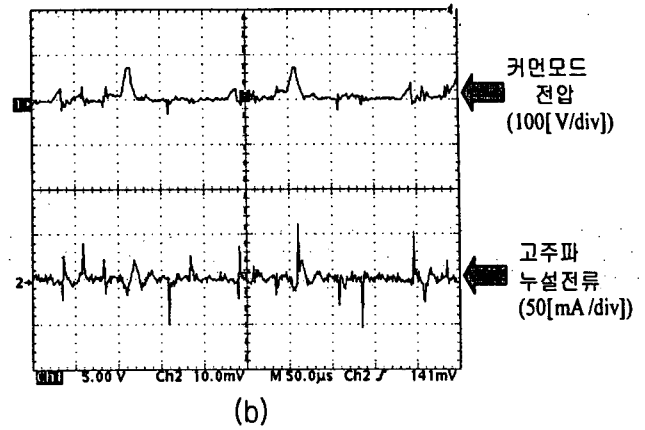
(b) 능동형 커먼 모드 전압 감쇄기로 보상 후
(b) Simulation waveform with common-mode damper

그림 7 시뮬레이션 파형
Fig. 7 Simulation waveforms

그림 7은 능동형 커먼 모드 전압 감쇄기로 보상하기 전과 보상 후를 비교한 시뮬레이션 파형이며 그림 8은 2.2[kw] 유도 전동기에서 DC-Link 전압이 300[V]인 경우에 대해 능동형 커먼 모드 전압 감쇄기를 부가하기 전 (a)과 부가한 후 (b)의 실험 파형이다



(a)



(b)

그림 8 실험 파형

(a) 전압감쇄기 부가전

(b) 전압감쇄기 부가후 : 1[ms/div]

Fig. 8 High frequency leakage current and common mode voltage waveforms without common-mode voltage damper (a) and with it (b): 1[ms/div]

3. 결론

본 논문에서는 고주파 누설전류의 원인이 되는 커먼 모드 전압을 상쇄시킬 수 있는 새로운 형태의 능동형 커먼 모드 전압감쇄기를 제시하였다. 전체적인 하드웨어의 부피를 최소화 할 수 있는 간략화 된 4레벨 반파브릿지 인버터회로 및 브로킹 커패시터에 의한 커먼 모드 트랜스포머의 자기포화 방지를 통해 회로의 안정성을 확보하였다. 시뮬레이션 및 실험을 통해서 제안한 능동형 커먼 모드 전압 감쇄기에 의한 커먼 모드 전압 및 고주파 누설전류가 효과적으로 저감됨을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Y. Xang, "A Novel Active Common-mode voltage Compensator (ACCom) For Bearing Current Reduction of PWM VSI-Fed Induction Motors", APEC'98 Conf. Pro., Vol. 2, pp. 1003~1009, 1998.
- [2] Oriti, G., Julian, A.L., Lipo, T.A. "A new space vector modulation strategy for common mode voltage reduction" Power Electronics Specialists Conference, 1997. PESC '97 Record., 28th Annual IEEE Vol. 2, pp. 1541~1546, 1997.
- [3] Byong-Mo Sung, Do-Hyung Lyu, Sung-Jun Park, Cheul-U Kim, "A Study on the Reduction of high frequency leakage current in PWM inverter fed induction Motor" Transactions of KIEPE vol. 5, no. 5, pp. 443~450, October, 2000.