

능동보조회로를 이용한 전압형 PWM 인버터 시스템에서의 커먼 모드전압과 고주파 누설전류 억제방법에 관한 연구

전진휘, 박성준**, 김광태*, 김철우
거제대학교**, 부산정보대학교*, 부산대학교

Reduction of common mode voltage and high frequency leakage current generated by the PWM voltage source inverter using common mode voltage damper

Jin-whi Jun, Sung-Jun Park*, Kwang-Tae Kim, Cheul-U Kim
Pusan National University, Koeje college*

Abstract

This paper propose a "common mode voltage damper" that is capable of reducing the common mode voltage produced in the PWM VSI. An push-pull circuits and high frequency leakage current damper[1] are incorporated into the "common mode volatge damper", the design method of which is presented. Effect of "common mode voltage damper" is simulated in this paper verifies the viability and effectiveness in 2.2kW induction motor drive using IGBT inverter. Simulated results show that "common mode voltage damper" makes significant contributions to reducing a high frequency leakage current.

1. 서론

IGBT와 같은 고속 스위칭 소자의 발달로 인해 전압형 PWM 인버터의 스위칭 주파수의 증가가 가능하게 됐으며, 그로 인해 매우 우수한 동작 특성을 가지게 되었다. 그러나, 고속 스위칭은 전압과 전류의 급격한 변화로 인해 초래되는 다음과 같은 문제들을 발생시킬 수 있다.

- 모터 내부의 부유용량(straty capacitance)를 통하여 대지로 흐르는 고주파 누설전류(high frequency leakage current, ground current) [2]
- 전도 및 방사 EMI [3]
- 베어링 전류와 축전압(shaft voltage) [4]
- 전동기와 변압기의 절연 수명 단축[5]

기생적인 부유용량이 필연적으로 전동기의 내부에 존재하기 때문에, 매 스위칭마다 고속 스위칭에 의해서 생기는 전압과 전류의 변화는 진동하는 커먼모드 전류(common mode current)를 발생시킨다. 수십 kHz에서 수 MHz의 주파수 범위를 가지고 진동하는 전류는 자계를 형성할 뿐만 아니라 도처에서 EMI 노이즈를 방출할 수 있다. 그래서, AM라디오 수신기와 의학장비와 같은 전자장비에 악영향을 끼치게 된다.[2]

일반적으로 사용되는 커먼모드쇼크(common-mode choke)와 EMI 필터는 이러한 문제를 완벽하게 해결할 수 없다. [1]에서 저항에 의해 단락된 추가적인 권선을 가지는 누설전류 감쇄기를 제안했는데 이는 감쇄공진전류 형태의 누설 전류를 효율적으로 제한할 수 있다. 그래서, 본 연구에서는 누설전류감쇄기의 2차권선에 제동저항 대신에 능동보조회로를 첨가해서, 누설전류의 근원이 되는 커먼모드전압을 상쇄하는 효과를 가지는 "커먼모드전압 감쇄기(common mode voltage damper)"를 제시한다.

제시된 커먼모드전압 감쇄기는 PWM 인버터에 의해서 생기는 커먼모드전압과 크기는 동일하지만 반대의 극성을 가지는 보상전압을 생성하게 되고, 그 결과 커먼모드 전압은 상쇄됨으로 해서 고주파 누설 전류의 억제가 가능하다. 이 논문에서 제시된 커먼모

드전압감쇄기는 IGBT를 이용하는 2.2kW 유도전동기의 구동에서 발생하는 고주파 누설전류(즉, ground current)를 효율적으로 감소시킴을 알 수 있다.

2. 커먼모드전압 감쇄기의 원리

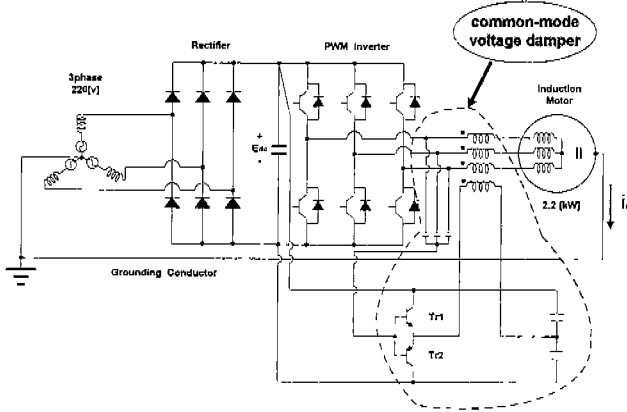


그림1. 실험시스템의 구성

그림1은 제시된 커먼모드전압감쇄기를 포함하는 실험 시스템의 모습이다. IGBT를 이용하는 전압형 PWM 인버터가 세 개의 케이블을 통하여 2.2kW의 유도전동기를 구동하고, 전동기의 외함은 접지 단자에 접속되어 있다. 커먼모드전압 감쇄기는 인버터 출력 단자와 세 개의 케이블 사이에 접속되며, 다음의 요소로 구성된다.

- 전력용 트랜지스터를 이용한 푸시풀 증폭회로
- 커먼모드전류 감쇄기[1],
- 인버터 출력단에 나타나는 커먼모드 전압을 검출하는 세 개의 커패시터.
- 두 개의 dc측 커패시터.

인버터의 커먼모드전압은 매 스위칭마다 $1/3 E_{dc}$ 의 크기로 변하기 때문에, 커먼모드전류 i_c 는 전동기의 권선과 외함 사이의 부유 용량(Stray capacitance)을 통하여 접지단자를 통해 흐른다.

커먼모드전압감쇄기의 목적은 고주파 누설전류의 근원이 되는 커먼모드전압을 상쇄함으로써, 고주파 누설전류는 흐르지 않도록 하는 것이다.(즉, $i_c=0$ 가 되도록 하는 것이다.)

그림 2는 실험 시스템과 등가인 커먼모드에 대한 등가 회로를 보여준다. 여기에서, C_c , R_c 는 전동기 권선과 외함 사이의 등가 부유용량과 저항을 의미하

고, 인덕턴스는 케이블의 L_c 를 나타낸다[1]. 등가회로에서, 인버터의 스위칭 동작은 커먼모드전압이 dc 링크 전압의 1/3의 크기만큼의 스텝변화 하는 원인이 되기 때문에, 전압형 인버터는 스텝적으로 변화하는 전압원(v_{inv})로 모델링 된다. 만약, 커먼모드전압 감쇄기가 연결되어 있지 않다면, 진동하는 고주파 누설전류 i_c 가 흐르게 한다.

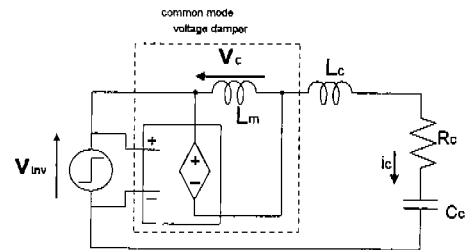


그림2. 등가회로

커먼모드전압감쇄기는 종속전압원(Voltage Controlled Voltage Source)과 인덕터의 조합으로, 점선부분에 해당한다. 커먼모드 전압 검출을 위한 3개의 커패시터와 푸시풀회로 구성된 능동보조회로는 다음의 특성을 가지므로 종속전압원으로 될 수 있다.

; 단위이득에 가까운 전압이득, 높은 입력 임피던스, 낮은 출력 임피던스.

누설전류감쇄기 부분은 부가적 권선(2차 권선)이 결합된 것을 제외하고는 기존의 커먼모드쇼크와 동일하다. 그러므로, 누설전류 감쇄기는 등가회로에서 누설 인덕턴스를 무시하고, 자화 인덕턴스 L_m 으로 표현된다.

그림 1에서 Y결선 된 커패시터의 목적은 인버터에 의해 발생하는 커먼모드 전압을 검출하기 위해서이다. 푸시풀회로에는 누설전류감쇄기에서 검출된 전압과 동일한 전압이 인가된다. 그림1의 점(dot)에 의해 나타내진 극성을 가지는 누설전류 감쇄기의 세 개의 1차측 권선은 인버터의 출력단자와 전동기 사이에 결합된다. 그러므로, 보상 전압 v_c 의 극성은 인버터에 의해 생성된 커먼모드 전압과 반대가 되어, 결과적으로, 커먼모드 전압이 상쇄된다. 그러므로, 커먼모드 전류는 흐르지 않게 된다.

3. 커먼모드전압감쇄기의 설계조건

(가) 최대 자화전류의 제한

그림 2에서의 종속전압원은 다음의 특성을 요구된다.

- 수 MHz에 이르는 넓은 주파수 대역폭
- 보상전압에 대한 출력전류의 어떠한 영향이라도 제거하기 위한 낮은 출력 임피던스
- C_1 의 커패시턴스를 최소화하기 위한 높은 입력 임피던스
- 1에 가까운 입. 출력 전압 이득

전력용 트랜지스터로 구성된 푸시풀 회로는 위의 조건들을 만족하고, 그래서 커먼모드 전압 감쇄기의 보조회로에 적합한 회로이다.

만약, 그림2에서의 L_m 이 무한히 크다면, 자화전류는 '0'이 된다. 그래서, 종속전압원으로 표기된 보조회로에서의 트랜지스터에서는 전력 손실이 발생하지 않는다. 하지만, 실제적으로는 사용되는 코어의 크기를 고려하면 L_m 값은 제한 받게 되고, 이로 인해 자화전류가 능동보조회로부터 공급되어야 한다. 트랜지스터의 전류정격을 제한하는 자화전류의 최대값(I_m)은 그림2의 개념도로부터 커먼모드 전압에 대한 다음(그림3)의 간단한 시뮬레이션을 통해서 얻을 수 있다.

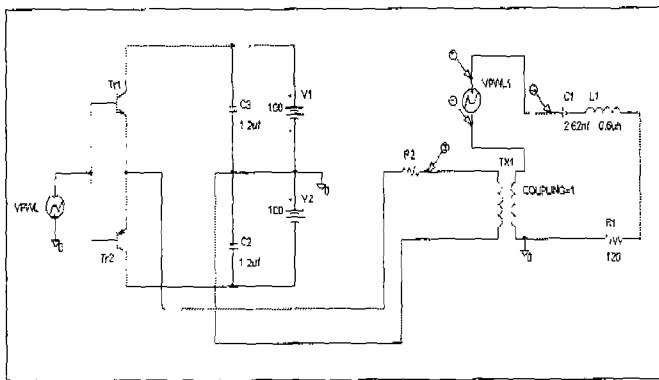


그림3. 시뮬레이션 회로도

그림3에서 등가적으로 시뮬레이션 된 회로에서 고주파 누설전류감쇄기는 결합율이 1이고 권수비가 1:1인 변압기와 푸시풀회로로써 모델링 됐다.

시뮬레이션 된 결과인 커먼모드전압과 자화전류를 나타내는 그림 4에서, 3상이 동시에 스위칭되는 부분(커먼모드전압의 크기가 $E_d/2$)인 구간이 길어질수록 자화전류의 최대값 i_m 의 크기는 더 커지게 된다.

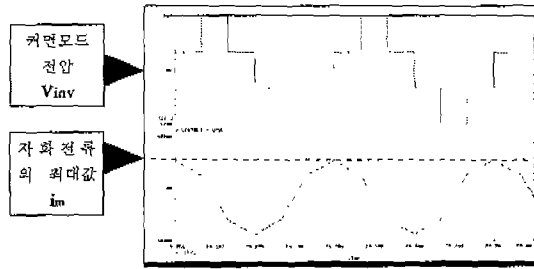


그림4. 커먼모드전압과 자화전류에 대한 시뮬레이션 파형

이 구간은 SVPWM의 경우, dc 링크전압 E_d 의 크기가 커짐에 따라 길어진다.

(나) 코어(Core)의 선택

커먼모드 전압감쇄기는 형태상 커먼모드쇼크와 유사하며, 트로이달 코어(Troidal core)에 능동보조회로를 부착하기 위해 하나의 권선을 추가적으로 감게 된다. 그리고, 사용되는 코어는 다음의 사항을 고려하여 선택되어야 한다.

- 포화되지 않을 정도로, 충분히 큰 포화자속밀도(B_s)를 가져야 한다.
 - 고주파영역에서도 일정 임피던스를 유지해야 한다.
- 코어를 k개 적층(stack)했을 때, 권수 N과는 다음의 식(1), (2)의 관계를 가진다.

$$kN > \frac{E_d T}{8A_e B_s} \quad (1)$$

$$kN^2 = \frac{L_m}{AL} \times 10^{-6} \quad (2)$$

(여기서, k는 적층한 코어의 갯수, N은 권수, E_d 는 dc-link 전압, B_s 는 포화자속밀도)

위의 관계를 이용하면 적절한 권수N과 적층갯수를 구할 수 있다.

4. 고주파누설전류에 대한 효과

그림5는 커먼모드전압감쇄기가 없는 경우의 커먼모드 전류와 전압의 실제 측정된 파형이다.

(dc 링크전압; 200[V], 스위칭 주파수; 2.5kHz 일때)

이로부터 무시할 수 없는 정도의 커먼모드전류(ground current)가 PWM 인버터의 매 스위칭 순간

마다 대지로 누설되고 있음을 보여준다.

측정된 커먼모드 전류 i_c 의 피크치는 100[mA] 이상이다. 이는 누전 차단기(earth leakage breaker)의 오동작 또는, 방사EMI 방출[6]의 원인이 된다.

참고문헌[1]에서는 고주파누설전류에 대하여, 그림 2와 같이 LCR 직렬 공진 회로를 형성하는 등가회로를 제시한다. 그림5의 감쇄진동하는 전류는 등가 공진 회로에 스텝전압이 인가된 뒤의 전류 파형과 유사하다. 그러므로, 등가회로는 고주파누설전류를 분석할 수 있는 간단한 방법이다.

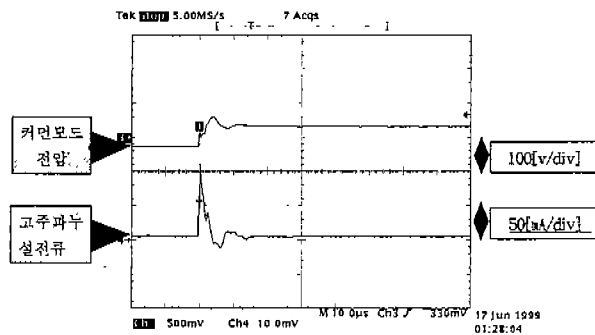


그림5. 커먼모드 전압감쇄기가 없는 경우의 실제 측정된 커먼모드전압과 고주파 누설전류

그림 6은 커먼모드전압감쇄기를 사용했을때에 대한 시뮬레이션 된 파형이다. 여기서, 고주파 누설전류의 피크치는 10[mV]이내의 아주 작은 값이다.

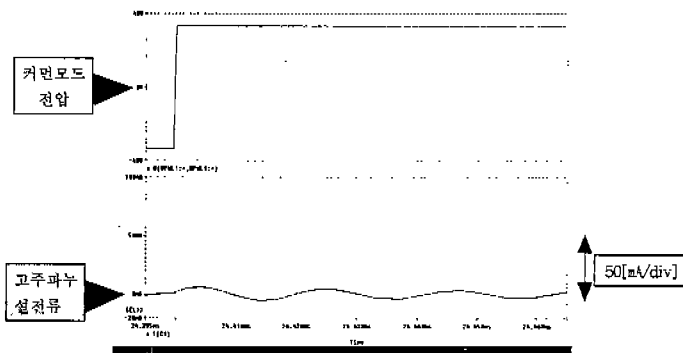


그림6. 커먼모드전압감쇄기를 사용 했을 때의 커먼모드 전압과 고주파누설전류의 시뮬레이션 파형

이들 파형은 커먼모드전압감쇄기가 common-mode 전압을 거의 완벽하게 상쇄하는 효과를 나타낼 수 있음을 보여준다. 그래서, 커먼모드전압감쇄기는 고주파

누설전류를 효과적으로 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다.

5. 결 론

이 논문에서는 PWM 인버터에 의해 생성된 커먼모드 전압과 고주파누설전류의 감쇄가 가능한 커먼모드전압감쇄기를 제시한다. 커먼모드전압감쇄기의 효과를 고려한 시뮬레이션을 통해 IGBT를 이용한 유도전동기 구동에 있어 효과적임을 알 수 있다. 그래서, 커먼모드전압감쇄기가 고주파 누설전류를 수 [mA]이내로 억제할 수 있음을 보여준다.

참고문헌

- [1]이재호, 전진휘, 박성준, 김철우, "PWM 인버터로 구동되는 유도 전동기의 고주파 누설전류 모델링 및 억제에 관한 연구", 1998년 연구회합동 학술발표회 논문집, p18-p22, 1998년 11월
- [2]Y.Murai, T. Kubota, and Y. Kawase, "Leakage Current Reduction for a High-Frequency Carrier Inverter Feeding an Induction Motor", IEEE Trans. Industry Applications, vol.28, no.4, pp.858-863
- [3]M.A.Jabbar and M.A.Rahman: "Radio Frequency Interference of Electric Motor and Associated Control," IEEE Trans. Industry Applications, vol.27, no.1, pp.27-31, Jan/Feb., 1991.
- [4]S.Chen, T.A.Lipo, D.Fitzgerald; "modeling of Motor Bearing currents in PWM Inverter Driver," IEEE Trans. Industry Applications, vol.32, no.6, pp.1365-1370, 1996
- [5]B.Heller, A.Veverka: "Surge Phenomena in Electrical Machine" ILIFFE BOOKS LTD., 1968.
- [6]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. pp 1072-1079, 1996