

전도성 EMI 저감을 위한 능동형 공통모드 EMI 필터

손요찬, 설승기

서울대학교 공과대학 전기컴퓨터공학부

A Novel Active Common-mode EMI Filter for Mitigating Conducted EMI

Yo-Chan Son and Seung-Ki Sul

School of Electrical Engineering and Computer Science,
College of Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

This paper presents a novel active common-mode EMI filter for the PWM inverter application. The proposed filter is based on the current sensing and compensation circuit and it utilizes a fast transistor amplifier for the current compensation. The amplifier utilizes an isolated low-voltage dc power supply for its biasing and it is possible to construct the active filter independent of the source voltage of the equipment. Thus the proposed active filter can be used in any application regardless of its working voltage. The effectiveness of the proposed circuit is verified by experimental results.

1. 서 론

최근 산업용 전동기 구동 시스템 뿐만 아니라 가전 분야에 있어서도 시스템의 효율 및 성능 향상을 위하여 PWM 인버터의 채용이 늘어나고 있다. 그림 1과 같은 전압형 PWM는 높은 dv/dt를 가지는 출력 전압을 발생시키고 이에 의해 시스템의 기생 캐패시터의 충·방전에 의해 고주파의 전류가 발생된다^[1, 2]. 이러한 고주파의 전류는 전도성 혹은 방사성 전자기 장애(EMI,

Electromagnetic Interference)로서 인접한 다른 기기의 오작동을 초래할 수 있다^[3, 4]. 반도체 기술이 발전함에 따라 전력 스위치 소자의 손실을 줄이고 제어 성능을 높이기 위하여 스위칭 시간은 점점 빨라지지만 앞서 언급한 이유로 인하여 EMI는 증가하게 된다. 특히 PWM 인버터의 공통 모드 전압에 의한 누설 전류의 증가는 전도성·방사성 EMI의 중요한 원인이 된다. 전도성 EMI의 경우 이러한 고주파 전류를 감쇄시키기 위하여 PWM 인버터의 입·출력단에 EMI 필터를 사용하며, 이에 대한 기존의 많은 연구가 수행되었다^[1~3, 5]. 기존의 대부분의 필터는 인덕터와 캐패시터 등의 수동소자를 사용한 필터이며, 이러한 수동형 필터의 감쇄율은 궁극적으로 필터의 LC 값에 의해 결정된다. 누설 전류 혹은 공통 모드(common-mode) 전류 감쇄를 위한 공통모드 EMI 필터의 경우, 안전의 문제 때문에 캐패시터(Y-capacitor) 값을 일정 수준 이상 증가시킬 수가 없으므로^[3] 필터의 감쇄율을 증가시키기 위하여 인덕터의 크기를 증가시켜야 하며 이는 시스템의 크기와 가격을 인상시키는 주요 원인으로 작용하게 된다. 능동형 EMI 필터는 이러한 수동형 필터의 제한 조건을 극복하기 위하여 고안되었다^[6~11].

본 연구에서는 전도성 공통모드 EMI를 억제하기 위한 새로운 능동형 공통모드 EMI 필터를 제안하였고, 실험을 통하여 그 효용성을 입증하였다.

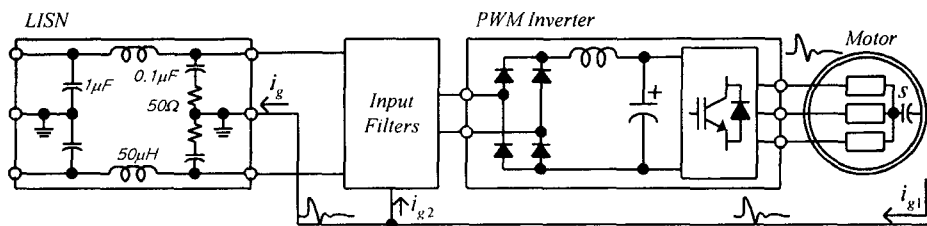


그림 1 단상 전원에 접속된 PWM 인버터.
Fig. 1 PWM inverter system fed to single-phase ac input

2. 제안된 능동형 EMI 필터

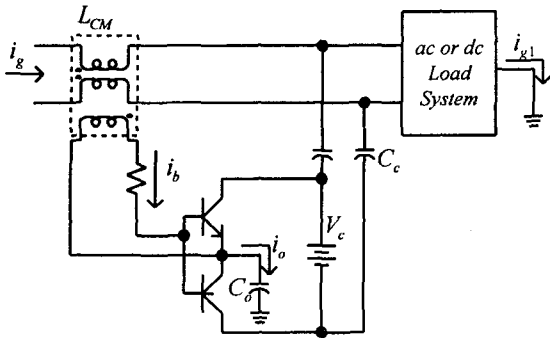


그림 2 제안된 능동형 공통모드 EMI 필터(ACEF)
Fig. 2 Proposed active common-mode EMI filter

그림 2는 제안된 능동형 공통모드 EMI 필터(ACEF)이다. 제안된 회로는 기본적으로 전류 검출, 전류 보상형의 구조를 채택하고 있다^[6-11]. 전원과 실험 대상 기기 사이에 접속되어 있는 공통모드 초크 L_{CM} 에 부가의 권선을 설치하여 유입되는 고주파의 공통 모드 전류 i_g 에 비례하는 신호 i_b 를 검출한다. 이를 푸시풀(push-pull) 증폭기를 이용하여 캐패시터 C_0 를 통해 접지로 입력 누설 전류에 대하여 역방향인 i_o 를 주입하여, 전동기 등을 통하여 발생하는 고주파의 누설 전류 i_{g1} 을 억제하는 기능을 수행한다. 제안된 ACEF는 별도의 바이어싱(biasing) 전원을 사용하는 트랜지스터 증폭기를 사용하며 누설 전류 순환의 폐회로를 구성하기 위하여 캐패시터 C_0 와 C_c 를 주회로와 필터 회로 사이에 설치한다. 이는 캐패시터의 주파수 특성에 의해 낮은 주파수에서는 높은 임피던스를 제공하여 시스템의 주 회로와 필터의 증폭기 회로를 전기적으로 분리하며, 높은 주파수에서는 임피던스가 낮아져 주 회로와 필터 회로를 단락시켜서 고주파의 누설 전류의 순환이 가능하도록 한다. 이러한 캐패시터의 영향이 작고, 증폭기의 대역폭이 무한대일 경우 제안된 ACEF에 의한 누설 전류의 감쇄는 식 (1)과 같이 얻을 수 있다.

$$i_g = \frac{1 + s/\omega_1}{1 + s/\omega_2} \quad (1)$$

여기서, $\omega_1 = \frac{r_i l_e}{\mu A_e}$, $\omega_2 = \frac{\omega_1}{1 + N h_{fe}}$ 이고 r_i 는 증폭기의

입력 임피던스이고 l_e 와 A_e 는 공통모드 초크의 형상에 의해 결정되며 μ 는 자기 코어의 투자율이다. N 은 공통모드 초크 L_{CM} 에 입력 누설 전류를 검출하기 위해 사용된 부가 권선의 권선비이며, h_{fe} 는 푸시풀 증폭기의 교류 이득이다.

그림 2에서 캐패시터 C_c 없이 증폭기의 직류단이 시스템의 직류단에 연결되는 경우^[8, 9] 시스템의 동작 전압에 해당되는 내압을 가지는 트랜지스터 증폭기를 사용하여야 한다. 일반적으로 고압 트랜지스터의 경우 가격이 비싸고 저압 트랜지스터에 비해 동작 주파수영역이 좁은 단점이 있다. 하지만 제안된 ACEF의 경우 각각의 npn, pnp 트랜지스터는 필터 전원 V_c 에 해당하는 낮은 내압을 가지는 소자를 사용하는 것이 가능하므로, 능동형 필터의 가격을 [8], [9]의 능동형 공통모드 EMI 필터에 비해 가격을 낮출 수 있을 뿐만 아니라 시스템의 동작 전압에 무관하게 제안된 필터를 적용하는 것이 가능하다. 또한 EMI원인 주 시스템과 분리된 필터의 제작이 가능하다.

3. 실험 결과

제안된 ACEF의 타당성을 입증하기 위해 그림 3의 시스템에 대하여 그림 4, 5와 같은 실험을 수행하였다. 실험의 상수들은 표 1에 나타내었다. 그림 3에서 3.7kW 유도 전동기는 무부하로 운전되었으며 프레임이 접지되었다. 전동기 접지선은 그림에 표시된 바와 같이 PWM 인버터의 입력 필터측에 연결되었다. PWM 인버터에서 직류단의 인덕터는 역률 개선 및 입력 고조파 저감을 위한 리액터이며, 리액터를 제외한 PWM 인버터는 하나의 PCB에 실장되었다. 그림 3의 정상모드 EMI 저감을 위한 C_x 와 제안된 ACEF를 포함한 입력 필터는 PWM 인버터 PCB와 분리된 PCB에 실장되었다. 전도성 EMI의 측정을 위해서는 전원측의 안정된 임피던스 공급이 필요하며 이를 위하여 그림 1과 같은 EMC03810/2 LISN (Line Impedance Stabilizing Network)이 사용되었으며

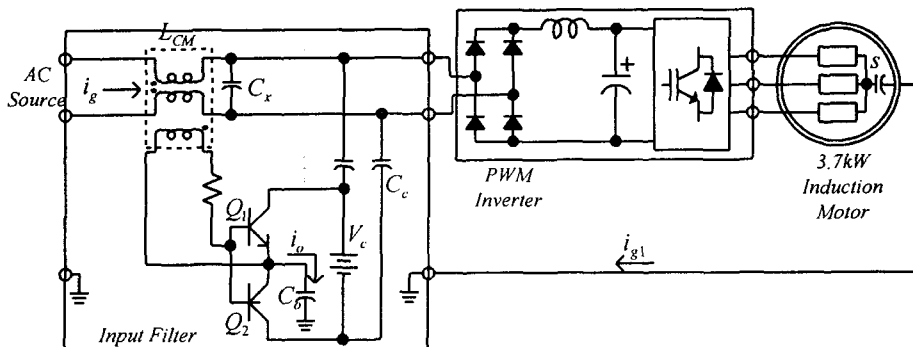


그림 3 실험 대상 시스템.

Fig. 3 Configuration of experimental system.

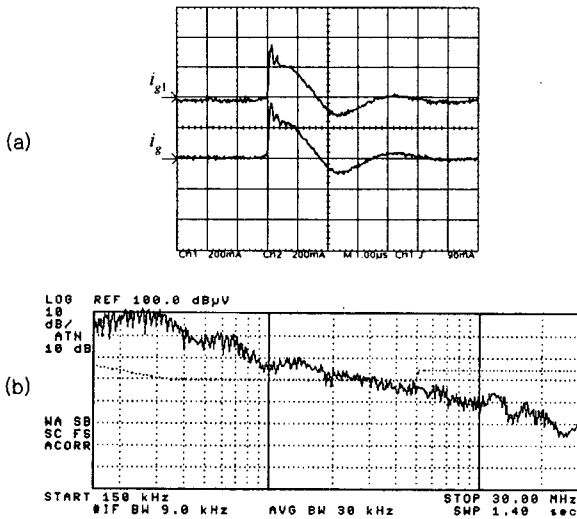


그림 4 EMI 필터가 없는 경우의 전도성 EMI

- (a) 누설전류(200mA/div, 1 μs/div)
- (b) 전도성 EMI 스펙트럼.

Fig. 4 Conducted EMI without any input EMI filter

- (a) Leakage current(200mA/div, 1 μs/div)
- (b) conducted EMI spectrum

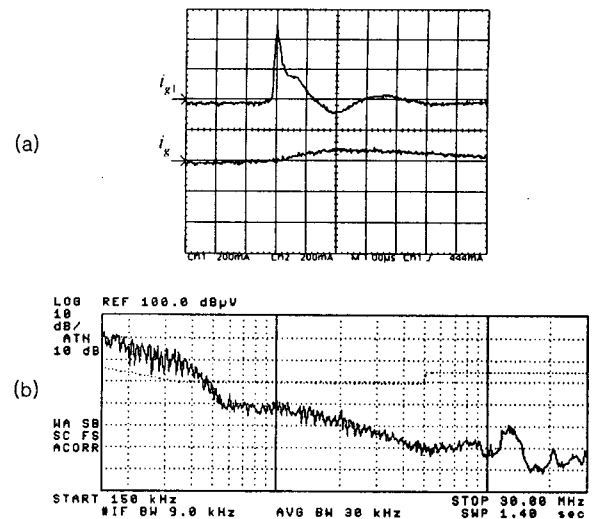


그림 5 ACEF가 적용된 경우의 전도성 EMI

- (a) 누설전류(200mA/div, 1 μs/div)
- (b) 전도성 EMI 스펙트럼

Fig. 5 Proposed ACEF installed

- (a) Leakage current(200mA/div, 1 μs/div)
- (b) conducted EMI spectrum

HP8591EM EMC 주파수 분석기를 사용하여 전도성 EMI의 최대값(peak detector)을 측정하였다^[3, 4, 12, 13]. LISN을 사용하여 측정하는 정상모드(normal-mode) EMI와 누설전류와 같은 공통모드 전류에 의한 공통모드 EMI의 합으로 나타나며 이렇게 측정된 전체 전도성 EMI의 저감을 위해서는 두가지 EMI 원인 모두의 저감이 필요하다^[10,12]. 그림 3의 C_x 는 정상모드 EMI 저감을 위해 사용된 캐패시터로서, 그림 4, 5의 전도성 EMI 측정 파형에서 정상모드 EMI를 감쇄시켜 공통모드 EMI가 전체 EMI 스펙트럼 상에서 지배적으로 나타나도록 하였다.

그림 4는 그림 3에서 입력단의 EMI 필터가 없는 경우의 누설 전류 파형과 전도성 EMI 스펙트럼이다. PWM 인버터의 공통모드 전압에 의해 발생된 고주파의 누설 전류는 전동기를 거쳐서 그림 4(a)의 i_{g1} 과 같은 형태로 발생한다. 입력 필터가 없기 때문에 그대로 전원에서 유입되는 공통모드 전류 i_g 에 그림 4(a)와 같이 반영된다($i_g = i_{g1}$).

그림 5에서는 그림 3과 같이 제안된 ACEF가 설치된 경우의 누설 전류 파형과 전도성 EMI 스펙트럼을 나타내었다. $V_{CE0} = 30V(max)$ 의 저압의 트랜지스터를 푸시풀 증폭기의 소자로서 사용하였으며 증폭기의 바이어싱 전원으로 PWM 인버터의 게이팅 전원으로 사용하는 $V_c=15V$ 직류 전원을 사용하였다. 그림 4(a)의 누설 전류 파형과 비교하여, 그림 5(a)의 전동기측 누설 전류 i_{g1} 의 peak값 및 주파수 성분은 거의 변하지 않았지만, 전원으로 환원되는 누설 전류 i_g 의 peak값은 크게 감소되었음을 알 수 있다.

표 1 실험 시스템 정수

인버터 정격	단상 220V _{rms} 60Hz 입력 145V _{rms} 60Hz 출력
PWM 방식	스위칭 주파수 2.5kHz, SVPWM
부하 전동기	3.7kW 범용 유도전동기
입력 필터 상수	$L_{CM} = 570 \mu H, N = 8$ $C_o = C_c = 10nF$ $C_x = 680nF$ $Q_1 : KTC3230, Q_2 : KTA1276$ $(I_{c(max)} = 3A, V_{CE0(max)} = 30V, f_r = 100MHz)$ $V_c = 15V$

푸시풀 증폭기 Q_1, Q_2 는 그림 3의 공통모드 초크 L_{CM} 에 설치된 부가 권선으로부터 검출된 전원측 누설 전류를 식(1)과 같이 감소하도록 보상전류 i_o 를 발생하여, 전동기측 누설 전류 i_{g1} 가 $i_{g1} = -i_o$ 이 되도록 한다. 결과적으로 제안된 ACEF는 PWM 인버터에 의해 발생한 고주파의 누설 전류를 시스템 내부에서 순환시켜, 보상 전류 i_o 와 전동기측 누설 전류 i_{g1} 의 합인, 전원으로 환원되는 누설 전류 i_g 를 줄이는 역할을 한다. 따라서 그림 5(a)에서 대부분의 고주파 누설 전류의 대부분은 사라지고 차단 캐패시터 C_c 와 C_o 를 통과하기 힘든 저주파의 누설 전류만이 전원측 누설 전류 i_g 에 남게 된다. 전도성 EMI 스펙트럼인 그림 4(b)와 5(b)를 비교하면 150~400kHz 사이에서 10dB μV 정도, 0.4~10MHz 사이에서 20dB μV 이상의 전도성 EMI 감쇄가 나타나는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 새로운 형태의 능동형 공통모드 EMI 필터를 제안하였고 이의 유용성을 실험을 통하여 검증하였다. 주회로와 필터 회로 사이에 차단 캐패시터를 설치하여 낮은 주파수에서는 주회로와 필터 회로를 분리하고 전도성 EMI의 규제 대상이 되는 높은 주파수에서는 회로를 단락시켜 주회로의 동작 전압에 관계없는 필터 전원을 사용하기 때문에 제안된 능동형 공통모드 EMI 필터에서는 저압 소자를 사용하여 증폭기를 구성하는 것이 가능하다. 따라서 필터의 가격을 낮출 수 있고 또한 보다 빠른 증폭기 소자를 사용할 수 있으며, 주회로의 동작 전압에 관계없이 다양한 응용분야에 적용될 수 있다. 또한 누설 전류 크기의 감소에 의해 부가적으로 설치되는 수동 필터의 포화를 방지하여 보다 효과적인 필터 구성에 도움을 줄 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] G. Skibinski, R. Kerkman, and D. Schlegel, "EMI Emissions of Modern PWM ac Drives," IEEE Industry Applications Magazine, pp. 47-81, Nov/Dec 1999.
- [2] S. Chen, "Generation and Suppression of Conducted EMI from Inverter-Fed Motor Drives," in Conf. Rec. of IEEE IAS, pp. 1583-1589, 1999.
- [3] L. Tihanyi, Electromagnetic Compatibility in Power Electronics, IEEE Press, 1995.
- [4] T. Williams, EMC for Product Designers, 2nd ed., Newnes, 1996.
- [5] M. J. Nave, Power Line Filter Design for Switched-Mode Power Supplies, Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [6] L. Lawwhite and M. F. Schlecht, "Design of Active Ripple Filters for Power Circuits Operating in the 1-10MHz Range", IEEE Trans. Power Electron., vol. 3, no. 3, pp. 310-317, Jul 1988.
- [7] N. K. Poon, J. C. P. Liu, C. K. Tse and M. H. Pong, "Techniques for Input Ripple Current Cancellation: Classification and Implementation," IEEE Trans. Power Electron., vol. 15, no. 6, pp. 1144-1152, Nov 2000.
- [8] S. Ogasawara and H. Akagi, "Circuit Configurations and Performance of the Active Common-Noise Canceller for Reduction of Common-Mode Voltage Generated by Voltage-Source PWM Inverter", in Conf. Rec. of IEEE IAS, pp. 1482-1488, 2000.
- [9] I. Takahashi, A. Ogata, H. Kanazawa, "Active EMI Filter for Switching Noise of High Frequency Inverters", in Conf. Rec. of IEEE PCC-Nagaoka '97, pp. 331-334, 1997.
- [10] Yo-chan Son and Seung-Ki Sul, "Conducted EMI in PWM Inverter for Household Electric Appliance," in Conf. Rec. of IEEE IAS 2001, pp. 2441-2447, 2001.
- [11] Yo-chan Son and Seung-Ki Sul, "A Novel Active Common-mode EMI Filter for PWM Inverter," in Conf. Rec. of IEEE APEC 2002, pp. 545-549, 2002.
- [12] M. J. Nave, "A Novel Differential Mode Rejection Network for Conducted Emissions Diagnostics," IEEE National Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1989.
- [13] EN 55 014 : 1993, "Limits and Methods of Measurement of Radio Disturbance Characteristics of Electrical Motor-operated and Thermal Appliances for Household and Similar Purposes, Electric Tools and Electric Apparatus"