

가전기기용 교류 전동기 구동 시스템의 EMI 특성 및 필터 설계

鄭世教[†], 愼輝範*

EMI Characteristics and filter design of AC Drives for Home Appliances

Se-Kyo Chung, and Hwi-Beom Shin

요 약

본 논문에서는 세탁기, 에어컨과 같은 가전기기에 사용되는 인버터 구동 교류 전동기 구동 시스템의 EMI 특성 해석 및 필터 설계 방법에 대하여 기술하였다. 먼저, 인버터 구동 교류 전동기 구동 시스템의 전도성 EMI 발생 및 전달 메커니즘에 대하여 분석하였고, 공통 및 차동모드 노이즈 분리 기법을 이용한 EMI 필터의 설계 방법을 제시하였다. 제시된 방법의 타당성을 검증하기 위해 PWM 인버터로 구동되는 유도 전동기 구동 시스템에 대한 실험을 수행하였고 EN55014 EMI 기준을 만족하는 결과를 얻을 수 있었다.

ABSTRACT

This paper describes a design method of electromagnetic interference (EMI) filter for pulse-width modulation (PWM) inverter-fed AC drives used for home appliances such as washing machine and air conditioner. The generating and coupling mechanisms of the conducted EMI for AC drives are first investigated. The design procedure of the EMI filter based on the EMI separation principle is then presented. Experiments are carried out for the PWM inverter-fed induction motor drive system and it is shown that the results satisfy the EN 55014 EMI regulation.

Key Words : Electromagnetic interference, AC drives, EMI filter

1. 서 론

최근 들어 전력전자 기술의 발전과 저가의 고속 디지털 프로세서의 개발에 따라 세탁기, 에어컨과 같은 가전기기 분야에도 인버터를 이용한 가변속 전동기 구동 시스템이 폭 넓게 적용되고 있다. 가전기기에 인버터 시스템을 적용하는 것은 성능 향상과 에너지 절약

등 여러 가지 장점이 있다. 그러나 인버터는 전력용 반도체 소자의 스위칭을 기반으로 동작하므로 이로 인한 전자파 간섭 (electromagnetic interference; EMI)이 큰 문제점 중의 하나이다. 또한, 세계적으로 EMI 규제가 점점 엄격해 지고 있어 EMI는 가전기기의 설계 및 제작에 있어서 매우 중요한 문제로 인식되고 있다.

전기전자 기기에서 발생하는 전자기적 노이즈는 전달 경로에 따라 전도 노이즈 (conducted noise)와 복사 노이즈 (radiated noise)로 나눌 수 있으며 본 논문에서는 전도성 노이즈를 다룬다. 전력전자 시스템의 전도성 노이즈 저감에 관해서는 스위칭 전원 장치를 중심으로 많은 연구가 진행되어 왔으며 최근 들어 전동

[†] 교신저자 : 정회원, 경상대 전기전자공학부 부교수
E-mail : skchung@gsnu.ac.kr

* 정회원, 경상대 전기전자공학부 부교수
접수일자 : 2003. 10. 14 1차 심사 : 2003. 10. 21
심사 완료 : 2003. 11. 13

기 구동 시스템 분야에서도 연구 결과들이 제시되고 있다^{[5]-[10]}. 본 논문에서는 가전기에 사용되는 가변속 교류 전동기 구동 시스템의 전도성 노이즈 저감을 위한 EMI 필터 설계 기법을 제시하였다. 이를 위해 먼저 교류 전동기 구동 시스템에서 전도성 노이즈의 발생 및 전달 메커니즘을 분석하였다. 그리고 공통모드 (common mode; CM)와 차동모드 (differential mode; DM)에 대한 EMI 필터 등가 회로를 유도 한 다음 노이즈 분리기 (noise separator)를 이용하여 가전기에 적용되는 EN55014 기준을 만족하는 EMI 필터를 설계 하였다. 설계된 EMI 필터의 성능을 검증하기 위해 PWM 인버터로 구동되는 유도 전동기에 대한 실험을 수행하였고 그 결과 요구되는 EMI 기준을 만족함을 입증할 수 있었다.

2. 교류 전동기 구동 시스템의 EMI 특성

2.1 EMI 측정 시스템의 구성

그림 1은 인버터 구동 교류 전동기에 대한 EMI 측정 및 해석 시스템을 나타내고 있다. 시스템의 구성은 전동기, 인버터, 정류기, line impedance stabilization network (LISN), 접지판, 노이즈 분리기 및 스펙트럼 분석기로 이루어져 있다. LISN은 전원과 피 측정기기 (equipment under test; EUT) 사이에 위치하며 전도성 EMI의 측정에 필수적이다. LISN은 전원 단자에 안정된 표준 임피던스를 제공하고 과도 상태에 임피던스 변동 방지 및 전원으로부터 노이즈 차단 역할을 한다. 또한, EMI 측정을 위해 hot line (L)과 return line (N)에 대한 측정 단자를 가지며 50Ω 케이블을 이용하여 측정한다^{[1]-[3]}. 노이즈 분리기는 CM과 DM 노이즈를 분리하는 역할을 하며 L, N, CM, DM 노이즈 출력을 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정할 수 있다^{[4][5]}.

2.2 EMI 발생 원인과 경로 분석

전도성 노이즈는 전달 경로에 따라 CM 및 DM 노이즈로 구분되며 LISN의 측정 단자 L, N에는 두 성분의 노이즈가 모두 나타난다. 그림 2는 전동기 구동 시스템의 CM 및 DM 노이즈 경로를 나타내고 있다.

CM 노이즈의 경로는 케이블과 공통접지 또는 전동기 권선과 공통접지 사이의 기생 커패시턴스 (stray capacitance)에 의해 형성된다. 노이즈 전류의 원인은 스위칭 소자의 dv/dt 와 기생 커패시턴스의 결합이며 노이즈 전류와 접지 임피던스에 의한 CM 노이즈 전압, 전동기 중성점과 접지 사이에 CM 전압 등이 발생

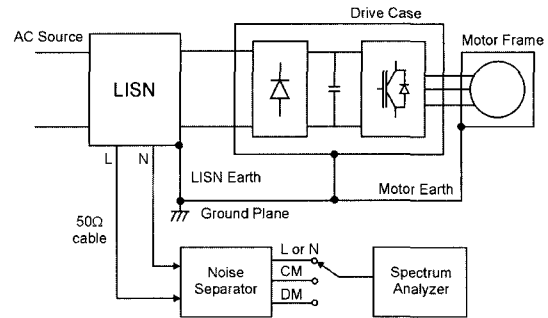


그림 1 교류 전동기 구동 시스템의 전도성 EMI 측정을 위한 시스템 구성

Fig. 1 System configuration for conducted EMI measurement of AC drives

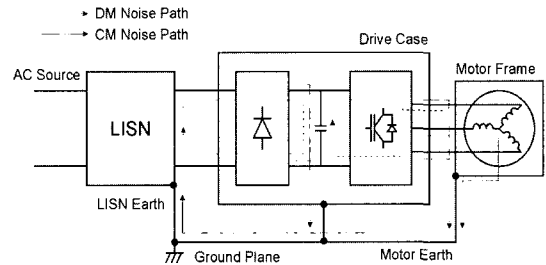


그림 2 교류전동기 구동시스템에서 CM 및 DM 노이즈 경로

Fig. 2 CM and DM noise paths for AC drives

된다. 그림 3은 전동기 중성점의 CM 전압과 전원 입력 라인에서 측정된 CM 노이즈를 나타내었다. 이 파형에서 인버터 스위칭 순간에 CM 노이즈가 크게 발생하며 스위칭 소자의 dv/dt 와 기생 커패시턴스의 결합이 CM 노이즈의 가장 큰 원인임을 알 수 있다.

DM 노이즈 경로는 DC link 커패시터에 의해 분리된 두 개의 노이즈 전류 루프(loop)로 구성되며 첫 번째 루프는 인버터의 출력과 케이블 및 전동기 권선 간에 발생하는 노이즈 전류 루프이다. 이 루프는 케이블 간 또는 전동기 권선 간의 기생 커패시턴스에 의해 형성되며 노이즈 전류는 스위칭 소자의 dv/dt 와 이들 기생 커패시턴스의 결합에 의해 발생한다. 한편, 다른 노이즈 경로는 정류기에서 형성되며 다이오드의 스위칭에 의한 dv/dt 와 케이블 및 전원 단자에서의 기생 커패시턴스의 결합으로 발생된다. 그림 4는 정류기의 입력 전류와 DM 노이즈를 나타내고 있다. LISN에서 측정된 DM 노이즈는 DC link 커패시터에 의해 독립된 루프를 형성하므로 정류기의 스위칭이 가장 큰 원인이 됨을 알 수 있다.

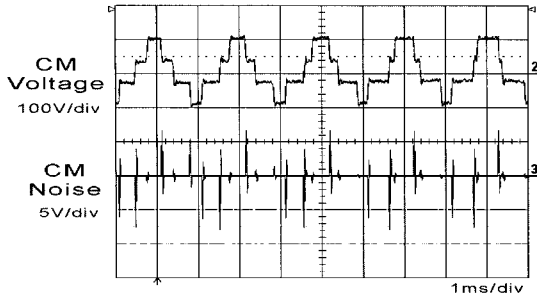


그림 3 전동기 중성점의 CM 전압과 입력 전원 라인의 CM 노이즈

Fig. 3 CM voltage at motor neutral point and CM noise in input power line

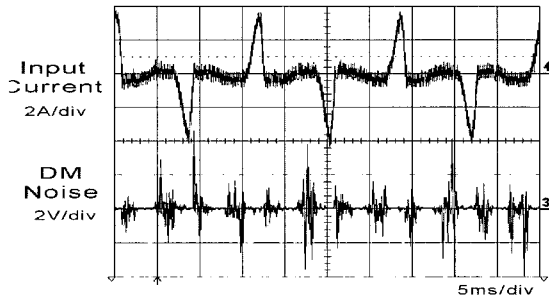
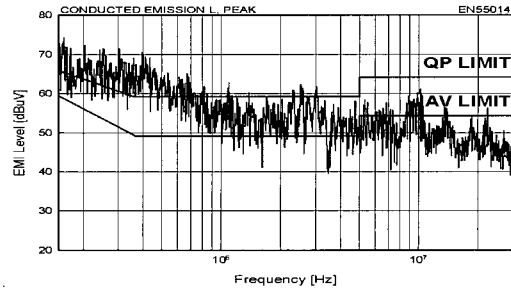


그림 4 다이오드 정류기의 입력 전류와 DM 노이즈
Fig. 4 Input current and DM noise in diode rectifier

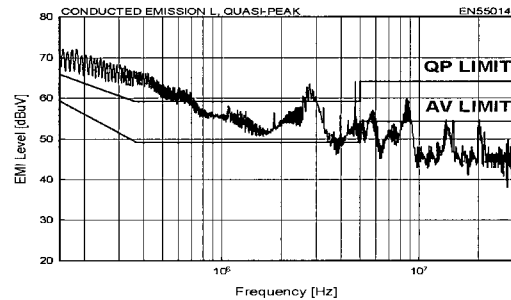
2.3 EMI 측정 및 시험

EMI에 대한 규정은 지역에 따라 다르며 IEC, FCC, VIE 등에 의해 정의되어 있다. 본 논문에서는 IEC 규정을 사용하였다. IEC 규정은 전도성 노이즈에 대해서 150kHz-30MHz 범위의 EMI 레벨을 측정하며 산업용 기기, 통신기기, 가전기기, 램프, 정보기기 등의 종류에 따라 각각의 허용 레벨이 정해져 있다. 여기서는 가전기기에 적용되는 EN55014 규정을 사용하였다^[11].

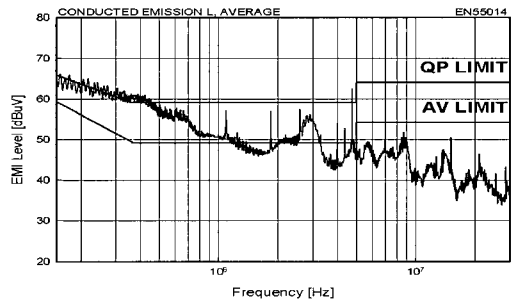
전도성 노이즈는 그림 1과 같은 장치를 이용하여 peak, quasi-peak, average 값을 측정할 수 있으며, 150 kHz-30MHz 전 구간에서 quasi-peak 및 average 값의 측정은 많은 시간이 필요하므로 먼저 peak 값에 대해 quasi-peak 및 average 조건 통과 여부를 검사한 후 통과 하지 못할 경우 다시 quasi-peak 및 average 값을 측정하여 각각의 기준에 대해 통과 여부를 검사한다. 그림 5는 EMI 필터를 적용하지 않은 경우 LISN L 단자의 EMI 측정 결과를 나타내고 있으며 각 EMI 레벨이 EN55014 기준을 초과하여 EMI 저감 대책이 필요함을 알 수 있다. 실험에 사용된 전동기의 사양 및 동작 조건은 표 1과 같다.



(a) peak 값



(b) quasi-peak 값



(c) average 값

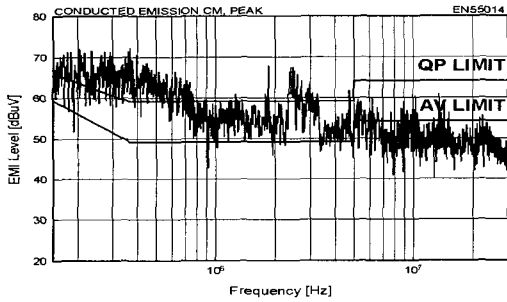
그림 5 실험용 전동기 구동 시스템의 입력 hot line에서 측정된 EMI

Fig. 5 Measured EMI at input hot line for experimental AC drive

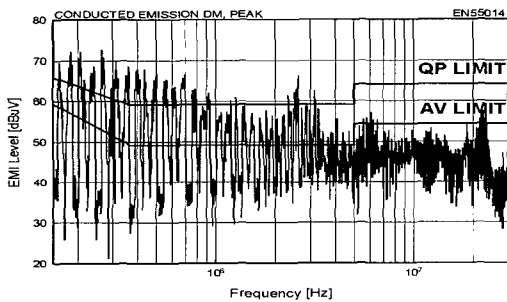
표 1 실험용 전동기의 사양

Table 1 Specification of experimental motor

항목	값	항목	값
정격용량	400W	정격속도	1750rpm
고정자 저항	19Ω	회전자 저항	19Ω
1차측 누설 인덕턴스	12mH	2차측 누설 인덕턴스	12mH
자화 인덕턴스	245mH	스위칭 주파수	
PWM 방식	Space Vector PWM		



(a) CM 노이즈



(b) DM 노이즈

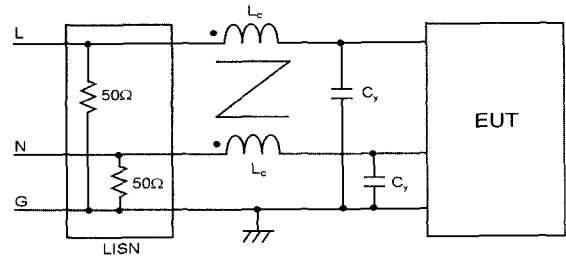
그림 6 실험용 전동기 구동 시스템에서 측정된 CM 및 DM 노이즈
Fig. 6 Measured CM and DM noises for experimental AC drive

전원 라인에서 측정되는 노이즈는 CM 및 DM 성분으로 구성되어 있으며 노이즈의 효과적인 저감을 위해 각 성분에 대한 저감 대책이 필요하다. 이를 위해 노이즈 분리가 필요하며 이 장치는 LISN에서 측정된 L과 N 노이즈 성분의 위상차를 이용해 노이즈 성분을 분리해 낸다^{[4][5]}. 그림 6(a), (b)는 노이즈 분리를 이용하여 측정된 CM 및 DM 노이즈를 나타내고 있다.

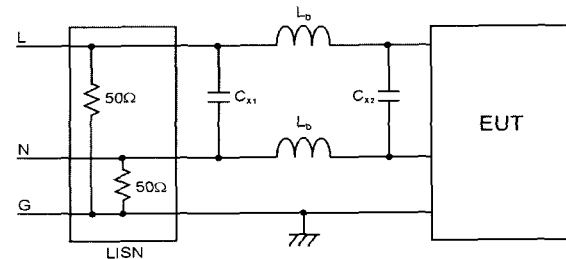
3. EMI 필터의 설계

3.1 전원 라인 EMI 필터의 구성

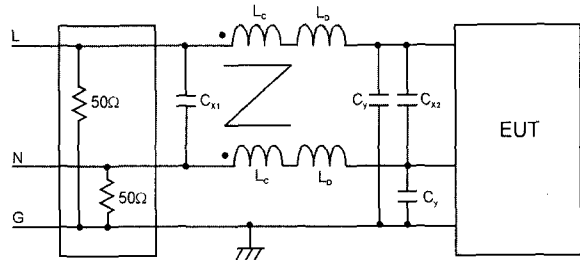
인버터와 전동기에 의해서 발생되는 노이즈는 전달 경로를 따라 제어 회로와 외부 시스템에 영향을 주며 이의 저감을 위해 EMI 필터가 사용된다. EMI 필터는 전원 입력 단에 설치되며 CM 및 DM 필터로 구성된다. CM 필터는 CM Choke 인덕터와 Y-커패시터로 구성되며 2차 필터의 경우 그림 7(a)과 같다. 이 그림에서 L과 N의 인덕터는 서로 결합되어 있어 DM 전류에 의해 발생하는 자속은 서로 상쇄되며 누설 인덕턴스만이 DM 회로에 영향을 준다. DM 필터는 그림 7(b)



(a) CM 필터의 구성



(b) DM 필터의 구성



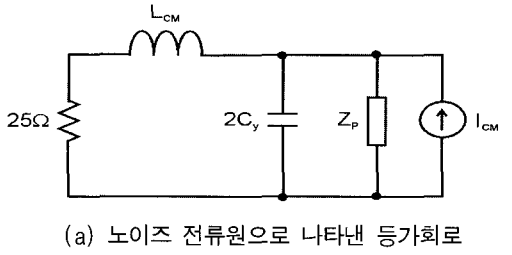
(c) CM 및 DM 필터의 구성

그림 7 전원 라인 EMI 필터의 구성
Fig. 7 Configuration of power line EMI filter

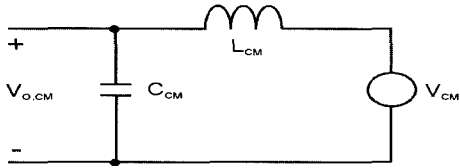
와 같이 구성 할 수 있으며 DM 인덕터와 X-커패시터로 구성된다. CM 및 DM 필터가 결합된 EMI 필터는 그림 7(c)와 같이 나타낼 수 있다.

3.2 EMI 필터 등가회로

그림 7(c)의 EMI 필터는 CM 및 DM 성분에 대해 각각 CM 및 DM 등가회로로 나타낼 수 있다. 그림 8(a)는 CM 등가회로를 나타내며 I_{CM} 은 노이즈 전류원이고 Z_p 는 내부 임피던스이다. EMI 측정 대역에서 $X_{L_{CM}} \gg 25\Omega$ 이고 노이즈 원의 임피던스가 충분히 크다고 가정하면 쌍대성(duality)을 이용하면 그림 8(b)와 같이 나타낼 수 있다. 이 경우 CM 필터는 2차의 감쇄 특성을 가지며 차단 주파수는 다음과 같다.

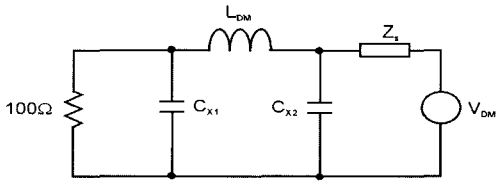


(a) 노이즈 전류원으로 나타낸 등가회로

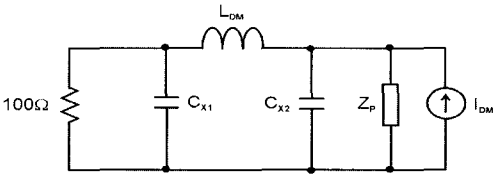


(b) 전압원으로 나타낸 간략화 된 등가회로

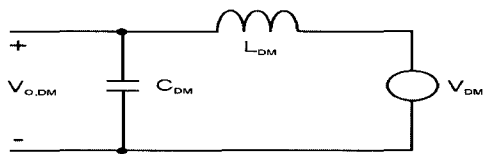
그림 8 CM 필터의 등가회로
Fig. 8 Equivalent circuit for CM filter



(a) 다이오드 ON 시 등가회로



(b) 다이오드 OFF 시 등가회로

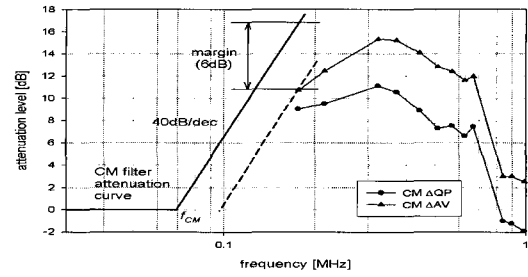


(c) 전압원으로 나타낸 간략화된 등가회로

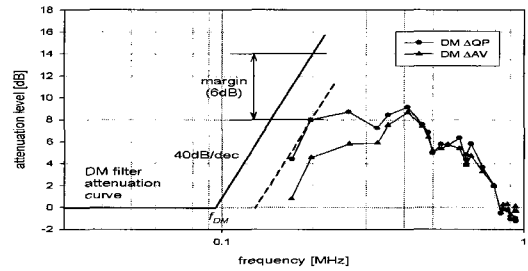
그림 9 DM 필터의 등가회로
Fig. 9 Equivalent circuit for DM filter

$$f_{CM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{CM}C_{CM}}} \quad (1)$$

여기서, $L_{CM} = L_C + 0.5L_D$, $C_{CM} = 2C_y$.
EM 등가회로는 다이오드의 상태에 따라 달라지며



(a) CM 필터



(b) DM 필터

그림 10 CM 및 DM 필터의 요구 감쇄량과 차단 주파수 선정

Fig. 10 Required attenuation and determination of cut-off frequency for CM and DM filter

다이오드 도통 시 그림 9(a)와 같은 전압원 형태로, 다이오드 차단 시 그림 9(b)와 같은 전류원으로 나타낼 수 있다. 여기서, Z_s 와 Z_p 는 각각 노이즈 전압원과 노이즈 전류원의 내부 임피던스이다. 그림 9(a)에서 DC Link 커패시터의 내부 저항은 매우 작고 그림 9(b)에서 다이오드 차단 시 노이즈 전류원의 내부 저항은 매우 크다. 이때 $X_{L_{DM}} \gg X_{C_{X1}}$ 이고 $C_{X1} = C_{X2}$ 일 경우 쌍대성을 이용하면 그림 9(c)와 같은 근사화된 등가회로로 나타낼 수 있다. 따라서 DM 필터도 2차의 감쇄 특성을 가지며 차단 주파수는 다음과 같다.

$$f_{DM} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{DM}C_{DM}}} \quad (2)$$

여기서, $L_{DM} = 2L_i + 2L_D$, $C_{DM} = C_{X1} = C_{X2}$ 이며 L_i 은 CM choke의 누설 인덕턴스이다.

3.3 EMI 필터 파라미터의 선정

CM 및 DM 필터는 각 모드의 노이즈 성분을 측정하여 노이즈 레벨을 EMI limit 이하로 하는 감쇄 계수를 선정하여 설계 한다. 그림 10(a)는 측정된 CM 노이즈의 quasi-peak 및 average 값으로부터 CM 필터

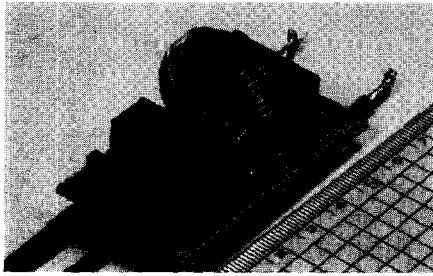


그림 11 제작된 EMI 필터
Fig. 11 Implemented EMI filter

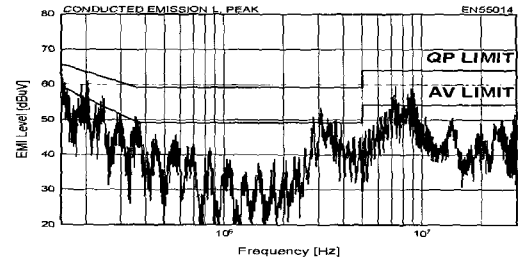
의 설계 방법을 나타내고 있다. 여기서, ΔQP 와 ΔAV 는 다음과 같다.

$$\Delta QP = \text{quasi-peak 값} - \text{QP Limit} \quad (3)$$

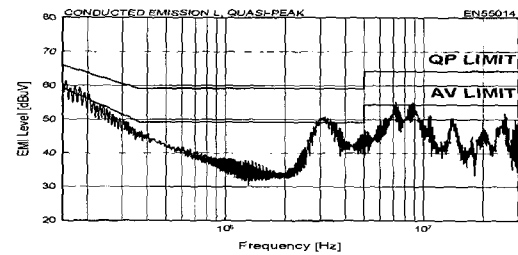
$$\Delta AV = \text{average 값} - \text{AV Limit} \quad (4)$$

2차 CM 필터의 감쇄율은 40dB/dec이며, 그림에서 점선으로 나타낸 40dB/dec 감쇄선과 측정값이 만나는 점에서 적절한 여유 (margin)를 주면 CM 필터의 감쇄선을 얻을 수 있다. 이때 필터의 차단 주파수는 감쇄선과 0dB 선의 교차점 주파수이다. 본 논문에서는 6dB의 여유를 두어 설계하였다. 그림 10(b)와 같이 DM 필터도 같은 방법으로 설계할 수 있다. EMI 시험에서 quasi-peak 및 average 기준을 모두 만족해야 하므로 두 값 중 요구 감쇄량이 큰 것을 기준으로 감쇄선을 설정하였다. 이 그림에서 얻어진 CM 및 DM 필터의 차단 주파수는 각각 $f_{CM}=49\text{kHz}$, $f_{DM}=95\text{kHz}$ 이다.

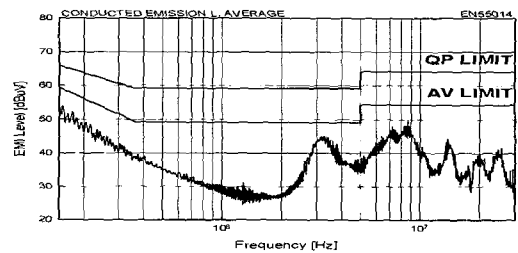
EMI 필터 파라미터는 CM 및 DM의 차단 주파수, 식 (1), (2), 그리고 누설 전류 (leakage current) 조건을 만족해야 한다^[3]. 전동기 구동 시스템의 누설 전류는 전동기, 인버터, 케이블의 누설 전류와 Y-Capacitor를 통해 접지로 흐르는 CM 전류의 합이다. 누설 전류의 허용치는 기기의 종류와 용도에 따라 다르며 UL, IEC, VDE 등의 표준에 정의되어 있다. Y-Capacitor가 클수록 누설 전류가 크며 Y-Capacitor는 최대 3300pF 정도이다. DM 필터의 X-Capacitor는 용량에 제한이 없으나 통상 수 천 nF 정도를 사용한다. 본 논문의 실험에 사용된 Capacitor 값은 $C_X=C_{X2}=0.22\mu\text{F}$, $C_Y=2200\text{pF}$ 이며 이를 기준으로 설계한 CM Choke의 인덕턴스는 $L_C=2.4\text{mH}$ 이다. 그리고 DM 필터 인덕터는 별도로 제작하지 않고 CM Choke의 누설 인덕턴스를 이용하였으며 측정된 값은 $L_D=7.9\mu\text{H}$ 이다. 사용된 파라미터에 의한 필터의 차단 주파수를 계산해 보면 각각 $f_{CM}=49\text{kHz}$, $f_{DM}=85\text{kHz}$ 이다.



(a) peak 값



(b) quasi-peak 값



(c) average 값

그림 12 제작된 EMI 필터를 적용한 경우의 실험결과
Fig. 12 Experimental results when the implemented EMI filter is applied

4. EMI 필터의 제작 및 실험

그림 11은 실험을 위해 제작된 EMI 필터이다. CM Choke는 환형 페라이트 (toroidal ferrite) 코어를 사용하였으며 설명한 바와 같이 DM 인덕터는 CM Choke의 누설 인덕턴스를 이용하였다. X 및 Y-Capacitor는 metalized paper capacitor를 이용하여 제작하였다.

그림 12는 제작된 EMI 필터를 적용한 경우 EMI 측정값을 나타내고 있다. 그림 12(a), (b), (c)는 각각 peak, quasi-peak, average 값이다. 그림에서 보는 바와 같이 quasi-peak 값과 average 값이 각각의 limit 내에 존재하여 EN55014 EMI 기준을 만족함을 알 수 있다. 실험 결과에서 약 2MHz까지는 EMI 필터가 설계된 감쇄 특성을 나타낸다고 볼 수 있으나 그 이상의

주파수에서는 감쇄 특성이 저하됨을 볼 수 있다.

이는 CM Choke에 사용된 페라이트 코어의 주파수 특성에 기인 한 것으로 생각된다. 따라서 2-30MHz의 주파수 영역에서 효과적으로 EMI를 저감하기 위해서는 EMI 원인이 되는 dv/dt 의 저감과 적절한 접지 및 차폐 등의 대책이 필요하며 본 실험에서도 이 방법을 이용하여 고주파 영역에서 EMI 기준을 만족할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 가전기기에 사용되는 가변속 교류 전동기 구동 시스템의 전도성 EMI 저감을 위한 EMI 필터 설계 기법을 다루었다. 이를 위해 교류 전동기 구동 시스템에서 전도성 노이즈의 발생 및 전달 메커니즘을 분석하였으며 필터 등가회로와 노이즈 분리기를 이용하여 EN55014 기준을 만족하도록 필터를 설계하였다. 설계된 필터의 성능을 검증하기 위해 PWM 인버터로 구동되는 유도 전동기 구동 시스템에 대한 실험을 수행하였고 그 결과 요구되는 EMI 기준을 만족함을 입증하였다. 실험 결과 2MHz 이하의 저주파 대역에서는 EMI 필터의 감쇄 특성이 설계치와 유사한 결과를 나타냈으나 2MHz 이상의 대역에서는 페라이트 코어의 고주파 특성에 의해 필터의 감쇄 특성이 저하됨을 볼 수 있었다. 따라서 2MHz-30MHz의 고주파 대역에서 EMI 조건을 만족하지 못할 경우 스위칭 소자의 dv/dt 저감과 적절한 접지 및 차폐 등이 효과적이며 추후 이에 대한 연구가 필요하리라 생각된다.

본 연구는 한국과학재단 지역대학 우수과학자 연구(F 05-2000-000-00257-0)의 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] W. Ott, *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*, Wiley, 1976.
- [2] C. R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, Wiley, 1992.
- [3] L. Tihanyi, *Electromagnetic Compatibility in Power Electronics*, IEEE Press, 1995.
- [4] C. R. Paul and K. B. Hardin, "Diagnosis and reduction of conducted Noise emission," *IEEE Trans. on Electromag. Compat.*, Vol. 30, No. 4, pp. 553~556, 1988.

- [5] T. Guo, D. Y. Chen, and F. C. Lee, "Separation of the common mode and differential mode conducted EMI Noise," *IEEE Trans. Power Electr.*, Vol. 11, No. 3, pp. 480~488, 1996.
- [6] F. Shin, D. Y. Chen, Y. P. Wu, and Y. T. Chen, "A procedure for designing EMI filters for AC line applications," *IEEE Trans. Power Electr.*, Vol. 11, No. 1, pp. 170~181, 1996.
- [7] 정용채, "저전력 스위칭 전원회로에서의 EMI 분석 및 대책," 전력전자학회 논문지, 제6권 2호, pp. 141-148, 2001.
- [8] G. L. Skibinski, R. J. Kerkman, and D. Schlegel, "EMI emissions of modern PWM ac drives," *IEEE Ind Appl. Mag.*, pp. 47~81, 1999.
- [9] L. Ran, S. Gokani, J. Clare, K. J. Bradley, and C. Christopoulos, "Conducted electromagnetic emissions in induction motor drive systems Part I: Time domain analysis and identification of dominant modes," *IEEE Trans. on Power Electr.*, Vol. 13, No. 4, pp. 757~767, 1998.
- [10] E. Zhong and T. A. Lipo, "Improvements in EMC performance of inverter-fed motor drives," *IEEE Trans. Ind Appl.*, Vol. 31, No. 6, pp. 1247~1256, 1995.
- [11] Limit and methods of measurement of radio interference characteristics of household electrical appliances, portable tools, and similar electrical apparatus, CISPR Publication, No. 14, 1985.

저 자 소 개



정세교(鄭世教)

1966년 11월 26일생. 1989년 경북대 전자공학과 졸업. 1992년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박). 1999년 12월~2000년 2월 일본 큐슈공업대학 객원교수. 2002년 2월~2003년 2월 미국 Texas

A&M 대학 Visiting Scholar. 1997년~현재 경상대학교 전기전자공학부 부교수 및 컴퓨터정보통신 연구소 연구원.



신휘범(愼輝範)

1982년 서울대 전기공학과 졸업. 1985년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박). 1990년~1993년 현대전자(주)선임연구원. 2000년~2002년 미국 University of Wisconsin Madison 방문교수.

1993년~현재 경상대학교 전기전자공학부 부교수 및 컴퓨터정보통신 연구소 연구원.