

광대역 설비용 전원선 EMI 필터의 설계

鄭世教[†], 林廷圭^{*}, 金茂鉉^{**}, 姜秉克^{**}

Design of Wideband Facility Power-line EMI filter

Se-Kyo Chung, Jeong-Gyu Lim, Mu-Hyun Kim, and Byoung-Kuk Kang

요 약

설비용 전원선 EMI 필터(Facility power-line EMI filter)는 컴퓨터 센터와 같이 전자기적인 노이즈에 민감한 장비를 가진 배전 설비로 유입되는 EMI를 차단하기 위해 사용된다. 따라서 전류용량이 크며 특정한 응용분야에서는 MIL-STD 220 기준으로 14kHz~10GHz의 광대역에서 최고 100dB 이상의 삽입 손실(Insertion loss)이 요구된다. 이러한 요구조건을 만족하기 위해서는 광대역의 주파수에서 커패시터, 인덕터 등의 특성 분석과 고차 LC 필터 (High order LC filter) 설계기술이 필요하다. 본 논문에서는 이러한 광대역 설비용 전원선 EMI 필터의 설계에 대하여 기술하였다. 먼저, EMI 필터 설계를 위한 필터의 특징과 구조, 필터의 설계 과정, 필터 설계 방법 등에 대한 연구를 수행하였다. 그리고 필터 구성의 기본 소자인 커패시터와 인덕터의 특성에 대해 분석하였다. 최종적으로 광대역 설비용 전원선 EMI 필터를 설계 및 제작하여 실험을 수행하였으며, 실험 결과의 비교 분석을 통해 연구 결과를 검증하였다.

ABSTRACT

Facility power-line electromagnetic interference (EMI) filters are used to provide radio frequency(RF) isolation between dedicated power distribution services and noise sensitive local power distribution systems. This type of EMI filters generally needs a high current capacity and, in some special applications, a high insertion loss of a minimum 100dB from 14kHz through 10GHz per MIL-STD 220 is required. This paper deals with an analysis and design of a wideband facility power-line EMI filter with the above requirements. The characteristics of the inductor and capacitor at high frequencies are investigated. The characteristics and design method of the facility EMI filter with a high order LC network are also presented. The prototype filter is finally implemented and its performance is verified from the experimental results.

Key Words : Power-line EMI filter, Facility filter, LC network, Wideband

1. 서 론

최근 들어 고주파 디지털기와 스위칭 전원장치 등

과 같은 비선형 부하의 증가로 인해 전기전자 시스템의 설계, 제작 그리고 운용에 있어서 이들로부터 발생되는 전자기파 간섭 (Electromagnetic interference; EMI) 또는 전자기 적합성 (Electro-magnetic Compatibility; EMC) 문제가 매우 중요하게 다루어지고 있다. EMI는 전파되는 매개체에 따라 전도성과 방사성 노이즈로 나눌 수 있으며, EMI 필터는 도선을 따라 전파되는 전도성 EMI를 감소시키는 가장 효과적

[†]교신저자 : 정희원, 경상대 제어계측공학과 교수
E-mail : skchung@gnu.ac.kr

^{*}정희원, 경상대 제어계측공학과 박사과정

^{**}학생회원, 경상대 제어계측공학과 석사과정

접수일자 : 2009. 8. 3 1차 심사 : 2009. 9. 10

심사완료 : 2009. 9. 20

인 방법 중의 하나이다.

EMI 필터는 적용 대상에 따라 신호선용 필터 (Signal-line filter)와 전원선용 필터로 (Power-line filter)로 나누어지며, 필터의 설치 목적과 장소에 따라 장비용 필터 (Equipment filter)와 설비용 필터 (Facility filter)로 구분 된다 .

장비용 필터는 전원장치의 입력필터와 같이 단일 장비에서 전원으로 전파되는 EMI를 감소시키는 역할을 하며, 전력전자 및 전동기 구동시스템에서 다루어지는 대부분의 EMI 필터가 이 범주에 속한다.

설비용 필터는 컴퓨터 센터와 같이 전자기적인 노이즈에 민감한 장비를 가진 설비와 배전 계통 사이에 전파되는 고주파 노이즈를 차단하기 위해 사용된다. 따라서 개별 전기전자 장비의 EMI 차단을 위한 장비용 필터에 비해 전류용량이 크다. 또한 특정 응용분야의 경우 MIL-STD 220 시험기준으로 14kHz~10GHz의 광대역에서 최소 100dB 이상의 삽입손실 (Insertion loss)이 요구 된다^[1-3]. 이를 위해서는 광대역의 주파수에서 커패시터, 인덕터 등의 특성 분석과 고차 LC 필터 (High order LC filter)에 대한 설계 기술이 필요하다. 그러나 광대역 설비용 필터의 설계에 대한 문헌은 매우 드물다.

따라서 본 논문에서는 이러한 요구조건을 갖는 광대역 설비용 전원선 EMI 필터의 설계에 대해 기술하였다. 설비용 EMI 필터의 종류와 구조, 그리고 고주파에서 인덕터, 커패시터 등의 필터 구성 소자의 특성을 분석하였으며, 이를 토대로 기생 성분의 영향을 고려한 필터의 설계 및 제작 방법을 제시 하였다. 본 연구에 대한 타당성을 검증하기 위해 14kHz~10GHz의 대역에서 100dB 이상의 삽입 손실을 갖는 필터를 설계하였다. 또한 실제 제작과 실험을 수행하였으며, 실험 결과의 비교 분석을 통해 본 논문에서 기술한 분석과 설계 방법이 타당함을 입증하였다.

2. 설비용 전원선 EMI 필터

2.1 설비용 전원선 EMI 필터의 특성

설비용 전원선 EMI 필터 (Facility power-line EMI filter)의 목적은 전력배전 계통과 설비 내의 배전 시스템 사이에 고주파 노이즈를 차단하는 것이다. 설비용 EMI 필터는 개별 장비에 사용되는 장비용 EMI 필터와는 구별되며, 장비용 필터에 비해 전류용량이 크다. 통상적인 설비용 EMI 필터의 전류용량은 5~800A 수준이다.

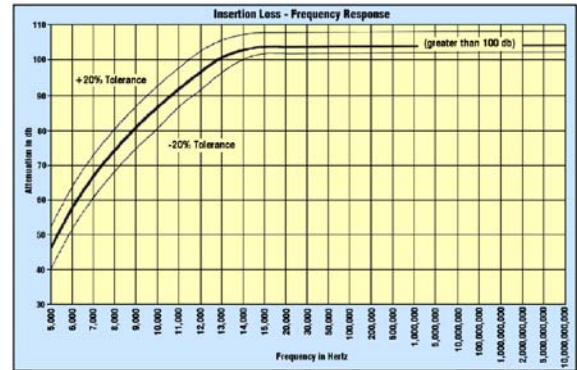


그림 1 설비용 전원선 EMI 필터의 삽입손실 (Genisco GF57915)

Fig. 1 Insertion loss of facility power-line EMI filter (Genisco GF57915)

설비용 전원선 필터의 삽입손실은 14kHz~10GHz의 주파수 범위에서 60dB~100dB 수준이며 차폐 인클로저의 경우 100dB, 비 차폐 설비의 경우 60dB 정도이다. 특히 군사목적의 특수시설 인 경우, MIL-STD 220 측정 기준으로 100dB 이상의 삽입 손실이 요구된다. 그림 1은 100dB 이상의 삽입손실을 가진 설비용 전원 필터의 삽입 손실 그래프의 예를 나타내고 있다^[4].

2.2 설비용 전원선 EMI 필터의 구성

그림 2는 설비용 전원선 EMI 필터의 구성 예를 나타내고 있다. 회로의 구성은 고차 LC 필터, 피드스루 커패시터 (Feedthrough capacitor), 블리드 저항 (Bleed resistor)로 구성된다. 고차 LC 필터는 바이패스 커패시터 C_1 과 인덕터 L_1 이 여러 단 직결된 회로 구성을 가지며, 저주파에서 높은 삽입손실을 얻기 위해 사용된다. 피드스루 커패시터 C_2 는 GHz 대역의 고주파에서 감쇄 특성을 얻는 용도로 사용되며, 블리드 저항 R_1 은 바이패스 커패시터에 저장된 전하를 리셋 시키는 데 사용된다.

위와 같은 필터 구성 소자들은 효과적으로 사용될 수 있는 주파수 범위가 한정되어 있으며 이를 정리하면 다음과 같다.

바이패스 커패시터는 5k~50kHz의 저주파 범위에서 높은 감쇄 비를 얻는 역할을 하며, 50uF~150uF의 범위를 가진다. 이 주파수 범위 이상에서는 커패시터의 리드 인덕턴스(lead inductance)에 의해 공진이 일어나며 공진주파수 이상에서는 유도성으로 작용한다. 바이패스 커패시터는 그림 2와 같이 공통 모드로 사용되므로 Y-급 (Y-Class)의 내전압 정격이 필요하다. 일반적

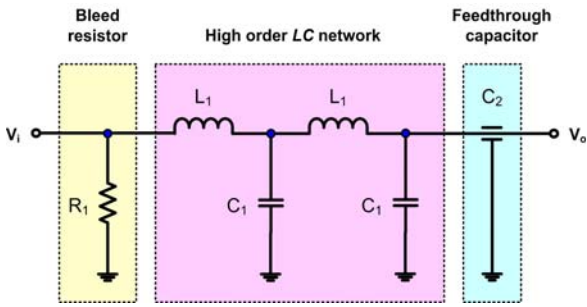


그림 2 설비용 전원선 EMI 필터의 구성
Fig. 2 Configuration of facility power-line EMI filter

인 장비용 EMI 필터의 설계에서 Y 커패시터의 용량은 UL 기준과 같은 누설전류 기준에 의해 제한받게 된다. 그러나 설비용 필터에서는 별도로 이러한 제한을 두지 않고 있으며, 직렬 인덕터의 전류용량을 크게 하기 위해 큰 값의 커패시터가 사용된다.

직렬 인덕터는 50kHz~50MHz의 범위에서 주 역할을 하며 50uH~150uH의 범위를 가진다. 설비용 전원 필터는 큰 전류용량을 가지므로 인덕턴스 값이 클 경우 코어의 포화가 일어날 가능성이 크다. 따라서 인덕턴스 값은 위의 범위로 제한되며 대신 큰 바이패스 커패시터를 사용한다.

피더스루 커패시터는 커패시터의 리드 인덕턴스에 의해서 발생하는 공진을 없애기 위해 리드를 제거한 커패시터로 100MHz 이상의 고주파 영역에서 주 역할을 하며 1uF~10uF 정도의 값을 가진다. 블리드 저항 R1은 바이패스 커패시터 C1에 충전된 전하를 한 주기 내에 방전하는 역할을 한다.

2.3 고차 LC 필터

2.3.1 필터의 입력 임피던스

설비용 전원선 EMI 필터에 사용되는 필터의 구조는 인덕터와 커패시터가 직렬된 고차의 사다리꼴 회로망(Ladder network) 구조가 일반적이다. 필터는 LC의 구성 형태에 따라 π형, T형, L형 필터 등이 있으며, 감쇄비와 전원 및 부하의 임피던스를 고려하여 필터의 구조를 선정한다.[1],[5~7]

전원 및 부하의 임피던스가 클 경우, 전류원의 특성을 가지므로 이와 연결되는 소자는 병렬 커패시터스로 한다. 반대로 전원 또는 부하의 임피던스가 낮을 경우, 이때는 전압원이 되므로 이와 연결되는 소자는 직렬 인덕터스로 하여야 한다. 그림 3은 전원과 부하의 임피던스에 따른 필터의 구조를 나타낸 그림이다.

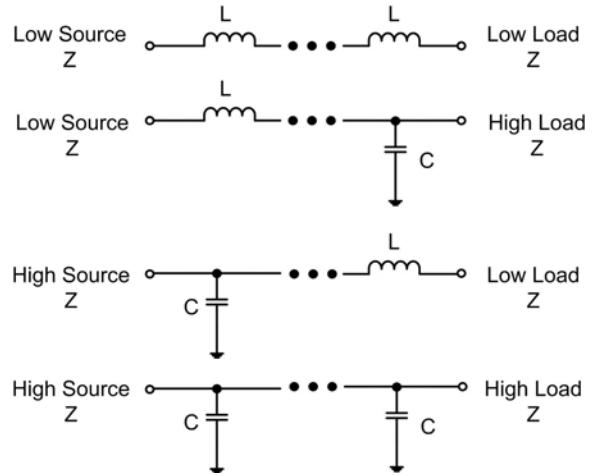


그림 3 전원과 부하의 임피던스에 따른 필터 입출력 구조의 선정
Fig. 3 Input/output structures of filter according to source and load impedance

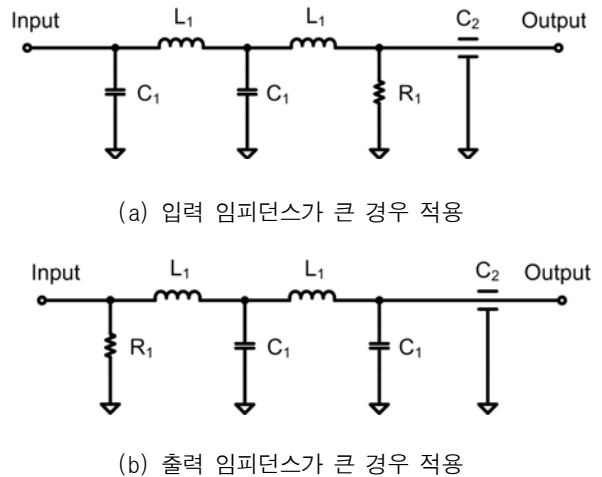


그림 4 2단 L형 필터
Fig. 4 Structure of 2-stage L-type filter

설비용 전원선 EMI 필터에는 그림 4와 같은 2단 L형 필터 구조가 가장 많이 쓰인다. L형 필터 구조는 하나의 L-C 쌍으로 40dB/dec의 감쇄 비를 얻을 수 있다. L형 필터는 그림 4(a)와 같은 C-L 구조 또는 (b)와 같은 L-C 구조를 가질 수 있으며, 앞서 설명한 바와 같이 입력 측의 임피던스가 큰 경우 (a), 출력 임피던스가 큰 경우 (b)와 같은 필터 구조를 사용한다.

2.3.2 고차 LC 필터의 설계 방법

고차 LC 필터는 일반적으로 정규화된 설계 테이블

을 이용하여 설계할 수 있다.^[5,6] 필터의 설계 순서는 다음과 같다.

- (1) 전원 및 부하 임피던스에 따른 필터 구조의 선정
- (2) 요구 삽입손실 (Insertion loss), 차단 주파수에 따른 필터 차수의 결정
- (3) 설계 테이블을 이용한 정규화 된 필터 파라미터 계산
- (4) 차단 주파수와 전원 및 부하 임피던스를 이용한 실제 L, C 값 계산
- (5) 표준 L, C 값의 선정 및 필터 특성 검증

필터의 차단 주파수와 차수는 필터의 요구 삽입 손실에 의해 결정된다. 본 논문의 대상인 설비용 전원선 EMI 필터는 14kHz에서 100dB 이상의 삽입손실을 가져야 하므로 2단 또는 3단의 LC 필터로 구성할 수 있다. 2단 LC 필터는 80dB/dec의 감쇄 비를 가지며 3단 LC 필터는 120dB/dec 의 감쇄 비를 가진다. 그림 5는 2단 및 3단 LC 필터의 경우, 14kHz에서 100dB의 삽입 손실을 가지기 위한 LC 필터의 차단 주파수를 도식적인 방법으로 구한 결과를 나타낸 것이다. 그림 5로부터 2단 LC 필터의 차단 주파수는 $f_c \approx 700Hz$, 3단 LC 필터의 차단 주파수는 $f_c \approx 2kHz$ 임을 알 수 있다. 차단 주파수가 낮을 경우 인덕터와 커패시터의 값이 매우 커지게 되므로 실제적인 적용이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 3단의 LC 필터를 고려하였다.

필터의 주파수 응답 특성은 극점 (Pole)과 영점 (Zero)의 배치에 의해 결정되며, 가장 흔히 쓰이는 방법으로는 버터워스 (Butterworth) 필터와 체비셰프

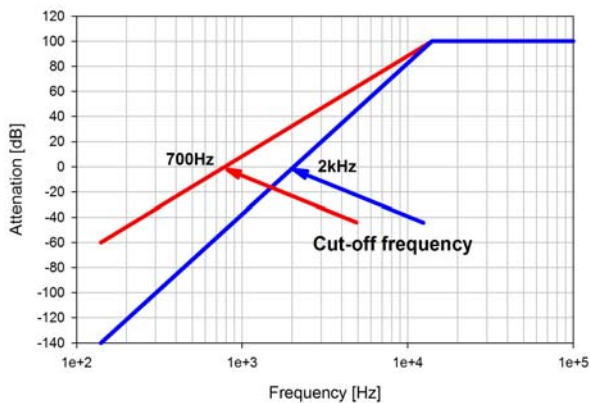


그림 5 2단 및 3단 LC 필터에서의 차단주파수 선정
Fig. 5 Determination of cut-off frequency in 2- and 3-stage LC filters

(Chebyshev) 필터가 있다.^[5] 버터워스 필터는 통과 대역에서 최대한 평탄 (flat) 한 주파수 응답 특성을 가지도록 설계되며 체비셰프 필터는 일정한 통과 대역 리플 (Pass-band ripple)을 가지도록 설계한다. 필터의 설계는 정규화 된 설계 테이블을 이용할 수 있으며, 설계 예는 3장에서 나타낸다.

2.4 필터 소자의 주파수 특성

본 논문에서 다루는 설비용 전원선 필터는 14kHz~10GHz의 광대역에서 동작하므로 필터 구성 소자의 주파수 특성이 매우 중요하다. 고차 LC 필터는 저주파에서 높은 삽입 손실을 얻기 위해서 사용되며, 주파수가 높아지면 인덕터와 커패시터의 기생 성분에 의해 특성이 바뀌게 된다. 따라서 필터 설계에 있어서 필터 구성 소자의 주파수 특성분석이 필요하다.

2.4.1 인덕터의 주파수 특성

설계된 인덕터 값을 필터에 적용할 경우 인덕터의 기생 커패시턴스를 고려해야 한다. 필터 인덕터의 저주파 및 고주파 등가회로 모델은 그림 6과 같다. 고주파에서는 인덕터 권선과 권선, 권선과 코어의 기생 커패시턴스를 고려해야 하며, 이로 인해 공진이 일어난다. 인덕터의 공진주파수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_R = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{ideal} \times C_{parasitic}}} \quad (1)$$

인덕터의 공진주파수 100k~5MHz의 범위에 있으며, 공진주파수 이하에서는 인덕터, 공진주파수에서는 저항성, 공진주파수 이상에서는 등가 커패시터로 작용한다.

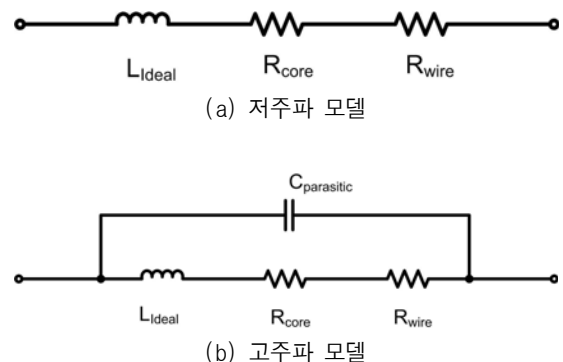


그림 6 인덕터의 등가 회로 모델
Fig. 6 Equivalent circuit models of inductor

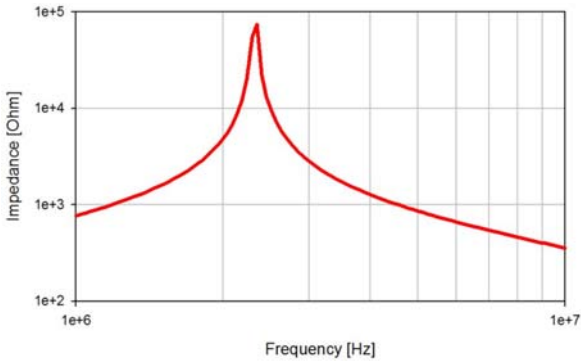


그림 7 인덕터의 권선 커패시턴스를 고려한 임피던스 특성
Fig. 7 Impedance of inductor considering inductor winding capacitance ($L_{ideal}=100\mu H$, $C_{parasitic}=47pF$)

그림 7은 인덕터의 고주파 등가모델을 적용한 경우에 대한 임피던스 특성을 나타낸 그림이다. 인덕터의 권선 커패시턴스가 가장 큰 기생 성분으로 작용하며, $f_R \approx 2.3MHz$ 부근에서 공진이 일어남을 볼 수 있다. 따라서 공진 주파수를 높이기 위해 인덕터의 제작에 있어서 권선 커패시턴스를 최소화해야 하며, 필터의 설계에 있어 권선 커패시턴스의 영향을 고려하여야 한다.

2.4.2 커패시터의 주파수 특성

인덕터와 유사하게 커패시터에서도 주파수에 따라 여러 가지 기생 성분의 영향이 나타난다. 그림 8은 고주파에서 커패시터의 등가적인 모델을 나타내고 있다.

커패시터에서 나타나는 가장 큰 기생 성분은 커패시터의 리드 인덕턴스 L_{leads} 이며, 이를 고려한 그림 8(b)의 단순한 고주파 모델에서 공진 주파수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_R = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{leads} \times C_{ideal}}} \tag{2}$$

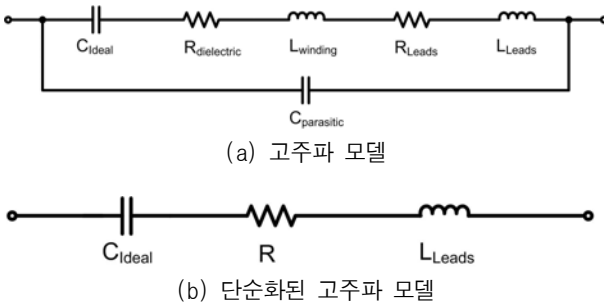


그림 8 커패시터의 등가회로 모델
Fig. 8 Equivalent circuit model of capacitor

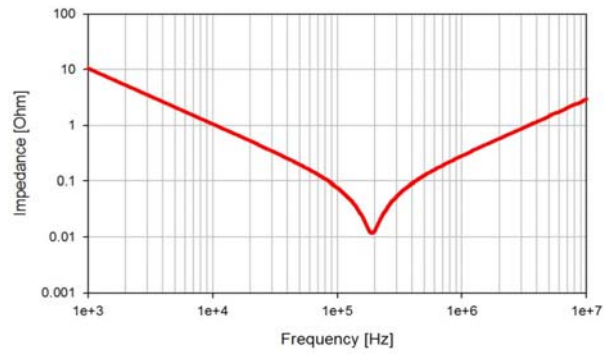


그림 9 커패시터의 리드 인덕턴스를 고려한 임피던스 특성
Fig. 9 Impedance of capacitor considering capacitor lead inductance ($C_{ideal}=15\mu F$, $L_{leads}=47nH$, $R=1.5m\Omega$)

그림 11은 커패시터의 리드 인덕턴스를 고려한 경우 임피던스 특성을 나타낸 그림이다. 주어진 파라미터에 대해서 $f_R \approx 190kHz$ 부근에서 공진이 일어남을 볼 수 있다. 따라서 필터의 설계에 있어 커패시터 리드 인덕턴스의 영향이 반드시 고려되어야 한다.

2.4.3 기생 성분을 고려한 필터의 주파수 응답

그림 10은 앞의 그림 8과 9에 주어진 인덕터와 커패시터를 이용하여 3단 LC 필터를 구성한 경우에 대한 주파수 응답 특성이다. 3단 LC 필터이므로 차단 주파수에서 부터 120dB/dec의 감쇄 비를 가지지만, 커패시터의 리드 인덕턴스에 의한 공진으로 200kHz 부근에서 6차의 영점이 발생하여 감쇄 비가 영이 된다. 그리고 인덕터의 권선 커패시턴스에 의한 공진으로 2.3MHz 부근에서 다시 6차의 영점이 발생하여 감쇄 비가 영으로 감소하게 됨을 볼 수 있다.

이 LC 필터에서 커패시터의 리드 인덕턴스가 커지게 되면 영점은 더욱 낮은 주파수에서 발생하게 되며, 만약 14kHz 이하에서 발생하게 되면 원하는 삽입 손실을 얻지 못할 수도 있다. 한편 인덕턴스의 공진 주파수 이상에서의 감쇄 비 손실은 피더스루 커패시터에 의해 보상되게 된다. 이를 위해서는 14kHz-10GHz의 전 구간에서 100dB 이상의 삽입 손실을 얻기 위해서는 인덕턴스의 공진 주파수 이하에서 피더스루 커패시터의 삽입 손실이 100dB 이상이 되어야 한다. 따라서 공진 주파수가 낮을수록 더욱 큰 피더스루 커패시터가 필요하게 된다. 이러한 결과로 부터 필터의 설계 및 제작에 있어 커패시터의 리드 인덕턴스와 인덕터의 권선 커패시턴스를 최소화해야 함을 알 수 있다.

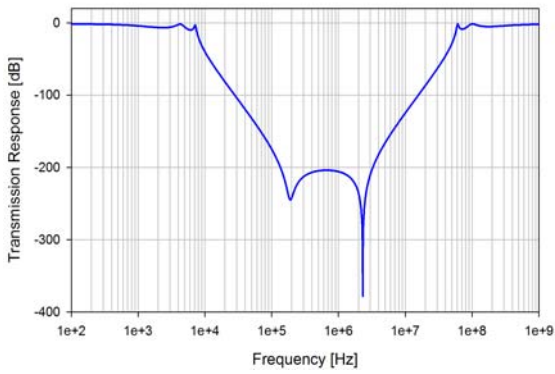


그림 10 기생 성분을 고려한 3단 LC 필터의 주파수 응답
Fig. 10 Frequency response of 3 stage LC filter considering parasitics

3. 설비용 전원선 EMI 필터의 구현

3.1 필터의 설계

본 논문에서는 설비용 EMI 필터의 설계를 위해 3단 LC 필터를 사용하였다. 그림 11은 설계된 필터의 구조를 나타낸 그림이다. 필터의 설계 사양은 표 1과 같다.

3단 LC 필터는 6차이며 120dB/dec의 감쇄 비를 가진다. 따라서 그림 5와 같은 방법으로 도식적으로 차단 주파수를 구할 수 있다. 설비용 전원선 필터의 요구 조건을 만족하기 위해서는 14kHz에서 100dB의 삽입 손실을 가져야 하므로 그림에서 120dB/dec 감쇄선과 0dB와의 교차 주파수는 2kHz 이다. 이 주파수에서 약간의 여유를 두어 필터의 차단 주파수는 $f_c \approx 1.8kHz$ 로 설정하였다.

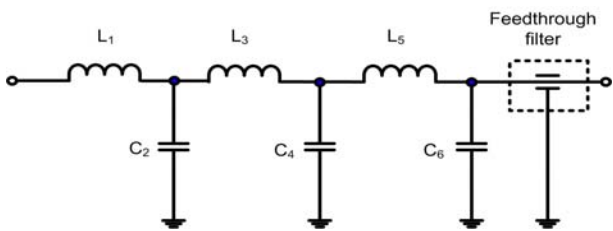


그림 11 설계된 설비용 EMI 필터의 구조
Fig. 11 Structure of the designed facility EMI filter

표 1 설비용 EMI 필터의 설계 사양
Table 1 Design specifications of facility EMI filter

항목	값	비고
삽입 손실	100 dB	14kHz~10GHz
입력 전압	220 Vrms	단상
출력 전류	20 Arms	

필터의 입력 및 부하 임피던스는 필터 설계에 있어 매우 중요한 파라미터이며, 필터의 정규화 된 설계 테이블에서는 $\bar{R} = R_S/R_L$ 가 설계 파라미터로 주어진다.^[5] 본 설계 예에서는 출력 전류가 20A 이므로 부하 임피던스는 약간의 여유를 두어 $R_L \approx 10\Omega$ 으로 설정하였으며, 입력 임피던스 역시 $R_S \approx 10\Omega$ 으로 두었다. 즉 $\bar{R} = 1$ 이다.

필터의 극점 설계는 버터워스와 체비셰프 방법으로 설계할 수 있다. 버터워스 필터의 경우 통과 대역에서 편평 (Flat)한 주파수 응답 특성을 얻을 수 있으나, 각 단의 인덕턴스 값의 차이가 크고 필요한 최대 인덕턴스 값이 커서 인덕터 설계에 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 체비셰프 필터 설계 방법을 사용하였다. 체비셰프 필터의 통과대역 리플을 3dB로 설계하면, 참고문헌^[5]의 정규화 된 설계 테이블에서 인덕터와 커패시터의 정규화 된 값은 다음과 같이 얻어진다. $\bar{L}_1 = 0.603$, $\bar{L}_3 = 0.793$, $\bar{L}_5 = 0.769$, $\bar{C}_2 = 4.464$, $\bar{C}_4 = 4.606$, $\bar{C}_6 = 3.505$. 이러한 정규화 파라미터에서 실제 인덕턴스와 커패시터를 환산하면 다음과 같다.

$$L_1 = \frac{R_L}{\omega_c} \bar{L}_1 = \frac{10\Omega}{2\pi \cdot 1.8kHz} \cdot 0.603 = 536\mu H \quad (3)$$

$$L_3 = \frac{R_L}{\omega_c} \bar{L}_3 = \frac{10\Omega}{2\pi \cdot 1.8kHz} \cdot 0.793 = 700\mu H \quad (4)$$

$$L_5 = \frac{R_L}{\omega_c} \bar{L}_5 = \frac{10\Omega}{2\pi \cdot 1.8kHz} \cdot 0.769 = 679\mu H \quad (5)$$

$$C_2 = \frac{\bar{C}_2}{\omega_c R_L} = \frac{4.464}{2\pi \cdot 1.8kHz \cdot 10\Omega} = 39.5\mu F \quad (6)$$

$$C_4 = \frac{\bar{C}_4}{\omega_c R_L} = \frac{4.606}{2\pi \cdot 1.8kHz \cdot 10\Omega} = 40.7\mu F \quad (7)$$

$$C_6 = \frac{\bar{C}_6}{\omega_c R_L} = \frac{3.505}{2\pi \cdot 1.8kHz \cdot 10\Omega} = 31.0\mu F \quad (8)$$

위와 같은 값을 바탕으로 실제 필터에 사용된 파라미터는 다음과 같다. $L_1 = 540\mu H$, $L_2 = L_3 = 700\mu H$, $C_2 = C_4 = 40\mu F$, $C_6 = 35\mu F$.

3.2 필터의 제작

그림 12는 제작된 인덕터를 나타낸 사진이다. 인덕터 코어는 Arnold사의 MPP Core A488752를 사용하였으며, 이 코어의 비 투자율은 $\mu_r = 60$ 이다. 필요한 인덕턴스를 얻기 위해 3개의 코어를 적층하여 사용하였다. 앞 장에서 설명한 바와 같이 필터의 저주파 공

진 주파수를 높이기 위해서는 인덕터 제작 시 기생 커패시턴스를 최소화해야 한다. 인덕터의 기생 커패시턴스는 권선과 권선 사이, 권선과 코어 사이에서 가장 크게 발생하므로 제작 시 이를 고려하여야 한다. 권선과 코어 사이의 기생 커패시턴스를 줄이기 위해서는 누설 전류를 줄여야 하며 권선과 코어 사이에 적절한 절연과 간극 (Gap)이 필요하다. 또한 권선 간의 누설 커패시턴스를 줄이기 위해서는 일반적인 인덕터와 달리 바이필라 (Bifilar) 권선은 피해야 한다. 그림 13과 14는 제작된 두 종류 인덕터의 임피던스 특성을 나타낸 그래프 이다. 그림 13은 권선과 코어 사이에 적절한 절연을 한 경우이며, 그림 14의 경우보다 주파수 특성이 우수함을 알 수 있다.

바이패스 커패시터는 전원선과 접지 사이에 연결되므로 Y급의 내 전압을 가져야한다. 따라서 본 논문에서는 전동기 스타트용 Film oil 커패시터를 사용하여 구성하였다. 또한 주파수 특성의 향상을 위해 필터의 제작에 있어 커패시터의 리드 선을 가능한 짧게 하여야 한다.

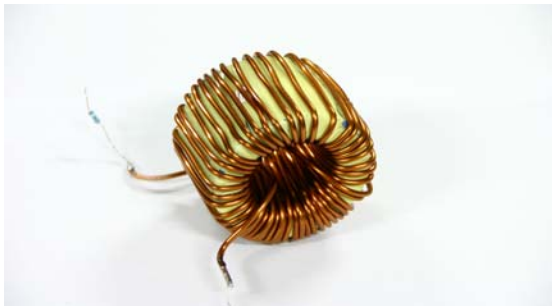


그림 12 제작된 인덕터 (540uH, MPP A488752 3개 적층)
Fig. 12 Implemented Inductor (540uH, MPP A488752 x 3 stacking)

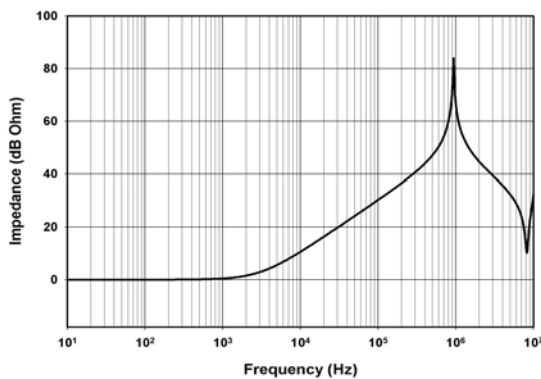


그림 13 제작된 인덕터의 임피던스 특성
Fig. 13 Impedance characteristics of the inductor

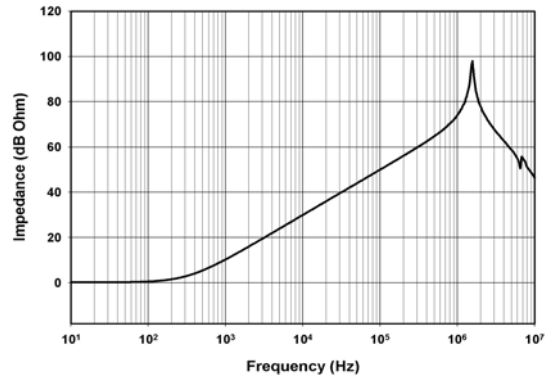


그림 14 인덕터의 임피던스 특성 (기생 커패시턴스 최소화)
Fig. 14 Impedance characteristics of the inductor (Minimizing stray capacitance)



그림 15 피더스루 필터의 감쇄 특성
Fig. 15 Attenuation characteristics of the feedthrough filter

3단 LC 필터는 기생 성분 때문에 수 MHz 이상의 고주파에서는 원하는 감쇄 특성을 얻기 어렵다. 따라서 고주파에서는 피더스루 커패시터 또는 피더스루 필터를 이용하여 원하는 삽입 손실을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 피더스루 필터를 출력단에 적용하였으며 사용된 피더스루 필터의 감쇄 특성은 그림 15와 같다.

3.3. 실험 결과

실험을 위한 측정 시스템의 구성은 그림 17과 같으며, 9kHz~8.5GHz의 대역폭을 가진 RF 네트워크 분석기, 차단 주파수 부근의 저주파 특성을 측정하기 위한 DC~15MHz 대역의 AP-200 저주파 주파수 응답 분석기가 사용되었다. RF 신호 측정을 위한 케이블로는 N-type 커넥터를 가진 RG-214U 케이블을 사용하였다.



그림 16 제작된 EMI 필터의 사진
Fig. 16 Photograph of the implemented EMI filter

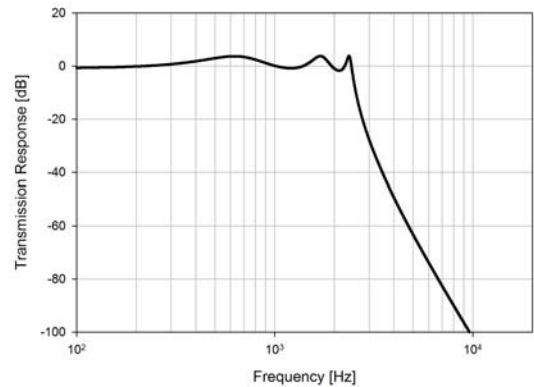


그림 18 제작된 필터의 저주파 특성
Fig. 18 Low frequency characteristics of the implemented filter



그림 17 실험 시스템의 구성
Fig. 17 Photograph of the experimental system

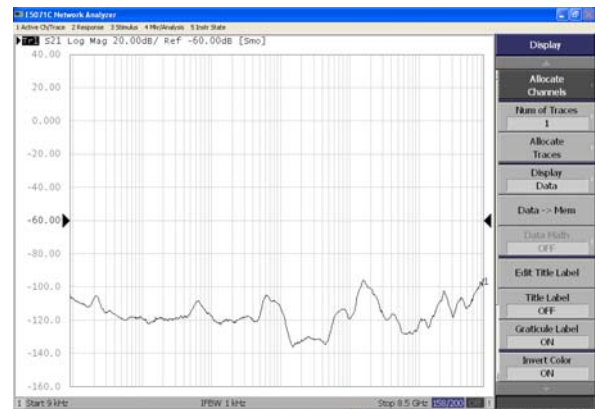


그림 19 제작된 필터의 고주파 특성
Fig. 19 High frequency response of the implemented filter

그림 18은 제작된 EMI 필터의 저주파 특성을 나타낸 그래프이다. 사용된 AP-200 저주파 주파수 응답 분석기의 신호측정 범위가 -100dB 여서 측정된 데이터를 -100dB 까지 표시하였다. 측정 결과 14kHz 에서 삽입 손실이 100dB 이상이 됨을 알 수 있다.

그림 19는 RF 네트워크 분석기로 측정한 고주파에서의 주파수 응답특성을 나타내고 있다. 주파수 측정 범위는 $9\text{kHz} \sim 8.5\text{GHz}$ 이며 전 범위에서 100dB 수준의 삽입 손실을 얻을 수 있음을 볼 수 있다. 실험 결과 MHz 이하의 주파수 대역에서는 LC 필터의 특성과 기생 성분의 영향이 필터의 특성을 결정하는 가장 큰 요인으로 작용하였다. 그리고 GHz 범위의 고주파 대역에서 100dB 수준의 삽입 손실을 얻기 위해서는 필터의 차폐 성능이 매우 중요함을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 $14\text{kHz} \sim 10\text{GHz}$ 대역에서 100dB 이상

의 삽입 손실을 갖는 광대역 설비용 전원선 EMI 필터의 설계에 대하여 기술하였다. 설비용 EMI 필터의 설계를 위해서 먼저 EMI 필터 설계를 위한 필터의 특징과 구조에 대한 설명하였고, 필터의 설계 방법에 대해 기술하였다. 그리고 필터의 구성을 위한 인덕터와 커패시터의 설계와 주파수 특성에 대한 분석을 실시하였다. 커패시터의 경우 리드의 인덕턴스에 의해 수십에서 수MHz 범위에서 공진이 일어나며 이로 인해 필터의 감쇄 특성에 영향을 미친다. 인덕터의 경우 권선 커패시턴스에 의해 수MHz 범위에서 공진이 일어난다. 따라서 커패시터와 인덕터의 기생 성분을 최소화해야 한다.

최종적으로 광대역 설비용 EMI 필터를 설계 및 제작하여 실험을 수행하였다. 3단 LC 필터와 피더스루 필터 이용하여 필터를 설계 및 구현하였다. 실험 결과,

14kHz-8.5GHz 범위에서 100dB이상의 감쇄 특성을 가질 수 있음을 입증하였다.

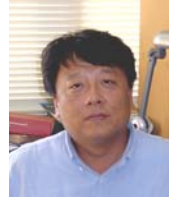
본 논문의 연구결과는 외부의 EMI에 민감한 컴퓨터 센터와 같은 설비의 안전과 정보보호 등에 활용될 수 있을 것이다. 추후과제로, 본 논문에서는 실험 시설의 제한으로 정격 부하에서의 필터 특성분석이 이루어지지 않았다. 향후 MIL-STD-220 또는 CISPR 17 기준의 실험 시설을 구성하여 정격 부하가 인가된 상태에서 특성 분석이 이루어져야 할 것이다.

본 논문은 ETRI 부설 국가보안기술연구소 및 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2009-(C1090-0904-0001))

참 고 문 헌

- [1] A Handbook Series on Electromagnetic Interference and Compatibility, Vol. 4 - Filtering and Power Conditioning, International Control Technologies, 1988.
- [2] MIL_STD 220B, Test Method Standard Method of Insertion Loss Measurement, Department of Defence, U.S.A., 2002.
- [3] T. D. Geist and K. O. Phipps, "Methods of 100dB RF performance verification of facility filters", 1998 IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility, pp. 159-164, 1998.
- [4] EMI Powerline filter data sheet, Genisco Co., <http://www.genisco.com>
- [5] D. R. J. White, A Handbook on Electrical Filters - Synthesis, Design and Applications, Don White Consultants, Inc., 1980.
- [6] A. I. Zverev, Handbook of Filter Synthesis, Wiley-Interscience, 2005.
- [7] R. L. Ozenbaugh, EMI Filter Design, 2nd Edition Revised and Expanded, Marcel Dekker, 2001.
- [8] Powder Cores Design Manual and Catalog, Magnetics, 2008.

저 자 소 개



정세교(鄭世敎)

1966년 11월 26일생. 1989년 경북대 전자공학과 졸업. 1992년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박). 1997년~현재 경상대 전기전자공학부 교수 및 공학연구원 연구원. 1999년 2월~2000년 3월 일본 큐슈공업대 객원교수. 2002년 2월~2003년 2월 미국 Texas A&M 대학 Visiting Scholar.



임정규(林廷圭)

1977년 6월 4일생. 2003년 경상대 공대 전기전자공학부 졸업. 2005년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2005년~현재 동 대학원 제어계측공학과 박사과정.



김무현(金茂鉉)

1982년 6월 7일생. 2008년 경상대 공대 전기전자공학부 졸업. 2008년~현재 동 대학원 제어계측공학과 석사과정.



강병극(姜秉克)

1983년 3월 16일생. 2008년 경상대 공대 전기전자공학부 졸업. 2008년~현재 동 대학원 제어계측공학과 석사과정.