

전압센싱 전압주입 전향 능동형 EMI 필터의 안정도해석

강병극, 최용오, 정세교
경상대학교

Stability Analysis of Feed-forward Type VSVI Active EMI filter

Byeong-Geuk Kang, Yong-Oh Choi, and Se-Kyo Chung
Gyeongsang National University

ABSTRACT

This paper deals with stability of active EMI filter. Feed-forward type voltage-sensing voltage-injection (VSVI) AEF is best topology when considering the filter size and leakage current. But it is not studied in stability. Therefore, the detailed and simplified transfer function is derived and it is used to analyze stability. The experimental results are provided to verify the effectiveness of the analysis.

1. 서론

일반적으로 전도성 노이즈 저감을 위해 인덕터와 커패시터로 구성된 수동형 EMI 필터가 널리 사용되고 있다. 특히 고용량의 SMPS의 경우 PFC회로와 DC-DC컨버터로 구성되어 넓은 범위의 노이즈를 발생시켜 주파수 대역별로 다수의 CM 초크와 Y-커패시터가 사용된다. 이로 인해 EMI 필터의 사이즈가 크고 가격이 비싸다는 문제점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 최근 공통모드 노이즈 전류 또는 전압을 측정하여 이를 능동적으로 상쇄하는 능동형 EMI 필터에 대한 연구가 진행되고 있다.^{[1][2]} 하지만 아직까지 능동형 EMI 필터에 대한 정확한 안정도 해석방법이 제시되어 있지 않다. 따라서 본 논문은 누설전류와 사이즈를 고려한 최적의 토폴로지를 선정하고 안정도를 분석하였다. 그리고 실험을 통해 검증하였다.

2. 능동형 EMI 필터의 종류

능동형 EMI 필터는 노이즈 측정하는 노이즈센싱 부, 그리고 보상전압을 생성하는 연산증폭기회로, 그리고 보상전압을 주입하는 주입부로 구성되어 있으며, 노이즈 센싱 및 주입 방법에 따라 4가지 방법(전압센싱 전압주입, 전압센싱 전류주입, 전류센싱 전압주입, 전류센싱 전압주입)으로 구분된다.

노이즈센싱 방법에서 전압센싱 방법은 커패시터를 사용함으로써 변류기(Current Transformer)를 사용하는 전류센싱 방법보다 사이즈가 작고 더 간단하다. 커패시터를 이용한 전류주입 방법은 노이즈 전류를 바이패스 함으로 누설전류가 늘어난다. 따라서 누설전류와 필터 사이즈를 고려했을 때 전압센싱 전압주입 방법이 가장 좋은 방법임을 알 수 있다.

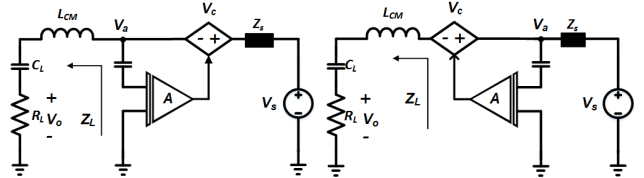
전압센싱 전압주입 능동형 EMI 필터는 센싱 및 보상 지점에 따라 전향(Feed-Forward) 보상법과 되먹임(Feedback) 보상

방법으로 나누어진다. 그림 1은 되먹임 능동형 EMI 필터와 전향 능동형 EMI 필터의 등가회로를 나타낸다. 여기서 V_s , Z_s , V_o , R_L 그리고 A 는 각각 노이즈 소스, 노이즈 소스 임피던스, LISN 전압, LISN 저항, 제어루프 이득을 나타낸다. 각각의 전달함수는 다음과 같이 나타낸다.

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{R_L}{Z_s + (1+A)Z_L} \tag{1}$$

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{(1-A)R_L}{Z_s + (1-A)Z_L} \tag{2}$$

위의 전달함수를 비교해보면 되먹임 능동형 EMI 필터는 제어루프 이득이 높을수록 노이즈 저감률이 높지만 전향 능동형 EMI 필터는 제어루프 이득이 1일 경우 노이즈 저감률이 높다. 따라서 전압 센싱 전압주입 전향 능동형 EMI 필터가 연산증폭기회로의 설계가 쉽고 노이즈 저감률도 더 높은 것을 알 수 있다.



(a) Feed-back active EMI filter (b) Feed-forward active EMI filter
그림 1 능동형 EMI 필터의 등가회로

Fig. 1 Equivalent circuit of active EMI filter

3. 안정도 해석

그림 2는 변압기 모델을 포함한 전압센싱 전압주입 전향 능동형 EMI 필터의 회로구조를 나타낸다. G_{op} 는 연산증폭기회로, G_T 는 전압주입 변압기이다. 전달함수는 식 (3)과 같이 나타낸다.

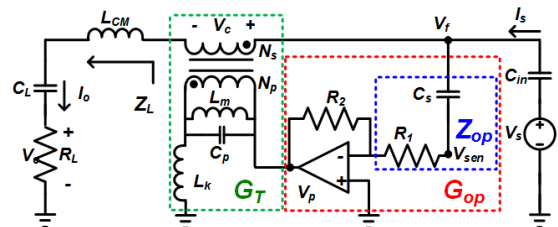


그림 2 변압기 모델을 포함한 능동형 EMI 필터의 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of active EMI filter with transformer model

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{R_L Z_{OP}(1 - G_T G_{OP})}{\frac{1}{s C_{in}} Z_{OP}(1 - G_T G_{OP}) + Z_L(Z_{OP} + \frac{1}{s C_{in}})} \quad (3)$$

안정도를 해석하기 위해서 식 (3)은 폐회로 시스템의 일반화된 식으로 변형할 수 있으며, 특성 방정식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$GH_s(s) = \frac{C_L [L_m + a C_s R_1 s]}{L_m (1 + C_L R_L s + C_L L_{cm} s^2) (b + C_{in} C_s R_1 s)} \quad (4)$$

여기서 A , a , b 는 아래와 같다.

$$a = L_k + L_M(1 - A), \quad b = C_{in} + C_s, \\ A = (R_2/R_1)(N_s/N_p)$$

식 (4)를 이용하여 전압 센싱 전압주입 전향 능동형 EMI 필터의 안정도 판별식을 유도할 수 있으며, 아래와 같이 나타낸다. 식 (5)에서 능동형 EMI 필터는 제어루프 이득 (A)에 따라 안정도가 변하는 것을 알 수 있다.

$$A = \frac{R_2 N_s}{R_1 N_p} < -\frac{\alpha + \beta}{\chi} \quad (5)$$

여기서 α, β, χ 는 다음과 같다.

$$\alpha = -C_L C_s L_m R_1 (L_{cm} + C_s L_{cm} + C_{in} C_s R_1 R_L) \\ \beta = C_L C_s R_1 [L_{cm} (C_{in} + C_s) (L_k + L_m) - C_{in} L_{cm} L_m + C_{in} C_s R_1 R_L (L_k + L_m)] \\ \chi = L_m R_L [C_L L_{cm} (C_{in} + C_s)^2 + C_{in}^2 C_s^2 R_1^2 + C_L C_{in} C_s R_1 R_L (C_{in} + C_s)]$$

능동형 EMI 필터의 파라미터가 표 1과 같을 때 식 (5)을 이용하여 루프이득(A)을 계산하면 0.972($R_2=4.86k\Omega$)이다. 따라서 능동형 EMI 필터가 안정하려면 루프 이득(A)은 0.972보다 작아야 한다.

4. 실험 결과

본 논문에서 유도된 능동형 EMI 필터 안정도 판별식을 검증하기 위해서 실험을 수행하였다. 실험에 수행된 능동형 EMI 파라미터는 표 1과 같다.

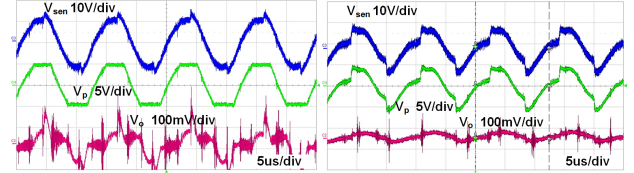
그림 3는 실험결과 파형을 나타내며, V_{sen} 은 센싱된 노이즈 전압, V_o 는 LISN 출력전압, V_p 는 연산증폭기 출력전압이다. 그림 3 (a)는 이득이 0.975로 능동형 EMI 필터가 불안정할 때의 파형이다. 능동형 EMI 필터의 불안정으로 연산증폭기의 출력 전압(V_p)이 포화 되어 충분한 상쇄 전압을 발생시키지 못 하였다. 그 결과 상쇄 전압이 센싱된 노이즈 전압(V_{sen})을 상쇄시키지 못해 LISN의 전압(V_o)이 높게 나타났다. 그림 3 (b)는 이득이 0.97로 능동형 EMI 필터가 안정할 때의 실험 결과 파형이다. 연산증폭기의 출력전압은 노이즈 센싱전압과 같은 파형을 생성 하여 노이즈가 상쇄되었다. 따라서 LISN의 전압(V_o)이 낮게 나타났다.

그림 4는 능동형 EMI 필터가 불안정($A=0.975$)할 때와 안정($A=0.97$)할 때의 LISN 출력 전압의 주파수 스펙트럼을 나타낸다.

표 1 능동형 EMI 필터의 파라미터

Table 1 Active EMI filter parameters

C_{in}	1.3nF	L_{cm}	1mH
R_f	10k Ω	C_L	0.2 μ F
C_{cm}	10pF	C_s	20nF
R_L	25 Ω	$N_p:N_s$	4:8

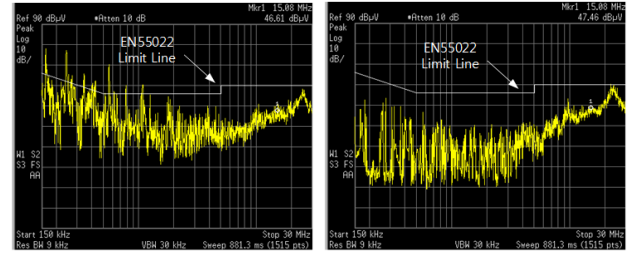


(a) $A = 0.975$

(b) $A = 0.97$

그림 3 V_{sen} , V_p , V_o 의 실험결과 파형

Fig. 3 Experimental waveforms of V_{sen} , V_p and V_o



(a) $A=0.975$

(b) $A=0.97$

그림 4 주파수 스펙트럼

Fig. 4 Frequency spectrum

능동형 EMI 필터가 불안정할 때는 약 1MHz 이하의 범위에서 EN55022의 기준선보다 높게 나타났지만, 능동형 EMI 필터가 안정할 때는 EN55022의 기준선보다 낮게 나타나고, 1MHz 이하의 범위에서 최소 10dBuV이상의 마진을 가진다. 따라서 실험 결과, 본 논문에서 제안된 능동형 EMI 필터 안정도 해석 방법은 타당함을 알 수 있다

5. 결론

본 논문에서는 능동형 EMI 필터의 특성을 분석하여 사이즈와 누설전류를 고려한 최적의 토폴로지를 선정하였다. 그리고 선정된 능동형 EMI 필터의 전달 함수와 특성 방정식을 유도하여 능동형 EMI 필터 안정도 판별식을 도출하였으며 이를 실험으로 검증하였다. 유도된 식은 앞으로 능동형 EMI 필터 설계에 활용 될 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] W. Chen, X. Yang, and Z. Wang, "An active EMI filtering technique for improving passive filter low-frequency performance," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 48, no. 1, pp. 172 - 177, Feb. 2006.
- [2] Y. C. Son and S. K. Sul, "Generalization of active filters for EMI reduction and harmonics compensation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 2, pp. 545 - 551, Mar./Apr. 2006.