

2단 직류-직류 전력 변환 시스템에서 임피던스 오버랩의 영향과 라인 필터 설계

김한상, 김연중, 최병조
경북대학교

Impacts of Impedance Overlap and Line Filter Design in Two-Stage Dc-to-Dc Power Conversion System

Hansang Kim, Yeonjung Kim, Byungcho Choi
Kyungpook National University

ABSTRACT

본 논문에서는 2단 직류-직류 전력 변환기에서 앞단과 뒷단의 전력 변환기 사이에 삽입된 라인 필터에 의해 발생하는 임피던스 오버랩이 전력 변환기에 미치는 영향을 파악한다. 그리고 본 논문은 전력 변환기가 우수한 특성을 가지도록 하는 간단하고 현실적인 라인 필터 설계 방법을 제시한다. 실험을 통하여 전력 변환기가 목표한 특성을 나타내는지 검증한다.

1. 서론

2개의 직류-직류 전력 변환기가 연속으로 연결된 2단 직류-직류 전력 변환기의 경우, 각각의 전력 변환기 사이에 EMI 감쇠를 목적으로 하는 라인 필터의 삽입이 요구 된다. 현재까지 라인 필터는 앞단의 직류-직류 전력 변환기의 출력 임피던스와 라인 필터가 연결된 뒷단의 직류-직류 전력 변환기의 입력 임피던스 간의 오버랩이 발생하지 않도록 설계되어왔다. 그 이유는 두 임피던스간의 오버랩이 발생할 경우 부하효과로 인해 앞단의 컨버터의 특성이 변하기 때문이다. 본 논문에서는 라인 필터를 삽입하였을 때, 두 임피던스 간의 오버랩을 피할 수 없는 경우에 임피던스 오버랩이 2단 직류-직류 전력 변환기에 미치는 영향을 파악한다. 그리고 임피던스 오버랩의 영향을 고려하여 목표한 위상 여유를 가지는 라인 필터를 설계하는 방법을 제시한다.

2. 2단 직류-직류 전력 변환시스템에서 임피던스 오버랩의 영향과 라인 필터 설계

2.1 2단 직류-직류 전력 변환시스템

그림 1은 2단 직류-직류 전력 변환시스템을 나타낸다. 앞단의 컨버터, 뒷단의 컨버터와 라인 필터로 구성되어 있다. 그리고 각각의 방향에서 바라본 컨버터와 필터의 임피던스를 표시하였다. 앞단의 컨버터는 전류 제어 방식의 부스트 컨버터이고 뒷단의 컨버터는 전류 제어 방식의 벡 컨버터이다.

2.1.1. 2단 직류-직류 변환시스템의 임피던스

그림 2에서 Z_{iF} 는 뒷단의 컨버터가 연결 되지 않은, 개방 상태에서 라인 필터의 입력 임피던스이다. 그리고 필터 앞에서 바라본 필터와 뒷단의 컨버터의 임피던스 Z_L 은 식 (1)과 같다.

$$Z_L \approx \begin{cases} Z_{iC} : |Z_{iF}| \gg |Z_{iC}| \\ Z_{iF} : |Z_{iF}| \ll |Z_{iC}| \end{cases} \quad (1)$$

그림 2를 보면 $|Z_L|$ 과 $|Z_{oC}|$ 의 오버랩이 발생한다. 이러한 오버랩을 피하기 위해서 $|Z_L|$ 이 A, B 지역에 위치하도록 라인 필터를 설계할 경우 수동소자의 크기가 커지거나 EMI 감쇠 효과가 저하된다.

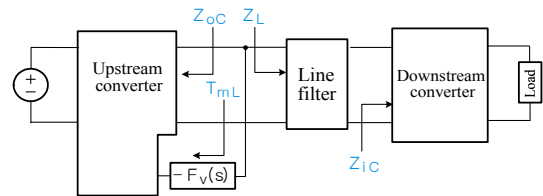


그림 1 2단 직류-직류 전력 변환시스템
Fig. 1 Two-stage DC-to-DC power conversion system

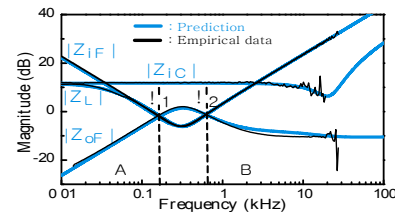


그림 2 2단 직류-직류 전력 변환시스템의 임피던스
Fig. 2 Impedances of two-stage DC-to-DC power conversion system

2.1.2 임피던스 오버랩의 영향

T_{mL} 은 앞단의 컨버터의 루프이득이고 T_{mn} 은 식 (2)와 같이 임피던스간의 비율이다. 그림 2에서 보이는 것과 같이 임피던스 오버랩이 발생하면 부하효과가 나타나게 되고 그 영향은 식 (3)과 같다. 앞단의 컨버터의 특성방정식에 식 (3)을 대입하면 앞단의 컨버터의 특성은 T_{mn} 에 의해 결정된다.^[1]

$$T_{mn} = \frac{Z_{oC}}{Z_L} \quad (2)$$

$$T_{mL} = \frac{1}{T_{mn}} \quad (3)$$

$$1 + T_{mL} = 0 \Rightarrow 1 + \frac{1}{T_{mL}} = 0 \Rightarrow 1 + T_{mL} = 0 \quad (4)$$

그림 2에서 w_1 이 w_2 보다 낮은 주파수 영역에 위치하기 때문에 계단 부하 응답에서 w_2 에 의한 효과 보다 w_1 에 의한 효과가 주로 나타난다. 따라서 w_1 의 변화에 따른 위상 여유를 변화를 식 (5), (6)^[2], (7)과 R_{iC} , w_o , $Q_o = 1$ 를 이용하여 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. R_{iC} 는 뒷단 컨버터의 입력 임피던스에서 알 수 있고 w_o 는 목표하는 EMI 감쇠 정도에 따라 미리 결정 된다. 공학적 접근을 위해 $Q_o = 1$ 로 두면 w_1 - PM_1 그래프를 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

$$|Z_{L@w_1}| = 20 \log R_{iC} - 20 \log \left(\frac{w_1}{w_p} \right) \quad (5)$$

$$\angle Z_{L@w_1} = -180^\circ + \tan^{-1} \left(\frac{w_1}{w_p} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{w_1 / (Q_o w_o)}{1 - w_1^2 / w_o^2} \right) \quad (6)$$

$$PM_1 = 180^\circ - (\angle Z_{OC@w_1} - \angle Z_{L@w_1}) \quad (7)$$

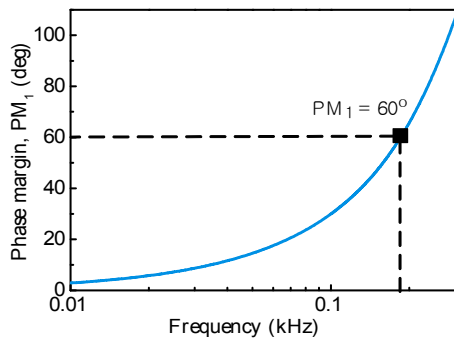


그림 3 w_1 의 위치에 따른 위상여유
Fig. 3 Phase margin by position of w_1

2.2 라인 필터 설계

목표하는 위상여유는 다음과 같은 라인 필터 설계를 통해서 얻을 수 있다.

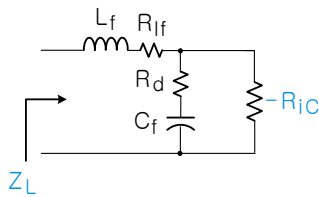


그림 4 라인 필터와 뒷단의 컨버터의 회로 모델
Fig. 4 Circuit model of line filter and downstream converter

$$Z_L = -R_{iC} \frac{1 + \frac{s}{Q_o w_o} + \frac{s^2}{w_o^2}}{1 + \frac{s}{w_p}} \quad (8)$$

$R_{iC} \gg R_d$, $R_{iC} \gg R_{lf}$, $C_f(R_{lf} + R_d) \gg L_f/R_{iC}$ 로 가정하면

$$w_o \approx \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}}, w_p \approx -\frac{1}{C_f R_{iC}}, Q_o \approx \frac{1}{R_{lf} + R_d} \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \quad (9)$$

그림 4는 Z_L 에 해당하는 등가 회로이고 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 그 식은 식 (8)과 같다. 목표한 위

상여유를 가지도록 하는 w_1 에 따라서 w_p 가 식 (5)에 의해 결정된다. 그리고 식 (9)을 통해서 라인 필터의 값들이 결정된다. 위의 과정을 따라 설계된 라인 필터를 삽입하여 나타난 앞단의 컨버터의 루프 이득을 그림 6에 나타냈다.

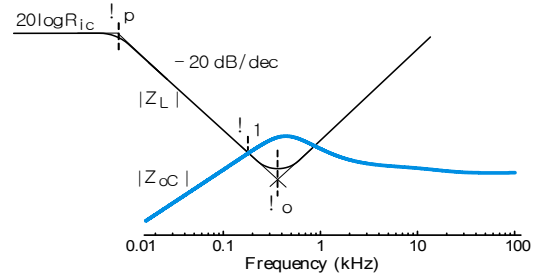


그림 5 라인 필터 설계
Fig. 5 Line filter design

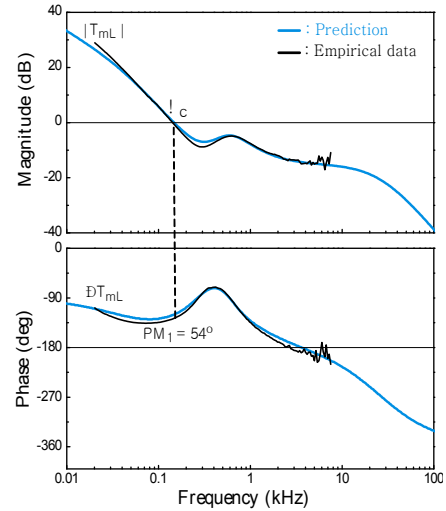


그림 6 앞단의 컨버터의 루프이득
Fig. 6 Loop gain of upstream converter

3. 결론

본 논문에서는 2단 직류-직류 전력변환시스템에서 임피던스 오버랩의 영향을 파악하고 목표하는 위상여유를 얻기 위한 라인 필터 설계 방법을 제시하였다. 본 논문에서 제시한 라인 필터 설계 방법은 2단 직류-직류 전력변환시스템에서 확장하여 다단 직류-직류 전력변환시스템에도 적용될 수 있다.

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 대학CT연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-2016-H8601-16-1002)

참고 문헌

- [1] B. Choi, J. Kim, B. Cho, S. Choi, and C. Wildrick, "Designing control loop for dc-to-dc converters loaded with unknown ac dynamics," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, no. 4, pp. 925-932, Aug 2002.
- [2] K. Ogata, "Modern Control Engineering", 4th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 2001