

LLC 공진형 직류-직류 변환기의 제어기 설계 및 동특성 해석

정민재, 장진행, 최병조
 경북대학교, LG전자

Control Design and Dynamics Analysis of LLC Resonant Dc-to-Dc Converter

Minjae Joung, Jinhaeng Jang, Byungcho Choi
 Kyungpook National University, LG Electronics Inc.

Abstract - 본 논문에서는 넓은 입/출력 변화를 가지는 비절연형 LLC 공진형 직류-직류 변환기의 제어기 설계 및 동특성에 대해서 설명한다. 먼저, 변환기의 동작 영역을 확인하고 각각의 동작점에서 변환기의 소신호 해석을 한다. 그 후에 소신호 특성을 바탕으로 적절한 보상기 회로를 구성하는 방안을 제시한다. 마지막으로 제시된 보상기 회로의 타당성을 컴퓨터를 통한 가상 실험과 실제적인 측정을 비교하며 확인한다.

1. 서론

LLC 공진형 직류-직류 변환기는 Soft-switching을 통한 스위칭 손실을 줄일 수 있고, 높은 주파수의 동작으로 큰 전력밀도를 가지며 EMI 특성이 좋아 널리 사용되고 있다. 하지만 동작 조건이 변화할 때 동작 주파수가 변화함에 따라 소신호 특성이 상당히 변화한다. 따라서, 정확한 소신호 특성에 대한 해석과 이를 바탕으로 한 제어기 설계를 해야 한다. 그렇지 않을 경우에는 특정 동작 조건에서 안정적으로 동작하더라도, 동작 조건이 변화하는 경우에 불안정한 동작을 함으로써 시스템의 고장을 종종 야기한다. 본 논문은 넓은 범위의 입출력 조건에서 동작하는 비절연형 LLC 공진형 직류-직류 변환기의 제어기 설계와 동특성 해석을 중점적으로 다룬다. 우선 최악의 동작 조건을 확인하기 위해서 변환기의 전력 변환단의 소신호 동특성을 해석하고, 이를 바탕으로 전압 궤환 보상 회로의 구조와 설계를 제시한다. 이러한 보상 회로를 가진 LLC 공진형 직류-직류 변환기가 주어진 넓은 입출력 동작 조건에서 안정적으로 동작하는 것을 확인한다. 마지막으로, 변환기의 페루프 응답 특성을 확인함으로써, 변환기의 안정성뿐만 아니라 빠른 응답 특성을 확인할 수 있다.

2. 비절연형 LLC 공진형 직류-직류 변환기

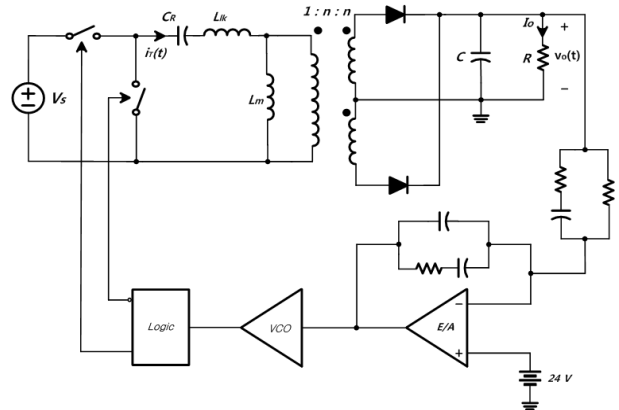
2.1 회로 구성과 동작 영역

그림 1은 제어기를 포함한 비절연형 LLC 공진형 직류-직류 변환기의 간략화된 구조를 보여준다. 이것은 두 개의 스위치와 공진 Tank, 정류 회로부 그리고 제어 회로부로 나눌 수 있다. 이것은 출력 전압 궤환 방식을 이용하여 동작 주파수를 제어하는 방식으로 구성되어 있다.

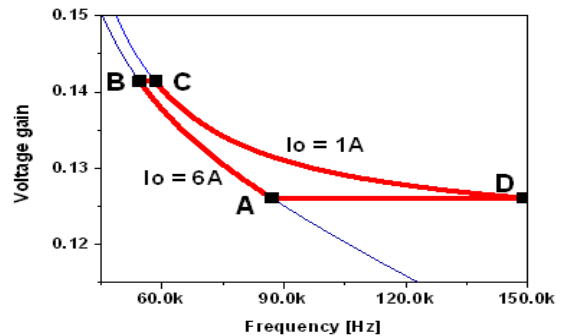
그림 2는 공진 회로의 스위칭 주파수에 따른 전압 이득 곡선을 나타내며 표시된 지점은 동작 조건의 변화에 따른 각각의 동작점을 나타낸다. 변환기의 앞단에는 Power Factor Correction 회로가 있으며 AC 입력 순간 정전과 같은 조건으로부터 340V에서 390V까지 변화하는 전압이 입력 전압으로 전달된다. 또한, 변환기의 출력부에는 CCFL Lamp가 병렬 연결된 Backlight system으로 되어 있다. 이러한 System은 최소 1A 부터 최대 6A까지 변화한다. 이러한 4개의 동작점 중에서 가장 나쁜 특성을 나타내는 곳에서 제어기 설계가 이루어지며, 동특성과 안정도 해석은 전체 4개의 동작점에서 평가되어 질 것이다.

2.2 전력 변환단의 소신호 특성

LLC 공진형 변환기의 소신호 특성은 변환기의 동작점에 크게 의존한다. 동작 주파수에 따라서 각각의 동작점이 결정되므로 주파수 대 출력 전달 함수를 통하여 소신호 특성을 살펴본다. 그림 3은 동작점이 A에서 B로 변화할 경우 주파수 대 출력 전달 함수의 특성을 나타낸다. 동작점 A에서는 전달 함수가 고주파 영역의 이중 극점 w_{bt} 과 w_{bt}^* , 저주파 영역의 극점 w_{pl} , 그리고 출력 필터 ESR에 의한 고정된 주파수 w_{esr} 을 가진다. 고주파 영역의 이중 극점은 변환기의 beat frequency 동특성으로부터 일어난다. 저주파 영역의 극점은 출력 필터단에 의해 위치한다. 동작점이 A에서 B로 이동함에 따라 이중 극점은 두 개의 극점, w_{sp1} 과 w_{sp2} 로 갈라지고, 저주파 영역에 위치한 극점 w_{pl} 은 w'_{pl} 으로 이동한다. 이 w_{sp1} 과 w'_{pl} 이 합하면서 이차 전달 함수의 특성을 나타내며 급격한 위상



<그림 1> 비절연형 LLC 공진형 직류-직류 변환기.



A: $V_s=390V / I_o=6A$ B: $V_s=340V / I_o=6A$
 C: $V_s=340V / I_o=1A$ D: $V_s=390V / I_o=1A$

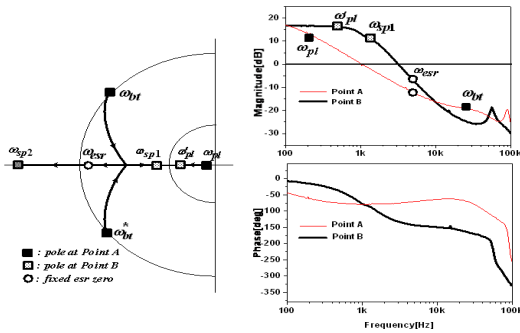
<그림 2> 동작 영역.

의 감소를 발생시킨다. 위상의 여유가 없다면 출력 전압과 공진 전류가 안정적인 모습을 보이지 않고 발진하는 경우가 생길 위험이 있다. 그렇게 된다면 시스템의 전체적인 안정도에 위험을 줄 수가 있다. 그리하여, 급격한 위상의 감소를 보상하기 위해 동작점 B에서 전압 보상 회로의 설계가 이루어 진다.

2.3 보상기 설계

$$F_v(s) = \frac{K_m(1+s/w_{z1})(1+s/w_{z2})}{s(1+s/w_{p1})(1+s/w_{p2})} \quad (1)$$

보상기의 설계는 동작점 B에서 나타나는 이차 전달 함수의 특성을 보상하기 위해 three-pole two-zero 보상기 회로를 이용한다. (1)은 three-pole two-zero 보상기 회로의 전압 궤환 보상식이다. 동작점 B에서는 두개의 극점과 하나의 영점을 가지고, 동작점 A에서는 하나의 극점과 또다른 이중 극점, 그리고 하나의 영점을 가지는 것을 그림 3을 통하여 확인하였다.



(a) 전력 변환단 근계적. (b) 보드 선도.

〈그림 3〉 LLC 공진형 변환기의 소신호 특성.

이러한 소신호 특성을 보상하기 위한 적절한 보상기 회로로 three-pole two-zero 보상기 회로를 선택하였다. three-pole two-zero 보상기 회로의 역할은 다음과 같다. 먼저, 보상기의 두 개의 영점들은 저주파 영역에 위치한 동작점 B의 두 개의 극점을 보상해주기 위해서 위치를 시킨다. 그리고 3개의 극점은 다음과 같은 목적으로 사용되었다. 우선 첫 번째 극점은 DC레귤레이션이 유지되도록 적분기상의 원점에 위치되는 것이고 두 번째 극점은 전력 변환단의 출력부분에 위치한 콘덴서에 기인한 ESR 영점을 완화시키기 위해서 위치시킨다. 마지막으로 세 번째 극점은 고주파의 잡음을 완화시키도록 고주파 영역에 위치시킨다. 마지막으로 적분기의 이득(K_m)은 600[r/s]로 선택되었다. 그림 4는 주파수 대 출력 전달 함수($|G_{vf}|$)와 루프 이득($|T_m|$)을 이용하여 전압 궤환 보상 회로를 설계한 것을 보여준다. 아래의 값들은 보상기 회로를 이루는 변수들을 그림 3의 소신호 특성 분석을 바탕으로 선택한 값들이다.

$$W_{z1} = W'_{pl} = 5.0 \times 10^3 [r/s] \quad W_{z2} = W_{sp1} = 7.0 \times 10^3 [r/s]$$

$$W_{p1} = W_{esr} = 3.3 \times 10^4 [r/s] \quad W_{p2} = 1.3 \times 10^5 [r/s]$$

2.4 루프 이득 및 위상 여유

앞서 언급한 보상기 설계를 바탕으로 루프 이득은 크로스오버 주파수까지 -20dB/dec 의 기울기를 유지하며 그것에 의해 충분한 위상 여유를 가지며, 동작점 B에서 뿐만 아니라 모든 동작점에서 안정도를 확보한다. 그림 5의 (a)에서는 약 2kHz의 크로스오버 주파수를 가지며 위상 여유는 $60^\circ \sim 70^\circ$ 이다. 그림 5의 (b)에서는 약 800Hz의 크로스오버 주파수를 가지며 위상 여유는 $60^\circ \sim 65^\circ$ 이다. 두 경우 모두 우수한 안정도를 보여주는 것을 측정과 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있다.

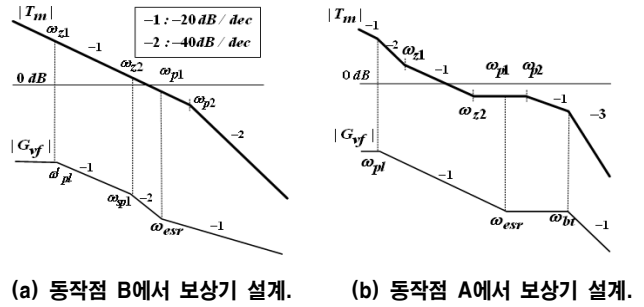
2.5 계단 부하 응답

그림 6은 출력 부하 변동 조건에서 출력 전압의 응답 특성을 나타낸다. 응답 조건은 동작점 B에서 동작점 C로 변화후 다시 동작점 B로 복귀한 경우이다. 동작 조건이 변화하더라도 발진하지 않고 빠르게 정상상태를 유지함을 보여준다.

3. 결 론

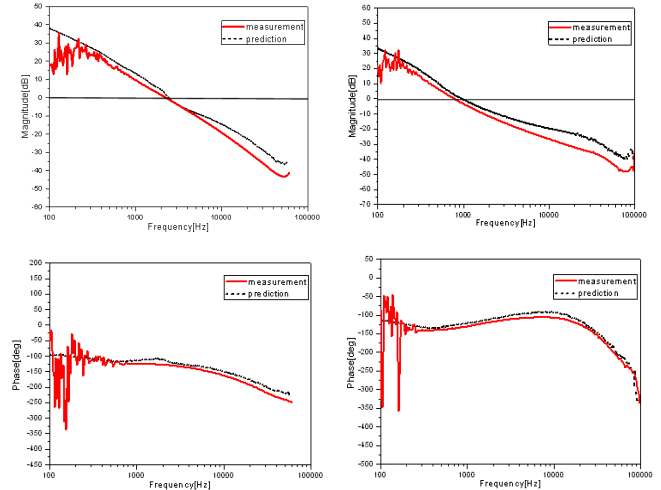
LLC 공진형 직류-직류 변환기가 입출력 조건의 변화에 따라서 소신호 특성이 크게 변화함을 확인하였다. 따라서, 제어기 설계를 위해 여러 동작점들 중에서 최악의 동작 조건을 확인하고 그 동작점에서의 급격한 위상의 감소를 보상하기 위해 제어기 회로를 설계하였다. 이 제어기를 가진 변환기는 주어진 모든 동작점에서 충분한 위상 여유를 가지는 것을 실험과 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 잘 설계된 보상기 회로를 통하여 안정도뿐만 아니라 빠른 응답 특성을 확인할 수 있다.

감사의 글 : 본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지·자원인력양성사업의 연구 결과입니다.



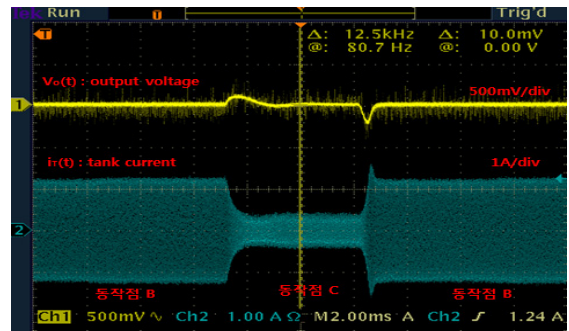
(a) 동작점 B에서 보상기 설계. (b) 동작점 A에서 보상기 설계.

〈그림 4〉 보상기 설계 및 루프 이득.



(a) 동작점 B의 Loop gain. (b) 동작점 A의 Loop gain.

〈그림 5〉 Loop gain 특성.



〈그림 6〉 계단 부하 응답.

[참 고 문 헌]

- [1] J.F. Lazar and R Martinelli, "Steady-state analysis of the LLC series resonant converter", APEC2001, pp.728-735.
- [2] Bo Yang, F.C. Lee, A.J. Jhang, and Guisong Huang, "LLC resonant converter for front end DC/DC conversion", APEC2002, pp.1108-1112.
- [3] B. Lu, W. Liu, Y. Liang, F.C. Lee, J.D. Van Wyk, "Optimal design methodology for LLC resonant converter", APEC2006, pp.533-538.
- [4] Bo Yang and F.C. Lee, "Small-signal analysis for LLC resonant converter", CPES Seminar, 2003, S7.3 pp.144-149.
- [5] Bo Yang, "Topology investigation for front end DC/DC Power Conversion for Distributed Power Systems", Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003