

분산형 전원 시스템용 승압형 컨버터의 제어 루우프 설계

김재열*, 최병조*, 안태영**
 *경북대학교 전자공학과 **청주대학교 첨단공학과

Designing the Control Loop
 of a Boost Converter for Distributed Power Applications

Jaе-Yeol Kim*, Byung-Cho Choi*, Tae-Young Ahn**
 *Kyungpook National University, **Chongju University

Abstract - This paper presents a method of designing the control loop for dc-to-dc converters when ac characteristics of the converter's load are unknown. In the proposed method, a converter is considered as a stand-alone module that feeds a current sink load, and the control loop is designed in order to maximize the robustness of the converter's closed-loop performance. The proposed method yields a control design that provides predictable and controllable closed-loop performance for the converter loaded with an actual load.

1. 서론

일반적으로 컨버터의 제어회로는 저항성 부하를 구동한다는 가정 하에서 설계되어 왔다. 그러나 분산형 전원 시스템의 경우 컨버터의 부하는 EMI 필터와 다른 컨버터의 조합으로 이루어진 매우 복잡한 부하이다[1], [2]. 따라서 저항성 부하를 가정하는 일반적인 제어 루우프 설계 방법을 분산형 전원 시스템에 사용되는 컨버터에 적용할 수 없다.

본 논문에서는 분산형 전원 시스템용 승압형 컨버터의 새로운 제어 루우프 설계 방법을 제시한다. 제안된 방법에서는 컨버터가 정격전력을 정전류 부하에 공급한다는 가정하에서 제어회로를 설계한다. 이상적인 전류부하의 입력 임피던스는 무한대이다. 따라서 제어회로를 부하와 무관하게 설계할 수 있으므로 제어 루우프를 컨버터의 성능이 부하의 동특성에 크게 좌우되지 않도록 설계할 수 있다. 이는 실용적인 분산형 전원 시스템에서 발생할 수 있는 컨버터와 부하사이의 임피던스 상호작용으로 인한 성능감소 및 발진현상을 피할 수 있다.

2. 정전류 부하를 구동하는 승압형 컨버터

정전류 부하를 구동하는 전류제어 승압형 컨버터의 회로도를 그림 1에 나타내었고, 동특성 해석을 위한 컨버터의 소신호 모델을 그림 2에 도시하였다. 컨버터의 동특성 해석을 위해서는 부하의 특성을 나타내는 두 가지 정수가 필요하다. 첫 번째는 출력전압과 출력전류의 비율인 직류부하($R_{dc} = V_o / I_o$)이다. 두 번째는 부하의 입력 임피던스(Z_{ac})이다. 정전류 부하의 경우 입력 임피던스는 무한대이다.

그림 1과 그림 2의 기호와 소자값은 참고문헌 [1]에 사용된 것과 동일하다.

2.1 전류 루우프만 달린 컨버터의 소신호 해석

전압 보상기(F_v)를 설계 하기위해 전류 루우프만 달린 상태에서 컨버터의 동특성을 해석하였다. "A" 에서 개방하여 분석한 제어 대 출력 전달함수는

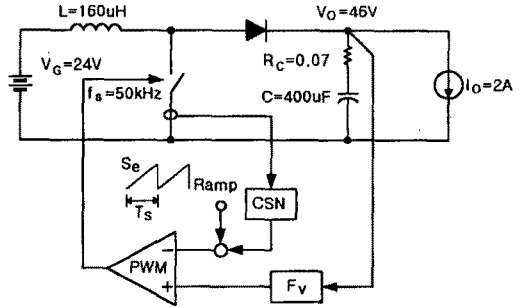


그림 1 정전류 부하를 구동하는 전류제어 승압형 컨버터

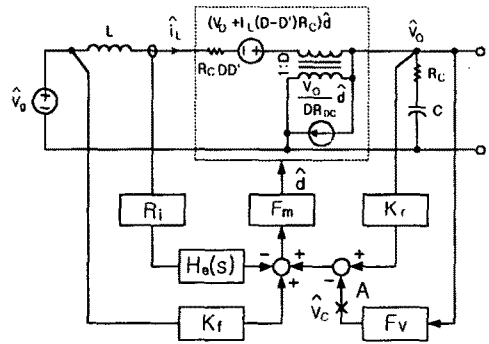


그림 2 승압형 컨버터의 소신호 모델

$$\frac{v_o}{v_c} \equiv G_{vc} \approx \frac{K(1+s/\omega_{csr})(1-s/\omega_{rhp})}{(1+s/\omega_p)} H_c(s) \quad (1)$$

와 같이 근사화된다. 여기서,

$$K = \frac{L}{R_i} \frac{1}{D^2 T_s [m_c - 0.5 + \frac{L}{D^3 T_s R_{DC}}]} \quad (2)$$

$$\omega_{csr} = \frac{1}{C R_c} \quad \omega_{rhp} = \frac{D^2 R_{DC}}{L} \quad (3)$$

$$\omega_p = D^2 T_s \frac{[m_c - 0.5 + \frac{L}{D^3 T_s R_{DC}}]}{LC} \quad (4)$$

이다.

식 (1)의 $H_e(s)$ 는 전류 감지회로의 샘플링(sampling) 이득이다[1]. 식 (2)와 (3)에 사용된 m_c 는

$$m_c = 1 + \frac{S_e}{S_n} \quad (5)$$

이고, 전류 제어형 컨버터를 설계하는데 중요한 변수이다. S_o 는 외부 램프의 기울기이고, S_n 은 온 시간(on-time)의 감지된 인덕터 전류의 기울기이다. 서로 다른 m_c 에 대하여 (1)식을 이용한 시뮬레이션결과와 실제 컨버터를 사용한 측정값을 그림 3에서 비교하였다.

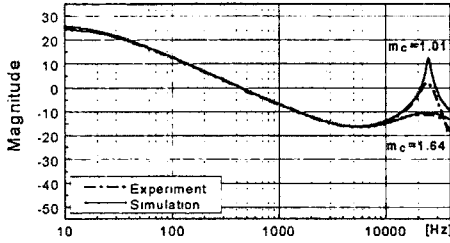


그림 3 제어 대 출력 전달함수

컨버터의 출력 임피던스는

$$\frac{\hat{v}_o}{\hat{i}_o} \equiv Z_{ou} \approx K \frac{(1+s/\omega_{err})}{(1+s/\omega_p)} \quad (6)$$

과 같이 근사화된다. 식 (6)에 사용된 변수는 제어 대 출력 전달함수에서 사용된 것과 같다. 식 (1), (6)은 제어루프 설계할수 있게 하는 중요한 관계식이다. 식 (6)의 시뮬레이션결과와 실제 컨버터를 이용한 측정값을 그림 4에서 비교하였다.

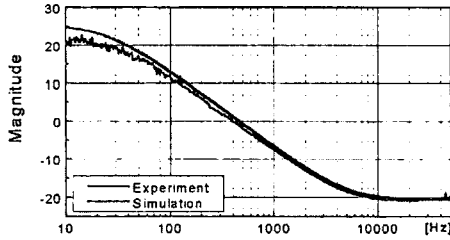


그림 4 전류 루우프만 닫힌 상태에서 출력 임피던스

2.2 제어루프 설계 원리

실제 분산형 시스템의 경우 실 부하가 연결되면 임피던스 상호 작용으로 인한 로딩 효과(loading effect)가 나타난다. 전류 루우프와 전압 루우프가 모두 닫힌 상태에서 정전류 부하일 때 출력 임피던스(Z_{ou})와 실 부하(Z_L)연결 시에 출력 임피던스(Z_{ol})는 다음 식에 의해 표현될 수 있다.

$$Z_{ol} = \frac{Z_{ou}}{1 + \frac{Z_{ou}}{Z_L}} \quad (9)$$

만일 $Z_{ou} \ll Z_L$ 이면 로딩 효과는 미약하며, 정전류부하일 때 출력 임피던스가 실 부하에서도 변함이 없다. 로딩 효과에 의하여 실 부하일 경우 루우프 이득(T_L)은 정전류 부하일 때 루우프 이득(T_U)과 크게 달라질 수 있다. 실 부하에서 루우프 이득(T_L)은

$$T_L = \frac{T_U}{1 + (1 + T_U) \frac{Z_{ou}}{Z_L}} \quad (10)$$

과 같이 나타난다.

따라서 $Z_{ou} \ll Z_L$ 되도록 제어루프를 설계하면 정전류 부하일 때의 예측된 루우프 이득이 실 부하시에도 크게 변화하지 않는다. 이는 로딩 효과(loading effect)의 영향을 줄여서 분산형 전원 시스템의 성능감소 및 발전현상등을 피할 수 있도록 해 준다.

2.3 전압보상기(F_V) 설계

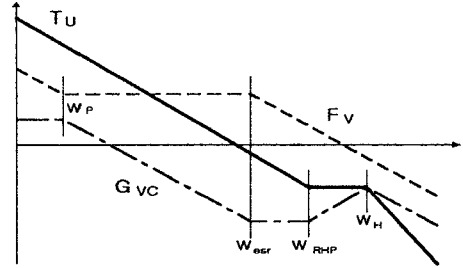


그림 5 $T_U(s), F_V(s), G_{vc}(s)$ 의 점근선

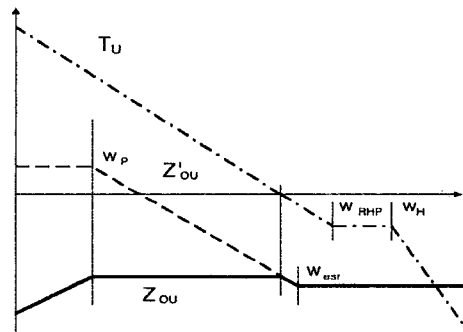


그림 6 $T_U(s), Z_{ou}(s), Z'_{ou}(s)$ 의 점근선

정전류 부하를 구동하는 컨버터의 페루프 성능을 최대화하기 위해 두가지 조건이 필요하다. 첫 번째로 임피던스의 간섭 효과를 줄이기 위해서 Z_{ou} 를 최소화 하여야 하고, 두 번째로는 가능한 넓은 주파수 범위에서 Z_{ou} 가 저항성 부하가 되도록 설계 해야한다. Z_{ou} 가 저항의 특성을 갖는 구간에서, $Z_{ou} > Z_L$ 인 경우에도 Z_{ou} 에서 피킹(peaking)을 방지할 수 있다[3]. 전압 보상기(F_V)는

$$F_V = \frac{K_m(1+s/\omega_{cp})}{s(1+s/\omega_{cp})} \quad (11)$$

과 같은 구조로 설계한다. 첫 번째 극점은 적분기로서 DC레귤레이션을 위한것이다. 그림 5에 도시된 것처럼 두번째 극점(ω_{cp})을 ω_{err} 에 위치시키고, 영점(ω_{cz})을 제어 대 출력 전달함수의 저주파 극점(ω_p)에 위치시킨다. K_m 은 루우프 이득의 위상 여유가 충분하도록 조절한다. 위와 같은 방법으로 설계하면 루우프 이득의 기울기가 넓은 주파수 범위에서 "-20dB/dec"이므로 동특성을 향상시킬 뿐만 아니라, 그림 6에 설명된 것처럼 Z_{ou} 를 작게 하고, 저항성 부하 특성을 가지도록 만들 수 있다. 그림 7에서 루우프 이득의 시뮬레이션과 측정값을 비교하였다. 그림 8에 설명한 것은 전류루프만 닫혔을 때 출력 임피던스(Z'_{ou}), 루우프 이득(T_U)과 전압루프와 전류루프가 모두 닫힌 상태에서의 출력 임피던스(Z_{ou})이다. Z_{ou} 가 넓은 주파수 범위에서 저항과 같은 특성을 가지므로 분산형 전원 시스템 적용 시에 임피던스 상호작용에 의한 피킹(peaking)을 방지할 수 있다[3].

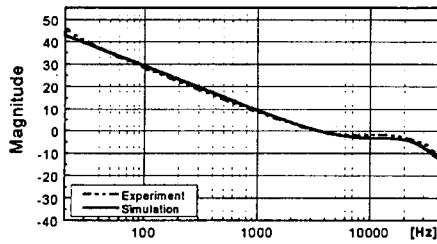


그림 7 루우프 이득

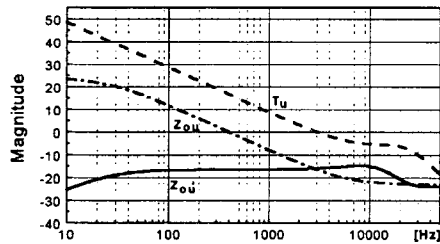


그림 8 루우프 이득에 의한 출력 임피던스 변화

3. 승압형 컨버터를 이용한 분산형 전원 시스템

승압형 컨버터와 필터를 포함한 강압형 컨버터로 구성된 분산형 전원 시스템을 그림 9에 도시하였다. 2절에서 제시한 방법으로 제어 루우프를 설계한 승압형 컨버터를 그림 9에 도시된 분산형 전원 시스템에 적용한 뒤 동특성을 해석하였다.

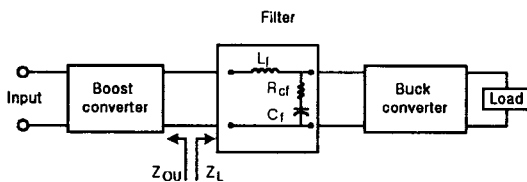


그림 9 이단 분산형 컨버터의 구성도

부하 컨버터에 서로 다른 세가지 필터를 적용하였을 경우 Z_{ou} 와 Z_L 를 시뮬레이션하여 그림 10에서 비교하였다.

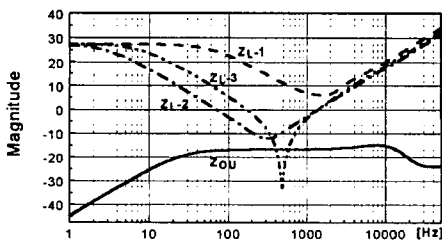


그림 10 실 부하시의 임피던스 특성

제한한 제어 루우프 설계 방식을 적용한 승압형 컨버터의 Z_{ou} 가 작고, 넓은 주파수 범위에서 저항성 부하의 특성을 가졌다. 따라서 Z_{ou} 와 Z_{L-1} 은 모든 주파수 구간에서 $Z_{ou}/Z_L \ll 1$ 때문에 임피던스 상호작용에 의한 영향이 없으므로 식 (10)에서 알 수 있듯이 루우프 이득의 변화가 없다. 한편 Z_{L-3} 과 Z_{L-2} 의 경우에는 일부 구간에서 $Z_{ou}/Z_L \ll 1$ 을 만족시키지 못하므로 로딩 효과

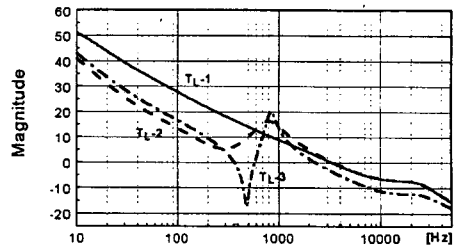


그림 11 실 부하시의 루우프이득(T_U)의 변화

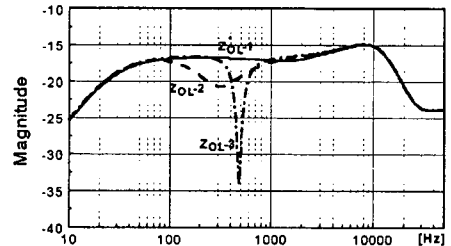


그림 12 실 부하시의 출력 임피던스(Z_{OL})

가 나타난다. 로딩 효과에 의한 루우프 이득의 변화를 그림 11에서 나타내었다. 로딩 효과에 의한 루우프 이득의 변화는 그림 12에 나타난 것과 같이 Z_{OL} 의 변화를 가져온다. Z_{ou} 가 넓은 주파수 범위에서 저항적 특성을 가지므로 이 구간에서는 Z_{ou} 의 위상이 0° 이므로 Z_{OL} 에 피킹(peaking)이 생기지 않으므로 전체 시스템은 안정하게 동작하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 분산형 전원 시스템을 위한 승압형 컨버터에 적용할 수 있는 제어 방식을 제시하였다. 우선 승압형 컨버터가 정전류 부하를 구동한다는 가정하에 전원단을 해석하고 그 결과를 이용하여 Z_{ou} 를 작고, 가능한 넓은 주파수 범위에서 저항성 부하 특성을 가지도록 제어 루우프를 설계하였다. 논문에서 제시한 설계 방법의 타당성을 시뮬레이션 결과와 실험을 통해 검증하였다. 제한한 제어방식으로 제어 루우프를 설계하면 컨버터가 실 부하에 연결 되었을 때 예측가능하고 또한 조정 가능한 특성을 얻을 수 있으며, 임피던스 상호작용에 의한 성능감소와 발전현상과 같이 불안정해지는 것을 피할 수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] B. Choi, B. H. Cho, and S. S. Hong, "Dynamics and control of DC-to-DC Converters Driving other converters Downstream," IEEE Trans. Power Electron., vol. 46, No. 10, pp. 1240-1248 Oct.1999.
- [2] B. Choi and B. H. Cho, "Intermediate Line filter Design to Meet Both Impedance Compatibility and EMI Specifications," IEEE Trans. Power Electron., vol. 10, No. 5, pp. 583-588 Sep. 1995.
- [3] C. M. Wildrick, F. C. Lee, and B. H. Cho, "A Method of Deriving the load Impedance Specification for A stable Distributed power system," IEEE Trans. Power Electron., vol. 10, No. 3, pp. 280-285 May 1995.
- [4] S. E. Schulz, "Systeminteractions and design consideration for distributed power system," M. S. Virginia Polytech. Ins. State Univ. Blackburg, VA, Jan. 1991.