부하 변동 특성 개선을 위한 이득 조정 기법

조제형, 박기범, 박진식, 문건우, 윤명중

Gain scheduling method for improving load transient characteristic

Je-Hyung Cho, Ki-Bum Park, Jin-Sik Park, Gun-Woo Moon, and Myung-Joong Youn

KAIST

Abstract

본 논문에서는 서버용 전원 장치의 DC-DC단에 사용되는 디지털 전압 모드 제어기를 설계한다. 서버용 전원 장치는 2차 측에 고전류가 흐르는 사양으로 인하여 부하 전류에 따라 출력 인덕턴스 변화를 가지게 되며, hold-up time 규제를 만족하기 위하여 입력 전압의 변동 범위를 가진다. 이와 같은 조건은 제어기를 설계하는데 제약을 작용하게 되어 고정 이득을 가지는 방식에서는 최적화된 부하 변동 특성을 얻기 힘들다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 제어기의 이득 조정 기법을 제안하고 실험을 통하여 검증한다.

1. 서 론

최근 다양한 인터넷 서비스의 발달로 인하여 데이터 센터에 대한 수요가 증가하고 있다. 이에 따라 서버용 전원 장치의 수요 역시 급격히 증가하고 있는 실정이다. 서버용 전원 장치는 높은 전력 밀도, 고성능, 고효율을 요구하며 50% 부하 변동 상황에서도 5% 이내의 출력 전압 변동을 만족해야 하는 요구사항을 가진다. 또한, host와의 통신 및 모니터링을 위하여 컨버터의 제어용 IC 이외에도 micro-controller가 필요하다. 최근 디지털 제어용 IC의 성능이 좋아지고 가격이 하락하면서 micro-controller를 사용하여 컨버터의 제어와 시스템 모니터링 및 관리를 겸하는 디지털 제어기가 주목 받고 있다. 이와 같은 방식은 사용되는 소자의 수를 줄이고 가격 경쟁력을 가질 수 있다는 장점을 가진다.

2. 이득 조정 기법

2.1 고정 이득 방식 제어기의 문제점

본 논문에서는 서버용 전원 장치 DC-DC단에 사용되는 제어기를 micro-controller를 사용하여 구현한다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 DC-DC단은 위상 천이 풀 브릿지 컨버터[1]가 사용되었고 제어 방식으로는 디지털 전압 모드 제어 방식이 사용되었다. 서버용 전원 장치는 2차 측 인덕터에 고전류가 흐르는 사양을 가지고 있기 때문에 부하 전류에 따라 출력 인덕터의 permeability가 변하게 되고 이는 그림 2와 같은 인덕턴스의 변화를 가져온다. 또한, hold-up time 규제를 만족하기 위하여 입력 전압 변동을 가지게 된다. 위상 천이 풀 브릿지 컨버터의 소신호 모델[2]은 (1)와 같으므로, 출력 인덕턴스 및 입력 전압 변동으로 인하여 DC-DC단의 소신호 특성이 변하게 된다. 이로 인하여 (2)와 같은 고정된 이득을 가지는 제어기를 설계하면 그림 3와 같이 부하 조건에 따라서 시스템의 대역폭이 달라지게 되고, 이로 인하여 부하 변동 특성이 고르지 못하게 된다. 본 논문에서는 이와 같은

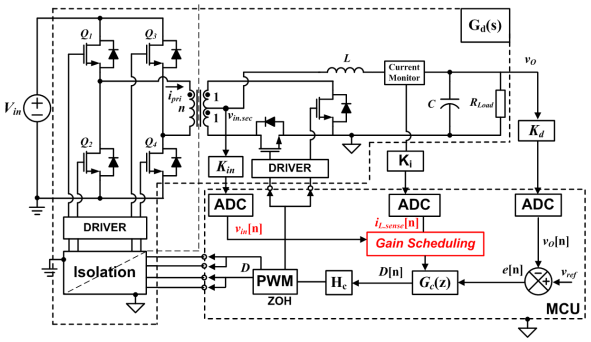

그림 1 이득 조정 기법이 적용된 디지털 전압 모드 제어기

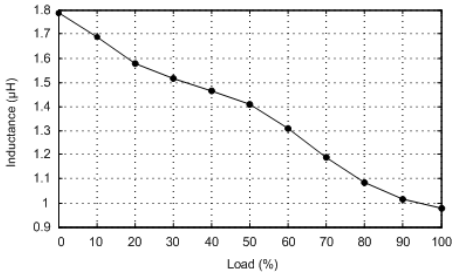

그림 2 부하 전류에 따른 인덕턴스 변화

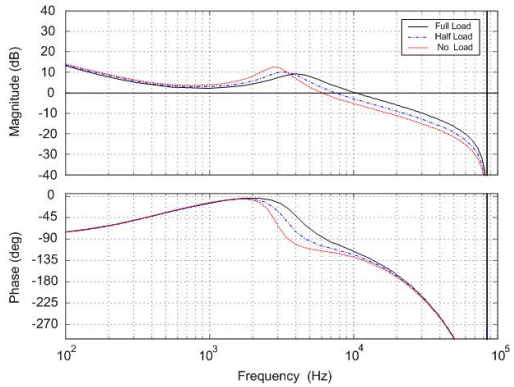

그림 3 고정 이득 사용 시 부하 조건에 따른 대역폭 변화

문제점을 해결하기 위하여 이득 조정 기법을 사용한 부하 변동 특성 개선 방식에 대하여 연구한다.

$$G_d(s)=\frac{\hat{v}_o}{\hat{d}}=\frac{V_{in}/n}{LC}\cdot\frac{1}{s^2+s\left(\frac{1}{RC}+\frac{R_d}{L}\right)+\frac{1}{LC}\left(\frac{R_d}{R}+1\right)} \quad (1)$$

where $R_d=4L_{lkg}f_s/n^2$

$$G_c(z)=K_c\times\frac{(z-z_{z1})(z-z_{z2})(z-z_{z3})}{(z-z_{p1})(z-z_{p2})(z-1)} \quad (2)$$

2.2 이득 조정 기법

출력 인덕터 및 입력 전압 변동에 의한 동특성 변화를 보상하기 위하여 제어기의 이득을 조정하는 기법을 제안한다. 본 논문에서 사용된 3pole-3zero제어기의 특성을 변화시키는 방식에는 이득, 영점, 극점을 조정하는 방식이 있다. 하지만, 영점이나 극점을 조정할 경우 대역폭, 위상 여유, 이득 여유 등이 모두 변하기 때문에 복잡도가 증가하고, 입력 전압 변동을 보상할 수 없다. 때문에 설계 및 분석이 용이하고 입력 전압 변동을 보상할 수 있는 제어기의 이득(K_c)을 변화시켜 보상하도록 한다.

그림 2와 같은 출력 인덕턴스의 변동을 고려하여 설계된 이득의 값은 그림 4와 같다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 부하가 낮아짐에 따라서 대역폭이 감소하기 때문에 그림 4와 같이 부하가 낮아질수록 높은 이득이 필요하게 된다. 이와 같이 부하에 따라서 이득을 조정하는 기법을 사용하게 되면 그림 5와 같이 부하가 달라져도 같은 대역폭을 가질 수 있게 되는 것을 확인할 수 있다.

입력 전압의 경우 (1)에서 볼 수 있듯이 소신호 모델의 이득에 정비례하는 영향을 주게 된다. 그러므로 입력 전압에 대한 보상은 설계 시 사용된 전압($V_{in.nominal}$)과 현재 입력 전압(V_{in})의 비를 곱해주어 보상할 수 있다. 이를 위해서는 입력 전압의 센싱이 필요하게 되는데, 이는 다양한 방법으로 센싱할 수 있다. 본 논문에서는 micro-controller가 컨버터의 2차 측에 존재하므로 그림 1과 같이 2차 측 트랜스포머에서 입력 전압을 sensing하는 방식을 사용한다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 입력 전압과 출력 전류를 센싱하여 제어기의 이득을 (3)과 같이 조정해줄 경우, 인덕턴스 변화와 입력 전압 변동을 보상할 수 있게 된다. 수식 (3)에서 K_1은 무부하에서의 이득, K_2는 이득 변화의 기울기를 나타낸다.

$$K_c = \left(K_1 - K_2 \cdot i_L\right)\frac{V_{in.nominal}}{V_{in}} \tag{3}$$

2.3 실험 결과

이득 조정 기법에 의한 부하 변동 특성 개선을 확인하기 위하여 실험을 진행하였다. 사용된 micro-controller는 TI사의 TMS320F28027이고, 실험은 입력 전압: 400V, 출력 전압: 12V이며 최대 부하: 100A 조건에서 수행되었다. 50% 부하 변동 시 출력 전압 변동 허용 범위는 12V의 5%인 600mV이다.

그림 6의 결과는 고정 이득으로 설계된 제어기를 사용했을 때의 결과이다. 모든 범위에서 안정적으로 동작해야 하기 때문에 그림 3과 같이 최대 부하 조건에서 안정적으로 동작하는 이득인 17을 사용하였다. 그림 6에서 확인할 수 있듯이 무부하에서 전압 변동이 600 mV 이상 발생하여 허용 범위를 초과함을 확인할 수 있다.

그림 7의 결과는 이득 조정 기법을 사용한 경우의 결과이다. 고정 이득을 사용한 경우와는 달리 600 mV의 허용 범위를 만족하는 것을 확인할 수 있다. 중부하에서 무부하로 부하 변동이 있는 경우 역시 고정 이득을 사용한 경우에 비하여 개선된 것을 확인할 수 있다.

3. 결 론

서버용 전원 장치에 사용되는 위상 천이 풀 브릿지 컨버터의 디지털 전압 모드 제어기에서 발생할 수 있는 동특성 저하를 해결하기 위하여 이득 조정 기법을 제안하였다. 제안한 이득 조정 기법은 고정 이득 제어기에 비하여 입력 전압 변동 및 부하 조건 변화에 따른 출력 인덕턴스 변화를 보상할 수 있어 시스템의 동특성을 개선하는 역할을 한다. 이를 확인하기 위하여 1.2kW급 서버용 전원 장치의 DC-DC단에 대하여 실험을 수행하였고, 이를 통해 제안한 기법의 타당성을 검증하였다.

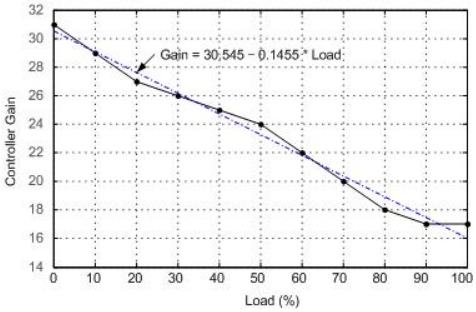

그림 4 부하에 따른 이득 변화

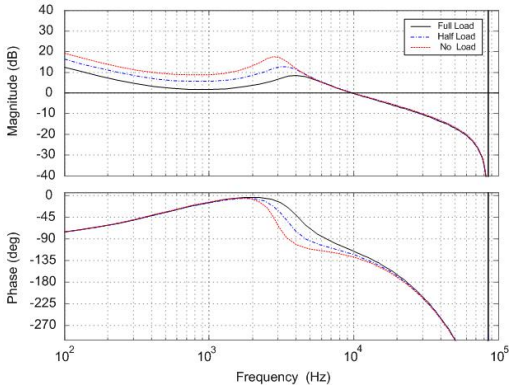

그림 5 이득 조정 기법 사용 시
부하 조건에 따른 대역폭 변화

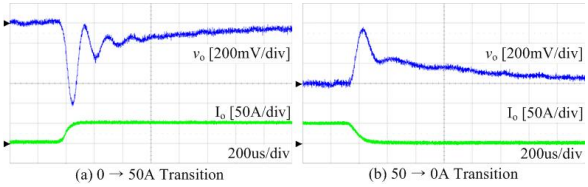

그림 6 고정 이득 사용 시 부하 변동 특성

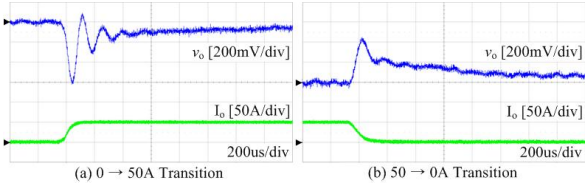

그림 7 이득 조정 기법 사용 시 부하 변동 특성

참 고 문 헌

[1] J.A. Sabate, V Vlatkovic, R.B. Ridely, F.C. Lee, and B.H. Cho, "Design considerations for high-voltage high-power full-bridge zero-voltage-switched PWM converter", APEC '90, pp. 275-284, 1990, March.

[2] V. Vlatkovic, J. A. Sabate, R. B. Ridley, F. C. Lee, and B. H. Cho, "Small-signal analysis of the phase-shifted PWM converter", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 7, No. 1, pp. 128-135, 1992, January