

컨버터의 페루프 식별 및 제어기 설계

윤경한*, 임연수*, 김려화*, 김재진**, 김영철*
 충북대학교 전자공학과*, 포스콘**

Closed-loop Identification and Controller Design for a Converter

Kyonghan Yun*, Yeonsoo Lim*, Lihua Jin*, Jaejin Kim**, Young Chol Kim*
 Chungbuk National University*, POSCON**

Abstract - This paper presents a new method of designing digital controller based on closed-loop identification of a pulse width modulation (PWM) converter system. We consider the control system structure which is composed of both current control loop and voltage control loop. The current controller can be designed independently of voltage loop. Whereas voltage controller can not do easily due to the PWM switching component which is nonlinear in nature. Furthermore, the control objective of inner loop is to track the sine wave of 60 Hz, but the outer loop shall maintain the constant DC voltage irrespective to load change. To systematically design outer loop controller, we propose a method finding linear approximate model of the nonlinear inner loop part including current controller by closed loop identification. Based on the identified model, we show that a simple digital voltage controller can be directly designed and it has good performance.

PWM 컨버터의 구조는 그림 1과 같다. 교류 입력단의 에너지를 부하 손실 없이 공급하기 위해서는 교류 입력단의 전압과 전류가 동위상이 되어야 한다. 전류제어기는 입력전류의 위상을 입력전압과 일치시키는 기능을 한다. 그림 1의 회로에서 부하 Z의 값이 변화하여 공칭 값보다 작아질 경우 축전기 C_{dc} 가 부하로 방전을 하게 되며, 이로 인해 충전전압이 낮아지게 되면 전압제어기는 스위칭회로의 ON/OFF 시간을 제어하여 교류입력단의 에너지를 C_{dc} 에 공급함으로써 충전전압을 일정하게 유지할 수 있도록 한다.

2.2 페루프 추정기법을 이용한 전달함수 추정

PWM 컨버터 제어기시스템의 페루프 블록선도는 그림 2와 같다. 여기서, $\bar{G}(s)$ 는 그림 3과 같은 전류제어루프와 스위칭회로를 포함하는 컨버터 회로의 선형근사화 모델을 나타낸다.

1. 서 론

컨버터 시스템의 제어기는 일반적으로 내부 루프의 전류제어와 외부 루프의 전압제어의 이중루프 형태를 갖는다. 전류제어기는 선형제어기 설계기법을 이용하여 해석적인 방법으로 설계를 할 수 있는 반면, 전압제어기는 PWM 스위칭회로의 특성에서 비롯되는 비선형성에 의해 해석적으로 제어기를 설계하는 것이 어렵다. 일반적으로 비선형성을 갖는 시스템에 대해 선형 제어를 설계하고자 할 때 선형근사화 모델을 이용할 수 있으나, 시스템의 동작조건이 변할 경우 설계된 제어기가 만족할만한 성능을 내지 못할 수 있는 문제가 있다.

본 논문에서는 이러한 컨버터 시스템의 제어기를 설계하기 위한 방법으로 내부 전류제어루프와 스위칭회로를 포함하는 컨버터 회로를 새로운 플랜트로 정의하고, 이산시간 영역에서 페루프 추정기법을 이용하여 새로운 플랜트의 선형근사화 모델을 구한 후, 이 모델을 근거로 하여 해석적인 방법에 의해 전압제어기를 설계하는 문제를 다루었다. 이러한 방법은 선형근사화 모델에 의거한 선형제어기 설계를 다루는 문제와 유사하지만, 시스템의 동작조건이 변동하는 경우에도 변동된 페루프 시스템을 재 식별하여 새로운 선형제어기를 설계하는 과정을 반복하여 변동된 시스템에 대해서도 원하는 성능을 비교적 쉽게 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다. 동작조건이 변동된 페루프 시스템에 대해서는 페루프 식별 알고리즘을 이용하여 재 식별함으로써 플랜트 자체의 전달함수를 추정하여 제어기를 재설계할 수도 있고, 기존의 제어기를 포함하는 페루프 시스템을 플랜트로 하여 이 플랜트에 대한 제어기를 설계함으로써 궁극적으로 전체 페루프 시스템으로부터 원하는 제어성능을 얻을 수 있다.

2. PWM 컨버터의 제어기 설계

2.1 PWM 컨버터 시스템의 구성

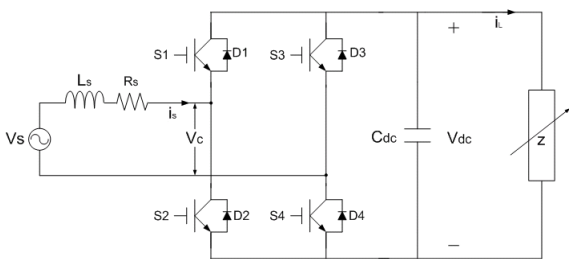


그림 1 > PWM 컨버터

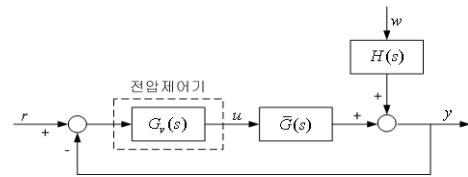


그림 2 > 페루프 시스템 블록선도

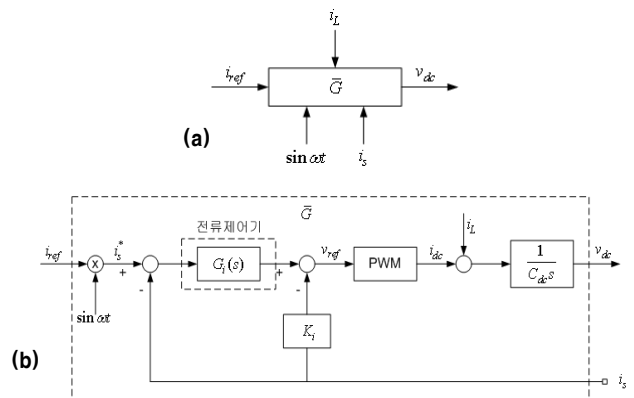


그림 3 > 선형근사화 모델의 블록선도

우선, 이산시간영역에서의 선형근사화 모델 $\bar{G}(z)$ 을 추정하기 위하여 그림 4와 같은 페루프 식별을 위한 시스템을 다루었다.

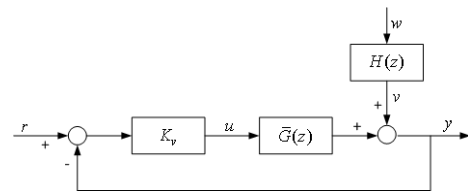


그림 4 > 이산시간영역에서의 페루프 식별을 위한 시스템

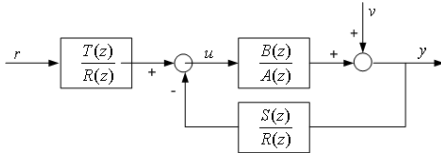
여기서, 전압제어기는 $K_v = 1$ 을 갖는 비례제어기를 사용하였다. 그리고

시스템의 입력전압은 r 은 전압지령 값 320V에 10%의 피크 값을 갖는 랜덤노이즈가 부가된 값을 주고 그에 상응하는 u 와 y 값을 측정하여 Least-Square 방법으로 ARMAX모형을 추정하였다. 추정된 전달함수는 다음과 같다.

$$\bar{G}(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{10^{-6}(-1.83z^2 + 7.43z + 5.931)}{z^3 - 2.001z^2 + 1.033z - 0.03183} \quad (1)$$

2.3 극배치 방법을 이용한 제어기 설계

본 절에서는 2.2절에서 추정한 전달함수 $\bar{G}(z)$ 에 근거하여 그림 5와 같이 제어시스템을 구성하고 극배치 방법을 이용하여 제어기를 설계한다. 여기서, $T(z)$, $R(z)$, $S(z)$ 는 제어기 다항식을 나타낸다.



〈그림 5〉 이산시간영역에서의 페루프 제어시스템

원하는 응답성능을 만족하는 페루프 시스템의 특성다항식 $A_d(z)$ 은 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} A(z)R(z) + B(z)S(z) &= A_d(z), \\ A_d(z) &= A_c(z)A_o(z), \\ T(z) &= \frac{A_d(1)}{B(1)}B(z). \end{aligned} \quad (2)$$

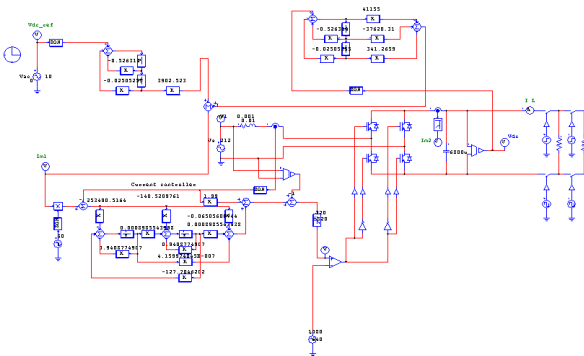
위 식에서 $A_c(z)$ 는 제어기 다항식이고, $A_o(z)$ 는 관측기(observer) 다항식이다. $A_d(z)$ 는 극배치 방법을 이용하여 원하는 시간응답성능을 갖도록 구성할 수 있다. 일반적으로 극점을 배치할 때에는 페루프 시스템의 안정도 및 성능을 고려하여 하게 되지만, 페루프 시스템이 internal stability조건을 만족하도록 하기 위해서는 $R(z)$ 의 근이 단위원 내에 위치하도록 배치하여야 한다는 제약조건을 갖게 된다. 극점을 단위원 내에서 원점에 근접하게 배치할 경우 시스템의 응답속도가 빨라지는 장점이 있지만, 플랜트가 이러한 응답속도에 반응할 수 있도록 충분히 빠른 시스템이 아닐 경우 제어기의 출력 값이 발산하는 경우가 발생할 수 있다.

식 (1)의 개루프 전달함수를 갖는 플랜트에 대해 페루프 극점을 0.85, 0.7, 0.2, $-0.1 \pm j0.2$ 에 배치할 경우 페루프 전달함수의 특성다항식은 (3)과 같이 된다.

$$A_d(z) = z^5 - 1.55z^4 + 0.605z^3 - 0.0255z^2 + 0.0215z - 0.006. \quad (3)$$

이 때 $R(z), S(z), T(z)$ 는 (2)의 관계들로 부터 (4)가 구해진다.

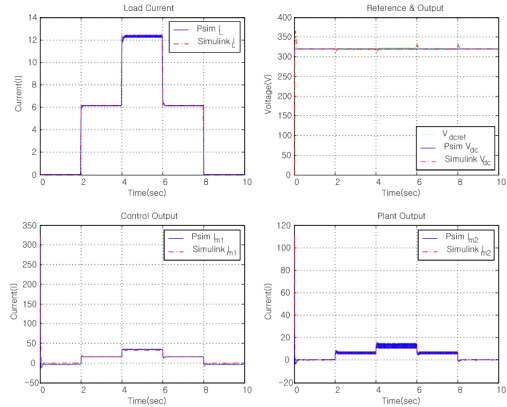
$$\begin{aligned} R(z) &= z^2 + 0.526314z + 0.02505255, \\ S(z) &= 4.1155 \times 10^4 z^2 - 3.7620 \times 10^4 z + 3.4126 \times 10^2, \\ T(z) &= 3.9025 \times 10^{-3} (-1.83z^2 + 7.43z + 5.931). \end{aligned} \quad (4)$$



〈그림 6〉 Psim으로 구현된 페루프 제어회로

설계된 페루프 제어시스템을 Psim으로 구현한 회로는 그림 6과 같다. 그림 7은 회로에 부하 변동이 있을 경우, 추정된 전달함수에 의하여 구성된 시스템과 실제 컨버터 시스템의 시간응답을 Psim과 Simulink에 의해 비교한 것이다. 제어입력 u 와 출력 y 로 볼 때, 추정된 선형근사화 모델 $\bar{G}(z)$ 이 실제 시스템과 매우 유사하다는 것을 알 수 있다.

그림 7의 결과는 페루프 식별, 제어기 설계과정을 1회 수행한 상태이며, 이 결과를 근거로 페루프 식별 및 제어기 설계의 과정을 반복하여 적용할 경우 원하는 성능을 만족하는 제어기를 비교적 용이하게 설계할 수 있을 것으로 된다. 또한 디지털 제어기를 구현하여 식별 및 제어를 할 경우 초기에 플랜트를 안정화 시킬 수 있는 임의의 제어기만 설계된다면 다음단계부터는 플랜트에 대한 어떠한 정보가 없어도 입력데이터만을 이용하여 플랜트를 재식별하고, 제어기를 재설계함으로써 플랜트의 동작조건이 변해도 항상 원하는 성능을 만족하는 제어기를 설계할 수 있다.



〈그림 7〉 실제시스템과 추정된 시스템의 시간 응답

3. 결 론

본 논문에서는 PWM 컨버터 시스템에 대하여 페루프 식별 알고리즘을 이용한 플랜트 식별방법과 추정된 플랜트 전달함수에 의한 제어기 설계방법을 제시하였다. PWM 컨버터와 같이 비선형 특성을 갖는 플랜트의 경우, 제어기를 해석적으로 설계하는 것은 어려운 일이다. 그리하여 내부 전류제어루프와 스위칭회로를 포함하는 컨버터 회로에 대하여 이산시간 영역에서 페루프 추정기법을 이용하여 선형근사화 모델을 구한 후, 이 모델을 근거로 하여 해석적인 방법에 의해 전압제어기를 설계하는 문제를 다루었다. 이러한 방법은 동작조건이 변할 경우 원하는 성능을 만족하기 어렵게 된다. 또한 선형근사화된 모델에 의한 제어기 설계과정에서는 플랜트에 대한 비교적 정확한 정보를 요구하게 된다. 본 논문에서는 플랜트의 동작조건에 변동될 경우, 페루프 식별 알고리즘을 이용하여 플랜트를 재식별하고, 재 식별된 플랜트의 전달함수에 근거한 새로운 제어기를 설계하여 적용하며, 궁극적으로 이러한 과정을 자동적으로 수행하여 플랜트 모델에 대한 정확한 정보가 없고, 플랜트의 동작조건이 자주 변동될 수 있는 상태에서도 항상 원하는 성능을 만족하는 제어기를 설계하기 위한 문제를 다루었다. 컨버터 시스템에 대해 페루프 식별을 통해 추정된 플랜트의 전달함수를 근거로 이산영역 제어기를 설계하고, 설계된 제어기를 적용한 예제를 통해 플랜트에 대한 정확한 정보 없이 원하는 성능을 만족하는 제어기를 해석적으로 설계할 수 있음을 보여주었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특장기초연구 (과제번호: R01-2006-000-10811-0) 지원으로 이루어진 연구임.

[참 고 문 헌]

- [1] Michel Gevers, "Identification for Control: From the Early Achievements to the Revival of Experiment Design," *European Journal of Control*, vol. 11, pp. 1-8, 2005.
- [2] Paul M. J. Van Den Hof and Ruud J. P. Schrama, "An Indirect Method for Transfer Function Estimation from Closed Loop Data," *Automatica*, vol. 29, No. 6, pp. 1523-1527, 1993.
- [3] Pedro Albertos and Antonio Sala "Iterative Identification and Control," Springer, 2002.